



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

单元机组集控运行

张磊 主编

张立华 刘玉文 副主编

行业
精品

★ 本书配课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

单元机组集控运行

主 编 张 磊
副主编 张立华 刘玉文
编 写 丁 超 王 琳 由 静 片秀红
纪恩庆 孙永福 孙立民 张东风
张卫军 薛马峰
主 审 章德龙



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书以大型直流锅炉发电机组为主,讲述了火力发电机组集控运行的基本知识,同时也介绍了自然循环锅炉和循环流化床锅炉的集控运行。本书内容涵盖了现代大型火力发电厂运行技术各个方面的问题,全书共七章,主要内容包括:单元机组的启动和停运、单元机组的试验、单元机组的运行调节、单元机组的控制、单元机组经济运行与优化、单元机组的事故与热工保护、火电厂主要系统及工作流程介绍。

本书可作为普通高等院校本科能源与动力工程专业的教材,也可作为高职高专电力技术类相关专业教材和仿真培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

单元机组集控运行/张磊主编. —北京:中国电力出版社, 2012.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3618-6

I. ①单… II. ①张… III. ①火电厂—单元机组—集中控制—高等学校—教材 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第245474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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013年2月第一版 2013年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 408千字

定价 30.00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

编 委 会

主 任 李勤道

副主任 彭德振

成 员 (按姓氏笔画排序)

丁 超 片秀红 王 琳 由 静

刘玉文 孙永福 孙立民 纪恩庆

张卫军 张东风 张立华 张 磊

杨志勇 薛马峰

前 言

环境和能源是关系到 21 世纪可持续发展的重要战略问题，节约环保已成为全世界人民的共同愿望和强烈呼声。我国能源结构以火电为主，火力发电厂主要是利用煤作为燃料生产电能的工厂，它的基本生产过程是：燃料在锅炉中燃烧将水加热使之成为蒸汽，将燃料的化学能转变成蒸汽的热能；蒸汽推动汽轮机旋转，使热能转换成机械能；汽轮机带动发电机旋转，将机械能转变成电能。

发展大容量、高参数火电机组是当今世界和我国火电发展的重要趋势之一，是发电行业为适应节约环保的要求，提高能源利用效率，提高火力发电设备的可靠性和经济性的必然选择，因而建设超（超）临界压力机组是现阶段提高煤电效率、降低单位发电量污染物排放最有效的手段之一。本教材正是应此要求编写而成的。

本书讲述了火力发电厂最先进的运行技术——一体化运行控制技术、优化运行理念、低氧化氮燃烧器运行调整、电袋除尘运行、脱硫系统运行、氧化皮脱落引起的受热面故障等，同时，加入了火力发电厂实际运行中 600MW 直流锅炉发电机组的主要系统图及系统流程，这是“单元机组集控运行”课程的一个新特点，能有效地缩短课堂理论教学 and 实际应用的差距。本书配备教学课件，方便教学。

本书由国网技术学院张磊主编，张立华和刘玉文副主编，参加编写的人员（按姓氏笔画排序）还有丁超、王琳、由静、片秀红、纪恩庆、孙永福、孙立民、张东风、张卫军、薛马峰，华电国际邹县发电厂运行专工杨志勇对火电厂系统流程进行了认真的审核，确保了系统图工作流程的正确性。本书由张磊和张立华统稿，上海电力学院章德龙教授主审，主审老师对本书提出了很多建议，在此表示衷心的感谢。

编 者

2012 年 11 月

目 录

前言

第一章 单元机组的启动和停运	1
第一节 单元机组启停概述	1
第二节 辅助设备及系统启动	13
第三节 单元机组的启动	33
第四节 600MW 超临界压力单元机组的停运	44
第五节 汽包锅炉机组启、停特性和受热面保护	52
第六节 机组停运后的维护保养	56
第二章 单元机组的试验	60
第一节 锅炉机组试验	60
第二节 汽轮机组试验	71
第三节 电气试验	77
第四节 机组大连锁试验	82
复习思考题	84
第三章 单元机组的运行调节	85
第一节 直流锅炉的动态特性	85
第二节 直流锅炉的运行调节	87
第三节 其他形式锅炉的运行调节	106
第四节 汽轮机的运行监视	112
第五节 电气的运行监视	121
复习思考题	125
第四章 单元机组的控制	126
第一节 单元机组的协调控制	126
第二节 DEH 控制系统	143
第三节 分散控制系统	147
第四节 单元机组一体化控制介绍	158
第五节 辅助系统控制	165
复习思考题	167
第五章 单元机组经济运行与优化	169
第一节 单元机组运行经济性及其影响因素	169
第二节 单元机组的经济调度	176
第三节 单元机组的调峰及变压运行	179
第四节 单元机组的变工况	184
第五节 火电机组运行优化	188

复习思考题	197
第六章 单元机组的事故与热工保护	198
第一节 锅炉事故	198
第二节 汽轮机事故	214
第三节 发电机—变压器组系统故障	217
第四节 单元机组的热工保护	219
复习思考题	228
第七章 火电厂主要系统及工作流程介绍	230
第一节 汽轮机系统介绍	230
第二节 锅炉系统介绍	250
第三节 电气系统流程介绍	257
参考文献	260

