



舰用机械基础

吴新跃 郑建华 主编



海军工程大学

PDF

舰用机械基础

吴新跃 郑建华 主编

海军工程大学

二〇〇〇年六月 内部发行

内 容 简 介

本书根据我校三大动力合训的要求,将《机械设计基础》、《工程材料》、《金属工艺学》、《互换性与技术测量》等课程的基本内容及海军装备的相关机械内容有机结合编写而成。全书内容分为常用机构原理、工程材料及机械制造基础、通用机械零件设计三大部分。

第一章至第四章是本书的第一部分,介绍了平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等常用平面机构的原理、运动学和动力学特性及其应用,轮系的传动比计算,另外还简要介绍了回转机械的平衡问题。

第五章和第六章为第二部分,简要介绍了工程材料、金属工艺学、互换性等方面的基础知识。这一部分知识是机械工程技术人员进行机械设计、机械设备管理、故障分析及维修工作所必备的基础。

其后数章为本教程的第三部分,主要介绍最常用的通用零件、舰用新型离合器的特点及设计、维护等。

在本教材的最后一章专门介绍 CAX (CAD/CAE/CAM/CAT) 的应用和发展,特别在海军工程中的应用例子,还简要介绍了国际先进的大型 CAX 软件。

舰用机械基础

吴新跃 郑建华 主编

*

海 军 工 程 大 学 出 版

海军工程大学印刷厂 印刷

*

787×1092 毫米 · 1/16 开本 · 22.125 印张 · 541 千字

2000 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册

校内统一书号:20.207.11 定价:12.70 元

前 言

本书是为海军工程大学三大动力合训教学改革课程“舰用机械基础”编写的教材,此课程将机械原理及机械零件、工程材料、互换性与技术测量、热加工及机械加工等课程的实用知识结合形成一门应用性的专业课。本课程旨在帮助学员在理论力学、材料力学等知识的基础上掌握机械原理及机械零件、机械制造等有关知识,使从事机电管理、维修等工作的技术人员在装备的使用和维护、装备的故障分析等方面获得一定的基础知识、基本方法及技能。掌握机械及常用机构的原理、特性、通用零件的工作原理、失效形式、结构特点及机械的使用管理要求等内容。使学员具有一定分析理解未曾遇到过的机械装置的能力,以满足掌握不断更新的武器装备的需要。

通过本课程的课堂讲授及课下练习,使学员掌握常用机构的类型、特点、工作原理,掌握简单机械的分析方法,通用机械零件的常用材料、热处理方法,公差标注要求,机械零件的特点和工作原理,失效形式及基本的结构强度计算方法;通过本课程的学习,使学员具有正确运用有关机械工程手册、国家有关技术标准、规范的能力;具备能考虑材料、加工、互换性、装拆、维修等诸方面的因素,初步设计常用机械零部件的能力;初步学会装配与调试轴系零件,为机械实践课及将来的工作打下一定的基础。

本书可作为三大动力合训的教材,也可作为其它近机类工程专业的教材,推荐课内安排 86 学时。

本课程的教学大纲由吴新跃副教授、郑建华讲师负责编写,207 教研室全体成员参与制定;经几易其稿,系教学委员会几次讨论并提出了宝贵意见,提交教务部门批准。本书由吴新跃、郑建华提供了绪论、第一至四章、七至十六章的初稿,金工教研室常万顺实验师根据大纲要求提供了第五、六章的初稿,经 97-031 班的试用,吴新跃组织了本书的修订,修订过程中 207 教研室付安林、谢沛霖、邓衍顺、王基、郑建华同志对本书进行了校审,并提出了宝贵意见。教材办王良钢主任对本书给予了大力支持。

限于编者的水平,书中可能有许多不当之处甚至错误,恳请读者批评指正。

编者

2000 年 6 月

目 录

绪论	1
§ 0.1 本课程的主要内容	1
§ 0.2 现代机械的发展趋势	2
第一章 平面机构	5
§ 1.1 平面机构的组成及自由度计算	5
§ 1.2 铰链四杆机构	12
§ 1.3 凸轮机构	26
第二章 齿轮机构	39
§ 2.1 齿轮机构的特点和类型	39
§ 2.2 齿廓啮合基本定律	40
§ 2.3 渐开线齿廓	41
§ 2.4 齿轮各部分名称及渐开线标准齿轮的基本尺寸	42
§ 2.5 渐开线标准齿轮的啮合	44
§ 2.6 渐开线齿轮的切齿原理	46
§ 2.7 根切现象、最小齿数及变位齿轮	49
§ 2.8 平行轴斜齿轮机构	52
§ 2.9 圆锥齿轮机构	56
第三章 轮系	60
§ 3.1 轮系的类型	60
§ 3.2 定轴轮系及其传动比	60
§ 3.3 周转轮系及其传动比	62
§ 3.4 混合轮系及其传动比	64
§ 3.5 轮系的应用	65
§ 3.6 几种特殊的行星传动简介	67
第四章 回转件的平衡	72
§ 4.1 回转件平衡的目的	72
§ 4.2 回转件的平衡计算	72
§ 4.3 回转件的平衡试验	76
第五章 工程材料基础	81
§ 5.1 材料的机械性能	81
§ 5.2 铁碳合金状态图及其应用	85
§ 5.3 钢的热处理常识	89

