

电气工程先进技术译丛

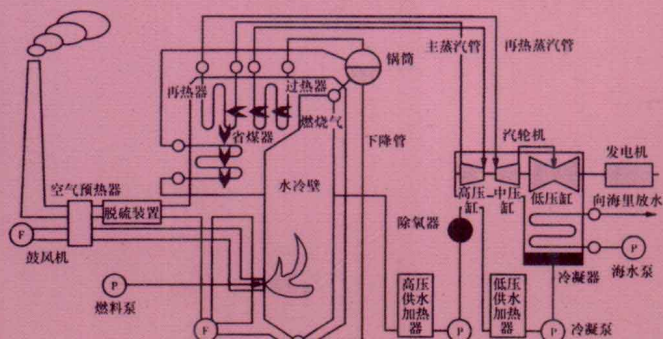
发电设备中的 控制技术

エネルギー産業に
おける制御

(日) 松村 司郎 平山开一郎 著
马立新 译



工业出版社
MACHINE PRESS



本书主要介绍了以控制理论为先导的控制技术在发电设备中的应用。书中第1部分“火力发电设备的控制”中详细介绍了现代控制理论在锅炉控制中的应用、人工智能技术在锅炉控制中的应用、火力发电设备的仿真技术、火力发电设备用的SCADA系统；第2部分“发电机的励磁控制”中详细介绍了发电机的励磁控制概要、励磁控制特性、励磁控制理论、电力系统的稳定性和励磁控制、电力系统稳定性、系统稳定性装置等实用技术。对从事发电系统控制理论研究的技术人员，可通过本书以发电设备控制中须待解决的课题为基础找到新的解决方案，帮助技术人员积累更多的经验。

本书适用于工业自动化控制理论的工程技术人员，以及大专院校相关专业师生参考。

Copyright © 2005 by Shiro Matsumura, Kaiichirou Hirayama & Corona Publishing Co., Ltd. All rights reserved.

Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd. Tokyo, Japan through TOHAN CORPORATION. Tokyo, Japan.

本书的中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字01-2009-5503号

书名原文：エネルギー産業における制御

英文书名：Control of Energy Industry

图书在版编目（CIP）数据

发电设备中的控制技术/（日）松村司郎，（日）平山开一郎著；马立新译．—北京：机械工业出版社，2012.1

（国际电气工程先进技术译丛）

ISBN 978-7-111-36671-3

I. ①发… II. ①松…②平…③马… III. ①发电厂—发电设备—控制
IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字（2011）第250826号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：张沪光 责任编辑：张沪光 版式设计：霍永明

责任校对：张晓蓉 封面设计：马精明 责任印制：李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2012年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.75印张·232千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-36671-3

定价：49.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心：（010）88361066

销售一部：（010）68326294

销售二部：（010）88379649

读者购书热线：（010）88379203

门户网：<http://www.cmpbook.com>

教材网：<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

译者序

本书从时间延迟问题和发电设备的先进运行系统的经典控制理论，到作为现代控制理论的人工智能技术等方面都有所论及。作为占我国能源生产百分之九十以上的火力发电及其技术仍是当前和未来相当长的时间内研究的重点。随着能源问题的日益突出和国家节能减排政策的推进，可再生能源发电事业越来越受到重视。因此风力发电，太阳能光伏发电，燃料电池发电等的研究也在如火如荼地进行着，并已经向着实用化的方向在发展，但是，却还没有发展成能够代替以石化燃料为主要能源的火力发电的规模。有关火力发电设备的控制研究虽然已经进行了 30 多年，大部分都是关于蒸汽从锅炉传到汽轮机的温度控制。可以这么说，蒸汽温度的控制难度非常高，几乎所有的研究人员都想研究攻克它。实际上至今仍然还未对关键的问题给出圆满的解答。随着智能电网的建设和使用，火力发电成套设备的锅炉控制和发电机的励磁控制理论与应用的研究将变得更加充满挑战性和具有吸引力。

本书在详细介绍锅炉的结构和传统的控制方法的基础上，着重讨论了现代控制理论在锅炉控制中的应用：如非线性离散控制、参考模型的自适应控制、长无时间体系的控制等；根据传统控制理论在锅炉控制中存在的问题，全面详尽地介绍了人工智能技术在锅炉控制中的应用，尤其重点介绍了模糊控制及其在蒸汽温度控制系统中的应用，还有混合模糊控制方法的新思考，以及讨论使用专家系统技术的先行控制信号的自动调整等；本书介绍的新的研究成果如锅炉跟踪控制系统、汽轮机跟踪控制系统、锅炉汽轮机协调控制系统等，对智能电网中发电系统、设备——锅炉温度控制问题研究提供了新的研究思路。本书在这些介绍中插入了大量的实例和仿真结果，通过这些来说明算法的可行性和有效性。本书简要介绍了火力发电设备的仿真技术和火力发电设备用的 SCADA 系统，还展望了火力发电的未来。本书的第 2 部分从提高电能质量的角度，介绍了至关重要的发电机的励磁控制技术。

本书的译者多年来从事人工智能与控制技术的研究应用、信息处理、管理以及翻译工作，对该领域的发展有着较深刻的认识和研究。本书的翻译工作得到了许多本领域专家的大力支持与协助，在此表示真诚的感谢。由于译者的水平有限，如有错误与不妥之处，敬请批评指正。

译者

2011 年 10 月

原 书 序

有过试图尽可能快地，并以更低价位生产出更好产品的人，大概都有一种欲罢不能的感受。在生产第一线，几乎是日益增长永无止境地追求着这个目标，而控制工程领域为了实现这个目标做出了贡献。作为实现上述目标的直接方法，Automation（自动装置）是第二次世界大战以后在欧洲诞生的术语，控制技术则是占据了其核心的关键技术（Key Technology）。说到 Automation，自然让人联想到自动化，但是现代控制技术并不仅仅是自动化，还会结合系统化、最佳化和智能化，为了以更快、更低成本地生产出更好的产品，在各个产业领域中不断地突破极限。

控制技术并不只是在制造产品过程中，在产品的使用中也被灵活地应用。为了提高汽车、照相机、空调器等消费品的功能，内置了先进的控制技术，使其附加价值得以提高。适用于制造技术的控制产品技术方面的应用范围也在快速扩大。而且在制造业范畴之外，控制技术也在日新月异地发展。

例如，飞机、火车、船舶等交通工具的控制是现代控制技术的一个重点，在环境产业中控制技术也发挥了关键技术的作用，而且通过家庭自动化，控制技术在提高个人生活方面也作出了巨大贡献。

最近，控制技术的显著发展在很多情况下负有推进各产业领域的具体技术进步的责任。控制技术的基础的是传感器和传动装置，如果没有与之相关的信号处理技术的进步，以及包含通信或图形接口的软件、硬件这两项计算机技术的进步，是根本得不到发展的。另一方面，控制技术也是各工业生产共通而且普遍的技术，就是所谓的跨学科技术，是具有跨越了各行业具体技术的通用性技术。

这个情景类似于材料，材料在自然科学（力学物理或化学等）中有着普遍性，对控制而言，控制理论就充当了这个角色。控制理论和其他工程理论相比较，不仅具有非常古老的历史，最近也取得了令人瞩目的发展。控制作为普遍性学科，其控制理论与产业现场的控制技术之间的关系并不是直接的，但是却有很强的关联性。控制技术在近年来的发展中，控制理论发挥着至关重要的作用。

本系列专著中[⊖]，工业界控制技术的最新发展，以控制理论的贡献为主线来介绍各领域中的成熟技术。基于控制理论的控制系统设计追求合理性，就是在基本成型的产品生产现场可以达成怎样的控制效果，作为这个系列专著的中心课题。到目

⊖ 日文原书为系列专著。

前为止，已经出版过大量控制理论方面的教科书、手册和专业书，有限领域或对象的控制技术方面的手册类书籍也不在少数。但是到目前为止至少在日本还没有出版过像本系列专著这样覆盖各个产业领域，从理论观点讲述与控制技术相关的控制方面书籍。我们相信这个系列专著会和在制造或开发现场兢兢业业工作的控制技术人员、希望了解控制理论应用现状的研究人员，以及学习控制相关知识的大学生们提供一套十分有用的参考书。

书中，变形后的瓦特离心调速器的封套设计图样是由北神由子提供的（译本封面未采用此图）。并借此机会对向本系列专著提供了相应成果的各位表示衷心感谢。

策划、编辑委员长 木村 英纪

前 言

在能源工业领域中，所谓燃料，也就是从煤炭与原油中提炼出能够在生产中使用的液化石油气与汽油、柴油等燃料能源的燃料制造设备技术与用燃料生产电力能源的发电设备技术，虽有以上两种技术，但本书将以电力作为讨论重点。

电力可以由各种能源转换而来。首先是采用利用重力势能差的水力发电，并在相当长的一段时间内保持着发电能源的首位，即使是现在水力发电对于发展中国家而言也是最重要的发电技术之一。其次讨论的是将燃料具有的能量转移到水中，即产生水蒸气，利用热能差发电。这是目前最容易产生大量电能的技术，且该装置被称为蒸汽发电设备。在蒸汽发电设备中，作为它的燃料，有使用煤炭、重原油或者天然气这些化石燃料设备，有应用核反应的核能发电设备，以及利用生活垃圾作为燃料的生物能发电设备。近来，人们考虑到能源的枯竭、环境问题，因此风力发电、太阳能光伏发电、燃料电池发电等的研究也在如火如荼地进行着，并渐渐地向着实用化的方向发展，但是还没有发展成能够代替蒸汽发电设备的规模。

本书中，作为商业发电主要蒸汽发电设备的高质量能源的运送媒介蒸汽，对电力的稳定供给做出了贡献。在第1部分会介绍关于针对电力需求的响应，既快速又稳定的蒸汽控制技术。

一般的发电技术是将各种涡轮机（水轮机、蒸汽汽轮机、风力机、内燃机等）的转动能量转换成电力的技术。为了提供高质量的电能，发电机的励磁技术显得至关重要，关于这方面的内容会在书的第2部分中进行描述。

本书总结了关于电气事业中的火力发电成套设备的锅炉控制与发电机的励磁控制理论与应用，并使之在实际中能够运用。本书推荐给缺少实际操作经验的技术者使之对理论有更深入的理解。也相信对于经验丰富的技术者而言，对实际中遇到的问题，在参考本书的同时，并根据这些问题的解析能够进一步加深理解。

将产生的电力输送到终端消费者的过程中，由于采取了其他产业中所没有的发电也就是消费形式，电力供应网的控制技术也是很重要的，虽然是技术上的关键课题，由于版面有限，本书就不作介绍了。但是，在电力市场化方面，若能够发现与欧美的水平相媲美的技术，无论是谁都希望能够尽早将其出版出来。

松村 司郎、平山开一郎

2005年1月

目 录

译者序

原书序

前言

第1部分 火力发电设备的控制	1
1.1 锅炉的构造与传统的控制	1
1.1.1 绪论	1
1.1.2 火力发电设备的构造	2
1.1.3 锅炉的种类和构造	6
1.1.4 锅筒锅炉的控制	7
1.1.5 直流锅炉的控制	14
1.2 现代控制理论在锅炉控制中起的应用	25
1.2.1 非线性离散控制	25
1.2.2 模型参考自适应控制	31
1.2.3 延迟时间长的系统的控制	45
1.3 人工智能技术在锅炉控制中的应用	50
1.3.1 模糊控制理论在蒸汽温度控制系统中的应用	50
1.3.2 混合模糊控制方案	60
1.3.3 采用专家技术的预先控制信号的自动调整	73
1.4 火力发电设备的仿真	78
1.4.1 MMS 的开发情况	78
1.4.2 MMS 的基本结构与特征	81
1.4.3 采用 MMS 的动力学仿真实例	82
1.5 用于火力发电设备的 SCADA 系统	84
1.5.1 支持 SCADA 的基础技术	85
1.5.2 火力发电的现状与未来前景	86
1.5.3 运行业务	88
1.5.4 操作界面	88
1.5.5 SCADA 系统的程序	90
参考文献	91

第 2 部分 发电机的励磁控制	93
2.1 绪论	93
2.2 发电机励磁控制的概要	95
2.2.1 自动电压调节器 (AVR) 的设置目的	95
2.2.2 励磁系统的构成	97
2.3 励磁控制特性	100
2.3.1 励磁控制功能	100
2.3.2 励磁系统的响应	103
2.3.3 数字励磁控制 (D-AVR)	104
2.4 励磁控制理论	106
2.4.1 励磁控制系统的框图	107
2.4.2 励磁机方式的设计实例	108
2.4.3 晶闸管励磁方式的设计范例	114
2.5 电力系统的稳定性与励磁控制	115
2.5.1 单位法	115
2.5.2 发电机模型	119
2.6 电力系统稳定性	129
2.6.1 静态稳定性	129
2.6.2 动态稳定性	131
2.6.3 暂态稳定性	134
2.6.4 利用励磁控制提高稳定性	136
2.7 电力系统稳定装置	137
2.7.1 利用伯德图的 PSS 设计	138
2.7.2 最佳控制的 PSS 设计	151
2.7.3 PSS 输出限幅装置	165
2.8 总结	166
参考文献	167
附录	170
附录 A 动态稳定性框图 ($K_1 \sim K_6$)	170
附录 B 由单机对无限大母线系统框图推导出状态方程式	175

第 1 部分 火力发电设备的控制

1.1 锅炉的构造与传统的控制

1.1.1 绪论

商用的全部发电设施如果以能源的来源作大致区分的话，虽然可以分为水力、火力、核能、风能、太阳能、燃料电池、地热等，但是能够稳定提供电力商用的主要能源却只有水力、火力和核能。

从控制技术分类来看，控制系统是一个巨大且非线性的系统，本章就有关火力发电设备进行处理的时间延迟等关键问题的控制内容做介绍。

从大的方面给火力发电（厂）设施分类的话，它由锅炉、汽轮机、发电机和它们的辅机等构成，有关汽轮机和发电机的控制研究已经比较成熟，该领域内非专业研究人员几乎已没有能介入的深入研究的空间。相对而言，锅炉有关的研究课题还是很多的，即使是从控制学角度来看，也能引起人们的兴趣，而这促使专业研究人员进一步对该领域做深入的研究，本章就有关锅炉控制的各种控制方法与理论的展开做详细叙述。

不过，有关火力发电厂的控制研究虽然已经进行了 30 多年，大部分都是关于蒸汽从锅炉传送到汽轮机的温度控制。可以说，蒸汽温度的控制难度非常高，几乎所有的研究人员都想研究攻克它。实际上至今仍然还未对关键的问题给出正确的解答。

在本书中大部分内容涵盖蒸汽温度控制，作者本人最近的研究，从时间延迟问题和发电设备的先进运行系统的经典控制理论，到作为现代控制理论的人工智能技术等多方面都有所论及。但是有些部分是正在研究开发的東西，我想难免有不能完全满足读者要求的地方，敬请读者谅解。

火力发电厂的能源大致可分为化石燃料的重油（液体）、天然气（气体）、煤炭（固体）。不同的燃料影响锅炉的大小，但它从控制角度看几乎没有差异，所以这里将不会对不同燃料的控制做论述。

1.1.2 火力发电设备的构造

火力发电设备是把燃料转换成电能的装置，其核心技术是朗肯循环[⊖] (Rankine cycle)。

基本朗肯（兰金）循环如图 1-1a、b 所示，把在锅炉产生的蒸汽 1 导入汽轮机使其加压膨胀为 2 状态，再把蒸汽 2 送入冷凝器（也称为凝汽器）冷却成饱和和水 3，用给水泵将其升压成 4 的状态送进蒸汽锅炉加热返回到蒸汽 1 的状态。

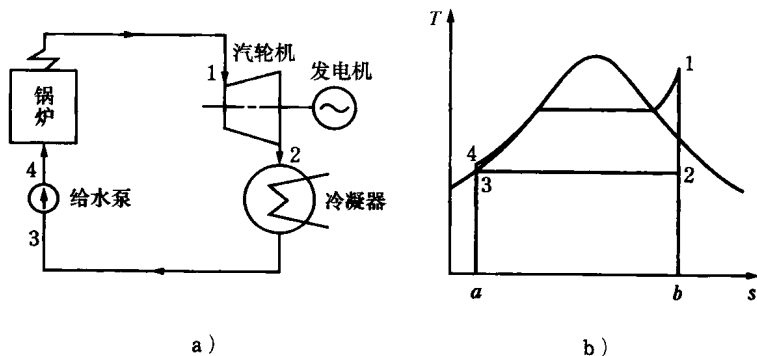


图 1-1 朗肯循环

图 1-1b 被称为 $T-s$ (温-熵) 图，纵轴表示温度 T ($^{\circ}\text{C}$)，横轴表示熵— s [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]。根据该图可知，面积 1、2、3、4 相当于做功的热量，面积 a 、4、1、 b 表示锅炉供给的热量，面积 a 、3、2、 b 表示冷凝器放出的热量。

实际上，在火力发电厂使用的是图 1-2a、b 所示的改进型朗肯循环的往复循环 (regenerative Rankine cycle)。

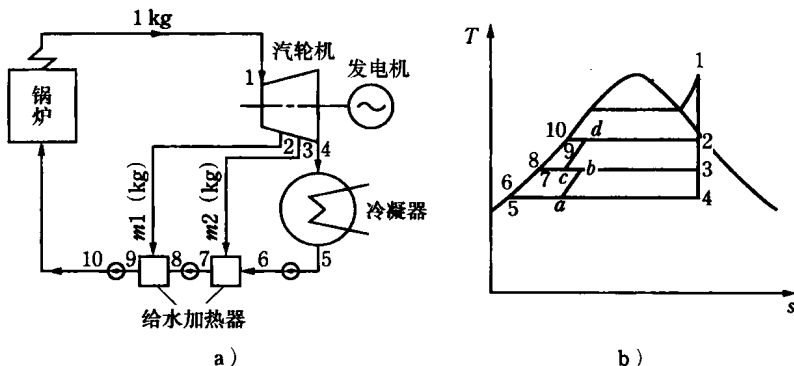


图 1-2 往复循环

[⊖] 朗肯循环是 19 世纪苏格兰工程师 W. J. M. 朗肯 (又译兰金) 提出的，因而得名。

往复循环目的是减少冷凝器放出的热量而增大循环热效率从而提出的方法，它是抽出汽轮机中一部分膨胀蒸汽并利用这部分热作为给水加热的方式。

在图 1-2b 中，若把给水泵的效果用图表示的话将变得复杂，因此省略。汽轮机做的功用面积 1、4、 a 、 b 、 c 、 d 、10、1 表示。蒸汽在汽轮机里膨胀时，由于图中 1、2 之间流动 1kg 的蒸汽，在 2、3 之间的 2 处被抽汽 m_1 (kg)，3、4 之间的 3 处被抽汽 m_2 (kg)， $1 - m_1 - m_2$ (kg) 蒸汽流入冷凝器。

如果增加抽汽的次数，循环的效率上升，这个效果将缓慢进行，像后面要叙述的那样包括除氧器在内八级最合适。

提高朗肯循环的热效率，就必须提高蒸汽的压力、温度，压力若提高则当汽轮机里的膨胀结束，蒸汽的湿度就增加。蒸汽的湿度增加使得汽轮机效率下降，进而发生汽轮机的叶片被腐蚀和侵蚀。如果提高蒸汽温度将能降低蒸汽的湿度，但是由于锅炉材料表面上的制约，不能过度的提高温度。因此就设计了再加热循环新方案。

如图 1-3a、b 所示，在一定的压力下，将汽轮机里膨胀的蒸汽送回锅炉，在循环加热器里把蒸汽加热到适当的温度，再送到汽轮机里加压膨胀。

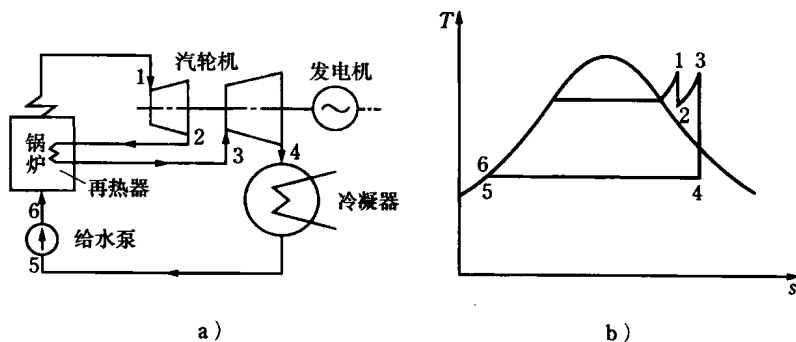


图 1-3 给水回热循环

商用发电厂采用的是取其往复、再加热优点的图 1-4a、b 所示的给水回热往复循环方式。

表示朗肯循环的图一般被称为热平衡图，作为实例的图 1-5 表示某公司的发电机输出功率 700MW 的热平衡图。该图是为讨论关于火力、核能发电厂极为重要资料，但不知为什么没有在关于火力和核能发电文献中介绍。

根据图 1-5，将燃料投入左端锅炉里燃烧，由该热能产生压力为 30.99MPa、温度为 566℃、焓为 3319.5kJ/kg 的蒸汽。这种蒸汽一般称为主蒸汽。

主蒸汽使超高压缸 (SHP) 旋转，再被送回锅炉加热成压力为 9.20MPa、温度为 566℃、焓为 3546.4kJ/kg 的蒸汽，在高压缸 (HP) 里做功。一般把这样的蒸汽

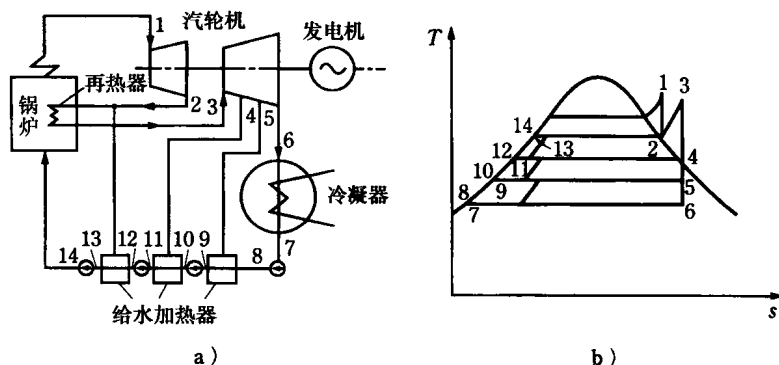


图 1-4 给水回热往复循环

称为过热蒸汽。但是，这里所介绍的锅炉因为准备了两级加热器，从开始的加热器出来的蒸汽称为 1 级过热蒸汽。

在高压缸（HP）做了功的蒸汽再被送到锅炉里经过二次加热变成 2.62MPa、温度为 566℃、焓为 3607.1kJ/kg 的蒸汽进入中压缸做功。

配备两级加热器的锅炉比较罕见，通常是一级加热。然而，在有超高压缸（SHP）的情况下，一级加热是主要机型。但是将主蒸汽输送到高压缸、将过热蒸汽输送到中压缸系统中，两级加热是主要机型。^①

在中压缸做完功的蒸汽被直接送回低压缸，传送到低压缸后，已经做了功的蒸汽流经冷凝器通过海水冷却变成水，也就是冷却水。这时送入锅炉里的热能的大约 45% 部分排放到海水里了。从锅炉的烟囱排放到大气的能量损耗大约为 14%，实际上由发电机作为电能发出的电能是 41%。

工厂等工业用锅炉的情况，试用把从汽轮机输出的蒸汽作为其他装置的热源，但商用的情况，发电是目的，因此从低压缸出来的蒸汽被冷却。由此可知锅炉出口与汽轮机出口的能量差变得很大，从这个过程中节约大量的能量将是可能的。

为了提高汽轮机效率，从汽轮机的各个部位节约蒸汽，把这个过程叫做抽汽。

从中低压缸的抽汽，就是在低压供水加热器 LP # 1 ~ LP # 4 加热从冷凝器流出的冷却水。在给水加热器加热的冷却水是蒸汽变成水，把这个水称为冷凝水。

被加热的冷凝水通过除氧器除氧。除氧器用英语写成 deaerator，一般的字典里面没有收录。这是从 de-aeration 转化成 deaerator 而来的。

构成火力发电厂的设备由碳钢、低合金钢或者合金钢制造而成的，根据设备的腐蚀情况，必须充分地考虑损伤或者腐蚀生成物的二次被害等。除氧就是除去溶解

① 向锅炉输送经处理过的煤粉，煤粉燃烧加热锅炉使锅炉中的水变为蒸汽，经一次加热之后，蒸汽进入高压缸。为了提高热效率，应对蒸汽进行二次加热，蒸汽进入中压缸。利用中压缸的蒸汽去推动汽轮发电机发电。从中压缸引出进入对称的低压缸。

于供水中的氧气或者碳酸盐气体等不凝气体,为了保护发电厂设备这是非常必要的。^[2]

通过除氧器的水作冷凝水,通过除氧器之后到锅炉的水叫给水。给水就是用给水泵将水泵入锅炉。在图 1-5 中给水泵出口的压力为 36.8MPa 的高压。给水与冷凝水同样用给水加热器由抽汽过程被加热送入锅炉。

从朗肯循环的角度出发,发电厂看似简单,除此之外有送入燃料的燃料泵,向锅炉里送入空气的鼓风机,向锅炉里送水的给水泵等被称为辅助设备的机械组、管道、控制阀,为了控制和监视的传感器组等极为庞大、而且具有复杂的组合,其构成被称为单元的发电系统之一。

但是,这里只从控制的角度叙述关于锅炉的控制。关于发电厂的详细介绍,有日本火力核能发电协会出版发行的许多教科书和参考书,可供参考。

1.1.3 锅炉的种类和构造

锅炉的种类由何种角度分类,将出现完全不同的定义。从控制的角度分类,分为直流锅炉和锅筒锅炉两种类型是合适的。进而由于制造商改变构造产生对控制设计的影响,日本国内能制造商用锅炉主要厂家大约有三家公司,大致做一下分类,不妨考虑有 $2 \times 3 = 6$ 种类型锅炉。

如不做特别规定,按其容量大小分类,被自然分类成大型锅炉为直流锅炉,小型锅炉为锅筒锅炉情形较多。在作者所在的电力公司大约有 40 种锅炉,直流和锅筒的锅炉刚好各占一半。除了一部分小型锅炉外,220 ~ 375MW 级的是锅筒锅炉,500 ~ 1000MW 级的是直流锅炉。这种情况在日本国内的电力公司里是大同小异。

1. 锅筒锅炉

锅筒锅炉是汽水分离(水和蒸汽分离)在其水冷壁的上部安装的锅筒中进行分离的锅炉,蒸汽压力最大约是 19MPa。

锅炉水的循环有自然循环(对流)的自然循环式(natural circulation)和使用水泵强制让水循环的强制循环式(controlled circulation)。自然循环式是利用锅炉水的密度差的对流进行循环的,其水冷壁的管径较粗,强制循环式是使用水泵让水循环,水冷壁的管径可以制作得细些。因此,当锅炉的特性发生变化时,在控制上应做必要的考虑。

锅筒锅炉的基本构造如图 1-6 所示。用给水泵泵入的给水经过高压给水加热器被送入省煤器。省煤器回收燃烧气体的热能,如根据英语 economizer 拼写的含义,其被解释为集热器。但最初因为这个装置能够节约用煤,在火力发电行业内被称为省煤器。

从省煤器出来的给水进入分离蒸汽和水的锅筒,水的名称变成锅炉水。锅筒中的锅炉水相对密度高,也就是说冷的物质通过下降管流入水冷壁的最下端。在上面

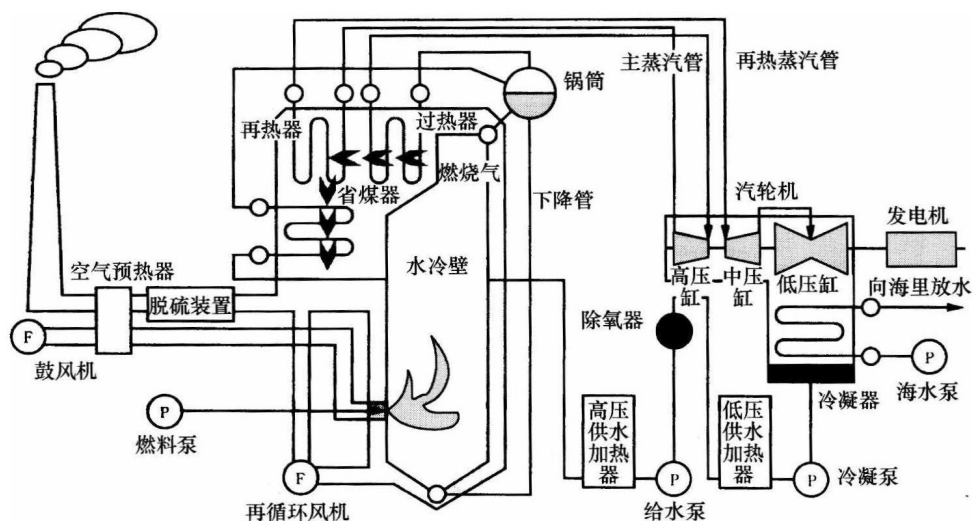


图 1-6 锅筒锅炉的构造

所述的强制循环式的情况下，该下降管上安装的泵强制进行锅炉水的循环。

在水冷壁中锅炉水接受燃料燃烧放出的热量再返回到锅筒。在锅筒中从锅炉水分离的蒸汽是湿蒸汽，因为湿蒸汽会腐蚀、侵蚀汽轮机，在过热器里由燃烧的气体加热成干蒸汽被引入汽轮机。

由于在高压缸里做功后的蒸汽变成湿蒸汽，由过热器加热成过热干蒸汽被送入中压缸。

另一方面，关于燃烧系统燃料在燃烧器被投入炉膛。燃烧必需的空气由鼓风机吹入炉膛，但中途燃烧的气体的热能由空气预热器回收。燃烧气体在过热器、再热器、省煤器、空气预热器分别进行热回收后，再从烟囱向大气中排放。

燃烧气体的一部分由再循环气体泵再注入炉膛，用于再热蒸汽的温度控制。

2. 直流锅炉

水的临界点的压力为 22.124MPa，温度为 274.2℃，锅炉如果在这个压力和温度高的地方运行，在水冷壁的管道中将发生汽水分离。利用这样特征的锅炉将不需要锅筒。也就是说，从水冷壁的管道下方进入的锅炉水在管的中途变成汽液混合状态，再随着向上移动只有蒸汽生成，这样的锅炉称为直流锅炉（once-through boiler）。

直流锅炉的构造可以理解为由从单纯的锅筒锅炉中把锅筒去掉后的其余部分组成的。图 1-7 所示为直流锅炉的构造。

1.1.4 锅筒锅炉的控制

锅炉的控制方式有三种形式，如图 1-8 所示。控制方式之间的差异，也应适用

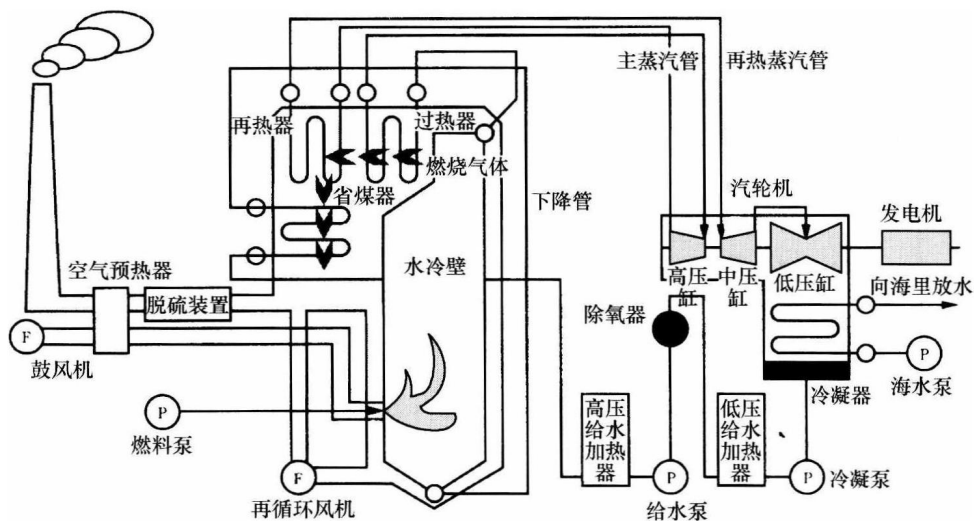


图 1-7 直流锅炉的构造

于后面所述的直流锅炉控制方式。

图 1-8a 所示为锅炉跟踪控制系统[⊖] (boiler-follow control system)，它是锅筒锅炉的基本控制方式，根据输出要求 MWD (Mega Watt Demand, 负荷需求信号)，操作调节器。如果输出要求 MWD 增加，则打开调节器，汽轮机获得蒸汽。这时由于蒸汽压力下降，采用打开燃料阀而使蒸汽压力恢复的控制方式，采用锅炉跟踪输出要求 MWD 的形式，被称为锅炉跟踪控制。这种控制方式是利用缓冲积累在锅炉中的能量，因此其控制系统的响应性较好，但稳定性较差。

图 1-8b 所示为汽轮机跟踪控制系统 (turbine-follow control system)，它是直流锅炉控制方式的一种，是在单管锅炉的控制中使用的方式，根据输出要求 MWD (功率需求信号) 调节锅炉输入燃料的量。输出要求 MWD 如果增加，则蒸汽压力上升，为了保持蒸汽压力一定，打开调节器，增加汽轮机输出。这种控制方式是汽轮机跟踪锅炉，称为汽轮机跟踪控制。因为这种控制方式不依赖积累在锅炉里的能量，它能稳定地进行控制，但响应性较差。

图 1-8c 所示为锅炉汽轮机协调控制 (coordinate control system)，其原则上根据输出要求 MWD，同时控制锅炉的输入燃料和给水、输出的调节器，是结合上述两者特长的控制。在日本国内最初使用的是直流锅炉控制方式，锅筒锅炉也使用了这种控制方式。但是，在锅筒锅炉上给水控制不直接根据输出要求 MWD 进行控制。其理由是锅筒锅炉的构造上，蒸汽压力由燃料量控制，给水与输出要求 MWD 没有

⊖ 跟踪控制系统也称为随动控制系统。——编辑注

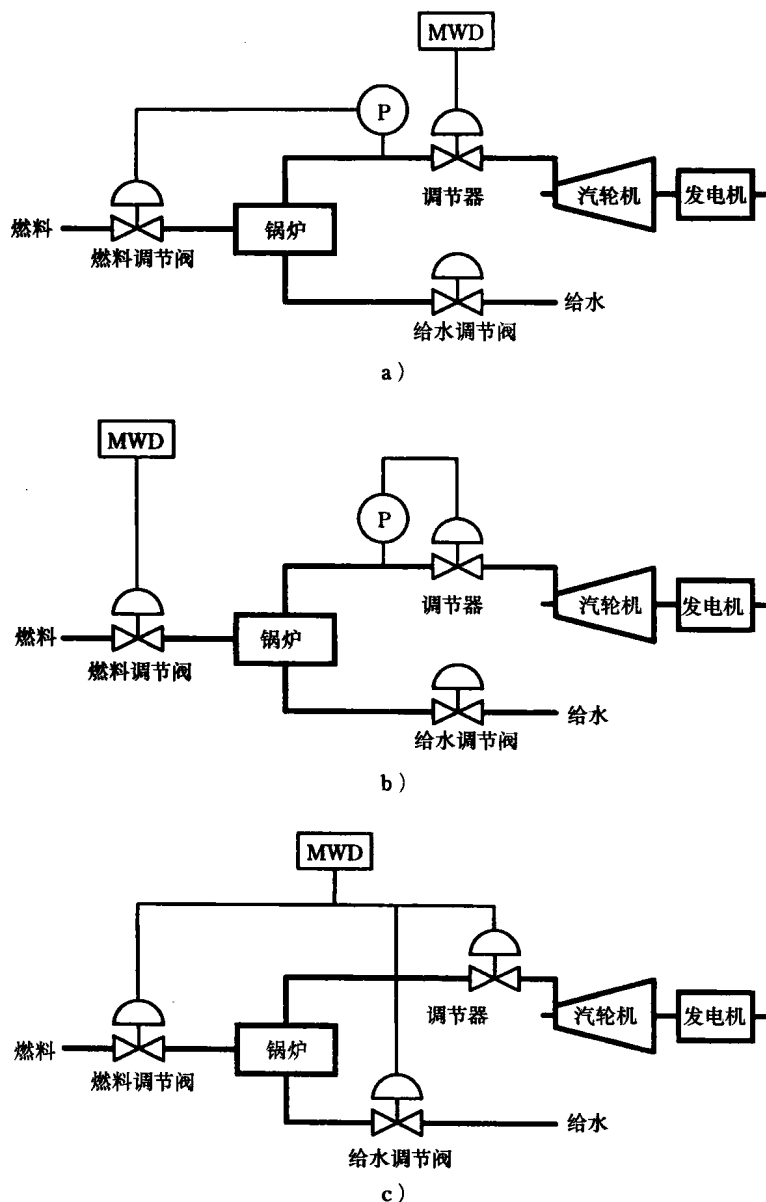


图 1-8 锅炉的控制方式

a) 锅炉跟踪控制 b) 汽轮机跟踪控制 c) 锅炉汽轮机协调控制

直接的关系。

最初的锅炉全部是锅筒锅炉，是由于现代控制理论还不普及，具有现代控制理论的基础技术的电子计算机还很少，控制系统应用了被称为代表 PID（比例积分微