

热能动力工程专业本科系列教材

现代火电厂 计算机控制系统

周洪煜 编



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

现代火电厂计算机 控制系统

周洪煜 编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是动力工程类专业本科生和研究生的火力发电厂计算机控制系统教材,全书共分为5章,在编写的过程中,力求把计算机控制系统的基础理论和火力发电厂DCS的应用实例有机地结合起来,使读者从原理上深入掌握DCS控制系统的设计原理、基本结构和运行效果,能够熟练地从事火力发电厂DCS控制系统的运行和维护。

本书的内部版曾在动力工程类专业本科生、研究生、工程硕士和发电厂技术人员的培训中多次作为教材使用,并结合发电厂的实际情况对教材的内容做了多次修改,可作为动力工程专业本科生、研究生DCS控制系统教材,也可作为自动化类专业热工控制系统教材,还可供从事计算机测控系统运行维护的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代火电厂计算机控制系统/周洪煜编. —重庆:重庆大学出版社,2009.3

(热能动力工程专业本科系列教材)

ISBN 978-7-5624-4792-4

I. 现… II. 周… III. 火电厂—计算机控制系统—高等学校—教材 IV. TM621.6-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第017547号

现代火电厂计算机控制系统

周洪煜 编

责任编辑:谭 敏 曾春燕 版式设计:谭 敏
责任校对:文 鹏 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:387千

2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN 978-7-5624-4792-4 定价:26.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

出版说明

在“十一五”GDP 能耗降低 20% 的大背景下,作为耗能大户的电力行业自然首当其冲,根据机组能耗情况进行调度则是实现这一目标的最直接手段和必然之举。在激烈的竞争面前,各个电力生产厂家为了获得上网优先权,必须采取一切措施降低机组能耗,而热力发电厂计算机控制系统的安全、有效运行是降低机组能耗的关键环节之一。

在燃煤发电机组的规模方面,截至 2008 年 4 月,已有 8 台国产百万千瓦超超临界机组投入运行,这标志着我国的发电核心技术进入了世界的先进行列。伴随着百万千瓦级别机组的增加,中国发电机组的规模结构开始加速调整。在新增机组中,30 万千瓦及以上机组占新增容量的 75.84%。随着机组规模的大型化和超临界、超超临界机组的投运,对电厂计算机控制系统的要求也越来越高。

综上所述,为了适应机组大型化和 DCS 系统的不断更新,在教材的编写上也要对其内容做相应的更新,使读者迅速掌握 DCS 控制系统方面的新知识和技术,满足实际工作的需要,而《现代火电厂计算机控制系统》正是针对上述要求编写而成。

本书读者群定位于动力工程专业和热工控制本、专科学生、研究生以及从事计算机测控系统运行维护的工程技术人员。

本书的出版拟作为重庆大学动力工程专业教材丛书之一,在出版的过程中得到了业界许多专家、学者的鼎力相助,对此表示衷心的感谢!同时,热切欢迎广大读者提出宝贵意见,或者推荐更多优秀选题。

重庆大学出版社
2009 年 3 月

前言

电力行业是把一次能源通过对应的各种发电设备转换成电能,并且把电能输送到最终用户处,向最终用户提供不同电压等级和不同可靠性要求的电能及其他电力辅助服务的一个基础性的工业行业。在过去的几年里,电力行业在国民经济中所占的比重逐年增加,目前已经达到了 3.28% 的高点。

在“十一五”GDP 能耗降低 20% 的大背景下,作为耗能大户的电力行业自然首当其冲,根据机组能耗情况进行调度则是实现这一目标的最直接手段和必然之举。在激烈的竞争面前,各个电力生产厂家为了获得上网优先权,必须采取一切措施降低机组能耗,而热力发电厂计算机控制系统的安全、有效运行是降低机组能耗的关键环节之一。

目前,火力发电厂 DCS 控制系统的教材出版很多,本书在编写的过程中,力求把计算机控制系统的基础理论和火力发电厂 DCS 的应用实例有机地结合起来,使读者从原理上深入掌握 DCS 控制系统的设计原理、基本结构和运行效果,能够熟练地从事火力发电厂 DCS 控制系统的运行和维护。

本书的内部版曾在动力工程类专业本科生、研究生、工程硕士和发电厂技术人员的培训中多次作为教材使用,并结合发电厂的实际情况对教材的内容做了多次修改,可作为动力工程专业本科生、研究生 DCS 控制系统教材,也可作为自动化类专业热工控制系统教材,还可供从事计算机测控系统运行维护的工程技术人员参考。

本书在编写的过程中,得到广东电力设计院、西北电力设计院、国电南自等从事热工控制的工程技术人员的大力支持,在此一并表示感谢。

重庆大学自动化学院朱麟章教授对本书的编写提出了宝贵的建议,重庆大学动力工程学院研究生陈孜虎、张振华、高鹏

飞、陈小健为本书的编写进行了大量的资料收集工作和相关的系统仿真实验。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2009 年 1 月

