

高等学校教材

发电厂概论

(实习教材)

西安交通大学 李朝阳 编



高等学校教材

发电厂概论

(实习教材)

西安交通大学 李朝阳 编

内 容 提 要

本书从工程实用观点系统地介绍了电能生产的全过程及其相应的基本知识和概念。

全书共分四章，第一章主要介绍各类发电厂的特点，电能质量标准 and 运行经济指标；第二章较系统地介绍火电厂动力部分，包括燃料运输、锅炉、汽机及其各系统的组成、功能和作用以及热力部分运行知识；第三章阐述了水电厂的径流调节、开发方式、水工建筑物以及由水力设备组成的各系统和运行特性；第四章对发电厂电气一次设备和二次设备及其系统作了全面论述，包括主接线形式和特点、高压电气设备作用原理和配置、配电装置类型和特点、防雷接地、厂用电及低压电气设备、操作电源、控制信号系统、继电保护装置、测量系统、自动装置和计算机应用等。为使读者能更好地理论联系实际便于自学，每章末都附有小结和较多的复习与思考题。

本书是高等学校“电力系统及其自动化”、“发电厂及电力系统”、“继电保护与自动远动技术”等专业的实习教材。也可作为发电厂或变电所技术培训教材以及从事电力工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂概论：实习教材／李朝阳编．—北京：中国电力出版社，1990.10 (1997重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-350-7

I.发… II.李… III.发电厂-概论-高等学校-教材 IV.TM62

中国版本图书馆CIP数据核字 (97) 第09570号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

冶林印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1991年10月第一版 1997年10月北京第三次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12印张 266千字

印数 20701—25740册 定价：11.20元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据能源部教育司1990~1992年高等学校教材编审出版计划,为高等院校“电力系统及其自动化”和“继电保护与自动远动技术”等专业编写的实习教材。其编写大纲在高等学校电力工程类“发电厂”教学组1989年贵阳扩大会议上讨论通过,并决定由西安交通大学李朝阳副教授编写,太原工业大学赵铭凯副教授审阅。

根据专业教学基本要求和数学计划的安排,本科四年中应安排两次实习,可在火力发电厂或水力发电厂进行。鉴于各校所处地区不同,下厂实习条件也各有差异,为落实中央关于加强和改进高等学校实践性教学环节的要求,本教材在内容上着重结合专业对实习的要求和在发电厂实习的特点,参照原水利电力部教材编审委员会1982年审定的高等学校本科四年制“电力系统及其自动化”专业和“发电厂及电力系统”专业生产实习大纲要求的深度和广度(见附录),阐述发电厂动力部分(热机部分和水动部分)及电气部分的各主要系统及其设备原理和运行知识,为后续即将学习的专业课提供必要的感性认识和基础知识。因此,尽可能地减少繁琐的数学运算和深奥的理论分析,力求层次分明、物理概念清楚,深入浅出便于自学。每章末附有小结。同时为了在实习中,引导同学逐步地结合现场实践深入学习,还附有复习与思考题。

本书编写过程中,曾得到不少单位和兄弟院校大力支持,并提供了大量参考资料和有益建议。在此表示衷心的感谢。

由于编者知识面和业务水平所限,书中错误和不妥之处,敬请读者不吝指正。

编 者

1990.8

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 我国电力工业发展概况	1
第二节 发电厂的类型和特点	2
一、火力发电厂(2) 二、水力发电厂(2) 三、核电厂(3)	
第三节 电能生产的特点及运行经济指标	3
一、电能生产特点(3) 二、发电厂运行经济指标(4) 三、电能质量的标准(4)	
本章小结	6
复习与思考题	6
第二章 火电厂的动力部分	7
第一节 发电厂热能基本知识	7
一、工质及其状态参数(7) 二、水蒸气(9) 三、热能的传递方式(10) 四、建造火电厂一般应具备的条件(11)	
第二节 火电厂的生产过程及其组成	12
一、火电厂的生产过程(12) 二、火电厂的主要生产系统(14)	
第三节 燃料及煤粉制备系统	15
一、燃料与燃烧(15) 二、燃料输送及其主要设备的作用(16) 三、煤粉制备系统(16)	
第四节 锅炉分类及本体结构	1
一、锅炉的任务与分类(19) 二、锅炉本体设备的工作原理(21) 三、直流锅炉的特点(24)	
第五节 锅炉的主要辅助设备	25
一、给水设备(25) 二、通风设备(26) 三、除尘设备(28) 四、排灰渣系统(28) 五、锅炉的主要附件(29)	
第六节 汽轮机及其分类	30
一、汽轮机工作原理(30) 二、汽轮机的构造及主要部件的作用(30) 三、汽轮机的分类(32)	
第七节 汽轮机的热力系统及其主要辅助设备	34
一、凝汽冷却系统(35) 二、回热加热系统(36) 三、疏水系统(37) 四、补充水系统(38)	
第八节 汽轮机的调速系统及保护装置	38
一、调速系统(39) 二、汽轮机的保护装置(40) 三、汽轮机油系统(41)	
第九节 火力发电厂热力部分运行基本知识及主要技术经济指标	42
一、锅炉运行(42) 二、汽轮机运行(43) 三、火电厂运行的主要技术经济指标(44)	
本章小结	47
复习与思考题	48
第三章 水电厂水力部分	51
第一节 概述	51
一、水电开发建设的决定因素(51) 二、水电厂电能生产过程(52)	
第二节 水能利用及径流调节	53
一、水能利用(53) 二、径流调节(54) 三、水库的特征水位及库容(55)	

