



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

国家骨干高职院校建设特色教材
重庆市市级精品课程配套教材

热工控制系统 运行与维护

向贤兵 李化霜 主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

热工控制系统 运行与维护

主 编 向贤兵 李化霜

副主编 杜礼春 倪 敏
刘建国 黄琪玲
编 写 藏 斌 高倩霞 胡军军
主 审 张丽香



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书采用了基于工作过程的项目化开发方式,以火电厂主要热工参数(压力、水位、温度、流量等)为载体,构建了除氧器压力控制系统运行与维护、汽温控制系统运行与维护、给水控制系统运行与维护、燃烧控制系统运行与维护、协调控制系统运行与维护、直流锅炉控制系统运行与维护六个典型工作项目,并以控制系统结构为载体,序化教材内容。

本书可作为高等职业院校生产过程自动化、火电厂集控运行、电厂热能动力装置等动力工程类专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热工控制系统运行与维护/向贤兵,李化霜主编. —北京:中国电力出版社,2014.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-4862-2

I. ①热… II. ①向…②李…③全… III. ①火电厂—热力工程—自动控制系统—电力系统运行—高等职业教育—教材②火电厂—热力工程—自动控制系统—维修—高等职业教育—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第203326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

*

2014年8月第一版 2014年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.25印张 368千字

定价 32.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

近年来,随着单机容量的增大和电网容量的迅速扩大,我国已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代。由于 600、1000MW 等大容量、高参数机组的新技术发展迅速,装机数量日益增多,机组对热工自动化水平的要求越来越高。同时,我国高等职业教育也迅猛发展,特别是基于工作过程的课程开发,对教材的开发和编写提出了全新的要求。

为了适应电厂热工自动化水平的快速发展,满足新时期高等职业教育的需要,热工控制系统运行与维护教材采用了基于工作过程的项目化开发方式。在本书的编写过程中,着重强调了以下几个原则:

(1) 以职业能力为核心、工作项目为导向、工作任务为驱动,选取教材内容。以火电厂主要热工参数(压力、水位、温度、流量等)为载体,典型热工控制系统的运行维护为引领,构建了除氧器压力控制系统运行与维护等六个典型工作项目,将生产项目与教学内容相融合。

(2) 以控制系统结构为载体,组织教材内容。教材以控制系统结构为线索,将教学内容按照单回路控制→串级控制→复合控制→比值控制→多变量控制进行由简单到复杂、由易到难序化典型工作项目,符合人们的认知规律和高职教育的特点。

(3) 以实际的工作过程为线索,将学习过程与工作过程相融合。根据火电厂热工控制系统运行与维护的实际工作过程,在工作项目下设置对象动态特性试验→控制方案分析→性能指标测试三个工作任务。为学生提供体验完整工作过程的学习机会,逐步实现从学习者到工作者的角色转换。

(4) 融入职业技能鉴定要求,将电力行业职业标准、生产技术标准和新技术引入教材中。在教材编写过程中,有机地将 DL/T 774—2004《火力发电厂热工自动化系统检修运行维护规程》、DL/T 657—2006《火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程》和《职业技能鉴定规范·热工仪表及自动装置专业》相关内容融入教材。

(5) 以工作任务引领专业知识,将理论知识与实践训练相融合。工作任务是核心,但并不否定专业知识;专业知识是围绕工作任务完成的需要合理地延伸出来的,有机地将专业知识融合在实际工作任务中。

(6) 以大机组、高参数机组为例,力求反映当前火电厂热工控制技术的新发展。本书中的控制系统图都是采用火电厂控制系统组态图改编而来的,涵盖了 300、600MW 及 1000MW 机组。

(7) 教材建设中紧密与企业合作,充分将一线工程技术人员的丰富实践经验融入到本书的编写中,既遵循了教育规律,又结合了现场实际操作,体现了高职教材的特点。在本书编写过程中,得到华电四川广安发电有限责任公司、国电重庆恒泰发电有限责任公司、四川泸州川南发电有限责任公司、贵州兴义发电有限责任公司等电厂工程技术人员的大力支持。

