

考虑变比热的冷却涡轮弯曲叶栅流场的数值模拟

(哈尔滨工业大学) 陈 浮 杨 科 王仲奇

[摘要] 对采用弯曲叶片的某型高压涡轮导向器有/无冷气喷射时的栅内流场进行了数值模拟。应用了以冷气源项反映冷气掺混影响的三维变比热计算方法。结果表明, 弯曲叶栅内的冷气喷射导致了马赫数和温度的变化; 叶片表面和端壁得到有效的低温保护; 在相同冷气流量下, 压力面附近温度降低较吸力面明显, 冷却气膜的作用也更为有效; 栅内二次流对冷气分布有影响。

关键词 弯曲叶栅 气冷涡轮 数值模拟 变比热

中图分类号 V231.3

1 前言

目前, 国内外先进航空发动机正通过在高压涡轮中采用弯曲叶片和增加涡轮入口燃气温度相结合以提高性能^[1], 这需要应用冷却技术对高温部件实施保护, 美国 IHPDET 计划已将带冷却的弯曲叶片用于核心机 XTC16^[2]。但冷却空气的加入将引起气动损失增加, 尤其是当冷气量达到主流流量的百分之十几, 甚至百分之二十以上时^[3], 它对涡轮性能的影响更为显著。因而气冷涡轮弯曲叶栅流场研究越来越重要。

本文通过求解考虑冷气掺混影响的双曲守恒型方程, 对采用弯曲叶片的某型高压涡轮导向器有/无冷气喷射时的流场进行了数值模拟, 研究了多冷却方式, 大冷气流量对弯曲叶栅气动性能和冷却效果的影响。此外, 考虑到该型涡轮在较大温度范围内工作, 且燃气主流与冷却空气之间的温差很大, 比热的变化对流场气动参数的影响将十分明显。因此, 在计算中采用了变比热方法。

2 数值方法

2.1 基本方程及差分格式

将喷射冷气作为在流场掺混区中按一定规律连续分布的“质量源”^[4], 设其为密度 m_c 。将文献

[4] 中通用形式的控制方程转换到任意曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 中, 推导出在冷气干扰下的双曲守恒型三维控制方程:

$$\partial \bar{U} / \partial t + \partial \bar{E} / \partial \xi + \partial \bar{F} / \partial \eta + \partial \bar{G} / \partial \zeta = \bar{S}$$

式中仅 \bar{S} 项含有冷气参数, 且 \bar{S} 可表示为:

$$\bar{S} = J \cdot \begin{bmatrix} m_c - \rho v / r \\ m_c u_c - \rho u v / r + f_z \\ m_c v_c + \rho [(w + \omega r)^2 - v^2] / v + f_r \\ m_c w_c - 2\rho (w + \omega r) + f_\phi \\ m_c (h_w^*)_c - (e + p) v / v + \rho \omega^2 v \gamma \end{bmatrix}$$

\bar{U} , \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} 的表达式与不考虑冷气影响时的形式相同^[5], J 为雅可比行列式, h_c^* 是冷气的相对滞止焓, ω 是叶片旋转速度, e 为单位体积气体总能, u , v , w 和 f_z , f_r , f_ϕ 是速度向量和单位质量流体粘性应力张量的柱坐标 z , r , ϕ 方向分量。

由于上述方程只有右端源项 \bar{S} 含有冷气参数, 因而可以采用常规未计及冷气影响的双曲守恒型方程的求解方法及边界条件。本文运用 Bean - Warming 近似因子分解技术和高分辨率、三阶精度 Godunov 格式^[6] 对通量项进行差分。质量源密度 m_c 的确定参见文献 [7]。

2.2 变比热计算

定比热计算中, 认为比热是与温度无关的常数, 其值可以选取某一温度 (如平均温度、状态的起始或终止温度) 的比热值。但当起始或终止温度的差异较大时, 比热值的差异也较大, 定比热计算无疑降低了计算的准确性。如果再考虑到气冷涡轮中燃气主流与冷却空气之间的温度差较大, 采用变比热计算就显得十分必要。

本文中作者在求解气动热力参数时, 比热随温度变化, 即任意一个温度都有与其对应的热力参数; 在气动计算时, 气动参数函数关系通过积分关系表达。

3 数值模拟结果分析

图 1 为弯曲叶片立体图和冷却方案示意图, 表 1 给出了冷气流量比和计算流量。由于该型涡轮入口处最高温度达 2000 K, 因而用于冷却保护的冷气量较大, 总冷气流量比为 14.94%, 这要求设计中必须综合考虑冷气对涡轮性能的影响和冷却效果。

