

# 高压涡轮导叶传热数值计算与分析

王建华,葛宁

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**以 NASA C3X 线性叶栅为研究对象,采用非耦合和耦合方法分析叶片表面外换热系数分布。结果表明:离前缘越远,外换热系数越容易受到壁温的影响,带转捩的  $k-\omega$  SST 湍流模型能很好地预测耦合换热。运用牛顿冷却定律对其进行修正和可行性分析,对比外换热系数分布,表明非线性方法简单有效。

**关键词:**线性叶栅;耦合换热;外换热系数;非线性方法

**中图分类号:**V231.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0045-04

## Numerical Calculation and Analysis of Heat Transfer in High Pressure Turbine

WANG Jianhua, GE Ning

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** With the linear NASA C3X cascade as the reserch subject, the distribution of external heat transfer coefficient on blade surface is worked out by uncoupling and coupling. The results show that the farther away from the leading-edge region is, the more easily the external heat transfer coefficient is affected by the wall temperature, and the  $k-\omega$  SST turbulence model with transition performs can well predict the conjugate heat transfer. Newton's cooling law is used for revision and feasibility study, and the distribution of heat transfer coefficient is compared, which manifests the simplicity and effectiveness of the nonlinear method.

**Keywords:** linear cascade; conjugate heat transfer; heat transfer coefficient; nonliner method

## 0 引言

在现代燃气涡轮发动机中,高压涡轮导叶与燃气热交换率最高。因涡轮进口温度远超过金属叶片的熔点温度,故必需大量使用冷却气体,这就要求在设计过程中准确地预测涡轮叶片表面温度分布。丁林<sup>[1]</sup>搭建了涡轮叶片测温平台,利用光学扫描和辐射测温方法对叶片表面温度分布进行测量。近年来,研究人员对气热耦合方法进行了广泛研究。LUO J 等<sup>[2]</sup>研究了涡轮导叶在 3 种典型工况下的气动和传热特性,采用不同的湍流模型计算分析了叶中截面处温度分布和外换热系数分布。褚云会等<sup>[3]</sup>对跨音速涡轮数值模拟,分析了网格量和湍流模型对计算结果的影响。CROCE G<sup>[4]</sup>将开发的程序和商业软件进行了耦合,即流体域和固体域使用不同的网格,通过插值程序将流固交接面上的信息进行传递。郭兆元等<sup>[5]</sup>采用耦合和非耦合方式对单级涡轮机叶片数值计算,表明两种计算方法对流场结构影响不大,只有耦合计算能准确地预测温度分布。虽然耦合计算正确地设置了流固交接面上边界条件,但是,在计算复杂的内部冷却结构时,这种方法在工程应用上受到限制。因此,在研究冷却问题时,有学者提出用外换热系数定量描述对流换热现象,这也是工程上初步设计冷却系统的常用方法。

本文首先在典型工况下对 C3X 计算域进行数值敏感性验证。然后采用非耦合方法计算分析了壁面温度对外

换热系数(HTC)的影响。采用耦合方法对比了不同湍流模型下 HTC 分布。最后对改进的换热量预测方法进行可行性分析并对比不同计算方法下的 HTC。

## 1 求解方法及验证

采用课题组自主研发的 NUAATURBO 三维数值求解器和 ANSYS-CFX 求解器求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS)。通过 Numeca 对 C3X 叶型建立计算域网格,如图 1 所示,其中进、出口为 H 型网格,叶片表面建立 O 型网格。由于热边界层受网格影响较大,为了正确模拟传热,叶片表面的  $y^+$  值  $< 1$ , 网格节点数达  $2 \times 10^7$ 。计算域边界条件如下:来流总压  $P_0 = 3.218 \times 10^5$  Pa, 来流总温  $T_{0in} = 783$  K, 出口马赫数  $Ma_{out} = 0.89$ , 湍动量  $T_u = 8.3\%$ , 湍流长度尺度为 0.005 m。

