

高等学校试用教材

机械设计学

清华大学 黄靖远 主编
重庆大学 龚剑霞

机械工业出版社

本书是根据1987年10月国家机械委机械设计及制造专业教学指导委员会制订的教学计划和课程的教学基本要求编写的。本书以“机械设计学”的学科思想为基础,以“功能设计”和“结构设计”为核心内容,将作为功能设计和结构设计支柱的主要理论与方法分在各章作了相应的介绍,最后以设计试验结束。全书共九章,辅以实例,以阐明理论与方法的应用。

本书以培养学生具有“能提出创新构思并能尽快将其转化为有竞争力的产品”的初步能力为目标,围绕影响产品竞争力的功能原理设计、实用化设计和商品化设计三个关键设计环节组织内容,以体现“学科”与“应用”相结合的思想并反映专业的特色。

本书可用作高等工科院校机械设计及制造专业的专业教学用书,也可供其它机械专业师生和机械科技人员参考。

机 械 设 计 学

清华大学 黄靖远 主编
重庆大学 龚剑霞

责任编辑:张一萍 责任校对:宁秀娥
封面设计:郭景云 版式设计:王 颖
责任印制:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $12^{3/4}$ 字数 312 千字
1991年10月北京第一版 1991年10月北京第一次印刷
印数 0.001—5,000 定价:3.75元

ISBN 7-111-02815-5/TH·294(课)



DD53/25
前言

作为机械设计及制造专业教学指导委员会规定的第一门专业主干课,本教材应能反映出专业的特色。本教材在教指委的指导下,总结多年本专业教学实践和机械产品设计的经验,努力提炼“机械设计学”的学科思想并以其为基础,力求在课程内容体系上能做到科学、系统、完整地反映出学科思想。

原有其它机械类专业的专业课程,内容和体系都相当成熟,而本教材为新专业的新编教材,在内容体系和编写水平上自然难以相比。为了在教学中尽量使学生具有初步的“能提出创新构思并能尽快将其转化为有竞争力的产品”的能力,本教材围绕影响产品竞争力的三个关键设计环节,按功能原理设计、实用化设计和商品化设计来组织课程内容,力求使学生的能力更符合当前国家建设的需要。

对比相近的课程,本课程更强调实质性问题的研究,强调基本知识、原则、规律、经验、设计实践以及实验验证的重要性;不倾向于研究设计阶段、设计进程、过程战略等方法。

参加本教材编写的有:西安交通大学牛锡传(第一章),哈尔滨工业大学贾延林(第六章),同济大学仲正华(第四章),毛培芳(第九章及第二章部分),北京航空航天大学李恩至(第六章部分),重庆大学张静如(第七章)、龚剑霞(第五章及第七章部分)、西北工业大学刘丽春(第八章),清华大学李平林(第七章部分及第一章部分),黄靖远(第三章及第二章部分)。

北京航空航天大学郭可谦教授任书审。黄靖远、龚剑霞任主编。

希望使用本教材的读者提出宝贵的具体修改意见,以供下一次修改参考。

目 录

第一章 绪论	1
§1-1 机械设计的地位与作用	1
§1-2 机械设计的任务	2
§1-3 机械设计中的功能原理设计、实用化设计和商品化设计的特点	4
§1-4 机械设计的思维和方法特点	6
§1-5 机械设计的发展简史	8
§1-6 机械设计的现状与展望	10
§1-7 机械设计学学科的形成	11
第二章 机器的组成及典型机器分析	14
§2-1 机器的定义	14
§2-2 机器的组成	14
§2-3 机器的分类	16
§2-4 典型机器分析举例之一——家用缝纫机	17
§2-5 典型机器分析举例之二——计算机打印机	22
第三章 机械产品的功能原理设计	27
§3-1 功能原理设计的工作特点和工作内容	28
§3-2 功能、功能单元和功能结构	30
§3-3 功能类型及其对应的求解思路	33
§3-4 功能原理设计中的创造性问题	44
第四章 机械功能原理的实现	48
§4-1 执行机构的设计	48
§4-2 传动机构的设计	51
§4-3 机器中的动力学和运动学问题	57
§4-4 优化方法在机械设计中的应用	61
§4-5 机构设计方案变换和更新	65
§4-6 实现特殊功能的机构(机、电、液、气结合)	69
第五章 机械产品的实用化设计	72
§5-1 产品设计的核心和外围问题	72
§5-2 实用化设计的任务和主要内容	74
§5-3 总体设计的基本任务和要求	74

§5-4 生产机械的布置	75
§5-5 机械总体方案设计	80
第六章 机械结构设计	93
§6-1 结构件的功用及基本类型	93
§6-2 结构方案设计的基本原则和原理	96
§6-3 结构设计中的强度和刚度问题	102
§6-4 支承件的结构设计	111
§6-5 结构设计中的工艺问题	115
§6-6 材料选择	119
第七章 实用化设计中的各种技术问题	126
§7-1 机械疲劳设计	126
§7-2 摩擦和磨损	131
§7-3 可靠性设计	134
§7-4 机械的热传导和热膨胀	141
§7-5 机械的抗振性设计与低噪声设计	149
§7-6 机械动态设计	153
§7-7 人机学设计	160
第八章 机械产品的商品化设计	167
§8-1 产品的市场竞争力和商品化设计	167
§8-2 产品性能的适用性变化——商品化设计措施之一	167
§8-3 标准化、系列化、模块化——商品化设计措施之二	168
§8-4 工业产品的艺术造型——商品化设计措施之三	169
§8-5 价值工程——商品化设计措施之四	178
第九章 设计试验	186
§9-1 功能原理设计阶段的模型试验	186
§9-2 模型试验中的相似理论	187
§9-3 实用化设计阶段的样机试验	190
§9-4 机械产品的综合性能检测试验	195
参考文献	199

第一章 绪 论

§1-1 机械设计的地位与作用

一、机械设计的概念

要学习和研究机械设计学，首先要对机械设计的概念有一基本了解。

机械设计是根据使用要求对机械的工作原理、结构、运动方式、力和能量的传递方式、各个零件的材料和形状尺寸、润滑方法等进行构思、分析和计算并将之转化为具体的描述以作为制造依据的工作过程。

