

# A Brief Analysis of the Causes and Solutions for the Break of Wheel-Set Lifting Crane in Metro Vehicles

Fenqing Xu Yecong Sun

CRRC Nanjing Puzhen Rail Transport Co., Ltd., Jiangsu, Nanjing, 210031, China

## Abstract

This paper takes the wheel-to-lift fault of the subway car bogie of a project in Suzhou City, Jiangsu Province, China as an example, and analyzes and proposes a solution to provide a reference for other wheels of the rail transit vehicle.

## Keywords

bogie; wheel lift; countermeasures

## 浅析地铁车辆轮对提吊断裂原因及解决方案

许分清 孙业聪

南京中车浦镇城轨车辆有限公司, 中国·江苏 南京 210031

## 摘要

本文以中国江苏省苏州市某项目地铁车辆转向架轮对提吊断裂故障为例, 展开详细分析并提出解决方案, 给轨道交通车辆其它项目轮对提吊使用提供一定借鉴作用。

## 关键词

转向架; 轮对提吊; 解决措施

## 1 引言

轮对提吊是转向架轮对定位装置的重要组成部分, 它是控制轮对和构架相对位置的重要零件, 尤其在吊装转向架、起落车时, 可以很好达到限位作用, 因此它的加工工艺必须严格控制尺寸, 否则会影响装配间隙, 甚至会影响整车落成质量。本文主要针对中国江苏省苏州市某地铁线路出现轮对提吊断裂故障着手分析, 找到根本原因, 从而寻求最优解决方案, 给地铁车辆制造及运营提供一定借鉴作用。

## 2 故障描述

2017年, 中国江苏省苏州市某地铁线路, T6 列出现 TC2 车 4 轴左侧防滑轴箱盖上的轮对提吊断裂、脱落故障。



图1 断裂轮对提吊



图2 轮对提吊安装位置实物

现场运营列车共计 25 列, 普查提吊安装座裂纹共 33 处, 判定属于批量故障。

### 3 原因分析

#### 3.1 故障件理化分析

理化分析委托第三方权威机构实施, 提供轴箱盖断裂残件及完好件各一(见图 3), 其中样件材质为 P355NL1 合金钢, 经查设计图纸, 断裂位置加工倒角  $R \leq 0.8\text{mm}$ 。<sup>[1]</sup>



图 3 送检样品宏观样貌



图 4 断裂位置示意图

##### 3.1.1 断口分析

图 5 可见断件残面有明显机加工痕迹。图 6 可见残件断口平整, 无明显塑性变形, 现将断口分成 A、B、C、D 四个区域, 进行描述。



图 5 断裂残件表面宏观样貌



图 6 断裂残件断口宏观样貌

由于 A、B 区域表面腐蚀严重, 微观无法观察到典型断口学特征, 图 7 为断面 C 区微观形貌, 可以看到明显疲劳纹样; 图 8 为断面 D 区微观形貌, 隐约可见韧窝形貌。图 9、图 10 为 A 区附近外表面微观形貌, 可见残留明显机加工刀痕。