§ 5.4 黑色金属材料	94
§ 5.5 有色金属及非金属材料	99
第六章 公差与配合和机械零件加工	105
§ 6.1 公差配合基础知识	105
§ 6.2 形状与位置公差	115
§ 6.3 表面粗糙度	121
§ 6.4 机械制造基础知识	123
第七章 机械零件设计概论	131
§ 7.1 机械零件的失效及强度	131
§ 7.2 机械零件的摩擦、磨损与润滑	135
§ 7.3 机械零件的工艺性和标准化	155
第八章 联接	157
§ 8.1 螺纹参数	157
§ 8.2 螺旋副受力分析、效率和自锁	158
§ 8.3 机械制造常用螺纹	160
§ 8.4 螺纹联接的基本类型及螺纹紧固件	162
§ 8.5 螺纹联接的预紧和防松	164
§ 8.6 螺纹联接的强度计算	167
§ 8.7 螺栓的材料和许用应力	170
§ 8.8 提高螺栓联接强度的措施	172
§ 8.9 螺旋传动	174
§ 8.10 键联接、花键联接及销联接	177
第九章 齿轮传动	184
§ 9.1 轮齿的失效形式	184
§ 9.2 齿轮常用材料和热处理	185
§ 9.3 齿轮精度简介	187
§ 9.4 直齿圆柱齿轮传动的作用力及计算载荷	188
§ 9.5 齿面接触强度计算	189
§ 9.6 轮齿弯曲强度计算	192
§ 9.7 斜齿圆柱齿轮传动	195

§ 9.8 直齿圆锥齿轮传动	198	§ 13.6 轴的临界转速的概念	263
§ 9.9 齿轮的构造	199	§ 13.7 轴系零件的公差与配合	263
§ 9.10 齿轮传动的润滑和效率	200	第十四章 联轴器、离合器	269
第十章 蜗杆传动	203	§ 14.1 联轴器、离合器的类型和应用	269
§ 10.1 蜗杆传动的特点和类型	203	§ 14.2 联轴器	269
§ 10.2 蜗杆传动的主要参数和几何尺寸	204	§ 14.3 离合器	275
§ 10.3 蜗杆传动的失效形式、材料和结构	207	§ 14.4 3S 离合器	280
§ 10.4 蜗杆传动的受力分析	208	第十五章 弹簧	304
§ 10.5 蜗杆传动的强度计算	209	§ 15.1 弹簧的功用和类型	304
§ 10.6 蜗杆传动的效率、润滑和热平衡计算	211	§ 15.2 圆柱拉伸、压缩螺旋弹簧的 应力与变形	304
第十一章 滑动轴承	215	§ 15.3 弹簧的制造、材料和许用应力	307
§ 11.1 滑动轴承的结构形式	215	§ 15.4 圆柱拉伸、压缩螺旋弹簧的设计	309
§ 11.2 轴瓦及轴承衬材料	217	§ 15.5 其他弹簧简介	314
§ 11.3 润滑剂和润滑装置	219	第十六章 计算机在机械工程中的应用	318
§ 11.4 非液体摩擦滑动轴承的计算	222	§ 16.1 CAD 技术的发展	318
§ 11.5 动压润滑的形成原理	223	§ 16.2 CAD 技术中的主流造型技术	322
§ 11.6 液体动压润滑的基本方程	224	§ 16.3 CAD 技术的应用基础	327
§ 11.7 液体动压单油楔向心轴承 的设计计算	226	主要参考书	347
§ 11.8 液体动压多油楔轴承简介	232		
§ 11.9 静压轴承与空气轴承简介	233		
第十二章 滚动轴承	236		
§ 12.1 滚动轴承的基本类型和特点	236		
§ 12.2 滚动轴承的代号	239		
§ 12.3 滚动轴承的失效形式和选择计算	240		
§ 12.4 滚动轴承的润滑和密封	246		
§ 12.5 滚动轴承的组合设计	248		
§ 12.6 滚动轴承的公差与配合	250		
第十三章 轴	253		
§ 13.1 轴的功用和类型	253		
§ 13.2 轴的材料	254		
§ 13.3 轴的结构设计	254		
§ 13.4 轴的强度计算	257		
§ 13.5 轴的刚度计算	261		

绪 论

0.1 本课程的主要内容

我们在生活、工作中几乎时时处处都离不开机器、机械。我们的舰艇、武器、装备大多是由机械组合而成的，或本身就是一台机械（机器）；机器的种类繁多，功能、外型各异，小到肉眼难以分辨，大到数十米高的庞然大物。那么机器、机械有些什么共同的特征呢？只要认真观察，稍加分析便可看出所有机器都具有以下三个方面的共同特征：

- 1) 机器是若干人造实体的组合；
- 2) 组成机器的各实体之间具有确定的相对运动；
- 3) 机器能用来代替或减轻人们的劳动去完成有用的机械功或转换能量。

对各种常见的机器（例如牛头刨床、起重机、汽车、拖拉机等）作进一步观察便不难发现，这些机器都装有一个（或几个）用来接受外界输入能源的原动机（如电动机、内燃机等），并通过一系列运动及动力传送、改变或转换、分配或合并的中间装置（常见皮带轮、齿轮、凸轮等），把原动机的动作转变为机器工作部分为完成机器功能所要求的特定的动作（如牛头刨床上刨刀的往复动作，起重机吊钩的升降动作等），用以克服工作阻力，输出机械功。由此可见，一台完整的机器总是包括原动部分、传动部分和执行部分。如图 0-1 所示的单缸四冲程内燃机，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 等组成。燃气推动活塞作往复运动，经连杆转变为曲轴的连续转动。凸轮和顶杆是用来启闭进、排气阀的。为了保证曲轴每转两周进、排气阀各启闭一次，在曲轴和凸轮轴之间安装了齿轮，齿数比为 1:2。这样，当燃气推动活塞、活塞带动连杆、连杆驱动曲轴运动时，就把燃气的热能转换为曲轴转动的机械能。

