



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

单元机组 运行

于国强 郑志刚 申爱兵 合编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

单元机组 运行

于国强 郑志刚 申爱兵 合编
杨建蒙 李子明 主审

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

全书分为八个部分。绪论简述了单元机组的构成特点和集控运行的概念,介绍了单元机组的运行管理制度;单元机组的启动和停运主要讲述配汽包锅炉和配直流锅炉的单元机组冷、热态启动和停运;单元机组的运行调整介绍了单元机组的运行监视、运行调整、调峰运行以及经济运行;单元机组的控制与保护介绍了单元机组的负荷调节方式,单元机组负荷控制系统及运行方式的控制,汽轮机数字电液调节系统,锅炉燃烧器管理系统,简述了单元机组的各种安全保护方式;单元机组的试验介绍了单元机组的典型试验,单元机组的热力试验;单元机组的事故处理叙述了单元机组事故特点和处理原则,并且重点分析了单元机组的几个事故案例。单元机组计算机监控简述了计算机监控系统的优点、功能、组成及应用方式。

本书可作为高职高专学校热能动力工程专业和火电厂集控运行专业的教材,也可作为电力职工大学、高等院校成人教育、函授相应专业的教材,并可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

单元机组运行/于国强,郑志刚,申爱兵合编.—北京:中国电力出版社,2005

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-2106-5

I.单… II.①于… ②郑…③申… III.火电厂—单元机组—电力系统运行—高等学校:技术学校—教材 IV.TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第086150号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

利森达印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005年9月第一版 2006年8月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.5印张 415千字

印数3001—6000册 定价25.00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

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织评审，同意列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术标准。本书可以作为学历教育的教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

全书共包括八个部分：绪论、单元机组的启动和停运、单元机组的运行调整、单元机组的控制与保护、辅助系统运行、单元机组的试验、单元机组的事故处理、单元机组计算机监控。本书以300MW及以上机组为研究对象，尽可能地引入最新的技术知识，以反映单元机组运行方面的先进水平。

本书由保定电力职业技术学院于国强、哈尔滨电力职业技术学院郑志刚、沈阳工程学院申爱兵合编，于国强编写绪论、第一章、第二章的部分内容和第五章的部分内容；郑志刚编写第三章、第四章的部分内容和第六章的部分内容；申爱兵编写第七章及第二章的第四节、第四章的第三、四节、第五章第一节的电气部分、第六章第二节的电气部分及第三节。全书由于国强统稿。华北电力大学杨建蒙教授及大唐广东潮州电厂高工李子明担任本书主审。

本书在编写过程中，得到中国电力企业联合会动力类专业教研会、中国电力出版社、本院及相关院校的一些领导、老师和电力行业的朋友们的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者的水平有限，书中缺点和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2005年5月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 单元机组的启动和停运	5
第一节 单元机组启停时锅炉、汽轮机的热状态	5
第二节 单元机组的启动和停运方式	18
第三节 配汽包锅炉的单元机组冷态滑参数启动	22
第四节 配直流锅炉的单元机组的冷态滑参数启动	31
第五节 单元机组的热态滑参数启动	41
第六节 中压缸启动	44
第七节 单元机组的停运	46
第二章 单元机组的运行调节	58
第一节 汽包锅炉的运行调节	58
第二节 直流锅炉的运行调节	71
第三节 汽轮机的运行监视	74
第四节 发变组与厂用电设备的运行监视	81
第五节 单元机组调峰运行	93
第六节 单元机组经济运行	104
第三章 单元机组的控制及安全保护	109
第一节 单元机组负荷调节方式	109
第二节 单元机组负荷控制系统	111
第三节 单元机组的运行控制方式	115
第四节 单元机组主控系统实例	117
第五节 汽轮机数字电液调节系统	120
第六节 单元机组辅机连锁保护逻辑系统	125
第七节 单元机组主机的保护监视系统	129
第四章 辅助系统运行	138
第一节 锅炉辅助系统运行	138
第二节 汽轮机辅助系统运行	152
第三节 厂用电系统的运行与维护	180
第四节 发电机励磁系统运行与维护	194
第五章 单元机组的试验	201
第一节 单元机组的典型试验	205
第二节 单元机组能量平衡和热力试验	215
第六章 单元机组的事故处理	219
第一节 单元机组事故特点及处理原则	219
第二节 单元机组的事故及处理	220

第三节	电力系统事故对单元机组运行的影响及处理	239
第四节	单元机组事故案例	244
第七章	单元机组计算机监控	248
第一节	发电厂的控制方式	248
第二节	计算机监控系统在发电厂中的应用	249
第三节	发电厂计算机监控系统的发展趋势	260
参考文献	265

绪 论

一、单元机组的构成和特点

随着国民经济的不断发展，电力需求随之增长，电力系统也在不断地扩大，为获得较高的经济性、安全可靠性及满足电力负荷的快速增长，大容量、高参数、高自动化技术的大机组的采用已成为电力发展的必然。

