

见习机械设计工程师资格考试培训教材

# 现代机械设计方法

中国机械工程学会机械设计分会 组编

谢里阳 主编

机械工业出版社

本书是中国机械工程学会关于《见习机械设计工程师资格认证实施细则》的规定与要求编写的，其目的是提高大学生从业的适应能力，满足用人单位对人才的迫切需要。

本书的编写充分考虑了工科专业大学生的基础和现实需要，内容全面，体系清楚，着重实例示范。本书内容包括四大部分：创新设计——~~创新理论~~、有限元方法与~~有限元应用~~、优化设计、可靠性设计。本书基本上包括了工程技术人员需要掌握的现代设计理论知识，在内容上力求做到深入浅出。

本书主要作为高等院校机械工程类专业毕业生和在校学生参加见习机械设计工程师资格考试的指导教材，也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代机械设计方法 谢里阳主编 北京：机械工业出版社，~~2008~~  
见习机械设计工程师资格考试培训教材  
~~陈景范~~

I 谢... II 谢... III 机械设计 原工程师 原资格  
考核 原教材 IV ~~机械工业~~

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 ~~10000~~ 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑：孙薇、邓海平  
责任编辑：蔡开颖 版式设计：张世琴 责任校对：程俊巧  
封面设计：王伟光 责任印制：洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2008 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷  
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 1.5 插页 1 字数 30 千字  
定价：15.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) ~~68995166~~  
封面无防伪标均为盗版



冯培恩教授，博士研究生导师，国家有突出贡献中青年专家。现任九三学社中央副主席、全国政协常委、国际机器与机构理论协会中国委员会副主席、中国机械工程学会机械设计分会理事长、中国挖掘机机械研究会理事长。

努力做好  
中国机械  
设计工程  
师资格认  
证事业。

姚福生

姚福生教授，博士研究生导师，中国工程院院士。现任中国机械工业教育协会理事长、中国机械工程学会副理事长、中国机械工程学会机械设计分会名誉理事长、中国电工技术学会副理事长等职。

任重道远

阮雪榆

2014年11月

阮雪榆教授，博士研究生导师，中国工程院院士。现任国家模具 悦 工程研究中心主任、上海模具技术研究所有限公司总裁。

发展职业资格  
培训  
提升机械设计  
水平

闻邦椿  
2004年4月1日

闻邦椿教授，博士研究生导师，中国科学院院士。现任 国际机械理论及机构学联合会（国际机器理论与机构学联合会）中国委员会委员、国际转子动力学技术委员会委员、亚太振动会议指导委员会委员、中国振动工程学会名誉理事长。

# 前 言

“~~圆~~世纪是设计的世纪”。为了更好地满足顾客的需求，保证产品质量，给企业带来最大的效益，减少对资源的消耗及环境产生的不利影响，科学、先进的设计方法的价值日益突显。

在“设计的世纪”，产品的质量在很大程度上依赖于产品的设计，据统计，产品的设计对产品质量的贡献率可达 ~~苑~~左右，而设计的成本只占总成本的 ~~圆~~~~~猿~~。这就要求设计工程师有科学设计的理念，掌握先进的设计方法，综合多学科的知识，创造性地应用各种各样的技术。同时，知识经济时代也是一个终生学习的时代，是一个更注重规范的时代。在这样的时代里，知识更新、持续发展都变得更加迫切，为了适应这样的需求，中国机械工程学会展开了见习工程师资格认证及相应的培训工作。作为“见习机械设计工程师”培训教材，本书以“适当阐释原理、力求学以致用、着重实例示范”为宗旨，安排了创新设计、优化设计、有限元方法和可靠性设计四部分内容。

