

高速受电弓上框架裂纹故障分析与改进

陈明国^{1,2}, 冯 叶², 孙云嵩²

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
2. 中车株洲电力机车有限公司 电气设备分公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 针对高速受电弓上框架顶管、肘接连接管处裂纹故障, 对故障产生的原因进行了分析, 提出了改进方案。通过仿真分析软件计算, 对上框架原结构与改进方案进行对比, 确定了最终改进方案。经测试分析, 证明新型改进方案是有效的。

关键词: 高速受电弓; 上框架; 裂纹; 仿真分析; 结构优化

中图分类号: U269.6; U264.3⁺4 **文献标识码:** B
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.04.026

0 引言

高速受电弓是高速动车组的重要部件, 它是一种铰接式的机械构件, 通过绝缘子安装于车辆车顶。高速受电弓的弓头升起后与接触网导线接触, 从接触网上集取电流, 并通过车顶母线传送至车辆, 进而供整车用电。高速受电弓对动车组的安全、稳定、良好运行具有重要影响。

本文结合原广州地铁3号线受电弓上框架改进方案, 提出了新的结构优化方案, 通过仿真分析和地面静态载荷对比试验, 证明了新型方案进一步提升了上框架结构的疲劳强度。

1 故障描述

高速受电弓具体结构如图1所示。其中上框架又

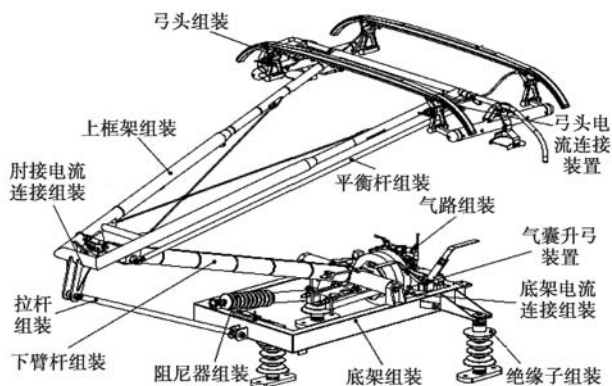


图1 高速受电弓结构图

是高速受电弓的重要承力部件, 用于连接受电弓弓头与下臂杆, 并为弓头组装提供支撑并缓解弓网冲击, 其结构如图2所示。

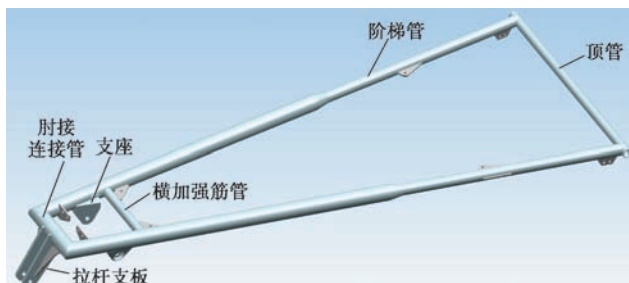


图2 上框架结构图

高速受电弓运营故障信息统计显示, 上框架裂纹故障发生于2个位置: 上框架顶管处和上框架肘接连接管对接焊缝处。具体故障分别如图3、图4所示。

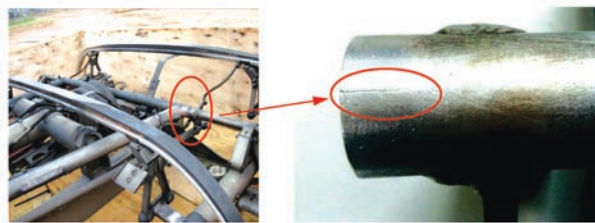


图3 高速受电弓上框架顶管裂纹

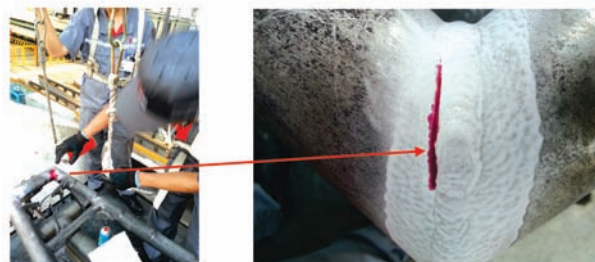


图4 高速受电弓上框架肘接位置对接焊缝处

2 原型上框架仿真计算

2.1 上框架强度计算

在受电弓运行过程中, 主要受到弓网动态接触力作用, 按前期弓网试验结果, 最大动态弓网平均接触力一般不超过200 N, 在速度超过300 km/h时, 最大动态弓网平均接触压力也不会超过230 N。受电弓弓头质量一般为14 kg; 结合受电弓接触压力及弓头重力, 垂向载荷一般不超过340 N。现对上框架施加350 N垂

