

# 基于 POD 降阶技术的冲击/气膜冷却壁 温度场快速预测方法

张钟文, 黄伟宸, 王鸿江, 董 含, 王炜哲, 周文武  
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200241)

**摘要:** 复杂换热结构的热特性分析和控制策略制定依赖于对温度场的在线评估, 针对冲击/气膜冷却壁, 采用本征正交分解方法结合稀疏温度传感器数据实现三维稳态温度场的快速重构。首先, 建立流固耦合模型, 并基于有限体积法进行数值模拟, 生成温度场数据样本; 随后, 基于数值模拟数据样本建立快照矩阵, 通过 POD 方法构建降阶模型, 实现绝热与非绝热工况下的温度场快速重构; 最后, 结合数值模拟结果以及实验数据验证模型的准确性, 并进一步评估降阶模型在中央处理器硬件平台的计算效率。结果表明: 在非绝热工况中重构结果与实验结果高度一致, 在绝热工况下重构结果与仿真结果的相对误差不超过 0.18%; 模型能够在 0.001 s 内完成温度场的快速预测, 相较于传统数值模拟方法, 降阶模型的加速比达到了  $1.8 \times 10^7$ ; 所提方法为工程应用中温度场的实时监测和分析提供了可行的技术手段。

**关键词:** 本征正交分解; 数值模拟; 双层壁冷却; 降阶模型; 温度场预测

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.003

[引用本文格式] 张钟文, 黄伟宸, 王鸿江, 等. 基于 POD 降阶技术的冲击/气膜冷却壁温度场快速预测方法[J]. 热能动力工程, 2025, 40(4): 24-32. ZHANG Zhongwen, HUANG Weichen, WANG Hongjiang, et al. Efficient temperature field prediction method of an impingement/film cooling wall based on POD reduced-order technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 24-32.

## Efficient Temperature Field Prediction Method of an Impingement/Film Cooling Wall based on POD Reduced-Order Technology

ZHANG Zhongwen, HUANG Weichen, WANG Hongjiang, DONG Han, WANG Weizhe, ZHOU Wenwu  
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200241)

**Abstract:** Accurate analysis and control strategy formulation of the thermal performance of complex heat exchange structures require real-time evaluation of their temperature fields. The impingement/film cooling walls were investigated and a reduced-order model (ROM) was introduced based on proper orthogonal decomposition (POD) and sparse temperature sensor data to rapidly reconstruct three-dimensional steady-state temperature fields. First, a fluid-structure coupling model was established, and a numerical simulations based on the finite volume method (FVM) were performed to generate temperature field data samples. Next, a snapshot matrix was constructed from the numerical simulation data sample, and a reduced-order model was built using the POD method to realize rapid reconstruction of the temperature field under both adiabatic and non-adiabatic conditions. Finally, the model's accuracy was verified through comparisons with both numerical simulation results and experimental data, and the computational efficiency of the reduced-order model was further assessed on a central processing unit (CPU) hardware platform. The results indicate that the reconstructed results are in high agreement with experimental data under non-adia-

batic conditions, and the relative error between the reconstructed and simulated results does not exceed 0.18% under adiabatic conditions. The model can achieve rapid temperature field prediction within 0.001 second, with a speed-up factor of up to  $1.8 \times 10^7$  compared to traditional numerical simulation methods. This approach provides a feasible technical means for the real-time monitoring and analysis of temperature fields in engineering applications.

**Key words:** proper orthogonal decomposition, numerical simulation, double-wall cooling, reduced-order model, temperature field prediction

## 引言

冲击/气膜复合冷却是一种结合冲击冷却和气膜冷却的高效冷却策略,与传统单一冷却相比,这种策略显著提高了冷却效率,并在电子系统、燃烧室衬板、涡轮叶片和加力燃烧室等高冷却性能需求的领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。然而,其复杂的冷却结构使流动和传热过程更加复杂,因此准确评估该结构的温度场对于工程系统中高温组件的设计、操作和维护至关重要<sup>[5-6]</sup>。

现有的温度场测量方法存在多种限制。热电偶只能测量单点温度,且测量过程中可能干扰流场;示温漆等涂层技术虽能提供面分布温度测量,适合非接触式离线测温,但其应用受到相机拍摄角度等因素的限制,此外,示温漆在流体冲刷作用下容易脱落,从而进一步限制了其适用场景<sup>[7]</sup>。传统的全阶数值计算方法(如有限元方法和有限体积法等)可提供详细的三维温度场数据以预测热行为,但面对在线运维等具有高实时性要求的场景,全阶模型的高计算成本成为限制其工程应用的主要障碍。

基于本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)的模型降阶方法,通过构建具有更小自由度且计算成本低的降阶模型(Reduced-order Model, ROM)代替复杂的全阶模型,能够显著提高计算效率,从而可以快速获得物理场分布,被广泛应用于流体力学和固体力学等领域<sup>[8-9]</sup>。本文以冲击/气膜冷却壁为研究对象,首先通过有限体积法(Finite Volume Method, FVM)对不同工况下的稳态温度场开展数值模拟,生成数值快照样本集<sup>[10-12]</sup>;然后,通过分析冲击/气膜冷却壁的特征模态分布以及传感器相关系数等,结合有限传感数据和子空间正交向量,建立子空间投影的降阶模型,完成温度场快速重构。最后,通过对比不同工况下的重构温度值与实

