

舰用蒸汽轮机推进技术的发展

R·L·莎德

舰用蒸汽轮机,特别是用于核动力推进的舰用汽轮机目前正谋求实现高功率密度和减少噪音。单位重量的功率目前较之十年前相应装置约提高50%以上。机械噪音较之七十年代来说,在规定的频率范围内已经减少了三分之二以上。但高功率密度、低噪音和高效率三者之间有直接的相互关系。为了减少燃料费用,而实现汽轮机高效率;这对民用部门来说是直接的目标,但对海军舰用蒸汽轮机却并非如此。即使是对于设想中的舰用汽轮机,虽然海军规范对耗汽率规定得很低,使其流道结构必须采用三元理论进行设计,但设计者的目标仍然是要以最轻和最安静的装置来满足所需要的性能。

高效率汽轮机的固有特点是:那些能激发高速结构噪音和旋转部件机械振动的紊流、气流分离和冲击波均比较小。设计时需进行权衡考虑的因素主要是高功率密度(额定功率、重量、尺寸)、低噪音和高效率。但这应在机舱接口控制、机架系统、可靠性、可维修性、可接近性和冲击性和安全性等的限制性条件内加以考虑。

对许多推进循环进行综合研究后的结果表明,整个蒸汽推进装置的重量在额定的蒸汽参数下,随汽轮机转速增加而减少。对于给定的蒸汽初参数和冷凝器压力,增加汽轮机的转速可减少汽轮机的重量,但增加了减速齿轮的重量,就象汽轮机转速一样,汽轮机的其他许多设计变量是根据系统设计方法而不是部件设计方法确定的。汽轮机在机舱的方位、管路、汽轮机阀和第一级进口结构都要受系统最佳化的制约。

蒸汽流路

过去十年中,汽轮机最持续的改进领域是汽轮机蒸汽通流部分的设计和制造。汽轮机效率的提高也受到燃料危机的刺激。美国通用电气公司在发展新的高效三元流路和使用先进的计算机来加工这些部件上作了大量的投资。美海军也直接从这些技术进步中得到好处。用于未来舰用推进装置的汽轮机反映了这方面的最新技术。这项技术通过工业应用实践被证明具有高度可靠性和风险小。而且,每当为海军研制一种独特的速度可变的汽轮机流路时,其旋转件均可使用遥测技术在高速、高温和全负荷下进行验证。

汽轮机内部流体的流动问题是工程领域内遇到的最复杂的流动问题之一。这种情况是由许多因素造成的。最重要的是三元流动性,特别是对低压级。因为,在低压级中,蒸汽的容积膨胀极为迅速,因此级的叶片高度增加很快。急速的蒸汽膨胀产生了流动的径向速度分量,因为蒸汽从一级至另一级必须向外运动。此外,叶片高度增加使叶片与蒸汽的速比由根至梢不断增加。这就引起叶栅内或叶栅间的流动性质在径向、切向和轴向上有很大变化。如果叶片的叶梢半径比叶根半径大20%,那么三元性的影响就会很大,想要设计效率高的汽轮机,该影响就必须予以考虑。美国通用电气公司在六十年代就开拓了三元蒸汽流路的设计和分析。三元轴对称计算机程序能求解稳态、非粘性、绝热、旋转对称可压缩流在子午面上的三元方程(欧拉方程式)(图1)。该程序所需的输入包括蒸汽流路的内外边界、级数及其在