（一）单元机组的构成

现代大容量机组一般均采用蒸汽中间再热方式，中间再热机组必须采用单元制。即每台锅炉直接向所配合的一台汽轮机供汽，汽轮机驱动发电机，发电机发出的电功率直接经一台升压变压器送往电力系统，组成了炉—机—电纵向联系的独立单元。各独立单元之间没有大的横向联系，在机组正常运行时，本单元所需要的蒸汽和厂用电均取自本单元。这种独立单元系统的机组称为单元机组。非中间再热机组除可采用母管制系统外，也可以采用单元制系统，构成单元机组。

（二）单元机组的特点

与非单元制系统（母管制系统）相比，单元机组系统简单，管道短，发电机电压母线短，管道附件少，发电机电压回路的开关电器少，投资最为节省，系统本身事故的可能性也最少，操作方便，便于滑参数启、停，适合炉、机、电集中控制。

单元制系统的缺点是其中任一主要设备发生故障时，整个单元都要被迫停止运行，相邻单元之间不能互相支援，机炉之间也不能切换运行，运行的灵活性较差；当系统频率发生变化时，单元机组由于锅炉的热惯性大，故对负荷变化的适应性相对较差。

二、单元机组集控运行的概念和内容

（一）单元机组集控运行

单元机组的炉、机、电纵向联系相当密切，相互构成了一个不可分割的整体。因此在单元机组的运行中，必须把炉、机、电看成一个独立的整体来进行监视和控制，这就是所谓的单元机组集控运行。

集控运行的控制对象一般包括：锅炉及燃料供应系统、给水除氧系统、汽轮机及其冷却系统、抽汽回热加热系统、凝结水系统、润滑油系统、发电机—变压器组系统、高低压厂用电及直流电源系统等。升压母线及送出线电气系统视具体情况可在集控室内控制或另设网控室控制。

单元机组采用集控后，全厂公用系统如水处理系统、燃料运输系统等仍采用就地控制或车间集中控制。

单元机组集中控制便于运行管理和统一指挥，利于协调操作，因此有利于机组的安全和经济运行。单元机组集中控制不仅要分别考虑锅炉、汽轮机、电气等各专业的特殊要求，同时也需综合、全面地考虑它们之间的联系，以便完成对单元机组总体的监视与控制。为了满足这种需求，使得单元机组集中控制技术远比母管制小机组复杂。为了适应这种情况，要求集控运行人员在炉、机、电、化学、热控等各个专业方面有更高的技术水平。

(二) 单元机组集控运行的内容

单元机组集中控制应能满足以下要求：

- (1) 对机组实现各种方式的启动、停运。
- (2) 在机组正常运行时，对设备的运行情况进行监视、控制、维护以及对有关参数进行调整。
- (3) 机组的紧急事故处理。

单元机组集控运行的内容如下：

- (1) 自动检测。自动地检查和测量反映单元机组运行情况的各种参数和工作状态，监视单元机组运行的生产情况和趋势。
- (2) 自动调节。自动地维持单元机组在规定的工况下安全、经济地运行。
- (3) 程序控制。根据值班员的指令，自动完成整个机组或局部工艺系统的程序启停。
- (4) 自动保护。当机组运行情况出现异常或参数超过允许值时，及时发出报警信号或进行必要的动作，以避免发生设备事故和危及人身安全。

三、单元机组的运行管理制度

为了保证单元机组的安全、经济运行，很好地完成上级调度部门安排的生产任务，电厂对单元机组集控运行制定了许多行之有效的运行管理制度。

1. 安全生产制度

为了确保机组安全发电、供电，保护国家、集体财产不受损失，保护人民生命安全和健康，运行人员必须贯彻执行“电力生产，安全第一”及“预防为主”的方针，对运行的各项操作应做到准确无误。

2. 交接班制度

交接班制度是保证交班、接班不出现漏洞以及保证安全发电的重要制度。交接班制度内容包括：①交接程序；②交接班的主要项目；③班前会、班后会和各个岗位的交接等。

3. 巡回检查制度

巡回检查是发现设备隐患、消灭隐性事故、保证设备安全的重要措施。根据巡回检查制度的要求，运行人员在值班期间，应该按照岗位分工的不同，定时地对设备按照固定巡回检查路线进行检查，巡回检查中要按照设备情况的变化有不同的检查重点。

4. 设备定期试验和切换制度

对运行中的设备进行定期检查、记录、试验和切换，是保证设备处于良好的运行状态和有效备用的重要措施。对于列入规程中的试验和切换的设备和系统，试验和切换的周期等都应该严格按照规程执行，执行中要做好事故预想和安全对策。

5. 工作票及设备验收制度

工作票是准许在设备上进行工作的书面命令卡。工作票是明确安全责任，向执行工作的人员进行安全交底，以及履行工作许可手续，工作间断、转移和终结手续，并且实施保证安全技术措施的书面依据。因此，在运行人员管理的设备上进行检修工作，都要办理工作票（事故处理和事故抢修除外），严禁无票作业。运行设备检修完成后，先经检修人员检查合格，再由运行人员验收，质量不合格应返修直至合格。

