

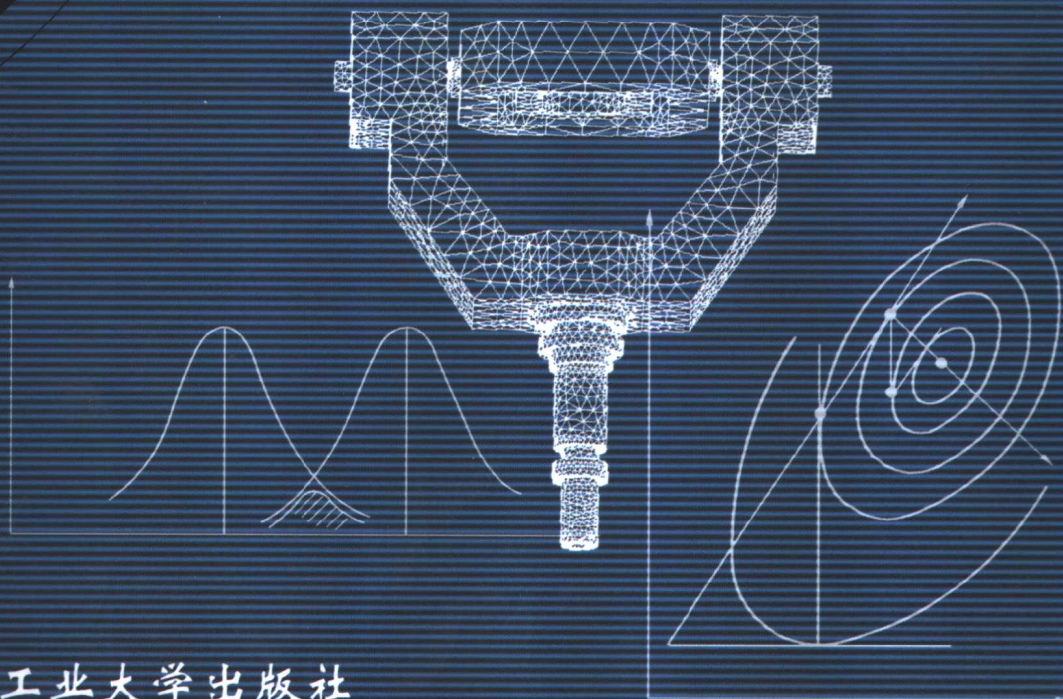
机械工程



国防科工委「十五」规划教材

现代机械设计方法

● 主编 孙靖民



哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·机械工程

现代机械设计方法

主 编 孙靖民
副主编 陈时锦
参 编 梁迎春 刘亚忠

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 北京航空航天大学出版社

内容简介

现代设计方法在国外已经广泛应用于机械、电子等类产品设计,我国也已大力推广应用。本书结合机械产品介绍设计过程的程式和工程设计中行之有效的诸种科学方法论,内容包括系统分析设计法、创造性设计方法、机械可靠性设计、有限元分析方法、优化设计方法、动态分析设计法和反求工程设计等共八章。本书内容深入浅出,易于阅读和自学。

本书既可作为高等学校机械工程类本科学生或研究生的教材,也可作为工程技术人员继续学习和培训的教材或自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代机械设计方法/孙靖民主编.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.8
ISBN 7-5603-1919-X

I.现… II.孙… 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(2003)第 030607 号

现代机械设计方法

主 编 孙靖民

责任编辑 徐 雁

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区教化街 21 号 (150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail:press@0451.com

哈尔滨工业大学印刷厂印刷 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:19 字数:400千字

2003年8月第一版 2003年8月第一次印刷

印数:3000册

ISBN 7-5603-1919-X/TH·114 定价:24.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编委:王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其它技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替



代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振

兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

设计是把各种先进技术成果转化为生产力的手段和方法,是人类改造自然的基本活动之一。任何设计都具有开发和创造新的系统和机构的目的,因而设计过程本身就是一个创新和发明过程。