本书由重庆电力高等专科学校向贤兵和华电四川广安发电有限责任公司总工程师李化霜担任主编。国电重庆恒泰发电有限责任公司杜礼春和黄琪玲、保定电力职业技术学院倪敏、

重庆电力高等专科学校刘建国担任副主编。重庆电力高等专科学校龚齐斌、高倩霞和神华神东电力重庆万州港发电有限责任公司胡军军对本书的编写提供了帮助。

本书由太原电力高等专科学校张丽香主审，她提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。

本书为国家骨干高职院校建设特色教材和重庆市市级精品课程配套教材，相关资源读者可登陆课程网站 (<http://rgkz.jpkc.cqepc.com.cn/>) 访问。

本书引用了大量的技术标准、专业文献和资料，虽已在参考文献中注明，但难免有所遗漏，恳请相关作者谅解。

本书的内容体系在国内属首次尝试，且作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 7 月

目 录

前言

绪论	1
项目一 除氧器压力控制系统运行与维护	5
任务一 除氧器压力控制对象特性试验	5
任务二 除氧器压力控制方案分析	20
任务三 除氧器压力控制系统性能测试	35
项目二 汽温控制系统运行与维护	49
任务一 汽温控制对象特性试验	49
任务二 汽温控制方案分析	57
任务三 汽温控制系统性能测试	74
项目三 给水控制系统运行与维护	82
任务一 汽包水位动态特性试验	82
任务二 给水控制方案分析	87
任务三 给水控制系统性能测试	103
项目四 燃烧控制系统运行与维护	113
任务一 燃烧控制对象特性试验	113
任务二 燃烧控制方案分析	119
任务三 燃烧控制系统性能测试	147
项目五 协调控制系统运行与维护	156
任务一 负荷动态响应特性试验	156
任务二 协调控制方案分析	161
任务三 协调控制系统性能测试	190
项目六 直流锅炉控制系统运行与维护	194
任务一 直流锅炉控制对象动态特性试验	194
任务二 直流锅炉控制方案分析	202
任务三 直流锅炉控制系统性能测试	222
附录 A 试验方案样表	225
附录 B 控制对象动态特性试验报告样表	226
附录 C 模拟量控制系统性能指标试验报告样表	227
附录 D 机组各主要被控参数的动态、稳态品质指标	228

附录 E 火力发电厂模拟量控制系统定值扰动下的品质指标 229

附录 F 火力发电厂热控工作票样表 230

附录 G SAMA 图 231

参考文献 235

绪 论

自 1875 年法国巴黎建成世界上第一座火力发电厂,人类步入了电气化时代,电力已成为关系到国计民生的基础产业。

电力工业自动化主要包括电厂自动化和电网自动化。过去,电厂自动化通常被认为是电力生产过程中的辅助手段。现在,随着以计算机芯片技术为标志的信息时代的到来,广泛应用计算机技术、通信技术、控制技术、网络技术、检测技术等先进技术的电厂自动化技术,已成为现代电站的核心技术之一。因此,电厂的规划、设计、施工、运行、检修等领域需要一大批熟悉并掌握先进自动化技术的工程技术人员。

电厂自动化亦称热工自动化,通常简称为热自(亦称热控或热工),在欧美及日本等国家和地区也称为仪表与控制(Instrument&Control, I&C)。

热工自动化技术是一种运用控制理论、热能工程技术、智能仪器仪表、计算机技术和其他信息技术,对热力学相关参数进行检测、控制,从而对生产过程实现检测、控制、优化、调度、管理、决策,达到确保安全、增加产量、提高质量、降低消耗、减员增效等目的的综合性高新技术。它主要是指对锅炉、汽轮机及其辅助设备运行的自动控制,使机组自动适应工况的变化,且保持在安全、经济、环保的条件下运行。

一、热工自动化发展历程

20 世纪 50 年代,我国火电单机容量小,自动化程度较低,机组基本依赖于人工操作,辅以简单的仪表来控制生产过程。到 70 年代,随着电力工业的发展,热工自动控制系统出现了集中控制方式,操作人员主要通过操作按钮和各种仪表进行控制和监视,但机组的自动化水平仍很低。70 年代末,投入使用单回路调节装置和模拟组装仪表。

70 年代中期,随着计算机技术的迅速发展,国外开发出了分散控制系统(DCS),并迅速应用于过程自动化领域。80 年代初,国内电厂开始试点采用 DCS,实现了数据采集处理系统(DAS)和模拟量控制系统(MCS)功能。90 年代,国内开始大量采用 DCS,300MW 级及以上机组全面进入了 DCS 时代。

