



普通高等教育“十二五”“卓越工程能力培养”
改革创新型规划教材

机械原理

Mechanisms And Machine Theory

江帆 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”
“卓越工程能力培养”改革创新型规划教材

机械原理

主 编 江 帆

副主编 韩立发 董克权

参 编 黄春曼 田 君 邓洪超 黄春燕

吴青凤 何 华 吕 明 区嘉洁

主 审 朱文坚



机械工业出版社

本书为适应教育部“卓越工程师教育培养计划”、适应 CDIO 教学而编写。由项目驱动教学,根据驱动项目实施过程采取“总-分-总”的思路进行章节安排,即先介绍机构基本知识、常用机构、机械运动方案设计 & 实例分析,再介绍机构结构分析机构运动分析、机构力学分析、杆机构设计、凸轮机构设计、齿轮机构设计、轮系传动分析与设计、机械效率与平衡及速度波动调节等基础知识。在此基础上,介绍了基于再生运动链的杆机构设计方法、基于 TRIZ 理论的机构创新设计方法及机构优化方法。

本书尽量选用有工程应用背景的例题、强化训练题和习题,使读者能够融入机构的工程应用环境。知识点与实例及练习交替出现,学习知识点后马上练习,增强学生对知识的应用能力;并且例题和习题量大,使学生在大量练习中对知识点融会贯通。此外,本书兼容了经典知识点和现代新型机构知识,注重知识的更新与计算机技术和机构技术发展趋势,使学生掌握的知识更实用。

本书可作为高等学校机械类各专业的教学用书,也可供机械工程领域的研究生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械原理/江帆主编. —北京:机械工业出版社,2012.12
普通高等教育“十二五”“卓越工程能力培养”改革创新型规划教材
ISBN 978-7-111-40585-6

I. ①机… II. ①江… III. ①机构学—高等学校—教材 IV. ①TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 284308 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:余 焯 责任编辑:余 焯 李 超 邓海平
版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔
封面设计:张 静 责任印制:乔 宇
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷
2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 19.25 印张 · 538 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-40585-6
定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在结合机械课程教学指导委员会对机械原理课程知识点要求，适应教育部“卓越工程师教育培养计划”，及 CDIO 教学实际的基础上进行编写的。

本书按照项目驱动理论教学原则，为了配合驱动项目开展，采取“总-分-总”的思路进行章节安排，即先介绍机构基本知识、常用机构、机械运动方案设计及实例分析，再介绍机构结构分析、机构运动分析、机构力学分析、机构设计基础、机械效率与平衡及速度波动调节等基础知识。在此基础上，介绍机构创新设计方法及优化方法，包括再生链的杆机构创新设计方法、TRIZ 理论机构创新设计方法、机构优化设计等。第 1、3 章为总体介绍，第 4~11 章为基础知识，第 12 章为机构创新设计与优化。

每章的内容安排是：先介绍一个知识点，对于重要的知识点设置例题，接着强化训练题；而后再按照这个思路安排另外一个知识点，直到本章知识点介绍完毕，最后给出课后习题。

考虑到教学的实际情况，本书建议的课堂组织形式为：

1) 提前三周将教学进度表（包括每次讲授的知识点信息、驱动项目、课后实践内容、关键节点、考核要求等）发给学生，并提醒学生严格按照进度表教学。

2) 驱动项目主体实践工作放在课后进行，课内以重要知识点传授和研讨为主。

3) 课堂安排为：a) 对于关键节点，要求学生以小组为单位汇报课后实践情况，通过 PPT 和实物讲解实践结果，并回答其他组的质疑；b) 典型知识点讲授，对重点、难点知识点进行讲授，并回答学生在课后实践中发现的问题；c) 专题讨论，针对讲授的难点知识进行深入讨论，每组分别总结观点，并汇总各方观点给出参考建议；d) 提醒如何进行课后的实践任务。

本书构建了适合 CDIO 教学的机械原理知识体系，着力培养学生机构知识和创新机构分析与设计能力，体现了以下特色：

1) 按照实际项目组织知识点，采用“总-分-总”顺序构建知识点顺序，便于学生边实践边学习理论知识，并给出足够的实例参考，帮助学生有参照地学习机构分析与综合方面的知识。

2) 尽量选用有工程应用背景的例题、强化训练题和习题，使学生能够融入机构的工程应用环境。知识点与实例及练习交替出现，学习知识点后马上练习，增强学生对知识的应用能力；并且例题和习题量大，使学生在大量练习中对知识点融会贯通，特别是第 2 章习题中给出大量生产实际中的机构，通过绘制这些机构的机构简图，让学生充分了解机构种类及基本构成。

