

电子信息与电气工程技术丛书 E&E

本书英文版由Springer出版发行

ROBOT CONTROL SYSTEM
DESIGN AND MATLAB
SIMULATION
THE BASIC DESIGN METHOD



机器人控制系统的设计
与MATLAB仿真
基本设计方法

刘金琨 著

Liu Jinkun

清华大学出版社



电子信息与电气工程技术丛书

E&E

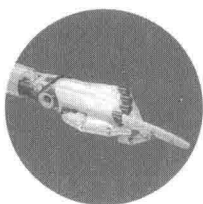
ROBOT CONTROL SYSTEM DESIGN
AND MATLAB SIMULATION
THE BASIC DESIGN METHOD

机器人控制系统的设计 与MATLAB仿真

基本设计方法

刘金琨 著

Liu Jinkun



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了机械手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。

本书以机械手的控制为论述对象,共包括 10 章,分别介绍了先进 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、末端轨迹及力控制、重复控制设计方法。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相互独立,读者可根据自己的需要选择学习。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,也可作为高等院校工业自动化、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:基本设计方法/刘金琨著. —北京:清华大学出版社,2016

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-45696-4

I. ①机… II. ①刘… III. ①机器人控制—系统设计 ②机器人控制—系统仿真—Matlab 软件
IV. ①TP24 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288810 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20

字 数:486千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:69.00元

产品编号:068580-01

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算法的分析和设计,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、实用化而成的,特点如下:

(1) 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结果分析,为读者提供了有益的借鉴。

(4) 所给出的各种控制算法完整,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械手的控制,同时也适合解决运动控制领域其他背景的控制问题。

本书主要以机器人手臂为被控对象,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、倒立摆为被控对象来辅助说明。

本书是在原有《机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真》基础上撰写而成的,并增加、修改和删除了部分内容。全书共分为上下册,本书作为上册,共包括 10 章。第 1 章为绪论,介绍机械手的几种控制方法及模型特性;第 2 章介绍机械手 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 章介绍机械手神经网络自适应控制的几种设计方法;第 4 章介绍基于 LMI 的模糊鲁棒控制方法和几种机械手模糊自适应控制器的设计方法;第 5 章介绍机械手迭代学习控制和重复控制的设计方法;第 6 章介绍机械手反演控制的设计方法;第 7 章介绍机械手滑模控制基本设计方法;第 8 章介绍机械手自适应鲁棒控制方法,包括鲁棒控制器和自适应控制器的设计;第 9 章介绍机械手末端轨迹及力控制设计方法;第 10 章介绍重复控制的基本原理及设计方法。

本书介绍的控制方法有些选自于高水平国际杂志和著作中的经典控制方法,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进行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。

本书是基于英文版 MATLAB 环境下开发(书中仿真图的图字均为英文)。书中各

前言

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及仿真等方面给予作者很多的指点,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。

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 [ljkbuaa.edu.cn](mailto:ljkbuaa@buaa.edu.cn) 与作者联系。作者相信,通过与广大同行的交流,可以得到许多有益的建议,从而再版时将本书完善。

刘金琨

2016年12月

于北京航空航天大学

仿真程序使用说明

1. 所有仿真算法按章归类,程序名与书中一一对应。
2. 将下载的仿真程序复制到硬盘里 MATLAB 运行的路径中,便可仿真运行。
3. 本书算法在当前 MATLAB 版本下运行成功,并适用于其他更高级版本。
4. 假如您对仿真程序有疑问,请及时通过 E-mail 与本书的编辑或作者本人联系。

编辑 E-mail 地址: shengdl@tup. tsinghua. edu. cn

作者 E-mail 地址: ljk@buaa. edu. cn

5. 程序下载网址:

北京航空航天大学页面: <http://shi. buaa. edu. cn/liujinkun>

清华大学出版社本书页面: www. tup. tsinghua. edu. cn

前言	I
仿真程序使用说明	III
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	3
1.3 基于 S 函数的 Simulink 仿真	4
1.3.1 S 函数简介	4
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
1.3.4 S 函数描述实例	5
第 2 章 机械手 PID 控制	7
2.1 机械手独立 PD 控制	7
2.1.1 控制律设计	7
2.1.2 收敛性分析	7
2.1.3 仿真实例	8
2.2 基于重力补偿的机械手 PD 控制	12
2.2.1 控制律设计	12
2.2.2 控制律分析	12
2.3 基于模型补偿的机械手 PD 控制	13
2.3.1 系统描述	13
2.3.2 控制器的设计	13
2.3.3 仿真实例	14
参考文献	20
第 3 章 机械手神经网络自适应控制	21
3.1 一种简单的 RBF 网络自适应滑模控制	21
3.1.1 问题描述	21
3.1.2 RBF 网络原理	22
3.1.3 控制算法设计与分析	22
3.1.4 仿真实例	23
3.2 基于 RBF 网络逼近的机械手自适应控制	27

