

高等学校教材

机器人控制工程

徐缤昌 阙志宏 等 编著

西北工业大学出版社

高等学校教材

机器人控制工程

徐缤昌 阙志宏 编著

西北工业大学出版社

1991年5月 西安

内 容 简 介

本书全面系统地推导和论述了机器人的运动模型及其控制的原理和技术,介绍了较为成熟的机器人控制方法,对于有发展前景的新控制方法也作了较完整的归纳。全书内容包括机器人工程的基本概念、位姿及速度的运动学、力/力矩关系、轨迹规划、动力学、位置控制、力控制、应用线性化模型的多变量控制、非线性控制、最优控制、递阶及分散控制、自适应控制以及几个研究发展的新方向,共十五章,每章附有一定数量的例题和习题。

本书可作为自动控制专业、工业电气化专业高年级本科生及研究生的必修或选修课的教材,亦可作为广大工程科技人员及有关大专院校师生从事机器人技术工作时参考。

高等学校教材
机器人控制工程
编 著 者 徐滨昌
 颀志宏
责任编辑 郑永安
责任校对 樊 力

*
西北工业大学出版社出版
(西安市友谊西路 127 号)

陕西省新华书店发行
陕西富平县印刷厂印装

ISBN 7-5612-0286-5 / TP·46(课)

*
开本 787×1092 毫米 1/16 26 印张 632 千字

1991 年 5 月第 1 版 1991 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1 500 册 定价: 6.70 元

前 言

本教材是按照机电工业部的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版计划, 由“自动控制”教材编审委员会征稿、推荐出版, 责任编委及主审是西安交通大学胡保生教授。

本课程的参考学时数为 60~80 学时。全书内容共十五章, 主要包括: 机器人工程的基本概念(第一章), 坐标变换及运动学方程的建立(第二章), 运动学方程的解法(第三章), 用矢量微分法及矩阵微分变换法建立雅可比矩阵(第四章), 力/力矩关系(第五章), 轨迹规划(第六章), 拉格朗日动力学方程及牛顿-欧拉运动方程(第七章), 机械手的位置控制(第八章), 力控制(第九章), 基于线性化模型的机械手多变量控制(第十章), 非线性控制(第十一章), 按最小时间-燃料指标的次优控制及最优 PID 控制(第十二章), 两级递阶控制及分散控制(第十三章), 自适应控制(第十四章), 机械手控制中几个研究发展的新方向(第十五章)。

在本书编写过程中, 力求对机器人的基本运动模型及其控制的原理和技术进行全面系统的推导和论述; 对于某些有发展前景的新控制方法, 注意给出较完整而简要的归纳。书中内容限定于对确定性机械手的研究上。各章含有一定数量的例题和习题, 章末均附有参考文献。

使用本教材时, 可根据专业需要及教学计划安排的可能, 选学其中部分内容。某些新控制方法(目录中注有 * 号的章节)可不选为基本内容, 留待研究生阶段学习或供进一步开拓知识时参考。

本教材的第一、八至十五章由西北工业大学徐缤昌教授编写, 第二至第七章由阙志宏副教授编写, 并由徐缤昌教授统编全稿。

胡保生教授审阅了全部书稿, 西安交通大学冯祖仁博士也参加了审阅工作, 他们提出了许多宝贵意见, 在此表示诚挚的感谢。

在本书编写过程中, 我们得到“自动控制”教材编委会主任、上海交通大学张钟俊教授的关怀与指导, 并得到西北工业大学陈新海教授的宝贵支持, 在此表示衷心谢意。

范围广泛的现代控制理论及更新的计算机技术在机器人控制工程中的综合应用, 目前正处迅猛发展的阶段, 在机器人控制工程中提出的许多理论问题, 正在促进着控制理论的发展, 并成为热门的研究课题。机器人技术在我国作为一门新兴技术和学科, 已引起学术界、工程界的广泛关注。关于机器人的控制, 目前已有许多专门研究散布于国内外的文献资料之中。我们根据数年来的教学和科学研究实践, 力求在本教材中着重就机器人控制问题进行范围广泛的综合论述。对编者来说, 这是一次初步尝试, 限于经验和水平, 书中存在缺点和错误是难免的, 殷切地希望读者批评指正。

