

汽轮机原理及运行思 考题答案

第一章 汽轮机的热力特性思考题答案

1. 什么是汽轮机的级？汽轮机的级可分为哪几类？各有何特点？

解答： 一系列喷嘴叶栅和其后面相邻的一系列动叶栅构成的基本做功单元称为汽轮机的级，它是蒸汽进行能量转换的基本单元。

根据蒸汽在汽轮机内能量转换的特点，可将汽轮机的级分为纯冲动级、反动级、带反动度的冲动级和复速级等几种。

各类级的特点：

(1) 纯冲动级：蒸汽只在喷嘴叶栅中进行膨胀，而在动叶栅中蒸汽不膨胀。它仅利用冲击力来做功。在这种级中： $p_1 = p_2$ ； $\times h_n = 0$ ； $\Omega_m = 0$ 。

(2) 反动级：蒸汽的膨胀一半在喷嘴中进行，一半在动叶中进行。它的动叶栅中不仅存在冲击力，蒸汽在动叶中进行膨胀还产生较大的反冲击力做功。反动级的流动效率高于纯冲动级，但做功能力较小。在这种级中： $p_1 > p_2$ ； $\times h_n \approx \times h_b \approx 0.5 \times h_t$ ； $\Omega_m = 0.5$ 。

(3) 带反动度的冲动级：蒸汽的膨胀大部分在喷嘴叶栅中进行，只有一小部分在动叶栅中进行。这种级兼有冲动级和反动级的特征，它的流动效率高于纯冲动级，做功能力高于反动级。在这种级中： $p_1 > p_2$ ； $\times h_n > \times h_b > 0$ ； $\Omega_m = 0.05 \sim 0.35$ 。

(4) 复速级：复速级有两列动叶，现代的复速级都带有一定的反动度，即蒸汽除了在喷嘴中进行膨胀外，在两列动叶和导叶中也进行适当的膨胀。由于复速级采用了两列动叶栅，其做功能力要比单列冲动级大。

2. 说明冲击式汽轮机级的工作原理和级内能量转换过程及特点。

解答： 蒸汽在汽轮机级内的能量转换过程，是先将蒸汽的热能在其喷嘴叶栅中转换为蒸汽所具有的动能，然后再将蒸汽的动能在动叶栅中转换为轴所输出的机械功。具有一定温度和压力的蒸汽先在固定不动的喷嘴流道中进行膨胀加速，蒸汽的压力、温度降低，速度增加，将蒸汽所携带的部分热能转变为蒸汽的动能。从喷嘴叶栅喷出的高速气流，以一定的方向进入装在叶轮上的动叶栅，在动叶流道中继续膨胀，改变气流速度的方向和大小，对动叶栅产生作用力，推动叶轮旋转做功，通过汽轮机轴对外输出机械功，完成动能到机械功的转换。由上述可知，汽轮机中的能量转换经历了两个阶段：第一阶段是在喷嘴叶栅和动叶栅中将蒸汽所携带的热能转变为蒸汽所具有的动能，第二阶段是在动叶栅中将蒸汽的动能转变为推动叶轮旋转机械功，通过汽轮机轴对外输出。

3. 什么是冲击原理和反击原理？在什么情况下，动叶栅受反冲击力作用？

解答：冲击原理：指当运动的流体受到物体阻碍时，对物体产生的冲击力，推动物体运动的做功原理。流体质量越大、受阻前后的速度矢量变化越大，则冲击力越大，所作的机械功愈大。反击原理：指当原来静止的或运动速度较小的气体，在膨胀加速时所产生的一个与流动方向相反的作用力，称为反击力，推动物体运动的做功原理。流道前后压差越大，膨胀加速越明显，则反击力越大，它所作的机械功愈大。

当动叶流道为渐缩形，且动叶流道前后存在一定的压差时，动叶栅受反击力作用。

4. 什么是最佳速度比？纯冲动级、反动级和纯冲动式复速级的最佳速度比的值是多少？

解答：轮周速度与喷嘴出口汽流速度的比值，称为速度比。级效率最高时，所对应的速度比称为最佳速度比。

纯冲动级的最佳速度比约为 0.4~0.44；反动级的最佳速度比约为 0.65~0.75；纯冲动式复速级的最佳速度比约为 0.21~0.22。

5. 汽轮机的能量损失有哪几类？各有何特点？

解答：汽轮机内的能量损失可分为两类，一类是汽轮机的内部损失，一类是汽轮机的外部损失。汽轮机的内部损失主要是蒸汽在其通流部分流动和进行能量转换时，产生的能量损失，可以在焓熵图中表示出来。汽轮机的外部损失是由于机械摩擦及对外漏汽而形成的能量损失，无法在焓熵图中表示。

6. 汽轮机的级内损失一般包括哪几项？造成这些损失的原因是什么？

解答：汽轮机的级内损失一般包括：喷嘴损失；动叶损失；余速损失；叶高损失；扇形损失；叶轮摩擦损失；部分进汽损失；漏汽损失；湿汽损失。

造成这些损失的原因：

(1) 喷嘴损失：蒸汽在喷嘴叶栅内流动时，气流与流道壁面之间、气流各部分之间存在碰撞和摩擦，产生的损失。

(2) 动叶损失：因蒸汽在动叶流道内流动时，因摩擦而产生损失。

(3) 余速损失：当蒸汽离开动叶栅时，仍具有一定的绝对速度，动叶栅的排汽带走一部分动能，称为余速损失。

(4) 叶高损失：由于叶栅流道存在上下两个端面，当蒸汽流动时，在端面附面层内产生摩擦损失，使其中流速降低。其次在端面附面层内，凹弧和背弧之间的压差大于弯曲流道造成的离心力，产生由凹弧向背弧的二次流动，其流动方向与主流垂直，进一步加大附面层内的摩擦损失。

(5) 扇形损失：汽轮机的叶栅安装在叶轮外圆周上，为环形叶栅。当叶片为直叶片时，其通道截面沿叶高变化，叶片越高，变化越大。另外，由于喷嘴出口汽流切向分速的离心作用，将汽流向叶栅顶部挤压，使喷嘴出口蒸汽压力沿叶高逐渐升高。而按一元流动理论进行设计时，所有参数的选取，只能保证平均直径截面处为最佳值，而沿叶片高度其它截面的参数，由于偏离最佳值将引起附加损失，统称为扇形损失。

(6) 叶轮摩擦损失：叶轮在高速旋转时，轮面与其两侧的蒸汽发生摩擦，为了克服摩擦阻力将损耗一部分轮周功。又由于蒸汽具有粘性，紧贴着叶轮的蒸汽将随叶轮一起转动，并受离心力的作用产生向外的径向流动，而周围的蒸汽将流过来填补产生的空隙，从而在叶轮的两侧形成涡流运动。为克服摩擦阻力和涡流所消耗的能量称为叶轮摩擦损失。

(7) 部分进汽损失：它由鼓风损失和斥汽损失两部分组成。在没有布置喷嘴叶栅的弧段处，蒸汽对动叶栅不产生推动力，而需动叶栅带动蒸汽旋转，从而损耗一部分能量；另外动叶两侧面也与弧段内的呆滞蒸汽产生摩擦损失，这些损失称为鼓风损失。当不进汽的动叶流道进入布置喷嘴叶栅的弧段时，由喷嘴叶栅喷出的高速汽流要推动残存在动叶流道内的呆滞汽体，将损耗一部分动能。此外，由于叶轮高速旋转和压力差的作用，在喷嘴组出口末端的轴向间隙会产生漏汽，而在喷嘴组出口起始端将出现吸汽现象，使间隙中的低速蒸汽进入动叶流道，扰乱主流，形成损失，这些损失称为斥汽损失。

(8) 漏汽损失：汽轮机的级由静止部分和转动部分组成，动静部分之间必须留有间隙，而在间隙的前后存在有一定的压差时，会产生漏汽，使参加作功的蒸汽量减少，造成损失，这部分能量损失称为漏汽损失。

(9) 湿汽损失：在湿蒸汽区工作的级，将产生湿汽损失。其原因是：湿蒸汽中的小水滴，因其质量比蒸汽的质量大，所获得的速度比蒸汽的速度小，故当蒸汽带动水滴运动时，造成两者之间的碰撞和摩擦，损耗一部分蒸汽动能；在湿蒸汽进入动叶栅时，由于水滴的运动速度较小，在相同的圆周速度下，水滴进入动叶的方向角与动叶栅进口几何角相差很大，使水滴撞击在动叶片的背弧上，对动叶栅产生制动作用，阻止叶轮的旋转，为克服水滴的制动作用力，将损耗一部分轮周功；当水滴撞击在动叶片的背弧上时，水滴就四处飞溅，扰乱主流，进一步加大水滴与蒸汽之间的摩擦，又损耗一部分蒸汽动能。以上这些损失称为湿汽损失。

7. 什么是汽轮机的相对内效率？什么是级的轮周效率？影响级的轮周效率的因素有哪些？

解答：蒸汽在汽轮机内的有效焓降与其在汽轮机内的理想焓降的比值称为汽轮机的相对内效率。

一公斤蒸汽在级内转换的轮周功和其参与能量转换的理想能量之比称为轮周效率。

影响轮周效率的主要因素是速度系数 ϕ 和 ψ ，以及余速损失系数，其中余速损失系数的变化范围最大。余速损失的大小取决于动叶出口绝对速度。余速损失和余速损失系数最小时，级具有最高的轮周效率。

8. 什么叫余速利用？余速在什么情况下可被全部利用？

解答：蒸汽从上一级动叶栅流出所携带的动能，进入下一级参加能量转换，称为余速利用。如果相邻两级的直径相近，均为全周进汽，级间无回热抽汽，且在下一级进口又无撞击损失，则上一级的余速就可全部被下一级利用，否则只能部分被利用。当上一级的余速被利用的份额较小时，视为余速不能被利用。

9. 什么是多级汽轮机的重热现象？由于多级汽轮机内存在重热现象，可以从损失中回收一部分可用能量，是否可以说重热系数愈大愈好？

解答：蒸汽在多级汽轮机内进行能量转换时，所有的内部损失都因为摩擦而转变为热量，在绝热条件下被蒸汽吸收，使各级的排汽焓和排汽温度相应增加，下一级的热力过程线向右偏移。此时在下一级的前后蒸汽压力不变的条件下，其级内蒸汽的理想焓降相应增加，这种现象称重热现象。

重热是多级汽轮机所特有的现象。重热现象实质上是从损失中回收部分能量，而在后面各级内继续进行能量转换，故其可以提高多级汽轮机的效率。因汽轮机内部损失愈大、级数愈多，重热系数愈大，故不能说重热系数愈大愈好。

10. 渐缩喷嘴和缩放喷嘴的变工况特性有何差别？

解答：缩放喷嘴与渐缩喷嘴的本质区别，是它的临界截面与出口截面不同，且缩放喷嘴设计工况下背压低于临界压力、出口汽流速度大于音速，而在最小截面处理想速度等于音速。缩放喷嘴的变工况与渐缩喷嘴的差别是：当出口压力大于设计工况下背压时，在喷嘴出口截面或喷嘴渐扩部分将产生冲波，速度系数大大降低。另外，对应临界流量的压力比小于临界压力比。

11. 为什么可以利用研究喷嘴变工况特性的结果分析动叶栅变工况特性？

解答：动叶栅为渐缩流道，压力比都用滞止压力比，渐缩喷嘴蒸汽参数与流量的特性完全可适用于动叶栅，所不同的是研究动叶栅变工况时，应使用相对速度 w 。

12. 弗留盖尔公式中各符号代表什么意义？该公式在什么条件下可以简化，简化为什么形式？

解答：弗留盖尔公式为：
$$\frac{G_1}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_0^2 - p_z^2}} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}}$$

式中 p_0 、 p_z 、 T_0 、 G_0 —— 工况变化前级组前后蒸汽压力、级组前蒸汽绝对温度和蒸汽流量；

p_{01} 、 p_{z1} 、 T_{01} 、 G_{01} —— 工况变化后级组前后蒸汽压力、级组前蒸汽绝对温度和蒸汽流量。

当 $p_z < 0.1p_0$ 时， p_z 的变化对级组蒸汽流量影响很小；级组中有一级叶栅在工况变化前后均为临界时， p_z 的变化对级组蒸汽流量不产生影响，故上式可简化为：

$$\frac{G_1}{G_0} = \frac{p_{01}}{p_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}}$$

当级组前蒸汽温度变化不大时，可进一步简化为：

$$\frac{G_1}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_0^2 - p_z^2}} \quad \text{或} \quad \frac{G_1}{G_0} = \frac{p_{01}}{p_0}$$

13. 弗留盖尔公式应用的条件有哪些？

解答：弗留盖尔公式的应用条件是：要求级组内的级数较多；各级流量相等；变工况时各级通流面积不变；如果级组中某一级后有抽汽，只要抽汽量随进汽量的变化而按比例变化，各级蒸汽流量按比例变化的条件下，弗留盖尔公式仍然成立。

14. 采用喷嘴调节的汽轮机进汽量减小时，各类级的理想焓降如何变化？反动度、速度比、级效率如何变化？

解答：当汽轮机的工况变化时，按各级在工况变化时的特点通常级分为调节级、中间级和末级组三类。

(1) 中间级：在工况变化时，压力比不变是中间级的特点。汽轮机级的理想焓降是级前温度和级的压力比的函数，在工况变化范围不大时，中间级的级前蒸汽温度基本不变。此时级内蒸汽的理想焓降不变，级的速度比和反动度也不变，故级效率不变。随着工况变化范围增大，压力最低的中间级前蒸汽温度开始变化，并逐渐向前推移。当流量减小，级前蒸汽温度降低，中间级的理想焓降减小，其速度比和反动度相应增大。由于设计工况级的速度比为最佳值，级内效率最高，当速度比偏离最佳值时，级内效率降低。而且速度比偏离最佳值愈远，级内效率愈低。

(2) 末级组：其特点是级前蒸汽压力与其流量的关系不能简化为成正比关系，且级组内级数较少。由于在工况变化流量下降时，汽轮机的排汽压力变化不大，级前压力减小较多。且变工况前级组前后的压力差越大，级前压力降低的多，级后压力降低的少。此时级的压力比

增大，级内理想焓降减小，而且末级的压力比和理想焓降变化最大。级的速度比和反动度随理想焓降的减小而增大，速度比偏离最佳值，级效率相应降低。

(3) 调节级：调节级前后压力比随流量的改变而改变，其理想焓降亦随之变化。当汽轮机流量减小时，调节级的压力比逐渐减小，调节级焓降逐渐增大。在第一调节阀全开而第二调节阀刚要开启时，级的压力比最小，故此时调节级理想焓降达到最大值。级的理想焓降增大，其速度比和反动度随之减小，速度比偏离最佳值，级效率相应降低。

15. 主蒸汽压力变化，对机组安全经济运行有何影响？

解答：在初压变化时，若保持调节阀开度不变，此时除少数低压级之外，绝大多数级内蒸汽的理想焓降不变，故汽轮机的效率基本保持不变，但其进汽量将随之改变。对于凝汽式机组或某一级叶栅为临界状态的机组，其进汽量与初压的变化成正比，由于此时汽轮机内蒸汽的理想焓降随初压升高而增大，机组功率的相对变化大于机组进汽量的相对变化。对于不同背压的级组，背压越高，初压改变对功率的影响越大。

当主蒸汽温度不变，主蒸汽压力升高时，蒸汽的初焓减小；此时进汽流量增加，回热抽汽压力升高，给水温度随之升高，给水在锅炉中的焓升减小，一公斤蒸汽在锅炉内的吸热量减少。此时进汽量虽增大，但由于进汽量的相对变化小于机组功率的相对变化，故热耗率相应减小，经济性提高，反之亦然。

采用喷嘴调节的机组，初压改变时保持功率不变。当初压增加时，一个调节阀关小，其节流损失增大，故汽轮机的内效率略有降低。虽然初压升高使循环效率增高，但经济性不如调节阀开度不变的工况。

采用节流调节的机组，若保持功率不变，初压升高时，所有调节阀的开度相应减小，在相同条件下，进汽节流损失大于喷嘴调节。初压升高使循环效率增大的经济效益，几乎全部被进汽节流损失相抵消。

初压升高时，所有承压部件受力增大，尤其是主蒸汽管道、主汽门、调节阀、喷嘴室、汽缸等承压部件，其内部应力将增大。初压升高时若初温保持不变，使在湿蒸汽区工作的级湿度增大，末级叶片的工作条件恶化，加剧其叶片的侵蚀，并使汽轮机的相对内效率降低。若初压升高过多，而保持调节阀开度不变，由于此时流量增加，轴向推力增大，并使末级组蒸汽的理想焓降增大，会导致叶片过负荷。此时调节级汽室压力升高，使汽缸、法兰和螺栓受力过大，高压级隔板前后压差增大。因此对机组初压和调节级汽室压力的允许上限值有严格的限制。

当初压降低时，要保持汽轮机的功率不变，则要开大调节阀，增加进汽量。此时各压力级蒸汽的流量和理想焓降都相应增大，则蒸汽对动叶片的作用力增加，会导致叶片过负荷，并使机组的轴向推力相应增大。现代汽轮机在设计工况下，进汽调节阀的富余开度不大，保证在其全开时，动叶片的弯曲应力和轴向推力不超限。

