

同行专家业内评价意见书编号： 20250858251

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名： 王家锋

学号： 22260458

申报工程师职称专业类别（领域）： 能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年05月14日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

知识掌握

在参与新能源汽车热管理系统的研究过程中，我在理论和实践两个维度上都大大增强了对专业知识的掌握。通过使用AMESim商业软件建立电动汽车热管理系统的仿真模型，我深入理解了热管理系统的复杂性以及不同环境温度和汽车驾驶循环对系统能耗的影响。这一过程不仅要求对传热学、流体力学和热力学等基础理论有扎实的掌握，还需要熟悉仿真软件的操作和模型建立方法。通过实际的仿真建模，我进一步理解了热管理系统中各个子系统的相互作用以及如何通过调整模型参数来优化系统性能。此外，我主要参与了实验台架的改造以及汽车热管理仿真模型的建立。通过团队的协作，最终完成了电动汽车直冷热管理系统的模型构建，并成功搭建了基于AMESim平台的仿真系统。此外，我们还利用实验数据对仿真模型进行了验证，确保了模型的准确性和可行性。我能够将理论知识与实际数据结合起来，理解模型的误差来源，并进行相应的修正。这一系列的训练大大提升了我对新能源汽车热管理系统的全面认识和专业知识的掌握。

能力提升

在研究过程中，我不仅学会了如何建立复杂的仿真模型，还在解决实际问题的过程中提升了我的综合能力。首先是技术能力的提升。在建立电动汽车直冷热管理系统和AMESim仿真系统时，我面对了模型复杂性和计算资源紧张的挑战。为了解决这个问题，我学习并应用了简化模型的方法，通过简化一些非关键变量和优化计算步骤，显著提升了仿真的效率。这不仅增强了我的技术能力，还提高了我在面对复杂问题时的解决能力。此外，我在实验台架的改造过程中积累了丰富的实践经验，特别是在设备兼容性问题，我学会了如何选择和更换传感器硬件，以确保数据采集的准确性。这些实践经历极大地增强了我的动手能力、问题分析和解决实际问题的能力。

素质养成

素质的养成是这一研究经历中我个人成长的重要方面。通过参与实验台架的改造和仿真模型的建立，我养成了更加严谨细致的工作态度。在实验台架改造过程中，由于传感器与采集软件之间的兼容性问题，我必须对每一个细节进行仔细检查和测试，这不仅要求耐心和细致，还培养了我面对技术挑战时的毅力和责任感。此外，在面对仿真模型复杂性和计算资源紧张的挑战时，我学会了如何冷静分析问题，并通过逐步优化来解决问题，这种遇到困难不退缩、寻找最佳解决方案的精神也在这一过程中得到了培养和增强。通过这次研究，我还学会了如何高效地与团队成员合作，在分工协作中发挥个人优势，同时尊重和支持团队其他成员的工作，这为我今后在团队中发挥作用打下了坚实的基础。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

在上海适宇智能科技有限公司的工程实践中，我参与了电池直冷热管理系统控制研究项目，该项目聚焦于解决系统两相流流动沸腾不稳定性或多干扰、强耦合及非线性特征带来的控制难题。在导师和工程师的指导下，我与团队搭建了等效锂离子电池直冷热管理系统试验台，包含热管理制冷剂回路和冷却水回路，涵盖涡旋压缩机、电池直冷板等关键部件。针对口琴管式冷板流液不均问题，采用上下斜对称设计均流管进出口，使通道间流动阻力相等；为解决科里奥利质量流量计测量气液两相流不准确的问题，在其前安装立式储液罐实现气液分离，确保测量精准可靠。鉴于直接使用锂离子电池实验存在热失控风险，我们设计等效电池，以磷酸铁锂电池为蓝本，基于其热物性参数，选定 410

铁素体不锈钢作为等效材料，通过调整高度使总热容相近，并在等效电池顶部中央放置 PTC 加热片模拟电池发热，同时贴附导热硅脂垫片降低接触热阻。实验台搭建后，开展变工况实验，通过 Matlab

编写代码对数据进行快速傅里叶变换（FFT），发现微通道冷板入口存在复合型振荡现象，而减小膨胀阀开度、增大压缩机转速可有效抑制压降型振荡，如膨胀阀开度从 300 step 降至 200 step 时，振幅减少 85%， “高转速 -

低开度” 参数协同调控机制为压降型振荡抑制提供了切实可行的解决方案。

针对直冷电池热管理系统控制难度大的问题，我们引入模型预测控制（MPC），凭借其多目标滚动优化与强鲁棒性特点，开展预测模型建立工作。将电池直冷板和冷凝器视为动态模型，运用一维建模方法，依据质量守恒定律和能量守恒定律构建制冷剂侧状态参数模型，同时借助管壁能量守恒定律对电池直冷板管壁温度进行建模，搭建起移动边界系统模型，并将涡旋压缩机和电子膨胀阀建模为稳态模型。通过对电池能量守恒方程推导，得到电池温度集总参数动态模型，并在系统稳态工作点实施线性化处理，获取状态空间表达式。以减小系统能耗和最小化电池温度设定值跟踪误差为优化目标，运用 MPC

算法求解最优控制序列并滚动优化。在电池热管理系统运行过程中，设定控制目标，确保电池温度曲线紧密贴合设定温度，同时兼顾降低能耗。实验对比显示，MPC 策略在初始温度 50℃、热负荷 3000 W 下，仅需 262 秒将电池温度降至并维持 30℃，而 PID 控制策略需 965 秒。在 WLTC 工况仿真实验中，MPC 能快速应对热负荷变化，将电池温度标准差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内，标准差仅 0.044°C ，相较 PID 控制（ 1.2°C ）提升 27 倍鲁棒性。

通过参与该项目，我的专业技能、实践能力、团队协作与沟通能力等都得到了显著提升。我深入掌握了电池直冷热管理系统的复杂原理与结构，熟练运用 Matlab

编程进行数据分析，学会了精准运用专业工具获取高质量数据。在实验台搭建与调试过程中，积累了丰富的实践经验，锻炼了动手能力和问题解决能力。同时，在团队合作中，学会了如何发挥自身优势，与他人紧密配合，共同推动项目进展。这段经历不仅让我在技术层面收获颇丰，更在综合素质上实现了飞速成长，为我未来的职业发展奠定了坚实的基础。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

我在上海适宇智能科技有限公司的工程实践过程中，我参与了电池直冷热管理系统控制研究的项目中，在现场导师与资深工程师的指导下，发现由于直冷电池热管理系统具有多干扰、强耦合及非线性特征增加了系统的控制难度，传统的PID控制难以很好在电池发热量剧烈变化的情况下把电池温度控制在最佳范围内，而根据电池工作特性，容易知道电池温度过低导致容量衰减加速，电池温度过高导致热失控风险激增。

针对这个问题——

直冷电池热管理系统具有多干扰、强耦合及非线性特征增加了系统的控制难度。我们发现模型预测控制凭借多目标滚动优化与强鲁棒性特点，为复杂热管理系统控制提供了新思路，为了设计先进的直冷热管理控制算法，因此我们首先开展模型预测控制算法中的预测模型建立工作，将电池直冷板和冷凝器视为动态模型，通过该方法进行一维建模。在制冷剂侧的状态参数建模中，应用了质量守恒定律和能量守恒定律。而电池直冷板的管壁温度则通过管壁能量守恒定律进行建模，从而得到直冷热管理系统的移动边界系统模型。在这一模型中，涡旋压缩机和电子膨胀阀被建模为稳态模型。此外通过对电池的能量守恒方程进行推导，得到了电池温度的集总参数动态模型，并在系统稳态工作点对其进行线性化处理，进而获得系统在稳态工作点的状态空间表达式。以减小系统能耗和最小化电池温度设定值跟踪误差为优化目标，运用模型预测控制算法求解最优控制序列，并将最优控制序列的第一项施加于控制对象，随后进行滚动优化。在电池热管理系统的运行过程中，我们设置的控制目标是缩小电池温度与设定值之间的偏差，从而确保电池的高效和安全运行，同时控制过程还应考虑降低直冷

