

# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：电源系统设计、管理与大数据

客座编辑：熊瑞 陈泽宇 于全庆

57卷 **14**期 **半月刊**  
2021年7月刊



## /// 特邀专栏 ///

### 电源系统设计、管理与大数据

客座编辑：熊 瑞 教授（北京理工大学）

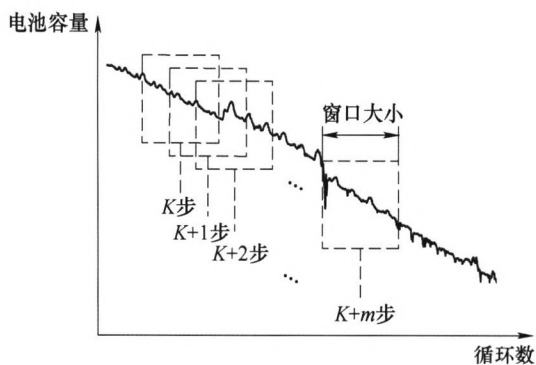
陈泽宇 副教授（东北大学）

于全庆 副教授（哈尔滨工业大学（威海））

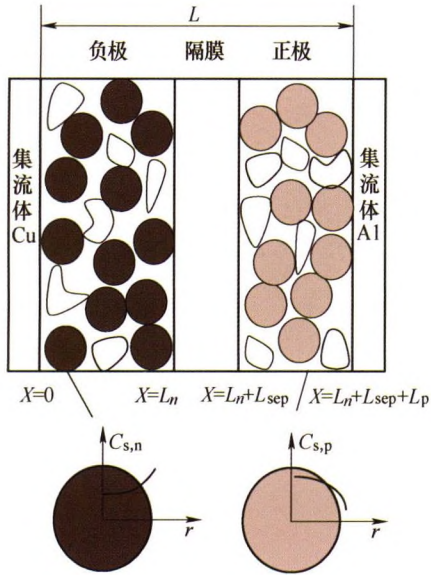
策划编辑：张 彤（《机械工程学报》编辑部）

## 1 考虑混杂充电数据的锂离子电池容量估计

周子游 刘永刚 杨 阳 陈 峥 舒 星 秦大同

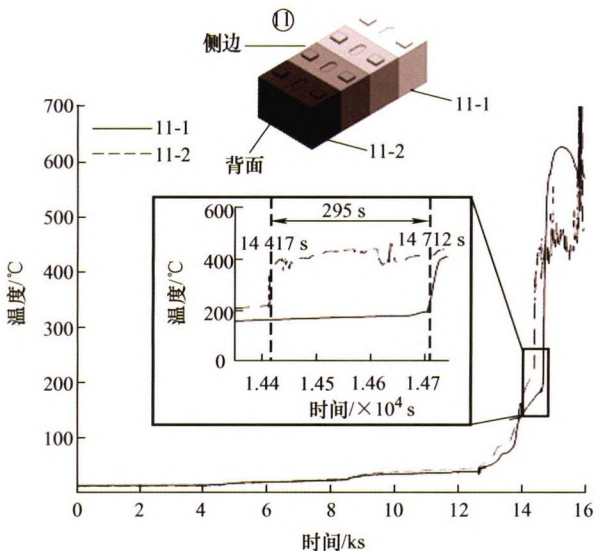


**摘要：**准确有效的电池容量估计对于电动汽车的安全性等有着十分重要的意义。目前结合健康因子提取的电池容量估计方法受到了广泛的关注，然而大多数研究没有考虑到电池实际应用中每个循环的充电数据会根据充放电情况的不同而具有不同的充电数据结构，这会导致健康因子的提取不能连续有效地进行，无效或缺失的健康因子序列会导致无法有效地估计电池容量，由此开展考虑混杂充电数据的锂离子电池容量估计方法研究。考虑三种最常见的充电数据结构组成混杂充电数据，根据不同的数据结构提取有效健康因子，再由粒子群算法寻优获得最佳健康因子；以相关向量回归为工具，通过健康因子估计健康因子的方法获取其中一种完整健康因子序列；以完整的健康因子序列训练长短时记忆网络以达到估计未来电池容量的目的。仿真试验结果表明，RVM估计健康因子的相对误差均保持在1%以内，未来电池容量的估计相对误差基本在2%以内，达到较高的估计精度，可满足一定的实际应用需求。



**摘要:** 精确的电池模型是车用锂离子电池系统状态估计和能量管理的基础。电化学机理模型用途广、精度高,是下一代电池管理系统的重点研究对象。然而,目前电池电化学机理模型建立过程中存在参数获取困难、依赖后期参数标定等问题。为此,提出一种大容量车用锂离子电池电化学-热耦合高效建模方法。将电化学机理模型的参数进行分类,对可测量/辨识参数(几何尺寸、正负极初始化学计量比和固相颗粒最大嵌锂浓度等)进行精确的测量和参数辨识。利用不同温度下的脉冲充电试验来标定固相扩散系数  $D_s$  和反应速率常数  $k$ 。进一步地,建立电池产热模型,搭建考虑温度影响的电池电化学-热耦合模型。不同倍率充放电、不同温度下的脉冲放电和动态应力工况测试下试验验证结果显示,所搭建的模型具有很好的精度和适应性,电压平均误差小于 10 mV,温度平均误差小于 1.1 °C。参数敏感性分析结果显示固相扩散系数  $D_s$  的减小会导致电极颗粒内部锂离子浓度差变大,从而使得颗粒表面电势提前达到截止电压,降低电池容量;反应速率常数  $k$  的减少主要影响电池阻抗,将造成放电电压曲线整体下移和产热增加。所提出的建模方法可以快速高效地建立精度高、普适性好,成本低的电池电化学-热耦合模型。

23 车用锂离子电池系统热蔓延试验与机理研究

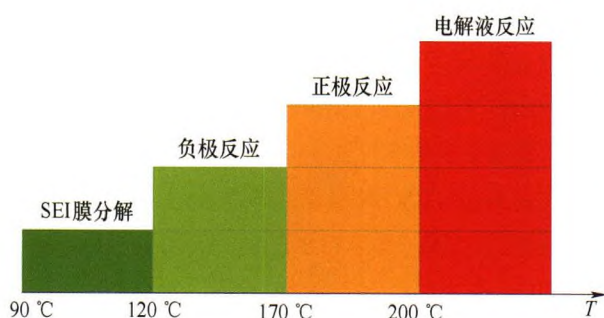


**摘要:** 动力电池的安全问题始终阻碍着电动汽车的推广,而热失控是安全问题的主因。锂离子电池在极端滥用条件下会发生热失控,同时热失控的能量会引发模组乃至系统的热蔓延。目前,单体热失控及模组热蔓延的机理被广泛研究,有关系统层级的热蔓延研究还较少。为研究电池系统热蔓延的机理,进行电池系统热蔓延试验。根据试验中系统热失控能量释放的剧烈程度,将电池系统热蔓延分为三个阶段:始发模组内热蔓延、模组间热蔓延和轰燃。此外,根据模组的不同受热情况,模组内热蔓延的规律可总结为顺序蔓延、同步蔓延和倒序蔓延三种模式。最终,结合蔓延表征结果和电池系统结构,发现液冷板对系统蔓延路径起到导引作用,以及当系统上盖破损后,电池热失控时会伴随着火焰,进而加速系统热蔓延过程,同时还验证了空气间隙对热蔓延的延缓作用。研究揭示了电池系统热蔓延的特征,为电池系统的安全性设计提供了依据。



