

基于等效双线性波形的客车前部结构耐撞性设计与实现

卢琳兆¹, 陈良¹, 叶松奎²

(1. 厦门市产品质量监督检验院, 国家场(厂)内机动车辆检验检测中心, 福建 厦门 361004;

2. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要:本文基于能量守恒原理,将客车正碰波形转换为等效双线性波形后验证其有效性。首先通过优化分析,获得WIC最大值和最小值的波形区间;其次进行概念设计和子模型验证;最后进行整车碰撞试验。试验结果表明:采用等效双线性波形不仅能大幅减少设计变量从而提升优化效率,还能明确客车前部结构的耐撞性设计和改进方向,有利于车辆安全性的正向设计,具有较强的工程实用性和行业参考性。

关键词:等效双线性波形;优化分析;客车前部结构;耐撞性设计

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.03.009

Crashworthiness Design and Implementation of Coach Front Structure Based on Equivalent Bilinear Waveform

LU Linzhao¹, CHEN Liang¹, YE Songkui²

(1. Xiamen Products Quality Supervision & Inspection Institute, National Supervision & Inspection Center for Inside Vehicle, Xiamen 361004, China; 2. Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China)

Abstract: Based on the principle of energy conservation, this paper converts the frontal collision waveform of a coach into an equivalent bilinear waveform and then verifies its effectiveness. Firstly, it determines the waveform range of WIC's maximum and minimum values through optimization analysis. Secondly, it carries out conceptual design and sub-model verification. Finally, it conducts the full-vehicle collision test. The test results show that adopting an equivalent bilinear waveform can significantly reduce the number of design variables, thereby improving optimization efficiency and clarifying the crashworthiness design and improvement direction of the coach's front structure. It is conducive to the forward design of vehicle safety and has strong engineering practicability and industry reference value.

Key words: equivalent bilinear waveform; optimization analysis; front structure of coach; crashworthiness design

汽车被动安全一直是人们最关注的问题之一^[1]。车辆被动安全的理想状态需同时满足以下两点:①车体结构在碰撞过程中吸收绝大部分能量。②乘员生存空间保持完整,使乘员舱受到的外力与约束系统相互匹配,从而降低车内乘员的伤害^[2-5]。

目前,客车仍是我国公路客运体系中主要的运输工具,然而公路交通事故发生率也持续偏高。为系统提升客车的乘员碰撞安全性能,诸多研究已围绕结构、波形与约束系统等多方面展开。文献[6]通过对

原客车前部结构的改进,使车辆满载工况碰撞速度为30 km/h时满足碰撞安全要求。在车辆满足基本碰撞要求之后,研究焦点逐渐从结构完整性转向乘员损伤机理。文献[7]和文献[8]研究了客车碰撞波形与乘员伤害之间的关系,为客车前部结构设计及乘员损伤研究提供了关键理论参考。文献[9]通过优化约束系统参数,有效降低了胸部损伤值。文献[10]从碰撞波形出发,研究了将乘用车碰撞波形转换成等效双线性波形的方法,结果表明,当第一阶段斜率大且

收稿日期:2025-08-05。

基金项目:2023年度厦门市重大科技计划项目(3502Z20231055)。

第一作者:卢琳兆(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事整机检测及车辆性能和结构安全研究。E-mail:lulinzhao82@163.com。

波形末尾峰值较大时, 乘员损伤较小。

然而, 该方法在客车上的适用性及各波形因素对客车乘员的影响程度尚不明确。因此, 本文提出将客车碰撞波形转换成等效双线性波形, 分析各因素对碰撞用假人伤害的影响程度, 进而明确客车前部骨架结构安全性正向设计, 使其满足 JT/T 1369—2020《客车正面碰撞的乘员保护》^[11] 标准要求。