编 者

1989 年 2 月

目 录

第一章 机器人工程的基本概念	1
§ 1-1 机器人的优越性和应用	1
§ 1-2 机器人的基本结构	3
§ 1-3 分辨率、精度及重复度	5
§ 1-4 位置表示	6
§ 1-5 机器人系统的分类及其基本原理	6
参考文献	18
第二章 机械手运动学	19
§ 2-1 转动(方位)变换	19
§ 2-2 齐次变换	21
§ 2-3 广义转动变换	27
§ 2-4 欧拉变换和 RPY 变换	30
§ 2-5 D-H 坐标变换	32
§ 2-6 运动学方程	35
§ 2-7 机械手常用坐标系及变换方程	53
习题	54
参考文献	58
第三章 逆运动学问题	59
§ 3-1 腕运动学方程的解	59
§ 3-2 典型臂运动学方程的解	63
§ 3-3 机械手运动学方程的解	67
习题	73
参考文献	74
第四章 微分关系和雅可比矩阵	75
§ 4-1 连杆上一点的速度及其相对基座的广义速度向量	76
§ 4-2 用矢量微分法建立雅可比矩阵	79
§ 4-3 典型臂及 PUMA560 的雅可比矩阵	83
§ 4-4 用矩阵微分变换法建立雅可比矩阵	89
§ 4-5 逆雅可比矩阵及广义逆雅可比矩阵	101
§ 4-6 加速度关系	109

习题	112
参考文献	113
第五章 力/力矩关系	115
§ 5-1 力/力矩转换	115
§ 5-2 广义力/力矩关系	118
§ 5-3 带球面腕机械手的力/力矩关系	123
§ 5-4 负载质量的确定	128
习题	132
参考文献	133
第六章 轨迹规划	134
§ 6-1 多项式轨迹	134
§ 6-2 线性段及抛物线混合轨迹(LSPB)	145
§ 6-3 “取-放作业”轨迹	150
§ 6-4 协调运动轨迹	151
习题	153
参考文献	155
第七章 机械手动力学	157
§ 7-1 拉格朗日力学在机械手中的应用	157
§ 7-2 通用机械手动力学方程的建立	165
§ 7-3 牛顿-欧拉运动方程	179
附录 一般几何形状的惯性矩	195
习题	196
参考文献	197
第八章 机械手的位置控制	199
§ 8-1 机械手的单关节控制	200
§ 8-2 单关节机械手的传送带跟踪	209
§ 8-3 多关节机械手的控制	212
§ 8-4 关节力矩及位置控制系统	217
习题	224
参考文献	224

第九章 机械手的力控制	225
§ 9-1 机械手直角坐标系的主动刚性控制	227
§ 9-2 机械手的位置和力的混合控制	229
§ 9-3 机械手在作业空间的位置和力的控制	240
习题	246
参考文献	246
第十章 应用线性化模型设计机械手控制器的方法	247
§ 10-1 两连杆机械手的线性多变量控制	247
§ 10-2 n 连杆机械手的线性多变量控制器	259
*附录 A 多变量系统的 PD 输出反馈的设计	273
*附录 B 为配置极点的多变量 PID 控制器的设计	276
习题	279
参考文献	279
第十一章 机械手的非线性控制	280
* § 11-1 带极点配置的机械手的非线性控制	280
§ 11-2 应用非线性反馈及非线性变换的机械手控制器	295
习题	304
参考文献	304
第十二章 机械手的最优控制	306
§ 12-1 机械手的加权最小时间燃料指标的次最优控制	306
§ 12-2 机械手的最优 PID 控制	319
附录 式(12.21a)的推导	326
习题	327
参考文献	327
第十三章 机械手的递阶及分散控制	329
§ 13-1 机械手的两级递阶控制方案之一	329
* § 13-2 机械手的两级递阶控制方案之二	335
§ 13-3 机械手的分散控制	341
习题	346

参考文献	346
第十四章 机械手的自适应控制	348
§ 14-1 基于机械手线性化模型的自校正控制方案	348
§ 14-2 基于机械手线性化模型的模型参考自适应控制方案	355
§ 14-3 基于非线性反馈的自适应控制器	360
§ 14-4 机械手补偿非线性及解耦控制的自适应方案	368
§ 14-5 机械手的变结构模型跟踪控制	378
习题	384
参考文献	384
第十五章 机械手控制的几个研究发展新方向	386
§ 15-1 柔性机械手的建模与控制	386
§ 15-2 冗余机械手的控制	390
§ 15-3 多机械手的递阶控制	394
参考文献	404

第一章 机器人工程的基本概念

§ 1-1 机器人的优越性和应用

机器人(Robot)一词出自捷克作家 K.Capck 在 1920 年写的一个剧本, 名为《罗莎姆万能机器人公司》。在捷克语里, Robot 意为劳役苦工; 在斯洛伐克语里, Robotnik 意指劳动者。剧作家在剧中所描写的主人公是一个看起来像人、但没有人的感觉能力的机器人, 名叫 Robot, 用来替人们做体力劳动和日常劳动。

工程应用中的机器人看起来并不像人, 它们是应用计算机进行控制的高度自动化的系统。工业应用中的机器人又称为操作手或工业机械手。工业机械手的概念在 1954 年由美国 G.C.Devol 提出并获得专利(美国专利号 No.2988237)。他提出了如何制造一个可控的机械手并能在工厂工作。第一台商用工业机器人于 1961 年由美国 Unimation 公司制出。1970 年以后, 在美、日、欧洲的工厂才开始大量使用工业机器人。

