

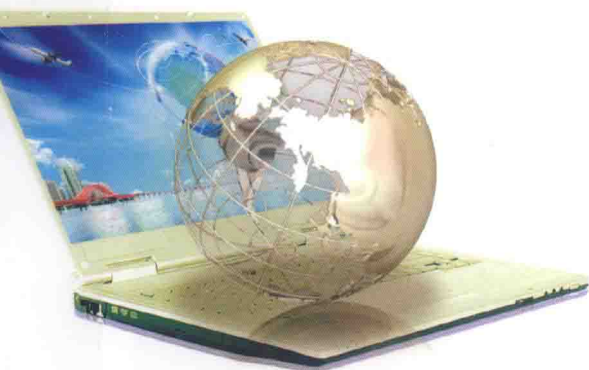
高等学校规划教材·电子、通信与自动控制技术

PLANNING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



先进控制理论及应用导论

谢 蓉 王晓燕 王新民 巩建英 编著



西北工业大学出版社

高等学校规划教材·电子、通信与自动控制技术

XIANJIN KONGZHI LILUN JI YINGYONG DAOLUN

先进控制理论及应用导论

谢 蓉 王晓燕 王新民 巩建英 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 为了满足读者学习控制理论知识的需求,使其全面了解、掌握当前在工程应用中颇具前景的控制方法,本书系统扼要地介绍了控制理论主要研究领域的发展过程,在此基础上,阐述了目前在工程技术领域备受关注的先进控制理论分支,例如纯滞后补偿和内模控制、预测控制、鲁棒控制、分数阶控制、自适应控制、变结构控制、非线性控制、模糊控制、神经网络、专家系统和粒子群优化等,并提供了不少的应用算例。

本书内容宽泛,选材注重新颖性,撰写注重简洁性与通俗性,论述深入浅出,可作为自动控制和工业自动化专业高年级本科生和研究生的教科书,也可作为计算机应用以及相关专业技术人员和科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进控制理论及应用导论/谢蓉等编著. —西安:西北工业大学出版社,2015.2
高等学校规划教材. 电子·通信及自动控制技术
ISBN 978-7-5612-4334-3

I. ①先… II. ①谢… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 044976 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:<http://www.nwpup.com>

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.5

字 数:326 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

随着电子技术、计算机技术的飞速发展,自动化技术形成理论并逐步发展取得了极其显著的成就。由于被控对象日趋复杂,控制理论已从早期针对线性时不变系统的研究,发展到针对非线性时变系统的研究。控制理论也从经典控制理论发展到现代控制理论,目前已进入智能控制理论阶段。

本书编写的目的是为了拓宽控制类与工业自动化专业学生的知识面,使其了解控制理论的发展过程、研究现状、应用概况及发展趋势。因此,本书注重控制理论基本概念和基本方法的介绍,撰写时注重简洁性与通俗性。在内容上,第1章为绪论,主要介绍控制系统的构成及控制理论的发展概况;第2章为纯滞后补偿及内模控制,内容包括史密斯(Smith)预估算法和内模控制器的设计方法;第3章为预测控制,内容包括模型算法控制、动态矩阵控制、广义预测控制等3种主要的预测控制方法;第4章为鲁棒控制,内容包括 H_∞ 控制器设计和参数不确定性系统的鲁棒控制等;第5章为分数阶控制,内容包括分数阶的数值描述与数学算法、分数阶线性系统性能分析及分数阶控制器设计;第6章为自适应控制,内容包括模型参考自适应控制、自校正控制及其他类型的自适应控制;第7章为变结构控制,内容包括开关控制和滑模变结构控制;第8章为非线性系统及其控制,内容包括非线性系统的反馈线性化控制、非线性系统的内模控制及非线性系统的动态逆控制;第9章为智能控制,内容包括模糊控制、神经网络、专家系统及粒子群优化。

本书由谢蓉、王晓燕、王新民、巩建英编著,各章的编写者分别为:谢蓉(第4,5,7章),王晓燕(第2,9章),王新民(第1章),巩建英(第3,6,8章)。在编写工作中,得到了西北工业大学自动化学院各位老师和研究生的大力帮助,在此一并表示衷心感谢!此外,本书是在参考了国内外控制理论与应用方面重要文献的基础上,结合了笔者的研究工作总结整理而成的,在此也向著作和文献的作者表示感谢!

