

先进控制技术

毛志忠 常玉清 编著



科学出版社

先进控制技术

毛志忠 常玉清 编著

东北大学 985 工程资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

先进控制是一门随着生产过程对控制系统要求不断提高而迅速发展起来的控制技术。本书针对复杂工业过程可能具有的非线性、大滞后、强干扰、参数时变、变量耦合及部分变量不可测等问题,重点介绍了目前能有效解决这些问题的先进控制技术和方法,其中包括一些作者及同行的教学经验及科研成果,主要包括推理控制、自适应控制、预测控制、多变量控制、智能控制、过程优化及故障检测与诊断等相关内容。

本书可作为自动化学科高年级选修课或控制理论与控制工程学科研究生课程的教材,也可供相关学科科研或工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进控制技术/毛志忠,常玉清编著. —北京:科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-034897-5

I. ①先… II. ①毛…②常… III. ①工业控制系统 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 130036 号

责任编辑:张海娜 潘继敏 / 责任校对:张怡君
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 335 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

先进控制技术目前尚无严格统一的定义,而且所涉及内容比较多。本书在简要归纳过程控制系统的特点和对控制器要求的基础上,主要介绍了比较成熟且具有广泛应用前景的先进控制技术和方法,全书共8章,内容如下:

第1章简述了控制系统的基本组成、复杂工业过程的特点及对控制系统的要求、先进控制技术的产生背景。

第2章介绍了推理控制系统的组成、模型误差对系统性能的影响、输出可测条件下的推理控制以及多变量推理控制系统的结构及推理控制器设计。

第3章在介绍自适应控制的功能及特点的基础上,主要讨论了模型参考和自校正两类自适应控制器。

第4章以模型算法控制、动态矩阵控制和广义预测控制算法为例,对预测控制的基本思想进行了介绍。

第5章主要介绍多变量系统的描述方法、多变量系统的基本关系,以及常用的多变量系统控制方法。

第6章介绍了智能控制的基本概念,重点介绍了比较成熟的模糊控制、神经网络控制和专家控制。

作为过程控制系统的核心,控制器的任务是使被控物理量平稳、快速和准确地跟踪设定值(或抑制干扰的影响),而过程的设定值需要进行优化,因此第7章介绍了过程优化的基本概念、优化目标的确定及最优设定值的求解方法。过程优化是在不修改工艺、不增加生产设备的情况下,根据市场经济信息和生产条件的变化,在满足各种生产约束的条件下,利用数学规划方法或近期发展起来的进化算法,求出使评价生产过程性能指标达到最优的各种工艺参数的设定值。

对现代复杂的工业过程而言,除了要求控制系统能对各物理量实现定值调节或跟踪设定值外,还希望控制系统能对过程中的设备进行早期的和准确的故障检测与诊断,并自动进行相应的处理,以减少停产时间、增加设备运行的安全性、避免人员和财产损失,争取尽可能大的经济效益。基于上述考虑,第8章给出了故障诊断的基本概念,并介绍了基于模型、基于数据以及基于知识的故障诊断方法。

全书由毛志忠和常玉清编写,何大阔、肖冬、王姝等也参加了部分章节的编写工作。由于作者水平有限,书中会存在一些不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 过程控制系统的基本组成	1
1.2 复杂工业过程的特点及对控制系统的要求	2
1.2.1 复杂工业过程的特点	2
1.2.2 复杂工业过程对控制系统的要求	2
1.3 先进控制技术的产生背景	4
1.3.1 PID 控制器的特点	4
1.3.2 先进控制技术的产生背景	5
第 2 章 推理控制	7
2.1 概述	7
2.2 推理控制系统的原理	7
2.2.1 问题的提出	7
2.2.2 推理控制系统的组成	10
2.2.3 推理控制器的设计	12
2.2.4 推理-反馈控制系统	14
2.3 推理控制系统模型误差对系统性能的影响	16
2.3.1 扰动通道模型误差的影响	16
2.3.2 控制通道模型误差的影响	17
2.4 输出可测条件下的推理控制	19
2.4.1 系统构成	19
2.4.2 模型误差对系统性能的影响	20
2.5 多变量推理控制	21
2.5.1 多变量推理控制系统的基本结构	21
2.5.2 多变量推理控制器的 V 规范型结构	22
2.5.3 带时间滞后多变量系统的 V 规范型推理控制器设计	24
2.5.4 滤波矩阵的选择	33
第 3 章 自适应控制	35
3.1 自适应控制概述	35
3.1.1 自适应控制系统的功能及特点	35