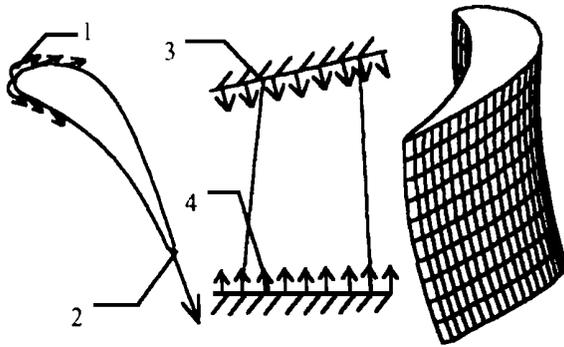


图 1 冷却方式示意图及叶片立体造型图

表 1 冷却方式及冷气流量与涡轮入口流量比

冷却方式	1	2	3	4
冷气流量比 (%)	9.09	3.07	1.39	1.39
总冷气流量比 (%)	14.94			
计算流量 (kg/s)	无冷气喷射		有冷气喷射	
	$G_n = 88.08$		$G_c = 83.44$	
$(G_n - G_c) / G_n$	5.26%			

表 1 表明, 由于叶片前缘温度最高, 因而冷却空气量最大。此外, 冷气加入所形成的冷却气膜相当于叶型局部有所增厚, 端壁位置变化, 从而导致通流面积减小, 在入口边界条件不变的情况下, 涡轮入口主流流量明显减少。因此, 如果要求保证气冷涡轮气动性能的话 (如流量、做功量等), 在设计中必须考虑上述因素。

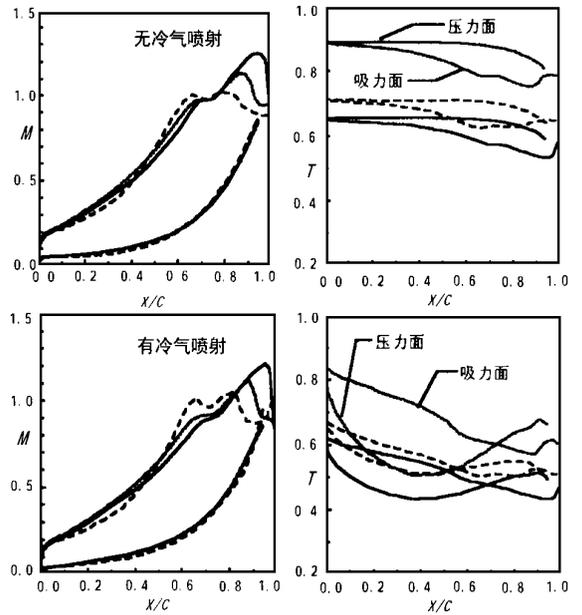


图 2 型面附近马赫数和温度比较 (—叶根, ...中径; ——叶顶)

