

ASEA

培训与考试指定参考丛书

自动化系统工程师资格认证

电站过程自动化

中国自动化学会 ASEA 办公室 组编
刘吉臻 白 焰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



ASEA 培训与考试指定参考丛书

电站过程自动化

中国自动化学会 ASEA 办公室 组编

刘吉臻 白 焰 主编

罗 毅 田 涛 于希宁 陈彦桥 参编

赵文杰 陆会明 杨国田

机械工业出版社

本书为 ASEA 培训与考试指定参考丛书之一。本书介绍了电站过程自动化的被控对象、系统整定、系统分析、控制设备、控制系统和系统设计。主要包括电站控制系统对象分析、电站控制系统整定、电站一般控制系统分析、电站复杂控制系统分析、电站控制系统设备、电站计算机控制系统, 以及电站控制系统工程设计等。该书取材广泛, 重点突出, 联系实际, 深入浅出。不仅是 ASEA 培训与考试的指定参考书, 也可供电站自动化专业技术人员或其他工程技术和管理人员自学, 或作为大专院校有关专业教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电站过程自动化/中国自动化学会 ASEA 办公室组编.

—北京: 机械工业出版社, 2006.3

(ASEA 培训与考试指定参考丛书)

ISBN 7-111-18750-4

I. 电… II. 中… III. 变电所-自动化系统-工程技术
人员-资格考核-自学参考资料 IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024738 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张宝珠 版式设计: 张世琴

责任校对: 姚培新 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 5 月第 1 版 · 第 1 次印刷

787mm × 1092mm $1/16$ · 11.25 印张 · 276 千字

0 001—3 500 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

自动化系统工程师资格认证 (ASEA)

领导小组

戴汝为 吴启迪 孙优贤 李衍达 孙柏林 马正午 李爱国

培训与教材编审委员会

主 任	吴惕华 (河北省科学院)
常务副主任	萧德云 (清华大学, 兼丛书执行主编)
副主任	韩崇昭 (西安交通大学)
秘书长	刘朝英 (河北科技大学)
	胡毓坚 (机械工业出版社)
委 员	(按姓氏笔画排序):
	马竹梧 (冶金自动化院)
	尹怡欣 (北京科技大学)
	王建辉 (东北大学)
	王钦若 (广东工业大学)
	刘祥官 (浙江大学)
	刘朝英 (河北科技大学)
	关新平 (燕山大学)
	孙鹤旭 (河北工业大学)
	杨煜普 (上海交通大学)
	金以慧 (清华大学)
	胥布工 (华南理工大学)
	段建民 (北京工业大学)
	胡毓坚 (机械工业出版社)
	董春利 (大连职业技术学院)
	廖晓钟 (北京理工大学)
	潘立登 (北京化工大学)

编 者 的 话

为适应在我国开展自动化系统工程师资格认证 (Automation System Engineer Accreditation, ASEA) 的需要, 中国自动化学会全国 ASEA 办公室决定, 由 ASEA 培训与教材编审委员会负责策划、组织编写了这套《ASEA 培训与考试指定参考丛书》。全套丛书共有 20 本左右, 从 2006 年起开始陆续出版问世, 计划用 2~3 年时间完成, 以满足广大自动化系统工程技术人員参加不同层面的 ASEA 培训与考试的需求。

本套丛书主要面向 ASEA 考试, 同时兼顾 ASEA 培训及后续的工程教育, 分五大类出版: (1) 自动化专业基础知识, 包括自动控制理论、自动化控制系统、仿真技术、自动化元件等; (2) 自动化技术基础知识, 包括计算机控制、网络与通信、单片机技术、监控组态技术、嵌入式系统等; (3) 行业自动化专业知识, 包括石油化工自动化、电站过程自动化、冶金工业自动化、机械制造自动化、轻工与制药自动化、煤炭工业自动化、农业自动化、交通智能管理、航空航天自动化、军事工业自动化、建筑智能化、企业信息化、数字化服务、自动化系统工程设计、自动化项目管理等; (4) 自动化专业技能知识, 包括过程控制技能、运动控制技能、计算机控制技能等; (5) ASEA 培训与考试指南, 包括 ASEA 报考范围、考试规则、评审标准及有关 ASEA 的综合问答等。

本套丛书采用了“单元”与“模块”结构的编写风格, 每本书将所要涵盖的自动化知识分成若干“单元”, 每个“单元”由若干“模块”组成, 每个“模块”又按“知识点”、“知识点分析”和“考试训练”分节论述。其中, “知识点”给出本“模块”所应包含的知识要点, 起到画龙点睛的作用; “知识点分析”则以论述或实例的方式对本“模块”所涉及的知识点进行深入分析; “考试训练”就所述的知识点, 从考试训练的角度, 列出或设计出多种考试训练题, 包括思考题、论述题、综合题、设计题、计算题、选择题等题型, 并对考试训练题作必要的分析, 给出解题概要或提示, 以供备考之用。采用这种独具一格的编写风格是从 ASEA 培训与考试的实际需要出发的, 可以使参加 ASEA 培训与考试的学员以较高的效率掌握应知应会的知识点并以较快的速度进入临考状态。应该说, 这是一套系统性和实用性强的, 既具有创新性和先进性, 又富有特色的 ASEA 培训与考试参考用书。

本套丛书的主要读者群是准备参加 ASEA 培训与考试的自动化专业及相关专业的工程技术人员和高等学校的本科生与研究生等。我们希望它既是 ASEA 培训与考试指定用书, 也能为广大自动化工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的参考资料。衷心感谢自动化同仁们的热情支持, 并欢迎对本丛书提出批评和意见。