工业机器人(机械手)的典型结构是模仿人的一个臂, 有相似的关节, 有时称作肩、肘、腕; 腕有倾斜、俯仰、滚动的方位变化。关节由电动、气动或液动执行机构驱动, 由计算机控制操作。

工业中愈来愈多地使用机器人, 首先是因为它能显著提高生产率。据有关资料介绍, 在 Chrysler's Jefferson 工厂, 装配线上的 200 个焊工被 50 个机器人代替(1980 年 2 月), 这些机器人上两班, 装配线的输出增加几乎 20%, 据称, 在 1947 至 1965 年, 美国生产率每年增加 3.4%, 在以后的十年中降至 2.3%, 1970 年降低 1%, 1980 年变为负数。随着工业生产线上应用更多的机器人及其它计算机自动化设备, 美国的生产率在 1980 年以后终于取得增涨。在同一期间, 日本的生产率每年平均增加约 7.3%, 与广泛采用机器人技术密切相关。

应用机器人可取得较好的产品质量。例如教导机器人在汽车上作 20 个点焊, 它总是作二十个点焊; 但人操作时, 有时可能少焊几点。机器人可使产品质量更一致, 对质量的控制更简单一些。

机器人具有“柔性”(flexibility), 这一特性使其在将来自动化工厂中将扮演一个重要角色。在将来的工厂中, 原料转变为成品的过程将完全实现自动化。从产品设计、制造到组装、检验, 将用计算机监控, 而它们的操作则依赖于机械手和人工智能系统。所谓柔性, 指通过简单的改变计算机程序和相应的简单调整, 就可改变工厂的产品。显然, 这种柔性会给工厂带来较大的自由, 可能使一个给定的生产线满足不同的要求, 更快地更新产品型号。例如一个日本工厂的柔性生产线, 在接到商业部指示后不到半年就产出一个新型号彩色电视机。没有机器人的参予, 将来的工厂便无法生产。

关于机器人在工业上的用途分类见图 1.1, 它示出 1982 年底在美国和日本的应用情况。

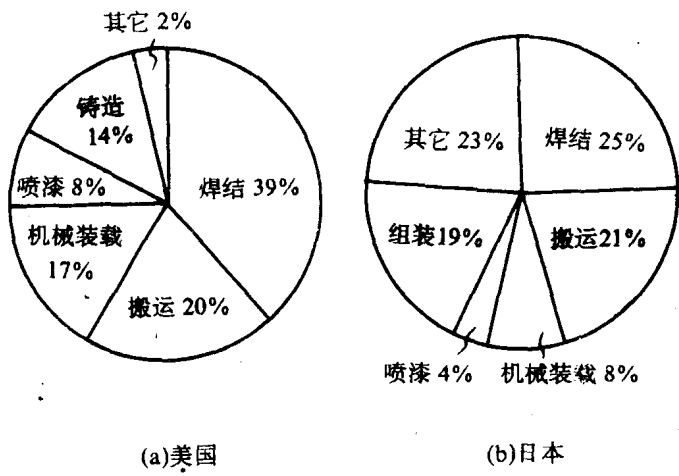


图 1.1 美、日机器人用途分类

机器人广泛地用于那些被人们认为单调厌烦、重复性的、对健康有害的工作场合。例如用喷漆机器人就可减轻有毒气体对人体的危害；水下机器人能下到人类达不到的水深；排险机器人替人在危险易爆场所工作；在原子能站中用遥控机器人去搬运毒性最烈物质——钚。至于许多组装线上的简单组装工作，其有限操作并不需要熟练技工，用机器人工作会更有效。自然，机器人代替不了只有发挥人的创造性才能完成的智能工作。

有一个应用机器人的不寻常的实例是从羊身上把所有的毛剪掉。1979年澳大利亚开发的实验机器人，在活羊身上作过150次实验 (Stauffer 1982, Wong 和 Hudson 1983)。剪羊毛的装置是微机控制的8轴液压机械手，应用专门为剪羊毛动作开发的软件和电传感器技术探测羊皮，并设计有专门装置能固定和操纵羊的不同部分以便剪毛。

机械手已应用于空间技术，1981到1982年美国航天飞机哥伦比亚号首次飞行中引人注目的是应用了机械手。如图1.2所示。机械手是一个50英尺长的机械操纵器，它由飞机座舱后部一名宇航员控制。宇航员通过安装在机械手上的电视录像机观察目标，并操纵手的末端运动到目标点。在飞机的第三次飞行中，机械手持重353磅负载。这个遥控机械手的任务是将卫星放入轨道或在失败时回收它们，这是空间技术发展的重要进展。

