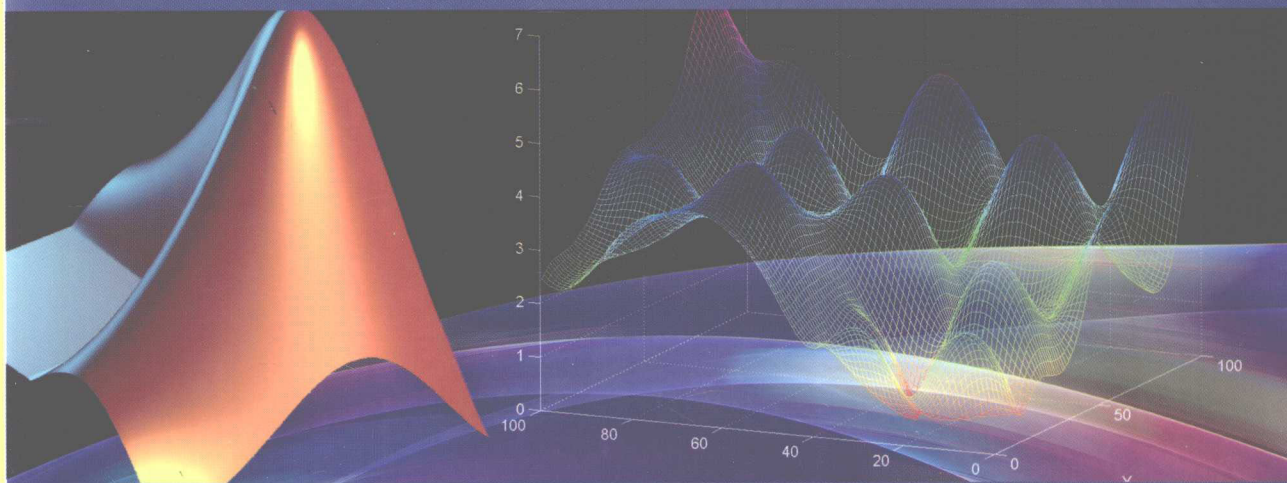


电子工程技术丛书

先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第3版)

● 刘金琨 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

先进 PID 控制 MATLAB 仿真

(第 3 版)

刘金琨 编著

電子工業出版社

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 14 章,包括基本的 PID 控制、PID 控制器的整定、时滞系统的 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、模糊 PD 控制和专家 PID 控制、神经 PID 控制、基于遗传算法整定的 PID 控制、伺服系统 PID 控制、迭代学习 PID 控制其他控制方法的设计与仿真,以及 PID 实时控制的 C++语言设计及应用。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. —3 版. —北京:电子工业出版社,2011.3

(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-13049-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 039369 号

策划编辑:赵丽松

责任编辑:李雪梅

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:30 字数:768 千字

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:59.80 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。

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。

服务热线:(010)88258888。

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，程序结构设计力求简单明了，便于自学和进一步开发。

本书共分 14 章。第 1 章介绍了连续系统 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，包括挠性航天器稳定 PD 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 RBF 神经网络整定的 PID 控制和基于自适应神经网络补偿的倒立摆 PD 控制；第 10 章介绍了基于遗传算法的 PID 控制，主要包括基于遗传算法整定的 PID 控制和基于遗传算法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 章介绍了其他控制方法，针对每种方法给出了实例说明；第 14 章介绍了 PID 在实时控制中的应用实例，并给出了相应的 Borland C++ 语言实时控制程序。

本书是基于 MATLAB 7.1 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和薛定宇教授给予了大力支持和帮助，北京航空航天大学林岩教授和全权博士也给予了帮助，在此一并表示感谢。

