

高等学校教材

# 机械原理

(第六版)

西北工业大学机械原理及机械零件教研室 编

孙 桓 陈作模 主编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是在前五版的基础上,根据工科高等学校机械类专业机械原理课程的教学基本要求和多年来教学实践的经验,并考虑到我国机械工业发展的需要修订而成的。

全书共十四章,包括绪论,机构的结构分析,平面机构的运动分析、力分析,机械的效率和自锁,机械的平衡,机械的运转及其速度波动的调节,平面连杆机构及其设计,凸轮机构及其设计,齿轮机构及其设计,齿轮系及其设计,其他常用机构,工业机器人操作机机构及其设计,机械传动系统方案的设计。在各章之后还附有一定数量的思考题和练习题。本次修订扩大了机构的类型和面上知识的介绍,增强了与机械工程实际的联系,而对齿轮机构、机构的运动分析及力分析等则作了适当的精简。

本书可作为高等院校工科机械类专业的教材,也可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械原理 孙桓,陈作模主编.—6版.—北京:高等教育出版社,2000

高等学校教材

ISBN 7 - 04 - 009148 - 8

.机... . 孙... 陈... .机构学 - 高等学校 - 教材 .TH11

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第75488号

责任编辑 马盛明 封面设计 李卫青 责任绘图 李维平  
版式设计 马静如 责任校对 俞声佳 责任印制

机械原理 (第六版)

西北工业大学机械原理及机械零件教研室 编

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号 邮政编码 100009

电 话 010 - 64054588 传 真 010 - 64014048

网 址 [http:// www.hep.edu.cn](http://www.hep.edu.cn)

[http:// www.hep.com.cn](http://www.hep.com.cn)

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷

开 本 850×1168 1/32 版 次 1959年6月第1版  
年 月 第 版

印 张 17.125 印 次 年 月 第 次印刷

字 数 430 000 定 价 17.30 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

## 第六版序

本书是在前五版的基础上,根据工科高等学校机械类专业机械原理课程的教学基本要求和多年来教学实践的经验,并考虑到我国机械工业发展的需要修订而成的。

在此次修订中,我们对教材内容体系的安排作了一些调整。全书共十四章,其中第一章主要阐述本课程研究的对象和内容,以及学习本课程的目的和方法;第二章至第七章属机构分析方面的内容,包括机构的结构分析、运动分析、力分析和动力学分析;第八章至第十三章属机构综合方面的内容,包括连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、其他常用机构及组合机构、工业机器人机构等,并涉及广义机构的概念;第十四章对机构的选型、组合及机械传动系统的设计问题进行了论述。

在内容的取舍及阐述方面,仍着重于讲清有关机械原理的基本概念、基本理论和基本方法,并使论述尽可能做到深入浅出,符合学生认识规律,使学生易于理解和掌握。另一方面,根据机械工业发展的需要,在机构分析与设计方面加强了解析法,保留了仍有应用价值的图解法,并适当增加了有关机械动力学方面的一些内容。为了拓宽学生在机构选型和设计方面的思路,扩大了机构类型的介绍,并引入了广义机构的概念,还介绍了工业机械手操作机的组成、类型及其分析与设计问题。对于已十分成熟的内容(如齿轮)则作了较多的精简。在内容的阐述上更加注意与工程实际的结合,以期学生尽早建立工程观点。

在思考题及练习题方面进一步进行了精选和补充,以求更有利于启发和加深学生对所学内容的理解,并进一步培养他们分析和解决问题的能力。

参加本书修订工作的有孙桓、陈作模(第一、十一章),葛文杰(第二、三、四、五、十三章),苏华(第六、七章),李树军(第八章),张永红(第九章),李继庆(第十章),董海军(第十二章)和王三民(第十四章)等,并由孙桓、陈作模主编。

本书承肖大准、汪萍两位教授审阅,提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于水平所限,漏误及不当之处在所难免,敬请各位机械原理课程的教师和广大读者不吝指正。