16. 主蒸汽和再热蒸汽温度变化，对机组安全经济运行有何影响？

解答：（1）初温变化对安全经济运行的影响：

汽轮机的初温升高，蒸汽在锅炉内的平均吸热温度提高，循环效率提高，热耗率降低。另外，由于初温升高，凝汽式汽轮机的排汽湿度减小，其内效率也相应提高。循环效率和汽轮机的效率提高，运行经济性相应提高。反之，汽轮机的初温降低，运行经济性相应降低。

由于初温的变化，汽轮机的进汽量和进汽比焓值均变化，汽轮机的功率也相应变化。在汽轮机的进汽压力和调节阀开度不变时，进汽量与主蒸汽绝对温度的二次方根成反比。对于非再热机组，在进排汽压力不变时，其理想焓降与主蒸汽绝对温度成正比。汽轮机功率的相对变化与主蒸汽温度的二次方根成正比。对于再热机组，由于假定主蒸汽压力和再热蒸汽温度不变，此时再热蒸汽压力因流量减少而降低，主蒸汽温度变化时对机组功率的影响小于非再热机组，但其功率的变化仍与主蒸汽温度的二次方根成比例。

汽轮机的进汽部分和高压部分与高温蒸汽直接接触，蒸汽初温升高时，金属材料的温度升高，机械强度降低，蠕变速度加快，许用应力下降，从而使机组的使用寿命缩短。

在调节阀开度不变，主蒸汽温度降低时，汽轮机功率相应减小。要保持机组功率不变，要开大调节阀，进一步增加进汽量。此时对于低压级、特别是末级，流量和焓降同时增大，导致动叶栅上蒸汽的作用力增加，其弯曲应力可能超过允许值，且转子的轴向推力相应增大。另外，主蒸汽温度的降低，导致低压级的湿度增大，使湿气损失增大，对动叶片的冲蚀作用加剧。若蒸汽初温突然大幅度降低，则可能产生水冲击，引起机组出现事故。

（2）再热蒸汽温度变化对机组安全经济运行的影响

再热机组的再热蒸汽温度变化，对机组安全经济运行的影响与主蒸汽温度变化的影响相似。所不同的是再热蒸汽温度变化时，仅对中、低压缸的理想焓降和效率产生影响，而对高压缸的影响极小。只是再热蒸汽温度升高时，其比容相应增大，容积流量增加，再热器内流动阻力增大，使高压缸排汽压力略有增加。因此再热蒸汽温度变化 1℃，对机组经济性的影响小于主蒸汽温度变化 1℃时产生的影响。

17. 排汽压力变化，对机组安全经济运行有何影响？

解答: 在进汽参数和进汽量不变的条件下, 排汽压力变化对机组经济性的影响分为: 末级未达临界、达临界和排汽压力低于末级动叶栅的极限背压三种情况。

在末级未达临界的情况下, 排汽压力变化影响到末级组各级的功率, 使机组功率变化。排汽压力升高, 末级组的理想焓降减小; 此时排汽比容和湿度相应减小, 使末级组的湿汽损失和末级余速损失减小, 末级组的效率有所提高; 另外, 排汽压力升高, 凝汽器内凝结水温度升高, 凝结水在低压加热器内的温升减小, 低压回热抽汽量相应减少, 末级组各级的流量随之增大。由于在正常情况下, 排汽压力变化幅度不大, 末级组各级的流量增加和效率提高不足以弥补理想焓降减小的影响, 故排汽压力升高, 末级组的功率相应减小, 且呈线性关系; 反之亦然。

随着排汽压力逐渐降低, 若末级组出现临界状态, 则首先发生在末级动叶栅。当末级动叶栅达临界状态时, 排汽压力降低, 末级组中各级级前参数保持不变, 蒸汽在末级动叶栅的斜切部分内由临界压力膨胀到排汽压力。由于蒸汽在动叶栅斜切部分内膨胀, 动叶的速度系数相应减小, 动叶损失随之增加, 故级效率降低。而且排汽压力愈低, 在动叶栅斜切部分内的膨胀量愈大, 级效率也愈低。其次, 随着排汽压力的降低, 凝汽器内凝结水温度相应降低, 而回热抽汽压力不变, 因此凝结水在最末一级低压加热器内的焓升增大, 最末一段的回热抽汽量相应增大, 末级的蒸汽流量随之减少。由于末级效率进一步降低, 其蒸汽流量随之减少, 使得排汽压力降低时功率的增加量相应减小, 功率随排汽压力的变化不再呈线性关系。

当排汽压力继续降低至动叶栅斜切部分膨胀的极限压力后, 排汽压力继续降低, 由极限压力降到排汽压力的膨胀, 将在动叶栅后无序进行, 损失增加, 末级的有效焓降不再增加。而凝结水温度却继续降低, 最后一段低压抽汽量继续增加, 从而使末级的蒸汽流量进一步减少。此时末级功率不但不再增加, 反而减少, 对经济性产生负效应, 即随着排汽压力的降低, 热耗率相应增加。

对于具有回热系统的机组, 在其排汽压力变化时, 蒸汽在锅炉中的吸热量不变, 其热耗率随功率的增加而降低, 随功率的减小而增加。其变化幅度与功率的变化幅度一致。

排汽压力的变化不仅引起机组经济性的改变, 同时也将影响机组的安全性。若排汽压力升高较多, 使排汽温度大幅度升高, 导致排汽室的膨胀量过分增大。若低压轴承座与排汽缸连为一体, 将使低压转子的中心线抬高, 破坏转子中心线的自然垂弧, 从而引起机组强烈振动, 若采用独立轴承座, 则排汽室抬起影响汽封径向间隙, 可能使动、静部分发生摩擦。此外排汽温度大幅度升高, 还将导致凝汽器内铜管的胀口松动, 造成冷却水漏入汽侧空间, 凝结水的水质恶化, 影响汽轮机运行的安全。排汽压力升高时, 若保持机组功率不变, 要相应增大汽轮机的进汽量, 使轴向推力增大。

18. 汽轮机热力设计的任务是什么？设计程序分哪几个步骤？

解答：汽轮机热力设计主要是按已给定的设计条件，确定机组通流部分的几何尺寸、热力参数，以获得尽可能高的效率和要求的功率，为汽轮机的结构设计和强度校核提供条件。

热力设计的一般步骤：（1）确定汽轮机设计的基本参数；拟定回热系统，进行初步热平衡计算，确定各段回热抽汽量和各级流量；（2）进行汽轮机各级焓降分配和级的热力计算，确定汽轮机的级数、通流部分叶栅的几何尺寸和各级的内功率；（3）根据汽轮机设计工况的内功率计算值和要求值的相对误差，按比例修正汽轮机的进汽量和各级流量，使之与原确定的设计功率相等；（4）利用弗留盖尔公式，对各级后的压力进行修正；（5）按级后蒸汽参数修正各段抽汽压力和抽汽焓（只能从级后进行抽汽）；（6）再次进行回热系统热平衡计算和汽轮机各级的热力计算。反复进行修正，直至设计工况热力系统流量平衡、计算的输出功率与原确定的设计功率之间的相对误差小于 1%；（7）进行变工况时机组回热系统热平衡计算和各级的热力计算，确定调节级的部分进汽度和机组变工况的热力特性。

19. 非调节级设计计算前为什么要进行各级焓降分配？焓降分配的原则是什么？

解答：压力级热力计算前，要确定压力级的级数和进行级的焓降分配，以减少修正计算的迭代次数。

压力级中焓降分配的原则是使子午面流道形状光滑变化，各级的速度比为最佳值，保证级具有较高的内效率，并使末级的排汽压力等于给定值。

20. 调节级和压力级各自有何特点？

解答：（1）调节级的特点：在工况变化时，通流面积呈阶梯形变化，其理想焓降变化最大。为使其在工况变化时效率相对变化小一些，应尽可能增大调节级的理想焓降。通常其平均直径比高压非调节级大，同时速度比小于最佳值。调节级的效率相对较低，其理想焓降的取值需考虑汽轮机的效率和整体结构。为了提高调节级的级效率，其应具有一定的反动度。考虑到调节级为部分进汽的级，且叶片较短，为了减小漏汽损失，一般反动度值不宜过大。

（2）压力级的特点：压力级一般是指调节级后各非调节级。根据蒸汽容积流量的大小和压力的高低，将压力级分为三种不同的级组：高压级组、中压级组和低压级组。

A. 高压级组：高压级组中蒸汽容积流量不大，其变化相对较小。高压级组的通流部分叶栅高度一般不大，平均直径和叶栅高度变化比较平缓，其各级的能量损失中叶栅端部损失、级内间隙漏汽损失所占比例较大。当蒸汽容积流量较小，可采用部分进汽的措施来提高叶片高度。对于大容量汽轮机，高压级组通流部分叶栅高度虽较大，但为了保证必要的刚度和强度，往往采用较厚的高压隔板和较宽的喷嘴，这将导致喷嘴相对高度降低，端部损失较大。

B. 中压级组：中压级组介与高压级组与低压级组之间，随着蒸汽的不断膨胀，其容积流量已较大。中压级组一般工作在过热蒸汽区，无湿汽损失，同时各级的端部损失和漏汽损失相对较小，级组中各级的级效率较高。

C. 低压级组：低压级组指包括最末级在内的几个压力级，其蒸汽压力低，容积流量大，一般工作于湿蒸汽区。由于低压级组蒸汽容积流量急剧增大，导致低压级组的叶栅高度和平均直径相应增大。一般加大直径可限制叶栅高度过分增大，又可增加级的理想焓降，减少级数，但末级的余速损失也会相应增大。低压级由于平均直径增加，叶栅高度增大，圆周速度相应增加，使离心力增大。在目前的技术条件下，末级叶片长度可达 1000mm 左右，末级的平均直径可达 2500mm 左右。单排汽口的汽轮机，其最大额定功率可达 150MW 左右。因此大功率汽轮机的低压部分必须进行分流。为减少湿汽损失，降低湿汽对叶片的冲蚀，限制汽轮机排汽的湿度应不超过 12~13%，并设置去湿装置和采用去湿措施来降低蒸汽湿度对叶栅的冲蚀。

第二章 汽轮机的负荷调节思考题解答

1. 汽轮机的负荷调节方式有几种？各有什么优点？

解答：汽轮机的负荷调节的方式有喷嘴调节、节流调节、滑压调节和复合调节四种。

喷嘴调节和节流调节是定压运行机组采用的负荷调节方式，在外负荷变化时，通过改变调节阀的开度，使进汽量变化，改变机组的功率，与外负荷的变化相适应。

采用喷嘴调节的汽轮机，在外负荷变化时，各调节阀按循序逐个开启或关闭。由于在部分负荷下，几个调节阀中只有一个或两个调节阀未全开，因此在相同的部分负荷下，汽轮机的进汽节流损失较小，其内效率的变化也较小。从经济性的角度，当机组负荷经常变动时，这种调节方式较为合理。

汽轮机采用节流调节，在部分负荷下，所有的调节阀均关小，进汽节流损失较大，在相同的部分负荷下，其内效率相应较低，因此这种调节方式仅适应于带基本负荷的汽轮机。另外，采用节流调节的汽轮机没有调节级，在工况变化时，高、中压级的温度变化较小，故启动升速和低负荷时对零件加热均匀。

采用滑压调节的汽轮机，在外负荷变化时，调节阀保持全开，通过改变进汽压力，使进汽量和蒸汽的理想焓降变化，改变机组的功率，与外负荷的变化相适应。在相同的部分负荷下，由于所有的调节阀均全开，节流损失最小。但在部分负荷下，由于进汽压力降低，循环效率随之降低。另外，由于锅炉调节迟缓，在部分负荷下，若所有的调节阀均全开，当负荷

增加时，调节阀不能参与动态调节，机组的负荷适应性较差。只有单元机组，或可切换为单元制连接的机组，其汽轮机才能采用复合调节方式。

复合调节方式是上述调节方式的组合。它有两种组合方式：其一是高负荷区采用额定参数定压运行喷嘴调节；中间负荷段采用滑压运行；低负荷区，采用低参数定压运行节流调节，即“定—滑—定”的调节方式。其二是低负荷区，采用低参数定压运行节流调节，其他负荷区采用滑压运行，即“滑—定”的调节方式。由于复合调节方式包含滑压调节方式，也只有单元机组，或可切换为单元制连接的机组，其汽轮机才能采用。对于亚临界机组，在高负荷区采用额定参数定压运行喷嘴调节，节流损失不大，循环效率没有降低，其经济性优于滑压运行方式。另外，可使部分负荷下滑压运行的主蒸汽压力相应提高，使循环效率降低较少，提高滑压运行的经济性，而且可以利用已关闭的高压调节阀参与动态调节，提高机组对外界负荷变化的适应能力。在低负荷区采用低参数定压运行节流调节，有利于锅炉稳定运行。对于超临界机组，在高负荷区等压线和等温线很陡，采用滑压调节经济性优于额定参数定压运行喷嘴调节，若不参加电网调频，在高、中负荷区采用滑压调节；在低负荷区采用低参数定压运行节流调节，即“滑—定”的复合调节方式。若参加电网调频，仍要采用“定—滑—定”的复合调节方式。

2. 什么单元机组的汽轮机均采用复合调节方式？

解答：复合调节方式综合喷嘴调节、节流调节和滑压调节的优点，在负荷调节过程中可以使机组获得较高的经济性，提高机组对外负荷变化的响应速度。而且只有单元机组，或可切换为单元制连接的机组，其汽轮机才能采用复合调节方式，故单元机组均采用复合调节方式。对于亚临界中间再热机组，在高负荷区，采用额定参数定压运行，喷嘴调节的节流损失不大，循环效率没有降低，其经济性优于滑压运行方式。而且使部分负荷下滑压运行的主蒸汽压力相应提高，循环效率降低较少，经济性相应提高。同时，可以利用高压调节阀参与动态调节，提高机组对外界负荷变化的适应能力。在低负荷区，要保证锅炉稳定运行，故采用低参数定压运行节流调节。即“定—滑—定”的复合调节方式。对于超临界机组，在理论上高负荷区采用滑压运行的经济性优于额定参数定压运行喷嘴调节，但若参加电网调频，为了提高机组滑压调节的动态特性，仍采用“定—滑—定”的复合调节方式，只是采用额定参数定压运行喷嘴调节的区段相对较小。若超临界机组在电网中带基本负荷，则可采用高负荷和中间负荷区滑压运行，低负荷区低参数定压运行的“滑—定”复合调节方式。

3. 轮机运行对其调节系统的基本要求有哪些？

解答：汽轮机运行对其调节系统有如下基本要求：

1) 能控制汽轮机转速, 按要求从零逐步升高到额定转速; 并入电网后, 能使机组功率在零和额定值之间任一负荷下稳定运行; 外负荷不变时, 能保持机组功率和转速不变。

2) 在外负荷变化时, 能迅速改变机组输出功率与外负荷相适应, 从原稳定工况过渡到新的稳定工况, 保证机组转速的变化在允许范围内。

3) 在机组甩负荷(主汽门全开, 突然与电网解列, 负荷降至零)时, 能维持机组转速在3000r/min左右空负荷运行。

4) 能按要求控制机组正常停机; 当出现危及机组安全的情况时, 能迅速切断汽源, 实行事故停机。

4. 汽轮机调节系统一般由哪些机构组成? 各自的作用分别是什么?

解答: 汽轮机的调节系统, 由感应机构、传动放大机构、执行机构和定值机构组成。

它们各自的作用如下: 感应机构接受调节信号的变化, 并将其转换为可传递的信号。采用转速变化为调节信号时, 感应机构称为调速器。传动放大机构将感应机构送来的调节信号进行幅值放大和功率放大, 并进行综合处理, 传递给执行机构进行调节。汽轮机调节系统的执行机构是进汽调节阀和操纵机构, 也称配汽机构。它根据调节信号, 改变调节阀的开度, 使机组功率相应变化。定值机构即同步器, 对于电液调节系统即转速给定和功率给定。它通过手动产生调节信号, 也送入传动放大机构, 以改变进汽调节阀的开度。

5. 调节系统动态特性品质用哪几项指标来衡量? 何谓动态响应曲线?

解答: 衡量调节系统动态特性品质的指标为: (1) 调节系统的动态稳定性。即受扰动后, 能从原稳定工况过渡到新的稳定工况。(2) 动态超调量。即在调节动态过程中, 被调量的最大值与新的稳定工况对应值之差。(3) 过渡时间。即从原稳定工况过渡到新的稳定工况所经历的时间, 或被调量振荡的次数。

动态响应曲线是指当机组受到扰动, 由原稳定工况过渡到新的稳定工况过程中, 被调量随时间的变化曲线。

6. 影响汽轮机调节系统动态特性的主要因素有哪些? 改善调节系统动态特性的措施有哪些?

