

现代机械设计理论与方法

中国金属学会

冶金继续教育丛书

科学出版社

邹家祥 主编

冶金继续工程教育丛书

现代机械设计理论与方法

邹家祥 主编

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书是“冶金继续工程教育丛书”之一。书中系统地介绍了现代机械设计理论与方法。全书共6章,分别阐述了设计方法学,有限差分法、有限单元法和边界元法,机械优化设计方法,机械可靠性设计,计算机辅助设计,系统仿真技术等内容,并从理论和实际应用两方面予以论述。

本书可作为机械专业的工程技术人员继续教育用书,可供各行业从事机械设计、使用和管理的工程技术人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

冶金继续工程教育丛书 现代机械设计理论与方法

邹家祥 主编

责任编辑:杨家福

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1990年4月第一次印刷 印张: 11.25 插页: 1

印数: 0001—5 000 字数: 253 000

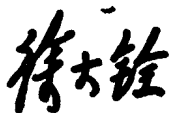
ISBN 7-03-001705-6/TB·49

定价: 7.00元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事
冶金工业部副部长



一九八八年十二月

前 言

随着科学技术的迅速发展，特别是从60年代开始，许多软科学技术大量涌现并进入实用阶段，加上计算机和计算技术的迅速发展及应用，为现代设计科学及设计方法现代化奠定了理论基础，且提供了现代化手段，使机械设计领域发生了深刻变化，进入了一个新的发展阶段。

传统的设计方法一直是以采用初步设计（方案设计）、技术设计、施工设计为内容的设计方法；起决定作用的方案设计，大多是凭借现有专利、图纸等资料和设计者自己的经验进行的，这种直观的、经验和模仿式的方法往往跳不出传统的框框，所提供的可供选择的方案少，局限性较大，分析问题的方法少，基本上是静态的、古典力学的、经验性的，其计算、绘图大多采取手工方式。

与传统的设计方法相对而言，现代的设计方法是运用系统工程，把产品开发和设计放在一个人-机-环境系统中一体化进行，运用系统工程形成一套科学方法，设计进程合理。从系统工程出发，加强设计师的培养和继续教育，加强设计和其他部门协作，能促使设计组织的现代化。由于软科学的大量出现，采用动态分析、有限元分析、可靠性分析、价值分析、故障分析、外观造型分析等多种方法，可使问题分析进入动态化。现代设计方法的宗旨是：对可供选择的众多方案和数据分析，以及对设计的进程和战略选择，都要进行综合优化；运用新的设计理论和方法进行复杂的动态分析和计算，减轻大量的手工绘图作业，实现计算机化。

由此可见，现代机械设计理论与方法是一门广义的综合

性学科，它包括了近些年来出现的设计方法学及一切用于机械产品的相关理论和方法。但是，从一件产品设计的角度看，这门学科又是狭义的、实用的，本书主要介绍后者。通过列举当今在设计工作中可以具体应用的设计方法，本书从理论和应用两个方面着力，既力争避免空谈各种理论和概念，又尽量避免只讲具体方法和程序运算。

现代的设计理论和方法极多，不能在这里做透彻、详尽的介绍。作为继续教育的一本基本教程，本书主要综述如下六个方面：设计方法学，有限差分法、有限单元法和边界元法，机械优化设计方法，机械可靠性设计，机械计算机辅助设计，系统仿真技术等。这些方法既相互独立，又相互联系，机械工程技术人员在实际工作中可以选择采用，也可根据产品设计的具体要求综合运用。

为了增强实用性，本书提供了有关实例。中国金属学会还编写了现代机械设计理论与方法方面的应用软件，其中提供了常用算法程序、平面问题有限单元法程序、优化设计SUMT法程序、可靠性设计P-S-N曲线测定程序、机械零件概率设计程序、仿真程序和机械零部件CAD程序举例等，并配有软盘，可供配套使用。

本书由中国金属学会冶金设备学会组织编写，邹家祥主编，参加编写的有易秉铎(第1章)、邹家祥(第2章)、吴继庚(第3章)、关焯(第4章)、林学福(第5章)、沈祥芬(第6章)等。

本书承林鹤教授主审，郭可谦教授复审，谨表衷心的感谢。

因编者水平有限，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者指正。

编著者

1989年4月

目 录

序 前言

1 设计方法学	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 创造性思维及开发	(2)
1.2.1 创造性思维及其特点	(2)
1.2.2 创造性设计方法	(3)
1.3 系统化设计	(10)
1.3.1 设计系统分析和程序设计	(10)
1.3.2 设计任务的提出——问题分析	(16)
1.3.3 合理构形设计——问题综合	(27)
1.3.4 评价与决策	(41)
2 有限差分法、有限单元法及边界元法	(56)
2.1 弹性力学问题的有限差分法	(57)
2.1.1 有限差分方程式	(57)
2.1.2 平面问题应力函数的差分分解	(62)
2.1.3 有限差分法应用举例	(67)
2.2 弹性力学问题的有限单元法	(72)
2.2.1 有限单元法的概念及解题步骤	(72)
2.2.2 平面问题的有限单元法	(80)
2.2.3 轴对称问题的有限单元法	(97)
2.2.4 空间问题的有限单元法	(103)
2.3 边界元法的基础知识	(108)
2.3.1 概述	(108)
2.3.2 用互易定理求解边界元问题	(111)

