

文章编号:1671-6833(2024)02-0001-11

特约述评:跨临界 CO₂ 循环系统控制策略

【特约专家】王定标:中国能源学会副理事长

【按 语】随着全球对氢氟碳化物(HFCs)的生产和使用的限制要求,包括中国在内的主要发展中国家要在 2024 年将 HFCs 生产和使用量冻结在基线值,并在 2047 年前减少 85% 的 HFCs 使用量。《制冷空调行业“十四五”规划》中强调,中国要加快以 CO₂ 为主的绿色制冷剂在空调、制冷、热泵、储能等领域中的广泛应用,并加大力度推进该系统的集成、运行及相关核心设备的开发与研究。现阶段,跨临界 CO₂ 循环系统(transcritical CO₂ cycle system)已初步产业化,然而其暴露的问题也十分突出,如压力控制中的能耗问题、常规控制策略的滞后性问题、多样化循环系统控制策略适用性问题等,均阻碍了其在高端智慧能源装备的深入应用。另外,随着对可再生能源利用的持续推进,在循环系统中集成太阳能、地热能、空气能、海水能等已成必然趋势,然而如何合理调控多种可再生能源的复合利用,并基于时间和空间维度发挥不同类型可再生能源性能优势,已成为控制策略面临的巨大挑战。因此,深入阐述跨临界 CO₂ 循环系统控制策略的研究历程,并结合 CO₂ 循环特性提出可行性发展方向,对该系统的进一步工程化应用有着十分重要意义。在论文《跨临界 CO₂ 循环系统控制优化策略的研究进展》中,作者以跨临界 CO₂ 循环系统控制策略研究过程为逻辑,从离线参数的最优排气压力控制和经验参数的 PID 控制,到实时在线的梯度控制和极值寻优控制,最后到基于神经网络的智能化控制,全面阐述控制理论、方法、适用范围、优劣势等;在此基础上,对新能源汽车、建筑供暖、轨道交通、商超冷藏、军工等领域的控制策略实际应用现状进行了探讨;结合能源领域发展趋势和人工智能方法,对跨临界 CO₂ 循环系统控制策略的发展方向进行了探索,并提出了广义预测控制在该循环系统中应用的设想。

跨临界 CO₂ 循环系统控制优化策略的研究进展

王定标^{1,2}, 段鸿鑫^{1,2}, 王光辉^{1,2}, 申奥奇^{1,2}, 刘鹤羽^{1,2}, 秦 翔^{1,2}

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 新能源清洁利用技术与节能装备河南省国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘 要: 控制策略作为跨临界 CO₂ 循环系统的重要组成部分,是保证系统高效节能运行的关键。介绍了系统最优排气压力经验计算和泊金汉 π 定理的反馈控制、基于梯度追踪和极值寻优的实时在线控制以及基于神经网络的预测控制等,详细分析了系统控制策略的发展历程和未来发展形势,并总结如下:离线控制建立简单、成本低,但易受到环境因素和系统部件变化的影响而导致控制性能降低;实时在线控制策略可以实时追踪系统最大能源效率对应的排气压力,但由于寻优过程费时较长,导致控制系统的收敛时间过长;模型预测控制系统可以实现实时优化和快速收敛,有着良好的发展前景。结合新能源汽车、建筑供暖、轨道交通、商超冷藏、军工等实际场景对跨临界 CO₂ 循环系统控制策略的应用特点和未来发展形势进行分析,进一步说明了提高控制策略的适用性是未来研究的重要方向,并分析将广义预测控制、强化学习等具有自适应属性的方法应用于跨临界 CO₂ 循环系统控制策略的可行性,同时探讨了开发适用于大规模循环系统和储能系统控制策略在我国“双碳”背景下的重要意义。

关键词: 跨临界; CO₂ 循环系统; 优化; 控制策略; 预测控制

中图分类号: TK123; TB65; TP13

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.02.013

收稿日期: 2023-11-07; **修订日期:** 2024-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576245, 52206120)

作者简介: 王定标(1967—),男,浙江杭州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事工业节能技术及先进装备、装备数字化仿真优化及安全方面的研究, E-mail: wangdb@zzu.edu.cn。

通信作者: 秦翔(1989—),男,河南郑州人,郑州大学讲师,博士,主要从事跨临界 CO₂ 热泵系统集成与控制、喷射制冷技术应用方面的研究, E-mail: xqin@zzu.edu.cn。

引用本文: 王定标,段鸿鑫,王光辉,等. 跨临界 CO₂ 循环系统控制优化策略的研究进展[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(2): 1-11. (WANG D B, DUAN H X, WANG G H, et al. Research progress of control optimization strategies for transcritical CO₂ cycle system [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(2): 1-11.)

以电力驱动为核心的热泵技术是引领全球能源可持续发展的关键^[1]。研究表明:热泵技术作为一种环保、绿色、高效的能源转化方式,可完成空气源、地热源、海水源热能等可再生能源的综合利用,是我国“双碳”目标实现的有效途径。然而,传统热泵系统中使用的人工制冷剂会带来臭氧层破坏、温室效应、合成污染等环境问题。基于国际公约对制冷剂环保性的要求^[2],天然制冷剂 CO_2 回归到大众的视野。

值得注意的是, CO_2 在超临界状态下的热物性尤为突出,超临界 CO_2 的黏度系数接近于气体,这使得 CO_2 具有较好的流动性,相应的阻力损失较低,超临界 CO_2 的密度接近于液体,相应地具有较高的体积热容量,这使得可以使用更少制冷剂充注量来达到相同的加热需求。在假临界区域, CO_2 的热容量等属性激增,这显著提高了其传热性能。同时,在亚临界区, CO_2 潜热较大,这使得它在发生相变时可以吸收更多热量。

基于超临界和亚临界 CO_2 良好的传热特性,Lorentzen 等^[3]在 1993 年首次提出跨临界 CO_2 循环方式,如图 1 所示。跨临界 CO_2 循环存在较大的压差,可以采用膨胀功回收装置回收膨胀过程中的能量损失。目前主要使用的膨胀功回收装置可分为动机械、静机械 2 种。喷射器可利用多股流压差变化,对膨胀后的 CO_2 进行回收,可有效提高压缩机进口品位、降低压缩机功耗。又因喷射器不涉及动态组件,且制造成本较低,受到了广大学者的青睐^[4]。回热器的使用可以降低进入节流装置的 CO_2 温度、减小节流损失,并且提高了压缩机吸气处 CO_2 的过热度,同样降低了节流损失和压缩机功耗^[5]。此外,采用膨胀器^[6]、涡轮^[7]等动机械代替膨胀阀,可以将膨胀功转化为压缩机运行所需电能,以回收膨胀功,降低系统能耗。

