

# 动力电池直冷系统控制策略及散热性能研究\*

陈世龙<sup>1</sup> 杨元龙<sup>2</sup> 杨乃兴<sup>1</sup> 赵剑坤<sup>1</sup> 陈文辉<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055; 2. 苏文电能科技股份有限公司, 常州 213100)

**【摘要】**针对电动汽车直冷系统,提出了一种具有启停功能的模糊PID控制策略,并利用AMESim和Simulink搭建了联合仿真整车模型,对电池在不同控制策略下的散热过程进行了模拟,结果表明:相比传统PID控制,启停-模糊PID控制具有响应时间快、超调时长短和系统功耗低的优点,且对环境温度较高或行车速度较低情况下的超调时长缩短和功耗节省效果更为明显。

**关键词:**动力电池 直冷系统 PID控制 超调 功耗

**中图分类号:**U469.7 **文献标志码:**A **DOI:**10.19620/j.cnki.1000-3703.20240552

## Research on Control Strategy and Heat Dissipation Performance of Direct Cooling System for Power Battery

Chen Shilong<sup>1</sup>, Yang Yuanlong<sup>2</sup>, Yang Naixing<sup>1</sup>, Zhao Jiankun<sup>1</sup>, Chen Wenhui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;

2. Suwen Electric Energy Technology Co., LTD., Changzhou 213100)

**【Abstract】**This paper proposes a fuzzy PID control strategy with start-stop function for the direct battery cooling systems of electric vehicle. A whole vehicle model is developed using AMESim and Simulink co-simulation, to simulate the battery heat dissipation process under different control strategies. The results indicate that compared with traditional PID control, the start-stop fuzzy PID control has advantages including faster response time, shorter overshoot duration and lower system power consumption. Furthermore, the effect of shortened overshoot duration and power consumption savings is more pronounced in scenarios with higher ambient temperatures or lower driving speeds.

**Key words:** Power batteries, Direct cooling system, PID control, Overshoot, Power consumption

**【引用格式】**陈世龙,杨元龙,杨乃兴,等.动力电池直冷系统控制策略及散热性能研究[J].汽车技术,2025(4):32-39.

CHEN S L, YANG Y L, YANG N X, et al. Research on Control Strategy and Heat Dissipation Performance of Direct Cooling System for Power Battery[J]. Automobile Technology, 2025(4): 32-39.

## 1 前言

动力电池温度过高会对其寿命和容量产生重要影响,甚至引发安全事故<sup>[1]</sup>。因此,设计高效电池散热系统可使其在适宜温度下工作,显著提升电池性能和寿命<sup>[2]</sup>。当前,动力电池冷却方式主要有空冷、液冷、直冷、相变材料冷却等<sup>[3-4]</sup>。其中,直冷系统因其散热效率高、均温性好等优点,逐渐成为最具前景的动力电池冷却方案<sup>[5]</sup>。

目前,国内外学者已对动力电池直冷系统开展了一定研究。杨世春等<sup>[6]</sup>提出混合制冷剂可在保持合适温度窗口的同时提高散热性能。Tang等<sup>[7]</sup>研究了直冷板

布置形式和流道参数对冷却性能的影响,确定冷媒蒸发温度的边界。然而,现有研究多集中在系统部件优化,对其控制研究较少。研究表明,控制策略对电池散热性能及系统功耗均有重要影响<sup>[8]</sup>,因此开展电池直冷系统控制策略的研究对提高其冷却性能具有重要意义。

当前,国内外对控制策略已有诸多研究。张文俊等<sup>[9]</sup>采用逻辑门限值法实现对电池组最高温度和电芯间最大温差的有效控制,但逻辑控制功能较为有限。林必超等<sup>[10]</sup>提出一种动态温度PID算法控制电池温度。然而,PID控制属于单反馈控制,无法综合考虑多个温度反馈信号<sup>[11]</sup>,同时还存在响应时间慢、温度超调等问

\*基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024GX-YBXM-435);西藏民族大学重大项目培育计划项目(17MDZP07)。

通信作者:杨乃兴(1986—),男,甘肃定西人,副教授,博士,研究方向为电动汽车动力电池管理系统, yangnaixing@xauat.edu.cn。

题<sup>[12]</sup>。Chen等<sup>[13]</sup>提出一种神经网络控制方法,实现对电池性能的动态控制,但该方法存在计算复杂等问题。相较而言,逻辑和PID控制仍是常用方法<sup>[14]</sup>。同时,模糊PID控制易实现,对非线性和时变性的系统具有较好的控制效果<sup>[15]</sup>,使其实际应用逐渐增多。

综上,本文以直冷系统为研究对象,基于AMESim平台搭建电池直冷系统—维热模型,并联合Simulink建立控制策略。基于启停和模糊PID控制策略,设计出启停—模糊PID控制方法,并与传统PID控制方法比较。

## 2 动力电池直冷系统模型构建

### 2.1 系统组成

图1所示为电动汽车动力电池直冷系统。在直冷系统工作时,制冷剂在压缩机中被压缩后进入冷凝器,在冷凝器中液化放热,经膨胀阀节流降压后,进入电池蒸发器,通过制冷剂蒸发相变与电池组进行热交换而实现电池冷却,最后通过储液罐进行气液分离后进入压缩机,完成一个工作循环。本文主要研究动力电池直冷系统部分,不考虑空调蒸发器部分。

