

新能源汽车热管理系统协同优化策略

何亚茹¹, 梁坤峰¹, 高春艳¹, 陈浩远¹, 李琳琳¹, 李硕鹏¹, 陈彬², 王林³, 谈莹莹³

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳; 2. 豫新汽车热管理科技有限公司, 453000, 河南新乡; 3. 河南科技大学土木建筑学院, 471023, 河南洛阳)

摘要: 针对新能源汽车热管理系统多目标协同的调控需求,提出了一种协同控制策略。首先,基于 AMESim 平台,构建乘员舱-电池耦合热系统动态仿真模型;其次,将非线性自回归外生输入神经网络引入控制模块,模型预测控制(MPC)以降低压缩机能耗和控制最小化温度偏差为双目标,优化压缩机转速;接着,对阀件等关键执行机构建立基于比例-积分-微分(PID)的动态响应模型,以实现制冷剂流量的分配;最后,将热管理系统模型与 MPC 控制模型进行联合仿真,在中国轻型汽车测试循环-乘用车工况中对比分析了 MPC 与 PID 控制策略对电池和乘员舱温度动态响应的调控效果。研究表明:环境温度为 35℃时,相较于 PID 控制,MPC 策略能将乘员舱温度的超调量降低 0.9℃,且在环境温度为 40、45℃时均未出现超调现象;与 PID 控制相比,当环境温度为 35、40、45℃时,一个循环工况下采用 MPC 策略的压缩机平均温降能耗分别降低了 7.2%、2.4%和 3.5%,整体能效表现优于 PID 控制。该研究为实现整车热管理提供了可靠的控制方法,对新能源汽车优化研究具有较好的参考价值。

关键词: 新能源汽车;控制策略;神经网络;热管理

中图分类号: TB66 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202602005 **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0049-10

Collaborative Optimization Strategy for Thermal Management System of New Energy Vehicles

HE Yaru¹, LIANG Kunfeng¹, GAO Chunyan¹, CHEN Haoyuan¹, LI Linlin¹,

LI Shuopeng¹, CHEN Bin², WANG Lin³, TAN Yingying³

(1. College of Vehicle and Transport Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 2. Yuxin Automobile Thermal Management Technology Co., Ltd., Xinxiang, Henan 453000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: To address the multi-objective collaborative control requirements of the thermal management system in new energy vehicles, a coordinated control strategy is proposed. First, a dynamic simulation model of the passenger compartment-battery coupled thermal system was constructed based on the AMESim platform. Second, a nonlinear autoregressive exogenous input neural network was introduced into the control module, and a model predictive controller (MPC) was designed to optimize compressor speed with the dual objectives of reducing compressor energy consumption and minimizing temperature deviation. Subsequently, a dynamic response model based on proportional-

收稿日期: 2025-07-31。 作者简介: 何亚茹(2001—),女,硕士生;梁坤峰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52378094);洛阳市科技发展计划资助项目(2302035A)。

网络出版时间: 2025-09-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250924.1019.002>

integral-derivative (PID) control was established for key actuators such as valves to achieve refrigerant flow distribution. Finally, a co-simulation of the thermal management system model and the MPC control model was performed, and the regulation effects of MPC and PID control strategies on the dynamic temperature responses of the battery and passenger compartment were compared and analyzed under the China light-duty vehicle test cycle-passenger condition. The results show that at an ambient temperature of 35 °C, compared with PID control, the MPC strategy reduces the overshoot of the passenger compartment temperature by 0.9 °C, and no overshoot occurs at ambient temperatures of 40 and 45 °C. Compared with PID control, at ambient temperatures of 35, 40, and 45 °C, the average energy consumption for compressor temperature reduction per cycle under the MPC strategy is reduced by 7.2%, 2.4%, and 3.5%, respectively, indicating overall energy efficiency superior to that of PID control. This study provides a reliable control method for vehicle thermal management and offers valuable reference for optimization research on new energy vehicles.

Keywords: new energy vehicles; control strategy; neural network; thermal management

在全球环保与可持续发展诉求日益增强的背景下,新能源汽车凭借其清洁高效的特性,正迅速取代传统燃油车,成为汽车产业的主流发展方向^[1-2]。然而,其大规模商业化应用仍存在关键挑战,其中热管理系统的性能与效率问题尤为突出,而良好的控制策略能较大地提升系统性能^[3]。新能源汽车的热管理系统不仅直接关系到动力电池的安全性、寿命和充放电性能^[4-5],还深刻影响乘员舱的舒适体验^[6]。电动汽车的快速普及亟需先进的热管理方案,以同时满足乘员舱热舒适性和电池系统可靠性的双重需求^[7-8]。不同于传统车辆,新能源汽车面临着严峻的能源约束。集成乘员舱和电池两大热域虽具有显著的节能与系统简化潜力,但也引入了复杂的动态耦合和冲突的控制目标^[9],因此优化控制策略对提升续航里程和乘员的舒适性至关重要^[10-11]。

传统的比例-积分-微分(PID)控制因其结构简单、参数调整直观且在稳定工况下鲁棒性良好,已在乘员舱和电池的独立热管理控制中得到广泛应用^[12-13],为系统基础控制提供了可靠方案。然而,随着电动汽车热管理系统向高度集成化发展,其架构涉及乘员舱系统的非线性和时变动态特性,以及乘员舱与电池热域间复杂的耦合热交互、动态扰动和多重约束^[14-16],这对控制策略提出了更高要求。在此背景下,模型预测控制(MPC)凭借其独特优势,为解决提升整车经济性并延长关键部件(如电池)寿命的核心挑战提供了有效途径,已在近年来成为该领域的重要研究方向^[17-18]。