6. 操作票联系制度

操作票是依据生产计划和上级调度的综合命令，为设备运行和作业安全措施而事先写好

的工作程序卡,是保证安全操作具有程序性的操作命令,是避免发生事故的一项组织措施。操作票的填写和执行必须严格遵守《电业安全工作规程》有关规定,认真填票,确定操作人和监护人,操作时按照操作票步骤逐条进行。

7. 岗位责任制

发电厂根据岗位特点、设备状况及工作量的大小划分为若干个运行岗位,根据不同的工作岗位性质制定相应的岗位制度,使每个运行人员清楚本岗位职责,做好本职工作。岗位责任制的内容一般包括岗位职责、工作标准和任职条件。

8. 电网调度管理条例

电网运行实行统一调度、分级管理,认真执行《电网调度管理条例》是保障电网安全、保护用户利益、适应经济建设的重要措施。《电网调度管理条例》由国务院令发布。

《电网调度管理条例》规定:发电厂必须按照调度机构下达的调度计划和规定的电压范围运行,并且根据调度命令调整功率和电压;发电、供电设备的检修应当服从调度机构的统一安排;任何人不得操作调度机构管辖范围内的设备,但是当电网运行遇有危及人身及设备安全的情况时,值班人员可以按照有关规定处理,事后应立即报告有关调度机构。

设备检修申请应按照设备管理范围申报,锅炉、汽轮机、发电机、主变压器、高压母线、负荷开关等直接影响发电出力的设备归电网管理。

9. 运行规程

发电厂运行规程是发电厂运行方面的权威性技术文件,是保证设备安全经济运行的重要规章制度。运行规程由发电部有关专业工程师负责,由具有丰富运行经验的工人参加,参照《电力工业技术管理法规》、电力行业颁布的各个专业典型运行规程、安全规程、制造和设计资料、设备特性等有关资料,根据现场具体条件编写。规程由发电厂有关专业专责工程师审查,由总工程师批准公布。全体运行人员在运行工作中应该随时注意规程的正确性,发现问题应该及时向专责工程师、总工程师汇报。专责工程师应作好记录,作为修订规程的依据。对于规程的重要临时修改,应由厂总工程师批准,作为运行规程的临时措施。运行规程一般包括以下内容:

- (1) 设备技术规范;
- (2) 机组启动;
- (3) 机组正常运行与参数调整;
- (4) 机组停止;
- (5) 机组事故处理;
- (6) 定期工作、保护和连锁。

10. 运行分析制度

运行分析制度能够促进运行人员和各级生产管理人员掌握设备性能及其运行规律,是保证机组安全经济运行的重要措施。运行分析工作一般分为四种:岗位分析、定期分析、专题分析和异常(事故)分析。

11. 经济工作制度

机组运行是在保证安全生产的基础上,尽可能地提高其运行的经济性。通过开展群众性的运行小指标竞赛活动,促使运行人员在值班中认真监盘,合理地进行调整,节约燃料、蒸汽和厂用电。

12. 事故调查规程

在电业生产（包括电厂运行）中发生的事故，依照事故性质的严重程度及经济损失大小分为特大事故、重大事故、一般事故、障碍几类。事故调查和考核依照《电业生产事故调查规程》进行。生产中发生各类事故后，必须按照“三不放过”原则认真对待，即事故原因不清不放过，事故责任者和应受教育者没有受到教育不放过，没有采取防范措施不放过。

此外还包括培训管理制度、燃料管理制度、用水管理制度、消防系统管理制度、环保工作管理制度、五项技术监督管理制度等。

单元机组的启动和停运

单元机组的启动是指将静止状态的机组转变为运行状态的过程，包括锅炉点火、升温升压，汽轮机冲转升速、并网，升负荷直到带至额定负荷的全过程。单元机组的启动过程实质上是一个对设备部件的加热升温过程。停机则是指启动的逆过程。是指从带负荷运行状态到减去全部负荷，直至发电机与电网解列，汽轮机打闸，锅炉灭火，汽轮发电机组惰走停转及盘车，锅炉降压和机炉冷却等全过程。单元机组的停机过程实质上是一个对设备部件的冷却降温过程。

在机组启、停过程中，锅炉、汽轮机各部件与工质的温度不断变化，是一个不稳定的过程。启、停工况极为复杂，各部件的温度和承受的压力在启、停过程中变化很大，因此会产生热膨胀、热变形和热应力。温度的变化引起的物体变形称之为热变形。如果物体的热变形受到约束，则在物体内就会产生应力，这种应力称为热应力。特别是高参数、大容量机组，由于设备体积庞大，结构复杂，各个部件（如锅炉受热面、汽包，汽水管道，汽轮机汽室、汽缸、转子、法兰及螺栓等）所处的条件不同，火焰及工质对它们的加热或冷却速度也不同，因而各部件之间或部件本身沿金属壁厚方向产生明显的温差而导致膨胀或收缩不均，产生热应力。热应力随温差的变化使金属产生疲劳。当热应力超过允许的极限值时，会使部件产生裂纹乃至损坏。

