

氢燃料电池物流车集成控制器散热系统设计与仿真

杨剑波, 蒋平, 卢正义, 洪凌, 尹进

(成都客车股份有限公司, 成都 611730)

摘要:根据氢燃料电池物流车集成控制器热源多、温区广的特点,合理设计六合一集成控制器及其冷却流道,并对集成控制器散热系统性能进行仿真分析。仿真结果表明,集成控制器散热效果良好,满足设计要求。

关键词:氢燃料电池; 物流车; 集成控制器; 散热系统

中图分类号: U463.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)02-0001-05

Design and Simulation of Heat Dissipation System for Integrated Controller of Hydrogen Fuel Cell Logistics Vehicle

YANG Jianbo, JIANG Ping, LU Zhengyi, HONG Ling, YIN Jin

(Chengdu Bus Co., Ltd., Chengdu 611730, China)

Abstract: According to the characteristics of multiple heat sources and wide temperature zones of the integrated controller for hydrogen fuel cell logistics vehicles, this paper rationally designs the six-in-one integrated controller and its cooling channels and conducts the simulation analysis on the performances of the integrated controller's cooling system. The simulation results show that the heat dissipation effect of the integrated controller is good and meets the design requirements.

Key words: hydrogen fuel cell; logistics vehicle; integrated controller; heat dissipation system

氢燃料电池物流车的零部件较多,整车体积较小,又需要留出足够大的载货空间^[1],因此需要开发体积较小、集成化程度更高的控制器。本文的集成控制器是包含主驱电机 MCU、辅助 DC/DC、气泵 DC/AC、油泵 DC/AC、高压配电以及燃料电池 DC/DC 六合一的集成控制器^[2]。由于其模块多,发热量大,所以需要设计合理的冷却流道,以保证集成控制器各模块工作在合适的温度区间,从而提高集成控制器的效率和可靠性。本文从各发热零部件的额定及峰值功率入手,计算六合一控制器各模块的最大散热量,然后通过温度区域的划分,对冷却液流道进行设计,并进行建模仿真分析^[3]。

1 六合一控制器架构

该氢燃料电池六合一集成控制器是在纯电动五合一集成控制器的基础上,将燃料电池 DC/DC 集成

进去,从而进一步减小整车控制系统体积,降低系统重量,提高系统的功率密度^[4]。其原理框图如图 1 所示。

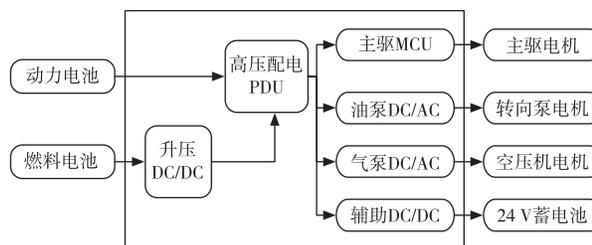


图 1 集成控制器原理框图

1.1 DC/AC 设计

DC/AC 实现直流电能到交流电能的转换,从直流动力母线变换得到设定电压和频率的交流电,从而满足主驱电机、油泵、气泵等部件的电能需求。其基本原理是通过半导体功率开关的通断,把直流电能转换成交流电能^[5],原理框图如图 2 所示。

收稿日期: 2023-12-22。

第一作者: 杨剑波(1971—),男,硕士;高级工程师;主要从事客车产品设计开发工作。E-mail: Cdbus_yjb@163.com。

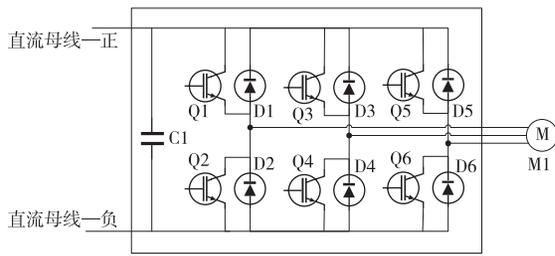


图2 DC/AC原理框图

1.2 DC/DC 设计

DC/DC 是通过开关方式实现直流到直流的电压平台转换的部件,用于燃料电池的电压升压和直流母线电压的降压。其基本原理与 DC/AC 类似,通过半导体功率开关的通断,先把直流电能变换成交流电能,通过变压器调整到所设交流电压平台,再进行全桥整流得到所需电压的直流电^[6],原理框图如图 3 所示。

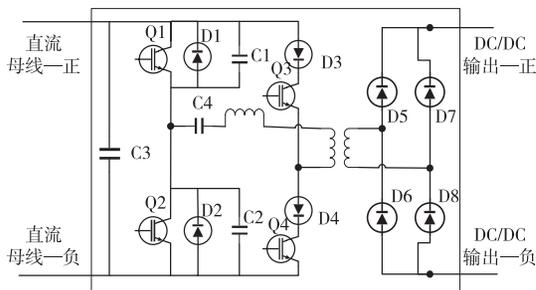


图3 DC/DC原理框图

1.3 高压配电设计

集成控制器内部电路板集成了主驱电机、气泵和油泵的 DC/AC 电源变换器,燃料电池和辅助的 DC/DC 电源变换器,配电 CAN 控制器,高压接触器,预充电阻,熔断器,铜排等^[7]。其三维数模及电气原理图分别如图 4 和图 5 所示。整车高压上电过程:首先经过主负预充接触器吸合,待主负预充完成后再进行主正预充,主驱电机 MCU 内部的电容完成预充电后开始主正接触器吸合,然后断开预充接触器,完成整车的高压上电过程。对正极和负极分别进行预充电路设计,可有效避免上电过程中过电压及过电流对零部件造成损伤^[8]。

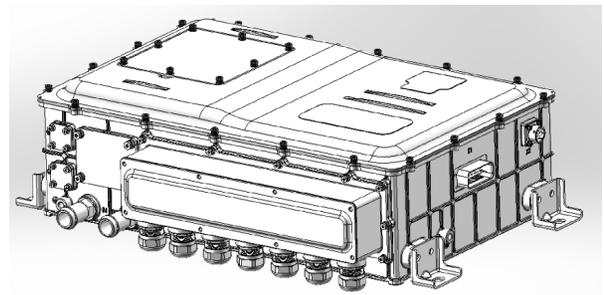


图4 三维数模图

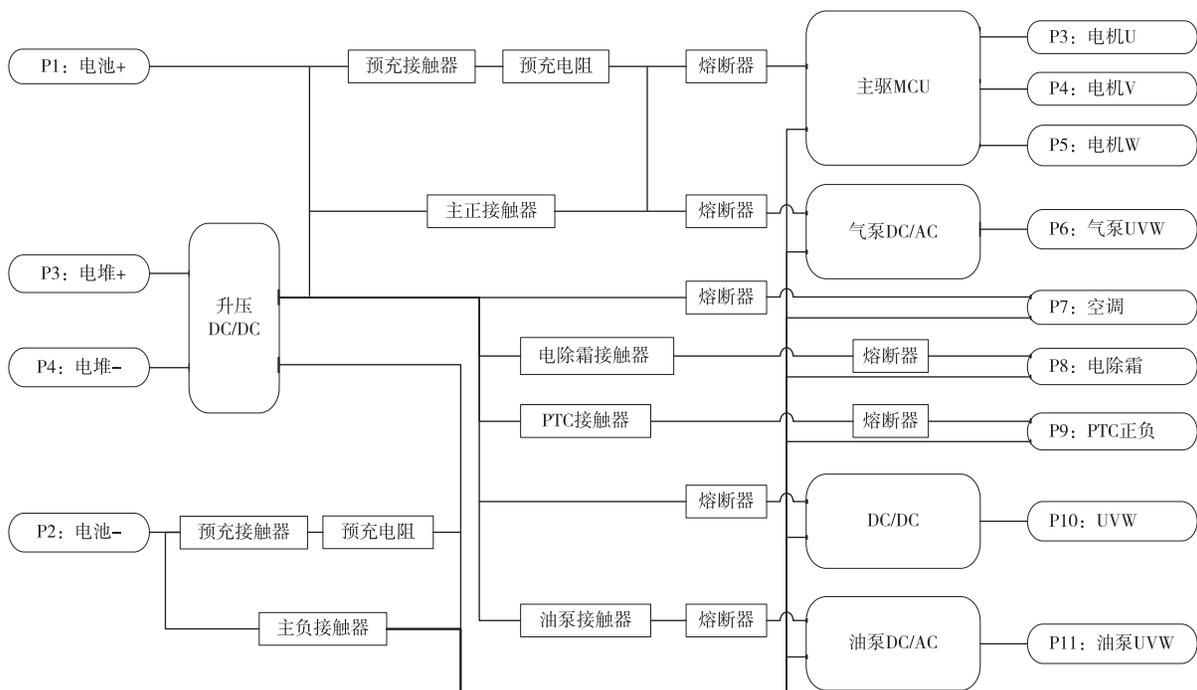


图5 集成控制器电气原理图

2 热负荷计算

2.1 功能模块主要参数

根据氢燃料电池物流车的动力性、经济性以及制动和转向性能需求, 匹配合适的模块参数^[9]。该集成控制器各模块主要参数见表1。

表1 集成控制器模块参数

模块名称	输入电压/	输出电压/	额定功率/	峰值功率/
	VDC	VAC	kW	kW
主驱电机 MCU	560	380	100	150
油泵 DC/AC	560	380	3	5
气泵 DC/AC	560	380	3	5
辅助 DC/DC	560	27.5	3	3.3
IGBT 模组	560	380	3	3.3
燃料电池 DC/DC	200	560	80	80

2.2 发热量计算

按 $P_h = P_i \cdot (1 - \eta_i)$ 公式计算各模块发热量, P_h 为各模块额定发热量, P_i 为各模块额定功率, η_i 为各模块工作效率, 计算结果见表2。因为各模块峰值功率持续时间较短 (≤ 60 s), 所以采用额定功率计算额定发热量。表2中六合一集成控制器总发热量为各模块发热量之和, 各模块的效率 η_i 是根据实验室测定的各个模块最低效率点乘以 1.1 倍的安全系数后取整修正得出的。

表2 集成控制器模块发热量

模块名称	$\eta_i/\%$	P_h/kW
主驱电机 MCU	95	5
油泵 DC/AC	95	0.15
气泵 DC/AC	95	0.15
辅助 DC/DC	97	0.09
燃料电池 DC/DC	98	1.6
IGBT 模组	97	0.09
集成控制器总发热量	/	7.08

3 冷却流道初步设计

根据各模块的发热量, 结合水道内阻应尽量小,

出水口进水口压力基本相等, 以及冷却液在水道内流速不能超过壳体承受上限等要求, 将水道设计成 S 型。主驱部分散热需求大, 需增加散热鳍片, 以加大冷却液与壳体接触面积, 提升散热效果。辅驱部分散热功率需求小, 冷却液流过即可满足散热需求。对壳体内壁做平滑处理, 减小水阻。初步设计的冷却流道如图6所示^[10]。

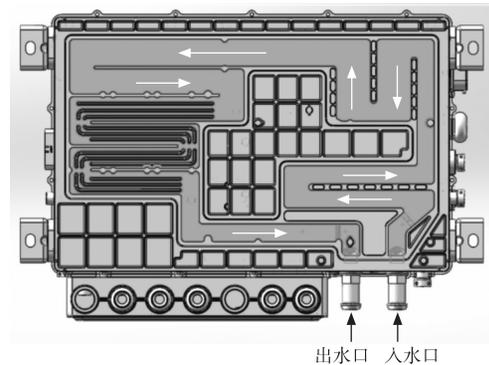


图6 集成控制器冷却液流道设计

氢燃料电池物流车主驱动冷却系统包括电子水泵、散热器、六合一集成控制器、燃料电池空压机、氢气循环泵和驱动电机^[11]。以上冷却系统所有零部件水口内径均为 20 mm, 该规格水嘴为标准件, 可节约大量开模加工成本。为与整车冷却水道内径相匹配, 集成控制器入水口水口内径也设计为 20 mm, 即入水口水口截面积为 $314 \text{ mm}^2 (\pi \cdot R^2)$, 壳体内水道横截面均不小于入水口水口横截面, 因此内部流道横截面不小于 314 mm^2 。流道为导流槽导流设计, 在集中散热区域增加导流槽, 加大冷却液与壳体接触面积, 提升散热效果。该冷却流道设计方案效果由下面的仿真进行初步分析。

4 仿真分析

仿真分析基于 SOLIDWORKS Flow Simulation 流体仿真软件。

4.1 仿真模型建立

1) 建立仿真模型。根据图4所示的几何模型和图6所示的冷却流道初步设计方案, 建立集成控制器的仿真模型。在仿真软件中先导入包含流道结构的

三维数模;然后确定仿真参数单位,如压力、流量、温度和时间的单位^[12];再输入仿真初始条件:固体材质为铝 6061,铝导热系数 $96.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$;液体介质为水,入水口温度 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,流量 25 L/min ;水泵流量 $4\ 000 \text{ L/h}$;风扇功率 500 W ;散热器面积/体积 $13 \text{ m}^2/5.5 \text{ L}$ (仿真参数输入如图 7 所示);最后根据整车实际情况确定水流方向。建立的仿真模型如图 8 所示。



图 7 仿真参数输入

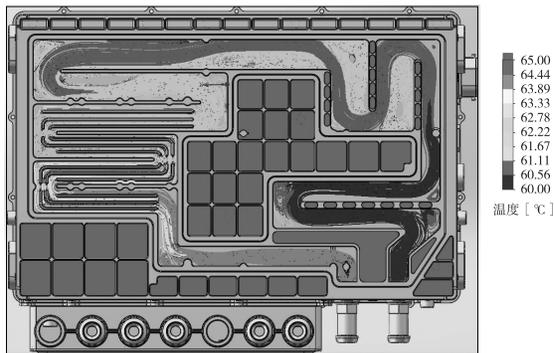


图 8 集成控制器仿真模型

2) 表面热源输入。对于壳体来说,热源均为表面热源。根据表 2 计算的各模块发热量,在软件中直接赋予上述仿真模型表面热源,如图 9 所示。对 1 号和 2 号区域分别赋予表面热源:1 号区域为油泵 DC/AC、气泵 DC/AC、辅助 DC/DC、燃料电池 DC/DC、IGBT 模组发热区域,其总体额定发热功率之和为 $2\ 080 \text{ W}$;2 号区域为主驱电机 MCU 发热区域,额定发热功率为 $5\ 000 \text{ W}$ 。

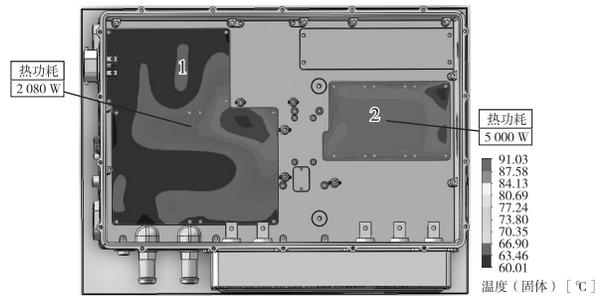


图 9 表面热源输入

4.2 仿真结果及分析

1) 壳体温度结果及分析。由壳体温度分布图(图 10)可知,水道覆盖区域温度均保持在 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下;水道未完全覆盖区域温度升至约 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。说明水道散热效果良好,可满足六合一集成控制器常规工作的散热需求。

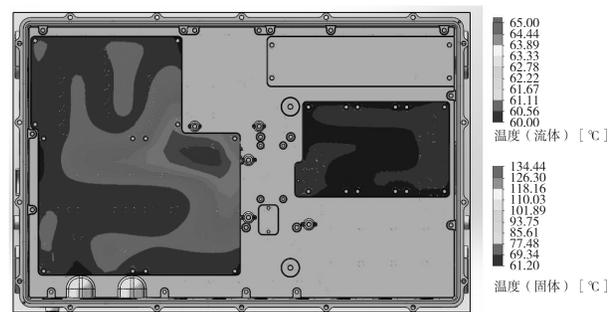


图 10 壳体温度分布图

2) 冷却液温度结果及分析。由冷却液温度迹线图(图 11)可知,入水口温度设置为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$,出水口温度不高于 $64.4 \text{ }^\circ\text{C}$,冷却液流经散热区域后温升约为 $4.4 \text{ }^\circ\text{C}$,该温升不会对该冷却液回路中其他零部件的散热需求产生明显的负面影响。

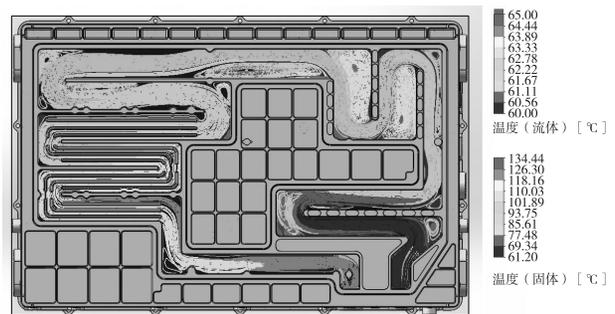


图 11 液体温度迹线图

3) 冷却液流速结果及分析。由液体流速迹线图(图 12)可知,入水口流速约为 20 m/s ,最高速度为

42.2 m/s, 最高速度远低于壳体水道可承受速度 177 m/s, 水流速度不会对壳体水道产生明显损伤。

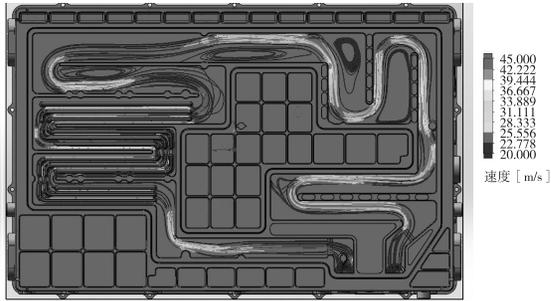


图 12 液体流速迹线图

以上仿真结果说明, 第 3 部分设计的集成控制器冷却流道是合理的, 能够满足车辆运行时的散热需求。

5 结束语

本文分析了燃料电池升压 DC/DC 与纯电动五合一控制器高度集成后的六合一集成控制器的散热问题, 有针对性地设计了集成控制器的冷却流道, 建立了整车热管理系统的模型, 仿真分析了不同工况下集成控制器的散热能力。为氢燃料电池物流车集成控制器散热系统的设计提供了一种方案。

参考文献:

[1] 吴小员, 左哲伦, 郭诗钰, 等. 燃料电池物流车城市应用准

备度评价[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1574-1584.

- [2] 刘峰, 候永坤, 郭清成, 等. 氢燃料电池客车的动力系统匹配设计[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(3): 1-5.
- [3] 谭金超, 张朋桥, 杨国樑, 等. 新能源城市客车多合一集成控制器方案设计[J]. 汽车电器, 2023(6): 12-15.
- [4] 汪帆, 王坤俊, 周欢, 等. 纯电动轻型客车高集成度动力系统方案设计优化[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(2): 25-27.
- [5] 刘钧, 胡伟, 温旭辉. 电动汽车用高功率密度集成控制器研究[J]. 大功率变流技术, 2011(1): 44-48.
- [6] 朱正礼, 周红丽. 新能源客车高压附件集成控制器开发[J]. 机械与电子, 2020, 38(7): 50-54.
- [7] 杨杭旭. 电动汽车车载充电及 DC/DC 一体化技术研究及样机设计[J]. 汽车实用技术, 2016(5): 107-109.
- [8] 刘景凯, 张景涛, 裴崇利, 等. 一种新型纯电动客车充电配电控制系统[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(4): 14-17.
- [9] 曾昭炜, 刘阳, 严超, 等. 燃料电池物流车动力驱动系统参数匹配[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 108-112.
- [10] 徐涛, 阮承治. 大功率电力电子装置自适应散热控制系统设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(3): 43-49.
- [11] 张建林, 冯水安, 陈荣祥, 等. 无人驾驶客车电机冷却系统设计[J]. 机电技术, 2020(2): 73-76.
- [12] 邓义斌, 黄荣华, 王兆文, 等. 发动机电控冷却系统建模设计与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 31-34.

◆ 广告目次

比亚迪汽车工业有限公司	(封面)	北京福田欧辉新能源汽车有限公司	(前插一)
中通客车股份有限公司	(封二)	公益广告	(前插二)
《客车技术与研究》理事会名录	(封三)	中车时代电动汽车股份有限公司	(后插一)
期刊信息	(封底)	厦门金龙联合汽车工业有限公司	(后插二)

基于 CAN 数据和图像数据融合算法的 商用车能量智能优化系统

彭旺, 梁丰收, 文李华, 郭琪, 卢逸飞

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东深圳 518118)

摘要:针对当前纯 CAN 数据和纯图像数据的不足,提出基于 CAN 数据和图像数据融合算法,并根据该算法输出的 8 种工况和特征开发能量智能优化系统。仿真分析表明,该能量智能优化系统能有效地节约能量。

关键词:纯电动商用车; CAN 数据; 图像数据; 融合算法; 能量优化

中图分类号:U461.8

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0006-05

Intelligent Optimization System of Commercial Vehicle Energy Based on CAN Data and Image Data Fusion Algorithm

PENG Wang, LIANG Fengshou, WEN Lihua, GUO Qi, LU Yifei

(BYD Automotive Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: In view of the shortcomings of current pure CAN data and pure image data, this paper proposes an algorithm based on the fusion of CAN data and image data, and develops an energy intelligent optimization system based on the 8 working conditions and characteristics by the algorithm output. The simulation analysis shows that the energy intelligent optimization system can effectively save energy.

Key words: pure electric commercial vehicle; CAN data; image data; fusion algorithm; energy optimization

目前,混合动力汽车的能量分配策略、制动能量再回收和高效能量管理系统已有大量研究。文献[1]借助交通平台获取预行驶路段道路信息,制定对应路段的速度曲线,实现电池 SOC 轨迹规划的能量管理策略。文献[2]基于 PSO-BP 神经网络的能耗等级辨识驾驶风格。文献[3]基于双模混合动力车辆通过 K 均值聚类算法识别平稳工况和快变工况,从而制定能量优化策略。文献[4]采用自组织映射神经网络和灰狼算法,离线识别行驶工况。

上述文献^[1-4]均采用单一的数据进行工况、驾驶风格和道路场景识别,并制定能量优化策略,鲜有采用多种数据融合算法来制定车辆控制策略以实现节能的研究。本文基于 CAN 数据和图像数据融合算

法,开发一种用于提升纯电动车续航里程的能量智能优化系统。

1 CAN 数据和图像数据的融合算法

1.1 融合算法框架

在基于 CAN 数据的驾驶风格和场景识别分析的基础上,为更精确分类和预测道路工况,本文加入了前向单目图像数据进行道路场景识别和拥堵识别。两种数据的融合算法框架如图 1 所示。融合算法通过接收 CAN 数据和前向单目摄像数据,使用两种算法(CAN 数据算法和图像数据算法)实时输出驾驶风格、道路场景和拥堵情况等数据,再通过这些数据的融合构建能量优化工况库。

收稿日期:2024-03-14。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2501700)。

第一作者:彭旺(1982—),男,高级工程师;主要从事新能源商用车设计研发工作。E-mail:peng.wang@byd.com。

通讯作者:文李华(1991—),男,博士;主要从事新能源汽车智能驾驶感知算法研发工作。E-mail:wen.lihua@byd.com。

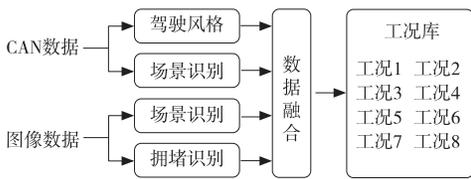


图 1 CAN 数据和图像数据融合算法框架

1.2 CAN 数据算法

CAN 数据中包含众多车辆行驶时的数据, 本文仅解析车速、加速踏板深度(对应加速度)和制动踏板深度(对应减速度)3 种数据用于驾驶风格(激进型和保守型)和道路场景识别(城市和高速)算法的开发。算法框架如图 2 所示。

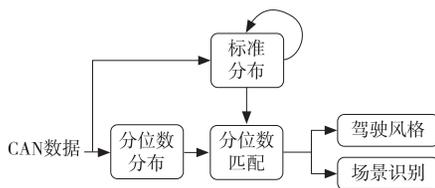


图 2 CAN 数据算法框架

其中“分位数分布”表示一段时间内某个变量的统计情况。以分析速度的变化情况为例, 具体操作是对 60 s 内速度的连续监测值排序, 然后在每十分之一的位置取一个值, 总共选取 10 个值用于表示这段时间内的速度特征。该方法的优点是能表示一段时间内数值的整体情况且稳定性强。如果使用“直方分布图”等方法也能达到类似统计效果, 但当速度集中在某个区间时, 直方分布图的利用效率低, 而统计分位数分布则不受此影响。

本文对行驶速度、加速度和减速度三类 CAN 数据进行实时的分位数分布统计, 并用两个分支进行处理: 历史 CAN 数据用于构建、迭代优化标准分布库; 实时 CAN 数据提取当前分位数分布, 通过对比标准分布, 判断驾驶风格和道路场景。

为了计算标准分位数分布, 设计了如下迭代优化流程: ①估测一个标准分布作为初始值; ②根据当前的标准分布对已有历史数据分类; ③根据置信度较高的分类结果, 重新估计一个标准分布; ④重复②~③直至结果收敛。

实时判断时, 计算当前分位数分布和工况标准分布之间的“欧氏距离”, 从而计算出驾驶风格类别(概

率 P_j) 和场景类别(概率 P_{CAN})。

1.3 图像数据算法

图像数据可以提供丰富的道路环境和交通状况等视觉信息, 比单纯的 CAN 数据更加直观和稳定。利用图像数据, 可以获取车前的实时道路场景和拥堵情况, 其算法框架如图 3 所示。

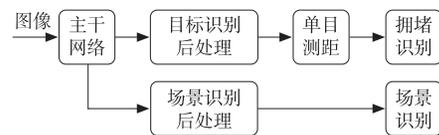


图 3 图像数据算法框架

图像数据算法使用主干神经网络(图 3 中简称主干网络)提取图像特征^[5-8]。其目标识别后处理和场景识别后处理模块接收主干神经网络输出的图像特征, 根据后面任务(拥堵识别和场景识别)的不同, 设计不同的算法。为使算法效率和精度满足实时性要求, 本文选用像素为 224×224 的图像, 利用 YOLOv7 (You Only Look Once)^[9]中的主干神经网络算法提取图像中的特征, 输出特征图像的像素(有效特征数)为 28×28。下面介绍两个后处理模块的算法。

1.3.1 拥堵识别后处理模块

该模块首先进行目标识别。在图像坐标系下获得目标类别和目标框参数 (x, y, w, h) , 其中 (x, y) 代表目标框中心点在图像中的坐标, (w, h) 代表目标框的宽度和高度, 如图 4 所示。目标类别包括: 车辆(客车、货车、专用车和自行车)和行人。单目摄像测距模块基于目标识别结果, 利用单目测距返回一个角度和距离, 进行目标距离计算、车前目标计数和方向角计算。该算法模块接收摄像机相关参数和目标框参数 (x, y, w, h) , 输出目标的距离(在摄像机坐标系 O_c 下), 计算过程如下。

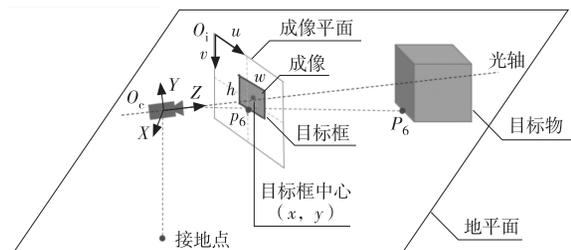


图 4 单目成像及单目测距原理图

1) 4中涉及3个坐标系:世界坐标系 O_w 、摄像机坐标系 O_c 和图像坐标系 O_i 。其中 O_w 和 O_c 为同一坐标系,原点在摄像机中心, X 轴为水平方向, Y 轴为垂直方向, Z 轴为摄像机光轴方向; O_i 坐标系的原点在成像平面的左上角点, u 、 v 分别为成像平面的水平方向和垂直方向。摄像机固定在客车中控台仪表台中间位置,挡风玻璃后,摄像机镜头朝前,离地高度1.5 m。

2) 以地面上任意一点(P_6 点)为例,单目测距模块旨在求出其成像所对应的像素点 p_6 在摄像机坐标系 $O_c(O_w)$ 下的三维位置(X_6, Y_6, Z_6),其计算公式为:

$$\begin{bmatrix} X_6 \\ Y_6 \\ Z_6 \\ 1 \end{bmatrix} = Z_c \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t}_{\text{cam}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_6 \\ v_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_c 为摄像机的深度值; u_0 和 v_0 分别代表摄像机成像平面主点在图像坐标系 u 和 v 轴方向上的坐标值, \mathbf{R} 和 \mathbf{t}_{cam} 分别代表摄像机的旋转矩阵和平移向量, f_u 、 f_v 分别表示焦距在 u 和 v 轴方向上的分量;矩阵中的“1”用于补位构成齐次矩阵。

3) 通过式(1)可获得点 P_6 在 O_c 坐标系下的三维坐标信息,进而可计算出目标点 P_6 与摄像机之间的距离。由于摄像机安装高度固定,因此只需计算该距离在地面上的投影大小 d :

$$d = \sqrt{X_6^2 + Y_6^2} \quad (2)$$

4) 在摄像机坐标系 O_c 下的 XZ (即水平)平面,计算目标点 P_6 与摄像机光轴在水平面上的夹角(即为目标点 P_6 的方向角),用于确定目标点所在车道位置。

$$\theta = \arctan(X_6/Z_6) \quad (3)$$

5) 拥堵识别。假设车道宽2.5 m,旁车道以2 m宽的小车为目标,则若上述计算出的 $\theta \leq |10^\circ|$,说明前方目标与本车在同一车道,此时若上述计算出的 $d \leq 0.5$ m(也可设定为其他合适值),则判定为拥堵场景;若上述计算出的 $\theta \geq |80^\circ|$,说明前方目标在本车的左或右边车道,此时若上述计算出的 $d \leq 2.8$ m(与

前面的0.5 m相关联),则判定为拥堵场景;其他的定义为非拥堵场景。拥堵场景输出概率 $P_y = 1$,非拥堵场景输出概率 $P_y = 0$ 。

1.3.2 道路场景识别

基于前述224×224像素图像的道路场景识别算法,将主干神经网络输出的28×28像素的图像特征馈入场景识别的后处理模块进行道路场景(城市道路和高速道路)识别。神经网络演绎一般分为两个阶段:神经网络训练阶段和神经网络推理阶段。

