

涡轮叶片的热流固耦合数值方法研究及应用

汪翔宇, 高尚鸿, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对航空发动机高压涡轮叶片缺乏有力的热流固耦合分析工具的现状, 构建了集流动、换热与振动于一体的多物理场耦合数值模拟基础框架与计算方法。依托双重运动方法和动网格技术, 使用跨求解器的弱耦合方法实现了动静交错环境下带陶瓷涂层动叶的热、流、固耦合数值分析。计算分析了简化约束条件的涡轮叶片在多物理场环境下的振动特性, 获得了涡轮叶片重要的热流固特性及其变化规律。结果表明: 涡轮叶片在热流固耦合环境下的振动形态为一阶弯曲及扭转振动形态的混合, 其最大位移为 0.209 mm; 动叶的变形会进一步显著影响作用在叶片上的气动力和热负荷, 叶尖附近的静压变化达 9.44%, 热流密度变化达 39.7%; 陶瓷涂层对热流固耦合条件下振动特性的影响极小。

关键词: 涡轮叶片; 热流固耦合; 陶瓷涂层; 振动

中图分类号: V235.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jtuxb202503003 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0021-13

Study on Numerical Method of Thermal-Fluid-Structure Coupling for Turbine Blades and Its Application

WANG Xiangyu, GAO Shanghong, FENG Zhenping

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the current lack of effective thermo-fluid-structure coupling analysis tools for high-pressure turbine blades in aircraft engines, a multi-physics field coupling numerical simulation framework and computational method integrating flow, heat transfer, and vibration are developed. Leveraging the dual-motion method and dynamic mesh technology, a weak coupling approach across solvers is employed to achieve thermal-fluid-structure coupling numerical analysis of moving blades with ceramic coatings in a dynamic-steady alternating environment. The vibration characteristics of turbine blades under multi-physics field environments with simplified boundary conditions are computationally analyzed, revealing crucial thermal-fluid-structural properties and their variations. Results indicate that under the thermal-fluid-structure coupling environment, blade vibration exhibits a mix of first-order bending and torsional modes, with a maximum displacement of 0.209 mm. Blade deformation further significantly affects aerodynamic forces and thermal loads acting on the blade, with static pressure changes near the blade tip reaching 9.44% and heat flux density variations of 39.7%. The impact of ceramic

收稿日期: 2024-06-21。 作者简介: 汪翔宇(1992—), 男, 博士, 助理教授; 丰镇平(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-II-0008-0028)。

网络出版时间: 2025-01-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241231.1231.014>

coatings on vibration characteristics under thermal-fluid-structure coupling conditions is minimal.

Keywords: turbine blade; thermal-fluid-structure coupling; barrier coating; vibration

半个世纪以来,涡轮进口温度已从 1 600 K 左右提升至第四代发动机的 2 000 K,叶片所能承受的热负荷日益严峻。此外,涡轮叶片还承受来自上、下游的非定常气动载荷^[1-3],出现共振和高周疲劳,导致涡轮叶片的强度及振动问题日益突出。随着燃气温度上升,叶片材料的导热系数、弹性模量、屈服极限以及持久强度等都将发生显著变化^[4],即气动、传热和振动及其设计目标是有极强联系的,因此涡轮叶片的热流固耦合问题得到了广泛的关注。

然而,即使是涡轮叶片的热耦合(亦称为气热耦合、共轭换热)、流固耦合这样的两两耦合也存在极大的难点。流热耦合面临动静干涉^[5]和强湍流条件下流体对流换热和固体导热之间时间尺度不匹配的问题。对于后者,流体力学和固体力学协同求解的方式难以统一。

在流热耦合方面,Sondak 等^[6]最早意识到了非定常流热耦合的时间尺度不统一的问题。Hwang 等^[7]在流体时间尺度上研究了动静干涉条件下静叶尾缘冷气对下游动叶换热的影响,表明固体的温度几乎保持在定值。Rahaim 等^[8]使用耦合的有限体积/双重互易边界元方法求解了共轭耦合传热问题。Hernández 等^[9]从较大的时间尺度(1 000 s)上分析了带热障陶瓷涂层(TBC)的叶片从冷态进入热态的过程。Makhija 等^[10]提出使用与流体域时间常数相当的物性参数与替代的势流方程进行计算。Schmidt 等^[11]对流场进行有限容积法的非定常计算,对固体域进行有限元定常计算,在流固边界交换数据。He 等^[12]量化了对流和传导之间在时间尺度上的巨大差异,以及其对稳态和非稳态共轭解的影响,并采用时域流体解和频域固体传导之间的耦合混合方法来重新调整严重不匹配的时间尺度。上述学者的研究,使得非定常流热耦合分析得到了较好的发展,为热流固耦合分析获得叶片的温度分布提供了有力支撑。

在涉及流体力学和固体力学协同求解时,从耦合机理上讲,研究固体和流体采用的坐标系不同,在固体的求解中习惯采用 Lagrange 坐标系,着眼于质点;而在流体的求解中多使用 Euler 坐标系,着眼于空间点。因此,如何将两种坐标系协调统一以完成求解耦合问题,是流固耦合以及热流固耦合中不可

回避的一个难点。周盛^[13]以叶片上 70%~75%展向处叶片截面为研究对象,将固体力学部分简化为平移-扭转弹性模型,分析了二维流固耦合问题。过去数十年间,随着商业软件的发展,通过求解器之间的数据交换,使得流体和固体之间以弱耦合的方式完成数值协同求解成为可能。Davison 等^[14]详细研究了流体分析、热传导分析和应力分析的耦合分析方法。Dawes 等^[15]以气冷涡轮叶片和机匣的寿命预测为例,进行了气动、热传导和应力等控制方程的求解以及耦合分析。Collard 等^[16]研究了动静干涉以及叶片振动情况。全金楼等^[17]、周迪等^[18]均使用计算流体动力学(CFD)和计算结构动力学(CSD)协同求解的方法分析了叶片颤振问题。在计算准确度和速度得以保证的前提下,使用跨求解器的弱耦合是一种协调统一行之有效的工程求解方法。

部分研究者尝试将原本双向强耦合的问题朝着单向弱耦合的方向简化。Rademaker 等^[19]研究了中型商用发动机高压涡轮机匣的热负荷及冷却通道设计。谢永慧等^[20]采用热流固耦合方法获得了叶片温度分布和应力应变分布的具体信息。黄朝晖等^[21]研究了液体火箭发动机涡轮泵的叶片裂纹。汤文章^[22]对带热障涂层的涡轮叶片的温度场和应力场进行数值模拟。除了商业软件外,也有不少研究者尝试自己开发耦合计算程序,其中 Guo 等^[23]基于有限差分法开发了涡轮热流固耦合仿真计算平台,李涛^[24]开发了一套气热弹耦合计算程序。尽管单向弱耦合的数值求解如今在部分领域能得到令人满意的解^[25-27],但大多数所谓的耦合研究仅仅只是将其中一个物理场作为边界条件单向输入从而进行孤立的数值求解,固体叶片发生的形变量以及温度重新分布并没有进一步返回到流场,从而无法形成热、流、固三者耦合的闭环,以至于流场在微小变形下发生的改变对后续带来的影响并不可知。陈刚等^[28]明确指出,耦合必定是两者的相互作用。所谓单向耦合这种单方面作用的形式是否能被称之为耦合受到了质疑。两场耦合并没有得到良好充分的发展,反而类似于 MPCCI、Ansys system coupling 等用于数据交换和传递的商业软件开始逐步出现且升级。

然而,热、流、固耦合在流热耦合依然存在不少

问题的情况下,还引入了另外一个物理场,使问题进一步复杂化。原本流热耦合已经存在时间尺度不匹配问题,叶片的往复振动又将引入一个新的时间尺度,如何平衡上述时间尺度,成了一个新的难点。为了得到准确的传热求解,通常流体域棱柱网格的第一层节点需要深入黏性底层,但叶片的振动使得保持合理的精细化动网格质量和稳定求解变得尤为困难。而在诸多单向耦合的数值分析中,并没有直面双向耦合过程中协同求解的核心问题。