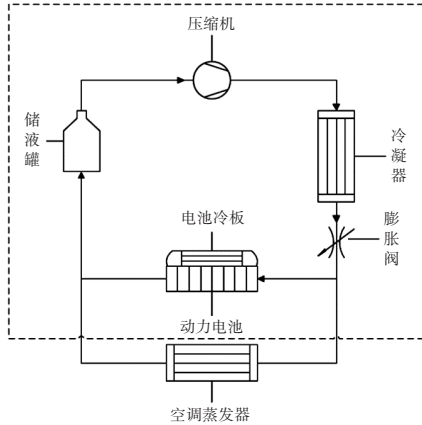


图1 动力电池直冷系统示意

### 2.2 模型构建

#### 2.2.1 压缩机模型

从图1可以看出,上述直冷系统的耗电元件主要为压缩机,其功耗计算公式如下:

$$P = N\tau/9.55 \quad (1)$$

式中: $P$ 为压缩机功耗; $N$ 为压缩机转速,本文取0~5 000 r/min; $\tau$ 为扭矩。

其中:

$$N = \frac{m}{\rho_{\text{suc}} \cdot h_v V_{\text{disp}}} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{m(h_d - h_{\text{suc}})}{\eta_{\text{mech}} N} \quad (3)$$

式中: $h_v$ 为压缩机体积效率; $m$ 为制冷剂质量流量; $\rho_{\text{suc}}$

为压缩机入口制冷剂密度; $V_{\text{disp}}$ 为压缩机排量,本文取 $3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ; $h_d$ 为排气比焓; $h_{\text{suc}}$ 为吸气比焓; $\eta_{\text{mech}}$ 为机械效率,本文取90%。

#### 2.2.2 冷凝器模型

本文对冷凝器中制冷剂的流动和换热简化为离散微元(空气/壁面、壁面和翅片以及制冷剂/壁面)进行建模。制冷剂与换热器壁面之间的单元对流换热量可表示为:

$$Q_{\text{in},i} = h_{\text{c},i} A_i (T_{\text{ref},i} - T_{\text{wall},i}) \quad (4)$$

式中: $h_{\text{c},i}$ 为制冷剂与换热器壁面间的单元对流换热系数; $A_i$ 为单元内部换热面积; $T_{\text{ref},i}$ 、 $T_{\text{wall},i}$ 分别为单元制冷剂温度和单元壁面温度。

其中, $h_{\text{c},i}$ 的计算公式为:

$$h_{\text{c},i} = \frac{\lambda_{\text{re}} Nu}{d_n} \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\text{re}}$ 为制冷剂导热系数, $Nu$ 为努赛尔系数, $d_n$ 为制冷剂侧水力直径。

空气侧与换热器壁面之间的单元对流换热量为:

$$Q_{\text{ex},i} = \eta_{\text{fin},i} h_{\text{ex},i} A_e (T_{\text{wall}} - T_{\text{ma}}) + m_{\text{cond},i} L_{\text{vap}} \quad (6)$$

式中: $\eta_{\text{fin},i}$ 为单翅片传热率, $h_{\text{ex},i}$ 为空气侧与换热器壁面间的单元对流传热系数, $A_e$ 为单元对流传热面积, $T_{\text{wall}}$ 、 $T_{\text{ma}}$ 分别为壁温和空气温度, $m_{\text{cond},i}$ 为单元质量流量, $L_{\text{vap}}$ 为工质潜热。

其中整体翅片效率为:

$$\eta_{\text{fin}} = \frac{\lambda_{\text{wall}}}{e^*} \quad (7)$$

式中: $\lambda_{\text{wall}}$ 为壁面导热系数, $e^*$ 为几何学参数。

空气侧与换热器壁面单元对流传热系数 $h_{\text{ex},i}$ 为:

$$h_{\text{ex},i} = \frac{Nu \lambda_{\text{ma}}}{D_{\text{air}}} \quad (8)$$

式中: $\lambda_{\text{ma}}$ 为空气导热系数, $D_{\text{air}}$ 为空气侧水力直径。

$Nu$ 根据流态确定,层流时为定值,湍流时是翅片有效面积的函数,表示为:

$$Nu = \eta_{\text{fin}} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr \quad (9)$$

式中: $\eta_{\text{fin}}$ 为翅片表面效率, $Re$ 为雷诺数, $Pr$ 为普朗特数。

电池冷板(蒸发器)与冷凝过程发生的热力过程相反,其换热系数可表示为:

$$h_{\text{TP}} = Fh_{\text{cv}} + Sh_{\text{NcB}} \quad (10)$$

式中: $Fh_{\text{cv}}$ 为对流换热项, $Sh_{\text{NcB}}$ 为核态沸腾项。

冷板外部换热可表示为:

$$Q_{\text{ex}} = Ah_b (T_{\text{hs}} - T_{\text{wall}}) \quad (11)$$

式中: $A$ 为换热面积, $h_b$ 为冷板与电池间换热系数, $T_{\text{hs}}$ 为电池温度。

#### 2.2.3 动力电池模型

动力电池产热和端电压的计算公式分别为<sup>[16]</sup>:

$$Q = I^2 R_{ohm} + I^2 R_{act} - IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (12)$$

$$U_{cell} = U_{ocv}(S, T) + I(R_{ohm} + R_{act}) \quad (13)$$

式中:  $S$  为电池荷电状态;  $R_{ohm}$  和  $R_{act}$  分别为欧姆内阻和极化电阻。

根据式(12), 电池热量来源于3个部分, 即欧姆热、极化热和熵变热。

动力电池开路电压是温度和电池荷电状态的函数, 按照温度进行一阶泰勒级数展开后可表示为:

$$U_{ocv}(S, T) = U_{ocv,ref}(S) + (T - T_{ref}) \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (14)$$