1) 神经网络训练阶段。将已有的上万张图像的每一张,根据道路环境(多车道和路面状况等)和是否有除车辆以外的其他目标(人、骑车的人等)等特征,人工标注一个高速道路场景或城市道路场景标签,再将带标签的图像送入神经网络,用于训练神经网络的参数。

2) 推理阶段。车辆行驶中实时拍摄的未带标签的道路图像被输入到上述训练好的神经网络,用于提取图像中的道路特征,最后通过激活函数层输出两个道路特征概率值,如果高速道路场景特征多,则高速道路场景的概率值大于城市道路场景的概率值,反之亦然。

道路场景识别后处理模块算法的具体过程如下:

1) 3层卷积层。卷积层用于神经网络进一步提取像素为28×28的图像特征,输出像素为28×28的卷积特征图像,为后续提供更准确的特征(点、线、面、形状等)。

2) 1个2×2池化层。该层又称为下采样层,旨在将像素为 $n \times n$ (如前所述,本文 n 取值28)的卷积特征图像,通过下采样降为 $n/2 \times n/2$ (即14×14)像素的特征图。

3) 1个Resize层。将上述 $n/2 \times n/2$ 像素的特征图像按行排为 $n/2 \times n/2$ 的一维向量,用于下一步中全连接层采用一维卷积神经网络提取图像特征。

4) 一个全连接层。全连接层用一维卷积神经网络进一步提取上一步的 $n/2 \times n/2$ (即14×14=196个数据)的一维向量中的两个特征,并输出对应的两个数值 z_1 和 z_2 (z_1 代表高速道路场景, z_2 代表城市道路场景)。

5) 一个激活函数层。激活函数层接受全连接层输出的两个数值构成一个向量 $\mathbf{z} = [z_1, z_2]$, 然后输入到激活函数(Softmax)按式(4)求出各自的占比, 其中高速道路为 P_1 , 城市道路为 P_2 , 如式(5)所示。如果高速道路场景值的占比大, 则识别为高速道路场景, 反之则识别为城市道路场景。

$$P_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}} \quad (4)$$

式中: P_i 是向量 \mathbf{z} 中第 i 个元素经过 Softmax 函数后的值; e 是自然对数的底; K 是总的道路场景数, 本文取值 2。

$$P_1 = \frac{e^{z_1}}{e^{z_1} + e^{z_2}}, P_2 = \frac{e^{z_2}}{e^{z_1} + e^{z_2}} \quad (5)$$

1.4 数据融合算法

融合算法根据融合阶段的不同可分为: 前融合、特征融合和结果融合^[10]。本文属于工况识别结果的融合, 结果融合的算法有: 对应数值直接取均值、数值取最大值和数值串联。本文采用取均值方法融合基于 CAN 数据识别的结果和基于图像数据识别的结果。

现结合图 1 描述数据融合的具体方法。CAN 数据算法分别输出驾驶风格类别(保守、激进)的概率 P_j 和道路场景识别(城市、高速)的概率 P_{CAN} ; 图像数据算法分别输出道路场景识别(城市、高速)的概率 P_t 和拥堵识别(拥堵、非拥堵)的概率 P_y 。数据融合模块对基于 CAN 数据算法输出的道路场景识别概率 P_{CAN} 和基于图像数据算法输出的道路场景识别概率 P_t 进行融合计算, 以确定最终道路场景和道路场景的概率 P_a , 公式见式(6)。

$$P_a = \begin{cases} P_{CAN}, P_{CAN} > P_t (\text{场景不同}) \\ P_t, P_{CAN} \leq P_t (\text{场景不同}) \\ \frac{P_{CAN} + P_t}{2} (\text{场景相同}) \end{cases} \quad (6)$$

1) 当两种方法输出的场景不同时, 最终道路场景为概率较大值所对应的场景; P_a 取两种算法中的较大值(如果两值相等, P_a 取 P_t 的值, 但实际上这两个值不可能完全相等)。

2) 当两种方法输出的场景相同时, 最终道路场景为两者所对应相同场景; P_a 取 P_{CAN} 和 P_t 的均值。

将融合计算出的 P_a 及 CAN 数据计算出的驾驶风格的概率 P_j 和图像数据计算出的拥堵场景的概率 P_y 对应的特征进一步融合在一起, 用于构建工况库, 工况库包含 8 种工况: 保守-城市-拥堵, 保守-城市-非拥堵, 保守-高速-拥堵, 保守-高速-非拥堵, 激进-城市-拥堵, 激进-城市-非拥堵, 激进-高速-拥堵, 激进-高速-非拥堵。每种工况对应的概率值和特征输入到本文第 2 部分(能量智能优化系统)进行仿真, 获取扭矩曲线用以控制加速踏板和制动踏板开度。

本文采用的融合算法具有以下特点:

- 1) 输入数据包含 CAN 数据和前向单目图像数据, 数据丰富、互补, 结果更稳定。
- 2) 拥堵识别和场景识别算法采用主干神经网络提取图像特征, 进行驾驶风格、拥堵识别和场景识别, 通过后融合使得算法的性能更具有鲁棒性。

2 能量智能优化系统

本文设计的能量智能优化系统, 旨在车辆通过识别上述 8 种行驶工况, 自动控制车辆加速踏板和制动踏板开度(0 代表开度最小, 1 代表开度最大), 以实现最佳性能和电机效率的平衡。纯电商用车智能优化系统主要分为三大模块: 驾驶员信息采集模块、目标多状态扭矩控制模块和扭矩输出模块。

1) 驾驶员动作采集模块。该模块的主要功能是采集加速踏板、制动踏板的状态与开度信息和前向单目图像信息。模块传感器采集的数据通过 CAN 数据和图像融合算法获得 8 种工况特征, 算法详见第 1 部分。

2) 目标多状态扭矩控制模块。该模块结合 8 种工况信息的概率值(P_a 、 P_j 和 P_y) 和最后的特征, 兼顾动力性、安全性、舒适性和经济性, 通过 Simulink 仿真分析获得 8 种工况对应的 3 种扭矩曲线。这 3 种扭矩曲线及其功能如下:

①驱动状态下的车速-加速踏板开度-驱动扭矩曲线: 根据车速和加速踏板开度, 生成最优的驱动扭矩曲线, 以实现理想的动力性能。

②松油门回馈状态下的车速-加速踏板开度-松油门回馈扭矩曲线: 当驾驶员放开加速踏板时, 根据

车速和加速踏板开度,生成松油门回馈扭矩曲线,以保证车辆平稳过渡并提供舒适的驾驶体验。

③制动回馈状态下的车速-制动踏板开度-制动回馈扭矩曲线:当制动踏板被踩下时,根据车速和制动踏板开度,生成制动回馈扭矩曲线,以提供安全的制动性能并减少制动时的不适感。

3) 扭矩输出模块。根据第1部分算法输出的实时工况(8种工况之一),智能匹配实时工况对应的3种扭矩曲线。随后,扭矩输出模块在驱动电机与驱动桥的扭矩加、卸载速率规定范围内,智能地确定当前状态电机输出扭矩的加载、卸载速率。最终,该模块智能控制车辆扭矩的输出,实现对车辆能量的智能优化。通过优化扭矩输出,车辆能够在不同工况下高效地利用能量,从而降低能源消耗、提高车辆效率,并改善整体驾驶体验。

3 效果分析

经过数据采集和预处理,算法模型建立阶段可用的有效数据数量为:摄像机数据约31万张,CAN数据约260万条,具体见表1。两种数据分为训练数据和预测数据,比值为7:3。

表1 有效数据详情

工况	图像数据	CAN数据
城市	204 326	1 649 721
高速	116 652	1 012 352
总计	310 978	2 662 073

基于在深圳九月(最低温度22℃,最高温度38℃)采集的上述多场景数据,应用Simulink进行商用车能量流管理的动力控制仿真分析^[11]。通过仿真获得8种工况对应的3种扭矩曲线,用于车辆智能控制加速踏板和制动踏板的开度,以达到节能的目的。某12m纯电客车搭载本文设计的能量智能优化系统后,车辆根据仿真获得的扭矩曲线智能控制加速踏板和制动踏板的开度,再进行能耗仿真分析,能耗结果见表2,节能效果提升了7.2%。表中涉及11段不同驾驶风格、不同道路场景和不同拥堵情况的数据,数据总里程超过5000km。

表2 搭载能量智能优化系统前后能耗对比

数据集	能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]		性能提升比/%
	优化前	优化后	
数据1	47.30	44.69	5.51
数据2	41.13	38.68	5.96
数据3	62.80	61.18	2.58
数据4	37.19	36.32	2.34
数据5	51.07	47.53	6.93
数据6	41.85	40.70	2.70
数据7	41.58	40.21	3.30
数据8	46.71	42.43	9.15
数据9	51.79	47.17	8.91
数据10	57.93	54.07	6.65
数据11	47.40	44.07	7.03
总和	50.03	47.33	7.24%

4 结束语

本文基于CAN数据和图像融合算法得到8种工况及其对应的概率和特征,通过Simulink建模与仿真,获取8种工况对应的扭矩曲线,最终构建了端对端的能量智能优化系统。通过对大量实车仿真工况进行分析,本文设计的能量智能优化系统可使12m纯电客车综合节能7.2%。未来工作中,将进一步研究纯电动商用车基于更多数据源融合的能量智能优化系统,包括不同数据的融合方法和能量智能优化系统。

参考文献:

- [1] 刘春娜. 基于工况识别和多目标优化的PHEV能量管理策略研究[D]. 济南:山东大学,2022.
- [2] 李沛润. 基于驾驶风格的纯电动汽车制动能量回收优化控制策略研究[D]. 盐城:盐城工学院,2023.
- [3] 丁峰,王伟达,项昌乐,等. 基于行驶工况分类的混合动力车辆速度预测方法与能量管理策略[J]. 汽车工程,2017,39(11):1223-1231.
- [4] 郭志奇. 基于行驶工况感知的四驱PHEV自适应优化能量管理策略研究[D]. 长春:吉林大学,2023.

18 m BRT 纯电动铰接客车设计方案

吴接聪

(厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 简要说明 18 m BRT 纯电动铰接客车开发背景, 详细介绍某 18 m BRT 纯电动铰接客车的设计方案, 并对其进行相关性能分析。

关键词: 纯电动铰接客车; 18 m BRT; 设计方案

中图分类号: U462.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)02-0011-04

Design Scheme of an 18-meter BRT Pure Electric Articulated Bus

WU Jiecong

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

Abstract: This paper briefly describes the development background of an 18-meter BRT pure electric articulated buses, introduces the design scheme of an 18-meter BRT pure electric articulated bus in detail, and carries out its related performance analysis.

Key words: pure electric articulated bus; 18-meter BRT; design scheme

快速公交系统(BRT)以快速便捷、准时和运行安全等优势,在许多城市成为广大群众喜爱的交通工具。据统计,目前国内共有 30 多个城市运营(或在建)BRT,共设立有 160 多条 BRT 线路^[1]。在有 BRT 规划的城市中,具有大承载量、便捷性、稳定性、舒适性等优势的 18 m 铰接车有着更大的市场竞争力^[2]。当前关于纯电动铰接客车设计方案的研究并不多,本文以厦门 18 m BRT 纯电动铰接客车为例,简要说明其设计方案。

1 纯电动铰接客车布置方案

1.1 总体要求

厦门 BRT 原有 18 m 常规燃油铰接车 100 多辆,为响应节能环保政策要求,车辆将更换为纯电动车型。厦门 BRT 为智能站台,车辆总体布置上需有延续性。整车尺寸、乘客门位置等设计需匹配现有站台边界,保证车辆安全入站。

由燃油车型转变为纯电动车型,两者在结构及零

部件上差异较大,总布置设计时也需有延续性,同时还需考虑纯电动车与常规燃油车不同的制作工艺和客户使用便利性^[3]。

整车设计总体需求如下:采用直驱电机;整车尺寸(长×宽)为 18 000 mm×2 550 mm,高度小于 3 400 mm;右侧三开门状态;大承载量和大续驶里程;高运营效率。

1.2 电池布置

长续驶里程的车辆,可减少充电次数,提高运营效率,但需搭载更多的电池模组,导致电池成为布置难点。若电池布置不理想,则易造成整车的轴荷分配不合理,导致车辆转弯或转弯制动过程中出现侧滑和甩尾现象,影响车辆的行驶操稳性^[4]。

本文采用 12 箱电池,共 422.876 kW·h 电量,CCBC 工况^[5]续驶里程可达 444.2 km,满足城市客车续驶里程的国标要求。其中顶置 6 箱电池布置在中轴上方,底置 6 箱电池布置在后舱。此方案理论上可增大中、后轴的整备质量,实现更合理的整车质量分

收稿日期:2023-11-09。

第一作者:吴接聪(1987—),男,硕士;工程师;主要从事客车底盘总布置相关研究工作。E-mail:fjwuje@163.com。

配比,同时不占用车内空间,实现整车低地板、大载容量的优势。

该方案的座位数为45个,站立面积为 12.75 m^2 ,最大载客可达140人,载客数相当于 10.5 m 车型的2倍,符合BRT路线大载客量要求。

1.3 充电方式

纯电动城市客车到公交场站后,通常采用充电枪连接方式充电,该方式需车辆进站,人工操作插枪充电,充电方式较为繁琐、操作便利性差^[6]。对于追求高运营效率的厦门BRT而言,这不是一个较好的解决方案。

参考国内外相关技术,当前已有车顶弓式便捷的充电方式,可通过下压式充电机构自动连接电动汽车的充电接口,对纯电动车进行快速充电^[7]。此方式无需驾驶员下车操作,且具有占地面积小、成本低、充电快等优势。

结合厦门BRT车型状态和现有充电弓技术,纯电动BRT采用双充电插座,同时在铰接盘后上方增加充电弓。此位置便于高压管线路布置、充电弓充电及日常维护。在厦门BRT主要站点均设立有充电弓,具有充电弓的车辆的充电速度可提升30%,节省车辆充电时间、提高运营效率。

1.4 检修便利性

整体布置既要考虑运行的便利性,也要考虑后期维保的便利性。为提升纯电动车底盘和电气零部件等常检修件操作的便利性,布置方案如下:①电动转向泵布置在驾驶员下方的检修舱中;②电动打气泵及其空滤器布置在右后桥后检修舱,同时将需常更换的制动阀类布置在此舱中;③冷却系统布置在左后桥后检修舱;④低压蓄电池采用大容量(200 Ah)电池,可延长车辆用电时间,将其布置在后门前检修舱;⑤电机控制器和整车控制器等布置在后检修舱中;⑥除霜机、集中润滑布置在前围后,前围为翻转机构,打开机构即可检修和操作。

1.5 可继承性和可拓展性

本文设计方案基于厦门BRT纯电动铰接车平台,该平台可继承性和可拓展性特点如下:①电池数量可按需求增减配量;②预留中(后)门可双开门、前桥和中轴桥处大通道、整车低地板;③车架采用模块化设计,分为7个模块,其中前桥段、中轴桥段和驱动桥段按照固化模块设计。前门段、中门中段和后门中段按需调整边界,可快速设计出满足不同市场需求的BRT纯电动铰接车。总体布置如图1所示。

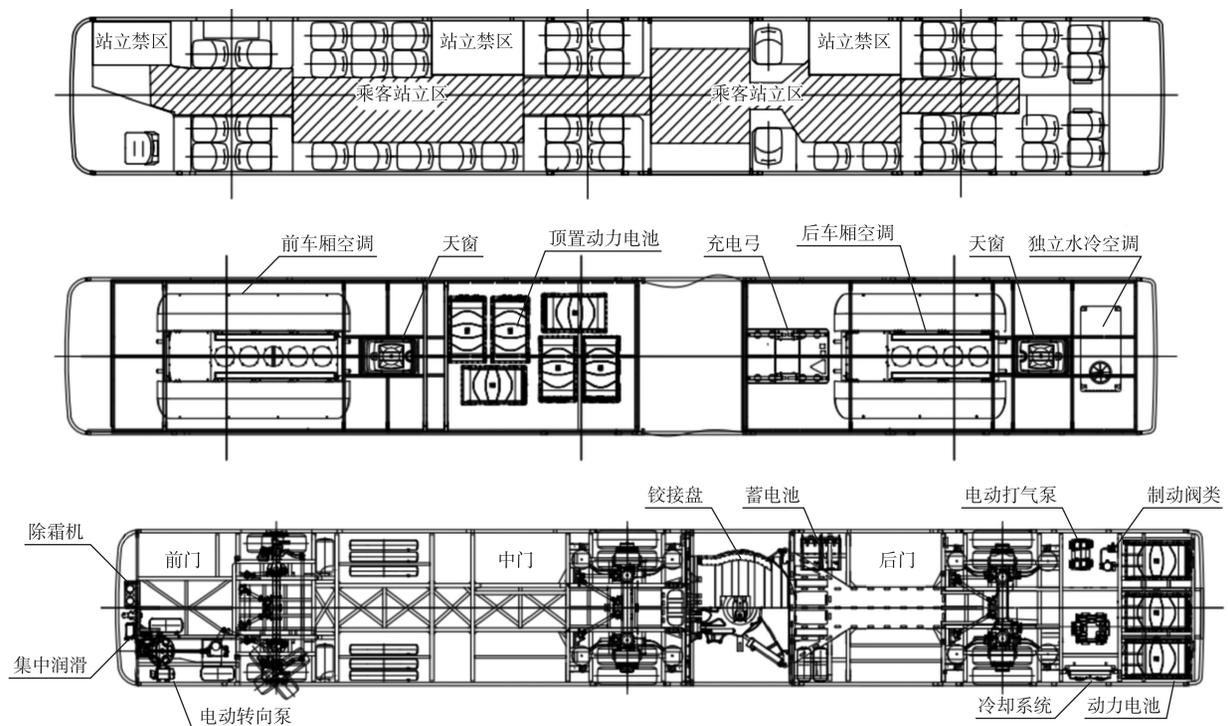


图1 18 m纯电动铰接车整车站立区及车顶布置示意图

2 相关参数计算及分析

2.1 轴荷分布计算

两轴车采用简单的静力平衡方法即可进行整车轴荷计算,但铰接车为多轴状态,无法采用简单的静

力平衡方法计算^[4,8]。本文以铰接盘活动点为边界,将铰接车分为前后两节车厢,设定整车模型为三轮模型,如图 2 所示。在此方案上再结合两轴车轴荷类比计算方法,进行分步叠加轴荷计算^[5]。

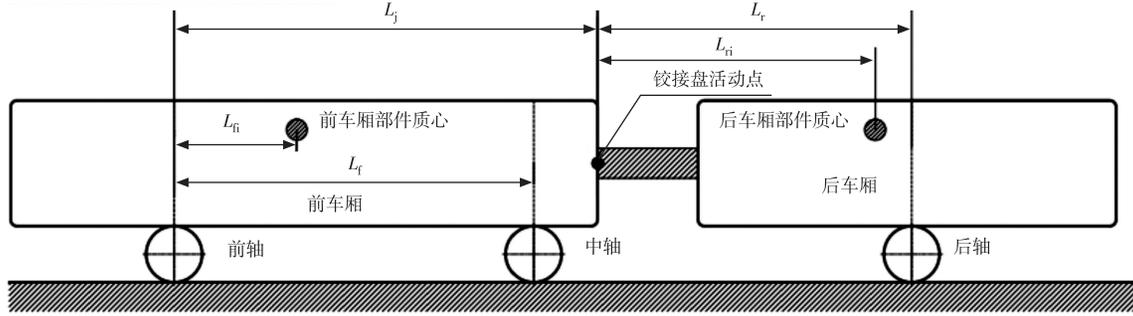


图 2 三轮模型示意图

前车厢各部件分配到前轴的总质量 M_f 和分配到中轴的总质量 M_r 的计算公式如下:

$$M_f = \sum (M_{fi} \cdot L_{fi}) / L_f \quad (1)$$

$$M_r = \sum M_{fi} - M_f \quad (2)$$

后车厢各部件分配到铰接盘活动点的总质量 M_{rf} 的计算公式如下:

$$M_{rf} = \sum (M_{ri} \cdot L_{ri}) / L_r \quad (3)$$

后车厢各部件分配到后轴的总质量 M_{rr} 的计算公式如下:

$$M_{rr} = \sum M_{ri} - M_{rf} \quad (4)$$

前轴总轴荷 M_1 、中轴总轴荷 M_2 、后轴总轴荷 M_3 及整车轴荷 M 的计算公式如下:

$$M_1 = M_{rf} \cdot (1 - L_j / L_f) + M_f \quad (5)$$

$$M_2 = M_{rf} \cdot L_j / L_f + M_r \quad (6)$$

$$M_3 = M_{rr} = \sum M_{ri} - M_{rf} \quad (7)$$

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (8)$$

式(1)~(8)中, M_{fi} 为前车厢各部件质量; L_{fi} 为前车厢各部件的质心距离前轴的水平距离; M_{ri} 为后车厢各部件质量; L_{ri} 为后车厢各部件的质心距离铰接盘活动点的水平距离; L_r 表示客车后轴到铰接盘活动点的水平距离; L_j 、 L_f 分别为铰接盘活动点到前轴的水平距离、前轴到中轴的水平距离,如图 2 所示。

从燃油车型转变为纯电动车型,车长、前后悬、轴距都保持不变,仅变更部分零部件总成。根据原有柴油车实测的轴荷数据,通过分布叠加轴荷方法可计算

出纯电动车的轴荷,具体计算结果见表 1。

表 1 整备质量计算结果 kg

车型	总质量	前轴质量	中轴质量	后轴质量
燃油车实测值	17 227	4 647	3 751	8 829
纯电动车计算值	20 161	5 268	5 157	9 736
纯电动车实测值	20 413	5 295	5 239	9 879

表 1 中纯电动车计算值和实测值误差约为 1.2%,满足法规要求^[9]。因此,该计算方法可满足新车开发轴荷计算的要求。

由计算结果可知,纯电动车前、中、后轴荷占比分别为 26.1%、25.6%、48.3%,中轴占比从燃油车的 21.7% 提高到了 25.6%,车辆行驶稳定性有一定的提升。

2.2 铰接客车动力性经济性分析

动力性、经济性通过 Cruise 软件搭建仿真模型并计算,如图 3 所示。

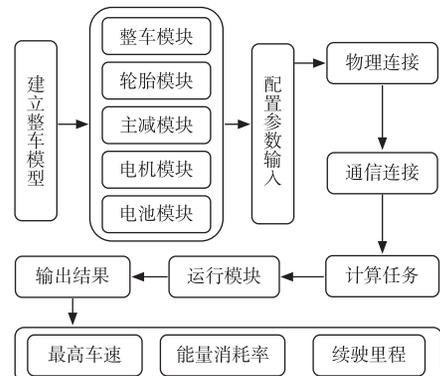


图 3 18 m 纯电动铰接车仿真模型架构图

整车性能仿真分析指标主要关注续驶里程、能量消耗率和最高车速等。经济性主要以 CCBC 循环工况和 40 km/h 等速工况续驶里程作为评价指标^[10], 经仿真分析两种工况续驶里程分别为 444.2 km 和 590.1 km, 满足设计要求; 动力性能仿真最高车速为 98 km/h, 满足最高车速不低于 70 km/h 的设计要求; 最大爬坡度 14.5% 满足厦门 BRT 实际路况需求。

3 结束语

该纯电动铰接客车经实车运营验证, 乘客出行体验良好, 其行驶操纵稳定性、舒适性及维修性等得到了较高的评价。本文为纯电动铰接客车提供了一种有效的设计思路。

参考文献:

- [1] 梁浩. 我国快速公交系统发展特征研究[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(27): 78-80.
- [2] 快速公交这十年——快速公交研究会 2020 年度工作报告(内容节选)[J]. 人民公交, 2021(1): 34-36.
- [3] 张斯阳, 盛志前, 曹雄超, 等. 快速公交与其他公共交通方式比选及融合发展[J]. 城市交通, 2022, 20(3): 55-63.
- [4] 张伟. 大型后驱铰接式系列客车底盘的研究和开发[J]. 汽车实用技术, 2012(6): 25-28.
- [5] 张利新, 刘逸群, 明杰婷. 纯电动城市客车动力系统匹配设计及仿真分析[J]. 客车技术与研究, 2022, 44(3): 15-18.
- [6] 陈笃廉. 一种纯电动客车用弓式充电系统[J]. 福建农机, 2017(3): 35-38.
- [7] 徐威, 夏修龙. 新能源客车的自动充电系统设计[J]. 中国新技术新产品, 2020(9): 18-20.
- [8] 曾志俊. XML6125JEV 纯电动城市客车中置后驱底盘设计开发[J]. 客车技术与研究, 2016, 38(1): 14-16.
- [9] 中华人民共和国公安部. 机动车安全技术检验项目和方法: GB 21861—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 9.
- [10] 李廷朋, 封进, 张瑞宾, 等. 纯电动客车动力系统参数匹配与仿真分析[J]. 机电工程技术, 2022, 51(9): 170-173.
- [5] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016: 779-788.
- [6] LIU Wei, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox Detector [C]//European Conference on Computer Vision, 2016: 21-37.
- [7] GIRSHICK R. Fast R-CNN [C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 2015: 1440-1448.
- [8] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal Networks [J]. in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [9] WANG Yaochien, BOCHKOVSKIY A, LIAO M H Y. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors [C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vancouver, BC, Canada, 2023: 7464-7475.
- [10] WEN Lihua, JO Kang-Hyun. Deep learning-based perception systems for autonomous driving: a comprehensive survey [J]. Neurocomputing, 2022(489): 255-270.
- [11] 王自强, 严运兵. 纯电动商用车能量回收策略优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(1): 39-44.

(上接第 10 页)

纯电动客车电动液压转向系统噪声分析与改进

齐 瀛, 王浩宇, 李俊强

(宇通客车股份有限公司, 郑州 450016)

摘要:针对纯电动客车电动液压转向系统的噪声来源、种类、传播途径,通过噪声产生机理分析,进行试验研究和效果验证,采用客观数据与主观评价相结合的分析方法,最终降低电动液压转向系统噪声,提升整车乘坐舒适性。

关键词:纯电动客车; 电动液压转向; 噪声分析与改进

中图分类号:U463.4

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0015-04

Analysis and Improvement on Noise of Electro-hydraulic Steering System for Pure Electric Buses

QI Ying, WANG Haoyu, LI Junqiang

(Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Aiming at the noise source, type, and transmission path of the electro-hydraulic steering system for pure electric buses, this paper carries out experimental research and effect verification through the analysis of the noise generation mechanism, adopts the analysis method combining objective data and subjective evaluation, which finally reduces the noise of the electro-hydraulic steering system and improves the ride comfort of the whole vehicle.