目录

3.2.1	问题的提出	27
3.2.2	基于 RBF 神经网络逼近的控制器	28
3.2.3	针对 $f(x)$ 中各项分别进行神经网络逼近	31
3.2.4	仿真实例	33
	参考文献	42
第 4 章	机械手模糊自适应控制	43
4.1	单力臂机械手直接自适应模糊控制	43
4.1.1	问题描述	43
4.1.2	模糊控制器的设计	44
4.1.3	自适应律的设计	44
4.1.4	仿真实例	46
4.2	单力臂机械手间接自适应模糊控制	52
4.2.1	问题描述	52
4.2.2	自适应模糊滑模控制器设计	53
4.2.3	稳定性分析	54
4.2.4	仿真实例	56
4.3	单级倒立摆的监督模糊控制	63
4.3.1	模糊系统的设计	64
4.3.2	模糊监督控制器的设计	64
4.3.3	稳定性分析	65
4.3.4	仿真实例	66
4.4	基于模糊补偿的机械手自适应模糊控制	73
4.4.1	系统描述	73
4.4.2	基于传统模糊补偿的控制	74
4.4.3	基于模型信息已知的模糊补偿控制	76
4.4.4	仿真实例	78
4.5	基于线性矩阵不等式的单级倒立摆 T-S 模糊控制	102
4.5.1	基于 LMI 的 T-S 型模糊系统控制器设计	102
4.5.2	LMI 不等式的设计及分析	103
4.5.3	不等式的转换	105
4.5.4	LMI 设计实例说明	105
4.5.5	单级倒立摆的 T-S 模型模糊控制	106
	参考文献	119

第 5 章 机械手迭代学习控制及重复控制	121
5.1 迭代学习控制的数学基础	121
5.1.1 矩阵的迹及初等性质	121
5.1.2 向量范数和矩阵范数	121
5.2 迭代学习控制方法介绍	123
5.2.1 迭代学习控制基本原理	123
5.2.2 基本的迭代学习控制算法	123
5.2.3 迭代学习控制主要分析方法	124
5.2.4 迭代学习控制的关键技术	125
5.3 机械手轨迹跟踪迭代学习控制仿真实例	126
5.3.1 控制器设计	126
5.3.2 仿真实例	126
5.4 线性时变连续系统迭代学习控制	134
5.4.1 系统描述	134
5.4.2 控制器设计及收敛性分析	134
5.4.3 仿真实例	136
5.5 任意初始状态下的迭代学习控制	143
5.5.1 问题的提出	143
5.5.2 控制器的设计	143
5.5.3 仿真实例	146
参考文献	151
第 6 章 机械手反演控制	152
6.1 简单反演控制器设计	152
6.1.1 基本原理	152
6.1.2 仿真实例	153
6.2 单关节机械手的反演控制	157
6.2.1 系统描述	157
6.2.2 反演控制器设计	158
6.2.3 仿真实例	160
6.3 双耦合电机的反演控制	163
6.3.1 系统描述	163
6.3.2 反演控制器设计	164
6.3.3 仿真实例	166

