



普通高等教育机电类规划教材

机械系统设计

第2版

朱龙根 主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

机械系统设计

第2版

主 编 朱龙根
参 编 王恪典 张 眉 高荣慧
付云忠 王 洪
主 审 郭可谦



机械工业出版社

本书是在 1992 年第 1 版的基础上修订的。本书从系统的观点出发, 分析机械系统的特点, 阐述机械系统设计的一般规律和方法。全书共分九章: 第一章概述, 第二章机械系统的方案设计与总体设计, 第三章机械系统的载荷特性和动力机选择, 第四章执行系统设计, 第五章传动系统设计, 第六章操纵系统设计, 第七章控制系统设计, 第八章机械系统的噪声及控制, 第九章机械基础设计。

本书为高等学校机械设计制造及其自动化专业和机械设计类专业的教材, 也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械系统设计/朱龙根主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社,
2001. 5

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-03089-3

I. 机… II. 朱… III. 机械系统—系统设计—高等学校—教材
IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 20780 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 邓海平 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 方 芬 责任印制: 闫 焱

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 10 月第 2 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18.5 印张·454 千字

25 001—28 000 册

定价: 25.00 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) 68993821、68326677—2527

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书第1版自1992年面世以来已历七载,根据机械设计及制造专业教学指导委员会1997年4月工作会议制定的教材编写出版规划,决定对本书进行修订。按教学指导委员会意见,综合了各兄弟院校的修改建议,并经编写组研究讨论提出如下修订原则:

(1)“机械系统设计”是专业教学指导委员会规定的专业主干课之一,设置本课程的目的是使学生通过本课程学习,能从整机的角度和系统的观点了解一般机械产品设计的规律和特点,拓展学生的知识面,扩大机械结构设计知识,增强机械设计能力,掌握机械产品设计基本方法和技术,结合课程设计和实践教学环节,培养学生具有开发设计性能良好的有市场竞争力的机械产品的初步能力。这也是本次修订的指导思想。

(2)机械系统设计涉及的内容很多,除本书已包涵的各章内容外,还应包括很多设计内容,如各种设计方法、液压系统设计、润滑系统设计、造型设计、摩擦学设计、可靠性设计、零部件结构设计、结构件设计、工艺分析、系统分析等等,但作为一门课程不可能包罗那么完整、全面。教材必须体现其内容的科学性、先进性与实践性,并处理好与相关课程内容的衔接、呼应和延伸,不过分强调内容的完整性和系统性。为此,本书以一般机械产品设计中的共性内容为重点,并与本专业课程体系中的其他课程一起构筑专业教学框架。各校应在教学中按各自的具体情况和特点作必要的增删。

(3)为了说明一般机械产品设计的共性规律和设计方法,应尽量从各个不同行业及机械中选择有代表性的典型实例,这也是拓宽学生知识面的需要。限于篇幅,在教材中不可能列入太多的典型实例,各校可在授课时补充或选择更有代表性的典型实例。

(4)本教材中的量和单位一律采用GB3100~3102—93《量和单位》的规定,物理量一般均采用首选符号。对于未列入国家标准而各行业采用不同符号的,本书均作统一处理。

本次修订时保留了第1版的基本体系和内容,有些则做了补充和修改,并增加了如下内容:

1)第四章执行系统设计中增加了常用机构的主要性能、特点及选择,以便于机构选型和执行系统设计。这部分内容可作为学生自学,不在课内讲授;

2)第五章传动系统设计中增加了液压传动及传动系统动力学设计概述;

3)第七章增加了常用控制电机和检测传感器简介;

4)增加了第八章机械系统的噪声及控制。噪声控制已成为现代机械设计的重要内容,越来越多的机电产品已将噪声指标列为产品性能指标。本专业学生应对机械系统的噪声机理、控制途径及测量方法有基本的了解;

5)各章都适当列出一些思考题。

参加本教材修订的人员有:杭州应用工程技术学院朱龙根(第一、二、九章及第八章部

分), 西安交通大学王恪典(第三章), 四川大学张眉(第四、五章)、合肥工业大学高荣慧(第六章)、哈尔滨工业大学付云忠(第七章)、杭州应用工程技术学院王洪(第八章部分)。朱龙根任主编, 北京航空航天大学郭可谦教授任主审。

诚望使用本教材的各校师生指正书中不当及错误, 以使本教材不断改进、完善。

编 者
于 杭 州

第 1 版 前 言

本书是根据全国高等工业学校机械设计及制造专业教学指导委员会 1988 年 3 月制订的“机械系统设计”教材编写大纲编写的。

为市场提供优质高效、价廉物美的机械产品，以满足不断增长的社会生产活动和人们生活的需要，是机械产品设计的根本宗旨。

“机械系统设计”是机械设计及制造专业的主干必修课程之一。通过本课程的学习，使学生能从整机的角度和系统的观点了解一般机械产品设计的规律和特点，扩大机械结构知识，增强机械设计能力，掌握机械产品设计的基本方法和技术，并结合课程设计和实验等实践教学环节，培养学生具有开发设计性能良好的和有市场竞争力的机械产品的初步技能。

