



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热工控制系统

刘久斌 主 编
张 君 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热工控制系统

主 编 刘久斌
副主编 张 君
参 编 李 荣
主 审 韩 璞



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书作为“自动控制原理”的后续教材，主要介绍火力发电厂的热工控制系统。全书共七章，第一章介绍单回路控制系统，以便与“自动控制原理”衔接。后六章论述了火电机组的蒸汽温度、给水、旁路、燃烧、直流锅炉及协调控制系统。在汲取以往教材精华的基础上，反映热工控制技术的发展，每章都列举了现场实例进行分析，深入浅出，循序渐进，做到理论联系实际，有较强的工程实用性。

本书可作为普通高等院校能源与动力工程专业“热工控制系统”课程的本科教材，也可供成人高校学生使用，同时可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热工控制系统 / 刘久斌主编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 12

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-0395-7

I. ①热… II. ①刘… III. ①火电厂—热力工程—自动控制系统—高等学校—教材
IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第028634号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 李 莉 (010-63412538)

责任校对: 朱丽芳

装帧设计: 郝晓燕 张 娟

责任印制: 吴 迪

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

版 次: 2016年12月第一版

印 次: 2016年12月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 15.75

字 数: 381千字

定 价: 36.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

我国以火电为主的发电格局长期不会改变,随着低碳经济和环境保护要求日益严格,必须优化发展火电、绿色发展火电,火力发电机组必须采用高参数、大容量以实现高效率、低污染的发展愿景,热工控制系统对于火电机组的经济性、安全性和清洁性具有重大意义。

为了加强大型火电机组人才培养力度,加速教学内容、课程体系、教学方法的改革和创新,满足大型火电机组发展对高素质人才的迫切需求,热工控制系统教材也应持续更新。

本书根据生产过程自动化(热工自动化)方向“热工控制系统”课程的教学要求,结合近年来火电机组热工控制技术和多年来教学实践编写而成。本书在内容和体系上力求彰显能源与动力工程专业(热工自动化方向)的特色,体现教学内容课程体系改革的成果,在汲取以往教材精华的基础上,反映热工控制技术的最新发展,做到理论联系实际,深入浅出,循序渐进。

本书精简了以往教材关于热工控制基本理论部分,避免与前期课程“自动控制原理”不必要的重复;同时,加强控制系统的篇幅,新增了超(超)临界机组热工控制系统内容和旁路控制系统;加强课程内容间的联系与综合应用,有利于拓宽学生的专业面,培养学生的创新能力。

本书由刘久斌教授任主编,张君副教授任副主编,李荣参编。刘久斌编写第一、二、五章,张君编写第六、七章,李荣编写第三、四章。全书由华北电力大学韩璞教授主审,在此深表谢意。

限于编者水平,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2016年10月

目 录

前言

第一章 单回路控制系统 1

第一节 热工控制技术概述 1

第二节 热工控制系统的组成原理和性能指标 3

第三节 控制参数对控制质量的影响 6

第四节 单回路控制系统的工程整定方法 10

本章小结 14

课后练习与思考题 14

第二章 蒸汽温度控制系统 15

第一节 过热蒸汽温度控制系统 15

第二节 再热蒸汽温度控制系统 29

第三节 大型机组蒸汽温度控制系统实例 34

本章小结 49

课后练习与思考题 49

第三章 给水控制系统 51

第一节 汽包锅炉给水控制系统 51

第二节 直流锅炉给水控制系统 64

第三节 给水控制系统实例 72

本章小结 90

课后练习与思考题 90

第四章 旁路控制系统 91

第一节 汽轮机旁路控制系统 91

第二节 旁路启动系统 99

本章小结 105

课后练习与思考题 106

第五章 燃烧过程自动控制系统 107

第一节 燃烧过程自动控制的任务和特点 107

第二节 燃烧过程控制对象的动态特性 108

第三节 各种燃料量信号的实现方式 110

第四节 各种燃烧控制子系统的控制策略 114

第五节 燃烧过程控制系统实例 124

本章小结 147

课后练习与思考题 148

第六章 直流锅炉控制系统	149
第一节 直流锅炉介绍	149
第二节 直流锅炉的动态特性	161
第三节 燃水比控制系统的控制策略	181
第四节 超(超)临界机组燃水比控制实例分析	197
本章小结	201
课后练习与思考题	202
第七章 协调控制系统	203
第一节 概述	203
第二节 单元机组的动态特性	205
第三节 单元机组负荷控制系统的构成及原理	215
第四节 单元机组主控系统	232
第五节 超(超)临界单元机组负荷控制系统实例分析	237
本章小结	241
课后练习与思考题	242
参考文献	243

第一章 单回路控制系统

内容摘要

本章介绍单回路控制系统。首先介绍热工控制技术概况；其次介绍热工控制系统的组成原理和性能指标；然后介绍控制参数对控制质量的影响；最后介绍单回路控制系统的工程整定方法。

第一节 热工控制技术概述

一、火力发电厂热工控制的概念及内容

火力发电厂热工控制是指在无人直接参与的情况下，通过控制仪表和自动控制装置（包括计算机和计算机网络）完成火力发电厂热力过程参数测量、信息处理、自动控制、自动报警和自动保护。它是保障设备安全、提高机组经济性、减轻劳动强度及改善劳动条件的重要技术措施。火力发电厂热工控制的范围是极其广泛的，包括主机、辅助设备、公用系统等自动化，大致可分为自动检测、自动保护、顺序控制和远方控制，以及自动调节四个基本内容。

