热力系统

文章编号:1001-2060(2024)08-0076-10

超临界二氧化碳物性表格多方法计算特征研究

梁成彬,郑 群,刘 彪,姜玉廷

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:超临界二氧化碳(sCO₂)闭式布雷顿循环发电在能源领域展现出一定优势,而 sCO₂物性的准确快速计算直接关系到系统和部件的热力设计及压缩机和透平气动性能的准确预测。本文建立了包括表格自生成、索引查找及不同插值算法的高效模拟 sCO₂物性的表格计算体系,提出了有效表格的通用制作方法,结合 sCO₂定压比热和密度变化规律,研究了双线性、双立方和 B 样条插值方法计算特征,并对比了不同表格分辨率的影响程度及各方案计算耗时。结果表明:物性表格计算的高误差主要分布在饱和线附近;双立方插值在全域平均误差最小,数量级在 10⁻⁴ ~ 10⁻³之间,B 样条插值沿饱和线平均误差最低,最大误差数量级仅为 10⁻²;表格分辨率取 401 × 401,可兼顾计算成本和求解精度;基于物性表格方案计算耗时远低于 REFPROP 数据库。

关 键 词:二氧化碳;物性表格;插值方法;计算精度和成本;REFPROP

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.009

[引用本文格式]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. LIANG Chengbin, ZHENG Qun, LIU Biao, et al. Study on calculation characteristics of multi-method in property table of supercritical carbon dioxide [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(8):76-85.

Study on Calculation Characteristics of Multi-method in Property Table of Supercritical Carbon Dioxide

LIANG Chengbin, ZHENG Qun, LIU Biao, JIANG Yuting

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (sCO_2) closed Brayton cycle power generation shows a certain advantages in the energy field. Accurate and rapid calculation of sCO_2 physical properties is directly related to the thermal design of systems and components and the accurate prediction of aerodynamic performance of compressors and turbines. In this paper, the table calculation system for efficiently modeling the physical properties of sCO_2 is established, including table self-generation, index search and different interpolation algorithms. A general method of making effective tables is put forward. Combined with the rules of variation of sCO_2 isobaric specific heat and density, the calculation characteristics of bilinear, bicubic and B-spline interpolation methods are studied. The influence degree of different table resolutions and the calculation is mainly distributed near the saturation line. The average error of bicubic interpolation is the smallest in the whole region, with the order of magnitude between 10^{-4} and 10^{-3} . In contrast, the average error of B-spline interpolation along the saturation line is the lowest with the largest error

Fund-supported Project: Shanghai Institute of Space Propulsion Innovation Fund (17DZ2280800)

作者简介:梁成彬(1999-),男,哈尔滨工程大学博士研究生.

收稿日期:2023-08-29; 修订日期:2023-10-02

基金项目:上海空间推进研究所创新基金(17DZ2280800)

通信作者:姜玉廷(1987-),男,哈尔滨工程大学副教授.

ror of only 10^{-2} . The resolution of the table is 401×401 , which can give consideration to both calculation cost and solution accuracy. Moreover, the calculation time based on property table scheme is much less than that using REFPROP database.

Key words: carbon dioxide, property table, interpolation method, calculation accuracy and cost, REF-PROP

引 言

超临界二氧化碳(sCO₂)密度接近液体,粘度接 近气体,无论在化石能源发电还是应用于核能、太阳 能或地热能领域都展现出蓬勃生命力,以sCO₂为工 质的闭式布雷顿循环有望于未来10~20年内带来 能源转化领域的重大变革^[1]。然而,sCO₂在临界点 (温度304.13 K,压力7.38 MPa)附近物性变化剧 烈,物性的准确表征是开展系统热力设计和气动性 能预测的基础和前提。

为准确表征近临界物性规律,杨富方等人^[2]基 于通用范德瓦尔斯理论,提出了立方型状态方程超 临界外推一般准则,建立了 CO₂跨接比容平移 SRK 状态方程;富畅等人^[3]提出了压缩因子实验数据的 多参数拟合方程,运用遗传算法建立了热物性模型; 常发旺等人^[4]采用 P - R 方程和 Chung 方程计算不 同工况 CO₂密度和粘度,精度达到了工程要求;熊先 闯等人^[5]基于 BWRS 状态方程构建了气动热力物性 快速解析模型,并以 S - W 方程作参考对比;Bjorner 等人^[6]针对 CO₂提出四极矩修正的 CPA 状态方程; Muzny 等人^[7]和 Huber 等人^[8]分别推导了 CO₂粘度 和导热系数的多参数关联式;另外,随着人工智能优 化算法的发展,章聪等人^[9]和贺三等人^[10]分别采用 神经网络、支持向量机等模型实现了对 sCO₂近临界 区的物性预测。