热管理系统的能耗。因此，在电池温度预测控制方案中，首先，使电池温度曲线尽可能接近设定温度；其次，考虑到压缩机转速与电池热管理系统能耗之间的直接关系，在保障电池可靠工作的前提下，应尽量维持较低的压缩机转速，以减少系统能耗。基于以上策略，与PID控制策略对比：将电池的初始温度从50℃迅速降至30℃，在电池热负荷恒定为3000 W的条件下进行实验。，在相同的初始条件和热负荷下，MPC策略需要262秒将电池温度降至并维持在30℃，而PID控制策略则需要965秒。这一实验结果表明，MPC在电池温度控制方面展现出显著的优势。为对比MPC与PID控制策略在电池温度控制的鲁棒性差异，在仿真实验中采用WLTC（全球统一轻型车辆测试循环）驾驶循环工况。通过AMESim软件中已标定的锂离子电池模型获取动态热负荷数据，MPC通过预测时域内的优化求解，能够给出较大幅度的控制信号变化，快速应对热负荷变化，可以稳定地把电池温度控制在30℃，使电池温度标准差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内，如图 5.4 (b)所示电池温度变化；而PID控制由于仅依赖温度与设定值的偏差进行反馈调整，存在其滞后补偿特性，无法快速应对热负荷的剧烈波动，导致电池温度大幅波动。PID控制的电池温度最高偏移到32.3℃，最低漂移到27.1℃。MPC通过预测时域内的扰动补偿策略，将电池温度标准差控制在0.044℃，相较PID控制（1.2℃）提升27倍鲁棒性。

(二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利（含发明专利申请）、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申请时间等	刊物名称/ 专利授权或申请号等	本人排名/ 总人数	备注
电池直冷热管理系统的动态建模及模型预测控制研究	核心期刊	2025年02月19日	制冷学报	1/2	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 84 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.2 年（要求1年及以上） 考核成绩： 80 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名：王家锋	

工作单位考核评价：
各
章）：2015年5月14

日常表现考核评价	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价： ☒优秀 ☐良好 ☐合格 ☐不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字（公章）： 2025年5月14日
申报材料审核公示	根据评审条件，工程师学院已对申报人员进行材料审核（学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况），并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日，具体公示结果如下： ☐通过 ☐不通过（具体原因： ） 工程师学院教学管理办公室审核签字（公章）： 年 月 日

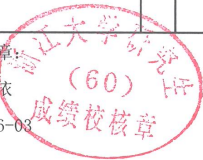
浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号：22260458	姓名：王家锋	性别：男	学院：工程师学院	专业：能源动力	学制：2.5年
毕业时最低应获：29.0学分	已获得：31.0学分			入学年月：2022-09	毕业年月：
学位证书号：			毕业证书号：		
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	创新设计方法		2.0	通过	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	高等反应工程		4.0	70	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	84	专业学位课
2022-2023学年秋季学期	工程数值分析		2.0	84	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	工程伦理		2.0	85	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	智慧能源系统工程		2.0	86	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	91	专业学位课
2022-2023学年秋冬季学期	研究生英语		2.0	87	公共学位课
2022-2023学年春季学期	绿色化工与生物催化前沿		2.0	87	专业学位课
2022-2023学年春季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	83	公共学位课
2022-2023学年春季学期	研究生论文写作指导		1.0	88	专业学位课
2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	73	公共学位课
2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	85	公共学位课
2022-2023学年夏季学期	现代分析测试实验		2.0	92	专业选修课
2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	79	专业学位课
	硕士生读书报告		2.0	通过	

说明：1. 研究生课程按三种方法计分：百分制，两级制（通过、不通过），五级制（优、良、中、及格、不及格）。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章：
成绩校核人：张梦依
打印日期：2025-06-03





录用通知

尊敬的 王家锋、徐象国 先生/女士：

您好！

本刊编辑部决定拟录用您的稿件（登记号：20241125002）《电池直冷热管理系统的动态建模及模型预测控制研究》。

特此通知。

此致

敬礼

《制冷学报》杂志社有限公司
2025 年 1 月 19 日



第一作者：王家锋 浙江大学宁波科创中心

网址：<http://www.zhilengxuebao.com>

地址：北京市海淀区阜成路 67 号银都大厦 10 层《制冷学报》编辑部

邮编：100142 电话：(010) 68711412 E-mail: editor@car.org.cn

电池直冷热管理系统的动态建模及模型预测控制研究

王家锋¹ 徐象国^{2, 3}

(1 浙江大学宁波科创中心 宁波 315100; 2 浙江大学制冷与低温研究所 浙江省制冷与低温技术重点实验室 杭州 310027; 3 浙江大学平衡建筑研究中心 杭州 310027)

摘要 基于制冷剂直接冷却的电池热管理系统具有多干扰、强耦合及非线性特征, 传统 PID 控制在电池温度调节过程存在超调现象且难以兼顾节能需求。基于第一性原理建立了直冷热管理系统的动态降阶模型, 并利用实验数据验证了其线性化模型。基于该模型设计了一种线性时变模型预测控制 (Model Predictive Control) 策略, 并在电池冷却和 WLTC 驾驶循环两种工况下与 PID 控制进行了对比。结果显示, 在电池发热量恒定条件下, 对比电池温度从 50°C 降至 30°C 的稳定时间, MPC 控制策略为 262 秒, 而 PID 控制策略为 965 秒, 同时 MPC 节约了 2.47% 的能耗。在 WLTC 工况中, PID 控制的温度波动较大, 最大偏差为 2.9°C, 而 MPC 能够快速响应热负荷变化, 稳定控制温度在 30°C。两种控制策略的温度变化标准差分别为 1.21°C 和 0.044°C 上, MPC 策略在温度调节速度、能效及鲁棒性方面均优于 PID 控制。

关键词 电池热管理; 直冷系统; 制冷系统建模; 模型预测控制

中图分类号 TB61+1; TP273; TM912

Dynamic modeling and model predictive control study of direct cooling thermal management system for batteries

WANG Jiafeng², XU Xiangguo^{1, 3, *}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory of Refrigeration and Cryogenic Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University Hangzhou 310027, China; 2. Ningbo Science and Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo, 315100, China; 3. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract The battery thermal management system based on refrigerant direct cooling is characterized by multiple disturbances, strong coupling and nonlinearity, and it is difficult to regulate the temperature effectively with traditional PID control. In this paper, a dynamic step-down model of the direct cooling thermal management system is established based on the first nature principle, and its linearized model is verified using experimental data. Based on this model, a linear time-varying model predictive control (Model Predictive Control) strategy is designed and compared with PID control under two operating conditions, battery cooling and WLTC driving cycle. The results show that under the condition of constant battery heat generation, the stabilization time of comparing the battery temperature from 50°C to 30°C is 262 seconds for the MPC control strategy, while it is 952 seconds for the PID control strategy, and at the same time, the MPC saves 5.57% of energy consumption. In the WLTC condition, the temperature fluctuation of the PID control is large, with a maximum deviation of 2.9°C, while the MPC is able to respond quickly to the heat load change and stabilize the control temperature at 30°C. The standard deviation of temperature change of the two control strategies is 1.7°C and 0.06°C, respectively. In summary, the MPC strategy is superior to PID control in terms of temperature regulation speed, energy efficiency and robustness.