蒸汽流路内的轴向位置,前面的蒸汽参数、

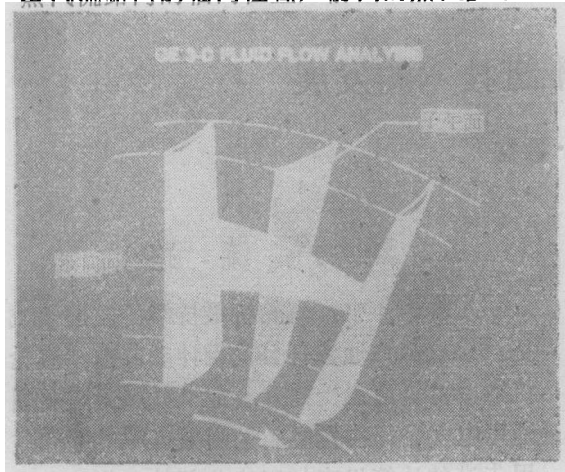


图1 通用电气公司的三元流动分析

汽轮机转速以及级间的功的分配。用这个程序来计算为满足三元流动方程所需的喷嘴和叶片进口角和出口角的径向分布。计算沿着每个叶片出口边上的径向点进行,流线达30条。压力、密度、热焓、流动速度和马赫数、流线的位置和斜率等的径向变量也要进行计算。该程序考虑了级间的相互影响,并将整个汽轮机当作一个整体来设计。这是一个真实的设计程序,它没有必要来反复分析逐次逼近法设计方案。按这种程序设计的汽轮机蒸汽流路,较之普通的二元设计说来,内外环的壁流线比较平滑。三元设计的流线能与内外环的流线角一致,而用普通的二元设计,端壁的膨胀气流要不断转向,因此降低了效率,还增加了叶片振动和结构噪音。蒸汽流路设计取得进展的一个主要因素是按三元流方法的要求来加工平滑流路,叶片和喷嘴截面的能力有所提高。

叶片造型

三元流设计法能在各种径向位置沿流线给出喷嘴和叶片的进、出口角。但是,它不能提供最佳的叶型。但这可用同时考虑气动设计和机械设计的计算机综合设计过程来完成。通用电气公司的施里克特技术(施瓦茨

·克里斯托费尔速度图层流可压缩保角变换技术)就是这个设计过程的基础。已经根据施里克特(SCHLICHT)技术衍生了许多有效的并经过考验的叶型。这些“施里克特”涡叶型最初是为发电设备研制的,他们较之更普通的叶型级效率增加了约1%。图2为典型的施里克特涡叶片叶型。施里克特涡法也用于有高通道效率和高薄缘强度的喷嘴叶型。

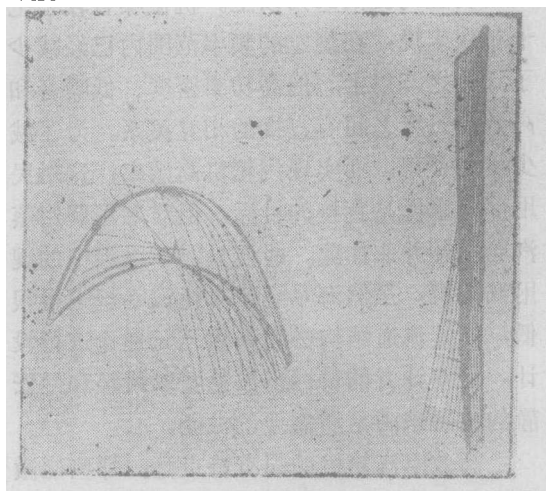


图2 标准的施里克特涡叶片

为保证实现高效率从而实现高功率密度和低噪音的设计,以及为了取得海军需要的高度可靠性和低风险,通用电气公司最大限度地利用了现有的经过考验的高效叶片。这要通过反复的设计过程来实现。选择了合适的施里克特圆柱型叶片。这些现有叶片的实际角度作为三元程序的分析点输入,并调整固定喷嘴的金属截面角直到与三元解法一致。采用这样的方法时,喷嘴从根至叶顶以图3所示的可控涡的型式扭曲,在有些情况下,这种方法也用来增加静叶扭曲,减少动叶扭曲,从而改进叶片的振动特性。喷嘴静叶和动叶的这种配合也用于所有各级,以实现一种以计及离心应力和蒸汽弯曲应力的安全系数为基础的机械设计(该安全系数已由美国通用电气公司验证)。此外,在压力较高和级的叶片较短时,选择作这种配合的喷

嘴应使叶片的自然频率与喷嘴通过频率的第一、第二倍频不发生重合。在压力较低和级的叶片较长时,叶片应设计成带有长弧或连续圆带,以避免和工作转速的低倍频重合并抑制成组叶片振动的切向和轴向振型。