现在,不同单机容量的火电机组基本上都采用了 DCS,辅助车间大都采用了可编程逻辑控制器(PLC)系统。

随着世界高科技的飞速发展和我国机组容量的快速提高,热工自动化技术不断地从相关学科中吸取最新成果而迅速发展和完善,近几年更是日新月异,一方面作为机组主要控制系统的 DCS,已在控制结构和控制范围上发生了巨大的变化;另一方面随着厂级监控系统(SIS)、现场总线技术和无线智能仪表的应用,给热工自动化系统注入了新的活力。同时,随着国家法律对环保日益严格的要求和计算机网络技术的进步,未来热工自动化技术将围绕“节能增效,可持续发展”的主题,向智能化、网络化、透明化,保护、控制、测量和数据通信一体化发展,新的测量控制原理和方法不断得以应用,将使机组的运行操作和故障处理像操作普通计算机一样方便。

二、热工自动化在电厂中的作用

随着我国国民经济的高速发展,工农业生产和人民生活对电力的需求不断增长,电力工业通过引进、消化、吸收国外的先进技术和管理经验,得到了迅速的发展。随着单机发电容量的增大和电网容量的迅速扩大,我国已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代。由于300、600MW及以上大容量、高参数机组的新技术发展迅速,装机数量日益增多,机组对热工自动化水平的要求越来越高。

同中小容量火电机组相比,300MW及以上大容量机组的特点是监视点多、参数变化速度快和被控对象数量大,而且各个被控对象相互关联,操作稍有失误就会引起严重的后果。因此,大型发电机组必须采用完善的自动化系统。如果将大型发电机组的监视和操作任务仅交给运行人员去完成,不仅体力和脑力劳动强度大,而且很难做到及时调整和避免人为误操作。

大量事实证明,自动化技术的运用对于提高大型火电机组的安全经济运行水平是行之有效的,它可以保证机组在启停工况、正常运行工况和参数异常工况下的自动监测、控制和保护,以实现火电机组的安全、经济运行。

具体来说,在大型火电机组的运行过程中,热工自动化系统主要起以下几个方面的作用:

(1) 机组正常运行时。自动化系统根据机组运行的要求,自动将运行参数维持在所要求给定值(亦称设定值)上,以取得较高的运行效率和较低的消耗。

(2) 机组在异常工况时。在参数超限、辅机跳闸时,自动化设备能及时报警,并迅速、及时地按预定的规律进行处理,以保证机组设备的安全,减少机组停运次数。

(3) 机组运行在危急情况时。即当危及设备或人身安全时,自动采取措施进行处理,以保证设备和人身的安全。

(4) 在机组启停过程中。根据设备的状态进行相应的控制,以避免机组产生不允许的热应力,而影响机组的寿命。

通常,自动化系统按照预先制定的规律进行工作,不需要人工干预。但在特殊情况下却要求人工给以提示或协调,即需要人的更高层次的干预。所以,随着自动化水平的提高,也要求运行人员具有更高的文化和技术素质。

三、热工自动化的主要内容

火电厂自动化的任务所涉及的专业面相当广泛,除了对锅炉、汽轮机、发电机进行自动控制外,还要对各种辅助设备如除氧器、凝汽器、磨煤机、化学水处理设备等进行相应的控制。由于采用的主机及辅助设备不同,如汽包锅炉和直流锅炉,它们的控制方法也有较大的区别。又由于采用的控制设备不同,组成的控制系统不同,因而自动化系统的结构更加复杂。但不管如何复杂的自动化系统,它们的控制目的都是要保证电能生产过程的安全和经济,以及生产的电能要满足一定的数量和质量。为完成这一任务,要求大型火力发电机组具有进行自动检测、自动控制、顺序控制、自动保护等功能,这四部分即构成了热工自动化的内容。这些内容将有机地合成一个不可分割的整体,共同完成火力发电机组的自动控制任务。

(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項参数的变化,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、偏心度、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) 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,亦称自动调节。

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。

(3) 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,亦称程序控制。

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。

(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。

热工自动化各个方面的内容,是一个相互联系的有机整体。自动控制是最基本的内容,也是热工控制系统的核心。而要保证自动控制的正常投入,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。当自动控制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。