1 有效性验证

1.1 仿真模型有效性验证

根据 JT/T 1369—2020 标准^[11] 中的附录 B 构建台车有限元模型(见图 1)。提取某客车以 30 km/h 的碰撞初速度进行 100% 正面刚性墙撞击的加速度波形, 将该波形施加到台车仿真模型上进行计算。通过修正台车仿真模型, 使仿真结果尽可能接近试验结果, 从而再现真实碰撞过程。仿真计算得到的假人伤害曲线对比如图 2 所示, 假人伤害值对比汇总见表 1。

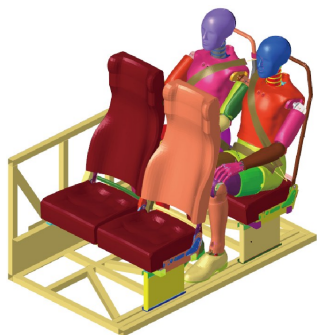
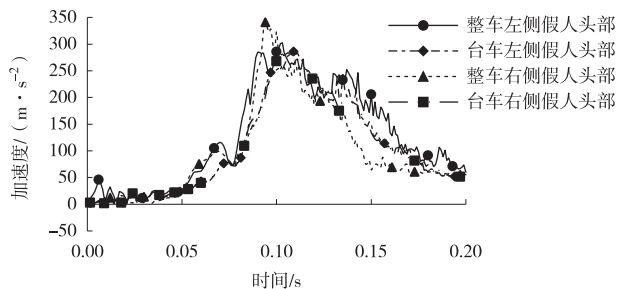
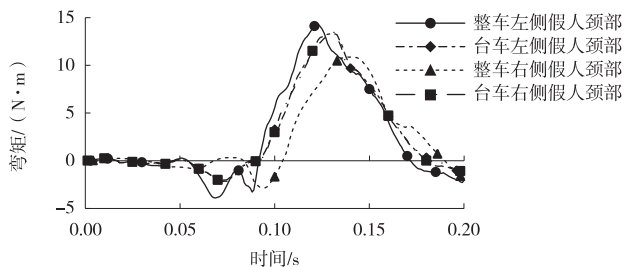


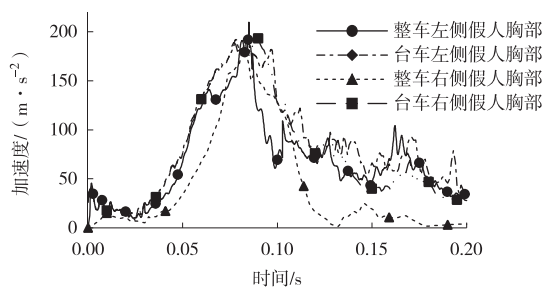
图 1 台车仿真模型



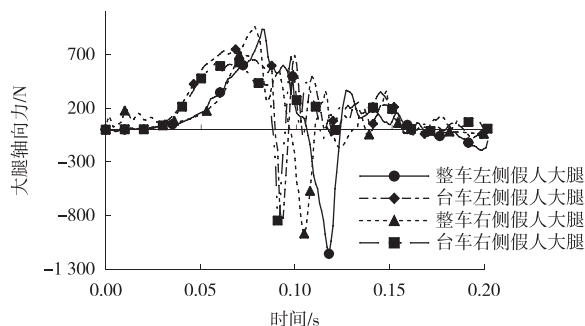
(a) 头部加速度对比



(b) 颈部对 Y 轴弯矩对比



(c) 胸部加速度对比



(d) 大腿受力对比

图 2 整车试验与台车仿真的假人伤害曲线对比

表 1 中所列指标包括: 头部损伤指标 (Head Injury Criterion, HIC)、颈部绕 Y 轴弯矩 (Moc_y)。本文通过对比整车试验与台车仿真的各项伤害值及相对误差, 验证台车仿真模型的有效性。