2.3.3	边界单元的离散化及解法	(116)
2.3.4	常数边界单元的位移和应力	(119)
3	机械优化设计方法	(125)
3.1	优化设计的基本知识	(125)
3.1.1	优化设计概述	(125)
3.1.2	优化设计数学模型	(126)
3.1.3	优化设计过程	(131)
3.1.4	终止准则与最优化解	(133)
3.2	一维搜索	(135)
3.2.1	寻查区间的确定方法	(136)
3.2.2	几种一维搜索方法	(139)
3.2.3	二次插值法	(141)
3.3	无约束最优化方法	(144)
3.3.1	坐标轮换法	(145)
3.3.2	共轭方向法	(148)
3.3.3	鲍威尔法	(151)
3.4	约束最优化方法	(157)
3.4.1	直接求解法	(157)
3.4.2	间接求解法	(159)
3.4.3	惩罚函数法	(159)
4	机械可靠性设计	(180)
4.1	机械可靠性设计概述	(180)
4.1.1	可靠性工程发展概况	(180)
4.1.2	可靠性研究的特点和内容	(181)
4.2	可靠性的基本概念和主要指标	(183)
4.2.1	可靠性的基本概念	(183)
4.2.2	常用的概率运算和分布函数	(185)
4.2.3	可靠性特征量	(195)
4.3	机械零件概率设计	(205)
4.3.1	概率设计的必要性	(205)

4.3.2	应力-强度干涉理论及其应用	(208)
4.3.3	应力与强度为正态分布时可靠度的计算	(211)
4.3.4	应力与强度为任意分布时可靠度的计算	(216)
4.3.5	概率设计举例	(220)
4.4	系统可靠性分析	(231)
4.4.1	系统可靠性框图	(231)
4.4.2	系统可靠性计算	(232)
5	计算机辅助设计	(241)
5.1	CAD基本知识	(241)
5.1.1	概述	(241)
5.1.2	国内外CAD发展概况	(242)
5.1.3	微机CAD系统	(244)
5.2	图形编辑软件及应用	(246)
5.2.1	图形编辑软件Auto CAD 的主要内容	(246)
5.2.2	Auto CAD的主要功能简介	(248)
5.2.3	Auto CAD的使用方法	(250)
5.2.4	Auto CAD交互式绘图	(252)
5.3	Auto CAD图形编程语言Auto LISP	(255)
5.3.1	Auto LISP的特点	(255)
5.3.2	Auto LISP的安装	(255)
5.3.3	怎样运行Auto LISP程序	(257)
5.3.4	Auto LISP 程序的结构	(259)
5.3.5	Auto LISP 的数据类型	(260)
5.3.6	Auto LISP 的函数类型	(261)
5.3.7	Auto LISP 语言编程	(280)
5.3.8	混合方式绘图	(289)
6	系统仿真技术	(293)
6.1	系统仿真的基本概念	(293)
6.1.1	系统的概念及机械设计系统	(293)
6.1.2	模型的概念及数学仿真	(297)

6.1.3	系统仿真的主要内容	(304)
6.1.4	系统仿真技术的应用及发展	(307)
6.2	模拟仿真技术	(311)
6.2.1	相似原理与模拟计算机	(311)
6.2.2	模拟仿真的工作过程	(314)
6.2.3	连续动态系统的模拟仿真	(319)
6.3	连续系统的数字仿真	(326)
6.3.1	数字仿真的基本原理	(326)
6.3.2	连续系统仿真模型及仿真算法	(327)
6.3.3	离散事件系统的仿真	(339)
6.3.4	连续动态系统仿真程序	(341)
参考文献		(347)

1.1 引言

60年代初期，随着科学技术的进步，为了培养新型设计师、实现设计方法现代化，联邦德国、英、美、日等工业发达国家的学者和工程技术人员开始研究工程设计的思维规律、程序和工作原则及方法，探讨如何进一步调动设计者的能动性和创造性，以便更快地设计出更多的物美价廉具有竞争力的产品。这样，一门新学科——设计方法学（Design Methodology）就逐渐形成了，现已成为现代设计科学的重要组成部分。事实证明，这门学科已对上述国家的发展起了重要作用。