四、大型火电机组的自动化功能

大型火电机组由于具有大容量、高参数的特点,因此要有相应先进的自动化功能与之相适应,特别是近年 600MW 及以上的超(超)临界压力机组装机增多,已逐渐成为我国电力系统的主力机组。超(超)临界压力机组由于其直流锅炉的启动特性、大范围的滑压运行,更需要与之相适应的控制策略来进行控制。概括地说,大型机组的自动化功能大致包含以下内容:

(1) 模拟量控制系统 (Modulation Control System, MCS);

(2) 锅炉炉膛安全监控系统 (Furnace Safeguard Supervisor System, FSSS) 或称燃烧器管理系统 (Burner Management System, BMS);

(3) 顺序控制系统 (Sequence Control System, SCS), 包括机组辅机顺序控制系统和发电机—变压器组及厂用电源顺序控制系统;

(4) 数据采集系统 (Data Acquisition System, DAS);

(5) 汽轮机数字电液控制系统 (Digital Electric Hydraulic System, DEH) 和汽动给水泵汽机电液控制系统 (Micro Electro Hydraulic Control System, MEH);

(6) 旁路控制系统 (Bypass Control System, BPS);

(7) 汽轮机自启停系统 (Automatic Turbine Startup Or Shutdown Control System, ATC);

(8) 汽轮机监视仪表 (Turbine Supervisory Instrument, TSI) 和汽轮机紧急跳闸系统 (Emergency Trip System, ETS);

(9) 全厂闭路工业电视系统;

(10) 辅助生产系统网络化集中监控系统。

上述火电机组的自动化功能在当前的大型机组上都有体现, 它们集中反映了机组的自动化水平。图 0-1 为大型火电机组自动控制系统的组成示意。

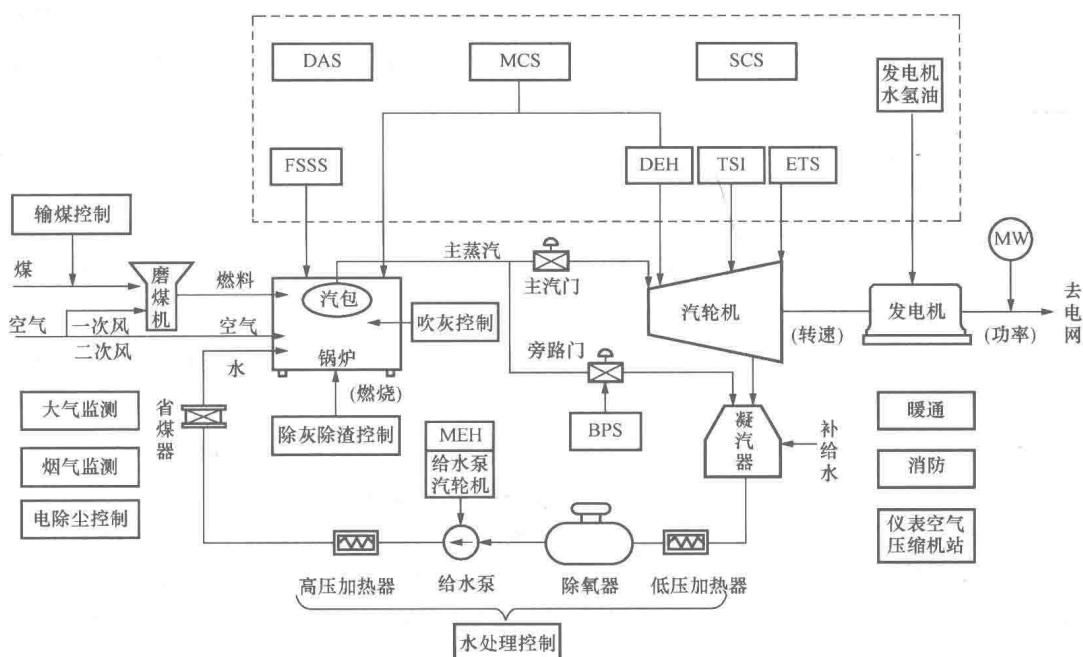


图 0-1 大型火电机组自动控制系统组成示意

项目一 除氧器压力控制系统运行与维护

【项目描述】

在机组启、停和低负荷运行时,需要通过辅助蒸汽向除氧器供汽,以维持除氧器最低允许压力。此时用辅助蒸汽供汽管道上的压力调节阀来控制除氧器压力,使其不低于最低允许压力。当抽汽压力超过最低允许压力时,系统抽汽自动切换到四段抽汽,此时不进行压力控制,除氧器实际为滑压运行方式。本项目研究的压力控制系统为用辅助蒸汽时的压力控制系统。