表 1 仿真与试验的假人伤害值对比

指标及位置	整车 试验值	台车 仿真值	相对 误差
HIC(左侧)	127.3	111.7	-12.3%
HIC(右侧)	119.3	107.6	-9.8%
Moc _y (左侧)/N·m	15.11	10.94	-27.6%
Moc _y (右侧)/N·m	14.23	10.17	-28.5%
胸部加速度(左侧)/(m·s ⁻²)	205.7	190.1	-7.6%
胸部加速度(右侧)/(m·s ⁻²)	189.6	188.0	-0.8%
大腿力(左侧假人大腿受力最大值)/kN	1.16	1.25	+7.8%
大腿力(右侧假人大腿受力最大值)/kN	0.97	1.31	+35.1%

本文通过试验样车碰撞试验, 获取了假人头部加速度、颈部绕 Y 轴弯矩 (Moc_y)、胸部加速度及大腿轴向力的响应, 并与仿真模型相应部位的响应进行对比。加权损伤准则 (Weighted Injury Criterion, WIC)^[12] 综合头部、颈部、胸部、大腿的伤害值, 其值越小表示整体损伤越低。结果表明: 仿真与试验结果在起始时刻、峰值大小及峰值出现时刻等方面基本一

致;由式(1)计算得到的仿真与试验 WIC 值误差在 10%以内,满足工程分析要求。因此,该台车仿真模型精度较高,可用于后续碰撞加速度波形优化分析。

$$W=0.6\times(H_{36}/500)+0.35\times(A_c/30)+0.05\times(F_{\max}/10)$$

(1)

式中: W 为 WIC 值; H_{36} 为 36 ms 时间窗口的头部损伤指标; A_c 为胸部合成加速度; $F_{\max}$ 为大腿轴向压缩力的最大值。

1.2 等效双线性波形的可行性验证

基于碰撞能量守恒定理,先将车体正面碰撞加速度波形转换成如图 3 所示的等效双线性波形^[3]。然后将该波形施加到台车仿真模型中进行计算,得到假人各部位的伤害值,对比结果见表 2。

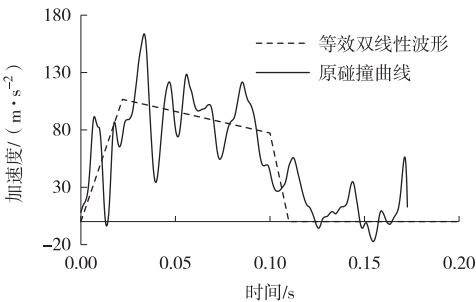


图 3 波形等效

表 2 不同波形下的假人损伤对比

指标及位置	原始 波形	等效双线性 波形	法规值
HIC(左侧)	111.7	114.73	≤500
HIC(右侧)	107.6	111.23	≤500
Moc _y (左侧)/N·m	10.94	12.12	≤57
Moc _y (右侧)/N·m	10.17	11.18	≤57
胸部加速度(左侧)/(m·s ⁻²)	190.1	191.8	≤294
胸部加速度(右侧)/(m·s ⁻²)	188.7	178.4	≤294
大腿力(左侧假人大腿受力最大值)/kN	1.25	1.61	≤10
大腿力(右侧假人大腿受力最大值)/kN	1.31	1.05	≤10
WIC(左侧)	0.366	0.374	—
WIC(右侧)	0.360	0.351	—

通过对比原始波形与等效双线性波形的仿真结果发现,相对于原始波形,等效波形右侧假人 WIC 值降低 1.34%,左侧假人 WIC 值增加 2.22%。总体而言,等效波形与原始波形之间的各项伤害指标差异均较小,表明等效双线性波形具有较高的精度。因此,后续客车正面碰撞波形等效分析中,可采用等效双

