



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

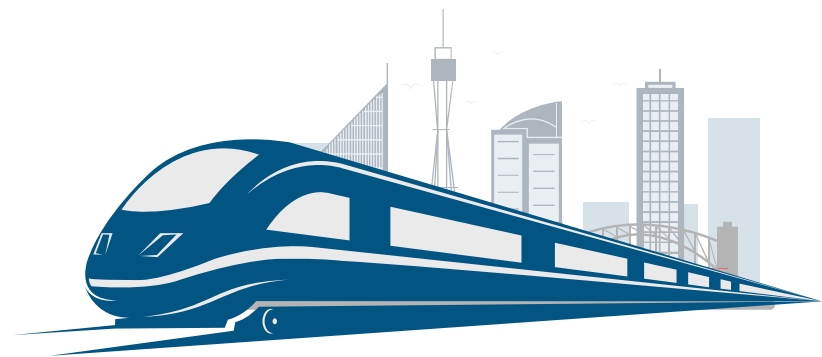
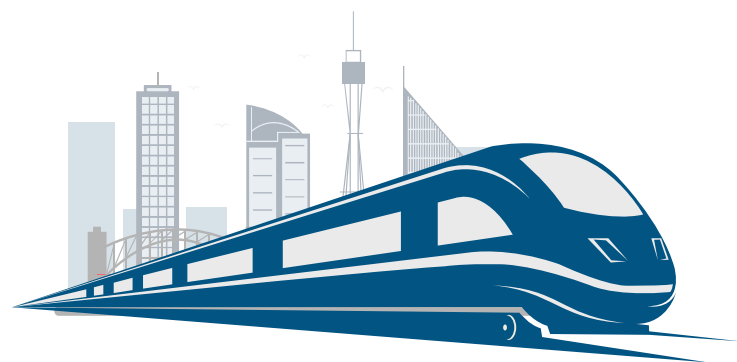


基于深度学习的低温环境锂离子电池状态预测

西南交通大学

曹晓玲

2026.05.22





西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE

- 01 研究背景、现状与技术路线
- 02 低温实验设计与电池特性分析
- 03 低温SOC预测模型与结果分析
- 04 低温SOH健康特征构建与迁移预测
- 05 研究结论与未来展望





西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE



01

研究背景、现状与技术路线

02

低温实验设计与电池特性分析

03

低温SOC预测模型与结果分析

04

低温SOH健康特征构建与迁移预测

05

研究结论与未来展望

01 研究背景、现状与技术路线



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

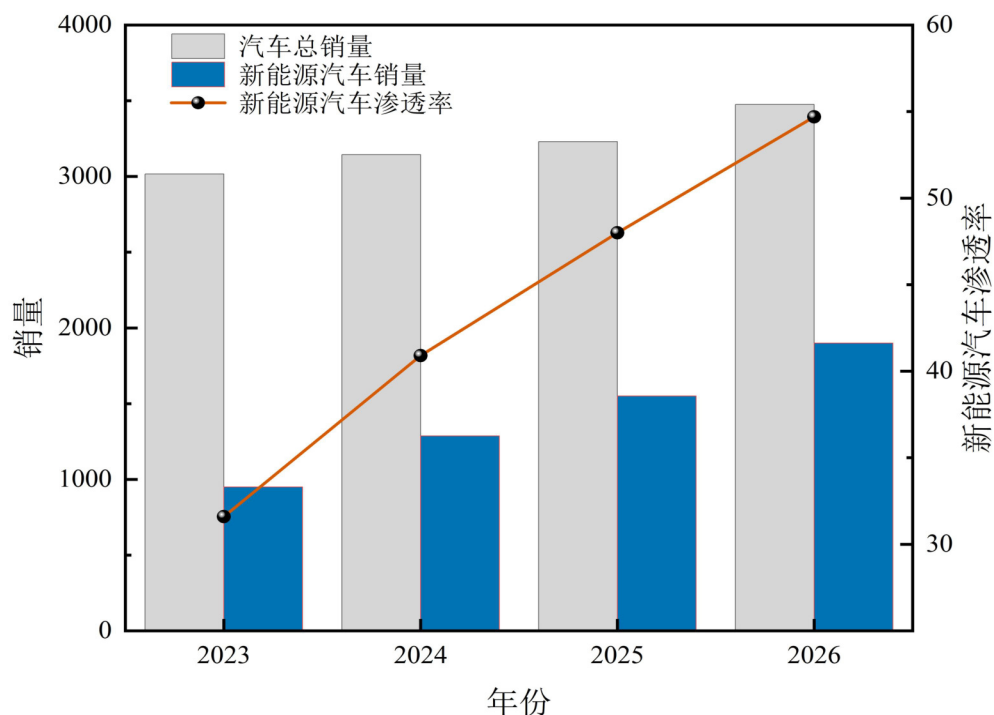


机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

研究背景：新能源汽车发展推动及BMS状态估计需求提升

新能源汽车销量与渗透率变化趋势图



新能源汽车销量持续增长，渗透率不断提升，推动动力电池及BMS市场快速发展。

新能源汽车产业规模大

代表性新能源汽车企业



动力电池广泛应用



BMS实时监测与管理



SOC/SOH预测需求提升



01研究背景、现状与技术路线



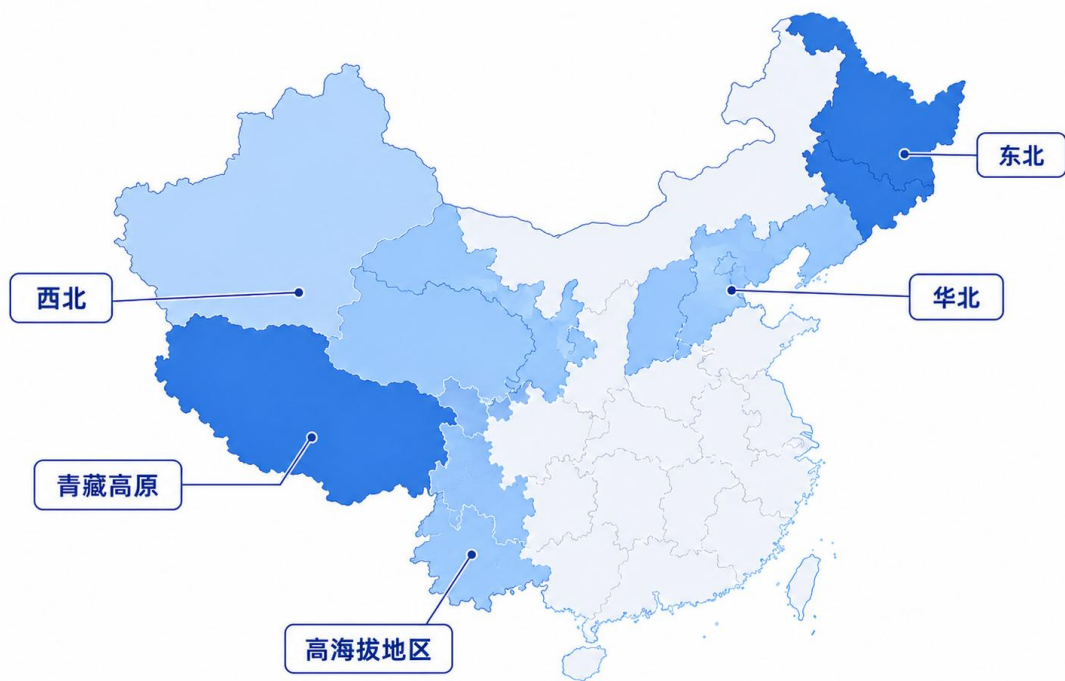
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

研究背景：低温环境加剧电池状态预测难度



我国典型低温用车区域示意图



冬季低温场景覆盖范围广，对SOC/SOH预测精度和稳定性提出更高要求。

研究现状与不足归纳

SOC预测研究方面

现状:

已有研究从安时积分、等效电路模型发展到EKF/UKF、LSTM、GRU等数据驱动方法，能够较好实现常温或部分工况下的SOC估计。

不足:

但针对低温条件下一些多工况动态负载的验证仍不足，对电压瞬态响应及温度扰动耦合特征表征不够。

SOH预测研究

现状:

现有SOH预测多基于容量、电压、内阻等健康特征，并结合SVR、GPR、LSTM等模型进行状态估计。

不足:

但低温循环老化实验周期长、成本高，低温SOH样本有限，导致目标域建模和早期寿命预测受到限制。

低温状态预测研究

现状:

已有研究多从温度修正、跨温区建模等方面提升低温状态预测精度。

不足:

对低温动态工况和小样本健康预测场景的适应性仍有不足、跨电芯状态预测的稳定性和泛化能力仍需提升。

基于上述问题，围绕低温动态SOC预测与低温小样本SOH迁移预测展开研究。

01研究背景、现状与技术路线



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

研究内容

• 低温实验设计与电池特性分析

构建10°C、0°C、-10°C动态放电数据集
获取10°C低温循环老化数据

分析容量、能量、电压、内阻及SOH衰减规律

• 面向低温动态工况的SOC预测模型研究

提出TGR-MSR-LSTM模型

增强温度扰动感知与多尺度动态特征表征

• 面向低温小样本的SOH迁移预测研究

提出TL-TransLSTM迁移预测模型

实现低温条件下SOH早期外推与跨域预测

技术路线



形成“低温实验数据支撑—状态预测模型构建—模型性能验证”的研究主线



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE

01

研究背景、现状与技术路线

02

低温实验设计与电池特性分析

03

低温SOC预测模型与结果分析

04

低温SOH健康特征构建与迁移预测

05

研究结论与未来展望



03 低温实验设计与电池特性分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

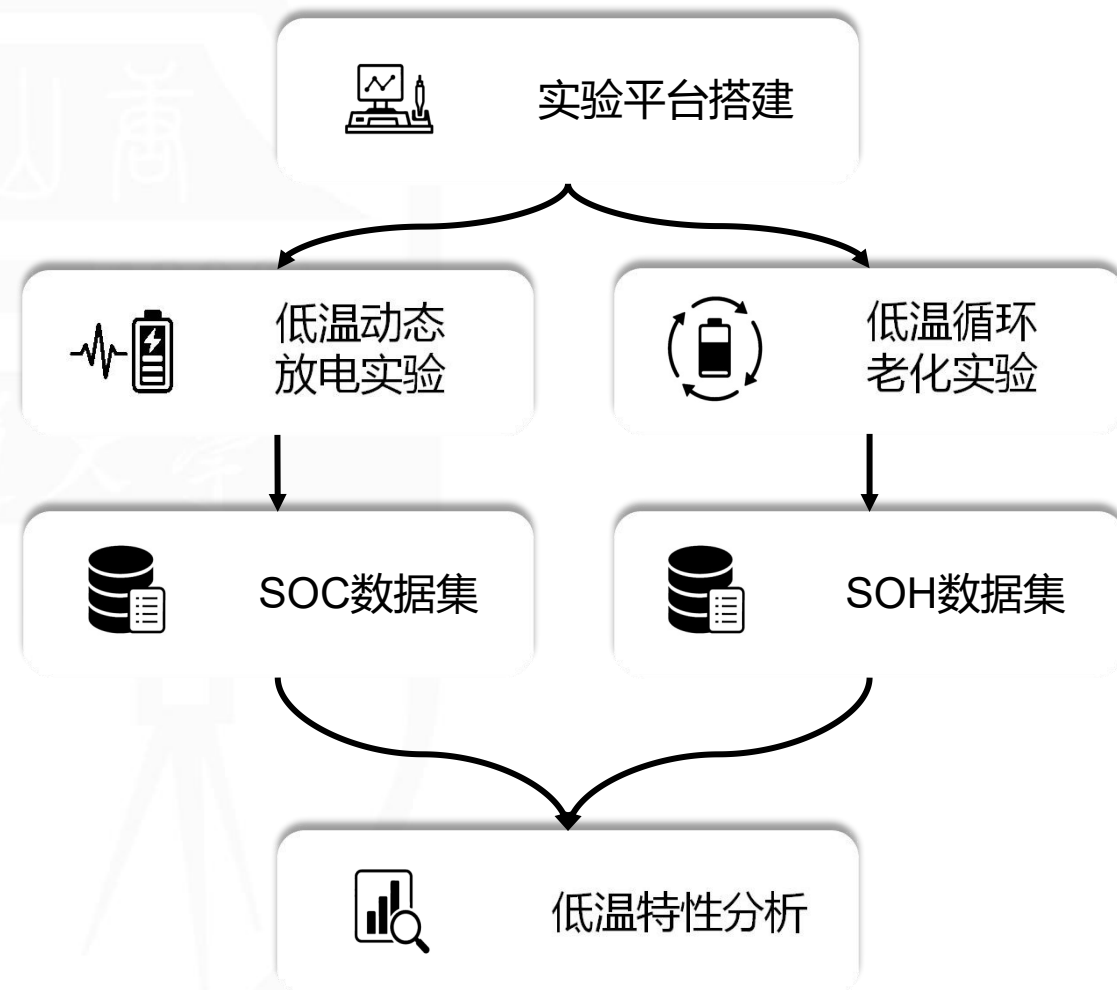
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

实验目的

- 围绕低温环境下锂离子电池状态预测需求，开展**动态放电实验**与**循环老化实验**，获取SOC与SOH建模所需数据。

实验内容

- 低温动态放电实验：
构建多温度、多工况SOC预测数据集
- 低温循环老化实验：
获取10°C条件下SOH衰减数据
- 特性分析：
分析容量、能量、电压、表观直流内阻及SOH衰减变化规律