第一章 单元机组的启动和停运

第一节 单元机组启停概述

单元机组启动是指从锅炉点火、升温升压、暖管到锅炉出口蒸汽参数达到要求开始冲转汽轮机，将汽轮机由静止状态升速至额定转速，发电机并网带初负荷直至逐渐带到额定负荷的全过程。停运是启动的逆过程，是指从带负荷运行状态减负荷，直到负荷减到一定数值后机组解列、汽轮机打闸、锅炉熄火，汽轮机发电机组惰走停转及盘车、锅炉降压和机炉冷却等全过程。

实践证明，单元机组的启、停工作是机组运行过程的一个重要阶段，同时也是机组设备最危险、最不利的过程。很多机组的设备损坏事故就是发生在启、停过程中。有些启、停过程中发生的异常现象，虽未立即造成设备的损坏事故，却对机组的安全运行带来隐患，缩短了设备的使用寿命，因此通过研究单元机组启、停过程中的加热方式和热力特性，找到合理的单元机组启、停方式和方法就非常必要。

合理的启、停方式就是在机组的启停过程中，使机组的各部件得到均匀加热（或冷却），将温差、胀差、热应力和热变形等控制在允许的范围内，并尽可能缩短机组总的启停时间，保证机组的安全可靠并提高机组的经济性。

一、单元机组启动方式分类及特点

单元机组的启动方式一般按照汽轮机的启动方式分类，归纳起来有四种方法。

（一）按新蒸汽参数分类

1. 额定参数启动

在整个启动过程中，从冲转至并网、带满负荷，汽轮机主汽阀前的蒸汽参数（压力、温度）始终维持额定参数，这种启动方式称为额定参数启动。额定参数启动时蒸汽的压力、温度相当高，与汽缸、转子等金属部件的温差很大，而机组启动时又不允许有过大的温升速度。为了设备的安全，需要将进汽量控制得很小，这样节流损失增加，同时汽轮机必须延长升速和暖机的时间，致使经济性降低。汽轮机调节级后温度变化剧烈，零部件受到很大的热冲击，热应力也大，以及各部件受热不均易产生热弯曲，另外，锅炉还需使蒸汽参数达到额定值后，汽轮机才能冲转，延长了启动时间，将损失较多的燃料、降低发电厂的效益，所以额定参数启动仅适用于采用母管制的机组，不适用于单元制的大容量发电机组。

2. 滑参数启动

滑参数启动是指汽轮机主汽阀前的蒸汽参数（如压力、温度）随汽轮机的转速和负荷的升高而升高，直至启动完成，蒸汽参数也达到额定值的启动过程。滑参数启动分真空法和压力法。

真空法滑参数启动是指汽轮机真空只抽到高压主汽阀，冲转参数选用适当压力和温度的过热蒸汽（过热度不小于 50°C ），从冲转到汽轮机达额定转速的全过程中蒸汽参数基本维持不变，通过控制汽轮机进汽量来控制汽轮机转速；机组并网后，调节阀全开，采用滑压运行升负荷，直至带满负荷。相比于真空法，压力法便于控制转子转速，可避免中、低压部分动

叶的冲蚀。由于压力法启动参数高，故整个启动过程中操作简单、控制方便，但也存在一定的问题，如冲转时蒸汽温度与金属温度的匹配不理想，有一定程度的热冲击，降低了汽轮机的寿命，定速后缸温水平不高，需要在低负荷下长时间暖机等。

滑参数启动克服了额定参数启动时由于蒸汽参数高，对汽轮机部件产生热冲击，进汽流量小，暖机和启动时间长，以及冲转前为了提高蒸汽参数而使锅炉燃料和汽水浪费大等缺点，因此在单元制大容量发电机组启动中得到广泛应用。