性波形替代原始碰撞波形。

2 等效双线性波形优化

车辆碰撞加速度曲线经过等效处理后特征较为明显,但各因素对假人伤害程度不一。为便于后续结构设计,需进一步了解各因素对假人伤害的影响程度。

2.1 试验设计

选取等效双线性波形上的特征点(即拐点,如图 4 所示)作为设计因子,各因子的参数范围见表 3。图 4 中 t_1 为前端吸能完全压溃时刻; a_1 为 t_1 时刻的加速度; t_m 为车体回弹时刻; a_m 为 t_m 时刻的加速度; t_r 为车体碰撞终止时刻; t_c 为车体从碰撞开始至碰撞终止时间的一半(即 $t_r/2$)。本文采用优化拉丁超立方试验设计方法获得 60 个样本点,通过仿真计算得到各样本点对应的假人加权伤害指数 WIC。试验测得的 WIC 分布如图 5 所示,各特征点取值对 WIC 的影响程度如图 6 所示。

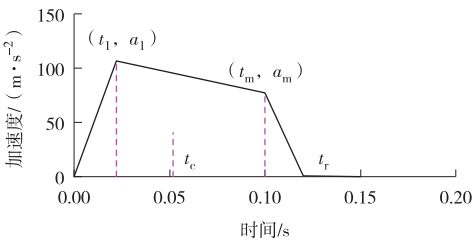


图 4 等效双线性波形上的特征点

表 3 各因子取值范围

参数	下限值	初始值	上限值
$a_1/(m\cdot s^{-2})$	60.0	148.0	160.0
$a_m/(m\cdot s^{-2})$	40.0	93.0	135.0
t_1/s	0.015	0.026	0.040
t_m/s	0.070	0.084	0.150
t_r/s	0.080	0.094	0.150

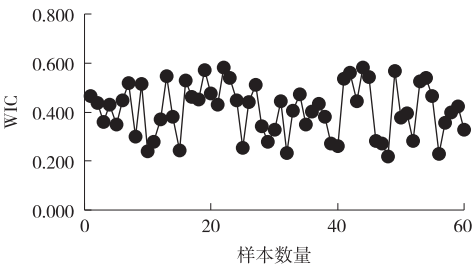


图 5 试验结果

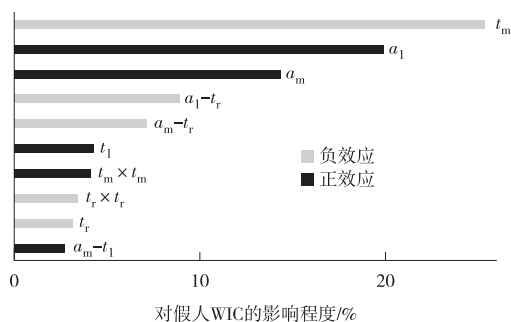


图6 各因子的帕累托图

由上述试验结果可知,在初始碰撞速度不变的情况下,对假人 WIC 影响最大的 3 个因素依次为 t_m 、 a_1 、 a_m 。其中, t_m 的值越大, WIC 的值越小, 两者呈负相关; a_1 和 a_m 的值越大, WIC 的值也越大, 呈正相关。而 t_1 与 WIC 也呈正相关, 但影响程度较小。

2.2 构建近似模型

客车前部结构较为紧凑,各踏板与最前端的距离较小,可供吸能盒布置的空间有限。因此, t_1 和 t_m 的取值需同时满足以下两点: ①保证足够的吸能行程; ②不超出实际布置的物理限制。

根据试验设计结果,以 a_1 、 a_m 、 t_1 、 t_m 为试验因子(取值范围见表 4),构造径向基函数(Radial Basis Functions, RBF)近似模型。该模型以 WIC 的最大值和最小值为优化目标,约束条件为:碰撞初速度 v 保持不变,且碰撞压溃变形量不大于 0.4 m。

表4 构造 RBF 近似模型的试验因子的取值范围

参数	下限值	初始值	上限值
$a_1/(m \cdot s^{-2})$	60.0	148.0	160.0
$a_m/(m \cdot s^{-2})$	40.0	93.0	135.0
t_1/s	0.015	0.026	0.030
t_m/s	0.070	0.084	0.100

