



普通高等教育“十二五”规划教材

热工控制系统

谷俊杰 李建强 编
高大明 牛成林



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

热工控制系统

谷俊杰 李建强 编
高大明 牛成林
王 健 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书从单元机组热工控制的角度出发,全面介绍了火电机组热工自动控制系统的组成和基本理论。本书共十四章,主要内容包括热工自动控制概论、控制系统的数学模型、被控对象的动态特性、控制系统的时域分析、根轨迹分析、频域分析、单回路控制系统分析及其参数整定、汽包锅炉给水控制系统、蒸汽温度自动控制系统、汽包锅炉燃烧过程控制系统、汽轮机数字式电液控制系统、单元机组协调控制系统、超临界压力机组自动控制系统以及循环流化床机组自动控制系统。

本书注重理论联系实际,既包括自动控制理论的基本概念、原理和方法,又包括热工控制的基本概念、理论以及在电厂的实际应用,热工控制部分每章最后附有SAMA图和系统操作画面,便于读者学习、掌握。

本书可作为普通高等教育本科热能与动力工程专业和自动化专业教材,也可作为从事大型火电机组热工控制、单元机组运行与管理的工程技术人员的参考书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

热工控制系统/谷俊杰等编. —北京:中国电力出版社, 2011.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1421-4

I. ①热… II. ①谷… 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(2011)第025467号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年6月第一版 2011年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.625印张 478千字

定价 34.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是根据普通高等学校能源与动力学科专业教学大纲的要求,为热能与动力工程专业编写的。

随着我国大型机组的应用和发展,为了保证单元机组的正常运行以及高度的安全性和经济性,对机组的自动化水平提出了更高的要求,热工控制技术日益重要。本书从火电机组热工控制理论与工程实际应用角度出发,结合编者多年的教学经验和科研实践,注重理论联系实际。本书内容既包括自动控制理论的基本概念、原理和方法,又包括热工控制的基本概念、理论以及在电厂的实际应用。热工控制部分包含电厂实际热工控制系统分析、系统流程和系统主要操作画面,便于控制方法和实际操作画面之间的结合。本书既可作为高等院校相关专业的教材,也可作为各大电厂热工过程自动控制技术人员的参考书。

本书共分为十四章。第一章介绍热工自动控制的基本概念,第二章介绍控制系统的数学模型,第三章介绍被控对象的动态特性,第四章介绍控制系统的时域分析方法,第五章介绍控制系统的根轨迹分析,第六章介绍控制系统的频域分析,第七章介绍单回路控制系统分析及其参数整定,第八章介绍汽包锅炉给水控制系统,第九章介绍蒸汽温度自动控制系统,第十章介绍汽包锅炉燃烧过程控制系统,第十一章介绍汽轮机数字式电液控制系统,第十二章介绍单元机组协调控制系统,第十三章介绍超临界压力机组自动控制系统,第十四章介绍循环流化床机组自动控制系统。

本书由华北电力大学谷俊杰、李建强、高大明、牛成林编写,全书由谷俊杰统稿。本书由江苏省电力设计院高级工程师王健主审,主审老师提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

除了所列的参考文献外,作者还参阅和引用了许多电厂技术人员提供的资料,并参考了很多优秀的教材,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

前言

第一章 热工自动控制概论	1
第一节 热工自动控制的发展概况	1
第二节 自动控制的基本概念	3
第三节 自动控制系统的分类	5
第四节 典型输入信号与控制系统的性能指标	7
思考题与习题	11
第二章 控制系统的数学模型	13
第一节 控制系统的微分方程	13
第二节 传递函数	14
第三节 控制系统的基本环节	20
第四节 控制系统的方框图	27
第五节 自动控制系统的传递函数	34
第六节 控制系统数学模型的 MATLAB 实现	38
思考题与习题	43
第三章 被控对象的动态特性	45
第一节 基本概念	45
第二节 单容被控对象的动态特性	46
第三节 多容被控对象和迟延	50
第四节 无自平衡能力被控对象	53
第五节 被控对象传递函数的试验求取	54
思考题与习题	60
第四章 控制系统的时域分析	61
第一节 系统的时域性能指标	61
第二节 一阶系统的动态性能	62
第三节 二阶系统的动态性能	65
第四节 高阶系统的性能分析	75
第五节 系统的稳定性分析	77
第六节 系统的稳态误差分析	84
第七节 MATLAB 在控制系统时域分析中的应用	88
思考题与习题	90
第五章 控制系统的根轨迹分析	92
第一节 根轨迹的基本概念	92
第二节 系统根轨迹图的绘制	94

