

# 纯电动微型卡车嵌入式电池包结构路谱疲劳仿真分析研究

张涛, 王强, 何敏, 蒋世林, 蒋宽

(重庆瑞驰汽车实业有限公司, 重庆 401133)

**摘要:**本文面向纯电动微型卡车平台嵌入式电池包的结构安全与耐久性需求,以某型号电池包结构为研究对象,建立了高精度有限元模型。通过整车路谱疲劳耐久仿真分析,系统评估了该结构在试验场强化路况下的疲劳损伤。结果表明,原始结构的最大疲劳损伤值为49.7,远超临界值1,无法满足目标寿命要求。对此,本研究提出了以增设局部加强件为核心的优化方案。经仿真验证,优化后结构的最大疲劳损伤值已降至0.061,降幅显著,已满足设计指标。本文为嵌入式电池包的结构设计与优化提供了一套完整的仿真分析方法与理论依据。

**关键词:**嵌入式电池包;有限元分析;路谱;疲劳分析

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.06.009

## Research on Road Spectrum Fatigue Simulation of an Embedded Battery Pack in a Pure Electric Mini-truck

ZHANG Tao, WANG Qiang, HE Min, JIANG Shilin, JIANG Kuan

(Chongqing Ruichi Automotive Industrial Co., Ltd., Chongqing 401133, China)

**Abstract:** This paper addresses the structural safety and durability requirements of an embedded battery pack for a pure electric light truck platform. It establishes a high-fidelity finite element model based on the battery pack structure of a specific model. Through vehicle road spectrum fatigue durability simulation analysis, this paper systematically evaluates the fatigue damage of the structure under intensified proving ground conditions. The results indicate that the maximum fatigue damage value of the original structure reaches 49.7, far exceeding the critical value of 1 and failing the target service life requirements. To resolve this issue, this paper proposes an optimization scheme primarily centered on adding local reinforcements. Simulation verification confirms that the maximum fatigue damage value of the optimized structure drops to 0.061, demonstrating a significant reduction and fully complying with the design targets. This paper thereby provides a complete set of simulation analysis methods and a theoretical basis for the structural design and optimization of embedded battery packs.

**Key words:** embedded battery pack; finite element analysis; road spectrum; fatigue analysis

随着城市物流“最后一公里”需求的激增与环保法规的日益严格,纯电动微型卡车(下文简称纯电微卡)已成为城市货运体系的重要组成部分。该类车型采用电池包嵌入式设计,将电池包置于车架纵梁之间,以优化空间布局。然而,此设计使电池包结构需承受来自车架的复杂载荷,因而对其结构完整性与疲劳寿命提出了更高要求。

电池包作为车辆的核心动力源与高价值部件,其

结构完整性直接关系到整车的安全性与可靠性。因此,在设计阶段应用计算机辅助工程技术,对嵌入式电池包结构进行试验场路谱下的疲劳仿真分析,其目的在于规避结构失效风险、评估结构耐久性,最终实现提升产品寿命与加速开发进程的目标。

国内外学者已在电动汽车电池包结构仿真领域开展了广泛研究。早期研究主要关注乘用车领域的平板式电池包,分析内容通常涵盖静态压溃、机械冲

收稿日期:2025-10-11。

第一作者:张涛(1981—),男,工程师,从事新能源汽车研发高级管理工作。E-mail:ZTAVES@163.com。

通信作者:王强(1985—),男,助理工程师,从事新能源汽车研发强度耐久仿真工作。E-mail:403231268@qq.com。

击及随机振动等关键机械性能。随着商用车电动化进程的推进,相关研究已从乘用车延伸至重型商用车。然而,在纯电微卡这一细分领域,针对其“嵌入式”电池包结构的深入研究目前尚显不足。在分析方法上,现有研究普遍以 GB/T 38031—2025《电动汽车用动力蓄电池安全要求》<sup>[1]</sup>为依据,采用随机振动疲劳分析<sup>[2]</sup>、多工况强度分析与模态分析<sup>[3]</sup>等手段,对电池包的结构进行基础评估。然而,现行标准及相关研究多侧重于电池包作为独立单体的性能,未能有效涵盖其在整车集成状态下的实际载荷环境。对于商用车上采用的嵌入式电池包而言,其自身作为车体结构的一部分,主要失效模式源于车辆行驶过程中车架弯扭变形所引发的结构疲劳。因此,需在设计阶段考虑车架变形对电池包结构疲劳性能影响的研究,而目前行业内对该方向的研究尚不充分,亟待深入探讨。

