

# Research on Fault Diagnosis and Prediction of New Energy Vehicle Power Systems Based on Digital Twin

Xiaoguang Yang

Intelligent Manufacturing College of Urban Vocational College, Zhengzhou, Henan, 450000, China

## Abstract

In recent years, the global new energy vehicle industry has shown an explosive growth trend. According to data from the China Association of Automobile Manufacturers, the production and sales of new energy vehicles in China will reach 11.9 million and 11.7 million respectively in 2024, with a year-on-year growth rate of over 30%; Among them, pure electric vehicles account for about 78%, and plug-in hybrid vehicles account for 22%. With the rapid increase in ownership, the maintenance needs of new energy vehicle power systems are becoming increasingly prominent. Fault diagnosis and life prediction of batteries, motors, and electronic control systems have become key bottlenecks in industrial development. Especially in the commercial sector, such as new energy taxis, logistics vehicles, and other high-frequency usage scenarios, the downtime losses caused by power system failures can reach an average of 2000 yuan per vehicle per day, far exceeding the maintenance costs of traditional fuel vehicles.

## Keywords

new energy vehicles; Digital technology; system maintenance

## 基于数字孪生的新能源汽车动力系统故障诊断与预测研究

杨晓光

城市职业学院智能制造学院, 中国·河南 郑州 450000

## 摘要

近年来, 全球新能源汽车产业呈现爆发式增长态势。据中国汽车工业协会数据显示, 2024年我国新能源汽车产销量分别达到1190万辆和1170万辆, 同比增长均超过30%; 其中纯电动汽车占比约78%, 插电式混合动力汽车占比22%。随着保有量的快速攀升, 新能源汽车动力系统的维护需求日益凸显, 电池、电机、电控系统的故障诊断与寿命预测已成为产业发展的关键瓶颈。特别是在商用领域, 如新能源出租车、物流车等高频使用场景中, 动力系统故障导致的停运损失可达日均2000元/车, 远超传统燃油车维护成本。

## 关键词

新能源汽车; 数字技术; 系统维修

## 1 引言

传统故障诊断方法存在显著局限性: 一是依赖事后检测, 难以实现早期预警, 某运营公司数据显示, 约65%的电池故障在发生前已出现潜在征兆但未被识别; 二是基于经验规则的诊断模型泛化能力弱, 难以适应复杂工况, 不同气候区域(如寒带与热带)的故障模式差异可导致诊断准确率下降30%以上; 三是孤立的设备监测无法反映系统级关联故障, 例如电机控制器异常可能引发电池放电特性畸变, 传统方法易误判为电池本身故障。某新能源汽车厂商售后数据显示, 采用传统方法导致的误诊率高达28%, 平均故障修复时间超过4小时, 严重影响用户体验。

数字孪生(Digital Twin)技术通过构建物理实体与虚

拟模型的实时映射, 为故障预测与健康管理(PHM)提供了全新范式。在新能源汽车领域, 数字孪生能够整合多源异构数据, 实现动力系统全生命周期的动态仿真与健康评估。美国能源部资助的EV PHM项目研究表明, 应用数字孪生技术可使故障预测准确率提升40%以上, 维护成本降低30%, 动力电池循环寿命延长15%。在我国“双碳”战略背景下, 该技术对于提升新能源汽车可靠性、降低全生命周期成本具有重要的理论价值与工程意义。

## 2 关键技术综述

### 2.1 数字孪生技术体系

多物理场建模是数字孪生的核心基础, 需融合机械、电磁、热管理等跨域物理模型。针对动力电池系统, 采用电化学-热耦合模型(Newman模型)可精确表征电池内部锂离子迁移与温度场分布, 通过引入SEI膜生长动力学方程, 使循环寿命预测误差控制在5%以内; 对于驱动电机, 基于

