

冶金动力工厂 汽轮机运行

徐福权 吴鹤汉 主编

冶金工业出版社

9500240

TK267

冶金动力工厂汽轮机运行

徐 福 权 主 编
吴 鹤 汉

(京) 新登字 036 号

图书在版编目(CIP)数据

冶金动力工厂汽轮机运行 / 徐福权, 吴鹤汉主编. —北京: 冶金工业出版社, 1994.12
ISBN 7-5024-1627-7

I. 冶… II. ①徐…②吴… III. 汽轮机运行—冶金工厂: 动力工厂 IV. TK267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 12087 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京怀柔东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1994 年 12 月第 1 版, 1994 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.25 印张; 359 千字; 235 页; 1-1500 册

16.00 元

内 容 提 要

本书共分八章。一、二、三章主要介绍汽轮机主体设备、附属设备、管道及阀门的运行、操作与维护；四、五、六章介绍了三种型号汽轮发电机的热力系统、调节与保护；七、八章介绍了两种型号鼓风机的热力系统、电气部分的调节与保护。

各章都详细地叙述了标准化作业程序、先进的操作方法；列举了典型案例的分析及处理各种异常情况的方法；每章后都附有训练题。

前 言

1989年7月，本书作为冶金工人岗位技能培训教材的《汽轮机运行工》分册出版。出版后，在鞍钢及同行业中反映良好，对开展冶金工厂汽轮机工种岗位技能培训起到了一定的作用。现在，应广大读者要求，在广泛征求意见的基础上，编者对原书进行了补充、修改，并将书名改为《冶金动力工厂汽轮机运行》，予以正式出版。

本书简要地介绍了汽轮机主体及附属设备运行及操作知识，较详细地介绍了目前我国动力工厂中自备热电厂比较典型的三种型号汽轮发电机、两种型号汽轮鼓风机的概况及其热力系统、调节及保护系统，以及标准化作业知识，以期对冶金工厂从事汽轮机运行和检修的工人和技术人员有一定的帮助。

本书由鞍山钢铁公司第一发电厂徐福权、吴鹤汉主编。初稿由徐福权、吴鹤汉、王川、曹洪波、宁福顺、杨春景、姚荣伟、刘继伦、李德宽编写，汪昔奇、范天池、王殿国审稿。在编写和修订过程中，得到了有关单位及同志的大力支持，谨此致谢。

由于编者水平所限，书中难免有不当之处，诚望读者批评指正。

作 者

1994年7月

目 录

第一章 汽轮机设备及运行	1
第一节 热膨胀和热应力	1
第二节 汽轮机的启动	5
第三节 汽轮机的停机	8
第四节 汽轮机的经济运行	12
第五节 汽轮机的运行及维护	16
第六节 发电机的运行及维护	19
第七节 鼓风机的运行及维护	21
第八节 事故处理	25
第二章 附属设备运行及操作	29
第一节 凝汽器	29
第二节 循环水泵	31
第三节 凝结水泵	32
第四节 抽气器	35
第五节 冷水塔	37
第六节 加热器	39
第七节 除氧器	42
第八节 给水泵	45
第三章 管道及阀门	48
第一节 概述	48
第二节 蒸汽管道的作业	48
第三节 给水道的作业	52
第四节 循环水管道的作业	55
第五节 凝结水管道的作业	57
第六节 阀门	59
第四章 АП-25-2 型汽轮发电机	63
第一节 概述	63
第二节 热力系统	66
第三节 调节及保护	75
第四节 标准化作业	96
第五节 故障的判断、分析和处理	100
第六节 典型案例分析	102
第五章 CC12-35 / 10 / 1.2-1 型汽轮发电机	105
第一节 概述	105

第二节	热力系统	108
第三节	调节及保护	116
第四节	标准化作业	141
第五节	故障的判断、分析和处理	144
第六章	B₆-35 / 10 型汽轮发电机	147
第一节	概述	147
第二节	热力系统	150
第三节	调节及保护	152
第四节	标准化作业	160
第五节	故障的判断分析和处理	163
第七章	VAS-9018 型轴流式高炉鼓风机	166
第一节	鼓风机	166
第二节	汽轮机及热力设备	171
第三节	调节及保护	177
第四节	电气部分	195
第五节	标准化作业	200
第六节	故障的判断分析和处理	204
第七节	典型案例剖析	206
第八章	K-4250 离心式高炉鼓风机	209
第一节	概述	209
第二节	热力系统	213
第三节	调节及保护	217
第四节	标准化作业	228
第五节	故障的判断、分析和处理	232
第六节	典型实例剖析	234
参考文献		235

第一章 汽轮机设备及运行

第一节 热膨胀和热应力

一、汽轮机的受热特点

汽轮机在启动、停机和负荷变化的过程中，各部件的金属温度都将发生变化，尤其在启动过程中，温度的变化更为剧烈。由于各部件受热条件不同，加热或冷却时的传热情况也不相同，因此汽轮机运行人员必须了解和掌握汽轮机启动和停机过程中的受热情况。