第三节 水电厂的开发方式	56
一、堤坝式水电厂(57) 二、引水式水电厂(59) 三、混合式水电厂(60)	
第四节 水电厂的主要水工建筑物	61
一、挡水建筑物(61) 二、进水建筑物(65) 三、引水建筑物(67) 四、泄水建筑物(67) 五、平水建筑物(68) 六、其它水工建筑物(68)	
第五节 水轮机的分类及其结构特点	70
一、水轮机的分类(70) 二、反击式水轮机(71) 三、冲击式水轮机(75) 四、冲击式水轮机和反击式水轮机的基本区别(76)	
第六节 水轮机组的主要辅助系统	77
一、调速系统(77) 二、油系统(79) 三、压缩空气系统(79) 四、供排水系统(79)	
第七节 水轮机的工作参数及运行特性	80
一、水轮机的型号(80) 二、水轮机工作参数(80) 三、水轮机运行特性(81) 四、水轮机的水击现象(82) 五、水轮机的汽蚀现象(83)	
第八节 水电厂运行特点及其在电力系统中的作用	83
一、水电厂的运行特点(83) 二、水电厂在电力系统中的作用(86)	
本章小结	87
复习与思考题	88
第四章 发电厂电气部分	91
第一节 主控制室	91
一、主控制室的形式及布置特点(91) 二、控制屏台的型式(92)	
第二节 发电厂电气主接线	94
一、主接线及其基本要求(94) 二、主接线基本形式特点(94) 三、火力发电厂电气主接线举例(98) 四、水力发电厂电气主接线举例(99)	
第三节 发电厂主要电气设备	100
一、发电机与变压器(100) 二、高压开关设备(105) 三、电气保护设备(113) 四、低压开关电器设备(115)	
第四节 配电装置	118
一、配电装置及其分类(118) 二、对配电装置的基本要求(119) 三、屋内配电装置(119) 四、屋外配电装置(120) 五、成套配电装置(121)	
第五节 厂用电系统	123
第六节 仪用互感器	125
一、电压互感器(126) 二、电流互感器(128) 三、发电厂中仪用互感器的配置原则(129)	
第七节 发电厂操作电源	130
一、操作电源的功用和分类(130) 二、蓄电池(130) 三、蓄电池组的运行方式(132)	
第八节 发电厂控制与信号系统	135
一、控制系统(135) 二、信号系统(140)	
第九节 继电保护装置	144
一、继电保护的基本原理(144) 二、电磁式继电器结构型式及表示符号(144) 三、发电厂继电保护的配置(146) 四、保护装置原理接线举例(147)	
第十节 发电厂测量系统	150
一、测量仪表的配置(150) 二、测量仪表接线(152) 三、绝缘状况的观察(153)	
第十一节 发电厂的自动装置	156
一、备用电源自动投入装置(156) 二、自动重合闸(157)	

三、同步发电机的同期装置(160)	四、同步发电机的励磁自动调节装置(161)	
第十二节	计算机在发电厂的应用	165
一、计算机在火电厂的应用(166)	二、计算机在水电厂的应用(168)	
第十三节	防雷与接地	169
一、大气过电压的形式及危害性(169)	二、发电厂的防雷保护(169)	三、接地与接零(171)
本章小结		173
复习与思考题		176
附录	高等学校“电力系统及其自动化” “发电厂及电力系统”专业生产实习大纲(摘录)	181

第一章 绪 论

本章首先简要地介绍我国电力事业发展概况以及电力工业开发的方针,进而对目前电力系统中起主导作用的火电厂与水电厂的特点作了较详尽的分析对比,最后指出发电厂电能生产特点、运行经济指标和电能质量的标准。

第一节 我国电力工业发展概况

科学技术的发展,促使人们能不断地开发和利用自然界的各种能源。能源有两种形式:其一为一次能源,如煤、水力、油等天然能源,它可直接应用于生产与生活;其二为二次能源,即经过能量转换变成机械能或电能作为生产上的动力。电能属于二次能源,亦是工农业生产的动力,并广泛应用于一切生产部门和日常生活方面。电力工业的发展水平和电气化程度已成为衡量一个国家经济发展水平的一个重要标志。因此它在国民经济中占有十分重要的地位,而且电力必须先行。从世界各国经济发展的进程来看,国民经济每增长1%,就要求电力工业增长1.3%~1.5%左右,才能适应生产发展的需要。

