文章编号:1001-2060(2011)03-0280-04

气冷涡轮叶栅流场计算方法及其应用

周鸿儒, 顾忠华, 韩万金, 刘占生 (哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:基于三维 N-S方程求解,采用三阶段精度 TVD格 式以及分区算法,结合自由型曲面复杂网格生成技术,开发 了高效的冷气掺混流场计算方法。对某气冷涡轮在多种喷 气方案下的流场进行了数值模拟,指出叶片前缘喷气对叶栅 能量损失影响相对较小。叶片顶端开设离散 孔喷气方案 具 有较小的能量损失以及较好的气冷效果。所开发的计算方 法能够较好地应用于冷气掺混复杂流场的计算。

关 键 词: 自用型曲面; 多块网格; 气冷涡轮; 能量损失

中图分类号: TK263.3 文献标识码: A

引 言

深入理解气冷涡轮叶栅内的流场结构及损失机 理,发展有效的数值模拟技术,定性或定量地了解各 种参数对冷却涡轮气动性能的影响,对提高气冷涡 轮设计水平有着必然的促进作用。目前气膜冷却问 题研究都集中在冷气流动以及热传导的机理方 面^[1~4],已经对叶根、叶顶以及前、尾缘不同位置的 射流运动做了细致的研究。但是由于精确求解冷气 掺混问题需要大量的计算机资源,因此对气冷涡轮 叶栅在任意冷却方案下的流场特征以及气动性能的 数值研究还不多见。文献 [5~6] 做了叶栅多排冷 气孔的数值模拟,但是对计算资源要求较高,不适于 工程设计应用。

基于全三维 N- S方程求解,采用具有 Godunov 性质的三阶精度 TVD(TotalVariation Diminished)格 式、分区算法以及隐式多重网格算法,对具有复杂几 何外形的气冷涡轮流场进行高效、快速的求解。应 用自由型曲面技术,可以生成任意排列的冷气孔网 格,实现对气冷涡轮流场进行多种冷气喷射方案的 计算,并使之能够应用于工程设计当中。计算了叶 片前缘、压力面、吸力面、端壁以及离散孔喷气对叶 栅气动参数以及能量损失的影响,评估了各方案的 冷却效果。通过选择喷气方案,得到较好的计算 结果。 1 数值方法

1.1 控制方程

时间平均的无量纲化任意曲线坐标系下的 N— S方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{\partial G}{\partial \xi} = \frac{1}{r} (\tilde{f} + \tilde{f}) + \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\partial R}{\partial \eta} + \frac{\partial S}{\partial \xi}$$
(1)

式中: Ē Ē Ğ—无粘通量; Q R Š—粘性通量; [〔], [〔]{一源项,具体表达式见文献[7]。本研究采用具 有 TVD性质的三阶精度 Godunov有限差分格式对 方程进行离散,湍流模型采用 B— I代数模型。各 子区域之间的参数传递采用通量的线性插值,并做 守恒处理。采用隐式多重网格进行加速。在喷射孔 区设定边界条件,通过确定每一个冷气孔处的冷气 总温、流量和喷射角,补充流场内点压力,利用一维 等熵关系式确定冷气孔区的参数,详细过程见文献 [7]。

1.2 计算网格

双 3次参数样条曲面模型:

$$\begin{split} P_{i,ij}(\psi, v) &= A^{\circ} B^{\circ} C \qquad (2) \\ A &= \begin{bmatrix} F_{0}(\vartheta) & F_{1}(\vartheta) & G_{\delta}(\vartheta) & G_{\ell}(\vartheta) \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} P_{i,j} & P_{i+1,i+1} & P_{v,i,j} & P_{v,i,i+1} \\ P_{i+1,j} & P_{i+1,i+1} & P_{v,i,j} & P_{v,i,i+1} \\ P_{v,i,j} & P_{v,i,i+1} & P_{uv,i,j} & P_{uv,i,i+1} \\ P_{v,i,j} & P_{v,i,i+1} & P_{uv,i,j} & P_{uv,i,i+1} \\ \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} F_{0}(\vartheta) \\ F_{1}(\vartheta) \\ G_{\delta}(\vartheta) \\ G_{\ell}(\vartheta) \end{bmatrix} \end{split}$$