3.1.2	自适应控制系统的分类	36
3.1.3	自适应控制系统的发展及应用	38
3.2	模型参考自适应控制	38
3.2.1	模型参考自适应控制的数学描述	38
3.2.2	采用 Lyapunov 稳定性理论的设计方法	42
3.2.3	模型参考自适应系统的鲁棒性	49
3.3	自校正控制	50
3.3.1	概述	50
3.3.2	动态过程参数估计的最小二乘法	51
3.3.3	最小方差自校正控制器	56
3.3.4	广义最小方差自校正控制器	60
3.3.5	零极点配置自校正控制器	63
3.3.6	自校正 PID 控制器	68
3.4	多变量自校正控制器	71
3.4.1	多变量最小方差自校正控制器	71
3.4.2	多变量广义自校正控制器	74
第 4 章	预测控制	82
4.1	概述	82
4.2	预测控制的基本原理	83
4.3	模型算法控制	85
4.3.1	预测模型	85
4.3.2	模型校正	86
4.3.3	参考轨迹	88
4.3.4	滚动优化	88
4.4	动态矩阵控制的基本原理	89
4.4.1	预测模型	90
4.4.2	反馈校正	90
4.4.3	滚动优化	91
4.4.4	动态矩阵控制的基本算法	91
4.4.5	动态矩阵控制的性能分析	101
4.5	广义预测控制	106
4.5.1	预测模型	106
4.5.2	预测模型参数的求取	107
4.5.3	滚动优化	110
4.5.4	反馈校正	113

4.5.5 广义预测控制的稳定性	113
4.6 面向实际应用中的预测控制	115
4.6.1 前馈-反馈预测控制	115
4.6.2 串级预测控制	118
第5章 多变量控制	119
5.1 概述	119
5.2 多变量系统的数学描述	119
5.2.1 对象模型的内部描述法	120
5.2.2 对象模型的外部描述法	121
5.3 多变量系统分析	126
5.3.1 闭环系统的传递函数矩阵	127
5.3.2 闭环传递函数矩阵的极点和零点	128
5.3.3 系统的极点和零点	130
5.3.4 能控性和能观性	133
5.4 互联分析	137
5.4.1 多回路控制系统的互联	137
5.4.2 互联的度量	139
5.5 极点配置问题	144
5.5.1 状态反馈极点配置	145
5.5.2 输出反馈极点配置	149
5.6 解耦控制	152
5.6.1 串联解耦	152
5.6.2 线性状态反馈解耦	154
5.6.3 线性输出反馈解耦	159
第6章 智能控制	163
6.1 模糊控制	163
6.1.1 模糊数学简介	163
6.1.2 模糊控制的工作原理	170
6.1.3 模糊控制器的基本结构与组成	171
6.1.4 基本模糊控制器的设计	171
6.1.5 模糊 PID 控制器	179
6.2 神经网络控制	181
6.2.1 神经网络简介	181
6.2.2 神经网络直接反馈控制	185
6.2.3 神经网络逆控制	185

