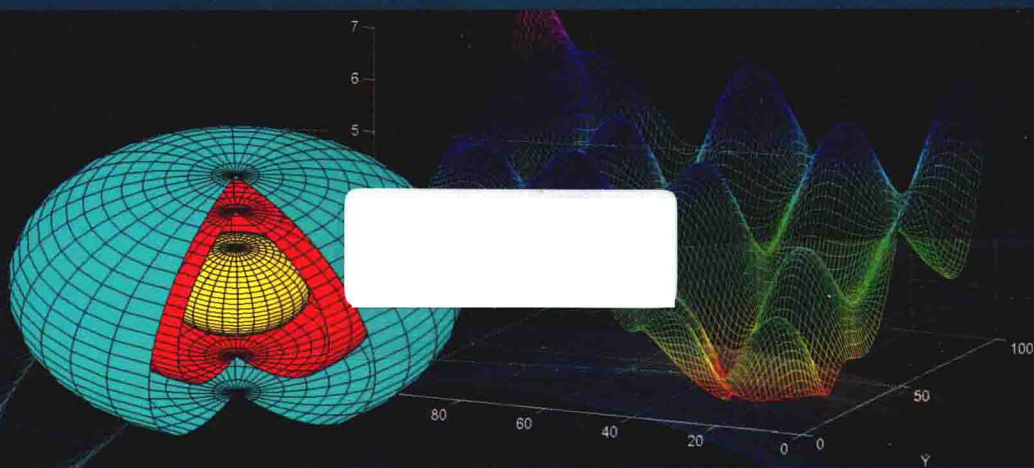


电子工程技术丛书

先进PID控制 MATLAB仿真 (第4版)

● 刘金琨 编著



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程技术丛书

先进 PID 控制 MATLAB 仿真

(第 4 版)

刘金琨 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了 PID 控制的几种设计方法,是作者多年来从事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。

全书共分 17 章,包括基本的 PID 控制、PID 控制器的整定、时滞系统 PID 控制、基于微分器的 PID 控制、基于观测器的 PID 控制、自抗扰控制器及其 PID 控制、PD 鲁棒自适应控制、专家 PID 控制和模糊 PD 控制、神经网络 PID 控制、基于差分进化的 PID 控制、伺服系统 PID 控制、迭代学习 PID 控制、挠性及奇异摄动系统的 PD 控制、机械手 PID 控制、飞行器双闭环 PD 控制、倒立摆系统的控制及 GUI 动画演示,以及其他控制方法的设计。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。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

先进 PID 控制 MATLAB 仿真 / 刘金琨编著. —4 版. —北京:电子工业出版社,2016.6

(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-28846-3

I. ①先… II. ①刘… III. ①PID 控制②计算机辅助计算-软件包 IV. ①TP273②TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 108574 号

责任编辑:刘海艳

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:北京京科印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:34 字数:870.4 千字

版 次:2003 年 1 月第 1 版

2016 年 6 月第 4 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:79.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: lhy@phei.com.cn。

前 言

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一, 由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高, 被广泛应用于过程控制和运动控制中, 尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。然而实际工业生产过程往往具有非线性、时变不确定性, 难以建立精确的数学模型, 应用常规 PID 控制器不能达到理想的控制效果, 而且在实际生产现场中, 由于受到参数整定方法繁杂的困扰, 常规 PID 控制器参数往往整定不良、性能欠佳, 对运行工况的适应性很差。

计算机技术和智能控制理论的发展为复杂动态不确定系统的控制提供了新的途径。采用智能控制技术, 可设计智能 PID 和进行 PID 的智能整定。

有关智能 PID 控制等新型 PID 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智能控制方面的研究和教学工作, 为了促进 PID 控制和自动化技术的进步, 反映 PID 控制设计与应用中的最新研究成果, 并使广大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 PID 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、实用化而成的, 其特点如下。

(1) PID 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 PID 算法给出了完整的 MATLAB 仿真程序, 这些程序都可以在线运行, 并给出了程序的说明和仿真结果。具有很强的可读性, 很容易转化为其他各种实用语言。

