

全国普通高校自动化类专业规划教材



A ANALYSIS AND DESIGN OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS

数字控制系统分析与设计



朱晓青 ◎主 编

Zhu Xiaqing

郭艳杰 彭晓波 黄浪尘 ◎副主编

Guo Yanjie

Peng Xiaobo

Huang Langchen

清华大学出版社

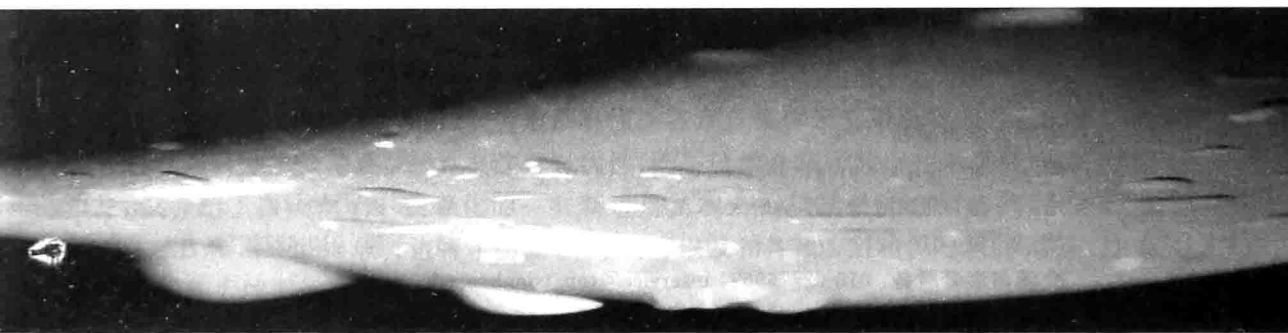


全国普通高校自动化类专业规划教材



ANALYSIS AND DESIGN OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS

数字控制系统分析与设计



朱晓青 ◎主 编

Zhu Xiaqing

郭艳杰 彭晓波 黄浪尘 ◎副主编

Guo Yanjie

Peng Xiaobo

Huang Langchen

内 容 简 介

本书是作者在多年教学工作、工程实践并结合国内外该领域的教学和技术发展等基础上形成的一部教材。全书系统地介绍有关数字控制的基本理论、基本分析方法与数字控制器设计技术等。本书共分5章,内容包括连续控制回顾、离散时间系统分析、采样数据系统、基于传递函数的数字控制器设计和基于极点配置的数字控制器设计等。

本书可作为自动化类专业或相关专业本科生计算机控制或数字控制类课程教材或教学参考书,也可作为有关工程技术人员相关的参考资料。

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

数字控制系统分析与设计/朱晓青主编.--北京:清华大学出版社,2015

全国普通高校自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-302-38819-7

I. ①数… II. ①朱… III. ①数字控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 293757 号

责任编辑:梁颖 薛阳

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:刘海龙

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>, 010-62775954

印装者:河北新华第一印刷有限责任公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.25

字 数:320千字

版 次:2015年2月第1版

印 次:2015年2月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

产品编号:060207-01

随着计算机技术的迅速发展,目前的工业控制系统、机器人系统或其他电子控制装置基本都采用数字控制器来实现。本书针对这种情况,着重对数字控制系统的分析、设计和建模等进行了较系统的介绍。尤其以较多的篇幅讨论了数字控制系统的设计方法。

考虑到目前本科教学人才培养方案课时的逐步压缩,专业课程的课时多为 32~40 课时,这样对数字控制系统的介绍既要较为系统,又要非常简练。本书正是基于以上考虑,并参考了国内外相关教材来进行编写的,旨在能为学习与自动化相关技术的学生提供良好的工程基础。

本书第 1 章从对连续控制系统的回顾开始,介绍系统及其动态特性、基于根轨迹技术、频率响应技术和状态空间技术的设计方法等。

第 2 章介绍如何用线性差分方程和 z 变换技术对离散时间系统进行描述和分析。

第 3 章介绍对采样数据的分析技术、信号重构技术以及离散模型的建立与分析等。

第 4 章介绍基于传递函数的数字控制器设计,包括 s 平面对 z 平面的映射、离散系统的稳定性分析、离散等价方法、 z 域设计指标、数字控制器的根轨迹直接设计、数字控制器的频率响应直接设计、数字控制器的解析设计、模拟 PID 控制器的数字化以及数字控制器的实现等。

