

车用CO₂热泵压缩机控制策略设计及制冷性能研究

黄 仙, 暴秀超*, 孙文豪, 张家铭, 殷文程

西华大学汽车与交通学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月26日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月29日

摘 要

随着全球能源消耗持续加剧及环境污染问题日益严重, 新能源汽车在汽车市场已展现出巨大发展潜力, 而相较于传统空调或其他类型空调, CO₂热泵空调在环境保护与能耗降低方面更具优势。因此本文依托于自主搭建的车用CO₂热泵空调测试系统, 建立一维仿真模型, 并且基于粒子群寻优对不同PID的控制方法进行参数调节, 实现对乘员舱温度的控制, 并对比分析不同控制方法下的制冷性能及乘员舱舒适性。结果表明双回路PID既具备模糊自适应PID的快速响应能力, 同时保留了传统PID的稳定性。双回路PID控制算法下制冷能耗在45℃和50℃时分别仅有0.101 kW·h和0.147 kW·h; COP分别可以达到2.10和1.92; 此外系统稳定状态下的双回路PID控制方法更贴近舒适区域中心。

关键词

CO₂热泵, 压缩机, PSO, PID, 控制策略

Design of Control Strategy and Research on Refrigeration Performance of CO₂ Heat Pump Compressor for Vehicles

Xian Huang, Xiuchao Bao*, Wenhao Sun, Jiaming Zhang, Wencheng Yin

School of Automobile and Transportation, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: August 26, 2025; accepted: September 16, 2025; published: September 29, 2025

Abstract

With rising global energy consumption and worsening pollution, new energy vehicles show great

*通讯作者。

文章引用: 黄仙, 暴秀超, 孙文豪, 张家铭, 殷文程. 车用 CO₂ 热泵压缩机控制策略设计及制冷性能研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 353-364. DOI: 10.12677/dsc.2025.144036

potential in the market. CO₂ heat pump air conditioners outperform traditional/other types in environmental protection and energy efficiency. This study uses a self-developed vehicle CO₂ heat pump test system, establishes a 1D simulation model, optimizes different PID controller parameters via particle swarm optimization, controls cabin temperature, and compares refrigeration performance and comfort. Results show dual-loop PID combines fuzzy adaptive PID's fast response with traditional PID's stability: it yields 0.101 kW·h and 0.147 kW·h refrigeration energy at 45°C and 50°C, with COP 2.10 and 1.92 respectively, and stays closer to the comfort zone center in steady state.

Keywords

CO₂ Heat Pump, Compressor, Particle Swarm Optimization, PID, Control Strategy

Copyright © 2025 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

随着全球能源消耗的不断攀升和环境污染问题的日益严峻,新能源的开发和利用成为解决当前问题的重要途径,新能源汽车的发展拥有巨大的发展潜力[1][2]。在满足驾乘人员温湿度舒适性需求方面,汽车空调系统发挥着重大的作用[3]。近年来,CO₂热泵系统因其出色的加热效率在业界引起了广泛关注,其有效地解决了电动汽车在寒冷条件下因客舱加热需求而导致的电能消耗上升和行驶里程减少的问题。在此基础上良好的控制策略不仅能进一步提升能量利用率,还能在不同环境和行驶工况下保持高精度的温度控制,从而优化乘坐体验。

刘忠宝[4]在电动汽车空调系统的控制中,结合了模糊控制与PID控制两种方法,对比了单独使用PID算法、模糊算法以及综合的模糊PID控制算法的效果。实验结果显示,采用模糊PID控制算法能够显著提升温度响应速度和控制精度。叶立[5]开发了一种模糊PID控制策略,用于调节风机转速和压缩机状态,其中PID参数是通过粒子群算法进行优化得到的。尽管这种控制方法在时间上稍微增加了一些,但与传统的PID控制相比,它在温度控制方面展现出了更高的精度。刘宽[6]提出了运用BP神经网络算法来控制汽车空调温度的策略,并自主设计了一种简化的样本数据采集方法来验证BP神经网络的可行性和性能。仿真结果表明,采用BP神经网络进行汽车空调温度控制能显著提升驾驶员与乘客的温度舒适性体验。黄世佩[7]基于状态空间方程的模型预测控制方法来优化压缩机的转速控制。通过仿真对比分析了MPC与PID控制在蒸发器出口风温分别为3°C、6°C和10°C时的性能。仿真结果显示,采用MPC控制的压缩机在稳定性与节能性方面均优于PID控制。Qin [8]提出一种利用WOA-PID模糊控制策略的控制系统来调节压缩机转速,实现最优的乘客舱温度控制,结果表明,与传统的PID控制和模糊PID控制相比,WOA-PID模糊控制策略显著降低了乘客舱温度的过调,并提高了COP值。

传统PID控制在复杂工况下的适应性有待提升,而粒子群优化算法凭借其全局搜索能力[9][10],可根据实时工况动态调节温湿度参数,在降低系统能耗的同时显著提升乘员舱舒适度[11]。将粒子群优化与PID控制相结合,该方法既保留了PID控制高稳定性和精确性的特点,又融入智能算法的动态调节与学习能力,使控制系统能够依据实时工况自适应优化控制参数,实现高效、节能且舒适的环境温度调控。

针对CO₂热泵空调控制问题,采用粒子群优化算法优化双回路PID、传统PID及模糊自适应PID控制参数,对比三种策略。重点探究优化后算法在提升系统响应速度、降低能耗及增强乘员舱舒适度方面的效能,为其控制系统工程化应用提供理论与实践参考。

