

后加载技术在极小展弦比叶栅中的应用

王玉璋¹, 赵亚芳², 丰镇平², 王永泓¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 西安交通大学 叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 具有后部加载载荷分布的透平叶片能有效控制叶片通道内二次流的形成, 降低二次流动损失, 同时该类型叶栅具有良好的攻角适应性, 因此可以显著提高叶栅通道内的流动效率。本文应用后加载技术设计了一种具有后部加载特性的极小展弦比静叶栅。其叶栅的数值分析结果和实验结果表明, 叶栅有低的三维叶栅损失, 叶栅性能随不同展弦比、不同攻角和不同出口马赫数的变化不大。

关键词: 后部加载技术; 展弦比; 二次流动; 叶栅实验

中图分类号: TK262 文献标识码: A

1 前言

提高新汽初压、初温和再热蒸汽温度是提高汽轮机组热经济性, 因而超临界及超超临界汽轮机的研制受到世界各国的普遍重视。但超临界及超超临界汽轮机进口压力很高, 因此, 汽轮机调节级的进汽容积流量比同功率的亚临界机组要小 67% 以上, 相应使叶片长度也缩短, 同时又由于叶栅的工作压力增大, 必须增加叶片的宽度来保证工作强度, 因而该类叶栅的展弦比(远小于 0.6)相对亚临界汽轮机调节级的要小的多, 若采用常规调节级叶栅, 则叶栅两端部的高损失区将充满整个叶栅通道, 二次流损失显著增大, 使调节级效率大幅度下降。然而调节级所作功率占整机的 10% 左右, 因此对整机效率影响很大。

近年来很多新的设计思想与概念在汽轮机中得到应用, 汽轮机流通部分效率大幅提高。目前当代汽轮机流通部分关键新技术主要有后加载叶型、子午收缩静叶栅、弯扭静叶栅与全三维流型设计等^[1]。后加载叶栅能有效控制叶栅通道内二次流的形成, 降低二次流损失, 而且有大范围攻角适应性^[2]。文献[3]中最早引入“后部加载”概念, 与均匀加载或前部加载相比, 后加载叶栅的最大起动负荷明显地向下游移动, 在相对弦长的 60%~70% 处, 该叶型不

仅可以推迟转捩的发生, 减小转捩区长度, 降低型线损失, 更大意义能够削弱三维通道的二次流损失。ABB 公司工作表明, 后部加载叶型尽管吸力面后部有一定程度的扩压, 但是在较大攻角范围内并没有出现分离现象且损失维持较低值不变。

2 后加载技术和叶型

后加载技术是使叶栅的最大气动负荷位置明显向下游移动, 为相对弦长的 60%~70% 处, 气流在叶型吸力面上的喉部以前加速, 而在喉部以后扩压, 这样边界层的转捩就会推迟到喉部, 能有效推迟转捩发生、减小转捩区长度, 从而降低叶型的三维总损失。

基于上述思想, 本文设计了一个静叶栅, 如图 1 所示。该叶型主要设计参数是: 叶型弦长 b 为 40.4 mm, 叶栅设计进口气流角 90° , 叶片安装角 β_y 为 52° 。从图中可以看到叶栅有大的头部, 可以有大的进口气流角变换范围对攻角变化不敏感, 且叶栅较大宽度, 可以抗大工作强度。

3 数值分析

本文利用本课题组开发的求解三线可压缩粘性 $N-S$ 方程组的软件对该叶栅进行数值分析。进口给定总温、总压及进口气流角; 出口给定平均背压; 采用周期边界条件; 固定壁面上满足速度无滑移条件, 并采用壁面函数模拟近壁区流动。三维数值计算选用的叶栅参数为: 叶栅中径 R 为 160.10 mm, 相对栅距 \bar{t} 为 0.6176。网格剖分采用圆柱坐标系, 生成环形叶栅计算网格, 计算采用网格数 $(150 \times 60 \times 60)$ 。在叶栅的端壁、前缘、尾缘处以及吸力面、压力面附近加密网格。数值分析所采用的叶栅展弦比分别为: 0.2、0.3、0.4, 其中叶栅的中径和中径处栅距

