



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION

智能制造中的 数字化设计与仿真

DIGITAL DESIGN AND SIMULATION IN INTELLIGENT MANUFACTURING



INCLUSIVE AND SUSTAINABLE INDUSTRIAL DEVELOPMENT

《智能制造中的数字化设计与仿真》

*Digital Design and Simulation in
Intelligent Manufacturing*



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION



免责声明：

本文未经联合国正式编辑。文中使用的名称和呈现的资料并不代表联合国工业发展组织秘书处对任何国家、领土、城市或地区的法律地位，或者对其边界与界线划分，或其经济系统和发展程度，表示任何意见。

诸如“发达”，“工业化”和“发展中”等文字仅出于统计使用，并非就特定国家或地区在发展过程中达到的程度作出判断。

文中提及的公司名称或商业产品，并非联合国工发组织宣传和认可。

本文仅用于开放式的公益培训，可以自由引用或复印，但要有致谢程序。

版权所有© 2020年联合国工业发展组织

目 录

页码

II 免责声明

IX 致谢

1	第1章	智能制造概述
1	1.1	智能制造的发展历程
2	1.2	智能制造的相关技术
2	1.2.1	智能制造领域中的核心智能技术
3	1.2.2	智能制造领域中的核心制造技术
4	1.3	智能制造与设计仿真

7	第2章	产品数字化设计与仿真
7	2.1	数字化设计发展的历史与现状
7	2.1.1	数字化设计的出现
9	2.1.2	数字化设计的内涵与外延
13	2.1.3	中小企业应用数字化设计技术的现状
13	2.2	数字化设计技术
13	2.2.1	计算机辅助设计概述
15	2.2.2	常见计算机辅助设计软件系统
16	2.3	仿真技术发展及现状
16	2.3.1	仿真技术概述
17	2.3.2	仿真图形交互与动画技术
18	2.3.3	有限元法
19	2.3.4	虚拟现实技术
21	2.4	数字化设计与仿真的智能化

24	第3章	产品的强度设计
24	3.1	强度设计概述
25	3.2	金属材料拉伸时的力学性能
26	3.3	四种常用的强度理论
27	3.3.1	最大拉应力理论（第一强度理论）
27	3.3.2	最大伸长线应变理论（第二强度理论）

27	3.3.3	最大切应力理论（第三强度理论）
28	3.3.4	畸变能密度理论（第四强度理论）
28	3.3.5	小结
29	3.4	商用车车架强度设计实例
29	3.4.1	车架基本参数及分析工况
30	3.4.2	分析模型建立
32	3.4.3	车架强度分析
36	3.4.4	小结

38 第4章 产品的动力学设计

38	4.1	模态分析
38	4.1.1	基本概念
39	4.1.2	模态分析实例
41	4.2	瞬态响应
41	4.2.1	瞬态响应分析方法
44	4.2.2	瞬态响应实例
46	4.3	频率响应
46	4.3.1	频率响应分析方法
46	4.3.2	频率响应实例
47	4.4	随机响应
47	4.4.1	随机响应分析方法
49	4.4.2	随机响应实例

53 第5章 产品的热设计

53	5.1	热分析
54	5.2	热应力分析
54	5.3	热分析有限元方法
55	5.4	电子器件热分析
55	5.4.1	问题概述
56	5.4.2	有限元模型
56	5.4.3	材料属性
57	5.4.4	载荷与边界条件
58	5.4.5	热分析结果
60	5.5	散热器热分析
60	5.5.1	概述
61	5.5.2	有限元模型

62	5.5.3	热分析边界条件
62	5.5.4	应力分析边界条件
63	5.5.5	热分析结果
64	5.5.6	应力分析结果

67	第6章	产品寿命设计
67	6.1	疲劳的基本概念
67	6.1.1	疲劳的定义
67	6.1.2	疲劳的分类
68	6.1.3	疲劳强度、疲劳极限与疲劳寿命
68	6.2	疲劳设计方法
68	6.2.1	无限寿命设计
69	6.2.2	安全寿命设计
69	6.2.3	破损安全设计
69	6.2.4	损伤容限设计
69	6.3	影响疲劳强度的主要因素
69	6.3.1	应力集中的影响
70	6.3.2	尺寸影响
70	6.6.6	表面状况的影响
71	6.4	提高构件疲劳强度的措施
72	6.5	车轮疲劳寿命设计实例
72	6.5.1	弯曲疲劳仿真分析
76	6.5.2	径向滚动疲劳分析

80	第7章	用优化技术找到产品设计的最佳方案
80	7.1	产品设计中的优化问题
81	7.2	优化设计的历史发展
82	7.3	优化技术的分类
83	7.4	工程问题优化设计的流程
85	7.5	优化设计的数学模型
85	7.5.1	设计变量
86	7.5.2	约束条件
87	7.5.3	目标函数
89	7.5.4	优化问题的基本求解方法
89	7.6	多学科优化介绍
90	7.6.1	多学科优化设计的目的和意义

页码		
90	7.6.2	多学科优化设计算法
91	7.6.3	多学科优化设计的框架
92	7.6.4	多学科优化设计中的障碍及解决办法
92	7.6.5	多学科优化设计的成果
<hr/>		
95	第8章	产品的可靠性和稳健性设计
95	8.1	稳健性概述
96	8.2	机械产品的可靠性稳健性设计
97	8.3	田口稳健性设计方法
97	8.3.1	信号因子、控制因子和噪音因子
98	8.3.2	稳健性设计
99	8.3.3	质量损失函数
99	8.4	稳健性设计算法介绍
99	8.4.1	正交表的构造
100	8.4.2	静态特性评价指标
101	8.4.3	动态特性评价指标
102	8.5	案例介绍
102	8.5.1	问题描述
103	8.5.2	稳健性设计
<hr/>		
106	第9章	材料加工工艺仿真
106	9.1	概述
106	9.2	工艺仿真建模
106	9.2.1	几何非线性
107	9.2.2	材料非线性
108	9.2.3	接触
108	9.3	工艺仿真计算方法
108	9.3.1	迭代计算
109	9.3.2	牛顿-拉普森迭代法
110	9.4	无缝钢管斜轧穿孔仿真
110	9.4.1	斜轧穿孔有限元仿真建模
113	9.4.2	斜轧穿孔有限元仿真结果
<hr/>		
118	第10章	企业产品数字化虚拟试验规范的建立
118	10.1	仿真流程概述
118	10.2	仿真结果的校核

119	10.3	VV&A的基本概念
120	10.4	VV&A的一般原则
122	10.5	案例介绍
123	10.6	仿真分析设置经验固化

125 第11章 企业数字化虚拟试验自动流程的建立

125	11.1	企业数字化虚拟流程的特点
128	11.2	虚拟仿真的协同计算技术
131	11.3	虚拟仿真的自动计算技术
137	11.4	虚拟仿真基础数据库
138	11.5	企业数字化虚拟试验自动流程的建立

142 第12章 企业数字化设计和仿真数据管理

142	12.1	仿真数据管理平台建立的必要性
142	12.2	仿真数据管理系统框架
143	12.3	仿真数据组织
143	12.3.1	数据定义
144	12.3.2	数据管理
147	12.4	仿真材料数据和标准件数据管理
147	12.5	多方案数据对比
148	12.6	结果可视化
149	12.7	报告自动生成
149	12.8	仿真数据管理平台给企业带来的收益

152 第13章 面向中小企业的协同仿真云平台

152	13.1	中小企业的仿真现状
152	13.2	中小企业的仿真需求分析
153	13.3	中小企业的仿真技术解决方案
154	13.4	中小企业的协同仿真云平台
154	13.4.1	仿真需求的规范化描述
156	13.4.2	仿真需求到力学模型抽象
156	13.4.3	仿真建模分析过程规范化
158	13.4.4	仿真分析质量控制与评估
158	13.4.5	仿真业务协同管理
159	13.4.6	仿真专家工作室
159	13.5	小结

页码

161	第14章	智能数字化设计和仿真的未来技术展望
161	14.1	数字化设计技术发展趋势
161	14.2	数字化仿真技术发展趋势
161	14.2.1	大数据对企业数字化设计和仿真的影响
164	14.2.2	人工智能技术的应用
164	14.2.3	软硬件技术的发展和高性能计算的应用
165	14.2.4	VR技术的应用
165	14.2.5	智能化设计和仿真技术与3D打印技术的联动
166	14.2.6	产品的个性化订制时代的实现
166	14.3	全数字化产品设计的实现

致谢：

联合国工业发展组织 “智能制造技术及其在中小企业应用” (NO. 140037) 项目致力于向中小企业引进智能制造技术，帮助企业理解智能制造所必备的各项通信技术和基础设施的要求，提高对智能制造的认识，并围绕智能制造技术和理论开展开放式的培训；《智能制造中的数字化设计与仿真》是为了开展培训而编著的参考教材，是联合国工业发展组织智能制造项目成果之一；

本参考教材的编著工作由“智能制造技术及其在中小企业应用”项目团队负责，编著团队由联合国工业发展组织项目特聘专家毛力奋先生领衔、团队成员王治国先生、文卫兵先生、李国清先生、吴玉刚先生组成；感谢工发组织总部团队负责人TAVARES Raymond先生、以及季楠女士、DHAVLE Jaidev 先生、李君茹女士为编辑和校对工作提供的支持；感谢项目机构上海国际智能制造促进中心主任吴玉刚先生、项目成员王梦雪女士、丁天悦女士所作的支持与协调工作；

本参考教材将作为数字设计培训板块的基础材料，用于后续的“授之以渔”计划；

英文翻译由中国对外翻译有限公司完成。

第1章

智能制造概述

第1章

智能制造概述

1.1 智能制造的发展历程

制造业是一个国家国际竞争力和综合实力的重要表现，对于国家的经济建设具有重要作用。在技术革命、工业革命、数字化以及信息化时代的推动下，制造业从单件生成到流水线生产，再到柔性生产，最后发展到智能制造。

智能制造是随着信息通讯技术的不断发展而逐步发展起来的。1988年，美国纽约大学的怀特教授(P. K. Wright)和卡内基梅隆大学的布恩教授(D. A. Bourne)在《Manufacturing Intelligence(智能制造)》书中，首次提出了智能制造的概念。

智能制造(Intelligent Manufacturing, IM)是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统，它在制造过程中能进行智能活动，诸如分析、推理、判断、构思和决策等。通过人与智能机器的合作，去扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。智能制造把制造自动化的概念扩展到柔性化、智能化和高度集成化。

智能制造源于人工智能的研究。人工智能就是用人工方法在计算机上实现的智能。随着产品性能的完善，产品结构的复杂化、精细化，以及产品功能的多样化，促使产品所包含的设计信息和工艺信息量猛增，随之生产线和生产设备内部的信息流量增加，制造过程和管理工作的信息量也必然剧增，因而促使制造技术发展的热点与前沿，转向了提高制造系统对于爆炸性增长的制造信息处理的能力、效率及规模上。先进的制造设备离开了信息的输入就无法运转，柔性制造系统(FMS)一旦被切断信息来源就会立刻停止工作。制造系统正在由原先的能量驱动型转变为信息驱动型，这就要求制造系统不但要具备柔性，而且还要表现出智能，否则是难以处理如此大量而复杂的信息工作量的。其次，瞬息万变的市场需求和激烈竞争的复杂环境，也要求制造系统表现出更高的灵活、敏捷和智能。因此，智能制造越来越受到高度的重视。

上世纪90年代，随着信息技术和人工智能的发展，智能制造技术引起发达国家的关注和研究，美国、日本等国纷纷设立智能制造研究项目基金及实验基地，智能制造的研究及实践取得了长足进步。

1990年4月，日本提出了“智能制造系统IMS”国际合作研究计划。许多发达国家如美国、欧洲共同体、加拿大、澳大利亚等参加了该项计划。该计划共计划投资10亿美元，对100个项目实施前期科研计划。

同期，加拿大制定了1994~1998年发展战略计划，认为未来知识密集型产业是驱动全球经济和加拿大经济发展的基础，认为发展和应用智能系统至关重要，并将具体研究项目选择为智能计算机、人机界面、机械传感器、机器人控制、新装置、动态环境下系统集成。

本世纪2008年金融危机以后，发达国家重新认识到制造业的重要性，制定了“重返制造业”的发展战略，把智能制造作为未来制造业的主攻方向，推出了一系列的扶持政策，以抢占国际制造业科技竞争的制高点。

2008年，英国政府推出“高价值制造”战略，鼓励英国企业在本土生产更多世界级的高附加值产品，确保高价值制造（HVM）成为英国经济发展的主要推动力，促进企业实现从概念到商业化整个过程的创新。应用智能化技术和专业知识，以创造力带来持续增长和高经济价值潜力的产品、生产过程和相关服务，达到重振英国制造业的目标。

2009年，美国提出了“再工业化”计划，具体内容是：以高新技术为依托，发展高附加值的制造业，如先进制造技术、新能源、环保、信息等新兴产业，从而重新拥有强大竞争力的新工业体系。

同年，韩国提出了“新增长动力规划及发展战略”，确定3大领域、17个产业为发展重点，推进数字化工业设计和制造业数字化协同建设，加强对智能制造基础开发的政策支持。

2013年，德国提出了“工业4.0”计划，其模式是由分布式、组合式的工业制造单元模块，通过工业网络宽带、多功能感知器件，组建多组合、智能化的工业制造系统，从根本上重构了包括制造、工程、材料使用、供应链和生命周期管理在内的整个工业流程。

同年，法国提出了“新工业法国”计划，旨在通过创新重塑工业实力，使法国处于全球工业竞争力第一梯队。用10年时间让法国重振工业强国雄风。该计划梳理出34个项目作为法国工业复兴的支点，从大数据到云计算，从新一代高速列车到电动飞机，从智能纺织到未来工厂。

2014年，印度提出了“印度制造”计划，以基础设施建设、制造业和智慧城市为经济改革战略的三根支柱，通过智能制造技术的广泛应用，将印度打造成新的“全球制造中心”，希望通过各项经济改革，完善投资环境，吸引国际制造业巨头投资本国。

2015年，中国提出了“中国制造2025”计划，坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针，坚持“市场主导、政府引导，立足当前、着眼长远，整体推进、重点突破，自主发展、开放合作”的基本原则，通过“三步走”实现制造强国的战略目标：第一步，到2025年迈入制造强国行列；第二步，到2035年中国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平；第三步，到新中国成立一百年时，综合实力进入世界制造强国前列。

当前，大数据、云计算等一批信息技术发展的前端科技，加快了制造业向智能化转型。全球制造业正加快迈向数字化、智能化时代，智能制造对制造业竞争力的影响越来越大。

1.2 智能制造的相关技术

智能制造技术包括智能技术和制造技术，是智能技术和制造技术的融合。智能制造技术，根据不同的范畴和分类，有各种各样的描述。

1.2.1 智能制造领域中的核心智能技术

1) 图像识别

图像识别，是指利用计算机对图像进行处理、分析和理解，以识别各种不同模式的目标和对象的技术。一般工业使用中，采用工业相机拍摄图片，然后再利用软件根据图片灰阶差做进一步识别处理。

图像识别是智能制造重要的环节之一，三维物体识别技术是在智能制造服务系统中识别物体几何形状的关键技术。

2) 实时定位系统

实时定位系统 (Real Time Location System, RTLS), 是一种基于信号的无线电定位手段, 可以采用主动式, 或者被动感应式。实时定位系统可以对多种材料、零件、工具、设备等资产进行实时跟踪管理。在生产过程中需要跟踪在制品的位置行踪, 以及材料、零件、工具的存放位置等。在智能制造服务系统中就需要建立一个实时定位网络系统, 以及生产全流程实时监控系统(透明工厂, 实时生产进度跟踪, 生产管理系统)。

3) 云计算

云计算 (cloud computing) 是分布式计算的一种, 指的是通过网络“云”将巨大的数据计算处理程序分解成无数个小程序, 然后, 通过多部服务器组成的系统进行处理和分析这些小程序得到结果并返回给用户。云计算可以在很短的时间内 (几秒钟) 完成对数以万计的数据的处理, 从而达到强大的网络服务。云计算就是互联网虚拟大脑中枢神经系统。

4) 网络安全

网络安全是指网络系统的硬件、软件及其系统中的数据受到保护, 不因偶然的或者恶意的原因而遭受到破坏、更改、泄露, 系统连续可靠正常地运行, 网络服务不中断。数字化推动了制造业的发展, 但同时也给工厂的网络安全带来了威胁。现在制造过程越来越依赖于计算机网络、自动化机器和无处不在的传感器, 制造过程的数字化技术资料支撑了产品设计、制造和服务的全过程, 必须得以保护。

5) 人工智能

人工智能是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能是计算机科学的一个分支, 它企图了解智能的实质, 并生产出一种新的能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器, 该领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能从诞生以来, 理论和技术日益成熟, 应用领域也不断扩大, 人工智能可以对人的意识、思维的信息过程进行模拟。

1.2.2 智能制造领域中的核心制造技术

1) 工业机器人

工业机器人是智能制造的较佳助手, 工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置, 它能自动执行工作, 是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。它可以接受人类指挥, 也可以按照预先编排的程序运行, 现代的工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。

2) 工业互联网

工业互联网是全球化的网络, 将人、数据和机器连接起来, 是全球工业系统与高级计算、分析、传感技术及互联网的高度融合。工业互联网的本质和核心是通过工业互联网平台把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地连接融合起来。可以帮助制造业拉长产业链, 形成跨设备、跨系统、跨厂区、跨地区的互联互通, 从而提高效率, 推动整个制造服务体系智能化。还有利于推动制造业融通发展, 实现制造业和服务业之间的跨越发展, 使工业经济各种要素资源能够高效共享。

3) 工业大数据

工业大数据技术是使工业大数据中所蕴含的价值得以挖掘和展现的一系列技术与方法, 包括数据规划、采集、预处理、存储、分析挖掘、可视化和智能控制等。工业大数据应用, 则是对特定的工业大数据集, 集成应用工业大数据系列技术与方法, 获得有价值信息的过程。工业大数据技术的研究与突破, 其本质目标就是从复杂的数据集中发现新的模式与知识, 挖掘得到有价值的新信息, 从而促进制造型企业的产品创新、提升经营水

生产运作效率以及拓展新型商业模式。

4) 3D打印

3D打印是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术。3D打印的主流工艺包括挤出成型、光聚合成型、粒状物料成型等。3D打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的。常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型，后逐渐用于一些产品的直接制造，已经有使用这种技术打印而成的零部件。该技术在珠宝、鞋类、工业设计、建筑、工程和施工（AEC）、汽车，航空航天、牙科和医疗产业、教育、地理信息系统、土木工程、枪支以及其他领域都有所应用。

5) 计算机仿真

计算机仿真是以相似原理、信息技术、系统技术及相应领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。计算机仿真行业按仿真技术的应用特点可以划分为计算机仿真测试、仿真模拟训练、虚拟制造等领域，计算机仿真技术广泛应用于国防、工业及其他人类生产生活的各个方面。

1.3 智能制造与设计仿真

仿真技术，是以计算机和专用物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行动态试验的一门综合性技术。其影响已由最初的航空、航天、核工业等少数领域，逐渐扩大到机械制造、电力、交通、医疗、教育等国民经济各领域。

在工业产品实物化前，利用仿真技术可以对设计思想、产品潜在性能、价值、使用效能和适应性等方面进行研究和评估，从而极大地减少了研制风险和周期，降低研制成本。

在设计产品方案之初，首先建立产品的数字化样机，然后在计算机上，运用不同的仿真分析软件，模拟产品的性能属性，最大限度缩短产品开发时间，优化产品性能，减少物理样机的问题，从而提高设计的效率。

比如，过去设计一台汽车，要经过反复的碰撞试验，在碰撞中毁掉数辆真车，研发时间动辄几年，而有了仿真技术，只要在软件中输入数据，各种碰撞结果就能迅速计算出来。仿真技术的最大功用在于将人们平时所思想，在一个虚拟的世界里进行“重现”。

作为工业生产中的重要环节，产品设计的创新能力一定程度上决定了产品的市场反映。产品设计的新颖与否，主要取决于产品设计师的才能。可设计师的才能是需要一定空间才会得到施展的。而仿真技术的快速发展，就为产品设计师提供了极大的施展空间，为他们插上了想象的翅膀。

智能制造离不开仿真技术的支持。目前，仿真技术成为任何复杂系统特别是高科技产业不可替代的分析、研究、设计、评价、决策、训练的重要手段，更是中国从制造业大国向制造业强国转变的重要技术手段。有数据显示，中国每年仿真技术软硬件投入费用在30亿至50亿元。

世界上一些大型企业也广泛地将仿真技术应用到工业智能制造的各个环节，对企业提高开发效率，加强数据采集、分析、处理能力，减少决策失误，降低企业风险起到了重要的作用。

美国波音公司设计和制造波音777时，采用仿真技术，当设计师戴上头盔显示器后，就能进入虚拟飞机中，审视飞机的各项性能，由概念设计到仿真定型后直接生成成功试飞的产品，研制周期缩短一半，经费节省数亿美元。总部位于英国的Virtualis使用虚拟现实技术，让制造商们可以真实感知处于施工阶段的工程，比如潜

艇或公寓大楼。像英国BAE、利兰汽车和劳斯莱斯这些公司都曾用仿真技术虚拟现实系统提高产品制造质量，减少误差，避免返工。英国BAE公司的Dean Brown表示：“毫不夸张地说，人们可以‘行走’在正处于创建中的建筑里，准确排查每一处问题。”

仿真技术还在军事制造方面发挥巨大作用。最新的飞行模拟器采用全新的电子仪器，高速率大数据运算的计算机，精确的追踪设备以及高品质的图形模拟器，为飞行经验较少的飞行新手提供身临其境的飞行教学与训练，以便于他们能在受控的环境下练就一身过硬的本领和一手精细的技术，为提高飞行员的战斗水平起到了很大的作用。正因为如此，美国把仿真技术列为国防技术领域一项重要技术，甚至把仿真环境列为现代局部战争的七大需求之一。目前，已有不少国家把仿真技术视为国防工业的优先发展技术并上升到国家战略。

在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》中关于应鼓励发展的前沿技术有：智能感知技术、自组织网络技术、虚拟现实技术。根据国家中长期科技发展规划，在2049年前，仿真产业应针对国家科技发展的新形势，自主创新，下大力气开展关键技术研究 and 仿真平台开发，培育和提高仿真产业发展的内生动力，快速形成世界先进的产业技术优势，推动社会经济转型升级，带动国家战略新兴产业和国民经济科学发展。这是国家赋予仿真产业能力建设战略使命。

第2章

产品数字化设计与仿真

第2章

产品数字化设计与仿真

本章主要介绍由于计算机的出现，制造业产品设计工程师从传统的手工画二维图纸转向使用计算机三维设计软件进行产品设计，并由此引出三维仿真技术对产品性能检验的重要性和必要性。

2.1 数字化设计发展的历史与现状

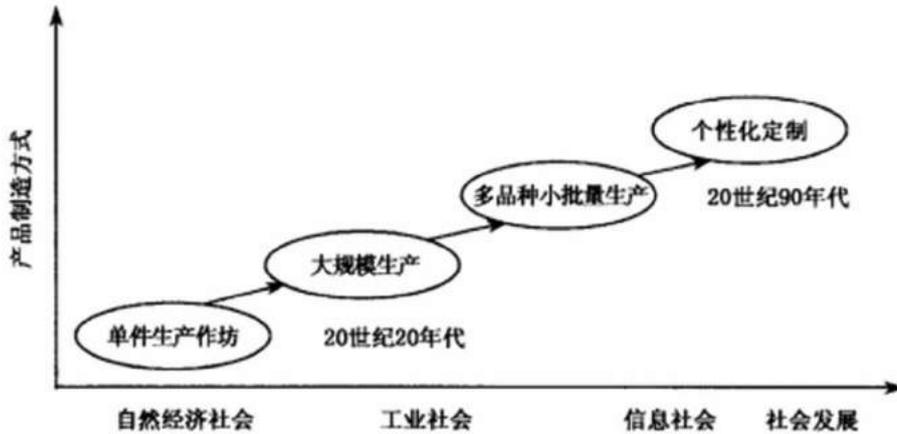
2.1.1 数字化设计的出现

产品设计的数字化是随着人类进入信息时代而出现的，来自于现代制造企业对技术的巨大需求。随着信息技术的快速发展和经济全球化进程的加快，现代制造也发生了重大变化：产品生命周期缩短，交货期成为主要竞争因素，用户需求个性化、多品种小批量生产增多等。现代制造业已经进入数字化设计、数字化制造、数字化测试、数字化产品管理的新时代，其核心表现为：在产品生产全过程中推行数字化技术，在产品全生命周期中的各个环节普及与深化计算机辅助技术、系统集成技术的应用，全面提升企业在设计、制造、管理等多方面的技术水平，促进传统产业的技术进步。事实上，数字化技术已经成为制造企业尤其是中小企业生存与发展的主要技术支撑，并且是企业不断扩大其竞争优势的有效途径。

回顾历史，产品设计技术经历了一个漫长的技术进步过程。在第一次工业革命阶段，以大机器生产为代表，人类用蒸汽机驱动机器，然后用机器加工与处理原材料、用机器加工生产所需的各种器具等，形成了大批量机器生产产品的成熟技术。在这一阶段，诞生了“零部件专业化生产”、“零件互换与标准件”、“测量与试验工具化”、“批量化生产”等具有革命性意义的生产制度创新。随后到了上个世纪20年代，福特开创了机械自动化流水线生产，提出了标准化的概念，加上引入科学的管理思想，出现了“少品种、大批量”的生产方式。大批量的生产方式带来了成本的降低和稳定的质量。这种生产模式的特点是零部件可以高度互换、产品选择范围小、功能固定、生产批量大、成本和价格较低，这种生产模式下的经济被称为规模经济（Economy of Scale），在以后相当长的时间内，这种生产方式得到了空前的成功，典型应用在车辆制造、机床系列化制造、家用电器流水线等。

自1990年代以来，随着科技进步和经济发展，顾客消费水平提高，企业之间竞争加剧，世界进入了一个经济全球化、全球产业分工布局的时代。进入21世纪以来，随着计算机和IT技术的迅猛发展，人类进入所谓的信息社会，基于全球信息流、物流和人员流动的现代制造业，已经发生了巨大变化。随着社会发展，产品制造方式或者生产模式不断演化和发展，由“大规模生产”向“多品种小批量生产”和“个性化定制”方式转变，如图2-1。

图2-1 生产模式随社会发展的变化



通常把一种设想通过合理的规划、周密的计划、通过各种感觉形式传达出来的过程，称之为“设计”（design）。人类通过劳动改造世界，创造文明，创造物质财富和精神财富，而最基础、最主要的创造活动是制造产品。设计便是造物活动进行预先的计划，可以把任何造物活动的计划技术和计划过程都理解为设计，设计技术的发展是随着生产模式的变化而变化的。从图2-1可以看出，在单件生产作坊阶段，产品生产基本依靠手工临摹和仿制，因为产品数量少、不定型，产品设计没有从产品生产流程中独立出来；在大规模生产阶段，在产品生产过程中“产品设计”阶段已经作为一个专业化的分工门类独立出来。在这里，制造业产品的设计不仅包含工业设计的概念，还笼统地包括了与产品相关的所有研究，包括产品概念（production profile）、外观设计（production design）、产品模型（production model）、生产模具（production mold）、产品测试（production test）、产品质量（production quality）等，也包括对生产过程的相关研究，例如时间研究（time study）、动作（姿态）研究（motion study）、方法研究（method study）等，并将这些研究与产品的经济指标相关联，从而诞生了一批适应大工业生产的管理科学。

在设计技术中，人类使用的设计工具不断进化和发展，尤其是电子计算机的出现，给产品设计技术带来了革命性的变化。在石器时代，人类只能把自己对新产品的设想刻画在石头上。在蒸汽机时代，人们已经可以把产品设计绘制在纸张上，并开始统一标识。在二战期间，大量工业制成品已经是按照统一的标准图纸加工制造的，并开始使用统一度量衡（英制）的量具等绘图工具，实现了从图纸设计与大批量产品生产的高度一致性。在二战结束并全面进入电气化时代的时候，已经成立了国际标准化组织（ISO，1947年）。在1946年，世界上第一台计算机ENIAC诞生，从而彻底改变了人类从事产品设计的方式。计算机在发明以后很快应用于具有巨大发展潜力的产品设计技术中，在1950年代就诞生了第一台计算机绘图系统，开始出现具有简单绘图功能的计算机辅助设计（Computer Aided Design，缩写CAD）技术。1960年代初期出现了CAD的曲面片技术，中期推出商品化的计算机绘图设备。1970年代，完整的CAD系统开始形成，后期出现了能产生逼真图形的光栅扫描显示器，推出了手动游标、图形输入板等多种形式的图形输入设备，促进了CAD技术的发展。1980年代，出现专门的具有强大图形功能的设计工作站，CAD技术开始在中小型企业普及，并且CAD技术向标准化、集成化、智能化方向发展。近年来，随着人工智能和专家系统技术引入CAD，出现了智能CAD技术，使CAD系统的能力大为增强，设计过程更趋大为增强，设计过程更趋自动化。目前，CAD已在建筑设计、电子和电气、科学研究、机械设计、软件开发、机器人、服装业、出版业、工厂自动化、土木建筑、地质、计算机艺术等各个领域得到广泛应用。

改革开放以来，我国自行发展的CAD技术助推制造业取得显著的进步。作为先进制造技术中的重要组成部分，CAD技术的研究与应用成为推动我国制造业企业技术更新与技术改造必不可少的手段。从1990年代开始，我国已经逐步形成具有我国特色的CAD/CAM产业，工作重点为CIMS应用工程。CIMS是CAD、CAM、CAPP、CAE、管

理与决策、网络与数据库、质量保证系统等单元技术的集成。CIMS应用工程选定数百家大中型企业科研单位作为CIMS应用工厂，推动CIMS技术的实现与应用，从更高的技术层次上推动着CAD技术的发展。在改革之初，我们就提出了明确的目标，即要让CAD技术成为生产力。通过不断的探索，确定以“甩图板”实现绘图设计自动化，以此作为推广应用CAD技术的突破口，这是一条符合中国国情的、投资小、见效快的战略决策。“甩图板”工程就是要使企业设计部门广泛地采用先进的CAD技术代替手工绘图。这项工程，企业无需投资过大，但能较快形成微机绘图的规模，使CAD从“机房”走到设计人员面前，大大提高了设计质量和效率。经过30多年的努力，我国工程设计单位CAD普及率已经从60%提高到100%。应用CAD技术取得了显著的成效，企业普遍反映：设计周期缩短1/2以上，产品质量有明显提高，人力投入减少1/2以上，降低成本效果明显。

除了“甩图板”以外，数字化设计技术还改变了传统的产品开发流程。通常，产品设计遵循“设计—绘图—制造—装配—样机试验”的串行工程（Sequential Engineering）。由于结构设计、尺寸参数、材料、制造工艺等各方面原因，样机通常难以一次性达到设计指标，产品研发过程中难免会出现反复修改设计、重新制造和重复试验的现象，导致新产品开发周期长、成本高、质量差、效率低。采用数字化设计与产品的三维数字化模型，设计者可以更逼真地看到正在设计的产品及其开发过程，认知产品的形状、尺寸和色彩基本特征，用以验证设计的正确性和可行性；通过数字化分析，可以对产品的各种性能、动态特征和工艺参数进行计算仿真，如质量特征、变形过程、力学特征和运动特征等，模拟零部件的装配过程，检查所用零部件是否合适和正确；通过数字化加工软件定义加工过程，进行NC加工模拟，可以预测零件和产品的加工性能和加工效果，并根据仿真结果及时修改相关设计。借助于产品的虚拟模型，设计人员可以直接与所设计的产品进行交互操作，为相关人员的交流提供了统一的可视化信息平台。这种并行设计思想也称为并行工程（Concurrent Engineering），强调信息集成、过程集成和功能集成，能有效地缩短产品的开发周期，提高产品质量。

进入新世纪以来，经济发展对产品的设计技术提出了更高的要求，设计制造过程更加全面地采用数字化工程，对传统的技术内容和体系进行改造。数字化的对象可以是工程计算中涉及的各类计算问题，如微分方程、偏微分方程、矩阵特征值等。同时数字化还在向各个其他的学科分支渗透：如统计、数据挖掘、计算机算法、图形学、图像处理、生物计算等。数字化设计基于数值计算方法、计算机软硬件技术、网络传输技术、信息处理技术，建立一套专门支持产品开发和生产全过程的设计方法和相关技术。支持基于设计规则、领域知识的设计进化，表现为支持方便快速地进行创新设计、变型设计、优化设计、重新设计等。此外，数字化设计还支持产品开发全过程的数据管理、流程控制与优化。设计过程的数字化技术包括CACD（计算机辅助概念设计）、CAGM（计算机辅助几何建模）、CAE（计算机辅助工程）、PDM等。数字化制造（DM）对制造过程和设备进行数字化定义和描述，通过网络环境下的计算机控制来实现产品的加工制造，包括CAM（计算机辅助制造）、CAPP（计算机辅助工艺规划）、CATD（计算机辅助刀具设计）、CAP（计算机辅助规划）等。

2.1.2 数字化设计的内涵与外延

数字化设计应用计算机软硬件技术提高产品开发质量和效率，与传统产品研发手段相比，它更强调计算机、数字化信息、网络技术以及智能算法在产品开发中的作用。

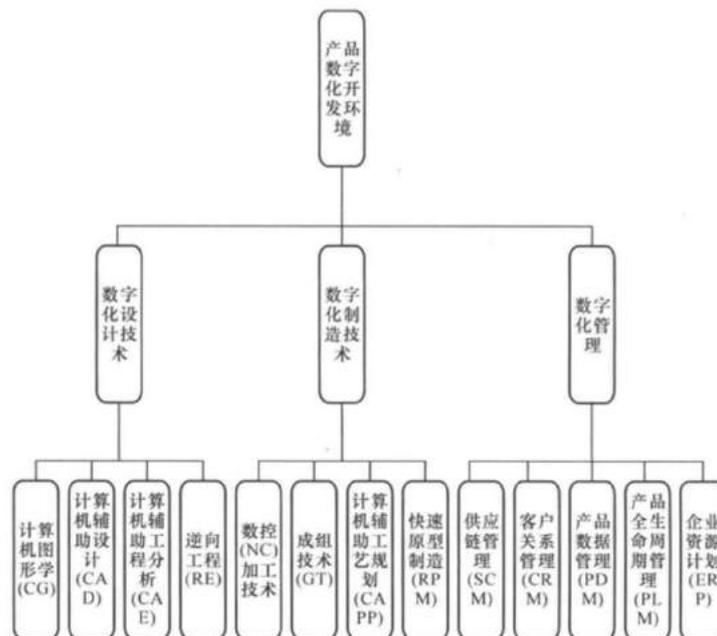
数字化设计制造主要包括计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助工艺设计（CAPP）、计算机辅助工程分析（CAE）、产品数据管理（PDM）等内容。其内涵是支持企业的产品开发全过程、支持企业的产品创新设计、支持产品相关数据管理、支持企业产品开发流程的控制与优化等，归纳起来就是产品建模是基础，优化设计是主体，数控技术是工具，数据管理是核心，它们的关系如图2-2所示。

图2-2 产品数字化设计制造概念



随着计算机技术、网络技术、数据库技术的成熟以及产品数据交换标准的不断完善，各种数字化开发技术呈现交叉、融合、集成的趋势，表现为功能更完整、信息更畅通、效率更显著、使用更便捷。图2-3是产品数字化开发环境及其学科体系。

图2-3 数字化设计知识体系



1) 计算机辅助设计技术 (CAD)

计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 作为信息化、数字化的源头，主要完成产品的总体设计、部件设计和零件设计，包括产品的三维造型和二维产品图绘制。CAD的支撑技术是曲面造型、实体造型、参数化设计、特征技术和变量参数技术等。

2) 计算机辅助工程技术 (CAE)

计算机辅助工程技术 (Computer Aided Engineering, CAE) 主要指用计算机对工程和产品进行性能与安全可靠性分析，对其未来的工作状态和运行行为进行模拟，及早发现设计缺陷，并证实未来工程、产品功能和性能的可用性和可靠性。

3) 计算机图形学 (CG)

计算机图形学 (Computer Graphic, CG) 是一种使用数学算法将二维或三维图形转化为计算机显示器栅格形式的科学。即计算机图形学的主要研究内容就是研究如何在计算机中表示图形, 以及利用计算机进行图形的计算、处理和显示的相关原理与算法。其研究内容包括图形硬件、图形标准、图形交互技术、光栅图形生成算法、曲线曲面造型、实体造型、真实感图形计算与现实算法、非真实感绘制, 以及科学计算可视化、计算机动画、自然景物仿真、虚拟现实等。

4) 逆向工程技术 (RE)

逆向工程 (Reverse Engineering, RE) 也称为反求工程。它是在没有产品原始图纸、文档的情况下, 对已有的三维实体 (样品或模型), 利用三维数字化测量设备准确、快速测得轮廓的几何数据, 并加以建构、编辑、修改生成通用输出格式的曲面数字化模型, 从而生成三维CAD实体模型、数控加工程序或者为快速成型制造提供所需的模型截面轮廓数据。

5) 计算机辅助工艺设计技术 (CAPP)

计算机辅助工艺设计 (Computer Aided Process Planning, CAPP) 通过向计算机输入被加工零件的几何信息 (图形) 和工艺信息 (材料、热处理、批量等), 由计算机自动输出零件的工艺路线和工序内容等工艺文件。CAPP从根本上改变了依赖于个人经验, 人工编制工艺规程的落后局面, 促进了工艺过程的标准化和最优化, 提高了工艺设计质量。CAPP的支撑技术是信息建模技术、工艺设计自动化和产品数据交换标准。

6) 成组技术 (GT)

成组技术 (Group Technology, GT) 利用事物间的相似性, 按照一定的准则分类成组, 同组事物能够采用同一方法进行处理, 以便于提高效益。全面采用成组技术会从根本上影响企业的管理体制和工作方式, 提高标准化、专业化和自动化程度。在机械制造工程中, 成组技术是计算机辅助制造的基础。

7) 快速成型 (RP)

快速成型 (Rapid Prototyping, RP) 技术是20世纪90年代发展起来的, 被认为是近年来制造技术领域的一次重大突破。它综合了机械工程、CAD、数控技术、激光技术及材料科学技术, 可以自动、直接、快速、精确地将设计思想物化为具有一定功能的原型或直接制造零件, 从而可以对产品设计进行快速评价、修改及功能试验, 有效地缩短了产品的研发周期。

8) 产品数据管理 (PDM)

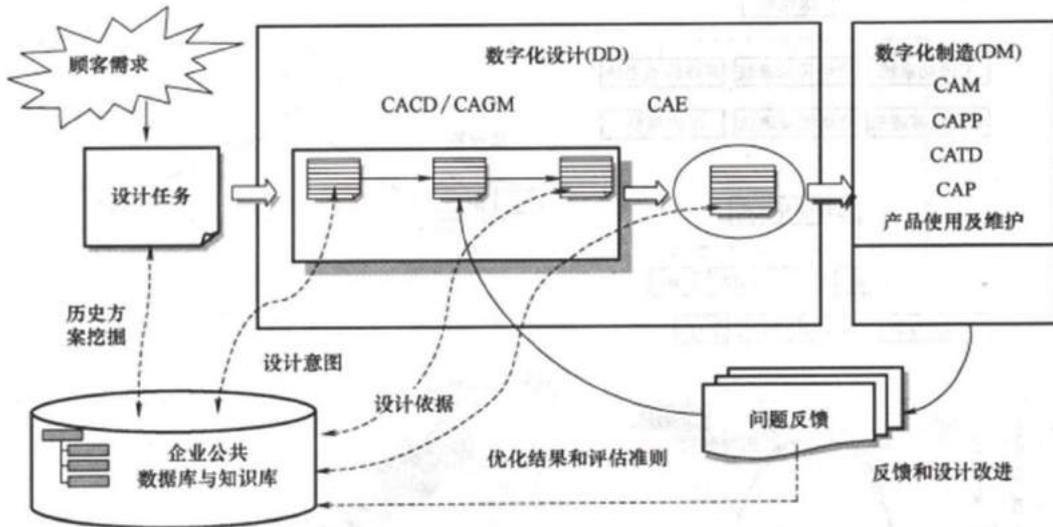
产品数据管理 (Product Data Management, PDM) 是用来管理所有与产品相关的信息 (包括零件信息、配置、文档、CAD文件、结构、权限信息等) 和所有与产品相关的过程 (包括过程定义和管理)。通过实施PDM, 可以提高生产效率, 有利于对产品的全生命周期进行管理, 加强对文档、图纸和数据的高效利用, 使工作流程规范化。

9) 企业资源计划 (ERP)

企业资源计划 (Enterprise Resource Planning, ERP) 是对企业的所有资源 (物流、资金链、信息流、人力资源) 进行整合集成管理, 采用信息化手段实现企业供销链管理, 对供应链上的每一环节实现科学管理。在企业中, ERP的管理主要包括三个方面: 生产控制 (计划、制造)、物流管理 (分销、采购、库存管理) 和财务管理 (会计核算、财务管理)。

将所述全部或部分系统集成起来, 就可以形成一个完整的数字化设计平台或者系统, 如图2-4所示。

图2-4 产品数字化技术构成



进入21世纪后，计算机技术、信息技术（IT）、网络技术以及管理技术的快速发展，对制造企业和新产品开发带来了巨大挑战，也提供了新的机遇。在网络化和信息时代，产品数字化设计与制造技术呈现出以下发展趋势：

（1）利用基于网络的全数字化设计与制造技术，实现了完全无图纸的设计和全数字化制造。利用产品数据管理（PDM）技术实现并行工程，提高产品开发的效率和质量。利用系列件、标准件、借用件、外购件，减少重复设计；利用网络环境的高效数据链接，进行协同产品设计和制造；利用CAD/CAPP/CAE/CAM/PDM/PLM等模块的系统集成，实现了全数字化设计与制造的大平台。

（2）数字化设计与制造技术与企业资源计划、供应链管理、客户关系管理结合，形成企业信息化的总体构架。数字化设计可应用于产品的设计、工艺和制造过程管理；将数字化设计数据应用于企业资源计划（ERP），实现企业产、供、销、人、财、物的管理目标；运用数字化设计数据，开展供应链管理（SCM），实现企业内部与上游企业之间的物流自动化管理；将数字化设计系统与客户关系管理（CRM）系统建立联系，帮助企业建立、挖掘和改善与客户之间的关系。上述技术的集成，可以显著提升企业的管理水平，实现企业内部、企业与外界的信息流、物流和资金流的顺畅传递，有效地提高企业的市场反应速度和产品开发速度，确保企业在竞争中取得优势。

（3）通过Internet、Intranet、Cloud（云端）、大数据平台等将企业的业务流程紧密地连接起来，对产品开发的所有环节进行高效、有序地管理。为将来进入物联网时代打下基础。

（4）虚拟工厂、虚拟制造、动态企业联盟、敏捷制造、网络制造以及制造全球化成为数字化设计与制造技术发展的重要方向。

在虚拟制造方式中，产品开发的电子文档以及相关信息可以通过Internet在联盟企业之间传递；通过准时制生产（Just In Time, JIT）实现合作厂商之间物流的零库存，以降低库存成本；合作厂商之间的结算可以利用电子商务完成；产品销售也可以利用企业-企业（Business to Business, B2B）或企业-顾客（business to customer, B2C）之间的电子商务方式实现；对用户或产品的售后服务和技术支持，也可以通过电子服务来实现。

2.1.3 中小企业应用数字化设计技术的现状

与大型企业尤其是大型跨国企业相比，中小企业存在着许多明显的弱点，例如抗风险能力低、研发投入较少、技术力量薄弱、产品品种单一等等。为了在残酷的国际竞争环境下生产和发展，制造业中小企业加强数字化设计与制造技术的应用，无疑是明智的战略选择。目前中小企业在数字化设计与制造技术的应用中存在诸多的短板，其主要表现可以总结为如下3个方面。

(1) 仅仅应用了数字化设计与制造技术的单项技术，而并没有形成有效的技术组合和系统集成。这种情况在中小企业中十分普遍。例如，许多汽车零部件配套厂家已经实现了完全无图纸的设计，即CAD技术应用非常成熟，但是从加工图纸(CAD)到数控机床之间的工序衔接却几乎完全依靠人工，即缺少CAD/CAM之间的无缝衔接。再例如，某中型汽车零部件厂家，已经解决了CAD/CAM之间的衔接问题，但是，当出现产品质量问题时，需要对某汽车零件的强度、温度场、应力场、疲劳等进行分析的关键时候，该企业可能缺乏对该汽车零件进行分析和测试的能力，即企业无法翻过CAD/CAM和CAE之间的“技术大山”。事实上，因企业规模和资金的限制，中小企业是无能力建立CAD/CAPP/CAE/CAM/PDM/PLM完整的集成系统的。同时，这也成为阻碍企业从数字化设计与制造技术中获得更大经济效益和竞争优势的主要原因之一。

(2) 中小企业在数字化设计与制造技术应用方面，还不同程度地存在着部门之间条块分割、缺少统一规范和计划、与产品生产核心部门脱节等问题。其主要原因是企业管理者对数字化新技术运用缺乏全盘和长远的考虑。例如，某些企业拥有超过其实际需要的研发部门，雇佣了一批高水平的分析工程师(Analysis Engineers)或者设计工程师(Design Engineers)，但是该部门的开工率可能严重不足，因其它部门的制约而导致大量研发成果无法取得实际成效，因偏离企业生产环节而导致工作效率低下。因为上面论述到的数字化设计与制造技术是一个有机结合的整体，如果中小企业片面地追求数字化设计与制造技术中某一单项技术的领先地位，往往是“得不偿失”的。

(3) 中小企业中普遍存在着数字化设计与制造技术升级迟缓或落后的现象。例如，至今某些中小企业仍然在使用10年前甚至20年前的CAD技术，除了平面设计图以外，几乎没有新的产品数字化设计作品出现，如机械部件的三维建模、三维仿真等。再例如，某些企业研发部门虽然有基本的有限元分析能力，但是无法解决需要数值计算的复杂工程问题。由于数字化设计与制造技术的快速发展，中小企业中出现这种情况并不奇怪。以有限元分析为例，最新的有限元计算能力已经涵盖了多学科(Multi-disciplines)、多物理场耦合(Multi-physical Coupling Fields)、非线性(Nonlinear)、复杂材料(Complex Materials)、多尺度(Multi-scale)、复杂过程(Complex Process)等极其广阔的领域。中小企业要跟踪这些计算技术的进步是非常困难的，也是没有必要的。但是，中小企业为了自身的生存和发展，必须找到一条在数字经济中的取胜之道。

2.2 数字化设计技术

本节首先从CAD入手介绍数字化设计，由数字化设计的发展必然导致数字仿真技术的兴起，因此下一章将介绍仿真技术的发展及现状。

2.2.1 计算机辅助设计概述

计算机辅助设计是一种利用计算机软硬件系统辅助人们对产品进行设计的方法和技术，主要包括设计、绘图、工程分析与文档制作等设计活动。从设计方法看，设计师用CAD软件和计算机硬件完成设计全过程。从设

计技术看，CAD技术把产品的物理模型转化为存储在计算机中的数字化模型，从而为后续的工艺制造、管理等环节提供了共享的信息来源。早期的CAD概念是计算机辅助绘图（Computer Aided Drafting），历经数十年的研究与应用，CAD的概念已经发生了本质的飞跃，涵盖了产品的全生命周期，已经发展成为数字化设计与制造系统的重要基础部分。通用CAD系统主要功能可归纳如下：

- ◆造型功能，包括实体造型和曲面造型功能；
- ◆二维图形与三维图形的相互转化功能；
- ◆参数化设计功能；
- ◆图形处理功能，包括图形的动态显示、编辑、消隐、渲染、输出等；
- ◆三维运动机构的分析与仿真功能；
- ◆初步的有限元分析与优化功能；
- ◆数据处理与数据交换功能；
- ◆二次开发功能。

CAD技术在机械行业的应用最早，也最为广泛，所带来的经济效益十分可观。经典的案例包括美国的波音747飞机，它比英国的三叉戟飞机晚开工，但由于采用了CAD技术，Boeing747先于三叉戟完工。

目前流行的主要CAD软件系统包括：

1) 由美国Autodesk（欧特克）公司出品的AUTOCAD（Autodesk Computer Aided Design），从1982年推出以来不断更新版本，目前的最新版本是AUTOCAD2019，其功能全面，发展历史最长，而且应用范围最广，也是中国用户数最多的CAD软件；

2) 由Siemens PLM Software公司出品的UG（Unigraphics NX），也称为交互式CAD/CAM系统，其设计出发点是为用户的产品设计及加工过程提供数字化造型和验证手段。它在诞生之初主要基于工作站，但随着PC硬件的发展和个人的迅速增长，在PC上的应用取得了迅猛的增长，已经成为模具行业三维设计的一个主流应用。

3) 法国达索（Dassault Systems）旗下的SolidWorks软件，它可以说是AUTOCAD软件的“后起之秀”，它是世界上第一个基于Windows开发的三维CAD系统，由于技术创新符合CAD技术的发展潮流和趋势，SolidWorks公司成为近年来CAD/CAM产业中获利最高的公司。它的根本优势在于软件技术持续更新，适应技术的不断进步。例如，在WINDOWS平台，SolidWorks是按照产品阶段（草图-部件图-装配图-组装图-施工图等）开展并行设计最好的软件，适应目前数字化设计技术进步的潮流。另外，SolidWorks也是通过Web开展协同设计工作最方便的CAD软件，贴合目前互联网技术深度发展的趋势。

4) 由美国参数技术公司出品的Pro/Engineer（2010年起整合升级改名为CREO），它是一款CAD/CAM/CAE一体化的三维设计软件，以参数化建模著称，也是参数化建模技术的最早应用者。在目前的中国市场应用上，Pro-E的应用主要集中于消费电子、高科技领域、玩具的产品设计和模具设计，因此也决定了用户的关注热点比较集中于零件建模、曲面造型、工程图、优化设计方法、分模和模具设计和逆向造型等模块。

5) 法国达索公司的旗舰产品CATIA，作为PLM协同解决方案的一个重要组成部分，它可以通过建模帮助制造厂商设计他们未来的产品，支持从产品设计、分析、模拟、组装到维护在内的全部工业设计流程。

除了上述5款主流CAD软件以外，还有一些在特殊行业专门定制的CAD软件。例如，美国DAR（Design，

Analysis and Research) 公司专门进行飞机设计与分析的Advanced Aircraft Analysis (AAA) 分析软件, Shark FX-AP建模软件和SharkCAD-AP系列软件。

中国在自主知识产权的CAD软件方面, 也有许多具有代表性的软件系统。例如: 1) 天喻CAD (InteCAD), 由华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心和天喻软件有限责任公司开发, 在国内机械行业拥有较多的用户; 2) 天正建筑CAD (TArch) 是由天正软件公司基于AUTOCAD二次开发的专用于建筑工程的CAD系列软件, 占据了国内建筑行业的主要市场。3) 中望CAD软件, 具有完全自主知识产权, 集“曲面造型、实体建模、模具设计、装配、钣金、工程图、2-5轴加工”等功能模块于一体, 是覆盖产品设计开发全流程的三维CAD/CAM软件; 还有北京数码大方科技股份有限公司出品的CAXA软件、浩辰CAD软件、华天软件的Sinovation 3D等等。需要指出的是, 基于已有的CAD系统二次开发适合中国国情和行业专门要求的定制CAD软件系统, 成为自主CAD软件取得成功的一条捷径。

2.2.2 常见计算机辅助设计软件系统

通过下面1张表格对比常见的5款CAD软件系统。从表中可以看出, 这些流行的CAD软件各具优点和特色, 企业或者工程师选用某一个CAD软件, 可以参考表2.1给出的评价和指标。例如, 对于汽车整车企业, 首选是CATIA, 如国内的东风汽车公司。又例如, 对于中小型机械制造企业, 则需要根据自己企业的产品特性进行选择。如果是模具加工制造为主的企业, 则可以选择UG或者SolidWorks; 如果企业以数控加工为主业, 那么选择SolidWorks或UG都不错; 如果企业是流水线组装机械产品为主, 则可以选择Pro/E。而对于许多小微制造企业或土木建筑行业企业而言, 则选择最普及的AutoCAD软件一般可以满足企业的需要。

