

通用高效高精度物性插值计算方法及应用研究

李 飞^{1*}, 熊一鸣², 张宇航¹, 董竖彪¹, 张乾平¹, 张 弦¹, 曹锐起¹, 张元东²

¹中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉

²哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月24日

摘 要

针对核动力流体系统仿真对多工质、宽工况物性计算的高效高精度需求, 解决传统数据库调用效率低、常规插值法相变区精度不足的工程痛点, 本文开展多工质物性计算方法研究。提出多层次网格加密算法, 针对相态边界线和低精度网格进行加密处理, 生成高精度物性库。在此基础上, 引入双线性插值模型对高精度物性库进行高效插值计算以快速获得高精度物性计算结果, 并且开发了适用多工质的物性计算软件, 以供专业热工工程师使用。计算结果表明, 高精度插值方法在宽工况范围内, 相比于美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的REFPROP标准物性数据库, 利用压力、温度作为自变量计算比焓和密度的相对误差小于1%, 且计算效率具有明显优势。

关键词

物性计算, 高精度物性库, 物性插值方法, 多工质物性查询

A General Efficient and High-Precision Physical Property Interpolation Calculation Method and Its Application

Fei Li^{1*}, Yiming Xiong², Yuhang Zhang¹, Shubiao Dong¹, Qianping Zhang¹, Xian Zhang¹, Ruiqi Cao¹, Yuandong Zhang²

¹China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan Hubei

²College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

Received: May 18, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 24, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李飞, 熊一鸣, 张宇航, 董竖彪, 张乾平, 张弦, 曹锐起, 张元东. 通用高效高精度物性插值计算方法及应用研究[J]. 应用物理, 2026, 16(6): 715-726. DOI: 10.12677/app.2026.166065

Abstract

This paper studied the physical property calculation methods for multi-working fluids to meet the requirements of efficient and high-precision property computation in nuclear power fluid system simulations under multi-fluid and wide operating conditions, and to solve the engineering challenges including low efficiency of traditional database access and insufficient accuracy of conventional interpolation in the phase-change region. A multi-level grid refinement algorithm was proposed to refine the phase boundaries and low-precision grids, and a high-precision physical property database was generated. On this basis, a bilinear interpolation model was introduced to perform efficient interpolation on the high-precision database for rapid and accurate property results. Furthermore, a multi-working fluid physical property calculation software was developed for professional thermal engineers. The results show that, compared with the REFPROP standard database developed by the National Institute of Standards and Technology (NIST), the proposed high-precision interpolation method achieves relative errors of less than 1% for specific enthalpy and density calculated from pressure and temperature across a wide range of operating conditions, and exhibits significant advantages in computational efficiency.

Keywords

Physical Property Calculation, High-Precision Physical Property Database, Physical Property Interpolation Method, Multi-Working Fluid Property Query

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流体物理性质计算是能源动力系统仿真、热工水力分析、装置设计优化的核心基础，其计算精度直接影响仿真结果精度。在核动力工程领域，多种核动力系统涉及水、重水、惰性气体、不凝性气体等工质，各种先进反应堆设计工况覆盖常温常压至超临界状态，对物性计算提出多工质兼容、宽工况覆盖、高精度、高效率的严苛要求。

工程实践中，流体热物理性质的求解主要采用状态方程直接求解、经验公式拟合、物性表格插值三类技术方案[1]-[4]。由美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的 REFPROP 标准物性数据库，是当前国际公认的高精度基准物性数据库；其工质物性主要基于亥姆霍兹自由能方程、修正型 Benedict-Webb-Rubin (MBWR)状态方程及扩展对应态原理(ECS)模型求解，虽具备极高的计算精度，但反复调用的计算开销大，在大规模超实时仿真场景下计算效率不佳[5][6]。针对水和水蒸气工质，国际水和水蒸气性质协会(IAPWS)于 1997 年发布的工业用水和水蒸气物性计算公式(IAPWS-IF97)，将水的热力学状态划分为 5 个分区，通过分段多项式经验公式拟合求解，兼顾了较高的计算精度与运算效率[7]-[9]。针对超临界二氧化碳的物性计算，梁成彬等学者基于 REFPROP 数据库预生成高精度物性网格，结合高精度插值算法实现物性快速求解，在保证计算精度的同时大幅提升了运算效率[10]。

为满足核动力工程领域水、重水、惰性气体、不凝气体等多类型工质的兼容计算需求，同时破解大规模网格数值仿真中物性计算的效率瓶颈，本文提出高精度物性表格插值类的高精度物性插值方法，建立全工况高精度物性数据库，结合自适应高精度插值算法，最终实现多工质的高效、高精度物性求解。

2. 多工质高效高精度物性插值计算方法

多工质高效高精度物性计算方法属于物性表格插值方法, 利用 REFPROP 预生成多种流体的高精度物性库, 并使用双线性插值方法对物性状态进行高精度插值求解, 得到高精度物性计算结果。

2.1. 高精度物性数据库生成

为了更好地适应物性参数间的非线性特性, 提出一种多层次网格加密法, 以高效高精度地生成物性数据库。首先, 多层次网格加密法将物性范围划分成多个正交网格(第一层网格), 并计算每个网格点的物性值。如果判断到网格与物性相变的边界线(饱和线)相交或者网格精细程度不足以满足误差要求时, 则对网格进行加密处理。如图 1 所示:

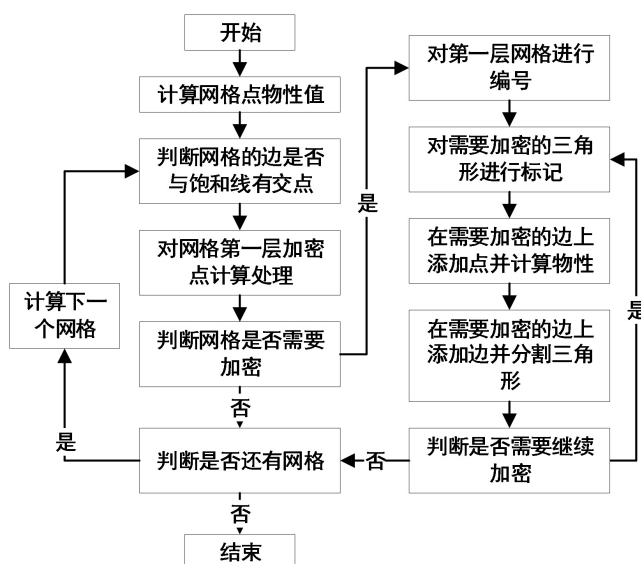


Figure 1. Flowchart of grid refinement program

图 1. 加密程序流程图

1) 饱和线相交网格加密

如图 2 所示, 假设网格为压力 - 温度网格, 此网格的四条边分别为压力 P_1 , P_2 和温度 T_1 , T_2 。计算 P_1 的饱和温度 T_{s1} , 并与 T_1 和 T_2 进行对比。若 $T_1 < T_{s1} < T_2$, 则表示饱和线与 P_1 边相交。

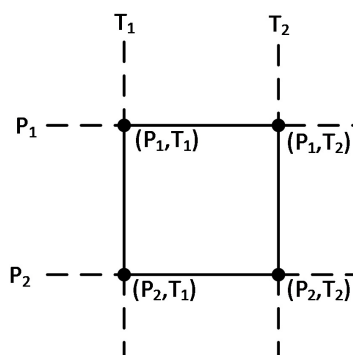


Figure 2. Schematic diagram of pressure-temperature grid

图 2. 压力 - 温度网格示意图

对与饱和线相交的第一层网格加密。首先对第一层网格的四条边进行加密，并将加密点与中心点连接起来。第一层网格加密后的点如图 3 所示，加密点及其标识号为图中的数字，加密后的线及其标识号为图中的括号数字，加密后的三角形及其标识号为图中的圆圈数字。对于不与饱和线相交的边，每条边的加密点为边的中点，如图 3 所示的点 3 和 7；对于有饱和线通过的边，如图 3 所示的点 1 和 5，其加密点为饱和线与边的交点，并将此加密点标记为在饱和线上的点。

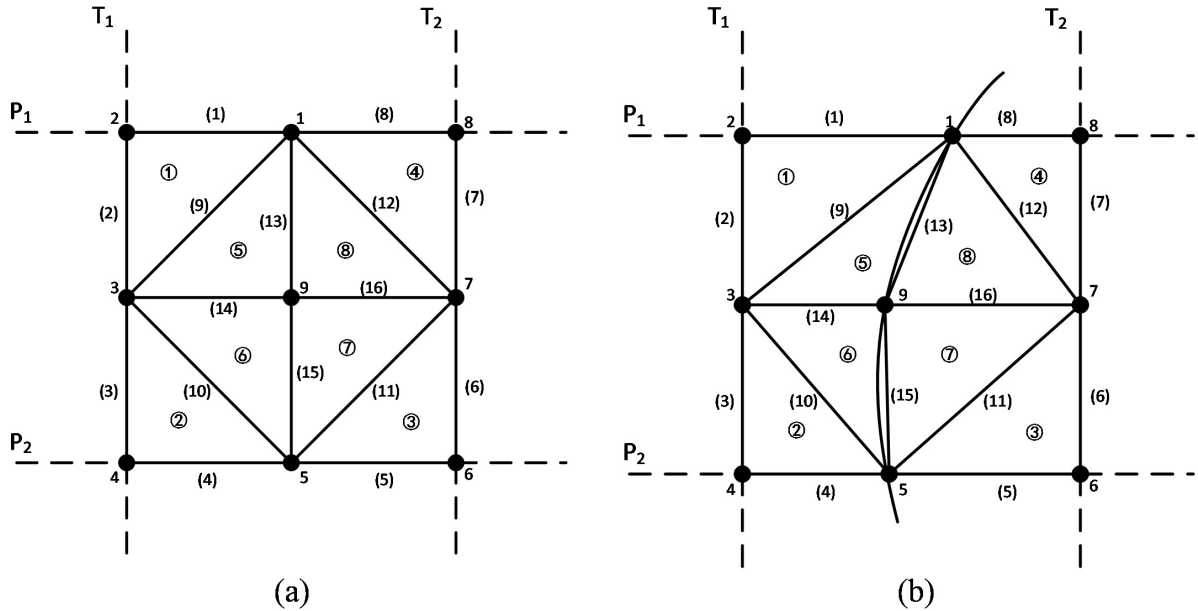


Figure 3. Schematic diagram of grid refinement, (a) Structured grid; (b) Grid with saturation line
 图 3. 网格的加密示意图, (a) 结构化网格加密; (b) 与饱和线相交网格加密

在与更复杂地饱和线相交情况时(如饱和线与 3 条边相交)，随着网格的进一步细化加密，使得网格与饱和线相交点位变少，故本方法提供的饱和线加密方案能够随着网格的加密具有普适性。

2) 误差偏大的网格加密

根据网格的插值计算值与 REFPROP 计算值的偏差是否大于所设定的偏差 ϵ 判断网格是否需要加密。选择网格的四条边的中点和中心值进行比较。以图 3(a)为例，中心点的插值计算公式为：

$$v_m = \frac{(v_2 + v_4 + v_6 + v_8)}{2} \tag{1}$$

其中， v_m 是中心点位被查询的物理量， v_2, v_4, v_6, v_8 分别是点 2、4、6、8 处的被查询物理量的值。而由 REFPROP 计算得到参考值 v_{ref} 的计算公式为：

$$v_{ref} = f_{ref} \left(\frac{P_1 + P_2}{2}, \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \tag{2}$$

