

舰船用汽轮机末级叶片设计与研究

孙先亮 罗新春

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 对大功率舰用汽轮机末级叶片的热力参数、几何尺寸、叶片各截面型线几何特性数据计算、叶片的成型、叶根型线的选择、叶片强度计算、叶片安装计算及叶片振动计算等问题进行了研究。

关键词 末级叶片 叶型 叶根 强度与振动

1 前言

世界上的海军大国早在50年代就研制出单机功率36.76~51.47 MW(50 000~70 000 ps)的舰用蒸汽轮机,并在舰艇上服役。迄今为止,这些国家服役的许多舰艇还是用蒸汽轮机驱动,汽轮机末级叶片的高度约在230~350 mm之间。而目前我国服役的舰艇主汽轮机不论在单机功率,还是末级叶片高度方面与世界水平相比还有很大差距,要研制适应大中型舰艇所需要的汽轮机,必须首先研制相应的舰用蒸汽轮机叶片。

2 末级叶片热力参数和几何尺寸的确定

表1列出某36.76 MW(50 000 ps)的舰用汽轮机末级叶片平均截面处的有关热力参数和几何尺寸。本文后面的计算,皆以本表数据为根据。

表1 末级叶片平均截面的热力参数和几何尺寸

名称和符号	单位	静叶	动叶
蒸汽流量 G	kg/s	22.3	
末级初压 P_1	MPa	0.05	
末级初焓 i_1	kJ/kg	2 611.73	
末级绝热焓降 h_a	kJ/kg	134.42	
叶片平均直径 D_p	mm	998	1 017
叶片数 Z_1, Z_d	只	40	100
平均截面进气角 α_0, β_1	°	~90°	74°52'
平均截面出气角 α_{1y}, β_2	°	25°24'	34°
$\sin\alpha_{1y}, \sin\beta_2$		0.429	0.559
绝对速度 C_1, C_2	m/s	373	202
相对速度 W_1, W_2	m/s	165	372.6
静叶与动叶的焓降 h_j, h_d	kJ/kg	69.4	65.02
圆周速度 u	m/s	302.8	
反动度 D	%	48.4	

收稿日期 1992-04-30 修改定稿 1993-03-11

本文联系人 孙先亮 男 58 高工 150036 哈尔滨77信箱

3 末级动叶片各截面型线几何特性数据计算

为了对叶片进行拉伸、弯曲等强度计算和对叶片进行振动计算,必须首先计算叶片各截面型线的几何特性数据:叶型重心坐标、叶片截面积、叶型惯性矩、叶型断面系数等。工程上一般都用近似的计算方法求解叶片各截面型线的几何特性数据。通常使用矩形法和梯形法,这两种计算方法都编成了计算程序。

4 叶型的成型及叶根型线选择

末级叶片的绝对高度虽不大,但径高比较较小,而且舰用汽轮机末级的径向扩张角却普遍较大,约 40° 左右。该末级叶片为扭曲叶片,叶片的扭曲程度介于等环流与等 α 流的扭曲规律之间。

扭曲叶片的成型除首先要保证平均截面的型线具有较好的气动性能外,还要兼顾叶片根部和顶部。

按表1所列参数而设计的末级叶片扭曲程度适中,平均截面的反动度为48.4%,这样就保证了叶片根部截面具有一定的反动度,而顶部截面的反动度又不太大。气流在流道不断加速运行,流动条件较好。该末级叶片在亚音速区工作,叶型进、出气边没有直线段,这就避免了沿叶型外廓的二阶导数过大突跳现象。在叶型两圆弧段连接处,曲率半径之比在3.1以下,尽量避免了对气流的扰动。

叶片各截面型线的流道做到了从进气边到出气边逐渐均匀收敛,没有扩压段。

叶片的进气边半径适当地选得较大,以减小叶片进气边的涡流损失,同时也提高了

叶片的抗振、抗腐蚀和抗水蚀性,并有利于改变工况性能。

根据舰用汽轮机对叶片可靠性的要求确定选择枞树型叶根。

5 叶片强度计算

计算叶片弯曲应力时,应选择汽流最大的工况作为计算工况。表2列出末级叶片在额定工况下的强度计算结果。

表2 末级叶片强度计算

名称	符号	单位	计算数值
叶片数	Z_d	只	100.
叶片根部拉伸应力	σ_{gl}	MPa	217.8
叶根颈部拉伸应力	σ_g	MPa	186.4
叶片蒸汽弯曲应力	σ_w	MPa	13.7
叶根挤压应力	σ_{gy}	MPa	218.3

