

DIANLI

电力行业继续教育培训教材

电厂汽轮机 运行与事故处理

付忠广 编著

DIANCHANG QILUNJI
YUNXING YU SHIGU CHULI



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力行业继续教育培训教材

光纤通信技术及其在电力系统中的应用

电力系统继电保护原理与实用技术

● 电厂汽轮机运行与事故处理

火电厂锅炉运行及事故处理



ISBN 978-7-5083-5519-1



9 787508 355191 >

定价：29.00 元

销售分类建议：动力工程

8-8

电力行业继续教育培训教材

电厂汽轮机 运行与事故处理

付忠广 编著

DIANCHANG QILUNJI
YUNXING YU SHIGU CHULI



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《电力行业继续教育培训教材》，涵盖了现代大型火力发电厂汽轮机运行技术各个方面的问题。包括汽轮机启动与停机、汽轮机启停中的安全问题、汽轮机组的调峰运行、汽轮机组运行在线监测与诊断、汽轮发电机组振动、汽轮机运行事故预防与处理、汽轮机辅助设备故障与预防、汽轮机运行危险点分析预控、运行管理和 SIS 系统等。

本书注重于理论的提高，新知识和新技术的拓宽。本书可供火电厂、核电站运行管理人员以及相关领域的专业人员阅读参考，也可供相关专业高年级本科生、研究生学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂汽轮机运行与事故处理/付忠广编著. —北京: 中国电力出版社, 2007

电力行业继续教育培训教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5519 - 1

I. 电… II. 付… III. ①火电厂 - 汽轮机运行 - 技术培训 - 教材②火电厂 - 蒸汽透平 - 事故 - 处理 - 技术培训 - 教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 061796 号

中国电力出版社出版、发行

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

利森达印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 18.625 印张 421 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

前 言

本书是《电力行业继续教育培训教材》中的一本，是为适应现代大型火力发电厂技术人员再培训的需要而编写的。本书注重于理论知识的提高，新知识和新技术的拓宽，以帮助读者解决汽轮机运行中的各种技术问题。

现代大型火力发电厂汽轮机运行技术涉及面广，新技术多，而且理论深度较深。随着电力行业的发展，企业对提高技术人员的专业素质和专业技术水平越来越重视。针对电力行业相关专业技术人员继续教育的培训需求，在本书的编写过程中，注意到知识的系统性、全面性。本书系统地介绍了火电厂汽轮机运行中可能遇到的各类问题，包括：汽轮机启动与停机、汽轮机启停中的安全问题、汽轮机组的调峰运行、汽轮机组运行在线监测与诊断、汽轮发电机组振动、汽轮机运行事故预防与处理、汽轮机辅助设备故障与预防、汽轮机运行危险点分析预控、运行管理和 SIS 系统等十章内容。

本书内容与电力生产实际结合密切，力求理论联系实际、深入浅出、通俗易懂。内容编排上注意理论与实际并重，学术性与普及性合理结合，尽量使它对更广泛范围的技术人员都有阅读参考价值，以拥有更大的读者范围。通过本书的学习，可拓宽电力行业相关专业技术人员的专业知识面和视野。

本书可供火电厂、核电站运行管理人员以及相关领域的专业人员阅读参考，也可供相关专业高年级本科生、高职高专学生以及研究生学习、了解汽轮机运行及事故处理方面的新知识、新技术。

本书由华北电力大学付忠广教授编撰。在编撰的过程中，硕士研究生王同宇、付玲、焦润平和刘其良在资料收集与整理过程中，硕士研究生王志鹏在后期书稿整理过程中做了大量工作，在此表示感谢。

本书希望对读者拓宽基础、开阔视野、增强能力、提高素质和水平有所帮助。限于编者的水平，疏漏之处在所难免，敬请读者指正。

编者于华北电力大学

2007年4月

目 录

前言

第一章 汽轮机启动与停机	1
第一节 启动状态的划分.....	1
第二节 冷态滑参数启动.....	4
第三节 热态启动	15
第四节 中压缸启动	17
第五节 汽轮机停机	22
第六节 转子惰走及盘车	27
第七节 停机后的维护与保养	29
第八节 汽轮机的快速冷却	30
第二章 汽轮机启停中的安全问题	36
第一节 FATT	36
第二节 热应力	37
第三节 热膨胀	44
第四节 热变形	51
第五节 寿命管理	55
第三章 汽轮机组的调峰运行	62
第一节 汽轮机运行方式	62
第二节 汽轮机的调峰运行	70
第三节 驱动给水泵汽轮机的变工况运行	80
第四节 开展机组运行优化管理、降低能耗	89
第四章 汽轮机组运行在线监测与诊断	93
第一节 机组运行经济性分析	93
第二节 机组热应力与寿命损耗在线监测.....	101
第三节 机组运行故障诊断技术.....	105
第五章 汽轮发电机组振动	116
第一节 振动概述.....	116