03 低温实验设计与电池特性分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

实验平台与测试对象



测试对象

NCR18650GA三元锂电池

额定容量: 3.35 Ah

额定电压: 3.6V

电压范围: 2.5-4.2V

主要设备

电池充放电测试仪: BTS-5V60A

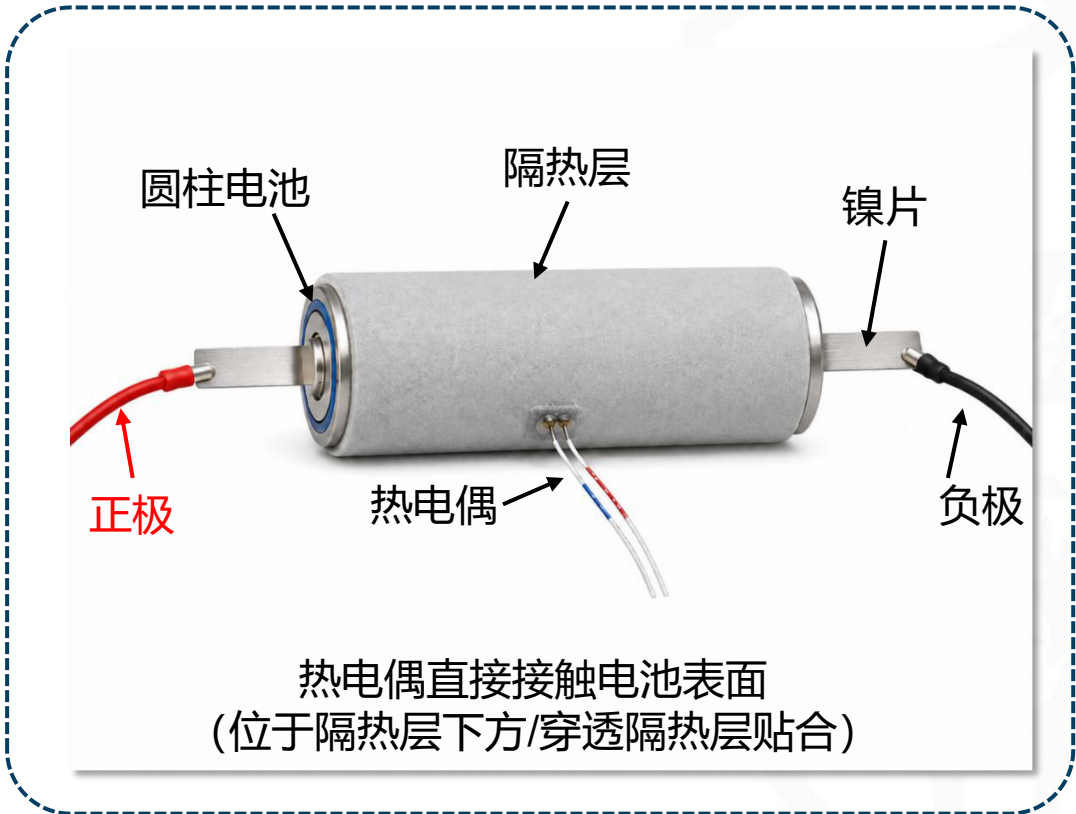
恒温环境箱: SDL410FH

数据采集仪: Keysight DAQ970A

采集数据: 电压、电流、容量、能量、温度

实验平台可实现低温环境下电压、电流、温度和容量等数据的同步采集，为后续SOC/SOH建模提供数据基础。

电池测试示意图



电池初始容量一致性验证

初始容量标定结果		
测试号	电池1	电池2
平均值	3.3627 Ah	3.3415 Ah
厂家额定容量	3.35 Ah	
相对偏差/%	+0.38%	-0.25%
平均容量差异: 0.63		



低温动态放电实验(SOC)

- 实验目的

模拟新能源汽车典型动态运行场景，构建低温SOC预测数据集
- 支撑作用

验证SOC模型在多温度、多工况下的适应能力
- 支撑作用

支撑作用

工况	代表场景	温度	主要特点
DST	动态应力测试	10℃ 0℃ -10℃	脉冲电流频繁，突出瞬态响应
FUDS	城市道路		中低速、频繁启停
UDDS	城市循环		多段加减速，覆盖城市驾驶差异
HWFET	高速巡航		负载较平稳，持续时间较长
US06	激烈驾驶		高动态、大电流波动

低温循环老化实验(SOH)

- 实验目的

获取低温条件下容量衰减规律，为SOH建模提供标签数据
- 实验对象

B1-B4
- 支撑作用

构建低温SOH标签，并支撑健康特征分析与迁移预测

电池编号	充电倍率	放电倍率	温度	有效循环次数
B1、B2	0.5C	0.2C	10℃	85
B3、B4	1C	0.2C	10℃	85

03 低温实验设计与电池特性分析



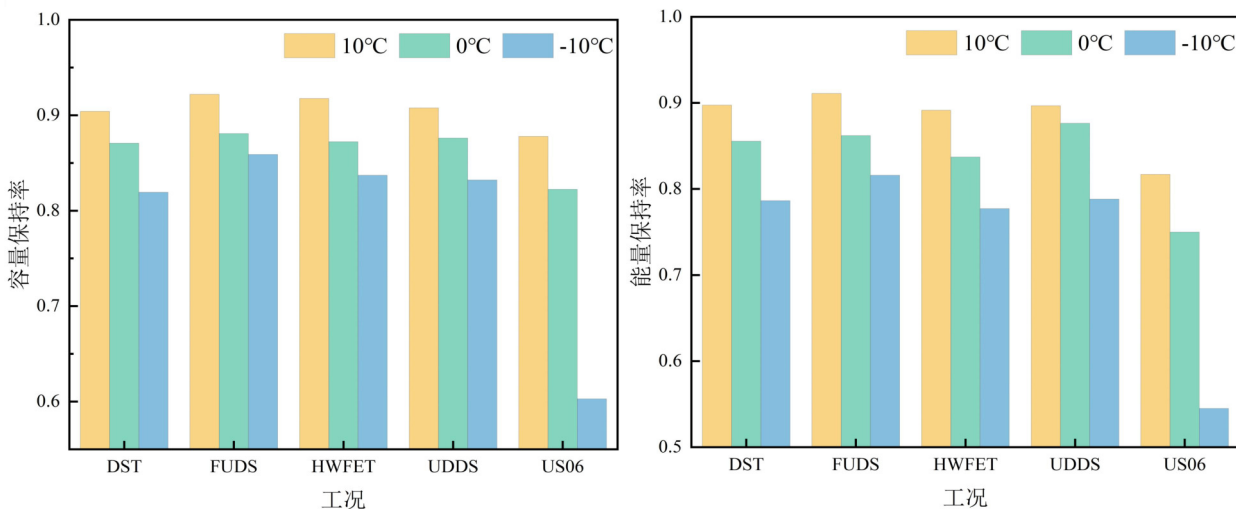
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

容量与能量保持率

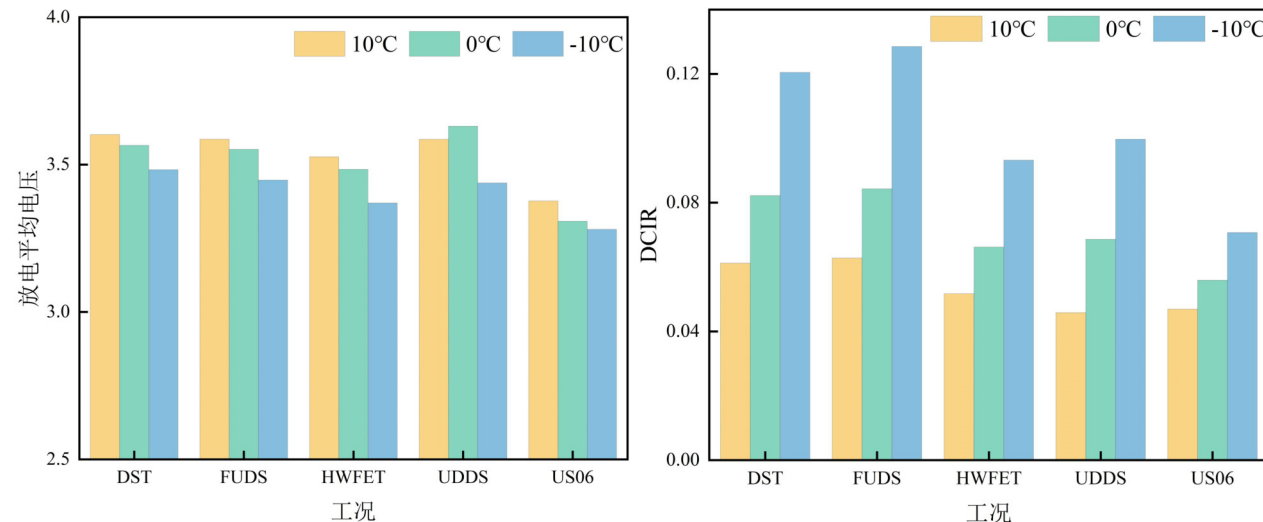


温度降低→容量/能量保持率下降

US06工况下降最明显

-10°C下：容量保持率**60.28%**，能量保持率**54.50%**

平均电压与直流内阻



低温导致电压平台整体下移

低温显著增大表观直流内阻

US06工况下，平均电压由**3.3765 V**降至**3.2801 V**，表观直流内阻由**0.0469 Ω**升至**0.0707 Ω**。

03 低温实验设计与电池特性分析



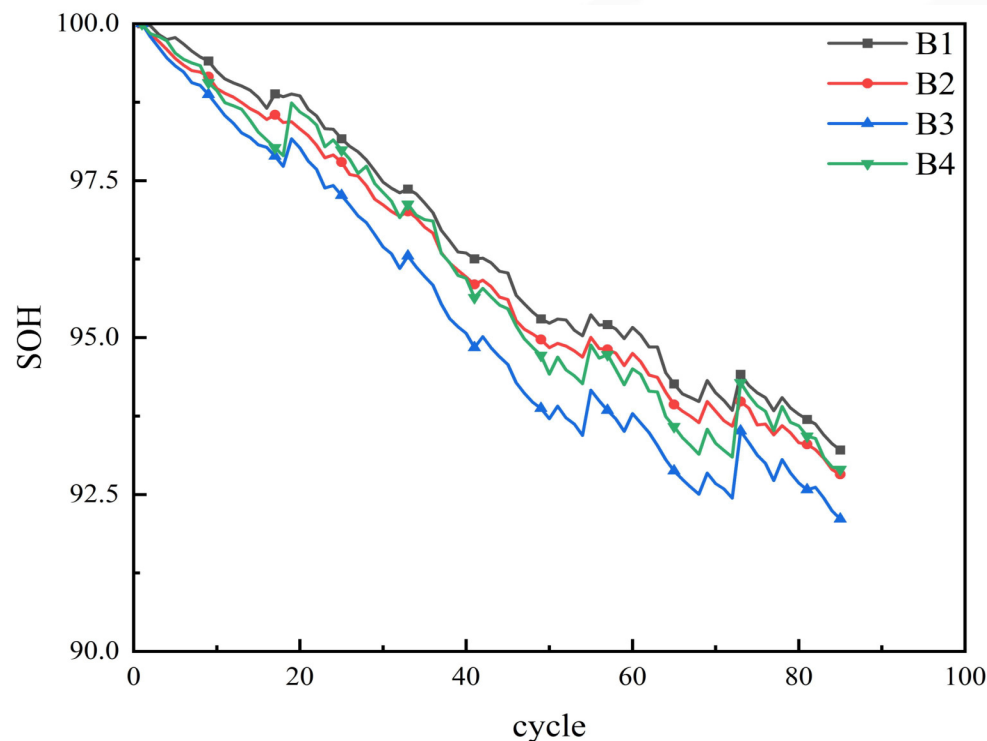
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

低温环境锂电池SOH衰减变化



- B1、B2：0.5C充电组
- B3、B4：1C充电组

- 整体趋势
10°C循环老化过程中，B1~B4电池SOH均随循环次数增加而持续下降。

- 倍率影响
相比0.5C组，1C组SOH下降更快、波动更明显，说明较高充电倍率会加剧容量衰减。

- 数据价值
低温SOH数据样本虽有限，但具有连续退化趋势，可作为迁移学习目标域数据。



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE

01

研究背景、现状与技术路线

02

低温实验设计与电池特性分析

03

低温SOC预测模型与结果分析

04

低温SOH健康特征构建与迁移预测

05

研究结论与未来展望



低温动态工况下SOC预测问题



- **低温扰动**：内阻增大、极化增强，常温模型适应性下降



- **动态工况**：电流波动频繁，端电压压降与恢复过程明显



- **时序演化**：SOC同时包含短时扰动与长时趋势特征

需要构建能够同时表征温度扰动、多尺度动态特征和时序依赖关系的SOC预测模型。



低温环境

内阻增大/极化增强



动态负载

电流波动/电压压降



时序演化

短时扰动/长时趋势

SOC预测
误差增大

核心问题：低温扰动与动态工况耦合下，SOC映射关系更加复杂。

04 低温SOC预测模型与结果分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



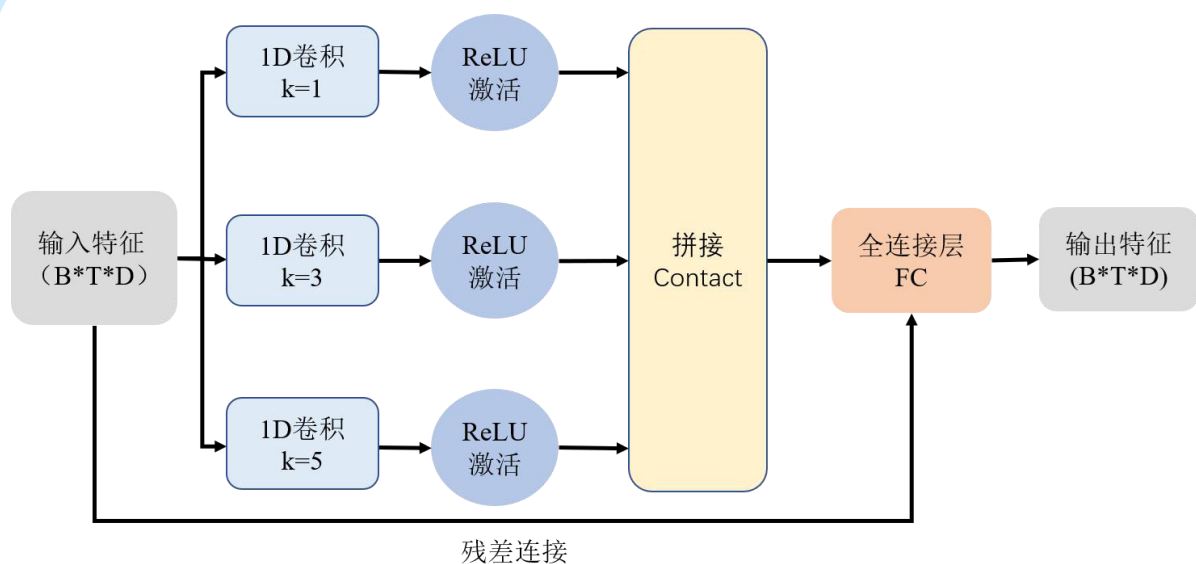
机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