我国具有丰富的能源资源。全国水能资源蕴藏量约6.8亿kW,其中可开发利用的约为3.7亿kW、年发电量可达1.9亿kW·h居世界首位,煤炭储量也很丰富约有二万多亿吨,石油资源可采量为几十亿吨,天然气资源也很丰富。这些优越的自然条件为电力工业发展提供了良好的物质基础。可是到1949年全国发电装机容量只有184.9万kW,年发电量为43亿kW·h,电力工业居世界第25位。经过40年来的建设,到1987年底,我国发电装机容量已突破1亿kW,年发电量近5000亿kW·h,已建成大型现代化火力发电厂46座,水电厂41座,两座核电厂亦将相继投产,中小型发电厂星罗棋布,遍及全国。100万kW以上装机容量的电力系统达12个,其中装机容量在1000万kW以上的电网4个。火电厂最大单机容量为60万kW、水电厂为32万kW,核电厂为90万kW。电力工业在世界上已跃升为第五位。虽然已取得了很大成绩,但由于我国人多地广仍感电力不足,按每人平均用电量计算,仍相当落后。展望未来,更需加倍努力发展电力技术,使电力工业有一个较快的发展。

我国电力工业开发的基本方针是因地制宜地执行水火电并举,大中小相结合的能源政策。在有水力资源的地方多建设水电厂,在盛产煤炭的矿区则宜有计划地发展坑口电厂,特别应对劣质煤优先使用,而对油和气则应尽量少采用。在自然能源匮乏的缺电地区,有重点、有步骤地建设核电厂。结合具体条件充分利用资源兴办小水电、小火电、风力发电、潮汐发电和地热发电等。继续努力提高技术和管理水平,使电力工业适应国民经济发展的需要。

第二节 发电厂的类型和特点

发电厂是把各种天然能源如煤炭、水能、原子能等转换成电能的工厂，根据所利用的能源形式可分为火电厂、水电厂、核电厂以及潮汐、风力、燃气轮机发电等。目前在电力系统中起主导作用的电厂还是火电厂和水电厂。

一、火力发电厂

利用煤、石油和天然气等作为燃料的发电厂称为火电厂。目前我国火电厂主要以煤为燃料，分为凝汽式电厂和热电厂。凝汽式电厂是单纯用来发电的电厂，一般都建设在燃料基地或矿区附近。发出的电能用高电压线路送往负荷中心，这样既免去了燃料的长途运输，提高了能量输送效益，同时又防止煤灰对城市周围地区环境污染。这种建设在燃料基地的凝汽式电厂又称为坑口电厂，也是今后兴建大型火电厂的主要方向。热电厂是既发电又兼供热的电厂。由于供热网络不能太长，所以一般都建设在热用户附近靠近工业区或大城市。发电与供热必须兼顾，在电力系统中的运行方式远不如凝汽式电厂灵活，但其热效率较高。

火电厂目前我国电力系统中装机容量约占70%以上，它具有以下特点：

(1) 它布局比较灵活，装机容量大小可按需要而定；

(2) 建设初投资较水电厂为小。根据正在建设的各大中型电厂概算统计，火电厂平均每千瓦投资800元，而水电厂每千瓦为1560元。修建工期短，火电厂热机部分的修建远比水电厂的水动部分省时省力，一般兴建一座大中型火电厂只需3~5年，而水电厂则需十来年或更长时间；

(3) 火电厂的主要燃料为煤炭，属于消耗性能源。虽然我国煤炭资源丰富，但化工、冶金更为需要。目前每年发电用煤约占总产量的25%左右，火电的电能生产成本远比水电为高；

(4) 火电厂相对水电厂讲其动力部分设备较为复杂，厂用电量消耗也大，运行人员多，运行费比较高；

(5) 汽轮发电机组操作控制比较复杂，开停机时间长，因此在电力系统中最宜于带基荷和腰荷，不适宜于担任系统中变动较大的尖峰负荷。否则不仅使煤耗增大而且会缩短机组使用寿命；

(6) 火电厂的排烟、除灰将造成空气和环境的污染。

二、水力发电厂

水电厂是利用江、河、湖、泊所蕴藏的水能资源而生产电能的工厂。根据开发方式的不同分为堤坝式、引水式和混合式等类型。它具有以下特点：

(1) 使用的能源是取之不尽、用之不竭的水能，属于再生性能源。因此它的电能成本只是火电厂的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ ；

