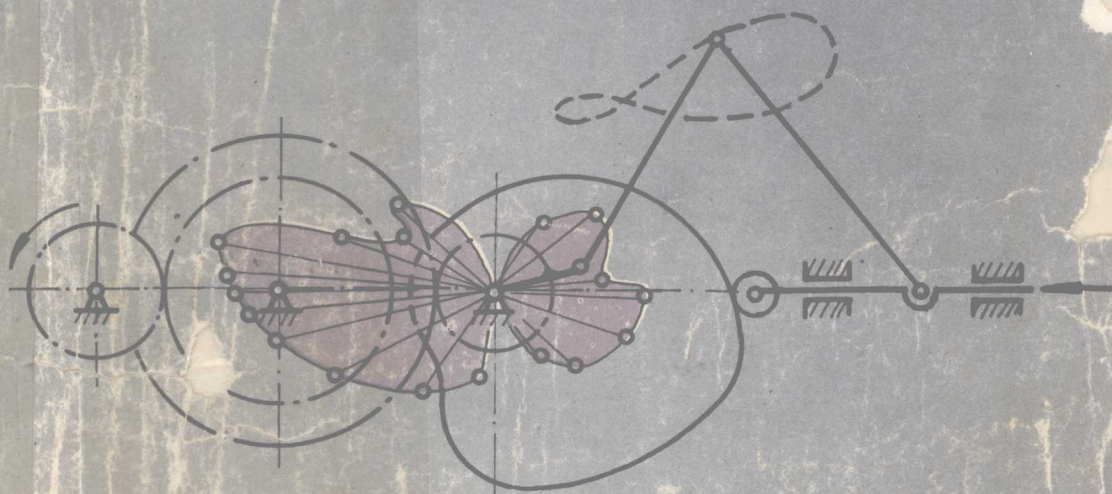


机械原理

曹泗秋 杨 巍 主编



湖北科学技术出版社

前 言

本书以国家教委 87 年颁发的“高等工业学校机械原理课程教学基本要求”及国家教委机械原理课程教学指导组于 93 年 8 月所修正的“基本要求”(报批稿)为依据而编写的。

机械原理课程是机械类各专业中研究机械共性问题的一门主干技术基础课。它在培养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能力和开发创造能力的重要作用。为了实现机械原理课程教学的这一宗旨,本书在内容选材上,在保证机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能等基本内容的前提下,力图加强学生对机械系统运动方案的拟定、分析和设计整体素质与综合能力的培养;在内容的编排顺序与叙述方式上,我们综合了参编学校的教学经验,国内外优秀教材和兄弟院校的教改成果,并注意到当前高等学校改革和发展对本课程教学的要求。编者充分运用图形简捷、形象、直观的特点,并给插图配以图名来表达基本概念和基本方法。书中列举了大量的机构分析与综合示例与例题,并在各章首末辅以提示和小结,书末配置了数量适中的思考题与习题,力求使本书便于教师执教和学生自学。上述编排与叙述方式的尝试,如果能对学生在本课程的预习与复习的自学中有所补益,将使编者感到极大的欣慰。

本书可作为机械类、非机械类本科、专科及成人教育有关专业的教材。书中注有*的内容及附录所列机构优化设计一章,均属选修内容,可以根据教学要求及学时数的多少安排决定取舍。

参加本书编写的有武汉工学院的曹泗秋、诸传忠、杨光、李刚炎、陈晓琴、李友萍;洛阳工学院的杨巍、刘红旗、何晓玲、武汉水利电力大学的王贤虎、恽俐丽、胡基才及湖北工学院的江大风、谭琼。由曹泗秋、杨巍担任主编,江大风、恽俐丽、杨光、刘红旗担任副主编。

本书承我国著名机构学学者、武汉工学院严振英教授精心审阅,提出了许多宝贵意见,编者在此表示衷心感谢。本书在编写与出版的过程中,得到了武汉工学院教务处、教材出版中心、机械工程一系、机械原理及零件教研室的全体同志和洛阳工学院、武汉水利电力大学、湖北工学院有关部门和领导的大力支持,在此一并表示感谢。

由于我们的水平所限,加之时间仓促,漏误及不当之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编 者

1994 年 4 月 10 日于武昌

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 本课程研究的对象和内容	(1)
§ 1-2 本课程的地位与作用	(3)
§ 1-3 本课程的性质与学习方法	(5)
§ 1-4 机械原理学科发展简述	(5)
第二章 平面机构的结构分析	(7)
§ 2-1 机构的组成	(7)
§ 2-2 机构运动简图	(9)
§ 2-3 机构的自由度	(12)
§ 2-4 机构的组成原理及结构分析	(18)
本章小结	(22)
第三章 平面机构的运动分析	(23)
§ 3-1 机构运动分析的目的和方法	(23)
§ 3-2 平面机构运动分析——图解法	(24)
§ 3-3 平面机构运动分析——解析法	(39)
本章小结	(45)
第四章 平面机构的力分析	(46)
§ 4-1 机构分析的目的和方法	(46)
§ 4-2 构件惯性力的确定	(47)
§ 4-3 运动副中的摩擦分析	(50)
§ 4-4 平面机构的动态静力分析——图解法	(55)
§ 4-5 平面机构的动态静力分析——解析法	(61)
§ 4-6 机械的效率	(64)
§ 4-7 机构的自锁	(66)
本章小结	(69)
第五章 平面连杆机构及其设计	(71)
§ 5-1 平面连杆机构的基本类型、结构特点及其应用	(71)
§ 5-3 平面连杆机构的运动特性	(77)
§ 5-4 平面连杆机构的传力特性	(82)
§ 5-5 平面四杆机构的设计	(85)
本章小结	(98)
第六章 凸轮机构及其设计	(99)
§ 6-1 概述	(99)
§ 6-2 从动件的运动规律及其设计	(101)
§ 6-3 凸轮轮廓曲线的设计	(109)
§ 6-4 凸轮机构基本尺寸的确定	(117)