验传感器数据<sup>[13]</sup>,验证了所提方法的可行性与准确性,并进一步量化了其计算成本。

## 1 双层壁数值模拟

### 1.1 物理模型

本研究中风道及双层壁面物理模型参考文献[13]的实验结构,如图1所示。

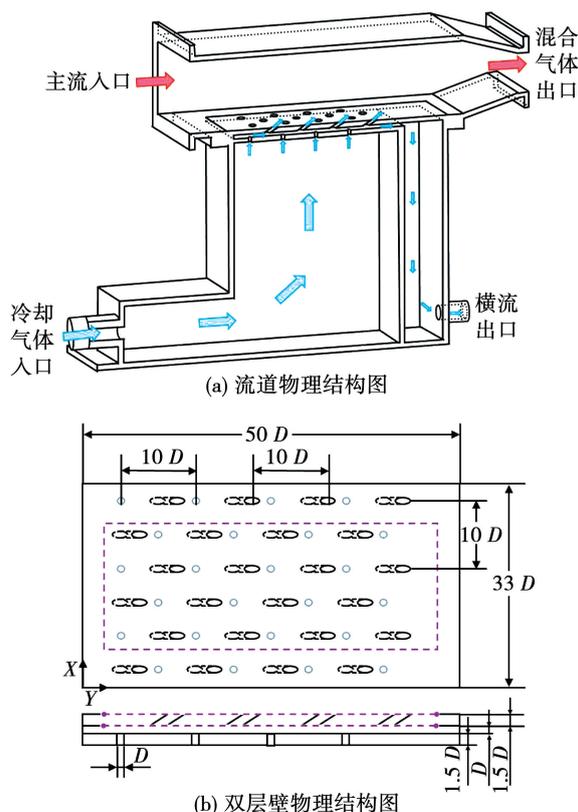


图1 双层壁换热实验台物理结构

Fig. 1 Physical structures of double-wall heat exchange experimental platform

主流入口处进气道截面为  $303 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ , 进气道长度为  $498 \text{ mm}$ ; 实验中双层壁结构如图1(b)所示, 尺寸为  $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , 孔的排列为交错排列, 冲击孔为垂直钻孔, 直径  $D$  为  $6 \text{ mm}$ , 气膜孔倾

斜角度为  $30^\circ$ 。冲击板和气膜板的厚度均为  $1.5D$ ，板间距(即横流流道高度)为  $D$ ，沿主流流向各孔间的间距为  $10D$ 。其中虚线部分为实验感兴趣区域，该区域的实验温度场数据将用作模型验证。模型所有部件材料均为有机玻璃(PMMA)，主流气体为空气，冷却气体为氮气。其中，氮气从冷却气体入口进入，经由冲击孔进入双层壁的内部横流流道，一部分作为气膜孔的气膜冷却流体，另一部分作为内部横流流体流出。

本文采用 ANSYS FLUENT 商业软件通过有限体积法进行数值模拟计算。模型计算域包括固体域和流体域两部分，固体域为风道及双层板复合结构，流体域为冷却气体及主流气体。网格划分如图 2 所示，其中图 2(a) 为实验台的整体网格情况，包括流道和双层壁的固体域以及冷却气体和主流的流体域，图 2(b) 进一步展示了双层壁固体域的网格划分情况。针对冲击孔和气膜孔等复杂小尺寸结构，采取非结构化网格进行加密，网格数量为 726 万，其中边界层第一层厚度  $0.01 \text{ mm}$ ， $y^+$  值为 1.005。本文中的计算采用流固耦合方法，并采用  $k-\varepsilon$  湍流模型。

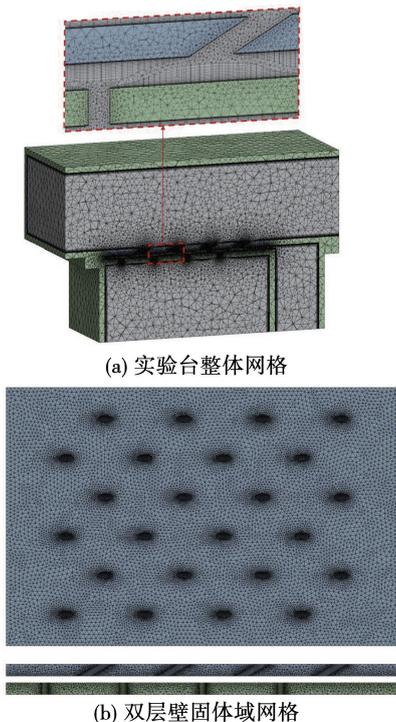


图 2 计算域网格

Fig. 2 Meshes of computational domain

## 1.2 工况设置

定义冲击板下壁面加热膜所产生的热流密度为  $Q_{\text{foil}}$ ，空气温度为  $T_r$ ，冷却气体氮气温度为  $T_c$ 。分别定义冲击雷诺数  $Re_{\text{jet}}$  和内部横流质量流量比 CMR 如式(1)和式(2)所示。

$$Re_{\text{jet}} = \frac{U_{\text{jet}} D}{\nu} \quad (1)$$

$$\text{CMR} = \frac{m_{\text{int}}}{m_0} \quad (2)$$

式中： $U_{\text{jet}}$ —冲击孔的射流流速， $\text{m/s}$ ； $D$ —冲击孔直径， $\text{mm}$ ； $\nu$ —射流气体的运动粘度， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $m_{\text{int}}$ —内部横流的质量流量， $\text{kg/s}$ ； $m_0$ — $Re_{\text{jet}}$  为 20 000 时氮气入口质量流量， $\text{kg/s}$ 。