目 录

第 1 章 热工自动控制系统的基本理论	1
第 1 节 概述	1
第 2 节 单回路控制系统	5
第 3 节 复杂控制系统	29
第 4 节 针对延时系统的控制策略	42
第 2 章 火力发电厂锅炉自动控制系统	44
第 1 节 概述	44
第 2 节 锅炉给水自动控制系统	47
第 3 节 锅炉蒸汽温度自动控制系统	60
第 4 节 锅炉燃烧自动控制系统	72
第 5 节 锅炉炉膛安全监控系统	87
第 3 章 汽轮机的自动控制	100
第 1 节 概论	100
第 2 节 电液调节系统	102
第 3 节 数字式电液控制系统(DEH)	104
第 4 节 DEH 系统的转速控制和负荷控制	115
第 5 节 DEH 系统的汽轮机自动程序控制	129
第 6 节 DEH 系统的超速防护和汽轮机危急遮断 控制系统	135
第 4 章 协调控制系统	147
第 1 节 协调控制系统概述	147
第 2 节 协调控制系统的总体结构	154
第 3 节 协调控制系统的运行方式	167
第 4 节 解耦控制在协调控制系统中的实现	175
第 5 章 计算机分散控制系统的硬件设备	185
第 1 节 计算机分散控制系统的一般概念	185
第 2 节 计算机控制系统的数据采集	207
第 3 节 分散控制系统的控制单元和控制站	217
第 4 节 分散控制系统的数据通信	220
参考文献	235

第 1 章

热工自动控制系统的基本理论

第 1 节 概 述

一、电力系统的发展与热力发电厂计算机控制系统

电力行业是把一次能源通过对应的各种发电设备转换成电能,并且把电能输送到最终用户处,向最终用户提供不同电压等级和不同可靠性要求的电能及其他电力辅助服务的一个基础性的工业行业。在过去的几年里,电力行业在国民经济中所占的比重逐年增加,目前已经达到了 3.28% 的高点。

在“十一五”GDP 能耗降低 20% 的大背景下,作为耗能大户的电力行业自然首当其冲,根据机组能耗情况进行调度则是实现这一目标的最直接手段和必然之举。在激烈的竞争面前,各个电力生产厂家为了获得上网优先权,必须采取一切措施降低机组能耗,而热力发电厂计算机控制系统的安全、有效运行是降低机组能耗的关键环节之一。

在燃煤发电机组的规模方面,截至 2008 年 4 月,已有 8 台国产百万千瓦超超临界机组投入运行,这标志着我国的发电核心技术进入了世界的先进行列。伴随着百万千瓦级别机组的增加,中国发电机组的规模结构开始加速调整。在新增机组中,30 万千瓦及以上机组占新增容量的 75.84%。随着机组规模的大型化和超临界、超超临界机组的投运,对电厂计算机控制系统的要求也越来越高。

此外,电力辅助服务在近几年的电力改革中已经被高度重视,辅助服务包括基本辅助服务和有偿辅助服务。基本辅助服务是指为了保证电力系统安全稳定地运行,保证电能质量,发电机组所必须提供的辅助服务,包括一次调频、基本调峰、基本无功调节等。

(1) 一次调频是指当电力系统频率偏离目标频率时,发电机组通过调速系统的自动反应,调整有功出力,以减少频率偏差所提供的服务。

(2) 基本调峰是指发电机组在 50% ~ 100% 额定出力范围内,为了跟踪负荷的峰谷变化而有计划地,按照一定的调节速度调节发电出力所提供的服务。

(3) 基本无功调节是指发电机组迟相功率因数在 0.9 ~ 1.0 范围内向电力系统注入无功

功率,或进相功率因数在 0.97 ~ 1.0 范围内从电力系统吸收无功功率所提供的服务。

有偿辅助服务是指并网发电厂为基本辅助服务所提供的辅助服务,包括自动发电控制 (AGC)、有偿调峰等。

预计未来几年,电力辅助服务将单独收费。电力生产企业从自身的经济利益出发,将增强其提供电力辅助服务的能力,而这种能力在很大程度上取决于燃煤发电厂计算机控制系统的运行质量。