TGR-MSR-LSTM模型核心结构 (1/2) : MSR-LSTM特征提取与时序建模

输入序列 → MSR多尺度特征提取 → LSTM时序建模 → TGR温度门控残差修正 → SOC预测输出

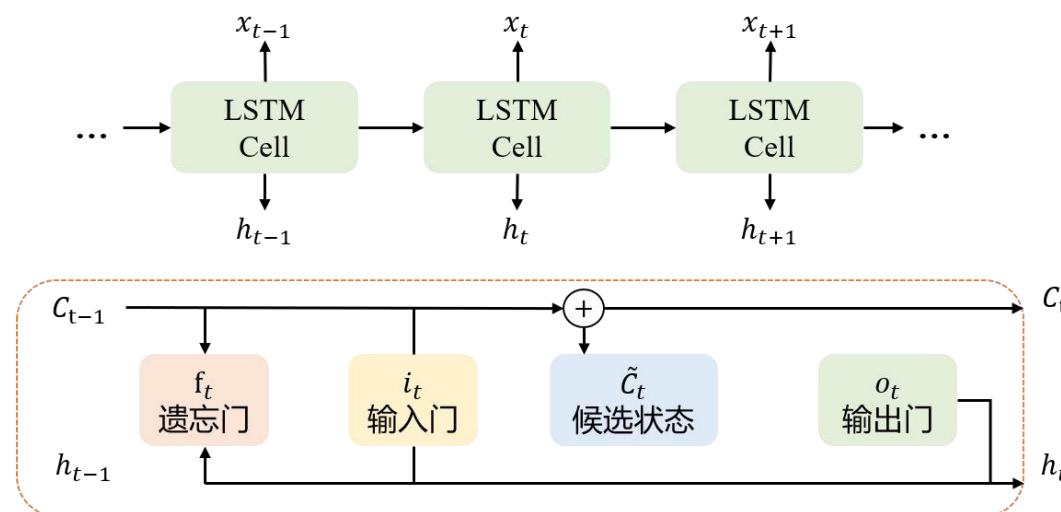
MSR多尺度特征提取模块



结构特点: **多分支卷积**并行提取不同尺度信息, 融合后通过全连接映射并结合残差连接输出。

作用: 增强对多尺度动态特征的表达能力, 提升对复杂工况下短时波动与趋势变化的捕捉能力。

LSTM时序建模模块

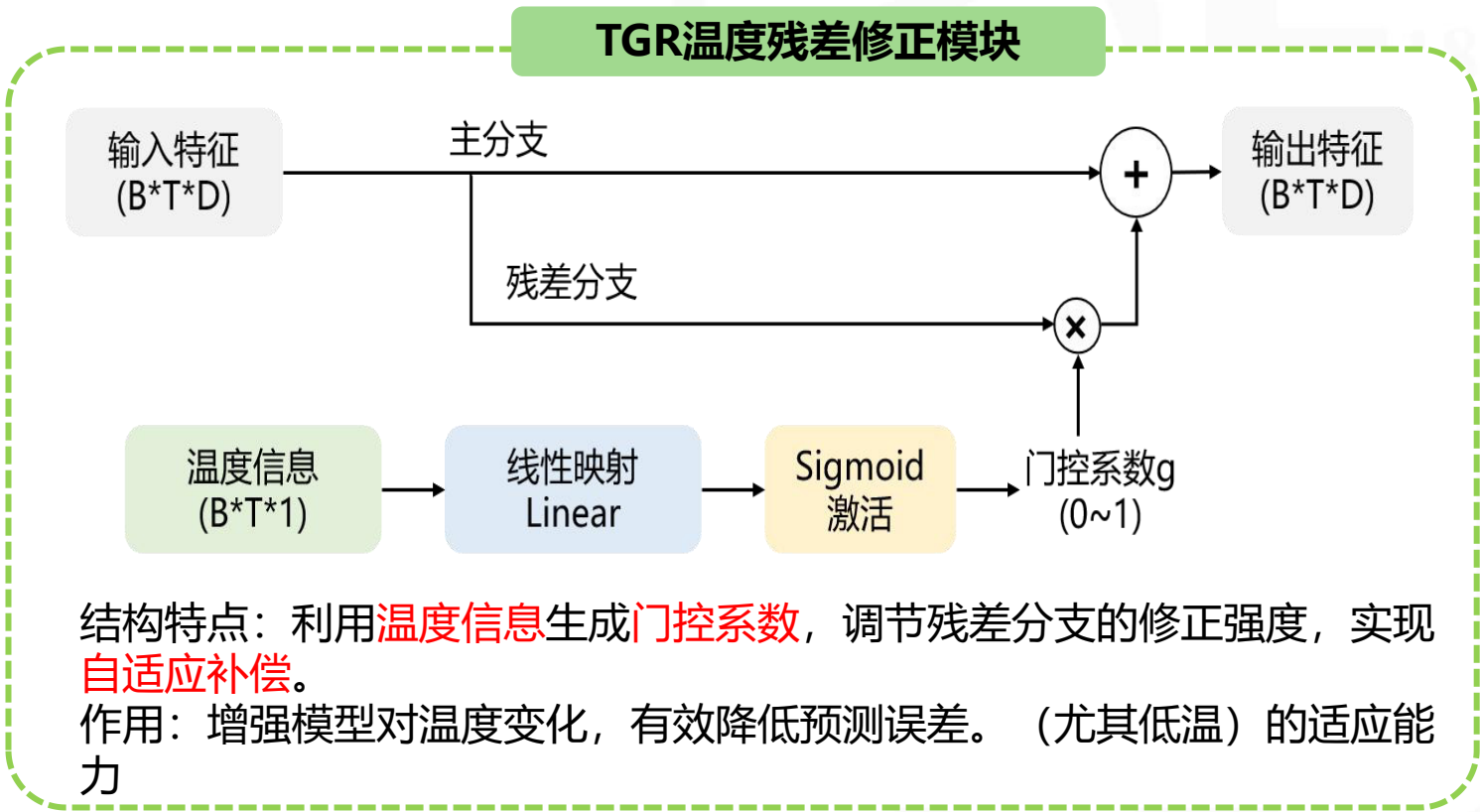
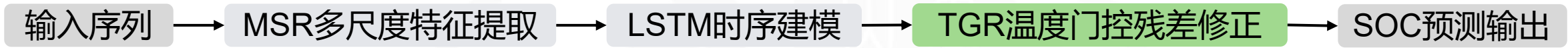


结构特点: 通过**输入门**、**遗忘门**、**输出门**控制信息流动, 保留有效历史信息, 抑制无关扰动。

作用: 刻画SOC演化的长期时序依赖与记忆性, 提高预测的连续性与稳定性。

04 低温SOC预测模型与结果分析

TGR-MSR-LSTM模型核心结构 (2/2) : TGR温度门控残差修正



模型主要参数设置	
参数	设置
激活函数	ReLU
LSTM层数	2
隐藏单元	64
门控激活	Sigmoid
优化器	Adam
学习率	0.001
批量大小	64
损失函数	MSE

04 低温SOC预测模型与结果分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

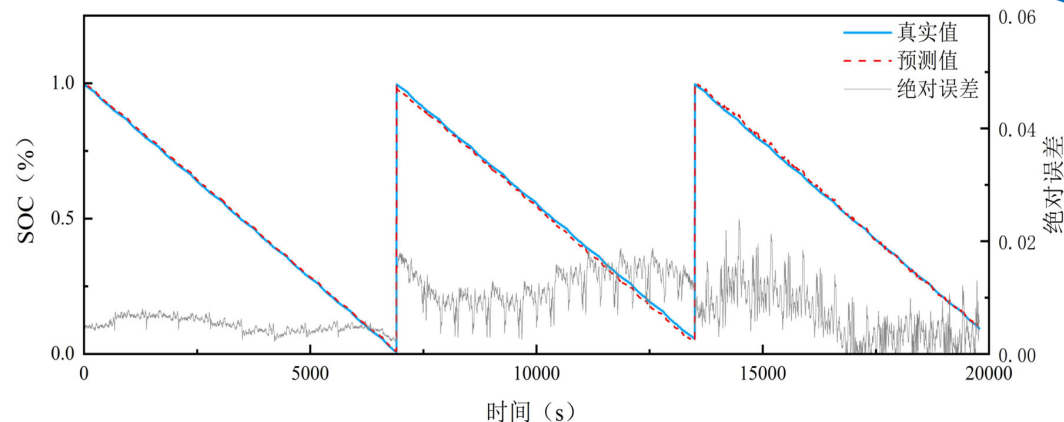


机械工程学院

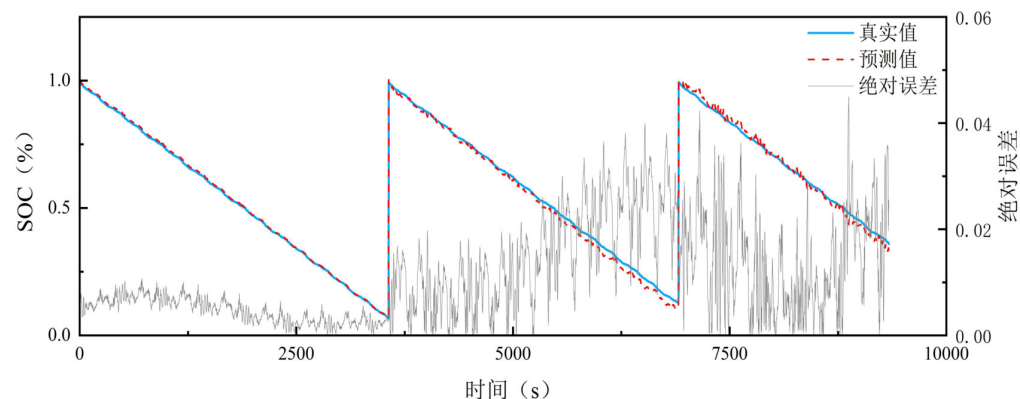
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

