





孙迪生 王炎 编著

# 机器人 控制技术



电气自动化  
新技术  
丛书



机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

# 机器人控制技术

孙迪生 王 炎 编著



机械工业出版社

机器人控制是一门新的综合性技术。全书共11章,第1~5章从控制工程角度论述机器人学基础知识,包括绪论、位姿描述与空间变换、机器人运动学、机器人动力学及机器人传感器;第6~9章介绍机器人控制基础技术,包括驱动方法、位置控制、力控制及基于视觉的机器人位置控制原理;第10、11章介绍机器人控制系统实现技术,包括硬件组成方法及近代控制技术的应用。

本书适宜于从事工业自动化的工程技术人员阅读,也可以作为机电一体化专业和工业自动化专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

D11 B60

机器人控制技术/孙迪生,王炎编著. —北京:机械工业出版社, 1997

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05447-4

I. 机… II. ①孙… ②王… III. 机器人控制-技术  
IV. TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第23953号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:王颖 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年4月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1/32</sup>·9.75印张·252千字

0 001—3 000册

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

# 《电气自动化新技术丛书》

## 序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174

号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》  
编辑委员会

# 《电气自动化新技术丛书》

## 编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德钤 李永东

委员：(以姓氏笔划为序)

王 炎 王文瑞 王正元

刘宗富 孙 明 孙武贞

孙流芳 过孝瑚 许宏纲

朱稚清 夏德钤 陈伯时

陈敏逊 李永东 李序葆

张 浩 张敬民 周国兴

涂 健 蒋静坪 舒迪前

喻士林 霍勇进 戴先中

《电气自动化新技术丛书》

**出版基金资助单位**

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

# 前 言

机器人是近年来迅速发展起来的高新技术密集的机电一体化产品。在发达国家，工业机器人已经得到广泛应用，这是因为应用工业机器人是提高生产过程自动化、改善劳动环境条件、提高产品质量和生产效率的一种非常有效的手段，亦是技术革命的重要内容之一。随着技术的发展，机器人的应用范围已在不断扩大，遍及工业、国防、宇宙空间、海洋开发、抢险救灾、医疗康复，甚至进入人类生活的各个方面。可以相信，于 21 世纪，机器人将得到普及。然而机器人的核心是机器人的控制系统。机器人的先进程度和功能强弱通常都直接与其控制系统的性能有关。特别是新一代计算机的出现与人工智能的发展，给机器人控制技术带来极其丰富的内容。所以机器人控制是一项跨多个学科的综合性的技术，它涉及自动控制、计算机、传感器、人工智能、电子技术和机械工程等多种学科的内容。

为了使广大读者扩大眼界、丰富知识，我们编写了这本书。希望在了解机器人的同时，了解机器人控制的一些基本理论与基本技术，并熟悉最新技术在机器人控制中的应用。

本书的内容取材于作者多年来从事机器人控制工程研究工作的总结和相应的教学手稿。全书共 11 章，讲述三部分内容：第 1~5 章从控制工程角度，论述机器人学基础知识，包括绪论、位姿描述与空间变换、机器人运动学、机器人动力学及机器人传感器；第 6~9 章介绍机器人控制基础技术，包括驱动方法、位置控制、力控制及基于视觉的机器人位置控制原理；第 10、11 章，介绍机器人控制系统实现技术，包括硬件组成方法及近代控制技术的应用。

为使本书易于为工程技术人员接受，简化了理论推导过程，着



重于物理概念的阐述和分析。书中既讲述了一般原理，也充实进许多实际应用例子，书中取材具有实用性和先进性。

在本书选题、编写、定稿和出版过程中，得到了中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、机械工业出版社以及《电气自动化新技术丛书》编委会的大力支持与帮助，对此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到哈尔滨工业大学机器人研究所的大力支持，在此深表感谢。