当工作温度较低时,叶片离心力和汽流产生的合成应力的校核是以工作温度下的屈服极限 $\sigma_{b.2}$ 作为基准,叶片的许用应力: $[\sigma]=\sigma_{b.2}/K_s$,式中 K_s 为安全系数。

安全系数与许多因素有关,目前国内外安全系数取为 $K_s=1.7$ 。

进行叶根强度校核时,由于叶根形状复杂,容易形成应力集中,故安全系数不能比叶型部分低。在校核叶根或轮缘截面上的合成应力时,安全系数取为 $K_s=2.0$ 。

叶根或轮缘的挤压许用应力较大,安全系数取为 $K_s=1.25$ 。叶根或轮缘的剪切许用应力为拉伸许用应力的0.75倍,即 $[\tau]=0.75[\sigma]$ 。

由表2的叶片强度计算结果可看出,末级叶片的各种应力都不太大,并且叶片进气边

的蒸汽湿度控制在10%左右,选择马氏体不锈钢1Cr13作为末级叶片的材料是合适的。

6 叶片安装计算

表3列出对末级叶片根部截面所选定的安装位置进行应力计算的结果。

表3 选定安装位置的应力计算结果

名 称	单位	进气边	背弧
叶片根部截面的拉伸应力	MPa	217.8	217.8
蒸汽弯曲应力	MPa	13.7	-11.0
偏心距起引的弯应力	MPa	0	0
总应力	MPa	231.5	206.8

计算结果表明,末级叶片的根部截面所承受的总应力小于叶片材料1Cr13的许用应力。

7 叶片振动计算

叶片在低频不均匀气流场中旋转时,实际上主要考虑 $K = 1 \sim 6$ 阶激振力作用,其相应的频率为: $f_1 = Kn, K = 1, 2, 3, \dots, 6$ 。汽轮机运行经验表明,有连接件(拉金)的动叶片的一阶切向振动固有频率大于转子旋转频率的六倍时,动叶片可在与第一类激振力共振的条件下工作。

作用在组内每只叶片上的激振力的振幅和作用在以相同频率振动的单只叶片上的激振力的振幅之比值——成组系数 μ 小于1,它表明当装上连接件时激振力减小的程度。当成组系数的值很小时,对于全周进汽级的动叶片组的一阶切向振动来说,就不需要调开因静叶片出气边的脉冲数引起的共振。

若要叶片不产生危险的共振,叶片的动频率必须满足下列条件,对于低频激振力:

$$f_d = \sqrt{f^2 + Bn^2} \neq Kn$$

对于低频激振力频率 Kn 和 A 型振动的频率避开率为

$$\Delta f = \left| \frac{Kn - f_d}{Kn} \right| \times 100\%$$

A 型振动与低频激振力之间的频率避开率对于不同 K 值下的 Δf 的最小裕量规定为:

K	2	3	4	5	6
$\Delta f, \%$	12	7	5	4	3

对该末级叶片进行了单只叶片一阶振动频率的计算、叶片组一阶振形和振动频率的计算、叶片组一阶振形和动频率的计算。计算结果列于表4。另外,还计算了叶片组一阶振动的动频率。单只叶片振动频率、叶片组第一阶和第二阶振动频率经安全性校核都满足舰用汽轮机各运行工况对叶片频率避开率的要求。

表4 末级叶片振动频率计算结果

名 称	符号	单位	计算数值
单只叶片的固有振动频率	f	Hz	264
叶片组一阶振动频率	f_1	Hz	292
叶片组二阶振动频率	f_2	Hz	908

8 结束语

所设计的舰船用大功率汽轮机末级叶片有关截面的叶型经平面叶栅吹风试验证明:气动性能良好,工况适应性强。另外,强度、振动计算结果满足各种规定,材料立足国内,加

工工艺性也较好。所设计的末级叶片较好地满足了对舰船用汽轮机叶片的各种技术要求,进一步开展舰船用大功率汽轮机末级叶片的研究设计工作是极其重要的,也是完全符合我国国情的。