向载荷, 上框架强度计算结果如图 5 所示, 肘接处强度计算结果如图 6 所示。其中, 上框架阶梯管与肘接横管对接焊缝处最大应力为 142 MPa, 而上框架顶管处应力小于 30 MPa, 上框架整体最大应力 264 MPa, 位于拉杆支板与肘接管焊接处。

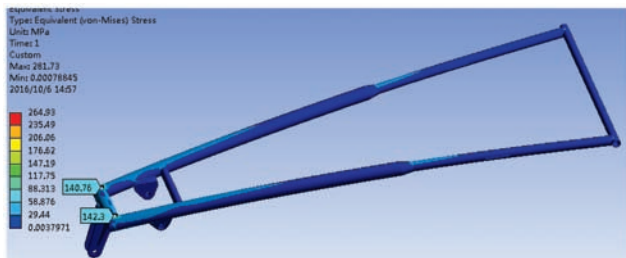


图 5 上框架强度计算结果 (接触压力 210 N)

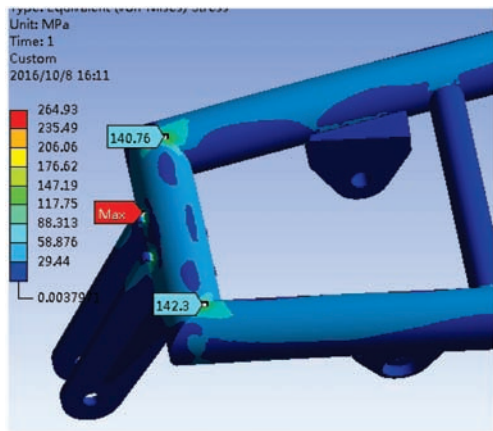


图 6 肘接处强度计算结果 (接触压力 210 N)

根据标准, 当速度大于 200 km/h 时, 弓网最大接触力应小于 350 N。结合弓头质量 14 kg, 现对上框架施加 490 N 垂向载荷, 上框架强度计算结果如图 7、图 8 所示。其中, 上框架阶梯管与肘接横管对接焊缝处最大应力约为 172 MPa, 而上框架顶管处应力小于 37 MPa, 上框架整体最大应力 338 MPa, 位于拉杆支板与肘接管焊接处。

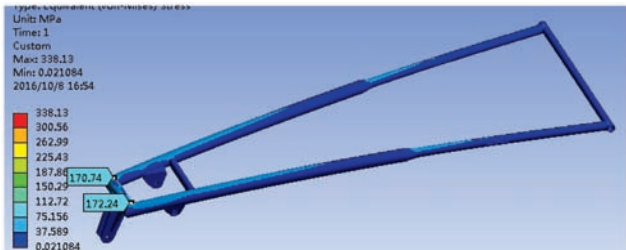


图 7 上框架强度计算结果 (接触压力 350 N)

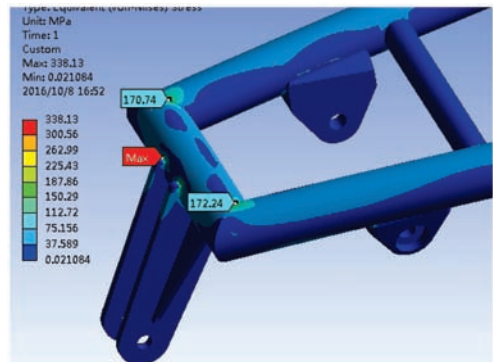


图 8 肘接处强度计算结果 (接触压力 350 N)