3) 给出再生运动链杆机构创新设计方法、TRIZ 理论机构创新设计方法及机构参数优化方法，引导学生在学习基本知识的同时，应用创新思维与创新方法设计更为合理的创新机构。

4) 兼容经典知识点和现代新型机构知识，注重知识的更新与计算机技术和机构技

术发展趋势同步，使学生掌握的知识更实用。

本书由江帆担任主编，韩立发、董克权担任副主编，黄春曼、田君、邓洪超、吴青凤、何华、吕明、黄春燕、区嘉洁参与各章的编写工作及插图制作。另外还有龙云、孙骅、游思坤、石怀荣、陈兴强、陈显明等为书籍的编写做了一些有益的工作。研究生冯均明、喻娟、杨鹏海承担了文字编辑工作、习题解答及配套课件的制作。苏穗江、陆俊杰、曾威、吴凯敏、陈彬、陈兆涛、陈广欢等许多同学参与插图的制作。本书的习题答案、配套课件请在机械工业出版社教育服务网（www.cmpedu.com）下载。

本书由朱文坚教授审阅，她提供了很多宝贵意见，特此致以深深的谢意。

本书得到广州大学教材出版基金资助，得到张春良、满连杰、喻萍、刘晓初、刘超英、王一军等领导的支持和指导，得到机电工程系很多老师的帮助以及得到兄弟学校相关领导和老师的帮助和支持，这里一并致以衷心的感谢！本书引用了一些网络资源，这里对原作者致以谢意。

本书是 CDIO 与卓越工程能力培养教材的一种尝试，难免有漏误及不当之处，敬请各位机械原理教师及广大读者指正！

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 机械、机器与机构	1
1.2 课程目标与任务	1
1.3 本课程驱动项目与导入项目参考	2
1.4 本课程课堂教学组织顺序 建议	4
第2章 机构组成、类型、应用及进展	5
2.1 机构的基本组成	5
2.2 机构运动简图	10
2.3 机构类型及其应用	13
思考题	31
习题	31
第3章 机械运动方案设计及实例 分析	38
3.1 机械运动方案设计过程	38
3.2 机械产品的需求分析	39
3.3 机械总功能分析与功能分解	40
3.4 执行机构的运动协调设计	41
3.5 机械系统运动方案选型设计	43
3.6 机械运动方案设计实例分析	48
思考题	52
习题	52
第4章 机构的结构分析	55
4.1 机构的自由度分析	55
4.2 机构自由度分析中的关键问题	57
4.3 机构的组成原理	61
4.4 平面机构中高副用低副代替的方法	61
4.5 机构结构分类及结构分析	62
思考题	65
习题	65
第5章 机构运动学分析	72
5.1 机构运动分析的目的和方法	72
5.2 基于速度瞬心法的机构速度分析	72
5.3 基于矢量方程图解法的平面机构运动 分析	74
5.4 基于解析法的平面机构运动分析	80
思考题	85
习题	85
第6章 机构力学分析	92
6.1 机构力学分析的目的和方法	92
6.2 构件上的作用力分析	92
6.3 构件的惯性力和惯性力偶分析	93
6.4 运动副中的摩擦力分析	95
6.5 忽略摩擦时的机构受力分析	99
6.6 考虑摩擦时的机构受力分析	104
思考题	105
习题	105
第7章 机械系统动力学	114
7.1 机械的效率与自锁	114
7.2 机械平衡	120
7.3 机械系统动力学分析	136
思考题	150
习题	150
第8章 平面连杆机构设计	159
8.1 平面四杆机构的基本知识	159
8.2 平面四杆机构的设计	167
思考题	178
习题	178
第9章 凸轮机构设计	184
9.1 凸轮机构的基本知识	184
9.2 从动件的运动规律	185
9.3 凸轮轮廓曲线的设计	191
9.4 凸轮机构基本尺寸的设计	197
思考题	204
习题	205

VI 机械原理

第 10 章 齿轮机构及其设计	211	11.2 各类轮系传动比分析	247
10.1 齿廓啮合基本定律及渐开线齿形	211	11.3 行星轮系的设计	256
10.2 渐开线圆柱齿轮各部分名称和 尺寸	213	思考题	260
10.3 渐开线直齿圆柱齿轮机构的啮合 传动	216	习题	260
10.4 其他齿轮机构的啮合特点	229	第 12 章 机构创新与优化设计	267
思考题	240	12.1 机构创新设计	267
习题	241	12.2 机构优化设计	291
第 11 章 轮系传动分析与设计	245	思考题	298
11.1 各类轮系简介	245	习题	298
		参考文献	300

