

北京市优秀人才培养资助



# 机器人控制系统的设计与 *MATLAB* 仿真

刘金琨 编著

清华大学出版社



北京市优秀人才培养资助

# 机器人控制系统的设计与 *MATLAB* 仿真

刘金琨 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了机器人控制的几种先进设计方法,是作者多年来从事机器人控制系统教学和科研工作的结晶,同时融入了国内外同行近年来所取得的最新成果。

全书以机器人为对象,共分10章,包括先进PID控制、神经网络自适应控制、模糊自适应控制、迭代学习控制、反演控制、滑模控制、自适应鲁棒控制、系统辨识和路径规划。每种方法都给出了算法推导、实例分析和相应的MATLAB仿真设计程序。

本书各部分内容既相互联系又各自独立,读者可根据需要选择学习。本书适用于从事生产过程自动化、计算机应用、机械电子和电气自动化领域工作的工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、机械电子、自动化仪表、计算机应用等专业的教学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

机器人控制系统的设计与MATLAB仿真/刘金琨编著. —北京:清华大学出版社,2008.6  
ISBN 978-7-302-17160-7

I. 机… II. 刘… III. ①机器人控制—控制系统—系统设计 ②机器人—系统仿真—计算机辅助计算—软件包,MATLAB IV. TP24

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第028810号

责任编辑:王敏稚

责任校对:白蕾

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:44.5 字 数:1077千字

版 次:2008年6月第1版 印 次:2008年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:75.00元(含光盘)

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:022019-01

# 前

# 言

有关机器人控制理论及其工程应用,近年来已有大量的论文发表。作者多年来一直从事控制理论及应用方面的教学和研究工作,为了促进机器人控制和自动化技术的进步,反映机器人控制设计与应用中的最新研究成果,并使广大研究人员和工程技术人员能了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用 MATLAB 语言进行各种机器人控制器的设计,作者编写了这本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书是在总结作者多年研究成果的基础上,进一步理论化、系统化、规范化、实用化编写而成的,其特点是:

(1) 机器人控制算法取材新颖,内容先进,重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术,取材着重于基本概念、基本理论和基本方法。

(2) 针对每种控制算法给出了完整的 MATLAB 仿真程序,并给出了程序的说明和仿真结果,具有很强的可读性。

(3) 着重从应用领域角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性。书中有大量应用实例及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴。

(4) 所给出的各种机器人控制算法完整,程序设计结构设计力求简单明了,便于自学和进一步开发。

(5) 所介绍的方法不局限于机器人的控制,同时也适合于解决运动控制领域其他背景的控制问题。

本书主要以机器人力臂为被控对象,此外,为了介绍一些新的运动控制方法,本书还以机械系统、电机、倒立摆和飞行器为被控对象来辅助说明。

全书共分 10 章。第 1 章为绪论,介绍了机器人的几种控制方法及模型特性;第 2 章介绍了 PID 控制的几种基本设计方法,通过仿真和分析进行了说明;第 3 章介绍了神经控制的设计方法,包括基本神经网络设计方法和几种神经网络自适应控制设计方法;第 4 章介绍了模糊控制的设计方法,包括基本模糊控制、基于 LMI 的模糊鲁棒控制和几种模糊自适应控制器的设计;第 5 章介绍了几种迭代学习控制的基本设计方法;第 6 章介绍了反演控制的设计方法,包括基本的反演控制器的设计、模糊自适应反演控制和神经网络自适应反演控制的设计方法;第 7 章介绍了滑模控制的几种基本设计方法;第 8 章介绍了自适应鲁棒控制方法,包括几种鲁棒控制器和几种自适应控制器的设计;第 9 章介绍了控制系统参数的遗传算法辨识、一种用于机械手的非线性干扰观测器和一种基于神经网络的状态观测器的设计;第 10 章介绍了路径规划,包括基本遗传算法的路径规划和基于神经网络的路径