为了与文献[13]中的实验结果对比以验证本文所提模型的准确性，数值模拟工况划分及其参数设置与文献[13]中实验保持一致。具体工况参数如表 1 所示，主流流速均为  $48.7 \text{ m/s}$ ，其中工况 3 由于受到实验冷却气体进出口压降的限制，在实验中该工况并不存在，其余仿真工况与实验中的工况一一对应。

表 1 仿真工况参数设置

Tab. 1 Parameter settings in simulation cases

工况	$Re_{\text{jet}}$	CMR	热流密度 $Q_{\text{foil}}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	空气温度 $T_r/\text{K}$	氮气温度 $T_c/\text{K}$
1	10 000	0	1 870	292.08	291.30
2	10 000	0.2	1 870	292.03	291.36
3	10 000	0.3	1 870	292.05	291.29
4	15 000	0.1	2 697.19	292.49	292.9
5	15 000	0.25	2 697.19	292.79	293.04
6	20 000	0	2 776.67	291.33	292.84
7	20 000	0.2	3 130.83	291.34	294.52
8	20 000	0.3	3 130.83	291.30	294.34
9	25 000	0.1	2 776.67	293.34	301.97
10	25 000	0.25	2 776.67	294.29	300.89
11	10 000	0.1	1 870	291.97	291.29
12	10 000	0.25	1 870	292.05	291.29
13	15 000	0	2 697.19	292.25	292.36
14	15 000	0.2	2 697.19	292.69	293.16
15	15 000	0.3	2 697.19	292.87	292.84
16	20 000	0.1	3 130.83	291.38	294.78
17	20 000	0.25	2 422.50	294.92	299.33
18	25 000	0	2 776.67	293.53	302.11
19	25 000	0.2	3 609.67	293.00	301.54
20	25 000	0.3	3 609.67	292.64	300.04

### 1.3 模型验证

选取了网格数量分别为 282.19 万, 337.21 万, 432.45 万, 528.96 万, 648.62 万, 726.17 万以及 802.44 万的网格进行无关性验证, 以计算工况 6 的仿真结果为例, 网格无关性验证结果如图 3 所示, 综合考虑计算精度与计算效率, 选择 726.17 万作为数值模拟的网格数。

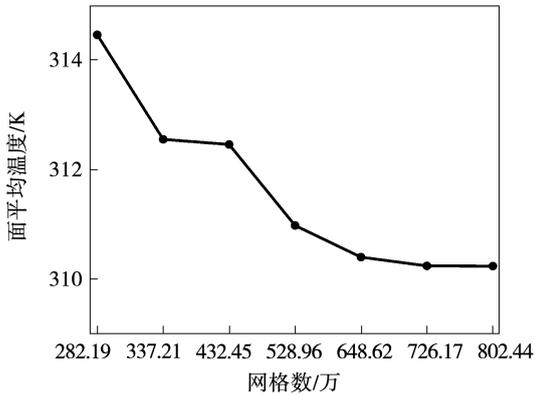
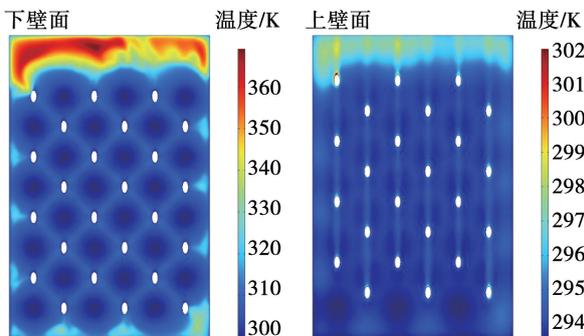


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

进一步分析工况 6 的仿真稳态温度场分布情况, 如图 4(a) 所示, 可以看出, 由于冲击冷却和气膜冷却的影响, 冲击区域和气膜覆盖区域分别呈现出相应的温度分布, 冲击/气膜冷却壁的最高温度区域出现在没有气膜覆盖且没有冲击冷却的区域, 整个壁面最大温差约为 70 K。将该工况下沿主流方向的实验感兴趣区域表面的温度平均值与文献[13]中的实验结果进行对比, 由图 4(b) 可知, 模拟结果与实验结果吻合良好, 验证了模型的准确性。



(a) 仿真温度场

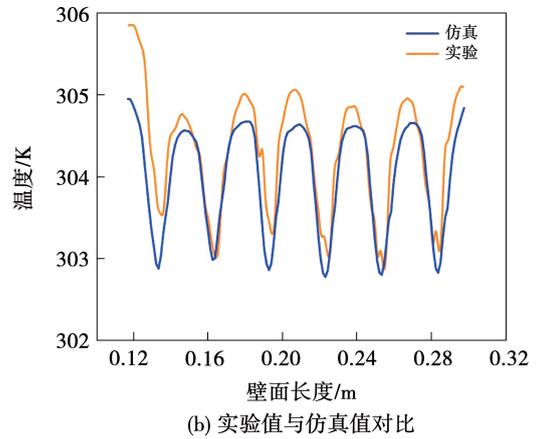


图4 工况 6 仿真温度场与实验温度场对比

Fig. 4 Comparison of temperature fields between simulated and experimental results for case 6

