

高等学校教材

现代机械设计方法

倪洪启 谷耀新 主编



化学工业出版社

·北京·

现代设计方法在国内外已经广泛应用于机械、电子等类产品设计。本书介绍了产品设计中已获得广泛应用且较为成熟的五种现代设计方法,具体内容包括:设计方法学、计算机辅助设计、有限元法、机械最优化设计和机械可靠性设计五方面。本书从实际应用角度阐述了这些方法的基本概念、基本理论、基本计算步骤和应用实例。本书内容深入浅出,易于阅读和自学,通过本书学习,意在培养高等工科院校学生和有关人员了解、掌握和应用现代设计方法解决生产实际问题的基本技能。

本书可作为高等学校机械类专业及相关专业本科生的教材,也可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代机械设计方法/倪洪启,谷耀新主编. —北京:化学工业出版社,2008.2
高等学校教材
ISBN 978-7-122-02020-8

I. 现… II. ①倪…②谷… III. 机械设计-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第012396号

责任编辑:程树珍 金玉连

文字编辑:陈喆

责任校对:王素芹

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数467千字 2008年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究

机械设计制造及其自动化专业系列教材编写委员会

主任委员：邵泽波

副主任委员：程 凯 张建伟

委 员：（按拼音排序）

陈 庆 董林福 耿德旭 姜生元 刘晓杰 吕 太
田 野 闫占辉

编写人员：（按拼音排序）

高 艺 郝成弟 靳 丹 李任江 李 静 李颖卓
孟庆合 宋树坚 王毅坚 王 茁 张志义 张 波
赵艳春

总 主 编：邵泽波 程 凯 陈 庆

前 言

现代设计方法是在继承和发展传统设计方法的基础上融合了现代的科学理论和科学技术成果而形成的，是以设计产品为目标的一个知识群体的总称，目前已发展成为一门新兴的综合性、交叉性学科。现代设计方法在国内外已经广泛应用于机械、电子等类产品的设计中。现代设计方法种类繁多，内容十分广泛，编者结合多年来从事教学与科研工作的经验，将本书的重点放在实践中应用十分广泛的几种现代设计方法：设计方法学、计算机辅助设计、有限元法、机械最优化设计和机械可靠性设计等。

本书在编写过程中，贯彻少而精、理论联系实际的原则。在教材的编写上着重考虑以下几方面。

① 本着少而精的原则，着重讲解了设计方法学、计算机辅助设计、有限元法、机械最优化设计和机械可靠性设计五种现代设计方法的基本概念、基本理论和基本计算步骤，内容由浅入深，通俗易懂。

② 重点突出。现代设计方法种类繁多，内容十分广泛，没有必要介绍和讨论现代设计方法的全部内容。因此，本书着重介绍了在实践中应用十分广泛的、技术成熟的现代设计方法：设计方法学、计算机辅助设计、有限元法、机械最优化设计和机械可靠性设计等。

③ 既注重全书的整体性，又兼顾各章节的独立性，以便于组织教学。本教材作为一个整体，每一章节介绍了一种现代设计方法。一方面各章节力求保持统一风格，另一方面各章节又自成一体，教师可根据教学计划和学生基础合理取舍。

④ 理论与实际应用相结合。在介绍这些方法的基本概念、基本理论、基本计算步骤的同时，也列举了大量的这些设计方法的应用实例，便于学生对这些方法的理解和掌握。

本书由沈阳化工学院倪洪启和沈阳理工大学谷耀新主编。参加编写的人员有：倪洪启和沈阳工业大学赵铁军（第1章）；沈阳化工学院于玲（第2章）；沈阳化工学院王树强、刘希敏（第3章）；沈阳理工大学谷耀新、周丽（第4章、第5章）；沈阳理工大学杨永清（第4.5节）；倪洪启、沈阳航空工业学院白金兰（第6章）。全书由倪洪启统稿，由沈阳化工学院董林福和沈阳理工大学安晓卫主审。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2008年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 现代设计方法的概念	1
1.1.2 设计方法的发展过程	1
1.1.3 现代设计与传统设计	2
1.2 现代设计方法的主要内容和特点	2
1.2.1 现代设计方法的主要内容	2
1.2.2 现代设计方法的特点	5
1.3 学习现代设计方法的意义	6
2 设计方法学	7
2.1 概述	7
2.1.1 设计系统	8
2.1.2 技术系统	12
2.1.3 产品设计的类型与设计原则	13
2.2 创造性设计方法	14
2.2.1 创造力和创造过程	14
2.2.2 创造性思维	17
2.2.3 创造技法	19
2.3 系统化设计方法	21
2.3.1 功能分析法	21
2.3.2 系统化设计实例——汽车举升机设计	25
2.3.3 系统化设计中的评价与决策	27
习题	33
3 计算机辅助设计 (CAD)	34
3.1 CAD 的概述	34
3.1.1 CAD 的概念	34
3.1.2 应用 CAD 技术的优越性	35
3.1.3 CAD 技术的应用领域	35
3.1.4 CAD 的发展历程及其发展趋势	36
3.2 CAD 系统的构成	38
3.2.1 CAD 系统的硬件平台	38
3.2.2 CAD 系统的软件平台	41
3.2.3 CAD 系统的类型及系统选择	43
3.3 工程数据的处理方法	44
3.3.1 数据组成	45
3.3.2 数表的程序化处理	45
3.3.3 实测数据的曲线拟合	47
3.3.4 数据结构	48