第 5 章介绍基于极点配置与状态估计的数字控制器设计,包括离散时间系统的状态空间分析、极点配置技术、状态观测器设计以及带状态观测器的离散系统极点配置设计等。

书中带 * 的内容可根据教学情况选择性地安排。本书可作为自动化类专业或相关专业本科生数字控制或计算机控制类课程的教材或教学参考书。

本书体系结构较为完整,涵盖数字控制系统分析与设计的内容。本书内容与工程结合较强,可读性好。全书图文并茂,较为通俗易懂。各章自成体系又融会贯通,可方便读者有选择地学习。本书既注重系统性又注重时代性,既系统地介绍了数字控制系统分析与设计方法,又介绍了在该领域中数字化的一些新进展。本书控制器设计方面的例题全部基于 MATLAB 和 Simulink 软件进行了仿真,书中内容以及和各章节后相关习题的编排,注意对学生动手能力的训练与培养。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 11 月

第 1 章 引言与连续控制系统回顾	1
1.1 引言	1
1.1.1 数字控制器的应用领域	1
1.1.2 数字控制系统的基本构成与特点	4
1.2 连续控制系统及其动态特性	5
1.2.1 微分方程	5
1.2.2 拉氏变换与传递函数	5
1.2.3 反馈控制的基本特性	6
1.2.4 反馈系统的稳定性分析	6
1.2.5 时间域设计指标	8
1.2.6 PID 控制	9
1.3 根轨迹设计法	11
1.3.1 s 域设计指标	11
1.3.2 根轨迹及其画图规则	12
1.3.3 基于根轨迹的控制器设计	13
1.4 频率响应设计法	14
1.4.1 频域设计指标	14
1.4.2 基于波特图的控制器设计	15
1.5 状态空间设计法	17
1.5.1 极点配置方法	17
1.5.2 状态观测器的设计	18
1.5.3 极点配置与观测器的组合: 调节器的设计	19
1.5.4 参考输入与积分控制	20
1.6 本章小结	20
习题 1	21
参考文献	23
第 2 章 离散时间系统分析	24
2.1 线性差分方程	24
2.1.1 数字化与差分方程	24
2.1.2 差分方程的求解	28
2.2 z 变换与离散传递函数	30
2.2.1 z 变换及其性质	30
2.2.2 z 变换法求解差分方程	35
2.2.3 结构图描述与分析	37

IV 数字控制系统分析与设计

2.2.4 离散传递函数	39
2.3 离散传递函数与脉冲响应的关系	40
2.4 BIBO 稳定	42
2.5 本章小结	43
习题 2	44
参考文献	47
第 3 章 采样数据系统	48
3.1 采样与保持	48
3.1.1 对采样数据的分析	48
3.1.2 采样信号的频谱	53
3.2 信号重构	57
3.2.1 数据外推技术	58
* 3.2.2 零阶保持对输出信号的影响	62
3.3 采样数据系统的结构图分析	63
3.4 离散模型	65
3.4.1 基于多项式的 z 变换的离散模型	66
* 3.4.2 基于状态空间表达的离散模型	71
3.5 本章小结	75
习题 3	75
参考文献	78
第 4 章 基于传递函数的数字系统分析与数字控制器设计	79
4.1 s 平面对 z 平面的映射	79
4.2 离散系统的稳定性	84
4.2.1 闭环系统的稳定性分析	84
4.2.2 绝对稳定性的检验方法	86
4.2.3 相对稳定性的检验方法	92
4.3 数字控制器的仿真设计	95
4.3.1 离散等价方法	95
4.3.2 仿真设计及对设计的评价	105
4.4 数字控制器的根轨迹直接设计	111
4.4.1 z 域设计指标	111
4.4.2 数字控制器的根轨迹直接设计	115
4.5 数字控制器的频率响应直接设计	121
4.5.1 离散系统的频率响应及其特性	122
4.5.2 双线性变换与频域设计指标	123
4.5.3 数字控制器的波特图直接设计	124
* 4.6 数字控制器的解析设计	130
4.7 模拟 PID 控制器的数字化	134