机械设计是机械的重要组成部分，是机械生产的第一步，是决定机械性能的最主要因素。机械设计的努力目标是：在各种限定的条件（如材料、加工能力、理论知识和计算手段等）下设计出较好的机械，即做出优化设计。设计者的任务是按具体情况权衡轻重，统筹兼顾，使设计的机械有最优的综合技术经济效益。

不同产业机械的设计，特别是整体和整系统的机械设计，须依附于各有关的产业技术而形成各产业机械设计学科。出现了农业机械设计、矿山机械设计、纺织机械设计、汽车设计、船舶设计、飞机设计、压缩机设计、汽轮机设计、内燃机设计、机床设计等专业性的机械设计分支学科。但是，这些专业设计又有许多共性技术，例如机构分析和综合、力与能的分析和计算、工程材料学、材料强度学、传动、润滑、密封，以及标准化、可靠性、工艺性、优化等。此外，还有研究设计工作的内在规律和设计合理步骤与方法的设计方法学。

机械设计学就是将机械设计的共性技术与理性化的设计方法有机地结合在一起而形成的一门独立的、综合性的学科。本课程旨在研究机械设计的规律、过程、原理、方法、设计原则以及其它机械设计的共性技术。

二、机械设计与其它学科和科技的关系

1) 新兴技术对机械产品的渗透、改造和应用，使产品的功能和结构产生很大的变化。现代产品的特点主要表现在采用现代技术，对产品的功能、可靠性、效益等提出更为严格的要求，而这些现代技术往往是通过设计的途径在机械产品中得到体现，因此，从某种意义上讲，机械设计是科学技术转化为生产力的过程。现代的机械产品正向着机械—电子—信息一体化技术方向发展，机械产品在功能上的这种大跨越是现代产品最突出的特点，是当前机械设计者为之奋斗的主要目标之一。

2) 科学技术的发展促使设计方法和技术的现代化。科技的新成就不断地丰富、充实机械设计的思想、理论、方法和手段，促进了机械设计的变革、创新和发展。由于控制技术、计算机和应用数学的发展和应用，特别是大型计算机和微型计算机的广泛采用，使设计方法和技术有着突破与跃进的条件和可能，正在逐步形成一系列包括脑力劳动自动化和各种人工智能化为特征的新的现代设计方法和技术，如计算机辅助设计（CAD），专家系统等。这对加速新产品的开发，改变机械产品和我国机械工业的面貌将起着重要的作用。

三、机械设计是联接需求到满足需求这一链条上的最基本的环节

设计是以满足需求为目的,但从需求的提出到满足需求要经过很多环节,如设计、制造、销售、售后服务、改进设计等等。其中设计是第一个也是最基本的环节,没有设计就没有以后的制造、销售等环节。就是说制造、销售都要以设计为基础来开展。工厂在生产某种产品时,组织生产的基本依据就是设计。因为在设计过程中,制造产品所需的材料、加工工艺、加工精度、所需设备、乃至车间空间位置的安排以及材料和成品存储都在设计阶段就基本被确定了。所以,设计是第一个也是最基本的环节。

四、机械产品的质量、性能和成本,在很大程度上是由设计阶段的工作决定的

设计的最终目的是生产出能满足需求的产品。但设计出的产品能否满足预想的要求,满足的程度如何,即产品的质量和性能如何,主要是在设计阶段决定的。如一辆汽车,它能否行驶、行驶速度、载重量、制动性能、耗油量等,在很大程度上在设计阶段就已经确定了。这就是设计的技术意义。

据调查,产品成本的75%~80%是在设计阶段决定的。从费用的角度看,设计通常是研制一个产品各阶段中花费最少的一个阶段。但从后果看可能是最昂贵的。因为设计中一个细小错误或缺点,如在设计阶段加以改正,花费将是最小的,而若在试制或批量生产阶段加以改正,那么花费会增加上百倍甚至上千倍。实际上不仅产品的制造成本是由设计阶段决定的,产品的运行费用也主要由设计阶段决定的。如内燃机的燃烧室或燃油系统设计不当,就会使耗油增加,运行经济性下降。这就是设计的经济意义。

五、设计水平与工业发展水平是相互影响的

众所周知,机械工业的发展水平是衡量一个国家整个工业乃至整个国民经济发展水平的标志。而机械工业的发展水平又是以机械设计和机械制造为基础的,没有高水平的机械设计和机械制造技术,就不会有高水平的机械工业,没有高水平的机械工业,也就不会有先进的石油工业、核工业等。当然,工业发展水平又在很大程度上影响到机械设计的水平。如果没有先进的电子工业、微电子工业以及材料工业等,那么信息技术、新材料技术、新能源技术和体现这些技术群体的现代设计方法和技术,也就不可能出现。

§1-2 机械设计的任务

没有客观的需求,就不会有设计任务。因此,设计来源于客观需求,而以满足这种需求为归宿。概括地说,机械设计的任务就是根据客观需求,通过人们的创造性思维活动,借助人类已经掌握的各种信息资源(科学技术知识)经过反复的判断和决策,设计出具有特定功能的技术装置、系统或产品以满足人们日益增长的生活和生产需求。

一、机械设计的一般过程(模式)

机械设计的总过程可分解成图1-1所示的各个基本部分。它大致反映了产品设计的一般规律,由于是根据以往的产品设计过程剖析得来的,因此具有一定的普遍性。由于设计类型、性质不同,学术观点的差异,设计人员倾向性和设计习惯的区别,基本构成部分也会有所差别,但各步骤之间存在的逻辑关系应该是一致的。一般地说,图1-1所示的过程不能随意颠倒或跳越,但可以有反馈或迭代,这种反馈或迭代过程可以是局部的,也可以是整体的。正因为如此,一个成熟的设计往往要经过图1-1所示的多次循环过程才能真正完成。从时间上

