

发电厂热工自动化技术丛书

锅炉热力 过程控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 刘武林 主审 / 侯子良



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

发电厂热工自动化技术丛书

锅炉热力 过程控制系统

丛书主编 / 孙长生 主编 / 刘武林 主审 / 侯子良



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由中国自动化学会发电自动化专业委员会、电力行业热工自动化技术委员会组织编写,共11册,内容包括燃煤、燃气、核电机组的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、设计与安装调试、运行维护与检修、热工技术与监督管理、故障分析处理与过程可靠性控制等多方面。

本书为《锅炉热力过程控制系统》分册,书中系统介绍了大型火力发电机组(含亚临界、超临界、超超临界、循环流化床机组)锅炉热工控制系统的工艺流程、测量系统、连锁保护、自动控制等,内容包括汽水系统、燃烧系统、风烟系统、制粉系统、锅炉炉膛安全监控系统等,并对热工自动控制对锅炉节能降耗的影响分析、循环流化床锅炉进行了介绍。

本书适合从事大型火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,也可作为发电厂热工监督专责工程师的培训教材,并可为有关专业人员以及高等院校热工自动化相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉热力过程控制系统/刘武林主编. —北京:中国电力出版社,2015.12

(发电厂热工自动化技术丛书/孙长生主编)

ISBN 978-7-5123-8557-3

I. ①锅… II. ①刘… III. ①锅炉-热力系统-过程控制-控制系统 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第310262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

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 22印张 520千字

印数 0001—2000册 定价 68.00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

《发电厂热工自动化技术丛书》

主 编 单 位

丛书组织编写单位：中国自动化学会发电自动化专业委员会、
电力行业热工自动化技术委员会

丛书主编单位：国网浙江省电力公司电力科学研究院、
中国电力企业联合会科技发展服务中心

各分册主编单位：

第一册 《热工自动化系统及设备基础技术》

——华北电力科学研究院有限责任公司

第二册 《汽轮机热力过程控制系统》

——神华国华(北京)电力研究院有限公司

第三册 《锅炉热力过程控制系统》

——国网湖南省电力公司电力科学研究院

第四册 《单元机组及厂级控制系统》

——广东电网公司电力科学研究院

第五册 《脱硫、脱硝、公用及辅助控制系统》

——广东电网公司电力科学研究院

第六册 《燃气轮机发电机组控制系统》

——中国华电集团电气热控技术研究中心、
国网浙江省电力公司电力科学研究院、
江苏华电戚墅堰发电有限公司等

第七册 《压水堆核电站过程控制系统》

——大亚湾核电运营管理有限责任公司、
中广核运营有限公司

第八册 《热工自动化系统安装调试技术》

——浙江省火电建设公司、
国网浙江省电力公司电力科学研究院、
浙江省电力建设有限公司等

第九册 《热工自动化系统检修维护技术》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

第十册 《热工过程技术管理与监督》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

第十一册 《热控系统典型故障分析处理与预控》

——国网浙江省电力公司电力科学研究院等

《发电厂热工自动化技术丛书》

审 委 会

主 任 金耀华
副主任 黄世强 金 丰 许继刚
委 员 段 南 王利国 仝 声 胡文斌 沈丛奇
毕诗芳 盛建华 吴革新 叶江琪

编 委 会

主 编 孙长生 朱北恒
副主编 尹 淞 尹 峰
编 委 李劲柏 刘武林 岳建华 陈世和 骆 意
章素华 施可登 孙 耘 张秋生 项 谨
王建强 黄 勃

《锅炉热力过程控制系统》

编 审 人 员

主 编 刘武林
副主编 朱晓星 张建玲
参 编 寻 新 王伯春 刘复平 胡雄辉 刘文丰
倪宏伟 李劲柏 傅 强
主 审 侯子良

发电厂热工自动化技术丛书

锅炉热力过程控制系统

序

热工自动化系统在发电厂机组安全稳定运行中的地位已不言而喻。热工自动化专业技术从主体上涉及热控系统设计、安装、调试、运行维护、检修和技术管理方方面面。因此,不断提高发电厂热工专业技术人员的技术素质与管理水平是发电企业的一项重要工作。