2. 仿真建模与标定

2.1. 实物测试系统搭建及仿真模型建立

图 1 为车用 CO₂ 热泵空调测试系统的原理展示图, 图 2 为测试台架实物图。其系统组成主要包括电动压缩机、车室内外换热器、节流装置、四通换向阀及一系列传感器等部件。当系统处于制冷模式时, 此时 1 和 3 通道相通, 2 和 4 通道关闭。高温高压气体通过换向阀 1 进入车室外换热器, 通过与外界环境进行热量交换来释放热量。随后, 室外换热器排气的 CO₂ 气体经过膨胀阀的节流作用, 接着进入车室内换热器, 吸收车内环境的热量, 从而实现制冷效果。最后, 这些气体通过换向阀 3 返回压缩机, 完成整个制冷循环。

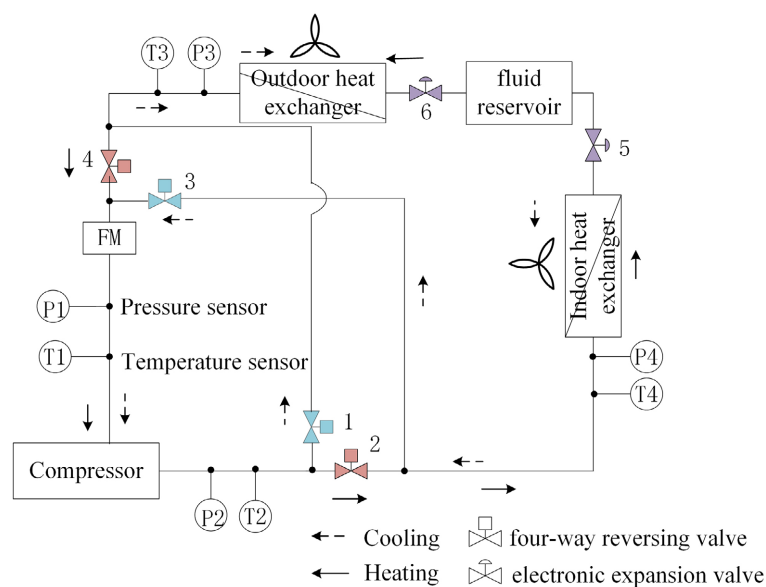


Figure 1. Schematic diagram of CO₂ heat pump air conditioning testing system

图 1. CO₂ 热泵空调测试系统原理图



Figure 2. CO₂ heat pump air conditioning system testing

图 2. CO₂ 热泵空调系统测试

本研究通过在 AMEsim 一维软件中建立了空调系统的一维模型如图 3 所示, 模型包含压缩机、冷凝器、蒸发器、中间换热器及乘员舱五部分。

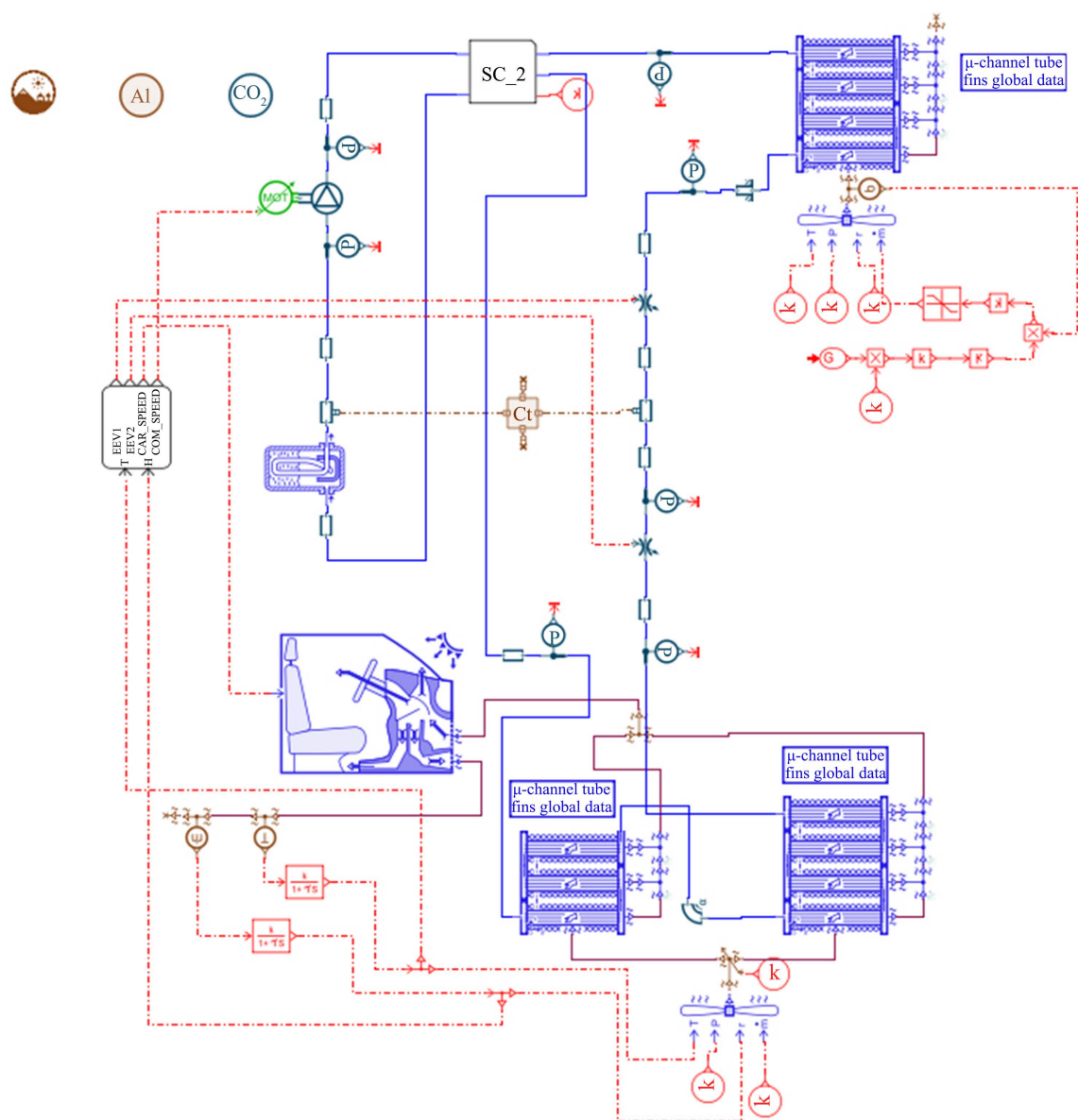


Figure 3. Simulation model of CO₂ heat pump air conditioning system

图 3. CO₂ 热泵空调系统仿真模型

模型主要结构参数如表 1~3 所示。

Table 1. Compressor structural parameters

表 1. 压缩机结构参数

参数	数值
排量(ml/r)	5.3
长度(cm)	20
直径(cm)	13
质量(kg)	6.5

Table 2. Geometric parameters of indoor and outdoor heat exchangers
表 2. 室内外换热器几何参数

	冷凝器	蒸发器
类型	翅片式	翅片式
质量(kg)	2.6	2.5
迎风面积(cm ²)	2720	720
总换热面积(m ²)	5.8	4.8
芯部深度(cm)	1.65	6.5
芯部体积(cm ³)	4300	4680

Table 3. Geometric parameters of intermediate heat exchanger
表 3. 中间换热器几何参数

参数	高压侧管路	低压侧管路
管长(m)	0.6	0.6
液力直径(mm)	5	9
横截面积(mm ²)	19.62	63.58

2.2. 仿真模型标定

通过实验数据验证模型的准确性。设置实验工况的环境温度为 30℃，分别进行实验研究和仿真模拟。
表 4 给出的是在压缩机排量、换热器换热面积、空气侧湿度、室内外换热器风量及工质充注量不变的条件下，该热泵空调系统的实验值与仿真的对比结果。

Table 4. Comparison between theoretical results and experimental data
表 4. 仿真结果与实验数据对比

测试项	压缩机排量 5.3 mL/r，转速 4000 r/min，车外温度 30℃		
	实验值	仿真值	相对误差
压缩机进气温度(K)	298.3	285.4	4.32
压缩机进气压力(MPa)	4.34	4.21	2.99
