

基于贝叶斯优化 GPR 模型的 PCHE 流动传热性能三维降阶分析方法

赵梓炎 温从义 赵鹏程 刘紫静

(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

摘要 印刷电路板式换热器(Printed Circuit plate Heat Exchanger, PCHE)具有高效紧凑的换热特点,但基于有限体积法(Finite Volume Method, FVM)开展 PCHE 流动换热性能分析效率较低、不易开展优化计算。本文将本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)、截断奇异值分解(Truncated Singular Value Decomposition, tSVD)与高斯过程回归(Gaussian Process Regression, GPR)相结合构建融合场降阶模型,提高对三维模型的分析优化效率。以梯形 PCHE 为研究对象,通过拉丁超立方抽样与 Fluent 软件生成少量样本数据构建降阶模型,并用降阶模型预测新工况下 PCHE 流动传热特性与整体性能。结果表明,融合场降阶模型能高效分解高秩矩阵,且能较为准确地预测梯形 PCHE 多物理场分布,对于 PCHE 的温度场与速度场,样本空间内新工况的均方根误差为 1.5×10^{-3} ,样本空间外新工况的均方根误差为 6.2×10^{-3} ,且计算效率提升了 270 倍,但该模型对 PCHE 整体性能的预测效果较差。融合场降阶模型对以后的优化分析工作有一定的参考意义。

关键词 印刷板式换热器, 高斯过程回归, 奇异值分解, 本征正交分解, 模型降阶

中图分类号 TL339

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240329

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240329

Three-dimensional reduced-order analysis method for flow and heat transfer performance of PCHE based on Bayesian optimized GPR model

ZHAO Ziyang WEN Congyi ZHAO Pengcheng LIU Zijiang

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract [Background] Printed circuit plate heat exchanger (PCHE) has the characteristics of high efficiency and compact heat transfer, but the analysis method of PCHE flow and heat transfer based on finite volume method (FVM) is inefficient and difficult to carry out large-scale optimization calculation. [Purpose] This study aims to improve the analysis and optimization efficiency of three-dimensional models by constructing a fusion field reduction model for PCHE low and heat transfer. [Methods] Firstly, the trapezoidal PCHE was taken as the research object, supercritical CO₂ as the working fluid for the hot channel, and water as the working fluid for the cold channel. Then, the proper orthogonal decomposition (POD), truncated singular value decomposition (tSVD), and gaussian process regression (GPR) were combined to construct a reduced-order model by Latin hypercube sampling and a small amount of sample data generated by Fluent software. Thereafter, the reduced-order model was applied to the prediction of flow

装备预研教育部联合基金(No.8091B032243)资助

第一作者: 赵梓炎, 男, 2002 年出生, 现就读于南华大学核科学技术学院, 研究领域为先进核能系统热工水力设计与安全分析

通信作者: 刘紫静, E-mail: liuzijing1123@163.com

收稿日期: 2024-08-15, 修回日期: 2024-09-19

Supported by the Joint Fund of the Ministry of Education for Equipment Pre-Research (No.8091B032243)

First author: ZHAO Ziyang, male, born in 2002, currently studying at the School of Nuclear Science and Technology, University of South China, focusing on thermal-hydraulic design and safety analysis of advanced nuclear system

Corresponding author: LIU Zijiang, E-mail: liuzijing1123@163.com

Received date: 2024-08-15, revised date: 2024-09-19

and heat transfer characteristics and overall performance of PCHE under new working conditions. **[Results]** The prediction results show that the fusion field reduction model efficiently decomposes the high rank matrix and accurately predict the multi-physics field distribution of trapezoidal PCHE. For the temperature field and velocity field of PCHE, the root mean square error of the new working condition in the sample space is 1.5×10^{-3} , and the root mean square error of the new working condition outside the sample space is 6.2×10^{-3} , and the calculation efficiency is improved by 270 times. However, the prediction effect of the fusion field reduction model on the overall performance of PCHE is poor. **[Conclusions]** The reduced-order model of the fusion field has certain reference significance for the future optimization analysis work.

Key words PCHE, GPR, Singular value decomposition, Proper orthogonal decomposition, Model reduction

印刷电路板式换热器(Printed Circuit plate Heat Exchanger, PCHE)具有高效紧凑等特点,近年来被广泛研究,有望应用于石油化工和核反应器中间冷却器等诸多领域^[1-4],用超临界CO₂作为工质时,温度越高,换热器效率也就越高,甚至可以达到50%^[5],然而,在拟临界点处剧烈的物性变化使得超临界CO₂的传热规律区别于常规换热工质,进而使PCHE换热器的设计与优化的难度增加。传统的有限体积法计算效率低,难以开展大规模的优化计算,进一步加剧了换热器的设计难度,因此,使用模型降阶的方法利用少量样本构建降阶模型,再使用降阶模型快速计算换热器不同工况或不同结构下的流场分布和换热性能是有必要的。

近年来,国内学者对超临界CO₂流动换热的研究颇多,吴新汶等^[6]构建了PCHE分段设计模型,研究煤基超临界CO₂循环在定换热热量条件下冷热侧质量流量与预冷器设计参数的变化关系,探讨其内部传热流动特性,得出热侧工质物性变化对预冷器传热性能影响更显著,且热侧入口质量流量增加能显著提高平均传热系数,但冷侧入口质量流量增加仅能强化冷侧传热的结论。纪宇轩^[7]开展了一种新的梯形流道结构的PCHE数值模拟研究,并与直线型、Z型和S型流道进行对比,分析了传热和压降特性,并提出一种优化的三通道传热单元布置,得出梯形结构具有更好的综合热工水力特性的结论。王焯等^[8]构建了正弦波翅片的本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)降阶模型,研究不同参数变化时降阶模型对PCHE二维截面下流场的计算精度和效率,得出温度场偏差主要在翅片表面区域,速度场的差异主要在主流区域,降阶模型重构的平均相对偏差最大为2.921%。

