



961797

TM621.6
0024

高等学校教材
专科适用

单元机组集控运行

上海电力学院 章德龙 编



.6

高等学校教材

————— 专 科 适 用 —————

单元机组集控运行

上海电力学院 章德龙 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书着重叙述了火力发电厂单元机组集控运行形式和方法,内容包括单元机组的启动和停运、运行调整、控制调节,单元机组的顺序控制、事故处理及联锁保护,计算机在电厂监控系统中的应用等。

本书系高等学校热能动力类专业专科教材,也可供有关工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材

专 科 适 用

单 元 机 组 集 控 运 行

上海电力学院 章德龙 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16印张 366千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 0001— 4196 册

ISBN 7-120-01686-5/TK·267

定价4.20元

前 言

单元机组集控运行是电厂单元机组集控运行专业的一门主要专业课。本书是根据能源部热能动力类高等专科学校教学组关于专科教材要求及所确定的教学大纲进行编写的。全书授课约需60学时，共编六章。

本书内容包括火电厂大容量单元机组的启动、停止、调峰技术、协调控制、顺序控制、机组联锁保护以及计算机在电厂中的应用等。在取材方面尽量反映目前国内大容量单元机组集控运行技术水平。

本书系高等专科学校电厂集控运行专业的试用教材，也可作为热能动力类专业的参考书，亦可供从事火电厂工作的运行技术人员参考。

本书由上海电力学院章德龙副教授编著。

本书由南京电力专科学校范仲元教授主审，他对原稿进行了仔细的审阅，并提出了很多宝贵意见，特在此致谢。

由于编者水平有限，书中一定存在不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

一九九一年七月

EA005/09

目 录

前 言

第一章 单元机组的启动和停运	1
第一节 单元机组启停特点和方式	1
第二节 配汽包锅炉的单元机组冷态启动	3
第三节 配直流锅炉的单元机组启动	13
第四节 启动中几个问题	25
第五节 热态滑参数启动	33
第六节 单元机组的停运	38
第二章 单元机组的运行调整	45
第一节 锅炉运行调节	45
第二节 汽轮机的运行监视	54
第三节 发电机、主变压器的监视和维护	64
第四节 大容量火电机组调峰	68
第三章 单元机组的控制调节	80
第一节 单元机组负荷调节方式	80
第二节 单元机组负荷控制系统	82
第三节 单元机组的运行控制方式	92
第四节 单元机组主控系统实例	95
第五节 汽轮机电液调节	103
第四章 顺序控制——自动操作	122
第一节 概述	122
第二节 汽机的局部顺序控制系统	123
第三节 锅炉的局部顺序控制系统	129
第四节 炉膛安全监控系统	139
第五节 锅炉吹灰顺序控制	165
第五章 单元机组的事故处理及联锁保护	172
第一节 单元机组事故特点与处理原则	172
第二节 单元机组故障及其处理	174
第三节 单元机组的联锁保护	181
第六章 计算机在电厂监控系统中的应用	200
第一节 概述	200
第二节 控制计算机的开环监视	207
第三节 计算机的闭环控制	216
第四节 单元机组自启停的计算机控制	220
第五节 集散型计算机控制系统	228

第一章 单元机组的启动和停运

第一节 单元机组启停特点和方式

一、单元机组启停特点

单元机组是炉机电纵向联系的一条龙式的整体生产系统，不同单元之间无横向联系，因而其启停操作方式有其特点。另外，单元机组均为大容量高参数机组，故单元机组的启停又体现了大容量高参数机组的某些特殊要求。

在母管制系统中，机炉的启停是分别进行的。锅炉启动是先点火，再升温升压至蒸汽参数略低于额定参数，然后并入母管，逐步提高蒸发量至预定值，锅炉启动结束。汽轮机启动则是从蒸汽母管引来额定参数蒸汽，先进行暖管，然后冲动转子、升速暖机、并网和带负荷，最终升负荷到预定值，汽机启动结束。由于机炉的启停是分别进行的，所以它们的启停速度分别取决于它们各自的特性，互不影响。母管制系统的这种启停方式耗用时间长，热损失和工质损失大，不经济；金属部件本身及金属部件间温差大，不安全；操作也较复杂。高参数大容量机组若采用这种启停方式，必然会产生不少的问题。

单元机组的启停是整组启停，炉机电之间互相联系，互相制约，各环节的操作必须协调一致、互相配合，才能顺利完成。由于单元机组采用了集中控制方式，这又为整组启停创造了条件。