限于我们的经验与水平，书中难免有许多不妥之处，希望读者批评指正。

孙迪生 王 炎

1996年4月于哈尔滨工业大学

# 目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 机器人技术的发展 .....	1
1.1.1 机器人的定义 .....	1
1.1.2 机器人发展史 .....	2
1.1.3 机器人技术展望 .....	3
1.2 机器人的结构与分类 .....	8
1.2.1 机器人系统结构 .....	8
1.2.2 机器人的几何模型 .....	9
1.2.3 机器人的分类 .....	9
1.3 对机器人控制的基本要求 .....	14
第 2 章 位置与姿态描述和空间变换 .....	16
2.1 机器人位置与姿态的描述 .....	16
2.2 坐标变换 .....	18
2.2.1 齐次坐标 .....	18
2.2.2 齐次变换 .....	18
2.3 齐次变换的几何意义 .....	30
2.3.1 变换矩阵的块分解及其几何意义 .....	31
2.3.2 方向余弦阵的几个性质 .....	32
第 3 章 机器人运动学 .....	34
3.1 机器人正向运动学 .....	34
3.1.1 机器人坐标系的建立方法 .....	34
3.1.2 机器人正向运动学的解 .....	43
3.2 机器人逆向运动学 .....	49
3.2.1 逆向运动学问题的多解性与可解性 .....	50
3.2.2 解析法求解逆向运动学问题 .....	51

3.2.3 求解逆向运动学问题小结 .....	61
3.3 机器人运动学仿真 .....	63
3.4 机器人的雅可比矩阵 .....	65
3.4.1 雅可比矩阵的定义 .....	65
3.4.2 雅可比矩阵的求法 .....	67
3.4.3 雅可比矩阵的逆 .....	76
3.5 雅可比矩阵的应用 .....	77
3.5.1 分离速度控制 .....	77
3.5.2 雅可比矩阵在静力分析中的应用 .....	78
第4章 机器人动力学 .....	81
4.1 概述 .....	81
4.2 达朗伯原理和虚位移原理 .....	82
4.2.1 达朗伯原理 .....	82
4.2.2 虚位移原理 .....	83
4.3 拉格朗日方程 .....	92
4.3.1 动力学普遍方程 .....	92
4.3.2 拉格朗日方程 .....	93
4.4 一个简单例子 .....	98
4.5 机器人的动力学方程 .....	104
第5章 机器人传感器 .....	117
5.1 机器人传感器的选择要求 .....	117
5.1.1 对机器人传感器的要求 .....	117
5.1.2 传感器的评价和选择 .....	123
5.2 位置传感器 .....	127
5.3 速度传感器 .....	133
5.3.1 模拟式速度传感器 .....	133
5.3.2 数字式速度传感器 .....	134
5.4 力与力矩传感器 .....	136
5.5 接近觉传感器 .....	147
5.6 触觉传感器 .....	152
5.7 传感器输出信号的处理 .....	160
5.7.1 输出形式的转换 .....	160
5.7.2 输出的解调、标定和线性化 .....	161

第 6 章 机器人驱动技术 .....	163
6.1 对机器人驱动装置的要求 .....	163
6.2 液压驱动 .....	164
6.2.1 直线液压缸 .....	165
6.2.2 旋转执行元件 .....	165
6.2.3 电液伺服阀 .....	166
6.2.4 闭环伺服控制 .....	168
6.2.5 对液压机器人示教 .....	168
6.2.6 液压动力源 .....	169
6.2.7 液压驱动的优缺点 .....	170
6.3 气压驱动 .....	170
6.4 电气驱动系统中执行机构的功率确定方法 .....	172
6.4.1 基于负载所需功率的估算 .....	172
6.4.2 计算所需最大的功率 .....	173
6.5 机器人中的驱动电动机 .....	177
6.5.1 步进电动机 .....	177
6.5.2 步进电动机的微步驱动 (细分原理) .....	181
6.5.3 直流伺服电动机 .....	183
6.5.4 无刷电动机 .....	185
6.6 电动机驱动方法概述 .....	190
6.6.1 步进电动机驱动 .....	190
6.6.2 直流伺服电动机驱动 .....	192
6.6.3 无刷电动机驱动 .....	194
第 7 章 机器人位置控制技术 .....	199
7.1 基于直流伺服电动机的单关节控制 .....	199
7.2 基于交流伺服电动机 (AC 无刷电动机) 的关节位置控制 .....	206
7.3 轨迹插补算法 .....	212
7.3.1 定时插补与定距插补 .....	213
7.3.2 直线插补算法 .....	215
7.3.3 圆弧插补 .....	216
第 8 章 力控制技术 .....	221
8.1 力控制的原理 .....	221
8.2 建立柔顺运动控制坐标系 .....	223

