

# 100%低地板有轨电车新型复轨器强度分析

严国希<sup>1\*</sup>, 王木子<sup>2</sup>, 安博洋<sup>3</sup>, 崔大宾<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>成都地铁运营有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

<sup>3</sup>西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年7月28日; 录用日期: 2023年10月2日; 发布日期: 2023年10月8日

## 摘要

以HT250、40Cr两种材质的新型复轨器为研究对象, 在ABAQUS中建立了其有限元模型, 控制两者边界条件和载荷工况相同的情况下, 仿真分析得出HT250复轨器最大接触应力为600 MPa, 超出了其许用应力。40Cr复轨器最大接触应力为818 Mpa, 基于静力安定理论计算出40Cr复轨器的安定极限为1812 Mpa远大于仿真计算的最大接触应力, 并采用E-N法在FE-SAFE计算其疲劳寿命为331,895次大于设计之初对其使用寿命的要求。之后进行了现场试验, HT250复轨器在试验中直接破损, 40Cr复轨器复轨过程高效且平顺, 完成复轨后40Cr复轨器没有破损仅在表面留下轻微变形, 验证了仿真计算的正确性。

## 关键词

有轨电车, 复轨器, 强度分析, 试验验证

# Strength Analysis and Experimental Study on the New Rail Re-Railer of 100% Low-Floor Tram

Guoxi Yan<sup>1\*</sup>, Muzi Wang<sup>2</sup>, Boyang An<sup>3</sup>, Dabin Cui<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>Chengdu Metro Operation Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Jul. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Oct. 8<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 严国希, 王木子, 安博洋, 崔大宾. 100%低地板有轨电车新型复轨器强度分析[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(5): 420-429. DOI: 10.12677/met.2023.125047

## Abstract

Taking HT250rerailer and 40Cr rerailer as the research object, the finite element model of HT250 rerailer and 40Cr rerailer is established in ABAQUS. Under the same boundary conditions and load conditions, the simulation analysis shows that the maximum contact stress of HT250 rerailer is 600 MPa, which exceeds its allowable stress. The maximum contact stress of the 40Cr rerailer is 818 Mpa. Based on the static stability theory, the stability limit of the 40Cr rerailer is 1812 Mpa, which is much larger than the maximum contact stress calculated by simulation, The fatigue life calculated by E-N method in FE-SAFE is 331,895 times, which is greater than the requirement of its service life at the beginning of design. After that, the field test was carried out. The HT250 rerailer was directly damaged in the test, and the rerailing process of the 40 Cr rerailer was efficient and smooth. After the rerailing, the 40Cr rerailer was not damaged and only left a slight deformation on the surface, which verified the correctness of the simulation calculation.

## Keywords

Tram, Rerailer, Strength Analysis, Experimental Verification

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代社会经济的发展,我国城市对快捷交通和节能减排、低能耗的要求日益迫切。有轨电车以其经济性、环保性以及美观舒适性等诸多优点在国内被众多城市所认可并运用[1]。现代新型有轨电车分为70%低地板和100%低地板技术2种主要车型。随着对人性化设计理念的追求,70%低地板技术正在逐渐被替代,最近几年国内进行研究和建设的有轨电车线路主要以100%低地板车型为主[2]。100%低地板有轨电车指的是整个乘客区域内无台阶的低地板有轨电车。其基本特点运行速度较低、使用独立车轮转向架、没有独立的路权。独立车轮转向架是实现低地板车辆的关键。但是独立车轮的轮缘磨耗要比传统刚性轮对大得多,并且容易脱轨。而且由于有轨电车没有独立的路权,导致槽中的污垢积累,更加提升了其脱轨的风险[3]。目前,国内外针对列车脱轨后复轨采用较多的救援设备及方法主要分为3类[4]:①起重机救援方法为吊复法;②牵引机车/复轨器拉复法;③液压顶复机具顶复法。

对于列车脱轨后复轨所使用的救援设备相关学者进行了研究,主要集中在两个方面:一是针对不同车型的机车及其使用环境的特殊性设计了新的复轨器;二是为验证设计的复轨器的可靠性和安全性,对其强度进行了校核。相关成果如下,沈岳等[5]针对目前行业所用的各种矿车轨道复轨器存在的体积和重量过大、不便于携带、不能单人操作等问题,设计了结构简单的可拆分便携式矿车复轨器。张弛等[6]研究了对现有的液压起复装置进行了改进,提出通过采用“凹”形导轨式横移梁避免横移小车横向移动滑脱危险,提高了作业效率和安全性。范晓云[7]针对100%低地板有轨电车的车底空间狭窄,复轨救援与常规轨道交通车辆有所不同的特点。对列车各种出轨及轮轴卡死工况下的复轨情况进行分析。韩吉元[8]建立了某地铁车体的有限元模型,并对枕外复轨位置复轨与牵引梁位置单点复轨两种复轨方法的车体应力分布进行了有限元计算,找出了两种复轨方式车体上应力最大值及其最大值产生的位置。白付维等[9]