4.7.1	数字 PID 控制的基本算法	135
4.7.2	数字 PID 控制器的参数整定	136
4.7.3	数字 PID 控制的改进算法	140
4.8	数字控制器的实现	141
4.8.1	直接程序实现法	142
4.8.2	串行程序实现法	143
4.8.3	并行程序实现法	144
4.8.4	嵌套程序实现法	145
4.8.5	采样周期的选择	145
4.9	本章小结	146
	习题 4	147
	参考文献	152
第 5 章	基于极点配置与状态估计的数字控制器设计	153
5.1	离散时间系统的状态空间分析	153
5.1.1	离散时间系统的状态空间表达	153
5.1.2	离散时间状态空间系统的求解	154
5.1.3	脉冲传递函数矩阵	155
5.1.4	离散时间状态空间系统的稳定性	156
5.2	极点配置	156
5.2.1	能控性	157
5.2.2	能观性	158
5.2.3	采样周期与能控性和能观性	159
5.2.4	离散时间状态空间系统的极点配置	160
5.3	状态观测器设计	164
5.3.1	全阶观测器	165
5.3.2	降阶观测器	168
5.4	带状态观测器的极点配置	169
5.4.1	分离原理	169
5.4.2	控制器特性与系统特性	170
5.4.3	带状态观测器的离散系统极点配置	170
5.5	带参考输入的离散系统极点配置	179
5.6	本章小结	180
	习题 5	180
	参考文献	181
附录 A	拉普拉斯变换与 z 变换表	182
附录 B	本书中用到的部分数学公式	184
附录 C	本书中用到的部分 MATLAB 指令和部分 Simulink 模块	185
附录 D	部分习题参考答案	191

引言与连续控制系统回顾

教学目标

数字控制系统的设计原理在很大程度上还是基于连续控制系统设计方法的,因此本章将简要回顾连续控制的基本概念和连续控制器设计的基本方法。需要说明的是,这里只对结论性的要点做了列举,对首次学习这些知识的人来说,本章的内容是不够的,读者需要查阅相关书籍。通过对本章内容的学习,希望读者能够:

- 了解或回顾控制系统描述的基础知识;
- 了解或回顾拉氏变换的基本知识;
- 了解或回顾反馈控制的基本特性;
- 了解或回顾 PID 控制的基本原理;
- 了解或回顾系统设计的指标表达方式;
- 了解或回顾基于根轨迹方法设计控制器的基本思路;
- 了解或回顾基于频率响应方法设计控制器的基本思路;
- 了解或回顾基于状态空间方法设计控制器的基本思路。

1.1 引言

随着计算机技术的迅速发展和应用的日益普及,如今绝大部分控制系统都采用计算机进行控制,这些控制系统包括工业实时控制系统、伺服机械控制系统、各类电子装置的控制系統,甚至军事设施的控制系統或航空航天设施的控制系統等。因此,对数字控制器的分析与设计也就越显重要。数字控制器能够使得传统的反馈控制变得更为灵活且高效。

1.1.1 数字控制器的应用领域

1. 工业及制造业领域

工业与机械制造行业是最早应用数控技术的行业,这些行业需要为其他经济领域提供先进装备。在冶金、石油、化工、造纸、发电、配电、玻璃或采矿等流程工业中,过程参数的实时监控已广泛地使用了基于数字控制器的计算机控制系统。这使得传统的过程控制功能与诸如生产计划、调度、优化及操作控制等实时信息处理和决策应用不断地渗透、融合。也为提高工业设备处理能力和生产效率、提高产品质量、有效利用能源、满足环保要求、确保人身安全以及优化技术经济指标,使工业企业在日益激烈的国内外市场竞争中保持竞争优势,发挥着举足轻重的作用。图 1-1 是一个基于数字控制技术的工业过程控制的例子。

在国防及科研领域(如研制开发与生产现代化军事装备用的高性能加工中心等),汽车制造业(如发动机、变速箱、曲轴柔性加工生产线上用的数控机床和高速加工中心以及整车装备生产线等),机械制造业(如焊接、装配、切割、喷漆机器人等),航空、船舶、发电行业(如加工螺旋桨、发动机、发电机和水轮机叶片零件用的高速加工中心等)都广泛地使用了基于数字控制器的计算机控制系统。图 1-2 是一个基于数字控制技术的机器人控制系统的例子,图 1-3 则是一个基于数字控制技术的设计加工中心的例子,由图可见,数字加工中心可