## 2 冲击/气膜冷却壁的温度场降阶模型

本节基于本征正交分解方法, 结合有限传感数据和子空间正交向量, 建立子空间投影的降阶模型。该模型能够高效地重构冲击/气膜冷却壁的全局温度场, 从而实现对全局温度状态的快速预测, 甚至满足在线重建的需求。

### 2.1 模型降阶方法

大规模离散空间  $V$  中的任何向量  $\mathbf{v}$  都可以在一组正交基上展开, 如式(3)所示。

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \boldsymbol{\psi}_i, \mathbf{v} \in V \quad (3)$$

式中:  $\boldsymbol{\psi}_i$ —正交基的第  $i$  个向量;  $\alpha_i$ —第  $i$  个向量对应的投影系数;  $N$ —正交基中向量的总数。

向量  $\mathbf{v}$  可以由其中截取出的前  $r$  阶多项式近似表示。当  $\mathbf{v}$  用于传热问题时, 离散节点的原始全阶温度矢量  $\mathbf{T}$  可以由式(4)近似表示。

$$\mathbf{T} = \tilde{\mathbf{T}}_r + E_{\text{trunc}} \approx \sum_{i=1}^r \alpha_i \boldsymbol{\psi}_i \quad (4)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{T}}_r$ —低维近似温度向量;  $E_{\text{trunc}}$ —截断误差。

为了确保低阶物理场的准确性, 截断误差  $E_{\text{trunc}}$  必须是相对于低维近似的温度向量的高阶无穷小。

POD 是建立正交矩阵并满足该截断误差假设的有效方法<sup>[14]</sup>。正交矩阵可以从快照矩阵中提取, 快照可以由有限体积法获得的数据组成。快照矩阵  $\mathbf{u}$  通常由不同工况下的温度数值解组成, 如式(5)

所示。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{1n} \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ T_{m1} & \cdots & T_{mn} \end{bmatrix} \in R^{m \times n} \quad (5)$$

式中:  $T_{mn}$ —节点位置  $m$  在第  $n$  个工况下的温度值,  $K$ ;  $m$ —全阶数值仿真模型网格节点数, 即离散的自由度数量;  $R$ —实数域中的矩阵空间。

使用奇异值分解来提取其正交基向量, 如式(6)和式(7)所示。

$$A\varphi_i = \lambda_i \varphi_i \quad (6)$$

$$A = \mathbf{u}^T \mathbf{u} \in R^{n \times n} \quad (7)$$

式中:  $\varphi_i$ —第  $i$  个特征向量;  $\lambda_i$ —第  $i$  个特征值;  $A$ —根据快照矩阵  $\mathbf{u}$  得到的相关矩阵。

随后, 结合特征向量  $\varphi$  和快照矩阵  $\mathbf{u}$  可以获得一组正交的 POD 基函数, 如式(8)所示。

$$\psi_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \mathbf{u} \varphi_i \in R^{m \times 1} \quad (8)$$

将等式(8)中获得的正交向量按其特征值的大小进行排列, 并且每一阶特征值的占比可以量化为式(9)。

$$e_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (9)$$

式中:  $e_i$ —第  $i$  阶特征值占比。

提取占比最大的前  $r$  阶正交向量, 前  $r$  个正交向量的比例可以表示为式(10)。为了准确捕捉物理状态的最重要特征, 并且使得正交基的数量  $r$  足够小, 方程中的  $r$  值通常需要满足式(11)中的比例准则。

$$E_{\text{prop}} = \sum_{i=1}^r e_i \quad (10)$$

$$E_{\text{prop}}(r) \geq \delta \quad (11)$$

式中:  $E_{\text{prop}}$ —前  $r$  阶正交向量的比例;  $\delta$ —占比判断准则数, 通常取 99.999 9%。

在基于本征正交分解方法获得一组约简的正交向量后, 为了满足截断误差的要求, 温度场的降维重建可以表征为最小二乘问题, 如式(12)所示。

$$S = \left\| \begin{bmatrix} T_1^{\text{mea}} \\ \vdots \\ T_M^{\text{mea}} \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^r \alpha_i \tilde{\psi}_i \right\|_2^2 \leq \varepsilon, \quad \tilde{\psi}_i \in R^{M \times 1} \quad (12)$$

$$\tilde{\psi}_i^k = \psi_i^j, \quad j = \text{No.}(T_k^{\text{mea}}), \quad k \in [1, M] \quad (13)$$

式中:  $S$ —温度目标函数;  $T_M^{\text{mea}}$ —由温度传感器测得第  $M$  个位置处的温度数据;  $\varepsilon$ —很小的正数来表示收敛误差;  $\tilde{\psi}_i$ —第  $i$  个正交向量的约简向量;  $\text{No.}(T_k^{\text{mea}})$ —在有限体积离散格式中第  $k$  个测量温度位置处相对应的节点编号;  $\psi$ —基于本征正交分解方法得到的正交基向量。

