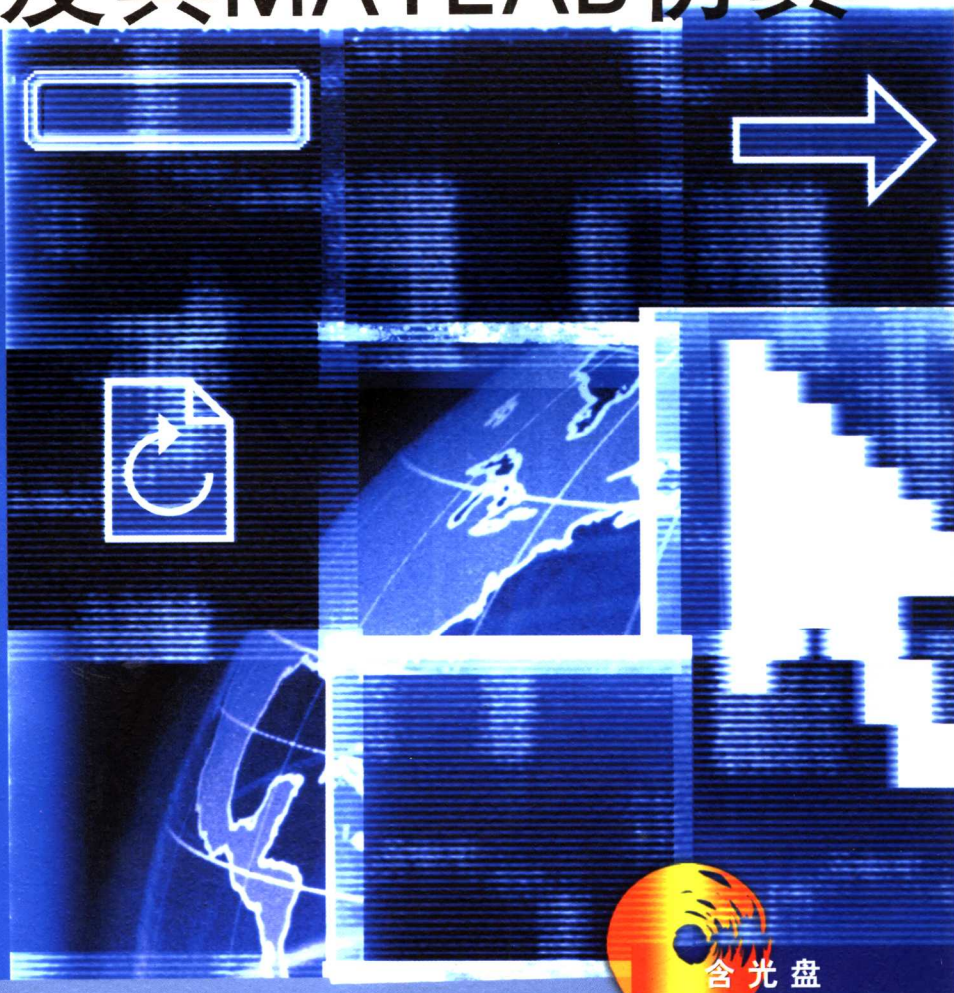


国家自然科学基金 航空基金 资助项目

# 先进PID控制 及其MATLAB仿真

刘金琨 著



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

国家自然科学基金  
航空基金 资助项目

# 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真

刘金琨 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从 MATLAB 仿真角度系统地介绍了 PID 控制的基本理论、基本方法和应用技术,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新成果。

全书共分 10 章,包括连续系统和离散系统的 PID 控制;常用数字 PID 控制;专家 PID 和模糊 PID 控制;神经 PID 控制;遗传算法 PID 控制;多变量解耦 PID 控制;几种先进的 PID 控制;灰色 PID 控制;伺服系统 PID 控制;PID 实时控制等内容。每种方法都通过 MATLAB 仿真程序进行了说明,所有仿真程序均存储在光盘中,读者可以直接调用。

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及研究生阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、机械电子、自动化仪表以及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 控制及其 MATLAB 仿真/刘金琨著. —北京:电子工业出版社,2003.1  
ISBN 7-5053-8427-9