在努力建设全面小康社会的今天,在当今科技竞争日益激烈的新形势下,特别是在加入 WTO 以后,我国的改革开放进一步深化的过程中,惟有不断进行产品创新,不断提高产品质量,才能参与国际和国内两个市场的竞争。为此,就该大力推广和广泛采用目前已在我国行之有效的先进设计方法,以求既缩短新产品的研制周期,又提高产品的质量,且降低产品的成本。

自 1978 年开始,我们在哈尔滨工业大学陆续为研究生和本科生开出了机械结构的有限元分析方法和机械结构的优化设计等课程,先后编写出版了《机床结构计算的有限元法》(1981 年由机械工业出版社出版)、《机械优化设计》(1995 年由机械工业出版社出版)和《现代机械设计方法选讲》(1982 年由哈尔滨工业大学出版社出版)。以此为基础,在 2002 年初,按照“国防科工委重点教材建设计划”的要求,我们提出《现代机械设计方法》的教材编写申请,并获得审查批准,列为国防科工委“十五”重点教材建设项目。

编写本书的目的是为了使读者能较系统地了解 and 掌握现代设计理论和方法以及计算机技术在现代设计领域中的应用情况。

考虑到现代设计方法实质上是科学方法论在设计中的具体应用,而科学方法论涵盖的面较广,如信息论、系统论、控制论等十来个方面的方法,其中许多方法已有专门著作出版,所以本书的主要内容安排为:第一章概述,第二章系统分析设计方法,第三章创造性设计方法,第四章机械可靠性设计,第五章有限元分析方法,第六章优化设计方法,第七章动态分析设计法和第八章反求工程设计。



参加本书编写的人员有:孙靖民编写第一、二和四章;陈时锦编写第三、五和八章;梁迎春编写第六章;刘亚忠编写第七章。

在本书成稿过程中,始终得到哈尔滨工业大学王新荣、高圣英、黄开榜以及哈尔滨工程大学米成秋和合肥工业大学柯尊忠等五位教授的大力支持和帮助,特此致谢!

由于作者的水平所限,书中缺点和不足之处在所难免,敬请读者多提宝贵意见。

编者
2002年12月

目 录

第一章 概述	1
1.1 传统设计与现代设计及其范畴.....	1
1.2 设计过程和设计技术简述	3
习题	6
第二章 系统分析设计方法	7
2.1 技术系统的组成和处理对象	7
2.2 系统分析设计方法	8
2.3 价值分析	16
2.4 成本估算方法简介	20
习题.....	23
第三章 创造性设计方法	25
3.1 创造力和创造过程	25
3.2 创造性思维	27
3.3 创造技法	30
习题.....	34
第四章 机械可靠性设计	35
4.1 关于机械可靠性设计的几个问题	35
4.2 可靠性的概念和指标.....	38
4.3 可靠性设计方法举例.....	49
4.4 系统的可靠性设计	54
4.5 系统的可靠性优化	75
4.6 失效分析方法	77
4.7 维修度和有效度	79
习题.....	80
第五章 有限元分析方法	81
5.1 有限元分析方法的基本概念	81
5.2 有限元法中单元特性的导出方法	83
5.3 有限元法的解题步骤.....	96
5.4 结构分析的有限元法	107



5.5 结构动力学问题的有限元法	116
5.6 有限元法的前后置处理简介	125
习题	136
第六章 优化设计方法	137
6.1 优化设计概述	137
6.2 无约束优化问题的解法	165
6.3 约束优化问题的解法	189
习题	223
第七章 动态分析设计法	224
7.1 传递函数分析法	224
7.2 模态分析方法	234
7.3 模态综合方法	247
习题	255
第八章 反求工程设计	256
8.1 概述	256
8.2 相似理论及相似设计方法	258
8.3 零件尺寸确定和制造工艺	280
8.4 零件材料分析和选择	282
8.5 反求分析和设计举例	283
习题	288
参考文献	289