当汽轮机冷态启动时，较高温度的蒸汽与冷态的汽缸内壁相接触，这时蒸汽的热量主要以凝结放热的方式传给金属内壁。由于凝结放热是一种剧烈换热方式，汽缸内壁的温度会很快上升，直至升高到该蒸汽压力下的饱和温度时，凝结放热阶段即告结束。蒸汽在以后的换热将以对流方式进行。

对流换热的程度远远低于凝结换热，且不稳定。其大小取决于蒸汽的流速和重度（重度根据蒸汽的压力和温度而定）。流速越高，换热进行的越迅速。随着换热过程的进行，汽缸内壁温度不断升高，汽缸内外壁之间温差增大，使汽缸受热不均匀。因此在启动过程中，应通过改变蒸汽压力、温度、流量等方法来控制蒸汽对金属的放热量，使之均匀受热。

汽轮机金属部件本身的传热是热传导过程。外壁的热量是由金属内壁通过传导而获得的。蒸汽接触汽缸内壁后，首先将热量传给内壁表面，然后向外壁传递，因而在内外壁之间形成温差。对汽轮机转子来说，虽然叶轮两侧都会与蒸汽均匀接触，但转子中心的热量仍然是由它的外周以热传导的方式向中心传递，所以转子沿径向从叶轮的外缘到中心也存在着温差。正是由于这些温差的存在，使金属部件的热传导过程得以进行下去。

二、汽轮机的热膨胀

（一）汽缸的热膨胀

由于物体在温度变化时的热胀冷缩，因此汽缸在加热或冷却时将产生膨胀或收缩。膨胀量除了与几何尺寸和金属材料的线膨胀系数有关外，还与汽缸各部金属温度有关。由于汽缸轴向长度最大，因此热膨胀量也最大。

运行中每一台汽轮机，汽缸沿轴向温度分布都有一定的规律，因此可以找到调节级处汽缸（或法兰）的金属温度与汽缸热膨胀值的对应关系，其对应关系曲线如图 1-1 所示。这样汽轮机运行时就可以把调节级温度做为监视点，检查汽缸的膨胀情况。只要把调节级

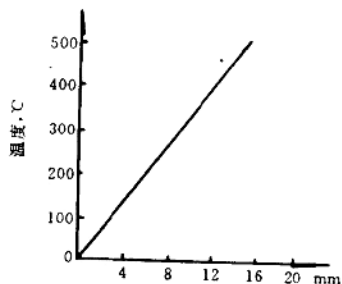


图 1-1 调节级法兰内壁金属温度与汽缸膨胀值的关系曲线

温度控制在适当的范围内,就能保证汽缸的膨胀符合要求。汽轮机运行中还应保证横向膨胀均匀,否则汽缸中心将发生偏移。

(二) 汽缸与转子的相对膨胀

汽缸受热时将以死点为基准在滑销系统的引导下分别向横向、纵向及斜向膨胀。因为轴向尺寸最长,所以纵向膨胀是主要的。转子与汽缸不仅金属材料的线膨胀系数不同,而且转子的质量与汽缸也不相同,转子的质量比汽缸小,而转子与蒸汽接触的面积却比汽缸大,因此在启动过程中温升较快,轴向膨胀值也比汽缸大。使二者轴向膨胀值产生一定的差异。图 1-2 是一台汽轮机转子与汽缸相对膨胀的示意图。汽缸受热膨胀时以死点为基准,通过推力轴承带动转子一起向前移动;而转子受热后又以推力轴承为基点向后膨胀。转子与汽缸沿纵向膨胀之差称之为转子与汽缸的相对膨胀差,简称胀差。

胀差的大小表明汽轮机内部轴向间隙变化的情况。从图 1-2 可以看出当胀差为零时,转子和汽缸的膨胀值相等。末级轴向间隙 a、b 保持正常。当转子膨胀大于汽缸时,规定胀差为正值,反之为负值。当胀差为正值时表明汽轮机喷嘴出口轴向间隙 b 增大,入口轴向间隙 a 减小;胀差为负值时叶片出口轴向间隙 b 减小,而入口间隙 a 增大。任何一侧间隙消失时,都会引起动静部份发生摩擦而损坏设备。因此在汽轮机运行时,尤其在启动、停机过程中,应注意监视胀差值的变化并将其控制在允许范围内。