I. 先… II. 刘… III. ①PID 控制 ②计算机辅助计算-软件包, MATLAB IV. ①TP273 ②TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 110541 号

责任编辑:龚兰方

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:506 千字 附光盘:1 张

版 次:2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:36.00 元(含光盘)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话:(010)68279077

## 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
$r, rin$	输入理想信号
$y, yout$	输出信号
$\theta$	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
$\eta$	学习速率
$\alpha$	惯性量
$S$	信号选择变量

## 序 言

在实际的过程控制与运动控制系统中，PID 家族占有相当的地位，据统计，工业控制的控制器中 PID 类控制器占有 90% 以上 (K J Åström and T. Hägglund. *PID Controllers. Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, 1995)。PID 控制器是最早出现的控制器类型，因为其结构简单，各个控制器参数有着明显的物理意义，调整方便，所以这类控制器很受工程技术人员的喜爱。此外，随着控制理论的发展，出现了各种分支，如专家系统、模糊逻辑、神经网络、灰色系统理论等，它们和传统的 PID 控制策略相结合又派生出各种新型的 PID 类控制器，形成庞大的 PID 家族，很多算法大大改进了传统 PID 控制器的性能。

拜读了刘金琨博士的新作《先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真》，顿觉耳目一新。国际上近年有大量的文章介绍各种新型的 PID 控制系统，也出现了一些介绍 PID 控制的专著，和同类专著相比较，这部力作有如下特色：

- **内容新颖：**以新型的 PID 控制器为主加以介绍，包括一般连续及离散的 PID 控制器、专家系统整定的 PID 控制器、模糊逻辑 PID 控制器、各种神经网络 PID 控制器、基于遗传算法整定的 PID 控制器、多变量解耦 PID 控制器、非线性鲁棒 PID 控制器、灰色 PID 控制器，这是 PID 类专著中较少见的。
- **系统性强：**在介绍各种算法时，首先较好地介绍其理论背景，然后通过例子介绍该 PID 控制器设计与仿真，展示仿真效果，很有说服力。本书选材较全面，内容深入浅出，易于理解和直接应用。
- **计算机实现直观实用：**每种介绍的算法均有 MATLAB 语言实现，适合于通用化，用户可以对所附的程序稍作修改，就可以直接解决自己的控制器设计与仿真问题，这也往往是其他专著所缺乏的。
- **直接面向工程应用：**介绍了 MATLAB/Simulink 模型的 C 语言转换和工程应用，很有实际应用的价值。

本书作者多年来一直从事 PID 控制类的研究与教学，积累了大量的经验和第一手材料，取材恰当，叙述清晰，结构合理，适合于工程应用和理论研究。

本人在评审博士、硕士论文时经常发现，许多学生往往将自己的控制算法与策略和传统的 PID 控制算法相比较，来演示自己算法的优越性。这样的比较有时有些偏颇，因为论文中的算法常常和目前公认的效果不佳的 Ziegler-Nichols 整定算法比较，所以本人认为这样的比较很不客观，因为他们比较的对象不是最好的 PID 控制器。此外，由于其他新型 PID 控制器实现与仿真的代码十分匮乏，也极大地影响了研究者选择适当比较的对象。相信这部著作及其所编写的程序可以作为 PID 控制领域的标准，也可以作为论文中算法比较的参照物。

众所周知，MATLAB 在控制界之所以成为最受欢迎的语言，除了有其自身在科学运算与可视化方面的优势外，最大的特点还在于其开放性，正因为这个原因，许多控制界的名家编写出各种各样的工具箱，这些工具箱已经成为各自领域的标准。迄今为止，尚没有被广泛认可的关于 PID 控制器的工具箱，所以可以预见，如果对本书中的程序进行较好的封装，

并适当地扩充，将有望形成很有竞争力的 PID 工具箱，在国际上也将有很大的影响。

综上所述，本书是在 PID 控制器设计与实现领域的不可多得的优秀著作，故不揣冒昧，为本著作写此序言，乐于将其推荐给国内的同行和学生，望引起国内 PID 控制的研究者与应用者的注意，推进 PID 类控制器在我国的实际应用。