目前,采用 Span 等人^[11]建立的亥姆霍兹自由 能形式 Span-Wagner(S-W)状态方程计算 CO₂热物 性受到学者们普遍认可,被美国国家标准与技术研 究院(NIST)写入了 REFPROP 数据库中,并结合 Fenghour^[12]和 Vesovic^[13]模型计算粘度和导热系 数,具有受众性高的优势;Varzandeh 等人^[14]证明了 利用 S-W 模型预测 sCO₂物性具有非常高的精度, Mazzoccoli 等人^[15]和 Zhao 等人^[16]也得到了相同的 结论;彭兆睿等人^[17]基于 NIST 数据采用基准函数 结合调整函数的方法,建立了大工况范围内 sCO₂显 式拟合关联式。另外,为提高计算效率,基于 sCO₂ 物性表格可以实现物性的高效准确计算。Shao 等 人^[18]基于 REFPROP 数据库建立 sCO₂物性双线性 插值表格,为物性求解提供了极大便利。当前,采用 物性表格开展 sCO₂压缩机和透平设计性能及流场 分析研究得到了大多数学者认可^[19-21];

sCO₂物性表格作为一种快速、兼容性强的计算 方法,可基于任意数据库开展计算,一旦生成表格便 可避免直接求解物性方程导致的高昂开销,成为求 解 sCO₂物性的有效方案。但是,目前其研究仍停留 在表格直接调用或采用低阶插值算法阶段,对物性 表格制作方法的研究甚少,难以优先保证物性表格 的精度。本文开展了 sCO₂物性表格多方法计算特 征研究,采用 C 语言编译开发,建立了通用表格生 成方法以实现任意形式有效表格制作,对拉丁超立 方生成的样本空间进行了 sCO₂特殊物性规律与双 线性、双立方及 B 样条插值精度的耦合关联探究分 析,详细比较了不同插值方案及表格分辨率带来的 效益和不足,为接下来开展闭式布雷顿循环整体优 化设计或压缩机透平性能模拟分析研究提供了物性

1 原理介绍

1.1 物性表格生成

生成物性表格是进行插值计算的前提,在近临 界点,当温度或压力仅发生微小变化时,物性将出现 剧烈变化,因此对临界点附近区域进行更加精细的 捕捉显得尤为重要。此外,在制作表格过程中存在 部分节点数值缺失的情况,这是因为 REFPROP 数 据库基于密度和温度两个物理量对其所需物性参数 进行求解,当向其输入其他物理量时存在计算迭代, 可能造成求解不收敛,为确立一套通用表格构造准 则,必须弥补这些缺失的节点物性数据。 基于 REFPROP 数据库中的 S – W 模型、Fenghour 模型及 Vesovic 模型^[22],本文开发了适用于计算不同 情况下 sCO₂物性的表格自生成程序,用于布置自变 量节点坐标,可以独立生成指数型正交表格(图1)、 等距型正交表格(图4(a))以及非正交表格(图4 (b))。为方便对比不同插值算法特点,采用等距型 正交表格进行物性插值计算比较。为减小物性精度 对热力设计和气动性能数值预测的影响,可采用指 数型正交表格对临界点进行局部加密。当进行非收 敛点处理时,因选用中间因变量作为自变量重构表 格将导致表格非正交,需要使用非正交表格处理。



图 1 指数型正交表格 Fig. 1 Exponential orthogonal table

1.2 输入量索引

选用合适的索引查找算法可以快速得到插值点 在表格中位置。对于等距型正交表格以及指数型正 交表格采用哈希函数^[18],因代码不涉及循环结构, 查找时间复杂度最小,仅为 *O*(1)。

等距型正交表格的第(*i*,*j*)个表格节点坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\min} + (i-1)\Delta x \\ y_{\min} + (j-1)\Delta y \end{bmatrix}$$
(1)