规划。

所介绍的控制方法大多选自高水平国际杂志和著作中的典型方法,并对其中的一些算法进行了修正或补充。通过对一些典型控制器设计方法较详细的理论分析和仿真分析,使一些深奥的控制理论易于掌握,为读者的深入研究打下基础。

本书是基于 MATLAB 6.5 环境下开发的,各个章节的内容具有很强的独立性,读者可以结合自己的方向深入地进行研究。

作者在研究过程中,东北大学徐心和教授和薛定宇教授在机器人控制、S 函数设计及 Simulink 仿真等方面给予作者很多的指导,北京航空航天大学尔联洁教授给予作者在控制理论方面多年的指导,在此深表感谢。

林岩教授、吴怀宁教授对本书部分内容给予了宝贵的建议。本书部分控制算法的推导和仿真得益于作者与研究生卢宇、刘华祥、王伟和穆敏等的多次探讨,在此对他们一一表示感谢。

书中所有算法的仿真程序都附在光盘中,读者也可以通过网站 <http://si.buaa.edu.cn> 中的“其他资料下载(Download)”功能下载,或通过邮件与作者联系索取。作者在网站中会对本书程序进行不定期地更新,使之日臻完善。由于篇幅所限,只对作者认为较重要的程序在书中列出,以方便读者的阅读。

本书的研究工作得到了北京市优秀人才培养资助(编号:20071E1600600404)。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,真诚欢迎广大读者批评指正。若读者有指正或需与作者商讨,或对控制算法及仿真程序有疑问,请通过电子邮件 [lj@buaa.edu.cn](mailto:lj@buaa.edu.cn) 与作者联系。作者相信,通过与广大同行的交流,作者会得到许多新的有益的建议,从而将本书写得更好。

刘金琨

2008年1月 于北京航空航天大学



---

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人控制方法简介	1
1.1.1 机器人常用的控制方法	1
1.1.2 不确定机器人系统的控制	2
1.2 机器人动力学模型及其结构特性	2
1.3 基于 S 函数的 SIMULINK 仿真	3
1.3.1 S 函数简介	3
1.3.2 S 函数使用步骤	4
1.3.3 S 函数的基本功能及重要参数设定	4
第 2 章 机器人 PID 控制	5
2.1 机器人独立 PD 控制	5
2.1.1 控制律设计	5
2.1.2 收敛性分析	5
2.1.3 仿真实例	5
2.2 基于重力补偿的机器人 PD 控制	10
2.2.1 控制律设计	10
2.2.2 控制律分析	10
2.3 机器人鲁棒自适应 PD 控制	11
2.3.1 问题的提出	11
2.3.2 机器人动力学模型及其结构特性	11
2.3.3 控制器的设计	12
2.3.4 机器人动态方程的线性化推导	17
2.3.5 仿真实例	18
参考文献	29
第 3 章 机器人神经网络自适应控制	31
3.1 定理与引理	31

3.1.1	全局不变集定理	31
3.1.2	用 Barbalat 引理作类 Lyapunov 分析	31
3.1.3	一种微分方程不等式的收敛性分析	31
3.2	RBF 网络的逼近	32
3.2.1	RBF 神经网络	32
3.2.2	网络结构	32
3.2.3	逼近算法	32
3.2.4	网络参数对逼近效果的影响	33
3.2.5	仿真实例	35
3.3	基于模型不确定补偿的 RBF 网络机器人自适应控制	41
3.3.1	问题的提出	41
3.3.2	模型不确定部分的 RBF 网络逼近	42
3.3.3	控制器的设计	43
3.3.4	仿真实例	45
3.4	基于模型分块逼近的机器人 RBF 网络自适应控制	62
3.4.1	问题的提出	62
3.4.2	控制律的设计	63
3.4.3	稳定性分析	64
3.4.4	仿真实例	66
3.5	工作空间中机械手的神经网络自适应控制	86
3.5.1	工作空间直角坐标与关节角位置的转换	86
3.5.2	机械手的神经网络建模	87
3.5.3	控制器的设计	88
3.5.4	仿真实例	90
3.6	基于模型整体逼近的机器人 RBF 网络自适应控制	102
3.6.1	问题的提出	102
3.6.2	基于 RBF 神经网络逼近的控制器	103
3.6.3	针对 $f(x)$ 中各项分别进行神经网络逼近	105
3.6.4	仿真实例	107
3.7	基于死区补偿的神经网络自适应鲁棒控制	123
3.7.1	死区非线性特性	123
3.7.2	系统描述	124
3.7.3	GL 矩阵和 GL 乘法算子	125
3.7.4	RBF 神经网络死区补偿器的设计	126
3.7.5	系统的稳定性分析	129
3.7.6	仿真实例	132
3.8	机器人神经网络数字控制	144

