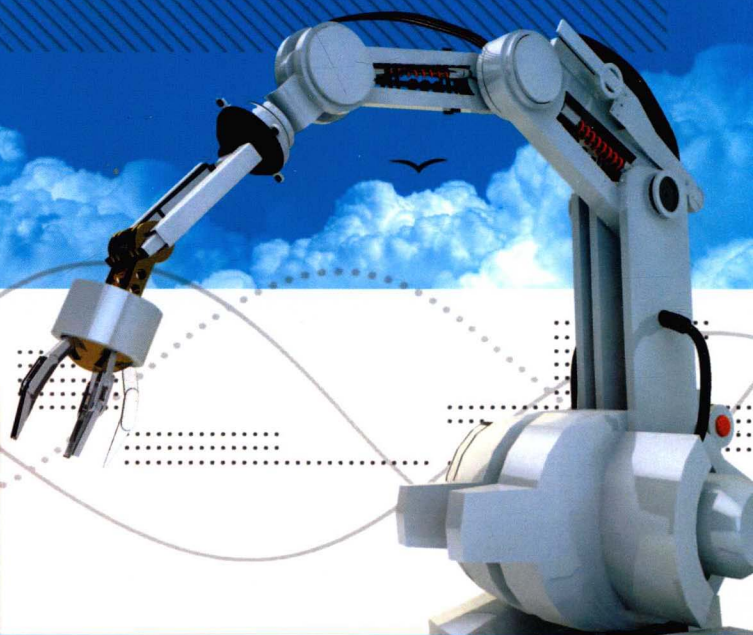


工业机器人技术应用系列
职业教育“十三五”规划教材

工业机器人 机械装调与电气控制

◎ 主编 陈国栋



立体化教材:

- 教材
- 动画
- 视频



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

应用系列

职业教育“十三五”规划教材

工业机器人机械装调与 电气控制

陈国栋 主 编◎

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共分7个单元, 主要包括: 工业机器人基础知识, 工业机器人机械本体的拆装与检测, 工业机器人电力系统, 工业机器人控制系统, 工业机器人电气系统的装配与调试, 工业机器人基本运动任务调试, 工业机器人常见故障分析及精度检测方法。

本书可作为本科及职业院校机电及电气类专业教材, 也是企业技术人员的有益读本。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人机械装调与电气控制 / 陈国栋主编. —北京: 电子工业出版社, 2019.3

ISBN 978-7-121-35169-3

I. ①工… II. ①陈… III. ①工业机器人—装配(机械)—高等学校—教材 ②工业机器人—调试方法—高等学校—教材 ③工业机器人—电气控制—高等学校—教材 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第227774号

策划编辑: 朱怀永

责任编辑: 朱怀永

印 刷: 北京七彩京通数码快印有限公司

装 订: 北京七彩京通数码快印有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 12.25 字数: 313千字

版 次: 2019年3月第1版

印 次: 2019年3月第1次印刷

定 价: 39.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254608, zhy@phei.com.cn。

前言

PREFACE



在智能制造和 AI 技术快速发展的今天，机器人已经成为现代装备制造业的主体，江苏汇博机器人技术股份有限公司（以下简称汇博机器人）联合苏州大学、常州机电职业技术学院、深圳职业技术学院、无锡职业技术学院等院校，在机器人教育方面规划编写了本教材，致力于为广大院校提供机器人专业建设一体化解决方案，包括专业建设论证、课程体系建设、教学设备开发、培养方案制定等。

当前，智能制造产业正飞速发展，国际上掀起了新一轮科技革命和产业革命的浪潮。产业发展带动人才需求，我国有机器人及智能制造行业的相关企业数千家，相应的人才储备数量和质量却捉襟见肘。根据教育部、人力资源和社会保障部、工业和信息化部等部委联合发布的《制造业人才发展规划指南》中预测，到 2025 年高档数控机床和机器人领域，人才缺口将达到 450 万人。为解决行业人才缺口，教育部、人力资源和社会保障部等部委出台了相关人才培养计划，提出完善职业教育和培训体系，深化产教融合、校企合作，推出“现代学徒制”等模式，将企业作为职业教育人才培养的双主体之一。

作为工业机器人职业教育的先行者，2009 年以来，汇博机器人秉承工业应用、教育应用与人才培养三位一体的发展模式，在工业机器人教育领域与 500 余所院校展开深入合作，开发出了一系列接近工业实际应用并且针对教学需求专门做了优化设计的机器人产品，提升了机器人专业和学科的建设水平，学生能通过实训平台实现由理论知识到实际应用的迅速转换，完美实现了理论学习与生产实践的零距离对接。