众多研究聚焦于 MPC 模块在热管理中的应

用,例如:协同优化电池和乘员舱温度,以平衡舒适性、电池健康与能耗^[19];集成推进系统和座舱冷却^[20];开发适用于热系统非线性的先进预测模型,如线性时变模型(LTV-MPC)^[21]、基于数据驱动的非线性模型预测控制(NMPC)或融合车速/工况预测的前瞻性控制^[22];开发具有最优工作温度跟踪功能的预测控制策略^[23]以及能源管理优化电池运行计划^[24]。值得注意的是,将神经网络预测模型与 MPC 模块结合,已在压缩机控制及温度预测^[25-26]、融合电机热控制^[27]、开发高效热管理模型^[28]和考虑电池寿命的多目标能量管理^[29]等研究方向展现出强大潜力,为 MPC 控制提供更准确的预测基础,显著提升了复杂动态下的控制性能。上述研究展现了 MPC 控制在实现多目标优化方面的广泛应用。

现有文献大多关注将 MPC 模块与神经网络相结合的单一子系统控制,或将神经网络模型用于工况预测。相比之下,本文采用神经网络对整车耦合系统状态进行估计,用于表征其动态特性。提出并构建了协同控制架构以优化压缩机转速,基于 AMESim 平台建立了乘员舱-电池耦合热系统的动态仿真模型,并将非线性自回归外生输入(NARX)神经网络引入控制模块估计系统的动态特性,为 MPC 控制提供准确的状态估计。基于温度估计值, MPC 控制利用其滚动优化特性动态调节关键执行器-压缩机转速,在严格保障乘员舱热舒适性约束的同时降低系统能耗,结合 PID 控制应对耦合热域的动态耦合和冲突目标。为验证策略的有效性,基于

标准化测试工况,将所提出的 MPC 控制和传统 PID 控制用于压缩机转速控制性能的对比分析,评估两者在控制稳定性和压缩机能耗方面的表现。

1 热管理系统模型

1.1 系统介绍

如图 1 所示,选取动力电池和乘员舱高温制冷模式为研究对象。采用双支路设计以灵活适配乘员舱环境调控与电池热管理需求,其中红色管路表示高压侧,蓝色管路表示低压侧。系统共同实现热量从车内关键区域向外界的有效转移,从而保障乘员舱舒适性与电池运行的可靠性。

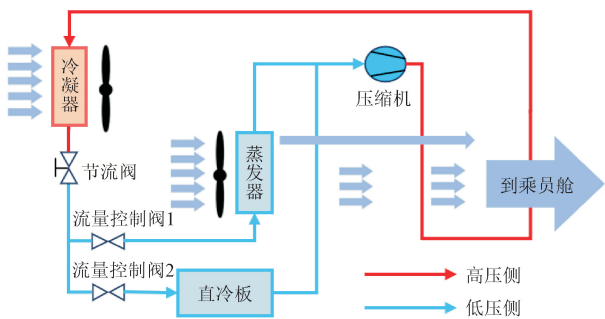


图 1 动力电池与乘员舱协同热管理系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coordinated thermal management system for power battery and cabin

基于 AMESim 平台构建的热管理模型,将乘员舱和动力电池作为核心温控对象。乘员舱的温控特性主要受外界环境温度、空调系统性能以及人体热负荷的综合影响;而动力电池的温控特性则与电池的充放电过程、内阻发热效应以及外部冷却条件密切相关。深入解析二者的产热机制和热动态特性,是优化热管理系统设计的关键,有助于在不同工况下合理分配热负荷,确保系统维持高效、稳定的温控性能。因此,构建乘员舱与动力电池的精细化温控对象模型,可为后续系统仿真及性能评估提供准确的热源基础。

1.2 乘员舱模型

乘员舱换热过程受多重因素综合影响,主要包括太阳辐射、车内蓄热和人体散热。基于 AMESim 平台,构建乘员舱简化仿真模型,重点考虑车顶、侧围板、玻璃传热、新风和内部热负荷等核心参数,模型的环境边界条件包括太阳辐射、车速、进风速度和温度等因素。乘员舱模型采用一维集总参数法,忽

略材料导热梯度,舱内空气密度和比热容均设为常数。相关的参数设置如表 1 所示。

表 1 乘员舱相关参数设置

Table 1 Setting of parameters related to the passenger cabin

参数	数值
太阳辐射强度/(W · m ⁻²)	700
太阳辐射吸收率	0.75
容积/m ³	4
壁面比热容/(kJ · K ⁻¹)	7
外部换热面积/m ²	8

综合考虑自然对流与强制对流,对流换热系数的计算式可写为

$$h_{\text{conv}} = (h_{\text{forced}}^3 - h_{\text{free}}^3)^{1/3} \quad (1)$$

式中: h_{conv} 、 h_{forced} 、 h_{free} 分别为对流换热系数、强制对流换热系数和自然对流换热系数。

壁温 T_w 的计算式可写为

$$\frac{dT_w}{dx} = \frac{f_s - f_{\text{ext}} - f_{\text{int}}}{m c_p} \quad (2)$$

$$f_s = \alpha S_{\text{ext}} q_{\text{sol}} \quad (3)$$

$$f_{\text{ext}} = h_{\text{conv,ext}} S_{\text{ext}} (T_w - T_{\text{ext}}) \quad (4)$$

$$f_{\text{int}} = h_{\text{conv,int}} S_{\text{int}} (T_w - T_{\text{int}}) \quad (5)$$

式中: f_s 、 f_{ext} 、 f_{int} 分别为太阳辐射热流量、外部对流热流量和内部对流热流量; m 为壁面质量; c_p 为壁面比定压热容; α 为太阳辐射吸收率; S_{ext} 为外部换热面积; S_{int} 为内部对流换热面积; q_{sol} 为太阳辐射强度; $h_{\text{conv,ext}}$ 、 $h_{\text{conv,int}}$ 分别为外部和内部对流换热系数; T_{ext} 、 T_{int} 分别为外部和内部温度。