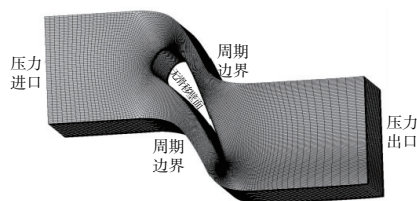


图 1 计算域网格及边界条件

## 1.1 网格无关性验证

首先改变沿叶片轮廓周围边界层中的 O 型网格节点,使用 NUAATURBO 求解器来进行网格无关性验证。在保证离壁距离相同的情况下,比较了 3 种不同的网格节点。如图 2 所示,在温度比  $T_R = T_w/T_{0in} = 0.65$  时,计算了 30、40 和 50 个节点下叶片表面的无量纲换热量  $q/q_{ref}$  分布。无量纲换热量的计算方法见式(1),换热量  $q$  通过壁面附近流体分子之间导热计算,即  $q = -k(\partial T/\partial n)$ 。 $C$  为叶片轴向弦长, $k$  为进口温度条件下的导热系数。从整体上看,3 种网格节点下的计算结果差异很小,在之后的计算中选择网格节点为 40。

$$q/q_{ref} = \frac{qC}{(T_{0in} - T_w)k} \quad (1)$$

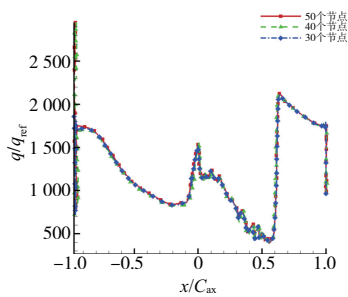


图 2  $T_R = 0.65$  时不同边界层节点 HTC 分布

## 1.2 非耦合计算

通过 NUAATURBO 求解器的定量计算来分析  $T_R$  对 HTC 的影响。计算域的边界条件如上所述,在不同工况下,仅仅改变壁面温度边界条件。假设空气为理想气体,理想气体定律和萨瑟兰黏性定律来求解气体的状态和热物理性质。从图 3 中可以清楚地看出叶片壁面温度对 HTC 的影响。在叶片尾缘的相同位置处,在  $T_R = 0.60$  情况下的 HTC 比  $T_R = 0.95$  情况下高 30% 左右。同时,在叶片前缘的驻点区域,  $T_R$  对 HTC 的影响不如尾缘区域明显。这也表明上游历史效应对边界层的影响。在叶片前缘附近,由于边界层刚形成,对壁面的温度影响较小,但是,随着边界层在叶片表面的发展,相比于边界层外部流动,温度不同的流体在边界层内部逐渐积累并且不断影响壁面温度。这表明当地壁面温度条件影响 HTC,同时受冷却表面的外换热系数还与上游边界层发展历程相关。

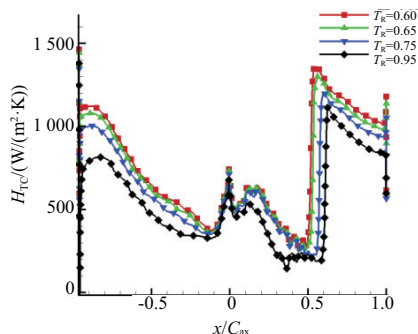


图 3 外换热系数  $H_{TC}$  依赖于  $T_R$

## 1.3 耦合计算

在非耦合计算中只是考虑外部气动影响。正如在数值计算时,都是给定等温边界条件,这就改变了叶片表面和流体域之间的真实交界面边界条件。为了排除这种任意边界条件的影响,采用 CFX 求解器中的热-固耦合模型数值计算。图 4 给出了耦合计算域,外部流体域与非耦合计算下的边界条件一致,叶片内部固体域材料选择热导率较低的 ASTM310 型不锈钢,在叶片内部有 10 个冷却通道,每个冷却通道进口给定半径、进口质量流量、进口静温和湍流度。这里选择文献[6]中 4422 工况。

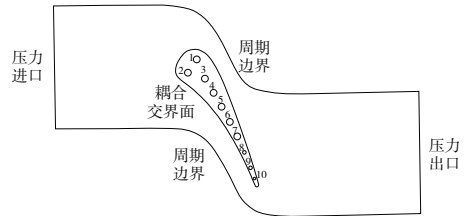


图 4 耦合计算域

图 5 显示了不同湍流模型下,叶片表面无量纲静压分布,计算结果表明湍流模型对气动特性的影响较小。在压力面,从叶片前缘到  $x/C_{ax} = -0.5$  附近,压力几乎保持不变,这个阶段流体加速缓慢,叶片表面没有分离,边界层内的静压梯度为 0,叶片表面的压力分布受湍流模型的影响很小。从压力面中部到尾缘附近,压差增大,流体急剧加速。在吸力面,从前缘到  $x/C_{ax} = 0.4$  附近,静压快速下降到进口压力的一半。随后流体开始减速,到尾缘附近,流体又经历了缓慢地加速的过程。