ASEA 培训与教材编审委员会

2006 年 1 月于北京

序

为了逐步改变我国长期以来专业技术职称终身制的状况，不惟学历、不惟资历、以业绩和能力作为考核标准，进行社会化的专业技术资格认证，并逐步实现与国际接轨，在中国科协的领导下，中国自动化学会于 2004 年在自动化领域开始策划、开展了自动化系统工程师资格认证（Automation System Engineer Accreditation, ASEA）。这是落实中央人才工作会议精神，积极推进专业技术职称改革的一个重要举措，对充分开发和利用我国自动化人才资源，更好地为社会主义现代化建设服务也具有重要的意义。

中国科协学会学术部专门为这项工作进行了批复，要求中国自动化学会“按照国家有关政策，借鉴国外先进经验，积极探索，认真做好自动化系统工程师的培训、考核、认证以及相应的服务工作，并及时总结经验，推动学会改革发展，促进工程师资格的国际互认，促进我国专业技术人才成长和学科发展，不断提高技术人员水平，为我国自动化事业的发展做出新的更大贡献”。这正是我们开展 ASEA 工作的目的和准绳。

为了顺利开展 ASEA 工作，中国自动化学会专门成立了 ASEA 领导小组，下设 ASEA 办公室并分设若干委员会与工作部，依靠全国自动化领域的专家、教授和学者，按照中国科协的指示精神，正在一步一个脚印地开展起来了。

《ASEA 培训与考试指定参考丛书》是在 ASEA 办公室领导下，由 ASEA 培训与教材编审委员会策划、组织编写的，这是一项非常有意义的基础性工作。这套为 ASEA 培训和考试专门设计的参考丛书，内容涵盖自动化专业基础知识、自动化技术基础知识和国民经济主要行业的自动化专业知识，编写风格独树一帜，确有成效地将先进性、实用性和系统性有机地结合起来。在这套参考丛书的编写过程中，充分发挥了高等院校强大的师资力量，也全力调动了自动化企业技术人员的参与，从 ASEA 培训与考试的实际需要出发，全面考虑了理论和技能两个方面的知识考核，充分保证了 ASEA 的质量和水平。

相信本套参考丛书的出版，将为 ASEA 提供特色鲜明的培训与考试资料，对 ASEA 工作一定会起到积极的作用，对大学后的继续教育也是一套宝贵的参考资料。在此，我谨向参与这套参考丛书编写的自动化技术工程师、高校老师，致以诚挚的感谢。对参考丛书的整体结构到每本书的内容所存在的不足甚至谬误之处，还望使用本套参考丛书的各界人士不吝批评指正。

戴汝为 院士

2006 年 1 月于中国科学院

前 言

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。100 多年后,人们回顾 20 世纪对人类社会影响最大的工程技术成就时,电力工程被推为榜首。电力已成为关系到国计民生的基础产业。现代电力工业已进入了大电网、大机组、高电压、高自动化的时代。

电能的生产、传输、消费同时进行,并且要保持瞬间的平衡。电站将一次能源,包括煤炭、水力、油气、核能、风能、太阳能等,转化为二次能源——电能。电力工业自动化主要包括电站自动化和电网自动化。

传统的电站过程自动化被认为是电力生产过程中的辅助手段,采用自动化设备代替手工操作,节省人力资源,提高生产运行水平,减轻劳动强度,实现自动化生产。随着以计算机芯片技术为标志的信息时代的到来,传统的工业自动化发生了深刻的变革。今天,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站过程自动化系统,已成为现代电站的核心技术之一,以支持大型发电机组安全、经济运行,获得更高的社会效益。相应地,现代电站的规划、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,这也是推进电站过程自动化迈向更高水平的第一资源和原动力。

全国自动化工程师资格认证试点工作,是遵循国际惯例,适应社会需求,推动我国工程师职业化、社会化和国际化的重要举措。为了满足中国自动化学会和中国电机工程学会开展电站自动化系统工程师认证工作的需要,我们参加了本书的编写,深感荣幸。然而,面对这一崭新的事物,特别是面对如此浩瀚且日新月异的专业知识,在限定的篇幅之内如何按照工程师认证培训与考试的要求确定“应知应会”、“知识点”和“考试要点”确实相当困难。最终,也只能“挂一漏万”、“断章取义”、“抛砖引玉”了。

本书内容体系以“电站自动化系统”为主线,采用“自低向上”、“由简至繁”的叙述方式,由电站的控制对象到基本的控制原理、由电站一般控制系统到电站复杂控制系统、由简单的现场控制设备到复杂的计算机控制系统、直至纵观全局的电站控制系统工程设计——加以讲解。本书注重知识体系的系统性,突出基本概念、基本原理和基本技能,密切结合工程实际。力求深入浅出、抓纲带目、举一反三、融会贯通。总之,本书注重构建本专业领域的知识体系,而这些知识的学习与掌握仅靠本书则是远远不够的。

全书共分为七个单元。华北电力大学控制科学与工程学院的部分教授分别担任各单元的编者。概论部分由刘吉臻教授编写,第一单元由罗毅副教授编写,第二单元由田涛副教授编写,第三单元由希宁教授编写,第四单元由陈彦桥副教授、赵文杰副教授编写,第五单元由陆会明副教授编写,第六单元由杨国田教授编写,第七单元由白焰教授编写,全书由刘吉臻教授和白焰教授主编并统稿。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中定有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

