

基于FKM标准的高压电器箱 随机振动疲劳研究

李赢平, 李 华

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 当地铁车辆运行时, 其高压电器箱会受到随机载荷的作用, 为保证行车安全需要保证其疲劳强度满足设计要求。针对某型地铁车辆在运行过程中出现的高压电器箱三位置开关处的铝板安装螺栓松动的问题, 文章根据GB/T 21563—2018标准规定的载荷和FKM标准对高压电器箱疲劳强度进行评估, 计算结果表明铝板的疲劳强度利用率大于1, 疲劳强度无法满足FKM标准要求。通过对高压电器箱进行冲击试验, 在纵向随机振动试验中铝板出现了开裂和螺栓松动现象, 这验证了纵向随机振动仿真结果的准确性。基于仿真和试验结果, 对高压电器箱结构进行改进设计, 改进后的高压电器箱疲劳强度满足设计要求。

关键词: 高压电器箱; 随机振动; FKM标准; 疲劳利用率; 结构改进; 城市轨道交通; 地铁车辆
中图分类号: U231 **文献标识码:** A

Research on random vibration fatigue of high-voltage electrical box based on FKM standard

LI Zhenping, LI Hua

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The high voltage electrical boxes on metro vehicles are subjected to random load during operation. In order to ensure operation safety, it is necessary to ensure that the fatigue strength of high voltage electrical box meets the design requirements. Aiming at the problem of aluminum plate mounting bolts at the three-position switch of the high voltage electrical box become loose during the operation of a metro vehicle, the fatigue strength of the high voltage electrical box is evaluated according to the standard load and FKM provided in GB/T 21563—2018 standard. The calculation results show that the fatigue strength utilization of aluminum plate is greater than 1, and the fatigue strength cannot meet the requirements of standard FKM. Through the impact test of the high voltage electrical box, in the longitudinal random vibration, the aluminum plate cracked and the bolts become loose, which verified the accuracy of the longitudinal random vibration simulation results. Based on the simulation and test results, the structure of the high voltage electrical box is improved. After the improvement, the fatigue strength of the high voltage electrical box meets the design requirements.

Keywords: high-voltage electrical box; random vibration; FKM standard; fatigue utilization; structural improvement; urban rail transit; metro vehicle

0 引言

城市轨道交通能有效缓解市内交通压力, 方便居

民出行, 国内主要大城市都在大力修建城市轨道交通^[1]。城市轨道交通中的地铁车辆主要采用“直-交”牵引传动系统, 受电弓从接触网获取直流电, 经直流

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4300103)

通信作者: 李赢平 (1997—), 男, 硕士, 主要从事结构仿真及优化设计方面的研究; E-mail: lzp_cz@126.com

引用格式: 李赢平, 李华. 基于FKM标准的高压电器箱随机振动疲劳研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 104-111.

Citation: LI Zhenping, LI Hua. Research on random vibration fatigue of high-voltage electrical box based on FKM standard[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(3): 104-111.

回路输入到逆变器, 逆变器将直流电逆变为牵引电机使用的三相交流电, 牵引电机将电能转化为驱动车轮转动的机械能^[2]。由隔离开关、高速断路器等组成的高压电器箱和牵引逆变器是地铁牵引传动系统重要的组成部分, 列车在运行时电气柜由于受到随机振动载荷的作用, 柜体结构的强度影响着内部电器设备的正常运行, 对行车安全产生重大影响^[3], 因此需要对高压电器箱和牵引逆变器等电气柜进行随机振动分析, 保证其疲劳强度满足设计要求。

文献[4]提出了一种随机载荷作用下疲劳裂纹监测方法, 通过检测随机载荷下的悬臂梁, 验证了该方法的有效性。文献[5]研究了路面随机载荷对车载供氢系统的影响。文献[6]提出一种频域随机振动疲劳分析方法, 与时域分析方法相比, 该方法的计算时间更少。文献[7]基于FKM标准对大型立式泵叶轮的疲劳特性进行了分析。在轨道交通车辆关键零部件的强度评估和仿真精度方面, 我国学者开展了大量的研究^[8-10], 提高了轨道车辆运行的可靠性。

本文针对某型地铁车辆高压电器箱三位置开关处的铝板安装螺栓出现松动问题进行了研究, 对地铁高压电器箱进行了随机振动疲劳仿真分析, 通过高压电器箱纵向冲击和纵向随机振动试验, 验证了仿真结果的准确性, 并根据试验和仿真结果对标准地铁高压电器箱结构进行改进设计, 保证了高压电器箱疲劳强度满足设计要求, 该方法对高压电器箱的结构设计可提供一定的参考借鉴。

1 高压电器箱有限元建模

1.1 结构及材料属性

地铁车辆高压电器箱主要由钣金件焊接和螺栓连接而成, 其骨架材料主要为不锈钢, 少部分材料为铝合金, 如顶板、门板等。其材料的力学性能参数如表1所示。

表1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	密度/(t·mm ⁻³)
06Cr19Ni10	210	205	515	0.28	7.85×10 ⁻⁹
5052-O	70	65	170	0.33	2.68×10 ⁻⁹