设计的核心是创新。创新能力已是当今企业核心竞争力的重要标志，也是设计人员能力与价值的体现。本书在创新设计部分介绍了创造、创新、发明以及创新设计等基本概念，结合大量的工程应用实例，对解决创新、创造问题的理论（~~栽~~）进行了详细的分析和论述。通过 ~~栽~~理论的学习，能帮助设计人员打破思维定势，避免思维惰性，挖掘自身的潜能，开发人们的创新，创造或发明意识实现技术创新。内容包括冲突的概念及其分类、设计中物理冲突的解决原理和方法、设计中技术冲突的解决原理和方法、给出了利用冲突矩阵实现设计创新的具体步骤，使创新设计具体化。通过技术进化的实例分析，介绍了技术进化的基本思想，比较详细地论述了技术系统进化的 ~~员~~种模式，并对产品的技术成熟度预测方法进行了分析，从而使创新设计有章可循，方便快捷。

有限元方法是一种应用十分广泛的数值计算方法。在有限元方法部分，作为弹性力学问题有限元法的理论基础，介绍弹性力学中的基本概念、基本假设、基本方程以及虚位移原理等。结合弹性力学的平面问题，讲述有限元方法的基本内容、方法与步骤，包括边界条件处理和计算结果的后处理等内容，以及应用有限元法解决工程实际问题时常见的处理方法与技术。本书还通过典型实例比较详细地介绍了大型商用有限元分析软件 ~~粤~~的应用。

在优化设计部分，从优化设计的基本概念、分类及进行机械优化设计的一般过程开始，从机械优化设计的实例入手，介绍机械优化设计的数学模型、数学模型的标准格式、数学模型中应用到的基本概念，以及优化设计问题的基本

解法。

在可靠性设计方法方面，讲述工程中可靠性问题的表述方法和可靠度、失效率、平均无故障工作时间等可靠性度量指标，以及可靠性设计的基本内容和程序。介绍可靠性设计中经常用到的概率分布函数，作为零件可靠性设计基本原理的应力强度干涉模型及其应用，包括载荷分布参数的计算与强度分布参数的计算等。还有系统可靠性计算模型和系统可靠性分配模型等内容。

本书由谢里阳主编，参加编写的有：赵新军（第 1 篇），谢里阳（第 2 篇部分、第 3 篇），由美雁（第 4 篇部分），何雪泓（第 5 篇）。在本书的编写过程中得到了亿维迅集团的赵敏先生、广东再兴公司的田锋先生的真诚帮助，在此表示衷心的感谢。

本书为高等院校机械工程类专业毕业生和在校学生参加见习机械设计工程师资格考试的培训教材，也可供有关工程技术人员参考。愿此教材能作为设计人员拓展设计能力的工具，对设计人员应用先进的设计方法与技术、提高设计水平有所补益。

编者  
于沈阳

# 目 录

前言

## 第 1 篇 创新设计——创新理论

第 1 章 创新设计的基本概念 .....	1	第 7 章 利用技术进化模式	
1.1 创新设计 .....	1	7.1 实现创新 .....	1
1.2 创新的基本概念 .....	1	7.2 概述 .....	1
第 2 章 设计中的冲突及其		7.3 技术系统进化模式 .....	1
2.1 解决原理 .....	2	第 8 章 计算机辅助创新	
2.2 概述 .....	2	8.1 设计软件 (CAE) .....	2
2.3 物理冲突及其解决原理 .....	2	8.2 概述 .....	2
2.4 技术冲突及其解决原理 .....	2	8.3 创新能力拓展平台 (CAE) .....	2
2.5 利用冲突矩阵实现创新 .....	2	8.4 思考题与习题 .....	2

## 第 2 篇 有限元方法与工程应用

第 3 章 弹性力学有限元法的基本		3.4 连续体离散化 .....	3
3.1 思想和特点 .....	3	3.5 单元分析 .....	3
3.2 弹性力学问题概述 .....	3	3.6 整体分析 .....	3
3.3 有限元法的基本思想和特点 .....	3	3.7 边界约束条件的处理 .....	3
3.4 有限元法的应用领域 .....	3	3.8 求解、计算结果的整理和	
第 4 章 弹性力学的基本理论 .....	4	有限元后处理 .....	3
4.1 弹性力学中的基本假设 .....	4	第 5 章 有限元设计分析中的	
4.2 弹性力学中的基本概念 .....	4	5.1 若干问题 .....	4
4.3 弹性力学的基本方程 .....	4	5.2 有限元计算模型的建立 .....	4
4.4 平面问题基础理论 .....	4	5.3 减小解题规模的常用措施 .....	4
4.5 弹性力学中的能量原理 .....	4	第 6 章 有限元分析软件 .....	4
第 5 章 弹性力学有限元法 .....	4	6.1 通用有限元分析软件 .....	4
5.1 有限元法求解问题的基本步骤 .....	4	6.2 有限元分析软件介绍 .....	4