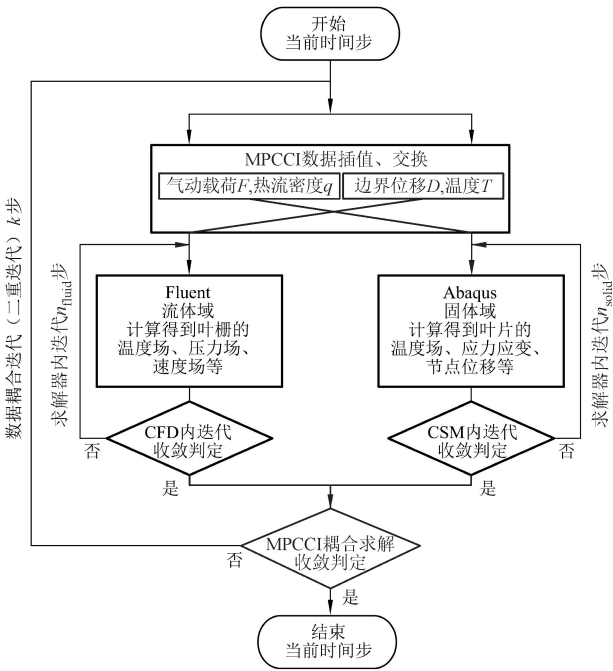
针对上述问题及其复杂物理现象,本文应用作者独立开发的边界层动网格技术和双重运动方法^[29-30],构建了涡轮叶片热流固耦合数值计算方法,计算评估了求解器的数据传递误差,并应用于GE-E3 发动机第一级高压涡轮叶片,实现了工程意义上的热流固耦合计算与分析,进一步给出了多物理场耦合的情况下带陶瓷涂层的该涡轮叶片的振动和换热特性。

1 热流固耦合计算方法

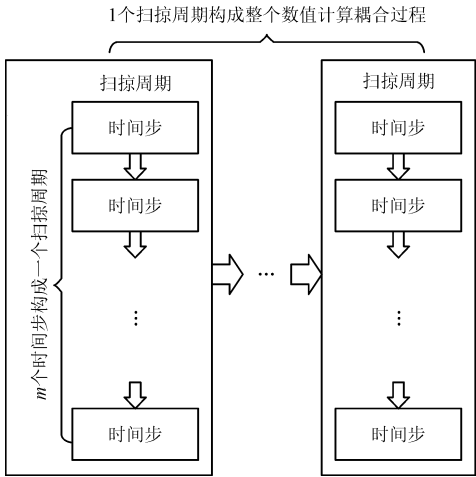
1.1 耦合计算基础框架

在热流固三者耦合的计算框架中,固体内的导热是在有限元求解器中完成,即流体与固体之间的共轭换热属于弱耦合。相比于强耦合,弱耦合的缺点是耦合传热需要在两个求解器之间迭代,增大了计算工作量。优点是在计算热应力前,温度数据是以面的形式而不是体的形式进行传递和插值,减小了插值的计算量和误差,也避免了有限容积法求解中动网格需要同时兼顾流体与固体两个区域的网格质量的束缚。

热流固耦合的计算需要同时使用有限容积求解软件 Fluent、有限元求解软件 Abaqus 和数据交换软件 MPCCI。具体是利用 Fluent 求解流体域,利用 Abaqus 求解固体域,两者通过 MPCCI 联立起来并交换数据。图 1(a)给出了热流固耦合基本框架。在一个时间步内,Fluent 和 Abaqus 分别完成内迭代之后再次交换数据,如此最多循环 5 次进入下一个时间步。图 1(b)为时间步迭代方法,展示了时间步、动静干涉下的扫描周期以及整体数值计算过程的构成关系。为了获得求解精度与求解速度的平衡,在计算中各个参数取值通常为:单求解器迭代步数 $n_{solid} = 10, n_{fluid} = 40$,耦合迭代步数 $k = 5$,时间步数 $m = 25$,周期数 $l = 20$,按照总迭代步数计算式 $(n_{solid} + n_{fluid}) \times k \times m \times l$,则整个热流固耦合计算总共需要计算迭代至多 125 000 步。



(a)热流固耦合框架



(b)时间步迭代方法

图 1 动叶热流固弱耦合求解的整体结构

Fig. 1 Overall structure of the rotor blade for the thermal-fluid-structure coupling solution

1.2 双重运动方法

为了使得形变传输精确,本文未使用常规的滑移网格模型来实现动静叶之间的相对运动。其原因在于,在滑移网格模型下,动叶叶栅计算域网格会在每一个时间步进行一次移位,其数量级为 10 mm。在每一次流固之间进行数据交换时,叶片形变使流体计算域产生的网格位移,其数量级为 1×10^{-3} mm。最终的网格节点位移为两者之和,形变位移在计算过程中极易被忽略。因此,本文提出了一种新的计算方案,即双重运动方法,来模拟动静叶之间的相互交

错。所谓双重运动方法,就是静叶同时使用动坐标系模型(frame motion)和滑移网格模型(slide mesh motion),而动叶使用动坐标系模型。虽然静叶和动叶同时采用动坐标系模型,但反向的滑移网格模型使得静叶相对于绝对坐标系依然是静止状态。而动叶网格的网格不滑移,其旋转运动由动坐标系模型实现,最终计算域的网格只有来自于结构变形产生的位移。

双重运动系统下流动规律的正确性已经通过理论推导得到了证实。流体的真实速度 $\boldsymbol{u}$ 、流体在动坐标系下的速度 $\boldsymbol{u}_r$ 、流体在双重运动系统下的合成速度 $\boldsymbol{u}_{\text{DMS}}$ 之间有如下关系

$$\boldsymbol{u}_r = \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{\text{frame}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{u}_{\text{DMS}} = \boldsymbol{u}_r - \boldsymbol{u}_{\text{mesh}} \tag{2}$$

式中:下标 frame 表示动坐标系的相关变量;mesh 表示动网格的相关变量。

特别地,在双重运动系统中,动坐标系角速度、动网格角速度数值相同而方向相反,即

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{mesh}} = -\boldsymbol{\omega}_{\text{frame}} \tag{3}$$

将上述关系代入至旋转坐标系下的相对动量方程

$$\rho \left(\frac{D\boldsymbol{u}_r}{Dt} \right)_r + \rho (2\boldsymbol{\omega}_{\text{frame}} \times \boldsymbol{u}_r + \boldsymbol{\omega}_{\text{frame}} \times \boldsymbol{\omega}_{\text{frame}} \times \boldsymbol{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \cdot \boldsymbol{f} \tag{4}$$

则能得到如下表达式

$$\rho \frac{D\boldsymbol{u}_{\text{DMS}}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \cdot \boldsymbol{f} \tag{5}$$

式中: ρ 是流体密度; p 是压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪切力张量; $\boldsymbol{f}$ 为彻体力。上式与绝对静止坐标系下的动量方程完全一致,除此之外的连续性方程和能量方程同理,从而证明了双重运动系统和绝对静止坐标系下流动的等价性。

总之,双重运动方法在模拟叶片真实转动和相互干扰进行流场数值计算时,在流固数据传递中确保了动叶微小变形的数据真实性和精确度。

2 计算模型与边界条件

2.1 金属基、陶瓷涂层及流体域

本文以 GE-E3 高压涡轮第一级静动叶排为研究对象,对动静交错环境下带陶瓷涂层的涡轮叶片进行热流固耦合研究。对于静叶模型,将气膜孔排简化为槽缝处理,即在叶片吸力面前部、压力面中后部绘制模拟气膜孔的槽缝,在尾缘处绘制劈缝,三者均含有气膜通道,以降低网格量和计算量。动静叶