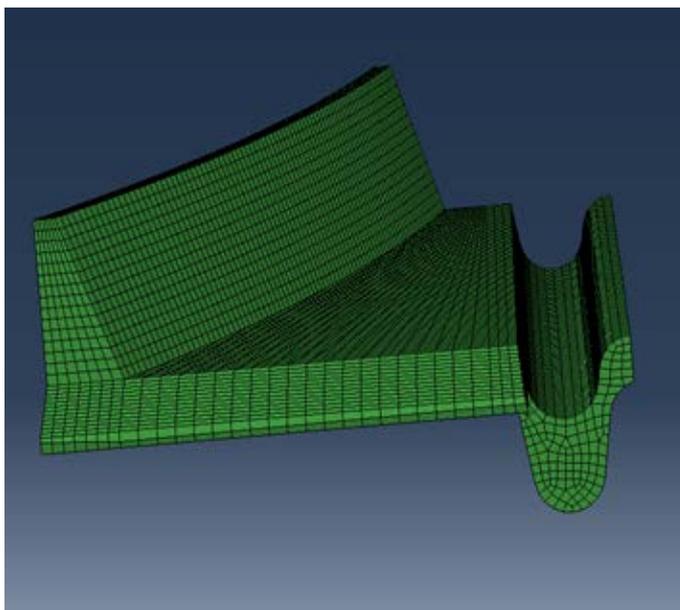
针对高速动车组车辆结构复杂、下部空间狭小的特点及高速铁路线路特征，研制了高速铁路专用单边复轨器以及用于拉复救援中代替机车进行牵引作业的液压牵引机具，包括牵引油缸、卡轨器、有节定位索及超高压液压泵站等部件。通过有限元方法对关键部件进行了强度校核及结构优化，并在救援基地进行了列车复轨试验，取得了良好的试用效果。

100%低地板有轨电车运行速度较低，路况平缓，发生脱轨后脱轨距离不大，所以 100%低地板有轨电车的复轨距离需求不大。但是由于其采用埋入式钢轨，车体与大地之间距离较小，且转向架侧边有用于制动的磁轨。这导致复轨器放置的空间有限，并对复轨器的结构设计和强度提出了更高求。本公司针对上述问题参照铁路上常用的人字形复轨器为蓉 2 号线上运营的 100%低地板有轨电车设计了一种有轨电车单边导向复轨装置[10]。本文以设计的新型复轨器为研究对象，基于有限元方法，在仿真软件 ABAQUS 中计算了 HT250、40Cr 两种材质复轨器的接触应力，并采用现场试验的方式为仿真计算结果的正确性做支撑。

## 2. 有限元模型建立

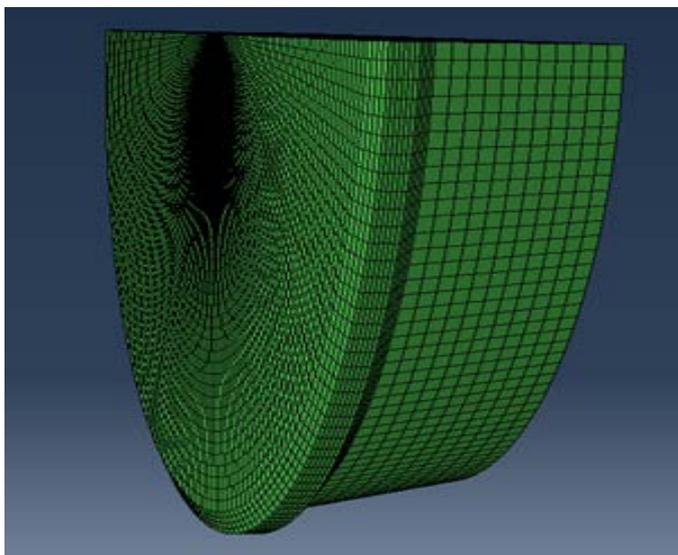
### 2.1. 网格划分

列车复轨过程中，只有一边复轨器的导向筋对列车车轮具有反作用力，这一反作用力即列车的复轨力。为简化模型和计算时间，将车辆的复轨过程转化为车轮和复轨器的接触过程。基于 HyperMesh 软件分别对复轨器和车轮进行有限元网格划分。首先对复轨器模型进行几何处理去除了对计算影响较小的倒角和不受载荷和约束的半边平板。六面体网格具有计算效率高、收敛性好、离散误差小的特点。所以复轨器的网格划分均采用 3D 六面体单元，网格划分后复轨器模型包括 30,208 个单元和 37,409 个节点如图 1 所示。