3.3.5	图形标准	51
3.3.6	产品数据管理技术	53
3.4	数据库及其应用	55
3.4.1	数据模型	56
3.4.2	数据库的特点	56
3.4.3	数据库管理系统	57
3.4.4	工程数据库系统	58
3.4.5	数据库系统的应用	59
3.5	图形处理技术	61
3.5.1	计算机图形技术的基本概念	61
3.5.2	图形处理的数学基础	62
3.5.3	坐标系	64
3.5.4	窗口与视区变换	65
3.5.5	图形裁剪	66
3.5.6	二维与三维图形变换	66
3.6	常用的 CAD 软件	70
3.6.1	I-deas 系统	70
3.6.2	Unigraphics 系统	70
3.6.3	Pro/Engineer 系统	70
3.6.4	CATIA 系统	71
3.6.5	AutoCAD 系统	71
	习题	71
4	有限元法	73
4.1	概述	73
4.2	弹性力学基础	75
4.2.1	弹性力学假设	75
4.2.2	基本概念	75
4.2.3	弹性力学中的典型问题	77
4.2.4	弹性力学平面问题基本方程	78
4.2.5	圣维南原理	82
4.2.6	虚位移原理	83
4.3	平面问题的有限元法	85
4.3.1	三角形常应变单元	85
4.3.2	面积坐标与形函数性质	90
4.3.3	单元刚度矩阵及性质	92
4.3.4	整体分析	97
4.3.5	单元等效节点力与整体载荷阵列	101
4.3.6	收敛准则	104
4.3.7	有限元分析步骤	105
4.4	轴对称问题有限元法	110
4.4.1	轴对称问题基本方程	110
4.4.2	单元分析	113
4.4.3	等效节点载荷计算	115
4.5	等参数单元	117
4.5.1	四节点平面矩形单元	118
4.5.2	等参元的概念	121

4.5.3	平面等参元	126
4.5.4	高斯积分法简介	135
4.6	有限元软件简介	136
4.6.1	概述	136
4.6.2	ANSYS 的相关介绍及其分析流程	141
	习题	160
5	机械优化设计	164
5.1	优化设计总论	164
5.1.1	优化设计数学模型	164
5.1.2	优化问题的几何描述	168
5.1.3	优化问题的数值迭代法	169
5.2	一维优化方法	170
5.2.1	确定初始区间的进退法	171
5.2.2	黄金分割法	172
5.2.3	二次插值法	175
5.3	无约束优化方法	178
5.3.1	数学基础	178
5.3.2	梯度法	183
5.3.3	牛顿法 (Newton 法)	186
5.3.4	共轭梯度法	189
5.3.5	变尺度法	194
5.3.6	鲍威尔 (Powell) 法	198
5.4	约束优化方法	203
5.4.1	约束优化问题的极值条件	204
5.4.2	随机方向法	206
5.4.3	复合形法	210
5.4.4	可行方向法	214
5.4.5	惩罚函数法	219
5.5	最优化方法在机械设计中的应用	228
5.5.1	机械优化设计的一般步骤	228
5.5.2	阶梯轴的优化设计	231
5.5.3	平面铰链四杆机构再现运动规律的最优化设计	232
5.5.4	最小体积二级圆柱齿轮减速器的优化设计	234
	习题	236
6	机械可靠性设计	239
6.1	概述	239
6.1.1	可靠性研究历史发展	239
6.1.2	中国机械可靠性研究现状	240
6.1.3	机械可靠性研究的必要性	241
6.1.4	机械系统可靠性设计的特点和难点	242
6.2	可靠性基本概念和理论	242
6.2.1	可靠性的基本概念	242
6.2.2	可靠性特征量	243
6.2.3	典型失效曲线	247
6.2.4	可靠性的概率分布	247
6.3	机械零件可靠性设计	252

6.3.1	概率法机械设计	253
6.3.2	应力-强度干涉模型	254
6.3.3	零部件静强度可靠性设计	256
6.3.4	零部件疲劳强度可靠性设计	257
6.4	机械系统可靠性设计	263
6.4.1	系统模型	263
6.4.2	系统可靠性预测	266
6.4.3	系统可靠性分配	268
6.4.4	机械系统可靠性预计	271
6.5	可靠性设计应用实例	272
6.6	其他机械产品可靠性设计方法简介	273
6.6.1	TTCP法	274
6.6.2	平均累计故障率方法	274
6.6.3	稳健性设计	274
6.6.4	故障模式、影响及危害性分析(FMECA)	275
6.6.5	故障树分析法(FTA)	275
	习题	275
	参考文献	278

