

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械设计基础

陈晓南 杨培林 主编

陈晓南 杨培林 陈 钢 庞宣明 编

吴宗泽 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书以培养学生基本的机械设计能力和现代设计意识为目的。本书根据编者多年来的教学经验在内容上对机械原理、机械设计课程的基本内容进行整合,以实用为原则,适当删去部分内容,增加结构设计内容以及现代设计理念和现代设计方法方面的知识。全书共分四篇 18 章。第一篇导论,主要介绍关于机械和机械设计的基本概念。第二篇机械设计基础知识,主要介绍机械运动设计、机械零部件工作能力设计和结构设计的基础知识。第三篇机构与机械传动,主要介绍常用的机构和机械传动及其设计,以及机械动力学的基础知识。第四篇连接件和轴系零部件,主要介绍螺纹连接、联轴器、离合器以及轴和轴承的设计与选用。

本书可作为高等院校机械工程及自动化各类专业的教材,也可作为相近专业有关课程的参考用书,并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计基础/陈晓南,杨培林主编;陈晓南等编.—北京:科学出版社,2007

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-017810-7

I.机… II.①陈…②杨…③陈… 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(2006)第 093320 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 2 月第一次印刷 印张:30 1/2

印数:1—4 000 字数:583 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，适用于高等工科院校机械工程及相近专业机械设计基础课程的教学。

随着机械类专业教学体系及内容改革的发展，在不少学校“机械原理”、“机械设计”这两门课程有合一的趋势，以形成一个更为系统的机械设计基础类课程。本教材就是为了适应这一趋势，同时也结合了我校（西安交通大学）的教学改革与教学实践而编写的。我校对机械基础系列课程（机械制图、机械原理、机械设计、精度设计）的改革（包括某些课程的单项改革）已有近 20 年的历史，并逐步形成了以设计为主线的课程体系和教学内容。近年来，在不断的实践过程中，又对机械基础系列课程进行了“大机械设计”课程体系的改革与实践。其特点是：加强实践环节，通过项目驱动学习；实现分层次教学，因材施教。其目标是：重组、融合相关教学内容，建立起内容合理、各内容之间衔接紧密的“大机械设计”课程教学体系，更有利于人才的培养。

作为体系中的一部分：我们对机械原理、机械设计课程进行了重组整合，合并为机械设计基础课程，学时数也由原来的 128 减为 64。但是，两门课程的合一，绝不是简单的 1+1 过程，也不是单纯的为了减少学时数，最终目的还是要使学生用较少的学时数完成技术基础课程的学习，具备较扎实和较宽广的机械设计基础知识。所以，与此同时，加强了实践环节（主要是增加了课程设计和实验课的内容及学时），力争使得理论学习与实践结合得更为密切，并希望通过实践项目驱动学习，最后达到培养学生机械设计的能力并增强其现代设计意识的目的。

由此，本教材有以下主要特点：

1. 突破了机械原理、机械设计原有的课程界限，从机械系统整体考虑，以机械设计基本理论与方法为主线，以常用机构和典型的机械传动设计为主导，将二者内容进行必要调整实现有机融合，形成一个知识体系更系统、整体性更好的教材，达到用较少学时完成机械设计基础知识学习的目的。

2. 教材以原机械原理、机械设计课程的基本内容为主，以实际、实用为原则，突出设计主线，适当增加结构设计的内容（包括机构的结构设计）和工程设计需要的其他知识，以及现代设计理念和现代设计方法方面的知识。同时较好地处理了少而精与广而深的关系。

3. 在编排结构上，用较多的篇幅介绍了与机械设计有关的概念和基础知识，

目的是高屋建瓴，使学生在开始学习本课程时，就能在一个较高的层面对“机械设计”有一个明确的、宏观的认识；同时也对课程涉及的基础性、共性的内容有总体的了解与掌握。试图通过这样的编排方式解决两 W 问题（Why, What），同时又达到提纲挈领的作用，以及节约篇幅与学时的结果。

4. 在编写方式上符合学生的认知规律和课程的教学规律，注重学生综合设计能力的熏陶与培养，使学生能初步掌握、了解机械设计的整个过程。书中各章附有思考题和习题。例题、思考题、习题的选择均注意与工程应用背景相结合。

5. 作为机械设计基础课程，按照我校教学改革的构思，全套教材主要由三部分组成（三者可独立使用，也可配套使用）：机械设计基础（本教材，64 学时）、机械设计基础课程设计（在编，64 学时）、机械工程实验（在编，64 学时）。其指导思想仍是加强实践环节、项目驱动学习以及分层次教学。

6. 本教材既可供机械类专业学生使用，也可供近机类或非机类专业学生使用。教师可灵活掌握。

本教材分四篇 18 章。参加编写工作的有陈晓南（第 1、3、6、7、9、10、13、14、15、16、18 章）、杨培林（第 2、4、5、8 章）、陈钢（第 11、17 章）、庞宣明（第 12 章）。由陈晓南、杨培林担任主编。

本书承蒙清华大学吴宗泽教授主审。吴先生非常仔细地审阅了全书，提出了许多宝贵的修改意见，为本书编写质量的提高给予了极大帮助，在此向吴先生表示衷心的感谢。

科学出版社编审人员的专业知识、敬业精神以及花费的心血亦为本书的质量和出版提供了保证。在此，作者也向他们致以衷心的感谢。

作者第一次按这样的体系编写教材，肯定存在误漏之处，敬请各位同仁、广大读者批评指正。

编者

2006 年 9 月

目 录

前言

第一篇 导 论

第 1 章 绪论	3
1.1 机械的组成	3
1.2 本课程的内容、性质和任务	5
第 2 章 机械设计概述	6
2.1 概述	6
2.2 机器的功能分析及功能原理设计	7
2.3 机械设计的基本要求和程序	9
2.4 机械设计中的常用设计方法	16
思考题与习题	17

第二篇 机械设计基础知识

第 3 章 机械运动设计与分析基础知识	21
3.1 概述	21
3.2 机构的组成	21
3.3 平面机构运动简图	25
3.4 平面机构的自由度计算	29
3.5 平面机构的速度瞬心	34
思考题与习题	38
第 4 章 机械零部件工作能力设计计算基础	42
4.1 概述	42
4.2 作用在零件上的载荷	42
4.3 机械零件中的应力	45
4.4 机械零件的工作能力设计及材料选用原则	49

4.5	机械零件的强度和刚度	53
4.6	机械零件的振动稳定性	58
4.7	摩擦、磨损和润滑简介	59
	思考题与习题	75
第5章	机械零部件结构设计基础	76
5.1	概述	76
5.2	结构设计方法	76
5.3	结构设计应考虑的因素	77
	思考题与习题	84

第三篇 机构与机械传动

第6章	平面连杆机构	87
6.1	概述	87
6.2	平面连杆机构的基本形式及演化	88
6.3	平面四杆机构的基本特性	98
6.4	平面连杆机构的运动设计	104
	思考题与习题	109
第7章	凸轮机构	113
7.1	概述	113
7.2	凸轮机构的类型和应用	113
7.3	从动件的几种常用运动规律	117
7.4	盘形凸轮轮廓曲线的设计	121
7.5	凸轮机构的基本尺寸设计	128
	思考题与习题	131
第8章	齿轮传动	134
8.1	概述	134
8.2	齿廓啮合基本定律	136
8.3	渐开线齿廓	137
8.4	渐开线标准直齿圆柱齿轮及其啮合传动	139
8.5	渐开线齿轮的加工方法及齿轮变位的概念	144
8.6	齿轮传动的失效形式、设计准则及材料选择	147