热工专业人员既要有扎实的专业理论基础,又要有丰富的专业实践经验,同时还要求有一定的热力系统知识。因此,热工专业知识的掌握,应该是基础理论联系实际经验、热力过程结合控制系统设备的渐进过程。随着技术的发展和新建机组的不断增加,新老电厂的热工专业人员都面临着专业知识和技术素质再提升的需求。

为了给热工专业人员提供系统、完整、实用、可操作、案例丰富的教材,推动热工专业培训工作的深化,造就业务精湛娴熟的专业人才队伍,电力行业热工自动化技术委员会根据专业知识的要求,组织编写了本套《发电厂热工自动化技术丛书》。丛书汇集了一批热爱自己的事业、立足岗位、善于吸取前人经验、勤于钻研、勇于实践的行业资深前辈、热工专家和现场技术人员的集体智慧。尤其可贵的是,在专业技术竞争激烈的今天,他们将自己长期用心血与汗水换来的宝贵经验,无私地奉献给了广大读者,相信本套丛书一定会给广大电力工作者和读者带来启发和收益。

希望本套丛书的出版,能推动热工专业运行、维护、检修及管理人员学习专业知识、深入技能培训。进而提升专业技术人员技术水平和解决生产过程实际问题的能力,涌现出更多的热工专业技术人才。为强健我国热工自动化人才队伍,在保证发电机组安全稳定、经济、节能环保运行中发挥作用,为国民经济的增长与繁荣作出贡献。

中国大唐集团公司副总经理
电力行业热工自动化技术委员会主任委员



二〇一五年十月

前言

随着科学技术的发展、机组容量不断增大,热工技术日新月异,热工自动化系统已覆盖到发电厂的各个角落,其技术应用水平和可靠性决定着机组运行的安全经济性。同时,热工自动化技术及设备的复杂程度不断提高,新工艺、新需求、新型自动化装置系统层出不穷,对热工专业人员掌握测量和控制技术提出了更高要求。新建机组数量的不断增加伴随着对热工人员需求的不断上升,又对热工专业的专业知识和运行维护能力提出了更高层次的要求。因此提高热工自动化系统的技术水平与运行可靠性,以人为本,通过加强热工人员的技术培训,提高热工人员的技术素质,是热工管理工作中急需的,也是一项长期的重要工作。

为了推动热工培训和技能竞赛工作的开展,协助各集团做好热工专业的技术培训工作,提供切合实际的系统培训教材,根据金耀华主任委员的意见,由电力行业热工自动化技术委员会主持、浙江省电力公司电力科学研究院和中国电力企业联合会科技服务发展中心牵头,华北电力科学研究院有限公司、神华国华(北京)电力研究院有限公司、湖南省电力公司电力科学研究院、广东电网公司电力科学研究院、中国华电集团电气热控技术研究中心、大亚湾核电运营管理有限公司、浙江省火电建设公司、江苏华电戚墅堰发电有限公司、华电杭州半山发电有限公司、浙江浙能嘉兴发电有限公司、浙江萧山发电厂、浙江浙能金华燃机发电有限责任公司等单位参加,编写了本套丛书,这套丛书主要有以下特点:

(1) 热工自动化系统及设备与热力系统融为一体,便于不同专业人员的学习,加深学习过程中的理解。

(2) 由浅入深,内容全面,包含了燃煤、燃气、核电机组,概括了火力发电厂的整个热力系统、热工过程控制设备与系统、安装调试与检修运行维护、热工监督与管理和故障分析处理技术。

(3) 按主设备的划分进行编写,适合发电厂热工专业因分工不同而开展的培训需要。

本丛书主要从应用的角度进行编写,作者均长期工作在电力建设和电力生产的第一线,不仅总结、提炼和奉献了自己多年来积累的工作经验,还从已发表的大量著作、论文和互联网文献中获得许多宝贵资料和信息进行整理并编入本丛书,从而提升了丛书的科学性、系统性、完整性、实用性和先进性。我们希望丛书的出版,有助于读者专业知