2.2 上框架疲劳分析

基于仿真计算以及应力测试结果, 进行上框架顶管的疲劳强度分析。为提高疲劳计算的有效性, 上框架顶管裂纹处的应力不进行 Goodman 应力幅修正, 同时基于 Miner 累积损伤理论, 采用最大应力值进行疲劳累计。根据铝合金材料特性以及试验经验, 上框架顶管 7020-T6 铝合金材料按照 $P=95\%$ 概率进行 S-N 公式近似计算, 计算按式 (1) 进行, 其中该材料的 A 为 12.9732, B 为 -4.5。

$$(\lg N)_p = A_p + B_p \lg S \quad (1)$$

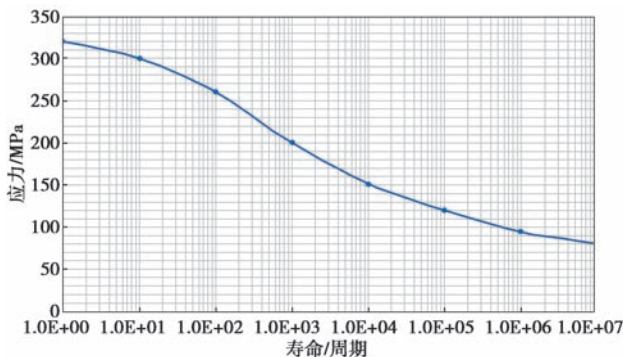


图 9 铝合金材料 S-N 曲线

根据上述仿真计算以及铝合金材料的 S-N 曲线分析, 在接触压力 210 N 时 (上框架施加 350 N 垂向载荷), 上框架顶管与肘接处寿命如下:

①上框架顶管端部的应力小于 30 MPa, 小于该材料的无限疲劳寿命 (通常为 10 000 000 次循环周期) 80 MPa, 表明现有上框架顶管处结构在正常的工作载荷作用下不会出现疲劳裂纹, 即正常工作载荷不是导致裂纹产生的主要因素。

②上框架肘对接焊缝处最大局部应力为 142 MPa, 在该应力下的疲劳寿命约为 11 000 次循环周期。

当接触压力增大至 350 N (上框架施加 490 N 垂向载荷) 时, 上框架顶管处应力小于 41 MPa, 仍可以达到无限疲劳寿命。而肘对接焊缝位置的局部最大应力增加至 172 MPa, 疲劳寿命约为 1 200 次循环周期。

3 故障原因分析

3.1 上框架顶管处裂纹

根据以上仿真计算, 上框架顶管处不存在疲劳裂纹的风险, 因此需结合实际工艺情况进行顶管裂纹故障分析。而在对裂纹上框架的检查中发现, 上框架顶管壁厚存在不均匀的情况, 最厚处达到 2.7 mm, 最薄处仅为 1.7 mm, 如图 10 所示。

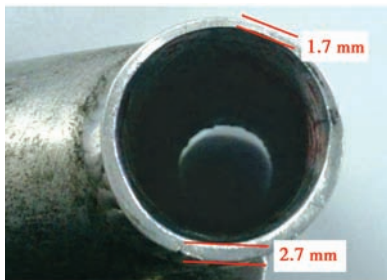


图 10 顶管壁厚示意图

由于该部分存在焊接热变形, 焊后上框架顶管向肘接方向收缩, 如图 11 所示红色箭头方向, 同时顶管端

面向焊缝区域收缩, 如图 12 所示红色箭头方向, 端面呈垂向长、水平方向短的近似椭圆形状, 并且由于镗孔工装不完善, 焊后顶管加工后壁厚严重不均匀。



图 11 焊后顶管焊接变形

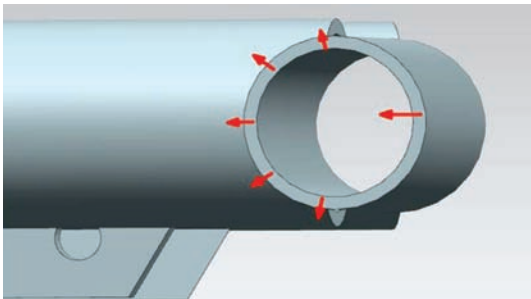


图 12 焊后顶管端面焊接变形

综合上框架强度计算结果、疲劳分析及上框架顶管加工工艺分析, 上框架顶管裂纹故障原因如下:

①在正常运行工况下, 该处设计结构能够满足受电弓疲劳强度要求, 而实际运行时产生了裂纹, 说明受电弓顶管或外部连接件处受到异常的大冲击 (冲击力至少为 5 000 N);