第三节	典型系统根轨迹图的绘制	98
第四节	控制系统的根轨迹分析	102
第五节	MATLAB 在控制系统根轨迹分析中的应用	106
	思考题与习题	110
第六章	控制系统的频域分析	111
第一节	频率特性	111
第二节	典型环节的频率特性模型	114
第三节	控制系统开环频率特性曲线的绘制	124
第四节	频率特性的稳定判据	132
第五节	控制系统的相对稳定性	137
第六节	系统开环频率特性对系统性能的影响	138
第七节	MATLAB 在控制系统频域分析中的应用	139
	思考题与习题	142
第七章	单回路控制系统分析及其参数整定	145
第一节	单回路控制系统的组成	145
第二节	控制器的控制规律	146
第三节	单回路控制系统的参数整定	150
第四节	单回路控制系统参数整定仿真	157
第五节	火电厂热工过程单回路控制系统实例	159
	思考题与习题	167
第八章	汽包锅炉给水控制系统	168
第一节	给水控制的任务和被控对象的动态特性	168
第二节	单冲量给水控制系统	171
第三节	单级三冲量给水控制系统	172
第四节	串级三冲量给水控制系统	173
第五节	串级三冲量给水控制系统参数整定	174
第六节	汽包锅炉串级三冲量给水控制系统仿真	176
第七节	给水全程控制系统实例	177
	思考题与习题	186
第九章	蒸汽温度自动控制系统	188
第一节	过热汽温控制的任务和被控对象的动态特性	188
第二节	串级过热汽温控制系统	192
第三节	串级汽温控制系统参数整定	193
第四节	串级过热汽温控制系统仿真	195
第五节	串级过热汽温分段控制系统	196
第六节	串级过热汽温控制系统实例	197
第七节	再热汽温控制系统	201
	思考题与习题	208

第十章 汽包锅炉燃烧过程控制系统	209
第一节 燃烧过程控制的任务和被控对象的动态特性	209
第二节 燃烧过程控制系统基本方案	212
第三节 中储式制粉系统锅炉燃烧控制系统	214
第四节 直吹式制粉系统锅炉燃烧控制系统	226
思考题与习题	236
第十一章 汽轮机数字式电液控制系统	237
第一节 汽轮机 DEH 控制系统简介	237
第二节 汽轮机转速控制	243
第三节 汽轮机负荷控制	247
第四节 高压调节门管理与控制	251
第五节 DEH 的保护功能与阀门试验	254
第六节 汽轮机阀门控制系统	257
思考题与习题	260
第十二章 单元机组协调控制系统	262
第一节 协调控制系统的基本概念	262
第二节 协调控制系统的基本方案	263
第三节 单元机组协调控制策略	265
第四节 单元机组协调控制系统实例分析	271
思考题与习题	280
第十三章 超临界压力机组自动控制系统	281
第一节 直流锅炉的基本概念	281
第二节 直流锅炉的动态特性	284
第三节 直流锅炉的控制系统	286
第四节 直流锅炉控制系统实例分析	289
思考题与习题	298
第十四章 循环流化床机组自动控制系统	299
第一节 循环流化床的基本概念	299
第二节 循环流化床锅炉控制系统	300
第三节 循环流化床控制系统实例	303
思考题与习题	305
参考文献	306

第一章 热工自动控制概论

第一节 热工自动控制的发展概况

电力工业作为国民经济的基础性产业,有别于其他工业过程的主要特征是:电能的“发、输、供、用”必须同时进行,并保持瞬时的平衡,在这个系统中发电机组处于系统的最底层。现代化大型火力发电机组是由锅炉、汽轮发电机组以及众多辅助设备组成的庞大设备群,并且机组的参数、容量不断提高,控制过程日益复杂,如果没有与之相适应的自动控制系统,生产过程将无法正常运行。因此,热工自动控制系统已成为与单元机组中机、炉、电等主要生产设备不可分割,而且同等重要的组成部分。

一、电厂热工自动控制技术的发展

随着科学技术的进步,火力发电机组单机容量从建国初期的 50MW,逐步发展到目前以 600MW、1000MW 为主的水平;蒸汽参数也由 8MPa/535℃ 提高到 17MPa/540℃,并随着超临界和超超临界技术的推广应用,最终可达到 28MPa/580℃ 以上。机组的大容量和高参数带来的是过程参数测量点的大量增加,相应的控制回路数和控制的复杂程度都大为提高,电网为了确保电网频率、网间联络线潮流合格,对发电机组控制品质提出了更为严格的要求,即机组应在自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 方式下快速安全运行。伴随着电力工业的发展,电站自动化技术的内涵和外延发生了巨大的变化。

一方面,自动控制系统已从辅助运行人员监控机组运行发展到实现不同程度的设备启停、过程控制和联锁保护的综合体系;另一方面,借助计算机和网络技术的发展,电站生产过程的自动化程度达到了前所未有的高度,监控和管理信息系统的广泛应用为电站自动化的进一步发展提供了必要的物质基础。

二、大型单元机组热工自动控制系统的组成

大型单元机组热工自动控制系统以分散控制系统为基础,应用先进的计算机技术、自动控制技术、通信技术和 CRT 图形显示技术,实现了对单元机组启、停以及运行过程的综合控制与管理,主要由以下控制系统组成。