数分别取 76 和 38,即一个静叶和两个动叶形成对应关系。根据 GE-E3 的原始设计,动叶内部带有冷却通道,动叶表面绘制 0.1 mm 厚的热障陶瓷涂层,叶尖部分采用凹槽。其中,陶瓷涂层通过向固体侧按当地法向方向偏置曲面得到,以保证叶片外部几何完全相同。鉴于目前国内的陶瓷涂层喷涂技术和工艺,叶片的叶尖及其凹槽没有陶瓷涂层覆盖。图 2(a)展示了热流固耦合研究的涡轮级几何模型,图 2(b)所示为叶片内冷通道、金属基及表面的陶瓷涂层模型。

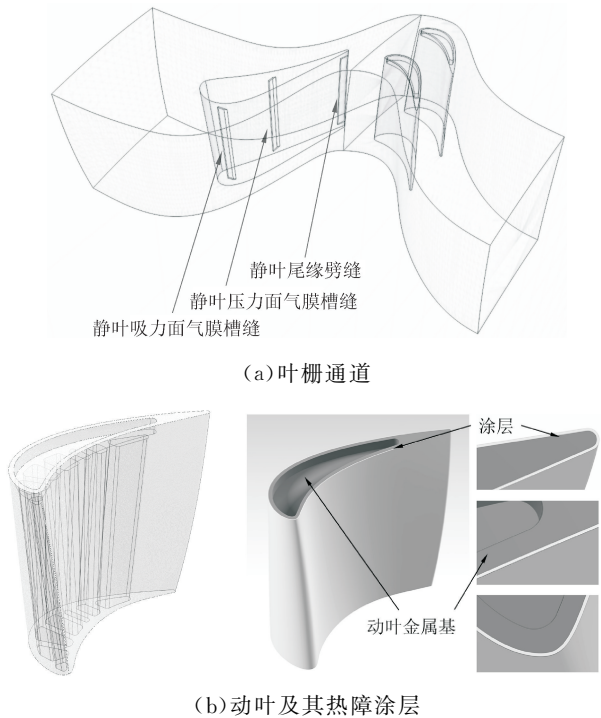


图 2 GE-E3 高压涡轮第一级静动叶排几何示意图
Fig. 2 Schematic of the first stage of GE-E3 high-pressure turbine

2.2 边界条件及参数

静叶的压力面、吸力面气膜孔槽缝和尾缘劈缝均为流量进口边界,流量和总温分别为 0.033 6 kg/s 和 960 K、0.033 2 kg/s 和 980 K 以及 0.022 4 kg/s 和 987 K。冷气设置为垂直边界面进入。表 1 展示了主流进出口边界条件。

表 1 流体域的边界条件

进口				出口	
总压/ MPa	总温/ K	湍流 强度/%	湍流 尺度/mm	静压/ MPa	转速/ (r·min ⁻¹)
2.526	1 780	10	7.5	1.122 7	12 630

通过 Abaqus 求解固体导热,涂层和金属基形成装配体,两者接触面设定绑定约束,叶根施加钳定约束。使用动力-温度-位移耦合的显式求解器,设定额定转速为 1 322.6 rad/s 时非惯性参考系下离心力形成的预应力场为初始应力场,设定 1 143 K 为初始应力温度场。陶瓷涂层表面、陶瓷叶尖侧面、金属基叶尖面分别赋予来自流体的气动载荷。动叶内部通道依据其气热耦合计算,分别设定恒定的内冷换热系数,以模拟冷气在蛇形通道中带走内壁上热量的过程。K405 高温合金叶片的弹性模量、剪切模量、泊松比和线膨胀系数均随温度变化而变化。陶瓷涂层简化为一层计算,共弹性模量取 87 GPa,泊松比为 0.12,密度为 6 150 kg/m³,线膨胀率为 12.16×10⁻⁶ K⁻¹。

3 热流固耦合数值方法评估

有关热流固耦合实验数据的报道,在公开文献中非常少。为了保证热流固耦合计算结果的可靠性,必须同时确保流热耦合的准确性和结构力学求解的准确性。在结构变形和气动载荷耦合方面,数值求解准确性借助跨声速机翼颤振的实验数据得到了验证^[31]。本文在流热耦合的基础上进行网格无关性验证和湍流模型验证,以提高流场和温度场计算的准确性。借助某航发全尺寸、全气膜中温中压涡轮动叶中叶展的温度分布^[32]进行数值验证,如图 3 所示,实验点的数字为测温热电偶的编号。虽然计算结果在压力面尾缘区域差距较大,但 $k-\omega$ 模型与实验结果吻合最好,数值计算结果的最大误差不足 5%,均方根误差为 1.2%。网格无关性亦使用该实验数据进行评价,网格的拟合外推误差为 2.064%。

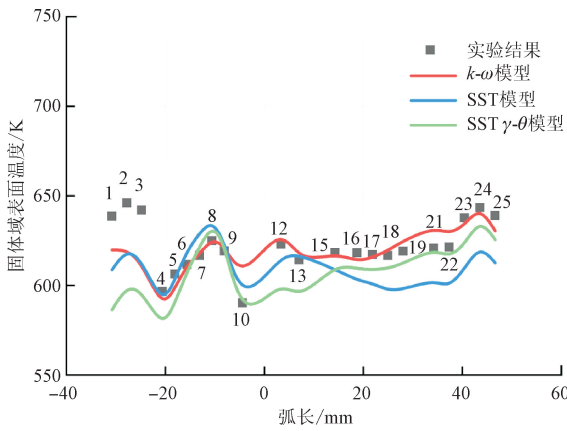
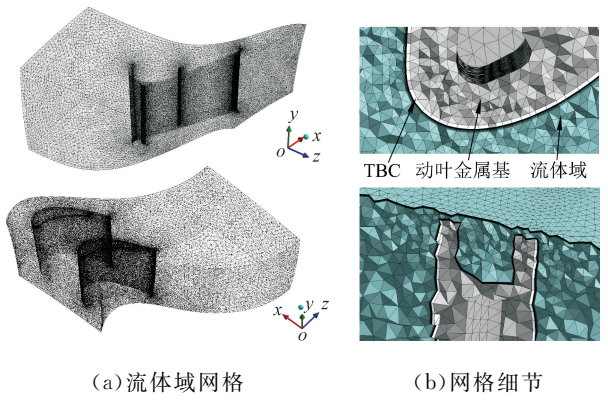


图 3 湍流模型验证
Fig. 3 Turbulent model validation

本文的流体域使用四面体网格,由 Ansys Meshing 绘制,在壁面上绘制棱柱边界层网格,边界层第一层网格厚度为 0.001 6 mm,保证叶片表面的近壁面 y^+ 在 1 附近。流体域动叶部分网格数为 571 万,静叶部分网格数为 384 万。对于固体域,通过扫掠的方法绘制一层四棱柱陶瓷涂层网格,使用三棱锥绘制叶片金属基网格。叶片金属基的网格数为 33 万,陶瓷涂层的网格数为 1.4 万。图 4 所示为整体网格和局部细节。流体域的计算采用 $k-\omega$ 湍流模型。



(a) 流体域网格 (b) 网格细节
图 4 耦合计算所使用的网格整体和局部细节
Fig. 4 Overall and local details of the mesh used in computation

3.1 数据传递误差评估

计算过程中监视了数据传递的残差,如图 5 所示。除了最开始时间步的残差较高外,剩下时间步内的残差均有下降,其中流体和固体之间节点传递的位移、气动力误差均方根不超过 0.1%,温度数据的均方根残差保持在 0.001% 以下。