1.3 动力电池模型

纯电动汽车行驶工况复杂多变,动力电池在高温下易因过热触发热失控风险,在低温下则导致容量衰减并影响续航。因此,研究电池产热是热管理系统设计的基础之一。在车辆运行过程中,电池会持续释放热量,其产热来源主要包括内阻热(焦耳热)、可逆熵热、混合热、相变热和反应热。通常情况下,反应热与相变热影响较小,可忽略不计^[30]。电池产热速率可简化为

$$q = \frac{I}{V} \left[(U_{\text{OCV}} - U) + T \frac{dU_{\text{OCV}}}{dT} \right] \quad (6)$$

式中: I 为充放电电流; V 为电池体积; U_{OCV} 为电池开路电压; U 为电池工作电压; T 为电池温度; dU_{OCV}/dT 为电池电压温度影响系数。

基于整车集成热管理系统对动力电池进行建模分析,采用经验模型中的等效电路模型,将电池视为二端口电路网络,并通过电压源和电阻表征其内部电特性。为提高模型准确性,需考虑温度对电池内阻的影响。总内阻 R_{total} 由极化内阻和欧姆内阻组成,表达式写为

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^3 (a_i \beta^i T^{3-i} + b_i \beta^i + c_i T^{3-i}) \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数; β 为荷电状态。

电池工作电压 U 和开路电压 U_{OCV} 的计算式分别如下

$$\frac{dU}{dt} = \frac{I - U_{\text{OCV}}/R}{C_f} \quad (8)$$

$$U_{\text{OCV}} = d_0 + d_1 \beta + d_2 \beta^2 + d_3 \beta^3 + d_4 \beta^4 \quad (9)$$

式中: $d_1 \sim d_4$ 为常数; C_f 为电池容量; R 为电阻。

本文选用磷酸铁锂(LFP)电池作为研究对象,其标称容量为 $124 \text{ A} \cdot \text{h}$,标称电压为 3.2 V 。在 AMESim 仿真平台中建立的电池包模型由 3 个模组组成,其核心参数如下:电池包总能量为 270 MJ ,总重量为 589 kg ,额定电压为 610 V ,标称容量为 $124 \text{ A} \cdot \text{h}$,电芯为 192 个电池串接的电池组。在完成上述电池关键参数的设定后,基于 AMESim 平台建立了反应电池电热特性的模型。

1.4 系统仿真验证

为验证仿真系统准确性,进行压缩机定转速工况测试,测量系统在不同压缩机转速下的质量流量和功耗。将热管理系统实验结果与仿真结果进行对比,分析系统仿真模型的准确性,结果如图 2 和图 3 所示。由图可见,压缩机功耗平均相对误差为 3.18% ,系统质量流量平均相对误差为 3.66% ,表明仿真与实验匹配度较好。

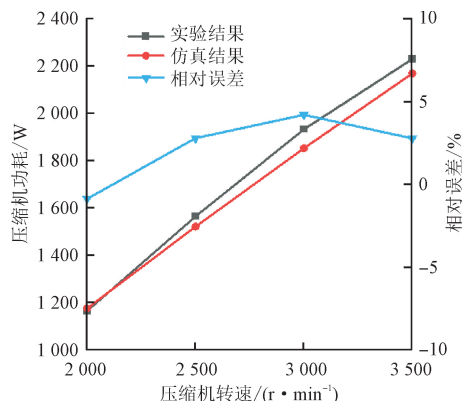


图 2 压缩机功耗的对比

Fig. 2 Comparison of compressor power consumption

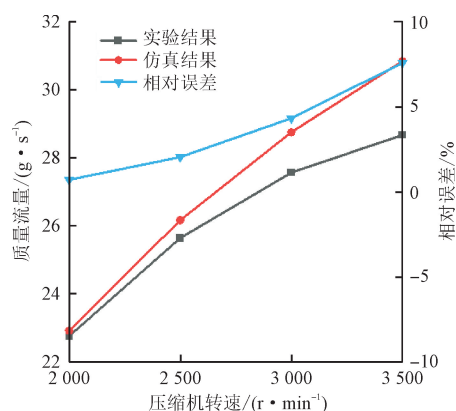


图 3 系统质量流量的对比

Fig. 3 Comparison of system mass flow rates

2 目标函数及控制模型建立

2.1 目标函数建立

热管理对乘员舱和电池双直冷耦合系统的温控起着至关重要的作用,但乘员舱与电池适用温度范围存在差异。如何能够根据不同环境条件灵活调节制冷剂的流量和流向,确保乘员舱和电池均处于最佳温度状态,同时还能降低系统能耗,已成为当前亟需解决的问题。因此,有必要为系统设计协同控制策略,以保障电池安全、乘员舱舒适,同时提升组件能效,增强电动汽车的整体可靠性和安全性。

基于此,本文提出了将 MPC 与 PID 控制相结合的协同控制架构,其中 MPC 控制器跟踪乘员舱温度调控压缩机转速,PID 控制器则用于两处,一处根据过热度来调节节流阀开度,另一处以温度为目标控制流量分配阀开度。系统的控制结构如图 4 所示。

采用状态空间方程构建 MPC 控制器,表达式如下

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u \mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_v \mathbf{v}(k) \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x}(k+1)$ 、 $\mathbf{x}(k)$ 分别为 $k+1$ 和 k 时刻系统的状态变量; $\mathbf{y}(k)$ 、 $\mathbf{v}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k)$ 分别为 k 时刻系统的输出变量、可测量扰动变量和输入变量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_u$ 、 $\mathbf{B}_v$ 、 $\mathbf{C}$ 分别为系统的状态矩阵、输入矩阵、可测量干扰矩阵和输出矩阵。