式中:i和 j—沿两个自变量方向的索引值;角标 min—表格中的最小物性参考点; Δx 和 Δy —沿两个 自变量方向的间隔。

因此,对任意自变量(*x*,*y*),可得到等距型哈希 函数的表达形式:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \text{INT} \begin{bmatrix} \frac{x - x_{\min}}{\Delta x} \\ \frac{y - y_{\min}}{\Delta y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2)

对于指数型正交网格,第(*i*,*j*)个表格节点坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\min} + \frac{q_x^{i-1} - 1}{q_x - 1} \Delta x_1 \\ y_{\min} + \frac{q_y^{j-1} - 1}{q_y - 1} \Delta y_1 \end{bmatrix}$$
(3)

式中: $q_x \pi q_y$ —沿两个自变量方向的加密系数; Δx_1 和 Δy_1 —加密起始点沿各方向与邻近点的间隔。

因此,可以得到指数型哈希函数的表达形式为:

$$\begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} = \text{INT} \begin{bmatrix} \log_{q_x} ((q_x - 1) \frac{x - x_{\min}}{\Delta x_1} + 1) \\ \log_{q_y} ((q_y - 1) \frac{y - y_{\min}}{\Delta y_1} + 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$(4)$$

对于非正交表格,因为 x 与 y 存在对应关系,不 再互相独立,哈希函数不能完全适用。非正交表格 查找计算原理如图 2 所示。图中绿点为给定任意量 (x,y)。为实现快速搜索,采用二叉排序树查找,时 间复杂度为 O(log n),图中索引值查找结果为 i = 2, j = 1。具体查找步骤为:(1)首先沿 x 方向采用哈 希算法查找对应索引值 i;(2)由于 y 是中间因变 量,通过 x_i和 x_{i+1}可得到 y_{i,j}与 y_{i+1,j}数组;(3)分别 对数组 y_{i,j}和 y_{i+1,j}创建二叉排序树,使左子树所有 节点值小于其根节点值,右子树所有节点值大于其 根节点值;(4)应用二叉排序树查找,若 y 小于二 叉,查找树根节点对应值,递归查找左子树;若 y 大 于二叉,查找树根节点对应值,递归查找右子树;当 y 的大小位于递归路径两根节点对应值之间或 y 与 根节点对应值相等,则查找结束,得到索引值 j。



non-orthogonal table

1.3 物性表格插值计算方法

借鉴图像缩放过程中避免图像严重失真的技 术处理,开发了适用于物性表格的双线性、双立方 以及 B 样条求解算法,原理如图 3 所示。为获得样本集中任一样本点 A(x,y)的物性数据,将其投射在物性表格中,基于表格中已知参考节点 p 的物性

值,可以实现对样本点的物性预估。选用不同的表 格节点或不同的插值算法,会影响样本点物性的求 解精度。



图 3 双线性、双立方及 B 样条插值原理

Fig. 3 Principles of bilinear, bicubic and B-spline interpolation

(1) 双线性插值

取样本点环绕的 2 × 2 个表格节点 $p_0 ~ p_3$ 来计 算物性,此时有:

$$A(x,y) = \sum_{i=0}^{1} \sum_{j=0}^{1} A(p_{ij}) \cdot W(i,j)$$
 (5)

$$W(i,j) = (-1)^{i+j} \frac{(x_{1-i} - x)(y_{1-j} - y)}{(x_1 - x_0)(y_1 - y_0)}$$
(6)

式中:A(x,y)一样本点物性; $A(p_{ij})$ 一各节点物性; W(i,j)一基函数; (x_0,y_0) 和 (x_1,y_1) 一 p_0 和 p_3 点。

(2) 双立方插值

取样本点周围 4×4 的表格节点值 $p_{00} ~ p_{33}$ 作为参考计算样本点物性,此时其由 16 个节点共同决定:

$$A(x,y) = \sum_{i=0}^{3} \sum_{j=0}^{3} A(p_{ij}) \cdot W(i,j)$$
(7)

$$W(i,j) = \prod_{\substack{p=0\\p\neq i}}^{3} \prod_{\substack{q=0\\q\neq i}}^{3} \frac{x - x_p}{x_j - x_p} \frac{y - y_q}{y_i - y_q}$$
(8)