1.2 柜体有限元模型

为了简化模型, 提高计算效率, 去掉不起承载作用的门板、线束和质量较小的部件, 将其质量通过MASS点加到周围骨架上; 柜体骨架钣金件使用壳单元进行网格划分, 内部器件使用体单元进行模拟, 单元大小为5 mm; 使用Rigid单元模拟钣金件之间的焊接, 柜体的螺栓和铆钉连接根据实际尺寸使用梁单元

进行模拟。高压电器箱有限元模型如图1所示, 其中x方向为纵向(行车方向), y向为垂向(垂直于地面方向), z向为横向。有限元模型总质量为418 kg, 高压电器箱通过4个吊耳托装在地铁车辆车体底部, 根据柜体的实际安装方式, 对高压电器箱有限元模型的4个吊耳螺栓孔施加固定约束, 约束其所有自由度。

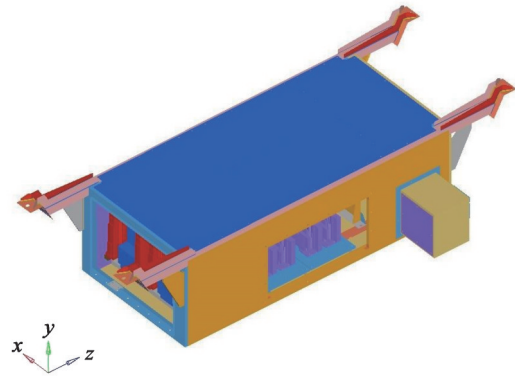


图1 高压电器箱有限元模型

Fig. 1 Finite element model of high-voltage electrical box

2 随机振动疲劳分析

当地铁车辆运行时, 安装在车体上的设备(如高压电器箱)会受到随机振动载荷的作用, 因此需要对高压电器箱进行随机振动疲劳分析。根据GB/T 21563—2018《轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验》^[11]中的试验等级分类, 安装于车体底部的高压电器箱的试验属于“1类A级”的试验等级。因此, 对高压电气箱加载使用GB/T 21563—2018中“模拟长寿命振动试验的1类A级车体安装ASD频谱”, 加速度比例系数取7.83, 其ASD频谱如图2所示。

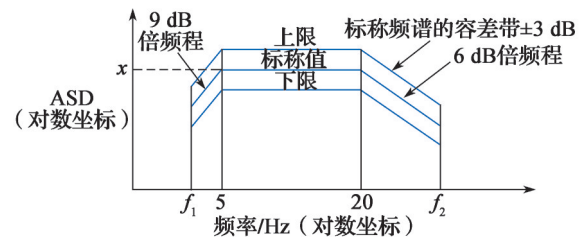


图2 1类A级车体安装ASD频谱

Fig. 2 Category-1 Class-A vehicle body-mounted ASD spectrum

图2中, 当 $m \leq 500$ kg时, $f_1 = 5$ Hz, $f_2 = 150$ Hz; 当 $500 < m \leq 1\ 250$ kg时, $f_1 = (1250/m) \times 2$ Hz, $f_2 = (1250/m) \times 60$ Hz; 当 $m > 1\ 250$ kg时, $f_1 = 2$ Hz, $f_2 = 60$ Hz; 长寿命振动试验ASD量级: 垂向 1.034 ($m \cdot s^{-2}$)/Hz, 横向 0.250 ($m \cdot s^{-2}$)/Hz, 纵向 0.452 ($m \cdot s^{-2}$)/Hz。

2.1 随机振动分析

通过随机振动仿真分析得到高压电器箱纵向、垂向和横向3个方向的 1σ von-Mises应力, 其应力分布如

图3~图5所示。由仿真结果可知,高压电器箱在纵向、垂向和横向随机振动的最大 1σ von-Mises 应力分别为111.0 MPa、108.9 MPa和48.7 MPa,其中纵向和垂向的最大应力较大。纵向随机振动应力最大值出现在三位置开关安装梁的连接处,垂向随机振动应力最大值出现在侧板与接触器安装梁连接处,横向随机振动应力最大值出现在熔断器安装板折弯处。