2017 年汇博机器人公司组建了“汇博机器人学院”，由我国机器人领域泰斗蔡鹤皋院士亲自担任名誉院长，致力于成为校长的专业建设参谋、教师的教学深造摇篮、学生的技术技能加油站。学院以任务驱动、项目引领、科研带动为教学理念编写了汇博机器人系列课程教材，本教材为该系列课程教材的重要组成部分，是汇博机器人十多年来“工业机器人专业建设整体解决方案”成果的总结和提炼。

本书是根据“任务引领、项目驱动、科研带动”的课程指导思想和理念模式编写的。本书侧重工业机器人系统的操作实践和应用，编写时以任务驱动为主线，以项目导向为主题；以教师为主导，以学生为主体；注重实操体验，理实一体。本书主要内容包括：工业机器人基础知识、工业机器人机械本体的拆装与检测、工业机器人电力系统、工业机器人控制系统、工业机器人电气系统的装配与调试、工业机器人基本运动任务调试、工业机器人常见故障分析及精度检测方法。通过学习训练培养学生的方法能力、专业能力和社会能力，从而提高学生知识、技能和态度等综合素质。

为方便教师教学和学生学习，针对工业机器人机械本体的拆装与检测操作，编写人员制作了演示动画，可以通过扫描附录 C 中的二维码进行观看。

由于时间仓促，本书难免有不足之处，敬请广大教师学生读者批评指正！联系邮箱：
institute@huiborobot.com。

编 者
2018 年 12 月 30 日

目 录

CONTENTS



单元一 工业机器人基础知识	001
任务一 工业机器人常用传动机构及工作原理	001
一、机械传动	002
二、工业机器人气压与液压传动	009
任务二 工业机器人用减速器	018
一、传统减速器	018
二、工业机器人用精密减速器	027
问题与思考一	037
单元二 工业机器人机械本体的拆装与检测	039
一、同步带	039
二、谐波减速器的结构与安装	041
三、六轴机器人基本结构概述	043
四、安全注意事项	049
任务一 工业机器人机械部分的拆卸与检测	050
一、手腕（五、六轴）的拆卸与检测	052
二、大臂及小臂（二、三、四轴）的拆卸与检测	054
三、底座的拆卸与检测	057
任务二 工业机器人机械部分的装配与检测	059
一、底座的装配与检测	060
二、大臂及小臂（二、三、四轴）的装配与检测	062
三、手腕（五、六轴）的装配与检测	068
问题与思考二	074
单元三 工业机器人电力系统	076
一、电力的输配——变压器	077
二、电力的变换——电力电子技术	079
三、电力的转化——电机	089
问题与思考三	093

单元四 工业机器人控制系统	094
一、供电系统——电气控制技术	095
二、驱动层	097
三、感知层——传感器	099
四、核心——控制器	103
问题与思考四	104
单元五 工业机器人电气系统的装配与调试	105
任务一 机器人控制柜电气元件安装与接线	105
一、所需工具和相关材料的准备	105
二、电气控制柜线路安装与调试	108
任务二 机器人本体电气元件安装与接线	116
一、机器人本体电气元件的安装及线缆分布	116
二、电机动力线缆的内部连接	119
三、电机编码器线内部连接	120
问题与思考五	122
单元六 工业机器人基本运动任务调试	123
任务一 工业机器人运动介绍	124
一、工业机器人示教器	124
二、开/关机操作步骤	128
三、机器人运动方向认识	130
任务二 工业机器人示教编程介绍	133
一、点到点指令、直线指令、圆弧指令介绍	133
二、新建项目及程序	136
三、编程介绍及自动运行	138
问题与思考六	142
单元七 工业机器人常见故障分析及精度检测方法	144
任务一 机器人常见故障及其解决办法	144
任务二 机器人重复定位精度检测方法	151
问题与思考七	158
附录 A 螺钉拧紧力矩表	159
附录 B 机器人装配作业指导书	160
附录 C 工业机器人机械本体的拆装与检测演示动画	188
参考文献	189

工业机器人基础知识



单元描述

本书重点介绍 3kg 工业机器人的拆装、检测与调试，还包括对机器人本体、电气系统的操作。工业机器人是一种高级机电一体化产品，在学习机器人技术之前需要掌握一定的准备知识，如机械传动、电气、控制等基础知识。