(二) 按冲转时进汽方式分类

1. 高、中压缸启动

高、中压缸启动时，蒸汽同时进入高压缸和中压缸冲动转子，这种启动方法对高、中压缸合缸的发电机组，可使分缸处加热均匀，降低热应力，缩短启动时间。

2. 中压缸启动

高压缸不进汽、只向中压缸进汽冲转，待机组达到一定转速或带到一定负荷后，再切换为高、中压缸共同进汽，直至机组带满负荷的启动，这种启动方式称为中压缸启动。

(三) 按控制进汽流量的阀门分类

1. 调节门启动

启动时电动主闸阀和自动主汽门处于全开位置，进入汽轮机的蒸汽流量由调节阀控制。

2. 用自动主汽门预启门启动

启动前汽轮机调节阀全开，用自动主汽门预启门控制蒸汽流量，当自动主汽门预启门全开后，进行主汽门和调节阀切换，即主汽门全开，用调节阀单阀方式控制进汽流量。

(四) 按启动前汽轮机金属温度（内缸或转子表面温度）水平分类（以哈尔滨汽轮机厂 CLN 600-24.2/566/566 为例）

1. 冷态启动

启动前，当汽轮机高压缸调节级汽室的金属温度低于维持汽轮机空转时蒸汽温度，其金属温度在 120°C 以下时，称为冷态启动。

2. 温态启动

金属温度为 $120\sim 415^{\circ}\text{C}$ 时启动称为温态启动。

3. 热态启动

金属温度在 $415\sim 450^{\circ}\text{C}$ 时的启动称为热态启动。

4. 极热态启动

金属温度为 450°C 以上时的启动称为极热态启动。

二、滑参数启停的优点和冲转蒸汽参数的选择

(一) 滑参数启停的优点

现代大容量单元机组均采用滑参数启停。在滑参数启停的整个过程中，蒸汽参数是滑变的（滑升或滑降），这种启停方式的优点表现在以下几方面。

1. 安全可靠性好

滑参数启动时，整个机组的加热过程是从较低参数开始的，因而各部件的受热膨胀比较均匀。对汽包锅炉而言，滑参数启动可使水循环工况得到改善，汽包壁温差减小，过热器冷却条件变好。对汽轮机，开始启动时进入的是低压、低温蒸汽，其容积流量大，容易充满汽轮机，而且流速也可增大，使汽轮机各部件加热均匀而温升平稳，故热应力不均的情况可以

改善,增加了安全可靠,并可延长设备寿命。

滑参数停机时,由于蒸汽流量大,对汽缸冷却较均匀,同样使汽轮机热变形和热应力较小。

2. 经济性高

单元机组滑参数启动时,因主蒸汽管道上所有的阀门全开,减少了节流损失,主蒸汽的热能几乎全部用来暖管、暖机;自锅炉点火至发电机并网发电的时间短,可多发电,辅机耗电也相应减少;锅炉不必向空大量排汽,减少了工质和热量的损失,从而减少了燃料消耗;叶片可以得到清洗,使汽轮机效率得到提高。

单元机组滑参数停机比额定参数停机经济,凝结水可全部回收,余汽、余热可用来发电。

3. 提高设备的利用率和增加运行调度的灵活性

采用滑参数启动,可缩短启动时间,提前并网发电。采用滑参数停机,余汽、余热可被用来发电,同时也缩短了汽轮机的冷却过程,可以提前揭缸,缩短检修工期,增加了设备利用小时数。这样就提高了设备利用率,增加了运行调度的灵活性。

4. 操作简化并易于实现程序控制

在滑参数启、停过程中,汽轮机采用全周进汽,调节阀门处于全开位置,操作调节简单,而且给水加热也可随主机进行滑参数运行,简化了操作。随着计算机技术的应用,整个滑参数启动过程可采用顺序控制系统(SCS),它可以完成对机组自动启停的控制,如对引风机、送风机、给水泵、盘车装置等辅机进行开、关,启、停的程序控制,也可以对常用的阀门和挡板进行顺序控制(遥控)等。

5. 改善发电厂的环境条件

由于减少了蒸汽排放所产生的噪声,故改善了电厂周围的环境。

(二) 冲转时蒸汽参数的选择

滑参数启动要选择好汽轮机冲转的蒸汽参数,这对机组的可靠性和经济性很重要。要掌握好蒸汽与金属的温差,冲转升速后要使锅炉的动态特性与汽轮机的升速相配合,使汽轮机的升速按预定的曲线进行。

汽轮机的启动过程属于不稳定导热过程,在机组冷态启动之前,汽轮机金属温度较低。在蒸汽进入汽轮机后,蒸汽以对流方式将热量传给汽缸内壁和转子外表面,然后再传至汽缸外壁和转子中心。由于金属壁存在热阻,因而在汽缸内外壁之间和转子半径方向将出现温差,温差值与单位时间内蒸汽传给金属的热量 ϕ 成正比,对流换热公式为

$$\phi = kA(t_s - t_m)$$

式中: k 为蒸汽的放热系数; A 为换热面积; $t_s - t_m$ 为蒸汽与金属间的温度差。

当 A 一定时, ϕ 与 k 和 $t_s - t_m$ 成正比。冲转后如果 $t_s - t_m$ 较大,将使金属产生热变形和热应力。启动参数的选择主要是考虑到金属部件的热应力,而热应力的大小主要取决于蒸汽与金属部件之间的温差和放热系数,选择适宜的启动蒸汽温度对汽轮机的合理启动具有决定性的意义。因此,为了减缓冲转时产生的热冲击,减小热应力,要求蒸汽放热系数要小些,而低压过热蒸汽的放热系数 $[k = 58.15 \sim 174.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 较小,它相当于额定参数启动时的1/10。所以冲转时采用低压过热蒸汽,以便与汽轮机金属温度合理匹配。同时,在保证允许的金属温度变化率的条件下,低参数蒸汽将有较大的流量,使得机组可以很快达到