6.2.4	神经网络自适应控制	186
6.2.5	神经网络 PID 控制	187
6.2.6	神经网络预测控制	190
6.3	专家控制	191
6.3.1	专家系统概述	191
6.3.2	专家控制系统	193
6.3.3	专家控制系统应用实例	198
第 7 章	过程优化	204
7.1	概述	204
7.1.1	基本概念	204
7.1.2	过程优化的主要工作	205
7.2	过程优化模型	206
7.2.1	目标函数	206
7.2.2	决策变量	208
7.2.3	约束条件	208
7.2.4	过程优化模型的建立	210
7.3	过程优化模型的求解	214
7.3.1	优化算法的选择	214
7.3.2	遗传算法	214
7.3.3	过程优化实例	218
7.3.4	过程优化控制的结构	219
7.4	大工业过程稳态优化	220
7.4.1	大工业过程稳态优化问题的引入	220
7.4.2	大工业过程稳态优化问题的数学描述	223
7.4.3	三种基本协调方法	225
第 8 章	故障检测与诊断	232
8.1	概述	232
8.1.1	故障诊断技术的发展	232
8.1.2	故障的定义及分类	233
8.1.3	故障诊断的定义及分类	234
8.1.4	故障诊断系统性能评价	235
8.1.5	故障诊断方法	236
8.2	基于状态估计的故障诊断	238
8.2.1	引言	238
8.2.2	冗余信号的产生	238

8.2.3 IFD 诊断方案	239
8.2.4 IFD 系统实例	242
8.3 基于时序分析的故障诊断	244
8.3.1 引言	244
8.3.2 时序建模	245
8.3.3 判别函数	246
8.4 基于多元统计的故障诊断	248
8.4.1 主成分分析原理	248
8.4.2 基于主元分析的故障检测	250
8.4.3 基于主元分析的故障诊断	252
8.4.4 基于主成分分析的故障诊断实例	253
8.5 智能故障诊断方法	257
8.5.1 引言	257
8.5.2 基于专家系统的故障诊断	257
8.5.3 基于 RBF 神经网络的故障诊断	260
参考文献	264

第 1 章 绪 论

过程控制技术是利用测量仪表自动获取过程相关变量,通过控制器对影响过程状况的变量进行自动调整,以达到控制目的的技术。过程控制涉及化工、冶金、电力、航空等许多工业部门,对国民经济的发展起着十分重要的作用。过程控制水平的高低是衡量一个国家科学技术先进与否的重要指标之一。随着各个行业对产品数量和质量要求的不断提高以及控制理论和计算机技术的飞速发展,过程控制技术也在不断地发展和完善。

1.1 过程控制系统的基本组成

根据生产过程和使用设备不同,过程控制系统有多种不同的形式,但概括起来,大多数控制系统可用图 1.1 所示的结构表示,即过程控制系统主要由被控对象、检测环节和控制器等组成。

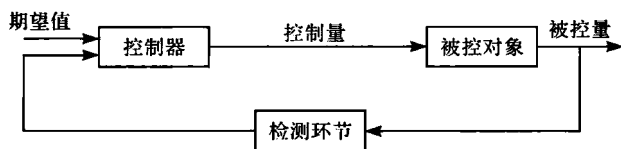


图 1.1 控制系统结构示意图

被控对象是指要进行控制的设备或过程(本书将执行机构和功率放大单元都归入被控对象),其输出称作被控量,其输入称作控制量。

检测环节包括传感器和变送器,用来检测被控量。检测环节的精度和特性直接影响控制系统的控制品质,它是构成自动控制系统的关键环节,所以,一般要求检测环节的精度高、反应灵敏且性能稳定。

控制器是过程控制系统的核心,它根据被控量的期望值与实际检测值之差(控制偏差)及相关信息(例如偏差的导数、积分等变量)来确定控制量,使控制系统趋于平衡状态(例如对 n 阶线性时不变系统而言,除偏差为零外,偏差的 $n-1$ 阶导数也应为零),或使系统输出按照期望的轨迹变化,以满足生产工艺要求。

1.2 复杂工业过程的特点及对控制系统的要求

1.2.1 复杂工业过程的特点

在一般的生产过程中,常规比例、积分和微分(以下简称 PID)控制器就能满足要求,这从 PID 控制器应用的广泛程度就可得出结论。据有关资料介绍,在现代化的大型企业中,85%~95%的控制系统采用常规 PID 控制器。但当被控对象比较复杂或对控制系统品质要求较高时(例如不仅希望调节时间短,同时还希望超调量小),常规 PID 控制器就无法满足生产工艺要求了,主要原因可归纳为如下几点。