任务一 工业机器人常用传动机构及工作原理

◎ 任务目标

1. 认识常用传动方式的类型；
2. 了解常用传动原理；
3. 了解液压与气压传动系统的构成。

◎ 任务描述

传动分为机械传动、流体传动和电气直驱传动 3 大类，如图 1-1 所示。本任务将对工业机器人常用的机械传动和流体传动进行介绍。

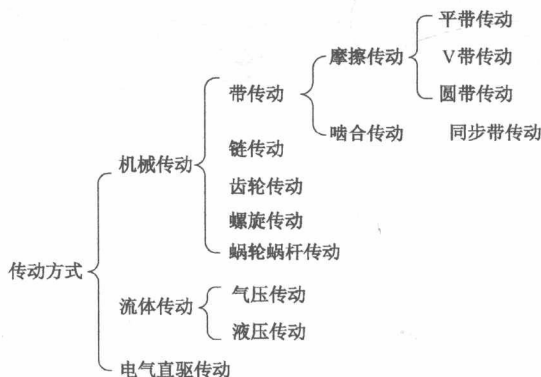


图 1-1 传动类型

一、机械传动

如图 1-2 所示,机械传动装置按照其传动原理,主要可以分为两类:第一类是靠传动件之间的摩擦力传递动力和运动的摩擦传动,主要有带传动、绳传动以及摩擦轮传动等。依据摩擦传动的传动原理,其能够很容易实现无级变速,且能适应周间距较大的传动场合。当出现传动过载时,还可以起到缓冲和保护传动装置的作用,但这种传动一般不能用于大功率的传动场合,也不能确保精确的传动比。第二类则是靠主动件与从动件,或者是两者之间通过中间件啮合的方式传递动力和运动的啮合传动,主要有带传动、齿轮传动、链传动、螺旋传动以及谐波传动等。啮合传动能够胜任大功率的应用场合,传动比精确,但此类零件对于制造精度和安装精度的要求比较高。

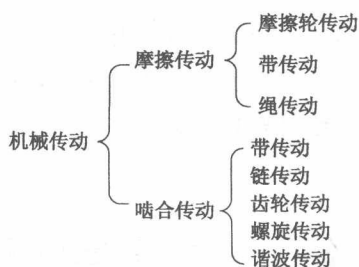
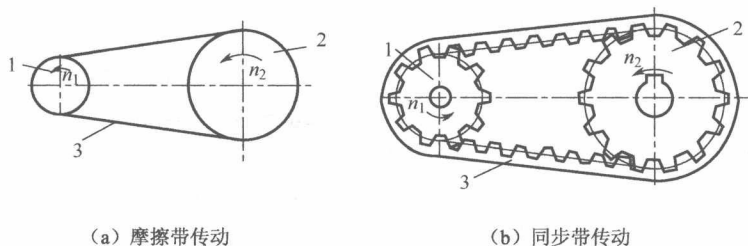


图 1-2 机械传动的分类

下面将对工业机器人中常见的机械传动装置进行详细介绍。

(一) 带传动

带传动是利用张紧在带轮上的柔性带进行动力或者运动传递的一种传动机构,根据其传动原理的不同,可以分为靠传动带与带轮之间的摩擦力进行传动的摩擦带传动以及靠传动带与带轮上的齿相互啮合的同步带传动。带传动原理如图 1-3 所示。



1—主动轮; 2—从动轮; 3—传动带

图 1-3 带传动原理

靠摩擦传动的传动带的常见种类有平带、圆带、三角带和多槽带。

1. 平带传动

在平带传动过程中, 将平带套在平滑的带轮上, 借助传动带与带轮之间的摩擦力进行传动。常见的传动形式有开口式传动、交叉式传动以及半交叉式传动, 如图 1-4 所示。

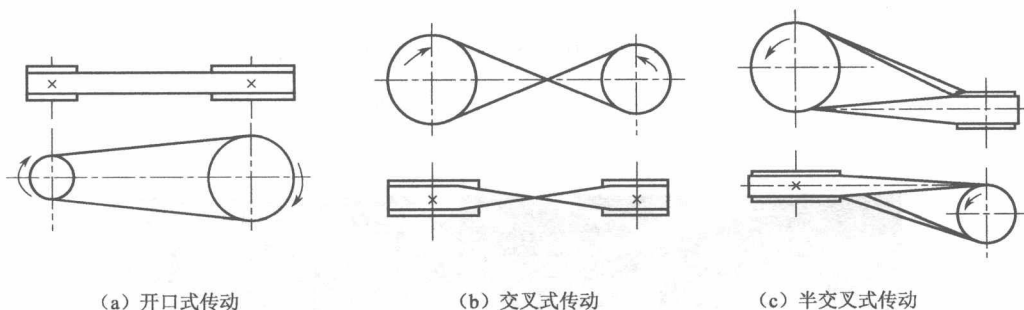


图 1-4 平带传动形式

平带有胶带、编织带、强力棉纶带和高速环形带等。胶带是平带中用得最多的一种, 强度较高, 传递功率范围广; 编织带挠性好, 但易松弛; 强力棉纶带强度高, 且不易松弛。平带的截面尺寸都有标准规格, 可选取任意长度, 并通过胶合、缝合或金属接头连接成环形。

