

某型地铁列车端部底架疲劳寿命研究

刘龙玺¹ 赵思聪¹ 陈书杰¹ 王 康²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 地铁车体为焊接结构, 受应力集中、焊接缺陷及焊接残余应力等影响, 其车体疲劳强度会明显小于金属母材。而地铁列车端部底架作为转向架和车体相连接的部位, 其承受的载荷相对更大, 因此有必要研究其疲劳寿命。[方法] 采用数值仿真和疲劳试验相结合的方法, 对某型地铁列车端部底架常见的疲劳寿命问题进行研究。建立了地铁车辆有限元模型, 确定了相应的疲劳载荷和评估点, 对地铁车辆整车和端部底架分别进行了疲劳损伤仿真, 对端部底架开展台架试验; 并对台架试验结果、整车疲劳试验结果和底架仿真结果进行了对比分析。[结果及结论] 该地铁车体整车底架和端部底架在单向疲劳损伤和组合载荷疲劳损伤的情况下, 均没有产生裂纹的风险, 满足标准相关要求。此外, 将载荷放后端部底架在疲劳试验时可以获得更为保守的结果, 并且端部底架有限元模型的仿真结果和试验结果一致性较好, 可以真实反映整车模型的应力状态, 满足相关标准的要求。

关键词 地铁列车; 端部底架; 疲劳试验; 有限元

中图分类号 U270.32

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.014

Study on End Underframe Fatigue Life of a Certain Type of Metro Train

LIU Longxi¹, ZHAO Sicong¹, CHEN Shujie¹, WANG Kang²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The car body of metro vehicle is a welded structure, and its fatigue strength is obviously smaller than that of the base metal due to the influence of stress concentration, welding defects and welding residual stress. As the part connecting bogie and car body, the end underframe of metro vehicle bears more load. Therefore, it is necessary to study its fatigue life. [Method] The numerical simulation and fatigue test are jointly used to study the fatigue life of the end underframe of a certain type of metro train. Firstly, a finite element model of metro vehicle is established and the corresponding fatigue load and evaluation points are determined. Then, the fatigue damage simulation is carried out on the

whole train and the end underframe respectively. Finally, the bench test on the end underframe is performed, and the result is compared with that of the train fatigue test and the simulation result of the end underframe. [Result & Conclusion] Under the condition of unidirectional fatigue damage and combined load fatigue damage, both the vehicle chassis (underframe) and the end underframe of the metro train car body have no risk of cracking, meeting the requirements of the relevant standards. Meanwhile, the end underframe can obtain more conservative results in fatigue test when the load is amplified, and the simulation results of the end underframe finite element model are in good agreement with its test results, which can truly reflect the stress state of the train model and meet the requirements of the relevant standards.

Key words metro train; end underframe; fatigue test; finite element

疲劳破坏是机械零部件早期失效的主要形式^[1]。地铁列车车体多采用焊接结构, 受应力集中、焊接缺陷及焊接残余应力的影响, 其车体疲劳强度会明显小于金属母材疲劳强度^[2]。而地铁列车端部底架(以下简称“端部底架”)作为转向架和车体主体相连接的部位, 其承受的载荷也相对更大, 因此对端部底架疲劳寿命的研究非常有必要。

众多学者对车体及其端部底架的疲劳寿命已经进行了一系列研究。文献[3]构建了考虑前从板座角焊缝的 C70 车体有限元模型进行疲劳寿命分析, 发现在建模过程中应考虑模拟焊缝, 并采用疏密结合的方式划分有限元模型更符合实际情况。文献[4]通过疲劳试验发现车钩座内侧筋板焊缝存在疲劳安全隐患并提出了满足设计要求的优化方案。文献[5]通过对端部底架进行疲劳强度试验而验证整车的疲劳强度, 设计了端部底架的疲劳强度台架试验方案。

本文按照 EN 12663-1:2010 + A1:2014 *Railway applications-Structural requirements of railway vehiclebodies-Part 1: Locomotives and passenger rolling*

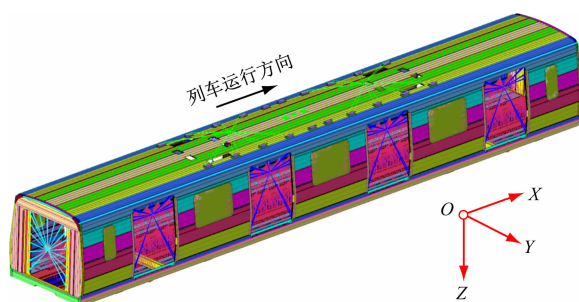
stock (and alternative method for freight wagons) 标准规定的载荷, 基于某型地铁车辆车体建立整车仿真的车体有限元模型 (以下简称“整车模型”) 和仅端部底架部分的局部有限元模型 (以下简称“局部模型”), 对端部底架疲劳寿命进行试验研究。首先, 对整车底架和端部底架分别进行了疲劳损伤计算; 然后, 对端部底架开展台架试验, 并将台架试验结果、整车仿真条件下的疲劳试验结果及底架仿真条件下的疲劳试验结果进行对比分析。

