

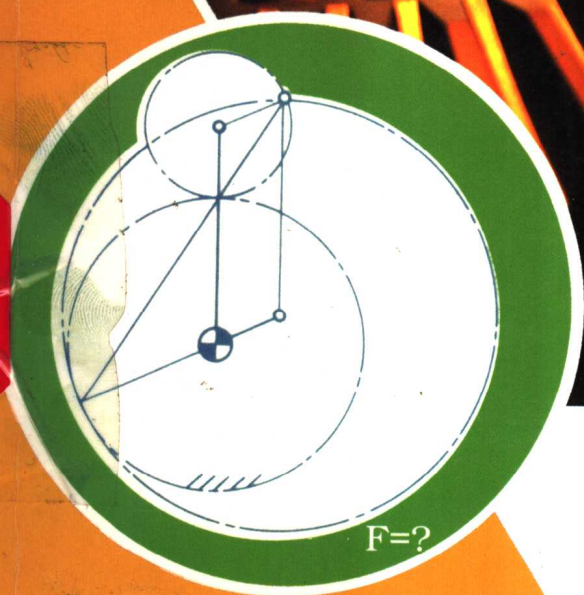


高等学校教材

机械原理

西南交通大学 谢泗淮 编著

机械原理



中国铁道出版社

高 等 学 校 教 材

机 械 原 理

西南交通大学 谢泗淮 编著
西南交通大学 陈 永
天 津 大 学 张 策 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 1 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是教育部批准的高等教育“面向 21 世纪课程教材”之一。主要内容有:绪论;机构的构型分析、运动分析、力分析;平面连杆机构、凸轮机构、齿轮机构的综合;机械的质量平衡、功率平衡;机械运动方案设计等。全书着重把机械原理放在机械产品设计的总体观念上来讲授,并突出原理,加强建模指导,强调设计实例的学习,以期在传授知识的同时加强学生创新意识和创新能力的培养。

本书为机械类专业本科生教材,也可供从事机械研究与应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理/谢泗淮编著. —北京:中国铁道出版社,2001.8 高等学校教材
ISBN 7-113-04271-6

I. 机… II. 谢… III. 机构学-高等学校-教材 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 045203 号

书 名:机械原理

作 者:谢泗淮

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑:赵 静

封面设计:马 利

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787 mm×960 mm 1/16 印张:14.75 字数:293 千

版 本:2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 7-113-04271-6/TH·94

定 价:20.40 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

机械原理是机械学科相关专业的一门基础理论课程。科学技术和机械工业的迅速发展对课程提出了新的要求。近 20 年来机械原理的同仁们一直致力于本课程教学内容和方法的改革。本书是在作者编著的机械原理补充讲义“平面机构分析与综合”,以及教学与教改实践和科研成果的基础上写成的。

编写本书的基本依据是教育部高等学校工科机械基础课程教学指导委员会修订的高等工业学校“机械原理课程教学基本要求”。同时根据教育部教材改革的精神,结合作者几年来主持本校机械类面向 21 世纪教改试点班的教改与教学实践,本书在内容与体系上有以下求新:

一、根据机械基础系列课程改革的精神,本书将机械原理课程定位为研究机械运动性能和设计的基本理论与方法。具体落实在机械运动方案设计上。机械原理(含课程设计)的实用性与取材在于“使学生基本掌握机械运动方案设计的知识与能力”。为此本书的最后一章是“机械运动方案设计”,同时加强了机械系统动力学分析与综合——机械的质量平衡与功率平衡的内容与实用性。

机构学是机械原理的基础,但它的实用价值通常要在机械系统中体现。比如,机构的真实性能除了与机构的构型有关之外,还与输入运动有关,这就决定于机械系统的真实运动了;再则,机构的质量平衡也只有放在机械系统中讨论才是完整的、有用的。

总之,本书着意把机械原理放在机械产品设计的总体观念上来讲授。

二、机械运动方案设计是机械产品创新与质量保证的一个重要环节。因此,机械原理是培养机械工程师创新能力的一门重要课程。本书刻意追求的又一个目标是,在传授知识的同时加强学生的创新意识和创新能力的培养。在创新方法方面,全书特别突出了分析与综合中的几何建模与数学建模,以及等效变换的内容与练习。