3.8.1	基于 RBF 网络补偿的单机机械力臂自适应数字控制 .....	144
3.8.2	基于 RBF 网络的双机械力臂自适应数字控制 .....	148
3.9	机器人神经网络鲁棒控制 .....	154
3.9.1	相关知识 .....	154
3.9.2	控制律的设计与分析 .....	154
3.9.3	仿真实例 .....	156
	参考文献 .....	158
<b>第 4 章</b>	<b>机器人模糊自适应控制 .....</b>	<b>160</b>
4.1	单力臂机械手直接自适应模糊控制 .....	160
4.1.1	问题描述 .....	160
4.1.2	模糊控制器的设计 .....	160
4.1.3	自适应律的设计 .....	161
4.1.4	仿真实例 .....	162
4.2	单力臂机械手间接自适应模糊控制 .....	169
4.2.1	问题描述 .....	169
4.2.2	自适应模糊滑模控制器设计 .....	170
4.2.3	稳定性分析 .....	171
4.2.4	仿真实例 .....	172
4.3	单级倒立摆的监督模糊控制 .....	180
4.3.1	模糊系统的设计 .....	180
4.3.2	模糊监督控制器的设计 .....	181
4.3.3	稳定性分析 .....	182
4.3.4	仿真实例 .....	183
4.4	基于 MIMO 系统的多关节机械手自适应模糊控制 .....	190
4.4.1	问题描述 .....	190
4.4.2	模糊系统的设计 .....	192
4.4.3	基于上界已知的自适应模糊控制 .....	193
4.4.4	基于上界未知的自适应模糊控制 .....	207
4.5	基于模糊补偿的机械手自适应模糊控制 .....	219
4.5.1	系统描述 .....	219
4.5.2	基于传统模糊补偿的控制 .....	219
4.5.3	基于模型信息已知的模糊补偿控制 .....	221
4.5.4	仿真实例 .....	223
4.6	基于线性矩阵不等式的单级倒立摆 T-S 模糊控制 .....	234
4.6.1	基于 LMI 的 T-S 型模糊系统的控制器设计 .....	234
4.6.2	单级倒立摆的 T-S 模型模糊建模 .....	235