平带传动结构简单, 但容易打滑, 因此通常用于传动平稳、传动功率较小且传动比较小的场合。

2. V 带传动

在使用 V 带进行传动时, 通常将带放在带轮上相应的型槽内, 通过 V 带与型槽两壁面间的摩擦力实现传动。V 带通常是数根并用, 并匹配有相应数目的型槽。V 带截面示意图如图 1-5 所示。

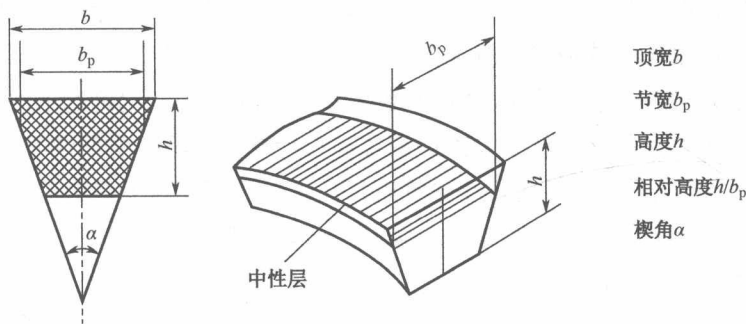


图 1-5 V 带截面示意

常见的 V 带类型有普通 V 带、窄 V 带、宽 V 带、双面 V 带和多楔带等。普通 V 带当量摩擦系数大, 工作面与轮槽附着性好, 可承载传动比大、预紧力小的传动; 窄 V 带除具有普通 V 带所具有特性外, 还可承受较大的预紧力, 运行速度的曲挠次数高, 承载传动功

率大；宽 V 带曲挠性优良，且耐热性和耐侧压性能较好；双面 V 带可以两面同时工作，从而带动多个从动轮，但其带体较厚，曲挠性差，寿命和效率较低。

3. 同步带

(1) 同步带传动工作原理

同步带传动（见图 1-6）是由一根内周表面设有等间距齿形的环行带及具有相应吻合的轮所组成，它通过传动带内表面上等距分布的横向齿与带轮上的相应齿槽的啮合来传递运动。

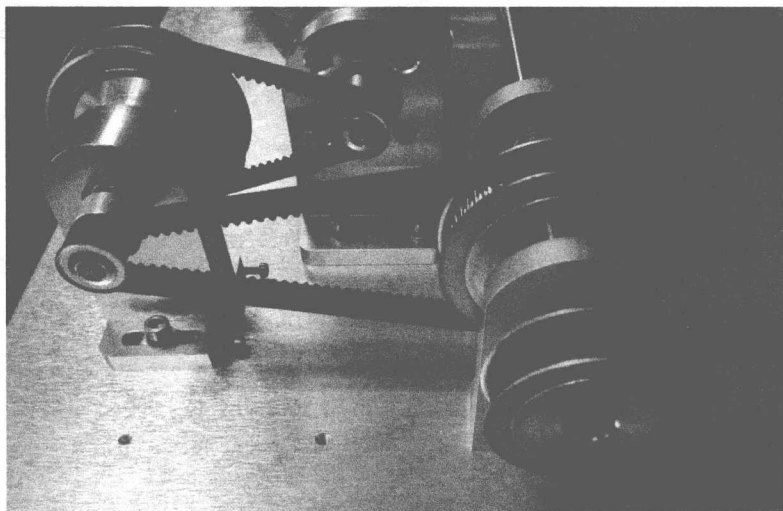


图 1-6 同步带传动

同步带传动综合了带传动、链传动和齿轮传动的优点。在传动过程中，通过带齿与轮的齿槽相啮合来传递动力。与摩擦型带传动比较，同步带传动的带轮和传动带之间没有相对滑动，能够保证严格的传动比；但同步带传动对中心距及其尺寸稳定性要求较高。

同步带通常以钢丝绳或玻璃纤维绳为抗拉体，氯丁橡胶或聚氨酯为基体，这种带薄且轻，故可用于较高速度的传动；传动时的线速度可达 50m/s，传动比可达 10，效率可达 98%；结构紧凑，适宜于多轴传动，传动噪声比链传动和齿轮传动小，耐磨性好，不需油润滑，寿命比摩擦带长，无污染，因此可在不允许有污染和工作环境较为恶劣的场所下正常工作。其主要缺点是制造和安装精度要求较高，中心距要求较严格，所以同步带广泛应用于要求传动比准确的中、小功率传动中。

(2) 同步带分类

常见的同步带有梯形齿同步带和圆弧齿同步带两种，如图 1-7 所示。圆弧齿又有三种系列：圆弧齿（H 系列，又称 HTD 带）、平顶圆弧齿（S 系列，又称为 STPD 带）和凹顶抛物线齿（R 系列）。

梯形齿同步带分单面有齿和双面有齿两种，简称为单面带和双面带。双面带又按齿的排列方式分为对称齿型（代号 DA）和交错齿型（代号 DB），如图 1-8 所示。梯形齿同步