由于企业的CAD在数字化设计仿真与制造中发挥着中心和领导的作用, 因此选择好本企业的CAD软件产品是十分重要的。

表2-1 常见CAD软件的技术特性和指标

CAD 软件 特性	Autocad	SolidWorks/SolidEdges	Unigraphics NX	Pro/Engineer	CATIA
支持 OS 及硬件	WinPC	WinPC 和工作站/工作站	先工作站后 WinPC	先工作站后 WinPC	IBM 工作站
基本功能 (5 级评分)	二维绘图编辑(5/5) 三维实体造型(1/5) 2D-3D 转换(2/5) 参数化建模(2/5) 渲染(2/5) 曲线和曲面造型(2/5) 图形处理功能(2/5)	二维绘图(3/5) 三维实体造型(3/5) 2D-3D 转换(4/5) 参数化建模(4/5); 渲染(5/5) 曲线和曲面造型(4/5) 图形处理功能(4/5)	二维绘图(3/5) 三维实体造型(2/5) 2D-3D 转换(3/5) 参数化建模(2/5) 渲染(4/5) 曲线和曲面造型(3/5) 图形处理功能(4/5)	二维绘图(2/5) 三维实体造型(3/5) 2D-3D 转换(3/5) 参数化建模(5/5) 渲染(3/5) 曲线和曲面造型(4/5) 图形处理功能(2/5)	二维绘图(1/5) 三维实体造型(5/5) 2D-3D 转换(4/5) 参数化建模(4/5) 渲染(4/5) 曲线和曲面造型(5/5) 图形处理功能(4/5)
设计流程	样本库和标准件库	工程图, 装配设计, 协同, CNC	NX 工业/产品, CNC, Mold 等定制	CABLING/CAT/CDT 等定制	全流程全覆盖全协同
特色功能	与 Windows OA	Windows 风格全兼容, 协同	三层软件结构, 产品关联协同	单一数据库, 特征参数化	交互全相关并行混合建模
二次开发	Auto lisp, Visual lisp, VB, C++	VB, VC++, 支持 OLE	Open Grip, C, mem 脚本, UI style	Pro/Program, Pro/Develop	自成体系 CAD/E/M 系统
模块功能	机电\土建\服装等行业版	零件\曲面\钣金\渲染\特征等	注塑\PostBuilder\协作\CAE 等	组装管理\定制化\CAE\CAM 等	曲面\PDG\ASD\IDR\STD\SHIP 等
主文件/转换/样板	DWG/DXF/DWT	PRT/ASM/DRW/DXF... IGES/STEP	PRT/FEM/SIM.../IGES/STEP	PRT/ASM/DRW/MFG/FRM/STEP	CATDrawing 系列文件
市场竞争	二维制图, 传统, 中低端市场	WinPC 新贵, 中端市场	大型交互 CAD/CAM	主流的 CAD/CAM/CAE	超大型集成, 高端市场
主要应用行业	机电\土建\服装等中小企业	航空汽车机械等	模具塑料汽车大众工业品	机械/电缆/模具等	航空汽车等跨国企业
用户体验	最广泛用户, 易学易用	Win 用户熟悉, 易学易用	与 CNC 融合好, 较难学	定制多, 针对性学习	需要专门系统培训效率才高

2.3 仿真技术发展及现状

2.3.1 仿真技术概述

系统仿真是随着计算机技术发展而逐步形成的一门新兴学科。仿真(Simulation)就是通过建立系统模型对实际系统进行实验研究的过程。自40年代仿真技术与计算机技术结合以来,先后出现了模拟机仿真、混合机仿真(模拟与数字技术相结合)、数字机仿真以及数学-物理仿真(数学模型与物理效应模型相结合)。最初仿真技术主要用于航空、航天、原子反应堆等代价昂贵、周期长、危险性大、实际系统试验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金、机械等一些主要工业部门,并进一步扩大到社会系统、经济系统、交通运输系统、生态系统等一些非工程系统领域。可以说,现代系统仿真技术和综合性仿真系统已经成为任何复杂系统特别是高技术产业不可缺少的分析、研究、设计、评价、决策和训练的重要手段,其应用范围在不断扩大,应用效益也日渐显著。

仿真的基本思想是利用物理或者数学模型来类比模仿现实过程,以寻求过程规律。它的基础是相似现象,即几何相似性和物理相似性。在工程应用中,按照实现方式和手段的不同,系统仿真可划分为以下三种主要类型。

(1) 物理仿真

物理仿真是按照实际系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行仿真试验研究。物理仿真直观形象,逼真度高,但不如数学仿真方便。对于复杂系统,物理模型的建立通常需要巨大的资金和时间的投入,而且物理模型一旦建立,就很难修改其结构和参数。另外,物理仿真是实时运行的。

(2) 数学仿真

数学仿真无需昂贵的实物系统,也不需要模拟客观世界真实环境的各种物理效应设备,而是建立等同的数学模型,在计算机上编写仿真程序,编译并运行。数学仿真实验时,用户可以通过键盘等输入设备改变系统参数或结构,通过CRT、打印机、绘图仪等输出设备显示仿真结果,或将结果保存到存储设备上(如磁带、磁盘、光盘等)。数学仿真既可以实时运行,也可以非实时(超实时或欠实时)运行。数学仿真具有经济性、灵活性和模型通用性等特点。随着并行处理技术、图形技术、人工智能技术和仿真软硬件技术的发展,数学仿真技术正在得到越来越广泛的应用。

(3) 混合仿真

混合仿真也称为半物理仿真。它包括三种类型:(A)硬件在回路仿真。硬件在回路仿真是将实际系统的一部分用数学模型加以描述,并转换为仿真模型在计算机上运行,将系统的另一部分以实物(或物理模型)引入仿真回路。通常,由于真实系统的某些部分很难(或根本无法)建立准确的数学模型,再加上各种难以实现的非线性因素和随机因素的影响,使得进行纯数学仿真十分困难。面对这种情况,可以采用硬件在回路仿真,将不易建模的部分用实物代替。由于在回路中有实物硬件加入,硬件在回路仿真必须是实时运行的。利用硬件在回路仿真,可以检验真实系统的某些实物部分乃至整个系统的性能指标和可靠性,有助于准确调整系统参数和控制规律,可以用来检验数学模型的正确性和数学仿真结果的准确性。硬件在回路仿真在航天航空、武器系统等研究领域已成为不可缺少的重要技术手段。(B)软件在回路仿真。软件在回路仿真是将系统计算机与仿真计算机通过接口连接起来进行系统仿真试验。接口的作用是将不同格式的数字信息进行转换。在卫星、飞行器的导航系统和制导系统等高精度复杂系统中,广泛采用专用的系统软件进行控制、导航和制导运算。由于软件的规模越来越大,功能越来越强,软件在系统中的测试显得尤为重要。软件在回路仿真就是针对这种情况产

生的，一般情况下，软件在回路仿真要求实时运行。（C）人在回路仿真。人在回路仿真是指操作人员在系统回路中进行操作的仿真试验。这种仿真将对象实体的动态特性由数学模型在计算机上运行，通过各种模拟人感觉的物理效应设备包括视觉、听觉、触觉和动感等，模拟生成人所感觉到的物理环境。由于操作人员在回路中，人在回路仿真必须同时进行。

根据对仿真对象模型的掌握程度和对象的特点，可以有以下三种建立模型的途径。（A）对内部结构清楚的系统（白箱），可以利用已知的基本规律，推导出系统的数学模型。（B）对内部结构不清楚或不是很清楚的系统（黑箱），如果允许进行实验性观测，则可以先猜想系统的模型，然后再通过试验验证对模型进行修正。（C）对内部结构不清楚或不是很清楚，但又不允许直接试验观测的系统，则通过数据收集和归纳统计的方法来假设模型。机电系统一般属于前两种情况，系统中的多数环节可以用物理或数学模型来描述。对于个别参数（如摩擦特性），可通过试验观测来获得。

2.3.2 仿真图形交互与动画技术

计算机图形学的核心目标在于创建有效的视觉交流。在科学领域，图形学可以将科学成果通过可视化的方式展示给公众。在认识论方面，计算机图形学在帮助人脑从图形图像的角度理解事物本质的重要作用，因为图形图像比单纯数字具有更强的洞察力。在软件系统方面，图形界面（GUI）通常是最直接的人机交互形式。在数字化设计与计算方面，图形作为“最直观的设计语言”来使用的。

计算机图形学核心目标（视觉交流）可以分解为三个基本任务：表示、交互、绘制，即如何在计算机中“交互”地“表示”、“绘制”出丰富多彩的主、客观世界。这里的“表示”是如何将主、客观世界展现在计算机中（二维、三维对象的表示与建模）；而“绘制”是指如何将计算机中的对象用一种直观形象的图形图像方式表现出来（二维、三维对象的绘制）；“交互”是指通过计算机输入、输出设备，以有效的方式实现“表示”与“绘制”的技术。其中，“表示”是计算机图形学的“数据层”，是物体或对象在计算机中的各种几何表示；“绘制”是计算机图形学的“视图层”，指将图形学的数据显示、展现出来。“表示”是建模、输入，“绘制”是显示、输出。“交互”是计算机图形学的“控制层”，它负责完成有效的对象输入与输出任务，解决与用户的交互问题。

计算机图形学的主要研究对象是点、线、面、体、场的数学构造方法及其图形显示，及其随时间变化的情况。它需要研究以下几方面的内容。

（1）描述复杂物体图形的方法与数学算法。二维或三维景物的表示是计算机图形显示的前提和基础，包括曲线、曲面的造型技术，实体造型技术，以及纹理、云彩、波浪等自然景物的造型和模拟；三维场景的显示包括光栅图形生成算法、线框图形以及真实感图形的理论和算法。

（2）物体图形描述数据的输入。

（3）几何和图形数据的存储，包括数据压缩和解压缩。

（4）物体图形数据的运算处理，包括基于图像和图形的混合绘制技术、自然景物仿真、图形用户接口、虚拟现实、动画技术和可视化技术等。

（5）物体图形数据的输出显示，包括图形硬件和图形交互技术等。

（6）实时动画和多媒体技术，研究实现高速动画的各种硬/软件方法、开发工具、动画语言以及多媒体技术。

（7）制定与图形应用软件有关的技术标准。

计算机图形学的重要应用包括：（1）计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）；（2）计算机动画；（3）科学计算可视化；（4）虚拟现实等。在计算机辅助设计与制造方面，前面已经论述。

在计算机动画方面，常见的图形处理和三维动画软件有Photoshop、Illustrator、CorelDraw，Rhinoceros等，还有Maya、3DMAX、XSI、LightWave等。常见的Windows图形显示驱动程序包有OpenGL，DirectX等，常见的表现技术与工具有：关键帧动、层级动画、路径动画、互动动画、表达式、刚体动力学和柔性体动力学以及一些变形工具。这些技术和工具可以相互组合使用，以便获得更好的制作功能。

2.3.3 有限元法

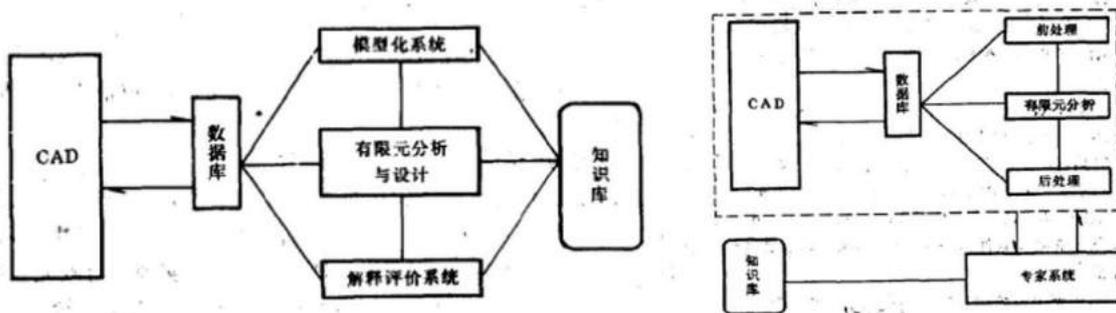
有限元法 (finite element method, 缩写FEM) 是一种常用的高效能数值计算方法，它的基本思想是将连续问题离散化，转化为便于数值计算的矩阵求解问题。有限元法最早可上溯到20世纪40年代。Courant第一次应用定义在三角区域上的分片连续函数和最小位能原理来求解圣文南 (St. Venant) 扭转问题。通常认为，现代有限元法的第一个成功尝试是在1956年由Turner、Clough等人在分析飞机结构时，将刚架位移法推广应用于弹性力学平面问题，所以有限元的原型可以称为“结构分析的矩阵位移法”。1960年，Clough进一步处理了平面弹性问题，并第一次正式使用“有限元法”一词。从有限元的基本方法派生出来的方法很多，包括各种板和壳单元、复杂材料的三维单元，还有有限条法、边界元法、杂交元法、非协调元法和拟协调元法等，用以解决特殊的问题。

伴随着计算机硬件与软件技术的进步，有限元软件的发展大约可以分成如下几个阶段：

- (a) 有限元计算软件；
- (b) 有限元分析与设计软件，即FEM与CAD软件集成为一体；
- (c) 有限元分析与设计的专家系统，即FEM与CAD和专家系统软件集成为一体；
- (d) 智能有限元结构分析系统，即人工智能AI加入到FEM软件中；
- (e) 集成化有限元软件开发环境，即FEM开始形成一个数字化设计与分析的大系统。

通常，一个FEM程序包括前处理、有限元计算和后处理三个部分，当FEM与其它计算机软件技术融合为一体的时候，系统的计算能力将极大地放大出来。例如，典型的智能有限元结构分析系统CAD与FEM关系框图如图2-5。

图2-5 CAD与FEM关系



有限元法的基本思想是富有创意的。通常，有限元分析 (FEA) 或称为有限元法 (FEM)，它是求解连续物理场问题数值解的一种方法。连续的物理场问题需要我们确定一个或多个相关变量的空间分布。例如，一台发动机活塞内的温度分布或者混凝土路面的位移和应力分布，是我们工程中亟待解决的问题。在数学上，一个物理场问题由微分方程或者积分表达式描述，每种描述都可用于有限元列式，在通用的有限元程序中包含了现成形式的有限元列式。当人们对有限元知识或者对其用于求解的问题知之甚少时，运用有限元程序，有可能导致小到令人烦恼、大到灾难性的后果。单个的有限单元可形象化地视为结构的一小片，“有限”这个词区分了这些小片和微积分学中的无穷小微元。在每个有限单元中，允许一个物理变量仅有简单的空间变化，比如由多

项式各项的和来描述，单元所跨区域的实际变化几乎可以肯定比较复杂，因此有限元法提供的仅是近似解。单元的连接点叫做“节点”，单元的集合称为有限元结构，通常用的“结构”一词意味着已定义的物体或区域，特定的单元排列称为网格（mesh）。在数值分析中，有限元网格用待求节点未知量的代数方程组来表示。节点上的未知量是物理场中变量的值，它依赖于单元的形状，或许也依赖于它的一阶导数。节点值的解，当它和给定单元上的节点变量结合起来时，完全决定了单元上场的空间变量。如此，整个结构上连续变化的物理量，以分段的形式由逐个单元进行了近似。所以，尽管有限元不是精确解，但是可以通过对结构划分更多的单元来提高解的精度，足以满足工程中所需要的计算精度要求。比之其它数值方法，有限元法具有许多优点，包括通用性强和物理概念明确。

最后，需要提及的是近年来发展迅速的无网格法（Meshless Method or Meshfree Method），它在数值计算中不需要生成网格，而是按照一些任意分布的坐标点构造插值函数离散控制方程，就可方便地模拟各种复杂形状的流场。该方法大致可分成两类：一类是以Lagrange方法为基础的粒子法（Particle method），如光滑粒子流体动力学（Smoothed particle hydrodynamics，简称SPH）法，和在其基础上发展的运动粒子半隐式（Moving-particle semi-implicit，简称MPS）法等；另一类是以Euler方法为基础的无格子法（Gridless methods），如无格子Euler/N-S算法（Gridless Euler/Navier-Stokes solution algorithm）和无单元Galerkin法（Element free Galerkin，简称EFG）等。无网格方法可以方便地利用坐标点计算模拟复杂形状流场计算，但不足之处是在高雷诺数流动时提高数值计算精度较困难。无网格伽辽金法成为目前影响最大，应用最广的无网格计算方法，现有的LS-dyna，Abaqus，Radioss等商业软件都加入了该方法的计算模块。因为无需对实体区域划分网格，以无网格方法为基础的CAE程序与CAD接口方面具有优势，例如SolidWorks XFlow模块，采用了无网格方法进行CFD计算，显示出较大的技术优势。虽然无网格方法有发展成为替代有限元法数值方法的趋势，但是，目前工程数值分析领域仍然是有限元法占据绝对统治地位。

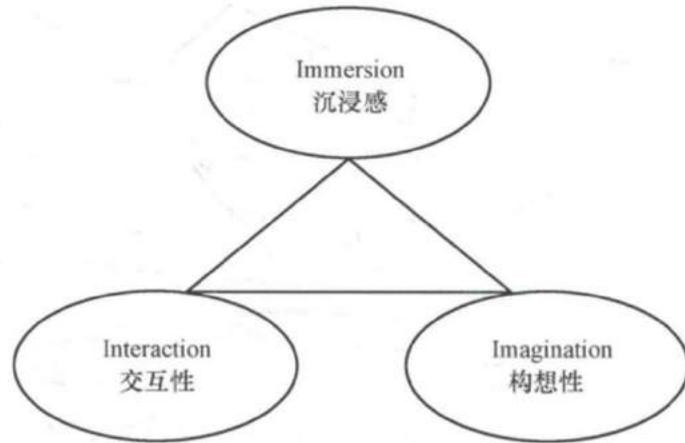
2.3.4 虚拟现实技术

虚拟现实可看成对虚拟事物的三维可视化或真实三维世界的重现，它不仅是一种人机接口，更主要的是利用计算机技术、传感与测量技术、仿真技术、微电子技术等现代技术手段构建模拟虚拟世界，使某个特定环境真实再现后，用户通过接受和响应模拟环境的各种感官刺激，与虚拟世界中的人或物进行交互，进而产生身临其境的感觉。由此可见，虚拟现实这一术语包含了三个方面的含义：

- （1）虚拟现实是一种基于计算图形学的多视点、实时动态的三维环境，这个环境可以是现实世界的真实再现，也可以是超越现实的虚构世界；
- （2）用户可以通过人的视、听、触等多种感官，直接以人的自然技能和思维方式与所投入的环境交互；
- （3）在操作过程中，人是以一种实时数据源的形式沉浸在虚拟环境中的行为主体，而不仅仅是窗口外部的观察者。

美国科学家Burdea G和Philippe Coiffet提出了虚拟现实技术三角形，即VR具有沉浸感（immersion）、交互性（interaction）和想象力（Imagination），如图2-6所示。

图2-6 VR技术的特性



在实际应用中，虚拟现实系统根据用户“沉浸”程度的高低和交互程度的不同，一般分为桌面式虚拟现实系统（Desktop-VR）、沉浸式虚拟现实系统（Immersion-VR）、增强式虚拟现实系统（Augmented-VR）和分布式虚拟现实系统（Distributed-VR）4种模式。它们的典型系统组成如图2-7所示。

图2-7 桌面式虚拟现实系统的体现结构



VR技术除了在电子游戏、影视制作、观光旅游、移动穿戴、网络社交等领域的典型应用以外，在工业、医疗、教育等领域，VR的应用具有非常广阔的前景。在数字化设计与制作领域，VR也有非常重要的应用价值。

在制造业借助虚拟现实技术，可以实现虚拟产品设计、虚拟产品制造、虚拟生产过程、虚拟产品展示与维护等。利用虚拟现实技术，可以帮助制造领域工程师完善产品设计、优化产品性能、提高产品质量和设计效率、降低开发成本。目前在工业领域虚拟现实技术的应用已经非常广泛。

(1) 虚拟现实在汽车制造上的应用

VR技术可以用于汽车虚拟设计。传统的新车型设计耗资大、周期长，利用虚拟现实技术，整车的实物化图纸和模型可以省略，所有新车开发过程在计算机内完成，因此明显缩短汽车研发周期。1990年代新车研发时间是48~60个月，采用了虚拟现实技术后，已经缩短到18~24个月。另外，采用虚拟设计，还可以方便地修改设计方案，在设计早期发现并修正设计缺陷，避免造成巨大的经济损失。

(2) 虚拟现实在船舶制造上的应用

虚拟现实技术用于全生命周期的虚拟船舶设计系统开发，可以提高船舶设计的质量，减少船舶制造费用，缩短船舶制造周期。在船舶制造阶段，同样可以应用虚拟现实仿真系统，对船厂厂区及设施、船舶内部结构和布置、船体制造以及预定的工艺流程进行逼真的3D可视化虚拟展示。工程师可以与虚拟环境中的船体模型进行

交互操作，完成钢材预处理、钢材切割、钢材弯曲成型等。与此同时，虚拟现实系统还提供了船体装配功能，通过模拟真实的装配方式，帮助用户了解船体装配流程、船体构造等等。

(3) 虚拟现实在飞机制造上的应用

现代飞机的研制周期在日益缩短，同时对飞机性能的要求与日俱增，飞机技术的复杂性也越来越高。因此，在飞机研制的过程中，应用虚拟现实技术成为确保飞机研制成功的关键手段之一。在飞机设计的过程中，应用虚拟技术能提前开展飞机飞行仿真演示、人机工效分析、总体布局、装配与维修性评估，能够及早发现、弥补设计缺陷，实现“设计—分析—改进”的闭环迭代。因此，虚拟现实技术能显著促进飞机设计能力的提升。

此外，虚拟现实还在能源开采仿真、水利工程仿真、电力系统仿真等工业部门大量地应用起来。

2.4 数字化设计与仿真的智能化

CAD技术研究的重点包括计算机辅助概念设计、计算机支持的协同设计、海量信息存储、管理及检索、设计方法及其相关问题、支持创新设计等。CAD技术经历了二维平面图形设计、交互式图形设计、三维线框模型设计、三维实体造型设计、自由曲面造型设计、参数化设计、特征造型设计等发展过程。近年来又出现了许多先进技术，如变量化技术、虚拟产品建模技术等。随着互联网的普及，集成化、协同化、智能化成为CAD技术新的发展特点，CAD软件发展成为支持协同设计、异地设计和信息共享的网络化平台。具体而言智能化CAD技术的发展趋势包括如下几个方面：

(1) 变量化设计环境

先进的超变量几何 (Variational Geometry eXtended, VGX) 技术是由SDRC公司推出的一种CAD核心技术。VGX提供了三维变量化控制技术，贯穿于二维草图设计、三维零件造型，直到装配设计全过程；提供变量化草绘、建立变量方程、设计变量特征的能力；直接修改与基于设计历程修改相结合，可随时灵活地修改原约束、建立新约束和删除旧约束，或进行与造型顺序无关的尺寸标注，而不必关心设计顺序。VGX可在欠约束情况下进行任意几何与工程约束的自由创新设计，可在复杂的曲面边缘上自动生成凸缘。VGX完全一体化的变量化设计环境，支持统一的线框、裁剪曲面和实体造型。VGX技术扩展了变量化产品结构，允许用户对一个完整的三维数字产品从几何造型、设计过程、特征，到设计约束，都可以进行实时直接操作。而且随着设计的深化，VGX可以保留每一个中间设计过程的产品信息。

VGX为用户提出了一种交互操作模型的三维环境，设计人员在零部件上定义关系时，不再关心二维设计信息如何变成三维，从而简化了设计建模的过程。设计人员可以针对零件上的任意特征直接进行图形化的编辑、修改，这就使得用户对其三维产品的设计更为直观和实时。用户在一个主模型中，就可以实现动态捕捉设计、分析和制造的意图。VGX技术极大地改进了交互操作的直观性及可靠性，从而使CAD软件更加易于使用，效率更高。

从设计角度看CAD技术的深化问题，毫无疑问，优化设计和智能设计技术的研究是根本的方向，因为设计的最终目的在于产生多个满足各种要求和约束的设计方案，并从中选择和确定最优方案。已得到推广应用的CAD技术在实现设计自动化、提高设计效率方面发挥了重要作用，但仍然主要集中于实现设计方案的中下游设计阶段。在产生设计概念或设计方案的概念设计与方案设计等上游设计阶段，设计人员的创造性活动对设计质量、产品创新起着决定性的作用。智能设计技术或智能CAD技术，在更高的创造性思维活动层次上将给予设计人员有效的辅助，是真正意义上的计算机辅助设计。智能CAD技术是CAD技术与人工智能技术结合的产物。人工

智能中的专家系统技术、实例推理技术、约束满足技术、神经网络技术等已在CAD技术中得到广泛的研究，并在一些专业应用CAD系统中得到实现。人工智能技术领域仍在继续发展，定性推理技术、模糊推理技术非单调推理技术等八十年代以后出现的新的的人工智能技术则有待探索它们与CAD技术的结合。

随着技术系统日益复杂,技术问题增多,传统的优化技术不能完全适合解决问题。因此,工程广义优化设计方法与技术的研究及应用受到重视。工程广义优化方法与技术以产品的全系统、全性能、全过程优化为目标,集建模、寻优、分析、再设计为一体。采用基于大量基础知识和专业知识的全系统、全性能建模,运用多种传统和先进的优化方法实现并行的寻优,并且运用可视化等技术对寻优过程和优化结果进行分析,提供再设计建议。

(2) 在CAD中引入数据库和专家系统

当CAD发展到一定阶段,随着数字化设计产品的增多,工程师们自然就考虑建立数据库,把好的设计保存起来留作参考,形成CAD技术相关的数据库。而当同类产品已经设计并大批量生产多年以后,工程师们需要在新产品设计上提出创新的设计,这时候就需要利用专门的知识 and 技能,才能达成新产品的设计创意。这就产生了与产品相关的知识库需求,而且对掌握和运用这些知识的人才也产生了很大的需求。这一类专家人才的数量是十分有限的,所以产生了用计算机程序代替“专家思想”的计算机软件系统,就是所谓在CAD中引入数据库和专家系统。这一发展趋势从1980年代开始直至今日仍然是智能数字化设计的一项基础性工作。例如,在1990年代出现的典型机电产品的“机械故障诊断专家系统”研究,先后取得了“起重机钢索的无损检测”、“由振动信号进行转子机械故障诊断的专家系统”等重大科技成就,在其中都应用了CAD数字化模型和仿真计算技术。

(3) 引入人工智能(AI)技术

设计是一个含有高度智能的人类创造性活动,CAD系统将引入知识工程,从而产生智能CAD系统。智能CAD是数字化设计与制造技术发展的必然方向。智能设计(smart CAD or intelligent CAD)与基于知识库系统的专家系统结合,成为解决工程问题的新趋势。在运用知识化、信息化的基础上,建立基于知识的设计仓库(design repository)。运用数字化设计数据库,设计人员能够及时准确地获取产品开发所需的信息与帮助,利用互联网,可以实现信息共享与交换,解决产品设计中对知识的需求问题。从数据库到数据仓库再到知识库,从单纯的数据集到应用一定的规则从数据中进行知识的挖掘,到让数据自身具有自我学习、积累能力,这就是一个大数据与人工智能化的设计数据处理过程。若将这一智能化过程与工程实际应用同步进行,则可以实现一次重要的制造技术的跨越式发展。形象地讲,智能CAD软件采用动态导航技术,用户甚至会觉得设计过程中有一位同事在指点提示,用户的设计工作就是在与这位同事的交流中完成的。近年来AI技术已经取得了突飞猛进的发展,可以预期,人工智能将对数字化设计与虚拟制造带来革命性的改变。

第3章

产品的强度设计

第3章

产品的强度设计

3.1 强度设计概述

各种材料因强度不足引起的失效现象是不同的，脆性断裂和塑性屈服是材料失效的两种类型。由脆性材料制成的构件，如铸铁，在拉力作用下，当变形很小时就会突然断裂。塑材料制成的构件，在拉断之前先已出现塑性变形，由于不能保持原有的形状和尺寸，它已不能正常工作。但是构件失效并不都是强度问题。例如，若机床主轴变形过大，即使未出现塑性变形，但还是不能保证加工精度，这也是失效，它是刚度不足造成的。受压细长杆的被压弯，则是稳定性不足引起的失效。此外，不同的加载方式，如冲击、交变应力等，以及不同的环境条件，如高温、腐蚀介质等，都可以导致失效。

脆性材料断裂时的应力是强度极限 s_b ，塑性材料到达屈服时的应力是屈服极限 s_s ，这两者都是构件失效时的极限应力。为保证构件有足够的强度，在载荷作用下构件的实际应力 s ，显然低于极限应力。强度计算中，以大于1的因素除极限应力，并将所得结果成为许用应力，用 $[s]$ 来表示。对塑性材料，

$$[s] = \frac{s_s}{n_s}$$

对脆性材料，

$$[s] = \frac{s_b}{n_b}$$

式中，大于1的因数 n_s 或 n_b 称为安全因数。把许用应力 $[s]$ 作为构件工作应力的最高限度，即要求工作应力 s 不超过许用应力 $[s]$ 。于是得构件轴向拉伸或压缩时的强度条件为

$$s = \frac{F_N}{A} \leq [s]$$

根据以上强度条件，便可进行强度校核、截面设计和确定许可载荷等强度计算。在工程问题中，如工作应力 s 略高于 $[s]$ ，但不超过 $[s]$ 的5%，一般还是允许的。

实际构件危险点的应力状态往往不是单向的。实现复杂应力状态下的实验，要比单向拉伸或压缩困难得多。常用方法是把材料加工成薄壁圆筒，在内压 P 作用下，筒壁为二向应力状态。如果再配以轴向拉力，可使两个主应力之比等于各种预定的数值。这种薄壁圆筒试验除作用内压和轴力外，有时还在两端作用扭矩，这样还可得到更普遍的情况。此外，还有一些实现复杂应力状态的其他试验方法。尽管如此，完全复现实际中遇到的各种复杂应力状态，并不容易。况且，复杂应力状态中应力组合的方式和比值，又有各种可能。如果像单向拉伸一样，靠实验来确定失效状态，建立强度条件，则必须对各式各样的应力状态一一进行试验，确定失效应力，然后建立强度条件。由于技术上的困难和工作的繁重，往往是难以实现的。解决这类问题，经常是依据部分试验结果，经过推理，提出一些假说，推测材料失效的原因，从而建立强度条件。

3.2 金属材料拉伸时的力学性能

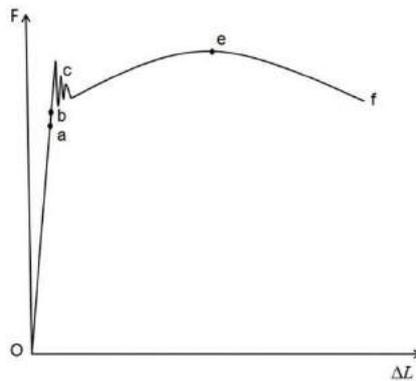
分析构件的强度时，除计算应力外，还应了解材料的力学性能。材料的力学性能也称为机械性质，是指材料在外力作用下表现出的变形、破坏等方面的特性。它要由实验来测定。在室温下，以缓慢平稳的加载方式进行试验，称为常温静载试验，是测定材料力学性能的基本试验。为了便于比较不同材料的试验结果，对试样的形状、加工精度、加载速度、试验环境等，国家标准《金属拉伸试验方法》都有统一规定。在试样上取长为 L 的一段作为试验段， L 称为标距。对圆截面试样，标距 L 与直径 d 有两种比例，即

$$L=5d \text{ 和 } L=10d$$

工程上常用的材料品种很多，下面以低碳钢为主要代表，介绍材料拉伸时的力学性能。低碳钢是指含碳量在0.3%以下的碳素钢。这类钢材在工程中使用较广，在拉伸试验中表现出力学性能也最为典型。

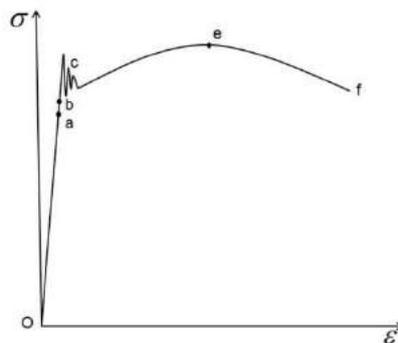
试样装在试验机上，受到缓慢增加的拉力作用。对应着每一个拉力 F ，试样标距 L 有一个伸长量 ΔL 。表示 F 和 ΔL 的关系的曲线，称为拉伸图或 $F-\Delta L$ 曲线，如下图所示。

图3-1 $F-\Delta L$ 曲线示意图



$F-\Delta L$ 曲线与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响，把拉力 F 除以试样横截面的原始面积 A ，得出正应力： $\sigma = \frac{F}{A}$ ；同时，把伸长量 ΔL 除以标距的原始长度 L ，得到应变（工程应变）： $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 附带指出， $\frac{\Delta L}{L}$ 是标距 L 内的平均应变。因在标距 L 内各点应变相等，应变是均匀的，这时，任意点的应变都与平均应变相同。以 σ 为纵坐标，为 ϵ 横坐标，作图表示 σ 与 ϵ 的关系(如下图)称为应力 $\sigma-\epsilon$ 应变图或曲线。

图3-2 $\sigma-\epsilon$ 曲线示意图



根据试验结果，低碳钢的力学性能大致如下：

1、弹性阶段：在拉伸试样的初始阶段， s 与 e 的关系为直线 $0a$ ，表示在这一阶段内，应力 s 与 e 应变成正比，即

$$s \propto e$$

或者把它写成等式

$$s = Ee$$

这就是拉伸或压缩的胡克定律。式中 E 为与材料有关的比例常数，称为弹性模量。因为应变 e 的量纲为一，故 E 的量纲与 s 相同，常用单位为GPa。 $E = \frac{s}{e}$ ，而 $\frac{s}{e}$ 正是直线 $0a$ 的斜率。直线部分的最高点 a 所对应的应力 s_p 称为比例极限。显然，只有应力低于比例极限时，应力与应变才成正比，材料才服从胡克定律。这时，称材料是线弹性的。

超过比例极限后，从 a 点到 b 点， s 与 e 之间的关系不再是直线，但解除拉力后变形仍可完全消失，这种变形称为弹性变形。 b 点所对应的应力 s_e 是材料只出现弹性变形的极限值，称为弹性极限。在 s - e 曲线上， a 、 b 两点非常接近，所以工程上对弹性极限和比例极限并不严格区分。

在应力大于弹性极限后，如再解除拉力，则试样变形的一部分随之消失，这就是上面提到的弹性变形。但还遗留下一部分不能消失的变形，这种变形称为塑性变形或残余变形。

2、屈服阶段：当应力超过 b 点增加到某一数值时，应变有非常明显的增加，而应力先是下降，然后作微小波动，在 s - e 曲线上出现接近水平线的小锯齿形线段。这种应力基本保持不变，而应变显著增加的现象，称为屈服或流动。在屈服阶段内的最高应力和最低应力分别称为上屈服极限和下屈服极限。上屈服极限的数值与试样形状、加载速度等因素有关，一般是不稳定的。下屈服极限则有比较稳定的数值，能够反应材料的性能。通常就把下屈服极限称为屈服极限或屈服点，用 s_s 来表示。

3、强化阶段：过屈服阶段后，材料又恢复了抵抗变形的能力，要使它继续变形必须增加拉力。这种现象称为材料的强化。在图3-2中，强化阶段中的最高点 e 所对应的应力 s_b 是材料所能承受的最大应力，称为强度极限或抗拉强度。它是衡量材料强度的另一重要指标。在强化阶段中，试样的横向尺寸有明显的缩小。

4、局部变形阶段：过 e 点后，在试样的某局部范围内，横向尺寸突然急剧缩小，形成缩颈现象。由于在缩颈部分横截面面积迅速减小，使试样继续伸长所需要的拉力也相应减少。在应力-应变图中，用横截面原始面积 A 算出的应力 $s = \frac{F}{A}$ 随之下降，降落到 f 点，试样被拉断。

3.3 四种常用的强度理论

前面已经提到，强度失效的主要形式有两种，即屈服与断裂。相应地，强度理论也分成两类：一类是解释断裂失效的，其中有最大拉应力理论和最大伸长线应变理论。另一类是解释屈服失效的，其中有最大切应力理论和畸变能密度理论。现依次介绍如下。

3.3.1 最大拉应力理论（第一强度理论）

这一理论认为最大拉应力是引起断裂的主要因素。即认为无论是什么应力状态，只要最大拉应力达到与材料性质有关的某一极限值，则材料就发生断裂。既然最大拉应力的极限值与应力状态无关，于是就可用单向应力状态确定这一极限值。单向拉伸只有 s_1 ($s_2=s_3=0$)，而当 s_1 达到强度极限 s_b 时，发生断裂。这样，根据这一理论，无论是什么应力状态，只要最大拉应力 s_1 达到 s_b 是导致断裂。于是得断裂准则

$$s_1 = s_b$$

将极限应力 s_b 除以安全因素得许用应力 $[s]$ ，所以按第一强度理论建立得强度条件是

$$s_1 \leq [s]$$

铸铁等脆性材料在单向拉伸下，断裂发生于拉应力最大的横截面。脆性材料的扭转也是沿拉应力最大的斜面发生断裂。这些都是与最大拉应力理论相符。这一理论没有考虑其他两个应力的影响，且对没有拉应力的状态（如单向压缩、三向压缩等）也无法应用。

3.3.2 最大伸长线应变理论（第二强度理论）

这一理论认为最大伸长线应变是引起断裂得主要因素。即认为无论什么应力状态，只要最大伸长线应变 e_1 达到与材料性质有关的某一极限值，材料即发生断裂。 e_1 的极限值既然与应力状态无关，就可由单向拉伸来确定。设单向拉伸直到断裂仍可用胡克定律计算应变，则拉断时伸长线应变的极限值应为 $e_1 = \frac{s_b}{E}$ 。按照这一理论，任意应力状态下，只要 e_1 达到极限值 $\frac{s_b}{E}$ ，材料就发生断裂。故得断裂准则为

$$e_1 = \frac{s_b}{E}$$

由广义胡可定律：

$$e_1 = \frac{1}{E} [s_1 - m(s_2 + s_3)]$$

代入*式得断裂准则

$$s_1 - m(s_2 + s_3) = s_b$$

将除以安全因数得许用应力，于是按第二强度理论建立的强度条件是

$$s_1 - m(s_2 + s_3) \leq [s]$$

石料或混凝土等脆性材料受轴向压缩时，如在试验机与试块的接触面上加润滑剂，以减小摩擦力的影响，试块将沿垂直于压力的方向裂开。裂开的方向也就是的方向。铸铁在拉-压二向应力，且压应力较大的情况下，试验结果也与这一理论接近。不过按照这一理论，如果在受压试块的压力垂直方向再加压力，使其成为二向受压，其强度应与单向受压不同。但混凝土、花岗岩和砂岩的试验资料表明，两张情况的强度并无明显差别。与此相似，按照这一理论，铸铁在二向拉伸时应比单向拉伸安全，但试验结果并不能证实这一点，对这总情况，还是第一强度理论接近试验结果。

3.3.3 最大切应力理论（第三强度理论）

这一理论认为最大切应力是引起屈服的主要因素。即认为无论什么应力状态，只要最大切应力 t_{max} 达到与材料性质有关的某一极限值，材料就发生屈服。单向拉伸下，当与轴线成 45° 的斜截面上的 $t_{max} = \frac{s_s}{2}$ （这时，横截面上的正应力为 s_s ），出现屈服。可见， $\frac{s_s}{2}$ 就是导致屈服的最大切应力的极限值。因为这一极限值与应力状态无关，任意应力状态下，只要 t_{max} 达到 $\frac{s_s}{2}$ ，就引起材料屈服。任意应力状态下，

$$\tau_{\max} = \frac{s_1 - s_3}{2}$$

于是得屈服准则

$$\frac{s_1 - s_3}{2} = \frac{s_s}{2}$$

或

$$s_1 - s_3 = s_s$$

将 s_s 换为许用应力 $[s]$ ，得到按第三强度理论建立的强度条件

$$s_1 - s_3 \leq [s]$$

最大切应力理论较为满意的解释了塑性材料得屈服现象。例如，低碳钢拉伸时，沿与轴线成 45° 的方向出现滑移线，是材料内部沿这一方向滑移的痕迹。沿这一方向的斜面上切应力也恰为最大值。通过最大切应力屈服准则与试验结果对比，可以发现这一理论偏于安全。

3.3.4 畸变能密度理论（第四强度理论）

这一理论认为畸变能密度是引起屈服的主要因数。即认为无论什么应力状态，只要畸变能密度 u_d 达到与材料性质有关的某一极限值，材料就发生屈服。单向拉伸下，屈服应力为 s_s ，相应的畸变能密度为 $\frac{1+m}{6E}(2s_s^2)$ 。这就是导致屈服的畸变能密度的极限值。任意应力状态下，只要畸变能密度 u_d 达到上述极限值，便引起材料的屈服。故畸变能密度屈服准则为

$$u_d = \frac{1+m}{6E}(2s_s^2)$$

在任意应力状态下有，

$$u_d = \frac{1+m}{6E}[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]$$

整理后可得屈服准则为

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]} = s_s$$

由方程可知上列屈服准则为一椭圆形曲线。把除以安全因数得许用应力，于是，按第四强度理论得到得强度条件是

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]} \leq [s]$$

几种塑性材料钢、铜、铝的薄管试验资料表明，畸变能密度屈服准则与试验资料相当吻合，比第三强度理论更为符合试验结果。在纯剪切的情况下，由畸变能屈服准则得出的结果比最大切应力屈服准则结果大15%，这是两者差异最大的情况。

3.3.5 小结

综合以上四个强度理论的强度条件可写成以下统一的形式：

$$s_1 \leq [s]$$

式中称为相当应力。它由三个主应力按一定形式组合而成。按照从第一强度理论到第四强度理论顺序，相当应力分别为：

$$s_{r1} = s_1$$

$$s_{r2} = s_1 - m(s_2 + s_3)$$

$$s_{r3} = s_1 - s_2$$

$$s_{r4} = \sqrt{\frac{1}{2}[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]}$$

以上即为四种常用的强度理论。铸铁、石料、混凝土、玻璃等脆性材料，通常以断裂的形式失效，宜采用第一和第二强度理论。碳钢、铜、铝等塑性材料，通常以屈服的形式失效，宜采用第三和第四强度理论。应该指出，不同的材料固然可以发生不同形式的失效，但即使是同一种材料，在不同应力状态下也可能有不同的失效形式。例如，碳钢在单向拉伸下以屈服的形式失效，但碳钢制成的螺钉受拉时，螺纹根部因应力集中引起三向拉伸，就会出现断裂。这是因为当三向拉伸的三个主应力数值接近时由第三或第四强度理论的相当应力公式看出，屈服将很难出现。又如，铸铁单向受拉时以断裂的形式失效。但如以淬火钢球压在铸铁板上，接触点附近的材料处于三向受压状态，随着压力的增大，铸铁板会出现明显的凹坑，这表明已出现屈服现象。以上例子说明材料的失效形式与应力状态有关。无论是塑性或脆性材料，在三向拉应力相近的情况下，都将以断裂的形式失效。无论是塑性或脆性材料，在三向压应力相近的情况下，都可引起塑性变形，宜采用第三或第四强度理论。

3.4 商用车车架强度设计实例

商用车底盘车架是载货汽车的脊梁，支撑连接汽车各零部件，承受各零部件的重量及行使中的冲击、扭曲和惯性力，足够的强度和刚度是汽车承受内外载荷的关键，底盘车架强度直接关系到整车的安全性能和使用寿命。本节将对车架进行强度分析，来验证车架在使用过程中是否满足强度设计要求。

3.4.1 车架基本参数及分析工况

为了综合评价车架在使用过程中的力学性能，本次分析主要考虑满载弯曲、冲击、刹车、转弯和扭转几种工况，具体载荷信息如下表3-1所示。

表3-1 工况、载荷、约束表

工况	约束	载荷
静载弯曲	约束右前轮 xyz 向自由度；	Z 向 1G
垂向冲击	约束左前轮 xz 向自由度；	Z 向 2.5G
转弯	约束右后轮 yz 向自由度；	Y 向 0.5G；Z 向 1G
刹车	约束左后轮 z 向自由度	X 向 0.8G；Z 向 1G
扭转 1 (FL_150mm)	约束其它三个轮胎	左前轮抬高 150mm
扭转 2 (RR_150mm)	约束其它三个轮胎	右后轮抬高 150mm

本次分析车架的材料为B610L，基本力学参数如下表3-2所示。

表3-2 材料基本力学参数

材料	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	屈服极限 (MPa)	抗拉极限 (MPa)
B610L	7850	210	0.3	500	610

车架有限元分析过程中涉及的参数见表3-3所示。

表3-3 模型基本参数

参数名称	数值
动力总成质量/kg	400
驾驶室总成质量/kg	600
货箱总成及载货质量/kg	12000
前簧/后主簧/后副簧刚度/ (N/mm)	218/250/713
车架下沉多少距离后后副簧起作用/mm	35

3.4.2 分析模型建立

1) 车架有限元建模

车架模型主要包括纵梁、横梁、横梁纵梁连接件、板簧支座等结构。建立车架有限元模型时，薄壁类零件（纵梁、横梁、横梁与纵梁联接件）简化为壳单元，实体部件（板簧支架）采用四面体单元进行网格划分。各部件之间的铆钉连接采用刚性单元来模拟。车架整体网格尺寸为6mm，保证整体网格规模的一致性。车架几何模型和网格模型分别如下图3-3、3-4所示。

图3-3 车架几何模型示意图

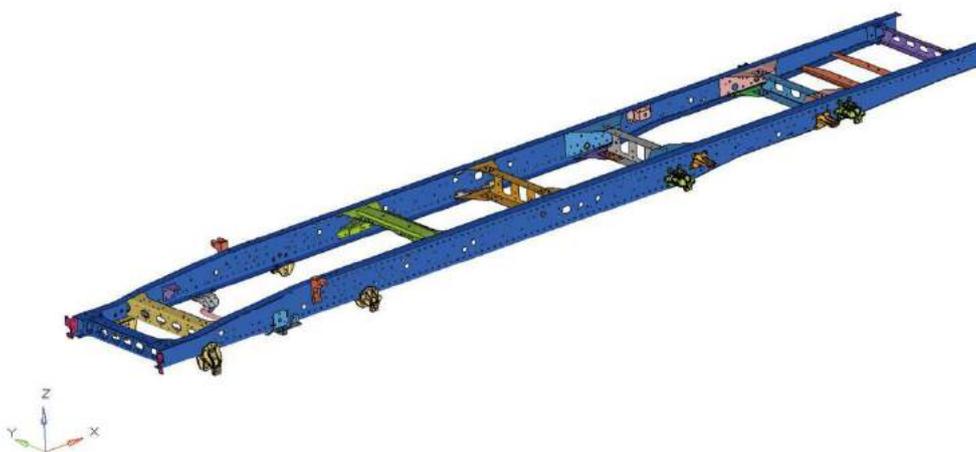


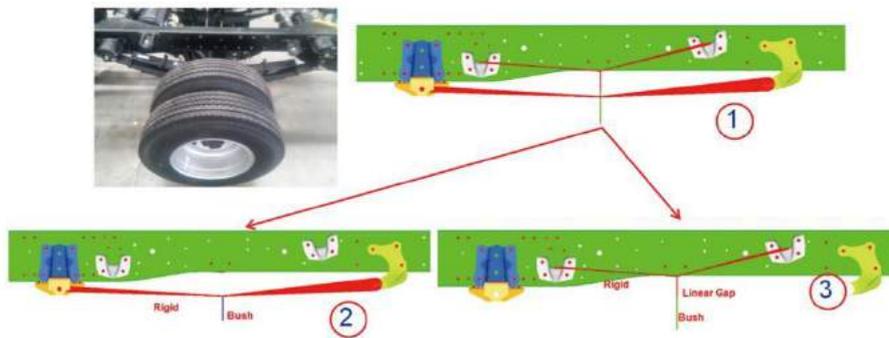
图3-4 车架有限元模型示意图



2) 后钢板弹簧有限元建模

车架与车轮通过车轴和钢板弹簧相连，当车不承受载荷或承受很小的载荷作用时，车架与后轮之间的载荷只通过主钢板弹簧传递；只有随着载荷增加，车架下沉量增加，当车架下沉量达到35mm时，后副簧才会与后副簧支架发生接触进行载荷传递；之后又主簧和副簧共同承受载荷。为了真实合理模拟车架受力情况，建立如下图3-5所示的后钢板弹簧力学模型。

图3-5 后钢板弹簧力学模型

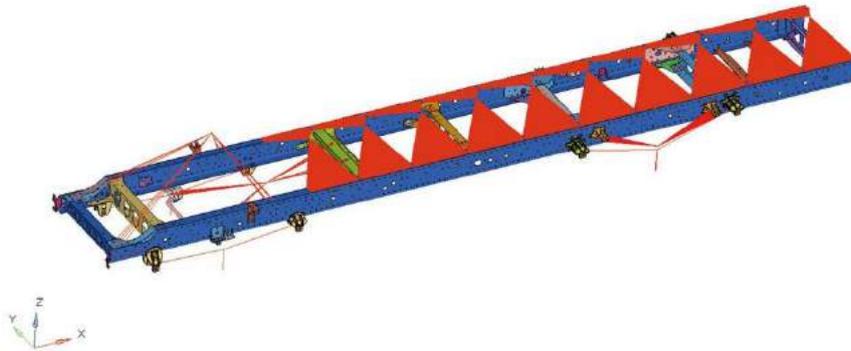


完整的后钢板弹簧力学模型上图中1所示，1包含2和3。主板簧简化成弹簧单元通过刚性单元与车架连接；副板簧简化成bush单元加Linear Gap单元(只承压不承拉)，只有当车架下沉35mm后副板簧才起作用。

3) 车架总成有限元模型

驾驶室总成、动力总成、货箱总成及载货重量均简化成集中质量点，通过刚性单元RBE3与车架相连，车架总成有限元模型如下图3-6所示。

图3-6 车架总成有限元模型示意图

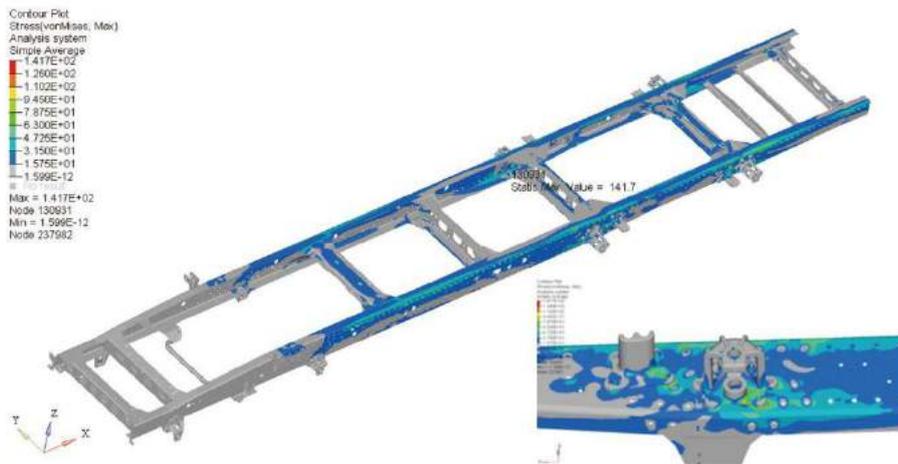


3.4.3 车架强度分析

1) 静载弯曲工况仿真分析

当车架承受满载载荷作用时，车架应力云图如下图3-7所示。

图3-7 静载弯曲工况应力云图

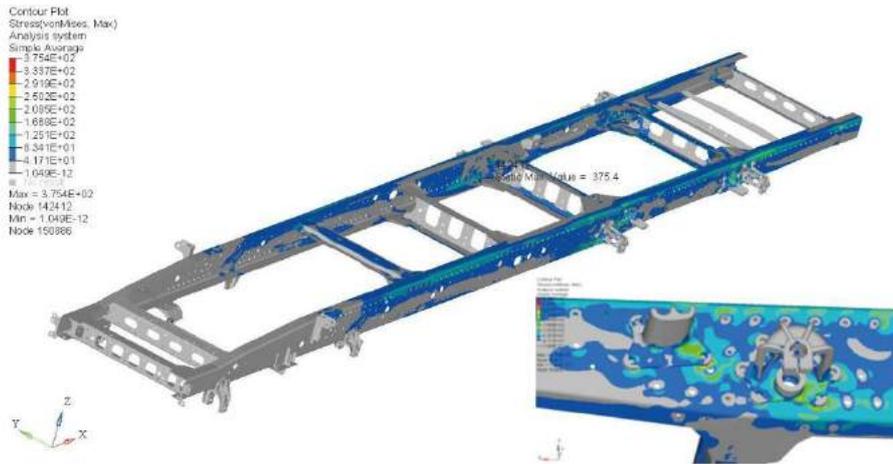


当车架承受满载载荷作用，匀速行驶或者静止时车架最大应力为141.7MPa，低于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

2) 冲击工况仿真分析

当车架承受2.5G冲击载荷作用时，车架应力云图如下图3-8所示。

图3-8 冲击工况应力云图

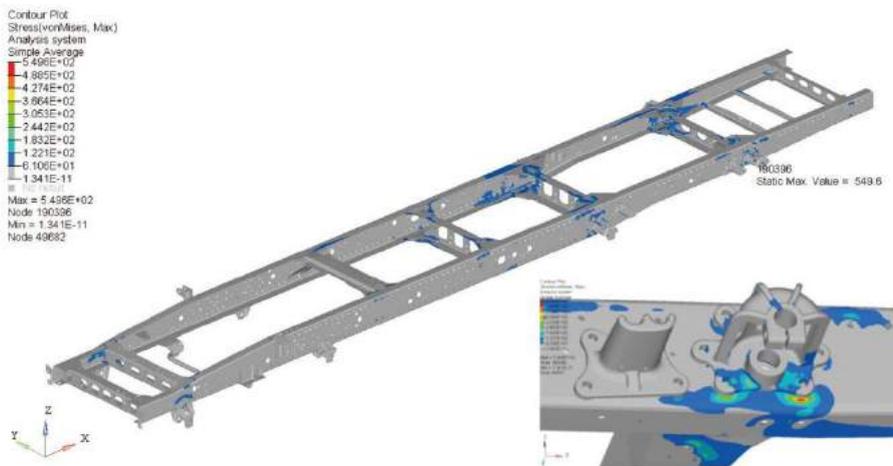


当车架承受2.5G冲击满载载荷作用，车架最大应力为375.4MPa，低于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

