

# 上海轨道交通9号线车辆转向架轴箱吊耳失效分析及优化建议

印楨民

(上海地铁维护保障有限公司车辆分公司,200235,上海//高级工程师)

**摘 要** 针对上海轨道交通9号线车辆转向架轴箱吊耳出现裂纹和断裂问题,分析了轴箱吊耳材料的化学成分,建立了轴箱吊耳有限元模型,校核了其静强度和疲劳强度。结合线路轮轨振动试验,获得了实际的轴箱吊耳振动数据,综合评估分析了转向架轴箱吊耳断裂失效原因。确定共振是引起轴箱吊耳断裂的主要原因。提出了尺寸优化、结构优化和改善线路状况等可行的优化建议。

**关键词** 城市轨道交通;车辆;轴箱吊耳;故障分析;部件优化

**中图分类号** U270.331

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.05.008

## Failure Analysis of Axle Box Hanger on Shanghai Rail Transit Line 9 and Optimization Suggestions

YIN Zhenmin

**Abstract** For the crack and fracture problems in the bogie axle box hanger on Shanghai metro Line 9, the chemical composition of the material is analyzed. Then, a finite element model of the axle box hanger is established to check the static strength and fatigue strength. Combined with the line's wheel-rail vibration test, the actual axle box hanger vibration data are obtained. Through a comprehensively evaluation of the bogie axle box hanger fracture failures, and the resonance is detected as the main cause of the axle box hanger fracture. Therefore, feasible optimization suggestions are proposed.

**Key words** urban rail transit; vehicle; axle box hanger; failure analysis; component optimization

**Author's address** Vehicle Branch, Shanghai Metro Maintenance Guarantee Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

地铁车辆转向架的轴箱吊耳是转向架重要组成部件之一,对于行车安全意义重大。其主要功能是与撞击止挡相互配合,限制转向架轮对过多偏转,并在转向架处于起吊状态时防止轮对与构架分离。轴箱吊耳安装位置如图1所示。

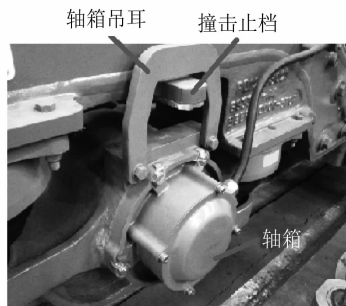


图1 轴箱吊耳安装位置照片

列车在正线运营过程中,如果轴箱吊耳失效,势必会造成较大的运营风险。风险主要表现为两方面:①轴箱吊耳断裂后,断裂后的吊耳可能会掉落在正线道岔等关键位置,脱落部件有可能造成严重的行车事故<sup>[1]</sup>;②轴箱吊耳功能失效,将不具备轴箱限位功能,导致列车运行动态稳定性有所降低,在正线运营时存在侵限可能。

本文以上海轨道交通9号线(以下简称“9号线”)车辆转向架轴箱吊耳故障为切入点,采用材料化学成分分析、有限元仿真和振动试验等方法进行分析研究,判断轴箱吊耳断裂失效的可能原因;同时,基于对故障轴箱吊耳的受力及承载分析,提出了防止轴箱吊耳发生断裂的优化建议。

## 1 故障描述

自2013年6月,9号线列车转向架轴箱位置吊耳陆续出现裂纹和断裂故障,断裂形式见图2。在此后的一年多时间里,9号线共计出现轴箱吊耳裂纹或断裂故障90余起,其中既有吊耳断裂故障,也有母材存在明显可视裂纹故障。

探究轴箱吊耳失效的可能原因,需对其材料进行化学成分分析,以确认是否满足原材料性能要求,同时还需对其静强度和疲劳强度进行分析,以判定其强度是否满足相关标准要求。



图2 断裂的轴箱吊耳

2 失效原因分析

2.1 化学成分分析

根据 EN 10025-2:2004 标准及设计技术文件,转向架轴箱吊耳的材料为 S355J2,属于热轧结构钢。选取 1 个故障轴箱吊耳作为分析对象,从断裂部位进行取样,通过光电直读光谱仪确定材料的主要化学成分及其占比。分析结果如表 1 所示。

