

北京市轨道交通新机场线车辆转向架 横向止挡设计及优化

李 涛¹ 薛世海¹ 赵 卓¹ 刘海涛¹ 舒 友¹ 陈水友² 黄 涛³ 阴晓铭¹

(1. 中国中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 2. 武汉地铁运营有限公司, 430030, 武汉; 3. 株洲时代瑞唯减振装备有限公司, 412007, 株洲//第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对北京市轨道交通新机场线对车辆技术参数的较高要求,对传统横向止挡结构刚度性能及抗疲劳性能进行分析,并提出了将外围金属与橡胶硫化粘结为一体的横向止挡优化方案。建立横向止挡的有限元分析模型计算其刚度,采用疲劳曲线,根据多应力和应变条件下的疲劳累积法则对优化后的横向止挡橡胶弹性体疲劳强度进行分析。仿真结果表明,优化后的横向止挡完全满足使用要求;试验结果表明,优化后的横向止挡刚度性能和抗疲劳性均满足使用要求。

关键词 城市轨道交通车辆; 横向止挡; 抗疲劳性能

中图分类号 U270.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.032

Design and Optimization of Bogie Lateral Buffer for Beijing Rail Transit New Airport Line Vehicle

LI Tao, XUE Shihai, ZHAO Zhuo, LIU Haitao, SHU You, CHEN Shuiyou, HUANG Tao, YIN Xiaoming

Abstract In view of the high requirements of Beijing rail transit new airport line on vehicle technical parameters, the performance of stiffness and fatigue resistance of conventional lateral buffer structure is analyzed, and an optimization scheme of lateral buffer is proposed, which integrates the peripheral metal and rubber by vulcanization and bonding. A finite element analysis model of lateral buffer is established to calculate its stiffness, then using fatigue curve and according to the fatigue cumulation rule under multi-stress and strain conditions, the fatigue strength of the optimized lateral buffer rubber elastomer is analyzed. The simulation results show that the optimized lateral buffer fully meets the operation requirements, and the test results show that the stiffness performance and fatigue resistance of the optimized lateral buffer meet the operation requirements as well.

Key words urban rail transit vehicle; lateral buffer; fatigue

resistance performance

First-author's address National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

北京市轨道交通新机场线(以下简为“新机场线”)车辆以市域(郊)铁路运营环境为设计基础,是介于地铁车辆和动车组之间的新型城市轨道交通车辆,设计运行速度为160 km/h。相对于传统地铁车辆,新机场线车辆对运行平稳性、舒适性及安全性的要求更高,相应地对转向架横向止挡的性能要求也更高。

转向架横向止挡是保证车辆平稳、舒适、安全运行的重要弹性悬挂部件。为适应线路复杂工况,新机场线车辆横向止挡应具有较优的刚度性能和抗疲劳性能。相较于传统的横向止挡产品,新机场线车辆横向止挡不仅要满足更严格的技术参数要求,还须满足多点强刚度非线性要求,以及5种不同载荷工况下10 000 000次总循环次数的疲劳试验要求。由此可见,新机场线车辆的横向止挡结构须进行优化设计。

本文基于新机场线线路运营要求,对传统横向止挡结构的橡胶弹性体刚度进行有限元仿真计算,根据多应力和应变条件下的疲劳累积法则(即Miner法则)^[1],采用疲劳曲线对橡胶弹性体疲劳性能进行分析,针对横向止挡结构的刚度及疲劳特性提出优化方案,并制作样品,通过仿真和实体试验进一步验证优化后止挡结构的刚度和疲劳性能要求。

1 优化思路与理论

1.1 疲劳分析理论

1.1.1 疲劳曲线

疲劳曲线反映疲劳循环次数 N 与极限应力 σ_N

的关系。 σ_N 也称为条件疲劳极限。对于某一种材料,可通过试验得出 σ_N 。

1.1.2 疲劳累积损伤准则

疲劳累积损伤准则在疲劳可靠性分析中占有重要地位。现在工程上最常用的疲劳损伤准则是 Miner 线性累积损伤准则。该准则认为:构件在不同载荷作用下各个应力循环的疲劳损伤是相互独立的,是可以线性累加的;当累加的损伤达到一定数值时,零部件或构件就发生破坏。即如果构件承受应力幅值为 σ ,重复 N 次后破坏,则在整个过程中材料所承受的损伤线性地分配给各次循环,即在第 i 次循环中的材料损伤 $D_i = 1/N_i$ 。若 σ_1 载荷作用 n_1 次,则材料的损伤 $D_1 = n_1/N_1$;同样,应力 σ_2 、 σ_3 分别作用 n_2 、 n_3 次,则材料损伤依次为 $D_2 = n_2/N_2$, $D_3 = n_3/N_3$ 。当材料完全损伤时, $\sum D_i = 1$ 。以此类推,则材料发生破坏时有:

$$\sum (n_i/N_i) = 1 \tag{1}$$

1.2 设计要求

为了确保车体与横向止挡的柔性接触,北京新机场线车辆横向止挡的初始刚度非常低:当横向止挡位移为 0 ~ 5.0 mm 时,对应的横向止挡刚度(以下称为“初始刚度”)为 300 N/mm;当横向止挡位移为 20.0 ~ 25.0 mm 时,对应的横向止挡刚度(以下称为“末端刚度”)为 12 000 N/mm。由此可见,横向止挡的末端刚度是初始刚度的 40 倍。为了确保横向止挡的可靠性和疲劳寿命,横向止挡在不同载荷工况下的循环次数见表 1,其中总计疲劳循环次数为 10 000 000 次。

表 1 横向止挡的疲劳载荷要求

Tab.1	Fatigue load requirements of lateral buffer		
载荷工况	横向止挡位移/mm	加载频率/Hz	循环次数/次
载荷 1	5.0	5.0	5 000 000
载荷 2	10.0	3.0	2 000 000
载荷 3	15.0	2.0	1 500 000
载荷 4	20.0	1.0	1 000 000
载荷 5	25.0	0.5	500 000

2 方案的优化与验证

2.1 横向止挡原方案

新机场线车辆的横向止挡原方案结构如图 1 所示。横向止挡主要由橡胶弹性体和金属结构止挡装配组成,用于缓冲车体振动及限制过大的车体横

向位移。

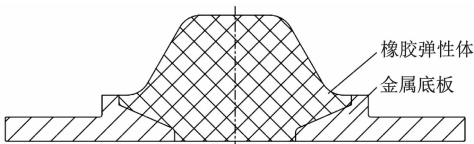


图 1 新机场线车辆横向止挡原方案结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of new airport line vehicle lateral buffer in the original scheme

当车辆在直线段行驶时,横向止挡不与安装在车体上的中心销接触,以确保直线段行驶时的横向舒适性。当车辆通过曲线段时,横向止挡与安装在车体上的中心销接触,以减缓车辆横向振动及限制车体过大的横向位移,确保车辆通过曲线时的运行平稳性和安全性。当车辆在小半径曲线段运行时,横向止挡的橡胶弹性体与车体频繁接触,不断发生压缩变形。传统的横向止挡橡胶型面受载变形自由度大、性能曲线线性程度高,在疲劳工况下的受载形变过大,容易出现裂纹和粘结失效,进而影响其使用性能,降低车辆运行的平稳性和舒适性。

采用 Ansys 有限元软件分析原方案横向止挡在不同载荷工况下的橡胶变形情况,验证其结构是否能满足图 2 中载荷位移曲线的要求。在 Ansys 有限元分析中:橡胶材料采用 Neo-Hookean 模型,泊松比取 0.5;金属件采用普通钢材,弹性模量为 210 GPa,泊松比取 0.3。经有限元计算得到的原方案载荷-位移拟合曲线及其对应要求曲线如图 2 所示。

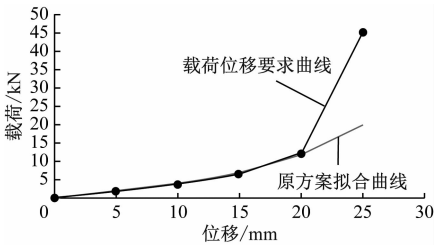


图 2 原方案的载荷-位移拟合曲线及其对应要求曲线

Fig. 2 Load-displacement fit curve and corresponding requirement curve in the original scheme

由图 2 可知,当横向止挡位移为 5.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm 时,载荷拟合值与要求值非常接近,经计算刚度误差约为 $\pm 11.11\%$ 。而当横向止挡位移达 25.0 mm 时,原结构方案计算载荷与要求值相距甚远,其刚度误差达到 55.56%,因此原结构方案止挡产品不满足非线性刚度使用要求。

