

机械设计基础

主 编 田万禄 熊晓航 张世娴 马 超

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

本教材是由教育部课程指导委员会审定通过，并根据教育部批准的高等工业学校“机械设计基础课程教学基本要求”，同时结合了编者 20 多年的教学实践经验编写而成的。本教材可以与中国科学院机械工程系列规划教材编写委员会与东北大学国家工科机械基础课程教学基地共同组织编写的机械设计系列教材配套使用，且普遍适用于近机械类各专业的机械设计基础课程的教学。

当前，由于教学时数逐渐减少，教学内容却不断增加，要求学生自学内容的比例也越来越高。因此，本教材在编写过程中充分考虑了这一现实情况，以打好基础、突出应用为原则，对基本教学内容的讲解力求由浅入深、通俗易懂，并强调对基本概念的讲解，以求达到掌握或熟练掌握的目的。而对于边缘知识内容只做简单的介绍，了解即可。另外，本教材基本上每章增设应用设计实例一节，以加强学生对基本知识的理解和应用训练。

本教材所涉及的教学内容全面，为增加本书的适用范围，书中能独立的内容均独立列为一章，这样读者可以根据自己的实际需要选学、选讲其中的全部或部分内容。

本教材全部采用了当前正在执行或将在 2017 年 1 月执行的最新国家标准。

本教材在编写过程中得到了来自东北大学国家工科机械基础课程教学基地的陈良玉教授、孙志礼教授和巩云鹏教授的具体指导和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

参与本教材编写的人员有田万禄（绪论、第十章、第十七章）、熊晓航（第五章、第七章、第十五章）、张世嫻（第二章、第四章）、赵欣欣（第十一章、第十二章）、孙洪哲（第三章、第八章）、马超（第十三章、第十六章、第十九章、第二十章）、贾凯（第一章、第九章、第十四章）和陈晔（第六章、第十八章）。本教材由田万禄、熊晓航、张世嫻和马超担任主编，由李卫民教授、曾红教授担任主审。

由于编者的水平所限，书中难免存在不妥、疏漏或错误之处，殷切希望读者给予批评和指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一节 机械及其组成	1
第二节 机械设计的基本要求和一般程序	3
第三节 本课程的研究内容、性质和任务	5
第一章 平面机构的结构分析	6
第一节 平面机构的组成	6
第二节 平面机构的运动简图	8
第三节 平面机构的自由度	10
第四节 平面机构的结构分析与应用实例	13
习题	14
第二章 平面连杆机构	15
第一节 平面连杆机构的特点	15
第二节 铰链四杆机构的基本类型及应用	15
第三节 平面四杆机构的基本知识	18
第四节 铰链四杆机构的演化	22
第五节 平面四杆机构的设计	25
第六节 平面连杆机构设计的应用实例	27
习题	29
第三章 凸轮机构	31
第一节 凸轮机构的类型及应用	31
第二节 从动件的运动规律	34
第三节 用图解法设计凸轮轮廓	37
第四节 凸轮机构基本参数的确定	40
第五节 凸轮机构的应用设计实例	43
习题	44
第四章 齿轮机构	45
第一节 齿轮传动的特点和类型	45
第二节 齿廓啮合基本定律	46
第三节 渐开线齿廓及其特点	47
第四节 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分的名称及尺寸	49
第五节 标准渐开线直齿圆柱齿轮啮合传动	51
第六节 轮齿的切削加工与变位齿轮的概念	53
第七节 斜齿圆柱齿轮传动	57
第八节 直齿锥齿轮传动	62

第九节 齿轮机构的应用设计实例	65
习题	67
第五章 轮系	69
第一节 齿轮系及其分类	69
第二节 定轴轮系的传动比计算	70
第三节 周转轮系的传动比计算	72
第四节 混合轮系的传动比计算	75
第五节 齿轮系的功用	77
第六节 几种常用的行星齿轮传动简介	79
习题	82
第六章 间歇运动机构	84
第一节 槽轮机构	84
第二节 棘轮机构	86
第三节 不完全齿轮机构	88
第四节 凸轮式间歇机构	88
第七章 回转体的平衡	90
第一节 概述	90
第二节 刚性转子的静平衡	91
第三节 刚性转子的动平衡	92
第四节 平衡实验	94
第五节 转子的许用不平衡量	95
第八章 机械速度波动的调节	97
第一节 机械运转的速度波动	97
第二节 速度波动和调节	99
习题	102
第九章 机械设计概述	103
第一节 机械零件的主要失效形式	103
第二节 机械零件的常用工作能力准则	105
第三节 摩擦、磨损和润滑的基本知识	106
第四节 机械零件的常用材料	109
第五节 机械零件的设计步骤、工艺性和标准化	114
第十章 连接	117
第一节 螺纹	117
第二节 螺纹连接的类型和螺纹连接件	120
第三节 螺纹连接的预紧与防松	122
第四节 螺栓连接的强度计算	125
第五节 提高螺栓连接强度的措施	132
第六节 螺旋传动简介	134
第七节 键和花键连接	135
习题	144