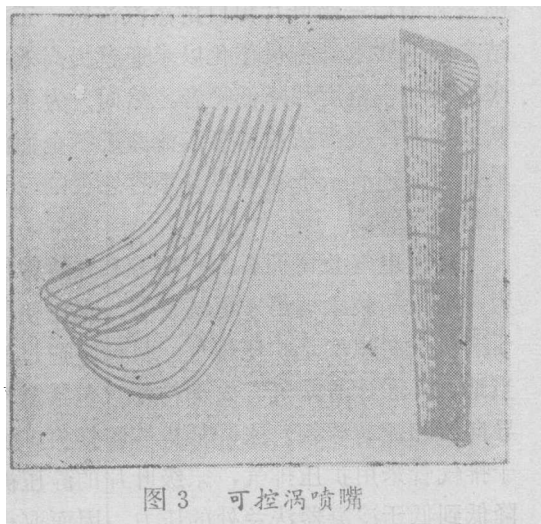


图3 可控涡喷嘴

虽然现有的叶片一般对大多数级都适用,但最后一级或二级要作三元设计时,为了实现效率高的、机械上可接受的结构,一般要求独特的叶片设计。为此,也使用施里克特法来决定沿流线任何给定径向位置的叶片线型。为了把沿着所有流线的线型叠加和掺合为一个连续的静叶片(此静叶其后混入燕尾和铆钉头缘板),要使用另外的交互影响(人机对话)程序,包括通用电气公司分析跨叶片表面上的流道效率的单叶栅程序,叶片截面叠加和内插法程序以及机械振动应力计算程序。由于大部分这些程序可通过交互作用计算机终端取得,因此可实现较之非交互作用技术高二倍还多的生产率增长。

计算机设计喷嘴和叶片技术的另一优点是叶型数据被自动地送到磁带,用于数控机、床加工喷嘴金属截面或叶片靠模。

降低级损失和排气损失

如上所述,施里克特圆柱形叶片和施里

克特涡流叶片已使每级效率增加1%。三元蒸汽流路设计总效率也提高了1%。这些加上轴向和径向设计漏泄带、湿蒸汽级的固定式汽水分离器等,使汽轮机的总效率由于紊流、汽流分离、失速、颤振和冲击的减少而大为提高。然而还可进一步提高级效率。图4为汽轮机的级损失图。此图使用了三元设计作为基线,表示了在典型情况下的剩余级损失。