为此，本书在编写过程中力求从系统的观点出发，对机械系统的组成和设计要求进行分析，并介绍机械系统的主要组成部分的设计方法和原理。为使学生具有较宽广的知识和视野，有较强的工作适应能力，不仅有从事机械设计的基础知识和基本技能，有对机械设计中的具体技术问题进行分析和设计的能力，而且还具有对各类产业机械进行整机设计的初步能力，本书在内容的选择和安排上尽量注意拓宽专业面，结合典型机械设计实例，概括机械设计的一般规律和方法。讲授本课程约需 50 学时。

本书由合肥工业大学朱龙根副教授、东北工学院黄雨华副教授主编。具体编写分工：第一、八章及附录由朱龙根编写；第二章由江苏工学院蒋生发副教授编写；第三章由黄雨华编写；第四章由上海工业大学胡潮曾副教授编写；第五章由山东工业大学庄莅之副教授编写；第六章由吉林工业大学张家励副教授编写；第七章由哈尔滨工业大学黄开榜副教授编写。

本书在编写时注意理论联系实际，并努力遵循“少而精”的原则。第四章执行系统设计中不包含机构设计理论和方法的内容，这部分内容由“机构设计”课程进行系统的讲述。“机械工程控制基础”是本课程的先修课程之一，考虑到没有学过该课程的学生学习的需要，将有关机械系统控制的基础知识在附录中作一概要介绍。

本书由同济大学喻怀正教授主审。参加审稿会的还有哈尔滨工业大学孙靖民教授、西北工业大学沈允文教授、东北工学院崔广椿教授、大连理工大学欧宗瑛教授、吉林工业大学赵清副教授等。

本书在编写过程中得到全国高等工业学校机械设计及制造专业教学指导委员会的具体指导，尤其是合肥工业大学徐业宜教授、北京航空航天大学郭可谦教授对本书的指导思想和内容体系均提出了许多宝贵意见。此外，全国机械设计及制造专业教育研究会的兄弟院校也对本书的编写给予了很大的支持和帮助，编者在此一并表示由衷的感谢。

本书可作为机械设计类专业本科生教材，也可供有关专业师生和工程技术人员参

考。

限于编者水平，加之本课程是一门新开设的课程，很多问题都有待进一步探讨。因此，本书的缺点和不足，甚至谬误之处在所难免，殷切希望使用本书的各校师生和广大读者批评指正，编者将不胜感激。

编 者

1990 年 4 月

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
第一章 绪论	1
第一节 机械与机械系统	1
第二节 机械系统设计的任务	5
第三节 机械系统设计方法概述	15
思考题	19
第二章 机械系统的方案设计与总体设计	20
第一节 机械系统的方案设计	20
第二节 机械系统的总体设计	30
思考题	43
第三章 机械系统的载荷特性和动力机选择	44
第一节 工作机械的载荷和工作制	44
第二节 动力机的种类、机械特性及其选择	54
思考题	73
第四章 执行系统设计	74
第一节 执行系统的组成、功能及分类	74
第二节 机构选型及常用执行机构的主要性能特点	81
第三节 执行系统设计	100
思考题	105
第五章 传动系统设计	106
第一节 传动系统的功能和要求	106
第二节 传动系统的类型及其选择	106
第三节 传动系统的组成	111
第四节 传动系统的运动设计	131
第五节 传动系统动力学分析概述	151
思考题	162
第六章 操纵系统设计	163
第一节 操纵系统的功能和要求	163
第二节 操纵系统的组成和分类	164
第三节 操纵系统设计	167
第四节 操纵系统与人机工程学	175
思考题	182
第七章 控制系统设计	183
第一节 控制系统的作用、分类和组成	183
第二节 控制原理	185
第三节 控制电机和位置检测装置	191
第四节 伺服系统设计	200
思考题	217
第八章 机械系统的噪声及控制	218
第一节 机械系统噪声的分类和特性	218
第二节 机械系统噪声控制	223
第三节 机械噪声测量简介	235
思考题	244
第九章 机械基础设计	246
第一节 机械基础的要求	246
第二节 机械基础的静力学计算	247
第三节 机械基础的动力学计算	250
第四节 机械基础的构造与材料	260
第五节 机械基础的隔振简介	262
思考题	267
附录 A 拉氏变换及其应用	268
附录 B 传递函数和方框图	273
附录 C 若干声学性能参考数据	279

第一章 绪 论

第一节 机械与机械系统

一、系统的概念

人类在长期的社会实践中认识到,客观事物是复杂的,为了准确而科学地把握和研究某一事物,除了必须研究和分析该事物的特性及其发展规律外,还必须研究和分析该事物与其周围相关事物之间的联系和作用,由此逐渐形成了系统的概念。“系统”这一概念是对世界上一切事物和现象的共性——系统性的高度概括。