典型工况下SOC预测结果

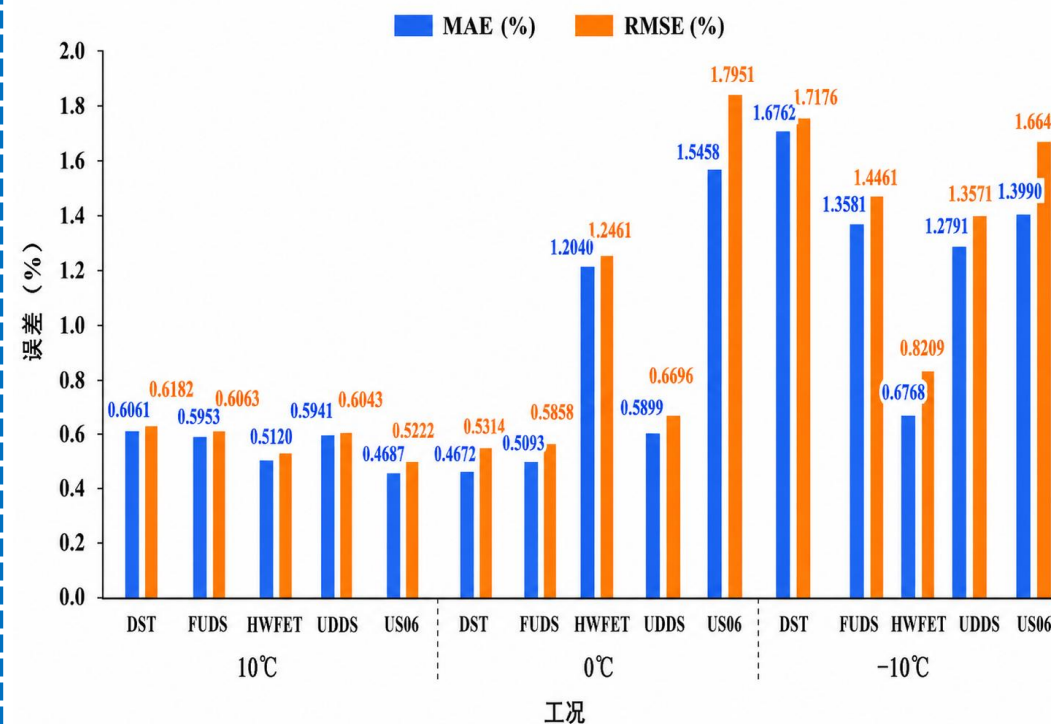
FUDS



US06



不同温度和行驶循环下的SOC预测误差对比



04 低温SOC预测模型与结果分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

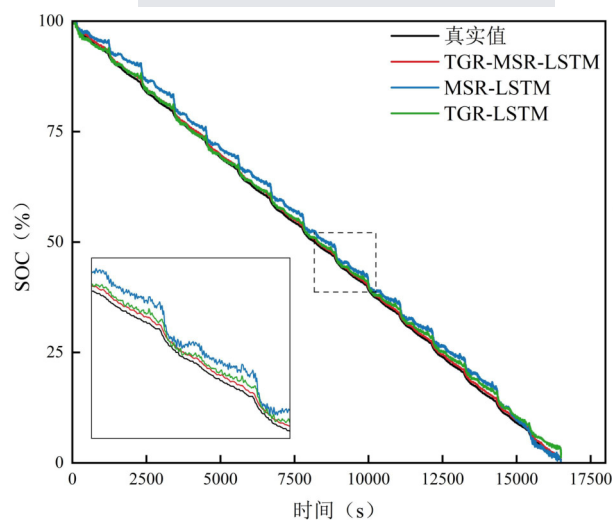


机械工程学院

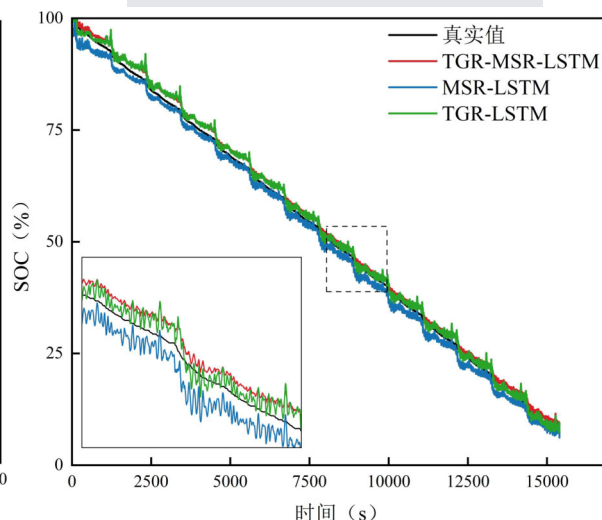
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

SOC预测模型消融实验预测曲线对比

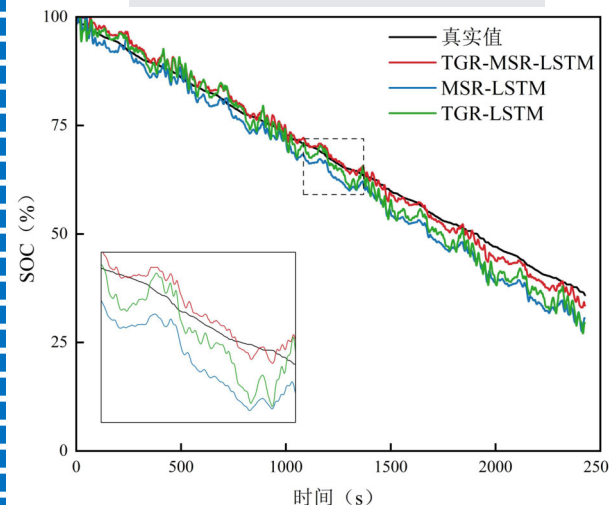
FUDS 10°C



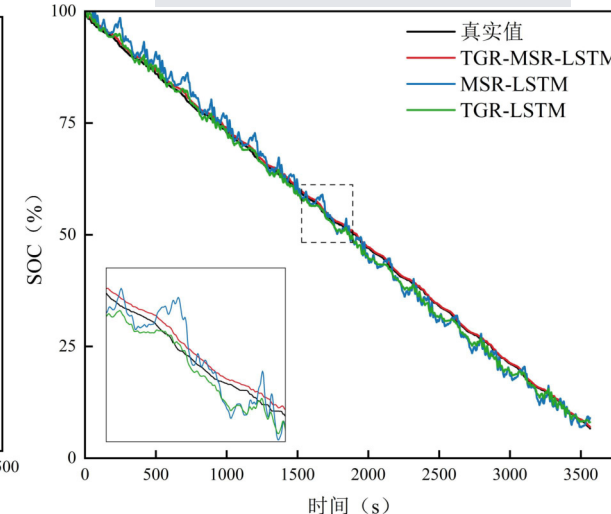
FUDS -10°C



US06 10°C

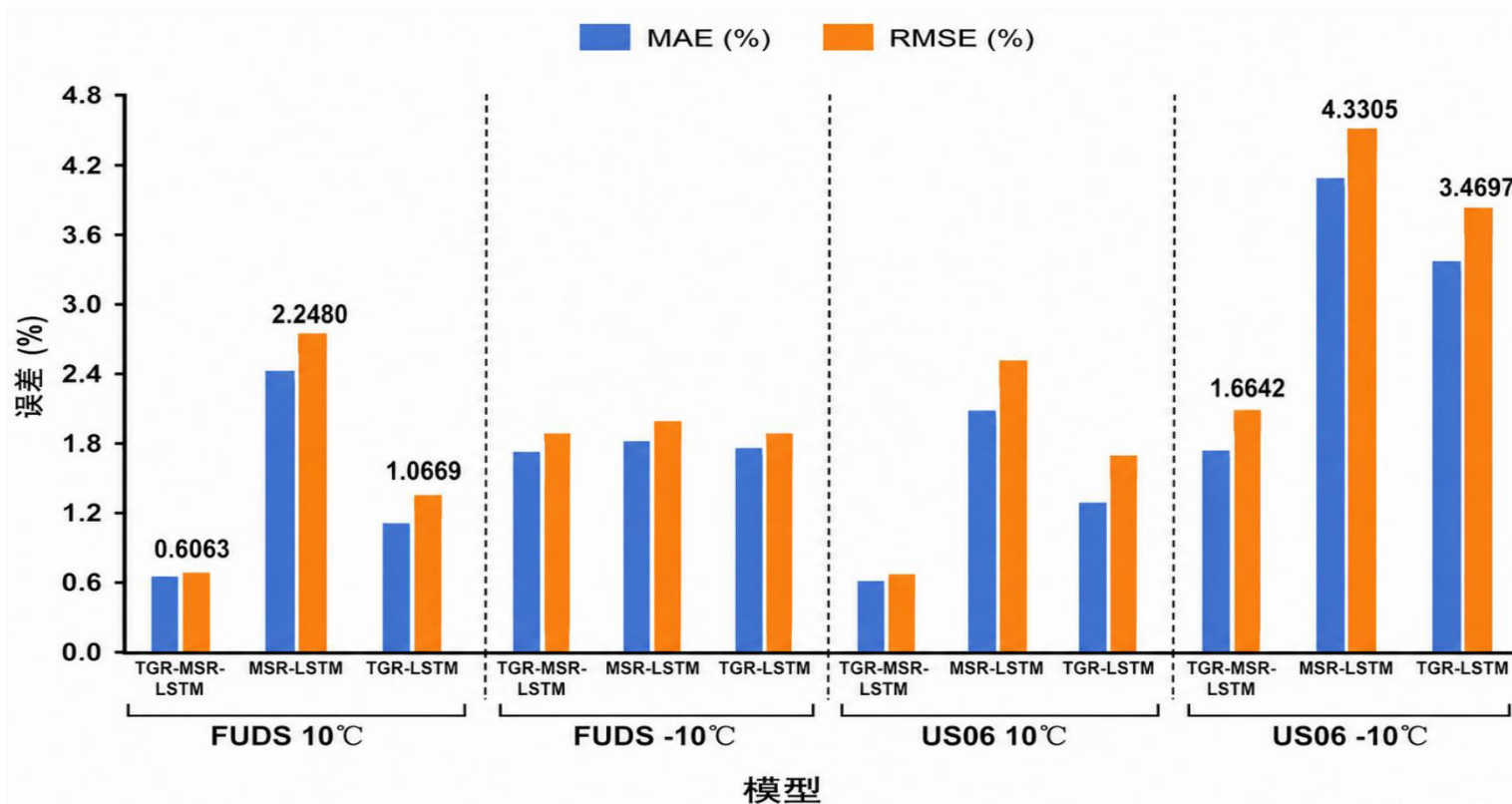


US06 -10°C



与MSR-LSTM和TGR-LSTM相比，完整的TGR-MSR-LSTM模型在不同湿度和动态工况下均能更好地跟踪真实SOC变化，尤其在低温和强动态工况下表现更稳定。

SOC预测模型消融实验误差对比



- TGR-MSR-LSTM在四组典型场景下均取得较低的MAE和RMSE，整体预测精度最高。
- 在US06-10°C工况下，完整模型RMSE为1.3990%，明显低于MSR-LSTM(3.7416%)和TGR-LSTM(2.7770%)，在低温强动态场景下优势突出。

04 低温SOC预测模型与结果分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

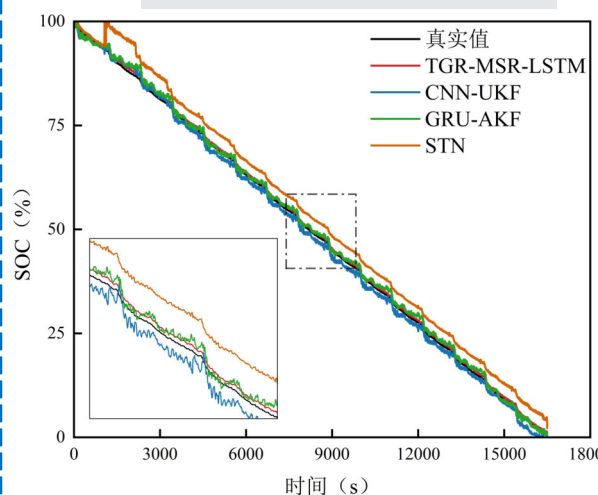


机械工程学院

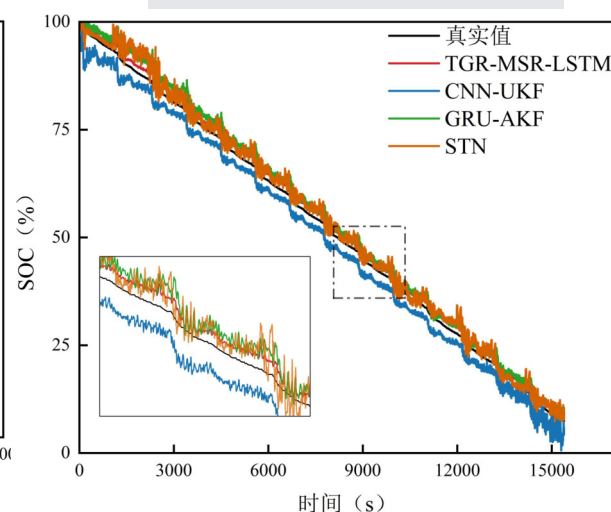
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

