

涡轮高载荷动叶片设计及级三维流场数值分析*

周凡贞^{1,2}, 王世勇², 丁晓娟², 冯国泰¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈电发电设备国家工程研究中心有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 针对一个涡轮的典型级, 减少动叶片的数 18 只, 采用参数化叶型法重新成型三维叶片的五个截面叶型, 用 Fluent 分别对各截面进行粘性 S1 正问题流场分析计算, 然后将 5 个截面沿径向以各截面的重心积迭形成三维叶栅。对新成型的叶栅和原叶栅组成的涡轮级分别进行三维粘性流动分析, 表明新设计的叶栅叶片载荷增加 15%, 而效率基本保持不变。

关键词: 涡轮; 高载荷涡轮; 叶片; 数值分析

中图分类号: V232.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 01-0062-04

Design and 3-D numerical analysis of highly loaded turbine rotor blade

ZHOU Fan-zhen^{1,2}, WANG Shi-yong², DING Xiao-juan², FENG Guo-tai¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;
2. Power Equipment National Engineering Research Center, Harbin 150040, China)

Abstract: For a typical turbine stage, with a reduction of 18 for the rotor blades. Five sections of the blade were reconstructed respectively by adopting the parametric blade design method, and the computations of viscous blade-to-blade flow were also carried out respectively by FLUENT commercial software package. The blade was stacked by the center of gravity in radial direction with five sections. Three-dimensional flow analyses were carried out to compare the flow field characteristic between the new highly loaded rotor blade turbine stage and the conventional one. It is found that the blade load is increased by 15% and the stage efficiency is basically maintained.

Key words: Turbine; Highly loading turbine; Blade; Numerical analysis

1 引 言

对于叶轮机械, 叶片节距的选择对于优化叶片数和降低制造成本是非常重要的。高载荷叶片一直在高压比的燃气轮机中进行研究和应用, 其导致较大的流动折转和较高的出口马赫数。另外, 在通过减少叶片数或叶栅稠度来增加每只叶片的气动载荷方面也进行了研究, 其目的是在不破坏性能的情况下减小涡轮重量和成本。

许多学者对高载荷叶片叶栅的流动特性及其与损失产生的机理进行了研究。Hashimoto and Kimura^[1]研究了用前加载叶栅来减少叶片数, 结果表明没有增加能量损失。他们的叶片与后加载叶片相比有

较小的损失系数。Weiβ and Fötter^[2]对具有相同载荷但却有不同的载荷分布的前加载和后加载两种高载荷叶栅的内部三维流动进行了试验研究, 试验结果的计算表明, 前加载叶栅产生了较大的二次流损失。Curtis 等人^[3]进行了另一项试验研究, 为航空发动机的低压部分开发了一种高载荷叶片, 减少叶片数 20%。这些文章讨论了与已知叶片相比具有较高的载荷的新叶片的损失、重量和成本。

近年来, 将燃气轮机高载荷叶片的概念应用于大功率汽轮机的研究主要是由 Kiyoshi Segawa^[4,5]等人进行的, 采用的方法主要是 S1 正问题设计、平面叶栅试验^[4]及反问题叶型设计、二维及三维级粘性流场分析及空气透平模型试验^[5]; 文献[6]也对汽轮机采

* 收稿日期: 2003-04-18; 修订日期: 2003-06-16。基金项目: 国家“九七三”资助项目 (G1999022307)。

作者简介: 周凡贞 (1965—), 男, 博士, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail: zhoulz@hpec.com

用高载荷叶片和大焓降级的机理及其意义进行了探讨。文献[4~6]指出,传统的高中压汽轮机叶片数可减少 15%,而级性能不降低,是减少部件数量从而减少制造成本的有效途径。