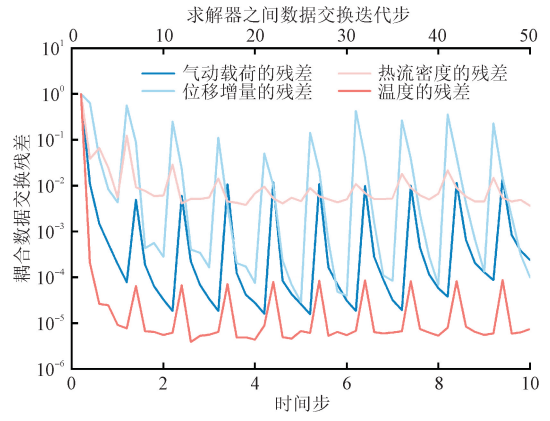


图 5 数据传递残差
Fig. 5 Data transfer residuals

3.2 动网格质量评估

计算过程中发现,在对固体施加至流体的位移增量进行积分后,其位移总量达到了 3×10^{-4} m 数量级。这一位移量为陶瓷涂层厚度的几倍,在真实情况下振动幅度肉眼可见;在流体计算域中这一变形量也已大幅度超过了边界层棱柱网格的总厚度。为了保证流体网格质量,使用动网格技术,即在划分网格时将棱柱网格和四面体网格分离到两个计算域,赋予边界层棱柱网格和壁面相同的运动。在整个计算过程中,最差网格质量为 0.89,经过一个叶片振动的往复运动之后,最差网格质量有所好转并稳定在 0.86 附近,网格平均质量保持 0.24 不变。计算过程中并没有出现因为边界运动产生负网格而计算失败或网格质量过低,导致单个有限体积内计算精度过低而浮点溢出的情况。图 6 为计算过程中保存叶片振动至总体位移最大处时的 cas 文件所观察到的网格细节。

从图 6 可见,叶片附近的网格依然保持着良好的形态,没有出现可观的大面积畸变。由此可见,本文发展的细分到黏性底层的低 y^+ 值边界层网格的高容错率动网格技术,在实际的数值计算中是切实有效且可行的。这种方法解决了诸多动网格技术在数值工程中应用的难点,提升了计算稳定性,避免了计算中途出错带来的资源和时间的浪费。

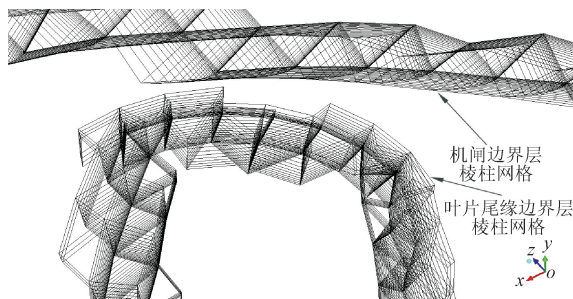


图 6 叶尖处边界层棱柱网格示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the mesh at the blade tip

4 结果分析

4.1 热流固耦合场下叶片应力应变分析

图 7 为叶片隐藏涂层后其金属基部分在两个扫掠周期内不同时刻的 von Mises 等效应力与变形,为了更明显观察叶片的振动形态,将位移整体放大了 20 倍。可以看出,在叶片的 3 个位置处出现了较大的应力,分别是叶尖肩部中弦区域、叶根尾缘和内部通道叶根吸力面。

为了研究传热和热应力在整个热流固耦合系统中的作用机理和重要性,设置了流固对照组。流固对照组在数据交换中去掉热流密度和温度的传输及插值,在固体域直接赋予恒定温度 1 143 K,原本的热流固耦合计算简化为流固耦合计算。与图 7 相似,图 8 为对照组两个扫掠周期内不同时刻叶片的 von Mises 等效应力。

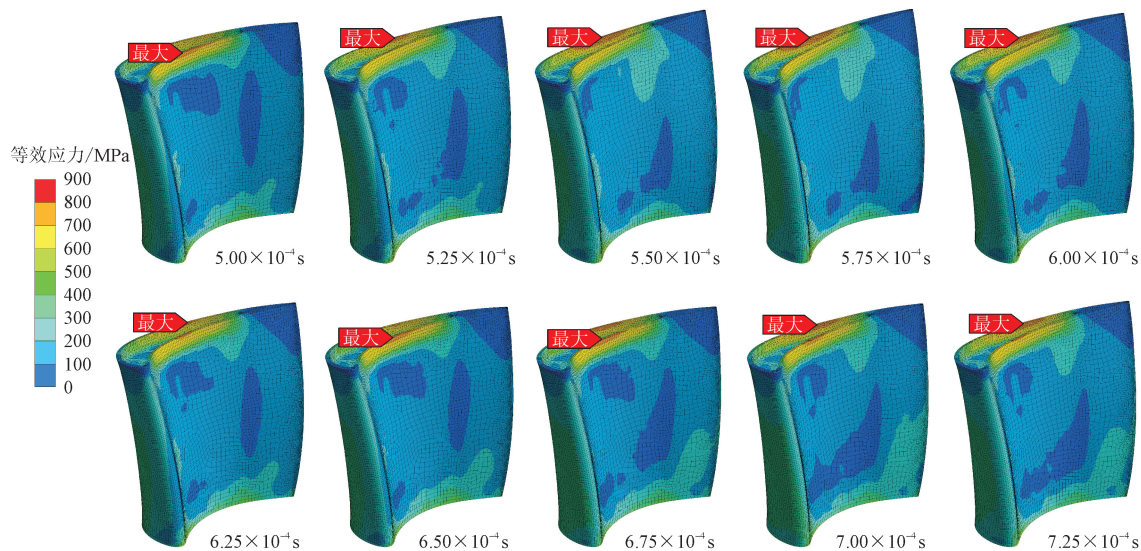


图 7 热流固耦合两个周期内不同时刻叶片的等效应力

Fig. 7 Thermal-fluid-structure coupling equivalent stress of a blade at different times in two periods

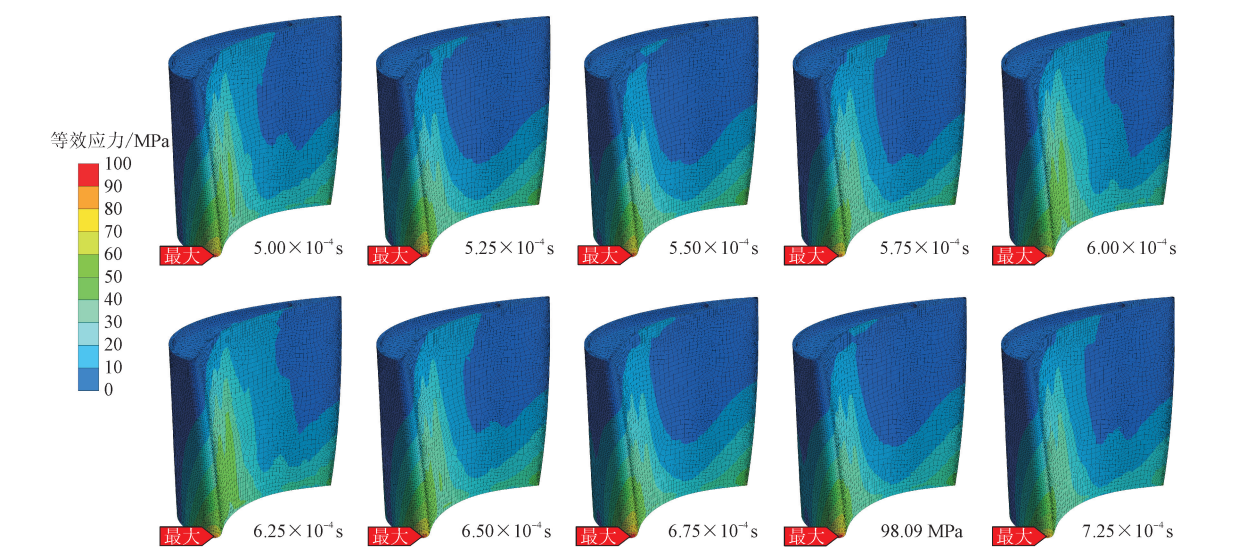


图 8 流固耦合(对照组)两个周期内不同时刻叶片的等效应力

Fig. 8 Fluid-structure coupling (control group) equivalent stress of the blades at different moments in two periods