看,可能需要很多年。作为一个设计者,应尽可能地缩短这个过程。

二、设计各阶段的具体任务

从设计过程的总体结构看,可将图1-1所示的过程大致分为四个阶段:可行性研究、初步设计、详细设计及改进设计。

可行性研究阶段在整个设计过程中起着指导性的作用。从分析需求出发,经过信息交流、寻找问题的解法、进行原理性方案构思,最终得到一组可行的原理性方案,作为本阶段的输出。

初步设计阶段的任务是从上阶段输出的一组可行的原理性方案中选出最优方案,依此建立相应的数学模型并进行设计参数的分析,将设计参数定量并加以优化。

详细设计阶段的任务是完成产品的总体设计,确定零件、部件的结构形状、数量和相互配置关系,绘制全套零件图和总装图,编制技术文件。

改进设计阶段是根据制造加工、样机试验、使用、鉴定及市场反馈等环节所暴露出来的问题,进一步对产品各部分作适当的技术处理,以确保产品的质量。从而得到成本低、性能完善、用户欢迎的产品。

三、三种不同类型的设计任务

如果对机械工业中所需用各类机械作一番调查统计,就会发现设计者常会遇到下述三类不同的设计:

1) 开发性设计 在工作原理、结构等完全未知的情况下,应用成熟的科学技术或经过实验证明是可行的新技术,设计过去没有过的新型机械。这是一种完全创新的设计。最初的蒸汽机车设计就属于开发性设计。这也叫从“零”→“原型”的创新开发。

2) 适应性设计 在原理方案基本保持不变的前提下,对产品作局部的变更或设计一个新部件,使产品在质和量方面更能满足使用要求。如内燃机加一增压器后就可使输出功率增大,加一节油器就可节约燃料。增添增压器和节油器的设计就属适应性设计。

3) 变型设计 在工作原理和功能结构都不变的情况下,变更现有产品的结构配置和尺寸,使之适应于更多的量的要求。如由于需要传递的转矩或速比改变而重新设计减速器的传动系统和尺寸,就属于变型设计。

在工业实践中,开发性设计总是少量的,为充分发挥现有机械设备的潜力,适应性设计和变型设计就显得很重要了。作为一个设计者,不论从事的是那一类设计,着眼点都应该放在“创新”上。一个有远见卓识的企业家若不把开发新产品摆在他的议事日程上,一旦一种新的、工作原理或结构截然不同的产品在市场上出现,很可能一夜之间就把老产品的市场挤跨。

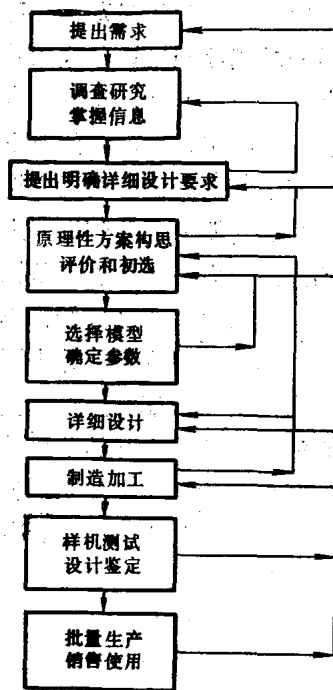


图1-1 机械设计过程

§1-3 机械设计中的功能原理设计、 实用化设计和商品化设计的特点

一、功能原理设计

任何一个产品的开发，都面对着市场竞争的考验。为了适应市场竞争的要求，产品开发必须经历功能原理设计、实用化设计和商品化设计三个重要阶段。只有经历了这三个阶段的精心设计，一个产品才能具备竞争的基本条件。在我国改革开放的新形势下，国内外市场竞争日益加剧，用户对产品的要求越来越高，一个好的设计工作者如不在产品的功能原理上加以创新而仅满足于搞一些适应性或变型设计，就无法使他的产品在商品市场上长期站住脚跟。因此，强调功能原理的创造开发实为必要。

功能原理设计实质上就是原理方案的构思与拟定的过程。它是从最新的自然科学原理及其技术效应出发，通过创新构思、优化筛选，找出最适宜于实现预定功能目标的原理方案。为此需运用创新思维方法并借鉴前人有效的设计经验，把设计要求通过功能关系抽象为一简单的模式，去寻求能满足产品主要功能要求的原理方案。

功能原理设计在开始阶段往往无需涉及具体解法，而是将问题抽象化，把所设计的机械产品的基本功能和主要约束条件突出出来，以利于突破和创新。

一个待设计的机械产品，其设计明细表往往是复杂的，但不外乎是输入量、输出量、特性、空间尺寸，以及对这些量的限制（约束条件）等。设计者可将待设计的机械产品看作是一个“黑箱”，此时应给出黑箱的输入输出量，以及来自外界对黑箱的影响和黑箱对外界的影响。具体说这些量可以是成本、预期寿命、运转范围、运转温度、可靠性等。或者说是速度、进给量、温度限制、最大运行范围、变量的预期变化、尺寸以及重量的限制等。

功能原理设计通常是以简图或示意图来进行方案构思，图中所示的构件（元件）的结构、形状以及材料等都还不可能有成熟的考虑，实际上也是不需的。

例如要设计一发电机的驱动装置。在开始进行方案构思时，不一定就以某种方案来约束自己的创新思维，实际上能满足这种功能要求的方案是很多的，图1-2所示的就是实现这种功能要求的一些可能方案。设计者可以根据输入和输出量的要求及约束条件，选择一个最优方案。但在这阶段，对使用何种型的原动机，传动机构的具体结构形状、材料、加工工艺等方面，都不一定去考虑。

又如要设计一个换向机构，可能的原理方案也是很多的。如摩擦轮或圆柱齿轮机构、圆锥齿轮机构、蜗杆蜗轮机构、杠杆机构、液压机构等。

图1-3是船用抽水机功能原理构思。设计的意图是要将船底的积水排出而不使用动力机，设计者构思了三个原理性方案：1) 利用船体的摆动带动活塞往复运动，达到抽水目的；2) 利用船在水中的起伏，通过杠