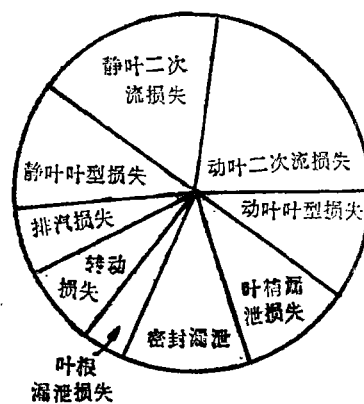


图4 汽轮机的级损失

由图可知,级的二次损失在此图中占的比例相当大。二次流的情况如图5所示。

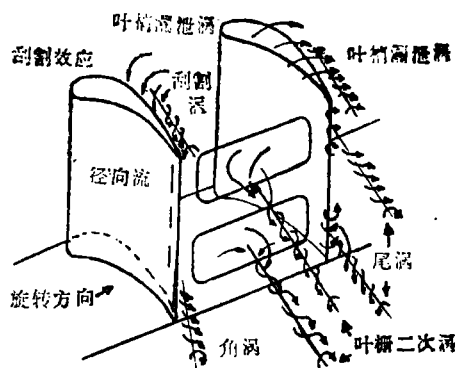


图5 二次流和流道涡流

已经制订了第一个原理性的时间步进三元粘性流计算机程序,并经专门机构的试验室试验作了校准。起支配作用的二流是流动通道内从内弧到背弧沿端壁的交叉流动,对

后者的数值作了测定。二次流的照片如图 6 所示。

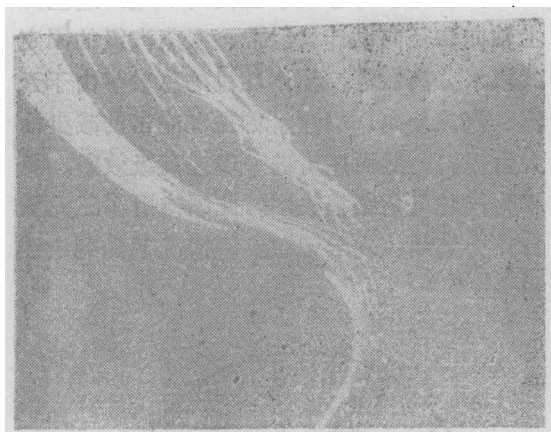


图 6 二次流

这是通过有机玻璃端壁并在充有氮气的肥皂泡喷进风洞空气流时所看到的放大金属截面叶型。二次流沿着端壁成马蹄形涡流。离开端壁后仍有纤细微流附于叶片上。为了减少和消除二次流损失，现正在着手研究作设计改进，其中包括改变端壁型面和可控涡喷嘴叶片型线。随着叶片的长宽比的下降，潜在的效率改进可望进一步增长。端壁型面设计的原型试验结果表明，级效率可增加 0.7%。减少二次流损失是一个可取得实效的领域，预计未来还可取得更大的成就。

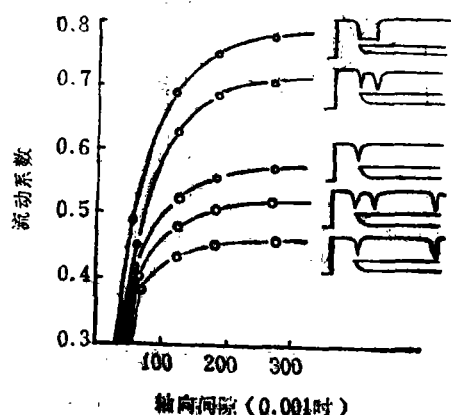


图 7 叶片叶梢漏泄试验

图 7 是叶梢漏泄试验结果。通过试验分析已经得出径向叶梢漏泄带齿的最佳间隙的

相互关系。由图 7 可知，两个间距小的齿比单齿的漏泄量大，但两齿轴向间距增加时，流动阻力增加。这可从流动系数减小看出。

为了减少剩余级的损失，对从第一级喷嘴室到最后一级叶片出口的蒸汽流路，正在结合舰用要求进行最佳化以求通过提高效率来提高功率密度和降低噪音。然而，为了对从进口到冷凝器法兰的蒸汽流路进行全面的最佳化，还有一个领域也是不容忽视的，那就是排气管。

通用电气公司拥有的一项专利开始曾作为一项最新技术被用于电站设备，现已使用于蒸汽轮机以实现扩压排气。目标是通过适当地设计和计算排气管内部构件（包括蒸汽导向器和流动导板）来降低排气管损失。由于排气管采用扩压排气，末级叶片的静压被降低到低于冷凝器法兰处的压力，因而取得了较多的有用功。通用电气公司的这项技术系根据排气管最佳化设计的经验性关联，并经模型试验和全尺寸运行试验证实。

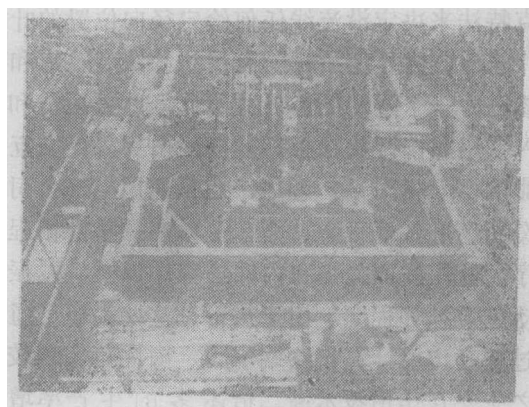


图 8 电站分流汽轮机的下汽缸

图 8 为大型双流向排气的电站汽轮机的下半部。其两端可清楚看到蒸汽导向装置和流动分配板。图 9 为新、老排气管的模型照片图。由冷凝器往排气管内看，老排气管有一个大的内法兰和许多支架。重新设计的新排气管，没有内法兰，把支架改成流动导