其中， f_{ref} 是 REFPROP 是查询的物理量的计算函数。对于无网格的边界中点，以 P_1 边为例，其中点插值计算公式为：

$$v_m = \frac{(v_2 + v_8)}{2} \tag{3}$$

参考值计算公式为：

$$v_{ref} = f_{ref} \left(P_1, \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (4)$$

若存在中点或中心点, 使得 $\frac{|v_m - v_{ref}|}{v_{ref}} \geq \varepsilon$ 成立, 则将网格标记为需要加密, 直到满足精度要求为止。

3) 循环加密

对第一层网格的点、边和三角形进行编号, 并对需要加密的三角形和边进行标记。以图 3 中编号为 ① 的三角形为例, 首先需要判断此三角形是否需要加密。通过计算并比较三角形重心和三条边中点的插值计算值和 REFPROP 计算值来进行判断。重心插值公式为:

$$v_m = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3} \quad (5)$$

参考值计算公式为

$$v_{ref} = f_{ref} \left(\frac{P_1 + P_2 + P_3}{2}, \frac{T_1 + T_2 + T_3}{2} \right) \quad (6)$$

若偏差过大需要加密, 则将三角形的最长边标记为需要加密, 如图 4 所示。在添加点时, 需要判断边的两个端点是否在饱和线上。假设物性的计算为根据压力和温度 T 计算密度 ρ , 若有端点不在饱和线上, 则加密点为边的中点; 若两个端点均在饱和线上, 则加密点添加在饱和线上。加密点坐标的计算方式为: 先计算边的中点, 即点 3 的横坐标, 并计算饱和物性压力 P_s , 并将饱和压力和温度构成的点 4 作为边的加密点。

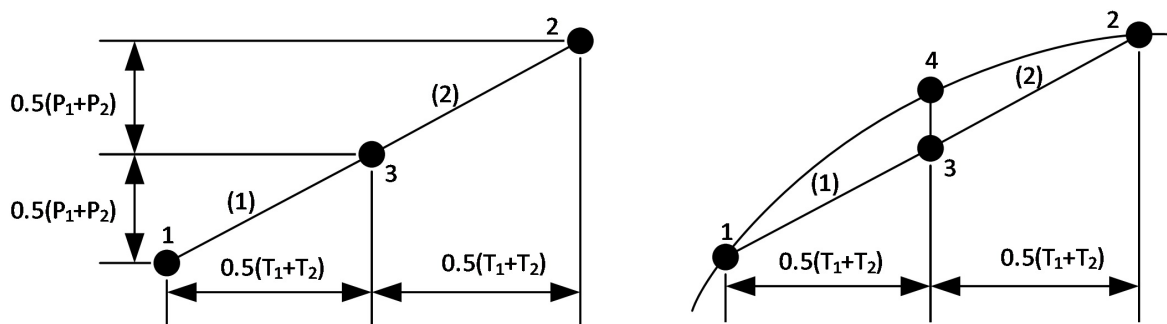


Figure 4. Schematic diagram of line refinement in unsaturated and saturated regions
图 4. 非饱和区和饱和区线加密示意图

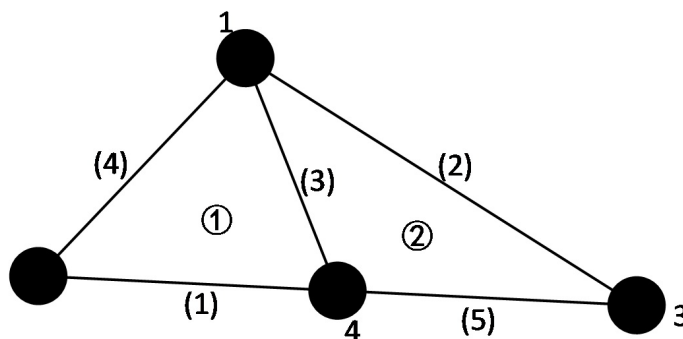


Figure 5. Schematic diagram of triangle refinement
图 5. 三角形加密示意图

对上述添加的点进行物性值计算。对于不在饱和线上的点，输入点的坐标，计算点的物性值并将点的相态和物性值存储在表示点的变量中；对于在饱和线上的点，需要根据点的横坐标或纵坐标分别计算点的气相饱和值和液相饱和值。

在需要加密的边上添加边，分割需要加密的三角形。如图 5 所示，针对需要加密的三角形，首先需要添加一条连接最长边相对顶点和最长边加密点的边，即添加连接点 1 和点 4 的边 5，然后新添加一个三角形②。

对网格循环加密。如图 6 所示，在加密完一层后，用新的关联数组替代原来的数组，并从步骤 5 开始循环，直到加密精度达到要求或加密层数达到上限。

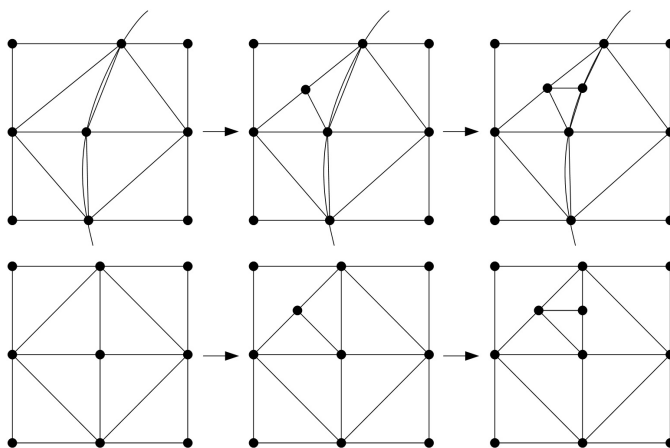


Figure 6. Schematic diagram of grid refinement steps in unsaturated and saturated regions
图 6. 非饱和区和饱和区网格加密步骤示意图