在启停过程中，锅炉受热面内工质的流动不正常，有的受热面内工质流量很少，甚至在短时间内没有工质流动，因此这部分受热面不能被工质正常冷却，如果加热速度控制不当，就会造成部分受热面超温。而对于汽轮机，由于其结构复杂，又有高速旋转的转子，因而当汽缸和转子之间出现膨胀差时，会使本来就小的动静间隙进一步缩小，甚至产生摩擦，引起事故。实践证明，一些对设备最危险、最不利的工况往往出现在启停过程中。有些在启停过程中产生的问题虽不立即引起明显的设备损坏，却会给设备带来“隐患”，降低了设备使用寿命。因此，通过研究单元机组在启停过程中的热状态和热力特性，寻求合理的单元机组启停方式，就成为发电厂集控运行的一项重要任务。

所谓合理的启停方式就是寻求合理的加热或降温的方式，使启停过程中机组各部件的热应力、热变形、汽轮机转子与汽缸的胀差和转动部件的振动均维持在较好的水平上。

第一节 单元机组启停时锅炉、汽轮机的热状态

一、锅炉的热状态和热应力

（一）锅炉汽包的温差与热应力

1. 锅炉上水时汽包的温差与热应力

机组冷态启动时，锅炉汽包在上水之前，其金属温度接近环境温度。一定温度的给水进入汽包后，内壁温度随之升高，因汽包壁较厚（一般约100mm左右），外壁温升较内壁温升慢，从而形成内、外壁温差，产生热应力。另外，锅炉上水一般是欠热水，不会产生饱和蒸汽对上部汽包壁的凝结放热，只有水直接对汽包下部内壁加热，被给水浸没的部分受热、壁

温上升,使汽包下半部壁温高于上半部。汽包内外壁和上下壁存在着温差,温度高的部位金属膨胀量大,温度低的部位金属膨胀量小,而汽包是一个整体,其各部位间无相对位移的自由,因而汽包内侧和下半部受到压缩,外侧和上半部受到拉伸。汽包压缩部位产生压缩热应力,拉伸部位产生拉伸热应力,且温差愈大,所产生的热应力也愈大。该热应力与温差成正比关系,而温差的大小又取决于金属加热或冷却的速度和金属壁厚。

通过上述分析可知,在锅炉上水时,汽包的上下壁温差和内外壁温差,均使汽包下部内壁产生压缩热应力。为减小该热应力,在上水过程中应限制汽包上下壁、内外壁温差,其方法为限制上水温度和上水速度。一般规定冷态启动时,锅炉上水温度不高于 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$,热态上水时,水与汽包壁温差不大于 40°C 。锅炉上水速度是用开始上水到所规定水位的时间来控制。对高压以上锅炉,夏季上水时间不少于2h,冬季不少于4h,对有缺陷的锅炉应酌情减慢。另外,为安全起见,用常温水向锅炉上水时,上水温度必须高于汽包材料性能所规定的脆性转变温度(FATT) 33°C 以上。

2. 升压过程中汽包的温差和热应力

在升压过程中,汽包的温差和热应力,可分以下三个阶段加以分析。

(1) 升压初期即锅炉点火后,投入燃料量很少,火焰在炉内充满程度差,水冷壁受热不均,工质吸热较少。在低压时工质的汽化潜热较大,这时产生的蒸汽量很少,水循环尚未正常建立,汽包下半部的水处于不流动或流动非常缓慢的状态,放热系数很小,使汽包下半部金属升温缓慢,而汽包上半部接触的是饱和蒸汽,其传热方式为凝结放热,放热系数要比下半部缓慢的对流传热大几倍,故上半部壁温升高较快。当压力升高时,上半部壁温很快达到对应压力下的饱和温度,这样就使汽包上半部壁温高于下半部壁温,形成上高下低的温差,产生热应力。随着压力的升高,温差加大,热应力也随之加大,在汽包上半部产生压缩热应力,而下半部则产生拉伸热应力,使汽包产生拱背变形,严重时损坏汽包。上下壁温差与升压速度有关,升压速度越快,该温差越大,且压力越低时越明显。这主要是由于在低压时,压力升高对应的饱和温度上升较快的缘故。故在升压过程中应严格控制升压速度,这是防止汽包壁温差过大的根本措施。在此阶段内,应采取各种措施促进水冷壁的正常循环,以加强汽包内水的流动,从而减小汽包温差。为此,可在各水冷壁下联箱内设置邻炉蒸汽加热装置。在点火前先预热带压,不仅有利于水循环的建立,而且有利于缩短启动时间。另外,还可通过加强下联箱放水,以加快汽包内水的流动。

