

客车侧翻结构安全性能试验和优化研究^{*}

高轶男¹, 巩建强²

(1.招商局检测车辆技术研究院有限公司 国家客车质量监督检验中心, 重庆 401329;

2.交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 从理论上分析客车侧翻结构安全性能变化规律及影响因素, 利用客车上部结构强度试验对影响因素进行验证, 并对客车侧翻结构安全性能进行评价, 得出客车侧翻结构安全性能优化方式。结果表明, 调整车身骨架梁结构截面形态、增大关键部位薄壁型钢结构厚度、改变材料属性及其力学性能可增加抗弯截面系数或材料许用应力, 提高客车侧翻结构安全性能, 其中改变材料属性及其力学性能的优化方式最有效, 侧翻后最小生存空间提升 126.32%, 调整车身骨架梁结构截面形态、增大薄壁型钢结构厚度的优化方式使侧翻后最小生存空间分别提升 12.12%、44.32%。

关键词: 汽车; 客车; 侧翻; 安全性能; 生存空间

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0001-04

随着道路网络的迅猛发展和道路旅客运输量的快速增加, 涉及客车的道路交通事故时有发生。客车的道路交通事故形态包括碰撞、碾压、侧翻、坠车、失火等, 其中侧翻事故发生概率较小, 但其造成的伤亡程度远高于其他事故, 研究客车侧翻结构安全性能对评价客车被动安全性能、降低道路交通事故人员伤亡和财产损失具有重要意义。Yamaguchi G. T. 等分析了整车宽高比对侧翻安全性能的影响; Cruz M. G. H. 等对比分析了材料属性对侧翻安全性能的影响; Ko H. Y. 等研究了骨架蜂窝结构对侧翻安全性能的影响; 何汉桥等建立客车车身结构有限元模型, 分析了高床大客车的侧翻安全性能。客车侧翻结构安全性能研究方法主要有试验法和有限元仿真分析法, 目前的研究主要基于有限元仿真分析法开展, 虽然能实现对侧翻结构安全性能的有效分析, 但缺乏试验验证。为此, 该文采用试验法, 通过同系列车型整车上部结构强度试验验证影响客车侧翻结构安全性能的因素, 实现对其全面可靠的评价, 并对客车侧翻结构安全性能进行优化。

1 侧翻试验及评价指标

客车侧翻结构安全性能主要通过客车上部结构强度试验进行考察。国际上最具代表性的是联合国欧洲经济委员会 ECE R66 法规《关于大客车上部结构强度认证的统一技术规定》。中国根据 ECE R66

法规 01 版及其修订单、勘误单, 制定 GB 17578—2013《客车上部结构强度要求及试验方法》, 对客车上部结构强度的技术要求及试验方法作出规定。

按照 GB 17578—2013 的规定, 在侧翻试验台上进行客车上部结构强度试验。侧翻试验台从客车稳定位置开始以不大于 0.087 5 rad/s 的角速度倾斜到不稳定的平衡位置后, 客车围绕车轮一侧翻试验台平面接触点翻转至撞击平面(见图 1), 将侧翻后留给车内乘员的生存空间作为评价指标考察客车上部结构强度。车内乘员生存空间表示侧翻事故发生后维持车内乘员生命的最小空间(见图 2)。

2 侧翻结构安全性能影响因素

客车上部结构强度试验考察客车侧翻过程中车身骨架结构强度, 其中侧围及顶盖骨架为主要受力

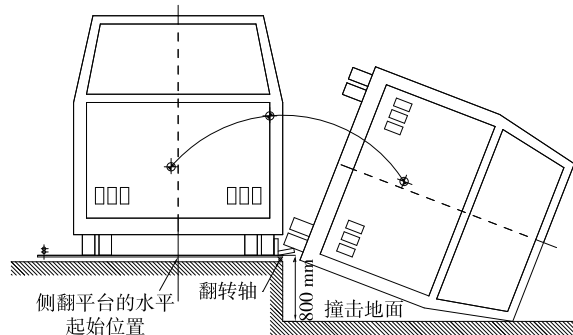


图 1 客车上部结构强度试验示意图

^{*} 基金项目: 交通运输部公路科学研究所(院)科技创新专项资金项目(2018-D0007)

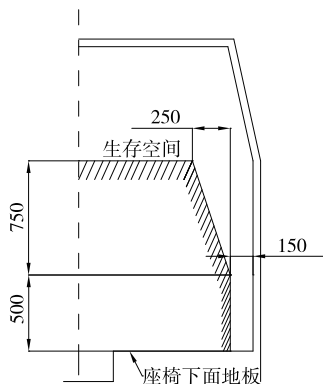


图2 车内乘员生存空间(单位:mm)