压缩机排气温度(K)	366.49	352.83	3.73
压缩机排气压力(MPa)	6.94	6.67	3.89
室外换热器排气温度(K)	324.82	317.54	2.24
室外换热器排气压力(MPa)	6.91	6.65	3.76
室内换热器排气温度(K)	296.15	283.2	4.4
室内换热器排气压力(MPa)	4.49	4.34	3.34
膨胀阀进口温度(K)	323.45	311.3	3.75
膨胀阀进口压力(MPa)	6.87	6.54	4.8
平均误差(%)	-	-	3.72

由表 4 可知, 仿真结果与实验数据有较好的一致性, 工况中最大相对误差为 4.8%, 平均相对误差为 3.72%, 符合工程要求。所以, 该仿真模型可以用于对电动汽车热泵空调系统的性能分析和预测研究。

3. 压缩机控制策略研究

本文将建立双回路 PID 控制策略对比传统 PID 控制和模糊自适应 PID 控制, 三种控制方法的比例、积分和微分系数均使用 PSO 寻找合适的值, 也就是基于 PSO 算法对 PID 参数的自寻优。

3.1. 双回路 PID 控制策略设计

相较于模糊自适应 PID 和传统 PID, 双回路 PID 由两个单回路构成闭环系统, 对非线性、大滞后或高惯性被控对象可实现更精细调节。温度控制中, 主从回路协同工作: 主回路 PID 根据当前温度 T_{cab} 与设定值 T_{goal1} 的偏差 $e(t_1)$ 计算初步输出 $u(t_1)$, 作为从回路设定值 T_{goal2} ; 从回路 PID 再依据该设定值与实际温度的偏差 $e(t_2)$ 进行精细调节。

主回路 PID 控制器的输出 $u(t_1)$ 的计算公式如下:

$$u(t_1) = K_{p1} \cdot e(t_1) + K_{I1} \cdot \int e(t_1) dt + K_{D1} \cdot \frac{de(t_1)}{dt} \quad (1)$$

式中, K_{p1} 、 K_{I1} 和 K_{D1} 分别是主回路 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数。温度偏差 $e(t_1)$ 可表示为:

$$e(t_1) = T_{goal1} - T_{cab} \quad (2)$$

从回路 PID 控制器的输出则可根据主回路的输出设定值 T_{goal2} 与实际温度之间的偏差 $e(t_2)$ 来计算, 可以表示为:

$$u(t_2) = K_{p2} \cdot e(t_2) + K_{I2} \cdot \int e(t_2) dt + K_{D2} \cdot \frac{de(t_2)}{dt} \quad (3)$$

式中, K_{p2} 、 K_{I2} 和 K_{D2} 分别是主回路 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数。偏差 $e(t_2)$ 可以表示为:

$$e(t_2) = T_{goal2} - T_{cab} \quad (4)$$

主从回路控制可减小系统滞后与回冲, 提升控温精度。主回路 PID 快速响应大温差, 通过比例调节快速调整以减小偏差, 积分消除稳态误差, 微分则依据温度变化率抑制超调; 从回路 PID 侧重系统稳定性与精度, 接收主回路设定值, 依据实际温差微调以减小波动与回冲。外环通过动态纠正内环设定值, 使其适应负荷与操作条件变化。系统原理如图 4 所示。