对于每一个控制时刻 k ,需要确定从该时刻起 n 个控制量的增量 $\Delta u(k)$, $\Delta u(k+1)$, $\dots$, $\Delta u(k+n-1)$,使得被控对象在未来 p 个时刻的预测输出

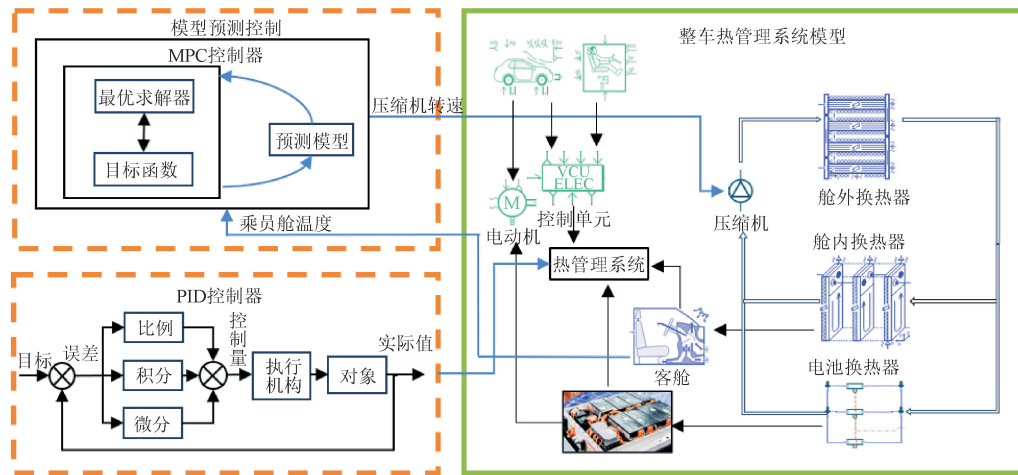


图4 控制体系结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of control architecture

值 $\hat{\mathbf{y}}$ 尽可能接近期望输出值 $\mathbf{w}(k+i)$ ($i=1,2,\dots,p$), 且 $\Delta \mathbf{u}$ 的变化不会过于剧烈。此时, 将系统的目标函数设置如下

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^p \|\mathbf{w}(k+i|k) - \hat{\mathbf{y}}(k+i|k)\|_{\mathbf{q}_i}^2 + \sum_{j=1}^n \|\Delta \mathbf{u}(k+i|k)\|_{\mathbf{r}_j}^2 \quad (12)$$

式中: $\mathbf{q}_i, \mathbf{r}_j$ 分别为跟踪误差变化量和控制量变化的权重矩阵。

本文采用的 MPC 控制为压缩机单输出控制, 需要规定压缩机转速在实际合适范围内, 因此制定如下的约束条件

$$1\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq N_{\text{comp}} \leq 5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \quad (13)$$

式中: N_{comp} 为压缩机转速。

系统以一个中国轻型汽车测试循环-乘用车 (CLTC-P) 循环为基础, 在将乘员舱温度控制在 25°C 目标温度的前提下, 引入单位温降能耗 e 作为评价指标来评估功耗, 表达式为

$$e = \frac{P}{\Delta T} \quad (14)$$

式中: P 为压缩机功耗; ΔT 为电池温度降低量。

2.2 控制模型建立

系统联合仿真控制框图如图5所示, 包括基于 AMESim 平台搭建的整车热管理系统模型、Simulink 软件环境中的 MPC 控制器和神经网络模块。本文以 AMESim 热管理空调模块为控制对象, 通过状态空间方程构建 MPC 控制的预测基础, 形成闭环控制流程。采用 MPC 控制器基于滚动优化

生成最优控制序列输入物理模型, 同时将系统实时状态反馈至神经网络, 预估乘员舱的温度并反馈至 MPC 控制器进行下一周期优化求解, 实现持续在线循环。联合仿真过程中, 用 AMESim 模型替换状态空间方程, 将整个耦合系统系统的状态量传递给 Simulink 软件中的 NARX 模块, MPC 控制器处理 NARX 模块输出的乘员舱温度估计结果, 确定下一时刻压缩机最优转速 (操纵变量), 并将该转速传送至 AMESim 热管理模型的压缩机模块。

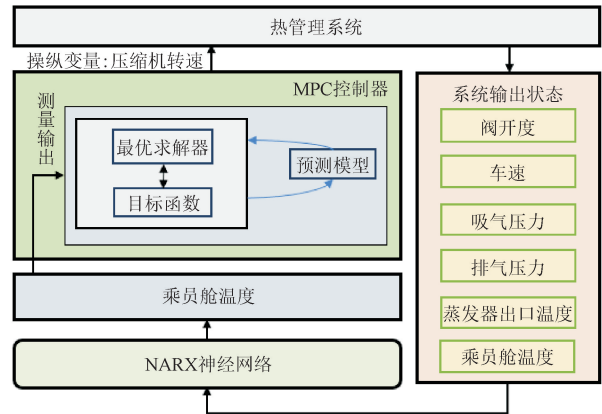


图5 联合仿真控制框图

Fig. 5 Co-simulation control block diagram

为构建 MPC 控制器, 本文采用黑箱模型, 在对模型实施离散化处理的同时, 还纳入系统所受的其他外部环境干扰因素。通过 Simulink 软件调用 MATLAB 软件工作区的数据, 对状态矩阵 $\mathbf{A}$ 、控制矩阵 $\mathbf{B}$ 进行参数辨识, 所得离散状态空间方程如下