作者在控制系统的分析中，有许多方面得益于与研究生的探讨，这些研究生包括孔建、卢宇、贺庆、郑明慧、张琳军、李晓光等，在此表示感谢。

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
2010 年 7 月 30 日

再版说明

本书在第 2 版的基础上主要增加了以下内容：PID 控制器的整定、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、自适应模糊补偿 PD 控制、自适应神经网络补偿 PD 控制、迭代学习 PID 控制及其他控制方法的介绍，给出了基于 GUI 的倒立摆控制动画演示，并针对第 2 版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”、“工业过程控制”和“系统辨识”等课程。研究方向为控制理论与应用。自从事研究工作以来，主持国家自然科学基金等科研项目10余项，以第一作者发表学术论文70余篇。曾出版《智能控制》、《先进PID控制及其MATLAB仿真》、《机器人控制系统的设计与MATLAB仿真》、《滑模变结构控制MATLAB仿真》和《微分器设计与应用——信号滤波与求导》等著作。

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	19
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	27
1.3.6 抗积分饱和 PID 控制算法及仿真	32
1.3.7 梯形积分 PID 控制算法	35
1.3.8 变速积分 PID 算法及仿真	35
1.3.9 带滤波器的 PID 控制仿真	39
1.3.10 不完全微分 PID 控制算法及仿真	45
1.3.11 微分先行 PID 控制算法及仿真	49
1.3.12 带死区的 PID 控制算法及仿真	52
1.3.13 基于前馈补偿的 PID 控制算法及仿真	56
1.3.14 步进式 PID 控制算法及仿真	59
1.3.15 PID 控制的方波响应	61
1.3.16 基于卡尔曼滤波器的 PID 控制	64
1.4 S 函数介绍	73
1.4.1 S 函数简介	73
1.4.2 S 函数使用步骤	73
1.4.3 S 函数的基本功能及重要参数设定	73
1.4.4 实例说明	74
1.5 PID 研究新进展	74
第 2 章 PID 控制器的整定	76
2.1 概述	76
2.2 基于响应曲线法的 PID 整定	76
2.2.1 基本原理	76
2.2.2 仿真实例	77
2.3 基于 Ziegler-Nichols 的频域响应 PID 整定	81
2.3.1 连续 Ziegler-Nichols 方法的 PID 整定	81

2.3.2	仿真实例.....	81
2.3.3	离散 Ziegler-Nichols 方法的 PID 整定	84
2.3.4	仿真实例.....	84
2.4	基于频域分析的 PD 整定.....	88
2.4.1	基本原理.....	88
2.4.2	仿真实例.....	88
2.5	基于相位裕度整定的 PI 控制	91
2.5.1	基本原理.....	91
2.5.2	仿真实例.....	94
2.6	基于极点配置的稳定 PD 控制.....	95
2.6.1	基本原理.....	95
2.6.2	仿真实例.....	96
2.7	基于临界比例度法的 PID 整定	98
2.7.1	基本原理.....	98
2.7.2	仿真实例.....	99
2.8	一类非线性整定的 PID 控制	101
2.8.1	基本原理.....	101
2.8.2	仿真实例.....	103
2.9	基于优化函数的 PID 整定	105
2.9.1	基本原理.....	105
2.9.2	仿真实例.....	105
2.10	基于 NCD 优化的 PID 整定	107
2.10.1	基本原理.....	107
2.10.2	仿真实例.....	107
2.11	基于 NCD 与优化函数结合的 PID 整定	111
2.11.1	基本原理.....	111
2.11.2	仿真实例.....	111
2.12	传递函数的频域测试.....	113
2.12.1	基本原理.....	113
2.12.2	仿真实例.....	114
第 3 章	时滞系统的 PID 控制	117
3.1	单回路 PID 控制系统	117
3.2	串级 PID 控制	117
3.2.1	串级 PID 控制原理	117
3.2.2	仿真实例.....	118
3.3	纯滞后系统的大林控制算法.....	122
3.3.1	大林控制算法原理.....	122
3.3.2	仿真实例.....	122
3.4	纯滞后系统的 Smith 控制算法	124
3.4.1	连续 Smith 预估控制.....	125