## 1 本文研究内容与技术路线

本文旨在系统性地解决某纯电微卡嵌入式电池包结构的疲劳耐久性问题。研究遵循图1所示的技术路线,具体包含以下4个核心步骤:

1) 高精度有限元<sup>[4]</sup>建模。建立精确的电池包结构有限元模型,准确模拟其钣金结构、焊接与连接关系;同时建立车身有限元模型,并与电池包模型进行装配,以反映整体结构的耦合效应。

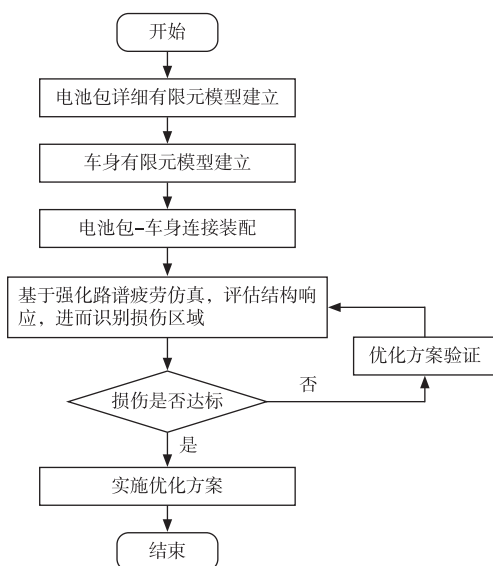


图1 主要研究内容及技术路线流程

2) 路谱疲劳仿真分析<sup>[5]</sup>。基于试验场强化路谱,进行整车级疲劳耐久仿真分析,系统评估电池包结构在真实载荷下的响应,从而识别出疲劳损伤过高

的区域。

3) 结构优化设计。针对仿真识别出的结构薄弱环节,提出以局部加强为主的优化方案,并进行路谱疲劳验证仿真分析,评估是否满足设计要求。

4) 方案实施。对满足设计要求的优化方案进行可行性评估,最终确定可实施的优化方案。

## 2 结构分析与有限元建模

本章以某纯电微卡的嵌入式电池包为研究对象,重点阐述其作为整车骨架一部分的结构集成方案与功能,并系统介绍从几何清理到连接模拟的整车及电池包有限元建模关键步骤,为后续力学仿真奠定基础。

### 2.1 车体骨架与电池包结构概述

本文研究对象为某纯电微卡的嵌入式电池包结构。该电池包的结构主体为“目”字形框架,由高强度钢板冲压焊接构成,并通过多个安装点与车架纵梁刚性连接,已成为整车骨架结构的一部分。该电池包结构对提升整车弯扭刚度有较大贡献。该电池包内部用于容纳电池模组、热管理系统及高压线束等设备;其结构则集成于整车骨架,主要包含以下组件:①纵梁与横梁:作为核心承载骨架,负责传递与分散车架载荷;②上/下壳体:承担主体承力与密封作用;③内部加强筋与支架:用于提高局部刚度并支撑电池模组;④关键安装点:作为与车架的连接接口,承受复杂的力与力矩。

从整车层面看,其结构体系主要由车架、驾驶室、货箱及电池包组成。车辆行驶过程中的载荷,正是由这一整体结构系统共同承担与传递的。

### 2.2 有限元模型建立

为精确模拟电池包结构的力学行为,建立了车体和电池包有限元模型,关键步骤如下:

1) 几何清理与简化。使用 Hypermesh 软件对原始三维模型进行清理,去除不影响整体刚度和强度的微小特征(如小圆角、倒角、工艺孔等),以提高网格质量和计算效率。

2) 网格划分。采用 HyperMesh 等前处理软件,主要使用二阶四面体(C3D10)和壳单元(S3、S4)进行网格划分。对关键区域(如安装点、焊缝、结构突变处)进行网格细化,以确保计算精度。最终模型单元总数约为 266.214 万个,节点总数约为 194.245 8 万个。

3) 材料属性定义。车架主要材料为 B510L, 电池包骨架主要材料为 HC340 高强度钢, 电池包壳体材料为 DC04, 其材料属性见表 1。

4) 连接关系模拟。点焊与缝焊分别通过 RBE2 节点耦合法与区域接触法进行模拟; 螺栓连接在安装点处采用 RBE2 单元表征; 部件间潜在的相对滑动则由面面接触定义。