除了上述带有形变的应力云图外,图 9 和图 10 分别给出了热流固耦合计算及流固耦合对照组的叶根前后缘及高应力区域的应力变化情况。

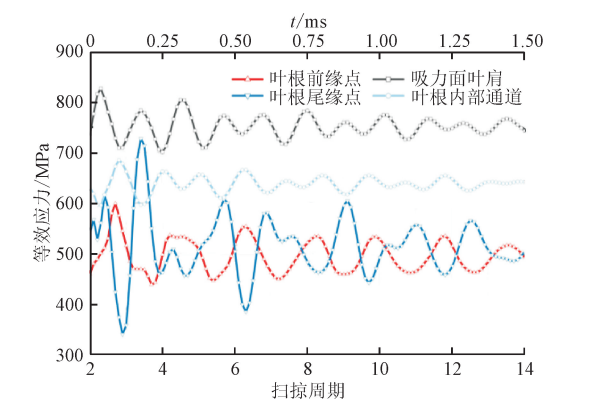


图 9 热流固耦合叶片的等效应力变化曲线

Fig. 9 Thermal-fluid-structure coupling equivalent stress curves of blades

在对照组中,除离心力外其主要应力来源于气动载荷,较大应力区域在叶根前后缘、尾缘和吸力面。在除去第一个周期内的振动后,其最大值分别为 108.30、67.29 MPa,比考虑传热的数值结果要小一个数量级。这是由于当加入流热耦合中的换热,其应力应变的主要来源从单一的气动力转变成气动载荷和热载荷的综合作用。对于叶片叶肩部分(固体),在泄漏流和刮削涡的影响下,流体对固体形成了一个强换热效果,叶肩一侧有热障涂层,顶面和凹槽内侧由于直接与高温燃气接触,底面通过金属热

传导出热量,在这样的环境下其温度梯度较大,形成了较大的热应力,其时均值为 752.1 MPa。对于叶片叶根部分,内部通道温度低于无预应力初始温度,而叶片表面温度高于无预应力初始温度,形成了叶型平面内的温度差异;受端壁附近的马蹄涡的影响,其外部的热负荷与中叶展区域的热负荷存在差异,形成了叶高方向上的温度差异,两者一起形成了叶根部分的热应力。

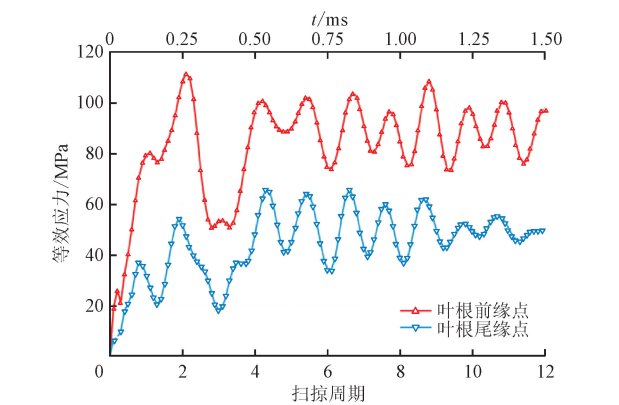


图 10 对照组流固耦合叶片的等效应力变化曲线

Fig. 10 Fluid-structure coupling equivalent stress curves of blades (control group)

需要特别指出的是:真实情况下涡轮叶片同时承受气动载荷和热载荷,两者无法剥离独立,而本文计算中通过关闭数据传递的方式进行对照,考虑气动载荷的独立作用才呈现出了数量级的差异。其次,涡轮动叶还有一个非常重要的载荷来源即离心

力,当考虑离心力时,在叶根处呈现出的应力亦在百兆帕的量级。然而在转速恒定时,离心力形成的应力分布也是恒定的。本文主要是分析动静干涉下非定常气动载荷和热载荷的影响,根据结构力学中的线性叠加原理,在分析上述载荷时都统一约去了离心力,以便能更好地分析两种载荷对于涡轮叶片的作用。

图 11 展示了两个扫掠周期内不同时刻下叶片的变形,叶片各节点上的矢量箭头长度和颜色代表

当地的位移,叶片整体变形形态同样放大了 20 倍。依照同样的视角和放大倍率,绘制了如图 12 所示的对照组两个扫掠周期内不同时刻叶片的总变形。在热流固耦合仿真结果中,振动稳定后叶片的最大位移为 2.09×10^{-4} m。在流固耦合对照组中,计算一开始,由于气动力直接施加在叶片上,叶片在两个扫掠周期内达到最大位移为 8.33×10^{-5} m,在流体形成的阻尼耗散消除初场的影响后,其最大位移为 4.95×10^{-5} m。

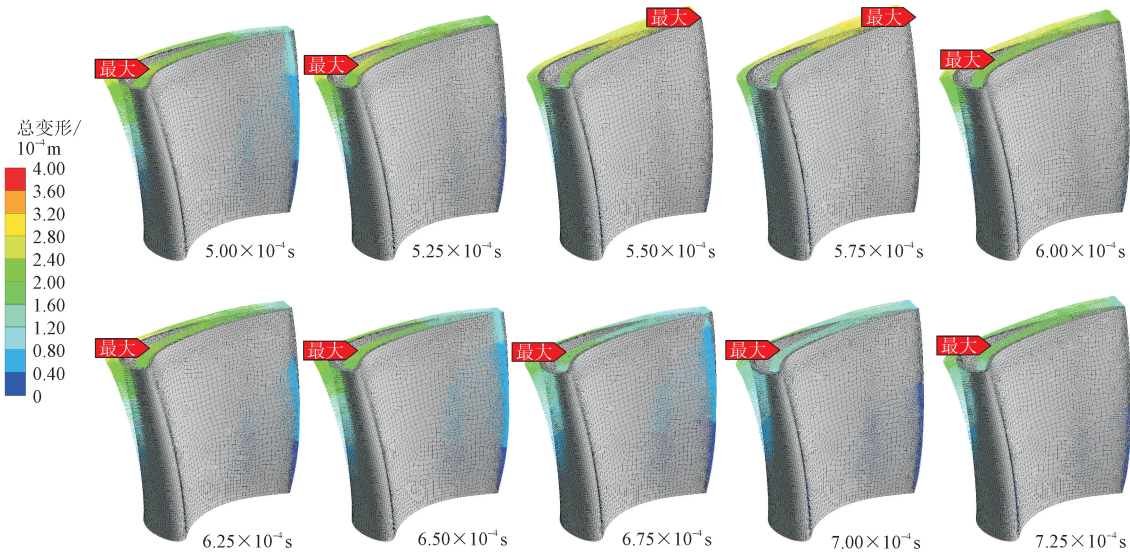


图 11 热流固耦合两个周期内不同时刻叶片的总变形

Fig. 11 Total deformation of the blade at different times during the two periods of thermal-fluid-structure coupling