2 叶型参数化及设计

叶型参数化,即用若干个设计参数描述叶型。要求达到用较少的设计参数确定出定性合理、可变性较大的叶型。设计参数越多,叶型可变性越大,但优化计算工作量也越大。

本文的叶片设计中,叶片的基本形状是根据 Pritchard 的 11 参数法^[7]设计,如图 1。该参数化叶型法是把叶型分为前缘、内弧和背弧三条曲线,根据叶片数 Z ,叶型截面半径 R ,前缘小圆直径 D_1 ,尾缘小圆直径 D_2 ,弦长 L (或轴向弦长 B),安装角 β_y ,前楔角 W_1 ,尾楔角 W_2 ,后弯角 δ ,进口几何角 β_1 ,出口几何角 β_2 等 11 个叶型基本参数,确定叶型内弧的两个端点,背弧的两个端点和一个内点,共 5 个叶型点。叶型的内弧和背弧,采用多点 Bezier 曲线构成,前缘部分采用圆弧。这种方法的几何意义明确,但设计者除了这 11 个基本参数没有其他的修改曲线的自由度,同时多项式曲线也难以避免拐点的存在。

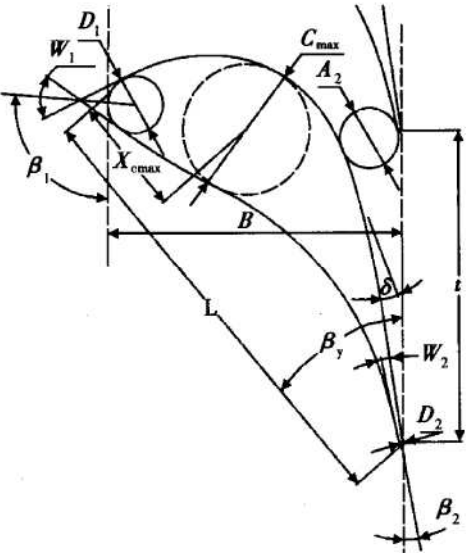


Fig. 1 Blade geometric parameters

叶型的设计是根据以上参数化方法编制的具有良好用户界面的叶型编辑程序来进行的,可以直接用鼠标操作叶型上的控制点来改变叶型,除基本控制点外,可以增减控制点来成型所希望的叶型。

本文高载荷叶片的设计,是以某一涡轮级为基型。动叶片的主要几何特性参数见表 1,重新成型相

对叶高 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 五个截面。由于是设计与原叶型相比能够减少叶片数 15% 的新叶型,考虑到叶片载荷增加引起的叶片强度方面的要求,在本文新叶片各截面成型过程中,保持叶型的最大厚度不小于原叶型;同时保持各截面的喉部尺寸与原叶型相等;在本文不讨论叶型的攻角特性,叶型的进口几何角也与原叶型保持一致。另外,考虑到是冲动式动叶扭叶片,新设计的叶片各截面三维成型是在 UG 上以叶型的型心沿辐射线径向积叠的。

Table 1 Geometry parameter of the moving blade

Parameters	Rotating speed/(r/ min)	Blade number	Aspect ratio	Height of the blade/ mm	Mean diameter/ mm
Conventional	3000	128	0.3604	111	1061
Highly loaded	3000	110	0.3604	111	1061

3 基于 S1 流面正问题的叶型气动设计

通过以上参数化几何成型的各截面叶型,使用 FLUENT 软件,进行 S1 流面的粘性流动分析计算。根据计算结果分析流场特点、计算各叶栅的总压恢复系数和能量损失系数。如果不满足要求,再通过调整叶型的几何参数,重新获得流场图景和叶栅的损失,这样反复直到获得具有令人满意的气动性能的叶型几何参数。

采用该方法设计的叶型的气动性能优劣和设计时间的多少,相当大的程度上决定于设计者对 S1 流场的物理特性的理解,如通过叶片表面静压(或等熵马赫数)分布、速度矢量图、静压(或马赫数)等值线判断其对叶栅流动性能的影响。