带有两种尺寸制：节距制和模数制。我国采用节距制，并根据 ISO5296 制定了同步带传动相应标准 GB/T11361~11362—1989 和 GB/T11616—1989。梯形齿同步带齿形为梯形，在传动过程中齿顶与带轮槽不是直接接触的，带齿构成直边，进而形成多边形效应，其多边形的边长直接影响了梯形齿同步带的传动精度，但总体来看，梯形齿同步带可以满足较高转速的传动，而且传动效率高、传动比恒定、运转平稳。

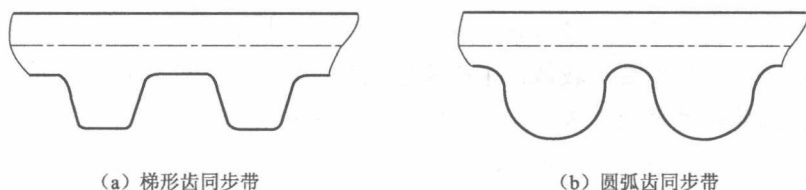


图 1-7 同步带齿形

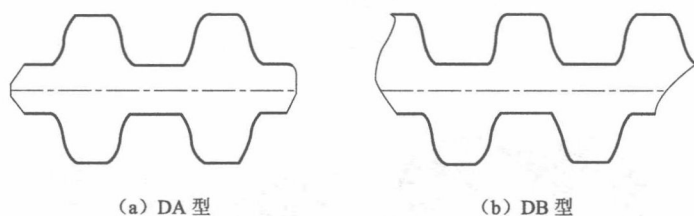


图 1-8 双面带

圆弧齿同步带除了齿形为曲线形外，其结构与梯形齿同步带基本相同，带的节距相当，其齿高、齿根厚和齿根圆半径等均比梯形齿大。带齿受载后，应力分布状态较好，平缓了齿根的应力集中，提高了齿的承载能力。故圆弧齿同步带比梯形齿同步带传递功率大，且能防止啮合过程中齿的干涉。圆弧齿同步带耐磨性能好，工作时噪声小，不需润滑，可用于有粉尘的恶劣环境。

同步带传动广泛地应用于食品、汽车、纺织、机器人等行业，HB03-760-C10 型 3kg 机器人的大臂和小臂都用了同步带传动，如图 1-9 所示。

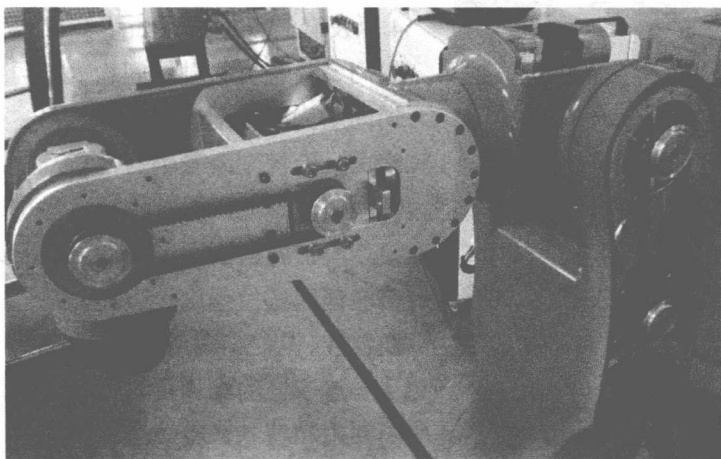


图 1-9 同步带传动应用于机器人的大臂和小臂

(二) 链传动

链传动是由两个具有特殊齿形的齿轮和一条闭合的链条所组成, 工作时主动链轮的齿与链条的链节相啮合带动与链条相啮合的从动链轮传动。

优良的传动特点, 使链传动应用在多种场合: 与带传动相比, 链传动没有弹性滑动和打滑, 能保持准确的平均传动比; 需要的张紧力小, 作用于轴的压力也小, 可减少轴承的摩擦损失; 结构紧凑; 能在温度较高、有油污等恶劣环境条件下工作; 与齿轮传动相比, 链传动的制造和安装精度要求较低; 中心距较大时其传动结构简单; 瞬时链速和瞬时传动比不是常数, 因此传动平稳性较差, 工作中有一定的冲击和噪声。

常见的链传动有齿形链和滚子链两种。

齿形链又称无声链, 属于传动链的一种形式, 通常由若干组齿形链板交错排列, 然后用铰链相互连接而成, 链板两侧的工作面通常为直边, 两直边间夹角为 60° , 如图 1-10 所示。在传动过程中, 通过链板工作面和链轮轮齿之间的啮合来实现传动。