(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 PID 算法完整, 程序设计力求简单明了, 便于自学和进一步开发。

本书共分 17 章。第 1 章介绍连续系统 PID 控制和离散系统数字 PID 控制的几种基本方法, 通过仿真和分析进行了说明; 第 2 章介绍了 PID 控制器整定的几种方法; 第 3 章介绍了时滞系统的 PID 控制, 包括串级计算机控制系统的 PID 控制、纯滞后控制系统 Dahlin 算法和基于 Smith 预估的 PID 控制; 第 4 章介绍了基于微分器的 PID 控制, 包括基于全程快速微分器和基于 Levant 微分器的 PID 控制; 第 5 章介绍了基于观测器的 PID 控制, 包括基于干扰观测器、扩张观测器和输出延迟观测器的 PID 控制; 第 6 章介绍了自抗扰控制器及其 PID 控制, 包括非线性跟踪微分器、安排过渡过程及 PID 控制、基于非线性扩张观测器的 PID 控制、非线性 PID 控制和自抗扰控制; 第 7 章介绍了几种 PID 鲁棒自适应控制方法, 包括一种稳定的 PD 控制算法、基于模型的 PI 鲁棒控制、基于名义模型的机械手 PI 鲁棒控制、基于 Anti-windup 的 PID 抗饱和控制和基于增益自适应调节的模型参考自适应 PD 控制; 第 8 章介绍了专家 PID 和模糊 PID 整定方法, 其中模糊 PID 包括自适应模糊补偿的倒立摆 PD 控制、基于模糊规则表的模糊 PD 控制和模糊自适应整定 PID 控制; 第 9 章介绍了神经网络 PID 控制, 包括基于单神经元网络的 PID 控制、基于二次型性能指标学习算法的单神经

元自适应 PID 控制和基于自适应神经网络补偿的倒立摆 PD 控制;第 10 章介绍了基于差分进化的 PID 控制,主要包括基于差分进化整定的 PID 控制和基于差分进化摩擦模型参数辨识的 PID 控制;第 11 章介绍了伺服系统的 PID 控制,包括伺服系统在低速摩擦条件下的 PID 控制、单质量伺服系统 PID 控制和二质量伺服系统 PID 控制;第 12 章介绍了迭代学习 PID 控制,包括迭代学习 PID 控制基本原理和基本设计方法;第 13 章介绍了挠性及奇异摄动系统的 PD 控制,包括基于输入成型的挠性机械系统 PD 控制和基于奇异摄动理论的 P 控制;第 14 章介绍了机械手的 PID 控制,包括机械手独立 PD 控制、工作空间中机械手末端轨迹 PD 控制、工作空间中机械手末端的阻抗 PD 控制和移动机器人的 P 控制;第 15 章介绍了飞行器的双闭环 PD 控制,包括基于双环设计的 VTOL 飞行器轨迹跟踪 PD 控制和基于内外环的四旋翼飞行器的 PD 控制;第 16 章介绍了倒立摆系统的一种控制方法及 GUI 动画演示;第 17 章介绍了其他控制方法,针对每种方法给出了实例说明。

本书是基于 MATLAB 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。

北京航空航天大学尔联洁教授在伺服系统设计方面提出了许多宝贵意见,东北大学徐心和教授、薛定宇教授给予了大力支持和帮助,作者在控制系统的分析中,有许多方面得益于作者与研究生的探讨,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,欢迎广大读者批评指正。

刘金琨

北京航空航天大学

2016 年 3 月 10 日

第 4 版说明

在第 3 版的基础上主要增加了以下内容：挠性及奇异摄动系统的 PD 控制、机械手 PID 控制、飞行器双闭环 PD 控制，将第 3 版第 10 章“基于遗传算法整定的 PID 控制”改为“基于差分进化的 PID 控制”，并针对第 3 版中的部分内容进行了更新，对书中的某些错误进行了修改。