4.6.3	LMI 设计及求解 .....	236
4.6.4	仿真实例 .....	237
4.7	基于死区补偿的机械手模糊自适应控制 .....	243
4.7.1	死区非线性特性 .....	243
4.7.2	死区模糊补偿器 .....	244
4.7.3	多人多出控制系统的死区模糊补偿器 .....	246
4.7.4	仿真实例 .....	250
	参考文献 .....	258
<b>第 5 章</b>	<b>机器人迭代学习控制及重复控制 .....</b>	<b>259</b>
5.1	迭代学习控制的数学基础 .....	259
5.1.1	矩阵的迹及初等性质 .....	259
5.1.2	向量范数和矩阵范数 .....	259
5.2	迭代学习控制方法介绍 .....	260
5.2.1	迭代学习控制基本原理 .....	261
5.2.2	基本的迭代学习控制算法 .....	261
5.2.3	迭代学习控制主要分析方法 .....	262
5.2.4	迭代学习控制的关键技术 .....	263
5.3	机械手轨迹跟踪迭代学习控制仿真实例 .....	264
5.3.1	控制器设计 .....	264
5.3.2	仿真实例 .....	264
5.4	线性时变连续系统迭代学习控制 .....	271
5.4.1	系统描述 .....	271
5.4.2	控制器设计及收敛性分析 .....	271
5.4.3	仿真实例 .....	273
5.5	任意初始状态下的迭代学习控制 .....	280
5.5.1	问题的提出 .....	281
5.5.2	控制器的设计 .....	281
5.5.3	仿真实例 .....	283
5.6	一种机械手轨迹跟踪自适应鲁棒迭代学习控制 .....	288
5.6.1	问题的提出 .....	288
5.6.2	控制器的设计 .....	289
5.6.3	仿真实例 .....	293
5.6.4	算法的改进 .....	301
5.7	机械手自适应迭代学习控制 .....	302
5.7.1	单关节机械手自适应迭代学习控制 .....	302
5.7.2	一种机械手轨迹跟踪自适应迭代学习控制 .....	311

5.8 移动机器人轨迹跟踪迭代学习控制 .....	323
5.8.1 数学基础 .....	324
5.8.2 系统描述 .....	324
5.8.3 控制律设计及收敛性分析 .....	326
5.8.4 仿真实例 .....	329
5.9 重复控制的基本原理 .....	332
5.9.1 重复控制的理论基础 .....	332
5.9.2 基本的重复控制系统结构 .....	333
5.9.3 基本重复控制系统稳定性分析 .....	333
5.9.4 仿真实例 .....	335
5.10 一种具有多路周期指令信号的数字重复控制 .....	337
5.10.1 系统的结构 .....	337
5.10.2 仿真实例 .....	340
参考文献 .....	344
<b>第 6 章 机器人反演控制</b> .....	<b>345</b>
6.1 反演控制器设计的原理及应用 .....	345
6.1.1 反演控制器设计的基本原理 .....	345
6.1.2 反演控制器设计的基本应用 .....	346
6.2 基于 Backstepping 的单关节机器人自适应模糊控制 .....	347
6.2.1 系统描述 .....	347
6.2.2 Backstepping 控制器的设计 .....	348
6.2.3 基于 Backstepping 的自适应模糊控制 .....	350
6.2.4 仿真实例 .....	353
6.3 双关节机械臂的 Backstepping 自适应模糊控制 .....	360
6.3.1 系统描述 .....	360
6.3.2 传统 Backstepping 控制器的设计及稳定性分析 .....	361
6.3.3 仿真实例 .....	364
6.4 柔性机器人的反演控制 .....	372
6.4.1 系统描述 .....	372
6.4.2 反演控制器的设计 .....	372
6.4.3 仿真实例 .....	375
6.5 柔性机器人神经网络反演控制 .....	380
6.5.1 系统描述 .....	380
6.5.2 反演控制器的设计 .....	381
6.5.3 仿真实例 .....	386
6.6 双耦合电机自适应神经网络反演控制 .....	392