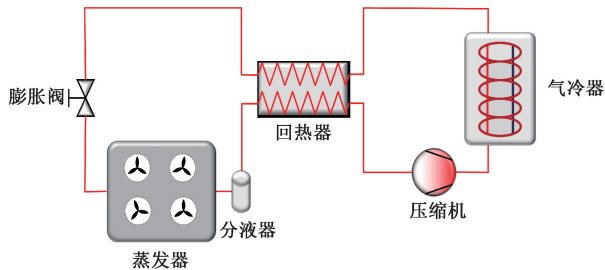


图 1 跨临界 CO_2 循环系统^[3]

Figure 1 Transcritical CO_2 cycle system^[3]

除了上述通过增添系统部件提升系统能效的方式,对系统的控制优化是自跨临界 CO_2 循环系统提出以来就被学者们重点关注的领域。由于在超临界

区 CO_2 的温度与压力无关,而高压的变化会影响系统的制冷量和功耗,因此对系统的高压侧压力进行控制,使得系统在满足制冷量要求的情况下尽量减小压缩机功耗,这是系统控制的核心思路。

然而系统的最优排气压力点并不可知,在不同应用场景下寻找最优排气压力点是研究的首要难点,并且由于系统内部各部件存在复杂的耦合关系,对系统目标制冷量和最优排气压力的耦合控制也是需要关注的问题。

初始阶段的研究集中于仿真和实验结果对系统最优排气压力与可控变量的拟合^[8],然而该方法的控制效果会受环境因素变化影响而降低。近些年逐步发展起了部分实时控制策略^[9-10],但也会存在收敛时间过长或适用性不足的情况。因此,跨临界 CO_2 循环控制仍存在需要解决的难题。

本文以递进式介绍跨临界 CO_2 循环系统控制策略发展过程,并对系统控制策略的应用情况进行梳理与总结,对未来跨临界 CO_2 循环系统控制策略提出展望。

1 基于系统最优排气压力的反馈控制

系统性能测试是开发新系统的关键环节,对跨临界 CO_2 循环系统性能变化区间的测试,通常以改变压缩机出口压力作为目标变量,得到在给定工况下的极限性能指数。

如图 2 所示,在系统的排气压力增加后,比压缩机功(Δh_c)随着排气压力的增大呈现增大趋势,这是由于压缩比的升高增加了压缩机的功耗。同时,系统的单位制热量(Δh_{gc})也随之增加,但增加速率先快后慢,而系统的能效(COP)由二者共同决定,故呈现先增加后减小的趋势,即对应存在最优排气压力点,使得系统的 COP 达到最大。

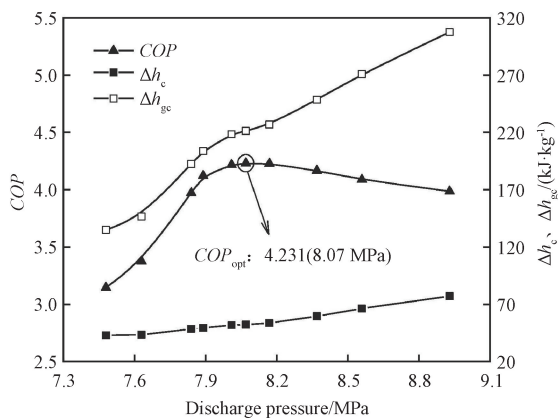


图 2 排气压力对 COP 、 Δh_c 和 Δh_{gc} 的影响^[11]

Figure 2 Effect of discharge pressure on COP , Δh_c and Δh_{gc} ^[11]

从跨临界 CO₂ 循环系统压焓图^[3]上可以看出,如图 3 所示,循环的焓差随着高压侧压力的增加而增大,并且增加的速度先快再慢,而高压侧压力的增大对应着压缩机功耗的增大,这意味着存在某个压力点,使得系统焓差与压缩机功耗的比值达到最大。

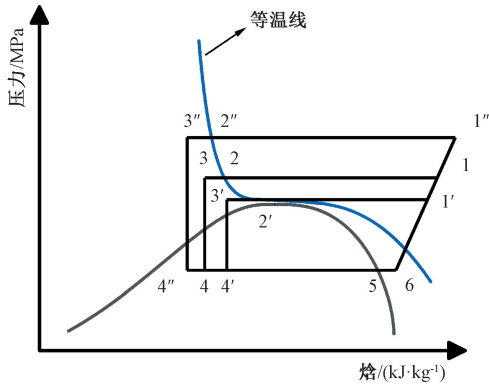


图 3 跨临界 CO₂ 循环系统压焓图^[3]

Figure 3 Pressure-enthalpy diagram of transcritical CO₂ cycle system^[3]

以上分析说明,跨临界 CO₂ 循环系统存在最优排气压力点使得系统的 COP 达到最大。为了寻找系统的最优排气压力,学者们通过数值仿真或实验研究的方法来寻找最优排气压力与其他系统参数的关系,通过经典的比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 反馈控制实现对系统最大 COP 的追踪。

1.1 最优排气压力的影响因素

跨临界 CO₂ 循环系统的最优排气压力受到系统中多个参数的影响,寻找跨临界 CO₂ 循环系统最优排气压力的主要影响参数是学者们进行相关分析的基础。

早期学者们直接分析仿真数据^[12]或实验数据^[13]寻找最优排气压力的影响因素。近年来,不断有学者提出了更为直观、经济的分析方法来比较各系统参数对最优排气压力的影响。响应面分析^[14]的方法可被用于研究跨临界 CO₂ 制冷系统和热水器最优排气压力的影响因素。该方法不仅有利于减少实验次数、节约成本,同时考虑了各因素之间的影响,但同时也须注意,该方法需要合理设计实验以获得整个设计空间的输出参数的值,并需要选取合适的模型,以提高响应面的质量与精度^[15]。如图 4、图 5 所示,该研究表明对于制冷系统,气冷器出口处的 CO₂ 温度对系统最优排气压力具有绝对的影响力;而对于热水器系统,出水温度起主导作用,其次为蒸发温度,气冷器夹点温差及进水温度,且各参数之间存在耦合关系。此外,数据处理型分组^[16]、方