第二节	轴系弯曲振动	119
第三节	轴系扭转振动	131
第四节	机组振动标准	139
第五节	机组振动故障诊断及处理	147
第六章	汽轮机运行事故预防与处理	170
第一节	汽轮机进冷汽、进水	170
第二节	汽轮机大轴弯曲	173
第三节	汽轮机大轴断裂	179
第四节	油系统火灾	194
第五节	油系统及轴承事故	197
第六节	调节系统及油系统出现的故障	200
第七节	轴承座轴向振动机理及原因	202
第八节	通流部分事故	206
第七章	汽轮机辅助设备故障与预防	218
第一节	除氧器爆破事故与预防	218
第二节	加热器泄漏	223
第三节	凝汽器真空恶化	230
第四节	给水泵汽蚀故障	237
第五节	调节汽门故障	243
第八章	汽轮机运行危险点分析预控	249
第一节	危险点含义及特点	249
第二节	危险点与事故	252
第三节	危险点分析方法	259
第四节	汽轮机运行危险点控制措施	263
第九章	运行管理	271
第一节	运行管理目标	271
第二节	运行管理措施	273
第三节	运行人员培训	275
第十章	SIS 系统	278
第一节	SIS 系统简介	278
第二节	SIS 系统案例一	284
第三节	SIS 系统案例二	286
第四节	SIS 发展形势	288
参考文献		290

第一章 汽轮机启动与停机

汽轮机的启动，是指汽轮机从静止状态过渡到额定转速，并逐渐加负荷到额定负荷的特定过程。在启动过程中，随着进汽量的增加和时间的推移，汽轮机的转子、汽缸等部件将由常温（或更高温度）状态加热到带对应负荷的温度状态，汽轮机通流各部分也将由大气压力逐渐变为真空及与负荷对应的压力。停机则是一个相反的过程，即使汽轮机从带负荷正常运转的状态过渡到静止状态，汽轮机各部件逐渐冷却，通流各部分压力过渡为大气压力。

由上述可知，在启动和停机过程中，汽轮机各部件以及管道的机械状态和热力状态都要产生很大的变化。因此，汽轮机的启、停操作是汽轮机运行中最关键的一项工作，启、停操作的正确与否不仅直接影响到运行的可靠性、经济性，而且会影响到机组的使用寿命。汽轮机运行的经验也表明，大部分设备损伤事故就是由于操作不正确，在启、停过程中发生的。

因此，必须充分掌握汽轮机启、停过程中各主要参数的变化规律，各种可能出现的故障及其对策，了解汽轮机的各种启、停方式以及在特殊条件下的启、停方法。为了准确合理地进行启、停操作，在不少大机组中应用了启、停自动化。本章将对这些问题作简要的论述。

第一节 启动状态的划分

根据机组状态的不同，汽轮机的启动可以分成不同的启动状态。划分启动状态的目的是，为了根据不同的启动状态，来决定汽轮机启动的方式和启动的速度，以获得最快的启动速度和最经济的效果。具体地说，汽轮机划分启动状态具有以下实际意义：

- (1) 根据不同的启动状态决定汽轮机的启动参数。
- (2) 根据不同的启动状态决定汽轮机在启动过程中的暖机时间。
- (3) 根据不同的启动状态决定汽轮机不同的转速变化率。
- (4) 根据不同的启动状态决定汽轮机在启动过程中应注意的问题。

一、按新蒸汽参数分类

根据启动过程中采用的新蒸汽参数，汽轮机启动可以分为两类。

1. 额定参数启动

在整个额定参数启动过程中,从冲转直至汽轮机带额定负荷为止,电动主汽门前的蒸汽参数(压力和温度)始终保持额定值。也就是说,要求锅炉先行启动,当其出口参数达到额定参数后,汽轮机才开始启动。因此,这种启动方式的启动时间长、经济性差、金属部件受热冲击大、热应力大。而这种启动方式的优点是机、炉相互干扰少,所以,一般用于母管制供汽的汽轮机,大容量汽轮机几乎都不采用这种方式启动。

2. 滑参数启动

在启动过程中,电动主汽门前的蒸汽参数(压力和温度)随机组转速或负荷的变化而逐渐升高,称为滑参数启动。对于喷管调节的汽轮机,定速后调节汽门保持全开位置。采用这种方式启动,汽轮机可以充分利用锅炉启动过程中产生的蒸汽进行能量转换,热量和汽水损失较小,经济性好。另外,汽轮机采用这种方式启动时,汽缸和转子受热均匀,热冲击小,可以在保证安全的前提下加快启动速度。机、炉同时启动,可缩短启动时间。它是一种较好的启动方式,目前被国内外大容量机组广泛采用。