## 32 磷酸铁锂储能电池簇过充热失控蔓延特性仿真研究

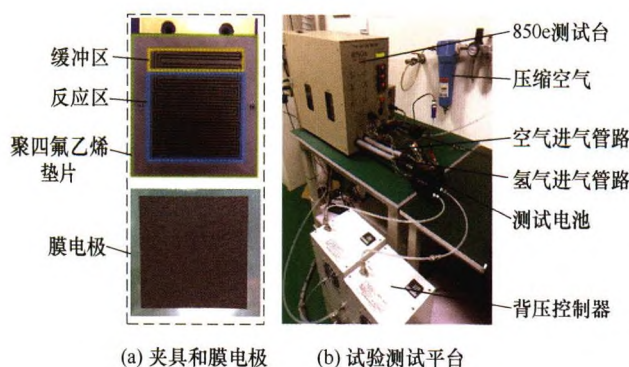
王怀铷 孙宜昕 金 阳



**摘要:** 储能电站集装箱是以电池簇即电池多模组为基础建立的, 电池模组相对密集并且极端情况下电池模组的热失控容易造成电池簇蔓延从而引发更严重的后果。因此, 有必要对储能环境中电池簇的热失控蔓延过程进行热场仿真研究。通过设计和搭建 8.8 kW·h 的磷酸铁锂电池模组试验方案进行不同充电倍率的过充试验, 试验结果表明磷酸铁锂电池模组在 0.4C 的过充倍率时未出现燃烧现象, 0.5C 过充条件时出现燃烧起火现象。在试验的基础上, 通过 COMSOL 仿真软件建立电池簇热场仿真模型, 对不同倍率下电池簇的过充热失控蔓延过程进行仿真分析。仿真结果表明, 电池模组 0.4C 倍率过充时不会引起电池簇内其他电池模组热失控, 过充模组正下方的电池模组所受影响较大; 电池模组 0.5C 倍率过充时上表面温度急剧上升, 会逐级触发上方电池模组的热失控。本研究可为储能电站的过热安全防护提供理论和技术支撑。

## 40 质子交换膜燃料电池电化学阻抗谱敏感性研究

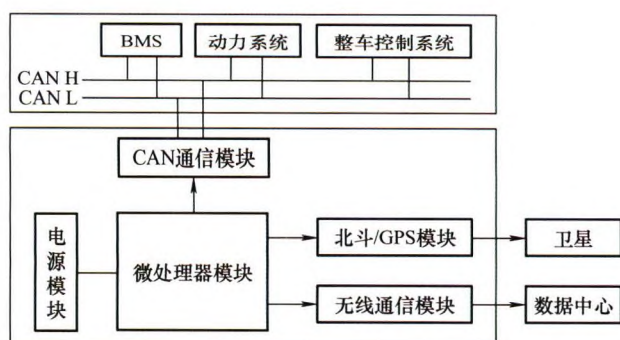
张少哲 戴海峰 袁 浩 明平文 魏学哲



**摘要:** 电化学阻抗谱能被用来表征燃料电池内部状态和电化学行为信息, 通过构建合适的等效电路模型拟合电化学阻抗谱, 可辨识和量化燃料电池内部不同的极化过程及状态。针对质子交换膜燃料电池, 系统研究电流密度、工作温度、压力、阴/阳极进气过量系数和阴/阳极进气湿度 7 种外部工作条件对燃料电池电化学阻抗谱的影响。基于等效电路法, 对阻抗谱各频段阻抗的变化及其对工作条件的敏感性进行分析和讨论。研究表明, 燃料电池损耗在低、中、高电流密度下分别由活化损耗、欧姆损耗和传质损耗主导; 在固定电流密度下, 电池温度、压力、阴极进气过量系数和阴极进气湿度对阻抗谱影响较大; 欧姆阻抗是对阴阳极进气湿度变化最敏感; 阳极活化阻抗仅对阳极进气过量系数和阳极进气湿度较为敏感; 阴极活化阻抗是对阴极过量系数最敏感, 其次是温度和压力; 传质阻抗对阴极过量系数敏感程度最大, 压力和温度次之; 为燃料电池工作条件优化和内部状态的监测与诊断研究提供指导。

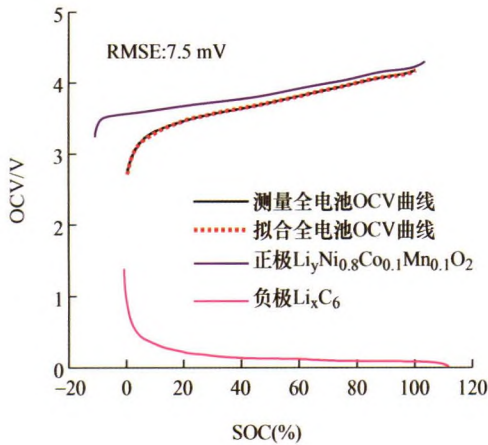
## 52 大数据下电动汽车动力电池故障诊断技术挑战与发展趋势

王震坡 李晓宇 袁昌贵 黎小慧



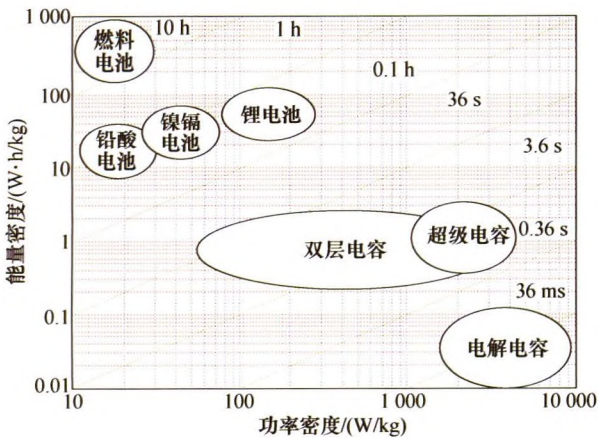
**摘要:** 电动汽车故障诊断技术是汽车安全运行的重要保证, 高效精准的故障诊断不仅提高整车的安全性和可靠性, 而且有利于促进电动汽车市场的积极健康发展。围绕电池管理系统和热管理系统, 综述电池系统状态估计以及冷却技术, 在保证电动汽车安全运行方面的最新研究进展; 以整车局域网层面和车端云网联层面, 分别介绍电池系统运行数据传输安全的先进技术手段; 从实车运行大数据视角将故障诊断技术归纳为多尺度数据融合、故障识别、故障预报警三个方面分别展开阐述, 剖析当前技术的优势及不足; 针对当前故障诊断技术所面临的难点问题, 展望未来融合大数据及人工智能技术, 车端云智能网联条件下电动汽车故障诊断方法研究发展趋势。





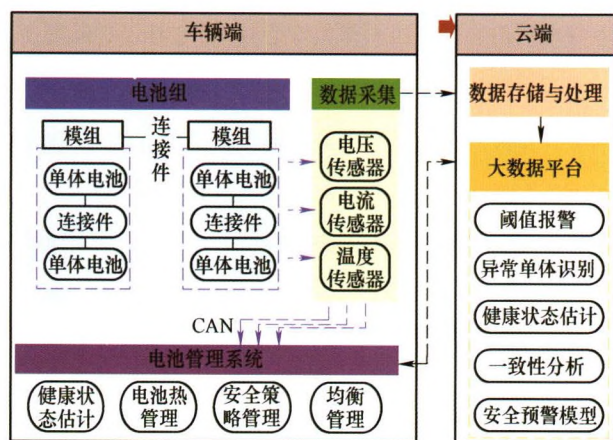
**摘要:** 锂离子电池的功率状态(State of power, SOP)估计在电动汽车的电池管理系统中起着至关重要的作用。准确的参数化模型为 SOP 估计提供了重要的参数和结构信息。从电池内部机理出发,总结用于表征电化学反应过程的等效元件及方程所构成的等效电路模型,并推导其电压仿真表达式。针对模型参数边界不准确而陷入局部最优和计算效率低的问题,提出基于电化学机理的参数边界确定方法。以 DST 工况为参数辨识数据集获取八种参数化模型,从模型精度和计算效率来验证参数化模型在 FUDS 工况下的鲁棒性和时效性。针对非线性模型无法获取峰值功率解析解问题,提出了基于多约束的 SOP 优化估计方法。最后,根据 DST 工况+恒功率下获取的 SOP 真值以验证所提算法在 SOC10%放电和 90%充电下的有效性。结果表明,温度对电化学反应和扩散限制的主导地位影响显著,所提模型最优估算方法在高低 SOC 区间的 SOP 估计误差均在 8%以内。