第1章 绪 论

1.1 机械、机器与机构

机构是用来传递与变换运动和力的可动的装置，如连杆机构、凸轮机构、螺旋机构、带传动机构、链传动机构、齿轮机构等。

机器是用来变换或传动能量、物料与信息的机构组合。如内燃机实现从热能转换为机械能，运输带实现物料的输运等。

机械是机器与机构的总称。

机械、机器与机构如图 1-1 所示。

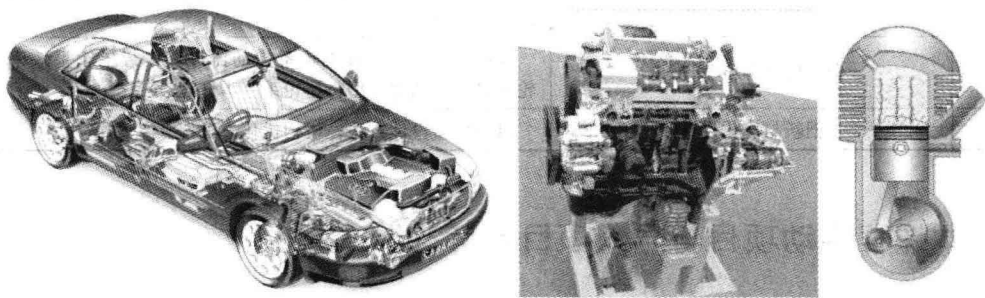


图 1-1 机械、机器与机构

机械原理是研究机械的基本理论，包括：① 机构结构分析，机构组成及组成原理、机构具有确定运动的条件、机构运动简图；② 机构运动分析；③ 机器动力学；④ 常用机构分析与设计；⑤ 机械系统方案设计。

1.2 课程目标与任务

机械原理是一门技术基础课程。通过学习这门课程，能够理解各种机构和机器所具有的一般共性问题，认识各种机器中的常用机构，掌握连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等结构的运动和动力性能及其设计方法。

机械原理课程将完成机构结构分析、机构运动分析、机构力分析、连杆机构设计、凸轮机构设计、齿轮机构设计、机器运转、摩擦、效率、平衡等方面的内容的学习，课程知识体系见表 1-1。

根据本课程的目标和任务，在本课程的学习过程中，将“势能小车”作为驱动项目，完成势能小车的设计制作任务。其他学校可根据自己的实际情况，选择适合本校的驱动项目。

表 1-1 机械原理知识体系任务表

序号	知识单元	学习任务
1	机构认识	机构的基本组成，机构简图绘制，常见机构的特点及应用
2	机械系统方案拟定	机械运动方案设计过程，机械产品的需求分析，机械总功能分析与功能分解，执行机构的运动协调设计，机械系统运动方案选型设计，机械运动实例分析

(续)

序号	知识单元	学习任务
3	机构结构分析	机构的自由度分析, 机构自由度分析中的关键问题, 机构的组成原理, 平面机构中高副用低副代替的方法
4	机构运动分析	基于速度瞬心法的机构速度分析, 基于矢量方程图解法的平面机构运动分析, 基于解析法的平面机构运动分析
5	机构力学分析	构件上作用力分析, 构件的惯性力和惯性力偶分析, 运动副中摩擦力分析, 忽略摩擦时的机构受力分析, 考虑摩擦时的机构受力分析
6	机械系统动力学	机械的效率和自锁, 机械平衡, 机械系统动力学分析
7	平面连杆机构设计	平面四杆机构的基本知识, 平面四杆机构的设计方法
8	凸轮机构设计	凸轮机构的基本知识, 从动件的运动规律, 凸轮轮廓曲线的设计, 凸轮机构基本尺寸的设计
9	齿轮机构设计	齿廓啮合基本定律及渐开线齿形, 渐开线圆柱齿轮各部分名称和尺寸, 渐开线直齿圆柱齿轮机构的啮合传动, 其他齿轮机构的啮合特点
10	轮系传动分析与设计	轮系基本知识, 各类轮系传动比计算, 行星轮系效率计算, 轮系设计, 其他新型行星轮系基本知识
11	创新与优化设计	机构创新设计方法, 机构优化方法

