

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.011

某地铁车辆构架疲劳寿命分析

张又铭^a, 李晓峰^a, 周韶泽^a, 郭翰飞^b, 钟英凯^a

(大连交通大学 a. 机车车辆工程学院; b. 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要:针对地铁车辆转向架构架的疲劳失效问题,基于 UIC615-4 标准建立某地铁车辆焊接构架的疲打工况,使用主 S-N 曲线法对关键位置的静态疲劳寿命进行分析;使用虚拟激励法对地铁车辆构架进行随机振动响应分析并基于 IIW 标准对其进行动态疲劳寿命预测。计算结果表明:静态疲劳分析中寿命最短的节点位于横向止挡焊缝,动态疲劳分析中寿命最短的节点位于空气弹簧座处,且构架的动态疲劳寿命相对更短。由于动静态疲劳分析结果有明显差异,故动态疲劳分析是不可或缺的。

关键词:地铁车辆;焊接构架;疲劳寿命;主 S-N 曲线法;随机振动;虚拟激励法

中图分类号: TB302.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0047-06

Fatigue Life Analysis of Metro Vehicle Frame

ZHANG Youming^a, LI Xiaofeng^a, ZHOU Shaoze^a, GUO Hanfei^b, ZHONG Yingkai^a

(a. School of Locomotive and Rolling Stock Engineering;

b. School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at fatigue failure of metro vehicle bogie frame, the fatigue condition of a subway vehicle weld frame is established based on UIC615-4 standard, the static fatigue life of key position using main S-N curve method is analysed, analysis on the random vibration response is conducted by pseudo-excitation method and the dynamic fatigue life is predicted based on IIW standard. The calculation results show that the node with the shortest life in the static fatigue analysis is located in the transverse stop weld, the node with the shortest life in the dynamic fatigue analysis is located in the air spring seat, and the dynamic fatigue life of the frame is relatively shorter. Since the dynamic fatigue analysis result differs from the static one significantly, the dynamic fatigue analysis on the frame is indispensable.

Keywords: metro vehicle; welded frame; fatigue life; master S-N curve method; random vibration; pseudo-excitation method

0 引言

构架作为转向架的骨架,其在列车运营过程中的受力状态较为复杂,而且它的可靠性与列车的运行安全性及稳定性^[1]息息相关。随着轨道交通车辆高速化发展,转向架构架大部分的破坏不是静强度破坏,而是由于交变载荷的反复作用造成的疲劳破坏^[2],且疲劳失效频繁发生于构架焊接接头处^[3]。为避免构架焊接接头疲劳失效导致的重大安全事故,对焊接构架疲劳问题的研究日益紧迫^[4]。焊接构架的疲劳寿命分析主要包括静态与动态疲劳寿命分析,静态疲劳是构架在相关标准中的载荷组合工况作用下受静应力作用产生的疲劳,而动态疲劳是由轨道车辆在运行过程中受轨道不平顺、弓网振动及车体与空气的动态作用等随机激励影响而产生的疲劳。

由于主 S-N 曲线法克服了名义应力法的局

限性并具有网格不敏感和广泛适用性等显著优势,本文使用主 S-N 曲线法对构架进行静态疲劳分析,再使用能够更加快速且不失准确地求解结构随机振动响应的虚拟激励法求解构架的动应力响应,并基于 IIW 标准对地铁车辆构架这一重要结构进行随机振动疲劳分析,以实现对该结构全面的疲劳寿命分析,找出易发生疲劳的薄弱区域。

1 预备知识

1.1 主 S-N 曲线法

焊接接头焊趾截面上的非线性应力由焊接工艺过程中产生的缺口应力和与外力互相平的结构应力^[5]构成,其中结构应力 σ_n 由膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 两部分相加而成,如式(1)所示。

$$\sigma_n = \sigma_b + \sigma_m = \frac{1}{t} \mathbf{L}^{-1} \left(F_{yn} + \frac{6}{t} \mathbf{M}_{xn} \right) \quad (1)$$

式中: t 为接头处板厚; \mathbf{L}^{-1} 为单元长度等效矩阵的

第一作者简介:张又铭(1998—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为车辆 CAE 关键技术研究,1416078589@qq.com。