第十一章 带传动	146
第一节 带传动的类型、特点和应用.....	146
第二节 带传动的工作情况分析.....	150
第三节 普通 V 带传动的设计计算	155
第四节 带传动的使用维护与张紧.....	161
第五节 V 带传动应用设计实例	162
习题.....	164
第十二章 链传动	166
第一节 链传动的类型、特点和应用.....	166
第二节 链传动的结构、主要参数及几何尺寸.....	167
第三节 链传动的运动分析和受力分析.....	171
第四节 链传动的设计计算.....	173
第五节 链传动的布置、张紧和润滑.....	177
第六节 链传动的应用设计实例.....	179
习题.....	181
第十三章 齿轮传动	182
第一节 轮齿的失效形式及设计准则.....	182
第二节 齿轮的材料及其选择.....	185
第三节 齿轮传动的载荷计算.....	187
第四节 标准直齿圆柱齿轮传动的强度计算.....	188
第五节 齿轮精度、设计参数的选择与许用应力.....	192
第六节 标准斜齿圆柱齿轮传动的强度计算.....	197
第七节 标准直齿锥齿轮传动的强度计算.....	200
第八节 齿轮的结构设计.....	201
第九节 齿轮传动的润滑.....	203
第十节 齿轮传动设计应用实例.....	204
习题.....	209
第十四章 蜗杆传动	210
第一节 蜗杆传动的特点、类型及精度.....	210
第二节 圆柱蜗杆传动的基本参数和几何尺寸计算.....	211
第三节 蜗杆传动的承载能力计算.....	215
第四节 蜗杆传动的效率、热平衡计算及润滑.....	219
第五节 蜗杆和蜗轮的结构.....	222
第六节 蜗杆传动的应用设计实例.....	223
习题.....	228
第十五章 轴	229
第一节 概述.....	229
第二节 轴的结构设计.....	231
第三节 轴的计算.....	234
第四节 轴的应用设计实例.....	237

习题	241
第十六章 滚动轴承	242
第一节 概述	242
第二节 常用滚动轴承的主要类型、代号及选择	244
第三节 滚动轴承类型的选择	247
第四节 滚动轴承的工作情况	248
第五节 滚动轴承的寿命计算	250
第六节 滚动轴承的静强度计算	254
第七节 滚动轴承的组合设计	255
第八节 滚动轴承的设计应用实例	261
习题	263
第十七章 滑动轴承	265
第一节 滑动轴承概述	265
第二节 滑动轴承的结构形式	266
第三节 滑动轴承的失效形式、轴承材料及轴瓦结构	267
第四节 非液体润滑滑动轴承的设计计算	271
第五节 滑动轴承的润滑	273
第六节 非液体润滑滑动轴承的设计应用实例	275
习题	276
第十八章 联轴器和离合器	277
第一节 概述	277
第二节 联轴器	277
第三节 联轴器的选择	282
第四节 离合器	283
第五节 联轴器应用设计实例	286
习题	286
第十九章 弹簧	287
第一节 概述	287
第二节 弹簧的材料、许用应力和制造	288
第三节 圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧的结构和设计	289
第四节 圆柱形压缩(拉伸)螺旋弹簧的设计计算	291
第五节 其他弹簧简介	296
习题	297
第二十章 机械创新设计方法与实践	298
第一节 创新设计	298
第二节 开展创新的步骤	299
第三节 基础知识与创新方法	300
第四节 创新实例	302
参考文献	309

绪 论

第一节 机械及其组成

机械是人类在长期的劳动实践中创造出来的生产工具。机械是帮助人类减轻劳动强度、改善劳动条件、提高产品质量和劳动生产效率的装置，它在人类文明的进步过程中起到了重要的作用。目前，现代化的大生产更是离不开机械，机械工业为国民经济建设提供了重要的技术装备。机械化的水平是一个地区乃至一个国家社会生产发展水平的重要标志。

机械是机器与机构的总称。

对于各种机器而言，如常见的电动机、内燃机、起重机、机床、汽车及洗衣机等，虽然它们的构造、用途和性能各异，但它们都可以用来代替人的劳动。它们有的可以传递或转换能量，有的可以改变物料的形态，有的可以进行信息处理，具有这些功能的技术系统就是机器。所有机器都具有以下三个共同特征：

- 1) 它们是人为实体的组合；
- 2) 它们各部分之间具有确定的相对运动；
- 3) 它们能用来代替人的劳动以完成有用的机械功或进行能量转换与信息处理。

随着生产技术和现代化建设的发展，机器的种类、形式和功能越来越多。

机构包括如我们在前述课程中了解的齿轮机构、连杆机构等，以及以后还要学到的凸轮机构、间歇运动机构以及带传动、链传动和蜗杆传动等。机构只具备机器的前两个特征，即它是人为实体的组合，且各部分之间具有确定的相对运动，但它不能独立做功，只能用来传递运动和动力、改变运动的形式和速度等。

