

弯曲叶片涡轮叶栅二次流损失计算经验模型

于 清

(北京航空航天大学动力系)

[摘要] 根据倾斜、复合弯曲平面叶栅的实验数据的分析,提出了一个适用于弯扭气动成型设计的涡轮叶栅的二次流损失计算模型,此模型反映了叶片倾角、展弦比、叶栅稠度等诸因素对二次流损失大小以及分布规律的影响。用此模型预估了直、弯两种叶片形式下的一小展弦比燃气涡轮导向器的损失值,模型计算值同试验测试结果吻合得很好。

关键词 弯曲叶片 涡轮叶栅 二次流模型

中图分类号 V231.3

0 前言

涡轮机械作为能源转换中的一个重要部分,提高工作效率是至关重要的。近期研究表明,损失同流体的旋涡特征紧密相关,叶栅出口通道涡对应着高的能量损失区,其低能流体大多来自卷吸固壁表面附面层,也就是说通道涡在叶栅流动中起着迁移低能流体的作用,通道涡的形成和发展是由叶栅本身的几何形状以及气流气动条件决定的。由于叶栅几何形状是影响流动的重要因素,人们在叶栅成型方面作了大量的工作。对倾斜、弯曲叶片叶栅多年的研究工作取得了不小进展,主要包括两个方面,一是对叶栅内流动机理的细致研究,揭示了复杂的三维叶栅通道内旋涡系的流动结构;二是弯曲叶片设计技术已成功地应用于现役先进涡轮机械中。尽管人们在很大程度上可通过数值模拟技术来研究复杂的流动现象,但是,经验的损失计算模型对设计高性能涡轮叶栅仍具有工程应用价值。

叶栅通道内的二次流是由叶栅几何形

状和来流气流条件两方面因素决定的,在来流条件已定的情况下,确定的叶栅通道也就决定了其二流大小和位置。在加速叶栅中,气流转折较大,通道涡较强,二次流不易耗散,其卷吸低能流体的能力较强;而在扩压叶栅中,二次流对应的旋涡较弱,其卷吸能力弱,在逆压梯度下易耗散。近几年的实验表明,由于二次流同端壁流动有关,在小展弦比叶栅中,二次流损失所占的比重是相当大的,因此正确分析预估二次流损失就成为十分重要的研究内容,这也是本文工作的目的所在。

1 倾斜、弯曲叶栅的二次流损失计算方法

倾斜、弯曲叶栅能够减少叶栅通道的总损失,这一点已得到公认。然而,定量的描绘此类叶栅的损失值到目前为止仍没有十分满意的方法,近几年对弯扭叶栅进行了大量的试验研究^[1,2],在弯扭叶栅减小损失的机理上有了更深入的认识,得出了对于不同几

何形状的叶栅存在最佳弯曲角度的结论,这些工作为叶栅二次流损失模型的建立奠定了基础。

1.1 二次流平均损失的计算

二次流损失的两个主要来源是端壁进口附面层以及流道壁面、叶片表面的附面层,即在叶片前缘形成的马蹄涡压力面分支在穿过叶栅通道时,将端壁附面层卷入旋涡,形成通道涡,通道涡在向后流动过程中,又不断的将新形成的附面层继续卷入,使其一起参加旋涡运动。叶栅负荷大小不同,通道涡形成的强弱就不同,相应的二次流损失就不同。对于直列叶栅,可以将叶栅的平均二次流损失的大小表达成叶栅气动负荷的关系^[3]如图 1,近似公式如下:

$$Y_{PS} = \lambda \frac{t}{h} Z \quad (1)$$

其中, Z — 叶栅气动负荷, h — 叶片高度, t — 叶栅的栅距, λ — 为经验系数,其取值范围为 0.08~ 0.015 通过对弯曲叶栅流动机理的分析,其损失值同直列叶栅损失值可用下式关联:

$$\frac{Y'_{PS}}{Y_{PS}} = \frac{\sin \lambda_2 - \lambda_3}{\sin(\lambda_1 V + \lambda_2) - \lambda_3} \quad (2)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是与倾斜、弯曲角度无关的叶栅几何参数和气动参数的函数, V 为叶栅弯曲角度。

上述表达式是针对涡轮叶栅气流转折角在 $65^\circ < X < 135^\circ$ 范围的情况下得出的,可以看出,只有弯曲角度等于最佳弯曲角度时,叶栅通道的二次流损失才最小。另外,上述计算公式是从平面叶栅实验得出的,当应用于环形叶栅时,还应对其进行修正。