并网带负荷的条件,节约启动时间和启动用燃料。

启动汽压的选择要综合机、炉两方面及旁路系统的因素来考虑,它主要取决于启动汽温。理想的汽温应当是能避免启动初期的热冲击,而在随后的过程中汽温的上升能保证关键零部件的金属(如调节级处汽缸金属)维持某一选定的温升速度。此外,为了保证汽轮机内不致过早出现湿蒸汽区域,一般要求主蒸汽、再热蒸汽有 50°C 以上的过热度。调节阀全开时,可以维持机组并网和带少量负荷。对于中间再热机组、特别是高中压缸合缸的机组,为了防止高中压缸分缸处温度差和热应力过大,再热蒸汽温度不能低于主蒸汽温度 30°C ,当高中压缸同时进汽启动时,应该尽量保证高中压缸进汽量的均衡。

汽轮机启动时的升温 and 升压速度以及转速和负荷的增大速率应该根据零部件金属最大温差、胀差和振动值等因素来决定。这些监视控制指标应严格控制允许的范围以内。

美国GE公司生产的660MW汽轮机的冲转参数选择如下:冷态启动时主蒸汽温度为 304°C ,主蒸汽压力为 6.89MPa 。热态启动时主蒸汽温度为 454°C ,主蒸汽压力为 8.27MPa 。法国阿尔斯通公司(ALSTHOM)生产的600MW亚临界压力机组冷态启动时,冲转参数:主蒸汽温度 410°C (最高不超过 440°C),主蒸汽压力 4.6MPa ,再热蒸汽温度 $320\sim 380^{\circ}\text{C}$ (最高不超过 430°C),再热蒸汽压力 1.6MPa 。

三、中压缸启动的特点

(一) 中压缸启动的设计依据及系统配置

1. 启动程序要遵循的准则

- (1) 尽量简化汽轮机的操作程序。
- (2) 尽量降低汽轮机受到的热冲击程度,降低热疲劳消耗。
- (3) 能够快速启动带负荷。

利用高、低压旁路系统直接从中压缸启动汽轮机的办法,可以较好地符合上述准则,这也是世界上许多大公司的成熟经验。

2. 中压缸启动汽轮机的典型系统配置

为实现汽轮机的中压缸启动,热力管道布置与常规电厂不同,图1-1画出了邹县电厂600MW汽轮机的系统配置图。

(1) 高、低压旁路系统的作用。大型汽轮机的热惯性远远大于锅炉。锅炉的冷却速度较快,这是因为用于热交换的传热面积很大,在重新启动前还必须放水排污。600MW汽轮机达到完全冷却大约需要7天时间,锅炉的冷却只要50h左右即可,而这时的汽轮机缸温仍可达 350°C 左右。因此,短时停运后接着再启动,转子和汽缸仍然处于热态,这时汽轮机在启动期间必须供给温度较高的蒸汽,目的是不使汽轮机冷却。

采用高、低压旁路系统后既满足了汽轮机对汽温的要求,又保护了再热器,同时使锅炉的燃烧调整变得相当灵活。

(2) 高压缸抽真空阀(VV阀,又称通风阀)的作用。高压缸抽真空阀在汽轮机负荷达到一定值、完全切断高压缸进汽流量之前用于对高压缸排真空,以防止高压缸末级因鼓风而发热损坏。在冲转及低负荷运行期间切断高压缸进汽以增加中、低压缸的进汽量,有利于中压缸的加热和低压缸末级叶片的冷却,同时也有利于提高再热蒸汽压力,因为再热蒸汽压力过低将无法保证锅炉的蒸发量,从而无法达到所需要的汽温参数。

(3) BDV阀(紧急排放阀)的作用。高压缸和中压缸之间没有轴承,蒸汽通过转子轴

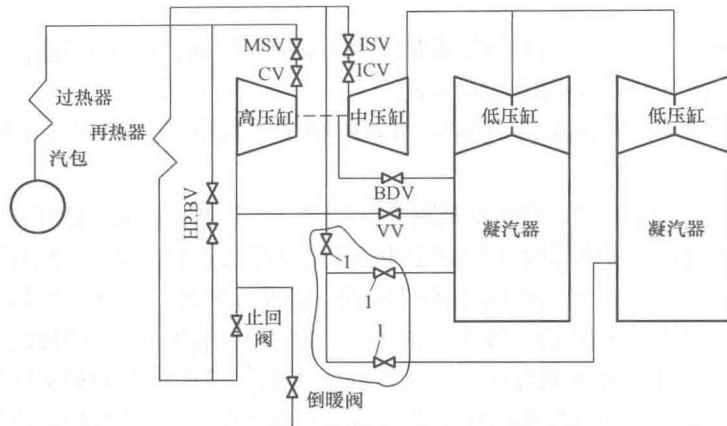


图 1-1 典型机组的启动旁路系统

MSV—高压主汽门；ISV—中压主汽门；CV—高压调速汽门；ICV—中压调速汽门；VV—高压缸抽真空阀；BDV—紧急排放阀；HP. BV—高压旁路阀
1—低压旁路阀

