

基于实测谱的转向架支架随机振动仿真 分析及结构改进

谢莹莹 王洪雨 金鑫

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的] 对某一安装在城市轨道交通车辆转向架构架端部的天线支架结构, 在随机振动激励下的疲劳损伤情况进行研究, 以期提出改进措施。[方法] 利用有限元分析软件对天线支架系统进行有限元建模, 对结构进行模态分析, 在此基础上用线路实测的 ASD(振动加速度谱密度) 代替标准谱作为载荷激励; 在疲劳分析软件 nCode 中对天线支架进行随机振动仿真, 获取支架的疲劳损伤结果; 针对支架疲劳薄弱部位提出改进措施, 并验证改进措施的有效性。[结果及结论] 通过仿真发现: 此结构的疲劳薄弱部位在支架两侧筋板的根部, 最大总损伤为 15.58, 其不能满足运用要求。改进措施为: 将支架两侧筋板根部进行局部加厚, 并在侧面增加支撑筋。采取上述措施后, 支架的疲劳损伤值显著降低, 最大总损伤为 0.02, 其可满足运用要求, 从而验证了改进方案的有效性。

关键词 城市轨道交通; 随机振动; 实测谱; 疲劳损伤; 结构改进

中图分类号 U260.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.007

Bogie Bracket Random Vibration Simulation Analysis and Structural Improvement Based on Field-measured Spectrum

XIE Yingying, WANG Hongyu, JIN Xin

(CRRC Nanjing Puzhen CO., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] It is aimed to investigate the fatigue damage of an antenna bracket structure installed at urban rail transit vehicle bogie frame end under random vibration excitation, and improvement measures are proposed. [Method] Finite element modeling of the antenna bracket system is conducted using finite element analysis software. Modal analysis of the structure is performed, and the on-site measured vibration ASD (acceleration spectral density) from the track is used as the load excitation instead of the standard spectrum. A random vibration simulation of the antenna bracket is conducted using fatigue analysis software nCode to obtain the bracket fatigue damage result. Improvement measures are proposed for the fatigue weak points of the bracket, and the effectiveness of the

improvement measures is verified. [Result & Conclusion] Simulation results reveal that the fatigue weak points of this structure are at the roots of the reinforcement plates on bracket both sides, with a maximum total damage of 15.58, failing to meet application requirements. The improvement measures involve locally thickened plate roots on bracket both sides and adding support ribs on the sides. After implementing these measures, the fatigue damage value of the bracket significantly decreased, with a maximum total damage of 0.02, meeting application requirements, thereby verifying the effectiveness of the improvement scheme.

Key words urban rail transit; random vibration; field-measured spectrum; fatigue damage; structural improvement

0 引言

转向架是城市轨道交通车辆的重要组成部分, 其端部可以根据功能需求安装如排障器、轮缘润滑装置、踏面清扫装置及天线支架等附属设备。这些设备通常采用螺栓连接, 其本身不会直接承受较大载荷, 但由于受到来自轨道传递给转向架的振动激励, 当交变载荷的频率范围与结构自身的固有频率重叠或相近时, 会引发结构共振从而造成疲劳失效, 进而严重影响车辆的功能性与安全性, 因此对转向架端部支架进行随机振动仿真十分必要。

我国学者围绕结构的随机振动疲劳评估开展了大量研究工作。曾超以某卡车车架搭载的尿素箱为研究对象, 对尿素箱支架进行随机振动疲劳仿真, 发现风险点与支架实际断裂位置基本吻合, 验证了仿真方法的准确性^[1]。李如忠利用 ANSYS 软件对某一电子产品的安装架结构进行随机振动仿真分析, 提出了结构的改进方案^[2]。杨虎为快速找到机载设备阵列天线的断裂原因, 改进天线结构, 对其原结构和改进结构进行随机振动仿真分析, 对比分析改进前后的仿真结果, 验证了结构改进的合

理性^[3]。袁雨青基于随机振动疲劳分析方法,依据标准 GB/T 21563—2008《轨道交通 机车车辆设备冲击和振动试验》,采用有限元软件 ABAQUS 对铁道车辆某部件进行随机振动仿真计算,对其应力薄弱位置进行疲劳损伤评估,再结合实测数据对比分析有无车轮多边形的影响^[4]。郑长国等以某城铁车辆转向架3种类型的端部支架为研究对象,分别依据标准 EN 13749—2011《铁路应用-轮对和转向架-转向架结构要求的规定方法》和标准 GB/T 21563—2008《轨道交通 机车车辆设备冲击和振动试验》,采用 ANSYS 软件对其进行结构强度及随机振动仿真分析^[5]。