由于本书涉及的范围较广,难免会有疏漏或不足之处,恳请读者指正。

编 者
2015年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制系统的构成	1
1.2 控制理论发展概况	3
第 2 章 纯滞后补偿和内模控制	6
2.1 史密斯(Smith)预估算法	6
2.2 内模控制	12
第 3 章 预测控制	19
3.1 概述	19
3.2 预测控制基本原理	20
3.3 常见的预测控制	23
3.4 预测控制在高温热水网控制系统中的应用	30
3.5 预测控制的发展前景	34
第 4 章 鲁棒控制	36
4.1 鲁棒性与鲁棒控制的基本概念	36
4.2 系统不确定性描述	37
4.3 H_∞ 优化与鲁棒控制	42
4.4 H_∞ 控制器的设计	49
4.5 参数不确定系统的鲁棒控制	52
4.6 无人机的鲁棒控制	55
第 5 章 分数阶控制	57
5.1 分数阶微积分	57
5.2 分数阶系统的数学描述和数值算法	61
5.3 分数阶线性系统的稳定性、可控性和可观测性分析	63
5.4 PI^aD^b 控制器的设计分析	67
5.5 分数阶控制在飞行器控制系统中的应用	77
第 6 章 自适应控制	78
6.1 概述	78
6.2 模型参考自适应控制	80

6.3	自校正控制·····	88
6.4	其他类型的自适应控制·····	102
第7章	变结构控制·····	110
7.1	变结构控制与开关控制·····	110
7.2	变结构控制系统中的滑动模态·····	113
7.3	滑模变结构控制·····	117
7.4	直升机的滑模控制律设计·····	124
第8章	非线性系统及其控制·····	130
8.1	非线性系统概述·····	130
8.2	非线性系统的线性化标准型·····	133
8.3	非线性系统的反馈线性化控制·····	137
8.4	非线性系统的内模控制·····	141
8.5	非线性系统的动态逆控制·····	143
第9章	智能控制·····	150
9.1	模糊数学基础·····	150
9.2	模糊控制的基本理论·····	156
9.3	模糊控制系统·····	162
9.4	神经网络理论基础·····	170
9.5	神经网络控制·····	179
9.6	专家控制系统的概念和特征·····	190
9.7	专家系统的基本思想和结构·····	192
9.8	基于粒子群优化的控制和滤波方法·····	195
参考文献 ·····		207

第 1 章 绪 论

自动化技术形成理论和逐步发展的 100 多年历史中,随着电子技术、计算机技术的飞速发展,已取得了极其显著辉煌的成就。同时由于被控对象的日趋复杂,控制理论已从早期的针对线性时不变系统的研究,发展到现在针对非线性时变系统的研究。控制的方法也从 PID 控制发展到现在的先进控制理论的方法。

1.1 控制系统的构成

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作,以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制,用人工操作称为人工控制,用自动装置来完成称为自动控制。

图 1-1(a)所示是人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水位是被控制的物理量,简称被控量。水池这个设备是控制的对象,简称被控对象。当水位在给定位置且流入、流出量相等时,它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时,就需要对流入量进行必要的控制。在人工控制方式下,工人用眼看水位情况,用脑比较实际水位与期望水位的差异并根据经验做出决策,确定进水阀门的调节方向与幅度,然后用手操作进水阀门进行调节,最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值,工人便要重复上述调节过程。

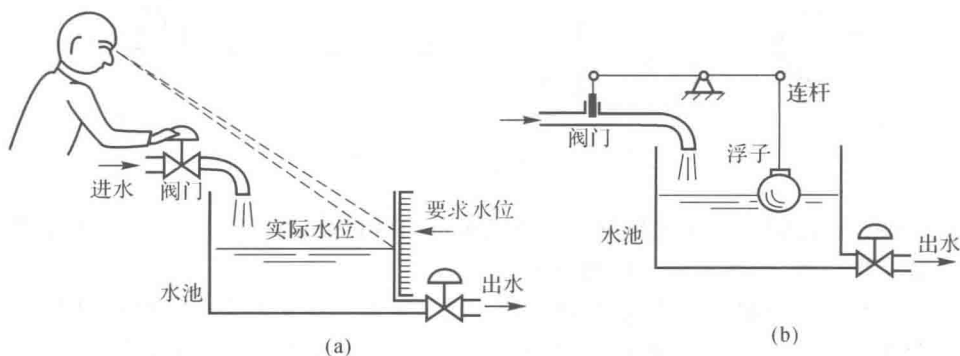


图 1-1 水位控制系统示意图

(a)人工控制的水位系统; (b)简单的水位自动控制系统

图 1-1(b)所示是水池水位自动控制系统的一种简单形式。图中用浮子代替人的眼睛,用来测量水位高低;另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能,用来进行比较、计算误差并实施控制。杠杆的一端由浮子带动,另一端则连向进水阀门。当用水量增大时,水位开始下

降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用将进水阀门开大,使水位回到期望值附近。反之,若用水量变小,水位及浮子上升,进水阀关小,水位自动下降到期望值附近。整个过程中无须人工直接参与,控制过程是自动进行的。

图 1-1(b)所示的系统虽然可以实现自动控制,但由于结构简陋而存在缺陷,主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多,水位就越低,偏离期望值就越远,误差越大。控制的结果,总存在着一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时,为了使水位基本保持恒定不变,就得开大阀门,增加进水量。要开大进水阀,唯一的途径是浮子要下降得更多,这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样,整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。

为克服上述缺点,可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统,如图 1-2 所示。这里,浮子仍是测量元件,连杆起着比较作用,它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机,其转轴经减速器后拖动进水阀门,对系统施加控制作用。