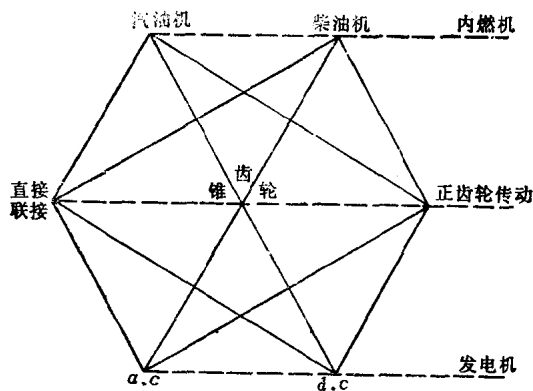


图1-2 发电机驱动的多方案

杆使活塞运动；3) 利用涨潮的水位落差，将水排出。

由此可见，功能原理设计是一个形象思维与逻辑推理的过程，是实现创新和开发的关键阶段，它的成败优劣，从质的方面决定了设计的水平，也决定了机械产品的性能及其在市场上的竞争能力。

二、实用化设计

功能原理的设计仅能提出各种功能要求的原理方案图，这与生产用图还有很大的距离，其间有很多的工作要做，其中关键的工作就是将原理方案结构化，即确定完成功能要求所需零件的材料、形状、尺寸、加工方法及总体布局。这就是通常所说的结构设计。也有人把这一设计阶段称为“具体化设计”

(Embodiment Design)、“详细设计”(Detail Design)、“技术设计”、“总体设计”等，不论说法如何，该阶段涉及到材料、工艺、精度、设计计算方法、实验与测试技术、制图等许多学科的问题，是一项复杂的综合性的工作。因此，这阶段的工作可概括为：设计结构，选择材料，确定尺寸。

实用化设计的目的不仅在于将原理方案结构化（具体化），而且还要考虑总体布局 and 一系列外围问题，以使机械产品能达到实用的要求。这阶段的工作特点与功能原理设计阶段有很大的不同，后者主要靠创造性思维和系统方法，前者则非常具体，除创造性思维外，更多的是分析及校核工作，因此机械零件课程的知识是必不可少的。但设计者不应局限于机械零件课程的范围内，因为这仅能解决一个量的问题。而设计的优劣更重要的是结构方案的设计，也就是“定形”问题，即构成这种技术系统的元件或零部件的数目及其相互位置的安排。因此在实用化设计阶段，工艺和经济观点占有很重要的地位。此外，设计者往往要花很多时间进行功能可靠性、制造、装配工艺性、使用性能以及成本等的审核工作。而且工作交叉多变，甚至需循环重复地进行，一个局部的结构变化往往会带来大量工作的反复和修改。因此实用化设计过程也是一个由初步设计到详细设计再到设计完善的由粗到细的过程。

实用化设计要求明确、简单及安全可靠，在保证完成功能要求的前提下，构成机械系统的元件（或零部件）的数目越少，结构越简单，系统的成本越低，运转的可靠性就越高。但在设计过程中会大量地碰到一些无法避免的因素，如零件中的应力、变形、振动、腐蚀、重量、空间乃至成本等，设计者的任务就是设法控制这些因素使其处在所允许的范围之内。

为了达到实用的要求，在进行实用化设计时必须掌握和遵循其内在规律和一般原理。如等强度原理、合理力流原理、变形协调原理、力平衡原理、自补偿原理、稳定性原理等等。

一般地说，功能原理设计应以模型试验来验证设计构思的可行性。试验和构思的结果完全吻合的情况是较少发生的，但设计者可从试验中得到某些启示，产生新的构思，或得到改进构思的新途径。而对实用化设计则应进行样机试验。在进行样机试验时，应着重检验实现功能目标的各种性能指标，同时对整机、部件及零件的强度、刚度、可靠度、振动稳定性、噪声以及抗腐蚀等方面也需进行试验，发现问题应及时改进。若将样机试验中暴露出来的问题

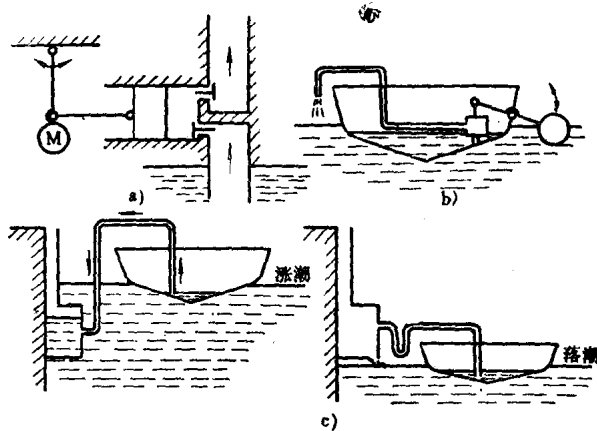


图1-3 船用抽水机功能原理构思

留待批量生产时去解决，则会在经济上造成很大的损失。

三、商品化设计

一个机械产品要能成为商品，即能拿到商品市场上去进行竞争，必须具备一定的条件，这些条件包括技术方面的、经济方面的及社会方面的。这几个方面实质上就是对一个机械产品的评价标准。

技术方面的评价主要包括设计原理、技术参数的选取、实现功能目标的技术先进性等，即通常所说的软件质量；保证实现功能的程度，如产品的材质、工艺精度、性能、寿命、可靠性等，即硬件质量。

经济方面的评价主要指设计方案的实施费用与可能取得的经济效益的比较，即成本与效益的比较。

社会方面的评价主要指产品可能产生的社会效益，其中包括：提高社会生产力，推动技术进步，增进社会福利，有利于身心健康等。具体说就是指产品的附加品质，如造型设计、人机功能、附加功能、使用维修条件、零部件的互换性、售后服务等。其中造型设计是很关键的一项。因为一个机械产品进入商品市场，首先给人以重要直觉印象的，就是其外观造型和色调，这对家电产品显得尤为重要。先入为主是人们的普遍心理反应，因此造型设计是一个与商品竞争力密切相关的问题。此外，不同的人们不同的时代，对商品的要求也有差别。有的人喜欢经久耐用的商品，对外观造型要求不高；有的则相反。但作为设计者来说，应该是既要求产品经久耐用，又要求外形美观大方，使人赏心悦目。