逆矩阵; F_{y_n} 为焊缝节点力; M_{x_n} 为焊缝节点力矩。

焊接结构的疲劳寿命可以应用断裂力学的理论进行求解^[6],且焊接接头的裂纹扩展过程可以分为短裂纹和长裂纹2个阶段进行分析与计算^[7],故通过Paris裂纹扩展公式将2个阶段的表达式统一起来并积分,再经过拟合便可以得到基于结构应力的焊接结构疲劳寿命的表达式,如式(2)所示。

$$N = (\Delta S_s / C_d)^{-1/h} \quad (2)$$

式中: C_d 和 h 均为实验常数; ΔS_s 为等效结构应力变化范围,其计算公式如式(3)所示。

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_n}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{-1/m}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma_n$ 为结构应力变化范围; m 为裂纹扩展指数,约等于3.6; r 为弯曲比,构件截面应力中弯曲应力的占比; $I(r)$ 为弯曲比 r 的无量纲函数,用于描述横截面内层应力和弯曲应力的状态,反映了载荷的加载模式对结构应力的影响,可由实验数据拟合得到。

式(2)可以改写为

$$N = C_0 / (\Delta S_s)^{1/h} \quad (4)$$

由于式(4)与传统的基于名义应力的疲劳寿命计算公式在形式上十分相似,故式(4)也被命名为主 $S-N$ 曲线方程。该公式不仅完全地考虑到了焊接接头的板厚、应力集中和外力加载模式的影响,还具有网格不敏感性,克服了名义应力法的局限性。此外,残余应力的影响也包含在主 $S-N$ 曲线数据中。

1.2 轨道车辆虚拟激励法

虚拟激励法的出现使随机振动的谱分析计算在精度不变的同时计算量大幅度地减少,其算法的核心在于构建虚拟简谐激励 $\tilde{x}(t)$ ^[8]:

$$\tilde{x}(t) = \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (5)$$

式中: $S_{xx}(\omega)$ 为系统受到的随机平稳激励 $\{x(t)\}$ 的自功率谱密度; $e^{i\omega t}$ 为一简谐激励。

轨道车辆在运行时会受到轨道不平顺激励的作用,且前后任意两轮对之间具有完全相关性。设轨道车辆运动微分方程为

$$M\ddot{\mathbf{y}} + C\dot{\mathbf{y}} + K\mathbf{y} = \mathbf{F}(t) \quad (6)$$

式中: M 为轨道车辆系统的质量矩阵; C 为轨道车辆系统的阻尼矩阵; K 为轨道车辆系统的刚度矩阵; \mathbf{y} 为系统的位移响应矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为车辆运行过程中的随机载荷矩阵。

基于虚拟激励法,构造虚拟激励 $\tilde{\mathbf{F}}(t) = \sqrt{S_{FF}(\omega)} e^{i\omega t}$ 代入轨道车辆的动力学方程式(6),得

$$M\ddot{\tilde{\mathbf{y}}} + C\dot{\tilde{\mathbf{y}}} + K\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{F}}(t) \quad (7)$$

式(7)中等号右边的激励 $\{\tilde{\mathbf{F}}(t)\}$ 为确定性的简谐激励,通过振型叠加法求解上式可得到轨道车辆结构在虚拟激励下的位移响应矩阵 $\tilde{\mathbf{y}}$ 。

则轨道车辆结构的实际位移响应功率谱矩阵可表示为

$$S_{yy}(\omega) = \tilde{\mathbf{y}}^* \cdot \tilde{\mathbf{y}} \quad (8)$$

同理可以求出轨道车辆结构在虚拟激励下的加速度响应功率谱密度或应力响应功率谱密度等响应量。

2 有限元模型及施加工况

2.1 有限元模型

本文以某地铁车辆转向架焊接构架为例,在Hypermesh中以壳单元shell181为主,辅以少量的1D,0D单元建立构架有限元模型,如图1所示。其中壳单元材料均为16MnR钢。

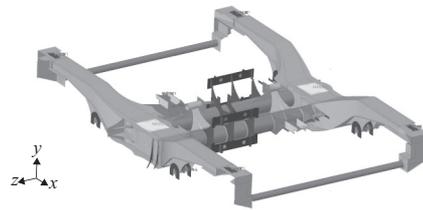


图1 某地铁车辆转向架焊接构架模型

本模型采用了该种带焊缝细节的建模方式,选取了5条容易发生疲劳失效的关键焊缝进行重点研究,焊缝位置及焊缝方向如图2所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