1 绪 论

1.1 概述

1.1.1 现代设计方法的概念

设计是人类一种复杂的思维过程，是创造性的劳动，是人类改造自然的基本活动之一。人类在认识世界和改造世界的历史长河中，一直在从事着设计活动。从某种意义上说，是人类不断进行的创新设计活动，推动了人类文明的进步。

人类的设计活动从早期的直觉设计阶段开始，经历了经验设计阶段，半理论半经验设计阶段，即所谓的传统设计，发展至今。随着电子技术、计算机技术、网络技术的迅猛发展，信息时代的来临，使人们以往的生活方式、工作方式和思维方式发生了巨大的改变，由此对设计方面产生了深远的影响。市场竞争的需要和各种新方法、新技术、新工艺、新材料的不断涌现，推动了设计方法和技术的进步，产品设计从传统的经验设计进入现代设计。

现代设计方法是传统设计方法的深入、丰富和完善，虽然目前对现代设计方法尚无确切定义，但可以这样理解现代设计方法：现代设计方法是用系统的观点，考虑自然科学、社会科学、经济科学等诸多现代因素，从而获得质高、价廉、有创新产品所使用的设计程序、规律及设计中的思维、工作方法和工具的总和；现代设计方法是以研究产品设计为对象的科学，它以电子计算机为手段，运用工程设计的新理论和新方法，使计算结果达到最优化，使设计过程实现高效化和自动化；现代设计方法是传统设计方法的延伸和发展，是人们把相关科学技术综合应用于设计领域的产物，它使传统设计方法发生了质的变化。

1.1.2 设计方法的发展过程

从设计方法的发展过程来看，设计方法的发展大致经历了如下四个阶段。

(1) 直觉设计阶段

古代的设计是一种直觉设计，当时人们是从自然现象中直接得到启示，或是凭自己的直观感觉来设计制作工具。设计方案存在于手工艺人头脑之中，无法记录表达，产品也是比较简单的。直觉设计阶段在人类历史中经历了一个很长的时期，17世纪以前基本都属于这一阶段。

(2) 经验设计阶段

随着生产的发展，一部分经验丰富的手工艺人将自己的经验或构思用图纸表达出来，然后根据图纸组织生产。图纸的出现，既可使具有丰富经验的手工艺人通过图纸将其经验或构思记录下来，传于他人，便于用图纸对产品进行分析、改进和提高，推动设计工作向前发展，还可满足更多的人同时参加同一产品的生产活动，满足社会对产品的需求及提高生产率的要求。

(3) 半理论半经验设计阶段

20世纪以来，由于科学和技术的发展与进步，设计的基础理论研究和试验研究得到加

强,随着理论研究的深入、试验数据及设计经验的积累,已形成了一套半经验半理论的设计方法。这种方法以理论计算和长期设计实践而形成的经验、公式、图表、设计手册等作为设计的依据,通过经验公式、近似系数或类比等方法进行设计。采用这套方法进行产品设计,称为传统设计。

(4) 现代设计阶段

近 30 多年来,由于科学和技术迅速发展,人们对客观世界的认识不断深入,设计工作所需的理论基础和手段有了很大的进步,特别是电子计算机技术的发展及应用,其计算速度不断加快,存储能力不断增强,工程软件水平日益提高,数据库的完备和网络技术的出现,对设计工作产生了革命性的影响,为设计工作提供了实现设计自动化和精密计算的条件。在产品设计中应用 CAD、CAE、优化设计、动态设计等技术方法,广泛应用试验和计算机技术进行产品设计。应用现代设计方法使新产品的开发周期大大缩短,产品质量和产品生产过程的自动化程度得到了提高,降低了产品的生产成本,增强了产品的竞争能力。

1.1.3 现代设计与传统设计

传统设计是以经验总结为基础,运用力学和数学而形成的经验、公式、图表、设计手册等作为设计的依据,通过经验公式、近似系数或类比等方法进行设计。传统设计在长期使用中得到不断的完善和提高,是符合当时技术水平有效设计方法。但由于所用的计算方法和参考数据偏重于经验的概括和总结,往往忽略了一些难点或非主要的因素,因而造成设计结果的近似性较大,难免有不确切和失误的地方。此外,在信息处理、参量统计和选取、经验或状态的存储和调用等还没有一个理想的有效方法,求解和绘图也多用手工完成,所以不仅影响设计速度和设计质量的提高,也难以做到精确和优化的效果。传统设计对技术与经济、技术与美学也未能做到很好的统一,使设计具有一定的局限性。