(2) 水力发电机组效率高，易于实现全盘自动化，运行灵活，从机组起动到带满负

荷只需几分钟，能够适应电力系统负荷变动，可担任系统调频、调峰及负荷备用；

(3) 水电厂运行费用低，厂用电量小，运行人员较少；

(4) 不会产生对空气和环境的污染，水工部分还可以发挥综合利用效益如防洪、灌溉、航运、给水和水产养殖等，使国民经济取得更多的效益；

(5) 水电厂的寿命为50年，比火电厂25年寿命大一倍；

(6) 水电厂多建筑在江河湖泊峡谷地带，远离城市和负荷中心，电能通过高压输电传送，增大输变电投资，同时水工建筑设施投资也高、工期长，甚至可能因修建调节水库而引起淹没村镇、耕地，涉及居民搬迁和交通改道等问题；

(7) 水电厂的工况受水文条件限制较大，分洪水期、平水期和枯水期，虽有水库调节，但也有一定限度。因此水电厂的发电量将受到水文和气象条件的一定制约。

三、核电厂

核电厂又称原子能发电厂，是利用原子核内的变化所释放的核能转变成电能的场所。核燃料（铀 U ）在反应堆内发生核裂变，即所谓链式反应，释放出大量热量，由水或气体作为冷却剂带出，在蒸汽发生器中把水加热变为蒸汽，推动汽轮发电机做功获得电能，其生产过程与火电厂雷同。根据核反应堆形式的不同，原子能发电可分为压水堆、沸水堆、重水堆和气冷堆等类型，其主要特点为：

(1) 大量节省煤、石油等燃料。核能比化学能大得多，例如燃烧1t标准煤可放出 $0.3MW \cdot d$ 热能，而用天然铀作燃料的反应堆，每吨燃料可发出 $8000 \sim 9000MW \cdot d$ 的热能； $1kgU_{235}$ 发出的电能相当于2700t标准煤发出的电能；一座容量为50万kW的火电厂，每年至少要燃烧150万t煤，而同容量的核电厂每年只消耗20t铀燃料就够了。相应也减少了大量燃料运输；

(2) 核电厂在核裂变时不需要空气助燃，因此选址不受限制，也可以建设在地下、山洞、水下和空气稀薄的高原地区；

(3) 铀的浓缩、重水制造和燃料的处理在技术上比较复杂、投资大，电厂建设工期较长，因此造价比火电厂要高，但电能成本比火力发电厂要低30%~40%，装机容量愈大则单位kW平均投资愈经济；

(4) 正常运行时对大气没有化学污染和粉尘污染，但放射性污染使人们关注，电厂用过的废燃料目前多采取集中密封存放在海底或深埋地下。此外对退役的核电厂处理等问题尚待进一步研究妥善措施；

(5) 核电厂在电力系统中最适宜担任基荷部分。发电机维持恒定的出力更能充分发挥技术经济效益，因此运行调度灵活性不如水电厂。

发电厂的类型除上述外还有潮汐发电、风力发电、燃气轮机发电、地热发电、太阳能发电以及磁流体发电等。

第三节 电能生产的特点及运行经济指标

一、电能生产特点

电能的生产、输送、分配和使用的过程与其它工业部门有着完全不同的特点，主要表

现在:

(1) 电能的生产和消费是在同一时间实现的, 也就是说, 电能不能储存, 每时每刻的发电量取决于同一时刻用户的用电量。因此要求发电厂不间断地、可靠地供应电能, 随时都应保持电源和负荷间功率平衡。电能的生产、输送分配和使用等所有环节, 必须相互依赖密切配合, 这比其它工业有着更严格的要求。在一般工业生产中, 都可以将成品或半成品累积起来, 使生产中的各工序相互依赖关系减少, 产销关系易于调节平衡。而电能由于不能储存, 从生产到使用过程中, 只要其中任何一个元件故障都将会影响动力系统的正常工作。为此所有运行的设备都必须安全可靠, 并需加强监护与维修, 随时排除事故隐患。为此, 制定了各种规章制度、技术操作规程和安全法规等, 凡是现场工作人员都必须严格执行。参观与实习者都应在下厂前进行安全法规教育, 考试合格者才能入厂。这不仅为了个人和设备的安全, 更重要的是保证电力系统的安全可靠运行。

(2) 电能的生产应服从统一调度和管理, 合理地利用动力资源。电力系统中, 可能有各种类型的发电厂, 而负荷结构又与工业布局、城市规划等因素有关。为了经济合理地安全运行, 使系统的各个环节形成一个紧密的有机整体, 必须设置一个管理和指挥机构即中心调度所。各电厂电能生产任务都由电力中心调度所统一规划和统一调度, 以便合理地利用动力资源, 协调水、火电厂的经济运行, 综合考虑安排机组、设备的检修和试验, 在事故情况下迅速进行处理, 提高运行可靠性。为加强发电厂与中心调度所的联系, 各电厂除按预定的负荷曲线进行生产外, 还通过专用的载波通讯、调度电话向中心调度所汇报运行工况和听取调度命令。一些较先进且自动化程度较高的系统, 还装有遥测、遥信和遥控的自动远动装置。