3.4.2	仿真实例.....	126
3.4.3	数字 Smith 预估控制.....	128
3.4.4	仿真实例.....	129
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 PID 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
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	基于干扰观测器的 PID 控制.....	162
5.2.1	干扰观测器基本原理.....	162
5.2.2	干扰观测器的性能分析.....	164
5.2.3	干扰观测器鲁棒稳定性.....	166
5.2.4	低通滤波器 $Q(s)$ 的设计.....	167
5.2.5	仿真实例.....	168
5.3	基于扩张观测器的 PID 控制.....	172
5.3.1	扩张观测器的设计.....	172
5.3.2	扩张观测器的分析.....	173
5.3.3	仿真实例.....	175
5.4	基于输出延迟观测器的 PID 控制.....	189
5.4.1	系统描述.....	189
5.4.2	输出延迟观测器的设计.....	189
5.4.3	延迟观测器的分析.....	190
5.4.4	仿真实例.....	191
第 6 章	自抗扰控制器及其 PID 控制.....	201
6.1	非线性跟踪微分器.....	201
6.1.1	微分器描述.....	201
6.1.2	仿真实例.....	201
6.2	安排过渡过程及 PID 控制.....	205
6.2.1	安排过渡过程.....	205
6.2.2	仿真实例.....	206
6.3	基于非线性扩张观测器的 PID 控制.....	212
6.3.1	系统描述.....	212
6.3.2	非线性扩张观测器.....	212

6.3.3	仿真实例.....	213
6.4	非线性 PID 控制.....	225
6.4.1	非线性 PID 控制算法.....	225
6.4.2	仿真实例.....	225
6.5	自抗扰控制.....	228
6.5.1	自抗扰控制结构.....	228
6.5.2	仿真实例.....	228
第 7 章	PD 鲁棒自适应控制.....	239
7.1	挠性航天器稳定 PD 鲁棒控制.....	239
7.1.1	挠性航天器建模.....	239
7.1.2	PD 控制器的设计.....	240
7.1.3	仿真实例.....	240
7.2	基于名义模型的机械手 PI 鲁棒控制.....	245
7.2.1	问题的提出.....	245
7.2.2	鲁棒控制律的设计.....	246
7.2.3	稳定性分析.....	246
7.2.4	仿真实例.....	247
7.3	基于 Anti-windup 的 PID 控制.....	255
7.3.1	Anti-windup 基本原理.....	255
7.3.2	基于 Anti-windup 的 PID 控制.....	255
7.3.3	仿真实例.....	256
7.4	基于 PD 增益自适应调节的模型参考自适应控制.....	259
7.4.1	问题描述.....	259
7.4.2	控制律的设计与分析.....	260
7.4.3	仿真实例.....	261
第 8 章	模糊 PD 控制和专家 PID 控制.....	270
8.1	倒立摆稳定的 PD 控制.....	270
8.1.1	系统描述.....	270
8.1.2	控制律设计.....	270
8.1.3	仿真实例.....	271
8.2	基于自适应模糊补偿的倒立摆 PD 控制.....	274
8.2.1	问题描述.....	274
8.2.2	自适应模糊控制器设计与分析.....	275
8.2.3	稳定性分析.....	276
8.2.4	仿真实例.....	277
8.3	基于模糊规则表的模糊 PD 控制.....	284
8.3.1	基本原理.....	284
8.3.2	仿真实例.....	285
8.4	模糊自适应整定 PID 控制.....	288
8.4.1	模糊自适应整定 PID 控制原理.....	288