编者的话

序

前言

概论 1

第一单元 电站控制系统对象分析 5

模块一 汽包锅炉蒸汽温度控制系统的
对象特性 5

模块二 汽包锅炉给水控制系统的
对象特性 8

模块三 汽包锅炉燃烧控制系统的
对象特性 11

模块四 直流锅炉的对象特性 15

模块五 循环流化床锅炉的对象特性 18

模块六 单元机组负荷控制系统的
对象特性 21

第二单元 电站控制系统原理与
整定 26

模块一 品质指标及整定的一般原则和
过程 26

模块二 单回路控制系统的整定 30

模块三 复合控制系统的整定 34

模块四 多回路控制系统的整定 38

模块五 多变量控制系统的整定 40

第三单元 电站一般控制系统分析与
投运 44

模块一 汽包锅炉蒸汽温度控制系统 44

模块二 汽包锅炉给水控制系统 49

模块三 汽包锅炉燃烧控制系统 52

模块四 直流锅炉控制系统 57

模块五 循环流化床锅炉 (CFB) 燃烧控制
系统 64

模块六 汽轮机旁路控制系统 69

模块七 烟气脱硫装置控制系统 72

第四单元 电站复杂控制系统分析 78

模块一 单元机组协调控制系统 78

模块二 炉膛安全监控系统 83

模块三 汽轮机数字电液控制系统 88

模块四 汽轮机监测仪表系统 93

模块五 火电厂厂级监控信息系统 98

第五单元 电站控制设备 106

模块一 变送器 106

模块二 执行机构 112

模块三 变频器 118

模块四 液力耦合器 122

第六单元 电站计算机控制系统 128

模块一 DCS 的硬件结构 129

模块二 DCS 的软件组态 136

模块三 DCS 的人机接口 138

模块四 DCS 的通信系统 141

模块五 DCS 的可靠性措施 147

第七单元 电站控制系统工程设计 151

模块一 检测系统设计 151

模块二 模拟量控制系统设计 154

模块三 顺序控制系统设计 158

模块四 联锁与保护系统设计 160

模块五 600MW 机组控制系统分析 163

参考文献 171

概 论

早在 19 世纪 80 年代末期，火力发电厂就开始为工业生产提供电能了。1875 年比利时的格拉姆将改造后的发电机安装在法国巴黎北火车站发电厂，该厂是世界上第一座火电厂。1882 年爱迪生在纽约曼哈顿的珀尔街建立了中心发电站。当时电站采用的是简单的直流发电机，以燃煤的往复式活塞蒸汽机驱动，电能传输的距离比较短，主要用于街区的照明。然而单靠照明，电站的商业运行并不经济，因此需要人们发现电能的新用途。19 世纪 80 年代和 90 年代，电车和城铁的普及促进了发电设备的发展。

最初的电站采用简单的水管式锅炉，烧煤或煤气。典型的工作参数是 0.9MPa、150°C，发电机的功率是 30kW。之后，电厂逐渐发展成高度复杂的系统。今天的汽轮机和锅炉，采用新型的金属合金材料，工作在超临界工况下，压力为 28.5MPa，温度为 600°C，发电机的单机容量已经达到 1000MW 以上。

为了减小运行成本，电站的设计发展到采用朗肯（Rankine）循环的发电机组。这类机组典型的热效率为 30% ~ 40%。现在采用最新的热能回收蒸汽锅炉（HRSG）的联合循环燃气轮机发电机组（CCGT），其热效率可达到 50% ~ 60%。随着欧共体取消了对发电过程中使用天然气的限制，导致了 CCGT 发电机组的快速发展。尽管出现了各种各样的电厂，但它们的基本工作原理都和 19 世纪末的电厂相同。从那时起，新技术的采用就成为电厂发展的主要动力。在过去的 30 年里，微处理机已经大量应用到发电和输电中的各个环节。在未来的 20 年里，微处理机高速发展所带来的计算能力的提高将会进一步促进技术的发展，智能控制技术也将会得到应用。新型计算机控制系统将提高电厂的自动化水平，改善单元机组的控制，同时还将优化单元机组的效率，减小环境污染。

电厂的设计不断地发展，单元机组的效率也将不断地提高。当前流行的整体燃气联合循环（IGCC）以及先进的加压流化床燃烧（PFBC）都是正在崭露头角的新技术，这些技术表现出提高效益和减小污染的巨大潜力。在美国能源部出版的第 21 版电厂设计中短期目标中提出，煤或固体燃料机组的热效率将达到 60%，天然气机组的热效率将达到 75%，环境影响将降至零或极小。

尽管电厂的系统构成与设计方案各不相同，但就其基本原理而言，它是用燃料燃烧产生蒸汽，驱动汽轮机，然后再带动发电机产生 50Hz 的交流电。传统电厂的核心是锅炉，它是以朗肯循环原理工作的，即理想卡诺循环的实际实现过程。图 0-1 是一个燃煤电厂中的蒸汽流程简图。

现代发电机组可以分为亚临界机组、超临界机组和联合循环机组。

在亚临界机组中，蒸汽的温度和压力参数不超过临界点，即 373.9°C 和 22.1MPa。汽水循环的分析一般是从凝汽器处的给水流量开始的。凝汽器的热井为给水泵提供水源，给水的温度和压力由一系列低压和高压加热器中流过的汽轮机抽汽来加热和提升，因此提高了机组的效率。省煤器是给水进入汽包之前的最后一个加热段。

汽包的双重作用是建立炉膛水冷壁的水循环和汽水分离。由汽包输出的过热蒸汽温度，

仅仅受到主蒸汽管道金属特性的限制。汽轮机一般是多级的，汽轮机中蒸汽的动能，随着各级的膨胀，转化为机械转矩。在经过高压缸之后，蒸汽回送到锅炉中进行再热，在汽轮机低压缸的出口，饱和蒸汽被凝汽器中的冷却水冷却后成为凝结水。