SOC预测模型对比实验预测曲线

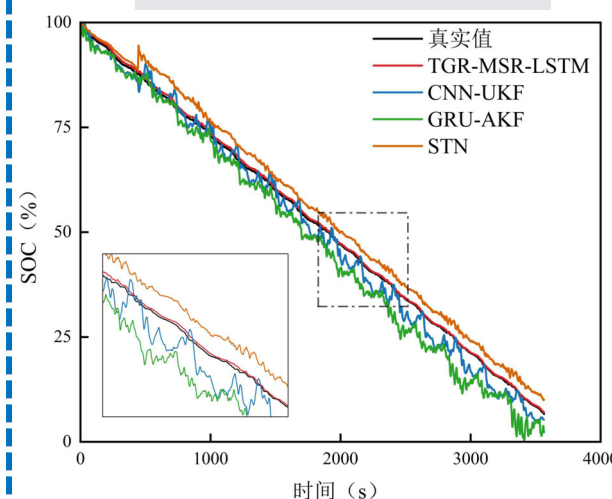
FUDS 10°C



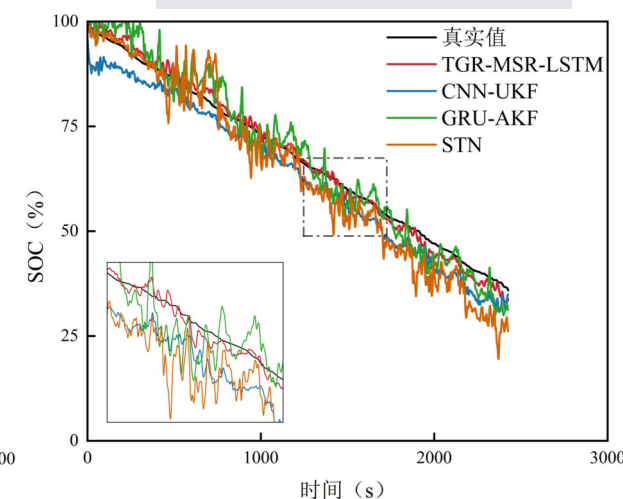
FUDS -10°C



US06 10°C



US06 -10°C



与对比模型相比，TGR-MSR-LSTM预测曲线与真实SOC整体贴合更好，在FUDS和US06低温动态工况下均表现出更稳定的跟踪能力。

04 低温SOC预测模型与结果分析



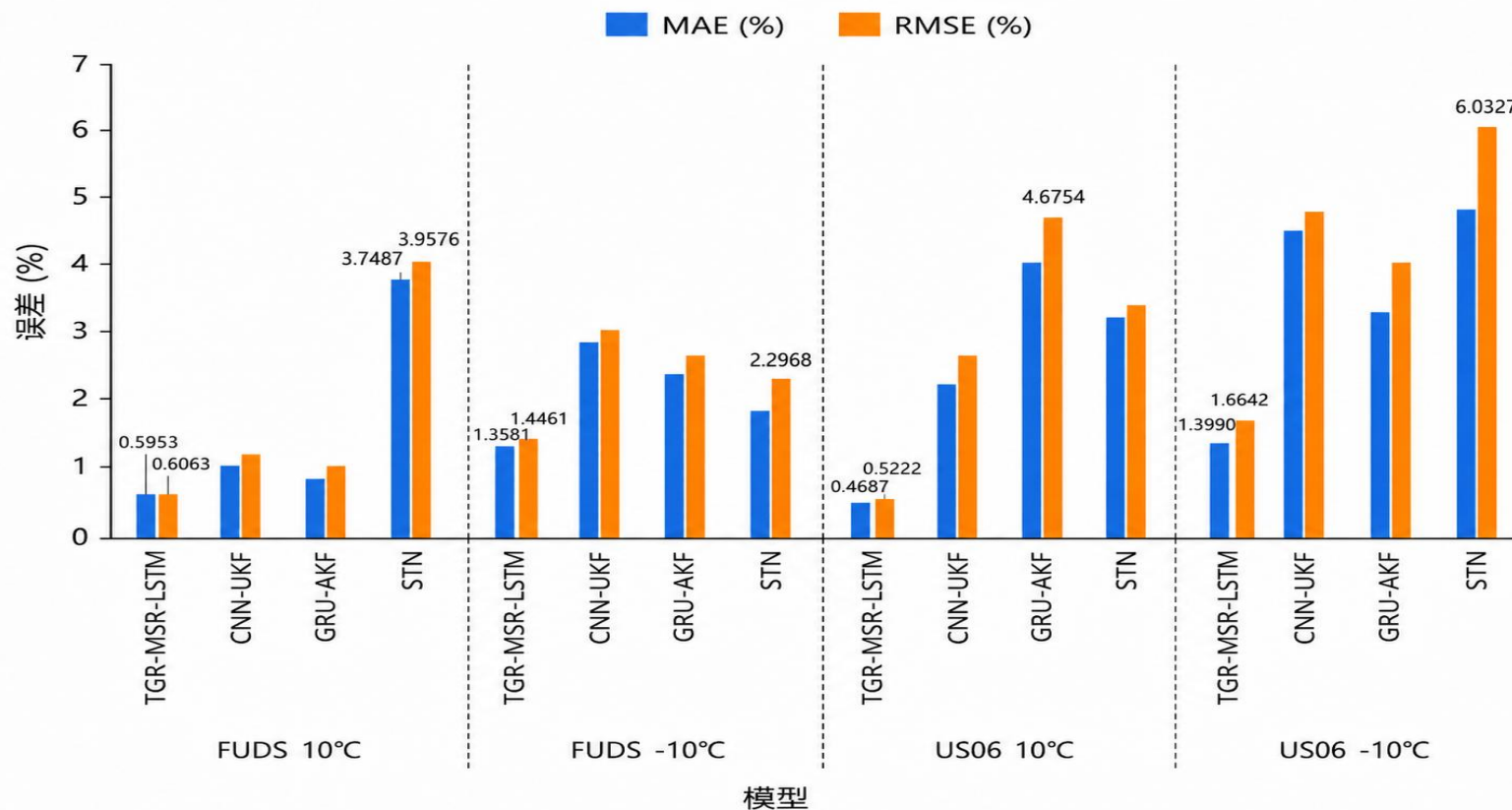
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

SOC预测模型对比实验误差对比



结果分析

- TGR-MSR-LSTM与已有代表性方法相比均取得较低的误差。
- 在US06、-10°C强动态低温工况下，本文模型MAE为1.3990%，RMSE为1.6642%，明显优于对比模型。
- 结果表明，本文模型在跨温度、跨工况SOC预测中具有更好的稳定性和泛化能力。



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE

01

研究背景、现状与技术路线

02

低温实验设计与电池特性分析

03

低温SOC预测模型与结果分析

04

低温SOH健康特征构建与迁移预测

05

研究结论与未来展望



低温小样本条件下SOH预测难点



» **核心问题：**如何利用常温退化先验，提高低温小样本条件下SOH预测精度。

04 SOH健康特征构建与迁移预测



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

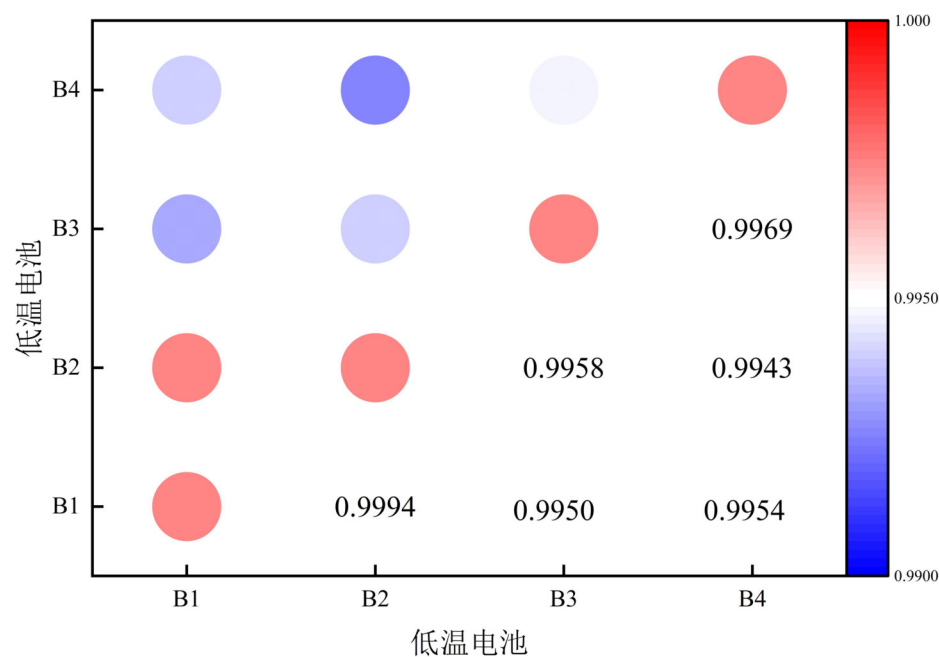


机械工程学院

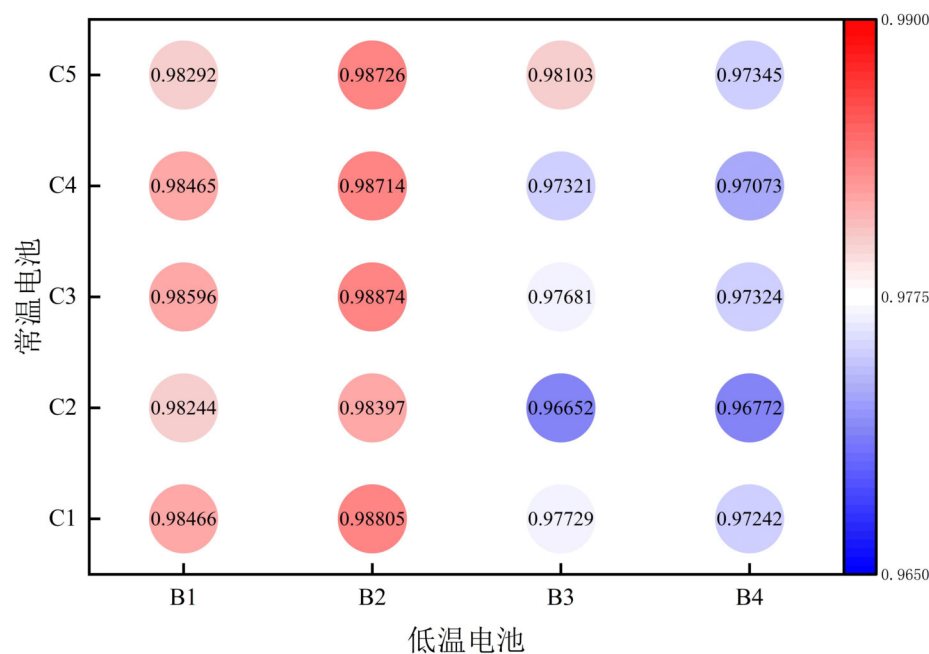
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