判断加密网格的相态。遍历所有网格中的三角形，判断三角形的三个点的相态。若存在点为液相、气相、饱和或超临界，则将三角形标记为对应的相态。

综上，本文采用针对饱和线相交网格和计算误差较大的网格进行循环加密以生成高精度物性数据库，该生成方法伪代码如表 1 所示。

Table 1. Pseudocode of high-precision physical property database

表 1. 高精度物性数据库伪代码

1	设置初始化精度误差 ε_0 ，收敛要求的误差 ε_c ，令最大误差 $\varepsilon = \varepsilon_0$
2	While $\varepsilon > \varepsilon_c$:
3	If 网格与饱和线相交且网格处精度 $\varepsilon_n > \varepsilon_c$:
4	采用饱和线加密方法进行加密，并计算新的 ε_n
5	End IF
6	If 普通网格处精度 $\varepsilon_m > \varepsilon_c$:
7	采用误差偏大网格加密方法进行加密，并计算新的 ε_m
8	End IF
9	计算最大误差 $\varepsilon = \max\{\varepsilon_m, \varepsilon_n\}$
10	End While

目标误差设定阈值过宽会造成相变强非线性区域物性插值精度劣化, 阈值过严则引发全域过度加密、激增存储与插值耗时, 合理取值可实现计算精度与运行效率的最优平衡。在工程实践中, 误差阈值与最大加密层数可以依据工程需求限定, 避免无限制加密现象, 本文误差阈值与标准物性结果相对误差小于1%。

2.2. 物性插值计算

通过多层次网格加密法生成了高精度物性数据库, 为了保证物性计算的准确性, 引入重心插值计算方法, 以提升插值计算精度[11] [12]。根据加密算法所生成的加密物性矩阵, 进行特定物性的插值求解, 如图7所示:

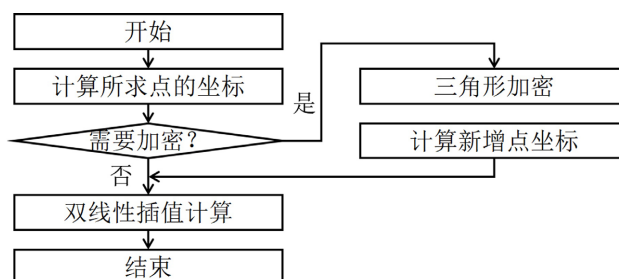


Figure 7. Flowchart of interpolation program

图7. 插值程序流程图

根据输入的物性, 求出其在物性网格中的坐标。假设输入的物性值为 P_v 和 T_v , 物性网格边界分别为 (P_{\min}, P_{\max}) 和 (T_{\min}, T_{\max}) , 网格点数量分别为 n_p 和 n_T , 则坐标计算公式为:

$$P_{\text{label}} = \frac{P_v - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}(n_p - 1) + 1 \quad (7)$$

$$T_{\text{label}} = \frac{T_v - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}(n_T - 1) + 1 \quad (8)$$

取计算点坐标值的余数 (P_{lr}, T_{lr}) 为计算点在此网格内的坐标。判断计算点所在网格是否为加密网格。若所在网格不是加密网格, 则插值计算此点的物性值。以图2为例, 假设四个点的物性值分别为 v_{11} , v_{12} , v_{21} , v_{22} , 则重心插值计算公式为:

$$v = [v_{11} + (v_{11} + v_{12})T_{lr}](1 - P_{lr}) + [v_{21} + (v_{21} + v_{22})T_{lr}]P_{lr} \quad (9)$$

在加密计算部分, 首先需要寻找计算点所在的三角形。判断的方式为通过计算三角形与点形成的向量的叉乘, 并判断其正负一致性来判断是否在所在的三角形内。假设计算的点为 P 点, 三角形的三个点分别为 A , B , C 点, 则叉乘的计算公式如下:

$$\overline{BA} \times \overline{PA} = (x_b - x_a) \cdot (y_p - y_a) - (y_b - y_a) \cdot (x_p - x_a) \quad (10)$$

$$\overline{AC} \times \overline{PC} = (x_a - x_c) \cdot (y_p - y_c) - (y_a - y_c) \cdot (x_p - x_c) \quad (11)$$

$$\overline{CB} \times \overline{PB} = (x_c - x_b) \cdot (y_p - y_b) - (y_c - y_b) \cdot (x_p - x_b) \quad (12)$$

若三个叉乘的值均为正或负, 则说明计算点在此三角形的内部。通过计算在由 \overline{AB} 和 \overline{AC} 向量构成的坐标平面内 P 点的坐标的方式, 然后插值计算 P 点的物性值, 即 P 点的坐标为:

$$x'_p \cdot x_{\overline{AB}} + y'_p \cdot x_{\overline{AC}} = x_{\overline{AP}} \quad (13)$$

$$x'_p \cdot y_{\overline{AB}} + y'_p \cdot y_{\overline{AC}} = y_{\overline{AP}} \quad (14)$$

进而 P 点的坐标值计算公式为:

$$x'_p = \frac{(x_p - x_a) \cdot (y_c - y_a) - (y_p - y_a) \cdot (x_c - x_a)}{(x_b - x_a) \cdot (y_c - y_a) - (y_b - y_a) \cdot (x_c - x_a)} \quad (15)$$

$$y'_p = \frac{(x_p - x_a) \cdot (y_b - y_a) - (y_p - y_a) \cdot (x_b - x_a)}{(x_c - x_a) \cdot (y_b - y_a) - (y_c - y_a) \cdot (x_b - x_a)} \quad (16)$$