区域。参与受力的骨架结构主要由侧围窗立柱、腰梁及顶盖纵梁组成,其结构形式可视为梁结构,在侧翻过程中主要承受弯曲应力,可通过降低梁结构承受的最大弯曲应力提升客车侧翻结构安全性能。梁结构的最大弯曲应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为梁结构最大弯曲应力; M_{\max} 为梁结构最大弯矩,按式(2)计算; W 为梁结构抗弯截面系数,按式(3)计算; $[\sigma]$ 为梁结构所用材料的最大许用应力。

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} = 0.125ql^2 \quad (2)$$

式中: q 为施加在梁结构的载荷; l 为梁结构长度。

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (3)$$

式中: b 为截面承载面的宽度; h 为截面非承载面的宽度。

综上,可通过减小梁结构最大弯矩或增加梁结构抗弯截面系数降低梁结构承受的最大弯曲应力。最大弯矩的影响因素是梁结构载荷和长度,抗弯截面系数的影响因素是梁结构截面形态,其中抗弯截面系数较易改变。

2.1 截面形态

在其他因素不变的前提下,梁结构的抗弯截面系数越大,抗变形能力越强。因此,可通过调整车身骨架梁结构截面尺寸及形态改变其抗弯截面系数,提高侧翻结构安全性能。最常用的车身骨架梁结构是矩形薄壁型钢结构,其抗弯截面系数 W_0 为:

$$W_0 = \frac{1}{6}(BH^2 - bh^2) \quad (4)$$

式中: B 为客车与刚性面发生碰撞的梁结构截面外表面宽度; H 为梁结构截面非碰撞外表面宽度; b

为梁结构截面碰撞内表面宽度; h 为梁结构截面非碰撞内表面宽度。

2.2 薄壁型钢结构厚度

根据式(4),在骨架梁结构外表面宽度 H 、 B 不变的情况下,可通过减小内表面宽度 h 、 b 增加抗弯截面系数,提升客车侧翻结构安全性能。因此,从理论上,适当增大车身骨架梁结构的薄壁型钢结构厚度可增强客车侧翻结构安全性能。

2.3 材料属性及其力学性能

根据式(1),梁结构的最大弯曲应力应不大于材料的许用应力。当材料的许用应力提升时,梁结构抗变形能力增强,其所承受的最大弯曲应力可适当增加。因此,理论上,车身骨架梁结构的材料属性及其力学性能是影响侧翻结构安全性能的本质因素,其强度直接影响车身骨架梁结构在侧翻过程中的弯折程度及乘员生存空间大小。车身骨架梁结构主要采用钢制材料,材质主要为低碳钢、合金钢、高强度马氏体钢等,其中低碳钢及合金钢最常用,主要包括Q235、Q345等。

3 侧翻试验结果及优化分析

利用试验法对客车侧翻结构安全性能影响因素进行验证。以理论上对侧翻结构安全性能产生影响的车身骨架梁结构截面形态、薄壁型钢结构厚度、材料属性及其力学性能等3个因素作为控制变量,在仅改变控制变量,不改变基本属性参数、骨架结构形式等的情况下进行客车上部结构强度试验。共进行6次试验,包括3个组别,每个组别进行2次试验。每个组别的试验采用相同系列客车,除需考察的控制变量外,车身骨架等主要变形部件结构及车辆基本属性等参数均保持一致或相似。

3.1 截面形态对侧翻结构安全性能的影响

针对同系列客车,在车身骨架等主要变形部件结构及车辆基本属性等参数一致或相似的情况下,改变骨架梁结构截面尺寸进行上部结构强度试验(试验1),试验客车的基本参数见表1。

按式(4)计算,客车1、客车2的车身骨架梁结构抗弯截面系数分别为 3.3×10^3 、 4.0×10^3 。理论上客车2在侧翻过程中承受的最大弯曲应力低于客车1,侧翻后保留给车内乘员的生存空间应更大。

试验1的试验结果见表2、图3。客车2在侧翻后的乘员最小生存空间大于客车1,生存空间提升

表1 试验1中试验客车的基本参数

客车编号	车身高/mm	车身高/mm	车身高/mm	承载方式	骨架材料	骨架截面形状	骨架截面尺寸/mm	侧立柱间距/mm	顶棚立柱间距/mm
客车1	10 990	2 500	3 600	全承载	Q345	矩形	30(与刚性面接触)×50×2	1 540	1 125
客车2	10 990	2 500	3 600	全承载	Q345	矩形	40(与刚性面接触)×50×2	1 540	1 120