参 考 文 献

- 1 吴厚钰主编. 透平零件结构和强度计算. 机械工业出版社. 1982
- 2 舒本柯 Л А—舒宾主编. 汽轮机强度. 机械工业出版社. 1980
- 3 Моисеев А. А. Длинные лопатки судовых турбин. Л. Судостроение 1969
- 4 Моисеев А. А., Розенберг А. И. Конструирование и расчет прочности судовых ТЗА. Судостроение, 1964

简 讯

锅炉制造的进展

据“Промышленная Энергетика”1992年5月号报导,以奥尔忠尼启则命名的巴达列茨基(Подольский)机械制造工厂——俄罗斯生产热动力设备主要工厂之一,位居建造当代热电站和核电站设备的制造工厂的前列。生产大容量的锅炉组成该厂锅炉制造的基础。该厂在设计制造烧“重”煤(高成渣、高污染性的煤)电站锅炉方面积累了丰富的经验,其行之有效的结构措施如下:

- 锅炉的加热面呈T形配置并具有悬挂式气密结构;
- 具有固体除渣的燃料低温燃烧;
- 切向四层配置直流式燃烧器;
- 具有直接吹入、气体干燥、粉磨风机的煤粉制备系统;
- 膜式水冷壁省煤器;
- 管式空气加热器。

该工厂也是设计生产余热锅炉的骨干企业之一,已为功率为345MW和450MW蒸燃联合装置设计制造了余热锅炉。

为了提高锅炉的蒸发量、可靠性和经济性,利用了现代结构的分离和燃烧设备、肋形加热面、装有窄管距的空气加热器等。

为了提高设备加工制造的质量,巴达列茨基奥尔忠尼启则机械制造工厂在下列方面做了许多工作:

- 材料、半成品和配套制品的输入检验;
- 新的工艺规程和设备用于保证无缺陷的制造;
- 设备制造、设计服务的监督;
- 严格检验以便更有效地剔除焊接缺陷。

基于工厂检验结果方面的信息和电站运行可靠性方面信息的制造质量的管理。

(学奥 供稿)

**JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL
ENERGY AND POWER**
1993 Vol. 8 No. 3

CONTENTS

(113)МАШИНОЕКТ-the Cradle of Marine Gas Turbines of the Former Soviet Union.....

Wen Xueyou (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

(117)Design Features of ГТД 8000 and ГТД 15000 Marine Gas Turbine Engines.....

Victor I. Romanov (*NPO Mashproject, Nikolayev, Ukraine*)

This paper describes the design features and performance data of new generation ГТД 8000 and ГТД15000 engines. The efficiency of these engines is (34-35)% (simple cycle, ISO conditions). This paper presents the basic trends of design and technology improvements resulting in high performance engines. Some examples of new gas turbine applications are given. **Key words:** *gas turbines*

(123)An Experimental Study on the Adjustment of Steam Injection Tube Insertion Length for a PG 5361 STIG Gas Turbine.....Zhou Jizhong, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The authors discussed the effect of tube insertion depth at mixing-dilution holes on the performance of a gas turbine combustor. Briefly described are also the relevant test facilities and experimental test methods. **Key words:** *gas turbine, combustor, steam injection, experimental study*

(130)Performance Test of the Gas Generator of a Double-Flow Fan Engine With Variable Duct Resistance.....Ye Zide, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

This paper deals with the test plant and test results of a gas generator of a by-pass dual-rotor engine with variable duct flow path resistance. The said test results will provide valuable data for the potential on-land applications of turbofan engines and create an effective avenue for relevant engine modifications. **Key words:** *test plant, test results, turbofan engine, engine inner and outer duct*

(134)The Design and Study of Naval Steam Turbine Last Stage Blades.....Sun Xianliang, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

With regard to a high-capacity naval steam turbine last stage blades a study has been conducted of the following items: thermal parameter, geometric dimensions, the calculation of geometric characteristic data of various blade section profiles, blade configuration, the selection of blade root profile, blade strength calculation, blade mounting and blade vibration calculation, etc. **Key words:** *steam turbine, last stage blade, blade profile, blade root, strength and vibration*