目前,对梯形PCHE流动传热性能进行三维降阶分析的研究较少。本文首先使用拉丁超立方抽样确定样本空间下输入参数组合,接着使用Fluent软件计算得到梯形PCHE各组参数对应的样本数据并构建融合场降阶模型,为了能快速分解高秩矩阵,经

过测试不同SVD变体,选择用截断SVD替换POD方法中的标准SVD,构建tPOD方法并与GPR算法结合,通过贝叶斯算法优化超参数后,预测梯形PCHE新工况,证明融合场降阶模型具有高效的预测能力。

1 数学模型

1.1 本征正交分解

POD通过快照矩阵提取主要模态和特征,实现对高维数据的降维处理。快照是已经计算出的物理场在不同状态下的数值解的空间分布^[9],本研究所需要的快照为不同输入参数下三维PCHE模型每个网格空间坐标下的物理场数值。向量 ϕ_L 表示第L个样本下物理场的空间分布,取所有的样本构成一个快照矩阵 M :

$$M = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_L\} \quad (1)$$

在矩阵 M 中, N 代表计算网格数量, L 代表样本数。对快照矩阵进行奇异值分解,得到一组POD基矩阵 W ,和对应的特征值矩阵 E 。这组POD基是具有物理信息指引的基函数,通过基函数的线性组合可以得到表征模型整体行为的低阶模型^[10-11]。

$$W = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_R\} \quad (2)$$

φ_R 为快照矩阵的第R个基向量,每个基向量的长度等于计算网格数量。

$$E = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_R\} \quad (3)$$

λ_R 为第R个基向量的特征值。求得的POD基是一组标准正交基,可由式(4)验证:

$$\varphi_i \cdot \varphi_j = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

在保证计算精度下,尽可能提高计算效率,通过对特征值能量筛选,只保留最重要的前 r 阶基向量作为构建低阶模型的基底,基向量数目由式(5)、(6)确定,特征值的绝对值大小反映了该特征向量在整个快照矩阵的数值特性中所占的比例的大小。 γ 为

前 r 阶模态总能量百分比,取 99.9, R 是所有的模态数, λ_i 是第 i 个基向量的特征值。从左到右取矩阵 W 的前 r 列,构成一组简化后的 POD 基函数矩阵,它使用较少的维度包含了快照矩阵中绝大部分信息特征,是建立低阶模型的重要部分。

$$r = \arg \min \left\{ I(r) : I(r) \geq \frac{\gamma}{100} \right\} \quad (5)$$

$$I(r) = \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i}{\sum_{i=1}^R \lambda_i} \quad (6)$$

1.2 SVD 及其变体

矩阵分解是高维大数据分析中进行降维和降低计算复杂度的重要方法, SVD 是其中具有代表性的矩阵分解算法,其基本原理是将高维矩阵投影到低维空间中,实现数据的压缩。但对于工程实际应用中,由于数据量过于庞大,标准 SVD 会使计算复杂度急剧升高,甚至普通计算机无法分解,难以实现数据压缩^[12-13],因此,标准 SVD 更适合低秩矩阵分解。

截断 SVD 作为标准 SVD 的一种变体,又称约化 SVD,是通过矩阵分块运算将非负对角矩阵约化为方阵,因此可以在一定程度上提高计算与储存效率。

除此之外, Halko 等^[14]提出了一种简单但精度较高的随机算法,即随机 SVD (Random Singular Value Decomposition, rSVD) 算法,用来替代标准 SVD 分解高秩矩阵,针对矩阵 M 的分解过程如下:

步骤 1: 构造一个 $L \times k$ 的标准 Gaussian 随机矩阵 Ω ;

步骤 2: 计算得到一个新的矩阵, $Z = M\Omega$, $Z \in R^{N \times k}$;

步骤 3: 对 Z 进行 QR 分解得到正交矩阵 Q ;

步骤 4: 令 $Y = QQ^T M$, 计算约化矩阵 $F = Q^T Y$;

步骤 5: 对 F 进行 SVD 分解得到 $F = U_F A_F V_F^T$;

步骤 6: 计算左奇异向量矩阵 $U_{DM} = QU_F$;

步骤 7: 求 M 的低秩近似矩阵 $M \approx D_M = U_{DM} A_F V_F^T$ 。

此时进行 SVD 分解的对象就由 R 变成了 F , 而 $F \in R^{k \times L}$, k 取值远小于 N , 因此, F 远小于 $M \in R^{N \times L}$, 实现了矩阵的低秩分解。

1.3 贝叶斯优化 GPR 模型

GPR 模型是一种强大的非参数贝叶斯回归方法,它可以适应不规则数据分布,即不需要数据满足

特定的分布假设,因此,对各种类型的数据都能够很好地拟合和预测,并且它在处理小样本数据时表现出色,能够有效地利用有限的数据进行建模,而且随着数据量的增加,模型的预测精度也会提高,因此,使用 GPR 模型能够在小样本下生成输入参数到输出 POD 模态系数间的映射关系,节约生成样本所需时间。

贝叶斯优化在 GPR 超参数调优过程中被广泛使用,它假设待优化目标函数是从一个高斯过程中随机抽取的样本,即目标函数的先验分布是一个高斯过程,接着 GPR 根据已有的观测数据,建立目标函数的先验分布,再通过贝叶斯推断,利用观测数据更新目标函数的后验分布,在每一步中,都会根据当前的后验分布选择最有希望改善目标函数的点进行采样,通过这种方式,贝叶斯优化能够在较少的评估次数内找到目标函数的全局最优解。