Keywords battery thermal management; cooling based on refrigerant; refrigeration system modeling; model predictive control

由于自放电率低、储能密度高、重量轻、循环寿命长,锂离子电池被广泛应用在电动汽车中^[1,2],然而,由于其化学反应和内阻产生的热量,电池在充电和放电过程中温度会升高。如果热量不能及时消散,电池温度可能会失控,导致电池起火事故,从而危及乘客的安全和财产。因此,一套可靠的电池热管理系统(Battery thermal management system, BTMS)对于确保电动汽车的高效安全运行至关重要。几种广泛使用的电池热管理技术有^[3]:空气冷却、液体冷却、和基于制冷剂冷却(直冷)。由于直冷 BTMS 利用制冷剂相变吸收电池的热量,具有更高的热流密度,充分利用潜热量的优点^[4],能够提高冷板沿流程的均温性^[5],而且该方式去除了冷冻液循环管路,有效减轻车载重量,因此直冷 BTMS 被认为是下一代制冷技术^[6]。

由于电池热管理系统内的动力电池具有热容较大,发热量频繁变化的特点,导致温度控制系统存在的时滞性较强、干扰量大的问题,过往研究中电池热管理系统主要采用传统开关控制^[7]、比例积分微分(Proportional-Integral-Derivative Control, PID)控制策略^[8-10]、模糊控制^[11]、神经网络^[12],但是传统开关控制不可避免地会导致控制目标产生大幅波动,PID 控制、模糊控制这些控制方法的规则往往来自经验确定,当经验不足时,这些方法无法达到令人满意的控制效果,而且只根据反馈的电池温度调节压缩机转速,在运行过程没有考虑能耗优化,神经网络模型需要大量数据,而且超出训练模型范围,准确度快速下降,

预测控制因为其将反馈和优化算法结合,并通过调整不同目标变量的权重输出控制变量,具有预测,而且超出训练模型范围,准确度快速下降,预测控制因为其将反馈和优化算法结合,并通过调整不同目标变量的权重输出控制变量,具有预测系统未来动态及滚动优化的特性,被认为是解决上述控制问题的有效手段。建立可靠预测模型是设计模型预测控制的第一步,有学者通过数据驱动建立预测模型^[13-15],为提升 J 型电池组的风冷热管理系统的性能,Liu Ying 等^[15]设计了一种结合自适应机制的智能预测控制系统。该研究通过神经网络算法构建动态优化模型,成功实现了电池模组内部温差降低 34.6%的调控效果,实验结果表明系统能效比提升至 92.7%,显著优于传统 PID 控制策略。Wang Haidan 等^[16]提出一种跨临界 CO₂座舱热管理系统的模型预测控制器,通过控制压缩机、电子膨胀阀和风扇,实现最佳排气压力下的实时运行。仿真结果表明,与 PI 控制器相比,以节能为主目标的 MPC 可以节约能耗 20.27%,以舒适为主目标的 MPC 可以节能 13.33%。但是建立数据驱动预测模型需要大量数据作为支撑,提高了预测控制算法的开发成本,而且在超出数据范围的工况下预测准确性会变差,也有学者通过物理机理建模,张腾等^[17]结合物理机理和数据驱动建立电池液冷热管理预测模型,设计了电池冷却系统 MPC 控制策略,并与 PI 控制策略在不同放电倍率下对比,提高了对电池的温度控制效果;Pan Chaofeng 等^[18]提出了一种基于线性时变模型预测控制的电池液冷热管理优化策略。该策略通过三维热流分析建立降阶模型,利用分段线性化方法减少计算复杂度,并结合粒子群优化算法优化控制参数。仿真结果表明,与传统控制器相比, MPC 显著降低了温度波动和能耗,能效提升达 21.2%。Guo

基金项目:国家自然科学基金项目(51976181),中央高校基本科研业务费专项资金(2022FZZX01-09)。(The project was supposed by National Natural Science Foundation of China(No.51976181) and Central University Basic Scientific Research Business Expenses Special Fund(No.2022FZZX01-09))

Rong 等^[19]提出了一种基于动态规划的 MPC 算法用于电池液冷热管理系统,仿真结果表明,与基于开关和比例控制的策略相比,该算法在极端温度下最高节省 77.83%能耗。虽然风冷和液冷系统中的模型预测控制已在电池热管理中取得了显著成效,但其冷媒换热过程不发生相态变化,只有温度变化,而直冷系统中制冷剂相变换热过程更加复杂,存在着传热机理和流动形态的变化,Hong 等^[20]通过实验研究不同制冷剂流量对电池直冷热管理温控效果的影响,结果表明由于两相流制冷剂与冷板发生沸腾传热,制冷剂流量调节不及时,不仅会使得电池温度振荡,还会延长冷板压力降振荡时间,从而加快直冷板热疲劳损坏和机械损坏,综上,相比风冷和液冷热管理系统,直冷热管理系统的非线性和系统复杂性问题更加突出。直冷热管理系统的温度控制研究仍处于起步阶段,本文提出基于第一性原理的直冷热管理系统建模,并在稳定工作点对模型线性化后设计线性时变模型预测控制算法,与传统 PID 控制算法对比对电池温度的调节速度和抑制电池温度超调、减少电池温度振荡等方面效果。

1 电池热管理系统模型建立

该电池热管理直冷系统由涡旋压缩机、电池直冷板,钎焊板式冷凝器、电子膨胀阀、储液器、气液分离器、等效电池组成,其拓扑结构如图 1,

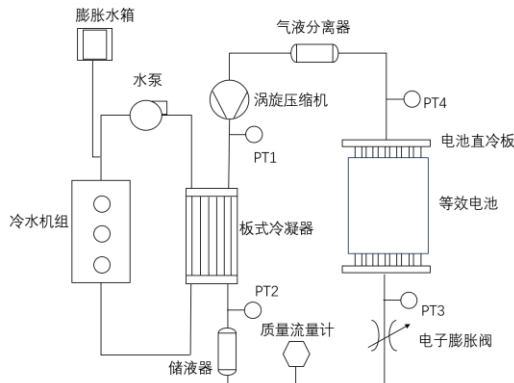


图 1 电池直冷热管理试验台结构

Fig.1 Refrigerant-based battery thermal management system test bed structure

系统的工作原理是涡旋压缩机 1 对吸入的低温低压气态制冷剂做功,排出高温高压制冷剂蒸气流经板式冷凝器,被冷却水冷凝为液体,在电子膨胀阀节流后进入电池直冷板吸热气化、流经气液分离器后进入压缩机,形成完整的制冷循环。

本模型的建模对象为已搭建的试验台,试验台设备详情见表 1,为了降低模型复杂度,对系统中的涡旋压缩机、板式冷凝器、电池直冷板三个主要设备建模,为保证冷凝器散热良好,将冷凝器冷却液侧的流量和温度设为定值,冷却水流量为 20L/min,入口温度为 32℃。

1.1 压缩机稳态模型

整个电池热管理系统主要包括蒸发器、冷凝器、压缩机、膨胀阀,涡旋压缩机,由于压缩机参数动作相较蒸发器、冷凝器内参数变化迅速,因此利用稳态模型进行建模;可假设工质热力参数均匀,采用稳态的集中参数法建立其数学模型。

压缩机压缩过程视为绝热变化过程,其模型方程为:

$$m = n_{\text{com}}/60V_{\text{com}}\eta_v\rho_{e,o} \quad (1)$$

$$h_{c,i} = h_{e,o} + p_e \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_c}{p_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{v_{\text{com},i}}{\eta} \quad (2)$$

表 1 试验台设备参数

Tab.1 Experimental bench equipment parameters

设备	类型	参数
压缩机	涡旋压缩机	排量 24cc/rev，转速 1500-6000rpm
冷凝器	钎焊板式换热器	长 208mm，宽 78mm，高 66mm
电池冷板	口琴管式直冷铝板	长 650mm，宽 220mm，高 3mm
电子膨胀阀	永磁步进电机	最大通径 1.65mm
储液器	立式	高 180mm，直径 89mm，容量 0.9L
气液分离器	卧式	高 100mm，直径 70mm，容量 0.7L
等效电池	铁素体 430 不锈钢	长 500mm，宽 300mm，高 20mm
导热垫	硅脂垫片	热导率 13W/mK，长 500mm，宽 300mm，高 3mm
冷水机组	GATMS-R5H5A0 热管理机	额定电压 400-710V，制冷量 2kW-8kW
组		
加热源	PTC 加热片	额定功率 200W，长 100mm，宽 20mm，高 6mm