薛定宇 谨识

2002年12月2日于东北大学

# 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, 其特点是:

(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, 程序设计结构设计力求简单明了, 便于自学和进一步开发。

本书共分 10 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 章介绍了常用的数字 PID 控制系统, 主要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 3 章介绍了专家 PID 和模糊 PID 整定的基本算法和程序设计方法, 其中模糊 PID 包括模糊自适应整定 PID 控制和模糊免疫 PID 控制算法, 并进行了仿真分析; 第 4 章介绍了神经网络 PID 的几种方法, 包括单神经网络 PID 的设计、神经网络并行 PID 控制、PID 的几种神经网络整定方法, 并通过仿真进行了说明; 第 5 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 6 章介绍了多变量解耦 PID 控制的几种方法, 主要包括 PID 解耦控制、基于单神经元 PID 解耦控制和基于 DRNN 神经网络整定的 PID 解耦控制; 第 7 章介绍了几种先进的 PID 控制算法, 包括基于干扰观测器的 PID 鲁棒控制、基于 NCD 优化的非线性 PID 控制、非线性参数整定的 PID 控制、基于重复控制的 PID 高精度控制、基于零相差前馈补偿的 PID 控制和基于卡尔曼滤波的 PID 控制, 每种方法都通过仿真程序进行了说明; 第 8 章介绍了灰色 PID 控制算

法和仿真方法, 包括基于连续系统的灰色 PID 控制和基于离散系统的灰色 PID 控制; 第 9 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, 并进行了仿真说明; 第 10 章介绍了 PID 在实时控制中的应用实例, 并给出了 PID 控制的 MATLAB 程序和相应的 Borland C++ 语言实时控制程序。

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。

本书由北京航空航天大学尔联浩教授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, 薛定宇教授还提出了许多宝贵建议, 在此一并表示感谢。

作者在仿真研究中, 得到实验室许多同仁的帮助。在神经网络设计方面得到扈宏杰博士的帮助, 在遗传算法和零相差设计等方面得到刘强博士的帮助, 在灰色系统设计方面得到李水清硕士的帮助, 在 PID 实时控制方面得到刘涛硕士的帮助, 在此一一表示感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(编号: 69874037)和航空基金(编号: 00E51022)的资助。

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  
2003 年 1 月 3 日



# 目 录

<b>第 1 章 数字 PID 控制</b> .....	(1)
1.1 PID 控制原理 .....	(1)
1.2 连续系统的模拟 PID 仿真 .....	(2)
1.3 数字 PID 控制 .....	(2)
1.3.1 位置式 PID 控制算法 .....	(3)
1.3.2 连续系统的数字 PID 控制仿真 .....	(3)
1.3.3 离散系统的数字 PID 控制仿真 .....	(7)
1.3.4 增量式 PID 控制算法及仿真 .....	(13)
1.3.5 积分分离 PID 控制算法及仿真 .....	(15)
1.3.6 抗积分饱和 PID 控制算法及仿真 .....	(18)
1.3.7 梯形积分 PID 控制算法 .....	(21)
1.3.8 变速积分 PID 算法及仿真 .....	(22)
1.3.9 带滤波器的 PID 控制仿真 .....	(25)
1.3.10 不完全微分 PID 控制算法及仿真 .....	(30)
1.3.11 微分先行 PID 控制算法及仿真 .....	(34)
1.3.12 带死区的 PID 控制算法及仿真 .....	(38)
1.3.13 基于前馈补偿的 PID 控制算法及仿真 .....	(42)
1.3.14 步进式 PID 控制算法及仿真 .....	(45)
<b>第 2 章 常用的 PID 控制系统</b> .....	(49)
2.1 单回路 PID 控制系统 .....	(49)
2.2 串级 PID 控制 .....	(49)
2.2.1 串级 PID 控制原理 .....	(49)
2.2.2 仿真程序及分析 .....	(50)
2.3 纯滞后系统的大林控制算法 .....	(53)
2.3.1 大林控制算法原理 .....	(53)
2.3.2 仿真程序及分析 .....	(53)
2.4 纯滞后系统的 Smith 控制算法 .....	(55)
2.4.1 连续 Smith 预估控制 .....	(55)
2.4.2 仿真程序及分析 .....	(57)
2.4.3 数字 Smith 预估控制 .....	(58)
2.4.4 仿真程序及分析 .....	(59)
<b>第 3 章 专家 PID 控制和模糊 PID 控制</b> .....	(63)
3.1 专家 PID 控制 .....	(63)
3.1.1 专家 PID 控制原理 .....	(63)
3.1.2 仿真程序及分析 .....	(64)