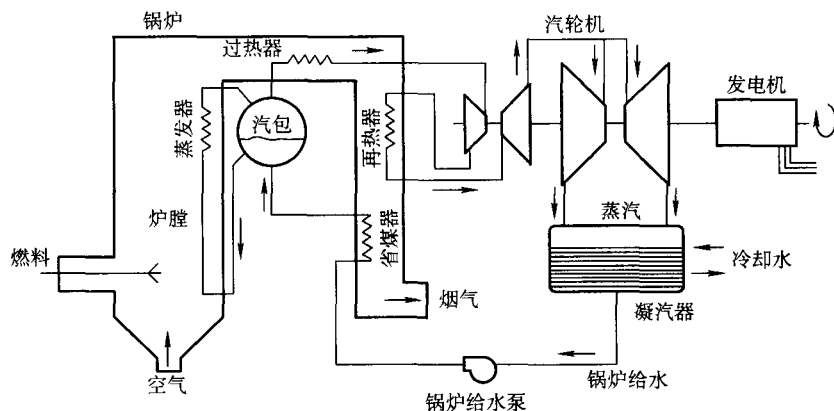


图 0-1 燃煤电厂蒸汽流程图

在亚临界区工作的优点之一是可以利用水和蒸汽之间的密度差来造成锅炉内炉水的自然循环。随着锅炉升温 and 升压的进行，如果汽水流量不平衡，锅炉给水泵就需要增加它的驱动力。因此，在不平衡的“强制循环”锅炉中，给水泵的额定功率就会明显地增加。

1971 年世界上第一台超临界机组运行，但直到 1979 年才进入商业化运营。这台 125MW 的机组安装在 Philo 电厂，其工作压力为 31MPa，工作温度为 621°C。由于温度和压力的升高，工作在超临界状态下的机组效率和传热效率都得到了提高。当前，最新技术参数的超临界机组要比亚临界机组的效率提高 3%，超临界机组锅炉的工作压力要大于 22MPa，又称直流锅炉，因为在汽水循环过程中，给水一次性通过锅炉。当工作压力超过临界点时，蒸汽和水的状态就没有明显的区别，它的密度范围可以从蒸汽的密度到水的密度。因此，作为汽水分离装置的汽包，就不需要了。如图 0-2 所示。

超临界锅炉的控制与汽包式锅炉不同。对于超临界锅炉，给水泵决定了蒸汽的流量，而对于汽包炉来说是由燃料量来决定蒸汽流量的。因此，直流炉过热蒸汽温度是通过调整燃料量与给水量比值来控制的，而汽包炉则是通过调整减温水的流量来控制的。

联合循环燃气轮机把燃气和蒸汽技术综合应用在单元机组中。它把传统汽轮机中的朗肯循环与燃气

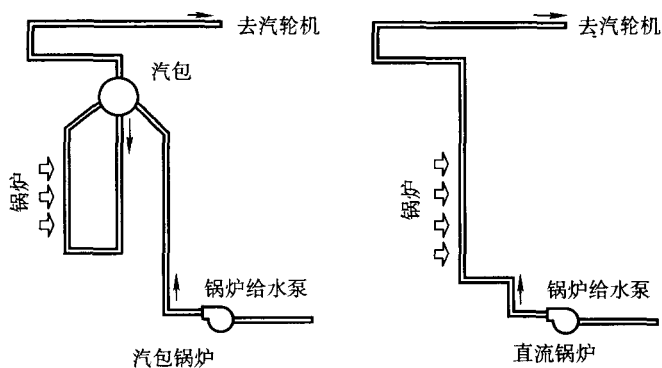


图 0-2 汽包炉与直流炉

轮机中的布雷顿循环结合在一起，使机组的热效率大大超过了传统的蒸汽轮机组。在这两类机组中，固有的能量损失限制了热效率的提高。然而，在 CCGT 机组中，通过热回收锅炉回

收燃气轮机中排气中的热量，使得机组的效率达到了 50% ~ 60%。一般来说，热回收所得到的能量足够驱动容量达燃气发电机 50% 的另一台发电机。一个简化的多轴 CCGT 机组示于图 0-3。

在另一种单轴 CCGT 机组中，燃气轮机和蒸汽轮机都连接到同一台发电机上。在起动时，或者“非联合”时，也就是燃气轮机单独运行时，蒸汽轮机可以通过液力耦合器解列。就整体投资而言，单轴系统成本要低 5% 左右，而且它的运行简单，可靠性高。而多轴系统的轴比较短，稳定性较好，机械设计上比较容易。

现代电厂是一个复杂的管路和机械系统。它有许许多多相互作用的控制回路和支持系统。然而，整个发电机组的行为是由锅炉的控制系统特性决定的。锅炉是机组动态响应的关键。所有的控制回路都必须对中心指令作出响应。中心指令系统给出了下属控制回路的给定值，并控制着被控对象的行为。蒸汽指令正是位于该层次结构之首。根据这一指令，所有其他控制回路得到自己的命令或给定值信号。因此，蒸汽指令信号经常被称为主控信号。

燃料燃烧时释放出热量，而热量又通过传导和辐射为给水所吸收。当燃烧大量的燃料时，控制燃料所释放出的热量是非常重要的，并且是具有一定的危险性的。而对于燃煤锅炉，又与燃油和燃气锅炉有很大的不同。

燃烧控制的基本问题是调整燃料与空气的流量以满足锅炉产生蒸汽的要求。理想的或“化学上的”完全燃烧是不切合实际的。由于燃料与空气不可能完全混合，因此会导致不完全燃烧。在实际设备中，必须存在一定的过剩空气，同“化学上的”完全燃烧值相比，大约有 10% 左右的过剩空气才能使燃料获得完全燃烧。没有充足的空气进入炉膛，不完全燃烧会导致冒黑烟，产生有毒的一氧化碳，以及在炉膛中积累未燃烧的燃料。相反，过多的空气进入炉膛，会产生我们所不希望产生的氮氧化物和硫化物，而且还会把热量从烟道中带走、降低锅炉的效率、增加送风机和引风机的电耗。锅炉中的空气是通过送风机送入炉膛，由引风机将烟气排出炉膛的。炉膛压力维持在比大气压略低一些，以防止有害气体由观察孔、吹灰口以及炉膛上的其他孔漏出。由这些孔进入炉膛的空气被称为“漏风”。