7 电动汽车混合储能系统的事件触发无差拍控制



**摘要:** 混合储能系统具有高功率密度和高能量密度的性能优势,已经被广泛应用于电动汽车。以电动汽车的电池-超级电容混合储能系统为研究对象,针对传统控制方法中快速动态响应和计算负荷的矛盾,提出一种基于事件触发无差拍控制的方法。该控制方法继承了无差拍控制方法响应速度快、过冲量小的优点,可以在一个控制周期内计算获得最优控制信号,从而充分利用混合储能系统应对复杂工况,以达到稳定母线电压的目的;同时,通过引入事件触发控制策略,根据系统状态消除冗余计算,可以在保持控制性能的前提下有效降低计算负荷。基于 Matlab/Simulink 构建了电池-超级电容混合储能的数字仿真系统,仿真试验结果表明所提出的事件触发无差拍控制具有良好的控制效果:① 可以将直流母线电压纹波稳定控制在参考值 1.4%,接近传统无差拍控制的 1.1%,性能上满足要求;② 计算执行平均次数是传统方法的 61.2%,计算负荷减小了 39.8%;③ 引入事件触发控制机制,可以有效消除冗余的开关动作,提高混合储能系统的整体效率。最后,围绕中国电动汽车的行驶工况,基于 OPAL-RT 的硬件在环试验,进一步验证事件触发无差拍控制方法在电池-超级电容混合储能系统的有效性,研究结果为电动汽车混合储能系统的控制提供了一种参考。

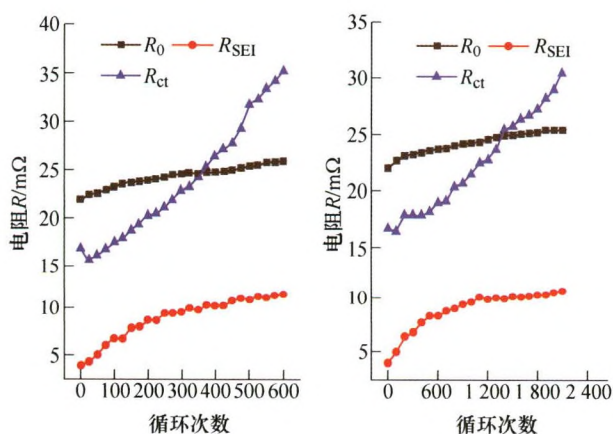




**摘要:** 随着新能源汽车保有量的增加, 新能源汽车安全问题日益突出, 严重威胁着驾乘人员的生命财产安全, 制约了新能源汽车产业发展。动力电池问题是新能源汽车着火事故发生的主要原因(占着火事故 60%以上), 发展先进的动力电池系统故障诊断技术已成为新能源汽车安全防护领域的热点。为填补该领域最新中文综述的空白, 基于动力电池系统故障发生位置的差异, 将故障分类为内部故障和外部故障, 描述过充电、过放电、外部短路、内部短路、过热、热失控、传感器故障、连接件故障、冷却系统故障的失效机理。从内部故障和外部故障两个角度出发, 总结锂离子动力电池的基于知识、模型、数据驱动三类故障诊断方法的研究现状与最新进展。讨论当前动力电池系统故障诊断技术中存在的主要问题, 提出电池故障诊断技术的未来发展趋势, 以期实现动力电池系统故障的准确诊断和早期防控, 提高新能源汽车安全性, 保障驾乘人员生命财产安全, 推动新能源汽车产业进一步发展。

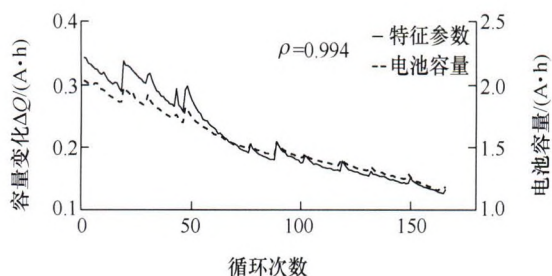
## 105 基于传荷电阻的锂离子电池剩余寿命预测研究

王学远 李日康 魏学哲 戴海峰 郑岳久



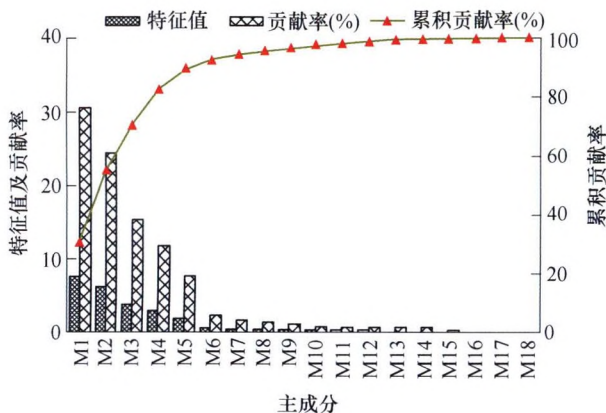
**摘要:** 锂离子电池的剩余寿命预测对实现高效、精准的电池管理和维护具有重要意义。电化学阻抗能够反映锂离子电池内部物理化学过程特性, 在电池寿命问题研究中被广泛应用。特别地, 传荷电阻描述电极界面过程进行的难易程度, 可用来表征电池的寿命状态。通过开展四种工况的锂离子电池老化试验, 获取传荷电阻随寿命衰减的演变规律。采用贝叶斯信息准则, 对多种寿命衰减经验模型进行评价, 选择并确立一阶多项式形式的经验模型。在此基础上, 提出基于粒子滤波算法的剩余寿命预测方法。结果表明该方法可准确实现锂离子电池的剩余寿命预测, 从而能够为电池管理和维护提供必要的电池寿命信息。





**摘要:** 精确、可靠的电池容量预测可以避免电池滥用，提升电池使用安全；同时在此基础上开展的剩余寿命估测能够为电池系统维护及更换提供参考。基于改进双最小二乘支持向量机方法和 Box-Cox 变换，提出一种锂离子电池容量及剩余循环寿命的协同估算方法。首先提取老化电池部分容量增量曲线包络面积作为特征量，通过 Box-Cox 变换进一步提高特征量与目标估计量之间的相关性。然后基于瑞利熵理论改进传统最小二乘支持向量机算法的稀疏性，建立电池容量和剩余使用寿命协同估算模型，结合层次分析法和熵权法对估算结果进行充分地评估。最后，采用粒子群优化算法搜索改进最小二乘支持向量机算法中的最优超参数组合。估算结果显示所研究的方法能够显著提高特征参数与估计量之间的线性相关性，容量估计误差小于 1.44%，剩余使用寿命预测误差小于 47 次循环，验证了算法的有效性。

129 基于用户大数据的电动汽车驱动系统可靠性试验循环工况构建方法

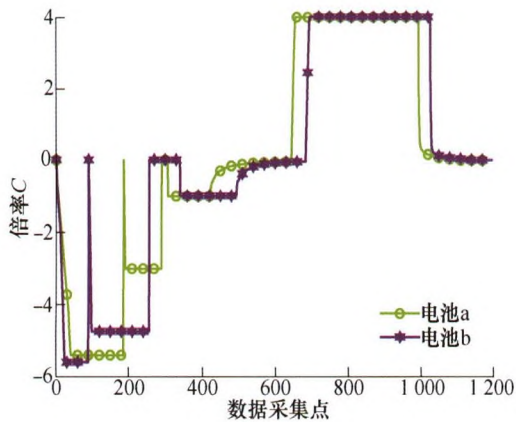


**摘要:** 为构建与用户载荷关联的电动汽车驱动系统可靠性试验循环工况，基于 300 个实际用户累计 3 540 000 km 载荷数据，提取工况片段并关联电驱动系统失效主导载荷构造工况特征参数，运用主成分分析与 K-Means 聚类分析法将用户使用条件下电驱动系统运行片段分成五种典型工况；基于损伤累积模型，分析不同工况载荷对电驱动系统部件造成的损伤，并确定各工况最优单位损伤强度分布模型，并以损伤分布连续性转折点，筛选单位损伤强度较高的片段作为可靠性试验循环工况；基于马尔科夫状态转移概率矩阵，采用马尔科夫链蒙特卡洛法产生伪随机数对工况拼接，构建电动汽车驱动系统可靠性试验加载谱。通过构造的可靠性试验载荷谱与标准循环工况及用户损伤对比，表明构建的电驱动系统可靠性试验加载谱具有较高的损伤强度，能够有效涵盖 90% 以上的用户使用强度，从而为电动汽车驱/传动系可靠性设计与验证提供参考和依据。