1.2 二次流损失在叶栅出口的分布

二次流损失主要发生在叶栅端壁附近,损失大小沿叶高有一特定的分布规律,这一分布规律是由通道涡的位置以及通道涡的强弱决定的。以气流转折角 X 与叶栅通道收

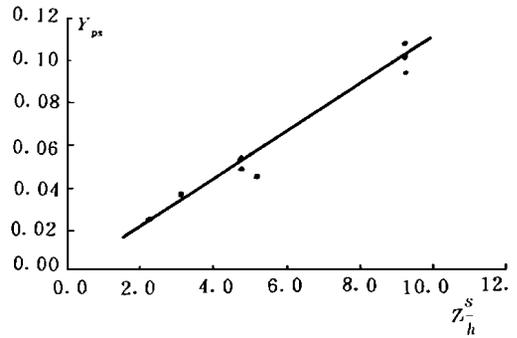


图 1 二次流平均损失随叶栅负荷的变化

敛度 CR 之比为变量,通道涡涡心位置 Z_p 有如图 2 所示的关系^[4],可近似用下式表示:

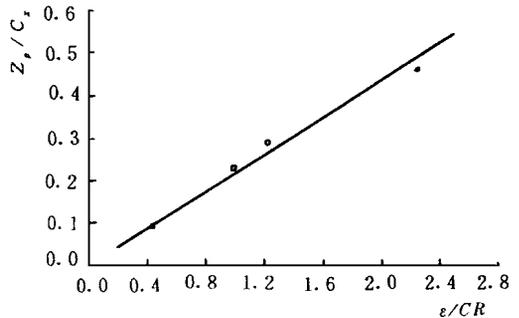


图 2 涡心位置随转折角和收敛度的变化

$$Z_p / C_z = _0 \frac{X}{CR} \quad (3)$$

其中, $_0$ 为经验系数。而对平面倾斜、弯曲叶栅的实验结果表明,通道涡的位置同直列叶栅相比发生了明显的变化。正倾斜、弯曲使得通道涡涡心向叶栅中部移动,而负倾斜、弯曲使通道涡向端壁移动,由此可将上式进行修正:

$$Z_p / C_z = _0 \frac{X}{CR} (1 + _1 V) \quad (4)$$

$_1$ 为弯叶片修正系数。

而二次流损失的影响范围,还受叶栅进口附面层厚度的影响^[5],若采用组合参数 $(Q = Z \frac{c}{s} \frac{\cos T_2}{\cos T_1} + 42.27 \frac{W}{h})$ 作自变量,二次流损失影响范围 Z_e 的相对值有图 3 所示的关系,用公式可近似表示为:

$$\bar{Z}_e = _2 Q \quad (5)$$

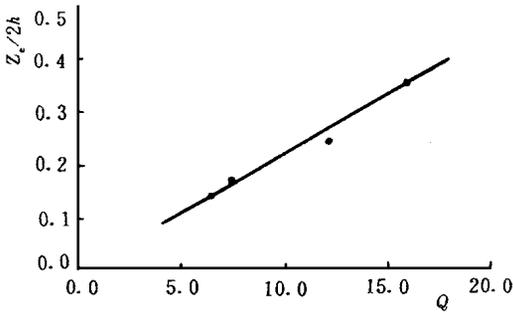


图 3 二次流影响区域随截荷的变化

根据二次流损失产生的机理,假设二次流损失在叶高方向上存在一个峰值,它沿叶高的分布可采用下式表示:

$$F(x) = \frac{1}{a} \frac{1}{2c} e^{-\frac{(x-b)^2}{2a^2}} \quad (6)$$

其中, $a = \frac{Z_c}{6h}$, $b = \frac{Z_c}{h}$, x 为相对叶高,而叶片高度上总的二次流损失值应等于由平均二次流损失模型的计算结果.若考虑到壁面损失,则叶栅通道的端壁损失可由这两部分叠加得到.如图 5

2 应用举例

将上述建立的二次流损失模型同叶型损失模型^[6]应用于具有弯扭叶片的涡轮级的设计,将损失采用熵增的方法加入到无粘的 S_2 流面程序中,由此可以估算出不同叶片弯曲形式(角度)对涡轮级效率的影响.如图 4 给出的是某单级涡轮的效率随导叶叶片根部和顶部弯曲角度的变化趋势.由于二次流损失在最佳弯曲角度下最小,对应于涡轮级的效率达到最高值.对于本算例,导向叶栅的气流转折角为 $63^\circ \sim 70^\circ$,最佳弯曲角根部在 24° 左右,顶部在 18° 左右.