二、热工生产过程自动控制与自动控制系统

目前,电力系统的设备日趋大型化,大型火力发电厂过程的自动控制主要是针对锅炉、汽轮机及其他辅助设备运行的自动控制。由于现代大型火力发电厂的生产过程具有生产的连续性和产品的无储备性两大特点,因此,电厂自动控制系统的目的是使机组自动适应外界负荷和内部系统工况的变化而保持在安全、经济的条件下运行。火力发电厂生产过程自动控制的目标是把表征生产过程是否正常进行的一些物理量和化学量,如主蒸汽压力、温度;炉膛负压、汽包水位、蒸汽流量和烟气中的含氧量等,尽可能地接近所希望的数值。通常把生产过程中的热工参数(如温度、压力、流量、液位、化学成分等)等称为热工过程控制参数,控制系统就是对这些参数实施控制。电厂生产过程中另一类控制是对生产设备的启动和停机的自动控制,例如锅炉、汽轮机、水泵、风机等设备在启动和停机时要按照运行要求,以规定的条件和程序进行一系列自动操作,这类控制称为顺序控制。顺序控制也是热工过程控制的重要组成部分。热工过程自动控制是现代火力发电厂生产的必要条件之一。

电厂控制系统设计的主要任务就是根据被控对象的动态特性,选择或设计控制器使所构成的系统满足规定的性能指标,可以利用各种仪表和自动化装置(包括计算机和微处理器)对热工过程实现自动控制,构成热工过程自动控制系统。热工过程自动控制系统可分为两大类:随动控制系统和自动调节系统。随动控制系统和自动调节系统都是反馈控制系统。

1. 随动控制系统

被调量通常是位置、速度、加速度等机械运动参数,它们随着设定值的改变而改变,这类反馈控制系统,也称为伺服系统。在随动控制系统中,引起控制系统动作的主要原因是设定值的变化,控制系统应使被调量尽快地跟随设定值的变化而变化。

2. 自动调节系统

即断续控制系统和连续控制系统。断续控制系统所要控制的变量是开关量(开或关、大或小、有或无)。如果控制系统只按事件的逻辑关系来决定控制变量的开或关,称为逻辑控制系统;如果控制系统根据规定的条件和程序来决定控制变量的开或关,就是顺序控制系统。断续控制系统主要应用于机组的自动启、停和自动保护系统以及周期性工作的设备中。

连续控制系统所要控制的变量是连续变化量,生产过程中热工参数的自动控制系统通常都是连续控制系统。这类控制系统也称为过程控制系统。控制系统通常用反馈控制的方式来实现,故也称为反馈控制系统,反馈控制系统的主要任务是抑制各种干扰对系统输出的影响。分析研究反馈控制系统的理论是反馈控制理论。本章主要叙述有关反馈控制的基本构成和工作原理。

三、生产过程自动控制系统的举例

一个典型的反馈控制系统的结构如图 1.1 所示。表征生产过程状态和运行质量的生产过程的被调量(被控变量)经自动检测装置测量和变换后与设定值进行比较,当两者出现偏差时,偏差信号进入控制器,控制器通过一定规律的运算产生出相应的控制信号输出(控制作用),该信号经放大处理后输入到执行器中去改变被调节量使其维持在希望的范围内,由于生产过程是非常复杂的,可能存在各种各样的干扰,这些干扰都可能使被控量偏离给定值从而影响运行质量,因此控制系统的任务就是如何采用正确的控制对策去抑制这些干扰对系统输出的影响。单元机组控制系统流程图如图 1.2 所示。