## 141 数据驱动的锂离子电池健康状态综合评分及异常电池筛选

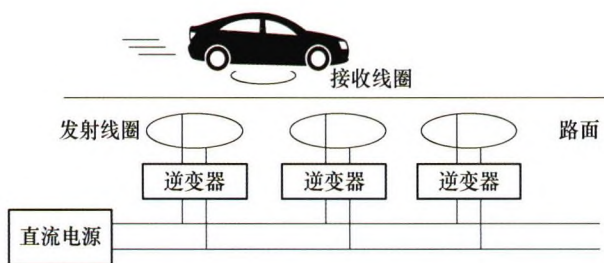
贾俊 胡晓松 邓忠伟 徐华池 肖伟 韩锋



**摘要:** 锂离子电池是电动汽车和储能系统最重要的组成部分,其故障预测和健康管理对于运行维护至关重要。数据驱动的方法较基于模型的方法更适合大规模工程应用,针对实际应用中工况复杂和数据质量较差的场景,提出数据驱动的健康状态综合评分及异常筛选算法,具有较强的适应性。首先,针对电池实际运行工况提出一种新的特征提取方案,可适用于非恒流的不稳定工况。开发了基于多维特征和混合聚类算法的健康状态综合评分体系,该方案采用无监督学习的算法框架,对可提取特征的数量和质量要求不高,无需进行事先的模型训练和复杂的超参数调整。然后,在麻省理工学院和斯坦福大学提供的公开数据集进行了算法验证,基于电池生命周期各阶段特征集进行健康度等级预测,并应用于健康度高低分选,均能达到 92% 以上的准确率。在某用户侧储能电站实现了该算法的应用,采用早期运行数据即可快速筛选异常电池,有利于尽早维护,提高电池系统的安全性和经济性。

## 150 基于 LCC-S 补偿的电动汽车动态无线充电系统拓扑参数优化

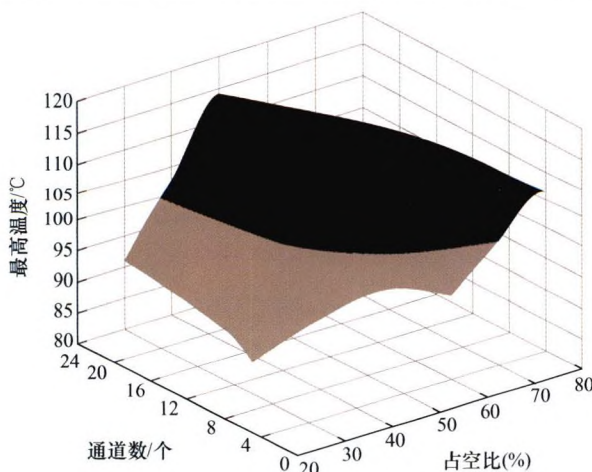
田勇 朱泽 田劲东 向利娟



**摘要:** 针对电动汽车动态无线充电过程中耦合系数会随着车辆横向位置偏移而发生随机变化,进而导致系统输出功率和效率降低的问题,提出一种基于加权平均效率的 LCC-S 拓扑结构参数优化设计方法。根据车辆行驶过程中横向偏移的统计特性,提出基于正态分布  $3\sigma$  原则的效率权重分配方法。该方法综合考虑了高、中、低三种不同耦合水平下的系统效率优化,使优化后的拓扑参数能够更好地适应动态无线充电系统实际工作特点,提高系统在不同偏移情况下的综合效率。采用优化参数搭建动态无线充电试验系统,并将提出的方法与 TWAE(Time-weighted average efficiency)方法进行对比分析,仿真和试验结果验证了该方法的有效性。

## 160 动力电池组动态均衡时的热安全边界计算与验证

吴舒婕 王军 熊瑞 李幸港

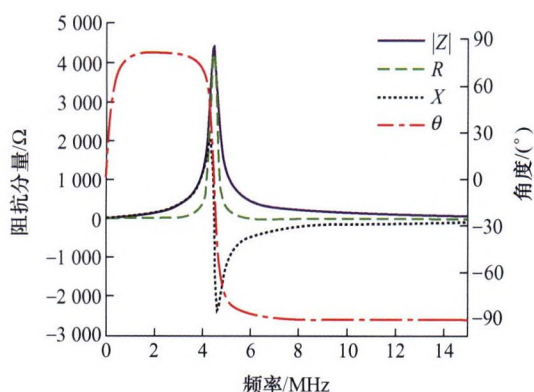


**摘要:** 均衡系统是解决动力电池系统不一致性的有效途径,然而电池组均衡电路产热过大也易引发控制器安全问题。针对均衡电路产热引发的热安全问题,以某分布式控制器为研究对象,建立电池管理系统控制器和电路板的热力学模型;通过温度场仿真研究不同动态均衡控制策略下电路板的最高温度以及温度分布;分析开启通道位置对动态均衡电路板温度分布的影响,计算在满足热安全设计条件下的各工况下的最大均衡工作效率及热安全边界,获得一套适用于电池管理系统均衡时的热力学模型建立和热仿真分析的方法。仿真与试验结果表明,任意采样点模型误差小于  $4^{\circ}\text{C}$ ,可以直观准确模拟动态均衡电路板的温度分布。



168 基于平面线圈电容电感效应的双模式检测技术

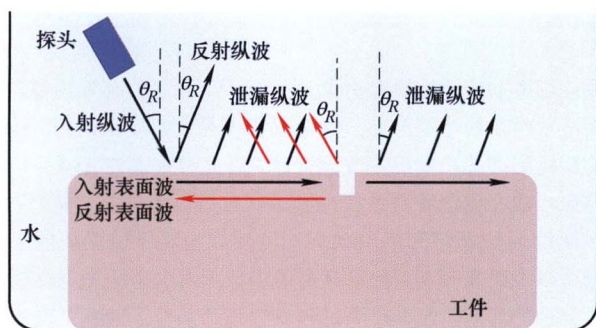
殷晓康 李盈盈 张晓瑞 朱挺 王明达 李伟 陈国明



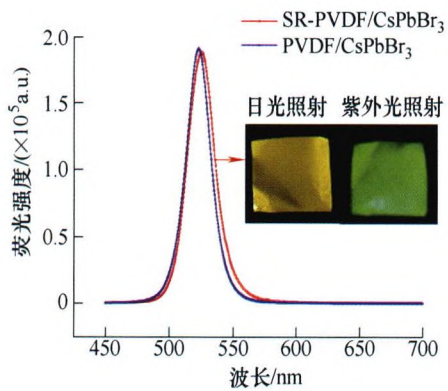
**摘要:** 在电磁无损检测领域, 涡流检测技术被用于导电材料的检测, 电容成像技术被用于绝缘材料的检测。而针对玻纤复合材料修复结构这类“绝缘-导电”混合结构, 单一涡流或电容技术无法实现混合结构各层材料中多类型缺陷的全面检测。通过采用平面线圈探头及较高频率激励, 线圈电容效应得以增强, 结合线圈本身的电感效应, 可同时实现电容、涡流两种模式的检测, 弥补单一技术的固有局限性。从双模式检测系统电容效应、检测系统等效电路分析及被测对象参数对抗测量影响三个角度对双模式检测技术的工作原理进行了分析, 构建了采用平面线圈探头的电容-涡流双模式检测系统, 并对玻璃钢和“玻璃钢-金属”混合结构两类典型试块中的表面与隐藏缺陷进行了检测。结果表明, 基于平面线圈电容电感效应的双模式检测技术可同时实现对绝缘材料与导电材料中缺陷的检测, 并可根据不同激励频率下的探头响应实现缺陷的区辨, 有望满足复合材料修复结构等“绝缘-导电”混合结构的全面检测需求。