1. 自动检测

自动地检查和测量反映生产过程进行情况的各项物理量、化学量及各生产设备的工作状态，以监视生产过程的进行情况和趋势，称为自动检测。它对生产过程及设备的参数、信号自动进行转换、加工处理、显示并记录下来。它相当于“眼睛”。火力发电厂需要连续进行检测的信号有温度、压力、流量、液位、电流、电压、转数、频率、振动、气体成分、汽水品质等。检测所采用的装置有测量仪表、记录仪表、巡回检测装置、工业电视、CRT显示器等。

2. 自动保护

在发生事故（异常）时，自动地采取保护措施，以防止事故进一步扩大或保护生产设备使之不受损坏，称为自动保护。电厂的自动保护对象主要有锅炉、汽轮机、发电机、辅助设备 & 局部工艺过程等。

3. 顺序控制和远方控制

按照预先拟定的顺序，有计划、有步骤、自动地对生产过程或设备进行一系列的操作，称为顺序控制。顺序控制也称程序控制。它主要是指机组（或局部系统、设备）在启动、停止、增减负荷、事故处理时的一系列操作的自动化。远方控制是通过开关或按钮，对生产过程中重要的控制机构和截止机构实现远距离控制。火力发电厂局部顺序控制对象主要有锅炉点火、吹灰、定期排污、汽轮机自升速、制粉系统、化学水处理、输煤等。

4. 自动调节

自动地维持生产过程在规定的工况下进行，或者说自动地维持各被控量为设定参数值或按一定规律变化，称为自动调节。它一般是指正常运行时操作的自动化，即在一定范围内自动地适应外界负荷变化或其他条件变化，使生产过程正常进行。火力发电厂的自动控制主要有锅炉给水控制、蒸汽温度控制、燃烧控制、辅助设备控制等。将顺序控制技术、逻辑功能和保护同自动调节结合起来，可实现全程控制，即在机组启动、停止及正常运行的全过程中，实现自动控制，如水位全程控制。

热工控制系统四个方面的内容,是相对独立而又相互配合的。自动调节是主要的,也是基本的内容,而要保证自动调节的正常投入,必须有准确可靠的检测信号,必须有自动保护作保证,否则,自动调节系统投入运行是不安全的。当自动控制进一步提高时,顺序控制就成为必要的手段。

二、火力发电厂热工控制的现状

20 世纪 50 年代,火力发电厂热工控制仪表主要是电子管型的 DDZ-I 型电动单元组合仪表;60 年代主要是晶体管型的 DDZ-II 型电动单元组合仪表;70 年代主要是集成电路组装型的 MZ-III 型、TF-900 型组装式控制仪表;80 年代主要是引进生产的 SPEC200 型控制装置和微机型的单回路数字控制器(即可编程控制器 PLC)。20 世纪 80 年代中期以来引进了基于 4C 技术(计算机、网络通信、控制、CRT 显示)的分散控制系统(Distributed Control System, DCS),目前国内火电机组已普遍采用 DCS,提高了运行的安全性和经济性。当前,新技术不断涌现,如采用通用化的硬件平台、独立的应用软件体系、标准化的通信协议、PLC 控制器的融入、现场总线控制系统(FCS)功能的实现、交流变频调速技术、控制技术优化和智能化、一键启动技术等。目前 PLC 方便地连入 DCS,DCS 运行参数的数据送入全厂管理信息系统(Management Information System, MIS),实现数据共享和处理,厂级监控信息系统(Supervisory Information System in plant level, SIS)实现电厂管理信息系统与各种分散控制系统之间数据交换、实时信息共享。一些电厂将电气发电机主变压器组和厂用电系统的控制(ECS)功能纳入 DCS 的顺序控制系统(SCS)控制功能范围,紧急跳闸系统(ETS)控制功能改由 DCS 模件构成,数字电液控制系统(DEH)与 DCS 的软硬件合二为一,以及一些机组的烟气湿法脱硫控制直接进入单元机组 DCS 控制的成功运行,各个辅助车间的控制已趋向适度集中,整合成一个辅控网(Balance Of Plant, BOP),标志着控制系统一体化在 DCS 技术的发展推动下走向成熟,这些都为 DCS 增添了新的活力,功能进一步提高,应用范围更加宽广。

三、火力发电厂热工控制的展望

1. 单元机组监控智能化

随着技术的进步,火力发电厂单元机组控制系统的智能化将是一种趋势,因此未来数年里,实现信息智能化的仪表与软件将会在火力发电厂得到发展与应用,如仪表智能管理软件,将对现场智能传感器进行在线远程组态和参数设置,对因安装位置和高静压造成的零位飘移进行远程修正,精度自动进行标定,计算各类误差,并生成标定曲线和报告;自动跟踪并记录仪表运行过程中综合的状态变化,如掉电、高低限报警、取压管路是否有堵或零位是否有飘移等。阀门智能管理软件将对智能化阀门进行在线组态、调试、自动标定和开度阶跃测试,判断阀门阀杆是否卡涩,阀芯是否有磨损等,通过阀门性能状况的全面评估,为实现预测性维护提供决策。