胀差的大小主要取决于蒸汽温度的变化率。当汽轮机以额定参数启动时,汽源的蒸汽参数是恒定的。为了控制转子和汽缸之间的温差不致于过大,通常进行低速暖机。其目的是

减少进汽量,使蒸汽在这段时间内较多地降低平均温度,即降低转子的平均温度。当汽缸的温度接近蒸汽的平均温度时,再继续增加进汽量,提高机组的转速或增加负荷。

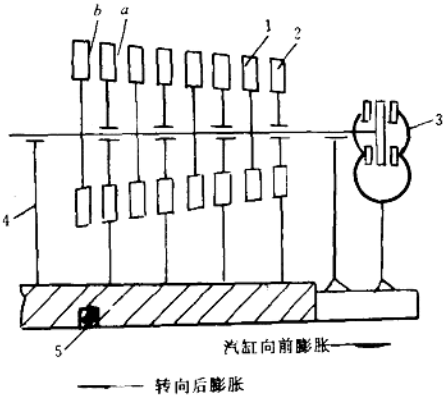


图 1-2 相对膨胀示意图

- 1—叶片; 2—喷嘴; 3—推力轴承;
- 4—支持轴承; 5—死点
- a—动叶片出口与静叶片入口间隙;
- b—静叶片出口与动叶片入口间隙

三、汽轮机的热变形

汽轮机在启动、停机和带负荷的过程中,由于加热和冷却速度不同所形成的温差除了使汽缸和转子等产生热膨胀外,还会使汽轮机产生热变形的现象。当金属部件受热不均匀,上侧温度高于下侧温度时,金属部件就会出现弯曲,产生热变形。其规律是温度高的一侧向外凸出,温度低的一侧向内凹进,即“热凸冷凹”。

(一) 上下汽缸温差引起的热变形

汽轮机启动和停机的过程中,上下汽缸会出现温差,即上缸的温度高于下缸的温度。其主要原因是:

(1) 上下汽缸的重量和散热面积不同。上缸重量轻,散热面积小,同样保温的条件下,上缸温度高于下缸温度。

(2) 启动时蒸汽凝结在下缸形成水膜,降低了下缸的受热条件。

- (3) 下汽缸形状复杂, 保温不易严密, 并容易脱落, 对比上汽缸保温效果差。
- (4) 下汽缸位于平面之下, 受平台底部低温空气对流的影响, 易于冷却。
- (5) 停机后汽缸内温度较高的蒸汽聚集在上部, 使上下汽缸冷却条件有差异, 而增大上下缸的温差。

(6) 较长时间低负荷或空负荷运行时, 对于只有上部调节汽阀开启的汽轮机来说也会使上下汽缸温差增大。

由于以上种种原因, 汽轮机在启动、停机过程中, 使上下汽缸产生温差, 造成上缸膨胀大于下缸。如图 1-3 所示, 上下汽缸温差最大值往往出现在调节级附近, 因此最大拱起变形是在调节级周围。

由于汽缸的拱起变形, 使汽轮机内部动静部件的间隙减小。调节级处上下汽缸温差每增加 10°C , 该处径向间隙变化 $0.1\sim 0.15\text{mm}$, 而在该处的隔板和汽封间隙都比较小, 只有 $0.4\sim 0.7\text{mm}$ 。因此对于大型汽轮机要控制上下汽缸的温差变化。

(二) 转子的热弯曲

转子的弯曲有两种情况。一种是弹性弯曲, 即转子径向存在温差时, 引起的弯曲, 温差消失后转子即恢复原状; 另一种

弯曲是塑性弯曲, 即转子径向出现较大温差时, 引起较大的变形, 温差消失后转子不能恢复原来的形状, 产生永久变形。弹性弯曲往往是塑性弯曲的起因, 因此, 运行中应使转子均匀地加热和冷却, 以减少热弯曲。引起转子弯曲的原因有:

- (1) 停机后转子在静止状态, 上、下汽缸的温差使转子产生径向温差。
- (2) 汽轮机静止后, 汽缸中有蒸汽漏入, 使转子受热不均。
- (3) 启动过程中操作不当, 在转子没转动之前, 就向轴封供汽。
- (4) 汽缸变形较大时冲动转子, 使动静部份局部发生摩擦而出现过热, 引起转子的弯曲。

当转子弯曲较大时, 也正是汽缸拱起最大时。这时汽轮机动静部份间隙最小, 也可能消失。如在此时冲动转子, 其弯曲部位可能与隔板上的汽封发生摩擦。使弯曲部份局部温度升高, 进一步加大了弯曲, 导致永久变形事故的发生。因此在启动过程中应引起充分注意。

四、汽轮机的热应力

汽轮机各部件在温度变化时将产生胀缩, 并因胀缩差而引起热变形。胀缩和变形受到约束时, 会在金属部件内产生热应力。金属杆件均匀加热膨胀受到约束时, 杆件内将产生热压应力; 反之均匀冷却收缩受到约束时, 杆件内将产生热拉应力。当金属杆件受热不均匀时, 温度高的一侧将产生膨胀, 温度低的一侧相对温度高的一侧表现为收缩, 因而也会产生弯曲。当弯曲受到约束时, 则温度高的一侧表现为热压应力, 温度低的一侧表现为热拉应力。这种受温度变化影响产生应力的规律, 可以概括为“热压冷拉”。