表 1 材料属性

| 材料      | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/( $t \cdot mm^{-3}$ ) | 抗拉强度/MPa |
|---------|----------|-----|--------------------------|----------|
| DC04    | 210      | 0.3 | $7.85e-9$                | 256      |
| HC340LA | 210      | 0.3 | $7.85e-9$                | 488      |
| B510L   | 210      | 0.3 | $7.85e-9$                | 510      |

电池包有限元模型如图 2 所示, 整车有限元模型如图 3 所示。

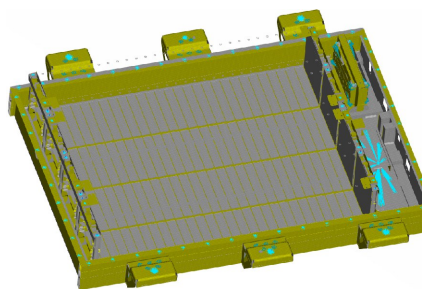


图 2 电池包有限元模型

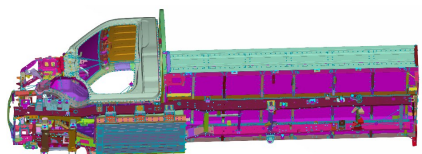


图 3 整车有限元模型

### 3 疲劳载荷谱处理与仿真分析

本章系统介绍了电池包结构疲劳分析的完整流程。首先基于试验场强化路谱获取动态载荷输入, 明确分析步骤; 随后通过仿真计算, 评估原始结构在目标寿命下的疲劳性能, 并得出结论。

#### 3.1 疲劳载荷谱与分析方法

首先, 以比利时路、扭曲路及搓板路等试验场强化路谱作为输入, 通过多体动力学模型仿真提取底盘关键接附点的动态载荷谱。随后, 以此载荷谱为基础, 对电池包结构进行疲劳耐久分析。分析流程如下:

1) 单位载荷应力分析。通过静力学分析获得各

加载点单位载荷下的应力, 如图 4 所示。

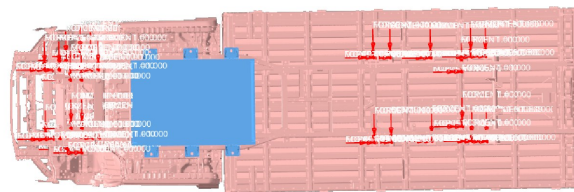


图 4 整车疲劳模型

2) 载荷谱与工况对应。对疲劳载荷谱进行整理, 各载荷通道与静力学载荷工况对应<sup>[6]</sup>, 如图 5 所示。

3) 疲劳损伤计算。基于材料的  $S-N$  曲线与 Miner 线性累积损伤法则<sup>[7]</sup> 进行疲劳分析。在 nCode 软件中, 依据等效于 1.5 万 km 强化道路的载荷谱设置循环次数, 计算得到结构的疲劳损伤云图 (见图 6)。根据 Miner 法则, 当累积损伤值  $D > 1$  时, 即判定结构发生疲劳破坏。

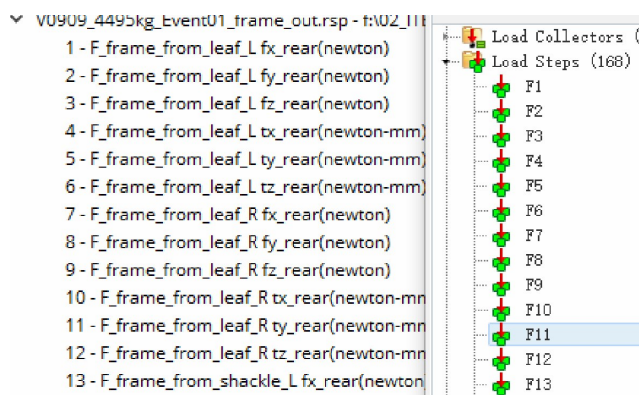


图 5 载荷通道与静力学工况示意

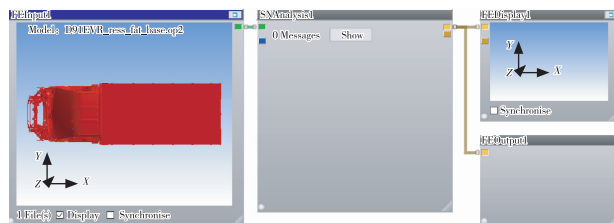


图 6 ncode 疲劳分析流程

#### 3.2 疲劳仿真分析结果

基于试验场道路谱的疲劳分析结果表明, 在目标寿命 (强化道路 1.5 万 km) 下, 原始结构在电池包上盖的疲劳损伤值最大为 49.7 (见图 7), 大于临界值 1。这表明, 该位置在目标寿命周期内会发生疲劳破坏, 导致壳体开裂, 从而使电池包内部进水, 最终严重影响其安全性能<sup>[8]</sup>。