为了求解式(12)中的  $r$  个位置参数, 最佳投影系数可以通过式(14)来求得。

$$\alpha^{\text{opti}} = (\tilde{\Psi}^T \tilde{\Psi})^{-1} \tilde{\Psi}^T T^{\text{mea}} \quad (14)$$

$$T^{\text{mea}} = \begin{bmatrix} T_1^{\text{mea}} \\ \vdots \\ T_M^{\text{mea}} \end{bmatrix}, \quad T^{\text{mea}} \in R^{M \times 1} \quad (15)$$

$$\tilde{\Psi} = [\tilde{\psi}_1 \cdots \tilde{\psi}_r], \quad \tilde{\psi}_i \in R^{M \times r} \quad (16)$$

$$\alpha^{\text{opti}} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{\text{opti}} \\ \vdots \\ \alpha_r^{\text{opti}} \end{bmatrix}, \quad \alpha^{\text{opti}} \in R^{r \times 1} \quad (17)$$

式中:  $\alpha^{\text{opti}}$ —最佳投影系数;  $T^{\text{mea}}$ —测量温度向量;  $\tilde{\Psi}$ —约简正交基矩阵。

最后, 全局温度场可以由正交向量及其最佳投影系数来近似得到, 如式(18)和式(19)所示。

$$T^{\text{pod}} = \sum_{i=1}^r \alpha_i^{\text{opti}} \psi_i \in R^{m \times 1} \quad (18)$$

$$T_j^{\text{pod}} = T_k^{\text{mea}}, \quad j = \text{No.}(T_k^{\text{mea}}), \quad k \in [1, M] \quad (19)$$

## 2.2 数据驱动降阶模型

基于上述方法, 建立子空间投影降阶模型以重构冲击/气膜冷却壁温度场。

根据表 1 中的仿真工况 1~10 的全局温度场来构建快照矩阵, 进而开展特征分析获取温度场分布的正交基向量, 并用于子空间投影降阶模型的构建。工况 11~20 作为样本外的外推工况, 其计算结果用来验证所提方法的泛化性。该样本划分方式所遵循的原则是确保有代表性的典型工况在样本内外均有分布。这种划分方式一方面提升了降阶模型的准确性, 另一方面通过确保样本外的典型工况足够全面, 可以更充分地验证所提模型的准确性。

将包含前 10 个工况的温度场快照矩阵应用 POD 方法进行特征分析, 获取各阶正交基向量及对

应的能量占比,如图5所示<sup>[15]</sup>。由图5可知,前几阶正交基能量占比较高,能量占比随阶数增加呈指数下降。其中,前3阶特征值基向量的能量占比已经超过了总能量的99.9999%。这一结果表明,温度场的主要特征可以被前3阶正交基充分描述,而后续高阶基向量的能量贡献可以忽略不计。基于上述特征分析,忽略能量占比较低的正交基,选择前3阶特征值对应的正交基作为子空间投影的基向量。通过这种处理,不仅显著降低了计算的复杂度,同时也保留了温度场的主要分布特征。根据式(12)所描述的温度场重构方法,至少需要3个传感器采集的温度数据来求解最小二乘问题。

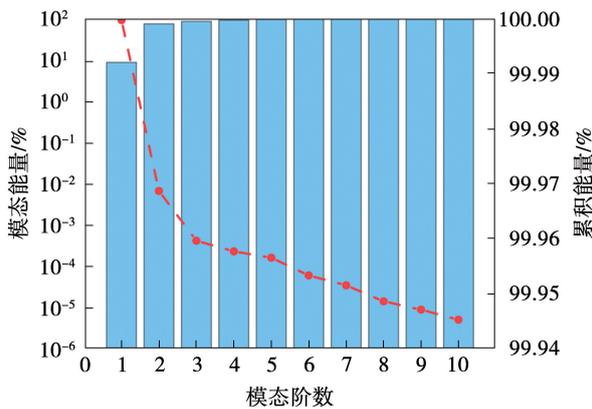


图5 各阶模态能量占比

Fig. 5 Model energy proportion of each order

图6为前4阶正交基对应的归一化温度模态,模态分析可以描述前4阶特征值所表征的温度空间分布规律,温度模态 $F$ 可以用对应的正交基向量表示,如式(20)所示。

$$F_i = uu^T \psi_i, i \in [1, 4], F_i \in R^{m \times 1} \quad (20)$$

从图6可以看出,1阶模态分布与稳态温度场分布相似,反映出整体的温度分布规律。其他3阶模态体现了局部细节处的温度分布特征。具体而言,1阶模态捕捉了温度场的全局特性,展示了整体的传热趋势与分布状态,表明该模态在重构温度场时占据主导地位。然而,仅依靠1阶模态难以描述局部温度场的细节变化。2阶和3阶模态逐渐揭示出温度场中的局部细节特征。