3) 转弯工况仿真分析

当车架承受满载载荷和侧向0.5G离心力共同作用时，车架应力云图如下图3-9所示。

图3-9 转弯工况应力云

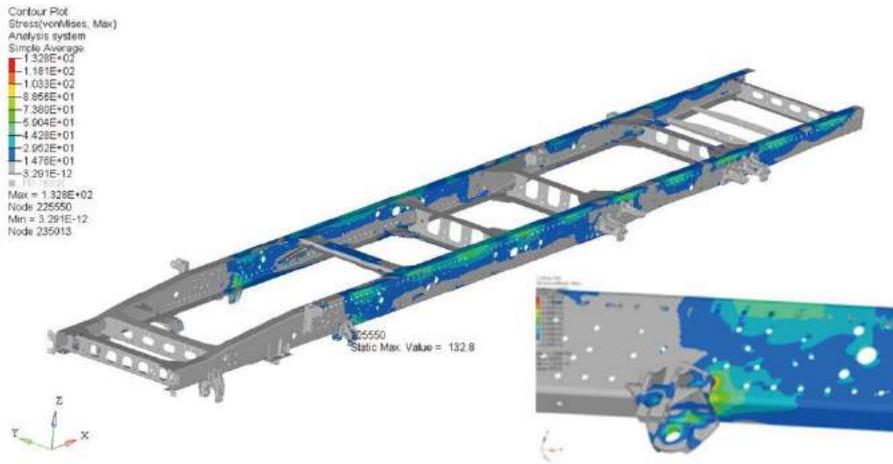


当车架承受满载载荷和侧向0.5G离心力共同作用时，车架最大应力为549.6MPa，高于材料的屈服强度500MPa，不满足设计要求，需进行局部结构优化。

4) 刹车工况仿真分析

当车架承受满载载荷和纵向0.8G惯性力共同作用时，车架应力云图如下图3-10所示。

图3-10 刹车工况应力云图

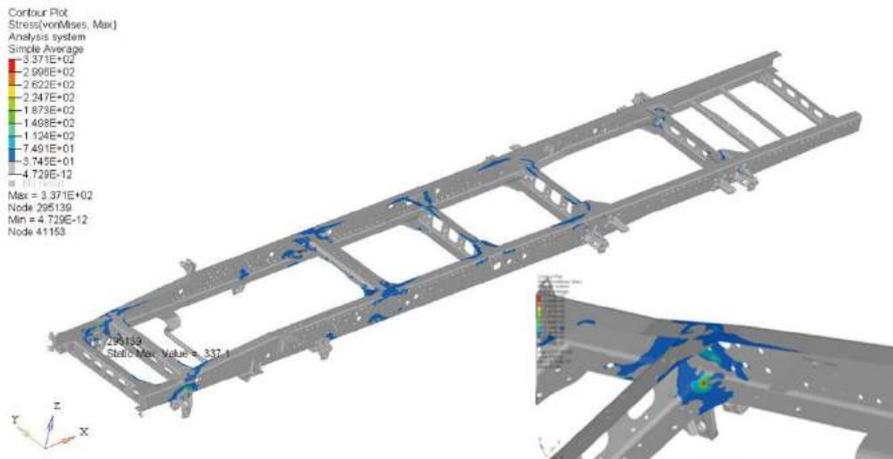


当车架承受满载载荷和纵向0.8G惯性力共同作用时，车架最大应力为132.8MPa，小于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

5) 扭转 (FL_150mm) 工况仿真分析

当车架左前轮抬高150mm时，车架应力云图如下图3-11所示。

图3-11 左前轮太高150mm时工况应力云图



当车架左前轮抬高150mm时，车架最大应力为337.1MPa，小于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

6) 扭转 (RR_150mm) 工况仿真分析

当车架右后轮抬高150mm时，车架应力云图如下图3-12所示。

图3-12 右后轮太高150mm时工况应力云图

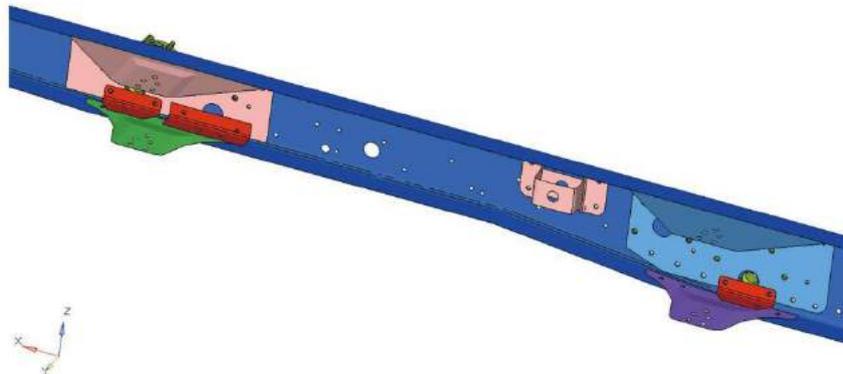


当车架右后轮抬高150mm时，车架最大应力为277.5MPa，小于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

7) 车架局部结构优化

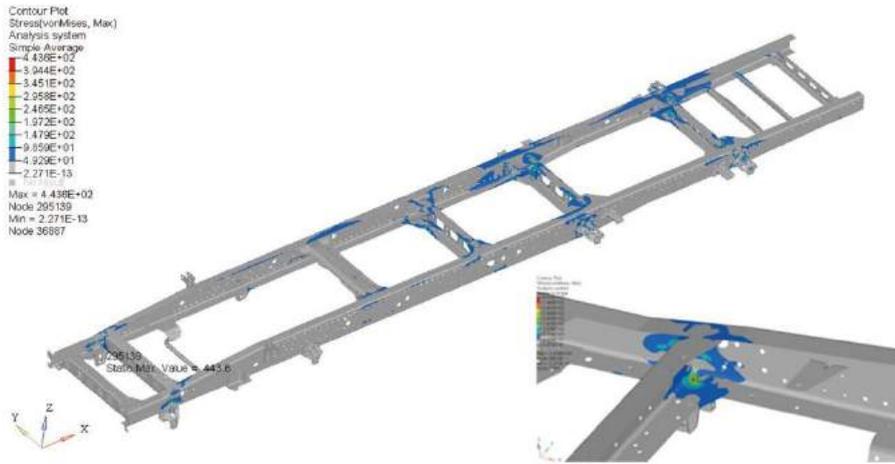
由以上分析可知，当车架在满载转弯时，车架最大应力值为549.6MPa，高于材料的屈服极限，存在一定的失效风险。故在后钢板弹簧支架与纵梁联接螺栓孔位置，纵梁内侧增加L型角片（红色部件），如下图3-13所示。

图3-13 L型角片示意图



结构优化后车架承受满载载荷和侧向0.5G离心力共同作用时，车架应力云图如下图3-14所示。

图3-14 局部优化后转弯工况车架应力云图



车架进行局部优化后，当车架承受满载载荷和侧向0.5G离心力共同作用时，车架最大应力为443.6MPa，低于材料的屈服强度500MPa，满足设计要求。

3.4.4 小结

根据车架强度分析，不同工况下车架应力峰值如下表3-4所示。当车架承受满载载荷和侧向0.5G离心力共同作用时车架应力峰值最大，最大应力为443.6MPa，小于材料的屈服强度，故车架满足设计要求。

表3-4 不同车况车架应力峰值和安全系数列表

方案	满载	冲击	转弯	刹车	FL_150	RR_150
应力/MPa	141.7	375.4	443.6	132.8	337.1	277.5
安全系数	3.53	1.33	1.13	3.77	1.48	1.80

第4章

产品的动力学设计

第4章

产品的动力学设计

产品在使用中受到动态载荷作用，产品结构会发生振动，甚至产生噪声，振动噪声的产生会严重影响产品使用的舒适性，甚至会降低产品的使用寿命，因此需要根据载荷环境对产品进行动力学设计，控制产品结构动力学响应，进行减振降噪，提高产品使用品质。

动态载荷可以表达成时域和频域两种形式。如果载荷是时域形式，则结构动力学响应是瞬态响应。如果载荷是频域形式，则结构动力学响应是频率响应；如果频域载荷是功率谱密度，则是随机响应。

结构受到动态载荷激励，产生动力学响应。结构响应取决于外部激励和结构自身动力学特性，结构动力学特性可以用结构模态来描述。模态分析是结构动力学设计的重要内容。

4.1 模态分析

4.1.1 基本概念

模态是结构的固有特性，模态频率是结构的共振频率，模态振型是和模态频率相对应的结构振动形态。考虑方程

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (4.1)$$

假设简谐运动形式的解

$$\{x\} = \{\varphi\}e^{i\omega t} \quad (4.2)$$

从方程4.2可以得到

$$\{\ddot{x}\} = -\omega^2\{\varphi\}e^{i\omega t} \quad (4.3)$$

把方程4.2和4.3代入方程4.1得到

$$-\omega^2[M]\{\varphi\}e^{i\omega t} + [K]\{\varphi\}e^{i\omega t} = 0$$

上式两边除以 $e^{i\omega t}$ ，简化为

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0 \quad (4.4)$$

这是一个特征值问题。因此，有两种情况。

1) 如果 $\det([K] - \omega^2[M]) \neq 0$ ，根据方程(4.4)就只有

$$\{\varphi\} = 0$$

这是所谓的平凡解，没有物理意义。

2) 要得到 $\{\varphi\}$ 的非平凡解，就需要 $\det([K] - \omega^2[M]) = 0$ 。

特征值问题转化为求解下列方程

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad \text{or} \quad \det([K] - \lambda[M]) = 0 \quad (4.5)$$

其中 $\lambda = \omega^2$ 。

如果结构具有N个自由度，则特征值问题将有N个解 $\omega_s (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ ，它们被称为结构的自然频率、特征频率或共振频率。

和自然频率 $\{\omega\}_j$ 相对应的特征向量 $\{\varphi\}_j$ 被称为正则模态或模态振型。正则模态是结构振动变形的形状模式。

结构振动时，它在任何时刻的变形都是正则模态的线性叠加。

结构有限元的刚度矩阵[K]和质量矩阵[M]都是实对称矩阵，它们具有如下正交特性：

$$\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_j\} = 0 \quad \text{If } i \neq j$$

$$\{\varphi_i\}^T [K] \{\varphi_j\} = 0 \quad \text{If } i \neq j$$

并且

$$\omega_j^2 = \frac{\{\varphi_j\}^T [K] \{\varphi_j\}}{\{\varphi_j\}^T [M] \{\varphi_j\}} \quad \text{瑞利商}$$

自然频率 $\omega_s (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 的单位是弧度/秒 (radians/seconds)，也可以表示为赫兹 (hertz = cycles/seconds)。

$$f_j(\text{hertz}) = \frac{\omega_j(\text{radian/second})}{2\pi}$$

4.1.2 模态分析实例

结构进行模态分析，首先需要结构几何模型、材料杨氏弹性模量、泊松比和密度、以及约束条件。模态分析，结构也可以是自由的，这样整个结构在空间有六个刚体自由度，模态分析结果会有六个零频率，对应于六阶刚体模态。

如图4.1所示为一结构有限元网格，结构底座四个位置固定约束。有限元建模完成，进行模态计算，前十阶模态计算结果如表4.1所示。

图4.1 结构有限元网格

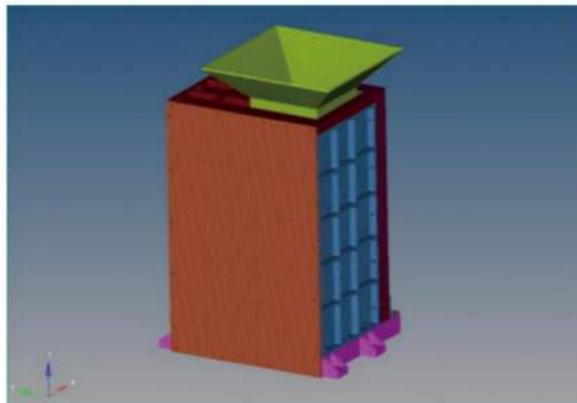


表4.1 模态计算结果

阶次	频率 (Hz)	振型
1	185.6	整体 X 向振动
2	240	整体 Y 向振动
3	290.4	顶部结构局部振动
4	313.3	侧板 X 向振动
5	319.5	内部组件 Z 向振动
6	337.6	顶部结构局部振动
7	358.7	顶部结构局部振动
8	373.8	内部组件局部振动
9	425.9	内部组件局部振动
10	462	顶部结构局部振动

图4.2 第1阶模态频率185.6Hz振型图

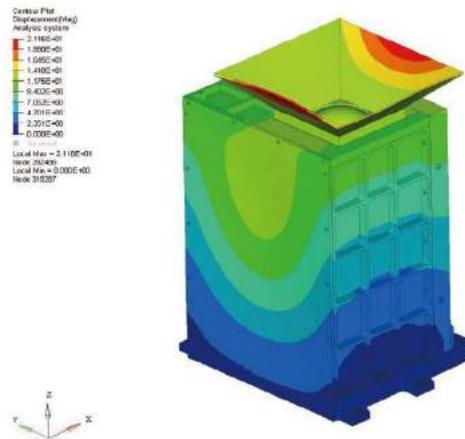


图4.3 第2阶模态频率240Hz振型图

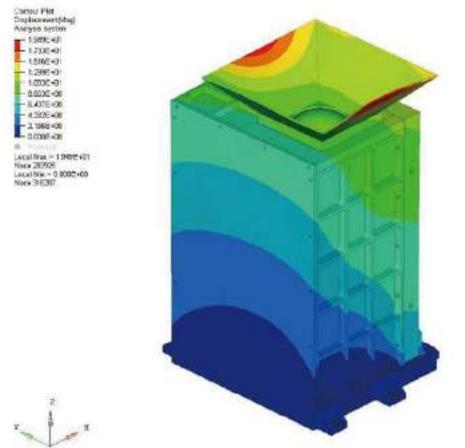


图4.4 第3阶模态频率290.4Hz振型图

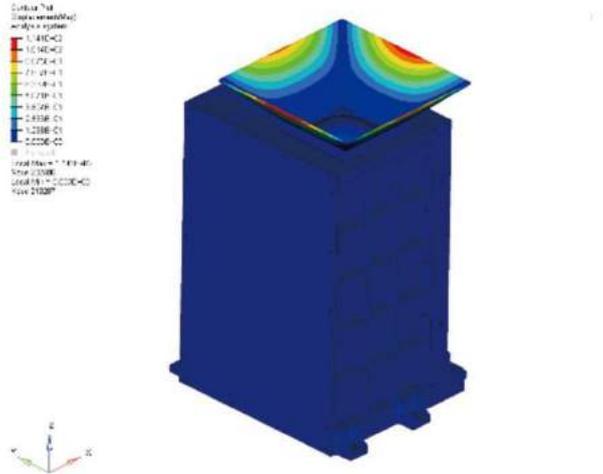
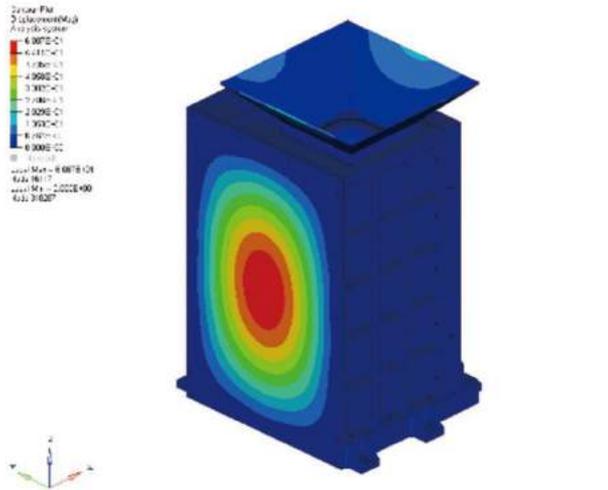


图4.5 第4阶模态频率313.3Hz振型图



4.2 瞬态响应

4.2.1 瞬态响应分析方法

如果结构激励载荷是随时间变化的，那么结构响应产生的位移、应力、加速度等都会是随时间变化的。

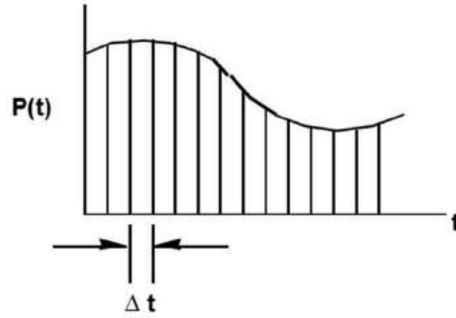
结构动力学方程

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (4.6)$$

结构响应以时间步长 Δt 在离散时间点进行求解。首先用中心差分表示 $\{\dot{u}(t)\}$ 和 $\{\ddot{u}(t)\}$ ，

$$\{\dot{u}_n\} = \frac{1}{2\Delta t} \{u_{n+1} - u_{n-1}\}$$

$$\{\ddot{u}_n\} = \frac{1}{\Delta t^2} \{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}\}$$



用中心差分法对方程 (4.6) 进行数值积分,

$$\frac{e}{e} \frac{m}{D\tau^2} \dot{u}_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + \frac{e}{e} \frac{b}{2D\tau} \dot{u}_{n+1} - u_{n-1}) + \frac{e}{e} \frac{k}{3} \dot{u}_{n+1} + u_n + u_{n-1}) = \frac{1}{3} (P_{n+1} + P_n + P_{n-1})$$

经过整理, 得

$$[A_1]\{u_{n+1}\} = [A_2] + [A_3]\{u_n\} + [A_4]\{u_{n-1}\} \quad (4.7)$$

其中

$$\begin{aligned} [A_1] &= [M/D\tau^2 + B/2D\tau + K/3] && \text{动力学矩阵} \\ [A_2] &= 1/3\{P_{n+1} + P_n + P_{n-1}\} && \text{外力} \\ [A_3] &= [2M/D\tau^2 - K/3] \\ [A_4] &= [-M/D\tau^2 + B/2D\tau - K/3] \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} [A_1] \\ [A_2] \\ [A_3] \\ [A_4] \end{aligned}} \right\} \text{来自前一步的初始条件}$$

可以采用类似于经典的Newmark-Beta法求解方程 (4.7)

瞬态响应的计算有两种方法, 第一种是如上所述, 直接对动力学方程进行积分求解, 称为直接积分法; 第二种是如下所述, 利用模态把结构动力学方程由物理坐标空间转换到模态坐标空间, 然后进行求解, 称为瞬态响应计算的模态法, 目的是降低计算规模, 提高计算效率。

瞬态响应分析模态法

从物理坐标空间到模态坐标空间的转换关系

$$\{u\} = [\varphi]\{\xi\} \quad (4.8)$$

暂不考虑阻尼, 动力学方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \quad (4.9)$$

把方程4.8代入方程4.9, 得

$$[M][\varphi]\{\ddot{\xi}\} + [K][\varphi]\{\xi\} = \{P(t)\} \quad (4.10)$$

用 $[\varphi^T]$ 左乘方程4.10, 得

$$[\varphi^T][M][\varphi]\{\ddot{\xi}\} + [\varphi^T][K][\varphi]\{\xi\} = [\varphi^T]\{P(t)\} \quad (4.11)$$

其中

$$\begin{aligned} [\varphi^T][M][\varphi] &= \text{模态质量矩阵 (对角形)} \\ [\varphi^T][K][\varphi] &= \text{模态刚度矩阵 (对角形)} \\ [\varphi^T]\{P(t)\} &= \text{模态力向量} \end{aligned}$$

方程4.11可以写成解耦的单自由度形式:

$$m_i \ddot{\xi}^i + k_i \xi^i = p_i(t) \quad (4.12)$$

其中

m_i = 第i阶模态质量

k_i = 第i阶模态刚度

p_i = 第i阶模态力

模态法瞬态响应分析中的阻尼

如果阻尼矩阵B不能够被模态向量矩阵 Φ 对角化:

$$\Phi^T B \Phi \neq \text{diagonal}$$

那么这是一个耦合问题。在模态坐标空间中,采用直接积分法的Newmark-Beta类数值积分进行求解。

$$[A_2]\{\xi_{n+1}\} = [A_2] + [A_3]\{\xi_n\} + [A_4]\{\xi_{n-1}\} \quad (4.13)$$

其中

$$[A_1] = [f^T] \left[\frac{M}{6\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} + \frac{K}{3} \right] f \quad \text{动力学矩阵}$$

$$[A_2] = \frac{1}{3} [f^T] [P_{n+1} + P_n + P_{n-1}] \quad \text{外力}$$

$$[A_3] = [f^T] \left[\frac{2M}{6\Delta t^2} - \frac{K}{3} \right] f$$

$$[A_4] = [f^T] \left[\frac{M}{6\Delta t^2} + \frac{B}{2\Delta t} - \frac{K}{3} \right] f \quad \text{来自前一步的初始条件}$$

如果采用模态阻尼,那么每阶模态有阻尼 b_i ,动力学方程可以解耦。

$$m_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + k_i \xi_i = p_i(t) \quad (4.14)$$

或

$$\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{\xi}_i + \omega_i^2 \xi_i = p_i(t)/m_i \quad (4.15)$$

其中

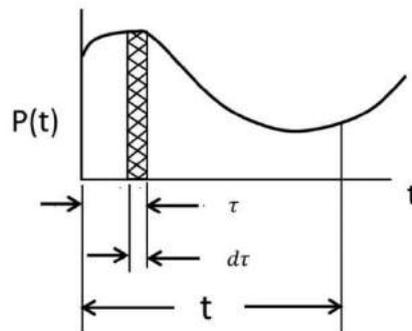
$$\zeta_i = b_i / (2m_i \omega_i) \quad \text{模态阻尼比}$$

$$\omega_i^2 = k_i / m_i \quad \text{特征值}$$

采用Duhamel积分求解上述解耦的单自由度方程:

$$\xi(t) = e^{-bt/2m} \left(\xi_0 \cos \omega_d t + \frac{\dot{\xi}_0 + (b/2m)\xi_0}{\omega_d} \right) + e^{-bt/2m} \frac{1}{m\omega_d} \int_0^t e^{b\tau/2m} p(\tau) \sin \omega_d (t-\tau) d\tau$$

图4.7 Duhamel积分



4.2.2 瞬态响应实例

利用模态分析实例进行瞬态响应计算，在基础上施加如表4.2 所示冲击载荷。结构上某点位移、应力、加速度随时间变化的响应曲线分别如图4.8、图4.9、图4.10所示。某一时刻结构变形位移、应力的分布云图分别如图4.11、图4.12所示。

表4.2 冲击半正弦波加速度

冲击加速度	50g
冲击波形	半正弦脉冲
持续时间	10ms±1ms
冲击方向	X 方向

图4.8 节点Node455150位移响应曲线

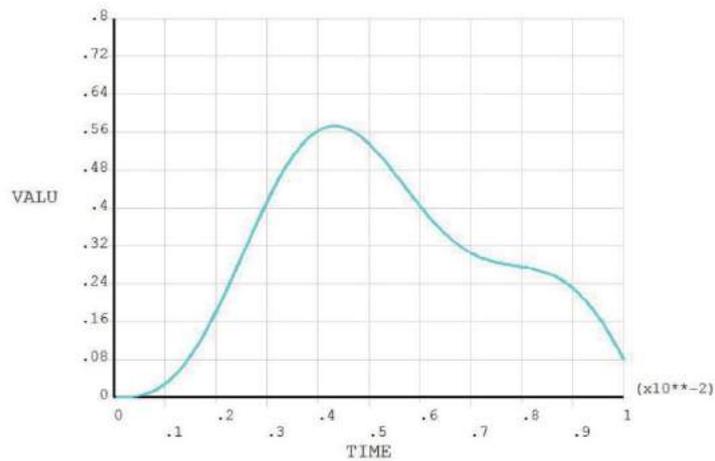


图4.9 节点Node455150应力响应曲线

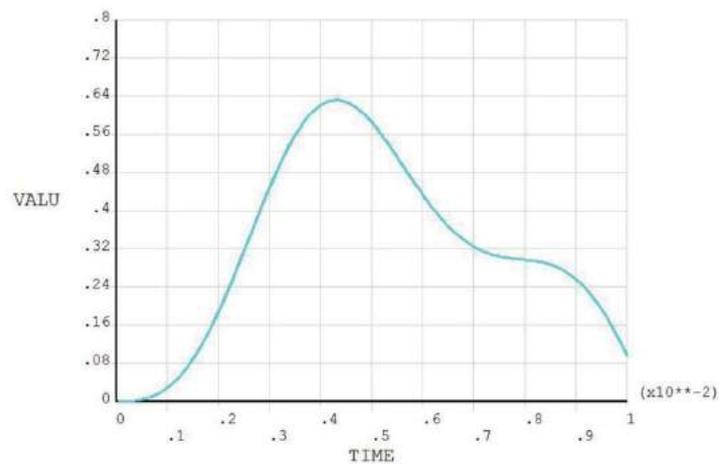


图4.10 节点Node455150加速度响应曲线

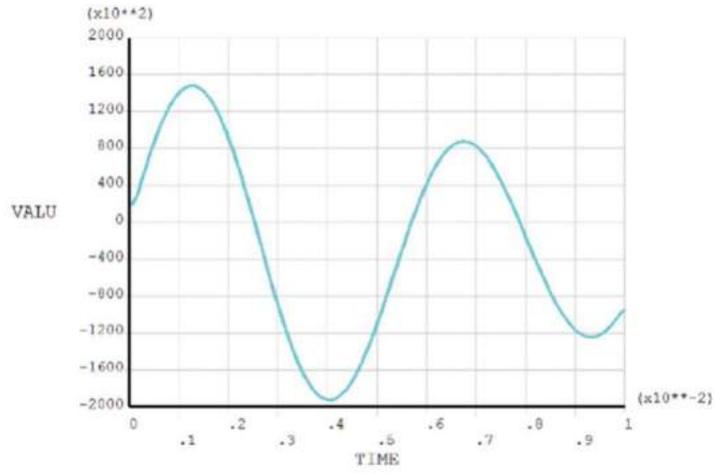


图4.11 结构变形位移云图，最大位移0.975mm

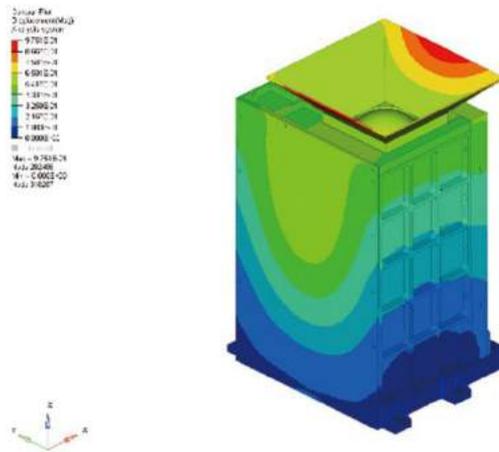
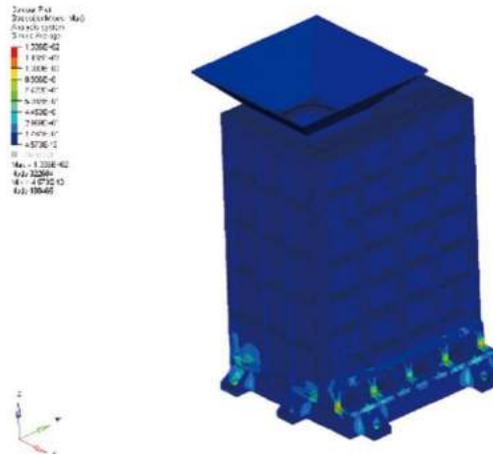


图4.12 结构应力云图，最大应力133.6MPa



4.3 频率响应

4.3.1 频率响应分析方法

如果结构激励载荷是随频率变化的，那么结构响应产生的位移、应力、加速度等都会是随频率变化的。

直接法频率响应分析

$$[-\omega^2 M + i\omega B + K]\{u(\omega)\} = \{P(\omega)\} \quad (4.16)$$

对于每个频率值 ω ，动力学方程(4.16)左边系数矩阵是复数的，可以采用复数算法，类似于静力学问题进行求解。

模态法频率响应分析

变换到模态坐标空间，求解解耦的单自由度方程：

$$\xi_i = \frac{P_i}{-m_i \omega^2 + i b_i \omega + k_i} \quad (4.17)$$

模态法计算速度要比直接法快很多。为使方程解耦，可以不考虑阻尼，或是采用模态阻尼。如果需要考虑阻尼，又没有模态阻尼，那么在模态坐标空间采用直接法，由于模态坐标矩阵规模较小，计算效率也较高。

4.3.2 频率响应实例

利用模态分析实例进行频率响应计算，在基础上施加如表4.3所示正弦振动载荷。结构上某点加速度随频率变化的响应曲线如图4.14所示。结构在某一频率的加速度、变形位移、应力的分布云图分别如图4.13、图4.15、图4.16所示。

表4.3 正弦振动加速度

频率 (Hz)	5~12	12~25	25~35	35~60	60~65	65~100
量级	3.88mm	2.25g	过渡到 5.25g	5.25g	过渡到 3.0g	3.0g
速率	2oct/min					
方向	X 方向					

图4.13 结构加速度云图，最大加速度 $9.54e4\text{mm/s}^2$

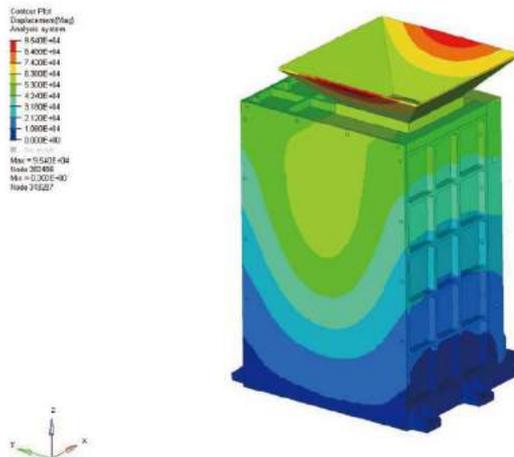


图4.14 节点Node106039加速度响应曲线

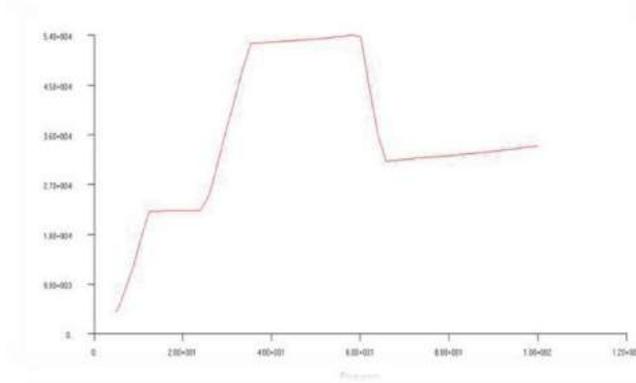


图4.15 结构变形位移云图，最大位移0.07mm

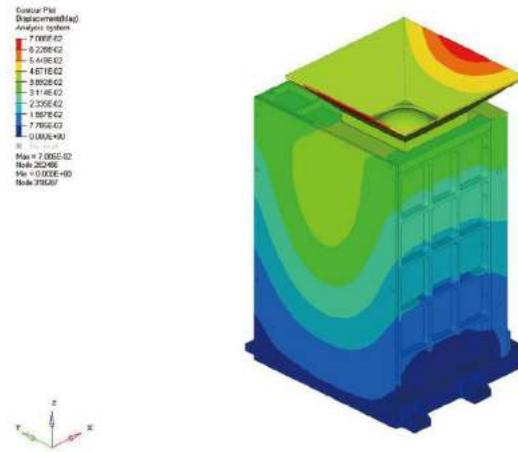
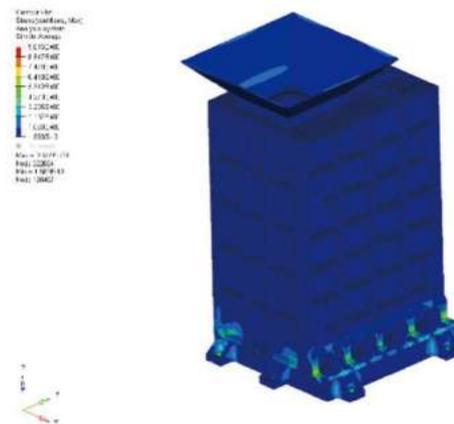


图4.16 结构应力云图，最大应力9.6MPa

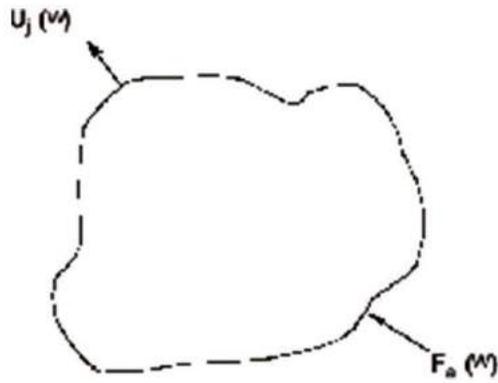


4.4 随机响应

4.4.1 随机响应分析方法

如果结构承受随机载荷，那么响应是随机响应。随机响应计算是从频率响应计算开始，频率响应计算得到传递函数，然后施加输入的功率谱密度，计算得到响应输出的功率谱密度。

图4.17 响应输入与输出



由频率响应分析，得

$$u_j(\omega) = H_{ja}(\omega) \cdot F_a(\omega) \quad (4.18)$$

其中 $H_{ja}(\omega)$ 是传递函数， u_j 是输出， F_a 是输入。

如果有多个输入，则有

$$u_j(\omega) = H_{ja}(\omega)F_a(\omega) + H_{jb}(\omega)F_b(\omega) + \dots \quad (4.19)$$

写成矩阵的形式为

$$u_j(\omega) = [H_{ja}(\omega) H_{jb}(\omega) \dots] \begin{Bmatrix} F_a(\omega) \\ F_b(\omega) \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

输出的自谱为

$$S_{ujuj} = T [H_{ja} H_{jb} \dots] \begin{Bmatrix} F_a(\omega) \\ F_b(\omega) \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix} [F_a^*(\omega) F_b^*(\omega) \dots] \begin{Bmatrix} H_{ja}^* \\ H_{jb}^* \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

每个输入的谱为

$$\overline{TF_a(\omega)F_a^*(\omega)} = S_{aa}(\omega)$$

$$\overline{TF_a(\omega)F_b^*(\omega)} = S_{ab}(\omega)$$

$$\overline{TF_b(\omega)F_b^*(\omega)} = S_{bb}(\omega)$$

多输入-输出的谱关系为

$$S_{u_j u_j}(\omega) = [H_j]^T \begin{bmatrix} S_{aa} & S_{ab} \\ S_{ba} & S_{bb} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix} [H_j^*]$$

其中

$$[H_j]^T = [H_{ja} H_{jb} \dots] \quad \text{and} \quad [H_j^*] = \begin{Bmatrix} H_{ja}^* \\ H_{jb}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{Bmatrix}$$

输入的互谱矩阵为

$$[S]_n = \begin{pmatrix} S_{aa}(\omega) & S_{ab}(\omega) & \dots \\ S_{ba}(\omega) & S_{bb}(\omega) & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \end{pmatrix}$$

并且具有如下特性

$$S_{ab}(\omega) = S_{ba}^*(\omega)$$

$$S_{aa}(\omega), S_{bb}(\omega) = \text{real} \geq 0$$

通常的特定情况

单输入分析

$$S_{u_j u_j}(\omega) = |H_{ja}(\omega)|^2 S_{aa}(\omega)$$

不相关多输入分析

$$S_{u_j u_j}(\omega) = |H_{ja}(\omega)|^2 S_{aa}(\omega) + |H_{jb}(\omega)|^2 S_{bb}(\omega) + \dots$$

4.4.2 随机响应实例

利用模态分析实例进行随机响应计算，在基础上施加如表4.4 所示随机振动载荷。结构上某点加速度功率谱密度曲线如图4.19所示。结构加速度、变形位移、应力的均方根RMS值分布云图分别如图4.18、图4.20、图4.21所示。

表4.4 随机振动载荷

频率范围(Hz)	20~100	100~600	600~2000
功率谱密度	+3dB/oct	0.09g ² /Hz	-9dB/oct
总均方根加速度	8.6g _{rms}		
试验方向	X 方向		
试验时间	2min		

图4.18 结构加速度RMS值云图，最大加速度 $8.919e5\text{mm/S}^2$

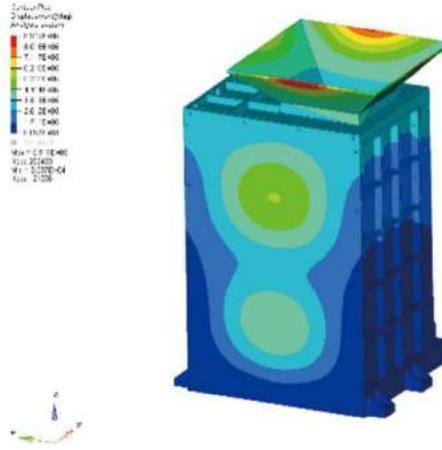


图4.19 节点Node106039加速度功率谱密度

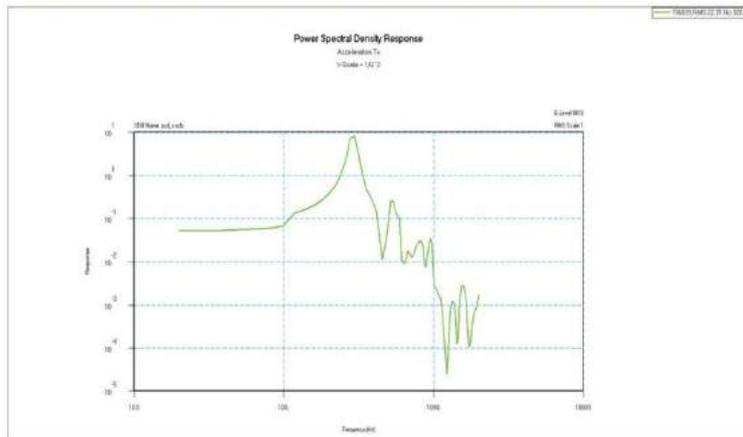


图4.20 结构位移RMS值云图，最大位移0.4151mm

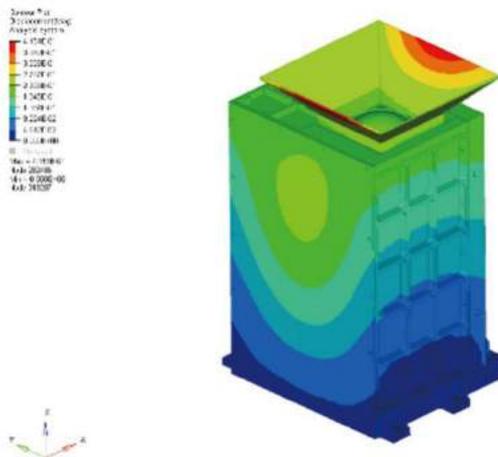
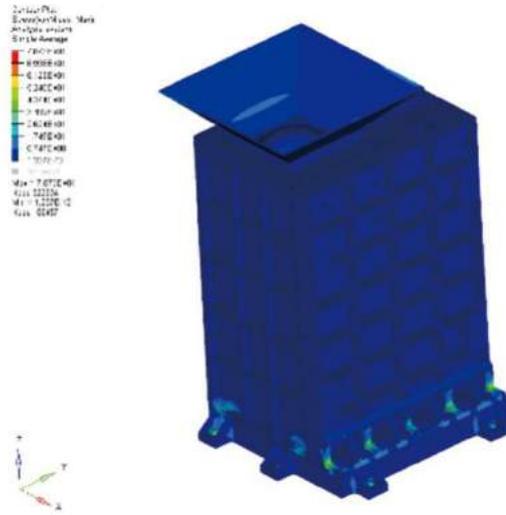


图4.21 结构应力RMS值云图，最大应力78.7MPa





第5章

产品的动力学设计

第5章

产品的热设计

许多产品在使用过程中会产生热，有些产品是使用在高温或低温环境下，热影响材料性能，影响产品可靠性和使用寿命，因此需要进行产品的热设计。

5.1 热分析

根据传热学，热在产品中沿着结构由温度高的地方向温度低的地方传导，也会以对流或辐射的形式与环境进行热交换。

三维温度场的热传导控制方程为

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (5.1)$$

其中

k, r, c —材料的热导率 ($W/(m \times K)$)、密度 (kg/m^3)、比热 ($J/(kg \times K)$)

Q —内部热源 (W/m^3)

如果温度场不随时间而变化，上述方程左端项为0，成为一个稳态的热分析问题。传热问题的边界条件可以分成四类，即在结构表面 G 上通常可以建立四类不同边界条件：

1、表面 G_r 上的给定温度

$$T = T(x_i, t)$$

2、在表面 G_q 上给定热流密度的边界条件

$$\bar{q}(x_i, t) = l_n \frac{\partial T}{\partial n}$$

n —— G_q 的外法线方向， $\bar{q}(x_i, t)$ ——随空间位置和时间变化的给定热流密度值。

3、在 G 边界上给定对流的边界条件

$$\bar{q} = h(T_G - T_V)$$

h ——表面对流换热系数 T_G 、 T_V ——表面和外界环境介质温度

4、在 G 边界上给定热辐射边界条件

$$\bar{q} = se(T_G^4 - T_V^4)$$

s ——Stefan-boltzmann 常数， e ——表面辐射效率

除了上述四类边界条件外，还需给定初始时刻的结构温度分布，即初始条件：

$$T(x_i, 0) = T_0$$

5.2 热应力分析

当物体温度发生变化时，物体将由于膨胀而产生线应变 αT ，其中 α 为材料的线膨胀系数， T 表示弹性体内任意点的温度改变值(从整个物体处于初始均匀温度状态算起)。如果物体各部分的热变形不受任何约束，则虽有变形却不会引起应力。但是，如果物体各部分的温度不均匀，或表面与其他物体相联系，即受到一定的约束，热变形不能自由地进行，就将产生应力。这种由于温度变化而引起的应力称为“热应力”或“温度应力”。

热应力问题与一般应力分析问题相比较，主要是应力-应变关系上有所差别。如果考虑到热应力，物理方程将具有以下形式：

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) \quad (5.2)$$

其中， $\{\varepsilon_0\}$ 为由于温度变化引起的热应变

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha T [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

其中， α 为材料的线膨胀系数， T 为温度的变化。

5.3 热分析有限元方法

根据变分原理，可以由方程5.1推导出如下的热分析有限元矩阵方程：

$$[B]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F\} \quad (5.3)$$

其中 $[B]$ 和 $[K]$ 分别是热容矩阵和热传导矩阵， $\{T\}$ 和 $\{F\}$ 分别是温度和热载荷向量。

MSC Nastran 中稳态热分析把矩阵方程 (5.3) 转换为：

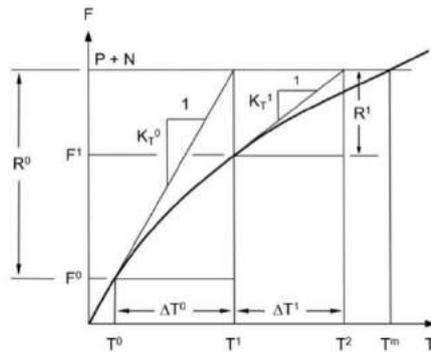
$$[K]\{T\} + [R]\{T + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\} \quad (5.4)$$

其中 $[R]$ 是热辐射矩阵， $\{T_{abs}\}$ 是热辐射计算时相对绝对温度的温度偏差， $\{P\}$ 是常热流向量， $\{N\}$ 是与温度相关的热流向量。

这是一个非线性矩阵方程，用 Newton-Raphson 迭代法求解。迭代计算中残余向量被定义为外部热载荷向量与单元内部热载荷向量的差。

$$\{R\} = (\{P\} + \{N\}) - ([K]\{T\} + [R]\{T + T_{abs}\}^4) \quad (5.5)$$

图5.1 Newton-Raphson 迭代法



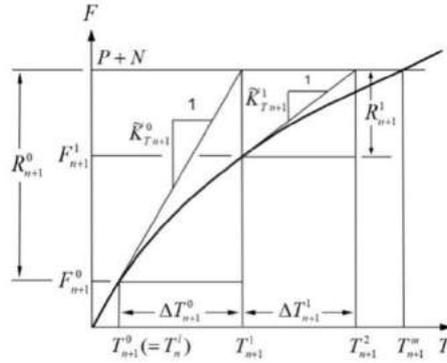
MSC Nastran中瞬态热分析把矩阵方程 (5.3) 转换为

$$[B]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} + [R]\{T + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\} \quad (5.6)$$

这是一个动态的非线性矩阵方程，在每个时间步用Newton-Raphson迭代法求解，如图5.2所示。迭代计算中残余向量被定义为外部热载荷向量与单元内部热载荷向量的差。单元内部热载荷向量不仅与温度有关，还与温度随时间变化有关。

$$\{R(t)\} = (\{P\} + \{N\}) - ([B]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} + [R]\{T + T_{abs}\}^4) \quad (5.7)$$

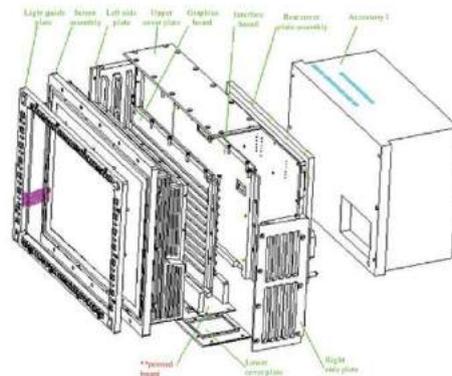
图5.2 时间 T_{n+1} 步Newton-Raphson迭代法



5.4 电子器件热分析

5.4.1 问题概述

图5.3 电子机柜构造

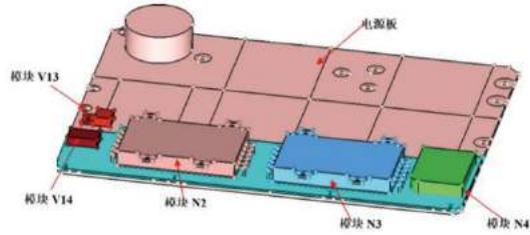


电子机柜的构造如图5.3所示，主要部件包括屏组件、图形板、接口板、电源板、机壳等。屏组件、图形板、接口板、电源板是电子机柜中的发热部件。

屏组件中屏四周有发热元件，发热功耗为20W。图形板的发热功耗为4W，假设为均匀分布。

接口板发热元件有CPU (U5)和FPGA (U4)。CPU (U5)功耗值为656mW，热功耗取其功耗值656mW的10%。FPGA (U4)功耗为500mW，热功耗取其功耗值500mW的10%。

图5.4 电源板CAD模型



A CAD m电源板的CAD模型如图5.4所示，其中模块N2、N3、N4、V13、V14是发热元件，它们的发热功率如表5.1所示。

分析电子机柜在工作过程中的温度状态，计算屏组件、图形板、接口板、电源板以及机壳的温度和热流分布，电子机柜环境温度为65℃。

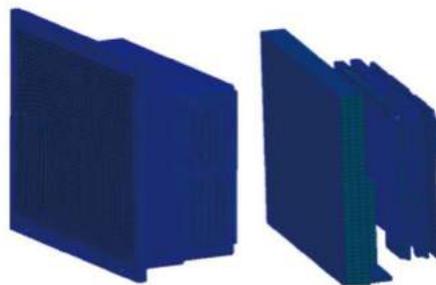
表5.1 电源板发热元件参数

序号	代号	热功耗 W
1	V13	1.8
2	V14	0.37
3	N2	5.8
4	N3	5.6
5	N4	1.14

5.4.2 有限元模型

如图5.5所示为电子机柜有限元模型，采用三维实体单元，图5.5中右边为机柜内屏组件、图形板、接口板、电源板的有限元模型。在有限元建模过程中对模型进行了适当的简化，不考虑机柜附件的影响。

图5.5 电子机柜有限元模型



5.4.3 材料属性

印制板材料的热传导系数取2.6W/(m.℃)；模块V13和V14材料的热传导系数取88.2 W/(m.℃)；模块N2和N3材料的热传导系数取88.2 W/(m.℃)；模块N4材料的热传导系数取88.2 W/(m.℃)；机柜屏的材料热传导系数取88.2 W/(m.℃)；机柜壳体材料的热传导系数取204 W/(m.℃)。

5.4.4 载荷与边界条件

电子机柜在工作时与周围环境以对流的形式进行热交换。机柜内电子元器件发热一方面通过固体器件传热向其周围散热，一方面以对流的形式向其周围空间机柜内散热。电子机柜工作一段时间后会与环境达到热平衡状态，所以本计算可以按稳态热分析计算。

电子元器件发热产生热载荷，在有限元模型中把热功率转换成热流密度（ W/m^2 ）来定义，如图5.6、图5.7、图5.8、图5.9所示。

图5.6 电源板热载荷

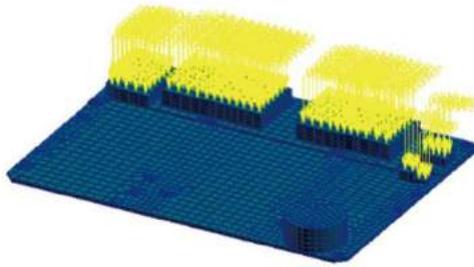


图5.7 接口板热载荷

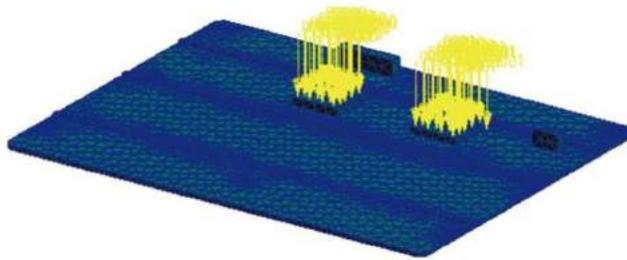


图5.8 图形板热载荷

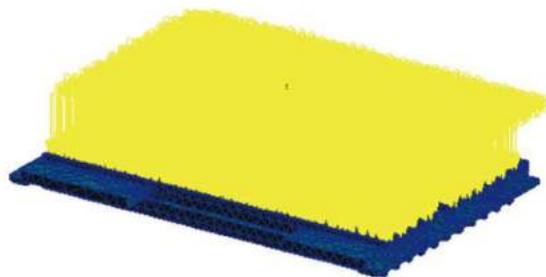
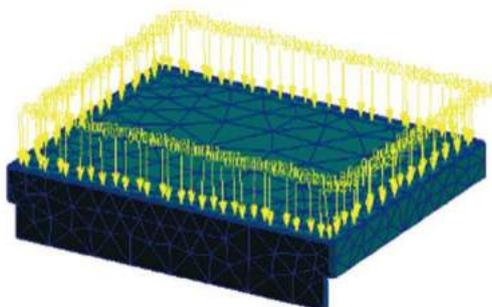


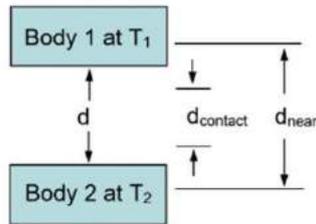
图5.9 机柜屏的热载荷



电子机柜在工作过程中与周围环境进行热交换，可以定义为对流边界条件，对流系数取 $30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 0\text{C})$ ，环境温度为 65.0C 。

机柜内传热可以认为有两种形式，一是热沿固体件传导，二是屏组件、图形板、接口板、电源板、机壳等之间以对流的方式传热。机柜内传热可以定义为热接触。

图5.10 热接触



热接触计算如图5.10所示，当 $d < d_{\text{contact}}$ 时，认为两个物体之间没有间隙，按固体热传导计算；

当 $d_{\text{contact}} < d < d_{\text{near}}$ 时，两个物体之间有间隙存在，它们通过对流和辐射传热；

当 $d_{\text{near}} < d$ 时，两个物体之间通过对流和辐射传热，而且向其周围环境传热。

本计算中热接触取热传导和对流两种传热形式，热传导系数取 $204\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ ，热对流系数取 $30\text{W}/(\text{m}^2 \cdot 0\text{C})$ 。

所以，在本计算中载荷和边界条件共有三种：热源，机壳与周围环境的热对流，机柜内的接触传热。

5.4.5 热分析结果

如图5.11所示为机柜内电源板、接口板、图形板、屏的温度分布，图5.12为机柜内电源板、接口板、图形板、屏的热流分布，最高温度为 84.40C ，最大热流密度为 $0.0181\text{W}/\text{mm}^2$ ，都发生在电源板上模块V13处，这主要是由于模块V13的体积小，单位体积内的热功率比较大。

图5.11 机柜内温度分布

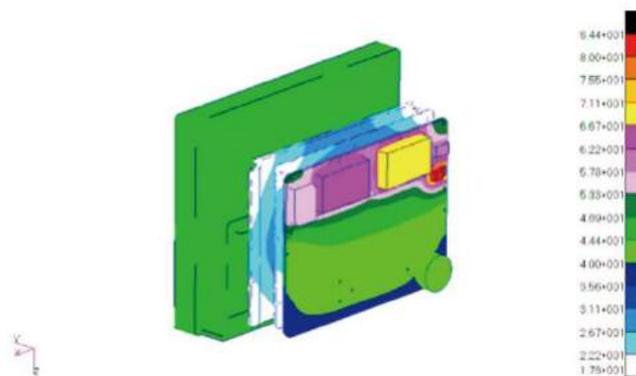


图5.12 机柜内热流分布

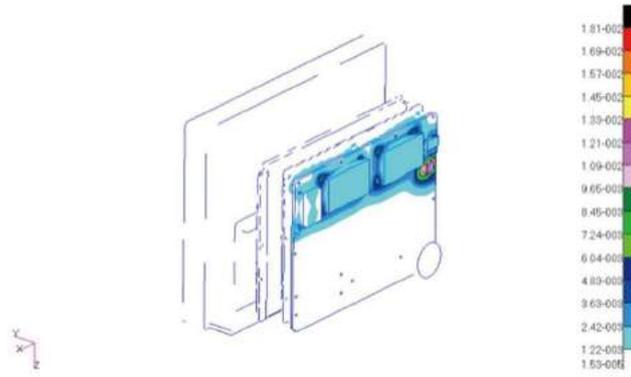


图5.13为电子机柜机壳的温度分布，最高温度为76.60C，后盖板温度较高，这是由于受到电源板的影响，这也正说明后盖板起到很好的散热作用。图5.14为机壳的热流分布，最大值为0.0314W/mm²，也发生在后盖板上。