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器的滑臂居中, $u_e = 0$ 。当出水量增大时,浮子下降,带动电位器滑臂向上移动,输出电压 $u_e > 0$,经放大后成为 u_s ,控制电动机正向旋转,以增大进水阀门开度,促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_e = 0$,系统达到新的平衡状态。

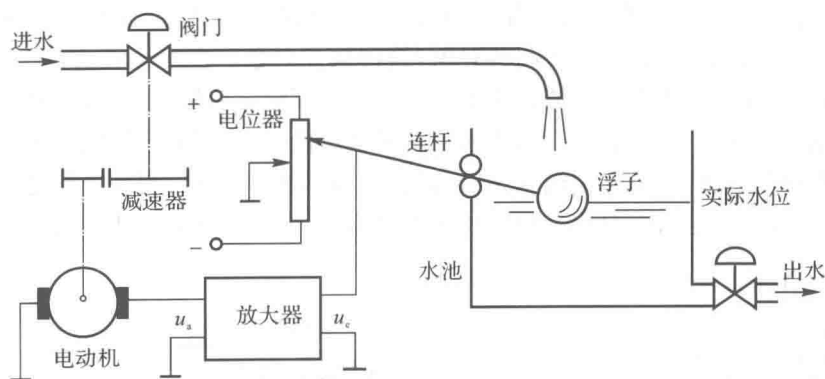


图 1-2 水位控制系统示意图

可见,该系统在运行时,无论何种干扰引起水位出现偏差,系统就要进行调节,最终总是使实际水位等于期望值,大大提高了控制精度。

自动控制和人工控制极为相似,自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的职能而已。图 1-2 中的浮子相当于人的眼睛,通常称之为测量元件,它对实际水位进行测量;连杆和电位器类似于大脑,通常称之为控制器,它完成比较运算,给出偏差的大小和极性;电动机相当于人手,通常称之为执行机构,它调节阀门开度,对水位实施控制。这些装置相互配合,承担着类似于人的控制功能。任何一个控制系统,都是由被控对象、测量元件、控制器和执行机构四部分所组成的,这是构成一个控制系统最基本的四个部分。

反馈控制只在外作用(输入信号或干扰)对控制对象产生影响之后才能做出相应的控制。尤其当控制对象具有较大延迟时间时,反馈控制不能及时地影响输出的变化,会影响系统

输出的平稳性。前馈控制能使系统及时感受输入信号,使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。将前馈控制和反馈控制结合起来,构成复合控制,可以有效提高系统的控制精度。

任何一个自动控制系统都是由被控对象和控制装置构成的。自动控制系统根据被控对象和具体用途不同,可以有各种不同的结构形式。图 1-3 是一个典型自动控制系统的功能框图。图中的每一个方框,代表一个具有特定功能的元件。除被控对象外,控制装置通常是由测量元件、比较元件、放大元件、执行机构、校正元件以及给定元件组成的。这些功能元件分别承担相应的职能,共同完成控制任务。

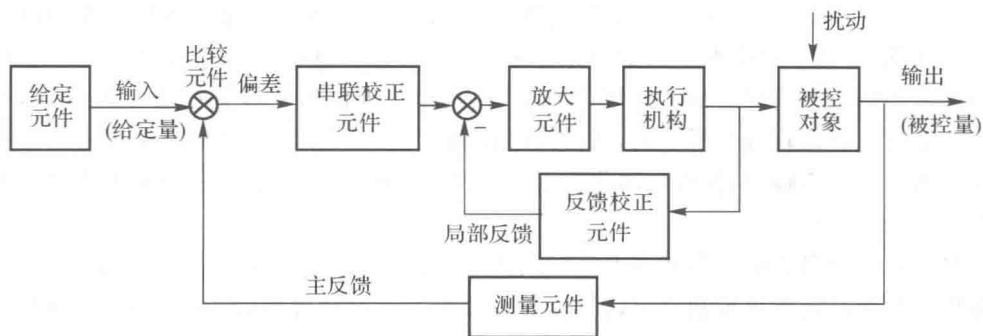


图 1-3 典型的反馈控制系统方框图

被控对象:一般是指生产过程中需要进行控制的工作机械、装置或生产过程。描述被控对象工作状态的、需要进行控制的物理量就是被控量。

给定元件:主要用于产生给定信号或控制输入信号。

测量元件:用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理。

比较元件:用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以是一个差动电路,也可以是一个物理元件(如电桥电路、差动放大器、自整角机等)。

放大元件:用来放大偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行机构调节被控对象,例如功率放大器、电液伺服阀等。

执行机构:用于直接对被控对象进行操作,调节被控量,如阀门、伺服电动机等。

校正元件:用来改善或提高系统的性能。常用串联或反馈的方式连接在系统中,例如 RC 网络、测速发电机等。

1.2 控制理论发展概况

控制理论的发展是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展完善起来的。

早在古代,我国劳动人民凭借生产实践中积累的丰富经验发明的指南车就是一个开环控制的例子;北宋时代苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台,就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统的实例。