(2) 随着锅炉燃料量投入的不断增多,锅炉受热加强,为升压的第二阶段,水循环渐趋正常。为了不使汽包内外壁、上下壁温差过大,仍应限制升温、升压速度。

(3) 升压的第三阶段,为压力升到接近额定值的最后阶段,汽包金属的机械应力亦接近于设计预定值。这时若再有较大的热应力是危险的,故升温升压速度仍受限制。

为了防止过大的热应力损坏汽包,目前国内各高压和超高压锅炉的汽包上下壁温差及汽包筒体任意两点的温差均控制在 35°C 以下。汽包上下壁温差和内外壁温差的大小,在很大程度上决定于汽包内工质的升温升压速度。一般规定汽包内工质温度升高的平均速度不应超过 $1.5\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。升温升压应按规定的启动曲线进行。在升压过程中,除严格按照规定的升压曲线进行外,还应保持蒸汽压力稳定变化,不使蒸汽压力波动太大,蒸汽压力波动时要引起饱和温度的波动,从而引起汽包温差增大。当发现汽包壁温差过大时,应减慢升压速度或暂停升压。

3. 停炉时汽包壁温差

锅炉停止燃烧后,即进入降压和冷却阶段。锅炉停止和启动过程一样,汽包内饱和蒸汽压力和温度有较大幅度的变动,而且由于汽和水的导热率不同以及汽包结构的影响,汽包壁不同部位将存在温度差异,产生应力。对汽包锅炉来说,汽包热应力仍是限制停炉、冷却、降压速度的核心问题。在降压过程中,汽包壁靠内部工质进行冷却,如果冷却不均就会出现温差。由于汽包内锅水压力及对应的饱和温度下降,下汽包壁对锅水放热,使汽包壁得到较快的冷却;而上汽包壁与蒸汽接触,因压力降落,汽包内壁向蒸汽放热,在近壁面处是一层带有过热度的蒸汽,它的放热系数小,金属冷却缓慢,所以仍会出现上壁温度大于下壁温度,形成温差,降压速度越快,则温差越大。特别应注意,当压力降低到最低值时将出现较大的温差。因此在低压时,更应注意严格控制降压速度,一般在最初的4~8h时间内应关闭锅炉各处挡板,避免大量冷空气进入。此后如有必要,可逐渐打开烟道挡板及炉膛各门孔进行自然通风冷却,同时进行一次放水,促使内部水的流动,使各部分冷却均匀。在8~10h内,如有必要加强冷却,可开启引风机通风,并可适当增加进水、放水次数。

(二) 锅炉受热面的温差与热应力

1. 水冷壁

在锅炉正常运行时,水冷壁管外壁受到高温火焰的辐射,内壁被汽水混合物冷却。汽水混合物的温度就只是汽包压力下的饱和温度,内外壁温差可达60~80℃,外壁承受压缩应力,内壁承受拉伸应力,这样在水冷壁管内产生了热应力。水冷壁管内外壁温差与壁厚成正比,壁越厚,温差越大,热应力越大,所以水冷壁壁厚不宜超过6mm。当压力更高时,则不采用增加壁厚的方法而采用强度更高的材料制造水冷壁管。目前,大部分锅炉水冷壁均采用15CrMo或15MnV等低合金钢。

停炉后,尽管在4~8h内关闭一切烟风挡板和检查孔,但由于烟囱会形成一定的抽力,冷空气很容易从不严密处漏入炉膛,对水冷壁的冷却速度也较快。若过早开启烟风挡板或炉水温度较高时就放掉,则会使水冷壁的冷却速度太快,热应力较大,长期下去会导致水冷壁损坏。

对多次强制循环锅炉,在启动过程中,由于使用强制循环泵进行强制循环,水冷壁管之间的温差很小,无需采取特殊措施来改善水冷壁的受热情况。

对采用螺旋管圈水冷壁的直流炉,因管内质量流速能保证,因而可防止膜态沸腾。工质焓较高的管带是在炉内热负荷较低的区域,故炉宽、炉深方向热负荷不均匀不会因热偏差增大而使管壁超温,故可不必采用内螺纹管;每根管子很长,流速较高,阻力大,水泵电耗大,但对水动力稳定有利,故回路进口可不装节流圈;水冷壁温度分布均匀,热膨胀舒畅,故可快速启动,缩短启动时间,不致带来不可接受的超温与热应力;不用下降管,少用或没有中间联箱,比较适合于机组的变压运行。

2. 过热器和再热器

锅炉正常运行时,过热器被高速蒸汽所冷却,管壁金属温度与蒸汽温度相差无几。但在启动过程中,情况则大不相同。在冷炉启动之前,部分立式过热器管内一般都有凝结水或水压试验后留下的积水。点火以后,这些积水将逐渐被蒸发,或被蒸汽流所排除。但在积水全部被蒸发或排除以前,某些管内没有蒸汽流过,管壁金属温度近于烟气温度。即使过热器内已完全没有积水,若蒸汽流量很小,管壁金属温度仍较接近烟气温度。因此,一般规定,在

锅炉蒸发量小于10%额定值时，必须限制过热器入口烟温。控制烟温的方法主要是限制燃烧率（控制燃料）或调整火焰中心的位置（控制炉膛出口温度）。

随着压力的升高，过热器内蒸汽流量逐渐增大，管壁冷却得越来越好，这时可逐渐提高烟温，同时必须限制出口蒸汽温度。过热器出口汽温主要取决于当时锅炉的燃烧率及汽轮机启动加热状态，也与炉内火焰中心位置和过量空气系数有关。在启动过程中也可采用喷水减温，但要注意对喷水量的控制，以防喷水不能全部蒸发，使蒸汽带水，危害汽轮机。对于高中压合缸的汽轮机，其过热汽温与再热汽温是相匹配的。这些除通过调节锅炉燃烧率来控制外，还可通过控制旁路系统的流量来控制两者汽温。