1.4 拉丁超立方抽样

蒙特卡罗抽样指使用随机数或伪随机数从概率分布中抽样的技术,样本完全可以落在任何位置,但绝大部分都集中在联合概率密度函数的最大值附近,因此选择蒙特卡罗抽样必须进行大规模抽样,模拟效率低,次数少时会产生聚集^[15]。相比之下,拉丁超立方抽样是将随机变量的取值划分为几个区间,每个区间内随机选取一个值,由这些值组成随机变量样本,可以覆盖足够大的样本空间,节省了抽样次数和时间,更适合用于 Fluent 计算前参数组合的随机抽样,在小样本前提下为数值模拟以及降阶模型的建立提供均匀的样本空间信息。

1.5 融合场降阶模型

为了提高 PCHE 流动换热特性的计算效率,本文构建了融合场降阶模型。首先通过拉丁超立方抽样确定输入参数样本空间,通过 Fluent 计算得到数据集,将数据集预处理后构建快照矩阵,再通过 tSVD 分解快照矩阵得到基函数矩阵与系数矩阵,接着构建输入参数到系数矩阵的 GPR 代理模型,流程图如图 1 所示。融合场降阶模型是将多物理场融入快照矩阵,矩阵每一列是一个样本。面对新工况,只需要将参数输入代理模型,再将输出系数矩阵与基函数矩阵做矩阵运算,便可得到新工况下 PCHE 的流动换热特性与整体换热性能。

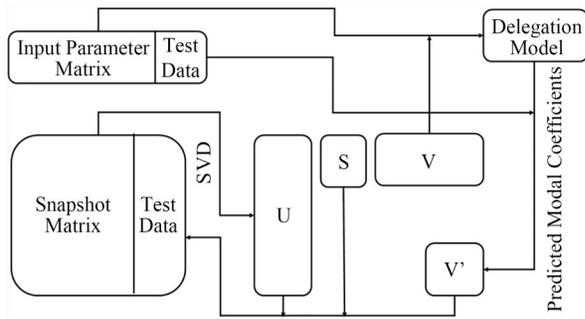


图1 降阶模型流程图
Fig.1 Flow chart of reduced-order model

2 应用分析

2.1 PCHE 高阶模型

印刷电路板式换热器内部的流动通道结构对整体的换热性能和压降影响较大,目前,研究主要集中于直线型流道、Z字型流道、S型流道等,但有研究证明,梯形结构有更好的换热能力,因此,本文选用梯形结构PCHE作为研究对象,探究降阶模型的计算效果。建立梯形PCHE模型,为了减小网格数量,将

实际模型长度缩短,并且只研究一个换热单元,换热单元由一个热通道和一个冷通道构成,冷通道在下侧,如图2所示。模型进出口截面为 $2.5\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的矩形,流道均为半径为 1 mm 的半圆形,流道间最小间隙为 0.5 mm ,模型沿流动方向总长度为 114 mm ,进口段与出口段长度为 8 mm ,用于消除进口效应,每个梯形小单元上底和下底均为 2 mm ,小单元总长度为 8 mm ,底角为 70° 。

此PCHE换热器模型中,热通道工质为超临界 CO_2 ,冷通道工质为水,由于超临界 CO_2 在临界点附近物性变化范围较大,为了更真实地反映传热特性,应考虑物性变化的影响。本文通过美国国家标准研究院开发的物性软件REFPROP导出 7.6 MPa 下超临界 CO_2 的物性参数(密度、比热容、热导率、黏度),通过TUI命令导入Fluent中并采用多项式拟合方法处理,这种方法比在计算中实时调用数据库能节省更多的时间,提高计算效率,物性参数如图3所示。