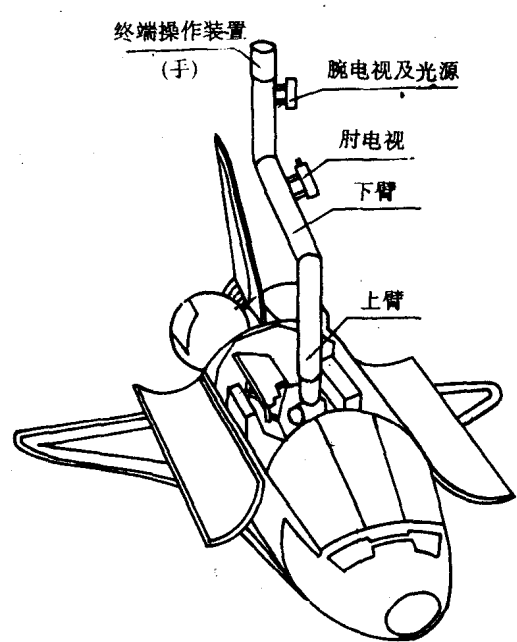


图 1.2 带机械手的航天飞机哥伦比亚号

机器人系统还可用于医院帮助瘫痪病人或手术后的卧床病人，病人用一个小操纵杆指示机器人取药、开窗、打开电视机；再增加一个对话系统，机器人通过示教可以响应病人发

出的指示话语。这样就可减轻护士的非技术性工作。

家务机器人是另一种梦想。每个管家都希望在家务工作上得到帮助：打扫房间、擦玻璃、洗盘子等。遗憾的是，用80年代初的机器人还不能作这些工作。今日的机器人是单手装置，没有视觉、触觉传感器，因此它们只适于作规定的简单作业。用机器人作家务不是一件简单事情。当你想判断机器人是否能作某项工作时，你不妨首先闭上你的眼，再只用一只手，并带上连指手套(姆指分开、其它四指连在一起)，这个手套降低了你手指的触觉，并限制了你的手只成为两指的夹手。在这些限制条件下，试试从桌上拿盘子，拿起一张椅子并移动它，或擦洗窗子，这不是很容易的！在工厂中要为机器人设置一项新工作，也可以作同样的实验。

家务机器人应该是什么样子？它们可能像R2-D2或星际大战中的机器人C3-PO。R2-D2是一个一米高的机器人，有两个短腿和一张圆柱形脸，有一双雷达眼。R2-D2只能与另一机器人用一系列电声通讯。C3-PO是人型机器人，有一张金属的人面，C3-PO是人-机器人关系专家，能将机器人的电子语言翻译成人类语言。另外一种可能的形式是用四轮驱动机构运动的机器人(也可用三轮驱动)，在胸前有一台小电视机，有两个机械手，也可以加有录象磁带记录仪、电视摄像机及语言通讯系统。到目前为止，这样的机器人的娱乐性价值比实用性更强一些，它能迎接客人，准备饮料端送给客人。将来随着计算机功能及人工智能的发展，这类机器人可做大量的家务工作。机械手能应用标准化的附件，如擦窗用的真空吸尘器、橡皮扫帚，它们可以自己更换这些附件。

家务机器人的最大困难之一是上、下楼梯的问题，这个问题不解决，就会极大地限制它的应用。可能将来的房屋设计要考虑对它们的方便，使它真正成为家庭的仆人。

§ 1-2 机器人的基本结构

工业机器人是一种可编程的机械操作装置，可以沿几个方向运动，在它的末端装有所谓的终端操作装置(工具)，能操作工厂内工人通常做的工作。机器人一词通常用于包含控制系统的操作机，并能独立工作。韦氏新世界词典对机器人的定义是：“能自动运行、像人一样操作的任何机械装置”。照这个定义，遥控自动开门的垃圾箱门启开器也是一个机器人，显然它不是一个工业机器人。制造工程师学会的机器人国际组(RI/SME)对机器人的定义为：“可以再编程的多用途的操作装置，它设计得能通过可变的程序运动搬运原料、部件、工具或特殊装置以完成各种作业”。定义中的关键词有“再编程”(可以一次再次的编程)、“多用途”(能进行一种以上特殊任务，但有时是一种)及“移动原料、部件、工具”(定义操作机的作业)。照这个定义，遥控机器人及航天机械手就不是机器人，因为它们不是编程的而是基于主仆操作的，这些装置有时称作远距操作器，因为它们由操作人员在一段距离外进行操作。RI/SME的工业机器人定义还应包括下列一些关键词：“沿几个方向(或自由度)运动”、“终端操作装置”及“工厂作业”，若缺少这些词中的一个，则洗衣机、自动换工具器或大规模生产的制造机也可称作机器人，这就和原意不同了。

近代机器人系统至少包括以下三个主要部分：

- ① 操作装置，它是机械活动结构；
- ② 能驱动操作装置的关节驱动器；

③ 作为程序存储器和控制器的计算机。

通常机器人操作装置包括一个主结构和一个腕，在它的末端有一工具，该工具可能是一个焊炬、喷枪、机械工具或带有能启闭的爪的夹手，与机械手的具体应用情况有关。这些工具由于装在机器人的末端，故称作机器人终端操作装置。主结构常称为臂，通常由关节联结着的一系列机械连杆组成，每个连杆用关节与另一连杆相联结，见图 1.3。关节的作用为控制连杆间的运动。处于末端的一组关节集体称为腕，它控制手的运动。典型的腕有三个关节，能提供滚动、俯仰、倾斜运动。