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.6860 \times 10^{-8} & -2.0000 \times 10^{-4} & 1.1800 \times 10^{-2} \\ -2.0000 \times 10^{-4} & 1.1729 \times 10^{-7} & 8.4000 \times 10^{-3} \\ 6.4647 \times 10^{-5} & 3.0000 \times 10^{-4} & -1.2154 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -3.0000 \times 10^{-4} & 2.2331 & 1.5000 \times 10^{-3} \\ -1.0000 \times 10^{-4} & 1.3067 & 4.0000 \times 10^{-4} \\ -5.1296 \times 10^{-5} & 0.3538 & 4.0000 \times 10^{-4} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

NARX 神经网络训练集将来源于 CLTC-P 工况下的数据作为输入参数。系统的状态量包含吸气压力、排气压力、车速、阀开度和蒸发器出口温度。参考文献[26]和文献[31],将训练集、测试集、验证集的比例划分为 70%、15%、15%。基于上述输入,模型可生成乘员舱温度的预测值。

乘员舱温度预测值和实际值的对比结果如图 6 所示。由图可见,预测结果与实际温度趋势相近,最大误差为 0.2℃,可为真实系统提供可靠的未来状态预测信息。

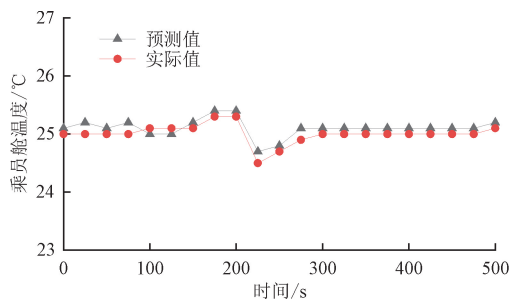


图 6 乘员舱实际温度和预测温度的对比

Fig. 6 Comparison of actual and predicted temperatures of cabin

3 联合仿真结果分析

3.1 仿真条件

为验证系统 MPC 控制器的有效性,基于 AMESim 平台集成热管理模型,与 MATLAB-Simulink 软件进行联合仿真,对比 MPC 与 PID 控制策略的性能。表 2 给出了系统的仿真参数。

表 2 系统的仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the system

参数	数值及范围
环境温度/℃	35, 40, 45
目标温度/℃	25
压缩机转速/(r · min ⁻¹)	1 000~5 000

采用典型的 CLTC-P 循环工况仿真模拟车辆热负荷的波动情况,分析所提出的 MPC 控制器热管理系统的动态响应能力。CLTC-P 工况共包含低速、中

速和高速 3 个速度区间,工况时长共计 1 800 s,平均车速为 29.0 km/h,最大车速为 114.0 km/h,怠速比例为 22.1%^[32]。CLTC-P 的工况曲线如图 7 所示。

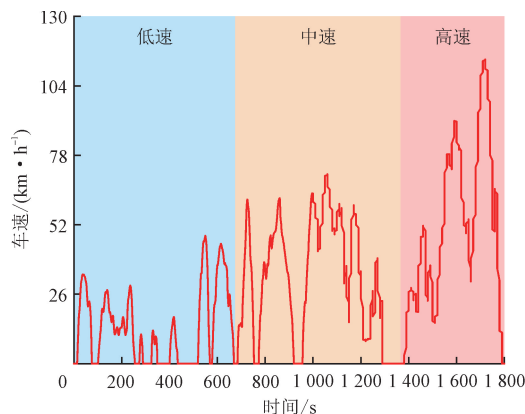


图 7 CLTC-P 测试工况

Fig. 7 CLTC-P driving cycle profile

3.2 热舒适性分析

预测平均投票(PMV)是基于人体热平衡理论建立的量化指标,用于预测群体在 7 级热感觉量表上的平均热感受。表 3 给出了不同 PMV 值对应的感受。

表 3 PMV 具体数值与对应感受

Table 3 Specific values of PMV and corresponding sensations

PMV 值	热感受
-3	寒冷
-2	凉爽
-1	微凉
0	中性(不冷不热)
1	微暖
2	温暖
3	炎热

基于 25℃ 的目标温度,结合 PMV 值与热感受的对应关系,在 35、40、45℃ 初始温度下,得到 MPC 控制的 PMV 变化曲线如图 8 所示。由图可见,在 0~200 s 内,由于初始温度显著高于目标温度,得到的 PMV 值较高,表征出一种热不适或炎热状态;但随着 MPC 算法开始调控,曲线快速下降,表现出 MPC 控制对高温初始状态的快速响应能

力。随着控制过程持续,600 s后各组的 PMV 曲线均逐渐稳定并收敛至 PMV 值为 0.75 范围内(图 8 中紫色区域),此阶段对应的是微暖-中性状态,与 25℃ 热环境下预期的舒适性相符。总体而言,MPC 控制在不同初始高温下均能快速降低 PMV 值,使得热感觉向目标 25℃ 对应的中性舒适靠拢,即便初始温差较大,也能将 PMV 值稳定在接近舒适区间,保障热环境的调控效果。

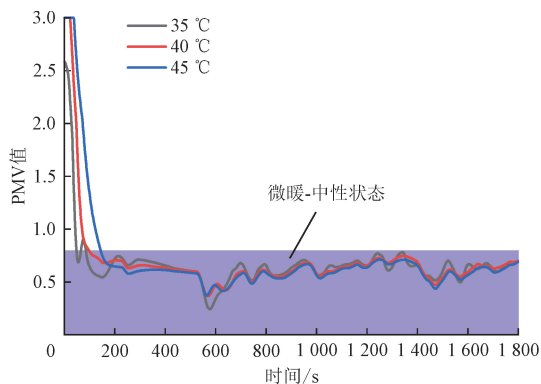


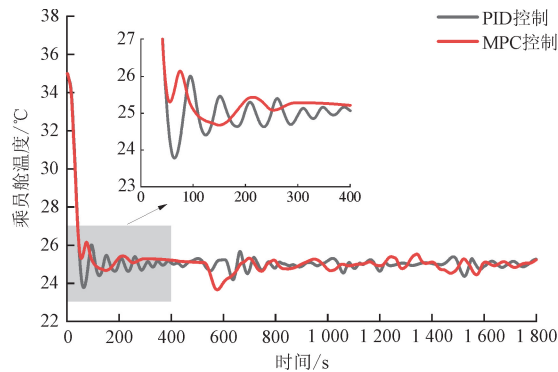
图 8 MPC 控制下不同初始温度 PMV 值的对比

Fig.8 Comparison of PMV values at different initial temperatures under MPC control