根据冲转前主汽门前压力的高低,滑参数启动又可分真空法和压力法两种。

(1) 真空法滑参数启动。在锅炉点火前,从锅炉出口到汽轮机管道上的汽门全部打开后,抽真空直到汽包。锅炉点火后产生的蒸汽冲动转子,随蒸汽参数的逐渐升高,提升转速和带负荷。此启动方式流行于20世纪50~60年代,仅适用于冷态启动,极易产生汽轮机水冲击和金属材料冷脆。但是,近几年又开始作实验,发挥其启动时间短的优势。

(2) 压力法滑参数启动。汽轮机冲转时,主汽门前的蒸汽具有一定的压力和过热度(50℃以上),在升速过程中和低负荷时,采用逐渐开大调节汽门的方法增加进汽量,直至调节汽门全开(或留一个未开)后,保持开度不变。此时增加锅炉负荷,使汽轮机负荷随蒸汽参数的升高而增加。当主汽参数升到额定值时,汽轮机的功率也随之达到额定值。但从既要减慢升温速度,又能缩短启动时间的角度出发,最好采用在汽轮机达到额定功率之后再使蒸汽温度升到额定值的运行方案。

二、按冲转时的进汽方式分类

1. 高、中压缸联合启动

启动时,蒸汽同时进入高压缸和中压缸,并冲动转子的方式称为高、中压缸联合启动。这种启动方式虽然简单,但因冲转前再热蒸汽参数低于主蒸汽参数,中压缸及转子的温升速度减慢,汽缸膨胀迟缓,故延长了启动时间。对于高、中压合缸的汽轮机,可使得分缸处均匀加热,减少热应力。当采用高压缸进汽冲动转子时,还有两种阀门的开启方式:

(1) 调速汽门冲转方式。早期生产的采用液压调节的大机组,冲转后,均采用调速汽门冲转控制转速。这种启动方式可减少蒸汽的节流,但因只有部分调速汽门打开,为部分进汽方式,故第一级焓降较大,调节级汽温较低,汽缸受热不均匀,各部分温差较大。

(2) 主汽门冲转方式。启动前,进入汽轮机的蒸汽流量由自动主汽门预启阀控制,这种启动方式使汽缸在圆周方向受热均匀,到一定负荷时转换为部分进汽控制。大多数进口机组和使用纯电液调节系统的国产机组采用此方式。

2. 中压缸启动

当采用中压缸启动冲动转子时，高压缸不进汽，中压缸先进汽，待转速升至一定转速（2000~2500r/min）后，才逐渐开启高压进汽门，使高压缸进汽。这种启动方式可排除高压缸胀差的干扰；在启动初期，只有中压缸进汽，中压缸可全周进汽；允许负荷变化大而温度变化率与热应力变化较小，故能适应电网调频的要求。为了缩短启动时间，在冷态启动开始时，可打开高压缸排汽止回阀，引入蒸汽进行暖缸。

三、按控制进汽量的汽门分类

1. 用调速汽门启动

当用调速汽门启动时，电动主闸阀和自动主汽门全部开启，进入汽轮机的蒸汽量由调速汽门来控制。这种方式的优点是有益于冲转和控制进汽量，缺点是调速汽门有节流，致使调节级蒸汽室和喷嘴局部受热。

2. 用自动主汽门或电动主汽门的旁路阀启动

启动前，调速汽门全部开启，进入汽轮机的蒸汽量由自动主汽门或电动主汽门的旁路汽门来控制。这种启动方式的优点是调速汽门和调节级蒸汽室能均匀受热，缺点是用自动主汽门或电动主汽门的旁路汽门来节流控制蒸汽流量时，旁路汽门的阀口、阀柄容易因不严密而漏汽，有时自动主汽门还容易发生自动关闭现象。

四、按启动前汽轮机金属温度水平分类

现在，国内外一般都把汽轮机的转子温度作为汽轮机温度的代表。具体测量时，则以汽轮机调节级温度作为转子温度的代表，根据启动前调节级的温度来进行汽轮机启动状态的划分。

- (1) 冷态启动。金属温度低于 150~180℃（对于不同机组），称为冷态启动。
- (2) 温态启动。金属温度为 300~350℃，称为温态启动。
- (3) 热态启动。金属温度为 400~450℃，称为热态启动。
- (4) 极热态启动。金属温度在 420~450℃者，称为极热态启动。

汽轮机采用高、中压缸启动时，按调节级处金属温度划分；中压缸启动时，按中压第一压力级处金属温度划分。对于不同的机组，具体划分温度有所不同，应按制造厂的规定。表 1-1 给出了四种 600MW 汽轮机的启动状态的划分。