最为人们所熟悉的例子就是:1788 年瓦特在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决

了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视,也可谓是采用控制理论思想来解决实际问题的成功实例。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868年,英国物理学家麦克斯韦通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统中会出现的不稳定问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯和德国数学家古尔维茨分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法形成了经典控制理论中时域分析法的基础。1932年,美国物理学家奈奎斯特研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,形成了频率响应法的基础。随后,伯德和尼柯尔斯在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。1948年,美国科学家伊万斯创立了根轨迹分析方法,从而经典控制理论得以完善。经典控制理论的形成被人们掌握并用于生产实践中,使得自动化在工业生产中发挥了巨大的作用,并且控制理论自身又得到更进一步的发展。

经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入单输出系统,对于一般的工业生产过程都能满足控制要求;但是,随着工业生产过程规模的扩大和复杂性的增加,对产品质量和过程被控变量的波动范围要求越来越严格,简单的PID控制系统已远远不能适应了。

20世纪50年代中期,空间技术的发展也迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题,如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制。飞机的飞行特性也不再能用线性化小扰动方程来近似描述。经典控制理论的设计方法还不能解决如时变参数问题,多变量、强耦合等复杂的控制问题,因此必须要发展能够适应非线性、时变、不确定等因素情况下以及多变量控制的设计问题。

自20世纪60年代发展起来的现代控制理论,在航空航天领域取得了较好的应用以后,人们一直以来寻求各种现代控制算法,企图能在复杂的工业生产过程控制中应用。经过30多年的努力,首先是基于模型的预测控制方法,于20世纪80年代在复杂的工业生产过程中取得成功应用以后,从而形成了先进控制理论在工业生产过程中应用的新时代。

先进控制是对那些不同于常规单回路PID控制,并具有比常规PID控制更好控制效果的控制策略的统称,而非专指某种计算机控制算法。由于先进控制的内涵丰富,同时带有较好的时代特征,可以用来处理那些采用常规控制效果不好,甚至无法控制的复杂工业过程控制的问题。

先进控制与常规PID控制的关系如图1-4所示。这种结构形成是在原来常规控制方案基础上,加上先进控制策略,这不仅容易实现,而且也方便操作和维护,从而保证先进控制系统安全可靠的运行。

计算机技术的发展是推动先进控制理论发展的主要动力,它从计算手段上为控制理论的发展提供了条件。适合于描述复杂系统运动规律的是微分方程,微分方程可以化成便于计算机求解的状态空间模型表达形式。其实早在18世纪状态空间法就已经被提了出来,这一将高阶微分方程转化为一阶微分方程组来表述的方法,虽然为求解高阶微分方程提供了一个很好的求解方法,但由于转化成一阶微分方程组后计算量巨大,依靠人工计算难以完成,因而该方法一直没有得到发展,直到计算机的应用解决了计算问题,从而彻底解决了状态方程的求解,

为先进控制理论的发展奠定了坚实的基础。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)1892年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956年,苏联科学家庞特里亚金(Pontryagin)提出极大值原理。同年,美国数学家 R. 贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959年美国数学家卡尔曼(R. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器,1960年卡尔曼又提出系统的可控性和可观测性问题。到20世纪60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析设计的新原理和方法基本确定,先进控制理论基本形成,但这一理论还在不断的发展和完善。

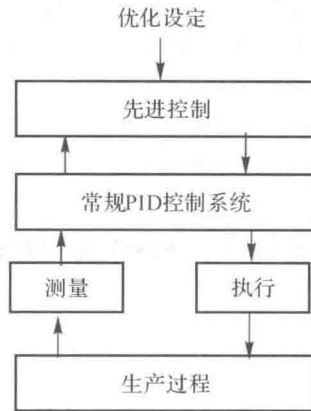


图 1-4 先进控制与常规 PID 控制的关系图

先进控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。先进控制理论在航空、航天、制导与控制中创造了辉煌的成就,使人类迈向宇宙的梦想变为现实。先进控制理论的发展也是为了解决工程实践中的具体问题而产生的。为了解决被控对象不太准确的问题,产生了模型预测控制方法;为了解决被控对象随时间或环境发生变化的问题,产生了自适应控制方法;为了解决被控对象建模中有部分不确定的问题,产生了鲁棒控制方法;为了模仿人不知道被控对象也能进行控制操纵的问题,产生了智能控制方法;为了解决被控对象的强非线性,进而研究了动态逆、反馈线性化等方法。认识也是在不断进步的。先进控制理论虽没有 PID 控制物理概念清楚、实际操作简单,但它可以解决 PID 控制解决不了的问题,先进控制应用得当可带来显著的经济效益。