作者简介

刘金琨：辽宁人，1965年生。分别于1989年7月、1994年3月和1997年3月获东北大学工学学士、工学硕士和工学博士学位。1997年3月至1998年12月在浙江大学工业控制技术研究所做博士后研究工作。1999年1月至1999年7月在香港科技大学从事合作研究。1999年11月至今在北京航空航天大学自动化学院从事教学与科研工作，现任教授、博士生导师。主讲“智能控制”、“先进控制系统设计”和“系统辨识”等课程。研究方向为控制理论与应用。自从从事研究工作以来，主持国家自然科学基金等科研项目10余项，发表学术论文100余篇。曾出版《智能控制》《机器人控制系统的设计与MATLAB仿真》《滑模变结构控制MATLAB仿真》《RBF神经网络自适应控制MATLAB仿真》《系统辨识》和《微分器设计与应用——信号滤波与求导》等著作。

常用符号说明


P	比例
I	积分
D	微分
T	采样时间
K	采样
A	正弦信号幅值
F	正弦信号频率
x_d 、 y_d	输入理想信号
y 、 y_{out}	输出信号
θ	角度
e 、error	误差
de 、 $derror$	误差变化率
k_p 、 k_i 、 k_d	PID 控制的比例、积分、微分系数
u	控制器输出
w_{ij}	神经网络权值
η	学习速率
α	惯性量
M 、 S	信号选择变量
n	噪声信号
d	干扰
τ	延迟时间

仿真程序使用说明

1. 所有仿真算法按章归类，下载的程序名与书中一一对应。
2. 将下载的仿真程序复制到硬盘 MATLAB 运行的路径中，便可仿真运行。
3. 本书算法在 MATLAB 7.12 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任何疑问，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: lhy@phei.com.cn

作者 E-mail 地址: ljk@buaa.edu.cn

5.  程序下载网址 1 (北航服务器):

<http://shi.buaa.edu.cn/liujinkun>



程序下载网址 2 (电子工业出版社):

<http://yydz.phei.com.cn/aspcms/down/2016-5-20/322.html>

北京航空航天大学 刘金琨

2016 年 5 月

目 录

第 1 章 基本的 PID 控制	1
1.1 PID 控制原理	1
1.2 连续系统的模拟 PID 仿真	2
1.2.1 基本的 PID 控制	2
1.2.2 线性时变系统的 PID 控制	8
1.3 数字 PID 控制	12
1.3.1 位置式 PID 控制算法	12
1.3.2 连续系统的数字 PID 控制仿真	13
1.3.3 离散系统的数字 PID 控制仿真	18
1.3.4 增量式 PID 控制算法及仿真	25
1.3.5 积分分离 PID 控制算法及仿真	26
1.3.6 抗积分饱和 PID 控制算法及仿真	31
1.3.7 梯形积分 PID 控制算法	34
1.3.8 变速积分 PID 算法及仿真	34
1.3.9 带滤波器的 PID 控制仿真	38
1.3.10 不完全微分 PID 控制算法及仿真	44
1.3.11 微分先行 PID 控制算法及仿真	48
1.3.12 带死区的 PID 控制算法及仿真	51
1.3.13 基于前馈补偿的 PID 控制算法及仿真	55
1.3.14 步进式 PID 控制算法及仿真	57
1.3.15 PID 控制的方波响应	60
1.3.16 基于卡尔曼滤波器的 PID 控制	62
1.4 S 函数介绍	71
1.4.1 S 函数简介	71
1.4.2 S 函数使用步骤	72
1.4.3 S 函数的基本功能及重要参数设定	72
1.4.4 实例说明	72
1.5 PID 研究新进展	73
参考文献	73
第 2 章 PID 控制器的整定	75
2.1 概述	75
2.2 基于响应曲线法的 PID 整定	75
2.2.1 基本原理	75
2.2.2 仿真实例	76