1 仿真疲劳试验

端部底架仿真疲劳试验可验证模型能够正确反映车体薄弱部位的疲劳寿命, 进而确定台架疲劳试验的边界条件。

1.1 整车模型

采用 Hypermesh 2019 软件对标准端部底架的三维几何模型进行前处理, 设置材料属性, 以及相应的载荷和约束。采用 OptiStruct 求解器进行计算。整车模型如图 1 所示, 共划分为 1 767 867 个单元, 含 1 547 895 个节点。



加车辆行驶方向 (X 向)

图 1 整车模型

Fig. 1 Vehicle finite element model

1.2 疲劳载荷及疲劳评估测点

端部底架静强度试验及疲劳试验主要工况及涉及的参数有:

1) 在 AW3 (满载) 工况下, 车体质量 W 为 34.631 t;

2) 在 X 向牵引工况下 (列车牵引加速度为 1 m/s^2), 车钩载荷 $F_{\text{CGFx}} = 46.781 \text{ kN}$, 中心销载荷 $F_{\text{PFx1}} = 28.920 \text{ kN}$;

3) X 向制动工况下 (列车制动加速度为 1.2 m/s^2), 车钩载荷 F_{CGFx2} 为 56.137 kN , 中心销载荷 $F_{\text{PFx2}} = 34.704 \text{ kN}$;

4) 在 Y 向加载工况下, 抗侧滚载荷 $F_{\text{ARBFz}} =$

8.934 kN , 中心销载荷 $F_{\text{PFy}} = 13.676 \text{ kN}$;

5) 在 Z 向加载工况 1 下, 单个空气弹簧的垂向力为 72.193 kN ;

6) 在 Z 向加载工况 2 下, 单个空气弹簧的垂向力为 97.672 kN 。

根据整车模型静强度计算结果选取疲劳评估测点焊缝, 并按 EN 12663-1:2010 + A1:2014 标准确认该焊缝的类型编号, 即: 枕梁内外筋板与地板和枕梁盖板的 T 形焊缝, 其焊缝类型编号为 13.3; 牵引梁和地板的搭接焊缝以及枕梁和地板之间的对接焊缝, 焊缝类型编号为 9.4; 枕梁和边梁以及牵引梁之间的弧形筋板对接焊缝, 焊缝类型编号为 7.4.3; 车体抗侧滚座附近的 T 形焊缝, 焊缝类型编号为 13.3。各疲劳评估测点焊缝如图 2—图 5 所示。

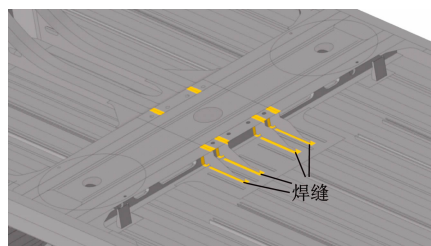


图 2 枕梁内外筋板、地板及枕梁盖板间的 T 形焊缝

Fig. 2 "T-shaped" welds between corbel inner and outer stiffeners, floor and corbel cover

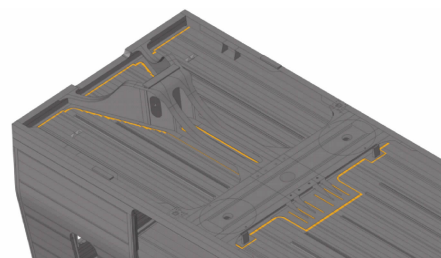


图 3 牵引梁和地板的搭接焊缝, 枕梁和地板之间的对接焊缝

Fig. 3 Lap welds between draft sill and floors, butt welds between corbel and floor

1.3 整车模型的端部底架焊缝疲劳损伤

1.3.1 在单向疲劳载荷作用下

根据 Miner 累积损伤法则, 计算 1 000 万次循环下的损伤值 D 。若评估区域的 $D < 1$, 则认为该评估区域没有产生裂纹的风险。

采用整车模型进行仿真计算可得, 在 X 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图如图 6 所示。由图 6 可知, D 最大值 $D_{\text{max}} = 0.305$, 小于 1, 且最大损伤位置位于枕梁内侧中间筋板与枕