Key words: pure electric bus; electro-hydraulic steering; noise analysis and improvement

由于纯电动客车取消了发动机,使得整车在怠速和行驶中相对安静,因此对车辆其他工作部件的噪声提出了更高的要求,需通过进一步研究来提升整车驾驶及乘坐舒适性。纯电动客车产生噪声的主要部件有主驱动电机、电动空调、电动打气泵(气压制动系统)或电控液压制动泵(液压制动系统)、电动液压转向系统、冷却水泵、控制器、车身振动及传动部件等,此外还有风噪、轮胎噪声,其中电动液压转向系统是汽车噪声的主要来源^[1]。本文重点研究电动液压转向系统噪声的产生机理和传播途径,通过优化转向电机控制程序、设计电机及油泵、改善转向油管及其固定方式等措施降低电动转向油泵噪声,并利用电动转向优势优化控制策略,以达到降低电动液压转向系统噪声的目的。

1 电动液压转向系统噪声分析及抑制措施

1.1 噪声源及噪声抑制措施

电动液压转向系统主要由转向控制器、电动转向油泵、转向油罐、整体式循环球动力转向器、转向油管组成,如图1所示,其中电动转向油泵由电机驱动。电动液压转向系统噪声来源主要为油泵电机的机械噪声和电磁噪声,油泵的机械噪声和流体噪声^[2]。

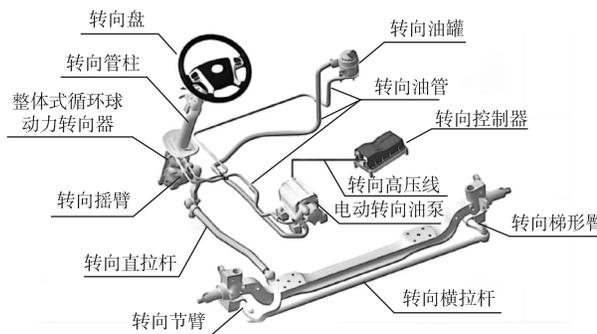


图1 电动液压转向系统的组成

收稿日期:2023-09-11。

第一作者:齐 瀛(1983—),男,高级工程师;主要从事新能源车辆电控、电附件设计工作。E-mail:qiyngxny@126.com。

1.1.1 油泵电机的机械噪声及抑制措施

机械噪声主要由油泵电机的定转子摩擦、动平衡破坏、轴承磨损以及电机本体共振共同形成。电机转子动平衡破坏是产生机械振动和机械噪声的主要原因;轴承是连接电机转子和定子的部件,其承受了电机中各种力的激励并传递激励力,产生振动和噪声并传递到电机本体,是影响电机机械噪声的次要原因^[3]。

抑制措施:电机进行动平衡校正、轴承采用低噪声轴承、保证轴承安装精度、选用合适的润滑脂等。电机的机械噪声在电动液压转向系统中相对于电磁噪声、液压脉动噪声而言较低。

1.1.2 油泵电机的电磁噪声及抑制措施

电磁噪声主要由电机周期变化的定、转子空间容积中径向电磁力或不平衡的磁拉力引起。电磁噪声也与电机定子、转子本身的振动特性(固有频率、阻尼、机械阻抗等)有关^[4]。另外电机的电磁噪声与电机控制器载波频率相关。纯电动客车电动转向油泵电机的电源为车载电池的直流电,电机一般为交流异步电机或永磁同步电机,采用电机控制器将直流电转换为交流电为电机供电。控制器采用最优的载波频率可有效降低电机的电磁噪声^[5]。

需要综合考量电磁噪声的抑制措施:一是选择合适的定、转子槽数配合,二是选择合理的气隙磁密,三是电机制造过程中确保定、转子圆度并保证定、转子同心,四是电机运行时要保持电压对称度,此外还可采用磁性槽楔和转子斜槽来减少电磁噪声。

若电机控制器载波频率设置不合理,电机就会发出刺耳的高频噪声。载波频率要综合考虑基波频率、硬件限制、内部软件、谐波电流、温升、电磁噪声,通过控制器和电机台架调试找到合适的值。

1.1.3 油泵的机械噪声及抑制措施

油泵的机械噪声主要是转子、叶片在旋转过程中产生的振动引起的,这与设计参数、制造精度相关。叶片泵的定子曲线采用综合性能好的高次定子曲线,其次在叶片泵配油盘的吸、排油腔边缘的封油区部分开设三角槽,避免压力冲击,消除困油产生的噪声。

1.1.4 流体噪声及抑制措施

流体噪声主要是由叶片泵内腔内液压油压力、流

速周期性变化以及空穴现象引起的,分为脉动噪声、气蚀噪声、困油噪声等^[6]。怠速工况下车内听到的“呜呜”和“嗡嗡”等声音,主要来自转向系统内油管的液压脉动噪声,通过油管与车身连接点传递到车身,对车内噪声影响最大。

抑制措施:改进吸油方式,降低吸油腔流道内的流速,减小进油口到转子的液流阻力,防止吸油系统进入空气。增加叶片泵出油口的容积腔,可有效衰减脉动频率。

1.2 噪声传播途径及抑制措施

电动液压转向系统噪声传播途径及抑制措施如下:

1) 油泵及其管路噪声通过空气传播。其抑制措施通常为增加密封舱体并加装隔音棉来降低空气噪声,具体可根据布置位置及空间大小合理选用,本文不再详述。

2) 油泵电机、油泵及其管路的振动噪声通过车身的连接点传递到车内^[7]。针对振动噪声的传递,主要采用以下2种抑制措施:

①增加降噪管减弱振动。降噪管内部的1/4波长管可以扰乱转向油泵所输出的周期性脉动流体,避免油管内的流体谐振,从而衰减系统噪声^[8]。降噪管中的波长管长度 L (单位为m)的计算公式如下:

$$L=C/(4f)$$

式中: C 为振动波在液压油中的传播速度,一般取132 m/s; f 为压力脉动频率 $[f=(\text{电机转速} \times \text{叶片数})/60]$,单位为Hz,其中电机转速单位为r/min。

在实际应用时,不同的部件具有不同的阶次及谐阶次,通过客观测试和阶次分析,确定峰值处对应噪声频率,从而计算出波长管长度值。

②转向管路固定点采用减振橡胶线卡固定,减弱振动的传递。

2 某纯电动客车转向系统噪声优化

某7 m纯电动高档商务车,采用电动液压转向系统(转向泵)和电控液压制动系统(制动泵)。样车试验时,为排除制动系统的干扰,关闭制动泵,车内转向系统噪声明显,说明转向系统存在噪声过大的问题,特别是整车怠速工况下噪声最明显,车内听到令人烦

躁的“嗡嗡”声。经分析主要为电动转向油泵电机的电磁噪声和叶片泵的流体噪声,影响驾驶员及乘客的驾乘舒适性,对此采取以下优化措施。

2.1 噪声源抑制

1) 电磁噪声源抑制,选用电磁噪声优化后的电动转向油泵(详见1.1.2节,电机设计阶段充分考虑电磁噪声的抑制措施)。通过整车台架测试,选择合适的载波频率完成电磁噪声和变频控制器效率的最优解,实现载波频率优化。台架测试不同载波频率下的电磁噪声(注意:测试前查询变频器电子器件规格书对可使用的载波频率范围的说明,此车型规格书要求载波频率 ≤ 10 kHz),此车型测试2~10 kHz下的电磁噪声,在6 kHz,电磁噪声为47 dB(A),噪声最小且变频控制器在最优效率区间,因此转向控制器载波频率设定值确定为6 kHz。

2) 流体噪声源抑制,主要调整电动转向油泵的工作转速,避免工作转速与整车固有频率相近引起共振。经台架测试,此款商务车电动转向油泵电机转速为怠速960 r/min,工作转速为1 200 r/min,满足转向受力要求,此转速下噪声值分别为51 dB(A)和53 dB(A),相对于其他转速噪声最低,设定此转速为工作转速。在此基础上增加整车传播路径隔音降噪措施。

3) 表1为电动转向油泵频率及噪声。由表中数据可知,车内电动转向泵噪声最明显的频率为192 Hz,噪声为34.1 dB(A)。由于转向泵怠速转速为960 r/min,叶片为12片,压力脉动频率为192 Hz,因此车内嗡嗡声主要由转向泵的基频贡献(192 Hz),其次是384 Hz倍频的贡献。

表1 电动转向油泵频率及噪声

频率/Hz	噪声/dB(A)			
	驾驶区	前坐区	中间区	后坐区
79	22.2	9.9	6.9	4.1
1 793	4.2	7.5	9.2	13.1
192	11.4	32.8	32.6	34.1
384	0.4	22.8	23.2	23.9

2.2 噪声传播途径抑制

1) 传播途径确认。同样,为排除电控液压制动

系统(制动泵)的干扰,首先关闭制动泵,然后将转向泵转向管路连接点与车身连接脱开,再将转向泵本体与车身固定连接脱开,最后将转向泵用隔音降噪材料包裹。试验结果见表2:192 Hz处噪声降低了14 dB(A),384 Hz处噪声降低了10.3 dB(A)。从而得出以下结论:

①电机电磁噪声通过空气传播,通过隔音降噪材料对转向泵电机包裹处理隔绝空气传播途径,整车噪声无明显变化。说明影响整车的并非电磁噪声,电磁噪声优化后不再是影响整车噪声的关键点,传播途径优化应不再考虑电机噪声。

②转向泵流体噪声通过转向高压管传递到车内,此为影响整车噪声的关键环节,所以传播途径抑制需重点抑制流体噪声。

表2 噪声试验结果

车辆状态	噪声/dB(A)		
	综合	基频 192 Hz	倍频 384 Hz
原始状态	35.7	34	23.5
转向管路脱开	33.4	20	13.2
本体脱开	37.7	34.6	28.1
本体包裹	32.8	30.7	14.9

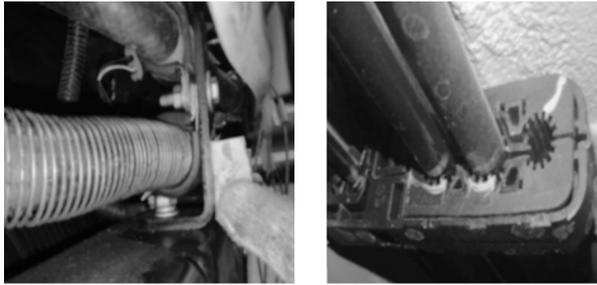
2) 传播途径中噪声基频确认。通过整车上转向泵管路支架 NTF(噪声传递函数)噪声诊断分析,进一步确认支架在转向泵的基频192 Hz和倍频384 Hz处有振动峰值(见表3),转向泵管路隔振性能差,导致转向管路的结构传递噪声未充分衰减,经过与车架和车身的连接支架,以结构声的方式进入车身。

表3 管路支架本体隔振量

支架	隔振量/dB(A)		
	X向	Y向	Z向
支架1	23.349 82	29.409 81	16.901 96
支架2	4.436 975	12.736 44	19.172 15
支架3	-2.922 56	6.020 6	7.359 536
支架4	53.979 4	63.690 49	51.796 51

3) 传播途径中噪声的衰减方法。改进措施:通过在转向管路中增加合适的降噪管(计算公式见1.2节),从而降低管路压力脉动导致的系统噪声;优化管

路与车身和车架的隔振垫,提高管路支架刚度,以提高隔振效果,图2为隔振垫改进前后对比。将优化后的液压助力管装车验证效果,主观感觉上已经听不到“嗡嗡”声,效果明显。



(a) 改进前

(b) 改进后

图2 隔振垫改进前后对比

3 结束语

本文分析了电动液压转向系统噪声源及传播途径,并针对不同噪声源提出了不同的改善措施,通过实车对比试验,确定了改进措施有效,最终降低了电动液压转向系统噪声,提高了整车 NVH 水平。

参考文献:

- [1] 秦成,盛君,龚佳强.纯电动客车转向系统噪声的改善研究[J].汽车实用技术,2021,46(15):21-24.
- [2] 牛彦彦,孙家宝,马腾.液压助力转向系统的噪声分析[C]//河南省汽车工程学会.第十届河南省汽车工程科学技术研讨会论文集,2013:67-68.
- [3] 黄国治,罗麦,曾兆炎.电机振动噪声研究(三)定子机械振动特性计算研究[J].中小型电机,1984(6):20-25.
- [4] 欧忠杰.电动汽车用永磁同步电动机电磁噪声的研究[D].广州:广东工业大学,2021.
- [5] 上海大郡动力控制技术有限公司.电动汽车电机控制器抑制高频噪声的方法:201611235387.4[P].2018-07-06.
- [6] 陶维龙,陈乐强,金明,等.液压转向助力系统噪声研究[J].机械工程师,2015(5):80-82.
- [7] 逢增山,朱志文,蔺磊,等.液压助力转向系统的噪声优化设计[J].上海汽车,2015(12):32-34.
- [8] 张乾斌,张兵舰,张莉萍.乘用车液压转向系统噪声分析及优化[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2016,34(6):923-925.

理事会邀请函

尊敬的客户企业:

《客车技术与研究》创刊于1979年,是我国创刊较早、发行量较大、学术水平较高的客车专业期刊,是交流客车技术的重要“阵地”。

当前,新能源、智能网联等新技术重塑着客车行业的发展,为准确把握市场和技术脉搏,进一步发挥期刊推动技术交流、促进行业发展的平台作用,现热忱邀请贵单位加入《客车技术与研究》理事会,共同擘画客车行业的美好未来!

希望广大客户企业积极参与并大力支持我国客车行业发展。本期刊理事会将充分发挥自身优势,竭诚为理事单位做好服务工作。

如有意向,请联系《客车技术与研究》编辑部,电话:023-62653044。

基于 T-S 模糊故障树的驱动电机冷却系统可靠性分析

柳炽伟, 郭美华

(中山职业技术学院 机电工程学院, 广东 中山 528403)

摘要: 车用驱动电机液压冷却系统存在故障机理不确定等问题。本文应用模糊数描述其故障概率和故障程度, 建立驱动电机冷却系统的 T-S 模糊故障树模型, 计算系统模糊可能性, 分析各部件的概率重要度和关键重要度, 找出影响系统可靠性的关键部件。

关键词: 电动汽车; 驱动电机; 冷却系统; T-S 模糊故障树; 可靠性分析

中图分类号: U462

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)02-0019-07

Reliability Analysis of Hydraulic Cooling System for Drive Motor Based on T-S Fuzzy Fault Tree

LIU Chiwei, GUO Meihua

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528403, China)

Abstract: The hydraulic cooling system of the drive motor for vehicles has problems of uncertain fault mechanisms. This paper uses fuzzy numbers to describe the probability and degree of faults, establishes the T-S fuzzy fault tree model of the drive motor cooling system, calculates the fuzzy possibility of the system, analyzes the probability and critical importance of each component, and identifies the key components that affect the reliability of the system.

Key words: electric vehicle; drive motor; cooling system; T-S fuzzy fault tree; reliability analysis

1 概述

电动汽车驱动电机冷却不良会导致其温度过高, 影响电机性能, 严重的会引起电机转子中永磁体产生不可逆的热退磁现象, 还会使电机绝缘材料发生质变失去绝缘能力。电机控制器和电源变换器等装置内的电子元件和模块也会因温度过高而被烧毁。目前, 水冷是车用驱动电机的主要冷却方式^[1]。因此进行电动汽车驱动电机冷却系统可靠性研究, 对延长电动汽车使用寿命、提高安全性和故障诊断效率等都具有重要意义。

故障树分析(FTA)是较为广泛使用的复杂系统可靠性分析方法之一。传统的基于布尔代数和概率

论的二态故障树分析方法, 需要已知精确的底事件概率且逻辑门关系明确, 限制了其应用范围^[2-3]。采用模糊数来描述底事件的模糊故障树模型, 解决了底事件故障概率不确定问题, 但其因果关系仍以“与或门”“表决门”等逻辑关系为主, 不能对多态问题和故障机理不明确问题进行分析^[4-5]。

近年发展较快的 T-S 模糊故障树模型, 以 T-S 门代替传统逻辑门来表达上下级关系, 用模糊数描述底事件故障程度, 以模糊可能性表征事件概率, 在解决复杂系统的多态故障、机理不明故障、故障概率不确定性等方面具有优势, 逐渐在可靠性及故障诊断领域得到研究和应用^[6-8]。

收稿日期: 2023-11-03。

基金项目: 2023 年广东省普通高校特色创新类项目(2023KTSCX367); 2020 年度中山市第二批社会公益与基础研究项目(2020B2028); 2023 年度中山职业技术学院科研项目(KYB2303)。

第一作者: 柳炽伟(1970—), 硕士; 副教授; 主要从事汽车检测与诊断技术, 汽车可靠性、维修决策等研究工作。E-mail: luke1011@sohu.com。

针对电动汽车驱动系统结构紧凑、使用工况复杂多变的状况,结合冷却系统故障发生的渐进性、模糊性,以及缺乏精确的故障率数据等特点,本文通过专家经验与历史数据结合获得底事件故障的模糊可能性,使用T-S模糊故障树进行驱动电机冷却系统可靠性分析和重要度计算,为电动汽车可靠性的优化和维修诊断提供参考。

2 T-S模糊故障树的理论基础

2.1 事件的模糊数描述方法

如前所述,电动汽车驱动系统故障的程度难以用精确的数值来表示,为此引入模糊逻辑,将故障概率、故障程度用区间 $[0,1]$ 上的模糊数来表示。如通常用0、0.5、1等来描述故障程度,分别表示无故障、中度故障和完全故障。描述故障概率的模糊数,其隶属函数可以是三角形、正态、梯形函数等。为方便使用和不失一般性,选用图1所示的梯形隶属函数来描述事件的模糊隶属度:

$$F \equiv (F_0, s_1, f_1, s_r, f_r) \quad (1)$$

式中: F_0 为模糊数支撑集中心; s_1 和 s_r 表示左右支撑半径; f_1 和 f_r 表示左右模糊区,其大小反映了模糊数的模糊程度。

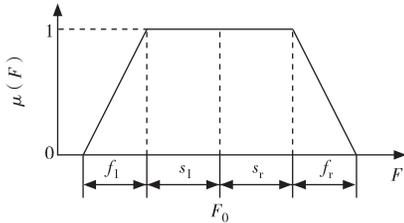


图1 模糊数的隶属函数

由图1可得出梯形模糊数的隶属函数表达式:

$$\mu(F) = \begin{cases} 0 & (0 \leq F \leq F_0 - s_1 - f_1) \\ \frac{F - (F_0 - s_1 - f_1)}{f_1} & (F_0 - s_1 - f_1 < F \leq F_0 - s_1) \\ 1 & (F_0 - s_1 < F \leq F_0 + s_r) \\ \frac{(F_0 + s_r + f_r) - F}{f_r} & (F_0 + s_r < F \leq F_0 + s_r + f_r) \\ 0 & (F_0 + s_r + f_r < F) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,当模糊数的左右支撑半径均为0时,梯形隶属函数变为三角形隶属函数;当支撑半径和左右模糊区间均为0时,模糊数变为确定值。可见梯形隶属函数具有简洁、普适性强的特点。通过模糊数来描述概率,解决了底事件故障的精确概率难以获取的问题,能将专家对程度、范围的描述通过数字的形式表达出来。

2.2 T-S模糊门算法

T-S故障树模型作为一种逻辑推理模型,由一系列if-then模糊规则组成,可描述复杂系统的多态逻辑关系。T-S模糊门描述如下:

在T-S故障树中,在已知规则 $l(l=1,2,\dots,m)$ 下,有 n 个底事件输入变量 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$, y_l 为上级事件输出变量。底事件的模糊集为 $F_{f_j}(j=1,2,\dots,n)$,对应的隶属函数为 $\mu_{F_{f_j}}(x_j)$,则该T-S门的输出为

$$y = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x) y_l \quad (3)$$

$$\beta_l^*(x) = \beta_l(x) / \sum_{l=1}^m \beta_l(x) \quad (4)$$

$$\beta_l(x) = \prod_{j=1}^n \mu_{F_{f_j}}(x_j) \quad (5)$$

式中: $\beta_l(x)$ 为模糊规则 l 的执行度; $\beta_l^*(x)$ 是 $\beta_l(x)$ 归一化后的值。

假设基本事件 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度分别描述为模糊数 $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k_1})$, $(x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k_2})$, \dots , $(x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{k_n})$,上级事件 y 故障程度描述为 $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$,则该T-S门对应规则的数量为

$$m = \prod_{i=1}^n k_i \quad (6)$$

同时故障树中各个事件满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq x_1^1 \leq x_1^2 \leq \dots \leq x_1^{k_1} \leq 1 \\ 0 \leq x_2^1 \leq x_2^2 \leq \dots \leq x_2^{k_2} \leq 1 \\ \vdots \\ 0 \leq x_n^1 \leq x_n^2 \leq \dots \leq x_n^{k_n} \leq 1 \\ 0 \leq y^1 \leq y^2 \leq \dots \leq y^{k_y} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

则通过T-S模糊门可得到以下算法:

1) 已知部件故障程度的模糊可能性,计算上级事件故障的模糊可能性。在规则 $l(l=1,2,\dots,m)$ 下,

设每个基本事件所对应故障程度的模糊可能性分别为 $P(x_1^{i_1}), P(x_2^{i_2}), \dots, P(x_n^{i_n})$, 输出事件 y 为 y^{k_y} 的模糊可能性为 $P^l(y^{k_y})$ 。其中: $i_1 = 1, 2, \dots, k_1; i_2 = 1, 2, \dots, k_2; \dots; i_n = 1, 2, \dots, k_n$ 。则 l 执行的可能性为

$$P_0^l = P(x_1^{i_1})P(x_2^{i_2}) \dots P(x_n^{i_n}) \quad (8)$$

进而得到上级事件的模糊可能性为

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^{k_y}) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^{k_y}) \end{cases} \quad (9)$$

2) 已知部件故障状态, 计算上级事件模糊可能性。假设已知底事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度记为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, 则由 T-S 模型可估计出上级事件的模糊可能性

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^n) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^n) \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_l^*(x') = \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^l}(x'_j) / \sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^l}(x'_j) \quad (11)$$

其中, $\mu_{x_j^l}(x'_j)$ 表示第 l 条规则中 x'_j 对相应模糊集的隶属度。

2.3 T-S 模糊故障树重要度分析

重要度描述底事件发生概率对顶事件的影响程度, 其对可靠性设计、故障诊断等具有重要作用。

2.3.1 T-S 概率重要度

底事件 x_j 故障程度为 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性为 $P(x_j^{i_j})$ ($i_j = 1, 2, \dots, k_j$), 对系统顶事件 T 为 T_q 的概率重要度为

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) = P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 1] - P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 0] \quad (12)$$

其中 $P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 1]$ 表示当部件 x_j 故障程度为 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性 $P(x_j^{i_j}) = 1$ 时, 引起系统顶事件 T

为 T_q 的模糊可能性。 $P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 0]$ 表示 $P(x_j^{i_j}) = 0$ 时引起系统顶事件 T 为 T_q 的模糊可能性。

综合底事件各个故障程度的 T-S 概率重要度, 得到底事件的 T-S 概率重要度:

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j) = \sum_{i_j=1}^{k_j} I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) / k'_j \quad (13)$$

式中: k'_j 表示第 j 个底事件的非 0 故障程度的个数, 比如故障程度用模糊数 0, 0.5, 1 描述, 则 k'_j 为 2。

2.3.2 T-S 关键重要度

底事件 x_j 的故障程度 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性 $P(x_j^{i_j})$ ($i_j = 1, 2, \dots, k_j$) 对系统顶事件 T 为 T_q 的 T-S 关键重要度为

$$I_{T_q}^{Cr}(x_j^{i_j}) = P(x_j^{i_j}) I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) / P(T = T_q) \quad (14)$$

$$I_{T_q}^{Cr}(x_j) = \sum_{i_j=1}^{k_j} I_{T_q}^{Cr}(x_j^{i_j}) / k'_j \quad (15)$$

式中: $P(T = T_q)$ 表示顶事件 T 为 T_q 的概率。

可见关键重要度含有部件的概率重要度、部件与系统的故障概率比两方面, 能更客观地体现部件对系统故障的影响程度。

3 驱动电机冷却系统可靠性分析

3.1 建立 T-S 模糊门规则

车用驱动电机铁损、铜损、永磁损耗和机械损耗的能量会转换为热能。电机控制器(含逆变器)、车载充电机、DC/DC 变换器内部功率器件均会在运行过程中大量生热, 需要在其壳体上制造各种形状的水道, 通过冷却系统的液流将热量带走, 液流经过散热器时将热量传导至空气中。冷却液流的压力由电泵产生, 散热器通过装配在后面的散热风扇加速散热。液泵和风扇的转速均由整车控制器根据温度信号按既定的各种模式运行^[9-10]。

以某乘用车永磁同步电机冷却系统为例, 以“驱动电机温度过高”为顶事件 T, 假设所有事件的故障程度为 (0, 0.5, 1), 依据历史数据和专家经验, 作出其 T-S 模糊故障树如图 2 所示。图 2 中的故障树有 12 个 T-S 门规则, 除顶事件 T 外, A、B、C、D 代表不同层级的中间事件, $X_1 \sim X_{21}$ 代表 21 个底事件, 具体事件代码的含义见表 1。

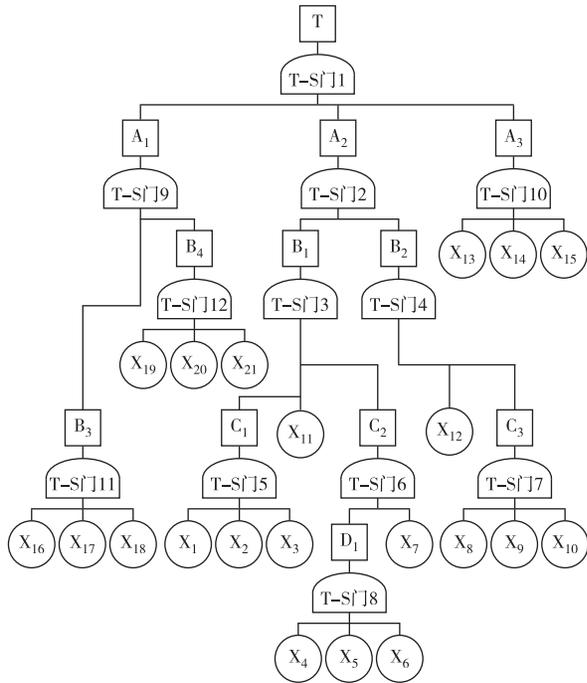


图2 电机过热的T-S故障树

表1 故障树事件代码表

代码	事件	代码	事件
T	电机温度过高报警	X ₆	膨胀水箱泄漏
A ₁	部件运作异常发热	X ₇	冷却液变质
A ₂	冷却系统散热不良	X ₈	散热风扇损坏
A ₃	温度信号故障	X ₉	风扇线束故障
B ₁	冷却液循环不良	X ₁₀	风扇继电器故障
B ₂	散热器换热不良	X ₁₁	散热器堵塞
B ₃	电机故障	X ₁₂	散热器脏污
B ₄	电源变换装置故障	X ₁₃	电机温度传感器故障
C ₁	电泵工作压力不足	X ₁₄	电机控制器温度传感器故障
C ₂	冷却液异常	X ₁₅	电源变换装置温度传感器故障
C ₃	散热风扇故障	X ₁₆	电机定子短路故障
D ₁	冷却液泄漏	X ₁₇	转子故障
X ₁	电泵劣化损坏	X ₁₈	过载
X ₂	电泵线束故障	X ₁₉	逆变器 IGBT 故障
X ₃	电泵继电器故障	X ₂₀	DC/DC 变换器故障
X ₄	输水管路泄漏	X ₂₁	车载充电机故障
X ₅	散热器泄漏		

表2为图2中T-S门5的模糊规则,其中编号4的规则表示:当X₁、X₂、X₃故障程度分别为0、0.5和0时,导致C₁故障程度为(0,0.5,1)的可能性为

(0.3,0.7,0)。

表2 T-S门5的模糊规则

规则编号	X ₁	X ₂	X ₃	C ₁		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.1	0.6	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.3	0.7	0
5	0	0.5	0.5	0	0.4	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

3.2 系统模糊可能性计算

3.2.1 通过部件模糊故障率计算顶事件“电机温度过高报警”的模糊可能性

分析电动车运行的历史数据,以及采用信心指数修正的专家调查法调研^[11],可得到对应的各底事件故障程度为1时的模糊故障率,详见表3。同时,为便于计算推理,假设各底事件故障状态为0.5和1时概率相等。

表3 底事件的模糊故障率值

代码	模糊故障率/(10 ⁻⁶)	代码	模糊故障率/(10 ⁻⁶)
X ₁	(1.745, 2.205, 2.773)	X ₁₂	(3.088, 4.162, 5.145)
X ₂	(0.604, 0.847, 1.105)	X ₁₃	(1.229, 1.549, 2.015)
X ₃	(2.051, 2.618, 3.150)	X ₁₄	(1.412, 1.857, 2.297)
X ₄	(6.277, 8.233, 10.518)	X ₁₅	(1.139, 1.518, 1.898)
X ₅	(2.363, 3.214, 4.188)	X ₁₆	(0.778, 0.936, 1.155)
X ₆	(0.791, 1.051, 1.295)	X ₁₇	(1.660, 2.213, 2.766)
X ₇	(0.183, 0.257, 0.318)	X ₁₈	(2.534, 3.245, 4.156)
X ₈	(1.601, 2.165, 1.516)	X ₁₉	(1.536, 2.181, 2.827)
X ₉	(0.605, 0.754, 0.923)	X ₂₀	(0.671, 1.028, 1.285)
X ₁₀	(2.479, 3.135, 4.026)	X ₂₁	(0.985, 1.378, 1.745)
X ₁₁	(0.488, 0.677, 0.914)		

顶事件模糊可能性是利用各T-S门算法,由最底层事件模糊可能性逐层向上推算得到。为便于理解,本文以规则较少的T-S门4(表4)为例,介绍T-S门模糊可能性的计算过程。

表 4 T-S 门 4 的模糊规则

规则编号	X ₁₂	C ₃	B ₂		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.8	0
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.3	0.7	0
5	0.5	0.5	0	0.4	0.6
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0.7	0.3
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

1) 用 T-S 门 7 算出 C₃ 故障程度为 0.5 和 1 时的模糊可能性分别为 (3.032, 3.924, 4.963) × 10⁻⁶ 和 (5.429, 6.995, 8.873) × 10⁻⁶。

2) 根据式(8)、式(9), 可得

$$P(B_2 = 0.5) = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_2 = 0.5) = P_0^2 \times 0.8 + P_0^4 \times 0.7 + P_0^5 \times 0.4 + P_0^7 \times 0.7 = (6.748, 8.966, 11.173) \times 10^{-6}$$

$$P(B_2 = 1) = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_2 = 1) = P_0^3 + P_0^5 \times 0.6 + P_0^6 + P_0^7 \times 0.3 + P_0^8 + P_0^9 = (6.355, 8.243, 10.416) \times 10^{-6}$$

3) 由计算结果可知, B₂ 模糊故障可能性比底事件 X₁₂ 大了一倍, 但仍在同一数量级上; 其中度故障的模糊可能性比严重故障的模糊可能性稍高, 符合实际情况。

4) 因 X₁₂(散热器脏污) 主要指外部沾积尘泥、树叶等脏物和内部水道积垢等情况, 这是一个渐进的过程。在散热风扇正常时, 它会造成散热器换热性能慢慢下降, 出现水温偏高情况(故障程度 0.5), 并持续较长时间。一旦同时出现风扇电机碳刷磨损或继电器触点性能劣化, 转速变慢(即故障程度 0.5) 或风扇停转等情况, 就会出现冷却液温度过高等严重故障。可见依据专家经验建立的 T-S 门能够较好地反映多态模糊故障的状况。

5) 同理, 计算出系统中其他中间事件的模糊可

能性, 详见表 5。

表 5 中间事件的模糊可能性

代码	模糊可能性/(10 ⁻⁶)	
	故障状态 0.5	故障状态 1
A ₁	(4.642, 6.478, 8.230)	(5.051, 6.737, 8.465)
A ₂	(9.224, 12.220, 15.429)	(22.411, 29.371, 37.155)
A ₃	(3.329, 4.358, 5.485)	(3.210, 4.165, 5.261)
B ₁	(10.350, 13.682, 17.450)	(11.601, 15.230, 19.270)
B ₂	(6.748, 8.966, 11.173)	(6.355, 8.243, 10.416)
B ₃	(1.890, 2.440, 3.055)	(3.455, 4.443, 5.537)
B ₄	(4.149, 5.963, 7.614)	(1.596, 2.294, 2.929)
C ₁	(2.699, 3.445, 4.289)	(5.015, 6.455, 7.972)
C ₂	(2.216, 2.950, 3.762)	(12.638, 16.761, 21.466)
C ₃	(3.032, 3.924, 4.963)	(5.429, 6.995, 8.873)
D ₁	(6.839, 9.064, 11.589)	(9.035, 11.972, 15.353)

6) 进一步计算得到顶事件 T 发生的模糊可能性为:

$$P(T=0.5) = (11.371, 15.267, 19.303) \times 10^{-6}$$

$$P(T=1) = (35.109, 46.191, 58.355) \times 10^{-6}$$

由该结果分析, 系统故障的模糊可能性比底事件高了一个数量级, 严重程度的故障模糊可能性比中等故障程度的模糊可能性要高近 3 倍。因为系统顶事件包含 21 个并联关系的底事件, 每个底事件都是最小割集, 均可能导致系统故障发生。较多的电路电器常为 0, 1 二态表现, 且故障程度为 1 的 1 个底事件发生或 2 个程度为 0.5 的底事件同时发生, 即导致系统发生严重故障, 因此系统严重故障的模糊可能性较中等程度故障的更高。