1.3 本课程驱动项目与导入项目参考

1. 驱动项目

本课程需要学生完成图 1-2 所示的一个势能小车的设计, 并要求势能小车行走时能够绕过如图 1-3 所示的障碍柱。

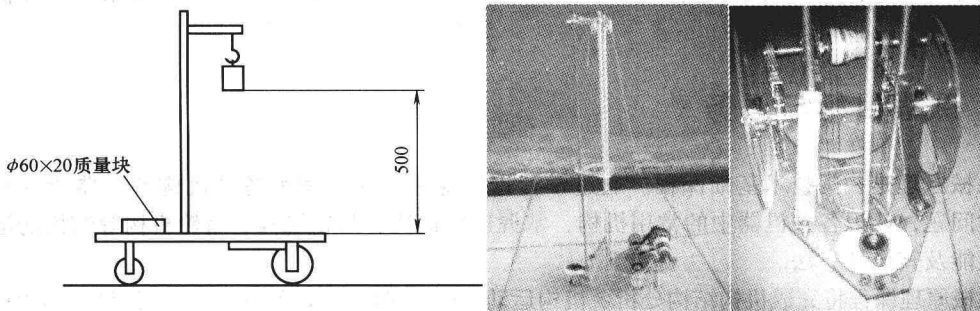


图 1-2 势能小车示意图与实物

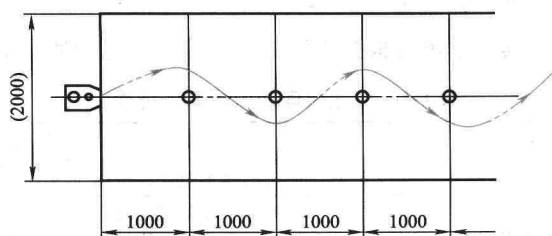


图 1-3 势能小车在重力势能作用下自动行走示意图

知识点与项目阶段的对应关系见表1-2。

表1-2 知识点与项目阶段的对应表

序号	知识点	项目的阶段
1	常用机构、机械系统方案拟定、创新设计方法	势能小车的总体方案设计
2	机构结构分析、机构运动分析、机构动力分析	势能小车中能量转换机构、转向机构分析
3	平面连杆机构设计、凸轮机构设计、齿轮机构设计、轮系设计	势能小车中能量转换机构、转向机构的设计
4	机械效率、平衡、速度波动调节	势能小车的平衡及波动调节

2. 各学习任务的导入项目

除了上述驱动项目外,为了便于学生在学习每章知识点之前,对该章内容有个形象的认识,在各章设置一个导入小项目,具体建议如表1-3。

表1-3 导入项目建议

知识单元	建议导入项目	项目目的
第2章机构结构分析	课前布置学生自制简易机构,学生分组展示自制的机构,介绍结构	导出机构的基本组成、运动副的构造方式、常见机构等
第4章机构结构分析	课前布置学生自制杆机构,课堂上让学生分组展示自制的杆机构,讨论什么情况能够运动	导出机构自由度及机构组成原理方面的知识
第5章机构运动学分析	课前布置学生对各自制机构设计简易的运动参数测试方法,课堂上让学生对自制机构的运动参数测试方法及测试结果进行汇报	让学生对机构运动参数有一定了解,进而导出机构运动分析及运动参数计算方法
第6章机构力学分析	前布置学生对各自制机构设计简易的力学参数测试方法,课堂上让学生汇报自制机构各点的力学测试结果	让学生对机构力分析有一定了解,进而导出机构力学分析与计算方法
第7章机械动力学	课前布置学生对汽车发动机运转时速度波动状况进行观察,课堂上让学生汇报观察结果	使学生了解机械波动与调节方面的基本情况
第8章平面连杆机构设计	课前布置学生了解发动机曲柄滑块机构要求(什么情况下是曲柄滑块机构)与设计要点(如何满足行程、压力角、急回特性等方面的要求),课堂上让学生汇报结果	使学生了解平面四杆机构的基本知识
第9章凸轮机构设计	课前布置学生观察汽车发动机气门开闭控制的凸轮机构,课堂上让学生汇报观察现象	使学生初步认识凸轮机构
第10章齿轮机构及其设计	课前布置学生观察一个齿轮对,让他们测试这两个啮合齿轮中什么参数是一样的,什么参数是不同的,课堂上让学生汇报观察现象	使学生初步认识齿轮机构
第11章轮系传动分析与设计	课前布置学生观察汽车变速器(传统变速器、自动变速器),课堂上让学生汇报运动如何传递、各挡位速度如何等	使学生初步了解轮系传动
第12章机构创新与优化设计	课前布置学生设计一种扑翼飞鸟的机构方案(或其他机构运动方案),让学生记录设计中求解困难问题的思路,课堂上让学生汇报设计思路	让学生初步了解如何创新设计、如何优化机构尺度