图5.13 机壳的温度分布

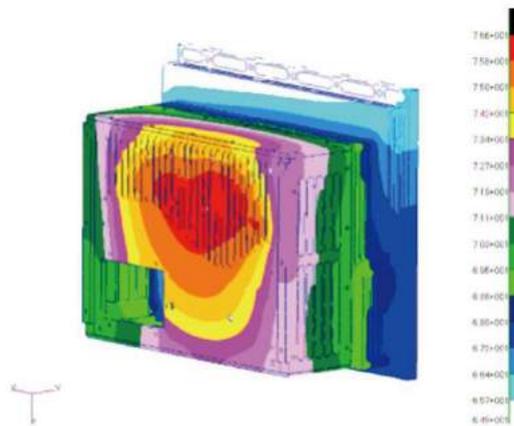


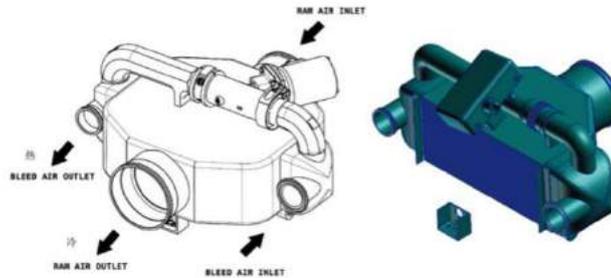
图5.14 机壳的热流分布



5.5 散热器热分析

5.5.1 概述

图5.15 散热器结构



散热器构造如图5.15所示，散热器的芯体和流体介质的材料性能参数如表5.2和5.3所示。

散热器的工作参数如表5.4所示，散热器热边进口温度恒定225℃，冷边进口温度曲线如图5.16所示，初始温度55℃，从T3开始。散热器的温度场是变化的，本计算是瞬态热分析。

表5.2 材料热物理特性

材料	热传导系数 (W/m·K)	比热 (J/kg·K)	密度(Kg/m ³)	动力粘度系数 (Kg/m·sec)
芯体	193	893	2730	/
空气	0.02622	1004.85	1.388	0.00001841

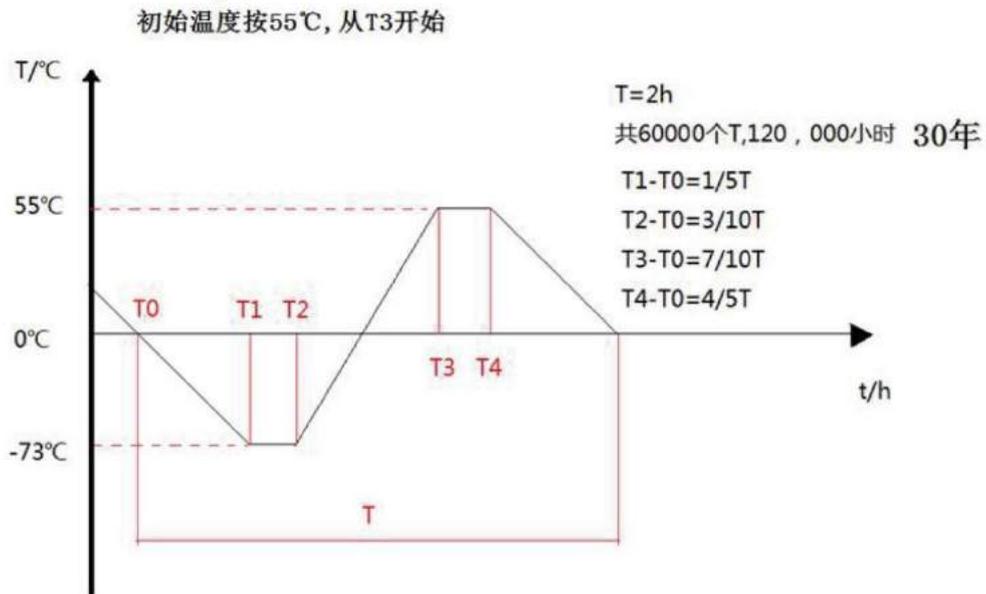
表5.3 材料机械特性

材料	温度 ℃	杨氏模量 (MPa)	泊松比	热膨胀系数 ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$)	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
芯体	20	70000	0.33	24.1	57	110
	90	64197	0.33	24.1	52	94.5
	100	63368	0.33	24.1	51.6	93
	150	59315	0.33	24.1	48.3	83
	175	57350	0.33	24.1	46.7	74
	200	55263	0.33	24.1	45	69
	250	43328	0.33	24.1	35.2	54

表5.4 散热器的工作参数

	流量 (Kg/s)	入口温度 (°C)	出口温度 (°C)	压力 (Pa)	对流系数 (W/m ² ·°C)
热边 BLEED	0.0415	225	66	411600	162.16
冷边 RAM	0.1284	55	83	101400	145.36

图5.16 冷边进口温度曲线



5.5.2 有限元模型

散热器芯体结构和流体介质的有限元模型如图5.17和5.18所示。芯体结构根据对称性取其1/4进行有限元建模，单元采用四边形板单元和六面体单元。流体介质采用一维流体单元。

图5.17 散热器芯体有限元模型

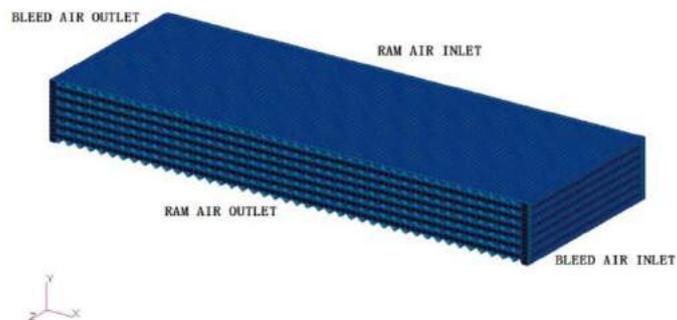
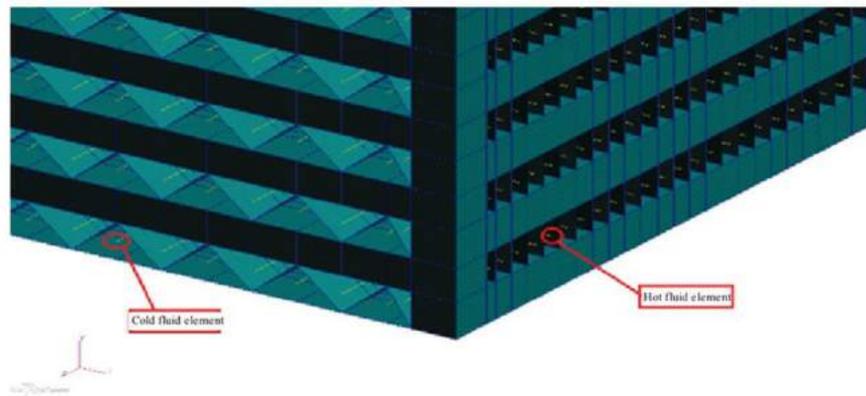


图5.18 散热器芯体流体介质有限元模型



5.5.3 热分析边界条件

热分析边界条件包括热边进口225℃和出口66℃，冷边进口55℃和出口83℃，以及热边空气与翅片的对流热交换，冷边空气与翅片的对流热交换。

图5.19 芯体热边空气进口和出口温度

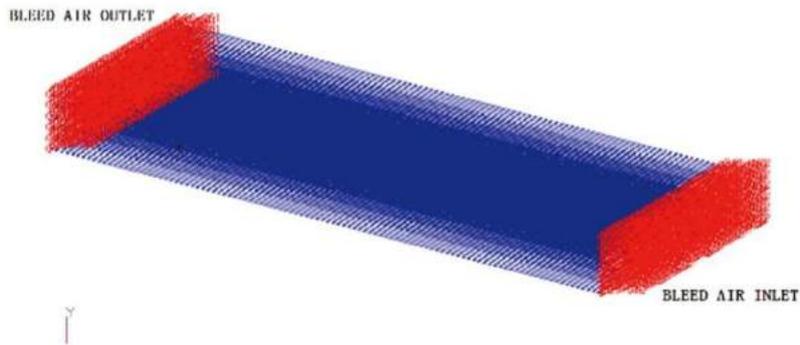
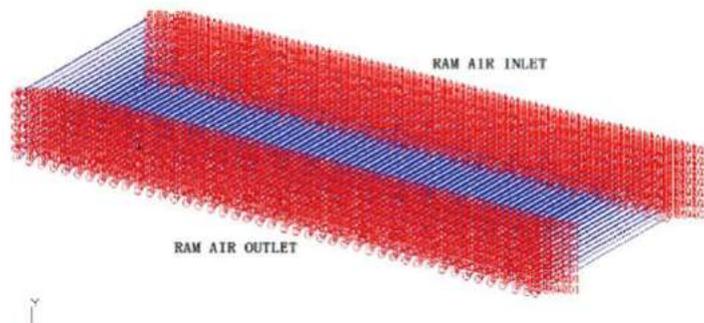


图5.20 芯体冷边空气进口和出口温度



5.5.4 应力分析边界条件

如图5.21所示，底面Y方向平动位移约束，热边出口周边封条位置X方向平动位移约束，冷边出口周边封条和侧板位置Z方向平动位移约束。载荷有温度场和热边、冷边的空气压力。

图5.21 位移约束边界



5.5.5 热分析结果

散热器芯体的温度分布如图5.22所示，芯体最高温度是176℃，在芯体热边进口和冷边出口相邻的区域温度较高。

图5.22 芯体温度场分布

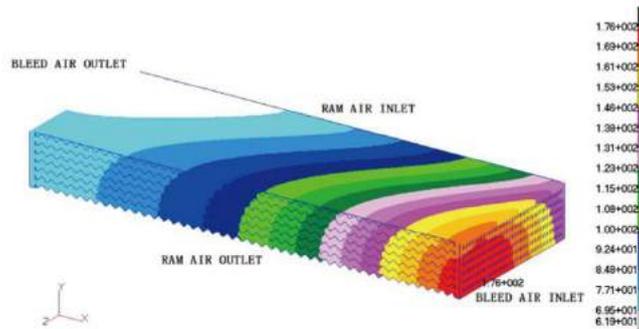


图5.23 热边空气温度

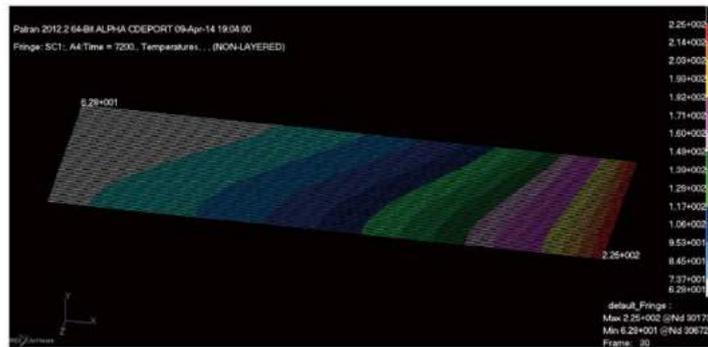


图5.24 冷边空气温度



5.5.6 应力分析结果

散热器工作过程中整个芯体的温度分布不均匀，芯体温度不均匀会产生不均匀的热变形，进而产生热应力。本分析计算芯体在热载荷和内部空气压力作用下的应力。热载荷就是第5.5.5节计算的温度场，初始参考温度为20°C。热边空气压力411600Pa，冷边空气压力101400Pa。

散热器芯体的最大应力为33.5MPa，发生在冷边封条的热边进口处，如图5.25所示。

图5.25 热边和冷边封条应力 (Pa)

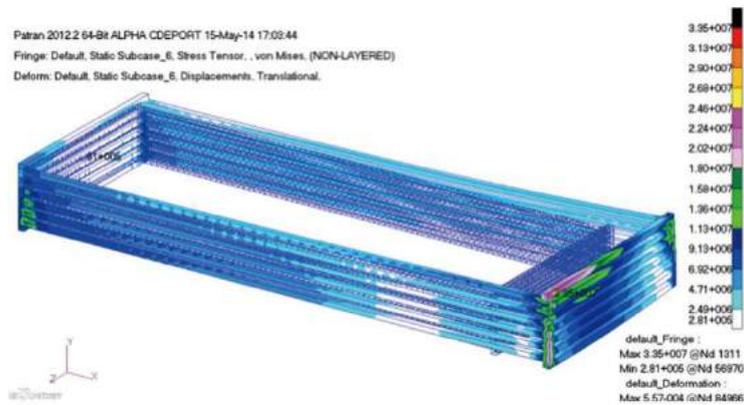


图5.26 隔板和侧板应力 (Pa)

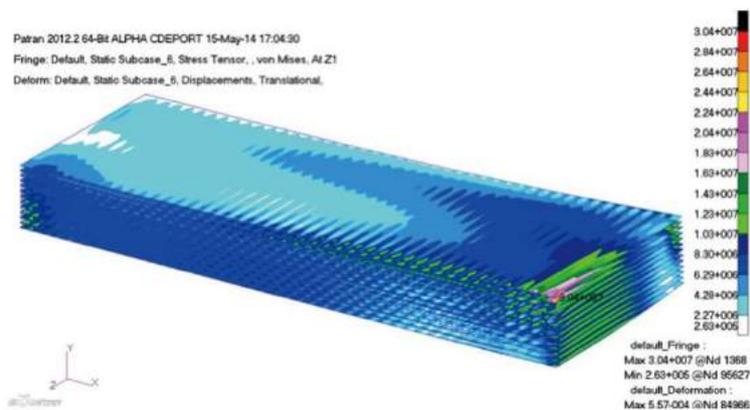


图5.27 热边翅片应力 (Pa)

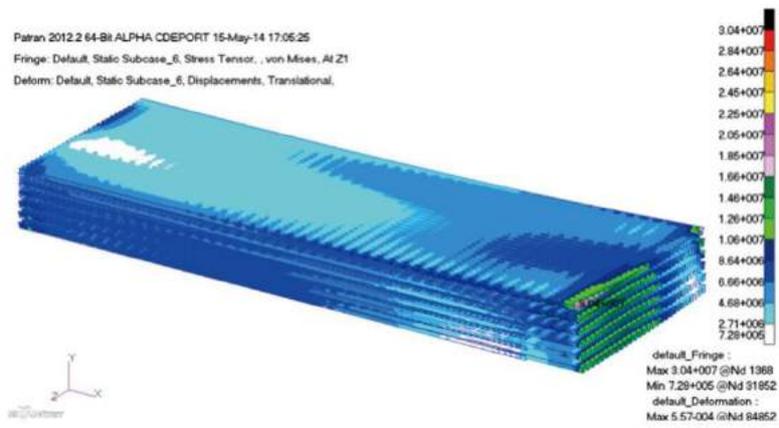
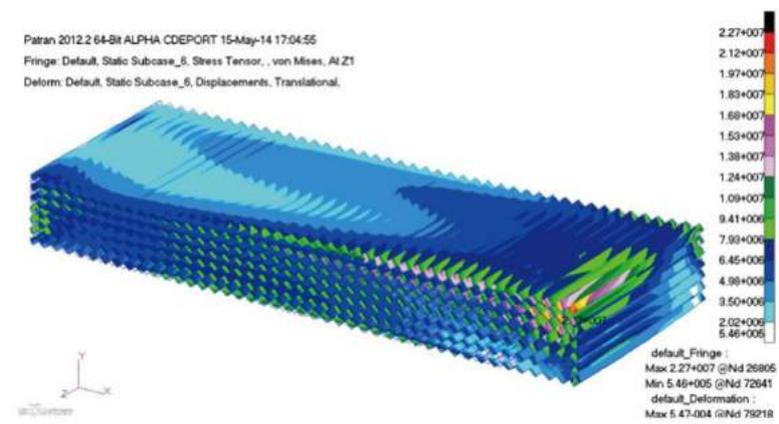


图5.28 冷边翅片应力 (Pa)



第6章

产品寿命设计

第6章

产品寿命设计

疲劳破坏是工程结构和机械失效的主要原因之一，引起疲劳失效的循环载荷的峰值往往远远小于根据静态断裂分析估算出来的“安全”载荷。因此开展疲劳研究有着重要的意义。疲劳是固体力学的一个分支，它主要研究材料或结构在交变载荷作用下的强度问题，研究材料或结构的应力状态与寿命的关系。

6.1 疲劳的基本概念

6.1.1 疲劳的定义

当材料或结构受到多次重复变化的载荷作用后，应力值虽然没有超过材料的强度极限，甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生破坏，这种在交变载荷重复作用下材料或结构的破坏现象，就叫做疲劳破坏。

疲劳 (fatigue) 与断裂 (fracture) 是引起工程结构和构件失效的最主要原因。什么是疲劳呢？这里引述美国试验与材料协会 (ASTM) 在“疲劳试验及数据统计之有关术语的标准定义” (ASTM E206-72) 中的定义：在某点或某些点承受扰动应力，且在足够多的循环扰动作用之后形成裂纹或完全断裂的材料中所发生的局部的、永久结构变化的发展过程，称为疲劳。

所有机器和设备经受的典型的交变载荷称为疲劳载荷，与其相应的应力称为交变应力或疲劳应力，该交变载荷随时间的变化过程称为载荷谱，它可能是无规律的、混乱的或者可能表现出某些规律性。具有周期性交变特征的载荷称为循环载荷。因此每一循环包含着一个载荷变化的完整周期和相应的应力变化的完整周期。

6.1.2 疲劳的分类

对疲劳可以从不同的角度进行分类。根据研究对象的不同可以分为材料疲劳和结构疲劳。材料疲劳研究材料的失效机理、化学成分和微观组织对疲劳强度的影响，标准试样的疲劳试验方法和数据处理方法，材料的基本疲劳特性，环境和工况的影响，疲劳断口的宏观和微观形貌等，其特点是通过使用标准试样进行试验研究；结构疲劳则以零部件、接头以至整机为研究对象，研究它们的疲劳性能、抗疲劳设计方法、寿命估算方法和疲劳试验方法，形状、尺寸和工艺因素的影响，以及提高其疲劳强度的方法。

根据材料疲劳破坏前所经历的循环次数（即寿命）的不同，可以分为高周疲劳和低周疲劳。高周疲劳是材料所受的交变应力远低于材料的屈服极限，甚至只有屈服极限的三分之一左右，断裂前的循环次数 N_f 大于 $1 \cdot 10^5 \sim 1 \cdot 10^7$ 次；通常用 S-N 曲线来描述该材料的疲劳特性。低周疲劳是指材料所受的交变应力较高，通常接近或超过屈服极限，断裂前的循环次数较少，一般少于 $1 \cdot 10^4 \sim 1 \cdot 10^5$ 次。高周疲劳与低周疲劳的主要区别在于塑性应变的程度不同。高周疲劳时，应力一般较低，材料处于弹性范围，因此其应力与应变是成正比的。低周疲劳则不然，其应力一般都超过弹性极限，产生了较大的塑性变形，所以应力与应变不成正比。因为高周疲劳是各种机械中最常见的，故简称疲劳，通常所说的疲劳一般是指高周疲劳。

根据应力状态的不同可以分为单轴疲劳和多轴疲劳。单轴疲劳是指单向循环应力作用下的疲劳，这时零件只承受单向正应力或单向切应力。例如只承受单向拉-压循环应力、弯曲循环应力或扭转循环应力。多轴疲劳是指多向应力作用下的疲劳，也称为复合疲劳。例如弯扭复合疲劳、双轴拉伸疲劳、三轴应力疲劳。

根据载荷作用的幅度和频率可以分为恒幅疲劳、变幅疲劳、随机疲劳。恒幅疲劳是指交变应力的幅度和频率都是固定不变的；变幅疲劳是指交变应力的幅度变化，而频率不变；随机疲劳则是应力幅度和频率都在随机变化的。

根据载荷工况和工作环境可以分为常规疲劳、高低温疲劳、机械疲劳、热疲劳、热-机械疲劳、腐蚀疲劳、接触疲劳、微动磨损疲劳和冲击疲劳。在室温、空气介质中的疲劳称为常规疲劳；低于室温的疲劳称为低温疲劳，高于室温的疲劳称为高温疲劳；仅有交变应力或应变波动造成的疲劳称为机械疲劳；温度循环变化产生的热应力所导致的疲劳称为热疲劳；温度循环与应变循环叠加的疲劳称为热-机械疲劳；循环交变应力和腐蚀环境复合作用所导致的疲劳称为腐蚀疲劳，它又可以分为气相疲劳和水介质疲劳；载荷反复作用与材料间的滑动和滚动接触相结合产生的疲劳称为接触疲劳；由于接触面间的微幅相对振动造成磨损和疲劳的联合作用所导致的疲劳称为微动磨损疲劳；重复冲击载荷所导致的疲劳称为冲击疲劳。机器或结构部件的失效大多数是由于发生上述某一种疲劳过程造成的。

6.1.3 疲劳强度、疲劳极限与疲劳寿命

材料或构件疲劳性能的好坏是用疲劳强度来衡量的，所谓疲劳强度就是指材料或构件在交变载荷作用下的强度。

疲劳强度的大小又是用疲劳极限来衡量的，所谓疲劳极限就是指在一定循环特征 R 下，材料或构件可以承受无限次应力循环而不发生疲劳破坏的最大应力 S_{max} ，一般用 S_r 表示。因材料的疲劳极限随加载方式和应力比的不同而异，通常以对称循环下的疲劳极限作为材料的基本疲劳极限。

疲劳寿命是疲劳失效时所经受的应力或应变的循环次数，一般用 N 表示。试样的疲劳寿命取决于材料的力学性能和所施加的应力水平。一般说来，材料的强度极限越高，外加的应力水平越低，试样的疲劳寿命就越长；反之，疲劳寿命就越短。表示这种外加应力水平和标准试样疲劳寿命之间关系的曲线称为材料 $S-N$ 曲线。

6.2 疲劳设计方法

6.2.1 无限寿命设计

无限寿命设计是最早的疲劳设计方法，它要求零构件的设计应力低于其疲劳极限，从而具有无限寿命。对于需要经历无限次循环（ $>$ 次）的零构件，如发动机气缸阀门、顶杆、弹簧、长期频繁运行的轮轴等，无限寿命设计至今仍是一种简单而合理的设计方法。

但是无限寿命设计方法常常使设计的构件过于笨重。随着现代工业特别是航空工业的发展，飞机朝着高速、高性能、低重量的方向发展。为了充分利用材料的承载潜力，设计应力水平不断提高，疲劳设计方法也从无限寿命设计进入到有限寿命设计阶段。

6.2.2 安全寿命设计

从无限寿命设计方法基础上发展起来的安全寿命设计，是一种有限寿命设计，也是依据试验中得到的S-N曲线来进行设计的。安全寿命设计方法只保证零构件在规定的使用期限内能安全使用，因此，它允许零构件的工作应力超过其疲劳极限，从而减轻自重。它是当前许多机械产品的主导设计方法。如航空发动机、汽车等对自重有较高要求的产品都广泛使用这种设计方法。

安全寿命设计必须考虑安全系数，以考虑疲劳数据分散性和其它未知因素的影响。在设计中可以对应力取安全系数，也可以对寿命取安全系数，或者规定两种安全系数都要满足。安全寿命设计可以根据S-N曲线设计，也可以根据曲线进行设计，前者称为名义应力有限寿命设计，后者称为局部应力应变法。

6.2.3 破损安全设计

随着现代工业的飞速发展，特别是飞机、火箭、船舶、运载工具的飞速发展，以及第二次世界大战以来疲劳破坏事故的大量涌现，对疲劳设计的安全可靠性提出了越来越高的要求。破损-安全设计方法就是在这个基础上发展起来的另一新的设计方法。

破损安全设计方法的实质是：结构在规定的使用年限中，允许产生疲劳裂纹，并允许疲劳裂纹扩展，但其剩余强度应大于限制载荷。而且在设计中要采取断裂控制措施，如采用多通道设计和设置止裂板等，以确保裂纹在被检测出来而未修复之前不致造成结构破坏。压力容器设计中的“破裂前渗漏”就是这种设计准则的一种体现。

6.2.4 损伤容限设计

损伤容限设计是破损-安全设计方法的体现和改进。此法首先假定零构件内存在初始裂纹，应用断裂力学方法来估算其剩余寿命，并通过试验来校验，确保在使用期内裂纹不致扩展到引起破坏的程度，从而有裂纹的零构件在其使用期内能够安全使用。它适用于裂纹扩展缓慢而断裂韧性高的材料。

6.3 影响疲劳强度的主要因素

材料的S-N曲线和疲劳极限。只能代表标准光滑试样的疲劳性能。而实际零件的尺寸、形状和表面情况是各式各样的，与标准试样有很大差别。影响机械零件疲劳强度的因素有很多，其中主要因素有：尺寸、形状、表面状况、平均应力、复合应力、腐蚀介质、温度等。本章主要讨论应力集中、尺寸、表面加工等因素对疲劳强度的影响。

6.3.1 应力集中的影响

在机械零件中，由于结构上的要求，不可避免地存在槽沟、轴肩、孔、拐角、切口等不连续部分致使截面形状发生突变。由于零件或构件几何形状的不连续而引起比名义应力大得多得局部应力的现象称为“应力集中”。

应力集中对疲劳强度的影响极大，并且是各种影响因素中起主要作用的因素，它大大降低了零构件的疲劳强度。应力集中降低疲劳强度的作用可以用疲劳缺口系数 K_f 来表征。疲劳缺口系数为光滑试样的疲劳极限 S_{-1} 与净截面尺寸及终加工方法相同的缺口试样疲劳极限 S_{-1k} 之比，即

$$K_f = \frac{S_{-1}}{S_{-1k}}$$

疲劳缺口系数主要取决于理论应力集中系数 K_t ，但还与材料性质、缺口形式、渠口半径及缺口深度有关，不过 K_f 的影响远比其他因素大。显然确定 K_f 最直接可靠的方法是进行疲劳试验，而进行疲劳试验耗资费时，且得到 K_f 还与试件尺寸有关。在一种试件上得到的 K_f 不能直接用到材料相同而尺寸不同的试件上去，再加上不同材料对应力集中的敏感性不同，使问题更加复杂化，故不能仅通过试验手段获得 K_f 。

6.3.2 尺寸影响

试样和零件的尺寸对其疲劳强度影响也很大。一般说来，零件和试样的尺寸增大时疲劳强度降低。这种疲劳强度随零件尺寸增大而降低的现象称为疲劳的尺寸影响，亦称为尺寸效应。

尺寸对疲劳强度的影响主要由于以下三个原因：

(1) 材料的机械性能（包括疲劳性能）随着材料断面的增大而降低。强度级别越高的合金钢这种现象越明显。显然它与材料的冶金、热加工工艺和金相组织有关，是由材料的内在性质决定的，而与零部件的结构、载荷情况、冷加工过程无关。

(2) 零部件的应力梯度是造成尺寸效应的主要原因。如尺寸不同的试件若受力条件相同，且危险点峰值应力相等，则大尺寸零部件由于应力梯度小而疲劳强度高，小试件由于应力梯度大而疲劳强度低。

(3) 从同一毛坯上取下的不同断面的试件，大尺寸试件的疲劳强度低于小试件。这是因为大尺寸试件含有更多的疲劳损伤源，裂纹萌生的概率就高，从而导致疲劳强度下降。

尺寸效应的大小用尺寸系数 e 来表征。 e 的定义为：当应力集中和加工方法相同时，尺寸为 d 的试样或零件的疲劳极限 S_{-1d} 与几何相似的标准尺寸试样的疲劳极限 S_{-1} 之比，即

$$e = \frac{S_{-1d}}{S_{-1}}$$

尺寸系数是小于1的系数，通常可由设计手册查得。

6.3.3 表面状况的影响

疲劳裂纹源通常萌生于试件表面，这是因为外表面的应力水平往往也最多，另外，表面层材料的约束小，滑移带最易开动。因此零部件的表面状况对其疲劳强度有着显著的影响，其影响程度用表面敏感系数来表示，即

$$b = \frac{\text{某加工试样的疲劳强度}}{\text{标准光滑试件的疲劳强度}}$$

通常，材料的疲劳强度或疲劳寿命是由标准光滑试件得到的，在用此数据估算零部件的疲劳强度或疲劳寿命时，需做表面敏感系数的修正。因为绝大多数结构或机械的疲劳关键部位往往就是应力集中部位，进行表面敏感系数的修正时要注意表面状况的对应。

表面状况主要包括表面加工粗糙度 b_1 、表面层的组织结构 b_2 和表层应力状态 b_3 ，且

$$b = b_1 b_2 b_3$$

1、表面加工粗糙度 b_1

大量的实验研究结构表明，表面加工粗糙度对疲劳强度有很大的影响，因为零构件表面加工后所引起的表面缺陷是应力集中的因素。特别是对高强度材料，表面有一小缺陷，常成为极危险的尖锐切口，形成应力集中，这里往往就是疲劳源，在交变应力作用下会形成疲劳裂纹并不断拓展，大大降低了疲劳强度。一般说来，表

面加工粗糙度越低，疲劳强度就越高。从微观机制角度解释，表面粗糙相当于表面有侵入和挤出，因此缩短了疲劳裂纹形成寿命，降低了疲劳强度；从宏观角度解释，表面粗糙造成微观应力集中，从而使疲劳强度降低。

2、表层组织结构 b_2

由于零部件表层对零部件的疲劳强度有着重要的影响，人们通过各种表面处理工艺来提高表面层的疲劳强度。常用的方法有：表面渗碳、渗氮、氧化、表面淬火、表面激光处理等。这些处理方法的本质是改变表面层的组织结构。通常其疲劳强度得到提高，即通常大于1，从而达到提高零部件疲劳强度的目的。的确定完全依赖于试验。而不同的工艺参数对的影响不同。

3、表层应力状态 b_3

表面冷作变形是提高零部件疲劳强度的有效途径之一。表面冷作变形的的方法主要有：滚压、喷丸、挤压等。表面冷作变形的本质是改变了零部件表层的应力状态，同时也使表层的组织发生了一些物理变化。

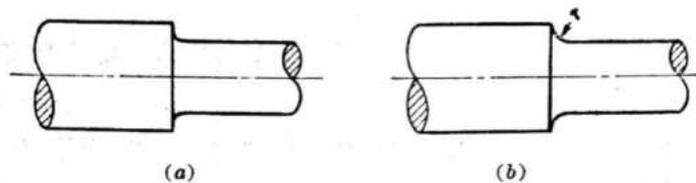
6.4 提高构件疲劳强度的措施

疲劳破坏是由裂纹扩展引起的，而裂纹的形成主要在应力集中的部位和构件表面。所以提高疲劳强度应从减缓应力集中，提高表面质量等方面入手。

1、减缓应力集中

应力集中是疲劳破坏的主要原因。为了提高构件的疲劳强度，应尽可能地消除或减缓应力集中。在设计构件的外形时，要避免出现方形或带有尖角的孔和槽。在截面尺寸突然改变处如阶梯轴的轴肩，要采用半径足够大的过渡圆角，以减轻应力集中。例如以图6-1中的两种情况相比，过渡圆角半径 r 较大的阶梯轴的应力集中程度就缓和得多。随着 r 的增大，应力集中会迅速减小。

图6-1 过渡圆角



有时因结构上的原因，难以加大过渡圆角的半径，这时可以在直径较大的部分轴上开减荷槽（图6-2）或退刀槽（图6-3），都可使应力集中有明显的减弱。

图6-2 减荷槽

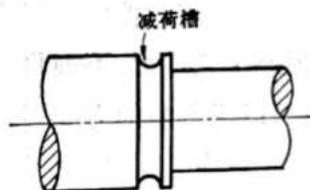
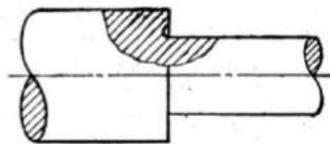
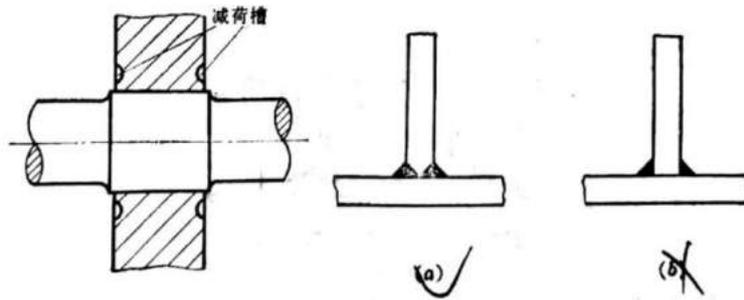


图6-3 退刀槽



在紧配合的轮毂与轴的配合面边缘处，有明显的应力集中。若在轮毂上开减荷槽，并加粗轴的配合部分（图6-4），以缩小轮毂与轴之间的刚度差距，便可改善配合面边缘处应力集中的情况。在角焊缝处，如采用图6-5（a）所示坡口焊接，应力集中程度要比无坡口焊接（图6-5（b））改善很多。



2、提高表面光洁度

构件表面层的应力一般较大，例如构件受弯或受扭时，最大应力都发生于表面。而构件表面的刀痕或损伤又将引起应力集中，容易形成疲劳裂纹。所以，构件表面加工质量对疲劳强度影响很大，疲劳强度要求较高的构件，应有较高的表面光洁度。高强度钢对表面光洁度更为敏感，只有经过精加工，才有利于发挥它的高强度性能。否则将会使疲劳极限大幅度下降，失去采用高强度钢的意义。在使用中也应尽量避免使构件表面受到机械损伤（如划伤、打印等）或化学损伤（如腐蚀、生锈等）。

3、增加表层强度

为了强化构件的表层，可采用热处理和化学处理，如表面高频淬火、渗碳、氮化等，皆可使构件疲劳强度有显著提高。但采用这些方法时，要严格控制工艺过程，否则将造成表面微细裂纹，反而降低了疲劳极限。也可以用机械的方法强化表层，如滚压、喷丸等，使构件表面形成一层预压应力层，减弱了容易引起裂纹的表面拉应力，从而提高了疲劳强度。

6.5 车轮疲劳寿命设计实例

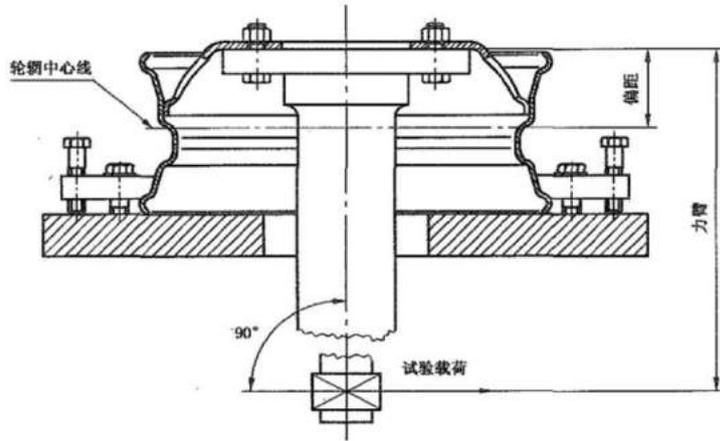
车轮是汽车行驶系统中重要的安全部件，汽车前进的驱动力通过车轮传递，车轮的结构性能对整车的安全性能和可靠性有着重要的影响。为满足强度及疲劳等的要求，GB/T 5909-2009《商用车车辆车轮性能要求和试验方法》标准规定，商用车车轮必须进行弯曲疲劳试验和径向滚动疲劳试验。本次分析以某款22.5×9商用车车轮为例，通过疲劳寿命分析，实现车轮产品疲劳寿命设计。

6.5.1 弯曲疲劳仿真分析

1、问题描述

按下图6-6所示将车轮轮辋牢固地夹紧到试验夹具上。试验机的连接面应与车辆上通常采用的连接件具有相同的安装尺寸特性。试验台连接面和车轮的安装面应无划痕和磨损，应去除多余的漆瘤、灰尘或异物。加载臂和连接件用无润滑的螺柱或螺母可靠的连接到车轮安装面上，安装状况应与在车辆上实际使用的工况相当。开始试验时，按车辆或车轮制造商规定的扭矩安装和紧固车轮。车轮螺栓或螺母在试验过程中可能需要再次紧固。

图6-6 动态弯曲疲劳试验加载示意图



标准中规定试验载荷（弯矩）由以下公式确定：

$$M = (mR + d)F_v S$$

其中，M：弯矩，单位为（N·m）； m ：轮胎和路面间设定的摩擦系数；R：车辆或车轮制造商规定的该车轮配用的最大轮胎的静态负载半径，单位为（m）；d：车轮的内偏距或外偏距（内偏距为正，外偏距为负），单位为（m）。如果车轮可使用内偏距也可使用外偏距，那么应用内偏距。 F_v ：车辆或车轮制造商规定的车轮额定负载值，单位为（N）；S：强化试验系数。

对于钢制车轮来说，当内偏距或外偏距大于101.6mm时，标准中规定摩擦系数取0.7，强化试验系数取1.1，最低循环次数为30万次。

2、有限元模型

车轮弯曲疲劳分析模型包含轮辐、轮辋、轮毂和螺栓四个部分，由于轮辐为变厚度设计，且需考虑接触和螺栓预紧力的加载，故采用六面体单元进行网格划分。整体网格尺寸为3.5mm，保证整体网格规模的一致性，保证厚度方向有4层网格。最终单元总数为350706，节点总数为437659，车轮弯曲疲劳分析网格模型如下图6-7所示。

图6-7 弯曲疲劳分析有限元模型



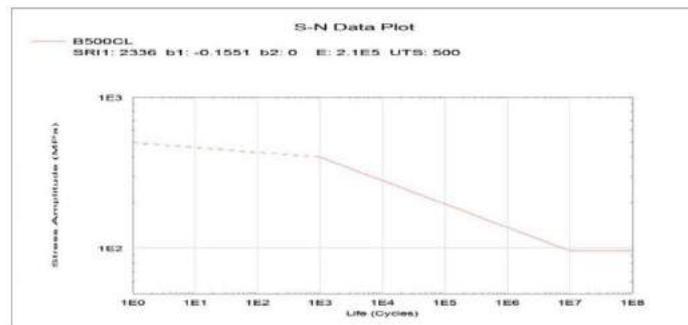
轮辐轮辋所用材料为B500CL，材料力学参数如下表6-1所示。

表6-1 材料力学参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
B500CL	210	0.3	7850	345	500

B500CL材料的S-N曲线如下图6-8所示。

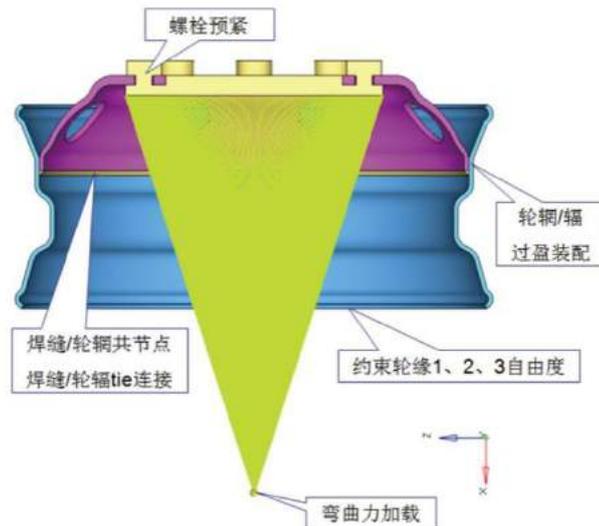
图6-8 B500CL材料S-N曲线



3、载荷与约束

如下图6-9所示约束轮缘X、Y、Z三个方向的平动自由度，在弯曲试验过程中主要受螺栓预紧力和弯曲载荷作用（分析表明离心力的影响可以忽略）。

图6-9 弯曲疲劳分析边界条件示意图



1、螺栓预紧力，试验过程中螺母扭矩为610N.m，根据机械设计原理相关计算方法可得到螺栓预紧力为1.4E5牛顿。

2、弯曲载荷，整个试验过程中载荷大小为22569N.m，但是力的作用方向是不断改变的，可分解为 $M_y = M' \sin(\omega t)$ 和 $M_z = M' \cos(\omega t)$ 。

$$\begin{aligned}
 M &= (nrR + d) \cdot F_v \cdot S \\
 &= (0.516 \cdot 0.7 + 0.1622) \cdot 4000 \cdot 1.1 \cdot 9.8 \\
 &= 22569 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

4、应力响应分析

当车轮承受弯曲扭转力作用时，某一时刻车轮应力云图如下图6-10所示。

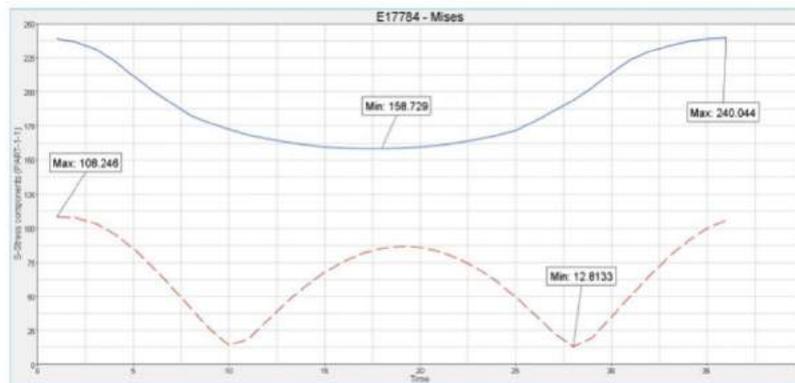
图6-10 弯曲载荷作用下车轮应力云图



由车轮应力云图可知，在承受弯曲载荷和螺栓预紧力载荷作用时，螺栓孔处应力最大，应力峰值为242MPa，其次是通风孔处，应力峰值为108MPa。

加载轴旋转一周为一个循环，本次分析将一个循环分成36步，可得螺栓孔处和通风孔处的应力变化如下图6-11所示。

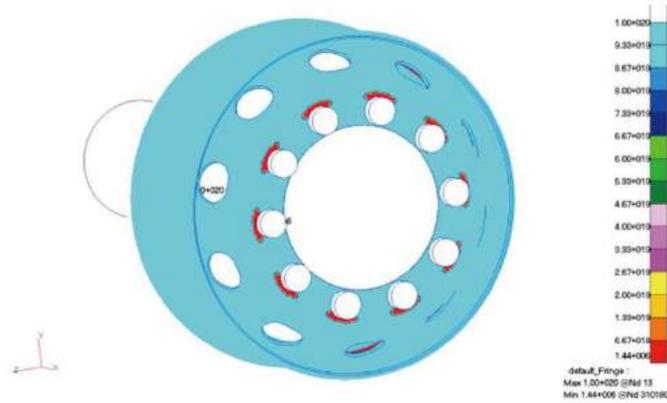
图6-11 螺栓孔处和通风孔处应力响应示意图



5、疲劳寿命分析

车轮在弯曲载荷循环作用下，结合材料的S-N曲线，可计算得到车轮的疲劳寿命云图如下图6-12所示。

图6-12 车轮弯曲疲劳寿命云图



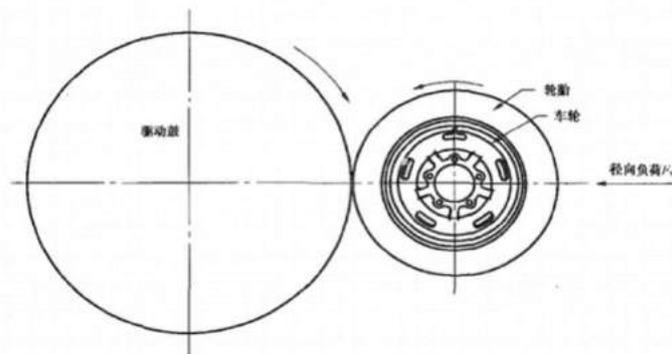
由疲劳寿命云图可知，弯曲载荷循环作用时，车轮危险点位于螺栓孔处，最小寿命为144万次，其次是通风孔处，疲劳寿命为577万次，大于最低循环次数30万次，满足车轮疲劳寿命设计要求。

6.5.2 径向滚动疲劳分析

1、问题描述

径向滚动疲劳试验机应装有在车轮旋转时能施加一恒定径向负载的装置，如下图6-13所示。应装有一个被驱动的可旋转的鼓型，转鼓具有比承载试验轮胎断面要宽的光滑表面，所推荐的最小转鼓外径为1700mm。车轮（单轮）和轮胎试验装置应使加载方向垂直于转鼓外表面，并且径向与试验车轮和转鼓的中心成一直线。转鼓和试验车轮的轴线应平行。

图6-13 径向滚动疲劳试验示意图



标准中规定径向滚动载荷 F_r 由以下公式确定：

$$F_r = F_v K$$

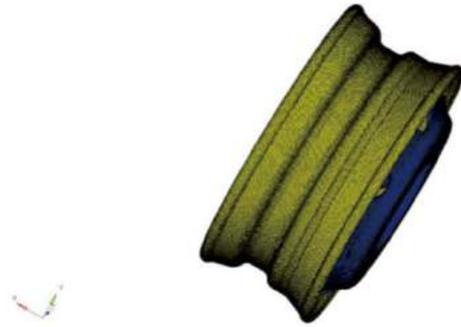
式中， F_r ：径向载荷，单位为牛顿（N）； F_v ：有车辆或车轮制造商规定的车轮额定负载值，单位为牛顿（N）； K ：强化试验系数。

对于本次分析钢制车轮，根据标准中规定强化试验系数取2.0，最低循环次数为50万次。

2、有限元模型

为了简化计算不考虑轮胎对分析的影响，车轮径向滚动疲劳分析模型只包含轮辐和轮辋，由于轮辐为变厚度设计，故采用六面体单元进行网格划分。整体网格尺寸为4mm，保证整体网格规模的一致性，保证厚度方向有4层网格。最终单元总数为352928，节点总数为446197，车轮径向滚动疲劳分析网格模型如图6-14所示。

图6-14 车轮径向滚动疲劳有限元模型示意图



3、载荷与约束

约束轮辐螺栓孔处X、Y、Z三个方向的平动自由度，在径向滚动疲劳试验过程中主要受轮胎充气压力和径向滚动载荷（分析表明离心力的影响可以忽略）。

1、轮胎充气压力，试验过程中轮胎充气压力为1MPa。

2、径向滚动载荷，根据艾科朗大学博士John C.Stearns的研究成果中，车轮在承受径向滚动载荷时，轮辋应力分布已被证明近似服从余弦函数分布，载荷作用范围角度 θ 范围为 0° 到 40° ，本次分析取 36° 。

4、应力响应分析

车轮径向滚动疲劳试验通常是轮辋最先出现破坏，因此重点考察轮辋的受力情况，当车轮承受轮胎压力和径向滚动载荷作用时，某一时刻车轮轮辐应力云图和位移云图分别如下图6-15和6-16所示。

图 6-15 轮辋应力云图

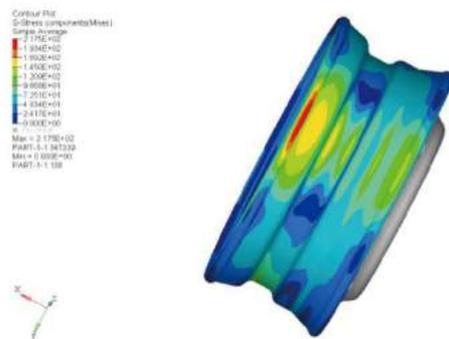
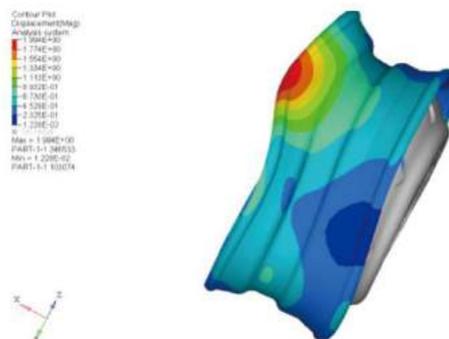


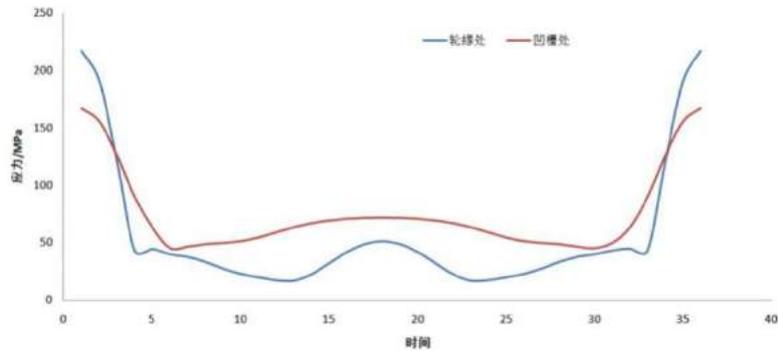
图6-16 轮辋位移云图



由车轮应力云图和位移云图可知，轮辋最大应力位于轮缘处，应力值为217.4MPa，其次为凹槽R角处，最大应力为167.4MPa，轮辋变形为1.994mm。

车轮旋转一周为一个循环，本次分析将一个循环分成36步，可得轮缘处和凹槽处的应力变化如下图6-17所示。

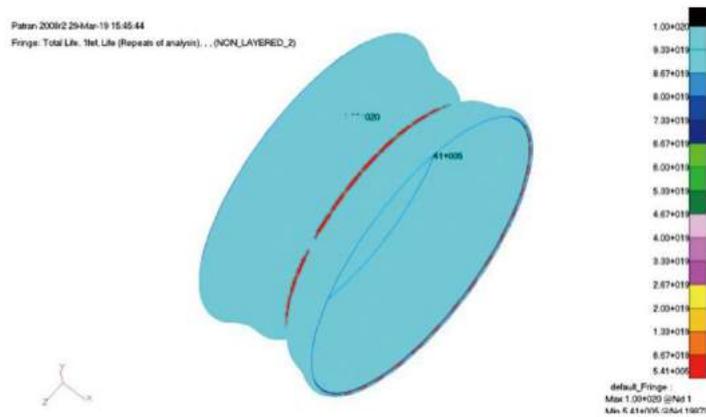
图6-17 径向滚动载荷作用下轮缘、凹槽位置应力响应示意图



5、疲劳寿命云图

车轮在径向滚动载荷循环作用下，结合材料的S-N曲线，可计算得到车轮轮辋的疲劳寿命云图如下图6-18所示。

图6-18 车轮径向滚动疲劳寿命云图



由疲劳寿命云图可知，径向滚动载荷循环作用时，车轮危险点位于轮辋边缘处，最小寿命为54.1万次，其次是凹槽R处，疲劳寿命为82.5万次，大于最低循环次数50万次，满足车轮疲劳寿命设计要求。

第7章

用优化技术找到
产品设计的最佳方案

第7章

用优化技术找到产品设计的最佳方案

7.1 产品设计中的优化问题

在产品的结构设计中，为满足设计的性能和功能的要求，设计工程师要对结构进行合理的构型，既要能够实现性能和功能的需求，同时又要考虑产品在使用过程中满足强度条件、振动条件、散热条件、电磁场条件、疲劳寿命等条件，从前面章节学到的知识我们知道，为了满足产品在使用中的各种条件，我们可以使用CAE仿真软件来验证一下我们所设计的产品是否满足这些条件，并设计出以满足各种条件的产品，但是对于一个设计工程师来说，并不是要设计出仅仅能够满足功能和性能要求的产品，一个优秀的产品设计工程师，还需要考虑该产品在市场上的竞争能力，也就是我们要设计出具有竞争力的产品，让我们的产品成为市场上的最佳产品。什么是我们还需要考虑的问题，性能更佳？功能更全？成本更低？外观更美？当你设计的产品还不是市场上最好的产品时，你就要去研究那个最佳的产品，并以其为目标让你设计的产品超过它，当你的产品已经是市场上最好的产品时，你就要去设计超越自我的产品，因此，产品的设计就是一个不断超越、寻找最佳设计的过程。

在数学上，我们把这个过程叫做寻优过程，让我们看一个实际问题：

案例1：圆杯的优化设计

要设计一个装水杯子，上下为圆形直径相同，要求满装能装300ml水，如何设计水杯的高度h和直径d，使得水杯的用料最省？

设计参数：水杯的高度h和直径d

设计目标：水杯材料的面积S最小： $\min S = h * \pi d + \pi * (d/2)^2$

（圆的周长= $2 \pi r$ r—圆的半径）

（圆的面积= πr^2 ）

约束条件：圆柱体体积=300ml，即 $V = \pi r^2 h$ (r>0, h>0)

按照Lagrange乘法法：

$F(r, h, m) = 2 \pi r h + \pi r^2 - m(\pi r^2 h - 300)$

分别对三个变量r, h, m求偏导数为0，得到以下3个方程：

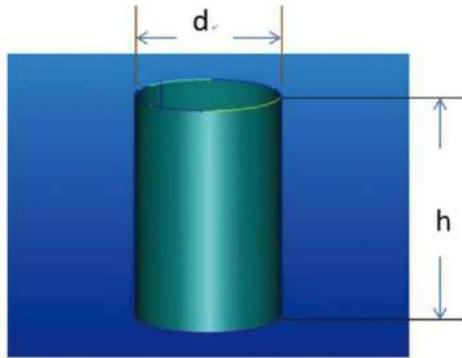
$$2 \pi h + 2 \pi r - 2 \pi m h r = 0$$

$$2 \pi r - \pi m r^2 = 0$$

$$\pi r^2 h - 300 = 0$$

$$r = h = 4.57 \dots$$

即最省材料并满足能装300ml水杯应该是设计为尺寸 $r = h = 4.57 \dots$



7.2 优化设计的历史发展

历史上最早记载下来的最优化问题可追溯到古希腊的欧几里得 (Euclid, 公元前300年左右), 他指出: 在周长相同的一切矩形中, 以正方形的面积为最大。十七、十八世纪微积分的建立给出了求函数极值的一些准则, 对最优化的研究提供了某些理论基础。然而, 在以后的两个世纪中, 最优化技术的进展缓慢。