(3) 电能生产与国民经济各部门和人民生活有着极为密切的关系。现代的工业、农业、交通运输业等都广泛地用电能作为生产的动力。随着科学的发展, 各部门电气化程度也越来越高, 人民日常生活也逐渐向电气化发展。电能供应中断或不足, 不仅直接影响各个部门的生产、造成人民生活紊乱, 在某些情况下甚至会造成政治上的损失或极其严重的社会性灾难。因此要求电能生产必须高度可靠, 保证对用户供电的连续性。

二、发电厂运行经济指标

保证有计划地、可靠地发出优质而廉价的电能是发电厂的基本任务。一般反映运行状况的主要指标有: 安全运行日、年发电量、煤(水)耗率、厂用电率、装机容量的年利用小时数、设备完好率、电能成本、发电厂总效率以及电能质量等。对不同类型电厂, 其指标亦有差异(参阅第二章第九节)。

三、电能质量的标准

在保证连续供电的前提下, 电能的质量通常用电压和频率来度量。电压与频率既是衡量电能质量的指标, 又是电气设备制造的基本技术参数。发电厂生产的电能质量对电气设备及用户都有着直接影响。若电压或频率不稳定甚至超过允许偏移值时, 不仅影响用电设备的正常运行, 造成减产或废品, 而且严重时可能损坏设备和破坏电力系统稳定运行。

生产中大量使用的电动机, 当电压降低时, 电机转矩显著减小, 电流增大, 可能导致电动机被烧毁; 当电压过高时铁芯磁密饱和, 使激磁电流和铁耗增加, 造成电动机过热, 效

率降低，再如照明的白炽灯，发光效率和寿命受电压波动影响极大，当电压下降10%时光通量减少30%；电压上升5%时则寿命将缩减一半。

为了保证电气设备安全正常地工作，必须要求发电厂发出的电能，其电压波动限制在一定允许范围内。为此发电厂需要采取一定的调压措施来维持电压水平。由电机学知道，发电机电压主要取决于发电机发出的无功功率与负荷无功功率需要量的平衡。无功功率不足，电压将偏低；无功功率过剩，电压将升高。因此，发电厂以调节发电机励磁电流值来改变供应无功功率的大小。

发电机的额定电压与其容量大小有关，我国生产的发电机组额定电压标准如表1-1所示。

表 1-1 发 电 机 额 定 电 压 标 准

发电机容量 P_e (kW)	2 万以下	1 万~10 万	8 万~20 万	15 万~30 万	30 万~60 万	60 万以上
发电机额定电压 U_e (kV)	6.3	10.5	13.8	15.75	18	20

根据运行实践经验及电气设备的要求，我国规定电压允许变化范围不应超过额定电压的±5%，对电力系统中各级电压用户处供电电压变化范围应不超过表1-2规定数值。

表 1-2 供 电 电 压 允 许 变 化 范 围

线路额定电压	35kV及以上	10kV及以下	低 压 照 明	农 业 用 户
允许变化范围	± 5 % U_e	± 7 % U_e	+ 5 % U_e - 10 % U_e	+ 5 % U_e - 10 % U_e

我国规定电力系统额定频率为50Hz。频率发生偏差同样也将影响电力用户正常工作。如对电动机，当频率下降，其转速下降，生产率降低并且影响电动机寿命；反之频率升高，转速上升，增大功率消耗使经济性降低。特别是某些对转速稳定要求较严格的部门如纺织、造纸等，频率波动都将影响产品质量，甚至出现废品。此外，频率波动对计算机、电钟以及自动控制等电子设备的准确工作也有一定的影响。

现代化的发电机，都并入电力系统运行。不论系统容量大小，在任一瞬间其频率值全系统是一致的。在稳定运行下，频率值决定于所有机组的转速，而机组的转速又主要取决于发电机输出功率与输入功率的平衡（有功功率）。频率偏低，表示发电机出力不足，也就是所带有功负荷过多；频率过高，则表示有功负荷偏少，发出的有功功率过剩。发电机应通过其调速系统进行控制，调节向原动机输送的进汽量（火电厂）和进水量（水电厂），以适应有功负荷的变化，维持其平衡，保证频率的偏移量不超过允许值。我国

表 1-3 电力系统允许频率偏差范围

运 行 情 况		允许频率偏差 (Hz)	允许标准时钟误差 (s)
正常运行	大容量系统	± 0.2	30
	中小容量系统	± 0.5	60
事故运行	30min以内	± 1.0	
	15min以内	± 1.5	
	绝对不允许	- 4	