计算的进出口参数是以 S2 多级计算沿叶高的参数分布取定的,有着较大的正攻角。在本文中,仅对根、中、顶三个截面进行分析讨论,计算的进出口气动参数见表 2。以根部为例的原叶型和新设计的高载荷叶型的比较示于图 2。原叶片、最终设计的高载荷动叶片、以及除减少叶片数外其他基本参数保持与原叶片一致的情况下新设计的高载荷动叶片,根、中、顶三个截面的静压系数分布如图 3,图 4 和图 5。压力系数为叶型表面的当地静压 p 与进口总压 p_0 的比值 p/p_0 ,横坐标为距前缘额线的距离 X 与轴向弦长 B 的比值,即相对轴向弦长 X/B 。由图可知,除减少叶片数外其他基本参数保持与原叶片一致的情况下,新设计的高载荷叶片的各截面的逆压梯度值和所占的轴向长度比例都有很大的增加,这将导致很大的叶栅损失。其原因是在保证喉部尺寸不变的情况下,减

少叶片数将引起型线背弧较大的变化,特别是背弧斜切部分的长度增加和曲率变小。得出的设计经验是,适当减少叶片参数化成型时的安装角和调整后弯角,同时通过控制点调整背弧曲率,特别是背弧斜切部分的曲率。通过改变参数化成型基本参数,如安装角、后弯角等,得到的最终高载荷叶片;其各截面的逆压梯度区都缩小,最低压力点沿背弧后移,有效地控制的流动分离,使最终设计的高载荷叶片有着与原叶片相当的损失系数。说明可以经过精心调整叶型的几何参数,设计出性能优良的高载荷叶片。

Table 2 Aerodynamic parameters on inlet/ outlet

Parameters	Root section	Middle section	Top section
Inlet total pressure/ Pa	1 085 500	1 069 900	1 093 200
Inlet total temperature/ K	542	539	542
Inlet flow angle/ (°)	25.14	19.87	41.63
Incidence angle/ (°)	11.2	25.39	8.097
Outlet geometry flow angle/ (°)	18.685	18.099	18.163
Outlet static pressure/ Pa	998 300	999 900	980 600