本项目主要完成除氧器压力控制对象特性试验、除氧器压力控制方案分析、除氧器压力控制系统性能测试等三项工作任务。

通过本项目的学习,使学生能理解除氧器压力控制系统的工作原理,能识读除氧器压力控制系统逻辑图,能进行对象动态特性试验和品质指标试验,最终完成除氧器压力控制系统运行维护工作。

任务一 除氧器压力控制对象特性试验

【学习目标】

- (1) 熟悉汽水系统工艺流程,理解除氧器的工作原理及在热力系统中的作用;
- (2) 理解热工控制对象的特点,掌握热工控制对象动态特性的求取方法;
- (3) 理解除氧器压力控制对象动态特性的特点;
- (4) 掌握除氧器压力控制对象动态特性的试验方法;
- (5) 能根据行业技术标准拟定动态特性试验方案;
- (6) 能根据试验方案完成除氧器压力控制对象动态特性试验;
- (7) 能根据试验结果分析除氧器压力控制对象动态特性特点,并完成试验报告;
- (8) 熟悉电力生产安全规定,严格遵守“两票三制”;
- (9) 具有团队合作意识,养成严谨求实的工作作风。

【任务描述】

除氧器压力动态特性试验目的是求取在蒸汽流量变化下除氧器压力变化的飞升特性曲线,为控制方案拟订和控制参数整定提供依据。

通常,在机组投运前、锅炉 A 级检修或控制策略改变时,需要进行除氧器压力动态特性试验。试验应在机组启、停和低负荷时进行,每一工况下的试验宜不少于两次,记录试验数据和曲线,并提交试验报告。

本任务建议采用项目教学法组织教学,其实施过程可参考表 1-1。

表 1-1 除氧器压力控制对象特性试验教学实施过程

序号	步骤名称	教学内容	学生活动	教师活动	时间分配	工具与材料	课内/课外
1	任务布置	分析工作任务背景、主要工作内容、教学目标及教学过程要求	听、记录	讲授		工作任务单	课内
2	资讯	学习热工控制对象动态特性	自学	指导		图书及网络资源	课外、课内
		学习除氧器压力动态特性的特点	自学	指导		图书及网络资源	课外、课内
		学习除氧器压力动态特性试验方法	自学	指导		行业技术标准	课外、课内
		回答引导问题	交流	答疑			课内
3	计划	分组拟定试验方案	拟定试验方案	指导		行业技术标准	课外
4	决策	小组汇报,完善试验方案	交流、修改	指导		行业技术标准	课内
5	实施	完成除氧器压力动态特性试验	操作、记录	指导		火电仿真机组	课内
6	检查	对照试验评价指标,检验试验结果	提交试验报告	指导		行业技术标准	课内
7	评估	开展自评、互评,评价任务完成质量	自评、互评	点评		检查评估表	课内

【知识导航】

一、热工被控对象动态特性

热工被控对象是热工自动控制系统的重要组成部分,要设计一个合理的控制系统,必须了解对象的动态特性;要确定出控制器的最佳整定参数,也必须了解对象的动态特性。了解了对象的动态特性,还可以对新设计的工艺设备提出要求,使之满足所需要的动态特性,为设计满意的控制系统创造先决条件。因此,研究对象的动态特性对实现生产过程的自动化具有重要的意义。

(一) 热工被控对象的分类

热工过程中的被控对象大都比较复杂,为了便于分析它们的动态特性,通常可按以下两种方法对现场中的被控对象进行分类。

1. 按被控对象有无自平衡能力划分

按被控对象有无自平衡能力划分,可分为有自平衡能力被控对象和无自平衡能力被控对象。

自平衡能力是指对象在受到扰动后,仅依靠自身能力而不依靠任何外加的控制作用就能使被控量趋于某一稳定值的能力。

(1) 有自平衡能力被控对象。具有自平衡能力的被控对象称为有自平衡能力被控对象,简称有自平衡对象,图 1-1 所示水箱就是一个有自平衡对象,该对象具有自平衡能力。