8.4.2	仿真实例.....	291
8.5	专家 PID 控制.....	296
8.5.1	专家 PID 控制原理.....	296
8.5.2	仿真实例.....	297
第 9 章	神经 PID 控制.....	301
9.1	基于单神经网络的 PID 智能控制.....	301
9.1.1	几种典型的学习规则.....	301
9.1.2	单神经元自适应 PID 控制.....	301
9.1.3	改进的单神经元自适应 PID 控制.....	302
9.1.4	仿真实例.....	303
9.1.5	基于二次型性能指标学习算法的单神经元自适应 PID 控制.....	305
9.1.6	仿真实例.....	306
9.2	基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制.....	309
9.2.1	RBF 神经网络模型.....	309
9.2.2	RBF 网络 PID 整定原理.....	310
9.2.3	仿真实例.....	311
9.3	基于自适应神经网络补偿的倒立摆 PD 控制.....	316
9.3.1	问题描述.....	316
9.3.2	自适应神经网络设计与分析.....	316
9.3.3	仿真实例.....	319
第 10 章	基于遗传算法整定的 PID 控制.....	325
10.1	遗传算法的基本原理.....	325
10.2	遗传算法的优化设计.....	326
10.2.1	遗传算法的构成要素.....	326
10.2.2	遗传算法的应用步骤.....	326
10.3	遗传算法求函数极大值.....	327
10.3.1	二进制编码遗传算法求函数极大值.....	327
10.3.2	实数编码遗传算法求函数极大值.....	331
10.4	基于遗传算法的 PID 整定.....	334
10.4.1	基于遗传算法的 PID 整定原理.....	335
10.4.2	基于实数编码遗传算法的 PID 整定.....	337
10.4.3	基于二进制编码遗传算法的 PID 整定.....	341
10.4.4	基于自适应在线遗传算法整定的 PD 控制.....	347
10.5	基于摩擦模型补偿的 PD 控制.....	352
10.5.1	摩擦模型辨识.....	352
10.5.2	仿真实例.....	353
第 11 章	伺服系统 PID 控制.....	359
11.1	基于 LuGre 摩擦模型的 PID 控制.....	359
11.1.1	伺服系统的摩擦现象.....	359
11.1.2	伺服系统的 LuGre 摩擦模型.....	359

11.1.3	仿真实例	360
11.2	基于 Stribeck 摩擦模型的 PID 控制	362
11.2.1	Stribeck 摩擦模型描述	362
11.2.2	一个典型伺服系统描述	363
11.2.3	仿真实例	364
11.3	伺服系统三环的 PID 控制	371
11.3.1	伺服系统三环的 PID 控制原理	371
11.3.2	仿真实例	372
11.4	二质量伺服系统的 PID 控制	375
11.4.1	二质量伺服系统的 PID 控制原理	375
11.4.2	仿真实例	377
11.5	伺服系统的模拟 PD+数字前馈控制	379
11.5.1	伺服系统的模拟 PD+数字前馈控制原理	379
11.5.2	仿真实例	380
第 12 章	迭代学习 PID 控制	382
12.1	迭代学习控制方法介绍	382
12.2	迭代学习控制基本原理	382
12.3	基本的迭代学习控制算法	383
12.4	基于 PID 型的迭代学习控制	383
12.4.1	系统描述	383
12.4.2	控制器设计	384
12.4.3	仿真实例	384
第 13 章	其他控制方法的设计与仿真	390
13.1	单级倒立摆建模	390
13.2	倒立摆 PD 控制	391
13.2.1	系统描述	391
13.2.2	仿真实例	391
13.3	单级倒立摆的全状态反馈控制	394
13.3.1	系统描述	394
13.3.2	全状态反馈控制	395
13.3.3	仿真实例	395
13.4	输入/输出反馈线性化	403
13.4.1	系统描述	403
13.4.2	控制律设计	404
13.4.3	仿真实例	404
13.5	倒立摆反演控制	408
13.5.1	系统描述	408
13.5.2	控制律设计	408
13.5.3	仿真实例	409
13.6	倒立摆滑模控制	413

13.6.1	问题描述.....	413
13.6.2	控制律设计.....	413
13.6.3	仿真实例.....	414
13.7	自适应鲁棒控制.....	419
13.7.1	问题的提出.....	419
13.7.2	自适应控制律的设计.....	419
13.7.3	仿真实例.....	420
13.8	单级倒立摆的 H_∞ 控制.....	427
13.8.1	系统描述.....	427
13.8.2	H_∞ 控制器要求.....	428
13.8.3	基于 Riccati 方程的 H_∞ 控制.....	429
13.8.4	基于 LMI 的 H_∞ 控制.....	429
13.8.5	仿真实例.....	431
13.9	基于 GUI 的倒立摆控制动画演示.....	438
13.9.1	GUI 介绍.....	438
13.9.2	演示程序的构成.....	439
13.9.3	主程序的实现.....	439
13.9.4	演示界面的 GUI 设计.....	439
13.9.5	演示步骤.....	440
第 14 章	PID 实时控制的 C++ 语言 设计及应用.....	442
14.1	控制系统仿真的 C++ 实现.....	442
14.2	基于 C++ 的三轴飞行模拟转台伺服系统 PID 实时控制.....	444
14.2.1	控制系统构成.....	445
14.2.2	实时控制程序分析.....	445
14.2.3	仿真实例.....	449
附录 A	常用符号说明.....	459
参考文献	460