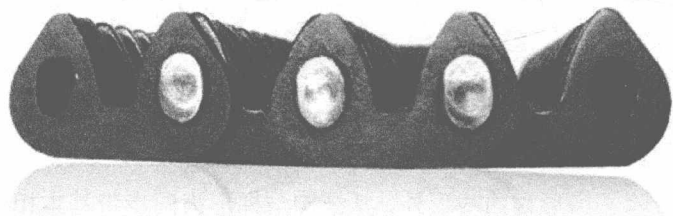
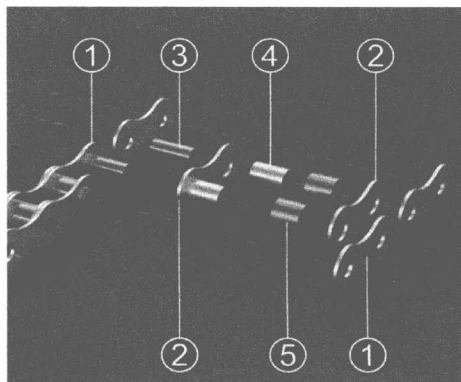


图 1-10 齿形链

由于齿形链的齿形以及啮合特点, 使其传动平稳、承载冲击性能好, 轮齿受力均匀, 工作噪声小、可靠性高、运动精度高。



1—外链板; 2—内链板; 3—轴销; 4—滚子; 5—套筒

图 1-11 滚子链

滚子链由外链板 1、内链板 2、轴销 3、滚子 4 以及套筒 5 组成, 如图 1-11 所示。内链板与套筒间、外链板与轴销间均为过盈配合, 套筒与轴销间则为间隙配合。工作时内、外链间可以相对挠曲, 套筒则绕轴销自由转动。啮合时, 滚子沿链轮齿廓滚动, 以减小链条和链轮轮齿之间的磨损。内、外链板均为 8 字形, 目的是维持链板各横截面的抗拉强度大致相同, 并减轻链条的重量及惯性。

滚子链的结构具有良好的柔性, 因而能够减轻冲击和振动, 可以胜任重载、较大冲击以及存在正、反转的复杂条件下的链传动。

（三）齿轮传动

齿轮传动是机械传动中应用最广的一种传动形式，利用两个齿轮轮齿之间的啮合来实现运动和动力的传输。齿轮传动的传动比准确、效率高、结构紧凑、工作可靠、寿命长。目前齿轮传动的技术指标已经可以达到：圆周速度 $v=300\text{m/s}$ ，转速 $n=105\text{r/min}$ ，传递的功率 $P=105\text{kW}$ ，模数 $m=0.004\sim 100\text{mm}$ ，直径 $d=1\sim 152.3\text{mm}$ 。

齿轮传动应用广泛、类型众多，按照啮合齿轮间轴线的空间关系，大致可以分为齿轮轴轴线相交和齿轮轴轴线平行两种空间分布方式。常见齿轮轴轴线相交的齿轮类型主要有：

圆柱齿轮传动，一般单级传动的传动比可达到 8，最高可达 20，传递功率可达到 $10\times 10^4\text{kW}$ ，圆周速度可达 300m/s ，单级效率为 $96\%\sim 99\%$ 。常见圆柱齿轮如图 1-12 所示。直齿轮传动适用于中低速传动；斜齿轮传动平稳，适用于中高速传动；人字齿轮适用于大功率和大转矩的传动。圆柱齿轮传动的啮合形式主要有两种：外啮合齿轮传动，由两个外齿轮相啮合，两啮合齿轮的转向相反；内啮合齿轮传动，由一个内齿轮和一个半径较小的外齿轮相啮合，两个啮合齿轮的转向相同。

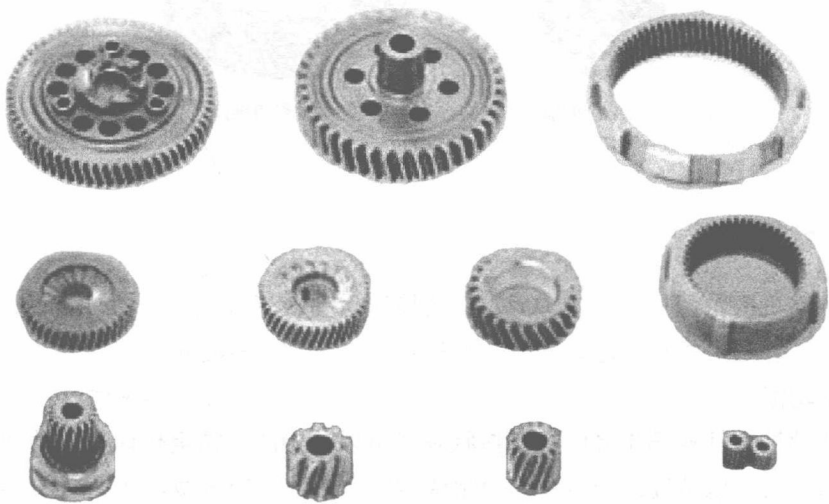


图 1-12 常见圆柱齿轮

齿轮齿条传动机构（参见图 1-13），可将齿轮的回转运动转变为齿条的往复直线运动，或者是将齿条的往复直线运动转变为齿轮的回转运动。齿轮齿条传动机构可以满足快速、精准定位、重载荷、高刚性、高速度的传动要求。