3.2	模糊自适应整定 PID 控制	(67)
3.2.1	模糊自适应整定 PID 控制原理	(67)
3.2.2	仿真程序及分析	(70)
3.3	模糊免疫 PID 控制算法	(81)
3.3.1	模糊免疫 PID 控制算法原理	(81)
3.3.2	仿真程序及分析	(82)
<b>第 4 章</b>	<b>神经 PID 控制</b>	(87)
4.1	基于单神经网络的 PID 智能控制	(87)
4.1.1	几种典型的学习规则	(87)
4.1.2	单神经元自适应 PID 控制	(87)
4.1.3	改进的单神经元自适应 PID 控制	(88)
4.1.4	仿真程序及分析	(88)
4.1.5	基于二次型性能指标学习算法的单神经元自适应 PID 控制	(92)
4.1.6	仿真程序及分析	(93)
4.2	基于 BP 神经网络整定的 PID 控制	(96)
4.2.1	基于 BP 神经网络的 PID 整定原理	(96)
4.2.2	仿真程序及分析	(98)
4.3	基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制	(104)
4.3.1	RBF 神经网络模型	(104)
4.3.2	RBF 网络 PID 整定原理	(106)
4.3.3	仿真程序及分析	(106)
4.4	基于 RBF 神经网络辨识的单神经元 PID 模型参考自适应控制	(112)
4.4.1	神经网络模型参考自适应控制原理	(112)
4.4.2	仿真程序及分析	(112)
4.5	基于 CMAC (神经网络) 与 PID 的并行控制	(117)
4.5.1	CMAC 概述	(117)
4.5.2	CMAC 与 PID 复合控制算法	(119)
4.5.3	仿真程序及分析	(120)
4.6	CMAC 与 PID 并行控制的 Simulink 仿真	(125)
4.6.1	Simulink 仿真方法	(125)
4.6.2	仿真程序及分析	(125)
<b>第 5 章</b>	<b>基于遗传算法整定的 PID 控制</b>	(130)
5.1	遗传算法的基本原理	(130)
5.2	遗传算法的优化设计	(131)
5.2.1	遗传算法的构成要素	(131)
5.2.2	遗传算法的应用步骤	(131)
5.3	遗传算法求函数极大值	(132)
5.3.1	遗传算法求函数极大值实例	(132)
5.3.2	仿真程序	(133)
5.4	基于遗传算法的 PID 整定	(136)