启动过程中，再热器的安全主要与旁路系统的型式、受热面所处的烟气温度、启动方式（主要指汽轮机冲转的蒸汽参数）以及再热器所用的钢材性能有关。对于采用串联二级旁路系统的再热机组，启动期间锅炉产生的蒸汽可通过高压旁路流入再热器，然后经低压旁路流入凝汽器，使再热器得到充分冷却。对采用一级大旁路的系统，汽轮机冲转前再热器无蒸汽流过，再热器采用耐高温的金属材料，允许短时间干烧，但必须严格控制再热器烟温，使流经再热器的烟温小于 540°C ，以免烧坏再热器。有的锅炉使用烟气旁路来控制进入再热器的烟气量。再热器的安全与冲转参数有关，由于冲转参数的高低决定于锅炉的燃烧率，燃烧率又影响流经再热器的烟温，因此可以把使用一级旁路系统的单元制发电机组的冲转参数选得低一些。

3. 省煤器

汽包炉在点火后的一段时间内，不需进水或只需间断进水。在停止给水时，省煤器内局部的水可能汽化，如果产生的蒸汽停滞不动，该处管壁可能超温，其余管壁温度却很低，这样就容易形成较大的热应力。省煤器间断上水的过程中，省煤器内的水温间断地变化，使管壁金属产生交变热应力，导致金属和焊缝产生疲劳。自然循环锅炉绝大多数采用锅炉汽包与省煤器下联箱通过再循环管连通的措施，在锅炉启动期间或事故情况下需要停止进水时，关闭锅炉给水门，开启省煤器再循环门，由于省煤器和汽包之间存在一定的位差以及省煤器内工质吸收烟气热量，导致省煤器和汽包内工质的密度不同，这样，可形成经过省煤器的自然循环回路，靠锅水循环冷却省煤器。当需要上水时，应关闭再循环门，以防止给水从再循环管路直接进入汽包。对多次强制循环锅炉，在点火升压期间依靠锅水循环泵对省煤器进行强迫循环，循环压头高，循环水量大，省煤器内的水温波动较小。而且再循环门不需要进行频繁的开关操作，在启动时开启，待省煤器连续给水时关闭。

二、汽轮机启停时的热状态及寿命管理

（一）汽轮机的热膨胀

汽轮机在启停和工况变动时，各部件金属温度都将发生变化，要产生热膨胀。由于零部件的几何尺寸、材质及受热情况等的不同，其热膨胀程度不尽相同，致使动静部分的轴向间隙发生变化，有可能危害汽轮机的安全。为保证汽轮机有足够的轴向间隙，必须对汽轮机汽缸和转子的绝对热膨胀和相对热膨胀进行分析研究。

1. 汽缸和转子的绝对热膨胀

汽轮机从冷态启动到带额定负荷运行，金属温度的变化很大（在 500°C 以上），因此汽缸轴向、垂直和水平等各个方向的尺寸都会显著增大。汽轮机启停和工况变化时，汽缸的膨胀、收缩是否自由，直接决定机组能否正常运行。

滑销系统的合理布置和应用,可以保证汽缸在各个方向能自由膨胀和收缩,同时保证汽轮机、发电机各部件的相对位置的正确,从而保证机组安全运行。运行中应注意经常向滑动面之间注油,保证滑动面润滑及自由移动。有些机组在轴承箱与台板滑动面之间安装一层很薄的助滑垫,能很大程度地减小滑动面之间的摩擦力,保证汽缸自由膨胀与收缩。

启动时,汽缸膨胀的数值取决于汽缸的长度、材质和汽轮机的热力过程。由于汽缸的轴向尺寸大,故汽缸的轴向膨胀成为重要的监视指标。对大容量中间再热机组,汽轮机法兰比汽缸壁厚得多,因此汽缸的热膨胀往往取决于法兰的温度。在启动时,为了使汽缸得到充分膨胀,通常用法兰加热装置来控制汽缸和法兰的温差在允许范围内。

汽轮机正常运行时,沿轴向各级金属温度分布都有一定规律,因此总可以测出调节级处汽缸或法兰的金属温度与汽缸自由膨胀的对应关系,以便于运行监督。

随着汽轮机容量的增大,其轴向长度也随之增加,转子和汽缸的绝对膨胀往往会达到相当大的数值,比如国产 300MW 汽轮机高中压缸总膨胀可达近 40mm。所以在汽轮机启停和变工况过程中,要加强对汽缸绝对膨胀的监视,此外,还要防止汽缸左右两侧膨胀不均匀,造成卡涩和动静部分的磨损。为了保证汽缸左、右均匀膨胀,规定主蒸汽和再热蒸汽两侧温差一般不应超过 28℃,调节级处法兰左、右温差应小于 10℃。