②上框架焊接会导致上框架顶管出现局部变形, 后续镗孔工艺会导致单边壁厚减少、力学强度下降的情况, 若单边情况严重, 壁厚减少过多, 则会增加受电弓顶管处产生裂纹的风险。

3.2 上框架肘接连接管对接焊缝处裂纹

该处存在应力集中, 通过仿真计算其应力确实超过无限疲劳寿命 (通常为 10 000 000 次循环周期) 80 MPa, 当 350 N 受电弓动态接触压力出现循环次数达到 1 200 次时, 或 210 N 动态接触压力出现循环次数达到 11 000 次时, 该处存在疲劳开裂的风险。

4 改进方案及仿真结果

前期广州地铁 3 号线受电弓应用的原方案与高速弓方案相同, 肘接部位出现了开裂故障, 经过第一轮改进后 (增加加强筋, 改进方案如图 13 所示), 较原

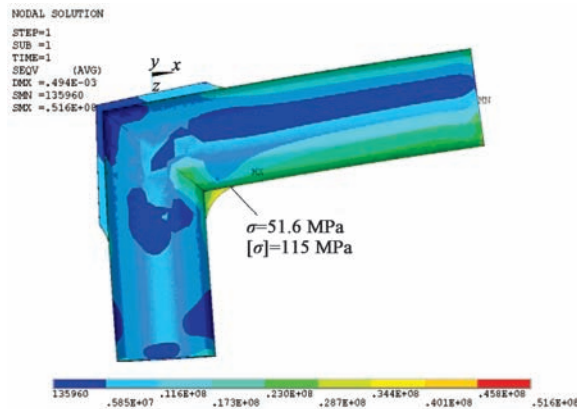


图 13 上框架肘接部位增加加强筋改进方案

方案疲劳强度有所提高, 但后续改进方案在线运行一段时间后, 又出现开裂, 如图 14 所示。



图 14 增加加强筋改进方案裂纹故障照片

根据分析, 结合广州地铁 3 号线受电弓上框架肘接增加加强筋改进方案, 针对高速受电弓上框架 2 处裂纹, 本次提出新改进方案需从不同方面对上框架结构进行优化: ①由于顶管裂纹与加工产生的单边有关, 可从增加顶管壁厚, 保证顶管镗孔时有足够加工余量, 避免单边壁厚过小可有效保证顶管安全; ②肘连接接管对接焊缝处确实存在疲劳开裂的风险, 需从结构方面再次进行优化。因此, 建议改进方案如下:

顶管端部厚度加大, 其结构示意图如图 15 所示。

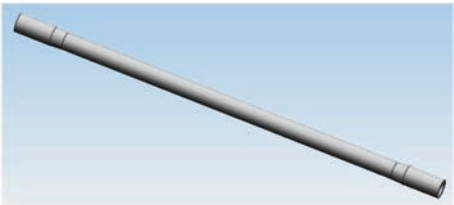


图 15 顶管结构

肘接位置的改进主要通过改进阶梯管结构与拉杆支板结构来实现: 新阶梯管则在原方案阶梯管基础上增加肘接弯头 (整体弯曲而成), 消除原方案和加强筋方案对角焊缝处尖锐部分的应力集中, 带弯头阶梯管结构如图 16 所示。拉杆支板为 2 件独立的铝合金板, 拉杆支板中间焊有一根直管及加强支板, 上框架整体结构如图 17 所示。



图 16 带弯头阶梯管结构

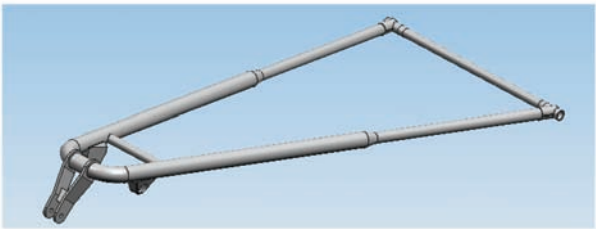


图 17 改进上框架

该方案在接触压力 210 N 与弓头质量 14 kg 产生的重力合力的作用下（垂向力 350 N），其结构强度如图 18 所示。顶管应力约小于 13 MPa；拉杆支板与阶梯管的焊接处的最大应力约为 56 MPa，阶梯管折弯处最大应力约为 75 MPa，框架整体应力最大应力位于阶梯管与支座焊接处，约为 117 MPa。其肘接部位的局部应力如图 19 所示。