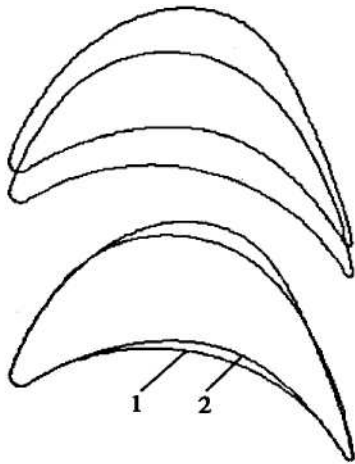


Fig. 2 Blade configuration on root section

1—Conventional; 2—Highly loaded

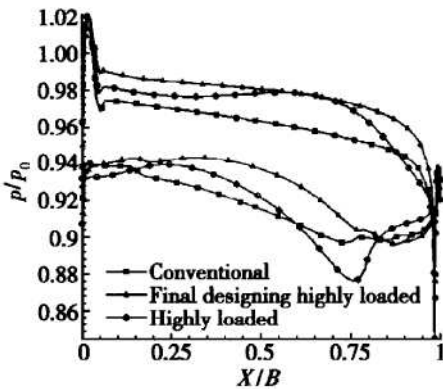


Fig. 3 Blade surface pressure on root section

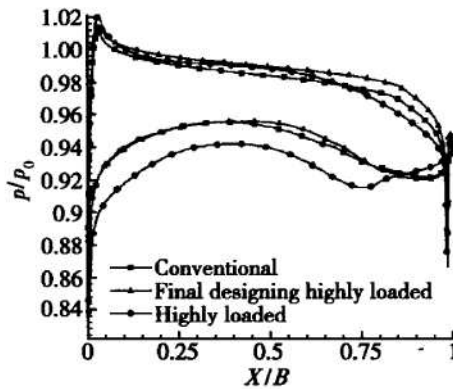


Fig. 4 Blade surface pressure on middle section

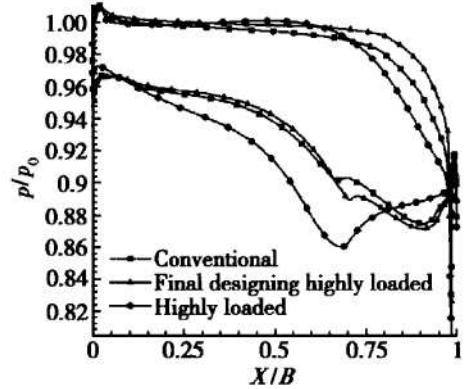


Fig. 5 Blade surface pressure on top section

由图可知,叶片数减少后,各截面的载荷明显增加,特别是根部截面;并且由于叶栅槽道的相对收敛性增强,使叶栅呈现后加载特性增强的特点。图3所示最终设计的高载荷叶片根部截面的压力面和吸力面压力都明显增加,但吸力面上的最低压力点上的压力值基本一致;减少叶片数前,吸力面上的压力在73%轴向弦长达到最低压力值,之后到85%轴向弦长压力基本上为恒定值,使吸力面上的转捩区变长,易于产生大的损失,从85%轴向弦长到出气边压力变化呈逆压梯度;减少叶片数后,吸力面上的流动一直加速到88%轴向弦长达到最低压力点,之后扩压,逆压梯度与减少叶片数前相当。表明减少叶片后与减少叶片数前相比,根部截面的流动性能得到了改善。图4和图5所示,减少叶片数后,吸力面上的最低压力点稍有降低,但其位置基本上没有变化,表明减少叶片数后叶栅性能没有恶化,至少与减少叶片数前相当。由此可知,整个叶片的性能减少叶片数后有所加,表明原叶栅的相对栅距用的偏小,完全可以减少叶片数14%,而不使叶栅的流动性能变坏。

4 全三维级流动分析

本文数值计算采用 NUMECA 商用软件包,求解三维定常 Navier-Stokes 方程组。采用空间中心差分格式,四步龙格-库塔法时间推进,BL代数湍流模型求解定常流场,对改型前后的动叶片级进行三维粘性计算。静动叶栅的计算网格采用 AUTOGRID 模块自动生成,用 IGG 模块进行连接。两种级方案的静叶栅采用完全相同的网格拓扑结构和网格点数,而动叶栅采用相似的网格拓扑结构和相同的网格点数。 i, j, k 分别为周向、展向和轴向的网格点数。静动叶栅网格

皆为 $i \times j \times k = 49 \times 65 \times 145 = 461825$, 整级的网格点数为 923650。为加速收敛, 计算时采用多重网格。计算时取进口均匀轴向进气, 出口给定节圆直径上的静压, 计算的级气动参数列于表 3。

Talbe 3 Aerodynamic parameters for computation

Inlet total pressure/ Pa	Inlet total temperature/ K	Outlet static pressure/ Pa	Specific heat ratio	Rotational speed/ (rad/ s)
0.12160×10^7	578.20	0.98401×10^6	1.3384	314.16