汽轮机的轴向膨胀值,在汽轮机启停及正常运行中,要经常与正常值对照。当汽缸的膨胀值在膨胀或收缩过程中有跳跃式增加或减小时,则说明滑销系统存在卡涩现象,应查明原因予以处理。对汽缸上进汽和抽汽管道的合理布置也应予以重视,否则会发生膨胀不均匀及动静部分中心发生偏斜等现象。

2. 汽缸和转子的相对膨胀

汽轮机启停和工况变化时,由于流经转子和汽缸相应截面的蒸汽温度不同、蒸汽对转子表面的放热系数比对汽轮机汽缸室的放热系数大以及转子质面比(转子质量与传热表面积之比)小于汽缸的质面比等原因,转子随蒸汽温度的变化而产生的膨胀或收缩都更为迅速,使转子和汽缸之间明显存在温差。转子与汽缸沿轴向膨胀的差值,称为转子与汽缸的相对膨胀差,简称胀差。若转子轴向膨胀值大于汽缸,则称为正胀差;反之称为负胀差。对于单流程汽轮机(推力轴承一般放在前轴承箱内),汽轮机各级动叶片出汽侧的轴向间隙大于进汽侧间隙,故允许的正胀差大于负胀差。在稳定工况下汽缸和转子的温度趋于稳定值,相对胀差也趋于一个定值。在正常情况下,这一定值比较小。但在启停和工况变化时,由于转子和汽缸温度变化的速度不同,可能产生较大的胀差,这就意味着汽轮机动静部分相对间隙发生了较大变化。如果相对胀差值超过了规定值,就会使动静间的轴向间隙消失,发生动静摩擦,可能引起机组振动增大,甚至发生叶片断裂、大轴弯曲等事故,因此汽轮机启停过程中应严密监视和控制胀差。

为了测量绝对膨胀和高压外缸、中低压缸胀差,在高压转子前端(前轴承箱内)、中压转子后端和低压转子后端(均在相应的轴承箱内)装有膨胀传感器,在前轴承箱和高中压缸轴承箱基架上装有高中压缸热膨胀传感器。传感器输出信号供机头仪表柜和集控室内仪表显示及计算机和记录仪用。

总之,对不同类型的机组,其膨胀系统可能有些差异,但只要掌握了机组的结构及膨胀原理,就能正确判断汽缸和转子的膨胀方向和动静间隙的变化规律,防止通流部分发生磨损。

(1) 启动时胀差的变化规律。汽轮机冷态启动前，汽缸一般要进行预热，轴封要供汽，此时汽轮机胀差总体表现为正胀差。从冲转到定速阶段，汽缸和转子温度要发生变化，由于转子加热快，汽轮机的正胀差呈上升趋势。但这一阶段蒸汽流量小，高压缸主要是调节级做功，金属的加热也主要在该级范围内，只要进汽温度无剧烈变化，相对胀差上升就是均匀的；对采取中压缸启动的机组，则这个阶段胀差的变化主要发生在中压缸。低压缸胀差的变化还要受摩擦鼓风热量、转子离心力等因素的影响。当机组并网接带负荷后，由于蒸汽温度的进一步提高、通过汽轮机蒸汽流量的增加，蒸汽与汽缸及转子的热交换加强，正胀差增加的幅度加大，对于启动性能较差的机组，在启动过程中要完成多次暖机，以缓解胀差大的矛盾。

(2) 汽轮机甩负荷、热态启动、停机时相对膨胀的变化规律。当汽轮机甩负荷或停机时，流过汽轮机通流部分的蒸汽温度会低于金属温度，转子比汽缸收缩得多，因而出现负胀差。

热态启动初始阶段，转子、汽缸的金属温度高，若冲转时蒸汽温度偏低，则蒸汽进入汽轮机后对转子和汽缸起冷却作用，也会出现负胀差，尤其对极热态启动，几乎不可避免地会出现负胀差。

汽轮机打闸停机后，由于没有蒸汽进入通流部分，转子鼓风摩擦产生的热量无法被蒸汽带走，使转子温度升高，加之转子（尤其是低压转子）的泊松效应，在惰走阶段胀差会有不同程度的增加。

(3) 影响胀差的因素。影响汽轮机胀差的因素主要有以下几点：

1) 蒸汽温度和流量变化速度的影响。蒸汽的温度或流量的变化速度大，转子与汽缸的温差加大，引起的胀差也就加大。因此，在汽轮机启停过程中，控制蒸汽温度和流量的变化速度，就可以达到控制胀差的目的。

2) 轴封供汽的影响。轴封供汽对胀差影响的程度，主要决定于轴封供汽温度，其次是供汽时间，供汽时间愈长对胀差影响愈大。现代大型机组轴封供汽除了低温汽源外，还设置了高温汽源。根据工况的变化情况，适时投用不同温度的轴封供汽汽源，可有效地控制胀差。冷态启动时为了不使胀差正值过大，应选择温度较低的汽源，并尽量缩短冲转前向轴封送汽的时间；热态启动时应合理地使用高温汽源，防止向轴封供汽后胀差出现负值；停机过程中，如出现负胀差过大，可向汽封送入高温汽源加热转子汽封段，控制转子收缩。