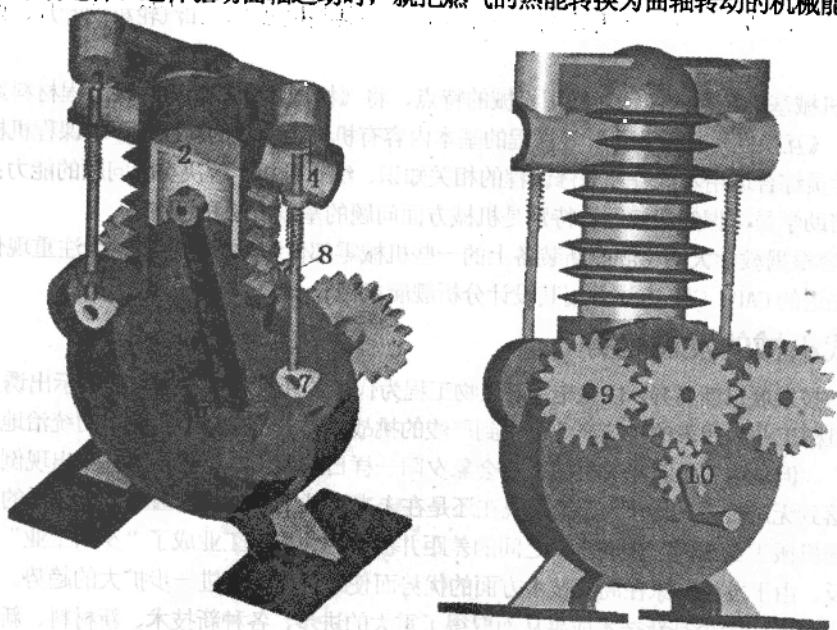


图 0-1 内燃机

不同机器的最终执行部分的运动规律千差万别,但是如果把机器拆开进行比较便会发现,在功能、外形、大小不同的机器中存在许多相似的结构或部件。例如在大多数机器的传动部分中都用齿轮来传递或分配原动机的运动和动力,车床中有齿轮、刨床中有齿轮、汽车中也有齿轮,到处都可见到齿轮;也有很多机器中使用了皮带轮;如果撇开它们在作功和转换能量方面所起的作用,仅从结构和运动的角度分析,不难发现不同机器之间存在着共性。例如,内燃机和曲轴冲床都应用了曲柄—连杆—滑块(活塞或冲头)实现圆周运动与直线往复运动之间的相互转换。因此,为了能对机器进行更深入、更全面的研究,在此引入**机构**的概念。从上述例子中我们可以归纳出机构的主要特征:

- 1) 机构是若干人造实体的组合;
- 2) 组成机构的各实体之间具有确定的相对运动;

从运动学角度来看,机构与机器二者的关系类似于化学中元素与化合物之间的关系。任何一台机器都至少应用一种机构,而同一种机构可以用在不同的机器中。若撇开机器在作功和转换能量方面所起的作用,仅从结构和运动的观点来看,则机器与机构之间并无区别,因此,在习惯上用“**机械**”一词作为机器和机构的统称。

组成机构的各个相对运动部分称为构件。那么什么是零件呢?零件是加工过程中的一个单元。构件可以是一个零件,也可以是几个零件组成的刚性联结(各零件间没有相对运动)。内燃机的连杆就是由连杆体、连杆盖、螺栓以及螺母等几个零件组成的。这些零件形成一个整体而进行运动,所以称为一个构件。由此可见,构件是运动的单元,而零件是制造的单元。

机器中普遍使用的机构称为**常用机构**,如连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等。

机械零件可分成两类。一类称为**通用零件**,它们在各种机械中都能经常遇到,如齿轮、螺栓、轴、轴承、弹簧等。另一类称为**专用零件**,它们只出现在某些机械中,如汽轮机的叶片、内燃机中的活塞等。

《舰用机械基础》是一门针对舰用机械的特点、将《机械设计基础》、《工程材料》、《金属工艺学》、《互换性与技术测量》等课程的基本内容有机结合而成的课程。本课程机械零件部分注重培养学员综合运用本课程和先修课程的相关知识、综合分析、解决实际问题的能力;通过本教材学习,帮助学员掌握解决问题、特别是机械方面问题的基本方法和思路。

教材内容根据教学大纲将舰艇新装备上的一些机械零部件编入教材之中,为注重现代内容,简要介绍最先进的CAD、CAE方法并用其设计分析舰艇机械。

0.2 现代机械的发展趋势

当今高科技发展日新月异,以微电子、生物工程为代表的新兴产业向人们展示出诱人的发展前景,而以机械工业为代表的传统产业已受到严峻的挑战,失去了在整个工业中的统治地位,成了“夕阳工业”。但是这并不意味着机械工业会象夕阳一样日落西山,绝不会再出现倒退,也不会在未来沦落到无足轻重的地步,无论是现在还是在未来机械工业仍将是国家工业体系的主要基础和支柱。我国机械工业与国际先进水平之间的差距并没有因为机械工业成了“夕阳工业”而迅速缩小,恰恰相反,由于发达国家在高新技术方面的优势而使这种差距有进一步扩大的趋势。实际上现代机械已经大量采用当今高新技术成果从而取得了重大的进步,各种新技术、新材料、新工艺得到了迅速发展和广泛应用,机械工业正在经历着一场全面而深刻的变革。

机电一体化技术就是其中一个重要的发展方向,并且已经形成了一门新的复合型边缘学科。它由微电子技术、电力电子技术、检测传感技术、信息处理技术、计算机技术、自动控制技术、伺服传动技术、精密机械技术以及系统总体技术等多种技术相互交叉、相互渗透与融合而成。机电一体化技术已经从根本上改变了传统机械的模式,赋予机械以新的生机和活力,出现了高度自动化并且具有一定智能化的机器;同时机电一体化技术也对机械的设计、制造和使用等各方面带来了许多全新的概念理论和方法。