式中:  $U_{ocv,ref}$  为参考温度下的开路电压, 可通过对电池在参考温度下进行恒电量滴定的方法测定。

### 3 动力电池直冷系统控制策略

传统PID控制主要适用于单输入-单输出问题, 对于具有时变性和迟滞性的动力电池冷却系统, 在控制过程中存在响应时间慢、温度超调及能耗较高等问题<sup>[17]</sup>。为克服上述缺点, 本文对传统PID控制方法进行改进, 并对其控制效果与传统PID进行对比分析。

#### 3.1 传统PID控制方法

传统PID控制方法的工作原理如图2所示。

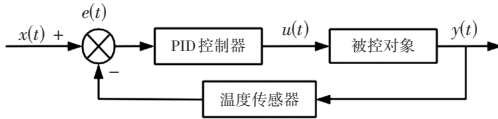


图2 传统PID工作原理

在传统PID控制系统中, 将  $t$  时刻温度传感器测得的电池组实际温度  $y(t)$  与设定温度  $x(t)$  之间的误差  $e(t)$  输入到PID控制器中, 求得当前对应状态下PID控制器的输出值  $u(t)$ :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别为PID控制器的比例系数、积分系数和微分系数。

#### 3.2 模糊PID控制方法

模糊PID相较于传统PID控制, 增加了模糊推理的过程, 其以当前值与目标设定值的偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  作为输入量, 通过模糊规则对PID控制器参数进行动态调整, 可实现PID参数的自适应调整, 加快系统响应, 控制原理如图3所示。

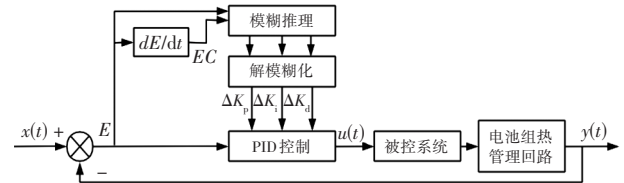


图3 模糊PID控制原理

本文以  $E$  和  $EC$  作为输入量, 定义  $E$ 、 $EC$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  的论域分别为  $[-8, 8]$ 、 $[-0.1, 0.1]$ 、 $[-0.6, 0.6]$ 、 $[-0.001, 0.001]$  和  $[-0.005, 0.005]$ 。将输入、输出的模糊论域划分为7个模糊子集 {NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、Z(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}, 进一步对式(15)中的控制参数进行修正, 修正后的参数为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p1} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i1} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d1} + \Delta K_d \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为校正后的参数,  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{d1}$  为初始参数,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为校正参数。

建立模糊控制规则: 当偏差较大时, 需要增大  $\Delta K_p$  和减小  $\Delta K_i$ , 以便加快系统响应, 避免超调, 使动力电池温度快速达到目标温度, 使用中等的  $\Delta K_d$  避免导数饱和; 当偏差较小时, 应减小  $\Delta K_p$  和增大  $\Delta K_i$ , 保证系统稳定性, 提高系统的抗干扰性能。基于以上模糊控制规则, 设计  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  模糊规则如表1所示。

#### 3.3 启停PID控制方法

模糊PID相较传统PID在控制过程中虽加快了温度响应时间, 减少了超调现象, 但仍会出现温度超调现象, 造成功耗的浪费。因此, 设计一种具有启停功能的

表1  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  模糊规则

EC	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/Z	PM/NM/Z	PS/NM/Z	Z/Z/PS	Z/Z/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/Z	Z/Z/PS	Z/Z/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	Z/Z/Z	NS/PS/PS	NM/PS/PM
Z	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/Z	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	Z/Z/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z	NM/PM/PS	NB/PBPS
PB	Z/Z/PS	NS/Z/Z	NS/PS/Z	NM/PM/NS	NM/PB/Z	NB/PB/PB	NB/PB/PB

PID控制策略,在电池到达目标温度时关闭压缩机,超过工作温度上限再开启压缩机,从而避免PID控制下连续温度超调,其控制逻辑为:

$$N_{\text{output}} = \begin{cases} N_{\text{set}} & T_c \geq T_w \\ 0 & T_c < T_w \end{cases} \quad (17)$$

式中: $N_{\text{output}}$ 为PID输出控制信号; $T_c$ 为电池组实际温度; $T_w$ 为目标温度,本文设定为 $32\text{ }^\circ\text{C}$ 。

当电池组实际温度大于等于 $T_w$ 时,PID输出信号为 $N_{\text{set}}$ ;当电池组实际温度小于 $T_w$ 时,PID输出信号为0。

### 3.4 启停-模糊PID控制方法

结合上述启停控制节省功耗及模糊控制温度响应快的优点,设计含有启停逻辑功能的模糊PID控制方法,其流程如图4所示。

## 4 模型参数及验证

在前述模型中,压缩机和冷凝器模型在AMESim中

已有相对成熟的模块,本文仅针对电池模型进行验证。在AMESim中搭建的动力电池直冷系统一维热仿真模型如图5所示,主要包括压缩机调节模块、电池冷却模型、动力总成模块、控制策略模块和材料参数模块。