(3) B 样条插值

B 样条的基本表达式同式(7),而基函数的确 定式发生了变化,为:

$$W(i,j) = w(d_{x_i}) \cdot w(d_{y_j})$$
(9)
$$w(d) = \begin{cases} \frac{2}{3} - (1 - \frac{|d|}{2}) |d|^2, |d| \le 1 \\ \frac{1}{6} (2 - |d|)^3, 1 < |d| < 2 \\ 0, \notin \mathbb{C} \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} d_{x_i} = \frac{x_i - x}{x_{i+1} - x_i} \\ d_{y_j} = \frac{y_j - y}{y_{j+1} - y_j} \end{cases}$$
(11)

式中: $w(d_{x_i})$ 和 $w(d_{y_j})$ 一沿两个方向的基函数,共同 决定W(i,j);d—沿两个方向各节点距样本点的相 对距离。

2 结果分析

2.1 任意有效表格通用制作方法

为实现任意有效表格制作,以焓-熵表格为例 介绍了焓 - 熵表格重构方案。焓 - 熵表格重构如图 4 所示。基于焓 - 熵制成的物性表格常在 NUMECA 求解器中用于计算密度、总压和静压,但是当采用 REFPROP 制作焓 - 熵表格时会在局部出现不收敛 解。由图4(a)可知,基于压力 - 熵进行物性计算在 工况内未出现不收敛解,通过压力、熵计算 CO,焓, 自变量熵和与之对应的因变量焓数据重组实现非正 交表格构建,然后采用非正交表格变量搜索,插值计 算不收敛点,如图4(b)所示。由图4(c)可知,蓝点 与蓝线均表示不收敛的点,红星代表临界点,不收敛 基本位于高密度区及临界点附近,采用非正交表格 修复后的新焓-熵表格如图4(d)所示。由此,解决 了调用焓 - 熵表格陷入局部不收敛点的问题,缓解 了求解器计算过程的不稳定性,为保证生成任意形 式的可用表格提供了指导思路和方法准则。





Fig. 4 Reconstructions of enthalpy-entropy table

2.2 物性与表格插值准确度分析

针对定压比热和密度进行了 sCO₂ 物性规律与 表格精度耦合分析研究,定压比热和密度作为物性 基础数据,是计算其他物性参数以及了解工质流态 和流动性质的必要条件。

2.2.1 定压比热与物性表格耦合分析

定压比热对表征工质传热、换热具有重要意义, 定压比热随温度、压力变化规律如图5所示。





由图 5(a)可知, CO₂定压比热在局部压力区间 出现波峰,在不同温度下,峰值不同且对应的压力也 不同,随着温度升高,波峰所对应的压力呈升高趋 势。这是因为当温度低于临界温度(263 K,283 K, 303 K)时,随着压力逐渐升高,到饱和线位置,气相 向液相冷凝过渡,此时定压比热达到极值;气态饱 和线和液态饱和线在临界点汇为一点,定压比热趋 于无穷(图5(b)红点);在超临界区域(T=323 K, 343 K,363 K和383 K,压力大于临界压力),因为 拟临界区的存在,出现第二级相变,表面张力的突 变导致定压比热在拟临界区间剧烈变化。随着压 力升高,对应的拟临界温度升高,长程关联作用减 弱,定压比热的峰值和陡度逐渐降低。另外,由图 5(b)可知,定压比热在跨气液相和跨类气类液相 时变化剧烈,从气态到拟气态、液态到拟液态均平 滑过渡。 依据 CO₂定压比热变化规律,开展了定压比热 表格插值精度研究。比较采用双线性、双立方及 B 样条插值方法带来的效益和造成的精度损失,通过 拉丁超立方取样,在样本空间内随机生成 10 000 个 样本,表格分辨率为 401 × 401,以 REFPROP 数据库 计算的 CO₂物性作为参考依据,计算误差所在数量 级 10^{*} 为:

$$x = \lg \left(\frac{|Value_{table} - Value_{REFPROP}|}{Value_{REFPROP}} \right)$$
(12)

图 6(a) 对比了 3 种方法基于压力和温度为自 变量对定压比热计算的误差分布。



Fig. 6 Comparison of calculation accuracies of isobaric specific heat by different interpolation methods

