

机械原理

上册

上海交通大学机械原理及零件教研组

一九六四年八月

上册目录

緒論

- § 0—1 机械原理的研究对象····· 1
- § 0—2 机械原理课程所研究的内容及其在教学
计划中的地位····· 3
- § 0—3 机械原理在发展国民经济中的作用····· 5
- § 0—4 机械原理发展简史····· 6

第一章 机构的结构分析

- § 1—1 研究机构结构的目的····· 9
- § 1—2 运动付及其分类····· 10
- § 1—3 运动链与机构、机构的运动简图····· 16
- § 1—4 平面机构的活动度，机构具有确定运动
的条件····· 18
- § 1—5 计算平面机构活动度时应注意的事项····· 21
- § 1—6 高付低代法····· 26
- § 1—7 平面机构的组成原理····· 29
- § 1—8 空间机构的基本知识····· 35

第二章 平面机构的运动分析

- § 2—1 机构运动分析的目的和方法····· 39
- § 2—2 图解法求平面机构位置图及其运动构件
上各点的轨迹····· 40
- § 2—3 速度瞬心及其在机构速度分析上的应用····· 43

- § 2—4 相对运动图解法求机构的速度和加速度……48
- § 2—5 解析法求简单机构的速度和加速度……67
- § 2—6 运动线图。图解微分法和图解积分法……70

第三章 平面机构的动态静力分析

- § 3—1 作用在机械上的力……77
- § 3—2 机构动态静力分析的目的和方法……78
- § 3—3 构件惯性力的确定……79
- § 3—4 质量代换法……81
- § 3—5 运动链的静定条件……87
- § 3—6 平衡力的概念和起始构件力分析……89
- § 3—7 机构的动态静力计算……91
- § 3—8 茹可夫斯基杠杆法……97

第四章 运动付摩擦和机械效率

- § 4—1 概述 …… 102
- § 4—2 移动付中的摩擦 …… 103
- § 4—3 螺旋付中的摩擦 …… 109
- § 4—4 转动付中的摩擦 …… 111
- § 4—5 高付中的摩擦 …… 122
- § 4—6 机械效率与自锁条件 …… 124

第五章 平面连杆机构及其设计

- § 5—1 连杆机构的应用及其设计的基本问题 …… 134
- § 5—2 铰链四杆机构的曲柄存在条件及其基本
型式 …… 138
- § 5—3 铰链四杆机构的演化 …… 147

§ 5—4	四杆机构设计概述	153
§ 5—5	平面连杆机构近似综合概述	162

第六章 凸輪机构及其設計

§ 6—1	凸輪机构的应用和分类	168
§ 6—2	从动杆的常用运动規律	173
§ 6—3	压力角及其许用值	179
§ 6—4	盘形凸輪基圓半径的确定	183
§ 6—5	作图法求凸輪的廓线	188
§ 6—6	解析法求平面凸輪的廓线	195
§ 6—7	圓弧凸輪机构	198
§ 6—8	圓柱凸輪机构概述	203

緒 論

§ 0—1 机械原理的研究对象

机械原理研究的对象是机械，而机械这一名词在本课中是作为机器和机构的总称的。因此，在研究本课程的具体内容之前，有必要先简单介绍一下机器和机构的概念。

图 0—1 所示的内燃机以及大家都很熟悉的蒸汽机、电动机、起重机等，均是机器。机器的种类极多，其构造、用途和性能等也各不相同，但它们却具有三个共同的特征，即：1)是刚强物体* 的人为组合系统；2)各组成部分间具有确定的相对运动；3)在生产过程中能完成有用的机械功或变换机械能。因此，同时具备上述三个特征的便可以称为机器。