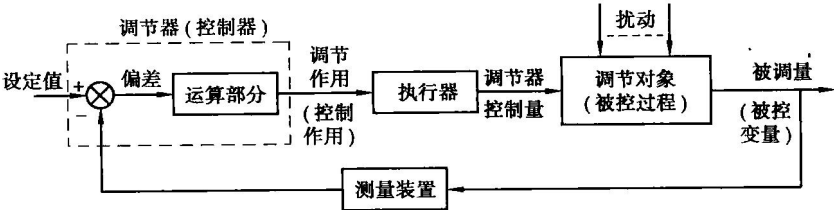


图 1.1 典型的热工过程控制系统

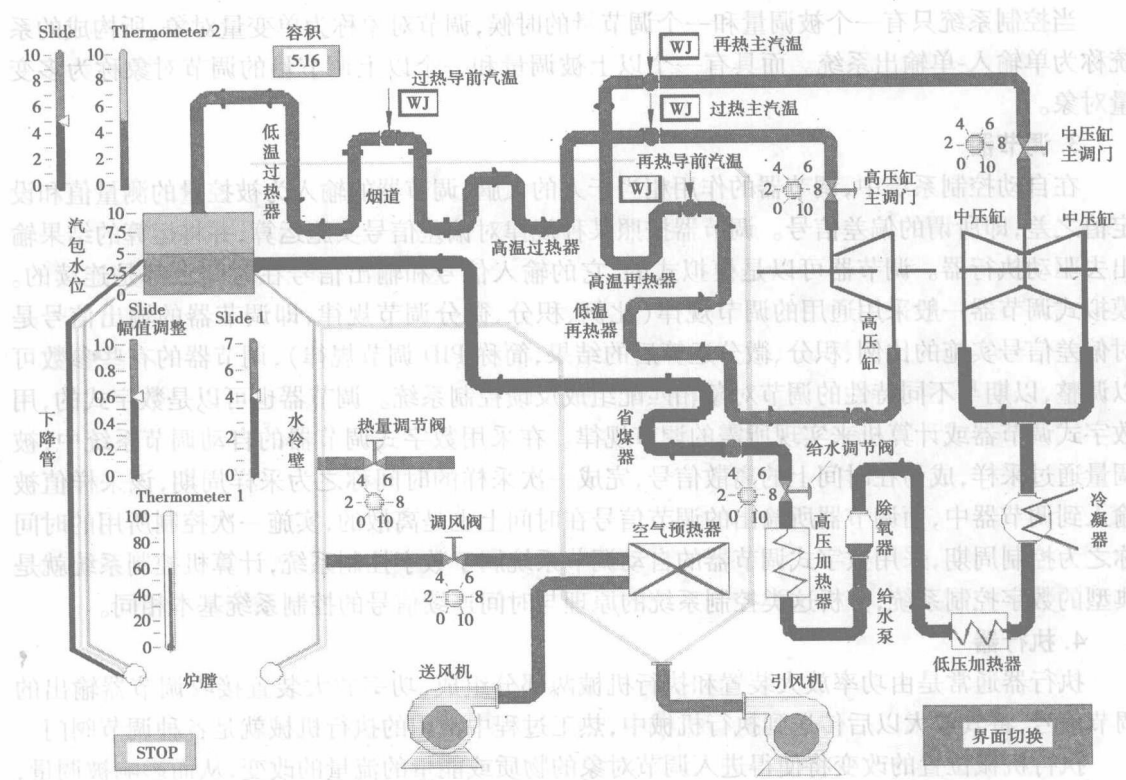


图 1.2 单元机组控制系统工艺流程图

基本反馈控制系统的主要环节为：

1. 设定值

设定值通常选择表征系统产品质量或运行状态的重要参数,设定值既可能为恒定值,也可能随时间缓慢地变化,即通常所说的慢时变系统。这类反馈控制系统的任务主要是克服各种扰动所造成的被调量的改变,使被调量与设定值的偏差尽可能地小,而且尽快地等于设定值。热工过程连续自动控制系统大多属于自动调节系统。随动控制系统和自动调节系统的基本原理相同,但控制系统的主要作用和控制性能指标是有差别的。

2. 调节对象

调节对象既可能是一些工艺设备、装置,也可能是一个生产过程。调节对象的输出信号通常是表征生产过程运行质量的重要的变量,亦称之为被调量(或被控变量);而输入信号则为影响被调量变化的各种因素,包括主动改变被调量的控制手段(称为调节量或控制量)和其他可以引起被调量变化的原因(称为扰动)。

例如,对于锅炉,为了实现给水自动控制,就要建立以汽包水位作被控量输出,而以给水流量(调节量)和蒸汽流量、燃烧率等扰动作为输入信号的给水调节对象。根据自动控制的目的,正确建立调节对象,是分析研究自动控制的基础。

调节对象的输入信号和输出信号在动态过程中的变化关系称为调节对象的动态特性,动态过程也称为过渡过程,用数学方程来描述对象的动态特性时,这些数学方程称为调节对象的数学模型。

当控制系统只有一个被调量和一个调节量的时候,调节对象称为单变量对象,所构成的系统称为单输入-单输出系统。而具有一个以上被调量和一个以上调节量的调节对象称为多变量对象。

3. 调节器

在自动控制系统中,调节器的作用相当于人的大脑,调节器的输入为被控量的测量值和设定值之差,即所谓的偏差信号。调节器按照某种规律对偏差信号实施运算,并将运算的结果输出去驱动执行器。调节器可以是模拟式的,它的输入信号和输出信号在时间上都是连续的。模拟式调节器一般采用通用的调节规律(比例、积分、微分调节规律,即调节器的输出信号是对偏差信号实施的比例、积分、微分运算后的结果,简称PID调节规律),调节器的有些参数可以调整,以期与不同特性的调节对象相匹配组成反馈控制系统。调节器也可以是数字式的,用数字式调节器或计算机来实现所需的调节规律。在采用数字式调节器的自动调节系统中,被调量通过采样,成为在时间上的离散信号,完成一次采样的时间称之为采样周期,该采样值被输入到调节器中,而调节器所输出的调节信号在时间上也是离散的,实施一次控制所用的时间称之为控制周期,采用数字式调节器的自动调节系统属于数字控制系统,计算机控制系统就是典型的数字控制系统,分析这类控制系统的原理与时间连续信号的控制系统基本相同。