* § 6-5 高速凸轮机构简介	(123)
本章小结	(125)
第七章 齿轮机构及其设计	(126)
§ 7-1 概述	(126)
§ 7-2 渐开线齿廓及其性质	(129)
§ 7-3 齿轮各部分名称及标准直齿圆柱齿轮的尺寸计算	(132)
§ 7-4 一对齿轮的啮合传动	(134)
§ 7-5 渐开线齿廓的切制原理	(141)
§ 7-6 渐开线齿轮传动的滑动系数	(146)
§ 7-7 直齿圆柱齿轮机构的设计计算	(148)
§ 7-8 斜齿圆柱齿轮机构及其设计	(156)
§ 7-9 蜗杆蜗轮机构及其设计	(163)
§ 7-10 圆锥齿轮机构及其设计	(167)
本章小结	(171)
第八章 轮系及其设计	(172)
§ 8-1 轮系及其分类	(172)
§ 8-2 定轴轮系的传动比	(173)
§ 8-3 周转轮系的传动比	(175)
§ 8-4 混合轮系的传动比	(177)
§ 8-5 轮系的功用	(179)
§ 8-6 行星轮系的效率	(181)
§ 8-7 行星轮系设计中的几个基本问题	(183)
* § 8-8 其它形式的行星轮齿传动简介	(186)
本章小结	(189)
第九章 其它常用机构	(190)
§ 9-1 棘轮机构	(190)
§ 9-2 槽轮机构	(194)
* § 9-3 不完全齿轮机构	(198)
* § 9-4 凸轮式间歇运动机构	(199)
§ 9-5 万向联轴节	(200)
本章小结	(201)
第十章 机械的运转及其速度波动的调节	(202)
§ 10-1 作用在机械上的力与机械的运转	(202)
§ 10-2 机械系统的等效动力学模型	(204)
* § 10-3 机械系统在外力作用下的真实运动规律	(209)
§ 10-4 机械系统速度波动的调节	(212)
本章小结	(218)
第十一章 机械的平衡	(220)
§ 11-1 机械平衡的目的、类型及方法	(220)
§ 11-2 刚性转子的平衡	(221)

· § 11-3 挠性转子的动平衡简述	(226)
§ 11-4 平面机构的平衡	(227)
本章小结	(231)
第十二章 机械系统的方案设计	(232)
§ 12-1 机械系统和基本机构	(232)
§ 12-2 机构的变异	(235)
§ 12-3 机构的组合与组合机构简介	(238)
§ 12-4 机械系统的方案设计	(242)
§ 12-5 机器的运动循环图	(249)
本章小结	(251)
附录 机构优化设计基础	(252)
§ 1 概述	(252)
§ 2 优化设计的数学模型	(253)
§ 3 优化设计的基本思想和迭代终止准则	(256)
§ 4 优化设计方法简介	(258)
§ 5 平面连杆机构优化设计实例	(264)
本章小结	(270)
思考题、习题	(271)
主要参考书目	(295)

第一章 绪 论

提示 本章介绍机械原理课程研究的对象、内容和特点及其在机械工程教育、现代机械设计中的地位与作用。

§ 1-1 本课程研究的对象和内容

一、本课程研究的对象

顾名思义，机械原理研究的对象是**机械**，而机械是**机器**和**机构**的总称。

机器的种类繁多，用途不同，构造各异。无论是工农业生产还是人们的衣、食、住、行、乐五行，无不以各式各样的机器展示出人类社会文明与科学技术的发展。内燃机、汽车、机床、洗衣机等均为大家所熟悉的机器。我们面对如此浩瀚的机器之海，研究之说何处入门？

其实，人们称上述诸多之物为“机器”，本身即为对它们的共性之归纳。那么，各种机器有什么共同特征呢？我们不防从科学技术的观点作个初步考察。

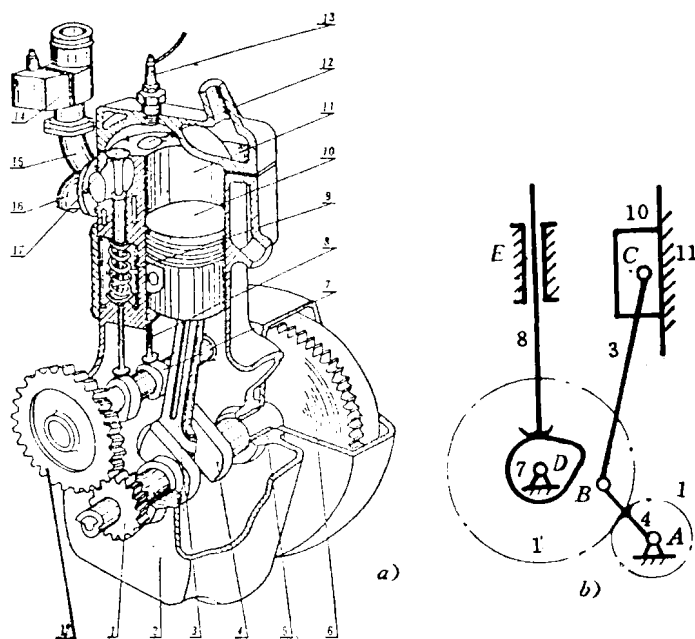


图 1-1 单缸四冲程内燃机

1'-正时齿轮 1-正时齿轮 2-曲轴箱 3-连杆 4-曲轴 5-轴承 6-飞轮 7-凸轮 8-推杆 9-弹簧
10-活塞 11-汽缸 12-进气阀 13-火花塞 14-汽化器 15-进气管 16-排气管 17-排气阀