第 1 章 基本的 PID 控制

自从计算机进入控制领域以来，用数字计算机代替模拟计算机调节器组成计算机控制系统，不仅可以用软件实现 PID 控制算法，而且可以利用计算机的逻辑功能，使 PID 控制更加灵活。数字 PID 控制在生产过程中是一种最普遍采用的控制方法，在机电、冶金、机械、化工等行业中获得了广泛的应用。将偏差的比例（P）、积分（I）和微分（D）通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，故称 PID 控制器。



1.1 PID 控制原理

在模拟控制系统中，控制器最常用的控制规律是 PID 控制。模拟 PID 控制系统原理框图如图 1-1 所示。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成。

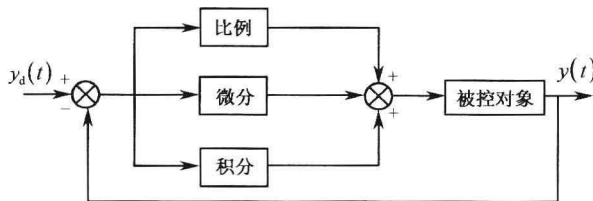


图 1-1 模拟 PID 控制系统原理框图

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $y_d(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差

$$\text{error}(t) = y_d(t) - y(t) \quad (1.1)$$

PID 的控制规律为

$$u(t) = k_p \left[\text{error}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \text{error}(t) dt + \frac{T_D d\text{error}(t)}{dt} \right] \quad (1.2)$$

或写成传递函数的形式

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (1.3)$$

式中， k_p ——比例系数； T_i ——积分时间常数； T_D ——微分时间常数。

简单来说，PID 控制器各校正环节的作用如下。

(1) 比例环节：成比例地反映控制系统的偏差信号 $\text{error}(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减小偏差。

(2) 积分环节：主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越大，积分作用越弱，反之则越强。

(3) 微分环节：反映偏差信号的变化趋势（变化速率），并能在偏差信号变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。



1.2 连续系统的模拟 PID 仿真

1.2.1 基本的 PID 控制

以二阶线性传递函数 $\frac{133}{s^2 + 25s}$ 为被控对象，进行模拟 PID 控制。在信号发生器中选择正弦信号，仿真时取 $k_p = 60$ ， $k_i = 1$ ， $k_d = 3$ ，输入指令为 $y_d(t) = A\sin(2\pi Ft)$ ，其中 $A = 1.0$ ， $F = 0.20\text{Hz}$ 。采用 ODE45 迭代方法，仿真时间为 10s。

仿真之一：连续系统 PID 的 Simulink 仿真

PID 控制器由 Simulink 下的工具箱提供。

仿真程序：chap1_1.mdl (见图 1-2 和图 1-3)