2 数字控制系统分析与设计

以直接接受来自设计中心的加工图纸,这将有效地提高加工效率和加工精度。

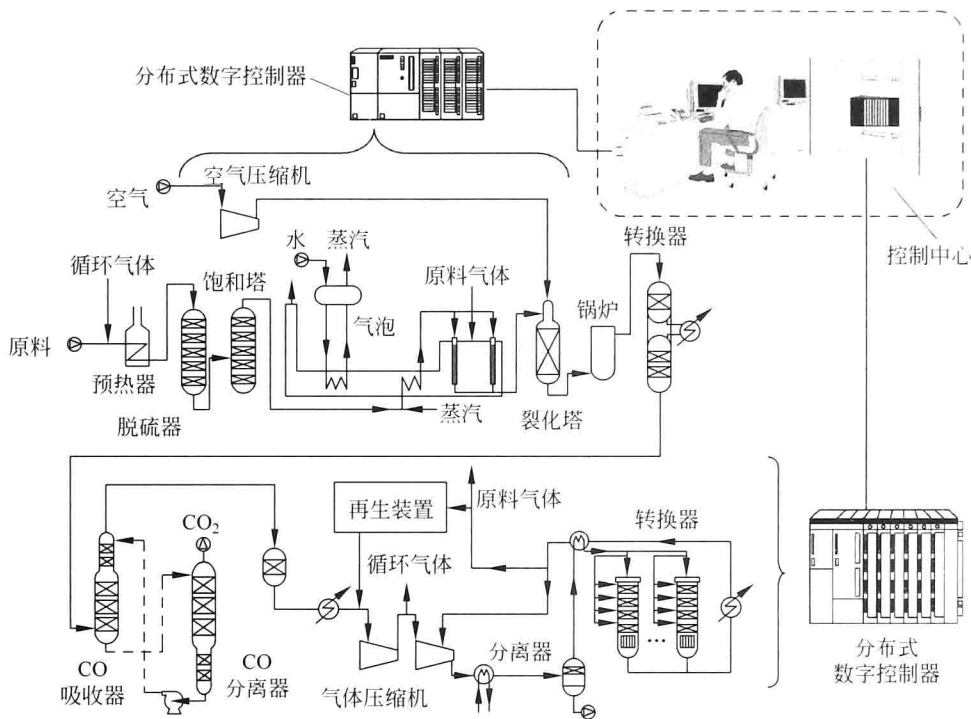


图 1-1 某化工生产流程的数字控制系统图

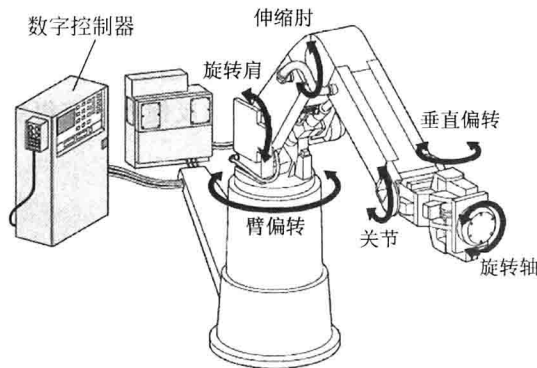


图 1-2 机器人系统图

2. 信息行业

在信息产业中,从计算机到网络、移动通信、遥测、遥控等设备,都需要采用基于超精技术、纳米技术的制造装备,如芯片制造的引线键合、晶片键合和光刻等,这些流程的控制都需要采用数控技术。信息技术的实现过程也同样越来越广泛地使用数字控制技术,图 1-4 是一个基于数字控制技术的能够实现前景与后景同步变焦的实时演播系统的例子。

3. 军事装备

现代的许多军事装备,都大量采用伺服运动控制技术,如火炮的自动瞄准控制、雷达的跟踪控制和导弹的自动跟踪控制等,数字控制器在这些领域更是有着广泛的应用。图 1-5 是一个基于数字控制技术的雷达跟踪控制系统的例子。