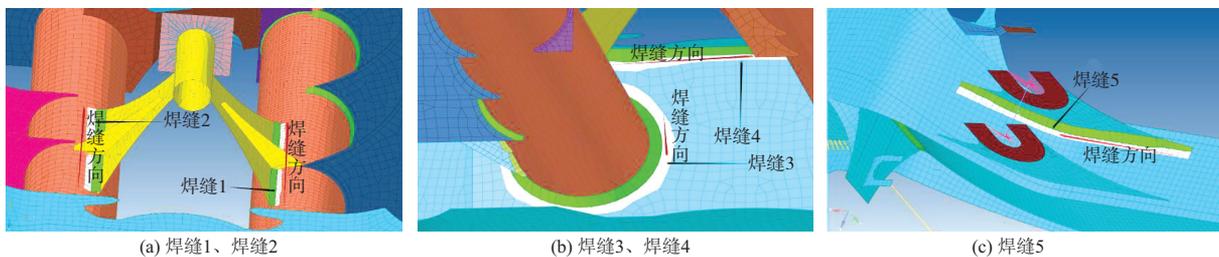


图2 关键焊缝位置图

2.2 施加的工况

根据 UIC 615-4《转向架构架结构强度实验》^[9]中的相关规定,本文计算并施加了构架主

体疲劳工况的疲劳实验载荷,并根据构架在转向架中的承载和连接关系施加了约束,构架有限元模型上施加的主体疲劳工况如表 1 所示。

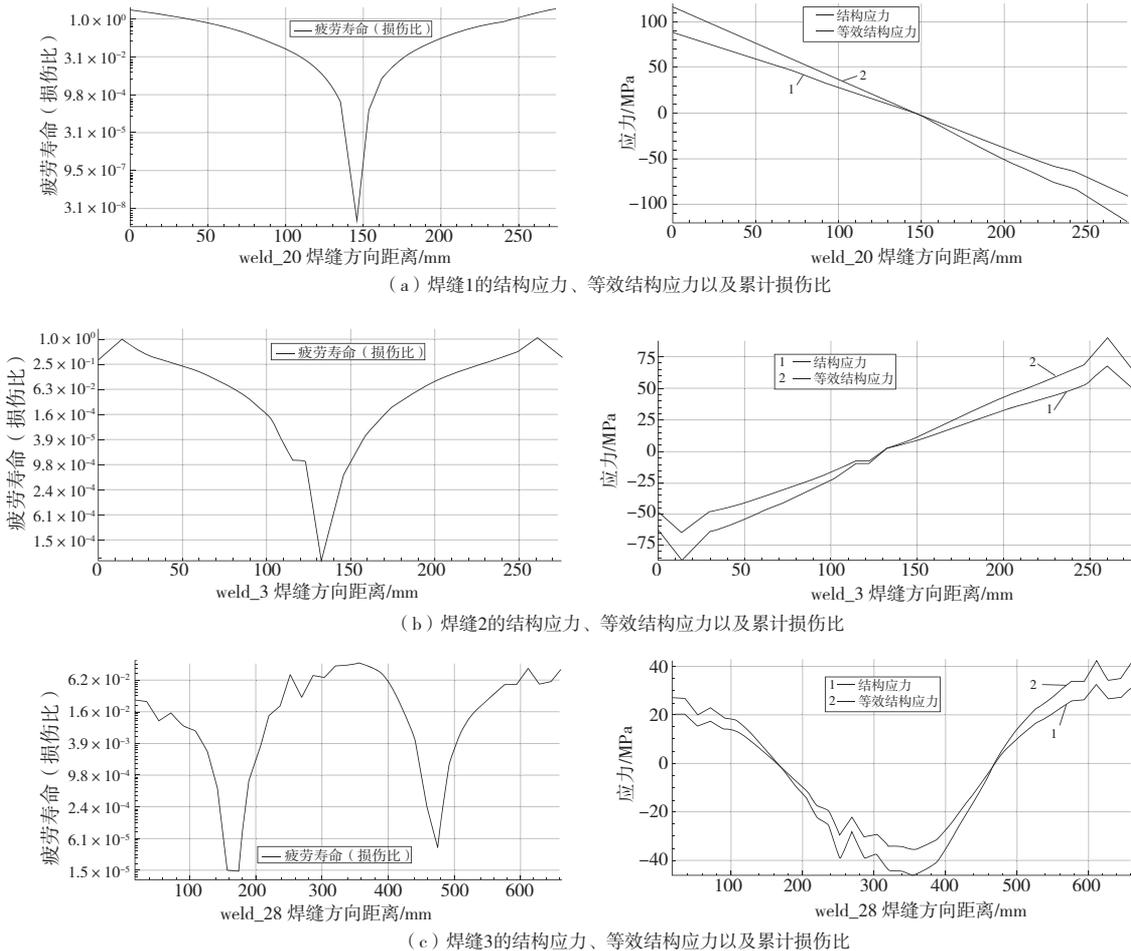
表 1 构架的主体疲劳工况

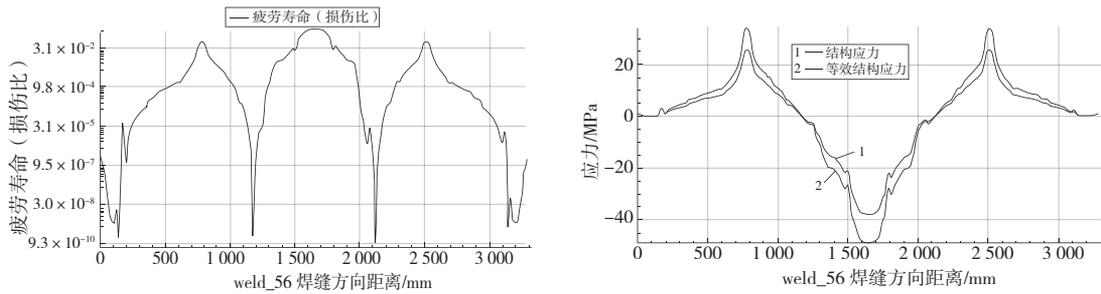
工况	载荷及施加位置		加载方式	施加的约束
	横向	垂向		
1	35 kN 准静态载荷和 35 kN 动态载荷,位于横梁上其中一侧的横向往止挡上	10 kN 准静态载荷和 20 kN 