8.7	齿轮传动的计算载荷	151
8.8	直齿圆柱齿轮的强度计算	155
8.9	渐开线斜齿圆柱齿轮传动	170
8.10	锥齿轮传动	178
8.11	齿轮的结构	184
	思考题与习题	187
第 9 章	蜗杆传动	190
9.1	概述	190
9.2	普通圆柱蜗杆传动的主要参数与几何尺寸计算	193
9.3	蜗杆传动的工作情况分析	197
9.4	蜗杆传动设计	202
	思考题与习题	211
第 10 章	轮系	214
10.1	概述	214
10.2	定轴轮系及其传动比计算	214
10.3	周转轮系及其传动比计算	216
10.4	混合轮系及其传动比计算	219
10.5	轮系的功用	221
10.6	行星轮系的效率计算	224
10.7	周转轮系各轮齿数的确定	226
10.8	其他行星齿轮传动简介	228
	思考题与习题	231
第 11 章	带传动	235
11.1	概述	235
11.2	V 带和带轮	239
11.3	带传动的工作情况分析	244
11.4	带传动的强度计算	251
11.5	普通 V 带传动的设计	256
11.6	V 带的使用和维护	262
11.7	同步带传动简介	264
	思考题与习题	265

第 12 章 其他传动类型简介	267
12.1 概述	267
12.2 棘轮机构	267
12.3 槽轮机构	271
12.4 不完全齿轮机构	275
12.5 液压传动简介	277
12.6 气压传动简介	279
12.7 电力拖动简介	281
思考题与习题	287
第 13 章 机构的组合与结构设计	288
13.1 概述	288
13.2 机构的组合方式	288
13.3 机构的结构设计及应用实例	293
思考题与习题	301
第 14 章 机械系统动力学	303
14.1 概述	303
14.2 机械系统动力学分析原理	303
14.3 机械系统的速度波动及其调节	312
14.4 刚性回转构件的平衡	317
思考题与习题	325

第四篇 连接件和轴系零部件

第 15 章 螺纹连接	331
15.1 概述	331
15.2 螺纹连接的基本知识	331
15.3 螺纹连接的预紧和防松	338
15.4 螺纹连接的强度计算	341
15.5 螺栓连接设计	350
思考题与习题	362
第 16 章 轴	364
16.1 概述	364

16.2	轴的工作能力计算模型	366
16.3	轴的设计	377
	思考题与习题	395
	附录	398
第 17 章	轴承	403
17.1	概述	403
17.2	滑动轴承的类型和典型结构	403
17.3	滑动轴承轴瓦结构	406
17.4	滑动轴承的工作能力计算	409
17.5	其他滑动轴承简介	421
17.6	滚动轴承的主要类型、特点及其代号	424
17.7	滚动轴承的类型选择	433
17.8	滚动轴承的工作情况分析	434
17.9	滚动轴承的额定载荷与寿命	437
17.10	滚动轴承的静载荷计算	448
17.11	轴承装置的结构设计	449
	思考题与习题	461
第 18 章	联轴器与离合器	464
18.1	概述	464
18.2	联轴器	464
18.3	离合器	469
	思考题与习题	474
	参考文献	475

第一篇 导 论

本篇所介绍的内容是本课程的基本知识。由两章构成，即“绪论”及“机械设计概述”。

在“绪论”中介绍了本课程的性质、内容和研究对象，以及关于机械及其组成的基本概念和定义。使读者在开始学习本课程时，能对机械有一个初步的认识。

在“机械设计概述”中，主要介绍了什么是机械设计、机械设计的一般方法、遵循的原则等。

第 1 章 绪 论

1.1 机械的组成

“机械”、“机器”、“机构”这些名词大家都不陌生。在日常生活与工作中，人们几乎天天都会接触到各种各样的机器或机械，如汽车、洗衣机、缝纫机、电动机、机床等。机械的应用极大地减轻了人们的体力劳动，提高了生产率并改善了劳动条件。机械的发展及应用水平也已成为衡量一个国家工业水平和现代化程度的重要标志之一。

但什么是机械？什么是机器或机构？它们都有何特征？如何定义？它们之间有什么不同？这就是本章要介绍的内容。

机器是执行机械运动的装置，用来变换或传递能量、物料或信息，它是人类在长期的生产实践中逐步创造并发展起来的。现代机器，尽管它们的结构形式不同、性能和用途不一，但从其组成、运动及功能转换关系看，都具有下列三个共同特征：

- (1) 它们都是若干人为实体的组合。
- (2) 各实体之间具有确定的相对运动。
- (3) 能用来代替人们的劳动去实现机械能与其他形式能之间的转换或做有用的机械功。

而仅具备以上 (1)、(2) 两个特征的则称为“机构”。机器与机构的主要区别就在于：机器具有运动和能量（而且总包含有机械能）的转换，而机构只有运动的变换。

显然，机器是由机构组成的。机构是机器的运动部分，是剔除了与运动无关的因素而抽象出来的运动模型，它主要用于研究机器运动，是机械学上的一个术语。一台机器可以包含一个机构或几个机构。功用不同的机器可以具有同样的主要机构。例如，图 1-1 所示的单缸内燃机和图 1-2 所示的冲床机，它们的主体机构都是曲柄滑块机构。机构又是由构件组成，且具有一定的相对运动关系，因此，构件是机构运动的基本单元体。

一部机器往往包含有机械、电气、液压、气动、润滑、控制等部分，各部分各司其责，使机器协调地工作。但就其功能而言，一般由四个部分组成，即驱动部分、传动部分、执行部分、协调控制部分，如图 1-3 所示。