177 基于 PCA-WHMM 的超声漏表面波频域合成孔径成像研究

胡宏伟 周刚 沈晓炜 徐晓强



**摘要:** 超声漏表面波可用于检测表面或近表面缺陷, 其非接触检测的优点易于实现自动化检测。但由于波型转换与传播衰减, 漏表面波的回波幅值较小, 不利于缺陷检测和成像。仿真分析了漏表面波的传播特性及缺陷回波特征, 应用主成分分析分离回波信号中的干扰波, 再利用小波域隐马尔可夫模型算法分离整段信号的系统噪声, 联合两种方法提取漏表面波信号中的缺陷信息, 最后通过频域合成孔径算法对漏表面波扫查数据进行了高分辨率图像重建。结果表明, 相比于传统 B 扫成像, 基于 PCA-WHMM 的超声漏表面波 F-SAFT 方法在回波信号平均信噪比上提高了 10.05 dB, 平均成像误差降低了 26.3%, 为金属表面及近表面缺陷检测提供了一种有效方法。

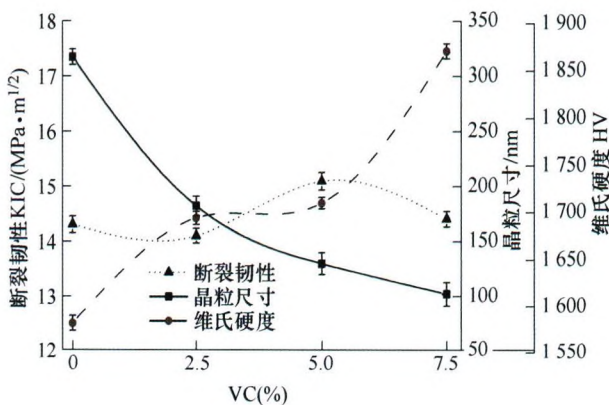


**摘要:** 全无机钙钛矿(CsPbBr<sub>3</sub>)量子点因其优异的光学性能在荧光温度传感器领域展现了巨大潜力。围绕高油污强干扰环境下滚动轴承内圈、保持架等旋转组件温度监测问题,针对原位生长策略不可控导致的 CsPbBr<sub>3</sub> 量子点荧光不均匀问题,提出基于静电纺丝原理制备包覆聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene difluoride, PVDF)纤维膜的 CsPbBr<sub>3</sub> 量子点,结合正交试验法优化传感器制备工艺,并利用微观形貌表征分析手段验证其有效性。在此基础上,进一步提出利用有机硅树脂(Silicone resin, SR)涂覆工艺提升钙钛矿量子点传感器的热稳定性。最后,基于轴承保持架温度监测试验验证了静电纺丝技术结合 SR 涂覆工艺对于提升钙钛矿量子点传感器监测性能的有效性。

## 材料科学与工程

### 195 WC 硬质合金强韧化的研究进展与展望

邹芹 张萌蕾 李艳国 罗永安



**摘要:** WC 硬质合金具有本质脆性,引入添加剂可以实现强度和韧性的同步提升,添加剂种类繁多且不同的添加剂表现出不同的强韧化机制,但目前缺乏对添加剂增强增韧金属粘结相 WC 硬质合金较为系统的综述。基于不同种类的添加剂,从硬质合金的组成、微观结构和烧结技术等方面综述了国内外对 WC 硬质合金强韧化的研究进展。着重介绍各种添加剂及其复合添加时的增强增韧机制,主要表现为细晶强韧化、位错强韧化、相变增韧、裂纹的偏转、桥接和分叉等。总结和对比采用不同金属粘结相和添加剂制备的 WC 硬质合金的强韧性所能达到的范围,指出目前研究中亟待解决的问题及未来发展趋势。通过对大量研究工作的系统整合,在 WC 硬质合金的组成和性能上建立联系,从而为工业生产提供参考,使行业根据所需的性能指标和服役条件,有目的地选择合适的配比,设计制造出符合要求的产品。

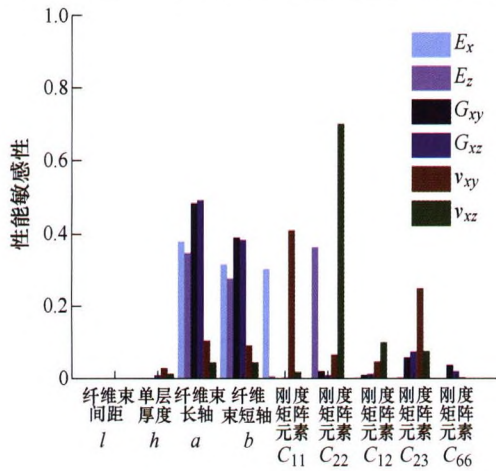
### 205 基于双层同轴复合电弧的穿孔焊工艺可行性研究

钟黎明 刘祖明



**摘要:** 单电极单电弧热源存在热力耦合的固有特性,制约了对熔池热力行为的精确调控,需要改进成弧方式来缓解电弧热力输出的耦合效应。提出双层电弧同轴复合成弧技术,基于等离子弧焊枪,设计了新型喷嘴,将环形自由电弧与中心的压缩电弧同轴复合。电弧燃烧试验测试发现,所设计的焊枪能够形成稳定的复合电弧,电弧宽度可由环形电弧电流调节;将复合电弧与纯压缩电弧进行初步的穿孔焊接对比试验,复合电弧能够实现稳定的穿孔焊接,焊接过程中的小孔行为和焊缝结果与常规压缩电弧基本一致。开展的试验结果初步验证了双层同轴复合电弧焊的可行性,为后续改善穿孔焊接小孔稳定性奠定基础。

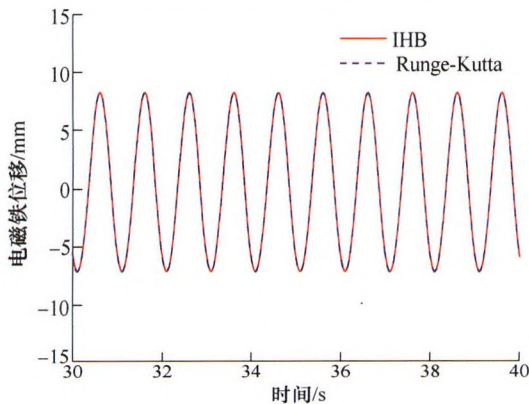




**摘要:** 平纹机织碳纤维复合材料各尺度的材料属性和空间结构不确定性对材料随机力学性能影响程度不一。为了在多个尺度上确定影响材料随机力学性能的关键参数,基于方差分析逐层级地研究平纹机织碳纤维复合材料各尺度中材料、结构参数关于随机力学性能的敏感性。通过指标集成策略将各尺度敏感性指标组合得到系统级敏感性指标,并对各参数的影响程度进行排序、评估,从根源上识别出关键参数。该方法能够确定考虑不确定性的材料-结构一体化设计过程中的关键设计变量,有助于降低变量维度从而提高设计质量和效率。