相对传统设计方法而言，现代设计方法有以下特点：现代设计方法运用了系统工程，实行人-机-环境系统一体化设计，使设计思想、设计进程、设计组织更合理化、现代化；大力采用许多动态分析方法，使问题分析动态化；设计进程和战略、设计方案和数据的选择广义优化；计算、绘图等计算机化。

设计方法学的工作在我国开展虽然较晚，但已引起有关领导、学者、工程技术人员极大的关注，

设计方法学的研究内容很多，有创造性设计、系统化设计、降低成本设计、相似性设计、模块式组合设计、设计与人机工程学和美学设计、计算机辅助设计等等。由于篇幅限制，这里仅介绍创造性和系统化设计，这是设计方法学中两个最基本、最重要的方法。

1.2 创造性思维及开发

现代设计方法的基石就是创造性。设计中是否注重创造性，是区别现代和传统设计方法的重要标志。

1.2.1 创造性思维及其特点

“工程”一词来自拉丁文，原意就是“创造”。人类生产不仅仅只是增加产品数量，更重要的是开发新产品，不断满足社会的需要，这主要就靠工程设计来实现。所以，工程设计的根本意义是“创造”。

创造就是创新。创造能力蕴藏在每个设计者身上，并不只为“天才”所占有。创造过程是一种高度强化的思维过程，只有靠强烈的动力和坚强的毅力，以丰富的经验和知识作为基础，在正确的科学方法指导下才有可能。

设计者洞察到某种客观的需求，能产生一种满足这种需求的强烈愿望，这便是进行创造性活动的内部动力和前提；而相应的环境条件的鼓励因素，则是进行创造性活动的外部动力。二者是相辅相成的。设计者在强烈的动力下能产生百折不挠的毅力，再加上在正确的科学方法指导下进行逻辑和形象思维，就有可能抓住瞬间想象和灵感，产生创造性。

创造性必须建立在丰富的经验和知识的基础上，这就需要善于学习。没有前人的经验和知识就不能从事今天的设

计，也就谈不上创造。著名物理学家杨振宁博士曾经说过，灵感和想象自古以来为科学家孕育出无数伟大的创造杰作，但这些摸不着的灵感是经过长时间的知识经验积累才迸发出来的。善于听取别人意见，也是一种学习，是创造性人才必备的修养。集体思维的交融和激励，往往能产生远远大于个人思维的作用，并且还有助于防止个人的思想僵化和思维灾害。

近年来，一些国家的心理学者、教育学者和工程技术人员对创新的心理过程进行研究，形成了一门“思维心理学”学科，并在此基础上又形成了“创新技术”。分析创新心理过程和心理障碍下如何提高创造能力的一些方法，对设计中进行创造性活动是有用的。

创造性思维具有如下特点：

1) 独创性。就是能敢于突破框框，能提出与众不同的看法。

2) 推理性。对于任何现象或想法，善于由此及彼地、合理地进行逻辑推理。推理可以纵向、横向、反向等多方面进行。

3) 多向性。善于从一个问题的多个影响因素进行分析，通过发散、换元（变换）、转向等途径，从不同的角度进行思考，以便寻找新的思路和解法。

4) 综合性。综合也能创造。善于把现有的各种信息、现象、概念等加以综合概括，也能解决问题。如美国阿波罗宇宙飞船，是由七百多万个现有零件通过有机的组合（综合）而成，终于创造奇迹。

1.2.2 创造性设计方法

1. 直觉思维法

正要解决某一难题时，忽然抓住某一瞬间、一闪念的直

觉思维（即灵感），将两个以上从不相关的观念串在一起而得到新的解法或新的发现，这种方法称为直觉思维法。属于这类的具体方法有很多，这里只简单介绍其中几种。

（1）智暴法。

“智暴法”就是抓住某一瞬间的灵感或潜意识流而得到新的想法的一种方法。例如，日本青年小田在下雨天路过一小道，忽然看见路旁一团卫生纸遭水后而展开，他便利用这种纸干卷湿伸原理，最后发明了纸型自动控制器。

（2）集智小组会（B.S小组会）。

它是建立在个人“智暴”基础上的，类似我国的诸葛亮会。

这个方法首先是美国奥斯本（A.F. Osborn）于1950年提出来的。具体方法是：针对一个既定的目标，召集有关专家开会，充分让与会者各抒己见，自由发言；欢迎自由奔放地思考，思路越新越好，方案越多越好；允许与会者改进自己的设想，也可综合别人的设想；会议组织者只起引导作用，不作任何评价和结论，力戒“思维扼杀”。为了开阔思路，会议应有不同专业、不同经历的人参加。为了让与会者充分发表意见，会议一般邀请5—10人。为了有利于激发灵感，会议一般约0.5—1个小时。