对电力系统频率允许变化范围的规定如表1-3所示。

本章小结

我国具有丰富的水力资源，煤炭、石油储藏量亦相当丰富，为电能生产提供了充足的能源。近几十年来电力工业的迅猛发展，已开始摆脱落后的局面，兴建了各种类型的现代化大中型水电厂、火电厂和核电厂，但与其它工业先进国相比尚有较大差距。今后将更加充分地利用各种能源，因地制宜地发挥各种发电优势，大中小相结合，水火并重，有计划地开发大型水电建设和核电厂，适应国民经济各部门发展及满足人民生活用电的需要。

发电厂的类型很多，各有其特点，目前我国电力系统中起主要作用的还是火电厂和水电厂。由于电能不能贮存，生产与消费同时完成，所以电能生产必须服从电力调度所的统一规划和统一调度，保证安全可靠连续地发电、输电和供电，以最大限度地满足生产和生活的需要。

发电厂运行经济指标是反映运行状态、评价运行水平的标志。对不同类型的发电厂其定额指标亦不尽相同，但电能质量却有统一的要求，我国规定电压波动范围不应超过额定电压的 $\pm 5\%$ ；而频率允许偏移值则应小于 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。我国规定额定频率为 50Hz 。

复习与思考题

1. 我国电力工业开发的方针是什么？
2. 试对比分析火电厂与水电厂的特点，说明其优缺点。
3. 电能生产有哪些特点？
4. 发电厂运行的经济指标有哪些？实习厂与同类型厂先进指标相比如何？
5. 衡量电能质量的标准是什么？

第二章 火电厂的动力部分

本章主要介绍火力发电厂的动力部分。在回顾发电厂热能基本知识的基础上,按生产流程分别介绍燃料运输、锅炉、汽轮机和热力部分运行的基本概念。以热力系统为主,分别对各主要设备的工作原理、结构特点和工作性能加以介绍。对热动部分各系统的功能与作用进行了分析并对锅炉、汽轮机的运行及其主要技术经济指标等作了系统的阐述。

第一节 发电厂热能基本知识

火电厂是以煤炭为主要燃料的生产电能的工厂。其生产过程就是把化学能转化为电能的过程。经过加工磨制的煤粉送到炉膛中燃烧,放出热量用来加热锅炉中的给水变为蒸汽,把燃料中的化学能变为热能。具有一定温度和压力的蒸汽冲动汽轮机转子,把热能转化为机械能,而与汽轮机同轴的发电机就把机械能转化为电能。

一、工质及其状态参数

欲使煤炭中的化学能转换成电能,除需要必要的热力设备外,还必须以蒸汽作为工作媒介或称作载热体。依靠传热体的状态交替变化——受热、压缩、膨胀、冷却才能使热能对汽轮机做功,并使这一过程连续进行。我们把热能变为机械能的媒介物质叫作工作物质,简称工质。在火电厂通常以水蒸气作为工质。用作描述工质状况的宏观物理量,叫作热力状态参数(简称参数)。压力、温度和比容三个物理量是最基本参数。

1. 压力

压力表示工质作用于容器壁单位面积上的垂直力(也就是压强)。压力的单位为 N/m^2 , 叫作帕斯卡(Pa), 即

$$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$$

在实际工程中还曾采用工程大气压(at)和物理大气压(atm)。

(1) 工程大气压(简称气压), 以at表示:

$$1\text{at}=1\text{kgf/cm}^2=9.80665\times 10^4\text{Pa}$$

从物理学得知:当容器中装有液体时,由于液体具有流动性,它对容器的侧壁和底部都有压强。也就是说液体内部任何方向上都有压强,并且在同一深度处各个方向上的压强大小都是相同的,且与液体的横向截面积无关。所以压力的大小可以用液柱的高度和液体的重度相乘积来表示:

$$p=h\gamma \quad (2-1)$$

式中 h ——液柱高度, m;

γ ——液体重度, N/m^3 。

水的重度(4°C 时)为 $9.80665\times 10^3\text{N/m}^3$; 汞的重度(0°C 时)为 $1.33321\times 10^5\text{N/m}^3$ 。

当工质压力较小时亦曾采用液柱高度来度量（例如mmHg、mmH₂O等），换算成法定计量单位时关系如下：

$$1\text{at}=10\text{mH}_2\text{O}=10^4\text{mmH}_2\text{O}=735.6\text{mmHg}=9.80665\times 10^4\text{Pa}$$

（2）物理大气压，以atm表示：

地球表面包围着一层几百公里厚的空气，通常称为大气。运动着的空气分子对地球上的物体撞击而产生压力，物体单位面积上所受到的压力叫作大气压强简称大气压。大气压的分布是不均匀的，我们把0℃时纬度45°海平面上大气的平均压力称为标准大气压亦叫物理大气压（atm）。

$$1\text{atm}=760\text{mmHg}=1.0332\text{at}=10.332\text{mH}_2\text{O}=1.01325\times 10^5\text{Pa}$$

