

# 舰用燃蒸联合装置COGAS汽轮机和 冷凝器的改进设计

[美] U·尼阿德 斯 J·P·瓦勒

主题词 燃蒸联合动力装置 汽轮机 冷凝器 设计

美海军燃蒸联合装置的汽轮机和冷凝器是一体化结构。采用这种结构可降低装置高度,使其能装于驱逐舰的机舱内。打算各种工况都使用燃蒸联合装置,但在巡航时燃油节省最多。采用横向交叉连结方式能更进一步节约燃料。所说的横向交叉连结系指两轴的驱逐舰,排气产生蒸汽的燃气轮机在一轴,而蒸汽轮机在另一轴。采用横向交叉连结在整个航速范围内节约的燃油比采用拖轴方式约降低30%。

已为舰用燃蒸联合装置设计了高效汽轮机。此汽轮机级数少,重量轻、紧凑而可靠。汽轮机和冷凝器的一体化设计就减少了基座和动力装置的整个尺寸和重量。汽轮机和冷凝器的一体化装置长约4.42米,宽2.59米,高4.12米。汽轮机是双层机壳设计,外层机壳为预制焊接结构,内层机壳为铸造结构。内机壳支承隔板,内置转子;外机壳支承冷凝器,并且在以旁道方式工作时提供了加热汽缸和转子的能力,以便加速启动并使转子的变形减到最小。该汽轮机类似汽轮机驱动的驱逐舰使用的低压汽轮机。蒸汽通过三路控制阀进入汽轮机或旁通过汽轮机。当汽轮机与推进系统接上时,控制阀开大,不调节或控制蒸汽流量。

汽轮机在设计时虽受空间限制,但效率很高。热力学限制与可获得的容积流量和冷态启动造成的高度瞬变状态有关。性能的设计标准是基于在全功率和20节速度下能取得最大的效率。冷凝器的尺寸和真空度根据节油和系统重量的优化设计进行。全功率时的最佳背压为7465.95 Pa[6.35厘米汞柱(绝对)]。为了有效地利用该背压并保持在20节条件下的高效率,需将汽轮机的转速设计为最大10 000转/分。全功率和全速时的过调尖峰使全功率和20节航速时效率很高。为了满足叶片在最佳环形面积和最大转速下的离心应力标准,此十一级汽轮机的第十和第十一级叶片使用了钛合金(Ti-6AL-4V)。汽轮机叶片通道采用三维、轴对称的计算方法。这对各级进行三维的速度三角形计算以确立流线,具有锥形边界的叶片流路结构和后几级变截面扭曲喷嘴和叶片的设计角。十一级叶片中有四级使用变截面扭曲叶片。为了提高这台中等反力度汽轮机的性能,使用

本文由郑定泰摘译自“The society of naval architects and marine engineers, Spring meeting/STAR symposium, Norfolk, Va., May 21-24, 1985.” 吉桂明校

了轴向密封和弹簧支持的径向密封。汽轮机的性能如表所示。

汽轮机按横向交叉连接要求设计。约在60%转速时能利用几乎全部的节流流量，从而能取得高扭矩。根据高的环境温度或燃气轮机的情况（旧的燃气轮机）可能使蒸汽温度变得高于510℃的设计温度。在不改变流量时，温度可能达到649℃，该温度超过了汽轮机材料的允许极限和过去汽轮机经验的极限。然而，为了保持510℃的温度，此系统设计成增加蒸汽压力，并允许更多的流量通过汽轮机。这可用增加蒸汽发生器的给水流量来控制。允许的最大工作压力为28公斤/厘米<sup>2</sup>。如保持该温度还需另外的流量，可将旁通打开，排放过剩的蒸汽流量。