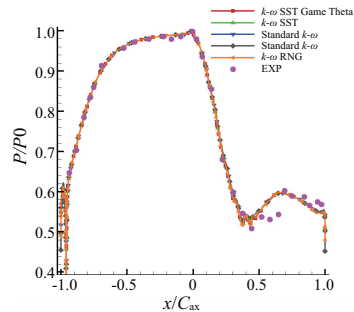


图 5 不同湍流模型下叶片表面静压分布

如图 6 所示,不同湍流模型下换热系数与实验值对比。从整体上看,边界层内部的转捩流动对 HTC 有较大影响。在吸力面前缘沿叶片表面下游,不同湍流模型对外换热系数的预测都有不同程度的偏差。高雷诺数湍流模型( $k-\varepsilon$ 类)主要模拟湍流状态,使用半经验公式简化边界层流动,计算所得的湍流强度比较高,同时在吸力面前缘附近,激波-附面层相互干扰的现象极为明显,对计算结果有较大影响。尽管低雷诺数湍流模型( $k-\omega$ 类)计算所得的湍流强度较低,但是仍然反映边界层内部的湍动特性。对于吸力面前缘附近的层流区域,无法准确地分辨。如果在  $k-\omega$  SST 湍流模型上使用转捩模型,预测的 HTC

与实验值吻合较好。

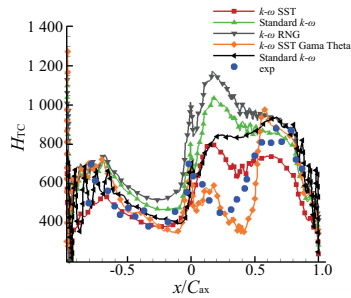


图6 不同湍流模型下  $H_{rc}$  对比

## 2 非线性方法可行性分析

在典型非耦合计算中假设:气动性能决定换热性能。对于给定的叶型结构和流动条件,在牛顿冷却定律  $q = h(T - T_{aw})$  中,有两个由气动决定的未知量 ( $h, T_{aw}$ )。由于这两个未知量不受壁温影响,  $h$  值能正确地表示为每一点的曲线斜率,可将其改写成式(2)的形式。

$$h = \frac{q_1 - q_2}{T_{w1} - T_{w2}} \quad (2)$$

当  $q$  与  $T_w$  呈现明显的非线性关系时,曲线斜率表现为在当地变化。式(2)改写成式(3)。此时式(3)中的外换热系数  $h$  可以解释为微分算子  $dq/dT_w$  的有限差分近似,对于给定的壁温  $T_w$ ,在极小的温差  $\Delta T$  范围内,曲线的局部斜率能正确地表示外换热系数。

$$h = \frac{q_1 - q_2}{T_{w1} - T_{w2}} = \frac{q_+ - q_-}{T_{w+} - T_{w-}} = \frac{\Delta q}{\Delta T} \quad (3)$$

为了确定式(3)中  $\Delta T$  的取值大小,在  $T_r = 0.70$  条件下,选取 3K, 5K 和 10K 进行验证研究。为了在图中显示清晰,去掉了尾缘回流区域内和转捩附近 HTC 分布的峰值点。如图 7 所示,在所选取的 3 个温差下,计算所得外换热系数基本相同,因此,在下面两点法的计算中选择 5K。

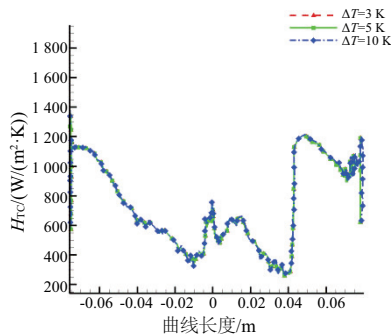


图7 3种温差下叶中截面外换热系数分布

根据非耦合计算结果中的分析,非线性方法主要考虑了 HTC 与  $T_w$  呈现线性关系,即  $H_{rc} = h_0 + h_1 T_w$ 。不考虑绝热壁温随壁面温度的变化。具体表达式如下:

$$q = (h_0 + h_1 T_w) (T_w - T_{aw}) \quad (4)$$

在 3 个壁温下,求解式(4)中的未知变量  $h_0, h_1$  和  $T_{aw}$ 。这些未知变量确定后,就可以根据式(4)确定未知  $T_w$  下的换热量分布以及对应壁面温度下的 HTC。未知变量也是叶片表面上的每个网格点的常数。这种当地校正方法与相关经验关系式有明显地区别。求解叶片表面 HTC 分布的常规做法是需要不同壁温下两个 CFD 计算解。该方法只需要 3 个 CFD 解,计算成本低,而预测精度得到质的提高。

