

陕西省自然科学奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	信息物理融合的锂离子电池热均衡状态估计理论及方法
主要完成人	张兄文，杨乃兴，张书帜，李国君
主要完成单位	西安交通大学，西安建筑科技大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	中共陕西省军民融合发展委员会办公室	提名等级	☒ 一等奖 ☐ 二等奖及以上
提名意见： 本项目面向新能源汽车、新型储能等国家战略性新兴产业的重大需求，在国家重点研发计划、国家自然科学基金、陕西省工业攻关科技计划及陕西省教育厅重点项目等多个科研计划的支持下，聚焦锂离子电池热安全管理与控制中的热均衡状态估计及调控难题，开展了长达十余年的系统研究。 项目揭示了热非均衡性对锂电池组放电容量的影响机制及不一致放电的作用机理，建立了基于锂离子传输熵变、极化和阻抗产热非线性解析的电池组散热均衡理论；提出了基于积分量化电极嵌锂容量的新型电池 SOC 估算方法；构建了信息物理融合的锂电池 SOC 与 SOH 协同估计理论，实现了宽温域全寿命电池 SOC 的高精度、快速实时估计；提出了考虑电池不同老化阶段的多目标高效热均衡控制策略，实现了电池组的快速、高效均衡控制，整体研究成果达到国际先进水平。 项目相关理论、方法及发现受到国内外知名学者的广泛引用与高度评价，被同行广泛采用或作为其后续研究的重要基础。5 篇代表性论文他引总计 1437 次（Scopus 数据库），2 篇入选 ESI 高被引论文。项目形成的原创性理论与方法已应用于指导电池组的热均衡设计、状态监测与热控制，有效提升了其热安全性能与使用寿命。开发的电池管理系统产品在新能源汽车、储能电站、通讯基站等多个领域实现广泛应用，累计销售额已突破亿元，初步取得了显著的经济效益，有力推动了我国新能源汽车与新型储能等战略新兴产业的技术进步。 提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。 说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

二、提名意见（适用于专家提名）

[illegible]

三、项目简介

锂离子电池因其高能量密度、长寿命等优点已广泛应用于新能源汽车、储能等新兴领域。2025 年我国锂离子电池总产量达到 17.8 亿千瓦时，同比增长逾 60%。其中，在新能源汽车和新型储能应用领域，锂离子电池装机容量超过 11.4 亿千瓦时，展现出广阔的市场前景和重要的战略地位。然而，锂离子电池在实际应用中仍面临热失控与燃爆风险，这一安全问题已成为制约新能源汽车和新型储能产业健康发展的关键瓶颈。因此，亟需通过原创性、引领性的科技攻关，从根本上突破锂电池热失控防控技术，为产业安全与可持续发展提供核心支撑。

锂电池电芯之间的热不均衡性是其热失控的重要诱因。锂电池组是由大量的单体电芯通过串联、并联和混联电连接而组成，不同电芯工作温度的差异导致电芯在充放电过程中内阻的不一致性增大，长时间累积使不同电芯之间的荷电状态 (SOC) 和健康状态 (SOH) 存在明显失衡，导致电池组在充放电过程中部分电芯出现过充或过放现象，过充或过放会产生锂析出和锂枝晶生长以及副反应可燃气体产生，加速电池寿命衰减，严重情况会发生热失控。为此，一方面需要深度揭示串并联锂离子电池组充放电过程的热非均衡机理，定量解析热-电非线性耦合规律；另一方面需要发展高精度、快速准确的锂离子电池状态 SOC/SOH 的估算，形成原创性理论和方法指导锂离子电池组的热均衡设计、监测和控制，避免锂电池的热失控发生。

本项目在国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金面上项目、陕西省工业攻关项目、陕西省教育厅重点项目等科研项目的资助下，开展了信息物理融合的锂离子电池热均衡状态估计理论及方法研究，取得的重要发现有：