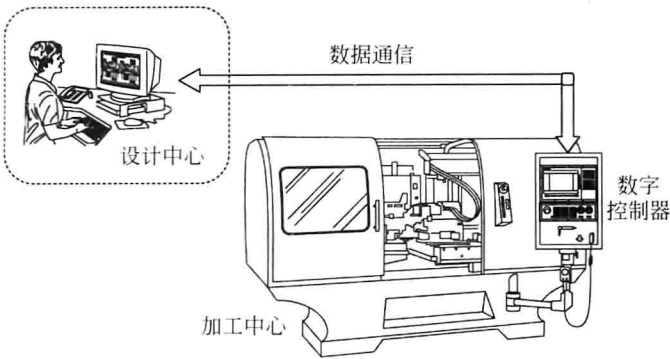


图 1-3 数字化加工中心系统图

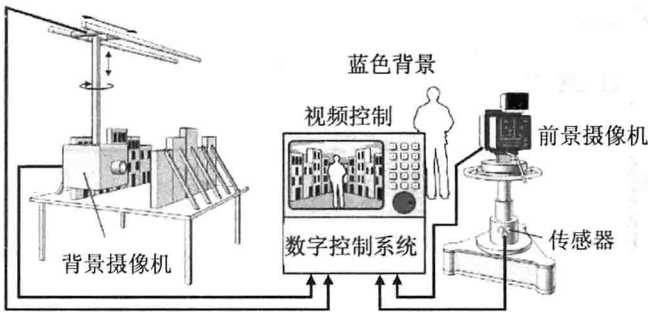


图 1-4 数字化演播控制系统图

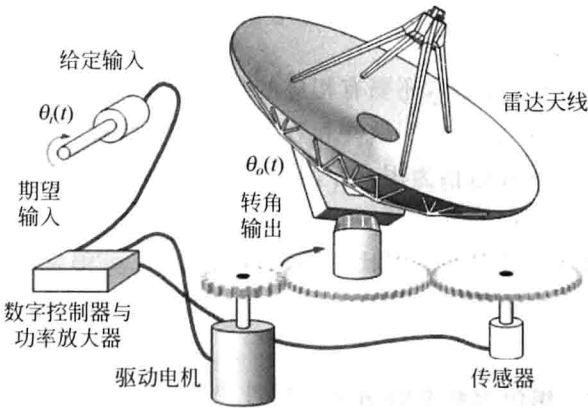


图 1-5 雷达控制系统图

4. 其他领域

数字控制器在其他领域的应用包括医疗领域,如许多现代化的医疗诊断、治疗设备都采用了数控技术,如 CT 诊断仪、全身刀治疗机以及基于视觉引导的微创手术机器人等;在轻工行业,采用多轴伺服控制的印刷机械、纺织机械、包装机械以及木工机械等;在建材行业,

用于石材加工的数控水刀切割机,用于玻璃加工的数控玻璃雕花机,用于席梦思加工的数控行缝机和用于服装加工的数控绣花机等。

1.1.2 数字控制系统的基本构成与特点

数字控制系统一般由基于计算机结构的数字处理系统、外围设备以及输入输出通道等构成,如图 1-6 所示。数字控制系统的硬件一般包括主机、输入输出通道以及外设等。主机是系统的核心,它包括 CPU、存储设备和总线等。主机通过运行软件程序向系统的各个部分发出各种命令,对被控对象进行检测与控制。输入输出通道是主机系统与对象之间进行信息交换的桥梁。输入通道把对象的被控参数转换成系统可以接收的数字信号,输出通道则把系统输出的控制指令和数据转换成对对象进行控制的信号。外部设备是主机系统与外界进行信息交换的设备,一般包括人机接口、输入输出设备和外部存储设备等。

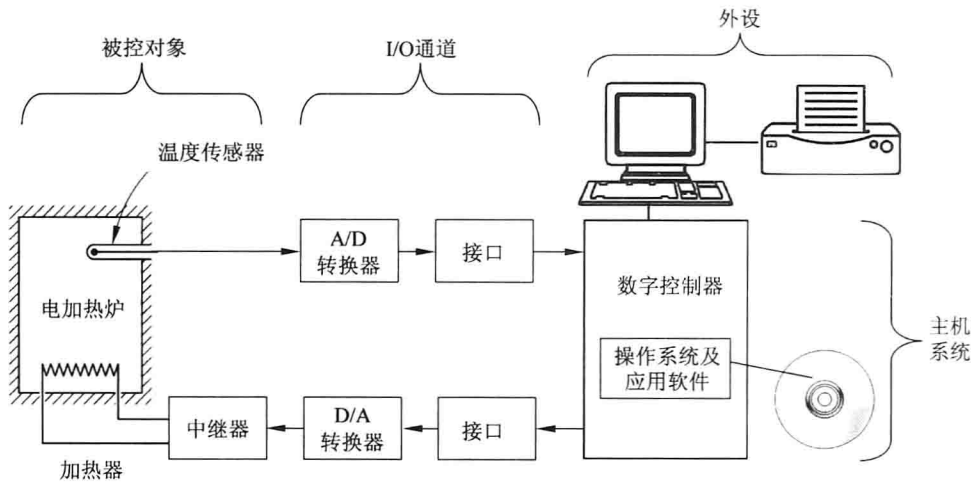


图 1-6 数字控制系统组成框图

数字控制系统除了硬件以外,还要有相应的软件系统。软件是指能够完成各种功能的程序。软件通常包括系统软件、应用软件和数据库等。系统软件包括操作系统、诊断系统和开发系统等软件。应用软件包括为用户专门开发的针对各种应用的算法程序等。数据库则是一些用于资料管理或存档的软件等。

数字控制系统与连续控制系统相比,具有以下特点:

- (1) 稳定性好。数控计算机只有 0、1 状态,抗干扰能力强,不像模拟信号受外界环境影响较大。
- (2) 控制精度高。模拟控制器的精度由硬件决定,同一批次的元器件可能具有不同的性能,例如电阻、电容的标称值和实际测量值会有不同,达到高精度很不容易,元器件的价格随精度不同变化很大;而数字控制器的精度与计算机的控制算法和字长有关,在系统设计时就已经决定了。
- (3) 控制规律实现灵活方便。采用程序控制,易于修改,改变控制规律不需要修改硬件,通过修改控制子程序就可以满足不同的控制要求。因此相对于连续控制系统更具有灵活性。