机器可以按照不同的观点来分类。按照机器的上述第三个特征，可将其分为原动机（又称发动机）、

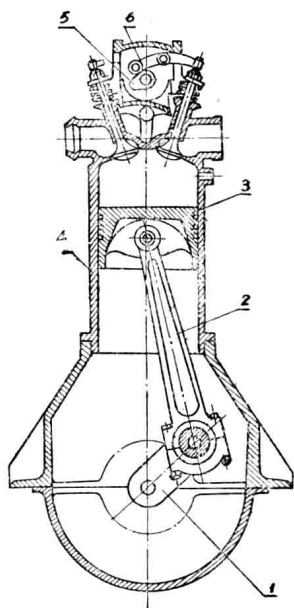


图 0—1

* 所谓物体的刚强与否是相对于负荷而言的。例如皮带、绳索等相对于拉伸，液体、气体等相对于压缩都是刚强的。

变能机和工作机三类。原动机是一种把其它形态的能变换为机械能的机器，如内燃机、蒸汽机、电动机、水轮机等；变能机是一种把机械能变换为其它形态的能的机器，如发电机、压气机等；工作机是一种把机械能用来完成有用功的机器（即改变被加工物体的性质、状态、形状或位置的机器），如轧钢机、纺织机、印刷机、磨粉机、金属切削机床、起重机等。

原动机和工作机（或变能机）必须用传动装置或直接组合起来，才能完成有用的工作过程。发动机、传动装置和工作机（或变能机）三者的组合称为机组。机组的这个定义是伟大的马克思在资本论中写下的，到今天仍然适用。不过由于技术的发展，传动装置常常变成了工作机的一部分，因此，某些现代机组可以视为由原动机和工作机（或变能机）两部分所组成。

在机器的三个特征中，仅具备前两个特征者称为机构，因此，机构可以定义为一种具有确定相对运动的刚强物体的人为组合系统。如钟表、计算装置、大多数的机械测量仪表等都属于机构。

由上所述机器和机构的定义可知，从产生一定相对运动来看，机器与机构是没有区别的。但从它们的功用来看，则又有区别。其区别在于：机构用来传递或变换运动，而机器用来完成有用的机械功或变换机械能。因此，在不考虑机器的功用的情况下，我们可以把机器当作机构或复合机构来看待。一般说来，机器必包含着一个或数个机构。例如图 0—1 所示的内燃机，就包含着由曲柄 1、连杆 2、活塞 3 和汽缸 4 所组成的曲柄滑块机构，由凸轮 5、从动杆 6 和汽缸 4 所组成的凸轮机构，以及图中未表示出来的用以联接曲柄 1 和凸轮 5 的齿轮机构等。

机器或机构中相互间可作相对运动的刚强物体，称为构件。一个构件可能就是一个零件（如图 0—1 所示内燃机的曲柄轴

1)，也可能是由几个零件刚性固结而成(如图0—1所示内燃机的连杆2，它是由连杆体、连杆头以及螺栓、螺母等零件刚性固结而成)。构件与零件的区别在于：构件是运动的单元，零件是制造的单元。在机械原理中，研究时所用到的都是构件。

机构或机器中固定不动的构件称为机架。应该注意的是，所谓固定不动是相对的，既可以固定于地球(如各种固定式机器)而不动，也可以固定于机体上(如飞机发动机和汽车发动机)而对地球作相对运动。

§ 0—2 机械原理课程所研究的内容及其在教学计划中的地位

机械原理是在数学、物理学和理论力学等学科的基础上来研究机械的结构、运动学和动力学的一门学科。这门学科所研究的内容是十分广泛的。但是作为一门课程，显然不可能也没有必要对学科所包含的一切内容都进行详尽的研究，而只需研究这门学科中最为基本的一些内容。为了便于教学，使理论与实际相结合，同时保持这门学科基本内容的系统性、完整性和科学逻辑性，根据现行的教学大纲，我们把本课程研究的内容概括为三部分。

第一部分内容为机械的一般分析方法，其中包括机构结构分析、运动分析、力分析以及机械效率分析的一般方法。结构分析主要研究机构具有确定运动的条件以及如何把构件组成为机构；运动分析主要是撇开作用在机构上的力，仅从几何观点来研究机构各构件上点的轨迹、速度、加速度等的确定方法；力分析及效率分析主要是研究作用在机构上的摩擦力、惯性力、未知外力和约束反作用力等的求法以及机械效率计算的一般方法。

