



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机器人技术基础

第二版

主编 刘极峰 丁继斌

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机器人技术基础

Jiqiren Jishu Jichu

第二版

主 编 刘极峰 丁继斌
副主编 邵秋萍 杨小兰 肖增文
参 编 陈永胜 陈辽军 刘玉松 杨文亮



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

作为机械类、近机械类专业课教材,本书第一版受到全国应用型本科院校广大师生的欢迎和肯定,被评为江苏省立项精品教材及普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本次修订旨在跟进机器人技术迅速发展的步伐,进一步突出应用型本科及 CDIO 工程教育的特点,使学生更好地理解和掌握机器人技术的基本内容。修订过程中,对部分章节内容进行了补充和完善,适当调整了章节次序,对涉及新国家标准的内容进行了相应更新;根据近年来机器人学的发展及编者在机器人科研项目中的研究成果,部分重点章节增加了计算或设计实例;增加了机器人课程实验示例,并将其作为附录。本次修订始终遵循下述原则:注重理论系统性,突出工程应用性,力求选材新颖性,提高文字可读性。

本书的主要内容包括绪论、机器人本体结构、机器人运动学、机器人动力学、机器人轨迹规划、机器人控制系统、机器人语言与编程、工业机器人、操纵型机器人、智能机器人及附录。与本书配套的多媒体课件附于书后,随书赠送。

本书可作为应用型本科机械类、近机械类各专业的教材,也可作为远程教育、成人教育、高等职业教育的教学用书,还可作为自学人员及机器人工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机器人技术基础/刘极峰,丁继斌主编. --2 版. --北京:高等教育出版社,2012. 12

ISBN 978 - 7 - 04 - 036352 - 4

I. ①机… II. ①刘…②丁… III. ①机器人技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 256860 号

策划编辑 薛立华
责任校对 杨雪莲

责任编辑 薛立华
责任印制 张泽业

封面设计 于涛

版式设计 童丹

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京机工印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 20.5
字 数 390 千字
购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2006 年 5 月第 1 版
2012 年 12 月第 2 版
印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价 38.10 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 36352 - 00

第二版前言

21 世纪是机器人技术创新、创造、发明和普及的新时代，各类机器人技术的发展日新月异，在全球范围内，机器人技术正悄然走进人类生活的方方面面：机器人医生、机器人护士、机器人厨师、机器人导游、机器人保姆、机器人花匠……以及自动按摩床、自动按摩椅、自动存取款机、自动售票机、自动售货机，厨房及房间的烟雾自动检测报警器，住宅小区立体车库的搬运机器人，人类生活中这些机器人产品，正为人类带来更多的便捷和安全。

2007 年比尔·盖茨在拉斯维加斯电子展演讲中讲到：“现在，我看着多种技术发展的趋势开始汇为一股推动机器人技术前进的洪流，我完全能够想象，机器人将成为人类日常生活的一部分。”他在《科学美国人》杂志向世界预言：“机器人领域即将重复个人计算机崛起的道路，只要点燃机器人普及的‘导火索’，这场革命必将与个人计算机一样，彻底改变人类的生活方式。”

本书第一版于 2006 年出版，2007 年被评为江苏省立项精品教材，同年被遴选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，迄今为止已完成第 11 次印刷，国内 40 余所应用型本科院校常年使用，这些都是对本书的最好肯定。

由于机器人技术的飞速发展，为凸显应用型本科及 CDIO 工程教育的特点，使学生更好地理解 and 掌握机器人技术的基本内容，对本书第一版的部分章节和内容进行了修订：对部分章节内容进行了补充和完善，适当调整了章节次序，对涉及新国家标准的内容进行了相应更新；根据机器人新技术的发展动态及编者近年来在机器人科研项目中的研究成果，部分重点章节增加了分析计算、设计实例及新技术介绍（第 3 章机器人运动学中增加了苹果采摘机械手运动学分析实例，第 8 章工业机器人中增加了弧焊机器人工作站柔性焊接夹具设计实例，第 9 章操纵型机器人中增加了果蔬采摘机器人，第 10 章智能机器人中增加了机器人焊缝视觉跟踪技术实例）；为增进校际交流和便于课程教学与实验教学，增加了机器人课程实验示例作为附录。

本书后所附多媒体课件主要包括 PPT 课件和部分习题解答两部分内容，与本书配套使用。

本书的修订工作主要由刘极峰、丁继斌、杨小兰负责，肖增文、杨文亮参加了部分章节的修订工作；另外，周玲、胡天翔也对本书文字及图表修订做了许多工作。

本书由东南大学王兴松教授审阅，他对本书提出了很多宝贵意见，特此

致谢!