4. 执行器

执行器通常是由功率放大装置和执行机械两部分组成,功率放大装置接收调节器输出的调节信号,将其放大以后传送到执行机械中,热工过程中常用的执行机械就是各种调节阀。

执行机械位置的改变将使得进入调节对象的物质或能量的流量的改变,从而影响被调量,使被调量的数值等于其设定值。

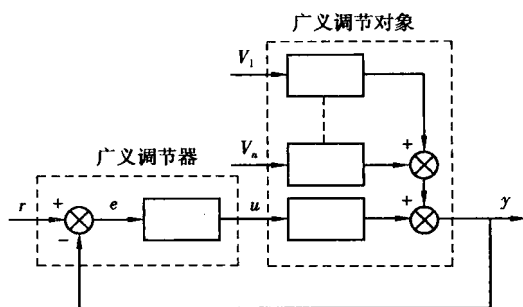


图 1.3 单变量反馈控制系统简化框图

r —设定值; e —偏差; u —调节量; y —被调量; $y_i, \dots, V_a$ —扰动

扰动通道纳入了广义被调对象中。

图 1.1 是对于一个单变量对象所组成的最基本的反馈控制系统,分析研究这类反馈控制系统是反馈控制理论的基础。为了便于分析讨论,在控制理论中常把图 1.1 所示的反馈控制系统表示为两个部分:其中一个控制子系统,或称为广义调节器,习惯上简称之为调节器或控制器;另一个是被控子系统,或称为广义调节对象(或广义被控过程),习惯上简称之为调节对象(或过程)。反馈控制系统的简化框图如图 1.3 所示。与图 1.1 相比可以看出:广义调节器中包含了设定值和被调量测量信号的比较部分、运算部分和执行器(或执行机构);广义调节对象中包含了被控过程和测量装置(也可能包含调节机构)。

本章主要介绍火电厂计算控制系统中的 PID 控制算法、原理、参数整定及控制效果分析等。并介绍串级控制、前馈控制、解耦控制和前馈-反馈控制等几种在火电厂中常用的复杂控制系统。本章还将介绍针对延时系统的自动控制策略和方法。

第2节 单回路控制系统

在过程控制系统中,应用最为广泛的是 PID 自动控制器;它具有原理简单、鲁棒性能(Robustness)强、易于实现、适用范围广等优点。近 20 年来,由于计算机技术的快速发展,出现了一些复杂的控制算法,但是 PID 仍然是应用最为广泛的控制算法。本节主要介绍计算机控制系统中常用的 PID 控制算法、原理、参数整定及实际控制效果分析等。

一、PID 控制原理

自动控制技术都是基于反馈的,其要素包括 3 个部分:测量、比较和执行。测量得到的是变量,与期望值相比较得到偏差,这个偏差信号作为控制系统的输入对系统进行控制。当被控对象的结构和参数不能完全获得或者根本得不到系统精确的数学模型时,控制理论的其他技术难以采用,系统控制器的参数必须依靠经验和现场调试来确定,这时应用 PID 控制技术最为方便。即使当我们不完全了解一个系统和被控对象,或是不能通过有效的辨识手段来获得系统参数时,也适合采用 PID 控制技术。PID 控制器就是根据系统的偏差,利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。PID 控制的结构框图如图 1.4 所示。

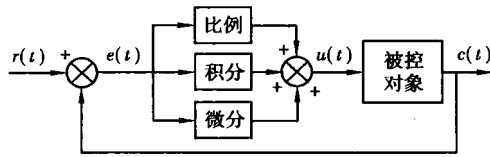


图 1.4 PID 控制结构框图

1. PID 控制的工作原理及环节

(1) 比例(Poportional)控制

比例控制是一种基本的控制方式,控制器的输出与输入误差信号成确定的比例关系,该常数称之为比例常数 K_p 。当仅有比例控制时,系统输出与给定值之间存在稳态误差(Steady state error),故比例控制也称为有差控制。比例控制贯穿于整个动态过程的始终。

(2) 积分(Integral)控制

在积分控制中,控制器的输出与输入偏差信号的积分成正比关系。对一个自动控制系统,如果进入稳态后存在稳态误差,则称这个控制系统是有稳态误差的,简称为有差系统(System with Steady state Error)。为了消除稳态误差,在控制器中必须引入积分作用,积分作用的大小就是偏差对时间的积分值。这样,即便偏差很小,积分作用也会随着时间的延长而改变,从而导致控制器的输出的变化,使稳态误差进一步减小,直到等于零。因此,比例-积分(PI)控制器,可以使系统在达到稳定状态后无稳态误差,实现无差控制。