收稿日期: 2002-04-20; 修订日期: 2002-07-20

基金项目: 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(98069819)。

作者简介: 王玉璋(1973-)男, 河北石家庄人, 上海交通大学博士生。

保持不变。为了进一步为该叶栅的应用提供可靠数据, 还对该叶栅在不同攻角和不同出口马赫数下进行吹风实验, 测量面选择叶栅叶高中部。

图 2 是展弦比为 0.2 时后加载叶栅在根部、中部和顶部叶栅表面上的压力分布情况。从图 2 中可见, 该叶栅在约 50% 轴向弦长以前压降小, 而在后半部分折转大, 压降增大, 加速快, 做功量大, 符合后加载叶栅的设计思想。叶栅在后部加载虽然要经受很大的从压力面到吸力面的压力差横行流动增强, 但由于流程短和较大的加速削弱了边界层, 在通道涡核未形成时流动已出了叶栅通道, 从而拟制了叶栅通道内的边界层损失与二次流的发展, 降低叶栅的三维总损失。从图中还可以看到叶栅出口处相应点压力自叶顶到叶根降低, 引起该现象的原因是由于离心力和流动速度降低。

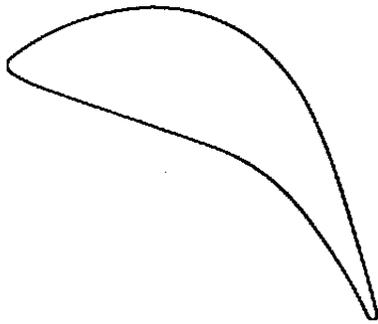


图 1 新设计的后加载叶型

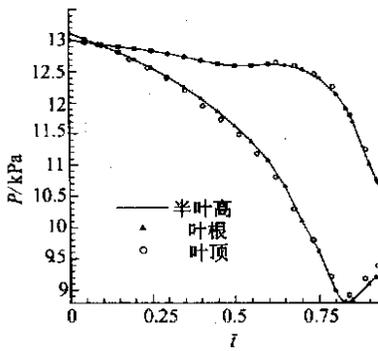


图 2 叶栅根部、中部和顶部表面的压力分布图(展弦比 0.2)

了叶栅通道, 由此后加载叶栅在整个叶栅通道内未形成通道涡, 但可以看出有二次流效应带来损失。在离端壁较远处的损失只有叶栅表面边界层带来的损失, 其值较小。可见后加载叶栅即使在展弦比为 0.2 时, 该叶栅主流区内损失的仍然很小, 与一般叶栅在高展弦比情况下损失的分布相当, 具有良好的气动性能, 整体有相对较小的损失, 是一种可在极小

图 3 为叶栅的中径和中径处栅距保持不变时计算出的三种展弦比情况下叶栅出口处节距平均总压损失系数沿叶高的分布曲线。从中可以看出在近端壁处由于端壁和叶栅边界层与二次流的共同作用使得损失很大。尽管在叶道内从压力面到吸力面的压力差横行流动增强, 但由于流程短和较大的加速削弱了边界层, 在通道涡核未形成时流动已出

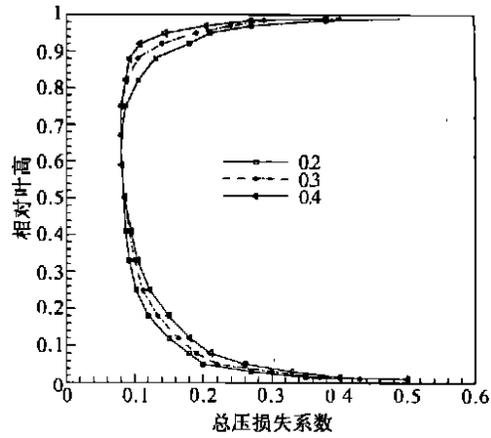


图 3 三种展弦比下叶栅出口处的节距平均总压损失系数沿叶高的分布

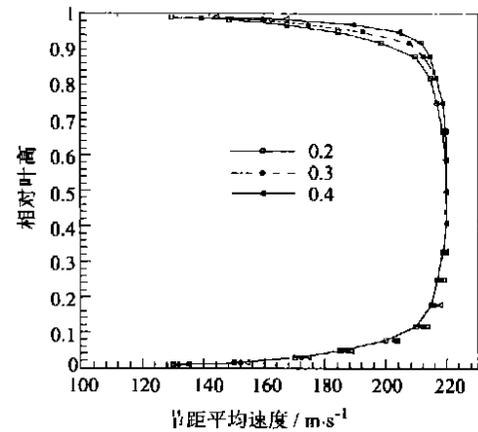


图 4 三种展弦比下叶栅出口处的节距平均绝对速度沿叶高的分布

对主流区有所影响, 总的来说当展弦比增大时端壁边界层对主流区的影响相对减小, 叶栅的总损失减小。图 4 所示为三种展弦比下叶栅出口周向平均绝对速度沿径向的分布。可见叶栅出口所达到的最大速度相同即都有相同的最大出口马赫数, 出口周向平均绝对速度沿径向分布规律相近。