表 1 轴箱吊耳化学元素成分的质量分数 %		
化学成分	试样值	标准值
C	0.140	≤0.220
Si	0.270	≤0.550
Mn	0.540	≤1.600
P	0.026	≤0.025
S	0.026	≤0.025
Cr	0.030	≤0.300

由表 1 可知,采样位置的材料化学元素成分符合 EN 10025-2:2004 标准要求。

2.2 静强度计算

采用参数化建模方法建立轴箱轴箱吊耳有限元模型,根据 S355J2 材料属性设置材料密度、弹性模量及泊松比。网格划分采用六面体实体单元,其中节点数为 1 853 个,单元数为 268 个。网格划分结果如图 3 所示。

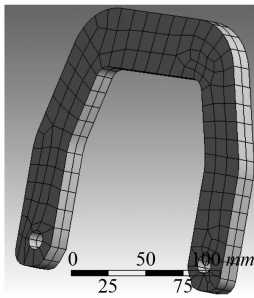


图3 建模及网格划分结果

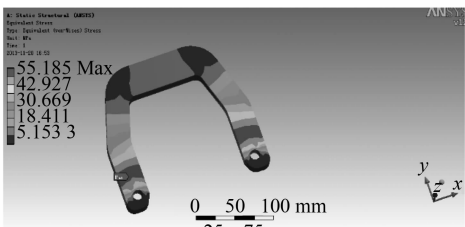
根据轴箱吊耳实际安装情况,在两个螺栓孔部位施加约束,并根据对正线运行的 926<sup>#</sup> 列车实测获

得振动冲击数据,进行加载计算。正线测得的轴箱吊耳横向加速度如表 2 所示。

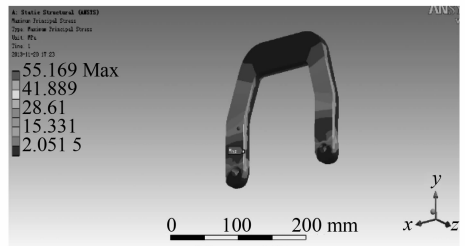
由表 2 可知,列车横向加速度最大值约为 1 227 m/s<sup>2</sup>,出现在佘山站—泗泾站区间。因此,列车横向加速度取 1 227 m/s<sup>2</sup>来作为模拟计算工况,进行有限元计算。静力学计算应力云图见图 4。

表 2 吊环各区段横向加速度

列车号	运行区间	轴箱吊耳横向振动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	
		最大值	有效值
926 <sup>#</sup>	洞泾站—佘山站	1 104.43	50.70
926 <sup>#</sup>	佘山站—泗泾站	1 227.02	78.45
926 <sup>#</sup>	泗泾站—九亭站	872.81	58.22
926 <sup>#</sup>	星中路站—合川路站	1 204.37	86.56
926 <sup>#</sup>	宜山路站—徐家汇站	1 138.42	45.89
926 <sup>#</sup>	打浦桥站—马当路站	583.69	39.23



a) Z轴方向列车加速度为 1 227 m/s<sup>2</sup> 工况下的应力云图



b) Z轴方向列车加速度为 -1 227 m/s<sup>2</sup> 工况下的应力云图

图4 最大横向振动工况下的轴箱吊耳应力云图

根据应力云图可知:在 Z 轴方向列车加速度为 1 227 m/s<sup>2</sup> 工况下,轴箱吊耳最大应力值为 55.19 MPa,且最大应力出现在节点 251 位置;在 Z 轴方向列车加速度为-1 227 m/s<sup>2</sup> 工况下,轴箱吊耳最大应力值为 55.17 MPa,节点 251 处的应力值为 -54.99 MPa。

根据 EN 10025-2:2004 标准,S355J2 的屈服强度  $\sigma_s=355$  MPa,抗拉强度  $\sigma_b=470\sim630$  MPa。在最大横向振动工况下,轴箱吊耳各位置的应力均小于相应材料的屈服强度,安全系数  $n=6.45$ 。经校核,轴箱吊耳静强度符合设计及承载要求。