所谓系统是指具有特定功能的、相互间具有有机联系的许多要素构成的一个整体。

一般认为,由两个或两个以上的要素组成的具有一定结构和特定功能的整体都可看作是一个系统。任何系统都具有一定的结构,任何系统都具有特定的功能。系统结构是指系统内部各要素相互联系的方式和作用秩序,系统功能是指系统对外部环境联系的效能和有利的的作用。从系统结构构成的层次看,一个大的系统是由若干个小的系统组成的,这些小的系统常称为子系统。子系统又是由它所属的更小的子系统组成,大的系统本身也是其他的更大系统的组成部分。

由此看来,任何机械都是由若干装置、部件和零件组成的一个特定的系统,是由确定的质量、刚度和阻尼的物体所组成并能完成特定功能的一个系统。机械零件是组成机械系统的基本要素,部件、装置是组成机械系统的子系统。从系统结构的不同层次看,零件、部件、装置都可被看作是构筑机械系统的要素,它们按一定的结构形式相互联系和作用,以完成系统特定的功能。从高一个层次看,机械本身又是人一机一环境这个更大系统的组成部分。为了研究的方便,机械系统设计时,把机械本身构成的系统称为内部系统,而把人和环境构成的系统称为外部系统。内部系统与外部系统之间存在着一定的联系,即相互间有作用和影响,如图 1-1a 所示。外部系统对内部系统的作用和影响,对外部系统来说是输出,而对内部系统来说则是输入;反之,内部系统对外部系统的作用和影响,对内部系统来说是输出,而对外部系统来说则是输入,见图 1-1b 所示。

系统有下述一些特性:

(1) 整体性 整体性是系统所具有的最重要和最基本的特性。系统是由若干个要素构成的统一体,虽然各要素具有各自不同的性能,但它们在结合时必须服从整体功能的要求,相互间须协调和适应。一个系统整体功能的实现,并不是某个要素单独作用的结果,或者说每一个要素对于系统整体都有影响,且影响有大有小,但都不具有独立的影响。一个系统的好坏,最终体现在其整体性能上。

因此,必须从整体着眼,即从全局出发确定各要素的性能和它们之间的联系,并不要求所有要素都具有完美的性能,对系统整体性能影响大、作用强的重要要素,应尽力提高其关键性能及保持其与相关要素的良好协调;对系统整体性能影响较小、作用较弱的次要要素,

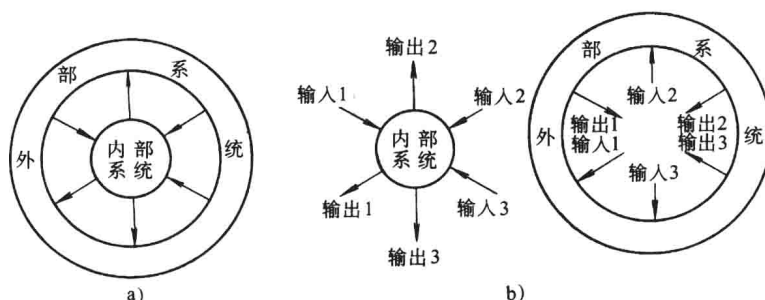


图 1-1 内部系统与外部系统

a) 内部系统与外部系统的联系 b) 系统的输入与输出

则不必追求其完善的性能，只要其与相关要素能保持必要的统一协调即可。

系统的整体性还反映在组成系统的各要素之间的有机联系上，正是这种联系，才使各要素组成一个整体，若失去了这种联系也就不存在整个系统。要素的随意组合不能构成系统。同样，在系统中不存在与其他要素不发生联系的独立要素。因此，系统是不能分割的，不能把一个系统分割成相互独立的子系统。

由于实际系统往往是很复杂的，为了研究的方便，可以根据需要把一个系统分解成若干个子系统，这与分割系统是完全不同的，因为在分解系统时始终没有忘记各子系统之间的联系，分解后的子系统都不是独立无关的，它们之间的联系分别由相应子系统的输入与输出表示。

(2) 相关性 系统内部各要素（或子系统）之间是有机联系的，即相关的，它们之间相互作用、相互影响而形成特定的结构关系，包括各要素间的输入与输出关系、各要素间的层次联系、各要素的排列组合形式等。当某一要素的功能或性能改变时，通过系统特定的结构关系影响相关要素，进而对整个系统产生影响。组成系统的各要素虽然相同，但结构关系改变时，它们之间的作用 and 影响也随之改变，因而也将影响整个系统的功能，尤其是关键要素的联系方式和作用秩序改变时，对系统功能将有很大影响。