式中: $F_0()$ 、 $F_1()$ 、 $G_1()$ 、 $G_1()$ 、 $G_2()$ 、 $G_2()$ 、 $G_2()$ 3次埃尔米特基, $P_{y,i}$, P_{y,i}, $P_{y,i}$, $P_{y,i}$ 心向和 v

收稿日期: 2010-05-06 修订日期: 2010-12-20

作者简介:周鸿儒 (1963—),男,吉林公主岭人,哈尔滨工业大学博士研究生. 1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House, All rights reserved. http://www.cnki.net

向切失; P_{ay,i}—二阶混合偏导失,详细定义见文献 [8]。在曲面参数坐标内求解二维 Possion方程,生 成冷气孔网格,作为边界条件,在绝对坐标系内求解 三维 Possion方程,生成多块网格中的子区域空间网 格,网格如图 1和图 2所示。



图 1 流面网格



图 2 下端壁表面网格



图 3 节距平均能量损失沿叶高的分布

2 算例分析

2.1 计算方案

以某型涡轮静叶栅为例,在叶片表面共开设了 7排冷气孔,并在叶片尾缘开设了一条冷气缝。计 算网格结点数: H区: 89×41×41; O区: 223×7× 301; 叶片数目: 53; 进口总温: 606 K 冷气总温: 480 K 进口总压: 122 300 P 弹进口气流角: 0 出口静压: 51 600 Pa 与在哈工大低速实验台上进行的该型 涡轮导叶实验结果进行了对比,结果表明,对该型子 午扩张涡轮叶栅出口能量损失的模拟,在损失高度 以及变化趋势上与实验是吻合的,并且总损失相差 不大, 对型面参数的计算结果与实验吻合较好。文 献[9]中采用基本相同的网格拓扑结构进行了气膜 孔周围流场细节的数值模拟,给出了合理的计算 结果。

2.2 有无冷气条件下叶片表面静压的比较

本研究对气冷涡轮叶片进行了不同冷气方案的 数值计算,如表 1所示。

表 1 冷气方案比较

(%)

				, -
		涡轮进	能量损	叶表平
	冷气方案	口流量	失系数	均温度
		改变量	改变量	改变量
	无冷气	0	0	0
(1)	叶表 8排喷气	39	22.4	-24 1
(2)	叶表 8排 +端壁喷气	62	26.9	-25 0
(3)	前缘 3排 +尾缘+端壁喷气	4 3	15. 1	-22 1
(4)	(3)+端壁离散孔喷气	4 5	18.3	-23 0



图 4 叶片压力、吸力表面压力等值线

图 4表示叶片压力面和吸力面静压等值线, 图 5表示不同叶高位置型面静压的比较曲线。叶片前 缘和吸力面喷气对叶片表面压力的影响非常明显, 其中吸力面两个位置的喷气影响尤为明显。吸力面 冷气孔附近压力明显的跳动, 使得在喷气区域叶片 负荷变化非常不均匀, 这种不均匀区域在吸力面加 速段以前影响范围比较大, 如图可以看到, 在中径处 达到了约 1/3弧长, 在叶顶, 则由于冷气喷射所导致 的型面压力与无冷气喷射时相比, 在整个吸力面弧 长内都没有重合在一起。另外, 观察不同叶高吸力

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面尾缘附近喷气,可以推测出等熵马赫数的分布规 律,即叶顶尾缘附近由于冷气喷射而导致气流加速 剧烈,更容易产生激波。因此指出,由于每个冷气孔 工作条件都有所不同,冷气喷射使得叶片负荷变化 的不均匀性大大增加,会极大影响涡轮气动性能。