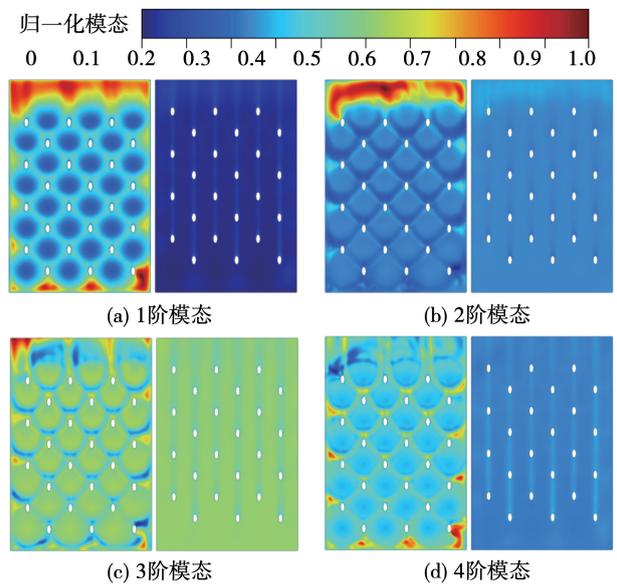


图6 温度场分布的前4阶模态

Fig. 6 First four order modes in temperature field distribution

### 2.3 温度传感器相关性分析

在重构温度场之前首先要分析壁面传感器位置处的正交基向量的线性相关性,以确保式(12)中最小二乘方程的适定性。传感器位置分布如图7(a)所示,其中传感器1,4,5为热电偶,传感器2,3,6,7的实验测量数据由文献[13]中温敏涂层技术获得;传感器5位于气膜冷却壁面一侧,其余传感器位于冲击冷却壁面一侧。

通过传感器的相关性分析也可以进一步确定传感器的位置最优选择,以减少非必要传感器的使用。

传感器位置处正交基向量的相关性如图7(b)所示,从7个传感器位置处的两两相关性分析的结果可以看出,6和7传感器的相关系数达到0.9997,其他传感器的相关系数相对较低。所以,在重构温度场时,为了减少传感器的使用数量,并避免方程的不适定性,以上较强相关性的传感器只选择二者之一。例如,本次重构选择1,2,3,4,7号传感器,虽然只有5个传感器,但是由于冲击/气膜冷却壁的降阶模型只包含前3阶特征,所以最小二乘问题依然是一个超定问题,可以据此求得稳定的数值解。未参与重构的2个传感器可以用于验证温度场重构结果的准确性。

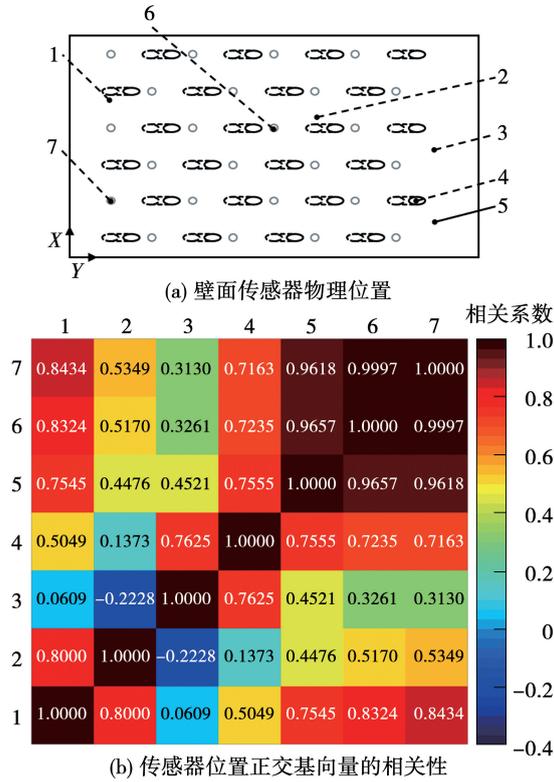


图7 传感器位置及其位置处正交基向量的相关性

Fig.7 Locations of the sensors and correlation matrix of orthogonal vectors at these locations

温度传感器两两之间对应的相关性可以定义为式(21)。

$$\beta = \frac{\text{cov}(\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q)}{\sigma \mathbf{x}_p \sigma \mathbf{x}_q}, \quad p \text{ 和 } q \in [1, 7] \quad (21)$$

式中： $\beta$ — $p$  和  $q$  传感器的相关性； $\text{cov}$ —协方差； $\sigma$ —标准差； $\mathbf{x}_p$ —第  $p$  个传感器位置处对应的正交基向量。

这 7 个传感器位置处对应的前 3 阶正交基可以表示为式(22)。

$$\tilde{\psi} = [\tilde{\psi}_1 \ \tilde{\psi}_2 \ \tilde{\psi}_3] = \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_1^{\frac{1}{1}} & \tilde{\psi}_2^{\frac{1}{1}} & \tilde{\psi}_3^{\frac{1}{1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\psi}_1^k & \tilde{\psi}_2^k & \tilde{\psi}_3^k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\psi}_1^M & \tilde{\psi}_2^M & \tilde{\psi}_3^M \end{bmatrix}, \quad k \in [2, M-1], M = 7 \quad (22)$$

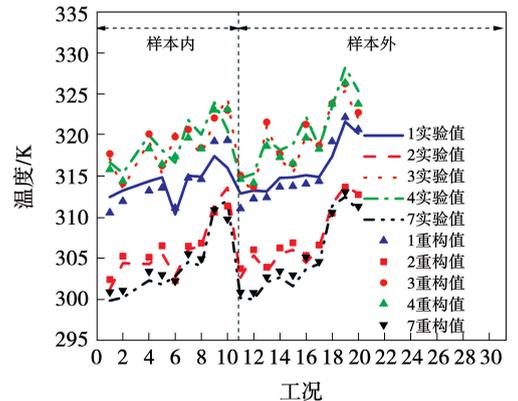
式中： $\tilde{\psi}_i^k$ —第  $i$  个正交基向量  $\tilde{\psi}_i$  的第  $k$  个元素。