1. 建立了基于锂离子传输熵变、极化和阻抗产热非线性解析的电池组散热与均热理论。锂离子电池的热均衡控制涉及电池内部产热、电池及电池组内部传热、电池组散热以及电池组内均热等基础科学问题。首先，通过对充放电过程中电池发热来源的解析，阐明了电池电极、电解液及隔膜等组件中欧姆热、极化热和熵变热的产生机理，建立了适用于电池全生命周期的发热非线性解析模型，揭示了电池在不同工况条件下充放电时的产热规律；其次，提出了电池比热容、熵变、欧姆电阻、极化电阻等热物性参数的测量方法，建立了基于电池发热解析模型的串并联锂离子电池热-电化学耦合模型，揭示了在不同成组方式和放电机制下电池组不均衡温度分布对其充放电性能的作用机理，获得了电池热非均衡分布与其性能之间的关联关系；第三，构建了基于热均衡(温度均匀性、最大温升、冷却指数)综合最优评价指标的锂离子电池组风/液冷参数设计准则，提出了高效散热和高性能均热的低功耗电池热管理方法，建立了面向电池组散热/均热设计的热-流耦合电池热管理系统设计理论。研究成果被评价为“精确的捕捉…”、“切合实际应用的更好的预测模型”、“合理的解决方案”、“发现了电池均温与容量衰退间的关联机制”等。

2. 提出了动态高精度捕捉锂离子电池荷电状态 SOC 的估计方法。锂离子电池的可用容量与电流、温度等有关，呈很强非线性关系，给精确在线估算 SOC 带来很大困难，严重影响充放电管理和均衡控制等。首先，构建了从电极颗粒(微米)、电极(毫

米)到锂离子电池(分米)的多尺度多物理场耦合模型,首次从量化的电极颗粒内部 Li 浓度分布动态特性阐明了温度、电流、循环次数等因素对电池容量的影响机制,揭示了电流和温度对锂离子电池充放电过程热非均衡性的影响规律;其次,提出了基于积分量化电极材料嵌锂容量的锂离子电池可用容量在线估算方法,实现了对电池全生命周期有效容量的准确估算。成果被评价为“解决电流突变时精确估计 SOC 的难题”、“提高了 SOC 估计精度”、“定量阐明了容量衰退变化规律”等。

3. 建立了机理-数据双核驱动的锂离子电池荷电状态 SOC 与健康状态 SOH 信息物理融合协同估计理论。为突破机理驱动模型实时计算复杂度高、数据驱动模型难以准确刻画电池内部电化学过程的限制。首先,基于电压差分的电池衰减机理诊断理论,建立了锂离子电池全生命周期静态充电工况下的电压差分-SOC 分析模型,实现了电极活性材料随电池老化历经的两相相变过程和电池 SOC 演变过程的高度解耦;其次,提出了基于离散度分析的电压差分特征在线提取方法,揭示了电池不同老化阶段电压差分特征与其 SOC 之间的关联机制;最后,通过匹配电池全生命周期静态充电工况下电压差分特征与 SOC 之间的映射关系,构建了以微观时间尺度估算 SOC、宏观时间尺度更新 SOH 的低复杂度、高精度信息物理融合 SOC-SOH 协同估计模型,实现了宽温域内锂电池组 SOC 的实时高精度快速估计。研究成果被评价为“显著减轻计算负荷同时提高 SOC 预测精度”、“达到了模型无关性电池 SOH 估计”、“实现了更好地估计电池状态”、“实现了…快速在线估算”等。

4. 提出了计及电池组不同老化阶段的多目标高效热均衡控制方法。不同电芯间 SOC 与 SOH 失衡引发产热、传热不均,热非均衡性加剧电非均衡性,高度耦合的电芯热、电特性为高效热均衡控制带来巨大挑战。首先,针对静态充、放电曲线难以完整获取及其带来的电池组高关联度老化特征难以挖掘问题,提出了基于高斯滤波的电量增量片段曲线平滑方法,并聚焦反映电池组衰减机理的电量增量曲线峰值区域,发展了融合相似性分析方法和区域等分电压概念的高关联度老化特征提取技术,实现了静态充放电数据片段下高精度电池组老化在线诊断。其次,构建了热非均衡分布与电池 SOC 和 SOH 的关联方程,结合电池组在线热响应预测和电芯老化评估,建立了考虑电池组温度非均匀性、发热功率、SOC、SOH 等因素的电池组热均衡优化模型,获得电池组的散热和均热的流动参数和串并联电路的电流、电压等电参数的综合均衡控制策略,实现电池组的快速、高效均衡控制。研究成果被评价为“简单的,更好的精度和泛化性能”、“结构简单,精度高且通用性强”、“实现了同步估算”、“成本低”、“使用方便”、“高精度”等。