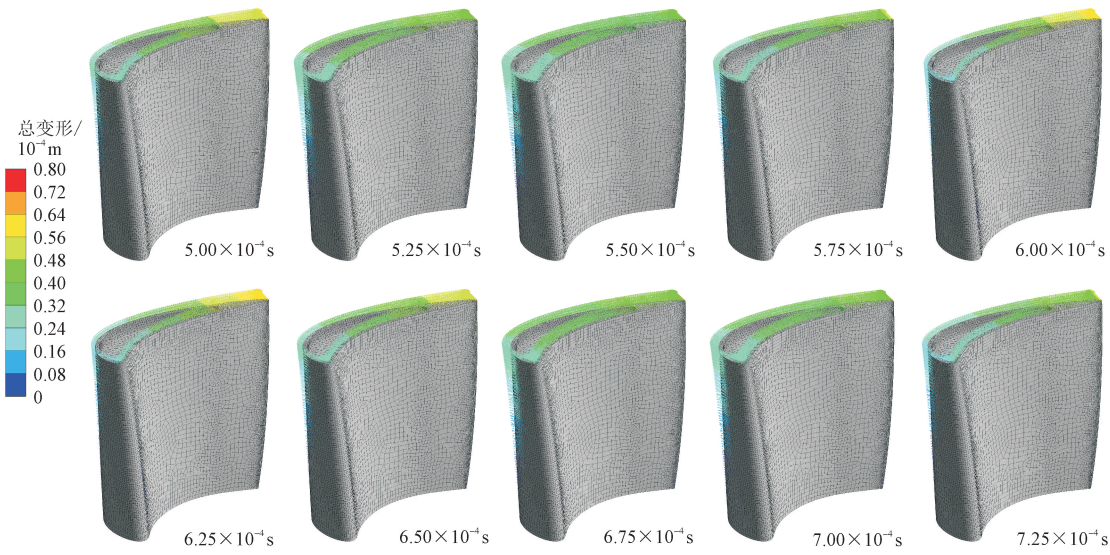


图 12 流固耦合(对照组)两个周期内不同时刻叶片的总变形(隐藏涂层)

Fig. 12 Fluid-structure coupling (control group) total deformation of the blade at different times in two periods (hidden coating)

对于考虑传热的热流固耦合计算,其最大位移比流固耦合对照组高出了一个数量级。如果将热流固耦合的计算结果与对照组的结果画在同一张图里,则由于其差异太大无法观察出其波动情况。因此,对于叶尖处,分别绘制了如图 13 和图 14 所示的两组前缘和尾缘点以及刚心的位移。在热流固耦合研究中,前缘点和尾缘点的位移相近。而在对照组中,气动载荷产生的负纵向力矩使得前缘点和尾缘点的位移均值并不相同,前缘点比尾缘点低 0.025 mm。

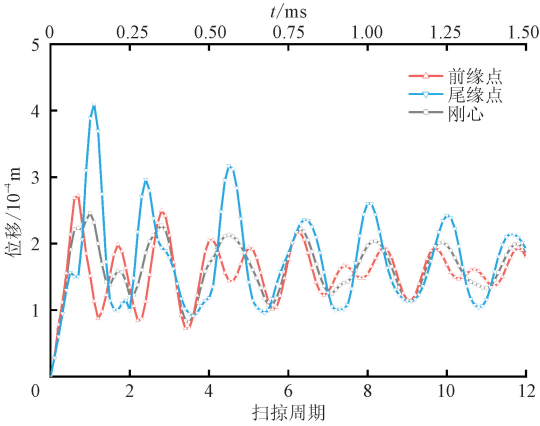


图 13 热流固耦合叶尖位移曲线

Fig. 13 Displacement curve of blade tip for thermal-fluid-structure coupling

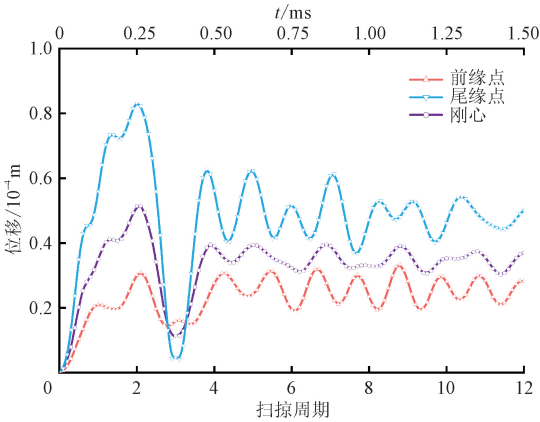


图 14 对照组流固耦合叶尖位移曲线

Fig. 14 Tip displacement curves of fluid-structure coupling (control group)

综上,在耦合场中是否考虑传热,不仅会导致应力结果的数值和分布的差异,而且在变形、整体位移上也存在差异。相比于流固耦合计算,尽管热流固耦合计算时固体域的平均温度和流固耦合计算时赋予的温度相等,但在前者计算时,叶片由于外部燃气

施加热负荷,内部通道带走热量形成叶片外部温度高内部温度低的情况,从而叶片材料模量随温度变化,形成了叶片外部模量低、内部模量高的情况。同时,由于压力面温度高于吸力面,其热膨胀量高于吸力面,形成了一个与气动载荷相同的使叶片向吸力面弯曲的趋势。因此,考虑固体内温度分布和热应力的热流固耦合数值结果,在整体位移和变形上要高于流固耦合的数值结果。

4.2 热流固耦合场下叶片振动形态分析

对于热流固耦合和流固耦合两组位移分别做快速傅里叶变换,其结果如图 15 和图 16 所示。当频率为 4 500 Hz 和 7 314 Hz 时,热流固耦合存在两个峰值,分别与叶片在流固耦合对照组定常气动力和离心力作用下的一阶、二阶模态接近。热流固耦合所形成的叶片各处模量的频率和对照组有略微的差别。叶片在耦合情况下呈现弯曲和扭转两种形式组合振动,在叶片扭转变形并不引起刚心的位移的前提下,为了分离两种振动形态单独研究,同样也提取并分析了叶尖刚心的位移,如图中黑色线所示。

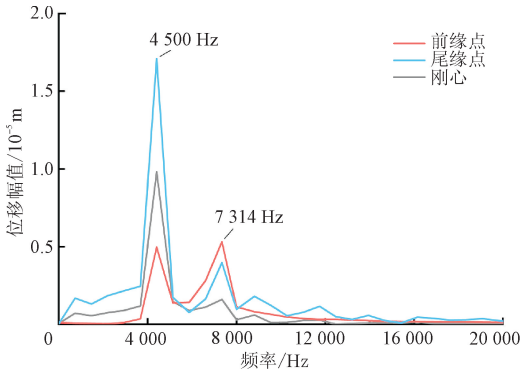


图 15 热流固耦合条件下叶片位移频域分析

Fig. 15 Frequency domain analysis of blade displacement under thermal-fluid-structure coupling

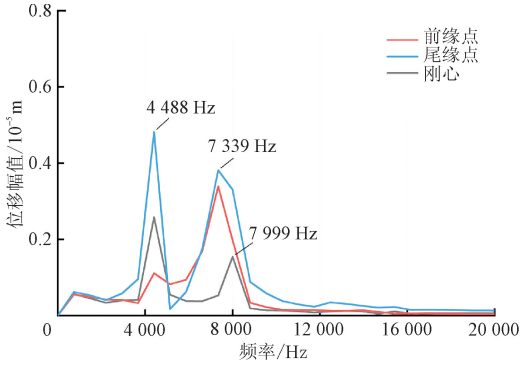


图 16 对照组流固耦合叶片位移频域分析

Fig. 16 Frequency domain analysis of blade displacement in the fluid-structure coupling (control group)

随时间变化,刚心的位移表现了叶片的弯曲振动情况,在对照组中,刚心的位移随时间变化存在两个峰值,第二个峰值与动静干涉即动叶被扫掠过的频率 7 999 Hz 吻合,而在热流固耦合的条件下仅在叶片一阶弯曲处存在一个峰值。因此,热流固耦合中热应力是影响其主要变形的因素,气动载荷对其变形的贡献次之,而在对照组得到的振动对气动载荷这一主要因素的响应更为明显。对照组前后缘振动的第二个峰值的频率为 7 339 Hz,与动静干涉的频率更为接近,即受交变气动载荷的驱动,其在第二个峰值的分量更大。