规 速	12节	巡航 (20节)	全功率 (32节)	设计
汽轮机功率(马力)	2 073	6 073	8 644	9 304
转速(转/分)	3 750	6 250	10 000	10 000
进口压力(公斤/厘米 <sup>2</sup> 绝对)	7.3	17.4	23.6	24.9
进口温度(°C)	356	421	483	510
排气压力(厘米汞柱, 绝对)	3.30	4.67	6.35	6.35
蒸汽流量(公斤/小时)	8 346	18 960	24 449	25 474
汽耗(公斤/马力小时)	4.14	3.21	2.91	2.81

汽轮机前七级叶片是有锥形围带的冲动式叶片，后四级是带有锥形围带的反动式变截面扭曲叶片。第一级叶片是典型的冲动式叶型、轴向枞树形叶根。蒸汽通过约40%的进气弧段进入喷嘴组。没有使用控制阀，消除了小流量时通常出现的部分弧段高的叶片负荷。这就改进了汽轮机的可靠性。第二级至第七级叶片也是典型的冲动式叶片，也有同样的轴向枞树形叶根和一条完整的锥形围带和一根拉筋。一、二级为部分进气，其余为全进气，围带的外径上有一条安装不锈钢线的轨道。八、九级叶片是反动式变截面扭曲叶片，具有同样的轴向枞树形叶根和锥形围带。前面九级叶片材料为标准的MIL-S-861, Class 422不锈钢。最后二级叶片也是反动式变截面扭曲叶片，叶根也是同样的轴向枞树形，但叶片材料是锻造和退火的钛合金(Ti-6Al-4V)。钛抗腐蚀，在这些运行条件下勿需采取防湿措施也能满意工作。最后两级围带也是整体锥形围带，但采用了类似燃气轮机使用的Z形叶冠。Z形围带锁在一起形成一条360°的连续长带或长弧围带。对十和十一级叶片进行了有限元分析以确定叶片对于转速的伸直效应和设计Z形围带。为了防止共振时的微振磨损，围带间的接触表面涂有在燃气轮机上也使用的硬质合金碳化钨。叶轮离心应力的最小安全系数为3。设计的叶片能否无故障地长期运行取决于对自然频率和振动应力的计算和预测。对各种结构和设计的叶片进行了大量的静试验，还进行了验证叶片工作频率的旋转试验。前七级叶片的频率计算使用了最近二十五年使用的新的计算方法，结果与静态和动态试验值极为吻合。后四级变截面扭曲叶片的频率计算使用了十五年来已经过静态和动态试验证实的方法。分析这些年来收集到的所有试验数据，已为具体的叶片设计、尺寸、连接件等确定了自然频带。使用这些试验频带，加上在干扰图和振动应力计算中的计算频率为设计可靠性最大的叶片提供了一种保守的方法。在美海军舰艇系统工程站的生产型转子的全尺寸和带荷试验将证实最后级的设计。

预计叶片的频率不会与试验频带值或计算值不同。这就证明了锁紧的Z形围带作为长围带极有效,能极大地降低振动应力。也可绘出每级的自然频带干扰图。为了将激振条件或振动应力降到最低限度,为短叶片选择了最佳喷嘴数。长叶片使用了模拟以往成功使用的长弧围带的围带设计以极大地降低或消除与低速激振有关的高应力。

**计算振动应力要考虑的因素很多,主要的是:**

- ① 共振类型(喷嘴通过频率或转速的倍数);
- ② 进汽类型(部分进汽还是全弧进汽);
- ③ 蒸汽的干、湿状况(在有腐蚀性的工质环境下工作将减少机组寿命);
- ④ 温度(增加温度会降低寿命);
- ⑤ 阻尼因素(材料、结构和气动情况);
- ⑥ 激振因素(取决于隔板的设计);
- ⑦ 汽动力(蒸汽的叶片弯曲应力);

计算振动应力所用的激振为10%。试验表明,此值非常保守。实际的隔板激振是根据已制造的尺寸和设计的静叶,或尾流效应。各种隔板的激振低于0.6%。实际的激振可在试验时通过对叶片的测量取得。预计的实际激振低于2%,因此,实际工作应力低于计算值。