仿真分析结果表明, 原始结构的疲劳耐久性能未



达到设计目标。因此,为确保其满足寿命要求,必须开展结构优化设计。

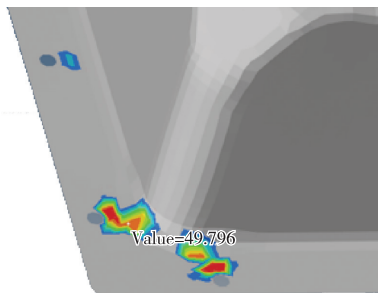


图7 原结构疲劳分析结果

#### 4 结构优化设计

针对第3章仿真分析识别出的薄弱环节,以提高局部刚度、平滑应力传递路径为原则,提出以下优化方案:

1) 方案一(局部加强):为应对应力集中,在相应区域设置了延伸加强板(见图8),其厚度为2 mm,材料为HC340LA。

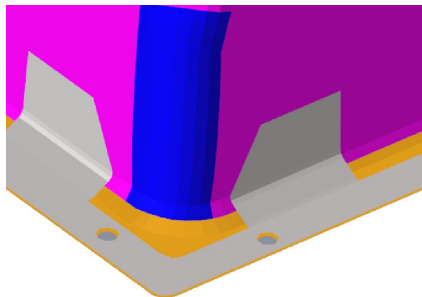


图8 方案一

方案一疲劳分析结果如图9所示,结构最大疲劳损伤值已降至17.56,该值高于目标值1,不满足目标寿命要求。

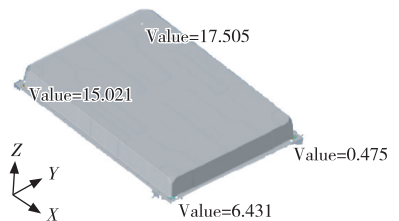


图9 方案一疲劳分析结果

2) 方案二(新增加强板):为提升结构局部刚度,在应力集中位置增加补强板,该补强板厚度为2 mm,材料为HC340LA,如图10所示。

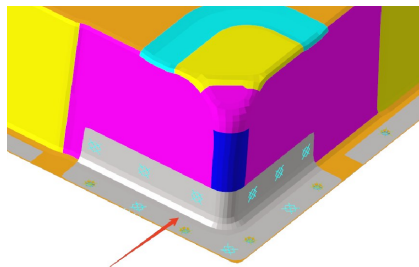


图10 方案二

方案2疲劳分析结果如图11所示,结构最大疲劳损伤值已降至0.061,该值显著低于临界值1,表明结构已满足目标寿命要求。

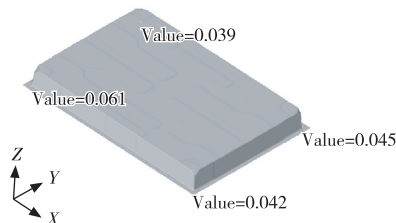


图11 方案二疲劳分析结果

对比2个方案的疲劳分析结果,最终选择方案二。方案二导致的质量增加约为0.5 kg。相对于原始骨架约100 kg的质量,此增量仅为0.5%,比例极小,在可接受范围内。

#### 5 结论

本文针对某纯电微卡嵌入式电池包结构,建立了基于整车路谱的疲劳仿真方法,系统分析了其在车架弯扭变形下的耐久性,并完成优化设计。主要结论如下:

1) 形成了一套有效的耐久性评估方法。通过构建精确的有限元模型并导入整车路谱载荷,为嵌入式电池包结构的耐久性能开发提供了可靠手段。

2) 识别并解决了疲劳风险。仿真表明,原始设计在强化路载荷下的最大疲劳损伤值达49.8,存在破坏风险。通过增加局部加强件的优化方案,将该值显著降低至0.061,满足设计指标。

3) 验证了方案的工程可行性。最终优化方案在彻底消除疲劳风险的同时,将重量增长成功控制在1%以内,展现出优异的工程应用价值。

尽管本研究取得了预期成果,但未来仍存在多个可深入的研究方向,包括但不限于多学科优化、热-力耦合分析、试验验证及复合材料应用。

(下转第78页)