西北工业大学  
机械原理及机械零件教研室  
2000年8月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
§1 - 1 本课程研究的对象及内容 .....	1
§1 - 2 学习本课程的目的 .....	4
§1 - 3 如何进行本课程的学习 .....	5
§1 - 4 机械原理学科发展现状简介 .....	7
第二章 机构的结构分析 .....	9
§2 - 1 机构结构分析的内容及目的 .....	9
§2 - 2 机构的组成 .....	9
§2 - 3 机构运动简图.....	15
§2 - 4 机构具有确定运动的条件 .....	19
§2 - 5 机构自由度的计算.....	20
§2 - 6 计算平面机构自由度时应注意的事项.....	23
§2 - 7 虚约束对机构工作性能的影响及机构结构的合理设计 .....	29
§2 - 8 平面机构的组成原理、结构分类及结构分析 .....	31
* §2 - 9 平面机构中的高副低代 .....	35
思考题及练习题.....	38
第三章 平面机构的运动分析 .....	47
§3 - 1 机构运动分析的任务、目的和方法 .....	47
§3 - 2 用速度瞬心法作机构的速度分析.....	47
§3 - 3 用矢量方程图解法作机构的速度及加速度分析.....	51
§3 - 4 综合运用瞬心法和矢量方程图解法对 复杂机构进行速度分析 .....	58
§3 - 5 用解析法作机构的运动分析 .....	61
思考题及练习题.....	72
第四章 平面机构的力分析 .....	82
§4 - 1 机构力分析的任务、目的和方法 .....	82

§4 - 2 构件惯性力的确定 .....	84
§4 - 3 运动副中摩擦力的确定 .....	86
§4 - 4 不考虑摩擦时机构的力分析 .....	94
* §4 - 5 考虑摩擦时机构的受力分析 .....	106
思考题及练习题 .....	107
<b>第五章 机械的效率和自锁 .....</b>	<b>114</b>
§5 - 1 机械的效率 .....	114
§5 - 2 机械的自锁 .....	119
思考题及练习题 .....	126
<b>第六章 机械的平衡 .....</b>	<b>131</b>
§6 - 1 机械平衡的目的及内容 .....	131
§6 - 2 刚性转子的平衡计算 .....	132
§6 - 3 刚性转子的平衡实验 .....	137
§6 - 4 转子的许用不平衡量 .....	140
* §6 - 5 挠性转子动平衡简述 .....	143
§6 - 6 平面机构的平衡 .....	144
思考题及练习题 .....	151
<b>第七章 机械的运转及其速度波动的调节 .....</b>	<b>155</b>
§7 - 1 概述 .....	155
§7 - 2 机械的运动方程式 .....	159
§7 - 3 机械运动方程式的求解 .....	165
§7 - 4 稳定运转状态下机械的周期性速度波动及其调节 .....	172
§7 - 5 机械的非周期性速度波动及其调节 .....	178
* §7 - 6 考虑构件弹性时的机械动力学简介 .....	181
思考题及练习题 .....	184
<b>第八章 平面连杆机构及其设计 .....</b>	<b>188</b>
§8 - 1 连杆机构及其传动特点 .....	188
§8 - 2 平面四杆机构的类型和应用 .....	190
§8 - 3 平面四杆机构的基本知识 .....	199
§8 - 4 平面四杆机构的设计 .....	209
§8 - 5 多杆机构 .....	230

思考题及练习题 .....	237
<b>第九章 凸轮机构及其设计 .....</b>	<b>248</b>
§9 - 1 凸轮机构的应用和分类 .....	248
§9 - 2 推杆的运动规律 .....	252
§9 - 3 凸轮轮廓曲线的设计 .....	264
§9 - 4 凸轮机构基本尺寸的确定 .....	276
* §9 - 5 高速凸轮机构简介 .....	283
思考题及练习题 .....	287
<b>第十章 齿轮机构及其设计 .....</b>	<b>292</b>
§10 - 1 齿轮机构的应用及分类 .....	292
§10 - 2 齿轮的齿廓曲线 .....	296
§10 - 3 渐开线齿廓的啮合特点 .....	299
§10 - 4 渐开线标准齿轮的基本参数和几何尺寸 .....	303
§10 - 5 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动 .....	310
§10 - 6 渐开线齿轮的变位修正 .....	319
§10 - 7 斜齿圆柱齿轮传动 .....	329
§10 - 8 蜗杆传动 .....	341
§10 - 9 圆锥齿轮传动 .....	347
* §10 - 10 圆弧齿轮传动简介 .....	351
思考题及练习题 .....	354
<b>第十一章 齿轮系及其设计 .....</b>	<b>361</b>
§11 - 1 齿轮系及其分类 .....	361
§11 - 2 定轴轮系的传动比 .....	364
§11 - 3 周转轮系的传动比 .....	366
§11 - 4 复合轮系的传动比 .....	371
§11 - 5 轮系的功用 .....	373
§11 - 6 行星轮系的效率 .....	380
§11 - 7 行星轮系的类型选择及设计的基本知识 .....	383
* §11 - 8 其他新型行星齿轮传动简介 .....	391
思考题及练习题 .....	398
<b>第十二章 其他常用机构 .....</b>	<b>406</b>