封部件和密封部件相通。当汽轮机带负荷跳闸后，高中压主汽门、调速汽门快速关闭，切断汽轮机进汽以防超速。但是由于中低压部分已是真空状态，积存在高压缸内的高温高压蒸汽会通过高中压缸间的轴封泄漏，继续膨胀做功，从而引起超速。为防止这种情况发生，安装了一个气动卸荷阀（BDV），当中压调节阀关闭时开启，将大部分泄漏的蒸汽直接引至凝汽器。

BDV 由一个气源门控制，自动动作。该卸荷阀为提升式蒸汽阀门，内有一个弹簧开启式活塞，活塞上部通有压缩空气，克服弹簧力使阀门严密关闭。当气压失去时，该阀内部同轴安装的小旁通首先开启 10mm，以建立门后压力，这样，阀门会容易开启，把高压蒸汽引入凝汽器。

(4) 高压缸倒暖阀的作用（又称高压缸排汽止回阀的旁路阀）及高压缸的预热。暖缸阀是在冷态启动时用于加热高压缸的进汽隔离阀。在汽轮机冲转启动的第一阶段，中压缸内的蒸汽压力很低，因此热量的传递也很慢。在这一阶段，中压转子和汽缸的温度上升较慢，因此尽管蒸汽和金属之间有温差，也不会产生过高的应力。

汽轮机高压缸的情况则不同，由于再热器压力已调整到一定的数值，所以蒸汽一进入汽缸，汽缸内的压力就升高了，为此，高压缸在进汽前必须先经过预热。

在启动的最初阶段，当锅炉出口蒸汽达到一定温度时，就可以进行汽轮机的预热。为了使蒸汽能进入高压缸，就需打开暖缸阀。此时，高压缸内的压力将和再热器的压力同时上升，高压缸金属温度将上升到相应于再热汽压力的饱和温度。运行实践证明，当机组汽温汽压具备冲转条件时，高压缸的预热正好或早已结束。由于高压缸暖缸过程的电动阀控制是自动的，且当机组冲转时高压缸暖缸已经结束，这就产生了用中压缸启动机组的又一优点，即无论是冷态还是热态启动，对运行人员的操作程序和步骤总是相同的。

(二) 中压缸启动的优点

利用旁路并向中压缸进汽来启动汽轮机的方法其优越性可概括如下：

(1) 在启动初期能保持高的再热器压力，因此它允许使用较小的旁路管道而达到所需要

的流量。

(2) 使用的蒸汽流量大, 锅炉可以维持在稳定的工况下运行, 同时能供应足够高的蒸汽温度, 因而就能与汽轮机的金属温度相匹配。

(3) 可避免高压缸在低流量下运行, 因而减少了高压缸第一级和高压缸排汽口处的热冲击。

(4) 由于在低负荷运行时, 高压缸被隔离且处于真空状态, 因此, 机组可以实现连续带厂用电运行或额定转速下空负荷运行而不受时间限制, 但凝汽器的真空须维持在一个适当值。

(5) 缩短启动时间。由于汽轮机冲转前对高压缸进行倒暖, 这样, 在启动初期启动速度不受高压缸热应力和胀差的限制。另外, 由于高压缸不进汽做功, 在同样的情况下, 进入中压缸的蒸汽流量大, 暖机更加充分迅速, 从而缩短了整个启动过程的启动时间。

(6) 汽缸加热均匀。中压缸启动时, 高中压缸加热均匀, 温升合理, 汽缸容易膨胀, 胀差小。与常规的高中压缸联合启动相比, 虽然多了一个切换操作, 但从整体上可提高启动的安全性和灵活性。

(7) 提前越过脆性转变温度。中压缸启动时, 高压缸倒暖, 启动期间中压缸进汽量大, 这样可使高压转子和中压转子尽早越过脆性转变温度, 提高了机组高转速运转的安全可靠性。

(8) 对特殊工况具有良好的适应性。该优点主要体现在空负荷和低负荷运行方面。机组启动并网过程中, 有时遇到故障等待处理, 或在并网前进行电气试验时, 就常常遇到要在额定转速下长时间空负荷运行的情况。在采用高、中压缸联合启动的传统方法时, 即使是冷态启动, 也会带来很多问题, 比如高压缸超温。然而采用中压缸启动方式, 只要关闭高压缸排汽止回阀门, 维持高压缸真空, 汽轮机就可安全地长时间空负荷运行。同样采用中压缸进汽方式, 只要打开旁路, 隔离高压缸, 汽轮机就能在很低的负荷下长时间运行。在单机带厂用电的情况下, 也可以采用该方式运行, 这样, 一旦事故排除后, 就能迅速重新带负荷。

(9) 抑制低压缸尾部温度水平。采用中压缸进汽, 启动初期流经低压缸的蒸汽流量较大, 这样就能更有效地带走低压缸尾部由于鼓风产生的热量, 保持低压缸尾部温度在较低的水平。