解答: 影响调节系统动态特性的主要因素有: 转子飞升时间常数、中间容积时间常数、油动机时间常数、速度变动率和迟缓率等。其中转子飞升时间常数和中间容积时间常数属于调节对象的特性参数, 而油动机时间常数、速度变动率和迟缓率属于调节系统的特性参数。

改善调节系统动态特性的措施有:

1) 尽量减小调节系统的迟缓率。调节系统的迟缓率是由于运动元件的摩擦、错油门的过封度、信号传递和综合速度慢等原因造成。设计中调节元件的铰链应采用高精度的滚珠轴承；采用自动对中滑阀，或旋转滑阀，或蝶阀；少用平衡弹簧；采用电液调节系统等。运行中保持调节油的质量。检修时，在保证调节特性的条件下，可适当调整移动件的间隙和错油门的过封度等。

2) 适当调整调节系统的速率变动率。在保证机组甩全负荷时能维持空负荷运行的前提下，适当增大速率变动率(一般不得超过 6%)。对液压调节系统，在油动机反馈系统中都设有调整速度变动率的元件。电液调节系统，调整系统的速率变动率更方便。

3) 适当减小油动机时间常数。在保证机组稳定工况转速波动和功率波动在允许范围的前提下，尽可能减小油动机时间常数。具体方法是：在系统设计时，提高调节油压以减小油动机活塞的面积；加宽错油门控制油口的宽度或采用特殊型线油口。

4) 设置加速度调节器(微分器)。当转速的变化率较大时，加速度调节器可给错油门一个附加信号，加快油动机的关闭速度。

5) 甩负荷时同步器回零。机组甩负荷时，同步器快速退到空负荷对应的位置(同步器回零)，使转速稳定在 3000r/min 左右。

6) 消除或减弱中间再热器的影响。对于中间再热机组，可设置中压调节阀和加装动态校正器，尽可能消除或减弱中间再热器的影响。

7. 研究调节系统动态特性的方法有几种？现场一般采用哪种方法？

解答：研究调节系统动态特性的方法有三种：理论分析、试验研究和试验仿真。电厂一般采用实验研究法。用理论分析法研究调节系统动态特性，通过建立调节系统各环节和调节对象的数学模型，进行分析计算，判断其动态特性的优劣。在建立调节系统各环节和调节对象的数学模型时，均作了一些简化假设，所以计算结果与实际动态过程存在差异，因此，仅用于新型调节系统的设计和改进方案的预测。对于电厂的汽轮机，调节系统已经存在，通常都用甩负荷试验的方法研究和分析其动态特性。对于大型机组，甩全负荷对电网的影响比较大，也可采用试验仿真的方法，通过甩部分负荷的试验结果，修改理论分析的数学模型，使其趋近实际系统，再进行分析计算，得到甩全负荷时的动态特性。

8. 中间再热式汽轮机的调节特点是什么？为什么有这些特点？

解答：由于中间再热式汽轮机与锅炉之间采用单元制连接，并存在很大的中间再热器容积，其调节特点是：在外负荷变化时，导致机组功率的变化“滞后”；对负荷变化的适应能力较差；甩负荷时动态超调量极大。

由于中间再热式机组采用单元制连接，主蒸汽系统的储热能力较小，且锅炉调节的迟缓率较大，从改变燃料到蒸汽量的改变，需要的时间长达 100~250 秒。在外负荷变化、高压调节阀开度变化时，主蒸汽相应变化，造成调节阀过调，高压缸的功率变化“滞后”。另外，又存在很大的中间再热器容积，高压调节阀开度变化后，要等再热器的压力变化达新工况对应值时在外负荷变化时，中、低压缸的功率才达到新工况的对应值，导致中、低压缸的功率变化“滞后”。由于在外负荷变化时，机组功率变化“滞后”，因此，对负荷变化的适应能力较差。若不采取适当措施，甩负荷时动态超调量极大。

9. 如何改善中间再热式汽轮机的调节系统动态特性？

解答：改善中间再热机组调节特性的方法如下：

1) 设置动态校正器，在调节的动态过程中，使高压调节阀动态过调，利用主蒸汽系统的蓄能，增加高压缸功率的变化，以弥补中、低压缸功率变化的“滞后”。

2) 设置中压调节阀，在低负荷区参与调节；在高、中负荷区，减负荷时参与动态调节；甩负荷时，与高压调节阀一起快速关闭，减弱中间再热器的影响。

3) 在外负荷增加的调节过程中，瞬间关闭除氧器的进水和低压加热器的进汽，利用除氧器的蓄热，使中、低压缸的功率提前变化，以弥补中、低压缸功率变化的“滞后”。

4) 实现机、炉联合调节，将外负荷变化的信号提前送入锅炉调节器，减缓其调节的迟缓。

10. 根据图 2-11，分析定压运行时中间再热式机组联合调节的过程。

解答：机组在调节过程中，其主调信号为 P'_0 ，它由频差信号(一次调频) $k\Delta f$ 和负荷给定值 P_0 组成。负荷给定值可以由运行人员输入，也可以由中心调度室输入（进行二次调频）。由于机组的输出功率受辅机出力的影响，所以引入辅机出力信号，作为 P'_0 的修正和限制信号。将主调信号 P'_0 、以及 P'_0 与测功信号 P 之差值 ΔP ，送入锅炉燃烧调节器，实现“提前燃烧”调节。并将主蒸汽压力与整定值之间的差值 Δp 也引入锅炉燃烧调节器，进一步加快燃烧调节，使锅炉的蒸发量迅速满足机组功率变化对蒸汽流量的需求，恢复主蒸汽压力为额定值。锅炉燃烧调节器综合处理这三个信号，并输出燃烧调节信号 FR ，以调整风、煤系统和给水系统。另外将 ΔP 和 Δp 引入汽轮机阀位调节器，经过调节器的综合处理后，输出阀位调节信号 m 至阀位控制器，控制汽轮机调节阀的开度。利用锅炉和主蒸汽系统的储热能力，迅速实现与外负荷之间的功率平衡。此时，若锅炉调节仍不能满足要求，使主蒸汽压力 Δp_0 的变化超过允许范围，此信号将限制调节阀的开度进一步开大（外负荷增加时），或开大旁路系统的控制阀（外负荷减小主蒸汽压力升高时），以防止锅炉出口压力大幅度波动，保证锅炉调节的稳定性。虽然将 Δp 引入阀位调节器后减弱了机组的一次调频能力，但同时采用提前

燃烧，因此有一定的补偿，所以联合调节可以提高机组的负荷适应能力，并改善机、炉调节的动态特性。

11. 数字电液调节系统有何优点？由哪几部分组成？

解答：数字电液调节系统（DEH）的优点如下：可满足汽轮机运行对调节系统的要求，可靠性强，具有易调的静态特性和良好的动态特性；信号综合能力强，可组合成多种控制方式，满足自动化水平日益提高的要求；它灵敏度高，能精确的控制机组的转速和功率（在转速控制时，其控制精度为 $\pm 2\text{r/min}$ ；在功率控制时，其控制精度可达额定负荷的 ± 0.007 以下）；能够实现机组的自动程控启动、负荷的自动调节和对机组的自动监视功能。

DEH 调节保护系统包括两大部分：即数字调节系统和 EH 油系统。数字调节系统由数字调节器及其外围设备组成；EH 油系统包括高压供油系统、带电液转换器的液压执行机构和危急跳闸系统（ETS）。

12. 数字电液调节系统中，在自动控制方式和手动控制方式下的转速调节有何不同？

解答：转速调节在自动控制方式下，系统根据机组状态，经过逻辑运算，决定其冲转升速的控制是采用高压主汽阀，或高压调节阀，还是中压调节阀，并确定升速率；由操作员设置目标转速，转速给定回路按确定的升速率，将阶跃的目标转速变换为线性变化的转速给定值；以转速给定值和实测转速的差值 Δn 作为调节信号，改变进汽阀门的开度，控制机组的转速。由于此时转速调节主回路和阀位控制子回路均为闭环结构，采用差值信号进行调节，只有 $\Delta n=0$ ，调节过程才结束。只要转速给定值不变，若出现内部扰动（如蒸汽参数变化），使转速偏离给定值（ $\Delta n \neq 0$ ）时，调节系统立即进行调节，恢复转速等于给定值，使机组转速始终跟随转速给定值的变化而变化。因此可以提高系统的调节精度，并具有很强的抗内扰能力。但用差值信号进行调节时，必须配置积分器或积分环节，以便在 $\Delta n=0$ 时，保持调节器的输出信号——阀位信号，使调节阀的开度不致因 $\Delta n=0$ 而关闭。

手动控制方式下的转速调节，系统的主调节回路是开环结构。需要改变转速时，操作员直接手动增、减转速按钮，发出指令信号 Δn_m^* ，通过相应阀门的阀位控制装置，使对应的进汽阀门开度变化，改变进汽量，从而控制机组转速。在阀位信号 ΔV_{T1} 等于指令信号 Δn_m^* 时，进汽阀门开度达到新的稳定状态。由于在手动控制方式下，没有引入转速反馈信号，主调节回路是开环控制，即使阀位不变，蒸汽参数的波动也会使转速产生漂移，所以系统没有抗内扰能力，调节精度相应降低。

13. 电液调节系统为什么引入功率信号？反调现象是怎样产生的？如何消除反调现象？

解答：电液调节系统引入功率信号是为了精确控制发电机输出的电功率，提高调节系统的稳定性和抗内扰能力。电液调节系统在进行负荷调节时，除以转速给定值（3000r/min）与实测转速的差值 $k \Delta n$ 作为调节信号之外，还设置功率给定回路，产生功率给定值 P^* ，并引入机组实测输出电功率 P 作为反馈信号，使功率调节回路为闭环结构，以负荷指令（ $k \Delta n + P^*$ ）与实测输出电功率的差值作为调节信号，控制机组输出的电功率。因此可以用负荷指令精确地控制机组输出的电功率，提高负荷调节系统的抗内扰能力。而且，改变负荷给定值，可以进行二次调频和各机组间的负荷调度。

由于外负荷均以并联形式接入电网，当外负荷增加时，电网阻抗减小，各发电机的输出电流增加，作用在机组转子上的电磁阻力矩增大，使机组转速降低。由于发电机输出电流的变化先于转速的变化，因此在外负荷增大的初始瞬间，发电机电功率实测信号 P 的增加先于机组转速实测信号 n 的降低，使负荷调节信号（ $\Delta P = K \Delta n + P^* - P$ ）瞬间降低，调节阀在此瞬间不是随外负荷增加而开大，反而关小，调节系统出现的这种现象称为反调现象。

解决“反调”问题有两种办法，其一是用汽轮机的内功率作为功率反馈信号，以便精确的控制机组输出的电功率；其二是抑制外负荷变化初期电功率反馈信号的强度，让机组转速变化的信号处于主导地位。

14. 电液调节系统中转速给定和负荷给定各有什么作用？为什么设置转速给定值形成模块？

解答：转速给定的作用是根据设定的目标转速和选定的升速率，产生转速给定值，使系统按选定的升速率，控制机组转速逐步达到目标转速确定的值。负荷给定的作用是根据设定的目标负荷和选定的升负荷率，产生负荷给定值，使系统按选定的升负荷率，控制机组功率逐步达到目标负荷确定的值。改变目标负荷，可以进行二次调频和各机组间的负荷调度。转速给定和负荷给定的作用，相当于液压调节系统的同步器。

“转速给定”设定的目标转速是一个阶跃值，系统设置转速给定值形成模块，按选定的升速率，将阶跃的目标转速转换为线性变化的转速给定值，使机组转速的变化率符合要求。

15. 液调节系统在进行转速调节和负荷调节时的调节信号各由什么信号组成？

解答：转速调节的调节信号是转速给定值 n^* 与转速测量值 n 的差值（ $n^* - n$ ），经放大后的信号 $K \Delta n$ 。负荷调节时，由负荷的给定值 P_0^* 和转速差值信号 $K(n_0 - n)$ 组成负荷指令 $[K(n_0 - n) + P_0^*]$ ，负荷指令与机组实测功率 P 之差 $[\Delta P = K(n_0 - n) + P_0^* - P]$ 作为调节信号，其中 n_0 为额定转速。

16. 阀门管理器的作用是什么？

解答：阀门管理器有两个作用，其一是实现“单阀”控制（节流调节）和“顺序阀”控制（喷嘴调节）方式之间相互切换；其二是将调节器输出的负荷指令（或称流量请求值 GVSP）转换为阀门开度请求值。

17. 电液转换器的作用是什么？

解答：来自阀门管理器输出的阀门开度请求值和阀门开度实测值的差值，经伺服放大器进行功率放大后的电信号，是调节阀的阀位调节信号。电液转换器又称电液伺服阀，它的作用是将来自伺服放大器的阀位调节信号，转化为油压信号，以控制高压主汽门、高压调节阀和中压调节阀的开度。

18. 数字电液调节系统的控制方式有几种？各有什么优点？

解答：DEH 调节系统有自动和手动两类控制方式。由“手动 / 自动”切换开关进行切换。手动方式一般分为二级手动和一级手动；自动方式又分操作员自动和程控自动。这四种控制方式的级别顺序为：二级手动→一级手动→操作员自动→程控自动。其中二级手动为最低级控制方式，操作员自动为最基本控制方式，四种控制方式可以按级别顺序无扰进行切换。

二级手动也称模拟手动，是一种备用控制方式，有些机组不设置这种控制方式。在这种方式下直接由操作员手动阀门开度的“增 / 减”按钮，向阀门控制系统的 V_{cc} 卡发送阀门的开度增、减指令，开启或关小相应阀门。

一级手动也称数字手动，它是在两台控制计算机出现故障，转速反馈、功率反馈和调节级压力反馈因故障全部切除后的一种开环控制方式。此时由操作员设置目标转速或目标负荷及其变化率，形成转速给定或负荷给定值，直接送入阀门管理器，控制阀门的开度。在这种方式下，故障减负荷和机组跳闸保护系统均投入。

操作员自动控制方式是由操作员设置目标转速或目标负荷及其变化率，由调节系统进行闭环自动调节。DEH 调节系统的各种功能回路都投入，系统具有监视功能各种保护功能。

程控自动方式与操作员自动控制方式的区别是：目标转速或目标负荷由控制程序设定，其变化率由计算程序根据机组的状态计算其应力水平确定。程控自动方式还可以和操作员自动或遥控方式组成联合控制方式。此时，目标转速或目标负荷及其变化率，由操作员或负荷调度中心设置，控制程序根据机组的状态计算其应力水平确定其变化率，对操作员或负荷调度中心设置的升速率和升负荷率进行修正。

19. 数字电液调节系统的总体功能是什么？

解答：数字电液调节系统的总体功能有：实现机组的自动启动；实现机组负荷的自动调节和二次调频；对机组运行状态进行自动监视；对机组进行自动保护。

20. 什么是炉跟机？什么是机跟炉？什么是协调控制？

解答：炉跟机运行方式将外负荷变化的信号引入汽轮机的调节系统，控制其调节阀的开度，改变其进汽量，从而改变汽轮机的功率，使其与外负荷的变化相适应。当汽轮机调节阀的开度变化时，造成锅炉产汽量与汽轮机的进汽量不平衡，主蒸汽压力相应变化。锅炉燃烧调节器接受主蒸汽压力变化的信号，进行燃烧调整，使主蒸汽压力恢复为规定的数值。这种调节方式可充分利用主蒸汽系统的蓄热能力，但主蒸汽压力波动幅度较大。

机跟炉运行方式将外负荷变化的信号引入锅炉燃烧调节器，使锅炉提前进行燃烧调整（与按主蒸汽压力变化进行调节相比）。外负荷增加，燃烧率增大，使主蒸汽流量增加，主蒸汽压力相应升高。汽轮机的调节系统根据主蒸汽压力的变化，改变其调节阀的开度，使主蒸汽压力恢复为规定的数值，机组的功率与外负荷的变化相适应。此调节方式主蒸汽压力波动幅度较小，但不能利用主蒸汽系统的蓄热能力。

协调控制是将单元机组作为一个整体进行调节，它是在炉跟机或机跟炉两种基本调节方式的基础上，将外负荷变化和主蒸汽压力变化的信号，同时引入锅炉燃烧调节器和汽轮机的调节系统，两者的调节相互协调，以提高机组对外负荷变化的响应速度，并使主蒸汽压力波动在允许范围内。

21. 单元机组协调控制的调节原理是什么？有何优点？

解答：机炉协调控制的基本原理是在机炉单独调节、炉跟机或机跟炉的基本调节方案中，增加机炉间的协调信号回路，两者的调节相互协调，以提高机组对外负荷变化的响应速度，并使主蒸汽压力波动在允许范围内。

以炉跟机为基础的协调控制方式，是在炉跟机基本调节方式的基础上，将主蒸汽压力变化的信号同时引入汽轮机的调节系统，仍以外负荷变化的信号控制其调节阀的开度，充分利用主蒸汽系统的蓄热能力，使汽轮机的功率与外负荷的变化相适应。若主蒸汽压力变化在允许范围内，此信号不起作用；当主蒸汽压力的变化超过允许范围时，该信号将限制汽轮机调节阀的开度进一步变化。另外，将汽轮机的功率信号同时引入锅炉燃烧调节器，仍以主蒸汽压力变化为主调信号，而汽轮机的功率信号用于强化燃烧调节，减缓锅炉燃烧调节的迟缓，使燃烧指令直接与汽轮机的能量需求相平衡。

以机跟炉为基础的协调控制方式，是在炉跟机或机跟炉两种基本调节方式的基础上，将外负荷变化的信号同时引入锅炉燃烧调节器，仍以主蒸汽压力变化为主调信号，而外负荷变化信号用于强化燃烧调节，以缩小机、炉调节对外负荷变化响应速度的差别。此时将外负荷变化和主蒸汽压力变化的信号同时引入汽轮机的调节系统，根据主蒸汽压力改变调节阀的开

度（主蒸汽压力升高，调节阀开大），使汽轮机的功率变化，与外负荷的变化相适应，维持主蒸汽压力为设定值。而引入外负荷变化的信号，则使汽轮机充分利用主蒸汽系统的蓄热能力，提高机组对外负荷变化的响应速度。

