

基于多场耦合代理模型的液冷系统监测维度扩展研究

徐瑞, 刘镭邦, 陈柏旭, 董晓阳, 罗利, 王娅君
(兰州陇能电力科技有限公司, 兰州 730070)

摘要: 储能系统在调频运行条件下普遍存在监测维度有限及内部状态难以全面观测的问题, 对此, 本研究提出并验证了一种基于多场耦合代理模型的监测扩展与多物理场重构方法。基于 ANSYS Fluent 软件构建锂离子电池电-热-流体耦合模型, 通过实验参数辨识与加速量热仪数据校验其精度, 并利用该高保真的多场耦合模型生成的仿真数据对代理模型进行节点的单独训练。实验结果表明, 代理模型能够在复杂工况下捕捉节点的温度演化趋势, 其多物理场重构结果与数值仿真结果高度吻合。研究最终构建的多场耦合代理模型不仅有效扩展了储能系统的监测维度, 实现多物理场的快速准确重构, 还为电网调频场景下储能系统的安全运行提供保障。

关键词: 锂离子电池; 储能系统; 多场耦合代理模型; 热安全管理; 多物理场重构

Research on Monitoring Dimension Expansion of Liquid-cooling Systems Based on a Multi-field Coupling Surrogate Model

XU Rui, LIU Leibang, CHEN Baixu, DONG Xiaoyang, LUO Li, WANG Yajun
(Lanzhou Longneng Power Technology Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: Energy storage systems in frequency-regulation operation condition commonly suffer from such problems as limited monitoring dimension and insufficient observability of internal status. To address this issue, in this paper a monitoring-dimension expansion and multiphysics field reconstruction approach based on a coupled surrogate model is proposed and verified. An electro-thermal-fluid coupled model of lithium-ion battery is constructed by using ANSYS Fluent software, and its accuracy is calibrated through experimental parameter identification and validation and accelerating rate calorimeter measurements. The simulation data generated by the high fidelity multi-field coupling model are subsequently used to train the surrogate model on individual spatial nodes. The experimental results show that the surrogate model is capable of capturing the temperature evolution trends at each node under complex operating conditions, with reconstructed multiphysics fields showing high consistency with numerical simulation results. The multi-field coupling surrogate model ultimately developed in this study not only effectively expands the monitoring dimensions of the energy storage system, enabling rapid and accurate reconstruction of multiple physical fields, but also provides safeguards for the safe operation of storage systems in grid frequency-regulation scenarios.

Keywords: Lithium-ion battery; energy storage system; multiphysics-coupled surrogate model; thermal safety management; multiphysics reconstruction

0 引言

储能技术是推动世界能源清洁化和高效化, 破解能源资源和环境约束, 实现全球能源转型升级的

核心技术之一^[1]。锂离子电池因其能量密度高、低自放电率和无明显记忆效应等优点^[2-5], 成为新型储能系统的核心。然而, 锂离子电池在充放电过程中会大量产热, 一旦电池经历热失控, 就容易引发大

收稿日期: 2025-08-26; 修回日期: 2025-12-22

基金项目: 国家电网公司科学技术项目 (20310057Q2025000427, SGGSLN00NYJS2500296)。

Project Supported by State Grid Science and Technology Program (20310057Q2025000427, SGGSLN00NYJS2500296)。

规模火灾和爆炸等危险的级联事件^[6-8]。保障电池的热安全是如今电网调频的储能系统中需要面临的主要问题。但现有针对储能系统状态的监测方法只停留在对表面数据的监测,难以获取电池内部温度和产热量等关键参数。因此,准确获取电池内部实时状态对储能系统的安全运行有重要意义。

制定高效的热管理策略、保证储能系统安全运行的关键是对电池温度的准确监测^[9-12]。目前,电池热管理系统主要通过电池表面的热电偶实时监测电池温度,并通过阈值判断法进行热管理操作^[13-15]。然而电池产生的热量主要源于内部的电化学反应,并由内部向表面扩散。这种传递过程缓慢且复杂,并且受到材料特性、环境和电池工作状态的影响,导致电池内外温度之间存在显著的差异与延迟^[16]。为了准确获取锂电池内部的温度,Mutyala^[17],Pan^[18]和Nascimento^[19]等通过向电池内部植入不同类型的温度传感器,测量不同运行工况下的内部温度,结果表明,嵌入电池内部的传感器可以准确地获得电池的内部温度,但植入传感器的精度很容易受到弯曲和振动的影响。此外,数值模拟^[20-23]也是直接获取电池内部温度的常用方法,可以分析不同运行工况下锂离子电池的三维瞬态性能。但每个数值仿真过程只针对一个特定问题,并且是离线计算,任何条件改变都需要对该问题进行重新计算,存在大量冗余工作,也无法直接应用于系统在线状态估计与空间物理场重构。

建设应用级储能系统的电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)需要实现锂电池的在线温度估计^[24-25]。目前,在线温度估计大致可分为3类:基于电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)的方法;基于简化模型;基于数据驱动的方法。Srinivasan等人^[26]在40~100 Hz的频率区间,-20~66℃的温度范围内,针对3种不同材料体系的锂离子电池进行了EIS测试。结果表明,SEI膜所对应的阻抗谱和电池的内部温度之间有着强相关性,且这一相关性与电池的荷电状态没有关联。然而,该研究存在一个缺陷,即把电池的温度当作平均温度来处理,这种假设与实际储能系统中电池温度不均匀的情况相矛盾。在实际应用过程中,不同频率和EIS参数的选择,会使电池温度估计的准确性出现明显差异,增加了测量的不确定性和难度。Pang等^[27]提出了一种改进的圆柱形电池电热模型,通过耦合等效电路模型和两态热模型并使用扩展卡尔曼滤波来估计堆芯和表面温度,结果显示,内部和表面温度的估计误差

保持在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。然而,这种方法依赖于集总热模型参数,限制了准确性,并阻止了对温度分布和梯度的详细分析。Wang等^[28]基于卷积神经网络与虚拟热传感器构建了电池外部温度与内部温度的数据驱动模型,通过将实时监测外部温度作为输入,该方法可以准确预测内部温度。但考虑的实验对象较为单一,若想用于单体电池众多的储能系统,每个单元的表面温度都需测量,复杂性与成本提高,限制了实际工程应用。

针对上述问题,本文基于ANSYS Fluent平台开发了锂电池的电-热-流体耦合模型,构建了多物理场耦合的代理模型,能够迅速实现对电池监测维度的扩展和空间物理场的重构。首先,构建电-热-流体仿真模型并通过实验验证模型的可靠性。其次,介绍储能系统调频工况的特点及代理模型训练的前期准备工作;模型训练完成后,在液冷电池模块上预先选取样本点,包括电池表面及电池内部,进而重点分析所构建多场耦合代理模型在实际调频工况下监测点时间演化过程的应用效果;最后,在验证工况下,对系统空间三维温度场重构效果进行了评估与分析。

1 锂离子电池电-热-流体耦合模型构建方法

1.1 多场耦合机理模型说明

对锂离子电池运行行为模拟是一个复杂的多物理场、多尺度建模问题,根据研究目的的不同,需选取合适尺度的数值仿真模型进行数据集的获取。微观尺度以电化学模型为代表。该模型是一个基于物质传递、电化学、热力学原理的具有强耦合性的偏微分方程系统,精度很高,但大量的非线性方程使其计算复杂度大、效率低^[29-30]。等效电路模型是一种简化模型,对于描述锂离子电池充放电过程中的响应特性,具有较高的计算效率且占用的计算资源相对较少^[31-33]。但难以描述电池模块三维物理场耦合特性,无法精确获取电池物理场演化行为。本文旨在用所提方法实现不同外部散热条件及电池运行工况下的电池系统物理场重构。因此通过耦合热-流体模型与等效电路模型,实现对电池系统电场-温度场-流场的相互作用机制、内部最高温度与外部热电偶监测数据的关联关系、系统温度梯度分布等信息的描述,进而进行系统尺度仿真以获取数据集。

1.2 热-流体模型与等效电路模型的耦合

热-流体模型与等效电路模型耦合过程基于ANSYS Fluent完成,耦合过程如图1所示。

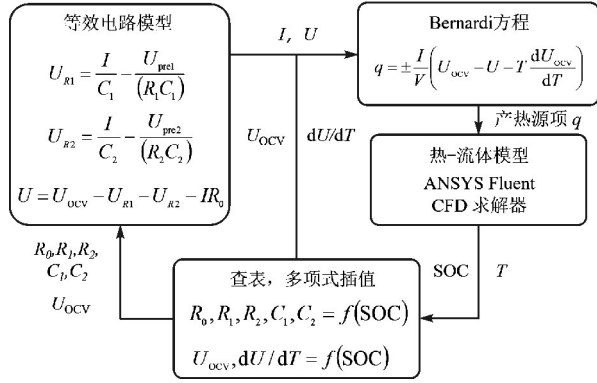


图1 电-热-流体耦合示意图

Fig. 1 Electro-thermal-fluid coupling schematic diagram

在计算过程中,用上一个时间步得到的荷电状态 (state of charge, SOC)通过查表/多项式插值更新对应的 ECM 电气参数及 U_{OCV} 、 dU_{OCV}/dT ,以便等效电路模型及 Bernardi 方程^[34]计算调用;进而通过等效电路模型式(1)–(3)计算得到当前状态下的端电压 U 。

$$U = U_{OCV} - U_{RC1} - U_{RC2} - IR_0 \quad (1)$$

$$\frac{dU_{RC1}}{dt} = -\frac{U_{RC1}}{(R_1 C_1)} + \frac{I}{C_1} \quad (2)$$

$$\frac{dU_{RC2}}{dt} = -\frac{U_{RC2}}{(R_2 C_2)} + \frac{I}{C_2} \quad (3)$$

式中, U_{RC1} 、 U_{RC2} 分别为两个 RC 网络的电压。

电池充放电产生的热量遵循能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_t \quad (4)$$

接着通过 Bernardi 方程式(5)计算电池产热率 q_t , 并将其作为能量守恒方程式(6)中的源项。

$$q_t = \pm \frac{I}{V} \left(U_{OCV} - U - T \frac{dU_{OCV}}{dT} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_t \quad (6)$$

式中: I 是指工作电流; V 是电池的体积; U_{OCV} 为开路电压; dU_{OCV}/dT 为开路电压对温度的导数。其中等式右侧的正号表示放电,负号表示充电。

最终,利用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 求解器,对电池模块不同区域的控制方程进行求解,至此,计算完成闭环实现等效电路模型与热-流体模型的耦合。

1.3 模型参数辨识及验证

这一节,主要通过实验测试方法辨识等效电路模型与热流体模型参数,即电池开路电压 U_{OCV} 、 R_0 、

R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 、 dU_{OCV}/dT 。首先对上述参数辨识方法及辨识结果进行简要分析;辨识结束后通过 Bernardi 方程计算电池产热,并将其与加速量热仪直接测量的电池产热量进行对比,验证参数辨识的结果。

1.3.1 热-流体模型参数辨识

由式(5)可知,锂电池产热分为欧姆内阻引起的不可逆热和内部电化学反应产生的可逆熵热。本文采用平衡电势法对熵热系数 dU_{OCV}/dT 进行辨识。通过固定电池 SOC,改变环境温度,测量电池在不同环境温度下的开路电压,最后拟合开路电压-温度曲线,曲线斜率即为电池对应 SOC 下的熵热系数。

本文分别测量电池在 6 个不同的 SOC (从 1.0 到 0,步长为 0.2)下的熵热系数,以得到 dU_{OCV}/dT -SOC 曲线。温度取 0℃、10℃、20℃、30℃、40℃,得到熵热系数结果如图 2 所示。

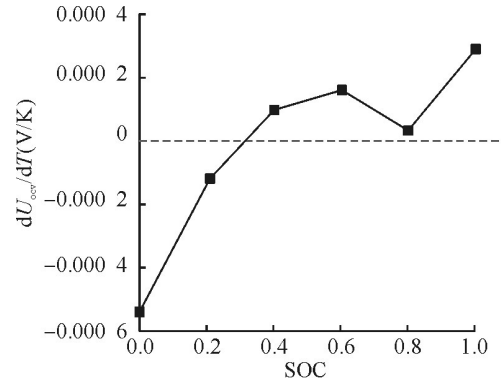


图2 热-流体模型参数辨识结果

Fig. 2 Thermal-fluid model parameter identification result

由图 2 可知,电池在不同 SOC 下熵热系数不同。当 dU_{OCV}/dT 大于 0 时,表示此时电池可逆热为放热反应;当 dU_{OCV}/dT 小于 0 时,表示此时电池可逆热为吸热反应。当 SOC 在 0~0.3 时,熵热系数小于 0,表现为吸热反应;当 SOC 在 0.4~0.8 之间时,可逆热大于 0 且几乎稳定,表现为放热反应。

1.3.2 等效电路模型参数辨识

电池在静置足够长时间后,其内部状态均匀稳定,此时的开路电压可认为正负极的电位差。将电池充放电至电池到不同的 SOC 下,分别静置 1 h,记录不同 SOC 下的开路电压。测试结果如图 3 所示。

拟合函数结果为

$$U_{OCV} = 2.517 + 10.68 \cdot SOC - 105.29 \cdot SOC^2 + 639.47 \cdot SOC^3 - 2397.55 \cdot SOC^4 + 5636.75 \cdot SOC^5 - 8307.49 \cdot SOC^6 + 7439.21 \cdot SOC^7 - 3695.32 \cdot SOC^8 + 780.28 \cdot SOC^9 \quad (7)$$

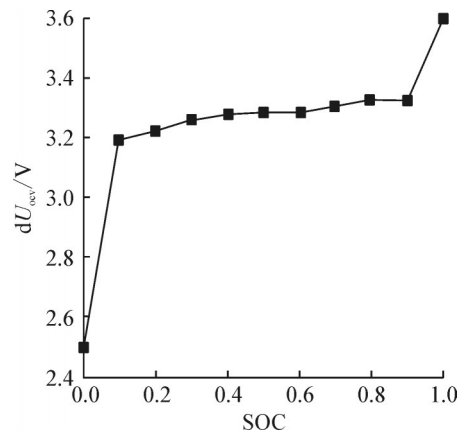


图3 电池SOC与 U_{ocv} 拟合曲线图
Fig. 3 Battery SOC and U_{ocv} fitting curve

1.3.3 参数辨识结果验证

在电池热管理和安全性研究的实际应用中,对锂离子电池的产热量获取的研究具有重要意义。锂离子电池产热量的获取方法除了通过 Bernardi 方程间接计算之外,还可以通过加速量热仪 (accelerating rate calorimeter, ARC) 进行直接测量。通过将参数辨识的结果代入 Bernardi 方程计算得到的电池产热量与用 ARC 直接测量的产热量进行对比,可以验证参数辨识结果的准确性。ARC 实验平台如图 4 所示,核心部分包括 ARC 测试腔、温度控制系统、数据采集系统和电池固定装置等。在实验过程中,锂电池置于 ARC 测试腔内,通过温度传感器实时监测电池表面温度变化。

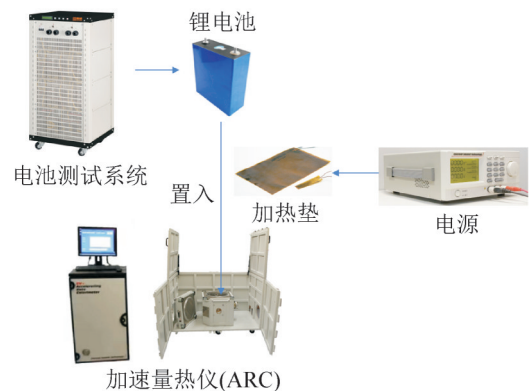


图4 ARC实验平台示意图
Fig. 4 Schematic diagram of ARC experimental platform

通过电池测试系统给定电池充放电电流即可直接测量到电池的产热量 Q 。本文实验直接测试了电池在 0.2 C 与 0.5 C 放电工况下的电池产热量,将其与 Bernardi 方程计算的平均产热量对比结果列于表 1。

表1 Bernardi 方程与 ARC 获取的平均产热量对比
Table 1 Comparison of average heat generation between Bernardi equation and ARC measurement

工况	平均产热量		误差/%
	Bernardi 方程	ARC	
0.2 C 放电	0.90	0.98	8.9
0.5 C 放电	3.87	4.34	12.1

表 1 量化了用 Bernardi 方程计算与 ARC 实验平台测量的偏差,相比于用 ARC 直接测量,通过 Bernardi 方程间接计算电池产热量的相对误差分别为 8.9%和 12.1%。误差主要来源于 Bernardi 方程在计算过程中,对电池内部的热传递和电化学反应特性进行了理想化假设,而实际情况下电池可能因材料特性、制造工艺和使用环境的差异而表现不同。并且在实验测量过程中会不可避免的受到外界环境因素(如温度波动、测量设备精度等)的影响,在使用 ARC 对产热量进行测量时,ARC 腔体相对于所测电池体积来说较大,导致腔体内空气流动产生的热交换对测量结果产生了较大的影响。由于腔体内的空气体积较大切空气流动无法完全控制,这些空气对流带来的热量传递作用使得热量在设备内的分布较为不均,影响电池产热量的精确测定。特别是在低倍率放电条件下(如 0.2 C、0.5 C),导致电池测量的误差更为明显。但是这一误差在工程应用中是可接受的,验证了参数辨识结果的可靠性。针对该问题,未来的研究可以采用体积更小的 ARC 腔体,减少空气对产热量测量的影响,并且进行更准确的模型参数辨识,减小 Bernardi 方程的计算结果误差。

2 多场耦合模型实验与代理模型训练

2.1 电-热-流体耦合模型分析

本文构建了基于典型模块结构的液冷热管理仿真模型来研究电池在复杂运行工况下的多物理场演化特征。仿真对象为 24 个单体串联组成的液冷电池模块,其中每个电芯为额定容量为 100 Ah 的棱柱形锂离子电池,通过嵌入流道的液冷板实现电池模块的热量调控。

在热管理方面,电芯被垂直安装于金属冷却板上,冷却通道安装在金属冷却板的内部,并且冷却液由入口流入冷却通道,在流动过程中实现与电芯之间的换热,最终从出口排出。这种液冷模块的整体设计能够扩大热交换面积,也便于实现冷却均匀性与结构集成度的统一。

模型在空间上划分为采用热传导控制方程进

行描述的固体区域和采用流动-换热控制方程进行描述的流体区域,主要研究电池内部和冷却回路的耦合行为。仿真模型的输入包括几何参数、材料物性参数、边界工况等,通过构建的高保真耦合模型生成仿真数据,支撑后续代理模型的训练与验证。

该储能系统的运行条件为频率调节,即工作充电/放电电流随时间变化。为了研究电池模块在复杂的调频工况下的热特性,本文选取了一段典型时段(7 200 s)的电流负载变化进行分析,电池在 0~0.98 C 范围内工作,如图 5(a)所示。其中电流为正时表示模块在放电,电流为负时表示模块充电,一个周期内电流在-98 A~98 A 波动。在上述边界条件与控制方程的约束下,得到仿真过程中电池能量源项如图 5(b)所示,电池能量源项的大小与充放电电流直接相关。本文用于训练多场耦合代理模型的数据均基于该工况获取,为后续模型的构建与验证提供了可靠的数据来源。

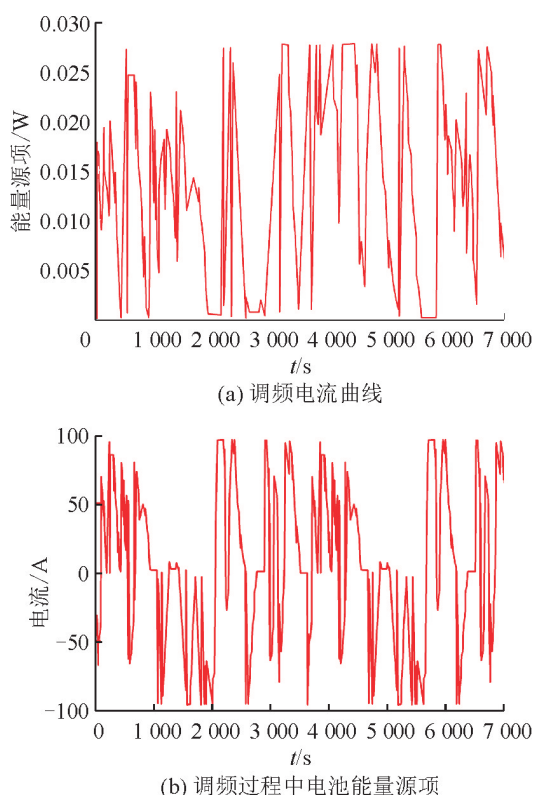


图5 模块调频工况曲线图

Fig. 5 Frequency regulation condition curve chart of the module

2.2 代理模型训练

本文重点在于实现电池模块在调频工况下对内部关键点及电池模组温度场演化趋势的精准评估。因此,这里仅将每个网格节点的温度值作为输出,输出矩阵表示为 $Y_i = [T]^T$,其中 T 为点阵节点温

度, i 为点阵序列号。在本案例中,电池工作电流遵循固定调频曲线,每个时间点下的产热源项已被唯一确定。因此电池模块的温度主要受外界冷却介质流量及流入温度决定。

为了简化问题,本文作出以下假设:1) 所研究的工况为电池长时间静置后的放电过程,即电池模块初始温度与环境温度相同;2) 忽略环境温度对电池等效电路模型参数的影响,从而避免了在不同环境温度下进行参数辨识的复杂性。图 6 展示了不同环境温度下电池最高温度的演化曲线。由于假设环境温度对模型参数无影响,改变环境温度仅使温度曲线整体上下平移,而整体变化趋势保持不变。基于此,本文未将环境温度作为模型输入,统一设定环境温度及初始温度为 298 K。最终,本文所训练的代理模型将冷却介质流量(v_{in})、流入温度(T_{in})及运行时间(t)作为代理模型的输入。输入参数矩阵表示为 $X_i = [v_{in}, T_{in}, t]^T$ 。

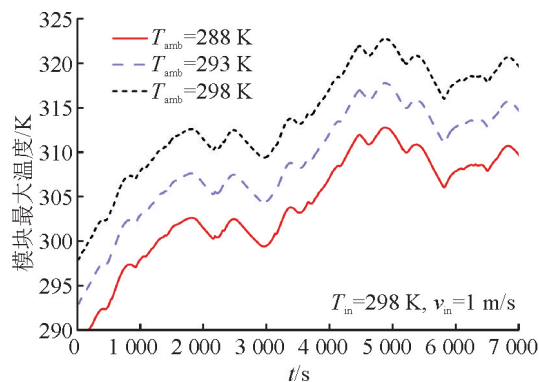


图6 改变环境温度模块最大温度演化曲线

Fig. 6 Evolution curve of maximum temperature of module with varying ambient temperature

模型的训练与后续的测试数据集是通过不同模拟条件采集的,每种工况均是上述冷却介质流量与冷却介质温度的随机组合,在仿真过程中,获取每个时间步的网格节点温度值,为后续模型训练提供训练集。锂电池的最佳工作温度为 15~35℃^[35],因此液冷介质的温度选取要低于 35℃,在本文中,基于环境温度,即电池初始温度为 298 K 的情况下,选取介质温度分别为 288、293、298 K。并且在主流的液冷系统中,冷却介质流量通常选择在 0.5~2 m/s 范围内,本文基于主流工况选择冷却介质流量为 0.5、1、1.5 m/s。所有参数互相组成 9 种不同的仿真工况,在计算时每 1 s 记录电池模块的节点温度值。最终经处理,获得了 64 800 组训练数据,导出每组数据中包含所有节点的坐标位置及温度值。包含冷却介质流速、冷却介质温度与时

间3个输入,每个节点的温度值为输出的模型训练数据。

2.3 样本点时间尺度演化

本节主要对电网调频工况下所训练的多场耦合代理模型对电池模块关键节点的温度在时间尺度上的演化效果进行评估。在电池模块中设置了如图7所示的3个样本点,分别位于模块外表面、模块内部与模块上表面。通过对比样本点分别在数值仿真与多场耦合代理模型的计算结果,评估模型在监测点扩展方面的应用效果。



图7 样本点布置分布图

Fig. 7 Sample point layout distribution diagram

为了验证代理模型在复杂工况下的鲁棒性,本

节设置了3个位置验证工况条件。工况1:改变液体工质的流速,并保持入流温度不变;工况2:改变液体工质的入流温度,并保持流速不变。工况3:在前两者的基础上同时改变液体工质的流速和入流温度。这3个未知工况条件下,代理模型与数值仿真模型计算的样本点温度值对比如图8所示,相比于训练工况,新参数设置在图中用红色表示。对应的评价参数列于表2,并且为评估模型在全时间尺度的计算精度,采用决定系数(coefficient of determination, R^2) 进行评价,计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中: y_i 为数值仿真计算的目标节点温度值; $\hat{y}_i$ 为与之对应节点的代理模型计算值; $\bar{y}$ 为计算平均值; n 为时间尺度样本数量。

样本点时间尺度误差评价表见表2。

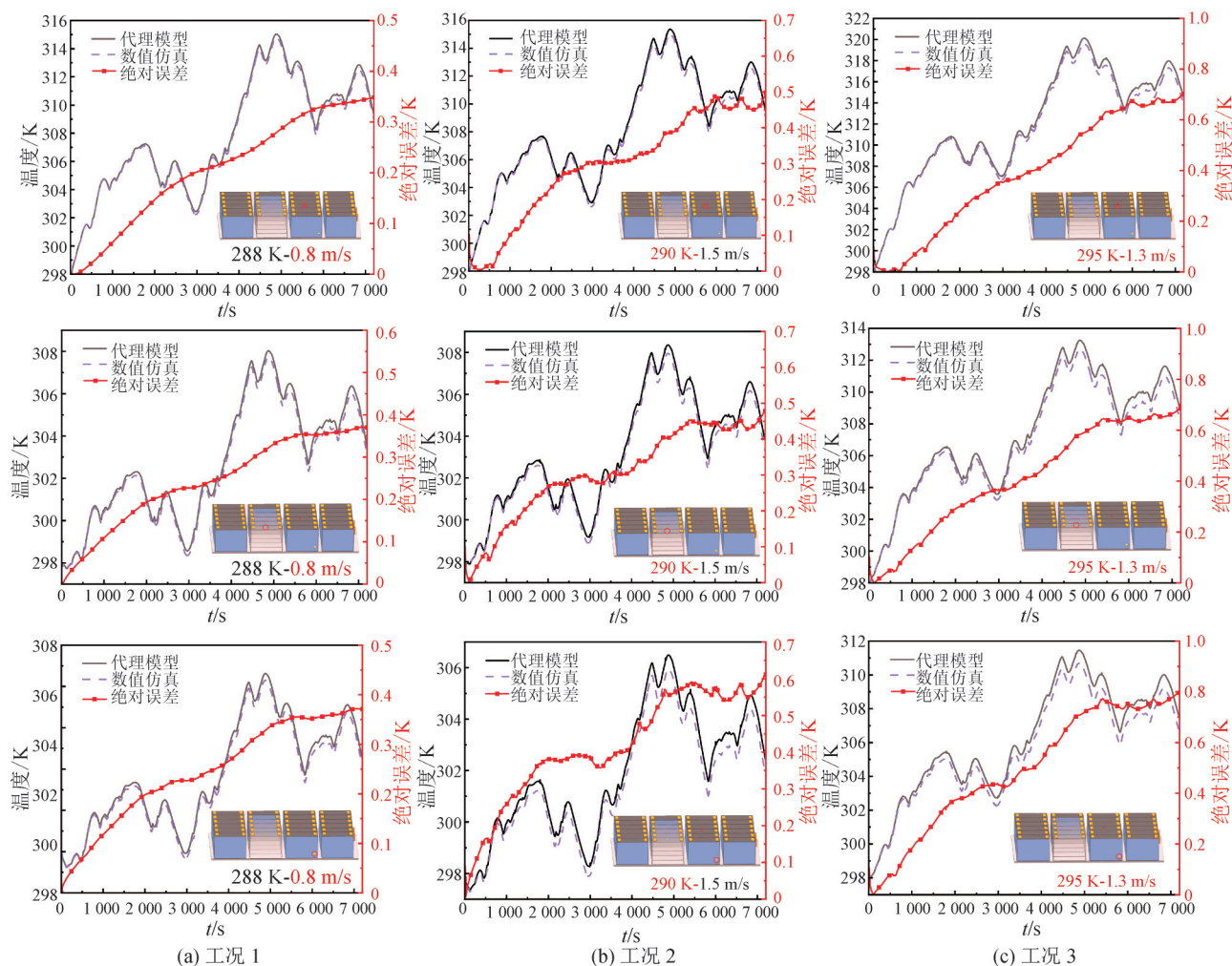


图8 验证工况下数值仿真与代理模型计算结果对比图

Fig. 8 Comparison of numerical simulation and surrogate model calculation results under verification conditions

表2 样本点时间尺度误差评价表
Table 2 Evaluation table for time-scale errors of sample points

验证工况	评价指标	样本点1	样本点2	样本点3
工况1 (288 K-1.3 m/s)	RMSE	0.263 1	0.233 5	0.265 7
	R^2	0.999 5	0.999 7	0.999 4
工况2 (295 K-1.5 m/s)	RMSE	0.329 2	0.329 2	0.440 3
	R^2	0.997 8	0.998 5	0.997 2
工况3 (290 K-0.8 m/s)	RMSE	0.458 2	0.447 9	0.544 8
	R^2	0.904 5	0.965 7	0.888 9

在整个模型验证过程中,获取样本点温度数据不是随机的,而是在给定的测试条件下以时间为自变量,样本点温度随时间的增加而变化。图 8(a)为在模型训练工况的基础上,改变入口流速为 0.8 m/s,仿真与模型计算结果对比。可以发现,模型计算误差随时间累积呈逐步上升趋势。在最初的 2 000 s 内,误差始终保持在 0.2 K 以内,在接下来的 2 000 s 至 4 500 s 内,误差逐渐趋于稳定,误差曲线存在一个上升平台,其他验证工况的变化趋势也大致相同。这一现象与液冷流速对电池模块散热效果的影响相关,随着电池模块充放电的进行,液冷流速对于模块的散热,即对电池温度的影响逐渐变强。

对比图 8(a)、8(b),改变入流温度这一工况与改变入口流速工况相比,代理模型的最大相对误差增大了 0.2 K。而在入口温度与流速均未知的工况下(图 8(c)),样本点在在一个周期内的最大绝对误差接近 0.8 K。尽管存在误差,但代理模型与数值仿真计算的样本点温度曲线整体吻合度较高,即使在 RMSE 相对较高的工况 3 中, R^2 仍为 0.888 9。结果说明了所构建的代理模型对热力学边界条件变化具有良好的泛化能力,也验证了代理模型在复杂场景下仍能对模块特征点的温度演化进行高精度评估。

对比图 8 中同一验证工况下不同样本点的温度分布可以发现,液冷模块存在明显的自上而下的温度梯度:模块最高温度集中于电池顶部,越靠近液冷板,电池温度越低。这是由于液冷板会优先带走与其直接接触部分的热量,导致热量在电池垂直方向上形成梯度分布。这一趋势在下一章的温度场三维重构云图中可以更直观的展现。

3 空间温度场重构结果评价

为对模型的空间尺度进行评价,分别在上述误差演化的 3 个阶段中各取了一个时间点进行温度场重构过程。观察图 8 中的误差演化曲线,大致可分

为 3 个阶段:0~2 000 s、2 000~4 500 s、4 500~7 200 s。在最初的 0~2 000 s,误差上升阶段,模型针对所取样本点的误差在逐步增大;2 000~4 500 s 误差稳定阶段,此时间段内,误差趋于稳定,存在一个平台期;基于此特点,本文分别在模块运行过程的 360 s、3 000 s 与 5 400 s 处均取了一个时间点,获取对应时刻的数值仿真与代理模型计算的温度云图,以此来评估模型空间尺度的重构效果。每个验证工况的误差评价指标结果如表 3 所示。

表3 验证工况下温度场重构的误差评价表
Table 3 Error evaluation table of temperature field reconstruction under verification conditions

验证工况	评价指标	360 s	3 000 s	5 400 s
工况1 (288 K-1.3 m/s)	RMSE	0.018 3	0.070 7	0.105 5
	MaxAE	0.115 4 K	0.135 0 K	0.226 0 K
工况2 (295 K-1.5 m/s)	RMSE	0.015 7	0.107 8	0.194 7
	MaxAE	0.264 7 K	0.488 9 K	0.795 1 K
工况3 (290 K-0.8 m/s)	RMSE	0.015 5	0.155 4	0.319 5
	MaxAE	0.365 8 K	0.517 9 K	0.956 2 K

3 个验证工况下,数值仿真模型与代理模型计算的结果云图对比如图 9 所示。在每个不同的时间节点中,图 9 左侧的为数值仿真计算云图,右侧为代理模型重构温度场云图。可以明显看出,代理模型重构的物理场与数值仿真模型计算云图在整体分布上较吻合。每个验证工况的误差评价指标随着时间的增大而增大,此规律与模型在时间尺度上的验证相似。分别比较所取的每个时间节点的数值仿真计算与代理模型的全域温度云图,在 3 个验证工况下,节点最大误差出现在工况 3 的模块顶部区域,为 0.956 3 K。如图 9(c)云图所示,误差最大点出现在模块顶部,这是由于电池模块及液冷散热系统的独特热管理特性所导致。在液冷系统中,冷却液在底部液冷板中出入,通过对流换热带走热量,因此液冷模块的底部区域温度较低,而顶部区域远离液冷板,产生热量积累,因此顶部区域温度较高,从而产生了自上而下的温度梯度。在模块顶部区域,水平方向上节点间的温差较小,温度梯度较小,所以导致代理模型在训练过程中较难捕获该区域节点之间的温度变化趋势。基于这一发现,可以探索通过增加液冷模块顶部辅助风冷,改进冷却介质流道的布局,或在特定区域增加冷却流量等方式在进行优化液冷的效果。降低电池模块的梯度效应,实现更均匀的温度分布。

尽管代理模型在模块顶部区域存在一定的预测偏差,但总体而言,用于对模型进行全局评价的

RMSE 较小。表明本文所提出的代理模型构建方法能够有效地处理复杂工况场景下的多物理场耦合问题。

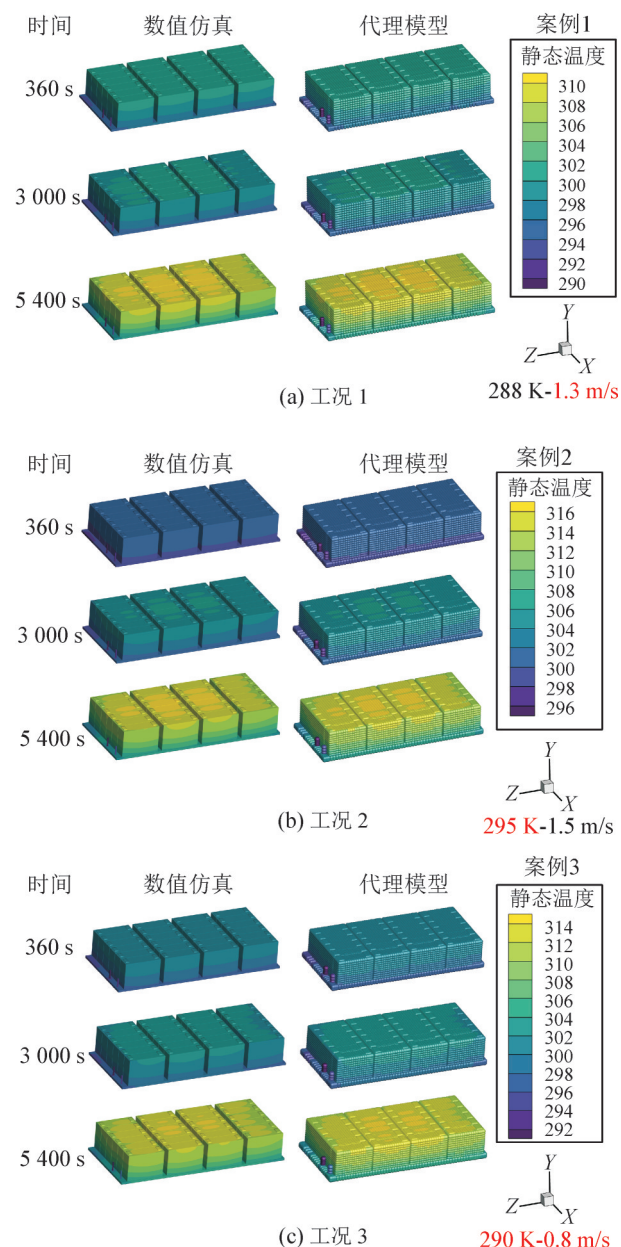


图9 验证工况下的温度云图对比
Fig. 9 Comparison of temperature cloud chart under verification conditions

综上,所训练多场耦合代理模型在验证工况下的计算结果验证了其在复杂工况下的监测点扩展与温度场重构的有效性和适用性。

4 结语

本文针对电网储能系统在调频工况下的产热分析问题,以液冷电池模块为研究对象,基于多场耦合代理模型构建方法,重点分析了其在系统监测维度的扩展与温度场重构方面的应用成效。全文

的主要结论如下:

1)对所研究的液冷模块建立了数值仿真模型,明确了模型的物理与数学模型,并在调频工况下进行仿真分析,获取了电池模块的动态温度分布特征,数值仿真结果和实验测量结果的最大误差在0.5 K 以内,验证了数值仿真模型的准确性。

2)以冷却介质流量、流入温度及运行时间作为代理模型的输入,模块的温度场作为输出,完成了多场耦合代理模型的训练,并通过多组验证工况对代理模型的精度与泛化能力进行了评估。结果表明,代理模型在复杂工况下仍能够精准捕捉样本点的温度演化趋势,与数值仿真计算的温度曲线整体吻合度较高,在所取的验证工况下, R^2 均大于0.888 9,展现了良好的监测点扩展能力,增强了系统的稳定性和可靠性。

3)进一步对模块的空间三维温度场进行了重构,通过分析空间尺度评价参数,验证了代理模型在空间尺度上的重构精度。并且本文还分析了液冷模块存在自上而下的温度梯度,最高温度集中在电池顶部,而底部温度因液冷板的高效散热作用显著降低,这一现象可为热管理优化提供重要参考。

本文研究成果为电网调频工况下储能系统的实时监测与热管理提供了多维度的数据支撑,展示了本文所提多场耦合代理模型在复杂工况下的应用潜力,为储能系统的安全运行与高效管理提供了理论和模型基础。

参考文献

- [1] 雷博,吴越,史尤杰,等. 液冷式锂电池储能系统高倍率调频应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 159-166.
LEI Bo, WU Yue, SHI Youjie, et al. Research on liquid-cooling Li-ion battery energy storage system in high frequency regulation application[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 159-166.
- [2] 常春,王瑛琦,姜久春,等. 基于主动方波激励检测锂离子电池早期内短路[J]. 电池, 2024, 54(1): 24-28.
CHANG Chun, WANG Yingqi, JIANG Jiuchun, et al. Detection of early internal short circuit of Li-ion battery based on actives quare wave excitation[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(1): 24-28.
- [3] 李奕彤,许乐俊,孙均利,等. 磷酸铁锂锂离子电池热滥用的热失控特性[J]. 电池, 2025, 55(4): 699-705.
LI Yitong, XU Lejun, SUN Junli, et al. Thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate Li-ion battery by thermal buses[J]. Dianchi(Battery Bimonthly), 2025, 55(4):

- 699-705.
- [4] 贾一凡,安海舰,周敏刚,等. 电化学储能电站研究现状综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3):99-105.
JIA Yifan, AN Haijian, ZHOU Mingang, et al. Review of current research status for electrochemical energy storage power station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3):99-105.
- [5] 卢兵荣,陈莉,韩丽华,等. 三电极软包装电池无析锂快充策略[J]. 电池, 2024, 54(3):344-347.
LU Bingrong, CHEN Li, HAN Lihua, et al. Non-lithium plating fast charging strategy for three electrode pouch battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(3):344-347.
- [6] CAO Xin, DU Jianhua, QU Chang, et al. An early diagnosis method for overcharging thermal runaway of energy storage Lithium batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75:109661.
- [7] 马文斌,杨小钰,谢松. 低温搁置对锂离子电池性能的影响[J]. 电池, 2024, 54(4):533-536.
MA Wenbin, YANG Xiaoyu, XIE Song. Effect of low-temperature storing on the performance of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2024, 54(4):533-536.
- [8] 杨振印,康赛赛,何飞,等. 隔膜对锂离子电池短路的影响[J]. 电池, 2025, 55(3):503-507.
YANG Zhengyin, KANG Saisai, HE Fei, et al. Effect of separator on the short circuit of Li-ion battery[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):503-507.
- [9] MURUGAN M, SARAVANAN A, ELUMALAI P V, et al. Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52, :104723.
- [10] 阮爱国,史仰泽,王方钦,等. 基于FFRLS-AIEKF的锂离子电池SOC估计[J]. 电池, 2025, 55(3):529-535.
RUAN Aiguo, SHI Yangze, WANG Fangqin, et al. SOC estimation of Li-ion battery parameters based on FFRLS-AIEKF[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):529-535.
- [11] PATIL M S, SEO J H, PANCHAL S, et al. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type micro-channel cold plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 155:119728.
- [12] 金朝昆,冀杰,李晓晖. 电动汽车锂离子电池状态检测方法的优化[J]. 电池, 2025, 55(3):542-547.
JIN Chaokun, JI Ji, LI Xiaohu. Optimization of state detection methods for Li-ion battery in electric vehicles[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(3):542-547.
- [13] LYU Youfu, LIU Guangjun, ZHANG Guoqing, et al. A novel thermal management structure using serpentine phase change material coupled with forced air convection for cylindrical battery modules[J]. Journal of Power Sources, 2020, 468:228398.
- [14] CHEN Kai, SONG Mengxuan, WEI Wei, et al. Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement[J]. Energy, 2018, 145(2):603-613.
- [15] WANG Haimin, WANG Yufei, HU Feng, et al. Heat generation measurement and thermal management with phase change material based on heat flux for high specific energy power battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194:117053.
- [16] MUTYALA M S K, ZHAO Jingzhou, LI Jianyang, et al. In-situ temperature measurement in Lithium-ion battery by transferable flexible thin film thermocouples[J]. Journal of Power Sources, 2014, 260(1):43-49.
- [17] PAN Y, XU K, CHEN Z, et al. Advanced techniques for internal temperature monitoring in Lithium-ion batteries: A review of recent developments[J]. COATINGS, 2025, 15(3):268.
- [18] NASCIMENTO M, NOVAIS S, DING M S, et al. Internal strain and temperature discrimination with optical fiber hybrid sensors in Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2019, 410 - 411:1-9.
- [19] SAW L H, YE Yonghuang, TAY A A O, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling[J]. Applied Energy, 2016, 177:783-792.
- [20] CHAVAN S, LIU Jie, VENKATESWARLU B, et al. Numerical simulation of Lithium-ion battery thermal management systems: A comparison of fluid flow channels and cooling fluids[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73, Part B:108940.
- [21] RUHANI B, ABIDI A, HUSSEIN A K, et al. Numerical simulation of the effect of battery distance and inlet and outlet length on the cooling of cylindrical Lithium-ion batteries and overall performance of thermal management system[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45:103714.
- [22] ALIHOSSEINI A, SHAFARAEI M. Experimental study and numerical simulation of a Lithium-ion battery thermal management system using a heat pipe[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39:102616.
- [23] GA BUI V, MINH TU BUI T, TUAN HOANG A, et al. Energy storage onboard zero-emission two-wheelers: challenges and technical solutions[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47:101435.
- [24] SUBRAMANIAN M, HOANG A T, B K, et al. A technical review on composite phase change material based secondary assisted battery thermal management system for

- electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 322:129079.
- [25] SRINIVASAN R, CARKHUFF B G, BUTLER M H, et al. Instantaneous measurement of the internal temperature in Lithium-ion rechargeable cells[J]. Electro chimica Acta, 2011, 56(17):6198-6204.
- [26] PANG Hui, GUO Long, WU Longxing, et al. A novel extended Kalman filter-based battery internal and surface temperature estimation based on an improved electro-thermal model[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41:102854.
- [27] WANG M, HU W, JIANG Y, et al. Internal temperature prediction of ternary polymer Lithium-ion battery pack based on CNN and virtual thermal sensor technology[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(9):13681-13691.
- [28] 韦雪晴,邓海鹏,周宇,等. 锂离子电池组的三维电化学-热耦合仿真分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3965-3977.
- WEI Xueqing, DENG Haipeng, ZHOU Yu, et al. Three-dimensional electrochemical-thermal coupling model of a Lithium-ion battery module[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12):3965-3977.
- [29] R ZHAO, P KOLLMEYER, R D LORENZ. Modeling Lithium-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013:1-1.
- [30] SAW L H, YE Y, TAY A A O. Electro-thermal characterization of Lithium iron phosphate cell with equivalent circuit modeling[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87:367-377.
- [31] DING Xiaofeng, ZHANG Donghuai, CHENG Jiawei, et al. An improved thevenin model of Lithium-ion battery with high accuracy for electric vehicles[J]. Applied Energy, 2019, 254:113615.
- [32] F M GONZÁLEZ-LONGATT. Circuit based battery models: A review [C]//In Proceedings of 2nd Congreso Iberoamericano De Estudiantes de Ingenieria Electrica, 2006, Puerto la Cruz, Venezuela.
- [33] BERNARDI D. E, PAWLIKOWSKI, J NEWMAN. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5-12.
- [34] IANNICIELLO L, BIWOLÉ P H, ACHARD P. Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378:383-403.

作者简介:

徐瑞(1995—),女,工程师,长期从事新能源发电及接入技术工作。E-mail:2207383221@qq.com。

刘镭邦(1995—),男,助理工程师,从事可再生能源发电与并网技术研究工作。E-mail:2449932001@qq.com。

陈柏旭(1992—),男,工程师,从事水电及新能源场站的涉网研究工作。E-mail:2673916018@qq.com。

董晓阳(1995—),男,工程师,从事新能源涉网能力评估和并网检测工作。E-mail:119242531@qq.com。

罗利(1989—),女,高级工程师,从事电网降损节能工作。E-mail:178313848@qq.com。

王娅君(1989—),女,工程师,从事新能源检测技术工作。E-mail:239216801@qq.com。