2.3 疲劳强度计算

由静力学结果显示,在最大横向振动工况下,

轴箱吊耳最大应力发生于节点 251 处。该处应力幅值为：

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 \tag{1}$$

将节点 251 的最大应力值和最小应力值代入式 (1) 可得,该位置应力幅值为 55.1 MPa。

根据材料在对称循环下的疲劳极限和极限静强度  $\sigma_b$  之间的关系<sup>[2]</sup>,其循环应力  $\sigma_{-1}$  约为 0.33 ~ 0.59 倍  $\sigma_b$ ,计算可得最小值  $\sigma_{-1,\min}$  约为 155.1 MPa。故安全系数  $n_6 = \sigma_{-1,\min}/\sigma_a = 2.8$ 。可见,疲劳强度符合设计及承载要求。

轴箱吊耳有限元仿真计算结果表明,轴箱吊耳的静强度和疲劳强度均满足技术要求及承载要求,在正常状态下,轴箱吊耳强度完全满足要求。

2.4 振动测试

为进一步确认故障发生的原因,选 1 列列车进行轴箱及轴箱吊耳振动测试,研究轴箱吊耳在正线运营时的横向振动情况。振动测试主要试验仪器如表 3 所示。本次测试目的是基于正线振动测试数据,由转向架轴箱与轴箱吊耳振动试验结果的频谱分析,提取两者的横向自振频率数值,并对比分析判定是否出现共振现象。

表 3 振动测试主要试验仪器表

仪器	数量/台	型号
分析软件	1	DASP-V10 工程版
CPCI 机箱	1	INV3020D
数据采集卡	8	INV3018G
加速度传感器-125 g	12	13 510

选取试验列车某节车辆的 1 位端转向架轴箱及其吊耳位置布置试验测点,并在正线进行两次振动试验测试。试验时硬件设备及采集信号均正常。对全线路采集后的数据进行分析发现,列车在部分区段运行时轴箱吊耳振动较为剧烈,部分区段内振动较为平缓。其中,振动剧烈区段内,各测点的轴箱吊耳横向振动主频率如表 4 所示,其中 4#测点轴箱吊耳频谱见图 5。

表 4 各测点轴箱吊耳横向振动主频 Hz

测点	横向振动主频	
	第一次正线实测	第二次正线实测
1#	367.5	343.5
2#	373.5	321.0
3#	359.5	334.5
4#	316.5	351.5

通过现场测试可知,车辆轴箱对轨道激励的频

率响应及自振频率在不同区段表现不尽相同,但是频率范围基本均为 300~400 Hz<sup>[3-4]</sup>。

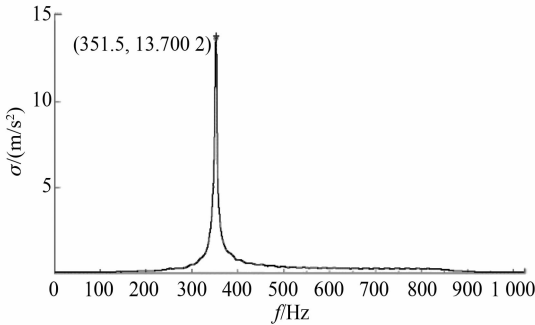


图 5 4#轴箱吊耳频谱

为明确地铁车辆轴箱的轴箱吊耳自振频率,选取 9 号线试验列车对轴箱吊耳进行频率响应测试。在轴箱吊耳上侧布设激励点,在故障位置附近布设响应点(如图 6 所示),用力锤对轴箱吊耳进行锤击,并记录响应信号,得到频率响应函数。对激励信号加汉宁窗函数处理,并对响应信号加指数窗函数处理,对每个吊耳进行 5 次锤击,经线性平均计算得到最后结果(分析频率至 1 000 Hz)。1#轴箱吊耳频率响应曲线如图 7 所示,所有吊耳测试结果见表 5。