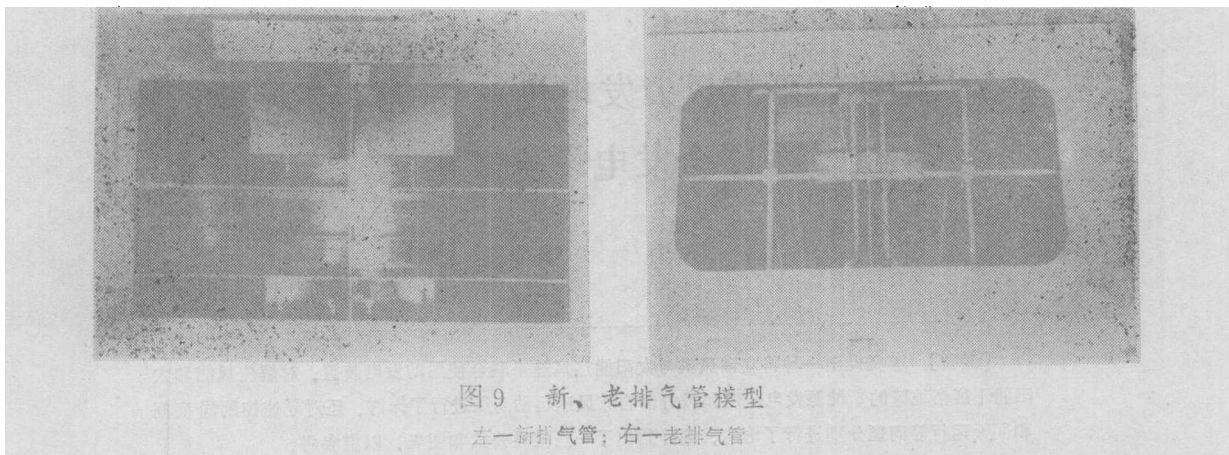


图9 新、老排气管模型

左一新排气管；右一老排气管

板，因而装置的总热耗降低了0.5%。

舰用汽轮机采用上述新排气管时（特别是在有倒车汽轮机时），可能的得益至今还不能用数量表示。现正计划作模型试验。然而，在作舰用时，流动方面还要考虑噪音。为了抑制流速以控制流动噪音，排气管的流动面积要限制。排气管在结构设计时要避免驻波共振或末级叶片由于排气管管背反射而产生的振动。采用扩压排气管不仅提高了效率，也降低了和流动扰动有关的结构噪音。

喷嘴隔板

与舰用推进蒸汽轮机技术进步有关的一个关键项目是喷嘴隔板的加工。由于采用新的方法，喷嘴的隔金箍从圆柱形扩展成精确控制的圆锥形。喷嘴叶片的开口用比常规冲压方式更精确的激光进行加工。然后沿径向从外至内安装叶片以形成360°蒸汽流路。在喷嘴叶片之间采用放电加工钢丝切割，把360°蒸汽流路分成二半。这样，接合处的喷嘴叶片就不会受到损害。

这种切削加工使水平接合处的接合呈Z形。蒸汽流路以最小畸变的方式焊接到内外支持环。畸变所以最小是由于用有限元分析确定了最佳焊缝位置，把最小的热输出和长期强度结合了起来。因此，最后的产品较之常规隔板来说是真正的轴对称隔板。而单独建造的两半隔板是在水平接合处接配的，一

般都牺牲了接合位置的喷嘴叶片。新建造法取消了手工加工，减少了谐波量，增加了级效率。而且，由于改进了尺寸公差和由于在水平接合处叶片有较大改进，振动源和噪音源都大大减少。

降低重量

推进装置的设计目标是要降低装置的重量和噪音。对汽轮机的转速进行了重点研究。为了使装置设计得轻，已作了综合平衡研究。除了高效率的蒸汽流路部件外，还考虑了许多能节约重量的想法。例如，使用现有的先进结构动力学的技术和程序（如ANSYS）有可能设计出重量轻的汽轮机缸体。如果第一级用全周进汽，取消喷嘴口和采用不需普通蒸汽室的安置在汽轮机本体之外的节流阀布置方式，则新制造的汽缸体重量约为老式设计的一半。另一些措施包括使用空心隔板环和取消至排汽缸垂直接头的常规的高压头。材料选择也是降低重量的一个关键因素。