2.3	基于 Ziegler-Nichols 的频域响应 PID 整定	79
2.3.1	连续 Ziegler-Nichols 方法的 PID 整定	79
2.3.2	仿真实例	80
2.3.3	离散 Ziegler-Nichols 方法的 PID 整定	83
2.3.4	仿真实例	83
2.4	基于频域分析的 PD 整定	87
2.4.1	基本原理	87
2.4.2	仿真实例	87
2.5	基于相位裕度整定的 PI 控制	89
2.5.1	基本原理	89
2.5.2	仿真实例	92
2.6	基于极点配置的稳定 PD 控制	94
2.6.1	基本原理	94
2.6.2	仿真实例	95
2.7	基于临界比例度法的 PID 整定	97
2.7.1	基本原理	97
2.7.2	仿真实例	98
2.8	一类非线性整定的 PID 控制	100
2.8.1	基本原理	100
2.8.2	仿真实例	102
2.9	基于优化函数的 PID 整定	104
2.9.1	基本原理	104
2.9.2	仿真实例	104
2.10	基于 NCD 优化的 PID 整定	106
2.10.1	基本原理	106
2.10.2	仿真实例	106
2.11	基于 NCD 与优化函数结合的 PID 整定	109
2.11.1	基本原理	109
2.11.2	仿真实例	110
2.12	传递函数的频域测试	111
2.12.1	基本原理	111
2.12.2	仿真实例	112
	参考文献	115
第 3 章	时滞系统的 PID 控制	116
3.1	单回路 PID 控制系统	116
3.2	串级 PID 控制	116
3.2.1	串级 PID 控制原理	116
3.2.2	仿真实例	117
3.3	纯滞后系统的大林控制算法	121

3.3.1	大林控制算法原理	121
3.3.2	仿真实例	121
3.4	纯滞后系统的 Smith 控制算法	123
3.4.1	连续 Smith 预估控制	123
3.4.2	仿真实例	125
3.4.3	数字 Smith 预估控制	127
3.4.4	仿真实例	128
	参考文献	133
第 4 章	基于微分器的 PID 控制	134
4.1	基于全程快速微分器的 PD 控制	134
4.1.1	全程快速微分器	134
4.1.2	仿真实例	134
4.2	基于 Levant 微分器的 PID 控制	143
4.2.1	Levant 微分器	143
4.2.2	仿真实例	144
	参考文献	155
第 5 章	基于观测器的 PID 控制	156
5.1	基于慢干扰观测器补偿的 PID 控制	156
5.1.1	系统描述	156
5.1.2	观测器设计	156
5.1.3	仿真实例	157
5.2	基于指数收敛干扰观测器的 PID 控制	162
5.2.1	系统描述	163
5.2.2	指数收敛干扰观测器的问题提出	163
5.2.3	指数收敛干扰观测器的设计	163
5.2.4	PID 控制器的设计及分析	164
5.2.5	仿真实例	164
5.3	基于名义模型干扰观测器的 PID 控制	171
5.3.1	干扰观测器基本原理	171
5.3.2	干扰观测器的性能分析	172
5.3.3	干扰观测器鲁棒稳定性	173
5.3.4	低通滤波器 $Q(s)$ 的设计	175
5.3.5	仿真实例	176
5.4	基于扩张观测器的 PID 控制	181
5.4.1	扩张观测器的设计	181
5.4.2	扩张观测器的分析	181
5.4.3	仿真实例	184
5.5	基于输出延迟观测器的 PID 控制	198
5.5.1	系统描述	198

5.5.2	输出延迟观测器的设计	198
5.5.3	仿真实例	199
	参考文献	208
第 6 章	自抗扰控制器及其 PID 控制	209
6.1	非线性跟踪微分器	209
6.1.1	微分器描述	209
6.1.2	仿真实例	209
6.2	安排过渡过程及 PID 控制	214
6.2.1	安排过渡过程	214
6.2.2	仿真实例	214
6.3	基于非线性扩张观测器的 PID 控制	220
6.3.1	系统描述	220
6.3.2	非线性扩张观测器	220
6.3.3	仿真实例	221
6.4	非线性 PID 控制	233
6.4.1	非线性 PID 控制算法	233
6.4.2	仿真实例	234
6.5	自抗扰控制	236
6.5.1	自抗扰控制结构	236
6.5.2	仿真实例	237
	参考文献	246
第 7 章	PD 鲁棒自适应控制	247
7.1	稳定的 PD 控制算法	247
7.1.1	问题的提出	247
7.1.2	PD 控制律的设计	247
7.1.3	仿真实例	248
7.2	基于模型的 PI 鲁棒控制	251
7.2.1	问题的提出	251
7.2.2	PD 控制律的设计	251
7.2.3	稳定性分析	252
7.2.4	仿真实例	252
7.3	基于名义模型的机械手 PI 鲁棒控制	256
7.3.1	问题的提出	256
7.3.2	鲁棒控制律的设计	257
7.3.3	稳定性分析	257
7.3.4	仿真实例	258
7.4	基于 Anti-windup 的 PID 控制	266
7.4.1	Anti-windup 基本原理	266
7.4.2	基于 Anti-windup 的 PID 控制	266