识的系统性提高。

在丛书编写工作的启动与丛书编写过程中，参编单位领导给予了大力支持，众多专家在研讨会与审查会中提出了宝贵的修改意见，使编写组受益良多，在此一并表示衷心感谢。

最后，特别感谢浙江省电力公司电力科学研究院和中国电力联合会科技发展服务中心，没有他们的支持，也就没有本套丛书的成功出版。

《发电厂热工自动化技术丛书》编委会

2015年10月

编者的话

《锅炉热力过程控制系统》分册是《发电厂热工自动化技术丛书》的第三分册。本书将大型火力发电机组锅炉热力系统分为汽水系统、燃烧系统、风烟系统、制粉系统四个部分，再将锅炉热工控制系统中最重要的炉膛安全监控系统、电厂最关注的热工自动控制对锅炉节能降耗的影响、系统最特殊的循环流化床锅炉三个部分独立成章，详细介绍了各部分的工艺流程、测量检测系统、连锁保护逻辑、自动控制技术等，并汇总了现行规程规范对锅炉热工控制的相关要求。特别指出的是，编写人员根据多年来参与火电机组调试、故障诊断处理的经验，分析了影响锅炉热工控制系统安全可靠性的常见因素，探讨了提高可靠性的技术措施，还针对热工自动控制对锅炉节能降耗的影响这一较新的课题进行了全面分析，力求本书对热工专业技术人员有较高的实用价值和参考意义。

本分册由国网湖南省电力公司电力科学研究院刘武林担任主编，朱晓星、张建玲担任副主编，具体分工如下：寻新、倪宏伟（第一章）；王伯春（第二章）、胡雄辉（第三章）；刘复平（第四章）；朱晓星、李劲柏（第五章）；刘武林、张建玲（第六章）；刘文丰、傅强（第七章）。

本分册由侯子良担任主审，他对本书进行了认真的审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，再次谨表示诚挚的谢意。

本分册在编写过程中，参阅了很多电厂、自动化设备公司、设计院和高等院校的技术资料、说明书、图纸等，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2015年10月

目 录

序	
前言	
编者的话	
第一章 汽水系统	1
第一节 汽水系统概述	1
一、概述	1
二、汽包锅炉汽水系统	2
三、直流锅炉汽水系统	3
四、过(再)热蒸汽系统	8
五、给水泵组	10
六、现行规程规范的相关要求	11
第二节 测量系统	16
一、汽包水位测量	16
二、汽水系统流量测量	21
三、炉管泄漏监测系统	24
四、炉水化学仪表	25
五、汽包水位电视监视系统	29
第三节 汽水系统的连锁保护	30
一、汽包锅炉汽包水位连锁保护	30
二、直流锅炉汽水系统的连锁保护	31
三、锅炉排污系统的连锁保护	32
第四节 汽水系统的自动控制	33
一、给水控制系统	33
二、过热蒸汽温度控制系统	45
第二章 燃烧系统	52
第一节 燃烧系统概述	52
一、概述	52
二、燃烧系统工艺流程	53
三、燃烧系统主要设备	56

四、现行规程规范的相关要求	64
第二节 测量系统	67
一、主蒸汽压力测量	67
二、燃料量测量	69
三、炉温测量	70
四、锅炉壁温测量	73
五、火焰电视	76
第三节 燃烧系统的连锁保护	79
一、等离子点火的连锁保护	79
二、微油点火的连锁保护	80
三、燃油泵房的连锁	81
四、测温探针的连锁保护	82
五、锅炉吹灰程控	82
第四节 燃烧系统的自动控制	84
一、基本内容及特点	84
二、锅炉主蒸汽压力控制	93