17 世纪, Newton & Leibniz 提出了函数的极值问题, 后来出现了Lagrange乘数法;

1847年, Cauchy研究了函数值沿什么方向下降最快的问题, 提出了最速下降法;

1939年, 苏联数学家提出解决下料问题和运输问题这两种线性规划问题的求解方法;

1947年, Dantzig 提出解线性规划问题的单纯形法, 被称为“20世纪最伟大的创作之一”;

1948年, Fritz John 提出最优性条件;

1951年, Kuhn和Tucher 提出最优性条件, 完成了非线性规划的基础工作;

二十世纪40年代初, 由于军事上的需要产生了运筹学, 并使优化技术首先应用于解决战争中的实际问题, 例如轰炸机最佳俯冲轨迹的设计等。

50年代末数学规划方法被首次用于结构最优化, 并成为优化设计中求优方法的理论基础。数学规划方法是在第二次世界大战期间发展起来的一个新的数学分支, 线性规划与非线性规划是其主要内容。

近几十年来, 最优化理论和算法发展十分迅速, 应用也越来越广泛, 已成为一个相当庞大的研究领域; 狭义上主要指非线性规划问题的相关内容; 广义上则涵盖线性规划、非线性规划、动态规划、整数规划、几何规划、多目标规划、随机规划甚至还包括变分、最优控制等等。

近代最优化设计是在数学规划方法的基础上发展起来的, 是60年代初电子计算机引入结构设计领域后逐步形成的一种有效的设计方法。利用这种方法, 不仅使设计周期大大缩短, 计算精度显著提高, 而且可以解决传统设计方法所不能解决的比较复杂的最优化设计问题。大型电子计算机的出现, 使最优化方法及其理论蓬勃发展, 成为应用数学中的一个重要分支, 并在许多科学技术领域中得到应用。

近二十多年来, 最优化设计方法已陆续用到建筑结构、化工、冶金、铁路、航天航空、造船、机床、汽车、自动控制系统、电力系统以及电机、电器等工程设计领域, 并取得了显著效果。其中在机械设计方面的应用虽尚处于早期阶段, 但也已经取得了丰硕的成果。一般说来, 对于工程设计问题, 所涉及的因素愈多, 问题愈复杂, 最优化设计结果所取得的效益就愈大。

总结来说，优化设计的发展可分为以下四个阶段：

第一阶段 人类智能优化：与人类史同步，直接凭借人类的直觉或逻辑思维，如黄金分割法、穷举法和瞎子爬山法等。

第二阶段 数学规划方法优化：从三百多年前牛顿发明微积分算起，电子计算机的出现推动数学规划方法在近五十年来得到迅速发展。

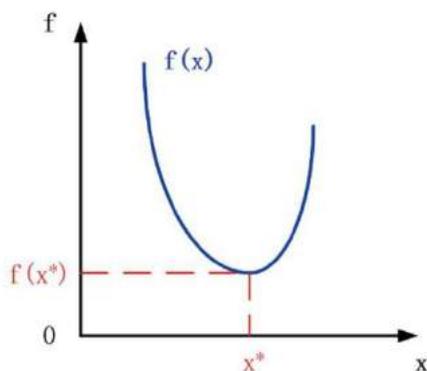
第三阶段 工程优化：近二十余年来，计算机技术的发展给解决复杂工程优化问题提供了新的可能，非数学领域专家开发了一些工程优化方法，能解决不少传统数学规划方法不能胜任的工程优化问题。在处理多目标工程优化问题中，基于经验和直觉的方法得到了更多的应用。优化过程和方法学研究，尤其是建模策略研究引起重视，开辟了提高工程优化效率的新的途径。

第四阶段 现代优化方法：如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、神经网络算法等，并采用专家系统技术实现寻优策略的自动选择和优化过程的自动控制，智能寻优策略迅速发展。

7.3 优化技术的分类

优化一语来自英文Optimization，其本意是寻优的过程，优化过程就是寻找约束空间下给定函数取极大值或极小值的过程。

图7.2 函数极值



如上图所示，对于这样一个变量是 x 的函数 $f(x)$ ，要求解 $x=?$ 时， $f(x)$ 的值最小？

从此图中可以知道，求得一维函数 $f(x)$ 最小值的条件为：若 x 取 x^* ，则 $f(x)$ 取得最小值 $f(x^*)$ 。

实际问题表达成的函数类型很多：

确定型、不确定型函数；

线形、非线性形（二次、高次、超越）函数。

变量类型也很多：

连续、离散、随机变量等等。

产生很多的优化算法：

无约束优化、约束优化；

单目标函数优化、多目标函数优化；

连续变量优化、离散变量优化、随机变量优化。

最优化是一个重要的数学分支，是一门应用广泛、实用性很强的学科。简单地说，最优化就是从所有可能的方案中选择最合理的一种以达到最优目标的学科。

达到最优目标的方案称为最优方案。

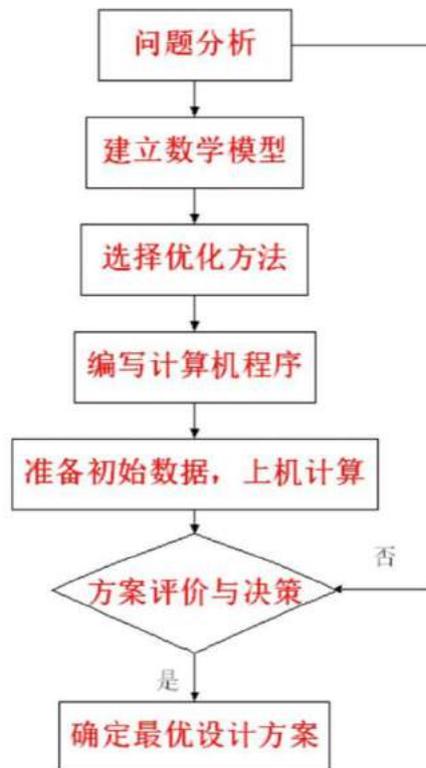
搜索最优方案的方法称为最优化方法。

这种方法的数学理论称为最优化理论。

7.4 工程问题优化设计的流程

下图描述了一般工程问题优化设计的主要流程：

图7.3 优化设计流程

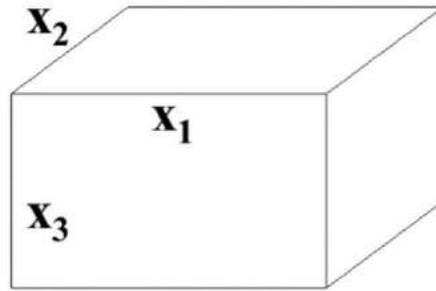


优化设计就是借助最优化数值计算方法与计算机技术，求取工程问题的最优设计方案。因而最先要做的就是如何把一个工程优化设计问题用数学的方法进行问题描述，形成数学模型，然后选用适当的一种最优化数值方法和计算程序运算求解，得到最优解，从而确定最优设计方案。

例1：箱盒的优化设计

已知：制造一体积为 100m^3 ，长度不小于 5m ，不带上盖的箱盒，试确定箱盒的长 x_1 ，宽 x_2 ，高 x_3 ，使箱盒用料最省。

图7.4 箱盒示意图



分析:

- (1) 箱盒的表面积的表达式;
- (2) 设计参数确定: 长 x_1 , 宽 x_2 , 高 x_3 ;
- (3) 设计约束条件:
 - (a) 体积要求;
 - (b) 长度要求;

数学模型:

设计参数: x_1, x_2, x_3

设计目标: $\min S = x_1x_2 + 2(x_2x_3 + x_1x_3)$

约束条件: $x_1 \geq 5$

$$x_2 \geq 0$$

$$x_3 \geq 0$$

$$x_1x_2x_3 = 100$$

例2: 最大产值生产资源分配问题

某工厂生产A和B两种产品, A产品单位价格为 P_A 万元, B产品单位价格为 P_B 万元。每生产一个单位A产品需消耗煤 a_C 吨, 电 a_E 度, 人工 a_L 个人日; 每生产一个单位B产品需消耗煤 b_C 吨, 电 b_E 度, 人工 b_L 个人日。现有可利用生产资源煤 C 吨, 电 E 度, 劳动力 L 个人日, 欲找出其最优分配方案, 使产值最大。

分析:

- (1) 产值的表达式;
- (2) 设计参数确定: A产品 x_A , B产品 x_B ;
- (3) 设计约束条件:
 - (a) 生产资源煤约束;
 - (b) 生产资源电约束;
 - (c) 生产资源劳动力约束;

数学模型:

设计参数: x_A, x_B

设计目标: $\max P = P_Ax_A + P_Bx_B$

约束条件: $a_Cx_A + b_Cx_B \leq C$

$$a_Ex_A + b_Ex_B \leq E$$

$$a_Lx_A + b_Lx_B \leq L$$

7.5 优化设计的数学模型

优化设计的数学模型是描述实际优化问题的设计内容、变量关系、有关设计条件和意图的数学表达式，它反映了物理现象各主要因素的内在联系，是进行优化设计的基础。

7.5.1 设计变量

一个设计方案可以用一组基本参数的数值来表示，这些基本参数可以是构件尺寸等几何量，也可以是质量等物理量，还可以是应力、变形等表示工作性能的导出量。

设计变量——在优化设计中，可以进行调整和优选的独立参数。

设计变量的全体实际上是一组变量，可用一个列向量表示。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

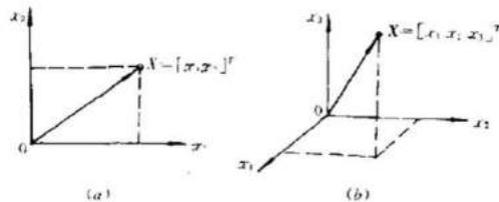
由 n 个设计变量 x_1, x_2, \dots, x_n 为坐标所组成的实空间称作设计空间。一个“设计”，可用设计空间中的一点表示。

设计变量的数目称为优化设计的维数，如 n 个设计变量，则称为 n 维设计问题。

按照产品设计变量的取值特点，设计变量可分为连续变量（例如轴径、轮廓尺寸等）和离散变量（例如各种标准规格等）。

只有两个设计变量的二维设计问题可下图所示的平面直角坐标表示；有三个设计变量的三维设计问题可用图7.5 (b) 所表示的空间直角坐标表示。

图7.5 设计变量所组成的设计空间



(a) 二维设计问题，(b) 三维设计问题

设计空间的维数表征设计的自由度，设计变量愈多，则设计的自由度愈大、可供选择的方案愈多，设计愈灵活，但难度亦愈大、求解亦愈复杂。

小型设计问题：一般含有2—10个设计变量；

中型设计问题：10—50个设计变量；

大型设计问题：50个以上的设计变量。

目前已能解决200个设计变量的大型最优化设计问题。

随着优化算法的不断改进和新算法的出现，理论上将更大型的问题如上千个设计变量也是有算法可以求解

的，但这还需要借助计算机硬件的性能，如高性能计算机，集群计算，并行计算等技术，使之可以求解更大规模的计算问题。

美国波音飞机公司对大型机翼用138个设计变量进行结构优化，使重量减少了三分之一；大型运输舰用10个变量进行优化设计，使成本降低约10%。

图7.6 波音飞机



实践证明，最优化设计是保证产品具有优良的性能，减轻自重或体积，降低产品成本的一种有效设计方法。同时也可使设计者从大量繁琐和重复的计算工作中解脱出来，使之有更多的精力从事创造性的设计，并大大提高设计效率。

如何选定设计变量？

任何一项产品，是众多设计变量标志结构尺寸的综合体。变量越多，可以淋漓尽致地描述产品结构，但会增加建模的难度和造成优化规模过大。所以选择设计变量时应注意以下几点：

(1) 抓主要，舍次要。

对产品性能和结构影响大的参数可取为设计变量，影响小的可先根据经验取为试探性的常量，有的甚至可以不考虑。

(2) 根据要解决设计问题的特殊性来选择设计变量。

例如，圆柱螺旋拉压弹簧的设计变量有4个，即钢丝直径 d ，弹簧中径 D ，工作圈数 n 和自由高度 H 。在设计中，将材料的许用剪切应力和剪切模量 G 等作为设计常量。在给定径向空间内设计弹簧，则可把弹簧中径 D 作为设计常量。

7.5.2 约束条件

设计空间是所有设计方案的集合，但这些设计方案有些是工程上所不能接受的。如一个设计满足所有对它提出的要求，就称为可行设计。

一个可行设计必须满足某些设计限制条件，这些限制条件称作约束条件，简称约束。

约束又可按其数学表达形式分成等式约束和不等式约束两种类型：

(1) 等式约束： $f(x)=0$

(2) 不等式约束： $f(x) \geq 0$

根据约束的性质可以把它们区分成：

性能约束——针对性能要求而提出的限制条件称作性能约束。例如，选择某些结构必须满足受力的强度、刚度或稳定性等要求；

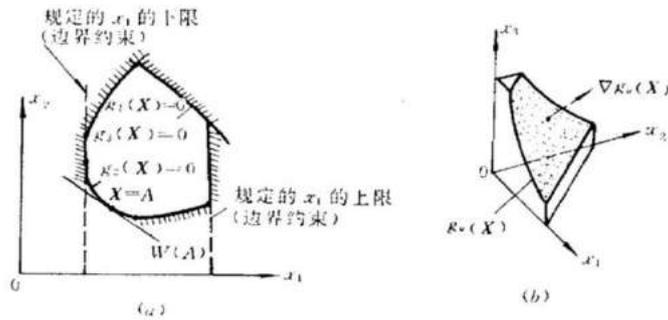
边界约束——只是对设计变量的取值范围加以限制的约束称作边界约束。例如，允许机床主轴选择的尺寸

范围，对轴段长度的限定范围就属于边界约束。

显式约束和隐式约束

约束函数有的可以表示成显式形式，即反映设计变量之间明显的函数关系，有的只能表示成隐式形式，如例中的复杂结构的性能约束函数（变形、应力、频率等），需要通过有限元等方法计算求得。

图7.7 设计空间中的约束面（或约束线）

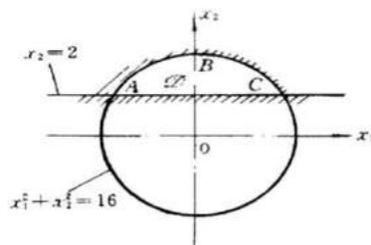


(a) 二变量设计空间中的约束线 (b) 三变量设计空间中的约束面

可行域：在设计空间中，满足所有约束条件的设计点所构成的空间。

例：满足两项约束条件 $g_1(X) = x_1^2 + x_2^2 - 16 \leq 0$ 和 $g_2(X) = 2 - x_2 \leq 0$ 的二维设计问题的可行域D。

图7.8 约束条件规定的可行域D



7.5.3 目标函数

为了对设计进行定量评价，必须构造包含设计变量的评价函数，它是优化的目标，称为目标函数，以 $F(X)$ 表示。

$$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

在优化过程中，通过设计变量的不断向 $F(X)$ 值改善的方向自动调整，最后求得 $F(X)$ 值最好或最满意的 X 值。在构造目标函数时，应注意目标函数必须包含全部设计变量，所有的设计变量必须包含在约束函数中。在机械设计中，可作为参考目标函数的有：

体积最小、重量最轻、效率最高、承载能力最大、结构运动精度最高、振幅或噪声最小、成本最低、耗能最小、动负荷最小等等。

在最优化设计问题中，可以只有一个目标函数，称为单目标函数。当在同一设计中要提出多个目标函数时，这种问题称为多目标函数的最优化问题。在一般的机械最优化设计中，多目标函数的情况较多。目标函数愈多，设计的综合效果愈好，但问题的求解亦愈复杂。

在实际工程设计问题中，常常会遇到在多目标函数的某些目标之间存在矛盾的情况，这就要求设计者正确处理各目标函数之间的关系。

目标函数等值（线）面：

目标函数是n维变量的函数，它的函数图像只能在n+1维空间中描述出来。为了在n维设计空间中反映目标函数的变化情况，常采用目标函数等值面的方法。

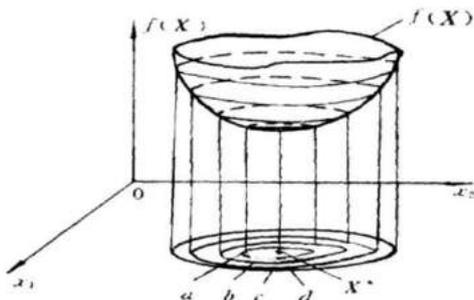
目标函数的等值面（线）数学表达式为：

$$F(x)=c$$

c为一系列常数，代表一族n维超曲面。如在二维设计空间中， $F(x_1, x_2)=c$ 代表x-x设计平面上的一族曲线。

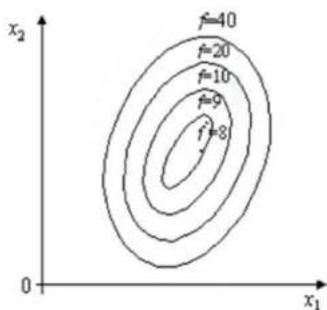
对于具有相等目标函数值的设计点构成的平面曲线或曲面称为等值线或等值面。

图7.9 等值线



上图表示目标函数 $f(X)$ 与两个设计变量 x_1, x_2 阶所构成的关系曲面上的等值线，它是由许多具有相等目标函数值的设计点所构成的平面曲线。当给目标函数以不同值时，可得到一系列的等值线，它们构成目标函数的等值线族。在极值处目标函数的等值线聚成一点，并位于等值线族的中心。当目标函数值的变化范围一定时，等值线愈稀疏说明目标函数值的变化愈平缓。利用等值线的概念可用几何图象形象地表现出目标函数的变化规律。

图7.10 等值线



如图7.10为函数 $F(x_1, x_2) = 60 - 10x_1 - 4x_2 + x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2$ 的等值线图。从等值线上，可以清楚地看到函数值的变化情况。其中 $F=40$ 的等值线就是使 $F(x_1, x_2)=40$ 的各点 $[x_1, x_2]^T$ 所组成的连线。

最优化设计的目标函数通常为求目标函数的最小值。若目标函数的最优点为可行域中的最大值时，则可看成是求 $[-F(X)]$ 的最小值，因为 $\min[-F(X)]$ 与 $\max F(X)$ 是等价的。当然，也可看成是求 $1/F(X)$ 的极小值。

对于复杂的问题，要建立能反映客观工程实际的、完善的数学模型往往会遇到很多困难，有时甚至比求解更为复杂。这时要抓住关键因素，适当忽略不重要的成分，使问题合理简化，以易于列出数学模型，这样不仅可节省时间，有时也会改善优化结果。

7.5.4 优化问题的基本求解方法

求解优化问题的基本解法有：

- (1) 解析法
- (2) 数值法

解析法：即利用数学分析(微分、变分等)的方法，根据函数(泛函)极值的必要条件和充分条件求出其最优解析解的求解方法。在目标函数比较简单时，求解还可以。

局限性：工程优化问题的目标函数和约束条件往往比较复杂，有时甚至还无法用数学方程描述，在这种情况下应用数学分析方法就会带来麻烦。

数值解法：这是一种数值近似计算方法，又称为数值迭代方法。它是根据目标函数的变化规律，以适当的步长沿着能使目标函数值下降的方向，逐步向目标函数值的最优点进行探索，逐步逼近到目标函数的最优点或直至达到最优点。数值解法(迭代法)是优化设计问题的基本解法。

最优化方法是与近代电子计算机的发展紧密相联系的，数值计算法比解析法更能适应电子计算机的工作特点，因为数值计算的迭代方法具有以下特点：

- 1) 是数值计算而不是数学分析方法；
- 2) 具有简单的逻辑结构并能进行反复的同样的算术计算；
- 3) 最后得出的是逼近精确解的近似解。

这些特点正与计算机的工作特点相一致。

数值迭代法的基本思路：是进行反复的数值计算，寻求目标函数值不断下降的可行计算点，直到最后获得足够精度的最优点。这种方法的求优过程大致可归纳为以下步骤：

- 1) 首先初选一个尽可能靠近最小点的初始点 $X(0)$ ，从 $X(0)$ 出发按照一定的原则寻找可行方向和初始步长，向前跨出一步达到 $X(1)$ 点；
- 2) 得到新点 $X(1)$ 后再选择一个新的使函数值迅速下降的方向及适当的步长，从 $X(1)$ 点出发再跨出一步，达到 $X(2)$ 点，并依此类推，一步一步地向前探索并重复数值计算，最终达到目标函数的最优点。

7.6 多学科优化介绍

多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, 简称MDO)是一种通过充分探索和利用工程系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的方法论。其主要思想是在复杂系统设计的整个过程中通过集成各个学科(子系统)的知识，应用有效的设计优化策略，组织和管理设计过程。其目的是通过充分利用各个学科(子系统)之间的相互作用所产生的协同效应，获得系统的整体最优解，通过实现并行设计，来缩短设计周期，从而使研制出的产品更具有竞争力。因此，MDO宗旨与现代制造技术中的并行工程思想不谋而合，它实际上是用优化原理为产品的全寿命周期设计提供一个理论基础和实施方法。

MDO研究内容包括三大方面：1，面向设计的各门学科分析方法和软件的集成；2，探索有效的MDO算法，实现多学科(子系统)并行设计，获得系统整体最优解；3，MDO分布式计算机网络环境。

多学科设计优化问题，在数学形式上可简单地表达为：

寻找： x

最小化: $f=f(x, y)$

约束: $h_i(x, y)=0 (i=1, 2, \dots, m)$ $g_j(x, y) \leq 0 (j=1, 2, \dots, n)$

其中: f 为目标函数; x 为设计变量; y 是状态变量; $h_i(x, y)$ 是等式约束; $g_j(x, y)$ 是不等式约束。状态变量 y , 约束 h_i 和 g_j 以及目标函数的计算涉及多门学科。对于非分层系统, 状态变量 y , 目标函数 f , 约束 h_i 和 g_j 的计算, 需多次迭代才能完成; 对于分层系统, 可按一定的顺序进行计算。这一计算步骤称为系统分析。

随着科学技术日新月异的发展, 我们的产品装备, 如飞机、汽车、电脑、手机等产品的各方面水平日益提高, 装备复杂程度已远超乎平常人的想象, 装备设计不单要用到大量的人力, 甚至已牵涉到了数多门学科。例如, 飞机设计中就包括了液压、传动、流体力学、计算流体力学、空气动力学、发动机、结构力学、传热学、热力学、自动控制、电子、软件、计算机、可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性等若干学科。随着时代的进步, 如今每个学科领域都形成了自己的一套研究方法与发展思路, 但显然各学科间明显缺乏沟通与联系, 形成了一个的“学科孤岛”。

近年来, 国外已经开始注意到这种“学科孤岛”现象, 从而开始了多学科优化设计方面的研究。就国外的研究现状而言, 目前已经实现了部分学科的综合优化设计, 并开发出了如Isight、OPTIMUS、ModelCenter等商业多学科优化软件。而国内也紧跟国际步伐, 开始了这方面的研究, 并在个别领域解决了优化算法的问题。

下面, 就多学科优化设计的目的、意义、算法、框架、所遇问题和解决方法、成果以及对多学科综合设计软件的介绍多个方面的内容对多学科优化设计方法进行综述。

7.6.1 多学科优化设计的目的和意义

进行多学科优化设计的主要目的有二: 一是将设计过程系统化, 即让参与整个系统设计的全部学科的人员都了解到其他学科的约束要求和优化目标, 使设计从一开始起就有全局观, 避免设计过程中由于互相之间不了解而造成设计撞车, 从而导致设计更改, 浪费时间与经费的现象发生; 二是使性能特性设计的过程中贯穿专门特性的设计, 即让传统的机、电、控制等设计专业在实现设计的过程中把可靠性、维修性、保障性、安全性、测试性这些专业结合起来, 把可靠性、维修性、保障性、安全性与测试性贯穿到整个系统设计过程中, 从而改变以往未把这些专门特性放在设计过程中进行考虑的现象。

多学科优化设计的意义主要表现在:

- (1) 通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应, 获得系统的整体最优解;
- (2) 通过实现并行计算和设计, 缩短设计周期;
- (3) 采用高精度的分析模型, 提高设计结果的可信度。

7.6.2 多学科优化设计算法

多学科优化设计有两大难点: 各分学科计算模型的多次迭代引起的计算复杂性和对各个学科之间的信息交换的组织和管理产生的信息交换复杂性。现在关于算法研究报告也不少, 总结起来, 主要的MDO算法有以下几种[2]:

(1) 单级优化

单级优化法是采用单学科优化的方法, 主要包括: 标准的系统级优化算法; 基于CSE 的单级优化算法; 一致性约束优化算法。在优化设计中各学科的分析计算只是被集合到一起形成系统性的分析, 通常所说的一体化设计都指这种算法。

(2) 序列优化

序列优化就是依次进行单学科优化, 计算系统性能, 然后循环, 直至收敛。在分析过程中各学科进行优化的目标函数按照对系统目标函数有利的原则选取。

(3) 并行子空间优化

并行子空间优化算法中系统的设计变量和状态变量被分配到各子空间, 大的优化问题被分为许多较小的优化问题, 而这些子空间优化问题均使用系统的约束条件和目标函数。目前主要包括: 基于敏感性分析的并行子空间优化算法; 改进的基于敏感性分析的CSSO 算法; 基于响应面的CSSO 算法。

(4) 协作优化

协作优化算法对每个子空间进行分析及优化设计, 且每个子空间进行设计优化时可暂不考虑其它子空间的影响, 只是满足本子系统的约束条件。并通过系统级优化协调各子系统设计优化结果之间的不协调性。通过系统级和子系统级之间的多次迭代计算实现一致性的最优设计。

(5) 多层递阶优化

多层递阶优化算法借用大系统控制理论的一些概念和方法对系统进行优化。这种方法具有较强的处理复杂的高阶多系统的综合能力。分级递阶的系统分解将子系统分为3 类: 顶层子系统、中间层子系统和底层子系统。系统运行按照从顶层到底层的次序, 逐层传达设计要求并进行各子系统的设计, 再逐层反馈信息, 根据下一层反馈的信息修改上一层的设计要求, 再次逐层优化直至收敛。

根据了解, 现在国内已经有人(例如西北工业大学的胡峪、李为吉等)在从事算法方面的详细研究, 并对协同优化算法、分级优化算法等有了较为详尽的方法论述。

7.6.3 多学科优化设计的框架

多学科优化设计(MDO)的计算框架可分为3 个层次:

第一层次是通用MDO计算框架, 如ModelCenter, iSIGHT, OPTIMUS等;

第二层次是针对某一特定MDO方法的计算框架, 如基于并行子空间优化的CSD框架, 基于协同优化的Caffe框架;

第三层次是基于某一MDO方法, 针对某类特定优化问题的计算框架, 如美国NASA针对高速民机初步设计问题开发的CJ0opt框架。

那么, MDO计算框架应具有如下特征和功能:

- (1) 易于实现各种MDO方法的表达方式;
- (2) 具有分布式计算环境的特征;
- (3) 能集成各学科的遗留程序和某些商用软件;
- (4) 提供优化算法库;
- (5) 支持代理模型的生成;
- (6) 支持并行计算;
- (7) 设计过程的可视化和监控;
- (8) 数据的存储、管理和提取;
- (9) 支持基于不确定性的设计优化;

7.6.4 多学科优化设计中的障碍及解决办法

多学科优化设计中遇到的主要问题包括：

(1) 各学科的研究人员都认为自己的设计工作最重要，不愿意与其他学科妥协，不能认识到多学科优化设计的重要性；

(2) 由于一个学科中的最优值有可能是另一学科中的最坏值，由此产生了如何协调各学科之间有依赖性的约束条件与优化目标的问题；

第一个问题主要是思想认识的问题，我们应当采取的办法是对多学科优化设计的普及知识教育，让参与工作的每一个员工都了解到实施多学科优化设计所能带来的诸多好处，包括设计周期的缩短和避免由各方之间设计冲突而造成的晚期设计更改等等，让参与工作的每一个员工都能产生全局观与系统观的概念，自主地参加到多学科优化设计工作中来。

第二个问题主要是技术方面的问题，涉及到决策论的应用。对于相互之间有依赖性的约束条件与优化目标，我们可以选取几个具有典型意义的测试点，进行多方案的计算与评估（评估指标可能是经济指标，也可能是技术指标），从而最终产生最优化的约束条件与优化目标组合。

7.6.5 多学科优化设计的成果

目前多学科优化设计的主要焦点集中在了各个方面：

(1) 飞行器空气动力与结构综合优化[3]

在飞行器设计中，空气动力和结构设计往往紧密地联系在一起。在传统的设计方法中，通常把空气动力和结构设计处理成两级优化的问题。也就是说，先对气动进行设计，再对其进行结构优化（先考虑气动设计的原因主要是基于结构设计费用远远低于气动设计）。那么，通过运用多学科优化设计，就可以将原本需要进行两次甚至多次的工作累积到一次设计中完成。这在提高设计效率和提高设计质量方面有重要意义。

空气动力优化一般用三维非线性模型进行而结构优化则用大型有限元模型。由于空气动力和结构间交互作用的非对称性，综合优化的重点在于改善空气动力模型。

南航的薛飞、余雄庆等人在《协同优化在机翼气动/结构一体化设计中初步应用》探讨协同优化方法是否能有效地解决机翼气动/结构一体化设计优化问题。研究表明，基本的协同优化算法不能有效地解决该机翼气动/结构一体化优化问题，而基于响应面的协同优化方法在求解这一问题时具有较好的鲁棒性。国防科大的何烈堂、曾庆华在《MAV 气动外形优化设计》一文中对微型飞机的气动和结构多学科综合设计也提出了类似的计算方法。

(2) 飞行器结构与主动控制同时优化[3]

在飞行器设计中，结构和主动控制也需要同时进行设计，原因是为了通过主动控制达到对结构的主动颤振抑制。传统的方法是顺序的，首先决定结构布局和横截面尺寸，然后添加一个控制系统来消除或减轻存在的不良性状[3]。顺序实践是不完善的，其不足可由结构和控制其性状的系统的同时优化来弥补。结构—控制综合优化典型地用一个复合目标函数，即结构质量和控制力的一个加权和，加权系数由主观判断确定。尽管如此，总可以在折衷方法下对机体质量和控制系统的质量进行权衡。

目前在这一方面的算法上还有争议，国际上从事这部分研究的人也不少。还有部分难题有待解决。

虽然现在从事多学科优化设计的人不少，但总的步伐还停留在上述几个方面。事实上，对于飞行器这样一

个复杂系统，实现全面的多学科优化还要走很长一段路，研究MDO 算法在飞行器设计中的应用研究还需在广度和深度上进一步发展。对于我们的专业而言，如何把可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性这五方面的专门特性的设计综合到性能设计当中也是值得考虑的关键问题之一。综上所述，多学科优化设计在武器装备研制过程中有着极其重要的意义，而目前在国内这方面的研究刚刚起步，因此，我们可以想象多学科优化设计在未来几十年中将大有作为。一方面，我们可以在优化算法上多做一些文章，使算法数据库得到充实；另一方面，可以进行框架设计研究，首先实现固有的框架设计，接着再在这之上对框架进行优化和分类，以突出个性，满足不同领域的需求。

（3）汽车设计中的减重优化

汽车行业也是一个激烈竞争的行业，如何设计出一款即有性能上的优势又能降低成本的车型，也是各汽车厂商追求的目标，在满足所有性能设计指标的条件下，汽车设计中还要关心碰撞安全指标，承载强度和刚度指标，疲劳寿命指标，噪声和舒适性指标，内外气动流场设计，发动机热设计等，也是一个学科繁多的复杂设计，在这么多学科设计中，减重也是各车厂特别关心的事情，如何在满足上述要求下，让整车的重量最轻，这也是各个整车厂要做的设计目标，这个正是多学科优化的典型案例。

实际上，优化技术和多学科优化技术，不仅是用在像飞机、汽车等复杂产品的设计中，也可以运用在简单零部件产品的设计中，运用优化技术寻找产品设计的最佳方案，应该是我们所有产品设计者不可缺少的方法。

参考文献：

- 1、《关于多学科设计优化计算框架的探讨》，余雄庆等，《机械科学与技术》，2004.3
- 2、《多学科优化设计在航空航天领域的应用及发展》，李哲，《航天返回与遥感》，2004.9
- 3、《飞机总体优化设计的新进展》，黄俊、武哲、孙惠中、吴炳麟，《航空学报》，2000.11

第8章

产品的可靠性 和稳健性设计

第8章

产品的可靠性和稳健性设计

8.1 稳健性概述

稳健性原是统计学中的一个专门术语，20世纪70年代初开始在控制理论的研究中流行起来，用以表征控制系统对特性或参数扰动的不敏感性。稳健性给经济管理、金融决策等方面的研究人员展现了工程领域是如何对模型误差、决策的稳健性等基本的定性叙述进行定量刻画的；它同时也告诉自动化和信号处理等领域的研究人员，在系统的可检测性等基本要求得不到满足时，怎样才能设计出好的决策规则。这种不同学科领域之间的实质性交融，是推动科学和技术发展的重要途径。

稳健性一词第一次出现在Box (1953)的文章中，这篇文章检验了均值和方差的假设，指出方差对偏离正态性的检验是不稳健的，均值的检验是稳健的。同时Box指出：研究稳健性标准是最重要的。术语“稳健性”并没有被官方正式的质量团体定义，但却被认为是一个非常重要的特性。在文献中，许多研究者早已讨论了这一问题，每个人都针对自己的领域提出了定义，在同一个领域内也可能变化。

有几个稳健性的传统定义：

- (1) 对实验条件微小的改变的抵抗能力，仅在实验室操作者或设备之间转换时可能发生；
- (2) 一个分析过程的稳健性是对参数中的变异转换时可能发生；
- (3) 一个分析过程的稳健性是对参数中的变异保持不受影响的能力的一种测量，并指出在正常应用条件下其可靠性即稳健性评价了一个方法抵抗在正常应用条件下变化的能力；
- (4) 一个过程的稳健性是指过程生产出具有一致性的良好产品的能力，在不可控的制造条件下对改变具有最小效应；
- (5) 一个方法的稳健性是在实验条件下对给出小的有意的变异所观察到的效应的水平，因而，稳健性应该视为在分析程序中所应用的实验优化的一个特性；
- (6) 在多元情况下，稳健性被视为模型的预测能力对外部因子(环境、设备以及抽样条件的变异)变化的敏感性；
- (7) 随着时间的变化产品所具有的稳定性的；
- (8) 稳健性是在所研究的优化域附近响应曲面上的信息特征；
- (9) 稳健性的概念是模型在小的扰动下保持稳定的能力；
- (10) Box从统计上给出了稳健的含义：即使过程在所基于的假设违背的条件下，仍能给出好的结果；统计分析的稳健性指的是优化设计对不符合规格的模型的敏感性，将稳健性作为对离群值估计的敏感性度量，因而稳健性出现在统计中提高了对离群值估计的抵抗能力；模型的稳健性指的是对统计假设(线性、正态、独立)不符合的非敏感性。

8.2 机械产品的可靠性稳健性设计

机械产品的可靠性稳健设计是在可靠性设计、优化设计、灵敏度设计和稳健设计的基础上进行可靠性稳健设计，把可靠性灵敏度融入优化设计模型之中，将可靠性稳健设计归结为满足可靠性要求的多目标优化设计问题。在机械产品的设计中，正确地应用可靠性稳健设计的方法，可以使产品在经受各种因素的干扰下，都能保持其可靠性的稳定，以使产品的可靠性对设计参数的变化不敏感，提高产品的安全可靠性和鲁棒性。稳健设计发展至今，其思想已发展为在满足系统性能优化，性能偏差最小化的同时，还必须满足优化设计中的性能优化，满足约束中稳健设计问题，即必须使得目标函数在满足约束条件的情况下，产品性能对设计变量发生扰动时并不敏感或敏感性很小。

以下为主要方法：

(1) 三次设计法

20世纪70年代，以日本田口玄一博士为首的一批研究人员，把由英国学者R. A. Fisher等为进行多因素的农田试验发展起来的试验技术引入日本。开发了应用正交表的技术，合理分析试验结果，创立了三次设计法。

三次设计即为：系统设计（第一次设计），参数设计（第二次设计），容差设计（第三次设计）。通过用正交表对设计参数及其所设定的容差大小安排进行试验，模拟设计参数和噪声参数对产品质量的干扰，并用望目损失函数的大小作为衡量产品质量特性的稳定性指标，以确定设计变量值及其容差的合理搭配，确保所生产的产品获得质量特性的稳定性。

特点如下：(1. a) 此法是以正交试验为基础，因而影响因素较多时其所需的试验次数较多，且由于其参数设计的因素组合是在已经确定的几个显著水平的组合，使得事先就必须要知道最优解的大致范围或水平（而这一点有时很难办到），故而试验成本可能较大。(1. b) 此法所处理的因素均假设为：正态分布、互相独立的离散变量，且涉及的变量数相对较少。(1. c) 相对来说此法步骤较繁琐且效率不是很高。

(2) 容差多面体法

容差多面体法是由Mihcael&siddall于1981年提出，他们根据所给变量加工公差越大时产品成本越低的指导思想，设定除设计变量具有公差外其余变量均认为纯理论值，即只考虑设计变量的容差而不考虑噪声因素变差的影响。特点如下：(2. a) 此法的优点可以求解有约束优化问题。(2. b) 此法比较适用于容差设计问题，尤其最坏情况的容差设计。(2. c) 由上述分析可知此法只考虑到了设计变量的变差而没有考虑到噪声变量的变差作用。

(3) 容差模型法

容差模型法又称变差传递法，他是由Pakrisnon等人于1993年提出的。由于产品的结构参数、物理或力学参数的设计值，与制造后和使用中的实际值肯定是有差异的，这种差异称为设计变量和噪声因素的变差。这种变差都会传递给设计函数（准则函数和约束函数）从而引起质量指标和约束的变差。其特点：(3. a) 此法不但比容差多面体法更接近实际，而且对田口方法而言，可以说是一个很好的数学表达。(3. b) 此法未能克服田口方法对变量要求服从正态分布的限制。

(4) 双响应曲面法

Myers和Carer在1973年提出了双响应曲面法。该法不使用田口方法中的信噪比和第二步优化概念，而是采用两个曲面来实现田口的目标，即一个曲面拟合质量特性的均值，另一个曲面拟合其方差。然后通过适当的试验设计，运用试验结果数据拟合出所要研究的质量特征值（即响应）的均值模型和方差模型。

(5) 随机模型法

它是将优化技术、概率论和数理统计、计算机技术，用于处理含有随机因素工程问题的一种方法。其主要考虑可控和不可控因素的随机性其特点：(5. a) 此法考虑了可控因素和不可控因素的随机性，故此法的实际意义较大。(5. b) 但此法中的随机模型的建立和计算都较复杂，在实际中往往不得不采用近似的数据或算法，从而降低了其计算结果的精度。

8.3 田口稳健性设计方法

田口稳健性设计方法 (TRD, Taguchi Robust Design, 以下简称田口方法) 是上世纪70年代由日本田口玄一博士创立的低成本、高效益的质量工程方法。田口方法不仅提倡充分利用廉价的元件来设计和制造出高品质的产品，而且使用先进的试验技术来降低设计试验费用，这也正是田口方法对传统思想的革命性改变，为企业增加效益指出了一个新方向。

田口博士把产品设计分为系统设计、参数设计和容差设计三个阶段，也称为三次设计。田口方法并不涉及系统设计，而是注重参数设计与容差设计，其核心是参数设计：

系统设计 (system design) 阶段，又称为概念设计 (concept design) 阶段，主要目的是寻找各种可能实现系统预期功能设计或技术。

参数设计 (parameter design) 阶段：以主动、积极方式对系统设计方案进行最优化，利用试验确定控制因子水平组合，使系统对噪音因子的敏感度最低，从而提升系统的稳健性。

容差设计 (tolerance design) 阶段：在参数设计阶段确定的最佳条件的基础上，确定各个参数合适的容差范围。容差设计是较被动的方式，它与制造成本有关，宽的容差常意味着低成本。

田口方法通过选择设计参数、确定正交表试验设计，以信噪比 (SN ratio) 为分析指标，实现减小目标值的变异 (即减小噪音因子对目标值的影响)，增强产品的稳健性，保证产品性能的稳健性、再现性。

田口方法具有以下特点：

基于质量损失函数评价质量特性；

通过信噪比 (SN ratio) 衡量稳健性；

通过田口正交表安排试验设计。

8.3.1 信号因子、控制因子和噪音因子

图8.1 P-diagram系统图



可用p-diagram系统图表明影响质量特性的参数可分为信号因子、控制因子和噪音因子三类。根据信号因子值的特点可以将系统分为如下两类：

当信号因子为一常数值时，称之为静态问题 (static problem)。

当信号因子非固定，则称之为动态问题（dynamic problem）。此时，设计人员希望系统响应按照预先设定的规则随信号因子水平的变化而变化。

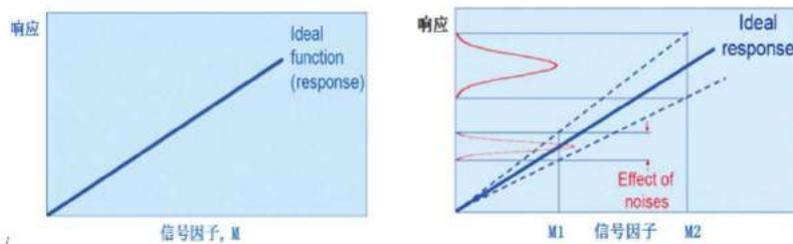
对于动态系统，信号因子（signal factors）由产品使用者或操作员所设定，以表达所想要的理想响应值。当响应的目标值改变时，可调整信号因子，使响应的平均值与目标理想值一致。以汽车转向系统为例，这是一个动态系统，其信号因子为驾驶员设定的转向角度，而系统的响应为实际的转向角度。

控制因子（control factors）是设计者可以控制的参数，其水准可由设计人员掌握且决定。稳健设计中设计人员必须通过搜索控制因子水平的不同组合，找到使响应对噪音因子导致的变化最不敏感的设计方案。一般来说，控制因子水准改变时，制造成本并不增加。

噪音因子（noise factors）是设计人员所无法控制的参数。凡是参数的水平不容易控制或必须花费高成本来控制的参数，皆可视为噪音因子。一般来说，噪音因子可归纳为三类：

- 环境噪音：比如环境温度、湿度，用户使用等；
- 制造噪音：比如产品间的变异、制造误差、零件间的波动等；
- 内部噪音：比如：材料老化、部件老化等。

图8.2 理想响应与实际响应



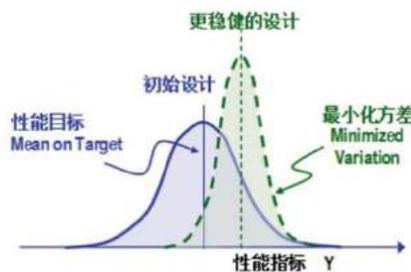
系统的响应由噪音因子和控制因子决定。对于动态系统，理想响应（ideal response）是噪音因子为零时系统的实际响应，它与信号因子（signal factor）之间呈线性关系。

8.3.2 稳健性设计

由于噪音因子的影响，系统实际响应与理想响应之间存在一定偏差。稳健性（robustness）也称鲁棒性，是指产品在受到干扰时仍能保持其设计性能的性质。为了提高产品稳健性，就要提高产品克服这些干扰因素影响的能力，使产品在不同的应用环境、条件下性能稳定。稳健设计的目标就是将实际响应尽量接近理想响应。

稳健性设计方法将噪音因子引入设计过程，通过最小化噪音因子的影响（“Minimize Variation”），求得“稳健的控制因子水平”，尽量保持系统性能（响应）接近理想响应（“Mean-on-Target”），以达到改善质量的目的。

图8.3 稳健性设计概念



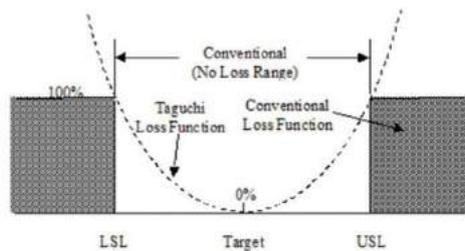
8.3.3 质量损失函数

与传统的质量定义不同，田口玄一博士将产品的质量定义为：产品出厂后避免对社会造成损失的特性。消费者是质量的最终决定者，他们会把对质量的满意度反应在市场上——质量差的产品或品牌会逐渐失去市场。当质量特性与消费者的期待（目标）一致时，消费者的不满意度是最低的（质量损失最小）；当质量特性开始偏离目标时，消费者的不满意度开始提高，质量损失开始增加。因此，对产品质量的如下表述可以认为是等价的：

- 1) 质量很好
- 2) 社会对它所付出的代价很小
- 3) 质量损失很小
- 4) 消费者满意度很高
- 5) 消费者不满意度很低

为了定量描述产品质量损失，田口提出了“质量损失函数”的概念。假设当质量特性 y 偏离目标 m 时，质量损失是以二次曲线的速度增加： $L(y)=k(y-m)^2$ 。

图8.4 质量损失函数



信噪比（Signal-to-Noise ratio，简称SN比）是田口方法中用来衡量产品稳健性的指标，表示系统响应偏离理想响应的程度。SN比愈高表示损失愈少，系统具有更高的稳健性。

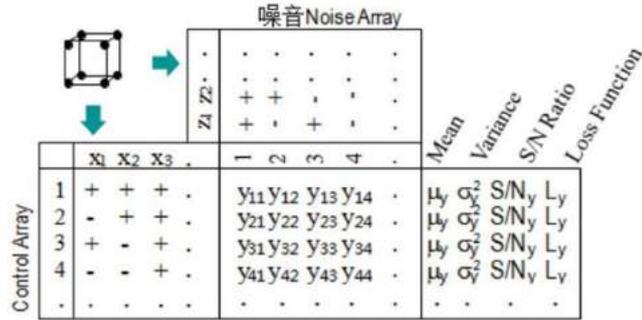
在决定了最优条件及其对应的预测值后，田口博士建议在最优参数下进行一次确认试验（confirmation experiment），然后把观测到的SN比与所预测的SN比做比较。如果两者非常接近，说明因子间交互效应可以忽略，因子效应是可以叠加的，因而，因子效应的估计是可靠的、结论的再现性良好。反之，如果两者相差很多，那么因子间可能存有强烈交互作用，对因子效应的估计是不可靠的。

8.4 稳健性设计算法介绍

8.4.1 正交表的构造

田口方法进行参数设计的思想基于正交试验，借助内外表安排可控因素和不可控因素，控制因子的最优水平组合，通过最大化信噪比来评价质量对随机波动的敏感性（如图8-5所示）。

图8.5 田口方法的正交试验表



基本步骤包括:

定义试验计划的意图和目标, 选定质量特性;

建立系统模型, 定义输入因子、信号因子和输出响应; 定义质量特性的理想响应 (ideal function / response);

定义所有控制因子, 选择关键控制因子和水平。选择正交表, 指定控制因子到正交表中;

定义所有噪音因子, 选择关键噪音因子及水平;

对于动态问题, 定义信号因子水平和范围;

执行试验计划, 搜集数据; 对于动态问题, 在每一个信号因子水平处, 都要对每一个控制因子的组合执行噪音因子的试验计划;

数据分析:

对于静态系统, 计算信噪比 (SN ratio)

对于动态系统, 计算动态信噪比 (Dynamic SN ratio)、灵敏度 ()

求出要因效果表/图 (response table/graph)

通过执行两阶段优化, 确定控制因子最优水平组合, 最大化 (动态) 信噪比;

执行确认试验;

汇总结果形成设计报告。

8.4.2 静态特性评价指标

望大特性 (larger-the-better, LTB) 是指质量特性y愈大愈好。

望大特性SN比计算公式为: $SN = h = -10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}$

望大特性质量损失计算公式为: $L(y) = k(\frac{1}{y})^2, \quad y \geq 0$

图8.6 望大特性

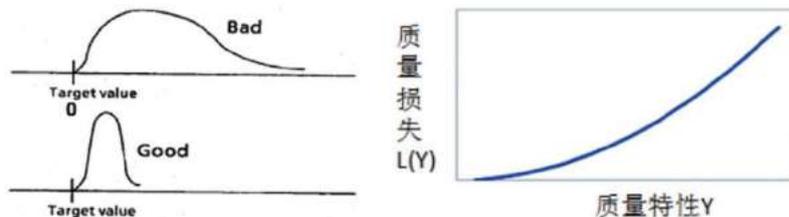


望小特性 (smaller-the-better, STB) 指: 非负值的质量特性y愈小愈好, y的理想值为0。

望小特性SN比计算公式为: $SN_{STB} = h - 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}$

望小特性质量损失计算公式为: $L(Y) = ky^2, y \geq 0$

图8.7 望小特性

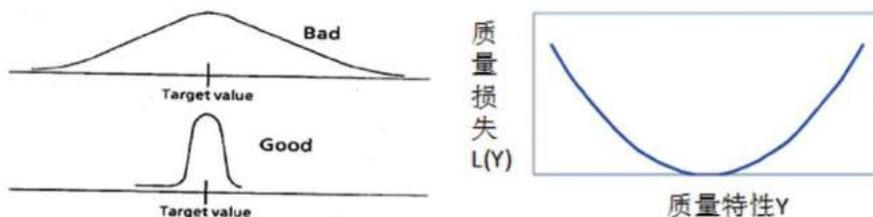


望目特性 (nominal-the-best, NTB) 指质量特性y具有目标值。采用二阶段优化方法 (two-step optimization): 第一步、通过SN响应表求得“稳健的控制因子水平”, 以最小化噪音因子的影响 (“Minimize Variation”); 第二步、找到关键控制因子, 调整平均值, 尽量保持系统性能 (响应) 接近理想响应 (“Mean-on-Target”), 以达到改善质量的目的。

望目特性SN比计算公式为: $SN_{NTB} = h - 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}^2 + \sum_{i=1}^n s_i^2}{n}$

望目特性损失计算公式为: $L(y) = k(y-m)^2$

图8.8 望目特性

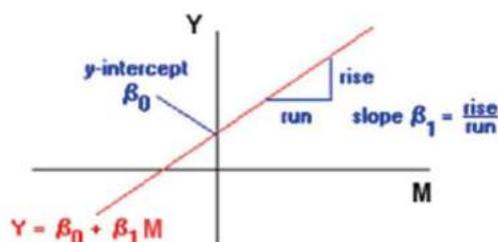


8.4.3 动态特性评价指标

动态信噪比 (Dynamic Signal-to-Noise Ratio) 用于衡量动态系统的信号因子与响应的线性关系、以及偏离线性拟合的变异度。动态信噪比可以通过对每一个试验设计方案 (由控制因子决定) 引入噪音因子的变异影响, 通过计算信号因子和系统响应的关系求出。

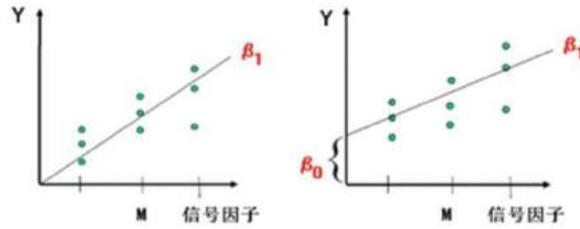
对动态系统, 信号因子与系统响应的线性关系, 可以通过线性回归进行表示: $Y_i = b_0 + b_1 M + e_i$, 其中 b_0 为截距 (intercept), b_1 为直线的斜率即灵敏度 (sensitivity), M 为信号因子, Y 为响应, e_i 为误差。

图8.9 动态特性的线性回归



当截距 b_0 为0时，信号因子与响应的关系为零点比例关系（Zero Point Proportional），信号响应线通过零点，比如：体重秤初始点输出必然是0；当截距 b_0 不为0时，信号因子与响应的关系为参考点比例关系（Reference Point Proportional），如图8-10，信号响应线通过一个已知的参考点，比如：烤箱的初始温度设置必然不为0。

图8.10 （左）零点比例关系 （右）参考点比例关系



敏感度计算公式为：
$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i M_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_i^2}$$

误差均方计算公式为：
$$s_e^2 = \frac{1}{nn-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{ij} - bM_i)^2$$

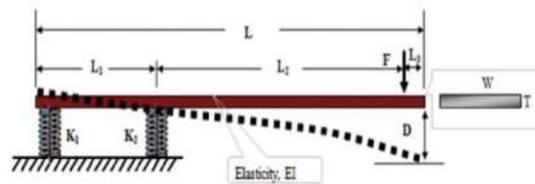
动态信噪比SN计算公式为：
$$SN = h = 10 \log_{10} \frac{b^2}{s_e^2}$$

8.5 案例介绍

8.5.1 问题描述

考虑弹簧和悬臂梁组成的跳板：

图8.11 跳板



控制因子：

- 悬臂梁长度BoardLength
- 悬臂梁宽度BoardWidth
- 悬臂梁厚度BoardThickness
- 线性弹簧刚度SpringConstantK1、SpringConstantK2
- 弹性模量ModulusOfElasticity
- 作用力Force

噪声因子：

- 作用力位置ForcePosition
- 材料特性不确定性MaterialVariation
- 作用力效果ImpactForceAffect

信号因子:

支撑点位置SupportPosition

系统响应:

变形量Deflection, 望大特性(Higher is Better)

8.5.2 稳健性设计

设置控制因子(Control Factors):

悬臂梁长度BoardLength, Levels = 114.0, 126.0

悬臂梁宽度BoardWidth, Levels =18.0, 24.0

悬臂梁厚度BoardThickness, Levels = 1.5, 2.0

线性弹簧刚度SpringConstantK1、SpringConstantK2, Levels = 1200.0, 1800.0

弹性模量ModulusOfElasticity, Levels =750000.0, 1250000.0

作用力Force, Levels =150.0, 200.0

设置噪音因子 (Noise):

作用力位置ForcePosition, Levels = 0.0, 10.0

材料特性不确定性MaterialVariation, Levels= -15.0 , 15.0

作用力效果ImpactForceAffect, , Levels= 50.0, 100.0

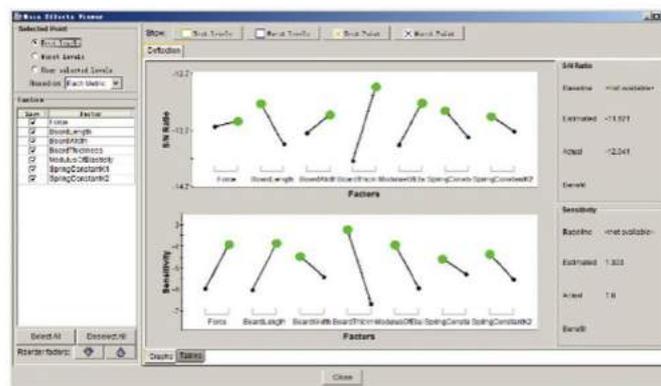
设置信号因子 (Signal):

支撑点位置SupportPosition, Level= 24.0, 30.0, 40.0

设置系统响应 (Response):

Deflection 变形为响应, 设置 **【Type】** 为望大特性 (Higher is Better), 动态系统特性为线性 (General Linear Equation)。

图8.12 主效应浏览器



1) 在主效应浏览器的中央区域按照信噪比S/N Ratio和敏感度Sensitivity两个方面显示了所有控制因子对响应(Deflection)的主效应, 用户可以据此认识关键控制因子和敏感度。

2) 可以估计最佳的稳健性设计方案: 从左上方**【Selection Points】**的复选框中选择**【Best Levels】**。

3) 可以对估计的稳健设计方案进行验证: 从右侧的**【S/N Ratio】**和**【Sensitivity】**框中点击**【Execute】**执行一次验证计算即可。

经过几十年的迅猛发展，可靠性稳健性技术已进入了一个崭新的阶段，其研究已遍及电子、机械、化工、自动化及航空、航天等领域。从最复杂的宇宙飞船到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车以及到细小的可置于人体内的心脏起搏器，都应用了可靠性稳健性技术。产品的可靠性稳健性已成为衡量产品质量的重要指标之一。随着可靠性稳健性技术的发展，应用可靠性稳健性技术的方法和手段也层出不穷，引起了各国学者的极大关注。

参考文献：

[1]邱继伟, 张瑞军, 丛东升, 郭楠. 机械零件可靠性设计理论与方法研究[J]. 工程设计学报, 2011, 18 (06) : 401-406+411.