目前,在随机振动仿真分析中,大多使用的是 GB/T 21563—2008^[6]标准规定的振动量级,而在实际运用中发现,依据该标准校核通过的支架频繁发生疲劳失效现象,这表明标准中的振动量级并不能涵盖实际线路的振动情况。因此,本文将线路实测的构架端部加速度数据转化成 ASD(加速度谱密度)谱,结合材料的应力-寿命曲线对支架进行线性累积损伤评估,根据损伤计算结果找出支架疲劳薄弱部位并提出结构改进措施。随机振动分析的技术路线如图1所示。

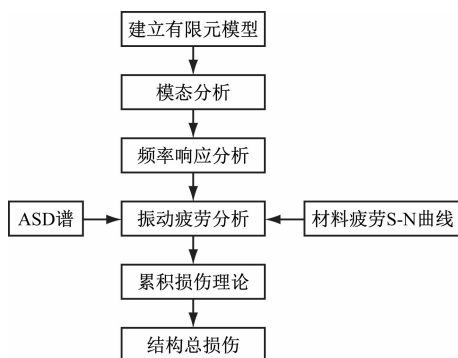


图1 随机振动疲劳仿真计算示意图

Fig. 1 Diagram of random vibration fatigue simulation calculation

1 建立有限元模型

天线支架系统主要由2个铸铝支架、1根横梁、2个 pick up(传动器)支架、1个U型板以及吊挂天线箱组成。在建模过程中,铸铝支架和吊挂天线属于不规则物体,需采用实体单元建模;横梁及U型板属于板材折弯或焊接,可采用壳单元建模;螺栓连接采用 rbe2 + beam 单元的方式进行简化建模;一些对分析结果影响很小的倒角、小孔可进行简化;

吊挂天线箱由于仅有外壳,可以通过调整密度还原其工作质量。通过 Hypermesh 软件的网格划分工具对模型各个部分分别划分网格,共划分了195 618个单元。划分后的天线支架有限元模型如图2所示。



图2 天线支架有限元模型

Fig. 2 Finite element model of antenna bracket

支架及横梁的材料为铝材,U型板为钢材,各材料特性见表1。

表1 天线支架的材料特性

Tab. 1 Material property of antenna bracket

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
铝材	2 700	210 000	0.33
钢材	7 850	70 000	0.30

2 模态分析

利用 ANSYS 软件的模态分析模块对模型进行模态分析,采用分块 Lanczos 法提取模型的前6阶模态,其前6阶模态频率见表2。前6阶模态频率下支架的振型特征截图见图3—图8。