6.6.1	系统描述	392
6.6.2	精确对象的反演控制	392
6.6.3	无需模型信息的神经网络反演控制	394
6.6.4	仿真实例	397
6.7	移动机器人的反演控制	402
6.7.1	移动机器人运动学反演控制	402
6.7.2	移动机器人动力学反演控制	410
	参考文献	419
<b>第7章 机器人滑模控制</b>		<b>420</b>
7.1	一种基于名义模型的机械手滑模鲁棒控制	420
7.1.1	系统描述	420
7.1.2	控制律设计	420
7.1.3	仿真实例	421
7.2	基于名义模型的机器人滑模控制	426
7.2.1	设计原理	426
7.2.2	基于名义模型的机器人指数趋近律的设计	426
7.2.3	仿真实例	428
7.3	基于计算力矩法的滑模控制	438
7.3.1	系统描述	439
7.3.2	控制律设计	439
7.3.3	仿真实例	440
7.4	基于输入输出稳定性理论的滑模控制	445
7.4.1	系统描述	445
7.4.2	控制律设计	445
7.4.3	仿真实例	447
7.5	主仆式机器人手的控制	453
7.5.1	系统描述	453
7.5.2	控制律的设计	454
7.5.3	仿真实例	454
7.6	基于模糊自适应增益调整的机器人滑模控制	459
7.6.1	机器人动力学模型及其结构特性	460
7.6.2	传统滑模控制律的设计	460
7.6.3	基于模糊自适应增益调整的机器人滑模控制	461
7.6.4	仿真实例	463
7.7	基于上界估计的机械手滑模控制	472
7.7.1	机器人动力学模型及其结构特性	472

7.7.2	滑模自适应控制律的设计及分析	472
7.7.3	鲁棒滑模自适应控制律的设计及分析	474
7.7.4	仿真实例	476
7.8	机械手双环积分滑模控制	487
7.8.1	系统描述	487
7.8.2	控制系统的设计	487
7.8.3	仿真实例	488
7.9	航天器姿态滑模控制	494
7.9.1	航天器姿态控制模型	494
7.9.2	传统滑模控制律的设计	495
7.9.3	双环滑模控制律的设计	495
7.9.4	仿真实例	497
7.10	直升机滑模控制	505
7.10.1	直升机数学模型	505
7.10.2	直升机模型的耦合分析	506
7.10.3	直升机模型的动态逆解耦线性化	506
7.10.4	直升机的滑模控制	507
7.10.5	仿真实例	508
7.11	机器人滑模控制的收敛性分析	511
	参考文献	512
<b>第 8 章</b>	<b>机器人自适应鲁棒控制</b>	<b>514</b>
8.1	不确定性摩擦特性的不确定机械系统鲁棒补偿控制	514
8.1.1	问题的提出	514
8.1.2	控制器的设计	515
8.1.3	稳定性分析	516
8.1.4	仿真实例	517
8.2	单力臂机械系统的鲁棒自适应控制	522
8.2.1	问题描述	523
8.2.2	鲁棒模型参考自适应控制	524
8.2.3	仿真实例	526
8.3	机械手自适应控制	531
8.3.1	系统描述	531
8.3.2	全局稳定的自适应控制器	531
8.3.3	消除位置稳态误差的自适应控制器	532
8.4	二自由度机械臂的鲁棒轨迹跟踪控制	547
8.4.1	问题描述	547

8.4.2	控制器的设计	547
8.4.3	仿真实例	551
8.5	基于名义模型的机器人自适应摩擦补偿鲁棒控制	560
8.5.1	系统描述	560
8.5.2	控制律的设计	560
8.5.3	仿真实例	562
8.6	基于 Lyapunov 方法的空间飞行器大角度姿态机动控制	566
8.6.1	数学模型	567
8.6.2	控制律的设计	567
8.6.3	仿真实例	568
8.7	二级倒立摆的 $H_{\infty}$ 鲁棒控制	573
8.7.1	系统的描述	573
8.7.2	基于 LMI 的控制律的设计	573
8.7.3	二级倒立摆系统的描述	574
8.7.4	仿真实例	575
8.8	不确定性系统的定量反馈鲁棒控制	583
8.8.1	定量反馈理论介绍	583
8.8.2	定量反馈控制器设计步骤	584
8.8.3	QFT 控制器的设计: 实例之一	585
8.8.4	QFT 控制器的设计: 实例之二	593
8.8.5	QFT 控制器的设计实例之三: 机器人关节的控制	602
	参考文献	613
<b>第 9 章</b>	<b>机器人参数观测、辨识及控制</b>	<b>615</b>
9.1	基于遗传算法的伺服系统静态摩擦参数辨识	615
9.1.1	伺服系统的静态摩擦模型	615
9.1.2	静摩擦模型 Stribeck 曲线的获取	615
9.1.3	基于遗传算法的静态摩擦参数辨识	616
9.1.4	仿真实例	617
9.1.5	基于摩擦模型补偿的伺服系统控制	623
9.2	一种机械手非线性干扰观测器及其在控制中的应用	627
9.2.1	系统描述	627
9.2.2	非线性干扰观测器的设计	628
9.2.3	双关节机械手干扰观测器的设计	629
9.2.4	仿真实例	632
9.3	基于干扰观测器的单机械臂滑模控制	637
9.3.1	单机械臂模型	637