若设水箱水位 h 为该被控对象的被控量,假设水箱在 $t=t_0$ 时刻以前处于平衡状态,即水箱的流出量等于流入量, $q_o=q_i$; 水箱水位等于恒定值, $h=h_0$ 。在 $t=t_0$ 时刻流入量 q_i 突然增加,导致水箱水位升高,使得水箱底部所承受的压力增加,从而导致调节阀 2 前后差压增加,流出量 q_o 变大,流出量 q_o 的增加又影响水位上升的速度,使得水位增加的速度降低,是一个负反馈作用,这样,经过一段时间的自调整,水箱水位又重新达到某一稳定值。可见,该水箱具有自平衡的能力。

(2) 无自平衡能力被控对象。不具有自平衡能力的被控对象称为无自平衡能力被控对象,简称无自平衡对象。无自平衡对象在受到扰动后,其被控量不能依靠自身能力趋于某一稳定值,必须借助外加的控制作用才能恢复到稳定值,图 1-2 所示水箱就是一个无自平衡对象,该对象无自平衡能力。

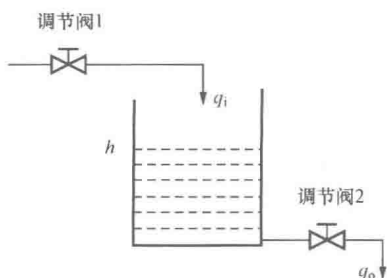


图 1-1 有自平衡能力被控对象

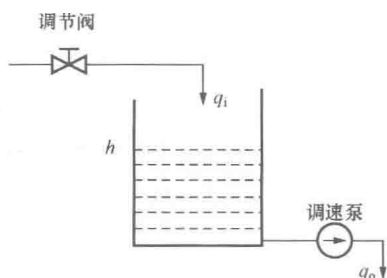


图 1-2 无自平衡能力被控对象

若设水箱水位 h 为该被控对象的被控量,假设水箱在 $t=t_0$ 时刻以前处于平衡状态,即水箱的流出量等于流入量, $q_o=q_i$; 水箱水位等于恒定值, $h=h_0$ 。在 $t=t_0$ 时刻流入量突然增加,导致水箱水位升高,这时,水箱水位升高也使得水箱底部承受压力增加,但流出量由调速泵决定,不受水箱底部压力变化的影响,因而流出量仍为定值,不发生变化。如此,水箱水位将会持续上升,再也不可能稳定下来。可见,水箱水位不断升高,无法恢复到稳定值,对象无自平衡能力,是无自平衡对象。

2. 按被控对象包含容积的数量多少划分

按被控对象包含容积的数量多少划分,可分为单容被控对象和多容被控对象。

(1) 单容被控对象。单容被控对象比较简单,被控对象只包含一个容积,图 1-1、图 1-2 所示对象均为单容被控对象。

(2) 多容被控对象。多容被控对象相对来说比较复杂,被控对象包含两个或两个以上容积,图 1-3 所示被控对象为由水箱构成的双容被控对象。

在热工现场中,被控对象通常是从有无自平衡能力和包含容积数目的多少两个方面同时进行考虑的,因而就有单容有自平衡被控对象、多容有自平衡被控对象和单容无自平衡被控对象、多容无自平衡被控对象四类。它们的传递函数以及单位阶跃响应曲线见表 1-2。