液体和气体的压力都是用压力表来测定。如果压力较大，例如锅炉进水压力及出口蒸汽压力、汽轮机内各处的蒸汽压力等，大都采用弹簧式压力表，其单位为at（kgf/cm²）；如果压力很小例如风道内的风压、煤气内的气压等则常用U形水柱式压力表（又称风压表），其单位为mmH₂O；对于压力在1kgf/cm²左右时，例如测量大气压力、冷凝器内的空压等就采用U形水银柱式压力表，因为水银的比重为水的13.6倍，其液柱高度只为水柱的1/10以下。

由于压力表本身处于大气压力作用下，其读数只是反映了容器内的压力与外界大气压的差值，通常称为表压力。当工质的压力低于大气压时，其差值称为真空度或负压。表压力及真空度的读数都将随大气压的改变而变化，它不能作为工质的状态参数，而工质的实际压力应当采用绝对压力，即表压力与大气压力之和。但绝对压力又不便于直接测量，只能通过简单换算得到。若以 p_s 、 p_a 、 p_a 及 p_v 分别代表表压力、绝对压力、大气压力及真空度，则它们之间的相互关系为

$$p_s = p_a + p_a \quad (2-2)$$

$$p_v = p_a - p_a \quad (2-3)$$

在工程中，当容器中工质压力比较高时，通常把外界大气压 p_a 近似地当作1at，所引起的误差是允许的。但对较低的压力（如测容器中真空度）就会引起较大误差。

2. 温度

温度表示物体的冷热程度。温度的数值通常用绝对温度或摄氏温度表示。绝对温度 T 的单位是开尔文，代号为K；摄氏温度 t 的单位是摄氏度，代号为℃。两者的关系为

$$t = T - T_0 \quad (2-4)$$

式中 $T_0 = 273.16\text{K}$

测量温度的仪表称为温度计。工程中所用的温度计种类很多，最常见的有水银温度计、气体温度计、热电偶温度计、电阻温度计及测量高温用的光学温度计等。

3. 比容

单位质量的工质所占有的容积称为比容 v 。如果用 $V(\text{m}^3)$ 表示 $m(\text{kg})$ 质量工质的容

积, 则比容为

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2-5)$$

比容的倒数, 即单位容积内工质的质量称为密度 ρ , 即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2-6)$$

二、水蒸气

火电厂实现能量转化的工质是水蒸气, 它是由水在锅炉中进行加热汽化而形成的。

从日常生活中观察水在容器中被加热而产生蒸汽的过程发现: 对 $1\text{kg}0^\circ\text{C}$ 的水在大气中进行加热时, 温度不断上升, 比容略有增加。在热力工程中把未达到沸腾状态的水称作“未饱和水”。当温度升高到某一数值时, 温度即停止上升, 水开始沸腾, 此时温度称为“饱和温度”, 它与外界大气压力有关, 此刻对应的压力称为“饱和压力”, 沸腾状态的水称为“饱和水”。随着继续加热, 水就开始汽化变为水蒸气, 汽化过程中, 压力和温度都将维持不变, 而比容则很快增大。在容器中呈现出水、汽共存的现象, 其蒸汽称作“湿蒸汽”或“湿饱和蒸汽”。继续加热, 当最后一滴水变为水蒸气时的这一特殊状态, 称为临界状态, 相应的无水蒸气称为“干饱和蒸汽”简称“干蒸汽”。 1kg 饱和水, 等压汽化为干蒸汽所需要的热量称为“汽化潜热”, 简称“汽化热”。如果对干蒸汽再继续加热, 水蒸气温度就会升高而超过饱和温度, 比容相应亦随之增大, 这种水蒸气叫作“过热蒸汽”。过热蒸汽的温度超过该压力下饱和温度的数值称为“过热度”。饱和蒸汽在定压下加热至过热蒸汽所需要的热量叫作“过热热量”简称“过热热”。在标准大气压下 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ (即 1atm) 水的饱和温度为 100°C 。压力愈高, 水的饱和温度也愈高, 如某锅炉的饱和压力为 $2.942\text{MPa}(30\text{atm})$, 饱和温度为 232.76°C ; 当饱和压力为 $10.1325\text{MPa}(100\text{atm})$ 时, 饱和温度为 309.53°C 。如果压力低于 $101325\text{Pa}(1\text{atm})$ 时, 则水的饱和温度就低于 100°C 。例如容器中的绝对压力为 $7092.75\text{Pa}(0.07\text{atm})$ 时, 则水在 38.66°C 就会沸腾而变为蒸汽。