但机械产品不是观赏品，其造型设计不能脱离功能要求，因此造型设计应是功能、物质技术条件和艺术内容三者构成的一个有机统一体。

从价值工程的角度来看，机械设计应以功能分析为核心，以科学的分析方法为工具，用最低的成本去实现机械产品的必要功能，从而提高产品的实用价值和市场竞争能力。功能与成本的关系可用下式表示：

$$V = F/C$$

式中 V —— 价值；

F —— 功能；

C —— 寿命周期成本。

用户为获得机械产品而用的购置费称为生产成本，在使用机械产品过程中所支付的各种费用称为使用成本，生产成本和使用成本之和就是寿命周期成本。

设计者应寻求不同的设计方案，以使寿命周期成本最低。但功能与成本往往是相互矛盾的，很多设计构思从出现到转化为商品，需要一定的时间，这其中当然有功能实现的问题，但有时却是功能与成本间的不协调而使设计构思迟迟不能转化成商品。因此设计者应力图使产品达到最适宜的功能水平和成本水平，既满足技术上的要求，又满足经济上的要求。

§1-4 机械设计的思维和方法特点

机械设计是一个创造过程，一切新产品都从这儿开始；它要提出各种不同的构思和设想去实现某一种功能；有时需要对多种甚至是相互矛盾的需求和约束条件反复进行协调和折衷。

设计思维首先应该是一种偏重直觉思维形式的创造性思维,是一种针对总功能目标的发散性思维,是一种对多解问题求优的思维,其特点可归纳如下:

一、设计是一个创新和综合的过程,也是在继承基础上的创新

任何设计都是以科学原理为基础的,设计人员只有大胆创新才能有所发明,有所创造,有所改进。创新就是要充分发挥设计人员的抽象思维、创造性思维和形象思维的能力,尽可能构思出实现产品功能要求的各种原理方案,然后运用收敛性思维,将获得的信息加以综合,最后导出一种结论(原理方案)。因此设计过程是从发散性思维到收敛性思维的过程。也是一种不断分析判断作出逻辑推理的思维过程,也可以说是一种综合的过程。

既然是创新(更多的是改进),其中就包含着一种新的设计思想,但任何新设计思想的出现,总是建立在科学基础之上,设计者只要在此前提下,尽可“异想天开”地去发挥自己的思维能力,一种新的发明创造或许就蕴育在这种“异想天开”之中。但是没有科学依据的或是违背科学的设想,都只能是徒劳的。永动机的设想就是违背热力学基本定律的一种空想,是无法实现的。

但是任何一种发明创造都不可能是一帆风顺的,设计者要想使自己的设计能够创新,就要敢于冲破传统观念的束缚,充分发挥自己的创造才能,去想去做前人未曾做过的事情。不要怕自己的思想、观念与传统的观念相背,真理和创新可能就隐在其中。渐开线齿轮隐含着圆弧齿轮,行星传动隐含着谐波传动,往复式压缩机又蕴育着回转式压缩机。

创新是设计的一个原则,但并不是说所有的设计都是完全的创新。蒸汽机车的出现是一个完全的创新,因为在此之前还没有出现过以蒸汽机作为动力的机车;虽然是完全创新,但所用蒸汽机是别人已经发明的。具有人工智能的第五代电子计算机是一种创新,但它是在第四代计算机基础上的创新,带有继承的特性。在一般机械产品的设计中,继承的特性更为明显,不可能设想一个设计人员完全脱离前人的经验和积累的知识而凭空设想出一个新的设计。上面提到的创新过程实际上也是综合各种信息、不断进行信息交流的过程,信息的综合和交流就是继承。因此设计应是在继承基础上的创新,在继承基础上加以发扬,设计者才能集中主要精力去解决设计中的主要问题。

任何一个机械产品的设计,都含有继承和创新的成分,仅仅程度不同而已。在继承时,设计者应特别注意现存设计不一定是最佳方案,只有选择地吸收其中含有的现实可行因素,才能推陈出新。

二、设计是一个迭代过程(信息反馈过程)

图1-1所示的设计过程流程图中含有多层的迭代(或反馈),有局部的,也有整体的,因为设计本身就是信息交流和综合的过程。有信息,就会有反馈,设计每进行一步,就会取得一些新的信息,这些信息包括市场信息,设计所需的各种科学技术信息,设计过程中的各种测试信息,加工过程中的各种工艺信息等。一般说来,上一步的输出信息,经过加工处理,就会转为一批新的信息,经过综合、判断及取舍,作为本步骤的输出而输入到下一步。如果不满意,则反馈到相应的上一步去,经过修正加工处理后,得到修正后的新信息,如此循环往复,直到得到满意的信息为止。这就是输入信息→处理加工→判断→输出信息的基本设计思想。一个好的、成功的设计者是决不放弃一切可能得到的信息的。因此,全面、充分、正确和可靠地掌握与设计有关的各种信息,是确保设计质量,杜绝不应有的浪费所必须的。

三、设计过程是在约束条件下的求优过程

上面已经提到设计过程是信息综合和交流的过程,综合就是一个选优的过程。选优应包括方案选优、设计参数的优化和整体方案的优化。因此设计过程始终贯穿着优化的过程。设计者应在不脱离设计的总功能目标和约束条件下,在众多的原理方案和设计参数中合理地选择优化目标,以期能取得满意的设计。由于设计要求和约束条件的相互制约,设计者有时不得不花很大的力气去协调那些相互制约甚至是相互矛盾的因素,虽经优化,也不可能得到一个各方面皆优的设计,即所谓理想的设计。