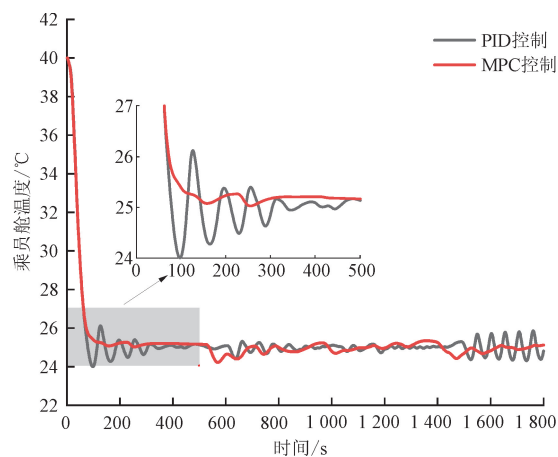
3.3 温控效果分析

图 9 给出了不同初始温度下,PID 和 MPC 控制模型计算得到的乘员舱温度变化规律。如图 9(a)所示,当初始温度为 35℃ 时,PID 控制体现在初始降温阶段,此时温度快速跌落,最低约至 23~24℃,与目标温度 25℃ 的偏差达 1~2℃,超调现象显著。然而,虽然首次接近 25℃ 在 51 s 左右,但因超调回落,真正进入可维持目标值需至 650 s 后,且后续仍有明显波动。在相同的初始降温条件下,采用 MPC 控制能够使乘员舱温度迅速降至约 25℃ 附近,温度偏差仅为 0.5℃,能更精准抑制超调,避免乘员舱温度剧烈波动。系统温度在约 290 s 时已稳定在 25℃,约 670 s 后维持在 (25 ± 0.5) ℃ 的窄幅波动范围内,有效缩短了降温到温度稳定的周期,使得乘员舱更快进入舒适温度区间。这表明在乘员舱温控场景中,MPC 控制能减少温度波动次数变化带来的不适感。

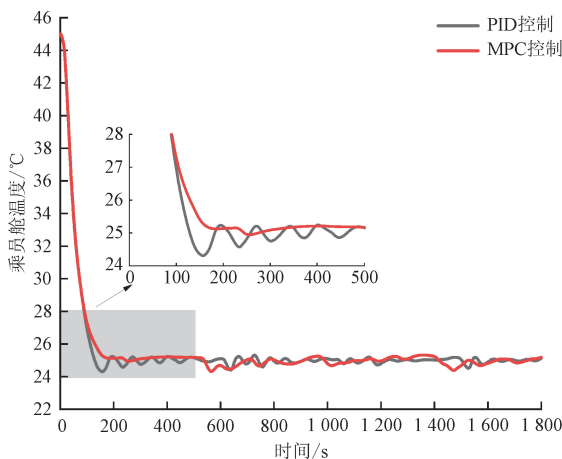
由图 9(b)可见,当初始温度为 40℃ 时,MPC 控制无超调,而 PID 控制出现明显超调现象,温度也降至 24℃。在波动性上,MPC 控制约 600 s 后就将震荡幅度严格控制在 (25 ± 0.5) ℃ 以内,而 PID 控制下的温度在 24~26℃ 反复波动,震荡幅度约为 2℃,且在 1 000 s 后才逐步收窄波动。



(a) 35℃



(b) 40℃



(c) 45℃

图 9 不同初始温度下乘员舱温度的对比

Fig.9 Comparison of cabin temperatures under different initial temperatures

由图 9(c)可见,当初始温度为 45℃ 时,在 0~200 s 初始降温阶段,PID 控制下的温度从 45℃ 快速跌落,与目标温度偏差达 1℃,超调现象显著;而在 MPC 控制下,温度最低仅至 25℃ 附近,几乎不存在超调。当 PID 控制进入 200 s 后的稳定阶段时,在目标温度附近反复震荡,且长期存在明显波动;相比之下,MPC 控制则更早进入稳定区间,且波

动较小。

综上所述,MPC控制通过更优的超调抑制与波动控制,提升了热管理系统的温控精度与舒适性,效果明显优于PID控制,对保障乘员舱热舒适体验、优化热管理能效具有实际价值。

3.4 能耗分析

采用MPC控制时,不同初始温度下的压缩机转速随时间的变化规律如图10所示。由图可见,随着环境温度从35℃升高至45℃,对应的压缩机转速均呈现整体上升态势,这是系统为适配热管理需求,对压缩机转速进行的适应性调整所导致的。随着乘员舱温度降低至目标温度,压缩机转速快速下降,200 s后的波动幅度明显更小,运行更为平稳,助力系统在维持温度稳定、降低能耗方面发挥作用,使乘员舱舒适性与系统能效都能得到更好保障。

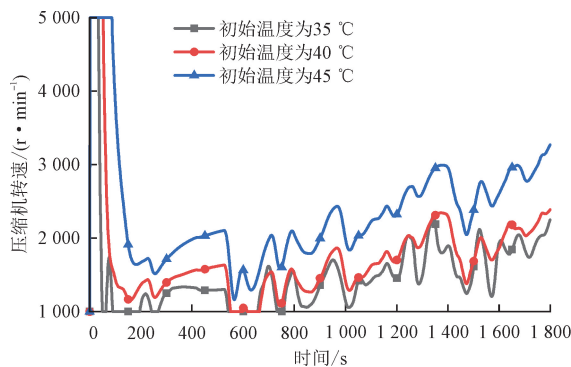


图10 MPC控制下不同初始温度压缩机转速的对比

Fig. 10 Comparison of compressor speeds at different initial temperatures under MPC control