12.12%,与理论推测相符。可见,可通过改变车身骨架梁结构截面形态提升抗弯截面系数,降低侧翻过程中梁结构承受的最大弯曲应力,改善客车侧翻结构安全性能。

表2 试验1中试验客车乘员生存空间情况

客车编号	最小生存空间/mm	客车编号	最小生存空间/mm
客车1	33	客车2	37

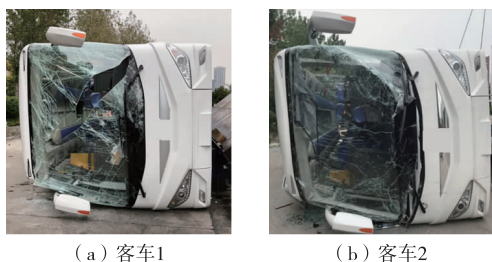


图3 试验1中试验客车侧翻后车身骨架变形情况

表3 试验2中试验客车的基本参数

客车编号	车身高/mm	车身高/mm	车身高/mm	承载方式	骨架材料	骨架截面形状	骨架截面尺寸/mm	侧立柱间距/mm	顶棚立柱间距/mm
客车3	8 130	2 160	2 900	非承载	Q235B	矩形	25×25×1.5	1 610	930
客车4	8 130	2 160	2 900	非承载	Q235B	矩形	25×25×2.0	1 610	910

表4 试验2中试验客车乘员生存空间情况

客车编号	最小生存空间/mm	客车编号	最小生存空间/mm
客车3	88	客车4	127

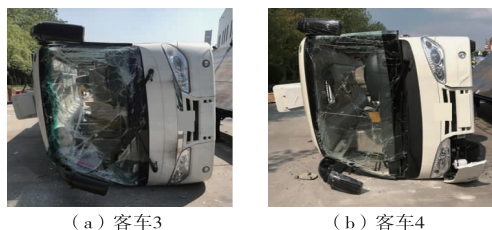


图4 试验2中试验客车侧翻后车身骨架变形情况

表5 试验3中试验客车的基本参数

客车编号	车身高/mm	车身高/mm	车身高/mm	承载方式	骨架材料	骨架截面形状	骨架截面尺寸/mm	侧立柱间距/mm	顶棚立柱间距/mm
客车5	8 045	2 190	2 750	全承载	Q235	矩形	30(与刚性面接触)×40×2	1 765	1 765
客车6	8 060	2 190	2 750	全承载	Q345	矩形	30(与刚性面接触)×40×2	1 760	1 760

3.2 薄壁型钢结构厚度对侧翻结构安全性能的影响

针对同系列客车,在车身骨架等主要变形部件结构及车辆基本属性等参数一致或相似的情况下,改变骨架梁结构的薄壁型钢结构厚度进行上部结构强度试验(试验2),试验客车的基本参数见表3。

客车4的车身骨架梁结构的薄壁型钢结构厚度大于客车3,按照理论计算,客车4的抗弯截面系数大于客车3,在侧翻后保留给车内乘员的生存空间应更大。

试验2的试验结果见表4、图4。客车4在侧翻后的乘员最小生存空间大于客车3,生存空间提升44.32%,与理论推测相符。可见,可通过增大车身骨架梁结构的薄壁型钢结构厚度提升抗弯截面系数,降低侧翻过程中梁结构承受的最大弯曲应力,改善客车侧翻结构安全性能。

3.3 材料属性及其力学性能对侧翻结构安全性能的影响

针对同系列客车,在车身骨架等主要变形部件结构及车辆基本属性等参数一致或相似的情况下,改变骨架梁结构材料属性及其力学性能进行上部结构强度试验(试验3),试验客车的基本参数见表5。

如表6所示,Q345的屈服强度及拉伸强度优于Q235,按照理论计算,客车6所用车身骨架梁结构材料属性及其力学性能优于客车5,在侧翻后保留给车内乘员的生存空间应更大。

表6 试验3中试验客车车身骨架梁结构材料属性及其力学性能

材料种类	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
Q235	235	375~500
Q345	345	470~630

试验3的试验结果见表7、图5。客车6在侧翻后的乘员最小生存空间大于客车5,生存空间提升126.32%,与理论推测相符。可见,可通过改变车身骨架梁结构材料属性及其力学性能,使用高强度钢,提高其最大许用应力及抗变形能力,改善客车侧翻结构的安全性能。