差分析^[17]等方法也可以被用于分析跨临界 CO₂ 循环系统的最优排气压力影响因素。

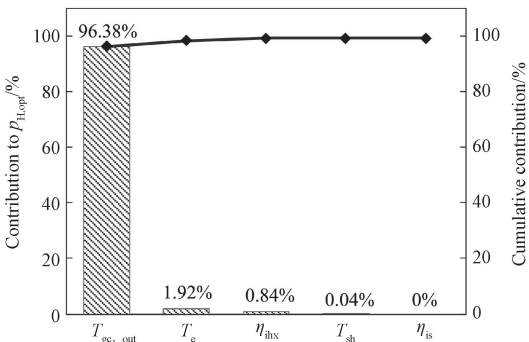


图 4 跨临界 CO₂ 制冷系统各因素贡献率^[14]

Figure 4 Contribution of factors in transcritical CO₂ refrigeration system^[14]

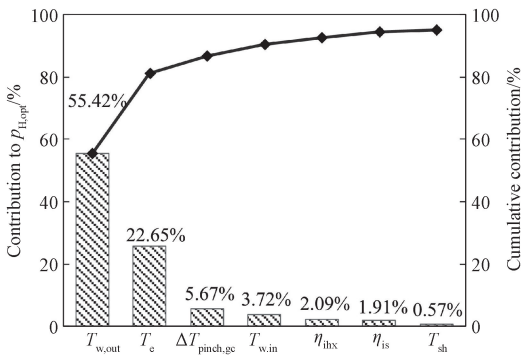


图 5 跨临界 CO₂ 热水器系统各因素贡献率^[14]

Figure 5 Contribution of factors in transcritical CO₂ water heater system^[14]

通过在 Web of Science 上检索“transcritical CO₂”与“optimal discharge pressure”,筛选相关文献,可以发现,近些年学者们往往认为跨临界 CO₂ 循环系统的最优排气压力与气冷器出口温度、环境温度、进水温度、出水温度等因素相关。

1.2 最优排气压力的经验关系式

基于对仿真或实验数据分析得到的最优排气压力影响因素,学者们建立了相关的经验关系式^[18-19]来寻找系统的最优排气压力,并逐步考虑系统的压缩机等熵效率^[20]、过热度^[21]等参数,以增大其可应用的环境温度范围,表 1 列出了部分由仿真模拟或实验得到的最优排气压力关系式。

这种由仿真或实验数据拟合得来的经验关系式受实验条件影响较大,在实验设备更改或部件老化的情况下,控制效果会出现下降的情况。

量纲分析是研究自然现象物理量量纲之间固有联系的分析方法,通过量纲分析,可以导出这些现象的相似准则数,哪怕是那些难以建立数学物理模型的复杂现象。泊金汉 π 定理是量纲分析法中的一

表 1 最优排气压力的关系式

Table 1 The correlation of optimal discharge pressure

来源	最优排气压力的关系式	适用范围
Kauf ^[18]	$P = 2.6T_{gc,out} + 7.54$	$35\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Wang 等 ^[19]	$P = 10.979\ 95 + 1.064\ 42T_{w,out} + 1.014\ 04T_{amb} - 0.012\ 16T_{amb}^2$	$5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$P = 23.083\ 91 + 1.223\ 79T_{w,out} - 0.004\ 07T_{wt,out}^2 + 0.162\ 07T_{amb}$	$-15\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Liao 等 ^[20]	$P = \frac{2.757\ 2 + 0.130\ 4T_e - \frac{3.072K}{C}}{1 + 0.053\ 8T_e + \frac{0.160\ 6K}{C}}T_{gc,out} - \frac{8.794\ 6 + 0.026\ 05T_e - \frac{105.48K}{C}}{1 + 0.051\ 63T_e + \frac{0.221\ 2K}{C}}$	$-10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_e \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{gc,out} \leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Li 等 ^[21]	$P = -5\ 184.4 + 512.7\ln T_{gc,out} + \frac{14\ 146}{\ln T_{gc,out}} - \frac{21\ 301}{T_{gc,out}} + 1.7 \times 10^{-4}T_{w,in}^2$	$-20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$P_1 = 0.06(S - 18) + 0.3; P_2 = 0.05(S + 16); P_t = f(x) = \begin{cases} P \\ P - P_1 \\ P + P_2 \end{cases}$	$30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{gc,out} \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

个普遍方法,被广泛应用于热泵等^[22]领域的研究。

该方法用于建立最优排气压力与其他系统参数的实验关联式^[23]上。研究 1.1 节中提到的方差分析法确认量纲分析所需的系统参数,选择气冷器出口 CO₂ 温度、CO₂ 质量流量、压缩机转速和压缩机功率 4 个相互独立的变量作为基本变量,使用实验数据拟合得到了关于最优排气压力的无量纲关系式,经校正的关系式误差小于 3%。此外,π 定理还被应用于建立跨临界 CO₂ 热泵热水器水侧温升^[24]及出水温度^[25]的关系式,预测精度良好,且采用泊金汉 π 定理得到的关联式反映了系统各参数之间的固有关系,突破了系统尺寸的限制,具有良好的适用性。

1.3 基于最优排气压力关系式的 PID 控制

基于通过实验或仿真得到的最优排气压力关系式,部分学者建立了跨临界 CO₂ 循环系统的 PID 控制器,以获得系统运行时的最大 COP。PID 反馈控制建立起来方便简单,符合实际应用的低成本要求。

赵清华等^[26]分析了美国 ARAC 的实验数据,得到了系统最优排气压力与环境温度的线性关系,依据该关系设计了模糊 PID 控制器,模拟结果显示模糊 PID 控制器的调节时间大大缩短,超调量明显减小,控制效果得到了很大改善。王静等^[27]针对汽车空调应用场景,研究了多 PID 控制的跨临界 CO₂ 空调系统中不同 PID 控制器启动顺序对系统动态响应的影响,仿真结果表明,排气压力—送风温度—车厢温度的启动顺序可以提高系统的动态响应特性,为实际汽车空调系统的控制设计提供了参考。

2 跨临界 CO₂ 循环系统实时控制

第 1 节中提到的由仿真或实验数据拟合得出的离线控制模式虽然很容易建立起来,但在实际应用中会受到环境因素、系统部件更换以及部件老化等干扰,导致控制性能降低,难以做到对最优排气压力的实时优化追踪。近年来许多学者基于公式推导或者梯度寻优的思想,提出了一些实时控制策略,实现了对系统最优状态的实时跟踪。