三、突出原理。以理为据,讲清所以然是本书追求的又一个目标。本书重点讲授与反复应用的原理有相对运动学原理、能量守恒原理、平衡原理、建模原理和等效变换原理等。

以理为据进行分析与综合,容易认识问题的本质,同时有事半功倍的效果。比如,利用相对运动学原理和等效变换是简化机构性能分析与综合十分有效的方法;讲清运动副的摩擦自锁平衡原理,大部分的间歇机构的工作原理与性能分析便可以作为例题讲授或当作习题由学生求解。

讲清所以然是摒弃单纯知识传授,培植借鉴创新的一种好方法。比如,讲清四杆机

构点运动等效变换的原理,就容易得到行星轮点运动等效变换的方法;又,通过机构构型的变换,便可以了解到不同功能的组合机构是如何演化出来的;等等。

四、加强建模指导。建模与结果是工程分析与设计的两个主要环节,是本课程教学的重点与难点。本书除了结合分析与综合的命题反复阐明约束建模原理,以及由给定约束和机构构型约束相结合的建模方法之外,还增加了优化建模的策略和模型完整性的检验。同时尽力以几何建模为基础来增加感性认知,以范例的题意分析来加深建模的领悟。

五、本书中的分析与综合方法面向计算机,采用解析法,图解法则用于几何建模。解析法主要讲授数学建模和结果分析。所有机构综合的建模工具都是矢量旋转变换。简明系统有利于学习掌握。

例、习题是体现教学要求和教学内容具体应用的一个主要环节。本书各章的重点、难点都设有例题。习题中有相当份量的综合题,其中一部分是开发型的。

本书由西南交通大学陈永教授和天津大学张策教授担任主审。本书受到了教育部高等学校工科机械基础课程指导委员会和西南交通大学教务处的关爱与支持;得到了哈尔滨工业大学李瑰贤教授、重庆大学黄茂林教授、四川工业大学黄恭彪教授以及西南交通大学许维璋副教授、谢进教授、李柏林教授、李立博士、卢存光副教授的宝贵意见与支持,我的研究生王新民为本书提供了例题8-2,特别是宋桂玉高级工程师为本书的成稿与出书付出了辛勤的劳动,在此对他们表示深切谢意。

谢进

2001年4月7日
于西南交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械的基本概念	1
1.2 机械科学与机械原理	2
1.3 机械原理与创新设计	3
习 题	3
第 2 章 机构的构型分析	4
2.1 机构的构造	4
2.1.1 构件	4
2.1.2 运动副	4
2.1.3 运动链与机构	6
2.2 机构运动简图	7
2.3 机构的自由度	8
2.4 过约束机构	9
2.5 机构的组成原理	12
习 题	15
第 3 章 机构的运动分析	17
3.1 三心定理	17
3.1.1 速度瞬心	17
3.1.2 三心定理	18
3.1.3 三心定理在机构速度分析中的应用	18
3.2 机构的可动性分析	20
3.2.1 死点	20
3.2.2 机构具有曲柄的条件	22
3.2.3 过约束机构可动的条件	24
3.3 平面连杆机构的运动分析	25
3.3.1 II 级机构的运动分析	25

3.3.2 高级机构的运动分析·····	31
3.3.3 其他算法简介·····	32
3.4 轮系的运动分析·····	33
3.4.1 定轴轮系的传动比·····	34
3.4.2 周转轮系的传动比·····	35
3.5 机构的运动等效变换* ·····	37
3.5.1 机构全运动等效变换·····	37
3.5.2 机构角运动等效变换·····	39
3.5.3 机构点运动等效变换·····	41
3.5.4 输入输出运动等效变换·····	45
习 题 ·····	49
第 4 章 机构的力分析 ·····	56
4.1 平面机构的动态静力分析·····	56
4.1.1 II 级机构的动态静力分析·····	57
4.1.2 平衡力(力矩)的简易解法·····	60
4.1.3 高级机构的力分析·····	61
4.2 机构的传动角·····	61
4.3 死区·····	63
4.3.1 运动副中的摩擦与自锁·····	64
4.3.2 死区·····	66
4.3.3 运动副自锁的应用·····	68
4.4 计及摩擦时连杆机构的动态静力分析·····	70
4.5 机械效率·····	71
习 题 ·····	76
第 5 章 平面连杆机构综合 ·····	79
5.1 平面连杆机构的功能与应用·····	79
5.2 实现给定刚体位置的四杆机构综合·····	89
5.2.1 刚体位置变换的描述——矢量旋转变换·····	89
5.2.2 刚体位置导引的铰链四杆机构综合·····	90
5.2.3 刚体位置导引的转杆滑块机构综合·····	98
5.3 实现给定连架杆对应位置的四杆机构综合 ·····	102
5.3.1 传动铰链四杆机构综合 ·····	102
5.3.2 传动转杆滑块机构综合 ·····	107