在温度比为 0.95、0.75 和 0.65 条件下,使用 NUAATURBO 求解器得到每个网格点的换热量来求解式(4)。用非线性方法可以预测温度比为 0.6~0.95 范围内的换热量。图 8 比较了非线性方法的计算结果与数值计算结果。这种方法可确保在整个  $T_w$  范围内,预测结果与 CFD 数值计算结果的匹配非常好。为了突出 HTC 独立于  $T_w$  的假设所带来的误差,还使用传统的两点法预测了温度比分别为 0.7、0.8 和 0.9 下的换热量。如图 9 所示,结果表明两点法无法体现 HTC 随壁面温度的变化,从而在换热量的预测中带来误差。

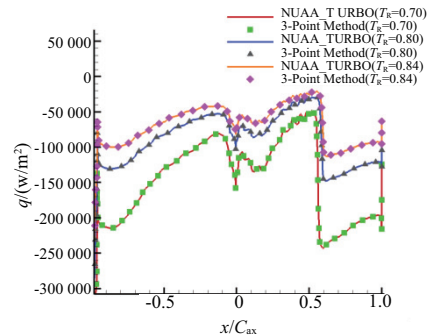


图8 CFD解与非线性方法的换热量对比

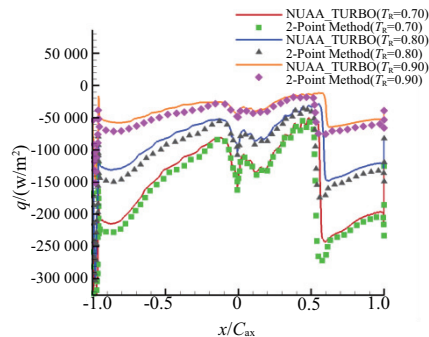


图9 CFD解与两点法的换热量对比

## 3 外换热系数分布

图 10 对比了叶片表面平均温度  $T_r = 0.84$  情况下,两点法、非线性方法以及耦合计算下的 HTC 分布。在校正过程中,两点法在转捩附近出现了尖峰值,与两点法相比,非线性方法预测的外换热系数值更加稳定,这种稳定性主要是对不同壁面稳定范围内的多点曲线拟合,而传统的两点法只是基于单个壁面温度上局部区域内的差分近似。如图 10 所示,非线性方法在转捩位置处与实验值和耦合计算有些误差,从整体上看,可以较为准确地预测外换热系数。

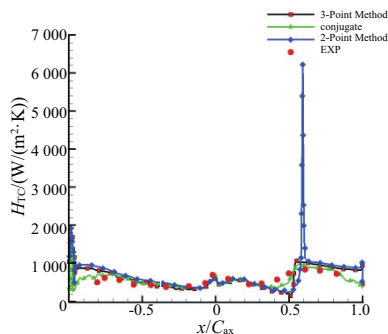


图 10  $T_R = 0.84$  条件下外换热系数分布对比

## 4 结语

本文以典型高压涡轮平面叶栅 C3X 为例,采用 NUA-TURBO 求解器和 CFX 求解器主要研究高压涡轮叶片外换热系数与壁温的关系。得出以下结论:

1) 非耦合计算时,壁温对叶片前缘处 HTC 的影响较小,但是在叶片尾缘有明显的非线性。特别地,在  $T_R = 0.60$  与  $T_R = 0.95$  两种情况下,HTC 相差达到 30% 左右。耦合计算时,带转轮的  $k-\omega$  SST 湍流模型能较为准确地预测外换热系数分布。

2) 基于牛顿冷却定律的非线性形式,采用非线性方法来计算不同壁温下外换热系数。与传统方法相比,可以有效地对  $H_{TC}-T_w$  依赖性进行校正。非线性方法是在给定壁面温度的情况下获得外换热系数,这种基于当地的而不是全局的校正方法,提高了计算精度。