单元机组的启动就是将静止状态的机组转变为运行状态的过程；停运则是启动的逆过程。在启停过程中，锅炉、汽轮机的各个部件以及管道的温度和应力状态都要发生很大的变化，特别是大容量高参数机组，由于体积庞大、结构复杂，它们的各个部件如锅炉汽包、各受热面，汽机的汽缸、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，温差导致膨胀不均，因而产生了热应力。汽轮机的“质面比”大，又有高速旋转的转子，在汽缸和转子之间出现膨胀差，会使汽轮机本来很小的动静间隙进一步减少，甚至会发生摩擦，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之中，很多设备的损坏事故就是在启停过程中发生的。有一些启停中的问题虽不立即引起明显的设备损坏，但却会给设备带来“隐患”，降低设备使用寿命。

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。

近年来，国内外对大容量单元机组的启停进行了大量的实践和研究，积累了不少经验，对单元机组的启停方式提出了下列原则要求：

(1) 应在最佳工况下启动机炉和增加负荷，并尽可能地在不同的温度情况下实现自动化程序启停；

- (2) 在机组启停期间工质损失和热损失最小;
- (3) 在任何情况下都要严格保证锅炉给水;
- (4) 根据负荷曲线的要求, 对蒸汽参数和蒸汽流量应能自动调节;
- (5) 只能用过热蒸汽(过热度最低为40~60℃)启动汽轮机;
- (6) 汽轮机进汽部分的金属与蒸汽之间的温度差在热态启动时, 应不超过50℃。

目前对单元机组已得出一致的结论, 即最经济的启动方式是采用滑参数启动, 这也是单元机组的主要优点之一。滑参数启动方式就是在锅炉点火、升温升压的过程中, 利用低温低压蒸汽进行暖管、冲转、暖机、并网及带负荷, 并随着汽温汽压的升高, 逐步增加机组的负荷, 待锅炉达到额定参数, 汽轮发电机组达到额定出力。由于汽轮机的暖管、冲转、暖机、升速及升负荷是在蒸汽参数逐渐变动的情况下进行的, 所以这种启动方式称为滑参数启动。启动时, 锅炉参数的升高速度主要取决于汽轮机所允许的加热条件, 蒸汽参数升至额定值时, 机组的负荷也可以同时增加到额定值。

滑参数停机则是在逐步降低汽温汽压情况下, 逐步降低机组的负荷, 直至负荷到零后解列停机。锅炉蒸汽参数的下降速度主要取决于汽轮机的冷却条件。

二、滑参数启停方式的主要优点

1. 安全可靠性好

滑参数启动时, 由于采用容积流量大的低参数蒸汽来加热设备部件, 使金属温差小, 对锅炉汽包、汽轮机转子及汽缸等加热比较均匀、温升平稳、热应力小, 从而使启动时的安全可靠性好。

2. 经济性高

单元机组滑参数启动时, 因主汽管道上的所有阀门全开, 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, 时间短, 可多发电, 辅机用电量也相应减少; 锅炉不必向空大量排汽, 减少了热量和汽水损失, 从而也减少了燃料消耗; 叶片在启停过程中可得到清洗, 使汽轮机效率得到提高。据100MW机组滑参数启动的实践结果表明, 采用滑参数启动可缩短启动时间约7h, 每启动一次可节约标准煤30t以上, 回收凝结水150t, 多发电20000kWh。

单元机组滑参数停机也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。因此, 滑参数启停提高了大机组运行的经济性。

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, 可以缩短启动时间, 提前并网发电。采用滑参数停机, 余汽余热被用来发电的同时, 加速了汽轮机的冷却过程, 所以可以提前揭缸检修, 缩短了检修工期, 增加了设备利用小时数。这样就提高了设备的利用率, 增加运行调度的灵活性。

4. 操作简化

在滑参数启动过程中, 当汽轮机采用全周进汽时, 汽轮机的调速汽阀处于全开位置, 操作调节简化。而且给水加热器也可随主机进行滑参数运行, 简化了操作。这些都在一定程度上为实现机组自动化顺序启停创造了条件。

5. 改善环境

由于减少了蒸汽排放所产生的噪音，改善了环境。

现代大容量单元机组启动均采用滑参数启动方法，而不采用额定参数启动。而单元机组停运则根据具体情况来定，或采用滑参数停机、或采用额定参数停机。

三、滑参数启动方式分类

1. 按操作方式分类

滑参数启动的操作方式可分为真空法和压力法两种。

真空法滑参数启动：启动前全开汽机电动主汽阀、自动主汽阀和调速汽阀，凝汽器抽真空，真空区一直扩展到锅炉汽包。锅炉点火后，锅水在真空状态下汽化，在不到0.1MPa的汽压下就可冲转汽轮机。随着锅炉燃料量的增大，一方面提高汽温汽压，另一方面汽轮机进行升速、暖机、并网及带负荷。但真空法滑参数启动存在一些明显的缺点，如依靠锅炉热负荷控制汽轮机转速比较困难，另外，疏水困难、蒸汽过热度低，易引起水击现象，因此安全性较差。特别对于中间再热机组，由于高压缸的排汽温度也相应较低，而有些锅炉的再热器又布置在烟气低温区，因而再热汽温就很难提高，这就可能使汽轮机低压缸最后几级叶片处的蒸汽湿度过大。真空法滑参数启动时，真空系统庞大，启动过程中抽真空也比较困难。因此，目前国内中间再热的单元机组均不采用真空法滑参数启动，而采用压力法滑参数启动。