迁移学习数据域差异分析

组内相似性分析

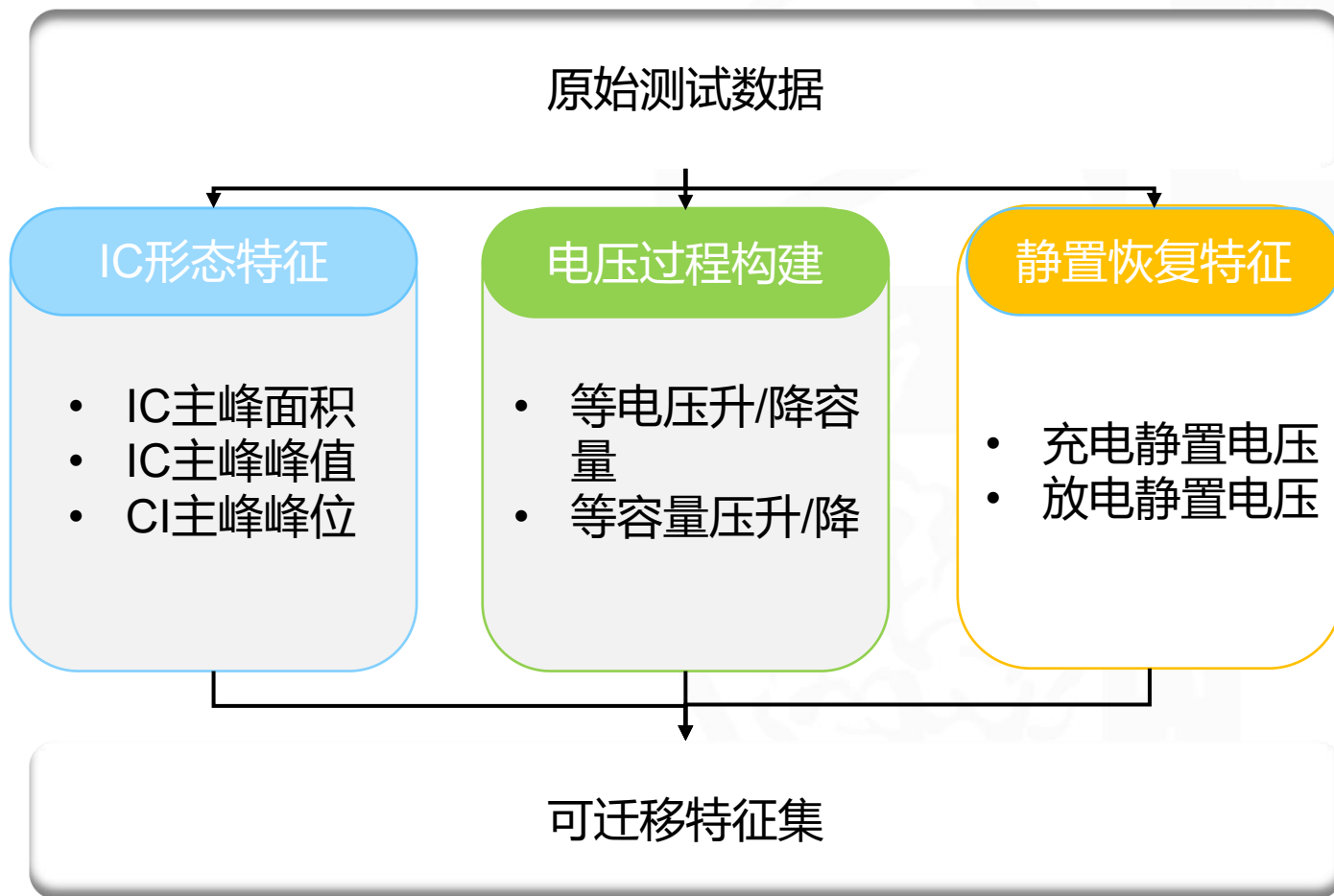


组间相似性分析



低温电池组内相关性较高，且与常温源域样本保持较强相似性，说明源域数据具备迁移到低温SOH预测任务的可行性。

健康特征构建与退化规律



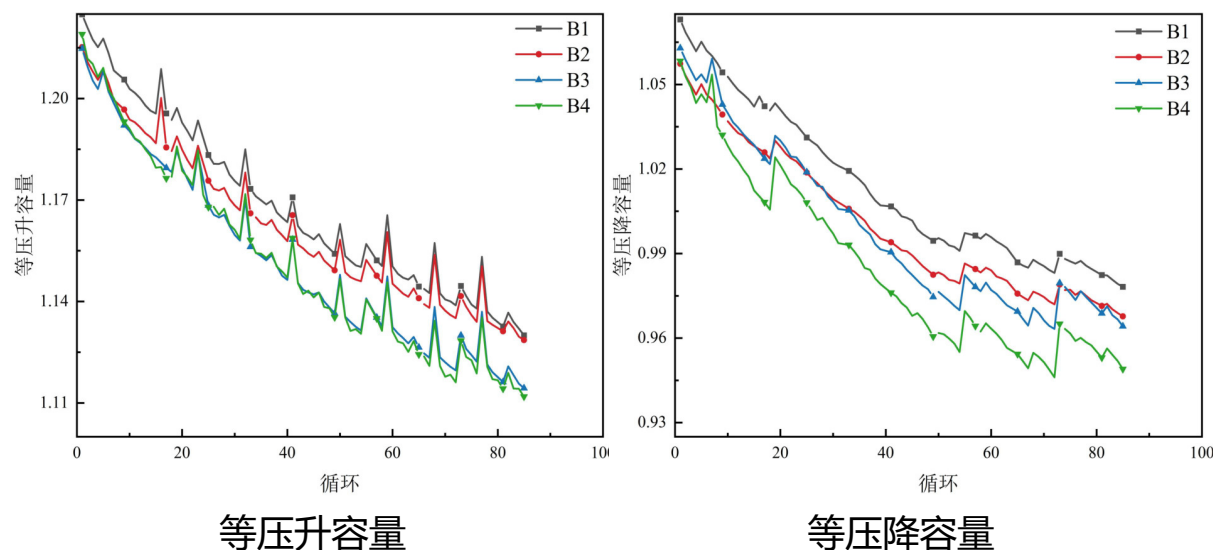
- IC形态特征
表征活性物质衰减、反应活性变化

- 电压过程特征
表征容量衰退、极化增强

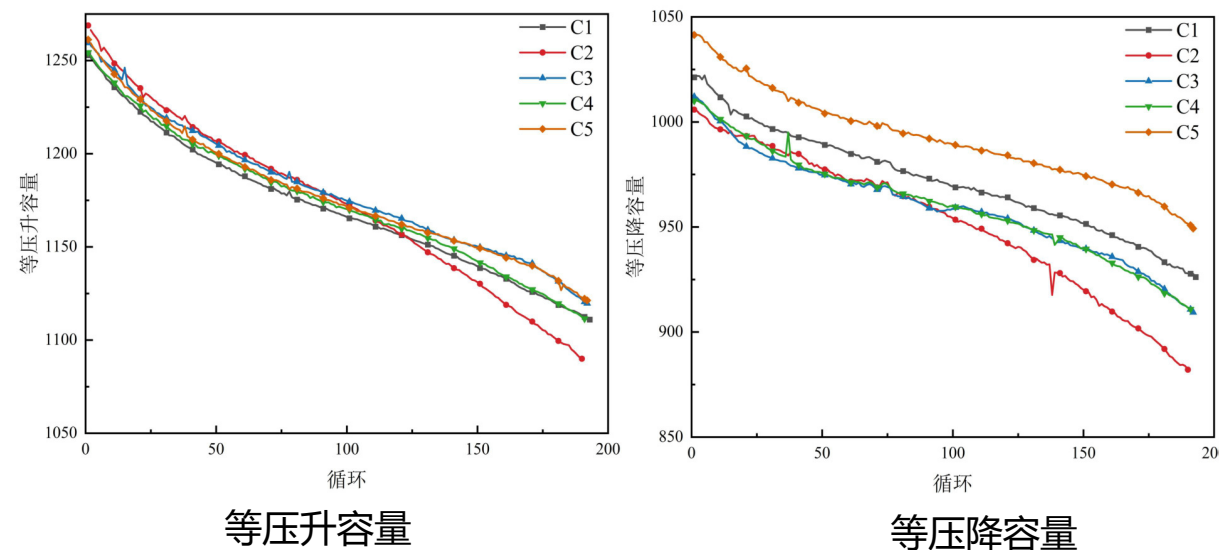
- 静置恢复特征
表征电化学恢复能力与老化程度

等电压区间容量特征

低温电池



常温电池



从相关性结果看，**等压升容量**与SOH的Pearson相关系数在**0.9747到0.9991**之间；**等压降容量**与SOH的Pearson相关系数在**0.9781到0.9967**之间。本文选择**等压降容量**作为**HF2**，主要是因为其与SOH相关性高且稳定，同时更能反映放电过程中容量衰退和低温极化增强对电压平台的影响。

04 SOH健康特征构建与迁移预测



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

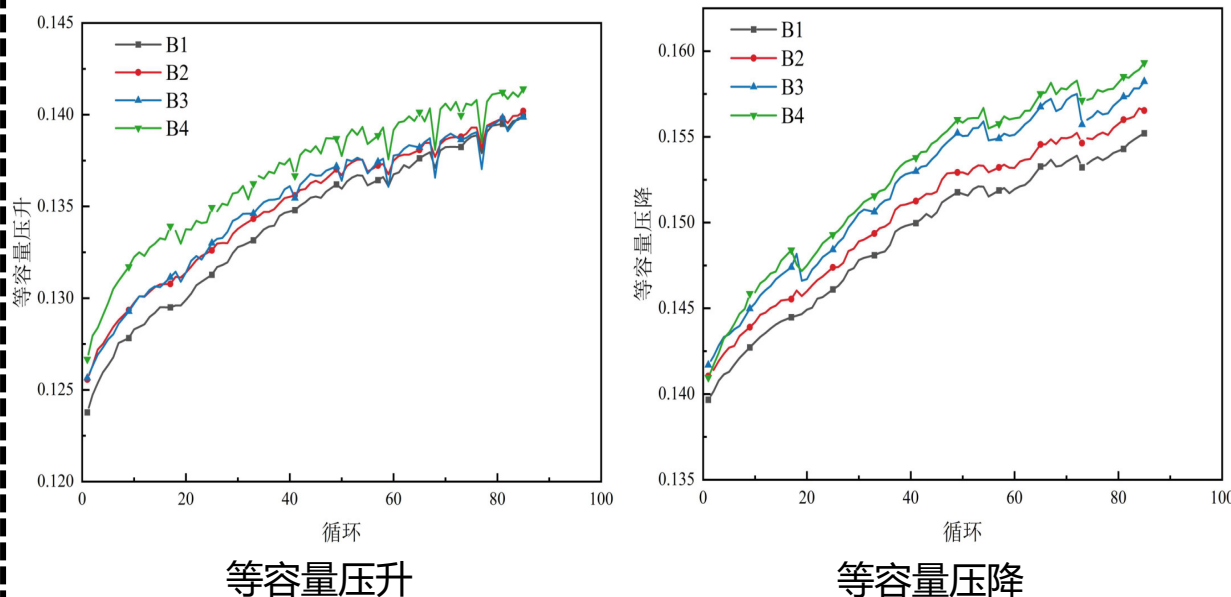


机械工程学院

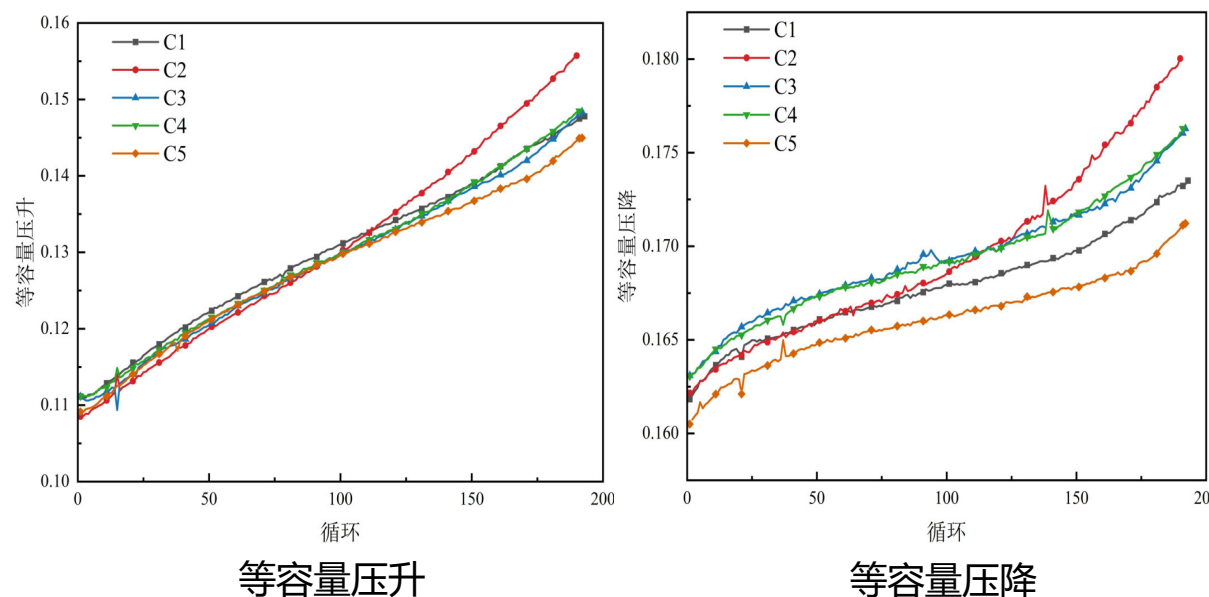
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

等容量区间电压特征

低温电池



常温电池



从相关性结果看，**等容量压升**与SOH呈显著负相关，Pearson相关系数绝对值为**0.9587到0.9989**；**等容量压降**的相关性更稳定，Pearson相关系数绝对值为**0.9815到0.9937**。本文将其作为后续SOH预测模型输入特征，分别记为**HF3和HF4**。

04 SOH健康特征构建与迁移预测



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

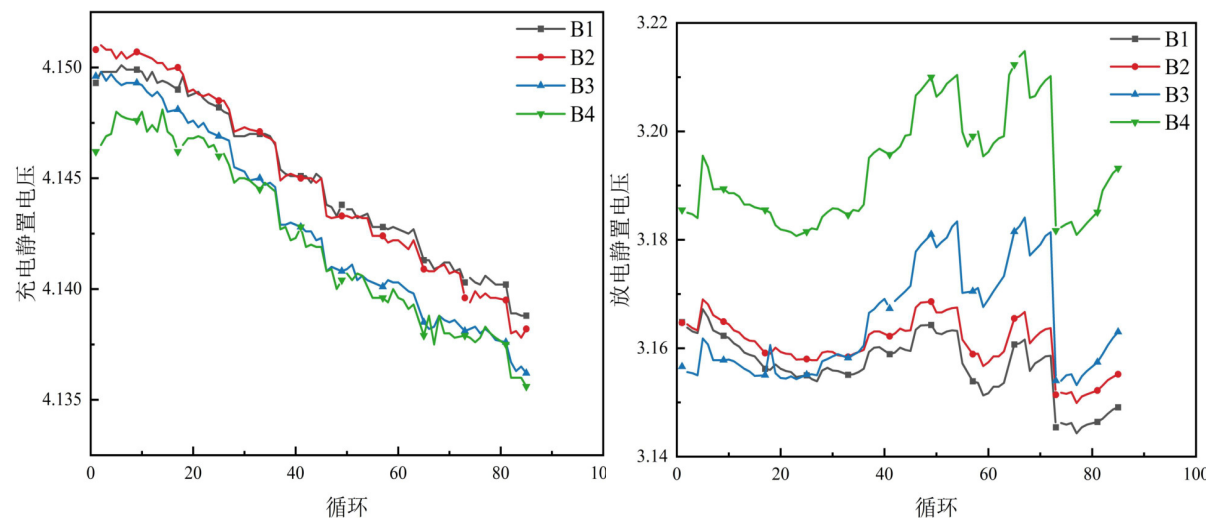


机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

静置电压特征

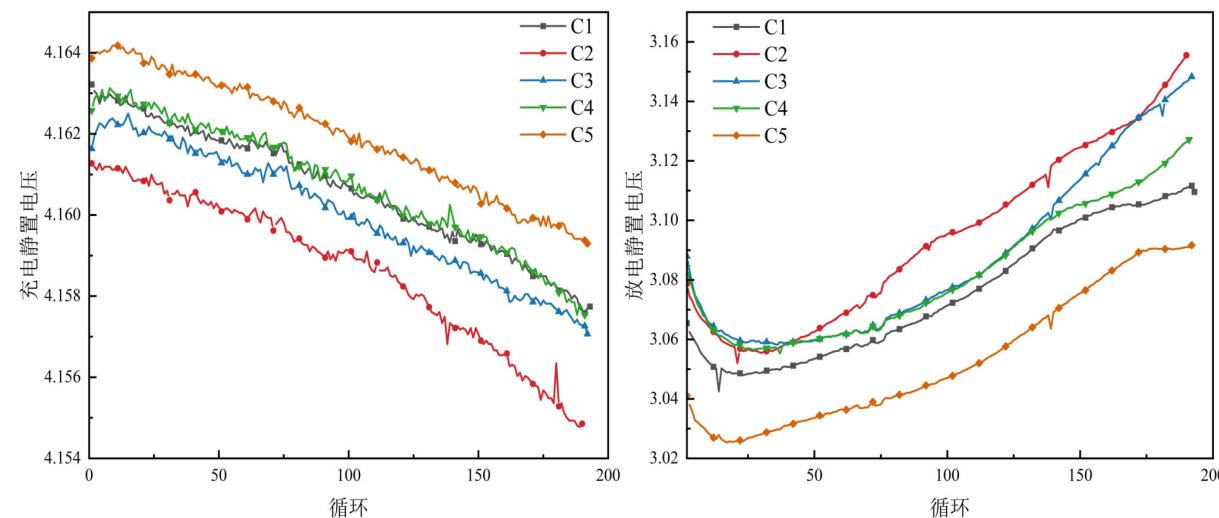
低温电池



充电静置电压

放电静置电压

常温电池



充电静置电压

放电静置电压

从定量结果看，**充电静置电压**与SOH的相关性较稳定，Pearson相关系数为**0.9703到0.9897**，说明其与SOH具有较强的线性关系和单调关系。相比之下，**放电静置电压**相关性波动较大，在低温电池中既有正相关也有负相关，Pearson从**0.4987变化到-0.5896**，稳定性不足。选取**充电静置电压**作为SOH预测输入特征，记为**HF5**