总之,传统设计以生产经验为基础,运用力学和数学而形成的经验公式、图表、手册等作为设计的依据和指导的准则,是一种以静态分析、近似计算、经验设计、手工劳动为特征的设计方法。显然随着现代科学技术的飞速发展、生产技术的需要和市场的激烈竞争以及先进设计手段的出现,这种传统设计方法已难以满足当今时代的要求,从而迫使设计领域不断研究和采用新的设计方法和技术。

现代设计是过去长期的传统设计活动的延伸和发展,是传统设计的深入、丰富和完善。随着设计实践经验的积累,设计理论的发展以及科学技术的进步,特别是计算机技术的高速发展,设计工作包括机械产品的设计过程产生了质的飞跃。为区别过去常用的传统设计理论与方法,人们把这些新兴理论与方法称为现代设计。“现代设计技术”就是以满足市场产品的质量、性能、时间、成本、价格综合效益最优为目的,以计算机辅助设计技术为主体,以知识为依托,以多种科学方法及技术为手段,研究、改进、创造产品活动过程所用到的技术的总称。现代设计不仅指设计方法的更新,也包含了新技术的引入和产品的创新。现代设计在设计各阶段中要采用其中某些合适、有效的方法和技术,以解决设计中的总体和各个具体问题,其核心是:动态、优化和计算机化。

1.2 现代设计方法的主要内容和特点

1.2.1 现代设计方法的主要内容

现代设计方法是随着当代科学技术的飞速发展和计算机技术的广泛应用而在设计领域发

展起来的一门新兴的多元交叉学科，它所涉及的学科范围非常广泛。国际上，大约在 20 世纪 60 年代末期，为了适应市场激烈竞争的需要，提高设计质量和缩短设计周期，在机电产品的设计领域中相继出现了一系列新兴学科，主要有设计方法学、优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计、动态设计、有限元法、工业产品造型设计、人机工程学、并行工程、价值工程、反求工程设计、模块化设计、相似性设计、虚拟设计、疲劳设计、三次设计等。在运用它们进行工程设计时，一般都以计算机作为分析、计算、综合、决策的工具。这些学科汇集成了一个设计学的新体系，即现代设计方法，它们包含了现代设计理论与方法的各个方面。本书根据实际工程需要着重讲解设计方法学、计算机辅助设计、有限元法、优化设计和可靠性设计五方面的内容。

(1) 设计方法学

设计方法学是研究设计的一般性方法、技巧、手段、进程及规律的一门新型综合学科。目前国际上对设计方法学的研究主要分为两大学派，即德国学派和英美学派。前者的特征是偏重研究设计的过程、步骤和规律，进行系统化的逻辑分析，并将成熟的设计模式、方法等编成规范供设计人员参考，从而形成了系统分析设计法体系；后者则重视创造性设计的研究，强调创造能力的开发，在总结了人类创造性思维的特点、类型的基础上，归纳出各种不同的创造性技法，形成了创造性设计法体系。

创造性设计方法是现代设计方法的基础。产品设计中是否注重创造性，是区别现代设计和传统设计的重要标志。在产品设计中，无论是确定技术原理、技术过程，还是确定系统的功能结构或者具体零件的形状、尺寸、加工制造方法等，都要充分发挥人的创造潜力，用创造性的方法求解问题，才可能获得高质量的产品。

传统的分析设计方法一般是把设计对象分解为许多独立的部分分别进行研究。由于这是孤立地、静止地分析问题，所得结果常常带有片面性和局限性。现代工程系统往往都很复杂，一般涉及到机械、电子、液压、测量、控制、计算机技术、人工智能以及信息处理等科学技术领域，大多是多学科的综合技术系统。这时就应该将设计对象看成一个系统，用系统工程的概念进行分析和综合，以求获得最佳设计方案。系统分析设计法，实际上就是当前广泛应用的系统工程在设计中的初步应用。

(2) 计算机辅助设计

计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 是利用计算机来辅助设计人员进行工程和产品的设计，以实现最佳设计效果的一种技术。随着高科技产业的迅速发展，计算机辅助设计已成为一门新的学科，它是现代设计方法的一个重要方面。

一个产品或一项工程的传统设计过程是设计者根据设计任务的要求，参考已有的经验和资料，进行构思设计方案、建立设计模型、计算、分析、绘图、反复修改等过程，最后设计出满足要求的产品，并绘制出图纸和编制出设计文件。在设计过程中，有创造性的思维劳动，也有复杂的计算及绘图等，其工作量大，而且要做很多重复、烦琐的劳动，这些环节都要由设计者来完成，设计效率低。随着现代科学技术和生产的迅速发展，产品的设计速度和质量要求越来越高，市场竞争加剧，迫切需要设计人员从简单而烦琐的计算和画图中解放出来，用更多的时间来进行创造性的设计。因而，传统的手工设计方法越来越难以适应现代化发展的需要。计算机辅助设计就是将计算机高速而精确的运算功能、大容量存储和处理数据的能力、丰富而灵活的图形文字处理功能与设计者创造性思维能力、综合分析及逻辑判断能力结合起来，形成一个人与计算机各发挥所长，又紧密配合的系统，从而极大地加快了设计进程，缩短了研制周期，提高了设计质量。这种人机结合的交互式设计过程，构成了计算机辅助设计的工作过程。