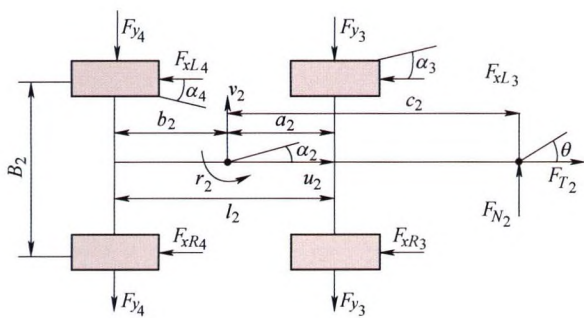
/// 运载工程 ///

223 气动升力下磁浮车辆非线性响应研究



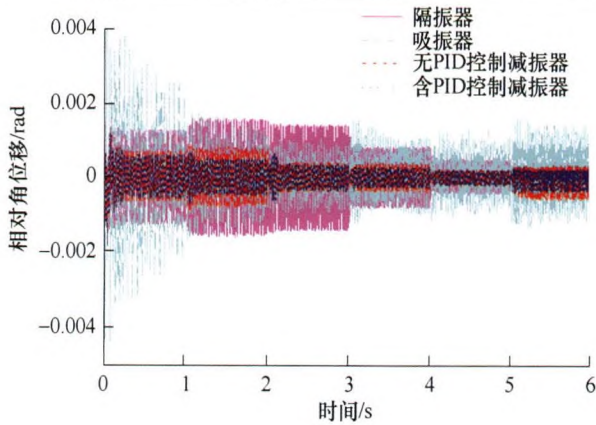
**摘要:** 磁浮列车在高速运行时受到的气动升力包含定常分量和非常气动升力,而非非常气动升力在某种程度上可以视为周期扰动。建立考虑非线性电磁力的磁浮系统二级悬挂的模型,推导了控制方程。利用增量谐波平衡法求解非线性方程,对考虑定常气动升力和周期性非常气动升力条件下的磁浮系统非线性响应特性进行分析。开展了线性和非线性模型对比、控制增益参数和气动系数影响规律分析。结果表明,采用 PD 控制器时,周期扰动的气动力会使得车辆振动中心发生偏移,反馈控制参数对振动偏移具有较大影响。

232 中置轴列车行驶稳定性分析



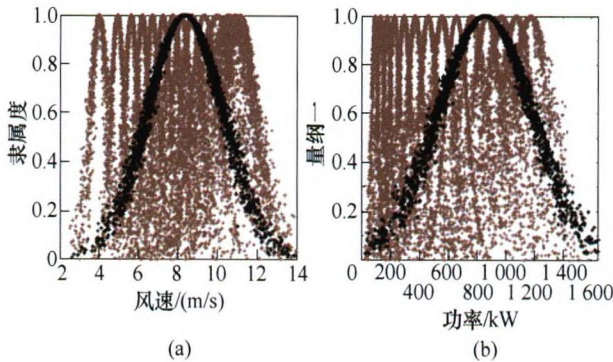
**摘要:** 针对中置轴列车行驶过程中出现的失稳现象,建立中置轴列车的数学模型和动力学仿真模型。在 70 km/h 和 50 km/h 的行驶速度下对阶跃工况、蛇形工况和双移线工况下的侧向加速度、侧倾角和横摆角速度进行了仿真分析,并进行阶跃工况和双移线工况下的行驶稳定性试验。仿真与试验结果表明,相同速度下牵引车的最大侧倾角大于挂车;挂车的最大侧向加速度和最大横摆角速度均大于牵引车,挂车存在明显的尾部放大效应,行驶速度越快,动力学参数放大效应越明显;中置轴列车行驶过程中后方挂车各动力学参数响应较牵引车时间上存在明显的延迟,列车行驶速度越快,挂车响应延迟时间越短,稳定性越低,侧翻风险越大;相同行驶速度下牵引车和挂车最大侧向加速度、最大侧倾角和最大横摆角速度均出现在双移线工况下,双移线行驶工况下中置轴列车稳定性较低,侧翻风险更高。



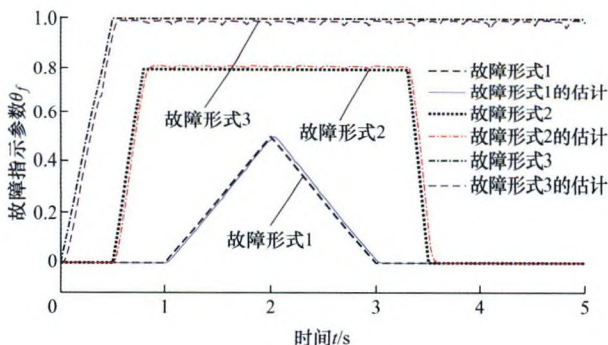


**摘要:** 搭建某实车动力传动系统的当量模型, 建立发动机转矩激励模型, 并以转速和谐次计算获得主谱次频率作为外部激励转矩的主导频率。随后对系统进行受迫振动分析, 获得振动响应恶化频带, 将模型简化, 进行固有振动特性分析, 探究振动恶化原因。然后根据系统固有振动特性匹配扭转隔振器和吸振器减振性能参数, 将两种装置与动力传动系统整合, 进行仿真计算, 对比两种装置减振效果, 并从减振机理分析两者差异性。最后将扭转隔振器和吸振器组合成减振组块安装到系统中, 进行参数匹配和结构设计, 制定频率调谐控制方案, 利用仿真计算验证其优良的减振性能。

/// 可再生能源与工程热物理 ///

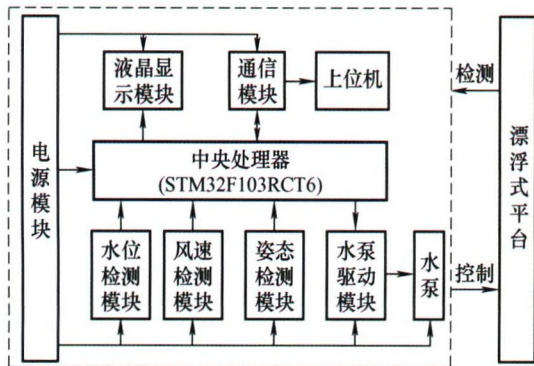


**摘要:** 风速和风向的不稳定、不确定性变化, 使得风电机组难以保持稳定的风能转换状态, 也直接导致了机组发电状态的不确定性。准确评估机组吸能与产能两种状态, 对于制定生产、调度策略以及维护维修决策有着非常重要的意义。通过分析机组能量的转换过程, 指出风电机组具有显性与隐性两种存在状态, 并进一步研究风电机组效能和性能两种功能状态特性。采用云模型描述机组监测数据, 应用云特征参数定量描述机组隐性状态的期望特性、偏离特性和离散特性, 建立机组自有的、蕴藏在 SCADA (Supervisory control and data acquisition, SCADA)数据中的、汇集机组效能与性能综合表现的隐性状态的评价模型。实现对机组不同风速、不同功率参数段局部评价和整个生产参数段整体综合评价, 评估结果能为生产调度和维护维修决策提供依据, 促进风电场科学、优化管理。最后, 采用风电场现场监测数据验证算法的正确性和可靠性。



**摘要:** 针对风电机组的传动系统、发电机和桨距系统故障的有限时间重构和实际应用中气动转矩无法准确获取等问题。提出一种新的自适应非奇异终端滑模观测器。在观测器中引入自适应律, 确保滑模观测器不受未知扰动的影响。设计的非奇异滑模面能有效解决常规滑模观测器的抖振问题, 避免了抖振现象造成的故障误判和漏判等问题, 提高了故障诊断效率。针对变桨系统故障, 通过引入故障指示参数, 将桨距执行机构的液压压降模型转化为加性故障。然后, 利用两个级联滑模观测器对桨距系统进行观测, 给出了有限时间状态的估计和故障重构。最后, 仿真结果验证了风电机组状态的有限时间估计和执行器故障的重构, 达到了风电机组故障诊断快速诊断的目的。证明所提方法的正确性、可行性。

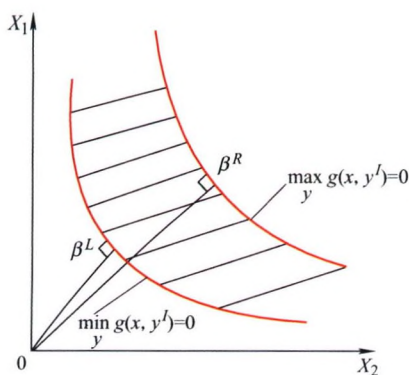




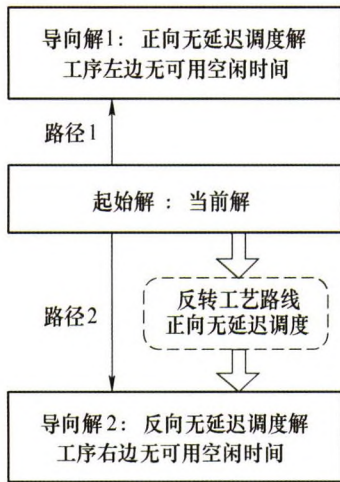
**摘要:** 在外部环境载荷作用下,海上风电漂浮式平台姿态始终动态变化,倾斜失稳会危及整个机组安全。为此,提出一种海上风电三浮筒式漂浮式平台稳定性控制策略。该策略通过姿态传感器感知漂浮式平台实时姿态角变化,借助动、静坐标变换技术将姿态角的变化转换为各浮筒高度变化。然后,进一步设计出压舱水动态调节策略,实时分配各浮筒内部压舱水水量,从而改变平台质量分布以保持平台稳定。在此基础上,面向未来海上风电漂浮式平台专用控制器发展需要,设计了一套基于嵌入式微控制器的平台稳定性控制系统。最后,开发了海上漂浮式风电机组试验模型,并进行了漂浮式平台稳定性控制试验研究。结果表明,提出的稳定性控制系统能够有效抑制漂浮式平台的动态变化,保持平台稳定。