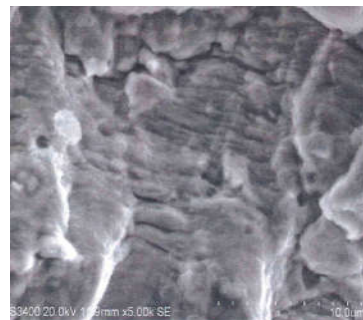


图 7 断面 C 区微观形貌



图 8 断面 D 区微观形貌

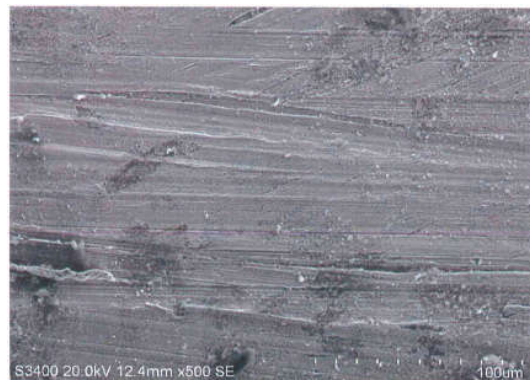


图 9 断面 A 区附近外表面微观形貌 I



图10 断面A区附近外表面微观形貌2

### 3.1.2 硬度测试

对断裂残件及完好件分别进行硬度测试，结果见表1，两者硬度值相近。

表1 送检试样硬度测试

项目	维氏硬度 /HV30
断裂残件	126/127/121
完好件	126/124/125

### 3.1.3 化学成分分析

采用直读光谱法对断裂残件进行化学成分分析，结果如表2所示，材质符合“GB/T699-1999”中对20钢的规定。

表2 断裂残件化学成分

化学元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
标准规定	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.25
实测值	0.19	0.26	0.46	0.007	0.010	0.04	0.03	0.07

### 3.1.4 结论

送检试样限位组织、硬度、化学成分等均未发现异常。断口宏观形貌显示，轮对提吊座断裂位置为过渡圆角处，断面腐蚀严重，但仍可见明显海滩纹样，呈典型疲劳断裂特征；断口微观形貌，可见明显疲劳辉纹，辉纹间距较窄，由此判断断样件失效模式为高周低应力疲劳断裂。

零件存在应力集中是产生高周低应力疲劳断裂的主要原因之一。送检断裂残件疲劳裂纹产生于轮对提吊座过渡圆角处，该处为典型应力集中部位，实际测量完好件倒角不足0.01mm，几乎无圆角，不满足设计图纸要求，同时断口源区附近表面存在明显机加工刀痕。轮对提吊一端通过轮对提吊座与轴箱通过螺栓刚性连接，另一端处于自由状态，属于典

型的悬臂梁结构。列车在运行过程中，由于载重、路况等特殊状况，震动剧烈，悬臂根部若存在应力集中，极易诱发疲劳裂纹。裂纹在交变应力作用下不断扩展，最终失稳断裂。

## 3.2 动力学振动测试

### 3.2.1 轮对提吊固有模态

表3所示为原有轮对提吊模态分析结果，为振动分析提供参考。

表3 原始方案模态分析结果

阶次	振型	频率 /Hz
1	一阶横弯	300
2	纵向弯曲	522
3	扭曲	1272
4	二阶横弯	1561

### 3.2.2 异常振动分析

为了更进一步分析轮对提吊异常振动的原因，以IEC 61373-2010《铁道车辆设备冲击和振动试验标准》为依据，对苏州某线路地铁分区段进行测试。针对轮对提吊出现的异常振动问题，在轴箱端盖、轮对提吊上部布置加速度传感器，测试其包括横向和垂向振动加速度，测点布置如图测试点布置如图11所示。

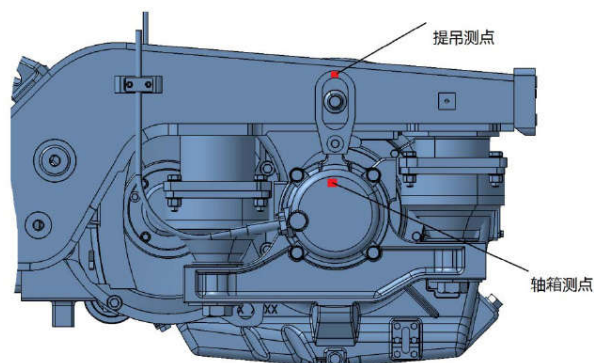


图11 测点布置

图12为轴箱和轮对提吊的全程振动加速度时域图，可以看出，轴箱横向振动加速度最大35g左右，轴箱垂向振动加速度最大60g左右，轮对提吊的横向最大加速度达到200g以上，轮对提吊垂向50g左右。选取3段典型区间进行分析，其中第1段整体振动较小，第2区段轴箱振动相对较小，但轮对提吊的振动大，第3区段轴箱振动与轮对提吊振动均较大。<sup>[2]</sup>