得到坐标点后, 根据点 A , B , C 的物性值计算点 P 的物性值。计算公式为:

$$v_p = (v_b - v_a) \cdot x'_p + (v_c - v_a) \cdot y'_p + v_a \quad (17)$$

3. 多工质高精度物性软件平台

多工质高精度物性软件平台界面如图 8 所示, 该平台支持水、重水、氦、二氧化碳、氮气、氧气等多种工质的物性计算。全局单位配置模块, 可自定义核心物性参数单位, 适配多类单位制, 规避换算误差。物性计算模块, 支持多类状态参数输入, 高精度插值求解关键物性并输出偏差与相态。软件可自定义工况范围, 批量生成物性数据网格, 适配仿真与数字孪生插值需求。同时支持宽工况扫描, 生成精度云图与效率评估结果, 为自定义数据库提供精度验证; 也可绘制物性变化曲线, 识别相变关键工况点, 为专业热工系统设计提供支撑。

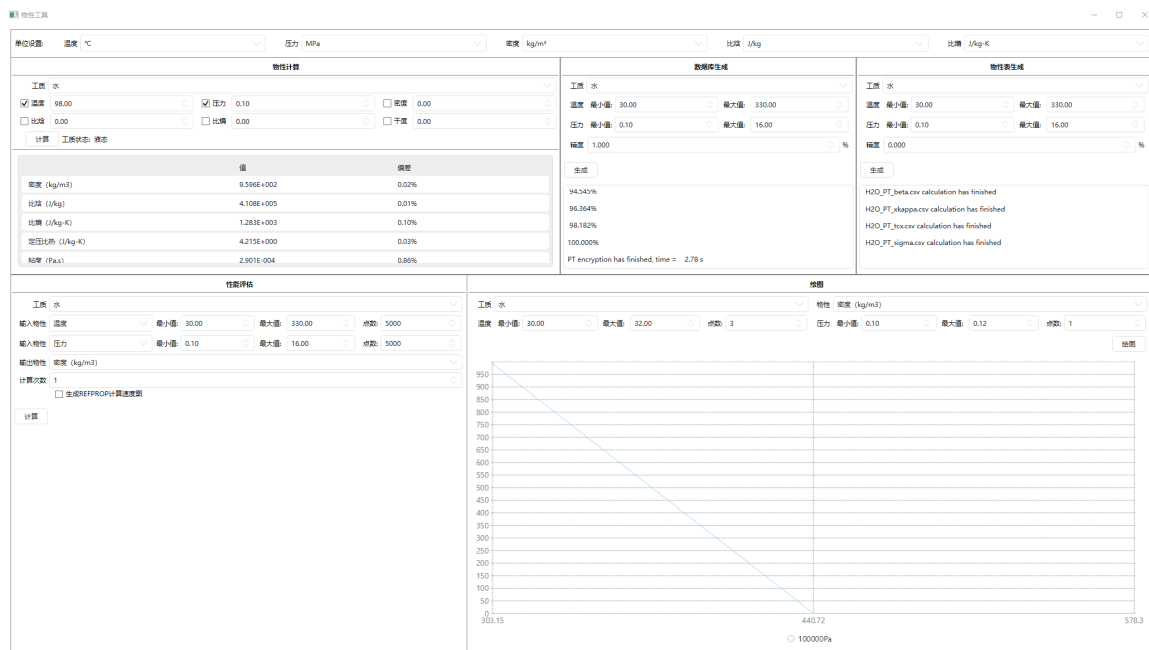


Figure 8. Interface of multi-working-fluid high-precision physical property software platform