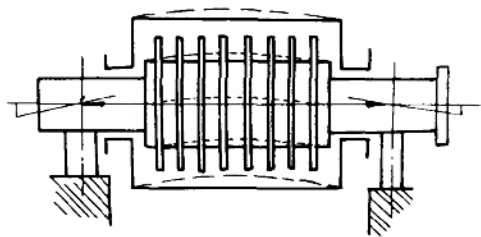


图 1-3 上下汽缸温差造成汽缸
向上拱起的示意图

热应力是造成汽轮机及受热部件损坏的主要原因。运行时因温升速度控制不当,会使金属部件表面出现裂纹或断裂,而发生设备损坏事故。下面分别叙述汽缸与转子产生的热应力。

(一) 汽缸壁的热应力

汽轮机启动时,汽缸内壁直接与高温蒸汽接触,温度上升很快。但由于汽缸壁较厚,热量传递到外壁需要足够长的时间,所以汽缸内、外壁会出现较大的温差。根据热应力“热压冷拉”的规律,则汽缸内壁产生热压应力,汽缸外壁产生热拉应力。根据分析可以得出以下结论:

(1) 在汽缸壁厚和金属材料一定的情况下,表面热应力的大小与汽缸内外壁温差 Δt 成正比,温差 Δt 增大时,热应力随之成比例的增大。所以运行中应监视内外壁温差,做为控制热应力的监视指标。当 Δt 过大时,热应力就会使汽缸产生永久变形。在机组频繁的启、停过程中,加热和冷却反复进行,会使材料因疲劳而出现内部组织断裂,最终形成裂纹。

(2) 汽缸的过快冷却比过快加热更为危险。汽轮机启动或运行时,内壁温度高于外壁温度,产生较高的热压应力,使内壁热压应力最大部份产生永久变形。这种变形在汽缸温度均匀后,会留有残余拉应力。处于这种状态的机组,当突然受到快速冷却时,在原先拉应力的基础上又出现了较大的拉应力,致使汽缸出现裂纹。因此运行中应避免这种情况的发生。

(3) 控制汽轮机金属的温升速度是控制热应力的基本方法。实践证明热应力的大小与受热的急剧程度有关。因为温升速度越快,内外壁温差也就越大,因此运行操作时除监视汽缸的内外壁温差外,还必须控制好金属温度的升降速度,才能保证汽缸的安全,一般对汽缸的温升速度应控制在 $3\sim 4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 为宜。

(二) 转子的热应力

机组启动过程中,转子表面被蒸汽加热,而内部却处于较低温度的状态。在转子的截面上形成径向温差,使转子表面产生热压应力,而中心部份承受拉应力。正常运行时,径向温差很小,转子的热应力基本消失。停机过程中出现的热应力恰与启动时相反,表面部份为热拉应力,中心部份为热压应力。但转子所产生的热应力对比汽缸出现的热应力要小得多,因此转子的热应力一般可以不予考虑。

必须注意到汽轮机每启停一次,在转子表面层就交替出现一次热拉应力和热压应力。汽轮机多次启停的过程中,交变应力反复作用,将会引起转子金属表面出现裂纹,这种情况称之为低频疲劳损伤。这种损伤加速了转子材料的疲劳老化,降低转子的使用寿命。

转子的低温脆性转变是指金属材料在低温条件下工作时,机械性能发生的变化,即从韧性转变成脆性的过程,使材料的许用应力下降。当温度低于某一数值时,金属材料会在外力的作用下发生脆性断裂,通常称这时的温度叫脆性转变温度。脆性转变温度一般为 $120\sim 140^{\circ}\text{C}$ 。汽轮机的超速试验习惯上是汽轮机升速后立即进行,这对转子是十分不利的。因为在升速后不仅转子受到较大的热应力,而中心处的温度低于材料的脆性转变温度。在提升转子的转速后,动应力不断增加,当转子中心温度也在逐步升高,中心温度达到脆性转变温度时,就可能出现转子断裂的重大事故。因此在超速试验过程中要注意充分暖机后再进行。

第二节 汽轮机的启动

将汽轮机从静止状态加速到额定转速，并将负荷逐渐加至额定负荷的过程称为汽轮机的启动过程。启动过程中，汽轮机各部件的金属温度将发生十分剧烈的变化，从冷态（或温度较低的状态）加热到对应负荷下运行时的高温工作状态。所以汽轮机启动过程的实质是对汽轮机各金属部件的加热过程。

一般电厂的蒸汽系统采用母管制，机组常常采用额定参数进行启动。根据启动前金属部件温度的高低，可分为冷态启动和热态启动。无论采用哪种方式在哪种状况下进行启动，都应将金属温升、温差、胀差等控制在允许的范围内，以减小热变形和热应力。在保证设备安全的条件下尽量缩短启动时间，在操作过程中要严格遵守厂内为各类机组所制定的运行规程。

一、额定参数下的冷态启动

启动过程中始终保持主汽阀前蒸汽参数为额定值，这种启动方式叫额定参数启动。采用这种方式对冷态机组进行启动叫做额定参数下的冷态启动。整个操作过程可分为启动前的准备、冲动转子、暖机、升速、接带负荷等几部分。下面按操作顺序对启动过程进行叙述。