**Figure 1.** The finite element model of the re-railer  
**图 1.** 复轨器有限元模型

为简化车轮模型，只保留车轮与复轨器相接触的下半部分，网格划分也均采用 3D 六面体单元，车轮模型包括 100,608 个单元和 114,775 个节点其模型如图 2 所示。



**Figure 2.** The finite element model of the wheel  
**图 2.** 车轮有限元模型

## 2.2. 材料参数

有轨电车车轮的材料为合金钢，其材料参数如表 1 所示。在复轨器的材料选用上考虑了两种材料分别是 HT250 和 40Cr。HT250 复轨器采用铸造工艺加工而成具有质量轻；制造成本低廉；强度、耐磨性、耐热性较好的特点。40Cr 复轨器采用数控机床切割而成，质量和制造成本较 HT250 复轨器高，但强度和硬度更高，HT250 和 40Cr 的材料参数如表 1 所示。

**Table 1.** A variety of material parameters

**表 1.** 各种材料参数表

材质	参数	弹性模量 E (pa)	泊松比 V	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
车轮		$2.06 \times 10^{11}$	0.29	$7.8 \times 10^3$
HT250 复轨器		$1.3 \times 10^{11}$	0.25	$7.35 \times 10^3$
40Cr 复轨器		$2.1 \times 10^{11}$	0.3	$8.0 \times 10^3$

## 2.3. 接触设置

ABAQUS 中提供了单面接触、点面接触和面面接触等多种可供隐式分析使用的接触算法。本模型分析车轮和复轨器的静力学接触，定义复轨器导向筋内侧面为主面，车轮侧轮缘面为从面，法向行为采用硬接触表示接触面之间能够传递压力大小不受限制，切向行为采用罚函数，罚函数法是一种常用的数值方法，它可以模拟两个物体之间的接触力和摩擦力，从而更加准确的预测物体的运动和变形，摩擦系数设为 0.25。

## 2.4. 边界与载荷条件

首先对复轨器进行受力分析：有轨电车受到两个力一个是竖直方向的重力，另一个是水平方向的牵引力，这两个力分别造成了复轨器垂向和横向的载荷。车轮从斜平板上进入复轨器时是复轨器受到垂向

载荷的最薄弱的地方，但斜平板在复轨器的结构中只起到导入车轮的作用，因此忽略对该区域的强度分析，只对复轨器平板上的垂向载荷进行分析。为简化计算假设牵引力作用在车轮上，复轨器有轨电车受到的牵引力的方向与轨槽平行，其牵引力分解成两个分量如下图 3 所示，两个分量中  $F_{压}$  会作用在复轨器的导向筋上，使导向筋受到载荷。车轮刚接触到导向筋时其产生的  $F_{压}$  的分量最大，导向筋受到的载荷最大，最易发生破坏。所以本次仿真分析选取，车轮刚接触到导向筋时进行接触分析，若本次仿真中复轨器的强度满足其设计要求，则整个复轨过程中复轨器强度也会满足其设计要求。