§ 12 - 1	棘轮机构 .....	406
§ 12 - 2	槽轮机构 .....	413
§ 12 - 3	擒纵轮机构 .....	423
§ 12 - 4	凸轮式间歇运动机构 .....	425
§ 12 - 5	不完全齿轮机构 .....	428
* § 12 - 6	非圆齿轮机构 .....	432
§ 12 - 7	螺旋机构 .....	436
§ 12 - 8	万向铰链机构 .....	439
§ 12 - 9	组合机构 .....	442
§ 12 - 10	含有某些特殊元器件的机构 .....	455
	思考题及练习题 .....	459
* 第十三章	工业机器人机构及其设计 .....	463
§ 13 - 1	概述 .....	463
§ 13 - 2	工业机器人操作机的分类及主要技术指标 .....	463
§ 13 - 3	机器人操作机的运动分析 .....	469
§ 13 - 4	机器人操作机的静力和动力分析 .....	481
§ 13 - 5	工业机器人操作机机构的设计 .....	482
	思考题及练习题 .....	486
第十四章	机械传动系统的方案设计 .....	490
§ 14 - 1	概述 .....	490
§ 14 - 2	机械工作原理的拟定 .....	491
§ 14 - 3	执行构件的运动设计和原动机的选择 .....	494
§ 14 - 4	机构的选型和变异 .....	499
§ 14 - 5	机构的组合 .....	505
§ 14 - 6	机械传动系统方案的拟定 .....	514
§ 14 - 7	机械传动系统设计举例 .....	522
	思考题及练习题 .....	533
	参考书目 .....	535

# 第一章 绪 论

## § 1 - 1 本课程研究的对象及内容

本课程名为“机械原理”，不言而喻，其研究的对象是机械，而研究的内容则是有关机械的基本理论问题。

“机械”这个名词，我们是很熟悉的，它是“机器”和“机构”的总称。所谓“机构”，我们也并不陌生，在理论力学等课程中，已对一些机构（如连杆机构、齿轮机构等）的运动学及动力学问题进行过研究。在工程实际中，常见的机构还有带传动机构、链传动机构、凸轮机构、螺旋机构，等等。各种机构都是用来传递与变换运动和力的可动的装置。至于所谓“机器”，则都是根据某种使用要求而设计的一种执行机械运动的装置，可用来变换或传递能量、物料和信息。如电动机或发电机用来变换能量，加工机械用来变换物料的状态，起重运输机械用来传递物料，计算机用来变换信息等。

在日常生活和生产中，我们都接触过许多机器，例如缝纫机、洗衣机、复印机、各种机床、汽车、拖拉机、起重机等。各种不同的机器，具有不同的形式、构造和用途，但通过分析可以看到，这些不同的机器，就其组成来说，却都是由各种机构组合而成的。例如图 1 - 1 所示的内燃机就包含着由气缸 11、活塞 10、连杆 3 和曲轴 4 所组成的连杆机构，由齿轮 1 和 18 所组成的齿轮机构，以及由凸轮轴 7 和阀门推杆 8、9 所组成的凸轮机构等。图 1 - 2, a 所示为工件自动装卸装置。其中包含着带传动机构、蜗杆传动机构、凸轮机构和连杆机构等。由电动机通过各机构的传动而使滑杆向左移动时，滑杆上的动爪和定爪将工件夹住。当滑杆带着工件向右移

动(图 b)到一定位置时,夹持器的动爪受挡块的压迫将工件松开,于是工件落于载送器上,被送到下道工序。

图 1 - 1

上面我们仅举了两个实例。从对其他不同机器的分析中同样可以看到,各种机器的主要组成部分都是各种机构。所以可以说,机器乃是一种可用来变换或传递能量、物料与信息的机构的组合。