四、单元机组启动过程的热力特性

在启、停过程中, 锅炉、汽轮机各部件与工质温度不断变化, 故也是一个不稳定的过程, 工况极为复杂, 各部件的温度和承受的压力在启停中变化很大, 因此产生热应力、热变形和热膨胀, 特别是大容量高参数单元机组, 由于体积庞大、结构复杂, 各受热面、汽缸、转子、法兰等所处条件不同, 火焰及工质对它们的加热或冷却速度不同, 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, 温差会导致膨胀或收缩不均, 因而产生热应力, 当热应力超过材料的许用应力时, 会使部件产生裂纹乃至损坏。汽轮机转子比汽缸“质面比”大, 又是高速旋转的, 因而在汽缸和转子之间易出现膨胀差(即胀差), 使汽轮机本来很小的动静间隙进一步减小, 甚至会发生碰摩。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之中, 有些启停中的问题即使当时未造成设备事故, 但却会产生不良后果, 留下隐患, 降低设备的使用寿命。

(一) 直流锅炉热应力特点及受热面的保护

1. 直流锅炉热应力特点

直流锅炉蒸发管出口往往是饱和蒸汽, 甚至是微过热蒸汽, 故管内发生膜态沸腾和结垢

的可能性较大。强迫流动的特性常导致并列蒸发管中吸热越多的管子，其工质流量反而越小。

目前的螺旋管圈水冷壁采用整焊膜式水冷壁，各个管带均匀地分布于炉膛四周，在同一高度上的管带受热几乎一样，相邻管带之间外侧管壁温差较小（ 30°C ）。由于各管带皆为倾斜上升，从而避免了拉姆辛管圈水平部分的较易发生的汽水分层现象。同时，低负荷时采用锅水循环泵，建立锅水再循环，保证水冷壁的最小启动流量，从而有效地降低了水冷壁管的金属温度，保证了安全可靠运行。

直流锅炉没有汽包，因此和汽包锅炉相比其金属壁较薄，在启、停过程中要注意以下几点：

(1) 机组并网前应严格控制炉膛出口烟温小于 530°C 。控制主、再热蒸汽温度变化率在低于 100°C 时不超过 $1.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，汽轮机冲转前不超过 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

(2) 控制螺旋管圈水冷壁管出口管壁温度不超过 410°C ，垂直管圈水冷壁管出口管壁温度不超过 430°C 。锅炉金属温差不超限，屏相邻单管间的管壁温差不超过 50°C 。

(3) 储水箱内外壁温差限制在 25°C 以内，内壁金属温度变化率限制在 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，超过以上限制值，应通过控制投入的油枪数量来控制升温升压速度。

2. 锅炉受热面的保护

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不大。在启动过程中，情况就与此大不相同。在冷炉启动之前，屏式过热器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，但在积水全部被蒸发以前，某些管内就没有蒸汽流过，管壁金属温度接近烟气温度。即使过热器内已完全没有积水，如蒸汽流量很小，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 $10\% \sim 15\%$ 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）。另外，还可使用喷水减温方法，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。

燃烧调整方面应注意两个问题：一是合理安排燃烧器的投入顺序，控制锅炉的左、右侧烟温差不超过 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，以避免过热器个别管子超温；二是增投燃料量应谨慎、缓慢。因为启动过程中锅炉利用热量的相当一部分是用于加热水冷壁、炉墙和受热面金属的。燃烧率增加过快时，烟量、烟温几乎立即增加，而水冷壁蒸发量的增加相对较慢，因而使过热汽温暂时升高。不仅如此，由于动态过程中管子壁温随烟量、烟温很快增加，也使壁温和工质温度的差值增大。

启动初期过热器系统的各级疏水阀开启。过热器的各级疏水主要用于疏去积水，待积水疏尽后应及时关闭，避免蒸汽短路降低了对受热面的冷却能力，使过热器超温。过热器冷却所必需的蒸汽流量，靠开启高、低压旁路门维持。

启动过程中，再热器的安全主要与旁路系统的形式、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。对于采用二级串联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站流入再热器，然后经低压旁路站流入凝汽器，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，因而应严格控制再热器前的烟温，有的锅炉可使用烟气旁路来控制进入再热器的

烟气量。另外，为控制进入再热器的烟温，在条件允许时，汽轮机的冲转参数宜选低一些。

对于再热器，启动初期也要放气和尽可能地彻底疏水。管束内的积水在点火以后也会逐渐蒸发，当凝汽器开始抽真空时，所有的放气门和疏水门都必须关闭，而从高、低温段再热器管通往凝汽器的疏水阀都应继续开启，直到机组带上初负荷时方能关闭。某些引进的600MW机组的锅炉，其再热器设计是可以干烧的，只要控制炉膛出口烟温在500℃以下，即使再热器内没有蒸汽流过，再热器仍然是安全的，这样的机组同样设置高、低压旁路系统，主要为再热器的启动和事故的应对提供可靠的保护措施。

此外，过热器和再热器升温过快时，不但会增大厚壁元件的热应力，而且不利于积水的蒸发，加剧了过热器和再热器管间加热的不均匀性。因此，过热器和再热器在启动过程中应尽可能均匀地加热，加热过程中可通过监视过热器和再热器出口管的金属壁温，检查其加热的均匀性。