本项目主要论文成果发表在 J. Power Sources、J. Energy Storage、Applied Thermal Engineering、Electrochimica Acta 等本领域国际重要期刊,5 篇代表性论文在 Web of Science 核心合集他引 1251 次(Scopus 数据集他引 1437 次),其中 2 篇论文连续入选 ESI 高被引论文。本项目的相关理论、方法和结果得到了美国、英国、德国、中国等著名学者的广泛引用和积极评价,被国内外同行采用或作为其研究的基础。基于本项目的理论和方法应用于锂离子电池管理系统(BMS)产品开发,产品上市 3 年累计产值超亿元。

四、客观评价

1、发现点 1 的权威专家评价：“精确地捕捉…”、“切合实际应用的更好的预测模型”、“合理的解决方案”、“发现了电池均温与容量衰退间的关联机制”等。

1) IMechE Fellow、英国格拉斯哥大学 Manosh C.Paul 教授评价本发现点构建的模型可实现对风冷电池组流场及其传热特性的精确捕捉。

2) 英国华威大学 Paul Jennings 教授高度评价本发现点具有强大的电池内外特性预测功能，为实际应用提供了一个更好的模型。

3) IEEE/ASME/SAE Fellow、美国马里兰大学杰出教授 Michael Pecht 评价本发现是满足均温要求的电池成组设计方法。

4) IET Fellow、国家杰青、华中科技大学副校长高亮教授多次评价本发现可获得功耗低且冷却性能更高的电池组。

5) World Electric Vehicle Journal 主编、比利时布鲁塞尔自由大学 Joeri Van Mierlo 教授团队评价本发现给出了电池组热均衡的合理方案。

6) ASME Fellow、中国科学院院士、南方科技大学教授赵天寿评价本发现点揭示了并联电池组容量衰减速率与其内部温差呈显著正相关关系的普遍规律。

7) 德国慕尼黑工业大学杰出教授 Markus Lienkamp 研究团队评价本发现揭示了电池组内部均温性与充放电一致性及老化速率间的关联机制。

8) 中国自动化学会会士、国家杰青、浙江大学苏宏业教授将本发现点的热均衡设计方法应用到了锂离子电池的智能化管理。

2、发现点 2 的权威专家评价：“解决了电流突变时 SOC 精确估计的难题”、“提高了 SOC 估计精度”、“定量阐明了容量衰退变化规律”等。

1) 韩国忠南大学 Jonghoon Kim 教授高度评价本发现点能准确捕捉电池 SOC 的动态变化，解决了电流突变时 SOC 精准估计存在跃变的挑战。

2) IEEE Fellow、重庆大学胡晓松教授将本发现点所提 SOC 估算方法有效嵌入锂离子电池热模型，实现了宽 SOC 范围内温度预测精度的显著提升。

3) 北京航空航天大学孟淑娟研究员评价本发现点能捕捉 SOC 在电流脉动时的动态响应。

4) 韩国仁荷大学教授 Gi-Woo Kim 高度评价本发现点通过电极嵌锂浓度分布与电池容量映射关系提高了 SOC 安时积分法的精度。

3、发现点 3 的权威专家评价：“显著减轻计算负荷同时提高 SOC 估算精度”、“达到了模型无关性电池 SOH 估计”、“通过新型特征提取方法实现了更好地估计电池状态”、“实现了…快速在线估算”、“更好地预测电池衰退”等。

1) 国际自动控制联合会委员、中国自动化学会系统仿真专业委员会主任、中国科学技术大学陈宗海教授评价本发现提出的库仑积分与电压差分融合方法具有模型无关性且计算成本低，同时能准确估计电池剩余容量。

2) 德国斯图加特大学 Kai Peter Birke 教授团队评价本发现点提出了一种无模型的计算方法，通过库仑积分与 SOC-电压差分曲线特征点的融合，成功实现了电池容量的精准估算。

3) IEEE Fellow、欧洲科学院院士、意大利米兰理工大学终身教授 Hamid Reza Karimi 评价本发现点提出了一种融合库仑积分和电压差分分析的无模型估算方法,实现了对电池剩余容量的快速在线估算。

