

车辆转向架转臂定位节点疲劳寿命可靠性研究<sup>\*</sup>顾正隆<sup>1</sup> 葛亦凡<sup>2</sup> 王子晗<sup>3</sup> 胡雅婷<sup>2</sup> 刘伟渭<sup>4</sup> 厉彦宏<sup>3</sup>(1. 上海地铁维护保障有限公司, 200235, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200235, 上海;  
3. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛; 4. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 基于虚拟仿真疲劳试验技术, 对某型车辆转向架的转臂定位节点进行疲劳寿命分析及可靠性评估, 以提高车辆稳定性并保障列车安全运行。[方法] 利用 ABAQUS 软件建立转臂定位节点有限元模型, 获取应力应变数据; 通过 FE-SAFE 软件设置橡胶材料的疲劳参数, 进行疲劳寿命仿真分析; 采用图检验法对伪失效疲劳寿命进行分布假设检验, 选取最优寿命分布; 利用寿命分布参数值与应力水平之间的关系拟合出适合的函数关系式, 对正常应力水平下转臂定位节点的疲劳寿命进行可靠性评估。[结果及结论] 转臂定位节点在正常应力水平下仅有橡胶衬套将产生疲劳损伤; 橡胶衬套最下端为伪失效疲劳寿命值最低的区域, 也是最先发生破坏的区域; 现场试验与疲劳仿真结果验证了转臂定位节点有限元模型的准确性; 确定了最优的正态寿命分布; 正常应力水平下, 转臂定位节点可靠度为 0.9 时的疲劳寿命循环次数大约为 21 万次。

**关键词** 轨道交通; 车辆; 转向架; 转臂定位节点; 疲劳寿命预测; 可靠性评估

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>2

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.013

## Study on Fatigue Life Reliability of Vehicle Bogie Arm Positioning Node

GU Zhenglong<sup>1</sup>, GE Yifan<sup>2</sup>, WANG Zihan<sup>3</sup>, HU Yating<sup>2</sup>, LIU Weiwei<sup>4</sup>, LI Yanhong<sup>3</sup>

(1. Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China; 2. Vehicle Branch of Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China; 3. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 4. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Based on the virtual simulation fatigue test technology, fatigue life analysis and reliability evaluation of the bogie arm positioning node of a certain type of vehicle are carried out to improve the vehicle stability and guarantee the train operation safety. [Method] ABAQUS software is

used to establish a finite element model of the arm positioning node and obtain the stress and strain data. FE-SAFE software is used to set the fatigue parameters of rubber material, simulate and analyze its fatigue life. Graph test method is used to test the distribution hypothesis of pseudo-failure fatigue life and to select the optimal life distribution. The relation between the life distribution parameters and the stress level is used to fit a proper functional relation and evaluate the reliability of the arm positioning node fatigue life under normal stress level. [Result & Conclusion] Under normal stress level, only the rubber bushing in arm positioning node will have fatigue damage. The bottom end of the rubber bushing is the area with the lowest pseudo-failure fatigue life value, and is also the area where the damage occurs first. On-site test and fatigue simulation results verify the accuracy of the finite element model of arm positioning node. The optimal normal life distribution is determined. Under normal stress level, the number of fatigue life cycles is about 210,000 when the reliability of the arm positioning node is 0.9.

**Key words** rail transit; vehicle; bogie; arm positioning node; fatigue life prediction; reliability evaluation

转臂定位节点作为轨道交通车辆转向架关键部件之一, 其性能的好坏直接影响车辆运行的稳定性和安全性<sup>[1]</sup>。随着车辆运营里程的增加, 转臂定位节点极易产生性能退化和疲劳失效等问题, 从而危及行车安全<sup>[2]</sup>。因此, 本文采用虚拟仿真疲劳试验技术对某型车辆转向架的转臂定位节点进行疲劳寿命分析及可靠性评估。

## 1 转臂定位节点结构

转臂定位节点主要由金属外圈、芯轴及橡胶衬套等三部分组成。车辆转向架转臂定位节点结构如图 1 所示。金属外圈与芯轴均采用对称结构, 其中, 金属外圈采用整体式结构, 芯轴结构呈现凹型。通过橡胶硫化方式将定位节点的金属外圈、橡胶衬

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(51875481, 51705432); 博士后科学基金(2020M682506)

套及芯轴组成一个整体。

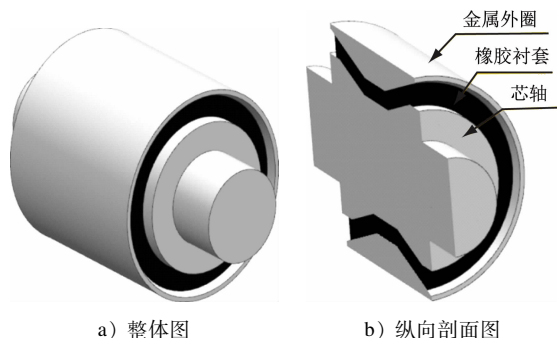


图1 转臂定位节点结构示意图

Fig. 1 Schematic picture of positioning node structure of pivoted arm

## 2 疲劳寿命预测方法

对转臂定位节点进行疲劳寿命预测及可靠性评估,基本流程如下:

- 1) 利用 ABAQUS 有限元软件计算获取应力应变数据结果;
- 2) 选取相应的橡胶材料 S-N 曲线数据;
- 3) 在 FE-SAFE 疲劳寿命软件中,导入应力应变计算结果,并对相关材料疲劳属性及疲劳寿命的各项系数进行设置,计算转臂定位节点的疲劳寿命;
- 4) 将疲劳寿命进行分布假设检验,选取最优寿命分布,利用寿命分布参数值与应力水平之间的关系拟合出适合的函数关系式,再外推正常应力水平下转臂定位节点的疲劳寿命可靠性评估。

## 3 有限元模型建立与分析

### 3.1 材料参数

转臂定位节点的橡胶衬套部件是一种具有超弹性的高分子材料,其力学性能非常复杂,因此,采用超弹性本构模型来模拟橡胶材料的参数属性。本文研究的转臂定位节点橡胶材料为 65HS,该模型材料参数如表 1 所示。

表1 模型中相关材料参数

Tab.1 Relevant material parameters in the model

材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
橡胶衬套	1 200	4.4	0.499
金属外圈、芯轴	7 000	210 000	0.300

### 3.2 载荷工况

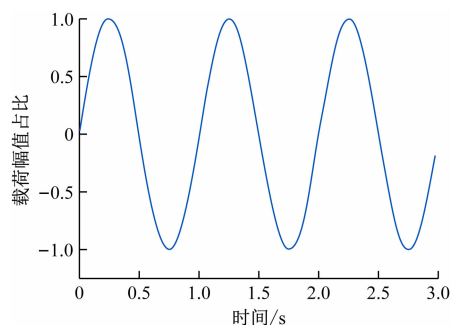
分别在转臂定位节点的芯轴两端施加径向集中

载荷,3 种载荷工况(40、45、50 kN)下,不同橡胶材料  $C_{01}$  和  $C_{10}$ (超弹性本构模型中橡胶材料参数)取值<sup>[3]</sup>如表 2 所示,橡胶材料正弦载荷曲线如图 2 所示。

表2 不同橡胶材料  $C_{01}$  和  $C_{10}$  参数取值

Tab.2 Parameter determination of different rubber material  $C_{01}$  and  $C_{10}$

橡胶材料样本	$C_{01}/C_{10}$	$C_{10}$	$C_{01}$
1	0.05	0.705	0.035
2	0.25	0.592	0.148
3	0.50	0.494	0.247
4	0.75	0.423	0.317



注:“载荷幅值占比”为 3 种载荷工况在各时间点上加载到所设定载荷的比例,负号反向加载。

图2 橡胶材料正弦载荷曲线

Fig. 2 Sine load curve of rubber material

### 3.3 有限元结果分析

对转臂定位节点的有限元模型进行计算,获取正常应力水平下橡胶衬套等效应力,结果如图 3 所示。当转臂定位节点载荷为 34 kN 时,橡胶衬套的最大应力为 0.85 MPa,其应力集中比较严重的区域主要在橡胶衬套最下端。

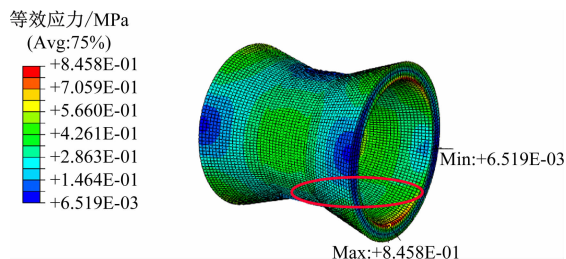


图3 正常应力水平下橡胶衬套应力分布云图

Fig. 3 Cloud map of rubber bushing stress distribution under normal stress

转臂定位节点在正常荷载 34 kN 情况下,由于橡胶衬套的最大应力值大于橡胶材料的疲劳极限值 0.8 MPa,橡胶衬套将产生疲劳损伤;而金属外圈和芯轴中最大应力为 65.03 MPa,小于其疲劳极限值 125 MPa,金属外圈和芯轴产生疲劳损伤的几率并不大。

因此,本文将金属外圈和芯轴视为始终处于无限寿命阶段,仅对橡胶衬套的疲劳寿命进行研究。

## 4 疲劳寿命仿真分析

### 4.1 橡胶材料 S-N 曲线

本文将美国 Axel 实验室轨道交通车辆橡胶材料 S-N 曲线数据<sup>[4]</sup>,作为转臂定位节点橡胶衬套材料的 S-N 曲线数据,如图 4 所示。

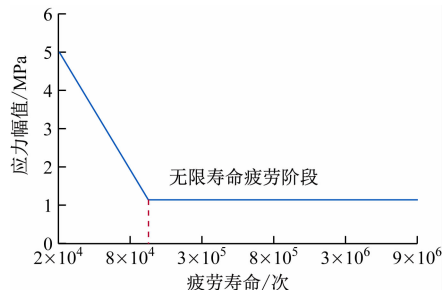


图 4 轨道交通车辆橡胶材料 S-N 曲线<sup>[4]</sup>

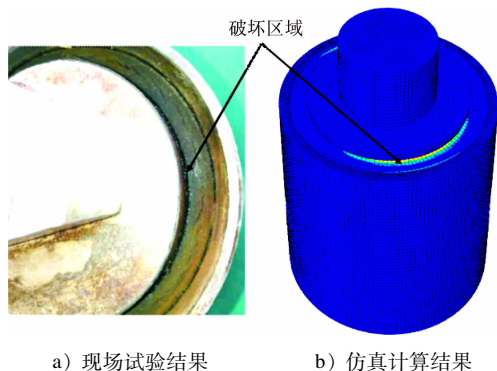
Fig. 4 S-N curve of rail transit vehicle rubber material

### 4.2 橡胶材料疲劳参数

在 FE-SAFE 软件中对不同橡胶衬套的超弹性本构模型参数进行设置,橡胶材料硬度为 65HS,抗拉强度为 25.65 MPa。由于橡胶衬套是超弹性材料,本文采用主应变法为橡胶材料的疲劳算法,并用 Morrow 平均应力进行修正。

### 4.3 结果分析

现场试验结果显示,转臂定位节点最容易发生损伤的区域是橡胶衬套<sup>[5]</sup>。转臂定位节点疲劳仿真计算结果与现场试验结果对比图如图 5 所示。转臂定位节点的疲劳仿真计算结果与实际疲劳损伤区域基本一致,验证了该仿真模型的准确性。



a) 现场试验结果

b) 仿真计算结果

图 5 转臂定位节点疲劳仿真计算与现场试验结果

Fig. 5 Simulated results and on-site test results of pivoted arm positioning node fatigue

## 5 可靠性评估

将不同径向加速应力水平下 4 个橡胶衬套样本的对数伪失效疲劳寿命进行数值转换,结果如表 3 所示。

表 3 不同荷载工况下橡胶衬套样本伪失效疲劳寿命

Tab. 3 Pseudo-failure fatigue life of rubber bushing sample under different loads

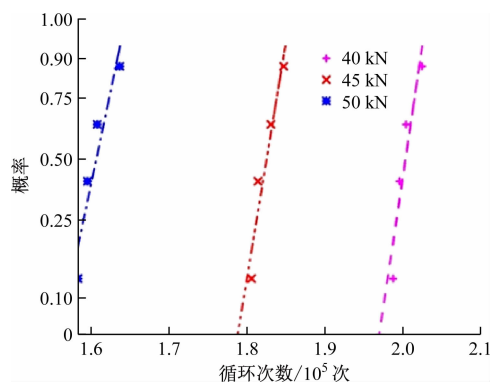
径向集中荷载/kN	样品编号	伪失效疲劳寿命循环次数/次
40	1	198 609
	2	199 526
	3	202 768
	4	200 447
45	1	179 473
	2	180 301
	3	183 653
	4	181 970
50	1	158 489
	2	159 587
	3	163 305
	4	160 694

将收集的伪失效疲劳寿命进行分布假设检验,采用图检验法的 P-P 图法进行分布假设检验<sup>[6]</sup>。此外,由于正态分布计算简单,而 Weibull 分布适用性较好,本文分别针对这两种寿命分布对伪失效疲劳寿命进行分布假设检验。

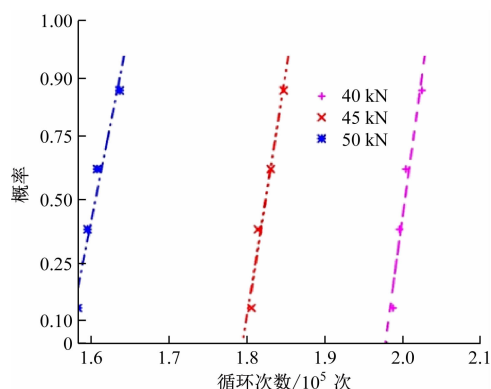
图 6 为伪失效寿命循环次数分布检验结果。由图 6 可知,3 种荷载工况下的伪失效疲劳寿命基本分布在一条直线上,正态分布下的概率曲线比 Weibull 分布下的概率曲线拟合度更好。而且正态分布下的 P-P 图法曲线更接近平行,伪失效疲劳寿命也更贴近于直线。