(二) 汽轮机部件的热应力、热膨胀和热变形

1. 热应力

汽轮机在启动、停机和变工况运行中，由于蒸汽与金属各部件的传热条件不同，以及汽缸和转子等部件的材料结构、导热系数、导热时间等不同因素，使得上下缸之间、汽缸内外壁、汽缸和法兰之间、转子表面与转子中心等产生温差，由于温差导致的膨胀不均，使汽轮机部件内部产生热应力。

因为温度不均引起的零部件的变形称为热变形。热变形受到约束时在物体内部会产生应力，这种由于温度不同使物体产生的内应力，称为热应力。如果部件内部温度不均匀，即使部件没有受到约束，在部件内部也会产生热应力，也就是说温度高的部分膨胀量大，温度低的部分膨胀量相对较小，它们的相互作用就使温度低的部分产生拉应力、温度高的部分承受压应力。由此可知，当物体内部温度变化时，由于其不能自由伸缩或物体内部彼此约束而产生热应力。引起热应力的根本原因是在温度变化时，物体变形受到约束。

2. 汽轮机启、停及变工况时的热应力

汽轮机启停和变工况运行时，各金属部件的温度或者部件内部的温度不同，其热应力水平也不相同，温差越大，热应力就越大，但是无论机组是在启动、停机，还是变工况运行时，最大应力的部位均为高压缸调节级处、再热机组中压缸进汽区、缸体内外缸壁面、法兰中分面及其内外壁面、法兰螺栓等处。

在启动过程中，汽缸应力变化过程为：冷态启动，在开始冲转时，由于蒸汽和金属温度相差较大，造成热冲击，使汽轮机各部位的热应力增加到很高；热态启动时，蒸汽很可能低于汽缸金属温度，特别是大型汽轮机组以及极热态启动时，很难达到金属要求的蒸汽温度，这样就使得汽缸先冷却后加热，使汽缸热应力产生一个交变过程，严重影响汽轮机组的寿命。

从汽缸的角度考虑，在启动过程中要注意以下几个方面：①冲转蒸汽温度与汽缸初始温度相匹配。②充分暖机。在汽缸温度较低时，暖机过程可以降低热应力水平。③控制蒸汽温升率。

汽轮机转子热应力是限制汽轮机启动速度和保证安全运行的重要指标之一。在启停过程中，随着蒸汽温度的变化，转子将产生很大热应力。冷态启动时，蒸汽进入汽缸对汽缸和转子进行加热。对于转子，由于是高速转动，其换热系数大，使转子外表面的温度上升很快，

可是转子中心处要靠导热将热量由外壁传入，中心温度要滞后于转子表面的温度，因而转子内外的温差很大，转子表面产生压应力、中心则产生拉应力，故现代大型汽轮机都把模拟测量的中心温度作为启动过程中的重要判据。

停机是对零部件的冷却过程，随着蒸汽温度的降低和流量的减小，汽缸内壁和转子表面被冷却，而外缸壁和转子中心处的温度变化稍滞后些，使得汽缸内壁温度低于外壁，转子表面温度低于中心处，热应力与启动时正好相反，汽缸内壁和转子表面产生拉应力，汽缸外壁和转子中心则产生压应力。

现代大型汽轮机在启停或负荷变化时，主要以监视转子的热应力来判断汽轮机组整个热应力水平，同时确定发电机组启停的速度，其主要原因是在启停和变工况下，转子的热应力要大于汽缸的热应力。

(1) 转子是高速旋转的，其换热系数远远大于汽缸的换热系数，同时现代大型汽轮机转子的直径增大很多，转子的半径已超过了汽缸内外壁的厚度，故转子表面和中心的温差要大于汽缸内外壁的温差。

(2) 转子和汽缸分别承受着两种应力，一种是热应力，另一种是工作应力。汽缸的工作应力是蒸汽的压力，而转子的的工作应力是转动时产生的离心力，这种转子的离心力要远远大于蒸汽对汽缸的压力。

3. 热冲击

热冲击是指蒸汽与汽缸与转子等部件之间在短时间内进行大量的热交换，金属部件内温差迅速增大，热应力增大，甚至超过材料的屈服极限，严重时，一次大的热冲击就能造成部件的损坏；汽轮机部件受到热冲击时产生的热应力取决于蒸汽和部件表面的温差和蒸汽的放热系数。造成汽轮机热冲击的主要原因有以下几种：

(1) 启动时蒸汽温度与金属温度不匹配。启动时，为了保证汽缸、转子等金属部件有一定的温升速度，要求蒸汽温度高于金属温度，且两者应当匹配，相差太大就会对金属部件产生热冲击。

(2) 极热态启动造成的热冲击。由于保护误动或机组出现小故障可能造成汽轮机短时间事故停机，如果在 2~4h 内汽轮机重新启动，此时高压缸调节级处金属温度极高，可达 450℃ 左右，由于启动时不可能把蒸汽温度提高至额定值或提高蒸汽温度所需时间太长，往往在参数相对较低时即启动。蒸汽经过汽门节流、喷嘴降压后，到调节级汽室时温度比该处金属温度低很多，因而在汽轮机转子和汽缸内产生较大的热应力。启动初期，由于存在负温差匹配，转子表面产生拉应力，经过一段时间后，蒸汽温度高于金属温度，转子表面又产生了压应力。因此，经过了一个热态启动过程，汽轮机转子将经受一次较大的拉—压应力循环，这对汽轮机的安全性是极为不利的，故应尽量减少极热态启动次数。在极热态启动时，尽可能提高蒸汽温度，加强启动前的暖管暖阀，并在启动初期，尽快提高汽轮机负荷，加速蒸汽温度与金属温度的匹配，减轻热冲击。