图 1 1a) 所示为单缸四冲程内燃机。它由气缸 11、活塞 10、连杆 3 及曲轴 4 等组成。当燃气在封闭的气缸中燃烧膨胀时, 驱动活塞向下移动并通过连杆带动曲轴转动。而飞轮的惯性作用驱使曲轴继续转动, 使活塞向上回移。经齿轮 1 和 1'、凸轮 7 推动推杆 8 打开排气阀 17 排出燃烧后的废气。继而再进行吸气、压缩、膨胀、排气, 四个冲程如此不断循环, 实现将燃气的燃烧热能转换成以曲轴转动形式输出机械能的目的。可见, 内燃机是用来转换能量的机器。

上述内燃机中, 由滑块 (活塞)、连杆、曲柄 (曲轴)、机架 (曲轴箱与气缸体) 所组成的部分称为**连杆机构**——将滑块的往复运动变换成曲柄的回转运动。类此, 由两个齿轮和机架组成的**齿轮机构**用来传递两轴间的运动和动力; 而由凸轮、推杆和机架所组成的**凸轮机构**又可将凸轮轴的转动变成推杆的上下直移运动以控制进、排气阀的启闭。一部比较复杂的机器, 可能包含多种类型的若干机构, 而简单的机器, 也可只含一种或一个机构。上述各机构中的滑块、连杆、齿轮、凸轮及机架等称为**构件**, 机构是由构件联接而成的, 构件是机构运动的基本单元。而构件又是由各种材料做成的制造单元 (常称为**零件**) 组成的。

读者可自行研究一下自己所熟悉的其它机器; 考察其组成, 分析其中各部分间的运动关系, 了解其功能, 就不难归纳出机器都具有如下的特征:

1) 它们都是由零件装配而成 (从运动观点看, 也可以说是由两个以上的构件组合而成) 的组合物;

2) 各构件之间具有确定的相对运动, 即当其中一个或几个构件的运动一定时, 其余各构件都将作预期的机械运动;

3) 能用来转换机械能或完成有益的机械功以减轻甚至代替人们的劳动。

科学技术的发展使机器的功能在不断扩展。突出表现在向多功能和具有信息处理能力的“智能”型自动化方向发展。现代机器的概念可以表述为: **机器**是一种通过其内的控制与信息处理装置使其执行预定的机械运动, 用以变换和传递能量、运送物料及处理信息, 从而减轻以至代替人们劳动的实物综合系统。

机器和机构之间在本质上并无区别, 只是研究的着重点不同。前者强调减轻或代替人们劳动的功能作用, 后者则主要以结构、运动和力作用为研究内容, 而且研究者首先关心的是机构的组成结构与运动学问题。因此, 可以认为机构具有机器的前两个特征。

二、本课程研究的内容

本课程所研究的是机械共性问题, 即关于机构学和机械动力学的基本理论、基本知识和基本技能。概括起来主要有以下几个方面:

1) 机构的结构理论 即研究机构运动的确定性条件、机构的组成原理及其分类的基本知识。

2) 机械的运动力学 即从运动几何学观点来研究机构中构件及其上点的位移、速度、加速度与轨迹等运动规律, 探讨按照预定的运动要求设计机器和机构的方法。

3) 机构的动力学 即研究机械运动过程中作用在构件上各未知力的求法、机械效率的确定、在已知力作用下机器的真实运动规律、机械速度波动的调节及惯性力的平衡等。

4) 常用机构的分析与设计 即介绍齿轮、连杆、凸轮及间歇运动机构等常用基本机构的结构特点、运动和动力性能以及它们的设计方法。

5) 机构的选型及机械系统的设计 即探讨根据工程要求、如何选用机构并进行组合, 怎样利用基本机构进行变异与创新, 确定机器的总体方案、设计出切合实际需要的机械系统。

上述问题,就其性质而论,可分为两大类:: **机构分析与机构设计**。前者为对给定的机构进行结构、运动和动力性能分析。后者则是机构分析的逆向问题,即根据预定的运动或动力要求,选择适当类型的机构或设计出新结构形式的机构,并确定其与运动有关的尺寸即**运动学尺寸**。进行机构设计时并不涉及零件的具体结构、外形尺寸、截面形状及强度与制造工艺等问题。可见,机构设计有别于机械零件设计,故本学科常称机构设计为**机构综合**。

§ 1-2 本课程的地位与作用

一、本课程在教学中的地位与作用

在高等学校机械类专业中,均设有研究专门机械的若干专业课程。但在进行专业课程学习之前,应具备有关机械共性问题的基本知识,也就是说都必须具备机械原理的知识。本课程既是将大学物理、理论力学及计算机语言等先导课程的基础理论引导于机械技术的应用课程,又是为后续课程的学习及掌握有关新技术打基础的课程。总之,机械原理是机械类专业的一门主干技术基础课。

二、机械原理学科在机械工程技术中的地位与作用

高级工程技术人员从事机械工程技术工作的基本任务可分为两类:设计制造新机器和合理使用现有机械设备。

任何一部新机器的设计与创造都是一个复杂的系统工程,现代机械设计更是多学科知识的综合应用。但是机械原理的知识当属必备的基础。为了进一步说明机械原理学科在机械技术及培养高级工程技术人员全局中的重要地位与特殊作用,我们不妨先初步了解一下机器设计所包含的一般内容。

首先,设计师应明确设计任务,弄清楚所设计机器或机械产品的使用要求(如机器的功能、作业环境、技术指标及使用对象等),制造条件(即承制单位的设备、工艺、技术力量等),明确制约设计的有关条件、确定设计目的与任务。

确定机器的工作原理,拟定总体方案。机器的工作原理选择是否得当是决定设计成败的关键。

试想,若硬是要将人工涂抹肥皂和双手来回搓动衣物作为洗衣机的工作原理,这种洗衣机即使能够设计与制造出来,其结构之复杂、价格之昂贵是可想而知的。而目前所流行的洗衣机则是通过偏置于缸中波轮的简单旋转运动带着衣物在水中转动并上下翻滚,使衣物在含洗涤剂的水中充分摩擦而达到洗涤的目的。这种将人手复杂的空间运动改变成机械易于实现的旋转运动,是正确制定机器工作原理的一个简单实例。