3) 汽缸法兰、螺栓加热装置的影响。汽轮机在启停过程中使用汽缸法兰和螺栓加热装置，可以提高或降低汽缸法兰和螺栓的温度，有效地减小汽缸内外壁、法兰内外壁、汽缸与法兰、法兰与螺栓之间的温差，加快汽缸的膨胀或收缩，达到控制胀差的目的。法兰加热装置使用要恰当，否则可能造成两侧加热不均匀或蒸汽在法兰内凝结。如果温度和压力控制不当，可能造成法兰变形和泄漏。

4) 凝汽器真空的影响。在汽轮机启动过程中，当机组维持一定转速或负荷时，改变凝汽器真空可以在一定范围内调整胀差。当真空降低时，欲保持机组转速或负荷不变，必须增加进汽量，使高压转子受热加快，其高压缸正胀差随之增大；由于进汽量的增大，中低压缸摩擦鼓风的热量被蒸汽带走，因而转子被加热的程度减小，正胀差减小。当凝汽器真空升高时，过程正好相反。应该指出，对不同的机组，不同的工况，凝汽器真空变化对汽轮机胀差的影响过程和程度是不同的。

(二) 汽轮机的热变形

1. 上、下缸温差引起的热变形

在汽轮机启停过程中，上、下汽缸常存在着温差，通常是上缸温度高于下缸温度。上、下汽缸温差产生的主要原因是：

(1) 上、下汽缸具有不同的重量和散热面积，下缸布置有回热抽汽管道，不仅重量大，散热面积也大，故在同样的加热或冷却条件下，上缸的温度要高于下缸温度。

(2) 启动时，蒸汽在汽缸内凝结形成的疏水都流经下汽缸经疏水管排出，疏水形成的水膜降低了汽缸的受热条件，而较高温度的蒸汽上升凝结放热加热上汽缸，故上汽缸温度比下汽缸高。

(3) 停机后，转子在静止状态下，汽缸内残存蒸汽和进入的空气，在汽缸内对流流动，热汽（气）流聚积在上汽缸，冷汽（气）流在下汽缸，使上下汽缸的冷却程度不一样。

(4) 下汽缸处于运行平台之下，受到下面温度较低空气对流通风的影响，使下汽缸加速冷却。

(5) 下汽缸布置有许多管道，使其较难敷设保温层，加之保温层运行中易于脱落，致使下缸散热较上缸快。

上、下汽缸过大的温差就会造成汽缸向上弯曲的“拱背”热变形，俗称“猫拱背”，如图 1-1 所示。

汽缸的这种变形使下缸底部径向动静间隙减小甚至消失，造成动静部分摩擦，尤其当转子存在热弯曲时，动静部分摩擦的危险更大。汽缸发生猫拱背变形后，还会出现隔板和叶轮偏离正常时所在的垂直平面的现象，使轴向间隙发生变化，进而引起轴向摩擦。

通常情况下，汽轮机出厂后都要给定汽缸上下缸温差的允许范围。对双层缸结构，内缸上下缸温差的要求与外缸的温差要求可能不一样，但通常的温差允许范围为 35 ~ 50℃。

为控制好上、下汽缸温差，必须严格控制温升速度；启动时尽可能同时投入高压加热器，开足下汽缸疏水门；安装或大修时，下缸应采用优质保温材料，或增厚下缸保温层；另外，还可在下缸装设挡风板，减小运行平台之下的冷风对下缸的冷却。

2. 汽缸法兰内外壁温差引起的热变形

大容量中间再热汽轮机高、中压缸的水平法兰厚度约为汽缸壁厚度的 4 倍。因此启动时，在法兰内、外壁会出现较大的温差，当法兰内、外壁温差过大时，将引起法兰水平方向和垂直方向的变形。

(1) 法兰在水平方向的变形。启动时，法兰内壁温度高于外壁温度，使法兰内壁金属的伸长大于外壁，从而使法兰在水平方向将产生如图 1-2 (a) 所示的热变形。法兰的这种热变形，使得汽缸中部截面 A-A 由圆变为立椭圆，如图 1-2 (b) 所示；而汽缸前后端部截面 B-B 由圆变为横椭圆，如图 1-2 (c) 所示。前者引起汽缸左、右径向间隙减小，后者引起汽

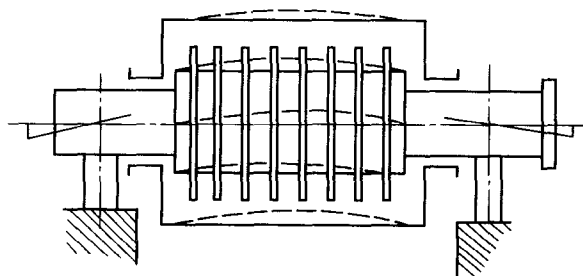


图 1-1 上、下温差造成汽缸向上弯曲的示意图