第三章 风烟系统..... 106

第一节 风烟系统概述.....	106
一、概述	106
二、风烟系统工艺流程	106
三、风烟系统主要设备	108
四、现行规程规范的相关要求	115
第二节 风烟系统热工测量装置.....	115
一、风机振动测量	116
二、风量测量	116
三、氧量测量	117
四、飞灰含碳测量	120
五、烟尘浊度仪	121
六、烟气排放连续监测系统	122
七、风机喘振	123
八、空气预热器火灾报警	124
第三节 风烟系统的连锁保护.....	125
一、送风机的连锁保护	125
二、引风机的连锁保护	128
三、一次风机连锁保护	131
四、空气预热器的连锁保护	132
五、热工保护可靠性分析与探讨	133

第四节 风烟系统的自动控制	136
一、送风量及氧量控制系统	136
二、炉膛压力控制系统	138
三、一次风压控制系统	139
四、空气预热器漏风控制系统	140

第四章 制粉系统 142

第一节 制粉系统概述	142
一、煤的基本知识	142
二、制粉系统工艺流程	145
三、制粉系统主要设备	148
第二节 测量装置	159
一、燃煤计量装置	159
二、料位测量装置	172
三、煤粉浓度测量装置	176
四、入磨风量测量装置	178
第三节 制粉系统的连锁保护	179
一、中间贮仓式制粉系统的连锁保护	179
二、中速磨煤机直吹式制粉系统的连锁保护	181
三、钢球磨煤机直吹式制粉系统的连锁保护	184
第四节 制粉系统的自动控制	187
一、中间贮仓式制粉系统的自动控制	187
二、中速磨煤机直吹式制粉系统的自动控制	195
三、双进双出钢球磨煤机直吹式制粉系统的自动控制	197
四、制粉系统自动启停控制	200
第五节 制粉系统防爆	201
一、煤粉的自燃与爆炸特性分析	201
二、制粉系统防爆措施	202

第五章 锅炉炉膛安全监控系统 206

第一节 锅炉炉膛安全监控系统概述	206
一、定义	206
二、意义及发展历程	206
第二节 炉膛爆燃	207
一、概述	207
二、产生爆燃的典型工况	208
三、爆燃的防止	209
第三节 锅炉炉膛安全监控系统构成	211

一、锅炉炉膛安全监控系统的主要功能	211
二、典型 FSSS 的配置构成	212
三、FSSS 试验与维护	216
四、现行规程规范的相关要求	218
第四节 检测系统	223
一、火检原理及设备	223
二、炉膛压力检测	230
第五节 MFT 及公用逻辑	232
一、吹扫逻辑	232
二、MFT 及 OFT 逻辑	235
三、MFT 硬跳闸回路的典型设计	243
四、点火控制逻辑	244
五、油检漏试验	247
第六节 安全可靠性分析与探讨	248
一、概述	248
二、影响 FSSS 安全可靠性的常见因素	249
三、提高 FSSS 安全可靠性的措施	251
第六章 热工自动控制对锅炉节能降耗的影响分析	256
第一节 影响锅炉经济运行的因素分析	256
一、影响锅炉经济运行的主要因素	256
二、锅炉的能耗指标	260
第二节 重要自动控制系统的品质优化	264
一、燃烧自动控制对锅炉节能降耗的影响分析	264
二、蒸汽温度自动控制对锅炉节能降耗的影响分析	267
三、给水自动控制对锅炉节能降耗的影响分析	271
四、其他自动控制对锅炉节能降耗的影响分析	273
第三节 锅炉受热面吹灰优化控制	274
一、锅炉受热面吹灰控制概述	274
二、锅炉受热面积灰对锅炉节能降耗的影响	274
三、锅炉受热面吹灰优化控制	275
第四节 重要辅机变频改造	276
一、变频控制技术简介	276
二、一次风机变频改造	279
三、送引风机变频改造	283
第五节 提高煤耗计算用数据的测量精度	284
一、节能指标计算用热工主要参数	285
二、电厂入炉煤计量对机组煤耗影响分析	285