图 8. 多工质高精度物性软件平台界面

4. 精度和效率验证

为了验证高精度物性插值计算方法的精度和效率, 采用宽范围的多工质工况验证, 验证范围如表 2

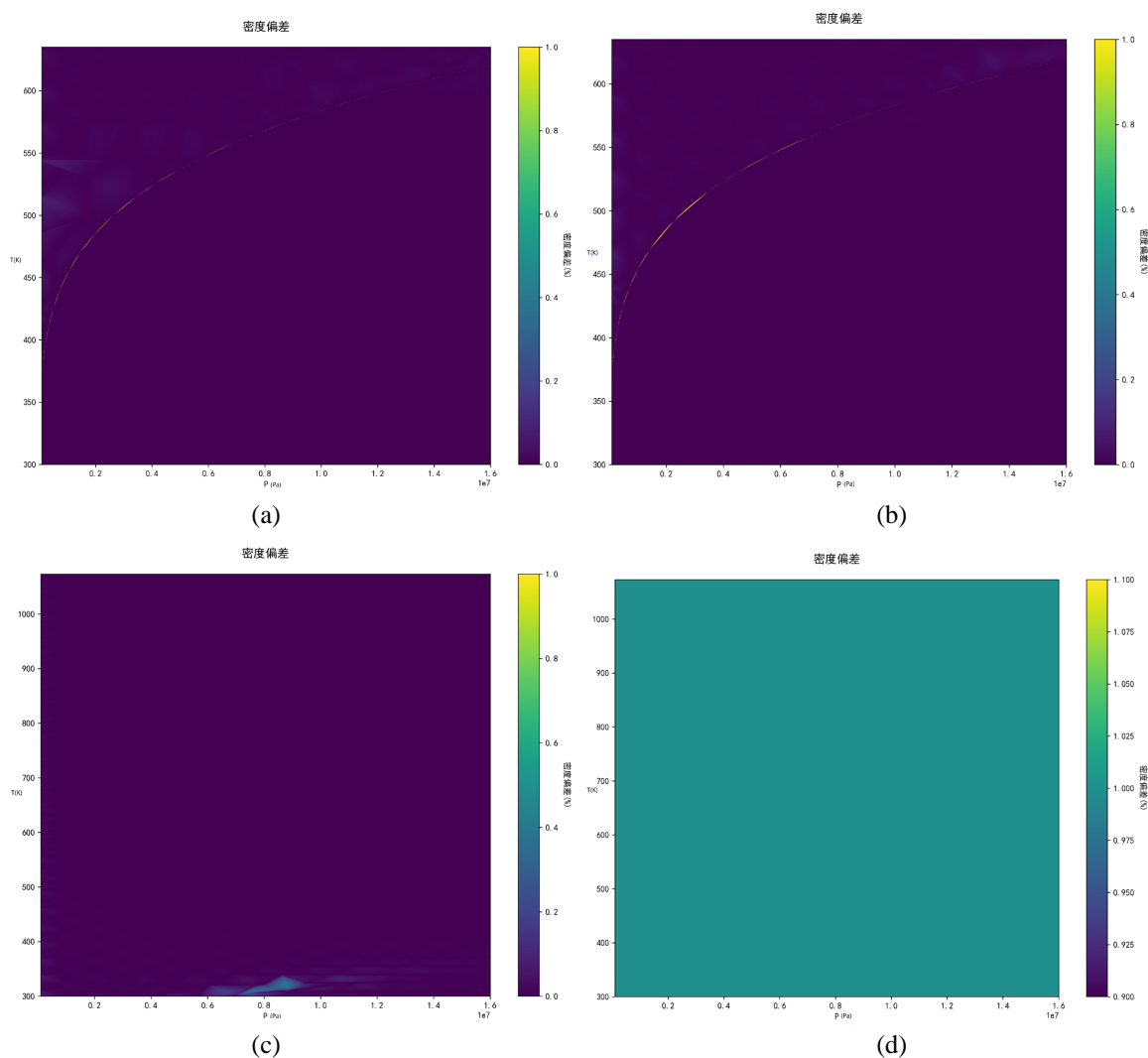
所示。利用宽范围的作为温度和压力自变量,通过高精度插值方法计算相应的密度和比焓值,与 REFPROP 标准物性数据库对比,进行精度和效率的验证。

Table 2. Range of independent variables for multi-working-fluid physical property calculation

表 2. 多工质物性计算验的自变量范围

序号	工质类型	温度范围(K)	压力范围(Pa)	序号	工质类型	温度范围(K)	压力范围(Pa)
1	水	300~635	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$	4	氮	300~1073	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$
2	重水	300~635	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$	5	氧	300~1073	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$
3	二氧化碳	300~1073	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$	6	氦	300~1073	$1.0 \times 10^{-1} \sim 1.6 \times 10^7$

多工质密度计算相对误差如图 9 所示,计算结果表明高精度插值方法在较宽的范围内,对于多种工质的密度计算相对误差小于 1%,具有较高的计算精度。其中,水、重水工质仅在气液相变饱和线附近的极小非线性区域出现误差峰值,且在 1% 限值内,有良好的精度表现;其它工质的密度计算误差分布均匀,维持在较低水平。