（一）启动前的准备

启动前的准备包括准备使用的工具和仪表，与有关部门和岗位的联系，对各系统进行检查。

（二）暖管

暖管一般分为两个阶段，电动（手动）主闸阀前的暖管为一段暖管，自动主汽阀前的暖管为二段暖管。每段暖管要分成二个阶段进行操作。首先是低压暖管，通入压力较低的蒸汽。压力一般维持在 $0.25 \sim 0.3 \text{ MPa}$ （绝对压力），疏水门应开大，管内壁温升控制在 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 以内，这样做可使管道在这段时间内只承受温度变化，不承受压力变化，使管道受热均匀而不致产生过大的温差，保证管道及附件的安全。当管壁温度达到该蒸汽压力下的饱和温度时，低压暖管即告结束，一般对中参数机组大约需要 20 分钟左右时间。接着开始升压暖管。升压暖管是依靠逐步提高蒸汽压力和温度来进行。随着汽压的升高，应将管道的疏水门逐渐关小，当蒸汽参数达到额定值后，可将疏水门关闭，暖管工作结束。在暖管工作的同时应将转机前可以投入的辅助设备投入运行。具体有以下一些主要的工作可以进行：辅助油泵投入运行并进行调节系统试验、盘车投入运行、凝汽器通冷却水、凝结水泵投入运行、抽气器投入运行、轴封供汽等。

（三）冲动转子

上述工作完毕之后，真空建立在 $4.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ 以上时，可以冲动转子。冲动转子有调节阀冲转和主汽阀冲转两种方式。前一种方式对部分进汽机组易产生受热不均，使得各金属部件受热后出现较大的热应力和热变形，后一种方式虽然受热均匀，但主汽阀的开度较小，蒸汽通过时流速很高，易造成阀芯磨损。目前有些汽轮机设置了启动汽阀，在电动主闸阀全关，调节阀、自动主汽阀全开的状态下用启动阀将蒸汽送到自动主汽门后冲转。避

免了上述两种方法的不足。但中压电厂大部份机组一般还是采用自动主汽阀冲转的方式进行启动。

不论采用什么方法进行冲转，转子一旦转动后，应立即关闭冲转的那个阀门，保持汽轮机低转速运转。这时应对各转动部位进行听音检查，确认无异常后，方可重新开启冲转的阀门，重新启动汽轮机，保持机组低转运行。

(四) 暖机和升速

汽轮机冲转之后就开始进行暖机。一般将保持在额定工作转速 10~15% 的暖机称之为低速暖机。低速暖机进汽量比较少，达不到预期的效果，一般只运行 20~30min，然后以每分钟额定工作转速 5~10% 的升速率，将机组的转速提升到 1000~1400r/min 继续暖机。此阶段称为中速暖机。这段运行时间应根据机组的参数高低、容量大小而定。对高参数、大容量的机组应适当延长暖机的时间。中速暖机完毕之后机组就可以升速，开大启动阀门使汽轮机的转速迅速通过临界转速（指临界转数在工作转数以下的机组），直至达到主油泵投入正常工作的转数。在汽轮机提升转速的过程中，必须严格检查机组的振动和膨胀情况，如果发现不正常的振动和异音，则有可能是由于暖机不良引起的，此时应降低转速继续暖机 15~30min，直至这种现象消失为止。否则应将机组停下来进行检查。

(五) 接带负荷

机组升速后，应进行全面检查。检查机组有无振动和异音，各运行参数是否正常，调节系统各油压是否符合规定值，并注意观察升速过程中，调节系统的动作是否正常，升速后调节系统有无摆动等现象。对鼓风机来说，机组升速后便带有一定的负荷，因此应放在最低工作转速上（即主油泵能供调节、保护、润滑系统工作用油所需的最低转速）继续进行暖机。因进汽量增加的幅度较大、金属部件的温差增大，出现较大的热应力和膨胀不均，因此，在最低工作转速上要停留 10~20min，然后再慢慢地增加负荷。

汽轮发电机升速后，调节系统进入工作，调速汽门开始控制汽轮机的转速。此时应将各主汽阀缓慢全开，然后继续提升转速，使之能与电网并列。空负荷时间不易过长；因这时进汽量较少，不能将转子转动时摩擦鼓风所产生的热量全部带走，会使排气缸温度逐渐升高而超过允许值。汽轮机从空负荷到满负荷的加负荷过程，蒸汽量增加较多，其温度变化较升速前更为剧烈。为了把金属的热膨胀和热应力控制在允许的范围内，必须严格控制加负荷的速度，在低负荷阶段，每增加一定的负荷需要停留一段时间，继续暖机，这种暖机被称做低负荷暖机。

随着汽轮机负荷的增加，各段抽气压力也相应的提高，运行人员应根据不同的压力分别投入低压加热器、高压加热器。对带调整抽气的机组在具备条件后将热负荷送出。

二、汽轮机在额定参数下的热态启动

(一) 汽轮机热态启动的特点

汽轮机刚刚停机时，汽缸和转子等部件的金属温度还接近于运行时的温度。由于被保温层遮盖着，停机后的降温过程进行的十分缓慢。一般中参数机组要在停机 18h 以后，汽缸温度才能接近冷态水平。与冷态的汽轮机相比较，热态的汽轮机具有以下特点：