4) 沙迦大学 Abdul Ghani Olabi 教授评价本发现点提出了融合库仑积分与电压差分分析的 SOH 估计方法。

5) 美国乔治华盛顿大学 Payman Dehghanian 教授评价本发现点能够从电压差分片段曲线中提取出精确刻画 SOH 退化的两个衰退特征。

4、发现点 4 的权威专家评价：“提出的…算法简单,且具有更好的精度和泛化性能”、“结构简单、精度高且通用性强”、“估算电池剩余容量的新框架”、“成本低”、“使用方便”、“实现对电池 SOH 的高精度估算”等。

1) IEEE Fellow、IEEE Transactions on Power Electronics 副主编、丹麦奥尔堡大学 Remus Teodorescu 教授团队评价提出的前馈神经网络估算框架简单,并且具有更好的估算精度和泛化性能。

2) IEEE Fellow、清华大学慈松研究员评价本发现点建立了用于 SOH 和 RUL 同步估算的双前馈神经网络模型,且该模型具有结构简单、估算精度高及通用性强等显著优势。

3) 国际欧亚科学院院士、中国电工技术学会会士、国家杰青、武汉大学何怡刚教授高度评价本发现点提出了融合电量增量片段与人工神经网络的电池寿命预测新框架,该方法获得了更好的泛化性和更高的预测精度。

4) 马来西亚国立大学 Aini Hussain 教授评价本发现点提出的估算方法简化了神经网络结构,具有精度高、成本低、使用方便等优点。

5) IEEE Fellow、国家杰青、同济大学陈虹教授团队评价本发现点通过增量容量分析技术成功从电池老化关联曲线中提取了衰退特征,并采用前馈神经网络算法成功实现了对电池 SOH 的高精度估算。

6) IEEE Fellow、澳大利亚斯威本科技大学 Saad Mekhilef 教授高度评价本发现点提出的方法架构简单,易于实现且成本效益显著。

五、代表性论文专著目录
(不超过 8 条, 其中代表性论文不超过 5 篇, 代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements	Applied Thermal Engineering	Naixing Yang, Xiongwen Zhang, Guojun Li, Dong Hua	2015 年 80 卷 55-65	2015 年 01 月 23 日	Xiongwen Zhang	Naixing Yang	杨乃兴, 张兄文, 李国君, 华栋	447	Scopus	是
2	Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination	Journal of Power Sources	Naixing Yang, Xiongwen Zhang, BinBin Shang, Guojun Li	2016 年 306 卷 733-741	2015 年 12 月 28 日	Xiongwen Zhang	Naixing Yang	杨乃兴, 张兄文, 尚斌斌, 李国君	347	Scopus	是
3	State of charge estimation for pulse discharge of a LiFePO ₄ battery by a revised Ah counting	Electrochimica Acta	Naixing Yang, Xiongwen Zhang, Guojun Li	2015 年 151 卷 63-71	2014 年 11 月 06 日	Xiongwen Zhang	Naixing Yang	杨乃兴, 张兄文, 李国君	135	Scopus	是
4	A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis	Journal of Power Sources	Shuzhi Zhang, Xu Guo, Xiaoxin Dou, Xiongwen Zhang	2020 年 479 卷 2287-40	2020 年 08 月 31 日	Xiongwen Zhang	Shuzhi Zhang	张书帆, 郭旭, 窦筱欣, 张兄文	226	Scopus	是

5	Synchronous estimation of state of health and remaining useful lifetime for lithium-ion battery using the incremental capacity and artificial neural networks	Journal of Energy Storage	Shuzhi Zhang, Baoyu Zhai, Xu Guo, Kaike Wang, Nian Peng, Xiongwen Zhang	2019年26卷100951	2019年09月19日	Xiongwen Zhang	Shuzhi Zhang	张书帜, 翟宝玉, 郭旭, 王开科, 彭年, 张兄文	282	Scopus	是
6											
7											
8											
合 计									1437		
补充说明（视情填写）:											