表 1-1 国外 600MW 汽轮机启动状态的划分 ℃

启动状态	温度标准	WH 公司	东芝公司	G/A 公司	ABB 公司
冷态	高压缸第一级金属温度	< 121	< 270	≤ 190	< 100
	中压缸第一级金属温度			≤ 150	
温态	高压缸第一级金属温度		270 ~ 350	190 ~ 300	> 100
	中压缸第一级金属温度			150 ~ 290	
热态	高压缸第一级金属温度	> 121	350 ~ 400	300 ~ 430	< 350
	中压缸第一级金属温度			290 ~ 430	
极热态	高压缸第一级金属温度		> 400	> 430	
	中压缸第一级金属温度			> 430	

有的汽轮机制造厂以汽轮机停机时间的长短作为启动状态划分的依据。

(1) 冷态启动。停机超过 72h，金属温度已下降至其额定负荷值的 40% 以下。

(2) 温态启动。停机在 10~72h 之间，金属温度已下降至其额定负荷值的 40%~80% 之间。

(3) 热态启动。停机在 8h 以内，金属温度已下降至其额定负荷的 80%~95% 之间。

(4) 极热态启动。停机在 1h 以内，金属温度仍维持或接近其额定负荷值。

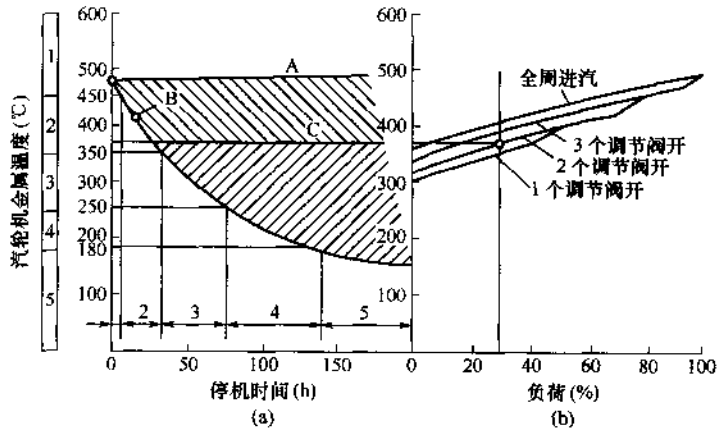


图 1-1 启动前后金属温度对启动的影响

(a) 冷却曲线；(b) 负荷与第一级后汽温（额定蒸汽参数）的关系

1—极热态；2—热态；3—温态Ⅱ；4—温态Ⅰ；5—冷态；

A—额定负荷时的温度；B—汽轮机打闸时金属温度；C—达到目标负荷时温度

图 1-1 表示启动状态、启动前金属温度、启动时间以及第一级后蒸汽温度的关系曲线。其中图 1-1 (a) 表示金属温度与停机时间之间的自然冷却曲线。根据停机时间，可确定启动时的金属温度及应该采用的启动方式。图 1-1 (b) 表示在额定蒸汽参数下，负荷与第一级后蒸汽温度之间的关系。如果此次启动所带负荷已定（如图 1-1 所示，30% 额定负荷），则可从纵坐标中查得欲达到目标负荷时，第一级出口的蒸汽温度约为 370℃。该温度就是这次启动所要达到的金属温度，其与图 1-1 (a) 自然冷却曲线的垂直距离差值，表示这次启动的金属温度升幅值。如果按转子寿命损耗率确定转子金属的温升速度，则可求出从启动到带上给定负荷所需的启动时间。

第二节 冷态滑参数启动

冷态启动是汽轮机各种启动中最重要的启动，是汽轮机最大的动态过程，在冷态启动中机从冷状态到热状态、从静止到额定转速转动、从空负荷到满负荷。这个过程中，各种参数的变化最大，运行人员的操作最多，需要掌握好很多关键问题。不仅关系到汽轮发电机的安全，而且关系到汽轮发电机组转子的寿命，所以应给予极大的重视。

一、启动过程

1. 启动前的准备工作

启动前的准备工作是为汽轮机启动冲转准备条件，其主要工作是设备和系统检查，进行必要的试验，测取机组初始状态参数，启动辅助设备，投入各种辅助系统。各种检查要符合运行规程的要求。

(1) 设备和系统检查。在接到机组准备启动的命令后，首先要对本机组范围内的设备、系统和各种监测仪表进行仔细检查，确认现场一切维护检查工作结束，设备和系统完好，仪表齐全，各阀门开闭位置正确。通知热工和电气部门送电，投入监测仪表和自制装置及保护、连锁和热工信号系统。记录汽轮机转子轴向位移、相对胀差和汽缸膨胀量及各测点金属温度的初始值。证实机组的主、辅设备和各系统均处在备用状态，可以投入运行。

(2) 投入冷却水系统。机组的凝汽器、冷油器和发电机的冷却都需要冷却水。对于单元制机组，需要先启动一台循环水泵（另一台处于备用）供水。在向冷却系统通水时，要打开相应设备的排气阀，在充水的同时，排出系统内的空气。排气阀设在系统或冷却器的最高点，当排气阀冒水时，证明系统已充满水，可关闭排气阀，缓开相应的出水阀，冷却水在系统内循环流动。空气排出后，一方面在运行中可以利用系统内水流向上和向下流动的虹吸作用，减少静压力产生的流动阻力，另一方面避免水流带气，改善冷却器的换热条件。