第七章 循环流化床锅炉	288
第一节 循环流化床锅炉工艺流程	288
一、概述	288
二、主要部件	291
三、床内的燃烧工艺流程	297
四、汽水流程	299
五、风烟系统	299
六、物料循环过程	300
第二节 测量系统	301
一、床温测量	301
二、床压测量	302
三、物料循环流率测量	302
四、汽包水位测量	303
第三节 循环流化床锅炉的连锁保护	303
一、FSSS	303
二、主要辅机的连锁保护	306
第四节 循环流化床锅炉的自动控制	309
一、燃烧控制系统	309
二、床温与送（配）风控制系统	314
三、床压控制系统	320
四、蒸汽温度控制系统	324
五、脱硫控制系统	327
六、其他控制系统	330
七、自动控制要点	332
八、Run back 控制	334
参考文献	337

汽水系统

第一节 汽水系统概述

一、概述

电站锅炉利用燃料燃烧释放的热能加热给水,以获得高温、高压的蒸汽。将高温、高压的蒸汽送到汽轮机中,推动汽轮机转动,并带动发电机转动产生电能。在电能转换的过程中,锅炉是火力发电厂的三大主要设备之一。

按照蒸汽参数,锅炉可分为低压锅炉(出口蒸汽压力小于或等于 2.45MPa)、中压锅炉($2.94\sim 4.90\text{MPa}$)、高压锅炉($7.8\sim 10.8\text{MPa}$)、超高压锅炉($11.8\sim 14.7\text{MPa}$)、亚临界压力锅炉($15.7\sim 19.6\text{MPa}$)、超临界压力锅炉($> 22.1\text{MPa}$)和超超临界压力锅炉($> 27\text{MPa}$)。

按照循环方式,锅炉可分为自然循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉三种类型。

(1) 自然循环锅炉。给水经给水泵升压后进入省煤器,受热后进入蒸发系统。蒸发系统包括汽包、不受热的下降管、受热的水冷壁以及相应的联箱等。当给水在水冷壁中受热时,部分水会变为蒸汽,所以水冷壁中的工质为汽水混合物,而在不受热的下降管中工质则全部为水。由于水的密度要大于汽水混合物的密度,因此在下降管和水冷壁之间就会产生压力差,在这种压力差的推动下,给水和汽水混合物在蒸发系统中循环流动。这种循环流动是由于水冷壁的受热而形成的,没有借助其他的能量消耗,所以称为自然循环。在自然循环中,每千克水每循环一次只有一部分转变为蒸汽,或者说每千克水要循环几次才能完全汽化,循环水量大于生成的蒸汽量。单位时间内的循环水量同生成蒸汽量之比称为循环倍率,自然循环锅炉的循环倍率为 $4\sim 30$ 。

(2) 控制循环锅炉。在循环回路中加装循环水泵就可以增加工质的流动推动力,形成控制循环锅炉。在控制循环锅炉中,循环流动压头要比自然循环时的压头增强很多,可以比较自由地布置水冷壁蒸发面,即蒸发面可以垂直布置也可以水平布置,其中汽水混合物既可以向上也可以向下流动,所以可以更好地适应锅炉结构的要求。控制循环锅炉的循环倍率为 $3\sim 10$ 。

自然循环锅炉和控制循环锅炉的共同特点是都有汽包。汽包将省煤器、蒸发部分和过热器分隔开,并使蒸发部分形成密闭的循环回路。汽包内的大容积能保证汽和水的良好分离,但是汽包锅炉只适用于临界压力以下的锅炉。

(3) 直流锅炉。直流锅炉没有汽包,工质一次通过蒸发部分,即循环倍率为 1 。直流锅炉的另一特点是在省煤器、蒸发部分和过热器之间没有固定不变的分界点,水在受热蒸发面中全部转变为蒸汽,沿工质整个行程的流动阻力均由给水泵来克服。如果在直流锅炉的启动回路中加入炉水循环泵,则可以形成复合循环锅炉。复合循环锅炉在低负荷或者本生负荷以