机械手终端操作装置在作业空间内的运动自由度有六个，其中三个用来改变终端位置的移动自由度，三个用来改变手的姿态的转动自由度。用马达独立驱动的机械手的关节数目 n 至少应有六个，若 $n > 6$ ，则称冗余机械手；若 $n < 6$ ，则机械手终端操作装置的运动空间将受约束。在平面内运动的机械手，其运动自由度有三个，其中两个移动自由度、一个转动自由度，这时用马达独立驱动的机械手的关节数目 n 至少应有三个。从机械手运动链结构来看，机械手中用马达独立驱动的关节数称为机械手的自由度。机械手终端操作装置的运动自由度一般小于或等于机械手的自由度。

臂的不同方位可能完全改变臂的位置，见图 1.4，在梁上一点进行焊接，同在梁下几乎同一点的焊接，所需臂的方位完全不同，臂的位置改变了。典型的臂有三个自由度，可以是移动或转动的；腕有三个转动自由度，六个运动联合起来能使终端操作装置按一定方位置于空间希望点上，但是也有许多机器人只需五个或四个自由度，同时使腕运动轴为两个或一个。

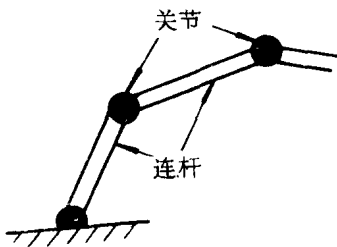


图 1.3 机器人臂的结构

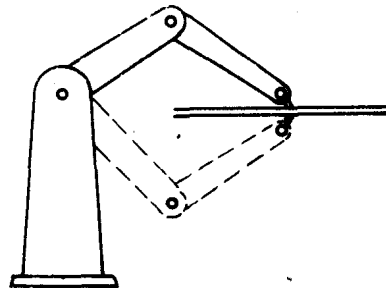


图 1.4 在梁的焊接中机械手不同方位

在运动学上称转动轴为转动付，它是一个简单的铰链，没有轴向滑动，转动运动可由执行机构直接驱动或通过减速器驱动。称移动轴(轴的线性运动)为移动付，可由导向螺杆取得，其滑动件沿轴向可正可负地移动，类似气压、液压机构中的活塞。

有时需要用只作简单的“取-放”动作的机器人，例如取一个有一定方位的部件，把它安放到机器内，作这种工作的机器人只需有限数目的序列动作，而不是高度的计算机编程控制的复杂运动，无需伺服控制，称非伺服机器人。通常这种机器人的驱动元件多是气压或液压作动筒，并需简单地设置一对可调限位开关及机械制动器。在每一步控制序列中，机器人控制器发出一个控制信号给希望轴的阀门使轴运动，运动持续到为对应的限位开关和机械制动器所制动，并发出信号使阀门关闭；进行第二步控制序列时，将控制另一轴的阀门参与工作。这个过程不断重复，直至控制序列中的各步都执行完毕。

虽然“取-放”机器人的价格相对便宜，也有满意的位置精度(小于 0.5mm)，但控制不太

灵活，因为程序中的运动要通过调整每个轴的限位开关和机械制动器来实现。以后的讨论将集中于更高级的机器人，它有高度的编程和控制灵活性，这种机器人常称为伺服控制机器人，是闭环控制方式。

新一代的机器人是指更智能的机器人，它能作出决策，能对新情况作出响应，产生“突发性”的运动。决策需根据传感器送来的信息，如为视觉用的录象机，为力反馈用的压力传感器。对于非工业用的机器人系统，附加传感器将是非常有用的。

§ 1-3 分辨率、精度及重复度

在机器人中的“精度”一词经常与分辨率及重复度相混。机器人的分辨率是由控制组合的设计确定的一种性质，且主要与位置反馈传感器有关，还需要把程序分辨率与控制分辨率加以区分。程序分辨率是在机器人程序中容许的最小位移增量，常称为基本分辨率单位(BRU)，对于典型的线性轴，它的量级是0.01英寸(0.25mm)；对于转动轴，它的量级是 0.1° 。控制分辨率是反馈装置能敏感的最小的位置变化，例如一个光学编码器在轴每转一周时能发出1000个脉冲，设它直接与转动轴相联，则轴每转 0.36° 将发出一个脉冲，这个运动轴的控制分辨率就是 0.36° ，小于 0.36° 的角位移不会被察觉。当程序分辨率等于控制分辨率时，可获得最好的性能，此时，两种分辨率可用一个词来表示，即系统分辨率。