从运动学的观点来看，机构和机器并无区别，故将其统称为机械。我们只是从做功和能量转换的角度将机械分为机器和机构。一般来说，机构比较简单，且在机械中的功能单一。而机器除了功能的实现比较复杂外，一般还对操作、控制、润滑等方面有要求，其构成比机构要复杂得多。通常，机器由一个或多个机构组成。

图 0-1 所示为单缸内燃机，其构成就含有三个机构，即由气缸 1、活塞 2、连杆 3 和曲轴 4 组成的曲柄滑块机构（属于平面连杆机构），由齿轮 5、6 组成的齿轮机构，由凸轮 7 和顶杆 8 组成的凸轮机构。燃油的爆发性燃烧推动活塞（滑块）做直线运动，由曲柄滑块机构将滑块的直线运动变为曲轴的转动并输出机械能，同时实现滑块的往复移动，完成排气、吸气和压缩的做功准备。由齿轮机构和凸轮机构共同构成的配气系统，用来完成气缸的进气和排气。两个凸轮机构负责定时开启和关闭进、排气门。除此之外，内燃机还具备必不可少的燃油供应系统和运转调速系统，前者负责为燃油进行净化、加压、定时喷射，后者负责减小输出轴转速的周期性波动，并防止发生飞车事故，这些功能都由不同的机构或装置完成。

从机械制造的角度来看，无论多复杂的机械最终都是由零件组成的，但在机构学科中，

将组成机构的运动单元体称为构件，即机构是由构件组成的。而构件则由零件组成，即一个构件是由一个或多个零件连接在一起组成的。构件是机构的运动单元，而零件是加工制造的单元。如图 0-2 所示的内燃机的连杆由连杆体 1、连杆盖 5、轴瓦 6、轴套 7、连接螺栓 2、螺母 3 以及开口销 4 刚性连接而成，它作为一个整体参与机构运动，是曲柄滑块机构的一个构件，也是曲柄滑块机构的一个运动单元。

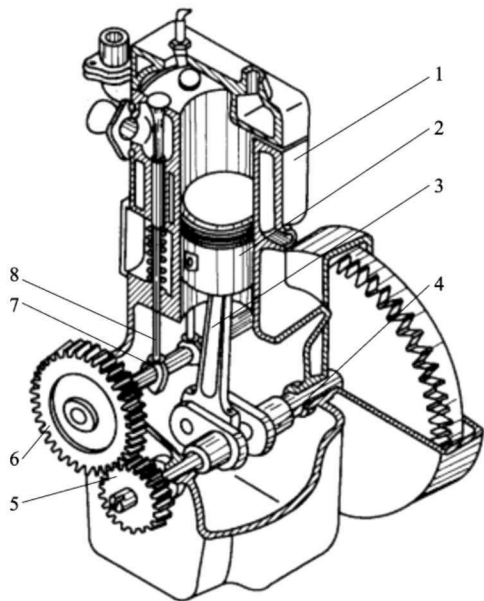


图 0-1 内燃机

1—气缸；2—活塞；3—连杆；4—曲轴；
5、6—齿轮；7—凸轮；8—顶杆

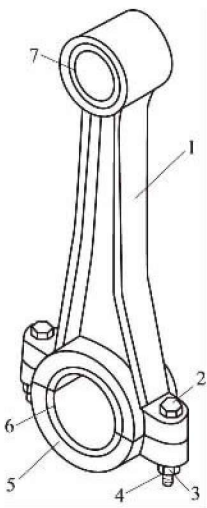


图 0-2 内燃机连杆

1—连杆体；2—连接螺栓；3—螺母；4—开口销；
5—连杆盖；6—轴瓦；7—轴套

虽然机械的结构和功能千差万别，但它们一般都是由原动机、传动系统、执行系统和控制系统四个基本部分以及其他辅助系统构成的，如图 0-3 所示。原动机是动力的来源，常用的有电动机、内燃机等。执行系统（即工作机）是完成机械功能的执行装置。控制系统是根据工况的变化对原动机、传动装置和工作机实施操控的装置。传动系统将原动机的运动和动力传递到执行系统，并使其达到在运动形式、转速和转矩方面的匹配，其在多数场合采用机械传动，有些场合则采用液压和气压传动等。机械传动是本课程的重点教学内容。

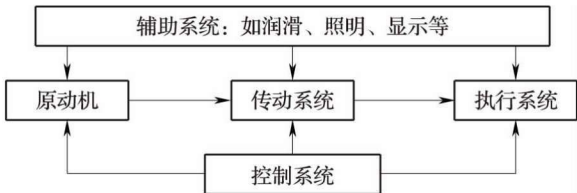


图 0-3 机械的组成

在图 0-4 所示的带式输送机中，电动机 1 为原动机，带传动 2 和齿轮减速器 3 组成传动系统，它负责将电动机的转速变换为输送机所需的转速，由带轮 5 和运输带 6 构成执行系统，控制柜 7 是控制系统，联轴器 4 用于连接齿轮减速器的输出轴和工作机的输入轴。

