

基于 nCode 的转向架支架随机振动疲劳强度分析及结构优化

周嫒 赵彬娜 刘余龙

中车株洲电力机车有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18245

[摘要] 本文提出一种基于nCode的转向架支架随机振动疲劳强度评估方法。该方法结合材料S-N曲线,应用Miner线性累积损伤理论和Dirlik计算方法,对支架进行随机振动疲劳寿命分析,定位易发生疲劳破坏的位置并评估各节点寿命。针对某城轨车辆撒砂支架出现的局部裂纹或断裂现象,对其进行了累积疲劳损伤及寿命计算,并依据评估结果进行结构优化。通过对三种优化方案的分析,优化后支架的第一阶模态频率显著提高,最终获得符合IEC 61373要求的方案。

[关键词] 转向架; 随机振动; 疲劳强度; 累积损伤; nCode

中图分类号: TB123 文献标识码: A

Random vibration fatigue strength analysis and structural optimisation of bogie bracket based on nCode

Yuan Zhou Binna Zhao Yulong Liu

CRRC Zhuzhou Locomotive Co.,Ltd.

[Abstract] This paper proposes a method for assessing the fatigue strength of bogie brackets under random vibration based on nCode. Combining material S-N curves with Miner's linear cumulative damage theory and Dirlik's calculation method, the approach performs random vibration fatigue life analysis on the brackets. It locates positions prone to fatigue failure and evaluates the life expectancy of each node. Addressing localized cracking or fracture phenomena observed in the sanding bracket of a specific urban rail vehicle, cumulative fatigue damage and life calculations were performed. Structural optimization was conducted based on the assessment results. Analysis of three optimization schemes revealed that the first-order modal frequency of the optimized bracket significantly increased. Ultimately, a solution compliant with IEC 61373 requirements was obtained.

[Key words] bogie; random vibration; fatigue strength; cumulative damage; nCode

1 概述

随着轨道车辆向高速重载方向发展,运行环境日趋复杂,关键零部件失效风险上升,对运行安全的要求也日益提高。转向架作为城市轨道交通车辆的重要组成部分,其上悬吊件多为螺栓连接的焊接钢结构,主要承受来自轨道及自身的随机振动激励,这是导致其疲劳破坏的主要原因。近年来,多位学者基于IEC 61373:2010标准,对结构在随机振动下的疲劳强度进行了研究^[1-4]。

本文以某城轨车辆撒砂支架为例,运用ANSYS软件对其进行静态有限元分析,并结合nCode软件及材料S-N曲线,对支架进行线性累积损伤评估。通过计算,确定支架易发生疲劳破坏的位置及各节点的疲劳寿命,为支架结构的进一步优化设计提供理论依据,也为其他悬吊件的疲劳分析提供了一种新的分析路径与方法。

2 基于nCode的随机振动疲劳强度分析方法

对结构进行疲劳强度分析是一项复杂繁琐的工作,其具体流程可简化为如图1所示的流程图。在基于nCode仿真的分析过程中,首先需要获取有限元模型,并通过模态分析得到结构的应力分布结果,进而进行频率响应分析。随后,结合材料的疲劳特性并输入载荷信息,最终在相应的疲劳分析引擎中进行求解,得出结构的疲劳破坏位置及疲劳寿命分析结果。

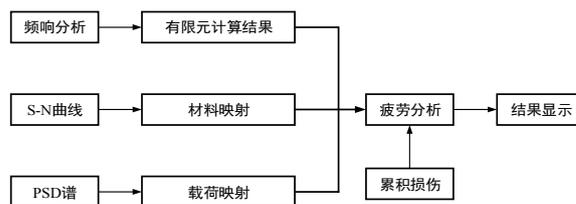


图1 nCode仿真流程图

3 有限元模型的建立

城轨车辆撒砂装置是转向架上常见的附属装置,通过该装置改善车辆轮轨接触面的工作环境。撒砂支架通过板件焊接成型,由螺栓连接固定在构架侧梁下方。支架的三维模型如图2所示。