表2 模型前6阶模态频率

Tab. 2 First six modal frequencies of the model

阶数	模态频率/Hz
第1阶	46.5
第2阶	82.6
第3阶	97.6
第4阶	114.1
第5阶	120.5
第6阶	139.4

3 频率响应分析

模态分析用于确定结构的模态参数,是一种相对值,若想观察零部件在不同频率的输入下所产生的输出响应特性,需对其开展谐响应分析,计算得

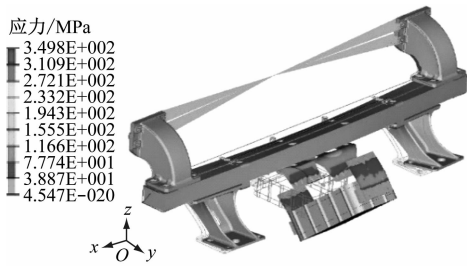


图3 第1阶模态振型截图

Fig. 3 Screenshot of first order mode

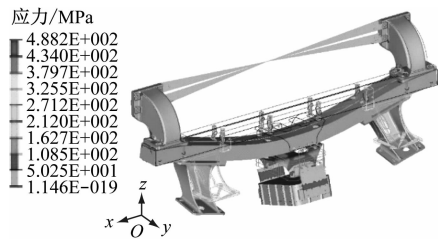


图4 第2阶模态振型截图

Fig. 4 Screenshot of second order mode

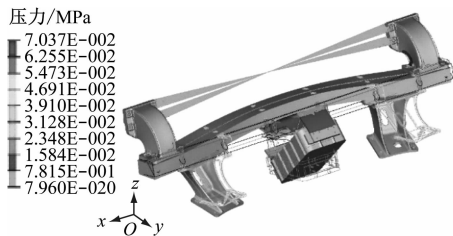


图5 第3阶模态振型截图

Fig. 5 Screenshot of third order mode

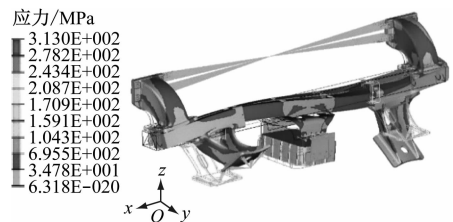


图6 第4阶模态振型截图

Fig. 6 Screenshot of fourth order mode

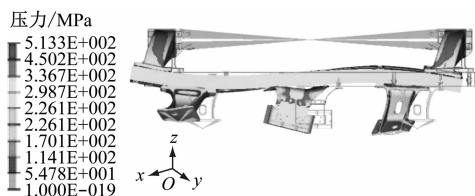


图7 第5阶模态振型截图

Fig. 7 Screenshot of fifth order mode

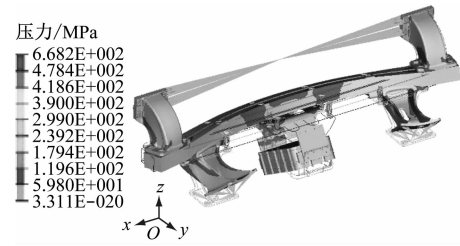


图8 第6阶模态振型截图

Fig. 8 Screenshot of sixth order mode

其余载荷,完全法与模态缩减法均满足要求,但模态叠加法求解速度较快,本文选用模态叠加法进行求解。

在有限元模型中分别对基础激励点的垂、横、纵3个方向以力的形式施加单位加速度激励,结合之前的模态计算结果,为保障计算精度,取激励载荷的频率范围为0~500 Hz。谐响应分析需要指定某种形式的阻尼,否则在共振频率处的响应将无限大,一般钢、铸铁、铝的阻尼比为0.02。根据支架材料,本文设置阻尼比为0.02。

4 振动疲劳分析

4.1 ASD 谱

ASD表示随机信号的各个频率分量所包含的加速度均方根值在频域上是怎样分布的,可以表征随机振动强度与频率的关系,它在频域上分布的曲线图称为谱,横纵坐标围成的面积表示能量。

根据GB/T 21563—2008标准规定,转向架端部天线支架属于2类转向架装设备,其随机振动ASD曲线如图9所示。

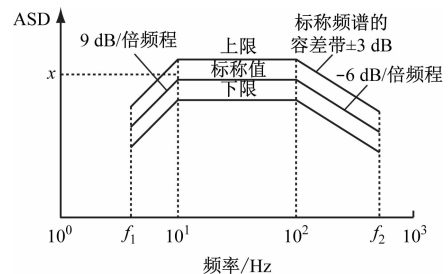


图9 GB/T 21563—2008规定的2类转向架装设备 ASD 曲线

Fig. 9 ASD curves for Type 2-bogie mounting equipment specified in GB/T 21563—2008

到传递函数。

ANSYS 软件提供了3种求解谐响应振动方程的计算方法,分别为完全法、缩减法和模态叠加法^[7];考虑天线支架谐响应激励载荷为加速度,无

以往的城市轨道交通车辆辅助支架强度校核主要依据EN 13749—2011和GB/T 21563—2008标准,但随着中国城市轨道交通车辆运营数量不断

增多,按照标准校核设计的支架产品出现疲劳裂纹现象逐渐增多,这表明标准中规定的加速度和加速度谱已经不能涵盖轨道实际激励,导致现有支架随机振动疲劳强度评估有时不能满足实际线路需求。

本文根据线路实测的轴箱上方构架三向振动加速度数据,经数据处理后按照标准 ASD 谱方式进行拟合,得到线路实测 ASD 谱(垂、横、纵三向),频率分布与标准一致。拟合的实测 ASD 谱与 GB/T 21563—2008 标准的 ASD 谱对比情况(以垂向为例)如图 10 所示,实测 ASD 谱的振动量级列于表 3。从图 10 中可以看出:线路实际的振动量级要高于标准,后续将以实测 ASD 谱作为随机振动仿真的输入进行疲劳损伤的计算。