(3) 有限元法

有限元法是以计算机为工具的一种现代数值计算方法。目前,该方法不仅能用于工程设计中复杂结构的静态和动力学分析,而且还可以用于复杂的非线性问题(如结构力学、流体力学、热传导、电磁场等)的求解,并能够精确地计算形状复杂零件的应力分布和变形,成为复杂零件强度和刚度计算的有力分析工具。有限元方法的基本思想是将结构离散化,用有限个容易分析的单元来表示复杂的对象,单元之间通过有限个节点相互连接,然后根据变形协调条件综合求解。这种方法与经典的解析法不同,在经典的解析法中,通常都是从研究连续体中微元体的性质着手,在分析中允许微元体的数目无限多而它的大小趋近于零,从而得到描述弹性体性质的偏微分方程,求解微分方程可以得到一个解析解。这种解是一个数学表达式,它给出物体内每一点上所要求的未知量的值。然而,对于大多数工程实际问题,由于物体几何形状的不规则,材料的非线性或不均匀等原因,要得到问题的解析解,往往是十分困难的。有限元法则是从研究有限大小的单元力学特性着手,最后得到一组以节点位移为未知量的代数方程组。应用现成的计算方法,得到在节点处所求未知量的近似解。离散化的组合体与真实弹性体的区别在于:组合体中单元与单元之间的连接除了节点之外再无任何关联。但是,这种连接要满足变形协调条件,既不能出现裂缝,也不允许发生重叠。显然,单元之间只能通过节点来传递内力,称为节点力,作用在节点上的载荷称为节点载荷。当连续体受到外力作用发生变形时,各个单元也将发生变形,因而各个节点要产生不同程度的位移,这种位移称为节点位移。在有限元中,常以节点位移作为基本未知量,并假设一个简单的函数近似地表示单元内位移的分布规律,再利用力学理论中的变分原理或其他方法,建立节点力与位移之间的力学特性关系,得到一组以节点位移为未知量的代数方程,从而求解节点的位移分量。然后利用插值函数确定单元集合体上的场函数。显然,如果单元满足问题的收敛性要求,那么随着缩小单元的尺寸,增加求解区域内单元的数目,解的近似程度将不断改进,近似解最终将收敛于精确解。目前,国际上有90%的机械产品和装备都要采用有限元方法进行分析,进而进行设计修改和优化。

(4) 优化设计

一般工程设计问题都存在着许多种可能的设计方案。人们在进行设计工作时,总是力求从各种可能方案中选择较好的方案,即优化的方案。优化设计是在所有可行方案中寻求最佳设计方案的一种现代设计方法。进行工程优化设计,首先需将工程问题即优化设计所规定的格式建立数学模型,然后选用合适的优化计算方法在计算机上对数学模型进行寻优求解,得到工程设计问题的最优设计方案。最优化设计是保证产品具有优良的性能,减轻自重或体积,降低工程造价的一种有效设计方法。同时也可使设计者从大量烦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。

在建立优化设计数学模型的过程中,把影响设计方案选取的那些参数称为设计变量;设计变量应当满足的条件称为约束条件;而设计者选定来衡量设计方案优劣并期望得到改进的指标表现为设计变量的函数,称为目标函数。设计变量、目标函数相约束条件组成了优化设计问题的数学模型。优化设计需把数学模型和优化算法放到计算机程序中用计算机自动寻优求解。常用的优化算法有黄金分割法、鲍威尔法、变尺度法、惩罚函数法等。

(5) 可靠性设计

可靠性的概念是人们早就熟悉的,一部机器、一个零部件是否可靠,在寿命期内能否实现其正常功能,会不会出现早期失效,这都是用户最关心的问题。但是,对可靠性从开始的定性认识到现在进入定量的系统的研究是经历了一段漫长的发展过程的。

可靠性是产品的一种属性,人们通常根据使用经验对产品作出评价,不管是什么产品,

大至人造飞船、飞机，小至日常生活用品，都有可靠或不可靠的问题，质量可靠、经久耐用的产品总是受到用户的欢迎。可靠性的定义通常是指产品在规定条件下规定时间内完成规定功能的能力。这里的“规定条件”包括工作条件、使用条件和环境条件；“时间”是指寿命、工作循环次数或行驶里程；“功能”是指技术文件规定的功能，包括精度及容许的波动范围。由于对产品功能的判据不同，同一种产品对可靠性可能有不同的评定指标。另外，一种产品可能规定有多项功能，评定时要考虑主要功能或用综合概率评价。