利用参数估计值建立寿命特征量与载荷之间的函数关系式,采用幂函数作为函数模型拟合,拟合结果如图 7 所示。

将幂函数对应的参数估计值和正常载荷代入幂函数,得到正常载荷 34 kN 下的寿命均值为  $2.3 \times 10^5$  次,寿命方差为  $2.2 \times 10^4$  次。由此可得转臂定位节点可靠度为 0.9 时的疲劳寿命大约为 21 万次。正常载荷 (34 kN) 下的可靠度曲线如图 8 所示。



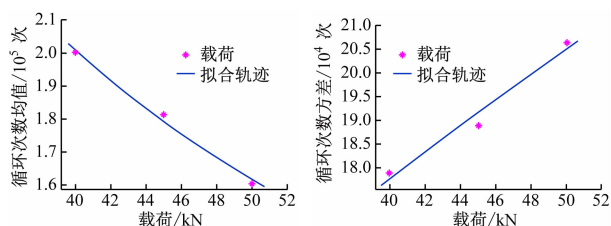
a) Weibull 分布检验



b) 正态分布检验

图6 伪失效寿命循环次数分布检验

Fig.6 Pseudo-failure life cycle times distribution test



a) 循环次数均值

b) 循环次数方差

图7 幂函数拟合轨迹

Fig.7 Fitting trajectories of power functions

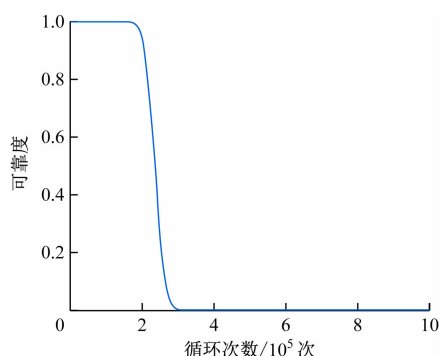


图8 正常荷载(34 kN)下可靠度曲线

Fig.8 Reliability curve under normal load(34 kN)

## 6 结语

1) 转臂定位节点在正常载荷和集中载荷下的应力点及应力集中区域主要发生在橡胶衬套与芯轴下端,橡胶衬套的最大应力值大于橡胶材料的疲劳极限值,会造成疲劳损伤。

2) 橡胶衬套应力分布较为集中的区域与疲劳寿命仿真最先出现破坏区域一致,橡胶衬套最下端为伪失效疲劳寿命值最低的区域,也是最先发生破坏的区域。

3) 选取幂函数作为加速模型,根据加速模型的参数估计值,计算得到正常荷载下转臂定位节点可靠度为 0.9 时的疲劳寿命循环次数大约为 21 万次。

## 参考文献

- [1] OMAN S, FAJDIGA M, NAGODE M. Estimation of air-spring life based on accelerated experiments[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3859.
- [2] 王鑫, 吴智强, 吴绍利, 等. 转向架轴箱橡胶节点疲劳寿命的有限元分析[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(2): 51.  
WANG Xin, WU Zhiqiang, WU Shaoli, et al. The finite element analysis of fatigue life of the bogie rubber joint[J]. Railway Locomotive & Car, 2014, 34(2): 51.
- [3] 王伟达. 轴箱橡胶节点抗疲劳机理的数值模拟分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2011.  
WANG Weida. Rubber joint for anti-fatigue mechanism numerical analysis[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011.
- [4] 王进, 左国兵. 疲劳试验在橡胶减振制品寿命预测中的应用[J]. 铁道车辆, 2005, 43(7): 7.  
WANG Jin, ZUO Guobing. Application of the fatigue test in the prediction of the service lives of rubber damping products[J]. Rolling Stock, 2005, 43(7): 7.
- [5] 侯茂锐, 胡晓依, 郭涛, 等. 高速动车组轴箱转臂节点性能对轮轨耦合振动的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 170.  
HOU Maorui, HU Xiaoyi, GUO Tao, et al. Effect of axle box rotary arm node performance on wheel-rail coupling vibration for high-speed EMUs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 170.
- [6] 宗序平, 姚玉兰. 利用 Q-Q 图与 P-P 图快速检验数据的统计分布[J]. 统计与决策, 2010(20): 151.  
ZONG Xuping, YAO Yulan. Using Q-Q diagram and P-P diagram to quickly test the statistical distribution of data[J]. Statistics & Decision, 2010(20): 151.

· 收稿日期:2023-01-20 修回日期:2023-04-15 出版日期:2024-06-10  
Received:2023-01-20 Revised:2023-04-15 Published:2024-06-10  
· 第一作者:顾正隆,高级工程师,geyifan@shmetro.com  
通信作者:王子晗,工程师,15063902608@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