可以看到,由于定压比热在临界点附近变化极 大,无论采用哪种方法,在该区域都出现了最亮光 斑,表明该区误差最大,这也是由定压比热数值突变 造成的;由于液相和气相定压比热并不连续,而插值 过程中分别参考了两种相态的物性,因而沿饱和线 出现明显光亮区;在拟临界区域,反而没有明显光亮 出现。当采用双线性插值时,最大误差数量级在 10°,位于临界点处;采用双立方插值,整个区间大误 差区域明显减小,全域平均误差数量级约在 10⁻³, 最大误差数量级在 10⁻¹,拟临界域内的大误差彻底 消失;而采用 B 样条插值后,虽然大误差区面积占 比缩小不明显,如在拟临界区误差高于双立方插值, 但在临界点附近最大误差数量级已达到 10⁻²左右, 该方法更准确地捕捉到了近临界点附近定压比热的 变化规律。另外,由于 NUMECA 采用内能和密度作 为求解基,继续分析基于内能 – 密度插值定压比热 误差分布规律,如图 6(b)所示。可以看到,光亮区 域主要出现在饱和线附近,采用 B 样条在光亮区域 的误差比双立方小1 个数量级。

2.2.2 密度与物性表格耦合分析

1000

密度随压力、温度变化规律如图7所示。



and temperature

从图7(a)可以看到,密度变化与压力呈正相 关,而与温度呈负相关。当温度低于临界温度时 (263 K,283 K,303 K),随着压力升高,在低压区会 有密度数值跳跃出现,即说明进入到了两相状态 (粉色区域),此时压力温度不再为独立变量。当 CO,从气态冷凝到液态时,分子间距减小,表面张力 突然增加并造成相态过渡不连续,密度发生剧烈变 化。在临界点处,气液分界面消失,结合图7(b)可 知,此后(323 K,343 K,363 K 和 383 K)不再有密度 阶跃现象发生,但仍出现局部压力区间斜率较大情 况。这也说明了在超临界拟临界区内,存在类气结 构与类液结构之间的转变,可以用超临界气液共存 和拟冷凝来描述。当压力继续升高时,对应拟临界 温度也升高,分子间相互作用减弱,拟临界区密度变 化幅度也逐渐减小。另外,由图7(b)也可以看到, 从液态到拟液态、从气态到拟气态,密度是连续平缓 过渡的。

通过密度变化规律分析表格插值特征,仍然通过 拉丁超立方取样生成 10 000 个样本,并取 401 × 401 表格分辨率。不同插值方法密度精度对比如图 8 所 示。由图8可知,误差较大区域仍在饱和线附近,且 饱和温度越低,误差越大。这是因为对应的饱和液 态和饱和气态密度相差越大,临界点处光亮越不突 出。需要说明的是,由于密度数量级跨度很大,因此 在制作物性表格文件过程中存在系统截断误差,造 成了图中出现误差间断线。双立方插值在整个样本 空间内平均误差最低,数量级在10-4,但饱和线局 部区域甚至比采用双线性还亮,原因是过度捕捉了 气液相密度间断。对比 Shao 等人^[18]在近临界点的 表格处理,B样条沿饱和线平均误差最低,数量级为 10⁻³。另外,焓-压力表格常被 NUMECA 用于计算 两相区密度。由图8(b)可知,光亮区仍沿饱和线且 在液态饱和线出现了最亮光斑,验证了由于表面张 力变化导致密度骤变的情况。整体看来,双立方和 B 样条插值方法均比双线性插值方法误差更低,双 立方对两相区内(光线以左)保真较好,B样条沿饱 和线精度最高。







2.3 物性表格分辨率分析

为探讨表格分辨率特征对物性计算精度的影响,选择了B样条插值方法,以内能和密度作为插

值基计算粘度,随机生成 10 000 个样本点,分别选 取 201 × 201,401 × 401 和 601 × 601 表格分辨率进 行比较,结果如图 9 所示。



图 9 基于内能 - 密度表格不同分辨率粘度计算精度对比

Fig. 9 Comparison of calculation accuracies of viscosity with different resolutions based on internal energy-density table