第 2 章 纯滞后补偿和内模控制

当控制系统存在大延迟环节时,会使系统的闭环特征方程式包含纯延迟因子。对具有纯滞后的系统分析表明,增大系统中的延迟因子,会使闭环控制系统的可控程度明显下降,甚至会不稳定。当被控对象的纯滞后时间与被控对象主导时间常数之比超过 0.5 时,被称为大纯滞后过程。对这种过程,在采用常规 PID 控制时,为了维持系统的稳定性,必须将控制作用整定得很弱,因此在很多场合将得不到满意的控制性能。

由于很多被控对象会呈现出纯滞后特性,这就需要人们积极去研究可以补偿纯滞后的新型控制方法。史密斯预估算法就是比较有效的方法之一。

2.1 史密斯(Smith)预估算法

2.1.1 史密斯预估算法

所有纯滞后补偿的方法中,史密斯预估算法是目前最有效最好用的一种方法,通常称为史密斯预估器。它是一种以模型为基础的方法,可用以改善大纯滞后系统的控制品质。这种方法在 1957 年就提出来了,但因缺乏实现这一算法的合适硬件而一直没有得到实际应用。计算机用于在线控制后,史密斯预估算法又得到重视,下面将介绍这种算法。

设一个单回路控制系统,对象特性为

$$G_C(s) = G_P(s)e^{-\tau_P s} \quad (2.1.1)$$

其中 $G_P(s)$ ——对象传递函数中不包含纯滞后项的部分;

$e^{-\tau_P s}$ ——对象中的纯滞后部分;

$G_C(s)$ ——控制器。

则闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s)G_P(s)e^{-\tau_P s}}{1 + G_C(s)G_P(s)e^{-\tau_P s}} \quad (2.1.2)$$

相应的简单反馈系统表示在图 2-1,图中是将对象的两部分分开表达的。设这两部分的中间有个变量 B 。

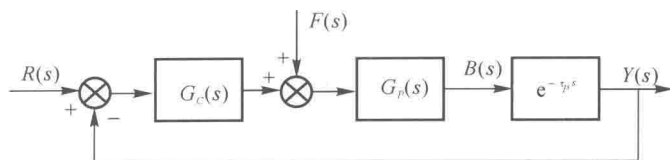


图 2-1 具有纯滞后过程的单回路控制结构图

从图 2-1 中可以看到被控变量 $y(t)$ 是 $B(t)$ 的延迟输出, $y(t)$ 将重复 $B(t)$ 同样变化,只

是时间上有个延迟。在这个单回路控制系统中, $B(t)$ 实际上是希望被控制的变量, 由于在实物系统中 $B(t)$ 是无法测量到的, 可以测量到的是与它变化相同, 只是时间上有个延迟的被控变量 $y(t)$ 。也正是由于希望的被控制变量 $B(t)$ 不能直接反馈而要经过延迟后反馈 $y(t)$, 这样就使得被控制变量的偏差不能及时通过反馈得到修正, 使得系统性能变差。从闭环系统特征方程 $1 + G_C(s)G_P(s)e^{-\tau_p s} = 0$ 中出现了延迟环节也可以说明, 由于延迟环节使系统稳定性降低。

要使系统性能保持没有延迟情况下的效果, 很自然就会想到能否直接从 $B(t)$ 引出反馈, 把纯滞后环节置于回路外边。由于反馈信号 $B(t)$ 没有滞后, 因而系统响应将会大大地改善, 如图 2-2 所示。