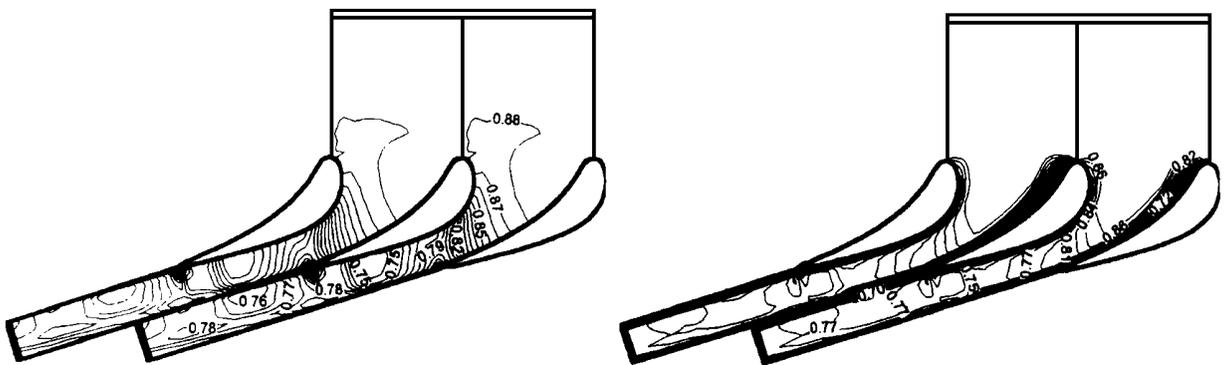
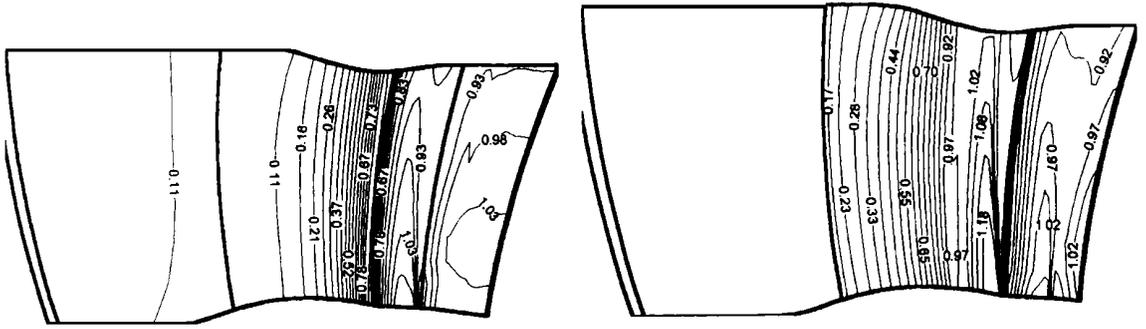


图 3 中径处 S_1 流面温度分布比较 (左, 无冷气喷射; 右, 有冷气喷射)

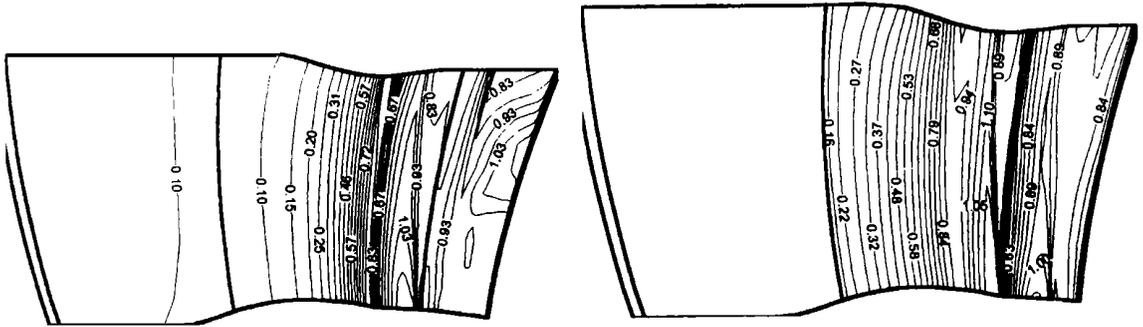
3.1 型面附近气动参数比较

从图 3 可以看出, 由于冷气与主流之间存在动量差别, 它们的掺混导致了压力面上马赫数略微降低, 吸力面上扩压段之前马赫数有所降低, 其后略微升高, 即冷气喷射可能加强激波。温度分布表明, 冷气喷射显著降低了型面附近温度; 压力面温

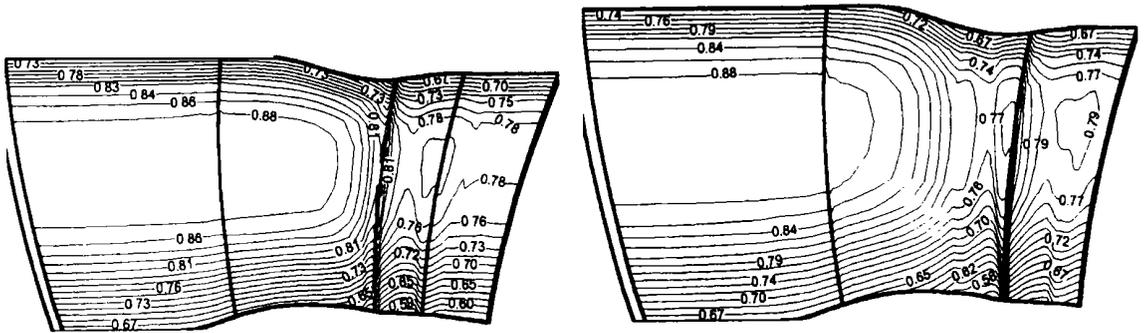
度降低远超过吸力面, 这说明如果在计算中将用于冷却前缘的冷气量平均分配在压力面和吸力面上, 压力面上的气膜冷却作用更为有效。此外, 压力面上存在最大温度降低值, 超过该值对应的位置, 温度降低程度下降, 这表明了冷却气膜的有效存在范围, 超过该位置, 冷却效果变差; 吸力面上则没有