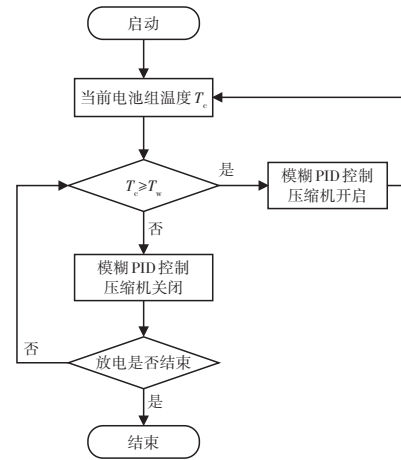


图4 启停-模糊PID控制流程

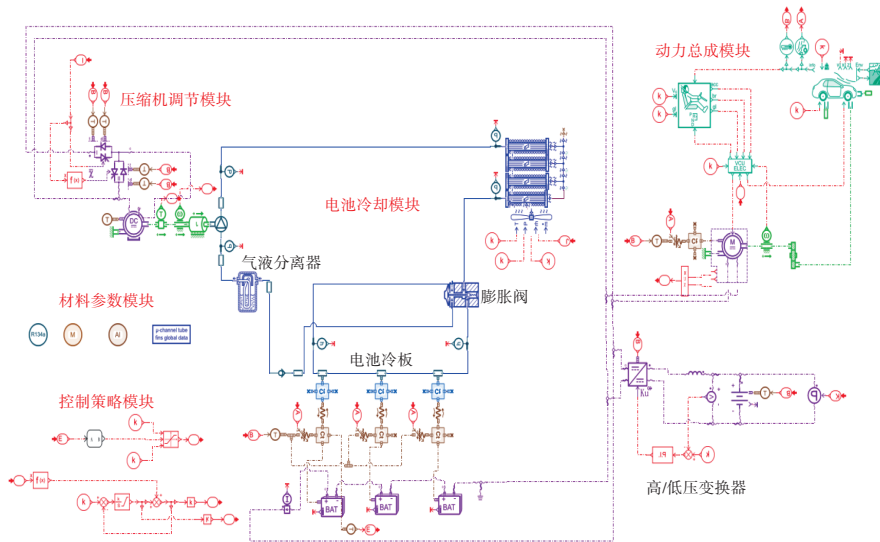


图5 动力电池直冷系统一维热模型

### 4.1 电池模型参数

本文直冷系统主要参数如表2所示<sup>[18]</sup>,制冷剂选用R134a。

### 4.2 电池模型验证

基于式(12)~式(14),在AMESim中构建动力电池集总参数模型,并利用电池充放电试验数据对模型进行验证。电池充放电试验平台如图6所示。设置环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,分别进行 $0.3\text{ C}$ 、 $1\text{ C}$ 和 $2\text{ C}$ 放电试验,电池温度利用布置在其外表面中心位置的热电阻进行测量。电池在放电过程中温度和电压的仿真与试验结果如图7所示。经计算,电池在 $0.3\text{ C}$ 、 $1\text{ C}$ 和 $2\text{ C}$ 放电过程中,其模拟温升和模拟电压绝对误差的平均值分别为 $0.18\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.13\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.25\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.018\text{ V}$ 、 $0.021\text{ V}$ 、 $0.017\text{ V}$ 。引起上述

误差的原因可能包括以下两点:一是为减少计算量,本文对电池模型进行了一维简化,未考虑电池几何空间上的参数分布特性;二是模型参数参考了相关文献中的数值,与电池实际参数可能存在一定误差。尽管如此,上述仿真结果仍与试验结果具有较好的一致性,可以用于动力电池直冷系统的评价分析。

## 5 结果与讨论

本文控制策略目标温度为 $32\text{ }^\circ\text{C}$ ,为方便比较,选定温度 $32.1\text{ }^\circ\text{C}$ 为控制策略完成温度调节目标值。其中,动力电池组由3.1中所述电池组成,成组方式为90串1并,额定容量为 $26\text{ A}\cdot\text{h}$ ,电压为 $342\text{ V}$ ,电池初始温度均设置为环境温度。为验证以上控制策略在实际行驶工况

下的控制效果,拟定控制策略在世界轻型汽车测试循环工况(World Light Vehicle Test Cycle, WLTC)下运行,包括低速、中速、高速和超高速四个阶段,每个阶段均设置停车、制动、加速等不同的行车动作,可以较好反映车辆性能,如图8所示。

表2 动力电池及直冷系统主要参数

组件	参数	数值
压缩机	转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	0~5 000
	排量/ $\text{m}^3$	$3.4 \times 10^{-5}$
冷凝器	翅片管长度/mm	559
	翅片管宽度/mm	16
	制冷剂侧微通道面积/ $\text{mm}^2$	9
	空气侧截面积/ $\text{mm}^2$	180
	翅片周期/mm	1.3
	翅片厚度/mm	0.08
	翅片长度/mm	8.2
直冷板	冷板材料比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	880
	冷板材料导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	237
	额定容量/ $\text{A} \cdot \text{h}$	26
动力电池	额定电压/ $\text{A} \cdot \text{h}$	2.8~4.2
	平均密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 700
	平均比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	975