1) 非线性

有的被控对象非线性特性比较严重,不能用简单的分段线性化的方法进行处理,如 pH 控制、聚合反应过程控制等。

2) 时变性

在实际生产中,部分被控对象的参数是时变的,而且变化幅度比较大,例如电炉炼钢电极升降系统中的电弧梯度(与系统开环放大系数成正比),在冶炼开始时约为 10V/mm,到冶炼结束时约为 1.1V/mm,其间大约变化了近 10 倍,显然在整个炼钢过程中,采用一个固定参数的控制器不可能满足生产工艺要求。

3) 耦合性

有些多变量系统相互耦合比较严重,不能简单地按单回路来处理,如隧道窑各区温度、精馏过程及电站锅炉燃烧过程的诸多控制回路中均存在较强的耦合关系。

4) 被控量不能在线测量

在实际控制过程中,存在一些在现有技术条件下无法在线测量的参数,或虽能测量,但设备昂贵且难以维护或者需离线且滞后较大,这些都给闭环控制造成困难,影响控制效果。如精馏过程塔顶(底)产品成分、聚合反应物的平均分子量、湿法冶金的浸出率等。

5) 大滞后

纯滞后的存在使闭环控制系统的性能变差,严重时将导致系统不稳定。

1.2.2 复杂工业过程对控制系统的要求

通常把被控量处于调节状态的过程称为动态过程或暂态过程,而把被控量处于相对稳定的状态称为静态或稳态,控制系统的指标通常用稳定性、稳态性能和动态性能来衡量。

1) 稳定性

当改变控制系统的期望值或发生扰动作用时,输出将偏离原来的稳态值,这时由于控制器的作用,系统输出若能达到新稳态或回到原稳态,就称系统是稳定的;若系统输出发散或不能回到稳态,系统就是不稳定的。对线性系统而言,系统的稳定性与系统期望值和扰动信号无关,只与系统结构和参数有关。显然,不稳定的系统是无法工作的,对控制系统最基本的要求就是稳定。

2) 稳态性能指标

通常采用稳态误差来衡量系统的稳态性能,当系统由动态进入稳态后,系统的期望值与实际输出值之差称为稳态误差,对于随动系统来说,稳态误差则是指在稳定跟随过程中,输出量偏离期望值的大小。稳态误差的大小反映了系统控制的准确程度,若稳态误差为零,则称系统为无差系统。在实际的控制系统中,要求稳态误差为零是不现实的,只要满足生产工艺要求,使稳态误差保持在规定范围内即可。

3) 动态性能指标

由于实际被控对象通常有一定的惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等),且实际的能源功率都有限制,系统中各种变量的值是不可能突变的。因此,系统从一个稳态转移到另一个稳态需要经历一段时间,即需要经历一个过渡过程,表征这个过渡过程品质的指标叫做动态性能指标,具体介绍如下:

(1) 最大超调量。最大超调量是输出最大值与输出稳态值的相对误差,简称超调量,它反映了系统的平稳性,超调量越小,说明系统过渡过程越平稳。

(2) 上升时间。上升时间是指系统输出第一次达到稳态值所对应的时间。对于无振荡的系统,常把输出量从输出稳态值的10%到输出稳态值的90%所对应的时间叫做上升时间。

(3) 调节时间。调节时间是指系统的输出量进入并一直保持在稳态输出值附近的允许误差带内所需的时间。允许误差带宽度根据实际生产工艺要求而定,一般取稳态输出值的 $\pm 2\%$ 或 $\pm 5\%$ 。调节时间反映了系统的快速性,调节时间越短,系统的快速性越好。