3.2.2 已知部件故障状态计算顶事件模糊可能性

如果不能确定车辆零部件的故障概率, 可通过行驶里程的估算, 或在维护过程得到它们的故障状态, 利用 T-S 模糊故障树模型求出顶事件在不同故障程度下的模糊可能性。

在图 1 所示的故障模糊隶属函数中, 取模糊故障程度的隶属函数参数为 s₁ = s_r = 0.15, f₁ = f_r = 0.2。各底事件的故障状态如下: X₁、X₄、X₆、X₁₂、X₁₈、X₂₀ 是 0.1, X₃、X₇、X₁₁、X₁₅、X₂₁ 是 0.2, X₂、X₈、X₉、X₁₃、X₁₆、X₁₇ 是 0.3, X₅、X₁₀、X₁₄、X₁₉ 是 0.4。以表 2 的 T-S 门

5 为例,结合式(2)得到 X_1 、 X_2 、 X_3 的故障模糊集隶属度情况,详见表 6。

表 6 T-S 门 5 中底事件隶属度

规则编号	隶属度			C_1 故障状态		
	X_1	X_2	X_3	0	0.5	1
1	1	0.25	0.75	1	0	0
2	1	0.25	0.25	0.2	0.5	0.3
3	1	0.25	0	0	0	1
4	1	0.75	0.75	0.3	0.7	0
5	1	0.75	0.25	0	0.4	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	0	1	0	0	0	1

1) 由式(10)、式(11)和表 6 计算得到 $P(C_1=0)=0.369$, $P(C_1=0.5)=0.50$, $P(C_1=1)=0.131$ 。

2) 同理可求得其他中间事件在不同故障程度下的模糊可能性。

3) 将中间事件的模糊可能性代替隶属度,最后求得顶事件不同故障程度的模糊可能性为: $P(T=0)=0.075$, $P(T=0.5)=0.650$, $P(T=1)=0.275$ 。

4) 计算结果显示,在各底层零部件存在上述轻微程度故障时,引起系统一般故障发生的模糊可能性较高,有近三成机会发生严重故障。

3.3 部件的重要度分析

为提高可靠性设计及故障诊断效率,对底事件(部件)的重要度进行分析,找到系统不同故障程度下的关键影响因素。事件模糊可能性值取中间值,先分别求得各部件对顶事件在 0.5、1 两种故障程度下 T-S 概率重要度,再结合部件的模糊可能性,计算其关键重要度。例如底事件 X_1 对系统故障程度为 1 的概率重要度、关键重要度计算如下:

1) 根据式(12)、式(13)可得 X_1 对顶事件 T 完全故障的 T-S 概率重要度:

$$I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) = P[T_1, P(x_1^{0.5}) = 1] - P[T_1, P(x_1^{0.5}) = 0] = 0.096$$

$$I_1^{Pr}(x_1^1) = P[T_1, P(x_1^1) = 1] - P[T_1, P(x_1^1) = 0] = 0.672$$

$$I_1^{Cr}(x_1) = [I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) + I_1^{Pr}(x_1^1)] / 2 = 0.682$$

2) 根据式(14)、式(15)得到 X_1 对顶事件 T 完全

故障的 T-S 关键重要度:

$$I_1^{Cr}(x_1^{0.5}) = P(x_1^{0.5}) I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) / P(T=1) = 0.0177$$

$$I_1^{Cr}(x_1^1) = P(x_1^1) I_1^{Pr}(x_1^1) / P(T=1) = 0.0485$$

$$I_1^{Cr}(x_1) = \sum_{i_j=0.5,1} I_1^{Cr}(x_1^{i_j}) / 2 = 0.0419$$

3) 同理可计算出其他底事件的概率重要度和关键重要度。计算结果按重要度排序,可找到影响系统可靠性的关键因素。表 7 是计算所得各底事件对顶事件部分故障和完全故障的概率重要度和关键重要度数据。

表 7 底事件的概率重要度和关键重要度

代码	$I_{0.5}^{Pr}(x_j)$	$I_1^{Pr}(x_j)$	$I_{0.5}^{Cr}(x_j)$	$I_1^{Cr}(x_j)$
X_1	0.096	0.580	0.014	0.028
X_2	0.096	0.580	0.005	0.011
X_3	0.089	0.672	0.015	0.039
X_4	0.143	0.458	0.076	0.084
X_5	0.143	0.458	0.030	0.033
X_6	0.122	0.385	0.008	0.009
X_7	0.157	0.585	0.003	0.003
X_8	0.118	0.590	0.017	0.028
X_9	0.118	0.590	0.006	0.010
X_{10}	0.101	0.727	0.020	0.051
X_{11}	0.210	0.540	0.009	0.008
X_{12}	0.294	0.374	0.079	0.035
X_{13}	0.175	0.675	0.018	0.023
X_{14}	0.175	0.675	0.021	0.028
X_{15}	0.325	0.575	0.032	0.019
X_{16}	0.122	0.785	0.007	0.016
X_{17}	0.171	0.699	0.025	0.034
X_{18}	0.318	0.341	0.007	0.002
X_{19}	0.364	0.354	0.051	0.017
X_{20}	0.364	0.354	0.024	0.008
X_{21}	0.364	0.354	0.033	0.011

4) 对系统完全故障的概率重要度排序,前 5 个部件是 X_{16} 、 X_{10} 、 X_{17} 、 X_{14} 、 X_{13} ,它们对系统完全故障发生的概率绝对值影响大,在系统可靠性优化设计时应考虑提高它们的可靠性。

5) 对系统完全故障的关键重要度排序,前 4 个部件是 X_4 、 X_{10} 、 X_3 、 X_{12} ,即输水管路泄漏、散热风扇继电

器、电泵继电器、散热器脏污等事件对系统完全故障发生的概率影响程度相对其他部件更大,其物理意义与实际经验吻合。通常这些部件在使用过程中发生故障的概率较高,一旦发生故障会导致系统的散热器无法正常换热,或使冷却液流动缓慢甚至不流动,这必然导致电机冷却系统温度过高,诊断相关故障时可先关注这些影响因素。

4 结束语

本文利用 T-S 模糊故障树分析车用驱动电机冷却系统的可靠性,引入了故障程度概念,可通过底事件模糊可能性或故障程度推算出系统故障的模糊可能性,解决了零部件故障概率和故障机理不确定性问题,更高效地实现液压冷却系统等复杂系统多态问题的推理。

根据专家经验和历史数据建立了车用驱动电机液压冷却系统 T-S 门及其模糊故障树,通过计算概率重要度和关键重要度,找到了车用驱动电机液压冷却系统失效的关键因素,为系统可靠性提升和故障诊断决策提供了参考依据。

参考文献:

[1] 刘慧军,陈芬放,黄瑞,等. 车用驱动电机冷却系统仿真研究[J]. 中南大学学报,2020,51(7): 2002-2012.

- [2] WANG Jianjun, ZHAO Jingyi, LI Wenle, et al. Reliability analysis and calculation of the drive hydraulic system group of combined transportation[J]. Machine Tool&Hydraulics, 2020, 48(24): 13-20.
- [3] 田世贺,李小波,程岳梅,等. 基于现场数据的地铁车辆牵引系统可靠性分析[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(2): 64-68.
- [4] 孙利娜,黄宁,仵伟强,等. 基于 T-S 模糊故障树的多态系统性能可靠性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 192-198.
- [5] 柳炽伟. 汽车 AMT 液压系统的模糊可靠性分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(2): 48-51.
- [6] 李翠玉,孙信民,蒋旭,等. 基于 T-S 模糊故障树的家用空调可靠性分析[J]. 机械设计, 2021, 38(2): 120-126.
- [7] 徐廷学,王凤芹,李志强. 基于 T-S 模糊故障树方法的惯性导航系统可靠性评估[J]. 测控技术, 2022, 41(2): 49-56.
- [8] 白斌,张俊一,周策,等. 基于 T-S 模糊故障树的工业机器人可靠性分析[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1348-1358.
- [9] 柴保明,李文选,苏茹茹,等. 基于故障树的电机温度过高故障诊断分析[J]. 煤矿机械, 2012, 33(2): 245-246.
- [10] 孙海燕,郑星,史立伟,等. 电动汽车水冷式永磁同步电机设计与分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 87-91.
- [11] 周亚辉,齐金平,李少雄,等. 基于 T-S 模糊故障树的制动系统可靠性分析[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(6): 24-28.

《客车技术与研究》投稿须知

文稿须为作者原创,不存在抄袭、侵权、涉密、一稿多投和重复发表等学术不端问题。作者享有文稿的著作权,文责由作者自负。

稿件须具有科学性、创新性、真实性、实用性,选题新颖、内容正确、结构合理、文字流畅。

为促进学术交流,扩大交流渠道,刊用的稿件将自动进入“中国期刊全文数据库”“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等,如不同意文章被收录,请来稿时声明。

一种基于 SPC584CE70 芯片的车载以太网网关控制器的设计与应用

明杰婷, 杨杰君, 文健峰, 彭兴宇, 刘逸群, 张利新

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:针对车载以太网与传统 CAN 网络不能直接通讯的问题,设计一款基于 SPC584CE70 MCU 主芯片的车载以太网网关控制器。该控制器具有 4 路以太网和 3 路 CAN 网络同时通讯的功能,可较好地实现以太网与以太网、CAN 网络与以太网、CAN 网络与 CAN 网络之间的信息交互。

关键词:车载以太网; 网关; 控制器; SPC584CE70 芯片

中图分类号:U463.67

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0026-06

Design and Application of Vehicle Ethernet Gateway Controller Based on SPC584CE70 Chip

MING Jieting, YANG Jiejun, WENG Jianfeng, PENG Xingyu, LIU Yiqun, ZHANG Lixin

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem that vehicle ethernet and traditional CAN networks can not communicate directly, this paper designs a vehicle ethernet gateway controller based on the SPC584CE70 MCU main chip. The controller has the function of 4-way ethernet and 3-way CAN network communication at the same time, which can realize the information interaction between the ethernet and ethernet, ethernet and CAN, CAN and CAN network.

Key words: vehicle ethernet; gateway; controller; SPC584CE70 chip

汽车的智能化、电动化、网联化、共享化时代已经到来,车载网络数据传输需求迎来爆发式增长^[1]。CAN 网络传输速率有限且有短帧传播的缺点,使得 CAN 总线在信息传输数量和实时性方面面临巨大挑战^[2]。而车载以太网以传输速率快、安全性高、实时性好、组网灵活等特点,有望发展成新一代车载骨干网络,从而满足更多车载数据传输的需求^[3-5]。现阶段,在信息量少、实时性要求低的控制器模块之间还是采用 CAN 通讯,但在信息量大、实时性高的模块之间已经采用以太网通讯^[6-10]。为适应传统 CAN 网络与以太网并存的网络架构,本文开发一款车载以太网网关控制器。该控制器既具有交换机功能,又肩负整

车 CAN 与以太网协议转化的功能,实现以太网网关控制器与人机交互域、车载终端(T-BOX)、远程诊断等模块之间采用以太网通讯,与底盘域、车身域、动力域等模块之间采用 CAN 通讯的功能,从而有效实现 CAN 网络与以太网网络的信息交互^[11]。

1 车载以太网网关硬件选型

该网关控制器的主芯片选用 ST 32 位单片机 SPC584CE70。该单片机为 ST 40 nm 工艺的 PowerPC 最新系列,专门用于车载网关。其性能强劲,资源丰富,具有 180 MHz 主频、4 MB Flash、392 KB RAM 及 Ethernet 以太网接口,支持硬件安全模块(HSM)、锁

收稿日期:2023-10-10。

第一作者:明杰婷(1989—),女,硕士;工程师;主要从事新能源车辆整车控制及车辆动力学仿真分析相关的工作。E-mail: mingjieting@163.com。

步(Lockstep)功能,满足 ISO 26262 标准要求。

该以太网网关控制器共支持 4 路以太网通讯,3 路 100BASE-T1 和 1 路 100BASE-Tx,以太网路由芯片和收发器芯片分别选用 NXP SJA1105 Switch 系列和 TJA110x 系列的芯片,支持 TC10 以太网唤醒。

3 路 100BASE-T1 的 PHY 芯片选用具有 1 通道的 TJA1101 芯片和具有双通道的 TJA1102 芯片,且符合 IEEE 100BASE-T1 的汽车以太网通讯标准。TJA1102 芯片是专为汽车应用而设计的,在长达 15 m 的非屏蔽双绞线(UTP)上,每个端口可提供 100 Mbit/s 的收发能力,集成度高,能有效节省 MDI 路径中的外部滤波器和 ESD 保护组件。TJA110x 系列的 PHY 芯片与 NXP SJA1105P/R/S 路由芯片相结合,可构建高效的小端口计数以太网网关解决方案。

100BASE-Tx 主要用于诊断系统,与 100BASE-T1 相比,100BASE-Tx 物理层多包括以下两个子层:物理媒介相关子层(PMD)和自动协商子层(AUTONEG),故 1 路 100BASE-Tx 选用 TI DP83848 芯片,用作以太网故障诊断接口。该网关控制器的硬件原理如图 1 所示。

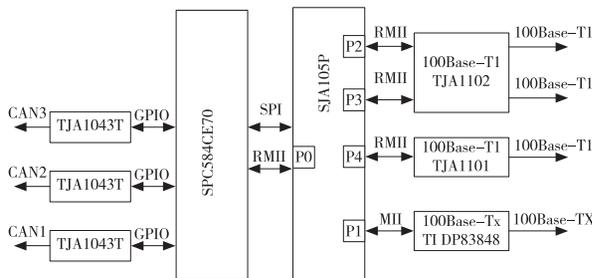


图 1 网关控制器硬件原理图

2 车载以太网网关软件设计

车载以太网网关控制器的软件应兼顾硬件资源、开发成本。基础软件层(BSW)应用 FreeRTOS 操作系统,并集成 TCP/IP 协议栈(LwIP);应用软件层(ASW)创建客户端任务(Client Task)、服务端任务(Service Task)、CAN 通讯任务(CAN Task),以实现客户端通讯、服务端通讯、CAN 通讯功能。软件架构如图 2 所示。

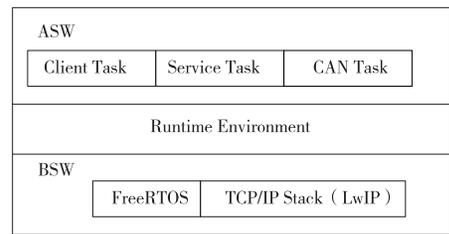


图 2 软件架构

2.1 FreeRTOS 介绍

FreeRTOS 是一个可裁减的小型实时操作系统(RTOS)。由于 FreeRTOS 小巧且易用,通常情况下内核只占用 4 KB~9 KB 的空间,非常适合在资源有限的微控制器中运行,已经在 30 多种架构的芯片上进行了移植^[12-13]。此外,FreeRTOS 还具有以下优点:

- 1) 支持实时任务,系统任务调度是可预测的,这正是嵌入式实时操作系统所需要的。
- 2) 可移植性高,代码主要用 C 语言编写。
- 3) 系统组件创建时支持动态或者静态的 RAM。
- 4) 任务数量不限,可同时创建若干任务。
- 5) 具有堆栈溢出检测功能。

正是由于 FreeRTOS 的优异性能,所以本文选择 FreeRTOS 作为操作系统,通过创建多客户端和服务端的任务来实现客户端、服务端的通讯功能。

2.2 LwIP 介绍

LwIP 是一个小型开源的 TCP/IP 协议栈,其设计初衷就是用尽可能少的资源消耗实现一个较为完整的 TCP/IP 协议栈。LwIP 的流畅运行大约需要 40 KB 的 ROM 和十几 KB 的 RAM,因此非常适合在内存受限的嵌入式设备中应用^[14-15]。LwIP 还有以下优点:

- 1) 资源开销小,拥有自己的内存管理策略和数据包管理策略,内核处理数据包效率高。
- 2) 支持较完整的 TCP/IP 协议,如以太网地址解析协议(ARP)、控制报文协议(ICMP)、用户数据包协议(UDP)、传输控制协议(TCP)、域名解析协议(DNS)、动态主机配置协议(DHCP)、网际互连协议(IP)等。
- 3) 提供 3 种编程接口:RAW API、NETCONN API、Socket API,Socket API 编写的程序可读性好,易

维护,该网关控制器采用 Socket API 的编程方式。

4) 可移植性强,源代码全部用 C 语言,便于实现跨处理器、跨编译器、跨操作系统的移植。

2.3 CAN 通讯设计

为提高软件的可读性、可移植性,每路 CAN 都共用一个 CAN 发送任务、CAN 接收任务,并为每帧报文创建一个接收或发送函数,供 CAN 主接收或发送函数调用。

1) CAN 接收。CAN 网络以总线方式通讯,CAN 网络上的所有节点都可以接收到其他节点的报文。为减小系统开销,可从硬件层过滤掉无关报文。每一支路 CAN 报文的接收都是在 CAN 接收回调函数中被处理,只有报文标志符与过滤器中对应的位匹配才能被接收。CAN 接收流程如图 3 所示。

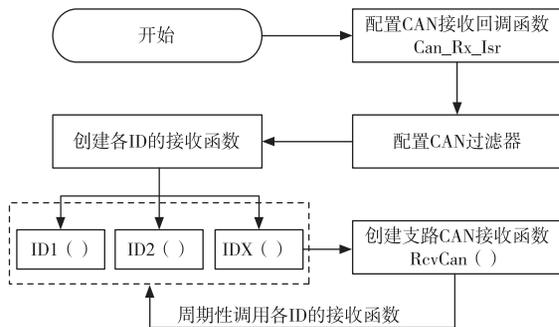


图3 CAN 接收流程

2) CAN 发送。CAN 网络的报文都是按照一定的发送周期向总线发送,故先创建一个 Veh_1msRun_task 任务。该任务使用任务通知 xTaskNotifyWait() 来实现 1 ms 周期性的调度。按照自上而下的程序设计原则,为每一功能创建子函数,提高程序的可读性和可移植性;为每一个报文创建一个发送函数 IDX(),在该函数内填充报文数据帧、帧类型、帧长度,指定 CAN 驱动通道和缓存区;为每一支路创建调度函数 SendCan(),在各支路的 CAN 调度函数中调度每一帧报文的发送函数 IDX()。最后,创建 CAN 发送的总调度函数 CANNet_Manage1ms(),在该函数中实现各支路调度函数的调用。因此,Veh_1msRun_task 任务中只需要调度 CANNet_Manage1ms()即可。按照上述架构设计原则,可充分实现报文的增加或删除,可读性好、可移植性强。CAN 发送流程如图 4

所示。

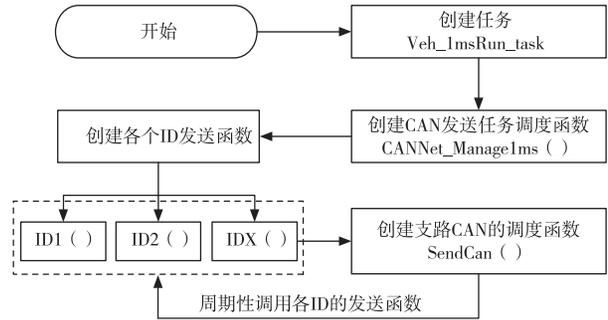


图4 CAN 发送流程

2.4 以太网通讯设计

1) 客户端通讯设计。在嵌入式开发中,客户端主要用于向服务端建立连接,并周期性地向网络中传输数据。所有通讯的建立都是基于 FreeRTOS 操作系统,该操作系统提供一系列的 API 接口函数用来建立连接和发送数据。该网关控制器的开发主要采用 Socket API 接口编程的方法,客户端先确定服务端的 IP 地址和端口号,调用 Socket() 函数创建一个文件描述符,再对文件描述符进行操作,调用 Connect() 函数建立连接,连接成功后即可调用 Write() 函数周期性地向服务端发送数据。客户端通讯流程如图 5 所示。

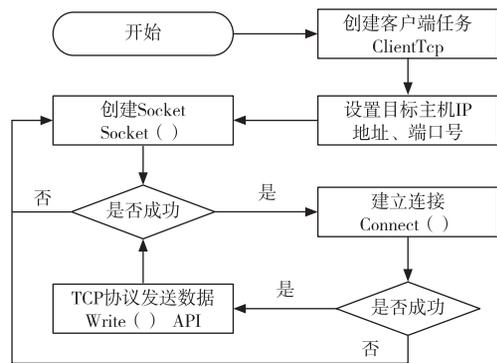


图5 客户端通讯流程

2) 服务端通讯设计。网关控制器作为服务端需同时与多个客户端建立连接,服务端通讯的建立仍采用 Socket API 接口编程的方法。首先创建服务端的任务 vSelectServerTask,调用 Socket() 函数创建文件描述符,并使用 bind() 函数绑定 IP 地址和端口号。由于是服务端,IP 地址的属性设置为 INADDR_ANY

(任意地址)。绑定 IP 地址和端口号后,服务端就处于监听状态,当有客户端请求与服务端建立连接,服务端即调用 `accept()` 函数与客户端建立连接,如果某一客户端已经与服务端建立连接,则不重复建立连接,即连接只能建立一次,建立好连接后,客户端与服务端即可进行数据交互。此外,服务端可同时连接多个客户端,其流程如图 6 所示。

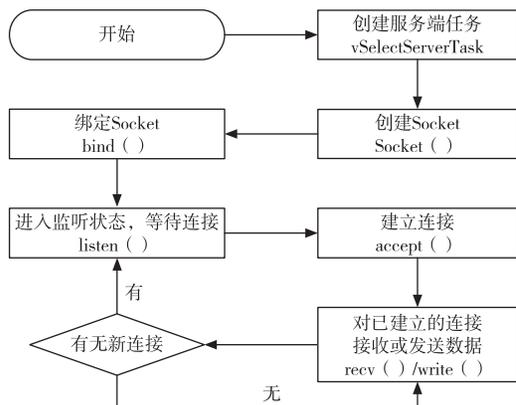


图 6 服务端通讯流程

3 测试验证

3.1 测试环境搭建

为了验证该网关控制器各项功能是否正常,搭建了 HIL 台架测试环境。网关控制器作为网关,通过网线与客户端 1、客户端 2、客户端 3 连接,客户端 1、客户端 2 为笔记本电脑使用网络调试助手模拟;客户端 3 为人机交互域控制器,支持串口调试,因此可通过串口来观测程序运行是否正常。测试环境的原理如图 7 所示。

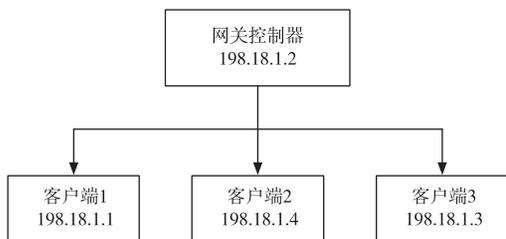


图 7 测试原理

3.2 CAN 通讯测试验证

该网关控制器的每一通道拥有 22 个 CAN 报文接收缓存,可同时接收标准帧和扩展帧,根据使用需

求,配置 15 个扩展帧的缓存通道,7 个标准帧的缓存通道。为验证 CAN 收发功能是否正常,以 CAN1 为例,在 CAN1 上周期性发送一帧报文, ID 为 0x18FC1100。同时使用 CANPro 工具模拟发送报文,扩展帧 ID 为 0x0C09A7F4,标准帧 ID 为 0x215,并且将这两帧报文增加到 CAN1 的 CAN 滤波器中。当网关控制器正常接收到 0x0C09A7F4、0x215 时,报文 0x18FC1100 的第一字节和第二字节都为 1,如果未接收到报文,则为 0。应用 CANPro 采集原始报文,如图 8 所示。

帧ID	周期/s	帧数量	CAN类型	方向	长度	数据
0x18FC1100	0.019	803	7 486	CAN	Rx	8 01 01 00 00 00 00 00
0xC09A7F4		1	826	CAN	Tx	8 11 11 11 11 11 11 00
0x215		688		CAN	Tx	8 22 22 22 22 22 22 00

图 8 CAN 通讯测试结果

分析报文可知,0x18FC1100 的第一字节和第二字节都为 1,表明网关控制器正常接收到了 0x0C09A7F4、0x215 报文。由此验证了网关控制器可正常发送报文,也可正常接收标准帧和扩展帧报文,确认 CAN 通讯功能正常。

3.3 以太网通讯测试验证

网关控制器作为服务端,需同时与多个客户端建立连接,并进行数据交互,因此,需对网关控制器进行组网测试。客户端 1、客户端 2、客户端 3 同时连接网关控制器,客户端 1、客户端 2 为笔记本电脑使用网络调试助手模拟;客户端 3 为人机交互域控制器,支持串口通信。该人机交互域控制器也可同时作为服务器和客户端,作为客户端,主动与网关控制器建立连接;作为服务器,可与网关控制器的客户端任务建立连接。

为验证各客户端与网关控制器的以太网通讯是否正常,设计测试用例进行验证。客户端 1、客户端 2、客户端 3 同时与网关控制器建立连接,如果网关控制器接收到客户端 3 的以太网报文,将该报文转发至客户端 1;如果网关控制器接收到客户端 1 的以太网报文,将该报文转发至客户端 2。网关控制器以 100 ms 为周期给客户端 3 发送报文,客户端 1、客户端 2、

客户端3都以1 000 ms为周期向网关控制器发送报文。通讯连接测试示意图如图9所示。

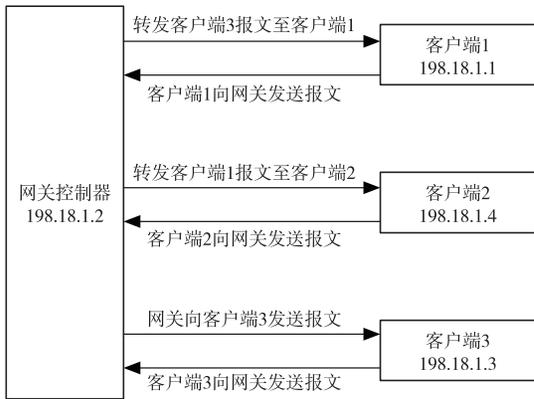


图9 以太网通讯测试示意图

观察网络调试助手窗口,确认网关控制器与各客户端的通讯连接是否合理。

1) 客户端3以1 000 ms为周期向客户端1发送报文,报文内容为“Hello, this is client 3!”。通过观察网络调试助手,可知客户端1可正常接收到客户端3的报文,验证了网关控制器转发客户端3报文至客户端1功能是正常的,如图10所示。



图10 客户端3向客户端1转发结果

2) 客户端1以1 000 ms为周期向客户端2发送报文,报文内容为“Client 1:Hello, client 2!”。通过观察网络调试助手,可知网关控制器可转发客户端1的报文至客户端2,如图11所示。



图11 客户端1向客户端2转发结果

3) 网关控制器作为服务器,同时也可作为客户端与服务器建立连接,并发送数据。网关控制器作为客户端任务以100 ms为周期向客户端3发送数据,报文内容为“ This is a client from gateway...”,观察网络调试助手的结果可知,网关控制器作为客户端时,可与客户端3建立通讯,从而验证了网关控制器同时作为服务端和客户端功能是正常的,如图12所示。



图12 网关控制器与客户端3通讯

4 结束语

本文设计了一款基于SPC584CE70 MCU主芯片的车载以太网网关控制器,有效解决了以太网与CAN网络不能直接进行信息交互的问题。在硬件

上,基于 TJA110x 系列的 PHY 芯片与 NXP SJA1105P 路由芯片的组合实现以太网通讯功能;在软件上,基于 FreeRTOS+LwIP 软件架构,兼顾了硬件资源与运行效率。通过搭建测试台架,将该网关控制器与其他客户端进行以太网组网测试验证。结果表明,该网关控制器可较好地实现以太网与以太网、CAN 网络与以太网、CAN 网络与 CAN 网络之间的信息交互。该网关控制器暂未在样车真实的网络环境中开展通讯速率、网络稳定性等方面的测试,这也是该网关控制器后续研究的重要内容。

参考文献:

- [1] 尹荣彬,陈博,孔祥明. 智能网联汽车车载以太网技术应用研究[J]. 汽车文摘,2019(11):1-5.
- [2] 张宝宝,张友兵,兰建平,等. 基于 LPC1768 的车载以太网网关设计[J]. 湖北汽车工业学院学报,2020,34(4):11-15.
- [3] International Organization Standardization. Road vehicles Diagnostic communication over Internet Protocol (DoIP) Part 2: Transport protocol and network layer services;ISO 13400-2:edition 2[S]. Geneva:International Organization Standardization,2019:18-48.
- [4] 顾春艳. 基于 TLS 的车载以太网诊断通信技术研究与应用[D]. 上海:华东师范大学,2022.
- [5] 王远波,陈姿霖,武萌. 基于 ISO 13400 标准的车载以太网 DOIP 技术应用浅析[J]. 汽车电器,2022(2):31-33.
- [6] 甄海川,牛玉娇,路哲,等. 车载以太网通信开发及应用[J]. 汽车文摘,2022(1):40-44.
- [7] 符丹丹,赵杰,美少楠,等. 基于商用车的车载以太网通信技术应用[J]. 汽车电器,2021(7):34-35.
- [8] 孟祥振,韩坤,李桂虎. 列车车载以太网设备自动化测试系统研究[J]. 控制与信息技术,2021(3):93-98.
- [9] 郑子健,张殿明,丁光林,等. 浅析基于车载以太网的总线拓扑结构[J]. 汽车电器,2016(12):66-68.
- [10] 焦育成,王硕,李长龙,等. 车载以太网网关原型浅析[C]//中国汽车工程学会. 2016 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2016:3.
- [11] 马剑,张炳力,黄振峰,等. 基于车载以太网的专用车架结构设计[J]. 汽车实用技术,2023,48(4):60-64.
- [12] 李坤明. 基于 ARM 和 FreeRTOS 的车用网关系统设计与实现[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [13] 张文亮,田沛,刘晖,等. 基于 FreeRTOS 的 lwip 协议栈的移植与测试[J]. 自动化技术与应用,2015,34(11):25-29.
- [14] 史先传,殷帅,许议元. 基于 LwIP 和 Modbus TCP 协议的网络控制器设计[J]. 自动化与仪表,2023,38(2):19-24.
- [15] 黄岩峰,王天林,刘国安. 基于 LwIP 协议栈和交换机芯片的多网口扩展系统设计[J]. 中国仪器仪表,2021,364(7):19-23.