了解 编写程序的界面简介 .....	了解	了解 编写程序分析实例 .....	了解
了解 编写程序的菜单简介 .....	了解	思考题与习题 .....	了解
了解 编写程序的单位制 .....	了解		

## 第 8 篇 优化设计

第 8 章 概述 .....	了解	第 8 章 无约束问题的优化设计方法 .....	了解
了解 优化设计与传统设计中优化概念的比较 .....	了解	了解 一维搜索方法 .....	了解
了解 优化设计的分类 .....	了解	了解 最速下降法(梯度法) .....	了解
了解 机械优化设计的一般过程 .....	了解	了解 共轭梯度法 .....	了解
第 9 章 优化设计问题的数学模型 .....	了解	了解 牛顿法 .....	了解
了解 机械优化设计问题示例 .....	了解	了解 变尺度法(拟牛顿法) .....	了解
了解 优化问题数学模型的标准格式 .....	了解	了解 坐标轮换法 .....	了解
了解 优化设计数学模型中的几个基本概念 .....	了解	了解 罚函数法 .....	了解
了解 优化设计问题的基本解法 .....	了解	第 10 章 约束问题的优化设计方法 .....	了解
第 10 章 优化设计的数学基础 .....	了解	了解 内点惩罚函数法 .....	了解
了解 等值线(面)的概念 .....	了解	了解 外点惩罚函数法 .....	了解
了解 二次型函数 .....	了解	了解 混合惩罚函数法 .....	了解
了解 多元函数的方向导数与梯度 .....	了解	第 11 章 机械优化设计的应用 .....	了解
了解 函数的泰勒级数展开 .....	了解	了解 机械优化设计的一般步骤 .....	了解
了解 共轭方向 .....	了解	了解 建立数学模型的基本原则 .....	了解
了解 函数极值的判别及约束条件 .....	了解	了解 机床主轴结构的优化设计 .....	了解
了解 迭代算法及终止准则 .....	了解	思考题与习题 .....	了解

## 第 9 篇 可靠性设计

第 12 章 产品可靠性及其度量指标 .....	了解	第 13 章 可靠性设计中常用的概率分布 .....	了解
了解 产品设计中的可靠性问题 .....	了解	了解 二项分布 .....	了解
了解 产品质量与可靠性 .....	了解	了解 泊松(离散)分布 .....	了解
了解 可靠性问题的统计描述和表达 .....	了解	了解 正态(连续)分布 .....	了解
了解 统计学参数 .....	了解	了解 对数正态分布 .....	了解
了解 应用范例 .....	了解	了解 威布尔(半连续)分布 .....	了解
了解 产品可靠性指标 .....	了解	了解 指数分布 .....	了解
了解 可靠性设计程序 .....	了解		

第 15 章 机械零件可靠性设计 .....	150	15.1 系统可靠性模型 .....	153
15.1.1 零件可靠度计算的应力—强度		15.1.2 可靠性分配 .....	158
干涉模型 .....	154	15.1.3 思考题与习题 .....	162
15.1.2 典型机械零件的可靠性设计 .....	156	参考文献 .....	163
第 16 章 机械系统的可靠性 .....	165	附录 粤 .....	167
		附录 月 .....	168