下运行时，由于经过蒸发面的工质不能全部转变为蒸汽，因此在锅炉的汽水分离器中会有饱和水分离出来，分离出来的水经过炉水循环泵再输送至省煤器的入口，这时流经蒸发部分的工质流量超过流出的蒸汽量，即循环倍率大于 1；当锅炉负荷超过本生点以上或在高负荷运行时，由蒸发部分出来的是微过热蒸汽，这时炉水循环泵停运，锅炉按照纯直流方式工作，循环倍率等于 1。

二、汽包锅炉汽水系统

自给水管来的水从锅炉后直接进入省煤器入口集箱，水流经省煤器受热面吸热后进入省煤器出口集箱，经连接管引至省煤器汇集箱，由此从汽包两端引入。给水在汽包两端引入后经内部多孔的给水管路均匀分配，与炉水混合经下降管、引入管进入炉膛。水通过受热的水冷壁向上流动并且产生蒸汽，汽水混合物在水冷壁上集箱汇集后，经引出管引入汽包，并在汽包内进行汽水分离。从汽包中分离出来的饱和蒸汽依次经顶棚管、热回收区、水平烟道、中隔墙、低温过热器、屏式过热器和高温过热器变成过热蒸汽；分离出来的水则进入下降管进行再循环。典型汽包锅炉汽水系统流程如图 1-1 所示。

调节蒸汽温度的一、二级喷水减温器分别装于低温过热器与屏式过热器之间、屏式过热器与高温过热器之间。

再热蒸汽从汽轮机高压缸排汽进入低温再热器进口集箱，经过冷段、热段再热器后，从再热器出口集箱引出至汽轮机中压缸。一般来说，再热蒸汽温度的调节通过位于尾部烟道的省煤器下方的烟气调节挡板进行控制。