智能网络化前照车灯控制系统开发

刘风旺^{1,2}, 邹月英^{1,2}, 韩娜³, 许宗岭^{1,2}, 黄成浩^{1,2}, 杨国忠^{1,2}

(1. 中通客车股份有限公司, 山东聊城 252000;

2. 山东省新能源客车安全与节能重点实验室, 山东聊城 252000;

3. 山东省聊城市茌平区贾寨镇人民政府, 山东聊城 252000)

摘要:开发一款基于嵌入式平台的智能网络化前照车灯控制系统,经摄像头和光强检测传感器识别夜间路况,通过 STM32F407 主控芯片与舵机模块控制前照车灯不同强度和不同角度照射,提高智能客车夜间行车的安全性。

关键词:前照灯; 嵌入式平台; 智能网络化; 控制系统

中图分类号:U463.65

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0032-04

Development of Intelligent Networking Headlight Control System

LIU Fengwang^{1,2}, ZOU Yueying^{1,2}, HAN Nan³, XU Zongling^{1,2}, HUANG Chenghao^{1,2}, YANG Guozhong^{1,2}

(1. Zhongtong Bus Co., Ltd., Liaocheng 252000, China;

2. Shandong Key Laboratory of Safety and Energy Saving of New Energy Bus, Liaocheng 252000, China;

3. People's Government of Jiazhai Town, Chiping District, Liaocheng 252000, China)

Abstract: This paper develops an intelligent networking headlight control system based on an embedded platform, which identifies night road conditions through the camera and light intensity detection sensor, controls headlight turning through STM32F407 master chip and steering gear module, realizes different angle changes, and improves the safety of intelligent bus running at night.

Key words: headlight; embedded platform; intelligent networking; control system

前照车灯作为客车的眼睛,对客车白天隧洞行驶、夜间行车、会车等的作用至关重要。随着客车智能网络化不断提升^[1-2],本文在传统客车前照车灯控制的基础上,通过 PC 端网络控制和程序编程对前照车灯的多角度方向进行远程控制。客车行驶中系统内部识别出不同路况并发出不同灯光控制指令,使灯光进行 30°、45°、90°、120°、135°、180°的方向变换,实现灯光的智能网络化控制,以降低驾驶员的疲劳度和发生事故的概率。该控制系统更有助于夜间行车、会车、复杂路况驾驶的安全性,未来可应用于智能客车无人驾驶及自动驾驶。

1 系统组成及功能介绍

本控制系统主要由光强检测模块、摄像头模块、蓝牙模块、稳压模块、主控模块、舵机模块、显示模块组成。其设计核心是基于嵌入式平台通过硬件和软件结合一体化控制^[3-4]。

该系统的光强检测模块用于检测客车周围的光强信号,将光强信号转换为电信号发送至主控模块芯片 STM32F407^[5];摄像头模块将客车行车路线周围数据传递给主控芯片;蓝牙模块用于与移动终端连接,获取行车路线地图,并反馈给主控芯片进行识别;稳压模块通过电路设计保证灯光显示的电压处于稳定状态,防止电压过高损坏线路;主控模块芯片将各

收稿日期:2023-11-13。

第一作者:刘风旺(1996—),男,助理工程师;主要从事客车电气化底盘、传动系统设计与开发工作。E-mail:544047611@qq.com。

模块采集的信息进行识别判断, 发送相应的调节指令至车灯模块; 舵机模块将主控模块发出的调节指令进行识别处理, 通过改变舵机的角度实现灯光不同角度的变化; 显示模块用于接收调节指令, 并根据接收到的调节指令对车灯的照射角度、灯光角度和灯光分裂情况进行实时调节。

该系统网络化是指客车正常运行时, 驾驶员可通过我司 PC 端网络与整车控制器进行数据传输, 经整车控制器与前照车灯的串口通信, 设置相应的参数来调节灯光的照射效果; 同时可通过我司技术中心中央显示屏实时监测系统的各项性能指标是否准确, 若出现故障, 我司相关工作人员可通过远程控制进行指导, 从而实现该系统的智能网络化控制^[6]。

该控制系统解决了客车传统前照大灯视线受阻、视野盲区、灯光分裂的难题, 减少了控制系统的复杂程度和多种线束铺设的走向问题, 非正常路况下通过网络化地图实现了智能客车提前识别提醒以及精准判断的可靠性, 提高了智能客车夜间行车的安全性, 实现了车灯的网络化智能控制。

2 控制系统设计

2.1 系统工作原理

该控制系统是通过路况采集、信息识别、数字转换、指令传输的顺序进行灯光识别照射。在前照车灯的内部安装有四回路舵机, 以控制不同 LED 灯的程度和方向; 控制开关安装在驾驶室控制面板上, 驾驶员可根据个人习惯选择手动模式或自动模式^[7]。同时, 对于自动驾驶或无人驾驶客车, 通过增加远程智能面板来应对会车、行人等突发路况, 从而进行路况识别、判断等相关功能的布置与设计。

控制模块程序初始化后, 控制系统首先判断蓝牙模块是否连接成功, 若连接失败则重新连接; 若连接成功, 则读取移动终端行车地图的信息。其次控制模块主要识别光强检测传感器发送的电流信号^[8]、客车周围的光照情况及客车周围行车路线数据。主控模块基于先前获取的各项信息进行内部识别处理, 对灯光进行各项指令的传输。另外, 通过手机 APP 可以调控主控制器对路况进行判断识别, 保证夜间行车、恶劣天气驾驶的安全性。

2.2 控制系统参数功能

该系统的具体控制对象为前照车灯运行参数, 控制精度要求高, 误差范围在 1~10 ms。系统各控制参数的功能见表 1。

表 1 系统控制参数

控制参数	功能
校准	根据系统识别路况, 自动调节车辆前照灯的亮度和角度
时间	根据相关路况对应前照车灯响应时间
电感	防止输出电流过大, 保障电感电流的纹波
电流	通过搭建恒流辅助电路保证控制系统电流输出稳定

2.3 硬件设计方案

本系统采用 STM32F407 主控芯片, 光强检测模块、摄像头模块、蓝牙模块、稳压模块、舵机模块、主控模块等经相关线束进行连接控制, 显示模块经串口通信进行识别。主控芯片 STM32F407 是 32 位单片机, 其优点是成本低、性能高、损耗小。其基于最新的 ARM Cortex M4 内核, 运行速度提高近百倍, 主频高达 168 M, 具有 512 KB 的 FLASH 以及 196 KB 的 RAM, 支持多种不同的串口。同时 CAN 总线可通过点对点, 一对多, 全局控制多种方式进行传送和接收数据, 实现全分布式多机系统^[9-10]。CAN 总线直接通信距离最远可达 10 km。

该设计方案将外部传感器采集的路况信息通过主控芯片 STM32F407 进行内部处理, 将模拟量转化为数字量进行分析识别控制, 通过 CAN 总线给出车灯显示模组, 前照车灯根据接收到的指令进行不同强度、不同角度的照射, 以此达到智能客车前照车灯 360°智能识别控制。其硬件结构方案如图 1 所示。

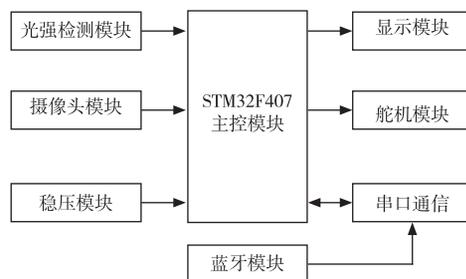


图 1 硬件结构方案

2.4 软件设计方案

该系统软件由 Keil uVision5 和 E4A 软件工具进

行编程设计^[11],通过 E4A 编程申请网络地图密钥,调取网络地图路况信息进行程序处理,并将处理好的信息通过蓝牙模块发送到主控芯片 STM32F407,由其进行识别和内部程序处理,然后将相应的执行命令发送到前车灯模组,继而发出相应的灯光指令,实现前照车灯的智能控制。

系统控制程序首先对主程序进行初始化,然后判断蓝牙是否匹配成功,若匹配成功则进行下一步指令,读取网络地图信息;若匹配失败则返回,重新进行程序初始化;读取到的网络地图路况信息^[12]、光强检测信息、摄像头数据采集信息由 STM32F407 主控芯片进行分析识别处理,若路况信息符合实际路况,则进行下一步指令,分别是通过 OLED 显示相应数据以及实现网络化车灯的自动调节;若路况信息与实际路况不符则返回,重新读取网络地图信息;软件设计方案如图 2 所示。

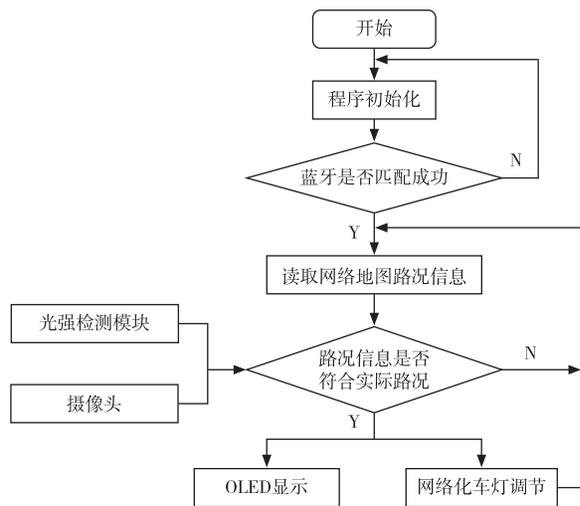


图2 软件设计方案

3 测试验证

3.1 光强测试

实际测试过程中,主控模块发给显示模块相应的灯光指令,传输过程通过程序报文进行指令发送、接收、计算,将需求反馈给电机以控制灯光的角度,根据外界实际状况将灯光强度反馈给大灯进行光强照射。

采集一段夜间行车相对光照强度与波长的关系,如图 3 所示,图中曲线显示在波长相对短的时候光照强度达到顶峰,随着波长的不断增加,中间光强会有

一个起伏的状态,之后光强随着波长的增加不断降低。以此来实现前照车灯在不同光照强度下的智能控制。

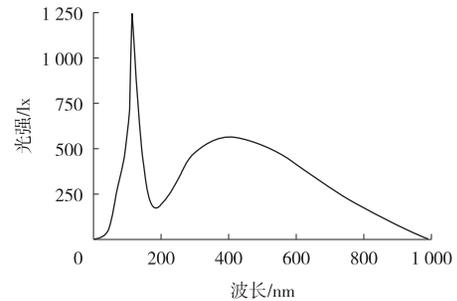


图3 相对光照强度曲线

3.2 调光特性测试

输出电流是整个控制电路能安全稳定运行的核心参数,对输出电流的控制主要是通过程序控制来调节设置相应的参数值。将客车路试采集的多组数据取平均值作为该显示模块的平均输出电流,如图 4 所示,该平均数值能够准确反映前照车灯模组的相应数据。

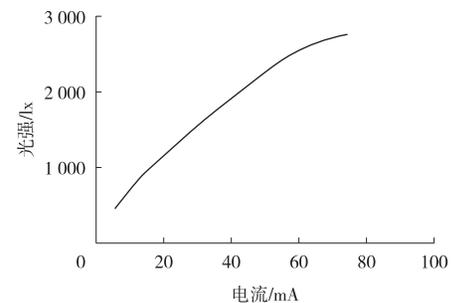


图4 输出电流与光强平均值曲线

由图 4 可知,输出电流与整车相对光照强度的关系符合实际状况,主要表现为随着输出电流的不断增大,前照车灯的光照强度也不断增大。正常状况下前照车灯的光强是稳定不变的,图 4 反映了复杂路况环境下前照车灯所做出的反应。

图 5 是针对行车转弯、灯光分裂、视野盲区等路况时的调光特性曲线。由图 5 可知,随着 PWM(调光亮度)信号百分比(亮度增强的比重)的不断增大,输出电流也不断升高,主要原因是复杂路况下车灯模组需要通过调节 PWM 内部占空比做出快速的反应^[13-14],从而实现从 0%到 100%的亮度调节,且不存在偏色问题,发热较低,更加省电,降低损耗。

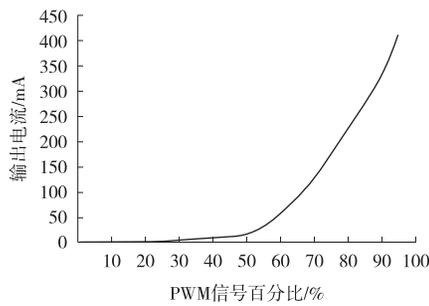


图5 PWM调光特性曲线

4 结束语

本文以智能客车为基础,对其网络化前照车灯进行了开发^[15],对车灯照射角度、灯光亮度和灯光分裂情况进行了改进,采用硬件设计与程序控制对整车大灯模块进行了优化设计,验证了整车灯光性能,提高了智能客车夜间行车的安全性,实现了网络化车灯的智能控制。

参考文献:

- [1] 杨世春,肖赞,夏黎明,等. 自动驾驶汽车平台技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,2020:13-19.
- [2] 许耀华,王文宇,宋文凤. 基于摄像头的无人驾驶车辆的道路检测[J]. 汽车实用技术,2018(4):35-37.
- [3] 哈尔滨融美科技有限公司. 一种基于嵌入式MES数据采集处理装置:202222375539.8[P]. 2023-02-14.
- [4] 刘振东. 基于ARM的嵌入式软硬件系统设计与实现[J]. 信息记录材料,2018,19(4):105-106.
- [5] WANG Renbiao. The design of motor precision positioning system based on STM32 single chip microcomputer[J]. Journal of Physics:Conference Series. 2018,1087(6):1-6.
- [6] 赵金栓. 基于图像信号与无线通信信号融合的室内定位技术分析[J]. 中国新通信,2021,23(11):17-18.
- [7] 杨丽艳,李虹,柏艳红. 基于RTWT的自动控制原理实验设计与实现[J]. 实验技术与管理,2015,32(6):123-126.
- [8] 王鑫. 工业CT探测器光电流信号放大及转换特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [9] 陈支,蒋瑞斌. 新能源汽车CAN总线异常仿真分析及试验验证[J]. 电子器件,2023,46(4):965-972.
- [10] 王悦,张昕. 新能源汽车仪表盘的CAN总线通讯研究[J]. 内燃机与配件,2021(21):22-23.
- [11] 陈卓,孙建军. 基于地图内容特征的网络地图服务分类方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(6):169-171.
- [12] 张益,徐文超,王雷,等. GIS地图在电源规划场景中的应用[J]. 现代科学仪器,2021,38(2):216-221.
- [13] 海纳川海拉(三河)车灯有限公司. 一种基于PWM占空比的电机控制系统:202223154496.7[P]. 2023-08-01.
- [14] 张洁,何文涛,刘亚. 集成多种PWM调制的直流无刷电机控制系统设计[J]. 电子设计工程,2022,30(1):61-65.
- [15] 中通客车股份有限公司. 一种智能客车网络化前照车灯控制系统及方法:202310402695.5[P]. 2023-07-14.

客车正面碰撞安全性仿真分析及结构优化

彭东庆

(厦门金龙旅行车有限公司, 福建 厦门 361022)

摘要:对某客车原结构的正面碰撞安全性能进行有限元仿真分析。根据仿真结果对原结构前部进行增加吸能盒、增强车架强度等优化设计并进行仿真验证。验证结果显示,该优化设计可有效减少车体结构对驾驶员生存空间的侵入。

关键词:客车; 正面碰撞; 生存空间; 结构优化

中图分类号:U462.3*5

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0036-04

Simulation Analysis and Structure Optimization of Coach Front Crash Safety Performance

PENG Dongqing

(Xiamen Golden Dragon Bus Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: The author carries out the finite element simulation analysis on the front crash safety performance of the original structure of a coach. According to the simulation results, the author does the optimization to the original front by adding energy-absorbing boxes and enhancing the frame strength and verifies the effect by simulation. The verification results show that the optimization design can effectively reduce the intrusion of the vehicle body structure into the driver's living space.

Key words: coach; front crash; living space; structure optimization

已有许多学者对汽车碰撞安全性能进行过相关研究。文献[1]对某客车正面碰撞安全进行仿真分析,验证撞击能量管理及碰撞力传递路径优化对提升客车正面碰撞性能的效果;文献[2]以经济型轿车为研究对象,通过车门和B柱的侵入量以及侵入速度评估侧面的耐撞性;文献[3]对汽车整车变形、车身能量、B柱加速度和前围侵入量等进行分析,研究汽车吸能部件对碰撞结果的影响。上述研究主要对整车结构的变形、能量、加速度进行碰撞安全性能分析,未重点考量驾驶员生存空间。

本文通过仿真客车正面碰撞过程中转向系统对驾驶员生存空间的侵入及驾驶员座椅处加速度来评估客车正面碰撞的安全性能,并根据仿真结果提出结

构优化设计方案,同时验证优化方案的有效性。

1 有限元模型的建立及设置

采用 HyperMesh 软件对整车进行有限元建模。车身构件主要采用壳单元进行网格划分,基本尺寸为 10 mm。单元类型以四边形单元为主,三角形单元为辅,将三角形单元比例控制在单元总数的 5% 以下。底盘部件采用体单元建模。焊缝采用节点耦合和刚性连接的方法模拟;螺栓采用刚性单元连接模拟;气囊、减振器采用弹簧单元模拟。整车有限元模型如图 1 所示,共有 1 845 428 个单元、1 815 493 个节点。

另外,参考 JT/T 1178.1—2018《营运货车安全技术条件 第 1 部分:载货汽车》^[4] 标准,建立假人生存

收稿日期:2023-12-14。

第一作者:彭东庆(1974—),男,高级工程师;主要从事客车企业经营管理工作。E-mail:pengdongqing@xmjl.com。

空间模型,模型采用四边形单元进行网格划分,基本尺寸为 50 mm,并根据 R 点位置安装假人。假人位置示意图如图 2 所示

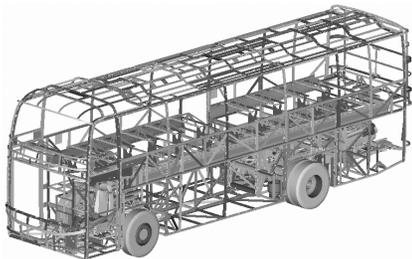


图1 整车有限元模型

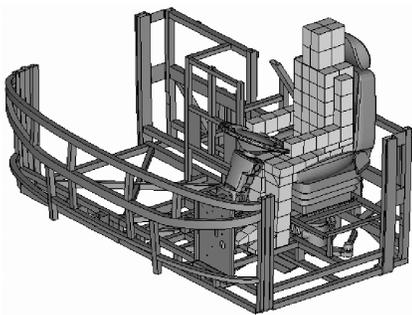


图2 假人位置示意图

仿真分析时对整车施加重力加速度,同时施加行驶方向 30 km/h 的初速度。碰撞仿真中,汽车碰撞从开始接触壁障到完全变形的时长一般为 80~120 ms。碰撞初速度相同时,因客车质量远大于乘用车,碰撞总能量要比乘用车大得多,同时因客车长度大于乘用车,发生完全变形的时间可能会更长,所以参照相关资料^[5],设置计算的终止时间为 120 ms。

2 仿真分析结果

该仿真分析采用 OptiStruct 进行求解计算,采用 HyperGraph 进行能量及加速度曲线的数据处理,采用 HyperView 进行云图分析、提取应力、变形等数据。

2.1 能量分析

整车整备质量 m 为 12.8 t,初始速度 v 为 30 km/h,仿真碰撞总能量 $E = mv^2/2 = 447$ kJ。碰撞过程中能量转化如图 3 所示,总能量基本保持不变,由动能转化为内能的能量变化曲线过渡平滑;整个碰撞过程中,沙漏能和界面能占总能量的百分比较小,因而对结果影响较小。因此,该仿真分析符合能量守恒定律,客

车正面碰撞模拟计算结果可用^[6-8]。

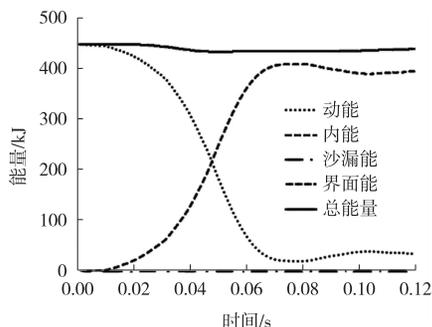


图3 能量曲线图

2.2 加速度分析

由于驾驶员座椅地板处不易发生变形,且与驾驶员最为接近,所以一般用驾驶室座椅地板中心处的加速度来表征驾驶员的加速度。原始状态驾驶员座椅地板中心处最大加速度为 87.1g,加速度随时间变化曲线如图 4 所示。

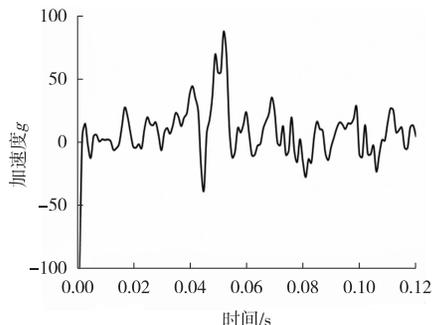


图4 驾驶员座椅地板中心处加速度变化图

2.3 变形分析

正面碰撞变形主要集中在乘客门后立柱前区域,其中前围骨架、前部地板、车架变形严重,多根杆件出现压溃、失稳现象^[9]。碰撞开始 75 ms 时速度降为 0,之后开始反弹。碰撞发生 40 ms 时转向管柱开始侵入假人生存空间,70 ms 时侵入量达到最大值 247 mm,之后开始减小,100 ms 时再次增加,至仿真结束一直保持侵入状态。驾驶舱随时间的变形图如图 5 所示。原始结构状态无法满足 JT/T 1369—2020《客车正面碰撞的乘员保护》^[10]关于“试验过程中和试验后,车辆上部硬度(A)大于 50 的非弹性部件不能与 JT/T 1178.1—2018 附录 C.4 所规定的人体模型接触”的要求,需要对结构进行优化设计。

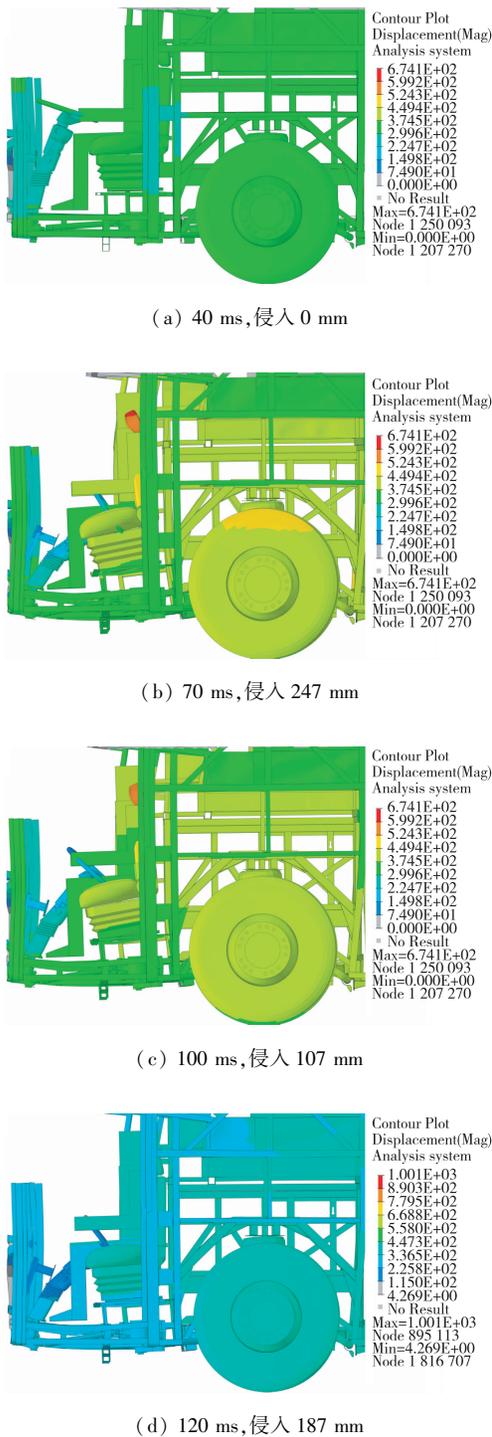


图5 驾驶员驾驶舱变形图

3 结构优化及效果

3.1 优化方案

车体结构优化设计首先要保证乘员拥有足够的生存空间,乘员舱区域主要承载变形的车架要有足够的刚度和强度,以提高前部抵抗变形的能力并保证力

的有效传递,确保乘员舱区域内的部件不对乘员身体造成伤害。同时,前段结构还应为吸能区域,通过变形、断裂等形式在碰撞过程中尽可能多地将动能转化为内能,降低碰撞过程中产生的能量^[11-12]。

具体方案为:①右侧车架增加规格为 60 mm×40 mm×3 mm 的型材与原型材并焊,再增加 40 mm×30 mm×3 mm 斜撑;②前立面型材厚度由 2 mm 增加至 3 mm;③前立面前部再增加 3 mm 厚加强板;④前段纵梁增加 3 mm 厚加强板;⑤在车架前端安装 4 个蜂窝铝吸能盒,提高缓冲吸能特性。结构优化方案如图 6 所示^[13-15]。

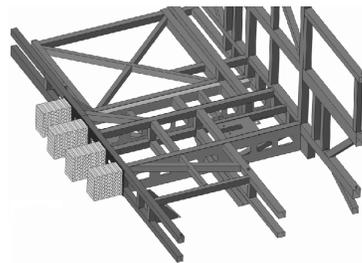


图6 结构优化方案

3.2 优化效果

驾驶员座椅地板中心加速度由优化前的 87.1g 降低至 34.9g,如图 7 所示。优化结构吸能效果良好,合理地将载荷传递至驾驶室后方,有效地降低了对驾驶员的伤害。优化后的驾驶舱随时间变形图如图 8 所示。从图 8 可知,发生碰撞 70 ms 时转向管柱与假人生存空间的距离达到最小值,最小距离在 X 方向为 7.2 mm,随后转向管柱回弹,离开假人生存空间。优化设计后的整个碰撞过程中,车内部件未侵入驾驶员生存空间。

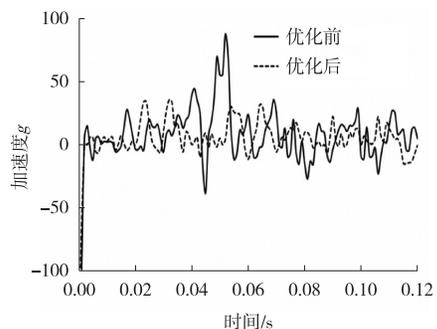
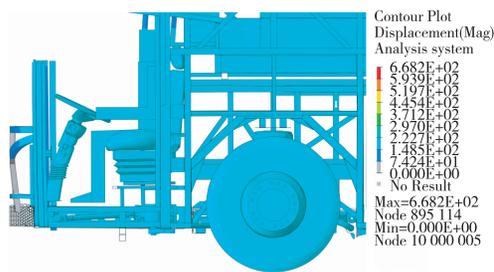
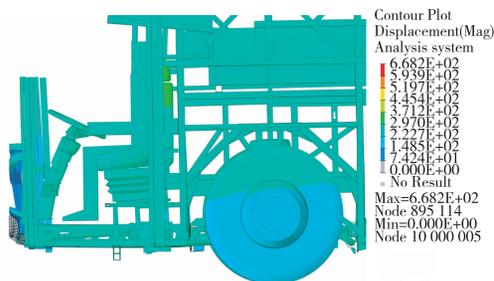


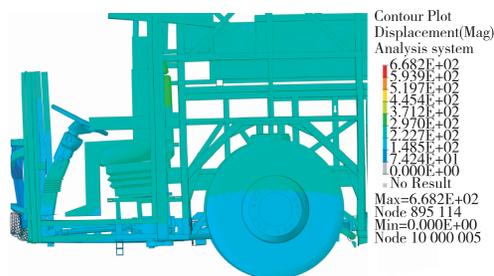
图7 驾驶员座椅地板中心加速度变化对比图



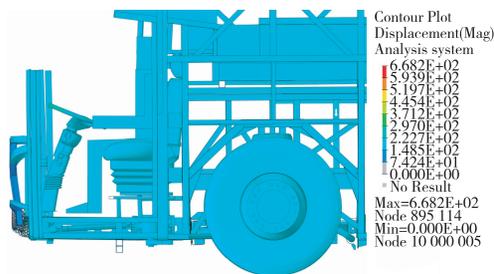
(a) 40 ms, 生存空间余量 43 mm



(b) 70 ms, 生存空间余量 7 mm



(c) 100 ms, 生存空间余量 22 mm



(d) 120 ms, 生存空间余量 41 mm

图8 优化后驾驶员驾驶舱变形图

进一步分析可知,碰撞时蜂窝铝吸能盒优先变形,前段车架变形减弱效果明显。吸能部分吸收的能量为 132 kJ,占总能量的 29.4%。由于蜂窝结构的特殊性,其对于碰撞能量的吸收及压缩变形展现出良好的特性。

4 结束语

对某客车正面碰撞仿真表明:该车正面碰撞过程中驾驶员生存空间遭到侵入,前部结构强度不满足

JT/T 1369—2020《客车正面碰撞的乘员保护》法规要求。根据仿真结果进行结构优化设计,采用蜂窝铝吸能装置可吸收 29.4%的能量,明显降低了驾驶员处的加速度峰值及转向系统对假人生存空间的侵入,证明了优化方案的有效性。

参考文献:

- [1] 彭旺,张雅鑫. 客车正面碰撞仿真分析及性能优化[J]. 客车技术与研究,2019,41(4):9-11.
- [2] 庞通,邓国红,杨鄂川,等. 某乘用车侧面碰撞性能分析及结构优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2013,27(12):22-28.
- [3] 郑何妍,卢耀辉,张德文,等. 汽车正面耐碰撞性有限元仿真分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)2018,32(2):31-37.
- [4] 交通运输部运输服务司. 营运货车安全技术条件 第1部分:载货汽车;JT/T 1178.1—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018:14-15.
- [5] 王煜,汪中传,郭悦. 10.5 m 公路客车正碰仿真分析及改进[J]. 客车技术与研究,2019,41(3):8-11.
- [6] 吴长风,那景新,杨佳宙,等. 客车正面碰撞车身结构耐撞性分析与改进[J]. 客车技术与研究,2018,40(4):4-7.
- [7] 于国飞,黄飞,王海兵. 管内填充对提高客车侧翻强度的研究[J]. 客车技术与研究,2018,40(5):56-59.
- [8] 吴靖. 基于承载式客车的正面碰撞性能仿真研究[J]. 汽车技术,2013(4):37-41.
- [9] 李瑞锋. 某大客车正面碰撞仿真分析及结构优化设计[J]. 机电技术,2016(1):90-92.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 客车正面碰撞的乘员保护: JT/T 1369—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020:1-2.
- [11] 张路,杨志刚,林祥辉. 正面碰撞车身设计基本思路[J]. 时代汽车,2022(16):109-111.
- [12] 司俊德,孟照雨,王铨溥. 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.
- [13] 史爱民,费敬,崔淑娟,等. 某MPV正面碰撞中结构改进优化研究[J]. 汽车工程学报,2019,9(4):294-298.
- [14] 熊辉,方军,胡钊. 基于C-IASI白车身结构正面和侧面碰撞分析与优化[J]. 汽车科技,2023(4):8-12.
- [15] 赵世婧,樊继红,王贞涛. 基于正面碰撞汽车前纵梁结构优化设计分析[J]. 机械设计与制造,2020(12):138-141.