9.3.2	单机械臂模型的滑模控制器设计及分析	638
9.3.3	干扰观测器的设计	639
9.3.4	仿真实例	639
9.4	一种基于神经网络的自适应状态观测器的设计及应用	645
9.4.1	系统描述	645
9.4.2	基本状态观测器的设计	646
9.4.3	基于神经网络的状态观测器设计	647
9.4.4	稳定性分析	648
9.4.5	仿真实例	652
9.4.6	基于神经网络观测器的单关节机械手反演控制	658
9.5	电机闭环系统的建模	661
9.5.1	基本原理	661
9.5.2	仿真实例	663
9.6	基于电机闭环系统辨识的数字前馈控制	667
9.6.1	零相差前馈控制基本原理	667
9.6.2	系统相移	668
9.6.3	仿真实例	669
9.7	电机开环传递函数的辨识	673
9.7.1	基本原理	673
9.7.2	仿真实例	674
	参考文献	678
<b>第 10 章</b>	<b>机器人路径规划</b>	<b>680</b>
10.1	旅行商问题的描述	680
10.2	基于遗传算法的 TSP 问题优化	680
10.2.1	遗传算法基本原理	681
10.2.2	TSP 问题的编码	682
10.2.3	TSP 问题的遗传算法设计	682
10.2.4	仿真实例	684
10.3	基于 Hopfield 神经网络的 TSP 问题优化	689
10.3.1	Hopfield 网络算法	689
10.3.2	求解 TSP 问题的 Hopfield 网络设计	690
10.3.3	仿真实例	692
	参考文献	696

# 第1章 绪论

## 1.1 机器人控制方法简介

机器人学科是一门迅速发展的综合性前沿学科,受到工业界和学术界的高度重视。机器人的核心是机器人控制系统,从控制工程的角度来看,机器人是一个非线性和不确定性系统,机器人智能控制是近年来机器人控制领域研究的前沿课题,已取得了相当丰富的成果。

机器人轨迹跟踪控制系统的主要目的是通过给定各关节的驱动力矩,使得机器人的位置、速度等状态变量跟踪给定的理想轨迹。

### 1.1.1 机器人常用的控制方法

常用的机器人控制方法有以下几种。

(1) 基于模型的控制方法:与一般的机械系统一样,当机器人的结构及其机械参数确定后,其动态特性将由动力学方程即数学模型来描述。因此,可以采用自动控制理论所提供的设计方法,通过基于数学模型的方法设计机器人控制器。基于被控对象数学模型的控制方法有前馈补偿控制、计算力矩法、最优控制方法、非线性反馈控制方法等。但在实际工程中,由于机器人是一个非线性和不确定性系统,很难得到机器人精确的数学模型,使这些方法难以得到实际应用。

(2) PID控制:机器人控制常采用PD控制和PID控制,其优点是控制律简单,易于实现,无需建模,但这类方法有两个明显的缺点,一是难于保证受控机器人具有良好的动态和静态品质,二是需要较大的控制能量。