由于机器人技术涉及知识面广,加之编者的经验与水平有限,取材与编写上的不妥之处在所难免,敬请广大读者提出宝贵意见或建议。

编者

2012年9月

第一版序

机器人技术是现代科学技术高度集成和交融的产物，它涉及机械、控制、电子、传感器、计算机、人工智能、知识库系统以及认识科学等众多学科领域，是当代最具代表性的机电一体化技术之一。经过40多年的发展，现代机器人技术在工业、农业、国防、航空航天、商业、旅游、医药卫生、办公自动化及生活服务等诸多领域获得了越来越普遍的应用，21世纪将是一个更为广泛地开发和应用机器人技术的时代。

教育科学“十五”国家规划课题子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”系列教材之一《机器人技术基础》的适时推出，适应了新世纪高素质机械工程技术人才培养和高等教育教学发展的需要。教材从读者的知识、能力和素质培养与协调发展的教学要求出发，介绍和讨论了机器人技术的一般原理，阐述了机器人在工程实践中的技术与方法以及机器人理论和技术的应用与发展趋势。

本书是作者总结了近年来在机器人教学实践中的心得体会，并结合他们的研究成果与工程设计经验，精心组织 and 编写，几经修改而完成的。

粗读此书，感到其具有如下特点：在理论方面，本书能反映当前国内外机器人技术研究开发的最新进展，为深入进行机器人技术的研究提供一些有益的参考；在内容的选择和编排上考虑了初学者的需求，侧重普及性、实用性和新颖性，力求做到理论与实践的有机结合。全书配有大量的图、表和实物照片，信息量丰富，语言叙述较为简练，避免了过于繁杂、冗长的公式推导。教材知识体系较为完整，适用于不同类型的院校。

对于希望掌握和应用机器人技术的基础知识，从事现代机械、机电工程、现代制造业及机器人技术应用领域工作的初级工程技术人员，阅读本书将大有裨益；对于对机器人技术有特殊或较高要求的中高级工程技术人员，本书也富有参考价值，值得一读。

上海交通大学机器人研究所所长
长江学者、特聘教授



2005年9月2日

第一版序

今天，形形色色的机器人实际上已经离我们很近，尤其在产业领域，机器人的应用已经有几十年的历史。机器人是典型的机、电、控制一体化的产品。一方面，机器人作为一种特殊的自动机器在工业领域几乎已经无所不在，很多大公司甚至把机器人作为一个新产业而抢占其制高点；另一方面，科学家们正在让机器人更加人性化，给机器人赋予了更多的智慧和情感。

在全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上，组织全国100余所培养应用型人才为主的高等院校，进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索，在高等教育出版社的支持和配合下，推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材，《机器人技术基础》即是课题的研究成果之一。

本书是作者在承接江苏省城市轨道车辆研究中心、南京工程学院、黄河科技学院、徐州师范大学、湖南工程学院、淮阴工学院等多家单位的数项科研与教研项目的基础上，结合近年来在机器人教学过程中的科学实验与现场应用经验，倾心编著、几易其稿完成的。

本书的新意在于结合工程实际及作者自身对机器人技术的理解和体会，用更合适的方法来阐述，具有较好的层次感和条理性。针对应用型人才培养体系的需要，全书内容新颖、系统全面、深入浅出，既有一定的理论深度，又偏重实用性。对于从事机器人技术的各级工程技术人员，本书富有参考价值；对于从事机器人技术的高校教学研究人员，本书也是一本好的参考书。