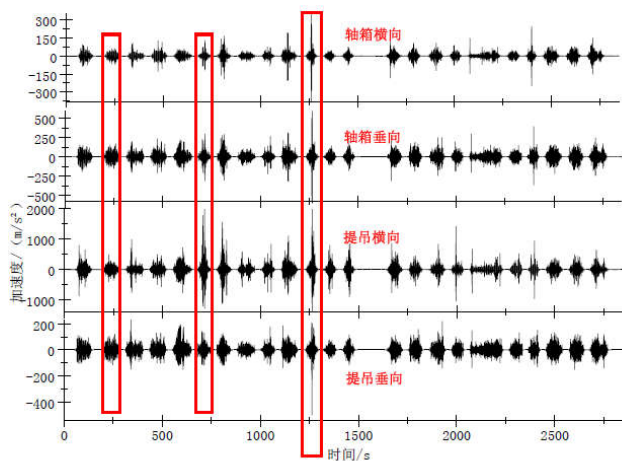


图 12 全程时域图

介于篇幅限制, 本文仅对第 2 区段振动进行分析。区段 2 轴箱振动加速度相对较小, 幅值约 10g 左右, 而轮对提吊振动加速度却非常大, 幅值达到 200g 以上, 放大 20 倍以上。从时域信号和时频信号可以看出轴箱和轮对提吊在 51-54s、60-63s 两段振动明显大于其他时间, 结合频谱图可以看出, 这两段的振动主频为 302Hz, 与轮对提吊的一阶固有频率 300Hz 非常接近, 从而发生共振, 主频幅值由  $0.48 \text{ m/s}^2$  变为  $12 \text{ m/s}^2$ , 主频幅值放大 26.8 倍。

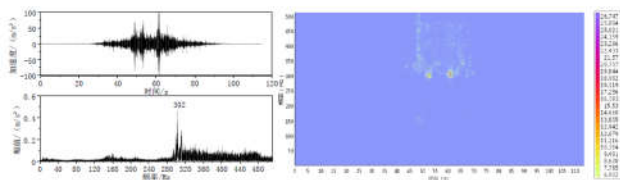


图 13 区段 2 轴箱横向振动

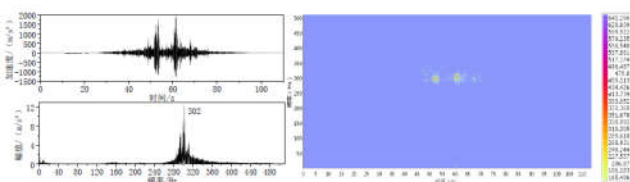


图 14 区段 2 轮对提吊横向振动

车辆试验运行速度为 70km/h, 根据特征频率推算对应的线路缺陷波长为 64mm, 现场排查得到线路的波磨如图 15, 轨枕间距 650mm, 两轨枕间约 10 个波磨, 对应波长约 65mm, 与推算波长基本吻合。



图 15 线路波磨

结论: 由于轮轨激扰 (主要为钢轨波浪型磨损) 导致提吊横向振动达到 200g 以上, 远超过 IEC61373-2010《铁道车辆设备冲击和振动试验标准》中规定的轴装设备冲击试验载荷 (100g), 提吊存在产生裂纹或断裂风险。

## 4 解决方案

### 4.1 应急方案

考虑到提吊仅在起车时起作用, 建议应急车辆运行时取消提吊安装, 避免提吊座断裂, 掉落正线, 给行车带来安全隐患。

### 4.2 正式方案

综合断裂样件理化分析及列车正线动力学振动实验结论, 正式方案从 2 个方向着手考虑, 对轮对提吊进行优化: (1) 加宽安装座尺寸, 达到加强安装座薄弱环节的作用。同时, 优化锻造件 (倒圆角) 加工工艺, 在设计图纸尺寸内尽可能扩大倒角, 减小应力集中点。(2) 加宽安装座尺寸的前提下, 采用碳纤维材质轮对提吊。方案见图 16。考虑到地铁车辆正线运行, 路况复杂, 轴箱振动非常大, 提吊又为典型悬臂梁结构, 采用碳纤维材质可使其轻量化, 加大其固有频率, 使提吊固有频率脱离轴箱及钢轨波磨频率, 避免共振现象发生, 可以使其更具安全性。