2.1 基于公式推导的最优排气压力实时控制

Zhang 等^[28]提出了一种新的跨临界 CO₂ 制冷系统在线优化控制方法,其原理如图 6 所示。该方法使用由数学公式推导得到的在线校正公式跟踪最佳压力设定点。相对于排气压力经验相关性的控制方式,它独立于循环、系统规格和操作条件,应用范围较广。此外,还可通过数学公式证明系统满足冷却需求的压缩机功耗最小化,等同于系统 COP 最大化^[29],从而达到使用更少的参数实现对系统控制的目的,既降低了成本,又减小了控制实现的难度。该研究还结合了实时扰动和观察程序,通过调节压缩机的转速和膨胀阀的开度调节系统的排气压力,从而实现对系统压缩机功耗的控制。最后通过实验验证了该策略的有效性。但在理论公式推导过程中涉及一些理想化的假设,过多的简化会使得该控制策略难以适用于所有工况。

2.2 实时梯度追踪控制

依据图解法的原理,可以构建一种实时追踪跨临界 CO₂ 循环系统最大 COP 的控制系统^[30]。控制系统在微调膨胀阀后,通过比较系统制冷量梯度与

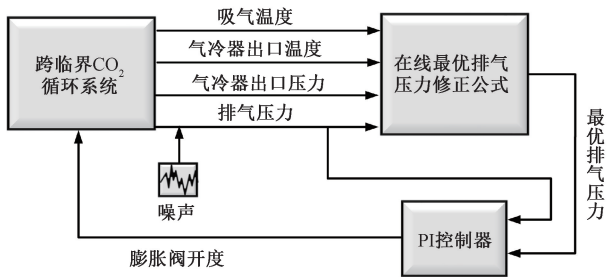


图 6 在线修正最优排气压力控制原理图^[28]

Figure 6 On-line revision of optimal discharge pressure control schematic^[28]

压缩功梯度的比值和实时 COP 的大小,来决策膨胀阀开度继续增大、减小或是保持不变,从而实现对系统最大 COP 的控制。如果梯度比值大于当前 COP 时,控制器将继续朝着该方向调整膨胀阀,反之则朝相反方向调整。实验结果表明,该系统在接近最优的范围中运行,具有良好的可控性。随后, Kim 等^[31]在不同制冷剂充注量和不同的气体冷却器二次流体入口温度下,研究了该实时控制方法的有效性。实验结果显示,该控制方法存在低估最优气冷器处压力的问题,但仍能够在各种实验条件下实现高于最大 COP 95%的水平,显示出实际应用的潜在可能性。

然而,该系统需要复杂的传感器系统和强大的计算处理能力来实现对系统的实时检测以及制冷量对压缩机功耗实时梯度等参数的计算,这使得建立该控制系统的成本较高。

2.3 基于抖动解调思想的极值寻优控制

极值寻优控制(extreme seeking control, ESC)是一种近乎无模型的自优化控制方式,其原理如图 7 所示,通过对抖动解调信号和适当的滤波实现对梯度信息的在线估计。

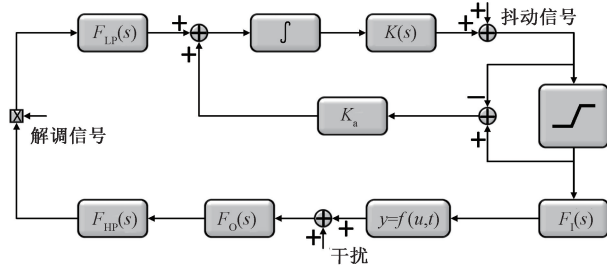


图 7 抖动 ESC 策略框图^[9]

Figure 7 Block diagram for dither ESC method^[9]

对于跨临界 CO₂ 循环系统,可以将排气压力设定值作为 ESC 控制器的输入,系统 COP 作为性能指标,并通过内环的比例积分 (proportional integral, PI) 控制器调整电子膨胀阀 (electronic expansion valve, EEV) 开度调节排气压力,从而实现 ESC 方法

的应用。研究结果表明:ESC 方法在跨临界 CO₂ 循环系统的高效运行控制方面具有很好的应用前景。并且通过热力学分析,可以证明系统功耗最小化和性能系数最大化之间的等价性,这样减少了系统所用测量设备的数量,降低该系统运行的成本^[32]。随后, Rampazzo 等^[33]针对跨临界 CO₂ 循环系统在风冷商业制冷设备和可变流量热泵热水机 2 个应用方向上,对 ESC 方法进行了实验验证,并与理论情况下的 Liao 等^[20]提出的关系式进行了对比,在风冷商业制冷方面,ESC 方法与 Liao 等^[20]的关系式所控制系统的性能非常接近;而在热泵热水机方面,ESC 方法要优于 Liao 等^[20]提出的关系式所控制系统的性能。

过冷器可以减少节流损失,提升系统的能效。对于采用过冷装置的系统来说,中间压力和排气压力的控制同样至关重要。ESC 方法被用于控制结合了过冷装置的跨临界 CO₂ 循环系统^[34],通过电子膨胀阀分别调节排气压力和中间压力,以实现系统最大 COP 追踪,研究扩大了 ESC 方法的应用范围,并在随后进行了实验验证^[35],分别在设计工况和非设计工况下验证了 ESC 实时优化方法的有效性。此外,Cui 等^[36]还将 ESC 控制加入到添加了专用机械过冷装置(DMS)的跨临界 CO₂ 热泵循环系统,同时调节 DMS 装置的回路水比和系统排气压力实现对系统最大 COP 的控制,通过与之之前提出的经验关联式^[37-38]的控制性能对比,证明了该控制策略的优越性。

极值寻优控制实现了跨临界 CO₂ 循环系统的实时控制,并且避免了建模的复杂过程,但其实验过程中较长的收敛时间会导致该方法在环境温度急剧变化的工况下不适用^[31],后续可以针对该方面进行优化。

3 基于数据驱动的系统模型预测控制

模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种在工业中广泛应用的预测控制方法,其基本原理是模型预测、滚动优化、反馈校正。近些年随着计算机硬件性能的提升,MPC 在热泵控制^[39]等领域有着良好的应用前景。

3.1 模型预测控制的建模机制

对于模型预测来说,建立精度高、泛化能力强的预测模型至关重要。目前对于模型预测控制的建模思想分为 3 类:白盒模型、黑盒模型和灰盒模型,如图 8 所示。白盒模型指的是依据数学物理定理推导出的模型,一般依据质量守恒及能量守恒等定理;黑