5.4.1	基于遗传算法的 PID 整定原理	(137)
5.4.2	基于实数编码遗传算法的 PID 整定	(138)
5.4.3	仿真程序	(140)
5.4.4	基于二进制编码遗传算法的 PID 整定	(144)
5.4.5	仿真程序	(145)
5.5	基于遗传算法摩擦模型参数辨识的 PID 控制	(149)
5.5.1	仿真实例	(149)
5.5.2	仿真程序	(150)
<b>第 6 章</b>	<b>先进 PID 多变量解耦控制</b>	<b>(156)</b>
6.1	PID 多变量解耦控制	(156)
6.1.1	PID 解耦控制原理	(156)
6.1.2	仿真程序及分析	(156)
6.2	单神经元 PID 解耦控制	(159)
6.2.1	单神经元 PID 解耦控制原理	(159)
6.2.2	仿真程序及分析	(160)
6.3	基于 DRNN 神经网络整定的 PID 解耦控制	(164)
6.3.1	基于 DRNN 神经网络参数自学习 PID 解耦控制原理	(164)
6.3.2	DRNN 神经网络的 Jacobian 信息辨识	(165)
6.3.3	仿真程序及分析	(166)
<b>第 7 章</b>	<b>几种先进 PID 控制方法</b>	<b>(176)</b>
7.1	基于干扰观测器的 PID 控制	(176)
7.1.1	干扰观测器设计原理	(176)
7.1.2	连续系统的控制仿真	(178)
7.1.3	离散系统的控制仿真	(180)
7.2	非线性系统的 PID 鲁棒控制	(186)
7.2.1	基于 NCD 优化的非线性优化 PID 控制	(186)
7.2.2	基于 NCD 与优化函数结合的非线性优化 PID 控制	(188)
7.3	一类非线性 PID 控制器设计	(189)
7.3.1	非线性控制器设计原理	(189)
7.3.2	仿真程序及分析	(190)
7.4	基于重复控制补偿的高精度 PID 控制	(196)
7.4.1	重复控制原理	(196)
7.4.2	基于重复控制补偿的 PID 控制	(197)
7.4.3	仿真程序及分析	(197)
7.5	基于零相差前馈补偿的 PID 控制	(202)
7.5.1	零相差控制原理	(202)
7.5.2	基于零相差前馈补偿的 PID 控制	(204)
7.5.3	仿真程序及分析	(205)
7.6	基于卡尔曼滤波器的 PID 控制	(217)
7.6.1	卡尔曼滤波器原理	(217)

7.6.2	仿真程序及分析 .....	(218)
7.6.3	基于卡尔曼滤波器的 PID 控制 .....	(221)
7.6.4	仿真程序及分析 .....	(221)
7.7	单级倒立摆的 PID 控制 .....	(224)
7.7.1	单级倒立摆建模 .....	(224)
7.7.2	单级倒立摆控制 .....	(226)
7.7.3	仿真程序及分析 .....	(226)
7.8	吊车-双摆系统的控制 .....	(231)
7.8.1	吊车-双摆系统的建模 .....	(231)
7.8.2	吊车-双摆系统的仿真 .....	(232)
<b>第 8 章</b>	<b>灰色 PID 控制 .....</b>	<b>(238)</b>
8.1	灰色控制原理 .....	(238)
8.1.1	生成数列 .....	(238)
8.1.2	GM 灰色模型 .....	(239)
8.2	灰色 PID 控制 .....	(239)
8.2.1	灰色 PID 控制的理论基础 .....	(239)
8.2.2	连续系统灰色 PID 控制 .....	(241)
8.2.3	仿真程序及分析 .....	(242)
8.2.4	离散系统灰色 PID 控制 .....	(246)
8.2.5	仿真程序及分析 .....	(248)
8.3	灰色 PID 的位置跟踪 .....	(252)
8.3.1	连续系统灰色 PID 位置跟踪 .....	(252)
8.3.2	仿真程序及分析 .....	(254)
8.3.3	离散系统灰色 PID 位置跟踪 .....	(257)
8.3.4	仿真程序及分析 .....	(259)
<b>第 9 章</b>	<b>伺服系统 PID 控制 .....</b>	<b>(263)</b>
9.1	伺服系统低速摩擦条件下 PID 控制 .....	(263)
9.1.1	Stribeck 摩擦模型描述 .....	(263)
9.1.2	一个典型伺服系统描述 .....	(263)
9.1.3	仿真程序及分析 .....	(264)
9.2	伺服系统三环的 PID 控制 .....	(271)
9.2.1	伺服系统三环的 PID 控制原理 .....	(271)
9.2.2	仿真程序及分析 .....	(272)
9.3	二质量伺服系统的 PID 控制 .....	(277)
9.3.1	二质量伺服系统的 PID 控制原理 .....	(277)
9.3.2	仿真程序及分析 .....	(278)
<b>第 10 章</b>	<b>PID 实时控制的 C++ 语言设计及应用 .....</b>	<b>(283)</b>
10.1	M 语言的 C++ 转化 .....	(283)
10.2	基于 C++ 的三轴飞行模拟转台伺服系统 PID 实时控制 .....	(286)
10.2.1	控制系统构成 .....	(286)

10.2.2	系统各部分功能的软件设计 .....	(287)
10.2.3	仿真程序及分析 .....	(287)
<b>参考文献</b>	.....	(299)