在信息技术推动下,基于计算机的现代仿真技术正在快速发展,使CAD(C、M、E、T)等计算机辅助设计、制造、工程、测试技术近年来发展十分迅速,已在发达国家中得到了普遍应用,对机械设计 & 制造过程产生了极其深刻的影响。它不仅仅实现了无图样设计,更重要的是CAX技术使设计人员在制造出机械之前就能对所设计的机械进行全面的分析(例如:零件的应力、应变分析,整机的模态分析等),甚至对其(虚拟样机)各方面性能进行测试;如汽车在设计阶段就可知其到什么路况、车速下每位乘客所能听到的噪声。汽车的碰撞、炮弹的穿甲功能等都可在设计阶段计算出来。许多在传统设计过程中难以实现的设计理论和方法(如动态设计、优化设计、模块化设计等)得以全面应用,大大提高了所设计机械的性能;同时CAD技术(特别是并行设计技术)与数控加工技术结合能大大缩短试制周期,降低研发成本。例如波音777飞机采用虚拟数字样机设计分析技术,实现了无图纸、无样机一次成功。又如据ZD Net网上杂志报道,波音及洛克希德-马丁公司均希望在两年后取得美国国防部数千亿美元的合约。除设计新战机外,它们建立的虚拟仿真系统,将用作研发和测试新战机,并用于训练飞行及地勤人员。两家公司的单型机,目前已在加州一秘密机场整装待发,虽然真正试飞要到明年才开始,但已在虚拟系统上进行了数千小时的测试。波音公司采用的SGI高速系统进行模拟,每个画面要处理上百万个多边形。该系统不仅呈现外形,亦须呈现内部机械细节。新一代的机械模拟系统,更可透过机械臂回传力量及触觉,因此用户可真的摸到东西。美国两大航空业巨人正在参与的、利用虚拟仿真系统协助设计新世纪战机:“精密战机在停机坪上引擎隆隆响动,两枚飞弹缓缓送来,身穿橄榄色服装的地勤,准备为超级战机装备飞弹……”其实这里的飞机、导弹、停机坪等,都是未来的虚拟空间,驾驶员头戴虚拟头盔,坐在美国西雅图波音飞机公司虚拟实验室的JSF战机模拟系统中。在舰艇的论证、设计、试验中也大量采用此项技术,所有设计人员的设计直接在计算机上以虚拟实体,例如美国海军新型“百人队长”(弗吉尼亚)级核动力潜艇(NSSN)的设计过程就完全采用计算机辅助设计的形式显示出来,图0-2就是该型潜艇的一种设计方案。在设计网络上形成了一个具有全部设计细节的虚拟潜艇。在最后制造之前完全取消了图纸,所有的设计都是在计算机上进行的。该潜艇的设计采用网络化的并行设计技术,设计阶段的所有活动都在设计数据库中综合和汇总。参与设计的每个人都能从网络上知道其所需知道的所有设计细节,每个人所进行的设计也都能实时地反馈给需要知情的人员,因此每项修改设计平均所用的时间由原来的几天减少到几小时,同时更为重要的是,这种设计信息的直接的、实时的反馈方式能够最大限度地避免由于不同设备设计人员之间协调不够而造成的设计失误。图0-3是这种设计方式的简况。正因为采取了先进的CAD技术,该级潜艇的方案设计工作进行得非常充分,在确定最后方案之前,先后一共设计了15个方案,最后从中选定“廉价、多能”的设计方案进行制造。必须引起注意的是,此处的设计方案与传统的设计方案完全是两个概念,这里的每一个设计方案都是已经设计出细节的、只要稍加完善就可以进行制造的完整设计,而不是那种只有框架的传统设计方案。

据称该型潜艇的设计数据库容量若折算成 1.44M 的软盘,其数量约 103600 片;叠放起来高约 328 米。

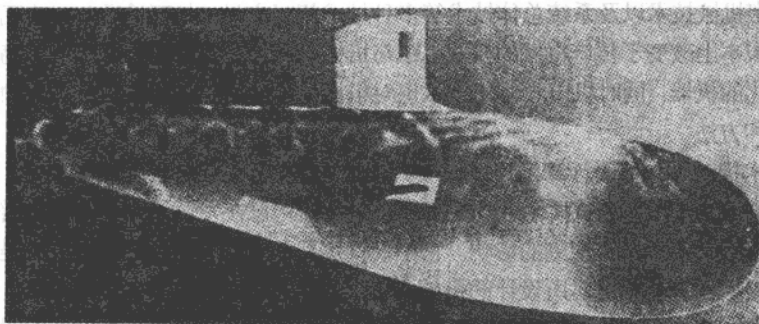


图 0-2 美国海军“百人队长”级潜艇一种设计方案的计算机实体造型

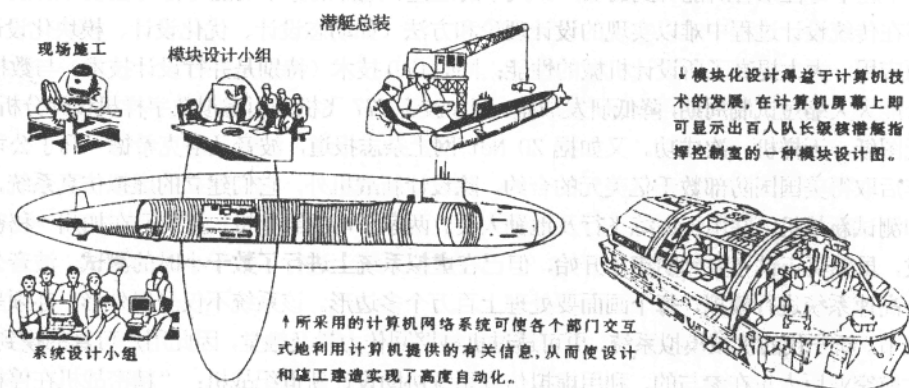


图 0-3 美国“百人队长”级潜艇计算机辅助设计过程简况

在武器装备的维护修理及教育、训练方面, CAD 技术及不断发展起来的虚拟现实技术也起着越来越重要的作用。例如有些结构复杂、精密的机械装备不能轻易进行实际拆装,但可在计算机上进行虚拟拆装、分析失效零部件,使维修工作手到病除;还可以用于训练操作人员,可节省大量时间和经费。这些仅是 CAX 技术在海军工程中的应用的例子,从中我们可以看到该技术对提高海军装备的技术水平,节省经费具有十分重要的意义。

因此在学习本课程时,除掌握好传统机械方面的知识外,应注意掌握机电一体化、CAX 等方面的理论基础和知识,注意设计创新能力的提高。

综上所述,机电一体化和 CAX 等高新技术正在或者说已经引发了机械科技发展史上的一次最为深刻而巨大的革命。现代机械工程技术人员应具备更高的素质,只掌握传统机械方面的知识是远远不够的,还必须具备电力、电子、控制、计算机等多学科的扎实理论基础和知识。本教材在介绍传统机械方面的基础知识的同时也将尽可能地多介绍一些新理论、新方法、新技术、新材料、新工艺,以及它们在海军工程中的应用,开拓大家的视野。