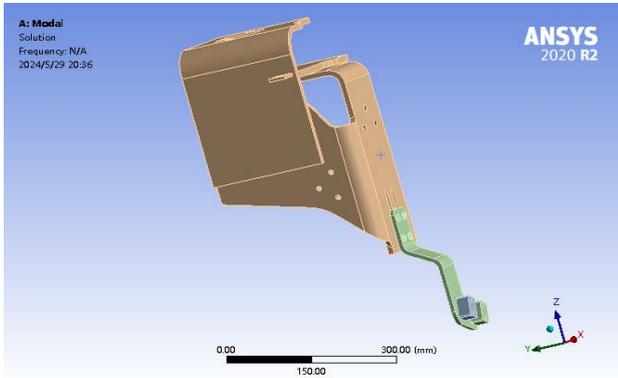


图2 撒砂支架三维模型

该撒砂支架的材料为Q345钢,材料特性见表1。

表1 撒砂支架材料特性

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
Q345	7830	206000	0.33

4 模态分析

转向架上支架的固有频率受材料特性、尺寸及边界条件等因素影响。车辆运行时,若外部激励频率接近支架固有频率,会引发共振,导致支架因振动疲劳受损,进而威胁行车安全。因此,模态分析对确定结构的固有频率和振型、指导结构设计具有重要意义。考虑到高阶模态对支架动态特性影响较小,本次分析仅提取前6阶模态,计算频率范围为1Hz至1000Hz。分析结果见表2,撒砂支架在该范围内前6阶固有频率已获确定。

表2 前6阶模态频率

阶数	模态频率/Hz
1	66.28
2	103.35
3	159.03
4	188.05
5	321.02
6	384.64

5 频率响应分析

频率响应分析从频域角度研究系统动态特性,用于评估结构是否会因共振或疲劳破坏,为优化改进提供指导。结构动力学

中谐响应求解主要采用完全法、缩减法及模态叠加法。本文研究的撒砂支架,其外部激励以加速度为主,无其他附加载荷。理论上完全法和缩减法均适用,但综合考虑计算效率与工程实用性,模态叠加法可在保证精度的前提下显著提升计算效率。在Workbench中采用该方法,并应用聚类算法,在结构固有频率附近加密频率步长,使频率响应曲线更光滑,确保准确捕捉峰值。

基于模态分析结果,将激励频率范围设为5Hz-400Hz。结合一般钢与铸铁材料阻尼比范围(0.02-0.06),本文取阻尼比为0.02,施加1g加速度谐波载荷。结构最大应力响应节点处的应力变化如图3所示,在400Hz范围内出现4处峰值,分别对应前4阶模态频率。

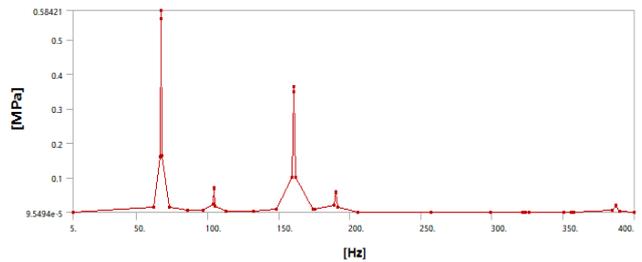


图3 应力幅值-频率响应曲线

6 随机振动疲劳强度评估

6.1 定义材料参数

通过nCode进行疲劳寿命分析前,为了保证计算的精确性,需要设置材料属性。根据Q345材料的性质,在nCode材料库中进行查找,可得Q345在nCode DesignLife中性能接近的牌号为Structural Steel BS4360 Grade 50D。

6.2 载荷映射

在使用nCode进行疲劳求解前,需通过载荷映射将有限元结果转换为交变应力。nCode支持恒定幅值、时间序列、时间步长、混合、振动及周期载荷等多种映射类型。针对该支架的实际运行环境,本文采用振动载荷映射方式,通过Vibration模块直接调用有限元结果,并选取全部载荷参与计算。

6.3 随机振动疲劳损伤计算结果

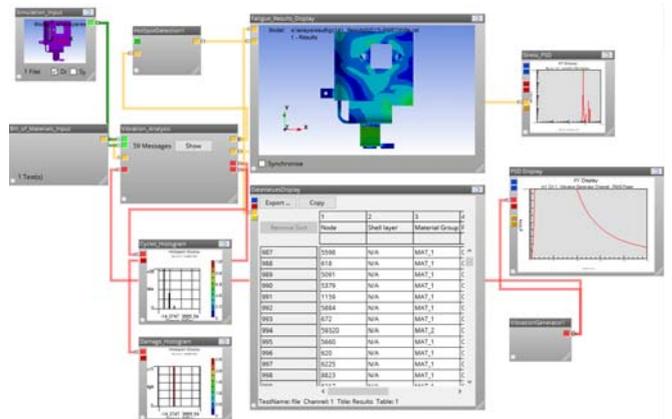
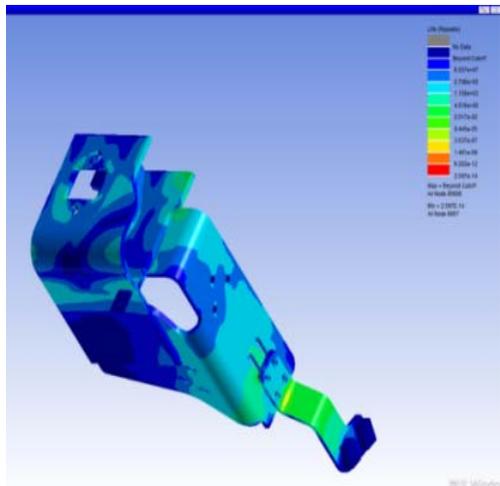
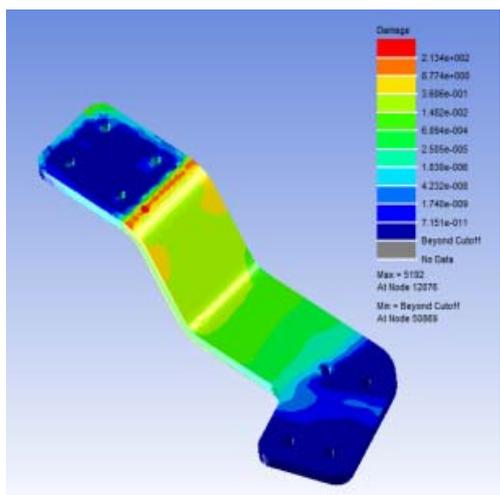


图4 nCode分析界面

在nCode中设置撒砂支架疲劳寿命分析流程,如图4框图所示。首先导入支架有限元模型和PSD载荷谱,设置材料参数并选择应力疲劳计算方式,对撒砂支架进行求解,结果显示在软件工作区。nCode可便捷显示疲劳寿命云图及节点循环数等结果,支架疲劳寿命分析结果见图5。



(a) 寿命分析云图



(b) 最大损伤位置云图

图5 撒砂支架疲劳寿命分析结果

疲劳寿命云图显示,支架折弯圆弧处寿命较低,最大应力集中于此。该部位最大损伤值为5192,远大于1,预示达到疲劳极限时可能发生断裂。仿真结果与实际支架断裂情况相符,验证了计算方法的可行性,同时也说明该结构难以满足寿命要求。

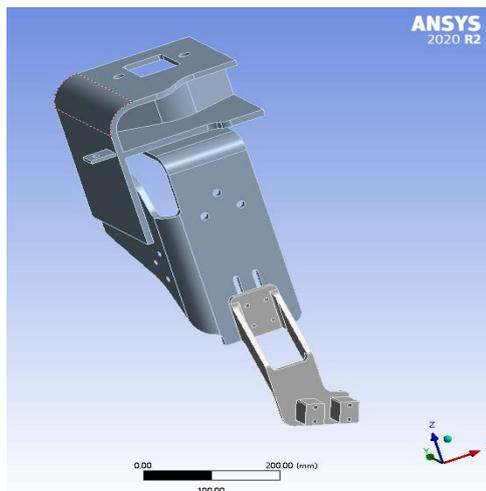
需要指出的是,疲劳损伤并非仅出现在高应力区域,还与几何形状、尺寸、表面状态及工艺等因素密切相关。鉴于疲劳寿命预测涉及多因素耦合分析,在试验条件受限且成本不足时,采用nCode进行疲劳寿命仿真是一条可行途径。

7 结构优化及验证

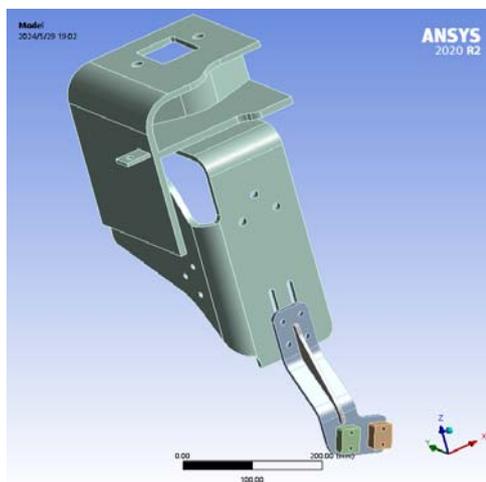
7.1 结构优化

根据前一节的分析结果可知该结构的危险点位置,在原结构的基础上对支架进行针对性优化:取消折弯圆弧,增加纵向板,

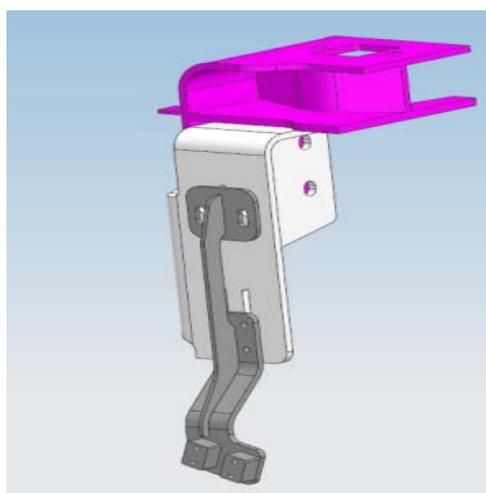
以增加纵向刚度,优化后的支架结构方案三维模型如图(a)(b)(c)所示。



(a) 方案一



(b) 方案二



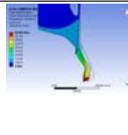
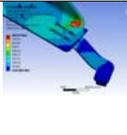
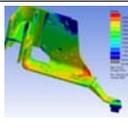
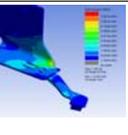
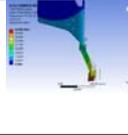
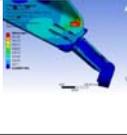
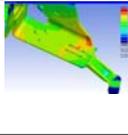
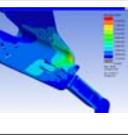
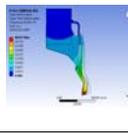
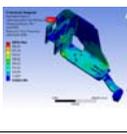
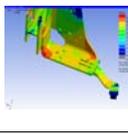
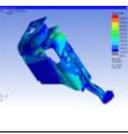
(c) 方案三

7.2 改进后支架疲劳计算

优化后的支架第一阶模态频率、纵向方向冲击的PSD的激励

下1区间内的应力分布以及通过nCode计算得到的损伤rms应力值如下所示:

表3 各方案计算结果对比

	一阶模态频率	1g 谐波载荷下 最大等效应力	Ncode 计算 5h 随机振动损伤	Ncode 计算 应力 rms 值
方案一	76	891	22	88.34
				
方案二	75	969	971	96.8
				
方案三	81	639	0.8459	76.04
				

通过计算结果对比,可以发现方案三的损伤值为0.8459,小于阈值1,因此优化后的结构疲劳寿命满足IEC 61373 的长寿命振动量级。

8 总结

(1) 本文基于ASD谱载荷激励,利用nCode对转向架撒砂支架进行随机振动疲劳分析,结果表明结构的疲劳薄弱部位位于折弯圆弧处,其损伤值为5192,无法满足使用要求。

(2) 根据疲劳损伤分析结果,对支架结构进行了优化。改进后的随机振动疲劳分析显示,损伤值显著降低,总损伤值降至0.8459,符合使用标准。这验证了优化方案的有效性,并为同类支架的结构设计提供了参考。

[参考文献]

[1] IEC 61373:2010, 铁路应用机车车辆设备冲击和振动试验[S].

[2] 谢莹莹,王洪雨,金鑫.基于实测谱的转向架支架随机振动仿真分析及结构改进[J].城市轨道交通研究,2024,27(5):30-34.

[3] 李佳睿,陈姝枚.基于IEC 61373的转向架支架强度分析及结构优化[J].电力机车与城轨车辆,2023,46(3):88-93+107.

[4] 赵彬娜,刘余龙,陈姝枚.转向架悬伸部件随机振动疲劳强度研究[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(06):91-94.

作者简介:

周媛(1997--),汉族,江西萍乡人,硕士研究生,中车株洲电力机车有限公司,助理工程师,研究方向:轨道交通转向架研发。