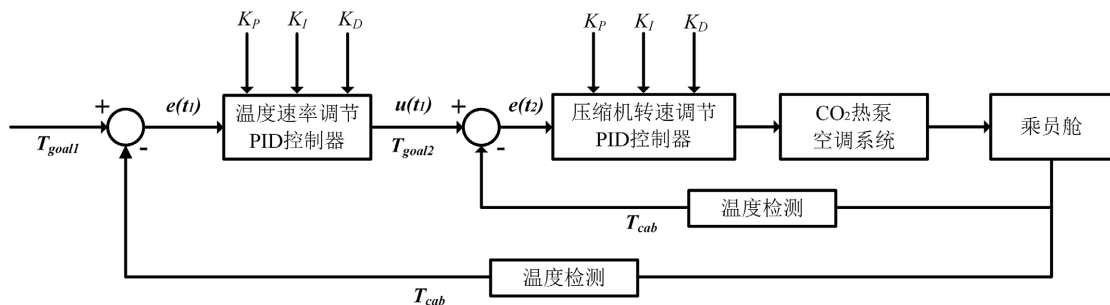


Figure 4. Schematic diagram of dual-loop PID control

图 4. 双回路 PID 控制原理图

3.2. 粒子群算法(PSO)寻优

粒子群算法(PSO)为受鸟群觅食启发的种群自适应优化算法,经迭代寻优与适应度评估搜索最优解。相较于遗传算法,其省去交叉变异操作,因易实现、精度高、收敛快而广泛应用[12][13]。针对空调系统复杂动态非线性特性,PSO可动态优化PID参数,结合群体智能与控制工程实现参数自整定,以提升系统稳定性、精度及鲁棒性。为高效搜索最优参数组合,设定PID控制器比例(K_P)、积分(K_I)、微分(K_D)增益的搜索空间。采用粒子群优化策略,将粒子视为潜在PID参数向量并在搜索空间内随机初始化。优化中,粒子基于当前位置、更新规则,结合自身历史最优与群体全局最优位置及速度调整机制动态更新参数,以实现目标函数最优,获得最佳PID参数配置。寻优流程如图5所示。

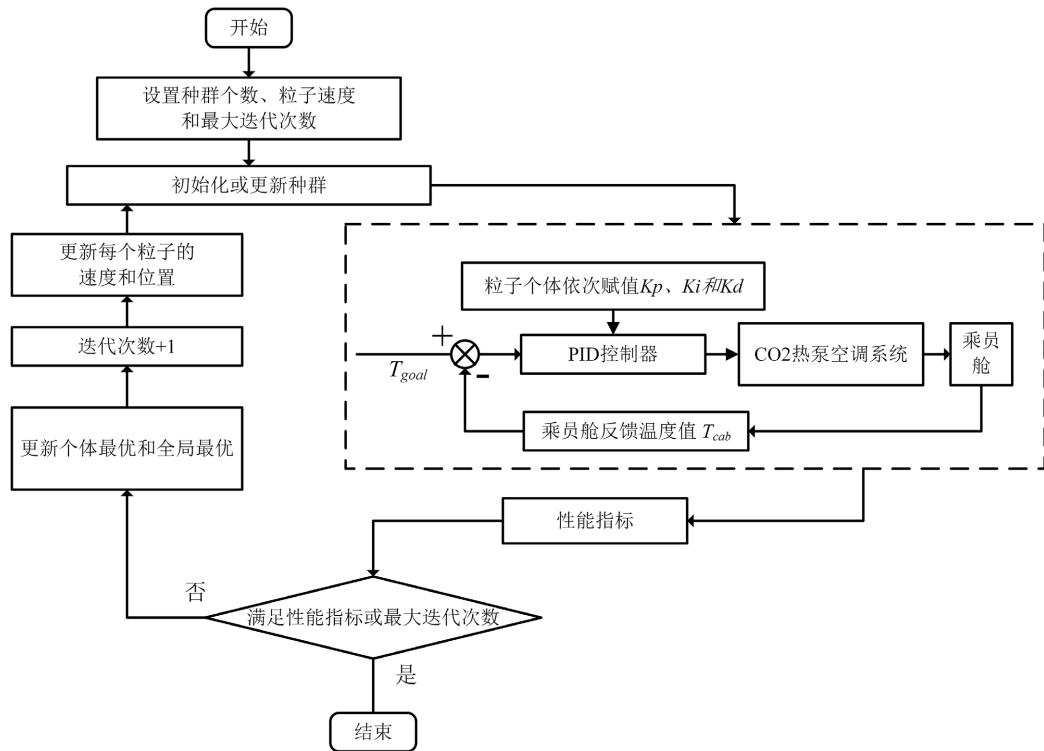


Figure 5. PID optimization flowchart based on PSO

图5. 基于 PSO 的 PID 寻优流程图

使用以下公式更新粒子速度和位置:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 (gbest - x_i(t)) \quad (5)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (6)$$

其中, w 是惯性权重, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是随机数, $pbest_i$ 是粒子 i 历史最佳位置, $gbest$ 是全局最佳位置。最后对于每个粒子,更新其个体最佳位置 $pbest_i$,更新到全局最佳位置 $gbest$ 。