(3) 向凝汽器和闭式冷却系统注入化学补充水。要求化学水处理车间提前准备足够的符合要求的补给水；启动补水泵向凝汽器补水，使其热井水位达到要求值。对于采用闭式冷却系统的大型机组，同时向闭式冷却系统注入化学补给水，启动闭式冷却泵。向闭式冷却系统注水时，也要打开相应设备的排气阀，排出系统内的空气。

(4) 启动供油系统和投入盘车设备。为防止转子受热不均，在蒸汽有可能进入汽轮机的情况下，必须投入盘车设备，进行连续盘车。而为了减少盘车功率，防止轴承磨损，在投入盘车前，必须启动润滑油供油系统，向轴承供油。此时，启动交流润滑油泵向系统充油，进行油循环，并进行低油压保护的联动试验，试验后，直流事故油泵处于备用状态。油循环的作用是冲洗油系统，排出空气、调节油温。当油温、油压正常后，启动发电机的密封油泵，向发电机充氢。为了减小盘车功率，避免轴承磨损，大型机组均配有顶轴油泵。在盘车装置投入前，启动顶轴油泵，利用很高的顶轴油压对轴承进行强制润滑。盘车装置投入后，应测取转子偏心率（晃度）的初始值，其变化应小于 0.02mm，并检查汽轮机动、静部分有无摩擦。

(5) 除氧器投入运行。对于单元机组，长时间停机就要停炉，除氧器也要停止运行。因此，在汽轮机启动之前，要使除氧器投入运行，以便向锅炉供水，保证锅炉点火升压，为冲转准备参数符合要求的蒸汽。

(6) 排除启动前机组不允许存在的禁止条件。例如：

- 1) 任一操作子系统失去人机对话功能；
- 2) 电厂保护系统 PPS 主要功能失去；

- 3) DEH 控制装置工作不正常, 影响机组启动或正常运行;
- 4) 高、低压旁路系统工作不正常, 影响机组启动或正常运行;
- 5) 调节装置失灵, 影响机组启动或正常运行;
- 6) TSI 工作不正常, 影响机组启动或正常运行;
- 7) 高、中压主汽门、调节汽门或抽汽止回阀卡涩;
- 8) 润滑油系统任一油泵或 EHC 高压油泵不正常;
- 9) 主机转子偏心度大于报警值;
- 10) 汽轮发电机组转动部分有明显摩擦声;
- 11) 润滑油油质不合格或主油箱油位低报警;
- 12) EHC 油箱油位低或油质不合格;
- 13) 汽轮机上、下缸温差超限;
- 14) 危急保安器充油试验不合格。

2. 轴封供汽

冲转前, 要在凝汽器内建立比较高的真空度, 必须向轴封供汽, 以防止空气经轴封漏入汽缸。对于大、中型机组, 其轴封漏汽是经轴封冷却器后, 由轴封抽气器抽出的。而轴封冷却器采用主凝结水冷却, 因此在轴封供汽、启动轴封抽气器之前, 应投入凝结水系统。由于凝汽器热井已注水, 可启动凝结水泵, 打开凝结水再循环阀, 进行凝结水再循环。若轴封冷却器和低压加热器水侧无水, 则启动凝结水泵后, 先向其水侧注水 (同时, 打开其水侧放气阀)。此时要在压力较高的低压加热器出口取样, 对水质进行分析。若水质不合格, 则打开低压加热器的冲洗阀, 对凝结水系统进行冲洗, 直至水质合格。

打开厂用蒸汽母管与轴封供汽联箱的联络阀, 逐步升压暖管。待管内压力合格后, 投入轴封供汽压力调节器。启动轴封抽气器, 打开供汽门, 向轴封供汽。启动主抽气器, 使凝汽器建立真空。打开各加热器的空气阀, 利用凝汽器的真空度, 抽出各加热器汽侧的空气至凝汽器。

有的机组明确规定, 在盘车状态下即可通过轴封向汽轮机供汽进行暖机, 而有的机组则不允许过早地向轴封供汽, 以免在冲转前转子与汽缸有过大的胀差, 冲动后胀差无法控制。对于大容量机组, 由于转子较长, 胀差控制复杂, 同时为了有利于上、下缸温差的控制, 一般不宜过早地向轴封供汽。