(3) 目的性 系统的价值体现在其功能上，完成特定的功能是系统存在的目的。因此，系统的目的性是很明确的，即实现要求的功能，排除或减小有害的干扰。组成系统的要素和结构都对系统的功能有影响，但要素和（或）结构都不同的系统，也可有相同的功能，即功能有多解性。

(4) 环境适应性 任何一个系统都存在于一定的物质环境中，外部环境的变化，会使系统的输入发生变化，甚至产生干扰，引起系统功能的变化。外部环境总是不断变化的，系统也总是处于动态过程中，稳态过程只是相对的、暂时的。因此，为了使系统运行良好，具有确定的特定功能，必须使系统对外部环境的各种变化和干扰有良好的适应性。

二、机械系统的组成

现代机械种类繁多，结构也愈来愈复杂，但从实现系统功能的角度看主要包括下列一些子系统：动力系统、传动系统、执行系统、操纵和控制系统等，如图 1-2 所示。每个子系统又可根据需要继续分解为更小

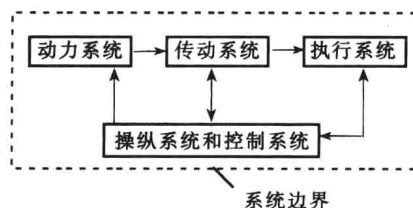


图 1-2 机械系统的组成

的子系统。

（一）动力系统

动力系统包括动力机及其配套装置，是机械系统工作的动力源。按能量转换性质的不同，动力机可分为一次动力机和二次动力机。一次动力机是把自然界的能源（一次能源）转变为机械能的机械，如内燃机、汽轮机、燃气轮机等，其中内燃机广泛用于各种车辆、船舶、农业机械、工程机械等移动作业机械，汽轮机、燃气轮机多用于大功率高速驱动的机械。二次动力机是把二次能源（如电能、液能、气能）转变成机械能的机械，如电动机、液压马达、气压马达等，它们在各类机械中都有广泛应用，其中尤以电动机应用更为普遍。由于经济上的原因，动力机输出的运动通常为转动，而且转速较高。

选择动力机时，应全面考虑现场的能源条件，执行系统的机械特性和工作制度，机械系统的使用环境、工况、操作和维修，机械系统对起动、过载、调速及运行平稳性等要求，并应有良好的经济性和可靠性。

（二）执行系统

执行系统包括机械的执行机构和执行构件，是利用机械能改变作业对象的性质、状态、形状或位置，或对作业对象进行检测、度量等，以进行生产或达到其他预定要求的装置。

执行系统通常处在机械系统的末端，直接与作业对象接触，其输出是机械系统的主要输出，其功能是机械系统的主要功能。因此，执行系统有时也被称为机械系统的工作机。执行系统功能及性能，直接影响和决定机械系统的整体功能及性能。功能有多解性，为实现机械系统的特定功能，可有多种执行系统方案，但各方案的其他功能及性能指标，如可靠性、经济性、动力学特性等往往不尽相同。因此，对执行系统尤应进行多方案的技术、经济分析比较，以便择优选用。

（三）传动系统

传动系统是把动力机的动力和运动传递给执行系统的中间装置。传动系统有下列主要功能：

（1）减速或增速 把动力机的速度降低或增高，以适应执行系统工作的需要。

（2）变速 当用动力机进行变速不经济、不可能或不能满足要求时，通过传动系统实行变速（有级或无级），以满足执行系统多种速度的要求。

（3）改变运动规律或形式 把动力机输出的均匀连续旋转运动转变为按某种规律变化的旋转或非旋转、连续或间歇的运动，或改变运动方向，以满足执行系统的运动要求。

（4）传递动力 把动力机输出的动力传递给执行系统，供给执行系统完成预定任务所需的功率、转矩或力。

传动系统在满足执行系统上述要求的同时，应能适应动力机的机械特性，尽量简单。如果动力机的工作性能完全符合执行系统工作的要求，传动系统也可省略，而将动力机与执行系统直接连接。

（四）操纵系统和控制系统

操纵系统和控制系统都是为了使动力系统、传动系统、执行系统彼此协调运行，并准确可靠地完成整机功能的装置，二者的主要区别是：操纵系统多指通过人工操作以实现上述要求的装置，通常包括起动、离合、制动、变速、换向等装置；控制系统是指通过人工操作或

测量元件获得的控制信号，经由控制器，使控制对象改变其工作参数或运行状态而实现上述要求的装置，如伺服机构、自动控制装置等。良好的控制系统可以使机械处于最佳运行状态，提高其运行稳定性和可靠性，改善操作条件，并有较好的经济性。