降低噪音率

在蒸汽流路内所有提高效率的技术进步都对结构噪音的激发带来直接有利影响。由于第一级全周进汽，一般比较麻烦的第一级

（下转32页）

参 考 文 献

- [1] 张俊迈, 陈林根, 《轴流透平机械通流部分优化设计译文集》, 海军工程学院, 1985年8月
- [2] 陈林根, 《多目标决策理论与舰用汽轮机最优造型、设计应用导论》, 海军工程学院, 1985年4月。
- [3] 陈林根, 《透平机械设计的新方向之一, 通流部分最优设计》海军工程学院, 1985年8月。
- [4] 陈林根, 《汽轮机热计算用水蒸汽性质FORTRAN语言通用计算程序库》, 海军工程学院研究生学报, 1985年第1期
- [5] H. R. M. Cralg, H. I. A. Cox, "performance Estimation of Axial Flow Turbines", Proceedings Instn Mech Eng, 1970~1971.
- [6] 西安热工研究所汽机室, 西安交大计算数学教研室, 涡轮机教研室《电子数字计算机在汽轮机热力计算中的应用》。
- [7] R. M. Jenkins "A Comprehensive Method For preliminary Design Optimization of Axial Gas Turbine stages", AIAA-82-1264, AIAA/SAE/ASME, 18th Joint propulsion Conference, June, 1982.

[8] R. P. Kroon, H. J. Tobiasz, "off-Design performance of Multistage Turbines", ASME Paper No70-PWR-2.

[9] 某型机热力设计计算说明书,

[10] A. C. Ласкин "Метод определения оптимального осевого зазора в турбинной ступени".

[11] 机械工程手册, 电机工程手册编辑委员会, 《机械工程手册, 第72篇, 汽轮机(试用本)》, 机械工业出版社, 1978.

[12] М. Б. Салуквадзе, "Задачи векторной оптимизации в теории управления", Машинерство, 1975.

[13] 程明煦, 《处理多目标决策问题的二项系数加权法和法》, 系统工程理论与应用, 1983年第4期。

[14] M. J. D. powell "A method For Minimizing a Sum of squares of Non-Linear Functions without Calculating Derivatives", The Computer Journal, Vol7, No4, Jan, 1965年.

[15] 刘德贵, 费景高, 于泳江, 李广元, 《FORTRAN算法汇编第2册》, 国防工业出版社, 1982年。

[16] 某型舰用机组热力设计计算说明书。

[17] 徐宜贵, 《透平级的最优化设计》, 海军工程学院, 1984年12月

(上接37页)

叶片的通过频率激发和部分弧的谐波已大为减少。在转子动力学方面, 通过转子的动力学分析和最优轴设计使对不平衡的敏感性有所降低。为了把悬臂情况降到最低限度, 轴承的位置应适当选择。复合高转速区段应作为一个系统在高速和高温下进行平衡。关于高频宽频带噪音源, 除前述在蒸汽流路设计和制造上作改进外, 还使用了带有低噪声调整元件的磨擦节流阀。减少舷外结构噪音虽然从总体上来说和推进装置的隔音防振技术的发展和机架系统的布置有关, 但减少汽轮机产生的噪音源仍是目前设计方法的直接目标。

未 来 前 景

舰用推进蒸汽轮机是一项成熟的技术,

高度的可靠性和比较长的使用寿命已反映了这项产品的成熟性。但是蒸汽轮机的技术仍有生机勃勃可供发展的领域。未来预计还可在提高效率, 改进制造技术和使用新材料上取得进展。降低二次流损失就是一个例子。这方面的进步也将使汽轮机的功率密度得以提高并降低其结构噪音。采用先进的汽轮机设计思想, 循环和隔音系统能导致更大的效益。

«郑定泰摘自“Marine Engineering/Log, Oct 1985”余永清校»