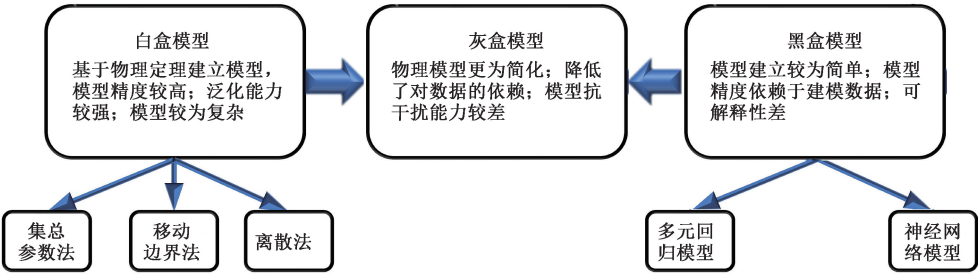


图 8 预测模型的 3 种建模思想

Figure 8 Three modeling ideas of prediction model

盒模型则是指依据数据驱动得到的模型,这种模型通过机器学习等技术探寻各变量的具体数据之间的关系,而不考虑其具体机理;而灰盒模型指的是将二者结合起来,基于已知的物理规律,并结合实验或仿真数据进行模型参数辨识及修正^[40]。三者的特点及大致分类如图 8 所示,对于跨临界 CO₂ 循环系统来说,由于系统机理方程的高度非线性,显然采用黑盒模型或灰盒模型更为合理,通过参数辨识来得到系统 COP 与系统中其他可控参数的关系,从而建立模型预测控制器。

3.2 基于多元回归模型的模型预测控制

Wang 等^[10]首先将模型预测控制方法用于对跨临界 CO₂ 热泵热水器的控制,其系统如图 9 所示。该研究首先建立高保真的物理模型,在该模型上得到大量仿真数据,并采用最小二乘参数辨识建立多元回归模型。在 MPC 控制系统中,将系统的出水温度与目标温度的偏差最小化和系统 COP 最大化作为优化目标,控制膨胀阀开度和进水流量实现对系统的最优控制。系统分别在 3 个测试工况下进行评估,模拟结果证实 MPC 是一种可行的低成本策略,可确保跨临界 CO₂ 热泵热水器在最优工况下运行。

常规空气源热泵中安装的传感器足够控制其运行,无须额外增加传感器;④模型预测控制技术可随着数据驱动建模相关技术的进步而得到发展。

后续研究表明,可根据系统的变化更新数据驱动模型,以避免系统组件性能变化带来优化不准确的问题^[41]。

3.3 基于神经网络的模型预测控制

近些年,神经网络在非线性系统辨识中得到了广泛的应用,从理论上来说,神经网络可以拟合任何非线性函数^[42],这适用于跨临界 CO₂ 循环系统这种强非线性系统。事实上,已经有相关学者采用基于粒子群算法优化的 BP 神经网络来预测跨临界 CO₂ 循环系统最优排气压力^[43]。

在 Zhang 等^[44]的研究中,采用人工神经网络建立了预测模型。该控制模型分别在稳定工况和铁路运行工况(乘客数量变化)下模拟运行。在稳定工况下,MPC 控制的系统 COP 近似达到了同时考虑排气压力和蒸发器空气流量下的最大 COP;在铁路运行工况下,采用 MPC 策略的控制方法的综合能耗低于采用 PID 控制策略的控制方法,仿真结果证明了 MPC 策略是跨临界 CO₂ 循环系统优化运行的有效策略。

值得注意的是,该研究建立了同时考虑乘客热舒适度和节能效果的预测模型。在模型预测控制中,最优化函数的设置可以综合考虑系统的多个影响因素。在近些年使用传统制冷剂的热泵空调应用中,模型预测控制的设计通常会将用户的热舒适度、用户活动、天气等因素考虑进去^[45],从而提高系统的实用性。

4 系统控制应用分析

随着对高污染制冷剂的强制淘汰和高性能循环系统的急切需求,跨临界 CO₂ 循环系统在实际应用中已崭露锋芒,如日本的 Eco Cute 系列热水器^[46]、大众汽车 ID. 4 CROZZ 系列搭载的汽车空调系统^[47]等。因此,根据实际应用场景制定合理的控制

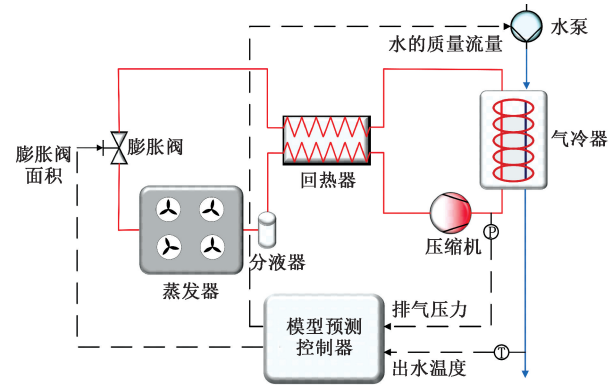


图 9 跨临界 CO₂ 热泵热水器模型预测控制示意图^[10]

Figure 9 The schematic diagram of MPC control for transcritical CO₂ heat pump water heater^[10]

该研究对模型预测控制的优点进行了总结:①实时控制;②快速收敛;③无须进行内环控制,且

策略成为该系统进一步发展的关键。表 2 总结了不同系统控制策略的应用场景及其优缺点。

(1)新能源汽车领域。跨临界 CO₂ 循环系统在低温工况下表现优异,合理的控制策略可以进一步提高系统能效,有利于解决新能源汽车在冬季的续航问题。针对汽车空调循环系统车厢温度控制和能效控制的耦合问题,可以建立多 PID 控制器分别对排气压力、送风温度、车厢温度等多参数进行控制^[27],并通过设置延迟时间获得稳定的控制效果,也可建立模型预测控制器,实现对车厢温度和 COP 的多目标实时优化^[41]。通过优化系统控制策略,可以进一步推进新能源汽车应用,促进可再生能源利用。

(2)建筑供暖领域。CO₂ 流体在气冷器处存在巨大的温度滑移,可以提供 40~90 ℃ 的热水,满足家庭用水和冬季建筑供暖的温度需求。极值寻优控制可以实现热水器系统的最优排气压力实时寻优,且控制性能优于通过经验关系式得到的 PID 控制^[33],且该方法结构简单,可以在微控制器上实现,提升系统的集成度,具有工程化应用的潜力。