5.4 实现给定行程速比系数的四杆机构综合	110
5.4.1 急回曲柄摇杆机构综合	110
5.4.2 急回曲柄滑块机构综合	112
5.5 实现给定点轨迹的四杆机构综合	113
5.5.1 点导引的铰链四杆机构综合	113
5.5.2 实现点位对应的铰链四杆机构综合	114
5.6 近似综合	115
5.7 多杆机构综合	116
5.7.1 导引六杆机构综合	117
5.7.2 传动六杆机构综合	118
习 题	120
第 6 章 凸轮机构综合	122
6.1 传动函数	122
6.1.1 多项式运动规律	123
6.1.2 三角函数运动规律	125
6.2 凸轮廓线的综合	127
6.2.1 对心直动尖端推杆盘形凸轮机构	127
6.2.2 偏置直动尖端推杆盘形凸轮机构	128
6.2.3 摆动尖端摆杆盘形凸轮机构	129
6.2.4 滚子从动杆盘形凸轮机构	129
6.2.5 直动平底推杆盘形凸轮机构	130
6.3 凸轮机构构型和基本尺寸的确定	131
6.3.1 凸轮机构构型的选择	131
6.3.2 凸轮机构基本尺寸的确定	131
习 题	142
第 7 章 齿轮机构综合	145
7.1 共轭齿廓	146
7.1.1 啮合基本定理	146
7.1.2 平面共轭齿廓的综合	146
7.1.3 渐开线齿廓	148
7.1.4 摆线齿廓	149
7.2 渐开线直齿圆柱齿轮传动的综合	151
7.2.1 直齿轮的基本参数和几何尺寸	151

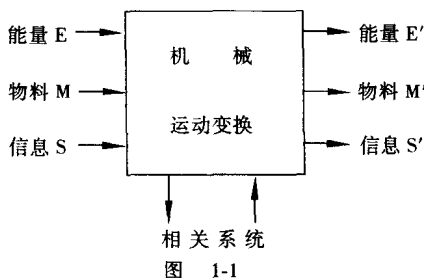
7.2.2 一对齿轮正常传动的条件	152
7.2.3 齿轮传动的类型与功用	154
7.2.4 齿轮传动的综合	158
7.3 斜齿圆柱齿轮传动	160
7.3.1 共轭齿面的特点	160
7.3.2 斜齿轮的基本参数	161
7.3.3 斜齿轮传动	162
7.4 圆锥齿轮传动	163
7.4.1 直齿圆锥齿轮共轭齿面的生成	163
7.4.2 直齿圆锥齿轮的基本参数	164
7.4.3 标准直齿圆锥齿轮传动	165
7.5 蜗杆蜗轮传动	165
7.5.1 共轭齿面的生成	165
7.5.2 阿基米德蜗杆蜗轮传动	165
习 题	167
第 8 章 机械的质量平衡	170
8.1 转子的平衡	170
8.1.1 转子的静平衡	171
8.1.2 刚性转子的动平衡	171
8.1.3 实验平衡	174
8.1.4 挠性转子动平衡简介	175
8.2 构件质量的等效代换	176
8.3 机构的静平衡	177
8.4 机构在机座上的完全平衡	180
8.5 机械系统的质量平衡	185
习 题	186
第 9 章 机械的功率平衡	188
9.1 机械的运动方程	188
9.2 机械的等效动力学模型	189
9.3 机械的真实运动	191
9.4 机械的功率平衡	196
9.4.1 过渡阶段的功率平衡	197
9.4.2 稳定运转阶段的功率平衡	198