[2]张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (14) : 167-188. [3]周峰. 机械稳健可靠性优化设计[D]. 太原科技大学, 2011.

第9章

材料加工工艺仿真

第9章

材料加工工艺仿真

产品设计不仅要满足其使用性能要求，还要具有可制造性。产品具有良好的可制造性，可以降低生产成本，可以保证产品质量。材料加工工艺仿真可以有效地验证和优化产品可制造性。

9.1 概述

产品的种类很多，材料的种类也很多，因此把材料加工制造成产品的工艺种类也很多。如果按照加工过程中所用能量来分类，那么加工分为机械加工和特种加工。特种加工是除了单独利用机械能进行加工以外的所有加工方法的总称，它可以利用电能、热能、流体能、光能、声能、化学能及机械能等。

机械加工包括切削和成形等，特种加工包括电火花加工、电化学加工、高能束加工等，增材加工的3D打印就属于特种加工。特种加工在加工机理和加工形式上与传统切削和成形加工有着本质的区别。

当前材料加工工艺仿真主要是以力学和传热学原理为基础，对加工过程中材料的变形、应力以及温度进行仿真计算。本章重点介绍机械加工的工艺仿真。

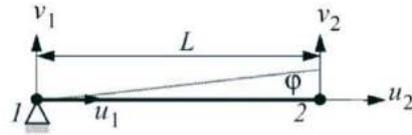
9.2 工艺仿真建模

材料加工过程是刀具或模具等工具与材料相互作用下获得所需要的材料几何形状和尺寸的过程，所以工艺仿真模型应该能够准确表达材料、工具以及它们之间的相互作用，从而准确描述材料和工具在加工过程中的力学行为，准确预测产品的加工质量。

从力学分析的角度讲，参与加工过程的材料和工具的变形位移和应变不再是线性关系，这称为几何非线性；材料，特殊情况下工具也可能发生，应力和应变不再是线性关系，这称为材料非线性；材料和工具相互作用而产生的接触关系，称为边界非线性。所以，材料加工工艺仿真是一个复杂的非线性力学问题。

9.2.1 几何非线性

几何非线性包括大变形、大位移问题。如果是小变形，但存在大位移，也是几何非线性问题。通常采用的工程应变适用于小变形小位移的情况如图9-1，几何非线性情况则需要采用对数应变也称为真应变。



$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \begin{bmatrix} -1/L & 0 & 1/L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{u_2}{L}$$

工程应变定义为

$$\epsilon_x = du/dx$$

考虑微小的刚体转动，

$$u_2 \approx 0, v_2 \approx \phi L$$

由于 ϕ 值较小 ($\tan(\phi) \approx \phi$),

$$\epsilon_x \approx u_2/L \approx 0$$

$$\epsilon_y \approx v_2/L = \phi L/L = \phi \approx 0$$

对于任意刚体转动，

$$u_2 \approx L(\cos \phi - 1), v_2 \approx L \sin \phi$$

则有

$$\epsilon_x \approx \cos \phi - 1 \approx -\phi^2/2$$

$$\epsilon_y \approx \sin \phi \approx \phi$$

可见，按照工程应变计算，刚体转动产生非零应变。

工程应变 Engineering (infinitesimal) strain = $\epsilon_E = (L - L_0)/L_0$

- 工程应变和工程应力相对应；
- 它只适用于小变形小应变的情况。

对数应变 Logarithmic (natural) strain = $\epsilon_L = dL/L = \ln(L/L_0)$

- 对数应变和柯西 (Cauchy) 应力相对应；
- 它适用于大变形大应变的情况。

工程应变和对数应变的关系如下：

$$\epsilon_L = \ln(1 + \epsilon_E)$$

如果应变很小 (例如 <3-4%)，那么不同的应变/应力度量方法会得到一样的结果。

工程应力 Engineering (nominal, conventional) = $\sigma_E = F/A_0$

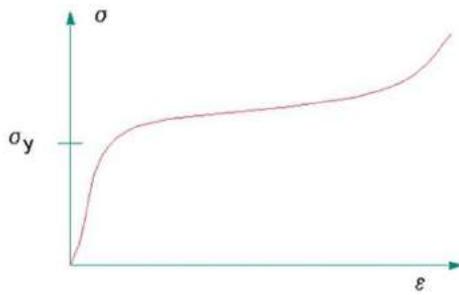
- 根据变形前的面积和几何尺寸计算

柯西应力 Cauchy (true) stress = $\sigma_C = F/A$

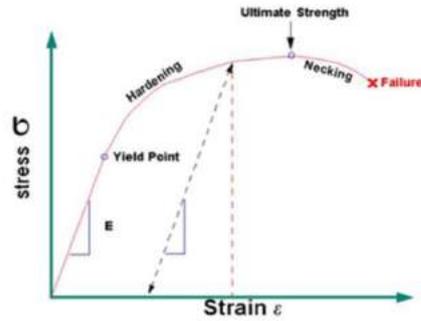
- 根据变形后当前的面积和几何尺寸计算

9.2.2 材料非线性

材料非线性，也就是应力与应变为非线性的关系，如橡胶是非线性弹性材料如图9-2，金属是非线性弹塑性材料如图9-3。



Uni-axial stress strain curve



9.2.3 接触

加工过程中材料和工具通过接触而相互作用，接触在仿真模型中定义为不等式约束，称为边界非线性。

接触定义有点对点接触和体对体接触。点对点接触，采用间隙单元 (GAP)，假定接触点的切向位移是小位移，接触存在于选定的两点之间。

体对体接触，则不需要定义接触单元，接触体之间的运动可以是任意的，可以是两体或多体接触。接触体可以是弹性体也可以是刚性体。刚性体假定是不可变形的，也就是没有应力存在，但是可以传热，有温度。

接触体之间相互运动，会存在摩擦，摩擦模型常用的有库伦摩擦和剪切摩擦。如果考虑静摩擦，可以采用粘-滑模型 (“Stick-slip” model)。

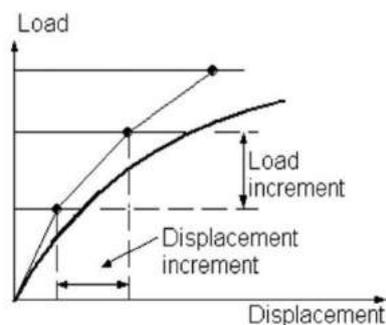
9.3 工艺仿真计算方法

9.3.1 迭代计算

材料加工工艺仿真是非线性问题，非线性问题的计算结果与加载路径有关，非线性问题加载通常采用增量法，在每个增量加载步内再进行迭代计算。

首先看单纯的增量加载计算，如图9-4所示，最后计算结果会偏离真实的平衡位置。

图9-4 增量加载



单纯增量算法:

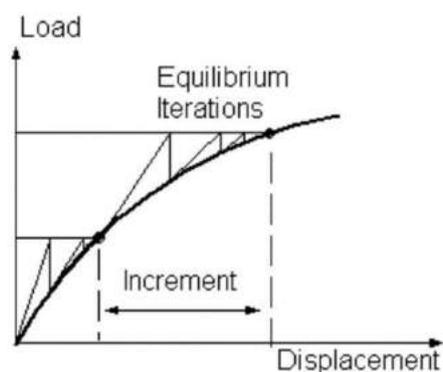
- 增量加载
- 没有迭代修正
- 基于增量步估计残余量
- 路径历程
- 每个增量步更新刚度
- 会从真实平衡位置发生漂移

为了使计算结果与真实的平衡位置相一致,需要在每个增量加载步内进行迭代计算,直到收敛于真值,如图9-5所示。

增量迭代算法:

- 增量加载
- 迭代修正直到收敛于增量步平衡位置
- 路径历程
- 每个增量步或迭代步更新刚度矩阵
- 牛顿-拉普森法

图9-5 迭代计算



9.3.2 牛顿-拉普森迭代法

计算过程中,需要求解如下方程:

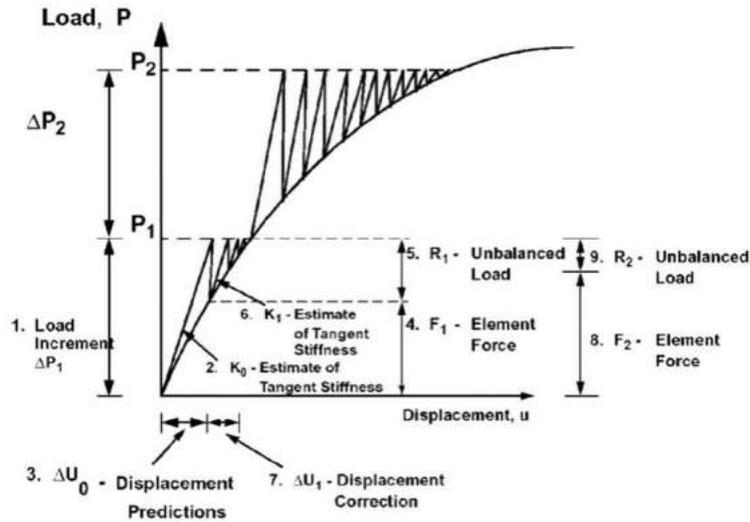
$$[K] \{a\} - \{F\} = 0 \quad \text{or} \quad \{I\} - \{F\} = 0$$

目的是让内力 $\{I\}$ 和外力 $\{F\}$ 达到平衡。

线性分析中,平衡方程的求解可以用如高斯消去法在一步完成。然而在非线性分析中,刚度和外力都有可能是位移的函数。求解这样的非线性方程组,可以使用牛顿-拉普森法,这是一个增量迭代方法。

$$I(a) - F(a) = 0$$

图9-6 牛顿-拉普森迭代法



算法:

- 1) 沿着平衡路径，确定一个增量（外力，位移，或者弧长）
- 2) 计算切向刚度矩阵
- 3) 通过求解平衡方程计算位移增量
- 4) 根据位移计算单元力
- 5) 计算单元力与外力的不平衡量，检查是否收敛。如果收敛，转到第一步；如果不收敛，继续下一步
- 6) 计算切向刚度矩阵
- 7) 计算不平衡力产生的位移增量
- 8) 计算单元力
- 9) 计算不平衡力，检查是否收敛。如果收敛，转到第一步；如果不收敛，转到第六步。

第一到第五步，称为加载阶段或预测阶段

第六到第九步，称为修正或迭代阶段

ΔP_1 和 ΔP_2 不必相等

K_0 和 K_1 不必相等

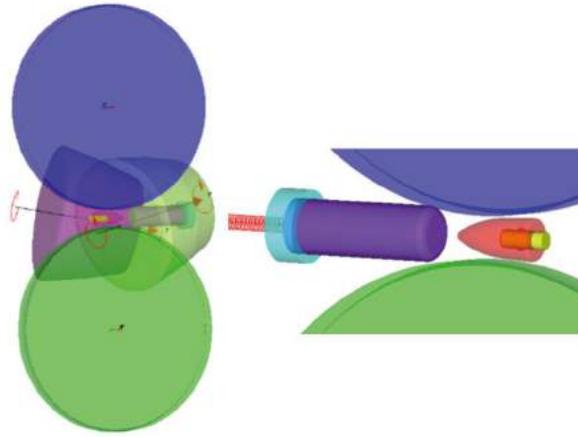
9.4 无缝钢管斜轧穿孔仿真

钢管穿孔，是实心圆坯在高温下经由二辊斜轧，并在顶头和导盘作用下，穿孔形成毛管。可见，钢管穿孔过程，涉及金属材料流动变形、管坯与工具的相互作用、以及热耦合作用。所以，从仿真计算的角度讲，钢管穿孔过程是一个高度复杂的非线性热力耦合问题，包括金属塑性变形的材料非线性、材料流动大变形的几何非线性、管坯与工具相互作用的接触非线性。

9.4.1 斜轧穿孔有限元仿真建模

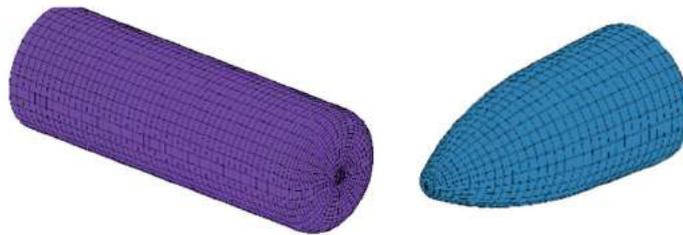
如图9-7所示为本仿真三维几何模型示意图，几何模型主要有轧辊、导盘、顶头、管坯、推料小车及顶头固定轴承（支撑顶头）组成。推料小车仅用于辅助计算，不影响管坯穿孔过程。

图9-7 斜轧穿孔几何模型示意图



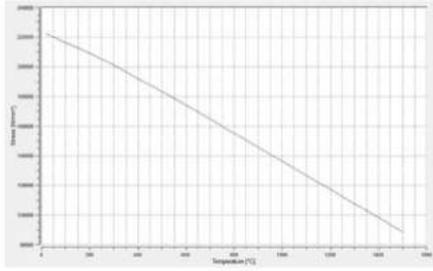
仿真计算中管坯和顶头设置为弹性体，其有限元网格如图9-8所示，轧辊和导盘等部件则设置为刚性体。轧辊和导盘按照设定的转速主动旋转，顶头在管坯的摩擦力带动下自由旋转，固定轴承对顶头起到支撑作用。推料小车定义固定力辅助管坯咬入。

图9-8 管坯和顶头的有限元网格

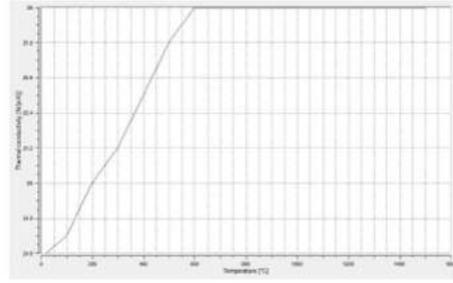


管坯的材料牌号为X20Cr13，计算所用的相关材料属性如图9-9示。顶头的材料牌号为X54NiCrMoW4，计算所用的相关材料属性如图9-10示。考虑了温度和应变率对材料参数的影响。管坯和顶头材料的热物理性能（热传导系数、热容和热膨胀系数）是随着温度变化的，变形抗力是热力学参数（变形程度、变形速度和变形温度）的函数。

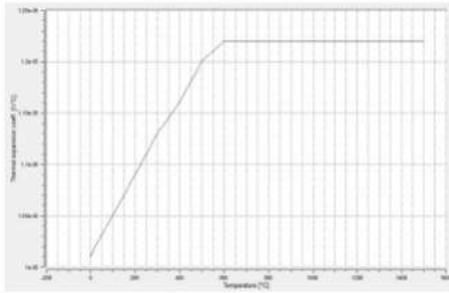
图9-9 管坯材料模型参数



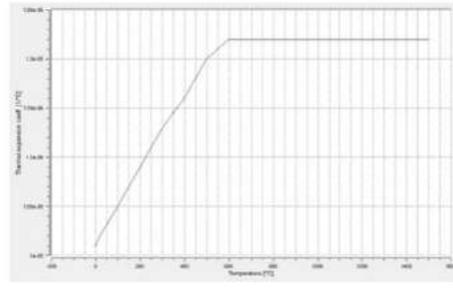
杨氏模量



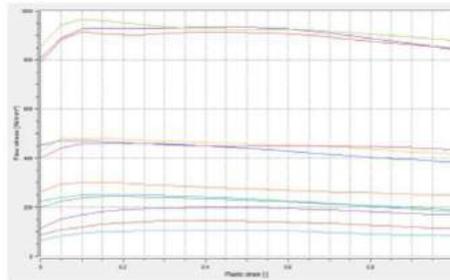
热传导系数



比热容

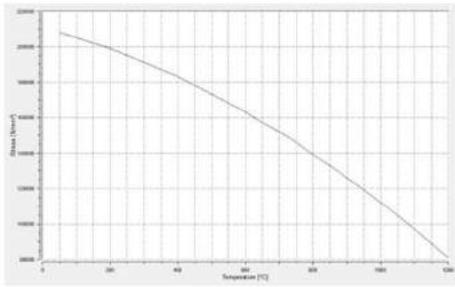


热膨胀系数

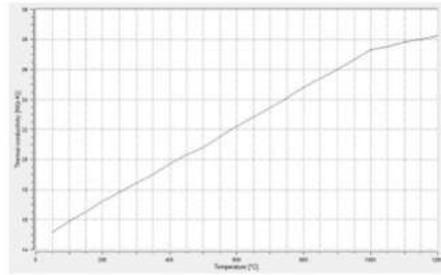


流变应力曲线

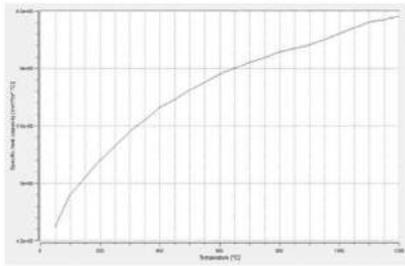
图9-10 顶头材料模型参数



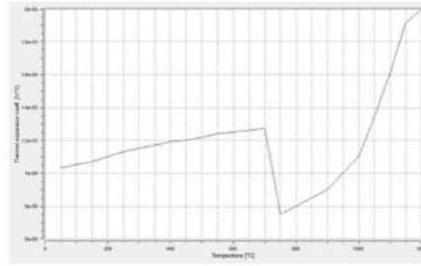
杨氏模量



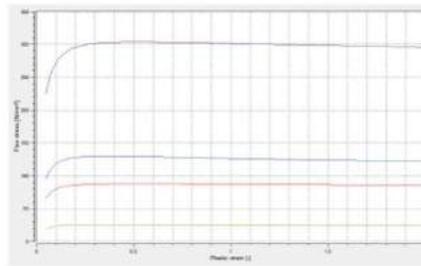
热传导系数



比热容



热膨胀系数



流变应力曲线

假定轧辊、导盘、顶头与管坯的接触表面遵循库仑摩擦定律。轧辊与管坯的摩擦系数为0.45，导盘与管坯之间的摩擦系数为0.3，顶头与管坯之间的摩擦系数为0.3。

顶头和管坯本身会由于塑性变形以及摩擦产生热量而导致温升。假定塑性功和摩擦功的90%转化为热量。

轧辊和导盘均视为恒温刚性体，表面温度为150℃。顶头的初始温度设为20℃，管坯开轧温度设为1200℃。

轧件的自由表面存在与周围环境的对流和辐射换热。考虑轧件与周围环境的辐射和对流传热，热交换系数为0.2kW/(m²·℃)，环境温度50℃。

管坯与轧辊、导盘以及顶头接触时存在接触传热。工件与轧辊、工件与导盘、工件与顶头接触传热系数，均取为20kW/(m²·℃)。

9.4.2 斜轧穿孔有限元仿真结果

如图9-11所示为二辊斜轧穿孔过程仿真结果，图中为了显示而隐藏了一个轧辊。

图9-11 穿孔过程仿真

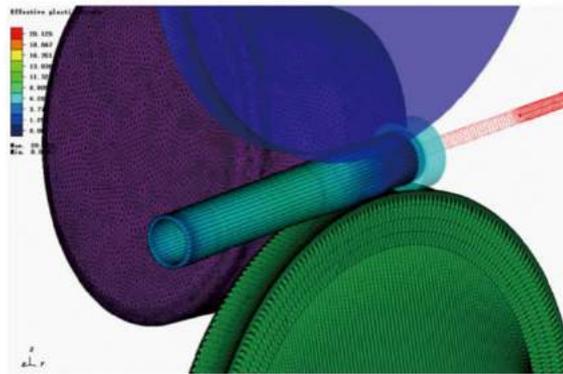


图9-12 穿孔过程中材料流动

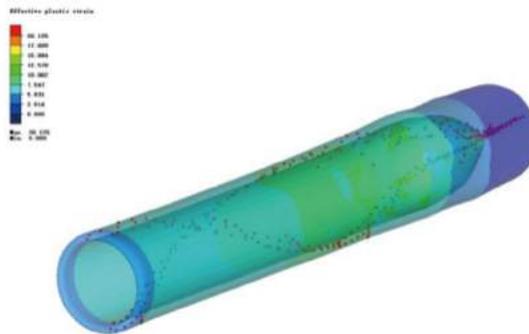


图9-13 轧辊平面轧件剖面图



图9-14 导盘平面轧件剖面图

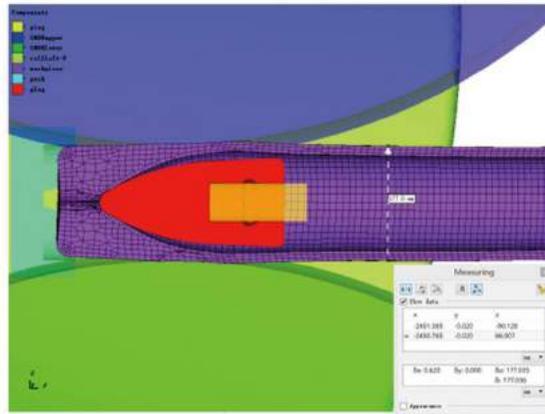


图9-15 穿孔过程中轧件纵向不同位置横截面图

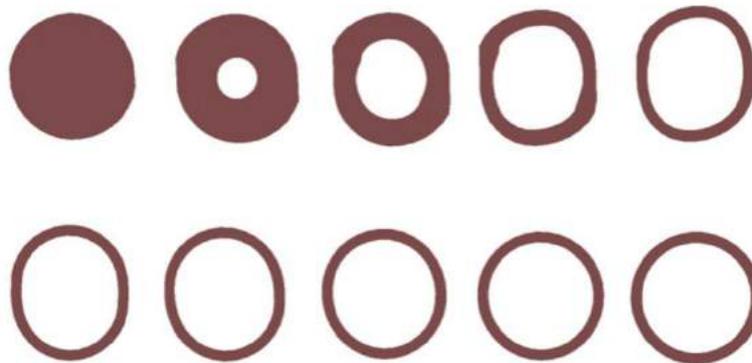


图9-16 顶头温度分布

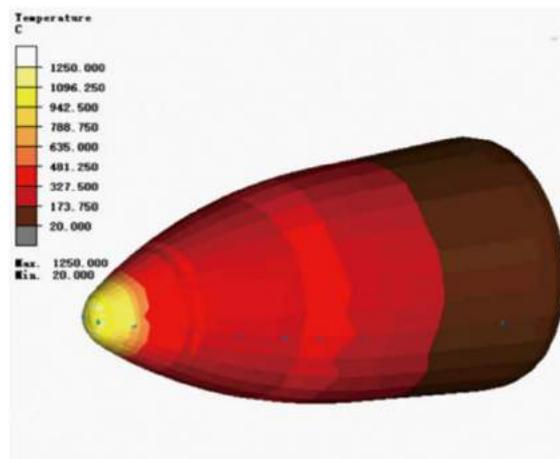


图9-17 顶头温度分布剖面图

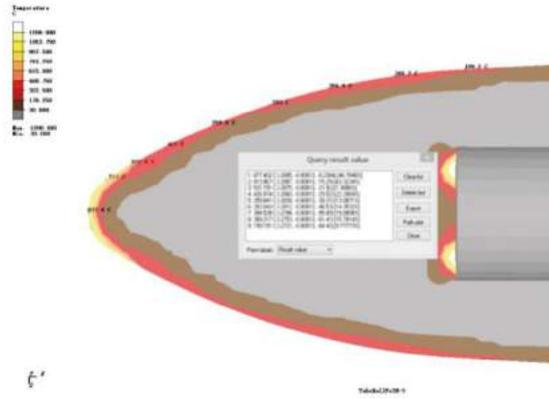


图9-18 顶头接触应力

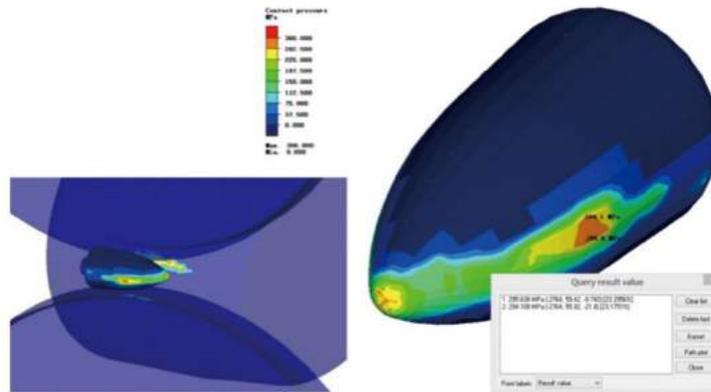
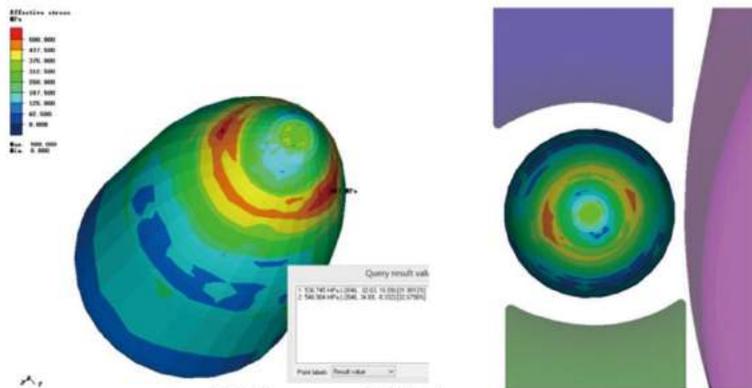


图9-19 顶头等效应力



第10章

企业产品数字化

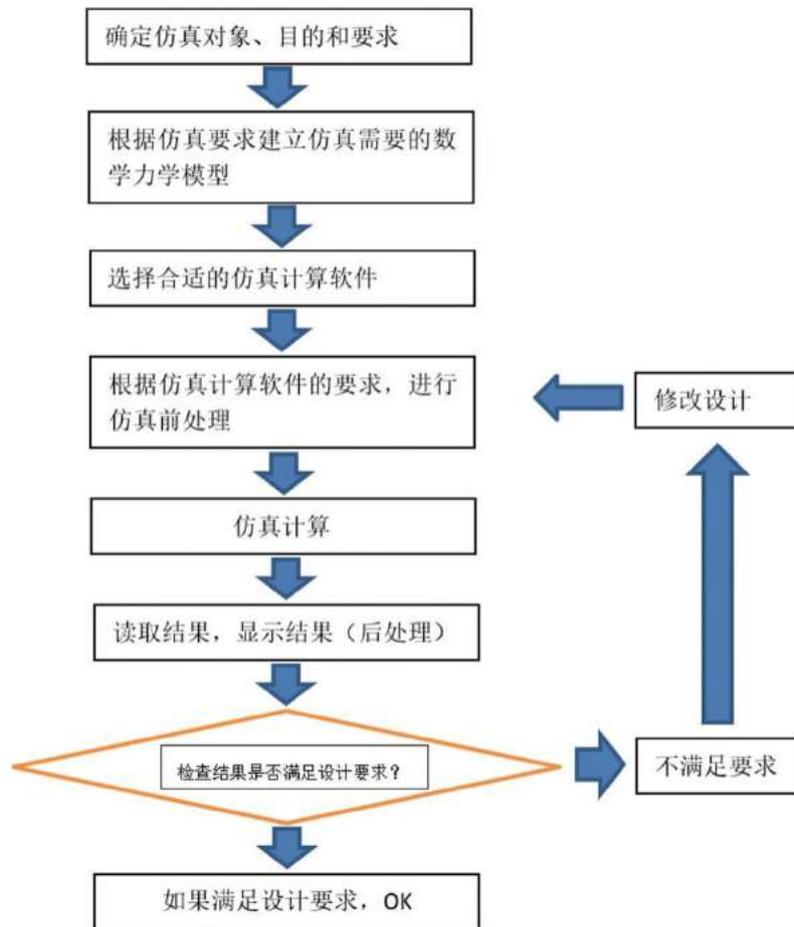
虚拟试验规范的建立

第10章

企业产品数字化虚拟试验规范的建立

10.1 仿真流程概述

通过前些章节的学习，我们总结下来要做一个完整的虚拟仿真，主要是由如下几个阶段构成：



10.2 仿真结果的校核

仿真前处理包含以下各个步骤：

- 1) 产品CAD模型的导入
- 2) CAD模型的简化和修补
- 3) CAE网格的划分
- 4) 材料参数的赋值
- 5) 约束条件、边界条件、连结关系的设置

6) 载荷条件的设置

通过上述前处理步骤就可以生成可以进行仿真计算的模型，实施仿真计算后再通过仿真软件进行仿真结果后处理，读取需要的结果。

当我们读取结果后，如何判断这些结果是正确可靠的？我们首先要做的是仿真结果与试验的对标校核。

由于模型的简化和以上各步骤的设置简化，我们要检查这些简化后的计算结果与试验结果的误差是多少？并确信这些仿真简化是正确的，结果也是可信的。

10.3 VV&A的基本概念

仿真的重要作用就在于其通过数字化建模，可以在实际样机还没有的情况下，对产品进行设计后的虚拟验证，这样就可大大节约样机制作成本，并可在样机出来之前进行大量的数字化仿真验证，修改设计，找到最佳设计方案。

那么关键你所建立的数字化模型通过数学和力学简化以后，是否真正代表了我们要设计的模型，其所计算的可信度如何，这也是大家非常关心的问题。为保证和验证模型的正确性，国际上提出了建模和仿真的校核、验证与确认的概念，英文是：Verification, Validation and Accreditation，简称VV&A概念。

这个概念最早是在系统仿真建模时提出来的，对于系统仿真来说，其建模都是以0维或1维方式体现出来，根本还没有3维模型，那这种建模后的仿真是否真正体现出3维设计产品的功能和性能，确实需要一个验证体系和方法来确认。同样，对于3维设计和仿真来说，在建模过程中，也存在许多简化和假设，这样，同样需要通过VV&A的过程，来证明建模和仿真的正确性和可信性。

校核 (verification)、验证 (validation) 与确认 (accreditation) 的字面意义非常接近，但在仿真系统它们的含义有所区别。

校核是用来确定仿真系统是否准确地代表了产品设计者的概念描述和设计的过程。校核关心“是否正确地建立模型及仿真系统 (building the model right)”的问题，即关心“设计人员是否将问题的陈述转化为模型阐述，是否按照仿真系统应用目标和功能需求的要求正确地设计出仿真系统的模型，仿真软件开发人员是否按照设计人员提供的仿真模型正确地实现了模型。从我们3维设计和数字仿真来说，就是我们的模型简化是否合理？即选用什么样的计算软件？（静力学问题、动力学问题、非线性问题、热问题、电磁场问题等等），采用什么类型的单元？（实体单元、板壳单元、梁单元、单元大小等等），载荷如何加载？哪里需要约束等？都需要事先进行研究后进行正确简化，才能保证模型的正确性。

验证是从仿真系统应用目的出发，确定仿真系统代表实际系统的正确程度的过程。验证关心的是“建立的模型和仿真系统是否正确 (building the right model)”，即关心“仿真系统在具体的应用中多大程度地反映了真实世界的情况”。即我们使用这个模型，根据实际情况设置了材料的参数、载荷的大小、计算了位移、变形、应力、应变等，是否和实际试验结果一致？是否具有参考价值，都是要通过验证后，才可以让我们今后可以安心地使用这套建模方法去进行仿真。

确认是“正式地接受仿真系统为专门的应用目的服务的过程 (the official certification)”。确认是在校核、验证的基础上，由仿真系统的主管部门和用户、专家组成的验收小组，对仿真系统的可接受性和有效性做出正式的确认。这样才可以把这套建模方法固化下来，写成仿真建模的规范手册，就如我们做真实物理试

验一样，有一本试验操作手册，告诉你如何进行试验，那么仿真建模规范手册的制作和建立，才是我们企业在数字化设计和仿真的真正知识财富，有了这样规范的建立，我们不管是有人员的变动还是不同工程师做同样的仿真，都可以放心地得到同样的结果，并保证结果的可信度。

校核、验证与验收之间有着密切联系。校核为验收系统提供了依据，验证作为系统有效性评估提供了依据，而系统性能的好坏是校核与验证都关心的问题。

VV&A的意义：

(1) VV&A为建模与仿真系统应用目标的可信度评估提供客观依据，增强了建模与仿真的发起者和用户对应用仿真系统解决具体的问题的信心。

(2) 校核与验证工作可以尽早发现建模与仿真设计开发中存在的问题和缺陷，帮助设计开发人员采取措施，修改模型设计和软件开发，避免由于设计和开发过程中的缺陷和错误给仿真系统带来的损失和风险。

(3) 校核和验证工作为建模与仿真未来的应用提供了良好基础，可以增加建模与仿真为特定应用目的服务的信心。

(4) 校核与验证工作可以及早发现设计开发中的错误，减少因模型及仿真策略错误造成的损失，并可以为仿真系统开发提供重要的数据资料。

(5) 校核、验证与确认为更好的分析原型提供了潜在的动力。

VV&A中的常用概念：

(1) 模型测试 (model testing)

检验模型中是否存在错误或者不精确、不准确的性质或状况。通常，通过给定某些数据和案例来判断它的结果是否与实际系统相吻合。

(2) 仿真精度 (simulation accuracy)

仿真系统能够达到的静、动态技术指标与规定或期望的静、动态性能指标之间的误差或允许误差。影响仿真精度的因素包括材料参数、网格参数和模型简化方法等。

(3) 仿真置信度 (simulation fidelity)

在特定建模目的下，模型逼近原型的程度，即模型与原型的相似程度的强、弱之分。

10.4 VV&A的一般原则

国际上在VV&A方法的建议指导规范，归纳总结了普遍适用的12条基本原则：

(1) 相对正确原则

模型可信性有其限定范围和特定条件；

建模与仿真的正确性仅针对其应用目标和采用的实验环境；

完备、完整的仿真模型测试是不可能做到的；

没有绝对正确的模型。

(2) 全生命周期原则

VV&A贯彻于建模和仿真开发的整个生命周期；

仿真系统生命周期中的每个阶段都应该根据研究内容和应用目标安排适合VV&A活动，以发现可能存在的问题。

(3) 有限目标原则

VV&A的目标应紧紧围绕仿真系统的应用目标和功能需求；

在接受和确认建模和仿真结果之前，必须对问题有系统地阐述，正确确定建模与仿真所研究问题范围。

(4) 必要不充分原则

VV&A并不能保证仿真系统应用结果的正确性和可接受性；

VV&A是必要的，但不是充分的，要尽力避免三类错误：

“仿真系统是正确的，但却没有被接受”；

“仿真系统是不正确的，但却被接受”；

“仿真系统解决了错误的问题”。

(5) 全局性原则

对仿真系统的组成部分的校核与验证不能保证整个仿真系统的正确性，整个仿真系统的正确性必须从系统整体出发进行校核与验证。

(6) 局部性原则

若某仿真模型仅专注于建模与仿真的一个部分，那么评价时也应该把它局限在该部分；

所有子模型通过测试并不意味着整体模型通过测试；

对子模型的校核与验证不能推断整个仿真模型的可信性，反之亦然。

(7) 程度性原则

对建模与仿真的验收，不仅仅是接受或拒绝的二值选择问题；

不能用VV&A的结果武断地判断仿真模型是完全正确的或者是完全不正确的，而是相对仿真系统的应用目标，判断可接受的程度。

(8) 创造性原则

仿真是一门创造性很强的科学技术，对仿真系统的VV&A需要评估人员具有足够的洞察力和创造力；

VV&A既是一门科学，也是一门艺术。

(9) 良好计划和记录原则

仿真系统的VV&A必须有计划地实施，有详细的文档记录，为后续工作和验收提供必要的信息；

良好的计划应选择对提高仿真系统的正确性和仿真结果的可信度最有贡献的活动，并优化安排其实施过程，以最大限度地发现问题，提高仿真系统质量。

(10) 分析性原则

仿真系统VV&A不仅要利用系统测试所获得的数据，还要充分利用系统分析人员的知识和经验，对有关问题进行细致深入的分析。

(11) 相对独立性原则

VV&A要求“独立无偏好”，保证评估工作的独立性，防止根据开发者的偏好来判断；

VV&A要与设计人员相互配合，加深对系统的理解。

(12) 数据正确性原则

成功的校核、验证及确认需要其使用的数据先经过校核、验证及确认；

VV&A所需要的数据、数据库必须经过校核、验证与确认，证明其正确性和充分性。

10.5 案例介绍

以下图示为某车企对白车身进行弯曲刚度和扭转刚度仿真的规范示意图：

1) 弯曲刚度仿真计算载荷和约束位置规范示意图：



2) 扭转刚度仿真计算载荷和约束位置规范示意图：



除了对约束条件和载荷条件做仿真规范以外，实际的仿真规范应该是更加详细，其包含以下内容：

- 1) 做该类型仿真计算要求使用哪个公司开发的仿真软件，即软件名，软件版本号，包括计算软件名和前后处理软件名；
- 2) 对每一个零部件指定仿真网格划分标准，明确该部件应该使用什么类型单元，划分网格的尺寸大小，网格划分时的质量检查要求等的设定；
- 3) 对每个零部件在材料参数设定时使用计算软件的哪一类型材料卡片；
- 4) 零部件装配链接关系的定义时，使用该软件哪一种链接单元；
- 5) 各种加载位置，并保证该位置有节点；
- 6) 各种约束位置和约束类型的指定。

总之，对同一类型仿真，将会做详细的规范，并写成手册，保证不同的工程师做同样模型的仿真得到同样的结果，即使仿真工程师人员有流动变化，通过仿真规范手册的制定，由仿真的经验而生成的规范要求始终在企业内传承。

10.6 仿真分析设置经验固化

应用到实际的仿真分析环境设置参数和分析过程是企业宝贵的知识财富，这些参数的设置和过程经过无数不断测试校对，已经相当接近工程实际。这些宝贵的经验通过前面阐述的仿真分析流程模板进行固化，保证新产品设计后工程的分析结果也同样准确。

企业通过CAE仿真分析规范的建立应用，能够使企业的CAE仿真分析工作标准化、规范化，有效缩短CAE分析的时间，提升CAE分析质量，通过规范建立积累-更新机制，实现工程分析经验与知识的不断积累，从总体上提高研发产品设计/分析能力，促进企业分析知识的共享和创新。

第10章

企业产品数字化

虚拟试验规范的建立

第11章

企业数字化虚拟试验自动流程的建立

本章介绍从通用仿真软件到企业专用界面及计算技术的引入，形成企业针对自己产品的专用数字化仿真工具。

11.1 企业数字化虚拟流程的特点

制造业企业生产的具有多种功能的复杂产品，经常由多种材料和构件组成而且承受多变的载荷，其安全性和经济性是重要的产品指标，产品的安全性需要经过多种试验得以保证。以汽车制造为例，汽车疲劳强度试验都是通过先制造样车后进行各类试验，因此汽车内部结构早已确定。如遇特殊情况，会影响汽车结构设计，从而导致汽车开发周期延长。随着计算机软硬件水平得到提高，新车试验方法已经发生重大改变，例如可以在虚拟试验场完成测试。企业数字化虚拟试验，是现代制造的一个重要技术手段，在几乎不占用任何实体资源和花费较小成本的条件下，可以重复完成产品的试验过程。对汽车而言，大型整车厂已经实现在无样车情况下进行各种工况试验，大大降低了产品开发时间，也能针对问题进行重新设计，因此非常有必要建设企业数字化虚拟试验流程。

目前常用基于大型仿真分析程序(如MSC Adams/ANSYS/LS-DYNA等)软件二次开发的虚拟试验技术——VPG技术，可以实现部件乃至产品整体的虚拟试验。仍然以汽车的虚拟试验为例，以整车为研究对象，输入所需要的车速及模拟道路数据，并考虑各种非线性因素，因此获得分析精度较高。虽然虚拟试验与样车测试存在误差，但是通过完善虚拟模型可将工程误差控制在可接受的范围内。因此，企业数字化虚拟试验可以部分替代实际产品的测试环节。

企业数字化虚拟试验具有明显的技术特点。其中主要内容有：

(1) 待检测的产品和它的试验条件完全数字化。即测试对象(企业产品例如汽车)，测试仪器、试验环境条件(温度、湿度、风速等)、试验工具和夹具、试验过程、加载过程等等，都必须建立数字化模型并加载到计算机内存中。换言之，数字化是虚拟试验的基础条件。

(2) 虚拟试验满足现实试验过程的回路。即在实际试验过程中从输入端到输出端的物理逻辑必须在虚拟试验中重建。用一句话概括，虚拟回路与物理回路的一致性在保证虚拟试验结果正确性的必要条件。以汽车整车的疲劳试验为例，在虚拟试验中需要重建试验的所有重要环节及其联系，

(3) 虚拟试验需要与实体试验配合。虽然虚拟试验可以高逼真还原试验真实情况，不过虚拟试验并不适用于某些材料基础参数、构件的长期性能、随机性很强的测试项目。例如，弹簧、橡胶等弹性部件，其结构和材料参数需要进行基础的力学测试试验，从而获取可靠的真实性能参数，然后代入虚拟试验模型进行建模，才能取准确的虚拟试验结果。又例如，对于分散性大的疲劳性能参数而言，大尺寸复杂结构的疲劳试验仍然需要进行实际试验而不便采用虚拟试验手段。

综上所述，虚拟试验场建设，可选用多种数字化建模与仿真工具，可采用虚拟样机技术，可建立准确的

整体系统的数字化模型，可模拟各种工况下动力学分析，可最终提取所关注的测试结果。虚拟试验为替代耗资巨大、历时较长的实体产品测试提供了另一条技术路线。某汽车整车虚拟试验场的具体建设提供思路，见图11-1。美国NASA智能虚拟飞行控制试验的组成如图11-2所示。以下结合这一个具体案例说明虚拟试验的特点和流程。

图11-1 虚拟整车试验场技术分析

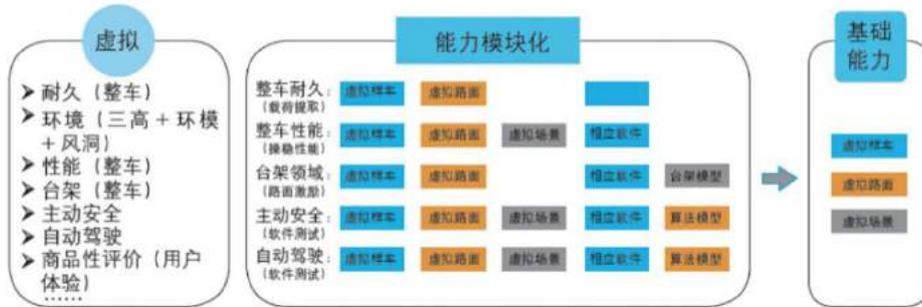
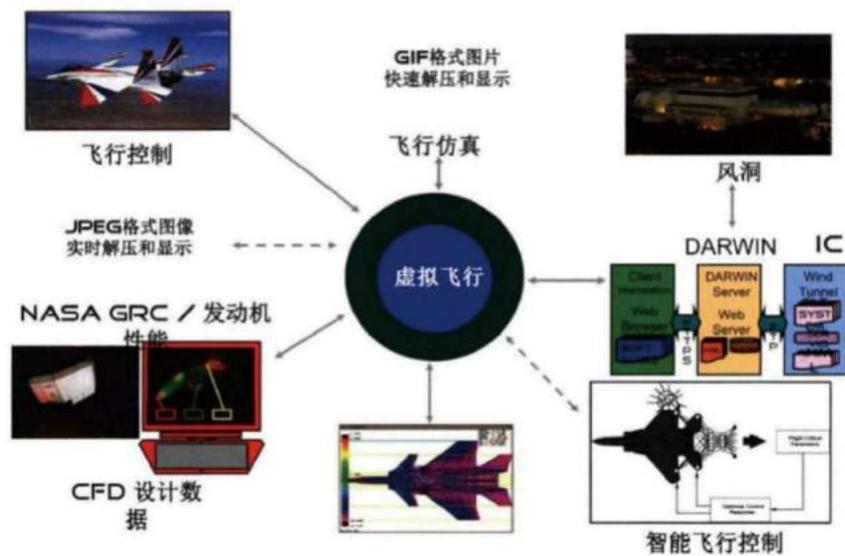
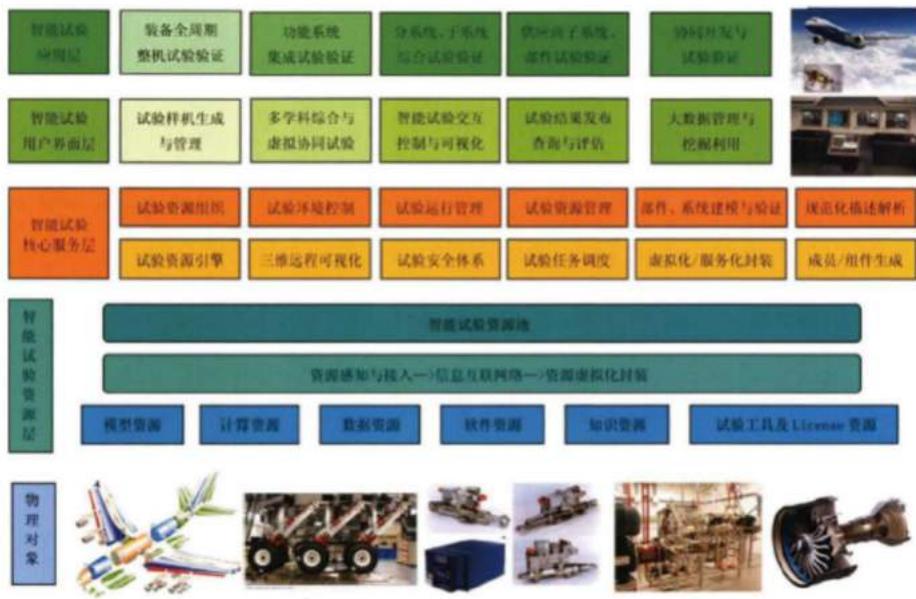


图11-2 NASA虚拟飞行控制系统



虚拟试验不但支持产品研发过程的部件、子系统验证，而且支持子系统、分系统的综合验证和系统集成验证，还支持产品全周期整机试验。为了更好地说明虚拟试验系统的层次结构，采用分层的体系结构，从底向上，依次为：虚拟试验物理对象、虚拟试验资源层、虚拟试验核心服务层、虚拟试验界面层、虚拟试验应用层，其中对虚拟试验核心服务层和虚拟试验界面层进一步具体化，从逻辑视图上细化提出虚拟试验核心服务。虚拟试验系统的层次结构如图11-3所示。

图11-3 虚拟试验系统层次结构



在整车虚拟试验中，首先整车虚拟试验按照功能领域划分可分为整车耐久、整车性能、整车台架、主动安全及主动驾驶等方面。将以上功能模块按照图11-1进行能力化分解，总结出虚拟试验场建设所需的基础能力包含有虚拟样车、虚拟路面、虚拟场景和虚拟整车试验以及提取试验数据。

(1) 虚拟样车

在整车虚拟试验场实验中，首先需要建立一部虚拟样车。样车整体建模采用有限元模型，除了车体结构的受力与变形以外，车辆的动态性能、车辆与路面之间相互作用模型是关键技术之一。可以采用的计算软件包括MSC系列的Adams、Nastran等以及网格划分工具Hypermesh。

(2) 虚拟路面

三维的路面建模主要依据试车场地3D扫描数据进行数字化重建得到。为了获得全面的数据，试验道路的类型应该比较全面，包括各种强化试验道路、高速环道、耐久性试验路段、ABS制动测试路段及其它类型的路面。

图11-4 虚拟整车试验场



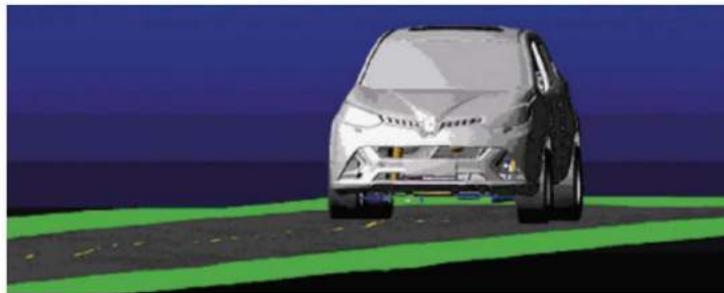
(3) 虚拟场景

接下来，还要建立虚拟的试验条件，即虚拟场景。虚拟场景包含以下元素构成：道路、天空、汽车、草地、树木等。对于近景应绘制较为精细且逼真，但是为了优化软件的实用性，远景描述是比较粗网格的。对于环境变化也要采用模型和参数进行定量化描述，例如，日照、阴天、雨天和雪天等，而对场景中树木、草地、标志等进行绘制，将道路与场景通过一定的形式整合成符合要求的场景，如图11-4。

(4) 虚拟整车试验

将虚拟样车、虚拟路面及虚拟场景通过模型整合形成虚拟试验场。输入动力参数，按照规定的试验行驶工况进行虚拟样车综合性试验，见图11-5。

图11-5 虚拟整车试验



(5) 提取试验数据

在数值计算软件的帮助下，可以获取所需要的虚拟试验结果与数据。例如，用有限元软件获取汽车底盘与车身连接硬点间的动载荷分布图，将各部件所受到的动载荷在有限元软件中进行加载，同时对其进行相应约束，进行整车零部件疲劳耐久分析，提供解决问题的有效思路，指导设计人员进行合理设计及布局。又例如，在虚拟飞行试验中，可以获得非常宝贵的飞行器载荷数据，包括过载（对飞行员的身体状态有重要影响）、载荷谱（飞机每次起降的应力/应变-时间曲线）等等。

11.2 虚拟仿真的协同计算技术

随着计算机网络和 I T 相关技术的飞速发展，出现了计算机支持的协同工作（Computer Supported Cooperative Work，简称CSCW）。CSCW利用互联网克服地理距离的限制，利用高速传输的网络数据建立虚拟的协同工作环境（例如，网络化VR已实现异地指导进行外科手术等），从而有力地支持跨时空的大群体协同工作，并使工作方式发生了质的变化。CSCW的应用非常广，在数字化设计与制造领域，CSCW的应用重点之一就是协同计算，尤其是针对难度较大的工程CAE工作，例如结构有限元分析、系统动力学分析等疑难问题。

CSCW的核心是解决群体成员之间、成员与组织之间、知识领域之间的相关关联问题，即如何利用计算机及时发现矛盾、解决矛盾，以减少不必要的反复，提高工作效率，避免或减少损失。利用计算机及时发现矛盾，解决矛盾，把它作为CSCW系统的内涵，有些人会提出异议。就以组织内部或组织与组织之间文件传递为例，似乎看不到发现矛盾、解决矛盾的作用，它属不属于协同工作呢？应该说，它属于协同工作，因为它是在确定的人群中按流程有序地转送，且有流程自动管理，保证正确无误地转送，达到传阅和批改的目的。

1、群体性

使用CSCW系统时，首先应明确是哪些成员一起协同工作，他们各自的权限等等。CSCW系统可支持多个群体，一个成员可参加多个群体工作，但任何群体外的成员都不能参与该群体的活动。群体的成员可以由人、组织甚至领域知识等组成，因此群体性非常强、非常明确。

2、群体的交互性

CSCW系统和支持个体工作的软件不同，它必须由群体中多个成员进行交互，无法支持单独一个人使用群件，不但无法用也毫无意义，这和传统的电话机很相似，打电话必须有两个人才行，因此，首先要有明确的群体，群体由两个以上成员组成，交互必须由群体成员共同参与。