单元机组的协调控制是解决大系统控制问题基本策略的具体运用。它采用分解与协调的基本方法，把系统分解成机、炉和其他辅机的若干个子系统，进行分块处理，求得各块达到最优控制。再从系统的全局出发进行各子系统之间的协调，求得各子系统之间的和谐，进而实现对整个系统的最优控制。因此，既可加快锅炉的燃烧调节、充分利用主蒸汽系统的蓄热能力，提高机组对外负荷变化的响应速度，又可保证主蒸汽压力波动在允许范围内，提高单元机组调节的动态稳定性。同时，在协调中充分考虑控制对象的性能和相互间的影响，控制精度和可靠性都很高。另外，它把自动调节、状态监视、逻辑控制、连锁保护和报警显示等功能有机地结合在一起，组成一个具有多种控制功能，满足不同运行方式和不同运行工况控制要求的综合控制系统。由于采用分散处理，各控制器的结构相对简单，易于整定和维修。

第三章 汽轮机的经济运行思考题答案

1. 热耗率反映了汽轮发电机组中那些的损失，它与机组绝对内效率有什么关系？

解答：机组热耗率与绝对电效率相对应，它反映：①机组的冷源损失，包括汽轮机的级内各项损失和系统中各管道的阻力（节流）损失等；②汽轮发电机组的机械传动损失；③发电机损失；④热力系统内各种管道的散热损失；⑤热力系统内各种汽水损失。

机组热耗率与机组绝对内效率的关系可由公式 $q_0 = 3600 / \eta_i \eta_m \eta_g$ (kJ/kW·h) 来表达。由该式可见，机组热耗率与机组绝对内效率成反比，它是影响机组热耗率的决定因素。机组绝对内效率越高，机组热耗率就越小，机组的热经济性越好。

2. 求取机组热经济指标有那些方法？它们各有什么特点？

解答：一般来说，在下列四种情况下，需要求取机组热经济指标：①汽轮机本体设计时；②设计热力系统时；③评价机组运行经济性时；④机组热力试验时。在不同情况下求取机组热经济指标，采用不同的方法。

①汽轮机本体设计过程中，应首先拟定一个相对简单的热力系统(只考虑基本汽水流程及轴封、门杆漏汽、厂用汽等)，然后同时进行通流部分的设计计算和热力系统的热力计算。因为汽轮机通流部分的设计计算需要已知各级的流量和各段回热抽汽量；而确定各段回热抽汽量的热平衡计算，又需要已知通流部分的蒸汽参数。因此两种计算需要交叉进行，通过反

复迭代达到预定的精度。一旦整个机组各部分的流量和参数都确定后，其热经济性也就随之确定。此外，还须同样的方法进行不同工况下的热力计算，求取各工况下的热经济性。

其特点是：各种损失均按经验公式计算；回热抽汽的压力损失和加热器端差按规定取值；计算出的热经济性仅为理论值。

②热力系统设计过程中，根据已选定锅炉、汽轮机，以及拟定的热力系统来计算其热经济性。这时，汽轮机及热力系统的汽水参数均为已知，各种系数则通常按规定取值或取额定值。计算中设主蒸汽的流量为 1kg，首先计算各辅助汽水的份额（即相对主蒸汽流量为 1kg 时的流量），然后根据加热器的热平衡计算，确定各回热抽汽的份额，从而算出排汽份额，以及 1kg 主蒸汽在汽轮机中所作内功和在锅炉（包括在再热器中）的吸热量等，最后便可求得机组的热耗率。如果所拟定的热力系统相对汽轮机制造厂设定的热力系统有较大的改动，则应对抽汽压力和抽汽比焓作相应的修正。此外，还可以运用这种方法对多种不同的热力系统的热经济性进行计算、比较，达到优化热力系统的目的。

其特点是：锅炉、汽轮机的效率取制造厂的给定值；回热抽汽的压力损失和加热器端差按规定取值；计算出的热经济性仅为设计工况的理论值。

③在机组运行中求取其热经济性指标，可以通过机组性能实时监测系统完成。机组性能实时监测系统利用计算机进行数据的采集，然后对数据进行处理和分析，计算出机组的热耗率和其他热经济指标。

其特点是：各种参数均为实测值；但由于相邻机组之间不可避免地存在工质交流，且主蒸汽流量测量存在误差，故严格来讲，实时计算出的机组热经济性指标并不很准确。

④机组热力试验时，求取其热经济性指标的方法与机组运行中的求取方法相同。

其特点是：试验时对机组的热力系统进行严格的隔离，并安装准确的流量计测量汽水流量，各贮水容器（如除氧器水箱、锅炉汽包等）的水位变化也予以考虑，并且计算前先对试验数据进行整理，故能够很准确地测量各处的汽水流量，计算出机组的热经济性指标也准确。

3. 实时监测热经济指标为什么不能替代热力试验？

解答：由于正在运行的机组不可能完全与相邻机组隔离；汽包、除氧器水箱等容器的水位也不可能完全稳定；实测的主蒸汽流量或由调节级后压力换算求得的主蒸汽流量都存在误差，因此实时监测的性能指标值并不十分准确，故不能取代热力试验准确测定机组的热耗率。

4. 影响汽轮机相对内效率的因素有哪些？

解答：汽轮机相对内效率反映机组通流部分的完善程度和运行状况。影响汽轮机相对内效率的主要因素有：汽轮机通流部分结构和表面状态的变化；通流部分动、静间隙的变化；汽轮机的负荷、进汽参数和调节阀门开度的变化等。

5. 机组主蒸汽参数降低为什么会影响其热经济性？

解答：主蒸汽参数是决定机组所采用的基本循环特性的重要参数，它们决定热力循环的平均吸热温度，对机组的经济性有很大的影响。在终参数不变情况下，主蒸汽压力或温度降低，将使热力循环的平均吸热温度降低，从而循环热效率降低，影响了机组的热经济性。

6. 机组运行时，引起表面式加热器端差增加的原因有那些？

解答：机组运行中，引起表面式加热器端差增加的原因很多，主要表现为：①加热器水管泄漏造成给水流到其汽侧，或者疏水器失灵，以致汽侧水位升高而淹没加热器水管，致使实际传热面积减小，传热温差增大，端差增加；②加热器抽气系统故障或者加热器漏气严重（对于处于真空状态的加热器而言）致使加热器内不凝结气体积聚，这些气体附着在水管外侧，致使传热系数降低，端差增加；③加热水管的表面被污染或结垢，使传热热阻增大，端差增加；④电厂常采用堵管的方法来临时处理加热器水管破裂的问题，而不至完全切除加热器，当堵塞的管束增多时，造成传热面积减少，而引起端差增加。

7. 蒸汽管道的节流损失在数量和质量上是如何体现的？

解答：蒸汽在管道中流动时，由于蒸汽管道及其阀门存在沿程阻力和局部阻力，产生压力损失，其大小一般采用压损系数来表示。压损系数的大小与蒸汽的热力参数、流速，以及管道的内径有关，设计时通过技术经济比较来确定经济上合理的压力损失。

压力损失是一种不明显的热力损失，使蒸汽的作功能力下降，即能量质量的下降。机组运行时，进、排汽节流损失增加，蒸汽在汽轮机内的理想焓降减小，所作的机械功减少。抽汽管道的压力损失增加，虽然抽汽的比焓不变。但使加热器内蒸汽压力降低，引起加热器内蒸汽温度降低。若端差不变，则加热器出口水温降低，造成给水加热不足。此时虽然本级抽汽量有所减少，但相邻上一级（压力较高）加热器的抽汽量则因其进口水温降低而增大。这样，在相同的加热效果下（本级进口水温和上一级出口水温不变），能级较高的抽汽增多，能级较低的抽汽减少，蒸汽在汽轮机内所作的机械功减少，其热经济性降低。

8. 加热器旁路泄漏为什么会引起机组热经济性的下降？

解答：加热器旁路装置是加热器切除时，提供主凝结水或给水绕过加热器的通路。正常运行时旁路阀门应关闭严密，以保证所有被加热的水都能流经加热器。而运行时往往因旁路阀门关闭不严导致泄漏，一部分水量经旁路绕过加热器流走，使加热器出口水温降低，产生

给水加热不足。虽本级加热器的抽汽量因此而减少，但上一级加热器的抽汽量相应增加，降低了机组热经济性。显然，旁路泄漏份额越大，热经济性降低越多；泄漏份额相同时，大旁路（多个加热器共用）的泄漏比小旁路（一个加热器的）泄漏对热经济性的影响大。

9. 引起机组真空下降的因素有那些？

解答：影响凝汽器真空的因素很多，除了凝汽器本身结构因素外，还与真空系统严密性、冷却水量、冷却水入口温度、管束的清洁度、抽气器的性能等有关。凝汽器运行中的常见问题是真空降低，这大多与真空系统严密性和抽气器工作不正常有关。

引起机组真空下降的因素主要有：①凝汽器管束内表面脏污，传热热阻增加，使传热端差增大；②真空系统不严密，漏入空气量过大，或抽空气设备运行不良，使凝汽器汽侧积存过量空气，影响凝汽器内的传热，传热端差和过冷度增大；③循环水泵故障或凝汽器铜管被堵塞，或循环水系统阀门未处于全开状态，而导致通过凝汽器的循环水量减少，使循环水温的升高值增大；④凝汽器水位过高，淹没了下层管束，冷却面积减小。

10. 相对于定压运行，机组滑压运行有那些优缺点？

解答：负荷调节时，相对于定压运行，单元机组采用滑压运行的优点有：①滑压运行时，保持进汽温度基本不变，在相同的变负荷速度下，转子和汽缸的温度变化小，其热应力和转子的相对胀差变化较小，可以加快负荷变化速度，提高汽轮机对外负荷变化的适应性。②滑压运行时，锅炉受热面和主蒸汽管道内的压力下降，其应力降低，可以延长机组使用寿命，提高其可靠性。并且，由于滑压运行时汽轮机末级蒸汽湿度的减少，而减轻对叶片的冲蚀，延长了末级叶片的使用寿命。③滑压运行在一定程度上提高了机组热经济性。首先，部分负荷下，汽轮机的进汽节流损失减小，相对内效率相对提高；其次，在较大的负荷变化范围内保持主蒸汽和再热蒸汽温度不变，在一定条件下，循环效率相应提高；第三，滑压运行时可以采用变速给水泵调压运行，在部分负荷下可降低水泵的耗功量，减少了厂用电的消耗；最后，除氧器可采用滑压运行，既消除了调压阀造成的节流损失，又可以提高回热系统的运行效果，有利于提高机组滑压运行的经济性。

机组采用滑压运行也存在一些问题：①主蒸汽压力降低时机组的循环热效率会降低，对于亚临界机组，在高负荷区汽轮机内效率的提高不足以弥补循环热效率降低对经济性的影响；另外，若从额定负荷开始就采用滑压运行（即所谓纯滑压运行），调速阀已经全开，负荷增加时没有其他调节手段，因此只有在适当的负荷下，采用滑压运行对经济性才有利。②超临界机组采用滑压运行时，水冷壁回路将移近临界压力点（22.12MPa），在这点以下将出现两相流动，会导致流动工况的恶化。同时由于压力的变化，管壁温度变化很大，对金属热应力的

影响较大。同时为了维持水冷壁内压力，给水泵功率降低得较少，这样就削弱了滑压运行的优点。③采用滑压运行时，若汽轮机的调节阀在整个负荷变化范围内均处于全开状态，完全要靠锅炉调节燃烧来适应负荷变化，存在负荷调节滞后的问题。因此采用该运行方式时，汽轮机的调节阀在整个负荷变化范围内，要保持一、两个调节阀处于关闭状态，以便机、炉实行协调控制。

11. 为什么滑压运行汽轮机在部分负荷时，相对于喷嘴调节汽轮机而言其热经济性的高低取决于 ΔQ_0 和 ΔQ_{s1} 的相对大小？

解答：同一机组采用滑压调节或喷嘴调节，其主蒸汽和再热蒸汽的温度均为额定值，在进汽量相同时，中压缸的进汽参数和热力过程基本相同，其差别仅在于高压缸的进汽和排汽参数不同。采用滑压调节时，高压缸的进汽和排汽比焓 h_0'' 、 h_{s1} 均较高。由于排汽参数不同，滑压调节与喷嘴调节在中间再热器中吸热量的差值为：

$$\Delta Q_{s1} = [(h)_{s1} - (h)_n] G_1 ;$$

而两者有用功的差值（即有效热降）为高压缸因进汽比焓较高而多作的功与排汽比焓较高而少作的功之差，即：

$$W_n - W_{s1} = G_1 [h_0'' - h_0] - G_1 [(h)_{s1} - (h)_n] = \Delta Q_0 - \Delta Q_{s1}$$

其中： ΔQ_0 即蒸汽在过热器中多吸的热， ΔQ_{s1} 为蒸汽在再热器中多吸的热。

故滑压运行的热效率为：

$$(\eta_t)_{s1} = \frac{W_{s1}}{Q_{s1}} = \frac{W_n + \Delta Q_0 - \Delta Q_{s1}}{Q_1 + \Delta Q_0 - \Delta Q_{s1}}$$

而喷嘴调节汽轮机的热效率为：

$$(\eta_t)_n = \frac{W_n}{Q_1}$$

根据分数基本性质，若 $\Delta Q_0 > \Delta Q_{s1}$ 则 $(\eta_t)_{s1} > (\eta_t)_n$ ，若 $Q_0 < \Delta Q_{s1}$ 则 $(\eta_t)_{s1} < (\eta_t)_n$ 。由此得出结论：滑压运行汽轮机在部分负荷时，相对于喷嘴调节汽轮机而言其热经济性的高低取决于 ΔQ_0 和 ΔQ_{s1} 的相对大小。

12. 什么是复合滑压运行？为什么要采用复合滑压运行？

解答：复合滑压运行是滑压和定压相结合的一种运行方式，即在不同的负荷区采用不同的运行方式，这样可充分发挥两种负荷调节方式的优点，优化出最佳的负荷调节方式。

理论上，复合滑压运行有三种方式：第一种是低负荷时滑压运行，高负荷时定压运行；第二种是低负荷时定压运行，高负荷时滑压运行；第三种是高负荷和低负荷区定压运行，中间负荷区滑压运行。采用最多的是第三种复合滑压运行方式，低负荷时，在较低压力下定压运行，中间负荷时，则关闭1~2个调速汽门，其余调节阀全开，而转入滑压运行，高负荷时，主蒸汽压力采用额定值，又转而采用喷嘴调节定压运行。此即所谓的“定-滑-定”方式。

由于在高负荷区两种运行方式的经济性差别不大，特别是亚临界机组喷嘴调节定压运行的经济性较好。另外，高负荷区采用喷嘴调节，降负荷时关闭一、两个调节阀，可使机组在中间负荷区实现机、炉协调控制，提高负荷调节能力。在低负荷区采用定压运行，可保证锅炉低负荷稳定运行。复合滑压运行方式既具有较高的经济性，又具有较强的负荷适应性，故应用最广泛。

13. 机组调峰有那些方式？它们各有什么特点？

解答：机组调峰的方式主要有以下四种：①变负荷运行方式；②两班制启停方式，又简称为两班制方式；③两班制低速热备用方式；④两班制调相运行方式，又称为电动机方式。

它们的特点分别是：

汽轮机变负荷运行是带基本负荷机组参与调峰的主要运行方式之一，机组根据电网负荷的要求改变其负荷。这种调峰方式主要要解决的问题是：增大调峰能力（降低锅炉最低稳定负荷和提高变负荷速度），提高机组低负荷的经济性。

机组两班制启停调峰，白天正常运行，夜间电网负荷低谷时停机（一般不超过8小时），次日清晨再重新启动并网。这种方式的优点是机组调负荷幅度大，特别是在低谷时间较长时经济性好。缺点是启停操作频繁，对设备的健康状况影响比较大，发生故障的可能性增加，有时会影响正常的调峰。这种调峰方式需要解决的问题是：提高机组自动化水平，在保证安全性的前提下尽可能加快启停速度，减少启停损失。

机组两班制低速热备用调峰是指电网低谷时机组与电网解列后，用蒸汽推动汽轮发电机组低速旋转，而处于热备用状态。这种调峰方式可以使机组在下次启动升速时，金属处于较高的温度水平（与极热态启动相当），以加快升速和带负荷的速度。启动时的运行操作比两班制启停方式调峰要简单得多。这种方式调峰需要解决的问题是：要引入低压蒸汽，保持在低速运转时转速稳定。

两班制调相运行是指调峰时停炉、停机，而发电机与电网不解列，以电动机方式带动汽轮机以额定转速转动。此时，发电机从电网中汲取必要的电能，用于克服汽轮机的机械损失和摩擦损失，同时向电网补偿无功功率。两班制调相运行方式与两班制启停调峰方式相比，

在向正常运行方式过渡时，具有一定的优势。首先，机组无须再并网，其次金属温度变化量较小，故启动时汽轮机部件的金属温度水平比较高，接近于极热态启动的水平，可以很快过渡到正常带负荷运行方式。同时，发电机改为电动机方式运行，可以调节电网无功分量。

这种方式调峰需要解决的问题是：由于高速旋转摩擦鼓风损失产生的热量必须带走，否则有可能导致通流部分过热，因此必须依据汽轮机结构和热力系统正确地组织冷却汽流，对通流部分实施冷却。

14. 什么是微增热耗率？它与热耗率有那些区别和联系，它们各适用于什么场合？

解答：微增热耗率是指机组功率变化时热耗量的变化率，即：

$$r_q = \lim (\Delta Q / \Delta P) = dQ/dP \quad (\text{kJ} / \text{kW} \cdot \text{h})$$