(1) 汽轮机停机冷却过程中，下缸比上缸冷却的快，使上、下汽缸之间出现温差，其变化规律如图 1-4 所示。 t_B 为上汽缸温度曲线， t_H 为下汽缸温度曲线。从图中可以看

出：在停机的初期，随汽缸的冷却，上、下汽缸间的温差逐渐增大；冷却到一定时间，温差达到最大值，然后上、下汽缸的温差逐渐减少。如果停机后蒸汽阀门不严密，向汽缸内漏入蒸汽，则上、下汽缸温差的消失会更加缓慢。

(2) 转子的热弯曲。在上、下汽缸温差的影响下，汽缸要发生向上的拱起变形，使汽缸的纵向中心线变成向上凸起的弧线。与此同时，转子在逐渐冷却过程中，受上、下汽缸温差的限制，径向也存在温差，发生向上的弯曲。热弯曲最大值往往出现在调节级附近，转子的热弯曲值随上、下缸温差的变化情况如图 1-4 中 f 曲线所示。转子的热弯曲值与上、下汽缸的温差成正比。上、下汽缸温差最大时，转子的热弯曲也出现最大值 $f_{\max}$ 。就一般情况而言，最大热弯曲对小型汽轮机约发生在停机后的 1.5~2h，对中型汽轮机约发生在停机后的 5~12h。

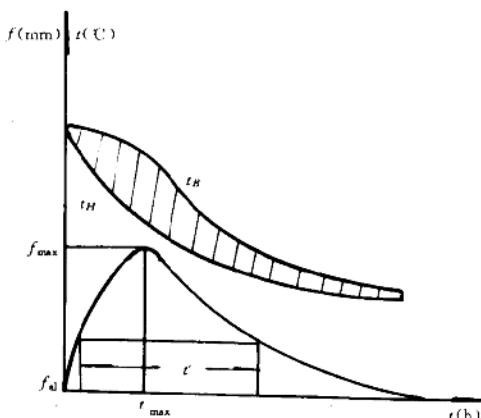


图 1-4 汽轮机上、下汽缸温度与转子弯曲随停机时间变化曲线
 t' —禁止启动的时间； tB —上缸温度； tH —下缸温度； f —转子热弯曲

在上下汽缸存有较大温差时启动汽轮机是相当危险的。这因为：

1) 转子的热弯曲加上汽缸的变形，可能造成动、静部分的径向摩擦。在这种情况下启动汽轮机，有可能使端部轴封、隔板汽封摩擦而发热，加剧转子的热弯曲，最终使转子产生永久性弯曲变形。

2) 即使不发生上述情况，由于转子的弯曲，将使转子的质量中心偏离旋转中心，机组启动过程中随转速的升高将会出现强烈的振动。

(二) 汽轮机的热态启动

汽轮机的热态启动是根据启动前金属部件温度来确定的。一般以调节级（轮室）汽室的温度来划分，当调节级汽室处温度高于 150°C 为热态；低于 150°C 为冷态。对高参数、大容量的机组，其分界点温度规定值还要高些。

汽轮机的热态启动过程与冷态相比应注意以下问题：

(1) 在盘车装置连续运行的条件下，首先向轴封供汽，然后抽真空，因为汽轮机在热态下，高压端轴封处及汽缸内温度比较高，大量冷空气从轴封处进入汽缸，使轴封处胀差值增大，可能超过允许值，此外还会使轴封套内壁被急剧冷却而产生松动。

(2) 应根据汽缸的温度，确定汽轮机的负荷，即与热态启动相同汽缸温度所对应的负荷。

(3) 为了适应热态启动较快地提升转速和加负荷的需要，冲转前应有较高的油温，一般维持在 30°C 以上。

(4) 热态启动应进行暖管。启动升速的过程中要严格地监视机组的振动。对启动过程中突然出现的较大振动要立即采取停机措施。待消除引起振动的原因后才允许重新进行启动。

第三节 汽轮机的停机

一、汽轮机停机的基本概念

汽轮机从带负荷正常运行状态到静止的过程叫汽轮机的停机。汽轮发电机组根据电网调度指示进行的停机称为正常停机。如因电网或设备事故，机组不能正常运行时被迫的停机称为事故停机。停机过程的实质上是汽轮机设备各金属部件的冷却过程。由于各部件冷却条件不同，随着温度下降，将出现温差，产生热应力和热变形。其热应力与热变形情况与启动过程所产生的情况正好相反。

以热变形中转子的相对膨胀为例，在停机过程中转子温度的下降快于汽缸的温度下降，即转子的收缩比汽缸收缩得快，胀差将出现负值。在通流部份，动叶进口边与静叶出口边的轴向间隙小于动叶出口边与下一级静叶入口边的轴向间隙。因此对汽轮机的安全威胁将更大。所以在停机的过程中更应控制胀差的变化。