为了便于网格划分,本文使用非结构化的混合六面体网格,流道入口选用质量流量进口条件,流道

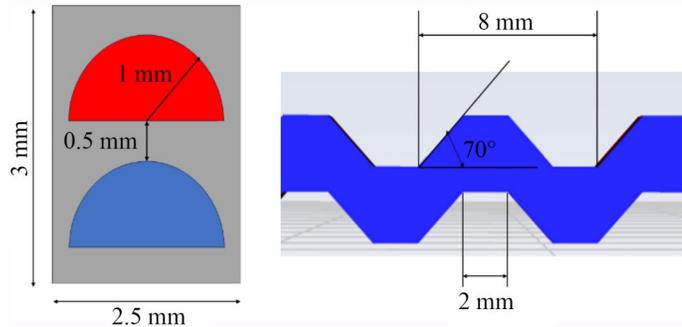


图2 模型结构示意图
Fig.2 Diagram of model structure

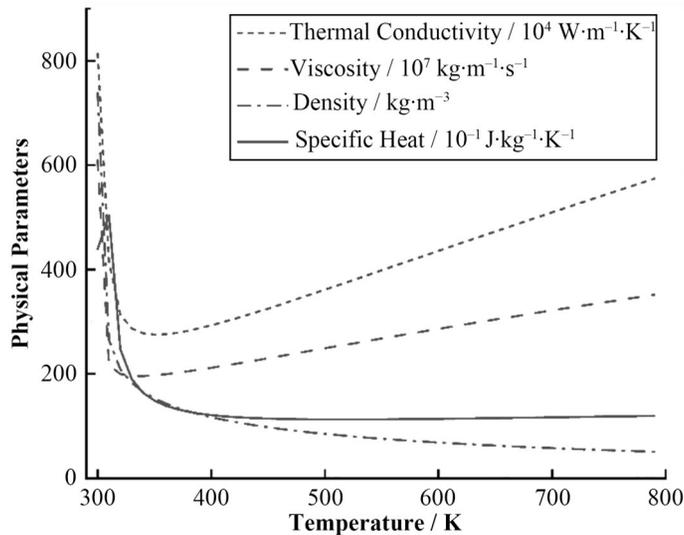


图3 物性参数曲线
Fig.3 Curves of physical parameters

出口选用压力出口条件,模型进出口端面为绝热壁面,四周边界选用对称边界,通过计算入口雷诺数确定采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,边界参数如表1所示。设置4套网格,网格量分别为51万、78万、96万和107万,在表1边界参数下计算不同网格量下模型压降,如表2所示,本文选取96万网格进行研究。采用 SIMPLE 算法处理压力与速度耦合关系,PRESTO! 格式求解压力方程,其他方程采用一阶迎风格式,当出口温度和通道压降的残差收敛到 10^{-5} 以下且数据基本稳定时结束计算,认为计算收敛。

一个好的换热板要做到在换热能力很强的同时压降要小,但由于压降与换热能力之间往往存在相关性,即流体扰动大时换热强,但也会增加压降,因此需要一种方法来判别平衡两者间的关系,从整体角度来评价换热板的综合换热能力^[16]。JF 因子将换热器的换热性能与压降的 1/3 次方相比较,同时考

虑换热与压降两方面的影响,JF 因子越大,意味着换热器性能越好,其表达式如(7)所示。

$$JF = \frac{H/H_0}{(\Delta P/\Delta P_0)^{1/3}} \quad (7)$$

式中: H 为总传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$; ΔP 为压降,Pa; 下角标0表示将某一工况数据作为计算参考量。本文将 JF 因子加入到降阶模型中,探究降阶模型能否准确预测不同工况下换热板的综合性能。

采用 Intel(R) Core(TM) i9-14900KF 处理器满利用率计算,计算至收敛耗时 4'30", 将计算结果导入到 CFD-Post, 三维温度场和速度场数据结果如图4所示。分析结果可以发现,温度场变化剧烈的区域主要位于热侧进口段,速度场变化剧烈的区域位于梯形小单元的拐角处,因此下文对降阶模型分析时重点考虑这些局部区域。

表1 边界参数
Table 1 Boundary parameter

流体域 Fluid domain	进口温度 Inlet temperature / K	进口压力 Inlet pressure / MPa	进口流量 Inlet flowrate / kg·s ⁻¹
热侧 Hot side	730	7.6	4.82×10^{-4}
冷侧 Cold side	380	20.2	

表2 网格验证
Table 2 Grid verification

网格量 Grid number	压降 Pressure drop / Pa
51万	6 512
78万	6 197
96万	5 990
107万	5 978

2.2 PCHE降阶模型

为验证融合场降阶模型对多物理场的降阶预测能力,本文构建了基础降阶模型对每个物理场单独降阶分析,对比精度与效率差距,又将随机奇异值分

解(rSVD)与POD方法结合构建rPOD模型,并与tPOD模型对比。

表3 样本参数取值范围
Table 3 Value range of sample parameters

流体域 Fluid domain	进口温度 Inlet temperature / K	进口流量 Inlet flowrate / kg·s ⁻¹
热侧 Hot side	640~780	$(4.82 \sim 14.45) \times 10^{-4}$
冷侧 Cold side	300~350	

2.2.1 样本选取

为了得到不同工况下PCHE流动换热情况,本文将热侧入口温度、热侧入口流量、冷侧入口温度、

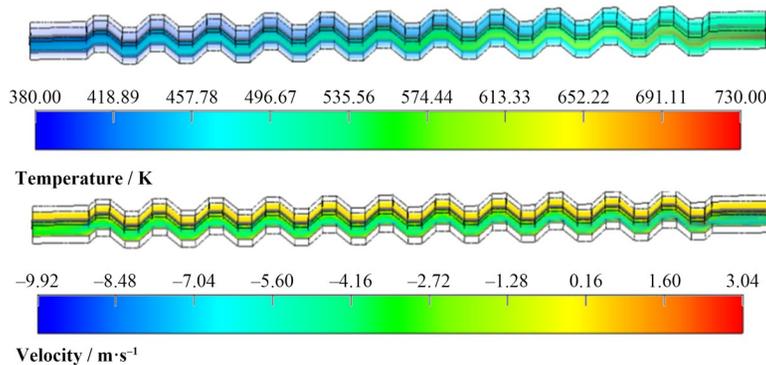


图4 FVM计算结果(彩图见网络版)
Fig.4 FVM calculation results (color online)

冷侧入口流量作为4个输入参数,通过拉丁超立方抽样在样本参数空间内随机抽样60组输入参数合并输入到Fluent中计算,导出三维模型的速度场以及温度场数据集。再随机抽取5组作为验证样本,这些样本不参与降阶模型的构建,各参数取值空间范围如表3所示。

2.2.2 分解算法

将上文构建的所有快照矩阵作为数据集,探究rPOD模型和tPOD模型重构精度和分解效率的优劣,同时探究数据量大小对模型降维能力的影响,实验结果如表4所示,其中*T*表示温度场,*V*表示速度场。