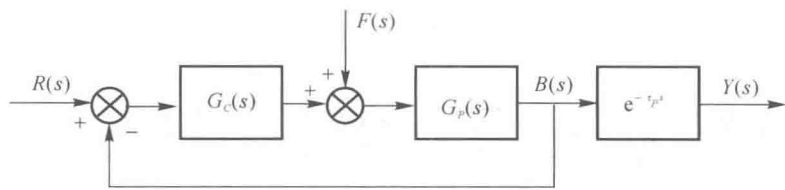


图 2-2 将纯滞后环节置于环外的单回路控制结构图

现在的问题是 $B(t)$ 是不可测量的, 无法引出 $B(t)$ 的反馈, 但是 $B(t)$ 用过程模型是可以推算出来, 如图 2-3 所示。

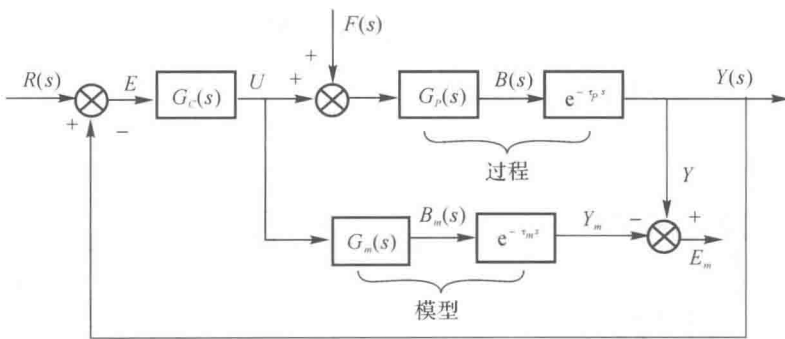


图 2-3 引入过程控制模型的反馈控制系统结构图

史密斯预估器的基本思想就是借助于过程模型, 推算出 $B(t)$, 以实现没有纯滞后的反馈控制。具有史密斯预估器的反馈系统如图 2-4 所示。

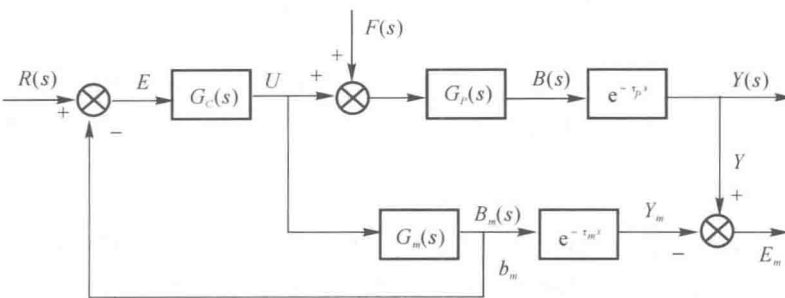


图 2-4 史密斯预估器控制系统结构图

如果模型是精确的,即 $G_P(s) = G_m(s)$, $\tau = \tau_m$, 且不存在扰动即 $F = 0$, 那么 y 将等于 y_m , $E_m = Y - Y_m = 0$ 。这样虽然实际系统中的 $B(t)$ 得不到, 但可以得到模型中相应的信号 B_m 。如果不存在建模误差, 那么 $B_m(t)$ 就等于 $B(t)$ 。就可以用 $B_m(t)$ 作为反馈信号实现无纯延迟情况下的控制效果。

但实际情况不可能如此理想, 如果模型不精确或出现扰动。即 $G_P(s) \neq G_m(s)$, $F \neq 0$, 那么, $Y \neq Y_m$, $E_m = Y - Y_m \neq 0$, 模型中信号 $B_m(t)$ 就不会与实际系统中的 $B(t)$ 完全一致, 采用图 2-4 的控制方式, 控制的精度也就不能令人满意。为了克服上述缺点, 可以采用图 2-5 所示的控制方式, 用 y_m 实现第二条反馈回路。对于模型不精确或出现的扰动而产生的 y_m 不等于 y 的偏差反馈回输入端用来抑制和减小两者的误差, 从而解决了模型不精确或扰动出现带来的影响。

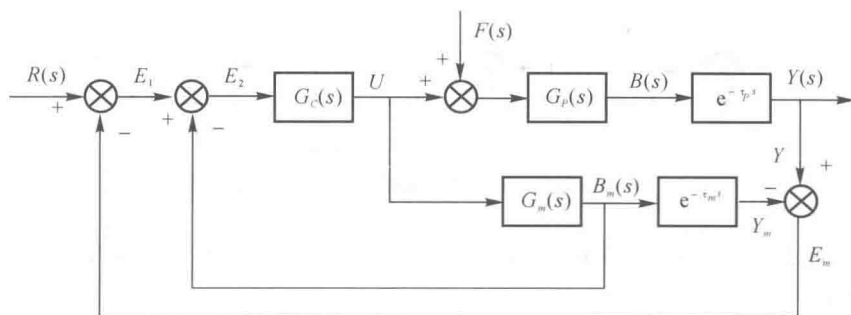


图 2-5 史密斯预估控制系统结构图

图 2-5 所示还可表示成图 2-6 所示的形式。

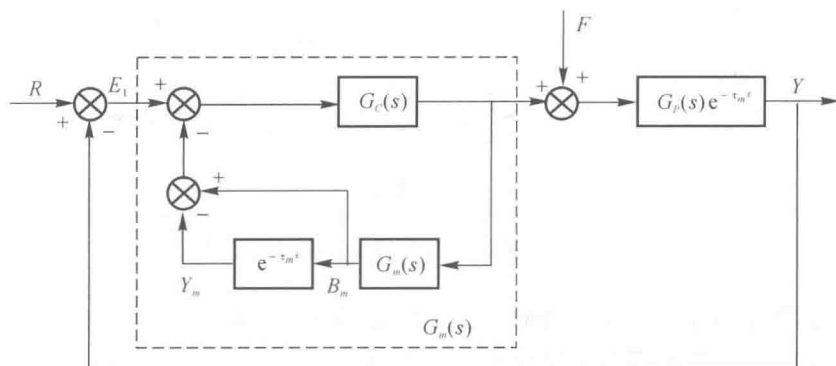


图 2-6 史密斯预估控制系统等效图

图 2-6 中的虚线方框表示整个控制装置。其中, $G_c(s)$ 为一般 PID 控制器。而虚线方框表示史密斯预估控制器, 它的传递函数为

$$\frac{G_c(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-\tau_m s})} \quad (2.1.3)$$