4.3 热流固耦合场下叶尖位移对流动和换热的影响分析

固体叶片造成的网格运动传递至流体边界时将产生网格运动和变形,其中叶尖最大位移在 0.3 mm。在许多叶片振动的简化研究中,通常只对固体叶片施加气动载荷而不考虑固体的变形对流场的影响。通过三维热流固耦合的计算结果,可说明微小变形在耦合计算中的重要性。

图 17 提取了不同时刻 90% 叶高截面处叶片表面的压力分布。通过保证动静叶均处于相同的相位,来排除动静叶不同的相对位置对动叶表面气动力的影响。可以明显看出,不同时刻叶片表面上静压的差异,即叶片微小的变形能带来气动上可观的变化。图 18 所示为热流固耦合数值结果所得的不同时刻下 90% 叶高截面处叶片表面的热流密度分布,可见除了气动上的差异外,微小的变形也带来了明显的传热差异。总之,以往不考虑固体的变形对流场影响的简化研究与真实情况是存在差异的,尤其是在考虑叶片换热和热应力的耦合计算中,流体的边界运动和计算域变形是极其重要的。

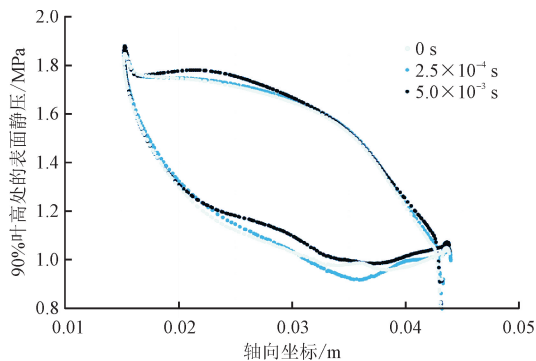


图 17 耦合场叶片形变下同一动静叶相位不同时刻叶表静压分布

Fig. 17 Static pressure distribution of the same stator and rotor phase at different times under the coupling field

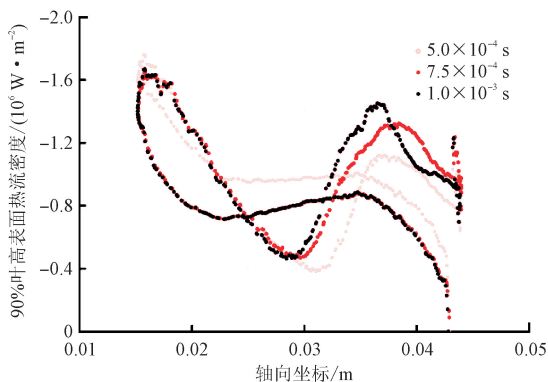


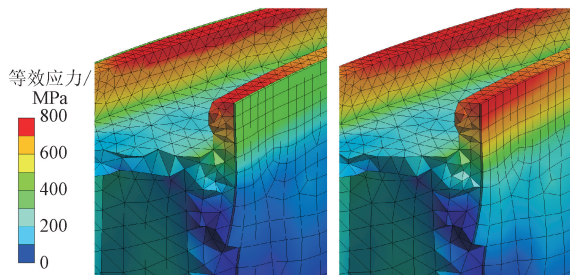
图 18 在耦合场叶片形变下同一动静叶相位不同时刻叶表热流密度分布

Fig. 18 Heat flux density distribution of the same stator and rotor phase at different times under the coupling field

4.4 热障涂层对叶片振动特性影响

热障陶瓷涂层会影响叶片整体耦合振动,主要原因有:①涂层阻隔了一部分热负荷,降低了叶片的整体温度,金属材料的力学特性随着温度变化从而其振动特性发生改变;②涂层的密度、模量和热膨胀系数与高温合金不尽相同,涂层会影响叶片整体的质量和刚度从而改变其振动特性。上述两者都会进一步影响流场的变化,如此循环造成整个热流固耦合特性的变化;③陶瓷涂层的模量比金属基低,其密度也低于金属基,根据一维无阻尼自由振动公式,其弹性模量和质量的改变会引起固有频率变化。为此,本小节研究在三维复杂热流固耦合环境下,陶瓷涂层弹性力学特性对叶片振动的影响规律。

本节同样设置一个对照组,即把陶瓷涂层的弹性力学参数设置为高温合金的力学参数,其传热参数依旧保持不变。对照组的应力分布如图 19 所示。可见,相比对照组,真实涂层参数条件下高温金属的模量大于陶瓷涂层,高应力大部分是由金属基承担,但对照组的陶瓷涂层也会呈现较大的应力。



(a) 原始 TBC 参数

(b) 变更 TBC 参数后

图 19 TBC 的弹性力学参数改变前后等效应力对比

Fig. 19 Comparison of equivalent stress before and after the change of elastic mechanical parameters of TBC

如图 20 所示,对照组与真实涂层的热流固耦合的振动特性十分接近,如果绘制形变云图或者位移线图,两者几乎看不出任何区别。经过对位移数据进行快速傅里叶变换,振动的两个峰值频率分别为 4 523 Hz 和 7 327 Hz,比真实频率分别高出 0.51% 和 0.18%,可见其差异十分微小。

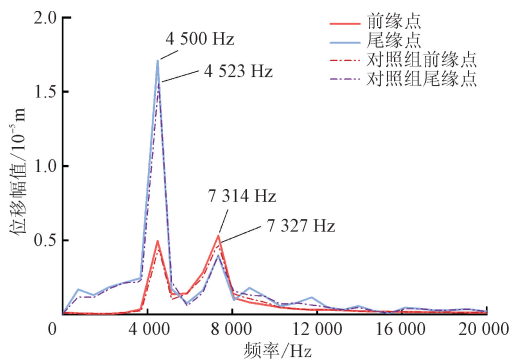


图 20 TBC 的弹性力学参数改变前后叶片振动特性对比
Fig. 20 Comparison of blade vibration characteristics before and after the change of elastic mechanical parameters of TBC

因此,在叶片表面喷涂陶瓷涂层,其核心的影响机理是陶瓷涂层改变了叶片的耦合换热特性和金属基的温度分布,形成了不一样的热应力分布,从而引起耦合条件下振动特性的改变。由于陶瓷涂层本身非常薄,单从弹性力学特性方面看,其对叶片热流固耦合条件下振动特性的影响极小。

5 结 论

本文以 GE-E3 高压涡轮第一级静叶和动叶为研究对象,应用动网格方法和双重运动方法,构建了热流固耦合数值模拟基本框架,并对动静交错环境下带陶瓷涂层的涡轮叶片进行了热流固耦合数值分析与研究,主要结论如下。

(1)在热流固耦合计算中,数据的跨求解器传递流体和固体之间节点传递的位移、气动力误差均方根不超过 0.1%,温度误差均方根不超过 0.001%。动叶在流固耦合数值计算中只考虑气动载荷及变形,其最大位移为 4.95×10^{-5} m。在热流固耦合中,同时考虑气动载荷热负荷及变形,其最大位移为 2.09×10^{-4} m。两种耦合下的振动形态均为一阶弯曲及扭转振动形态的混合,其响应频率与其固有频率接近。除了总变形存在着数量级的差异以外,热流固耦合的应力分布和单流固耦合也不同,其应力的主要来源是热应力,叶根前缘应力为 496.9 MPa,

亦比流固耦合高一个数量级。

(2)动叶在气动载荷和热载荷下的变形会进一步影响作用在叶片上的气动力和热负荷。由于其变形,叶尖附近的静压变化达 87 kPa(相较于当地静压占比 9.44%),热流密度变化达 4.6×10^5 W/m²(相较于当地热流密度占比 39.7%),即在考虑叶片换热和热应力的耦合计算中,叶片振动产生的微小边界运动与计算域变形是极其重要的。