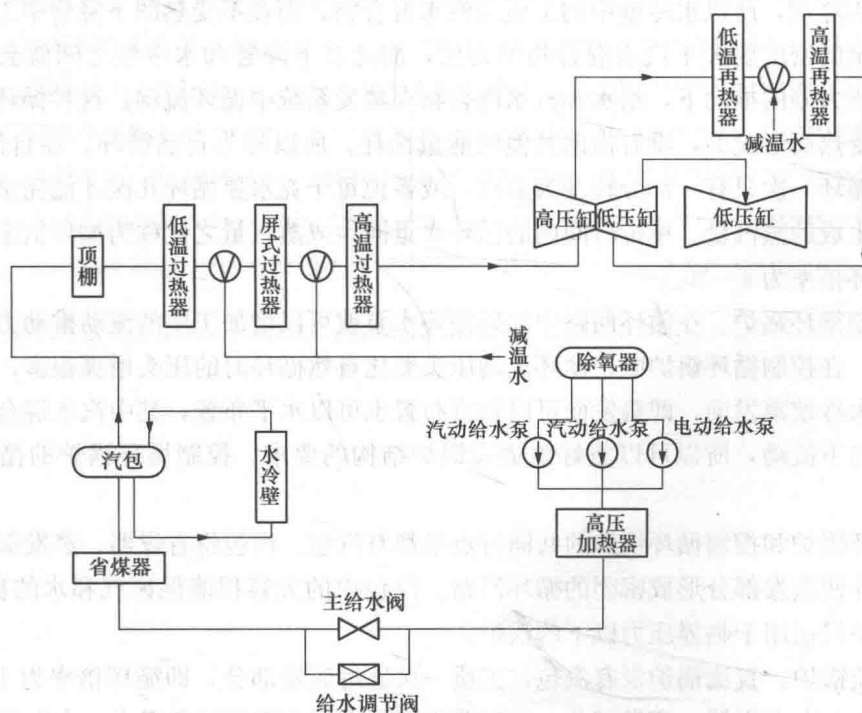


图 1-1 典型汽包锅炉汽水系统流程简图

三、直流锅炉汽水系统

(一) 典型直流锅炉的汽水系统流程

直流锅炉没有汽包，给水变成过热蒸汽是一次完成的，加热段、蒸发段与过热段之间没有明确的界限，随着锅炉负荷和工况的变动而变动。典型直流锅炉给水系统流程如图 1-2 所示，锅炉给水由锅炉炉前单路进入，经过主给水管后，分左右两侧到省煤器进口集箱。与主给水电动门并联布置有给水旁路调节阀构成的旁路管道。由省煤器进口集箱进入的给水流经省煤器管组，汇合在省煤器出口集箱，省煤器出口两侧管道在炉前汇集成一根下降管，从上至下引入到水冷壁底部进口集箱。

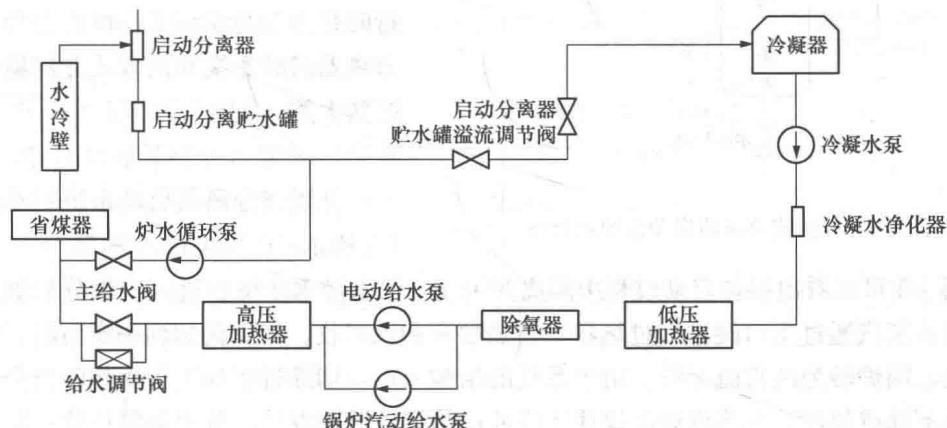


图 1-2 典型直流锅炉给水系统流程图

主给水电动门之后的管道上布置有一个锅炉启动旁路管道接口，启动阶段时水冷壁的汽水混合物经汽水分离器分离后，饱和水向下流动经炉水循环泵送入锅炉给水管，这部分水和来自给水泵的给水混合后一起并入省煤器进口集箱。

省煤器出口到下降管从上向下流动的管道上装设有流量测量装置。来自省煤器的介质通过下降管到锅炉底部，经过四根水冷壁进口引入管进入水冷壁进口集箱。水冷壁垂直管上部引入到前后左右 4 个出口集箱，每个出口集箱各分 2 根管道，总共 8 根管道引出到水冷壁出口汇集箱，4 个汇集箱再通过 24 根管道，导至汽水分离器。

蒸汽温度的调节除了喷水调节、挡板调节外，对于超临界直流锅炉，煤水比也是影响蒸汽温度的主要因素。保证锅炉燃烧过程适当的煤水比对于控制蒸汽温度非常重要，它可以保证蒸汽温度的粗调。

(二) 锅炉启动旁路系统

超临界锅炉的启动旁路系统是超临界机组的重要组成部分，由于超临界锅炉没有固定的汽水分离点，在锅炉启动过程中和低负荷运行时，给水流量有可能小于炉膛保护及维持流动所需的最小流量，因此必须在炉膛内维持一定的工质流量以保护水冷壁不致过热超温。设置启动旁路系统使锅炉在启动、低负荷运行及停炉过程中，通过启动系统建立并维持炉膛内的最小水流量，以保护炉膛水冷壁，同时满足机组启动及低负荷运行的要求。直流锅炉的启动旁路系统主要有以下功能：

(1) 辅助锅炉启动：辅助建立冷态和热态循环清洗工况；辅助建立启动压力与启动流