$y(t)$ 是过程的实际输出, $y_m(t)$ 为模型输出, 而 $B_m(t)$ 是没有纯滞后的模型输出。从史密斯预估控制器可以看出它包含了被控对象的全部信息, 因此设计出的史密斯预估控制器能实现较好的控制效果。

假定预估器中的参数与实际过程参数完全一致,则对设定值 R 而言,方块图2-2与图2-6所示是完全等效的,它们的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s)G_P(s)e^{-\tau_P s}}{1 + G_C(s)G_P(s)} \quad (2.1.4)$$

对比图2-1和图2-2(或图2-6),回路的开环传递函数由 $G_C(s)G_P(s)e^{-\tau_P s}$ 变成 $G_C(s)G_P(s)$ 。由于经补偿后,开环传递函数中不再包含纯滞后环节,这意味着若要求达到相同的回路稳定性,则控制作用可得到大大增强,从而显著地提高控制品质。

2.1.2 史密斯预估算法分析

例如:有一个一阶加纯滞后过程, $G_{PC}(s) = \frac{1}{10s+1}e^{-10s}$,若采用PI控制,则具有最佳整定参数的控制器算式为 $G_C(s) = 1.1\left(1 + \frac{1}{20s}\right)$ 。在经过史密斯补偿后,经重新调整参数的控制器算式为 $G_C(s) = 10\left(1 + \frac{1}{s}\right)$ 。可见比例增益约扩大9倍,积分时间缩小为原来的 $\frac{1}{20}$,表明了调节作用有了明显加强。

史密斯估计器对大纯滞后过程尽管能提供很好的控制质量,但遗憾的是,其控制质量对于模型误差(主要是纯滞后时间和增益误差)是很敏感的。为了说明模型误差带来的影响,仍然利用上面例子的情况,即设实际过程为

$$G_{PC}(s) = \frac{1}{10s+1}e^{-10s} \quad (2.1.5)$$

若建立的模型为

$$G'_{PC}(s) = \frac{1}{10s+1}e^{-8s} \quad (2.1.6)$$

显然模型中的纯滞后项存在误差。这样的补偿是不完全的。未被补偿的纯滞后将导致对象可控程度的下降。若采用能作完全补偿时的控制器参数,则可建立图2-7所示的控制系统图。可以想象这个系统的稳定性是很差的。其对 F 阶跃干扰的响应曲线表示在图2-8,可见系统已处于发散振荡。

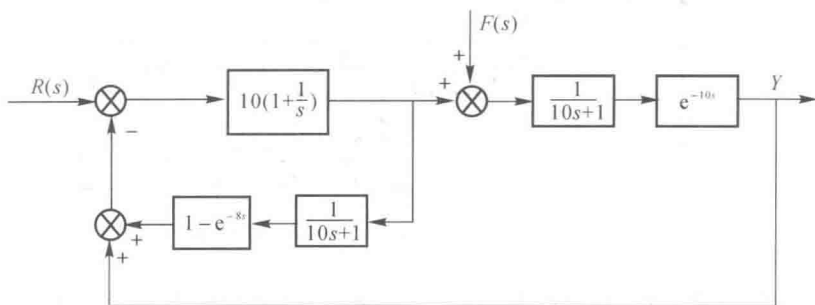


图 2-7 存在模型误差时的史密斯预估控制结构图

由于史密斯补偿器性能对模型误差很敏感,因而对严重非线性或时变增益的过程,这种线性的史密斯补偿是不太适用的,下面将介绍一种改进算法。

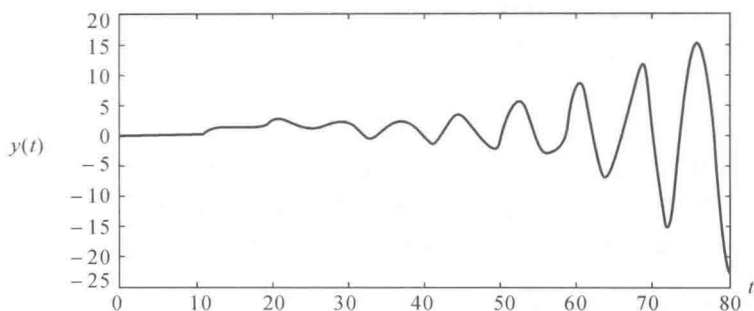


图 2-8 单位阶跃干扰响应曲线图

2.1.3 史密斯预估算法的改进

改进算法称为增益自适应纯滞后补偿器,它能有效地把控制对象和模型之间的所有差别都看作是增益的误差来处理。能通过利用控制对象和模型输出信号比较来对模型增益做出适应性修正。

采用改进算法后的系统方块图如图 2-9 所示。它的结构与史密斯预估器相似,只是系统的输出减去模型输出的运算,被系统的输出除以模型的输出的运算所代替,而对预估器输出作修正的加法运算改成了乘法运算。除法器的输出还串联一个超前补偿环节,其超前时间常数等于纯滞后时间。它用来使滞后了的输出比值有一个超前作用。这些运算的结果是使预估器的增益可根据模型和系统输出的比值有相应的校正值。