图 5 叶片型面静压分布

由冷气喷射所造成的另一变化就是在冷气孔排 附近形成了局部较强的顺压力梯度,对叶片表面,尤 其是对叶片吸力面径向压力梯度造成了比较明显的 影响。本研究涡轮叶型为大子午扩张,尤其是叶顶 扩张比较剧烈,这样就造成叶顶和叶根不同程度的 径向窜流,形成叶型造成的由端部指向中径的径向 压力梯度,叶顶这一径向压力梯度在冷气孔排的局 部顺压力梯度影响下受到了一定程度的削弱,根部 则基本消失,这可能会使端部损失有较为明显的增加。Adam iP等人通过实验和计算也对型面压力和 马赫数进行了描述^[3],在变化规律的细节上与本计 算结果是一致的。



图 6 4种方案下叶栅出口节距平均能量 损失系数沿叶高的分布

23 不同喷气方案条件下叶栅整体气动性能的 比较

图 6表示 4个方案下叶栅出口节距平均能量损 失比较。以方案 1叶表 8排孔损失曲线为基准,方 案 2端壁喷气后,在叶顶 15%范围以及叶根 10%范 围内,端壁喷气造成了明显的能量损失,尤其在大子 午扩张的叶顶,叶顶子无扩张造成了沿叶顶指向中 部的径向压力梯度,上通道涡的高度下降到了 70%

1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

~80% 叶高位置, 端壁掺混损失独立存在于叶顶 20%范围内, 且损失最大值已经超过了通道涡对应 的高损失峰值, 形成另一高损失区。叶根子午扩张 造成的径向压力梯度明显小于顶部, 下通道涡的高 度位于 5% ~15%范围内, 损失曲线在叶高中部 15% ~75%范围内损失没有任何变化, 说明在远离 端壁的区域不会受到端壁掺混损失的影响。

许多研究已经指出,前缘喷气处于较强顺压力 梯度区,在叶片表面大部分区域比较容易形成气膜。 在这里还指出,前缘喷气对叶栅气动性能的影响也 要比其他喷气位置小得多。此外,进口端壁喷射的 冷气一部分可以随马蹄涡吸力面分支进入通道涡, 并环绕在通道涡的外部,跟随通道涡扫过叶片端部 表面的两个三角区域,可以对那里进行一定程度的 冷却,而这一区域正是在叶片表面开设冷气孔所不 能形成有效气膜的区域。再增加叶片端部离散孔喷 气,保证叶根和叶顶的冷气量,以形成冷气对叶片表 面的完全覆盖,而气动性能不会明显下降。

3 结 论

提供有效地求解具有复杂几何外形的网格生成 方法以及流场计算方法,能够较准确地描述不同方 案冷气喷射对气冷涡轮叶栅气动参数及能量损失的 影响。与叶片压力、吸力面多排孔喷气以及端壁喷 气相比,叶片前缘喷气对叶栅能量损失的影响相对 较小,叶表温度相差不大。叶片顶端开设离散孔喷 气对吸力面通道涡区域的冷却作用比较明显,引入 的能量损失却不大。本研究计算得到了冷气量较 小,能量损失较低的喷气方案。

参考文献:

- BOHN D HEUER T Conjugate flow and heat transfer calculation of a high pressure turbine nozzle guide vane R]. AIAA-2001-3304 2001
- [2] DENNIS B H EGOROV IN GEORGE S OPtimization of a large number of coolant passages located close to the surface of a turbine bladel R. ASME Paper 2003-GT-38051, 2003
- [3] LIU CUN LANG ZHU HUI REN DU CHUN Film cooling per formance of converging slotholes with different exit entry area ration of Rl. ASME Paper 2009-GT-59002 2009.
- [4] KNOST D G THOLE K A Adiabatic effectiveness measurements of endwall film cooling for a first stage vane R]. ASME Paper 2004-GT-53326 2004
- [5] ADAMIP MARTELLIF Numerical predictions of film cooled NGV blades R. ASME Paper 2003-GT-30861 2003.
- [6] SHAPIRO JD TASLM M E Influence of cooling flow rate variation on gas turbine blade temperature distributions RJ. ASME Paper 2008-GT-50120 2008
- [7] 王松涛. 叶轮机三维粘性流场数值方法与弯叶片内涡系结构 的研究[D]. Harbin Harbin Institute of Technology 1999
- [8] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B样条[M]. 北 京: 航空航天大学出版社, 1994
- [9] 王松涛, 颜培刚, 韩万金, 等. 涡轮叶栅冷气掺 混数值模拟方法
 [1]. 航空动力学报 2003 18(4): 558-562