# 第 1 章 数字 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。

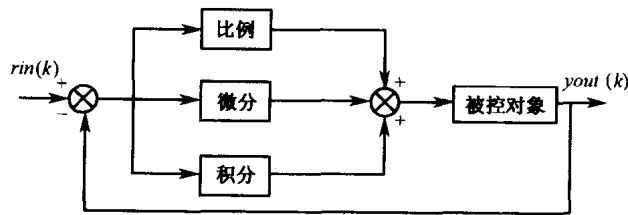


图 1-1 模拟 PID 控制系统原理框图

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

$$error(t) = rin(t) - yout(t) \quad (1.1)$$

PID 的控制规律为

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

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。

简单说来，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  $error(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。

(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

以三阶线性传递函数为被控对象，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  $rin(t) = A\sin(2\pi Ft)$ ，其中  $A = 1.0$ ， $F = 0.20$  Hz。采用 ODE45 迭代方法，仿真时间为 10s。

仿真程序：chap1\_1.mdl，如图 1-2 和图 1-3 所示。

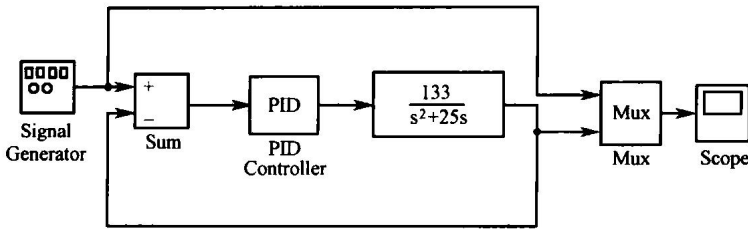


图 1-2 连续系统 PID 的 Simulink 仿真

在 PID 控制器采用封装的形式，其内部结构如图 1-3 所示。

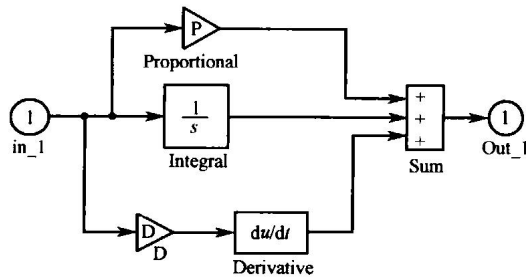


图 1-3 模拟 PID 控制器

连续系统的模拟 PID 控制正弦响应结果如图 1-4 所示。

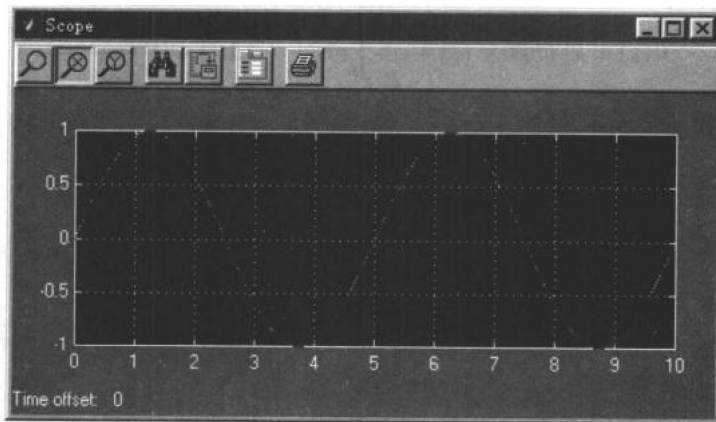


图 1-4 连续系统的模拟 PID 控制正弦响应

## 1.3 数字 PID 控制

计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量。因此，连续

PID 控制算法不能直接使用，需要采用离散化方法。在计算机 PID 控制中，使用的是数字 PID 控制器。

### 1.3.1 位置式 PID 控制算法

按模拟 PID 控制算法，以一系列的采样时刻点  $kT$  代表连续时间  $t$ ，以矩形法数值积分近似代替积分，以一阶后向差分近似代替微分，即

$$\begin{cases} t \approx kT & (k=0,1,2,\dots) \\ \int_0^t error(t)dt \approx T \sum_{j=0}^k error(jT) = T \sum_{j=0}^k error(j) \\ \frac{derror(t)}{dt} \approx \frac{error(kT) - error((k-1)T)}{T} = \frac{error(k) - error(k-1)}{T} \end{cases} \quad (1.4)$$