#### 2.4 温度场重构验证分析

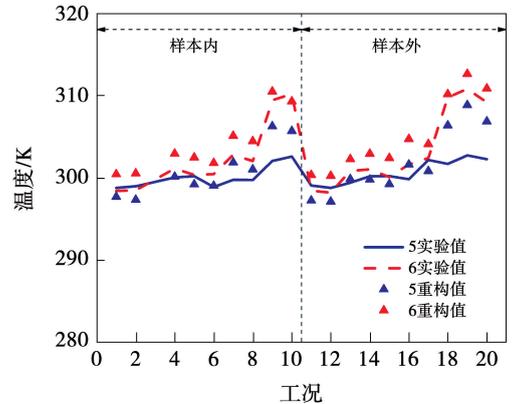
结合表面温度测量数据与温度场降阶模型,实

现了冲击/气膜冷却壁全局温度场的快速重构。利用所建立的降阶模型,重构表1中样本内工况1~10和样本外工况11~20的冲击/气膜冷却壁温度场,并将重构结果与文献[13]中的实验结果进行对比。

根据实验测得的5个传感器位置的温度,依照前文介绍的温度场重构流程,基于投影降阶方法,快速重构了不同工况下的冲击/气膜冷却壁温度场,然后提取7个传感器位置处的重构温度数据与实验数据进行对比,如图8所示。其中传感器1,2,3,4,7位置处的实验数据用于参与温度场的直接重构,5和6号传感器位置处的温度用来验证投影降阶模型的准确性。从对比结果中可以看出,重构结果和实验结果中传感器位置处的温度值基本一致,样本外工况18,19和20的误差有所提高。如表1所示,不同工况之间的变量较多尤其是加热膜的加热功率存在一定差距,导致类似工况在样本内的缺失,这是造成误差的主要因素。



(a) 参与重构的5个传感器



(b) 未参与重构的2个传感器

图8 实验工况中传感器温度与模型重构温度对比

Fig.8 Comparison of temperatures between sensor and reconstructed model under experimental condition

以工况 17 为例,进一步分析其重构误差。如图 9(a) 所示,重构温度场温度较高区域出现在不存在气膜覆盖以及射流冲击的区域,整个壁面最大温差约为 50 K。分别计算该工况下实验结果与重构结果中实验感兴趣区域沿主流方向面平均温度,计算结果如图 9(b) 所示。对比可知,样本内和样本外使用投影降阶模型重构的温度数据与实验测量结果有较好的一致性。

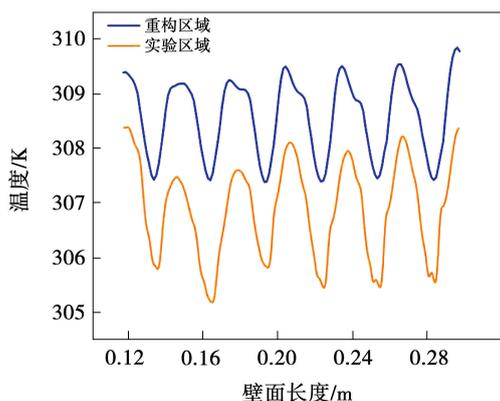
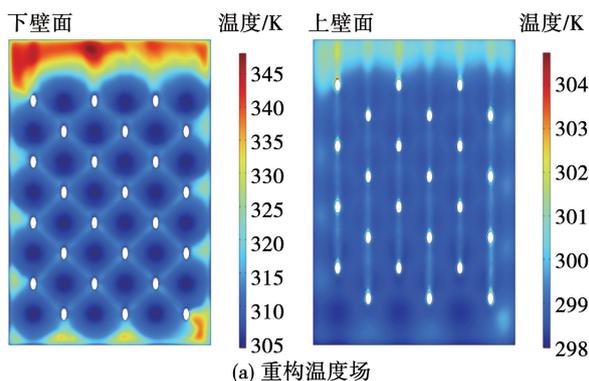


图9 工况 17 温度场重构结果

Fig.9 Reconstructed temperature field results for case 17

为评估降阶模型在预测冲击/气膜冷却壁稳态温度场中的计算效率,本文进一步分析了其重构温度场的时间消耗。该降阶模型预测的时间消耗被定义为从 5 个传感器温度输入该降阶模型到该模型完成整个温度场重建所需的 CPU 计算时间,整个过程在搭载 Intel 12700F 处理器、32GB RAM 和 Microsoft Windows 10 操作系统的 PC 上完成。结果表明,利用所提降阶模型重构稳态温度场,需要完成求解的方程维度为三,针对 20 个工况的平均预测时间消耗小于 0.001 s,且重构误差足够小,证明了模型具有

快速重构能力,甚至可实现在线计算。传统的数值模拟全阶模型完成三维温度场稳态计算需要求解方程的维度大于 20 万,对于相同的 20 个工况平均耗时约为 5 h,与之相比,通过降阶模型重构的方式加速比达到了  $1.8 \times 10^7$ 。由此可见,所提降阶模型在大幅降低计算成本的同时,显著提升了温度场预测的效率,为冲击/气膜冷却壁温度场的实时监测提供了潜在解决方案。