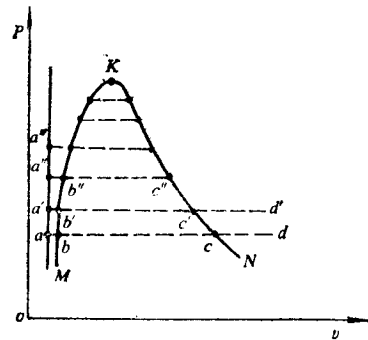


图 2-1 水蒸气的 P - v 图

上述水的等压汽化过程, 亦可用压容图 P - v 曲线描述, 如图2-1所示。图中 a 点相应于 $0^\circ\text{C}(273.15\text{K})$ 水的状态, a - b 乃表示未饱和水的预热过程。 c 点相应于干饱和蒸汽状态, b - c 表示水的定压汽化过程。 d 点则代表过热蒸汽状态, c - d 表示水蒸气的过热过程。如果在不同压力下, 对水重复等压加热就可分别得到 $a'b'c'd'$ 线、 $a''b''c''d''$ 线、……等。因为液态水是不可压缩的, 由于压力加大, 汽化过程就会在较高的饱和温度下开始, 于是开始汽化时的比容也略有增大, 所以压容图上出现 b' 比 b 稍许靠右一些。而压力的提高使干饱和蒸汽的比容显著减小, 故 c' 将比 c 靠左一点出现。把各压力下的饱和水状态 b 、 b' 、 b'' 、……、 K 连接起来的曲线称作“饱和水线”; 把干饱和蒸汽的状态点 c 、 c' 、 c'' 、……、 K 连接起来的曲线称为“干饱和蒸汽线”。 K 点为饱和水与干饱和蒸汽的重合点。在这一

点上液态和汽态界限消失,把这一特殊点称为“临界点”。相应的压力称作临界压力,水的临界压力为22.13MPa(225.65atm);相应的临界温度为374.15℃;临界比容为0.00317 m³/kg。工程上习惯把饱和水线MK称为低界限线,把NK干饱和蒸汽线称作高界限线。由图2-1明显看出,由MK及NK将P-v图分成三个区域,从0℃水线与MK之间是未饱和水区域,MK与NK之间是湿饱和蒸汽区域,在NK以右则为过热蒸汽区域。

含热量也是蒸汽的一个重要参数,简称焓。焓描述了蒸汽所含的热能,常以*i*表示,单位为kcal/kg。kcal(千卡)是热量的单位。它是加热1kg纯水,从19.5℃升高到20.5℃所需要的热量,相当于427kg·m的机械功,故而热功当量值*J*=427kg·m/kcal。

饱和压力越高,饱和水的焓也越大,但汽化潜热则随着饱和压力的升高而减少。这是因为汽化热是用来改变物质状态,也就是扩大分子间的距离,而不是用来升高温度。由于高压蒸汽的分子彼此距离较近,因而需要的热量较少。干饱和蒸汽的焓等于饱和水的焓加汽化热。而过热蒸汽的焓等于饱和水的焓、汽化热和过热热之和,或等于干饱和蒸汽焓和过热热之和。过热蒸汽的焓不但与压力有关,而且与蒸汽过热后的温度有关,即随着压力的升高而减小,随着温度的升高而增大。

火力发电厂都是应用过热蒸汽,因为它一方面性能接近于气体,比较稳定;另一方面,在过热过程中所加进去的热量使蒸汽进入汽轮机中膨胀时,能作更多的功,即通过发电机产生更多的电能,有利于提高经济性。

三、热能的传递方式

当物体之间存在着温度差时,就有能量传递,这种能量称作热能。在火电厂中能量转换大多与热能传递相联系。例如锅炉中,燃料燃烧时放出的热量,经各种受热面传给水、蒸汽和空气,从而使水汽化、蒸汽过热和空气得到预热。又如在汽轮机中作了功的乏汽排入凝汽器,将汽化潜热传递给冷却水,而使自己凝结成水。传热现象是一种复杂过程,热能的传递形式是多样的,在生产实践中可概括归纳为如下三种基本形式。

1. 导热形式

固体中由于晶格振动和自由电子运动,使热量由高温区传至低温区。而在气体中气体分子的不停运动,高温区域的分子比低温区域的分子具有较高的速度,分子从高温区运动到低温区便将热量带至低温区,这种传递能量的过程称为导热。火电厂热力设备中广泛采用平壁和圆筒壁构件作为导热设施,如锅炉汽包、水冷壁管、过热器管、各种联箱以及汽轮机的凝汽器管等,都采用圆筒壁钢质结构。钢管管壁热阻小、导热效果良好又便于制造,铜和铝材同样也是热的良导体。

2. 对流换热形式

气体各部分发生相对位移将热量带走,实现热量传递的过程称为对流。在火电厂热量传递中的对流换热是指流体和固体壁面接触时相互间的换热过程。它实际包含着导热和对流联合作用的复合过程,简称为放热。一块热金属板放在风扇前面比放在一般空气中要冷却得快,这种固体壁面与流体之间的热量传递过程,就称为对流换热。前者在外力影响下散热,称之为“受迫运动放热”;后者是由于流体冷热各部分的密度不同所引起的换热,称为“自由运动放热”。受迫运动比自由运动往往具有较快的热交换速度,所以工程中常