(3) 自适应控制:自适应控制是根据要求的性能指标与实际系统的性能指标相比较所获得的信息来修正控制规律或控制器参数,使系统能够保持最优或次最优工作状态的控制方法。具体地讲,就是控制器能够及时修正自己的特性以适应控制对象和外部扰动的动态特性变化,使整个控制系统始终获得满意的性能,其弱点是在线辨识参数所需的庞大计算,对实时性要求严格,实现比较复杂,特别是存在非参数不确定性时,自适应控制难以保证系统稳定和达到一定的控制性能指标。

(4) 鲁棒控制:它是一种保证不确定系统的稳定性以及达到满意控制效果的控制方法。鲁棒控制器的设计仅需知道限制不确定性的最大可能值的边界即可,鲁棒控制可同时补偿结构和非结构不确定性的影响,这也正是鲁棒控制优于自适应控制之处。除此之外,与自适应控制方法相比,鲁棒控制还有实现简单(没有自适应律),对时变参数以及非结构非线性不确定性的影响有更好的补偿效果,更易于保证稳定性等优点。

(5) 神经网络控制和模糊控制:神经网络和模糊系统具有高度的非线性逼近映射能力,神经网络和模糊系统技术的发展为解决复杂的非线性、不确定及不确定系统的控制开辟了新途径。采用神经网络和模糊系统,可实现对机器人动力学方程中未知部分的在线精确

逼近,从而可通过在线建模和前馈补偿,实现机器人的高精度跟踪。

(6) 迭代学习控制:它是智能控制中具有严格数学描述的一个分支,适合于解决强非线性、强耦合、建模难、运动具有重复性的对象的高精度控制问题。迭代学习控制方法不依赖于系统的精确数学模型,算法简单。与鲁棒控制一样,迭代学习控制也能处理实际系统中的不确定性,但它能实现完全跟踪,控制器形式更为简单且需要较少的先验知识。机器人轨迹跟踪控制是迭代学习控制应用的典型代表。

(7) 变结构控制:其本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制的不连续性。由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。这种控制方法通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动,使系统在受到参数摄动和外干扰的时候具有不变性,正是这种特性使得变结构控制方法在机器人控制中得到广泛的应用。

(8) 反演控制设计方法:其基本思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统,然后为每个子系统分别设计李雅普诺夫函数和中间虚拟控制量,一直“后退”到整个系统,直到完成整个控制律的设计。利用反演控制技术设计机器人控制器,可以解决系统中的非匹配不确定性。通过在虚拟控制中引入微分阻尼项,可有效地改善系统动态性能;通过在虚拟控制中引入模糊系统或神经网络,可实现无需建模的自适应反演控制;通过在虚拟控制中引入切换函数,可实现具有滑模控制特性的反演控制。

### 1.1.2 不确定机器人系统的控制

机器人控制系统的主要目的是通过给定各关节的驱动力矩,使得机器人的位置、速度等状态变量跟踪给定的理想轨迹。与一般的机械系统一样,当机器人的结构及其机械参数确定以后,其动态特性将由运动方程即数学模型来描述。因此,可以应用自动控制理论所提供的设计方法,基于数学模型来设计机器人的控制器。

在实际工程中要想得到精确的数学模型是十分困难的,因此在建立机器人的数学模型时,需要做合理的近似处理,忽略一些不确定性因素,这些不确定性因素包括:

(1) 参数不确定性:如负载质量、连杆质量、长度及连杆质心等物理量未知或部分已知。

(2) 非参数不确定性:高频未建模动态,包括驱动器动力学、结构共振模式等;低频未建模动态,包括动/静摩擦力、关节柔性等。

(3) 作业环境干扰、驱动器饱和问题,测量误差、舍入误差及采样延时等因素。

上述因素的存在可能会引起控制系统质的变化,甚至成为系统不稳定的原因。

应用于不确定性机器人的先进控制策略可分为三大类,即自适应控制、变结构控制和鲁棒控制。通过与自适应控制、变结构控制和鲁棒控制方法相结合,PID控制、神经网络控制、模糊控制、迭代学习控制和反演控制方法也可以实现对不确定机器人系统的精确控制。