【作者简介】杨晓光(1979-), 中国河南人, 本科, 从事汽车维修机电一体化、汽车技术电气研究。

有限元方法的电磁场建模能够捕捉齿槽效应、涡流损耗等细节特征，仿真精度较传统集总参数模型提升 20%，尤其在高速弱磁区域的转矩预测精度改善更为显著。为解决多场耦合计算复杂度问题，采用区域分解算法（DDM）可将求解效率提升 3 倍以上，满足实时仿真需求。

实时数据融合技术面临三大挑战：一是车载传感器（电流、电压、温度等）与云端数据库的时序同步问题，需采用动态时间规整（DTW）算法实现毫秒级时间对准，在 100km/h 行驶工况下可将时间偏差控制在  $\pm 2\text{ms}$  以内；二是异构数据（CAN 总线信号、图像数据、振动信号）的标准化处理，通过联邦学习框架构建分布式特征提取网络，在保护数据隐私的前提下实现多车数据协同训练，模型准确率较单车训练提升 18%；三是数据缺失补偿，基于生成对抗网络（GAN）的插值方法可将数据完整率提升至 98% 以上，尤其对间歇性通讯中断导致的数据包丢失修复效果显著。

## 2.2 动力系统典型故障模式

电池组衰减特性呈现显著的非线性特征，18650 型锂离子电池循环寿命实验表明，在 1C 充放电倍率下，经过 1000 次循环后容量衰减至初始值的 70%，且衰减速率随循环次数呈加速趋势——前 500 次循环平均每次衰减 0.05%，后 500 次则达到 0.07%。通过分析阻抗谱（EIS）发现，衰减主要源于 SEI 膜增厚（电荷转移电阻增大）和活性材料损失（扩散阻抗上升），二者贡献比约为 6:4，在低温（ $-10^{\circ}\text{C}$ ）环境下 SEI 膜增厚的影响占比可升至 75%。电池组的不一致性会加剧衰减，单体容量偏差超过 5% 时，整组循环寿命将缩短 20% 以上。电机轴承失效遵循“三阶段”演化规律：初期（0-30% 寿命）表现为振动信号中 2 倍转频成分增强，峰值能量较正常状态上升 15-20%；中期（30%-70%）出现明显的冲击脉冲，峭度值超过 5，此时轴承外圈出现微裂纹；晚期（70%-100%）高频共振带能量急剧增加，峰值因子突破 10，滚子与滚道接触表面出现明显剥落。基于小波包分解的特征提取方法可有效识别早期微弱故障信号，在信噪比 5dB 条件下仍能保持 85% 的检出率，较傅里叶变换方法提升 30%。

电控系统异常主要表现为三类特征：一是 IGBT 功率器件的结温波动异常，通过 thermo-sensitive electrical parameters（TSEP）监测可提前 500 小时预警潜在短路故障，该参数采用集电极-发射极饱和压降与结温的线性关系，测量误差小于  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；二是电机控制器的调制波畸变，总谐波畸变率（THD）超过 8% 时需警惕驱动波形异常，在 PWM 调制过程中，死区时间设置不当是导致畸变的主要原因（占比 65%）；三是通讯故障，基于时间触发以太网（TSN）的冗余设计可将通讯中断概率降低至  $10^{-9}$  次/小时，较传统 CAN 总线提升 4 个数量级，满足自动驾驶时代的高可靠性需求。