热耗率则是指机组生产单位功率电能所耗热量，即： $q=Q_n/P$ 。

这两个指标都与热耗曲线 $Q=f(P)$ 有关，某一工况的微增热耗率是热耗曲线在该工况点的斜率，而此时的热耗率是热耗曲线在该工况点的比值。

热耗率是一个综合性的热经济性指标，其热耗量 Q 由两部分组成：一是用于生产电能的有效热耗量 Q_i ；另一部分与空载热耗量 Q_n (维持机组空转的热耗量)，与负荷无关。生产电能的有效热耗率 $r_i=Q_i/P$ 。而微增热耗率 r_q 与空载热耗量 Q_n 无关，只与有效热耗量 Q_i 有关。当热耗曲线为直线时，微增热耗率与生产电能的效热耗率相等。

热耗率 q 用于定量评价、衡量和比较机组的热经济性，而微增热耗率 r_q 则用于并列运行的机组间负荷的经济分配。

15. 如何考虑与计算两班制运行中机组启动停机引起的煤耗增加？

解答：机组两班制运行的启停过程，一般可以分为 6 个阶段，即：机组停机降负荷过程；机组停运持续过程和准备启动过程；从锅炉点火到汽轮机冲转升速直至并网的过程；机组由并网到满负荷过程；机组运行工况趋于稳定的过程等。两班制运行的机组启动、停机引起的煤耗增加值，是这 6 个阶段煤耗增加值的总和。

机组启停过程中各阶段的燃料损失分别按如下方法进行计算：

机组停机降负荷过程：从机组开始降负荷到与电网解列。该过程的燃料损失是由于机组偏离额定工况造成的，但此时设备要向蒸汽释放一定的蓄热，基本上可以补偿这部分损失；而且该过程一般只有 30~40min，因此这部分损失可以忽略不计。

机组停运和启动准备过程：从机组解列到再次并入电网。此期间内有部分耗电、耗汽的辅助设备仍在运行，如盘车装置、油泵、疏水泵等，另外还包括在锅炉点火之前，要投入除氧器、启动给水泵、抽真空设备等辅机。它们所耗电能、热能全部为损失，应统计计算。

锅炉点火至机组并网过程：从锅炉点火，汽轮机冲转、升速，直至并网。此过程无功率输出，所消耗的能量全部是损失，约占有整个启停过程损失的 60%。

在机组由并网到满负荷过程中，由于蒸汽参数和机组功率偏离额定值，效率低于设计工况，造成损失。可将整个升负荷过程的热耗率曲线离散成若干个线性变化段，分段按热耗率的增量和该段持续的时间计算其燃料损失。

运行工况趋于稳定过程中，机组刚刚达到满负荷，各个部件金属内部的温度分布还没有达到稳定状态，需要消耗一定的热能进行加热，一直到热稳定状态。这段时间的热损失为机组在该过程的煤耗率与机组稳定运行时的煤耗率之差与这段时间的发电量的乘积。

各阶段的燃料损失值确定后，将其相加即得到机组整个启动、停机阶段的煤耗增加值。

16. 机组间负荷分配的目的是什么？母管制汽轮发电机组和中间再热机组负荷分配的原则有何差别？

解答：并列运行机组间进行负荷经济分配的条件是全厂机组负荷没有带满，其目的是在满足电网需求和保证设备安全的前提下，将电网给定的全厂负荷，最经济的分配给各台机组，使得总的能量消耗最少，以取得全厂和整个电力系统的最大经济效益。

由于汽轮机的动力特性可简化为连续的折线，故母管制汽轮发电机组的负荷经济分配是按其微增汽耗率的大小，从小到大地依次进行分配，使得总能耗为最小。

而中间再热式机组（包括锅炉在内）是以单元制方式运行。单元机组的动力特性是连续向上凹的曲线，应按各机组的微增煤耗率相等的原则进行其负荷经济分配，即当总负荷一定时，各单元机组所分配的负荷使其微增煤耗率相等时，总能耗达到最小。

第四章 汽轮机的安全运行思考题解答

1. 何谓材料的屈服极限、持久极限、蠕变极限和疲劳极限。

解答：材料的屈服极限：金属材料在受力较大时，可能产生塑性变形，称为屈服现象。过大的塑性变形将改变零件的形状，影响零件正常工作。材料试件受恒定拉力作用，卸载后产生 0.2% 的残余塑性变形（应变），试件受的拉应力值，称为材料的屈服极限。

材料的持久极限：金属材料在一定的温度和拉力持续作用下，会发生断裂。温度愈高、应力愈大，其断裂前的承力时间愈短。材料试件在一定温度下受恒定拉力作用，持续 10^5 小时断裂，此时试件的初始应力称为材料的持久极限。

材料的蠕变极限：金属材料在高温条件下（碳素钢在温度超过 300~350℃，合金钢在温度超过 350~400℃），受恒定拉力持续作用，即使应力小于屈服极限，也会产生缓慢的塑性变形，这种现象称为高温蠕变。工程上将材料试件在一定温度下，受恒拉力作用 10⁵ 小时，试件产生 1% 塑性变形的初始应力，定义为蠕变极限。

（4）材料的疲劳极限：金属在交变应力（应力循环变化）作用下，会产生裂纹，这种现象称为机械疲劳，简称疲劳。其裂纹的出现与应力循环次数和应力变化幅值的大小有关；应力变化幅值愈大，其产生裂纹所经历的循环次数愈少。工程上定义材料试件经历 10⁷ 次应力循环才断裂的应力变化幅值为材料的疲劳极限。

2. 零件安全的强度准则是什么？材料的许用应力如何确定？各种应力状态的零件，其最大应力如何确定？

解答：零件安全工作的强度准则是：零件内最大的合成应力小于或等于材料的许用应力。

材料的许用应力是材料的强度极限除以安全系数，相应屈服许用应力、持久许用应力、疲劳许用应力和蠕变许用应力。对于工作温度不高、承受非交变应力的零件，其许用应力为屈服许用应力与持久许用应力的最小值；对于在高温下工作的零件，其许用应力为以上两种许用应力和蠕变许用应力的最小值；若零件承受交变应力，其许用应力为以上两种，或三种许用应力和疲劳许用应力中的最小值。

首先确定零件的最大应力工况，计算该工况下零件的应力状态。对于受单向应力的零件（包括单向拉伸、压缩、挤压、剪切，或拉弯联合作用），其合成应力为危险截面各单向应力的代数和。对于内部为平面应力状态的零件，根据第三强度理论：若两向应力同号（拉应力为正、压应力为负），取其中最大值作为校核应力；若两向应力异号（一为拉应力、另一为压应力），则取两者的代数差作为校核应力。对于其内部为三向应力状态的零件（如汽缸和转子），则要根据第四强度理论求取其等效当量合成应力作为校核应力。

3. 零件安全工作的刚度准则是什么？刚度不合要求有什么危害？

解答：对于零件刚度的要求是在力的作用下产生的变形量不超过允许值。而受交变作用力的零件，对其刚度的要求主要是避开共振，使其自振频率与激振力的频率之间有一定的差值。万一无法避开共振，也要使零件在振动条件下振幅不超过允许值，以保证其动应力在允许范围内。

零件刚度不合要求时，在力的作用下产生的弹性变形量可能超过允许值，改变各相关零件的相对位置，影响其配合关系，甚至使动、静零件之间的间隙消失，而产生摩擦。对于受

交变作用力的零件，其振幅加大，动应力增加，可能大于疲劳许用应力；若发生共振，其振幅急剧增大，不但动应力增加，而且会使动、静零件之间的间隙消失，而产生摩擦。

4. 机组运行可靠性的指标有哪些？这些指标如何进行统计和计算？

解答：为了评价机组运行的可靠性，常采用以下指标：

(1) 可用系数：在统计时间段内，机组处于可用状态的时间所占的百分比。机组处于可用状态的时间等于机组实际运行时间与停机备用时间之和。

(2) 计划停运系数：在统计时间段内，计划大修、小修和节假日维修的时间所占的百分比。

(3) 非计划停运系数：在统计时间段内，机组因故障或事故停机维修和计划维修工期延迟的时间之和所占的百分比。

(4) 强迫停运系数：在统计时间段内，汽轮机因故障或事故被迫停机持续的时间所占的百分比。

(5) 运行系数：在统计时间段内，汽轮机运行时间所占的百分比。

(6) 强迫停运率：在统计时间段内，汽轮机被迫停机持续的时间占机组应运行时间的百分比。机组应运行时间等于机组实际运行时间与汽轮机被迫停机持续时间之和。

从安全角度，汽轮机运行的可靠性指标主要是可用系数和强迫停运系数，它们反映汽轮机设计、安装和运行维护的水平。

可靠性指标的计算，首先要确定统计时间段 PH（一年或一个大修期）；其次统计在此时间段内机组处于可用状态的时间 AH；机组实际运行时间 SH；计划大修、小修和节假日维修的时间 POH；汽轮机被迫停机持续的时间 FOH；故障或事故停机维修和计划维修工期延迟的时间 UOH。

可用系数 $AF = (AH/PH) \times 100\%$ ；计划停运系数 $POF = (POH/PH) \times 100\%$ ；非计划停运系数 $UOF = (UOH/PH) \times 100\%$ ；强迫停运系数 $FOF = (FOH/PH) \times 100\%$ ；强迫停运率 $FOR = (FOH / (FOH+SH)) \times 100\%$ ；运行系数 $SF = (SH/PH) \times 100\%$ 。

5. 汽轮机运行中，其汽缸受哪些作用力？这些作用力在汽缸内产生什么样的应力状态？这些作用力在什么条件下最大？它们对汽缸安全工作有何影响？在运行中如何保证汽缸安全工作？

解答：汽轮机运行中，其汽缸承受的作用力有：蒸汽与大气压力差产生的作用力；隔板或隔板套作用在汽缸上的力；汽缸内、外壁温差产生的热应力；连接管道作用在汽缸上的力。

蒸汽与大气压力差产生的作用力，在汽缸壁内部产生切向、轴向和径向应力；在高、中压汽缸的法兰内还产生弯曲应力；在其螺栓内产生拉应力。隔板或隔板套作用在汽缸上的力，在其与汽缸的接触面产生挤压应力；蒸汽喷射对隔板产生的反作用力，通过隔板的挂耳传递给汽缸，在汽缸内产生剪切应力；汽缸内、外壁温差产生切向、轴向和径向热应力。连接管道作用在汽缸上的力，在汽缸壁内产生局部的拉、压应力或剪切应力。

除凝汽式汽轮机的最末几级和低压排汽室外，其内部蒸汽压力大于大气压力，承受蒸汽表压力在其内壁产生的作用力，其中以进汽部分蒸汽压力最高，特别是在其进汽超压的最大流量工况，汽缸、法兰和螺栓承受的蒸汽作用力最大。对于其低压最末几级和低压排汽室，内部压力低于大气压力，主要承受大气的作用力，它随凝汽器真空升高而增大。隔板或隔板套作用在汽缸上的力，以最大流量工况时最大。汽缸内的热应力，与汽缸内、外壁温差成比例，温差愈大，热应力愈大。连接管道作用在汽缸上的力，与管道连接的状态有关。

对于汽缸的高、中压部分，若运行中其内、外压力差过大而超过最大许用值，其最大应力可能超过材料的许用应力；螺栓因变形而使预紧力消失，法兰结合面出现张口，产生漏汽，冲刷法兰结合面，破坏结合面的严密性。对于汽缸的低压部分，其内部压力低于大气压力，主要解决刚度问题，同时防止排汽压力高于大气压力。因为排汽压力升高，排汽温度随之升高，排汽缸的垂直膨胀量增大，破坏转子或汽缸中心线的自然垂弧，可能引起机组振动，造成动、静部分摩擦；而且可能造成凝汽器铜管泄漏，影响凝结水的质量。在汽轮机启停和变负荷过程中热应力为交变应力，热应力过大将使材料提前出现疲劳裂纹，还可能使合成应力超过许用应力。连接管道作用在汽缸上的力过大将阻碍汽轮机自由膨胀，严重时会引起汽缸中心线偏斜，或与台板脱离，造成推力轴承烧毁，或激起机组强烈振动。

只要在安装时注意控制连接管道作用在汽缸上的力；在运行中控制主蒸汽和调节级后蒸汽的参数不超过最大许用值；汽缸内、外壁温差和法兰内、外壁温差不超过最大允许值，可以保证汽缸的安全。

6. 汽轮机运行中，其隔板受哪些作用力？这些作用力在什么条件下最大？它们对隔板的安全工作有何影响？在运行中如何才能保证隔板安全工作？

解答：汽轮机运行中隔板承受其前后蒸汽压力差产生的作用力；隔板喷嘴内蒸汽加速产生的反作用力。这些作用力在最大流量工况下最大。隔板前后蒸汽压力差产生的作用力，使隔板产生弯曲变形，隔板体内孔产生轴向位移；喷嘴叶栅顶部截面产生较大的弯曲应力。蒸汽加速对喷嘴叶栅产生的反作用力，在叶栅顶部和根部截面产生较大的弯曲应力。隔板体内

孔轴向位移过大，可能使汽轮机动、静部分发生摩擦；喷嘴叶栅弯曲应力过大，可能产生裂纹。运行中控制汽轮机调节级汽室蒸汽压力不超过允许值，即能保证隔板安全工作。

7. 汽轮机运行中，其转子承受哪些作用力？哪些因素影响这些作用力的大小？这些作用力过大，对转子安全工作有何影响？在运行中如何保证转子安全工作，使其具有一定的使用寿命？

解答：汽轮机运行中转子承受其高速旋转产生的离心力；蒸汽作用在转子叶轮、轴肩和汽封凸肩上的轴向力；转子振动在其中产生的动应力；转子内部温度不均产生的热应力；传递机械功率的扭矩。

旋转产生的离心力与转速的平方成正比；蒸汽作用在叶轮上的轴向力与叶轮面积和其两侧蒸汽的压力差成正比；蒸汽作用在轴肩上的轴向力与其面积和该处蒸汽的压力成正比；转子振动在其中产生的动应力与振动的振幅和频率成比例，振动频率愈高、振幅愈大，动应力愈大；转子内的热应力与转子内、外壁温差和轴向温差有关，温差愈大，热应力愈大；传递机械功率的扭矩与机组的负荷成正比，以发电机短路时扭矩最大。

离心力过大，将使其合成应力大于许用应力，严重时造成转子飞车；轴向力的合力过大，使推力轴承承受的轴向推力超过其承载能力，推力轴承因温度过高而烧损，造成汽轮机轴向动、静间隙消失，而发生摩擦或叶片断裂；转子振动的动应力和热应力过大，可能使其合成应力大于许用应力，并将加快其材料的疲劳，使转子应力集中部位出现裂纹，缩短使用寿命，甚至发生断裂；转子振动过大，动、静间隙消失，而发生摩擦，造成转子弯曲，诱发更强烈的振动；转子扭转振动和传递机械功率的扭矩，在转子内部产生剪切应力，此应力过大，特别是转子扭转振动发生共振，会造成联轴节连接螺栓断裂，出现重大事故。

在运行中只要超速保护正常，控制转速不超过额定转速的 120%；发电机设置短路保护；控制蒸汽的温升率和升负荷率不超过允许值，可保证转子安全工作，并使其具有一定的使用寿命。

8. 作用在转子上的轴向力包括哪些？如何减小作用在推力轴承上的轴向推力？

解答：蒸汽作用在转子上的轴向力包括：蒸汽作用在叶轮轮面和动叶片上的轴向力、蒸汽作用在转子轴肩和汽封凸肩上的轴向力，以及推力轴承作用在转子上的轴向反作用力。

减小作用在推力轴承上轴向推力的方法有：设计时，在冲动级叶轮上开平衡孔，减小叶轮两侧的压力差；也可在转子上设置平衡盘，利用其两侧的压力差产生的反向推力平衡一部分轴向推力；对于中间再热式多缸汽轮机，常将其高、中压缸和分流的低压缸分别反向布置，

使它们的轴向推力方向相反，相互平衡一部分轴向推力。在运行中必要时可采用降负荷的办法，减小作用在推力轴承上的轴向推力。

9. 汽轮机运行中，其动叶栅承受哪些作用力？这些作用力在什么时候最大？如何保证动叶栅安全工作？

解答：汽轮机运行中，其动叶栅承受作用力有：蒸汽作用在动叶栅上的力；高速旋转产生的离心力；动叶围带产生的反弯矩和离心力；叶片振动时产生的动应力。

调节级在第一组调节阀（一个或两个）趋近全开时，级内蒸汽理想焓降最大，每一个动叶流道的流量也最大，此时蒸汽产生的作用力最大；对于各压力级，在最大流量时，级内的理想焓降也最大，此时蒸汽产生的作用力最大。离心力与转速平方成正比，在超速条件下最大。围带对动叶的反弯矩与围带的结构和动叶的变形量有关。叶片振动时产生的动应力在其共振条件下最大。

设计时：保证转速在额定值的 120%时，动叶片内最大静应力小与许用应力；控制汽轮机在第一组调节阀趋近全开或流量达最大值的工况下，蒸汽作用在动叶栅上的弯曲应力小与允许值；使动叶片避开共振，不能避开共振时，应使其安全倍率 A 大于许用安全倍率 $[A]$ 。运行中严格控制汽轮机不超速（ $n < 3600\text{rpm}$ ）；不在第一组调节阀趋近全开的工况下长期运行；调节级后压力不超过允许值；在启动升速过程中，不在叶片共振条件下暖机，可保证动叶栅安全工作。