4. 制冷性能的仿真研究

本节将采用 PSO 分别对传统 PID、双回路 PID 和模糊自适应 PID 控制参数进行寻优后的控制结果做出比较,从乘员舱温度、COP、压缩机转速、系统能耗和乘员舱舒适度五个方面系统地讨论三种控制方法的效果。

4.1. 仿真工况的设定

空调系统的制冷效果与乘员舱内部环境的舒适度深受内外部环境条件影响，如气温波动、舱内初始温度、太阳辐射强度和行驶车速等，停车时积累的热量尚未通过行驶充分散发因此初始温差能保持在 15℃，相关行驶条件和环境因素参数的设置如表 5 所示。

Table 5. Simulation-related parameters
表 5. 仿真相关参数

仿真参数	A	B
环境温度℃	30	35
车速 Km/h	30	30
乘员舱初始温度℃	45	50
太阳辐射 W/m ²	950	900
相对湿度%	40	40
车内容积 m ³	2.6	2.6
仿真时间 s	400	400

4.2. 乘员舱降温对比分析

图 6 呈现不同设定温度下，不同控制方法的乘员舱降温曲线。放大 100 s~300 s 区域可见显著差异：模糊自适应 PID 依托非线性隶属度函数，通过大比例系数快速提升压缩机转速强化对流换热，降温最快但后期因超调存在小幅波动；传统 PID 因单一回路对复杂工况扰动抑制不足，积分滞后导致流量调节迟缓，降温最慢；双回路 PID 通过主从协同，主回路比例控制实现近模糊控制的快速降温，从回路微调避免超调与滞后，降温速度介于两者之间，且稳态时舱内与换热器温差稳定在±2%内。

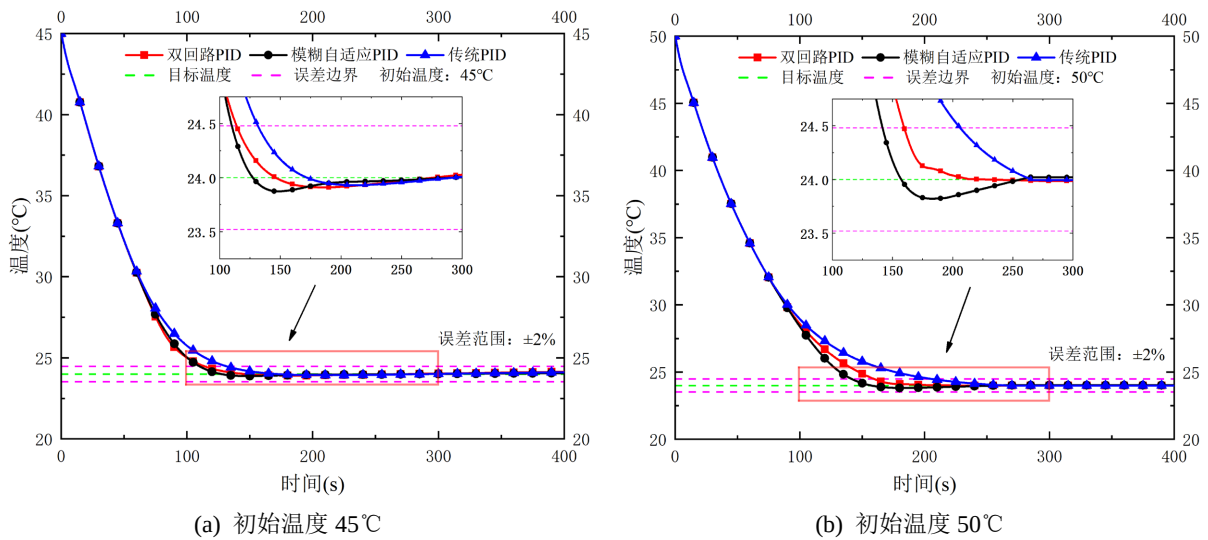


Figure 6. Crew cabin cooling curve
图 6. 乘员舱降温曲线图

由图6可知, 初始温度 45℃时, 双回路 PID 达误差区间时间为 118.37 s, 与模糊自适应 PID 接近, 较传统 PID 快 3.98%; 50℃时为 160.22 s, 较传统 PID 快 19.69%, 略慢于模糊自适应 PID。系统稳定后, 三种控制方法均能维持稳定状态, 且双回路 PID 在 45℃、50℃初始温度下的稳态误差率分别为 0.538%、0.063%, 控制精度高, 满足乘员舱温控要求。

4.3. 压缩机转速对比分析

图7展示的是不同设定温度在不同控制方法下的压缩机转速变化。由图可知, 在初始阶段双回路 PID 主回路根据舱内温差计算初始转速目标, 确保延长高速运行时间; 从回路侧实时接受主回路目标值的偏差抑制转速突变, 使转速变化更平滑。模糊自适应 PID 在初始阶段虽依赖非线性规则快速提升转速, 但缺乏中间变量的反馈修正, 易因超调引发流量波动; 传统 PID 因单回路无法分离温差-转速耦合关系, 转速调节滞后于实际负荷需求。