为了验证多种工况条件下该降阶模型重构方案的准确性,将表 1 中的工况重新调整,修改加热膜热流密度为零,修改主流温度与冷却气体温度分别为 300 和 290 K,得到绝热条件下的工况 1~20,对其完成有限体积法数值模拟。然后,执行与前文非绝热工况同样的重构过程,并将重构结果与仿真结果进行对比,相对误差如图 10 所示。由图 10 可知,样本内外工况的温度场重构相对误差均低于 0.18%,进一步证明了降阶模型的准确性。

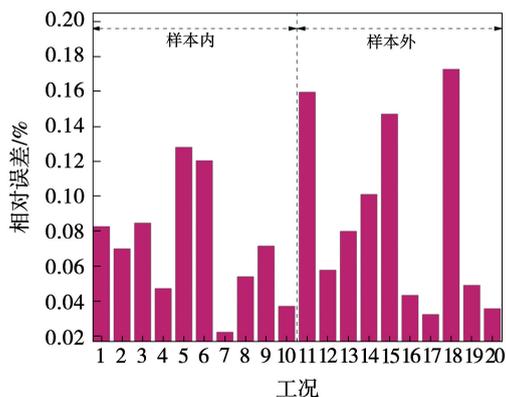


图 10 绝热条件下温度场重构相对误差

Fig.10 Relative error in reconstructed temperature field under adiabatic condition

### 3 结论

本研究利用 POD 模型降阶技术,通过数值仿真温度场样本建立了冲击/气膜冷却壁的温度场降阶模型,实现三维稳态温度场的快速预测,验证了所提降阶模型的准确性,得到如下结论:

- (1) 建立了冲击/气膜冷却壁的流固耦合数值模型,模拟结果和实验结果吻合良好。
- (2) 基于数值模拟温度场数据集和 POD 方法,通过分析冲击/气膜冷却壁的特征模态分布以及传

感器相关系数等,建立了冲击/气膜冷却壁温度场降阶模型。

(3) 所建立的温度场降阶模型对稳态温度场的预测精度较高,通过样本内外工况的对比验证,发现在非绝热工况下重构结果与实验结果保持高度一致,在绝热工况下重构结果与仿真结果相对误差在0.18%以内,证明了模型的准确性。

(4) 该模型降阶方法可以实现对温度场的快速预测和重构,在0.001 s内实现了冲击/气膜冷却壁的温度场快速预测。

## 参考文献:

- [1] MAGHRABIE H M, ATTALLA M, FAWAZ H E, et al. Impingement/effusion cooling of electronic components with cross-flow [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 151:199–213.
- [2] JACKOWSKI T, ELFNER M, BAUER H J. Numerical investigation of conjugate heat transfer in an effusion and impingement cooled combustor wall [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84164: V07AT11A009.
- [3] GU H, LIANG D, DUAN P, et al. Aerothermal characteristics of thin double-wall effusion cooling systems with novel slot holes and cellular architectures for gas turbines [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 140:108441.
- [4] NIU J, LIU C, LIU H, et al. Theoretical and experimental analysis of overall cooling effectiveness for afterburner double-wall heat shield [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176:121360.
- [5] 杨晓明, 张丽, 焦腾, 等. 涡轮叶片三维温度场耦合计算 [J]. *机械设计与制造*, 2012(8):18–20.  
YANG Xiaoming, ZHANG Li, JIAO Teng, et al. Three-dimensional temperature field of turbine blades based on coupling calculation [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(8):18–20.
- [6] ZENG F, WANG K, SHI Z, et al. Three-dimensional temperature reconstruction strategy for turbine blades using infrared thermography at simulated-engine conditions [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2024, 155:111201.
- [7] 王克辰, 牛夕莹, 周文武, 等. 基于快响应压敏漆和高温磷光热图的气膜冷却非定常实验测量技术综述 [J]. *热能动力工程*, 2023, 38(12):1–12.  
WANG Kechen, NIU Xiyang, ZHOU Wenwu, et al. A review of unsteady film cooling measurement techniques based on fast-responding pressure-sensitive paint and thermographic phosphor [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(12):1–12.
- [8] WANG Y, MA H, CAI W, et al. A POD-Galerkin reduced-order model for two-dimensional Rayleigh-Bénard convection with viscoelastic fluid [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 117:104747.
- [9] JIANG G, KANG M, CAI Z, et al. Data-driven temperature estimation of non-contact solids using deep-learning reduced-order models [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185:122383.
- [10] EVERSON R, SIROVICH L. Karhunen-Loeve procedure for gappy data [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(8):1657–1664.
- [11] BUI-THANH T, DAMODARAN M, WILLCOX K. Aerodynamic data reconstruction and inverse design using proper orthogonal decomposition [J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(8):1505–1516.
- [12] RAJARAM D, PERRON C, PURANIK T G, et al. Randomized algorithms for non-intrusive parametric reduced order modeling [J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(12):5389–5407.
- [13] HUANG W, JIANG J, XU Q, et al. A comprehensive heat transfer investigation for impingement/effusion cooling under crossflow conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 220:124950.
- [14] WANG H, JIANG G, WANG W, et al. A novel hyper-reduction framework featuring direct projection without an approximation process [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(8):085176.
- [15] WANG H, JIANG G, WANG W, et al. A reduced-order configuration approach for the real-time calculation of three-dimensional flow behavior in a pipe network [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(4):045127.

(姜雪梅 编辑)