第十和十一级的变截面扭曲叶片采用了模拟360°长弧围带的Z形围带。长弧围带的试验结果指出,应力值比原来每个围带4~5个叶片的叶片组的应力值低10%(响应系数)。第十和十一级的振动应力计算的响应系数更为保守。

转子是由422号不锈钢制成的实心锻件,它与各个叶轮和一个实心的联轴器轮壳锻成一体。轴和轴颈轴承配合处镀铬,还带有一个可拆卸的键连接的推力轴环。汽轮机转子的动态计算采用常规的方法。

轴的跨度、轴径、轴承的选择和悬臂的控制是影响取得结果的主要因素。为满足这台高速舰用汽轮机的要求,上述参数中没有一个超过现有保守设计标准。因此,预计此转子是相当可靠的。转子使用的422材料,其韧性超过铬一钼一钒高温转子材料。它也是具有高断裂强度的抗腐材料。轴颈轴承是已取得专利的五块蹄形可倾瓦球形自位轴承。此轴承由于能适应汽缸和转子的畸变(弯曲、扭曲等),在舰船汽轮机上使用时优点显著。

对一体化的汽轮机冷凝器进行了准静态和动态设计分析,包括确立真实的相当的静态冲击设计值,即垂向40g;横向16g;纵向8g。

动态设计分析提供的加速度值为:垂向46g;横向20g;纵向9g,极接近于上述静态值。

除几个局部区外,差不多所有汽轮机冷凝器的动态应力均低于工作温度下材料的允许应力,而就应力梯度论,此几个局部区附近的应力也大大低于允许应力。因此,这些局部高应力是无关紧要的。

为了防止冲击条件运行下的磨损,转子和内汽缸中心的最大相对偏差在可接受的设

计范围内。动态设计分析证明,设计的汽轮机-冷凝器能经受作用于其上的冲击负荷,不超过材料的弹性极限和良好运行可接受的挠曲。

汽轮机使用的材料是耐腐蚀材料,符合MIL-T-17 600D军标。用此高铬材料是为了限制抑制钝化水处理的腐蚀产物。汽轮机的主要部件全为含铬钢。

冷凝器的设计目标是:结构紧凑、重量轻、和汽轮机结为一体、不用法兰连结、需经驳船抗冲击试验、工作可靠。

#### 性能要求为:

设计热负荷:  $13.76 \times 10^6$  千卡/小时

蒸汽流量: 24 449公斤/小时

背压: 6.35厘米汞柱(绝对)

海水流量: 在进口温度 $23.9^{\circ}\text{C}$ 时为32 403公斤/分

管内流速: 对于上述流量为365.76厘米/秒

全功率蒸汽卸放量: 在 $260^{\circ}\text{C}$ 时为28 812公斤/小时

卸放热负荷:  $19.03 \times 10^6$  千卡/小时

背压: 9.398厘米汞柱(绝对)

#### 冷凝器还有如下设计特征:

冷凝器缸体使用304L不锈钢,

汽轮机汽缸和冷凝器缸结为一体,没有引起空气泄漏的连接法兰,

如有必要,可将热井设计成能容整个冷凝水;

双管板结构。管和管板的连接采用气焊密封焊,能完全防止海水混入凝水;

清洁度90%时的设计热耗高;

#### 管材为:

① 除法兰为inconel625外,水柜为Incoloy825;

② 管材为钛合金,无缝管、外径2.22厘米;

③ 外管板为304L,外罩以钛合金;

能承受40g的冲击载荷。

三重传感器的超声波液位控制系统。

三排钛冲击管。

对冷凝器的最低规范要求是:平均无故障时间为58 825小时,最多的平均修理时间为4小时。根据冷凝器在海军舰艇上使用时的破损纪录以及对COG AS装置冷凝器的推算,计算的平均无故障时间为113 000小时,平均修理时间为1.95小时。