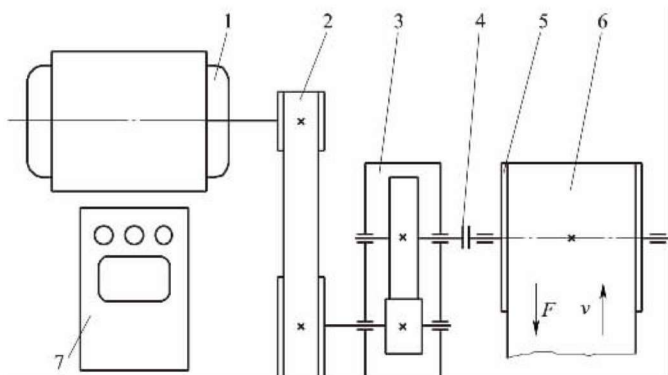


图 0-4 带式输送机

1—电动机；2—带传动；3—齿轮减速器；4—联轴器；5—带轮；
6—运输带；7—控制柜

在各种机械中普遍使用的机构称为常用机构，如平面连杆机构、凸轮机构和齿轮机构等。在各种机械中普遍使用的零件称为通用零件，如螺栓、齿轮、轴、轴承和弹簧等。只在特定机械上使用的零件称为专用零件，如内燃机的曲轴、活塞和汽轮机叶片等。有一些零（部）件在材料、尺寸、结构和性能上都已经标准化和系列化，称为标准件，如螺栓、键和滚动轴承等。

本课程作为机械设计的基础课程，主要学习机械中的常用机构和通用零件的工作原理、性能特点、适用场合、使用维护、标准规范以及设计计算等基本理论和方法。这是各类机械设计中普遍适用的基本知识。

第二节 机械设计的基本要求和一般程序

一、机械设计的基本要求

现代化的生产和生活对机械产品在质量、性能、价格等方面的要求越来越高，对机械设计的要求也越来越高。下述几点既是机器应满足的技术要求，也是对设计人员提出的设计要求。

1. 对功能的要求

对机械设计最基本的要求就是能实现其预定的功能。机器应能满足社会的需求，并能解决用户在生产或生活中的问题，这是设计机器的基本出发点。机械的功能是由许多量化指标来体现的。如运动学上的指标：位移、速度、加速度等，承载能力方面的指标：强度、刚度、寿命等，每个量化指标均应达到设计的要求。产品的功能在很大程度上取决于设计工作的优劣。为了实现其预定的功能，合理选择机器的原理方案就显得至关重要。

2. 经济性要求

经济性是一个综合指标，在产品的设计、制造、使用、维护等方面均有所体现。经济性要求的宗旨就是在实现其预定功能的前提下，让用户买到物美价廉的产品。“物美价廉”意味着良好的性能和优越的质量，以及设计和制造成本、使用耗材成本低廉。只有这样才能获得良好的社会效益和经济效益，这也是设计人员的责任。

3. 安全性要求

在机器的设计阶段就必须对机器的使用安全予以足够的重视。不仅要保证机器使用人员的安全,也要保证机器工作时自身的安全。

4. 可靠性要求

可靠性要求就是要保证机器在使用过程中性能的稳定性。可靠性高意味着故障率低,正常工作的时间长。机器的可靠性在设计、制造阶段就已经确定了,机器的设计者对机器的可靠性起决定性的作用。

5. 操作使用要求

机器的质量和是否便于操作密切相关。因此,在设计阶段就必须考虑机器是否符合人的生理条件,以及操作是否轻便省力。设计机器时,要尽量降低对操作人员学历和知识水平的要求。另外,机器的噪声要小,且能防止有害介质的泄漏,以减少对操作者的伤害。

6. 绿色环保的要求

在资源日趋紧张,治理污染日趋迫切的今天,节约资源和保护环境被列为基本国策,可持续发展被列为国家的发展战略,节能、减排、减少原料消耗,降低环境污染是每个机械设计师必须承担的责任和义务。

综上所述,我们要努力设计出高产、可靠、安全、经济和环保的绿色机器。

二、机械设计的一般程序

机械的开发性设计过程虽无一定的固定模式,但从提出设计任务到投入市场,一般都需要经过以下几个阶段。

1. 产品规划阶段

产品规划阶段的工作包括:通过市场调研,了解产品的社会需求;确定欲开发产品的总功能以及性能指标;根据现有技术和生产条件研究实现该产品的可行性;明确设计中需要解决的主要问题;拟定设计任务书。

2. 方案设计阶段

方案设计阶段的工作包括:根据设计任务的要求,调研市场上同类产品设计的功能原理、技术水平以及生产和使用情况;进行功能原理设计,努力探索多种新型的功能原理;拟定系统总成和总体布置;选择机构和传动方式;论证技术方案的可行性;方案的评价和优选。