1.4 本课程课堂教学组织顺序建议

机械原理 CDIO 教学过程面临着项目教学组织、知识点有限穿插的问题,比较复杂,基本思路是:由项目承载知识点,将项目细分为与知识点对应的各部分任务,每次课堂后的实践做一部分,通过这一部分来承载该次课的知识点,这样课堂组织顺序分为六部分:项目细分任务的讲解、知识点介绍、实例分析、学生强化练习、项目细分任务实践、学生总结。建议提前三周将教学进度表(包括每次讲授的知识点信息、驱动项目、课后实践内容、关键节点、考核要求等)发给学生,并提醒学生严格按照进度表学习。

对上述课程组织顺序详细介绍见表 1-4。

表 1-4 机械原理课堂组织顺序

课堂教学组织顺序	详细内容
1. 项目介绍与阶段解释	将项目按实施顺序进行细分,细分过程参考承载知识点的完整性。将细分部分要求及达到的目标给学生讲解
2. 知识讲解	讲解这个细分项目部分所承载的知识点。主要是:① 典型知识点讲授,对重点、难点知识点进行讲授,并回答学生在课后实践中发现的问题;② 专题讨论,针对讲授的难点知识进行深入讨论,每组分别总结观点,并汇总各方观点给出参考建议
3. 实例分析	多列举一些实际应用的例题,分析过程要清楚,让学生通过实例掌握这些知识点
4. 学生强化训练	通过实例讲解,布置一下类似的强化训练题,让学生强化训练
5. 学生项目阶段实践(课外)	学生实施该细分项目,并归纳好项目实施步骤、总结结果
6. 学生实践与理论学习报告	学生对细分项目的实践及理论学习的总结。对于关键节点,要求学生以小组为单位汇报课后实践情况,以 PPT 和实物进行讲解,并回答其他组的质疑

第2章 机构组成、类型、应用及进展

本章学习任务：机构的基本组成、机构简图绘制、各种常用机构类型及其作用、机构简单组合。

驱动项目的任务安排：完成项目中机构的总体构思，包括各机构组成及其组合方式。

2.1 机构的基本组成

机构在我们日常生活中处处可见，图 2-1 所示的健身器和缝纫机就是由一些机构组成。

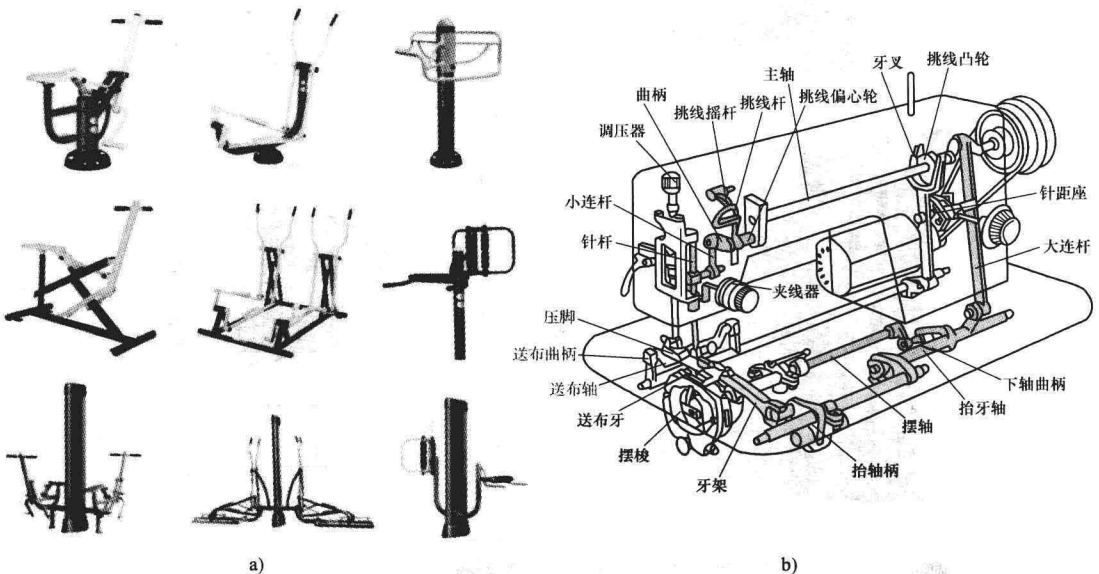


图 2-1 健身器和缝纫机

a) 健身器 b) 缝纫机

各种机构都是用来传递与变换运动和动力的可动装置，通常由构件和运动副两个要素组成。

2.1.1 构件

构件是由一个或多个零件所构成的运动单元。机器中的构件可以是单一的零件，如曲轴（图 2-2a）；也可以是若干个零件刚性连接而成，如连杆（图 2-2b）是由连杆体、连杆头、螺栓、螺母及垫圈等零件装配成的刚性体。