六、主要完成人情况表

姓 名	张兄文	排 名	1
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对发现点 1、发现点 2、发现点 3 和发现点 4 作出贡献，是发现点 1-4 理论和方法的主要思想提出者，代表性论文 1-5 的唯一通讯作者。 在发现点 1 中，建立了锂离子电池充放电过程的发热非线性解析模型，揭示了热非均衡性对串并联锂离子电池组放电容量和电压不平衡性影响的作用机理；在发现点 2 中，提出从量化的电极颗粒内部 Li 浓度分布动态特性来揭示放电电流和温度对锂离子电池放电容量影响的方法；在发现点 3 中，提出了机理和数据双核协同驱动多时间尺度架构的锂离子电池 SOC-SOH 信息物理融合协同估计的思想；在发现点 4 中，提出了串联锂离子电池组多目标高效热均衡控制方法。			

姓 名	杨乃兴	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目主要学术贡献： 对该项目主要贡献在于发现点 1、2 和 4，代表性论文 1、2、3 的第一作者。 在发现点 1 中，进一步发展了基于热均衡（温度均匀性、最大温升、冷却指数）综合最优评价指标的锂离子电池组设计方法，阐明了电流和温度对锂离子电池放电过程热非均衡性的影响规律；在发现点 2 中，进一步发展了基于积分量化电极颗粒嵌锂容量的电池可用容量在线估算方法；在发现点 4 中，优化了串联锂离子电池组主动热均衡控制方法。			

姓 名	张书帜	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	特聘研究员		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对该项目主要贡献在于发现点 3 和 4，代表性论文 4、5 的第一作者。 在发现点 3 中，提出了库仑积分和差电压分析信息物理融合的电池 SOH 估计方法；在发现点 4 中，建立了考虑电池组不同老化阶段的多目标优化串联锂离子电池组主动热均衡控制策略。			

姓 名	李国君	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对本项目发现 1 和发现点 2 作出贡献，代表性论文 1、2、3 的合作作者。 在发现点 1 中，给出了锂离子电池充放电过程的发热非线性解析建模方法；在发现点 2 中，给出了电极颗粒内部 Li 浓度分布动态特性数值建模方法。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 创建了信息物理融合的锂离子电池热均衡状态估计理论及方法，具体包括：1) 建立了锂离子电池组产热-传热-散热-均热基础理论；2) 提出了动态高精度捕捉锂离子电池荷电状态（SOC）估计方法；3) 建立了机理-数据双核驱动的锂离子电池 SOC-SOH 信息物理融合协同估计理论；4) 提出了计及电池组不同老化阶段的多目标高效热均衡控制方法。	

单位名称	西安建筑科技大学
对本项目主要学术贡献： 进一步发展了基于热均衡（温度均匀性、最大温升、冷却指数）综合最优评价指标的锂离子电池组热管理设计方法，阐明了锂离子电池不同成组方式的温度非均匀分布规律；进一步发展了基于积分量化电极嵌锂容量的电池可用容量在线估算方法；优化了锂离子电池组主动热均衡控制方法。	

完成人合作关系说明

本项目完成单位为西安交通大学和西安建筑科技大学。

项目第一完成人张兄文教授在 2001 年至 2008 年期间在西安交通大学分别攻读硕士和博士学位，本项目第四完成人李国君教授是其硕士论文的指导导师和博士论文的合作指导导师。张兄文 2008 年博士毕业后出国留学，继续从事科学研究工作，自 2010 年以来一直从事锂离子电池热管理、均衡控制及状态估计等研究，2012 年回国后形成了相关研究团队，提出了本项目的主要学术思想和方法。

第一完成人张兄文是第二完成人杨乃兴的博士论文合作导师，杨乃兴 2015 年 12 月博士毕业后进入本项目第二完成单位西安建筑科技大学工作，双方长期合作。

第一完成人张兄文是第三完成人张书帜的博士论文指导导师。第四完成人李国君是第二完成人杨乃兴的博士论文指导导师。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	张兄文（1） 杨乃兴（2） 李国君（4）	2014 年 1 月 1 日 至 2021 年 1 月 29 日	代表性论文 1、2、3	附件：代表性论文 1、2、3
2	论文合著	张兄文（1） 张书帜（3）	2018 年 9 月 1 日 至 2021 年 1 月 29 日	代表性论文 4、5	附件：代表性论文 4、5
3					
4					
5					
.....					
（不限 条目）					