又如图 1-2 所示公交汽车车门的启闭装置是连杆机构巧妙应用的实例。它是以车门作构件 4 通过两活动铰链 B、C 分别与摇杆 3 及滑块 5 相联接。当压力气源进入车门顶上固定于车箱壁的气缸 1 内推动活塞杆 2 移动时,带动摇杆 3 由 $\overline{AB}$ 转至 $\overline{AB_1}$ 位置,迫使车门上的活动滑块 5 在车箱壁上的滑道 6 内滑移,使得作为连杆的两扇车门 4 分别沿车箱端根作用平面运动而打开。而当气源反向进入气缸驱动活塞时,则使车门逆向运动而关闭。这种用连杆机构带动车门在较小的范围内作平面运动,能保证在乘客十分拥挤的情况下顺利地打开或关闭车门的设计方案,可说是机械原理知识在汽车设计中得以灵活运用的典型范例。

从以上两个简单例子看出,机器(机械)总体方案设计在很大程度上奠定了机器的骨架,

决定了机器的基本性能、工作质量的优劣，对其制造工艺及成本都具有很大影响。

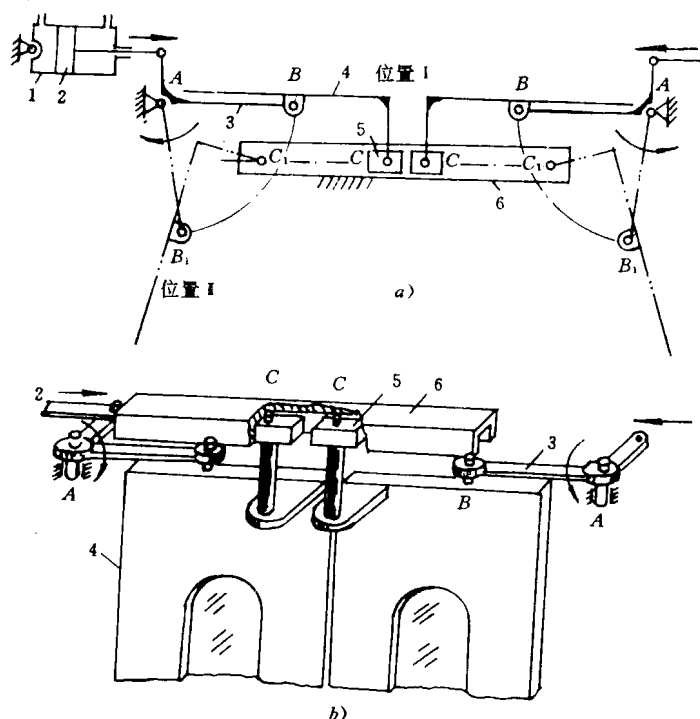


图 1-2 车门启闭机构

1-气缸 2-活塞 3-三角形摆杆 4-连杆（车门 BC） 5-滑块 6-滑道（车箱壁）

完成同一生产任务的机器，可以采用不同的设计方案，而同一设计方案中又有不同的设计参数组合。成功的设计往往基于总体方案的创新与突破及设计参数的正确配置。如果说设计是一种创造性的劳动，则可以认为拟定机器的总体方案是最能体现设计者的创新之意的。构思出一个较好的方案，即便对于基础理论扎实、经验丰富的高级工程技术人员也需要一个艰苦的思维过程。何况设计总是追求尽善尽美，人们不得不提出多种方案进行综合比较后择优而用。这就要求设计者首先应熟悉机械原理知识。

机器总体方案确定之后，为使机器能实现预期的运动，必须按照机构理论和方法正确设计出各机构的运动学尺寸。如上述车门启闭机构中各杆长度，各铰链及滑道位置等。必要时，对所设计的机构还要作运动和动力分析，有不尽人意之处应进一步修改设计。

最后，根据所定机构进行零件几何结构设计、绘制装配图与零个工作图、进行强度校核、编写设计说明书及其他技术资料等。

上述设计内容，彼此有甚为密切的联系，设计实际过程是相互补充，交错进行的。

由上可见，机械设计工作与本课程所研究的机构分析与综合通用方法有着十分密切的联系。至此，本课程对于培养机械设计师的重要性是显而易见的。而对于使用各种机械的工程师来说，要想能合理使用机械，充分发挥其工作潜力，或欲对其进行技术改造与革新，不熟悉各种机构的基本形式及其运动与传力性能、不掌握常用基本机构及简单机械系统设计的通用方法，也将难以发挥其聪明才智与创造力。

§ 1-3 本课程的性质与学习方法

本课程作为技术基础课,它既具有理论基础课程的性质,又兼有技术专业课程的特点。

首先,同理论基础课一样,它具有较强的理论性、严密的逻辑性和完整的系统性。应着重指出,本课程同理论力学有着特别紧密的联系。如有关运动学和动力学基本原理主要引自理论力学,只是两者研究的落脚点不同,理论力学是以一般刚体为研究对象,而本课程则以机构及构件为对象来研究。

其次,本课程所研究的机构,既来源于机械,又服务于机械。也就是说,它与机械工程实际有着十分紧密的关系而较之理论力学更具工程技术特色。

此外,本课程还具有如下的性质和特点:

1) 各章中新名词、新概念和计算式较多,学习时应注意其普遍意义与定义的本质内涵及公式的前提条件、推导思路和结论的应用。

2) 本课程中许多内容的研究都采用了图解法。它具有清晰、简便、直观的特点。机构分析与设计中的许多概念和方法都是通过图形来表达的,学习时应注意对图形的理解与应用。况且,目前工程上用图解法来解释和解决的问题较为普遍,它仍然是机械工程设计的重要方法。