3. 技术设计阶段

技术设计阶段的工作包括:对选定方案进行运动学和动力学的分析和计算;确定机构和零件的功能参数,必要时进行模拟试验;主要零件工作能力的计算;完成结构设计,形成总装图;考虑制造工艺,确定零件的形状、尺寸,确定零件的配合公差,绘制零件图;进行设计的标准化;编写零件的加工制造工艺流程;编写设计说明书等技术文件。

4. 试制、试验、改进、鉴定阶段

该阶段的工作包括:试制样机,并按规程进行试验;检测各项性能参数指标是否达到设计要求;经过鉴定、评价,提出改进意见。有时需要进行反复改进和试验。

5. 产品定型阶段

经过试验和鉴定,产品的各项指标达到设计要求后,可进行小批量试生产,经过实际使用,收集使用数据和反馈意见,并对设计做进一步的修改,使产品逐步完善,最后正式定型

投产。

实际上,设计的各个阶段是互相联系的,在某个阶段发现问题后,必须返回到前面的有关阶段修改设计。整个设计过程就是一个不断修改、不断完善并逐步接近理想结果的过程。

第三节 本课程的研究内容、性质和任务

机械设计基础的主要研究内容是:机械设计的基本原则、基本理论和方法;常用机构、机械传动和通用机械零部件的基本构成、工作原理、结构特点、性能参数以及设计计算方法。另外还介绍一些与机械设计密切相关的知识,如机械的平衡和运转调速,机械零件的常用材料和热处理方法,机械零件的润滑和润滑剂,有关国家标准和规范的运用以及一些标准件的选用原则和方法等。

机械设计基础是一门旨在培养学生具有一定机械设计能力的技术基础课。本课程运用机械制图、工程力学等先修课程的知识,来研究和解决机械设计中的共性问题,并为日后进一步学习专业课程中有关机械的内容或专业机械设备的相关知识打下一定的基础。

随着社会化大生产和人民生活的机械化、自动化水平的不断提高,机械设备在各行各业均得到了广泛应用,这不仅对学习机械设计和制造的专业技术人才有大量的需求,也要求其他行业的工程技术人员掌握一定的甚至是较深入的机械或机械设计的基础知识,并具有机械设备的管理、使用和维护甚至是技术革新的能力,以求更好地为生产技术的进步、生产水平的提高和经济建设的发展服务。本课程的开设正是为了适应这一社会需求,并在培养材料、冶金、铸造、采矿、建筑、交通、运输、物流、工业工程等专业的工程技术人员方面起到一定的作用。

本课程的主要任务是:

- 1) 掌握机械中常用的机构、通用零(部)件及标准零(部)件的工作原理、结构、性能特点、选用及其设计计算方法;
- 2) 具备设计简单的机械传动装置和研究机械设计方案的能力;
- 3) 具有运用标准、规范、手册、图册等技术资料的能力。

机械设计基础是一门涉及知识面广,而且偏重于应用的课程。学生在学习过程中应重视理论联系实际,注重分析问题和解决问题的方法,并学会综合运用本课程的知识来解决具体的机械设计问题。

第一章 平面机构的结构分析

所有机构都是由具有确定运动的构件组成的。若机构中所有的构件都在同一平面或相互平行的平面内运动，则称该机构为平面机构，否则，就称为空间机构。但将构件组合成机构是有条件的，并不是将构件任意组合都能组成机构。本章主要研究平面机构的结构分析，其内容包括：平面机构的组成、平面机构的运动简图和平面机构具有确定运动的条件等。