(3) 甩负荷造成的热冲击。汽轮机在稳定工况运行时，如果发生大幅度的甩负荷工况，则由于汽轮机通流部分蒸汽温度的急剧变化，在转子和汽缸上产生很大的热应力。负荷越大，甩负荷后引起的热应力就越大，但机组甩掉全部负荷（至空转）所产生的热应力比甩掉部分负荷（带厂用电）还要小，因为甩掉部分负荷后，调节级后较大流量的低温蒸汽流过汽轮机通流部分，造成转子和汽缸的急剧冷却，从而产生很大的热应力，而甩掉全部负荷后，

虽然蒸汽温度下降很多，但由于流量很小，蒸汽很快被金属释放的蓄热加热，因此对转子和汽缸冷却作用较小，产生的热应力也较小，但甩负荷后长时间在空负荷状态下运行也会引起较大的热应力。因此，大部分汽轮机厂家对甩负荷带厂用电及甩负荷空转工况要进行严格的时间限制，有的甚至不允许甩负荷带厂用电工况。

4. 汽轮机的热膨胀

(1) 汽轮机的绝对热膨胀。汽轮机从冷态启动到带额定负荷运行，金属温度显著升高，汽轮机的汽缸在各个方向的尺寸都明显增大，这也就是汽缸的热膨胀。汽缸膨胀是否正常直接影响着发电机组的启动速度及正常运行，而滑销系统的合理布置和应用，正是为了满足汽缸在各方向上的自由膨胀的要求，以及保证汽轮机、发电机等部件的相对位置不发生变化及各轴承座与转子的中心一致而设立的。这样也保证了发电机组不会因膨胀不均匀而产生较大的应力和振动。滑销系统包括横销、纵销、立销、角销和斜销。横销只允许轴承座横向膨胀。纵销只允许轴承座纵向膨胀。在汽轮机汽缸和轴承座之间设有立销，立销仅仅允许汽缸在垂直方向膨胀，使汽缸中心与轴承中心在同一纵分面上，保证转子和汽缸中心一致。如果分别通过横销与纵销作两直线，它们的交点既不能纵向膨胀，也不能横向膨胀，这称为汽缸膨胀死点。死点在任何工况下是固定不变的，是汽缸纵向膨胀和横向膨胀的原点。在汽缸膨胀的同时，转子也在以推力盘为相对死点沿着轴向进行膨胀，只不过膨胀的量与汽缸的轴向膨胀不一定相同。

汽轮机启动时，汽缸膨胀的数值取决于汽缸本身的长度、质量以及加热速度等因素。汽缸沿轴向尺寸（长度）最大，汽缸在轴向膨胀的数值也最大，故在启动时应重点监视汽缸的轴向膨胀。在严密监视汽缸绝对膨胀值的同时，对汽缸的左右两侧膨胀也要注意监视，确保汽缸在横向与轴向的膨胀均正常。如发现汽缸膨胀有跳跃式的增加（或减小）时，说明滑销系统或轴承座台板的滑动面可能有卡涩现象，必须停止启动，待查明原因并予以消除后，再重新启动汽轮机。

对于汽缸的膨胀，运行值班人员必须熟知发电机组滑销系统及其布置情况，以及汽缸的死点。在各种工况（启动状态）下，汽缸的膨胀量以及汽轮机各部位的膨胀方向，在任何时候都要确保汽缸的膨胀自由，否则，将会产生汽轮机组中心的偏移，发生动静部分摩擦并使机组振动增大。

(2) 汽缸和转子的相对膨胀。在启动、停机及变工况中，汽缸和转子分别以各自的死点向各个方向进行膨胀。可是由于蒸汽流经转子和汽缸的相应截面的温度不同，汽缸和转子的质量不同、工作条件也不相同等原因，使得汽缸和转子存在较大的温差，互相之间存在着膨胀及膨胀差。如转子的膨胀大于汽缸的膨胀，其两者的膨胀差值为正值，称为正胀差；反之，转子的膨胀小于汽缸的膨胀，称为负胀差。在发电机组启动阶段或正常运行增负荷时，转子的加热先于汽缸，则出现胀差正值；在停机或减负荷时，转子收缩先于汽缸，出现胀差负值。由于汽轮机各级动叶片的出汽侧轴向间隙大于进汽侧的轴向间隙，故允许的正胀差大于负胀差，在变工况及停机过程中，严禁出现较大的负胀差。

稳定工况下汽缸和转子的温度趋于稳定值，都接近同级的蒸汽温度，相对胀差也趋于一个定值，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，