此外，根据机械系统的功能要求，还可有润滑、计数、行走、转向等系统。

三、现代机械的功能要求

现代机械的功能要求非常广泛，不同机械因其工作要求、追求目标和使用环境的不同，其具体功能的要求也有很大差异。

例如，起重机械是一种有间歇运动的机械，主要用于物料的装卸。其作业过程一般是：从取物地点由起升机构把物料提起，由运行机构、回转机构或变幅机构把物料移位，到指定地点后下降以卸下物料，然后反向运动回到原位或移动到一个新的作业地点，进行下一次作业。在两次作业之间，一般有短暂的停歇。所以，起重机械工作时，各机构和构件经常处于起动、制动和正向、反向等相互交替的有停歇的运动状态中。因此，起重机械的基本功能要求是起升重量、起升高度、起升速度、运行速度、生产率、作业范围及经济性，以及工作过程的安全性、可靠性、稳定性、操纵性、对周围环境的适应性等。对于汽车起重机还要求有良好的机动性，对于大跨度龙门起重机则还要求大车运行时两侧门腿移动的同步性等。

又如，塑料注射成型是一种将塑料熔体以高速高压注入到模具型腔内，经冷却定型，得到成型塑料制品的加工方法。其主要作业过程是：将粒状原料塑化熔融，成型模闭合，将熔料注射入模，保持成型模闭合适当时间，待制品冷却固化成型后，开模取出制品。因此，塑料注射成型机的基本功能是：计量原料并使之塑化熔融，将熔料以所需速度和压力射出，成型模具的开、合、锁紧与保压，工艺参数（压力、速度、温度、时间等）须根据不同制品和原料进行调整和控制。此外还应保证制品的尺寸精度和稳定性，提高塑化能力、冷却速度与生产率，以及工作过程的安全性、可靠性及热稳定性等。

各种机械的功能要求大体可归纳为：

(1) 运动要求 如速度、加速度、转速、调速范围、行程、运动轨迹以及运动的精确性等。

(2) 动力要求 包括传递的功率、转矩、力、压力等。

(3) 可靠性和寿命要求 包括机械和零部件执行功能的可靠性、零部件的耐磨性和使用寿命等。

(4) 安全性要求 包括强度、刚度、热力学性能、摩擦学特性、振动稳定性、系统工作的安全性及操作人员的安全性等。

(5) 体积和重量要求 如尺寸、重量、功率质量比等。

(6) 经济性要求 包括设计和制造的经济性、使用和维修的经济性等。

(7) 环境保护要求 如噪声、振动、防尘、防毒、“三废”（废气、废水、废渣）的排放和治理、周围人员和设备的安全保护等。

(8) 产品造型要求 如外观、色彩、装饰、形体及比例、人一机一环境的协调性和宜人性等。

(9) 其他要求 不同机械还可有一些特殊要求，如精密机械要求能长期保持其精度并有良好的防振性；经常搬运的机械要求安装、拆卸、运输方便；户外型机械要求良好的防护、防腐和密封；食品和药品加工机械要求不污染被加工产品等。

第二节 机械系统设计的任务

机械系统设计的最终目的是为市场提供优质高效、价廉物美的机械产品，在市场竞争中取得优势、赢得用户，并取得好的经济效益。

产品质量和经济效益取决于设计、制造和管理的综合水平，而产品设计则是关键。没有高质量的设计，就不可能有高质量的产品。没有经济观点的设计人员，绝不可能设计出经济性好的产品。据统计，产品质量事故，约有 50% 是设计不当造成的；产品的成本，60% ~ 70% 取决于设计。因此，机械系统设计时，特别强调和重视从系统的观点出发，合理确定系统功能，提高可靠性，提高经济性，保证安全性。

一、从系统的观点出发

从系统的观点出发是指机械系统设计时，采用内部系统设计与外部系统设计相结合的方法，既要重视内部系统设计，也要重视内、外系统的联系。

传统的设计方法多偏重内部系统设计，且以改善零部件的特性为重点，至于各零部件之间、外部环境 with 内部系统之间的相互作用和影响考虑较少。因此，虽然对零部件的设计考虑得很仔细，但设计的系统仍然不够理想。零部件的设计固然应该给予足够的重视，但全部用好的零部件未必能组成好的系统，其技术性能和经济效益未必能实现良好的统一。

因此，不应只考虑各零部件的工作状态和性能，不能追求局部的最好，而应该在满足系统整体工作状态和性能最好的前提下，确定各零部件的基本要求及它们之间的协调和统一。

同时，应在调查研究的基础上，搞清外部环境对该机械的作用和影响，如市场对该机械的要求（包括功能、价格、销售量、尺寸、质量、工期、外观等）和约束条件（包括资金、材料、设备、技术、人员培训、信息、使用环境、后勤供应、检修、售后服务、基础和地基、法律与政策等），这些都对内部系统设计有直接影响，不仅影响机械系统的总体方案、经济性、可靠性和使用寿命等指标，也影响具体零部件的性能参数、结构和技术要求，甚至可导致设计失败。