(3)轨道交通领域。在轨道交通工具运行过程中,一方面要考虑跨临界 CO₂ 循环系统的安全性,建立压力控制与保护机制^[48];另一方面还需要考虑乘客数量变化对制冷量需求的影响,模型预测控制^[44]可根据历史数据对乘客数量变化进行预测,可以最大程度保证系统高效运行,同时提升乘客的舒适度。在该领域有着巨大的发展前景。

(4)商超冷藏领域。跨临界 CO₂ 循环商超制冷系统一般采用平行压缩模式,在提升系统性能的同时,可以提供中温和低温 2 个回路用于不同食品的冷藏。在工业化国家,超市是一种消耗大量能源的场所,每年消耗的电力占比在 3%~4%,而制冷系统

每年消耗的电能占总电能的 38%^[49],对中温回路的最优排气压力控制有利于减小超市制冷所用能耗^[50],促进资源的有效利用。

(5)军工领域。军用船舶、重卡等载具在运行过程中,发动机会产生大量余热,且船舶使用的液化天然气燃料具有大量冷能^[51],采用跨临界 CO₂ 循环系统可以回收发动机余热可用于供热,同时利用液化天然气的冷能用于供冷,有利于节约资源。对系统进行最优排气压力控制可以进一步节能增效^[52],优化能源利用,提升远洋船舶等载具的续航里程。

5 系统控制策略展望

跨临界 CO₂ 循环系统控制策略经过迅速发展,已经具有一定的实时优化能力,但考虑到已有控制策略的局限性,以及系统控制策略在部分应用场景的空白,未来可以从以下几个方面继续发展系统控制策略。

5.1 提高系统控制策略的适用性

目前已有系统控制策略存在收敛时间过长或预测模型不能实时更新的问题,可以考虑应用具有自适应特性的控制策略。广义预测控制是由广义最小方差控制和模型预测控制而来的控制方式,近年来被广泛应用于航空航天^[53]、智慧医疗^[54]、工业温控^[55]等领域,并取得了优秀的控制效果。广义预测控制既吸收了自适应控制适用于随机系统、在线辨识的优点,又具有模型预测控制算法中滚动优化、反馈校正的特性,满足系统快速收敛的要求。除此之外,强化学习^[56]等智能控制策略可以根据环境的变化来调整目前的最优策略,具有良好的适用性。这些现代控制理论和机器学习技术的发展为解决目前跨临界 CO₂ 循环系统控制遇到的问题提供了思路。

表 2 跨临界 CO₂ 循环系统控制策略比较

Table 2 Comparison of control strategies for transcritical CO ₂ cycle system			
控制类别	控制优化策略	应用场景	优缺点分析
反馈控制	经验关系式	建筑供暖 ^[19] 、汽车空调 ^[26-27] 、商超冷藏 ^[50] 、远洋船舶 ^[52]	优点:建立简单、成本低 缺点:工况或系统部件改变后控制性能降低
	公式推导控制	制冷系统 ^[28-29]	优点:实时优化、不依赖系统特性 缺点:推导过程简化较多
实时控制	实时梯度控制	制冷系统 ^[30-31]	优点:无须预先信息、鲁棒性较强 缺点:所需传感器较多、对硬件计算能力要求高、成本较高
	极值寻优控制	商超冷藏 ^[33] 、建筑供暖 ^[34-36]	优点:无模型、可在微控制器上实现 缺点:收敛时间较长
预测控制	模型预测控制	建筑供暖 ^[10] 、汽车空调 ^[41] 、轨道交通 ^[44]	优点:实时控制、快速收敛、可以考虑用户热舒适度等因素 缺点:需要手动更新预测模型

5.2 大规模系统控制策略开发

随着跨临界 CO₂ 循环系统的不断发展,其在市面上的应用也越来越多,并且许多具有多个建筑物或区域的大型系统应用也在不断推进,如北京冬奥会的“冰丝带”速滑馆等,这就需要开发出对应的控制策略,以提高系统在该应用场景下的能效。

针对大规模系统,采用单一整体的控制方法是不现实的,可以考虑具有集中管理的分布式控制架构^[57],分别对系统中的膨胀阀、泵等不同部件建立控制器,从而将集中问题分解为更小的子问题,同时,将所有控制器连接到一个中央控制系统,实现集中控制。前文提到的模型预测控制和强化学习等控制方法已被用于传统制冷剂的大规模系统控制,未来可以考虑开发针对跨临界 CO₂ 循环系统的大规模系统控制策略,以拓展其实际应用。

5.3 储能装置的系统控制策略开发

随着可再生能源利用的持续发展,跨临界 CO₂ 循环系统与可再生能源的耦合受到了许多学者的青睐,加装储能装置可以解决可再生能源在时间、空间上不均匀性的问题,同时提高空气源热泵在低温环境下的性能。储能装置对于加强可再生能源利用、提高热泵系统性能有着不容忽视的作用。而对于储能系统,制定合理的充能和释能控制策略至关重要^[58]。

目前针对耦合了储能装置的跨临界 CO₂ 循环系统,一般通过建立季节性的性能评价指数^[59]来评判系统优劣,但却忽略了实时排气压力优化。而将最优控制与储能系统结合,才能发挥出跨临界 CO₂ 耦合储能系统的最大优势。对此,可以建立综合考虑实时最优排气压力和全年经济运行的评价函数,以提高系统的经济性和实时能效。

6 结束语

本文分别对跨临界 CO₂ 循环系统现有的主要控制策略进行了分析,并对系统控制策略在新能源汽车、建筑供暖、轨道交通、商超冷藏、军工等领域的应用进行了总结。可以看出,跨临界 CO₂ 循环系统的控制优化策略正逐步向实时控制、在线优化、强适用性的方向发展。

在考虑了跨临界 CO₂ 循环系统控制目前面临的问题后,分析了广义预测控制、强化学习这类具有自适应特性的控制策略应用于跨临界 CO₂ 循环系统控制的可行性,并指出了目前跨临界 CO₂ 循环系统控制可能的应用发展方向,为接下来跨临界 CO₂ 循环系统控制策略的发展提供了参考。

参考文献:

[1] International Energy Agency. The future of heat pumps [R]. Paris: IEA, 2022.

[2] XIANG X Y, ZHAO X C, JIANG P N, et al. Scenario analysis of hydrofluorocarbons emission reduction in China's mobile air-conditioning sector[J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 13(5): 578-586.

[3] LORENTZEN G, PETTERSEN J. A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning [J]. International Journal of Refrigeration, 1993, 16(1): 4-12.