在电子计算机及其计算技术迅速发展的今天,解析法在本学科中占有越来越重要的地位,它具有精度高、速度快、信息量大的特点,是现代机械设计方法发展的方向。然而,解析法中数学模型的建立、理论与概念的应用、计算结果的分析,常常要借助于图解法。

3) 本课程与工程实际联系紧密。教学中常以各种机械为实例提出问题和讨论问题。因此,在学习中应用工程技术的观点,去观察周围的机械设备,理论联系实际地深入思考。同时,还要注意将理论的严密性与工程实际的灵活性、可行性结合起来。

本课程将通过课堂教学、实验、习题和课程设计等教学环节进行。学习过程中,既要注意在课堂教学中搞清基本概念和原理,又要注意在各实践性教学环节中发挥自学的积极效应。

§ 1-4 机械原理学科发展简述

人类创造和应用机械至少有 2000 多年的历史了。公元前 5 世纪阿基米德等人解决了杠杆的平衡问题,公元前 4 世纪人类开始应用齿轮。而在公元一、二世纪时期,我国的机械制作技术就相当成熟了。张衡等人发明创造的浑天仪、候风地动仪和指南车、计里鼓车等可算是人类在机构发明创造与应用方面最早的代表作了。

然而,机器和机构的理论作为一门独立的学科,是在 19 世纪工业革命的技术迅速发展中才奠定了基础的。1875 年德国的列罗 (*F·Reuleaux*) 所著《机械运动学》成为本学科机构运动学理论的奠基代表作。德国的另一位学者布尔梅斯特 (*L·Burmester*) 根据运动几何原理创立了机构分析与综合的图解法。而以俄国学者契贝舍夫 (*П·Л·Чебышев*) 为代表的学派则用函数逼近论等数学方法解决了机构近似综合问题,成为解析法求解机构问题的基础。

本学科一经问世,便一直处在机器工业发展的前沿,特别是本世纪 60 年代以来,国际上对本学科的研究有了飞速的发展。

在机构的结构理论方面,由于机器人、人工假肢以及仿生机械的研究与发展,使机构的结构由平面机构扩展到空间机构;由单自由度单闭环简单机构扩展到多自由度、多闭环的多杆机构;由以刚性材料为构件的机构扩展到有光电、电子、电磁、液、气等参与的广义机构的新领域。

电子计算机及其相应的数学方法发展的新成果,在应用于连杆机构的分析与综合方面显得特别活跃而有成效。许多成熟、大型的通用或专用的计算机程序被普遍用作平面连杆机构的分析与综合、编制连杆曲线。函数逼近法、优化设计方法及CAD的迅速发展和推广,使得机器人的研究在我国80年代以来发展得异常迅速。被国际机构学界誉为机构学之珠峰的空间任意7R机构运动分析的难题,近年来已由我国机构学学者攻克。^①

凸轮机构应用于高速机械时,要求具有良好的动力性能。为此,机构学学者对从动件运动规律的选择与探讨、凸轮系统质量分布、弹性变形、间隙、阻尼以及外界干扰频率、不平衡力的影响、表面润滑等诸多因素进行了广泛深入的研究。在凸轮-从动件系统动力学模型的建立及其运动微分方程式的求解方法、系统动力响应的分析、机构参数的选择与优化设计、凸轮廓线的动力学综合等方面,取得了许多重要的研究成果。使凸轮机构的动力性能更加切合高速、重载、高精度机构的工程实际需要。

高速、重载大功率机械的齿轮传动机构,要求具有磨损轻、噪音小、效率高、寿命长等特性。因此,研究形成共轭齿廓曲面的基本规律、分析其啮合特性、探寻新型啮合传动齿廓曲面仍然是机构学学者感兴趣的课题。前苏联的诺维柯夫齿轮传动便是重载高速齿轮传动机构的典型实例。设计、制造高质量的弧齿锥齿轮和准双曲线齿轮的成套技术是目前齿轮啮合理论中高水平的新成就。应用这些技术于其他类型齿轮的研究也是当前齿轮技术发展的新趋势。

为了适应现代工业发展的需要,机械正朝高速、重载、轻型、精密的方向发展。对机械的精度和可靠性要求也日益提高,按动力性能要求进行机构的分析与综合愈来愈受到重视。在转子动力学中,对转子的振动特性及其影响因素、临界转速的精确计算及挠性转子的动平衡理论与方法的研究都有很大的进展;对于机构动力学的研究、已经由刚性构件组成的机构扩展到考虑运动副间隙、含变质量、变尺度构件的机构的动力学研究,其中平面机构惯性力(矩)平衡问题、机构的运动弹性动力学、机械动力学测量技术等动力学理论研究及实际应用方面正在迅速发展,并取得了不少高水平的研究成果与技术成就。

计算机技术及其计算理论为机构综合及机构优化设计提供了全新的科学手段。现在,人们已经可以在数秒钟之内对复杂机构作出详尽的分析。通过简单的人机对话,或由计算机自动调整参数即能找出符合设计师意愿的机构。可见,计算机的应用使得机构的分析与综合之间并无严格的界线了。

总之,机器和机构理论的成果促进了机械技术的发展;另一方面,近代科学理论和技术的发展又在要求机械原理学科不断创新。机械原理正在发展成为一门含有不少新领域的现代学科。

^① 《第七届机构学学术讨论会论文集》前言,天津大学学报1990年增刊

第二章 平面机构的结构分析

提示 本章讨论组成机构的基本要素，机构运动简图，机构运动的确定性，机构的组成原理和分类。其重点为运动副及其分类，平面机构运动简图的画法，运动链自由度的计算及其具有确定运动而成为机构的条件；难点是虚约束的识别及其在自由度计算时的处理。