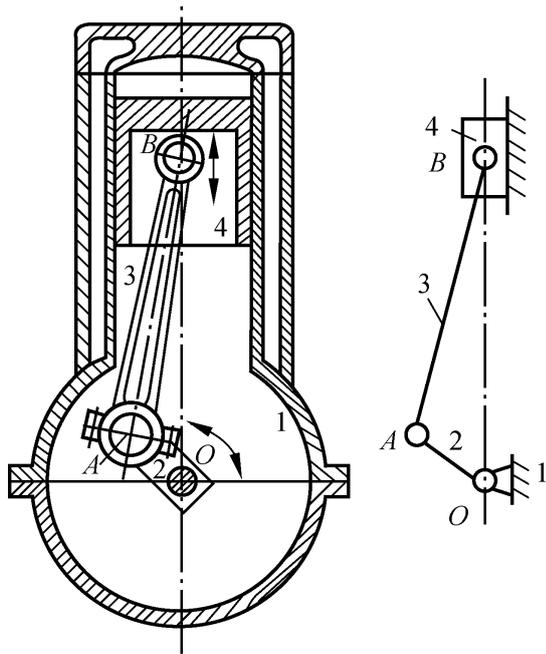


图 1-1 单缸内燃机

1. 机架；2. 曲柄；3. 连杆；4. 滑块

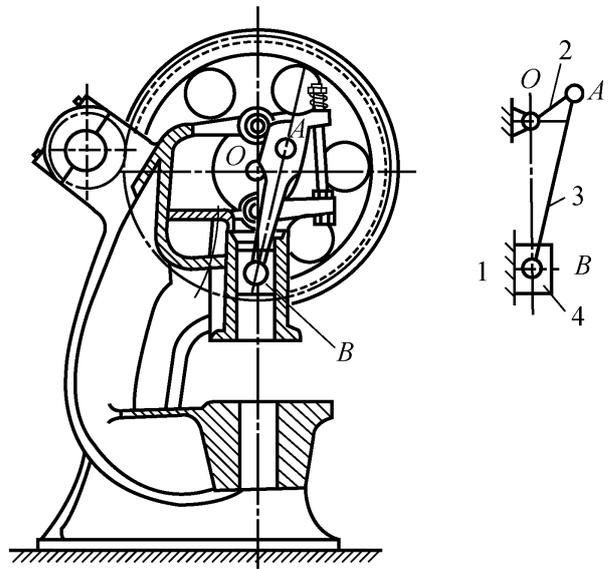


图 1-2 冲压机

1. 机架；2. 曲柄；3. 连杆；4. 滑块

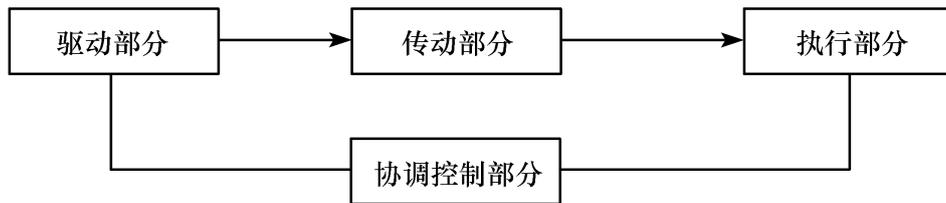


图 1-3 机器的组成

驱动部分是机器的动力源，最常见的动力源有电动机、内燃机等。执行部分是机器中用来产生规定动作以实现机器预定功能的部分。传动部分是机器中将驱动部分的运动和动力传递给执行部分的中间环节，利用传动系统可实现运动形式、运动参数及动力参数的改变，如把旋转运动变为直线运动、高转速变为低转速、小转矩变为大转矩等。协调控制部分是通过机器中信息的传递、加工处理和反馈对机器进行控制的部分。由于近代机器的功能日益复杂、精度越来越高，协调控制部分在其中的作用就显得尤为重要。

另一方面，从制造角度来说机器又是由机械零件组成的。所以，机械零件是机器的组成要素和制造单元。机械零件一般又分为通用零件和专用零件。广泛应用于各种不同类型机器中的机械零件称为通用零件，如螺钉、齿轮等。只用于某些特定机器中的机械零件称为专用零件，如汽轮机的叶片、内燃机的活塞等。在通用零件中，具有标准代号的零件或部件又称为标准件。为完成同一使命，在结构上组合在一起并协调工作的一组零件称为部件，如联轴器、离合器等。

若撇开机器在做功和转换能量方面的作用，仅从结构和运动的观点来看，机

器与机构并无区别。因此，习惯上用“机械”一词作为机器与机构的总称。但机械与机器在用法上略有不同：机器常用来指一个具体的概念，如内燃机、拖拉机等；而机械则常用在更广泛、更抽象的意义上，如机械化、机械工业等。

1.2 本课程的内容、性质和任务

作为机械设计的入门课程，本课程主要介绍机械设计的基本理论和技术，研究机械设计中常用机构和通用零件的工作原理、结构特点、设计方法等。在常用机构中，主要讨论了连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系和间歇运动机构；在通用零件中，主要研究了常见的机械传动、常用的连接、轴系零部件等。此外，还介绍了机械动力学方面的基础知识。

由此可见，“机械设计基础”是一门培养学生具有一定机械设计能力的技术基础课程。通过对本课程的学习（包括它的全部教学环节），可使学生着重掌握机械设计的基本知识、基本理论、基本方法和基本技能，并为后续课程的学习打下必要的基础。

第 2 章 机械设计概述

2.1 概 述

“机械设计”具有丰富的内涵，不同时期对设计的理解也不尽相同。一般认为，机械设计是根据市场需求对机械产品的功能、原理方案、技术参数等进行规划和决策，并将结果以一定形式（如图纸、计算说明书、计算机软件等）加以描述和表达的过程。设计质量的高低，将直接关系到机械产品的技术水平和经济效益，因而设计在机械产品开发过程中起着关键性的作用。

早期的设计，仅仅是工匠在头脑中的构思而已，所设计产品的结构也比较简单。随着社会及生产的发展，产品结构日趋复杂，发展到用图纸表达设计人员的设计结果，并按图纸制造产品。这时，设计工作在整个机器的制造过程中才具有相对独立的性质，可以利用图纸对产品进行分析和改进，也可以按图纸进行大规模生产。图纸的出现推动了设计工作的发展。

19 世纪至 20 世纪初，随着机械工业的发展，与机械设计有关的一些基础理论与技术，如理论力学、材料力学、弹性力学、流体力学、热力学、公差与技术测量、机械制图等，逐渐发展成为独立的学科。综合应用这些学科而逐渐形成的机械设计方法，称为传统设计方法。

近几十年来，随着科学技术特别是计算机技术的迅速发展，相应地发展了一系列先进的设计理论与方法，如优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工程（CAE）、虚拟设计等，这些统称为现代设计。它的出现使得机械设计更加科学、更加精确和更加完善。目前现代设计的理论与方法已日趋成熟，并在设计实践中得到广泛应用。

机械设计可以是应用新的原理或概念开发新的机器，也可以是在已有机器的基础上，重新设计或作局部的改进。

机器正常工作的前提是组成机器的各个零件能正常工作。由于某些原因机械零件不能在预定的条件下和规定的期限内正常工作时，称为失效。由于具体工作条件和受载情况的不同，机械零件可能出现不同的失效形式，即使是同类零件，也可能出现不同的失效形式。例如，机器中的轴，可能由于疲劳断裂而失效，也可能由于过大的弹性变形，使轴所支承的零件不能处于机器中的正确位置而失效。

机械零件在一定工作条件下抵抗失效的能力，称为工作能力。针对各种失效形式，机械零件有各种相应的工作能力。机械设计的主要任务之一就是要保证机械零件有足够的工作能力。

如前所述，机械设计是根据市场需求，对机械产品的功能、原理方案、技术参数等进行规划和决策的过程。不同的机械由于其功能、结构形式、用途及工作条件的不同，其设计要求、设计方法及步骤也会有所不同。尽管如此，机械设计仍有其固有的规律和特点，必须满足一些共同的基本要求，遵循一些基本的原则和程序。因此，要想科学合理地进行机械设计，就必须掌握机械设计的一些基本知识和一般规律，如机器的功能分析、功能原理设计、机械设计的基本要求和程序、机械零件材料的选用原则、机构运动方案设计、机械零部件的结构设计及工作能力设计等。

2.2 机器的功能分析及功能原理设计

2.2.1 机器的功能分析

功能是机器的核心和本质，是机器为满足用户需求所必须具有的“行为”或必须完成的任务。从某种意义上讲，可以认为“用户购买的不是机器本身，而是机器所具有的功能”。因此在进行机械设计时，首先应该考虑的是要实现什么功能和如何实现所需的功能。

机器是实现某种“功能”的装置。一台机器所能完成的功能，称为机器的总功能。例如，挖掘机的总功能是“取运物料”，减速器的总功能是“传递扭矩和变换速度”。

总功能可以分解成若干个分功能，如挖掘机的总功能可分解为获取物料、运送物料等分功能，如图 2-1 所示。因此从功能的观点来看，机器是由多个分功能构成的系统，它们的协调工作实现了机器的总功能。