可见，这种方法的特点是在与会者之间相互启发，以便引起创造性设想的连锁反应，一下子获得几十个到几百个创造性设想，是一种在短时间内调动创造力的行之有效的方法。

（3）专家预测法（Delphi法）。

这种方法是美国咨询机构兰德（RAND）公司在50年代首先使用的。现在这种方法的具体作法是：组织者针对有关问题编写一个意见征询表，并把表分发给全国范围内的有关

专家，请他们用书面充分发表意见和见解。然后将寄回的各种意见和见解进行统计，并整理成文，再编成意见征询表，再次分寄给同一批专家征求意见。经过这样多次反馈，意见和见解逐渐集中和明确，从而能获得较好的设想、预测和决策。

这种方法比集智小组会又进一步，专家可以用较充分的时间考虑问题，专家之间不会产生心理障碍和压力，更容易发挥每个人的创造力。

2. 推理思维法

推理思维法的特点有二：一是在逻辑推理、启发思考和强制联想的基础上扩展思路；二是在分析的基础上推理，即经过分析，把一个复杂的问题细分为一些较简单的小问题，再通过分析每个问题的各种影响因素，有针对性、有步骤地进行推理，寻得解法。

这种具体方法很多，这里仅介绍几种。

(1) 奥斯本提问法。

针对研制的新产品提出以下问题：

- 1) 就现有的产品稍加改变，能否有新的用途？
- 2) 能否借用别的经验和发明？过去有类似的东西吗？

有什么东西可供模仿？

3) 能否对产品进行某些改变？如改变运动形式、元件形状、颜色等。

4) 能否增加一些东西？如添加组件，增加长度、宽度等；能否减少一些东西？如取消某组件、压缩体积、缩小尺寸等。

5) 能否相互替换？如改变结构、改变顺序、元件互换、变换速度等。

6) 能否把某些东西颠倒过来? 如上下、里外、正反颠倒。

7) 能否代用? 如代用其它材料、元件、工艺、动力等。

8) 能否形成组合? 如目标组合、方案组合、部件组合、材料组合等。

(2) 阿诺德 (Arnold) 提问法。

针对设计过程中为解决各种问题而制订的检验表法, 提出如下问题:

1) 增加功能方面: 在原有基础上能增加新的功能吗?

2) 提高性能方面: 在便携、耐用、可靠、修理、保养等方面, 能否有所改善?

3) 降低成本方面: 是否能从去掉多余零件、选择便宜材料、采用简便制造方法等, 以减少费用、降低成本?

4) 增加销售方面: 对商品特点、产品包装等是否作了研究?

(3) 参量提问法。

分析影响某系统的各个参量, 然后针对参量分别提出问题, 以深入剖析或综合该系统。如针对影响轴毂联接的各参量提出问题:

1) 有哪些联接原理?

2) 每种原理有哪些结构型式?

3) 从几何形状上可作哪些改变?

4) 从尺寸上可作哪些改变?

5) 从数量上可作哪些改变?

6) 从顺序上可作哪些改变?

可见, 通过解决上述问题, 从不同的角度可以全面地寻求轴毂联接的许多变型方案。

(4) 反向探求法。

对现有解决方案作系统否定，或寻找其相反的一面，寻求找出新的设想和方案；这种方法称为反向探求法。

机械工程，采用这种方法的例子很多。如我国某厂家生产的产品为颚式破碎机，使用厂家经常反应该机主轴容易断裂。生产厂家多次把该轴直径不断加粗，但仍不见效。后来，他们采用把原有轴的直径减小，反而获得问题的解决。

(5) 形态综合法。

这是一种系统搜索的方法。首先把一个复杂的系统（问题）按分系统（影响问题的几个独立因素）进行分解（称为“目标标记”），然后找出每个目标标记的一切可能状态（解法）（称为“目标特征”）。如按表1-1所示表格形式，将目标标记与各自相应的目标特征列成形态学矩阵，便可排

表1-1 形态学矩阵

		目 标 特 征							
		1	2	3	4	5	6	...	n
目 标 标 记	F_1	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	...			L_{1n_1}
	F_2	L_{21}	L_{22}	L_{23}	...				L_{2n_2}
	F_3	L_{31}	L_{32}	L_{33}	L_{34}	L_{35}	...		L_{3n_3}
	⋮								
	F_m	L_{m1}	L_{m2}	L_{m3}	L_{m4}	L_{m5}	L_{m6}	...	L_{mn_m}

列组合出该系统（问题）的多种方案（解法）。其理论上的最大组合数 N 可按下式求出：

$$N = n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_4 \times \dots \times n_m \quad (1-1)$$

式中， $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ 分别为各个目标标记可能状态（解法）的数量。