第一节 平面机构的组成

一、运动副及其分类

机构中的每个构件都以一定方式与其他构件互相连接。两个构件直接接触并能产生一定的相对运动的连接称为运动副。

两个构件组成的运动副，不外乎通过点、线或面的接触来实现。按接触方式，可将运动副分为低副与高副两类。

1. 低副

两构件通过面接触连接组成的运动副称为低副。平面机构中的低副包括转动副（见图 1-1）和移动副（见图 1-2）两种。

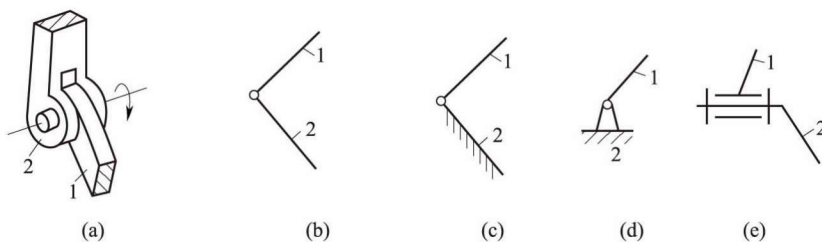


图 1-1 转动副及其表示方式

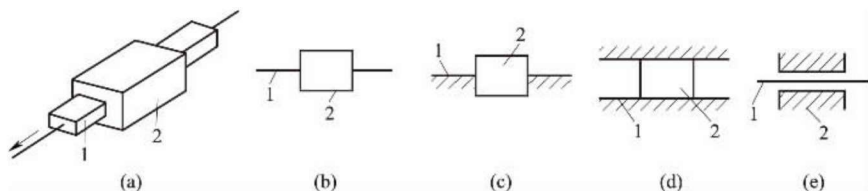


图 1-2 移动副及其表示方式

1—导杆；2—滑块

(1) 转动副

转动副的结构构成如图 1-1 (a) 所示，也称为铰链。组成转动副的两个构件只能做相

对转动，不能做相对移动。正是转动副的连接限制了两构件间的相对移动。转动副在机构运动简图中的表示方法（画法）如图 1-1（b）所示，当其中一个构件是机架时，其表示方法如图 1-1（c）~图 1-1（e）所示。

（2）移动副

移动副的结构构成如图 1-2（a）所示。组成移动副的两个构件只能沿直线做相对移动，不能做相对转动。同理，正是移动副的连接限制了两构件间的相对转动。移动副在机构运动简图中的表示方法如图 1-2（b）所示，通常将构件 1 称为导杆，构件 2 称为滑块，当其中一个构件是机架时，其表示方法如图 1-2（c）~图 1-2（e）所示。

2. 高副

两个构件通过点、线接触组成的运动副称为高副。如图 1-3 所示，由于两构件是点或线接触，组成高副的两个构件可以沿接触点 A 的切线方向做相对移动，也可以绕着接触点 A 相对转动。运动副只限制了两构件沿接触点法线方向的相对运动。

可见，运动副的作用就是限制构件的相对运动，这称为运动副的约束。运动副约束或限制相对运动的个数，称为运动副的约束数，详见本章第三节所述。高副有一个约束，低副有两个约束。

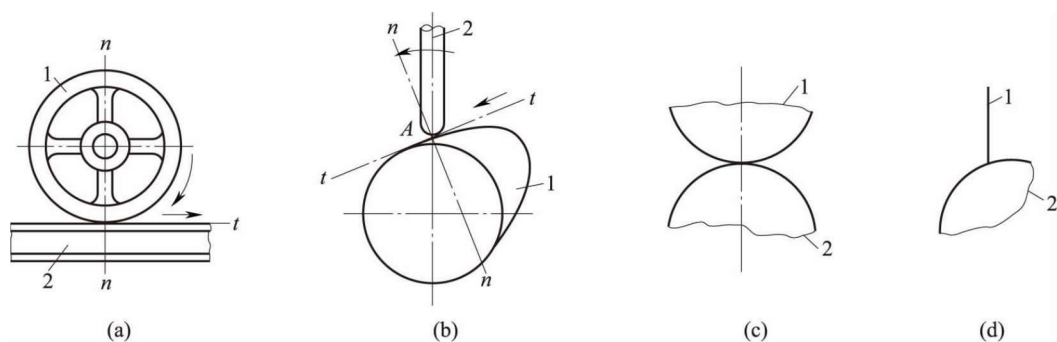


图 1-3 高副的表达方式

二、机构的组成

将构件用运动副连接起来即组成机构。机构中的构件按其功能特性可分为三类，下文以图 1-4 所示的曲柄滑块机构为例予以说明。

1. 机架

机构中相对其他构件固定不动的构件称为机架，即用来支撑其他运动构件的构件。通常以机架作为参考坐标来描述其他构件的运动情况，如图 1-4 中的构件 4，通常，在机构运动简图中机架以画上“阴影线”为标记。

2. 原动件

原动件又称为主动件或驱动件，是运动规律已知的活动构件。它的运动由原动机输入，故又称为输入构件，在机构运动简图中，它以画上表示运动

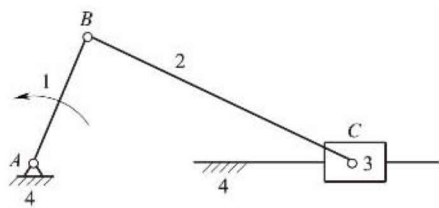


图 1-4 曲柄滑块机构

1—曲柄；2—连杆；3—滑块；4—机架

方向的箭头为标记，如图 1-4 中的构件 1（曲柄）。

3. 从动件

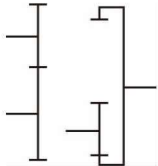
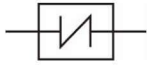
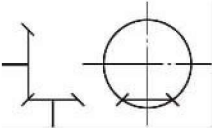
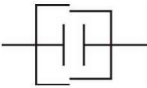
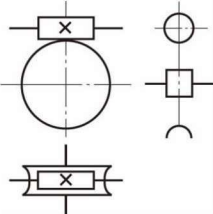
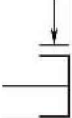
从动件是机构中随着原动件运动，而且运动确定的其余活动构件。其中，输出预期运动规律的从动件称为输出构件，它的运动规律取决于原动件与中间传递运动的从动件的尺寸。如图 1-4 中的构件 2（通常称为连杆）和构件 3（称为滑块）均为从动件。若选构件 3 作为输出构件，则曲柄滑块机构可以将曲柄 1 的定轴转动转换成滑块 3 的往复移动。