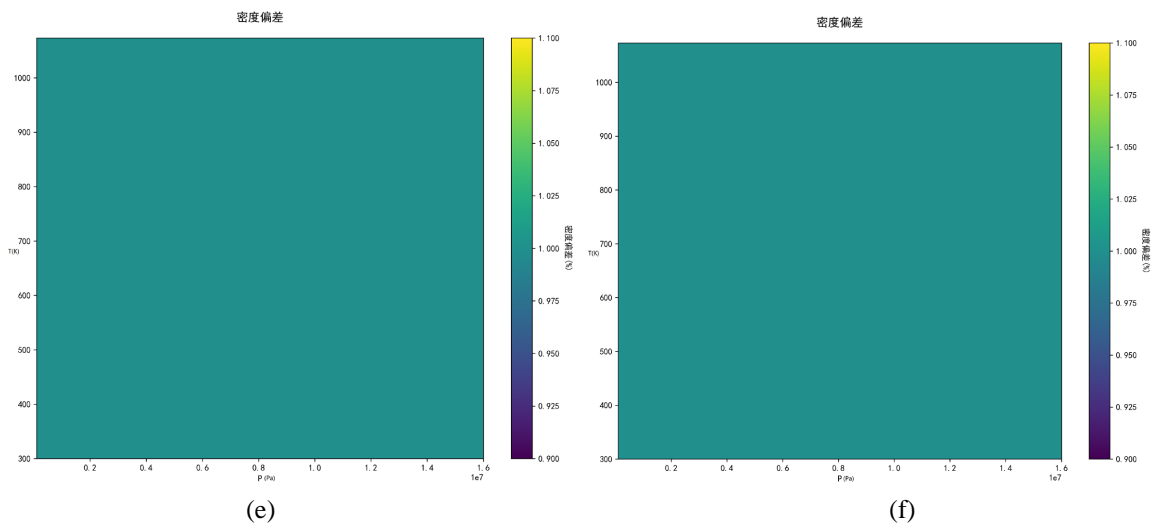
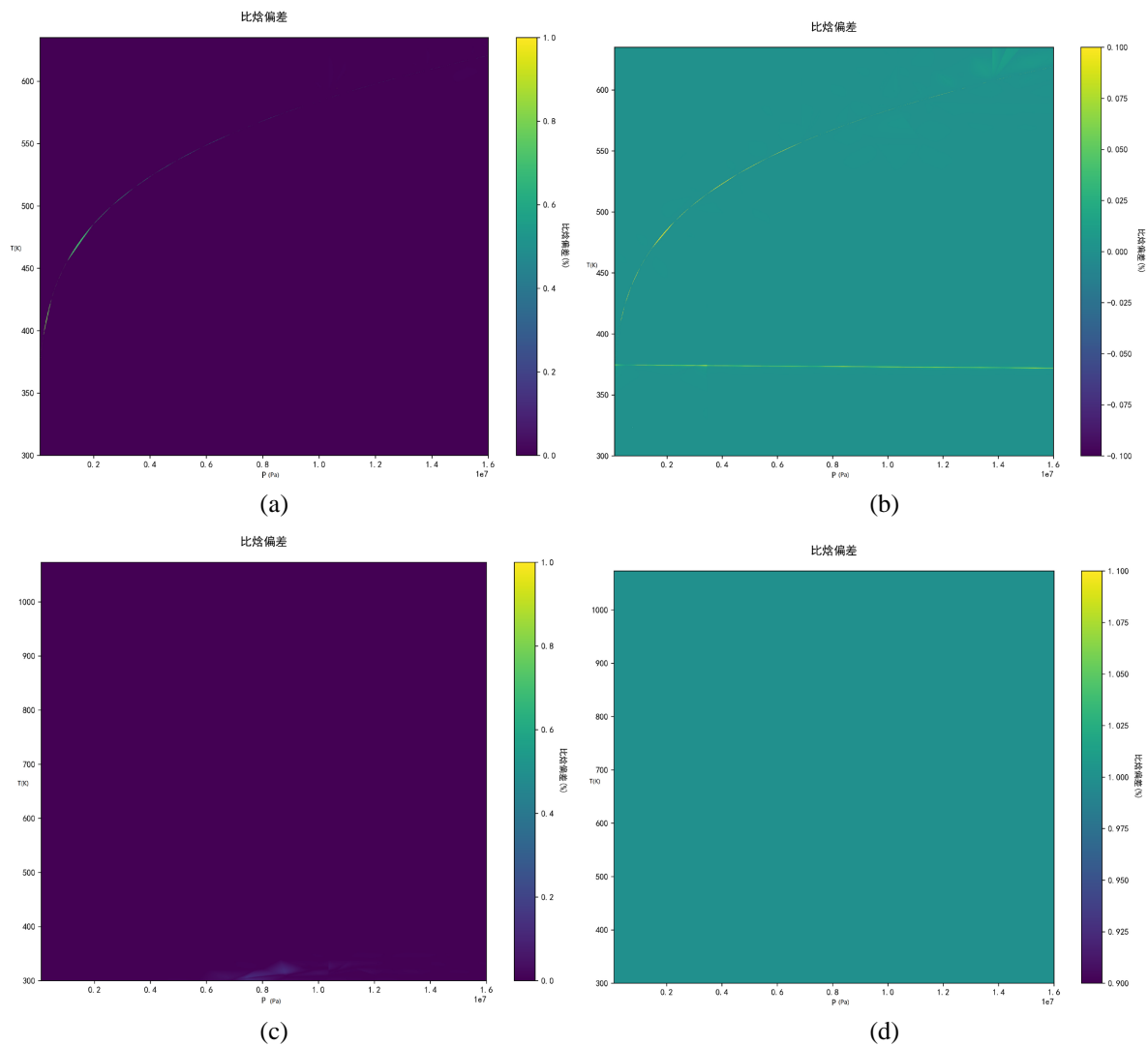


Figure 9. Relative error of density calculation for multi-working fluids, (a) H₂O; (b) D₂O; (c) CO₂; (d) N₂; (e) O₂; (f) He
图 9. 多工质密度计算相对误差, (a) 水; (b) 重水; (c) 二氧化碳; (d) 氮; (e) 氧; (f) 氦



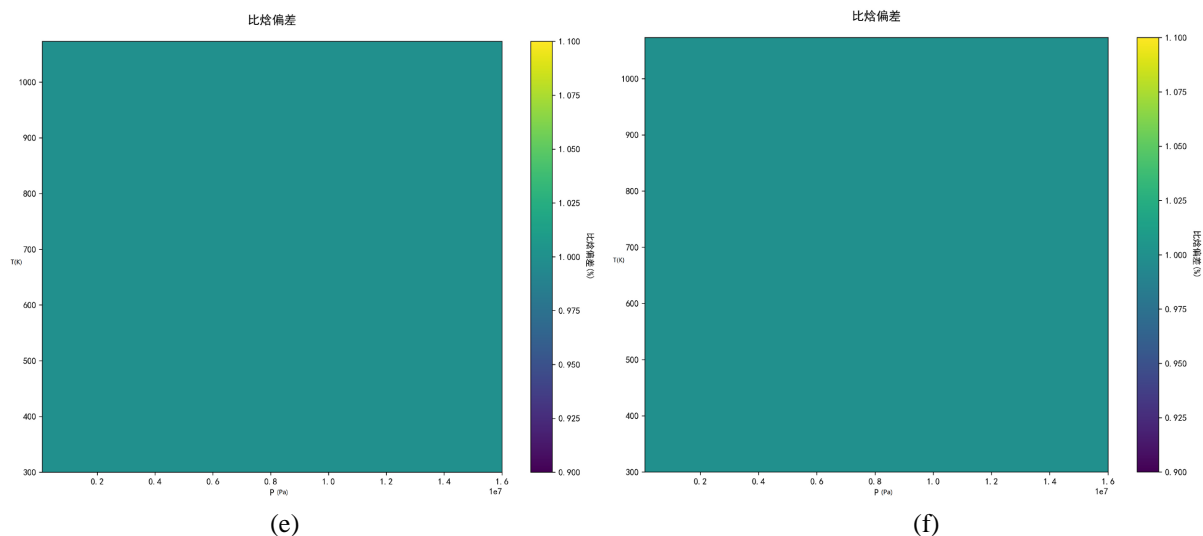


Figure 10. Relative error of specific enthalpy calculation for multi-working fluids, (a) H₂O; (b) D₂O; (c) CO₂; (d) N₂; (e) O₂; (f) He