8.3	6自由度机器人力控制算法 .....	227
8.4	主从操作及双向力反馈控制 .....	229
8.4.1	主从遥控机器人系统的组成及分类 .....	230
8.4.2	$M_m-F_m$ 型及 $M_m-M_m$ 型主从遥控系统工作原理 .....	232
第9章	机器人的视觉技术基础 .....	237
9.1	摄像机的几何模型及系统的校准 .....	237
9.2	CCD摄像机 .....	242
9.3	图像初级处理 .....	246
9.3.1	图像的分离算法 .....	247
9.3.2	图像的重心位置及惯性矩计算 .....	251
9.4	激光在机器人视觉中的应用 .....	253
9.4.1	点投式激光器应用 .....	253
9.4.2	线投式激光器应用 .....	255
第10章	机器人计算机控制系统 .....	257
10.1	概述 .....	257
10.2	机器人控制系统例 .....	259
第11章	近代控制技术在机器人中的应用 .....	264
11.1	机器人的自适应控制 .....	264
11.1.1	状态模型和主要结构 .....	265
11.1.2	模型参考自适应控制器的设计 .....	267
11.1.3	自校正自适应控制器的设计 .....	271
11.1.4	线性摄动自适应控制器 .....	274
11.2	滑模变结构控制 .....	276
11.2.1	滑模变结构基本控制理论 .....	276
11.2.2	应用举例 .....	279
11.3	机器人的人工神经网络控制 .....	280
11.3.1	神经网络的发展 .....	281
11.3.2	神经网络的基本原理与算法 .....	282
11.3.3	神经网络在机器人控制系统中的应用 .....	288
参考文献	.....	297

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机器人技术的发展

### 1.1.1 机器人的定义

现实世界里的机器人并不像文艺作品里描述的那样神通广大、与真人形似到真假难分的地步。就目前的水平而言，机器人一般不具有人的形态，即使那些用于娱乐的似人机器人，其智能程度也远不能与人相比。大多数机器人是用于生产活动，以提高生产效率或产品质量的。因此从这层意义上来讲，机器人是一个通用的自动化装置。

国际上关于机器人的定义主要有以下几种。

1. 英国简明牛津字典中的定义 机器人是“貌似人的自动机，具有智力的和顺从于人的但不具有人格的机器”。

2. 美国机器协会（RIA）的定义 机器人是“一种用于移动各种材料、零件、工具或专用装置的，通过程序动作来执行各种任务，并具有编程能力的多功能操作机（manipulator）”。

尽管这一定义较实用些，但仍然并非完美无缺。这里机器人指的是工业机器人。

3. 日本工业机器人协会的定义 工业机器人是“一种装备有记忆装置和末端执行装置的、能够完成各种移动来代替人类劳动的通用机器”。它又分以下两种情况来定义：

（1）工业机器人是“一种能够执行与人的上肢类似动作的多功能机器”。

（2）智能机器人是“一种具有感觉和识别能力，并能够控制自身行为的机器”。

4. 美国国家标准局（NBS）的定义 机器人是“一种能够进

行编程并在自动控制下执行某种引起操作和移动作业任务的机械装置”。

5. 国际标准化组织 (ISO) 的定义 “机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能操作机, 这种操作机具有几个轴, 能够借助可编程操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置, 以执行各种任务”。

6. 我国的定义 随着机器人技术发展, 我国也面临制订机器人技术各项标准问题, 其中包括对机器人定义。有的专家建议把机器人定义为 “一种拟人功能的机械电子装置”。

不管上述定义有多少异同, 我们可以看出, 机器人集中了机械工程、电子工程、计算机工程、自动控制工程及人工智能等多种学科的最新研究成果, 代表了机电一体化最高成就, 是当代科学技术发展最活跃的领域之一。

### 1.1.2 机器人发展史

当代的工业机器人起源于数控机床和遥控操作器。遥控操作器是一种允许操作人员在一定距离外完成某一任务的装置, 它是在二次世界大战期间, 为处理放射性材料而研制的。操作者和放射性材料被一混凝土墙隔开, 墙上有几个观察孔。此时, 遥控操作器代替人的手, 它的内部装有一对夹子, 是从动件; 外部装有两个手柄, 是主动件。夹子和手柄由 6 自由度机构连接在一起, 为主动件和从动件提供任意的位置的运动。1947 年, 第一台电伺服驱动的遥控操作器研制成功, 从动件用伺服控制来跟踪主动件的位置。尽管操作人员能够观察到工作现场, 但由于没有给操作者提供任何力的信息, 因而要求部件产生接触的工作难以完成。

1948 年, 即在上述遥控操作器研制成功一年以后, 一个新型遥控操作器研制成功了。在这新装置中, 由夹子施加的力可以通过反馈来告诉操作者, 同时, 操作者可以控制施加力的大小, 这是一个具有双向力反馈的遥控装置。