第一章 平面机构

如绪论所述,机构是由构件组成的,其各构件之间具有确定的相对运动。显然,任意拼凑的构件组合不一定能发生相对运动,即使能够运动,也不一定具有确定的相对运动。讨论构件按照什么条件进行组合才具有确定的相对运动,对于分析现有机构或设计新机构是非常重要的,对于上舰管理使用机械,掌握熟悉未曾遇到的机械装备也是很有作用的。

实际机械的外形和结构都很复杂,为了便于分析研究,在工程中用简单线条和符号来绘制机构的运动简图,以便分析研究机构,我们应该掌握绘制机构简图的方法。

上述内容将在本章的各节中详细加以讨论。

所有构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构,否则称为空间机构。目前工程中常见的机构大多属于平面机构,因此,本章限于讨论平面机构。

§ 1-1 平面机构的组成及自由度计算

1.1.1 运动副及其分类

一个作平面运动的自由构件有三个独立运动的可能性。如图 1-1 所示,在 oxy 坐标系中,构件 S 可随其上任一点 A 沿 X 轴、 Y 轴方向移动和绕 A 点转动。这种可能出现的独立运动称为构件的自由度。所以一个作平面运动的自由构件有三个自由度。

机构是由许多构件组成的。机构的每个构件都以一定的方式与某些构件相互联接。这种联接不是固定连接,而是能产生一定相对运动的联接。这种使两构件直接接触并能产生一定相对运动的联接称为运动副。例如轴与轴承的联接、活塞与气缸的联接、传动齿轮两个轮齿间的联接等都构成运动副。显然,构件组成运动副后,其独立运动便受到约束,自由度便随之减少。

两构件组成的运动副,不外乎通过点、线或面的接触来实现。按照接触特性,通常把运动副分为低副和高副两类。

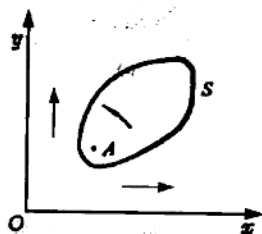


图 1-1 平面运动刚体的自由度

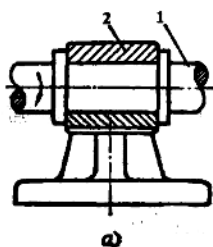


图 1-2 回转副

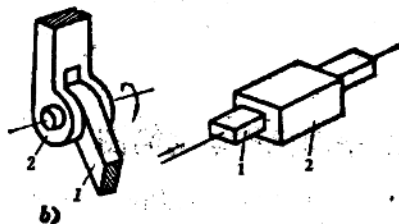


图 1-3 移动副

1. 低副

两构件通过面接触组成的运动副称为低副。平面机构中的低副有回转副和移动副两种。

(1) 回转副 若组成运动副的两构件只能在一个平面内相对转动,这种运动副称为回转副,或称铰链,如图 1-2 所示。在图 a 所示轴 1 与轴承 2 组成的回转副中,有一个构件是固定的,故称为固定铰链。图 b 所示构件 1 与构件 2 也组成回转副,它的两个构件都未固定,故称为活动铰链。

(2) 移动副 若组成运动副的两个构件只能沿某一直线相对移动,这种运动副称为移动副,如图 1-3 所示。

2. 高副

两构件通过点或线接触组成的运动副称为高副。图 1-4, 图 a 中的车轮与钢轨、图 b 中的凸轮与从动件、图 c 中的轮齿 1 与轮齿 2 分别在接触处 A 组成高副。组成平面高副两构件间的相对运动是沿接触处切线 $t-t$ 方向的相对移动和在平面内的相对转动。

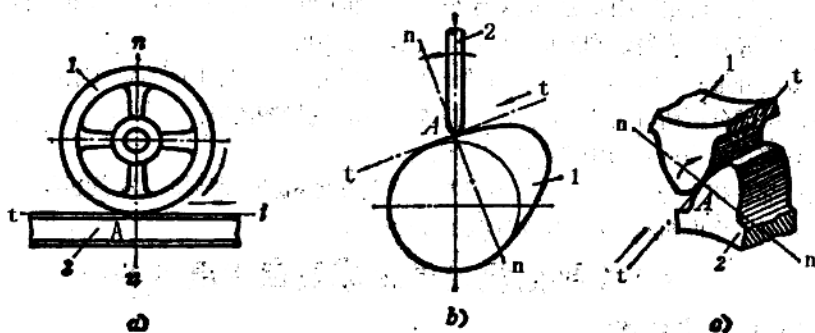


图 1-4 平面高副举例

除上述平面运动副之外, 机构中还经常见到如图 1-5, a 所示的球面副和图 1-5, b 所示的螺旋副。这些运动副两构件间的相对运动是空间运动, 故属于空间运动副。空间运动副已超出本章讨论的范围, 故不赘述。

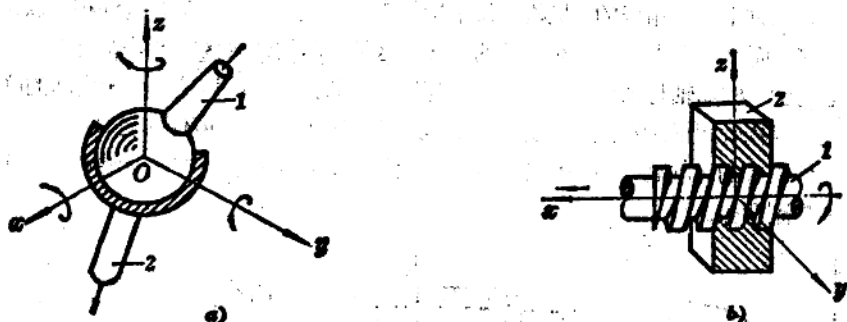


图 1-5 球面副和螺旋副

1.1.2 平面机构运动简图

实际构件的外形和结构往往很复杂, 在研究机构运动时, 为了简化问题, 有必要撇开那些与运动无关的构件外形和运动副具体构造, 仅用简单线条和符号来表示构件和运动副, 并按比例定出各运动副的位置。这种说明机构各构件间相对运动关系的简单图形, 称为机构运动简图。