(1) 计算机监视系统。计算机监视系统又称数据采集系统,其基本功能是对机组整个生产过程参数进行在线检测,经运算处理后以 CRT 图形画面的形式提供给运行人员。该系统可以进行自动报警、制表打印、性能指标计算、事件顺序记录、历史数据存储以及运行操作指导等。

(2) 汽轮机数字电液控制系统 (DEH)。DEH 是汽轮发电机组控制系统的核心,除完成汽轮机转速、负荷和机前压力的控制外,还可以实现机组启、停过程以及故障状态下的控制与保护。

(3) 汽轮机监视系统。汽轮发电机组为高速运转的大型机械设备,对其运行参数的要求十分严格。转子的振动、位移、偏心、热膨胀、热应力等参数直接影响汽轮机的安全运行,必须对其进行精确测量和实时监视。以微处理器为核心的汽轮机监视系统,可以实时准确地对汽轮机运行过程中各参数的变化进行检测与处理。

(4) 旁路控制系统。大型中间再热机组都设置有旁路热力系统,其作用是在机组启、停过程中协调机、炉的运行需求、回收工质、保护再热器等。完善的旁路控制系统是充分发挥旁路系统功能,优化机组启、停过程的前提。

(5) 锅炉炉膛安全监视系统。锅炉炉膛安全监视系统包括炉膛火焰监视、炉膛压力监测、炉膛吹扫、自动点火、燃烧器自动切换和紧急情况下的主燃料跳闸等控制功能。

(6) 协调控制系统。协调控制系统基于机、炉的动态特性,应用多变量解耦控制理论形成若干不同形式的控制策略,在机、炉控制系统的基础上协调机、炉之间的运行,对机组进行整体控制,是单元机组自动控制系统的核心。

三、电厂热工自动控制的基本内容

电厂热工自动控制涉及生产运行的全部过程,包括机、炉、电以及与之配套的众多辅助设备,其基本内容大致分为以下五个方面:

(1) 自动检测。自动地检查和测量反映生产过程运行状态以及生产设备工作状态的各项参数的变化,以监视生产过程和设备的状态及变化趋势。

对于锅炉,自动检测的主要参数包括炉膛温度、炉膛负压、过量空气系数、汽包水位和压力、过热蒸汽温度和压力、再热蒸汽温度和压力、排烟温度等;对于汽轮机,自动检测的主要参数包括机前压力,控制级压力,机组功率,转子的转速、位移、偏心、振动,汽缸的热应力和热膨胀等。

常用的自动检测设备主要包括模拟量仪表、数字式仪表以及图像显示、数据记录、报表打印和自动报警装置等。

(2) 顺序控制。按照生产过程和运行要求预先设定的程序,自动对生产过程和相应设备进行操作和控制。

对于单元机组,顺序控制主要用于对主机和辅机的启动、停止以及辅助系统的投入、切除进行自动控制,如汽轮机的自动启、停控制,炉膛吹扫过程控制,燃烧器的自动点火、切换控制,磨煤机的自动启、停控制等。

(3) 闭环自动控制。自动维持生产过程在规定的工况下使被控量尽可能快的等于设定值。

对于锅炉,自动控制主要包括锅炉给水自动控制、过热蒸汽和再热蒸汽温度自动控制、锅炉燃烧过程自动控制等;对于汽轮机,自动控制主要包括汽轮机转速自动控制、凝汽器水位自动控制等;对于机组,自动控制主要包括协调控制以完成 AGC 功能。

(4) 自动保护。发生事故时,自动采取保护措施,以防止事故进一步扩大或保护生产设备使之不受严重破坏。

对于单元机组,自动保护主要包括锅炉炉膛超压保护,汽轮机超速保护,发电机过电流、过电压保护等。

(5) 远方操作。利用辅助动力装置对远离主控室的设备进行遥控操作。如对气动阀和电动阀的开、关操作,对泵和风机的启、停操作等。

热工自动控制各个方面的内容,是一个相互联系的有机整体。自动调节是最基本的内容,也是热工自动控制系统的核心。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和自动保护作保证,否则自动控制系统的运行是不安全的。当自动调节的范围进一步扩大时,程序控制和远方操作就成为必要的手段。

第二节 自动控制的基本概念

一、自动调节的任务

电厂生产过程是否正常进行,通常用一些物理量来表征(如:锅炉汽包水位、炉膛负压、排烟温度,汽轮机转子的转速、调节级压力、凝汽器真空等)。当这些物理量偏离所希望维持的数值时,就表示生产过程离开了规定工况,此时,需要通过控制系统及时对生产过程进行自动调节。因此自动调节的任务就是使表征生产过程是否正常进行的这些物理量保持在所希望的数值上。