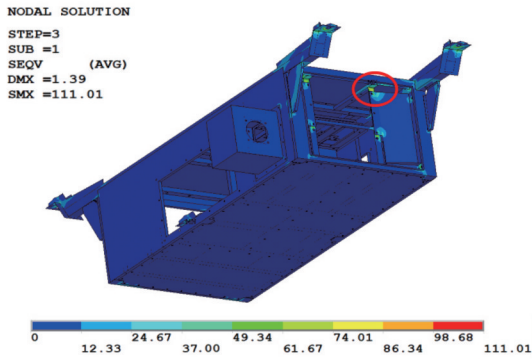


图3 纵向随机振动应力云图

Fig. 3 Nephogram of longitudinal random vibration stress

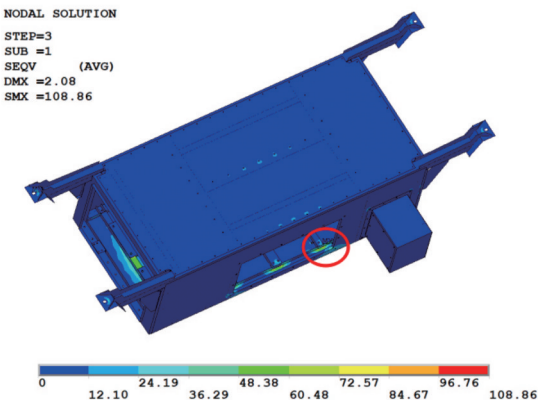


图4 垂向随机振动应力云图

Fig. 4 Nephogram of vertical random vibration stress

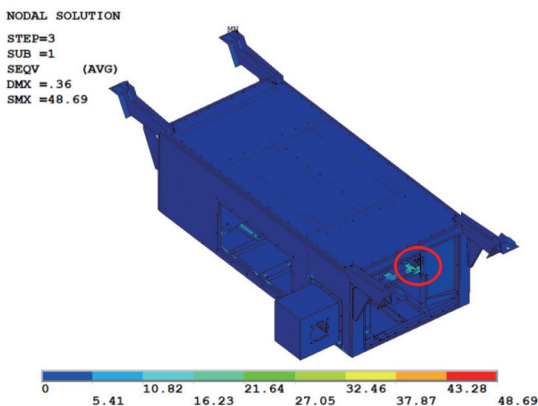


图5 横向随机振动应力云图

Fig. 5 Nephogram of transverse random vibration stress

2.2 高压电器箱疲劳利用度计算

德国机械工程研究委员会编写的FKM标准^[12]被广泛应用于评估非焊接和焊接结构的强度^[13-16]。高压电器

箱的疲劳强度使用FKM标准进行校核,FKM通过定义不同的安全因子来计算总安全系数,并由工作应力、结构疲劳强度和总安全系数获取结构疲劳利用度,疲劳利用度不大于1则认为结构疲劳强度满足要求。非焊接结构的轴向和切向变幅疲劳极限应力分别由下式计算得到:

$$\sigma_{BK} = K_{BK_\sigma} \times \left(K_{AK_\sigma} \times \frac{f_{W_\sigma} \times R_m}{K_{WK}} \right) \quad (1)$$

$$\tau_{BK} = K_{BK_\tau} \times \left(K_{AK_\tau} \times \frac{f_{W_\tau} \times \sigma_{W_{zd}}}{K_{WK}} \right) \quad (2)$$

式中: σ_{BK} 、 τ_{BK} 分别为非焊接结构轴向和切向变幅疲劳极限应力; K_{BK_σ} 、 K_{BK_τ} 分别为轴向和切向变幅疲劳强度因子; K_{AK_σ} 、 K_{AK_τ} 分别为轴向和切向应力平均应力因子; f_{W_σ} 、 f_{W_τ} 分别为轴向和切向应力的疲劳强度因子; R_m 为材料抗拉强度; K_{WK} 为设计因子。

根据正向和切向变幅疲劳极限应力,非焊接结构正应力和切应力的循环疲劳利用度为:

$$a_{BK_\sigma} = \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{BK}} \times j_D \leq 1 \quad (3)$$

$$a_{BK_\tau} = \frac{\tau_{a1}}{\tau_{BK}} \times j_D \leq 1 \quad (4)$$

式中: a_{BK_σ} 、 a_{BK_τ} 分别为非焊接结构正应力和切应力的循环疲劳利用度; σ_{a1} 、 τ_{a1} 分别为正应力和切应力的最大应力幅值; j_D 为总的安全因子。

根据正应力理论和 von-Mises 准则,复合应力下的非焊接结构的疲劳利用度为:

$$a_{BK_{\sigma\tau}} = q \times a_{NH} + (1-q) \times a_{GH} \leq 1 \quad (5)$$

$$a_{NH} = \frac{|a_{BK_{\sigma x}} + a_{BK_{\sigma y}}| + \sqrt{(a_{BK_{\sigma x}} - a_{BK_{\sigma y}})^2 + 4a_{BK_\tau^2}}}{2} \quad (6)$$

$$a_{GH} = \sqrt{a_{BK_{\sigma x}}^2 + a_{BK_{\sigma y}}^2 - a_{BK_{\sigma x}} \times a_{BK_{\sigma y}} + a_{BK_\tau^2}} \quad (7)$$

$$q = \frac{\sqrt{3} - 1/f_{W_\tau}}{\sqrt{3} - 1} \quad (8)$$

式中: $a_{BK_{\sigma\tau}}$ 为复合应力下非焊接结构循环疲劳利用度; q 为延性系数; f_{W_τ} 为完全对称循环切应力疲劳强度因子; $a_{BK_{\sigma x}}$ 、 $a_{BK_{\sigma y}}$ 分别为非焊接结构 x 方向和 y 方向的应力循环疲劳利用度。