本人十分支持本书的出版，相信本书一定能成为一部受欢迎的、适用于高等学校机械类及近机械类专业，特别是应用型本科的机器人技术基础课程的特色教材。衷心祝愿作者在研究、应用和推广机器人技术方面取得更大成就。

江苏大学教授、博士生导师
江苏大学智能机器人研究所所长



2005年8月22日

第一版前言

机器人是一种人类很早就梦想制造的、具有仿生性且处处听命于人的自动化机器，它可以帮助人类完成很多危险、繁重、重复的体力劳动或者进入各种服务领域。

历经数十年的发展变化，机器人技术不断进步与创新，所到之处使整个制造业乃至全社会都发生了和正在发生着翻天覆地的变化。机器人是最具代表性的现代多种高新技术的综合体，它可从某个角度折射出一个国家的科技水平和综合国力。

21世纪是一个更为广泛、更加深入地开发和应用机器人技术的新时代，伴随着现代技术的阶跃式更新以及计算机与光、机、电一体化等高新技术日新月异的突飞猛进，各种类型机器人的研究越来越向着更高的水平、更新的领域拓展，现在与未来的机器人将不仅具有更似人类的外形和基本动作，也将具有相应程度的触觉、视觉与思维能力，从而开始最终实现全面模拟或复制人类自身的里程。

在机器人发展的过程中，机器人技术已形成了一门新学科——机器人学。机器人技术在工业、国防、商业、农业、空间与海洋、医疗、卫生、办公、社会服务等诸多领域有着极其广泛的研究和应用。这些领域体现出广泛的学科交叉，涉及众多的学科内容，如机器人体系结构、机构学、运动学、动力学、控制、智能、传感、装配、语言、编程以及恶劣与危险环境下的特殊机器人学等。

一个现代工程师，一个准备涉足或已经涉足机器人领域的工程技术人员，欲掌握和应用机器人技术，必须学习和掌握机器人技术的基础知识。本书编写的目的正是为初、中级学习者提供一个能逐渐深入到机器人技术领域的适宜读本。

本书编写的基本思路是：以国内目前较流行的首都钢铁公司 MOTOMAN 机器人为主线，系统地介绍机器人技术的基础知识，在相关章节引入若干工程实例，推荐、介绍流行的实用语言和编程方法。本书各章结尾安排了一定量的计算、编程和习题，力争使之成为一部适用于全国应用型高校机械类、近机械类专业机器人技术基础课程教学与科研，具有鲜明的应用型特色，深受广大师生欢迎的优秀教材。

本书在编写过程中始终遵循下述原则：

(1) 注重理论系统性。在内容安排上遵照循序渐进原则，从结构学、机构

学、运动学、动力学理论内容向运动规划、本体结构设计、控制、编程等工程内容过渡,最后介绍工程应用实例与展望,使通篇具有良好的系统性。

(2) 突出工程应用性。本书以机械类专业人才为对象,以实用、实践、实际为原则,突出工程应用性特点。如对基本理论及有关公式的引入、论证尽量予以简化,基本略去推导过程,着重于它们在工程设计中的应用,注意培养学生的工程应用能力。

(3) 力求体现可读性。在突出重点、保证基础内容的同时,依据浅而广的原则增加知识点,扩大知识面。如机器人工作站与流水线、其他机器人简介等内容设专门章节介绍。全书追求概念准确、语句流畅、深入浅出、主次分明、详略得当、层次清晰,体现良好的可读性与可教性,使之易读易懂。

(4) 内容选材新颖性。本书在内容选择和编排上考虑了初学者的诸多困难,书中的部分内容源自实际工程项目,具有相当的实用性;在理论与实践方面,尽量反映当前国内外机器人开发研究领域的新进展,具有新颖性和实时性。