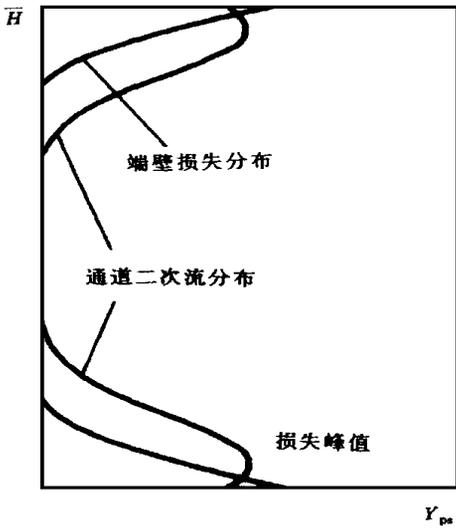


图 4 叶栅出口二次流损失分布

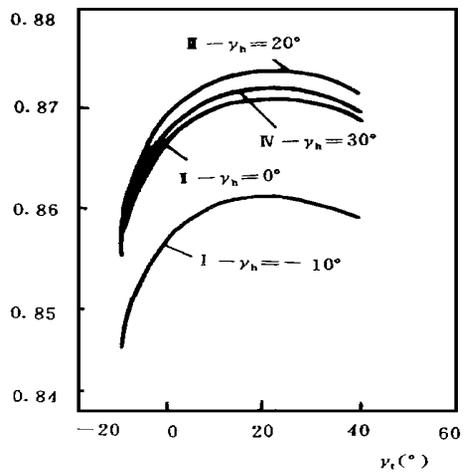
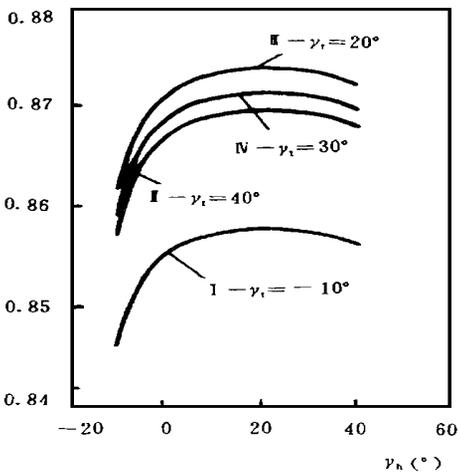


图 5 涡轮级效率随弯角的变化

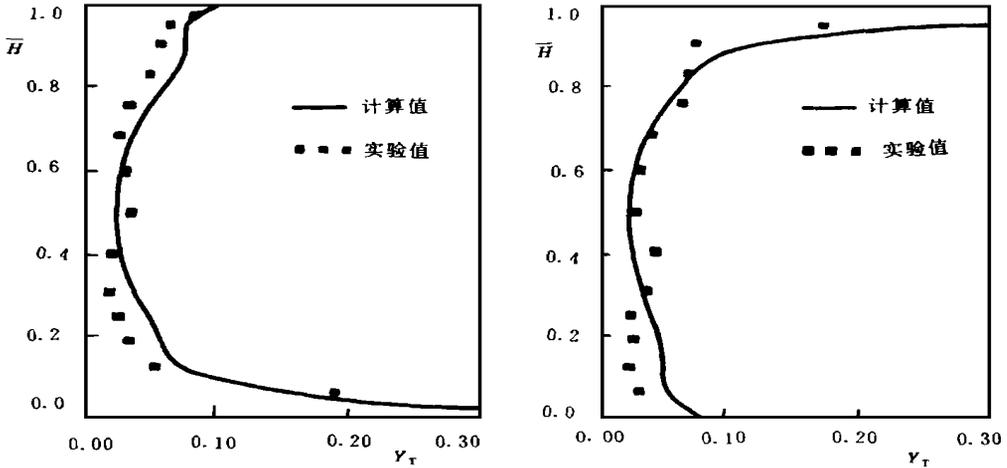


图 6 总压损失系数的径向分布

将此模型应用于一个直列叶栅和一个弯曲叶片叶栅的低速吹风实验,计算值同实验测试结果对比如图 6,模型基本反映了二次流损失的变化趋势。

3 结论

本模型是在有限的试验基础上建立的,各系数的选取有待于进一步完善,模型建立的方法反映了当前对叶轮机叶栅研究的最新思想。此模型仅适用于小展弦比涡轮叶栅,对大展弦比或小轮毂比环形叶栅模型的适用性有待于进一步研究。