(3) 微分(Differential)控制

在微分控制中,控制器的输出与输入偏差信号的微分(即偏差的变化率)成正比关系。自动控制系统在克服偏差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳,这是由于被控系统通常具有较大惯性或滞后(Delay),微分控制作用能够预测偏差的变化趋势,因此,具有比例-微分的控制器,能够根据偏差的变化趋势,提前采取行动,抑制偏差进一步增大,从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象,比例-微分(PD)控制器能够有效的改善系统在调节过程中的质量指标,使其具有较好的动态特性。微分控制不能单独使用,这是因为系统即使存在非常大的偏差,只要该偏差不发生变化,微分作用不能对系统的输出产生任何影响。明显可以看出,微分控制是在动态过程的初始阶段发生作用。

2. PID 控制器的参数及存在的缺陷

在 PID 控制器中有 3 个重要参数比例度 K_p ,微分时间常数 T_I 和积分时间常数 T_D 。参数的整定是 PID 应用中最为重要的一个环节。参数的整定将在第 2 节中进行深入探讨。在很多情况下,并不一定需要全部 3 个单元,可以取其中的一到两个单元,但比例控制单元是必不可少的。

PID 控制虽然应用十分广泛,但是也有存在固有的缺点:PID 在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时,控制效果不太理想。而且如果 PID 控制器不能控制一个复杂的过程,无论怎么调参数都是无法实现控制的。虽然有这些缺点,由于 PID 控制易于实现和较好的控制效果,而得到了极其广泛的应用。

二、PID 控制算法

PID 控制算法是根据被调量与设定值之间的比例(P)、积分(I)和微分(D)进行控制的,是

在控制系统中应用最为广泛的一种控制算法。理论分析和实际经验都表明, PID 控制对于大多数的工业过程都能得到较为满意的控制效果。

1. 理想 PID 算法

在控制器中设定值 r 与测量值 y 进行比较, 得到偏差 $e = r - y$, 并根据偏差的情况, 给出控制作用 u 。在时间连续类型的控制中, 理想 PID 算法的常用表示形式为:

$$u = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

$$\text{或} \quad \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1-1)$$

式中 K_c ——控制器比例增益;

T_i ——积分时间;

T_d ——微分时间。

在离散控制系统中, 要把 PID 控制算式进行离散化处理, 以便实现计算机控制。因为这里只能获得 $e(k) = r(k) - y(k)$ ($k = 1, 2, \dots$) 的信息, 所以比例作用只能采样进行, 积分作用需通过数值积分, 微分作用需通过数值微分。离散 PID 算法可分为三类: 位置算法、增量算法和速度算法。

(1) 位置算法

理想的 PID 位置算法为:

$$u(k) = K_c e(k) + \frac{K_c}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) T_s + K_c T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad u(k) = K_c e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (1-3)$$

式中 $K_i = \frac{K_c T_s}{T_i}$ ——积分时间常数;

$K_D = \frac{K_c T_d}{T_s}$ ——微分时间常数;

T_s ——采样周期。

在理想 PID 位置算法中, 控制作用输出 $u(k)$ 与控制阀 (或执行器) 的开度 (位置) 相对应的。采用这种算法, 控制计算机每一个控制周期所输出的均是阀位的绝对值。采用位置控制算法的缺点是: 其一计算求和项时, 需要作 k 次的加法计算, 这将增大计算量和数据存储空间; 其二控制器的运算错误和硬件故障将导致控制阀位的剧烈震动, 造成系统的不稳定。

(2) 增量算法

PID 增量算法计算的是相邻两次采样时刻的位置差, 即

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

$$= K_c [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1-4)$$

设 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

$$\text{则} \quad \Delta u(k) = K_c \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (1-5)$$

在增量控制算法中其输出 $u(k)$ 表示阀位的改变量, 控制阀每次按增量大小动作。采用增量控制算法将减少控制器的运算量, 并有利于系统对两个控制周期之间的阀位变化量进行幅度限制。

(3) 速度算法

速度控制算法是增量控制算法除以采样周期 T_s , 即

$$\nu(k) = \frac{\Delta u(k)}{T_s} = K_c \frac{\Delta e(k)}{T_s} + \frac{K_c}{T_s} e(k) + \frac{K_c T_D}{T_s} [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (1-6)$$

三种算法的选择,一方面要考虑执行器的形式,另一方面要考虑应用时的方便性。

从执行器的角度看,位置算法的输出除了用数字控制阀可直接连接外,一般需通过 D/A 转换器转换为模拟量,并通过保持电路,将输出信号保持到下一个周期输出信号到来为止;增量算法的输出可通过步进电机等累积机构化为模拟量;而速度算法的输出需采用积分式执行机构。