第一章 概 述

1.1 传统设计与现代设计及其范畴

一、传统设计与现代设计

“设计”是人类征服自然改造世界的基本活动之一,是人们为满足一定的需求而进行的一种创造性活动的实践过程。因此,“设计”从来就是和人类的生产活动紧密相连的。用通俗的话说,设计是把各种先进科学技术成果转化为生产力的一种手段和方法。就机械系统和结构范畴而言,它是从给定的合理的目标参数出发,通过各种方法和手段创造出一个所需的优化系统或结构的过程。所以,任何设计都是开发和创造新的系统和结构的过程。但是,由于一个设计总是反映着当时的生产力和技术水平,因而不同时期设计的内容是不同的,人们对设计的理解也是不同的。

最早的设计是由经验丰富、技术熟练的手工艺人进行的,这种设计只存在于手工艺人的头脑中,产品也是比较简单的。

随着生产的发展,需要更多、更好、更复杂的产品。因而促使手工艺人必须联合起来,互相协作,于是出现了图纸,开始按图纸制造产品。通过图纸,既可满足许多人同时参加制造的需要,又使手工艺人的经验和知识被记录并流传下来,还可用图纸对产品进行分析和改进,推动设计工作向前发展,从而使设计工作具有了相对独立的性质。

到了20世纪后期,由于科学技术的发展,设计工作所需的理论基础有了进步,特别是电子计算机技术的进展,对设计工作产生了很大促进作用,提出了设计现代化的需求。

此外,当前对产品的设计已不能仅考虑产品本身,并且还要考虑系统和环境的影响;不仅涉及技术领域,还涉及社会因素;不仅须顾及眼前,还须顾及今后。例如,汽车设计不仅要考虑其本身的有关技术问题,还须考虑使用者的安全、舒适、操作方便,以及燃料供应、车辆存放、道路发展等等问题,即已涉及国家的能源政策、城市布局、交通规划等社会问题。

为了寻求保证设计质量、加快设计速度、避免和减少设计失误的方法和措施,并适应科学技术发展的要求,使设计工作现代化,引发了“现代设计方法”的研究。设计方法可理解为:设计中的一般过程及解决具体设计问题的方法、手段。前者可认为是战略问题,后者是战术问题。如果把设计方法的发展进行概括,大致可以划分成:

- 1)17世纪前的“直觉设计阶段”;



2) 17 世纪后的“经验设计阶段”及其后形成的“传统设计阶段”；

3) 目前的“现代设计阶段”。

传统设计方法的特点是：静态的、经验的、手工式的方法。现代设计方法的特点是：动态的、科学的、计算机化的方法。它已经将那些在科学领域内得到应用的所有科学方法论应用于工程设计中来了。可以这样说，传统设计方法是被动地重复分析产品的性能，而现代设计方法则可能做到主动地设计产品的参数。

下面简单介绍一下近 30 年来，德、英、日、美等国在设计方法研究方面的情况。

德国在发现自己产品质量下降、竞争能力减弱之后，意识到这是和设计工作不符合要求、缺乏有能力的设计人员密切相关的。随即在 1963 年至 1964 年间，举行了全国性“薄弱环节在于设计”的讨论会，制订了一批有关设计工作的指导性文件，举办了有关产品系统规划、创造设计与发展、CAD 等许多专题的培训班和讨论会，并相应地在高等学校中开设了设计方法和 CAD 等专题课程。

英国自 1963 年开始提出工程设计思想后，广泛开展了设计竞赛，加强在设计过程中的创造性开发、技术可行性、可靠性、价值分析等方面的研究，从而改变了其设计水平低的局面。

日本由于受到美国提出的 CAD 及实现设计自动化可能性的冲击，为补救设计师的短缺和有效地使用计算机及改进设计教育，同时也是为了适应新产品日益增长的需要，自 20 世纪 60 年代以来，引进了名家的专著，开始自己进行有关 CAD 和设计方法的研究，以提高设计人员的素质、发展 CAD 和改进工程技术教育。目前日本在产品开发中的更新速度已受到全世界的关注，其产品的竞争能力也给许多国家造成巨大威胁。