可以看到,采用不同分辨率,沿饱和线的较大误差只能被削弱而不能彻底消除。分辨率从201×201 提高至401×401,饱和线以上(即液态区,超临界区 和气态区)误差明显降低,平均误差数量级从10⁻² 降至10⁻⁴。因为截断误差的存在,计算精度越高造 成的间断线也愈加明显,饱和线以下(即两相区), 误差也有所减弱。分辨率继续提高至601×601,误 差降低与401×401相比已不再明显,但在计算过程 中会占用更多内存空间且耗时更长,为追求较高的 计算效益,推荐使用401×401 表格分辨率。

2.4 物性表格同 REFPROP 的时间成本比较

为进一步挖掘物性表格的计算优势,图 10 对比 了 REFPROP 与以上选用的不同表格插值方法及不 同表格分辨率应用于不同数目样本计算耗时。可以 看到,随着样本数目从 5 000 增加到 100 000, REFPROP 计算耗时越来越高,但采用表格计算物性 的方法耗时增大幅度却相对较小,在 100 000 样本 数时,REFPROP 耗时约为采用 B 样条插值的 38 倍。 比较不同表格插值方法,基于 16 点插值(双立方和 B 样条)同基于 4 点插值(双线性)耗时并无太大差 异,双立方耗时最高,其次是 B 样条,但相差甚微。 采用不同分辨率,耗时基本呈线性规律,随着分辨率 增高,耗时也越长,但仍远低于 REFPROP 计算 成本。



图 10 REFPROP 和不同插值方法耗时对比 Fig. 10 Time-consuming comparison between REFPROP and different interpolation methods

3 结 论

本文建立了适用于求解 sCO₂物性的表格多方

法计算体系,具有精度高、快捷和兼容能力强的优势,提出了采用重构非正交表格建立任意有效表格的思路,为接下来开展闭式布雷顿循环整体优化设计及压缩机透平高效设计仿真提供了物性保证。通过本文研究得到以下结论:

(1) CO₂等压比热使用不同插值方案最大误差 均位于临界点处,且均沿饱和线平均误差较大,采用 双立方插值在全域平均误差数量级在 10⁻³,临界点 附近误差数量级在 10⁻¹,B 样条插值时临界点处误 差数量级能达到 10⁻²左右。

(2) CO₂密度使用不同插值方案计算误差沿饱 和线随饱和温度降低而升高,且主要位于液态饱和 线一侧。双立方插值在整个空间平均误差最低,数 量级在 10⁻⁴,但过度捕捉了气液相密度间断,B 样 条插值沿饱和线精度最高,可达到 10⁻³数量级。

(3)为兼顾计算精度与计算成本,当表格分辨 率为401×401时,全域平均误差已降低到10⁻⁴数 量级。在100000个样本时,物性表格计算耗时约 为REFPROP的1/38,且受样本数量影响小。另外, 双立方插值耗时高于 B 样条高于双线性,但差距 不大。

参考文献:

[1] 朱玉铭.超临界二氧化碳离心式压缩机研究[D].北京,中国 科学院大学,2020.

ZHU Yuming. Study on supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

[2] 杨富方,刘航滔,杨 震,等.超临界二氧化碳循环工质热物性 研究进展[J].热力发电,2020,49(10):21-29.

YANG Fufang, LIU Hangtao, YANG Zhen, et al. Thermophysical properties of working fluid of supercritical carbon dioxide cycle:
Research progress[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 49(10):21 - 29.

[3] 富 畅. 超临界二氧化碳的热物性模型[D]. 贵阳:贵州大学,2006.

FU Chang. Thermophysical model of supercritical carbon dioxide [D]. Guizhou: Guizhou University, 2006.

[4] 常发旺.超临界二氧化碳物性计算方法研究[J].石化技术, 2016,23(8):248.

CHANG Fawang. Study on calculation method of physical properties of super-critical carbon dioxide [J]. Petrochemical Industry Technology,2016,23(8):248.

• 85 •

[5] 熊先闯. 超临界二氧化碳气动热力物性快速解析模型研究[D]. 天津, 天津大学, 2021.

XIONG Xianchuang. The study on the fast analytical model for aerothermodynamic properties of supercritical carbon dioxide [D]. Tianjin:Tianjin University,2021.