// 交叉与前沿 //

282 基于高阶矩最大熵方法的结构混合可靠性分析



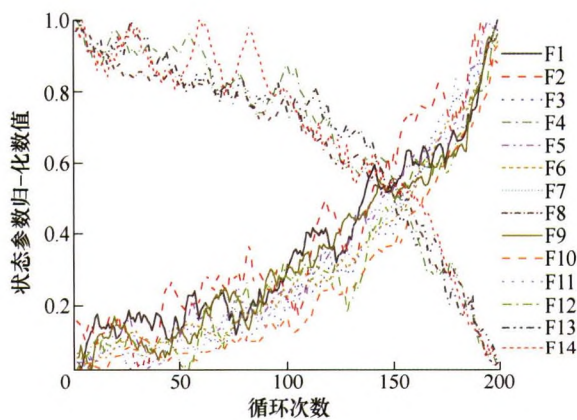
**摘要:** 针对随机-区间变量混合模型可靠性分析问题,提出一种基于高阶矩最大熵方法的结构混合可靠性分析方法。对于区间变量采用区间 Taylor 展开方法得到功能函数的下界表达式,对于随机变量首先采用最大熵方法确定功能函数概率密度表达式,然后利用 Taylor 展开和 Pearson 曲线族方法确定功能函数标准化后的六阶矩,利用 Matlab 求解概率密度函数的参数,并拟合概率密度曲线,最后积分求解功能函数的最大失效概率。该方法应用于一个数值算例和一个工程结构算例,数值算例计算结果与区间蒙特卡洛方法对比,验证了该方法具有较好的精度和效率,工程结构算例以旋压设备旋轮座体在某典型产品旋压过程中的退让量为目标建立功能函数,结合有限元分析软件得到了最大失效概率,为工程结构可靠性分析提供了理论支持。



**摘要：**针对作业车间调度问题(Job shop scheduling problem, JSP)，以优化最大完工时间为目标，提出一种路径重连和禁忌搜索混合算法。结合 JSP 领域知识设计路径重连，分别将正向无延迟调度解和反向无延迟调度解作为导向解。在正向无延迟和反向无延迟调度甘特图中，每一道工序的左边与右边分别无可用空闲时间。提出基于当前解工序头长度的正向无延迟调度转化算法，以及反转工件工艺路线，基于当前解工序尾长度的反向无延迟调度转化算法。设计新的基于精英解的回溯禁忌搜索算法，能够充分利用迭代过程中的历史解信息。不但提取更新的当前最优解加入到精英解集合，而且当最优解连续不更新代数达到设定值时，提取区间代数内较好的当前解加入到精英解集合。实现精英解池的不断补充和动态更新，使得算法可以持续进行回溯搜索。采用移动范围更广的邻域结构进行搜索，将路径重连与禁忌搜索算法混合，对 JSP 问题基准算例进行测试，验证了所提算法的有效性。

304 基于 1D-CNN 和 Bi-LSTM 的航空发动机剩余寿命预测

车畅畅 王华伟 倪晓梅 蔺瑞管 熊明兰



**摘要：**剩余寿命预测对航空发动机的预防性维修有重要指导作用，是保障飞机安全运行，提高维修保障效率的重要手段。一维卷积神经网络(1-dimensional convolutional neural network, 1D-CNN)和双向长短期记忆神经网络(Bidirectional long short memory, Bi-LSTM)被应用于航空发动机剩余寿命预测模型。首先，根据工程经验在多状态参数的主成分分析的基础上对退化过程进行随机分布拟合，得到综合性能退化量；然后将多变量时间序列样本和对应的性能退化量代入 1D-CNN 模型进行回归分析，从而得到性能退化分析模型；再通过 Bi-LSTM 对性能退化量进行时间序列预测，得到性能退化的未来趋势；最后通过设定性能退化阈值，得到剩余寿命预测结果，从而得到从多状态参数-性能退化分析-性能退化预测-剩余寿命预测的实时动态感知模型。实例分析结果表明，提出的混合模型与其他单一深度学习和传统模型相比，有更低的回归分析误差和退化预测误差，能够得到更准确可靠的剩余寿命预测结果。



## **CONTENTS**

- 1 Capacity Estimation of Lithium Ion Battery Considering Hybrid Charging Data**  
ZHOU Ziyou LIU Yonggang YANG Yang CHEN Zheng SHU Xing QIN Datong
- 10 Efficient Approach for Electrochemical-thermal Coupled Modeling of Large-format Lithium-ion Power Battery**  
KUANG Ke SUN Yuedong REN Dongsheng HAN Xuebing ZHENG Yuejiu GENG Zhaojie
- 23 Experimental Study on the Mechanism of Thermal Runaway Propagation in Lithium-ion Battery Pack for Electric Vehicles**  
JIANG Fachao ZHANG Fangshu XU Chengshan LI Cheng WANG Shuyang REN Yi FENG Xuning
- 32 Simulation Study on Overcharge Thermal Runaway Propagation of Lithium-iron-phosphate Energy Storage Battery Clusters**  
WANG Huairu SUN Yiting JIN Yang
- 40 Sensibility Study on Electrochemical Impedance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell**  
ZHANG Shaozhe DAI Haifeng YUAN Hao MING Pingwen WEI Xuezhe
- 52 Challenge and Prospects for Fault Diagnosis of Power Battery System for Electrical Vehicles Based on Big-data**  
WANG Zhenpo LI Xiaoyu YUAN Changgui LI Xiaohui
- 64 Comparative Study on State of Power Estimation of Lithium Ion Battery Based on Equivalent Circuit Model**  
CAI Xue ZHANG Caiping ZHANG Linjing ZHANG Weige GAO Le
- 77 Event-triggered Deadbeat Control for the Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles**  
WANG Benfei PENG Weiwen ZHANG Ronghui MANANDHAR Ujjal HU Xiaosong
- 87 Overview of Fault Diagnosis in New Energy Vehicle Power Battery System**  
SUN Zhenyu WANG Zhenpo LIU Peng ZHANG Zhaosheng CHEN Yong QU Changhui