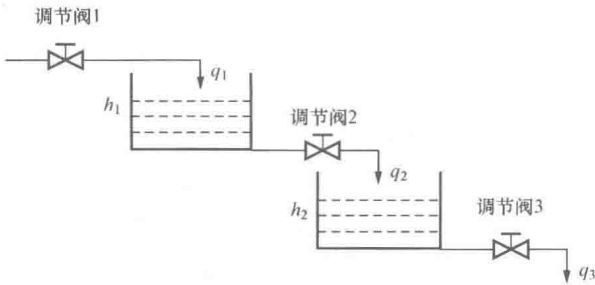


图 1-3 双容被控对象

表 1-2 被控对象的数学模型及动态特性

对象类别	传递函数	单位阶跃响应曲线
单容有自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{Ts + 1}$ 式中 k——单容被控对象的比例系数； T——单容被控对象的时间常数	
单容无自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_a s}$ 式中 T_a——单容无自平衡对象的时间常数（积分时间）	
多容有自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{(Ts + 1)^n} \approx \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}$ 其中 $n \approx 24 \times \frac{0.12 + \tau/T_c}{2.93 - \tau/T_c}$ $T \approx \frac{\tau + 0.5T_c}{n - 0.35}$ 式中 k——被控对象的比例系数； T——多容被控对象的惯性时间常数； n——多容被控对象的容数数目； τ——迟延时间	
多容无自平衡能力被控对象	$W(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_a s (Ts + 1)^n} \approx \frac{1}{T_a s} e^{-\tau s}$ 其中 $T_a \approx \frac{1}{0H\tau}$ $n \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{0H}{c(\tau)} \right) - \frac{1}{6}$ $T = \frac{1}{n} \tau$ 式中 T_a——积分时间； T——多容被控对象的惯性时间常数； n——多容被控对象的惯性环节数目； τ——迟延时间	

(二) 影响对象动态特性的结构性质

对象的动态特性取决于工艺设备的结构、运行条件和内部物理（或化学）的过程。在热工生产过程中，被控对象（以下简称对象）在结构上是多种多样的，而影响对象动态特性的主要特征参数有容量系数、阻力和传递迟延。

1. 容量系数

生产过程中大多数对象具有储存物质（或能量）的能力，容量系数就是衡量对象储存物质（或能量）能力的一个特征参数。

在图 1-1 所示水箱中，水箱的流入水量为 q_i ，流出水量为 q_o 。某一时刻后流入量 q_i 等于流出量 q_o ，水箱的水位 h 将稳定在某一值。设某种原因引起 $q_i \neq q_o$ ，水箱内储水量就会发生变化，而这种变化由水箱水位的变化表现出来。在 dt 时间内，水箱内储水量的变化为 $dq = (q_i - q_o)dt$ 。显然，不平衡流量越大，储水量的变化量就越大，对于一个截面积不变的圆柱形水箱，其水位的变化速度就越快。即

$$q_i - q_o = C \frac{dh}{dt} \quad (1-1)$$

式中 C ——比例系数。

由于 $dq = (q_i - q_o)dt$ ，则 C 又可表达为

$$C = \frac{dq}{dh} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 表明，比例系数 C 是被控量 (h) 变化一个单位时需要对象物质储存值 (q) 的变化量， C 就称为对象的容量系数。

设水箱的截面积为 F ，则 $dq = Fdh$ ，因此容量系数 C 在数值上等于 F 。这意味着水箱的截面积越大，在同样大小的不平衡流量作用下，水位变化速度就越小，即抵抗扰动的能力越强。从这一方面来说，容量系数描述了对象抵抗扰动的能力。

图 1-4 所示是流出侧阻力不变，同一阶跃扰动输入下水槽截面不同时的两条飞升特性曲线。由图 1-4 可见，截面积 F 增大，飞升曲线变平缓，即时间常数 T 增大。可以说，对象容量系数越大，其惯性越大。

2. 阻力

在电路中，电流会受到电阻的阻力；流体在管路中流动受到阀门等给予的阻力等。就是说，物质（或能量）在传输过程中总是要遇到或大或小的阻力，因此需给予推动物质（或能量）流动的压差（如电位差、水位差、温度差等）。

在图 1-1 所示的水箱系统中，流出侧有阀门 2，在阀门 2 的开度一定时，流出水量 q_o 的大小就取决于水箱水位 h 的高低。换言之，水箱流出水量每变化一个单位需要水位变化的多少，则取决于流出侧阀门 2 的阻力。阻力表达式为