习 题	202
第 10 章 机械运动方案设计	204
10.1 机械产品的开发与创新	204
10.2 功能原理解	205
10.3 机构构型设计	206
10.3.1 初始构型方案的生成	206
10.3.2 机构构型的演化	208
10.4 机械运动方案的生成与优选	216
10.4.1 原动机的选型	217
10.4.2 机构系统构型方案的生成	217
10.4.3 机构系统方案的优选	218
习 题	221
附 表	222
参考文献	225

第 1 章 绪 论

1.1 机械的基本概念

机械是以机械运动为主要特征的一种技术系统。机械的总功能是通过有约束的机械运动实现能量、物料、信息的预期变换(图 1-1)。



以上是根据现代科学世界观和方法论给机械所下的定义。狭义地说,内燃机、电动机、水轮机、汽轮机、风力发电机、液压泵等都是能量转换的动力机械;各类工程系统所用的机械大多属于物料成形和移位等变换的机械;典型的信息机械有打字机、雷达和测量仪表类机械等。广义地讲,机械本身就是由物料构成的,每台机械运动的同时,都伴随着能量、信息的传递与变换。也就是说,在机械中物料的运动流与能量流和信息流是同时存在的。其中信息流是运动流和能量流的映像,科学地提取和利用信息流对机械实施控制,从而提高机械中能量流与运动流的质量,这是现代机械的一个主要特征。

按系统的功能分解,机械又可分为动力系统、传动系统、执行系统和控制系统等四大子系统。或者,为了突出现代机械的特征,又可以简称机械是由机械系统和控制系统组成的。这里,将动力系统、传动系统和执行系统统称为机械系统。其中,传动系统和执行系统又可称为机构系统,因为组成它们的子系统是机构。机构是具有确定相对运动的构件组合体。机械中常用的基本机构有齿轮机构、凸轮机构和连杆机构等。图 1-2 所示为一单缸内燃机。其执行系统是输出曲柄轴和由曲柄轴 1、连杆 2、活塞 3 组成的曲柄滑块机构。气化燃料在燃烧室 9 内燃烧膨胀推动活塞使曲柄轴转动输出机械能。装在曲柄轴与凸轮轴 6 上的齿轮机构(4 和 5)作定传动比传动,使凸轮机构的凸轮推动推杆 7 和 8 作上下开启与关闭进气和排气阀门的运动,从而控制燃气的输入和废气的排出。这是一种比较典型的传统动力机械,其控制亦是由机构来实现的。现代机械的控制系统更加先进和精确,其中以计算机控制为主要手段。现在已有利用计算机

根据工况实施随机控制的内燃机用于汽车和工程机械上。也就是说机械正在机电结合中迅速发展。

机械是一个系统,它相对于其他系统而存在。机械与相关系统的作用与反作用首先是它与人、自然环境和接口系统——与输入和输出相关的系统有密不可分的技术联系,再则是机械与市场有着生存与互动的关系。如何使机械与其相关系统和谐相处相得益彰是现代机械概念设计的一个重要发展。

1.2 机械科学与机械原理

“机械科学是研究机械产品的性能、设计、制造的基础理论和技术基础的科学”^[1]。狭义地说,机械产品设计包括技术方案设计和结构与工艺设计两大部分。技术方案设计是根据机械产品的功能要求拟定可行的原理解和进行机械运动方案与控制方案的设计,结构与工艺设计包括机械强度、刚度和可靠性设计、润滑系统设计、造型设计和人机工效学设计,以及按照工艺要求与规范设计出供生产使用的机械图。

机械原理是机械产品性能分析和设计的基础理论课程之一。其内容是研究机械运动方案设计的理论与方法。机械运动方案设计包括:

1. 根据可行的功能原理解拟定机械系统——原动机和机构系统的方案;
2. 对非劣的机构系统方案进行运动设计——称机构尺度综合;
3. 对机械系统进行动力学设计;
4. 对综合出来的机构系统进行运动性能与动力性能分析;
5. 根据功能要求与约束条件对分析的结果进行优选,最后决策出最佳的功能原理解及其机械系统;
6. 画出机械系统的运动简图。