燃烧器管理系统（BMS）负责监控燃烧过程，它调整着极其危险的燃烧过程。为了确保安全，装设了大量的传感器来提供当前工作状态数据。其中包括 UV 火焰检测器、炉膛压力传感器、风量传感器、氧量传感器、氮氧化物传感器以及一氧化碳传感器。

锅炉控制系统是一个分层系统。如上所述，最上层是主控信号，它决定了单元机组的蒸汽负荷。位于底层的控制系统或回路控制器再根据主控制器指令产生它们的指令或者给定值。低层的控制回路主要有：制粉控制系统、燃烧控制系统、给水控制系统和蒸汽温度控制系统。

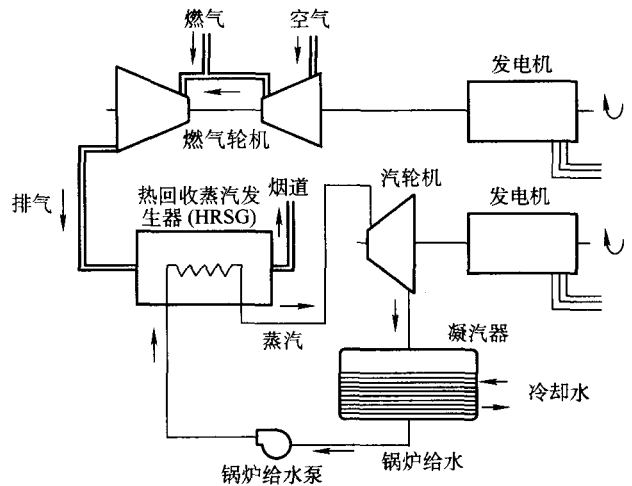


图 0-3 联合循环燃气轮机简图

除了前述的一些控制系统之外，还有其他一些控制系统是运行所必需的，如：发电机励磁控制、燃烧器摆角控制、循环水流量控制、高低压加热器控制、烟气再循环控制等。

在近一百年中，仪表和控制设备方面的变化要超过电厂中任何其他方面的变化。在 19 世纪 80 年代建成的发电机组中，采用了机械式的飞轮调速器来控制蒸汽流量。后来，采用气动以及电动仪表来控制电厂。然而，20 世纪 70 年代和 80 年代初期，微处理机的出现导致了控制领域中根本性的转变，微处理机的应用使得一些新的、革命性的控制策略得以实现，系统的处理能力和所实现的功能都有很大的提升。今天这些孤立的控制系统都已经集成到分散控制系统（DCS）之中。DCS 具有控制整个电厂的能力。尽管 DCS 主要还是用于实现回路控制，但是它的处理能力和灵活性使其完全能够解决其他方面的信息处理问题。

过去的 20 多年来，DCS 已经成为了大型工业生产过程和电厂生产过程的主流。确实，DCS 能够处理大规模系统的控制问题，使其区别于规模较小的可编程序控制器（PLC）以及工业控制计算机（IPC）。然而，高端的 PLC 和 DCS 相比，具有类似的功能和网络拓扑结构，因此，今天已经很难将它们完全分开。

今天许多电厂采用 DCS 取代了传统的模拟式或数字式控制器。因此，DCS 中所实现的控制系统经常是过去控制系统的翻版。在许多情况下，回路的控制是单输入单输出式的线性系统结构，采用 PI 或 PID 控制策略。而对于顺序控制，DCS 提供了大量的逻辑控制功能块（与、或、非、异或等）采用软件编程，把这些功能块组合在一起就建立起不同层次的控制程序。然而，大量的实时数据中只有很少的一部分被利用了，一般是向运行人员发出设备故障报警，偶尔会引发简单的数据趋势记录，以便查找故障或产生管理所用的汇总报表。为全厂控制策略和监督控制层服务的高速数据网络并没有充分地发挥作用。

分散控制系统的开放时代宣告了机械式和模拟式仪表的种种局限已经一去不复返了。电厂控制系统和管理系统更加开放，一些新的、革命性方法正在酝酿之中。在监控层中采用基于非线性模型的多输入—多输出控制策略，厂级协调控制（循迹控制和优化控制）以及专家系统、神经网络、数据挖掘和遗传算法为基础的智能控制，均具备了实现的可能。这些新技术几乎囊括了电厂运行操作的所有方面，故障诊断、智能维修、环境保护、数据管理、生产管理、智能报警管理、采购与结算等，其发展前景非常广阔。

第一单元 电站控制系统对象分析

电站控制系统对象是自动控制系统的重要组成部分，是设计一个合理的控制系统的基础和前提；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，电站控制系统对象动态特性分析对实现生产过程的自动化具有重要的意义。电站控制系统对象分析的主要方法有机理分析法和试验分析法。在工程中常用试验分析法，主要有两点法、切线法、半对数法、面积法等。

模块一 汽包锅炉蒸汽温度控制系统的对象特性

一、知识点

影响过热蒸汽温度和再热蒸汽温度对象特性的主要因素，在蒸汽量、烟气量和减温水量扰动下的过热蒸汽温度对象特性，在摆动喷燃器角度、用改变烟气挡板开度改变烟气量和事故喷水扰动下的再热蒸汽温度对象特性。