## 1.2 机器人动力学模型及其结构特性

一个典型的多关节机器人如图 1-1 所示。

考虑一个  $N$  关节机器人,其动态性能可由二阶非线性微分方程描述:



$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (1.1)$$

式中  $q \in \mathbf{R}^n$  为关节角位移量,  $M(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为机器人的惯性矩阵,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^n$  表示离心力和哥氏力,  $G(q) \in \mathbf{R}^n$  为重力项,  $F(\dot{q}) \in \mathbf{R}^n$  表示摩擦力矩,  $\tau \in \mathbf{R}^n$  为控制力矩,  $\tau_d \in \mathbf{R}^n$  为外加扰动。

机器人系统的动力学特性如下:

- 特性 1  $M(q) - 2C(q, \dot{q})$  是一个斜对称矩阵。
- 特性 2 惯性矩阵  $M(q)$  是对称正定矩阵, 存在正数  $m_1, m_2$  满足如下不等式:

$$m_1 \|x\|^2 \leq x^T M(q)x \leq m_2 \|x\|^2 \quad (1.2)$$

- 特性 3 存在一个依赖于机械手参数的参数向量, 使得  $M(q), C(q, \dot{q}), G(q), F(\dot{q})$  满足线性关系:

$$M(q)\vartheta + C(q, \dot{q})\rho + G(q) + F(\dot{q}) = \Phi(q, \dot{q}, \rho, \vartheta)P \quad (1.3)$$

其中  $\Phi(q, \dot{q}, \rho, \vartheta) \in \mathbf{R}^{n \times m}$  为已知关节变量函数的回归矩阵, 它是机器人广义坐标及其各阶导数的已知函数矩阵,  $P \in \mathbf{R}^m$  是描述机器人质量特性的未知定常参数向量。

一个典型的双关节刚性机械手示意图如图 1-2 所示, 本书中的大多数仿真实例都采用该机械手进行验证。

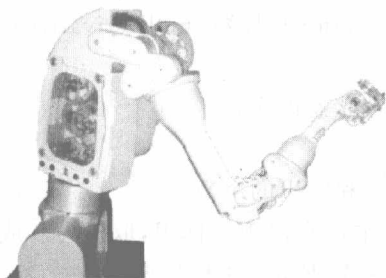


图 1-1 一个 8 关节机器人

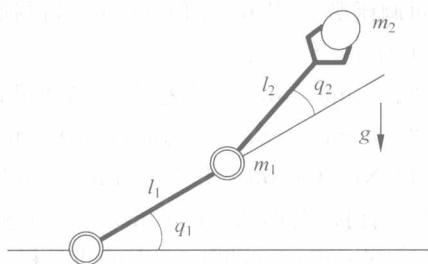


图 1-2 双关节刚性机械手示意图

## 1.3 基于 S 函数的 SIMULINK 仿真

S 函数中使用文本方式输入公式和方程, 适合复杂动态系统的数学描述, 并且在仿真过程中可以对仿真参数进行更精确的描述。在本书的机器人控制系统的 SIMULINK 仿真中, 主要使用 S 函数来实现控制律、自适应律和被控对象的描述。

### 1.3.1 S 函数简介

S 函数模块是整个 SIMULINK 动态系统的核心, 也可以说 S 函数是 SIMULINK 最具魅力的地方。

S 函数是系统函数(system function)的简称, 是指采用非图形化的方式(即计算机语言, 区别于 SIMULINK 的系统模块)描述的一个功能块。用户可以采用 MATLAB 代码、C、C++ 等语言编写 S 函数。S 函数由一种特定的语法构成, 用来描述并实现连续系统、离散系统以及复合系统等动态系统, S 函数能够接受来自 SIMULINK 求解器的相关信息, 并对