1949 年, 由于需要研制新型军用飞机, 这种飞机零件是用机械加工出来的。美国空军发起了对数控铣床的研制。这项研究工

作在于把成熟的伺服技术与当时新近发展起来的数字计算机技术结合起来。麻省理工学院 (MIT) 辐射实验室于 1953 年研制出这样的机器。

60 年代, George Devol 研制出了第一台通用工业机器人 (Engelberger), 这是一台将遥控操作器的连杆机构与数控铣床的伺服轴结合起来的设备。操作者控制机器人沿一系列点运动, 这些点的位置以数字形式存储起来, 然后机器人可以再现这些位置。这是第一台工业机器人, 随着电子计算机、自动控制理论的发展和工业生产需要及空间技术的进步, 机器人技术在一些发达国家迅速发展起来。

进入 70 年代, 出现了更多的机器人商品, 并在工业生产中逐步推广应用。这反过来又推动了机器人技术的发展。1979 年 Unimation 公司推出 PUMA 系列工业机器人, 它是全电驱动、关节式结构、多 CPU 两级微机控制、采用 VAL 专用语言, 可配置视觉、触觉、力觉传感器, 是技术较为先进的机器人。同年日本山梨大学的牧野洋研制成具有平面关节的 SCARA 型机器人。到 1980 年全世界约有 2 万余台机器人在工业中应用。

进入 80 年代, 机器人在工业中开始普及应用, 工业化国家的机器人产值, 以年均 20%~40% 的增长率上升。1984 年全世界机器人使用总台数是 1980 年的四倍, 到 1985 年底, 这一数字已达 14 万台, 到 1990 年已有 30 万台左右, 其中高性能的机器人所占比例不断增加, 特别是各种装配机器人的产量增加较快, 和机器人配套使用的机器视觉技术和装备也得到迅速发展。1985 年前后, FANUC 和 GMF 公司又先后推出了交流伺服驱动的工业机器人产品。

### 1.1.3 机器人技术展望

进入 90 年代, 机器人技术的发展由于受到发达资本主义经济不景气的影响, 专门从事机器人研究和生产的部门数目有所减少, 但由于人工智能、计算机科学、传感器科学的长足进步, 使得机器人的研究在高水平上进行, 未来的机器人技术, 将从以下几个



方面发展。

### 1.1.3.1 操作臂新动向

1. 高速操作臂 可以大大提高机器人的工作效率。为此,必须开展新的手腕机构和伺服驱动装置,以及能适应机械臂高速运动的变转动惯量的动态控制方法等研究。

2. 柔性操作臂 目前的操作臂自身质量要比它所能抓起的质量大得多。如臂自身质量为 30kg,仅能搬运还不到 10kg 物体,这与手臂相比要小得多,其原因除了还没有出力大的关节驱动装置以外,还缺乏用轻型材料研制的可搬运质量比自身质量大的柔性操作臂。

3. 冗余自由度操作臂 人手多达 27 个自由度,与此相比,现有的操作臂自由度就太少了。它不可能在狭小的工作区域内灵活作业,因此必须研制相当于人的手臂更实用的超多自由度机械手臂,这对在空间舱里作业的机器人就显得更重要了。

4. 高精度、多自由度力控制操作臂 目前对自由度较少的操作臂进行力控制,其精度可达到几克,可用来完成磁盘组装作业,但对于多自由度操作臂的力控制,其精度立刻下降到几十克。为此,必须进一步对多自由度操作臂的高精度力控制开展研究,才有可能在更复杂状况下完成精密组装作业。

5. 微型操作臂 在直接切割生物细胞和处理 DNA 过程中,提出了能在显微镜下进行作业的微型操作臂研究。

### 1.1.3.2 移动装置

1. 新型移动机构 为了能适应于非结构环境的地面,在狭小的压力容器内挪动,或在水下或海底移动,必须开展对新型移动机构的研究,如 2 足、4 足、多足移动机构,电磁吸盘和多关节蛇形驱体机构等。

2. 移动信号传感技术 现在移动式机器人多数是判断引导式的,而智能机器人应能对环境感知,并自治行动。为此,必须有强的视觉功能,并能对移动环境图像快速识别。

3. 移动路径的智能决策 它不同于用动态规划等方法来求取最小路径,而是指能对移动环境的各种情况作出综合性判断的