

锂离子电池健康状态与火灾安全研究

林彭勇^{1,2}

(1. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023;

2. 福建省客车安全与节能技术企业重点实验室, 福建 厦门 361023)

摘要:随着锂离子电池使用时间的延长, 电池单体的健康状态出现不同程度的退化, 导致单体性能不一致, 甚至可能引发内部短路导致热失控。本文基于对事故过程和后台数据的分析, 研究电池健康状态与热失控之间的关系, 提出实现锂离子电池热失控预警的有效方法。

关键词:电动汽车; 动力电池; 健康状态; 火灾安全

中图分类号:U461.91; TM912 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.02.002

Research on Health Status and Fire Safety of Lithium-ion Batteries

LIN Pengyong^{1,2}

(1. Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China;

2. Key Laboratory of Bus Safety and Power-saving Technology Enterprises of Fujian Province, Xiamen 361023, China)

Abstract: With lithium-ion batteries' usage time extending, the health status of individual cells undergoes varying degrees of degeneracy. This results in performance inconsistency among the cells, leading to internal short circuits and thermal runaway. This paper analyzes based on the accident process and backend data, investigates the relationship between batteries' health status and thermal runaways, and proposes effective methods for early warning of lithium-ion batteries' thermal runaways.

Key words: electric vehicles; power battery; health status; fire safety

锂离子电池凭借其高能量密度、长循环寿命、无记忆效应和低自放电率的优势, 被广泛应用于汽车、通信、储能等领域^[1]。其单体电池的电压范围(2~4.2 V)较低, 通常将若干个单体电池串联(提高电压)和并联(增大容量)用于电动汽车。受限于制造工艺, 同批次的电池单体在容量、内阻、电压和自放电率等关键性能上存在差异, 这些差异在使用时间的延长和电池的化学特性影响下变得更加明显。在充放电过程中, 性能最差的电池单体导致电池组(包)出现“木桶效应”, 从而造成电池组(包)容量的部分浪费, 甚至引起其他电池单体的过充或过放, 导致电池健康状态退化, 增加安全隐患。

许多学者对上述电池安全的检测展开了深入的

研究^[2-11]。文献[2]提出了一种基于部分信号进行电池电荷状态(SOC)和健康状态(SOH)的估计, 对全生命周期内的电池单体健康数据进行性能检验。然而, 上述方法大多基于实验室数据, 无法完全适用于实际运行环境。本文利用真实车辆的运行和故障数据, 提出一种基于 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 的早期热失控预警方法, 对锂电池实际运行的安全性进行评估。

1 数据采集及分析

新能源汽车监控平台对接入车辆的静态配置信息和动态实时运行状态进行监测和管理。GB/T 32960.1—2016《电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第1部分: 总则》^[12]中规定, 在电动汽车运行过

收稿日期: 2024-11-04。

第一作者: 林彭勇(1984—), 男, 工程师, 主要从事商用车售后服务、客车火灾鉴定分析及预防相关工作。E-mail: linpy@mail.king-long.com.cn。

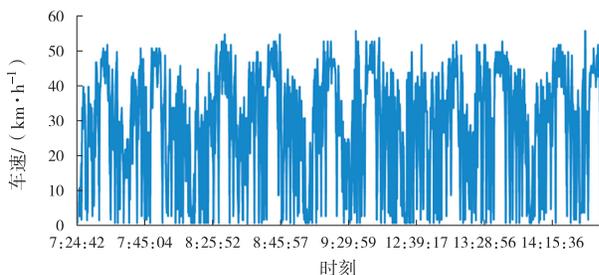
程中,车载终端将传感器采集到的数据通过 GPRS 无线网络传输到数据中心。

本文使用一辆纯电动大客车的数据,其配备的电池系统由 20 个电池箱组成,总参数为 568 V/81 A·h/46 kW·h(运营线路微循环),每个电池箱的参数为 28.4 V/81 A·h,单箱内共 72 个单体电池,为每 9 个电池单体并联后再组成 8 串联。20 个电池箱之间相互串联,每 5 箱一组,分上下 2 层安放在车辆左右两侧。车辆累计行驶里程为 42.33 万 km。发生电池热失控起火事故后,最下层电池箱如图 1 所示,电池箱上有明显的烧蚀痕迹,电池箱上盖出现明显的击穿现象,右侧线束有明显的烧融痕迹。