10. 汽缸、隔板、转子和动叶栅在强度校核时考虑了哪些作用力？是什么工况下的作用力？许用应力如何确定？

解答：在强度校核时，汽缸仅考虑超压时最大流量工况，其内、外压力差产生的作用力；隔板仅考虑最大流量工况其前、后压力差产生的作用力和蒸汽对喷嘴叶栅的作用力；转子考虑其在 120%额定转速下的离心力，并使其工作转速避开临界转速，其键和联轴节螺栓考虑发电机短路的剪切力；动叶片考虑其在 120%额定转速下的离心力和单通道最大流量工况蒸汽产生的作用力，以及振动产生的动应力（避开共振，或使其安全倍率 A 大于许用安全倍率 $[A]$ ）。

汽缸按屈服、持久、蠕变许用应力中最小值为许用应力，碳素钢和合金钢的安全系数不同。对于汽缸螺栓，在低温区工作时，用屈服许用应力校核；在高温区工作时，用蠕变极限校核。隔板按屈服、持久许用应力中最小值进行校核。工作温度在 450℃以下的动叶片，按屈服许用应力进行强度校核；工作温度在 450℃以上的动叶片，按屈服、持久、蠕变许用应力中最小值为许用应力进行强度校核，其各部位的安全系数不同。

转子在强度校核中要考虑材料的屈服许用应力、持久许用应力，在高温下工作的转子还要考虑蠕变许用应力，取它们中最小者作为许用应力。工作温度不同的套装转子、整锻转子或焊接转子安全系数不同。

11. 汽轮机的支撑定位有何要求？汽轮机如何在基础上支撑定位？

解答：汽轮机是在室温下进行安装，高温条件下工作的动力机械。启动运行时将因温度升高而膨胀；停机和备用期间，其温度又相应降低而收缩。汽轮机，包括其主要部件，应能自由膨胀和收缩。另外汽轮机又是一种比较精密的动力机械，在膨胀和收缩过程中，汽轮机的中心线应保持不变，以保证汽缸和转子的相对位置及汽轮机和基础之间的相对位置不变。

汽轮机的基础上用地脚螺栓固定有表面光滑的基础台板，汽轮机的轴承座和低压缸放置在基础台板上。高压缸和中压缸通过其猫爪支撑在轴承座的平台上。基础台板、轴承座和汽缸之间用一系列的滑销确定它们之间的相对位置，以保证汽轮机在运行中能自由膨胀和收缩，且在膨胀或收缩过程中保持汽轮机的中心线不变。

12. 何谓转子的相对胀差？运行中产生相对胀差的原因是什么？影响相对胀差的因素有哪些？相对胀差过大有何危害？在运行中如何控制相对胀差不超限？

解答：由于转子以推力轴承为基点，相对汽缸进行膨胀，汽缸的膨胀量与相对应的转子膨胀量之差，称为转子的相对膨胀差，或简称的相对胀差。

汽轮机的汽缸和转子的结构不同，在运行中转子旋转而汽缸静止，因此两者对应段与蒸汽之间的换热系数和对外散热条件不同，转子表面与蒸汽之间的换热强度较强，体积与面积的比较小，故其平均温度的变化量较大，膨胀量或收缩量均较大，使转子出现相对胀差。

影响转子和汽缸加热或冷却过程的一切因素，均影响转子的相对胀差。(1) 主蒸汽和再热蒸汽的温升速度，以及升负荷速度。主蒸汽和再热蒸汽的温升速度，以及升负荷速度加快时，各级蒸汽的温升速度加快，与金属表面之间的温差增大；由于转子表面与蒸汽之间的换热系数较大，换热量增加较多，金属的温升速度也较快，转子和汽缸的平均温度之间差值愈大，转子的相对胀差也愈大。反之亦然。(2) 轴封供汽温度。汽轮机在启动之前，开始向轴封供汽。在汽缸内压力大于大气压力之前，转子轴封段和轴封体的金属温度主要取决于轴封供汽温度。轴封供汽温度高于轴封段的金属温度，轴封段金属被加热，使转子的膨胀量增加。而轴封体嵌装在汽缸内，其膨胀对汽缸的膨胀及乎没有影响，因此转子的相对胀差增加。轴封供汽温度愈高，转子的相对胀差愈大。反之，轴封供汽温度低于轴封段金属温度，转子的相对胀差减小，甚至出现负胀差。(3) 汽缸法兰内、外壁温差。法兰的宽度比汽缸厚度大得多，在相同的加热条件下，法兰内、外壁温差大于汽缸内、外壁温差。在同一轴向截面内，

法兰的平均温度低于汽缸的平均温度，法兰的膨胀量小，制约汽缸的轴向膨胀，使汽缸的轴向膨胀量小于其平均温度对应的膨胀量，造成转子的相对胀差增大。(4) 汽缸夹层的蒸汽温度。对于双层汽缸的汽轮机，在机组膨胀过程中，轴承座的移动取决于外层汽缸的膨胀，而转子的相对位置由推力轴承确定，因此外缸的膨胀量，直接影响转子的相对胀差。若外缸温度偏低，则相对胀差增大。反之，相对胀差减小。外层汽缸的膨胀量，主要取决于内、外层汽缸间夹层的蒸汽温度。(5) 汽缸排汽温度。在汽缸排汽室端部的同一轴向截面内，转子裸露在汽缸外。特别是低压缸，排汽室的轴向长度比较大，排汽温度的高低，主要影响汽缸排汽室的轴向膨胀量，对转子轴向膨胀几乎没有影响。随着汽缸排汽温度升高，使转子的相对胀差减小。(6) 低负荷下的摩擦鼓风损失。在低负荷下，蒸汽的膨胀主要是在调节级和若干个高压级内进行，中、低压级，特别是低压级内，蒸汽的流速很低，而是动叶栅带动蒸汽运动，出现很大的鼓风损失。鼓风损失产生的热量被蒸汽吸收，而此时蒸汽流量较小，蒸汽的温升量相应较大。蒸汽温度升高，对汽缸和转子进行加热，使中、低压转子相对胀差增大。

转子的相对胀差过大，会使动、静轴向间隙消失而产生摩擦，造成转子弯曲，引起机组振动，甚至出现重大事故。

在运行中可通过控制主蒸汽和再热蒸汽的温升速度，以及升负荷速度控制相对胀差。对于具有汽缸夹层加热和法兰加热装置的机组，可通过调整此装置加热蒸汽的温度和流量，调节汽缸的轴向膨胀量，控制相对胀差。

13. 汽缸产生热变形的原因有哪些？在什么时候可能产生热变形？汽缸热变形过大有何危害？如何减小汽缸的热变形？

解答：汽缸产生热变形的原因是上、下缸温差和法兰内、外壁温差。上、下缸温差造成汽缸拱曲变形；法兰内、外壁温差造成法兰翘曲变形，而使汽缸产生椭圆变形。

在汽缸内蒸汽流量很小，或停机后汽缸内温度较高时，热气体的自然对流，使温度高的气体上升，温度低的气体下降，上半缸气体的温度高于下半缸气体的温度；下缸受车间零米低温汽流的冲刷，又有许多抽汽管道，一般下缸保温质量比上缸差，故下缸散热量较上缸大，出现上、下缸温差，使汽缸产生热变形。

热变形过大，使动、静部分径向间隙消失，转子旋转时产生摩擦，造成转子弯曲，引起机组强烈振动。机组振动又会加大摩擦，形成恶性循环，迫使停机。若处理不当，将造成重大事故。当上、下缸温差过大，汽缸热变形过大时，不允许机组启动。

减小上、下缸温差和法兰内、外壁温差，可减小汽缸的热变形。停机后汽缸内温度较高时，必须进行盘车；加强下缸保温质量；防止停机时阀门漏汽；热态启动时，加快升速速度，

可以避免上、下缸温差过大。对于具有法兰加热装置的机组，可通过调整此装置加热蒸汽的温度和流量，调节法兰内、外壁温差。对于没有法兰加热装置的机组，可通过控制主蒸汽和再热蒸汽的温升速度，以及升负荷速度控制法兰内、外壁温差。

14. 转子为什么会产生热弯曲？转子弯曲有何危害？如何防止转子出现热弯曲？万一出现热弯曲如何判断？如何处理？

解答：汽轮机转子圆周方向温度分布不均匀会产生热弯曲。转子产生热弯曲的三种直接原因是：停机后盘车装置使用不当；汽轮机发生水冲击；其动、静间隙消失，局部产生摩擦。

转子弯曲将引起机组强烈振动，而机组振动又会加大摩擦，形成恶性循环，迫使停机。若处理不当，将造成重大事故。

防止转子产生热弯曲，要按规定正确使用盘车装置：在向轴封供汽前，或蒸汽有可能漏入汽缸时，或停机后汽缸温度在 100℃ 以上，必须进行盘车。要加强进汽管道疏水、防止汽轮机进水。要控制汽缸的变形量、转子的振幅和晃度，及轴向位移，避免动、静部分产生摩擦。

转子产生热弯曲，机组振动加大、其晃度增加。可通过机组振动和转子晃度是否同时变化，判断转子是否产生热弯曲。一旦发现转子产生热弯曲，应立即甩负荷降速，在机组振动合格、动静部分无摩擦的条件下进行暖机。若暖机无效，则说明转子产生永久弯曲，应停机进行大修直轴。

15. 何谓热应力？汽缸和转子产生热应力的原因有哪些？影响热应力大小的因素有哪些？热应力过大有何危害？在运行中如何控制热应力的大小？热应力会不会等于零？

解答：因热量传递，在零件和零件之间，或零件内部形成温差，使其膨胀或收缩受阻，被强行拉伸或压缩而产生的应力称为热应力。

汽缸和转子产生热应力的原因是其内部存在温差。在启动、停机和负荷变化时，各级蒸汽温度发生变化，蒸汽与汽缸和转子金属表面产生热量交换。热量在零件内部传递，其金属温度沿半径方向和轴向都有变化，在零件内部出现温差。温度高的部分膨胀受阻，被压缩而出现的为压应力；低温部分被高温部分膨胀所拉伸，出现的为拉应力。

影响热应力大小的因素有零件表面与介质之间的换热强度和零件的结构。在零件结构和材料已经确定的条件下，蒸汽温度的变化率愈大，零件表面与介质之间的换热量愈大，零件内部温差也愈大，热应力也愈大。蒸汽温度的变化取决于主蒸汽和再热蒸汽温度的变化率，以及升速率和升负荷率。在相同的换热强度下，零件在传热方向的尺寸愈大，传热温差愈大，热应力也愈大。在零件形状突变的部位，存在应力集中现象，热应力较大。

热应力过大，可能使合成应力大于许用应力。另外，热应力为交变应力，其值过大，使材料的疲劳损伤加大，使用寿命缩短，提前出现裂纹。

在运行中，控制主蒸汽和再热蒸汽温度的变化率，以及升速率和升负荷率，可以控制热应力的大小。在运行中，由于存在散热损失，汽缸和转子内部总存在温差，除个别部位外，热应力不会为零。只有在长期备用、零件温度等于室温，内部温差为零时，其热应力才都等于零。

16. 动叶片在运行中为什么会产生振动？激振力的频率如何确定？在什么条件下振动的动应力最大？

解答：汽轮机在运行过程中，从喷嘴叶栅喷出的高速汽流，进入动叶栅，对动叶栅产生冲击力，其大小与喷嘴叶栅出口蒸汽的流速有关。由于喷嘴叶栅出口蒸汽速度沿圆周方向的分布并不均匀，使动叶片旋转一周时，其受力状态产生周期性的变化。在交变的蒸汽冲击力的作用下，动叶片产生振动。

激起动叶片产生振动的激振力，分高频激振力和低频激振力。高频激振力是由于蒸汽与喷嘴叶栅壁面的摩擦，造成蒸汽的速度沿圆周方向分布不均匀而产生交变的作用力，其频率与该级的当量喷嘴数和转子旋转频率的乘积相等。低频激振力是由于调节级喷嘴分组；上、下隔板水平结合面加工误差，喷嘴叶片的型线可能吻接错位，或结合面处喷嘴流道的宽度与其它流道不同；个别喷嘴叶片的栅距产生误差，造成流道几何形状变化等结构因素引起的。动叶片在旋转一周时，受力状态变化 K 次，其频率等于转子旋转频率的 K 倍。

当动叶片的自振频率与激振力的频率相等，发生共振时动应力最大。在非共振条件下，单个喷嘴流道的流量最大时，动应力最大。

17. 何谓 A 型振动和 B 型振动？最易发生的是哪种振型的振动？同一叶片各种振型的自振频率由小到大如何排序？

解答：动叶片顶部产生位移的振动，称为 A 型振动。动叶片顶部不产生位移的振动，称为 B 型振动。

动叶片最易产生的振动为 A_0 型振动。

同一动叶片各振型的自振频率，由小到大按 A_0 型、 B_0 型、 A_1 型、 B_1 型、 A_2 型、 B_2 型排列。

18. 影响叶片自振频率的因素有哪些？为什么叶片组同一振型的 B 型振动有若干个自振频率？在大修中实测的叶片自振频率要进行哪些修正才能代表叶片在运行时的自振频率？

解答: 影响动叶片自振频率的因素有:(1) 动叶片的抗弯刚度, 即材料的弹性模量与叶片截面轴惯性矩的乘积 (ED)。抗弯刚度愈大, 同一振型的自振频率愈高。(2) 叶片的长度愈大, 叶片同一振型的自振频率愈低。(3) 叶片同一振型的自振频率与其质量的二次方根成反比。(4) 动叶片的成组状况, 相同的叶片由围带连接成组后, 其刚度相应增加, 使叶片组的自振频率高于成组前叶片的自振频率。但叶片组产生 A 型振动时, 其围带的质量参于叶片组的振动, 使振动部分的质量增加, 又使叶片组 A 型振动的自振频率相应降低。因此叶片组 A 型振动的自振频率与成组前的叶片相比是提高, 还是降低, 要具体分析。

叶片组产生某一 B 型振动时, 由于同一时刻组内各叶片振动的相位可以不同, 其围带的变形不同, 所产生的反弯矩也不同, 使叶片组的抗弯刚度不同, 故叶片组同一振型的 B 型振动有若干各自振频率。

大修时是在室温条件下测量叶片或叶片组的自振静频率, 而运行中叶片在高温条件下高速旋转, 因此要对测量的自振静频率进行温度和转速修正, 才能代表运行中叶片的自振频率。

19. 什么是调频叶片和不调频叶片? 调频叶片安全工作的准则是什么? 不调频叶片安全工作的条件是什么? 为什么有些叶片一定要用不调频叶片安全评价标准来评价?

解答: 运行中叶片的自振频率能避开共振的叶片, 称调频叶片。允许叶片在共振条件下运行的叶片, 称不调频叶片。

调频叶片安全工作的准则是合成静应力小于许用应力; 蒸汽产生的弯曲应力小于许用弯曲应力; 叶片的自振频率和其 2~6 倍的值与激振力的频率有一定的避开率。不调频叶片安全工作的准则与调频叶片不同之处是可以不避开共振, 但要求动应力小于许用的动应力, 即安全倍率 A 大于许用的安全倍率 [A]。

由于加工误差和材料质量不均, 允许同一级叶片静频率的分散率可以达 8%。对于动频率等于或大于 350HZ 的叶片, 其分散度内的频率差已大于或等于 28Hz, 与 $K=7$ 的低频激振力之间无法满足调频叶片避开率大于 7.5HZ 的要求, 因此 A_0 型振动频率大于 325HZ 的动叶片无法采用调频叶片, 而要用不调频叶片安全工作的准则进行评价。

20. 何谓临界转速? 在发电厂如何确定转子的临界转速? 了解转子的临界转速有何意义? 临界转速与转子的自振频率有何关系?