4 实验分析

为了得到该叶栅可靠的结果, 本文还在平面叶栅风洞上对该叶栅进行了吹风实验。实验叶栅的叶高为 50 mm 的直列叶栅, 实验工况是分别在进气角为 80°、85°、90°、95° (设计进气角为 90°), 以及出口马赫数分别为设计值 0.671 7、+0.1、-0.1。

图 5 是叶栅在不同进气角和出口马赫数条件下半叶高处的型面压力系数分布图。从图中可以看到

展弦比情
况下降低
叶栅二次
流损失的
有效方法。
从图中还
可以看到
展弦比
为 0.3、
0.4 时在
半叶高以
上总压损
失系数明
显减小,
而在半叶
高以下却
略微有所
增大, 这
由于本文
计算采用
保持中径
不变当展
弦比增大
时叶根处
通流面积
减小导致
壁面边界
层内流动

角和该后加载叶栅的型面压力系数分布在设计工况下与设计数值计算的预测值吻合的很好。从不同的进口气流角的型面压力系数分布图可

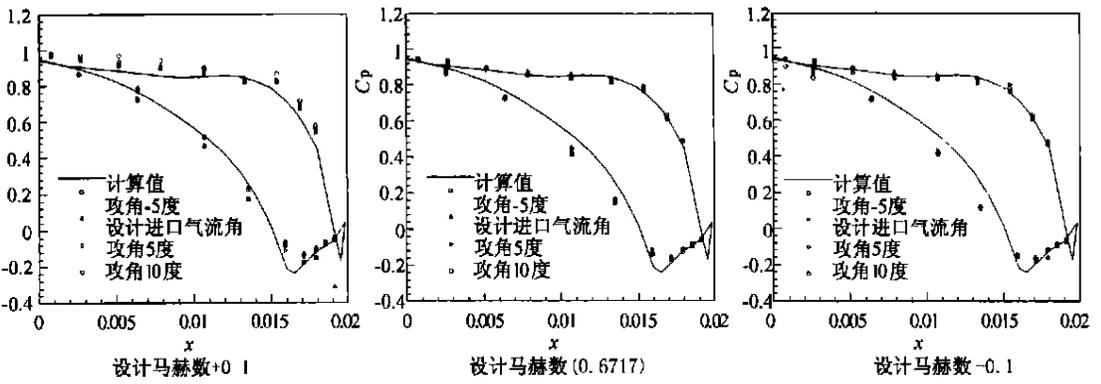


图5 叶栅在不同进气角和出口马赫数条件下半叶高处的型面压力系数分布图

以看到冲角不大的情况下叶栅型面压力系数的分布变化不大,当马赫数增大时压力系数相应增大,马赫数减小时压力系数也减小,但总的在不同的马赫数下压力系数的分布与设计工况下压力系数分布吻合还是比较好的。

该后加载叶栅的平均出口气流角和平均型面损失系数在不同的出口马赫数下随进口气流角变化的关系图,如图6所示。从图中我们可以看到平均出口气流角和平均型面损失系数受出口马赫数变化的影响比较小。平均型面损失系数随攻角变化很小,这说明后加载叶栅有很好的攻角适应性。平均出口气流角却随进口气流角的变化有一定的变化,但变化不大,在设计进口气流角和略有一点正冲角的情况下出口气流角与设计值吻合的比较;在正冲角比较大时出口气流角偏小,恰好相反在负冲角下出口气流角增大。这样就是有较大攻角的情况下出口气流角变化不大,因此也降低了尾迹对其叶道内流动的影响。

5 结论

(1) 通过数值分析和实验结果可以看出设计的后加载具有很好的气动特性,后加载技术应用到极小展弦比叶栅中也可以有效的降低二次流损失,提高叶栅流动效率,且有高的工作强度,为把后加载技术应用到设计性能优良的极小展弦比叶栅提供了可靠的依据。

(2) 分析结果表明展弦比的大小对后加载叶栅通道内的流动有一定的影响,当叶栅的展弦比很小时叶栅端壁边界层对叶栅通道内流动有较大的影

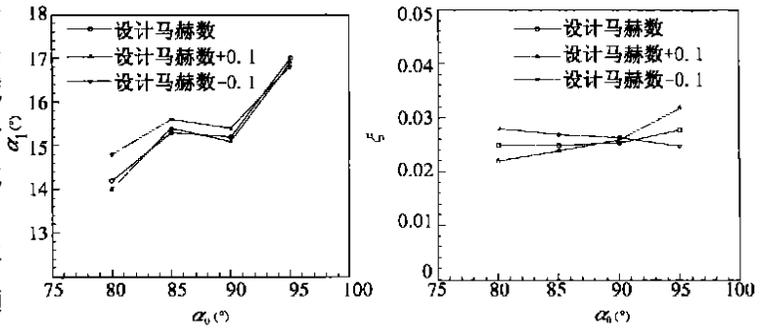


图6 平均出口气流型面损失不同的进口气流角及出口马赫数的变化关系图

响,叶栅端壁边界的损失所占的比例也相应增大,导致整个叶栅的效率降低,但当展弦比大到一定程度后展弦比对叶栅通道内流动的影响变的很小。

本文设计的极小展弦比后加载叶栅已成功地应用到大功率火箭发动机氧涡轮中,达到了预期设计的目标。

参考文献:

- [1] 蒋洪德,徐星仲,朱 斌,等.叶轮机数值计算与设计方法进展及其在汽轮机中的应用,第二部分:汽轮机通流部分若干关键技术开发及工业应用[J].工程热物理学报,1998,19(4):433-438.
- [2] 徐星仲,朱 斌,蒋洪德,等.一种“后部加载”型透平静叶的设计[J].工程热物理学报,1997,18(1):48-52.
- [3] MARCHAL P, SIEVERDING C.H. Secondary flows within turbomachinery bladings[R]. AGARD-CP-469 1977.
- [4] DOSSENA V, PERDICHIZZIA, SAVINI M. The influence of endwall contouring on the performance of a turbine nozzle guide vane[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121: 200-208.
- [5] 宋彦萍,芦文才,王仲奇,等.新型的汽轮机后加载叶型的研究[J].哈尔滨工业大学学报,1999,31(2):55-57.

(辉 编辑)

is necessary to conduct a more thoroughgoing research on a reference environment model. **Key words:** exergy, environmental impact, pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC), emissions

水煤膏压力泌水特性与可泵性分析 = **Coal-water Paste Water-seeping Properties under Pressure and Its Pumpability** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), ZHANG Ming-yao (Thermal Energy Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 78 ~ 81
Water-seeping properties of coal-water paste (CWP) under pressure are studied experimentally with the influence of particle size distribution and water content, etc on the pumping properties of CWP being analyzed. In conjunction with a CWP slump index proposed is a pumpability evaluation index of the CWP. It is found that the pumpability of the CWP can be featured by two indexes, namely, the slump and the total quantity of water seeping under pressure. The CWP with a good pumpability has a slump in the range of 8 - 24cm. The corresponding relative water seeping rate and water seeping quantity are respectively $S_{10} \leq 40\%$ and $V = 70 - 110$ ml. **Key words:** coal-water paste, water seeping under pressure, pumpability

下降液膜流动模型及稳定性分析 = **Model of a Falling Liquid-film Flow and an Analysis of Its Stability** [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, HU Zhi-hua, SUN He-dong, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 82 ~ 85

A sound mathematical model has been set up for the film flow of a free falling liquid. Boundary layer theory was used to analyze and simplify the model, securing a second-order boundary-layer model for the liquid-film flow. A stability analysis of this model was performed. Through calculations the wave growth rate of the falling liquid film and a neutral stability curve were obtained. The comparison of the calculation results with those of other models has confirmed that the second-order boundary model offers better prediction effectiveness and its form is more suited for performing further a nonlinear analysis. **Key words:** liquid film, boundary layer, wave, growth rate, neutral stability

后加载技术在极小展弦比叶栅中的应用 = **The Use of Rear-loading Technology in Ultra Low-aspect Ratio Cascades** [刊, 汉] / WANG Yu-zhang, WANG Yong-hong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHAO Ya-fang, FENG Zhen-ping (Turbomachine Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 86 ~ 88

Through the use of turbine blades with a rear-loaded load profile one can effectively control the formation of secondary flows in the blade passage, reducing secondary-flow losses. Meanwhile, this type of cascades is highly adaptive to a variety of incidence angles, thus significantly enhancing the flow efficiency in a cascade passage. An ultra low-aspect stator cascade with rear-loaded characteristics was designed by using the rear loading technology. The results of numerical analysis and test of the above-mentioned cascade indicate that the latter features a low three-dimensional cascade loss. Moreover, the cascade performance hardly changes with the change of aspect ratios, incidence angles and outlet Mach numbers. **Key words:** rear-loading technology, aspect ratio, secondary flow, cascade test

凝汽器铜管的联合保护研究 = **A Study of the Combined Protection of Steam Condenser Copper Tubes** [刊, 汉] / ZHU Zhi-ping, YANG Dao-wu (Chemistry Department, Changsha Institute of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410047) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 89 ~ 92, 96

The corrosion and protection of condenser copper tubes has always been a problem people are keenly concerned with but for which there still lacks a satisfactory solution. The complicated operating conditions of the copper tubes, variegated types of their fabrication material and the increasingly deteriorating quality of cooling water have led to a multitude of corrosion forms. In view of the above the authors have explored a combined protection method for condenser copper tubes.