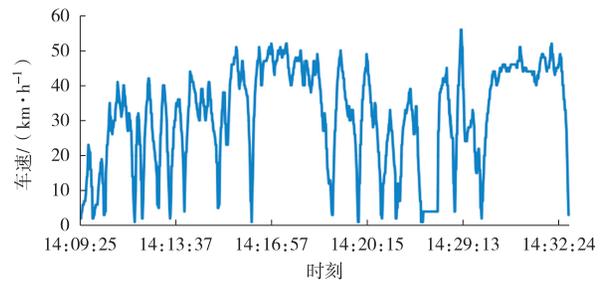


图 1 下层电池框架

首先,采集事故当天的后台数据,包含车速(事故当天车速及事故前半小时的车速)和电池数据,分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 中可以看出,事故发生前车辆在正常行驶,无法从车辆行驶速度判断是否会发生电池故障。从图 3 所示的电池数据中可以看出,电池单体最低电压在 14:32:48(2023 年 7 月 1 日)后突然降为 0 V,说明电池箱发生了内短路现象。然后,依据现场反馈的故障现象,结合后台数据对故障进行深入分析,分析对象包括电机与电机控制器、低压电器舱、高压电器舱以及电池舱。最终确定起火点为电池舱,起火原因是电池内部短路引发的热失控。



(a) 当天车速



(b) 故障前半小时车速

图 2 事故当天车速及事故前半小时车速

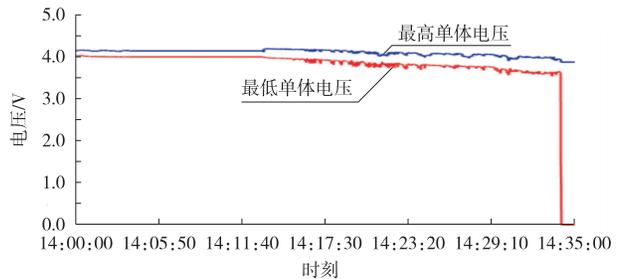


图 3 最高单体电压与最低单体电压变化趋势

2 电池热失控分析

2.1 电池健康状态

电动汽车电池热失控与电池健康状态(如老化)密切相关。电池健康状态变差会使内阻增加,导致充放电过程中电池温度不断升高,进一步加速电池内部的副反应,从而积累更多热量。与此同时,在电池健康状态变化过程中,锂枝晶可能刺穿隔膜从而直接引发内部短路,使电池内部的温度急剧上升,增加起火风险。因此,分析电池健康状态与热失控之间的关系,对提高电池安全性至关重要^[13]。

电池健康状态(SOH)参数 η_{SOH} 反映了其储存电量能力的变化:

$$\eta_{SOH} = C_m / C_n \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_m 为电池当前状态的最大可用容量; C_n 为新电池状态的标称容量。

2.2 电池热失控事故数据分析

图 4 为事故发生前的最高和最低单体电池开路电压-容量曲线。由图 4 可知,在发生事故之前的 2023 年 6 月 18 日和 6 月 24 日均出现了明显的电池健康衰减,即在相同的电压区间内,释放的电量明显减少,表明电池内部已出现异常。之后在 2023 年 7

月1日14:32:48发生起火事故。

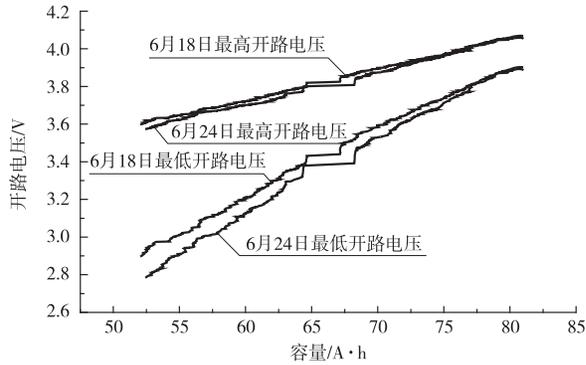


图4 事故发生前开路电压-容量曲线

电池箱(包)中单体电池健康状态的不一致会导致容量、电压、电流分布失衡,进而可能引发过热现象。若电池单体内部短路或过热,可能会触发热失控,导致单体电池温度急剧升高,甚至引发起火或爆炸。