表 3 实测 ASD 谱的振动量级

Tab.3 Field-measured vibration magnitude of ASD spectrum

方向	振动量级/ $((\text{m/s}^2)^2/\text{Hz})$
垂向	51.16
横向	15.11
纵向	5.18

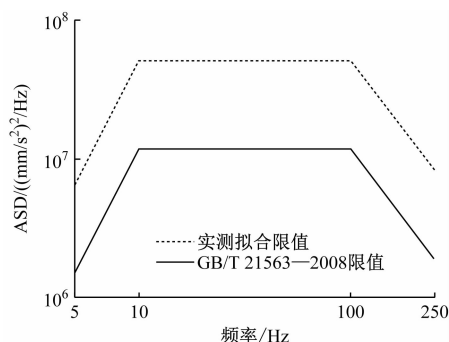


图 10 实测拟合的 ASD 谱与 GB/T 21563—2008 的 ASD 谱对比

Fig. 10 Comparison of field-measured fitted ASD spectrum with GB/T 21563-2008 ASD spectrum

4.2 材料应力-寿命曲线与累积损伤理论

应力-寿命曲线反映了材料的基本疲劳强度特性,是用于估算疲劳寿命和疲劳设计的基本。根据材料力学性能参数,可以得出钢材的应力-寿命曲线如图 11 所示,铝材的应力-寿命曲线如图 12 所示。

在众多疲劳累积损伤理论中,Miner 线性累积损伤法则(以下简称“Miner 法则”)在工程领域得到了广泛的应用。该理论假设结构件在某一恒幅应力水平 σ_i 单独作用时寿命为 N_i ,则该应力水平循环 n_i 次后引起的结构损伤 D_i 为:

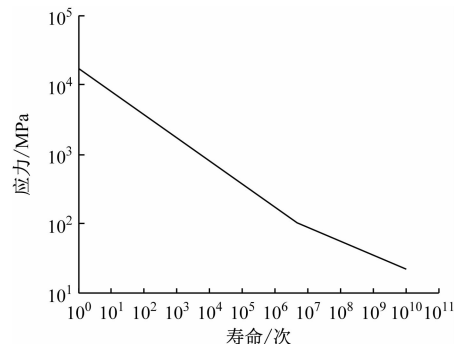


图 11 钢材的应力-寿命曲线

Fig. 11 S-N curve of steel

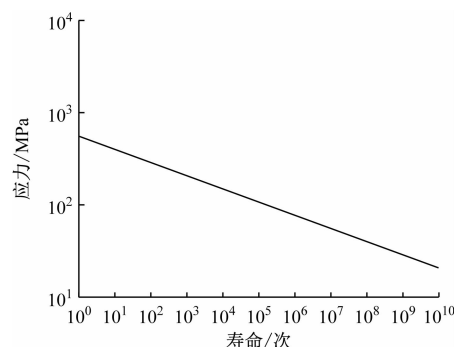


图 12 铝材的应力-寿命曲线

Fig. 12 S-N curve of aluminum

$$D_i = n_i/N_i \quad (1)$$

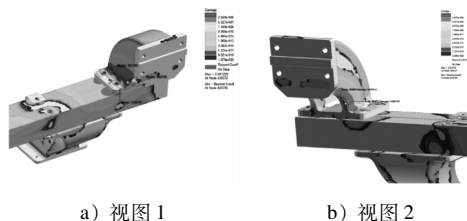
当结构受到 k 个互相独立应力水平作用时,各应力水平 σ_i 的循环次数分别为 n_i ,则变幅载荷作用时结构件的总损伤值为:

$$D = \sum_{i=1}^k n_i/N_i \quad (2)$$

式(2)中,当 $D \geq 1$ 时,结构件将发生疲劳破坏。

4.3 损伤计算结果

将之前频响分析得到的频响函数与线路实测的 ASD 谱导入 nCode 软件中,结合材料的应力-寿命曲线对支架进行线性累积损伤评估,计算后的铸铝支架疲劳损伤云图如图 13 所示。



a) 视图 1

b) 视图 2

图 13 铸铝支架疲劳损伤分布云图截图

Fig. 13 Screenshot of fatigue damage distribution nephogram of cast aluminum bracket