梁下盖板的 T 形焊缝。

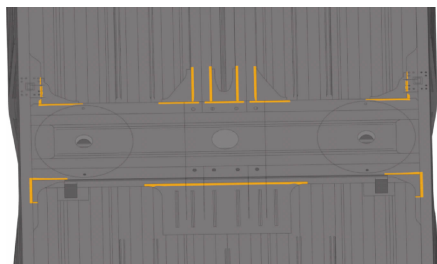


图 4 枕梁同边梁、牵引梁之间的弧形筋板对接焊缝

Fig. 4 Cambered stiffeners butt welds between corbel and draft sill

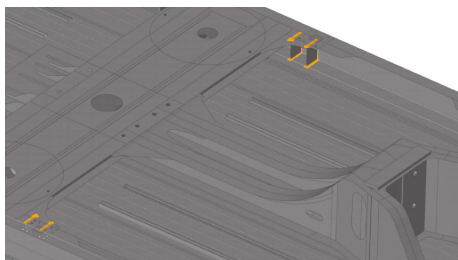


图 5 车体抗侧滚座附近的焊缝

Fig. 5 Welds near the anti-roll seat of the car body

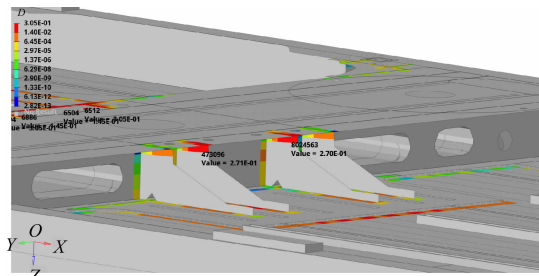


图 6 X 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 6 Weld damage cloud diagram of vehicle model end underframe under X-direction fatigue load

Y 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图如图 7 所示。由图 7 可知, $D_{\max} = 0.280$, 小于 1, 且最大损伤位置位于车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝。

Z 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图如图 8 所示。由图 8 可知, $D_{\max} = 0.013$, 远小于 1, 且最大损伤位置位于枕梁上盖板与地板上表面的对接焊缝。

由仿真结果可以看出, 在单向疲劳载荷作用下, 整车底架的 D_{\max} 均小于 1, 说明没有产生裂纹的风险, 满足标准相关要求。

1.3.2 在组合疲劳载荷作用下

在 X 向、Y 向及 Z 向分别进行 1 000 万次载荷

循环作为组合疲劳载荷, 仿真得到组合疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图如图 9 所示。由图 9 可知, 在组合疲劳载荷作用下, 最大损伤位置位于枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝, $D_{\max} = 0.316$, 小于 1, 说明没有产生裂纹的风险, 满足标准相关要求。

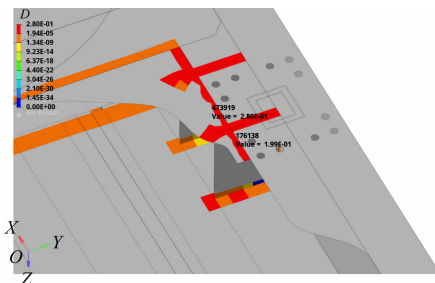


图 7 Y 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 7 Weld damage cloud map of vehicle model end underframe under Y-direction fatigue load

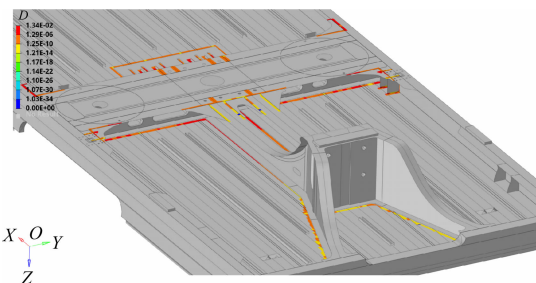


图 8 Z 向疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 8 Weld damage cloud map of vehicle model end underframe under Z-direction fatigue load

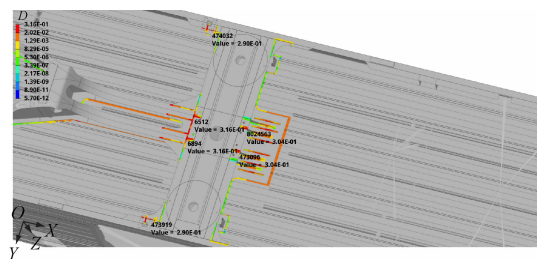


图 9 组合疲劳载荷作用下整车模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 9 Weld damage cloud map of vehicle model end underframe under combined fatigue load