由于电池生产过程存在差异,所以单体电池之间的健康状况也存在差异。图5为从云端读取到的该车衰减最慢的单体电池(SOH_{\max})与衰减最快的单体电池(SOH_{\min})4年内健康状态参数的变化趋势。由图5可知, SOH_{\max} 在使用末期时的 $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 仍保持在65%左右,然而 SOH_{\min} 在使用末期时的 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 已低于45%。其中, $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 和 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 分别为某车辆中衰减最慢的和衰减最快的电体电池SOH参数。经过多年使用,电池系统中电池单体容量的不一致性显著加剧,这不仅降低了总容量利用率,而且衰减最严重的电池单体易形成内部短路,从而引发热失控、鼓胀、绝缘性能下降等危险。

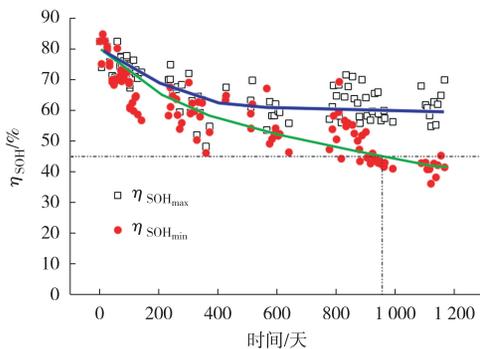


图5 $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 与 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 4年内变化趋势

图6为其他正常车辆(与起火车辆同批次)动力

电池SOH参数的变化趋势。由图6可知,电池箱中 $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 和 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 始终保持相同趋势,并且两者衰减速度相近,全生命周期内的一致性较好。

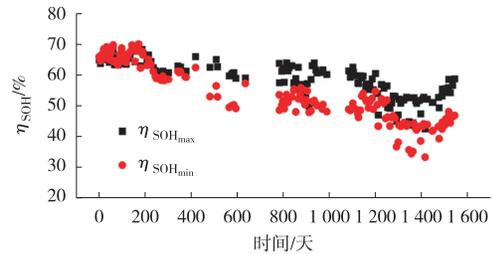


图6 正常车辆 $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 与 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 变化趋势

2.3 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 指标

由于一致性较差的单体电池易产生隐患从而引发故障,因此电池一致性是车辆安全隐患监管的一项重要指标。基于此,本文提出采用健康度一致性 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 指标对电池安全风险进行评估。 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 为电池系统中 $\eta_{\text{SOH}_{\max}}$ 和 $\eta_{\text{SOH}_{\min}}$ 之间的差值。设定阈值,当该差值超过阈值时,电池管理系统或云端诊断预警系统会发出热失控警报。

$$\Delta\eta_{\text{SOH}} = \eta_{\text{SOH}_{\max}} - \eta_{\text{SOH}_{\min}} \quad (2)$$

观察并分析事故车辆与正常车辆 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 在1200天内的变化趋势,如图7和图8所示。从图7中可以看出,事故车辆行驶约900天时, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 首次超过0.20;随后若干天,受数据质量和行车工况变动的影响, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 有所降低,但事故车辆行驶约1100天时, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 多次接近0.20,最高时达到了0.28;事故车辆行驶约1200天时, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 达到了最高值0.28,随后便发生了起火事故。与此相比,正常行驶车辆所有单体电池的 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 始终保持在0.15以下,如图8所示。