$$R = \frac{dh}{dq} \quad (1-3)$$

在图 1-1 所示的水箱系统中某一时刻流入量 q_i 阶跃增加 Δq_i ，随即有不平衡水量 dq 出

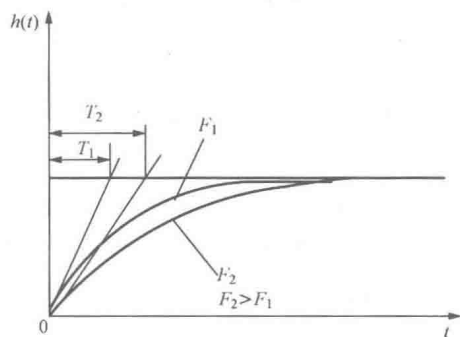


图 1-4 容量系数的影响

现, 水箱水位 h 开始增加。在阀门 2 开度一定, 即流出侧阻力为 R_2 时, 水位 h 的增加引起流出水量 q_o 的增加。这样, 不平衡水量 dq 随时间增加而逐渐减小, 水位 h 的增加速度越来越小, 最终为零, 这时水箱水位 h 稳定在一个新的数值上。本来被控量 h 的变化是由不平衡流量 $(q_i - q_o)$ 引起的, 由于流出侧阻力的存在, 水位变化反过来又影响不平衡流量的变化, 最终使被控量进入新的稳定状态。显然, 对象的阻力使之在动态过程中表现出自平衡能力。

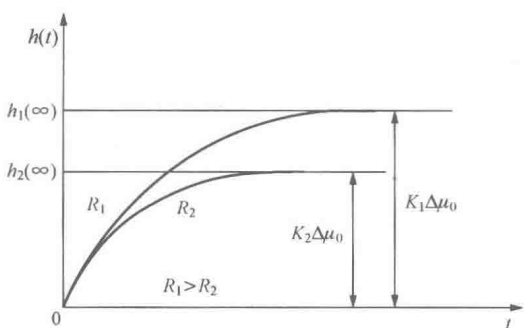


图 1-5 阻力的影响

图 1-5 所示是同一单容对象在阶跃扰动量相同, 而其流出侧阻力不同时的飞升特性曲线。由图 1-5 可以看出, 对象的阻力增大后其稳态值也增大, 且其时间常数也增大, 这是因为时间常数 $T = RF$, 与阻力 R 也有关。

以上分析表明, 对象的容积系数 C 和阻力 R 对对象的时间常数 T 均有影响, R 和 C 共同确定了对象惯性的大小。对象的容量系数 C 增加, 使其对扰动反应的灵敏度下降, 即惯性增大。对象的阻力 R 增加时, 虽然使时间常数 T 增大, 但同时又使自平衡能力下降。对象的容量系数在结构一定时是一个不变值, 而流出侧用户的负荷是根据需求而变化。因此, 被控对象在不同负荷 (由流出侧阻力 R 体现) 下其动态特性通常是不一样的。

3. 传递迟延

图 1-6 所示也是一个水箱系统, 它与图 1-1 所示水箱系统的不同之处就是控制流入水量的阀门 1 与水箱之间有一段距离 (不容忽略的)。在图 1-6 中, 设某一时刻调节阀门 1 阶跃开大 $\Delta\mu$, 则其流入量 q_i 随即阶跃增加 Δq_i , 然而因水流过一段距离需要时间, 所以流入水箱引起水位变化的流入量 q'_i 并不能立即变化。显然被控量水箱水位 h 的变化也要顺延一段时间。

上述被控量变化的时刻落后于扰动发生的时刻的现象称为对象的传递迟延。由于这种迟延是物质 (或能量) 在传输过程中因传输距离的存在而产生的, 所以又称为传输迟延或纯迟延。

对具有传递迟延的对象, 为分析方便往往将引起迟延的因素从对象中分离出来, 而作为一个独立的环节。在图 1-6 所示系统中, 设进入水箱的

流入量 q'_i 与水位之间具有的传递函数为 $W'(s)$, q_i 与 q'_i 之间存在传输时间 τ_0 , 即

$$\frac{q'_i(s)}{q_i(s)} = e^{-\tau_0 s} \quad (1-4)$$

则整个水箱系统的传递函数为

$$W(s) = W'(s)e^{-\tau_0 s} \quad (1-5)$$

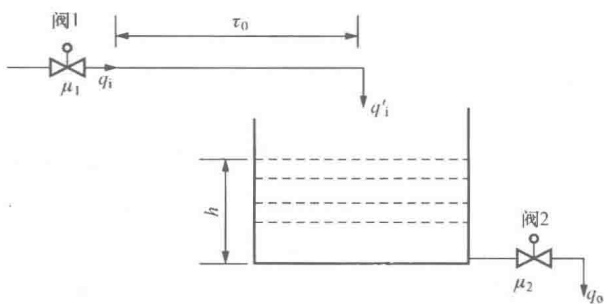


图 1-6 有迟延单容水箱示意