机械可靠性是指机械产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力，它是衡量机械产品质量的一个重要指标。机械可靠性设计是将概率统计理论、失效物理和机械学等相结合起来的综合性工程技术。机械可靠性设计方法的主要特征就是将常规设计方法中所涉及的设计变量，如材料强度、疲劳寿命、载荷、几何尺寸及应力等所具有的多值现象都看成是服从某种分布的随机变量，根据机械产品的可靠性指标要求，用概率统计方法设计出零部件的主要参数和结构尺寸。

可靠性设计的重要内容之一是：可靠性预测和可靠性分配。可靠性预测是一种预报方法，即从所得到的失效数据预报一个零部件或系统实际可能达到的可靠度，预报这些零部件或系统在规定的条件下和在规定的时间内，完成规定功能的概率。可靠性分配是把系统的可靠度目标进一步分配给系统的组成单元——零、部件或子系统，它对复杂产品和大型系统来说尤其重要。系统可靠度的分配应是合理的，应考虑分配的方法。

可靠度与失效率是可靠性研究的重要内容，可靠性的度量与失效率密切相关。失效率有三种基本失效模式：指数分布、正态分布和威布尔分布。机械设计中的设计变量大多符合这三种分布形式。

机械强度可靠性设计就是要得到载荷（应力）及零件强度的分布规律，合理地建立应力与强度之间的数学模型，严格控制失效概率，以满足设计要求。应力强度干涉模型揭示了概率设计的本质。

疲劳强度可靠性设计是根据直接测得的计算点的应力或根据实测的载荷推算出计算点的应力，经统计分析得出应力密度函数及其分布参数。结合材料疲劳强度分布资料，如 R-S-N 曲线或等寿命曲线；结构尺寸参数及强度修正系数的统计特性，再考虑机械零件所承受的应力的性质，对零件进行疲劳强度可靠性设计计算。

机械系统可靠性设计不仅取决于组成系统的单元的可靠性，而且也取决于组成单元的相互组合方式。为了计算系统的可靠度，不管是可靠性预测还是可靠性分配，首先都需要有系统的可靠性模型。

1.2.2 现代设计方法的特点

与传统的设计方法相比，现代设计方法的特点如下。

i. 程序性，现代设计方法研究设计的全过程，要求设计者从产品规划、方案设计、技术设计、总体设计、施工设计到试验、试制进行全面考虑，按步骤有计划进行设计，强调设计、生产与销售的一体化。

ii. 创造性，现代设计突出人的创造性，充分发挥设计者的创造性思维能力及集体智慧，运用各种创造方法，力求探寻更好的突破性方案，开发创新产品。

iii. 系统性，现代设计强调用系统工程处理技术系统问题。设计时分析各部分的有机联系，力求系统整体最优，同时要考虑系统与外界的联系。

iv. 优化性，通过优化理论及技术，对技术系统进行方案优化、参数优化、结构优化，争取使技术系统整体最优，以获得功能全、性能良好、成本低、价值优的产品。

v. 综合性, 现代设计方法是一门综合性的边缘学科, 采用逻辑、理论、系统的设计方法, 在系统工程、创造工作的基础上运用信息论、相似论、模糊论、可靠性、有限元、人机工程学及价值工程、预测学等理论。

vi. 计算机技术的广泛应用, 计算机技术的飞速发展和广泛应用带来了信息革命, 使人们的设计思想和方法有了飞跃的变化。随着计算机软硬件的发展以及工程数据库、网络技术的广泛应用, 使得工程技术人员的设计效率大大提高, 设计手段更加精确, 设计方法更加现代化, 设计方式由传统的串行设计发展为并行设计, 并且使得企业的组织模式发生改变, 管理水平提高, 实现优势互补和资源共享, 进而实现可持续发展。

1.3 学习现代设计方法的意义

产品设计是决定产品性能、质量、成本和企业经济效益的重要环节。随着科学技术的不断进步, 中国产品将逐渐越来越多地进入国际市场。产品的竞争能力, 在很大程度上取决于产品的设计。为此, 在产品设计中就必须大力推广目前在国外已经广泛应用并取得显著效果的先进设计方法, 以提高我国的设计水平, 使之既能缩短产品的设计周期, 又能提高产品的质量, 因此, 作为当代的工程技术人员, 学习和掌握现代设计方法及技术就具有特别重要的意义。

设计人员是新产品的重要创造者, 对产品的设计和发展有重大影响。为了适应当代科学技术发展的要求和市场经济体制对设计人才的需要, 必须加强设计人员的创新能力和设计素质的培养, 现代设计方法课程就是为达此目的而开设的。通过对这门课程的学习和研究, 以期提高未来从事设计工作人员的设计水平, 增强设计创新能力。

应该指出, 现代设计是传统设计活动的延伸和发展。现代设计方法也是在继承传统设计方法基础上不断吸收现代理论、方法和技术以及相邻学科最新成就后发展起来的。所以, 今天学习现代设计方法, 其目的不是要完全抛弃传统方法和经验, 而是要在掌握传统方法和实践经验的基础上, 再掌握一些新的设计理论和技术手段。