## 第 4 章 创新设计的基本概念

### 4.1 创新设计

设计是人类的基本活动。按研究目的的不同,设计可以分为三个层面,即:设计哲学,从心理学及认知的层面研究设计的本质;设计理论与方法,依据设计哲学的研究结果及设计的实践,建立分步的或细化的设计过程模型、研究过程模型的支持工具、开发工具软件;设计的应用,包括产品设计、稳健设计、可靠性设计、优化设计、动态设计等。设计中科学的一面是设计者能更好的理解设计过程,艺术的一面是设计者的灵感及创造性能得到发挥。设计过程是解决问题的过程,是使产品由初始状态通过单步或多步变换实现或接近理想状态的过程。如果实现变换的所有步骤都已知,则称为“常规问题”;如果至少有一步未知,则称为“发明问题”。解决常规问题的设计是常规设计,解决发明问题的设计是创新设计。

创新设计是解决发明问题的设计,该过程的核心是概念设计。创新设计的特征是在概念设计阶段解决设计中的冲突和矛盾,提出新的或有竞争力的原理解。

### 4.2 发明问题的基本概念

#### 4.2.1 发明问题的产生和主要内容

发明问题是解决发明问题的理论,是实现发明创造、创新设计、概念设计的最有效方法。发明问题的一系列普适性工具能帮助研究、设计人员尽快获得满意的解决方案。

发明问题(系俄文首字母的缩写)意为解决发明创造问题的理论,起源于原苏联,英译为发明问题,英文缩写为发明问题。1946年,以前苏联海军专利部副部为首专家开始对数以百万计的专利文献加以研究,经过多年的搜集整理、归纳提炼,发现技术系统的开发创新是有规律可循的,并在此基础上建立了一整套体系化的、实用的解决发明创造问题的方法。发明问题是基于知识的、面向人的解决发明问题的系统化方法学,其核心是技术系统进化原理。发明问题理论对产品的创新是前所未有的突破,发明问题的来源及内容如图4-1所示。

由于发明问题将产品创新的核心——产生新的工作原理的过程具体化了,并提出了规则、算法、与发明创造原理供研究、设计人员使用,使它成为一种较完善的创新设计理论。

发明问题几乎可以被用在产品全生命周期的各个阶段,它与开发高质量产品、获得高效益、扩大市场、产品创新、保护自主知识产权以及研发下一代产品等都有十分密切的联系。发明问题的主要内容如图4-2右部分所示。