机构的方案设计、尺度综合与性能分析是机械运动方案设计的基本内容。它们归属于机械科学的第一个分支——机构学,是机械原理研究的基本问题。机械系统动力学研究如何减少机械系统的振动与噪声。机械振动学是机械学科的又一个分支。机械原理将研究的是如何减少产生机械振动的迫振力——惯性力,即研究实现机械的质量平衡和功率平衡的问题。

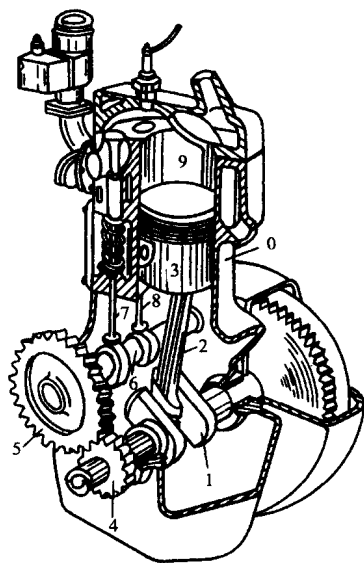


图 1-2
0—机体;1—曲柄轴;2—连杆;
3—活塞;4、5—齿轮;
6—凸轮轴;7、8—推杆;9—燃烧室。

1.3 机械原理与创新设计

机械运动方案设计是一种创新设计。它是提高机械产品性能、质量和竞争力的一个关键性环节,对于设计师是最具有魅力的挑战。设计师的创新能力包括创新思维、知识积累、创新方法和创新毅力四个方面。设计师创新能力的形成是一个系统工程,有一个积累的过程。机械原理课程在培养学生的机械创新能力方面处于十分重要的地位。在创新能力中,知识积累是创新能力的基石。学生通过学习掌握本课程的内容是基本的要求。为培养学生的创新性逻辑思维与科学的创新方法,在本课程的教学着重加强以下内容:

1. 机构分析与综合中几何建模与数学建模的理论与方法。
2. 理论与方法的发展及其条件性和实用性。
3. 机构及其运动副在运动学与动力学上的条件性等效变换原理与方法。
4. 方案设计中建模与优选的方法。

创新性思维中的非逻辑思维,即无序思维在创新设计中是极其重要的,它往往是创新的先导。创新性无序思维的特征是凭直觉、联想、发散式思维,从而产生灵感或预感,然后通过逻辑的理性推演产生出新的方案。创新性无序思维可以从机构的变换过程与创新范例中领悟和在设计实践中培养。至于创新需要毅力是不言而喻的,因为创新是对已有的挑战,缺乏勇气的人会望而却步,意志柔弱者会半途而废。有为的设计师应当是创新的实践人与推动者。

习 题

- 1-1 试以系统的相似性定律论智能机械与人。
- 1-2 试以一个范例(比如跳高运动技术的发展)论创新。
- 1-3 试以我国铁路运输动力机械的转型(由蒸汽机车——内燃机车——电力机车)论机械与相关系统(广义环境)的关系。

第2章 机构的构型分析

机构是机械的子系统,按其结构的运动特征定义,它是具有确定相对运动的构件组合体。机构构型分析的内容就是研究机构的生成原理和机构具有确定运动的条件。这是认识机构的开始,也是为机构的可动性分析寻找理论依据,并为建立机构的运动分析和综合的几何模型——机构运动简图以及机构的分类提供方法。

2.1 机构的构造

从运动学的观点,机构是由构件(简称杆)和可动联接(称运动副)构成的。

2.1.1 构 件

与零件不同,构件是机构中的一个运动单元。零件则是一个制造单元。例如,内燃机的主机构——曲柄滑块机构(图 1-2)中的连杆 2,从运动学上讲,它可以简化成一根直杆[图 2-1(a)],但在考虑了强度、刚度、磨损以及制造和安装等力学与制造学条件之后,它的实用结构则是由连杆头、连杆体、螺栓、螺母、垫片等零件组成的一个刚性联接部件[图 2-1(b)]。构件用得最多的是刚性构件(俗称构件。当然,这仅是一种近似的假定)。此外,还有拉曳件,如皮带、钢带、链条等。

2.1.2 运动副

运动副亦是一个运动学名词,指两个构件之间接触式的可动联接。常用的运动副列于表 2-1。机构构件间的运动与力是通过运动副来传递的;机构构件间的相对运动决定于机构中运动副的类型与配置;机构的运动精度与动力性能和运动副的制造精度、运转条件密切相关。因此,可以说,运动副是机构的关键。