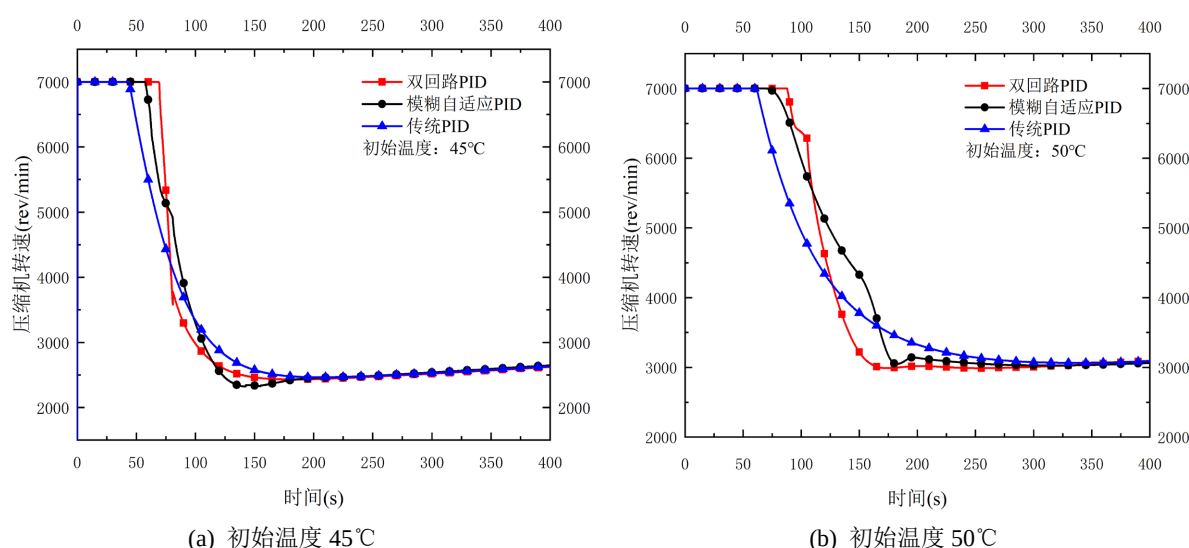


Figure 7. Compressor speed variation curve

图7. 压缩机转速变化曲线图

以图7(b)为例, 当初始温度为 50℃时, 我们可以观察到其余两种控制方法相较于传统 PID 控制, 在维持高速状态的时间分别增加了 9.08%和 42.46%。在转速变化的平滑性方面, 双回路 PID 与传统 PID 控制展现出了优于模糊自适应 PID 的表现。特别是双回路 PID, 在 156 秒之后, 其转速变化趋于平缓, 几乎维持在一个稳定的转速状态。而当整个系统达到稳定状态时, 无论是哪种控制方法, 其转速均大致维持在 2950 rev/min 左右, 这主要是因为室内外环境达到了一个相对稳定的热平衡状态。

4.4. 制冷能耗对比分析

图8显示不同制冷工况下能耗随时间的变化。结合上节转速特性: 双回路 PID 通过精准控制压缩机转速减少无效耗功; 模糊自适应 PID 虽快速响应温差, 但非线性调节易致压缩机高速持续过久、流量过剩, 增加能耗; 传统 PID 因调节滞后, 流量补偿不足, 需长时间维持高速以满足制冷量, 间接增加能耗。故双回路 PID 通过精确控制转速降低了制冷能耗。

以图8(a)为例, 初始温度为 45℃时, 双回路 PID、模糊自适应 PID 和传统 PID 控制的能耗分别为 0.101 kW·h、0.1029 kW·h 和 0.1018 kW·h, 能耗分别降低了 1.93%和 0.75%。

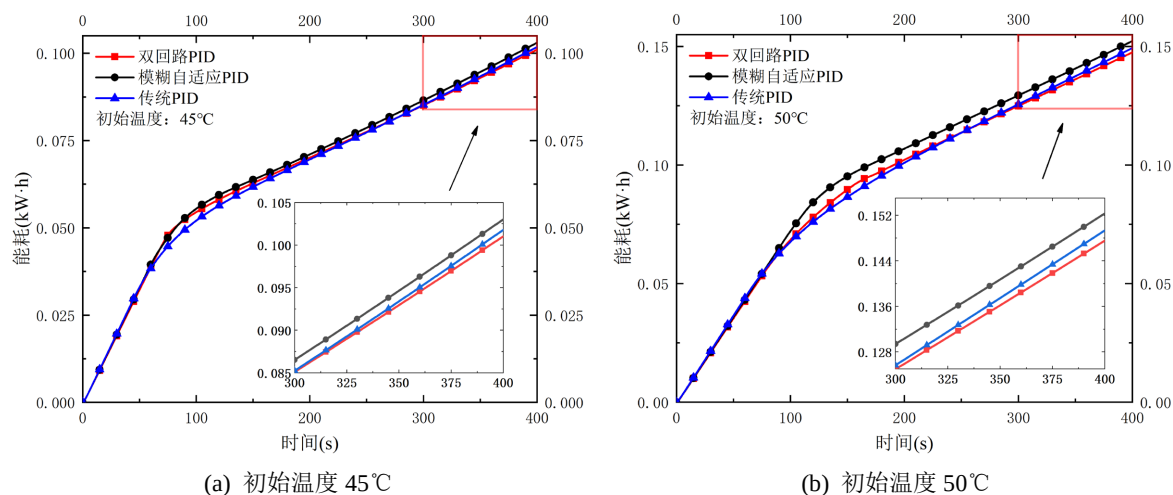


Figure 8. System energy consumption curve
图 8. 系统能耗曲线图

4.5. COP 对比分析

图 9 展示三种控制方案对系统制冷系数 COP 的影响。运行初期，双回路 PID 主回路快速响应温差以匹配舱内负荷，从回路抑制转速波动以趋近等熵压缩；模糊自适应 PID 因转速超调致制冷量短时过剩，COP 略低；传统 PID 因积分滞后致制冷量 - 负荷动态匹配差，耗功未随负荷下降及时调整，COP 提升受限。稳态时双回路 PID 的 COP 高于其余两种，体现对制冷量 - 耗功动态平衡的精准调控。