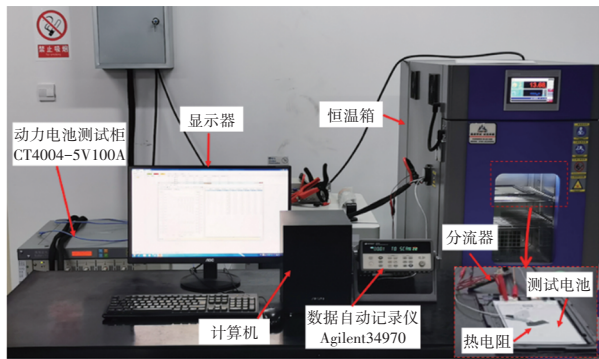
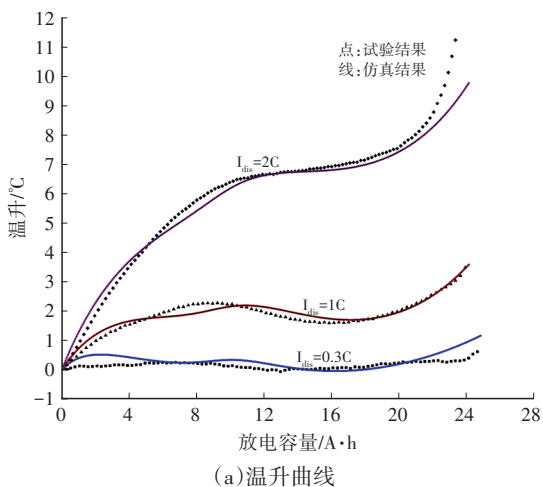
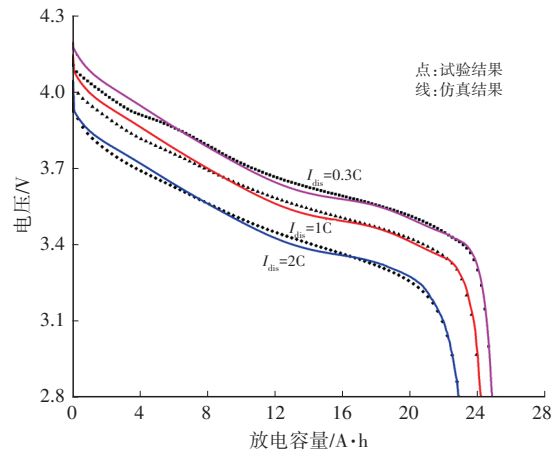


图6 动力电池充放电试验平台



(a) 温升曲线



(b) 电压曲线

图7 电池温度与电压的实验与仿真结果

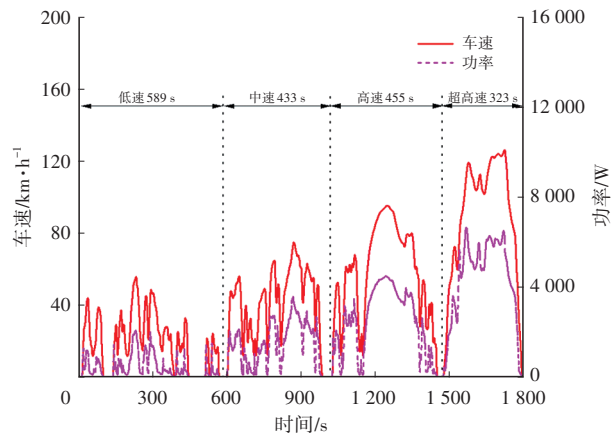


图8 WLTC工况车速和功率

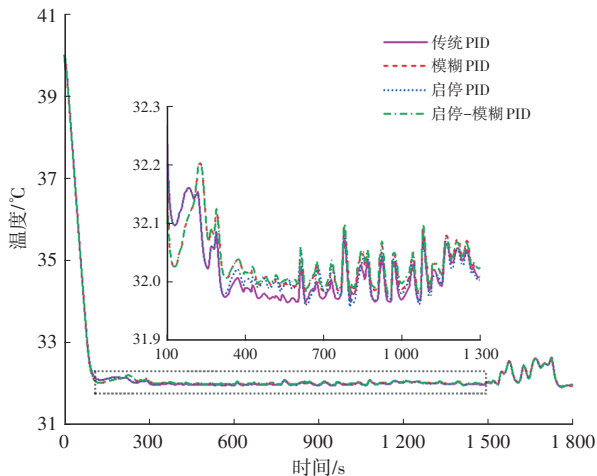
### 5.1 不同环境温度对电池冷却效果的影响分析

为验证上述控制策略在不同环境温度下的电池冷却效果,分别设定环境工况为 $40^\circ\text{C}$ (工况1)、 $45^\circ\text{C}$ (工况2)和 $35^\circ\text{C}$ (工况3),在WLTC工况下进行放电试验。