所谓压力法滑参数启动，是指待锅炉所产生的蒸汽具有一定的压力和温度后，才冲转汽轮机。汽轮机启动前，汽轮机主汽阀是处于关闭状态，汽轮机的冲转参数较真空法为高，国内机组冲转参数一般采用0.8~1.5MPa，220~250℃。

一些国外机组，启动前采用盘车暖机预热高压缸，启动冲转参数较高，一般为4~6MPa，300~350℃，称为中参数启动，但亦属压力法滑参数启动。这种启动方式便于用电子计算机按启动顺序进行自动控制。

2. 按启动前汽缸金属温度高低分类

按汽轮机启动前调节级汽缸金属温度高低，可将滑参数启动分为冷态启动及热态启动。

启动前，汽轮机高压缸调节级汽缸金属温度低于它在额定参数下维持空转时的金属温度，称为冷态启动；如果调节级汽缸处的金属温度高于此温度，则称为热态启动。不同类型的汽轮机在额定参数下维持空转时，其调节级汽缸处的金属温度会有所不同，例如N125-135/550/550机组及N200-130/535/535机组的这个温度约为150℃以上；而N300-165/565/565机组的这个温度则为200℃。1980年出版的《电力工业技术管理法规》（试行）中指出：如无制造厂规定时，高温高压机组宜以高压内缸第一级金属温度为依据，该温度在200℃以下为冷态，温度在200~370℃为温态，370℃以上为热态。有的国家则规定调节级断面处内缸下部温度超过150℃为热态，低于150℃为冷态。

第二节 配汽包锅炉的单元机组冷态启动

一、配自然循环锅炉的单元机组冷态滑参数启动

（一）启动前的准备

单元机组启动前的准备工作基本上是炉、机、电分别进行的，有相当一部分准备工作与母管制系统大体相同，如启动前对所有设备和系统都要进行详细检查，有关阀门、挡板应在规定的开、关状态，电动门、调整门和主要辅机都要经过认真局部试运行，确保其运行性能良好。还有锅炉水压试验、锅炉上水、联锁试验、汽机润滑油提升油温、油泵联动试验、大轴挠度测量、发电机—变压器组绝缘测定、断路器传动试验以及发电机—变压器组恢复备用等。但单元机组是一个整体，在启动前的准备工作中，炉机电是互相联系的。因此，单元机组启动准备工作也具有某些特点：

(1) 对于中间再热机组来说，汽轮机静止时调速系统动作试验，一定要在锅炉点火前进行。否则当锅炉点火后，蒸汽旁路系统投入，再热蒸汽系统已充汽，尽管汽轮机电动主汽阀在关闭状态，但中压缸进汽管没有截止阀。如中压调速汽阀一旦开启，就有可能由于中压缸进汽而冲动汽轮机转子。

(2) 单元机组均设置一系列保证安全的保护装置，除因启动过程的特殊条件不能投入外，其它各项保护应尽量投入。如汽机的低汽温、低真空保护，由于启动过程中汽温低、真空系统往往不稳定，尚不能投入外，其它汽机保护均可以投入。

(3) 高参数大容量汽轮机转子的临界转速偏低，当转速为最低临界转速的两倍以上时，易发生油膜共振。油温调节不当并偏低时，也往往会使稳定裕度不大的机组发生油膜共振。因此，要求油温不低于40℃，为了增加其稳定性，可维持油温为45℃。目前提高油温是靠油循环来实现。

(4) 锅炉上水所需时间，要视水温、气候条件及锅炉型式而定。高参数大容量锅炉上水速度应适当控制。一般锅炉的上水为104℃的除氧水，上水时间一般需3~4h，冬季上水时间应比夏季长些。

(5) 发电机—变压器组恢复备用，一定要在汽轮机冲转之前完成。汽轮机一经冲转，整个发电机—变压器组回路即认为已经“带电”。这一点对热态启动显得特别重要，因为热态启动过程所需时间很短，电气的准备工作一定要提前完成，才不至于影响整个启动过程进行。

(6) 燃运系统上煤、油系统油循环、化学水处理系统制水、发电机充氢、轴冷水系统投运等，都应在启动前作好准备。

(二) 锅炉点火

锅炉点火是单元机组启动操作的正式开始，单元机组启动主要操作都是在集控室内进行的。

点火前应对炉膛及烟道进行吹扫，以清除可能残存的可燃物，防止点火时发生炉内爆燃。吹扫时炉内通风的容积流量应大于25%额定风量，吹扫通风时间不少于5min。对于煤粉炉的一次风管亦应吹扫3~5min；对于燃油管及油喷嘴也应用蒸汽进行吹扫，以保证点火时油路畅通及防止点火时爆燃。

锅炉点火前，应先启动回转式空气预热器，然后顺序启动引风机和送风机各一台，以满足炉膛、烟道及预热器的吹扫要求，并可防止点火后回转式空气预热器由于受热不均而发生严重变形的问题。先启动引风机，后启动送风机，以保证炉内有一定负压，防止正压

出现。

目前国内不少电厂采用重油(或轻油)作为锅炉点火到机组20%~30%额定负荷的主要燃料。其点火方式有:用轻油点火器分别点燃重油及煤粉燃烧器;有的则采用轻油点火器点燃重油燃烧器,再由重油燃烧器点燃煤粉燃烧器。而轻油点火器的轻油是靠高能发火器来引燃的。对于轻油或重油系统,在其投运前应进行油系统泄漏检查,检查快关阀及炉前油系统泄漏合格与否。其检查方法是:先开重油快关阀,炉前油管充油,约经若干秒,快关阀关闭。再经若干秒,重油入口压力(或炉前油管的检查前后压力变化值)在规定值的范围内,说明炉前油系统与快关阀无泄漏,即泄漏试验合格。轻、重油系统泄漏试验的目的是防止油枪投运前或快关阀关闭时油泄漏进入炉膛而引起爆燃。因此在点火前,必须做好轻、重油系统的泄漏检查。

在轻油或重油投运后,炉温逐渐升高。对于煤粉炉,为使煤粉能稳定着火燃烧,要求炉内具有一定的热负荷(有相应的轻油量或重油量),一般要求锅炉具有20%以上的额定蒸汽负荷,并要求热空气温度在150℃以上,才允许投运煤粉燃烧器。

无论是点火油枪或主燃烧器,最初投入时最好不少于两只,其目的是使炉内热负荷均匀。如果点火失败(开始点火)或发生熄火,应立即切断燃料,并按点火前的要求对炉膛进行重新吹扫后再点火,否则往往会发生炉内爆燃。

(三) 锅炉升温升压

点火后,锅炉各部分温度逐渐升高,锅水温度相应提高,水汽化后汽压也逐渐升高。从锅炉点火到汽压升至工作压力的过程称为升压过程。

由于水和蒸汽在饱和状态下温度与压力之间存在一定的对应关系,所以蒸发设备的升压过程也就是升温过程,通常以控制升压速度来控制升温速度。为避免温升过快而引起温差热应力,在升压过程中汽包内水的平均温升速度限制为1.5~2℃/min。

升温升压过程中的控制要求:

1. 升压速度和汽包壁金属的热应力

在锅炉上水和初期升压过程中,汽包的受热是不均匀的。上水时,进入汽包的水温约为80~90℃,汽包水位以下部分受热,壁温上升,故汽包下半部壁温高于上半部。点火后水温升高,但初期产汽量少,水循环不良,汽包下半部与几乎不流动的水接触传热,放热系数小,汽包下半部金属温度升高缓慢;汽包上半部与饱和蒸汽接触,蒸汽与汽包壁为凝结放热,故其放热系数比下半部缓慢对流传热大几倍,故上半部壁温升高较快。这样上半部壁温很快由低于下半部而变为高于下半部,形成上高下低的温差,严重时将使汽包发生背拱状变形。上下壁温差与升压速度有关,升压越快,上下壁温差就越大。大容量锅炉汽包壁厚,升压越快,汽包内外壁温差也越大。温差大,热应力大,严重时会使汽包壁产生裂缝。

在升压初期,汽包内压力较低,汽包金属主要承受由温差引起的热应力,而此时各种温差往往比较大,故升压率应控制小些。另外,在低压阶段升高单位压力的相应饱和温度上升值大。因此升压初期的升压速度应特别缓慢,并应采取措施,加强汽包内水的流动,从而减少汽包上下壁温差。一般采用汽包内设置邻炉蒸汽加热装置和加强下联箱放水,以

尽早建立水循环和控制汽包热应力。当水循环处于正常后，为不使汽包内外壁、上下壁温差过大，仍应限制升温升压速度。当压力升至额定值的最后阶段，汽包金属的机械应力亦接近于设计预定值，这时如果再有较大的热应力是危险的，故升压速度仍受限制。一般规定汽包上下壁温差不得超过 50°C ，为此在大型锅炉汽包上一般均装设上下壁温测点若干对，以便在启动时监视。若发现壁温差过大，就应降低升压速度。

2. 水冷壁保护

在锅炉升压初始阶段，水冷壁受热不多，管内工质的含汽量较少，水循环处于不正常；又因此时投入燃烧器的只数少，使水冷壁受热和水循环的不均匀性较大。如果同一联箱上各根水冷壁管金属温度存在差别，就会产生热应力，严重时会使下联箱变形或管子损伤。对于膜式水冷壁，尤应注意其受热不均匀性。

水冷壁的受热膨胀情况可通过装在下联箱的膨胀指示器加以监视，做好记录，发现问题应暂缓升压，待查明原因处理后方可继续升压。为使各水冷壁受热均匀，应正确选择和适当轮换点火油嘴。加强下联箱放水，或在下联箱采用蒸汽加热装置，均可以加强水循环，改善水冷壁的膨胀情况。

3. 过热器、再热器启动中的安全

锅炉正常运行时，过热器管被高速蒸汽所冷却，管壁金属温度比蒸汽温度高得不多。在启动过程中，情况就不相同，在冷炉启动之前，直立的过热器管内，一般都有停炉时蒸汽的凝结水或水压试验后留下来的积水。点火后，这些积水将逐渐蒸发。锅炉起压后，部分积水也会被蒸汽流所排除，在积水未全部蒸发或排除之前，某些管内没有蒸汽流过，管壁金属温度近于烟气温度的。即使过热器内已完全没有积水，如蒸汽流量少，管壁金属温度仍不会比烟温低很多。因此一般规定，在锅炉蒸发量小于 10% 额定蒸发量时，必须限制过热器（或再热器）的入口烟温。考虑到在启动初始阶段，烟气侧有较大的热偏差，故烟温的限值应比过热器金属允许承受的温度还要低些。控制烟温的手段主要是限制燃烧率（燃料量）或调整炉内火焰的位置（实际上是控制炉膛出口烟温值）。

随着汽包压力的升高，过热器内蒸汽流量增大，管壁得到较好的冷却，这样可逐步提高烟温，而用限制出口汽温的方法来保护过热器。而再热器则通过汽机旁路系统进行保护。对单元机组来说，升压过程中的过热器出口蒸汽温度主要取决于汽机启动加热的状态，对高中压合缸的汽轮机，启动过程中还应考虑过热汽温与再热汽温的匹配问题，它们是通过调节锅炉燃烧率及汽机旁路系统的旁路流量来实现的。

4. 省煤器保护

在点火后的一段时间内，锅炉不需要进水或只需间断进水。在停止给水时，省煤器内局部地方的水可能汽化，如生成的蒸汽停滞不动，该处管壁可能超温。间断给水时，省煤器内的水温也就会间断地变化，使管壁金属产生交变的热应力，从而影响金属和焊缝的强度。

为了防止省煤器在启动中受到损伤，汽包锅炉均装置再循环管。在锅炉启动初期，开启再循环管上的阀门，使汽包与省煤器形成自然循环回路，汽包内的水经再循环管下降进入省煤器入口，在省煤器中受热后上升，又进入汽包。采用再循环管并非是很完善的措

施，一则在此再循环回路中循环压头很低，不易建立正常的循环；再则当汽包内水温高于给水温度较多时，间断的给水仍会使省煤器管金属温度发生较大的波动。

(四) 暖管

冷态启动前，主蒸汽管道、再热蒸汽管道、自动主汽阀至调速汽阀间的导汽管、电动主汽阀、自动主汽阀、调速汽阀等的温度相当于室温。锅炉点火后利用所产生的低温蒸汽对上述设备及管道进行预热，称为暖管。暖管的目的是减少温差引起的热应力和防止管道水击。汽机的法兰螺栓加热装置、轴封供汽系统、汽动油泵和蒸汽抽气器的供汽管道也应同时进行暖管。

对于单元机组，锅炉点火升压与暖管是同时进行的，锅炉汽包至汽机电动主汽阀之间的蒸汽管道上的阀门在全开位置，电动主汽阀及其旁路阀处在全关位置，再热机组通过汽机旁路系统对再热蒸汽管道进行暖管。同时，也可通入少量蒸汽，在盘车情况下对高、中压缸进行暖缸。

对高参数、大容量的机组，暖管时温升速度一般不超过 $3 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

暖管时应注意以下几点：

(1) 暖管时应注意疏水，如不及时排除暖管产生的凝结水，当高速汽流通过时便会发生水冲击，引起管道振动；如果凝结水被带入汽轮机会发生水冲击事故。疏水合理还可帮助提高汽温、加快暖管。

(2) 主蒸汽管和再热器冷、热段疏水一般经疏水扩容器排至凝汽器，汽机旁路系统的投运也使凝汽器带热负荷。所以循环水泵、凝结水泵和抽气器应在暖管前就投入运行。排汽室温度调整在 $60 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ，不允许超过 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3) 大容量机组的自动主汽阀和调速汽阀体积大，形状复杂、壁厚不均，往往因热应力而发生裂缝，所以在暖管时要注意暖管速度。国外某些机组采用预热调速汽阀的措施。