(3)陶瓷热障涂层对叶片振动影响的核心机理是涂层改变了叶片的耦合换热特性和金属基的温度分布,形成了不一样的热应力分布,从而引起其耦合条件下振动特性的改变,单从弹性力学特性方面看,这对叶片热流固耦合条件下振动特性的影响极小。

真实的动叶通过枞树型叶根固定在轮盘上,若要计算得到叶片的真实振动结果,未来需要考虑叶片端壁的几何构型、叶根与轮盘的接触,以及轮盘和转子轴构成的整个系统。此外,使用热流固耦合研究可以同时准确地得到涡轮叶片上各处的温度和应力,从而预测相应时间内的蠕变量,未来应开展基于涡轮叶片热流固耦合的蠕变及疲劳寿命研究。

参考文献:

- [1] 陈矛章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议 [J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 1-15.
CHEN Maozhang. Development of fan/compressor techniques and suggestions on further researches [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 1-15.
- [2] 张明明, 李绍斌, 侯安平, 等. 叶轮机械叶片颤振研究的进展与评述 [J]. 力学进展, 2011, 41(1): 26-38.
ZHANG Mingming, LI Shaobin, HOU Anping, et al. A review of the research on blade flutter in turbomachinery [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(1): 26-38.
- [3] 吴锦涛, 王珺, 徐自力, 等. 高转速部分进气涡轮盘气流量及叶片振动响应研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 108-117.
WU Jintao, WANG Jun, XU Zili, et al. Airflow force and vibration response for high speed partial-admission turbine disk [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 108-117.
- [4] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] GILES M B. Stator/rotor interaction in a transonic turbine [J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(5): 621-627.
- [6] SONDAK D L, DORNEY D J. Simulation of coupled

- unsteady flow and heat conduction in turbine stage [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(6): 1141-1148.
- [7] HWANG S, SON C, SEO D, et al. Comparative study on steady and unsteady conjugate heat transfer analysis of a high pressure turbine blade [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 765-775.
- [8] RAHAIM C P, KASSAB A J, CAVALLERI R J. Coupled dual reciprocity boundary element/finite volume method for transient conjugate heat transfer [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, 14(1): 27-38.
- [9] HERNÁNDEZ R A, MAZUR C Z, BAUTISTA P E A, et al. Unsteady 3-D conjugated heat transfer simulation of a thermal barrier coated gas turbine bucket [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2009: 2413-2423.
- [10] MAKHIJA D S, BERAN P S. Time scale effects in topology optimization of the interior material distribution of a body subject to transient conjugate heat transfer [C]//AIAA Scitech 2019 Forum. Reston, VA, USA: AIAA, 2019: AIAA 2019-1468.
- [11] SCHMIDT M, STARKE C. Comparison of steady and unsteady coupled heat-transfer simulations of a high-pressure turbine blade [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2015: V05AT10A016.
- [12] HE L, OLDFIELD M L G. Unsteady conjugate heat transfer modeling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3): 031022.
- [13] 周盛. 叶轮机气动弹性力学引论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 65-74.
- [14] DAVISON J B, FERGUSON S W, MENDONÇA F G, et al. Towards an automated simulation process in combined thermal, flow and stress in turbine blade cooling analyses [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2008: 2641-2648.
- [15] DAWES W N, KELLAR W P, HARVEY S A. Towards cooled turbine preliminary life prediction via concurrent aerodynamic, thermal and material stress simulations on conjugate meshes [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2010: 711-722.
- [16] COLLARD J E III, CIZMAS P G A. Blade-forced vibration effects on turbomachinery rotor-stator interaction [C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2001: AIAA 2001-3472.
- [17] 全金楼, 张伟伟, 苏丹, 等. 基于 CFD/CSD 时域耦合方法的多通道叶栅颤振分析 [J]. *航空学报*, 2013, 34(9): 2019-2028.
- QUAN Jinlou, ZHANG Weiwei, SU Dan, et al. Flutter analysis of turbomachinery cascades based on coupled CFD/CSD method [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2019-2028.
- [18] 周迪, 陆志良, 郭同庆, 等. 基于 CFD/CSD 耦合的叶轮机叶片失速颤振计算 [J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1076-1085.
- ZHOU Di, LU Zhiliang, GUO Tongqing, et al. Stall flutter computation of turbomachinery blade based on a CFD/CSD coupling method [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1076-1085.
- [19] RADEMAKER E R, HULS R A, SOEMARWOTO B I, et al. Modeling approach to calculate redistributions of HPT-shroud cooling channels minimizing thermal stresses including some turbine blade tip effects [C]//ASME 2013 Turbine Blade Tip Symposium. New York, USA: ASME, 2013: V001T05A003.
- [20] 谢永慧, 邓实, 张获, 等. 基于热流固耦合分析的重型燃气轮机透平高压叶片寿命研究 [J]. *热力透平*, 2011, 40(3): 151-158.
- XIE Yonghui, DENG Shi, ZHANG Di, et al. Study on life prediction for HP turbine blade of heavy-duty gas turbine based on analysis of multi-factor coupling physical fields [J]. *Thermal Turbine*, 2011, 40(3): 151-158.
- [21] 黄朝晖, 袁奇, 张弘斌, 等. 某型火箭发动机涡轮转子流热固耦合强度及疲劳寿命分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(8): 73-84.
- HUANG Chaohui, YUAN Qi, ZHANG Hongbin, et al. Analysis of fluid-thermal-solid coupling strength and fatigue life of a certain rocket engine turbine rotor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(8): 73-84.
- [22] 汤文章. 基于流固耦合热障涂层涡轮叶片应力场的数值模拟 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- [23] GUO Zhaoyuan, WANG Qiang, DONG Ping, et al. The key techniques for thermal-flow-elastic coupling numerical simulation platform in turbines [C]//ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2008: 1077-1083.
- [24] 李涛. 基于非结构网格的气冷涡轮气热弹耦合数值计算 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

- [25] 李立州,王婧超,吕震宙,等. 涡轮叶片流固耦合协作优化方法 [J]. 推进技术, 2008, 29(5): 604-608.
LI Lizhou, WANG Jingchao, LÜ Zhenzhou, et al. Collaborative optimization method for fluid-solid coupling problem of turbine blades [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 604-608.
- [26] XU Ning, LIU Zhansheng, PENG He. Transient thermal stress analysis of the typical structures in turbine rotor based on thermomechanical analysis [C]//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, USA: ASME, 2014: V05CT20A006.
- [27] 艾延廷,刘仲尧,王志. 起动阶段涡轮导向叶片热应力及冷却作用研究 [J]. 机械设计与制造, 2015(1): 97-100.
AI Yanting, LIU Zhongyao, WANG Zhi. Research of thermal stress and cooling effect on a turbine guide vane during the start-up period [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(1): 97-100.
- [28] 陈刚,李跃明. 非定常流场降阶模型及其应用研究进展与展望 [J]. 力学进展, 2011, 41(6): 686-701.
CHEN Gang, LI Yueming. Advances and prospects of the reduced order model for unsteady flow and its application [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 686-701.
- [29] 汪翔宇,丰镇平. 涡轮叶片振动对其换热影响的数值研究 [C]//中国工程热物理年会 2017 年学术年会论文. 2017: 20172146.
- [30] 西安交通大学. 叶轮机械流动仿真计算方法及系统: CN202311167825.8[P]. 2023-12-12.
- [31] WANG X Y, FENG Z P. Study on vibration characteristics of rotor blades and damping scheme with film cooling holes under rotor-stator interaction [C]//The 15th International Symposium on Ultrasonic Applications and Advanced Acoustic Technologies. Oxford, UK: ISUAAAT, 2018: ISUAAAT15-085.
- [32] 杨星,汪翔宇,丰镇平. 涡轮叶片综合冷却有效度评价指标研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(7): 1642-1648.
YANG Xing, WANG Xiangyu, FENG Zhenping. A study on scaling method of turbine blade metal temperatures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(7): 1642-1648.

(编辑 亢列梅)