从应用的角度看,采用增量算法和速度算法,手动与自动之间的切换比较方便,因为它们可以从手动时的 $u(k)$ 出发,直接求取在投入自动时刻的输出增量和增量的变化速率。同时采用这两种控制算法,不会产生积分饱和现象,因为它们求的是增量和增量的速度,即使偏差长期存在,控制增量的一次次输出,使执行器达到极限位置,但只要偏差的极性一旦改变,控制输出也立刻换向,输出立即脱离饱和现象。当然,加上一些必要的措施,手动自动切换和积分饱和问题在位置算法中也可以解决。

2. 控制精度和采样周期 T 的确定

离散的 PID 控制算法和模拟的 PID 控制算法相比较,有不少优点,例如, P, I, D 参数可以分别整定没有模拟控制参数间的关联问题;此外,用计算机实现 PID 控制时等效的 T_I 和 T_D 可在更大的范围内自由选择;积分作用和微分作用通过某些改进后更为灵活。但是人们在实践中发现,采用等效的 PID 参数,离散控制的品质往往差于连续控制。这是由于采用离散 PID 控制时,控制作用的实现要延迟半个采样周期。为了提高控制质量,采样周期的选择是十分重要的,采样周期越小,数字模拟越精确,控制效果就越接近于连续控制。

根据香农采样定理:

$$T \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}} \text{ 或 } (\omega \geq 2\omega_{\max}); \omega = 2\pi f \quad (1-7)$$

式中 ω ——采样角频率;

$\omega_{\max}$ ——输入信号的上限角频率。

采样信号不失真的条件是采样频率不小于信号中包含的最高频率分量的频率的两倍,这样才不会因为频谱的重叠而引起畸变。采样信号通过保持环节可以复原或近似复原为模拟信号,而不会丢失任何信号。由于控制系统的物理过程及参数变化比较复杂,输入信号的上限角频率很难确定,如阶跃信号就包含了无限频率成分。因此,香农采样定理仅从理论上给出了选择采样周期的上限角频率。但是采样周期的选择受到多方面因素的影响,在实际选择采样周期时,必须根据具体情况和系统的主要要求综合考虑。

对采样周期的选择主要要考虑以下因素:

(1) 对象的动态特性

采样周期 T 的选择应考虑被控对象的时间常数 T_0 和纯迟延时间 τ 。当系统中仅是惯性时间常数起作用时,即 $\tau = 0$ 或 $\tau < 0.5T_0$ 时,可选 $T = (0.1 \sim 0.2)T_0$;当系统中纯迟延时间占主导地位时,即 $\tau \geq 0.5T_0$ 时,可选 $T \approx \tau$ 。

(2) 执行机构的性能

如果控制系统中的执行机构响应速度较慢,过短的采样周期,执行机构将无法响应,达不

到控制的期望。而数字控制系统通常都采用零阶保持器,采样周期过大,保持器的跳变加大,控制作用粗糙度也增加。

(3) 系统扰动信号的频率

在控制系统中,主要要考虑系统的抗干扰能力,采样周期的确定要考虑到作用于系统的最大的高频随机干扰。一般来说,连续系统要比数字系统的抗干扰性能好,这是因为采样的数据一般是过时的信号。只有在采样频率比扰动信号的特征频率高得多的情况下,数字控制系统的抗干扰性才不会比连续系统差很多。扰动信号的频率越高,则采样频率也应该越高,即采样周期应远远小于对象的扰动信号的周期,使系统具有良好的抗干扰性和具备快速响应能力的特性。

(4) 对控制质量的要求

一般来讲,控制精度要求越高,则采样周期越短。但如果采样周期过小,相邻两次采样的数值之差可能会因为计算机字长的限制而无法得以准确反映,使调节被削弱。另外,在积分部分消除静差的控制回路中,如果采样周期太小,将会使积分部分的增益 T/T_1 过低,当偏差小到一定的限度时,增量式算法中的积分项就可能因为计算精度的限制而始终为零,从而失去积分作用。因此,采样周期的选择必须大到使由计算机精度造成的“积分残差”减小到可以接受的程度。

另外,控制性能要求采样周期要短,为此提高计算机字长、A/D、D/A 转换的位数和加快计算机运算速度,这会导致计算机系统投资增加,应综合考虑性能价格比,选取合适的采样周期。控制回路数多,计算量大,采样周期要大;反之,可以减小采样周期。