二、控制系统的调节过程

自动控制系统对生产过程的自动调节是在人工调节的基础上产生、发展起来的。了解人工调节过程对于深入理解自动调节具有很大的启发意义。下面结合锅炉给水控制系统对人工调节和自动调节的基本过程进行介绍。

1. 锅炉给水人工调节

锅炉给水人工调节如图 1-1 所示。给水 W 经过给水调节阀进入省煤器加热后进入汽包,用以调节汽包水位 h ,主蒸汽流量 D 的变化会引起汽包水位 h 的变化,为了使汽包水位 h 保持在某一给定的数值上或在一定范围内变化,必须在汽包上设置一个水位计,以测量汽包水位 h 的变化。

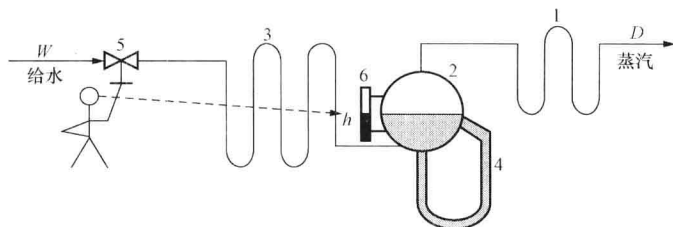


图 1-1 锅炉给水人工调节示意

1—过热器; 2—汽包; 3—省煤器; 4—水冷壁; 5—给水调节阀; 6—水位计

锅炉运行过程中,当操作人员从水位计上观察到的数值低于给定的汽包水位值时,则开大给水调节阀,增大进入汽包的给水流量 W ,使汽包水位 h 上升到给定的数值;当从水位计上观察到的数值高于给定的汽包水位值时,就关小给水调节阀,减小进入汽包的给水流量 W ,使汽包水位 h 下降到给定的数值。操作人员根据水位计的指示,不断地改变给水调节阀的开度,控制进入汽包的给水流量 W ,从而使汽包水位 h 维持在某个给定的范围内,此过程称为调节过程。归纳起来,操作人员在调节过程中进行的工作是:

- (1) 观察水位计的指示值;
- (2) 将汽包水位的指示值与汽包水位的给定值比较,并计算出两者的差值;
- (3) 当偏差值偏高时,则关小给水调节阀;当偏差值偏低时,则开大给水调节阀。阀门开大或关小的程度与偏差的大小有关。

将上述三步工作不断重复下去,直到水位计指示值达到要求的给定值,这种由人来直接完成的调节过程就称为人工调节。

综上所述,要进行人工调节,必须有一个测量元件(如上例中的水位计)和一个调节装置(如上例中的给水调节阀)。操作人员把通过测量元件观测到的指示水位与要求的给定水位进行比较,得到水位偏差并进行判断,从而决定如何去控制调节装置,使偏差最终消除。人在调节过程中起到了观测、比较、判断和控制的作用,因此人工调节就是“检测偏差,消除偏差”的过程。

2. 锅炉给水自动调节

如果用一整套自动控制仪表(自动调节器)来代替操作人员的作用,使调节过程在不需操作人员直接参与的情况下自动完成,就称为自动调节。

图 1-2 所示为锅炉给水自动调节示意。图中由测量变送器、比较器、调节器、执行器代替操作人员完成调节汽包水位的任务。测量变送器用来测量汽包水位的实际值 h , 并把水位信号转换成与之成一定关系(一般为比例关系)便于远距离传送的电流或电压信号。比较器接受来自测量变送器的测量信号,并把它与汽包水位的给定值 h_0 进行比较后输出偏差信号。调节器根据偏差信号按照一定调节规律进行运算,输出控制指令送往执行器。执行器按照调节器输出的控制指令操作执行机构(给水调节阀),通过改变给水流量 W 对汽包水位进行调节。当汽包水位的实际值 h 与给定值 h_0 之间的偏差完全消除时,调节过程结束。

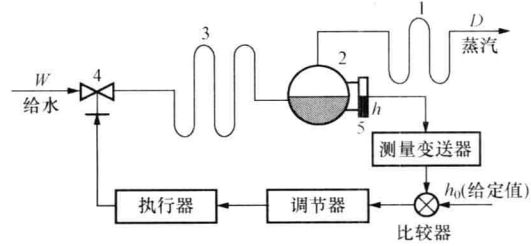


图 1-2 锅炉给水自动调节示意
1—过热器；2—汽包；3—省煤器；
4—给水调节阀；5—水位计

图 1-1 到图 1-2 表示了从人工调节到自动调节的演变过程。从这个演变过程中可以看出：人工调节中操作人员用眼睛、大脑、手完成观测、比较、判断和控制的任

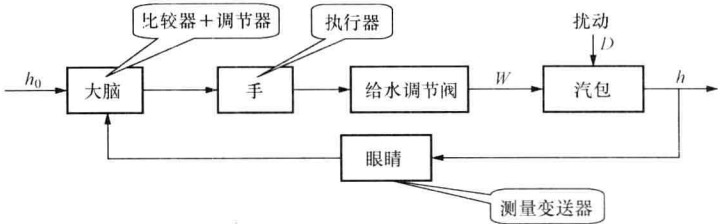


图 1-3 人工调节与自动调节对应关系

务；自动调节中则用测量变送器（相当于人的眼睛）、比较器和调节器（相当于人的大脑）、执行器（相当于人的手）完成，其对应关系如图 1-3 所示。

在人工调节中,操作人员是凭经验支配双手操作的,其效果在很大程度上取决于经验;而在自动调节中,调节器是根据偏差信号按一定调节规律去控制给水调节阀的,其效果在很大程度上决定于调节规律选用的是否恰当。