绪论部分介绍机器人的由来与发展、分类与应用、组成及技术参数等内容;第1章介绍机器人运动学的基础知识,包括齐次坐标、齐次变换、手部位姿、正向与逆向运动学等;第2章简要介绍机器人动力学的基础知识;第3章介绍机器人的轨迹规划,重点是机器人轨迹插值计算以及手部路径的轨迹规划;第4章介绍机器人本体结构,包括机身及臂部结构、腕部及手部结构、传动及行走机构等;第5章介绍机器人的控制系统,包括机器人传感器、驱动与运动控制系统、控制理论与算法;第6章介绍机器人编程语言与离线编程,包括编程语言的类型、系统、常用的编程语言及离线编程的特点等;第7章介绍工业机器人工作站及生产线,主要包括焊接、搬运、喷涂、装配及其他机器人工作站或生产线;第8章简要介绍了操纵型机器人的结构与控制;第9章简要介绍了智能机器人的驱动与控制技术、感觉与视觉技术以及发展趋势等。

本书是教育科学“十五”国家规划课题子课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究成果。书中汇集了作者近年来在机器人技术方面的有关论著、科研与教研的成果等,有些问题或看法(如机器人的分类、操纵型机器人的定义等)尚待商榷,愿与同仁或读者交流、切磋。

与本书配套的课程立体化系列教材《机器人技术基础》多媒体课件将随书赠送。该课件采用 Authorware 7.0、Flash MX、Photoshop、Windows Movie Maker、Cool Edit Pro 2.0 等多种软件进行制作,博采众长,内容丰富;大量使用 Flash 动画、影片剪辑、图片及配音等艺术表现手法,且应用图标、流线、影片剪辑、场景、帧等制作技巧,使课件真正达到多媒体教学效果。同时,实验指导书、课程设计指导书、(机电工程与机器人技术方向)毕业设计指导书、习题与解答、远程教育录像片等教材亦将陆续出版。该系列教材由全国部分应用型本科院校

在该课程理论教学与实践教学环节中具有较丰富经验的教师按照教育科学“十五”国家规划课题的基本要求，以“培养应用型人才”思想为指导，以“实践、实际、实用”为原则，精心组织教学内容编写而成。

鉴于机械类、近机械类各专业对“机器人技术基础”课程的要求和教学时数相差较大，本书在内容编排上从满足本科不同专业的教学需要出发，课时适于24~48学时，同时亦可供自学、远程教育、高职高专教育之用。书中上标*的部分为选学或拓宽内容，计算部分采用国际惯用的术语、符号及表示方法，并附有主要符号表。

参加本书编写的有淮阴工学院陈辽军（第7章），黄河科技学院陈永胜（第4章），徐州师范大学丁继斌（第2、8章），湖南工程学院刘玉松（第1章的1.3、1.4、1.5节及第9章的9.1至9.4节），南京工程学院刘极峰（绪论，第1章的1.1、1.2节，第3章及第9章的9.5节），邵秋萍（第5、6章）。全书由刘极峰主编，负责统稿，陈永胜、邵秋萍为副主编，协助统稿。在编写过程中，本书参考或引用了参考文献的部分内容，在此向文献作者致以诚挚的谢意。

上海交通大学机器人研究所所长丁汉教授、江苏大学智能机器人研究所所长马履中教授对本书的编写提出了许多宝贵意见并欣然作序，作者在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中的错误之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