### 参考文献:

- [1] 丁林. 涡轮叶片热分布测量方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [2] LUO J, RAZINSKY E H. Conjugate heat transfer analysis of a cooled turbine vane using the V2F turbulence model [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 773-781.
- [3] 褚云会,钟易成,徐伟祖,等. 跨音速涡轮叶栅数值计算方法研究与试验验证[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1): 49-54.
- [4] CROCE G. A conjugate heat transfer procedure for gas turbine blades[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001, 934(1): 273-280.
- [5] 郭兆元,王贤义,李程,等. 单级冲动式汽轮机叶片气热耦合数值计算[J]. 节能技术,2020,38(2): 99-103.
- [6] HYLTON L D, MIHELIC M S, TURNER E R, et al. Analytical and experimental evaluation of the heat transfer distribution over the surfaces of turbine vanes[EB/OL]. (1983-06-05) [2021-10-15] [https://www.researchgate.net/publication/24315094\\_Analytical\\_and\\_experimental\\_evaluation\\_of\\_the\\_heat\\_transfer\\_distribution\\_over\\_the\\_surfaces\\_of\\_turbine\\_vanes](https://www.researchgate.net/publication/24315094_Analytical_and_experimental_evaluation_of_the_heat_transfer_distribution_over_the_surfaces_of_turbine_vanes)

收稿日期:2020-11-16

(上接第 33 页)

1) 表面粗糙度随主轴转速的增加呈现先降低后升高的趋势,主轴转速为 9 000 r/min 时,  $Ra$  最低为  $0.169 \mu\text{m}$ ; 表面粗糙度随径向切深的增加而降低,切深 0.5 mm 时,  $Ra$  最低为  $0.155 \mu\text{m}$ ; 随着切削进给速度的增加,切削力的波动造成表面粗糙度变化趋势不稳定,进给速度为 1 150 m/min 时,  $Ra$  最低,为  $0.17 \mu\text{m}$ ;

2) 仅考虑刀具时,  $\phi 16$  刀具的切削力明显高于  $\phi 10$  的,且切削强度和径向切深更大,切深 1.0 mm 以下时两者表面粗糙度基本一致,切深 2.0 mm 时  $\phi 16$  加工表面粗糙度最低,为  $0.401 \mu\text{m}$ ;

3) 通过对被加工件表面形貌和表面灰度的分析可知,逆铣和顺铣的分形维数分别为 2.440 7 和 2.417 5,即逆铣加工的曲面更为复杂,顺铣表面更平滑,其结论和表面粗糙度的实测值完全一致。

### 参考文献:

- [1] 仲为武. 空气喷射辅助少量润滑对航空铝合金 7050-T7451 铣削力的影响[J]. 机床与液压,2019,47(7): 35-38.
- [2] 贾振元,肖军,湛利华,等. 大型航空复合材料承力构件制造关键技术[J]. 中国基础科学,2019,21(2): 20-27.
- [3] 黄丽娟,申世杰. 叶片数控侧铣表面质量的工艺实验研究[J]. 机械设计与制造,2017(1): 164-166.
- [4] LIU C Q, LI Y G, JIANG X, et al. Five-axis flank milling tool path generation with curvature continuity and smooth cutting force for pockets[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(2): 730-739.

- [5] LIU B, YUAN J X, ZHANG Z J. Simulation analysis of surface roughness for milling process[J]. Natural Science, 2019, 11(5): 127-135.
- [6] 李晟,周超. 基于随机森林的钛加工表面质量评定研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6): 36-38, 60.
- [7] 赵鹏,赵旭. 超高速切削的技术体系、技术现状和发展趋势[J]. 科技传播,2012,4(15): 124, 87.
- [8] 李文琴,许金凯,于化东,等. 基于多目标优化的微铣削表面粗糙度检测指标研究[J]. 航空制造技术,2020,63(19): 66-72.
- [8] 李文琴,许金凯,于化东,等. 基于多目标优化的微铣削表面粗糙度检测指标研究[J]. 航空制造技术,2020,63(19): 66-72.
- [9] 安琪,索双富,林福严,等. 车削粗糙表面的特征解耦与形貌仿真[J]. 机械工程学报,2019,55(23): 200-209.
- [10] 董义兵,刘涛,刘利江. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国高科技,2018(11): 52-54.
- [12] 王立涛,柯映林,黄志刚. 航空铝合金 7050-T7451 铣削力模型的实验研究[J]. 中国机械工程,2003(19): 70-72.
- [13] 彭臣西,吴运新,易守华,等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究[J]. 工具技术,2018,52(11): 59-62.
- [14] 刘丽艳,陈富强,杨薇,等. 分形维数与铣削参数的模型关联及验证[J]. 机械设计与制造,2015(5): 122-126.
- [15] 安琪,索双富,林福严,等. 基于小波变换的三维粗糙表面分形维数计算方法[J]. 润滑与密封,2020,45(3): 88-92.

收稿日期:2021-06-15