§ 2-1 机构的组成

如绪论所述，机构是具有确定相对运动的构件组合系统。那么，何谓构件，构件又是怎样联结而成为机构的呢？

一、构件

构件是由一个或多个零件固联在一起，且当机构运动时，组成构件的各零件之间不产生任何相对运动，而共同组成了一个独立的运动单元。它是组成机构的基本要素。**机械零件**是机器制造的单元。如图 2-1 所示的连杆构件是由杆体 2、连杆头 6、轴套 1、轴瓦 5 及联接螺栓 4 等零件装配固结而成，它们共同组成一个刚性整体而成为连杆机构的一个构件。

二、运动副及其分类

机构的运动是通过构件间的直接接触构成某种联接方式而进行传递的。但这种联接不是固联，它既要使彼此联接的两构件能产生某些相对运动，又要能保证在相对运动中始终保持接触。构件间的这种直接接触并能产生某些相对运动的可动联接称为**运动副**。如图 2-2a) 所示轴承与轴之间用同轴线的内外圆柱面保持接触又能绕其轴线作相对转动而构成所谓**转动副**。图 2-2b) 所示以面接触相联的滑块 2 与导杆 1 之间只能作相对移动，称为**移动副**。转动副和移动副都是通过面接触而构成的，统称为**低副**。而图 2-2c)、d) 所示两齿轮轮齿之间及凸轮与从动件之间分别沿着一条线和一点接触。这种以点或线相接触所形成的运动副称为**高副**。上述两种高副有时也直接称它们为**齿轮副**和**凸轮副**。组成上面所述低副和高副的两构件的相对运动是平面运动，故称它们为**平面运动副**。图 2-2e) 所示两构件作球面相对运动，属于**空间运动副**。

常见平面运动副的表示方法参见表 2-1。

应指出的是，两构件组成高副时，在机构运动简图（参见 § 2-2）中，一般应画出两构件接触处的曲线轮廓。对于凸轮机构，通常习惯画出凸轮和从动件顶端的全部轮廓；齿轮高副可按表 2-1 简化表示。

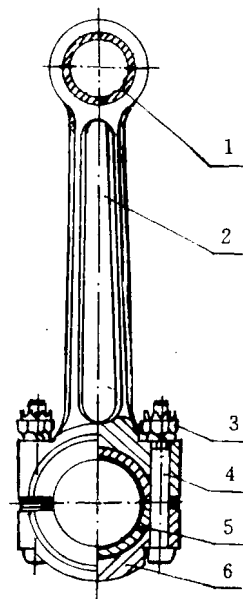


图 2-1 连杆构件

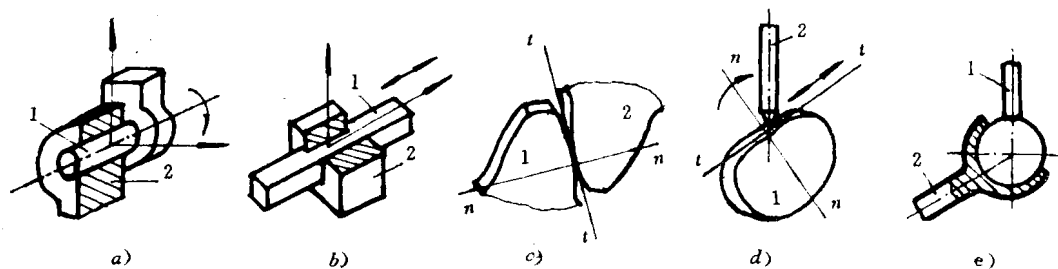


图 2-2 运动副

a) 转动副 b) 移动副 c) 齿轮副 d) 凸轮副 e) 球面副

表 2-1 平面运动副的常用符号

低 副		平 面 高 副
移 动 副	转 动 副	

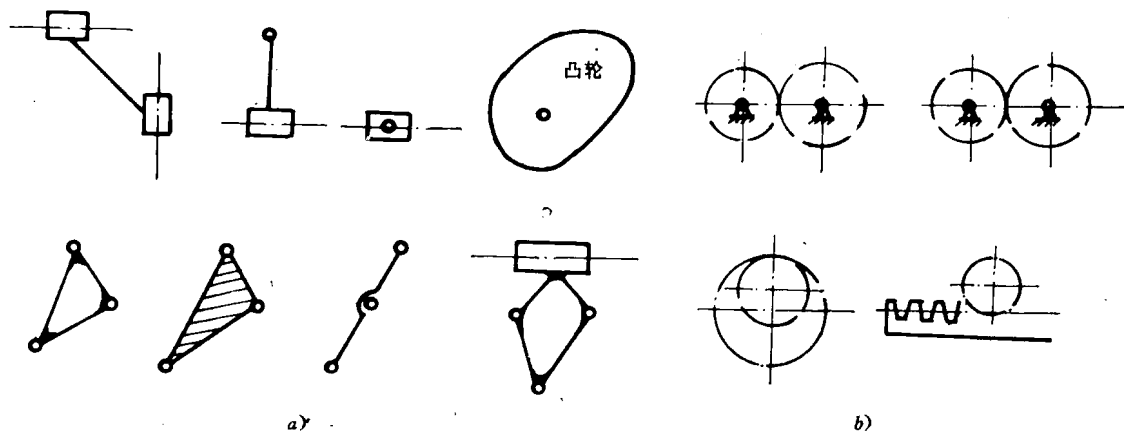


图 2-3 构件的表示方法

构件在机构运动简图(参见 § 2-2)中的表示较简单,一般只需用线条(直线或曲线)将构件上所有运动副联成一体即可,参见图 2-3a),固定构件(机架)上须画上短斜线,如表 2-1 所示;齿轮机构的习惯表示如图 2-3b)。

三、运动链

用运动副联接的构件系统称为**运动链**,如图 2-4 所示。运动链组成封闭环路的为**闭链**,其中又有单闭环链(图 2-4a)与多闭环链(图 2-4b)之分,多闭环链中至少有一个构件有三个或三个以上运动副;运动链组成不封闭环路的为**开链**,如图 2-4c)。