不同初始温度下,采用PID和MPC控制计算得到的电池温度和压缩机功耗对比如图11所示。由图可见,当动力电池初始温度分别为35、40、45℃时,一个CLTC-P循环后,采用PID控制的电池温度分别降低至30.2、35.5、41.8℃,压缩机功耗分别为1063、1274、1261 W;采用MPC控制的电池温度分别降低至31.0、35.9、40.3℃,压缩机功耗分别为822.0、1132.6、1787.0 W。

为评估MPC和PID控制在动态工况下对压缩机功耗的影响,在将乘员舱温度控制在25℃目标温度的前提下,引入单位温降能耗(即功耗与温降的比值)作为评价指标,得到的结果如图12所示。分析结果显示,MPC控制在35、40、45℃这3种初始温度下的单位温降能耗分别为205.5、276.2、380.2 W/℃,均低于PID控制的221.5、283.1、394.1 W/℃,能耗降低率分别为7.2%、2.4%和3.5%。

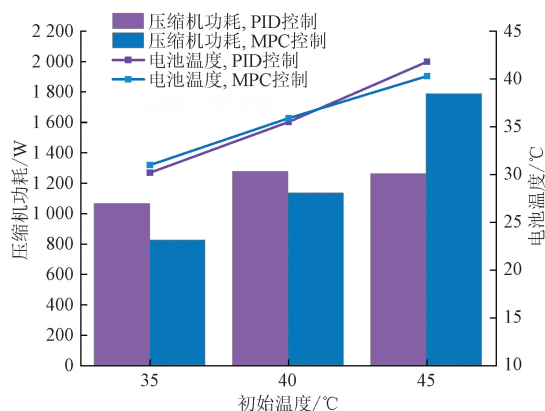


图11 不同初始温度和控制下压缩机功耗及电池温度的对比

Fig. 11 Comparison of compressor power consumption and battery temperature under different initial temperatures and controls

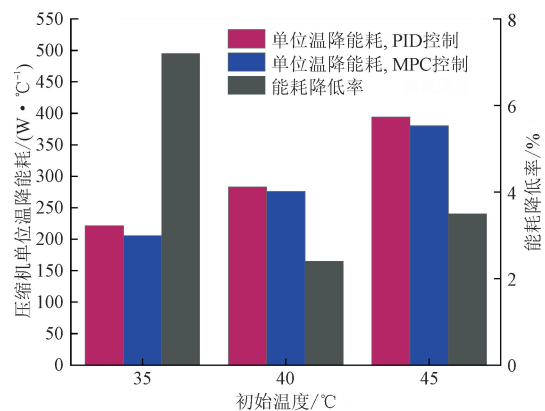


图12 压缩机单位温降能耗的对比

Fig. 12 Comparison of energy consumption per unit temperature drop of the compressor

综合图11和图12可知,在45℃环境下,PID控制在乘员舱达到目标温度后温度偏差较小,压缩机转速降低从而能耗较低;而MPC控制下压缩机转速较高,乘员舱温控达到需求时,部分冷量会较多地流入电池一侧,导致能耗增加。虽然MPC控制下的功耗为1787 W,高于PID控制下的1261 W,但MPC控制具备更优的主动强化散热能力,实现温降达到4.7℃,优于PID控制的3.2℃,因此单位冷却效率仍提升了3.5%,这为高温环境下电池的安全性提供了可靠保障。

综上,MPC控制以较小的压缩机转速波动,换取了能耗降低,在满足乘员舱温度调控需求的基础上,减少了压缩机做功,实现了能耗与温控效果的更优平衡,凸显了其相较于PID控制在热管理系统能

效提升方面的技术价值。进一步结合热管理系统的核心需求,其优化的控制逻辑还能同步保障乘员舱温度的精准调控,如抑制超调、减少波动,避免了PID控制可能因反馈调节滞后导致的能耗冗余——PID控制的高能耗部分源于对温控偏差的被动修正,而MPC控制通过提前预判工况实现了能量的精准分配。因此,MPC控制以更低能耗达成了更优的温控结果,充分表明了其在能耗方面的优势。

4 结 论

本文提出了一种新能源汽车热管理系统的协同控制方法,通过将NARX神经网络与MPC模块相融合,对提升温度稳定性与优化系统能耗开展综合分析,并将MPC与PID控制结果进行比较,得到如下主要结论。

(1)将建立的热管理系统实验数据与仿真数据对比,得到质量流量的平均相对误差为3.66%,功耗的平均相对误差为3.18%,表明模型能够较为准确地模拟真实热管理系统。

(2)所提MPC控制策略有效抑制了乘员舱温度超调现象,达到目标温度的时间均在200s左右并保持稳定,且600s后PMV值控制在0.40~0.78,对应微暖-中性的舒适状态。

(3)在初始环境温度分别为35、40、45℃时,相较于PID控制策略,MPC控制策略将压缩机的单位温降能耗分别降低了7.2%、2.4%和3.5%,有效提升了整车能量利用效率。

参考文献:

- [1] 邹慧明,唐坐航,杨天阳,等. 电动汽车热管理技术研究进展[J]. 制冷学报, 2022, 43(3): 15-27.
- ZOU Huiming, TANG Zuohang, YANG Tianyang, et al. Review of research on thermal management technology for electric vehicles [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(3): 15-27.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. [2025-03-10]. http://www.nea.gov.cn/1310524241_16479412513081n.pdf.
- [3] HU Donghai, HOU Wenshuo, XIANG Chenjie, et al. Waste heat utilization performance verification of heat exchanger only thermal management system for fuel cell vehicle [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139479.
- [4] 王从飞,曹锋,李明佳,等. 碳中和背景下新能源汽车热管理系统研究现状及发展趋势[J]. 科学通报, 2021, 66(32): 4112-4128.
- WANG Congfei, CAO Feng, LI Mingjia, et al. Research status and future development of thermal management system for new energy vehicles under the background of carbon neutrality [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(32): 4112-4128.
- [5] KUMAR P, CHAUDHARY D, VARSHNEY P, et al. Critical review on battery thermal management and role of nanomaterial in heat transfer enhancement for electrical vehicle application [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 102003.
- [6] LAJUNEN A, YANG Yinye, EMADI A. Review of cabin thermal management for electrified passenger vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6025-6040.
- [7] LIANG Kunfeng, WANG Moran, GAO Chunyan, et al. Advances and challenges of integrated thermal management technologies for pure electric vehicles [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46: 101319.
- [8] DAN Dan, ZHAO Yihang, WEI Mingshan, et al. Review of thermal management technology for electric vehicles [J]. Energies, 2023, 16(12): 4693.
- [9] LIU Fei, LI Meng, HAN Bing, et al. Research on integrated thermal management system for electric vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: part D Journal of Automobile Engineering, 2023, 237(12): 2957-2970.
- [10] 申明. 电动汽车热管理直冷系统研究及其控制分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [11] 叶崇阳. 电动汽车直冷式热管理系统控制策略仿真研究及实验验证[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [12] 林必超,岑继文,蒋方明. 汽车空调制冷剂直冷动力电池热管理系统的PID控制研究[J]. 新能源进展, 2020, 8(2): 123-130.
- LIN Bichao, CEN Jiwen, JIANG Fangming. A study on PID control for thermal management system of battery cooling by automotive air conditioning refrigerant directly [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(2): 123-130.
- [13] LIN Bichao, CEN Jiwen, JIANG Fangming. A lightweight compact lithium-ion battery thermal management system integratable directly with EV air conditioning systems [J]. Journal of Thermal Science, 2022, 31(6): 2363-2373.
- [14] LV Wenge, LI Deyuan, CHENG Siyuan, et al. Research on PID control parameters tuning based on election-survey optimization algorithm [C]//2010 Interna-

- tional Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010; 323-326.
- [15] ZHANG Guiying, QIN Fei, ZOU Huiming, et al. Experimental study on a dual-parallel-evaporator heat pump system for thermal management of electric vehicles [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2390-2395.
- [16] SHEN Ming, GAO Qing. System simulation on refrigerant-based battery thermal management technology for electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203: 112176.
- [17] CEN Jiwen, JIANG Fangming. Li-ion power battery temperature control by a battery thermal management and vehicle cabin air conditioning integrated system [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2020, 57: 141-148.
- [18] MORATO M M, FELIX M S. A survey of recent advances on data-driven MPC algorithms [J]. *Journal of Process Control*, 2024, 144: 103327.
- [19] XIE Yi, WANG Chenyang, HU Xiaosong, et al. An MPC-based control strategy for electric vehicle battery cooling considering energy saving and battery lifespan [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 14657-14673.
- [20] JU Fei, MURGOVSKIN, ZHUANG Weichao, et al. Integrated propulsion and cabin-cooling management for electric vehicles [J]. *Actuators*, 2022, 11(12): 356.
- [21] CHEN Youyi, KWAK K H, KIM J, et al. Integrated thermal management of electric vehicles based on model predictive control with approximated value function [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 58898-58914.
- [22] MA Jing, LIU Ahao, ZHANG Peng, et al. Collaborative thermal management of power battery and passenger cabin for energy efficiency optimization [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 293: 117514.
- [23] HU Donghai, WANG Yuteng, LI Jianwei, et al. Investigation of optimal operating temperature for the PEMFC and its tracking control for energy saving in vehicle applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 249: 114842.
- [24] LIU Yuanzhi, ZHANG Jie. Electric vehicle battery thermal and cabin climate management based on model predictive control [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(3): 031705.
- [25] HE Lian'ge, JING Haodong, ZHANG Yan, et al. Performance study of the MPC based on BPNN prediction model in thermal management system of battery electric vehicles [J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(6): 2318-2335.
- [26] 刘馨. 基于驾驶行为的动力电池生热预测与热管理控制策略 [D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- [27] HAN Jie, SHU Hong, TANG Xiaolin, et al. Predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering electric motor thermal dynamics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 251: 115022.
- [28] CHOI D, AN Y, LEE N, et al. Comparative study of physics-based modeling and neural network approach to predict cooling in vehicle integrated thermal management system [J]. *Energies*, 2020, 13(20): 5301.
- [29] ZHOU Lanqi, YANG Dongpo, ZENG Xiaohua, et al. Multi-objective real-time energy management for series-parallel hybrid electric vehicles considering battery life [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 290: 117234.
- [30] 陈通, 孙国华, 王明强, 等. 基于液体的动力电池热管理系统性能研究 [J]. *电源技术*, 2019, 43(4): 658-661.
- CHEN Tong, SUN Guohua, WANG Mingqiang, et al. Research on thermal management performance of electric vehicle power battery based on liquid [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(4): 658-661.
- [31] LU Dagang, HU Donghai, WANG Jing, et al. A data-driven vehicle speed prediction transfer learning method with improved adaptability across working conditions for intelligent fuel cell vehicle [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, 26(7): 10881-10891.
- [32] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 中国汽车行驶工况: 第1部分 轻型汽车: GB/T 38146.1—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

(编辑 李慧敏)