计算得到该 RBF 近似模型的决定系数 $R^2 = 0.9629$ 。由于 R^2 越接近 1,模型的拟合精度越高,因此该近似模型可信度较高,可用于后续优化分析。

2.3 优化分析

针对 RBF 近似模型,采用自适应遗传算法,以压溃变形量小于 0.4 m 为约束,经 500 次迭代优化,得到最大和最小加速度波形,其波形范围及对应的变形量如图 7 和图 8 所示。

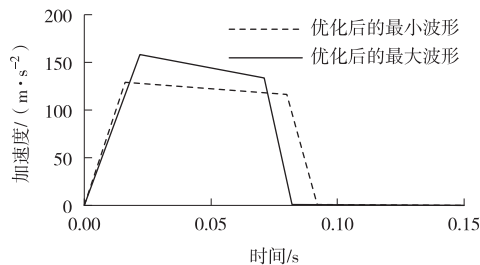


图7 WIC 最大最小时的加速度波形范围

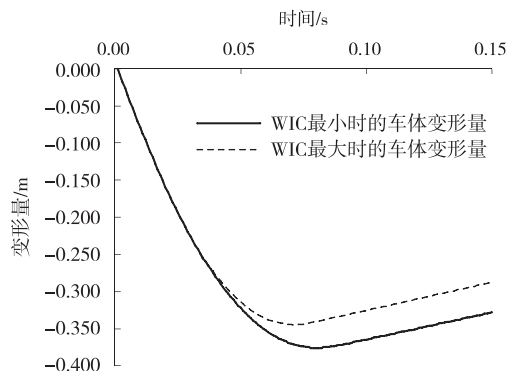


图8 变形量限值

3 客车前部结构的耐撞性设计

3.1 功能区的划分

某司现有客车前部结构既不能满足前部驾驶室生存空间的要求,也无法确保乘客区加速度处于合理范围内。针对这一问题,本文提出的改进设计方案如下:

1) 主吸能区:将转向器安装支座之前的区域改为主吸能区,并放置吸能盒。当乘客区乘员向前惯性运动时,吸能盒可吸收足够能量。

2) 辅助吸能区:将前桥后端面左右贯穿横梁之前的区域(除驾驶员座椅与转向立柱之间的刚性区外)设置为辅助吸能区(见图 9),使其发生合理变形,吸收剩余能量。

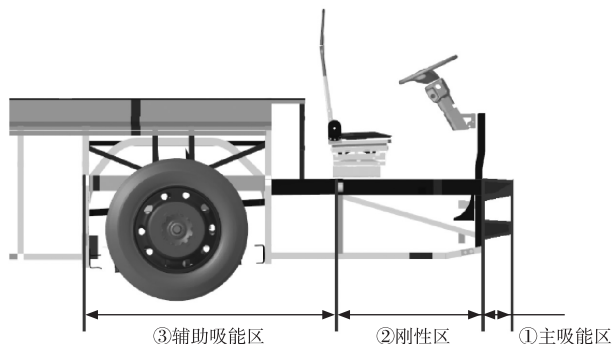


图9 各功能区示意图

3) 运动控制与损伤要求:在上述吸能设置下,乘

客区乘员将以合适的减速度向前运动,使乘员损伤满足法规要求。

4) 行李舱保护:需确保前桥后部与行李舱之间的区域仅发生小变形,不会挤压行李舱空间。

样车正向设计时,设计人员可按以下步骤确定结构参数:①根据图 7 中 WIC 最大和最小时的加速度波形范围,预先选取合适的加速度曲线;②依据第一个拐点的出现时刻及幅值,通过式(2)初步确定前部结构的压溃变形量及前端吸能盒的长度范围;③通过式(3)计算辅助吸能区的变形量。