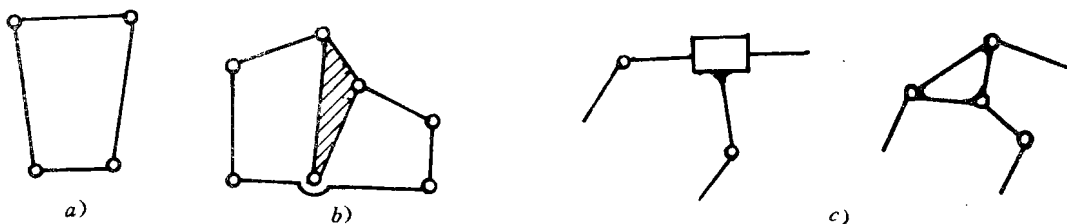


图 2-4 运动链

四、机构

运动链中若固定某一构件(该固定构件称为**机架**),并给定另外一个或数个构件以确定的独立运动,使其余构件(统称为**从动件**)的运动随之确定,这种运动链便成了**机构**。给定运动规律的构件称为**原动件**(常用箭头表示其运动方向)。实际机器中的机构,其原动件常由动力机或其它机构驱动并伴有力(或力矩)输入,这种原动件称为机构的**主动件**。而将预期的运动和动力输出的或直接执行工作任务的从动件称为**输出件**(或**执行件**)。从动件的运动规律取决于原动件的运动规律和机构的结构。

开链和闭链都可以用来构造机构。但在构件数目相同情况下,由闭链形成的机构较之由开链形成的机构,只需较少数目的原动件便可使机构各构件获得确定的相对运动。因此,机械中,广泛利用闭链来构造机构。

按照构件间的相对运动为平面运动或空间运动,又可将机构分为**平面机构**和**空间机构**两类。其中平面机构得到特别广泛的应用。

§ 2-2 机构运动简图

一、机构运动简图及其作用

机器通常由多个机构组成。因此,无论是设计新机器还是对现有机器进行运动和力的分析,都要用一种简明直观的机构图来表明其结构及相对运动特征,以作为机构设计与分析的基本工具(如绪论中图 1-1b)所示的简图,即表明了内燃机机构的结构及各构件的相对运动关系,进而展示出了内燃机的传动原理)。这种用简单线条和规定的符号表示组成机构的构件和运动副,并按比例表示各运动副相对位置的简单图形,称为**机构运动简图**。

为能以最简单形式而又正确地表达出实际机构的结构特征与运动特性,绘简图时应撇开那些并不影响机构运动的几何结构要素(如构件的几何形状、断面尺寸、组成构件的零件数目及运动副的具体结构等),而只表示出机构的组成要素及影响机构运动的特征尺寸等内容,如构件数目、运动副的数目、类型及其位置等。

二、平面机构运动简图的绘制

根据实际机构绘制机构运动简图可按下述步骤进行:

1. 了解机构运动的基本情况,分析构件间的运动性质

现场了解机构或机构所属机器的功用、运动要求等有关情况，将有助于机构运动简图的绘制。观察机构的运动情况，认清机架、原动件和输出构件；并按运动传递顺序分清有几个活动构件，联接各构件的运动副类型及数目。对于运动副内部结构比较隐蔽、两构件间相对运动不明显的地方，要特别仔细地加以考查，并从具体几何结构和相对运动两方面综合分析才能正确判别运动副类型。

2. 合理选择投影面及原动件的静态位置

投影面的选择，以简单、清楚、正确表示机构的结构和运动情况为原则。对于平面机构，通常以机构的运动平面作绘图投影面。复杂的机构或因某种需要也可用几个不同角度的视图表示。绘图时，其原动件应静止于适当或要求的位置以便使各构件尽可能明显地展现出来。

3. 选择恰当的比例尺

在测得各运动副间的相对位置尺寸（即运动学尺寸）后，应结合图纸大小和对运动简图精确度的要求选择恰当的长度比例尺 μ_l

$$\mu_l = \frac{\text{实际长度 (m)}}{\text{图示长度 (mm)}}$$

有时，如在设计新机器之初进行方案比较时，只需表明机构的运动原理，而不直接用机构图形作运动分析与力分析，各构件的运动学尺寸则可不按比例画出，这样的图形称为机构简图，习惯称机构示意图。常用机构的示意图代表符号参看表2-2。

表2-2 常用机构示意图符号（摘自 GB4460-84）

名 称	符 号	名 称	符 号
在支架上的电机		齿轮齿条传动	
带传动		圆锥齿轮传动	
链传动		蜗轮与圆柱蜗杆传动	
外啮合圆柱齿轮传动		凸轮传动	
内啮合圆柱齿轮传动		棘轮机构	

4. 用规定或习惯用的符号绘制简图

先画出运动副符号，然后以直线或适当的曲线相联。

5. 检查核对所绘简图是否正确

检查时，一是检查影响机构运动的有关要素是否与原机构相符；二是计算机构的自由度（参见 § 2-3），其结果与原机构的原动件数目应相等。

下面举例说明机构运动简图的具体画法。

例2-1 试绘制图2-5a) 所示某冲床主传动机构的运动简图。

解 1) 了解和分析该

冲床的运动情况：冲床工作时，电机的运动通过带传动（图中未画出）带动偏心轮1绕 O_1 轴转动，再经构件2、3、4带动冲头5沿铅垂导轨槽作往复移动而达到冲压工件之目的。其主传动机构是由机架6和活动构件1、2、3、4、5组成，偏心轮1是原动件，冲头5是输出构件。除构件5、6之间在E处组成一个移动副外，其它各相邻构件之间分别在 O_1 、A、B、C、D、 O_2 各处组成转动副，如图2-5b) 所示。