四、机械设计过程可作为一待定的技术系统来处理

如果把机械设计过程作为一个系统,设计者的任务就是通过分析把整个系统分解成系统单元或分系统,来研究这些系统单元或分系统之间的关系以取得各种信息(这里讲的系统单元或分系统可以是一个问题,一种要求或一种功能)。这样做的目的在于把整体分解成局部,便于进行循序渐进的思维,另一方面是把问题的主要和次要方面分开,抓住主要矛盾,以期迅速地得到解决问题的方案。

作为一个完整的思维和推理过程,设计者应有意识地进行综合,把这些系统单元或分系统之间的有机联系用系统工程的方法重新加以组合,使系统单元和分系统之间的相互作用达到最优化。如此循环往复,直到问题得到满意的解决。

§1-5 机械设计的发展简史

自从有了人类,就伴随有设计构思的出现,纵观人类几千年的文明史,从人类使用石刀、石斧、弓箭、指南车、记里鼓车到蒸汽机的出现,乃至今天的人造地球卫星、航天飞机,如果我们仔细地分析机械设计各方面的创造发明,就可清楚地看出以下几点。

一、自然、社会和文化与科技三方面的因素影响机械设计的展

绝大多数机械设计的出现,多源于农业生产或工业生产上的需要,其次是为了国防上的需要。大量的粮食需求,必然带来农业机械的发展,工业的发展促使机械需求的增多,武器的发展又促进了尖端科技的发展。所有这些都在不断地促进社会物质精神文明建设,引起社会生活新的变化,新的科技成就又不断地丰富、充实机械设计的内容,进一步推动机械设计的发展。

二、所有机械设计都要经过一个逐渐发展的过程

任何一个机械的发展,大都是由简入繁(也有由繁到简的,这里仅在说明事物的出现都有一个过程)、由粗到精、逐渐发展的过程,而且这个过程几乎是不会终止的。蒸汽机的出现,引起了一场工业革命,但它并不理想,因此就出现了内燃机、电动机。人们最初用算盘进行计算,而后用手摇计算机、电子计算器、大型电子计算机,而今又出现了具有人工智能的计算机。开始人们用棍、棒、石、刀、弓箭做武器,而后有了枪炮、火箭、导弹。概括地说所有的机械设计大致都经历了以下三个阶段:

1) 直觉设计阶段 人类祖先在还没有能力来抵御自然力、其他部落的掠夺和野兽的侵袭时,为了生存,最先利用自然材料制成刀、斧、棍棒、修建房屋、兴修水利。为了更有效地保存自己进行生产,又进一步学会了制作弓、箭、杠杆、铧犁、风车、水力机械等。那时人们或是从自然现象中直接得到启示,或是全凭直观感觉来设计制作工具和机械。只知道这

些工具、机械能省力，能提高工效，但并不知其所以然，这就驱使人们去分析研究各种现有工具和机械的工作原理，并将其与数学结合起来，逐步产生了力学和机械学。这段时间人们把注意力放在对已有机械设计的分析上。几百年前意大利物理和天文学家伽里略研究的是物体的运动特性，例如摆、抛物体、自由落体等。之后英国数学家和自然哲学家牛顿研究较多的是重力及其与行星间的关系，研究光的折射等。这些研究和其它先驱者在自然科学领域的探索对改进机械设计方法提供了必要的理论基础。

2) 经验设计阶段 自17世纪数学与力学结合后，人们开始运用经验数学公式来解决设计中的一些问题，如材料、结构件的应力和强度计算，机器功率及成本计算等。18世纪工业革命后，创造发明象雨后春笋般地不断涌现。19世纪成了科技发展史上的一个重要时期，但这个时期人们还不能提出更多的设计理论与方法来指导各类机械设计。借助图纸来设计是在本世纪初才出现的，当时先由主机械师完成一个发明，由绘图师将发明绘制在图纸上。之后人们感到先将设计构思用图纸表达出来，再到车间加工制造，成本会低得多，因此直到今天各国的设计者仍采用图纸设计法。这一阶段的设计特点主要是依靠个人的才能和经验，运用一些基本设计计算理论借助类比、模拟和试凑等方法来进行设计。因此设计仅能满足基本的功能要求，且设计的局限性很大，一个产品的完善周期往往较长，从发明到实际应用有时需几十年甚至上百年的演变过程。当然随着科学技术的发展这个周期会越来越短，如蒸汽机从发明到实际应用用了100年，电动机用了57年，汽车用了27年，电视机用了12年，晶体管用了5年，而激光器仅用了1年。

3) 半理论半经验设计阶段 本世纪以来，图纸设计法大大提高了设计效率和质量，减少了设计中的浪费。随着科技的进步，试验手段的加强，设计水平取得了很大的进展。

设计基础理论和各种专业产品设计机理的研究加强了，如材料应力应变理论，疲劳理论，材料的蠕变理论，流体润滑及弹性流体润滑理论，摩擦磨损理论，断裂力学，可靠性设计，以及机床、刀具设计，各种专业产品（内燃机、压缩机、涡轮机、风机等）的原理与设计等等，都为设计提供了大量的信息，如设计数据、图表（册）、设计手册以及各种标准等。

关键零部件的设计研究加强了。一个产品的设计成功与否往往取决于关键零部件的设计，50年代后期人们开始了加强关键零部件的模拟试验，大大提高了设计速度和成功率。

加强了零件标准化、部件通用化及产品系列化的研究，进一步提高了设计的速度、质量，降低了产品成本。

由于设计理论和方法研究的加强，与经验设计相比，大大减少了设计的盲目性，有效地提高了设计效率和质量。至今，这种设计方法仍被广泛采用。

所以称这个阶段是半理论半经验设计法，是考虑现有设计理论主要集中在揭示具体设计对象的内在机理上，而未能将设计本身作为一门学科来研究。设计的成败与设计者的经历、经验有着密切联系。而且有很多具体设计对象的内在机理的研究还不很成熟，设计带有很大的条件性和经验性。如读者熟悉的非液体摩擦滑动轴承的设计，由于边界润滑机理还有待于进一步研究，所以目前仍未有一个大家公认的、成熟的理论设计法，现只能靠验算 P 值及 Pv 值进行条件性计算，这里设计者的经验是不可忽视的。齿轮的磨损计算也是如此。此外这一阶段的设计方法未能完全将局部与系统，定性与定量，静态与动态，技术与经济，技术与美学等有机地统一起来，使设计仍带有较大的局限性。