某 10.5 m 客车中段车架结构优化设计

李腾, 闫冬, 朱红军

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:对某 10.5 m 客车中段车架进行优化方案设计、刚强度 CAE 对比分析及方案成本对比。结果表明,优化后的中段车架力学性能有所改善、成本有所降低。

关键词:客车车架; 中段车架; 结构优化设计

中图分类号:U469.72; U463.83⁺1 文献标志码:A 文章编号:1006-3331(2024)02-0040-04

Optimization Design of the Middle Frame of a 10.5 m Bus

LI Teng, YAN Dong, ZHU Hongjun

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The authors carry out the optimization scheme design, the CAE comparative analysis of stiffness and strength, and the comparison of scheme cost for the middle section frame of a 10.5 m bus. The results show that the mechanical properties of the optimized middle section frame are improved, and the cost is reduced somewhat.

Key words: bus frame; middle frame; structure optimization design

车架是客车主要的承载基体^[1-5],其中中段车架连接车架的前后桥段,并且承担主要的承载作用^[6-7]。我司某 10.5 m 一级踏步车型中段结构使用物料数量多,结构复杂,焊缝条数多,加工时间长且易产生漏焊问题。因此,本文基于整车结构刚强度,考虑加工工艺及制造成本等因素,对中段车架进行优化设计。

1 中段车架的优化设计

对原结构进行优化,需尽量减少对其他总成的影响,满足原有结构约束条件要求。如:不改变中段各侧横梁之间间距;保留纵梁间间距尺寸;保留中门前横梁带坡度设计,不影响整车布置等。

原中段车架高度为 140 mm,采用 40 mm+40 mm 双层梁,中间 60 mm 空间用于线束及管路布置,如图 1 所示。针对原结构存在的不足,考虑使用大规格矩形钢和槽型钢两种单层梁结构优化方案。

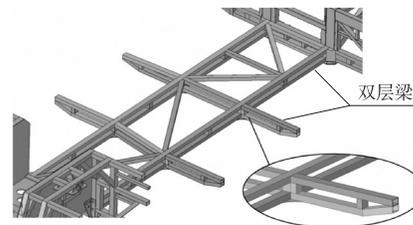


图 1 原结构三维图

1.1 优化方案一

采用大规格单层矩形钢代替原双层梁结构。选用成熟的型材物料尺寸为 120 mm×60 mm×3 mm 的 Q700 高强度钢作主纵梁及侧横梁;型材 120 面开有椭圆形过线孔并嵌入 3 mm 厚套筒,便于布置线束和管路的走向,同时不改变各侧横梁间间距及纵梁间间距;中段整体与前、后桥搭接位置做结构加强处理。

两主纵梁间的横梁采用双层 60 mm×30 mm×3 mm 型材布置,横梁与两纵梁间布置有 40 mm×40 mm×2 mm 的斜撑,纵梁与横梁搭接位置下方布置 4 mm 厚加强板进行局部加强;侧横梁端口下方开斜切口与

收稿日期:2023-09-05。

第一作者:李腾(1991—),男,硕士;助理工程师;主要从事新能源客车车架结构设计与研究工作。E-mail:1569950177@qq.com。

侧围进行搭接, 如图 2 所示。

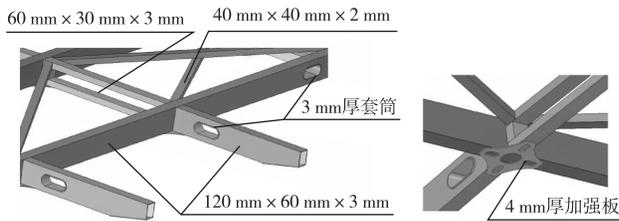


图 2 单层矩形钢方案及局部位置结构

1.2 优化方案二

采用槽型钢代替原双层梁结构。为避免不必要的结构更改, 槽型钢方案与原结构采用相同高度 140 mm, 上下翼面按高宽比接近 3 : 1 设计, 即翼面宽度设计为 50 mm。因此, 主纵梁及横梁设计为 140 mm x 50 mm 槽钢, 厚度 4 mm, 槽型钢腹面开有过线孔便于布置线束和管路的走向, 同时不改变各侧横梁间间距及纵梁间间距; 中段整体与前、后桥搭接位置做结构加强处理。

两纵梁间除有槽型钢横梁外, 靠纵梁上翼面布置有 40 mm x 40 mm x 2 mm 的斜撑; 斜撑、槽型钢横梁与主纵梁开口方向的搭接均采用斜撑、槽型钢横梁开口方式; 横梁与主纵梁搭接点上下位置均布置 4 mm 厚加强板进行局部加强。

原结构侧横梁与侧围连接处采用斜撑方式收口, 槽型钢方案采用调整槽型钢下翼面, 线性变化方式缩小截面尺寸, 中门前侧横梁则采用上下翼面线性变化方式缩小截面尺寸处理, 结构如图 3 所示。

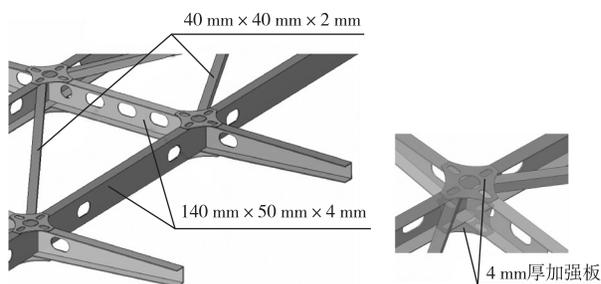


图 3 槽型钢方案及局部位置结构

2 优化方案对比分析

2.1 质量及结构对比

对上述两种优化方案及原结构进行质量计算: 方案一为 175.4 kg, 方案二为 164.7 kg, 原结构为 187.7

kg, 即方案一减轻了 12.3 kg, 方案二减轻了 23 kg。

另外, 方案二相对方案一及原结构存在如下问题:

- 1) 槽型横梁与主纵梁搭接位置上表面布置的 4 mm 横梁影响中段地板铺装。
- 2) 过线孔布置可满足线束和管路走向布置, 但无法满足部分客户要求制动铜管平铺布置的要求。

2.2 强度对比分析

建立如图 4 所示的整车骨架有限元模型, 分别对中段车架原结构、优化方案一和方案二进行整车强度对比分析。

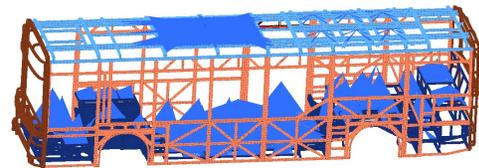
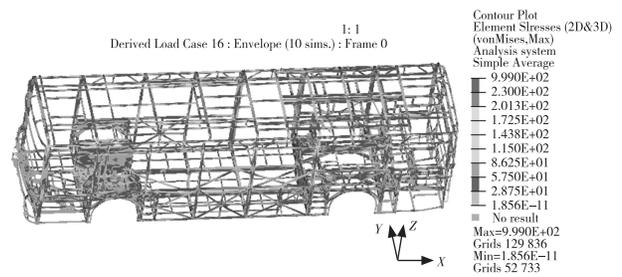


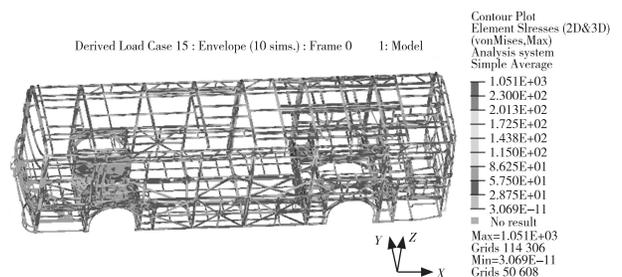
图 4 整车骨架有限元模型

基于整车强度工况对上述 3 种方案的整车骨架进行应力分析, 重点对标中段车架的应力差异。

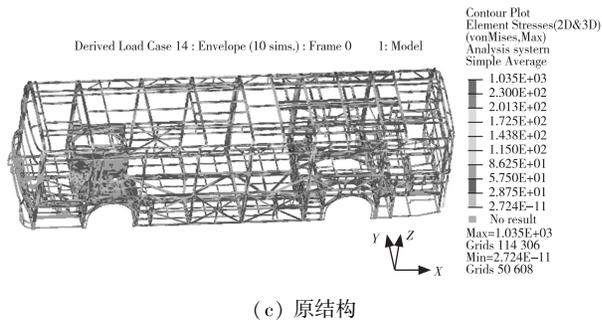
从图 5 中各方案的综合应力结果来看, 除中段车架外, 各方案骨架其余部位的应力均保持高度一致, 最大应力均出现在中门上横梁处, 方案一为 224.4 MPa, 方案二为 222.7 MPa, 原结构为 205.3 MPa。说明中段车架的方案变更对骨架其余部位的影响较小。



(a) 方案一



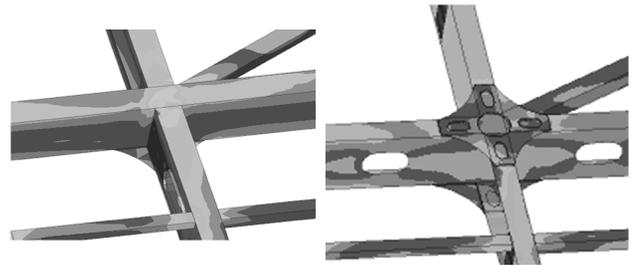
(b) 方案二



(c) 原结构

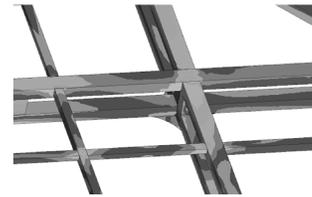
图5 各状态的整车强度分析结果应力云图

从中段车架的具体对比来看,方案二横梁在上层标记处存在明显的局部较高应力,位于槽型钢边缘(如图6和图7所示),且该处应力易受焊接影响;从图8和图9所示的中段车架下层结果来看,方案一和方案二相比原结构在图示位置的应力明显降低,强度更好。3种方案最大应力均出现在中门前横梁下表面位置,方案一为159.6 MPa,方案二为198.8 MPa,原结构为293.9 MPa。综上,方案一的整体应力状况更好。



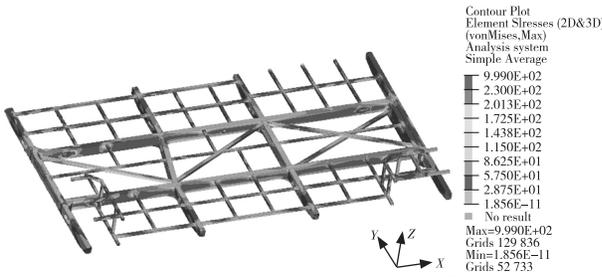
(a) 方案一

(b) 方案二

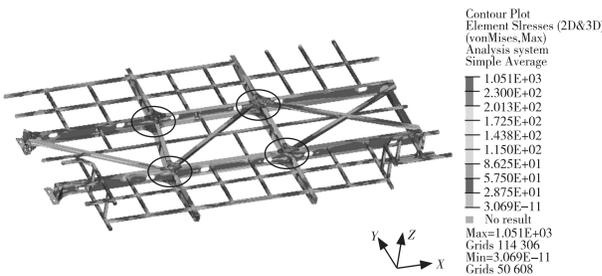


(c) 原结构

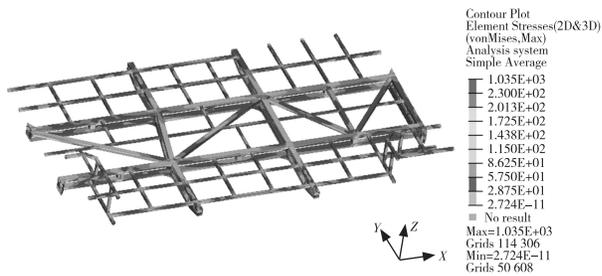
图7 中段车架上层各方案局部应力云图



(a) 方案一

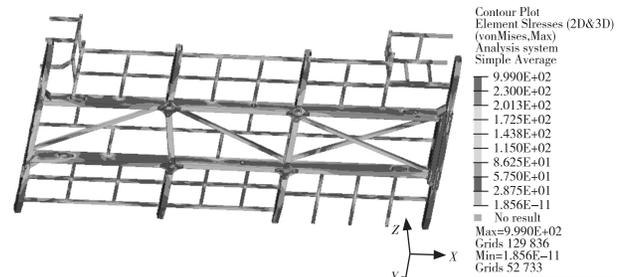


(b) 方案二

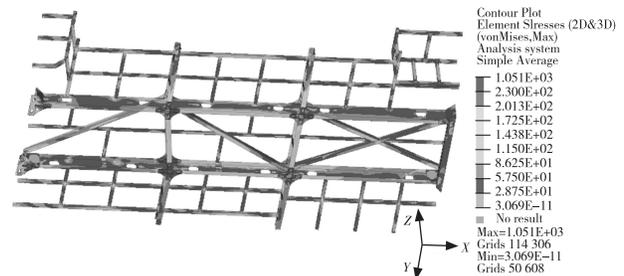


(c) 原结构

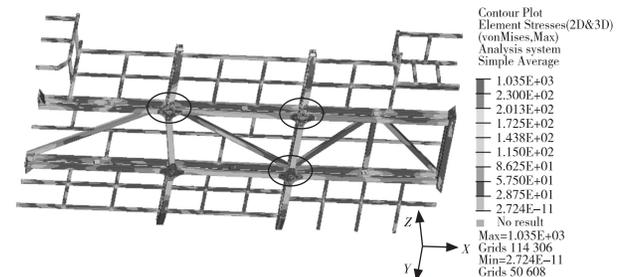
图6 中段车架上层各方案综合应力对比



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 原结构

图8 中段车架下层各方案综合应力对比

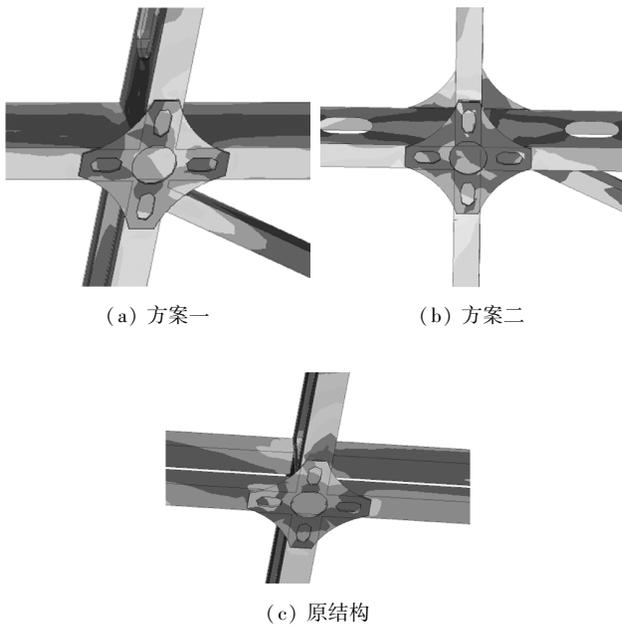


图 9 中段车架下层各方案局部应力云图

2.3 刚度对比分析

弯曲刚度、扭转刚度、一阶扭转模态频率是评价客车骨架的关键性能指标^[8-11]。利用 2.2 节中的整车骨架有限元模型,分别对上述 3 种方案的整车骨架进行自由模态、整体扭转刚度和整体弯曲刚度分析,对比见表 1。

表 1 整车骨架基础刚度性能对比

方案	弯曲刚度/ (N·mm ⁻¹)	扭转刚度/ (Nm·deg ⁻¹)	一阶扭转 模态/Hz	一阶纵向弯曲 模态/Hz
原结构	2 787	27 364	8.7	14.9
方案一	3 163	28 100	8.8	14.9
方案二	3 082	27 075	8.7	14.9

从上述数据来看,方案一和方案二的整体刚度性能较原结构均得到一定提升,其中方案一整体刚度性能更高。整体弯扭刚度的提升有助于减少骨架疲劳、异响及其他潜在未知问题发生的可能性。

2.4 成本对比分析

2.4.1 中段车架原材料成本对比分析

3 种方案的中段车架原材料成本见表 2。从表 2 可以看出:

- 1) 方案一的材料成本比原结构的材料成本少 106.6 元/辆。
- 2) 方案二因 510L 材质槽型钢单价较高,导致其

比原结构轻 23 kg 情况下材料整体成本与原结构接近。

表 2 中段车架原材料成本对比

材质	单价/ 元	原结构		方案一		方案二	
		重量/ kg	价格/ 元	重量/ kg	价格/ 元	重量/ kg	价格/ 元
Q700	7.7	168.2	1 301.9	148.4	1 148.6	51.8	400.9
Q355	6.2	19.5	121.3	27	167.9	26.9	167.3
510L	10	0	0	0	0	86	860
合计	/	187.7	1 423.2	175.4	1 316.6	164.7	1 428.3

2.4.2 中段车架制造成本对比分析

3 种方案的中段车架加工时间见表 3。

表 3 中段车架加工时间对比

方案	焊缝长度/mm	焊接工时/h	加工工时/h	工时合计/h
原结构	29 230	16.23	0	16.23
方案一	29 240	16.24	0	16.24
方案二	15 000	8.33	6	14.33

需要说明的是:

- 1) 加工工时是指单层梁状态下过线孔物料的加工时间,方案二中过线孔在原材料购买中已完成开孔,故不重复进行计算。
- 2) 方案一的加工时间比原结构的加工时间少 1.9 h/辆;方案二的加工时间与原结构接近。

综上所述,方案一为某 10.5 m 一级踏步车型中段车架结构的优化方案。

3 结束语

本文通过优化方案设计、刚强度 CAE 对比分析及方案成本对比等,在不降低整车刚强度情况下实现中段车架的优化设计,为后续整车骨架结构的优化设计提供参考。

参考文献:

[1] 鲁春艳, 万长东, 田菲. 巴哈赛车车架多目标拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(10): 66-70.
 [2] 陈家瑞. 汽车构造: 下册: 第 3 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 161.

基于 RAMSIS 仿真的客车改宿营车人机改进工效评估

庞茜月, 熊乐

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:为保证客车改宿营车的设计符合人机工效要求,本文基于 RAMSIS 分析工具,对客车改宿营车设计方案中的人机尺寸、舒适性、视野、可触及性进行人机工效评估,为客车改宿营车设计方案的筛选和改进提供有效手段。

关键词:人机工程; 客车改宿营车; RAMSIS 仿真; 工效评估

中图分类号:U462.2⁺5

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0044-06

Ergonomics Improvement Evaluation of Modified Camping Vehicle Based on RAMSIS Simulation

PANG Qianyue, XIONG Le

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: To ensure the design of camper buses derived from coaches according with ergonomic requirements, this paper conducts the ergonomic evaluation for the design scheme of camper buses derived from coaches based on the RAMSIS analytical tool. The evaluation items include human dimensions, comfort, visibility, and accessibility of the design scheme, which provides effective means for screening and improving the design scheme of camper buses derived from coaches.

Key words: ergonomic engineering; bus derived from coach; RAMSIS simulation; ergonomics evaluation

客车改宿营车是在公路客车的基础上针对特殊使用定制开发的。在行驶状态下,其车内相关驾驶操作及功能与一般客车一致,驾乘舒适性、操作性、可视性等人机工效要求也与一般公路客车一致。但在宿营状态下,其通过两侧拓展机构增大车内活动空间,同时将原有座椅翻转变为可休息的铺位,实现了车内功能的转换。车内功能的转换意味着车内人机工效要求的增加,首先是乘客区操作性要求增加,例如 USB 充电口的位置设置需要兼顾坐乘与躺卧两种姿势下的操作便利性。其次是乘客区舒适性要求增加,为实现躺卧功能,车内座椅背面需要提供躺卧的睡垫,这侵占了坐乘空间,在不减少载客量的情况下其坐乘舒适性设计难度增大。同时在座椅位置不动的情况下,座椅翻转后还要满足同等数量乘客躺卧的舒

适性要求,座椅选型及布置难度加大。最后是活动空间要求提高,座椅翻转后,通道不仅是行走通道,还是乘客坐于床尾时的容腿空间,存在腿部侵占通道空间情况,车内通道设计难度增加。所以为更好兼顾不同状态需求,提高设计方案质量,应在设计阶段就通过 JACK^[1]、RAMSIS^[2]等虚拟仿真软件进行方案评估及改进。本文基于 RAMSIS 建立宿营车人机工效仿真评估方法,并识别车内布置设计存在的缺陷,为进一步改进设计提供建议。

1 基于 RAMSIS 的人机分析流程

运用 RAMSIS 进行人机工程分析,其主要流程如图 1 所示。

收稿日期:2023-09-18。

第一作者:庞茜月(1997—),女,硕士;助理工程师;主要从事人机工程分析研究。E-mail:957641369@qq.com。

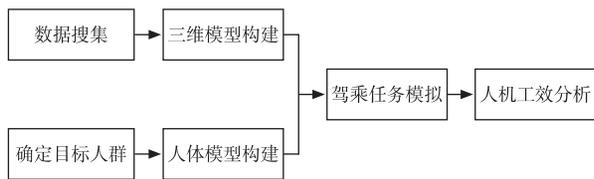


图 1 RAMSIS 分析流程

1.1 数据搜集及三维模型构建

首先需要根据设计方案确定内饰相关数据,并对不同方案的二维 CAD 文件进行搜集,以获取后续三维建模所需尺寸。若无完整的二维 CAD 文件,则可对关键尺寸进行搜集,以满足构建简易模型要求及人机工程分析需要。

然后基于所搜集到的数据,利用 CATIA 软件进行三维模型的构建,如图 2 所示。模型中需包含必须的分析部件以及相关辅助信息,如座椅调节范围、R 点位置等,以满足分析过程需要。

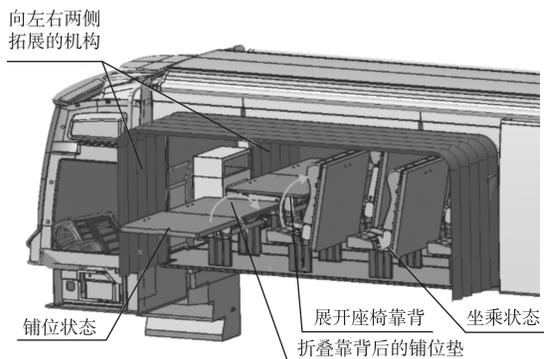


图 2 宿营车内饰三维模型

1.2 确定目标人群及人体模型构建

根据产品定位,确定本宿营车所面向的使用群体为军人,且男性占大多数。所以在 RAMSIS 中构建的三维人体数字模型,可参考相关的军用标准 GJB 2873—97^[3]和 GJB/Z 131—2002^[4]中给出的人体测量数据。最终建立了 5 百分位(P5)、50 百分位(P50)、95 百分位(P95)男性假人模型。

1.3 驾乘任务模拟

驾乘任务的模拟是基于 RAMSIS 姿势计算实现的,需要通过确定数字人体模型关键点与三维模型间的约束关系,来完成驾乘任务的仿真模拟。不同工况下的姿势约束关系如下:

1) 驾驶姿势。在 RAMSIS 中,将建立好的不同

百分位人体模型进行关键节点约束,RAMSIS 根据指定的约束运算匹配最佳操作姿势。通常驾驶操作的约束关系为:人体模型 H 点与座椅设计行程框;右脚踏点与搁脚板平面;右脚踏点与踏板平面;左脚踵点与地板平面;左右手抓握点与方向盘曲面;双手抓握姿势^[5]。除正常坐姿驾驶姿势外,还需要选取较频繁操作的踩踏踏板姿势进行分析,即在上述约束关系中更改右脚踏点约束,将右脚踏点约束到踏板行程最终位置平面上。

2) 乘坐姿势。乘坐姿势是乘客在乘坐过程中长时间保持的姿势。本文乘客座椅的前后位置及座垫高度不可调节,只可调整靠背角度,所以乘客乘坐姿势约束关系为:人体模型 H 点约束在座椅设计的 R 点上;右脚约束在地板平面上;左脚也约束在地板平面上;左右手前臂约束在座椅扶手上表面。

1.4 人机工效分析

驾乘姿势模拟好后需要确定人机工效分析评估要素,以开展人机工效分析工作。评估要素的选择取决于评估需求,文献[6]从舒适性、视野和可触及性三个方面对除雪车车内进行人机工效评估。文献[7]从作业空间设计、储物空间设计、进门设计及空间环境等方面对 BRT 车内空间人机工效进行了探讨。文献[8]从可达性、可视性和舒适性三个方面对商务车驾驶舒适性进行分析。文献[9]以人机尺寸、舒适性、可达性和视野作为高速列车驾驶界面评估要素。综合上述文献,本文将宿营车车内人机工效评估要素分为 4 项,详见表 1。

表 1 宿营车驾驶室评估要素

评估要素	具体内容
作业空间	尺寸设计、活动空间
舒适性	关节角度舒适性、脊柱舒适性
视野	间接视野、仪表视野、眩目
可触及性	左右手可达性

2 实例分析

按照前文所述 RAMSIS 虚拟仿真评估流程,以某型号宿营车设计方案为例,根据评估要素设定,对其

作业空间、舒适性、视野、可触及性进行人机工效评估。

2.1 作业空间分析

2.1.1 尺寸设计分析

GB 13094—2017^[10]、GB/T 13053—2008^[11]是我国关于客车设计标准,规定了大量的车内作业空间尺寸设计要求。本文也以 GB 13094 和 GB/T 13053 标准为依据,分析评估方案是否符合标准要求。表 2 为部分关键尺寸评估结果。

表 2 宿营车部分人机尺寸评估结果

尺寸参数	推荐范围	校核结论
行车制动踏板中心至方向盘中心距离/mm	70~180	符合
加速踏板中心至行车制动踏板中心距离/mm	110~160	符合
加速踏板中心至右侧最近障碍物距离/mm	≥60	符合
驾驶员座椅 R 点至踵点垂直距离/mm	405~508	符合
驾驶员座椅 R 点至踵点水平距离/mm	525~785	符合
驾驶员座椅前后调节量/mm	≥200	符合
驾驶员座椅上下调节量/mm	60~100	符合
方向盘下缘与座椅极限高度位置的上表面距离/mm	180~240	符合
方向盘外缘至驾驶员椅靠背表面的最小水平距离/mm	350~380	超出范围
方向盘直径/mm	400~550	符合
方向盘握把直径/mm	20~50	符合
乘客座椅高度/mm	≥100, ≤500	符合
乘客座椅间距/mm	≥650	符合
挡板后座椅前部空间/mm	≥280	符合
车内通道宽度/mm	≥350	符合
车内通道高度/mm	≥1 800	符合

该方案仅方向盘外缘至驾驶员座椅靠背表面的最小水平距离超出推荐标准。考虑由于座椅前后可调,此单项标准不符对于驾驶室整体设计方案影响不大,所以该方案在尺寸设计上基本符合人机尺寸要求。

2.1.2 活动空间分析

活动空间分析主要检查是否有足够的空间保证驾驶员正常驾驶活动及乘客各种车内活动。

客车驾驶区内空高和头顶空间充足,所以重点关注驾驶员腿部活动空间,保证驾驶过程中腿部不与仪表台发生干涉。在 RAMSIS 中,对不同百分位人体模型在驾驶状态下的腿部空间进行仿真评估,仿真结果为不同百分位人体腿部至仪表台表面距离均有 149 mm 以上。因此,该驾驶室设计提供了良好的腿部活动空间,驾驶区空间满足相关人机工效需求。

对于乘客区,乘坐状态下的活动空间与普通客车相同,在满足相关标准的要求下均可为乘客提供较为充足的活动空间。所以重点关宿营车在宿营状态时的活动空间。宿营状态下车内两侧扩展机构展开为车内增加了活动空间,保证了车内通道宽度不变,从而不影响车内通道通过性。座椅翻转为铺位后,铺位上表面到车身拓展机构内部上表面距离为 1 007 mm,可以满足 95%使用人群不会碰头,活动空间较为充足。双人铺位宽度 900 mm,结合人体肩宽尺寸以及穿衣、活动余量来看,铺位宽度能满足宿营基本需求,但略显拥挤。

2.2 驾乘舒适性分析

2.2.1 关节角度舒适性评估

驾乘舒适性与驾乘姿势息息相关,表 3 为常用的客车驾驶员舒适关节角度范围和乘客坐姿舒适关节角度范围参考值^[12-13]。

表 3 驾乘舒适关节角度数值范围 (°)

关节角度名称	乘客	驾驶员
躯干后倾角 α_1	10~20	3~20
躯干与大腿中心线夹角 α_2	90~115	90~115
大腿中心线与小腿中心线夹角 α_3	100~120	95~135
小腿中心线与脚底平面夹角 α_4	85~95	78~105
躯干与上臂夹角 α_5	/	0~50
前臂与上臂夹角 α_6	/	80~130

RAMSIS 拥有乘坐姿势自动计算功能,只需建立好人体模型约束关系,即可进行约束要求下人体模型最佳姿势的计算与调节。根据前文定义的不同工况下人体模型约束关系,在 RAMSIS 中创建相关约束关系并自动计算出对应的最佳驾乘姿势。在软件中提取最佳驾乘姿势的相关关节角度值,具体结果见表 4 和表 5。

