

高等学校教材

机械原理

(第六版)

东南大学机械原理及机械零件教研室

黄锡恺 郑文纬 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1987年国家教委批准的《高等工业学校机械原理课程教学基本要求》进行全面修订的。

本书除绪论外共十三章,包括机构的结构分析、平面机构的运动分析、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、轮系及其设计、其他常用机构、机构的选型和组合应用、平面机构的力分析、平面机构的平衡、机器的效率、机器的运转及其速度波动的调节、电子计算机在机构分析与综合中的应用。此外,书末还附有空间连杆机构的基本知识和各章习题,以便选用。

本书可作为高等工业学校机械类各专业的教材,也可供有关教师及工程技术人员参考。

高等学校教材 机 械 原 理

(第六版)

东南大学机械原理及机械零件教研室

黄锡恺 郑文纬 主编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 21.125 字数 508,000

1956年10月第1版

1989年4月第6版 1989年4月第1次印刷

印数 0001—19,500

ISBN 7-04-000612-X/TH·34

定价 5.00 元

序 言

本书第一、二、三版是分别按照1954、1956和1962年教育部颁发的机械原理教学大纲编写的。1965年又根据“少而精”原则出版了第四版，即删订本。1980年审订的《机械原理教学大纲(草案)》公布后，又按该大纲进行修订为第五版，问世迄今已逾七载。这次第六版是根据1987年国家教委批准的《高等工业学校机械原理课程教学基本要求》进行全面修订的，它适用于机械类各专业。书中大部分是《基本要求》所规定的内容，少量是为了课程设计等需要而安排的内容。其余有*号的内容为有关的扩充材料。由于各专业的要求和教学时数相差较大，上述安排既可以满足不同专业、不同学时数的教学需要，又可以供因材施教和自学提高之用。

本版的编排次序仍保持传统的先机构后机器、先运动学后动力学，并且在各部分之中又是按先分析后设计进行论述的。即先进行组成各种机器的主要机构的结构分析，再进行其运动分析和运动设计，最后再研究机器的功、能问题及其与机器真实运动的关系，即机器效率的计算和机器的运转及其速度波动的调节。这样编排的科学系统性较强，符合人们的认识规律，有利于启发和培养全面分析问题和解决问题的能力，其理由在第五版的序言中已有简明阐述。

本版的内容除经典的基本内容外，还更新和充实了部分内容。全书保留了原有图解法的精华，同时又加强了解析法的论述和应用。对于各章的结构和基本概念都曾反复推敲，力求严谨确切，并注意到体系完善，便于教学。根据《基本要求》，本版增加了第八章机构的选型和组合应用，编写时重视吸收各家所长，并另有新意。同时，为了保证完成《基本要求》所规定的任务和“在培养机械类高

级工程技术人才的全局中，具有增强学生对机械技术工作的适应性，培养其开发创新能力的要求”的要求，故又增加电子计算机在机构分析与综合中的应用内容，并汇集成第十三章。这样编排，一方面可使学生进一步熟悉和巩固电算技术，另一方面也自成系统便于教学安排，既可分散在有关章中讲授，亦可与课程设计结合起来。另外，有鉴于当前机器人技术和自动机的应用日渐广泛，空间连杆机构的知识将为工程技术界所急需，因此特将它的一些基本内容作为附录供读者参考，以扩展视野，这对完成上述要求也会有所裨益。

为了尽可能满足各专业的不同要求，本版除继续提供较多可选用的例题和习题以外，还增编了思考题，俾更有利于读者的学习和深入考虑问题。

本版的名词、术语、基本单位及符号采用现有国标(GB)和法定计量单位及国际标准化协会(ISO)的标准。

参加本书编写的同志有：郑文纬(绪论、第九章、第十章、第十一章及第十二章)、程光蕴(第一章和第四章)、张融甫(第二章和第三章)、吴克坚(第五章和附录)、黄锡恺(第六章和第八章)、郑星河(第七章和第十三章)，并由黄锡恺和郑文纬两同志负责主编。

本书承国家教育委员会机械原理课程指导小组成员、合肥工业大学丁爵曾教授和上海交通大学邹慧君副教授精心审阅，提出很多宝贵意见，编者特此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限和编写时间匆促，误漏欠妥之处在所难免，竭诚欢迎机械原理教师和读者批评指正。

编 者

1988年3月

目 录

绪论	1
§ 0-1 机械原理的研究对象及基本概念	1
§ 0-2 机械原理课程的内容及在教学中的地位、任务和作用	6
§ 0-3 机械原理与发展国民经济的关系	8
§ 0-4 机械原理学科的新发展	10
第一章 机构的结构分析	14
§ 1-1 研究机构结构的目的	14
§ 1-2 平面运动副及其分类	14
§ 1-3 平面机构运动简图	17
§ 1-4 平面机构的自由度	21
§ 1-5 平面机构的组成原理和结构分析	29
*§ 1-6 空间机构结构分析的基本知识	36
第二章 平面机构的运动分析	42
§ 2-1 研究机构运动分析的目的和方法	42
§ 2-2 平面机构的位置图及其各点轨迹和位移的求法	43
§ 2-3 速度瞬心法及其在机构速度分析上的应用	46
§ 2-4 用相对运动图解法求机构的速度和加速度	52
§ 2-5 用解析法求机构的位置、速度和加速度	63
§ 2-6 运动线图	72
第三章 平面连杆机构及其设计	75
§ 3-1 平面连杆机构的应用及其设计的基本问题	75
§ 3-2 平面四杆机构的基本型式及其演化	79
§ 3-3 平面四杆机构有曲柄的条件和几个基本概念	88
§ 3-4 平面四杆机构的运动设计	96
第四章 凸轮机构及其设计	126
§ 4-1 凸轮机构的应用和分类	126
§ 4-2 从动件的运动规律	129
§ 4-3 按给定运动规律设计凸轮轮廓——作图法	140

§ 4-4	按给定运动规律设计平面凸轮轮廓——解析法	149
§ 4-5	凸轮机构基本尺寸的确定	156
第五章	齿轮机构及其设计	166
§ 5-1	齿轮机构的应用和分类	166
§ 5-2	平面齿轮机构的啮合基本原理	170
§ 5-3	圆的渐开线及其性质	180
§ 5-4	渐开线齿廓的啮合及其特点	182
§ 5-5	渐开线标准直齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸	186
§ 5-6	渐开线直齿圆柱齿轮传动的啮合过程和正确啮合条件	193
§ 5-7	渐开线齿轮传动的重合度	196
§ 5-8	渐开线齿轮传动的无侧隙啮合	202
*§ 5-9	渐开线齿轮传动的齿廓滑动系数	208
§ 5-10	渐开线齿廓切削加工原理	210
§ 5-11	渐开线齿廓的根切现象和标准齿轮不发生根切现象的条件	216
§ 5-12	齿轮的变位原理和变位齿轮	219
*§ 5-13	渐开线齿轮传动的过渡曲线干涉	223
*§ 5-14	变位齿轮传动	225
§ 5-15	平行轴斜齿圆柱齿轮机构	235
§ 5-16	交错轴斜齿轮机构	246
§ 5-17	蜗杆蜗轮机构	251
§ 5-18	圆锥齿轮机构	256
*§ 5-19	摆线齿轮机构简介	265
*§ 5-20	圆弧齿轮机构简介	268
第六章	轮系及其设计	274
§ 6-1	轮系及其分类	274
§ 6-2	定轴轮系的传动比与应用	275
§ 6-3	周转轮系的传动比与应用	280
§ 6-4	组合轮系的传动比与应用	288
§ 6-5	行星轮系各轮齿数和行星轮数的选择	299
*§ 6-6	渐开线少齿差行星减速器、摆线针轮行星减速器及谐波齿轮传动简介	302

第七章 其他常用机构	313
§ 7-1 万向联轴节	318
§ 7-2 螺旋机构	319
§ 7-3 棘轮机构	322
§ 7-4 槽轮机构	329
§ 7-5 不完全齿轮机构	337
§ 7-6 凸轮式间歇运动机构	342
§ 7-7 非圆齿轮机构	344
第八章 机构的选型和组合应用	351
§ 8-1 研究机构选型和组合应用的目的和内容	351
§ 8-2 机构的组合方式和相应的组合机构的分析与设计	352
§ 8-3 机构的选型	379
§ 8-4 机器执行机构的协调设计和运动循环图	385
第九章 平面机构的力分析	394
§ 9-1 研究机构力分析的目的和方法	394
*§ 9-2 构件惯性力的确定	397
*§ 9-3 质量代换法	400
§ 9-4 运动副中摩擦力的确定	402
*§ 9-5 不考虑摩擦力的机构力分析	412
§ 9-6 速度多边形杠杆法	420
*§ 9-7 考虑摩擦力的机构力分析	423
第十章 平面机构的平衡	426
§ 10-1 平衡的目的与分类	426
§ 10-2 刚性回转件的平衡	427
§ 10-3 刚性回转件的平衡试验法	434
*§ 10-4 挠性回转件平衡概述	439
§ 10-5 机架上的平衡	444
第十一章 机器的机械效率	453
§ 11-1 机器的运动和功能的的关系	453
§ 11-2 机器的机械效率和自锁	455
§ 11-3 斜面传动的效率	462

§ 11-4	螺旋和蜗杆蜗轮传动的效率	464
§ 11-5	行星轮系传动的效率	468
*§ 11-6	连杆传动的效率	473
*§ 11-7	凸轮传动的效率	475
第十二章	机器的运转及其速度波动的调节	480
§ 12-1	研究机器运转及其速度波动调节的目的	480
§ 12-2	机器等效动力学模型	481
§ 12-3	机器运动方程式	489
§ 12-4	在已知力作用下机器的真实运动	490
§ 12-5	机器速度波动的调节方法	496
§ 12-6	机器运转的平均速度和不均匀系数	498
§ 12-7	飞轮设计的基本问题	500
§ 12-8	力是机构位置函数时飞轮转动惯量的计算法	503
*§ 12-9	力是速度函数时飞轮转动惯量的计算法	507
*§ 12-10	飞轮尺寸的确定	513
*第十三章	电子计算机在机构分析与综合中的应用	516
§ 13-1	概述	516
§ 13-2	单杆及杆组的运动分析	517
§ 13-3	单杆及杆组的力分析	529
§ 13-4	平面机构的分析示例	537
§ 13-5	平面机构的综合示例	540
*§ 13-6	机构优化设计简介	543
附录	空间连杆机构及其设计	557
	思考题和习题	574
	附表 5-1 至 5-7; 附表 10-1	655
	附图 10-1	663
	主要参考文献	664

绪 论

§ 0-1 机械原理的研究对象及基本概念

“机械原理”是“机构和机器的原理”的简称。它是一门以机构和机器为研究对象的学科。

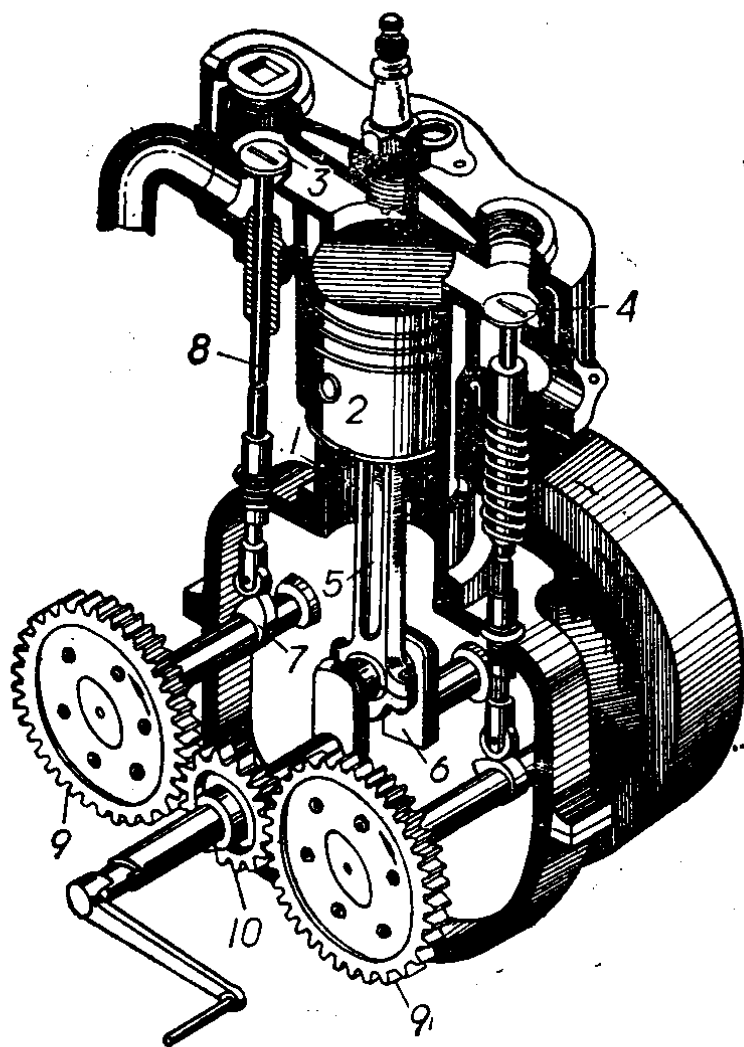


图 0-1

机器这一概念多少年来已逐渐在人们的头脑中形成，而且还在不断发展。机器的种类繁多，其构造、性能和用途等各不相同。如图 0-1 所示为单缸四冲程内燃机，它是由气缸体 1、活塞 2、进气阀 3、排气阀 4、连杆 5、曲轴 6、凸轮 7、顶杆 8、齿轮 9 和 10 等所组

成。活塞的往复移动通过连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进气阀和排气阀的。三个齿轮保证进、排气阀和活塞之间形成有一定节奏的动作。以上各件的协同工作便能使燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。又如图 0-2 所示的牛头刨床是由电动机 1、小齿轮 2、与大齿轮固定在一起的曲柄 3、滑块 4 和 6、导杆 5、刨头 7、工作台 8、丝杠 9、床身 10 以及其他图中未画出的辅助部分所组成。当电动机经胶带传动并通过齿轮使曲柄回转时,导杆作平面复杂运动。刨头便带着刨刀作往复直线移动,从而产生刨削动作。同时,动力还通过其他辅助部分带动丝杠作间歇回转,使工作台横向移动,从而实现工件的进给动作。再如电动机是由一个转子(电枢)和一个定子所组成。当定子中有电流输入

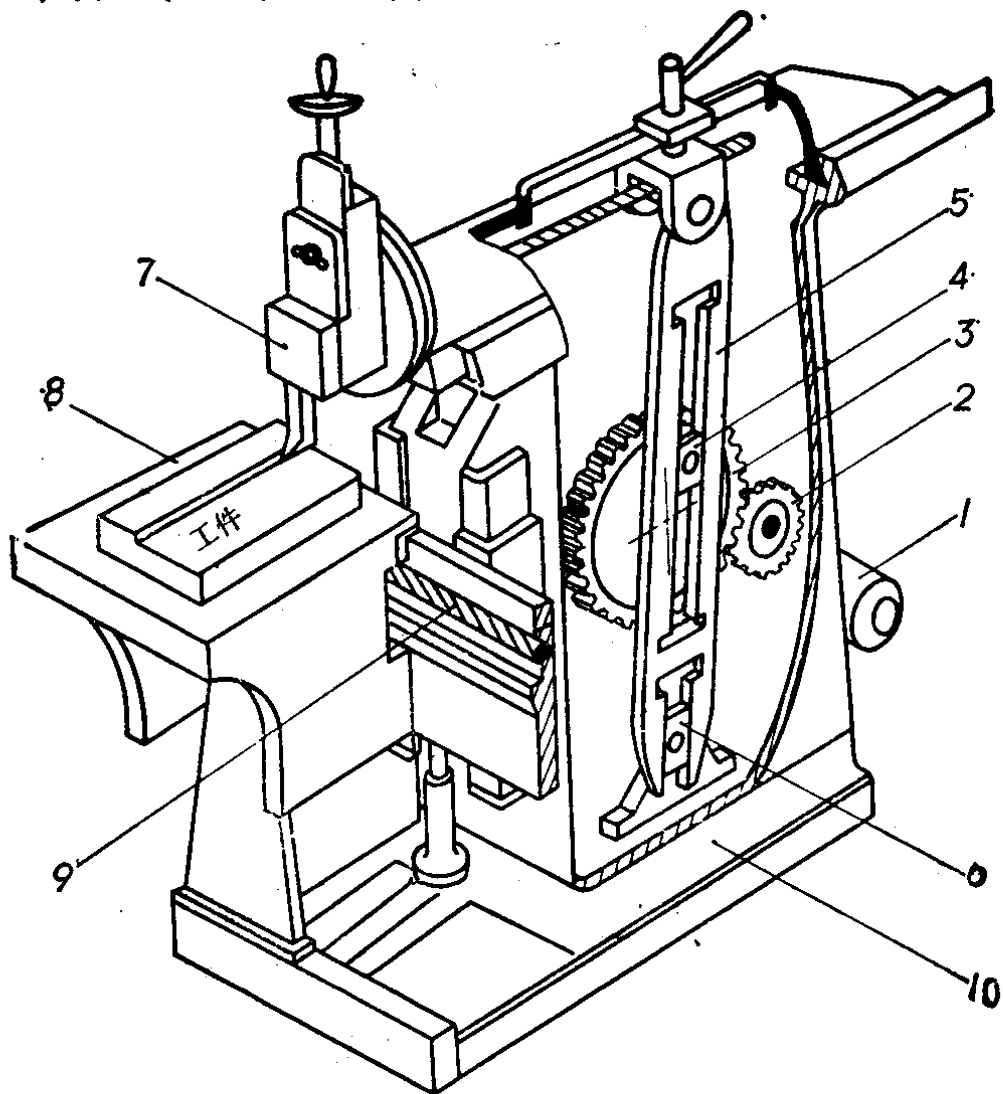


图 0-2

时,转子便能作回转运动,使电能转换为机械能。从以上三个例子可以看出,这些机器的构造、性能、用途等虽然不同,但从其力学特性和在生产中的地位来看,它们仍保持着下列共同的特征。即:

1) 它们都是由各种材料做成的制造单元(通常称为零件)经装配而成的组合体;

2) 它们分别通过刚性组合形成各个运动单元。各单元之间具有确定的相对运动。即当其中一个或一个以上单元的运动一定时,该组合体就能实现预期的机械运动;

3) 在生产过程中,它们能代替或减轻人类的劳动,来完成有用的机械功(如刨床的切削工作)或转换机械能(如内燃机、电动机分别将热能和电能转换成机械能)。

因此,机器是一种能实现预期的机械运动的系统,并可用来完成有用的机械功或转换机械能。凡利用机械能来完成有用功的机器称为工作机,如各种机床、起重机、轧钢机、纺织机、搅拌机、发电机、压缩机等。凡将其他形式的能量转换为机械能的机器称为原动机,如内燃机、蒸汽机、电动机等。互相配合着的工作机和原动机,有时再加上独立的传动系统(如齿轮减速箱等),则称为机组。

机器中的各运动单元称为构件。构件可以是单一的零件,也可以是由几个零件组成的刚性结构。所以,构件和零件是两个不同的概念,构件是运动的单元,而零件是制造的单元。在本课程中,我们将构件作为研究的基本单元。

凡本身固定不动的构件,或相对地球运动但固结于给定坐标参考系统并视为固定不动的构件统称为机架。前者如各种固定在地基上的机座;后者如飞机的机体和车辆的车架。由于机架支持各个作相对运动的构件,故研究它们的运动时,通常以机架为基准,即假定它是静止的。

在除机架外的构件中,驱动力(或力矩)所作用的构件称为原

动构件或主动构件，而其余随着原动构件的运动而运动的构件称为从动构件。也有将输入运动或动力的构件称为输入构件，而将输出运动或动力的构件称为输出构件。在一般情况下，原动构件即输入构件，而从动构件中能够实现预期运动的构件即为输出构件。在本课程中，常将各构件专门名称中的“构件”简称为“件”，如原动件、从动件等。

机器的概念已如上述，但仔细分析有关图例可以发现，一般机器还不是能够实现预期运动的最基本的组合体。在图 0-1 所示的内燃机中，活塞、连杆、曲轴和气缸体组合起来，可将活塞的往复移动变成曲轴的连续转动；凸轮、顶杆和气缸体的另一组合，可将凸轮的连续转动变成顶杆的按另一种预期运动的往复移动；而三个齿轮与气缸体组合在一起后，又可将转动变快或变慢，甚至改变转向。这些具有各自运动特点且均含有一个机架(这里是气缸体)的组合体才是基本的。人们将能够实现预期的机械运动的各构件(包括机架)的基本组合体称为机构。因此，机器应是由各种机构所构成的系统。多数机器都包含若干个不同的机构，上述内燃机就包含了曲柄滑块机构、凸轮机构和齿轮机构等三个不同的机构。最简单的机器只含有一个最简单的机构，如电动机、鼓风机等只含有一个双杆回转机构。

由于机器最终承担了“能代替或减轻人类的劳动来完成有用的机械功或转换机械能”的任务，故一般认为机器的研究重点是功能问题；而机构的研究重点应在结构、运动和力的作用等方面。两者本质上是相同的，只是研究的着重点不同而已。为了简化叙述，有时我们用“机械”一词作为机构和机器的总称。

随着近代科学技术的发展，机构和机器的概念也有相应的变化。如组成“机构”的构件在有些情况下已不能简单地看成刚体；有时候气体和液体也参与了实现预期的机械运动。对于前者含有

弹性构件的机构学,已成为本学科的研究内容之一;而后者特称之为气动机械和液压机械,另有专门课程予以讨论。与此同时,人类不仅对力学有了深刻的认识,而且在数学、电磁学等方面也有了巨大的成就。20世纪以来,人类应用各方面的知识不断创造出各种新型的机器。在某些方面,机器不仅可以代替人的体力劳动,而且还可以代替人的脑力劳动。例如电子计算机的出现和完善,在数学运算、工程管理、产品设计、生产过程的控制等方面都大大地减轻了人的脑力劳动。因此,“机器”的概念实际上已有所扩大,它包含了使其内部各机构正常动作的控制系统和信息处理、传递系统等,是一种能变换和传递能量、物料与信息的、能执行机械运动的综合系统。这些是机构所不具备的。目前本课程所述及的仅囿于力学范畴。至于“机组”的概念,在有些情况下也应包括独立的电子计算机控制系统和其他各种系统。图0-3便是一套由铰接臂机器人1(手端夹持器未装上)、电子计算机控制器2、液压装置3和电力装置4所组成的机组。

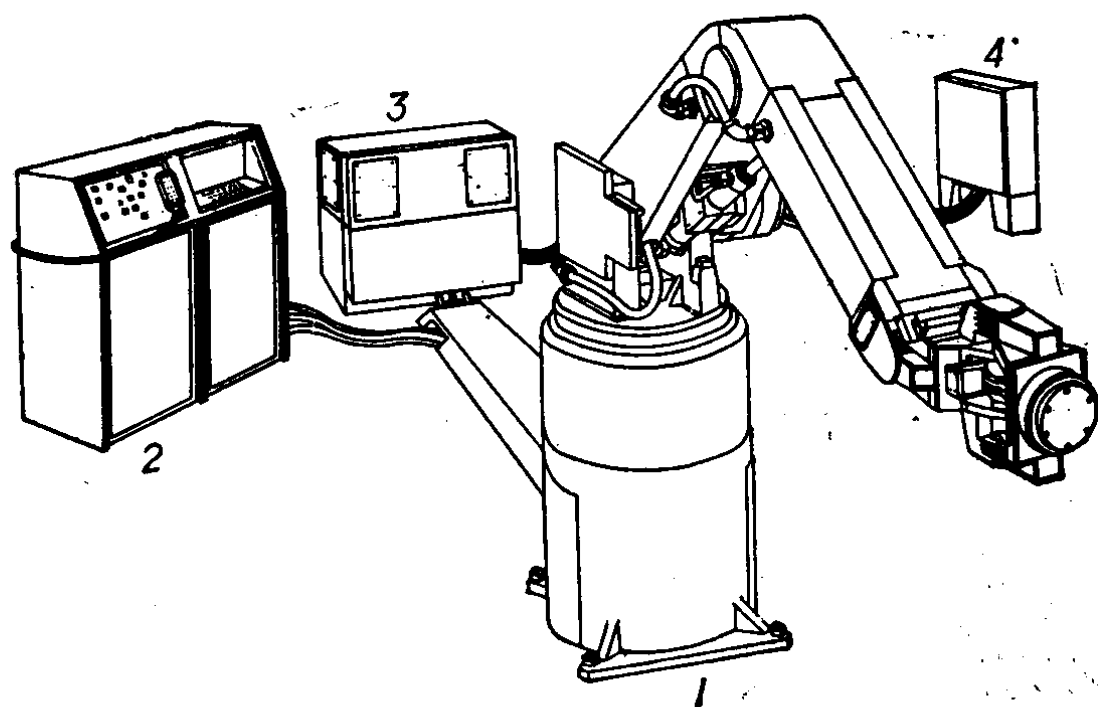


图 0-3

§ 0-2 机械原理课程的内容及在教学中的地位、任务和作用

一、机械原理课程的内容

如前所述,机械原理是一门研究机构和机器的学科。为了科学系统性和便于教学起见,在机械原理课程中,我们将各种机器的共同问题归纳成机构的结构和运动学以及机构和机器的动力学两大部分来讨论。这两部分的具体内容如下:

(1) 机构的结构和运动学 分析机构的结构是为了研究机构运动的可能性和确定性,并进一步讨论机构的组成原理;机构的运动学不考虑引起机构运动的力的作用,而从几何的观点来研究机构各点的轨迹、位移、速度和加速度的求法,以及按已知条件来设计新机构的方法。

(2) 机构和机器的动力学 研究在机械运动过程中作用在各构件上的力的求法和确定机械效率的方法;并研究在已知力作用下机械的真实运动规律,以及作用力、运动构件的质量和这些构件的运动之间的关系,即机械的运转和调速问题以及惯性力的平衡问题。

就上述内容的性质而论,机械原理所研究的问题又可归纳为两类:第一类问题是根据已有机构的结构和主要参数来分析该机构或所组成机器的各种特性(结构、运动学和动力学),即机构和机器的分析问题,如机构的结构分析、运动分析、力分析和在已知力作用下机器的真实运动等;第二类问题是根据预期的各种特性来确定新的机构和机器的型式、结构和主要参数,即机构和机器的设计问题,如各种主要机构的运动设计、机构的平衡和机器速度波动的调节等。这里研究的问题只限于就与机构和机器的运动和动力特性有关的机构型式、结构和各部主要参数之间的关系进行综合,

而不研究与机械零件有关的问题,如零件的形状、构造、强度、材料和工艺等。故在机械原理学科中常用“综合”来代替上述的“设计”这一名词,以示区别。综合也就是分析的逆问题。

电子计算机的发展和广泛应用,也为机械原理的研究提供了先进的工具和新的途径(如优化、仿真等),使得机构和机器分析和综合中的一些复杂问题成为实际可行。另一方面,测试技术的进步为机械运动学和动力学的研究创造了有利条件。但目前这些内容大多是机械原理学科中研讨的问题,故在本课程中只能略一提及。

二、机械原理课程在教学中的地位、任务和作用

机械的种类是十分繁多的,因此在高等工业学校中,就相应地设置了各种专业的专门课程来详尽地研究各种特殊的机械。但是当研究任一具体的机械时,不仅需要研究它所具有的特殊问题,而且还要研究所有机械和它们都具有的共同问题。机械原理和机械设计等便是为此目的而开设的技术基础课程。机械原理是以高等数学、普通物理、机械制图及理论力学等课程为基础的,它又为以后学习机械设计和有关专业课程以及掌握新的科学技术成就打好工程技术的理论基础,并能使学生受到某些必要的、严格的基本技能训练。因此,机械原理是机械类各专业的一门很重要的主干技术基础课程。

机械原理与理论力学的关系最为密切,它们都是研究运动和力的问题,可是二者的性质却不相同。理论力学是研究一般的刚体力学的原理;而机械原理则是将理论力学的有关原理应用于实际的机械上,它具有自己的特点。

机械原理与机械设计同样都是研究各种机械的共同问题的技术基础课程,但是它们之间是有所分工的:机械原理研究机械的结构、运动学和动力学问题;而机械设计研究一般机械零件的强度、

刚度、耐磨性、润滑、装配及材料的选择等问题。

如上所述，机器原理与专业课程的不同之处在于机械原理研究各种机械都具有的共同问题，而专业课程则研究某一种机械所具有的特殊问题。因此，对于很多具体问题，它们之间是有所分工的。机械原理课程中很多问题的已知条件都要在专业课程中研究确定。例如关于凸轮设计问题，在机械原理课程中只研究如何按照已知的从动件运动规律来设计凸轮轮廓的方法。至于应用于某一特殊机器上的凸轮机构，其从动件运动规律的选择，一般在研究了该机器所提出来的特殊要求之后才可以进行。这个问题便属于专业课程的研究范围。又如应用在各种机器中的同一机构，其运动分析和力的分析方法是相同的。因此，根据机构某一构件的已知运动规律来求其余构件的运动规律，以及根据作用在机构上的已知外力来求其平衡力和构件连接处的反作用力，便是机械原理课程所要解决的问题。至于某一特殊机器运转速度的大小及其外力（驱动力或生产阻力）的变化规律，则只有考虑到该机器的用途时才可以决定。因此，这类问题便要在专业课程中来研究。

由此可见，本课程的任务是通过课堂教学、习题、课程设计和实验等教学环节，使学生掌握机械原理的基本理论、基本知识和基本技能，并初步具有确定机械运动方案、分析和设计机构和机器的能力。它不仅在各有关课程中起承上启下的作用，而且在培养机械类高级工程技术人才的全局中，具有增强学生对机械技术工作的适应性和提高其开发创新能力的作

§ 0-3 机械原理与发展国民经济的关系

中国共产党十一届三中全会公报强调指出，要“把全党工作的着重点和全国人民的注意力转移到社会主义现代化建设上来”。这是全国人民的心愿。实现四个现代化的重要措施之一，就是要以

现代化的生产斗争手段来武装国民经济的各个部门。为了加快现代化的步伐,就要大力采用先进技术,促进国民经济从落后的、甚至是手工业劳动的基础上,转到先进的、现代化的技术基础上。从技术角度考虑,要达到这一目的,首先必须将大量的繁重体力劳动逐步用机器来代替,在生产中实现机械化和自动化。这样不但能够提高劳动生产率、降低产品成本、改进产品质量以及减少工伤事故,而且还可以大大地减轻工人、农民的劳动强度,使他们有提高文化技术水平的机会,从而逐步消灭脑力劳动和体力劳动之间的差别,进一步促进国民经济的繁荣。

要实现生产的机械化和自动化,就必须创造出各种新的优质机器;同时又要改进现有的机器设备以充分发挥其潜力。目前国内引进了大量的国外先进机械设备,也亟需进一步消化和开发,使我国的设计和生水平能及早地赶上世界先进水平。在完成这些艰巨的任务中,掌握好机械原理的有关内容是重要的技术保证之一。因为机构和机器的结构选择、运动设计和动力设计便是研究创造各种更完善的新机器的方法;同时也只有通过机构和机器的运动分析和动力分析,我们才能掌握现有各种机器的运动和动力性能,从而进一步改进它们。

为了提高劳动生产率,增加机器运转的速率也是一种有效途径,所以现代机器特点之一为高转速。在某些情况下,高转速还能改善产品的质量。但机器运转速率增高以后,由于不平衡惯性力的关系而产生的振动问题也随之而来。因此,必须设法加以平衡。机械的平衡问题正是机械原理所要解决的问题之一。

另一方面,提高机械效率也具有积极的意义,这意味着减少能源消耗,对于贯彻勤俭建国的原则是十分重要的。我国建设事业的规模极其巨大,假定由于合理设计使机器设备的效率提高1%,则其所节省的能量便极为可观。如前所述,机械原理的研究内容