§1-6 机械设计的现状与展望

从 §1-5 可知, 机械设计目前还只能说仍处在半理论半经验的设计阶段, 但从发展的过程来看, 机械设计最初只考虑运动设计, 之后加入了强度、刚度及稳定性的设计, 再后又加入热力学的设计, 近来又加入了摩擦学的设计, 可以预料一个新的机械设计发展阶段总有一天会到来。现代设计法的出现和兴起就足以说明这一点。特别是当今科学技术突飞猛进、日新月异, 近30年来大约每隔10年知识就翻一番。新兴学科和技术的不断涌现, 科学的交叉与综合, 新的原理与方法的出现, 分析、计算、试验从宏观走向微观, 从静态走向动态, 从单目标设计走向多目标综合设计等等, 这一切使设计的周期越来越短, 如果设计者仅满足于传统的设计理论和方法, 就无法适应这种快节奏的时代。

纵观整个设计的发展过程, 科学技术的发展和新兴学科的出现将从以下几个方面对机械设计起到促进作用。

一、产品功能原理的发展

产品的功能原理受约于科技的进步, 任何机械产品都具有时代的局限性, 时代在前进, 科技在发展, 产品的功能原理就会进化和发展。半导体的出现使电子管产生了一个质的飞跃, 超导的成就也将会使磁悬浮列车产生一个质的飞跃, 目前超导电机在实验室的研究成功, 肯定会对现有电机产生不可估量的影响。凡此种种, 科技进步对产品功能原理的促进和发展是不言而喻的。但是功能原理的每一次进化或飞跃, 并不一定都是在新技术出现后才实现的, 它有时仅反映了设计者构思的创新, 回转式压缩机、螺杆式压缩机的出现是一种创新, 但从物理原理来看, 二者没有质的区别, 仅仅是实现压缩的方式不同而已。无风叶电扇的出现, 也是一种创新, 仅仅是通过机械振动方式引起空气分子运动而已。这一类功能原理上的进化, 引起的是另一种意义上质的飞跃。硅光电池和一般电池相比, 是第一种质的飞跃, 尽管都是从一种能转换成另一种形式的能, 但输入的能和转换方式完全不同, 前者是借助硅片的光电效应将光能转换成电能, 后者则是直接将化学能转换成电能。可见, 功能原理的创新一方面源于科技的进步, 一方面源于设计者的创新思维。但是不论是功能原理的进化, 还是质的飞跃, 总是使机械产品更趋完善, 更能满足人们生活和生产的需要。

二、产品质量的提高

有时科技的进步虽不能引起机械产品功能原理的变化, 但对提高现有产品的质量却起着非常重要的作用。某种新工艺、新材料的出现有可能使机械产品的某些性能指标有明显的提高, 有时甚至会使产品在功能原理上的不足得到某些补偿, 或使原来比较完善的产品在功能原理上的优越性显得更加突出。例如一种具有某种添加剂的润滑油可以使齿轮的寿命延长几倍甚至十几倍; 一种好的耐磨铸铁制成的床身可使机床的加工精度几十年不降低; 用激光加工工艺加工出的喷油嘴更容易使燃料雾化, 燃烧得更加充分, 从而降低了油耗。

机械设计除应满足产品的基本性能(如动力机械的动力特性, 操作性能, 经济性能; 运输机械的爬坡性能, 越野性能等)要求外, 当工况发生变化时, 产品的适应能力也非常重要。工况包括作业对象的特征、工作状况、环境条件等, 如物料的形状、尺寸、理化性质、湿度、温度、粘度、载荷、速度、加速度、位置、各种干扰、振动等。如能在设计时对上述工况很好地进行分析, 并适时地对产品提出能适应工况变化的要求, 就会使产品的适应能力大大提

高。产品质量应包括基本性能和适应能力两个方面,有时把这两方面通称产品的行为问题。

正因为如此,近年来设计工作者开始重视产品行为方面的研究。例如摩擦磨损机理的研究、机器故障诊断的研究、噪声的研究、机械工作稳定性的研究、机械可靠性研究等等。所有这些研究成果,都会使机械设计的质量和水平大为提高。

三、设计方法和手段的发展

传统的机械设计方法和手段是图板、计算器加手册,设计人员用于计算和制图的时间几乎占去了总设计时间的 $3/4$ 。因此设计人员的主要精力都花在这上面去了。设计者为了赶任务,就无法在产品功能原理和总体设计上去精雕细琢,这就会影响产品的质量。

计算机的应用和普及给机械设计带来了勃勃生机,特别是计算机辅助设计(CAD)的推广应用,使设计者节省了大量的计算和制图的工作量,而且能非常方便地进行参数的优化和方案的优选。以往在设计中难以进行计算或根本无法计算的问题,采用计算机则变得轻而易举了。比如以往在设计连杆机构时,只能根据几个特殊位置,采用作图的方法进行设计,现在则可以对任何位置进行求解;又如滑动轴承的设计,常需求解一个二维椭圆型偏微分方程,过去用手摇计算机需几个月时间,还往往出错,现在在大型电子计算机上只要花很少的时间就可完成一整套的数据计算;再如以往计算汽轮机和风机的轮盘强度一直采用二次计算法人工计算,既费时又不精确,还容易出错,当今用有限元法在计算机上计算,既精确又省事。目前这种方法在汽轮机和风机行业中已推广应用。

由于计算机的应用,就有可能使大量的数据资料及其它各种信息存入计算机的数据库中,这就省去了设计者翻阅各种资料手册的时间,而且可以更有效地利用各种信息资源。

此外专家系统的出现,随着它的不断完善和发展,各类专家的经验就有可能以数据库的形式输入计算机,到时设计者的经验将不再成为机械设计成败的主要因素。但专家系统是以专家们现有的知识为前提的,估计在短时间内对机械设计所起的作用是十分有限的。