$$L_1 = \left| v_0 t_1 + \int_0^{t_1} \int_0^t a(t) dt dt \right| \quad (2)$$

$$L_2 = L_{\max} - L_1 \quad (3)$$

式中: L_1 为主吸能区的变形量; v_0 为客车碰撞前的初始速度; t 为碰撞开始至结束的时间; t_1 为前端吸能完全压溃时刻(即等效双线性波形的第一个拐点出现时刻); $a(t)$ 表示客车碰撞过程中某时刻的加速度; L_2 为辅助吸能区变形量; $L_{\max}$ 为设计人员根据图 8 确定的最大变形量。

3.2 传力路径的规划

前桥区域刚度较大,因此将与前桥悬架连接的大梁作为第二级传力路径,以有效传递载荷。同时,将与悬架连接的驾驶区结构上的纵梁作为第一级传力路径(又称为上传力路径),并在该纵梁的前端布置主吸能盒,在主吸能盒的下方布置辅助吸能盒,具体如图 10 所示。

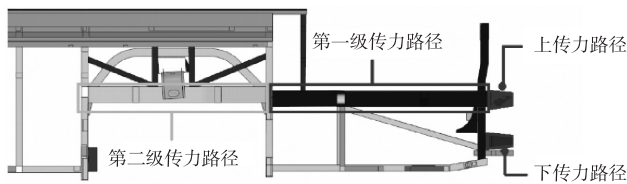


图 10 传力路径示意图

4 试验测试

4.1 子模型碰撞试验验证

为验证前部结构设计是否合理,以 30 km/h 的碰撞初速度进行试验。测点布置如图 11 所示,相应的测量结果如图 12 所示。结果表明,前部结构主吸能区的吸能变形及刚性区传力路径上的加速度均在设定范围内,为后续的整车仿真分析提供了模型试验验证依据。

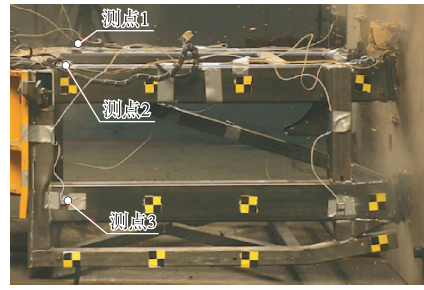


图 11 子模型的吸能变形及加速度测点布置

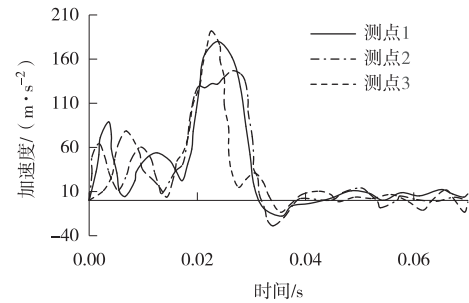


图 12 子模型后端的加速曲线对比

4.2 整车碰撞试验验证

将通过验证的子模型结构布置在整车模型中,进行仿真分析和试验验证,结果如图 13 和图 14 所示。试验结果表明:客车前部结构变形主要集中在前桥前部区域,驾驶员位置有足够的生存空间,且乘员伤害值较小,满足 JT/T 1369—2020 标准要求^[11](见表 5)。上述基于子模型的正向设计及验证流程,可用于指导客车前部被动安全结构设计。



图 13 整车碰撞试验

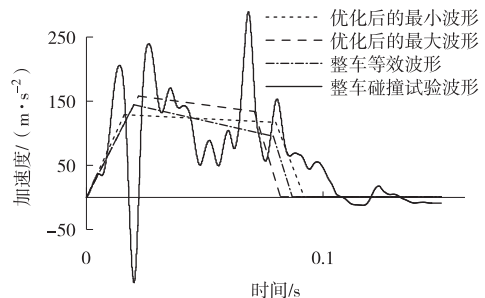


图 14 整车试验加速度波形对比

表5 乘员伤害值汇总

项目	法规值	试验结果
HIC	≤ 500	212.2
Mocy/(N·m)	≤ 57	16.69
胸部加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	≤ 294	219.0
大腿力(假人大腿受力最大值)/kN	≤ 10	1.337
WIC	—	0.522