[4] QIN X, ZHANG Y X, WANG D B, et al. System development and simulation investigation on a novel compression/ejection transcritical CO₂ heat pump system for simultaneous cooling and heating[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 259: 115579.

[5] FENG F, ZHANG Z, LIU X F, et al. The influence of internal heat exchanger on the performance of transcritical CO₂ water source heat pump water heater[J]. Energies, 2020, 13(7): 1787.

[6] GHAZIZADE-AHSAEE H, AMERI M, BANIASAD AS-KARI I. A comparative exergo-economic analysis of four configurations of carbon dioxide direct-expansion geothermal heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114347.

[7] AGHAGOLI A, SORIN M. CFD modelling and exergy analysis of a heat pump cycle with Tesla turbine using CO₂ as a working fluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115587.

[8] 王迪, 王定标, 杨雨隼, 等. 跨临界 CO₂ 热泵系统最优排气压力模拟与实验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(4): 33-39.

WANG D, WANG D B, YANG Y S, et al. Simulation and experimental analyses on the optimal discharge pressure of a transcritical CO₂ heat pump system[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 33-39.

[9] 胡斌, 李耀宇, 曹锋, 等. 跨临界 CO₂ 热泵系统最优排气压力的极值搜索控制[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 81-87.

HU B, LI Y Y, CAO F, et al. Extremum seeking control of discharge pressure optimization for transcritical CO₂ heat pump systems[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 81-87.

[10] WANG W Y, ZHAO Z F, ZHOU Q, et al. Model predictive control for the operation of a transcritical CO₂ air source heat pump water heater [J]. Applied Energy, 2021, 300: 117339.

- [11] YANG L X, QIN X, ZHAO L H, et al. Analysis and comparison of influence factors of hot water temperature in transcritical CO₂ heat pump water heater: an experimental study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198: 111836.
- [12] CHEN Y, GU J J. The optimum high pressure for CO₂ transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2005, 28(8): 1238–1249.
- [13] QI P C, HE Y L, WANG X L, et al. Experimental investigation of the optimal heat rejection pressure for a transcritical CO₂ heat pump water heater[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 56(1/2): 120–125.
- [14] LIANG X Y, HE Y J, CHENG J H, et al. Difference analysis on optimal high pressure of transcritical CO₂ cycle in different applications[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 106: 384–391.
- [15] 刘遵超. 二氧化碳车用空调系统气冷器关键技术研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- LIU Z C. Research on key technology of gas cooler in carbon dioxide automotive air conditioning system [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [16] YIN X, CAO F, WANG J, et al. Investigations on optimal discharge pressure in CO₂ heat pumps using the GM-DH and PSO-BP type neural network——part A: theoretical modeling[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 106: 549–557.
- [17] QIN X, ZHANG F, ZHANG D W, et al. Experimental and theoretical analysis of the optimal high pressure and peak performance coefficient in transcritical CO₂ heat pump [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 210: 118372.
- [18] KAUF F. Determination of the optimum high pressure for transcritical CO₂-refrigeration cycles [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 1999, 38(4): 325–330.
- [19] WANG S G, TUO H F, CAO F, et al. Experimental investigation on air-source transcritical CO₂ heat pump water heater system at a fixed water inlet temperature[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(3): 701–716.
- [20] LIAO S M, ZHAO T S, JAKOBSEN A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20(9): 831–841.
- [21] LI C H, JIANG P X, ZHU Y H. Optimal compressor discharge pressure and performance characteristics of transcritical CO₂ heat pump for crude oil heating[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 144: 99–107.
- [22] POPOV G, LEGUTKO S, KLIMENTOV K, et al. Applying criteria equations in studying the energy efficiency of pump systems[J]. *Energies*, 2021, 14(17): 5256.
- [23] QIN X, LIU H D, MENG X R, et al. A study on the compressor frequency and optimal discharge pressure of the transcritical CO₂ heat pump system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 99: 101–113.
- [24] QIN X, ZHANG D W, ZHANG F, et al. Experimental and numerical study on heat transfer of gas cooler under the optimal discharge pressure[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 112: 229–239.
- [25] DAI C, QIN X. Experimental study on heating performance and a novel calculation method of water outlet temperature based on air source transcritical CO₂ heat pump system [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 888562.
- [26] 赵靖华, 陶晶, 解方喜, 等. 用于跨临界 CO₂ 汽车空调系统性能优化的控制仿真[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(2): 492–497.
- ZHAO J H, TAO J, XIE F X, et al. Simulation of performance optimization control about transcritical CO₂ automotive air conditioning system [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(2): 492–497.
- [27] 王静, 孙西峰, 方健珉, 等. 跨临界 CO₂ 汽车空调多 PID 控制动态性能仿真研究[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(8): 168–176.
- WANG J, SUN X F, FANG J M, et al. Dynamic simulation of PID control in transcritical CO₂ automobile air conditioning system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(8): 168–176.
- [28] ZHANG W J, ZHANG C L. A correlation-free on-line optimal control method of heat rejection pressures in CO₂ transcritical systems[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011, 34(4): 844–850.
- [29] PEÑARROCHA I, LLOPIS R, TÁRREGA L, et al. A new approach to optimize the energy efficiency of CO₂ transcritical refrigeration plants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 67(1/2): 137–146.
- [30] KIM M S, SHIN C S, KIM M S. A study on the real time optimal control method for heat rejection pressure of a CO₂ refrigeration system with an internal heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 48: 87–99.
- [31] KIM M S, KANG D H, KIM M S, et al. Investigation on the optimal control of gas cooler pressure for a CO₂ refrigeration system with an internal heat exchanger[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 77: 48–59.
- [32] HU B, LI Y Y, WANG R Z, et al. Real-time minimization of power consumption for air-source transcritical CO₂ heat pump water heater system[J]. *International Journal*