04 SOH预测模型与结果分析



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

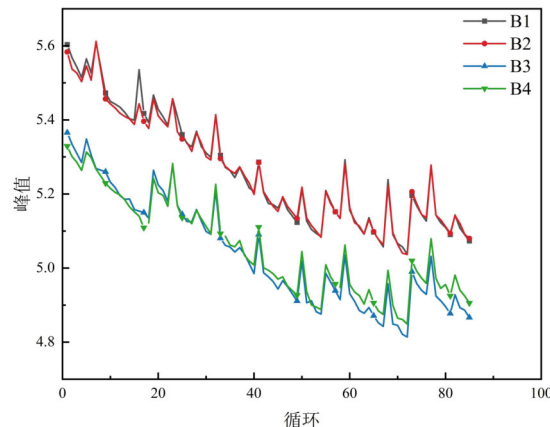


机械工程学院

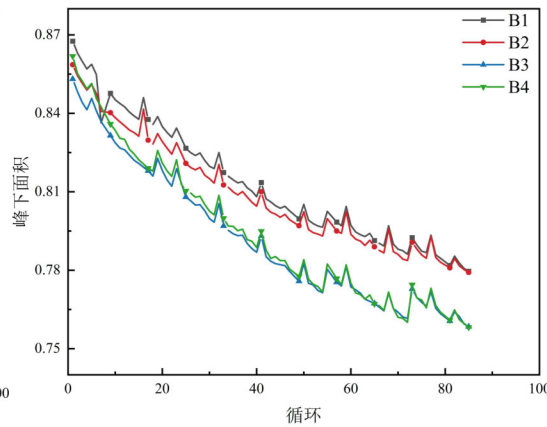
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

IC(容量增量曲线)形态学特征

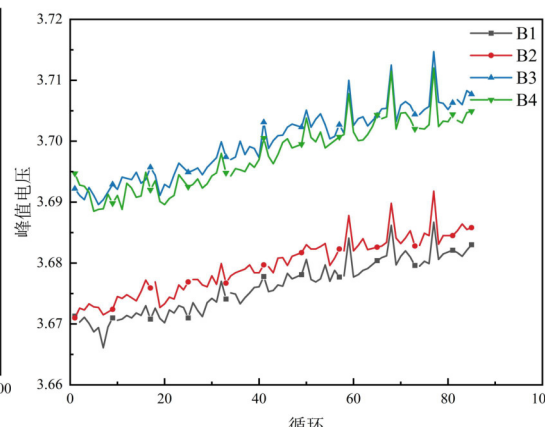
低温
电池



IC曲线峰值

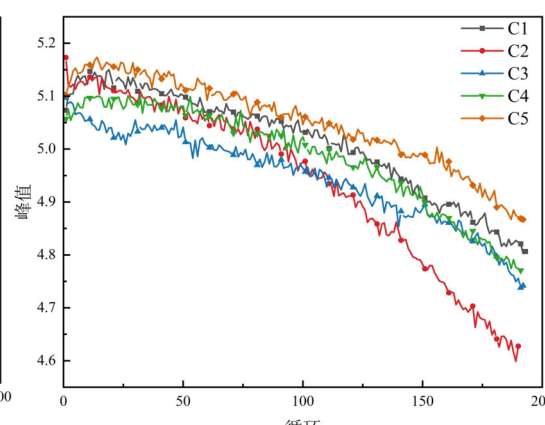
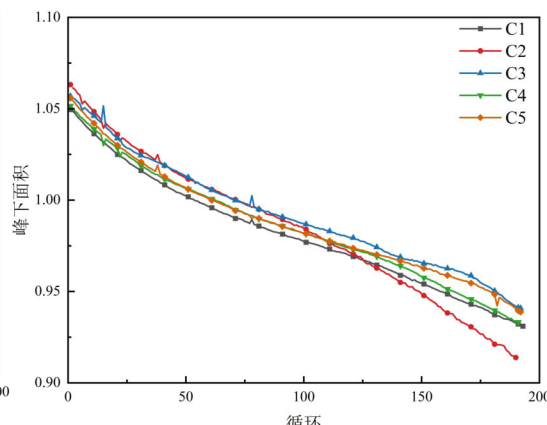
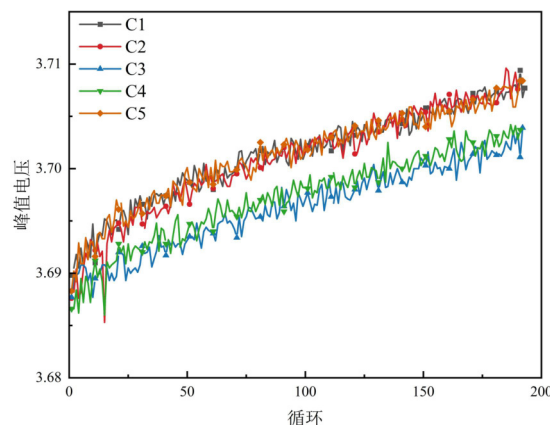


IC曲线峰下面积



IC曲线峰值电压

常温
电池



从定量结果看，**IC峰面积**与SOH相关性最稳定，Pearson相关系数为**0.9789到0.9993**，整体接近1。相比之下，峰值和峰值电压虽然也具有较强相关性，但**峰值**更容易受**噪声影响**，**峰值电压**主要反映**平台漂移**。综合稳定性和相关性，本文最终选取**IC峰面积**作为SOH预测输入特征，记为**HF1**。

迁移训练与早期预测流程

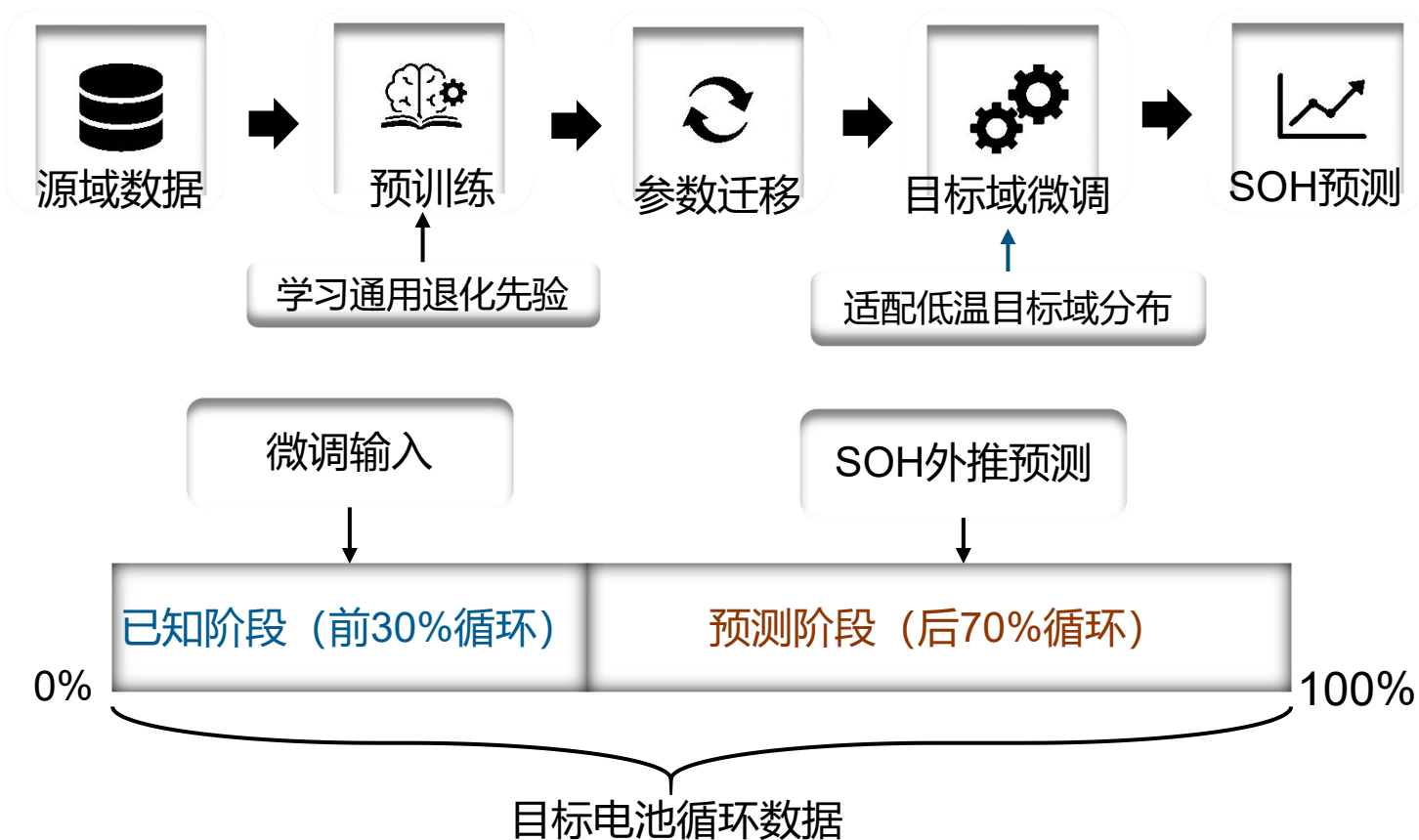


流程说明

- 阶段1：利用常温源域数据进行预训练，学习通用退化规律
- 阶段2：使用目标电池前30%循环数据进行微调，适配低温特征分布
- 测试阶段：后续循环不参与训练，仅作为预测区间
- 目标：实现低温小样本条件下的SOH早期外推预测
核心思想：源域预训练+目标域微调+早期预测

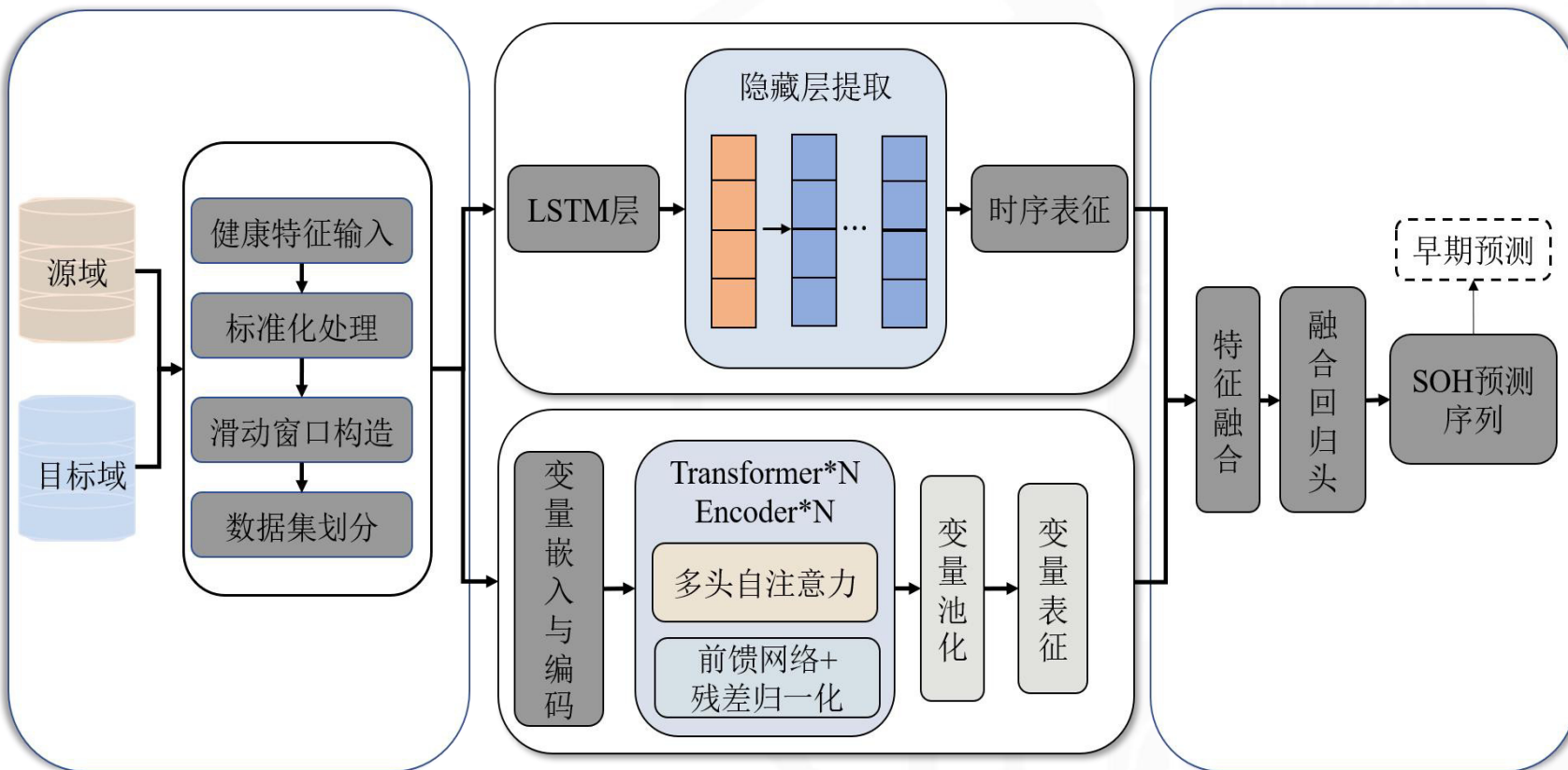


核心思想：源域与训练+目标域微调+早期预测



04 SOH预测模型与结果分析

TL-TransLSTM模型整体结构



模型关键参数设置

参数	设置
特征维度	5
滑动窗口	5
LSTM 隐层维度	64
Transformer 嵌入维度	32
注意力头数	2
Dropout	0.15
目标域微调比例	前30%循环
验证方式	留一电池外推