2 设计方法学

2.1 概述

方法是人类思维的宝贵财富，是搜索科学真理的钥匙。认识事物、解决问题都需要正确的方法。目前，国内外对设计本质及方法的研究已初步进入实用阶段，出版了一些有代表性的著作，召开了有关的国际学术会议，但是有关这门学科的名称并未得到统一，如，设计方法学，工程设计原理，设计学等。各国在设计方法研究过程中共同推进和发展了“设计方法学”这门学科，设计方法学是一门正在发展和形成的新兴学科，是现代设计方法的重要组成部分，它的定义、研究对象和范畴等，当前尚无确切的、大家公认的认识，但近年来它的发展极快，广泛受到各国及有关学者的关注。

虽然各国研究的设计方法在内容上各有侧重，但共同的特点都是总结设计规律，启发创造性，采用现代化的先进理论和方法使设计过程自动化、合理化，其目的是为了设计水平和质量，设计出更多功能全、性能好、成本低、外形美的产品，以满足社会的需求和适应日趋尖锐的市场竞争。

设计一词包括工程技术设计和工业产品设计两方面。工业产品设计是一种创造性活动，设计的结果直接影响产品性能质量、成本和企业经济效益。由于在产品开发和提高产品设计水平的工作中，科学的设计方法起着重要的作用，因此，加强对产品设计方法的研究有着十分重要的作用。

从 20 世纪 60 年代以来，由于各国经济的高速发展，特别是竞争的加剧，一些主要的工业发达国家采取措施加强设计工作并对设计方法学的研究有了迅速的发展，不同的国家已形成了各自的研究体系和风格。如德国的学者和工程技术人员着重研究设计的进程、步骤和规律，进行系统化的逻辑分析，并将成熟的设计模式、解法等编成规范和资料供设计人员参考。英美学派偏重分析创造性开发和计算机在设计中的应用。日本则充分利用国内电子技术和计算机的优势，在创造工程学、自动设计、价值工程方面做了不少工作。中国 20 世纪 80 年代前后在不断吸收引进国外研究成果基础上，开展了设计方法学的理论和应用研究，并取得了一系列成果。

关于什么是设计方法学，目前比较完整的和有一定代表性的是瑞士 V. Hubka 博士提出的一些观点。他认为：设计方法学是研究解决设计问题的进程的一般理论，包括一般设计战略及用于设计工作各个具体部分的战术方法，它还提出了它的主要领域及大致结构，包括进程模式、进程规划、进程风格、方法、方法学行动规划、工作方法、工作原则等。

设计方法学是以系统的观点来研究产品的设计程序、设计规律和设计中的思维与工作方法的一门综合性学科，它所研究的内容包括设计对象、设计过程及程序、设计思维、设计评价、设计信息管理、现代设计理论与方法的应用。

(1) 设计对象

设计对象是一个能实现一定技术过程的技术系统。能满足一定需要的技术过程不是唯一的，能实现某个一定的技术过程的技术系统也不是唯一的。影响技术过程和技术系统的因素

很多,设计人员应该全面系统地考虑、研究确定最优技术系统即设计对象。

(2) 设计过程及程序

设计方法学从系统观点出发来研究产品的设计过程。它将产品视为由输入、转换、输出三要素组成的系统,重点讨论将功能要求转化为产品结构图纸的这一设计过程,并分析设计过程的特点,总结设计过程的思维规律,寻求合理的设计程序。

(3) 设计思维

设计是一种创造活动,设计思维应是创造思维。设计方法学通过研究设计中的思维规律,总结设计人员科学的创造性的思维方法和创造性技法。

(4) 设计评价

设计方案的优劣评价,其核心取决于设计评价指标体系。设计方法学研究总结和评价指标体系的建立,以及应用价值工程和多目标优化技术进行各种定性、定量的综合评价方法。

(5) 设计信息管理

设计方法学研究设计信息库的建立和应用,即探讨如何把分散在不同学科领域的大量设计知识、信息挖掘并集中起来,建立各种设计信息库,使之可通过计算机等先进设备方便快速地调阅参考。

(6) 现代设计理论与方法的应用

为了改善设计质量,加快设计进度,设计方法学研究如何把不断涌现出的各种现代设计理论和方法应用到设计过程中,以进一步提高设计质量和设计效率。

由上述可知,设计方法学是在深入研究设计过程的本质的基础上,以系统的观点来研究产品的设计对象、设计进程、设计程序、设计规律和设计中的思维与工作方法的一门综合性学科。其目的是总结设计的规律性,启发创造性,在给定条件下,实现高效、优质的设计,培养开发性、创造性产品的设计人才。

可见,机械设计方法学是一门多元综合、新兴交叉学科,构成了现代科技发展的一个组成部分。设计方法学的研究在提高设计人员素质、改善设计质量、减少设计失误、加快设计进度等方面也将发挥重大作用。