二、知识点分析

汽包锅炉蒸汽温度控制对象包括过热蒸汽温度控制对象和再热蒸汽温度控制对象。

1. 过热蒸汽温度控制对象的动态特性

蒸汽从汽包出来以后通过过热器的低温段至减温器，然后再到过热器的高温段，最后至汽轮机。各种锅炉结构不同，过热器的结构布置也不同（辐射式、屏式、对流式）。影响蒸汽温度变化的因素很多，例如蒸汽负荷、烟气温度和流速、受热面结垢、给水温度、炉膛热负荷、送风量、给水母管压力和减温水量。归纳起来主要为蒸汽流量、烟气传热量和减温水三个方面的扰动。

(1) 蒸汽扰动下对象的动态特性

引起蒸汽流量变化的原因有二：一是蒸汽的压力变化；二是汽轮机调节汽门的开度变化。

结构形式不同的过热器，在相同蒸汽流量 D 的扰动下，蒸汽温度变化的静态特性是不同的。对于对流式过热器的出口温度，随着蒸汽流量 D 的增加，通过过热器的烟气量也增加，导致蒸汽温度升高；对于辐射式过热器，蒸汽流量 D 增加时，炉膛温度升高较少，炉膛辐射给过热器受热面的热量比蒸汽流量的增加所需的热量要少，因此辐射式过热器的出口蒸汽温度反而下降，对流式过热器和辐射式过热器的出口蒸

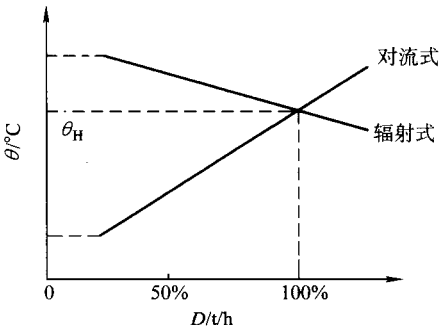


图 1-1 蒸汽量变化与对流式过热器及辐射式过热器出口蒸汽温度变化的静态特性

汽温度对负荷变化的反应是相反的，其静态特性如图 1-1 所示。

实际生产中，通常把两种过热器结合使用，还增设屏式过热器，且对流方式下吸收的热量比辐射方式下吸收的热量要多，因此综合而言，过热器出口蒸汽温度是随蒸汽流量 D 的增加而升高的。动态特性如图 1-2 所示。

对象动态特性的特点是有延迟、有惯性且有自平衡能力。

蒸汽流量扰动时，沿过热器长度上各点的温度几乎是同时变化的，延迟时间较小，约为 15s 左右。蒸汽流量的扰动是由机组负荷决定，故不能将这种扰动作为调节信号用。

(2) 烟气流扰动下过热蒸汽温度对象的动态特性

引起烟气传热量变化的原因很多，如给粉机给粉不均匀、煤中水分的改变、蒸汽受热面结垢、过剩空气系数改变、汽包给水温度变化、燃烧火焰中心位置的改变等。尽管引起烟气传热量 V_y 变化的原因很多，但对象特性总的特点是：有延迟，有惯性，有自平衡能力。它的特性曲线如图 1-3 所示。由于从烟气侧来的扰动量使沿整个长度过热器的传热量发生变化，所以蒸汽温度变化反应较快，延迟时间约为 10 ~ 20s。烟气传热量扰动可以用来作为调节量信号。

(3) 减温水量扰动下过热蒸汽温度对象的动态特性

常用的减温方法有两种：喷水式减温和表面式减温，前者的效果比后者好，喷水式减温器一般装在末级过热器高温段前面，一方面保护了过热器高温段，另一方面又改善了调节性能。这种过热器的安装方法与在饱和侧装设表面式减温器相比，延迟时间能减小 1/4。

减温水量扰动下的对象动态特性曲线见图 1-4。其特点是有延迟，有惯性和有自平衡能力，延迟时间约为 30 ~ 60s。减温水量是常用的调节量。

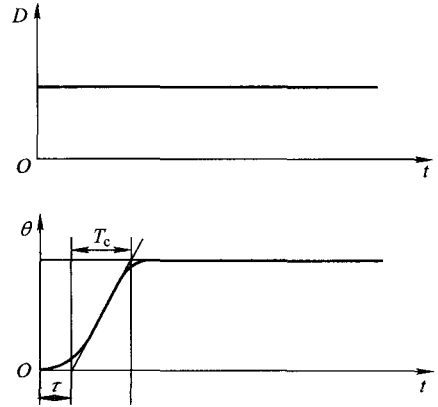


图 1-2 蒸汽量变化对过热蒸汽温度的影响

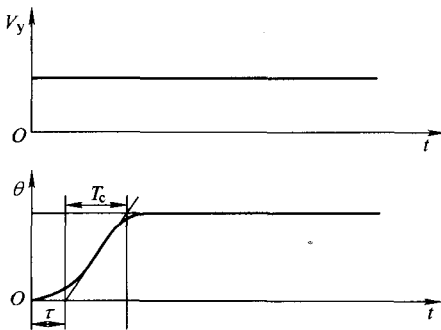


图 1-3 烟气流变化对过热蒸汽温度的影响

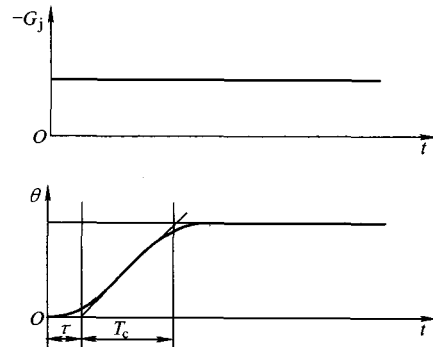


图 1-4 减温水量变化对过热蒸汽温度的影响

综上所述，蒸汽温度对象在各种扰动下都有延迟，有惯性，有自平衡能力，就惯性时间 T_c 值而言，减温水量扰动时其值最大，烟气次之，蒸汽流量扰动最小。

需要指出的是,在喷水减温控制系统中,减温水量的扰动强烈,对此段的温度要求比高温段出口要求低,所以往往将它作为串级控制的副参数。在导前微分系统中也常将它作为导前微分信号。