说明： 训练参数在不同模型间保持一致，以保证消融实验与对比实验公平性。

04 SOH预测模型与结果分析



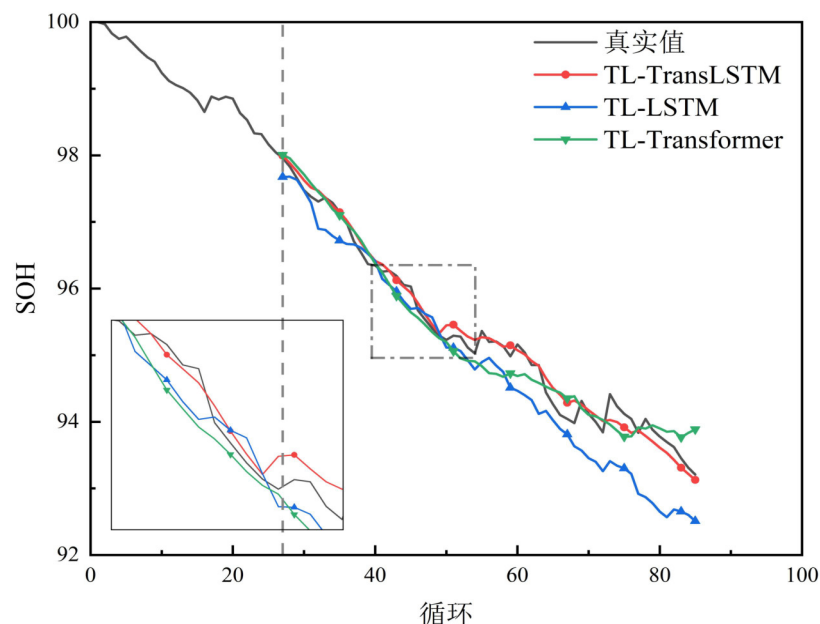
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



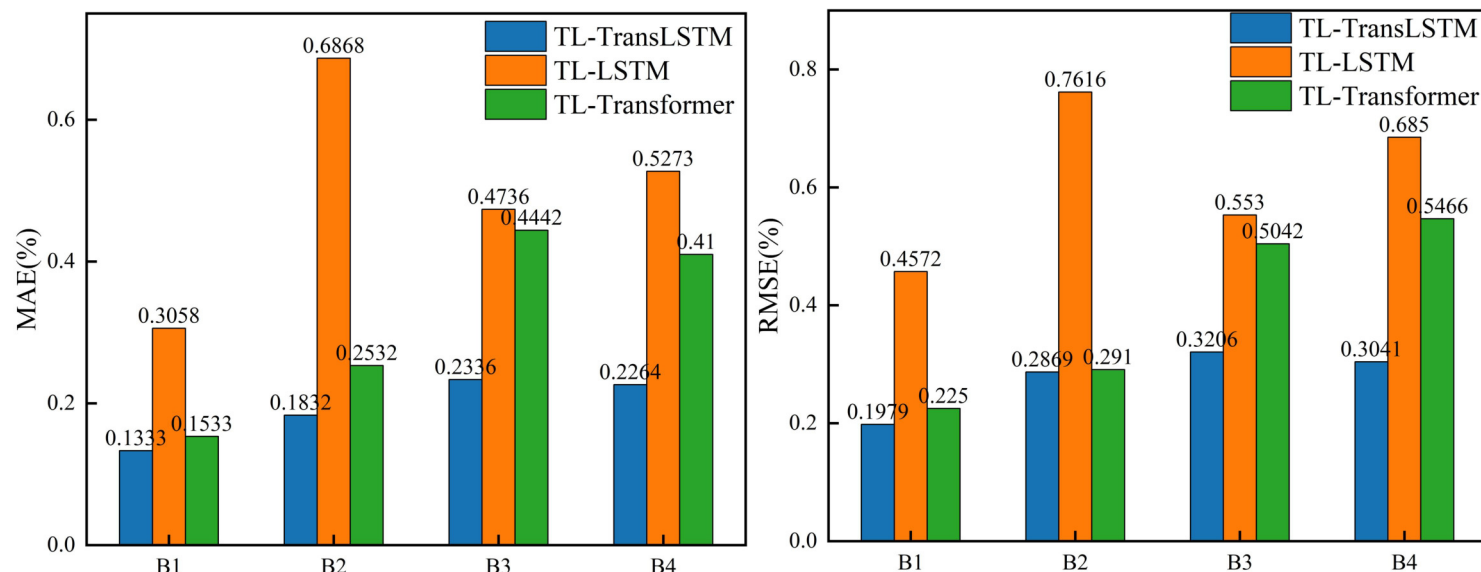
机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

TL-TransLSTM消融实验预测曲线(B1)



TL-TransLSTM消融实验误差对比



完整模型在B1到B4四个目标电池上均取得最低误差。其平均MAE为0.1941%；相比仅保留LSTM分支的模型，MAE降低约61.0%；相比仅保留Transformer分支的模型，降低约38.4%。

04 SOH预测模型与结果分析



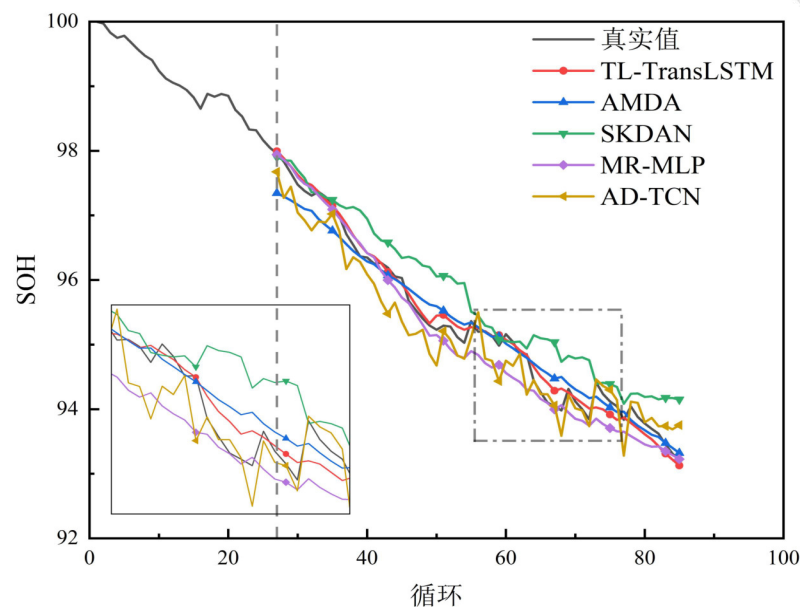
西南交通大学
Southwest Jiaotong University



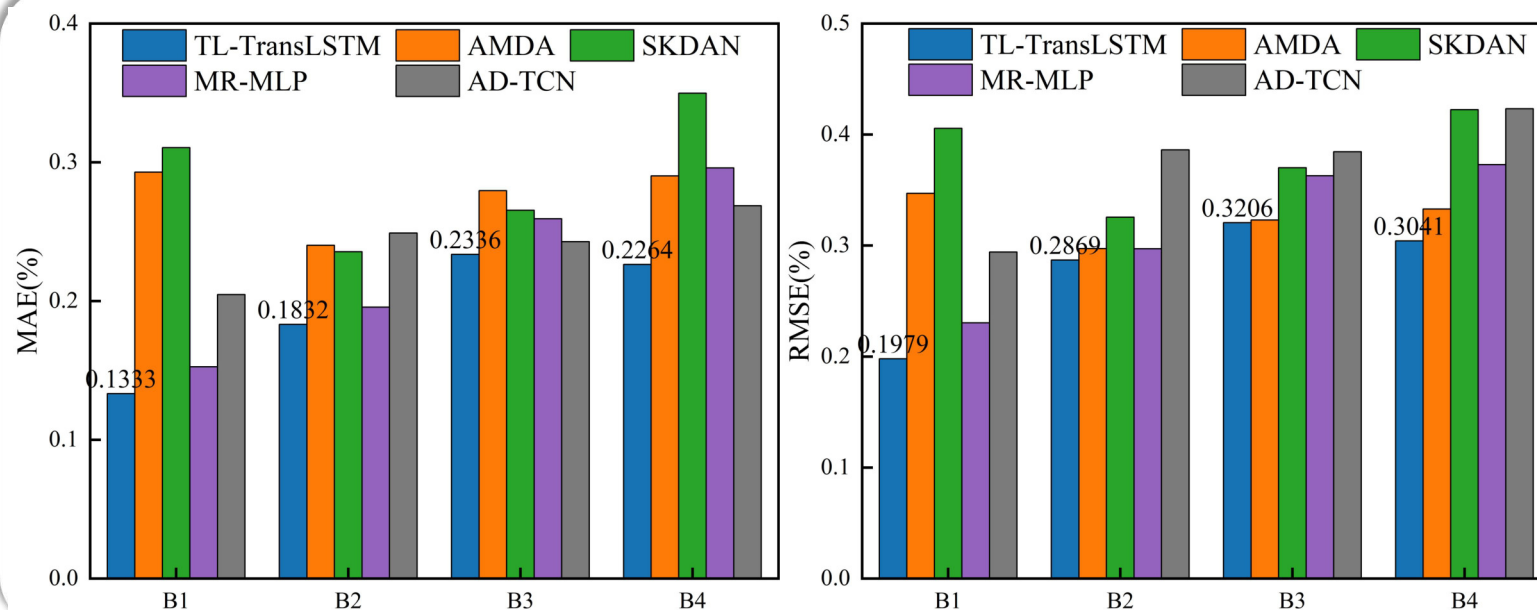
机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

TL-TransLSTM对比实验预测曲线(B1)



TL-TransLSTM对比实验误差对比



TL-TransLSTM在B1–B4上均取得较好预测，**平均MAE为0.1941%**，相比**AMDA**模型，MAE分别**降低约29.6%**；相比**SKDAN**模型，**降低约33.1%**。表明所提模型具有更优的SOH预测精度。



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



机械工程学院

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

提纲

OUTLINE

01

研究背景、现状与技术路线

02

低温实验设计与电池特性分析

03

低温SOC预测模型与结果分析

04

低温SOH健康特征构建与迁移预测

05

研究结论与未来展望



研究结论

- 低温实验数据基础：构建10°C、0°C、-10°C多温度动态放电数据与10°C循环老化数据集。结果表明，低温会导致电池容量/能量保持率下降、平均电压下移、表观直流内阻增大；其中在-10°C US06 工况下，容量保持率为 60.28%，能量保持率为 54.50%，FUDS工况表观直流内阻由 0.0628Ω 增至 0.1285Ω。
- SOC预测模型效果：提出TGR-MSR-LSTM模型，在多温度、多工况下实现SOC稳定跟踪；在-10°C US06强动态工况下，MAE为1.3990%，RMSE为1.6642%。四组典型场景中，平均RMSE较CNN-UKF、GRU-AKF和STN分别降低约63.0%、65.5%和72.8%。
- SOH健康特征构建：从IC形态、电压过程和静置恢复过程构建5个健康特征作为SOH模型输入，其中IC峰面积、等容量压升与压降、等电压降容量、充电静置电压与SOH相关性较强，相关系数绝对值大多高于 0.98，能够有效表征容量衰退与极化增强。
- SOH迁移预测模型效果：提出TL-TransLSTM模型，在B1-B4目标电池上平均MAE为0.1941%，RMSE为0.2774%；较TL-LSTM分别降低61.0%和54.8%，较TL-Transformer分别降低38.4%和29.2%，验证了低温小样本SOH迁移预测方法的有效性。

研究不足

低温循环老化数据规模有限

受实验周期和测试资源限制，本文低温SOH数据主要集中于10°C条件下的早期衰退阶段，0°C和-10°C条件下的循环老化数据及全寿命数据仍不够充分。

研究对象以单体电池为主

本文主要针对18650单体电池进行研究，尚未充分考虑电池模组中温度不均衡、单体一致性差异和热耦合效应对SOC/SOH预测的影响。

在线应用与BMS部署验证仍需加强

本文主要基于离线实验数据进行模型训练与验证对实际BMS中的传感器噪声、计算资源约束以及模型在线更新机制考虑仍有限。

未来展望

扩展低温全寿命数据，提升模型泛化性

开展0°C、-10°C条件下的循环老化实验，构建多温区、多倍率、多工况的低温寿命数据集，提升模型对不同温度与退化阶段的适应能力。

拓展研究对象至模组/电池包层级

将研究扩展至电池模组或电池包层级，结合多传感器数据与热管理信息，研究温度不均衡、单体差异等因素下的SOC与SOH联合预测方法。

面向BMS应用，提升模型工程化水平

开展模型轻量化、在线校正与自适应更新研究，并进行嵌入式部署与实车验证，提升模型在实际BMS中的实时性、稳定性和可靠性。



西南交通大学
Southwest Jiaotong University



基于深度学习的低温环境锂离子电池状态预测

西南交通大学

曹晓玲

2026.05.22