(4) 振荡次数。振荡次数是指在调节时间内,输出量在稳态值附近上下波动的次数,它也反映系统的平稳性,振荡次数越少,说明系统的平稳性越好。

在同一个控制系统中,上述性能指标往往存在着矛盾,必须兼顾它们之间的要求,根据具体的实际情况合理解决。

生产过程对控制系统的总体要求是:控制系统必须是稳定的,稳态误差在规定的范围内,动态过程的超调量应尽可能小且调节时间尽可能短。具体可归纳为如下几个方面:

(1) 控制器应使系统输出自动跟随期望值的变化,能够抑制系统中出现的扰

动,使系统达到最佳的性能指标。

(2) 当被控对象的结构及参数未知、或虽已知但在生产过程中变化时,控制器应能始终给出最佳的控制效果。

(3) 在某个输出变量受多个输入变量影响的多变量系统中,控制器应尽可能使该系统输出只受对应的期望设定值影响。

(4) 当系统输出不可测时,控制器能根据其他与系统输出有关的辅助变量保证系统稳定运行,并能消除系统的稳态误差。

以上是生产过程对控制器的要求,对于现代工业过程控制而言,不仅要求对重要工艺参数控制平稳、快速、准确,而且要求对整个流程实现优化控制,即系统追求的并非局部最优,而是全局最优。当然,这不是控制器本身的任务,而是以节约能源、降低原材料消耗、提高企业的经济效益为目的,要在不修改工艺、不增加设备的情况下,根据市场经济信息和生产条件的变化,调整各回路的设定值,使整个流程运行在最佳状态。

另外,为保证设备和控制系统安全可靠地运行,除定期对设备和控制系统中的各环节进行检修外,还希望能在运行过程中实时地进行故障检测和诊断,以便及时发现故障,把因故障造成的损失降到最小。

1.3 先进控制技术的产生背景

随着生产规模的不断扩大以及生产水平的不断提高,企业对生产过程的自动控制也提出了更高的要求。一些常规控制方法已远远不能满足一部分企业对提高经济效益、降低能耗、保护环境等的要求,这就使得先进控制技术的发展及应用成为必然。现代控制理论几十年来的发展为先进控制技术奠定了坚实的理论基础,而计算机技术的不断发展,又为先进控制技术的应用提供了软、硬件平台。可见,企业的需要、现代控制理论的发展以及计算机技术水平的提高推动了先进控制技术的发展及应用。在介绍先进控制技术的产生背景之前,先回顾一下PID控制器。

1.3.1 PID控制器的特点

广泛应用的PID控制律由比例控制、积分控制和微分控制综合而成,其特点可归纳如下:

(1) 控制量的计算既考虑了当前偏差的大小、偏差的积累,同时还考虑了偏差的变化趋势,控制系统的性能可通过比例增益、积分时间常数及微分时间常数来调整,综合性能较好。

(2) 采用PID控制器时,可以不知道被控对象的数学模型(当然,若知道被控

对象的数学模型,有利于 PID 参数的确定),对被控对象结构及参数的鲁棒性较强。

(3) 虽然有多种确定 PID 参数的方法,但要想将 PID 控制器的性能调整到最佳并非易事,且一旦控制器的参数调整完毕,控制器的性能也就固定不变了。

(4) PID 控制器属于线性控制器,难以实现既要调节时间短、还要超调量小的控制目标。虽然一些学者对经典 PID 控制器也作了一些改进,例如提出了积分分离 PID 控制器、带死区的 PID 控制器、微分先行 PID 控制器等等,但仍然不能满足现代工业过程对控制系统的要求。

1.3.2 先进控制技术的产生背景

何谓先进控制技术,目前还没有一种严格统一的定义,一般是指那些不同于常规单回路控制、并比常规 PID 控制器有更好控制效果的控制策略的总称,本书主要介绍对具有非线性、时变、大时滞、强耦合及关键变量不能在线获得的生产过程行之有效的先进控制技术。