参考文献

- 1 谭青春.透平叶栅中叶片的弯曲对流动性能影响的实验研究.哈尔滨工业大学博士学位论文,1993年 3月
- 2 钟兢军.弯曲叶片控制扩压叶栅二次流的实验研究.哈尔滨工业大学博士学位论文,1995年 12月
- 3 Dunhan J & Came P M. Improvements to the ainley-mathieson method of turbine performance prediction. ASME J. Eng. for power, July 1970
- 4 Sharma O P and Butter T L. Predictions of endwall losses and secondary flows,in axial flow turbine cascades. ASME Paper 86-GT-228, 1986.
- 5 Marchal P and Sieverding C H Secondary flows within turbomachinery bladings. AGARD-CP-214, 1977
- 6 于清.涡轮叶栅叶型损失数值模拟方法.航空动力学报,1997,12(2) (李乡复 编辑)

锅炉空气动力学和传热学的新课题

据“Теплоэнергетика” 1997年 9月号报道,巴达列茨基机械制造工厂注意到在锅炉结构的空气动力学和热力技术研究中一些尚未被研究的领域。

详细探讨了热烟气再循环、双层鳍片管、复合的金属陶瓷受热面、交错排列的对流管束、分路流动、对流换热器内的各向异性现象、通用的交错排列管束、热交换介质参数场的不均匀性等问题。

可靠地了解这些问题将有助于提高结构的有效性。也提出了有关建立锅炉新结构和热力系统的某些建议。

(思娟 供稿)

University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -178- 182

Through an experimental study conducted on a circulating fluidized bed model (height 5.9 m, inner diameter 0.14 m) the formation mechanism of a wall-adhered return flow was explored and discussed with a physical model of the wall-adhered return flow proposed. The above work is meaningful for both engineering design and theoretical research of circulating fluidized beds. **Key words** wall-adhered return flow, circulating fluidized bed

《热能动力工程》引文分析和研究 = **Analysis and Study of the Engineering Literature Citations of "Journal of Engineering for Thermal Energy & Power"** [刊, 中] / Huang Mao Lin (Harbin Institute of Technology)

Liu Changhe (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -183- 184

逆算法对涡轮特性柯特略尔估算的改进 = **An Improvement on Kotliar Prediction of Turbine Performance by the Use of an Inverse Computation Method** [刊, 中] / Xie Zhiwu, Wang Yonghong, Hong Bo, Chen Delai

(Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -185 ~ 188

Taking Kotliar method as an example, this paper discusses the applicability of an inverse computation method for the calculation of stage superimposed type turbine performance. It has been proved that the last stage first stagnation hypothesis can be naturally fulfilled under the condition of identical design pressure ratio for each corrected stage. In case of the design pressure ratio for each corrected stage not identical given are ascertainment criteria for finding the first stagnant stage. In addition, the use of a combined sequential-inverse computation method is proposed for the treatment of critical issues, thus making a breakthrough regarding the last stage first stage hypothesis. Computation procedures have been optimized, resulting in an enhancement in evaluation precision. **Key words** turbine, inverse computation method, Kotliar method

弯曲叶片涡轮叶栅二次流损失计算经验模型 = **An Empirical Model for Calculating Secondary Flow Losses of Curved Blade Turbine Cascades** [刊, 中] / Yu Qing (Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -189- 192

On the basis of the experimental data analysis of inclined and composite curved plane cascades the author has come up with a secondary flow loss calculation model applicable for turbine cascades of curve-twist aerodynamically formed design. This model reflects the effect of such factors as blade inclination angle, aspect ratio, cascade solidity on the magnitude and distribution mechanism of secondary losses. With the help of this model evaluated in advance are the losses of a small aspect ratio gas turbine guide vane device under two forms of blades, i. e. straight and curved. The model-calculated values are in good agreement with those of the test and measuring results. **Key words** curved blades, turbine cascade, secondary loss model

恒热流竖壁降膜发展段流动换热分析 = **Flow Heat Exchange Analysis of Constant Heat Flow Vertical Wall Downcoming Liquid Film Development Section** [刊, 中] / Shi Jinsheng, Shi Mingheng (Southeastern University)

// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -193- 195

With the help of a boundary layer analogous solution an analysis is conducted of the laminar flow and heat exchange characteristics in the constant heat flow vertical wall downcoming liquid film development section. Obtained is the calculation expression of the development section length, liquid film thickness and non-dimensional heat exchange factor. **Key words** downcoming film, development section, speed boundary layer, temperature boundary layer

NG-130/39-M₂型锅炉的节能技术改造与运行 = **Energy Saving-oriented Technical Modification and Operation of a Model NG-130/39-M₂ Boiler** [刊, 中] / Cheng Qingang, Bao Yanjun, Zhang Guojun, et al (Harbin Power Equipment Design Institute)

// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -196- 199

Through the tests of a NG-130/39-M₂ boiler installed at a thermal power plant and its pulverized coal system, analyzed are some causes leading to the excessively high fly ash and slag combustible content and ex-