构件和零件的区别：构件是运动单元，而零件是制造单元。

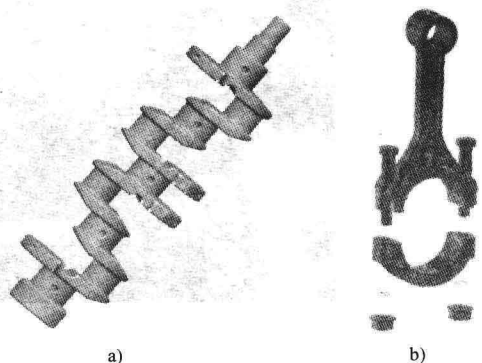


图 2-2 构件

a) 曲轴 b) 连杆

2.1.2 运动副

运动副是两构件直接接触并能相互产生相对运动而组成的活动连接，是组成机构的基本要素之一，如图 2-3 所示。运动副元素为两构件参与接触而构成运动副的部分。两构件间的运动副

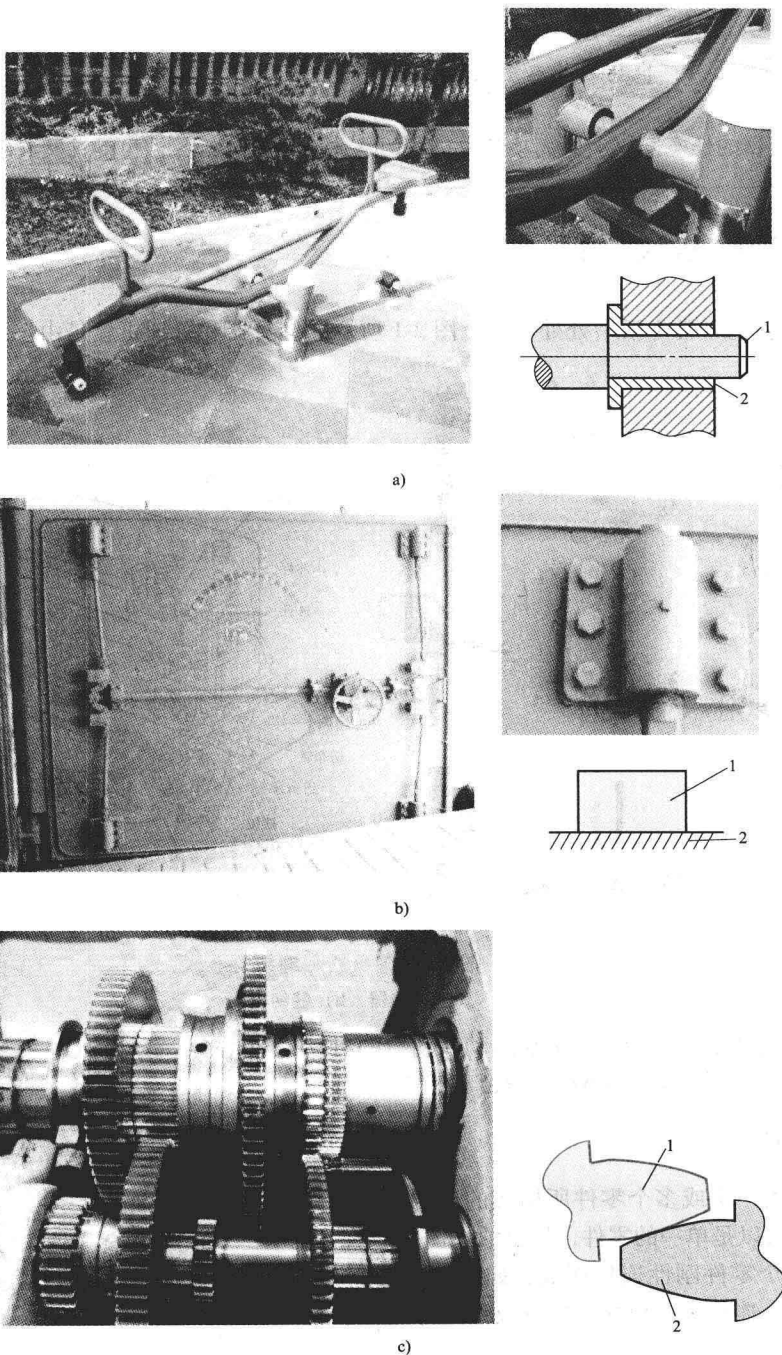


图 2-3 常见的运动副

a) 轴与轴承连接 b) 滑块与导轨连接 c) 两齿轮轮齿啮合

所起的作用是限制构件间的相对运动,使相对运动自由度的数目减少,这种限制作用称为**约束**,而仍具有的相对运动称为**自由度**。

图 2-3a 中的轴 1 与轴承 2 的连接、图 2-3b 中的滑块 1 与导轨 2 的连接、图 2-3c 中的两齿轮轮齿的啮合等均为运动副,它们的运动副元素分别是:圆柱面、平面、齿廓曲面。