基于FKM标准疲劳强度校核方法,计算得到高压电器箱随机振动疲劳利用度,表2为疲劳利用度大于0.8的部件的疲劳利用度,其具体位置如图6所示。其中,三位置开关右侧铝板在纵向随机振动的疲劳利用度超过了1,三位置开关左侧铝板在纵向和垂向随机振动的疲劳利用度超过了1,有失效的风险。高压电器箱在各个方向的疲劳利用度云图如图7~图9所示,其在纵向、垂向和横向的最大疲劳利用度分别为2.57、1.06和0.22。

表2 高压电器箱疲劳利用度汇总表
Table 2 Summary table of fatigue utilization of high voltage electrical box

部件	纵向利用度	垂向利用度	横向利用度	总利用度
三位置开关右侧铝板	2.57	0.98	0.20	3.75
三位置开关左侧铝板	1.72	1.06	0.22	3.01
高压电器箱左侧板	0.24	0.63	0.13	1.00
三位置开关右侧安装梁	0.66	0.25	0.08	0.99
三位置开关左侧安装梁	0.51	0.23	0.08	0.82
高压电器箱右侧板	0.15	0.53	0.12	0.80

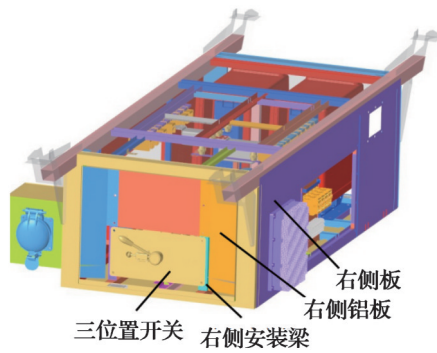


图6 高压电器箱结构说明图

Fig. 6 Structure illustration of high voltage electrical box

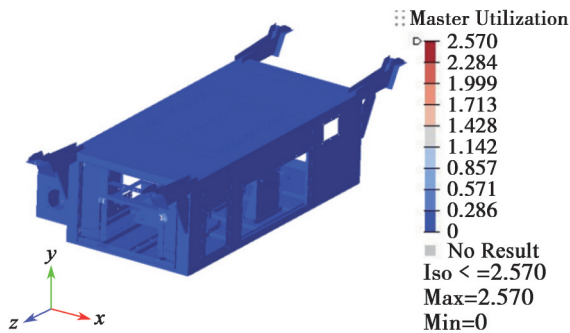


图7 纵向随机振动疲劳利用度

Fig. 7 Fatigue utilization of longitudinal random vibration

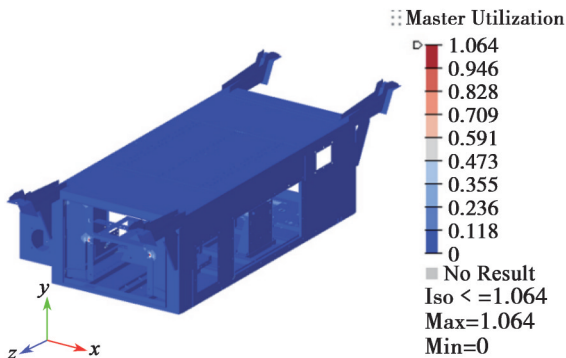


图8 垂向随机振动疲劳利用度

Fig. 8 Fatigue utilization of vertical random vibration

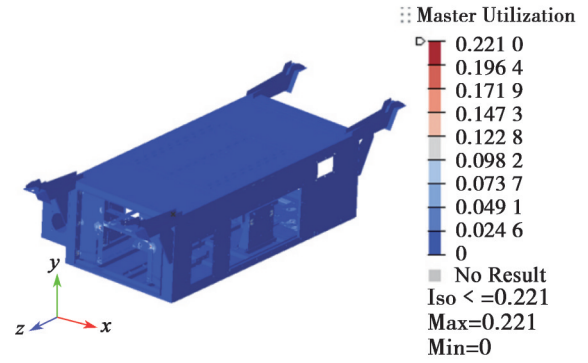


图9 横向随机振动疲劳利用度

Fig. 9 Fatigue utilization of transverse random vibration

3 试验验证

为了验证高压电器箱随机振动仿真分析结果的准确性,对高压电器箱进行纵向冲击试验和纵向随机振动试验,纵向冲击采用GB/T 21563—2018中1类A级车体安装半正弦脉冲载荷加载,峰值加速度为 50 m/s^2 ,标称持续时间为 30 ms ,冲击试验载荷如图10所示。纵向随机振动采用GB/T 21563—2018中模拟长寿命振动试验的1类A级车体安装ASD频谱加载,加速度比例系数取 7.83 ,纵向随机振动试验时间为 5 h 。