解答: 转子旋转频率与其横向自振频率相等的转速, 称为临界转速。

在发电厂中通常实测转子的临界转速。在升速过程中监测轴承或轴径振动的振幅, 其振幅最大时对应的转速, 即为转子的临界转速。

了解转子临界转速的数值，是为了升速过程不在临界转速下停留或暖机，以避免发生共振。另外，如果转子临界转速变化，则表明转子的支撑状态变化，或转子产生明显的裂纹。

转子临界转速对应的旋转频率与其横向自振频率相等。转子有一阶、二阶... 横向自振频率，对应有一阶、二阶... 临界转速。

20. 引起汽轮发电机组横向振动的原因有哪些？各种原因引起的振动有何特点？为什么横向受迫振动最大振幅的相位与激振力的相位不一致？

解答：引起汽轮发电机组横向振动的原因有：（1）不平衡的旋转离心力，包括转子质量不平衡；转子弯曲；转子上套装零件松动产生的不平衡离心力。（2）发电机电磁力不平衡，包括发电机转子和静子不同心；发电机转子线圈匝间短路造成磁场偏心；发电机静子铁心振动产生的不平衡电磁力。（3）轴承油膜自激振荡。（5）联轴节缺陷或对中不良。（6）通流部分汽流的自激振荡。（7）发电机三相负载不平衡，或电网故障在发电机内产生的脉冲电磁力矩使发电机组的扭转振动。（8）轴承支撑刚度不足。

不平衡的旋转离心力产生的振动，其振幅与转子转速的平方成正比；其振动频率与转子旋转频率相等；通过临界转速时振幅达最大值。其中：转子质量不平衡产生的振动，在相同的转速下，最大振幅的相位和转子的晃度不变；转子弯曲，其晃度变化，在相同的转速下，其振动的振幅与其晃度成正比，最大振幅的相位与转子晃度的变化一致。转子上套装零件松动产生的振动发生在高转速，或负荷突然增加的情况下，其最大振幅的相位与其定位键位置的相位有关。

发电机电磁力不平衡产生的振动，发电机轴承的振幅最大，且振幅与发电机转子的励磁电流成正比。其中：发电机转子和静子不同心产生的振动，其振动频率为转子旋转频率的两倍，最大振幅的相位与偏心的相位有关。发电机转子线圈匝间短路产生的振动，其振动频率与转子旋转频率相等，且输出电压特性的零点漂移。发电机静子铁心振动诱发转子的振动，是静子铁心与转子之间的偶合振动，其频率为转速的两倍，与转子和静子不同心产生的振动相比其静子的振幅较大。

轴承发生油膜自激振荡产生的振动，在转子旋转频率为其横向自振频率的两倍左右时突然发生，且振幅在较大的转速范围内保持不变；轴承发生油膜振荡前，转子振动中含有频率约等于旋转频率一半的谐波；在发生油膜振荡后，其主振频率等于转子的自振频率，而与转速无关，约等于 $1/2$ 的旋转频率。

联轴节本身有缺陷或对中不良，则造成质量不平衡，引起机组振动，具有质量不平衡振动的特点。它与质量不平衡引起的振动之间的差别是：质量不平衡的转子，其两端轴承的振

幅较大，而联轴节对中不良引起的振动，联轴节两侧轴承的振幅比较大。若联轴节本身无缺陷仅对中不良，则轴承上的负荷将重新分配，两侧轴承油膜压力差别较大，且轻载一侧转子的临界转速降低，易诱发该轴承失稳，发生油膜振荡。

通流部分汽流发生自激振荡诱发的振动，仅出现在高压转子，而且多出现在机组高负荷工况下。降低机组负荷，振动可很快消失。另外振动频率不是工作转速对应的频率，而是与转子的一阶自振频率相等。

发电机三相负载不平衡，或电网故障在发电机内产生的脉冲电磁力矩，使发电机组产生扭转振动，其振动频率与转子某一阶扭转振动的自振频率相等。若发生共振，则会出现严重事故。

轴承支撑刚度不足不是激发转子振动的原因，只是使振动放大，合格的振动变为不合格。

汽轮发电机组横向振动是交变的不平衡力引起，一旦发生振动，伴随产生振动阻尼力，它与转轴振动速度成正比，其方向与其线速度的方向相反。由于转轴以角速度 ω 旋转，故阻尼力有与转轴切线方向一致的分力。阻尼力与不平衡激振力的合力是周期性变化的交变力，激起转轴横向受迫振动。转轴横向振动的方向与此合力的方向一致，与不平衡激振力的方向有一夹角 ϕ 。此夹角的大小与振动阻尼的大小、转轴旋转频率和其自振频率的比值有关。

21. 何谓转子振动的烈度？评价机组振动是否合格的标准有哪几项指标？

解答：考虑振动频率和振幅对安全的共同影响，以机组轴承振动中所含各种简谐振动速度幅值的均方根表示振动烈度。

评价机组振动是否合格的指标有：（1）避开共振，要求机组工作转速与转子临界转速之间有一定的避开率，通常为 25%~30%。（2）振幅小于允许值。对于工作转速为 3000r/min 的机组，轴承双倍振幅小于 0.05mm 为合格；轴径双倍振幅小于 0.12~0.16 为合格。（3）振动烈度符合标准。要求振动烈度小于 4.5mm/s。对于转子的扭转振动和稳定性，国家标准中尚无具体评价标准。

22. 机组发生异常振动有何危害？当机组发生异常振动时如何处理？

解答：转子横向振动，一方面造成动、静径向间隙变化，另一方向产生动应力。振动的振幅过大，使径向间隙消失，产生摩擦；而摩擦又造成转子弯曲，激起更强烈的振动。如此恶性循环，轻者被迫停机；若处理不当，转子会出现严重的永久性弯曲，甚至出现飞车事故。转子扭转振动一旦但出现共振，振动幅角过大，将使转子内的剪切应力剧增，短时间造成转子疲劳断裂。

当机组发生异常振动时，若振幅尚未超标，应加强监视，分析产生振动的原因，采取相应措施。根据振动发展的趋势，决定是降负荷，还是解列降速。通常首先降负荷，因为发电机电磁力不平衡和通流部分汽流的自激振荡产生的振动，其振幅都与负荷有关。如果降负荷无效，则解列降速，在振动合格的条件下暖机。若振动超标或接近超标，应立即解列降速，在振动合格的条件下暖机。若暖机无效，应立即打闸停机，进行连续盘车。

23. 轮机故障诊断的目的是什么？汽轮机故障诊断包括哪些程序？判断振动故障的标准是什么？如何判断机组振动的原因和部位？

解答：故障诊断的目的是“保证可靠、高效地发挥设备应有的功能”。这包含三重意思：第一是保证设备无故障可靠地工作；第二是保证设备处在最佳运行状态，发挥其最大的功能，获得尽可能高的效益；第三是及时诊断出故障或故障的前期征兆，正确的决定对设备进行维修，以缩减维修时间、节省维修费用，保持设备的性能。

故障诊断的程序为：（1）正确选择和测取与设备状态有关的特征信号。（2）正确的从特征信号中提取与设备状态有关的信息——征兆。（3）根据征兆正确地进行设备状态的分析和诊断。（4）根据状态分析正确地作出决策。

判断机组振动故障的标准是国家颁布的有关评价汽轮发电机组振动的标准，以及正常运行时的振动状况。当机组的振幅大于正常值，即出现故障的征兆。一旦机组振动的振幅趋近或超过国家标准规定的合格值，故障已比较严重。

根据机组振动的特点，判断机组产生振动的原因。故障发生的部位，则根据各轴承振幅的大小和相位确定。通常故障部位两侧轴承的振幅较大，且一阶振动两者最大振幅的相位基本相同。

24. 当机组出现振动故障时，如何进行处理？如何排除故障？

解答：当机组发生异常振动时，若振动尚未超标，应加强监视，分析产生振动的原因，采取相应措施，根据振动发展的趋势，决定是降负荷，还是解列降速。通常首先降负荷，因为发电机电磁力不平衡和通流部分汽流的自激振荡产生的振动，其振幅都与负荷有关。如果降负荷无效，则解列降速，在振动合格的条件下暖机。若振动超标或接近超标，应立即解列降速，在振动合格的条件下暖机。若暖机无效，应立即打闸停机，进行连续盘车。

除转子弹性热弯曲产生的振动可以通过暖机或连续盘车进行直轴外，其他故障都必须停机，在大修中针对产生振动的原因进行排除。对于转子质量不平衡，则通过转子找动平衡，在转子适当的位置配适当的重量，使转子质量平衡。对于转子上套装零件松动，则更换套装零件，或镶衬套，增加装配紧力。对于发电机转子和静子不同心，则调整静子中心，使两者

同心。对于发电机转子线圈匝间短路，则更换转子线圈。对于发电机静子铁心振动，则增加静子的支撑刚度。对于轴承油膜自激振荡，则首先核对联轴节找中心的状况。若转子找中心无问题，则缩短轴承轴向支撑长度，或更换为多油楔轴承。对于通流部分汽流的自激振荡，则将高压级隔板重新找中心，使其在运行中与转子同心。对于联轴节缺陷或对中不良，则车削联轴节或重新找中心。对于轴承支撑刚度不足，则加固轴承座，或改善轴承座与台板支撑面的接触状态。

第五章 汽轮机启动与停机思考题解答

1. 汽轮机的启动过程有什么特点？所要解决的问题是什么？

解答：汽轮机的启动是将汽轮发电机组由备用状态加速到额定转速，并入电网，使其输出功率由零增加至额定值的过程。这个过程的特点是：汽轮机的进汽量由零逐渐增加至额定值；各级前的蒸汽压力和温度随之升高；汽缸和转子逐渐被加热，其受力也逐渐增大，因此汽轮机的启动过程是一个工况急剧变化的加热过程。在这个过程中，由于其工况偏离设计工况，汽轮机的效率低于设计工况的效率，造成额外的能量损失，使热耗率相应增加。启动过程持续的时间愈长，其能量损失的总额愈大。而加快启动速度、缩短启动过程持续的时间，又会因零件加热速度过快，使其内、外温差增大，造成过大的热应力，影响机组使用寿命。稍有不慎，还可能酿成重大事故。

汽轮机启动所要解决的问题是：在确保机组安全的条件下，尽可能的加快启动速度，减少启动过程的能量损失，并使机组的寿命损耗在允许的范围内。

2. 汽轮机启动过程可分为哪几个阶段？各阶段具体任务是什么？

解答：启动过程划分为四个阶段：启动前的准备；汽轮机冲转升速；并入电网；接带负荷。

启动前的准备是为汽轮机启动冲转准备条件。冲转升速是打开汽轮机的进汽阀，冲动汽轮机的转子，使其转速按预定的要求，逐步升高到额定转速，为发电机并入电网准备条件。并入电网是通过隔离开关将发电机与电网连接，以便向电用户供电。接带负荷是按预定的升负荷曲线，将机组负荷增加至电网调度确定的数值，以保证供电质量和数量满足用户要求。

3. 汽轮机的启动过程如何分类？各类启动过程有何特点？

解答：通常按启动前汽轮机零件的温度状态和启动过程中蒸汽参数的变化规律，对启动过程进行分类。按冲转前汽轮机零件的最高温度水平，通常分为冷态启动和热态启动两大类。

有些机组更细分为冷态、温态、热态和极热态启动。按启动过程中进汽参数的特点分为额定参数启动和滑参数启动。

冷态启动：启动前绝大部分辅机均处于停止状态，启动前的准备工作比较繁杂，且汽轮机冲转时，汽缸金属温度较低，通常低于 150~180℃，启动过程中零件金属的温升量较大。受热应力的限制，升速速度和升负荷速度较慢，并适当安排暖机。

热态启动：启动前绝大部分辅机均处于运行状态，启动前的准备工作比较简单。启动前期的主要问题是防止金属被冷却，故汽轮机冲转时进汽温度和轴封供汽温度较高，升速速度和升负荷速度较快。启动后期，当调节级后蒸汽温度高于汽缸金属温度，启动过程与冷态启动相同。

额定参数启动：汽轮机冲转时，进汽参数为额定值，且在启动过程中蒸汽参数保持不变。

滑参数启动：汽轮机冲转时，进汽温度比汽缸金属温度高 50℃左右，且其过热度大于 50℃；在启动过程中蒸汽参数逐渐达到额定值。

4. 汽轮机滑参数启动有何优点？在什么条件下可以采用滑参数启动？

解答：与额定参数启动相比，启动冲转蒸汽参数较低，启动过程中可以使蒸汽与汽轮机零件之间的温差较小；而且机、炉启动过程重合，机组启动时间最短，能量损失最少，其经济性和机动性均为最佳。

以单元制连接的或可以切换为单元制连接的机组，可以采用滑参数启动。

5. 汽轮机启动冲转应具备哪些条件？滑参数启动确定冲转进汽参数的原则是什么？

为什么要满足这些原则？

解答：汽轮机启动冲转应具备以下条件：（1）各种设备、仪表和系统完好；（2）凝汽器已建立适当真空；（3）供油系统运行正常；（4）氢冷发电机的氢压符合要求；（5）已长时间盘车，转子偏心率（晃度）正常；（6）汽轮机的进汽参数符合要求。

滑参数启动确定冲转参数应遵循以下原则：（1）进汽参数至少应保证在其调节阀全开的条件下，能并入电网带少量负荷。由于汽轮机在冲转升速和并网过程中，对转速的控制要求较严格，需要利用汽轮机的进汽阀，按启动要求控制其转速逐步升高至额定转速，使发电机按要求并入电网，并带少量负荷。（2）冲转时进入汽轮机的蒸汽，其过热度应大于 50℃，而且进汽温度要比冲转前汽轮机汽缸的最高温度高 50℃。以防止汽缸被冷却或受较大的热冲击，减小热应力和上、下缸温差。（3）由于汽轮机的进汽参数是由锅炉的运行工况确定，要充分考虑到锅炉低负荷运行特性，以保证锅炉能稳定运行为前提。

6. 汽轮机启动冲转有哪几种可供选用的方式？各种冲转方式有什么优缺点？

解答：汽轮机启动冲转可采用以下方式：（1）主汽门或其旁路阀控制冲转。（2）高压调节阀控制冲转。（3）再热机组用中压调节阀控制冲转。

主汽门或其旁路阀控制冲转，调节阀处在全开状态，各调节阀和其对应的喷嘴组均进汽，对汽缸和转子加热比较均匀，可减小启动初期上、下缸温差和左、右侧法兰温差，汽缸的热变形和热应力较小。但对于自动化水平不高的机组，用手动方式控制主汽门或其旁路门，不但劳动强度大，而且难以保证各阶段的升速率符合要求。另外，主汽门是保护系统的执行机构，在出现事故时，用其切断汽轮机的进汽，对其严密性有很高的要求。用主汽门冲转时，其受冲刷比较严重，易破坏其严密性。

高压调节阀控制冲转，可通过同步器（或转速调节器）控制调节阀的开度，进行冲转和提升转速，操作比较方便。这种冲转方式的缺点是启动初期只有一两个调节阀开启，汽缸加热不均匀。

中压调节阀控制冲转，可以使主蒸汽和再热蒸汽温度高于相应汽缸的最高金属温度，满足再热机组冲转对蒸汽参数的要求。但要在启动过程中进行高、中压调节阀之间的切换，手动操作比较麻烦。

7. 汽轮发电机组并入电网应具备什么条件？如何达到这些条件？

解答：并网前发电机输出电压的频率应与电网供电频率相同；隔离开关发电机侧的电压应与隔离开关电网侧的电压相等，且三相电压的相位与电网三相电压的相位对应。

调整机组转速，可使发电机输出电压的频率与电网供电频率相同；调整发电机转子的励磁电压，改变励磁电流，可使隔离开关两侧的电压相等；让发电机输出电压的频率与电网供电频率有一微量差，可在某一瞬间使发电机输出电压的相位与电网电压的相位对应，此时立即并入电网。

8. 汽轮机的停机过程有何特点？停机过程如何分类？各种停机过程有何不同之处？

解答：汽轮机的停机过程是启动的逆过程。在停机过程中汽轮发电机组的输出功率由运行工况降至零，与电网解列，主汽门关闭，其转速由于摩擦鼓风作用逐渐降至零。在停机过程中汽轮机的进汽量逐渐减小至零；高、中压级前的蒸汽参数逐步降低，其汽缸和转子等零件被逐渐冷却。

按停机过程中进汽参数变化的特点，可分为额定参数停机和滑参数停机。按停机的原因或目的可分正常停机和事故停机两大类。正常停机又可分为大修停机和调峰停机两种；事故停机分为一般事故停机和紧急事故停机两种。

大修停机后汽轮机要揭开汽缸进行检修，而揭开汽缸必须待汽缸金属温度降至 100℃左右才能进行。因汽缸保温较好，靠停机后自然冷却，需要较长的时间。为了缩短冷却降温的时间，在降负荷过程中，采用逐步降低主蒸汽压力和温度的办法（即滑参数停机），进行强制冷却。

调峰停机是在电网负荷低谷期间，将某些机组停机备用，待电网负荷增大时，再将此机组启动。由于机组启动时间与冲转时汽缸最高金属温度有关：冲转前汽缸的金属温度愈高，启动时加热的温升量愈小，在热应力相同的条件下，启动所需的时间愈短。因此调峰停机应采用滑压停机，或额定参数停机，在降负荷过程中尽可能保持主蒸汽和再热蒸汽温度不变，使停机后汽缸的金属温度较高，以缩短下一次启动的时间，减小启动损失，提高调峰的机动性。

事故停机是在设备或系统出现异常、可能危及安全运行时，保护系统动作或操作员按动“停机”按钮，主汽门和调节阀快速关闭，机组瞬间降负荷至零，与电网解列，进入惰走阶段，使机组降速至零的停机过程。紧急事故停机与一般事故停机之间的差别是前者在主汽门关闭后，立即打开凝汽器的真空破坏阀，破坏凝汽器的真空。使汽缸内的压力瞬间升至大气压力，加大转子惰走过程的摩擦鼓风作用，迫使转速迅速降至零，以避免转子长时间转动，而使机组损坏或事故扩大。而一般事故停机，则无须在主汽门关闭后，立即破坏凝汽器的真空。

9. 冷态滑参数启动冲转前要做哪些准备工作？哪一些准备工作必须按照严格的顺序？

解答：冷态滑参数启动前的准备工作主要是：设备、系统和仪表的检查；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。启动辅助设备和系统包括：启动循环水泵和冷却水系统；向凝汽器和闭式冷却系统注入化学补充水，启动凝结水系统和闭式冷却系统；启动供油系统、发电机充氢，投入盘车设备；投入轴封供汽、启动轴封抽气器；启动主抽气器，使凝汽器建立适当真空；投入除氧器，启动给水泵向高压加热器注水、向锅炉上水；锅炉点火升压、升温，进行暖管。

严格按照顺序进行的准备工作有：凝汽器注水，且水位合格后，启动凝结水泵，投入凝结水系统；凝结水系统和盘车设备投入后，才能向轴封供汽、启动轴封抽气器；密封油压建立后，发电机才能充氢；顶轴油泵启动，建立顶轴油压，且发电机已经充氢，才能投入盘车设备；盘车设备投入后，才能向除氧器供汽；主凝结水质合格后，向除氧器上水，投入除氧器；当给水含氧量合格后，才能向锅炉上水；投入除氧器或向轴封供汽前，供汽管必须暖管；