将若干个构件用运动副连接起来的构件系统，在没有规定机架和原动件之前只能称之为运动链，不能称为机构。因为同一个运动链，选不同的构件作机架时，将得到不同的机构，因此，机构是规定了机架和原动件，并且运动确定的运动链。

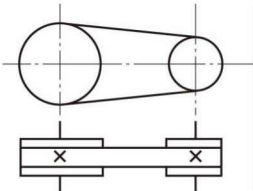
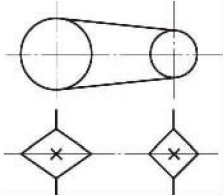
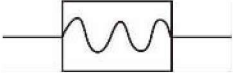
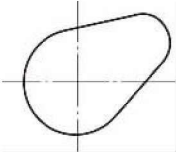
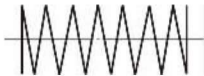
第二节 平面机构的运动简图

在图 1-4 所示的曲柄滑块机构中，曲柄 1、连杆 2，特别是机架 4 的实际外形和结构往往很复杂，连接它们的运动副的实际结构也多有不同，而我们在研究机构的运动时，并不需要了解这些实际的复杂结构，因为构件之间的相对运动仅与运动副的类型和运动副之间的相对位置有关。为使问题简化，不必考虑与运动无关的因素，只需用简单的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相对位置即可。这种说明机构中各构件间相对运动关系的简化图形，称为机构运动简图。常用机构的运动简图符号见表 1-1。

表 1-1 常用机构运动简图符号（摘自 GB/T 4460—2013）

名称	基本符号	名称	基本符号
齿轮传动		联轴器 不指明类型	
		弹性联轴器	
锥齿轮		可控离合器	
蜗轮与 圆柱蜗杆		制动器	
		向心轴承	

续表

名称	基本符号	名称	基本符号
带传动		向心滚动轴承	
		单向推力轴承	
链传动		单向推力球轴承	
		螺旋传动 (整体螺母)	
盘形凸轮		压缩弹簧	

下面以图 1-5 (a) 所示的内燃机配气机构为例，说明绘制机构简图的方法和步骤。

1. 明确机构的组成

配气机构由凸轮 1、滚子 2、摆杆 3、阀芯 4、阀体 5 共 5 个构件，3 个回转副 A、C、D，一个移动副 F 和两个高副 B、E 组成，其中，阀体 5 为机架。

2. 分析机构的运动

从原动件开始，按照运动传递顺序依次进行。原动件凸轮 1 按顺时针方向转动，通过滚子 2 带动摆杆 3 绕回转副 D 转动，由高副 E 与弹簧的作用使阀芯 4 做往复运动来实现阀门的启、闭。

3. 选择视图平面

一般选择与各构件运动平面相互平行的平面作为机构简图的视图平面，这样比较容易表达清楚机构的组成和运动情况。当一个视图不足以表达清楚时，可以再增加视图或局部视图。此配气机构的视图平面与纸面平行。

4. 绘制机构的运动简图

选定适当的比例尺，根据实际机构的运动副的位置和构件的尺寸，用规定的符号，从原动件连接的机架开始，依次绘出各个构件和运动副。在机架处画上阴影线，在原动件处用箭头标出运动方向。图 1-5 (b) 所示为绘出的配气机构的运动简图。

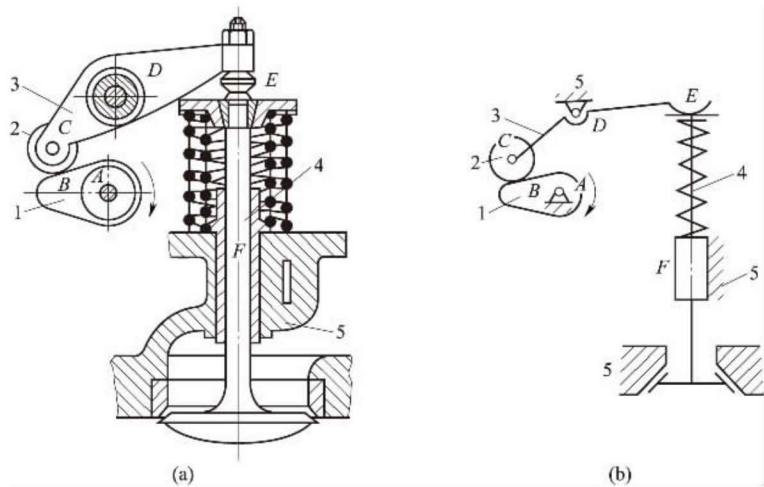


图 1-5 内燃机配气机构

(a) 配气机构结构图; (b) 配气机构运动简图

1—凸轮; 2—滚子; 3—摆杆; 4—阀芯; 5—阀体

第三节 平面机构的自由度

一、构件的自由度

一个自由构件在平面上可以具有三个独立运动。如图 1-6 所示, 在 xoy 坐标系中, 构件 S 可沿 x 轴、 y 轴方向移动和绕任意点 A 转动。构件的这种独立运动称为自由度。一个做平面运动的自由构件有 3 个自由度。