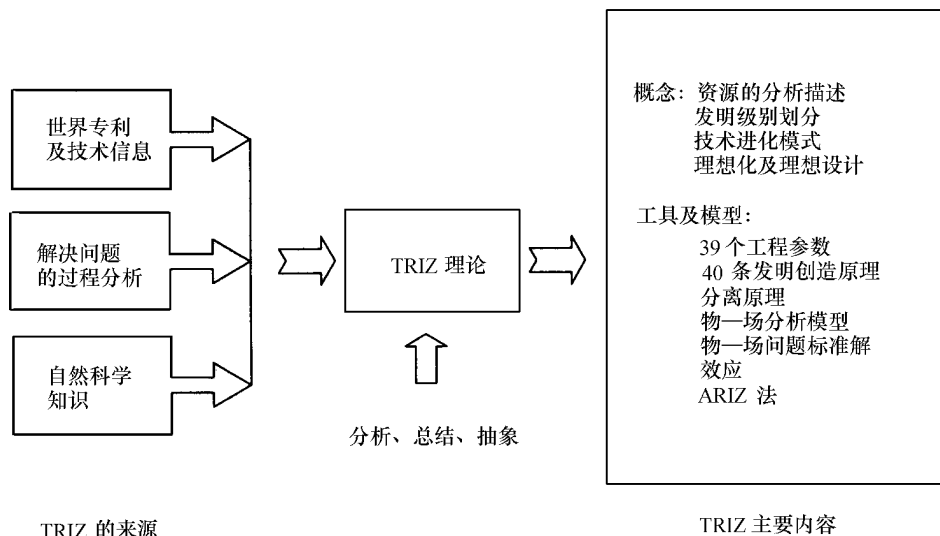


图 1-1-1 TRIZ 的来源及内容

### TRIZ 的重要发现

在技术发展的历史长河中，人类已完成了许多产品的设计，设计人员或发明家已经积累了很多发明创造的经验。TRIZ 研究发现有：

1. 在以往不同领域的发明中所用到的原理（方法）并不多，不同时代的发明，不同领域的发明，其应用的原理（方法）被反复利用。

2. 每条发明原理（方法）并不限定应用于某一特殊领域，而是融合了物理的、化学的和各工程领域的原理，这些原理适用于不同领域的发明创造和创新。

3. 类似的冲突或问题与该问题的解决原理在不同的工业及科学领域交替出现。

4. 技术系统进化的模式（规律）在不同的工程及科学领域交替出现。

5. 创新设计所依据的科学原理往往属于其他领域。

例 1-1-1 美国的 F-117 隐形战斗机，其隐身的主要原理是依靠奇特的外形设计、特种材料及特种涂料的共同作用，如图 1-1-2 所示。如果其他国家也想开发隐身战斗机，就不可能步美国的后尘，只能另辟蹊径，采用其他的原理和方法实现隐身的功能。俄罗斯已经开始试验研究，利用在飞机周围产生离子云的原理实现战斗机的隐身，如图 1-1-3 所示。由此可见，若要实现某一功能，可以采用不同的原理。可以是几何学方面的，也可以是物理学方面的，这也印证了“创新设计所依据的科学原理往往属于其他领域”。

### TRIZ 解决发明创造问题的一般方法

最早的发明课题是靠试误（错）方法，即不断选择各种解决方案来解决问题。例如：仿制自然界中的原型物、放大物体、增加数量、把不同物体联成一个系统等方法。在这段漫长的岁月里，人们积累了大量的发明创造经验与有关物质特性的知识。人们利用这些经验与知识提高了探求的方向性，使解决发明问题的过程有序化，同时发明问题本身也发生了变化，随着时间的推移越来越复杂，直至今日，要想找到一个需要的解决方案，也得作大量的无效尝试。



图 1-10 隐形隐身战斗机



图 1-11 能产生离子云隐身的战斗机

解决发明创造问题的一般方法是：首先将要解决的特殊问题加以定义、明确；然后，根据科学理论提供的方法，将需解决的特殊问题转化为类似的标准问题，而针对类似的标准问题总结、归纳出类似的标准解决方法；最后，依据类似的标准解决方法就可以解决用户需要解决的特殊问题了。解决发明创造问题的一般方法可用图 1-12 表示。图中的 39 个工程参数和 40 个解决发明创造的原理将在本书第 2 章中详细介绍。

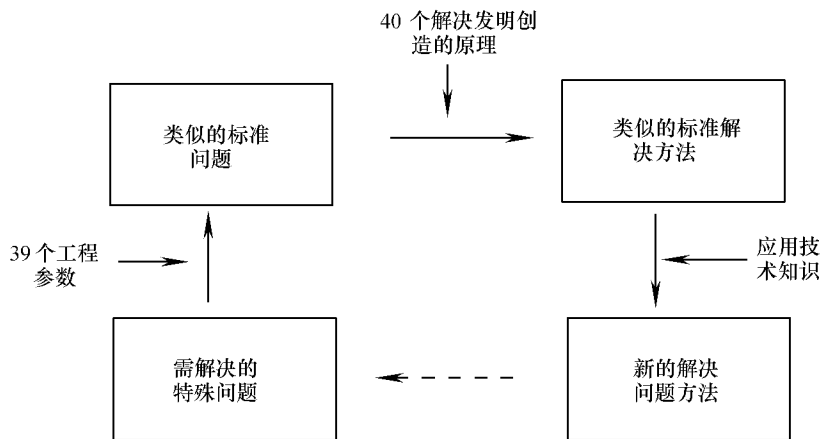


图 1-12 解决发明创造问题的一般方法

例 1-1 需设计一台旋转式切削机器。该机器需要具备低转速（ $1000 \text{ r/min}$ ）、高动力以取代一般高转速（ $3000 \text{ r/min}$ ）的交流电动机。具体的分析解决该问题的框图如图 1-13 所示。