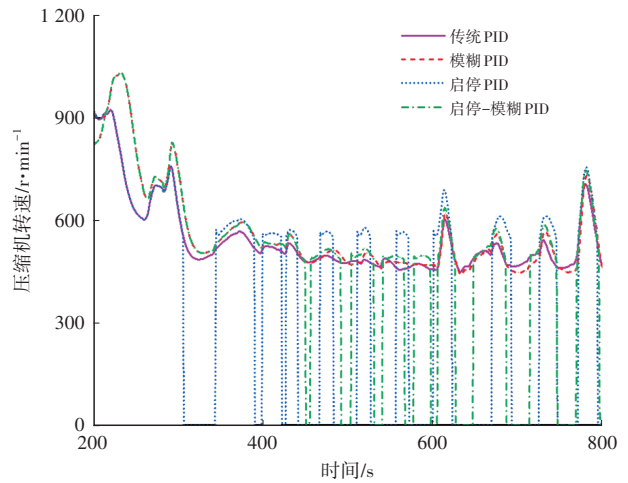
图9为动力电池在不同环境温度下控制策略对比图。从图9a中可以看出,传统PID与启停PID、模糊PID与启停-模糊PID在未达到目标温度前,温度曲线一致,在达到目标温度后,由于启停逻辑的控制,温度曲线出现分支。表3为上述不同环境温度下不同控制策略的冷却效果对比结果。根据表3,传统PID和模糊PID的温度响应时间分别为124 s和106 s,模糊PID响应时间比传统PID快14.5%。模糊PID超调时长相较传统PID减少40.9%,两种控制方法的功耗基本相同。由此可见,相比传统PID控制,模糊PID控制在不增加系统功耗的情况下可显著缩短系统响应时间和超调时长。尽管如此,模糊PID仍存在与传统PID控制相同的温度连续超调及功耗较大的问题。为缓解该问题,进一步考虑了系统的启停控制。该方法在电池温度发生超调后,通过启停控制逻辑使压缩机关闭;当电池温度高于目标温度时,压缩机重启。由图9b可以看出,在含有启停功能

的PID控制方法下,压缩机出现启停现象,从而引起电池温度在目标温度值附近波动,但能有效减少连续超调造成的功耗浪费。经计算,传统PID控制在增加启停功能后功耗减少9.8%;模糊PID控制在增加启停功能后功耗减少5.9%。由表3可看出,启停-模糊PID保留了模糊PID响应时间快及超调时长短的特点,其相较于传统PID控制,响应时间提升14.5%,超调减少57.1%,功耗减少5.9%。

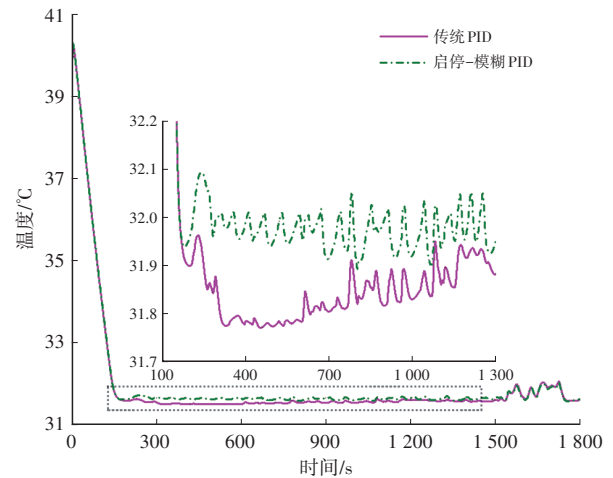
由图9c可知,启停-模糊PID控制相比传统PID控制方法,可使电池温度更好地在目标温度附近波动,从而给缩短超调时长;由图9d可知,启停-模糊PID控制下的电池温度相较传统PID可以更快到达响应温度,加快响应时间。由表4可知,随着环境温度的降低,启停-模糊控制方法下的响应时间缩短、超调时长和功耗均有减少,这是由于PID控制根据电池起始温度与目标温度的差值进行控制,当环境温度较高时,其与目标温度差值较大,导致PID输出的控制量较大,因此制冷系统产生的制冷量较大,电池温度更容易发生过量超调,压缩机功耗随之增大;与此同时,启停-模糊控制对传统PID控制超调时长和功耗的优化效果随温度的下降呈先增后减的趋势。引起这一现象的原因可能这环境温度越高导致PID积分环节较大,使得制冷量较大,在温度曲线回调后,又很快发生超调,随着温度降低,这一影响逐渐减小,因而启停-模糊控制对传统PID控制的优化呈增强趋势;但随着温度的进一步降低,整体超调减少,启停-模糊控制对传统PID控制的优化因而又呈下降趋势。当环境温度从45℃降低到35℃时,启停-模糊PID控制的响应时间从156s缩短到52s,超调时长从1087s缩短至78s。在35℃、40℃和45℃的环境温度下,启停-模糊PID控制相比传统PID控制,超调时长分别缩短了3.7%、57.1%和24.8%,功耗分别降低了0.8%、5.9%和19.1%。