美国是创造性设计的首倡者，在 CAD 方面做出了许多贡献。在日本等国的冲击下，1985 年 9 月由美国机械工程师协会 (ASME) 组织，美国国家科学基金会发起，召开了“设计理论和方法研究的目标和优先项目”研讨会。会后成立了“设计、制造和计算机一体化”工程分会，制订了一项设计理论和方法的研究计划，并成立了由化学、土木、电机、机械和工业工程以及计算机科学等领域的代表组成的指导委员会，来考虑针对工程设计所需进行研究的领域和对这些领域提出资助的建议。

其他如前苏联、东欧及北欧等国，也都开展了设计理论和方法的研究工作。

现在，有关国家组织了一系列关于设计方法的国际会议，如工程设计国际会议 (ICED) 就是其中之一。

近年来，我国已经广泛开展了对现代设计方法的研究，成立了各种研究协会和组织。机械电子部在有关文件中已经指出：现代设计方法在国外已广泛应用于机械电子产品设计。我国自 1980 年以来，也进行了一些工作。“六五”期间，国家科技攻关项目中的优化设计、CAD、工业艺术造型设计、模块化设计等已取得了实用性成果，并在一部分科技人员中间进行了现代设计方法的培训。不难看出，现代设计方法要在更大的范围内推广应用，不仅有必要，而且已具备了条件。



二、现代设计方法的范畴

现代设计的方法实质上是科学方法论在设计中的应用。冠以“现代”二字是为了强调其科学性和前沿性以引起重视,其实有些方法也并非是现代的。经分析,可归纳为下列具有普遍意义的方法:

- 1)信息论方法,如信息分析法、技术预测法等。它是现代设计方法的前提。
- 2)系统论方法,如系统分析法、人机工程以及面向产品生命周期中各个阶段(如设计、制造、使用、回收处理等)的设计。
- 3)控制论方法,如动态分析法等。
- 4)优化论方法,它是现代设计方法的目标。
- 5)对应论方法,如相似设计、反求工程设计等。
- 6)智能论方法,如 CAD、CAE、并行工程、虚拟设计、人工智能(主要是专家系统)等。它是现代设计方法的核心。
- 7)寿命论方法,如可靠性设计、价值工程和稳健性设计等。
- 8)离散论方法,如有限元和边界元方法。
- 9)模糊论方法,如模糊评价和决策等。
- 10)突变论方法,如创造性设计等。它是现代设计方法的基础。
- 11)艺术论方法,如艺术造型等。

我们是搞机械设计的,本课程是试图把一些现代设计方法应用到机械设计中来的一个尝试,所以称为《现代机械设计方法》。考虑到 CAD、并行工程、人工智能领域中的专家系统、人机工程以及有关信息论和模糊论方法等已有许多专门著作。为了减少篇幅,这里就不再列入了。

1.2 设计过程和设计技术简述

设计方法的研究包括设计步骤和程式以及与之相联系的解决具体设计问题的方法和手段的研究。下面将其分为设计过程和设计技术两个部分略加叙述,以便有个概念性的了解。

一、机械设计过程简述

机器的设计总是要有一定的步骤和程式的。例如,机床设计过去就有三段设计的程式,现在大体分为四个步骤,即调查研究,方案拟定(技术设计),工作图设计,样机试制和鉴定。显然,在完成每一步骤、程式时,都要应用一些分析问题和解决问题的具体方法和工具。这就涉及整个机床设计的具体技术问题。然而,如果不考虑设计方法,则可能做不出最佳的设计来。



例如,过去在机床的三段设计过程中,就很少考虑市场需求(因为不是商品经济而是计划调拨),设计方法上也未引入“创造性”的方法。

对于一般的机械设计,目前已提出了一些设计过程的程式。显然,它们有不同的阶段和内容以及步骤和程式的划分,因而不能就设计过程给出一个严格的、统一的模式,但若从系统分析的角度看,则设计过程的各阶段实质上都具有分析、综合和评价的内容,如图1.1的模型所示,都要利用各种方法和手段寻求最优的方案,不同的仅是细化的程度和考虑问题的出发点的差别。