作者

2005年7月

主要符号表

i	坐标系 X 轴的单位矢量
j	坐标系 Y 轴的单位矢量
k	坐标系 Z 轴的单位矢量
P	空间任一点
${}^A P$	空间一点 P 在 $\{A\}$ 坐标系中的位置矢量
R	两坐标系之间的变换矩阵
${}^H_B R$	从 $\{H\}$ 坐标系到 $\{B\}$ 坐标系的变换矩阵
Rot	转动的齐次变换矩阵, 又称旋转算子
Trans	移动的齐次变换矩阵, 又称平移算子
A_i	连杆 i 的坐标系到连杆 $i-1$ 的齐次坐标变换矩阵
T_i	连杆 i 的坐标系到基础坐标系的齐次变换矩阵
${}^{i-1} T_s$	连杆 s 到连杆 $i-1$ 的坐标齐次变换矩阵 ($s > i$)
J	机器人速度雅可比
$d\theta$	关节空间微小运动
dX	手部作业空间微小位移
X	末端手爪位姿
q	广义关节变量
v	机器人末端在操作空间中的广义速度
\dot{q}	机器人关节在关节空间中的关节速度
J^{-1}	机器人逆速度雅可比
$f_{i-1,i}$ 及 $n_{i-1,i}$	$i-1$ 杆通过关节 i 作用在 i 杆上的力和力矩
$f_{i,i+1}$ 及 $n_{i,i+1}$	i 杆通过关节 $i+1$ 作用在 $i+1$ 杆上的力和力矩
$-f_{i,i+1}$ 及 $-n_{i,i+1}$	$i+1$ 杆通过关节 $i+1$ 作用在 i 杆上的反作用力和反作用力矩
$f_{n,n+1}$ 及 $n_{n,n+1}$	机器人最末杆对外界环境的作用力和力矩
$-f_{n,n+1}$ 及 $-n_{n,n+1}$	外界环境对机器人最末杆的作用力和力矩
$f_{0,1}$ 及 $n_{0,1}$	机器人机座对杆 1 的作用力和力矩
m_i	连杆 i 的重量, 作用在质心 C_i 上
$r_{i-1,i}$	坐标系 $\{i\}$ 的原点相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的位置矢量
r_{i,C_i}	质心相对于坐标系 $\{i\}$ 的位置矢量
F	机器人手部端点的力和力矩
τ	关节力矩 (或关节力) 矢量
n	关节的个数
δq_i	关节虚位移
δX	末端执行器的虚位移

d	末端执行器的线虚位移
δ	末端执行器的角虚位移
δq	由各关节虚位移 δq_i 组成的机器人关节虚位移
δw	虚功
J^T	机器人力雅可比
m	质量
a_C	质心加速度
ω	刚体角速度
ε	刚体角加速度
M	刚体力矩; 某点处的弯矩
C_I	惯性张量
L	拉格朗日函数 (或称拉格朗日算子)
E_k	系统总动能
E_p	系统总势能
F_i	作用在第 i 个坐标上的广义力或力矩
$D(q)$	操作臂的惯性矩阵
$H(q, \dot{q})$	离心力和科氏力矢量
$G(q)$	重力矢量
\ddot{X}	末端加速度
$M_x(q)$	操作空间惯性矩阵
$U_x(q, \dot{q})$	操作空间离心力和科氏力矢量
$G_x(q)$	操作空间重力矢量
$\{B\}$	基础坐标系
$\{H\}$	手坐标系
E	弹性模量
ρ	密度
P_q	驱动力
F_m	各支承处的摩擦力
F_g	启动时的总惯性力
W	总重力
M_q	驱动力矩
M_m	总摩擦阻力矩
M_g	各回转运动部件的总惯性力矩
$\Delta\omega$	升速或制动过程中的角速度增量
Δt	回转运动升速过程或制动过程的时间
J_0	全部回转零部件对机身回转轴的转动惯量
G_i	零部件及工件的重量
L_i	零部件及工件的重心到机身回转轴的距离
h	导套的长度
f	摩擦系数

γ	固定连杆和弹簧间的夹角
l	弹簧拉伸后的长度
k	弹簧的刚度
i_n	速比
I_a	工作臂的惯性矩
I_m	电动机的惯性矩
ω	角速度
z	齿数
S	传感器的灵敏度
b	传感器线性度常数
Δy	传感器输出信号的增量
Δx	传感器输入信号的增量
x	传感器的输入信号
y	传感器的输出信号
u	电压
θ	角度
α	圆心角
m	定子绕组的相数
e	实际位姿或轨迹与期望位姿或轨迹之间的误差
X_d	期望的机器人末端位姿矢量
OR	模糊算子
IF-THEN	模糊控制规则
f	人工神经元传递函数
ω_{ij}	从细胞 j 到细胞 i 的连接权值
θ_i	阈值
$x_i(i=1,2,\dots,n)$	其他细胞传来的输入信号
f_i	图像的子区域
Z	灰度集合