在工业过程控制中,由于原材料成分不稳定,或者由于生产品种改变,或者由于设备磨损等,这都将导致系统运行环境或系统参数的改变,而常规 PID 控制器不能很好地适应工艺参数的变化,从而导致产品质量不稳定。由此发展起来的自适应控制技术,根据被控系统的输入输出数据,在线辨识系统的参数,进而确定控制器的参数,计算出最佳的控制信号。由于控制器参数可以随着环境和特性变化而自动整定,所以对各种不同的运行条件,控制器都能很好地工作,使被控过程输出对其设定值的方差达到最小,这样既保证了产品质量、又降低了原材料和能源的消耗。

相对常规 PID 控制器来说,自适应控制器比较复杂,绝大多数自适应控制器都要靠计算机实现,经典的自适应控制器对系统的零点和时滞比较敏感,而计算机的控制周期影响被控系统脉冲传递函数的零点和时滞,可见寻找一种理论上比较完善、适用范围广且鲁棒性好的控制方法势在必行,预测控制便是在这样的背景下产生的。它将多点预测、设定值柔化、滚动优化及反馈校正综合到一起;由于模型结构的不唯一性,使它可以根据对象的特点和控制要求,以最合适的方式建立预测模型;它可以把实际系统中的不确定因素考虑在优化过程中,形成动态的最优控制。预测控制是最有应用前景的先进控制技术之一。

对于输出无法测量或难以测量的工业过程,不能直接实现反馈控制,此时只能采用控制辅助输出的方法间接控制过程的主要输出,若采用常规 PID 控制器,很难使过程输出很好地跟踪设定值,为了解决过程控制中存在的这种情况,科学工作者进行了各种努力。理论分析和实验结果均表明,由美国科学家 Coleman Brosilow 和 Martin Tong 提出的推理控制较其他控制方法具有更好的效果。他

们在建立被控对象数学模型的基础上,根据对过程输出性能的要求,通过数学推理,得到控制器应具有的结构形式。

上面讨论的都是一个控制变量和一个被控变量的控制系统,称为单变量控制系统,但有些生产过程的被控变量和控制变量都不止一个,而且相互之间还有关联,若简单地采用常规的单回路方法控制多变量系统,尽管在设计和操作时可采取一些补救措施,但由于没有充分考虑系统内部的互联,因此系统的闭环性能很难达到要求,严重时甚至会破坏各回路间的正常运行状态。正是在实际生产过程要求的推动下,多变量系统的控制方法才得到发展和完善。由于单变量控制比较简单成熟,所以研究多变量控制系统的一个主要思路是解耦,即先使开环系统完全解耦,从而构成多个完全独立的单回路系统;另外,也可以利用补偿器和反馈使闭环系统解耦。

随着科学技术的不断发展,对产品质量的要求不断提高,进而对控制系统性能的要求也越来越高。另一方面有些工业过程具有综合复杂性,即被控对象具有非线性、时变性、强耦合、大滞后等特点,需要控制器具有自学习、自适应、自组织和决策能力等。这就带动了智能控制技术的发展,智能控制是一个新兴的学科领域,目前有关智能控制的定义、理论、结构等尚无统一的系统描述,本书仅介绍模糊控制、神经网络控制和专家控制。

第 2 章 推理控制

2.1 概 述

随着现代工业过程对控制、计量、节能增效和运行可靠性等要求的不断提高,各种测量要求日益增多,因此现代过程检测与以往相比具有更深的内涵以及更广的扩展。一方面,仅获得压力、液位、温度等常规过程参数的测量信息已不能满足工艺操作和控制的要求,需要获取如成分等与过程操作和控制密切相关的参数测量信息。另一方面,仪表测量的精度要求越来越高,测量从静态或稳态检测向动态检测发展。然而对于许多工业过程,一些与产品质量密切相关、需要加以严格控制的重要过程参数由于技术或经济的原因还很难(或根本无法)通过传感器在线得到,如精馏塔的产品组分浓度、化学反应器的反应物浓度和产品质量分布、生物发酵罐中的生物量参数等。若采取定时离线分析的方法,需要较长时间才能得到一组数据,无法实现关键变量的直接闭环控制。我们知道,当系统中的主要扰动可测、不可控时,可以采用前馈控制方法有效地克服其对过程关键变量的影响。但是,在工业生产过程中,当系统主要扰动不可或难于测量时,就无法直接利用前馈控制方法来补偿主要扰动对系统关键变量的影响。