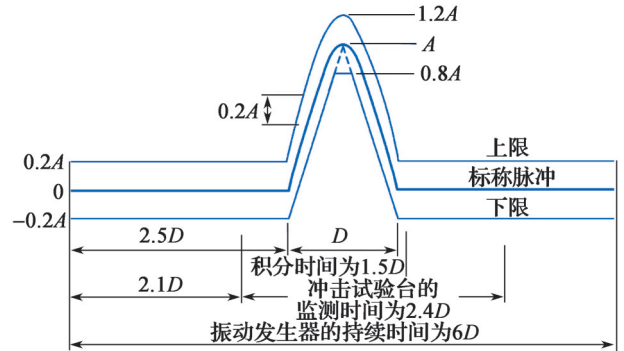


图10 冲击试验载荷

Fig. 10 Load of impact test

3.1 冲击试验和随机振动试验

基于冲击仿真结果的应力分布,并考虑选点粘贴三轴应变花的可行性,选取高压电器箱吊耳、纵向冲击峰值应力较大点附近作为应变测量点,如表3和图11所示。

表3 应变片粘贴位置

Table 3 Sticking position of strain rosette

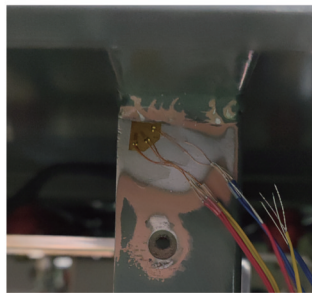
测点	测点1	测点2	测点3
位置	接触器安装梁	三位置开关右侧安装梁	吊耳

3.2 试验结果分析

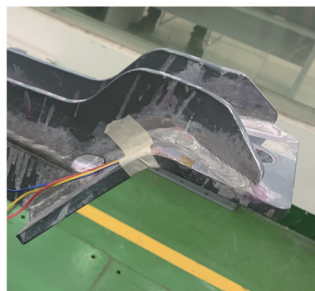
通过应变仪采集得到测点的应变数据,对应变数据进行处理获得测点纵向冲击峰值应力,其与仿真值



(a) 接触器安装梁



(b) 三位置开关安装梁



(c) 吊耳

图 11 三轴应变花粘贴位置图

Fig. 11 Diagram of sticking position of triaxial strain rosette

的对比如表 4 所示。由表 4 可知, 纵向冲击试验中测点 1、测点 2 和测点 3 的 von-Mises 应力峰值分别为 86.3 MPa、193.3 MPa 和 119.0 MPa, 3 个测点的峰值应力与仿真值的误差都小于 10%, 满足工程精度要求, 验证了高压电器箱仿真模型的准确性。

表 4 纵向冲击测点应力对比

Table 4 Comparison of stresses on measured point of longitudinal impact

项目	测点 1	测点 2	测点 3
试验值	86.3	193.3	119.0
仿真值	78.3	185.2	110.2
相对误差/%	9.3	4.2	7.4

完成纵向冲击试验后拆除门板, 检验高压电器箱, 可发现高压电器箱无裂缝产生, 确认高压电器箱正常后进行纵向随机振动试验。完成纵向随机振动试验后发现高压电器箱三位置开关器件处的铝板出现了开裂和螺栓松动, 如图 12 所示, 这就验证了高压电器箱疲劳强度校核结果的准确性。



(a) 铝板开裂

(b) 铝板螺栓松动

图 12 铝板开裂和螺栓松动

Fig. 12 Cracking of aluminum plate and loosening of bolts

4 高压电器箱结构改进设计

为了保证高压电器箱在实际运行环境下疲劳强度有一定的裕量, 需要对疲劳利用度大于 0.95 的部件进行结构改进设计, 降低随机振动疲劳利用度, 保证高压电器箱的疲劳强度满足设计要求。

4.1 结构改进

铝板材料为 5 系铝合金 5052-O, 其正应力和切应力疲劳强度分别为 50 MPa 和 30 MPa, 力学性能无法满足设计要求。通过分析试验和仿真结果, 可发现纵向随机振动试验时三位置开关安装梁的应力较大, 垂向随机振动试验时侧板与接触器安装梁连接处应力较大, 而铝板由于受到三位置开关安装梁传递的力, 进而在螺栓孔附近产生应力集中现象, 造成铝板出现开裂和螺栓松动。由于三位置开关处的铝板主要作用是遮挡, 不承担承力作用, 改进时取消铝板与三位置开关安装梁的螺栓连接, 并在铝板上添加加强筋, 如图 13 所示。将三位置开关安装梁和其上端连接的横梁加厚到 3 mm, 在梁和左侧板处添加 3 mm 厚的加强板, 局部放大图为整体图从左往右依次放大, 如图 14 所示。

4.2 高压电器箱随机振动分析

对改进设计后的高压电器箱进行随机振动分析, 3 个方向随机振动仿真结果如图 15~图 17 所示, 其最大 1σ von-Mises 应力如表 5 所示。由仿真结果可知, 改进后高压电器箱纵向和垂向随机振动最大 von-Mises 应力明显降低, 纵向最大 1σ von-Mises 应力降低了 8.4 MPa, 最大应力位置出现在高速断路器侧门板安装板上, 垂