表4 分解算法对比
Table 4 Comparison of decomposition algorithms

降阶模型 Reduced-order model	分解模型 Decomposition model	基函数数量 Number of basis functions / order	分解耗时 High decomposition time-consumption / s	重构误差(RMSE) Reconstruction error	数据量 Data size
融合场降阶模型 Fusion field reduction model	rPOD	46	6	0.001 1	130.2×10 ⁴ ×60
	tPOD	46	0.9	0.001 1	
基础降阶模型 Basic reduced-order model	rPOD	39 (<i>T</i>)+50 (<i>V</i>)	4.23 (<i>T</i>)+0.72 (<i>V</i>)	0.001 3 (<i>T</i>)+0.000 2 (<i>V</i>)	94.7×10 ⁴ ×60 +35.5×10 ⁴ ×60
	Average: 0.001 0				
	tPOD	39 (<i>T</i>)+50 (<i>V</i>)	0.67 (<i>T</i>)+0.21 (<i>V</i>)	0.001 3 (<i>T</i>)+0.000 2 (<i>V</i>)	
	Average: 0.001 0				

根据以往研究,随机SVD比截断SVD在处理大矩阵的问题上有更高的分解效率^[17],代价是损失一部分精度,但对于本文所用数据集,截断SVD反而比随机SVD效率更高。这是因为此数据集略小,由于随机SVD中存在额外的QR分解,并且需要生成新的高斯矩阵,因此总耗时会比只分解一次的截断SVD长。经过其他数据集验证,当此数据集规模扩大100倍时,随机SVD效率才会逐渐高于截断SVD,且工程上积累的数据量非常庞大,远高于本文使用的模拟数据,因此rSVD更适合工程应用。从精度上看,两种分解算法重构误差基本相同,对于数据量更大且数据大小有突变的融合场降阶模型,其重构误差只增高了0.000 1,表明降阶算法的精度几乎不随数据量增加而下降。由于基础降阶模型会引入更多的基函数,因此综合考虑降阶模型精度与效率之后,融合场降阶模型性能更优,对于此数据集,融合场降阶模型使用tPOD分解算法。

2.2.3 代理模型

通过tPOD分解数据矩阵后,分别得到基函数空间以及对应的系数矩阵,由于基函数空间不变,因此建立良好的输入参数与系数矩阵间的映射关系是提

表5 代理模型效果
Table 5 Proxy model effect

代理模型 Delegation model	MAE	RMSE	R ²
SVM	0.031 1	0.061 1	0.78
可优化GPR GPR can be optimized	0.018 1	0.026 8	0.94
可优化树集成 Optimized tree integration	0.049 2	0.064 9	0.76
BP神经网络 BP neural network	0.041 2	0.066 1	0.82
RBF神经网络 RBF neural network	0.035 5	0.065 7	0.75

高模型精度的关键。为证明GPR模型有更优异的映射性能,本文另构建了4种神经网络模型作为对比^[18-20],用80%的数据集训练,再用20%的数据集验证,得到不同网络模型的拟合能力,如表5所示。可以看出,基于贝叶斯优化的GPR模型拟合效果最优,这是因为它能适应不规则数据分布,且能在样本较少时快速学习映射特征,因此,本文使用可优化GPR模型构建降阶模型,经优化后的GPR模型超参数如表6所示。

表6 GPR模型超参数
Table 6 GPR model hyperparameters

模型 Model	标准化 Standardization	核函数 Kernel function	核尺度 Kernel scale	Sigma
GPR	Yes	Nonisotropic Matern 5/2	3.380 1	1.205 2

3 结果分析

利用 Fluent-udf 将融合场降阶模型得到的结果导入 CFD-post, 并与 Fluent 计算结果对比, 考察降阶模型对梯形 PCHE 流动换热特性^[21-22]及综合评价因子的预测精度, 并检验降阶模型计算效率。

3.1 样本重构结果

图 5 是梯形 PCHE 降阶模型重构结果与 FVM 计算结果的三维对比图, 可以看出, 在 4 参数输入下模型整体重构精度良好。为探究流场的局部信息预测效果, 选取 $x=-0.001$ m 处做一纵截面, $y=-0.015$ m 处

做一横截面, 通过云图与等值线方式展现物理场的精细结构, 以更好探究降阶模型对三维模型的重构精度。图 6 是部分纵截面物理场, 上侧为 FVM 计算结果, 下侧为降阶模型预测结果, 图 7 是横截面物理场, 左侧为 FVM 计算结果, 右侧为降阶模型预测结果, 下文所列结果图均以此形式排列。可以看到, 降阶模型能够准确完成对物理场的刻画, 均方根误差为 3×10^{-4} , 等值线重合效果很好, 由于速度值较小, 因此在保留两位小数下数值相同。为节约篇幅, 此后只展示温度场降阶结果, 速度场结果以表格形式展现。

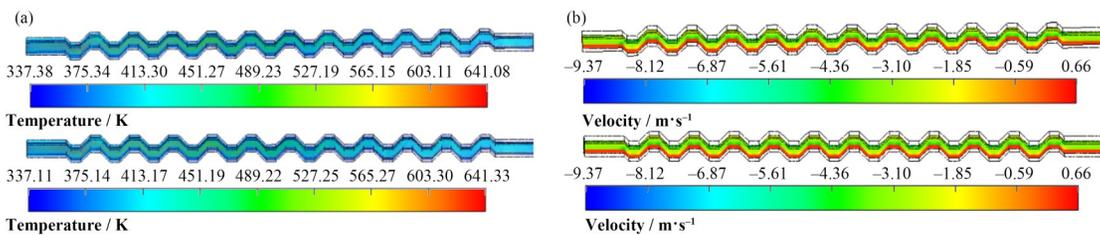


图 5 温度场(a)、速度场(b)重构结果对比(彩图见网络版)

Fig.5 Comparison of temperature field (a), velocity field (b) between FVM calculation results (upper) and reconstruction results (bottom) (color online)