2.1.1 设计系统

系统工程是在控制论、信息论、运筹学及管理科学基础上发展起来的,用于解决工程问题,使之达到最优化设计、最优控制和最优管理的一门科学。传统的分析方法往往把事物分解为许多独立的互不相干的部分分别进行研究,由于是孤立、静止地分析问题,所得出的结论往往是片面的、有局限性的。而系统工程的方法是把事物当作一个整体的系统来研究,从系统出发,分析各组成部分之间有机的联系及系统与外界环境的关系,是一种比较全面的综合研究方法。现代设计中的许多问题,都可以用系统论思想和方法去分析、认识和把握。

系统论设计思想的核心是把工业设计对象以及有关的设计问题视为系统。根据这一观点,设计是一种信息处理系统。输入的是设计要求和约束条件信息,设计者运用一定的知识和方法通过计算机、试验设备等工具进行设计,最后输出的是产品方案、图纸、程序、文件等设计结果,设计系统模型如图 2-1 所示。随着输入信息和反馈信息的增加,通过设计者的合理处理,将使设计结果更趋完美。

从系统工程的观点分析,设计系统具有三维空间,是一个由时间维、逻辑维和方法维组成的三维系统,如图 2-2 所示。时间维反映按时间顺序的设计工作阶段;逻辑维是解决问题的逻辑步骤;方法维列出设计过程中的各种思维方法和工作方法。设计过程中的每一个行为都反映为这个三维空间中的一个点。人们可以通过这三个方面深入分析和研究设计系统的

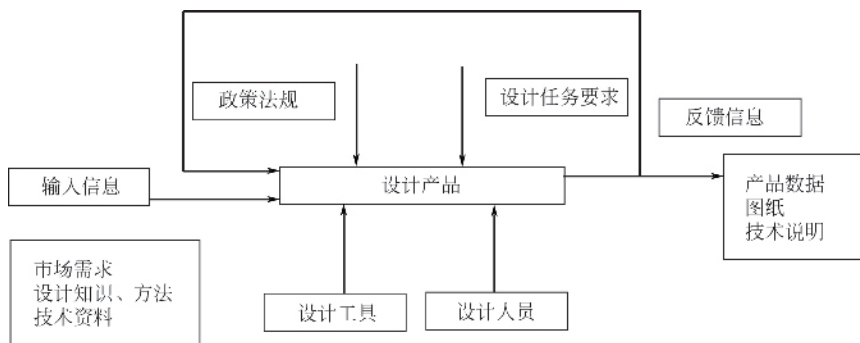


图 2-1 设计系统模型

规律。

由产品的设计要求转化为产品结构过程中，各种设计性能之间存在着错综复杂的关系。在设计系统输入转化为输出过程中，每一步都有许多设计解法，同时也存在着不断变化的限制条件。设计过程的实质就是通过转换，寻求恰当的设计性能。由于设计性能关系间的这种复杂性，转换过程是一个分阶段、分层次，由全局到局部，逐层循环，逐步迭代逼近，逐渐完善，最后达到设计要求的过

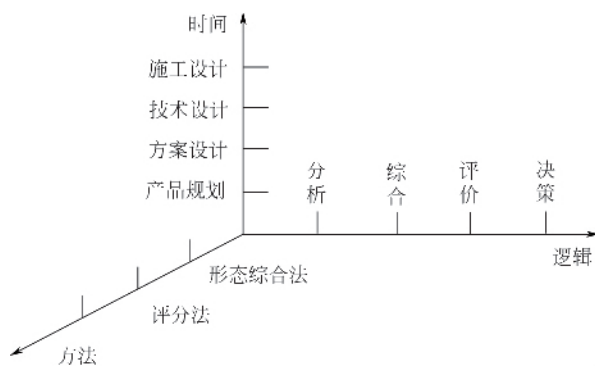


图 2-2 三维系统

2.1.1.1 产品设计的过程（时间维）

根据系统方法论，不仅把设计对象当作一个系统，还把产品设计过程当作系统，不仅研究各设计步骤，而且研究各设计步骤之间的联系，把全部设计过程按系统的方法连接成一个严密的、符合逻辑规律的整体，以便全面考虑问题，使设计过程科学化。

研究设计过程，拟定科学的、具有普遍适用性的产品设计程序，是设计方法学领域内的重要内容，也是设计工作科学化的基础。总结国内外理论研究和设计实践经验，提出符合国情的产品设计程序，以帮助设计师通过最经济的途径，获得最满意的解。产品设计进程一般可以分为 4 个阶段：产品规划阶段、原理方案设计阶段、技术设计阶段和产品试制阶段。

(1) 产品规划阶段

产品规划阶段就是进行待开发产品的需求分析、市场预测、可行性分析，确定设计参数及选定约束条件，最后提出详细的设计任务书，作为设计、评价和决策的依据。在此阶段，设计者尽可能全面地了解所要研究地问题。

(2) 原理方案设计阶段