2. 过程控制优化软件

进一步提高模拟量控制系统的控制范围和品质指标,是火力发电厂热工控制技术研究的一个方向。安全、经济效益方面取得明显效果、通用性强、安装调试方便的优化控制专用软件(尤其是燃烧和蒸汽温度优化、性能分析软件)将会在电厂得到进一步发展与应用。单机自动发电控制系统(Automatic Generation Control, AGC)方式将会向全厂负荷分配方式转变,SIS 将结合生产实际进行二次开发,促进自身应用技术走向成熟,在确保火力发电厂安全、环保、高效益及深化信息化技术应用中发挥作用。

3. 现场总线与 DCS 相互依存发展

未来一段时间里,现场总线将与 DCS、PLC 相互依存发展,现场总线借助于 DCS 和

PLC 平台发展自身的应用空间，DCS 和 PLC 则借助于现场总线完善自身功能。

4. 辅助车间（系统）集控

随着火力发电厂对减员增效的要求和运行人员整体素质的提高，辅助车间（系统）通过辅控网集中控制将会得到推广。

5. 单元机组监控系统集中布置

全厂单元机组集中于一个控制室，几台机组由一个控制室集中监控，提高了机组运行管理水平。

6. 一键启停

一键启停（Automatic Plant Start-up and Shut down System, APS）是机组级顺序控制系统。在机组启停中，仅需按下一个控制键，整个机组就将按照设计的先后顺序、规定的时间和各控制子系统的工作情况，自动启停过程中的相关设备，协调机炉电各系统的控制，在少量人工干预甚至完全不用人工干预的情况下，自动地完成整台机组的启停。

7. 无线测量技术

无线测量技术能监视和控制运行过程中发生的更多情况，除节省大量安装成本外，还将推动基本过程和控制技术的改善，如供热、供油和煤计量，酸碱、污水区域测量等，都可能通过无线测量技术实现远程监控。

总体来讲，热工控制系统的发展趋势是高速化、智能化、一体化和透明化。对故障信息的研究和充分利用是发掘热工故障诊断与故障预测的基础，现场总线的应用为热工控制系统的进一步发展提供了不断拓展的空间。现代控制理论的应用，将提高热工控制系统的指标。随着计算机技术的进步，网络化的保护及故障信息系统将会不断发展，最终基于网络大容量数据传输可实现，远程专家监控诊断系统的开发应用，火力发电厂检修运行维护的结构将彻底改变，届时仅需少量人员进行机组的运行维护，更多的是通过远程专家监控诊断系统，实现对机组的运行监控、维护和故障诊断、处理。

第二节 热工控制系统的组成原理和性能指标

一、热工控制系统的组成

$R(s)$ 代表给定值，是输入信号， $C(s)$ 代表被调量的检测转换信号，是输出信号， $E(s)$ 代表偏差，控制器接收偏差信号输出控制信号；执行器接收控制信号输出执行信号；调节机关接收执行信号改变调节量的大小；被控对象接收调节量输入信号，输出被调量信号；检测部件将被调量转换为检测信号，转换部件将检测信号转换为标准信号。分析控制系统时，将执行器、调节机关、检测部件及转换部件视为线性环节，且为比例环节。为便于讨论，将控制器、执行器和调节机关合并形成广义控制器，将被控对象、检测部件及转换部件合并形成广义被控对象，因此图 1-1 简化为单回路自动控制系统组成原理如图 1-2 所示。



图 1-1 热工控制系统的组成原理

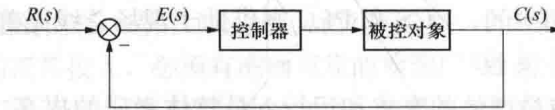


图 1-2 单回路自动控制系统组成原理

考虑到内外扰动后单回路自动控制系统组成原理如图 1-3 所示。

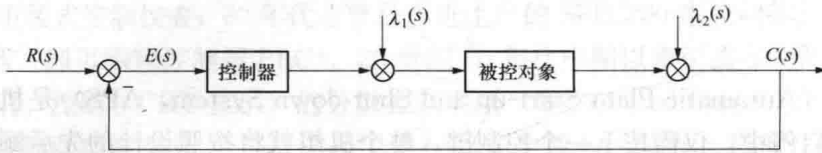


图 1-3 含内外扰动信号的单回路自动控制系统组成原理

图中 $\lambda_1(s)$ 和 $\lambda_2(s)$ 分别是内扰和外扰，信号线不标正负号的默认为正号。

二、典型的控制过程

控制系统品质的优劣，表示了控制系统克服外来干扰能力的大小。控制系统所要克服的干扰有大有小，变化有快有慢。一般来说，缓慢的干扰总是比突然的干扰更容易克服些。我们常把一种突然从一个数值变化到另一个数值，而且一经加上就持续下去不再消除的干扰称为阶跃干扰。阶跃干扰是最不利的干扰形式，如果一个控制系统能很好地克服阶跃干扰的影响，那么它对于其他形式的干扰，也就不难克服，所以我们常把对阶跃干扰的反映作为判别系统抗干扰能力好坏的标准。阶跃干扰也是一种最典型的最常出现的扰动形式，因此把阶跃干扰作为研究控制系统品质的标准输入信号。