机构运动简图中的运动副表示如下:

图 1-6, a、b、c 是两个构件组成回转副的表示方法。用圆圈表示回转副, 其圆心代表相对转动轴线。若组成回转副的二构件都是活动件, 则用图 a 表示。若其中有一个为机架, 则在代表机架的构件上加上斜线, 如图 b、c 所示。两构件组成移动副的表示方法如图 1-6, d、e、f 所示。移动副的导路必须与相对移动方向一致。同前所述, 图中画有斜线的构件表示机架。

两构件组成高副时，在简图中应当画出两构件接触处的曲线轮廓。如图 1-6, *g* 所示。

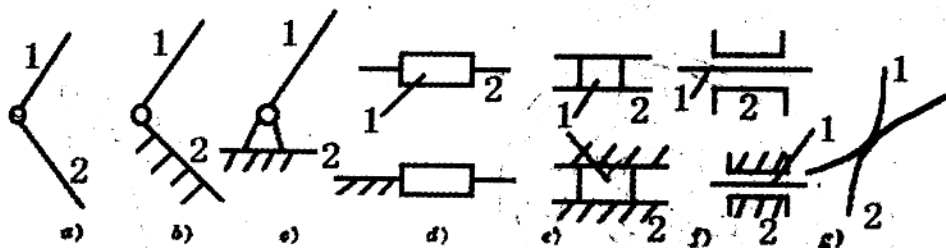


图 1-6 平面运动副的表示方法

图 1-7 为构件的表示方法。图 *a* 表示参与组成两个回转副的构件。图 *b* 表示参与组成一个回转副和一个移动副的构件。在一般情况下，参与组成三个回转副的构件可用三角形表示，如图 *c* 所示；如果三个回转副中心在一条直线上，则可用图 *d* 表示。超过三个运动副的构件的表示方法可依此类推。对于机械中常用的构件和零件，有时还可采用惯用画法，例如用细实线（或点划线）画出一对节圆来表示互相啮合的齿轮，用完整的轮廓曲线来表示凸轮。其他常用零部件的表示方法可参看 GB4460-84 “机构运动简图符号”（可查阅机械设计手册）。

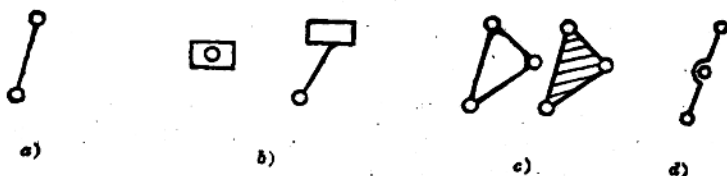


图 1-7 构件表示方法

机构中的构件可分为三类：

- (1) **固定件（机架）**——是用来支承活动构件的构件。例如图 0-1 中的气缸体就是固定件，它用以支承活塞和曲轴等。研究机构中活动构件的运动时，常以固定件作为参考坐标系。
- (2) **原动件**——是运动规律已知的活动构件。它的运动是由外界输入的，故又称为输入构件。例如图 0-1 中的活塞就是原动件。
- (3) **从动件**——是机构中随着原动件的运动而运动的其余活动构件。其中输出机构预期运动的从动件称为输出构件，其他从动件则起传递运动的作用。例如图 0-1 中的连杆和曲轴都是从动件，由于该机构的功用是将直线运动变换为定轴转动，因此，曲轴是输出构件，连杆是用于传递运动的从动件。

任何一个机构中，必有一个构件被相对地看作固定件。例如气缸体虽然跟随汽车运动，但在研究发动机的运动时，仍把气缸体当作固定件。在活动构件中必须有一个或几个原动件，其余的都是从动件。

下面举例说明机构运动简图的绘制方法。

例 1-1：绘制图 1-8, *a* 所示颚式破碎机的机械运动简图。

解：(1) 机械运动分析。颚式破碎机的主体机构由机架 1、偏心轴（又称曲轴）2、动颚 3、肘板 4 共四个构件组成。偏心轴是原动件，动颚和肘板都是从动件。当偏心轴在与它固联的带轮 5 的拖动下绕轴线 *A* 转动时，驱使输出构件动颚 3 作平面复杂运动，从而将矿石轧碎。

(2) 在确定构件数目之后，再根据各构件间的相对运动确定运动副的种类和数目。偏心轴 2 与机架 1 绕轴线 *A*

相对转动, 故构件 1、2 组成以 A 为中心的回转副; 动颚 3 与偏心轴 2 绕轴线 B 相对转动, 故构件 2、3 组成以 B 为中心的回转副; 肘板 4 与动颚 3 绕轴线 C 相对转动, 故构件 3、4 组成以 C 为中心的回转副; 肘板与机架绕轴线 D 相对转动, 故构件 4、1 组成以 D 为中心的回转副。