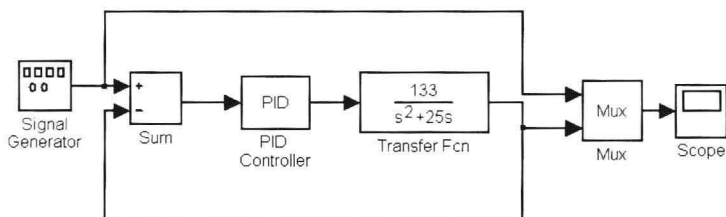


图 1-2 连续系统 PID 控制 Simulink 仿真程序

在 PID 控制器采用 Simulink 封装的形式，其内部结构如图 1-3 所示。

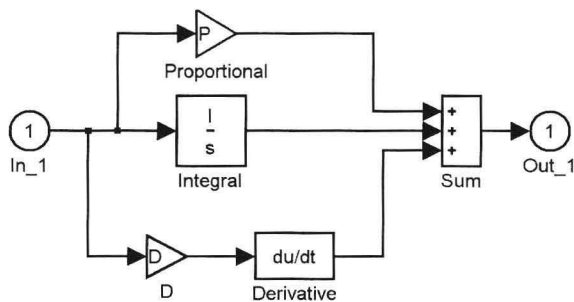


图 1-3 模拟 PID 控制器

连续系统的模拟 PID 控制正弦响应结果如图 1-4 所示。

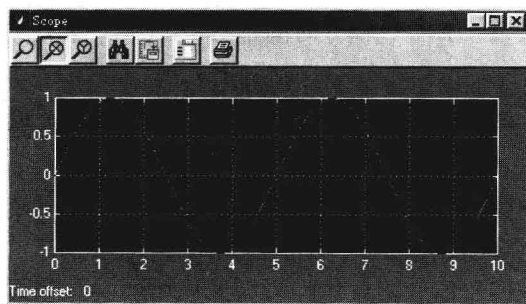


图 1-4 连续系统的模拟 PID 控制正弦响应



仿真之二：连续系统 PID 的 Simulink 仿真

在仿真一的基础上，将仿真结果输出到工作空间中，利用 M 语言作图，仿真结果如图 1-5 所示。

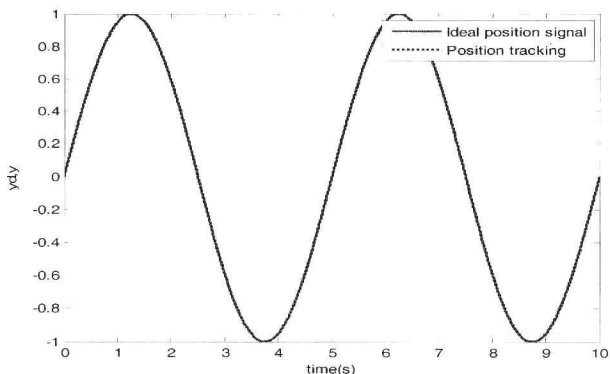


图 1-5 PID 控制正弦响应

仿真程序：chap1_2.mdl（见图 1-6）

程序中同时采用了传递函数 $\frac{133}{s^2 + 25s}$ 的另一种表达方式，即状态方程的形式，其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -25 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 133 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0], \quad D = 0.$$

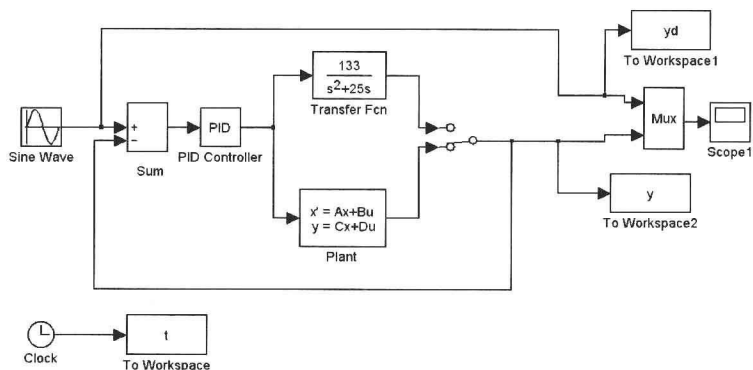


图 1-6 连续系统 PID 控制 Simulink 仿真程序

作图程序：chap1_2plot.m

```
close all;

plot(t,yd(:,1),'r',t,y(:,1),'k','linewidth',2);
xlabel('time(s));ylabel('yd,y');
legend('Ideal position signal','Position tracking');
```

仿真之三：采用 S 函数实现 Simulink 仿真

仍以二阶线性传递函数为被控对象，进行模拟 PID 控制。被控对象形式为 $\frac{a}{s^2 + bs}$ ，其中 b 在 $[103,163]$ 范围内随机变化， a 在 $[15,35]$ 范围内随机变化，则被控对象的描述方式可转换