综上所述,各种因素对采样周期的要求不同,甚至是相互矛盾的。因此,在确定实际的采样周期时,必须根据具体情况和关键的要求做出最优选择。

3. 理想 PID 算法的改进

对于 PID 控制来说,虽然它以其控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高而在工业控制中被广泛应用,但是 PID 控制系统所适用的对象应该是线性、时不变系统,而实际的热工生产过程对象往往具有非线性、时变不确定性等,特别是系统的容量滞后和纯滞后。应用常规的 PID 控制便不能达到理想的控制效果;这是由于 PID 控制器参数整定困难,而且在实际应用过程中,当对象的特性随时间发生变化以后,原来所整定的参数将不适用变化后的系统,最终导致控制质量严重下降。所以,人们就一直在寻求 PID 控制器参数的自动整定技术,以便适应复杂的工况和高性能指标的控制要求。随着微处理机技术的发展和数字智能式控制器的实际应用,同时,随着现代控制理论研究应用的发展与深入,为控制复杂的无规则系统开辟了新的途径。随之出现了许多改进型 PID 控制器,对于复杂系统,其控制效果远远超过了常规的 PID 控制。在这些改进型的控制系统中,主要有模糊 PID 控制系统、专家 PID 控制系统、基于遗传算法整定的 PID 控制系统、带纯滞后环节 PID 控制系统以及神经 PID 控制系统等。有兴趣的读者可以查阅相关书籍,这里我们不做深入讨论。下面只介绍算法方面的改进方法。

(1) 积分算法的改进

引入积分算法的目的是消除余差,离散 PID 算法中对积分控制作用进行了两点改进:

a. 圆整误差问题

计算机在进行数值计算,有定点运算和浮点运算两种方法。当采用定点算法时,存在字长精度问题;当运算结果超过机器字长表示的范围时,计算机就作为机器零而将此数丢掉。因此

对于较小的偏差,积分控制将不起作用,从而达不到完全消除偏差的目的。若通过增强积分作用将误差放大,又可能引起系统振荡。圆整误差就是在算法程序中增加一个求和单元,当输出控制增量出现机器零时,将偏差保留在求和单元内进行叠加,直到其累加结果使输出控制作用的增量大于机器零后,在产生一次输出控制的同时,将累加器清零。

b. 积分分离

由于PID控制中的积分作用是随时间而逐步增强的,因此相对于单纯的比例控制,它有一个时间滞后。其主要表现在偏差的变化趋势已经改变,但偏差的极性尚未改变阶段。由于此阶段积分控制作用在实际上是与控制调节作用相悖的,这种滞后是造成超调量增大,引起系统振荡的重要原因。在离散PID控制算法中采用了两种方法进行处理:

其一是只有当积分控制作用输出与比例控制作用输出同向时,才把积分作用引入。其二是只有当偏差的绝对值小于某一界限之后,方才引入积分控制,在大偏差的情况下将积分作用切除。这就是所谓的积分分离法,采用此法后,在同样衰减比的情况下,显著降低了系统的超调量,缩短了调节时间。

(2) 微分算法的改进

a. 微分先行算法

通常的微分是对偏差进行的,偏差是给定值和被控量的测量值之差,所谓微分先行就是只对控制变量的测量值求导,而不对设定值求导。这样在改变设定值时不会造成输出的突变,而被控量的变化通常是比较缓和的。从而避免了执行器的剧烈动作。控制算法为:

$$\Delta u_D(k) = -K_D[y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)] \quad (1-8)$$

b. 不完全微分算法

不完全微分是用实际的PD代替理想的PD环节。当出现一个快速变化的偏差时,微分作用不会一下太剧烈,但可保持一段时间,在模拟控制器中就是这样做的。

虽然热工对象,就其物理结构而言是各种各样的,但由于从安全运行的角度要求,在进行设备的制造时,总是考虑到使各种参数发生不振荡。因此,作为一个调节对象,它们是一个不振荡环节,其典型阶跃响应曲线有两类,如图1.5所示。

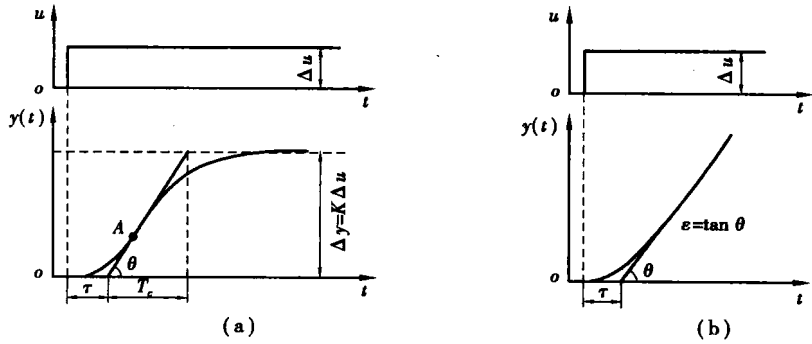


图 1.5 热工调节对象的典型阶跃响应曲线

(a) 有自平衡能力 (b) 无自平衡能力

由于大多数热工对象的阶跃响应曲线具有图1.5所示的特点,因此,工程上常在阶跃曲线上定出几个特征参数的数值来表示对象的动态特性。

对于图1.5(a)所示的有自平衡能力对象的阶跃响应曲线,在此曲线上 dy/dt 最大的点A