分功能还可以继续分解，一直分解到能找到原理解法的分功能为止。能找到原理解法的分功能称为功能元。功能元与一定的功能载体相对应，功能载体是实现对应功能的技术实体。例如，“铲斗”、“推压”、“回转”等分功能就是挖掘机的功能元，“铲斗”的功能载体可以是“正铲斗”、“反铲斗”、“抓斗”等。

设计机械产品时，很难根据总功能立即设计出对应的功能载体。所以功能分解的主要目的是将总功能分解为较简单的分功能或功能元，以便找出相应的功能载体。

在分析和确定所设计机器的总功能和分功能时，要应用抽象化的方法。通过抽象，一方面可以更深刻、更正确、更全面地反映所设计机器的功能；另一方面

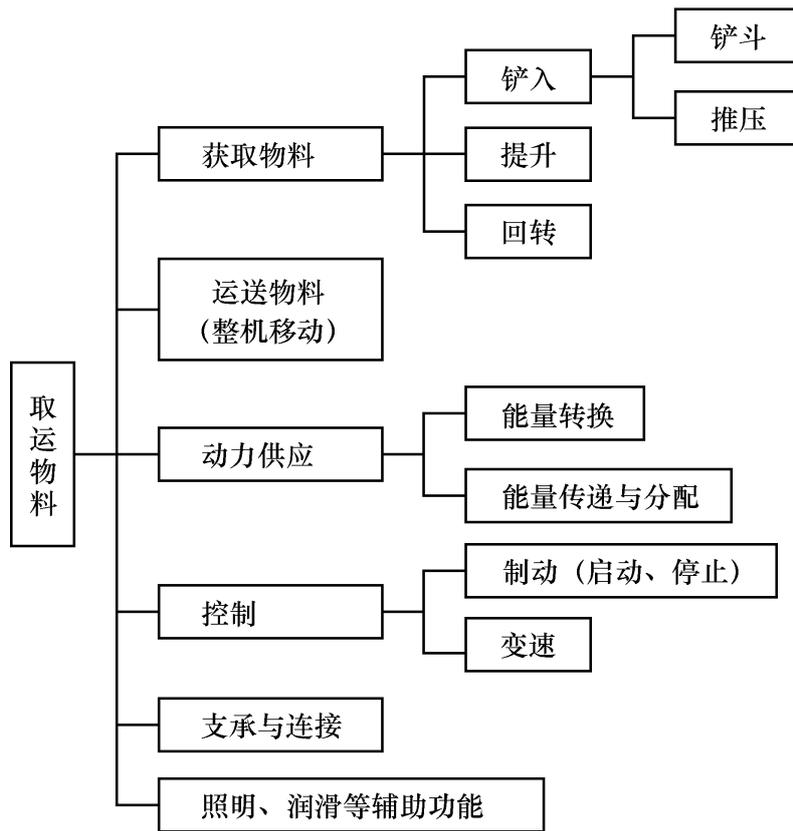


图 2-1 挖掘机的功能分解

也有利于抓住设计问题的本质，摆脱传统的设计思想和框架，开阔思路，获得更为满意的设计方案。例如，把轴承的功能抽象为“在相对回转运动表面间传递力”，就可以得到机械的、流体的、电磁的等不同工作原理和不同结构形式的轴承。

2.2.2 功能原理设计

在完成机器的功能分析后，下一步要针对机器的功能构思其工作原理。这种主要针对功能的原理性设计，称为功能原理设计。

功能原理设计应首先对各个功能元求解，然后将各个功能元的解综合，形成能实现机器总功能的原理方案。

功能元求解就是要寻找能实现功能元的原理方案或结构方案。功能元求解首先应根据一定的科学原理（如力学、电学、热力学等）确定能实现功能元的技术原理，然后按照技术原理来选择或构思功能载体。可只用简图或示意图来表示所构思的功能载体，不必考虑其具体结构、材料和制造工艺等细节问题。功能载体以它所具有的某种特性（运动特性、几何特性、物理化学特性等）来实现某一特定的功能。

功能元求解时，要始终明确功能是本质，而采用什么样的原理、何种功能载

体只是形式。只要本质不变，形式可以各种各样。既然人们购买的是产品所具有的功能，那么在保证实现功能的前提下，可以采用不同的原理、不同的功能载体来实现所要求的功能。因此求解功能元时要应用“发散”思维，进行创新构思，力求提出较多的解法供比较选优。

利用形态学矩阵将各个功能元的解进行综合就可以得到能实现机器总功能的多个原理方案。所谓形态学矩阵，就是用矩阵的形式列出各功能元及各功能元的解（功能载体）。表 2-1 就是在求得各功能元的解（功能载体）后，得出的挖掘机形态学矩阵。

表 2-1 挖掘机形态学矩阵

功能元	功能元的解（功能载体）			
	1	2	3	4
铲斗	正铲斗	反铲斗	抓斗	
推压	齿条	钢丝绳	油缸	
提升	油缸	绳索		
回转	内齿轮传动	外齿轮传动	液轮	
运送物料	履带	轮胎	迈步式	轨道-车轮
能量转化	柴油机	汽油机	电动机	液压马达
能量传递与分配	齿轮箱	油泵	链传动	带传动
制动	带式制动	闸瓦制动	片式制动	圆锥形制动
变速	液压式	齿轮式	液压-齿轮式	

用形态学矩阵进行方案综合，就可以得到多种原理方案。例如，由表 2-1 所示的挖掘机形态学矩阵，可得 $3 \times 3 \times 2 \times 3 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 = 41\,472$ 个原理方案。

在众多的原理方案中，应去除那些技术上明显不适用或不可行的方案，保留可行的方案。在剩余的可行方案中，再进行评价与决策，最终定出较为理想的方案。

2.3 机械设计的基本要求和程序

2.3.1 机器设计的基本要求及程序

1. 机器设计的基本要求

尽管各种机器的性能、用途及结构形式不同，但在设计时均应满足以下的基本要求。

1) 功能要求

如前所述, 功能是机器的核心和本质。因此设计的机器首先应能实现预定的功能, 并能在规定工作条件下和规定工作期限内正常运行。

2) 可靠性要求

机器由许多零件及部件组成, 机器的可靠性取决于零部件的可靠性。可靠性用可靠度来衡量。机器的零部件越多, 其可靠度越低。为了保证机器的可靠度, 当组成机器的零部件越多时, 对每个零部件的可靠度要求也就越高。因此, 在设计机器时应尽量减少零部件数目。

3) 经济性要求

机器的成本包括设计、加工、装配、材料、使用、维护等各环节的成本。设计对机器成本的影响很大, 统计分析表明机器成本的 80% 由设计所决定。因此, 设计时应全面考虑以上各环节的成本, 以提高机器的经济性。

设计机器时, 可通过以下措施提高机器的经济性。

(1) 采用先进的设计方法和设计手段 (如 CAD、有限元分析、并行设计等)。这样, 一方面可以得到尽可能精确的设计计算结果, 并能进行优化设计; 另一方面可尽量减少设计中的反复, 从而缩短设计周期, 降低设计成本。

(2) 最大限度地采用标准化、系列化及通用化的零部件。

(3) 采用新技术、新工艺、新材料和新结构。

(4) 改善零部件的结构工艺性, 使其易于加工、装配和维护, 并能节约材料。

(5) 采用合理的润滑方式及密封装置, 从而延长机器的使用寿命。

(6) 提高运动副及传动系统的效率, 以降低能源消耗。

(7) 提高机器的自动化水平, 以提高机器的生产率。

4) 操作方便和安全要求

设计机器时, 应根据人机工程学原理使人机关系协调, 力求操作方便、省力、舒适, 最大限度地减少脑力和体力消耗; 降低机器噪声, 防止有害介质的泄漏, 减少环境污染; 力求维护方便并降低维护费用; 设置必要的安全防护装置, 确保机器运行时的人身安全和机器自身的安全。

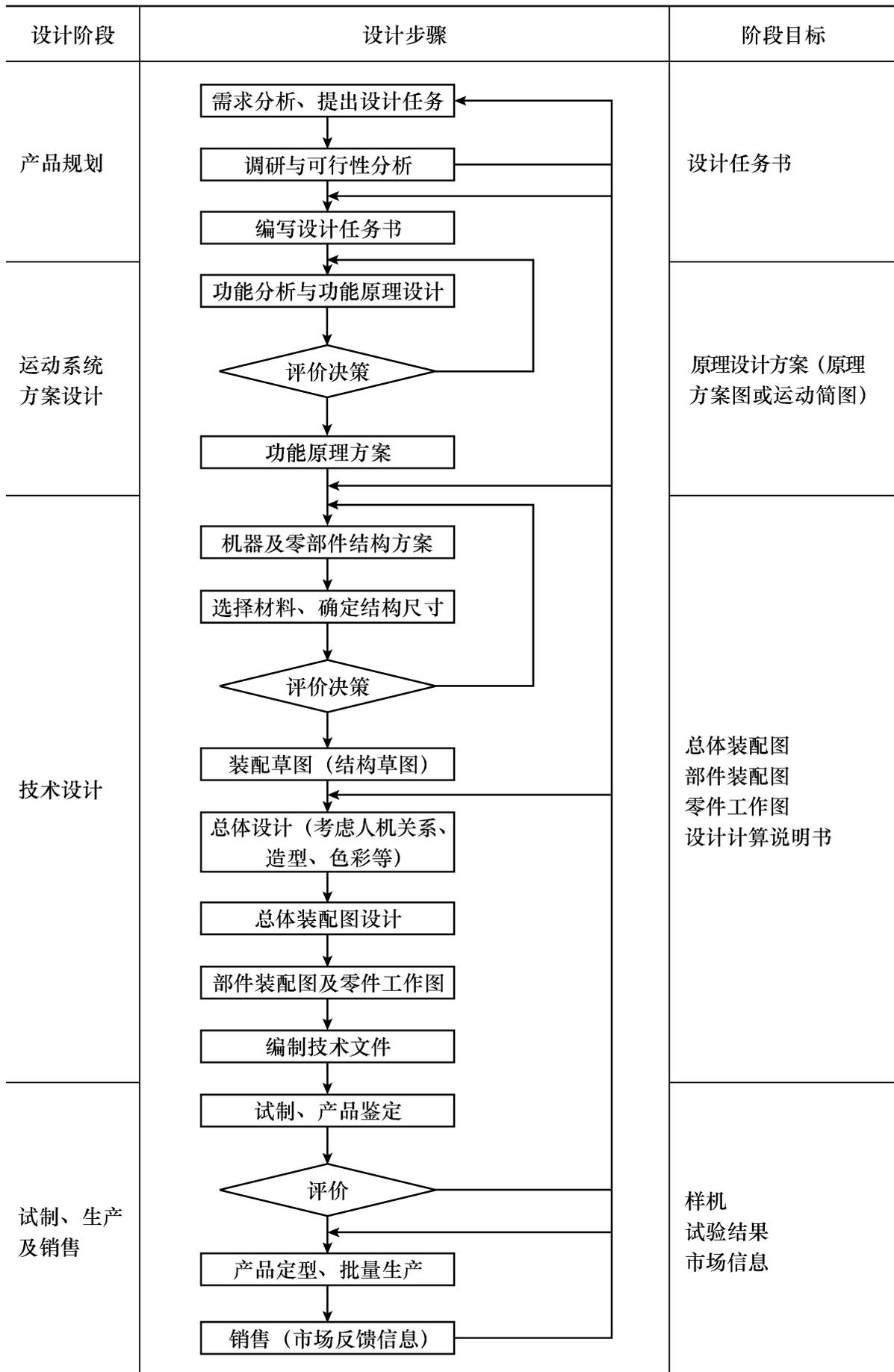
5) 造型、色彩要求

运用工业设计的方法, 对机器进行造型和色彩设计, 以实现人、机器和环境的完美协调。机械产品的造型和色彩设计, 直接影响到产品的销售和竞争力, 是机械设计中一个不容忽视的环节。

2. 机器设计的一般程序

机器设计有其固有的规律和特点。为提高设计质量, 机器设计应按照一定的程序来进行。机器设计的一般程序如表 2-2 所示, 现分述如下。

表 2-2 机器设计的一般程序



1) 产品规划

产品规划的主要工作是根据市场需求分析提出设计任务和明确设计要求。产品的市场需求分析包括：市场对产品功能、性能、质量和数量的具体要求，现有类似产品的情况及发展趋势，原材料及配件的现状与价格等。

产品规划阶段还需对设计项目做可行性分析，提出可行性报告。可行性报告的主要内容有：产品开发的必要性和市场调查情况；国内、外类似产品的发展水平；新开发产品预期能达到的水平及经济效益；设计与制造中需解决的关键问题；新技术、新工艺、新材料、新结构的采用；投资费用及进度计划等。

在以上分析的基础上进一步明确设计任务的全面要求及细节，形成设计任务书。设计任务书大体上应包括机器功能及经济性的估计、基本使用要求、完成设计任务的预计期限等。

2) 运动系统方案设计

运动系统方案设计就是根据所要求的机器功能，构思机器的工作原理，并用原理方案图或机构运动简图（参见第3章）来表示。

运动系统方案设计阶段首先要对机器的功能进行分析，确定机器的总功能并将其分解成若干个分功能。在功能分析的基础上，进行功能原理设计，经过评价决策，得到一个较为满意的原理方案。

运动系统方案设计是机械设计中的重要环节，也是整个设计的关键所在。运动系统方案是否合理是机器性能好坏的先天性的决定因素，所以必须对机器的运动系统方案设计予以高度重视。

3) 技术设计

技术设计的主要工作是将原理方案具体化为机器及零部件的合理结构。技术设计应完成机器的零部件设计及总体设计，并且绘制全套的总体装配图、部件装配图和零件工作图，编制相应的技术文件。

技术设计首先根据原理方案初步设计机器的整体结构及各零部件的结构形状，通过必要的设计计算及装配草图设计，最终确定机器的整体结构及各零件的结构尺寸及材料。装配草图设计应注意协调各零件的结构和尺寸，避免零件之间出现冲突或干涉，同时还应全面考虑所设计零部件的结构工艺性。

在以上设计的基础上，再进行机器的总体设计，最后绘出总装配图。总体设计应从人机工程学、包装、运输、环境保护等角度全面考虑机器的总体布局，并根据工业设计原理对机器的外观造型、色彩进行设计，达到“宜人”的效果。

根据总体装配图，设计部件装配图和零件工作图，绘出全部生产用图纸。编写设计计算说明书、使用说明书、标准件明细表及有关的工艺文件。

4) 试制、生产及销售

经过加工、安装及调试，制造出产品样机并进行样机试验及鉴定，然后组织

批量生产和销售。在样机制造、试验及鉴定中可发现设计存在的问题，同时用户在使用过程中也会对产品提出意见或建议。设计人员应根据这些问题、意见或建议，对设计进行修改，进一步完善产品设计。

经过上述四个阶段，即完成了机器设计的全过程。需要注意的是：上述各阶段的设计内容及设计步骤是相互联系、彼此影响的。具体设计过程往往是在各阶段、各步骤之间不断反复、交叉进行的过程，是一个“设计—评价—再设计（修改）”、逐步完善与优化的过程，决不能理解为一个简单的顺序过程。

2.3.2 机械运动系统方案设计的基本要求及程序

运动系统方案设计的基本要求是使机构的运动特性（包括运动学特性和动力学特性）满足使用要求或功能要求，并力求机构简洁、运动可靠。机械运动系统方案设计的一般程序如下。

1) 确定机械运动系统的技术原理

利用功能原理设计思想，根据使用要求或功能要求确定机械运动系统的技术原理。技术原理的好坏在很大程度上决定着机器设计的成败。

2) 确定机构的组成

根据机械运动系统的技术原理，确定机械运动系统的机构组成，也就是确定机构的选型、组合问题。可以用基本机构、变异机构或基本机构与变异机构的组合来实现各种运动要求。

3) 机构尺寸综合

依据机构的组成，对机构进行尺寸综合，以确定机构的尺寸、机构的运动空间等特征参数。

4) 设计文件编写

机械运动系统方案确定之后，进行必要的运动学和动力学计算。最后将设计结果以机构运动简图、设计计算说明书等形式表示出来。

2.3.3 机械零件设计的基本要求及程序

1. 机械零件设计的基本要求

机械设计的大部分工作是机械零件设计。机械零件作为组成机器的基本单元，其设计质量直接影响到机器的性能指标，如各种功能指标、可靠性、经济性等。机械零件设计的基本要求包括以下几点。

1) 机械零件的工作能力

机械零件的工作能力表现在强度、刚度、耐磨性、振动稳定性、可靠性等几个方面。工作能力要求是机械零件设计的最基本要求，应通过工作能力设计来保

证零件的工作能力。

2) 机械零件的结构工艺性

机械零件的结构工艺性是指零件在结构上有利于加工、装配、维护等方面的特性。所谓零件具有良好的结构工艺性，是指所设计的零件结构，除了满足零件的功能要求外，还有利于加工、安装、调试、维护等方面的要求。通常在设计机械零件时，通过工作能力计算可确定机械零件的主要尺寸或主要参数（如齿轮的模数、齿宽、分度圆直径等），而其他形状尺寸（如齿轮的轮缘、腹板、轮毂等）则需通过结构设计来确定。结构设计对零件的结构工艺性有着决定性影响，是机械零件设计中的一个重要环节，在整个设计工作中占有很大比例。

3) 机械零件的标准化、系列化、通用化

标准化是指对零件的尺寸、结构要素、材料性能、检验方法、设计方法、制图要求等制定出大家应共同遵守的标准。系列化是指将零部件的主要技术参数和结构尺寸按一定规律形成各种大小不同的系列。通用化是指系列之内或跨系列的产品之间尽量采用同一结构和尺寸的零部件。

在不同类型、不同规格的各种机器中，有很多零部件是相同的。设计工作中，对这些零件实施标准化、系列化和通用化具有十分重要的意义，主要表现在以下几方面。

(1) 便于安排专门工厂采用先进技术和设备对零部件进行大批量生产，并能提高质量、降低成本。

(2) 可以减少设计工作量，使设计者的主要精力用于创造性的设计工作中。

(3) 增大零部件的互换性，方便机器维修。

(4) 有利于增加产品品种，扩大生产批量，满足各种需求。

4) 机械零件的经济性

设计机械零件时，应力求降低零件的成本、提高经济性。常用的措施有以下几种。

(1) 减轻零件质量 在满足功能要求的条件下，通过合理的结构设计，尽量减轻零件质量，降低材料消耗，从而降低成本。

(2) 合理选择零件材料 优先选用价格便宜、供应充足的材料，以降低材料费用；充分利用热处理、预应力等各种工艺手段，发挥材料的潜力，使材料得到充分利用。

(3) 良好的结构工艺性 良好的结构工艺性可以降低加工、装配、维护等成本。

(4) 尽量采用标准化零件和通用化部件 采用这些零部件不仅可以降低设计、制造成本，还可降低以后的使用及维修成本。

2. 机械零件设计的一般程序

不同的机械零件，其设计程序也不尽相同，但大多数零件的设计可按以下程序进行。

1) 初步确定零件的结构形式或选择零件类型

设计零件时，应根据机器的整体结构、零件在机器中的作用（功能）及作用在零件上载荷的特点，对零件结构形式作初步设计。对某些已定型的零件（如齿轮、轴承等），在综合分析的基础上，初步确定其类型。

2) 计算作用在零件上的载荷

根据确定的结构方案，确定原动机的参数（功率、速度等），计算零件的运动和动力参数（速度、加速度、功率等），求出作用在零件上的载荷（包括大小、方向和作用位置），并确定载荷的性质。

3) 选择零件材料及其热处理方式

根据零件的使用条件及工艺性、经济性要求，合理选择零件材料及其热处理方式，如在腐蚀介质中工作的零件应选用不锈钢、铜合金等耐蚀材料。

4) 零件的工作能力设计

根据零件的工作条件及所受载荷的性质，分析、判断零件可能的失效形式。由失效形式确定零件的工作能力设计计算准则（如强度、刚度、振动稳定性等准则）。依据工作能力设计计算准则及零件所受的载荷，确定零件的基本结构尺寸。

5) 零件结构设计

根据零件的基本结构尺寸并结合装配草图设计，确定零件的结构形状和尺寸。结构设计要综合考虑零件的强度、刚度、加工、装配、维护等因素，使零件具有最合理的结构。

6) 校核计算

在前面的工作能力设计中，由于一些零件的结构尺寸未完全确定，只能对其工作能力做初步的设计计算。在完成结构设计后，所有零件的结构和尺寸均为已知，且零件之间的连接关系也已确定，所以这时可以较为精确地定出作用在零件上的载荷及影响零件工作能力的各个细节因素。在此条件下，有可能并且必须对一些重要的或者外形和受力情况比较复杂的零件进行精确的校核计算。若工作能力不满足要求，则应对所设计零件的尺寸、结构或材料进行修改，直到满足要求为止。

7) 绘制零件工作图、编写设计计算说明书

根据所设计零件的结构与尺寸，按制图标准绘制零件工作图。将设计过程中所用到的数据、图表、公式、主要结论等进行整理，编写设计计算说明书。

2.4 机械设计中的常用设计方法

2.4.1 机械设计的类型

机械设计可分为以下三种类型。

1. 开发性设计

在没有样机可供参考的情况下，对新型机械产品进行的全新设计称为开发性设计，如第一台内燃机和第一台数控机床的设计。对开发性设计，产品的主要功能、功能实现原理及功能载体中至少有一项是首创的，因此开发性设计具有很强的创新性。

2. 适应性设计

在主要功能的实现原理和功能载体结构基本保持不变的情况下，根据一些新的要求对产品进行局部改动（增、减某些功能，改变某些功能的实现原理或功能载体）的设计称为适应性设计，如由单缸洗衣机设计双缸洗衣机就属于适应性设计。

3. 变型设计

在功能原理和总体结构形式保持不变的情况下，仅改变产品的部分结构尺寸或一些技术性能参数的设计称为变型设计，又称变参数设计，如不同中心距的系列减速器设计、中心高不同的车床设计。

2.4.2 机械设计方法

1. 传统设计方法

由于科学技术发展水平的限制，传统的设计方法主要凭借设计者的经验和一些基本的设计计算理论，通过类比、模拟、试凑及相关的设计计算来进行机械设计。传统设计未能将局部与整体、静态与动态、技术与美学、设计与制造、设计与销售等有机地融入整个设计之中，因而具有很大的局限性。但由于其简单、易行，至今仍被广泛使用。常用的传统设计方法有以下几种。

1) 经验设计

根据过去的设计、生产和使用经验以及由此总结出来的经验公式或经验数据而进行的设计称为经验设计。

2) 类比设计

对所要设计的机器,分析其与同类型机器在功能和性能等方面的异同,在此基础上参考同类型机器所进行的设计称为类比设计。

类比设计和经验设计适用于使用要求无多大变化且结构形状已典型化的零件设计,如某些机架、箱体及传动零件等。

3) 半经验设计(理论设计)

人们在长期的设计、生产和使用实践中总结出来一些设计理论和经验公式并获得了一些实验数据,据此而进行的设计称为半经验设计,又称理论设计。理论设计中的计算分为设计计算和校核计算两种。设计计算是根据有关的设计理论和公式(如由工作能力设计计算准则确立的计算公式)计算出零部件的结构尺寸或参数;校核计算是在已知零部件的结构形状和尺寸的情况下,应用相关的设计理论和公式来检验零部件是否满足有关的设计准则。设计计算多用于结构及受力情况比较简单的零部件;对结构及受力情况比较复杂的零部件只能进行校核计算。

2. 现代设计方法

现代设计方法是在20世纪60年代发展起来的,它是现代广义设计和分析科学方法的统称。其特征是从静态走向动态、单项指标走向综合指标、粗略走向精确、经验走向理论、宏观走向微观。现代设计方法主要具有以下几个特点。

(1) 在设计思想上,现代设计将人-机-环境作为一个系统来考虑,强调创新设计、动态设计,并要求在设计阶段就要考虑产品全生命周期(产品生命周期是指产品从设计、制造、使用、维护、直至报废回收的全部过程)各个阶段的影响,实现产品全生命周期的广义优化设计。

(2) 在设计方法上,采用更加科学、理性和系统的设计方法代替原来的经验和半经验设计方法。充分利用最新发展起来的一些先进的设计、分析和计算技术,如创新设计、CAD、CAE、优化设计、可靠性设计、并行设计,并将这些单项技术集成起来,实现设计过程的集成化、智能化和网络化,以提高设计质量、缩短设计周期、降低设计成本。

(3) 在设计手段上,充分利用最新的计算机软/硬件技术、计算机图形学、网络技术、数据库技术。新的设计手段可实现设计信息的共享,并能显著提高设计效率和设计数据的准确性。

思考题与习题

2-1 什么是失效?机械零部件工作能力的含义是什么?

- 2-2 什么是机械设计？功能分析在机械设计中的作用是什么？
- 2-3 什么是功能原理设计？
- 2-4 分析机械设计的基本要求及程序。
- 2-5 结合实例，分析机械运动系统方案设计的重要性。
- 2-6 分析传统设计方法与现代设计方法的关系。

第二篇 机械设计基础知识

一般来说，机械设计的内容主要包括机械运动方案设计、机械零部件强度设计、机械零部件的结构设计三个方面。本篇即介绍了与这三个方面内容有关的基本知识。本篇由三章构成，即“机械运动设计与分析基础知识”、“机械零部件工作能力设计计算基础”、“机械零部件结构设计基础”。

在“机械运动设计与分析基础知识”章中，介绍了机构运动设计的基本概念——机构的组成要素，分析与设计机构的工具——机构运动简图，判断机构能否运动的方法——机构自由度的计算。

在“机械零部件工作能力设计计算基础”章中，主要介绍了进行机械零部件工作能力设计所需要的基础知识，包括力学模型的建立、零部件的失效形式。

在“机械零部件结构设计基础”章中，介绍了结构设计的基本知识，合理的结构设计所需考虑的各种因素。

第 3 章 机械运动设计与分析基础知识

3.1 概 述

对机构进行研究，首先就要研究机构的组成及组成要素，机构的组成要素就是构件与运动副；其次，要研究机构在什么条件下才具有确定的相对运动，这就是机构的自由度计算；要对机构进行运动分析与设计，就必须建立机构的运动模型，这个模型就是机构运动简图。此外，还有研究机构运动特性的一种工具——瞬心法求速度。这些都是机构运动分析与设计中涉及的基本知识，本章就对这些基本知识进行介绍。

3.2 机构的组成

3.2.1 机构组成要素

1. 构件

构件（或称“杆”）是机构中的运动单元体，是机构的基本组成单位。它可以是一个零件，也可以是由几个零件固结而成。因此，构件不同于作为制造单元的零件。如图 3-1 (a) 所示的内燃机连杆，因装拆、工艺等方面的原因，使它在结构上是由连杆体 1、连杆头 2、轴套 3、轴瓦 4、螺栓 5、螺母 6 等几个零件固结在一起组成。工作的时候，这些零件之间无相对运动，所以它成为一个运动单元，即一个构件。构件在机构运动简图中可用最简单的线条表示，如图 3-1 (b) 所示。

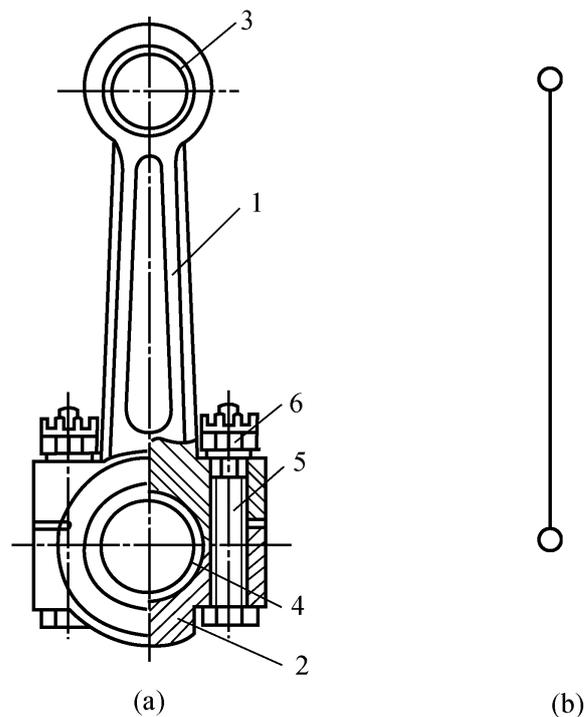


图 3-1 内燃机的连杆

1. 连杆体；2. 连杆头；3. 轴套；
4. 轴瓦；5. 螺栓；6. 螺母

2. 运动副

机构中所有构件之间都应具有确定

的相对运动，为此必须对各构件的运动加以约束。这种约束是通过机构中相邻两个构件之间一部分表面保持接触，形成可动的连接来实现的。这种可动连接限制了两构件之间的某些相对运动，而允许另一些相对运动的存在。通常将这种可动连接称之为运动副；而将组成运动副的两接触表面称为运动副元素。需要注意的是：若该两表面不再接触，则此运动副就随之而消失。

运动副有各种不同的分类方法，常见的有以下几种。

(1) 按组成运动副的两构件间是做平面平行运动还是做空间运动，可分为平面运动副和空间运动副。如果运动副限制了相邻两构件只能互做平面平行运动，则称该运动副为平面运动副，否则称为空间运动副。

平面运动副有转动副、移动副和平面滚滑副 3 种。

① 转动副 两构件形成运动副后只可做相对转动，称为转动副，也称回转副或铰链，如图 3-2 (a) 所示。转动副的几何特征是两圆柱面配合，运动特征是一个构件绕圆柱轴线相对另一构件转动。在机构运动简图中如图 3-2 (b) 所示。

② 移动副 两构件形成运动副后只可做相对直线移动，称为移动副，如图 3-3 (a) 所示。移动副的几何特征是两平面配合，运动特征是构件沿直线导轨的相对移动。在机构运动简图中如图 3-3 (b) 所示。需要注意的是：在研究机构运动时，移动副的位置仅与移动方位有关，而与其导轨的具体位置无关。

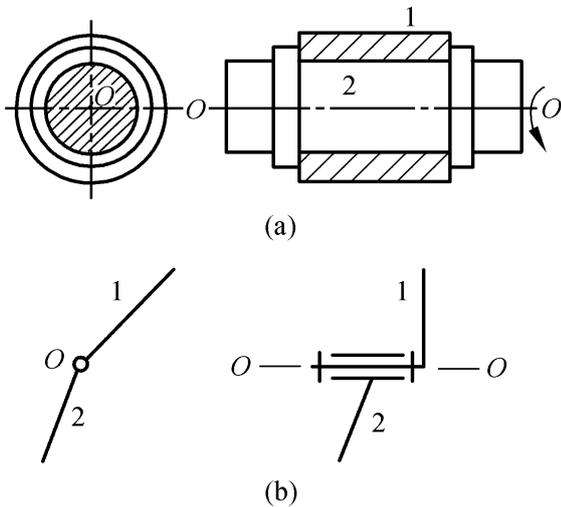


图 3-2 转动副
1, 2. 构件

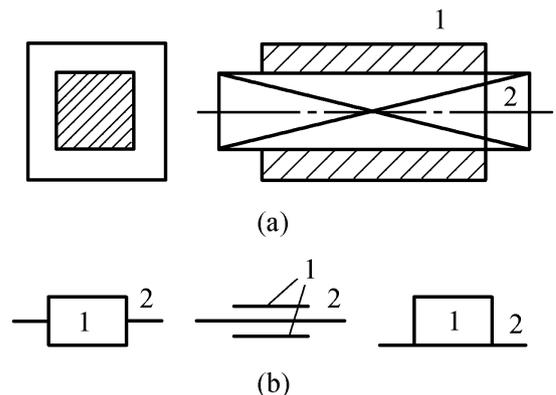


图 3-3 移动副
1, 2. 构件

③ 平面滚滑副 两构件形成运动副后，一般情况下相对滚动和相对滑动并存，故称为滚滑副，如图 3-4 所示。滚滑副的几何特征是两曲面配合，做点或线接触，运动特征是一个构件相对另一构件沿接触点切线方向的滑动和绕接触线的滚动。

除平面运动副以外的运动副均为空间运动副。常见的空间运动副有以下

几种。

① 螺旋副 构成运动副的两构件间的相对运动为螺旋运动，故称螺旋副，如图 3-5 所示。其几何特征是两螺旋面接触。

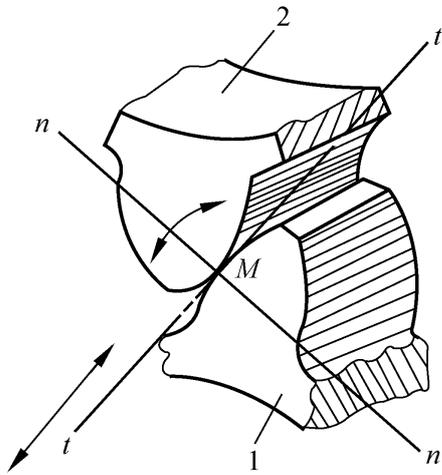


图 3-4 滚滑副
1, 2. 构件

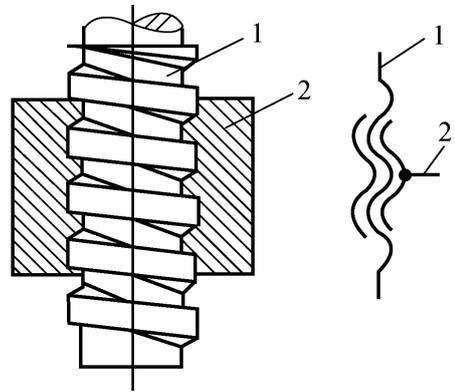


图 3-5 螺旋副
1, 2. 构件

② 球面副（球面低副） 运动特征是两构件间的相对运动为绕通过球心任意轴线的转动（构件上一点的轨迹在球面上），也称为球铰，如图 3-6 所示。两球面接触是其几何特征。

③ 圆柱副 其几何特征为两圆柱面配合，如图 3-7 所示。构成圆柱副和转动副的两构件都可绕其轴线做相对转动，区别在于圆柱副还可以延其轴线方向移动，而转动副则不能。

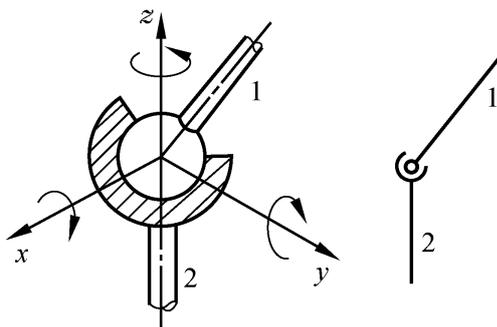


图 3-6 球面副
1, 2. 构件

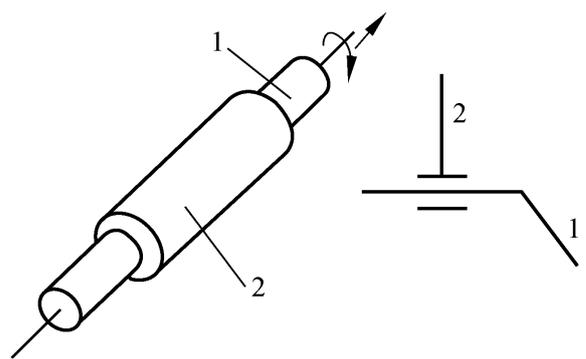


图 3-7 圆柱副
1, 2. 构件

(2) 按组成运动副的两构件间的接触情况，可将运动副分为低副和高副。做面接触的运动副称为低副，做点或线接触的运动副称为高副。转动副、移动副、螺旋副、球面副、圆柱副都是低副。滚滑副是高副，图 3-8 中球 1 与平面 2 形成点接触的运动副（球面高副）和图 3-9 中圆柱体 1 与平面 2 形成线接触的运动副（圆柱高副）都属高副。