第二部分内容为常用机构（包括连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系等）的分析和设计。在已经掌握了机械的一般分析方法的基础上，我们将有可能对实际工作中常常遇到的典型机构进行比较全面的和比较深入的讨论，从而了解它们的工作原理和性能，并掌握其运动设计的方法。

第三部分内容为机械的运转及其调整，它主要是研究机械在力作用下的运动、速度波动的调节以及构件质量的合理选择与分配。这些内容是机械动力学的重要课题，也是分析和设计机械所应具备的基础知识。

机械原理所研究的内容，就其性质而论，又可归之为两类问题，即机构分析与机构综合。所谓机构分析，是指对现有机械进行结构、运动学和动力学问题的分析，从而了解机械有关这方面的性质，以便于运用、管理以致于改进现有机械；所谓机构综合，则是指按照给定的条件来设计实现预定运动的机械。

由本课程的上述教学内容可知，机械原理是高等工业学校中的一门重要的基础技术课程，也是机械类学生在学完数学、物理学、理论力学等基础课程后，进而研究机器的第一门课程。这门课程的任务在于：为学生学习机械零件和专业课程以及掌握新的科学技术成就打好机械工程技术方面的理论基础，并使 学生得到某些必要的和严格的基本训练。在教学计划中，本课程不仅与先修课程和后续课程有一定的联系，而且也有着明确的分工：机械原理与理论力学的关系最为密切，后者主要是研究一般的刚体力学原理，而前者则主要是将理论力学中有关的原理应用于实际的机械上；机械原理与机械零件同样都是研究各种机械共性问题的基础技术课，但前者是研究机械的组成原理、运动分析、动力分析以及机构设计，而后者则研究零件的强度、刚度、磨损等问题以及合理选择零件的结构、材料、形

状、尺寸等；至于机械原理和专业课的不同，则主要在于前者是研究各种机械的共性问题，后者是研究某一机械所具有的特殊问题。

综上所述可见，机械原理不仅在教学计划中有承上启下的作用，而且在工程师的培养上还有自己独特的任务。

§ 0—3 机械原理在发展国民经济中的作用

机械是人类生产劳动的工具，它可以提高劳动生产率和产品的质量。在社会主义制度下，机械还能增进人民的生活福利，使劳动者从繁重的体力劳动中解放出来。毛泽东同志在1955年曾指出*：中国社会只有在社会经济制度方面彻底地完成社会主义改造，又在技术方面，在一切能够使用机器操作的部门和地方，通通使用机器操作，才能使社会经济面貌全部改观”。毛主席的这一指示告诉我们，广泛地生产与使用机械，对发展我国的国民经济和推进我国的社会主义建设事业，有着重大的作用。

在中国共产党的正确领导下，经过十五年来的努力，我国的机械工业已经基本上形成了一个独立和完整的体系，并已在支援农业和对其它工业部门进行技术改造的工作中发挥了愈来愈大的作用。为了进一步贯彻“鼓足干劲，力争上游，多、快、好、省地建设社会主义”的总路线和“以农业为基础，以工业为主导”的发展国民经济的总方针，今后我们除了应充分发挥现有机械的生产潜力，改进其性能外，还必须继续自力更生、奋发图强，为国民经济各部门不断提供成套的、最完善的、最经济和最耐用的新机械。我们知道，任何机械的改进和制造都是原

* 毛泽东：“关于农业合作化问题”人民出版社1955年版，第33页。

理、设计、工艺等各种知识综合运用结果，所以实现上述任务需要从各个方面来努力。由于机械原理研究了机构分析和机构综合这两方面的许多内容，而通过这些内容的研究又能达到改进现有机械与设计性能更完善、工作更可靠、效率更高、成本更低的新机械的目的，所以由此便可看出，机械原理在发展我国国民经济中是具有重大作用的。