### 发明创造的等级划分

通过分析专利发现，各国家不同的发明专利内部蕴涵的科学知识、技术水平都有很大的区别和差异。以往，在没有分清这些发明专利的具体内容时，很难区分出不同发明专利的知识含量、技术水平、应用范围、重要性、对人类的贡献大小等问题。因此，把发明专利依据其对科学的贡献程度、技术的应用范围及为社会带来的经济效益等情况，划分一定的等级加以区别，以便更好地推广应用。科学理论将发明专利或发明创造分为以下五个等级（水平）。

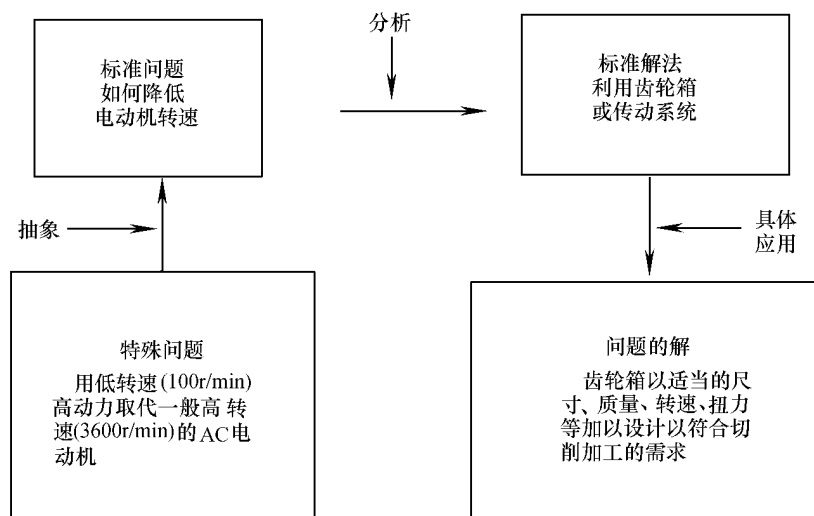


图 1-1-1 设计低转速高动力机器分析框图

第 1 级：通常的设计问题，或对已有系统的简单改进。这一类问题的解决主要凭借设计人员自身掌握的知识和经验，不需要创新，只是知识和经验的应用。如用厚隔热层减少建筑物墙体的热量损失，用承载量更大的重型卡车替代轻型卡车，以实现运输成本的降低。

该类的发明创造或发明专利占有所有发明创造或发明专利总数的 1/1000。

第 2 级：通过解决一个技术冲突对已有系统进行少量改进。这一类问题的解决主要采用行业内已有的理论、知识和经验即可实现。解决这类问题的传统方法是折中法，如在焊接装置上增加一个灭火器、可调整的方向盘等。

该类的发明创造或发明专利占有所有发明创造或发明专利总数的 1/100。

第 3 级：对已有系统的根本性改进。这一类问题的解决主要采用本行业以外的已有方法和知识解决该问题，如汽车上用自动传动系统代替机械传动系统，电钻上安装离合器，计算机上用的鼠标等。

该类的发明创造或发明专利占有所有发明创造或发明专利总数的 1/10。

第 4 级：采用全新的原理完成对已有系统基本功能的创新。这一类问题的解决主要是从科学的角度而不是从工程的角度出发，充分挖掘和利用科学知识、科学原理实现新的发明创造，如第一台内燃机的出现、集成电路的发明、充气轮胎的发明、记忆合金制成的锁、虚拟现实的出现等。

该类的发明创造或发明专利占有所有发明创造或发明专利总数的 1/1000。

第 5 级：罕见的科学原理导致一种新系统的发明、发现。这一类问题的解决主要是依据自然规律的新发现或科学的新发现，如计算机、形状记忆合金、蒸汽机、激光、晶体管等的首次发现。