三、自动控制系统的组成

一个简单的自动控制系统通常由一些具有不同功能的基本元件组成。通过以上对锅炉给水人工调节过程和锅炉给水自动调节过程的分析可知,一个典型的自动控制系统的组成可以用图 1-4 表示。

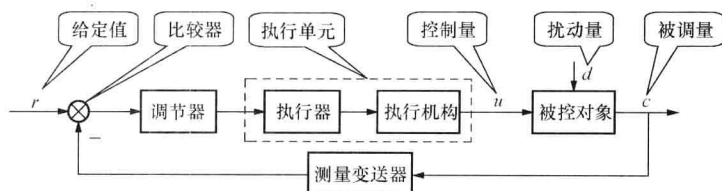


图 1-4 自动控制系统组成

通过图 1-4 可知，自动控制系统一般由以下几个部分组成：

比较器：将被测量与给定值进行比较并计算出二者之间的偏差信号。

调节器：根据偏差信号按照一定调节规律进行运算得出控制指令。

执行器：根据控制指令控制执行机构的动作。

执行机构：在执行器控制下对控制量进行调节的具体设备。

被控对象：被控制的生产过程或设备。

通过图 1-4 所示的自动控制系统，还可以概括出自动控制中的一些常用术语：

给定值：按照生产要求被测量必须维持的希望值。

被测量：表征生产过程是否正常并需要加以调节的物理量。

控制量：在执行机构控制下改变并控制被测量变化的物理量，也称为调节量。

扰动量：引起被测量变化的各种因素。

第三节 自动控制系统的分类

一、按系统结构特点分类

1. 反馈控制系统

反馈控制系统的基本工作原理是根据被测量与其给定值之间的偏差进行调节，最终减小或完全消除偏差，简单说就是按偏差调节。为了得到偏差信号，需要在比较器的输入端引入被测量测量值的反馈信号，此时控制系统构成一个闭合回路，因此也称为闭环控制系统，其结构如图 1-5 所示。

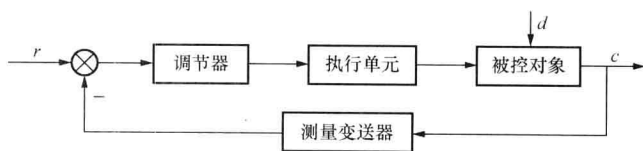


图 1-5 反馈控制系统结构

根据以上分析可以得出反馈控制系统的主要特点：

- (1) 按偏差进行调节，调节过程时间较长，但可以克服各种扰动对被测量的影响。
- (2) 需要对控制系统进行稳定性分析。
- (3) 调节作用落后于扰动，控制作用不及时。

2. 前馈控制系统

前馈控制系统的基本工作原理是根据扰动信号进行调节，即利用扰动信号产生的调节作

用去补偿（抵消）扰动对被调量的影响，简单说就是按扰动调节或扰动补偿。调节器在扰动信号 d 出现的同时就根据扰动信号 d 进行调节，用此调节作用去抵消扰动 d 对被调量 c 的影

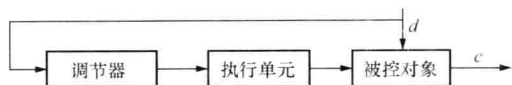


图 1-6 前馈控制系统结构

响，如果完全抵消，被调量 c 就可保持不变。在前馈控制系统中，没有被调量的反馈信号，系统是不闭合的，因此也称为开环控制系统，其结构如图 1-6 所示。

根据以上分析可以得出前馈控制系统的主要特点：

- (1) 按扰动进行调节，调节过程时间短，但只能克服某一种扰动对被调量的影响。
- (2) 不需要对控制系统进行稳定性分析。
- (3) 调节作用与扰动同时作用于被调量，控制作用及时。

3. 前馈—反馈控制系统

在反馈控制系统的基础上加入前馈控制就构成前馈—反馈控制系统。利用前馈控制将经常发生的主要扰动作为前馈信号，由于前馈信号快于被调量的反馈信号，可以及时克服主要扰动对被调量的影响。利用反馈控制克服其他扰动，使被调量在稳态时能准确地维持在给定值。在前馈—反馈控制系统中把前馈控制称为粗调，把反馈控制称为细调，其结构如图 1-7 所示。