7.4.3	仿真实例	267
7.5	基于 PD 增益自适应调节的模型参考自适应控制	271
7.5.1	问题描述	271
7.5.2	控制律的设计与分析	271
7.5.3	仿真实例	272
	参考文献	280
第 8 章	模糊 PD 控制和专家 PID 控制	281
8.1	倒立摆稳定的 PD 控制	281
8.1.1	系统描述	281
8.1.2	控制律设计	281
8.1.3	仿真实例	282
8.2	基于自适应模糊补偿的倒立摆 PD 控制	285
8.2.1	问题描述	285
8.2.2	自适应模糊控制器设计与分析	286
8.2.3	稳定性分析	287
8.2.4	仿真实例	288
8.3	基于模糊规则表的模糊 PD 控制	295
8.3.1	基本原理	295
8.3.2	仿真实例	296
8.4	模糊自适应整定 PID 控制	299
8.4.1	模糊自适应整定 PID 控制原理	299
8.4.2	仿真实例	301
8.5	专家 PID 控制	307
8.5.1	专家 PID 控制原理	307
8.5.2	仿真实例	308
	参考文献	310
第 9 章	神经网络 PID 控制	311
9.1	基于单神经网络的 PID 智能控制	311
9.1.1	几种典型的学习规则	311
9.1.2	单神经元自适应 PID 控制	311
9.1.3	改进的单神经元自适应 PID 控制	312
9.1.4	仿真实例	313
9.2	基于二次型性能指标学习算法的单神经元自适应 PID 控制	316
9.2.1	控制律的设计	316
9.2.2	仿真实例	317
9.3	基于自适应神经网络补偿的 PD 控制	320
9.3.1	问题描述	320
9.3.2	自适应神经网络设计与分析	321
9.3.3	仿真实例	323

参考文献	328
第 10 章 基于差分进化的 PID 控制	329
10.1 差分进化算法的基本原理	329
10.1.1 差分进化算法的提出	329
10.1.2 标准差分进化算法	329
10.1.3 差分进化算法的基本流程	330
10.1.4 差分进化算法的参数设置	331
10.2 基于差分进化算法的函数优化	332
10.3 基于差分进化整定的 PD 控制	335
10.3.1 基本原理	336
10.3.2 基于差分进化的 PD 整定	336
10.4 基于摩擦模型辨识和补偿的 PD 控制	340
10.4.1 摩擦模型的在线参数辨识	340
10.4.2 仿真实例	341
10.5 基于最优轨迹规划的 PID 控制	345
10.5.1 问题的提出	345
10.5.2 一个简单的样条插值实例	345
10.5.3 最优轨迹的设计	347
10.5.4 最优轨迹的优化	347
10.5.5 仿真实例	348
参考文献	354
第 11 章 伺服系统 PID 控制	355
11.1 基于 Lugre 摩擦模型的 PID 控制	355
11.1.1 伺服系统的摩擦现象	355
11.1.2 伺服系统的 LuGre 摩擦模型	355
11.1.3 仿真实例	356
11.2 基于 Stribeck 摩擦模型的 PID 控制	358
11.2.1 Stribeck 摩擦模型描述	358
11.2.2 一个典型伺服系统描述	359
11.2.3 仿真实例	359
11.3 伺服系统三环的 PID 控制	367
11.3.1 伺服系统三环的 PID 控制原理	367
11.3.2 仿真实例	368
11.4 二质量伺服系统的 PID 控制	371
11.4.1 二质量伺服系统的 PID 控制原理	371
11.4.2 仿真实例	372
11.5 伺服系统的模拟 PD+数字前馈控制	375
11.5.1 伺服系统的模拟 PD+数字前馈控制原理	375
11.5.2 仿真实例	376