运动副分类如下:

1) 根据运动副提供约束数目的不同,将运动副分为五级:提供 1 个约束的,称为 I 级运动副(简称 I 级副);提供两个约束条件的称为 II 级运动副(简称 II 级副);依此类推,还有 III、IV、V 级副。

2) 按照组成运动副两构件间的相对运动是平面运动还是空间运动,可以把运动副分为平面运动副和空间运动副。

3) 按照运动副元素的不同,通常把面接触的运动副称为低副,点接触或线接触的运动副称为高副,高副比低副容易磨损。低副常见的形式有转动副和移动副。

如图 2-4 所示,在空间有两个构件 1 和 2,构件 1 固定于坐标系 $Oxyz$ 上,当构件 1 与构件 2 组成运动副之前,构件 2 相对构件 1 可以沿 x 、 y 、 z 轴移动和绕 x 、 y 、 z 轴转动,即作空间自由运动的构件 2 具有 6 个自由度。当构件 1 与构件 2 组成运动副后,由于运动副元素的接触,使某些原有独立的相对运动受到限制,构件受到约束后其自由度减少。每加上一个约束,便失去了一个自由度,自由度与约束数之总和应等于 6,由于运动副为两构件的活动连接,因此对每个构件的约束数最多为 5,最少引入 1 个约束。运动副的自由度(以 f 表示)和约束数(以 s 表示)的关系为 $f=6-s$ 。

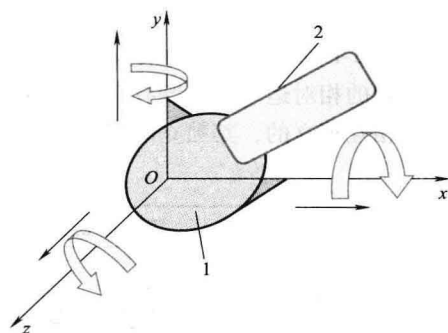


图 2-4 构件作空间运动时的自由度

平面的状况也类似,如图 2-5a 所示,构件 1 固定于坐标系 Oxy 上,当构件 1 和 2 没有组成转动副时,构件 2 可以沿 x 轴和 y 轴方向移动及绕垂直于平面 xOy 的 z 轴的转动,具有 3 个自由度。如图 2-5b 所示,当构件 1 和 2 组成转动副后,构件 2 的自由度只有 1 个了(绕 z 轴的转动)。

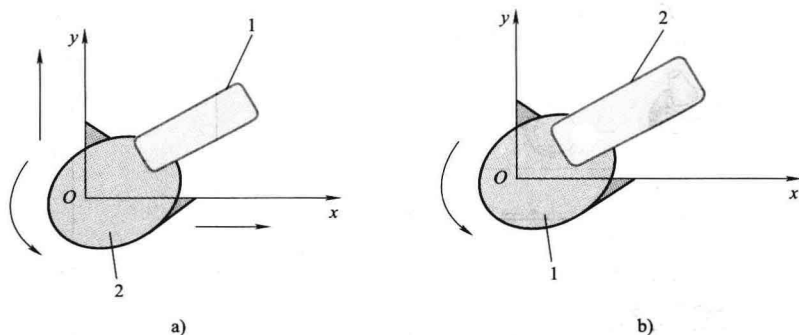


图 2-5 构件作平面运动时的自由度

转动副:具有一个独立相对转动的运动副,如图 2-6a 所示,构件 2 沿 x 轴和 y 轴两个方向的相对移动受到约束,构件 2 只能绕垂直 xOy 平面的 z 轴转动。其相对自由度数为 1,而约束数为 2。

移动副:具有沿一个方向独立相对移动的运动副,如图 2-6b 所示,构件 2 沿 y 轴的相对移动和绕垂直于 xOy 平面的 z 轴的转动受到约束,构件 2 只能沿 x 轴方向相对移动。其相对自由度