对于理想情况,过程输出和模型输出完全一样,又不考虑负荷变化问题,除法运算得到的结果始终等于 1,系统的方块图也可简化为图 2-2 所示形式。在这种情况下,增益自适应纯滞后补偿器与史密斯补偿器具有相同的改善控制性能的效果。当控制对象和模型输出并不完全一致时,增益自适应基本上是个多环控制系统。

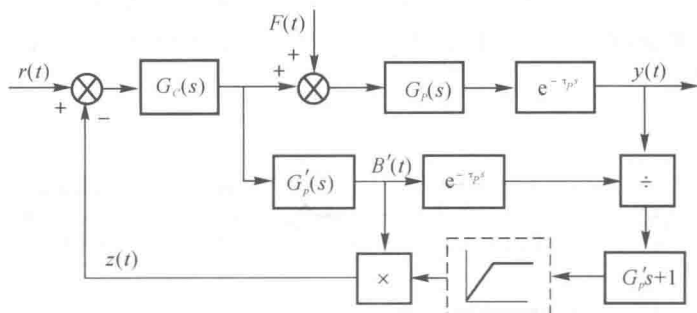


图 2-9 增益自适应纯滞后补偿器结构图

对于图 2-9 中的乘法器,假如将 $B'(t)$ 看成输入, $z(t)$ 看成输出,则可用图 2-10 表示。这种系统有一个值得注意的特点,就是它的稳定性仅仅取决于由控制器—预估器—可变增益环节组成的闭合回路(这里假定控制对象本身是稳定的)。在实施自适应纯滞后补偿方案时,必须对 K_e 值的允许范围加以限制以保证系统的稳定性。为此在运算器(即超前补偿环节)和乘法器之间增加限幅器(见图 2-9 中虚线方框)。而 K_e 变化的允许界限可利用稳定性分析来

获得。

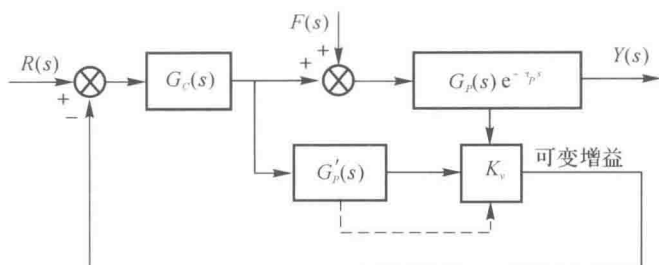


图 2-10 具有可变反馈增益的预估器结构图

数字仿真表明,采用增益自适应补偿的过程响应一般都比史密斯预估器更好些,对于模型不准确的情况尤其这样。但对模型纯滞后比对象纯滞后偏大的情况,增益自适应补偿的效果并不佳,所以在计算对象纯滞后时间时,估计得偏小一点比估计偏大更妥当些。

以上只是给出一种史密斯预估算法的改进方法,实际上有很多的改进形式的史密斯预估控制方法,但不论怎么改进,基本思想就是用模型中没有延迟的信息作为反馈量这一史密斯预估控制的基本思想,各尽所能的就是想尽各种方法来减少模型的误差或干扰带来的不利影响。

2.1.4 史密斯预估算法的离散化

下面来讨论模型没有误差情况下,用计算机控制时的史密斯预估算法设计,如图 2-11 所示。

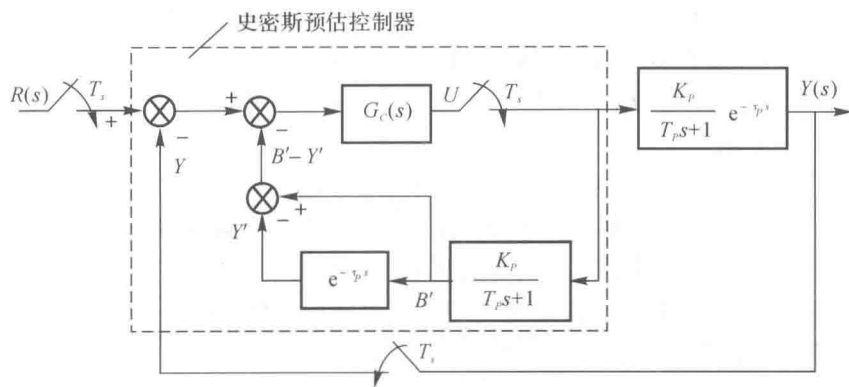


图 2-11 使用计算机时的史密斯预估补偿系统结构图

假定对象是一阶加纯滞后过程:

$$G_{PC}(s) = \frac{K_P}{T_p s + 1} e^{-\tau_p s} \quad (2.1.7)$$

参见图 2-11,可得

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = z[G_H(s)G_{PC}(s)] \quad (2.1.8)$$

其中, $G_H(s)$ 为零阶保持器的传递函数: