

电网调度运行 实用技术问答

国家电力调度通信中心 编

 中国电力出版社
www.ccpp.com.cn

TM734-44 617
G98

电网调度运行 实用技术问答

国家电力调度通信中心 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由国家电力调度通信中心组织编写,是2000年全国网省调调度值班人员统考、抽考的考试指南,旨在提高各级调度值班人员关于电网调度运行的理论水平和操作技能,更好地保证电网安全、优质、经济运行。

全书共分七章、447道题,以实际应用为主线,采取简明问答的形式介绍电网调度运行的基本理论和基本概念,突出了应当重点掌握的基础知识、基本原理和有关规程、规定。

本书被国家电力调度通信中心推荐为调度员的上岗培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电网调度运行实用技术问答/国家电力调度通信中心编.-北京:中国电力出版社,2000.3

ISBN 7-5083-0214-1

I. 电… II. 国… III. 电力系统调度-技术培训-教材 IV. TM73

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第72988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>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000年1月第一版 2000年3月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 10印张 202千字 2插页

印数10001-15000册 定价22.00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

为了总结多年来全国电网调度运行的实践经验，促进各级调度值班人员学习，提高各级调度值班人员关于电网调度运行的理论水平和操作技能，以便更好地保证电网安全、优质、经济运行，按国家电力公司领导的指示，由国调中心组织有关网省调，编写了这本《电网调度运行实用技术问答》。

本书第一章主要由王满意、林佑纆审编，第二章主要由冯贵明、刘明忠审编，第三章主要由辛绍平、张英怀审编，第四章主要由李发棣、邱金辉审编，第五章主要由李学勇、张国威审编，第六章主要由李其昌、邱野审编，第七章主要由尹其云、刘皓等审编。全书最后由尹其云等同志做了统一编审。

本书做为 2000 年全国网省调调度值班人员统考、抽考的考试指南，要求重点掌握，建议本书做为调度员的上岗培训教材之一，要求认真学习，并希望本书对地调、县调和发电厂、变电站值班人员的培训能发挥较好的作用，此外，本书也可供为大中专院校及科研单位参考。

本书在编审过程中，得到有关网省调、青岛地调、大连华能电厂等单位的大力支持，在此表示感谢。

本书涉及内容广泛，共编写 447 个问题和参考答案，由于长期以来各网运行操作习惯和事故处理方法有所不同，对书中个别观点可能会有一些不同意见，本书的目的之一就是提出问题，让大家进行深入的讨论和思考，寻找科学合理的答案，以便进一步交流总结并从理论上提高调度运行人员的水平。由于时间仓促，水平有限，对书中存在错漏之处，恳请读者批评指正。

编者

1999 年 9 月

第一章 发电厂基础知识

1. 发电厂按使用能源划分有几种基本类型？

答：发电厂按使用能源划分有下述基本类型：

(1) 火力发电厂。火力发电是利用燃烧燃料（煤、石油及其制品、天然气等）所得到的热能发电。火力发电的发电机组有两种主要形式：利用锅炉产生高温高压蒸汽冲动汽轮机旋转带动发电机发电，称为汽轮发电机组；燃料进入燃气轮机将热能直接转换为机械能驱动发电机发电，称为燃气轮机发电机组。火力发电厂通常是指以汽轮发电机组为主的发电厂。

(2) 水力发电厂。水力发电是将高处的河水（或湖水、江水）通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电。以水轮发电机组发电的发电厂称为水力发电厂。

水力发电厂按水库调节性能又可分为：

1) 径流式水电厂。无水库，基本上无调节能力的水电厂。

2) 日调节式水电厂。水库很小，水库的调节周期为一昼夜，将一昼夜天然径流通过水库调节发电的水电厂。

3) 年调节式水电厂。对一年内各月的天然径流进行优化分配、调节，将丰水期多余的水量存入水库，保证枯水期放水发电的水电厂。

4) 多年调节式水电厂。将不均匀的多年天然来水量进行优化分配、调节，多年调节的水库容量较大，将丰水年的多余水量存入水库，补充枯水年分的水量不足，以保证电厂的可调出力。

(3) 核能发电厂。核能发电是利用原子反应堆中核燃料（例如铀）慢慢裂变所放出的热能产生蒸汽（代替了火力发电厂中的锅炉）驱动汽轮机旋转带动发电机发电。以核能发电为主的发电厂称为核能发电厂，简称核电厂。根据核反应堆的类型，核电厂可分为压水堆式、沸水堆式、气冷堆式、重水堆式、快中子增殖堆式等。

(4) 风力发电场。利用风力吹动建造在塔顶上的大型桨叶旋转带动发电机发电称为风力发电，由数座、数十座风力发电机组成的发电场地称为风力发电场。

(5) 其他还有地热发电厂、潮汐发电厂、太阳能发电厂等。

2. 简述火力发电厂的主要设备。

答：火力发电厂的主要设备有锅炉、汽轮机和发电机。锅炉是将燃料（煤、石油或其制品、天然气等）进行燃烧并利用燃烧放出的热能将经过软化处理的水变为高温高压蒸汽送到汽轮机。高温高压蒸汽在汽轮机内膨胀做功，将携带的热能转变为推动汽轮机高速旋转的机械能，高温高压蒸汽在做功之后被冷却成凝结水又送回锅炉，完成热力循环的全过

程。发电机被汽轮机带动旋转，将汽轮机的机械能转变为电能。

3. 简述火力发电厂（以燃煤发电厂为例）主要生产过程。

答：燃煤火力发电厂主要生产过程是：原煤由火车、汽车或轮船运到发电厂后由卸煤设备卸下并转送到储煤场（或储煤罐）储存。原煤由输煤设备从储煤场送到锅炉的原煤斗中，再由给煤机送到磨煤机中磨成煤粉。煤粉送至分离器进行分离，合格的煤粉送到煤粉仓储存（仓储式锅炉）。煤粉仓的煤粉由给粉机送到锅炉本体的喷燃器，由喷燃器喷到炉膛内燃烧（直吹式锅炉将煤粉分离后直接送入炉膛）。燃烧的煤粉放出大量的热能将炉膛四周水冷壁管内的水加热成汽水混合物。混合物被锅炉汽包内的汽水分离器进行分离，分离出的水经下降管送到水冷壁管继续加热；分离出的蒸汽送到过热器加热成符合规定温度和压力的过热蒸汽经管道送到汽轮机。过热蒸汽在汽轮机内作功推动汽轮机旋转，汽轮机带动发电机发电，发电机发出的三相交流电通过发电机端部的引线引出送到电网。在汽轮机内作完功的过热蒸汽被凝汽器冷却成凝结水，凝结水经凝结泵送到低压加热器加热并送到除氧器除氧，再经给水泵送到高压加热器加热并送到锅炉继续进行热力循环。再热式机组采用中间再热过程，即把在汽轮机高压缸做功之后的蒸汽送到锅炉的再热器重新加热，使汽温提高到一定（或初蒸汽）温度，再把再热后的蒸汽送到汽轮机中压缸继续做功。

4. 锅炉本体有哪些主要部件？各有什么主要功能？

答：在火力发电厂中，锅炉的功能是利用燃料燃烧放出的热能产生高温高压蒸汽。锅炉本体的结构和主要部件都是为了实现它的功能而设置的。锅炉本体的结构有炉膛、水平烟道和垂直烟道（尾部烟道），主要部件按燃烧系统和汽水系统来设置，有空气预热器、喷燃器、省煤器、汽包、下降管、水冷壁、过热器、再热器等。

空气预热器分层布置在垂直烟道中（旋转式的不分层，布置在垂直烟道底部），它把送风机送来的空气利用流经垂直烟道的烟气进行加热，加热后的空气分别送到磨煤机（做为热风源）、排粉机、一次风箱和二次风箱。

喷燃器布置在炉膛四角（或前后墙），数目多时可上下分层。给粉机把煤粉送入喷燃器，一次风引入喷燃器把煤粉吹入炉膛。二次风口布置在喷燃器近旁，喷入助燃空气。直吹式锅炉由排粉机将煤粉直接吹入炉膛。煤粉燃烧后形成飞灰（细灰和粗灰）和灰渣。飞灰随烟气经水平烟道、垂直烟道到除尘器，除尘器把烟气中98%以上的细灰除下落入除尘器下部的灰斗中，极少的细灰随烟气经吸风机送入烟囱排入大气；灰渣则落入炉膛底部形成炉底渣，由除灰设备定时排出炉外。

省煤器分层布置在垂直烟道中，它把给水母管送来的水利用烟气加热再送到汽包中。

汽包布置在锅炉顶部，它在锅炉的汽水循环中起着接收来水、储水和进行汽水分离的作用。

汽包中的水经下降管、水冷壁下联箱（它们都布置在炉膛外壁）送到水冷壁。在强制循环式锅炉的下降管中安装有强制循环泵，加强水循环。

水冷壁是布置在炉膛四周的排管，在炉膛内燃烧的燃料所放出的热把水冷壁管内的水

加热成汽水混合物。汽水混合物经水冷壁上联箱和上升管进入汽包。汽包中的汽水分离器把汽水混合物进行分离，分离出的蒸汽送到过热器，余下的水留在汽包中继续参加水循环。直流式锅炉没有汽包，水冷壁将水直接加热成蒸汽送入过热器。过热器布置在炉膛上部和水平烟道中，它把蒸汽加热并调节成符合规定温度的过热蒸汽，过热蒸汽经集汽联箱、主汽门到汽轮机。

过热器又可分为低温过热器和高温过热器。在锅炉水平烟道入口处装有屏式过热器，在炉膛顶部装有顶棚过热器。

再热式机组的再热器也布置在水平烟道和垂直烟道中，再热器的功能是在汽轮机高压缸做过功的蒸汽再次加热到一定温度送回到汽轮机中压缸继续做功。

5. 强制循环炉与自然循环炉相比有何优缺点？

答：强制循环锅炉内工质（水）流动（汽水循环）过程依靠装设在下降管中的强制循环泵完成，不再象自然循环炉那样依靠工质本身的汽水密度差来完成。强制循环炉在结构和运行上的优缺点如下所述。

优点：金属耗量少；水冷壁等的蒸发设备布置灵活；不受工质压力限制，更适合于超高压、亚临界参数的炉型；便于制造、安装、运输；启停速度快，接带负荷快，更适应电网要求；深度调峰能力强。

缺点：锅炉要求给水品质高；要求较高的给水压力；要求高水平的控制调节系统；启停过程中热损失大；对循环泵的性能要求特别高。

6. 为什么过热器爆管要紧急停炉？

答：锅炉过热器的工作条件非常恶劣，管壁外受高温烟气冲刷，管内流动着高压蒸汽。过热器管一旦爆破，高压蒸汽流冲刷在其他管壁上，很快就会将其他管壁冲刷坏，引起新的爆管，产生恶性循环。所以，过热器爆管后要紧急停炉，否则大批过热器管损坏，不但危及锅炉运行安全，也会增加停炉检修的工作量、延长检修工期。

7. 锅炉燃烧方式有哪几种？简述其含义。

答：燃煤锅炉燃烧方式大致可分为以下三种：

(1) 固定燃烧。燃料在炉排上燃烧，放出热量，燃后的灰渣由炉排落下，燃料相对于运动的炉排是静止的，称为固定燃烧。电厂中采用固定燃烧的锅炉一般为链条炉，配套6MW以下的机组。

(2) 悬浮燃烧。燃料（一般指煤粉）随气流悬浮在炉膛空间，被炉内高温烟气加热，燃烧放出热量。燃煤电厂锅炉一般采用此种燃烧方式。悬浮燃烧根据燃烧器出口气流特性不同又可分为直流燃烧及旋流燃烧。

直流燃烧。煤粉与空气混合物由喷口直喷入炉膛，气流为一自由射流。一般喷口设置在炉膛四角，对角布置。四角喷出的煤粉气流在炉膛内形成一切圆，风粉卷吸炉内高温烟气并与其强烈混合，燃料被加热后着火燃烧，放出热量。

旋流燃烧。煤粉与空气混合物由喷口喷入炉膛，煤粉气流绕燃烧器轴旋转。风粉射流卷吸炉内高温烟气并与其强烈混合，燃料被加热后着火燃烧，放出热量。一般喷口设置在两侧炉墙上，对冲布置。

(3) 沸腾燃烧。燃料既不是在炉排上固定燃烧，也不象悬浮燃烧那样使煤粉随气流悬浮在炉膛空间完成，而是在沸腾床内上下翻滚燃烧，整体看燃料象是在沸腾，因此称沸腾燃烧。

现代大型电站锅炉一般采用四角喷燃直流燃烧的燃烧方式及旋流燃烧方式即悬浮燃烧。

8. 锅炉的循环方式有哪几种？简述其含义。

答：火力发电厂中的锅炉按水循环方式可分为自然循环、强制循环、直流锅炉三种类型。

依靠工质的重度差而产生的循环流动称为自然循环。借助水泵压头使工质产生的循环流动称为强制循环。

自然循环锅炉是由汽包、下降管、下联箱和上升管（即水冷壁）组成一个循环回路。由于上升管在炉内受热产生了蒸汽，汽水混合物的重度小，而下降管在炉外不受热，管中是水，其重大，两者重度差就产生推动力，水沿下降管向下流动，而汽水混合物则沿上升管向上流动，这样就形成水的自然循环流动。

强制循环锅炉的结构与自然循环基本相同，它也有汽包，所不同的在下降管中增加了循环泵，作为增强循环的动力。

直流炉的结构与自然循环锅炉结构不同，它没有汽包，是依靠给水泵压力使工质锅炉受热面管子中依次经过省煤器，蒸发受热面和过热器一次将水全部加热成为过热蒸汽。现在一般只宜用于亚临界，超临界压力锅炉。

强制循环锅炉与自然循环锅炉比较：

优点：可适用于亚临界、超临界压力；由于工质在受热面中是强制流动，因而受热面的布置较灵活，受热均匀水循环好；起停炉快；水冷壁可使小管径、薄管壁（压力准许），相对汽包容积减小，节省钢材。

缺点：加装循环泵，系统复杂，投资高，检修困难。

9. 发电机组低负荷运行对锅炉设备有什么影响？

答：发电机组低负荷运行时锅炉产生的蒸汽量只为额定量的40%以下（燃油炉在30%以下）。从燃烧系统来看，这时投入炉膛的煤粉量较少，炉膛温度较低，燃烧不稳定，容易灭火，如处理不当，会发生爆燃事故，有时被迫投油助燃；由于烟气量减少，使得尾部烟道的烟气温度下降，加剧尾部烟道受热面的腐蚀。从汽水系统来看，由于炉膛温度低，有可能造成蒸汽温度下降；对于自然循环炉则因蒸发量很小而引起循环速度减慢，在水冷壁管内的汽水混合物容易停滞，使局部水冷壁管过热产生“蠕胀”，这部分的管壁强度下降，容易爆破。

10. 中温中压、高温高压、亚临界、超临界、超超临界蒸汽参数是多少？

答：中温中压、高温高压、亚临界、超临界、超超临界蒸汽参数见表 1。

表 1

参数 蒸汽	蒸汽温度 (C)	蒸汽压力 (MPa)	参数 蒸汽	蒸汽温度 (C)	蒸汽压力 (MPa)
中温中压	540	9.9	超临界	538 或 566	24
高温高压	540	13.83	超超临界	600	30
亚临界	538	17			

11. 目前我国对于单元制机组一般采用什么方法启动？简述其含义。

答：一般采用滑参数启动。滑参数启动按操作方法分为压力法和真空法两种。

压力法滑参数启动就是锅炉先要产生一定温度和压力的蒸汽之后才开启电动主闸门及主汽门冲动汽轮机。启动参数一般为 0.8~1.5MPa、220~250℃。这种启动方法由于操作简单、控制方便而被广泛采用。

真空法滑参数启动就是启动前全开电动主闸门、主汽门和调速汽门，真空区一直扩展到锅炉汽包，点火后炉水在真空状态下汽化，在不到 0.1MPa 的压力下就可以冲动汽轮机，随着锅炉燃烧的增强，一方面提高汽温、汽压，一方面汽轮机升速、定速、并网、带负荷。由于真空法滑参数启动具有疏水困难、蒸汽过热度低、汽机转速不易控制、易引起水冲击等安全性较差及再热器出口温度很难提高、抽真空困难等缺点，目前真空法滑参数启动已很少采用。

滑参数启动按启动前汽缸金属温度的高低可分为冷态滑参数启动和热态滑参数启动。启动时高压缸调节级汽室下内壁温度低于它在额定参数下维持空转的金属温度时称为冷态滑参数启动；如果高压缸调节级汽室下内壁温度高于此温度则称为热态滑参数启动。

12. 汽轮发电机组的停机方式有几种？简述其过程及注意事项。

答：汽轮发电机的停机可分为正常停机及故障停机，对于正常停机按其停机过程不同又可以分为定参数停机与滑参数停机。

(1) 定参数停机。在停机过程中，主蒸汽参数保持在额定值不变，仅通过关小调速气门减少进汽量来减少负荷，一般可以在 40~50min 内将负荷减至零，电气解列，汽机打闸停机。这样停机后汽机金属温度保持在较高水平，利于再次启动，尽快接带负荷。

注意事项：在减负荷过程中，必须严格控制汽机金属温度的下降速度和温度的变化。一般要求金属温度的下降速度控制在 1.5℃/min 之内。

(2) 滑参数停机。在停机过程中，主汽门保持全开，仅通过降低主蒸汽的参数方法来减少负荷。如果整个过程全部采用滑参数方式，停机后汽缸温度可以达到较低的水平，有利于汽机检修，缩短工期。对于 20MW 以上机组一般采取滑参数方式停机。额定工况下滑停应先把负荷减至 80%~85% 额定负荷，随主蒸汽参数降低全开主汽门，稳定一端时间。当

金属温度降低，各部件温差减小后，开始滑停。滑停一般分段进行。严格控制汽机金属温度的下降速度和温度的变化，一般要求金属温度的下降速度控制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之内。减至较低负荷时，打闸停机，锅炉熄火，发电机解列。

注意事项：

1) 主蒸汽必须保持有 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过热度。

2) 整个停机过程中主蒸汽温降必须控制在 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 内，再热机组再热蒸汽温降控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。当主蒸汽温度低于汽缸温度，法兰温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，应停止参数滑降，稳定运行一段时间。

13. 汽轮发电机组启动方式有几种？简述启动过程及注意事项。

答：按启动过程中新蒸汽参数的情况，可分为额定参数启动和滑参数启动两种启动方式；按汽轮机启动前的金属温度高低，又可分为冷态启动和热态启动；按冲动转子时所用阀门的不同，又可分为调节门启动、自动主汽门和电动主闸门（或其旁路门）启动。

(1) 额定参数冷态启动。电动主闸门前的新蒸汽参数在整个启动过程中始终保持在额定值。启动过程一般包括主蒸汽管道暖管及前期准备，冲动转子暖机升速，定速并列带负荷等阶段。

主蒸汽管道暖管及前期准备：冷态的主蒸汽管道被高温高压的新蒸汽加热到与新蒸汽同温度压力的状态称为主蒸汽管道暖管。在暖管过程中，可以进行启动前的准备，凝汽器通循环水，启动凝结水泵，抽真空，送轴封，检查润滑油系统，启动盘车连续运转等。

冲动转子暖机升速：冲动转子一般使用调节门或电动主闸门（或其旁路门），这根据汽轮机调速系统的不同来选择。冲动转子后控制转子转速分别进行低，中，高速暖机。暖机过程中严格控制汽缸壁温升以及上下缸、内外缸、法兰、螺栓等处温差。一般控制温升在 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，温差在 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。

定速并列带负荷：汽机转速 $3000\text{r}/\text{min}$ 定速，电气进行并列操作，机组并列，带负荷暖机。带负荷暖机过程中仍应严格控制各处温升及温差等。随缸温升高，机组接带负荷至额定出力（整个启动过程共需时约 8h ）。

(2) 滑参数冷态启动。电动主闸门前的新汽参数随转速、负荷的升高而滑升，汽轮机定速或并网前，调节门一般处于全开状态。启动过程一般为：锅炉点火及暖管，冲动转子升速暖机，并列接带负荷等。

锅炉点火及暖管：锅炉点火前，汽轮机应做好前期准备包括凝汽器通循环水，检查润滑油系统，启动盘车连续运转等。联系锅炉点火，汽机抽真空，送轴封。锅炉升温升压，应及时开启旁路。电动主闸门前压力，温度达到冲动转子条件时，即可冲动转子。

冲动转子升速暖机：冲动转子后，低速暖机全面检查后即可在 $40\sim 60\text{min}$ 内将转速提到 $3000\text{r}/\text{min}$ ，定速。

并列接带负荷：定速后应立即并列接带少量负荷进行低负荷暖机。联系锅炉加强燃烧，严格按启动曲线控制升温升压速度。70%额定负荷后，汽缸金属的温度水平接近额定参数下额定工况下金属的温度水平时，锅炉滑参数加负荷的过程结束。此后，随着锅炉参数的

提高，逐渐关小调节门保持负荷不变，锅炉定压。当主汽参数达到额定值后再逐渐开大调门加负荷至额定出力。

注意事项：

1) 严格控制汽缸壁温升，上下缸温差，内外缸温差，法兰温差，螺栓温差等，不使其超过允许值。

2) 整个升速过程中严格监视机组振动，发现不正常振动必须立即查明原因设法消除，否则不允许继续升速。发生 0.1mm 及以上的振动应立即打闸停机。

3) 监视调整真空，油温，内冷水压力，(水冷机组)密封油压(氢冷机组)等参数，及时投停各辅助设备。

14. 汽轮机的滑参数启停有什么优缺点？

答：(1) 汽轮机滑参数启动的优点为：

- 1) 缩短机炉启动时间；
- 2) 减少锅炉对空排汽，节约蒸汽及热量损失；
- 3) 低参数蒸汽可对汽轮机叶片起清洗作用；
- 4) 减少启动过程的热应力及热变形。

(2) 汽轮机滑参数停机的优点为：

- 1) 加速各金属部件冷却，对机炉大修提前开工有利；
- 2) 减少汽机上下汽缸温差，从而减少热应力及变形；
- 3) 充分利用锅炉余热提高经济性；
- 4) 对汽轮机叶片也起清洗作用；
- 5) 停机后汽轮机汽缸温度较低，可缩短盘车时间。

(3) 汽轮机滑参数启停的缺点是：

- 1) 锅炉长时间低负荷运行，对锅炉燃烧不利；
- 2) 汽轮机转子因蒸汽参数低、流量大而使轴间推力增大；
- 3) 凝结水质量较差，要在较长时间后才可回收。

15. 大型火力发电机组采用压力法冷态滑参数启动时，启动前应做哪些工作？

答：大型火力发电机组采用压力法冷态滑参数启动前应做到以下几点：

(1) 大容量单元机组锅炉出口不设主汽门，锅炉打水压时汽轮机的电动主闸门必须关严，水压一直打到汽轮机电动主闸门前，打完水压后，锅炉应放水至低水位，主蒸汽管道和再热蒸汽管道内的水要放净，否则点火可能引起主蒸汽管道或再热蒸汽管道的水冲击。

(2) 对中间再热机组，汽轮机静止时的调速系统动作试验一定要在点火前进行，否则点火后，旁路投入、再热系统已充汽，由于中压缸进汽管没有截止门，中压调速汽门一旦开启，就可能由于中压缸进汽而冲动汽轮机。

(3) 在滑参数启动过程中，除了低真空保护因真空不稳不能投入和低汽温保护不能投

入外，汽机的其他保护（如超速保护、串轴保护、低油压保护等）必须全部完好投入。

(4) 为防止油膜共振的发生，启动前应使润滑油温不低于 40℃，为增加稳定性，可将油温保持在 40~45℃。

(5) 锅炉上水所需时间应视水温、锅炉类型、气候条件而定。

(6) 发变组、励磁系统一定要在汽轮机冲转前备用，汽轮机一经冲转整个发变组即认为已带电，此时切不可再在这些回路上作业。

(7) 应提前组织好外围专业准备工作，做好启动过程中各种异常的准备。

16. 简述汽轮机汽水系统及工质的流程。

答：(1) 汽轮机汽水系统包括：

- 1) 主蒸汽系统；
- 2) 高低压抽汽系统；
- 3) 真空系统；
- 4) 凝结水系统；
- 5) 给水系统。

(2) 工质的流程：

锅炉来的过热蒸汽→汽轮机电动主汽门→汽轮机自动主汽门→汽轮机调速汽门→高压缸做功→锅炉再热器→汽轮机中压缸调速汽门→中压缸做功→低压缸做功→凝汽器凝结成水→凝结水泵→汽封加热器加热→低压加热器加热→除氧器脱氧→高压给水泵→高压加热器加热→低温省煤器→高温省煤器→锅炉汽包。

17. 什么是汽轮机的真空和真空度？

答：当容器中的压力低于大气压力时，把低于大气压力的部分叫做真空，而容器内的压力叫绝对压力。另一种说法是，凡压力比大气压力低的容器都称做真空。真空有程度上的区别：当容器内没有压力即绝对压力等于零时，叫做完全真空；其余叫做不完全真空。汽轮机凝汽器内的真空就是不完全真空。

真空、绝对压力与大气压力之间的关系如下

$$h_1 + h_2 = h$$

式中 h_1 ——容器内真空汞柱的高度，mm；

h_2 ——相当于容器内绝对压力的汞柱高度，mm；

h ——大气压力的汞柱高度，mm。

真空也可以用百分比表示，叫做真空度，即用测得的真空汞柱除以相当于大气压力的汞柱再化为百分数，用公式表示时为

$$\text{真空度} = h_1/h \times 100\%$$

在凝汽器内绝对压力不变的情况下，真空度随着大气压力的变化而变化。所以，在理论计算上使用绝对压力来表示汽轮机凝汽器内的真空较为妥善。在已经测得大气压力和凝汽器内真空汞柱高度之后，绝对压力可由下述公式计算

$$P = (h - h_1) / 735.6 \text{ 工程大气压}^{①}$$

例如，测得汽轮机凝汽器内的真空等于 720mm 汞柱^②，另由压力表测得当时的大气压力是 750mm 汞柱，则凝汽器的绝对压力和真空度各为

$$P = (h - h_1) / 735.6 = (750 - 720) / 735.6 = 0.04 \text{ (工程大气压)}$$

$$\text{真空度} = h_1/h \times 100\% = (720/750) \times 100\% = 96\%$$

18. 什么是大型单元机组的定压运行和滑压运行？

答：定压运行是指汽轮机在不同工况运行时，依靠改变调速汽门的开度来改变机组功率而汽轮机前的新汽压则维持不变的运行状态。在母管制的发电厂中只能采用定压运行方式，在许多单元机组上也采用这种运行方式。

滑压运行是指汽轮机在不同工况运行时，不仅主汽门是全开的，而且调速汽门也是全开的，这时机组功率的变动是靠汽轮机前主蒸汽压力的改变来实现，即锅炉按汽轮机的负荷需要改变出口主蒸汽压力但汽温则维持不变。

19. 什么是汽轮机调速系统的迟缓率、速度变动率和调差系数？

答：汽轮机调速系统的迟缓率是指在调速系统中由于各部件的摩擦、卡涩、不灵活以及连杆、绞链等结合处的间隙、错油门的重叠度等因素造成的动作迟缓程度。机械液压型调速器最好的迟缓率 $\epsilon = 0.3\% \sim 0.4\%$ 。采用电液式数字型调速器灵敏度很高，迟缓率（人工死区）可以调节到接近于零。

速度变动率是指汽轮机由满负荷到空负荷的转速变化与额定转速之比，其计算公式为

$$\delta = (n_1 - n_2) / n \times 100\%$$

式中 n_1 ——汽轮机空负荷时的转速；

n_2 ——汽轮机满负荷时的转速；

n ——汽轮机额定转速。

对速度变动率的解释如下：汽轮机在正常运行时，当电网发生故障或汽轮发电机出口开关跳闸使汽轮机负荷甩到零，这时汽轮机的转速先升到一个最高值然后下降到一个稳定值，这种现象称为“动态飞升”。转速上升的最高值由速度变动率决定，一般应为 $4\% \sim 5\%$ 。若汽轮机的额定转速为 3000r/min，则动态飞升在 120~150r/min 之间。速度变动率越大，转速上升越高，危险也越大。

汽轮机调速系统的静态频率调节效应系数 K_f 的倒数为调速系统的调差系数。调差系数的计算公式为

$$K_s = \Delta f(\%) / \Delta P(\%)$$

式中 $\Delta f(\%)$ ——电网频率变化的百分数；

$\Delta P(\%)$ ——汽轮发电机组有功功率变化的百分数。

① 1 工程大气压 = 98066.5 Pa；

② 1mm 汞柱 = 133.3224 Pa。

调差系数的大小对维持系统频率的稳定影响很大。为了减小系统频率波动，要求汽轮机调速系统有合理的调差系数值，一般为4%~5%。

20. 电网频率过高、过低对汽轮机有什么影响？

答：电网高频率和低频率运行对汽轮机运行都是不利的。汽轮机叶片的固有振动频率都按电网频率正常的条件下调整在合格范围。当电网频率过高或过低时，有可能使汽轮机某几级叶片接近或陷入共振区，造成应力显著增加而导致疲劳断裂。此外，电网低频率运行使汽轮机汽耗增加，降低了效率；使给水泵转速减慢，降低了给水压力，严重时引起锅炉缺水；使循环水泵转速减慢，减少了循环水量，影响凝汽器真空；还使锅炉的风机转速减慢，造成锅炉热负荷降低和炉膛燃烧不稳定。

21. 发电机组低负荷运行对汽轮机设备有什么影响？

答：低负荷运行时，汽轮机的节流损失大，既不经济又造成汽轮机排汽温度高。另外在节流式调节中，前汽缸由于蒸汽集中在一个方向而造成汽缸加热不均匀，上下汽缸存在温差，使胀差增大，对汽轮机安全运行不利。

22. 为什么汽轮机停机后要进行低转速盘车？

答：汽轮机停机后需要经过较长时间才能冷却。假若汽轮机的大轴在静止状态下冷却，则由于汽缸内上部温度高、下部温度低，就会使大轴向上弯曲。最好的方法是在停机后的冷却期间内用盘车装置慢慢地转动转子，使转子消除热弯曲，适应随时都能启动机组的要求。

23. 什么是蒸汽—燃气联合循环机组，运行上有何特点？

答：蒸汽—燃气联合循环机组是把蒸汽轮机循环与燃气轮机循环综合在一起的动力装置。

用提高初温的办法来提高蒸汽轮机循环的效率时，会受到金属材料的限制，使初温难以继续提高。由于蒸汽轮机的循环终参数较低，而燃气轮机循环的初参数却较高，所以蒸汽—燃气联合循环机组利用燃气轮机循环有较高初温及蒸汽轮机循环有较低终参数的优点来提高整个循环的热效率。

采用不同方式的机组其运行特点各不同。

余热锅炉联合循环机组特点是汽轮机的容量和新蒸汽参数由燃气轮机容量、排汽温度决定，汽轮机不能单独运行，而且汽轮机负荷随燃气轮机而变动。

补燃余热锅炉联合循环机组特点是加装补燃器，利用燃气轮机排气中还有14%~18%的氧帮助燃烧，增加输入热量，提高汽轮机的功率和效率。

增压锅炉联合循环机组特点是，因锅炉增加燃烧，燃烧迅猛，使传热系数大为增加，燃气轮机的蒸汽参数随燃气轮机进气温度提高而增加；燃气轮机和汽轮机都不能单独运行。

排气助燃锅炉联合循环机组特点是，不仅回收燃气轮机的排气余热，同时充分利用排

气中的余热，燃气轮机和汽轮机可以分开运行；可配置高参数大型汽轮机；锅炉中的所用燃料可任意选择。

24. 同步发电机的冷却方式分哪几种？各有什么优缺点？

答：同步发电机的冷却分为外冷和内冷两种：

(1) 外冷包括空冷和氢冷。

空冷：冷却介质为空气，即用空气把发电机内因损耗而产生的热量带走，这种方式结构简单，但冷却效率不高。最大装机容量可达 100MW 左右。

氢冷：冷却介质为氢气，即用氢气把热量带走。与空气相比，冷却能力高。通风损耗较小，但结构复杂，需配置储氢设备。最大装机容量可达 200MW 左右。

(2) 内冷包括定子水内冷，转子氢内冷等。

内冷（直接冷却方式）：冷却介质为水、油、氢气，即将氢、水或油通过导线内部，直接把热量带走，与前述两种表面冷却方式相比，冷却能力高，可以缩小发电机体积，节省材料，便于制造大容量发电机，但发电机结构复杂，铜损较大，铁损和机械损耗较小，总损耗相差不多。

25. 简述大型单元机组的功率调节方式。

答：大型单元机组的功率调节方式有三种。

(1) 以锅炉为基础的运行方式。在这种方式下锅炉通过改变燃烧率来调节机组负荷，而汽轮机则是通过改变调速汽门开度以控制主蒸汽压力。当负荷要求改变时，由锅炉的自动控制系统根据负荷指令来改变锅炉的燃烧率及其他调节量，待汽压改变后由汽轮机的自动控制系统去改变调速汽门开度，以保持汽轮机前的汽压为设定值，同时改变汽轮发电机的输出功率。汽轮机跟随控制方式的运行特点是当负荷要求改变时，汽压的动态偏差小而功率的响应慢。

(2) 以汽轮机为基础的运行方式。在这种方式下锅炉通过改变燃烧率调节主蒸汽压力，而汽轮机则以改变调速汽门开度调节机组负荷。当负荷要求改变时，由汽轮机的自动控制系统根据负荷指令改变调速汽门开度，以改变汽轮发电机的输出功率。此时，汽轮机前的蒸汽压力改变，于是锅炉的自动控制系统跟着动作，去改变锅炉的燃烧率及其他调节量（如给水量、喷水量等），以保持汽轮机前的汽压为设定值。这种控制方式的运行特点是：当负荷要求改变时，功率的响应快而汽轮机前汽压的动态偏差大。

(3) 功率控制方式。这种方式是以汽轮机为基础的协调控制方式，机、炉作为一个整体联合控制机组的负荷及主蒸汽压力，也称为机炉整体控制方式。当负荷要求改变时，根据负荷指令和机组实际输出功率之间的偏差以及汽轮机主汽门前汽压与其设定值之间的偏差，使锅炉和汽轮机的自动控制系统协调地实时改变汽轮机的调速汽门开度和锅炉的燃烧率（和其他调节量），使汽轮机前汽压的动态偏差较小而功率响应较快。近来参加电网调频的大型火力发电机组大都采用这种控制方式。

26. 大型单元机组升降负荷速率受哪些因素影响？

答：大型单元机组升降负荷的速率受锅炉和汽轮机两方面的影响。为了免除锅炉汽包和受热面由于温差过大产生过大热应力而引起设备发生弯曲、变形，汽包和受热面的温升不能过快，一般控制在 $1.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，所以要严格控制升温速度，同时应根据本炉的升压曲线严格控制升压速度。汽轮机主要受汽缸上下缸温差、汽缸内外表面温差、汽缸与汽轮机转子的相对膨胀、汽缸体的绝对膨胀、法兰及螺栓的温差等因素的影响而限制升负荷速率，一般大中型机组升负荷速率控制在 $(1\sim 1.5)\%/ \text{min}$ 。目前新型全计算机控制机组，升负荷速率由热应力计算模块严格控制，以确保机组安全。

27. 提高火电机组运行经济性有哪些措施？

答：主要有以下措施：

- (1) 同一厂内运行机组按煤耗等微增率分配负荷；
- (2) 燃煤锅炉调峰减负荷尽量避免投油稳燃；
- (3) 在高于烟气酸露点的前提下尽量降低排烟温度；
- (4) 汽轮机运行在经济真空值（通常是偏低运行，因此要提高真空度）；
- (5) 当机组负荷在一定值以上，主、再热汽温、压力保持在额定值运行，即“压红线”；
- (6) 改善燃烧，保持合适氧量，降低灰、渣中的可燃物含量；
- (7) 投入高、低压加热运行，提高循环效率；
- (8) 采取降低厂用电的措施，如采用变频调速技术；
- (9) 尽可能减少不必要的机组启停操作；
- (10) 严守规程，保障安全生产，是经济运行的前提和基础。

28. 什么是火电机组最低技术出力？

答：火电机组最低技术出力即火电机组本身技术条件允许的最小生产能力，是指三大主力设备（锅炉、汽机、发电机）能够连续安全、稳定运行的最低负荷。

发电机功率的最小值，由锅炉或汽轮机的技术条件决定：锅炉的技术允许最小负荷取决于锅炉燃烧的稳定性，其值因锅炉的类型和燃料的种类而异，一般约为额定容量的 $60\%\sim 70\%$ ，目前可达到 $40\%\sim 50\%$ ；汽轮机的技术允许最小负荷约为其额定容量的 $10\%\sim 15\%$ 。因此，火电机组最低技术出力由锅炉的最小负荷决定。

29. 供热机组在运行上的特点有哪些？

答：供热机组运行时主要是用汽轮机作过功的可调整抽汽或背压排汽来满足热负荷的需要。

对于背压式供热机组，其特点是：

- (1) 没有凝汽器及其辅助设备，系统简单；
- (2) 没有冷源损失，热能利用率高；

(3) 供热量与供电量互相牵制，不能同时满足用户对电量和热量的反向要求，因此达不到理想的经济效果。

对于凝器式供热机组，其特点是：

- (1) 供热和供电可以调节；
- (2) 能同时满足不同用户的要求；
- (3) 自动调节电、热负荷，能满足电、热不同用户需要，经济性较高；
- (4) 存在着部分冷源损失。

供热机组能用合理，能做到按质供能，综合用能，各尽其用。

30. 在什么情况下机组可以紧急停机、停炉？

答：在下列情况下机组可以紧急停机：

- (1) 水击。
- (2) 机组超速。
- (3) 胀差超过允许值。
- (4) 机组内有清晰的金属声。
- (5) 控制油箱油位低于停机油位。
- (6) 油系统着火，威胁机组安全。
- (7) 冷油器出口油温过高或超出规定值。
- (8) 轴承金属温度高。
- (9) 发电机密封油回油温度高。
- (10) 主、再热蒸汽温度高。
- (11) 正常运行时主、再热蒸汽温度低。
- (12) 高缸排汽温度高。
- (13) 低缸排汽温度高。
- (14) 主机轴向位移大。
- (15) 偏心率大。
- (16) 主机推力轴承温度高。
- (17) 主机凝汽器水位过高。

在下列情况下发电机可与系统解列：

- (1) 发电机、励磁机内冒烟、着火或氢气爆炸。
- (2) 发电机或励磁机发生严重的振动。
- (3) 发生威胁人员生命安全的其他情况。

在下列情况下可紧急停炉：

- (1) 运行工况、参数达到事故停炉保护动作定值，而保护拒动。
- (2) 全部给水流量表损坏，造成主汽温度不正常或虽然主汽温度正常但半小时之内流量表计未恢复。
- (3) 主给水、蒸汽管路发生爆破。