1.2 电池温度变化模型

假设锂离子电池内部热源稳定且均匀分布，其能量守恒方程如下：

$$\rho_{\text{bat}}c_{\text{bat}}A_{\text{bat}}L_e\frac{dT_{\text{bat}}}{dt}=Q_{\text{bat}}+\alpha_{\text{e,o}}C_eL_e(T_{\text{bat}}-T_{\text{e,w}}) \quad (3)$$

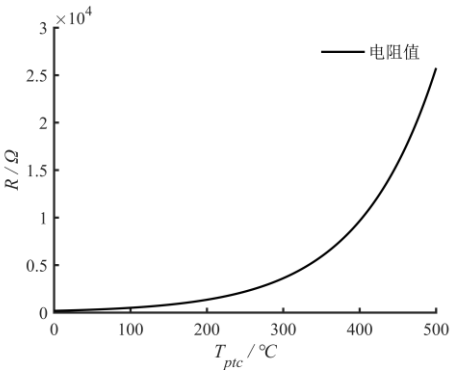


图 a 电阻随温度变化规律

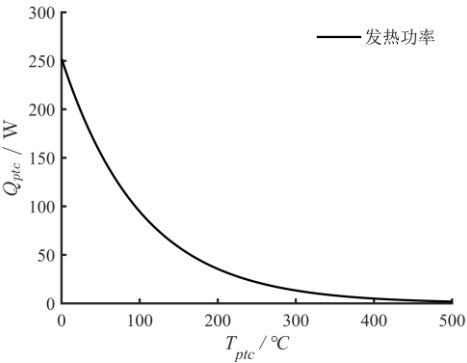


图 b 发热量随温度变化规律

图 2 PTC 电-热特性变化规律

Fig. 2 Change rule of PTC monolithic heating amount

本文在实验中是利用 PTC 电阻（Positive Temperature Coefficient）加热片模拟电池发热源，PTC 加热片的特点是，当其工作时，电阻会随着温度的升高而增大，其电阻随温度变化如图 2（a），当温度接近居里温度（270℃）时，电阻会急剧上升，使得发热功率降低，发热量随温度变化如图 2(b)，参考程文龙^[24]对 PTC 加热片热响应模型的研究，电阻与温度的关系可以表示为

$$R(T_{\text{ptc}}) = 511e^{0.098(T_{\text{ptc}}-100)} \quad (4)$$

根据焦耳定律可以计算出来单个 PTC 加热片的发热量随温度变化规律, 如图 2 (b)

$$W_{\text{ptc}} = \frac{U_{\text{ptc}}^2}{R(T_{\text{ptc}})} \quad (5)$$

实验中通过调整发热片数量来改变总发热量的, 因此总发热量可以表示为

$$W_{\text{bat}} = NQ_{\text{ptc}} \quad (6)$$

1.3 换热器移动边界模型

为了提高计算速度, 又因为蒸发器和冷凝器中换热热量主要集中在两相区, 过热区或过冷区的热量交换相对较小, 因此只对两个换热器的两相区进行集中参数建模; 在换热器两相区利用质量、能量、动量守恒方程的基本规律进行建模, 为了简化模型, 采用了如下假设:

- 1) 制冷剂在冷板内流动, 只考虑其径向传热, 忽略轴向传热;
- 2) 忽略电池直冷板内的压降;
- 3) 每个相区内的板壁温度一致;
- 4) 采用均相模型描述冷板内两相区, 即两相区内饱和温度和饱和压力相等, 气液流速相同;
- 5) 两相区内采用平均空隙率模型且假定空隙率恒定;
- 6) 制冷剂只与电池直冷板和冷凝器换热;

根据以上假设, 动量守恒方程可以忽略, 电池冷板和冷凝器可用如下方程表示:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_{e,r}}{\partial t} + \frac{\partial u_{e,r} \rho_{e,r}}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho_{e,r} h_{e,r} - p_e)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{e,r} u_{e,r} h_{e,r})}{\partial z} = \frac{4}{D_{r,i}} \alpha_i (T_{e,w} - T_{e,r}) \quad (8)$$

换热器管壁能量守恒方程:

$$\rho_w c_w A_w \frac{\partial T_{e,w}}{\partial t} = \alpha_{e,i} C_{e,i} (T_{e,w} - T_{e,r}) + \alpha_{e,w} C_{e,w} (T_{e,w} - T_{\text{bat}}) \quad (9)$$

两相流模型采用均相模型, 空泡系数可由两相滑移比计算, 空隙率计算如下:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) S} \quad (10)$$

在该模型中, 假设沿板程积分得到的平均空隙率是恒定的, 为

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{x_o - x_i} \int_{x_i}^{x_o} \gamma(x) dx \quad (11)$$

在电池冷板的两相区, 对质量守恒、能量守恒、管壁能量平衡方程沿管壁积分, 可得到冷板的两相区的状态方程:

冷板制冷剂两相区质量守恒方程:

$$A_e L_e \frac{d\rho_e}{dt} + A_e (\rho_e - \rho_{e,g}) \frac{dL_e}{dt} = 0 \quad (12)$$

冷板制冷剂两相区能量守恒方程:

$$A_e (\rho_e h_e - \rho_{e,g} h_{e,g}) \frac{dL_e}{dt} + A_e L_e \left(\frac{d\rho_e h_e}{dt} - \frac{dP_e}{dt} \right) = m(h_{e,i} - h_{e,g}) + \alpha_{e,i} C_{e,r} L_e (T_{e,w} - T_e) \quad (13)$$

利用冷板能量平衡方程沿着制冷剂流程积分, 可以得到如下方程:

$$\rho_{e,w} c_{e,w} A_{e,w} \frac{dT_{e,w}}{dt} = \alpha_{e,i} C_{e,i} (T_e - T_{e,w}) + \alpha_{e,o} C_{e,w} (T_{\text{bat}} - T_{e,w}) \quad (14)$$

上面各式的对流传热系数计算公式可见表 2, 对上式合并化简后, 写成矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{Z}_e^{-1} \mathbf{f}_e(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_e) \quad (15)$$

状态变量 $\mathbf{x}_e = [L_e, P_e, T_{e,w}, T_{\text{bat}}]$, 输入变量 $\mathbf{u}_e = [m, h_{e,i}, Q_{\text{bat}}]$, 其中 $\mathbf{Z}_e$ 和 $\mathbf{f}_e$ 分别为:

$$\mathbf{Z}_e = \begin{bmatrix} a_{e,11} & a_{e,12} & 0 & 0 \\ a_{e,21} & a_{e,22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{e,33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{e,44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{f}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ m(h_{e,i} - h_{e,g}) + \alpha_{e,r} C_{e,r} L_e (T_{e,w} - T_e) \\ \alpha_{e,r} C_{e,r} (T_e - T_{e,w}) + \alpha_{e,w} C_{e,w} (T_{\text{bat}} - T_{e,w}) \\ Q_{\text{bat}} + \alpha_{e,w} C_{e,w} (T_{\text{bat}} - T_{e,w}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$\mathbf{Z}_e$ 中的元素如下:

$$a_{e,11} = A_e (\rho_e - \rho_{e,g})$$

$$a_{e,12} = A_e L_e \left(\frac{\partial \rho_e(P_e, h)}{\partial P_e} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_e(P_e, h)}{\partial h_e} \frac{dh_e(P_e)}{dP_e} \right)$$

$$a_{e,21} = A_e (\rho_e h_e - \rho_{e,g} h_{e,g})$$

$$a_{e,22} = \left[\frac{d(\rho_g h_g)}{dP_e} \gamma_e + \frac{d(\rho_l h_l)}{dP_e} (1 - \gamma_e) - 1 \right]$$

$$a_{33} = \rho_{e,w} c_{e,w} A_{e,w}$$

$$a_{44} = \rho_{bat} c_{bat} A_{bat}$$

同理，根据质量、能量守恒方程，冷凝器的两相区状态方程也可以写成

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{Z}_c^{-1} \mathbf{f}_c(\mathbf{x}_c, \mathbf{u}_c) \quad (18)$$

状态变量 $\mathbf{x}_c = [L_c, P_c]$ ，输入变量 $\mathbf{u}_c = [\dot{m}_{c,i}, h_{c,i}]$ ，

其中 $\mathbf{Z}_c$ 和 $\mathbf{f}_c$ 分别为：

$$\mathbf{Z}_c = \begin{bmatrix} a_{c,11} & a_{c,12} \\ a_{c,21} & a_{c,22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{f}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ m(h_{c,i} - h_{c,l}) + \alpha_{c,r} C_{c,r} L_c (T_{c,water} - T_{c,r}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$\mathbf{Z}_c$ 中的元素如下：

$$a_{c,11} = A_c (1 - \gamma_c) (\rho_{c,l} - \rho_{c,g})$$

$$a_{c,12} = A_c L_c \left(\frac{\partial \rho_c(P_c, h_c)}{\partial P_c} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_c(P_c, h_c)}{\partial h_c} \frac{dh_c(P_c)}{dP_c} \right)$$

$$a_{c,21} = A_c (1 - \gamma_c) (\rho_{c,l} h_{c,l} - \rho_{c,g} h_{c,g})$$

$$a_{c,22} = \left[\frac{d(\rho_g h_g)}{dP_c} \gamma_c + \frac{d(\rho_l h_l)}{dP_c} (1 - \gamma_c) - 1 \right]$$

表 2 换热系数关联式

Tab 2 Heat transfer coefficient correlations

符号	换热关联式
$\alpha_{e,i}$	$\alpha_{e,i} = C_1 C_o^{C_2} \cdot \alpha_{conv} + C_3 B o^{C_4} F_1 \cdot \alpha_{conv}^{[22]}$
$\alpha_{e,o}, \alpha_{c,o}$	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \alpha_i = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_o}$
$\alpha_{c,i}$	$Nu = \frac{\alpha_r D_i}{k_l} = 4.118 Re_{eq}^{0.4} Pr_l^{1/3} [23]$

对整个热管理系统而言，将电池直冷板的四阶矩阵模型、冷凝器的二阶矩阵模型联立即可得到六阶矩阵的系统动态仿真模型：

$$\begin{pmatrix} Z_e & 0 \\ 0 & Z_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{x}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_e \\ f_c \end{pmatrix} \quad (21)$$

表 3 稳定点 x_0 的模型参数

Tab 3 Model parameters at steady point x_0

状态变量	值
L_c	0.35m
P_c	986kPa
L_e	0.361m
P_e	396.2kPa
T_{bat}	35.6765°C
$T_{e,w}$	28.9048°C

由于非线性模型描述了系统状态，计算复杂度大大增加。此外，由于系统时滞性大进行在线优化，不可避免地需要选择更长的预测范围，这会导致实时性能问题成为控制系统的缺点，为了提高模型预测控制器的求解速度，在稳定点 x_0 处对模型进行线性化处理，稳定点参数可见表 3，经过离散后，MPC 预测模型可以表示为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + d(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (22)$$

$x(k) = [L_c, P_c, L_e, P_e, T_{bat}, T_{e,w}]$ ， $u(k) = m$ ，表示输入变量为制冷剂质量流量， $d(k) = Q_{bat}$ 表示电池热负荷， W ， $y(k) = T_{bat}$ ，输出变量为电池温度，其中 A 是系数矩阵； B 是输入矩阵， C 是输出矩阵，分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0.9631 & -1.2e^{-8} & -8.814e^{-6} & -2.059e^{-9} & -5.199e^{-8} & -1.589e^{-7} \\ -5.986e^4 & 0.9805 & -14.32 & -3.334e^{-3} & 8.444e^{-2} & -0.2581 \\ 1.351e^{-6} & -4.416e^{-11} & 0.9998 & 5.203e^{-10} & -2.448e^{-6} & -4.254e^{-6} \\ -34.72 & 1.135e^{-3} & 8379 & 0.9869 & 62.88 & 109.3 \\ -7.792e^{-6} & 4.526e^{-10} & -1.644 & 9.2e^{-7} & 0.9775 & 0.01017 \\ 8.887e^{-3} & 3.707e^{-8} & 6.849e^{-2} & 4.644e^{-5} & 2.949e^{-1} & 8.166e^{-2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.201 \\ 3.575e^5 \\ 3.237e^{-3} \\ -8.317e^4 \\ -2.213 \\ -113.1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

1.4 实验验证

该试验台采用的制冷剂为 R134a，制冷剂质量流量采用科氏力质量流量计测量(测量精度为 $\pm 0.25\%$ 范围内)，制冷剂的温度压力采用盾安一体式温压

传感器测量（测量不确定度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ， $\pm 1\text{kPa}$ ），并在压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器后各布置一个。

为了验证该线性化模型，本文进行了压缩机转速调节制冷剂流量，以控制电池温度的验证实验，设定流经冷凝器的冷却水（乙二醇:水=1:1）入口温度为 32°C ，流量 $20\text{L}/\text{min}$ ，电池发热量为 3.6kW ，制冷剂充注量 950g ，通过压缩机转速的阶跃变化去验证仿真模型与实验模型动态变化的准确度，模拟电池包（PTC 加热片）的温度通过 T 型热电偶 1-3（测量不确定度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ）测量值取平均，热电偶布置如图 3 所示。

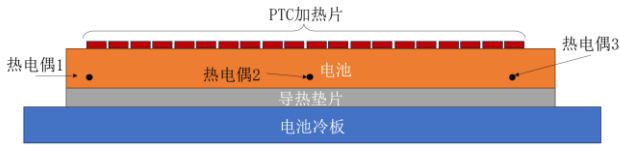
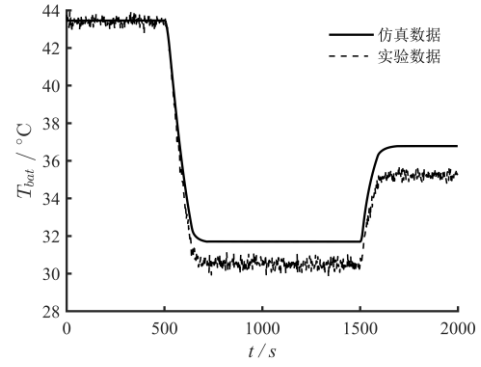


图 3 等效电池结构图

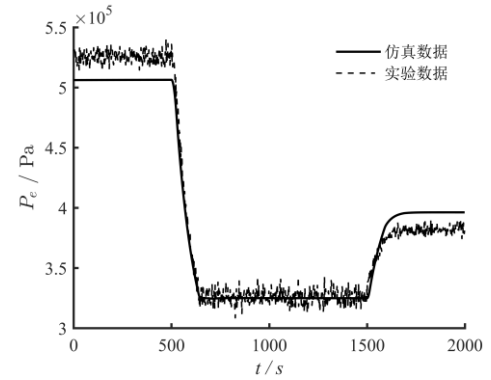
Fig 3 Equivalent battery structure diagram

如图 4，在 500 秒处压缩机转速从 3000rpm 增加到 4000rpm ，压缩机做功增大，单位时间内吸入压缩更多制冷剂，制冷剂质量流量增大，蒸发压力下降，制冷系统的制冷量增大，等效电池的散热量大于发热量，其温度逐渐下降，在 750 秒处压缩机的转速降低为 3520rpm ，由于等效电池的发热量是利用 PTC 加热片实现的，PTC 加热片的热敏特性决定了其发热量随温度下降而增大，因此该转速下电池的发热量和制冷剂提供的制冷量近似相等，电池温度保持稳定不变。

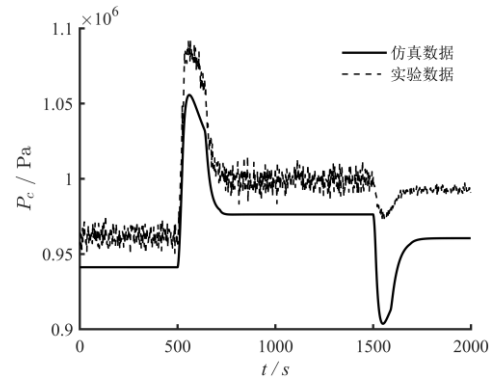
在 1500 秒处，将压缩机转速阶跃降低至 2500rpm ，系统制冷量减少，导致散热能力下降，此时等效电池的发热量大于散热量，电池包温度上升，在 1650 秒将压缩机转速调回 3310rpm ，此时电池包发热量再次与散热量相等，温度曲线再次趋于平稳。



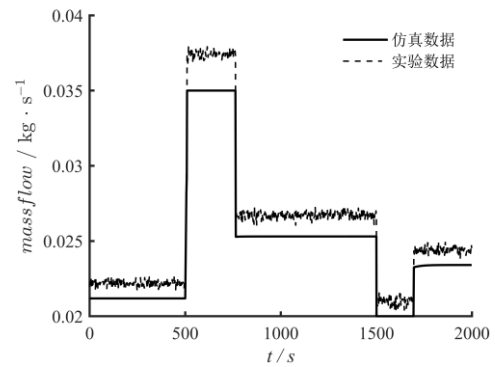
(a) 电池温度变化对比



(b) 蒸发压力变化对比



(c) 冷凝压力变化对比



(d) 制冷剂质量流量对比

图 4 压缩机转速阶跃变化系统响应曲线对比

Fig 4 Comparison of system response curves for step change in compressor speed

上述对比表明模型与实验数据的误差小于10%，说明该仿真模型对系统的压力和质量流量、电池温度满足预测要求，能够用于设计模型预测控制策略。

2 控制策略设计

2.1 PID 控制策略设计

PID 控制（比例-积分-微分控制）是一种经典的反馈控制策略，广泛应用于工业控制系统。PID 控制器通过计算控制误差（设定值与实际值之间的差异）来输出调整信号，确保系统能够稳定地达到目标。其核心内容由比例、积分、微分控制三部分组成。在设计控制器时需谨慎选择比例系数（ K_p ）、积分系数（ K_i ）、微分系数（ K_d ），以避免系统失稳或过大的超调现象。PID 控制策略通过电池实际温度与目标温度之间的反馈信号来调节压缩机转速，实现电池温度的精确控制，从而达到直冷热管理的目标。PID 控制的数学表达式如（25）所示：

$$u(t) = K_p(T_{\text{bat}} - T_{\text{ref}}) + K_i \int_0^t (T_{\text{bat}} - T_{\text{ref}})dt + K_d \frac{dT_{\text{bat}}}{dt} \quad (23)$$

式中， T_{ref} 为电池的参考温度， $u(t)$ 为压缩机转速， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。

2.2 MPC 控制策略设计

针对电池直冷热管理系统的非线性和时变特性，本文提出了一种基于（MPC）的控制策略。MPC 控制策略是一种前馈的控制策略，通过预测系统未来的动态行为，寻求最优的控制动作。MPC 控制策略的当前控制动作通过求解一个有限时域开环最优控制问题来获得。每个采样时刻基于系统的当前状态，求解得到的控制序列仅执行第一个控制动作。

MPC 控制策略的部署分为以下步骤：模型预测、构建优化问题、在线优化求解。在该过程中，首要目的是把电池的温度控制在合理范围内，同时最小化热管理系统的能耗，因此，优化目标函数不

仅考虑了电池温度的调节，还引入了电池温度变化率体现系统能耗的权衡，优化求解的数学表达见式（26）-（27）所示。式（26）表示优化目标，式（27）为优化问题求解的约束条件。

MPC 控制策略在做预测优化求解之前，需采集当前时刻的电池温度和电池热负荷，基于离散的状态空间表达式方程对未来系统的动态行为进行预测。

优化目标函数为

$$\min J = \min \sum_{i=1}^{N_p} \|T_{\text{bat}}(k+i) - T_{\text{bat,ref}}(k)\|_{Q_t} + \| \Delta T_{\text{bat}}(k+i) - \Delta T_{\text{bat,ref}}(k) \|_{Q_d} \quad (24)$$

考虑到压缩机转速存在一个上下限范围，电池温度存在一个最优温度区，因此将所有限制条件纳入最优控制的滚动优化求解中

约束条件为

$$\begin{cases} 1500\text{r/min} \leq n(k+j|k) \leq 6000\text{r/min} \\ \Delta T_{\text{bat}}(k+j|k) \leq 0.1^\circ\text{C/s} \\ m(k+j|k) \leq 0.05\text{ kg/s} \\ 20^\circ\text{C} \leq T_{\text{bat}}(k+j|k) \leq 40^\circ\text{C} \end{cases} \quad (25)$$

MPC 在每个采样时刻（ k 时刻）求解优化问题，目标是在未来的 j 步内，在压缩机转速、电池温度、温度变化率以及制冷剂质量流量等约束条件下，求解一个压缩机转速序列（包含 j 个时间步），使得电池温度与参考温度的偏差以及温度变化率的偏差最小。随后，将得到的最优控制序列中的第一个控制动作作为压缩机的转速控制输出，继续在下一个采样时刻重复上述过程，最终实现滚动优化。

3 仿真与讨论

假设 MPC 控制策略采样时间为 1 秒，控制时域为 500 步，预测时域为 20 步，表示在每一个控制周期内，MPC 对未来 20 步的系统状态进行预测，并在每个时刻选择最优控制策略， $T_{\text{bat}}(k+j|k)$ 代表第 k 时刻电池的温度， $\Delta T_{\text{bat}}(k+j|k)$ 表示第 k 时刻电池温度变化率。优化函数中考虑了电池温度变化率和电池温度，PID 控制的比例、积分、微分系数分别为 0.002, 1.059e-5, 0.119，仿真模型在

Matlab/Simulink 仿真平台中运行，求解器使用 ode45，仿真过程中时间步长采用了变步长方法。

3.1 温度动态调节过程的对比

控制策略的目标是在热负荷恒为 3000W 下，将电池初始温度从 50℃迅速降至目标温度 30℃。如图 5(a)所示，在相同初始条件和外部热负荷下，MPC 控制策略将电池温度从 50℃降低并稳定在 30℃所需调节时间为 262 秒，而 PID 控制策略的调节时间为 965 秒，这说明 MPC 在控制电池温度方面表现出显著优势。MPC 通过预测系统的动态行为，能够提前做出控制调整，从而缩短电池温度的调节时间。

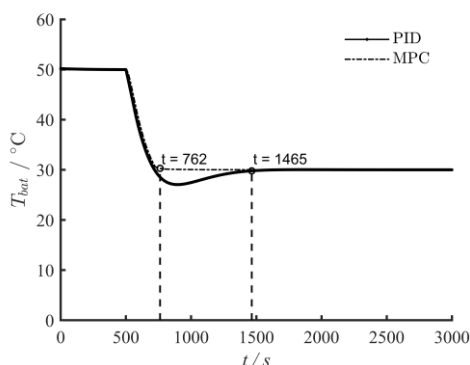
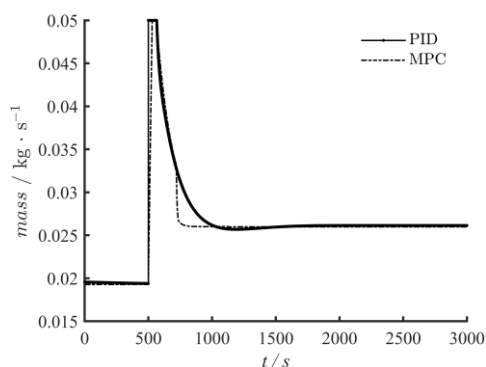
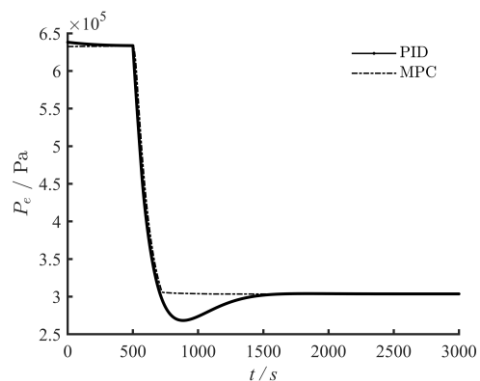


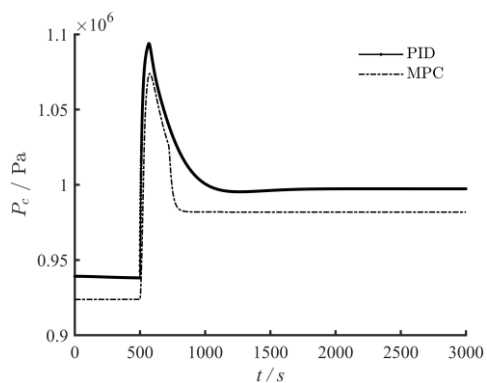
图 (a) 电池温度变化



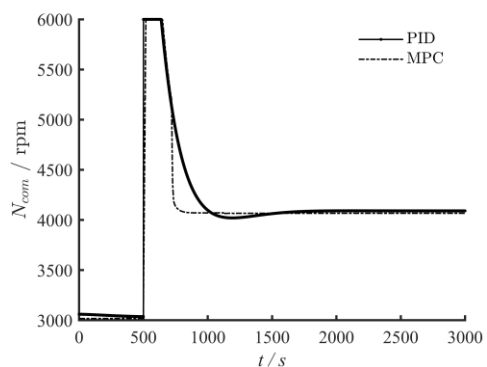
(b) 制冷剂质量流量变化



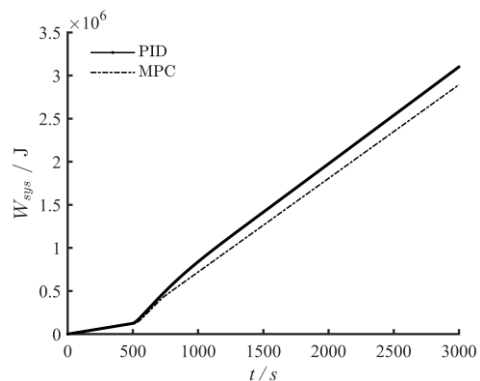
(c) 蒸发压力变化



(d) 冷凝压力变化



(e) 制冷剂质量流量变化



(f) 压缩机耗电对比

图 5 电池温度调节过程对比

Fig 5 Comparison of battery temperature regulation processes

在冷却过程中，PID 控制策略的响应存在一定的过调现象。当电池温度接近目标温度 30℃时，系统产生了明显的温度波动。而相比之下，MPC 控制策略能够更平稳地将电池温度调节至目标值，避免了过调或欠调的情况。MPC 的平滑动态响应不仅缩短了调节时间，还有效减少了系统的能耗。图 5(f)显示了压缩机能耗随时间的变化情况。

根据压缩机功耗计算公式：

$$Q_{com} = \int_{t_0}^{t_1} w(t)dt \quad (26)$$

其中， $w(t)$ 为压缩机的有效功率，单位为W，在电池降温过程中，PID 控制策略系统的能耗为 4.25396×10^6 J，MPC 控制策略的系统能耗为 4.14879×10^6 J，在整个调节过程中 MPC 控制策略节约能耗 2.47%。

3.2 温度控制的鲁棒性对比

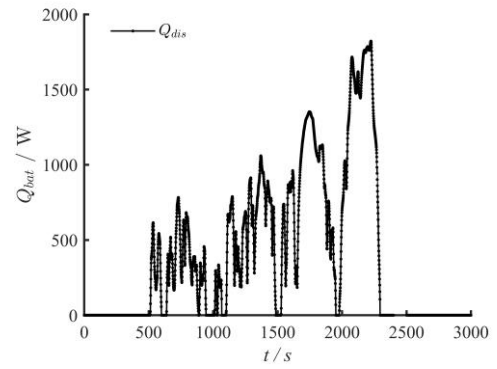
为对比 MPC 与 PID 控制策略在电池温度控制的鲁棒性，在仿真实验中采用 WLTC（全球统一轻型车辆测试循环）驾驶循环，过程中热负荷是从 AMESim 软件中已经标定好的锂离子电池获得。如图 6(a)所示为电池的发热量变化图，当车速上升，电池放电电流增加，导致发热量增加。如图 6(b)所示为电池温度变化，MPC 通过预测时域内的优化求解，能够给出较大幅度的控制信号变化，快速应对热负荷变化，可以稳定地把电池温度控制在 30℃，而 PID 控制由于仅依赖温度与设定值的偏差进行反馈调整，无法快速应对热负荷的剧烈波动，导致电池温度大幅波动。PID 控制的电池温度最高偏移到 32.3℃，最低漂移到 27.1℃；

驾驶循环中温度方差计算公式为：

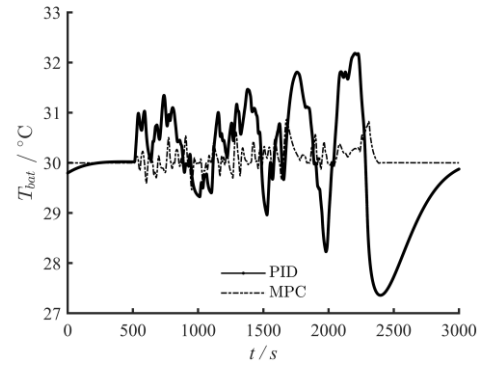
$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [T_{bat}(i) - \bar{T}_{bat}]^2 \quad (27)$$

计算可知，PID 控制策略和 MPC 控制策略的电池温度标准差分别为 1.2℃，0.044℃，MPC 控制策略显著提高了温度控制的鲁棒性。需要指出的是，

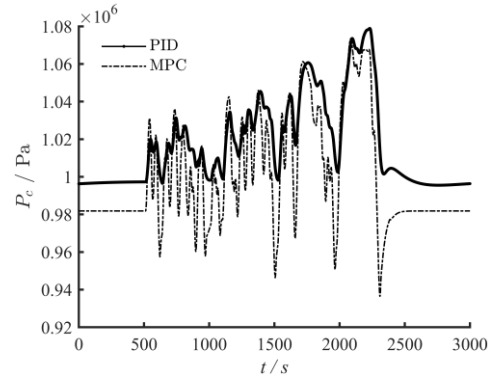
如图 6(c)-(f)所示，相比 PID 控制策略，MPC 控制策略下的压缩机转速变化较为剧烈，进而导致系统参数发生了较大震荡。其根源是因为热负荷发生了剧烈而快速的变化，为了应对这一动态工况，必然要求系统参数能够追随其变化，进而抑制电池温度的波动。这恰恰证明了 MPC 的快速响应能力。并且 MPC 自身具有多参数控制的能力，如果需要将其他参数的控制效果视为与电池温度同样重要，那么修改 MPC 的目标函数就可兼顾其他参数，但这已超出本文探讨的范围，因此不纳入讨论。



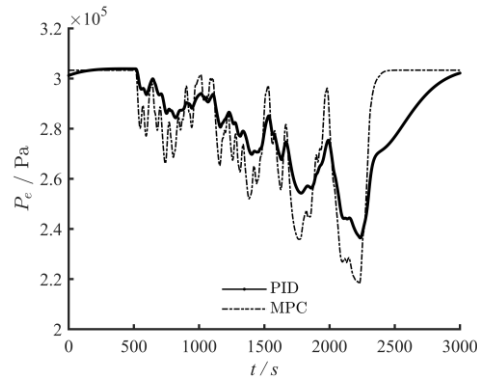
(a) 电池发热量变化



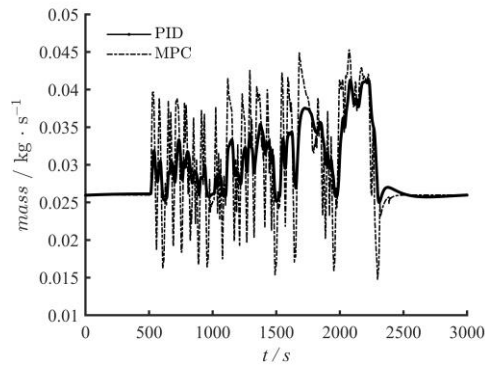
(b) 电池温度变化



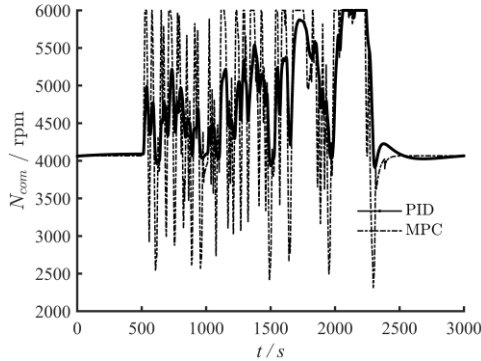
(c) 冷凝压力变化



(d) 蒸发压力变化



(e) 制冷剂流量变化



(f) 压缩机转速变化

图 6 WLTC 驾驶循环控制效果对比

Fig. 6 Comparison of control effects under WLTC driving cycle

4 结论

由于电池直冷热管理系统具有时滞性和非线性，传统的 PID 控制策略在温度调节中往往会导致较大的超调和较低的鲁棒性。为解决这些问题，本文基于第一性原理对直冷热管理系统建模，并在稳定工作点对模型线性化后设计线性时变 MPC 控制