(编辑 伟)

新技术、新工艺

俄亥俄州利用高炉煤气的热电联产装置

据《Gas TurbineWorld》2010年7~8月号报道,俄亥俄州环境保护局正在审查 Air Products公司提出的 建造一 (利用 BFG(高炉煤气)进行热电联产装置生产许可申请。

该项目将建造并运行动力涡轮、锅炉和相关的设备,将捕获现有 AK Steel sMiddletownWorks(米德尔顿钢铁厂)的废气。

按照 Air Products公司的申请,高炉废气将用作为燃料,生产电力和蒸汽用于炼钢过程。

该装置将使用一台额定功率超过 100 MW的 GE Energy 燃气轮机和一台供给 70 MW 汽轮机的不补燃余 热锅炉;一部分高炉煤气还将作为热源驱动辅助锅炉,产生蒸汽作为备用汽源。

投入运行时,两台发电机组将生产约 105 MW功率的电力。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net.

condition for fault diagnosis rules in assigning weights the demerits existing in subjectively assigning weights were overcome thereby weakening the influence of uncertainties in the process of fault diagnosis and reasoning. Then the weighted fuzzy logic was used to perform a reasoning of the fault diagnosis rules and identify the faultmode ac cording to the result of the reasoning. The above mentioned method not only fully utilize frequency spectrum characteristics an important fault sign as a preliminary basis for judging the fault diagnosis but also comprehensively utilize the fault signs in various types which reflect the information of the fault in various aspects thereby achieving the aim of more accurately identifying a fault Key words steam turbine unit vibration main element analysis clustering analysis rough set weighted fuzzy page fault diagnosis

气冷涡轮叶栅流场计算方法及其应用 = M ethod for Calculating the Flow Field in an A in cooling Turbine Cascade and Its Applications [刊,汉] ZHOU Hong ru GU Zhong hua HAN W an jin et al College of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology Harbin China PostCode 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy& Power - 2011, 26(3). -280~283

Based on the solutions to the three dimensional N— S equation, by using the TVD (total variation diminished) for mat and division a gorithm with a three order precision and in combination with the free type curved surface complex grid generation techn flue, developed was an effective method for calculating cold airmixed and diluted flow fields. A numerical simulation was performed of the flow field in an air cooling turbine with various air jet schemes and the air jet from the leading edge of the blades exercising a relatively small influence on the energy loss of the cascade was pinpointed. The air jet scheme with discrete holes drilled at the top of the blades has a relatively small energy loss and can achieve relatively good air cooling effectiveness. The calculation method developed by the authors can be applicable for calculating complex flow fields mixed and diluted with cold air. Keywords free type curved surface multibly block grid air cooling turbine energy loss

一种新型改进阈值函数的第二代小波降噪方法 = Second-generation Wavelet Noise Reduction Method Based on a New Type Improved Threshold Value Function [刊,汉] ZHAO Peng (College of Energy Source and Power Engineering North China University of Electric Power Beijing China Post Code 102206), SUN Bin LIU Tian dong (College of Mechanical Engineering Northeast University of Electric Power Jilin China Post Code 132012) // Journal of Engineering for Themal Energy & Power - 2011, 26(3). -284 ~289

In order to effectively eliminate the noise contained in mechanical fault signals and extract relevant fault characteris tics on the basis of the noise reduction obtained by wavelet threshold values presented was a second generation wavelet noise reduction method based on a new type improved threshold value function. The method in question re alized an evaluation of noise reduction effectiveness of complex vbration signals by utilizing the second generation wavelets to decompose the signals and employing a new type improved threshold value function to perform a thresh-?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net