可得离散 PID 表达式

$$\begin{aligned} u(k) &= k_p(error(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k error(j) + \frac{T_D}{T}(error(k) - error(k-1))) \\ &= k_p error(k) + k_i \sum_{j=0}^k error(j)T + k_d \frac{error(k) - error(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中， $k_i = \frac{k_p}{T_i}$ ， $k_d = k_p T_D$ 。  $T$  为采样周期， $k$  为采样序号， $k=1,2,\dots$ ， $error(k-1)$  和  $error(k)$  分别为第  $(k-1)$  和第  $k$  时刻所得的偏差信号。

位置式 PID 控制系统如图 1-5 所示。

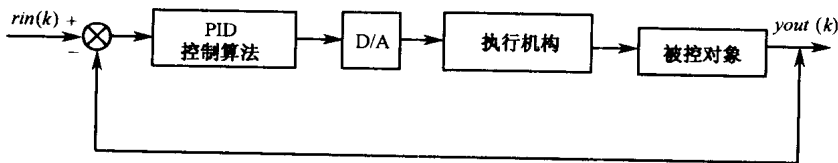


图 1-5 位置式 PID 控制系统

根据位置式 PID 控制算法得到其程序框图如图 1-6 所示。

在仿真过程中，可根据实际情况，对控制器的输出进行限幅： $[-10, +10]$ 。

### 1.3.2 连续系统的数字 PID 控制仿真

#### 仿真之一

采用 MATLAB 语句形式进行仿真。被控对象为一电机模型传递函数

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Bs}$$

式中， $J = 0.0067$ ， $B = 0.10$ 。

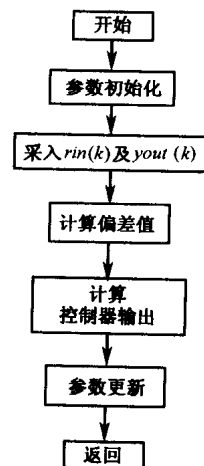


图 1-6 位置式 PID 控制算法程序框图



采用 M 函数的形式，利用 ODE45 的方法求解连续对象方程，输入指令信号为  $rin(k) = 0.50\sin(2\pi t)$ ，采用 PID 控制方法设计控制器，其中  $k_p = 20.0, k_d = 0.50$ 。PID 正弦跟踪结果如图 1-7 所示。

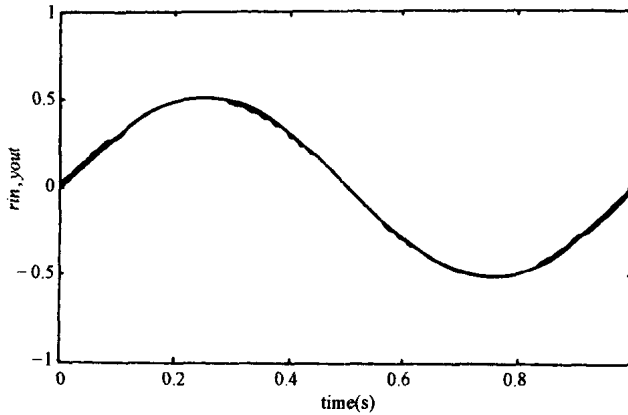


图 1-7 PID 正弦跟踪

控制主程序: chap1\_2.m

```
%Discrete PID control for continuous plant
clear all;
close all;

ts=0.001; %Sampling time
xk=zeros(2,1);
e_1=0;
u_1=0;

for k=1:1:2000
time(k) = k*ts;

rin(k)=0.50*sin(1*2*pi*k*ts);

para=u_1;
tSpan=[0 ts];
[tt,xx]=ode45('chap1_2f',tSpan,xk,[],para);
xk = xx(length(xx),:);
yout(k)=xk(1);

e(k)=rin(k)-yout(k);
de(k)=(e(k)-e_1)/ts;

u(k)=20.0*e(k)+0.50*de(k);
```