图 1-4 所示的是单回路自动控制系统（如图 1-2 所示）受到定值阶跃扰动后，被控量可能出现的几种典型的控制过程。

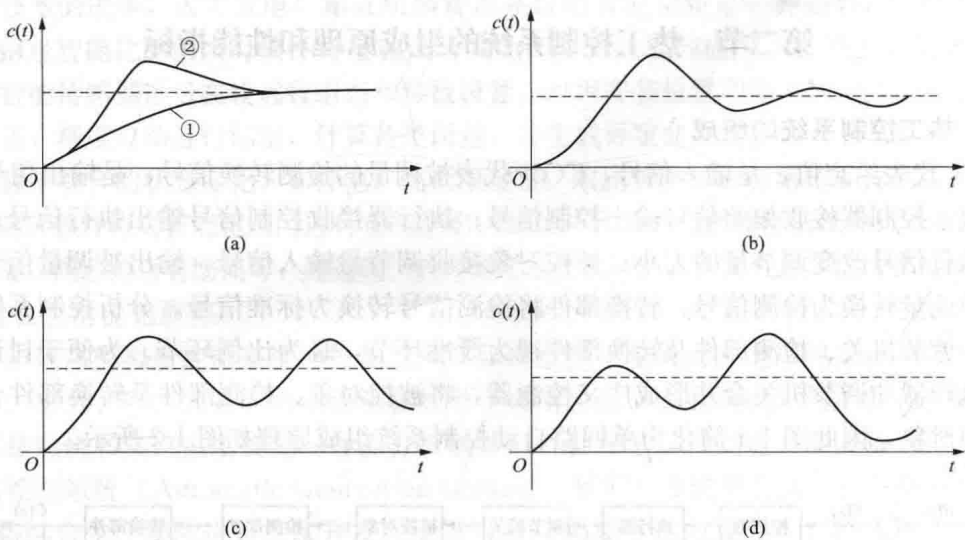


图 1-4 典型的控制过程

- (a) 非周期控制过程；(b) 衰减振荡控制过程；
(c) 等幅振荡控制过程；(d) 渐扩振荡控制过程

图 1-4 (a) 是非周期 (不振荡的) 控制过程, 其中, 曲线①是单调变化的非周期控制过程曲线, 曲线②是具有单峰值的非周期控制过程曲线。

图 1-4 (b) 是衰减振荡控制过程。

上述两种过程中, 被控量经过变化过程后能够重新达到新的平衡状态, 新的平衡状态下被控量的数值可能等于给定值, 也可能不等于给定值。自动控制系统受到扰动后破坏了原来的平衡状态, 在控制作用下, 重新达到了平衡状态, 这种自动控制系统称为稳定的控制系统。

图 1-4 (c) 是等幅振荡控制过程。这种控制过程受到扰动后不能达到新的平衡状态, 系统形成等幅振荡, 这种自动控制系统称为临界稳定系统。

图 1-4 (d) 是渐扩振荡控制过程。这种控制过程受到扰动后, 不但不能达到新的平衡状态, 而且幅值越来越大, 直到发生破坏作用或受到限幅保护装置的干涉为止, 这种系统在生产过程中是不能采用的, 称为不稳定的控制系统。

三、主要的性能指标

人们在设计和分析一个自动控制系统时, 首先应该考虑的是系统稳定性问题, 其次是控制系统的准确性和快速性。下面分别进行阐述。

1. 稳定性

控制系统的稳定性问题是由于系统本身的闭环反馈作用引起的, 负反馈是自动控制系统稳定的必要条件, 而正反馈往往是系统不稳定的根本原因。所以, 在实际工作中, 反馈回路的极性是不允许接反的, 否则将人为地破坏了系统的稳定性。

针对单回路自动控制系统 (如图 1-2 所示) 受到定值阶跃扰动后被控量的控制过程曲线 (如图 1-5 所示), 采用衰减率 ψ 这个品质指标来反映稳定性。图 1-5 中, $c(\infty)$ 为稳态值, c_0 为给定值, M_1 、 M_3 为超出稳态值的第一和第三波峰值。

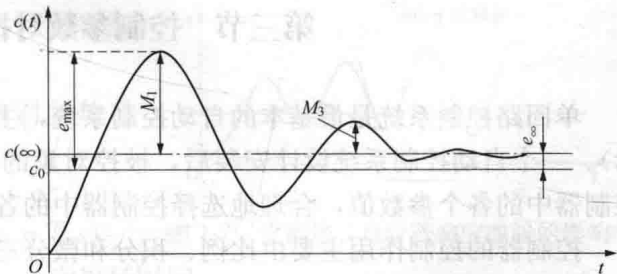


图 1-5 性能指标定义示意

$$\psi = \frac{M_1 - M_3}{M_1} = 1 - \frac{M_3}{M_1} \quad (1-1)$$

衰减率 ψ 作为稳定性指标比较直观形象, 在系统的控制过程曲线上能够很方便地得到它的数值。从式 (1-1) 中可得出, $\psi=1$ 是非周期的控制过程, $\psi=0$ 是等幅振荡的控制过程, $0 < \psi < 1$ 是衰减振荡的控制过程, $\psi < 0$ 是渐扩振荡的控制过程。在实际的生产过程中 ψ 取 0.75~0.9 或更高。