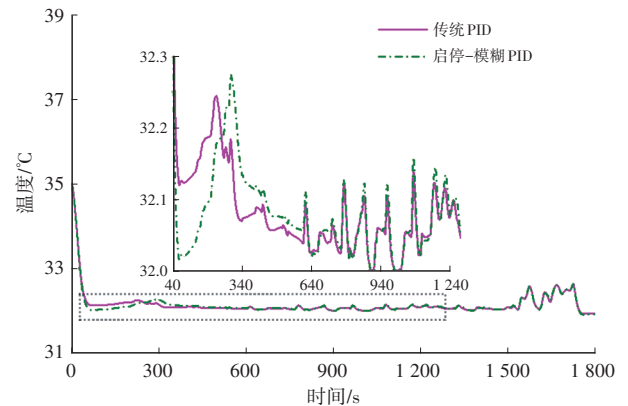
(a) 工况1温度控制对比



(b) 工况1转速对比



(c) 工况2温度对比



(d) 工况3温度对比

图9 不同环境温度下控制策略对比

## 5.2 WLTC工况下不同行驶速度对电池冷却效果的影响分析

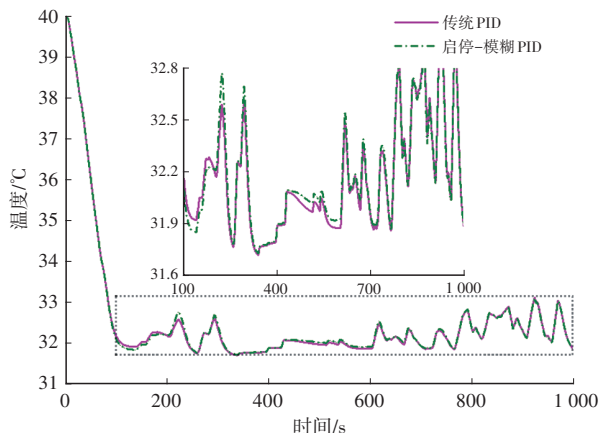
为验证在不同行驶速度下上述控制策略对电池冷却效果的影响规律,本文设定40℃以WLTC的功率行驶1000s的放电过程为工况5,将WLTC实际行驶车速提高一倍,设为WLTC-A。同理,将WLTC实际行驶车速减小50%,设为WLTC-B,同样在40℃行驶1000s,对应的放电过程分别为工况4(WLTC-A)和工况6(WLTC-B)。

表3 不同环境温度下冷却策略对比

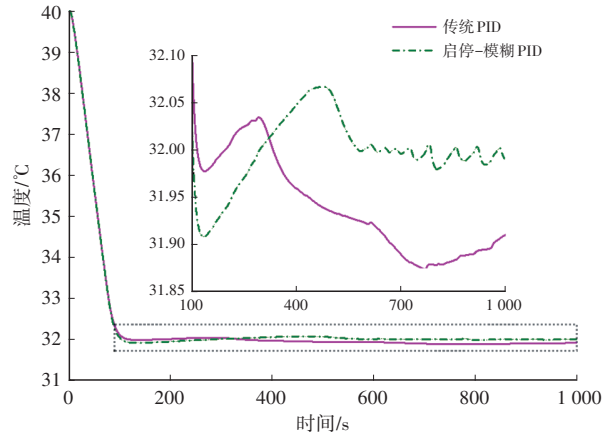
工况	冷却策略	响应时间/s	超调时长/s	功耗/kJ
1	传统PID	124	755	288.82
	模糊PID	106	446	288.63
	启停PID	124	619	260.65
	启停-模糊PID	106	324	271.74
2	传统PID	156	1 446	506.96
	启停-模糊PID	156	1 087	410.31
3	传统PID	308	81	112.31
	启停-模糊PID	52	78	111.38

注:响应时间为电池组温度第一次到达目标温度(32.1℃)时的时间;超调时长为电池组温度低于目标温度的时间总和;功耗为压缩机总功耗。

图10为电池在工况4和工况6下运行时,启停-模糊PID控制和传统PID控制策略下的电池温度对比结果。对比图9a和图10可知,随着实际行驶车速的减小,电池温度曲线逐渐趋于平缓,且在工况6下,温度曲线超调时长最长。表4为不同车速下启停-模糊PID控制和传统PID控制的冷却效果对比。由表5可以看出,随着行驶车速减小,超调时长增加,功耗减少,且启停-模糊PID控制对传统PID控制的优化效果越发明显。这是由于,在同一控制下,低车速下电池产热量小于高车速下产热量,因此,低车速更容易发生过量超调。在工况4下,传统PID响应时间较快,主要原因是,本文设置的响应温度为32.1℃,在第113s前,工况4温度均比其余两种工况(工况5和工况6)温度高,但此刻其余两种工况温度未达到响应温度,且由于工况4较其余两种工况更恶劣,此时PID基于温度差值的控制量大于其余两种工况,因此在电池冷却循环中产生冷媒的温度低于其余两种工况,当汽车在第101s停止时,其温度下降速度快于其余两种工况,并在第113s温度低于其余两种工况,致使温度更早到达响应温度。启停-模糊控制相较传统PID的效果随着车速的降低,响应时间加快由6.0%提升到14.5%、超调时长缩短由30.1%提升到75.5%、功耗节省量由0.4%提升到4.7%。



(a)工况4温度对比



(b)工况6温度对比

图10 不同车速下启停-模糊和传统PID控制效果对比

表4 不同车速下冷却策略对比

工况	冷却策略	响应时间/s	超调时长/s	功耗/kJ
4	传统PID	116	256	331.20
	启停-模糊PID	109	179	329.87
5	传统PID	124	546	198.17
	启停-模糊PID	106	196	187.65
6	传统PID	124	668	192.91
	启停-模糊PID	106	164	183.92