2. 再热蒸汽温度控制对象的动态特性

再热蒸汽温度的控制,一般以采用烟气控制的方式为主,这比采用喷水控制有较高的热经济性。实际采用的烟气控制方式有变化烟气挡板位置、采用烟气再循环、摆动喷燃器角度和采用多层布置圆形燃烧器、汽-汽热交换器和蒸汽旁通等方法。常见的控制方法是调整烟气挡板或摆动喷燃器角度,辅以事故喷水控制,这三种控制方式中,事故喷水的惯性和迟延较大,而摆动喷燃器的惯性和迟延较小,但烟气挡板或喷燃器摆动容易因积灰而卡涩。

(1) 烟气挡板调节

采用烟气挡板需把尾部烟道分成两个并联烟道,在主烟道中布置低温再热器,旁路烟道中布置低温过热器。在低温过热器下面布置省煤器,调温挡板则布置在工作条件较好的省煤器下面。主、旁两侧挡板的动作是相反的,即再热器侧开,过热器侧关,反之亦然。通过调节烟气挡板的开度,改变流经再热器的烟气流量,来调整再热蒸汽温度。

再热蒸汽温度控制对象的动态特性依控制方式的不同而不同,其特点是有延迟,有惯性和有自平衡能力。图 1-5 是再热蒸汽温度的动态特性,当挡板从 0% ~ 100% 变化时,再热蒸汽温度变化 58°C,滞后时间 140s。

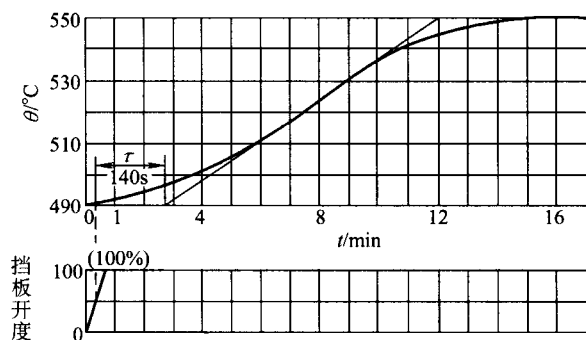


图 1-5 烟气挡板控制再热蒸汽温度的动态特性

(2) 摆动喷燃器角度

采用摆动喷燃器角度主要通过调节摆动式燃烧器喷嘴的上下倾角 (一般 $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$), 可以改变炉内高温火焰中心的位置。当喷嘴向上倾斜时, 火焰中心上移, 炉内吸收热量将减少, 炉膛出口烟温会升高, 对流受热面的吸热量就要增大。但是, 受热面离炉膛出口越远, 吸热量的增加就要减少。燃烧器的倾角不能太大, 过大的上倾角会增加燃料的未完全燃烧损失; 下倾角过大会造成冷灰斗的结渣。喷燃器角度扰动下的对象动态特性曲线如图 1-6 所示。

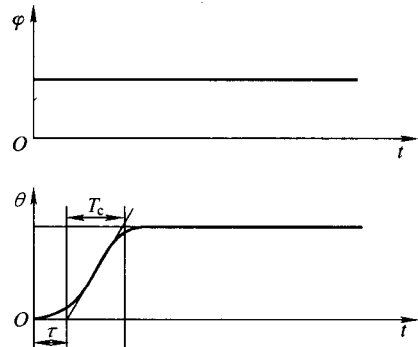


图 1-6 喷燃器角度控制再热蒸汽温度的动态特性

(3) 事故喷水

当调整烟气挡板或摆动喷燃器角度不能奏效时, 只能辅以事故喷水减温。由于过多的喷水会使汽轮机低压缸的通汽量变大, 增加冷凝损失, 对热力循环的经济性影响较大。所以喷水减温不能作为主要调节手段, 而只能作为一种降温的辅助措施。在再热蒸汽温度控制系统中仅作为事故喷水减温。事故喷水减温对象特性与过热

蒸汽喷水减温特性相似，在此不再复述。

三、考试训练

主要掌握过热器的结构形式对蒸汽温度的影响，过热蒸汽温度和再热蒸汽温度对象特性的主要扰动，在蒸汽量、烟气量和减温水量扰动下的过热蒸汽温度对象特性，在摆动喷燃器角度、改变烟气挡板开度来改变烟气量和事故喷水扰动下的再热蒸汽温度对象特性。

1. 随着蒸汽流量的变化，对流式和辐射式过热器出口温度变化有何不同？

参考答案：随着蒸汽流量的增加，对流式过热器的出口蒸汽温度升高，辐射式过热器的出口蒸汽温度下降。实际生产中，过热器出口蒸汽温度是随流量的增加而升高的。

2. 影响蒸汽温度的因素有哪些？

参考答案：影响蒸汽温度变化的因素很多，例如蒸汽负荷、烟气温度和流速、给水温度、炉膛热负荷、送风量、给水母管压力和减温水量。

3. 在蒸汽流量扰动下，过热蒸汽温度将如何变化？

参考答案：蒸汽流量扰动时，沿过热器长度上各点的温度几乎是同时变化的，延迟时间较小。当蒸汽流量增大时，过热蒸汽温度将升高。对象特点是有延迟，有惯性且有自平衡能力。蒸汽流量的扰动是由负荷决定，故不能将这种扰动作为调节信号用。