就停机时的热应力而言，其内壁表面比外壁表面冷却的快，因此汽缸内壁产生热拉应力，外壁产生热压应力。汽缸的裂纹及损坏往往是由于拉应力造成的，可见汽缸单向冷却过快要比汽缸单向受热过快更危险。不难看出，在停机时减负荷的过程里，对汽轮机的金属温差、温度变化率（即降温速度）的控制要比启动过程更为严格。汽轮机停机过程中减负荷的速度应比启动过程中增加负荷的速度更加缓慢。

二、额定参数下的正常停机

首先应做好停机前的准备工作，做好高压辅助油泵和润滑油泵的试验。有顶轴油泵的也要做好试验，并对盘车装置进行空负荷试验。在确认上述设备处于完好备用状态时，才能进行停机的操作。

减负荷时要逐渐将负荷减下，避免汽轮机出现急剧冷却的现象。在负荷剩余不多时，注意不要在低负荷或空负荷下停留时间过长。因为此时调节阀开度小，节流较大，造成调节级汽温大幅度下降，促使汽缸的热应力增大。并且这时蒸汽只对前几级做功，通过后面各级时对汽轮机转子起冷却作用，使转子收缩较快，胀差负值增大。

在减负荷的各个阶段，相应的加热器及供热抽汽应依次停用。在较低负荷或打闸后，应维持凝结水泵的运行。

汽轮机负荷减到零后，应将发电机解列。解列时应注意汽轮机转速的变化，防止超速发生。打闸后，自动主汽门、调速汽门、抽汽逆止门应能迅速关回。带供热的机组要严格监视抽汽逆止门的动作情况，因为在机组打闸时如果抽汽门不严，抽汽逆止门不及时关闭，将造成热网蒸汽倒流入汽轮机内，引起超速事故的发生。

汽轮机打闸后，由于惯性的作用，转子仍然要转动一段时间。从主汽阀和调节汽阀关闭时起，到转子完全静止时所需要的时间称为转子惰走时间。表示转子惰走时间内转速随时间变化的关系曲线叫惰走曲线。新安装的机组投产时，各部正常后应绘制出惰走曲线称为该机组的标准惰走曲线，如图 1-5 所示。绘制惰走曲线时，要控制凝汽器内的真空。使真空以一定的速度降低。并按图中的虚线绘出真空变化曲线，以便进行比较。

由图 1-5 可见，惰走曲线共分三段：第Ⅰ段为刚停止送汽时，其转速很高，摩擦鼓风损失很大，使转速由 $3000\text{r}/\text{min}$ 急剧下降到 $1500\text{r}/\text{min}$ 左右，故曲线较陡；第Ⅱ段

是在 1500r/min 的较低转速下，摩擦鼓风损失显著降低，能量损失在克服机械摩擦阻力上，而该阻力对比高转速下的摩擦鼓风损失所产生的阻力小得多，故此阶段各项阻力之和形成的阻力最小，在这段区间内，转速降低极为缓慢，转子惰走过程的大部份时间被这个阶段所占据；第Ⅲ阶段表示转速下降到一定数值以后，由于轴承油膜破坏，摩擦阻力迅速增大，转速迅速下降到零，故曲线较陡。

对汽轮鼓风机来说惰走曲线的变化也有上述三个阶段的规律，但惰走时间要比汽轮发电机组短较多。这是因为鼓风机在停机的过程中，仍然有较低的负荷所致。

根据转子的惰走曲线，可以判断汽轮机组的设备状况，并可以此分析设备可能存在的缺陷。如惰走时间比标准惰走时间变短。表明汽轮机内部摩擦阻力增大，可能是由于轴承工作条件恶化或汽轮机动静部分发生摩擦所致。反之如果惰走时间增长，则表明新蒸汽管道上阀门不严（主汽阀或调节汽阀）或抽汽管道上的逆止门不严，致使有压力的蒸汽进入汽轮机内部。

当转子惰走期间，轴封供汽不可过早的停止，以防大量空气从轴封处漏入汽缸发生局部冷却。一般当真空降到零时，停止轴封供汽。汽轮机惰走时，由于汽缸内部的热量不能被蒸汽带走，停机后排汽缸温度将会升高。因此冷凝器内仍然要有一定的循环冷却水通过。转子静止后，应立即将盘车投入运行。对设有顶轴油泵的汽轮机，在汽轮机转速下降到较低的数值时，应将其启动，防止油膜被破坏，而损伤轴承。

三、紧急故障停机

汽轮机在长期的运行中，由于某些零部件长期的在恶劣条件下工作，或在启动、停机、切换过程中操作不当，或因气候、电网、自然灾害等外界因素的影响，造成设备脱离正常运行状态而出现严重威胁人身和设备安全的紧急情况，运行人员应立即进行紧急故障停机。

紧急停机时应首先进行下列工作：

- (1) 用危急保安器使自动主汽门、调速汽门迅速关闭。
- (2) 给主控室发出“机器危险”信号。
- (3) 启动辅助油泵供润滑油用。
- (4) 停止抽气器并破坏真空。
- (5) 事后向调度室、值班长汇报。