机器人系统的最终精度和它的机械误差、计算机控制算法及系统分辨率有关。机械误差主要由操作装置的关节的间隙及连杆的弯曲所造成。间隙存在于减速器、导向螺杆及液压驱动的执行机构；机械手末端负载造成的连杆的任何挠曲都会造成位置误差，但只为提高连杆刚度而过大地增加连杆质量是不妥的，因连杆质量较大时，将增加响应时间，限制了机器人的工作速度。关于控制算法中的计算机舍入误差，会引起位置误差，控制设计者通常把这种由程序分辨率引起的系统误差取作 $\frac{1}{2}$ BRU，这是由于小于1BRU的位置误差不能编程又不能测量，故计为平均值。于是，实际系统的精度为：

$$\text{机器人精度} = \frac{1}{2} \text{BRU} + \text{机械精度}$$

在理想情况下，机械误差的积累效果应低于 $\frac{1}{2}$ BRU，这时则可保证机器人精度等于机器人分辨率。对于直角坐标系机器人，这个要求是合理的，但对于关节型机器人很难作到这一点。

重复度是与精度联系的统计名词。若令机器人的一个关节从某一点开始重复多次地转同样大小的角度，

各次的环境条件都相同，则可发现结果的运动并不相同，见图1.5。系统的重复度是相对于这些位移的平均值的位置偏差。例如重复度为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，意味着任何点相对于重复采样的中

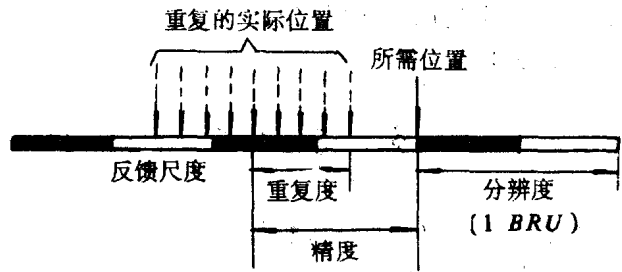


图 1.5 分辨率、重复度及精度

心可大于或小于 0.2mm, 显然, 通过较多次数的实验, 可给出较准确的重复度估值。机器人的重复度通常比精度高。

许多机器人厂商对他们的机器人只提供重复度的数值, 而不提供精度值, 其原因在于精度与机械手所持的特殊负载有关, 较大的负载会引起机器人连杆较大的挠曲, 而使精度下降。重复度的数值几乎与手持的负载无关, 因此可对任何机械手提出固定数值的重复度。

§ 1-4 位置表示

60 年代制作的机器人系统, 应用基于数字电路技术的电子硬件, 70 年代以来生产的机器人系统应用小型或微型计算机并尽可能多的消除附加的硬件电路, 二者对于运动轴的位置都是用二进制数字形式表示, 每个数字单位与运动轴位置的分辨率(即 BRU)相对应, 也称为增量大小或二进制码的权数。实际上, 它近似对应于机器人轴的重复度。

基于硬件的机器人系统的数字控制器应用指令脉冲, 每个脉冲使对应轴运动一个 BRU。计算机控制的机器人系统可按不同形式设计, 一种最简单的情况称为参考脉冲法, 计算机也传送指令脉冲, 这些脉冲可驱动步进电机作开环控制, 但通常都作用于伺服电机或液压执行机构作闭环控制。闭环机器人系统中的位置反馈装置如光学编码器, 每运动一个 BRU 便产生一个脉冲。在所有这些情况下, 一个脉冲等于一个 BRU 的位移, 即

$$\text{脉冲} \equiv \text{BRU} \quad (1.1)$$

在计算机中, 信息的改编、处理和存储, 都是用二进制数字形式, 每个数字有固定的位数, 最常用的是 8 位及 16 位。若轴的分辨率 $\text{BRU} = 0.05^\circ$, 则一个 3.05° 的角位移要用数 61 表示, 在 8 位计算机中表作 00111101, 每个二进制数字 (*bit*) 表示一个 BRU, 即

$$\text{Bit} \equiv \text{BRU} \quad (1.2)$$

当应用一个实际的 BRU 时, 8 位字长限制了所能指示的轴位移最大值, 故多用 16 位计算机字长 (或双 8 位字长), 它能给出 $2^{16} = 65536$ 个轴的不同位置 (包括 0); 若轴分辨率 $\text{BRU} = 0.1\text{mm}$, 则表示最大位移量为 6553.6mm 或 $\pm 3276.8\text{mm}$; 若分辨率 $\text{BRU} = 0.005^\circ$, 则最大位移量为 327.68° 。式 (1.1) 和式 (1.2) 可合并为:

$$\text{Bit} = \text{脉冲} = \text{BRU}$$

意为对所有类型的计算机控制的机器人, 名词“二进制数”、“脉冲”、“BRU”具有同等的含意, 可以交换使用。

§ 1-5 机器人系统的分类及其基本原理

机器人系统的分类有三种方法:

- ① 按系统的类型分为点到点及连续轨迹;
- ② 按控制回路类型分为开环与闭环;
- ③ 按操作装置结构分为直角坐标、圆柱坐标、球坐标及关节型。

分类方法的选择与特定的用途有关。另外还要选择腕及终端操作装置以适合所需用途。

一、点到点(PTP)和连续轨迹(CP)系统

对机器人没有经验的人可能认为点焊和弧焊机器人是一样的，只是所用焊接装置不同，实际上它们是两种不同的机器人系统。点焊机器人的控制是基于点到点的操作，不要求进行弧焊，而弧焊则需要连续轨迹系统。

1. 点到点机器人系统

点焊机器人是一个典型的点到点(PTP)系统。进行点焊时，机器人把焊炬一直运动到准确的焊接点，点焊完毕再移到一个新点。直到部件上所有焊点焊完，把焊炬移回起始点，系统并为下一个部件的焊接作好准备。

PTP 的操作一般可描述如下：机械手运动到数值确定的位置后，停止运动；终端操作装置进行所需的作业，此时机械手不动；作业完成后，机械手移动到下一点，重复以上循环。

在 PTP 系统中，当机械手从一点移到下一点时，其所经的路径及速度都没有任何重要性，只需轴位置计数器用以控制机器人工具终点的位置，以便把它移到目标点。每个轴的计数器装定着下一点希望位置的坐标值。计数器的分辨率与系统的 BRU 有关。当机械手运动时，每个关节上的编码器发出表示关节位置的脉冲并传输给对应的计数器，该脉冲使每个计数器读数逐渐下降，当所有计数器读数均为零时，机械手到达它新的希望位置。

PTP 机器人系统有两种基本结构。第一种是分别单独控制每个轴尽可能快地移动相应的分量，从一空间点运动到下一空间点，对从起点到终点的路程不加控制。这种类型的平面直角坐标机器人的运动轨迹见图 1.6。另一种较复杂的 PTP 系统结构能使所有轴同时运动、同时终止，在这种系统中，要从各轴运动中找出需要时间最长的轴的运动，用这个时间来确定其它轴的速度，结果的轨迹是完全任意的，图 1.7 示出圆柱坐标机器人的这种运动轨迹。

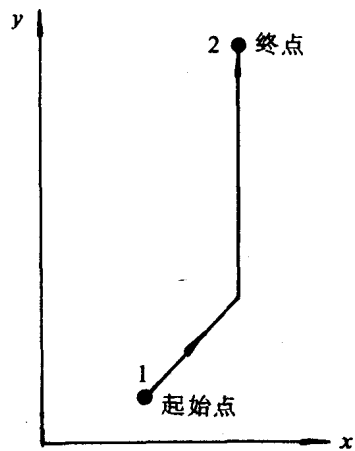


图 1.6 PTP 直角坐标机器人系统的轨迹

PTP 机器人通常用作点焊、物体搬运、装卸机器负载及简单的组装作业。

2. 连续轨迹机器人系统

连续轨迹机器人的轴在运动期间，其工具还在作着作业，如弧焊。弧焊机器人的作业就是引导焊炬沿预定轨迹运动。CP 机器人的所有轴同时运动，每个轴的运动速度并不相同，用计算机控制协调这些速度，以便跟踪所需的路径或轨迹。

在 CP 操作中，机器人工具在各段终点的位置及各轴的速度确定了所产生的轨迹(例如弧焊的焊弧)，同时合成速度会影响工作质量(例如弧焊中焊炬的速度变化会产生不均匀的焊缝厚度，甚至积累金属过多或有孔出现)。

在 CP 直角坐标机器人中，若要求腕以速度 V 跟踪长度为 l 的直线路径，则轴速度为

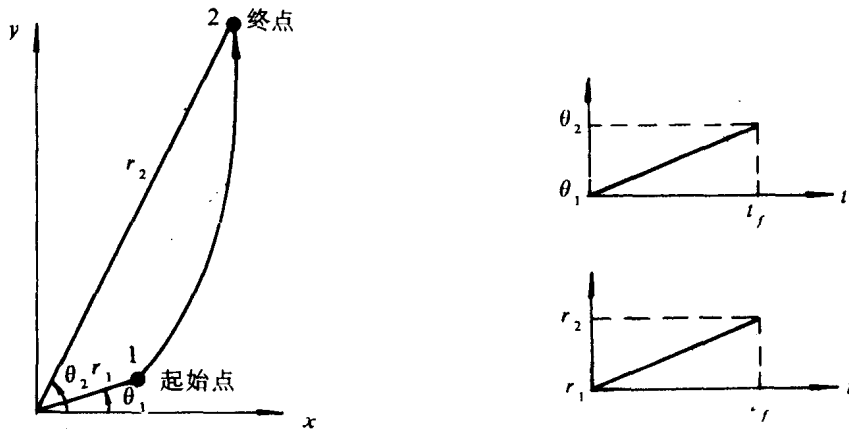


图 1.7 PTP 圆柱坐标机器人各轴同时运动同时结束的轨迹

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{x}{l} V \\ V_y &= \frac{y}{l} V \\ V_z &= \frac{z}{l} V \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中 $l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, x, y, z 分别为 l 在 x, y, z 方向的分量。