2. 准确性

准确性是反映控制过程中和控制结束时被控量与给定值之间偏差的程度。我们通常用动态偏差和静态偏差两个品质指标来描述系统的准确性。

(1) 动态偏差 $e_{\max}$ 是指在整个控制过程中被控量偏高给定值的最大偏差值, 如图 1-5 所示。对于一个自动控制系统, 系统的动态偏差 $e_{\max}$ 不能超过生产中所允许的范围, 如主蒸汽温度自动控制系统受到一个扰动后, 在控制作用下被控量 (主蒸汽温度) 以衰减振荡的控制过程变化, 其动态偏差 $e_{\max}$ (主蒸汽温度与给定值的最大偏差值) 不允许超过操作规程中的允许值。

(2) 静态偏差 e_{∞} 是指控制过程结束后被控量和给定值之间的偏差值, 如图 1-5 所示。一般应使静态偏差 e_{∞} 不超过生产允许的范围。

3. 快速性

快速性是反映控制过程持续时间的长短, 很显然持续时间越短越好。控制过程的持续时间也是一个品质指标, 称为控制时间 t_s 。

在系统控制过程中, 被控量完全达到稳态值, 理论上需要无限长的时间。实际上, 对系统的控制允许有一个稳定值的误差范围, 如图 1-6 所示。当被控量进入这个范围并不再超出此范围时, 就认为已达到稳定值, 即进入稳定状态, 此刻所对应的时间就定义为控制时间 t_s 。一般稳定值的误差范围可选取为稳定值的 $2\% \sim 5\%$ 。

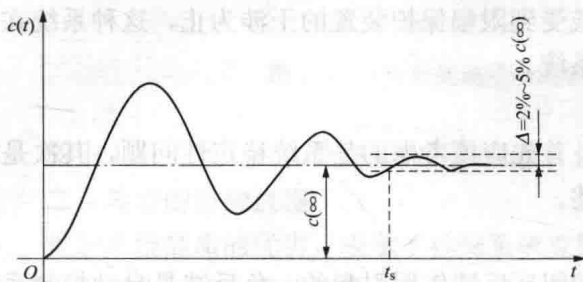


图 1-6 控制时间定义示意图

稳定性、准确性和快速性是反映自动控制系统性能的三个主要方面, 具体表达这些性能的主要品质指标有衰减率 ψ 、动态偏差 $e_{\max}$ 、静态偏差 e_{∞} 及控制时间 t_s 等。

一个自动控制系统, 要求稳定性、准确性和快速性都达到很高的水平往往是困难的, 也是不必要的。一般总是在保证稳定性的前提下, 再兼顾准确性和快速性。

第三节 控制参数对控制质量的影响

单回路控制系统是最基本的自动控制系统, 主要由被控对象和控制器组成 (如图 1-2 所示)。一个自动控制系统设计安装后, 被控对象的特性已经确定, 控制系统的性能仅取决于控制器中的各个参数值, 合理地选择控制器中的各个参数就是对控制系统的整定。

控制器的控制作用主要由比例、积分和微分三种基本的控制作用组成, 而控制作用的强弱分别取决于比例带 δ 、积分时间 T_I 和微分时间 T_D 三个参数的大小。下面我们分析三种控制作用及其参数对控制质量的影响, 以使我们在工程整定中改变参数的大小, 而获得最佳的控制品质指标。

一、比例作用及比例带 δ 对控制质量的影响

比例控制作用 (简称 “P 作用”) 是控制器的输出与输入成比例关系, 其动态方程为

$$\mu(t) = K_P e(t) = \frac{1}{\delta} e(t)$$

比例控制作用的传递函数为

$$G_R(s) = \frac{\mu(s)}{E(s)} = K_P = \frac{1}{\delta}$$

式中: K_P 、 δ 分别为比例放大系数和比例带。

比例控制作用的动作规律是执行机构的位移量 $\mu(t)$ 与偏差 $e(t)$ 的大小成比例, 即偏差 $e(t)$ 越大, 执行机构位移量 $\mu(t)$ 也越大; 偏差 $e(t)$ 的变化速度 $de(t)/dt$ 越大, 执行机构位移的变化速度 $d\mu(t)/dt$ 也越大。

比例控制作用的特点是动作快, 对干扰反应及时并有很强的抑制作用, 但由于执行机构的位移量 $\mu(t)$ 与被控量的偏差 $e(t)$ 有一一对应关系, 所以控制的结果是被控量存在着静态偏差。

在比例控制器构成的自动控制系统中, 可调整的参数只有一个, 就是控制器的比例带 δ , 它对系统阶跃响应的影响如图 1-7 所示, 图中的阶跃响应曲线反映的是单回路自动控制系统 (如图 1-2 所示) 在给定值发生阶跃扰动时被控量的变化过程。

1. 控制过程的衰减率

单容对象采用比例控制器时, 控制过程不会产生振荡, 为非周期控制过程 ($\phi=1$)。二阶及二阶以上的被控对象采用比例控制器控制过程会产生振荡。比例带 δ 越小, 比例控制作用越强, 振荡越剧烈, 衰减率 ϕ 减小。

2. 控制过程的静态偏差

采用比例控制器的系统, 在定值扰动作用下, 控制结束时有自平衡能力对象被控量是有静态偏差的。静态偏差的数值与比例带 δ 之间的关系可运用拉普拉斯变换的终值定理求得。

假设 $R(s)$ 为单位阶跃扰动, $G_o(s)$ 为对象传递函数, 有自平衡能力对象可表示为

$$G_o(s) = \frac{K}{(1+T_c s)} e^{-\tau s} \quad \text{或} \quad G_o(s) = \frac{K}{(1+T_o s)^n}$$