§ 0—4 机械原理发展簡史

恩格斯講过*：“科学的发生与发展从开始起，便是由生产所决定的”。作为科学之一的机械原理，其形成与发展当然也不会例外。

在很古的时代，由于生产和生活的需要，人类便已应用了简单的机械。此后，随着生产的发展，在机械方面又陆续出现了不少創造和发明。但总的看来，直到十八世紀，机械科学也还只是处于萌芽时期，沒有形成独立的系統。十八世紀中叶蒸汽机发明以后，欧洲进入了机器革命时代。这时，由于机器的广泛应用，使当时欧洲的机械工业得到了迅速的发展，結果也就推动了机械科学的形成。十八世紀末和十九世紀初，首先出现了法国和英国的古典机械学派，他們发表了机械运动学和机械分类方面的著作。十九世紀中下叶，随着研究資料和設計資料的积累，以研究机构运动学为主要内容的机构学开始从应用力学中分支出来。当时在这方面作出了重大貢獻的著名科学家有俄国机构原理学派的創始人 П. Л. 契貝歇夫 (Чебышев) 和德国机构原理学派的創始人 F·瑞罗 (Realeaux) 等。П. Л. 契貝歇夫主要研究了机构綜合和机构的結構，F·瑞罗主要研究了机构运动学和按构造特征的分类。十九世紀末叶以后，由于机械的速度和功率不断提高，机械动力学方面的問題显得日益重要，于是各国科学家便大力研究这方面的問題并获得了很大的成就。这期间，俄国科学家 И. А. 維希涅格拉斯基 (Вышнеградский) 研究了自动調节原理，俄国科学

* 恩格斯：“自然辯証法”人民出版社1959年版，第149頁。

家 Н. Е. 茹可夫斯基 (Жуковский) 研究了机构的力分析和机器的运转调速, 德国科学家 F·维欵巴威尔 (Wittenbauer) 研究了机构中力的作用和飞輪設計的方法。当机构运动学和机械动力学发展到一定阶段后, 为了寻求研究机构的系統方法, 許多科学家又开始研究机构的結構理論和按結構分类法。在这方面有重大貢獻的是俄国科学家 Л. В. 阿苏尔 (Ассур)、德国科学家 W. 拉宁 (Lynen), 以及苏联科学家 В. В. 多勃罗沃尔斯基 (Добровольский) 和 И. И. 阿尔托包列夫斯基 (Артоболовский) 等。到廿世紀初, 机械原理已形成为一門包括机构的結構、运动学和动力学的完整的科学。目前, 在机械原理学科的世界领域中, 居于領先地位的是以 И. И. 阿尔托包列夫斯基院士为首的苏联机械原理学派和以 R·貝尔 (Beyer) 教授与 W·梅尔楚卡伯倫 (Meyer zur capellen) 教授为首的德国机械原理学派。

在我国, 早在公元前六世紀(春秋战国时代), 科学技术的先驅者墨翟就在他的著作“墨經”里討論过杠杆的平衡問題和其它一些力学問題, 由此可見我国远在战国时代就有了机械力学的萌芽。根据可靠史料的記載, 我国历代均有过許多有关机械方面的创造和发明。其中如西汉以后的差动起重轆轤, 东汉張衡发明的带有連杆机构的候风地动仪, 三国时魏人馬鈞创造的应用复杂齿輪系的指南車等更为世界聞名。但由于长期的、殘酷的封建統治和百余年来帝国主义的侵略, 使我国科学技术的发展受到了严重的摧殘, 历史上的这些机械科学成就一直未能得到发展。而在帝国主义、封建主义和官僚資本主义統治和压迫下的旧中国, 由于工业十分落后, 机械科学同样也得不到应有的发展。

1949年中华人民共和国成立以后, 机械原理这門科学才和其它科学一样, 在我国得到了蓬勃的发展。1952年高等教育教学改革后, 在高等学校中把机构学課程改成了机械原理。1956年前后, 全国各高等学校开始分工合作, 建設了我国第一批机械原理實驗室。中国科学院和机械工业部相繼成立了机械研究所。历年来陸續出版和发表了有关机械原理方面的教材、著作、譯述和科学論文。1960年, 我国部分高等学校已开始招收了机械原理学科方面的研究生。所有这一切都表明, 我国机械原理科学的队伍