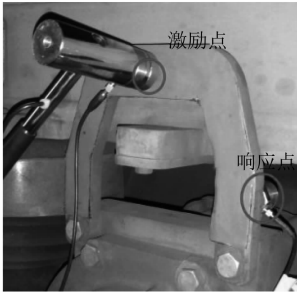


图 6 响应点和激励点

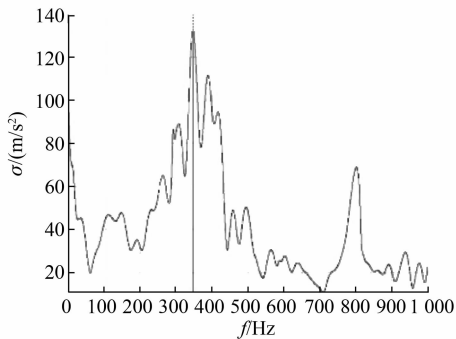


图 7 1#轴箱吊耳频率响应曲线

根据转向架振动试验及自振频率频谱分析可知,所有轴箱吊耳的振动主频均与自振频率接近,

易产生共振。故在列车运行时,轴箱吊耳振动受振动主频影响而加剧,进而导致轴箱吊耳发生断裂或裂纹故障。

表 5 频率响应测试结果

车辆编号	轴箱吊耳位置		频率/Hz
091141	1 位端转向架	1 轴 左侧	335
		2 轴 左侧	339
	2 位端转向架	3 轴 左侧	317
		4 轴 左侧	399
091132	1 位端转向架	1 轴 左侧	322
		2 轴 左侧	342
	2 位端转向架	3 轴 左侧	286
		4 轴 左侧	384

2.5 模态分析

通过有限元静力学建模,对轴箱轴箱吊耳进行模态分析,获得轴箱吊耳前 6 阶模态频率,如表 6 所示。

表 6 模态分析结果

阶数	固有频率/Hz	阶数	固有频率/Hz
1	372.7	4	2 533.7
2	1 057.7	5	3 961.4
3	1 366.1	6	4 074.1

轴箱吊耳一阶模态振型为横向振动,其振型分布如图 8 所示。通过分析可知,轴箱吊耳第一阶模态固有频率为 372.7 Hz,该阶模态下轴箱吊耳固有频率位于实测振动数据范围内。

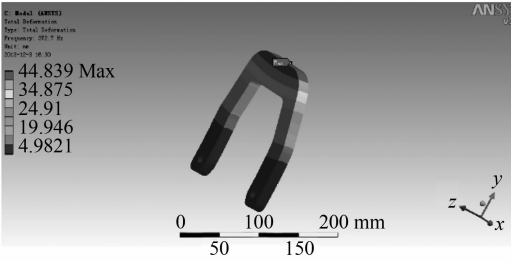


图 8 轴箱吊耳一阶模态振型分布图

将模态分析结果与实际轴箱吊耳发生裂纹及断裂的情况进行对比,确认两者间的受力方向基本一致。综合线路振动试验结果,即可判断轴箱吊耳发生故障的主要原因是由于共振所致。

3 优化建议

通过分析可知,轴箱吊耳发生故障的主要原因是共振原因所致。因此要消除轴箱吊耳断裂的发生,亟需解决的是轴箱吊耳与轨道之间的共振问题,可从优化轴箱轴箱吊耳结构或改善线路状态两方面着手考虑解决。优化建议为:

- 1) 尺寸优化,改变轴箱位置轴箱吊耳的形状或质量,使其固有频率远离列车行驶过程中所引起的激振频率,避免共振现象发生。
- 2) 结构优化,在轴箱吊耳与轴箱接触位置粘贴阻尼材料,通过阻尼材料来改变原轴箱吊耳的固有频率,以解决轴箱吊耳共振问题。
- 3) 改善线路状况,优化正线轮轨关系,尤其是实测振动剧烈的部分区间段,从而降低轮对的横向振动加速度,以达到降低吊耳振动的发生。

4 结语

针对上海轨道交通 9 号线车辆转向架轴箱位置轴箱吊耳频繁断裂故障,本文从结构设计、材质分析、有限元仿真、跟踪实测诸多方面着手分析,确定轴箱吊耳的横向振动主频与自振频率接近、外部激振频率与结构件固有频率接近,造成轴箱吊耳与列车行驶过程中外部激振发生共振,从而引起结构件疲劳断裂。

本文在明确故障诱因的基础上,针对故障源提出了可行的优化策略,对于后续同类型的结构设计提供了很好的借鉴与参考价值。

参考文献

[1] 董兴虎,李影.广州地铁 A2 型车轮对轴箱轴箱吊耳故障案例分析[J].机电工程技术,2018(1): 114.

[2] 孙训方.材料力学[M].成都:西南交通大学出版社,2006.

[3] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].北京:科学出版社,2015.

[4] 同济大学.上海轨道交通 9 号线车辆振动测试分析报告[R].上海:同济大学,2013.

(收稿日期:2019-07-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704