表 4 各百分位驾驶员不同驾驶状态对应的关节角度 (°)

关节角度 名称	正常驾驶坐姿			踩踏油门姿势		
	P5	P50	P95	P5	P50	P95
α_1	5.4	10.15	10.43	3.75	9.7	10.19
α_2	101.52	103.99	101.5	101.6	105.34	103.04
α_3	121.14	119.52	118.04	127.19	125.41	123.75
α_4	78.86	79.28	79.51	93.03	93.39	93.84
α_5	25.78	26.21	27.62	26.23	25.81	27.32
α_6	135.95	141.29	144.36	134.48	140.31	143.64

表 5 各百分位乘客坐姿对应关节角度 (°)

关节角度名称	P5	P50	P95
α_1	15.63	17.74	20.42
α_2	105.96	105.75	104.89
α_3	93	92.05	89.77
α_4	89.92	90.83	91.13

其中, 驾驶员 α_6 略高于规定的舒适关节角度范围, 其他关节角度均在舒适关节角度范围内, 驾驶姿势整体较为舒适。由于座椅靠背可调, 乘客 α_1 和 α_2 可在舒适角度范围内变化, 其他关节角度也均在舒适角度范围内, 乘坐姿势整体较为舒适。

2.2.2 身体各部位舒适度评估

利用 RAMSIS 软件的 Discomfort Assessment 工具可查看当前姿势的身体各部位舒适度。RAMSIS 软件的舒适性评价项目包括整体不舒适值、身体各部位不舒适值和脊柱健康指数。这些评价指标分数范围为 0 到 8 分, 通常以 2.5 和 5.5 对分值范围进行划分, 小于 2.5 表示舒适度高, 2.5 和 5.5 之间是可接受, 大于 5.5 表示非常不舒适甚至损害健康。表 6 为不同百分位人体模型正常驾驶坐姿以及踩踏油门姿势的舒适度数据。

评价结果表明, 当前驾驶室布置下的驾驶坐姿舒适性以及油门踩踏舒适性均在中等可接受水平, 舒适性达标。对比同一百分位人体模型在驾驶坐姿与踩踏油门姿势下的不舒适性值发现, 踩踏油门姿势的舒适性更好, 即不舒适度值更小, 因为油门踩踏频率高、踩踏姿势保持时间长, 所以当前设计方案的评估结果

为较合理。

表 6 各百分位驾驶员不同驾驶状态舒适性评价

评价项目	正常驾驶坐姿			踩踏油门姿势		
	P5	P50	P95	P5	P50	P95
整体疲劳值	3.1	3.4	3.5	3.0	3.3	3.5
整体不舒适值	3.9	4.4	4.6	3.7	4.4	4.5
颈部不舒适值	2.7	2.9	3.1	2.6	2.9	3.1
肩部不舒适值	2.6	2.8	2.9	2.4	2.7	2.8
背部不舒适值	2.2	2.5	2.6	2.1	2.5	2.6
臀部不舒适值	1.3	1.7	1.8	1.2	1.8	1.8
左腿不舒适值	2.2	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6
右腿不舒适值	2.1	2.4	2.6	1.7	2.0	2.1
左臂不舒适值	2.8	3.0	3.1	2.7	2.9	3.0
右臂不舒适值	2.3	2.5	2.7	2.1	2.4	2.6
脊柱健康指数	4.6	4.7	4.7	4.6	4.7	4.7

表 7 为不同百分位乘客乘坐姿势的舒适度数据。评价结果表明, 当前座椅布置下乘客的坐姿舒适性在较高水平, 舒适性达标。

表 7 各百分位乘客坐姿舒适性评价

评价项目	P5	P50	P95
疲劳值	2.3	2.2	2.1
不舒服值	3.1	3.0	2.8
肩部不舒适值	1.6	1.7	1.6
背部不舒适值	1.7	1.6	1.6
臀部不舒适值	1.7	1.4	1.3
左腿不舒适值	1.4	1.5	1.3
右腿不舒适值	1.7	1.5	1.5
左臂不舒适值	1.7	1.5	1.5
右臂不舒适值	1.8	1.8	1.6
肩部不舒适值	1.7	1.8	1.6
脊柱健康指数	6.5	6.4	6.5

2.3 驾驶员视野分析

驾驶员在驾驶过程中的直接视野、间接视野等有标准要求^[14]。在 RAMSIS 中对后视镜进行间接视野校核, 如图 3 所示, 后视镜视野满足标准要求。

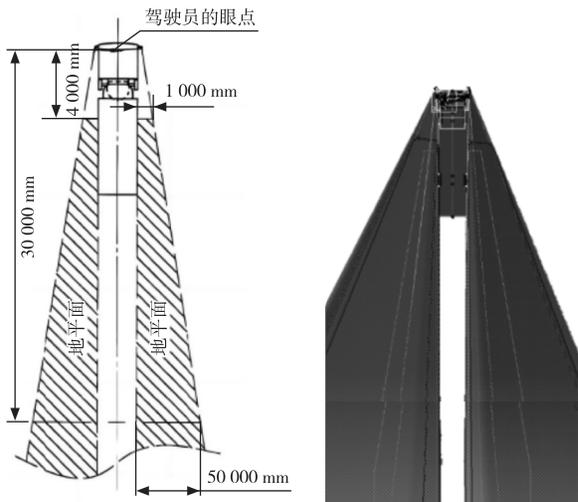
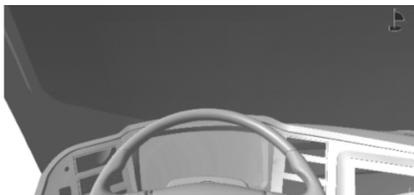
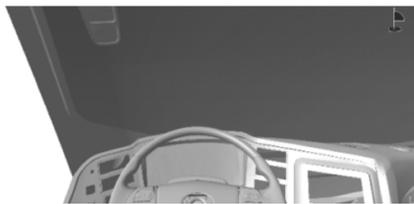


图3 外后视镜视野

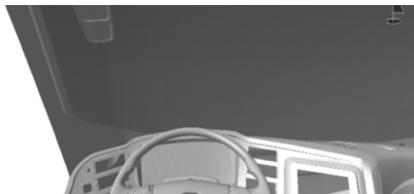
仪表板是驾驶员了解车辆当前状态的重要部件,影响行车安全。要保证仪表板展示的重要信息在行车过程中不被遮挡,在RAMSIS中校核了方向盘与转向柱对仪表盘的遮挡情况,转向柱对仪表板略有遮挡,但并未遮挡重要信息,满足行车要求,如图4所示。



(a) P5



(b) P50



(c) P95

图4 方向盘遮挡视野情况

最后是驾驶室的反光及眩目校核。通过RAMSIS校核发现,组合仪表发光物件在前侧窗存在眩目情

况,但眩目区域并未在驾驶员通过侧窗观察外后视镜区域(如图5所示),不影响驾驶员驾驶安全。



图5 侧窗眩目校核

2.4 可触及性分析

驾驶过程中,操纵器是驾驶员控制车辆的重要交互部件,所以保证重要操纵器的可触及性极为重要。运用RAMSIS软件生成P5人体模型的可触及范围,以极限法校核重要部件、使用频繁部件、应急操作部件等是否在可触及、易触及范围内。

图6为P5人体模型保持躯干不动时左右手可伸及的RAMSIS仿真界面,满足P5人群即可满足95%人群的可触及要求。由图可知方向盘及左手副台大部分均在可触及范围内,即主要操纵器均在伸及域范围内,满足操作需求。

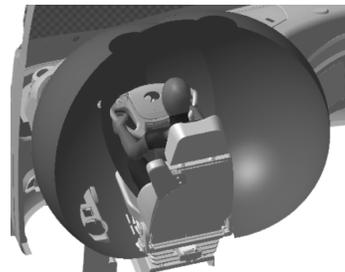


图6 P5驾驶员躯干不动时的可触及性分析

图7为P5人体模型躯干可动时左右手可伸及的RAMSIS仿真界面。由图可知,仪表台可操作部分均在可触及范围内,满足操作需求。

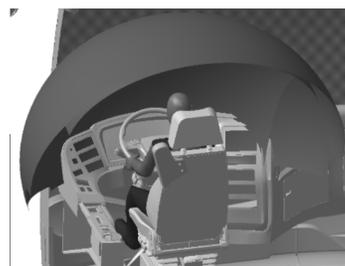


图7 P5驾驶员躯干可触及性分析

对于乘客来说,在乘坐过程中的操作主要为坐姿下的座椅调节、USB充电、空调调节等。图8为P5人体模型躯干可动时左右手可伸及的RAMSIS仿真界面。由图可知,相关所需操作设备均在可触及范围内,满足操作需求。



图8 P5乘客坐姿状态的可触及性分析

其次是在站姿状态下,在行李架上拿取行李是否便捷。图9为P5人体模型站姿状态下左右手可伸及的仿真界面。由图可知,行李架前端在P5人体可触及范围内,基本能够满足P5人群行李取放需求。

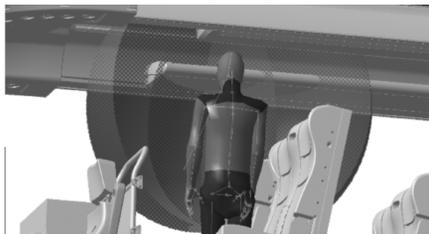


图9 P5乘客站姿状态的可触及性分析

3 结束语

宿营车驾乘舒适性是宿营车设计的重要内容之一。本文基于三维数字模型和虚拟仿真技术,建立了宿营车车内虚拟仿真人机工效分析方法,运用RAMSIS进行虚拟仿真,将仿真数据与相关国家标准对比,并将仿真结果用于宿营车车内人机工效评估,为宿营车驾驶室设计方案的筛选和改进提供有效手段。

参考文献:

- [1] 苏胜,王晗宇,史雪瑞.基于JACK的某型火箭炮乘员舱设计仿真与人机工程分析[J].火炮发射与控制学报,2018,39(3):47-51.
- [2] 程小彪,杨志刚,周振福,等.基于Ramsis软件的轿车上下车过程动态仿真[J].机床与液压,2013,41(18):130-135.
- [3] 航空工业总公司.军事装备和设施的人机工程设计准则:GJB 2873—97[S].北京:总装备部军标出版发行部,1997:5.
- [4] 航空工业总公司.军事装备和设施的人机工程设计手册:GJB/Z 131—2002[S].北京:总装备部军标出版发行部,2002:9.
- [5] 孟海洋.基于RAMSIS客车驾驶区布置舒适性校核分析[D].长春:吉林大学,2017.
- [6] 宗威,凌杰豪,惠慧.基于RAMSIS的除雪车驾驶室人机工程分析[J].机械设计,2017,34(8):112-115.
- [7] 毕君,苟锐.成都BRT驾驶室空间的人机环境评价及改良优化[C]//工业设计研究辑刊(第二辑).四川大学出版社,2014:28-31.
- [8] 金义淞.基于人因工程学的某商务车的驾驶舒适性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [9] 王洪宝,王金,支锦亦,等.基于RAMSIS仿真的高速列车驾驶界面人机工效评估[J].机械设计,2020,37(1):128-134.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部.客车结构安全要求:GB 13094—2017[S].北京:中国标准出版社,2017:10.
- [11] 国家发展和改革委员会.客车车内尺寸:GB/T 13053—2008[S].北京:中国标准出版社,2008:2.
- [12] 叶彪.客车乘客座椅的乘坐舒适性[J].客车技术与研究,2003,25(4):21-23.
- [13] 曹贵华.轻型客车驾驶室人机工程设计方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部.机动车辆间接视野装置性能和安装要求:GB 15084—2022[S].北京:中国标准出版社,2022:12.

某车型座椅低频振动分析与改进

王 兵

(隆鑫通用动力股份有限公司, 重庆 400052)

摘要:针对某车型座椅低频振动问题,采用测试与仿真手段找到座椅低频振动的根本原因。根据仿真结果提出优化方案,经试验和评价,优化效果较好,能够满足振动舒适性要求。

关键词:车辆座椅; 低频振动; 仿真与测试; 优化方案

中图分类号:U463.83+6

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0050-05

Analysis and Improvement on Low-frequency Vibration for a Vehicle Seats

WANG Bing

(Loncin Motor Co., Ltd., Chongqing 400052, China)

Abstract: Aiming at the problem of vehicle seats' low-frequency vibration, this paper uses testing and simulation methods to find the root causes of the seats' low-frequency vibration and proposes an optimization plan based on the simulation results. After testing and evaluation, the optimization effect is better and can meet the vibration comfort requirements.

Key words: vehicle seat; low-frequency vibration; simulation and test; optimization scheme

随着人们对乘坐舒适性^[1]要求的不断提高,车辆振动已成为衡量汽车品质的一个重要指标。车辆的异常振动会严重影响乘坐舒适性,甚至会对乘坐人员的身心健康造成伤害。因此在汽车设计开发过程中,通过 CAE 仿真以及物理测试等方法来分析和改善不良振动越来越重要。怠速振动是汽车常见的 NVH 问题,严重时会产生车身晃动、方向盘振动、座椅振动等^[2-3]。据评价人员反馈,某乘用车样车在怠速空调 AC 置 OFF 挡工况下,其所有座椅均存在明显的异常振动现象;怠速空调 AC 置 ON 挡工况下,空调压缩机转速 2 000 r/min 左右,工作频率约为 67 Hz,与发动机同时作为激励源,避开了动力总成的刚体模态频率,无明显异常振动;而在其他加速工况下,振动微弱甚至不存在。

该车型怠速异常振动的原因与空调开关状态有直接联系,空调开启,空调压缩机和发动机同时作为振动源;空调关闭,怠速工况下发动机是唯一振动源。为了分析车辆怠速工况下座椅异常振动的原因,本文

先采用 LMS Test. Lab 设备对座椅进行振动测试分析,然后应用 CAE 方法对该样车座椅及动力总成进行振动仿真,为解决车辆振动问题提供依据^[4-5]。

1 座椅振动试验

1.1 试验准备

将试验样车点火,保证空调 AC 置 OFF 挡,使试验工况与评价人员反馈工况保持一致。采用 LMS Test. Lab/Advanced Signature Testing 模块进行转速跟踪测试与分析,用转速计测量发动机转速。将笔记本、LMS 数采、加速度计及转速计连接好后设置采集参数,测试信号稳定后进行振动测试。

为识别出座椅的振动频率,根据座椅振动试验规范,在座椅导轨位置粘贴加速度传感器对驾驶员座椅导轨进行振动测试。加速度传感器方向定义为:整车前后方向为 X 向,整车左右方向为 Y 向,整车上下方向为 Z 向。测点的位置如图 1 所示。

收稿日期:2023-11-15。

第一作者:王 兵(1991—),男,工程师;主要从事车辆 NVH 分析与控制研究工作。E-mail:cqlxwb@163.com。



图1 座椅导轨上测点位置

1.2 测试结果及分析

座椅在怠速(空调 AC 置 OFF 挡)工况下 3 个方向的幅值-频率频谱图如图 2 所示。由图 2 分析可知:座椅主要是 Z 向低频振动较大,其中对应发动机激励一阶频率 13 Hz 处的幅值达到 0.0674 m/s^2 。

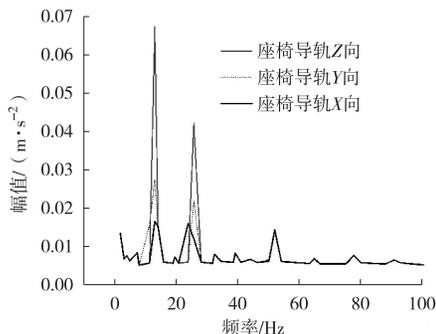


图2 座椅 X、Y、Z 方向频谱图

由于引发座椅振动的频率较低,而怠速工况下不开空调时,发动机是最主要的激励源,因此推测引起座椅低频振动的原因有两点:一是座椅骨架刚度不足,自身的模态频率与发动机的激励频率耦合;二是动力总成悬置系统的模态频率分布不合理,与发动机激励频率耦合。

为了进一步准确地找到振动异常的根本原因,需进行座椅模态 CAE 分析及原状态动力总成悬置解耦的 CAE 分析。

2 CAE 仿真分析与优化

2.1 座椅有限元模型建立

将座椅骨架三维数据导入 HyperMesh 中进行网格划分,钣金零件采用 shell 单元模拟,单元平均尺寸为 4 mm ,焊缝、螺栓连接采用 RBE2 单元模拟,座垫、靠背泡沫及头枕采用 RBE3+Conn2 模拟,座椅有限元模型如图 3 所示。



图3 座椅有限元模型

2.2 座椅模态结果及分析

为了模拟座椅在整车上的安装情况,将座椅与车身的安装孔约束 1~6 自由度,计算前 10 阶固有频率,由于篇幅原因,只对前 2 阶低频模态进行分析。座椅一阶前后摆动模态及一阶横向摆动模态云图分别如图 4 和图 5 所示。

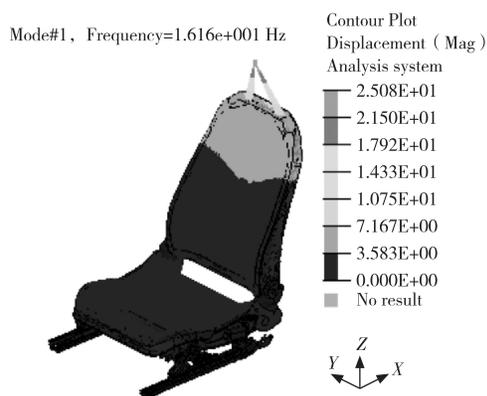


图4 座椅一阶前后摆动模态云图

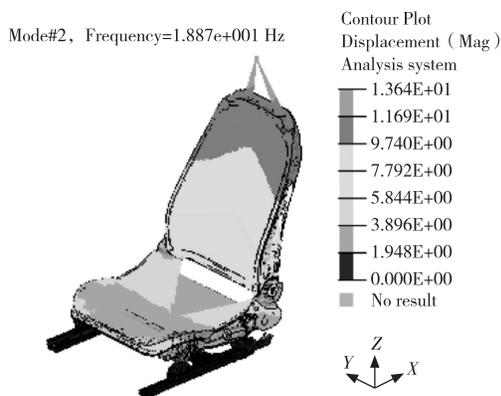


图5 座椅一阶横向摆动模态云图

由图 4 和图 5 可知:座椅一阶前后摆动模态频率为 16.2 Hz ,座椅一阶横向摆动模态频率为 18.8 Hz 。从第 1 部分中的振动测试分析可知,引起座椅低频振

动的发动机一阶激励频率为 13 Hz, 座椅的固有频率避开了发动机的一阶激励频率。因此可初步得出结论: 座椅低频振动不是座椅本身刚度不足引起的。

2.3 动力总成系统振动仿真模型建立

首先将原动力总成简化为一个六自由度的刚体^[6-7], 并把动力总成的质量和转动惯量集中赋予到动力总成质心处, 再通过 RBE2 刚性单元将质心与动力总成轮廓 plot 单元相连。橡胶悬置在正常运行工况下可认为是线弹性的, 在 3 个方向都有弹性并忽略其阻尼, 在 HyperMesh 中采用 CBUSH 弹簧单元模拟^[8]。由于悬置元件是橡胶通过硫化工艺和刚性支架固连, 所以最后通过 RBE2 单元模拟刚性支架将橡胶悬置与动力总成质心相连。与发动机相连的悬置支架均看作刚体, 与车身相连的部分固定在地面上。具体计算的输入参数有: 动力总成质量(213.77 kg)、质心位置及转动惯量(表 1)、各悬置弹性中心位置(表 2)、各悬置三向刚度(表 3)。

表 1 动力总成质心位置及转动惯量

质心位置/mm			转动惯量/kg·m ²					
X	Y	Z	I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	I _{xy}	I _{yz}	I _{zx}
-182.28	30.47	181.26	15.63	7.93	13.83	-1.23	2.88	0.57

表 2 各悬置弹性中心坐标 mm

悬置	X	Y	Z
右悬置	-220.9	509.1	437
左悬置	-142	-421	352
后悬置	45.2	-84.7	-99.5

表 3 各悬置三向刚度 (N·mm⁻¹)

悬置	静刚度			动刚度		
	K _u	K _v	K _w	K _u *	K _v *	K _w *
右悬置	140	70	190	182	91	304
左悬置	120	330	300	162	445.5	405
后悬置	180	10	10	234	13	13

根据以上参数, 在 Hypermesh 软件中建立如图 6 所示的动力总成有限元模型。

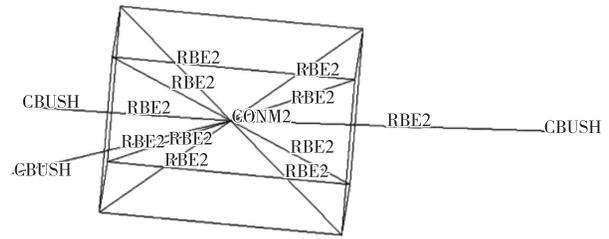


图 6 动力总成有限元模型

2.4 动力总成系统振动仿真结果及分析

采用 Optistruct 求解器求解 2.3 节中建立的模型并输出动力总成的刚体模态振型^[9], 鉴于篇幅原因, 仅展示刚体模态中的 Z 向平动 (Bounce) 模态振型 (图 7)。刚体模态频率分布见表 4。

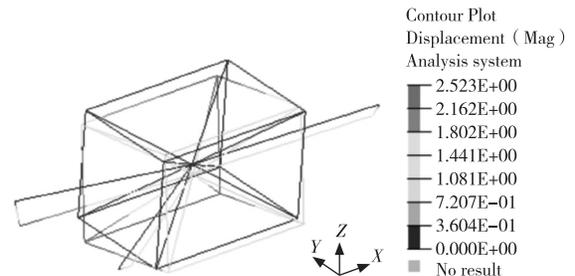


图 7 动力总成 Bounce 模态振型

表 4 动力总成悬置系统固有频率

阶数	振型	模态频率/Hz
一阶	X 向平动	22.3
二阶	Y 向平动	7.7
三阶	Z 向平动	13.3
四阶	绕 X 轴转动	16.4
五阶	绕 Y 轴转动	10.8
六阶	绕 Z 轴转动	14.9

由表 4 可知: 动力总成悬置系统的 Z 向平动的模态频率为 13.3 Hz, 与怠速工况下发动机一阶激励频率 13 Hz 接近, 二者发生了共振耦合, 导致 13 Hz 低频振动幅值较大, 从而引发了座椅的低频振动。

3 动力总成固有特性仿真优化及验证

3.1 仿真优化

根据振动理论, 悬置元件的布置位置、安装角度及其刚度、阻尼对动力总成振动的传递影响很大^[8]。

本文结合样车实际空间,利用 HyperMesh 的数值优化方法,将 3 个悬置刚度作为设计变量,通过优化悬置刚度来改善动力总成悬置系统的固有特性。刚度设定变化范围为±50%;约束条件:动力总成垂向位移不超过 3 mm;目标函数:保证固有频率在 5.5~16 Hz 范围内,并保证动力系统达到较好的解耦效果,即动力总成的前 6 阶刚体模态的固有频率要和发动机激励频率错开。

经过 HyperMesh 软件的自动迭代一系列数值优化计算^[10],并结合悬置生产工艺等条件,最终得到了 3 个悬置的刚度优化结果(见表 5),优化后的动力总成固有特性见表 6。由表 6 可知,优化后动力总成悬置系统 Z 向平动的模态频率为 9.1 Hz,已与发动机一阶激励频率 13 Hz 错开。

表 5 优化后各悬置三向刚度 (N·mm⁻¹)

悬置	K_u	K_v	K_w	K_u^*	K_v^*	K_w^*
右悬置	210	65	151	315	97	227
左悬置	230	71	166	345	106	249
后悬置	211	44	62	316	66	93

表 6 优化后动力总成悬置系统固有特性

阶数	振型	固有频率/Hz
一阶	X 向平动	13.8
二阶	Y 向平动	5.6
三阶	Z 向平动	9.1
四阶	绕 X 轴转动	12.0
五阶	绕 Y 轴转动	7.0
六阶	绕 Z 轴转动	9.3

3.2 试验及主观评价验证

1) 重新制作刚度优化后的悬置样件并装车,对样车怠速(空调 AC 置 OFF 挡)工况进行振动测试,测点布置与优化前保持一致。优化前后座椅 Z 方向的振动频谱如图 8 所示。由图 8 可知,座椅 Z 向低频率(13.3 Hz)的幅值由 0.067 4 m/s² 降至 0.012 8 m/s²,该频率的振动基本消除。

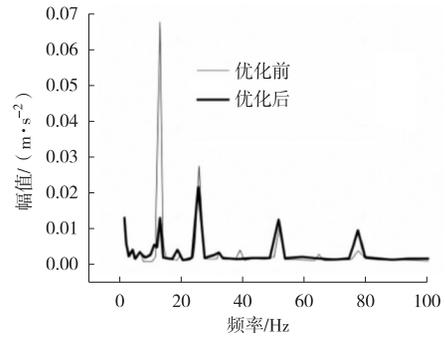


图 8 优化前后座椅 Z 向频谱图

2) 我司 NVH 性能主观评价团队经过一系列的产品触感,已制定了 10 分制评价标准,详见表 7^[11]。专业人员分别对 5 辆样车优化前后的状态进行主观评价,结果见表 8。由表 8 可知,优化后的评分均达到及格分及以上(≥6 分),满足振动舒适性要求。

表 7 主观评价标准表

触感描述	分值	触感描述	分值
不能忍受的	1	可接受的	6
令人难受的	2	好的	7
根本不能接受的	3	非常好	8
不能接受的	4	优秀	9
有待提高的	5	非常优秀	10

表 8 优化前后主观评价打分

样本	优化前	优化后
1 号车	5 分	6.5 分
2 号车	4.5 分	6 分
3 号车	5 分	6 分
4 号车	5 分	6.5 分
5 号车	4.5 分	6.5 分