常见齿轮轴轴线相交的齿轮传动主要为锥齿轮传动，如图 1-14 所示。在一般情况下，锥齿轮传动单级传动比可达 6，最大到 8，传动效率一般为 $0.94\sim 0.98$ 。直齿锥齿轮传动的传递功率可到 370kW ，圆周速度可达 5m/s ；斜齿锥齿轮传动运转平稳，齿轮承载能力较强；曲线齿锥齿轮传动运转平稳，传递功率可达到 3700kW ，圆周速度可达到 40m/s 。

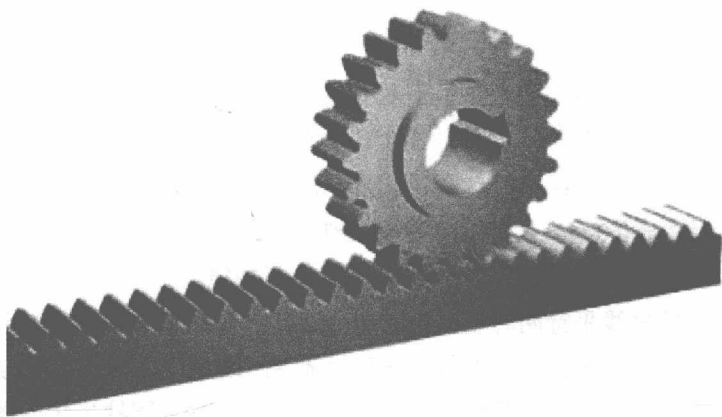
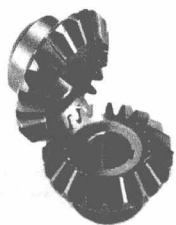


图 1-13 齿轮齿条传动机构



(a) 直齿锥齿轮



(b) 曲线齿锥齿轮

图 1-14 锥齿轮传动

(四) 螺旋传动

螺旋传动机构由螺杆和螺母构成，能将旋转运动转变为直线运动，当螺旋升角大于螺杆的摩擦角时，也可将直线运动转变为旋转运动，若螺旋升角小于螺杆的摩擦角时，则机构具有自锁功能。

螺旋传动按螺杆和螺母之间的摩擦状态，可以分为滑动螺旋传动、滚动螺旋传动、滚滑螺旋传动以及液压螺旋传动四种。中学课本中介绍的螺旋测微仪（见图 1-15）里面的传动机构就是一种典型的螺旋传动机构，车床工作台的移动所使用的丝杠螺母传动也属于螺旋传动方式。

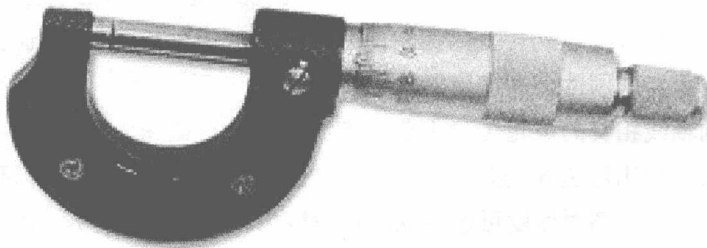


图 1-15 螺旋测微仪

（五）蜗轮蜗杆传动

蜗轮蜗杆传动机构由蜗轮和蜗杆组成（参见图 1-16），用来传递空间交错轴间的运动和动力，通常两轴空间垂直交错成 90° 。一般情况下，在蜗轮蜗杆传动中，蜗杆为主动件，蜗轮为从动件。蜗轮蜗杆传动的单级传动就可以获得很大的传动比，而且结构紧凑、传动平稳、无噪声，但传动效率较低。

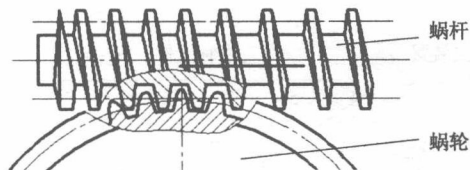


图 1-16 蜗轮蜗杆传动

蜗轮蜗杆传动机构根据蜗杆的形状不同，可以分为圆柱蜗杆传动和圆弧面蜗杆传动两类，圆柱蜗杆传动的应用较为广泛。圆柱蜗杆传动按蜗杆齿形又可以分为阿基米德蜗杆传动和渐开线蜗杆传动，其中阿基米德蜗杆传动应用最为广泛。