在 CP 机器人中, 一个轴的速度误差会引起路径的位置误差, 例如, 假设要求直角坐标机器人的腕沿 45° 方向作直线运动, 当沿 x 轴的速度增加时, 则腕运动的角度将小于 45° , 见图 1.8。为了避免产生这种误差, 系统需对每个运动轴配备独立的连续位置控制回路和一个计数器, 所需的臂位置装在在每个运动轴的计数器上, 它的读数被对应轴的编码器反馈脉冲所递减, 当达到希望位置时, 读数为零。

CP 机器人通常用作弧焊、喷漆、复杂的组装及检验。

3. 轨迹规划

机器人的作业是通过一系列的点来规定的, 把它们作为端点储存于机器人计算机中。PTP 机器人的终端操作装置沿任意路径从一端点运动到另一端点, 并要分别给出每个轴所需的位置值, 即把端点表成关节坐标, 作为对应轴控制回路的指令信号。PTP 关节型机器人方块图见图 1.9, 机器人的控制程序具有轨迹规划, 包括加速、减速, 有时还有各轴运动的同步。程序所用的数据有端点的关节坐标值, 它常用示教盒取得作业所需点的记录, 当得到的位置指令送给相应的控制回路时, 运动便开始。当所有运动轴达到所需位置时, 读出一组关节坐标, 继续进行作。

轨迹规划一词意味着确定机器人终端操作装置运动所沿的实际轨迹或路径。PTP 机器人轨迹规划的约束考虑有两种形式:

- ① 每个关节的最大容许加速度及速度;
- ② 由臂的几何及工作空间限制产生的约束。

为了说明轨迹规划, 考虑下列简单举例。设 PTP 机器人每个关节必须尽快运动到终点 θ_0 , 但不要超过最大容许加速度 a_m 及最大速度 V_m 。图 1.10 示出了希望轨迹, 它划分为三个

区域：起始段 $[0, t_1]$ ，以最大加速度运动；中间段 $[t_1, t_2]$ ，以最大容许速度运动；终段 $[t_2, t_f]$ ，以最大减速运动。为简单起见，设加速、减速时间相等。

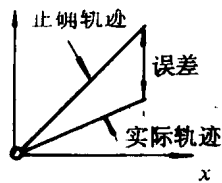


图 1.8 CP直角坐标系的路径误差

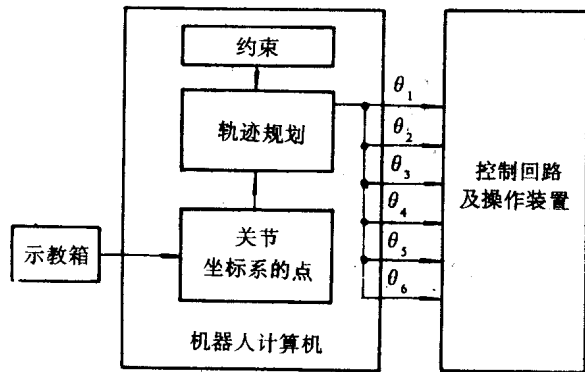


图 1.9 PTP关节型机器人方块图

$$t_1 = t_f - t_2 \quad (1.4)$$

控制程序需计算开关时间 t_1 及 t_2 ，它们与每个关节的初始位置 θ_0 及 θ_f ， V_m ， a_m 有关。

起始段轨迹为
$$0(t) = \frac{1}{2} a_m t^2 \quad (1.5)$$

其终点位置
$$\theta_1 = 0(t_1) = \frac{1}{2} a_m t_1^2 \quad (1.6)$$

其终点速度
$$V_m = a_m t_1 \quad (1.7)$$

中间段轨迹为
$$\theta(t) = \theta_1 + V_m(t - t_1) \quad (1.8)$$

其终点位置
$$\theta_2 = \theta_1 + V_m(t_2 - t_1) \quad (1.9)$$

终段轨迹为
$$\theta(t) = \theta_2 + V_m(t - t_2) - \frac{1}{2} a_m (t - t_2)^2 \quad (1.10)$$

令 $t = t_f$ ，且考虑式(1.4)有

$$\theta_f = \theta_2 + V_m t_1 - \frac{1}{2} a_m \cdot t_1^2 \quad (1.11)$$

联立式(1.6)，(1.7)，(1.9)和(1.11)得

$$\theta_f = V_m \cdot t_2 \quad (1.12)$$

由式(1.7)及(1.12)可求得两个所需的开关时间

$$t_1 = \frac{V_m}{a_m} \quad (1.13)$$

$$t_2 = \frac{\theta_f}{V_m} \quad (1.14)$$