已经开始成长起来。相信在中国共产党的正确领导下,在全国机械原理工作者、生产革新者的共同努力下,我国的机械原理科学,定能在不长的时期内,赶上并超过世界先进水平。

第一章 机构的結構分析

§ 1—1 研究机构結構的目的

绪论中已经指出，机构是一种具有确定相对运动的构件的组合系统。然而，任意联接起来的一些构件，并不能保证有确定的相对运动，或甚至不能产生相对运动。因此，研究机构结构的主要目的之一，就是研究机构具有确定相对运动的条件，并由此建立组成机构所应遵循的规律。

其次，机械原理的基本任务之一是研究机构所具有的各种性质，如速度和加速度的变化规律以及力和功率的传递规律等。然而机构的构造型式极其繁复，而且新的更为完善的机构还在不断地创造出来，要对所有的机构一一进行分析，事实上是不可能的而且也是不恰当的。因此机械原理学者就从事研究，将各种机构按某些共同的性质来分类以便于分析研究，其中按机构的结构特征来分类是合理的方法之一。根据这种分类法，可以建立起机构运动分析和力分析的普遍方法，并且指出构成新机构的途径。这是研究机构结构的另一重要目的。

此外，为了便于研究起见，我们常用简单的线条和符号来绘制机构运动简图以代表真实的机构。这种简图的绘制方法亦将在本章中介绍。

本章将着重讨论机构结构的基本知识、机械具有确定运动的条件以及机构的组成原理，至于机构按结构特征进行分类则仅作简单的介绍。

§ 1-2 运动付及其分类

机构中的各构件是通过互相联接来产生一定的相对运动的。两直接接触构件的活动联接称为运动付。例如轴和轴承的联接(图 1-1(a))、滑块与导路的联接(图 1-1(b))、凸轮与从动杆的联接(图 1-1(c))以及轮齿与轮齿的联接(图 1-1(d))等都是运动付。如果两构件不直接接触或者虽直接接触而不可活动的,亦即不可能作相对运动的,都不是运动付。又,组成

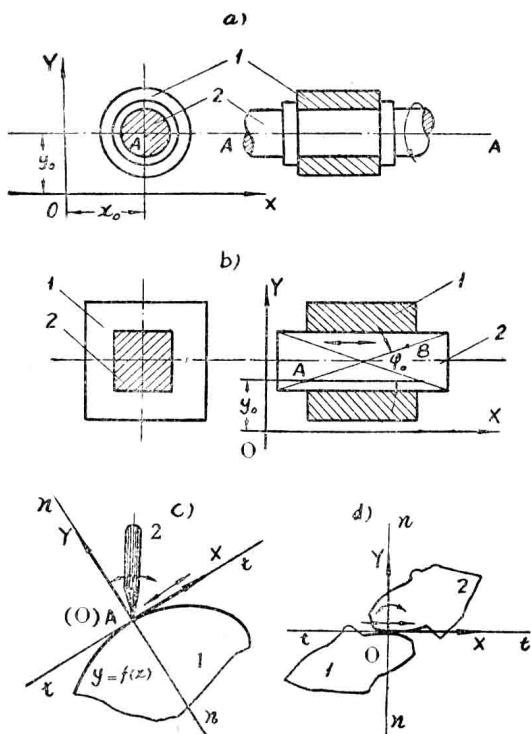


图 1-1

运动付两构件上可能参与接触的点、线或面称为运动付元素。

两构件通过运动付联接后，它们之间的相对运动将受到一定的限制。为了研究这种限制与相对运动的关系，我们来阐明自由度和运动付约束条件这两个概念，并研究它们之间的关系。

如图 1-2 所示，一个作平面平行运动的构件，在决定它

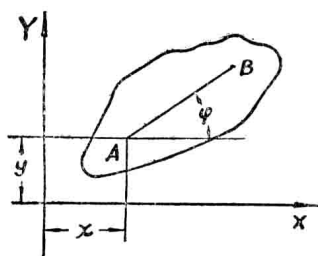


图 1-2

的位置时需要三个独立参变数，即构件上任一点 A 的坐标 x 和 y ，以及过 A 点的任一直线 AB 与 x 轴所夹的角 φ 。每一独立参变数代表着一种独立运动的可能性： x 和 y 各代表构件可沿 x 和 y 轴独立移动，而 φ 代表构件可绕 A 点独立转动。这种独立运动的可能性称为自由度。因该构件有三个可能的独立运动，故有三个自由度。当研究两个互动平面平行运动构件的相对运动自由度时，则可把其中一个构件视为不动，而另一构件相对于这一构件具有三个自由度。