(4) 软件复用性好。硬件不能复用,子程序却可以复用,所以具有可重复性。而且计算机系统和软件都可以更新换代。

(5) 控制与处理能力强。可同时控制多系统、多通道。因此控制效率更高。而模拟控制器一般只能完成单通道控制。

(6) 显示灵活方便,人机接口友好。

(7) 实现分级控制和整体优化,提高整体自动化水平。

1.2 连续控制系统及其动态特性

1.2.1 微分方程

线性动态系统可以用微分方程来描述。表达一个物理系统的一组微分方程就是该系统的数学模型。数学模型一般可以通过系统的能量平衡或物料平衡关系得到。有些系统中不同部分之间会有相互关联,描述这些相互关联的系统的微分方程可以转换为一组状态变量型的一阶微分方程。如下面的二阶微分方程描述为

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_n \dot{y} + \omega_n^2 y = Ku \quad (1-1)$$

该微分方程可以转化为状态变量型表达式

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-2)$$

这里

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

为描述系统特性的变量向量。

1.2.2 拉氏变换与传递函数

对线性系统进行分析的一个有效手段是拉氏变换。拉氏变换的定义为

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1-3)$$

拉氏变换的基本性质可参见附录 A。其中最重要的一个性质就是在零初始状态时,

$$\mathcal{L}\{\dot{f}(t)\} = sF(s) \quad (1-4)$$

利用这个性质可以将式(1-1)表达的微分方程转换为

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)Y(s) = KU(s)$$

从而得到传递函数 $G(s)$, 即

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-5)$$

传递函数可以表达为多项式型

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_1 s^m + b_2 s^{m-1} + \cdots + b_{m+1}}{a_1 s^n + a_2 s^{n-1} + \cdots + a_{n+1}} \quad (1-6)$$

传递函数也可以表达为零点-极点-增益型

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} \tag{1-7}$$

如果状态方程的通用型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \tag{1-8}$$

式中, $\mathbf{x}$ 为状态变量;

$\mathbf{A}$ 为系统矩阵;

$\mathbf{B}$ 为输入矩阵;

$\mathbf{C}$ 为输出矩阵。

其状态变量型表达与传递函数型表达是可以相互转换的,即

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \tag{1-9}$$

1.2.3 反馈控制的基本特性

由被控对象 G 及控制器 D 组成的典型的反馈控制系统如图 1-7 所示,该图也就是控制系统的方框图表达。该闭环系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} \tag{1-10}$$

上式中,

$$1 + D(s)G(s) = 0 \tag{1-11}$$

为该闭环系统的特征方程,特征方程的根即为闭环系统的极点。

在如图 1-7 所示的闭环系统输入端 $r(t)$ 加上单位阶跃信号,可在其输出端 $y(t)$ 得到阶跃响应。系统闭环极点位置不同,其对应的阶跃响应也会不同。

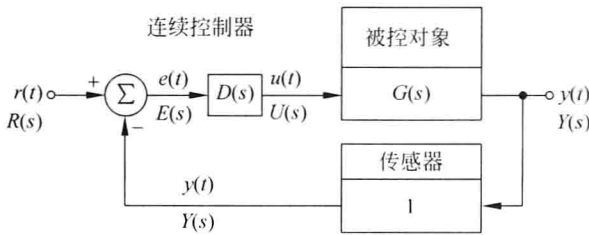


图 1-7 控制系统方框图

1.2.4 反馈系统的稳定性分析

反馈系统的稳定性分析主要是分析式(1-11)特征方程在右半 s 平面有无根。这可以直接求解方程式(1-11)得到结果。对于高阶系统来说方程的直接求解往往较为困难,可通过一些间接的方法来判断方程式(1-11)有无不稳定的根。

1. 劳斯判据

劳斯(Routh)判据可以在不解特征方程的情况下,来判断特征方程根在 s 平面上根的分布情况。如果已知系统闭环特征方程表达为

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0 \quad (1-12)$$

设 $a_n > 0$, 各项系数均为正数, 则该特征方程系数的劳斯阵列表如下:

s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	$\cdots$
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	$\cdots$
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	$\cdots$
s^{n-3}	c_1	c_2	c_3	$\cdots$
s^{n-4}	d_1	d_2	d_3	$\cdots$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
s^1	f_1			
s^0	g_1			