(五) 冲转

1. 冲转方式

我国单元机组的冲转方式一般采用高压缸进汽的冲转方式，在具体冲转操作上有三种方式：调速汽阀冲转、自动主汽阀冲转、电动主汽阀旁路阀冲转。

调速汽阀冲转是在自动主汽阀和电动主汽阀全开情况下，用同步器操作调速汽阀来冲转、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阀开启，蒸汽只通过汽缸喷嘴的某一弧段，易使汽缸受热不均，各部温差较大。但因采用冲转压力较低，对汽缸、转子的放热系数较小，流量亦小，汽缸因温差造成的热应力不致超过允许值，所以矛盾并不突出。优点是启动过程中都用调速汽阀控制，操作方便灵活。

用自动主汽阀冲转时，调速汽阀全开，全周进汽受热均匀。但自动主汽阀处于节流和被冲刷状态，易造成关闭不严，降低了自动主汽阀的保护作用。

用电动主汽阀的旁路阀（或用预启阀）冲转时，自动主汽阀和调速汽阀全开、电动主汽阀全关，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

动主汽阀的冲刷。缺点是在10%额定负荷左右，需进行由旁路阀切换到调速汽阀控制的“阀切换”操作，在操作方面不灵活。

压力法滑参数启动中，调速汽阀冲转和电动主汽阀旁路阀冲转都有应用。不论采用哪种方式冲转，转子一经冲转，立即关闭冲转的阀门，在断流的情况下，用听棒或其它专用设备检查汽缸内有无动静摩擦，但不要使转子停转。经检查确信无问题后，重新开启冲转阀门，保持转子在400~500r/min运转，进行全面检查。

国外大型机组，在汽机冲转之前，先进行盘车预热，然后再用高压缸冲转方式启动机组。采用盘车预热启动有以下几点好处：

(1) 国外大型汽机广泛采用多层汽缸及窄法兰结构，相当一部分为反动式汽轮机，转子直径较大，特别是中压转子不易做到均匀加热。采用盘车预热易于利用凝结放热的形式在较低温度下加热高、中压转子，又可避免高温蒸汽的热冲击。

(2) 由于高、中压转子的中心温度已被加热（盘车预热）到接近或超过材料的脆性转变温度（FATT），可以缩短定速暖机的时间。这样从冲转开始，可以较快的速度升至全速。

(3) 可以使用更高的冲转参数，而汽温高可提高加热速度，汽压高有利于滑压启动、简化操作。

(4) 在升速过程中可以减少汽缸热变形和振动。

(5) 便于使用电子计算机进行启动顺序控制。

2. 冲转参数的选择

冲转时主蒸汽压力的选择，要从便于维持启动参数的稳定出发，同时考虑除氧器和蒸汽抽气器的用汽情况，并在锅炉不增加燃烧率、不进行过多调整的情况下，蒸汽产量应能满足冲转、升速、顺利通过临界转速，并达到定速和进行超速试验，且有一定余量。由此要求主蒸汽压力高一些，用旁路阀冲转的机组要求在该汽压下有足够的通流能力。另一方面国产中间再热机组采用调速汽阀冲转，为了增加进汽度和容积流量以利于金属均匀加热，又希望启动冲转压力低些。综合上述两方面要求，各机组对于冷态压力法滑参数启动，一般采用冲转压力为1~1.5MPa。

关于冲转时的主蒸汽温度，主要考虑在保证主蒸汽压力下，要有足够高的过热度，以防止末几级叶片处蒸汽湿度过大，同时防止启动时因锅炉操作不当而使蒸汽进入饱和区。另一方面金属温度在冷态启动前比较低，仅相当于室温，为了不出现过大的蒸汽与金属的温差，以减少热冲击，则要求主蒸汽温度低些为好，但过低汽温又会延长启动时间。综合上述因素，一般认为主蒸汽过热度不小于50℃。

表1-1列出部分国产机组启动冲转主蒸汽参数。

国产机组采用上述冲转参数的其它原因还有：

(1) 大型汽机由冲转到全速的时间较短，因此希望在此期间尽量简化锅炉操作，并维持稳定参数，以便集中注意力于汽轮机启动，顺利进行冲转、暖机、升速、越过临界转速以至达到全速。

(2) 蒸汽温度和转速较低时，汽机的加热作用不大，适当提高蒸汽温度有利于缩

短启动时间，但不要超过350~400℃，因为国产大型汽轮机采用宽法兰结构，冲转汽温过高，容易产生过大的金属温差与差胀。

表 1-1 部分国产机组冲转主蒸汽参数

汽轮机型号		N125-135/550/550		N100-90/535	N200-130/535/535	N300-165/550/550	
锅炉炉型		汽包炉		直流炉	汽包炉	汽包炉	直流炉
冲转参数	压力(MPa)	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5	0.8~1.0	0.8~1.0	1.0
	温度(℃)	250~300	250~300	330~350	250~260	220~250	300