动态载荷,位于两侧梁空气弹簧座上	第 1 阶段为 1 倍载荷,300 万次;第 2 阶段为 1.2 倍载荷,100 万次;第 3 阶段为 1.4 倍载荷,100 万次。准静态载荷的总循环次数为动态载荷的 1/10,垂向与横向的动态载荷相位要相同。	转臂定位座处施加横向约束,牵引拉杆座处施加纵向约束,轴箱弹簧定位座处施加垂向约束
2	载荷大小同工况 1,方向与之相反,位于横梁上另一侧的横向往止挡上	同工况 1		

3 基于主 S-N 曲线法的构架静态疲劳寿命求解

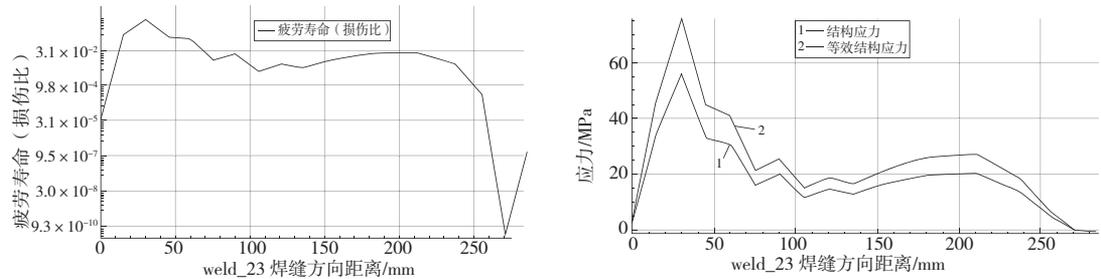
本文首先通过 Hypermesh 导出了包含焊缝信息的 inp 文件,并通过 ANSYS 19.2 对构架有限元模型进行静力学计算以得到包含了节点力信息的 RST 文件,再将 RST 文件与 inp 文件导入专用焊