目录

参考文献	169
第 7 章 机械手滑模控制	170
7.1 机械手动力学模型及特性	170
7.2 基于计算力矩法的滑模控制	171
7.2.1 系统描述	171
7.2.2 控制律设计	171
7.2.3 仿真实例	172
7.3 基于输入输出稳定性理论的滑模控制	178
7.3.1 系统描述	178
7.3.2 控制律设计	178
7.3.3 仿真实例	180
7.4 基于 LMI 的指数收敛非线性干扰观测器的控制	186
7.4.1 非线性干扰观测器的问题描述	186
7.4.2 非线性干扰观测器的设计	186
7.4.3 LMI 不等式的求解	187
7.4.4 计算力矩法的滑模控制	188
7.4.5 仿真实例	189
7.5 欠驱动两杆机械臂 Pendubot 滑模控制	200
7.5.1 Pendubot 控制问题	200
7.5.2 Pendubot 机械臂建模	200
7.5.3 Pendubot 动力学模型	203
7.5.4 Pendubot 模型的分析	205
7.5.5 滑模控制律设计	206
7.5.6 闭环稳定性分析	208
7.5.7 基于 Hurwitz 的参数设计	209
7.5.8 仿真实例	211
参考文献	219
第 8 章 机械手自适应鲁棒控制	220
8.1 单力臂机械系统的鲁棒自适应控制	220
8.1.1 问题描述	220
8.1.2 鲁棒模型参考自适应控制	221
8.1.3 仿真实例	222
8.2 二级倒立摆的 H_∞ 鲁棒控制	228
8.2.1 系统的描述	228

8.2.2	基于 LMI 的控制律的设计	228
8.2.3	二级倒立摆系统的描述	228
8.2.4	仿真实例	229
参考文献		237
第 9 章	机械手末端轨迹及力的连续切换滑模控制	238
9.1	基于双曲正切函数切换的滑模控制	238
9.1.1	双曲正切函数的特性	238
9.1.2	仿真实例	238
9.1.3	基于双曲正切函数的滑模控制	239
9.1.4	仿真实例	241
9.2	基于位置动力学模型的机械手末端轨迹滑模控制	246
9.2.1	工作空间直角坐标与关节角位置的转换	246
9.2.2	机械手在工作空间的建模	248
9.2.3	滑模控制器的设计	248
9.2.4	仿真实例	250
9.3	基于角度动力学模型的机械手末端轨迹滑模控制	257
9.3.1	机械手在工作空间的建模	257
9.3.2	工作空间直角坐标与关节角位置的转换	257
9.3.3	滑模控制器的设计	257
9.3.4	仿真实例	258
9.4	工作空间中双关节机械手末端的阻抗滑模控制	268
9.4.1	问题的提出	268
9.4.2	阻抗模型的建立	269
9.4.3	滑模控制器的设计	270
9.4.4	仿真实例	271
9.5	受约束条件下双关节机械手末端力及关节角度的滑模控制	282
9.5.1	问题的提出	282
9.5.2	模型的降阶	282
9.5.3	控制律的设计	284
9.5.4	稳定性分析	285
9.5.5	仿真实例	285
参考文献		292
第 10 章	重复控制基本原理及设计方法	294
10.1	重复控制的基本原理	294

目录

10.1.1	重复控制的理论基础	294
10.1.2	基本的重复控制系统结构	295
10.1.3	基本重复控制系统稳定性分析	295
10.1.4	仿真实例	297
10.2	一种具有多路周期指令信号的数字重复控制	299
10.2.1	系统的结构	299
10.2.2	重复控制器的设计	301
10.2.3	仿真实例	303
	参考文献	306

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,使这些方法很难得到实际应用。

(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,无须建模,但这类方法有两个明显的缺点,一是难以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 control 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,其缺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：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：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、无须系统在线辨识、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，使系统在受到参数扰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，可实现无须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，这些不确定因素包括以下几个方面：

(1) 参数不确定性：例如，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、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:

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

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

机器人系统的动力学特性如下:

(1) 特性 1, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 是一个斜对称矩阵, $\mathbf{x}^T (\mathbf{M}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \mathbf{x} = 0$;

(2) 特性 2, 惯性矩阵 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 是对称正定矩阵, 存在正数 m_1, m_2 , 满足如下不等式:

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

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

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

其中, $\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\vartheta}) \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 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, $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^m$ 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。