根据图 2,结合橡胶材料疲劳试验,拟合出原方

案橡胶材料的疲劳曲线^[2],见图 3。

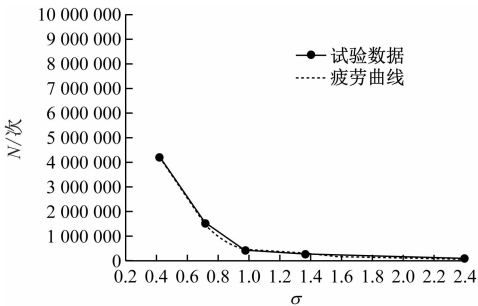


图 3 原方案橡胶材料的疲劳曲线

Fig. 3 Fatigue curve of rubber material in the original scheme

根据疲劳曲线来预测横向止挡位移分别为 5.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm 和 25.0 mm 时对应载荷工况下的疲劳循环次数,结果如表 2 所示。由表 1 得到各载荷工况下的疲劳循环次数,并根据疲劳损伤累积法则计算疲劳试验中横向止挡位移分别为 5.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm 和 25.0 mm 时的累积损伤。由表 2 可知,当横向止挡位移为 25.0 mm 时,横向止挡的疲劳累积损伤为 2.931 9,远大于 1,说明原方案结构难以满足产品疲劳性能要求。

表 2 原方案的横向止挡应变及疲劳累积损伤

Tab. 2 Lateral buffer strain and fatigue cumulative damage in the original scheme

横向止挡位移/mm	应变	预测循环次数/次	目标循环次数/次	疲劳累积损伤
5.0	0.09	154 792 068	5 000 000	0.032 3
10.0	0.21	21 081 394	2 000 000	0.127 2
15.0	0.32	7 824 623	1 500 000	0.318 9
20.0	0.45	3 508 103	1 000 000	0.603 9
25.0	0.63	1 589 399	500 000	1.849 6

进一步分析可知,原方案在横向止挡位移为 25.0 mm 时的载荷过小,且疲劳工况下橡胶应变过大,进而导致产品非线性刚度及疲劳性能难以满足要求。这主要是由于横向止挡在初期受载后其橡胶变形自由度未受限制导致的^[3]。因此,可在原方案的基础上,通过限制橡胶的受载变形自由度来增大横向止挡位移为 25.0 mm 时的载荷,进而降低疲劳载荷下橡胶的过大应变,实现横向止挡方案的优化。

2.2 横向止挡的优化方案

新机场线车辆横向止挡优化后的有限元模型

如图 4 所示。图 4 中,金属件与橡胶硫化粘结为一体^[4];橡胶弹性体用于缓冲车体冲击;金属结构件主要用于连接转向架,并限制车体过大的横向位移。一方面,横向止挡优化方案利用了橡胶的低泊松比特性(泊松比仅为 0.5)^[5],使横向止挡在橡胶弹性体末端变形时能迅速增大刚度;另一方面,横向止挡优化方案利用外围的金属件来约束橡胶弹性体变形自由度,避免其过大变形,确保了橡胶的抗疲劳性能。新机场线车辆横向止挡优化后的橡胶变形图见图 5。

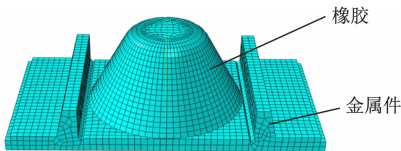


图 4 新机场线车辆横向止挡优化后有限元模型示意图

Fig. 4 Diagram of finite element model of new airport line vehicle lateral buffer after optimization

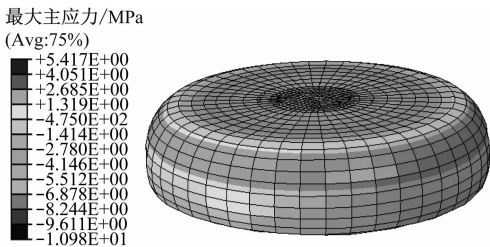


图 5 新机场线车辆横向止挡优化后的橡胶变形图

Fig. 5 Rubber deformation diagram of new airport line vehicle lateral buffer after optimization

横向止挡优化后新方案的载荷-位移拟合曲线及其要求曲线如图 6 所示。由图 6 可见,拟合曲线与要求曲线非常吻合。经计算,当横向止挡位移为 5.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm 和 25.0 mm 时,相应加载条件下的平均刚度误差不超过 $\pm 6\%$ 。可见,横向止挡结构优化后能够满足产品非线性刚度性能要求。横向止挡的疲劳累积损伤为 0.982 4 (见表 3),小于 1,说明疲劳试验完成时的横向止挡没有完全损伤,满足设计要求。

2.3 优化效果的试验验证

根据新方案,设计制作了 3 件试验样品(样品 1、样品 2 和样品 3)。在实验室对 3 件样品分别进行性能测试:采用型号为 MTS 810 的动态测试设备和标准试验方法对 3 件样品进行刚度检测和疲劳性能检测。