约束条件是指运动付对成付两构件的相对运动所施加的限制。各种不同构造形式的运动付，对成付两构件将提供不同数量的约束条件。

如图 1-1(a) 所示，当构件 2 相对于构件 1 (与座标系 xoy

连成一体)作平面运动时,如果限制构件2上的A点相对于座标轴固定不动,亦即使其座标 $x=x_0$ 和 $y=y_0$,那么由于引入了这两个约束条件,便消除了构件间的两个相对移动自由度,而仅剩下了绕A点相对转动的自由度。实现这种约束条件从而使成付两构件只能绕某轴线相对转动的运动付,称为转动付。因此转动付具有一个自由度,其约束条件为2。

如图1—1(b)所示,当构件2相对构件1(与座标系 xOy 连成一体)作平面运动付,如果限制构件2上任一点A的座标 $y=y_0$ 及过A点所作的任一直线AB与x轴所夹的角 $\varphi=\varphi_0$,那么由于引入了这两个约束条件,便消除了两个相对运动自由度,即绕A点相对转动的自由度和沿y轴相对移动的自由度,而所剩下的仅有一个沿x轴相对移动的自由度。实现这种约束从而使成付两构件只能沿某轴线相对移动的运动付,称为移动付。因此移动付具有一个自由度,其约束条件为2。

再如图1—1(c)所示,当构件2相对构件1(与坐标系 xOy 连成一体)作平面运动时,如果限制构件2上的A点,使其只能沿构件1上某曲线 $y=f(x)$ 运动,那么在引入 $y=f(x)$ 这一约束条件后,由于x和y两个参变数中只有一个是独立的,因而可以认为已消除了两构件沿接触点法线方向相对移动的自由度,所保存下的,只是绕接触点瞬时转动的自由度和沿接触点切线方向的瞬时移动自由度。同理,在图1—1(d)所示的轮齿与轮齿所形成的运动付中,两构件沿接触点法线方向的相对移动自由度也被消除,所保留的仍是绕接触点瞬时转动的自由度和沿接触点切线方向的瞬时移动自由度。

综上所述可知,互作平面平行运动的两自由构件本应具有三个相对运动自由度,但是当用运动付把它们联接起来以后,由于各种不同构造形式的运动付对成付两构件提供了不同数量

的约束条件,而每引入一个约束条件相应地便减少一个自由度,因此,减少的自由度数也就等于这个运动付所提供的约束条件数。这样,设在平行平面运动中成付两构件的相对运动自由度的数目为 H ,运动付所提供的约束条件的数目为 S ,则它们之间应有的关系式为

$$H=3-S$$

现在我们来研究运动付的分类。通常,运动付可按下述几种方法进行分类:

按成付两构件之间的相对运动是平面运动还是空间运动,可以把运动付分为平面运动付和空间运动付两类。上面所讲的几种运动付,由于成付两构件之间的相对运动为平面运动,故都属于平面运动付。图 1—3 所示的运动付称为球面付,其中构件 2 和构件 1 可以绕 O 点相对的作球面运动;图 1—4 所示的运动付称为螺旋付,其中构件 2 和构件 1 可以绕轴线 $x-x$ 相对的作螺旋运动,所以这两种运动付都属于空间运动付。

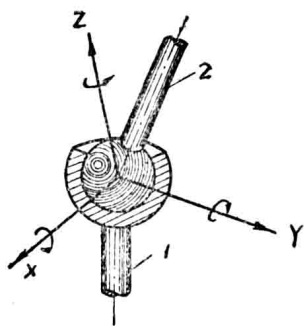


图 1—3

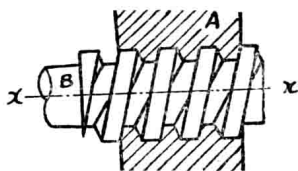


图 1—4

按运动付元素的接触特征可以把运动付分为低付和高付两类。两元素成面接触的运动付称为低付。转动付与移动付属平