汽轮鼓风机的紧急故障停机要及时打开放风门，并通知高炉。

一般遇有下列情况时应紧急故障停机：

- (1) 机组突然发生强烈振动。
- (2) 汽轮机转速升高到危急保安器动作转速而危急保安器未动作。
- (3) 清楚的听到机械内部有明显的金属撞击响声。
- (4) 水冲击。

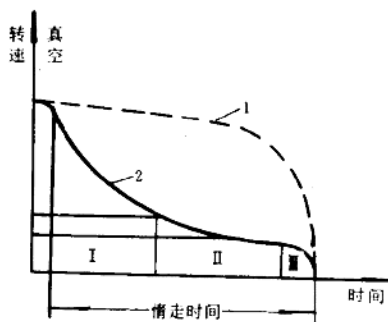


图 1-5 汽轮机停机时的转子惰走曲线和真空变化曲线
1—惰走曲线；2—真空变化曲线

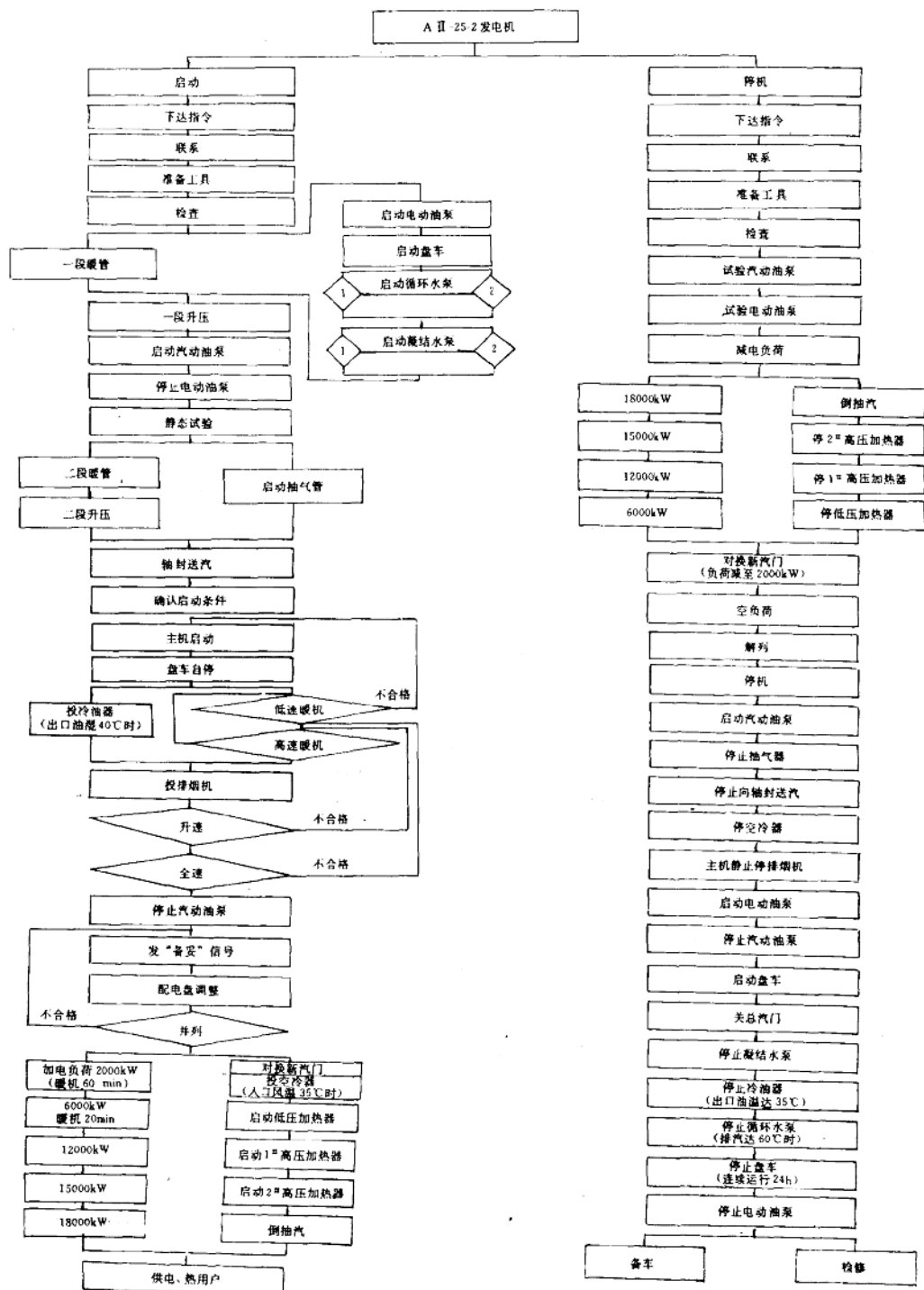


图 1-6 AII-25-2 型汽轮发电机启动和停机框图