前馈—反馈控制系统同时具有前馈控制与反馈控制的优点，可以明显提高控制系统的控制质量，是目前广泛应用的控制



图 1-7 前馈—反馈控制系统结构

二、按给定值特点分类

1. 定值控制系统

定值控制系统的给定值保持恒定，或在某一很小的范围内变化。定值控制系统是现阶段热工过程控制中广泛应用的一种控制系统。例如锅炉汽包水位控制系统、炉膛压力控制系统等。

2. 随动控制系统

随动控制系统的给定值是在一些随机因素的影响下随时变化的，要求其被调量以一定精确度跟随给定值变化。例如，在锅炉处于滑压运行方式时，主蒸汽压力的给定值随外界负荷变化而变化，要求主蒸汽压力的实际值及时跟随其给定值。随动控制系统在参与调峰调频的大型单元机组热工过程自动控制中得到了日益广泛的应用。

3. 程序控制系统

程序控制系统的给定值按预定规律随时间变化。例如，在汽轮机自启动程序控制系统中，预先设定转速给定值随时间的变化规律。在启动过程中，通过程序控制系统根据设定的变化规律控制汽轮机实际转速的变化。

三、按闭环回路数目分类

1. 单回路控制系统

单回路控制系统中只有一个测量信号反馈到系统的输入端，形成一个闭合回路，如图 1-5 所示的控制系统，就是一个典型的单回路控制系统。

2. 多回路控制系统

多回路控制系统中有一个以上测量信号反馈到系统的输入端, 形成一个以上闭合回路, 其中在实际中应用最多的为具有两个闭合回路的双回路控制系统。图 1-8 所示的锅炉主蒸汽温度自动控制系统即为由主、副两个闭合回路构成的双回路控制系统。

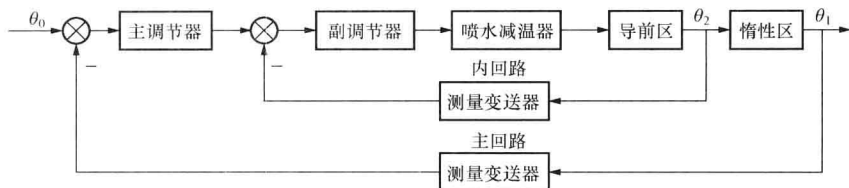


图 1-8 锅炉主蒸汽温度自动控制系统原理

四、按调节作用的形式分类

1. 连续控制系统

连续控制系统的特点是控制系统中所有环节之间信号的传递是不间断的, 而且各环节的输入量与输出量之间存在着连续的函数关系, 因此作用于被控对象的调节作用也是连续的。目前电厂中应用的大部分热工自动控制系统均为连续控制系统。

2. 离散控制系统

离散控制系统中至少有一个采样元件将连续信号转换为有一定周期的脉冲信号, 因此作用于被控对象的调节作用是不连续的。离散控制系统一般由数字计算机或数字式仪表组成。

3. 继电控制系统

继电控制系统的特点是控制系统中某一环节具有继电特性, 即它的输出量幅值保持恒定, 但是其有无输出或输出为正向还是反向决定于输入量的变化。继电控制系统通常用于对只具有开、关两种工作状态的设备进行控制。

第四节 典型输入信号与控制系统的性能指标

在对热工自动控制系统进行设计与评价时, 需要有一个对控制系统的控制品质进行比较的基准, 这个基准就是控制系统对预先规定的具有典型意义的试验输入信号的响应。本节将简单介绍一些常用的典型输入信号以及评价控制系统控制品质的性能指标。

一、典型输入信号

在控制系统的分析与设计中, 选取的典型输入信号需要满足以下基本条件: 首先, 输入信号的形式应反映控制系统在工作过程中的实际输入; 其次, 输入信号在形式上要尽可能简单, 以便于对控制系统的响应进行分析处理; 最后, 应选取能使控制系统工作在最不利情况下的输入信号作为典型输入信号。在热工过程自动控制中常用的典型输入信号有以下四种时间函数。

1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ r_0 & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad r(t) = r_0 \cdot \varepsilon(t) \quad (1-1)$$

式中: r_0 为阶跃函数的幅值。

阶跃函数的函数曲线如图 1-9 所示, 在实际生产过程中代表某一幅值为 r_0 的输入量或扰动量在 $t=0$ 时刻突然加到系统上。如电网负荷的增减、阀门的突然开大或关小、电源电压或电流的跃变等, 都可以看作阶跃输入信号。当阶跃函数的幅值 $r_0=1$ 时, 称为单位阶跃函数。