该类的发明创造或发明专利不足所有发明创造或发明专利总数的 1/1000。

实际上，发明创造的级别越高，获得该发明专利时所需的知识就越多，这些知识所处的领域就越宽，搜索有用知识的时间就越长。同时，随着社会的发展、科技水平的提高，发明创造的等级随时间的变化而不断降低，原来最初的最高级别的发明创造逐渐成为人们熟悉和

了解的知识。发明创造的等级划分及知识领域见表 1-1。

表 1-1 发明创造的等级划分及知识领域

发明创造的级别	创新的程度	所占百分比（豫）	知识的来源	参考解的数量
员	明确的解	猿	个人的知识	猿
圆	少量的改进	猿	公司内的知识	猿
猿	根本性的改进	猿	行业以外的知识	猿
源	全新的概念	源	科学知识	猿
缘	发现	约员	所有已知的知识	猿

由表 1-1 可以发现：

猿的发明专利是利用了行业内的知识。只有少于 缘的发明专利是利用了行业外的及整个社会的知识。因此，如果企业遇到技术冲突或问题，可以先在行业内寻找答案；若不可能，再向行业外拓展，寻找解决方法。若想实现创新，尤其是重大的发明创造，就要充分挖掘和利用行业外的知识，正所谓“创新设计所依据的科学原理往往属于其他领域”。

# 第 4 章 设计中的冲突及其解决原理

## 4.1 概述

### 4.1.1 冲突的概念

产品是多种功能的复合体，为了实现这些功能，产品要由具有相互关系的多个零部件组成。为了提高产品的市场竞争力，需要不断根据市场的潜在需求对产品进行改进设计。当改变某个零部件的设计，既提高产品某方面的性能时，可能会影响到与这些被改进零部件相关联的零部件，结果可能使产品或系统的另一些方面的性能受到影响。如果这些影响是负面影响，则设计出现了冲突。

例 4.1 飞机设计中，如果使其垂直的稳定器的面积加大一倍，将减少飞机振动幅值的缘故，但这将导致飞机对阵风和阵雨的敏感，同时增加了飞机的质量。

冲突普遍存在于各种产品的设计中。按传统设计中的折中法，冲突并没有得到彻底解决，而只是在冲突双方取得折中方案，或称降低冲突的程度。辩证理论认为，产品创新的标志是解决或移走设计中的冲突，而产生新的有竞争力的解。发明问题的核心是发现冲突并解决冲突，未克服冲突的设计并不是创新设计。产品进化过程就是不断的解决产品存在的冲突的过程，一个冲突解决后，产品进化过程处于停顿状态；之后的另一个冲突解决后，产品移到一个新的状态。设计人员在设计过程中不断地发现并解决冲突，是推动设计向理想化方向进化的动力。

### 4.1.2 冲突的分类

#### 4.1.2.1 通常的分类

图 4.1 是冲突的一般分类。冲突分为两个层次，第一个层次分为三种冲突：自然冲突，社会冲突及工程冲突，该三类冲突中的每一类又可细分为若干类。在图 4.1 中冲突解决的程度自下向上，自左向右，解决越来越困难。即技术冲突最容易解决，自然冲突最不容易解决。

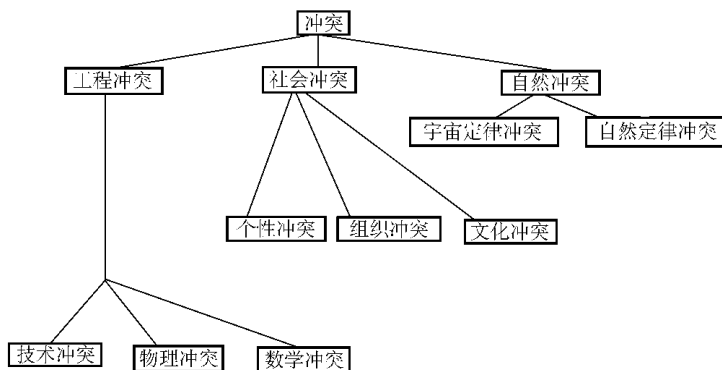


图 4.1 冲突分类树