式中: K 为放大系数; T_c 、 T_o 为时间常数; τ 为迟延时间。

无自平衡能力对象可表示为

$$G_o(s) = \frac{1}{T_a s} e^{-\tau s} \quad \text{或} \quad G_o(s) = \frac{1}{T_a s (1+T_o s)^n}$$

$$e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ s \left[\frac{1}{1+K_P G_o(s)} \right] R(s) \right\} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{1+K_P G_o(s)} \right]$$

式中: T_a 为时间常数。

对于有自平衡能力的对象, 则

$$e_\infty = \frac{\rho}{\rho + K_P}$$

式中: ρ 为被控对象的自平衡率。

因此, 比例带 δ 越小, 静态偏差就越小。

对于无自平衡能力的对象, $e_\infty=0$ 。

3. 控制过程的动态偏差

在反馈控制系统中, 控制作用对扰动是起抵消作用的。如果这个抵消作用发生的越快、

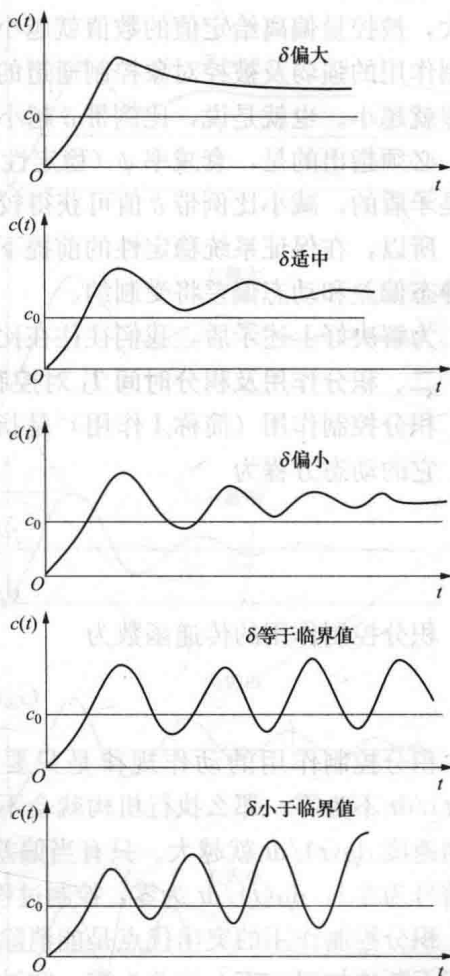


图 1-7 比例带 δ 对阶跃响应曲线的影响

越大,被控量偏离给定值的数值就越小,即动态偏差就越小。所以,动态偏差的大小取决于控制作用的强弱及被控对象控制通道的迟延时间。当被控对象一定时,控制作用越强,动态偏差就越小。也就是说,比例带 δ 越小,控制作用越强,动态偏差就越小。

必须指出的是,衰减率 ψ (稳定性) 与静态偏差、动态偏差 (准确性) 对比例带 δ 的期望是矛盾的,减小比例带 δ 值可获得较小的静态偏差和动态偏差,但势必会降低系统的稳定性。所以,在保证系统稳定性的前提下 (一般选择衰减率 $\psi=0.75\sim 0.9$ 或更高),选择较小的静态偏差和动态偏差将受制约。

为解决好上述矛盾,我们往往在比例控制器中加入积分控制作用。

二、积分作用及积分时间 T_I 对控制质量的影响

积分控制作用 (简称 I 作用) 是指控制器的输出变化速度 $d\mu/dt$ 与偏差 $e(t)$ 成比例作用,它的动态方程为

$$\mu(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt$$

或

$$d\mu(t)/dt = e(t)/T_I$$

积分控制作用的传递函数为

$$G_R(s) = \frac{\mu(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_I s}$$

积分控制作用的动作规律是只要对象的被控量不等于给定值 [即偏差 $e(t)$ 存在], $d\mu(t)/dt$ 不为零,那么执行机构就会不停地动作,而且偏差 $e(t)$ 的数值越大,执行机构的移动速度 $d\mu(t)/dt$ 就越大。只有当偏差 $e(t)$ 等于零时 (即被控量等于给定值,控制器的输入信号为零), $d\mu(t)/dt$ 为零,控制过程才能结束,执行机构才停止动作,控制系统才能平衡。

积分控制作用的突出优点是能消除静态偏差。因为只要被控量存在偏差,控制作用便随时间不断地加强,直至偏差为零。在被控量偏差消除后,由于积分规律的特点,执行机构将停留在新的与负荷变化相适应的位置上。

但是,单纯积分控制作用也有缺点。由于积分控制作用是随时间而逐渐增强的,与比例控制作用相比较过于迟缓,所以在改善静态品质的同时恶化了动态品质,使过渡过程的振荡加剧,甚至造成系统不稳定,所以,在实际生产过程中很少采用单纯的积分控制作用,只是把积分控制作用作为工业控制器控制作用的一个组成部分。

比例控制器加入积分控制作用后成为比例积分控制器,传递函数为

$$G_R(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

比例带 δ 对控制质量的影响已作了分析,在这里仅讨论积分时间 T_I 对控制质量的影响。如图 1-8 所示,图中反映的是单回路自动控制系统 (如图 1-2 所示) 给定值发生阶跃扰动时,被控量瞬时响应受 T_I 数值的影响。