1.4 局部模型的端部底架焊缝疲劳损伤

1.4.1 局部模型的端部底架约束条件

仿真计算的局部模型可看作是从车体整体截取出的、包含牵引缓冲结构的端部底架子模型。其与车体主体连接处的结构刚度较大, 故可认为截取边界均为刚性。故在 Hypermesh 软件中, 通过在端部底架与车体主体的边界处施加约束来模拟刚性边

界。端部底架的约束设置如图 10 所示。

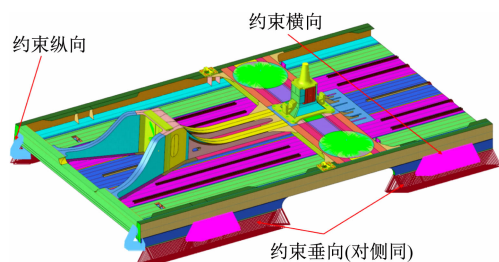


图 10 局部模型的端部底架约束示意图

Fig. 10 Schematic picture of local model end underframe constraints

1.4.2 在单向疲劳载荷作用下

仿真计算可得,在 X 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图如图 11 所示。由图 11 可知: $D_{\max} = 0.317$, 小于 1, 且最大损伤位置位于枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝。

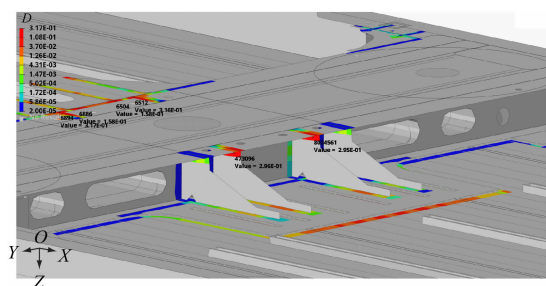


图 11 X 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 11 Weld damage cloud map of local model end underframe under X -direction fatigue load

Y 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图如图 12 所示。由图 12 可知, $D_{\max} = 0.224$, 远小于 1, 且最大损伤位置位于车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝。

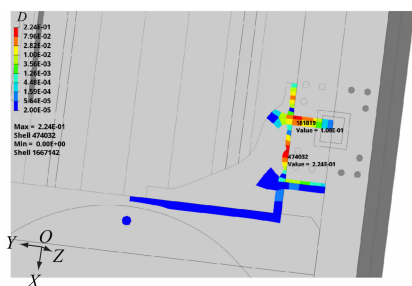


图 12 Y 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 12 Weld damage cloud map of local model end underframe under Y -direction fatigue load

Z 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图如图 13 所示。由图 13 可知, $D_{\max} =$

0.021, 远小于 1, 且最大损伤位置位于枕梁上盖板与地板上表面的对接焊缝。

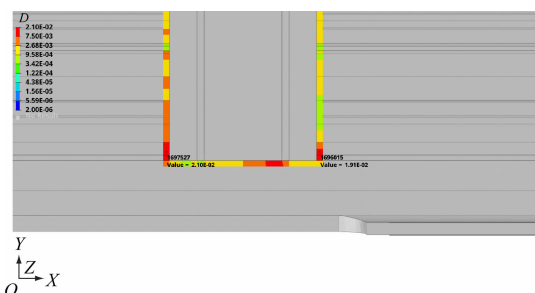


图 13 Z 向疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 13 Weld damage cloud map of local model end underframe under Z -direction fatigue load

由仿真结果可知,在单向疲劳载荷作用下,端部底架的 D_{\max} 均小于 1, 说明端部底架没有产生裂纹的风险, 满足标准相关要求。

1.4.3 在组合疲劳载荷作用下

在 X 向、 Y 向及 Z 向分别进行 1 000 万次载荷循环作为组合疲劳载荷, 仿真得到组合疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图如图 14 所示。由图 14 可知, 在组合疲劳载荷作用下, 最大损伤位置位于枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝, $D_{\max} = 0.317$, 小于 1, 说明车体没有产生裂纹的风险, 满足标准相关要求。

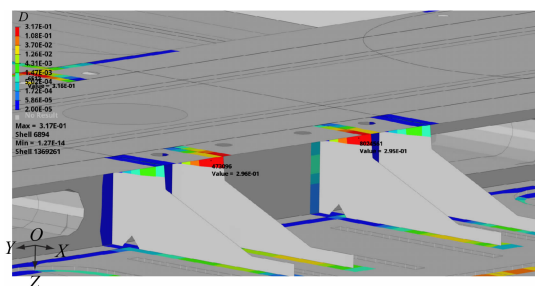


图 14 组合疲劳载荷作用下局部模型的端部底架焊缝损伤云图

Fig. 14 Weld damage cloud map of local model end underframe under combined direction fatigue load

2 台架试验

台架试验对象为某型标准端部底架, 主要包括牵引梁、枕梁、缓冲梁、地板和车钩安装座等结构, 台架试验的端部底架试件实景图如图 15 所示。该底架经过渗透探伤没有裂纹, 对其进行静强度实体试验和实体疲劳试验。



图 15 台架试验的端部底架试件实景图

Fig. 15 Picture of end underframe sample in bench test

2.1 静强度试验

在端部底架静强度试验前,必须对试件进行 PT 探伤,确认没有出现裂纹。端部底架静强度试验载荷工况如表 1 所示。为使得出的结果更具有参考性,主要选取载荷较大的工况进行计算和试验。

表 1 静强度试验的载荷工况

Tab.1 Load condition in static strength test

工况编号	不同载荷组合	工况说明
工况 1	W_g	Z 向静载
工况 2	$W(1 + 0.15)g$	单载荷工况
工况 3	$W_g + F_{CGFx2}$	单载荷工况
工况 4	$W_g + F_{PFy}$	单载荷工况
工况 5	$W_g + F_{PFx2}$	单载荷工况
工况 6	$W_g + F_{ARBFz}$	单载荷工况
工况 7	$W_g + F_{CGFx1} + F_{PFx1}$	起动工况
工况 8	$W_g + F_{CGFx2} + F_{PFx2}$	制动工况
工况 9	$W_g + F_{PFy} + F_{ARBFz}$	侧滚工况

注: g 为重力加速度。

2.2 疲劳试验方案

端部底架疲劳试验的疲劳次数为 1 000 万次,载荷组合形式有 2 种:组合 A 为 500 万次 X 向载荷循环 + 500 万次 Z 向载荷循环组合;组合 B 为 500 万次 Y 向载荷循环 + 500 万次 Z 向载荷循环组合。在疲劳强度试验过程中,组合 A 和组合 B 交替进行。为缩短试验时间,组合 A 的 500 万次 X 向载荷和 500 万次 Z 向载荷同时进行,组合 B 的 500 万次 Y 向载荷和 500 万次 Z 向载荷也同时进行,此时的实际加载次数有所减少,故需对载荷进行放大。第 600 万次—第 800 万次施载中,动态载荷放大系数 $k=1.2$;第 800 万次—第 1 000 万次施载中, $k=1.4$ 。端部底架疲劳试验的载荷施加情况如图 16 所示。

在台架试验开始前,以及疲劳次数为 600 万次、800 万次和 1 000 万次时对试验样件进行 PT(液体渗透检测)探伤。台架试验加载所用的疲劳载荷块谱如图 17 所示。

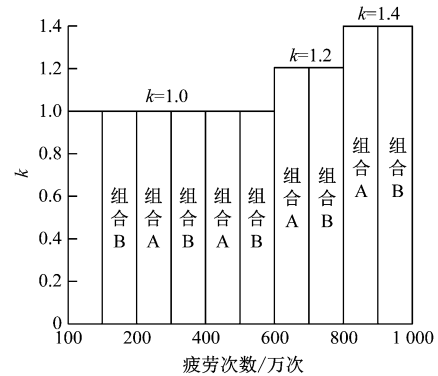


图 16 端部底架疲劳试验的载荷施加情况

Fig. 16 Loading on end underframe in fatigue test

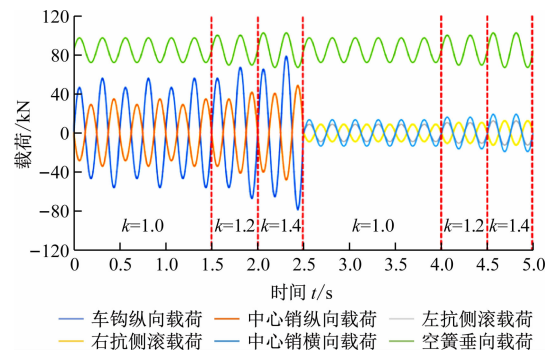


图 17 台架试验加载所用的疲劳载荷块谱

Fig. 17 Fatigue load block spectrum used for bench test loading

3 试验结果分析

3.1 局部模型与整车模型的仿真结果对比

组合疲劳载荷作用下,局部模型与整车模型的仿真疲劳损伤对比如表 2 所示。

表 2 组合疲劳载荷作用下 2 个模型的仿真疲劳损伤对比

Tab.2 Comparison of 2 models simulated fatigue damage under combined fatigue load

整车模型 $D/10^{-4}$	局部模型 $D/10^{-4}$	损伤最大处
1.263	1.697	枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝
1.190	1.050	牵引梁与枕梁下盖板弧板的焊接处
0.704	0.369	车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝

由表 2 可以看出:不同仿真条件下的端部底架损伤较大处位置一致,损伤最大处均位于枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝。

根据仿真结果,同时施加 X 向、Y 向、Z 向载荷时的损伤大于单向荷载分别施加时的损伤。由此对载荷不予放大,进行仿真验证。仿真验证的虚拟

循环次数为实际加载方案循环次数的 1/1 000,得到整车模型的底架焊缝损伤云图,如图 18 所示。按实际加载方案仿真,得到局部模型的端部底架焊缝损伤云图,如图 19 所示。

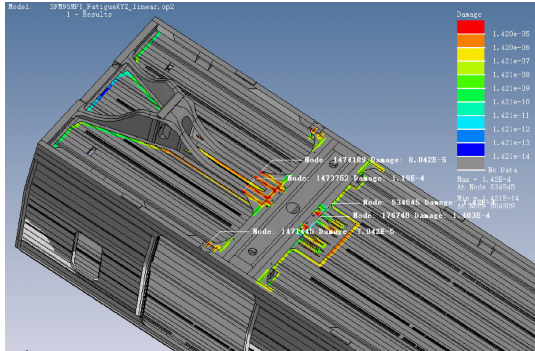


图 18 整车模型的端部底架焊缝损伤云图
Fig. 18 Weld damage cloud map of vehicle model end underframe

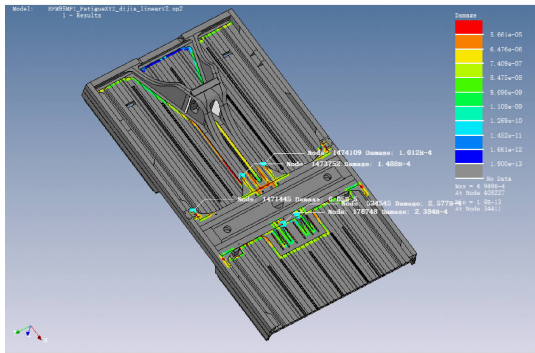


图 19 局部模型的端部底架焊缝损伤云图
Fig. 19 Weld damage cloud map of local model end underframe

从图 19 的仿真结果可以看出:在组合疲劳载荷作用下,除车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝外,整车模型的 D_{\max} 均小于局部模型的 D_{\max} ;对于车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝,图 18 的 D 值与图 19 的 D 值接近。由此可见,仅对抗侧滚扭杆载荷进行放大而对端部底架载荷不进行放大时的局部模型仿真疲劳试验结果更接近实际情况,且其对端部底架损伤的评估结果更保守,安全裕值更大。

由图 19 可知,载荷未经放大时 D 存在较大的安全裕量,故将载荷分别放大。

1) Z 向加载:当加载次数 $N < 600$ 万次时, k 取 1.0;当 $600 \text{ 万次} \leq N < 800 \text{ 万次}$ 时, k 取 1.2;当 $800 \text{ 万次} \leq N < 1\,000 \text{ 万次}$ 时, k 取 1.4。

2) X 向和 Y 向加载:当 $N < 300$ 万次时, k 取

1.0;当 $300 \text{ 万次} \leq N < 1\,300 \text{ 万次}$ 时, k 取 1.2;当 $1\,300 \text{ 万次} \leq N < 2\,300 \text{ 万次}$ 时, k 取 1.4。

调整 k 值后的局部模型端部底架损伤云图如图 20 所示。

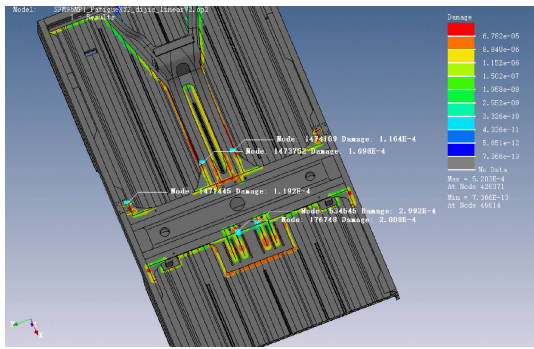


图 20 调整 k 值后的局部模型端部底架焊缝损伤云图
Fig. 20 Weld damage cloud map of the local model end underframe after adjustment of the k value

按 k 值调整前后的局部模型疲劳试验(疲劳循环总次数为 1 000 万次),以及整车模型的疲劳试验(疲劳循环总次数为 3 000 万次),得到局部模型与整车模型的端部底架损伤情况如表 3 所示。

表 3 局部模型与整车模型的端部底架损伤情况

Tab.3 End underframe damages of the local model and the vehicle model

未调整 k 值时 局部模型 D	调整 k 值后 局部模型 D	整车模型 D	损伤部位
0.258	0.299	0.142	枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝
0.238	0.281	0.140	枕梁内侧中间筋板与枕梁下盖板的 T 形焊缝
0.149	0.170	0.119	牵引梁与枕梁下盖板弧板的焊接处
0.101	0.116	0.080	牵引梁与枕梁下盖板弧板的焊接处
0.105	0.119	0.070	车体抗侧滚扭杆安装座接口的 T 形焊缝

由表 3 可见,调整 k 值后,局部模型端部底架疲劳试验的 D 值仍小于 1。这表明放大载荷后,端部底架在疲劳试验时不会发生疲劳破坏,放大载荷后能够获得更为保守的结果。当疲劳循环次数为 100 万次时,端部底架疲劳试验循环载荷块谱如图 21 所示。

3.2 台架试验对有限元模型的有效性验证

部分测点位置及台架试验应变花贴片实景图

如图 22 所示。其中应变花为三轴应变花,由 3 个方向的单向应变片组成。

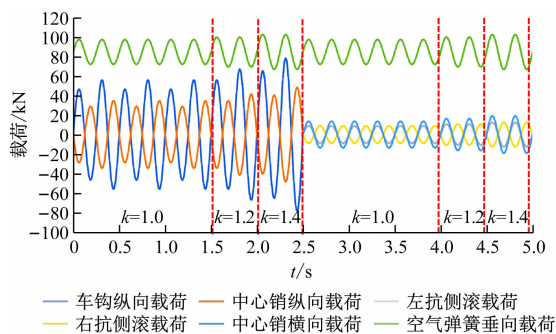
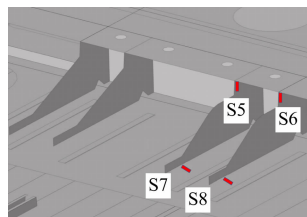


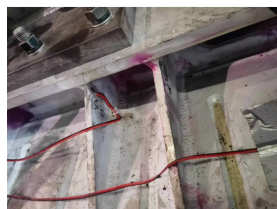
图 21 端部底架疲劳试验循环载荷块谱

Fig. 21 Cyclic load block spectrum of end underframe fatigue test



注: S5、S6、S7、S8 为测点。

a) 测点位置



b) S5 测点贴片实景图



c) S7、S8 测点贴片实景图

图 22 部分测点位置及台架试验应变花贴片实景图

Fig. 22 Schematic diagram of test strain flower patch and measuring points

根据弹性力学的虎克定律,若台架试验中单向应变片采集到的应变值为 ε ,则对应测点的应力 σ 为:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中:

E ——车体铝合金弹性模量,取 70 GPa。

设应变花中 3 个单向应变片的应力分别为 σ_0 、 σ_{45} 、 σ_{90} ,泊松比为 μ ,则应变花的相当应力 σ_e 为:

$$\sigma_e = \left\{ \left[\frac{\sigma_0 + \sigma_{90}}{2(1-\mu)} \right]^2 + 3 \left[\frac{1}{2(1+\mu)} \right]^2 \{ (\sigma_0 - \sigma_{90})^2 + [2\sigma_{45} - (\sigma_0 + \sigma_{90})]^2 \} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

将台架试验得到的端部底架应力实测值与局

部模型得到的端部底架应力仿真值对比,如图 23 所示。图 23 中,应力值以受拉为正,受压为负。

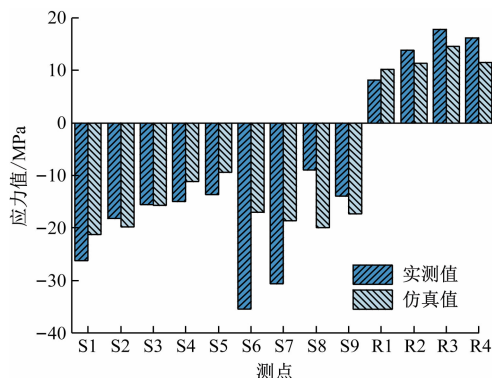


图 23 端部底架应力实测值与仿真值对比图

Fig. 23 Comparison of the measured stress and the simulated value of the end underframe

从图 23 中可以看出,除 S6、S7、S8 测点外,其他测点的应力实测值与仿真值一致性较好,误差较小,说明仿真结果可信,局部模型能够有效反映实际的应力状态。

4 结语

本文按照 EN 12663 标准规定的载荷,对某型端部底架的疲劳寿命进行研究和试验。首先,建立整车模型和局部模型,对端部底架分别进行了疲劳损伤计算;然后,对端部底架实体试件开展台架试验,并将台架试验结果同整车模型及局部模型仿真结果进行对比分析,得到以下结论:

1) 无论整车模型还是局部模型,在单向疲劳载荷作用和组合疲劳载荷作用下,端部底架均无产生裂纹的风险,满足标准相关要求。

2) 整车模型与局部模型的损伤较大处位置一致,并且将载荷放大后,局部模型在疲劳试验时可以获得更为保守的结果。

3) 局部模型的仿真结果和台架试验的实测结果一致性较好,能真实反映其应力状态,且仿真结果和实测结果均表明该端部底架疲劳寿命满足标准的相关要求。

参考文献

- [1] 姚凯. 疲劳与断裂的认识与发展概述[J]. 四川建材, 2021, 47(8): 48.
YAO Kai. Understanding and development of fatigue and fracture [J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(8): 48.

(下转第 83 页)

信号切换智能控制方法,借助双核控制器具有两个独立处理器核心的配置,可同时处理不同的任务,更快地响应制动信号的切换,更好地控制列车的运行;借助双核控制器的冗余设计,保证了制动信号切换控制的可靠性,大大减少了因控制器故障导致的事故发生,提高了有轨电车运行的安全性;通过对制动信号的智能分析、预测和控制,提高了列车运行的智能化水平。

参考文献

- [1] 谈思韵. 有轨电车信号系统线路数据自动生成系统研究[J]. 现代有轨电车, 2023(11): 36.
TAN Siyun. Research on line data automatic generation systems for urban rail transit signal systems[J]. Modern Urban Transit, 2023(11): 36.
- [2] 丁青. 有轨电车信号系统车地多重无线冗余方案应用研究[J]. 科学技术创新, 2023(25): 112.
DING Qing. Research on the application of vehicle-ground wireless multiple redundancy scheme in urban rail transit signal system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(25): 112.
- [3] 那哲铭, 丁莹莹. 基于 BIM 技术的有轨电车信号设备运维管理系统[J]. 铁路技术创新, 2023(4): 38.
NA Zheming, DING Yingying. O & M management system of signal facility of urban rail transit based on BIM technology[J]. Railway Technical Innovation, 2023(4): 38.
- [4] 徐峰. 城市轨道交通信号系统冗余设计及备用控制中心配置

方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 244.

XU Feng. Redundancy design of urban rail transit signal system and configuration scheme of backup control center[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 244.

- [5] 孙剑. 基于多 Agent 技术的地铁轨道交通信号智能控制方法[J]. 中国新技术新产品, 2023(17): 8.
SUN Jian. Intelligent control method of subway rail transit signal based on multi-agent technology[J]. New Technology & New Products of China, 2023(17): 8.
- [6] 蒋建金. 一种采用容器技术基于通用硬件的云计算轨道交通信号控制系统安全平台[J]. 科学技术创新, 2023(26): 214.
JIANG Jianjin. The technical research relates to a safety platform of cloud computing rail transit signal control system based on common hardware using container technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(26): 214.
- [7] 宋坚. 基于云存储技术的有轨电车信号安全预警研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(15): 79.
SONG Jian. Research on the security early warning of urban rail transit signal based on cloud storage technology[J]. Information & Computer, 2023, 35(15): 79.

· 收稿日期:2024-01-25 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-06-10
Received:2024-01-25 Revised:2024-03-20 Published:2024-06-10
· 作者:郭团生,高级工程师,605541862@qq.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

(上接第 78 页)

- [2] 王乐欣. 地铁铝合金车体的强度仿真及疲劳寿命评估[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
WANG Lexin. Strength simulation and fatigue life evaluation of subway aluminum alloy car body[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [3] 王生武, 李忠林. 考虑焊缝的 C70 车体疲劳寿命有限元模型分析[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(9): 65.
WANG Shengwu, LI Zhonglin. Finite element model analysis of fatigue life of C70 car body considering weld seam[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(9): 65.
- [4] 王超, 刘潮涛, 郭平波, 等. 高速动车组整车车体疲劳试验方法研究[J]. 机械强度, 2020, 42(3): 539.
WANG Chao, LIU Chaotao, GUO Pingbo, et al. Research on fa-

tigue test method of car body of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 539.

- [5] 陈逸斐. 地铁车辆端部底架疲劳寿命研究[J]. 机械, 2021, 48(1): 44.
CHEN Yifei. Study on the fatigue life of end-underframe for metro vehicles[J]. Machinery, 2021, 48(1): 44.

· 收稿日期:2021-11-29 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-06-10
Received:2021-11-29 Revised:2022-03-15 Published:2024-06-10
· 第一作者:刘龙玺,高级工程师,liulongxi@cqsf.com
通信作者:王康,硕士研究生,1458824214@qq.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