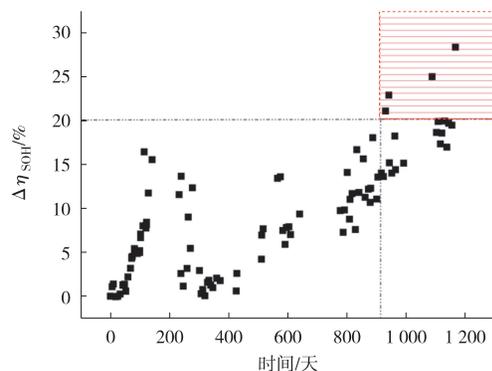


图7 事故车辆单体电池 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 变化趋势

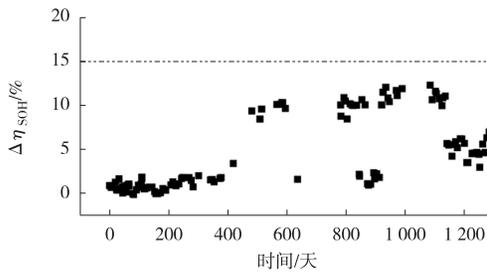


图8 正常车辆单体电池 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 变化趋势

因此,为给事故车辆安全预警预留足够的缓冲时间,并为售后维修预留充足的时间, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 的阈值应远小于 0.28。为避免误报警, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 的阈值应略大于 0.15。可将 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 的阈值设定为 0.20,一旦超过该阈值,应及时停车进行检测和维修。当 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 在 0.15~0.20 之间时,应对车辆进行重点监测;若 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 低于 0.15,则认为车辆动力电池完全处于正常状态。

2.4 推广应用

此 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 评估方法具有广泛的适用性,不仅适用于现有的纯电动车辆的电池系统健康状态和安全风险评估,还可推广到电压特征与本文研究的多元复合锂电池相似的体系(如三元锂电池、锰酸锂电池)中。鉴于事故车辆因动力电池单体 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 长时间超过 0.20 阈值且未及时维护检测,最终导致电池内部短路、热失控并起火,由此推断,正常车辆动力电池单体的 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 始终保持在安全范围内能有效监控电池健康和预防事故。与传统压差预警法相比, $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 方法能够更早、更精准地发现潜在电池隐患,并具有良好的适用性和应用效果。

3 结束语

本文通过对一辆纯电动大客车电池起火事故进行研究分析,讨论了动力电池单体不一致性和健康衰减对电池性能及安全的影响。基于新能源车辆后台数据的分析,提出采用 $\Delta\eta_{\text{SOH}}$ 电池评估指标来预判和预防可能发生的电池事故,并结合事故案例验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] 苏亮,姜宇航,宋光吉,等. 通用性强特征参数保障新能源汽车电池安全[C]//中国汽车工程学会汽车火灾安全技

术分会年会论文集,2024:7-15.

- [2] ZHAO Y, LIU P, WANG Z P, et al. Fault and defect diagnosis of battery for electric vehicles based on big data analysis methods[J]. *Applied Energy*, 2017(207):354-362.
- [3] 李奎杰,周开运,詹锐烽,等. 储能锂离子电池热失控早期主动安全预警技术[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(4):48-61.
- [4] LI F, MIN Y J, ZHANG Y, et al. A method for abnormal battery charging capacity diagnosis based on electric vehicles operation data[J]. *Batteries*, 2023, 9(2):103.
- [5] ZHAO D, ZHOU Z J, ZHANG P, et al. Health condition assessment of satellite li-ion battery pack considering battery inconsistency and pack performance indicators[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023(60):106604.
- [6] LU Y F, LI K, HAN X B, et al. A method of cell-to-cell variation evaluation for battery packs in electric vehicles with charging cloud data[J]. *eTransportation*, 2020(6):100077.
- [7] ZENG J B, ZHANG Y Y, ZHANG Z, et al. Identification of power battery voltage inconsistency faults in electric vehicles based on K-means ++ clustering with dynamic k-values[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2023, 53(1):28-40.
- [8] HONG J C, WANG Z P, MA F, et al. Thermal runaway prognosis of battery systems using the modified multiscale entropy in real-world electric vehicles[J]. *IEEE Transactions and Transportation Electrification*, 2021, 7(4):2269-2278.
- [9] HE H W, ZHAO X Y, LI J W, et al. Voltage abnormality-based fault diagnosis for batteries in electric buses with a self-adapting update model[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022(53):10507.
- [10] 张元星,李斌,颜湘武. 基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10):143-154.
- [11] NAAZ F, HERLE A, CHANNEGOWDA J, et al. A generative adversarial network-based synthetic data augmentation technique for battery condition evaluation[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(13):19120-19135.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第1部分:总则:GB/T 32960.1-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016:2.
- [13] 李鸿海,任永欢,郑彬彬,等. 新能源客车磷酸铁锂电池系统容量不均衡程度大数据分析及应用[J]. *厦门科技*, 2019(5):54-58.