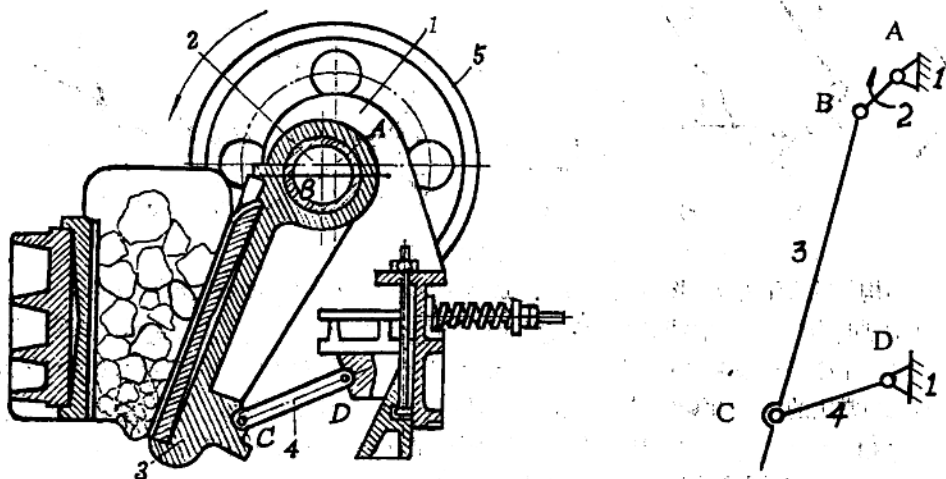


图 1-8 颚式破碎机及其机构运动简图

(3) 选定适当比例尺, 根据图 a 尺寸定出 A 、 B 、 C 、 D 的相对位置, 用构件和运动副的规定符号绘出机构运动简图, 如图 1-8, b 所示。

(4) 最后, 将图中的机架画上斜线, 并在原动件 2 上标出指示运动方向的箭头。

需要指出, 虽然动颚 3 与曲轴 2 是用一个半径大于 AB 的轴颈联接的, 但是运动副的规定符号仅与相对运动的性质有关, 而与运动副的结构尺寸无关, 所以在简图中仍可用小圆圈表示。

例 1-2 绘制图 1-9, a 所示活塞泵机构的机构运动简图。

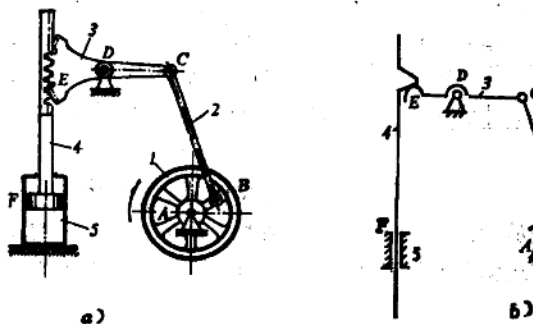


图 1-9 活塞泵及其机构运动简图

解: 活塞泵由曲柄 1、连杆 2、齿扇 3、齿条活塞 4 和机架 5 共五个构件所组成。曲柄 1 是原动件, 2、3、4 为从动件。当原动件 1 回转时, 活塞在气缸中往复运动。

各构件之间的联接如下: 构件 1 和 5、2 和 1、3 和 2、3 和 5 之间为相对转动, 分别构成回转副 A 、 B 、 C 、 D , 构件 3 的轮齿与构件 4 的齿条成平面高副 E 。构件 4 与构件 5 之间为相对移动, 构成移动副 F 。

选取适当比例, 按图 a 尺寸, 用构件和运动副的规定符号画出机构运动简图, 如图 1-9, b 所示。

应当说明, 绘制机构运动简图时, 原动件的位置选择不同, 所绘机构运动简图的图形也不同。

当原动件位置选择不当时, 构件互相重叠或交叉, 使图形不易辨认。为了清楚地表达各构件的相互关系, 应当选择恰当的原动件位置来绘图。

1.1.3 平面机构的自由度

机构的各构件之间应具有确定的相对运动。显然, 不能产生相对运动或无规则乱动的一堆构件是不能成为机构的。为了使组合起来的构件能产生相对运动并具有运动确定性, 有必要探讨机构自由度和机构具有确定运动的条件。

1.1.3.1 平面机构自由度计算公式

如前所述, 一个作平面运动的自由构件具有三个自由度。因此, 平面机构的每个活动构件, 在未用运动副联接之前, 都有三个自由度, 即沿 X 轴和 Y 轴的移动、以及在 oxy 平面内的转动。当两个构件组成运动副之后, 它们的相对运动就受到约束, 自由度数即随之减少。不同种类的运动副引入的约束不同, 因而所保留的自由度也不同。例如图 1-2 所示的回转副约束了两个移动的自由度, 只保留一个转动的自由度; 而移动副 (图 1-3) 约束了沿某一轴线方向的移动和在平面内的转动这两个自由度, 只保留沿另一轴线方向移动的自由度; 高副 (图 1-4) 则只约束了沿接触处公法线 $n-n$ 方向移动的自由度, 保留绕接触处的转动和沿接触处公切线 $t-t$ 方向移动这两个自由度。也可以说, 在平面机构中, 每个低副引入两个约束, 使构件失去两个自由度; 每个高副引入一个约束, 使构件失去一个自由度。

设平面机构共有 K 个构件。除去固定件, 则机构中的活动构件数为 $n=K-1$ 。在未用运动副联接之前, 这些活动构件的自由度总数应为 $3n$ 。当用运动副将构件联接起来组成机构之后, 机构中各构件具有的自由度数就减少了。若机构中低副的数目为 P_L 个, 高副数目为 P_H 个, 则机构中全部运动副所引入的约束总数为 $2P_L+P_H$ 。因此活动构件的自由度总数减去运动副引入的约束总数就是该机构的自由度 (又称机构活动度), 以 F 表示, 即

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

这就是计算平面机构自由度的公式。由公式可知, 机构自由度 F 取决于活动构件的数目以及运动副的性质 (低副或高副) 和数目。

机构的自由度也是机构所具有的独立运动的个数。由前述可知, 从动件是不能独立运动的, 只有原动件才能独立运动。通常每个原动件只具有一个独立运动 (如电动机转子具有一个独立转动, 内燃机活塞具有一个独立移动), 因此, 机构自由度与原动件的数目相等机构才具有确定的相对运动。

例 1-3 计算图 1-8, b 所示颚式破碎机主体机构的自由度。

解: 在颚式破碎机主体机构中, 有三个活动构件, $n=3$; 包含四个回转副, $P_L=4$, 没有高副, $P_H=0$ 。所以由式 (1-1) 得机构自由度:

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$$

该机构具有一个原动件 (曲轴 2), 故原动件数与机构自由度相等。

例 1-4 计算图 1-9 所示活塞泵的自由度。

解: 活塞泵具有四个活动构件, $n=4$; 五个低副 (四个回转副和一个移动副), $P_L=5$; 一个高副, $P_H=1$ 。由式 (1-1) 得机构自由度:

$$F = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 1 = 1$$

机构自由度与原动件(曲柄1)数目相等。

机构的原动件的独立运动是由外界给定的。如果给出的原动件数不等于机构自由度数,则将产生如下的影响,请看下面几个简单的例子。

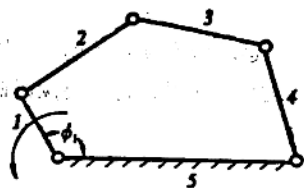


图 1-10 原动件数 $< F$

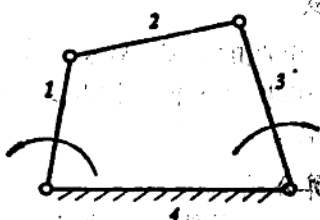


图 1-11 原动件数 $> F$

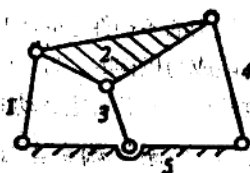


图 1-12 $F = 0$ 的构件组

图 1-10 所示为原动件数小于机构自由度的例子(图中原动件数等于 1, 而机构自由度 $F=3 \times 4 - 2 \times 5 = 2$)。显然, 当只给定原动件 1 的位置角 ϕ_1 时, 从动件 2、3、4 的位置不能确定, 不具有确定的相对运动。只有给出两个原动件, 使构件 1、4 都处于给定位置, 才能使从动件获得确定运动。

图 1-11 所示为原动件数大于机构自由度的例子(图中原动件数等于 2, 机构自由度 $F=3 \times 3 - 2 \times 4 = 1$)。如果原动件 1 和原动件 3 的给定运动都要同时满足, 势必将杆 2 拉断。

图 1-12 所示为机构自由度等于零的构件组合($F=3 \times 4 - 2 \times 6 = 0$)。它的各构件之间不可能产生相对运动。

综上所述, 机构具有确定运动的条件是: $F > 0$, 且 F 等于原动件个数。

1.1.3.2 计算平面机构自由度的注意事项

应用式(1-1)计算平面机构自由度时, 对下述几种情况必须加以注意。

1. 复合铰链

两个以上的构件同时在一处用回转副相联接就构成复合铰链。如图 1-13a 所示是三个构件汇交的复合铰链, 图 b 是它的俯视图。由图 b 可以看出, 这三个构件共组成两个回转副。依此类推。K 个构件汇交而成的复合铰链应具有 $(K-1)$ 个回转副。在计算机构自由度时应注意识别复合铰链, 以免把回转副的个数算错。

例 1-5 计算图 1-14 所示圆盘锯主体机构的自由度。

解: 机构中有七个活动构件, $n=7$; A、B、C、D 四处都是三个构件汇交的复合铰链, 各有两个回转副, 故 $P_2=10$ 。由式(1-1)可得:

$$F=3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$

F 与机构原动件个数相等。当原动件 8 转动时, 圆盘中心 E 将确定地沿直线 BE' 移动。

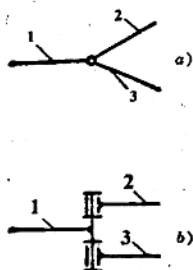


图 1-13 复合铰链

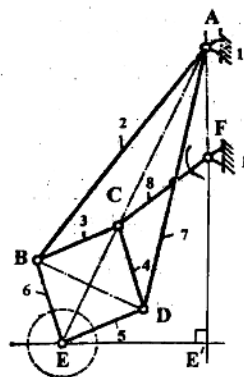


图 1-14 圆盘锯机构

2. 局部自由度

机构中常出现一种与输出构件运动无关的自由度，称为局部自由度或多余自由度，在计算机构自由度时应予排除。

例 1-6 计算图 1-15, a 所示滚子从动件凸轮机构的自由度。

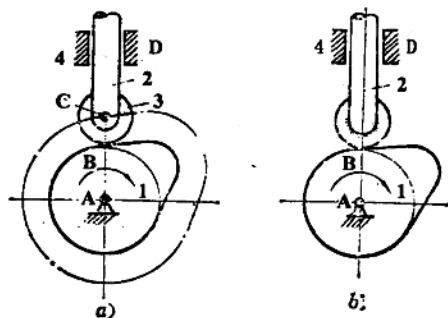


图 1-15 局部自由度

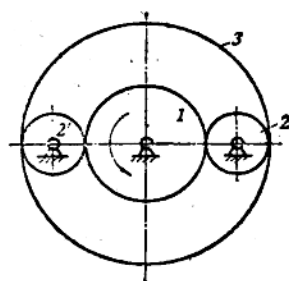


图 1-16 对称结构的虚约束

解：如图 a 所示，当原动件凸轮 1 转动时，通过滚子 3 驱使从动件 2 以一定运动规律在机架 4 中往复移动。因此，从动件 2 为输出构件。不难看出，在这个机构中，无论滚子 3 绕其轴线 C 是否转动或转动快慢，都丝毫不影响输出件 2 的运动。因此滚子绕其中心的转动是一个局部自由度。为了在计算机构自由度时排除这个局部自由度，可设想将滚子与从动件焊成一体（回转副 C 也随之消失）变成图 b 所示形式。在图 1-15, b 中， $n=2$, $P_L=2$, $P_H=1$ 。由式 (1-1) 可得：

$$F = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$$

局部自由度虽然不影响整个机构的运动，但滚子可使高副接触处的滑动摩擦变成滚动摩擦，减少磨损，所以实际机械中常有局部自由度出现。

3. 虚约束

在运动副引入的约束中，有些约束对机构自由度的影响是重复的。这些对机构运动不起限制作用的重复约束称为消极约束，或称虚约束，在计算机构自由度时应当除去不计。

虚约束是构件间几何尺寸满足某些特殊条件的产物。平面机构中的虚约束常出现在下列场合：