两个构件在联接前有 6 个独立的相对运动,简称有 6 个自由度(自由度数用 f 表示)。联接后彼此间只能作约束运动。根据提供约束数目 u 的不同,运动副分为 I ~ V 类。仅提供一个约束,使两个构件间保留 5 个自由度的运动副称为 I 级副,其余类

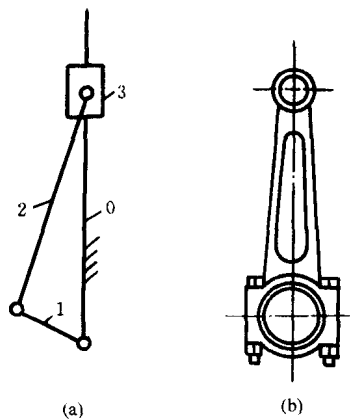
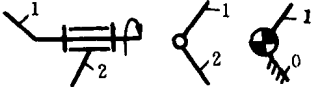
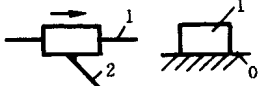
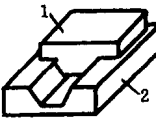
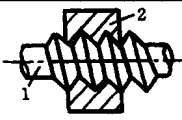
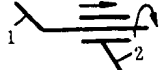
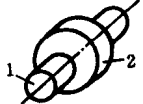
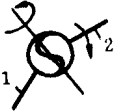
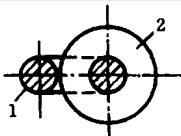
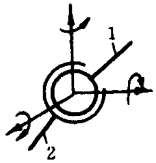
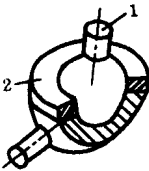
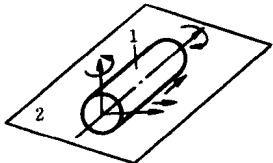
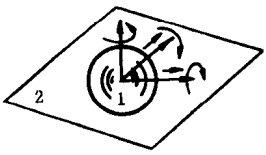


图 2-1

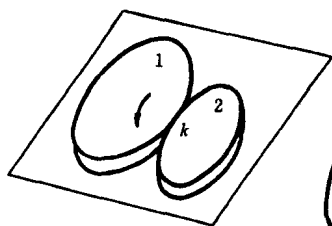
推。显然, $f + u = 6$ 。

表 2-1 常用的运动副

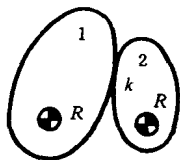
类型	序号	名 称	运 动 简 图	示 例	代号
V	1	转动副			R
	2	移动副			P
	3	螺旋副			H
IV	4	圆柱副			C
	5	环 副			T
III	6	球面副			S
II	7	圆柱—平面副			
I	8	球面—平面副			

从表 2-1 可知,运动副中构件间的接触形式有面接触和点、线接触两种。面接触

(在表中序号为 1、2、3、4、6)的运动副统称为低副;点、线接触(表中其余序号)的运动副称为高副。低副制造容易,承载能力大,但摩擦阻力亦大。根据组成运动副的两个构件



(a)

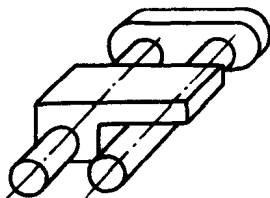


(b)

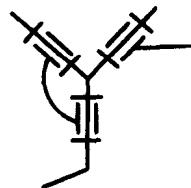
图 2-2

间的相对运动形式,运动副又有平面副与空间副之分。使被联接构件做平面相对运动的运动副称为平面副,否则属于空间运动副。独立的平面副只有转动副(又称铰链)和移动副,统称为平面低副。非独立的还有一个平面高副,它是由Ⅱ级副受平面约束生成的[图 2-2(a)],提供平面约束的是两个被联接构件与其他构件联接的两个平面低副[图 2-2(b)]。由平面高副联接的构件间