从国外引进的机组，其启动冲转压力一般选择较高，为4~8MPa。国外机组一般设置全周进汽、多层汽缸、窄汽缸法兰等，使汽机部件受热不均及热应力过大问题有所改善。如冲转汽压选择低，蒸汽放热系数小，使蒸汽对金属的放热量减少，延长启动时间。如采用较高冲转压力可以使启动冲转流量增大，又可提高蒸汽放热系数，缩短启动时间，节约启动费用。因此在热应力许可的条件下，冲转压力可以选得高些。宝钢电厂三菱 350MW 机组冷态启动冲转参数采用6MPa、360℃。

启动冲转时汽温选择原则，为了避免产生热冲击，减少寿命损耗，要求进入汽机内的蒸汽温度比金属温度（调节级汽缸温度）高50℃左右（26~66℃）。同样要求蒸汽至少有50℃的过热度，带有湿度的饱和蒸汽的放热系数比过热蒸汽大得多，因此启动时要防止由于蒸汽进入饱和区内而增大放热，使金属内外温差扩大，影响安全。当然有一定的过热度也可以减少水滴对金属的侵蚀，以及由湿蒸汽引起的腐蚀。有时上述两项原则同时兼顾有困难时，首先应满足过热度的要求，因为湿蒸汽引起放热系数增大所引起的后果比蒸汽与金属温度失配所引起的后果更严重。

在冷态启动时，由于汽机金属温度较低（相当于大气温度），蒸汽接触到这样低温的金属就会凝结。在凝结条件下蒸汽对金属放热系数比湿蒸汽放热系数还要大5倍左右，由此产生热冲击，其后果是严重的。因此比较合理的方法是在盘车时通入蒸汽预先加热转子，使转子温度超过相应蒸汽压力下饱和温度，然后用前述原则选择冲转参数。

（六）暖机

汽轮机在冷态启动时，蒸汽与汽缸、转子的温差很大，为防止汽机各金属部件受热不均匀产生过大的热应力和热膨胀，在冲转升至额定转速前，需要有一定时间的暖机过程。暖机的目的是防止金属材料脆性破坏和避免过大的热应力。

暖机转速愈高则蒸汽对金属的放热系数愈大，加热愈剧烈，但其离心应力过高会带来危险性。暖机转速太低，其放热系数小，加热慢，延长启动时间及增加启动损失。对于国产大容量高参数机组采用中速暖机，即在1000~1400r/min、真空80~86.6kPa下，维持30~60分钟。有时还需要在2000~2400r/min下进行高速暖机。

在定速暖机中应注意以下几个问题：

(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 2000r/min 左右，其蒸汽流量约为额定转速时的 $\frac{1}{3}\sim\frac{1}{4}$ 左右，应力约为额定转速时的 $\frac{1}{2}$ 左右。如暖机转速太高，则会因离心应力过高而带来危险性。

(3) 暖机结束后，应检查汽缸总膨胀和中压缸膨胀情况，并检查记录各处的差胀值。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。

以往国内机组启动时一般考虑汽缸的应力问题，这是因为国产汽机的汽缸大多是仿苏的，法兰凸缘厚而宽，法兰处的温差很大，成了大家的注意点。相反，对于转子，由于没有测温的手段，无法测量转子的内外温差，一般通过计算方法把稳定的温度场计算出来。对暂态过程中温度分布计算还存在困难，所以转子工况实际上是处于不清楚的状态。国内大机组运行时间一般很少达到十万小时，即使能达到的机组其启动次数亦并不太多，转子的问题可以说远远没有暴露。国外通过较长时间的运行实践，发现有很多转子在运行之后出现裂缝。另外也研究得到计算转子暂态温度分布的方法，可以定量分析启动或运行状态下的转子温差热应力情况，由此可知转子、汽缸的热应力都是启动或运行中的主要矛盾。

国外机组从汽缸结构上作了改进，采用双层汽缸结构。另外由于不采用过大的螺栓和将螺栓的部分圆弧置于汽缸壁的凹槽中，法兰凸缘已不明显，使汽缸法兰内外温差变小。因此对反动式汽轮机在启动运行中，主要考虑转子的温差热应力，如果转子得到满足，汽缸一般是偏于安全的。因此反动式汽轮机暖机的主要矛盾是转子加热问题。

(七) 升速

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 $2\sim 3$ 个升速率，其数值由计算机进行设定控制。