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

主要符号表	I
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 机器人发展简史	1
1.1.2 机器人的定义	4
1.1.3 机器人技术的研究领域与相关学科	4
1.2 机器人的分类	5
1.2.1 按机器人的开发内容与应用分类	5
1.2.2 按机器人的发展程度分类	7
1.2.3 按机器人的性能指标分类	8
1.2.4 按机器人的结构形式分类	8
1.2.5 按坐标形式分类	8
1.2.6 按控制方式分类	10
1.2.7 按驱动方式分类	10
1.2.8 按机器人工作时的机座可动性分类	11
1.3 机器人的组成	11
1.4 机器人的技术参数	13
1.4.1 机器人的主要技术参数	13
1.4.2 MOTOMAN UP6 型通用工业机器人的技术参数	17
1.4.3 MOTOMAN EA1400 型弧焊机器人的技术参数	18
习题	19
第 2 章 机器人本体结构	21
2.1 概述	21
2.1.1 机器人本体的基本结构形式	21
2.1.2 机器人本体材料的选择	22
2.2 机身及臂部结构	24
2.2.1 机身结构的基本形式和特点	24
2.2.2 臂部结构的基本形式和特点	28
2.2.3 机器人的平稳性和臂杆平衡方法	30
2.3 腕部及手部结构	33

2.3.1	腕部结构的基本形式和特点	33
2.3.2	手部结构的基本形式和特点	39
2.4	传动及行走机构	47
2.4.1	传动机构的基本形式和特点	48
2.4.2	行走机构的基本形式和特点	62
	习题	67
第3章	机器人运动学	68
3.1	齐次坐标与位姿表示	68
3.1.1	齐次坐标	68
3.1.2	位姿表示	69
3.2	齐次变换	73
3.2.1	旋转的齐次变换	73
3.2.2	平移的齐次变换	77
3.2.3	复合变换	80
3.3	机器人的位姿分析	81
3.3.1	杆件坐标系的建立	81
3.3.2	连杆坐标系间的变换矩阵	83
3.4	机器人正向运动学	84
3.4.1	斯坦福机器人运动方程	85
3.4.2	PUMA 560 型机器人运动学方程	87
3.5	机器人逆向运动学	89
3.5.1	逆向运动学的解	89
3.5.2	逆向运动学求解实例	90
3.6	苹果采摘机械手运动学分析实例	95
	习题	99
第4章	机器人动力学	104
4.1	机器人雅可比	104
4.1.1	机器人雅可比的定义	104
4.1.2	机器人速度分析	106
4.1.3	机器人雅可比讨论	108
4.2	机器人静力分析	109
4.2.1	操作臂的力和力矩平衡	109
4.2.2	机器人力雅可比	110
4.2.3	机器人静力计算	112
4.3	机器人动力学方程	113

4.3.1	欧拉方程	113
4.3.2	拉格朗日方程	114
4.3.3	平面关节机器人动力学分析	114
4.4	机器人的动态特性	119
	习题	119
第 5 章	机器人轨迹规划	123
5.1	概述	123
5.1.1	机器人轨迹的概念	123
5.1.2	轨迹规划的一般性问题	123
5.1.3	轨迹的生成方式	125
5.1.4	轨迹规划涉及的主要问题	125
5.2	插补方式分类与轨迹控制	126
5.2.1	插补方式分类	126
5.2.2	机器人轨迹控制过程	126
5.3	机器人轨迹插值计算	127
5.3.1	直线插补	127
5.3.2	圆弧插补	128
5.3.3	定时插补与定距插补	130
5.3.4	关节空间插补	131
5.4	机器人手部路径的轨迹规划	139
5.4.1	操作对象的描述	139
5.4.2	作业的描述	139
	习题	141
第 6 章	机器人控制系统	142
6.1	机器人传感器	142
6.1.1	机器人传感器的特点和要求	142
6.1.2	机器人内部传感器	145
6.1.3	机器人外部传感器	152
6.2	驱动与运动控制系统	157
6.2.1	概述	157
6.2.2	基于计算机和芯片的运动控制器设计	158
6.2.3	基于 PC 技术的运动控制(卡)器	161
6.2.4	机器人的伺服执行机构	172
6.2.5	MOTOMAN UP6 型机器人的运动控制	176
6.3	控制理论与算法	179