## 3 方法论创新

### 3.1 混合建模框架

物理模型与数据驱动融合架构采用“白箱-灰箱-黑箱”三层结构：底层基于物理定律构建机理模型（如电池等效电路模型、电机 dq 轴数学模型），中层通过高斯过程回归修正模型参数，解决参数时变问题，顶层利用深度学习（如 LSTM）捕捉非线性残差，补偿机理建模的简化误差。该架构在电池 SOC 估计中表现出优越性能，平均误差控制在 2% 以内，较单一模型降低 60%；在  $-20^{\circ}\text{C}$  至  $45^{\circ}\text{C}$  宽温度范围内，最大误差不超过 5%，远优于传统安时积分法（误差 10-15%）。多尺度建模技术路线覆盖从微观到系统级的全尺度分析：在微观层面（ $10^{-6}\text{m}$ ）建立电极材料微观结构模型，采用分子动力学模拟分析锂枝晶生长规律，揭示电解液浓度对枝晶生长速率的影响机制；在部件层面（ $10^{-3}\text{m}$ ）构建电池单体-模组的热失控传播模型，考虑不同排布方式下的热传导路径，模拟精度达到  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ；在系统层面（ $10^0\text{m}$ ）实现整车动力系统的能量流仿真，耦合底盘动力学模型，可反映不同驾驶风格对动力系统负荷的影响。通过自适应降阶技术（POD），在保留关键特征的前提下将系统自由度从  $10^6$  级降至  $10^3$  级，计算效率提升 100 倍，满足实时性要求。

### 3.2 健康状态评估模型

动态权重特征选择算法基于改进 ReliefF 算法，根据特征对健康指标的贡献度实时调整权重：对于电池健康状态（SOH）评估，将电压曲线斜率、温度 rise rate、阻抗谱特征等 12 个特征的权重系数动态更新，在电池循环初期（SOH>90%）赋予阻抗特征更高权重（30%），在衰减后期（SOH<80%）则增加温度特征权重（40%），较固定权重方法的评估准确率提升 15%；引入注意力机制的神经网络可自动聚焦关键特征频段，在电机振动信号分析中，对轴承故障特征频率（1000-3000Hz）的关注度达到 65%，表现出更强的鲁棒性。

基于迁移学习的退化评估有效解决样本稀缺问题：将某车型电机的故障数据作为源域，通过领域自适应算法（如 TCA）迁移至新车型电机的健康评估模型，在仅含 50 组样本的情况下，评估误差仍可控制在 8% 以内；针对电池数据的域差异问题，提出基于 adversarial 网络的域适应方法，使不同批次电池的故障识别准确率差异从 25% 缩小至 5%；对比实验表明，迁移学习方法较传统训练方式的收敛速度提升 3 倍，模型训练所需样本量减少 60%。

## 4 实验验证

### 4.1 数字孪生平台构建

硬件在环测试环境由五部分组成：动力系统物理样机（含 52Ah 磷酸铁锂电池包、150kW 永磁同步电机、两电平控制器）、实时仿真器（OPAL-RT eMEGAsim）、负载模

拟器(160kW测功机)、环境舱(-40°C~85°C,控温精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ )和数据采集系统。平台支持100kVA级功率闭环测试,可模拟城市道路(NEDC工况)、高速(CLTC-P工况)、爬坡(坡度0-30%)等28种典型工况,工况切换响应时间小于1s。通过可编程直流电源(0-600V/0-500A)模拟电池输出特性,可复现不同SOH状态下的电源特性。

实时数据采集系统采用分布式架构:车载端部署边缘计算单元(NVIDIA Jetson AGX,算力200TOPS),实现1kHz高频信号采集与预处理(包括滤波、特征提取),数据压缩比达到5:1;云端采用Kafka消息队列实现每秒10万条数据的并发处理,配合Redis缓存机制,数据写入延迟控制在50ms以内;数据库采用时序数据库(InfluxDB)存储历史数据,支持按时间范围、设备ID等多维度查询,单表数据量达10亿级时查询响应时间仍小于100ms。系统配备16通道同步采集卡(16位精度,采样率1MHz),可同步记录电压、电流、振动等关键信号。