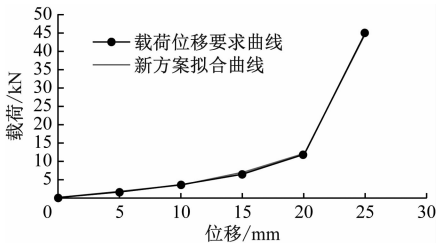


图6 新方案载荷-位移拟合曲线及其对应要求曲线

Fig. 6 Load-displacement fit curve and corresponding require-
ment curve in the new scheme

表3 新方案的横向止挡应变及疲劳累积损伤

Tab.3 Lateral buffer strain and fatigue cumulative
damage in the new scheme

横向止挡 位移/mm	应变	预测循环 次数/次	目标循环 次数/次	疲劳累积 损伤
5.0	0.06	162 636 145	5 000 000	0.011 6
10.0	0.16	30 574 628	2 000 000	0.062 4
15.0	0.24	8 542 724	1 500 000	0.161 2
20.0	0.33	4 945 049	1 000 000	0.296 4
25.0	0.46	3 487 410	500 000	0.450 8

新方案横向止挡样品的刚度测试结果见图7。测试结果显示,3件样品的载荷-位移曲线均能满足横向止挡位移分别为5.0 mm、10.0 mm、15.0 mm、20.0 mm和25.0 mm时的设计载荷要求。疲劳性能检测试验结果显示,横向止挡橡胶和金属件粘接良好,橡胶件表面没有发现超过3 mm的裂缝。上述试验结果证明,采用新方案后,横向止挡能满足刚度性能和疲劳性能的设计要求。

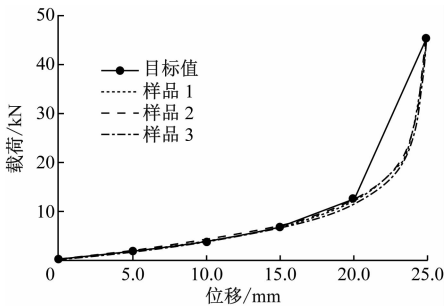


图7 新方案横向止挡样品刚度测试结果

Fig. 7 Stiffness test results of lateral buffer sample in the
new scheme

3 结语

1) 利用橡胶的低泊松比性,提出了外围金属板

与橡胶硫化粘结为一体的车辆横向止挡优化方案。该优化方案既有利于满足多点强非线性刚度要求,又有利于避免橡胶的过大变形,提高产品的疲劳性能。

2) 对横向止挡优化后新方案的结构刚度性能进行有限元计算。计算结果表明,优化后的止挡结构能够满足产品使用刚度要求。根据疲劳曲线,基于多应力和应变条件下的疲劳累积法则,结合橡胶材料疲劳试验,拟合出橡胶材料压缩疲劳曲线。疲劳累积损伤试验结果表明,优化后的横向止挡疲劳性能满足设计要求。

3) 根据新方案,制作了3件横向止挡样品以进行验证试验。试验得到的载荷-位移曲线满足不同止挡位移时的设计载荷要求,说明样品满足刚度性能要求。样品按照疲劳试验要求进行10 000 000次的疲劳试验后,外观良好,无裂缝等不良缺陷,表明样品满足疲劳性能要求。

参考文献

[1] 郑晓阳. 基于累积破坏率法的疲劳寿命及可靠性预测[D]. 北京: 北京交通大学, 1998.
ZHENG Xiaoyang. Fatigue life and reliability prediction based on cumulative failure rate method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 1998.

[2] 王伟晓, 丁智平, 王进, 等. 轨道交通车辆用横向止挡橡胶材料的断裂特性[J]. 橡胶工业, 2009, 56(6): 341.
WANG Weixiao, DING Zhiping, WANG Jin, et al. Fracture characteristics of lateral buffer rubber materials for rail vehicles[J]. China Rubber Industry, 2009, 56(6): 341.

[3] 刘丽, 张卫华, 黄光速, 等. 高速列车用橡胶减振垫研制及试验研究[J]. 现代制造工程, 2015(12): 86.
LIU Li, ZHANG Weihua, HUANG Guangsu, et al. Development and experimental study of a rubber damping pad on the high-speed train[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(12): 86.

[4] 詹特. 橡胶工程: 如何设计橡胶配件[M]. 张立群, 译. 北京: 化学工业出版社, 2002.
GENT A N. Engineering with rubber: how to design rubber components[M]. ZHANG Liqun, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

[5] TANAKA S. A probabilistic investigation of fatigue life and cumulative cycle ratio[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1984, 20(3): 501.

(收稿日期:2022-07-31)