此外，也不能忽略机械系统对外部环境的作用和影响，包括该产品投入市场后对市场形势、竞争对手的影响，该产品运行中对环境、操作人员及周围其他人员的影响等。

内部系统设计与外部系统设计相结合是系统设计的特点，它可以使设计尽量做到周密、合理、少走弯路，避免不必要的返工和浪费，以尽可能少的投资获取尽可能大的效益，其技术、经济、社会效果、往往随系统复杂程度的增加而越趋明显。

二、合理确定系统功能

一项产品的推出总是以社会需求为前提，或为满足社会生产活动的需要，或为满足人们生活的需要。没有需求就没有市场，也就失去了产品存在的价值和依据。而社会的需求是变化的，不同时期、不同地点、不同的社会环境就会有不同的市场行情和要求。产品应不断地更新改进，适应市场的变化，否则就会滞销积压，造成浪费，影响企业的经济效益，严重时甚至导致企业倒闭。所以，设计师必须确立市场观念，以社会需求和为用户服务作为最基本出发点。

所谓需求，就是对功能的需求。用户购买产品实际就是购买产品的功能。

按功能的性质可分为基本功能和辅助功能。基本功能是用户直接要求的功能，体现了产

品存在的基本价值。辅助功能是为了实现基本功能而附加在产品上的功能,是实现基本功能的手段。根据功能的多解性原理,为实现同一基本功能可采用不同的辅助功能,辅助功能不同则技术方案也不同,甚至有根本性差别,例如,为了实现执行构件的直线移动功能(这是产品要求的基本功能),可以采用曲柄滑块机构、齿轮齿条机构、螺旋机构、气压缸、液压缸、近似直线机构或直线移动电动机等不同的技术方案,各方案所需的辅助功能有很大差别。

辅助功能往往不是一个而是一群,如上述用曲柄滑块机构实现直线运动的方案中,需要在产品中附加上曲柄的转动功能(为此还要有曲柄轴的回转支承、回转运动的输入、曲柄存在条件的满足等次级功能)、滑块直线运动的导向功能(为此还要解决导向方式、导向构件、导向精度、导向件间隙调整等次级功能),以及曲柄与滑块的连接功能(为此还要解决连杆与曲柄的连接、连杆与滑块的连接、连接处间隙调整、连杆平衡等次级功能)。

在辅助功能群中包含有很多辅助功能及大量的次级功能,它们应该都是必要功能,但设计考虑不周时常会含有一些多余功能,如强度过剩、精度过高、寿命过长、多余约束等。

按功能满足用户要求的性质可分为使用功能和外观功能。使用功能是指能够满足用户使用要求的功能,是体现产品实际使用价值的功能,当然属必要功能。外观功能是指在使用功能基础上,对产品起美化、装饰作用的功能,可以起到增加产品竞争力和吸引顾客的作用。外观功能应服从使用功能,要在保证产品性能好、质量高的基础上,讲究造型、色彩、装饰等功能,为此适当多花费一些成本是必要的,尤其是投向国际市场的产品,更应对外观功能下足够的功夫。对外观功能无要求的产品,如地下管道、海底电缆等,则在外观上的任何费用支出都是多余的。

无论实现哪种功能都须成本投入。价值工程中常用价值来评价功能与成本的统一程度,即产品的价廉物美程度。价值可表示为

$$V = \frac{F}{C} \quad (1-1)$$

式中 V ——评价对象或产品的价值;

F ——评价对象或产品的功能;

C ——评价对象或产品的成本。

为了提高产品的价值,一般可以采取下述五种措施:①增加功能,成本不变;②功能不变,降低成本;③增加一些成本以换取更多的功能;④降低一些功能以使成本更多的降低;⑤增加功能,降低成本。显然,最后一种是最理想的,但也是最困难的。

在进行价值分析时,常利用式(1-1)进行定量分析,此时需将功能 F 量化为货币量,即把功能 F 表示成实现功能的最低费用,称为功能评价价值;取 C 为功能现实成本,即实现该功能所花的实际成本。比值 V 称为功能价值。

功能评价价值 F 的大小与实现该功能的难易程度有关。较难实现的功能,其功能评价价值较高;较易实现的功能,其功能评价价值较低。由于生产同类产品的各家企业的设备条件、技术水平、生产经营管理状况不同,各家实现相同功能的所花费用也不同。因此,功能评价价值应在可比范围内(一般指全国范围内或生产同种产品的行业范围内)实现相同功能的最低费用。功能评价价值也可按用户所能接受的价格按式(1-2)确定

$$F = D - (I_i + B_p) \quad (1-2)$$

式中 D ——用户在现有条件下认可的价格，可通过市场预测估计获得；

I_i ——产品的预期利润和税金；

B_p ——单位产品销售费用。

价值分析时，如 $V=1$ ，说明实现功能的现实成本 C 与实现功能的最低费用 F 相等，这是比较理想的状况；如 $V<1$ ，说明实现功能的现实成本 C 高于其最低费用 F ，应设法降低现实成本 C ，以提高功能价值 V ；如 $V>1$ ，应查证现实成本 C 与最低费用 F ，若确实无误，应将最低费用 F 提高为现实成本 C ，即将功能价值 V 调整到等于 1。

因此，确定系统功能时，应遵循保证基本功能、满足使用功能、剔除多余功能、增添新颖功能、恰到好处地利用外观功能的原则，降低现实成本，提高功能价值，力求使产品达到尽善尽美的境地。

三、提高可靠性

可靠性是指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。可靠性是衡量产品质量的一个重要指标。

所谓“产品”是泛指单独进行研究和试验考核的对象，可以是零件、部件、装置，也可以是整机系统。“规定条件”是指对产品进行可靠性考核时所规定的使用条件和环境条件，包括载荷状况、工作制度、应力水平、温度、湿度、尘砂、腐蚀等，也包括操作规程、操作技术、维修方法等，凡是影响产品功能的使用条件和环境条件均需明确规定。“规定时间”是指对产品可靠性考核时所规定的时间，包括运行时间、应力循环次数、汽车行驶里程等，因为可靠性是时间的函数。“规定功能”是指对产品考核的具体功能，产品规定功能的丧失称为失效，对丧失的规定功能可修复的产品其失效也称故障。

可靠性技术是研究产品发生故障或失效的原因及预防措施的一门技术。目前，可靠性技术已开始用于机械系统设计。

（一）衡量可靠性的指标。

能度量产品可靠性程度的数值量都可以作为可靠性的指标，它们都是带有统计性质的概率，常用的有下述几种：

（1）可靠度 $R(t)$ 可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能时不发生故障或失效的概率。可靠度 $R(t)$ 也称可靠度函数， $0 \leq R(t) \leq 1$ 。

（2）失效概率 $F(t)$ 失效概率是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能时发生故障或失效的概率。失效概率 $F(t)$ 也称不可靠度， $0 \leq F(t) \leq 1$ 。因为失效与不失效是对立事件，所以 $F(t) = 1 - R(t)$ 。

（3）失效率 $\lambda(t)$ 失效率是指产品工作到某一时刻后，在单位时间内发生失效或故障的概率。失效率 $\lambda(t)$ 也称故障率，常用单位为 $1\%/(10^3\text{h})$ 或 $1\%/(10^6\text{h})$ 。对于可靠性很高、失效率很小的产品，则用 Fit (Failure Unit) 作为单位， $1\text{Fit} = 1\%/(10^9\text{h})$ 。

（4）平均无故障工作时间 MTBF MTBF (Mean Time Between Failures) 是指产品在使用寿命期内的某段观察期间累积工作时间与故障次数之比，是用于衡量可修复产品的可靠性指标。

（5）失效前平均工作时间 MTTF MTTF (Mean Time To Failure) 是指发生故障后不能修复的产品从开始使用直至失效的平均工作时间。

（6）维修度 $M(t)$ 维修度是指在规定的条件下使用的产品，在规定时间内按照规定的

程序和方法进行维修时，保持或恢复到能完成规定功能状态的概率。

(7) 有效度 $A(t)$ 有效度是可修复产品在规定的使用、维修条件下，在规定时间内，维持其功能处于正常状态的概率。有效度 $A(t)$ 也称可用率，可用观察期间内产品能工作时间对能工作与不能工作时间和之比来衡量。

此外，还有一些衡量可靠性的指标。不管哪一种可靠性指标，都只是衡量和评价产品可靠性的某一方面特征的尺度。对于不同产品应根据其不同的特点或习惯采用合适的可靠性指标。机械类产品常用的可靠性指标有可靠度 $R(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 、有效度 $A(t)$ 及平均无故障工作时间 MTBF（汽车、车辆则用行驶里程数）。

(二) 提高机械系统可靠性的措施

提高系统可靠性的最有效方法是进行可靠性设计。进行可靠性设计时必须掌握影响可靠性的各种设计变量的分布特性和数据，还要建立从研究、设计、制造、试验直至管理、使用和维护以及评审的一整套可靠性计划。当缺乏这些必要的数据和统计变量时，了解影响机械系统可靠性的因素，采取下述一些措施，对提高机械系统可靠性也是有益的。

1. 分析失效，查找原因

机械系统工作时，由于各种原因难免发生故障或失效。如果能在研究和设计阶段对可能发生的故障或失效进行预测和分析，掌握其原因，并采取相应的预防措施，则系统的失效率将会减小，可靠性也随之提高。为了使失效分析做得比较全面和切合实际，应对现有系统或同类系统进行质量调查和用户访问，收集失效实例，分析失效原因，对重要的系统应建立失效档案，特别是对典型的重大失效案例应召开失效分析会，请有关专家和人员进行详尽分析，以此积累经验和资料，作为指导和改进设计的根据。