蜗轮蜗杆传动与其他传动相比，具有以下特点：

- ① 可以得到很大的传动比，比交错轴斜齿轮机构紧凑。
- ② 蜗轮蜗杆啮合齿面间为线接触，其承载能力大大高于交错轴斜齿轮机构。
- ③ 蜗杆传动相当于螺旋传动，为多齿啮合传动，故传动平稳、噪声小。
- ④ 具有自锁性。当蜗杆的导程角小于啮合轮齿间的当量摩擦角时，机构具有自锁性，可实现反向自锁，即只能由蜗杆带动蜗轮，而不能由蜗轮带动蜗杆。如在其重型机械中使用的自锁蜗杆机构，其反向自锁性可起安全保护作用。
- ⑤ 传动效率较低，磨损较严重。蜗轮蜗杆啮合传动时，一方面，因为啮合轮齿间的相对滑动速度大，故摩擦损耗大、效率低；另一方面，相对滑动速度大使齿面磨损严重、发热严重，为了散热和减小磨损，常采用价格较为昂贵的减摩性与抗磨性较好的材料及良好的润滑装置，因而成本较高。
- ⑥ 蜗杆轴向力较大。

二、工业机器人气压与液压传动

机器人一般由执行机构、驱动装置、检测装置和控制系统以及复杂机械等组成。其中驱动装置是驱使执行机构运动的机构，按照控制系统发出的指令信号，借助于动力元件使机器人进行动作。它输入的是电信号，输出的是线、角位移量。机器人使用的驱动装置主要是电力驱动装置，如步进电机、伺服电机等，此外也有采用液压、气动等驱动装置。

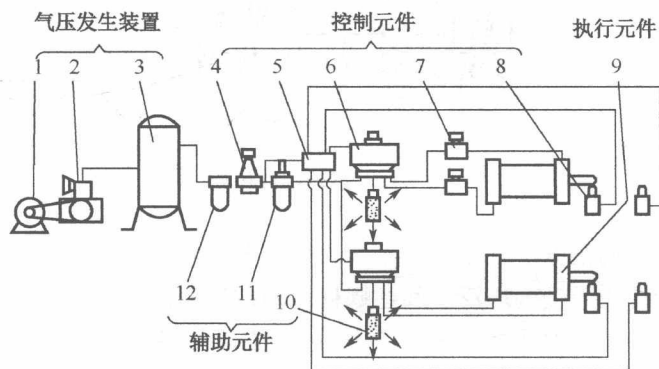
（一）气压传动

气压传动是以压缩气体为工作介质，靠气体的压力传递动力或信息的传动。传递动力

的系统是将压缩气体经由管道和控制阀输送给气动执行元件,把压缩气体的压力能转换为机械能而做功;传递信息的系统是利用气动逻辑元件或射流元件以实现逻辑运算等功能,也称气动控制系统。

1. 气压传动系统的组成

典型的气压传动系统的组成示意图如图 1-17 所示。气压传动系统一般由气压发生装置、控制元件、执行元件、辅助元件四部分组成。

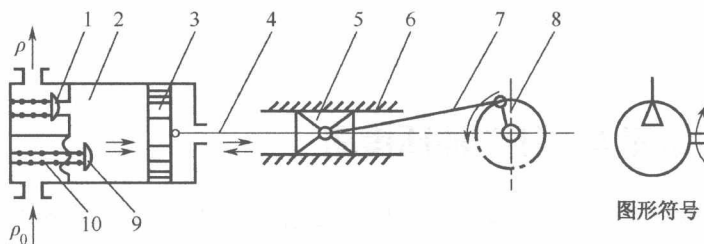


1—电动机；2—空气压缩机；3—储气罐；4—压力控制阀；5—逻辑单元；6—方向控制阀；
7—流量控制阀；8—机控阀；9—汽缸；10—消声器；11—油雾器；12—空气过滤器

图 1-17 气动传动系统的组成示意图

(1) 气压发生装置

气压发生装置将原动机输出的机械能转变为空气的压力能,其主要设备是空气压缩机。空气压缩机是一种用以压缩气体的设备,是将原动(通常是电动机)的机械能转换成气体压力能的装置。空气压缩机与水泵构造类似,大多数空气压缩机是往复活塞式。图 1-18 所示为活塞式空气压缩机工作原理图,图 1-19 所示为空气压缩机实物图。



1—排气阀；2—汽缸；3—活塞；4—活塞杆；5、6—滑块与滑道；7—连杆；8—曲柄；9—吸气阀；10—弹簧

图 1-18 活塞式空气压缩机工作原理图

(2) 控制元件

控制元件是用来控制压缩空气的压力、流量和流动方向,以保证执行元件具有一定的输出力和速度并按设计的程序正常工作。如压力控制阀、流量阀、方向阀逻辑元件和行程