



普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



# 机械系统设计

段铁群 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

# 机械系统设计

段铁群 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从整体的角度和系统的观点出发,较全面地叙述了机械系统的基本概念、性能要求、设计规律、评价方法和典型结构,重点突出了工程设计的应用技术知识。全书共分7章,内容包括绪论、总体设计、传动系统设计、执行系统设计、支承系统设计、控制系统设计和机械系统实用设计技术。

本书可作为普通高等学校机械类及相关专业本科生和研究生的教学用书,也可供相关机械工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

机械系统设计/段铁群主编. —北京:科学出版社,2010.2  
(普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材)  
ISBN 978-7-03-026629-3

I. ①机… II. ①段… III. ①机械系统-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019446 号

---

责任编辑:毛莹 于宏丽 / 责任校对:朱光光  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

**科学出版社**出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**诚志印刷厂**印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年2月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—4 000 字数:445 000

**定价:33.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

随着科学技术的发展和进步,人们对机械产品的要求越来越高。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和人类生活的需求,是机械产品的设计目标。机械产品的设计知识是机械类各专业学生必须掌握的内容。

本书从整体的角度和系统的观点出发,较全面地叙述了机械系统的基本概念、性能要求、设计规律、评价方法和典型结构,重点突出了工程设计的应用技术知识。全书共分7章,第1章介绍了机械系统的概念、特征和组成,机械系统的基本要求、设计类型和设计过程,以及机械系统设计的发展历程等,使读者对机械系统及设计知识具有一般性的了解和认识;第2章介绍了机械系统总体设计的概念、一般设计过程和设计方法,主要包括总体设计的原则、原理方案设计、方案评价、总体布置、主要技术参数的确定等内容;第3章较详细介绍了分级变速传动系统的一般设计方法和特殊设计、无级变速传动系统设计以及传动系统结构设计等知识;第4章在简要叙述执行系统一般概念和方案设计的基础上,重点介绍了应用较为广泛的执行轴机构和直线往复机构的相关设计知识、技术数据和参考结构等;第5章介绍了支承系统的功能、类型、基本要求、设计过程、静刚度和动态性能等,重点介绍了支承件的结构设计、材料与热处理、壁厚选择、结构工艺性等内容;第6章叙述了控制系统与机械系统的关系、控制系统的一般性概念,重点介绍了与机械系统结构设计直接相关的控制电动机和检测传感器、操纵机构设计以及操纵与人机工程学等方面知识;第7章介绍了部分机械系统的实用设计知识,包括形态变换、关系变换、结构合理受力、强度设计、刚度设计、精度设计、安全设计、降噪设计、绿色设计等内容。在每章最后均配有有一定数量的习题与思考题,以便于读者学习和复习。

参加本书编写的人员有哈尔滨林业大学贾娜,黑龙江大学毕永利,沈阳理工大学纪玉杰,哈尔滨商业大学刘义翔,哈尔滨理工大学段铁群、崔思海、胡乃文、陈永秋、葛江华、陈涛。全书由段铁群提出体系框架和构思,段铁群、崔思海统稿。段铁群任主编,崔思海、刘义翔任副主编。

书中插图由哈尔滨理工大学研究生石广远、王涛、邹德龙、徐磊、张达、董庆建等绘制,哈尔滨轴承集团公司的隋善勇、王多亮等同志为本书的编写提供了许多技术数据,在此一并表示感谢。

本书由大连理工大学欧宗瑛教授审阅,编者深表谢意。

限于编者的水平,书中难免存在一些疏漏或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年11月

# 目 录

前言	
<b>第 1 章 绪论</b> ..... 1	
1.1 机械系统的基本概念 ..... 1	
1.1.1 系统与机械系统 ..... 1	
1.1.2 机械系统的特征 ..... 2	
1.1.3 机械系统的组成 ..... 4	
1.2 机械系统设计的任务 ..... 5	
1.2.1 机械系统的基本要求 ..... 5	
1.2.2 机械系统的设计类型 ..... 7	
1.2.3 机械系统的一般设计过程 ..... 7	
1.3 机械系统设计的发展 ..... 9	
1.3.1 机械设计的发展简史 ..... 9	
1.3.2 机械系统设计的发展趋势和前沿 技术 ..... 12	
习题与思考题 ..... 15	
<b>第 2 章 总体设计</b> ..... 16	
2.1 总体设计概述 ..... 16	
2.1.1 总体设计的原则 ..... 16	
2.1.2 总体设计的内容与步骤 ..... 17	
2.2 原理方案设计 ..... 19	
2.2.1 需求与功能 ..... 19	
2.2.2 功能分析与原理方案求解 ..... 22	
2.2.3 创新技法 ..... 29	
2.3 方案评价 ..... 32	
2.3.1 评价原则 ..... 32	
2.3.2 评价目标 ..... 32	
2.3.3 评价方法 ..... 34	
2.4 结构总体设计 ..... 41	
2.4.1 总体布置 ..... 41	
2.4.2 系列化、标准化、通用化和模块化 ..... 43	
2.4.3 主要技术参数的确定 ..... 45	
习题与思考题 ..... 52	
<b>第 3 章 传动系统设计</b> ..... 54	
3.1 传动系统概述 ..... 54	
3.1.1 传动系统的功能和基本要求 ..... 54	
3.1.2 传动系统的类型 ..... 55	
3.1.3 传动系统的组成 ..... 57	
3.2 分级变速传动系统设计 ..... 60	
3.2.1 转速图 ..... 61	
3.2.2 结构网和结构式 ..... 64	
3.2.3 转速图的拟定 ..... 65	
3.2.4 齿轮齿数的确定 ..... 71	
3.2.5 功率扭矩特性和计算转速 ..... 76	
3.2.6 恒转矩传动系统的设计要点 ..... 79	
3.3 分级变速的特殊设计 ..... 81	
3.3.1 采用交换齿轮的传动系统 ..... 81	
3.3.2 采用多速电动机的传动系统 ..... 82	
3.3.3 采用混合公比的传动系统 ..... 83	
3.3.4 扩大传动系统的变速范围 ..... 86	
3.4 无级变速传动系统设计 ..... 88	
3.4.1 调速电动机的特点 ..... 89	
3.4.2 无级变速传动系统的设计原则和 设计要点 ..... 89	
3.4.3 无级变速传动系统设计举例 ..... 91	
3.5 传动系统结构设计 ..... 94	
3.5.1 结构设计原则与步骤 ..... 94	
3.5.2 箱体轴线的布置 ..... 95	
3.5.3 齿轮的布置与排列 ..... 98	
3.5.4 传动轴结构 ..... 101	
习题与思考题 ..... 106	
<b>第 4 章 执行系统设计</b> ..... 108	
4.1 执行系统概述 ..... 108	
4.1.1 执行系统的功能和组成 ..... 108	
4.1.2 执行系统的分类 ..... 109	
4.1.3 执行系统的基本要求 ..... 109	
4.1.4 执行系统的设计过程 ..... 110	
4.2 执行系统方案设计 ..... 111	

4.2.1 执行系统方案设计的一般过程	111	6.1.1 控制系统的概念与作用	203
4.2.2 执行系统方案设计举例	113	6.1.2 控制系统的组成和分类	204
4.3 执行轴机构设计	116	6.1.3 控制系统的基本要求	206
4.3.1 执行轴机构概述	116	6.2 典型控制系统举例	207
4.3.2 执行轴	117	6.2.1 机械控制	208
4.3.3 执行轴的滚动轴承	123	6.2.2 液压控制	209
4.3.4 执行轴的滑动轴承	132	6.2.3 气动控制	210
4.3.5 执行轴机构	136	6.2.4 电气控制	211
4.3.6 执行轴机构的计算	145	6.2.5 典型控制的对比	211
4.3.7 润滑与密封	151	6.3 控制电动机与检测装置	212
4.4 直线往复机构设计	153	6.3.1 控制电动机	212
4.4.1 直线往复机构概述	153	6.3.2 检测装置	217
4.4.2 滑动导轨	156	6.4 操纵机构	224
4.4.3 其他类型导轨	166	6.4.1 操纵机构概述	224
4.4.4 常用的传动形式	171	6.4.2 操纵机构设计	227
4.4.5 导轨的防护	174	6.4.3 操纵与人机工程学	234
习题与思考题	175	习题与思考题	241
<b>第5章 支承系统设计</b>	177	<b>第7章 机械系统实用设计技术</b>	242
5.1 支承系统概述	177	7.1 形态变换与关系变换	242
5.1.1 支承系统的功能和类型	177	7.1.1 形态变换	242
5.1.2 支承系统的基本要求	177	7.1.2 关系变换	244
5.1.3 支承件的设计过程	178	7.1.3 形态变换和关系变换的应用	246
5.2 支承系统的静刚度	179	7.2 强度与刚度设计	248
5.2.1 支承系统的受力分析	179	7.2.1 合理受力	248
5.2.2 支承件的静刚度	181	7.2.2 静强度设计	252
5.2.3 静刚度的折算和比较	184	7.2.3 疲劳强度设计	255
5.3 支承系统结构设计	185	7.2.4 刚度设计	259
5.3.1 截面形状的选择原则	185	7.3 精度设计	262
5.3.2 支承件的结构	187	7.3.1 误差的来源和性质	262
5.3.3 支承件的材料与热处理	192	7.3.2 精度设计的方法	263
5.3.4 支承件的壁厚	194	7.3.3 精度设计的原理	266
5.3.5 支承件的工艺性	196	7.3.4 传动精度设计	268
5.4 支承件的动态性能	199	7.3.5 误差补偿	270
5.4.1 固有频率和振型	199	7.4 安全与绿色设计	274
5.4.2 提高支承件动态性能的主要措施	201	7.4.1 安全设计	274
习题与思考题	202	7.4.2 降噪设计	281
<b>第6章 控制系统设计</b>	203	7.4.3 绿色设计	285
6.1 控制系统概述	203	习题与思考题	291
		<b>参考文献</b>	293

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机械系统的基本概念

### 1.1.1 系统与机械系统

#### 1. 系统的含义

为了准确科学地掌握某一客观事物的复杂性,除了需要研究该事物的内在性质和发展规律外,还必须分析其与周围相关事物之间的联系和相互作用。人类经过长期的社会实践逐渐形成了系统的概念。

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所构成的一个整体,即由两个或两个以上要素组成的具有一定结构和特定功能的整体都称为系统。系统的概念是对世界上一切事物和现象的高度概括,它包括两重含义:其一,系统由相互联系的许多要素构成;其二,系统要完成特定功能,就必然与环境发生关系。

系统由要素构成,所谓要素就是构成系统的各组成部分,离开了要素就谈不上系统。要素是系统的基本成分,是系统存在的基础。一般来说,系统的性质由要素决定,有什么样的要素,就有什么样的系统。各种要素在系统内相互联系和作用,以一定的结构形成系统。各种要素在系统中的地位和作用也不尽相同,有些要素处于系统的中心地位,支配和决定着整个系统的行为,这些要素是中心要素;还有些要素处于系统中被支配、非中心的地位,被称为非中心要素。系统的性质除了受各要素的影响外,主要取决于要素的结构。结构的优劣由各要素之间的协调作用直接体现出来,优质的要素如果协调得不好,形成的结构可能不是最优的;但质量差一些的要素,如果协调得好,则可能形成优异的结构,从而决定出较优的系统。因此,处理好要素与要素、要素与系统的关系,对于系统的功能和性质至关重要,这也体现了设计的重要意义。

系统要素的集合表现为具有固定的性质和作用。从系统功能的角度来看,任何系统都是一个不可分割的整体,如果硬把一个系统分割开,那么它将失去原有的性质和作用。系统在特定环境中发挥的作用称为系统的功能。可以看出,系统与环境存在着密切联系。一般把一个系统之外存在的所有其他事物统称为系统的环境。系统存在于环境之中,环境是系统的外部条件。环境影响着系统的行为,对系统的性质起着一定的支配作用。

值得强调的是,一个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,子系统又是由从属于它内部更小的子系统组成;而每一个系统本身又可以成为更大规模系统的组成部分。例如,我们可以将一个柔性制造系统看成是一个系统,其中的各数控机床可以看成是子系统;也可以将一台数控机床看成是一个系统,而将各零部件看成子系统。

#### 2. 机械系统

由若干机械要素组成,彼此间有机联系,并能完成特定功能的系统称为机械系统。

分析可知,任何机器都是由若干零部件和装置组成,均具有一定的质量、刚度和阻尼的结构形式,并能够完成指定的动作行为。这些零部件和装置构成了机械系统的机械要素,一定的结构形式确立了系统内部各机件和装置间的有机联系,其动作行为就是该机器要完成的特定功能。

机械系统是一个广义的概念,其含义可根据不同的研究对象加以具体化。一般来说,机器、机构等均可以称为机械系统,只是它们组成的机械要素不同。从完成单一运动要求考虑,机构作为机械系统,它的组成要素是构件;机器也是机械系统,它的组成要素是机构(或装置);从完成某一工艺过程考虑,生产线也是机械系统,它的组成要素是机器。如果从某一机器加工制造的角度出发,也可以将各零件看成它的组成要素。本书把机械系统界定为机器,这有利于系统内、外部关系的整体考虑。

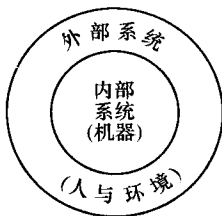


图 1-1 内部系统与外部系统

机器的运行离不开人和环境,我们把机器本身称为内部系统,把人和环境称为外部系统,内部系统和外部系统组成了广义机械系统,见图 1-1。内部系统与外部系统之间存在着一定的联系,相互作用和影响。机械系统本身是内部条件,决定着是否能够实现机器要求完成的功能。人与环境是机械系统的外部条件,对机器的效能起着一定的支配作用和重要的影响。例如,一台加工机床,其本身决定着能够完成的工艺范围和加工质量,但其效能发挥的好坏与操作者的技术水平和生理、心理因素有关,也与工作环境对机床的影响有关。

例如,一台加工机床,其本身决定着能够完成的工艺范围和加工质量,但其效能发挥的好坏与操作者的技术水平和生理、心理因素有关,也与工作环境对机床的影响有关。

### 1.1.2 机械系统的特征

讨论上述系统和机械系统的概念可知,机械系统由若干机构或装置组成。也可以将这些机构或装置称作机械系统的子系统。这些子系统之间既独立存在又密切联系,它们之间相互作用,具有一定的输入和输出关系。各子系统紧密联系构成机械系统的整体,保证系统整体特定功能的实现。机械系统是为了完成预期功能服务的,一定存在于物质环境中,系统与环境之间会相互作用和影响。分析可知,机械系统应具有下列特征。

#### 1. 目的性

完成特定的功能是机械系统存在的目的,是系统价值的体现。对于任何一台机器而言,如果不能完成要求的功能,那么这台机器的存在将失去意义,因此机械系统存在的目的就是要实现其自身的功能指标,这也是一个系统区别于另一个系统的重要标志。

机械系统的功能可以用具体的指标体系来描述。一般来说,一个较复杂的机械系统具有多个指标,各指标之间有时会相互矛盾、相互影响和制约,经常会出现此消彼长的情况。因此,要从机械系统全局的角度出发,设法协调好各指标之间的矛盾,寻求平衡点,使系统的性能达到最优。

机械系统的组成要素和结构形式决定着系统的功能,不同的要素或结构形成不同的系统,但不同的系统可能具有相同的功能,这就是系统功能的多解性。

#### 2. 整体性

整体性是机械系统的基本特性。机械系统是由若干机械要素构成的整体,虽然各机械要



素具有不同的性能,但它们结合后必须服从整体功能的要求,相互间需要协调和适应。对于任何一个系统,虽然每一个要素对于系统功能的实现都有影响,且影响的大小各有不同,但系统整体功能的实现,并不是这些要素单独作用的结果,而取决于各要素之间的相互影响和综合作用。一个系统的好坏体现在它的整体性能上。分析一个机械系统时,必须从系统全局的角度出发,根据其整体性能的优劣进行综合判断和评价。

一个完善的机械系统,并不要求所有的机械要素都具有完美性。全部由优质机械要素组成的机械系统,如果整体效能的统一性和协调性较差,也得不到令人满意的结果。相反,即使系统内某些非优质的机械要素,如果能够处理好各相关要素之间协调统一的关系,往往也可使系统达到令人满意的效果。在进行机械系统设计时,应特别注意系统整体的统一和协调。

整体性还体现在组成系统各要素之间的有机联系上,正是这种有机联系才使各要素组成一个整体,即系统具有不可分割性。为了研究方便,往往会把一个复杂的系统分解成若干个子系统,但分解后的各子系统之间并不是完全独立无关的,它们之间存在着一定的联系和输入、输出关系。

### 3. 相关性

相关性是指机械系统内部各机械要素之间的有机联系和相互作用。相关性包括各要素间的层次结构关系,各要素间的输入与输出关系,各要素的性质与系统整体性能间的关系等。

系统的相关性是通过要素之间的联系方式来实现的,不同的联系方式对系统的相关性有不同的影响和作用。系统之所以能够实现整体功能,是由于各要素之间相互联系、相互作用的结果。要素之间的联系包含时间和空间两个方面。当系统内部各要素之间的联系或某一要素发生变化时,系统的功能也将发生变化,即系统的组成要素和联系方式对整个系统的功能和性能产生重要影响。

系统各要素之间的联系方式也称为系统的结构。系统是一个由相互作用的许多要素构成的统一整体,系统分解为子系统后,各子系统存在着一定的层次结构。同一系统中不同子系统(或要素)之间的相互作用关系或从属关系如图 1-2 所示。

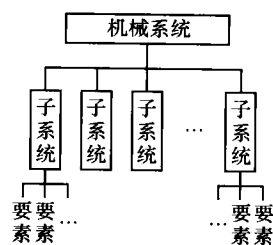


图 1-2 机械系统的层次结构

### 4. 环境适应性

任何一个机械系统都是在一定的物质环境中工作,即系统在工作环境中完成自身的特定功能。系统对环境会产生一定的作用,同样,环境也会对系统产生一定的影响。当系统外部环境变化时,会对系统的工作产生影响和干扰,甚至影响系统的功能。例如,当机器工作的环境温度变化时,机器内部润滑油的黏度也将发生变化,甚至影响机器的正常工作。

通常,外部环境总是在不断地变化,系统也经常处于环境动态变化过程中,稳态过程只是相对而短暂的。为了使系统运行良好,保证特定功能的实现,必须使系统对于外部环境具有良好的动态适应性。了解系统所处的环境,分析环境对系统有何影响,如何使系统适应外部环境是设计者应该重点考虑的问题。

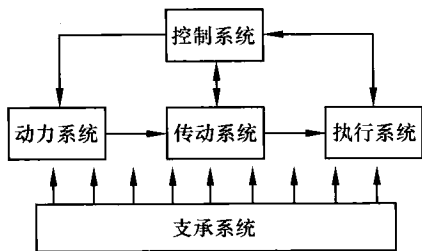


图 1-3 机械系统的主要组成

### 1.1.3 机械系统的组成

机械系统的种类繁多,其结构也都不尽相同。若从系统内各子系统能够完成的功能来区分,机械系统主要由动力系统、执行系统、传动系统、支承系统、控制系统等部分组成,见图 1-3。

#### 1. 动力系统

动力系统是机械系统的动力源部分,它为机械系统的工作提供所需要的运动和动力。动力系统包括动力部件和配套装置。常见的动力部件包括各类电动机、液压电动机、液压缸、气压电动机、气压缸、内燃机和汽轮机等,其中以各类电动机在机械系统中的应用最为广泛。

选择动力部件时,应全面考虑机械系统的工作特性、现场的能源条件和使用环境等因素,力求既能够满足系统的工作要求又具有良好的经济性。

#### 2. 执行系统

执行系统是在机械系统中能够直接完成预期工作任务的子系统,其功用是完成系统预期的功能。由于各机械系统要完成的功能不同,所以执行系统的种类很多,通常有转动、移动、夹持、搬运、输送、分度、转位、检测、度量等。

一般来说,执行系统在工作时是以机械功的形式输出,用来直接改变作业对象的性质、状态、形状或位置等。执行系统的输出是机械系统的主要输出,执行系统的功能是机械系统的主要功能,执行系统的功能和性能将直接影响和决定着机械系统的整体功能和性能。

#### 3. 传动系统

传动系统是联系动力系统与执行系统的中间环节,其作用是为执行系统传递所需要的运动和动力。传动系统经常用来完成升速或降速、变速、改变运动形式、改变运动规律等。传动系统可分为机械式、液压式、气动式等多种类型。

传动系统的相互联系使得动力系统的机械特性满足执行系统的工作要求。当动力系统的机械性能与执行系统的工作要求相互匹配时,可以省略传动系统,这样能够大大简化机械结构。

#### 4. 支承系统

支承系统是在机械系统中起着支承作用各机械零部件的统称,用来保证各零部件和装置之间的相互位置关系。支承系统由各部分支承件组成,常见的支承件有机身、底座、立柱、横梁、箱体、工作台、升降台和尾座等。

支承系统是机械系统的重要组成部分,它联系着各个子系统,保证了机械系统工作时各子系统的正确空间位置。支承系统的强度、刚度、质量分布、阻尼比、动态性能和热性能等,都将对机械系统的整体性能和功能的可靠性产生重要影响。

## 5. 控制系统

控制系统是使动力系统、传动系统和执行系统各部分彼此协调运行,并准确可靠地保证机械系统整体功能实现的子系统。控制系统包含通常所说的“控制系统”和操纵机构两部分。操纵机构多指以人工操作完成控制功能的装置,通常包括启动、停止、变速、换向、离合和制动等装置。

控制系统协调着各子系统的动作顺序和运动规律,使机械系统整体功能的实现得到保证。良好的控制系统可以使机械系统处于最佳运行状态,提高其运行的稳定性和可靠性,改善操作条件,获得良好的经济效益。

此外,根据机械系统的不同要求还可以有润滑、冷却、密封等系统。

## 1.2 机械系统设计的任务

机械系统设计是指根据产品的功能要求和市场需求,应用现代科学技术知识,经过设计者创造性思维和设计,完成制造方案和工程图样的工作过程。机械系统设计的任务就是开发新产品和改造老产品,其目的是为市场提供高质量、高性能、高效率、低能耗、低成本的机械产品,以获取最大的经济效益和社会效益。任何机械系统的设计都要根据客户的需求,通过设计者创造性的思维和劳动,借助人类已掌握的科学技术知识和各种资源,经过主观判断、决策、设计和评价,最终制造出具有特定功能、并能够满足人们日益增长的生产和生活需要的各类机械产品。

机械产品的质量和经济性取决于设计、制造和管理等方面的综合水平。产品的设计是关键环节,只有高质量的产品设计,才可能生产出高质量的产品;只有设计者从经济观点出发,才可能设计出经济性良好机械产品。据统计,产品的设计成本约占产品总成本5%~7%,却决定着产品制造成本的60%~70%;由于设计不当造成的产品质量事故约占总事故率的50%。由此可见,机械系统设计的重要性。

### 1.2.1 机械系统的基本要求

机械系统的基本要求是设计和制造的依据,也是实现系统功能的基本条件。评价机械产品是否优良,主要根据技术指标和经济指标来综合判断。只有技术先进、经济合理的机械产品,才会受到用户的欢迎,才会具有市场竞争力。机械系统一般应具备以下几方面基本要求。

#### 1. 功能要求

用户对产品需求的实质是对产品功能的需求,产品存在的必要性体现为产品功能的实现。产品的复杂程度与其实现的功能密切相关,通常产品功能越多,则结构越复杂、设计越困难、价格也越昂贵。但产品的功能太少很可能缺乏市场竞争力。确定产品功能时,首先应考虑用户的需求,在保证基本功能和使用要求的情况下,根据实际需求合理取舍产品的其他功能。

#### 2. 性能要求

性能是指产品为保证功能的实现而表现出来的技术特征,通常包括工作范围、运动要求、

动力性能、准确程度等方面,例如,机床的工序种类、工件类型、尺寸范围、主轴转速、进给量、输出功率、加工精度、刚度、抗振性等。由于产品要实现的功能不同,性能要求也往往存在着较大差别。即使是相同功能的产品,其性能也可能有所不同。

### 3. 可靠性要求

可靠性是指产品在规定的工作条件下和预期的使用时间内,能够完成系统功能的概率。可靠性包括产品内部零部件的可靠性和整机的可靠性。可靠性关系到产品能否持续正常的工作,关系到产品安全和人身安全。可靠性与产品(或零部件)的重要程度、使用寿命和工作条件密切相关,产品(或零部件)越重要可靠性要求越高;寿命越长,可靠性要求也越高;而工作条件差,则会降低可靠性。可靠性不是越高越好,一个产品内各零部件的可靠性应匹配、合理,可靠性的选择要适度。

### 4. 工作效率要求

工作效率是指产品在单位时间内完成的工作量。工作效率受工作时间和辅助时间的影响,主要取决于产品的工作速度和自动化程度。自动化程度越高,则单位时间内完成工作量所需要的工作时间和辅助时间越短,产品的工作效率也就越高。但自动化程度越高,则产品越复杂,设计、制造越困难。不是说一个产品的工作效率越高越好,工作效率的高低应根据实际需要来确定。

### 5. 适应性要求

适应性是指当工作状态或环境发生变化时产品的适应程度。工作状态和环境包括作业对象、工作负荷、工作速度和环境条件等。一般讲,人们总是希望产品具有较强的适应性,但这会给产品的设计、制造、维护等方面带来很大困难,有时甚至难以实现。因此,应根据产品的工作状态和环境要求合理确定适应性。

### 6. 经济性要求

经济性是指单位时间内生产价值与同一时间内使用费用的差值。经济性主要反映在成本上,包括产品的生产成本和使用成本。生产成本是指产品在设计、制造、管理和销售方面的费用支出。使用成本是指产品在运行和维修方面的费用支出。对于用户和生产企业而言,由于所处的位置不同,考虑的问题着眼点也通常有所区别。

### 7. 寿命要求

寿命是指产品保持其应具有的功能和性能的时间。寿命决定了产品正常工作的时间。一般讲,任何产品的寿命都是有限的。随着产品技术更新的加速,寿命所要求的时间也在减短。产品寿命的确定主要与产品的重要程度、质量要求和工作条件等因素有关。另外,保养、维护和维修也会对产品的寿命产生重要影响。良好的保养和维护会延长产品寿命。即使是失效的产品,经过维修后仍可以发挥它应具有的功能和性能。

此外,还可能包括制造工艺性、人机工程学、造型与色彩、法律与法规等方面要求。

在进行产品性能和质量判断时,可以将上述要求细化,通常可分为功能、性能、工作原理、

结构、安全可靠、人机学、加工制造、检验、装配、运输、使用、维修、回收、费用、法律等,这样有利于产品或方案的分析与评价。

### 1.2.2 机械系统的设计类型

机械产品的种类多种多样,其工作原理和具体结构也千变万化,但从设计的角度可分为开发性设计、适应性设计和变异设计三种类型。

#### 1. 开发性设计

开发性设计是指在工作原理、结构等完全未知的情况下,根据用途和功能,应用科技知识对产品进行的设计。这是一种完全创新性的设计,目前世界上各类机械产品的初始设计均属于这类设计。其设计特点是:设计者需要根据产品的用途和功能选择其工作原理,设计产品结构,参考资料很少,设计难度大。

#### 2. 适应性设计

适应性设计是指在原有工作原理保持不变的前提下,为使已有产品适应新的性能或功能需要而对其结构进行的调整性设计。例如,车床为了适应多刀具快速更换的需要,将原有的刀架结构变化为可以自动转位的转塔(或转盘)刀架而进行的设计就属于适应性设计。

#### 3. 变异设计

变异设计是指在机械系统的工作原理和结构形式均不变的情况下,为适应产品某些量值方面的变化要求而对其局部结构或尺寸进行的设计。例如,车床为了适应拓宽加工直径的要求,将床身靠近主轴箱一侧变异为一段可拆卸的马鞍结构而进行的设计就属于变异设计。

据统计,在机械产品的设计总量中,开发性设计数量较少,大多数设计是对已有产品进行改造或更新,属于适应性设计或变异设计的范畴。虽然适应性设计和变异设计的工作相对比较简单,参考资料也较为丰富,但是设计者不应依赖于已有的参考结构,要有较强的创新意识。

### 1.2.3 机械系统的一般设计过程

机械产品的生命周期全过程如图 1-4 所示,它主要包括市场需求、产品策划、产品设计、产品制造、产品销售、产品运行和产品报废与回收等阶段。

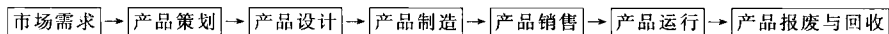


图 1-4 产品的产生和生命周期流程

机械产品是否需要设计取决于市场的需求,机械产品的设计、生产规模和销售策略要根据产品策划来决定。机械产品的获得必须经历设计和制造两个不同阶段。设计为产品的制造服务,制造是对产品设计思想的体现,两者相互影响、密不可分。产品设计是设计者创造性的劳动,是设计者智慧的体现,它对产品的功能实现、质量优劣,以及正常运行等起着十分重要的作用。

一个良好机械产品的获得首先取决于产品设计,一名优秀的设计者应熟悉产品的设计过

程。机械系统的一般设计过程可划分为总体设计、技术设计、工作设计和文档设计等。

### 1. 总体设计

机械系统的总体设计包含拟定设计要求、原理方案设计和结构总体设计。在设计前,要进行充分调查研究,收集和掌握与产品设计有关的情报、资料和信息。在设计时,首先要针对机械产品功能和使用要求提出切实可行的设计要求;其次应尽可能多地拟定可行的原理方案,经比较、分析和评价,确定出最佳方案;最后是实现最佳方案结构化,确定出结构的总体布置、主要技术参数,以及绘制机械产品的总体结构图等。

总体设计将在本书第2章中详细介绍。

### 2. 技术设计

技术设计主要指在总体设计的基础上,针对机械产品各子系统(部件和装置)进行的机械结构详细设计,它包含装配设计(绘制装配图)和计算校核两方面工作。通常绘制装配图与相应的计算校核应同时进行,不可以分割完成。在装配设计中,要保证各装置或零部件协调工作,避免发生干涉现象。装配设计应在总体设计的框架下进行,但装配设计的变化也会对总体设计产生一定的影响,总体设计也要根据装配设计的实际需要进行相应的调整。

技术设计除机械结构设计部分外,根据需要还可能包含液压系统设计、气压系统设计、控制系统设计等内容。这里不再赘述。

### 3. 工作设计

工作设计是指机械产品的全部零件设计工作。零件是机械产品的加工单元,是组成机械系统的基本元件。工作设计是机械设计者必须掌握的一项基本技能。工作设计的工作量较大,任务较为繁重。在工作设计中,除了要在图纸上完整清晰地表达零件的图形和尺寸外,还要对零件的工作条件、制造工艺、材料、热处理及其他技术要求等知识有足够的了解和掌握,这样才可能设计出既满足使用要求又造价低廉的机械零件。

### 4. 文档设计

文档设计是指对产品各类技术文件编制和整理的过程。需要设计的文档种类较多,要求也各不相同,常见的有产品设计计算书、各类零件明细表、检验标准、产品使用说明书、产品维修保养说明书及产品各类验收(或鉴定)材料等。

此外,产品图样的审查也是机械系统设计中必不可少的一项内容,通常包括结构审查、工艺性审查、标准化审查等。

一般来说,机械产品的设计不是一次完成的,要经过反复的验证和修改,逐渐达到设计成熟。在产品的加工、检验、装配、调试、运输、使用、维护、维修等环节上都可能存在着设计不尽如人意的情况,甚至出现一定的问题。这就需要设计者不断地发现问题,不断地调整或修改设计。随着时代的进步和科学技术的发展,一些新技术、新材料、新工艺在不断地涌现,这就要求设计者在调整或修改设计时要具有更广阔的视野,平时要多注意积累。

## 1.3 机械系统设计的发展

### 1.3.1 机械设计的发展简史

机械设计是人类在改造自然的长期生产实践中,不断地发现、探索、总结、积累的基础上产生和发展起来的,它是人类的共同智慧和劳动结晶。机械设计的发展经历了十分漫长的岁月,按其内容和时间可分为机械设计起源和直觉设计阶段、经验设计阶段、理论设计阶段及现代设计阶段四个发展时期。每一个阶段在设计理论、方法和制造工艺等方面都有明显的特色。

#### 1. 机械设计起源和直觉设计阶段

早在旧石器时代(公元前  $2.5 \times 10^6$  ~ 公元前  $10^4$  年以前),史前的人类在石料选择、不同工具的形状、刃口的制造等方面就有不少的实物资料,如球形石、薄刃多边石器、三棱大尖石器等。在新石器时代(公元前  $10^4$  ~ 公元前 4000 年以前),制造的石器质量有了很大提高,出现了骨鱼叉、石锯、玉铲、陶铍等工具和木杆石镞、骨柄石刃匕首等组合式刀具等。在青铜器和铁器时代(公元前 4000 年~公元前 2500 年以前),由于冶炼、铸造和锻造技术的产生,设计制造出了各种工具、用具、武器等,如我国马家窑出土的青铜刀、伊拉克和埃及出土的铸造金属饰物、我国河北等地出土的青铜为身陨铁为刃的古代兵器等。

我国古代的许多著作中都对于古代使用、制造机械的情况有所记载。在《周易》“系辞下”中有“斫木为耜,揉木为耒,耒耨之利,以教天下”,“剡木为舟,剡木为楫,舟楫之利,以济不通”,“断木为杵,掘地为臼,杵臼之利,万民以济”,“弦木为弧,剡木为矢,弧矢之利,以威天下”。可见在 4000 多年前,我国古代已经发明了农具、车船、用具和武器。在《易经》第 47 卦“困”中有“困于金车”,金车是指古代用铜装饰的豪华马车。在《道德经》中有“三十辐共一毂,像日月也”,而在秦始皇陵发掘的二号铜车马,验证了每个车轮有 30 个轮辐的说法,说明我国古代对轮辐的数目已经有了规定或惯例。此外,东汉张衡(78 年~139 年)设计制造了漏水转浑天仪和候风地动仪,三国时期马钧设计制造了由齿轮传动的指南车(235 年),南北朝祖冲之(429 年~500 年)设计制造了利用水力转动石磨舂米磨谷的水碓磨,唐朝(618 年~907 年)按照重心原理设计制造的被中香炉,北宋苏颂、韩公廉设计制造了带有联动式擒纵机构的水运仪象台(1088 年)等。南宋薛景石编著的《梓人遗制》(1263 年)和元朝陈椿编著的《敖波图》(1330 年)分别记载了木制机具和化铁炉(煅炉),明朝宋应星的著作《天工开物》(1637 年)详细记载中国古代生产器具和技术。以上成果表明,我国古代机械设计和制造已经达到相当高的技术水平,在当时世界上处于领先地位,在世界机械工程史中占有十分重要的位置。

世界其他国家也有很多机械成果。公元前 600 年,古希腊和古罗马进入古典文化时期,学者希罗著书阐明关于五种简单机械(杠杆、尖劈、滑轮、轮与轴、螺纹)推动重物的理论,这是已知最早的机械理论书籍。公元前 220 年,希腊科学家阿基米德实验发现斜面、杠杆、滑轮的规律以及浮力原理(阿基米德原理),设计制造出螺旋提水工具。公元前 110 年前后,罗马桔槔式提水工具和吊桶式水车使用范围扩大,涡形轮和诺斯水磨等新的流体机械出现,前者靠转动螺旋形杆,将水由低处提到高处,主要用于罗马城市的供水;后者用来磨谷物,靠水流推动方叶轮而转动,其功率不到半马力。公元前 100 年,功率较大的维特鲁维亚水磨在罗马出现,水轮靠

下冲的水流推动,通过适当选择大小齿轮的齿数,就可调整水磨的转速,其功率约3马力,后来提高到50马力,成为当时功率最大的原动机。公元1世纪,亚历山大的西罗著有《气动力学》中记载了利用蒸汽作用旋转的气转球(反动式汽轮机雏形),并设计制造了第一个把蒸汽压力转化为机械动力的汽转球(又叫风神轮),它也是最早应用喷气反作用原理的装置。此外,波斯设计制造了以风能为动力的风车(700年),意大利的丹蒂设计制造了以重锤下落为动力齿轮传动的机械钟(1350年),德国设计制造了杆棒车床(1395年)和木制凸版印刷机(1439年)等。

直觉设计阶段又可称为古代机械设计阶段,一直延续到17世纪。在这个阶段,机械的设计与制造两者是统一的,设计多是从自然现象中直接得到启示或是凭直观感觉来完成,与科学几乎不发生联系。机械设计制造的目的主要是降低人类在生产、生活中的劳动强度。机械大都是木结构由手工制成,金属(主要是铜、铁)仅用以制造仪器、锁、钟表、泵和木结构机械上的小型零件,金属加工靠工匠的精心细作以达到需要的精度。

## 2. 经验设计阶段

随着欧洲的文艺复兴,意大利、法国、英国等相继兴办大学,大力发展自然科学和人文科学,培养了大批人才。17世纪60年代起,英国、德国、法国、意大利等相继成立了研究机构,加快了机械设计与制造相关领域科学技术的发展。许多学者对物理现象进行实验研究并把实验的方法与数学方法、逻辑论证相结合逐渐产生了物理学和力学。意大利科学家伽利略(1564年~1642年)发现了振摆、自由落体、抛物体的运动规律和惯性定律,还进行过梁的弯曲实验和理论分析。英国科学家牛顿(1643年~1727年)研究了物体运动的三个基本定律(牛顿力学三定律),创立了经典力学理论体系。1676年英国物理学家胡克建立了弹性体的应力与应变之间成正比的固体弹性定律(胡克定律)。1680年法国物理学家马略特在梁的弯曲试验中发现变形与外力的正比关系。在此期间,先后有许多专家学者进行过与机械设计有关的理论分析和计算,为建立机械设计理论奠定了基础。1769年英国人瓦特发明了蒸汽机,为各类机械提供了强大的动力,促进了采矿、纺织、冶炼、船舶、铁路等多种行业对机械的需求,推动了18世纪欧洲工业革命中机械化的进程。

17世纪以后,与机械有关的设计发明速度明显加快。1608年荷兰人李普希发明了望远镜,1629年意大利人布兰卡设计出靠蒸汽冲击旋转的转轮(冲动式汽轮机的雏形),1654年德国人盖利克发明了真空泵,1657年荷兰人惠更斯设计制造了单摆机械钟,1665年荷兰人列文胡克和英国人胡克发明了显微镜,1698年英国人萨弗里设计制造了第一台命名为“矿工之友”的用于矿井抽水的蒸汽机,1735年英国人达比发明的焦炭炼铁技术用于生产,1764年英国人哈格里夫斯发明了手工操作的竖式多锭纺纱机,1769年法国人居诺设计制造了三轮蒸汽汽车,1772~1794年英国人瓦洛和沃恩先后发明球轴承,1774年英国人威尔金森发明了世界第一台真正加工机器的机器炮筒镗床,1785年英国人卡特赖特发明了动力织布机,1786年英国人西兹发明了割穗机,1790年英国人圣托马斯发明了手摇缝纫机,1792年英国人莫兹利发明加工螺纹的丝锥和板牙,1794年英国人威尔金森建成冲天炉,1795年英国人布拉默发明了水压机,1797年英国人莫兹利设计制造了带有丝杠、光杠、进给刀架和导轨的车床等。

在这一阶段,机械的设计和制造仍然是一体的,机械设计主要是依靠前人积累的有限技术知识,凭借直观想象和工作经验来完成,物理学、数学、力学和零散有限的机械学知识已经逐渐用于机械设计。机械由手工木质结构逐渐转化为机械加工和手工制作联合完成的金属结构,



机械设计制造的目的重点在于省力和提高劳动效率。机器的种类增多,体积减小,精度大幅度提高。

### 3. 理论设计阶段

随着工业革命的兴起,工场手工业向着机器大工业过渡,机械工业的快速发展对机械设计的理论提出了很多要求。19世纪以后,机械设计逐渐形成了独立的理论体系。

1799年法国学者蒙日编著了《画法几何》一书,形成机械制图的投影理论。自此机械设计图形开始严格按照画法几何的投影理论绘制,改变了以往机械设计图样的混乱局面,为机械设计中工程图样的规范化奠定了理论基础。

1806年在法国巴黎首先将“机构学”从一般力学中独立出来建立了分支学科,1847年成立了世界上最早的机械工程学术团体——英国工程师学会,1856年德国工程师协会成立,1880年美国工程师学会成立,1897年日本机械工程师学会成立,1912年詹天佑发起成立中华工程学会,后成为中国工程师学会,1969年在波兰成立了国际机构和机器原理协会等。这些学会或协会的成立与学术活动的开展,有力推动了机械设计理论的研究与交流。英国学者威利斯提出了用于机构分析的各种机构概要图表,德国学者勒洛建立了构件、运动副、运动链和机构运动简图等概念,英国学者史密斯用图解法获得了联动机构的速度和加速度的分析结果等。许多研究成果具有很大的实际意义,为机械设计的迅速发展做出了突出贡献。

1854年德国学者劳莱克斯发表了著作《机械制造中的设计学》,建立了以力学和机械制造为基础的“机械设计”理论体系,将“机构学”和“机械零件”作为机械设计的基本内容。该理论体系成为欧洲乃至世界的学习样板,并逐渐纳入高等工科院校的课堂教学。此后,机构运动学、机械动力学、机械零件、材料学、工程图学、互换性等都得到了快速发展,在机械构件的接触应力、疲劳强度、断裂力学、高温蠕变、流体润滑等方面都取得了大量的成果。随着电力系统的发展和电动机的产生,为各类机器提供了新型的动力源,电气革命进一步推动了生产的机械化。新工艺、新材料、新结构的不断涌现,使得机械设计的水平不断提高。机器的尺寸减少、速度增加、性能提高,机械设计的计算方法和数据积累也相应有了很大的发展。

在这个阶段,加强了机械设计基础理论的研究,逐渐形成了完整的机械设计的理论体系和设计方法,实现了技术人员与操作者的分离。针对各类机械产品和关键零部件进行了大量设计研究工作,提供出大量的图册、图表、手册、数据等设计信息。实现了机械产品的“三化”,即系列化、通用化和标准化,提高了机械设计的速度和质量,降低了机械产品的制造成本。

### 4. 现代设计阶段

现代设计阶段始于20世纪40年代,人们对新的设计思想、设计方法及创造性设计进行了探索和研究。五六十年代,现代设计方法的研究才逐渐引起人们的重视。80年代以后,对现代设计方法的研究出现了高潮。特别是计算机技术在机械设计中的广泛应用,进一步促进了现代设计方法的研究和发展。

现代设计方法是一种广义的设计和分析方法,其实质是科学方法论在设计中的应用。现代设计方法是在机械强度与振动、摩擦学、腐蚀、可靠性、流体理论、热工学、电工学等知识基础上,综合考虑工业美学、人机学、制造工艺、材料学、环境学,以及计算机应用技术、现代管理技术等科学知识,是一门多学科、多专业相互交叉的综合性很强的技术。其内容主要包含信息论