在过程关键变量和主要扰动不可直接测量的情况下,推理控制(inferential control)能够有效地解决不可直接测量的关键变量的控制问题。推理控制是美国 Coleman Brosilow 和 Martin Tong 于 1978 年提出的,基本思想是利用生产过程中可以在线测量的变量,如温度、压力和流量等信息作为辅助变量(secondary variable),估计出不可测扰动对系统不可测关键变量(primary variable)的影响,再在建立的过程数学模型的基础上,根据对过程输出性能的要求,通过数学推理推导出控制系统所应具有的结构形式,以消除不可直接测量的主要扰动对过程关键变量的影响,进而改善控制系统的控制品质。

2.2 推理控制系统的原理

2.2.1. 问题的提出

在工业过程中,当过程输出变量无法直接获得时,通常采取间接控制方法。

所谓间接控制方法是指对一个与过程输出直接相关的可测变量(辅助变量)进行自动控制,从而达到间接控制过程关键变量(也称为主变量)的目的,控制原理如图 2.1 所示。

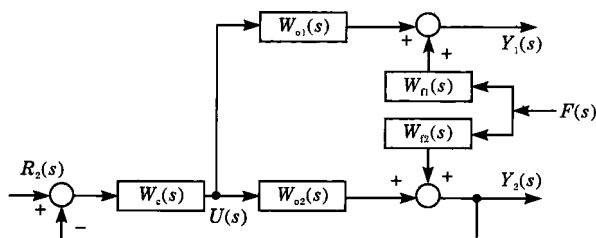


图 2.1 间接控制原理图

图 2.1 中, $Y_1(s)$ 为不可测的过程关键变量, $Y_2(s)$ 为用于实现间接控制所选的辅助变量; $W_{oi}(s)$ 、 $W_{oz}(s)$ 分别为控制通道的传递函数; $W_{fi}(s)$ 、 $W_{fz}(s)$ 分别为扰动通道的传递函数; $W_c(s)$ 为控制器; $R_2(s)$ 为辅助变量 $Y_2(s)$ 的设定值; $F(s)$ 为不可测扰动。

在常规控制器的控制作用下,系统的关键变量和辅助输出分别为

$$Y_1(s) = \frac{W_c(s)W_{oi}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)}R_2(s) + \left(W_{fi}(s) - \frac{W_{fz}(s)W_c(s)W_{oi}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)} \right) F(s) \quad (2.1)$$

$$Y_2(s) = \frac{W_c(s)W_{oz}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)}R_2(s) + \frac{W_{fz}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)}F(s) \quad (2.2)$$

式(2.1)的证明

由图 2.1, 设控制器输出的控制作用为 $U(s)$, 则

$$Y_1(s) = U(s)W_{oi}(s) + W_{fi}(s)F(s) \quad (2.1a)$$

$$U(s) = [R_2(s) - (W_{fz}(s)F(s) + U(s)W_{oz}(s))]W_c(s) \quad (2.1b)$$

整理式(2.1a)和式(2.1b)后,有

$$U(s) = \frac{R_2(s)W_c(s) - W_{fz}(s)F(s)W_c(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)} \quad (2.1c)$$

将式(2.1c)代入式(2.1a),有

$$\begin{aligned} Y_1(s) &= \frac{R_2(s)W_c(s) - W_{fz}(s)F(s)W_c(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)}W_{oi}(s) + W_{fi}(s)F(s) \\ &= \frac{W_c(s)W_{oi}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)}R_2(s) + \left(W_{fi}(s) - \frac{W_{fz}(s)W_c(s)W_{oi}(s)}{1+W_c(s)W_{oz}(s)} \right) F(s) \end{aligned}$$

式(2.2)的证明

由图 2.1 有