2) 该机构为平面机构，以机构的运动平面作为投影面，将机构转至适当位置，以免代表构件的线条重叠或交叉使传动关系表达不明朗。

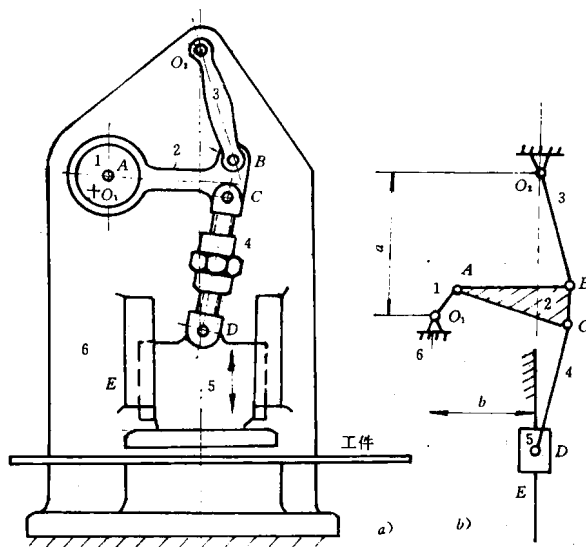


图2-5

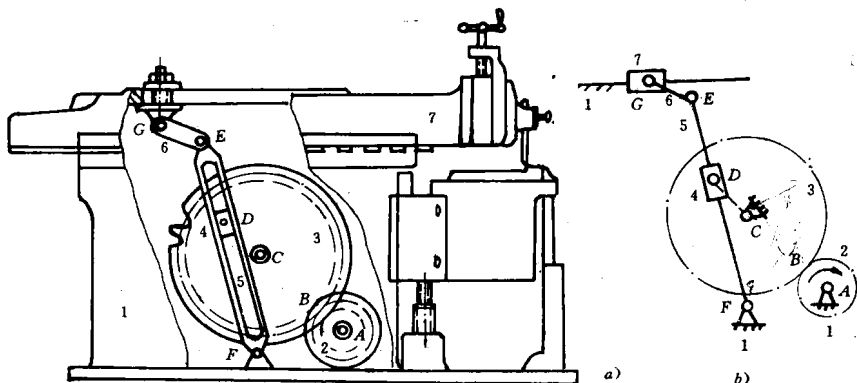


图2-6

3) 测出有关的运动学尺寸： l_{O_1A} 、 l_{AB} 、 l_{CA} 、 l_{O_2B} 、 l_{CD} 、 l_a 、 l_b 等，并结合图纸大小，选择适当的比例尺 μ_1 ，计算

出各作图尺寸 O_1A 、 AB 、 BC 等。

4) 用规定的符号画出其机构运动简图如图2-5b) 所示。

5) 核算该机构的自由度 (计算方法参见 § 2-3), 检查测绘的正确性。

例2-2 试绘制图2-6a) 所示牛头刨床主传动机构的运动简图。

解 了解和分析该机床的工作情况知: 电机的运动和动力是经带传动 (图中未画出) 使齿轮2绕轴A回转, 再经齿轮3、滑块4、导杆5、连杆6带动装有刨刀的滑枕7沿床身1的导轨槽作往复直线运动, 从而完成刨削工作的。显然, 床身1为机架在A、C、F处分别与活动构件2、3、5构成转动副, 与7构成移动副; 构件5、6、7之间分别在E、G处形成转动副; 滑块4则与3、5、在D处分别构成转动副与移动副。齿轮3、导杆5皆为三副构件, 机架上有A、C、F、G四个运动副, 其余构件均为二副构件。最后按比例以运动平面为投影面作出机构运动简图, 如图2-6b) 所示。

§ 2-3 机构的自由度

一、构件的自由度

由理论力学可知, 如图2-7所示的两构件 (构件2与固定坐标 oxy 固联), 构件1相对于构件2有6个独立的相对运动 (沿 x 、 y 、 z 轴的3个移动和绕 x 、 y 、 z 轴的3个转动)。构件的这种独立运动数目称之为构件的自由度。所以作空间运动的自由构件具有6个自由度。当两构件以某种方式相联接而构成运动副时, 则两构件间的相对运动无疑要受到一些限制, 这种限制称为运动副的约束。构件自由度减少的数目就等于该运动副所引入的约束数目。

由于两构件构成运动副后, 必须保证能产生一定的相对运动, 故运动副最多只能引入5个约束。按照引入的约束数多少将运动副分为五级, 即把引入一个约束的运动副称为Ⅰ级副; 引入的两个约束的运动副称为Ⅱ级副, 依次类推, 参见表2-3。

作平面运动的自由构件只有三个自由度 (因沿垂直于运动平面的轴线方向的移动和绕运动平面内两轴的转动均被约束), 当它与其它构件组成运动副后, 至少又要引入一个约束, 但最多只能引入两个约束。故平面高副引入一个约束, 平面低副引入两个约束。

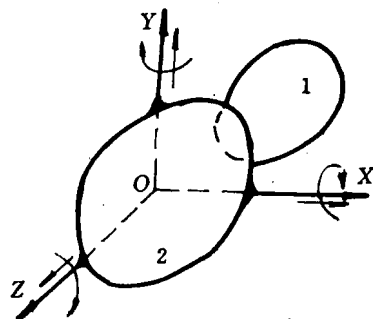


图2-7 构件的自由度

二、运动链的自由度

运动链相对于机架的独立运动参变量的数目就是运动链的自由度。常用符号 F 表示。

对于平面运动链各构件均作平面运动, 其自由度 F 的计算公式可这样来建立, 先假定运动链中的各活动构件皆是独立自由的, 即互不相关, 则由 n 个活动构件组成的运动链共有 $3n$ 个自由度。事实上, 构件间彼此是以运动副相联的, 同时引入了相应数目的约束, 相对于机架的独立运动参变量数目即自由度随之减少。若该平面运动链有 P_L 个低副和 P_H 个高副, 则它们引入的总约束数为 $(2P_L + P_H)$, 于是可得平面运动链自由度的计算公式为

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (2-1)$$