注:表中数据为第一排左侧靠通道处假人的伤害试验结果。

5 结论

本文将客车正面碰撞加速度波形转换为等效双线性波形,分析了各特征参数对假人伤害的影响程度,在此基础上构建了RBF近似模型并采用自适应遗传算法进行优化,最终得到了满足法规要求的合理波形范围,并结合客车前部结构特点实现了正向设计。主要结论如下:

1) 将试验波形根据能量守恒定理转换成等效双线性波形。转换后的波形可直观反映前端结构的刚度变化、车体回弹时刻及总变形量,用于指导客车前端结构的骨架设计。

2) 以乘员伤害权重指数WIC为总目标,在给定一定碰撞初速度及总变形量的条件下,通过试验设计,确定了等效双线性波形各特征点对假人各部位伤害的影响程度,并给出了合理的参数取值范围。

3) 结合客车前部结构特点,构建RBF径向基函数模型并采用自适应遗传算法优化,得到满足法规要求的合理波形范围,使假人各项伤害值达标。

4) 以优化碰撞等效波形为总目标,分解得到车体结构性能子目标,通过实现子目标达成总目标,实现了客车前部耐撞结构的正向快速设计。

参考文献:

- [1] 邱少波. 汽车碰撞安全工程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2016:3-4.
- [2] Peddi S N. Selection of optimal design parameters to achieve improve occupant performance in frontal impacts;2013-01-0756[R]. Warrendale, PA, SAE International,2013:1-8.
- [3] Huang M. Vehicle Crash Mechanics[M]. Florida: CRC Press, 2002:27-30.
- [4] 徐珍珍,尹辉俊,易超,等. 微型电动汽车正面碰撞约束系统匹配研究[J]. 广西科技大学学报,2024,35(1):26-32.
- [5] 林坡. 汽车偏置碰撞中驾驶员侧乘员约束系统优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2018:26-33.
- [6] 司俊德,孟照雨,王铨薄. 大客车正面碰撞安全性能分析及结构改进验证[J]. 汽车实用技术,2023,48(16):80-85.
- [7] 吴长风,张君媛,那景新,等. 基于客车乘员损伤的尖顶等效方波参数研究[J]. 汽车工程,2019,41(7):785-791.
- [8] 孙婷婷. 基于客车正面碰撞加速度优化波形的车身前部结构设计[D]. 厦门:厦门理工学院,2018:43-55.
- [9] 张世哲. 基于正面碰撞驾驶员胸部有限元模型的汽车约束系统优化[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021:55-60.
- [10] 袁庆磊. 正面碰撞双线性波形及约束系统参数的研究与优化[D]. 沈阳:沈阳化工大学,2023:40-51.
- [11] JT/T 1369—2020 客车正面碰撞的乘员保护[S].
- [12] Viano D C, Arepally S. Assessing the safety performace of occupant restraint system [R]. SAE Paper No. 902328, 1990:301-327.

(上接第15页)

- [15] 王杨宇航. 基于电动汽车运行数据的动力电池异常检测与故障预警[D]. 西安:长安大学,2024:13-17.
- [16] 虞婧. 基于数据挖掘技术的电动汽车充电安全监测与故障预警方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2021:2-3.
- [17] 申江卫,岩川,刘永刚,等. 基于数据挖掘与大数据分析的

电池故障诊断与异常检测[J]. 电工技术学报,2024,39(24):7979-7994.

- [18] 闫湖,胡静,王哲. 退役动力电池剩余电量状态估计方法研究[J]. 电器与能效管理技术,2021(10):33-41.