由三维计算得到的改进前后动叶片根、中、顶三个截面的表面静压系数分布如图 6, 图 7 和图 8, 表明

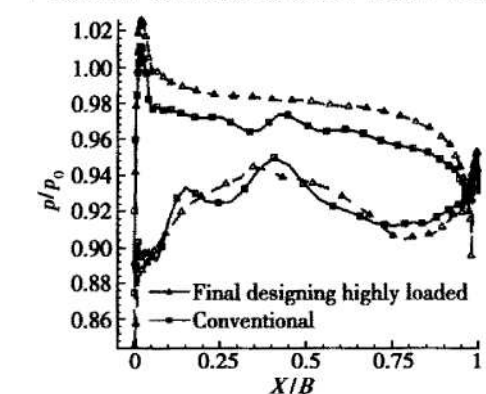


Fig. 6 Blade surface pressure on root section

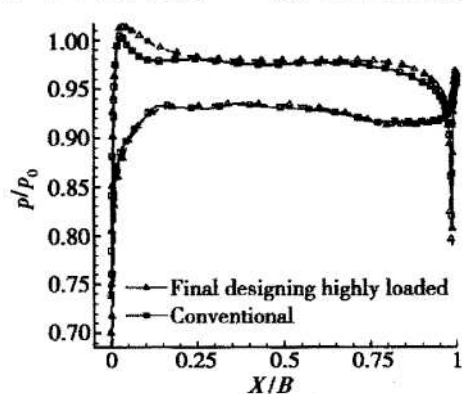


Fig. 7 Blade surface pressure on middle section

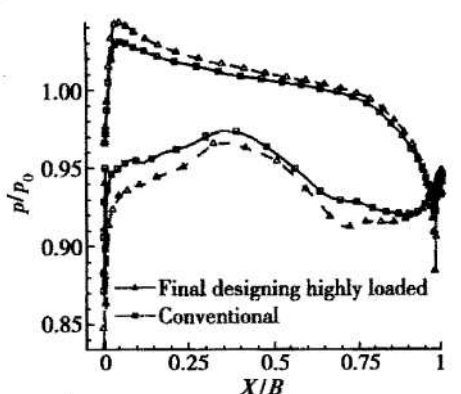


Fig. 8 Blade surface pressure on top section

5 结 论

(1) 由正问题方法最终设计成性能良好的高载荷动叶片, 需要进行大量的方案计算比较, 非常的耗时, 且最终满意的叶型不一定是最佳。但它确实是最常规、最直接的方法, 特别是针对已有的叶片改型设计。

(2) 叶片数减少导致叶栅的横向二次流增强, 但合理设计叶型, 使背弧上的最低压力点尽可能后移, 逆压梯度区的大小和梯度值尽量小, 将能充分抑制流动的分流, 不至于引起较大的损失。同时由于叶片数的减少, 使叶片表面的摩擦面积减小, 摩擦损失减小, 尾迹损失也减小。

(3) 减少传统典型级的动叶片数, 增加单只动叶片的载荷 14%, 经三维计算结果表明, 应用最终设计的高载荷动叶片, 级效率基本保持不变; 说明通过应用现代气动设计的最新成果, 原典型级的动叶片数可以减少, 相对栅距可以增大 14%。

(4) 叶片数减少, 将有助于在保持效率基本不变甚至有所提高的情况下, 降低涡轮的重量和制造成本。

参考文献:

[1] Hashimoto K, Kimura T. Preliminary study on forward loaded

载荷明显提高, 吸力面和压力面的压差增大, 特别是在根部和顶部截面, 这表明叶栅的横向二次流变强。高载荷叶片的根部截面的逆压梯度区稍微有些减少, 但梯度值变大; 顶部截面的逆压梯度区增大, 但梯度相对平滑。三维级计算结果表明, 整个级效率基本保持不变, 即常规动叶片级的等熵效率为 91.585%, 而高载荷动叶片级的等熵效率为 91.49%。这是因为叶型设计相对合理, 引起的二次流损失增加不大; 同时由于叶片只数的减少, 叶片的壁面摩擦损失和尾迹损失都有所减少。

cascades designed with inverse method for low pressure turbine [R]. ASME 84-GT-65.

[2] Weiß A, Fötter L. The influence of load distribution on secondary flow in straight turbine cascades [R]. ASME 93-GT-86.

[3] Curtis E M, Hodson H P, Banieghbal M R, et al. Development of blade profiles for low pressure turbine applications [R]. ASME 96-GT-358.

[4] Kiyoshi Segawa, Yoshio Shikano, Kuniyoshi Tsubouchi, et al. Development of high loaded rotating blade for steam turbines [C]. 1999 Joint Power Generation Conference, ASME 1999.

[5] Kiyoshi Segawa, Yoshio Shikano, Kuniyoshi Tsubouchi, et al. Performance verification of a high loaded steam turbines blade [C]. JPGC2001/PWR19125, Proceedings of JPGC' 01, 2001 International Joint Power Generation Conference, 2001, New Orleans, Louisiana.

[6] 周凡贞, 蒋洪德, 冯国泰. 汽轮机采用高载荷叶片和大焓降级的初步探讨 [J]. 汽轮机技术, 2002, 44(1).

[7] Pritchard L J. An eleven parameter axial turbine airfoil geometry model [R]. ASME 85-GT-219, 1985.

(编辑: 梅 瑛)