本课程研究的内容主要包括以下几个方面。

(1) 机构结构分析的基本知识 如上所述,各种机构是本课

图 1 - 2

程研究的主要对象。首先我们将要研究机构是怎样组成的,机构的组成情况对其运动的影响,以及机构具有确定运动的条件;其次要研究机构的组成原理及机构的结构分类;最后我们还要研究如何用简单的图形把机构的结构状况表示出来,即如何绘制机构运动简图的问题,以便据以对机构进行运动及动力分析。

(2) 机构的运动分析 对机构进行运动分析,是了解现有机械运动性能的必要手段,也是设计新机械的重要步骤。本课程将介绍对机构进行运动分析的基本原理和方法。

(3) 机器动力学 机器动力学研究的内容主要是两类基本问

题:其一是分析机器在运转过程中其各构件的受力情况,以及这些力的做功情况;其二是研究机器在已知外力作用下的运动。一般情况下机器的运动速度是不均匀的,而过大的速度波动,将直接影响到机器的工作质量;再者,机器在运转中各构件所产生的不平衡惯性力,对机器的工作也十分不利。所以对机器速度波动的调节和不平衡惯性力的平衡问题,都是机器动力学中要研究的重要问题。

(4) 常用机构的分析与设计 如上所述,各种机器即使是非常复杂的机器,其机械部分也无非是由齿轮、凸轮、连杆等一些常用的机构组合而成的。所以,对这些常用的机构的运动及工作特性进行分析,并探索其设计方法,便是十分必要的。另外,由于机器人在现代工业中的应用日益广泛,故对机器人机构也作了必要的介绍。

(5) 机械传动系统运动方案的设计 最后,本课程将讨论在进行具体机械设计时机构的选型、组合、变异及机械传动系统运动方案的设计等问题,以便对这方面的问题有一个概略的了解,并初步具有拟定机械传动系统方案的能力。

## § 1 - 2 学习本课程的目的

在介绍了本课程研究的内容之后,对于学习本课程的目的就不难理解了。首先,机械类各专业的同学,在以后的学习和工作中总要遇到许多关于机械的设计和使用方面的问题,而本课程所学的内容乃是研究现有机械的运动及工作性能和设计新机械的基础知识。正因为如此,所以它是机械类各专业必修的一门重要的技术基础课程。

现代世界各国间的竞争主要表现为综合国力的竞争。要提高我国的综合国力,就要在一切生产部门实现生产的机械化和自动化,这就需要创造出大量的、种类繁多的、新颖优良的机械来装备

各行各业,为各行业的高速发展创造有利条件。任何新技术、新成果的获得,莫不有赖于机械工业的支持。机械工业是国家综合国力发展的基石。

随着各种新兴学科的兴起,机械工业也向着更高的阶段发展,以与各相关学科的发展相适应。例如大型天文望远镜的抛物面反射镜,要求表面粗糙度小于  $0.05\ \mu\text{m}$ ; 镜面磁鼓和磁盘在高速运转中的径跳和端跳要小于数微米; 高速摄影机棱镜的旋转速度要高达  $10^6\ \text{r min}$  以上,等等。没有相应的机械设备来加工,没有相应的机械设备作为承载主体,都是不可能实现的。故机械现在是,将来仍是人类利用和改造自然界的直接执行工具。

机械工业历史悠久,但至今仍在蓬勃发展。过江隧道、海底隧道的掘进,跨度长达一二百米的悬索桥、斜拉桥的架设,大型水利工程的兴建,连铸连轧钢板的生产,……等等的得以实现,莫不有赖于现代机械工业的支持,没有现代机械工业为基础的信息社会是难以想象的。

为了满足各行各业和广大人民群众的日常增长的新需求,就需要创造出越来越多的新产品,故现代机械工业对创造型人才的需求与日俱增。而机械原理方面的知识,在新机械的创造中起到不可或缺的基础作用。当我们掌握了本课程所介绍的内容之后,我们就有可能在积累一定实践经验的基础上,为现有设备的充分利用,合理改造和根据需要创造新机械提出切实可行的办法来。

当然,本课程所讲的内容,对于一个工程技术人员来说,还仅是他所应具备的机械基础知识的一个方面。

### § 1 - 3 如何进行本课程的学习

在进行本课程的学习时,首先应当注意,机械原理课程是一门技术基础课程。它一方面较物理、理论力学等理论课程更加结合工程实际;而另一方面,它又与专业机械的课程有所不同。由于专