四、机电一体化技术和产品的发展

目前微电子技术和信息处理技术正在突飞猛进地发展,而且不断地向机械工业渗透,因而机械工业就面临着一个信息化、柔性化和智能化的问题。不仅传统机械工业的高、大、精、尖设备的生产离不开机电一体化技术,成套设备和系统的自动化、柔性化离不开机电一体化技术,就连关键设备的改造和更新也离不开机电一体化技术。因此机电一体化技术已成为实现机械工业的高效、自动化、柔性化发展的焦点。目前世界上开始大量涌现机电一体化产品,使机械产品发生了质的变化,具有自动检测,自动数据处理(运算、判断、存储、记忆),自动显示,自动调节、控制、诊断和自动保护等功能,使人机关系发生了根本的变化,并开始向智能化方向发展。鉴于上述情况,机电一体化的机械设计也就势在必行了。尽管我国在这方面还刚刚起步,但作为一个机械设计人员,从现在起就应该在机电一体化的共性关键技术(检测传感技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服传动技术、精密机械技术、系统总体技术)方面有意识地进行一定的知识储备,一俟机电一体化技术发展的高潮到来,就可以从容地成为这个发展队伍的一员。

§1-7 机械设计学学科的形成

机械设计的发展历史告诉我们,从人类开始制作最简单的工具起,可以说机械设计就已

经开始了,不过那时的设计纯粹是直觉性的,并无理论指导,两千多年前出现的一些较为复杂的机械,也是如此。机械设计作为一门学科还仅仅处于萌芽状态。只是当数学和力学出现并得以发展后,机械设计学才得以崭露头角,特别是欧洲工业革命以后,机械、造船、铁路、冶金、纺织、化工、电器工业发展异常迅速,机械设计的作用越来越引起人们的重视。但当时的创造发明家往往集多家于一身,机械设计学仍溶于数学、力学和物理学之中。直到19世纪中叶德国学者才首先将“机械设计”学科从力学中独立出来,逐渐形成当今的机械原理和机械零件,这是一个了不起的功绩。当时总结的6大类机构:螺旋机构、轮形机构、滚柱机构、凸轮机构、曲柄机构和棘轮机构,已成为当今机构学中的基本内容,近年来出现的组合机构和空间机构仍未超出上述机构的范围。

但是作为学科,不论是机械原理还是机械零件,都具有很大的局限性,还不能反映机械设计的主要任务和内容。机械原理仅给出了机械设计中功能原理设计的一个方面(机构综合设计法),机械零件仅反映了结构设计中的一个方面。因此,从学科角度看,机械设计学应以机械设计的规律和设计特征来划分它的学科,即应按功能原理设计和结构设计发展成两门既有联系又有明确分工的主体专业学科。

早在本世纪30、40年代,人们已开始对新的设计思想、设计方法等进行了研究和探索,但直到50年代中期,特别是60年代初,欧美各国才对功能原理设计引起普遍的重视,德、日、苏、法等国的学者也相继在这方面做了大量的研究工作。在结构设计方面也有了专著。由此看来,机械设计学做为—门学科,其主体骨架已经建立起来了。

机械设计中的基本理论,依传统的设计方法来看,直接涉及到功能原理设计的分支学科有机械原理、机构综合、液压传动,与此相对应的基础理论有理论力学、机器动力学、流体力学等。直接涉及结构设计的分支学科有机械零件、结构理论,与此相对应的基础理论有材料力学、弹性力学、断裂力学、蠕变理论等。

随着现代设计法及机械行为性能研究的不断深入和发展,逐渐产生了与机械设计密切相关的分支技术学科如疲劳理论(疲劳的累积损伤理论、疲劳理论的断裂力学学说)、摩擦学(摩擦磨损的机理和理论、流体润滑理论、弹性流体润滑理论、摩擦化学)、振动理论、噪声理论、

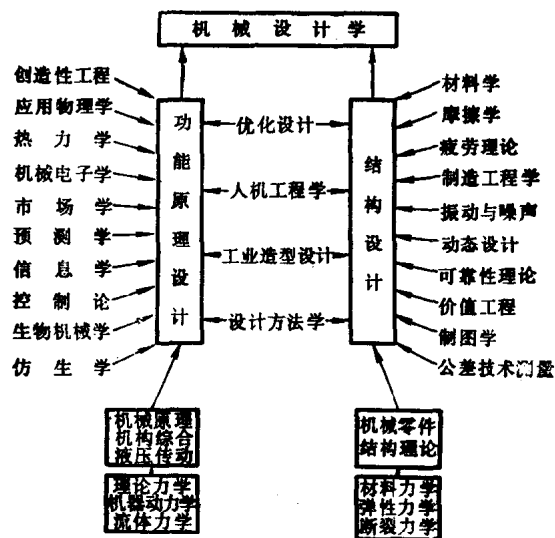


图1-4 机械设计学的学科组成

动态设计、可靠性设计、人机工程学、造型设计、价值工程等等。所有这些都可以看做是机械设计学的一系列技术理论支柱。

有了这些技术理论作为支柱支撑着两大主体学科，“机械设计学”这一大学科的体系就基本形成了。

当然，还有很多学科也可视为机械设计学的相关学科，如机械制图学、机器制造工艺学、公差与技术测量、材料学、热力学、微电子学、控制理论、测试技术、CAD、CAE等等。由于科学技术的突飞发展，相关的学科、边缘学科会不断出现，此处就不再一一列举了。

图1-4所示为机械设计学的大学科组成体系的大致关系。图中明确指出机械设计学的主体专业学科是功能原理设计和结构设计，其基础理论是理论力学、机器动力学、流体力学、热力学（涉及功能原理的）、材料力学、弹性力学、断裂力学（涉及结构设计的），其技术基础理论是机械原理、机构综合、机械零件。其它的相关分支学科就是其技术支柱。