有两个自由度——两构件绕接触点 k 的相对转动和沿接触点切线方向的微移动。和构件一样,同一种运动副的结构可能很不一样。它可以仅由两个构件直接联接生成,比如表 2-1 中序号为 2~6 的运动副示例;也可能加中间元件,比如表 2-1 中序号 1 的示例或者由其他运动副组合生成的等效运动副。等效的条件是约束条件不变。图 2-3(a)所示为由一个圆柱副(Ⅳ级副)和一个圆柱-平面副(Ⅱ级副)合成的一个Ⅴ级移动副。这是一个由低级副合成高级副的例子。由高级副合成低级副的一个典型例子是采用三个轴线汇交于一点的Ⅴ级转动副等效一个加工困难的Ⅲ级球面副,如图 2-3(b)所示。此外,运动副的实用结构除了要考虑力学和制造学条件之外,还要考虑润滑、密封、散热等条件。



(a)



(b)

图 2-3

保持运动副中构件间接触的方式称为运动副的偶合。常用的有靠形体约束保持接触的形偶合,比如表 2-1 中序号为 1、3、4、5、6 的运动副示例;和利用力约束保持接触的力偶合,比如表 2-1 中序号 2 的示例中的重力偶合。图 2-3(a)所示则是以上两种偶合并用的例子。

2.1.3 运动链与机构

杆副连成的相对可动系统称为运动链。首末相接的运动链称为闭链[图 2-4(a)(b)],反之称为开链[图 2-4(c)]。当运动链中各构件间的相对运动皆平行于同一个平面时,此链称为平面运动链,否则称为空间运动链[图 2-4(b)、(c)]。

一般说来,运动链还没有直接使用的价值。只有将其中的一个构件固定在机架上,

它才变成能传递确定的动力和运动的有实用意义的机构。机构中,机架是支承机构的基础构件,同时也是机构运动的参考系;输入运动的构件称为主动件,输出运动的构件称为输出构件,其余构件称为传动件;主动件以外的可动构件统称为从动件。根据机构的定义,当主动件输入运动时,机构各构件间将具有确定的相对运动。其中输出构件的运动应是机构设计所期望的给定运动。一个运动链,可以通过取不同构件为机架(参考系),或/和采用不同的主动件和输入运动,不同的输出构件将得到不同的输出运动,从而生成不同运动功能的机构。机构按运动链的分类,也相应地分成平面机构和空间机构两大类。

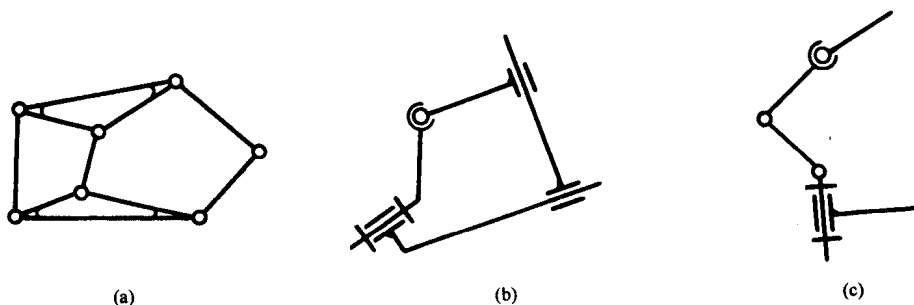


图 2-4

2.2 机构运动简图

用构件和运动副的简图表示的机构图形称为机构的运动简图。其功用是正确地表征机构各构件间的相对运动关系。它是机构分析与综合的几何模型。因此,学会绘制机构的运动简图,并能利用它来表达机械运动方案设计的构思是机械学子的一项必备的能力。

绘制机构运动简图的关键在于正确地表达出机构各构件间运动副的形式和它们的相对位置。绘制的步骤如下:

1. 查清机架、主动件和所有从动件,给各构件编号。
2. 从主动件开始,按运动传递的顺序,根据相邻构件间相对运动的形式,逐次画出运动副的简图,并用被联接构件的标号给运动副标号。
3. 将含有相同构件号的运动副相连(移动副的导杆与导路平行),该连线代表该号构件。这样,便得到由构件和运动副连成的运动链。再标上机架与主动件,即是该机构的运动简图。

下面以图 2-5(a)所示机构为例,说明其运动简图绘制的方法。

这是一个四杆机构,主动件 1 是一个圆盘,它与机架 0 以转动副 A 联接,转动中心