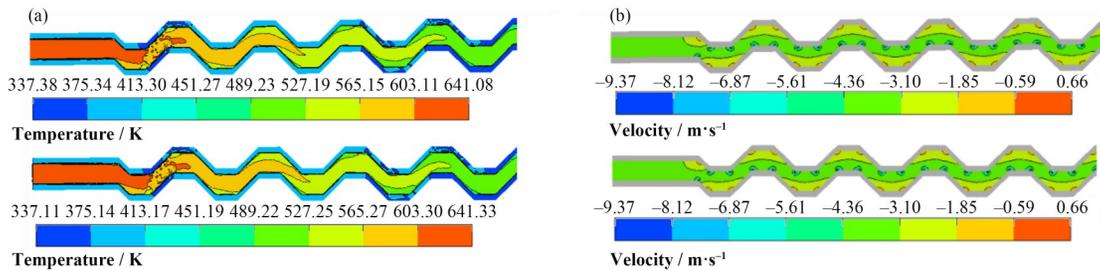


图 6 温度场(a)、速度场(b)纵截面的 FVM 计算结果(上)与重构结果(下)对比(彩图见网络版)

Fig.6 Comparison of reconstruction results of longitudinal section of temperature field (a), velocity field (b) between FVM calculation results (upper) and reconstruction results (bottom) (color online)

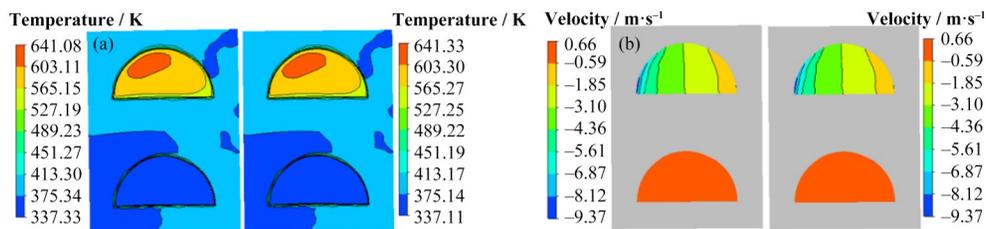


图 7 温度场(a)、速度场(b)横截面的 FVM 计算结果(左)与重构结果(右)对比(彩图见网络版)

Fig.7 Comparison of reconstruction results of cross section of temperature field (a), velocity field (b) between FVM calculation results (left) and reconstruction results (right) (color online)

3.2 温度场预测结果

在样本空间内, 随机抽一组工况验证降阶模型预测精度, 即为图 8(a)~图 10(a)所示的内推结果, 而在样本空间外抽取的工况, 即为图 8(b)~图 10(b)

所示的外推结果。可以看出, 模型内推时, 整体计算结果良好, 但精度低于重构结果, 均方根误差为 0.001 5, 最大温差 2.41 K, 并且有部分等值线不重合, 说明其对场分布的预测略有降低。模型外推时, 虽然整体趋势相似, 但数据差距较大, 均方根误差为

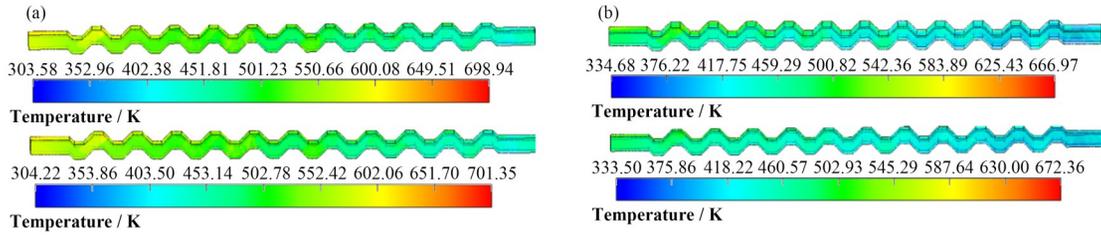


图8 温度场内推(a)、外推(b)结果对比(彩图见网络版)

Fig.8 Comparison of prediction results of interpolation (a) and extrapolation (b) temperature field (color online)

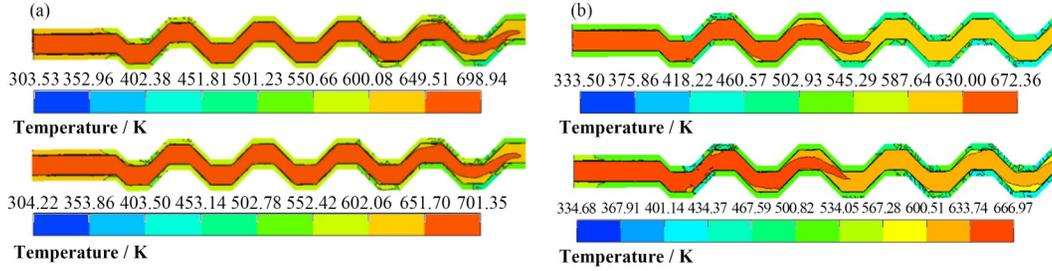


图9 纵截面温度场内推(a)、外推(b)结果对比(彩图见网络版)

Fig.9 Comparison of results of interpolation (a) and extrapolation (b) longitudinal section temperature field (color online)

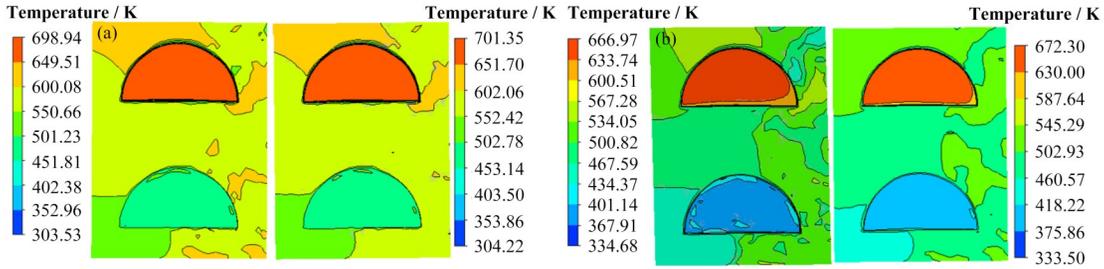


图10 横截面温度场内推(a)、外推结果(b)对比(彩图见网络版)