优化后的高度阀采用前二后一的布置形式,具体方案如下:①阀1的形位参数保持不变。②将阀2从后悬架移至前悬架,与阀1关于 $Y_0$ 轴对称布置。前悬架左右两侧气囊分别由阀2和阀1单独供气。③将阀3从其现有位置向 $Y_0$ 线方向移动,负责为后悬架的左右两侧气囊供气。在 $XY$ 平面上,阀1、2、3呈锐角三角形分布,旨在尽量减小长边上2个高度阀的相互影响。优化后3个高度阀的 $XY$ 平面形位参数见表3。

表3 优化后高度阀布置参数 mm

| 部件 | $X$ 轴坐标 | $Y$ 轴坐标 |
|----|---------|---------|
| 阀1 | -462    | 630     |
| 阀2 | -462    | -630    |
| 阀3 | 3 705   | 300     |

### 2.3 装车验证

按照优化的高度阀在整车 $XY$ 平面呈锐角三角形倒置布置的方案进行实车验证。车辆从初始状态(车轴上方两侧腰线距地面高度相等)出发,以25 km/h的速度直角转向,转向结束后,车辆能在4~8 s内自行恢复至初始状态。此前转向后车身无法自动扶正的问题得以解决,验证结果达到预期效果。

## 3 结束语

本文通过分析高度阀响应特性及悬架抗倾斜性

能,提出基于 $XY$ 平面的高度阀锐角三角形倒置布置方案。经实车验证,该方案可有效改善空气悬架客车转向时的车身倾斜现象,对增强车辆操纵稳定性、提升乘坐舒适性具有重要的实际应用意义。

### 参考文献:

- [1] 王传晓. 四轮转向的半主动空气悬架车辆车身姿态控制研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2021.
- [2] 张小刚. 基于空气悬架"高度阀统一应用模型"的智能空气悬架系统[J]. 汽车实用技术, 2021,46(7):73-75.
- [3] 郭君娥,李殿起. 空气悬架客车的操纵稳定性研究[J]. 机械工程师,2020(11):62-64.
- [4] 赵金龙,童剑铭,曲金亮. 三轴铰接空气悬架客车的倾斜校核[J]. 客车技术与研究,2018,40(2):14-15.
- [5] 黄其柏,王勇,赵明,等. 汽车空气悬架系统的发展概况[J]. 噪声与振动控制,2005,25(3):13-15.
- [6] 齐丹,越文,吴学军. 客车空气悬架安装使用与维护保养要点[J]. 客车技术与研究,2018,40(1):60-62.
- [7] 于菲,闫岩,吴学军. 客车空气悬架使用中常见故障及原因分析[J]. 客车技术与研究, 2017,39(6):58-60.
- [8] 于功臣,越文,何文彪. 空气悬架系统不同气路管径对车辆平顺性的影响[J]. 客车技术,2017(6):11-13.
- [9] 崔晓利. 车辆电子控制空气悬架理论与关键技术研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- [10] 杨国库. 客车空气悬架高度控制阀种类及布置[J]. 客车技术与研究,2010,32(5):42-43.

(上接第53页)

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力蓄电池安全要求:GB/T 38031—2025[S]. 北京:中国标准出版社,2025:1-40.
- [2] 秦玉英,曹俊杰. 电池包联合工况振动疲劳仿真分析[J]. 电源技术,2023,47(12):1579-1582.
- [3] 秦玉英,曹俊杰. 新能源动力电池包模态分析及优化设计[J]. 电源技术,2023,47(8):1060-1063.
- [4] 徐婧雨,陈冲,段术林,等. 基于HyperMesh的客车底架后

桥段结构的优化分析[J]. 2024,46(5):34-37.

- [5] 杨权,马小芹,陈志洋,等. 基于路谱载荷的副车架疲劳损伤分析与优化[J]. 汽车实用技术,2024,49(21):83-87.
- [6] 郑凯铭,徐小彬. 基于Adams/ncode整车车架疲劳寿命分析[J]. 内燃机与配件,2024(7):9-11.
- [7] 张烈明,崔震,郭继文,等. 基于台架试验数据的铸件疲劳寿命分析与应用[J]. 汽车工艺与材料,2024(7):49-53.
- [8] 李军,毕朋飞,邓磊,等. 基于有限元仿真的汽车电池包上箱体开裂分析[J]. 科技和产业,2025,25(19):69-75.