1. 控制过程的静态偏差

比例积分控制器构成的控制系统在扰动作用下,控制过程的静态偏差 [假设 $R(s)$ 为单位阶跃扰动] 为

$$e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta T_I s} \right) G_o(s)} R(s) \right] = 0$$

上式表明, 由于积分作用的存在, 无论被控对象有无自平衡能力, 都能使控制过程在阶跃扰动作用下, 被控量的静态偏差为零。

系统稳定的前提下, 积分时间 T_I 越小, 积分作用越强, 消除静态偏差的能力就越强。当积分时间 T_I 无限大时, 比例积分控制器变成了比例控制器, 无差控制也变成了有差控制。

2. 控制过程的衰减率

积分作用虽然能有效地消除静态偏差, 实现无差控制, 但它是控制系统中的不稳定因素, 随着积分作用的增强, 会促使系统振荡加剧, 甚至产生不稳定的控制过程。和比例控制器相比, 积分作用加入后会使衰减率减小, 为了保持原来的衰减率 ψ , 必须将比例带 δ 的数值适当提高。

3. 控制过程的动态偏差

比例控制器中加入积分作用后, 可消除静态偏差, 改善了控制系统的静态品质, 积分作用将抵消内扰作用对被控量的影响, 内扰作用时在控制过程中动态偏差将随积分时间减少而减小, 但定值扰动时控制过程中动态偏差将随积分时间的减少而增加。从整个动态过程的品质看, 不但没有改善, 反而使动态品质变坏, 所以我们往往在比例积分控制器中再加入微分控制作用。

三、微分作用及微分时间 T_D 对控制质量的影响

微分控制作用 (简称 “D 作用”) 是指控制器的输出与偏差的变化速度成正比, 它的动态方程为

$$\mu(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

微分控制作用的传递函数为

$$G_R(s) = \frac{\mu(s)}{E(s)} = T_D s$$

微分控制作用的特点是与比例和积分控制作用相比, 它是超前的控制作用, 因为在控制过程刚开始时, 虽然偏差小, 但其变化速度却较大, 可使执行机构产生一个较大的位移, 有利于克服动态偏差。但是, 当控制过程结束, 即偏差 $e(t)$ 的变化速度等于零 $[de(t)/dt=0]$ 时, 微分控制器的输出 $\mu(t)$ 也将等于零, 即执行机构位置最后是回到原来位置, 被控量不能维持, 偏差不能消除, 不能满足控制的要求。因此, 只有单纯微分控制作用的控制器在工业上是不能使用的, 微分控制作用只能作为工业控制器控制作用的一个组成部分, 组成 PD 控制器或 PID 控制器。控制系统中有时取某一信号经微分后送入控制器作为超前

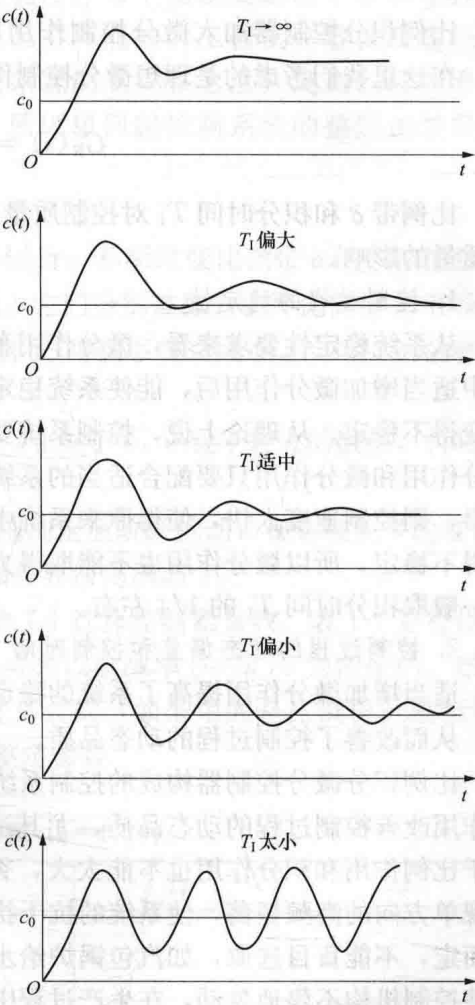


图 1-8 积分时间 T_I 对阶跃响应曲线的影响

信号。

比例积分控制器加入微分控制作用后成为比例积分微分控制器（为了分析问题方便起见，在这里我们考虑的是理想微分控制作用）。传递函数为

$$G_R(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

比例带 δ 和积分时间 T_I 对控制质量的影响已作了分析，在这里仅讨论微分时间 T_D 对控制质量的影响。

1. 控制过程的稳定性

从系统稳定性要求来看，微分作用和积分作用起相互补偿的作用，所以在比例积分控制器中适当增加微分作用后，能使系统稳定性提高，但过分增加微分作用（太大）反而会使系统变得不稳定。从理论上说，控制系统要保证其稳定，比例作用的大小是有一定限制的，而积分作用和微分作用只要配合适当的系统，则总是稳定的。实际上，积分作用和微分作用太大后，则控制速度太快，使得原来系统中可忽略的一些非线性因素开始产生作用，导致系统变得不稳定，所以微分作用也不能取得太大。在比例积分微分控制器中，微分时间 T_D 的数值一般取积分时间 T_I 的 1/4 左右。