业机械的种类繁多,机械原理课程不可能,而且也不必要对各种各样的具体机械进行研究。它只是对各种机械的一些共性问题和各种机器中常用的一些机构进行较为深入的探讨。为了学好本课程,在学习过程中,同学们就要着重注意搞清基本概念,理解基本原理,掌握机构分析和综合的基本方法。

其次,本课程中对于机械的研究,是通过以下两大内容来进行的:

(1) 研究各种机构和机器所具有的一般共性问题。如机构的组成理论,机构运动学,机器动力学等。

(2) 研究各种机器中常用的一些机构(如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构,等等)的运动和动力性能,以及它们的设计方法。

这两部分内容虽然自成系统,然而却又是互相密切联系的。在学习过程中,应注意把一般的原理和方法与研究实际机构和机器时的具体运用密切联系起来。并应随时注意在日常生活和生产中所遇到的各种机构和机器,根据所学的原理和方法进行观察和分析,做到理论和实际的紧密结合。

第三,在本课程的学习过程中,要注意培养自己运用所学的基本理论和方法去分析和解决工程实际问题的能力。解决工程实际问题,往往可以采用多种方法,所得结果一般也不是唯一的。这就涉及到分析、对比、判断和决策的问题。对事物的分析、判断、决策的能力,是一个工程技术人员所必须具备的基础能力,在学习中必须刻意加以培养。

最后,工程问题都是涉及多方面因素的综合问题,故要养成综合分析、全面考虑问题的习惯。另外,工程问题都要经过实践的严格考验,不允许有半点疏忽大意,故在学习中就要坚持科学严谨的、一丝不苟的工作作风,认真负责的工作态度,讲求实效的工程观点。

## § 1 - 4 机械原理学科发展现状简介

当今世界正经历着一场新的技术革命。新概念、新理论、新方法、新工艺不断出现。作为向各行各业提供装备的机械工业,也得到了迅猛的发展。

现代机械工业日益向高速、重载、高精度、高效率、低噪声等方向发展。对机械提出的要求也越来越苛刻。有的需用于宇宙空间,有的要在深海作业,有的小到能沿人体血管爬行,有的又是庞然大物,有的速度数倍于声速,有的又要作亚微米级甚至纳米级的微位移,如此等等。处于机械工业发展前沿的机械原理学科,为了适应这种情况,新的研究课题与日俱增,新的研究方法日新月异。

为适应生产发展的需要,当前在自控机构、机器人机构、仿生机构、柔性及弹性机构和机电光液综合机构等的研制上有很大进展。在机械的分析与综合中,也由只考虑其运动性能过渡到同时考虑其动力性能;考虑到机械在运转时,构件的振动和弹性变形,运动副中的间隙和构件的误差对机械运动及动力性能的影响;以及如何对构件和机械进一步作好动力平衡的问题等等。

在连杆机构方面,重视了对空间连杆机构、多杆多自由度机构、连杆机构的弹性动力学和连杆机构的动力平衡的研究;在齿轮机构方面,发展了齿轮啮合原理,提出了许多性能优异的新型齿廓曲线和新型传动,加速了对高速齿轮、精密齿轮、微形齿轮的研制;在凸轮机构方面,十分重视对高速凸轮机构的研究。为了获得动力性能好的凸轮机构,在凸轮机构推杆运动规律的开发、选择和组合上作了很多工作。此外,为了适应现代机械高速度、快节奏、优性能的需要,还发展了高速高定位精度的分度机构,具有优良综合性能的组合机构,以及各种机构的变异和组合等等。

目前,在机械的分析和综合中日益广泛地应用了计算机,发展并推广了计算机辅助设计、优化设计、考虑误差的概率设计。提出了多种便于对机械进行分析和综合的数学工具,编制了许多大型通用或专用的计算程序。此外,随着现代科学技术的发展,测试手段的日臻完善,也加强了对机械的实验研究。

总之,作为机械原理学科,其研究领域十分广阔,内涵非常丰富。在机械原理的各个领域,每年都有大量的内容新颖的文献资料涌现。但是,作为一门技术基础课程,根据教学要求,我们将只研究有关机械的一些最基本的原理及最常用的机构分析和综合的方法。这些内容也都是进一步研究机械原理课题所必须的知识基础。

---

综合与设计具有相似的意义。在机械原理中常把不考虑零件的材料、强度、结构及工艺性的机构运动尺寸的设计称为综合。