## 6 结束语

本文基于PID控制和模糊逻辑控制设计了一种面向电动汽车动力电池制冷剂直冷系统的控制策略,并考虑的系统启停功能。随后,通过AMESim/Simulink联合仿真建立了整车动力电池热管理系统模型,进而研究了所提出的启停-模糊PID控制和传统PID控制在不同环境温度和汽车行驶速度下的电池冷却效果,结果表明:与传统PID控制相比,启停-模糊PID控制具有响应时间快、超调时间短及功耗小的优点。动力电池在较低环境温度下放电时,启停-模糊PID控制对响应时间的优化效果最好,在工况3下其响应时间仅为传统PID响应时间的16.9%;在较低车速条件下放电时,启停-模糊PID控制对超调时长的优化效果最明显,在工况6下其超调时长仅为传统PID超调时长的24.6%;在较高环境温度下放电时,启停-模糊PID控制对功耗优化最明显,在工况2下为其功耗仅为传统PID功耗的80.9%。

### 参考文献

[1] MOUSAVI S, ZADEHKABIR A, SIAVASHI M, et al. An Improved Hybrid Thermal Management System for Prismatic Li-Ion Batteries Integrated with Mini-Channel and Phase Change Materials[J]. Applied Energy, 2023, 334.

[2] LIU H Q, JIN C W, LI H, et al. A Numerical Study of PCM

- Battery Thermal Management Performance Enhancement with Fin Structures[J]. *Energy Reports*, 2023, 9(S7): 1793–1802.
- [3] AKULA R, BALAJI C. Thermal Management of 18650 Li-Ion Battery Using Novel Fins-PCM-EG Composite Heat Sinks[J]. *Applied Energy*, 2022, 316.
- [4] 练晨, 王亚楠, 何鑫, 等. 相变材料在汽车动力电池热管理中的应用新进展[J]. *汽车技术*, 2019, 2: 38–47.  
LIAN C, WANG Y N, HE X, et al. New Progress in Application of Phase Change Material in Thermal Management of Automotive Power Battery[J]. *Automobile Technology*, 2019(2): 38–47.
- [5] 申明, 高青, 王炎, 等. 电动汽车电池热管理系统设计与分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(7): 1398–1406.  
SHEN M, GAO Q, WANG Y, et al. Design and Analysis of Battery Thermal Management System for Electric Vehicle[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(7): 1398–1406.
- [6] 杨世春, 周思达, 张玉龙, 等. 车用锂离子电池直冷热管理系统用冷媒研究进展[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(11): 2123–2132.  
YANG S C, ZHOU S D, ZHANG Y L, et al. Review on Refrigerant for Direct Cooling Thermal Management System of Lithium-Ion Battery For Electric Vehicles[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(11): 2123–2132.
- [7] TANG A K, YANG J Z, YANG P, et al. Optimization and Working Performance Analysis of Liquid Cooling Plates in Refrigerant Direct Cooling Power Battery Systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 231.
- [8] XIE Y, OU J Z, LI W, et al. An Intelligent Eco-Heating Control Strategy for Heat-Pump Air Conditioning System of Electric Vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216.
- [9] 张文俊, 喜冠南, 朱建新, 等. 混合动力汽车用锂电池组温升控制策略研究[J]. *汽车技术*, 2020(3): 10–14.  
ZHANG W J, XI G N, ZHU J X, et al. Research on the Temperature Rise Control Strategy for Lithium-Ion Battery Pack in Hybrid Electric Vehicles[J]. *Automobile Technology*, 2020(3): 10–14.
- [10] 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 B C, CEN J W, JIANG F M. 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.
- [11] JIANG D, DONG Z. Dynamic Matrix Control for Thermal Power of Multi-Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor Plants[J]. *Energy*, 2020, 198.
- [12] LIANG Z J, WANG J Y, WANG Y, et al. Transient Characteristics of A Solid Oxide Electrolysis Cell under Different Voltage Ramps: Transport Phenomena Behind Overshoots[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 279.
- [13] CHEN S Q, BAO N S, AKHIL G, et al. A Fast Charging - Cooling Coupled Scheduling Method for A Liquid Cooling-Based Thermal Management System for Lithium-Ion Batteries[J]. *Engineering*, 2021, 7(8): 1165–1176.
- [14] YU Y, CHEN M, ZAMAN S, et al. Thermal Management System for Liquid-Cooling PEMFC Stack: From Primary Configuration to System Control Strategy[J]. *eTransportation*, 2022, 12.
- [15] LIU Z M G, LIU Z X, LIU J Z, et al. Thermal Management with Fast Temperature Convergence Based on Optimized Fuzzy PID Algorithm for Electric Vehicle Battery[J]. *Applied Energy*, 2023, 352.
- [16] YANG N X, FU Y H, YUE H Y, et al. An Improved Semi-Empirical Model for Thermal Analysis of Lithium-Ion Batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 311: 8–20.
- [17] LIANG Z J, WANG J Y, WANG Y, et al. Transient Characteristics of A Solid Oxide Electrolysis Cell under Different Voltage Ramps: Transport Phenomena Behind Overshoots[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 279.
- [18] 高永利. 某型纯电动汽车热管理系统全局优化控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.  
GAO Y L. Research on Global Optimization Control Strategy of Thermal Management System for A Certain Electric Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2023.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2024年8月16日。