图 10. 多工质比焓计算相对误差, (a) 水; (b) 重水; (c) 二氧化碳; (d) 氮; (e) 氧; (f) 氦

多工质比焓计算相对误差如图 10 所示, 计算结果表明高精度插值方法在较宽的范围内, 对于多种工质的比焓计算相对误差小于 1%, 具有较高的计算精度。其中, 水的比焓计算的误差峰值出现在饱和相变线附近的物性强非线性区域, 将相变区的最大误差成功控制在 1% 以内, 具有良好的精度表现。

在 CPU 型号为 Ryzen 7 5800X, 内存为 32 GB 计算机中, 二维样本点数为 5000 × 5000, 高精度插值方法与 REFPROP 计算效率对比如图 11 所示, 计算结果表明高精度插值方法在计算比焓和压力时, 最大耗时和平均耗时均明显低于 REFPROP 的耗时。因此, 高精度物性插值计算方法相较于 REFPROP 物性方程计算方法具有较高的计算效率。

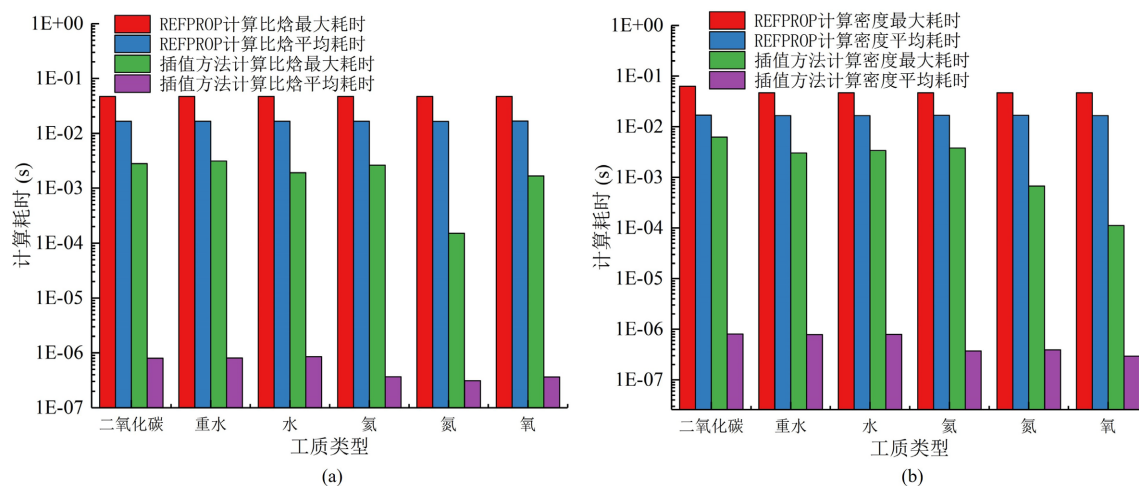


Figure 11. Comparison of computational efficiency between high-precision interpolation method and REFPROP

图 11. 高精度插值方法与 REFPROP 计算效率对比

5. 结论

本文提出了一种物性表格插值类型的物性计算方法, 利用多层次网格加密技术实现了对跨物性状态

边界线及误差偏差较大的网格循环加密, 生成高精度物性数据库。并使用双线性插值技术实现了利用高精度物性数据库的高性能插值计算。通过与国际权威的 REFPROP 标准数据库对比, 计算结果表明高精度物性插值方法具有较高的计算精度和效率。

基金项目

中核武汉“青年创新基金”项目(B260601)。

参考文献

- [1] 李俊杰, 张奕楠, 杨雨, 等. 融合机理模型和参数辨识的锅炉主蒸汽温度建模方法[J]. 热力发电, 2026, 55(3): 36-43.
- [2] 钱笑寒, 方爱平, 王煦璋, 等. 不同物态方程对常见气体热物性描述的对比研究及对 Redlich-Kwong 方程参数的修正[J]. 物理与工程, 2026, 36(1): 190-196.
- [3] 闫晨帅, 武文华, 王浩, 等. 超临界压力 CO₂-SiO₂ 纳米流体流动换热特性数值分析[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.251670>, 2026-06-17.
- [4] 赵学浩, 时立民, 崔立鑫, 等. γ -TiAl 合金超临界 CO₂ 微量润滑切削的换热系数预测与仿真研究[J]. 机械研究与应用, 2025, 38(6): 4-8+11.
- [5] 徐成佳, 张小卿, 新家正太. 基于努塞尔数的液氢低温四区存储模型研究[J]. 可再生能源, 2025, 43(4): 427-432.
- [6] 董泽明, 娄聚伟, 王楠, 等. 含余热回收的超临界压缩二氧化碳储能系统热力学特性研究[J]. 化工学报, 2025, 76(7): 3477-3486.
- [7] 吴松, 畅院东. 工况自适应的温压补偿优化计算方法[J]. 中国仪器仪表, 2025(6): 28-32.
- [8] 王庆生. 用热力学方法模拟汽轮机三维流动蒸汽 IAPWS-95 的性能[J]. 设备管理与维修, 2023(16): 137-138.
- [9] Wagner, W., Cooper, J.R., Dittmann, A., *et al.* (2008) IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, International Steam Tables: Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97. Springer, 7-150. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74234-0_3
- [10] 梁成彬, 郑群, 刘彪, 等. 超临界二氧化碳物性表格多方法计算特征研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(8): 76-85.
- [11] 姜晓武. 特殊工质轴流透平设计及性能分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [12] 薛彬彬. 基于流线曲率法的涡轮反问题研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.