## 4.2 案例对比分析

某型永磁同步驱动电机故障预测实验持续6个月,累计采集数据1.2TB;设置轴承外圈磨损(3种磨损程度)、转子不平衡(2种偏心量)、匝间短路(3种短路程度)三种故障模式,每种模式包含50组全生命周期数据,覆盖转速500-12000rpm、负载0-150Nm的工况范围。实验结果显示,基于数字孪生的方法对早期故障的检出率达到92%,较振动分析法(76%)和温度监测法(68%)具有显著优势;在故障定位精度方面,可区分轴承内圈/外圈故障(准确率89%),远高于传统方法(62%)。实验还验证了不同转速下的性能表现,在高速段(>8000rpm)仍保持85%以上的检出率。

与传统方法的F1-score对比实验中,数字孪生融合模型的综合评分达到0.89,分别优于基于规则的专家系统(0.62)、单一传感器机器学习模型(0.75)和无模型的阈值判断法(0.58)。在不同信噪比条件下的鲁棒性测试表明,当信噪比从30dB降至10dB时,该模型的F1-score仅下降0.09,仍能保持在0.8以上,而传统机器学习模型下降幅度达0.25;在数据缺失率10%的情况下,数字孪生模型通过虚拟补全仍能维持0.85的F1-score,表现出强抗干扰能力。

预测时效性验证聚焦提前30天的预警准确率:在电池组容量衰减至80%的临界状态前,数字孪生模型的预警准确率为87%,且平均提前预警时间达到34天,较实际需要更换的时间点提前1-2个充电周期;电机轴承故障的30天预警准确率为91%,能够有效避免突发性失效,在实验中成功预警了12次潜在的轴承卡滞风险。对比实验表明,该

方法的预警提前量较传统方法增加2-3倍,使维护部门有充足时间制定维修计划,某车队应用后应急维修次数减少70%。

## 5 工程应用展望

车-云协同健康管理系统的架构采用“边缘-雾-云”三级架构:边缘层(车载终端)实现实时故障检测与数据压缩(压缩比10:1),采用轻量化算法(如随机森林)进行本地快速诊断,响应时间小于100ms;雾层(区域服务中心)进行区域fleet健康状态分析,统计不同区域的故障模式分布,如北方地区电池低温衰减问题占比达45%;云层(厂商数据中心)构建全局数字孪生体,实现全生命周期追溯,累计存储100万辆级车辆的健康数据。该架构可将数据传输量降低60%,同时保证关键故障的实时响应,在5G网络环境下端到端延迟控制在50ms以内。

预测性维护决策支持系统包含三大模块:健康状态可视化模块(采用数字孪生三维渲染),可直观展示电池单体一致性、电机轴承磨损程度等细节;维护策略优化模块(基于马尔可夫决策过程),综合考虑维护成本、车辆停运损失和故障风险,生成最优维护时机,使全生命周期维护成本降低28%;备件管理模块(结合库存水平与故障概率),实现备件库存的动态调整,库存周转率提升35%。某试点应用显示,该系统可使维护计划准确率提升50%,备件库存成本降低25%,用户满意度从72分提升至89分。

技术推广面临三大标准化挑战:一是数字孪生模型的接口标准,需统一不同厂商的模型描述语言,目前SAE J3106标准已初步规范了数据格式,但模型结构差异仍导致兼容性问题;二是数据安全标准,需平衡数据共享与隐私保护,欧盟GDPR法规对车辆数据跨境传输的限制已影响多车企协同研发;三是验证与确认标准,需建立统一的模型可信度评估体系

## 参考文献

- [1] 刘春燕.新质生产力赋能汽车产业加速跑头部车企热议创新与出海[N].上海证券报,2025-08-02(004).
- [2] 任风龙.新能源汽车企业市场营销策略分析[J].现代营销,2025,(22):153-155.DOI:10.19921/j.cnki.1009-2994.2025-22-0153-051.
- [3] 徐靓.理实一体化教学模式中的数字技术应用探索——以新能源汽车构造与维修课程为例[J].汽车实用技术,2025,50(14):138-142.DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2025.014.026.
- [4] 衣彩年.数智化背景下新能源汽车检测与维修专业数字技能人才培养路径探究[J].汽车维修技师,2025,(10):55-57.