表7 试验3中试验客车乘员生存空间情况

客车编号	最小生存空间/mm	客车编号	最小生存空间/mm
客车5	19	客车6	43

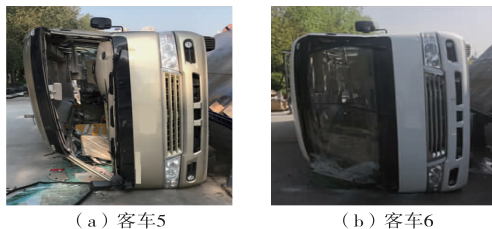


图5 试验3中试验客车侧翻后车身骨架变形情况

3.4 侧翻结构安全性能优化

通过理论分析及3组试验验证,车身骨架梁结构截面形态、薄壁型钢结构厚度、材料属性及其力学性能均会对客车侧翻结构安全性能产生一定影响。可通过如下方式优化客车侧翻结构的安全性能:

(1) 调整车身骨架梁结构截面形态,提升抗弯截面系数。适当增加与刚性面发生碰撞的梁结构截面外表面宽度,提升抗弯截面系数,改善侧翻结构的安全性能。

(2) 增大车身骨架梁结构关键部位的薄壁型钢结构厚度,提升抗弯截面系数。适当增大关键部位及应力较大区域薄壁型钢结构厚度,在质量变化不大的情况下改善侧翻结构安全性能。

(3) 改变车身骨架梁结构所用材料属性及其力学性能,提升侧翻结构安全性能。改变材料属性及其力学性能是侧翻结构安全性能优化最有效且最本质的方式,材料属性及其力学性能对侧翻结构安全性能的改善程度最大、效果最明显。

4 结论

(1) 提升车身骨架梁结构抗弯截面系数或增加

材料许用应力,可改善客车侧翻结构的安全性能。

(2) 调整车身骨架梁结构截面形态、增大关键部位薄壁型钢结构厚度、改变材料属性及其力学性能,可增加抗弯截面系数或材料许用应力,提高车身骨架抗变形能力,提升客车侧翻安全性能。

(3) 改变材料属性及其力学性能是改善客车侧翻安全性能最有效且最本质的方式,侧翻后其最小生存空间提升126.32%;其次是增大薄壁型钢结构厚度及调整车身骨架梁结构截面形态,侧翻后最小生存空间分别提升44.32%、12.12%。

参考文献:

- [1] 那景新,王秋林,高剑峰,等.基于侧翻安全性的客车腰梁接头结构改进研究[J].汽车工程,2015,37(7):848-852+860.
- [2] 公安部计算机与信息处理标准化技术委员会.道路交通事故信息代码第2部分:事故形态代码:GA/T 16.2-2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [3] 刘君.基于侧翻安全性的中型客车车身骨架结构分析与优化[D].长沙:湖南大学,2017.
- [4] 王书举,潘一山,张国胜,等.某6756型客车侧翻碰撞安全性分析[J].公路交通科技,2015,32(6):154-158.
- [5] YAMAGUCHI G T, ASHBY B, LAI W, et al. Occupant mechanics in rollover simulations of high and low aspect ratio vehicles[Z].SAE 2006 World Congress & Exhibition,2006.
- [6] CRUZ M G H, VIECELLI A. A methodology for replacement of conventional steel by microalloyed steel in bus tubular structures[J].Materials and Design,2008,29(2):539-545.
- [7] KO H Y, SHIN K B, JEON K W, et al. A study on the crashworthiness and rollover characteristics of low-floor bus made of sandwich composites[J].Journal of Mechanical Science and Technology,2009,23(10):2686-2693.
- [8] 何汉桥,张维刚.高床大客车侧翻结构安全性仿真研究[J].机械科学与技术,2007,26(7):922-925+930.
- [9] GÜRSEL K Turgut, GÜRSERLI Serap. Analysis of the superstructure of a designed bus in accordance with regulations ECE R66 [J].Gazi University Journal of Science,2010,23(1):71-79.
- [10] 张胜兰,吕文芬.8 m 客车侧翻仿真与上部结构安全性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(6):1212-1216.
- [11] 徐晓芳,韩健,路斌.客车上部结构强度分析及试验[J].客车技术与研究,2017(1):51-53.