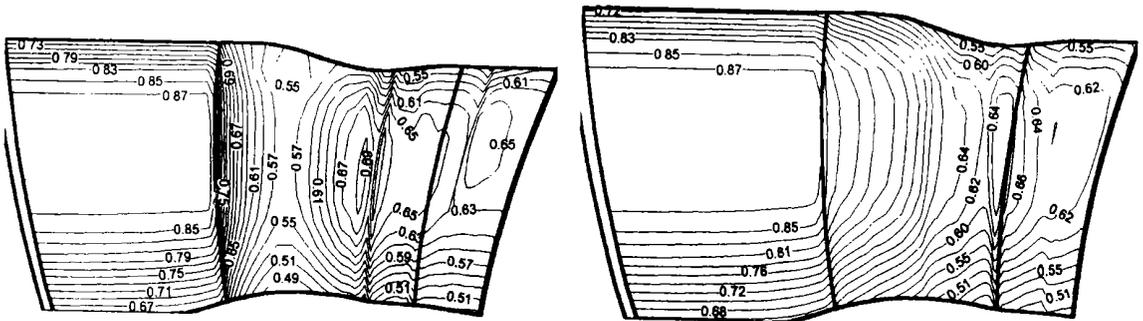
(a) 无冷气喷射时压力面和吸力面 S_2 流面马赫数分布



(b) 有冷气喷射时压力面和吸力面 S_2 流面马赫数分布



(c) 无冷气喷射时压力面和吸力面 S_2 流面温度分布



(d) 有冷气喷射时压力面和吸力面 S_2 流面温度分布

图 4 有/无冷气喷射时压力面和吸力面 S_2 流面马赫数和温度分布比较

这种现象, 温度单调降低, 这是由于上下端壁的冷气射流在栅内二次流作用下向吸力面方向集聚造成的。

3.2 S_1 、 S_2 流面气动参数比较

图 4 和图 5 给出的 S_1 、 S_2 流面马赫数和无量纲温度的分布情况表明, 流道中的温度明显降低, 且温度梯度变得极为平缓。最显著的变化是在叶片表面附近, 尤其是压力面附近出现的密集的低温层, 对叶片有较好的低温保护作用。由于流道中二次流的存在, 压力面和吸力面附近流动状态差别较大, 即压力面上的冷气射流易于形成存在距离较长的冷却气膜。从 S_2 流面上无冷气喷射时温度分布可以看出, 上下端壁附近为较低温度区, 中间则为高温区, 压力面附近的温度高于吸力面附近的温度。冷气喷射的影响表现为, 大部分区域内马赫数降低; 中间流面上下端壁处出现低温保护层, 压力面和吸力面附近温度降低, 叶片前缘, 尤其是压力面前缘得到较好的低温保护。压力面附近的中间区域出现显著的低温区。

4 结论

数值模拟结果表明: (1) 在入口条件不变时, 冷气加入导致通流面积减少, 涡轮入口主流流量降低; (2) 冷气与主流间的动量差使得掺混后型面附近马赫数轻微降低; (3) 叶片表面和端壁得到有效

的低温保护, 且相同冷气流量下, 压力面附近温度降低较吸力面明显, 冷却气膜的作用也更为有效; (4) 叶栅内二次流对冷气分布和冷却效果有一定影响。

参考文献

- 1 Sarpkaya T. Computational methods with vortices— 1988 freeman scholar lecture. ASME J. of. Fluids Engineering, 1989, 111 (1): 5~52.
- 2 斯坦利 W 坎德伯. Allison Core Meets 1997 IHPTET Goals. 国际航空, 1994
- 3 杨弘. 具有弯扭叶片的燃气涡轮三元设计计算方法. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 1992.
- 4 杨弘等. 涡轮冷气掺混数学模型与计算方法的研究. 航空动力学报, 1993, 8 (1): 15~18.
- 5 顾发华等. 一种求解透平叶栅三维流场的高精度 TVD 格式. 航空动力学报, 1994, 9 (1): 10~14.
- 6 Ivanov M J, Nigmatullin R Z. Implicit high order godunov scheme for numerical solution of the euler Equation. Journal of Comput. Math. and Math. Phys., 1987, 27 (2): 1725~1735.
- 7 杨弘, 陈浮, 王仲奇. 在冷气干扰下叶栅绕流的控制方程及求解方法. 工程热物理学报, 1997, 18 (3): 311~314.