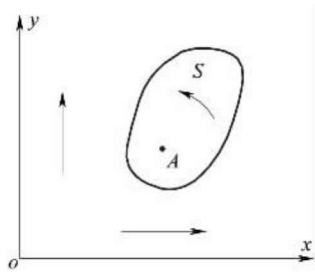


图 1-6 构件的自由度

二、运动副的约束

两构件组成运动副后, 由于构件间的直接接触使某些独立运动受到了限制, 其自由度随之减少。对独立运动所加的限制

称为约束。不同类型的运动副引入的约束也不同, 所保留的自由度也就不同。例如图 1-1 所示的转动副, 约束了 2 个移动的自由度, 保留了一个转动的自由度; 而如图 1-2 所示的移动副, 约束了一个方向的移动和平面内 2 个转动的自由度, 保留了沿另一个轴方向移动的自由度; 如图 1-3 (b) 所示的高副只约束了沿接触点公法线 $n-n$ 方向移动的自由度, 保留了绕接触点转动和沿接触点公切线 $t-t$ 方向移动的 2 个自由度。所以说, 其低副的约束数目为 2, 高副的约束数目为 1。

三、机构的自由度

机构能够产生独立运动的数目称为机构的自由度。若一个平面机构由 N 个构件组成, 去掉机架 (其自由度为零) 后, 其活动的构件数为 $n = (N - 1)$ 。在没用运动副连接之前, 在 n 个活动构件中有 $3n$ 个自由度。用运动副将构件连接起来组成机构之后, 各构件的自由度就减少了。若该机构中有 P_L 个低副和 P_H 个高副, 则分别引入了 $2P_L$ 和 P_H 个约束, 机构中

减少的自由度数为 $(2P_L + P_H)$ 。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，以 F 来表示，即

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

四、机构具有确定运动的条件

机构的自由度也是机构具有独立运动的数目。如前所述，从动件是不能独立运动的，只有原动件才能独立运动。通常原动件都与机架相连，并具有一个独立运动，由外界给定。如果给定的原动件数不等于机构的自由度，则会出现以下几种情况：

- 1) 若 $F \leq 0$ ，表示没有原动件，这时机构不能运动，变成了桁架；
- 2) 若原动件数目大于 F ，则会导致机构中最薄弱的构件被损坏；
- 3) 若原动件数目小于 F ，则机构运动不确定，会产生无规则的运动。

所以，机构具有确定运动的条件是： $F > 0$ ，且原动件数等于自由度数 F 。

在图 1-4 所示的曲柄滑块机构中，活动构件 $n = 3$ ，低副数 $P_L = 4$ ，高副数 $P_H = 0$ 。则机构的自由度数为

$$F = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

由图 1-4 可见，构件 1 为原动件，原动件的数目等于自由度数，则该运动是确定的。

五、计算自由度时应注意的问题

1. 复合铰链

当两个以上的构件用同一回转副连接时就构成了复合铰链，如图 1-7 所示。在与轴线垂直的视图上，只能看到一个铰链，容易误认为是一个回转副，使计算出错。 K 个构件组成的复合铰链应有 $K-1$ 个回转副。

2. 局部自由度

对于某些构件所产生的并不影响其他构件的局部运动称为局部自由度。如图 1-8 所示，平面凸轮机构的推杆 2 底部有为了减小磨损而加入的滚子 3，而滚子绕其自身轴心的转动并不影响推杆的运动。在计算自由度时，对局部自由度的处理方法是滚子与安装滚子的构件

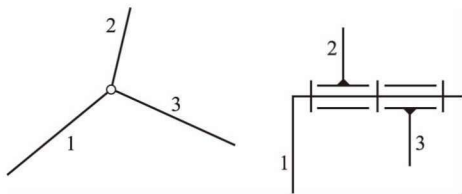


图 1-7 复合铰链

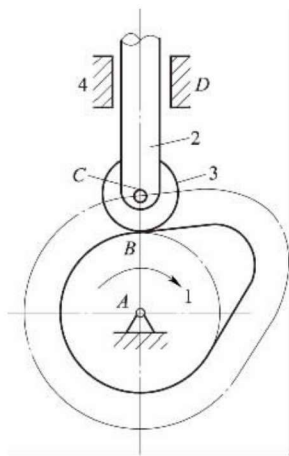


图 1-8 局部自由度

1—凸轮；2—推杆；3—滚子