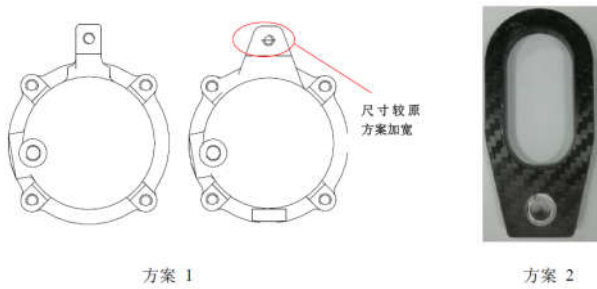


图 16 轴箱轮对提吊组成优化方案

### 4.3 两种优化方案仿真计算及对比

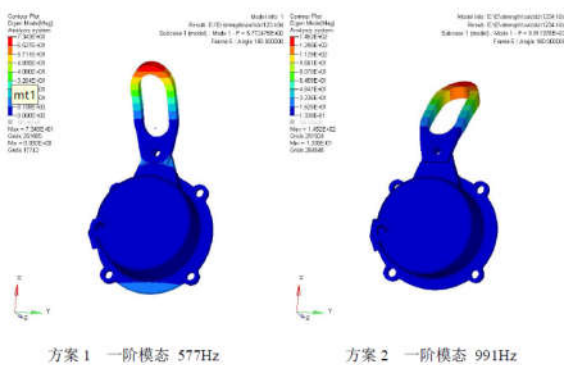


图 17 方案 1 和方案 2 一阶模态计算

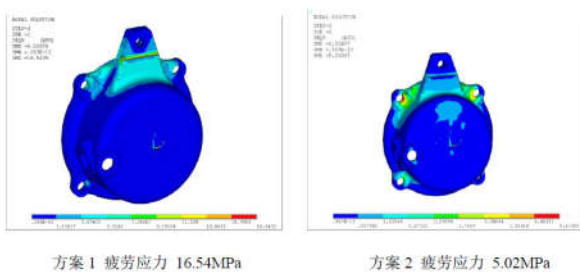


图 18 方案 1 和方案 2 疲劳应力计算

从图 17、图 18 中所展示计算结果中可以看出，方案 1

的一阶频率为 577Hz，方案 2 的一阶频率为 991Hz，均明显高于 80 公里速度等级的城市轨道交通波磨引起的轮轨振动一般为 200Hz-350Hz，所以方案 2 的安全裕量更大；方案 1 的疲劳应力为 16.54MPa，方案 2 的疲劳应力为 5.02MPa，方案 2 的结构强度明显大于方案 1。同时为了对两个方案有更加直观的认识，现对两种方案进行了列表对比，对比数据见表 4。

表 4 两种优化方案对比

方案	优化方向	材质	疲劳强度	重量
方案 1	加强薄弱环节	P355NL1	良	1260g
方案 2	提高固有频率降低质量	碳纤维	优	380g

### 4.4 结论

(1) 轮对提吊的横向振动明显大于轴箱横向振动，振动主频为 300Hz，为轮对的一阶横弯模态，轴箱轮对提吊组成的设计应避免该频段，方案 1 和方案 2 都避开了此频率，但方案 2 差异性更明显，更优。

(2) 方案 2 的疲劳应力值明显优于方案 1 的疲劳应力值，因此轮对提吊采用碳纤维材料具有明显优势。

(3) 碳纤维符合材料，具有密度小，重量轻，相比金属材料，其减重优势非常突出，同时该材料兼备高强度、高硬度的优点，在航空航天、轨道交通等多领域均有使用。

(4) 碳纤维结构提吊组成为新型结构，目前在推广验证阶段，故只在在苏州地铁选 1 列车进行试装验证。

### 参考文献

- [1] 贺小龙, 张立民, 鲁连涛. 高速列车车下设备对车体垂向振动影响规律研究 [J]. 振动与冲击. 2017(19)
- [2] 张富兵, 邬平波, 屈升. 地铁车辆轮对安全吊的振动疲劳特性研究 [J]. 2018.