由图 13 可知:铸铝支架上损伤最大的区域为内

侧筋板根部,通过计算可得其三向累积总损伤为 15.58。根据 Miner 法则,损伤值大于 1,将会发生疲劳破坏,需要对该位置进行优化改进。

4.4 改进后支架疲劳计算

由上述方法获取了天线支架的危险点位置,对该支架现有结构进行改进,将铸铝支架两侧筋板根部进行加厚,并在侧面增加支撑筋,如图 14 所示。

对新结构进行有限元建模,通过模态分析与频响分析获取新的频响函数,用相同的 ASD 谱进行随机振动疲劳仿真计算,得到改进后的铸铝支架疲劳损伤结果云图如图 15 所示。

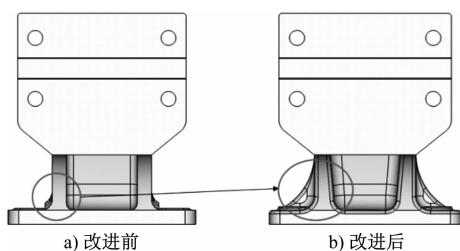


图 14 铸铝支架结构改进对比

Fig. 14 Comparison of cast aluminum bracket structural improvement

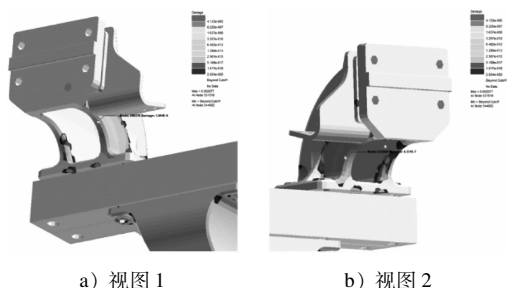


图 15 改进后的铸铝支架疲劳损伤分布云图截图

Fig. 15 Screenshot of fatigue damage distribution nephogram of improved cast aluminum bracket

由图 15 可知,改进后的铸铝支架内侧筋板根部的损伤显著降低,三向累积总损伤为 0.02,满足累积损伤法则要求,证明改进方案合理有效。

5 结语

1) 本文以线路实测 ASD 谱作为载荷激励对转向架天线支架进行随机振动疲劳分析,确定了此结构的疲劳薄弱部位在铸铝支架两侧筋板的根部,损伤值为 15.58,不满足运用要求。

2) 根据损伤结果提出了结构改进方案,对改进后的支架重新进行随机振动疲劳分析,发现其损伤值显著降低,总损伤值为 0.02,满足运用要求,从而

验证了改进方案的有效性,也为后续类似支架的设计开发提供了参考依据。

参考文献

- [1] 曾超,付春雨,王剑雄,等.基于随机振动的尿素箱支架疲劳仿真分析[J].农业装备与车辆工程,2022,60(8):130.
ZENG Chao, FU Chunyu, WANG Jianxiong, et al. Fatigue simulation analysis of urea tank bracket based on random vibration[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(8):130.
- [2] 李如忠.结构随机振动仿真分析[J].机械,2007,34(5):21.
LI Ruzhong. Random vibration analysis of structure[J]. Machinery, 2007, 34(5):21.
- [3] 杨虎,陈俊桃,苏关云,等.基于随机振动仿真分析的阵列天线结构改进[J].机械管理开发,2021,36(6):60.
YANG Hu, CHEN Juntao, SU Guanyun, et al. Structural improvement of array antenna based on random vibration simulation analysis[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(6):60.
- [4] 袁雨青.铁道车辆随机振动计算标准研究[J].中国标准化,2017(14):43.
YUAN Yuqing. Study on calculation standard for railway vehicle railway vehicles[J]. China Standardization, 2017(14):43.
- [5] 郑长国,于森,马天逸,等.城铁车辆转向架端部支架结构强度及随机振动疲劳分析[J].内燃机与配件,2023(5):52.
ZHENG Changguo, YU Miao, MA Tianyi, et al. Structural strength and random vibration fatigue analysis of bogie end support of urban rail vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(5):52.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.轨道交通机车车辆设备冲击和振动试验:GB/T 21563-2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, the National Standardization Administration of China. Impact and vibration testing of rail transit locomotive and rolling stock equipment: GB/T 21563—2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [7] 代森.动车组转向架电线支架振动特性及疲劳损伤研究[D].北京:北京交通大学,2022.
DAI Sen. Research on vibration characteristics and fatigue damage of wire bracket of EMU bogie[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

· 收稿日期:2023-12-01 修回日期:2023-12-22 出版日期:2024-05-10

Received:2023-12-01 Revised:2023-12-22 Published:2024-05-10

· 通信作者:谢莹莹,正高级工程师,13813971347@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license