(下转第7页)

上转速段较采用原盖板时无明显改善。新盖板 24 阶噪声在 1 640 r/min 转速时的 RMS 值为 58 dB(A),较原盖板的 81 dB(A)减少 23 dB(A)。这主要是因为电机 24 阶 1 640 r/min 对应的频率为 656 Hz,换新盖板后,640 Hz 附近的共振带消失,振动减弱,进而对外辐射噪声减小。

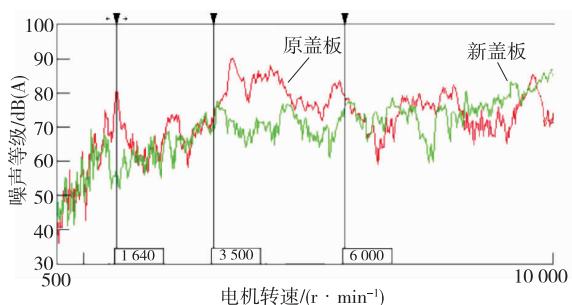


图 6 采用不同盖板时电机总成 24 阶噪声对比

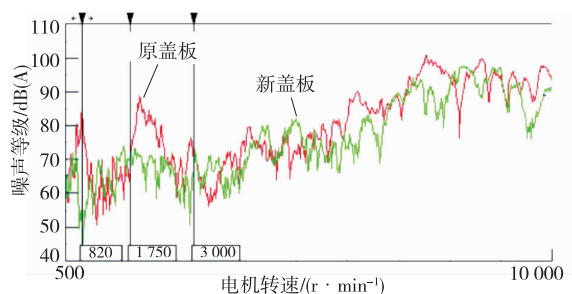


图 7 采用不同盖板时电机总成 48 阶噪声对比

从图 7 可看出:采用原盖板时电机总成对外辐射的 48 阶噪声在 1 750~3 000 r/min 转速段的 RMS 值为 80 dB(A),采用新盖板时为 68 dB(A),较原盖板减少 12 dB(A),降噪明显。但采用新盖板时电机总成 48 阶噪声在 3 000 r/min 以上转速段较原盖板无明显改善。新盖板 48 阶噪声在 820 r/min 转速时的噪声为 51 dB(A),较原盖板的 85 dB(A)减少 34 dB(A)。这主要是因为电机 48 阶噪声在

820 r/min 转速时对应的频率为 656 Hz,换新盖板后,640 Hz 附近的共振带消失,振动减弱,进而对外辐射噪声减小。

综上,新盖板对电机总成有较好的减振降噪效果,其有效减振降噪作用频率为中低频段 1 400~2 400 Hz。

4 结论

针对一款研发中电机总成的 NVH 问题,从降低噪声辐射传递的角度,选用一款新型阻尼复合材料盖板代替原铝盖板。试验研究表明:新盖板在中低频段对降低电机噪声辐射效果显著,24 阶噪声在该频段降低 11 dB(A),48 阶噪声在该频段降低 12 dB(A),且由于盖板模态的改变,原盖板 640 Hz 附近的共振带消失,进而使 640 Hz 附近的噪声明显减小。采用该复合材料能显著降低电机总成的振动噪声,该研究可为电机总成的振动噪声改善提供一种新思路。

参考文献:

- [1] 严刚,夏顺礼,张欢欢,等.某纯电动车车内噪声试验分析与识别[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(9):1298—1301.
- [2] GUO J P,DONG L L.Sliding mode based load frequency control for a two-area interconnected power system[J].International Journal of Intelligent Control and Systems,2015,20(1):16—25.
- [3] 李涛,曲艳双,周秀燕,等.复合材料老化性能影响因素的研究[J].纤维复合材料,2015,22(2):22—25.
- [4] 熊志远,王士军,张龙,等.阻尼结构减振性能的测试及分析[J].机械设计与制造,2020(8):64—67.

收稿日期:2021—09—25

(上接第 4 页)

- [12] 纪绪北,雷发荣,潘亚南,等.客车侧翻仿真与试验分析[J].客车技术与研究,2019(4):16—18.
- [13] 郝海舟,符志.某客车侧翻的计算机模拟测试[J].客车技术与研究,2015(1):23—25.
- [14] 杨瑞峰,樊江顺,崔海涛,等.基于 ECE R66 法规的某大客车上部结构强度[J].公路交通科技,2011,28(10):136—140.
- [15] 全国汽车标准化技术委员会.客车上部结构强度要求及试验方法:GB 17578—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.

- [16] 亓文果.基于 ECE R66 法规的客车侧翻碰撞安全性能的仿真与优化[J].汽车工程,2010,32(12):1042—1046.
- [17] 杨伯源.材料力学[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [18] 邵毅明,司红建,查官飞.大客车侧翻安全性仿真分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2013,27(2):6—12.
- [19] 周鑫美.基于侧翻安全性的客车骨架设计研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [20] 申福林,胡选儒.客车新技术与新结构[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.

收稿日期:2021—07—14