作者简介 陈浮 男 1970 年生 博士, 现从事叶轮机械气动热力学方向的实验和计算研究工作, 尤其是燃气涡轮气动性能和流场结构方面的实验研究、数值计算和设计计算研究, 已发表论文十余篇。联系地址: 150001 哈尔滨工业大学热力发动机教研室。

(渠源 编辑)

—design conditions. **Key words:** design system, naval steam turbine, S_2 stream surface, three—dimensional calculation, loss

卧式内燃油和燃气锅炉的结构和设计 = **Construction and Design of Oil—fired and Gas—fired Horizontal Boilers** [刊, 中] /Gao Yukuan, et al (Harbin Municipal Labor Bureau) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2) —122~124

Discussed in this paper are the overall construction and design of oilfired and gas—fired horizontal boilers. Put forth are the requirements for the design of the furnace, tail heating surfaces and burners for such boilers. **Key words:** oil—fired boiler, gas—fired boiler, overall construction, design

汽轮发电机密封油冷却系统模糊建模与仿真研究 = **Fuzzy Model Creation and the Simulation Study of a Turbogenerator Seal Oil Cooling System** [刊, 中] /Wang Hongwei, Zhang Tong, Wang Zicai (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —125~127

The seal oil cooling system of a turbogenerator constitutes a complicated system in the simulation study of thermal power plants. After a study of the fuzzy model creation method the authors constructed a fuzzy model for a turbogenerator seal oil cooling system with satisfactory results being attained. **Key words:** fuzzy identification, fuzzy clustering, linear interpolation, Kalman filter, turbogenerator seal oil cooling system

双线圈电液转换器的可靠性分析 = **Reliability Analysis of a Double—coil Electro—hydraulic Converter** [刊, 中] /Yu DaRen, Xujiyu (Harbin Institute of Technology), Wang Hongbin, Yang Ge, Lin Bingjian (Harbin Turbine Co. Ltd.) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —128~130

A dynamic mathematical model is set up for a double—coil electro—hydraulic converter and a simulation analysis conducted of the coil broken wire fault. It is shown that the double—coil structure used for the electro—hydraulic converter of zero—steady current type can significantly enhance its reliability. **Key words:** electro—hydraulic converter, double—coil, reliability, fault tolerance

考虑变比热的冷却涡轮弯曲叶栅流场的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Cooled Turbine Curved Cascade Flow Field with Variable Specific Heat Being Taken into Account** [刊, 中] /Chen Fu, Yang Ke, Wang Zhongqi (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (2). —131~134

A numerical simulation is conducted with respect to an in—cascade flow field of a high—pressure turbine nozzle assembly of curved vanes in the case of the presence and absence of an air cooling spray. A three—dimensional variable specific heat computation method has been employed with the cooling air source reflecting the cooling air mixing/dilution effect. The calculation results show that the cooling air spray in the curved cascades led to a change in Mach number and temperature with the blade surface and end wall obtaining an effective low—temperature protection. Under the same cooling air flow rate the temperature reduction near a pressure side appears to be more marked than at the suction side with the cooling air film playing a more effective role. The in—cascade secondary flow exercises an influence on the cooling air distribution. **Key words:** curved cascade, air cooled turbine, numerical simulation, variable specific heat

旋转机械的功率在线测试技术 = **Rotating Machinery Power Output On—line Testing Techniques** [刊, 中] /Xu Jun, Li Chunlan, Lu Wenfa (Harbin 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14 (1). —135~139

The difficult problem of power output on—line measurement under unfavorable conditions can be solved by utilizing state—of—the—art science and technology. Described in this paper are the basic principles, the structure and composition of a measuring and testing system and calibration techniques with key issues and system features also pinpointed. The recommended measuring and testing system has broad application prospects. **Key words:** power output, remote measurement, on—line measurement