4 结束语

本文通过仿真和测试,找出了引起车辆座椅低频振动的根源,并通过 HyperMesh 软件对悬置刚度进行了优化,然后结合工程实践经验设计出了可行的悬置刚度,最后再装车测试验证,有效地解决了怠速低频振动问题。本文提出的只修改悬置刚度的思路及方法调整成本较小,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 王城,梁天也,龙岩. 基于动力总成三点悬置的改进 TPA 方法应用研究[J]. 噪声与振动控制,2011,31(2):34-37.
- [2] 赵帅,范习民,袁飞. 商用车低频怠速抖动问题分析及解决方案[C]//中国汽车工程学会 2021. 中国汽车工程学会年会论文集(4). 北京:机械工业出版社,2021:47-50.
- [3] 王健,朱广栋,向洪博. 客车座椅靠背晃动异响分析及控制[J]. 客车技术与研究,2022,44(5):39-41.
- [4] 邵威,黄志亮. 某工程机械整车异常抖动测试分析[C]//LMS 公司. 2013 年 LMS 中国用户大会论文集,2013:1-4.
- [5] 徐海澜,王若璜,朱红岩. 客车座椅车辆固定件强度静态试验载荷确定方法研究[C]. 客车技术与研究,2023,45(5):49-52.
- [6] 季晓刚,章应雄,唐新蓬. 汽车动力总成悬置研究的发展[J]. 汽车科技,2004(1):4-6.
- [7] 宋婷婷,刘美,沈福亮. 动力总成悬置系统仿真分析[C]//中国汽车工程学会. 2009 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2009:129-132.
- [8] 彭磊,许春铁,王卓. 基于动力总成刚体模型的悬置系统解耦快速优化设计[C]//澳汰尔工程软件(上海)有限公司. 2015 Altair 技术大会论文集,2015:6.
- [9] 何洋志,陈吉清,兰凤崇. 动力总成悬置系统隔振分析及优化[J]. 现代制造工程,2012(2):80-83.
- [10] 李红松,屈翔,张勇. 汽车发动机悬置系统主要特征参数的计算分析[J]. 重庆工学院学报,2005(8):13-15.
- [11] 陈良松,宋俊,邱毅,等. 汽车座椅振动舒适性主客观测试及关联性分析[J]. 汽车工程,2021(8):1263-1269.

~~~~~  
(上接第 43 页)

- [3] 韦于刚. 半承载式客车车身结构侧翻有限元分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2014.
- [4] 燕战秋,华润兰. 论汽车轻量化[J]. 汽车工程,1994(6):375-383.
- [5] 王念,高群,黄心深,等. 轻型电动客车榫卯结构骨架仿真分析[J]. 机械设计与制造,2015(5):181-184.
- [6] 宋群. 基于全承载技术的纯电动客车设计与研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [7] 王文甲,吴长风,张勇,等. 客车骨架局部结构的多工况拓扑优化设计[J]. 客车技术与研究,2018,40(1):26-29.
- [8] 熊波. 全碳纤维复合材料桁架制备与可靠性分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [9] 乔蔚炜,金达锋,于兴林. 微型电动车车身结构优化设计中性能指标的确定方法[J]. 天津汽车,2008(8):36-38.
- [10] 瞿元,张林波,王志超,等. 某概念白车身正向开发流程[J]. 计算机辅助工程,2022,31(1):28-33.
- [11] 于保君,何洪军,肖永富,等. 某小型客车车身骨架轻量化综合优化设计[J]. 客车技术与研究,2021,43(3):22-25.

# 客车车身油漆外观光泽影响因素及提升措施

宋海泉, 朱 广, 郭 瑞, 楚家俊, 黄斐荣

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

**摘要:**为提升客车车身油漆外观,分析在涂装过程中影响客车车身油漆外观光泽的主要因素,并提出提升措施。

**关键词:**客车车身; 油漆外观; 影响因素; 提升措施

中图分类号:U466

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0055-04

## Influencing Factors and Improving Measures of Bus Body Paint Appearance Gloss

SONG Haiquan, ZHU Guang, GUO Rui, CHU Jiajun, HUANG Feirong

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

**Abstract:**To improve the paint appearance of the bus body, this paper analyzes the main factors that affect the appearance gloss of bus body paint during the painting process and proposes improving measures.

**Key words:**bus body; paint appearance; influencing factor; improving measure

客车车身油漆外观体现在颜色和光泽两个方面。

由于颜色属于设计范畴<sup>[1]</sup>,所以油漆外观的感官效果主要体现在光泽上,需要高水平的涂装作业来保证。目前,已有金属漆、珠光漆等特殊油漆被广泛用于提升客车车身油漆的光泽感官效果。同时,各种涂装工艺的改善和创新(如2K清漆工艺、中涂厚膜工艺、机器人喷涂工艺等)以及工艺仿形(如喷涂仿形)和过程控制也在不断进行<sup>[2-5]</sup>,以提升客车车身油漆的外观效果。本文从技术层面较深入地分析客车车身油漆外观光泽的影响因素,并提出控制措施。

## 1 客车车身油漆外观光泽影响因素

油漆外观光泽主要表现在油漆表面的反光性和镜面感光效果,通常用橘皮、鲜映性、光泽度等指标进行评价<sup>[6]</sup>。涂装作业不当会产生严重的油漆外观光泽问题,客车车身油漆外观光泽主要受车身结构、油漆种类、漆膜结构、喷涂工艺和打磨工艺等因素影响。

### 1.1 车身结构

车身结构主要指车身造型特征,涂装外观光泽首先与车身造型特征线和曲面有关。提高特征棱线的圆滑度可提升油漆外观的鲜映性。不管是人工喷涂还是自动喷涂,客车蒙皮曲面过于明显或突出就会影响上漆率,从而产生油漆外观光泽问题<sup>[7]</sup>。客车侧围蒙皮一般采用大平面结构,在人工喷涂和自动喷涂条件下,都易于保证上漆率,虽然不会出现明显的油漆外观光泽问题,但整体感光效果还是会受到影响。客车前后围多采用具有一定造型的曲面结构,存在喷涂死角,不利于油漆上装(易导致面漆露底和虚喷)和流平,常出现橘皮等外观光泽问题。

客车车身油漆套色较多会出现与造型和间隙尺寸有关的油漆外观光泽问题。同时,蒙皮搭接方式对油漆外观光泽也有影响。如果搭接区域的蒙皮包边或结构设计不方便涂胶,面漆“湿碰湿”喷涂就容易出现流挂,影响油漆的光泽效果。此外,如果车身蒙

收稿日期:2023-11-25。

第一作者:宋海泉(1982—),男,助理工程师;主要从事商用车焊装、涂装、总装整车工艺开发的研究工作。E-mail:411438012@163.com。

通讯作者:黄斐荣(1989—),男,博士;助理工程师;主要从事汽车油漆外观质量提升的研究工作。E-mail:hfeirn101006@163.com。

皮棱角和开孔不当,油漆流平不好,也会产生局部外观橘皮问题。例如,车身前围上部和中部开设的总装装配孔以及外板尖角部位,在喷涂面漆时就容易发生流挂而产生油漆外观光泽问题。

### 1.2 油漆种类

不同类型的油漆会呈现不同的光泽特性。客车常用油漆包括单色漆、金属漆和珠光漆。单色漆颜色较饱满,但光泽度相对较低;金属漆因含有金属粉,能赋予相应金属的光泽,外观更加夺目;珠光漆同时具有金属和珠光光泽,能在阳光下呈现出闪亮效果,外观更为绚丽。油漆类型不同,其分散介质不同,流平特征也不同。油漆表面光滑性与油漆的流平特性直接相关,表面越光滑,其光泽度也越高。

### 1.3 漆膜结构

相同光照条件下,不同漆膜结构会对光产生不同的光学反映,导致进入人眼中光的数量和强度不同,带来不一样的目视感觉。客车油漆采用多涂层结构,基材材质和整个漆膜体系都对油漆外观光泽有影响<sup>[8]</sup>。油漆涂层数量、结构复杂性和厚度决定了油漆外观的光泽质量,油漆涂层数量越多、结构越复杂,油漆的外观光泽越难控制。

客车油漆涂层数量较多,包括电泳层(或底漆)、腻子层、中涂层、面漆和清漆。其中,腻子层是以局部涂敷方式存在于漆膜中,同时由于客车白车身表面质量较差,各种涂层表面特征轮廓的演化受白车身表面特征影响,这种自下而上的表面轮廓的克隆和消亡导致了客车油漆涂层结构空间分布的复杂性<sup>[9]</sup>,影响油漆涂层对光的表达和人眼目视效果,从而产生了油漆的外观光泽问题。

此外,漆膜厚度对涂层表面光泽也有影响,当遮盖力达到要求的情况下,一般单色漆和清漆膜厚越厚,越能改善底层表面特征,使油漆外观光泽变好。不过,对于金属漆和珠光漆,由于外观质量还受到金属粉、珠光粉的浓度和排布方式的影响,当膜厚过厚时,由于金属粉、珠光粉的空间分布方式发生较大变化,产生了复杂的光学作用,从而导致油漆外观光泽效果变差。

### 1.4 喷涂工艺

喷涂技术不同会影响油漆在喷涂表面的均匀分

布,从而影响油漆外观光泽性。客车一般用空气喷枪喷涂,油漆的雾化程度和颗粒大小取决于压缩空气的流量、流速和油漆喷出量。油漆的雾化不好会导致膜厚变化,以及金属粉和珠光粉排布方式的变化,从而出现油漆外观光泽问题。在人工喷涂时,因人的走枪速度、枪与被喷涂面距离和角度的变化,很难保证油漆在喷涂表面均匀分布,导致油漆外观出现严重的橘皮和鲜映性差等光泽问题。

### 1.5 打磨工艺

因为客车制造自动化水平较低,白车身表面质量差,往往需要靠多道腻子、多序打磨、多次弥补才能将喷涂底层处理到接近理想状态。打磨是客车涂装工艺过程中改善车身表面质量最重要的手段之一。在实际打磨过程中,一般存在两种打磨手法:一是利用磨具外圆表面打磨,主要对如肌癌、台阶棱等高点进行快速切削;二是利用模具整个端面打磨,主要去除连续凸点、凸台等高点缺陷,切削量相对较小。

白车身、底漆、腻子、中涂层的打磨主要是消除各层表面缺陷,为面漆喷涂提供理想的表面;而面漆和清漆的打磨主要是消除和修复漆膜弊病,提升油漆外观光泽质量。如果白车身、底漆、中涂层打磨不好,不良的表面特征(包括粗糙度和波纹度)会传递到面漆,从而产生严重的油漆外观光泽问题<sup>[10]</sup>。如果面漆存在漆膜弊病,进行打磨修补后也会留下肉眼不易察觉的簇状花纹和微划痕(被称为“抛光玫瑰”<sup>[11]</sup>),其在高光照条件下,在不同角度观察呈现三维立体视觉效果,从而影响油漆整体的感官效果。不论单色漆还是金属漆或珠光漆,修补部位的光泽度均会有不同程度下降<sup>[12]</sup>,这也是修补部位油漆感官效果不好的主要原因。

## 2 客车车身油漆外观光泽提升方法

### 2.1 优化车身结构设计

车身结构设计应特别注意车身造型特征线和曲面部的设计要与油漆涂装作业匹配,应减少明显的特征棱线或将其改为圆滑弧线过渡。同时,车身结构设计可借鉴乘用车曲面外观设计,减少大平面设计元素,以增加整个车身感光效果。另外,车身结构设计要减少或避免棱角和开孔,确实需要开孔也应避免开

方孔和不规则孔,以减少漆膜弊病并保证油漆整体感光效果。

## 2.2 合理选配油漆

在选用油漆时要考虑油漆与车身结构的适配性。对于具有大曲面的车身结构,尽量选用添加有表面控制剂和慢干剂的油漆,因为大多数客车工厂并没有恒温恒湿、高洁净度的喷涂车间。针对地域和季节带来的环境温湿度上的差异,还要考虑水性面漆和油性面漆的适用性。水性面漆的固含量一般为20%~30%,而油性面漆高达60%~70%,因此水性面漆的平滑性较好,但其喷涂和流平效果受施工环境影响很大,所以水性面漆适合在气候温和的地区使用,同时要求喷涂车间环境较好。此外,相比1K清漆,2K清漆具有更好的填充性,能改善油漆的橘皮长波值和鲜映性DOI值<sup>[13]</sup>,因而能提升油漆的外观光泽。

## 2.3 优化漆膜结构

为提高客车油漆外观质量,中涂厚膜化涂装工艺逐渐变成一种趋势<sup>[14]</sup>。中涂漆厚膜化填充腻子层以缓解其粗糙度对漆面外观质量的不利影响。因为组成腻子层的微粒粒度较大,具有较差的外观表现力,所以腻子层表面漆膜的鲜映性比其他区域低,增加中涂膜厚有利于修复腻子层的表面缺陷,从而提高鲜映性。国内某客车车型一次中涂膜厚可达50~60 μm,而且为提高客车外观光泽度,采用两遍喷涂工艺;国外高端客车车型总膜厚达270 μm,其主要是增加了中涂膜厚。

对于面漆层,金属漆和珠光漆在满足遮盖力和涂层均匀性的前提下不宜过厚,而单色漆应尽可能厚才能尽显漆面的丰盈与艳丽<sup>[15]</sup>。另外,对于清漆层,在成本和力学性能满足要求的前提下,也要尽量厚,这样才能通过其对面漆的修复作用和其本身对外观光泽的贡献提升油漆整体的外观光泽水平。例如,二次罩光清漆工艺就是通过提高清漆厚度来改善面漆表面微观缺陷,从而改善油漆表面特征,有效降低外观橘皮。同时,两遍中涂+两遍清漆的厚膜涂装工艺也可改善漆膜的橘皮和提高漆膜的光亮性和平滑性<sup>[16]</sup>,从而提高油漆外观光泽。

## 2.4 优化打磨工艺

客车白车身因为表面感光性差,表面焊渣、毛刺、

杂物等缺陷很难通过目视检出,但经过电泳或底漆喷涂后,表面缺陷就会暴露出来。为了确保进入涂装前的白车身表面无明显缺陷,在对白车身精修打磨后,需设置专门的检查环节:一是在焊装车间收尾工序增加照明灯具,加强对白车身打磨质量的目视检查;二是每道打磨工序后需用手触摸检查。

此外,应用打磨机器人可有效提升底漆和腻子层的打磨质量。打磨机器人可以通过传感器实时监测打磨压力、自身姿势、加速度等多种参数,以提高打磨质量和确保打磨的一致性。同时,随着客车白车身质量的提高,加之机器人打磨技术的应用,中涂免打磨技术将会被广泛应用,从而可通过减少打磨操作来提升油漆外观光泽。

## 2.5 优化喷涂工艺

不同喷涂工艺对漆膜外观影响很大,通过控制油漆的固含量、喷涂流量、喷枪速度、扇面搭接、喷幅等可有效控制油漆分布的均匀性。喷涂时油漆雾化均匀,油漆流平好,橘皮小,油漆外观将更加光亮。目前国内部分客车厂采用机器人喷涂,但由于面漆颜色的多样化和套色需求,喷涂机器人大都用于喷漆中涂层。随着客车面漆和清漆自动喷涂技术的应用,客车油漆外观光泽将发生质的飞跃。同时,喷涂工艺的稳定性和喷涂过程的细腻程度还需要良好的喷涂环境,即要保持稳定和优良的温湿度和洁净度条件,才能避免油漆外观弊端。因此,客车喷涂设施的升级以及自动化和智能化水平的提高,在保证客车油漆外观光泽方面也很重要。

## 2.6 新工艺的应用

### 2.6.1 镀晶工艺

镀晶工艺最显著的特点是在物体表面上形成一层强大纤维网,用来填补车身漆面看不见的细微“毛孔”<sup>[17]</sup>。镀晶层具有高亮度,是一层通透清澈的结晶层,极致镜面效果,比普通镀膜厚2~3倍,但亮度和光泽却丝毫不减,所以客车高端车型和展会都尝试采用镀晶工艺。对于外观有特殊要求的车型,镀晶工艺也是一个不错的选择。

### 2.6.2 珠光清漆工艺

珠光清漆是一种不同于普通珠光漆的高级装饰性油漆,其外观色彩斑斓、琳琅满目,但成本高、施工

工序复杂,基本只有高档车型选用。珠光清漆是与幻彩珠光颜料相混合而制成的类似有色罩光用清漆的一类面漆,少量珠光颜料配合实色漆一起使用,成膜色彩鲜艳,装饰性远超常规色漆。相对珠光漆和金属漆,其具有以下优势:①成本较低;②涂层晶莹闪烁、炫彩亮丽、透明感强、装饰性好;③与色漆“湿碰湿”喷涂,双层面施工,操作简单且施工要求低;④可满足颜色鲜艳、高亮度的外观要求。

### 2.6.3 无遮蔽彩色智能喷涂工艺

对于色彩复杂、图案追求个性化的客车车身,传统的“遮蔽-喷涂-卸遮蔽”彩条套色工艺难以满足高装饰性油漆外观光泽要求。汽车无遮蔽彩色智能精密涂装工艺,以车身为画布快速喷涂出定制化的色彩和图案,可在任意车型、任意部位进行无遮蔽喷涂,其精密喷头可实现直径0.4~10 mm的单点或连续线条直接喷涂,涂料利用率接近100%,且在软件辅助下,可实现不同曲面喷涂轨迹规划。因此,无遮蔽彩色智能喷涂工艺为解决传统彩条套色工艺由于繁琐的施工过程而导致的油漆外观光泽问题提供了方案。

## 3 结束语

本文围绕提升客车油漆外观质量这一主题,从工艺和技术层面,深入分析和讨论了油漆外观光泽的影响因素,并基于油漆外观提升最新研究成果和涂装技术进展,提出了优化措施,为提升客车车身油漆外观品质提供理论支持和创新方案。

### 参考文献:

- [1] CHAE Youngjoo. Color appearance shifts depending on surface roughness, illuminants, and physical colors[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1371.
- [2] 王明,完颜成功,强俊,等. 油漆外观能力提升创新成果探讨[J]. *现代涂料与涂装*, 2023, 26(8): 60-62.
- [3] 俞峰,张志山,吴成,等. 车身油漆外观质量影响因素的研究[J]. *现代涂料与涂装*, 2022, 25(1): 21-23.
- [4] 李欣,郭波,易炜. 涂装机器人仿形规划与车身外观工艺调试[J]. *汽车实用技术*, 2019(5): 158-161.
- [5] 胡玲,陈向,黄茂韶,等. 客车车身油漆色差原因及控制[J]. *客车技术与研究*, 2024, 46(1): 59-62.
- [6] 吴乐芳,王利民,唐璽,等. 客车车身表面涂装橘皮表现的改善措施[J]. *客车技术与研究*, 2023, 45(1): 50-52.
- [7] 李艳霞,吴吉霞. 浅谈商用车车身结构设计对涂装外观质量的影响[J]. *现代涂料与涂装*, 2017, 20(5): 53-55.
- [8] AKAFUAH N, POOZESH S, SALAIMEH A, et al. Evolution of the automotive body coating process—a review[J]. *Coatings*, 2016, 6(2): 24.
- [9] SALCEDO-HERNÁNDEZ J, GARCÍA-BARRUETABEÑA J, I PASTOR-LÓPEZ I, et al. Predicting enamel layer defects in an automotive paint shop[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 1.
- [10] MEZGHANI S, ZAHOUANI H, PIEZANOWSKI J. Multi-scale characterizations of painted surface appearance by continuous wavelet transform[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(2): 205-211.
- [11] SABINA R, B-G R. A measure of perceived quality to secure the polishability of new paint systems[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2023, 11(2): 024006.
- [12] 胡旭东,张扬明,韩雪芹,等. 客车外观目视化效果提升要素分析与建议[J]. *现代涂料与涂装*, 2018, 21(10): 36-38.
- [13] 杨报军,占早华,高文化. 双组分(2K)清漆喷涂机器人升级改造探讨[J]. *电镀与涂饰*, 2019, 38(20): 1138-1141.
- [14] 吉学刚,贾连洋,刘建秀. 大巴车涂装技术发展新趋势[J]. *汽车实用技术*, 2020, 45(19): 208-210.
- [15] 崔泳,刘士海. 汽车面漆桔皮缺陷的机理分析及其控制[J]. *汽车工艺与材料*, 2010(8): 22-25.
- [16] 许淑娟,杨报军,和军强. 油漆外观提升之两遍清漆验证[J]. *汽车实用技术*, 2017(23): 122-124.
- [17] 董素芳. 漆面纳米镀晶工艺浅谈[J]. *表面工程与再制造*, 2018, 18(1): 25-26.

# 电动客车再生制动系统现行测试标准分析

张涛<sup>1</sup>, 王治文<sup>1</sup>, 姚成金<sup>2</sup>

(1. 招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 401329; 2. 常州市高级职业技术学校, 江苏 常州 213161)

**摘要:** 现行标准中关于电动客车再生制动系统的要求和试验方法都不够完备和明确。本文通过研究再生制动系统结构, 从制动、防抱死制动、能量回收效率等方面分析相关标准存在的问题, 提出一些建议。

**关键词:** 电动客车; 再生制动; 标准分析

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)02-0059-04

## Analysis of Current Test Standards for Regenerative Braking System in Electric Buses

ZHANG Tao<sup>1</sup>, WANG Zhiwen<sup>1</sup>, YAO Chengjin<sup>2</sup>

(1. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401329, China;

2. Changzhou Vocational College of Technology, Changzhou 213161, China)

**Abstract:** The requirements and test methods of regenerative braking system for electric buses in current standards are not complete and clear. By studying the structure of regenerative braking system, this paper analyzes the problems existing in related standard from the aspects of braking, anti-lock braking, energy recovery efficiency, etc., and then proposes some suggestion.

**Key words:** electric bus; regenerative braking; standard analysis

利用驱动电机和储能装置进行再生制动, 从而替代辅助制动和部分行车制动功能, 可以降低电动客车使用成本, 提升续航里程。该项技术已广泛应用于电动客车。但是对于再生制动系统性能的测试, 包括安全性、能量回收效能等, 现行标准还不完善。本文主要对目前标准中涉及电动客车再生制动的相关条款和存在的问题进行分析, 提出改进和优化再生制动系统的测试方法。

## 1 再生制动结构概述

再生制动系统主要包含驱动电机、动力电池、电机控制器、电池管理系统以及逆变器等<sup>[1]</sup>。驱动电机是系统实现再生制动的关键元件, 其性能会直接影响制动、能量回收效果; 动力电池是储存制动回收能量的储能元件, 其最大充电功率等参数同样会影响再生制动功率。再生制动力受驱动电机转矩、储能装置

SOC 等因素影响, 能提供的制动力有限, 当所需的制动力大于再生制动力时, 就需要摩擦制动参与到行车制动中。电动客车按照再生制动和摩擦制动的耦合关系分为并联式和串联式, 如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

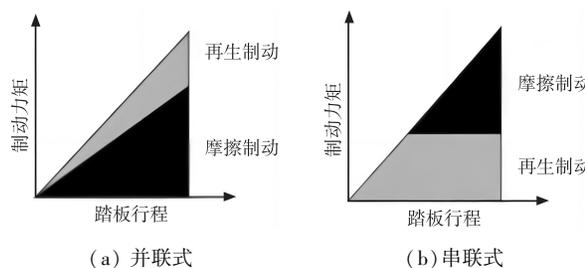


图 1 再生制动和摩擦制动的耦合关系

并联式的结构系统不调节原有的摩擦制动系统, 也无需进行额外的改进, 按照所需的制动力大小以一定比例输出摩擦制动力和再生制动力。这种结构比较方便, 有利于工程实现, 但是该结构制动能量回收

收稿日期: 2023-11-15。

第一作者: 张涛(1987—), 男, 硕士; 高级工程师; 主要从事新能源及整车检测研究工作。E-mail: cjzhangtao@cmhk.com。

率较低。早期的传统能源汽车改造的新能源汽车,采用该结构的较多。

串联式的结构在所需的制动力较小时,优先采用再生制动,当所需的制动强度超过一定值时,驱动轮上的再生制动力不变,剩下的制动力由摩擦制动补充。该结构能充分利用再生制动效能,能量回收率高,减少摩擦制动系统的磨损,但是系统比较复杂,技术难度也较大。

## 2 现行标准中针对再生制动的相关条款及问题

现行相关标准主要是 GB 7258—2017《机动车运行安全技术条件》<sup>[3]</sup>,其规定:车长大于 9 m 的未设置乘客站立区的客车装备的辅助制动装置的性能要求应使汽车能通过 GB 12676—2014<sup>[4]</sup>规定的 II A 型试验。而 GB 12676—2014《商用车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法》中并未对电动客车的 II A 型试验状态、方法进行说明。

由于目前主流电动客车制动结构大多采用串联式,行车制动时先再生制动,制动力不足时,再机械制动介入,而再生式制动由电机控制策略规定,ABS 系统只控制液压或气压制动力,可见两套系统的控制对象完全不同,在极端工况下,必须对制动力进行协调,否则车辆很可能发生车轮抱死或制动力突然减小导致车辆前冲甚至刹不住车,危及道路交通安全。对于  $M_3$  类电动客车,防抱系统是否控制再生制动系统现行标准也无明确规定。

在再生制动能量回收测试方面,目前只有 QC/T 1089—2017《电动汽车再生制动系统要求及试验方法》<sup>[5]</sup>提出了适用于乘用车的制动能量回收效能的测试方法,用来评价制动能量回收的有效性。关于电动客车的再生制动能量回收测试,目前还没有标准进行规定。

## 3 相关条款应完善的几个方面

### 3.1 制动测试方面

目前客车在进行 GB 12676—2014《商用车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法》试验时,需要进行 II A 型试验(客车)或者 II 型试验(城市客车),是

通过坡道模拟方法,测试车辆在长下坡工况下,辅助制动可能会因为制动器长期工作导致热衰退,造成制动功能降低。

常规车辆中,制动过程减少的机械能被车辆制动系统转化为内能,散失到空气中,因此常规车辆必须设计合理的制动冷却系统或辅助制动系统,保证在连续制动过程中,制动器不会因过热导致制动效能下降。对于电动客车,这部分机械能被再生制动系统转化为电能,存储在车载储能装置中,不存在制动器的热衰退现象,但车载储能装置存储的电能有限,若 SOC 已充满,则再生制动系统可能停止工作,造成辅助制动系统失效,难以满足标准要求。因此对于电动客车来说,进行 II A 型试验或者 II 型试验时,应考虑车载储能装置的充电情况,即应在车辆充满电情况下进行,此时为电动客车进行该项目试验的最恶劣条件。

车辆设计时,也应考虑车载储能装置 SOC 较高时的车辆制动效能,为保证满足标准要求,应在充电控制策略设计时进行充分考虑,或者增加制动电阻,在 SOC 较低时将再生制动产生的电能存储在储能装置中;当储能装置充满电时,将再生制动产生的电能通过制动电阻,以热的形式散发到环境中。

### 3.2 防抱死制动测试方面

GB 12676—2014《商用车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法》对于电动车辆,规定对装有电力再生式制动系统的  $M_2$ 、 $N_1$  和最大设计总质量小于 5 000 kg 的  $N_2$  类车辆,当装备防抱系统时,由防抱系统控制电力再生式制动系统。对于  $M_3$  类客车防抱制动系统和再生制动系统没有进行任何规定。GB/T 13594—2003《机动车和挂车防抱制动系统性能和试验方法》<sup>[6]</sup>由于标准发布较早,对电动汽车的防抱制动系统也未进行规定。

对于电动客车,防抱制动系统只能控制传统的气压或者液压制动力;当再生制动系统工作时,为保障安全性,整车控制系统应同时控制电机的再生制动和传统气压或液压制动力,需要对再生制动力和传统摩擦制动力进行协调,从而使驱动轮将要抱死时,停止再生制动或者减小再生制动力,增加从动轮的摩擦制动力,防止驱动轮抱死,这也带来了制动强度在一

段时间内明显减小,制动距离增加的结果。

因此,对于装配再生制动系统和防抱死制动系统的电动客车来说,在进行防抱死制动测试时,应考虑以下方面:第一,对于装备A型再生制动车辆<sup>[5]</sup>,应测试仅再生制动工作且制动强度最大时,车辆在低附着系数路面、车辆由高附着系数路面驶向低附着系数路面、车辆的左右两侧车轮分别位于两种不同附着系数情况下,车辆是否抱死;第二,对于装备B型再生制动车辆<sup>[4]</sup>,应测试全力制动时,车辆在不同附着系数路面上是否抱死,并且测试车辆再生制动系统和机械制动同时工作时的制动距离相对仅机械制动时的制动距离是否显著增大,特别是低附着系数路面上的变化率。

车辆设计时,应充分考虑再生制动系统工作时制动力的控制算法;同时,也应考虑在特定附着系数路面上,再生制动系统和防抱制动系统的协调控制,尽量减小再生制动和控制策略对制动效能的影响。

### 3.3 再生制动能量回收效率测试方面

再生制动能量回收的特性对于电动客车的续驶里程提升明显,能在较频繁制动与起动的城市工况运行条件下,有效地回收制动能量,电动汽车大约可降低15%的能量消耗,可使电动汽车的行驶距离延长10%~30%<sup>[7-8]</sup>,这也是公交运营企业采购、运营非常关注的性能指标。但是针对电动客车再生制动能量回收性能的评价指标和测试方法都还没有统一的标准进行规定。

QC/T 1089—2017《电动汽车再生制动系统要求及试验方法》针对乘用车提出制动能量回收效率、制动能量回收系统续驶里程贡献率两个指标。制动能量回收效率是指汽车减速过程中,由再生制动系统回收,最终回馈至可充电储能系统的能量与汽车减速过程中所需施加的制动能量之间的比值;制动能量回收系统续驶里程贡献率是指相同试验条件下,开启与关闭制动能量回收功能时电动汽车运行里程的差值,与关闭制动能量回收功能时的运行里程的比值<sup>[5]</sup>。相对电动客车来说,该评价指标试验周期长,试验数据庞大,计算复杂,且需要更改整车控制策略,不适合运营时进行计算分析。

有文献提出制动能量回收率<sup>[9]</sup>,即电机回收的制

动能量经过电机控制器输出的能量与在制动过程中车辆总动能的比值。相比QC/T 1089,该评价指标只需要进行3个完整的试验工况,每次计算偏差小于规定值,即可确定最终制动能量回收率,试验周期短,计算过程较简单。但是,该方法对于运营时的电动客车分析制动能量回收效率,也同样存在着试验数据量较大,不够直观的问题。

目前部分公交运营企业提出了利用单次工况循环过程中,电机回收至储能装置的制动能量与储能装置输出的能量比值来评价制动能量回收效率。表1为某纯电动城市客车(车长为6 005 mm)按照GB/T 38146.2—2019《中国汽车行驶工况 第2部分:重型商用车辆》<sup>[10]</sup>中的中国城市客车行驶工况进行3次试验的数据。

表1 某纯电动客车制动能量回收效率试验数据

| 试验次数  | 电机回收至<br>储能装置的<br>制动能量/kW·h | 储能装置输出<br>的能量/kW·h | 制动能量<br>回收效率/% |
|-------|-----------------------------|--------------------|----------------|
| 第一次循环 | 0.786                       | 3.69               | 21.30          |
| 第二次循环 | 0.744                       | 3.62               | 20.55          |
| 第三次循环 | 0.763                       | 3.65               | 20.90          |

可以看出,该测试方法计算的制动能量回收效率相对标准偏差为0.37%,重复性好。而且该方法测试简单,适用性强。专业机构可以通过外接高精度仪器测量电流、电压进行计算,普通运营者也可通过车载程序进行粗略计算。

## 4 结束语

本文针对电动客车再生制动系统,分别从制动测试、防抱死制动测试、能量回收效率测试三个方面,探讨了现行相关标准中再生制动系统相关条款存在的问题,并提出了优化建议。

### 参考文献:

- [1] 方春杰,李军. 电动汽车再生制动系统综述[J]. 上海汽车,2016(5):3-7.
- [2] 向佳豪. 纯电动汽车再生制动策略研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.

- [3] 中华人民共和国公安部. 机动车运行安全技术条件:GB 7258—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:22.
- [4] 全国汽车标准化技术委员会. 商用车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法:GB 12676—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015:26.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车再生制动系统要求及试验方法:QC/T 1089—2017[S]. 北京:科学技术文献出版社,2018:1-6.
- [6] 全国汽车标准化技术委员会. 机动车和挂车防抱制动性能和试验方法:GB/T 13594—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2004:1.
- [7] 仇斌,陈全世,张开斌. 北京市区电动轻型客车制动能量回收潜力[J]. 机械工程学报,2005(12):87-91.
- [8] 何仁,胡青训. 带有制动能量再生系统的公共汽车制动过程[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2005(5):389-392.
- [9] 初亮,刘达亮,刘宏伟,等. 纯电动汽车制动能量回收评价方法研究[J]. 汽车工程,2017,39(4):471-479.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 中国汽车行驶工况 第2部分:重型商用车辆:GB/T 38146.2—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019:3-4.

## 《客车技术与研究》征稿启事

《客车技术与研究》创刊于1979年,双月刊,是目前国内唯一一本公开发行的客车领域学术期刊。本刊由重庆市交通局主管,重庆交通科研设计院、重庆车辆检测研究院和中国公路学会客车分会主办,现已被国内外多家检索机构收录,包括中国核心期刊(遴选)数据库、万方数据——数字化期刊群、中国期刊全文数据库、中文科技期刊数据库、中国学术期刊综合评价数据库、JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)(2018)等,是《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。在“中国知网”收录的与汽车相关的近70种学报和期刊中,本刊的复合影响因子位列前十,具有较高的学术影响力。

本刊主要刊登国家科技政策及国内外客(汽)车技术等方面的学术论文,包括科研成果和实践经验,标准,新技术、新工艺及新材料,客车市场,客车检测,使用和维修,经营与管理等。欢迎相关领域的专家、学者赐稿。

本刊重点关注的研究方向:

- |            |           |          |
|------------|-----------|----------|
| ◆智能网联客(汽)车 | ◆新能源客(汽)车 | ◆节能与排放   |
| ◆安全与碰撞     | ◆振动与噪声    | ◆新工艺与新材料 |
| ◆客(汽)车电子   | ◆设计与计算    | ◆标准解读    |

E-mail:btrcq@163.com

QQ:1711088150

微信公众号:客车技术与研究

网址(在线投稿):<http://bus-in.cmvr.com.cn/>(中交客车网)

地址、电话:重庆市高新区新金大道9号 023-62653044