参考文献	377
第 12 章 迭代学习 PID 控制	378
12.1 迭代学习控制方法介绍	378
12.2 迭代学习控制基本原理	378
12.3 基本的迭代学习控制算法	379
12.4 基于 PID 型的迭代学习控制	379
12.4.1 系统描述	379
12.4.2 控制器设计	379
12.4.3 仿真实例	380
参考文献	385
第 13 章 挠性及奇异摄动系统的 PD 控制	386
13.1 基于输入成型的挠性机械系统 PD 控制	386
13.1.1 系统描述	386
13.1.2 控制器设计	386
13.1.3 输入成型器基本原理	386
13.1.4 仿真实例	388
13.2 基于奇异摄动理论的 P 控制	393
13.2.1 问题描述	394
13.2.2 模型分解	394
13.2.3 控制律设计	394
13.2.4 仿真实例	395
13.3 柔性机械臂的偏微分方程动力学建模	398
13.3.1 柔性机械臂的控制问题	398
13.3.2 柔性机械臂的偏微分方程建模	398
13.4 柔性机械臂分布式参数边界控制	402
13.4.1 模型描述	402
13.4.2 边界 PD 控制律设计	403
13.4.3 仿真实例	405
参考文献	412
第 14 章 机械手 PID 控制	413
14.1 机械手独立 PD 控制	413
14.1.1 控制律设计	413
14.1.2 收敛性分析	413
14.1.3 仿真实例	413
14.2 工作空间中机械手末端轨迹 PD 控制	417
14.2.1 工作空间直角坐标与关节角位置的转换	418
14.2.2 机械手在工作空间的建模	419
14.2.3 PD 控制器的设计	419
14.2.4 仿真实例	420

14.3	工作空间中机械手末端的阻抗 PD 控制	426
14.3.1	问题的提出	426
14.3.2	阻抗模型的建立	427
14.3.3	控制器的设计	428
14.3.4	仿真实例	428
14.4	移动机器人的 P+前馈控制	438
14.4.1	移动机器人运动学模型	439
14.4.2	位置控制律设计	439
14.4.3	姿态控制律设计	440
14.4.4	闭环系统的设计关键	441
14.4.5	仿真实例	441
	参考文献	448
第 15 章	飞行器双闭环 PD 控制	450
15.1	基于双环设计的 VTOL 飞行器轨迹跟踪 PD 控制	450
15.1.1	VTOL 模型描述	450
15.1.2	针对第一个子系统的控制	451
15.1.3	针对第二个子系统的控制	452
15.1.4	仿真实例	452
15.2	基于内外环的四旋翼飞行器的 PD 控制	459
15.2.1	四旋翼飞行器动力学模型	459
15.2.2	位置控制律设计	460
15.2.3	虚拟姿态角度的求解	461
15.2.4	姿态控制律设计	462
15.2.5	闭环系统的设计关键	463
15.2.6	仿真实例	464
	参考文献	473
第 16 章	小车倒立摆系统的控制及 GUI 动画演示	474
16.1	小车倒立摆的 H_∞ 控制	474
16.1.1	系统描述	474
16.1.2	H_∞ 控制器要求	475
16.1.3	基于 Riccati 方程的 H_∞ 控制	475
16.1.4	LMI 及其 MATLAB 求解	476
16.1.5	基于 LMI 的 H_∞ 控制	477
16.1.6	仿真实例	477
16.2	单级倒立摆控制系统的 GUI 动画演示	485
16.2.1	GUI 介绍	485
16.2.2	演示程序的构成	485
16.2.3	主程序的实现	485
16.2.4	演示界面的 GUI 设计	486