根据拉普拉斯变换定理, 阶跃函数的拉普拉斯变换为

$$L[r_0 \cdot \varepsilon(t)] = \frac{r_0}{s} \quad (1-2)$$

在控制系统的分析与设计中, 采用阶跃函数作为输入信号, 不但可以反映控制系统在输入作用下最不利的工作情况, 而且得到的试验结果便于分析处理, 因此经常被采用。

2. 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ vt & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad r(t) = vt \cdot \varepsilon(t) \quad (1-3)$$

式中: v 为斜坡函数的变化速度。

斜坡函数的函数曲线如图 1-10 所示, 由于其变化速度恒定, 因此也称为等速度函数。在实际生产过程中表示从 $t=0$ 时刻开始, 某一以恒定速度 v 变化的输入量或扰动量加到系统上。当 $v=1$ 时, 函数式 (1-3) 称为单位斜坡函数。

根据拉普拉斯变换定理, 斜坡函数的拉普拉斯变换为

$$L[vt] = L[vt \cdot \varepsilon(t)] = \frac{v}{s^2} \quad (1-4)$$

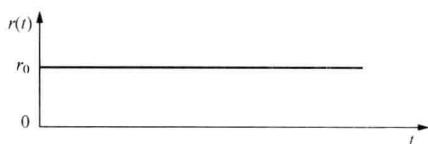


图 1-9 阶跃函数

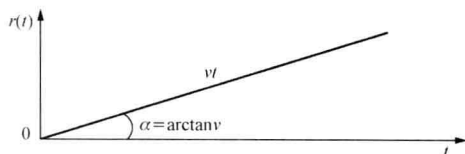


图 1-10 斜坡函数

3. 脉冲函数

脉冲函数是一个时间宽度为无穷小, 幅值为无穷大, 且函数曲线与时间轴围成的面积为 A 的特殊输入信号, 因此它可以看作是时间宽度为 t_0 , 面积为 A 的方波函数在时间宽度 $t_0 \rightarrow 0$, 但面积保持不变时的极限情况, 如图 1-11 所示。

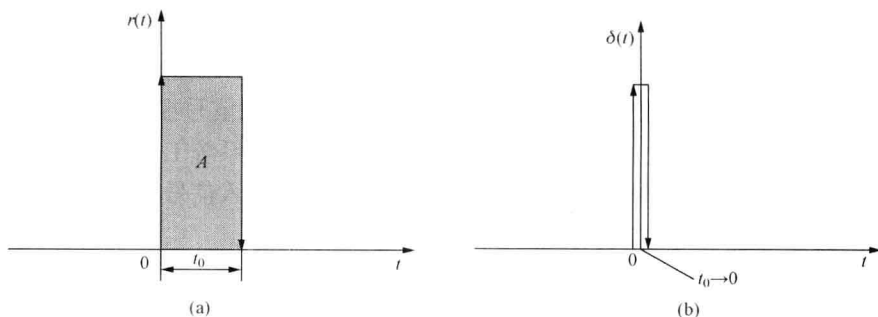


图 1-11 方波函数和脉冲函数

(a) 方波函数; (b) 脉冲函数

由图 1-11 (b) 可以看出, 脉冲函数的幅值在 $t=0$ 时刻突然达到极大值后瞬间消失 (信号值恢复为 0)。脉冲函数的函数曲线与时间轴围成的面积 A 定义为脉冲函数的强度。强度 $A=1$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数, 记作 $\delta(t)$, 对于强度为 A 的脉冲函数, 可以表示为 $A \cdot \delta(t)$ 。根据脉冲函数强度的定义可得如下关系式:

$$\lim_{t \rightarrow 0} A \cdot \delta(t) t = A \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可得单位脉冲函数具有如下特性:

$$\delta(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{A}{t} = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1-7)$$

由式 (1-6) 和式 (1-7) 所示单位脉冲函数的特性可以看出, 单位脉冲函数 $\delta(t)$ 是单位阶跃函数 $\epsilon(t)$ 的导数, 即

$$\delta(t) = \frac{d}{dt} [\epsilon(t)] \quad (1-8)$$

根据拉普拉斯变换的微分定理, 单位脉冲函数的拉普拉斯变换为

$$L[\delta(t)] = L\left[\frac{d\epsilon(t)}{dt}\right] = 1 \quad (1-9)$$

脉冲函数在实际过程中是不能实现的, 只具有数学上的意义, 但对于生产过程中幅度很大而持续时间非常短的输入量可以近似地用一个脉冲函数代替。脉冲输入信号可以在很短的时间内产生一定的能量, 对系统具有很大影响, 因此必须对其加以重视。