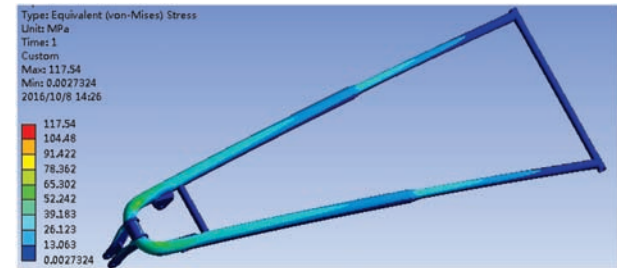


图 18 改进上框架结构强度（接触压力 210 N）

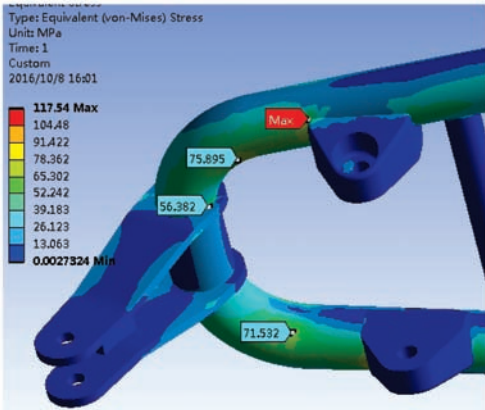


图 19 改进上框架肘接位置应力（接触压力 210 N）

结合铝合金材料 S-N 曲线，此时，肘接处与顶管处应力均小于该材料的无限疲劳寿命（通常为 10 000 000 次循环周期）80 MPa，较原上框架疲劳寿命也有大幅

提高，能够有效地克服肘接与顶管两处的裂纹产生。
当考虑接触压力为最大接触压力 350 N 时，则上框架施加 490 N 垂向载荷，上框架强度计算结果如图 20、21 所示。其中，框架整体最大应力位于阶梯管与支座焊接处，约为 163 MPa，拉杆支板与阶梯管的焊接处的最大应力约为 82 MPa，阶梯管折弯处最大应力约为 106 MPa，上框架顶管处应力小于 18 MPa。此时肘接位置疲劳寿命约为 110 000 次循环寿命。

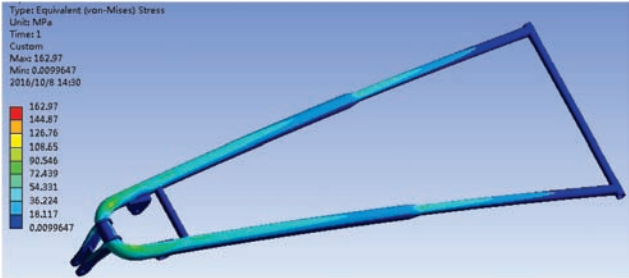


图 20 改进上框架结构强度（接触压力 350 N）

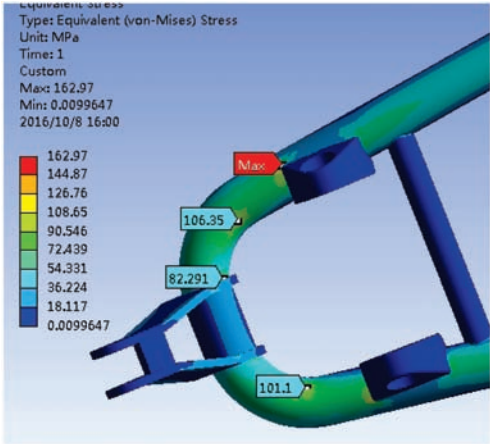


图 21 改进上框架肘接位置应力（接触压力 350 N）

综上，原方案上框架与改进方案的对比见表 1。

表 1 上框架分析结果对比

方案	接触压力 210 N					接触压力 350 N				
	肘接处 应力 / MPa	顶管处 应力 / MPa	最大应力		肘接位置 寿命	肘接处 应力 / MPa	顶管处 应力 / MPa	最大应力		肘接位置 寿命
			应力 / MPa	位置				应力 / MPa	位置	
原方案	142	< 29	264	拉杆支板与 横管焊接处	11 000 次	172	< 37	338	拉杆支板与 横管焊接处	1 200 次
改进方案	56（焊缝处） 75（阶梯管折弯处）	< 13	117	阶梯管与 支座焊接处	无限疲 劳寿命	82（焊缝处） 106（阶梯管折弯处）	< 18	163	阶梯管与 支座焊接处	110 000 次