3. 盘车预热

为了避免启动时产生热冲击, 减少转子的寿命损耗, 防止转子的脆性断裂, 要求进入汽轮机的蒸汽温度要与汽缸、转子金属温度相匹配, 即温差要合理。为此, 有些大容量汽轮机采用盘车预热的方式, 即在盘车状态下通入蒸汽或热空气, 预热汽轮机转子、汽缸金属部件, 使金属温度尽量升高到其脆性转变温度 (FATT, Fracture Appearance Transition Temperature) 以上。采用盘车预热后, 金属的温度状态得以改善, 启动热应力减小, 并由于预热后转子和汽缸的温度都比较高, 故根据情况可缩短或取消中速暖机。一般, 盘车预热在锅炉点火以前进行, 用辅助汽源蒸汽进行预热, 因而可以缩短启动时间。

4. 冲转、升速、暖机

(1) 冲转。当蒸汽参数达到汽轮机冲转参数的要求,并满足汽轮机设备冲转条件下,可以冲动汽轮机转子。当锅炉参数达到要求,汽轮机各项指标符合冲转条件时,准备冲动汽轮机。高压缸冲转时,有调速汽门冲转、自动主汽门冲转、电动主汽门旁路阀冲转三种方式。

1) 调速汽门冲转是在自动主汽门和电动主汽门全开情况下,用同步器操作调速汽门来冲转、升速、升负荷。国内大容量机组过去较多采用这种方式:该方式可减少对蒸汽的节流,但冲转时只有部分调速汽门开启,蒸汽只通过汽缸喷管的某一弧段,易使汽缸受热不均,各部位温差较大。优点是,在启动过程中,都用调速汽门控制,操作方便灵活。

2) 用自动主汽门冲转时,调速汽门全开,全周进汽受热均匀。但自动主汽门处于节流和被冲刷状态,易造成关闭不严,降低了自动主汽门的保护作用。

3) 用电动主汽门的旁路阀(或用预启阀)冲转时,自动主汽门和调速汽门全开,电动主汽门全关,缓缓开启旁路阀冲转。这种方法既具有全周进汽加热均匀的优点,又能避免自动主汽门的冲刷。缺点是在10%额定负荷左右,需进行由旁路阀切换到调速汽门控制的阀切换。

转子冲动后,应关闭调速汽门(转子不能静止),在无汽流的情况下,用听针或其他专用设备检查汽缸内部有无动静摩擦。确认无异常情况,重新开启调速汽门,维持400~600r/min转速下,对汽轮机组进行全面检查。

(2) 升速。

低速检查结束后,以 $100 \sim 150 \text{r} \cdot \text{min}^{-1} / \text{min}$ 的升速率将汽轮机转速升高到中速(1100~1200r/min),并在此转速下停留,进行中速暖机。中速暖机时,要注意避开临界转速,防止落入共振区,引起强烈振动。

中速暖机结束后,继续操升转速,通过临界转速时,要迅速而平稳地通过,切忌在临界转速下停留,以免造成强烈振动;但也不能升速过快,以致转速失控,造成设备损坏。

在升速过程中,由于转子温度的升高和轴瓦的摩擦发热,润滑油温会逐渐升高。当油温达到45℃时,应开启冷油器冷却水门,投入冷油器,维持油温在40~45℃。但在投入冷油器时,要注意油温的变化,切不可造成油温大幅度波动,影响转子转动的稳定性。

在升速过程中,金属的温度和膨胀量均要增加,所以仍需严格控制和监视,应注意以下几个问题:

1) 升速率。一般,启动过程的升速率是根据蒸汽与金属温度之间的匹配情况来加以区别对待的,也就是说,蒸汽与金属温度差不同,所选用的升速率也不同。现代大容量机组自动化程度高,由计算机控制整个启动过程,采用单一的或者2~3个升速率,其数值由计算机进行设定控制。

2) 在升速过程中,应由专人监测各轴承的擦动值,并与以往启动时的振动值比较,如有异常,应查明原因处理,有问题时,严禁硬闯临界转速。

3) 当转速控近2800r/min时,注意调速系统动作是否正常,应对汽轮机调速系统及保安系统进行静特性试验。还应检查主油泵是否投入工作,并着手进行发电机升压的准备工作。在3000r/min时,根据汽轮机各状态参数,决定是否立即并网。

4) 定速后, 根据金属温度及温差、胀差、振动情况来决定是否进行额定转速暖机。

(3) 暖机。暖机的目的主要有两个, 即防止材料脆性破坏和过大的热应力。中速暖机主要是提高转子的温度, 防止转子低温脆性破坏。这时, 由于蒸汽对转子的放热系数较小, 热应力还不是主要问题, 在提高转子温度的过程中, 若暖机转速控制得太低, 则放热系数小, 温度上升过慢, 延长了启动时间; 若暖机转速控制得太高, 则会因离心力过大而带来脆性破坏的危险。因此, 在确定暖机转速时, 要两者兼顾, 同时还应考虑避开转子的临界转速。

暖机时应注意如下问题:

1) 暖机转速应避开临界转速。大型汽轮发电机组轴系长, 转子较多, 临界转速也比较分散, 往往找不到合适的高速暖机的转速。所以, 通常是在中速暖机之后, 以每分钟升速 $100 \sim 150 \text{r/min}$ 的速度升速至额定转速。

2) 在大型反动式汽轮机中, 暖机的目的主要是提高高、中压转子的温度, 防止其脆性破坏。暖机转速一般在 $2/3$ 额定转速左右, 即在 2000r/min 左右。其蒸汽流量约为额定转速时的 $1/3 \sim 1/4$ 左右, 应力约为额定转速时的 $1/2$ 左右。如暖机转速太高, 则会因离心应力过高而带来危险。

3) 暖机结束后, 应检查汽缸总膨胀和中压缸膨胀情况, 并检查记录各处的胀差值。如膨胀不足, 应查明原因, 及时解决, 以免在继续升速过程中出现振动。

4) 对于自启动的汽轮机, 暖机时间应根据实际的热应力情况和金属温度情况实时确定; 对于没有自启动系统的汽轮机, 暖机时间应根据运行规程的规定。图 1-2 给出了国外某机组根据高压调节级金属初始温度或者中压静叶隔板金属初始温度来决定暖机时间的曲线。

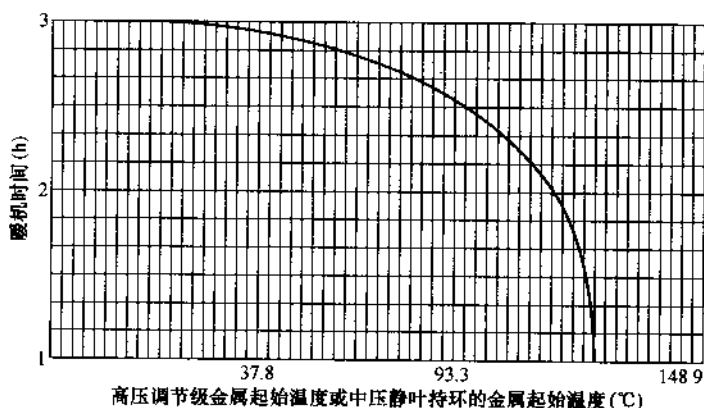


图 1-2 暖机曲线

5. 并网、带负荷

(1) 并网。达到额定转速后, 经检查确认设备正常, 完成规定试验项目, 即可进行发电机的并两操作。并网操作采用准同步法, 要严格防止非同步并列。

发电机与系统并网时的要求有:

- 1) 主开关合闸时没有冲击电流;
- 2) 并网后能保持稳定的同步运行。

要满足上述两点要求, 准同步并网时必须满足三个条件, 即发电机与系统的电压相等、电压相位一致、频率相等。如果电压不等, 其后果是, 并列后发电机与系统间有无功性质的冲击电流出现。如果电压相位不一致, 则可以产生很大的冲击电流, 使发电机烧毁或使发电机端部受到巨大电动力作用而损坏。如果频率不等, 则会产生拍振电压和拍振电流, 将在发电机轴上产生力矩, 从而发生机械振动, 甚至使发电机并入电网时不能同步。准同步法并网的优点是发电机没有冲击电流, 对电力系统没有什么影响。

为了达到并网条件, 在并网前必须进行调整。通过调整发电机转子的励磁电流, 改变转子的磁场强度, 达到调整其输出电压的目的。可通过调整汽轮机的转速, 使发电机输出电压的频率与电网频率相等。而要使发电机输出电压的相位与电网三相电压相位对应, 则要通过两者频率的微小差值, 逐渐缩小对应相的相位差来实现。

现代汽轮发电机组均配有自同步装置, 它根据电网电压自动调整励磁电流, 使发电机组与电网之间隔离开关的两侧电压相等; 同时向汽轮机发出转速控制信号, 使其转速在 $3000 \pm (10 \sim 30) \text{r/min}$ 的范围内周期性变化。当发电机输出三相电压的相位与电网电压的相位相对应时, 自动控制隔离开关闭合, 实现机组自动同步并网。为了防止机组并网时出现逆功率工况 (发电机从电网吸收功率, 变为电动机运行), 机组并网后, 立即带初始负荷。冷态启动时, 初始负荷通常为机组额定功率的 5% 左右。

(2) 初负荷暖机。汽轮机在额定转速时的蒸汽流量约为额定负荷下蒸汽流量的 4% ~ 5% 左右。同定速暖机时相比, 并网后为额定转速, 此时, 由于蒸汽流量增大, 调节级压力亦上升。因此, 蒸汽对转子、汽缸的放热系数比定速暖机时大得多。同时, 蒸汽流量的增大, 锅炉汽温上升, 传给转子、汽缸的热量亦增多。热量增多和放热系数增大, 这两个因素使转子、汽缸的温差增加, 此时最容易出现较大的金属温差及胀差。所以, 机组并列后, 还需带一段时间的初负荷, 进一步进行暖机, 这就叫初负荷暖机, 它的作用也是为了防止汽缸、转子热应力过大。