4. 正弦函数

正弦函数的数学表达式为

$$r(t) = A \sin \omega t \quad (1-10)$$

式中: A 为正弦函数的振幅; ω 为正弦函数的角频率。

正弦函数的函数曲线如图 1-12 所示, 海浪对舰船的扰动力, 振动台的输入指令, 电源和机械振动的噪声等均可以近似看作正弦信号。

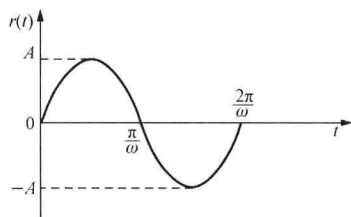


图 1-12 正弦函数

根据拉普拉斯变换定理, 正弦函数的拉普拉斯变换为

$$L[A \sin \omega t] = \frac{A \omega}{s^2 + \omega^2} \quad (1-11)$$

二、控制系统的调节过程

控制系统的控制品质, 可以用控制系统在单位阶跃输入信号作用下 (阶跃扰动作用或阶跃给定作用下) 被调量 (即控制系统的输出量) 在调节过程中的响应曲线来分析。

当控制系统受到单位阶跃给定输入信号作用时, 被调量在调节过程中的响应曲线有以下四种基本形式, 如图 1-13 所示。

图 1-13 (a) 是非振荡调节过程, 又称单调过程, 调节过程具有较高的稳定性, 但调节过程时间较长, 一般认为不理想; 图 1-13 (b) 是衰减振荡调节过程, 被调量经过一段时间的振荡后, 能很快地趋向于一个新的平衡状态, 控制系统具有较好的稳定性和快速性, 在工程实际中广泛应用于各种生产过程和设备的控制; 图 1-13 (c) 是等幅振荡调节过程, 控制系统处于临界稳定状态, 抗干扰能力很差, 一般认为是不稳定的, 因此在工程实际中很

少采用；图 1 - 13 (d) 是发散振荡调节过程，被调量的变化幅度越来越大，控制系统处于不稳定状态，在工程实际中不能应用。

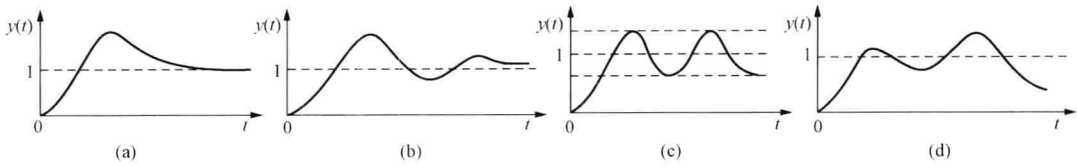


图 1 - 13 调节过程响应曲线的基本形式

(a) 非振荡过程；(b) 衰减振荡过程；(c) 等幅振荡过程；(d) 发散振荡过程

综上所述，图 1 - 13 (a) 及 (b) 是稳定的调节过程，而图 1 - 13 (c) 和 (d) 是不稳定的调节过程。在工程实际中，都希望控制系统得到图 1 - 13 (b) 所示的衰减振荡调节过程。

三、控制系统的性能指标

控制系统控制品质的优劣，常用一些性能指标来评价。性能指标可以通过理论计算的方法得到，也可以通过对控制系统在输入信号作用下调节过程响应曲线的分析处理得出。

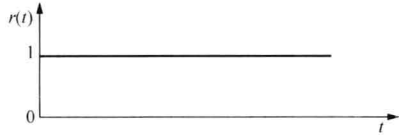


图 1 - 14 单位阶跃输入信号

在热工过程自动控制中，通常把单位阶跃输入信号作为研究控制系统控制品质的标准输入信号，其数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad r(t) = 1 \cdot \epsilon(t) \quad (1 - 12)$$

单位阶跃输入信号的函数曲线如图 1 - 14 所示。

图 1 - 15 所示为某控制系统在单位阶跃输入信号作用下调节过程的响应曲线，下面结合图 1 - 15 对衡量控制系统控制品质的三个基本性能指标进行介绍。

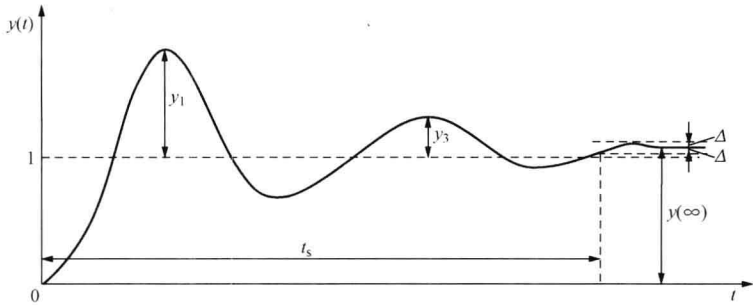


图 1 - 15 调节过程响应曲线

1. 稳定性

稳定性是对控制系统的最低要求，只有稳定的控制系统才能完成正常的调节任务。在工程实际中，不仅要求控制系统是稳定的，而且还要有一定的稳定裕量，以提高控制系统克服各种干扰的能力。控制系统的稳定性可以用衰减率 φ 来衡量，衰减率的定义为：调节过程中每经过一个周期，被调量波动幅值减少的程度。根据定义和图 1 - 15 可得衰减率 φ 的计算公式为

$$\varphi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} \quad (1 - 13)$$