凝汽器建立适当真空后，锅炉才能点火升压、升温，进行暖管；新装或大修后的机组启动时，应在暖管前启动调节油泵，进行调节保护系统的试验；

10. 冷态滑参数启动的升速过程如何控制？要注意什么问题？

解答：当汽轮机冲转条件具备，可按机组状态选择冲转方式，打开相应的进汽阀，冲转升速。确认盘车装置退出后，将转速提升到 500 r/min 左右，进行全面检查（此时轴承油膜已经建立，可停顶轴油泵）。检查完毕，按每分钟 100r/min 的升速率，继续升速。适当进行暖机，快速通过临界转速。在额定转速下定速，准备并入电网。

转子旋转后，主要是保证轴承有良好的润滑和充分的冷却；防止其动、静部分发生摩擦和出现不允许的振动；注意管道和汽缸疏水。汽轮机冲转后，盘车装置要自动退出，否则应立即打闸停机。在 500 r/min 左右，检查动、静部分有无摩擦；轴承振动应小于 0.04mm；转子晃度变化不超过 0.02mm；上、下缸温差合格；轴承回油正常等。升速过程严格控制升速率在每分钟 100r/min 左右，若其动、静部分发生摩擦，或出现异常振动，应立即降速至故障消失，进行暖机，检查原因。未找出故障原因，或故障排除前，不允许升速。转速升至 3000 r/min 之前，当主油泵出口油压稍高于电动油泵出口油压时，由主油泵向油系统供油，此时可停电动油泵。在停电油泵时，要注意观察油压的变化，防止系统瞬间断油。

11. 冷态滑参数启动的升负荷过程应如何控制？要注意什么问题？在升负荷过程中要投入哪些辅助设备？

解答：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。通过控制蒸汽的温升速度和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。在低负荷区，控制每分钟负荷增加额定值的 0.5~0.8%，蒸汽温升 1~1.5℃；在中等负荷区，控制每分钟负荷增加额定值的 0.6~1.0%，蒸汽温升 1℃左右；在高负荷区，控制每分钟负荷增加额定值的 0.8~1.2%，蒸汽温升 0.5℃左右。根据汽缸内、外壁温差和相对胀差的情况，在低负荷暖机和中负荷适当安排暖机（保持负荷不变），暖机时间一般为 30~60 分钟，以使零件内部温差和热应力，以及转子的相对胀差相应减小。

升负荷过程主要注意的问题是：严格控制蒸汽的升温升压速度和升负荷率适当进行暖机，以保证汽缸内、外壁温差不大于 35~50℃；汽缸法兰内、外壁温差不大于 80~100℃；转子热应力和相对胀差不大于允许值。

在升负荷过程中，当金属温度已高于该处蒸汽压力对应的饱和温度时，蒸汽不会凝结，为了减少蒸汽泄漏，应关闭对应的疏水阀；当负荷达额定值的 15%后，低压缸已有足够的汽流进行冷却，可以关闭低压缸喷水降温的控制阀；当供除氧器的回热抽汽压力已高于除氧器

压力，除氧器的供汽由厂用蒸汽母管切换为回热抽汽；当高压缸的排汽压力已达厂用蒸汽母管压力时，厂用蒸汽由本机高压缸排汽供给，同时投入高压加热器；当供给汽动给水泵的回热抽汽压力达到小汽轮机允许的最低进汽压力时，启动一台汽动给水泵，与已投入的电动给水泵并联运行；当负荷达额定值的 60%左右时，启动另一汽动给水泵，而停用电动给水泵；当负荷达额定值的 70%左右时，启动另一台循环水泵；逐步使热力系统和辅助设备达到设计状态。

12. 与冷态滑参数启动相比，热态滑参数启动有哪些特点？要注意什么问题？

解答：热态启动过程与冷态启动过程基本上相同，与冷态启动相比，有以下特点：（1）机组处在盘车状态，大部分辅机仍在运行，启动前的准备工作相对简单一些。（2）启动前汽缸和转子的金属温度比较高，冲转时蒸汽参数较高；轴封供汽温度也较高。（3）启动前期升速速度和带负荷速度较快。

热态启动冲转前要注意上、下缸温差和负胀差不能过大；启动过程中要防止汽缸和转子被冷却，要先向轴封供汽，再抽真空；对于再热机组要注意再热蒸汽温度，不能偏低。

13. 汽轮机启动过程优化的目标是什么？启动前的准备工作优化的原则是什么？带负荷过程优化的原则是什么？

解答：启动过程优化的目标是在确保机组安全的前提下，尽可能加快启动速度，减小启动过程的能量损耗，并使转子和汽缸的最大应力不超过允许值，其寿命损耗在允许范围内。

准备工作优化的原则是：各项操作严格按其相互关系进行；确定各项操作发出操作指令的时间，分别使各项操作的前提条件同时具备，减少相互等待的时间，降低能量损耗，确保机组安全。

带负荷过程的优化原则是：在确保机组安全和使用寿命的条件下，加快升负荷速度，减小启动损耗，使能耗增量折算的燃料费与设备寿命损耗的折旧费之和最小。

14. 轮机实现程控启动的条件是什么？启动程控装置有哪些必要的功能？程控启动装置如何进行启动过程的控制？

解答：实现程控启动的条件是：机组自动化水平比较高；机、炉应具有性能良好的调节系统，而且具有完善的检测系统，能对主、辅机的运行状态和相关参数进行检测。若启动前的准备工作也要实现程序控制，所有的设备都能远方操作，所有的阀门必须是自动控制的阀门，辅助系统的参数能实现自动调节。

启动程控装置必要的功能有：（1）控制和协调功能，能按确定的程序实现自动控制和协调各设备的工作。（2）检查监视功能，对每一个操作步骤的前提条件循环进行检查；当这些

条件具备时，发出进入这一步骤的指令，由相应的子控制系统负责执行；对汽轮机和其辅机的运行状态进行监视，并检查操作指令是否完成；一旦出现异常情况，则根据其严重程度，发出返回指令，使机组返回到安全的运行工况；（3）人机对话功能，操作人员可修改控制程序，或干预控制过程。

启动程控装置按程序设置的阶段和各阶段的步骤顺序进行控制。对程序的每一个步骤都按照下列过程进行检查和控制：（1）检查该步骤的操作条件是否具备。（2）操作条件具备，程控系统向其子控制系统发出进入此步骤的指令，由该子控制系统执行这个指令，投入相应的设备和系统，并控制其相应的参数。若该步骤的操作条件不具备，则程序处于保持状态，保持一定的时间后，其操作条件仍不具备，程序则发出返回指令，返回到安全工况。（3）当某一步骤接受操作指令后，子控制系统执行的信息，应在规定的时间内，回报到程控装置。

（4）当一个操作步骤完成的回报信息在规定的时间内送达程控装置，再延时 2 秒左右，程控装置确认此操作步骤完成，并将此信息作为下一操作步骤的一次判据。依次类推，完成整个启动过程。

15. 大修停机过程如何进行？有什么特点？大修停机后进行快速冷却可采用哪些冷却介质？强制冷却应注意哪些问题？

解答：大修停机过程可明显的分为：降负荷；打闸停机与电网解列；转速逐渐降至零（惰走过程）；停机后的处理四个阶段。为了使机组充分冷却，对于中间再热机组，或可以切换为单元制的机组，多采用滑参数停机。在降负荷过程中，可保持调节阀开度不变，逐步降低主蒸汽和再热蒸汽的温度，并相应降低主蒸汽压力，以保证蒸汽的过热度和排汽湿度在允许范围内。为了便于锅炉操作，蒸汽的降温和降压交替进行，并适当安排暖机，使转子中心孔的温度也按一定的速度降低，避免出现过大的热应力和负胀差。适时切换除氧器供汽和轴封供汽、停用高压加热器和一台给水泵、一台循环水泵。在尽可能低的负荷下，锅炉熄火，打闸停机与电网解列。在惰走过程中，随润滑油压降低，辅助润滑油泵应自动投入。适时停用主抽气器，使凝汽器真空为零时，转速为零，停止向轴封供汽，立即投入盘车设备，进行连续盘车，直至汽缸温度降至 100℃。

大修停机后，在惰走过程，可采用低温过热蒸汽进行冷却。在盘车过程，可采用空气冷却。

强制冷却应注意：设计合理的冷却系统，组织冷却汽流，使汽缸和转子均匀冷却；控制冷却介质的温度及流量，以控制金属的冷却速度不超过 1℃ / min，使热应力在允许的范围；

要控制汽缸的内、外壁温差和上、下缸温差，使它们符合运行规程的有关规定，同时要避免出现负胀差。

16. 与大修停机相比，调峰停机过程有何特点？应注意什么问题？

解答：调峰停机是在电网低谷期间，某些机组停机；而当电网负荷增加时，再将这些机启动投入运行。由于启动前汽轮机的金属温度愈高，启动过程金属的温升量相应减小，启动速度可以加快。为了缩短下一次启动的时间，减少启停损失，提高电网调度的机动性，在调峰停机过程中，尽可能保持机组的金属温度在较高的水平。调峰停机的特点是：在降负荷过程中，或保持蒸汽参数为额定值，或采取滑压停机，尽可能保持主蒸汽和再热蒸汽温度不变；在尽可能高的负荷下打闸停机；在汽机打闸停机后，锅炉才能熄火；凝汽器内真空为零后，才能停止轴封供汽和轴封抽气，防止冷空气由轴封漏入汽缸。

调峰停机也应该严格控制机组降负荷速度；适时切换除氧器供汽和轴封供汽、停用高压加热器和给水泵、循环水泵；同时避免机组被过分冷却。

17. 与正常停机相比，事故停机过程有何特点？一般事故停机与紧急事故停机有何差异？

解答：事故停机过程的特点是：主汽门和调节阀迅速关闭，负荷瞬间降到零，机组与电网解列，进入惰走阶段。

一般事故停机与紧急事故停机的差异在于：打闸停机后，要不要立即破坏凝汽器的真空。一般事故，允许机组继续转动，不需立即破坏凝汽器真空。按正常停机的惰走过程，适时停主抽气器，转速降到零时，凝汽器真空也降至零，停止向轴封供汽，投入盘车装置进行盘车。而紧急事故停机打闸停机后，要立即破坏凝汽器的真空，以增加转子的摩擦鼓风作用，使转速迅速降至零。

18. 紧急事故停机对机组有何不利影响？哪些事故必需实行紧急事故停机？

解答：由于紧急事故停机破坏凝汽器真空时，大量冷空气进入凝汽器，对凝汽器和低压缸迅速冷却，产生很大的“冷冲击”，会造成凝汽器铜管急剧收缩，使其胀口松动，产生泄漏。而且使低压缸和低压转子的热应力增大，有时还会诱发机组振动增大。

必需实行紧急事故停机的事故包括：（1）汽轮机的机械故障。机组振动突然超限；转子轴向位移超限；汽缸内有异常声音或动、静部分发生摩擦；轴承金属温度过高；严重超速等。

（2）润滑油系统故障。润滑油压降至 30~40kPa(表压)，无法恢复；系统大量漏油，需停交流润滑油泵；油箱油位降至最低油位，可能影响正常供油；发电机密封油压降低，且低于氢压等。（3）重大灾害。车间起火，无法扑灭；发生破坏性地震等

19. 何谓惰走曲线？测绘惰走曲线有何作用？

解答：在停机的惰走过程中，转速随时间的变化的曲线，称为惰走曲线。惰走曲线反映转子的机械状态和主汽门、调节阀等的严密性，可以利用它进行上述问题的判断。如果惰走时间增长，则说明阀门严密性欠佳，有蒸汽漏入汽缸，对转子产生作用力；若惰走时间缩短，则说明动、静部分存在摩擦，或系统严密性不佳；若转速突降对应的转速偏高，则说明轴承润滑有故障或缺陷。

20. 造成汽轮主要零件失效的原因是什么？汽轮机的寿命如何定义？影响汽轮机寿命的主要因素有哪些？

解答：汽轮机的主要零件是汽缸和转子。在启动、停机和负荷变化过程中，因转速或温度的变化，其中将出现交变应力。在这种交变应力的反复作用下，造成转子材料脆化而产生疲劳裂纹。另外，在高温条件下承受应力的零件，将产生蠕变。工作温度愈高，承受的应力愈大，材料蠕变速度越快。高温蠕变使金属内部晶格产生塑性变形，蠕变的积累，晶格边界产生滑移，甚至晶格内部出现微观裂纹。一旦出现裂纹，在裂纹的尖端形成极大的应力集中，使裂纹继续扩展，以致断裂。发现汽缸出现少数裂纹时，可以补焊修复。一旦大面积出现众多裂纹，无法补焊，裂纹继续扩展，其深度达极限值时，汽缸便失效。发现转子表面出现少量裂纹时，可以进行车削。转子车削后，其刚度降低，临界转速随之降低。当临界转速或其倍数与工作转速的差值小于规定的避开率，机组将出现异常振动，转子再无法使用。若转子出现裂纹未被发现，其周向刚度不对称，而使机组出现异常振动。裂纹尺寸愈大，振动愈强烈。当转子因裂纹引起的振动超限，而又无法车削修复时，转子即失效报废。总之：材料在交变应力作用下，产生疲劳裂纹；在高温条件下承受应力产生蠕变裂纹，又无法修复，是造成汽缸和转子失效的原因。

汽轮机是以其转子的使用寿命，作为汽轮机的使用寿命。从新机投入运行，至转子出现第一条可观察到的宏观裂纹，所经历的低周交变应力循环次数，定义为汽轮机的疲劳寿命。从转子出现第一条可见裂纹到转子失效，所经历的低周交变应力的循环次数，定义为残余寿命。汽轮机的使用寿命是转子的疲劳寿命和残余寿命之和。

影响汽轮机寿命的主要因素有：转子承受交变应力的幅值；工作温度的高低；承受应力的的大小和持续时间。交变应力的幅值主要取决于零件温度的变化速度，既取决于机组的升速速度和变负荷速度。机组的负荷愈大，工作温度愈高，承受的应力愈大，材料蠕变速度越快。而持续时间愈长，蠕变损伤愈大。

21. 材料的低周疲劳是什么含意？影响材料低周疲劳特性的主要因素是什么？

解答: 材料低周疲劳的特点是应力循环的频率比较低, 应力幅值比较大, 工作温度高, 一般经历 $10^4 \sim 10^5$ 次应力循环即产生裂纹, 故称低周疲劳。有时也称热疲劳。

影响材料低周疲劳特性的主要因素, 首先是材料的种类, 不同的材料, 其低周疲劳特性不同。其次是所承受交变应力的变化幅值和工作温度。交变应力的幅值愈大, 致裂的循环次数愈少; 工作温度愈高, 在相同的交变应力幅值下, 致裂的循环次数相应减少。第三是材料在高温、高应力下持续工作的时间。

22. 如何利用材料低周疲劳特性曲线具体计算汽轮机在启动、停机、变负荷过程的疲劳寿命损耗?

解答: 材料的低周疲劳特性曲线是在工作温度、应力变化幅值和高应力持续时间一定, 对称的应力循环下, 通过实验求出致裂应力循环次数绘出。而汽轮机的启动和停机, 或升负荷和降负荷, 或负荷上下波动, 均经历一次应力循环。但启动和停机、升负荷和降负荷, 其应力循环通常不对称。为了利用材料的低周疲劳特性曲线, 计算该过程的疲劳寿命损耗, 分别将启动、停机、升负荷和降负荷作为半个应力循环处理。首先计算出汽轮机在启动、停机、升负荷和降负荷各过程中, 应力最大的变化值对应的全应变, 再按此全应变, 从材料的低周疲劳特性曲线查出对应的致裂应力循环次数 N_i , 则本次启动、停机, 或升负荷和降负荷的疲劳寿命损耗为 $1/2N_i$ 。对于运行中负荷上下波动, 一般为对称的应力循环。若负荷波动时, 应力循环的幅值较大, 造成疲劳寿命损耗, 可用上述方法求出致裂应力循环次数 N_i , 负荷波动造成疲劳寿命损耗为 $1/N_i$ 。

23. 汽轮机寿命分配时要考虑哪些运行工况? 汽轮机寿命分配的原则是什么? 如何进行寿命分配?

解答: 汽轮机在运行中可能造成寿命损耗的工况包括: 启动、停机、负荷大范围的变动(变负荷调峰)、参数或负荷较大的波动、稳定工况运行和甩负荷。

目前进行寿命分配的原则是保证机组的可使用期为 30 年, 即 30 年内转子不出现裂纹。

按照这种寿命分配原则进行寿命分配, 首先要根据机组在电网中是否参加调峰? 采用什么方式进行调峰? 年运行小时数是多少? 确定在 30 年内各种运行工况出现的次数。其次对这些工况进行优化, 确定每一种工况最合理的寿命损耗。最后对各种工况的寿命损耗进行累加与平衡, 并考虑一定的寿命裕量, 确定寿命分配方案。

24. 如何在运行中对汽轮机的寿命损耗进行控制?

解答: 根据所确定的每一种工况最合理的寿命损耗, 求出对应的致裂应力循环次数; 利用材料的低周疲劳特性曲线反查该工况转子材料允许的最大全应变, 算出对应的最大允许的

应力变化幅值；在运行中控制蒸汽温度、转速和负荷的变化速度，使该工况应力变化的最大幅值不大于寿命损耗允许的应力变化幅值，即可对汽轮机的寿命损耗进行控制。