接结构疲劳寿命计算软件 Weld Fatigue 中,施加载表 1 所示的疲劳载荷并选用钢的可靠度为 97.7%、应力水平为 -2σ 主 S-N 曲线进行疲劳强度计算,求解了 5 条关键焊缝在 2 种工况下结构应力、等效结构应力以及累计损伤比,结果如图 3 所示(横坐标表示此焊缝上的节点距离其起始节点的距离,最小为 0)。





(d) 焊缝4的结构应力、等效结构应力以及累计损伤比



(e) 焊缝5的结构应力、等效结构应力以及累计损伤比

图3 疲劳寿命最短的5条焊缝的疲劳寿命计算结果

由图3可知,疲劳载荷作用下等效结构应力水平最高的焊缝为焊缝1,出现在其焊缝节点上的最大等效结构应力为118.27 MPa,焊缝上有一部分节点的累积损伤比大于1,其中最大疲劳损伤比为2.547,因此该处是最有可能发生疲劳失效的位置;焊缝2具有仅次于前者的应力水平,最大等效结构应力为90.113 MPa,其仅有一点疲劳强度不满足要求,该点累计疲劳损伤比为1.089。其余3条焊缝等效结构应力水平明显低于焊缝1、焊缝2,大部分焊缝节点的等效结构应力介于±50 MPa之间、应力损伤比均小于1,满足疲劳强度要求。

4 基于虚拟激励法的构架动态疲劳寿命求解

4.1 构架动态疲劳寿命求解

为避免疲劳分析的片面性,使分析结果更具有实际参考价值,有必要通过随机振动分析方法对结构进行振动疲劳分析,进一步了解其动态疲劳薄弱区域。

本文使用以 Matlab App Designer 开发的轨道车辆随机振动分析系统^[10] (RVRAP)进行随机振动响应分析及动态疲劳寿命求解,该系统可以基于虚拟激励法快速准确地完成全有限元模型的轨道车辆随机振动响应分析并基于 Dirlik 模型以实现基于频域数据的疲劳寿命评估。该系统参数设置界面及结果输出界面如图4所示。

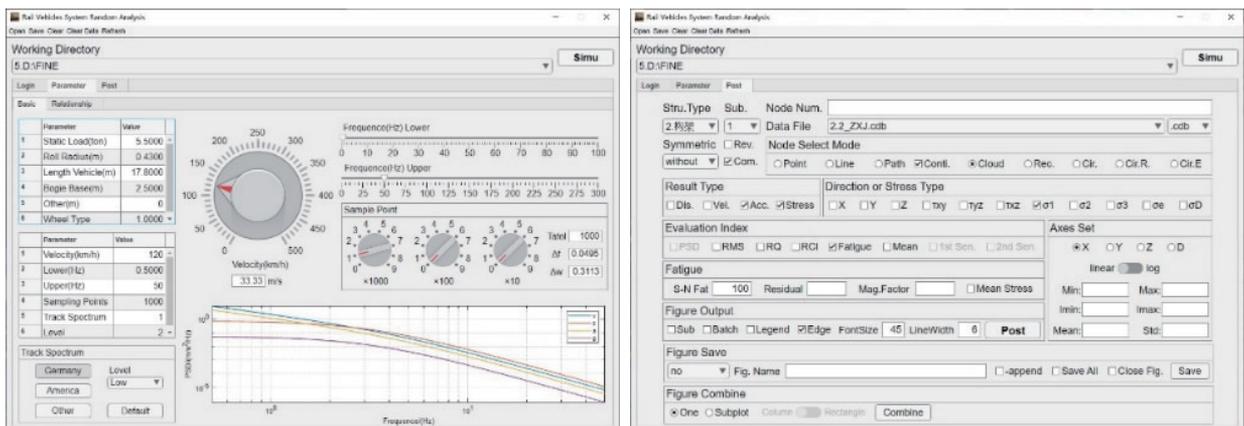


图4 RVRAP 系统参数设置及结果输出界面

为使用 RVRAP 系统进行随机振动响应分析,首先通过 ANSYS 命令流对构架模型进行模态求解,得到构架前 10 阶非刚体模态的固有频率如表 2 所示。

表 2 构架前 10 阶非刚体模态的固有频率

模态阶数	固有频率/Hz
1	27.798
2	28.814
3	35.052
4	48.781
5	55.576
6	63.677
7	66.272
8	72.304
9	74.639
10	88.460

本文将车速设置为 120 km/h,频率上下限分别设置为 0.5 Hz、80 Hz,输入的轨道不平顺功率谱设为美国五级谱,以朱程等^[11]的研究为依据,输入可以令地铁车辆具有良好动力学性能的转向架悬挂参数,对整个地铁车辆构架进行振动响应分析,并选择 IIW 标准中疲劳等级为 100 的接头的 S-N 曲线进行随机振动疲劳寿命评估。RVRAP 系统用于随机振动分析和疲劳寿命计算的时间分别为约 22 s、15 s,相比传统动力学分析软件具有

更高的效率。最终绘制出的疲劳寿命云图如图 5、图 6 所示。

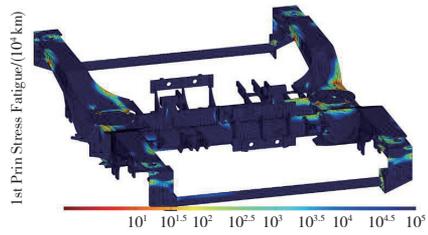


图 5 构架振动疲劳寿命云图 1

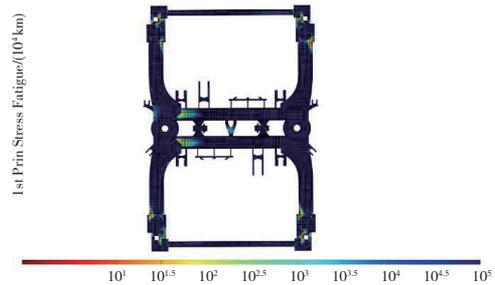


图 6 构架振动疲劳寿命云图 2

本文所研究的地铁车辆构架的动态疲劳薄弱点主要分布在空气弹簧座、侧梁上盖板焊缝、纵横梁连接处焊缝以及制动器安装座焊缝附近,这些位置存在部分节点疲劳寿命(里程)小于 100 万 km,未达到 GB 50157《地铁设计规范》^[12]中的要求。从上述 4 个位置各取 1 个寿命较短的节点,输入其第一主应力响应功率谱,如图 7 所示。

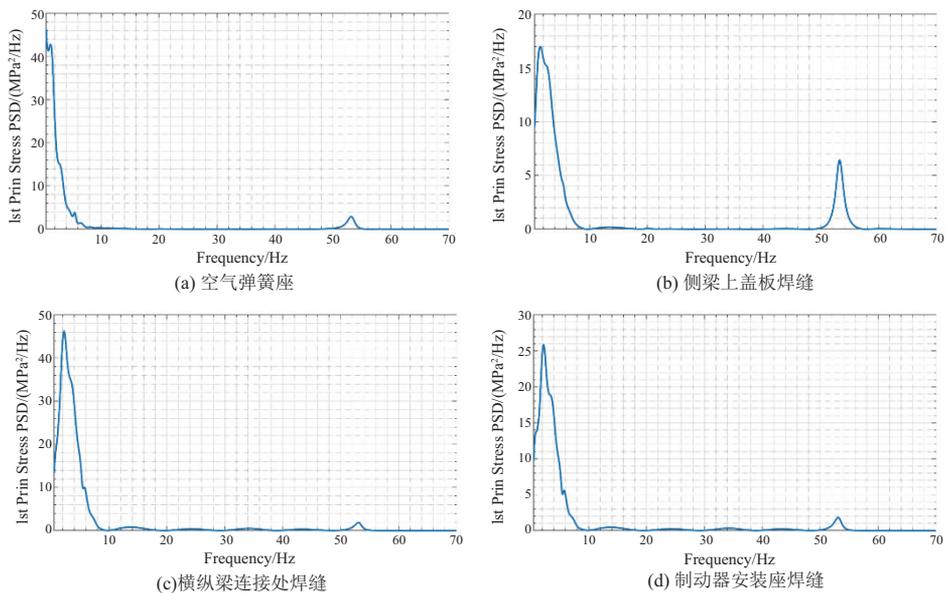


图 7 动态疲劳薄弱位置的第一主应力响应功率谱

由图7可以看出,这些位置主要在0~10 Hz低频下具有较大的应力响应且在50~60 Hz的高频下具有一定水平的应力响应,从而导致结构疲劳寿命大幅降低。其成因是因为车辆运行中承受的轨道不平顺激励激起了构架0~10 Hz附近的刚体模态以及50~60 Hz附近的中低阶弹性模态,令

构架整体或局部构件发生共振,从而使构架结构的第一主应力响应幅值^[13]增加。

4.2 动静态疲劳寿命计算结果对比与分析

上述结果与第3节中的分析结果有较大不同,其主要不同如表3所示。

表3 动静态疲劳分析计算结果对比

名称	静态疲劳分析	动态疲劳分析
主要疲劳薄弱区域	横向止挡焊缝、转臂定位座焊缝、横纵梁连接处焊缝	空气弹簧座、侧梁上盖板焊缝、横纵梁连接处焊缝
各区域最小疲劳寿命(里程/公里)	3.91×10^5 、 1.41×10^6 、 8.51×10^6	约为 1×10^5 、 $1 \times 10^{5.5}$ 、 1×10^6
各区域疲劳失效节点数	8、1、0	32、27、6

由表3可见构架的静态与动态疲劳薄弱区域存在较大差异,且动态疲劳寿命水平相对较低。由此可见,仅依靠静态疲劳分析难预测到构架上所有疲劳薄弱区域,这将为构架留下疲劳隐患,故有必要进行动态疲劳分析以进一步补全疲劳强度评估结果,以尽可能发现结构存在的不合理设计。

5 结语

本文利用Weld Fatigue软件实现基于主S-N曲线的构架静态疲劳分析,得到了静态疲劳薄弱位置,其中疲劳寿命最短的节点位于横向止挡焊缝上,其累计损伤比为2.547,最大等效结构应力为118.27 MPa;再通过RVRAP系统进行基于虚拟激励法的随机振动响应分析进而实现构架的振动疲劳分析,得到了动态疲劳薄弱位置,其中疲劳寿命最短的节点位于空气弹簧座上,其大小(里程)约为 10^5 km。由于动态疲劳分析与静态疲劳分析的结果具有明显差异,在实际工程项目中应该对地铁车辆构架的动态疲劳分析给予足够的重视程度以全面地完成该结构疲劳强度评估。

参考文献:

[1] 刘春洋,张明,张西洋,等.B型地铁转向架焊接构架静强度及疲劳强度分析[J].焊接技术,2021,50(12):40-42.
 [2] 黄晓青,吴才香,刘余龙,等.基于BS7608标准转向架构架疲劳强度评估[J].装备制造技术,2021(3):113-115.

[3] 姜朝勇,赵鑫源,魏苇,等.基于有效缺口应力的地铁构架疲劳损伤研究[J].机车电传动,2022(2):135-140.
 [4] 李岐峰,张旭.基于等效结构应力的地铁车辆焊接构架疲劳寿命分析[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(1):35-39.
 [5] 彭李想.基于主S-N曲线法的轨道车辆转向架构架焊缝疲劳分析[J].现代制造技术与装备,2021,57(9):102-106.
 [6] 梁树林,聂春戈,王悦东,等.焊缝疲劳寿命预测新方法及其在焊接构架上的应用[J].大连交通大学学报,2010,31(6):29-34.
 [7] 兆文忠,李向伟,董平沙.焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M].北京:机械工业出版社,2017.
 [8] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2004.
 [9] UIC 615-4-2003 Motive power units - bogies and running gear - bogie frame structure strength tests[S].
 [10] 郭翰飞,佟维,谢素明,等.轨道车辆随机振动分析系统RVRAP的开发及验证[J].大连交通大学学报,2022,43(4):44-49.
 [11] 朱程,杨陈,贾小平,等.中国标准地铁列车时速80公里B型车关键悬挂参数研究[J].机车电传动,2022(2):31-39.
 [12] GB 50157-2013 地铁设计规范[S].
 [13] 李凡松.服役环境下动车组车体振动与疲劳研究[D].成都:西南交通大学,2017.

收稿日期:2023-05-05