3、动态性

在工作过程中，每个阶段、每个步骤，参加工作的群体成员、任务安排、设备直至环境等均在动态变化，故协同过程应根据成员和设备的变动、任务需求的改变、执行情况的变化等因素而随时调整，以适应动态变化的需求。

4、并行性

传统的设计方法学是以设计师个体为主进行设计的，相互之间很难及时交流，矛盾和冲突往往要等到加工制造阶段才能暴露和发现，因而，往往会带来巨大损失。并行工程的出现，就是要改变已有的设计现状，探索新的并行设计方法学。CSCW不但需要并行设计方法的支持，同时它又具体实现并丰富了新方法。并行性有两种含义，除了一般并行任务的安排外，更要注意让活动的安排达到高度并行，在具体的协同计算中可以看到并行计算的效率。

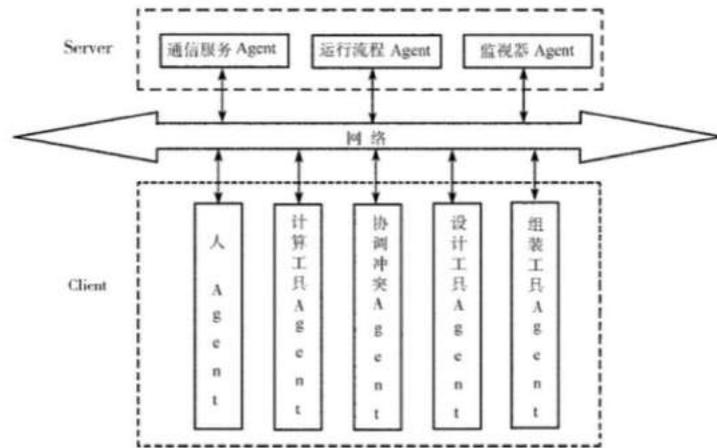
5、异地性

群体成员一般是分散在不同的地域，应通过局域网、企业网或国际网进行交互。

6、异时性

异时性也是CSCW的重要特点之一。在个体工作方式下，只有软件的人机交互方式。但是，在协同工作方式，群体、个体、软件系统之间出现了一种3方关系，这3方相互之间的通信问题成为关键。根据成员之间交互的时间关系，就有了实时和异时交互之分。在协同交互时，CSCW系统往往提供两种工作方式：即同步方式和异步方式。同步方式是参与交互的成员必须同时在场，实时进行交互。而异步方式则不同，允许参与交互的成员不必同时在场，在规定的时间内异地地进行交互。这两种工作方式各有优缺点，一般而言，对于实时性要求很高的情况下，应采用同步方式，例如，异地协同完成病人的外科手术，必须采取同步的方式而且是采取最可靠的通信方式。又例如，在重大工程(例如航天发射)的实际试验阶段，也是采用同步方式进行协同工作的。另一方面，对实时性要求不高的场合，一般采用异步方式开展协同设计与计算，这样更高效、更灵活、适应更强，而且代价比同步方式也要小得多。特别需要说明的是：在几年前，在国际范围的群体协调，由于时差的存在，考虑到通信能力的限制，大容量多媒体数据的传输尚有困难，实时传输不但价格高，也难以实现，因此，过去的国际协作基本都采用异步方式。但是，随着5G技术普及推广，在2020年以后，即使在跨大地域、国际范围的群体协调，采用同步方式，已经变得更加可行，经济代价也完全可以为中小企业所接受。典型的协同工作系统结构如图11-6所示。

图11-6 协同工作系统示意图

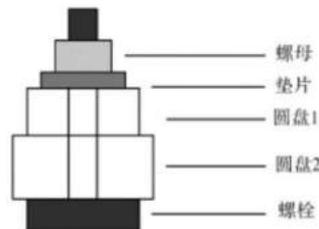


下面简要介绍一个协同设计的工程实例。

实例：协同设计一个机械零件

设计对象为一个螺栓组件，如图11-7所示。这个实例虽然很简单，但麻雀虽小，五脏俱全。通过这个实例可以说明协同设计的含义和特点。

图11-7 螺栓组件



这个机械组合件由五个子部件组成，分别为螺栓、圆盘1、圆盘2、垫片和螺母，如图所示。本实例的所谓“参数修改”是指修改螺栓承受的总拉力、应力和安全系数三个参数。当这三个参数出现变化时，通过计算，可能改变原设计的螺栓直径(d)。随着螺栓直径的改变，圆盘、垫片和螺母也相应改变，才能实现相互关系的匹配。同时，要协调螺栓的长度，与圆盘、垫片和螺母的总厚度相匹配，避免螺栓的长度过长或过短，达到实用和美观的要求。

这个协同设计方案，首先考虑在服务器端或某“管理”端，能够组合客户端的设计任务，掌握整个系统的结构，负责完成螺栓组件的整合；还有考虑协同设计过程中，负责冲突的发现与协调。这一任务可以由专人用某一具有管理功能的终端完成，也可以由具备AI功能的程序完成；还应设置代理(Agent)单元分别负责螺栓图中不同的部件。设计过程由多个Agent协同完成，Agent既有软件的Agent，又有人的Agent，可动态地增加或撤销Agent；可高度支持并行设计运行流程；支持同步、异步的工作模式；协调冲突Agent可自动检测和协调整个工作过程中的冲突；支持人一人交互方式检测和协调冲突；并且完整地保存协同历史。由于Agent具有自治性强和协作性好等突出特点，因此多Agent的系统结构备受人们关注。协同设计系统采用多Agent与Client/Server相结合的系统结构。一般而言，Agent的结构可以被划为分为主动式和反应式两种，前者具有智能认知能力，最近发展迅猛的人工智能(AI)在此可发挥巨大的作用，而后者没有推理能力，则需要人工干预。在本例中，协作设计系统设计为若干个相对独立的设计任务，系统由13个Agent组成，各Agent的功能如下：

- (a) 通信服务Agent, 它负责各Agent之间的通信与管理;
- (b) 监视器Agent, 用于可视化地监视各Agent的运行状态;
- (c) 运行流程Agent, 用于控制和协调系统的运行流程;
- (d) 主席Agent0, 是一群体成员Agent, 主持参数修改的讨论, 讨论成员Agent, 参加参数修改讨论。
- (e) 讨论成员Agent1, 参加参数修改讨论的另一位成员, 计算工具Agent, 根据输入参数进行计算, 相当于系统中CAE的角色, 并可协调冲突的Agent, 协调各部件尺寸的冲突;
- (f) 螺母设计工具Agent2, 根据约束从某一零件库中选定螺母并绘图;
- (g) 垫片设计工具Agent3, 根据约束从某一零件库中选定垫片并绘图;
- (h) 圆盘设计工具Agent4, 根据约束从某一零件库中选定圆盘并绘图;
- (i) 螺栓设计工具Agent5, 根据约束从某一零件库中选定螺栓并绘图;
- (j) 组装工具Agent6, 组装并绘图。

该系统在国内大学Sun工作站/Intranet系统已经作为科研成果并纳入教学。

11.3 虚拟仿真的自动计算技术

在这里, 虚拟仿真的自动计算技术主要指(自动化)参数化建模技术、自动建立数字模型技术(包括网格自动生成)、自动计算技术以及软件系统的(组合)集成技术。以下分四个方面逐一加以介绍。

(1) 关于参数化建模技术

目前流行的CAD软件基本上都支持参数化建模技术, 已经占据CAD技术的主导地位, 也是随后进行参数化设计的重要基础。在参数化建模环境里, 零件是由特征集(sets)组成的。特征可以由正空间或负空间构成。正空间特征是指真实存在的块(例如, 突出的凸台), 负空间特征是指切除或减去的部分(例如, 孔)。参数化建模的主要考虑因素是满足设计所需要的几何要素的集合, 建模时的关键问题就是如何创建一个满足设计要求的参数化模型, 所以在进行参数化建模时需要考虑多方面的因素:

- 1、分析组成零部件几何形体的基本元素, 以及各个元素之间的关系。
- 2、分析自由参数与哪些元素有关, 如何保证参数的自由变化。
- 3、确定模型主特征及所有的辅助特征。
- 4、利用表达式编辑器, 按照自由参数对部分表达式进行分析。
- 5、确定特征创建顺序, 并进行模型的创建。
- 6、更改各个自由参数的值, 验证模型的变化是否合理。

参数化建模方法与常规的建模方法有根本的区别, 主要采用特征及其参数进行建模, 对几何对象的抽象程度比较高。具体而言, 参数化建模可说是基于几何特征的建模方法, 首先确定主特征、然后确定辅助的特征, 最后将它们用逻辑布尔运算联系起来, 从而完成系统的建模。这些特征可以分类包括:

(a) 基准特征 (base point & line & curve)

包括基准面、基准轴线和基准坐标系, 这些特征作为主特征和辅助特征的定位基准, 在建模时已经数字化和由特殊参数确定了。

(b) 与曲线相关的特征 (operation)

包括拉伸 (extrude)、旋转 (rotate)、扫描 (sweep)、管体 (map)、镜像 (mirror) 等。这些特征对曲线

进行操作，可以对实体的边缘进行操作，也可以与草图结合进行参数化建模。

(c) 布尔运算(boolean)

布尔运算是定义几何特征相互之间的空间运算。例如，A-B(remove B)对应着从A中减去B而且删除B，而A+B也可以保留B。在例如，A*B可以定义为A和B之间的交界面或交界线等。

(d) 曲面相关的特征(operation2)

与曲线相关的特征类似，包括拉伸(extrude)、旋转(rotate)、扫描(sweep)、管体(map)、镜像(mirror)等。这些特征的结果通常是三维实体的参数化建模。

(e) 附加特征(appendix)

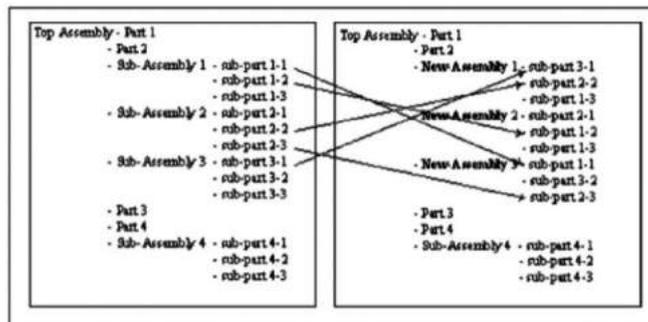
这些特征包括孔、槽和凸台等工程上常出现的特征。虽然它们可以通过基本几何元素特征间接生成，但由于在建模的过程中经常出现，所以将其进行特征标准化以供使用，这样可以使建模的过程得到简化，同时可降低出错的几率。但是这些特征只能在主特征上进行操作，不能独立进行。

(f) 利用草图建模(using draft)

草图是与实体模型相关联的二维图形。它的方便之处在于：草图平面可以进行尺寸驱动，通过对草图对象上所添加约束方式或者约束值的修改可以改变设计参数，从而改变对象特征。通过对草图上创建的截面曲线进行拉伸、旋转和扫描等操作生成参数化实体模型，从而可以提取模型中截面曲线的参数和拉伸参数来实现整个模型的尺寸驱动。

需要特别说明的是，在参数建模的过程中只能有一个主特征，其他的特征都依附于主特征，通过主特征基准点等进行定位，并与主特征保持固定的位置关系。从计算机数据和软件的角度看，参数化建模形成一种组件的(assembly)或部件式(component)的、多层的(hierarchy)数据集合，其中某些部件(part)数据是可以共享的，因而通常呈现一种组件树结构(assembly tree)。如图11-8所示。

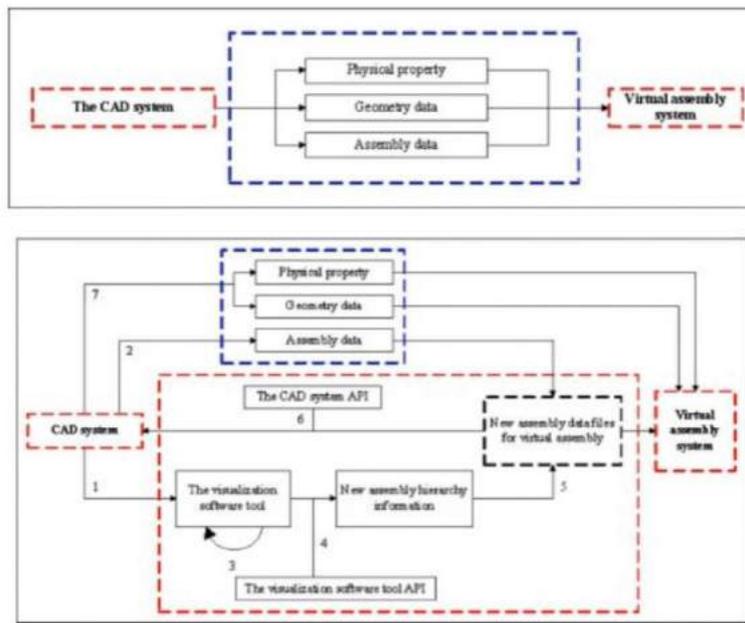
图11-8 组件树(the assembly tree)



参数化建模的优点很多，其中最主要的优点就是便于后续的参数化设计与参数化分析，因为参数化建模减少了设计变量的数目，如果对每一个零件的每一个细节几何尺寸都进行设计，则这个设计无论是用人工还是计算机都是无法完成的。可以说，参数化建模技术是后续开展数字化设计与制造的基础条件。

另外，参数化建模技术使得统一的CAD数据格式和存取方式成为可能，这极大地方便了后续数字仿真计算和分析等。图11-9显示了从上述组件树中如何提取数据并建立一个虚拟组件系统(即虚拟设计)的数据处理流程。当虚拟组件系统重建以后，通过适当的技术处理，就可以在图形显示终端加以展示或者导入虚拟现实设备中重建一个虚拟的实现物体。

图11-9 CAD与建立虚拟组件系统的关系



目前流行的CAD软件都具有非常强大的参数化建模功能，其它的共性在上面已经有所论述，而它们各自具有一些技术特点。为了建立全球统一的CAD技术标准，在1997年ISO颁布了一个国际标准，即ISO DIS 13367—The Proposed International Standard for Structuring Layers in Computer Aided Building Design；而随着技术的不断发展，尤其是考虑到各大CAD软件公司制定了不同的图形文件格式，统一这些文件格式也成为国际标准化组织（ISO）的必要工作。于是，在2013年，ISO及时推出了STEP（Standard for the Exchange of Product Model Data—产品模型数据交互规范），这个规范全面地考虑了产品数字化设计所需要的数字信息，成为当今CAD技术通用的主要文件传递格式。STEP标准是一个正在完善中的“产品数据模型交换标准”。它是由国际标准化组织（ISO）工业自动化与集成技术委员会（TC184）下属的第四分委会（SC4）制订，ISO正式代号为ISO-10303。它提供了一种不依赖具体系统的中性机制，旨在实现产品数据的交换和共享。这种描述的性质使得它不仅适合于交换文件，也适合于作为执行和分享产品数据库和存档的基础。发达国家已经把STEP标准推向了工业应用。它的应用显著降低了产品生命周期内的信息交换成本，提高了产品研发效率，成为制造业进行国际合作、参与国际竞争的重要基础标准，是保持企业竞争力的重要工具。

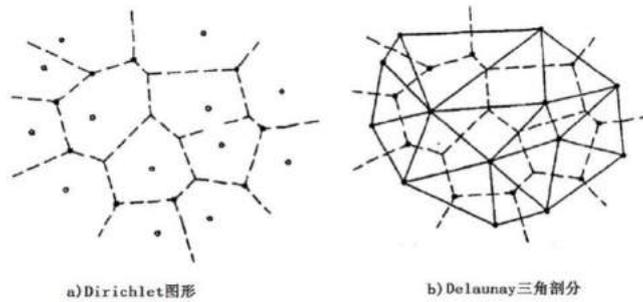
（2）网格自动生成技术

伴随有限元法的研究进展，网格自动生成(automatic mesh generation for FEM)技术也快速发展起来了。截至目前，有限元网格自动生成技术在2维平面问题中已经成熟了，并在许多商用有限元软件中得到了应用；而在3维有限单元的自动划分方面还存在着许多困难。

在二维网格的自动生成方面，主要采用了Delaunay三角剖分方法。Delaunay三角剖分方法是目前流行的通用全自动非结构化有限元网格生成方法之一，Delaunay三角剖分不仅是有限元网格生成中的重要方法，而且在数学、地理、工程等许多领域有着重要应用。Delaunay三角剖分从Dirichlet和Voronoi图形发展而来的。给定区域首先剖分成互相联系的凸多边形并在其中定义一个点集，这个图形就称为Dirichlet图形，如图11-10a所示。每个区域（图中虚线包围区域）称为Voronoi区域，它像细胞一样以相同的速度向各个方向生长而可将中间的点看作细胞核。当一个细胞的边界与另一个细胞的边界相遇时，这个边界就停止生长。最终，除了边界上的点形成的区域继续生长以外，其它点都将给定的区域分割成一系列的凸多边形，这些多边形互不重叠，而且每个多边形对应一个细胞核，即节点，形成的图形称为Dirichlet图形，如图11-10b所示。如果连接有一个公

共边的节点，则形成凸三角形。这个就是Delaunay三角剖分。

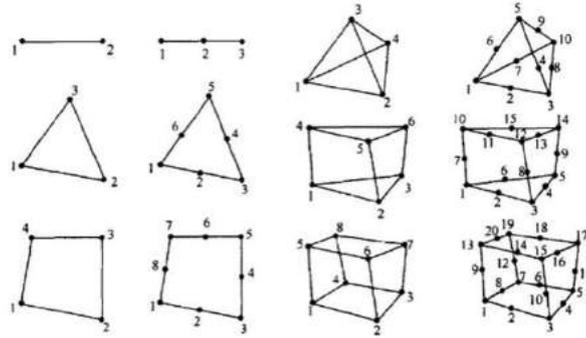
图11-10 Delaunay三角剖分



经典Delaunay三角剖分技术已经相当成熟，近年来的研究重点是约束Delaunay三角剖分的边界恢复算法以及如何克服Bowyer-Watson算法退化现象所产生的薄元(Sliver Element)问题。截至目前，对于绝大多数工程实际中的二维问题，基于Delaunay三角剖分的算法已经可以解决全自动有限元网格生成。

相对而言，三维有限元网络的自动生成就困难得多。目前而言，对于特定的结构类型，几何特性尤其是拓扑结构已经研究透彻的情况下，三维有限元网络的自动生成是可以实现的。一般而言，特殊结构的三维网格自动生成技术有许多“巧妙”的处理方法。例如，对于“柱状”实体，可以采取“扫描”(sweep-mesh)方法，其实质是把二维网格分沿着某一个方面不断复制下去，这个复制过程可以采取比例缩放等算法，从而该法适用于许多类似于“柱状”的三维模型。另一方法，是采取“映射”(map-mesh)的方法，映射网格划分是对规整模型的一种规整网格划分方法，映射网格对包含的单元形状有限制，而且必须满足特殊的规则。映射面网格只包含四边形或三角形单元，而映射体网格只包含六面体单元。而且，映射网格典型具有规则形状，明显成排的单元。如果想要这种网格类型，必须将模型分成具有一系列相当规则的体或面才能接受映射网格划分。由此可见，“扫描”法和“映射”法对于待剖分的三维实体的拓扑形状和剖分规则都有一定的要求。对于不规则的三维物体，通常只有采用4节点的四面体单元(tetrahedron element)，也就是所谓的“自由网格”(free-mesh)才可能实现三维有限元网络的完全自动生成。这里需要提及的是：大量理论与实际算例证明，4节点四面体单元的计算精度是低于8节点的六面体(hexahedron element)单元的，所以在过去相当长一段时间内，四面体单元的计算精度受到工程界的怀疑而且应用范围受到限制。但是，随着有限元及计算机软硬件技术的发展，采用网格加密而且质量良好的四面体单元，所获得的计算精度已经完全可以满足工程要求。更重要的是，在4节点四面体单元的基础上，是很容易通过增加中间节点的方式，转换为2阶的10节点四面体单元的，如图11-11中2个三角锥所示。同样，经过理论分析和数值算例证明：采用2阶的四面体单元可以获得与六面体单元相当的计算精度。换句话说，采用如图11-11中的单元进行完全自动的三维网格剖分，是可以满足工程对有限元计算精度要求的。当然，采用10节点六面体单元，则意味着更多的节点、更多的自由度和更大的计算规模和计算代价，可如今增加计算机的内存和运算速度并不是一件困难的事情。

综上所述，对于工程实际问题，全自动有限元网格生成技术已经可以解决绝大部分的问题。



(3) 自动仿真计算技术

自动计算 (Automatic Computation) 是一个具有广泛含义的概念, 它通常与数值算法 (Numerical Algorithms)、智能计算 (Intelligent Computation)、进化计算 (Evolutionary Computation)、机器学习 (Machine Learning) 乃至云计算 (Cloud Computation) 等相关的。在本文中, 自动仿真计算是指由CAD无缝衔接到CAE过程中的相关软件技术, 包括自动建模 (Automatic construction of numerical models)、模型检验 (model checking)、CAD导入CAE技术以及数字化设计与分析数据的自动转换与存储等。从3个不同方向都可以获取这些技术, 从而实现用CAD到CAE的自动建模和自动计算。这3个方向包括: (1) 从CAD向下延伸至CAE或有限元分析; (2) 从CAE向上关联CAD软件; (3) 单独进行CAD或CAE软件的二次开发, 通过二次开发实现自动仿真与计算。以下选择几个典型的案例简要加以介绍。

介绍1. SolidWorks Simulation

SolidWorks具有很强的三维实体建模和设计能力, 完全支持参数化建模等优点, 如第2章所述, 这里不再重复。除此以外, SolidWorks Simulation是每一个设计工程师和分析工程师都能够快速、方便地利用的CAE工具, 它采取了在CAD软件中嵌入FEM的解决方案, 它的有限元计算能力已经涵盖了线性应力分析、非线性分析、计算流体力学 (CFD)、动力学分析、频率分析乃至金属疲劳等模块, 已经具有与传统的FEM程序 (如ABAQUS) 相匹敌的分析与计算能力。从产品开发周期看, 与产品的分析 (analysis) 相比, 产品的设计 (design) 往往处于产品生命初期的核心地位, 即CAE事实上居于CAD的从属地位, 所以从CAD向下延伸至CAE或有限元分析软件, 在工程中具有产品主导的优势, 这也是SolidWorks软件装机数量迅速上升的一个重要原因。可以说, 在工作平台层面上, SolidWorks已经CAD无缝衔接到CAE。

介绍2. Hyperworks系列产品

Altair Hyperworks的前身是一款进行有限元网格剖分的专门软件, 历经多年的技术升级和软件开发以后, 核心模块Altair HyperMesh仍然功能强大而且优势明显, 而目前最新的版本已经发展为一个创新、开放的企业级CAE平台, 它集成设计与分析所需各种工具, 具有无比的性能以及高度的开放性、灵活性和友好的用户界面。其中具有的计算模块包括: Altair HyperForm 集成HyperMesh强大的功能和金属成型单步求解器, 是一个使用逆向逼近方法的金属板材成型仿真有限元软件; Altair HyperOpt 使用各种分析软件进行参数研究和模型调整的非线性优化工具; Altair OptiStruct 世界领先的基于有限元的优化工具, 使用拓扑优化方法进行概念设计以及Altair OptiStruct/FEA 包含基本线性静态力学分析、特征值 (固有频率) 分析模块等。特别值得一提的是: Hyperworks提供的CAD接口及几何模型整理在CAE软件中具有领先地位。(1) 几乎支持所有的CAD软件导入或导出; (2) 拥有最可靠的几何模型整理技术, 基本克服了输入的几何模型可能的间隙、重叠和缺损等; (3) 网格划分的总体速度和质量领先其它软件; (4) 提供了最全面的模型检查技术 (model checking) 如云图显示网格质量、单元质量跟踪检查等方便的工具, 能及时检查并改进网格质量。

介绍3. ANSYS APDL/ABAQUS Python二次开发

从国内应用情况看，基于ANSYS APDL和ABAQUS Python二次开发是研究最多，领域最广的。APDL的全称是ANSYS Parametric Design Language，也称为ANSYS参数化设计语言。APDL不仅是优化设计和自适应网格划分等ANSYS经典特性的实现基础，ABAQUS Python语言与Abaqus脚本接口，提供了编写脚本实现各种功能，包括快速建模、访问输出数据库、对外部数据进行其他后处理和部分高级处理功能。这些接口为CAD到CAE的无缝衔接提供了便利。APDL的运用主要体现在用户可以利用程序设计语言将ANSYS命令组织起来，编写出参数化的用户程序，从而实现有限元分析的全过程，即建立参数化的CAD模型、参数化的网格划分与控制、参数化的材料定义、参数化的载荷和边界条件定义、参数化的分析控制和求解以及参数化的后处理。限于篇幅，以下介绍一个用MATLAB\APDL\Python开发的“含分布点腐蚀坑平板的蒙特卡罗随机有限元分析”项目。程序的主要模块有：主程序模块、参数化建模模块、数据库模块、网格自动生成模块、计算模块和计算提取模块。计算流程主要流程包括：

(1) 建立腐蚀坑模型

在自动化计算中，考虑腐蚀率为腐蚀坑体积相加后除以总体积，将腐蚀坑随机分布在钢板中间，还要防止腐蚀坑之间相互重合，预先将样板平均分成若干小块，每个腐蚀坑分布在小块中。以小块中心为原点，采用随机数发生器，生成腐蚀坑的半径、蚀坑中心点距原点的长度以及蚀坑中心点偏离原点的角度三组随机数，作为腐蚀坑的位置参数，建立二维模型。

(2) 建立含腐蚀坑的三维模型

将上述所生成的二维腐蚀板模型通过网格扫略，形成三维六面体网格单元模型，建立预设腐蚀率的矩形钢板，如图11-12所示。从图中可见，可以模拟与实际腐蚀复杂情况相近的实体模型。

(3) 自动生成APDL/INP文件与ANSYS/ABAQUS计算

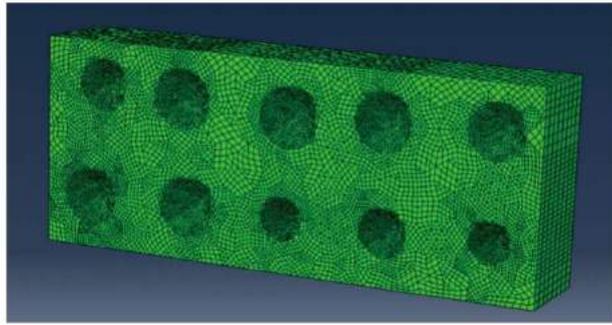
这一步骤生成了可执行的有限元模型分析代码，其中包括检查模型、提取数据库中的材料弹性和塑性材料参数，设置计算选项等。本研究提供了2条计算路径，既可以用ANSYS也可以选择用ABAQUS进行弹塑性有限元计算。

(4) ABAQUS的Python后处理/ANSYS APDL后处理

除了FEA计算自动完成以外，结果的提取过程也需要实现自动化。这里分别采用ABAQUS的Python后处理/ANSYS APDL后处理程序，提取所关心的计算结果。

该程序的特点是有限元的前处理、计算和后处理实现了完全的自动化，每一次执行可以完成许多次的有限元分析计算。在实际工程中，我们选取有效样本总数为1000个，在一次回车下就执行完成了1千次的有限元计算。

综上所述，目前流行的大型CAD或者CAE程序都已经部分具备了自动计算与分析功能，但是因为工程实际问题的复杂性，针对具体的产品，采取CAE或CAD软件二次开发技术，可以实现用专用程序而非人工完成从数字设计到有限元计算与仿真的全过程。



11.4 虚拟仿真基础数据库

在数字化设计与制造的要求下，建立虚拟仿真基础数据库是非常必要的。在第二章提到智能设计与基于知识库系统的专家系统结合，成为数字化设计与制造的发展趋势。运用数字化设计数据库，设计人员能够及时准确地获取产品开发所需的信息与帮助，利用互联网Web机制，可以实现信息共享与交换，解决了产品设计中对知识需求的问题。从数据库到数据仓库再到知识库，从单纯的数据集到应用一定的规则从数据中进行知识的挖掘，到让数据自身具有自我学习、积累能力，这就是一个大数据与人工智能化的设计数据处理过程。若将这一智能化过程与工程实际应用同步进行，则可以实现一次重要的制造技术的跨越式发展。从上可以看出，虚拟制造(VM)或者虚拟试验(VT)都依赖于仿真数据库或数据仓库。在数据库技术的基础上，数字化的产品信息可以进行规范化的表达、高效存储和有效利用。按照虚拟仿真技术的要求，基础数据库可以分为：基础材料库、基础元件库、基本产品数据、基本(软件)组件库等等。

(1) 基础材料库

该数据库是一个真正海量的数据库，泛指所有工业产品所采用的任何材料的所有的性能与指标或参数。从数据库的来源划分，第一类是公共网络数据库，通常是面向公众的而且在互联网上实现完全自由开放的共享和共用，例如面向全球的MatWeb数据库。第二类是公共官方数据库，通常为某些组织机构所有，在一定范围实现了共享和共用。这类数据库非常多，例如美国标准与技术局(NIST)物性数据库、美国金属协会的ASM-International、日本国立材料科学研究所的材料数据库(mits.nims.go.jp)、中科院物性及热化学数据库、剑桥大学材料资源等等。第三类是企业材料数据库，这一数据库通常是不公开的，例如NASA的内部数据库，还有国内某大型钢铁集团公司内建的材料数据库。从数据的权威性、详细程度和可靠度来看，第三类数据无疑是最好的数据来源，而前二类数据库往往需要对数据进行再次核实以后才能放心使用。企业可以用建立自己的基础材料数据库的方法，从公共数据库中获取材料数据，再经过系统而全面的数据核实以后，将数据转存入企业的服务器中，就可以形成企业自己的基础材料数据库，成为企业开展数字化虚拟设计与制造仿真基础工作的一部分。

(2) 基础元件库\基本产品数据

建立基础元件库是企业开展数字化设计与制造不可缺少的重要步骤，因为每一个企业在用CAD设计一个新产品的时候，不可能是从一个“螺丝帽”开始的，基础元件库就是把企业重复使用的基本标准件、重复使用的零部件以及过去老产品的CAD文件，统一按照一定的格式和规则存储起来。该数据库涉及的领域也是非常庞大的，主要数据格式是各类工业产品的三维模型数据。与材料数据库类似，也可以划分为公共网络数据库、公共

官方数据库和企业内部数据库，不过相对材料库而言，工业产品的三维模型数据库在数据的数量和质量方面，都有很大的差距。例如，在3dcontentcentral.com网站上提供了上万种工业产品的三维CAD模型数据，例如在以bolt为关键字检索结果中列出了5481个结果，每个都可以下载完整的CAD模型文件，而且有近30种文件格式可供下载，几乎可以支持所有的CAD软件，进行模型重复使用。但是，这些模型通常是由供货厂商免费提供的，既然免费就有类似广告的作用，某些重要产品信息是被忽略的，其它厂家可以参考却不能直接使用这些模型作为新产品设计的。简单而言，基础元件库并没有可供中小企业直接获取使用的公共数据库，因为从公共网络数据库提取的模型，基本上都不可能满足企业自身产品的设计要求。所以，基础元件库都需要企业自建的。相对而言，基本产品数据已经是目前各类企业的标准配置了。这其中包括企业已经生产出来的所有产品的描述、特性、参数、数据、指标等，这个数据库反映了一个企业在数字制造时代的技术储备和技术实力。这个产品数据库每个企业或早或晚都建立起来了，但是数据库的规模、质量和利用效率可能有很大的区别。在数字化设计与制造技术的要求下，企业的基本产品数据库应使用规范统一的数据，加强智能的科学管理，并且推广应用到新产品设计与制造的各个环节，从而在数字设计中真正有效地利用好企业的基本产品数据库。

(3) 基本组件库

组件(Component)是一个现代软件技术中的术语，是指对数据和方法的简单封装，也就是包含特定功能的某一个软件模块。按照面向对象的程序设计语言，一个组件就是一个从某一个(class root)基类派生出来的特定对象。组件可以有自己的属性和方法。属性是组件数据，方法则是组件的一些简单而可见的功能。使用组件技术可以实现拖放式编程、快速的属性处理以及真正的面向对象的设计，在这里泛指所有能完成预定功能的某一段相对独立的软件程序。例如，常见的Flash就是一个组件。Flash组件是带有参数的影片剪辑(Movie clip)，这些参数可以用来修改组件的外观和行为。每个组件都有预定义的参数，并且它们可以被设置。每个组件还有一组属于自己的方法、属性和事件，它们被称为应用程序接口(API)。使用组件，可以使程序设计与软件界面设计分离，提高代码的可复用性。用C++或其它多种程序都可以开发和应用组件。在企业建立数字化设计与制造软件平台中，使用组件技术是非常有效的途径。所谓基本组件库，是按照功能把一些基本功能(例如矩阵运算、显示CAD作品动画)，把组件进行分类并存储在网络集成软件平台中，规定统一的访问方式和软件接口技术。企业建立基础组件库是实现数字化设计与制造的重要基础条件。例如，对于一些基本的CAD、CAE、CAM、CAPP功能，利用组件技术就脱离了具体的CAD、CAE软件，形成了企业自主的数字化设计与制造软件平台；利用组件技术的高度可重用特性，可以避免大量繁杂的CAD/CAE工作；利用组件技术，也便于实现网络共享机制和协作设计与制造等现代制造技术的推广与使用。随着软件系统工程及技术发展，在如何充分利用好组件技术，发挥其在企业数字化系统工程中的作用，国内最近的软件技术进展就是推出了V+工业件技术。有兴趣的读者可以查阅相关网站和技术资料。

11.5 企业数字化虚拟试验自动流程的建立

企业数字化虚拟试验平台是指通过软件环境建立的工件或产品试验台，在软件环境中建立试验平台和被测试构件的虚拟仿真模型，完成与实际试验相同或类似的试验任务。虚拟试验可以在物理试验之前尽可能全面的了解并及时发现问题，将重复工作降到最低；另一方面可以为物理试验作好充分准备，减少对物理试验的依赖，进一步加快产品研发进程。

按照虚拟试验的功能划分，典型的虚拟试验平台可以分为以下几种：

- (1) 虚拟结构强度和安全性(包括结构刚度、稳定性、断裂和疲劳等)试验平台；

- (2) 虚拟机械系统振动和动力学特性试验平台;
- (3) 虚拟环境试验系统;
- (4) 虚拟制造组装过程的虚拟厂房或虚拟车间;
- (5) 虚拟产品使用过程的仿真机、虚拟训练机;
- (6) 虚拟产品功能的演示平台等等

这些系统按工作内容划为: 虚拟产品(待检测物体)、虚拟激励系统、虚拟传感系统、虚拟环境、虚拟控制系统、人机交互控制等等。在计算机中完成以上各部分的建模, 并将各部分的仿真模型进行装配, 完成各种工况的虚拟试验系统的主要建设目标。

以某企业的虚拟振动试验台为例, 说明如何根据企业对产品试验的要求, 建立虚拟试验平台的主要步骤。

(1) 试验平台的仿真模型建立与验证

首先, 论证建模方案, 选择合理的数值计算工具。例如, 用ANSYS或ABAQUS计算构件变形, 用MSC. Admas模拟机械运动, 用AMESim模拟液压系统, 用Virtual. Lab建立测试仪器的模拟系统, 用MATLAB/Simulink设置控制模块等。通常, 对同一个仿真模型, 其物理模型是确定的, 但是可以选择的计算工具并不是唯一的。例如, 对于结构应力与强度计算而言, 大多数情况下可采用有限元法, 但流行的有限元软件有许多种, 包括MSC. Nastran、ABAQUS、ANSYS等等, 而且, 除了有限元法, 在某些情况下, 也可以用以PDE求解为核心的计算工具, 例如Cosmos、无网格算法、MATLAB\FEM等等。按照虚拟试验的高要求, 通常不能由单一的计算工具完成。

以虚拟振动试验平台为例, 可以选用有限元法和非线性的多体动力学方法(内建控制单元和有限元)模拟振动, 但是, 有限元法是开环式仿真, 整个振动试验台中各个部分均建立其有限元模型, 并且通过合适的连接单元进行有限元装配。在进行振动试验台设计时, 这种方法可以用于验证试验台的结构特性, 包括强度、模态、传递函数以及与被测试件模型的耦合, 而多体动力学建模可以通过结合控制和电磁作动系统模型实现完整的闭环仿真。振动试验台机械部分通过多体动力学软件建立其模型, 而控制器和电磁作动器部分, 则通过系统仿真软件建立模型。将两部分集成起来可以实现闭环分析。这种方法可以考虑控制器、激励、机械及其耦合, 在振动试验设计过程中, 便于进行方案选型和完整方案的验证。振动台的多体动力学模型最终要与被测试件的有限元模型进行集成, 通常借助于多体动力学软件的刚柔耦合分析功能。

(2) 待测试件模型的创建

如果被测试是一辆汽车, 则需要建立一个汽车整车的模型; 如果被测试的对象是一架飞机, 同样需要建立一个与实物一致的飞机仿真模型。对于整体系统仿真, 建模和计算的工作量可能非常大, 但在目前计算水平和计算条件下是完全可以实现的, 同时, 人力和物力的投入也会非常大。如前所述, 这些整体系统虚拟仿真试验的大平台, 通常在先进的大型跨国制造企业中才能够做到。对于中小型制造企业, 通常是针对某一个零部件或中间产品进行数字化虚拟试验平台研究。被测试件的仿真模型建模要求是真实、准确, 其产品特性应该与实际物理试件一致。在虚拟试验实施过程之前, 应通过一定的技术手段保证被测试件仿真模型的准确性。

(3) 被测试件仿真模型与虚拟试验平台的装配

在模型装配阶段, 要点是真实反映试验平台与试件之间的连接特性, 包括系统的物理特性、力学特性(刚度、阻尼)等, 从而保证试验台与试件之间的耦合关系准确。这也是整个虚拟试验系统建立的关键步骤。

(4) 搭建虚拟试验平台的软件平台

根据虚拟试验平台的建设目标, 虚拟试验系统涉及 CAD 建模、有限元建模、多体动力学建模、控制与电

磁系统仿真、刚柔耦合分析、机电一体化分析、试验相关性分析与模型修正、多学科优化等，并且需要将这些学科结合起来，形成一个闭环系统的仿真软件系统。

（5）虚拟试验平台的运行与调试

在这一步骤，执行虚拟试验平台的主程序，跟踪系统中(子系统)的具体模型数据，检验模型和数据是否符合虚拟试验的设计要求，提取在虚拟激励下的虚拟(动力学)响应，在有可能的条件下，比较虚拟试验结果与实际测试结果之间的误差，完成修正模型或参数，达到预测的试验目的。

（6）虚拟试验应用于新产品的检测与检验

这是企业建立虚拟试验平台的最终目的。当新产品实际投产之前，就从虚拟试验平台上获得了有关新产品的可靠的试验数据，让企业对所开发的新产品“心中有数”，让企业新产品的竞争力提前具有测试数据的支撑，这对企业保证产品的核心竞争力无疑是非常重要的。

综上所述，企业数字化虚拟试验平台是实现数字化设计与制造的一个重要环节，它可以部分或完全取代传统的实物实景现场试验。对企业而言，建立虚拟试验平台的意义很多也很大。首先，虚拟试验可以加快新产品的开发速度，节省产品测试阶段所需的大量时间和人力物力投入；其次，虚拟试验对保证产品的先进性乃至企业核心竞争力有重要的作用，因为只有虚拟试验才可能在新产品样品之前就获得有关新产品的性能数据，提前认知新产品，从而避免对新产品的“盲目投产”或者“重大投资失败”；最后，虚拟试验可以彻底免除某些新产品在现场试验中可能出现的各种人身与财产安全风险，因为某些产品的试验是破坏性的（例如车辆的耐久性试验、连接件的破坏试验、旋转机械的振动与动力学试验等），需要将待测产品试验到完全破坏为止，这一测试过程不可避免地存在风险。总之，现代制造企业积极建立自己的数字化虚拟试验平台，已经成为企业走入数字经济时代的必然选择。



第12章

企业数字化

设计和仿真数据管理

第12章

企业数字化设计和仿真数据管理

12.1 仿真数据管理平台建立的必要性

随着产品开发中不断采用仿真技术，一个产品在设计定型前，首先需要进行多次仿真来验证其设计是否满足设计性能和功能的要求，并确认该设计产品是否满足静力强度、动态性能、疲劳寿命等要求，虚拟仿真计算已大量替代实际样机的物理试验，以汽车工业为例，在上世纪末20年的时间里，通过采用碰撞仿真技术，汽车平台车型的开发，碰撞试验的次数由240多次下降到了80多次，大大加速了汽车开发的周期。与此同时从事碰撞仿真的分析工程师人数却急剧增加，今天，美国三大汽车公司中，每个公司每个工作日都有几十次甚至近百次的碰撞仿真计算，每个公司从事碰撞仿真工作的分析工程师人数达百人。如此庞大的团队，每次仿真涉及到的各种文件和报告达100个，每次仿真平均产生1GB的数据，如果每天进行1次仿真计算，每年仿真涉及的文件数将达2万多个，每年产生的仿真数据将达200GB以上，而三大汽车公司每天仅碰撞仿真的次数就达百次，试想如此海量的仿真文件和数据如果没有有效的管理，如何查找？如何使用？又如何与试验结果进行快速对比和修正？

这些数据是判断设计性能和功能的重要数据，如果每个工程师把这些数据放在自己的电脑里，或者由于人员的流动没有交接好这些数据，那当我们需要查找或使用，是很难再利用的。因此，建立一个适合企业针对仿真专用的数据管理平台是非常重要的，这就是我们本章要介绍的企业数字化设计的仿真数据管理平台的建立。

12.2 仿真数据管理系统框架

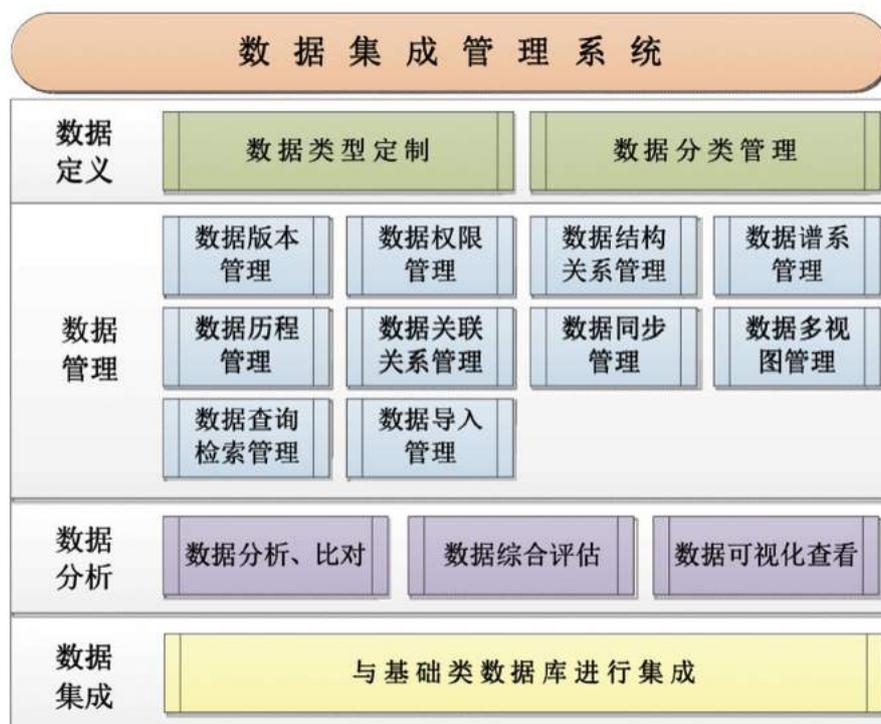
针对仿真数据是一个过程数据的特点，仿真数据管理系统可以对仿真数据进行锁定、共享、比较、批处理、追踪和审计等工作。数据管理工具有与数据库及企业级别数据管理系统的接口，可以快速与企业已有的数据管理系统进行集成。仿真数据管理还可以对仿真数据进行挖掘、提取和处理，可以建立仿真知识库管理，如仿真模型库、仿真分析流程模板库、报告模板库、材料库以及CAE相关的规范库等知识库。

此外，仿真数据管理还可以对仿真项目、数据、文件等资源实现多关键字组合查询、多层次查询和多条件模糊查询，通过查询功能，对有权限的用户提供在线浏览和下载服务，另外，CAE主管或项目经理可以对仿真任务进度进行查询，同时可以查询整个仿真项目的人员分配以及整个CAE室的人员分配情况。

12.3 仿真数据组织

企业仿真数据管理的一个重要目的是使企业的仿真数据和知识资源合理地在业务流程过程中顺畅的流动，让每一个员工可以方便的获取与业务有关的数据和知识，同时为企业贡献自己的知识、经验和技能专长。只有将数据和知识的沉淀、共享、学习和应用、创新与特定的业务流程相结合，才能有效地提高企业的业务能力，进而产生价值。

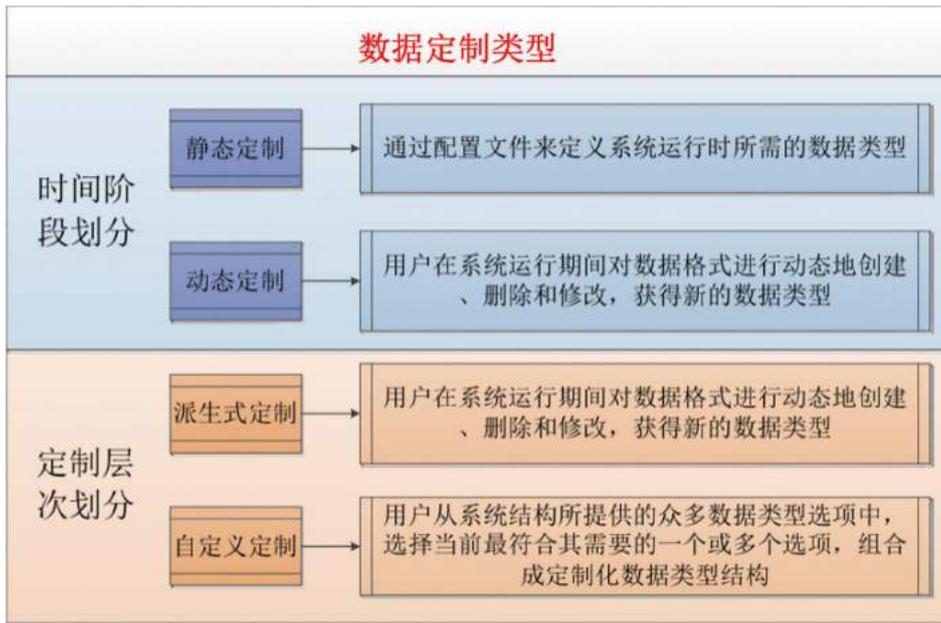
设计工作正常执行的基础上，需要有独立的服务来对一个产品的所有层次的设计过程中所产生的各种类型的数据进行统一收集，并统一形成完整的设计数据管理和知识管理体系。这个知识体系将为包括设计流程优化、设计知识的重用等重要功能提供数据支撑。



12.3.1 数据定义

a) 数据类型定制

系统可以提供多种方式的数据类型定制，可以从以下几种方法进行分类：从定制活动的时间阶段来分，可以分为静态定制和动态定制。静态定制是指系统管理员在系统运行之前通过配置文件来定义系统运行时所需的数据类型。而动态定制则允许用户在系统运行期间对数据格式进行动态地创建、删除和修改，获得新的数据类型。从定制的层次来分，可以分为派生式定制和自定义定制。派生式定制是指首先建立基础数据模型，再根据企业的实际需求在已有模型的基础上进行派生设计，最终形成定制数据类型的设计方法。在这种定制方式中，系统的基础数据是相对固定的，使得系统的通用性得到保障，派生设计主要由企业的实际需要所驱动，如企业需要在产品定义中增加某种特征，并且希望在最终报表中反映出来。自定义定制是指用户从系统结构所提供的众多数据类型选项中，选择当前最符合其需要的一个或多个选项，组合成定制化数据类型结构。在数据类型定制过程中，可以采用以上几种定制方法相结合的方式，如动态和静态定制相结合、派生式与自定义定制相结合等，以灵活多样的方式满足用户的定制要求。



b) 数据分类管理

根据数据类型定制方式、数据显示方式、数据功能等不同，可对数据进行不同分类，并且可以自定义数据分类类别。

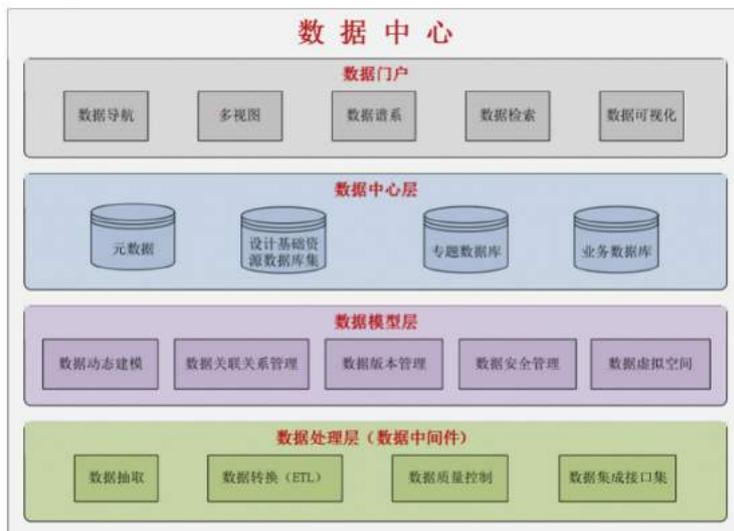
根据数据定制方式不同，可将数据分为静态数据类、动态数据类、派生数据类以及自定义数据类等多种数据类别，并实现分类管理。

根据数据显示方式不同，可将数据分为二维图像类、三维图像类、曲线类等多种数据类别，并实现分类管理。

根据数据功能，可将数据分为设计方案数据类、指标数据类、模型数据类、流程数据类、日志数据类等多种数据类别。

12.3.2 数据管理

仿真数据管理系统的交换体系，是通过数据总线技术，在初步实现各个应用系统间对仿真系统数据进行统一管理和交换。技术要求主要包含数据中心数据库框架系统、各个异构数据源的数据抽取、数据中心间数据共享推送机制，以及数据分析和展示等。



a) 数据版本管理

数据版本是记录特定对象各个可选状态的快照，版本管理的任务就是对对象的历史演变过程进行记录和维护，根据实际应用背景选择合适的版本间的拓扑结构，并包括以下功能：新版本的生成；统一、协调管理各个版本；有效记录不同版本的演变过程及对不同版本进行有效管理，以尽可能少的数据冗余记录各版本。同时，保证不同版本在逻辑上的一致性和相对独立性，一个版本的产生和消失不会对其余版本的内容产生影响。版本切换时，指定了新的当前版本后，对象的映象和指定的版本保持一致。

b) 数据权限管理

系统的岗责体系是动态的，这是由业务的特性所决定的。动态的岗责体系成为实现一个灵活的业务信息系统的重要障碍。这是因为动态的岗责要求业务流程脱离具体的人员设定、业务逻辑操作者是抽象而不是现实、应用系统中关于用户和组织信息的获取是通过上下文环境动态的获取，这些直接影响了整体系统的实现方式。

具体技术实现动态的岗责体系的基本概念是，组织机构、用户群、资源的动态绑定。也就是在技术实现上，包含了三层相互独立的管理体系：

- 1) 管理组织机构的组织树。
- 2) 管理用户群的用户信息管理。
- 3) 管理应用子系统、模块、数据的资源管理。

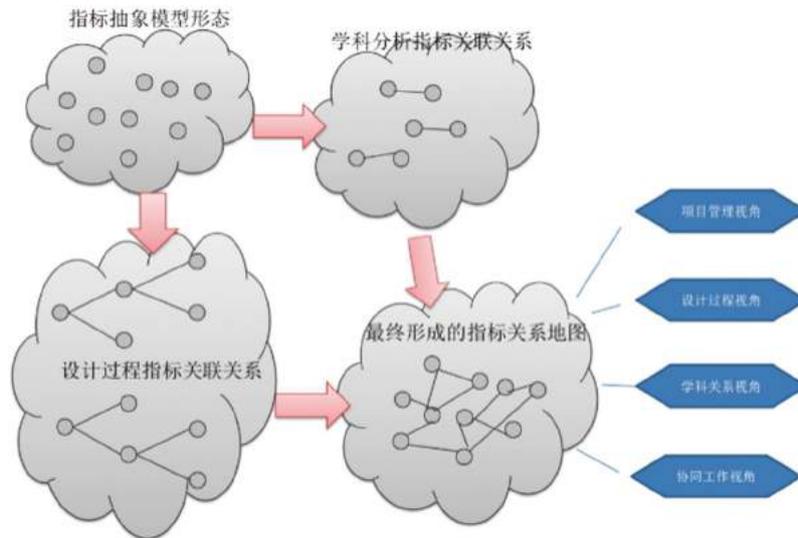
下图是组织机构和用户的动态绑定视图，在运行时，可以动态的在组织树和具体的用户间建立关联。在图中只说明一个组织树的绑定概念，实际情况中组织树可以有多个。



c) 数据结构关系管理

以设计过程模型组织设计数据基于设计模型从产品设计的宏观上组织设计数据的关系，可为产品快速设计最大化的利用已有设计资源提供了完善的数据利用链，这一点从根本上改变了设计数据相互孤立的状态，形成了清晰的数据组织结构和数据分布地图。用户能够对数据及数据结构关系进行定义、编辑、查看、查询、删除等操作。