4. 在烟气量扰动下，过热蒸汽温度对象有何特性？

参考答案：从烟气侧来的扰动量使沿整个长度过热器的传热量发生变化，蒸汽温度变化反应较快。当烟气传热量增大时，过热蒸汽温度将升高，有延迟，有惯性，有自平衡能力，可用来作为调节量信号。

5. 在减温水量扰动下，蒸汽温度对象有何变化趋势？

参考答案：在减温水量扰动下，随喷水量的增大蒸汽温度下降，最后趋于平稳，反之亦然。蒸汽温度对象特点是有延迟，有惯性和有自平衡能力，是常用的调节量。

6. 在喷燃器角度摆动扰动下，再热蒸汽温度将如何变化？

参考答案：当火焰中心抬高时，炉膛出口温度上升，以对流受热面为主的再热器其进口烟温升高，吸热量增加，再热蒸汽温度提高；反之，再热器吸热量减少，再热蒸汽温度降低。炉膛火焰中心的高度对再热蒸汽温度有相当显著的影响，是调节再热蒸汽温度的主要手段。

7. 在烟气挡板开度扰动下，再热蒸汽温度将如何变化？

参考答案：当烟气挡板的开度增大时，流经再热器的烟气流量增大，再热蒸汽温度升高。烟气挡板是调节再热蒸汽温度的主要手段。

8. 蒸汽温度的主要扰动中，哪种扰动下蒸汽温度对象惯性时间最大？

参考答案：就惯性时间而言，减温水量扰动时其值最大，烟气次之，蒸汽流量扰动最小。

模块二 汽包锅炉给水控制系统的对象特性

一、知识点

给水扰动下的对象特性，蒸汽扰动下的对象特性，热负荷扰动下的对象特性。

二、知识点分析

影响水位的主要因素有：锅炉蒸发量（负荷 D ）、给水量 W 、炉膛热负荷（燃烧率 M ）和汽包压力 p_d 。

1. 给水量扰动下水位变化的动态特性

图 1-7 中曲线 1 为沸腾式省煤器情形下的水位的动态特性。曲线 2 则是非沸腾式省煤器情况下的水位动态特性。

从物质平衡的观点来看，加大了给水量 W ，水位应立即上升，但实际上并不是这样，而是经过一段延迟，甚至先下降后上升，出现了所谓的“虚假水位”现象。这是因为给水温度远低于省煤器的温度，即给水有一定的冷却度，水进入省煤器后，使一部分汽变成了水，特别是沸腾式省煤器，给水减轻了省煤器内的沸腾度，省煤器内的汽泡总容积减少，因此，进入省煤器内的水首先用来填补省煤器中汽泡破灭容积减少而降低的水位，经过一段延迟甚至水位下降后，才能因给水量不断从省煤器进入汽包而使水位上升。在此过程中，负荷还未发生变化，汽包中水仍然在蒸发，因此水位也有下降趋势。

沸腾式省煤器的延迟时间 τ_1 为 100 ~ 200s，而非沸腾式省煤器的延迟时间 τ_2 为 30 ~ 100s。

水位在给水量扰动下的传递函数可表示为

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{\epsilon}{s} - \frac{\epsilon T}{1 + Ts} = \frac{\epsilon}{s(1 + Ts)} \quad (1-1)$$

水位对象可近似认为是一个积分环节和一个惯性环节并联的形式。用一阶近似表示时

$$\frac{H(s)}{W(s)} = \frac{\epsilon}{s} e^{-\tau s} \quad (1-2)$$

2. 蒸汽流量扰动下水位的动态特性

如果只从物质平衡的角度来看，蒸发量突然增加 ΔD 时，蒸发量高于给水量，汽包水位是无自平衡能力的，所以水位应该直线下降，如图 1-8 中 $H_1(t)$ 所示的那样，但实际水位是先上升，再下降，即出现“虚假水位”现象，甚至比给水扰动还严重，如图中 $H(t)$ 所示。

其原因是由于负荷增加时，在汽水循环回路中的蒸发强度也将成比例增加，水面下汽泡的容积增加得也很快，此时燃烧率 M 还来不及增加，汽包中水的体积增大而水位上升，如图 1-8 中曲线 $H_2(t)$ 所示。在开始的一段时间 $H_2(t)$ 的作用大于 $H_1(t)$ 。当过了一段时间后，即汽泡容积和负荷相适应而达到稳定后，水位

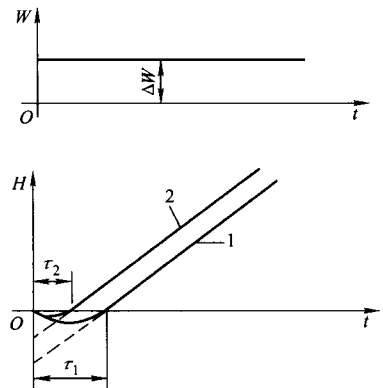


图 1-7 给水量扰动时水位阶跃响应曲线

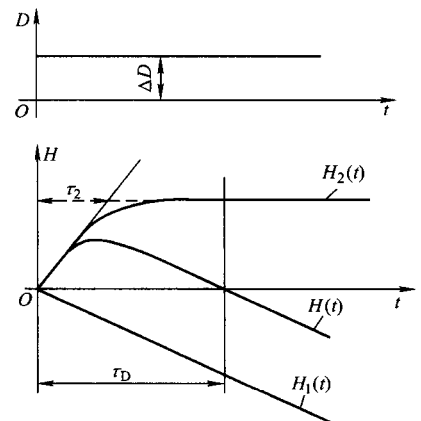


图 1-8 蒸汽流量 D 扰动下水位阶跃响应曲线