根据表 1 对比数据，得出结论如下：

①相对于原方案，改进后 2 种方案肘接处、顶管处的应力及框架最大应力均有明显降低，结构强度与肘接位置疲劳寿命均明显提高；

②现提出的 2 种改进方案结构强度与疲劳寿命相当；

③假设受电弓运行过程中，每天出现 1 次 350 N 接触压力，则当受电弓运行 3.28 a 时，原框架肘接位置出现裂纹；而改进后框架疲劳寿命较原框架提高 90.7 倍左右，则可以有效满足车辆对受电弓框架的寿

命要求。

④改进方案中，最大应力位于阶梯管与支座焊接处，该处主要受压力影响，不同于既有框架开裂位置受力的情况，不存在开裂的风险。

5 地面静态载荷试验对比分析

为了进一步验证新型改进方案的可靠性，对原型受电弓上框架和改进型上框架顶管加载垂向载荷 500 N，测试了改进前后 2 种上框架组焊在模拟工况下的应力水平。

按上框架组焊有限元仿真的数据和实际运行时故障位置, 危险区域为顶管端部与肘接部位, 需在应力测试中重点进行检测、评判。图 22 为原型受电弓上框架测试点布置, 图 23 为新型改进上框架测试点布置, 图 24 为上框架顶管加载图。

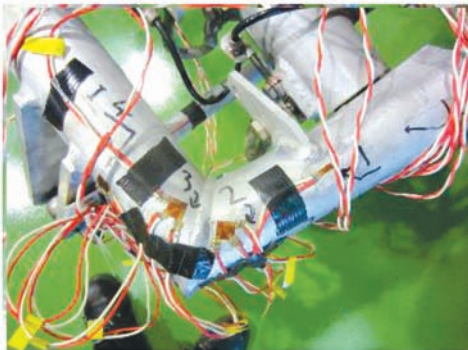


图 22 原型上框架测试点布置

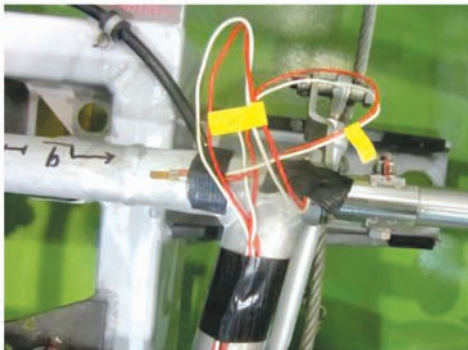
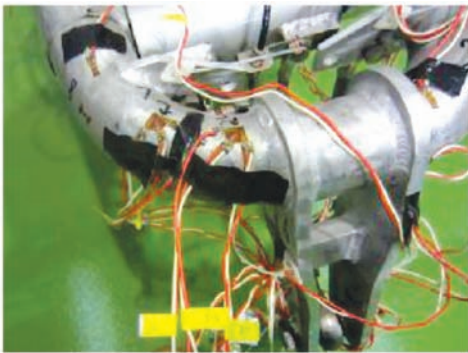


图 23 改进上框架测试点布置



图 24 上框架顶管加载垂向 500 N 负载

6 结语

通过测试的数据对比分析, 改进上框架组焊, 肘接部位由于取消了原有对接焊缝, 改进后最大应力下降了 61% (优于加强筋方案的 36.4%) ; 顶管端部, 由于管壁由 2.5 mm 增加到了 4 mm, 改进后最大应力值下降了 53%。由此可知, 新型改进方案是有效的。

参考文献:

[1] 铁路应用 集电系统 集电弓与上滑线共同作用的技术标准: EN 50367—2006 [S] .
[2] 安孝廉. 受电器 [M] . 北京: 中国铁道出版社, 1984.
[3] 北京有色冶金设计研究总院. 机械设计手册(第 1 卷)[S] . 北京: 化学工业出版社, 2002.
[4] 张海丰, 佟来生, 陈珍宝, 等. 基于疲劳寿命分析的地铁受电弓上框架改进 [J] . 电力机车与城轨车辆, 2010(6): 30-32.

作者简介: 陈明国 (1978-), 男, 高级工程师, 长期从事受流电器设计开发工作。