数为1，而约束数为2。

高副：如图2-6c、d所示，当两构件组成运动副后，构件2沿公法线 $n-n$ 方向的移动受到的约束，但可以沿接触点切线 $t-t$ 方向相对移动，还可以同时绕接触点（或线）转动。其相对自由度数为2，约束数为1。

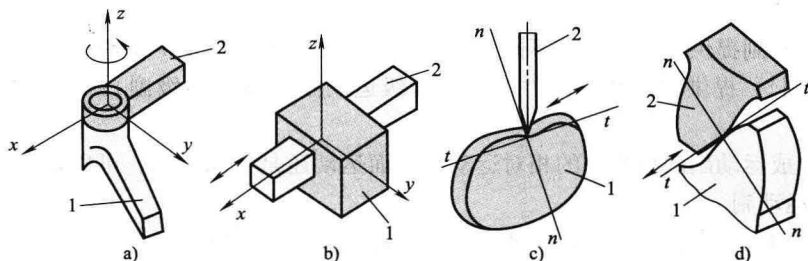


图2-6 平面运动副的约束特点

表2-1列出了依据约束数的不同而分的各级运动副。其中V级副为机械中最常见的运动副。螺旋副的相对运动虽然既有转动又有移动，但两者有一定关系（每转一圈，移动一个导程）而不是相互独立的，其独立的相对运动只有一个，因此螺旋副也属V级副。

表2-1 常用运动副的分类及其代表符号

名称	简图或几何图形	代号	约束条件数	自由度数	级别
点高副			1	5	I
线高副			2	4	II
球面低副		S	3	3	III
球销副		S'	4	2	IV
圆柱副		C			
螺旋副		H	5	1	V
转动副		R			
移动副		P			

2.1.3 运动链

运动链是用运动副将两个或两个以上的构件连接而成的构件系统。

闭式运动链，运动链中的各构件构成首末封闭的系统，如图2-7所示，多数机械中为闭式运动链。

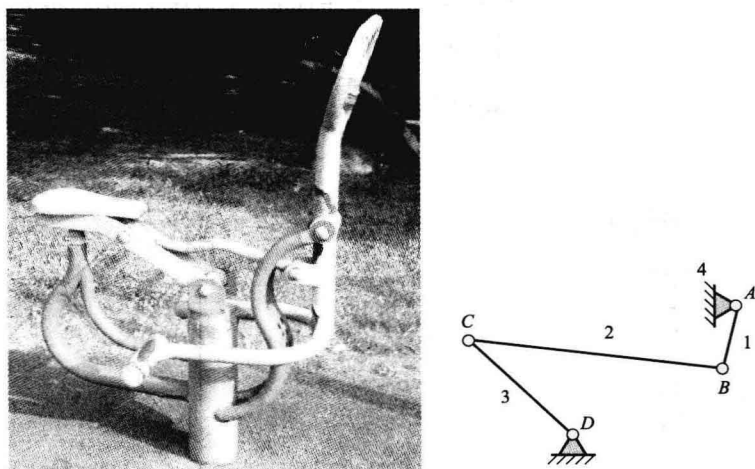


图2-7 闭式运动链

开式运动链，组成运动链的各构件没有构成首末封闭的系统，如图2-8所示，在机器人机构中较多是开式运动链。

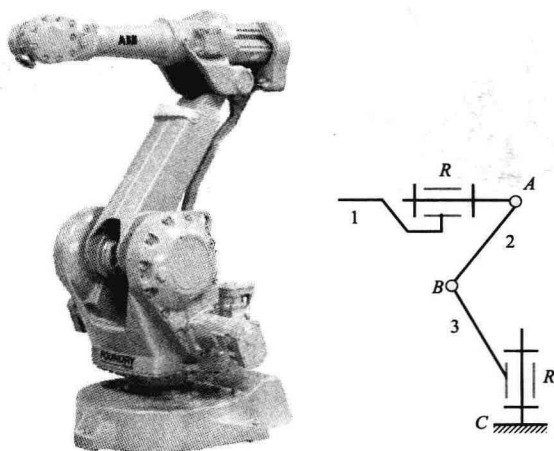


图2-8 开式运动链

根据运动链中各构件间的相对运动为平面运动还是空间运动，可把运动链分为平面运动链和空间运动链两类。

2.1.4 机构

机构是由若干个构件组成的系统，各构件间具有确定的相对运动。机构也是运动链，但它必须具有原动件（1个或几个）和机架，且有确定运动。

机架是相对固定不动的构件。当闭式运动链的一个构件固定为机架时，运动链便成为机构。机构中按给定的已知运动规律独立运动的构件称为原动件，而其余活动构件则称为从动件。当