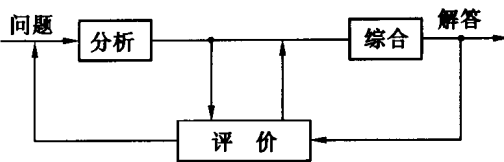


图 1.1 系统设计方法的模式

为了说明设计方法,举一个例子。假设要设计一种既要跑得快,又会吱吱叫,又会游泳的新“动物”。在图 1.2 中,给出了一个按功能来考虑的,以创造性思维为主线的,为解决该问题提供初步设计方案的设计步骤和程式。从这个例子可以看出,在设计过程中引入创造性设计方法的意义。

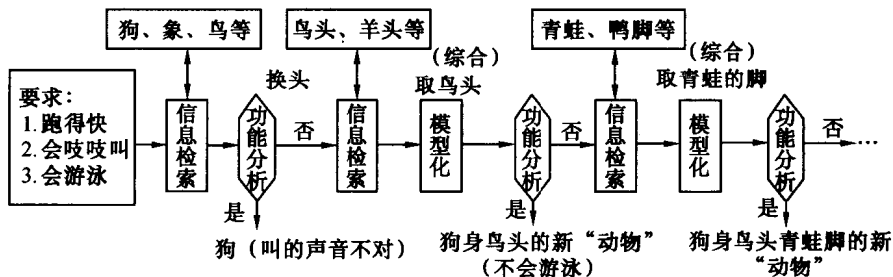


图 1.2 按功能以创造性思维进行的初步方案设计程式举例

二、设计技术

不管采用哪种技术过程的程式,对每一个具体阶段或步骤都需要应用某种设计技术。目前经常采用的是上述十一种方法论中的以下一些现代设计方法:1)技术预测法;2)创造性设计法;3)系统设计法;4)信号分析法;5)相似设计法;6)模糊设计法;7)动态分析设计法;8)有限元和边界元分析设计法;9)优化设计法;10)可靠性设计法;11)计算机辅助设计(CAD)法;12)艺术造型设计法等。

可以把设计时的一般程式(纵向主线)和具体设计技术(横向方法)的纵横交叉关系看成是一个三维结构模式,如图 1.3 所示,并可称为“系统工程设计方法”模式。它是一个考虑多因素、多层次的复杂的科学方法体系。