Fig.10 Comparison of prediction results of interpolation (a) and extrapolation (b) cross section temperature field (color online)

0.006 5,最大温差为9.5 K,并且捕获流场细节的能力下降,无法准确分辨温度梯度。因此想要提高降阶模型预测精度,还需要尽量确保预测样本在训练样本的空间范围之内,偏离此空间越远,精度越低。

3.3 其他预测结果与计算耗时

为从整体角度评判降阶模型的预测能力与计算效率,本文抽取5组重构样本、5组内推样本、5组外推样本进行检验,将其预测结果的均方根误差取平均,作为模型整体预测能力,并将降阶模型在线阶段的预测时间与FVM计算时间对比,算出计算效率提升倍数,所有数据如表7所示。可以看出,降阶模型对温度场预测的偏差最小,对评价因子预测的偏差最大,这是评价因子的数据类型少,因此无法准确提取特征。对于融合场降阶模型,将温度场和速度场同时预测,即使数据变化范围较大,依旧能够准确预测各自的变化情况,且预测精度几乎一致。降阶模型在线计算时间为1 s,相比于FVM计算效率提升

270倍。

4 结语

本文构建了用于分析不同工况下梯形PCHE流动与传热特性的融合场降阶模型,旨在探究降阶模型能否更高效地对三维模型多物理场同时分析,以及能否利用降阶模型直接预测换热板整体性能,得到的主要结论如下:

1) 随机SVD对于大规模矩阵有更快的分解重构能力,但对于某些高秩矩阵,其通过约化方法节约的时间小于额外的QR分解引入的时间,因此分解重构能力不如截断SVD,但两者精度相似。

2) 融合场降阶模型能够同时计算多物理场,相比于针对单一物理场的降阶模型有更高的计算效率,4个参数变化时计算效率相比FVM提升270倍,且能保证预测精度基本保持一致,同时说明了POD降阶的精度不会随数据量的增加和数据绝对值大小

表7 降阶模型性能
Table 7 Performance of reduced-order model

计算模型 Calculation model	研究对象 Research object	均方根误差MSE			计算效率提升倍数 The calculation efficiency is increased by multiples
		重构 Reconstruction	内推 Interpolate	外推 Extrapolate	
融合场降阶模型 Fusion field reduction model	温度场 Temperature field	4.58×10^{-4}	0.001 9	0.008	270
	速度场 Velocity field	4.6×10^{-4}	0.002 2	0.008	
	评价因子 Evaluation factor	0.004 6	0.022 5	0.138	

的突变而明显减小。

3) 降阶模型预测温度场的精度要高于速度场。样本空间内新工况的预测效果较优, 样本空间外新工况的预测效果较差。因此, 要想提高模型预测精度, 输入参数应尽量在训练样本空间范围内, 并且使用性能更优的代理模型, 且由于降阶模型的线性条件, 增加更多的基函数不会进一步提高模型精度。降阶模型对PCHE综合评价因子的预测效果较差, 这是由于评价因子的样本类型较少, 降阶模型无法准确提取其演化特征。

作者贡献声明 赵梓炎负责分析数据、起草文章; 温从义负责建立模型; 赵鹏程负责提出研究思路, 理论指导; 刘紫静负责论文整体设计, 指导研究, 获取研究经费, 行政支持。

参考文献

- Han Z X, Guo J F, Huai X L. Theoretical analysis of a novel PCHE with enhanced rib structures for high-power supercritical CO₂ Brayton cycle system based on solar energy[J]. *Energy*, 2023, **270**: 126928. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126928.
- Zhang Y D, Peng M J, Xia G L, *et al.* Numerical investigation on local heat transfer characteristics of S-CO₂ in horizontal semicircular microtube[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **154**: 380 - 392. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.082.
- Kim D E, Kim M H, Cha J E, *et al.* Numerical investigation on thermal - hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, **238**(12): 3269 - 3276. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2008.08.002.
- Wang R, Kashinath K, Mustafa M, *et al.* Towards physics-informed deep learning for turbulent flow prediction[C]. *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. July 6-10, 2020, Virtual Event, CA, USA. ACM, 2020: 1457 - 1466. DOI: 10.1145/3394486.3403198.
- 丁源, 童自翔, 王文奇, 等. 超临界二氧化碳印刷电路板式换热器设计及应用研究[J]. *工程热物理学报*, 2022, **43**(5): 1351 - 1356.
DING Yuan, TONG Zixiang, WANG Wenqi, *et al.* Study on the design and applications of supercritical carbon dioxide printed circuit heat exchangers[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, **43**(5): 1351 - 1356.
- 吴新汶, 邵应娟, 钟文琪. 600 MW煤基超临界二氧化碳循环PCHE预冷器设计及传热特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, **43**(15): 5916 - 5925. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220689.
WU Xinwen, SHAO Yingjuan, ZHONG Wenqi. Design and heat transfer characteristics of 600 MW coal-based supercritical carbon dioxide cycle PCHE pre-cooler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, **43**(15): 5916 - 5925. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220689.
- 纪宇轩. 超临界二氧化碳布雷顿循环印刷电路板式换热器特性的模拟与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002744.
JI Yuxuan. Simulation and experimental study on characteristics of plate heat exchanger for supercritical carbon dioxide Brayton cycle printed circuit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002744.
- 王焯, 朱欣悦, 孙振东. 基于POD降阶模型的正弦波翅片扁管翅式换热器流动与传热特性分析[J]. *化工学报*, 2022, **73**(5): 1986 - 1994. DOI: 10.11949/0438-1157.20211203.
WANG Ye, ZHU Xinyue, SUN Zhendong. Flow and heat transfer characteristics analysis of flat tube-bank-fin heat exchanger with sine wave fin based on POD reduced-order model[J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(5): 1986 - 1994. DOI: 10.11949/0438-1157.20211203.
- 鲁红钰. 不同翼型涡产生器扁管翅式换热器流动与传热性能的POD分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.