- of Refrigeration, 2018, 85: 395–408.
- [33] RAMPAZZO M, CERVATO A, CORAZZOL C, et al. Energy-efficient operation of transcritical and subcritical CO₂ inverse cycles via extremum seeking control [J]. Journal of Process Control, 2019, 81: 87–97.
- [34] CUI C, REN J H, SONG Y L, et al. Multi-variable extreme seeking control for efficient operation of sub-cooler vapor injection trans-critical CO₂ heat pump water heater [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116261.
- [35] CUI C, ZONG S, SONG Y L, et al. Experimental investigation of the extreme seeking control on a transcritical CO₂ heat pump water heater [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 111–122.
- [36] CUI C, REN J H, RAMPAZZO M, et al. Real-time energy-efficient operation of a dedicated mechanical sub-cooling based transcritical CO₂ heat pump water heater via multi-input single-output extreme seeking control [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 144: 76–89.
- [37] SONG Y L, CAO F. The evaluation of optimal discharge pressure in a water-precooler-based transcritical CO₂ heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 8–18.
- [38] SONG Y L, CAO F. The evaluation of the optimal medium temperature in a space heating used transcritical air-source CO₂ heat pump with an R134a subcooling device [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 166: 409–423.
- [39] MAIER L, SCHÖNEGGE M, HENN S, et al. Assessing mixed-integer-based heat pump modeling approaches for model predictive control applications in buildings [J]. Applied Energy, 2022, 326: 119894.
- [40] ESTRADA-FLORES S, MERTS I, DE KETELAERE B, et al. Development and validation of “grey-box” models for refrigeration applications: a review of key concepts [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29 (6): 931–946.
- [41] WANG H D, WANG W Y, SONG Y L, et al. Data-driven model predictive control of transcritical CO₂ systems for cabin thermal management in cooling mode [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121337.
- [42] WANG L Y, ZHU Y L. Neural-network-based nonlinear model predictive control of multiscale crystallization process [J]. Processes, 2022, 10(11): 2374.
- [43] SONG Y L, YANG D F, LI M J, et al. Investigations on optimal discharge pressure in CO₂ heat pumps using the GMDH and PSO-BP type neural network——part B: experimental study [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 106: 248–257.
- [44] ZHANG T, CAO F, SONG Y L, et al. The model predictive control strategy of the transcritical CO₂ air conditioning system used in railway vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119376.
- [45] TAHERI S, HOSSEINI P, RAZBAN A. Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: a state-of-the-art review [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60: 105067.
- [46] GOTO H, GOTO M, SUEYOSHI T. Consumer choice on ecologically efficient water heaters: marketing strategy and policy implications in Japan [J]. Energy Economics, 2011, 33(2): 195–208.
- [47] 武悦, 郑铭铸, 杨坚, 等. 电动汽车 CO₂ 热泵系统采暖实验研究及模拟分析 [J]. 制冷技术, 2019, 39 (5): 33–38.
- WU Y, ZHENG M Z, YANG J, et al. Experimental study and simulation analysis on heating performance of CO₂ heat pump system for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(5): 33–38.
- [48] 中车大连机车研究所有限公司. 一种轨道交通车辆 CO₂ 空调系统压力保护控制系统: CN202120260818.2 [P]. 2021–11–09.
- CRRC Dalian Locomotive. A pressure protection control system for CO₂ air conditioning system of rail transit vehicles: CN202120260818.2 [P]. 2021–11–09.
- [49] 陈威. R744 双温超市制冷系统的优化控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- CHEN W. Study on optimal control of a R744 two-temperature supermarket refrigeration system [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [50] GE Y T, TASSOU S A. Control optimisation of CO₂ cycles for medium temperature retail food refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(6): 1376–1388.
- [51] DADPOUR D, GHOLIZADEH M, ESTIRI M, et al. Multi objective optimization and 3E analyses of a novel supercritical/transcritical CO₂ waste heat recovery from a ship exhaust [J]. Energy, 2023, 278: 127843.
- [52] YANG D Z, LI Y, XIE J, et al. Energetic and entropy analysis of a novel transcritical CO₂ two-stage compression/ejector refrigeration cycle for shipboard cold chamber [J]. Thermal Science, 2023, 27(4): 2607–2621.
- [53] SUN G, CHEN J L, YONG Y Q, et al. Generalized predictive control of spacecraft attitude with adaptive predictive period [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(3): 596–606.
- [54] HU Z, ZHANG J F, XIE L, et al. A generalized predictive control for remote cardiovascular surgical systems

[J]. ISA Transactions, 2020, 104: 336–344.

[55] CHEN Z, CUI J L, LEI Z Z, et al. Design of an improved implicit generalized predictive controller for temperature control systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13924–13936.

[56] HAN G, JOO H J, LIM H W, et al. Data-driven heat pump operation strategy using rainbow deep reinforcement learning for significant reduction of electricity cost[J]. Energy, 2023, 270:126913.

[57] WANG Y C, FENG H R, XI X Y. Monitoring and autonomous control of Beijing Subway HVAC system for energy sustainability[J]. Energy for Sustainable Development, 2017, 39: 1–12.

[58] WANG Y Q, RAO, Z H, LIU J X, et al. An optimized control strategy for integrated solar and air-source heat pump water heating system with cascade storage tanks[J]. Energy and Buildings, 2020,210:109766.

[59] HAN Z W, BAI C G, MA X, et al. Study on the performance of solar-assisted transcritical CO₂ heat pump system with phase change energy storage suitable for rural houses[J]. Solar Energy, 2018, 174: 45–54.

Research Progress of Control Optimization Strategies for Transcritical CO₂

Cycle System

WANG Dingbiao^{1,2}, DUAN Hongxin^{1,2}, WANG Guanghui^{1,2}, SHEN Aoji^{1,2}, LIU Heyu^{1,2}, QIN Xiang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of New Energy Clean Utilization Technology and Energy Saving Equipment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As an important part of the transcritical CO₂ cycle system, the control strategy played the key role to ensure the high efficiency and energy saving operation of the system. Studies of control strategies were examined such as the feedback control based on the empirical calculation of the optimal discharge pressure of the system and the Buckingham π theorem, the real-time online control based on gradient tracking and extreme seeking, and the predictive control based on the neural network, etc. The development history and future development trend of the system control strategy were analysed and summarized in detail. Off-line control was easy to establish with low cost, but it was easily affected by environmental factors and changes in system components, resulting in reducing control performance; The real-time online control strategy could track the discharge pressure corresponding to the maximum energy efficiency of the system in real time, but due to the long optimization process, the convergence time of the control system was too long. Model predictive control system could realize real-time optimization and rapid convergence, and had a good development prospect. Combined with the practical scenarios of new energy vehicles, building heating, rail transit, commercial refrigeration, military industry and other practical scenarios, the application characteristics and future development trend of the control strategy of the transcritical CO₂ cycle system were explored, and it was further explained that improving the applicability of the control strategy was an important direction for future research. The feasibility of applying adaptive methods such as generalized predictive control and reinforcement learning to the control strategy of transcritical CO₂ cycle system was proposed, and the significance of developing control strategy for large-scale cycle system and energy storage system in China with the background of “double-carbon” was discussed.

Keywords: transcritical; CO₂ cycle system; optimization; control strategy; predictive control