- 105 Study on Remaining Useful Life Prediction of Lithium-ion Batteries Based on Charge Transfer Resistance**  
WANG Xueyuan LI Rikang WEI Xuezhe DAI Haifeng ZHENG Yuejiu
- 118 Capacity Prediction for Lithium-ion Batteries Based on Improved Least Squares Support Vector Machine and Box-Cox Transformation**  
SHU Xing LIU Yonggang SHEN Jiangwei CHEN Zheng
- 129 Construction Method for Reliability Test Driving Cycle of Electric Vehicle Drive System Based on Users' Big Data**  
ZHAO Lihui WANG Zhen FENG Jinzhi ZHENG Songlin NING Xin
- 141 Data-driven Comprehensive Evaluation of Lithium-ion Battery State of Health and Abnormal Battery Screening**  
JIA Jun HU Xiaosong DENG Zhongwei XU Huachi XIAO Wei HAN Feng
- 150 Parameters Optimization of Electric Vehicles Dynamic Wireless Power Transfer System Based on LCC-S Compensation Topology**  
TIAN Yong ZHU Ze TIAN Jindong XIANG Lijuan
- 160 Calculation and Verification of Thermal Safety Boundary for Dynamic Equalization of Battery Pack**  
WU Shujie WANG Jun XIONG Rui LI Xinggang
- 168 Dual Modality Inspection Technique Based on Capacitive-inductive Effect of Planar Coil**  
YIN Xiaokang LI Yingying ZHANG Xiaorui ZHU Ting WANG Mingda LI Wei  
CHEN Guoming
- 177 PCA-WHMM-based Frequency-domain Synthetic Aperture Focusing Imaging Using Ultrasonic Leaky Rayleigh Waves**  
HU Hongwei ZHOU Gang SHEN Xiaowei XU Xiaoqiang
- 188 Research on Performance Enhancement of Quantum Dot Sensors for Temperature Monitoring of Rotating Components**  
LIANG Panting ZHANG Pan YAN Ke HONG Jun ZHU Yongsheng
- 195 Research Progress and Prospect of Strengthening and Toughening WC Cemented Carbides**  
ZOU Qin ZHANG Menglei LI Yanguo LUO Yongan
- 205 Primary Study on Keyhole Welding with Two-coaxial-layers Hybrid Arc Technology**  
ZHONG Liming LIU Zuming



- 213 Hierarchical Sensitivity Analysis of Multiscale Stochastic Mechanical Properties for Plain Woven Carbon Fiber Composites**  
XU Can ZHU Ping LIU Zhao
- 223 Nonlinear Dynamics of Malev Vehicle under Aerodynamic Lift**  
WU Han ZENG Xiaohui
- 232 Analysis of Running Stability of Train with Center Axle**  
GUO Rui CHEN Jiaheng ZHANG Qixing CAI Wei ZHAO Jingyi WANG Jianjun GUAN Chang
- 244 Study on Torsional Isolator and Absorber Comprehensive Vibration Reduction Technology for Vehicle Powertrain**  
GAO Pu LIU Hui XIANG Changle YAN Pengfei
- 253 Research on Unified Assessment Model of Wind Turbine Efficiency and Performance**  
DONG Xinghui LI Jia GAO Di ZHENG Kai
- 261 Fault Reconstruction of Wind Turbine Actuator System Based on Sliding Mode Observer**  
WANG Hao HAO Wanjun LI Ze CUI Guozeng WU Yu ZHANG Zhengfu SUN Zhihui
- 270 Stability Control Strategy and Experimental Study on Floating Platform for Offshore Wind Turbines**  
DAI Juchuan QIN Haojie ZHANG Fan ZENG Huifan CHEN Huanguo HE Tao
- 282 Hybrid Reliability Analysis for Structures Based on High-order Moments and Maximum Entropy Method**  
ZHENG Hongwei MENG Guangwei LI Feng GUO Yaming XUAN Mohan ZHAO Weidong  
WANG Yu
- 291 Research on Path Relinking Based on Non-delay Scheduling and Backtracking Tabu Search Algorithm of Job Shop Scheduling Problem**  
ZHAO Shikui
- 304 Residual Life Prediction of Aeroengine Based on 1D-CNN and Bi-LSTM**  
CHE Changchang WANG Huawei NI Xiaomei LIN Ruiguan XIONG Minglan



# 《机械工程学报》第十一届编委会

## 名誉主任

钟群鹏(院士) 路甬祥(院士) 潘际奎(院士)

## 名誉委员

王玉明(院士) 石治平(研高) 叶声华(院士) 宁汝新(教授) 过增元(院士) 刘大响(院士)  
刘友梅(院士) 刘宏民(教授) 李圣怡(教授) 周祖德(教授) 胡正寰(院士) 柳百成(院士)  
钟掘(院士) 闻邦椿(院士) 耿荣生(教授) 徐金梧(教授) 徐滨士(院士) 熊有伦(院士)

## 主任

陈学东(院士)

## 副主任

王国彪(教授) 邓宗全(院士) 李奇(编审) 陈超志(教授级高工) 邵新宇(院士)  
黄田(教授) 黄庆学(院士)

## 国内委员

丁汉(院士) 王雪(教授) 王田苗(教授) 王华明(院士) 王庆丰(教授) 王时龙(教授)  
王树新(教授) 王海斗(教授) 王润孝(教授) 王耀南(院士) 孔祥东(教授) 卢秉恒(院士)  
史玉升(教授) 冯吉才(教授) 权龙(教授) 曲兴华(教授) 朱胜(教授) 朱荻(院士)  
朱向阳(教授) 华林(教授) 刘强(教授) 刘少军(教授) 刘军山(研究员) 刘志军(教授)  
刘辛军(教授) 刘检华(教授) 刘雪峰(教授) 刘献礼(教授) 刘德顺(教授) 孙伟(教授)  
孙汉旭(教授) 孙逢春(院士) 严新平(院士) 杜雪(教授) 杜朝辉(教授) 李大勇(教授)  
李荣德(教授) 李涤尘(教授) 杨永强(教授) 杨华勇(院士) 杨兆军(教授) 杨绍普(教授)  
何存富(教授) 沈功田(研究员) 张峥(教授) 张义民(教授) 张卫红(教授) 张立军(教授)  
张宪民(教授) 陈新(教授) 陈文华(教授) 陈兵奎(研究员) 陈雪峰(教授) 苑世剑(教授)  
苑伟政(教授) 范志超(研究员) 林京(教授) 林峰(教授) 林忠钦(院士) 周仲荣(教授)  
周华民(教授) 单忠德(院士) 项昌乐(院士) 赵杰(教授) 赵继(教授) 赵韩(教授)  
赵丁选(教授) 赵宏伟(教授) 赵国群(教授) 柯映林(教授) 钟志华(院士) 段吉安(教授)  
段宝岩(院士) 姜澜(教授) 洪军(教授) 宫声凯(院士) 姚建华(教授) 姚振强(教授)  
袁巨龙(教授) 袁寿其(教授) 都东(教授) 贾振元(院士) 夏长亮(院士) 钱林茂(教授)  
徐西鹏(教授) 殷国栋(教授) 高金吉(院士) 郭万林(院士) 郭东明(院士) 涂善东(院士)  
陶飞(教授) 黄卫东(教授) 黄传真(教授) 黄明辉(教授) 梅雪松(教授) 彭艳(教授)  
彭芳瑜(教授) 葛世荣(教授) 韩旭(教授) 焦宗夏(教授) 温激鸿(研究员) 谢建新(院士)  
雒建斌(院士) 廖维新(教授) 谭建荣(院士) 翟婉明(院士) 熊蔡华(教授) 融亦鸣(教授)  
戴一帆(教授)

## 国际委员

Bi Zhang (美国) Denis Cavallucci (法国) Dong-Pu Cao (英国)  
Duc Truong Pham (英国) Erhan Budak (土耳其) Guang-Bo Hao (爱尔兰)  
Gui-Yun Tian (英国) Hai-Jun Su (美国) Han Huang (澳大利亚)  
Hong-Chao Zhang (美国) Jian-Sheng Dai (英国) Jie (Peter) Liu (加拿大)  
Jin Wang (英国) Jorge Angeles (加拿大) Jun Wang (澳大利亚)  
Kai Cheng (英国) Kazushi Sanada (日本) Lian-Xiang Yang (美国)  
Li-Hui Wang (瑞典) Marco Ceccarelli (意大利) Ming-Jian Zuo (加拿大)  
S.S. Park (加拿大) Shao-Ping Bai (丹麦) Shin Usuki (日本)  
Tamás Insperger (匈牙利) Wei Gao (日本) Wei-Dong Li (英国)  
Wei-Ming Shen (加拿大) Xian-Wen Kong (英国) Xiao-Ping Du (美国)  
Xi-Chun Luo (英国) Xu-Dong Zhao (英国) Xun Chen (英国)  
Y. Lawrence Yao (美国) Yan Jin (英国) Ye-Hwa Chen (美国)  
Yong Huang (美国) Yong-Bo Deng (德国) Yu-Chun Xu (英国)  
Zhao-Jie Ju (英国)