策略，并在电池降温和 WLTC 驾驶循环条件下，与 PID 控制策略的温度控制效果进行了对比分析。

1) 与 PID 控制策略相比，MPC 策略缩短了电池温度的调节时间。采用 MPC 控制策略时，电池温度达到稳定状态的时间为 262 秒，能耗为 4.14879×10^6 J。而使用 PID 控制策略稳定时间为 965 秒，调节过程中的能耗为 4.25396×10^6 J，MPC 控制策略节约了 2.47% 的能耗。

2) 在 WLTC 汽车驾驶循环中，面对电池发热量的持续扰动，MPC 控制策略实现了电池温度的稳定控制，而 PID 控制策略的最大温度偏差为 2.9°C 。在整个驾驶循环过程中，PID 控制的温度方差达到 1.2°C ，而 MPC 控制的温度方差仅为 0.044°C ，显著提高了电池温度控制的稳定性。

符号说明

- α ——换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- A ——截流面积， m^2
- $\mathbf{A}$ ——离散状态变量矩阵
- $\mathbf{B}$ ——离散输入变量矩阵
- Bo ——沸腾数
- $\mathbf{C}$ ——离散输出变量矩阵
- C ——单位长度的换热面积， m^2/m
- $C_{1,2,3,4}$ ——换热关联式系数
- Co ——对流数
- c ——比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- D ——水力直径， m
- $\mathbf{d}$ ——外部干扰变量矩阵
- E ——能量， J
- $\mathbf{f}$ ——状态空间矩阵
- F ——强迫对流关联系数
- h ——比焓， kJ/kg
- J ——优化目标函数
- k ——绝热指数
- K ——PID 控制器参数
- L ——换热器两相区长度， m
- $\dot{m}$ ——压缩机制冷剂质量流量， kg/s

N——加热片个数
 N ——预测步长
 Nu ——努塞尔数
 n ——压缩机转速, rev/min
 P ——饱和压力, Pa
 Pr ——普朗特数
 Q_d ——能量, J
 Q_r, Q_d ——权重系数
 R ——电阻, Ω
 Re ——雷诺数
 S ——制冷剂两相流滑移比
 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$
 U ——电压, V
 u ——制冷剂流速 m/s
 V ——排量, m^3
 v ——比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
 W ——发热功率, W
 ρ ——密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 λ ——导热率, W/(mk)
 x ——干度
 $\mathbf{x}$ ——状态变量矩阵
 γ ——空隙率
 η ——容积效率
 $\mathbf{Z}$ ——系数矩阵

下标

bat——电池
c——冷凝器
com——压缩机
conv——对流传热
e——蒸发器
g——饱和蒸气
i——入口
l——饱和液体
o——出口
ptc——正向热敏电阻加热片
r——制冷剂
w——换热器管壁

water——冷却水

5 参考文献

- [1] KUMAR R, GOEL V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: a critical review[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71: 108025.
- [2] 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, 56.)
- [3] JAGUEMONT J, VAN MIERLO J. A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101551.
- [4] 聂磊, 王敏弛, 赵耀, 等. 纯电动汽车冷媒直冷电池热管理系统的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 52-58. (NIE Lei, WANG Minchi, ZHAO Yao, et al. Experimental study on direct refrigerant battery cooling system for electric vehicle[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 52-58.)
- [5] 高帅, 王俊博, 朱佳慧, 等. 制冷剂相态变化对动力电池直冷系统温控性能的影响分析[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 58-66. (GAO Shuai, WANG Junbo, ZHU Jiahui, et al. Influence of refrigerant phase change on temperature control performance of direct cooling system for power batteries[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(3): 58-66.)
- [6] LIN Xiangwei, LI Yubai, WU Weitao, et al. Advances on two-phase heat transfer for lithium-ion battery thermal management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114052.

-
- [7] CEN Jiwen, LI Zhibin, JIANG Fangming. Experimental investigation on using the electric vehicle air conditioning system for lithium-ion battery thermal management[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2018, 45: 88-95.
- [8] 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.
- [9] GAO Yuan, GAO Qing, ZHANG Xuwen. Study on battery direct-cooling coupled with air conditioner novel system and control method[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 70: 108032.
- [10] SHEN Ming, GAO Qing. System simulation on refrigerant-based battery thermal management technology for electric vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203: 112176.
- [11] XU Ning, YE Chongyang, HU Yongjun, et al. Decoupling control of an integrated direct cooling thermal management system for electric vehicles[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 160: 165-174.
- [12] ZHANG Yan, ZHAO Donggang, HE Liange, et al. Research on prediction model of electric vehicle thermal management system based on particle swarm optimization- Back propagation neural network[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, 47: 102281.
- [13] XIE Yi, LIU Zhaoming, LI Kuining, et al. An improved intelligent model predictive controller for cooling system of electric vehicle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 182: 116084.
- [14] CHENG Hangyu, JUNG S, KIM Y B. Battery thermal management system optimization using Deep reinforced learning algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121759.
- [15] LIU Yuanzhi, ZHANG Jie. Self-adapting J-type air-based battery thermal management system *via* model predictive control[J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114640.
- [16] WANG Haidan, WANG Wenyi, SONG Yulong, 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.
- [17] 张腾, 李明佳, 李冬, 等. 模型预测控制在电池二次冷却系统中应用研究[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(1): 13-19. (ZHANG Teng, LI Mingjia, LI Dong, et al. The research of MPC in secondary cooling system of battery[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(1): 13-19.)
- [18] PAN Chaofeng, JIA Zihao, WANG Jian, et al. Optimization of liquid cooling heat dissipation control strategy for electric vehicle power batteries based on linear time-varying model predictive control[J]. *Energy*, 2023, 283: 129099.
- [19] GUO Rong, SUN Ziyi, LUO Maohui. Energy-efficient battery thermal management strategy for range extended electric vehicles based on model predictive control and dynamic programming[J]. *Energy*, 2024, 307: 132769.
- [20] HONG S H, JANG D S, PARK S, et al. Thermal performance of direct two-phase refrigerant cooling for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 115213.
- [21] ZHANG Wei, ZHAO Rui, CHENG Wenlong. Temperature control performance of a spaceborne PTC heating system: Dynamic modeling and parametric analysis[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 44: 102062.
- [22] KANDLIKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer

inside horizontal and vertical tubes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1990, 112(1): 219-228.

[23] LONGO G A. Refrigerant R134a condensation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(5): 780-789.

通信作者简介

徐象国，男，教授，浙江大学制冷与低温研究所，0571-87953944，E-mail: zjuxgxu@zju.edu.cn。研究方向：空调系

统模拟、动态特性以及高级控制算法开发，新能源汽车热管理技术。

About the corresponding author

Xu Xiangguo, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, 86-571-87953944, E-mail: zjuxgxu@zju.edu.cn. Research fields: air conditioning system simulation, dynamic characteristics, and advanced control algorithms, new energy vehicle thermal management technology.