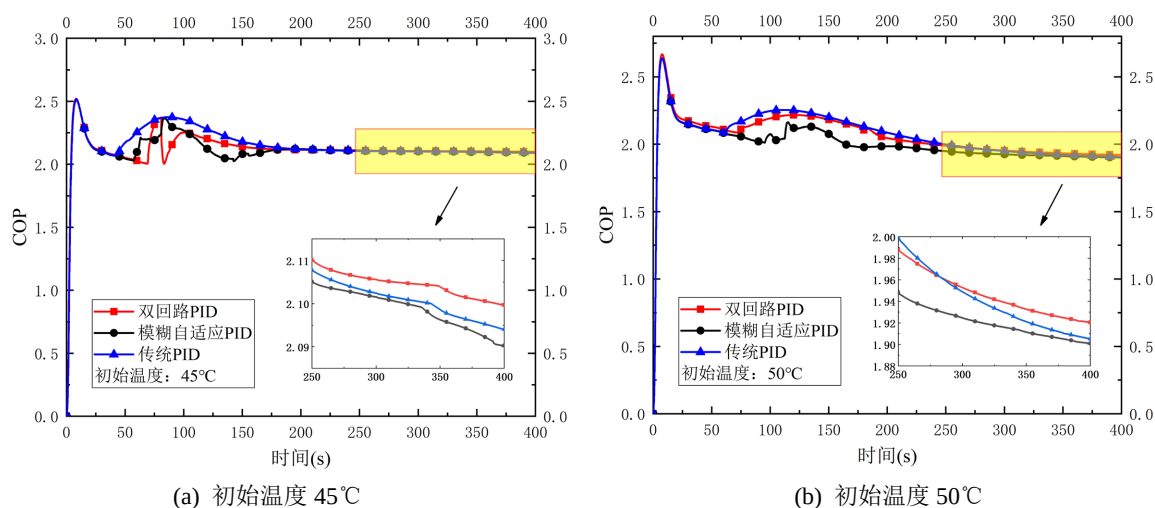


Figure 9. COP variation curve
图 9. COP 变化曲线图

以图 9(a)为例，当初始温度为 45°C 时，双回路 PID、模糊自适应 PID 和传统 PID 控制的 COP 分别为 2.10、2.086 和 2.092，COP 分别高出 0.65% 和 0.37%。

4.6. 乘员舱舒适度对比分析

乘员舱舒适度由 PMV 和 PPD 界定。PMV 用于预估人群热感觉的平均投票结果，PPD 则预估对环境冷热不满的人群百分比。当 PMV 处于 -0.5 至 0.5 且 PPD < 10% 时，为可接受的热舒适范围。

图 10 显示制冷工况下不同控制方法的舒适区进入时间及稳态 PMV、PPD 值。双回路 PID 通过主从协同优化舒适度：主回路快速调节缩短舒适区收敛时间，规避传统 PID 单回路滞后的长时间偏离；从回路实时修正偏差以抑制舱内热惯性引发的微波动，减少对人体感知的影响。相较而言，模糊自适应 PID 因单回路超调使 PMV 波动略大；传统 PID 调节滞后，温度收敛慢且微波动更明显。最终双回路 PID 的 PMV-PPD 表现最优，精准匹配人体对快速达标与环境稳定的舒适需求。