2. 把可靠性设计到零部件中去

机械系统的可靠性是由零部件的可靠性保证的，只有零部件的可靠性高，才能使系统的可靠性高。但是，并不意味着全部零部件都要有高的可靠性。对系统可靠性有关键影响的零部件通常是系统的重要环节，这些零部件必须保证其必要的可靠性。而有些零部件对系统功能的影响较弱，在系统中的重要度较低，其可靠性的要求相对可低些。对于那些价值较低、整机可靠性要求不高的系统，其零部件的可靠性要求也相应较低。

总之，机械系统设计时应从整体的、系统的观点详细分析其输入、输出，把握功能结构要求，尽量减小不稳定因素的干扰。对于可靠性要求很高的零部件，应进行可靠性分析和设计，消除薄弱环节，必要时可采用减额使用的办法，使其工作负荷低于额定值，减少超负荷工作的几率；或采用冗余技术，即加大可靠性的贮备，如用并联系统代替串联系统、采取载荷分流和均载等技术措施。采用冗余技术对提高系统可靠性是最有效的，但会相应地增加系统的复杂性，增加制造成本和维修费用。

3. 提高维修性

维修是保持或恢复功能的技术措施。维修性是指在规定的条件下和规定的时间内按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复产品功能的能力。因此，维修性也可看作是维护产品可靠性的能力。

任何机械系统在使用过程中都会因各种原因而发生故障，随着服役时间的增加，故障率一般也会变化。机械系统典型的故障率曲线如图 1-3 所示，因其形状象浴盆，故常称浴盆曲线。根据故障率的变化趋势，通常将故障分为初期故障、偶发故障和耗损故障。

初期故障通常是由系统中某些可靠性较差的零部件引起的,也可由设计中的不当或制造装配中的缺陷引起,也会在系统进行大修理或改造后重新投入使用的初期出现。初期故障的特点是故障率高,但故障率下降很快。当系统中的薄弱环节和缺陷得到改进或在一定条件下通过适当的试运行、调整、跑合,初期故障率可以减小。

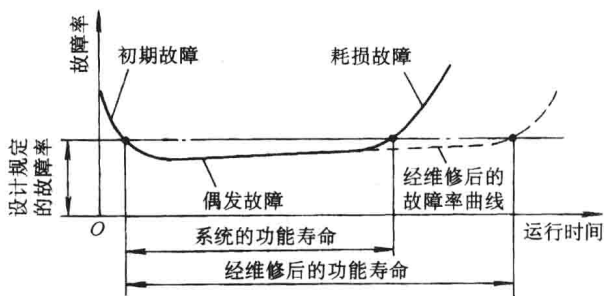


图 1-3 机械系统典型的故障率曲线

当初期故障阶段结束后,系统进入正常运行时期,其故障率小而稳定。此时的系统故障主要是由一些偶发的因素引起的,如操作不当、运行条件的突然变化和过载、零部件的偶然性缺陷等,所以这时的故障常称为偶发故障。偶发故障所对应的运行时间是系统能有效工作的时间,称为系统的功能寿命或有效寿命。

随着使用时间的增加,系统中的零部件因磨损、疲劳、老化等原因,故障率又显著上升,这时的故障常称为耗损故障。一般说来,进入耗损故障期后,系统的效率降低、生产率下降,意味着该系统正常使用寿命的终结。

在正常运行时期,如能进行良好的维修,及时更换磨损、疲劳和老化的零部件,则系统的故障率显著下降,功能寿命得以延长,如图 1-3 中虚线所示。

维修应在设计阶段就要进行考虑,使系统具有良好的维修性,易于检查、发现和排除故障,便于维修,如把系统的薄弱环节,易损件尽量做成独立部件或采用标准件、通用件,并设计成容易拆卸和更换的结构等。

4. 简化结构,提高标准化程度

结构简单的零部件往往工艺性好,制造和装配的质量容易得到保证,故障的潜在因素容易得到控制。

标准化也是提高可靠性的一项重要措施。一般,标准件的结构工艺性好、可靠性高,设计时应尽量提高产品标准化程度。

产品标准化程度一般用标准化因数和重复因数表示。

标准化因数是产品所用标准件、通用件和外购件总数占全部零件数的百分比。

重复因数是产品全部零件数与零件品种数之比。

四、提高经济性

(一) 以寿命周期成本最低为目标

所谓寿命周期成本 LCC (Life Cycle Cost) 是指产品从计划、设计、制造和使用直至报废的整个寿命周期内所花费用的总和。寿命周期成本既包含设计和制造厂方的支出费用,也包含用户使用该产品过程中的支出费用,前者称为生产成本,后者称为使用成本。机械产品寿命周期成本的构成见图 1-4。

生产成本由直接成本和间接成本两部分构成。其中直接成本主要包括研究与设计、材料及采购、加工和装配等与生产直接有关的各项成本;间接成本主要包括管理、销售和用工、广告、租赁、公用事业、保险、福利和奖励、研究和发展、专利、支付利息等各非直接生产环节的支出分摊到该产品的成本。