- DOI: 10.27205/d.cnki.gltec.2020.001097.
- LU Hongyu. POD analysis of flow and heat transfer performance of flat tube plate-fin heat exchanger with different airfoil vortex generators[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020. DOI: 10.27205/d.cnki.gltec.2020.001097.
- 10 龚禾林, 陈长, 李庆, 等. 基于物理指引和数据增强的反应堆物理运行数字孪生研究[J]. 核动力工程, 2021, **42**(S2): 48 - 53. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.S2.0048.
GONG Helin, CHEN Chang, LI Qing, *et al.* Study on a data-enabled physics-informed reactor physics operational digital twin[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, **42**(S2): 48 - 53. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.S2.0048.
 - 11 路达, 贺翔, 张引弟, 等. 正弦波微通道PCHE中超临界LNG流动换热研究[J]. 低温与超导, 2021, **49**(7): 45 - 52. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.07.008.
LU Da, HE Xiang, ZHANG Yindi, *et al.* Study on supercritical LNG flow and heat transfer in sinusoidal wave microchannel PCHE[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, **49**(7): 45 - 52. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.07.008.
 - 12 Struski Ł, Morkisz P, Spurek P, *et al.* Efficient GPU implementation of randomized SVD and its applications [J]. Expert Systems with Applications, 2024, **248**: 123462. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123462.
 - 13 任潇潇, 牛成英. 基于不等概自适应抽样和随机SVD分解的CUR矩阵重构[J]. 数理统计与管理, 2024, **43**(2): 280 - 294. DOI: 10.13860/j.cnki.stj.20240228-001.
REN Xiaoxiao, NIU Chengying. CUR matrix decomposition based on unequal probability adaptive sampling and stochastic SVD decomposition[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2024, **43**(2): 280 - 294. DOI: 10.13860/j.cnki.stj.20240228-001.
 - 14 Halko N, Martinsson P G, Tropp J A. Finding structure with randomness: probabilistic algorithms for constructing approximate matrix decompositions[J]. SIAM Review, 2011, **53**(2): 217 - 288. DOI: 10.1137/090771806.
 - 15 陆征然, 于珈邨, 路林翰, 等. 基于拉丁超立方抽样的高大模板支撑体系承载力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, **40**(3): 461 - 469.
LU Zhengran, YU Jiali, LU Linhan, *et al.* Finite element analysis on bearing capacities of high-formwork support system on Latin hypercube sampling[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024, **40**(3): 461 - 469.
 - 16 杨俊康, 王凯, 赵鹏程, 等. 铅铋反应堆新型双层换热管式主热交换器设计与优化分析[J]. 核技术, 2023, **46**(10): 100606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100606.
YANG Junkang, WANG Kai, ZHAO Pengcheng, *et al.* Design and optimization analysis of a new double-layered tube-type main heat exchanger for lead-bismuth reactors [J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(10): 100606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100606.
 - 17 Noorizadegan A, Chen C S, Cavoretto R, *et al.* Efficient truncated randomized SVD for mesh-free kernel methods Image 1[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2024, **164**: 12 - 20. DOI: 10.1016/j.camwa.2024.03.021.
 - 18 冀南, 易金豪, 赵鹏程, 等. 基于自适应RBF神经网络预测堆芯热工水力参数的方法研究[J]. 核技术, 2022, **45**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.090601.
JI Nan, YI Jinhao, ZHAO Pengcheng, *et al.* Research on adaptive RBF neural network prediction method for core thermal-hydraulic parameters of fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.090601.
 - 19 赵构, 熊翰林, 吴国东, 等. 基于神经网络的实物保护系统综合效能评估研究[J]. 核技术, 2020, **43**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.020602.
ZHAO Gou, XIONG Hanlin, WU Guodong, *et al.* Evaluation study on comprehensive efficiency of physical protection system based on neural network[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.020602.
 - 20 淳思琦, 冯欢, 张安妮, 等. 基于软注意力GRU模型的堆芯瞬态热工水力参数预测方法研究[J]. 核技术, 2024, **47**(1): 010603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010603.
CHUN Siqi, FENG Huan, ZHANG Anni, *et al.* Method of predicting transient thermal hydraulic parameters of the core based on the gated recurrent unit model of soft attention[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(1): 010603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010603.
 - 21 丁梦婷, 陈玉爽, 傅远. 高温熔盐印刷电路板式换热器的热工水力特性研究[J]. 核技术, 2024, **47**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040601.
DING Mengting, CHEN Yushuang, FU Yuan. Thermal hydraulic performance analysis of printed circuit heat exchanger based on high temperature molten salt[J].

- Nuclear Techniques, 2024, **47**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.040601.
- 22 刘晨, 李启明, 邹杨, 等. 翼型翅片PCHE的结构参数优化与流动传热的数值模拟[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110602.

LIU Chen, LI Qiming, ZOU Yang, *et al.* Optimization of structural parameters and thermal-hydraulic numerical simulation of printed circuit heat exchanger with airfoil fins[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110602.