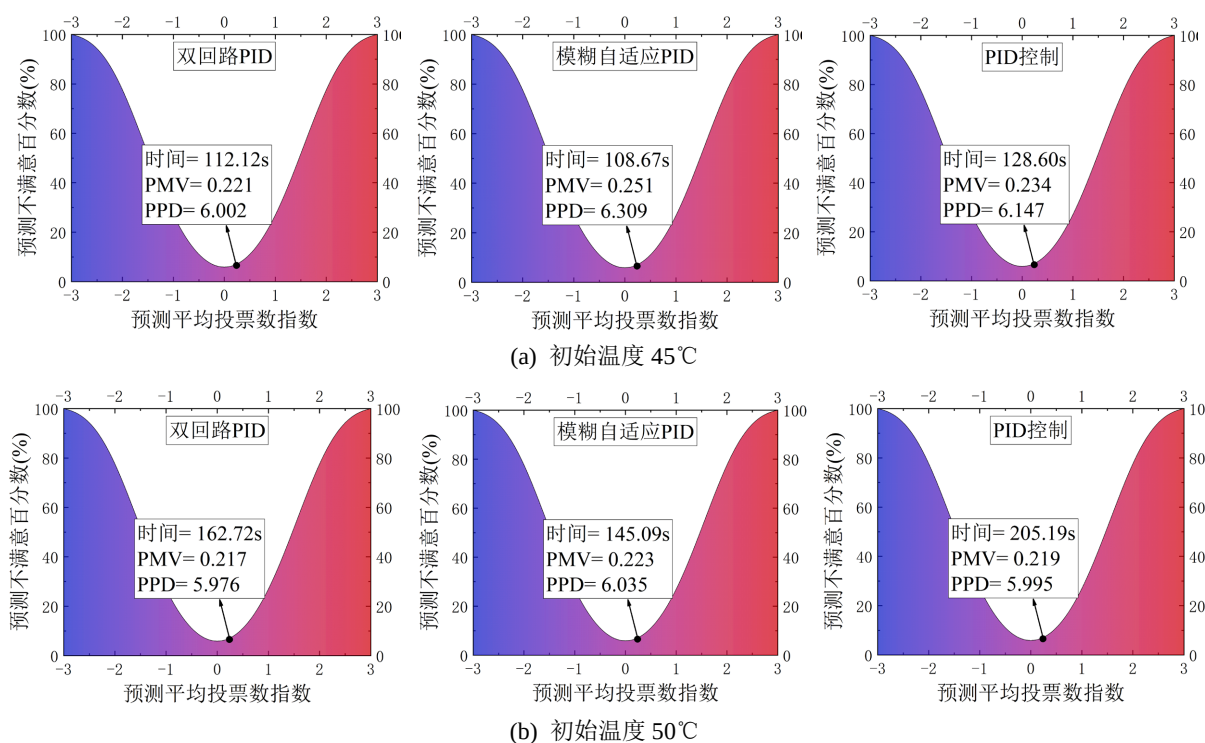


Figure 10. Crew cabin comfort curve
图 10. 乘员舱舒适度曲线

初始温度 45℃时，双回路 PID 与模糊自适应 PID 进入舒适区时间接近，分别较传统 PID 快 14.69%、18.33%；三者 PMV 值依次为 0.221、0.251、0.234，PPD 值为 6.002、6.309、6.147。双回路 PID 热舒适性接近传统 PID，因能耗优化其速度低于模糊自适应 PID，进入舒适区时间更长。其余工况趋势类似，双回路 PID 的 PMV-PPD 最优，稳态温度及舒适性表现更优。

5. 结论

本研究根据实际台架测试系统建立一维仿真模型，基于粒子群优化算法对双回路 PID、模糊自适应 PID 和传统 PID 进行寻优调参，并将三种控制方法作用于空调压缩机上，研究 CO₂ 热泵系统的制冷性能。最后，比较了三种控制方法在不同高温情况下的制冷效果和能耗变化得出的结论有：

1) 在 45℃和 50℃初始环境下，双回路 PID 控制的稳态误差低至 0.538%和 0.063%，能耗值比模糊自适应 PID 和传统 PID 分别降低 1.93%、0.75%和 3.13%、1.21%，COP 值比模糊自适应 PID 和传统 PID 分别高出 0.65%、0.37%和 1.02%、0.85%。

2) 双回路 PID 的热舒适效应接近常规 PID，其调节速度慢于模糊自适应 PID，进入舒适区耗时更长；但双回路 PID 的 PMV-PPD 值最优，且稳态温度控制与舒适性表现更优。

3) 从工程应用价值看, 双回路 PID 虽性能提升幅度有限, 但在高温制冷场景意义显著: 更低稳态误差可减少系统压力波动, 延长核心部件寿命; 1.21%~3.13%的能耗降低与 0.65%~1.02%的 COP 提升, 长期运行可累积显著电费节省与碳减排效益。其算法复杂度介于传统 PID 与模糊自适应 PID 之间, 硬件成本增幅有限, 却能兼顾稳态精度与舒适性, 尤其适配对持续稳定制冷及运行经济性要求较高的电动汽车制冷, 为 CO₂ 热泵空调控制器选型提供性价比优先的实践指导。

参考文献

- [1] Fathabadi, H. (2014) A Novel Design Including Cooling Media for Lithium-Ion Batteries Pack Used in Hybrid and Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, **245**, 495-500. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.160>
- [2] Greco, A., Jiang, X. and Cao, D. (2015) An Investigation of Lithium-Ion Battery Thermal Management Using Paraffin/Porous-Graphite-Matrix Composite. *Journal of Power Sources*, **278**, 50-68. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.027>
- [3] Yanping, A. and Ping, Q. (2015) Air-Conditioning Energy-Saving Control Strategy at Subway Station Based on MAS Evolutionary Algorithm. 2015 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Nanchang, 14-15 June 2015, 122-125. <https://doi.org/10.1109/icit.2015.39>
- [4] 刘忠宝. 汽车自动空调控制系统研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [5] 叶立, 张梦莎, 叶欢, 等. 基于 PSO 的模糊 PID 汽车空调控制策略优化[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 32-37.
- [6] 刘宽. 基于智能控制算法的汽车空调控制器设计[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] 黄世佩. 某型纯电动汽车热泵空调集成式热管理系统构建及研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [8] Qin, Z., Wang, X., Zhang, H., Liu, F., Yin, C., Han, Z., et al. (2024) Research on Heat Pump Air Conditioner Compressor Speed Control Strategy Based on Whale Algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*, **53**, Article 103939. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103939>
- [9] Guo, F., Chen, Z., Xiao, F., Li, A. and Shi, J. (2023) Real-Time Energy Performance Benchmarking of Electric Vehicle Air Conditioning Systems Using Adaptive Neural Network and Gaussian Process Regression. *Applied Thermal Engineering*, **222**, Article 119931. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119931>
- [10] Huang, X., Li, K., Xie, Y., Liu, B., Liu, J., Liu, Z., et al. (2022) A Novel Multistage Constant Compressor Speed Control Strategy of Electric Vehicle Air Conditioning System Based on Genetic Algorithm. *Energy*, **241**, Article 122903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122903>
- [11] Li, J., Li, S., Ruan, X., et al. (2022) Review of CO₂ Heat Pump and Thermal Management for Pure Electric Vehicle. *Energy Storage Science and Technology*, **11**, Article 2959.
- [12] Ekrem, Ö. and Aksoy, B. (2023) Trajectory Planning for a 6-Axis Robotic Arm with Particle Swarm Optimization Algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **122**, Article 106099. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106099>
- [13] Sun, X., Xie, M., Zhou, F., Wu, X., Fu, J. and Liu, J. (2023) Hierarchical Evolutionary Construction of Neural Network Models for an Atkinson Cycle Engine with Double Injection Strategy Based on the PSO-Nadam Algorithm. *Fuel*, **333**, Article 126531. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126531>