式中

$$b_1 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}$$

$$b_2 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix}$$

$$b_3 = -\frac{1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-6} \\ a_{n-1} & a_{n-7} \end{vmatrix}$$

$$\vdots$$

直至其余项均为零。

$$c_1 = -\frac{1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix}$$

$$c_2 = -\frac{1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-5} \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix}$$

$$c_3 = -\frac{1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-7} \\ b_1 & b_4 \end{vmatrix}$$

$$\vdots$$

按此规律一直计算到 $n-1$ 行为止。

若劳斯阵列表中第一列系数均为正数, 则该系统是稳定的, 即特征方程的根均位于左半 s 平面。若劳斯阵列表中第一列系数有负数, 则第一列系数符号的改变次数等于系统在右半 s 平面上根的个数。

2. 奈奎斯特判据

奈奎斯特(Nyquist)判据是用开环系统来分析闭环系统的一种方法, 也就是通过对式(1-11)中 $D(s)G(s)$ 的分析来判断 $1+D(s)G(s)$ 根的分布情况。

奈奎斯特稳定性判据可以叙述为:

当 $D(s)G(s)$ 在右半 s 平面的极点个数为零 ($P=0$) 时, 当且仅当 $D(s)G(s)$ 的围道, 即

$D(s)G(s)$ 的奈奎斯特图在 s 平面上不围绕 $(-1,0)$ 点时,反馈系统稳定。

当 $D(s)G(s)$ 在右半 s 平面有 P 个极点时,当且仅当 $D(s)G(s)$ 的围道,即 $D(s)G(s)$ 的奈奎斯特图在 s 平面上逆时针方向围绕 $(-1,0)$ 点 P 次时,反馈系统稳定。

奈奎斯特判据的公式化表达为

$$Z = N + P \quad (1-13)$$

式中, Z 为 $1+D(s)G(s)$ 在右半 s 平面的零点个数;

N 为 $D(s)G(s)$ 的奈奎斯特图在 s 平面上顺时针方向围绕 $(-1,0)$ 点的次数;

P 为 $D(s)G(s)$ 在右半 s 平面的极点个数。

1.2.5 时间域设计指标

如果式(1-10)表达的系统也为二阶系统,其传递函数有着与式(1-5)同样的特征,即

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-14)$$

该系统的阶跃响应则如图 1-8 所示,对阶跃响应的要求可用图 1-8 中所示的指标表示。

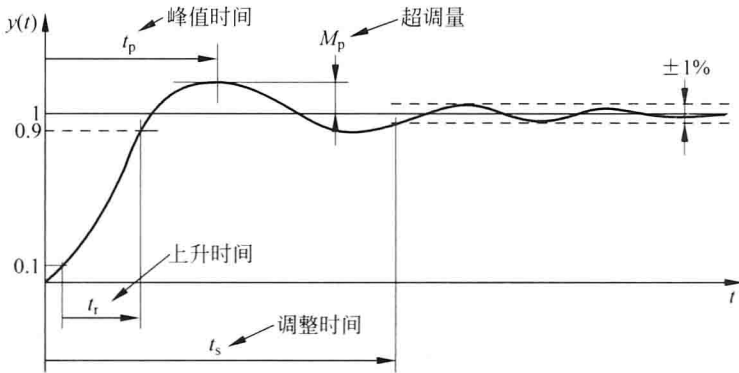


图 1-8 时域指标定义图

(1) 上升时间 t_r : 即系统响应首次达到新设定点附近的时间。上升时间与式(1-14)中参数的近似关系为

$$t_r = \frac{1.8}{\omega_n} \quad (1-15)$$

(2) 调整时间 t_s : 即系统瞬态过程衰减的时间。调整时间与式(1-14)中参数的近似关系为

$$t_s = \frac{4.6}{\zeta\omega_n} \quad (1-16)$$

(3) 超调量 M_p : 即为系统响应超过终值部分的最大值与系统响应终值之比的百分数。超调量与式(1-14)中参数的近似关系为

$$M_p \approx 1 - 1.7\zeta$$

或

$$\zeta \approx 0.6(1 - M_p) \quad (1-17)$$

式(1-17)超调量与阻尼比的近似关系如图 1-9(a)所示。而阻尼比在阶跃响应中对超调量的影响则如图 1-9(b)所示。

(4) 峰值时间 t_p ：即为系统响应达到最大超调点的时间。峰值时间与式(1-14)中参数的近似关系为

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$$

(1-18)