- [6] BJORNER M G, KONTOGEORGIS G M. Modeling derivative properties and binary mixtures with CO₂ using the CPA and the quadrupolar CPA equations of state [J]. Fluid Phase Equilibria, 2016, 408:151-169.
- [7] MUZNY C D, LAESECKE A. Reference correlation for the viscosity of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2017, 46(1):013107.
- [8] HUBER M L, SYKIOTI E A, ASSAEL M J, et al. Reference correlation of the thermal conductivity of carbon dioxide from the triple point to 1 100 K and up to 200 MPa[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2016, 45(1):013102.
- [9] 章 聪,江锦波,彭旭东,等. 近临界区 CO₂ 物性预测模型对比 与修正[J]. 化工学报,2019,70(8):3058-3070.
 ZHANG Cong,JIANG Jinbo,PENG Xudong, et al. Comparison and correction of CO₂ properties model in critical region [J]. CIESC Journal,2019,70(8):3058-3070.
- [10] 贺 三,唐 凯,张茂超,等. 基于 WOA-LSSVM 模型的近临 界区 CO₂ 物性预测[J]. 计量学报,2023,44(5):803-809.
 HE San, TANG Kai, ZHANG Maochao, et al. Prediction of CO₂ physical properties in near-critical region based on WOA-LSSVM model[J]. Acta Metrologyca Sinica,2023,44(5):803-809.
- [11] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1 100 K at pressures up to 800 MPa[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1996, 25(6):1509 - 1596.
- [12] FENGHOUR A, WAKEHAM W A, VESOVIC V. The viscosity of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2009, 27(1):31-44.
- [13] VESOVIC V, WAKEHAM W A, OLCHOWY G A, et al. The transport properties of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1990, 19(3):763 – 808.
- [14] VARZANDEH F, STENBY E H, YAN W. Comparison of GERG-2008 and simpler EoS models in calculation of phase equilibrium and physical properties of natural gas related systems [J]. Fluid Phase Equilibria, 2017, 434:21 - 43.
- [15] MAZZOCCOLI M, BOSIO B, ARATO E. Analysis and comparison of equations-of-state with p-p-T experimental data for CO₂ and

 $\rm CO_2\text{-}mixture$ pipeline transport [J]. Energy Procedia , 2012 , 23 : 274 – 283.

- [16] ZHAO Q, MECHERI M, NEVEUX T, et al. Selection of a proper equation of state for the modeling of a supercritical CO₂ Brayton cycle: Consequences on the process design [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2017, 56(23):6841-6853.
- [17] 彭兆睿,郑秋云,张信荣.大工况范围内超临界区二氧化碳物 性快速计算方法研究[J].节能与环保,2023(1):39-41.
 PENG Zhaorui, ZHENG Qiuyun, ZHANG Xinrong. Study on the fast calculation method of thermophysical properties of carbon dioxide in supercritical state within large working ranges[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023 (1): 39-41.
- [18] SHAO W, YANG J, WANG X. Accuracy study and stability control of a property-table-based CFD strategy for modeling SCO₂ compressors working near the critical point of the fluid [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183.
- [19] 童志庭,邢 浩,张 超. 叶顶间隙对超临界二氧化碳向心透 平性能的影响[J]. 热能动力工程,2022,37(9):66-72.
 TONG Zhiting, XING Hao, ZHANG Chao. Influence of blade tip clearance on performance of supercritical carbon dioxide radial inflow turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(9):66-72.
- [20] 曹 润,李志刚,邓清华. 超临界二氧化碳离心压气机设计和 气动性能研究[J]. 西安交通大学学报,2020,54(4):44-52. CAO Run, LI Zhigang, DENG Qinghua. Design and aerodynamic performance investigation of supercritical carbon dioxide centrifugal compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4):44-52.
- [21] 孙宇轩,郭朝红,姜玉雁. 超临界 CO₂ 径流透平一维计算模型的研究[J]. 热能动力工程,2023,38(1):23-33.
 SUN Yuxuan, GUO Chaohong, JIANG Yuyan. Study on one-dimensional calculation model of supercritical CO₂ radial-inflow turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023,38(1):23-33.
- [22] 何欣欣,裴东升,陈会勇. 二氧化碳热物性方程研究进展及应用[J]. 热力发电,2021,50(5):27-33.
 HE Xinxin, PEI Dongsheng, CHEN Huiyong. Research progress and applications of thermophysical equations of carbon dioxide [J]. Thermal Power Generation,2021,50(5):27-33.

(刘 颖 编辑)