初负荷暖机的负荷是根据蒸汽和金属温度的匹配情况来决定的, 温度相差越大、暖机负荷值越小。暖机负荷通常为额定负荷的 5% 左右, 暖机时间也根据蒸汽与金属温度失配情况来定, 失配越大, 时间越长。

从并列到初负荷暖机时间要适当控制, 锅炉燃烧率尽量保持不变, 逐渐开大调速汽门加负荷。随着调速汽门开大, 部分进汽逐渐加大, 调节级汽温上升, 高压胀差正使增加很快。因此, 调速汽门开大操作要缓慢, 调节级汽温上升率控制在 $1 \sim 1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 为宜。

在初负荷暖机阶段, 除严格控制蒸汽温度变化率和金属温差外, 尚须监视胀差变化。如发现胀差过大时, 应延长暖机时间。同时, 还可以采取调整真空和增大法兰加热装置的进汽量等方法进行调整。同样也应监视振动, 发现振动值过大时, 应延长暖机时间。

(3) 升负荷。汽轮机冷态启动的升负荷过程, 是零件金属被加热的主要阶段。通过控制升负荷率来控制零件金属的温升速度和其内部的温差, 从而控制汽缸和转子的热应力和相对胀差。对于冷态启动, 在低负荷区, 升负荷率控制在每分钟负荷增加额定值的

0.5%~0.8%；在中等负荷区，升负荷率控制在每分钟负荷增加额定值的0.6%~1.0%；在高负荷区，升负荷率控制在每分钟负荷增加额定值的0.8%~1.2%。在滑参数升负荷阶段，升负荷率主要取决于主蒸汽的升压速度，通常控制升压速度为每分钟升高额定压力的1%左右。金属的温升速度和内部温差，除了取决于升负荷速度之外，还与主蒸汽的温升速度有关。一般，在半负荷以下，蒸汽的温升速度约为1~2℃/min左右；半负荷以上为0.5~1℃/min左右，以保证汽缸内、外壁温差不大于35~50℃（视不同机组而定）；汽缸法兰内、外壁温差不大于80~100℃（视不同机组而定）；相对胀差不大于允许值。根据汽缸内、外壁温差和相对胀差的情况，在低负荷和中负荷适当安排暖机（保持负荷不变），暖机时间一般为30~60min，以使零件内部温差相应减小。在暖机过程中，若汽缸内、外壁温差和相对胀差基本稳定（变化比较小），则本次暖机过程结束，继续升负荷。在保证各项指标都满足要求的条件下，一直把负荷升至满负荷。

二、滑参数启动的特点

滑参数启动与额定参数启动相比有以下的优缺点：

(1) 额定参数启动时，锅炉点火升压至蒸汽参数到额定值，一般需要2~5h。达到额定参数后，方可进汽暖管，而后汽轮机冲转，并要分阶段暖机，以减小热冲击。而采用滑参数启动时，锅炉点火后，就可以用低参数蒸汽预热汽轮机和锅炉间的管道，锅炉压力、温度升至一定值后，汽轮机就可冲转、升速和接带负荷。随着锅炉参数的提高，机组负荷不断增加，直至带到额定负荷。这样大大缩短了机组启动时间，提高了机组的机动性。

(2) 滑参数启动用较低参数的蒸汽加热管道和汽轮机金属，加热温差小，金属内温度梯度也小，使热应力减小；另外，由于低参数蒸汽在启动时，容积流量大，流速高，放热系数也就大，即滑参数启动可在较小的热冲击下得到较大的金属加热速度，从而改善了机组加热的条件。

(3) 滑参数启动时，容积流量大，可较方便地控制和调节汽轮机的转速与负荷，且不致造成金属温差超限。

(4) 随着蒸汽参数的提高和机组容量的增大，额定参数启动时，工质和热量的损失相当可观。而滑参数启动时，锅炉基本不对空排汽，几乎所有的蒸汽及其热能都用于暖管和启动暖机，大大减少了工质的损失，提高了电厂运行的经济性。

(5) 滑参数启动机组升速和接带负荷时，可做到调速汽门全开，全周进汽。使汽轮机加热均匀，缓和了高温区金属部件的温差和热应力。

(6) 滑参数启动时，通过汽轮机的蒸汽流量大，可有效地冷却低压段，使排汽温度不致升高，有利于排汽缸的正常工作。

(7) 滑参数启动时，可事先作好系统的准备工作，使启动操作大为简化，各项限额指标也容易控制，从而减小启动中发生事故的可能性，为大机组的自动化和程序启动创造条件。

总之，滑参数启动时，蒸汽参数的变化与金属温升是相适应的，反映了机组启动时金属加热的固有规律，能较好地满足安全和经济两方面的要求。