2. 控制过程的动态偏差和控制时间

适当增加微分作用提高了系统的稳定性，控制过程的动态偏差 y_M 和控制时间 t_s 都减小了，从而改善了控制过程的动态品质。

比例积分微分控制器构成的控制系统既能靠积分作用消除被控量的静态偏差，又能靠微分作用改善控制过程的动态品质，尤其适用于 τ/T_c 比较大的被控对象。但是，微分作用相对于比例作用和积分作用也不能太大，否则会使控制速度太快而造成系统工作品质的恶化，出现单方向的高频振荡，使系统的抗干扰能力变差。另外，是否采用微分作用要根据实际情况而定，不能盲目选取，如汽包锅炉给水自动控制系统中，由于汽包水位的波动，微分作用会使控制机构不停地晃动，在生产过程中是不允许的。

实际使用中不用理想微分而是用实际微分，理想微分工程上无法实现。因为理想微分器接收到一个阶跃信号（无论是多大），那么控制器的输出在初始时刻为无穷大，实现不了。因此，在工业中使用实际微分器 $T_D s / (1 + K_D T_D s)$ ，其中， K_D 为阻尼作用系数。它是理想微分 $T_D s$ 与阻尼器 $1 / (1 + K_D T_D s)$ 的串联。输入发生阶跃变化时，实际微分器的输出函数是随时间衰减的负指数函数，初始值为 $1/K_D$ ，可调节阻尼器的作用大小， K_D 越小，阻尼作用就越小，输出的初始值就越大， K_D 越大，阻尼作用就越大，输出的初始值就越小，一般取 $K_D = 0.1 \sim 1$ 。

实际比例积分微分控制器的传递函数为

$$G_R(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + K_D T_D s} \right)$$

第四节 单回路控制系统的工程整定方法

控制系统的整定可通过理论计算的方法求取控制器中的各个整定参数，也可通过现场试验的方法确定控制器中的各个整定参数。对于简单的被控对象和控制作用，采用理论计

算的方法进行整定是完全适合的，也具有较高的精确性。对于比较复杂的系统和被控对象，采用理论计算的方法进行整定就很困难，甚至是不可能的，工程上一般采用现场试验的方法，即工程整定法。这里只介绍单回路控制系统的工程整定法，复杂的控制系统的整定一般都能够转化为单回路控制系统的整定，所以单回路控制系统的整定也是最基本的。

一、临界比例带法

临界比例带法是在纯比例作用下将系统投入闭环运行，不断改变比例带 δ 的数值使控制系统产生等幅振荡，并记录对应的比例带和振荡周期，它们分别被称为临界比例带 δ_c 和临界振荡周期 T_c 。然后根据临界比例带 δ_c 和临界振荡周期 T_c 得到系统衰减率 $\psi=0.75$ 时的整定参数。具体整定步骤如下：

(1) 设置控制器为纯比例作用，参数 T_I 置于 ∞ ， T_D 置于 0， δ 置于较大的数值，再将系统投入闭环运行。

(2) 系统运行稳定后，逐步减小比例带的数值并施加定值阶跃扰动，观察被控量的变化，直到出现等幅振荡为止。记录此时的临界比例带 δ_c 和临界振荡周期 T_c 。

(3) 根据临界比例带 δ_c 和临界振荡周期 T_c ，查表 1-1 计算控制器参数。表 1-1 是提供临界比例带法整定参数用的计算表，表中所列的计算公式是以衰减率 $\psi=0.75$ 为依据的。根据控制系统采用不同类型的控制器，选用表中不同的计算公式（如采用的是比例积分控制器，即选用 $\delta=2.2\delta_c$ ； $T_I=0.85T_c$ ），求出控制器中的各整定参数。

表 1-1 按临界稳定条件确定控制器参数 ($\psi=0.75$)				
调节规律	调节器传递函数	δ	T_I	T_D
P	$\frac{1}{\delta}$	$2\delta_c$		
PI	$\frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$	$2.2\delta_c$	$0.85T_c$	
PID	$\frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$	$1.67\delta_c$	$0.57T_c$	$0.25T_I$

通过表 1-1 中所列的计算公式，也可看出各整定参数对控制过程的影响。采用比例控制器时，比例带是临界比例带的 2 倍，可使衰减率 $\psi=0$ 的等幅振荡控制过程改变为衰减率 $\psi=0.75$ 的衰减振荡控制过程。当引入积分作用成为比例积分控制器时，因为引入了积分作用这一不稳定因素，为了获得同样的衰减率 $\psi=0.75$ ，比例带的参数值要增加 10%，即比例带是临界比例带的 2.2 倍。当再引入微分作用成为比例积分微分控制器时，因为适当引入微分作用可增加原比例积分控制的稳定性能，所以比例带可减小到临界比例带的 1.67 倍。

(4) 将计算出的各整定参数值设置到控制器中，对系统作定值阶跃扰动试验，观察被控量的阶跃响应，适当修改各整定参数，直到满意为止。

临界比例带法适用于可能出现等幅振荡、等幅振荡幅度不大和振荡周期较长的控制系统。对于那些被控对象时间常数和迟延较小的、控制系统始终是稳定的（如一阶控制系统）