以上只考虑了系统的动态指标,系统的稳态指标则在 s 域表达更为直观,见 1.3.1 节。

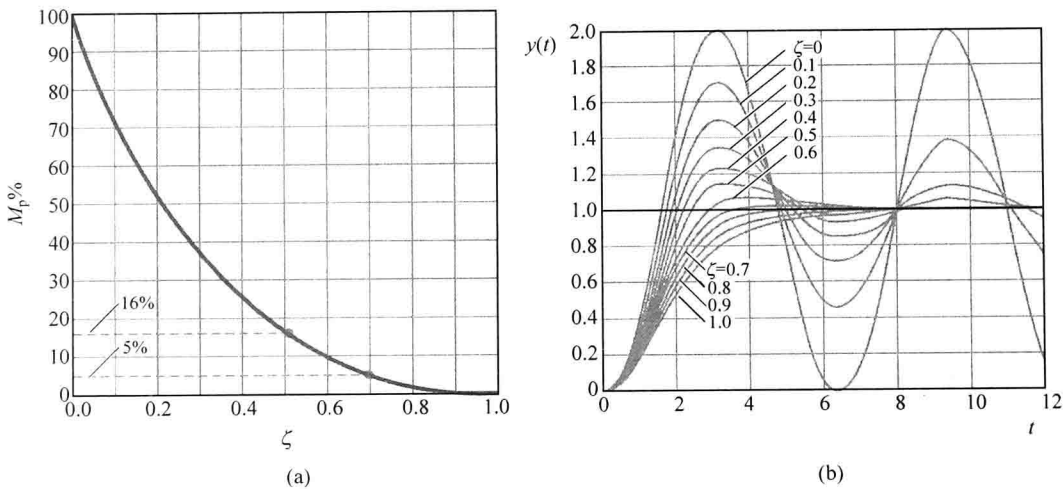


图 1-9 二阶系统超调量与阻尼比的关系图

1.2.6 PID 控制

PID(比例、积分、微分)控制是工业过程控制中最常用的控制规律,这种控制规律的时域表达为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

(1-19)

PID 控制规律的传递函数表达为

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

(1-20)

对不同的对象模型或不同的指标要求,PID 控制参数(K_p 、 T_i 和 T_d)是不同的。选择或者说整定 PID 参数的方法主要有响应曲线法、极限灵敏度法及衰减法等。

1. 响应曲线法

响应曲线法是在系统的单位阶跃响应曲线如图 1-10 所示时,PID 控制参数可按照表 1-1 选取。

表 1-1 基于阶跃响应法的 PID 参数选择表

选 项	K_p	T_i	T_d
比例(P)	τ/L		
比例、积分(PI)	$0.9\tau/L$	$3.3L$	
比例、积分、微分(PID)	$1.2\tau/L$	$2L$	$0.5L$

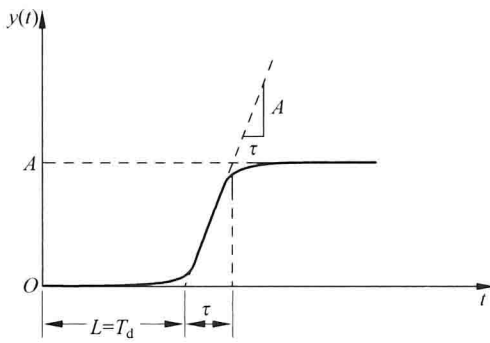


图 1-10 响应曲线图

用响应曲线法调整 PID 参数时,式(1-20)可改写为

$$\frac{U(t)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1.2 \frac{\tau}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) = 0.6\tau \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (1-21)$$

2. 极限灵敏度法

极限灵敏度法是在增加比例增益使系统变为如图 1-11 所示的临界稳定时(此时 $K_p = K_u$),PID 控制参数可按照表 1-2 选取。

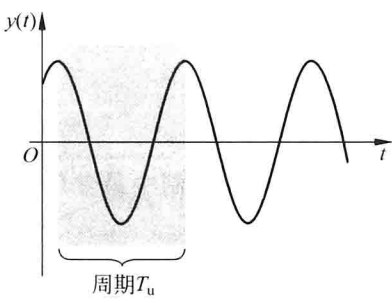


图 1-11 极限振荡图

表 1-2 基于极限灵敏度法的 PID 参数选择表

选 项	K_p	T_i	T_d
比例(P)	$0.5K_u$		
比例、积分(PI)	$0.45K_u$	$0.83T_u$	
比例、积分、微分(PID)	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

用极限灵敏度法调整 PID 参数时,式(1-20)可改写为

$$\begin{aligned} \frac{U(t)}{E(s)} &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 0.6K_u \left(1 + \frac{1}{0.5T_u s} + 0.125T_u s \right) \\ &= 0.075K_u T_u \frac{\left(s + \frac{4}{T_u} \right)^2}{s} \end{aligned} \quad (1-22)$$

3. 衰减振荡法

衰减振荡法是在调整比例增益使系统变为如图 1-12 所示的 1/4 幅值衰减时(此时 $K_p = K_s$),