三、机械结构设计中的现代方法

机械结构系统的模型可以一组代表外力(外载荷)、结构尺寸和强度(或刚度)等相互关系的数学方程式来表述。如静态问题时的

$$F = Kq$$

或动态问题时的

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = f(t)$$

两式中的 K 是结构的刚度特性, M 是结构的质量特性, D 是结构的阻尼特性, F 和 $f(t)$ 分别是静载荷和动载荷, q 是静态位移或相应的动态响应。

机械结构系统的力学模型可以用图 1.4 所示的框图表示(为简化起见,图中没有划出对应于动态问题时的 M, D 和 $f(t)$)。

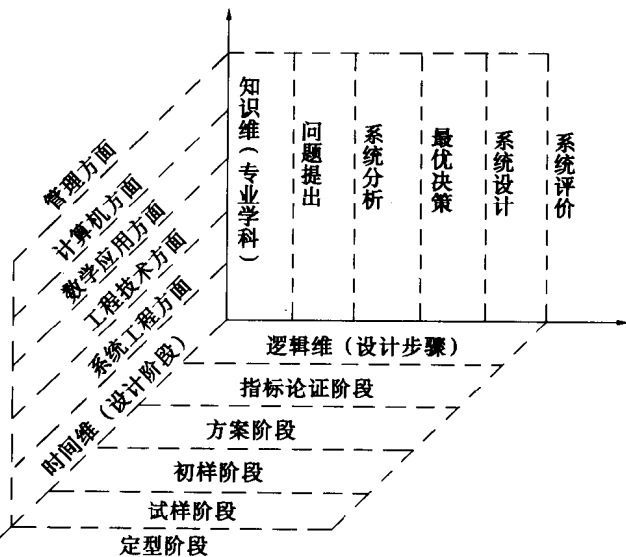


图 1.3 系统工程设计方法模式

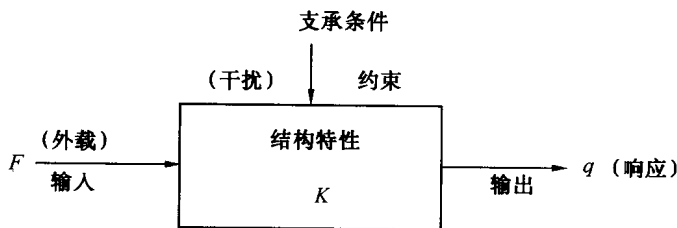


图 1.4 机械结构系统的力学模型

在求解 $F = Kq$ 类型的方程时,将出现三类问题(下面所讨论的虽是静态问题,但同样适用于动态问题),即:

1. 已知 F 和 K , 求输出 q 。此时有

$$q = \frac{F}{K}$$

2. 已知 K 和 q , 求输入 F 。此时有

$$F = Kq$$

3. 已知 F 和 q , 求结构的刚度特性 K 。此时有

$$K = \frac{F}{q}$$



上述三类问题可以通过结构静、动态方面的理论和技术进行分析、综合和设计、控制等方法求解;也可以采用试验方法进行结构模态或参数识别的理论和方法求解。

当外载荷 F (或 $f(t)$) 和结构特性 K (或 M 、 D 和 K) 已知时,求解应力(强度问题)或应变(刚度问题)的有效方法是有限元分析方法。若外载荷或结构特性未知,可以采用载荷参数或结构参数的识别方法求解。但若由于其结构几何尺寸或形状、拓扑等是可变(设计时可以作为设计变量进行调整)的,以使在外载一定和满足给定约束条件下获得最佳的结构特性时,就是结构的优化设计问题了。

优化设计也可以看成是一个研究结构的几何尺寸、形状或拓扑如何控制的理论和方法的问题。

归纳上述机械结构设计的三类问题,给出下面的表 1.1 所列的三类问题的提法(求解方法)和相应的表述形式的综合表。

表 1.1 机械结构设计三类问题提法(求解方法)及表述形式综合表

表述形式	表 述 形 式			
提法	输入载荷 F 或 $f(t)$	结构系统特性 K 或 M 、 D 、 K	输出 q (位移、应 力或动态响应)	问题的表述方式或表达方程式
结构分析 (有限元法)	F 或 $f(t)$ 已 知	K 或 M 、 D 、 K 已 知	求 q	$Kq = F$ 静态分析 $M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = f(x)$ 动态分析
参数识别	F 或 $f(t)$ 未知	K 或 M 、 D 、 K 已知	用试验方法求出 q	载荷的参数识别
	F 或 $f(t)$ 已知	K 或 M 、 D 、 K 未知		结构的参数识别
优化设计	F 或 $f(t)$ 已 知	结构特性(几何 尺寸、形状或拓 扑)可变	以 q 等为约束 条件求最佳的 几何尺寸、形状 或拓扑	$\min J(q_i)$ s. t. $h_i(q_i) = 0$ $g_j(q_i) \leq 0$ (包括侧面约束)
最优控制	控制变量 u 未知	结构特性(K 或 M 、 D 、 K) 已知	工作指标 J 已 知	$\min J(q, u)$ s. t. $\dot{q} = Aq + B$

习 题

1. 从科学方法论的观点考虑,在现代机械设计领域中有哪些具体的方法?
2. 一般的机器设备的设计要经历哪些过程,其中可能涉及哪些方面的方法和技术?
3. 试以机械结构系统的力学模型为例,说明机械结构设计中可能采用哪几种现代设计方法?