(2) 越过临界转速时，应开大冲转汽阀，迅速而又平稳越过临界转速，不得停留但也不要升速太快，以免失去控制而造成设备损坏。

(3) 在升速过程中，应由专人监测各轴承的振动值，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。

(4) 当转速接近 2800r/min 时，注意调速系统动作是否正常，应对汽机调节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。

(5) 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

或进行并列。

(八) 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网操作。并网操作采用准同期法，要严格防止非同期并列。

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，准同期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、周波相等。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。准同期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。

准同期法分自动准同期、半自动准同期和手动准同期三种。调周波（调节汽轮发电机转速）、电压及合主开关全由运行人员手动操作的称手动准同期；由自动装置来完成的，称自动准同期；三项工作中有一项以上为自动的，即为半自动准同期。

大容量机组一般都采用自动准同期方法，它能够根据系统的频率检查待并发电机的转速，并发出调节脉冲来调节待并发电机的转速，使它达到比系统高出一个预先整定的数值。然后检查同期回路便开始工作，这些工作是由发电机自动准同期装置（ASS）来完成的，当待并发电机以一定的转速向同期点接近，由电压自动调整装置（AVR）通过调节转子励磁回路的励磁电流改变发电机电压，当待并发电机电压与系统的电压相差在 $\pm 10\%$ 以内时，它就在一个预先整定好的提前时间上发出合闸脉冲，合上主断路器，使发电机与系统并列。

2. 带负荷及初负荷暖机

大型汽机在额定转速时的蒸汽流量约为额定负荷下蒸汽流量的 $4\% \sim 5\%$ 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差胀。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。

初负荷暖机的负荷值是根据蒸汽和金属温度的匹配情况来决定的，失配越大，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，失配大时间长。

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，逐渐开大调速汽阀加负荷。随着调速汽阀开大，部分进汽逐渐加大，调节级汽温上升，高压差胀正值增加很

快，因此调速汽阀开大操作要缓慢（以国产机组采用调速汽阀冲转的方式来讨论），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，尚须监视差胀变化，如发现差胀过大时，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，应延长暖机时间。

3. 并列后发电机操作的有关要求

发电机并列后可立即接带部分无功负荷以改善系统的电压水平。对于表面冷却的发电机，并列后，即可按定子电流的50%接带无功负荷，这主要考虑转子线圈不会出现残余变形；对于内冷式发电机，冷态启动时，如立即给转子加很大的励磁电流，由于转子绕组和铁芯发热时间常数差别较大，会使两者形成较大的温差，这样多次启停会引起绝缘损坏。所以规程中规定：对内冷式发电机，并列后，电流、负荷增长速度不应超过正常有功负荷的增长速度。

（九）阀切换

有的机组的启动是采用电动主汽阀的旁路阀或用带有预启阀的主汽阀进行冲转、升速、并列和接带初负荷。当负荷增至10%额定负荷左右时，进行“阀切换”，即由主汽阀的旁路阀或预启阀控制切换到调速汽阀控制。

（十）升负荷

1. 升负荷率的控制

初负荷暖机之后，随着负荷的增加，蒸汽量增大，蒸汽对金属的放热系数越来越大，对汽机金属部件加热增强。由于负荷与汽机调节级后汽压有一定关系，调节级后汽温与负荷也有一定关系，因此仍应按热应力来控制升负荷率的大小，以防止汽缸、转子温差过大。升负荷时，除对汽轮机要求外，还应考虑发电机的要求，两者选用较小升负荷率作为实际升负荷率的控制值。

2. 对机炉操作的要求

当汽机调速汽阀全开后，锅炉增加燃料量，按预先制定的冷态滑参数启动曲线进行升温升压。随着锅炉参数的提高，汽轮机负荷逐渐增加，此时亦应根据启动曲线严格控制升温升压速度。当负荷增至80%额定负荷后，汽缸金属的温度水平接近于额定工况下的金属温度水平，锅炉滑参数增加负荷的过程即告结束。此后随着锅炉蒸汽参数的提高，保持负荷不变，逐渐关小调速汽阀。当锅炉参数达到额定参数后，再逐渐开大调速汽阀把负荷增至额定负荷。

3. 对发电机操作的要求

发电机并入系统后，就可按规定的速度增加有功和无功负荷，但要求定子电流及有功负荷的增加有一个逐步增加的过程。在冷态启动时，发电机处于冷状态，如立即使发电机带上很大的负荷，就会在线棒铜线和定子铁芯间产生很大的温差。为了防止由于过大的铜铁温差而损坏发电机定子线棒的绝缘，所以不允许发电机一并入系统就立即使定子电流达到额定值，应有一个逐步增加的过程。同时为使汽机各部件能均匀膨胀，也要求发电机有功负荷的增加有一个过程。大容量发电机，由于线棒长、铁芯尺寸大，增加负荷时铜铁温