在仿真流程集中管理的基础上，建立产品的数据包分解模型，建立通用分解结构模型树主要目的是形成数据包目录，不同角色工程师产生的结果数据均保存在数据包目录节点上。这些数据包节点数据具有从属、分解，收敛的内在关联关系，这个关系形成了数据集之间的分解、继承、扩展关系，这些关系存在两种形态，一种是自上而下通过分解产生的树状关系结构；另一种是无从属关系指标或数据因计算和分析需要人工建立的横向关联关系，这两种关系组成一个指标数据间的网状关系，这个网状关系实际就是数据地图，是建立多视角设计过程监控和管理的内部关系索引。下图是指标数据关系建立过程。



d) 数据历程管理

相对单一的管理设计类型数据或按照仿真环境管理过程数据，以仿真设计过程模型组织的设计数据库，能够记录任务在各时刻产生的数据、前后逻辑关系、时间信息等，更清晰的表达了设计数据产生、演变、传递、回归的变化情况和过程，这对于设计数据的回溯非常重要，是设计数据在复用中数据回溯的重要基础，这一点在设计过程模型框架中，其实现有据可依，符合设计过程及多学科的综合要求。

e) 数据关联关系管理

产品设计过程中产生的需求特征、设计目标、设计参数、技术指标、验证结果这些数据之间不但存在从总体到分系统、子系统的分解关系，而且在平行数据间，因为多学科验证的客观约束，同时存在内在关联关系，在数据传递过程中，还存在复制/引用、索引关系。这种关联有具体学科客观决定因素，也有人为主观认识因素，相互的关联关系，可实现用户管理。

f) 数据同步管理

系统提供数据同步、共享和交换，在异构子系统间，同时存在数据不集中的情况下，必须使用有效的技术手段来保证异构的数据共享和交换。

g) 数据多视图管理

多视图管理数据模块提供从一个或多个表或视图中导出视图，其结构和数据是建立在对表的查询基础上的。和真实的表一样，视图也包含几个被定义的数据列和多个数据行，这些数据列和数据行来源于其所引用的表。用户可以根据需要选择不同的行和列建立不同的视图，并且具有不同专业和组织的展现形式。多视图管理功能可以是视图集中数据、简化和定制不同用户对数据库的不同数据要求；可以屏蔽数据的复杂性，用户不必了解数据库的结构，就可以方便地使用和管理数据，简化数据权限管理和重新组织数据以便输出到其他应用程序中；可以使用户只关心他感兴趣的某些特定数据和他们所负责的特定任务，而那些不需要的或者无用的数据则不在视图中显示。

h) 数据查询/检索管理

提供数据查询/检索功能，数据的查询方式有两种：

查询方法一是根据产品和相关数据文档，在文档列表中有相关文档的链接，点击该链接即可访问设计所查询的型号的所有知识文档。

查询方法二是根据关键词进行查询，关键词可以是数据的名称、ID、创建人、描述的条件等，并支持模糊关键词查询，来查询符合的相关数据文档，点击这些文档的链接访问获得数据的具体信息。可以同时选择多个关键词来检索，使检索的结果更符合需要。

i) 数据导入管理

数据集成管理系统允许用户导入从其它应用程序，比如文字处理（Txt、XML）、电子表格（Excel）以及数据库程序（ORACLE、SQL Server）中获得信息。数据集成管理系统集成了该类数据的接口，不仅能够对该类数据进行导入导出，而且可以实现数据的打开、编辑、显示等功能，方便用户实现对不同类型数据使用和操作。

12.4 仿真材料数据和标准件数据管理

基于统一的标准与规范，创建仿真材料库，可供其他系统程序直接调用并计算，以大幅提升建模效率和质量。同时，也可以保证仿真结果的一致性和可追溯性。

材料管理

材料数据是仿真分析的原始输入，直接影响到仿真结果的准确性和一致性。因此，建立统一的材料库对于仿真是至关重要的。更进一步，为了提高效率，可基于各种仿真分析的具体需求，针对某一种应用工具软件，定义各种材料模型（或材料卡片），并保存，以备相关计算程序直接调用。

在产品结构分析中，按照材料的组分，对于不同类型的仿真分析，往往需要不同的材料参数，例如：对于静态仿真分析，材料库可提供的材料参数有：弹性模量，拉伸强度，屈服强度等；而对于疲劳仿真分析，材料库可提供材料的疲劳强度。另外，为便于识别并被程序调用，对每一种材料模型，在数据库中，都定义唯一的材料模型编号。

材料库中的材料模型数据卡如下图所示。材料库具有可扩展性，即：用户可以根据需要，添加和删除材料类别，牌号和材料属性等（数据库字段）。另外，客户也可基于材料库，在不同的仿真应用中，直接调用材料库中的数据，或者利用库中的材料数据，直接生成材料卡片，以供调用。

材料模型编号	类别	牌号	密度 (g/ [mm] ^3)	弹性模量 (Gpa)	拉伸强度 (Mpa)	拉伸屈服强度 (Mpa)	压缩屈服强度 (Mpa)	疲劳强度 (Mpa)	延伸率
10001	铝合金	2024	2.8	68	470	325		105	20%
10002	铝合金	2A70	2.8		355				12%
20001	钛合金	TC4	4.5		895	825			10%
20002	钛合金	TC10	4.5	108	1150	1060			
30001	镁合金	AZ31	1.74	44.5	260	195	100		14%

标准件管理

系统也可以根据企业产品的特点，建立适合企业的标准件仿真模型库，常用零部件仿真模型库，供仿真时直接调用，并可以对这些仿真模型库进行参数化，以快速生成仿真需要的CAE网格模型。

12.5 多方案数据对比

产品设计涉及多方案选型和对比，需要综合性能评价进行快速多方案、多工况数据对比。数据对比能够对

多个分析方案，不同工况分析数据基于分析目标进行自动的数据挖掘和组合，支持对分析关键结果数值曲线插值，帮助工程师分析设计方案的演化趋势，实现6-Sigma设计。

工程师可以根据需要选取装配组件和分析类型，可以一次只进行一种类型的仿真分析，也可以同时提交多种分析。通过仿真分析定义与应用软件的接口，驱动工具软件以交互或批处理方式执行。通过与分析过程集成配置，能够对多个方案、方案、模型及其关键结果等数据对比结果数据形成对比报告，且可以方便的发布到其它企业信息系统 如PDM系统等系统。

利用优化设计工具，设计人员可以通过直接改变设计变量，更新CAD模型，并且通过快速轻量化浏览工具观察新的设计模型。仿真人员可以直接点选CAE分析按键，多方案优化系统将自动将模型输出给仿真分析模板进行分析，并将分析结果也快速轻量化展示给设计人员，通过将分析结果以图、表等形式直观的展现给设计人员，从而实现方案的比对。该系统不仅可以对最终结果数据进行分析、比对，也可以对不同阶段、不用应用系统产生的数据进行分析、比对。

12.6 结果可视化

仿真结果数据可视化是指对某个或某几个数据以图形图表的方式显示出来，并可以对这些数据进行相关的操作和处理。仿真结果数据可视化为工程技术人员对模型的改进和优化提供依据。目前，各种 CAE 模型的统一可视化实现较为困难，可以将CAE模型转化为某种特定的数据格式，然后再通过可视化工具进行模型的浏览和查看，前提是需要CAE模型支持这种数据格式。

基于轻量化显示技术的显示工具是进行性能数字样机协同研发平台中重要的辅助工具，其主要功能需求是为了解决以下多学科仿真分析中的问题：

CAD/CAE/CAM工具种类日益增多，应用范围广、频率高

随着计算机及相关信息技术应用的不断深入和深化，研发企业使用的CAD/CAE/CAM工具越来越多，对此类工具的依赖程度也越来越高，尤其是相关设计人员日常工作基本就是同这些设计软件打交道。

产生大量数据，管理、共享困难

CAD/CAE/CAM使用范围、频率的增大，必然会产生大量的文件数据，包括3D模型数据、计算结果等，这些数据随着时间的积累不仅数量巨大，而且其中多数文件体量也很大，动则达到G级大小。如何在研发企业内有效的管理和共享这些数据，是一个巨大的挑战。频繁的进行数量众多的大文件的数据交换，必将导致相当程度的时间浪费和效率低下。

多种数据格式，难以统一处理

由于CAD/CAE/CAM工具的种类繁多，生成的数据文件也将是多种多样的，而一般情况下各种不同的数据格式都需要相对应的专业软件工具才能查看处理。这对于企业计算机工作环境的管理提出了难题，会极大的增加计算机管理难度和购置成本。

相关部门协同共享查看数据的需求

随着现代设计分工协作的细致与紧密程度的不断加强，多部门协同设计、共享数据的需求也越来越迫切。有必要在跨部门的协作上提供一套行之有效的数据共享、查看的解决方案，方便各相关部门及时、快捷、便利的了解、查看相关设计数据。

结果可视化模块采用基于Web、网络浏览器的3D可视化技术，具有统一管理、易于维护、客户端无依赖等特点，从而极大的提高研发企业的大量数据共享、查看的效率，也为管理维护提供了便利。

12.7 报告自动生成

产品仿真数据管理系统可以提供自动生成报告，根据已有仿真结果，报告自动生成系统可以按照企业的设计验证要求，生成虚拟仿真结果报告，此报告可以以WORD文件作为模板文件，通过在WORD段落中置入关键字和相关表达式，来通过外部文字、数据、图表生成相应的WORD格式文件。

定义这种WORD模板文件并对其进行输入数据控制的功能就是仿真报告的定制。仿真报告的定义功能主要包括：

- 1) 仿真报告WORD模板的定义
- 2) 仿真报告WORD模板控制关键字和表达式的解析
- 3) 仿真报告WORD模板在报告模板库中进行管理
- 4) 仿真报告应用到仿真结果中的关键字录入
- 5) 生成特定仿真报告WORD文件

整个仿真数据管理系统就可以对这些标准报告文件进行检索和查询，作为知识库文件供新设计方案参考和利用。

12.8 仿真数据管理平台给企业带来的收益

创新 创新对于虚拟仿真流程中获得性能优异的、不同的产品而言是至为关键的。通过使仿真流程方便、快捷地在开发早期运行更多的基于仿真的调研，则高效率的虚拟仿真可以降低费用、缩短时间、减小风险。这是对传统设计的突破同时也是一项艰巨的挑战。

设计空间探索研究 探索研究的关键不仅仅是访问当前设计的能力，而且要具有访问设计空间所有设计以及产品所遇到的不同的工况条件的能力。这使得在早期就可以探究研究所有设计可能，以保证在产品所有可能的使用状况下具有最优的性能。一个高效的探索研究环境不但加速虚拟样机的建造过程，而且能够评估所有设计和载荷工况变量。因此，这个环境需要提供一种方法获得仿真流程并可重复使用。

管理 今天的分析师已经花费了大量的时间用于常规的数据管理和搜索以前建造的模型及结果数据，数据管理不成熟已经成为进一步充分利用仿真技术的一个主要不利因素。仿真数据管理系统将用户从繁重的数据管理中解放出来并自动对所有数据进行组织和索引，是扩大仿真使用的必要环节，并且数据谱系关系的追踪对于理解和解释仿真数据是十分必要的。

辅助设计 有效地改善产品开发流程是提高产品性能的基本手段。其中及时的反馈是问题的关键，非常遗憾的是当前许多企业仍旧在设计完成后再进行仿真，这样造成仿真数据提交太晚而不能改进设计。当虚拟仿真和设计能够做到无缝集成后，将会以快速的方式给设计人员提供反馈，以保证设计不断提高。为了保证在设计阶段使仿真发挥作用，模型要针对当前设计进行实时更新，所得结果和结论要以快速和一致的方式反馈给设计人员。在企业的产品生命周期管理框架下，这需要连接诸如PDM系统等不同的PLM组件和仿真管理数据系统，并

使其具有通知和签署的机制。仿真数据管理系统可以设计为PLM框架下的一个组件，并可以交互沟通PLM框架内企业系统之间的数据流，进而可以参与到企业范围的工作流中去。

提高效率 通常，利用仿真数据管理系统开始的、直接的效益是减少分析师常规的、管理的工作量。客户业已显示可以达到超过50%的效率提高。

模型和知识的共享和知识库的积累 仿真数据管理系统通过提供对不同开发项目的数据、模型和结果的一致性访问而产生长期的、实质性的效益。这包括使分析师访问以前的知识和工作，从而加速当前的项目；分析师还能够通过挖掘数据以决定其关联性和趋势，并可以提供以前未有的结论。在体现产品开发能力的因素中，有两个是至关重要的，一是自己的开发流程和规范，一是凝聚了自己知识的数据库，仿真数据管理系统可以通过将仿真的经验、知识、规范等纳入到仿真平台中，从而构建企业自己的专业化产品设计分析知识库。这对于企业在未来的市场竞争中保持快速反应能力和竞争优势是非常重要的。

第13章

面向中小企业的
协同仿真云平台

第13章

面向中小企业的协同仿真云平台

13.1 中小企业的仿真现状

CAE技术广泛应用于大型及超大型企业，涵盖汽车及交通运输行业、民用船舶、轨道交通和摩托车等领域；工程机械、重型装备、模具、电机等领域，取得很大的经济效益，但是在中小型企业应用较少甚至是空白，主要原因是采用CAE技术不仅需要大的资金投入，更需要有专业的技术人员。专业人员的匮乏是中小企业采用CAE技术的最大障碍。

相对于制造业先进的国家，仿真技术在中国的应用尚处于早期阶段，具体表现为中国仿真技术应用的两极分化明显：广大的中小型企业仿真技术应用水平上与大型企业有很大差距，企业缺乏仿真技术应用的人才梯队；仿真技术应用的成熟度还比较低，缺乏仿真流程规范、材料数据库，只能独立应用各个学科的仿真技术；仿真技术应用与产品设计和试验部门脱节，还只能将仿真技术作为一种验证手段。

中小企业内部从高层、中层到设计研发部门普遍存在重设计轻仿真、重软件轻人才、重使用轻规范。改变中小企业目前的仿真现状需要从以下几个方面着手考虑：

1) 仿真战略。确定产品仿真能力作为产品研发的核心能力之一，选定符合企业产品战略和当前现状的仿真战略是第一重要的，要将建立产品仿真能力提高公司战略层面的高度。好的战略，要立足现状，面向未来，同时注重持续改进。

2) 组织体系和文化环境。仿真能力是中小企业设计研发的软实力，其核心关键是围绕仿真战略组建团队，开展人才培养。创造一个有利于仿真人才培养、考核与激励的组织体系和文化环境。

3) 仿真标准和规范。没有标准，企业不知道在设计和研发过程中何时用什么软件做什么仿真；没有规范，企业不知道如何做、做成什么样是对的，所以仿真结果一直波动，无法作为设计的参考。仿真能力的建设自始至终都要考虑仿真标准和规范的建立，他们是企业仿真核心能力的具体体现。

4) 协同仿真生态。中小企业由于财力、人力和物力的限制，不可能在短时间内建立完善的产品仿真分析能力，要有所为，有所不为。充分利用外部仿真专家技术资源，借助互联网技术和信息化协同平台，建立可靠的协同仿真服务供应链，快速获得产品研发仿真技术能力。

13.2 中小企业的仿真需求分析

从仿真分析涉及的学科领域来看，中小企业的仿真需求涉及仿真技术的方方面面。但从单个企业的需求来看，涉及的学科领域有限。随着仿真技术应用的深入，仿真技术也由单学科仿真发展到多学科多领域的协同仿真，同时仿真工作流程不断得到简化，一些企业已经开始根据需求针对仿真软件进行二次开发，建立自己的材

料库和标准件库。仿真技术也逐渐走向企业产品研发流程前端，驱动产品的设计创新。

总体来看，中小企业的仿真需求符合CAE仿真技术能力建设的一般规律：由点扩展到面，由浅入深，由单学科分析到多学科联合优化仿真。但鉴于中小企业的财力、人力限制，以自我为主，逐步开展仿真能力的建设路径不适合。CAE能力建设的初期，软硬件投入大，人才缺乏，产品仿真能力弱，见效慢，投入产出比低，导致企业不愿意开展仿真能力建设，产品研发核心能力难以提升。

中小企业的特点决定其仿真能力建设总体策略应采用优先解决仿真需求，其次培养人才，逐步配套仿真装备，最后完善仿真标准和规范。

首先企业需要开展仿真战略咨询。仿真战略既要高瞻远瞩，又要切合实际。目标远大才能走得长远，脚踏实地才能见到实效。仿真战略要根据行业的CAE应用水平和企业现状，制定企业的仿真能力建设目标、建设方案和人才培养计划。

其次明确现实产品中亟待解决的关键问题，寻找合适的仿真技术服务提供商，建立稳定的供应链合作关系，通过购买仿真技术服务快速获得CAE分析能力。这种整合外部资源的方式，投资少，见效快，容易增强企业建立仿真能力的信心，推动企业实施仿真战略。

在与外部开展仿真合作的过程中，企业可逐步培养仿真项目管理和技术人才，借助外部人才资源开发产品仿真方法，内部人才重复使用项目成果方法，逐步开展产品仿真能力的建立。

最后总结经过试验或产品验证过的流程方法，建立企业仿真标准和规范，在产品设计和制造中推广应用。

13.3 中小企业的仿真技术解决方案

中小企业的仿真技术解决方案应该包括软件工具和技术服务两个方面。CAD/CAE厂家更多从软件工具和软件使用支持服务角度提供通用型解决方案，涉及到具体的产品仿真技术细节，需要用户自己摸索掌握，厂家只能提供有限的技术支持和参考案例。

不同的厂家从不同的角度提供了各自的解决方案。专业CAE厂家提供入门级的CAE仿真工具，强调性价比高、上手容易和满足基本分析功能，如机构运动学分析，结构强度、刚度分析、模态等。随着仿真技术的普及推广，目前专业CAE厂家不再过分强调这一概念，很多中小企业产品中需要仿真解决的关键问题已不是基本分析功能可以解决的。专业CAE厂家通过收购兼并，提供一站式多学科解决方案满足不同工业领域的仿真需求，解决方案更强调专业性，不再区分企业规模。

仿真技术对于非专业用户和小型企业的适用性在不断提高，仿真技术也更加“平民化”，主要手段包括将仿真功能嵌入到CAD环境或者将CAD功能嵌入到CAE软件或者仿真环境；加强仿真流程自动化；在研发流程中导入行业仿真模板；加强仿真数据和流程管理。

主流的CAD厂家通过增加或集成CAE仿真能力的CAD/CAE融合式解决方案在中小企业更容易得到推广和应用。传统的CAD厂家拥有大量的用户基础，为顺应CAE技术逐渐普及的趋势，纷纷开展收购CAE厂家软件，集成在CAD软件之中。如AUTODESK公司收购了ALGOR、CFDESIGN、MOLDFLOW，达索系统收购abaqus、Isight、SIMPOE、SimPack等。西门子公司在传统的CAD公司中本身拥有较好的CAE基础，产品线中包含著名的I-DEAS仿真软件。

在美国的反垄断竞争中获得Nastran求解器技术后，通过收购LMS等一系列的CAE厂家后，显著增强了CAE仿真产品竞争力。

CAD/CAE集成式的解决方案降低了中小企业引入CAE技术的门槛，设计人员在熟悉的CAD环境中更容易上手CAE仿真技术。这种CAD/CAE融合软件产品作为中小企业入门级的解决方案应该是一个不错的选择。

国内仿真技术公司多数没有自己的CAE产品，提供一家或多家代理产品组成的组合解决方案，且受限于代理厂商的产品限制，解决方案适合于代理产品有比较优势的行业。

由于中小企业普遍CAE技术人才缺乏，相比于CAE仿真工具软件，产品仿真技术能力的获得更为关键。当前CAE可选软件产品十分丰富，企业可根据自己的需求和预算选择合适的产品，但获得持续的产品仿真技术能力反而较为困难。国外特别是发达国家的中小企业能够充分采用CAE技术提高自身创新能力，主要也是依靠社会力量特别是CAE技术方面的专业服务公司，这是非常值得我们借鉴的。因此中小企业的仿真技术解决方案重点应关注提供持续、成本可接受的产品仿真技术服务。

13.4 中小企业的协同仿真云平台

中小企业仿真核心能力的建设涉及人财物大量的投入，首先要开展仿真业务战略规划，其次要逐步配套相应的软硬件资源、人才资源，这些对绝大多数中小企业来说是难以企及的目标。

随着云计算技术的普及和推广，对于中小企业来说，公有云是一个不错的选择。围绕公有云组织软硬件资源，尤其是广泛的人才资源，搭建协同仿真云平台，为中小企业提供丰富、高质量、成本可接受的仿真技术服务。企业通过云平台专家咨询服务，确定仿真战略规划，借助云平台开展项目合作，确定紧密合作的仿真技术服务供应商，建立虚拟的CAE服务部门。

仿真云平台首先通过信息化手段，建立企业和仿真技术服务商紧密的协同合作模式，如同企业内部使用的协同工作平台，规范沟通方法，提高沟通效率，降低双方的合作成本。其次仿真云平台要配置高可扩展性、大规模、高可用性、成本低廉的软硬件资源，为中小企业提供灵活的、高性价比的仿真装备资源服务。企业根据产品仿真业务的发展，逐步建立自己的基础仿真能力体系，对于复杂、前缘和探索性仿真业务依然借助外部专业仿真技术服务。

如何利用公有云计算资源搭建协同仿真云平台，已有企业进行过不少探索。但这些平台重点建设放在提供仿真软硬件资源，并不切合中小企业的实际需求。中小企业协同仿真云平台建设重点在于提供协同仿真生态的信息化服务，有效对接企业仿真需求和社会化的仿真技术服务资源、软硬件资源，提供专业、高效的协同仿真工作平台。中小企业协同仿真云平台重点解决以下几个方面问题：

13.4.1 仿真需求的规范化描述

在仿真分析过程中，完整、正确的需求描述是建模仿真、校核验证的基础。通过对需求的定义，仿真分析人员可以详细地理解用户希望仿真分析所要解决的问题。准确描述仿真需求是正确开展仿真分析的基础，有时正确提出问题甚至比解决问题更关键。不同专业背景导致对仿真需求描述的差异性较大，有时会导致对物理模型的理解出现较大差异。仿真需求描述的规范化就是要尽量避免出现对分析问题理解的差异性。

仿真分析设计的学科分析范围较广，仿真需求规范描述除了共性的描述，还应包含学科分析的需求描述。

仿真需求描述至少应包含以下内容：

– 仿真问题描述

仿真问题描述可以从仿真对象、工作状态、运行过程、问题现象（破坏、失效或者需要改进等）几个方面描述。

仿真对象：可以是单一结构或者复杂系统，突出需要仿真的部分。如果不能准确界定仿真对象，可以适度扩大仿真描述对象，由仿真专家建模时取舍。

工作状态：描述结构或系统的约束、运动和载荷等。

运行过程：仿真对象在不同的时间段处于不同的工作状态，典型如加工工艺过程仿真。

问题现象：需要仿真分析解决的主要问题，简单的问题如强度、刚度校核，复杂的问题如减振降噪、性能优化、加工工艺参数确认等。有些情况下用户不能明确确定仿真问题的学科属性，应尽量给出细致的现象描述，如结构工作多少时间后出现断裂，在高速运行状态下振动噪声明显加大等。详细的问题现象描述有利于仿真专家建立物理模型，明确建模思路和方法。

– 仿真目标描述

针对描述的问题现象，描述仿真分析应解决的问题。如提高强度、降低振动、减轻产品重量、优化工艺参数等。

下面给出一个仿真项目需求示例：

船用十字轴万向联轴器在轴系传动系统中要承担传递大负荷扭矩，扭矩通过轴承上分布的圆柱滚子将扭矩转换为分布接触力传递给轴承。某型号万向联轴器在运行一万小时后检修，会出现一定比例的显著接触磨损，降低联轴器的使用寿命。

本项目通过建立合理的仿真模型和方法，获得滚子的接触应力分布，找到在设计寿命时间内造成轴承磨损的主要原因。同时应用本仿真分析方法指导改进产品设计，使联轴器的使用寿命提高20%。

为便于仿真需求描述的规范化，采用标准化表格方式填写，更加规范和标准化，便于需求描述和交流。针对特定的问题，也可制定针对性的仿真需求表格。将上面的描述示例转换为如下表格：

船用十字轴万向联轴器接触磨损预防仿真分析需求描述表

仿真问题描述	
仿真对象	船用十字轴万向联轴器
工作状态	两端通过轴承支座支撑固定，传递大负荷扭矩，额定转速 1000RPM 下，工作扭矩 100kNm。十字轴与滚子采用油脂润滑。
运行状态	低速旋转运动，转速范围在 0~2000RPM。
问题现象	工作 10000 小时开展检修，出现一定比例的十字轴接触磨损，影响产品使用寿命。
仿真目标描述	
接触应力分布	建立合理的仿真模型和方法，获得滚子的接触应力分布。找到在设计寿命时间内造成轴承磨损的主要原因。
使用寿命提升	应用本仿真分析方法指导改进产品设计，使联轴器的使用寿命提高 20%。

13.4.2 仿真需求到力学模型抽象

根据仿真需求描述抽象出正确的力学模型是有效开展仿真分析的重要一步，也是对仿真工程师专业功底的检验。对于简单的仿真需求，这一过程往往显示不出重要性，容易被忽略而直接进入仿真建模分析。但对于复杂的仿真问题，正确抽象出力学模型是后续成功建模分析的关键。养成仿真需求到力学模型抽象的思维模式，可以更容易透过现象抓住问题的本质。

抽象的力学模型建立一种描述来表达问题的本质并通过它来研究问题。模型并不是真实事务的复制品，它只是为了满足某个特定的目标，对真实事务部分特征的描述，一般不是全部，也不可能是全部。这其实指出了力学模型抽象的一个重要原则，对既定仿真目标负责，不对多余、无关的因素进行抽象或描述。不仅仅出于处于成本、效率、软硬件计算能力的考虑，同时防止仿真工程师陷入对真实事务中细节做过多的考虑而不能自拔。从仿真需求到力学模型抽象过程中，这一原则要贯穿始终。

力学模型抽象表达出问题本质，帮助我们对最终的建模目标有一个清晰透彻的理解，避免在仿真建模过程中偏离目标。在这一建模过程中，建模人员的力学模型抽象过程往往仅存在自己的脑海中，影响仿真模型的建立。随着建模分析的逐步深入，抽象的力学模型会逐渐改变，趋于更合理的表达仿真问题的本质。经过迭代分析后总结的力学模型能更准确代表仿真系统，验证后可以作为后续规范化建模的基础。

根据前述十字轴联轴器仿真需求描述，抽象出的力学模型：仅取出一个十字轴承、滚子和外圈部分，在十字轴交点中心位置施加额定扭矩，计算滚子对轴承的接触应力分布。考虑到结构和受力的对称性，仅取四分之一的单个轴承考虑计算，根据轴承接触受力特点，接触滚子取一半数量，使力学模型大大简化。

如果不针对仿真需求描述抽象出力学模型，试图在仿真模型中表达全部细节，建立的仿真模型将异常复杂，计算求解代价巨大甚至在有限的硬件资源上可能无法求解。

13.4.3 仿真建模分析过程规范化

有了抽象力学模型建模，还需要规范化仿真建模过程，这样可以逐步积累仿真经验，固化已有的仿真分析成果。仿真建模分析过程规范是一个逐渐形成的过程，在仿真实践中一定要注重总结积累。有了这样的目标，在建模过程中始终要思考当前的建模方法可否形成规范？特别对于重要产品或者重复性较多的仿真分析，总结仿真规范就显得特别有意义。国外很多企业非常注重仿真规范的建立，对于大型复杂的产品研发，仿真规范已覆盖从总体设计、详细设计到试验验证的各个阶段，学科范围涉及强度、传热、振动噪声、气动分析等等。国内航空航天、汽车行业在仿真规范的建立方面走在前列，取得了很好的应用成果，为中小企业的推广应用起到了很好的示范作用。

那究竟什么是仿真分析规范，企业为什么要建立仿真规范，以及如何建立仿真分析规范呢？

仿真分析规范的概念

仿真分析规范是基于企业的产品特点，总结以往的仿真分析经验、参照试验数据、借鉴其它行业的相关标准，以理论为指导，制定出一套规范化作业流程。CAE仿真规范主要包括两部分，即基础通用CAE仿真规范与主要CAE仿真业务涉及的分析规范两大部分：

基础通用CAE仿真规范：指的是对于企业通常进行CAE仿真总体的工作规范，指导如何进行CAE仿真分析及管理，具体可以根据客户的具体业务来分类和梳理；

具体业务分析规范：指的是企业对于其研发的具体产品类型进行某一类型仿真分析的业务规范，比如某类

型机匣强度分析规范，包括从模型的导入、几何清理简化、网格生成、材料等属性赋予、边界载荷设定、分析提交、结果处理、评价及报告编写等，同时形成一套作业指导书，分析工程师按照作业指导书进行机匣的强度分析，以此保证工作效率、精度。因此需要根据企业自身的产品分类来进行梳理、规划。

通常，会以企业研发的主要产品为研究对象，建立相应的仿真分析规范，用以规范企业的仿真分析。

企业为什么要建立仿真分析规范？

随着CAE仿真分析工作在企业的开展，大量的工程师参与到CAE仿真分析工作中去，不同的分析工程师在分析过程中，由于自身掌握的相关专业知识、软件掌握能力以及对产品本身的理解程度，往往在模型简化、网格划分、边界条件的处理上各不相同，具有较大的随意性，这就造成了不同的分析人员对于同一问题分析结果有一定差异，导致产品设计者对于分析结果的怀疑；在这种情况下要对此分析结果反复核查，浪费大量人力物力。

CAE仿真分析的很多重复性工作很耗时，如建模、划分网格、加载、出报告等，但每次又不得不去做，这些无增值的重复劳动使原本不多的高级分析人员和专家等宝贵资源陷入了基础性分析工作的泥潭，没有时间做更高级的分析和技术创新，这对企业竞争力的提升是一个极大的阻碍。同时由于仿真分析工作需要经过CAD/CAE建模、不同的性能仿真分析求解、结果评估和报告书写过程，该过程用到各种不同工具软件，导致分析人员频繁地进行数据转换、传递与更改，容易导致人为的错误而且浪费时间。

基于以上原因，重视新产品研发的企业迫切需要建立自己的CAE仿真规范，用来解决目前CAE仿真存在的各种问题。通过CAE仿真规范的建立，一方面可以用以指导、规范有限元分析工作；另一方面可以形成自身的知识积累，便于其他分析人员快速进入到规范的工作流程中，使企业的CAE仿真工作高效、快捷、准确的进行，为产品研发提供强有力的保障。

如何建立仿真分析规范？

CAE规范的建立与CAD、试验密切相关，一般CAE规范建立的步骤如下：

明确产品的性能要求，一个产品具有不同种类的性能要求，首先确定哪些性能指标需要进行仿真分析验证；确定性能指标的评价标准，这需要在对同类产品进行大量试验测试、计算分析、质量事故统计、参考相关标准的基础上形成；

制定有限元建模标准，重点内容是网格质量标准、边界条件与载荷标准，材料数据、连接模拟标准（螺栓、点焊、缝焊等），这需要在大量试验测试结果与计算结果相互校对的基础上形成；

确定计算结果的处理方法，最终的计算结果可能需要在已有的计算输出中进行进一步的数据处理，才能与试验测试结果和评价指标进行比对。

对于CAE仿真分析规范建设项目，主要的技术实现路线有：

- (1) 制定规范的CAE编制方法；
- (2) 制定通用的CAE规范；
- (3) 规范CAE具体业务分析流程；
- (4) 编制规范的CAE业务作业指导书；
- (5) 定制应用的CAE软件二次开发模板。

CAE仿真规范的建立是一个不断完善的过程，首先要从最基本最有把握的性能开始，对这些性能一般有较为丰富的试验测试数据、计算分析数据、质量事故统计数据，产品设计也趋于成熟，因此对性能指标的把握更可靠，在此基础上制定CAE规范，并用规范指导分析就更可信。

通过CAE仿真分析规范的建立应用，能够使CAE仿真分析工作标准化、规范化，有效缩短CAE分析的时间，提升CAE分析质量，通过规范建立积累-更新机制，实现工程分析经验与知识的不断积累，从总体上提高研发产品设计/分析能力，促进企业分析知识的共享和创新。

13.4.4 仿真分析质量控制与评估

传统典型的产品研发流程是设计—仿真（虚拟实验）—真实物理试验，随着CAE技术的发展，仿真逐渐替代试验，仿真经过验证后成为虚拟试验。在制造工业发达的国家虚拟试验平均取代了70%以上的物理试验，在某些行业甚至做到了完全取代真实试验。美国Jaguar Principal CAE/CFD事业部利用流体CAE工具完全代替了气动阻力计算、发动机舱热管理试验。奥地利虚拟汽车研究中心用假人、虚拟试验场进行虚拟撞车试验，代替了90%以上的真实撞车试验，节省了大量的试验费用。

CAE仿真能够替代物理样机试验的一个关键就是CAE仿真可信度高，经得起验证。仿真分析质量控制于评估采用CAE的V&V (Verification & Validation) 理念，V&V理念在国外已经发展了近十年，指的是CAE模型的验证与校核，这是使得CAE仿真成为虚拟试验的关键。在一个先进企业仿真部门的平均时间分配情况是进行仿真建模和分析工作<50%，进行V&V CAE仿真验证及试验工作>50%，这也强调了CAE验证与校核即V&V的重要性。V&V的核心思想是利用物理试验结果、解析解等数据，对CAE模型进行验证与校核，使得CAE仿真结果与试验结果具有一致性。美国机械工程师协会（ASME）和国际有限元工程师协会(NAFEMS)每年都召开专门的世界性V&V会议，共同进行V&V的技术交流。

对于一个产品来说，从整机到单一物理特性单元，每一个级别都需要建立CAE仿真模型，而每一个级别也需要进行物理试验对模型进行验证。

图13-1从单一物理特性单元到整机的模型验证



13.4.5 仿真业务协同管理

协同仿真过程之间存在着错综复杂的顺序关系、协同关系以及数据交换和信息共享需求，如何对整个仿真过程进行有效的管理、控制和协调，是实现协同仿真的关键技术之一。针对异步协同仿真的特点和需求，提出了层次化的管理模式和融合任务流与工作流的集成化过程管理与控制机制。通过开发和扩展项目管理和过程管理的功能，以及任务流与工作流的功能集成和数据集成，实现了协同仿真过程的层次化、集成化管理与控制。

通过仿真流程管理规范仿真任务执行，保证正确的数据传递到正确的仿真人员，并且使仿真人员工作目的更加明确，从而有效提高仿真工作的效率。此外，仿真流程管理具有柔性扩展机制可将特定仿真流程固化，简化仿真过程，并能与企业现有应用系统进行集成。

通过仿真技术集成，各种工具软件集成到一个统一环境中，工程师不需要切换到各种工具界面环境，软件之间的数据传递自动完成，大大减少仿真工程师的非技术性劳动，提高工作效率。能够将一些具体的、流程化的分析过程进行封装，实现仿真全过程的向导化和模板化。

参数化及参数管理通过定义模型参数及参数管理，实现参数化建模及分析，提高了仿真分析效率。参数化及参数管理模块可以定义参数，并基于参数管理器对参数集中管理，当确认分析过程能够完整走通后，用户可以进行参数调整，并重新执行求解，实现基于参数的仿真过程驱动。

优化设计模块与参数管理器结合，通过设计参数的调整，实现优化设计。优化设计通过设计探索驱动参数的运行，可以进行最大值最小值搜索、响应面分析等优化分析。

13.4.6 仿真专家工作室

仿真专家是仿真云平台的重要资源，仿真专家资源管理是仿真云平台的重要组成部分。仿真云平台通过仿真项目管理联系仿真需求和仿真专家资源，协调客户和仿真专家共同开展仿真分析活动。

通过异地部署，构建产品研发和制造的网络化环境。协同仿真异地部署为时空上分散的仿真工作人员提供一个“面对面”的协同工作环境，实现各方的仿真数据分享和访问权限控制。不仅改善相互间交流信息的方式，缩短传递信息的途径，消除在时空上相互分割的障碍，而且节省工作时间和精力，提高工作质量和效率。

仿真专家工作室提供的功能包括：

- ◆专家工作室团队资源介绍：团队及核心团队资源介绍。仿真专家的专业背景，技能特长，团队业务方向定位。
- ◆工作室的项目经验：已有的项目经验，便于客户参考了解。
- ◆项目承接范围：专家工作室可以根据自己的资源情况限定自己的业务范围。

专家团队可分为不同的等级层次，分工协作，取长补短，建立协同仿真生态。高级仿真专家做顶层CAE战略规划，物理模型抽象或者系统概念模型建立。高级仿真专家需要全面的理论基础和行业背景。

应用专家团队擅长仿真工具的使用，重点开展仿真分析项目的实施工作。由于仿真分析涉及的学科领域较广，应用专家团队可细分为不同的学科领域专家甚至仿真软件应用专家。

仿真云平台可从不同的专业理论水平、行业背景、项目经验、用户服务反馈等多方面开展专家团队的服务认证，便于对专家资源的能力水平进行分类标识，利于用户快速对接仿真需求。

另外，仿真专家团队还可对外提供仿真知识服务。仿真知识库包含仿真基础知识库、工具软件使用经验库和项目案例库，可由仿真专家团队提供，云平台提供信息化管理服务。

13.5 小结

仿真云平台充分利用公有云便捷、经济的优势，通过互联网信息化的手段，连接大量的中小企业仿真需求和全国仿真专家资源，快速建立专业化的仿真应用生态，为中小企业提供成本可控、持续优质的仿真技术服务。

借助仿真云平台，中小企业可获得高性价比的软硬件资源以及广泛、优质的外部仿真技术服务，通过项目合作确定紧密的合作伙伴，打造虚拟的仿真部门，在此基础上逐步建立自己的仿真研发能力，最终走向技术创新驱动产品创新。

第14章

智能数字化设计
和仿真的未来
技术展望

第14章

智能数字化设计和仿真的未来技术展望

14.1 数字化设计技术发展趋势

先进机械制造技术发展总趋势是精密化、柔性化、虚拟化、网络化、智能化、集成化及管理的创新，而数字化设计与制造技术是先进制造技术的基础，随着计算机技术的不断提高，Internet网络技术的普及应用，以及用户的需求，CAM, CAE, PDM等技术的发展，必将有力促进数字化设计技术的进一步发展。数字化设计技术发展趋势主要有：

(1) 单项技术向多项技术集成完善化发展。在CAD/CAM中的技术主要有：曲面建模技术、曲面与实体集成技术、实体建模技术、大型组件设计技术等。

(2) PDM与CAD/CAPP的技术集成技术。当前和今后一个时期，主要集中在封装、接口和集成技术。

(3) 数字化设计与虚拟仿真和制造的无缝连接。基于CAD技术和以计算机支持的CAE仿真技术，形成虚拟的环境，虚拟的设计和仿真、虚拟的制造过程、虚拟的产品、虚拟的企业，从而大大缩短产品开发周期，提高一次成功率。

数字化设计的网络化网络技术使得并行协同异地设计成为可能，必将极大的拓展强化提高数字化设计的效能。网络技术的高速发展推动网络设计制造技术的发展和广泛应用。企业通过国际互联网、局域网和内部网，可以实现对世界上任何一地的用户订单而组建动态联盟企业，进行异地设计、异地制造，然后在最近用户的生产基地制造成产品。

14.2 数字化仿真技术发展趋势

14.2.1 大数据对企业数字化设计和仿真的影响

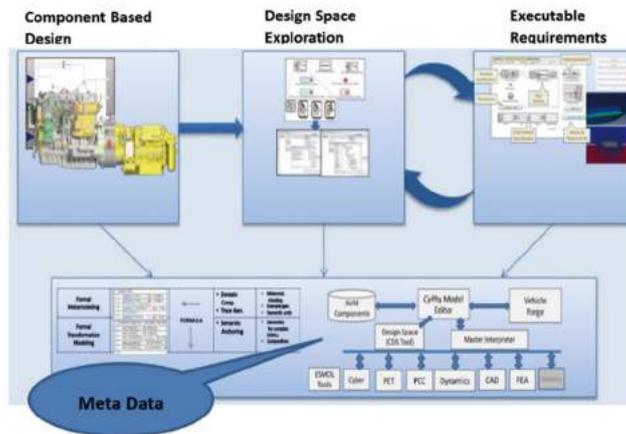
大数据时代的来临，影响着企业的生存命运，尤其是制造业，大数据作为新一代信息技术和产业发展的重要方向，对企业的设计研发，生产制造，经营管理，销售服务等产业链产生重要的影响。大数据与制造业融合空间广阔、发展潜力巨大，随着大数据海量、多样化、快速化、价值化特征的逐步显现，数据资产逐渐成为企业生产的核心，大数据对产品用户的重要性也日益突出，掌握收集大数据，进行智能化技术改革，已成为企业脱颖而出的关键。因此，越来越多的企业开始重视大数据战略布局，并重新定义企业的核心竞争力，乃至改变整个企业的发展方向。

提到“大数据”的概念，大多数人想到的是数据量的大，想到的大数据应用，也多是阿里巴巴、亚马逊等这些互联网企业和金融行业，制造业在数据量方面离这样的数据量级还有很大的差距，那是不是“大数据”离制造业很遥远呢？答案是否定的。维克托·迈尔·舍恩伯格在《大数据时代》指出，当我们用大数据的思维分析一个问题是，一个主要的特点是采用的数据样本不是抽取部分而是全部数据。当然，在多数情况下，这个“全

部数据”只能是理论上的无限接近,数据采集、存储、分析技术的发展给获得全部数据成为可能。在传统的信息化实施过程中,同样把数据的准确性和完整性作为重点,那么,从传统的信息化建设到“大数据”时代的跨越,我们需要从哪几方面进行思想上的转变呢?

首先,对数据的重视要上升到新的高度。在旧的观念中,数据质量一般会作为信息系统实施成功的关键,而在将来的企业管理中,数据会上升到企业战略的高度。数据不仅仅是服务于信息系统,而是要直接服务于企业的研发、设计和仿真、运营和决策。最近几年,有人提出了“数据资产”的概念,意在强调数据在未来企业研发和管理中的作用。作为制造企业来讲,要尽快对数据管理重视起来。

其次,要对数据的范围进行重新定义。在传统的企业信息化定义中,会把企业自身作为一个系统进行分析,一般将信息系统分为辅助决策系统、管理信息系统和底层的执行控制系统。在将来的信息化建设中,不仅要把原有系统数据进行整合,更要把数据的收集范围进一步扩大到整个供应链、行业及相关行业、社会环境等各个方面,要将产品全生命周期的数据进行收集和分析,将更多的数据纳入进来分析,才能为研发设计和管理人员决策提供更为有效地支持。



1) 大数据为建设制造强国提供机遇

大数据成为国家竞争力的战略制高点。当前,全球正处于新一轮科技革命和产业变革之中,通过对互联网、物联网等新一代信息技术所产生的海量数据进行分析,能够总结经验、发现规律、预测趋势、辅助决策,拓展人类认识世界和改造世界的能力,给人类经济社会创新发展提供强大引擎。

大数据为制造业转型升级开辟了新途径。处于数据爆炸的时代,制造企业获取、管理和利用到的数据量越来越大、种类越来越多,若能对数据进行科学的采集、组织、分析与利用,为产品全生命周期和企业生产经营各环节提供有价值的决策参考,就能提高生产率、利润率和企业综合发展水平。

我国具备发展制造业大数据的比较优势。我国制造业规模位居全球第一,规模以上制造企业数量众多,信息化发展水平日益提高,每时每刻产生大量制造数据,应用场景丰富,发展空间广大。为加快制造强国建设步伐,近年来国务院先后出台了《中国制造2025》《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》《促进大数据发展行动纲要》等政策文件,也为制造业大数据发展创造了良好的发展环境。

2) 大数据推动制造业全面转型升级

大数据精准响应用户需求,提高制造业研发设计水平。在研发设计过程中应用大数据,能够推动打造集成创新平台,广泛收集和深入挖掘消费者的使用行为数据与意见反馈信息,更准确地掌握海量消费者的使用喜好,并借由众创、众包等方式,将消费者带入到产品的需求分析和研发设计等创新活动中,推动产品设计方案的持续改进。

大数据实现业务场景交互，推动生产制造智能化升级。如果说传统的自动化、数字化、网络化给生产制造提供了“肢体”“感官”和“神经”，大数据的应用则给生产制造配上了“大脑”，使之能灵活应对各种业务场景，实现真正的智能。通过整合、分析制造设备数据、产品数据、订单数据以及生产过程中产生的数据，能够使生产控制更加及时准确，生产制造的协同度和柔性化水平显著增强。

大数据辅助企业科学决策，增强制造业经营管理能力。大数据的应用，能够推动跨行业、跨区域创新组织的建立和协同设计、电子商务、众包众创等新模式的发展，增强制造企业的经营管理能力。

大数据支撑生产型服务发展，加快制造业服务化进程。大数据加速制造业服务化转型主要有3个方向：一是使企业业务从产品生产销售，向生产型服务领域延伸；二是使企业发展模式从围绕产品生产销售提供售后服务，转为围绕提供持续服务进行产品设计；三是使企业的主要利润来源从产品制造与销售环节，转为售后的生产型服务环节。

大数据与传统业务加速融合，催生新产品新服务新业态。我国拥有全球最大的消费市场和最多样的消费需求，将大数据融入到可穿戴设备、家居产品、汽车产品的功能开发中，能够推动技术产品的跨越式创新，形成智能可穿戴设备、智能家居、智能网联汽车等制造业发展新领域，有助于抢占制造业新的增长点和制高点。

3) 促进大数据与制造业融合发展

当前和今后一个时期，推动大数据与制造业深度融合发展，要在以下几方面下功夫。

健全工业信息基础设施。加快建立容量更大、服务质量更可靠的工业宽带网络，加强制造业领域无线宽带网络规划布局，部署面向智能制造单元、智能工厂及物联网应用的低延时、高可靠的工业互联网。发挥互联网企业、工业软件企业优势，引导其与制造企业紧密融合，实现数据的统一采集、管理和高效处理。

建设制造业数据资源。推进传感器等数据采集终端的大规模应用，多渠道、多层面采集获取数据。引导和支持骨干企业、行业组织建设低成本、高效率的制造业大数据存储中心和分析中心，汇聚形成系统、全面、及时、高质量的数据资源。完善制造业数据资源建设相关体制机制，创新政策激励手段，形成各方面积极参与、互利共赢的数据资源建设生态。

突破制造业大数据核心技术。开放自主可控的制造业大数据平台软件和重点领域、重点业务环节应用软件，支持创新型中小企业开发专业化的制造行业数据处理分析技术和工具，提供特色化的数据服务。推动多学科交叉融合，开展制造业大数据分析关键算法和关键技术研究。

提升大数据分析应用能力。建设一批高质量的制造业大数据服务平台，推动软件与服务、设计与制造资源、关键技术与标准的开放共享，增强制造业大数据应用能力。

提高数据安全保障能力。研究制定面向制造业领域信息采集和管控、敏感数据管理等方面的大数据安全保障制度建设。研究制定数据分级标准，推动数据保护、个人隐私、数据资源权益和开发利用等方面的标准化工作和立法工作。制定出台对制造业数据采集、传输、保存、备份、迁移等的管理规范，有效保障数据全生命周期各阶段、各环节的安全可靠。

培养复合型大数据人才。支持有条件的高校结合计算机、数学、统计等相关专业优势，设立大数据相关专业。鼓励高校、科研机构和企业有计划、分层次的引进大数据相关的战略科学家和创新领军人才，依托制造业大数据领域的研发和产业化项目，引进拥有实践经验的大数据管理者、大数据分析员等高端人才。

4) 大数据在智能数字化设计和仿真的应用

从产品的全生命周期来看，概念设计、详细设计、仿真优化，虚拟样机、工艺制造、批量生产、用户使用

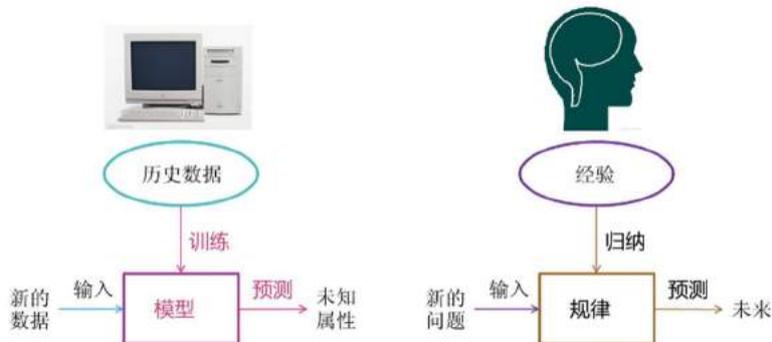
、日常维护直至产品寿命到期，整个过程会积累大量的数据，这些数据都会对我们的设计和仿真产生很大的影响，我们应该保留哪些数据、如何利用好这些数据来为新的设计和仿真服务，这始终是我们研究的课题。

大数据能为产品的运营维护服务，很典型的案例就是GE的案例，建立一个平台，为航空发动机的监控、运行监测、故障诊断提供一个全方位的服务。在产品的运行和维护过程中，大数据模式一改传统方法被动的运维模式，通过采集和分析智能设备的传感器数据，进行大数据分析，主动进行产品的安全监测、故障诊断，优化产品的运行过程。大数据应用过程中需要的是什么呢？首先需要的是能够采集到数据，也就是需要产品是一个智能化的产品，所以在智能制造中，首先要有智能化的产品，安装传感器，能够实时地传递数据，为后面的运行、维护服务提供依据。

当把监测反馈的数据传回企业数据中心，企业就能根据这些数据进行分析，重新进行仿真预测和实际结果的对比，找出存在的差距，调整仿真所需要的参数，实时预测产品今后可能存在的问题和寿命趋势，为产品的维护和零部件更换等提供精准指导。

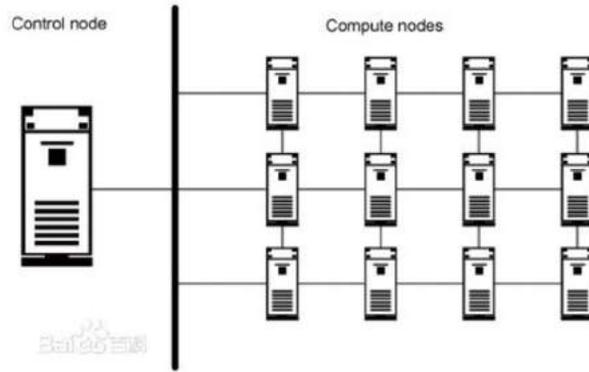
14.2.2 人工智能技术的应用

近几年也是人工智能技术大爆发的年份，人工智能的关键词是神经网络、机器学习、深度学习等词语，而这些词语的背后就是数学算法和大数据的支撑。通过对大量已有样本数据的分析和计算，让机器进行数据分析和学习，进行寻优，推演，找到正确的结论预测，给出最佳的对策，整个过程就是一个智能化学习、寻优、寻找最佳方案的过程，虽然现在应用于某些局部领域中，如下围棋、图像识别、智能驾驶等，但人工智能技术的发展也会应用到越来越多的领域，对于产品的全生命周期来讲，各个阶段都可以将人工智能技术融入其中。



14.2.3 软硬件技术的发展和高性能计算的应用

上面提到的人工智能技术最终都是硬件技术的实施让其成为实际应用，同样像5G技术、手机终端、超级计算机、云计算等技术，也会逐步应用到产品的研发设计和仿真中去，当设计和仿真伴随着大量数据时，首先就会带来计算量和计算速度问题，大量数据的快速传输通讯技术和高性能计算技术必然是实现其应用的基础，因此，这些技术也就会是智能化设计和仿真必然的组成部分。



14.2.4 VR技术的应用

VR技术也是这些年伴随着计算机图像学技术的发展在很多领域得到了应用，如游戏行业、产品广告宣传等等，都已经将虚拟现实技术融入其中，而我们CAE仿真中的后处理就是呈现仿真计算结果的过程，如果能将这此结果用VR的形式展现的话，那将会带来重大的视觉效果，并且这不仅仅是视觉效果的提升，产品的设计和仿真如果能以三维实际效果呈现的话，那对设计人员来说更是一种真实的体验，让设计人员真正感受到产品在三维场景下的工作状况，使其能够理解产品实际使用场景中的作用、性能、功能、空间等的实际效果。



14.2.5 智能化设计和仿真技术与3D打印技术的联动

智能化工厂的一大部分就是智能化生产，当通过智能化设计和仿真将产品设计定型后，下一步就是交由自动化生产线进行产品的批量生产，3D打印技术正在越来越多的被应用于各种产品的自动化生产线中，而智能化设计和仿真技术是3D打印技术必不可少的前提，如果没有经过优化设计和仿真验证的产品，那通过3D打印出来的产品也是没有竞争力的产品。



14.2.6 产品的个性化订制时代的实现

工业时代的最大特点就是规模化才有利润,这注定了产品不能彻底地个性化。如何调和这种矛盾,智能化设计和仿真技术伴随着以上各种技术的集成,让产品的个性化设计成为可能,在全数字化时代,客户对产品的需求全可以在虚拟的环境中看到并进行选择和体验验证,而被选择的产品就可以直接按照个性化的订制要求在工厂实现个性化制造,整个工厂的生产线的设计也可以按照个性化设计的概念进行配置和设计,这将会在保证大规模生产的前提下,生产出各人所需的产品,使产品设计真正实现个性化订制。

14.3 全数字化产品设计的实现

全数字化产品设计就是从产品的三维CAD设计、CAE仿真验证、直至CAM计算机辅助制造、包括产品的三维展现也是以VR形式展现、一切过程都可以在虚拟环境中实现,这就是我们制造业一直在努力的方向,真正实现全数字化产品的设计。



UNITED NATIONS
INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION

Vienna International Centre · P.O. Box 300 · 1400 Vienna · Austria
Tel.: (+43-1) 26026-0 · unido@unido.org
www.unido.org