表 5 结构改进前后最大应力对比

Table 5 Comparison of maximum stress before and after structural improvement

载荷	最大 1σ Von-Mises 应力	
	改进前	改进后
纵向载荷	110.0	101.6
垂向载荷	108.9	102.6
横向载荷	48.7	48.6

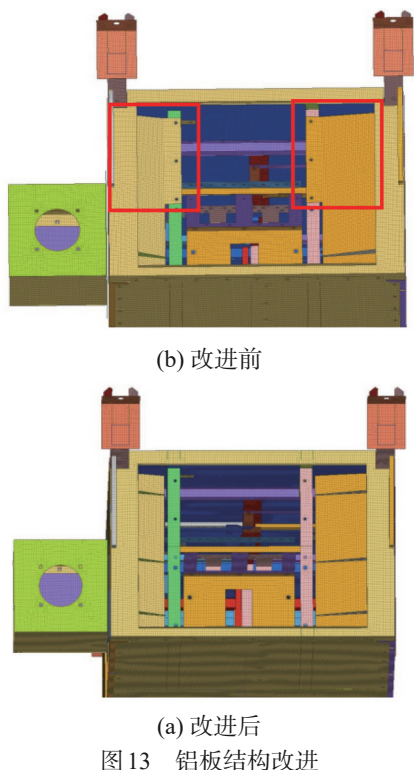


图13 铝板结构改进

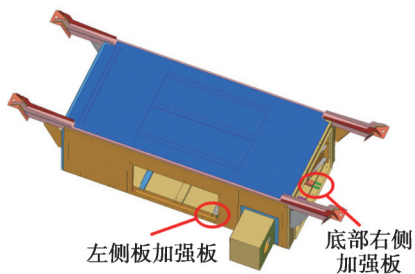
向最大 1σ von-Mises 应力降低了 6.3 MPa, 最大应力位置出现在侧板与加强梁的连接处, 横向最大应力基本无变化。

4.3 改进后疲劳利用度计算

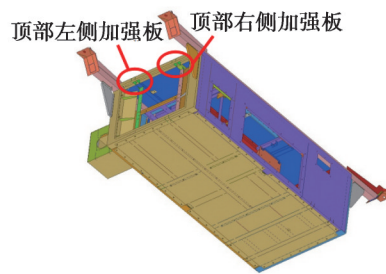
基于FKM标准的疲劳强度校核方法, 计算得到高压电器箱改进后的疲劳利用度(见图18~图20), 表6为改进前疲劳利用度小于0.8而改进后疲劳利用度大于

表6 高压电器箱疲劳利用度汇总表
Table 6 Summary table of fatigue utilization of high voltage electrical box

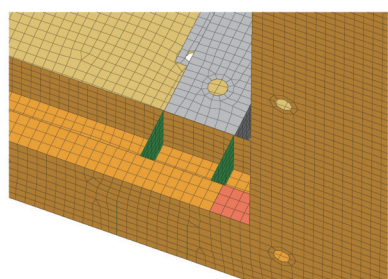
部件	纵向利用度	垂向利用度	横向利用度	总利用度
高压电器箱左侧板	0.26	0.55	0.12	0.92
三位置开关右下侧安装梁	0.33	0.47	0.10	0.90
高压电器箱右侧板	0.16	0.52	0.12	0.80
三位置开关右侧安装梁	0.51	0.19	0.08	0.78
三位置开关左侧安装梁	0.44	0.20	0.07	0.71
三位置开关右侧铝板	0.14	0.06	0.19	0.39
三位置开关左侧铝板	0.10	0.06	0.04	0.21



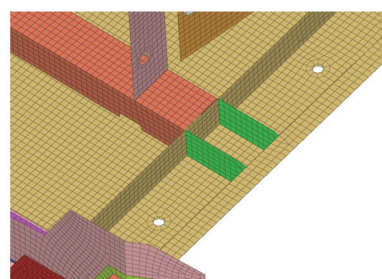
(a) 整体分布图1



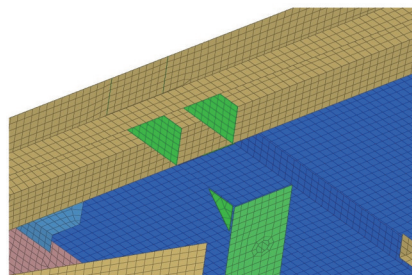
(b) 整体分布图2



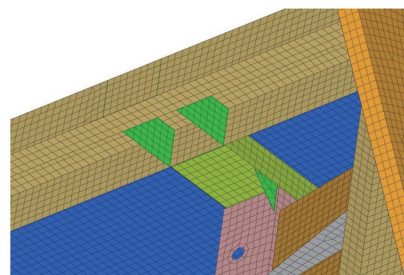
(c) 局部放大图1



(d) 局部放大图2



(e) 局部放大图3



(f) 局部放大图4

图14 加强板位置图

Fig. 14 Location of reinforcement plate

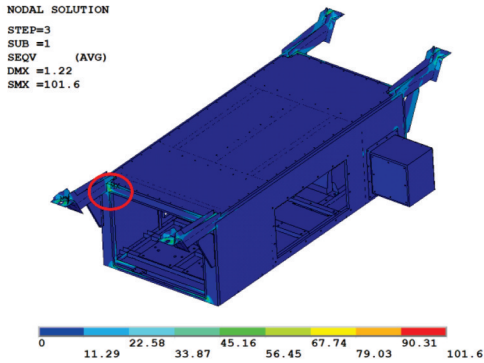


图 15 纵向随机振动应力云图

Fig. 15 Nephogram of longitudinal random vibration stress

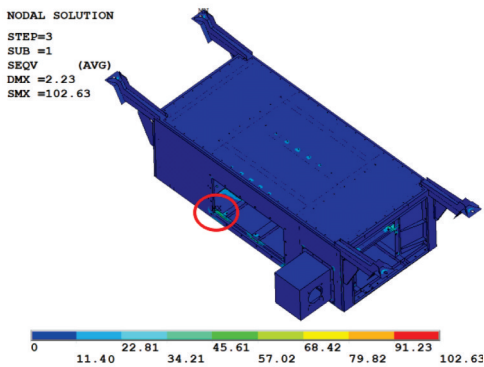


图 16 垂向随机振动应力云图

Fig. 16 Nephogram of vertical random vibration stress

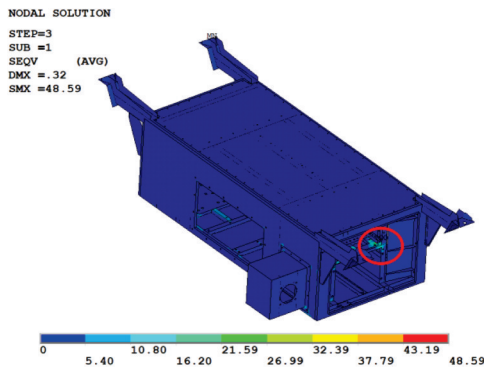


图 17 横向随机振动应力云图

Fig. 17 Nephogram of transverse random vibration stress

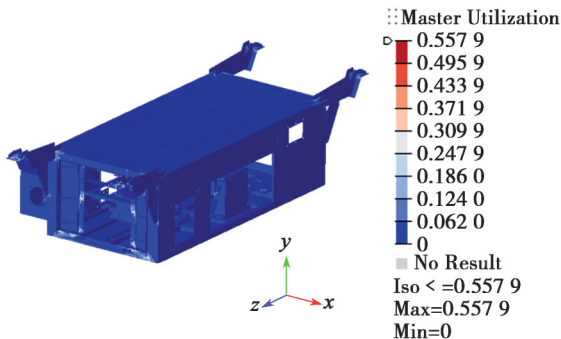


图 18 纵向随机振动疲劳利用度

Fig. 18 Fatigue utilization of longitudinal random vibration

0.8的部件，以及改进前疲劳利用度大于0.8的部件的疲劳利用度汇总表。高压电器箱在纵向、垂向和横向

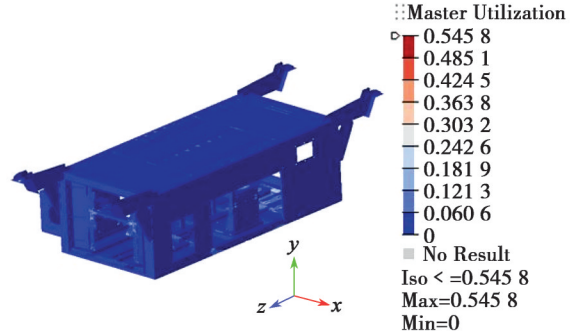


图 19 垂向随机振动疲劳利用度

Fig. 19 Fatigue utilization of vertical random vibration

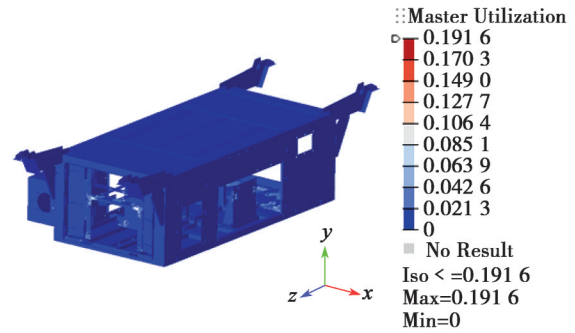


图 20 横向随机振动疲劳利用度

Fig. 20 Fatigue utilization of transverse random vibration

的疲劳利用度云图如图 18~图 20 所示，其在纵向、垂向和横向的最大利用度分别为 0.56, 0.55, 0.19。由计算结果可知，改进设计后铝板的利用度明显降低，左侧板的总利用度得到了一定程度的降低，高压电器箱总利用度小于 1，满足疲劳强度设计要求。

5 结论

本文基于 GB/T 21563—2018 标准和 FKM 标准对地铁车辆高压电器箱随机振动疲劳强度进行了仿真分析和试验研究，通过分析得到以下结论：

- ①基于 FKM 标准对高压电器箱随机振动疲劳强度进行了评估，结果表明铝板的疲劳强度无法满足设计要求。
- ②通过纵向冲击试验与仿真测点应力对比，验证了仿真模型的准确性；由纵向随机振动试验验证了仿真分析中铝板应力过大而出现疲劳失效的问题。
- ③提出分离铝板、增加梁的厚度和添加加强板的结构改进设计，改进设计后高压电器箱的疲劳强度满足设计要求。

参考文献：

[1] 田时沫, 鲁放, 杨珂, 等. 2017年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 16-20.
TIAN Shimo, LU Fang, YANG Ke, et al. China's operational urban rail transit lines, 2017: statistics and analysis

- [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(1): 16-20.
- [2] 林浩, 陈文光, 曹俊. 昆明地铁首期工程项目车辆电传动系统[J]. 机车电传动, 2013(5): 69-74.
LIN Hao, CHEN Wenguang, CAO Jun. Electric drive system design for Kunming metro line 1 rolling stock project [J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(5): 69-74.
- [3] 邓勇. 地铁辅助变流器柜体振动疲劳分析及轻量化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
DENG Yong. Vibration fatigue analysis and lightweight design of auxiliary converter cabinet of metro vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] MARQUES D E T, VANDEPITTE D, TITA V. Damage detection and fatigue life estimation under random loads: a new structural health monitoring methodology in the frequency domain[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(6): 1622-1636.
- [5] 刘智勇, 李晓峰, 朱冰冰, 等. 基于功率谱密度的两瓶组车载供氢系统随机振动分析[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 69-74.
LIU Zhiyong, LI Xiaofeng, ZHU Bingbing, et al. Random vibration analysis of two-component vehicle hydrogen supply system based on power spectral density[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 69-74.
- [6] 周航博, 肖守讷, 阳光武. 多轴随机振动疲劳频域方法的研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 84-88.
ZHOU Hangbo, XIAO Shoune, YANG Guangwu. Research on frequency domain method for multiaxial random fatigue [J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 84-88.
- [7] 熊珍兵, 肖腾. 大型立式泵叶轮振动及疲劳特性研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 41-47.
XIONG Zhenbing, XIAO Teng. Study on vibration and fatigue characteristics of a large-scale vertical pump impeller [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 41-47.
- [8] 张克姝, 马维莲. 地铁车辆变流柜机箱有限元分析[J]. 铁道车辆, 2014, 52(6): 8-12.
ZHANG Keshu, MA Weilian. Finite element analysis of the converter cabinet on metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2014, 52(6): 8-12.
- [9] 李潇潇. 动车水箱焊缝随机振动疲劳寿命仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
LI Xiaoxiao. Numerical simulation for random vibration fatigue life of weld seams in EMU tank[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [10] 赵子豪, 赵思聪, 戴昆, 等. 基于仿真与试验对标的轨道车辆有限元仿真优化方法研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(4): 21-24.
ZHAO Zihao, ZHAO Sicong, DAI Kun, et al. Research on finite element simulation and optimization method of railway vehicles based on simulation and test benchmarking[J]. Rolling Stock, 2021, 59(4): 21-24.
- [11] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会(SAC/TC 278). 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验: GB/T 21563—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Technical Committee for Standardization of Traction Electrical Equipment and Systems (SAC/TC 278). Railway applications—Rolling stock equipment—Shock and vibration tests: GB/T 21563—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [12] FKM. Analytical strength assessment of components: made of steel, cast iron and aluminium materials in mechanical engineering[M]. 6th ed. Frankfurt: VDMA Verlag GmbH, 2012.
- [13] 蒋奎, 刘卫. 基于FKM标准的出口欧洲铁路货车铸件轴箱体疲劳强度评估[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(6): 71-75.
JIANG Kui, LIU Wei. Fatigue strength evaluation of casting axle box of European railway wagons based on FKM standard[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(6): 71-75.
- [14] 张志新, 王起梁, 方翁武, 等. 基于FKM准则的车辆齿轮箱强度评定[J]. 机车电传动, 2020(3): 99-103.
ZHANG Zhixin, WANG Qiliang, FANG Wengwu, et al. Assessment of gearbox strength based on FKM guideline[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 99-103.
- [15] 程亚军, 滕万秀, 张玉涛. 基于FKM的某型转向架轴箱端盖疲劳强度评估[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 38-43.
CHENG Yajun, TENG Wanxiu, ZHANG Yutao. Fatigue strength assessment of bogie axlebox end cover based on FKM guideline[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(2): 38-43.
- [16] 刘飞, 张永贵, 曾祥浩. 基于修正FKM标准的高海拔车辆部件焊接结构的评价[J]. 铁道车辆, 2022, 60(6): 15-19.
LIU Fei, ZHANG Yonggui, ZENG Xianghao. Evaluation of welded structure of high-altitude vehicle parts based on modified FKM standard[J]. Rolling Stock, 2022, 60(6): 15-19.

收稿日期: 2023-02-05

修回日期: 2023-03-05