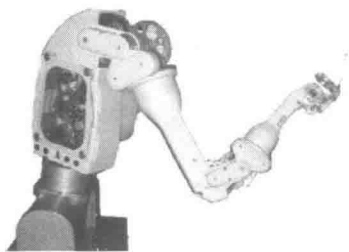


图 1-1 一个 8 关节机器人

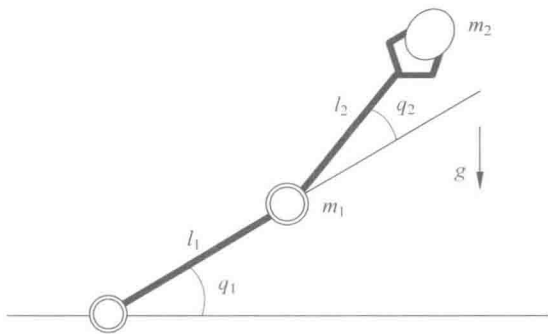


图 1-2 双关节刚性机械手示意图

1.3 基于 S 函数的 Simulink 仿真

S 函数是 Simulink 的重要部分,它为 Simulink 环境下的仿真提供了强有力的拓展能力。S 函数可以用计算机语言来描述动态系统。在控制系统设计中,S 函数可以用来描述控制算法、自适应算法和模型动力学方程。

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 函数能够接收来自 Simulink 求解器的相关信息,并对求解器发出的命令做出适当的响应,这种交互作用非常类似于 Simulink 系统模块与求解器的交互作用。一个结构体系完整的 S 函数包含了描述动态系统所需的全部能力,所有其他的使用情况都是这个结构体系的特例。

1.3.2 S 函数使用步骤

一般而言,S 函数的使用步骤如下:

(1) 创建 S 函数源文件。创建 S 函数源文件有多种方法,Simulink 提供了很多 S 函数模板和例子,用户可以根据自己的需要修改相应的模板或例子即可。

(2) 在动态系统的 Simulink 模型框图中添加 S-function 模块,并进行正确的设置。

(3) 在 Simulink 模型框图中按照定义好的功能连接输入输出端口。

为了方便 S 函数的使用和编写,Simulink 的 Functions&Tables 模块库还提供了 S-functiondemos 模块组,该模块组为用户提供了编写 S 函数的各种例子,以及 S 函数模板模块。

1.3.3 S 函数的基本功能及重要参数设定

S 函数的基本功能及重要参数设定如下:

(1) S 函数功能模块:各种功能模块完成不同的任务,这些功能模块(函数)称为仿真例程或回调函数(call-back functions),包括初始化(initialization)、导数(mdlDerivative)、输出(mdlOutput)等。

(2) NumContStates 表示 S 函数描述的模块中连续状态的个数。

(3) NumDiscStates 表示离散状态的个数。

(4) NumOutputs 和 NumInputs 分别表示模块输出和输入的个数。

(5) 直接馈通(dirFeedthrough)为输入信号是否在输出端出现的标识,取值为 0 或 1。例如,形如 $y=k \times u$ 的系统需要输入(即直接反馈),其中, u 是输入, k 是增益, y 是输出,形如等式 $y=x, \dot{x}=u$ 的系统不需要输入(即不存在直接反馈),其中, x 是状态, u 是输入, y 为输出。

(6) NumSampleTimes 为模块采样周期的个数, S 函数支持多采样周期的系统。

除了 sys 外,还应设置系统的初始状态变量 x_0 、说明变量 str 和采样周期变量 t_s 。 t_s 变量为双列矩阵,其中每一行对应一个采样周期。对连续系统和单个采样周期的系统来说,该变量为 $[t_1, t_2]$, t_1 为采样周期, $t_1 = -1$ 表示继承输入信号的采样周期, t_2 为偏移量,一般取为 0。对连续系统来说, t_s 取为 $[-1, 0]$ 。

1.3.4 S 函数描述实例

在控制系统设计中, S 函数可以用于控制器、自适应律和模型描述。以模型 $J \ddot{\theta} = u + d(t)$ 的 S 函数描述为例,其中, u 为控制输入, $d(t)$ 为加在控制输入端的扰动,模型输出为 θ 和 $\dot{\theta}$,即转动角度和转动角速度, J 为转动惯量。该模型可描述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{J}(u + d(t)) \end{aligned}$$

其中 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$ 。

针对该模型的 S 函数描述介绍如下:

1. 模型初始化 Initialization 函数

采用 S 函数来描述动力学方程,可选取 1 输入 2 输出系统,如果角度 θ 和角速度 $\dot{\theta}$ 的初始值取零,则模型初始化参数写为 $[0, 0]$,模型初始化 S 函数描述如下:

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 2;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0,0];
str = [];
ts = [0 0];
```

2. 微分方程描述的 mdlDerivative 函数

该函数可用于描述微分方程并实现数值求解。在控制系统中,可采用该函数来描述