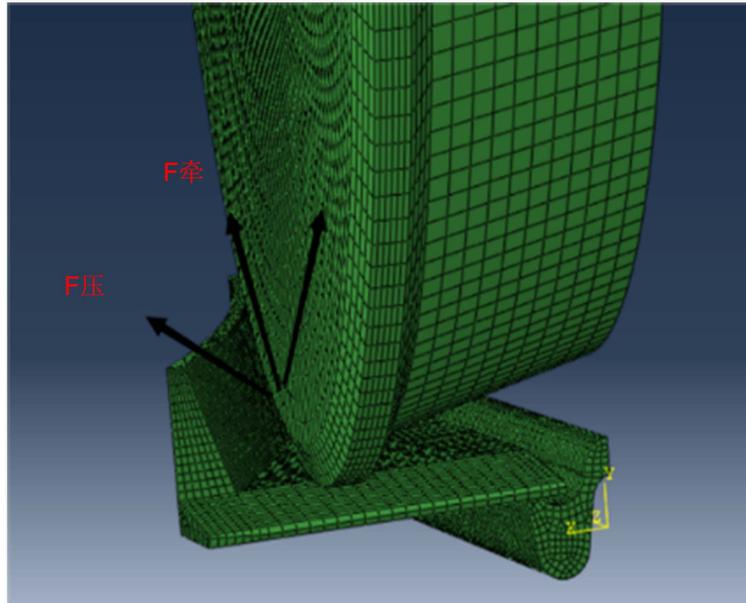


Figure 3. The force analysis diagram of the re-railer  
图 3. 复轨器受力分析图

复轨器受到的约束为大地和轨槽所提供的摩擦力，复轨过程中复轨器受到大地与轨槽之间的摩擦力静止不动，所以在有限元模型中将复轨器底面设为全约束。查阅有轨电车技术参数其最大轴重为 125 kN，则单个车轮受到的重力约为 62,500 N。文献[11]中经过理论计算得出列车最大启动轮缘牵引力在 90.784~100 kN 范围内，整列车由五节车箱组成则整车的重力为  $G = 125 \text{ kN} \times 10$ ，摩擦系数取 0.25。忽略列车行进过程中的空气阻力，轮缘牵引力减去摩擦力则列车为加速提供的牵引力，经计算其值为 68,750 N。车轮受到的载荷前进方向 62,500 N，竖直向下方向 68,750 N。于是将车轮轴孔面完全固定铰接在轴孔面圆心上，并且在圆心上约束掉除去车轮前进方向和重力方向的 4 个自由度，在车轮前进方向施加 68,750 N 的载荷，车轮重力方向施加 62,500 N 的载荷。

### 3. 强度分析

#### 3.1. 接触强度计算

利用有限元分析软件 ABAQUS 分别对有轨电车与 HT250 复轨器和 40Cr 复轨器接触过程进行仿真计算。由于车轮与复轨器接触过程中列车是低速匀速行驶，忽略其惯性力，仿真计算使用静力学隐式分析。在仿真计算中 HT250 复轨器与 40Cr 复轨器除材料属性不同之外，其它参数设置一致。车轮与 HT250 复轨器接触点有两个，一个是受重力影响车轮与复轨器平板面上接触，另一个是车轮与导向筋内侧表面。两接触点应力最大值截面云图分别由图 4 和图 5 所示。

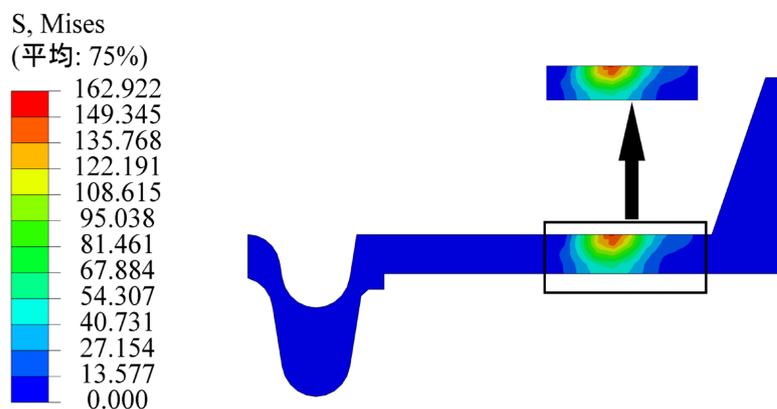


Figure 4. Stress cloud diagram of contact point 1 of HT250 re-railer  
图 4. HT250 复轨器接触点 1 应力云图

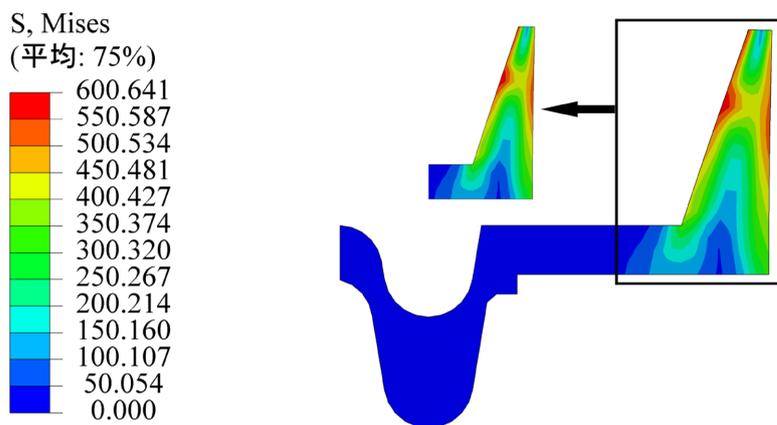


Figure 5. Stress cloud diagram of contact point 2 of HT250 re-railer  
图 5. HT250 复轨器接触点 2 应力云图

由图可知 HT250 复轨器最大接触应力发生位置为车轮与导向筋内侧面其最大值为 600 MPa，超过了 HT250 的屈服强度 250 MPa，HT250 是一种脆性材料最大接触应力超出其强度极限后会发生破损。40Cr 复轨器接触点 1 与接触点 2 应力最大值截面云图如图 6 和图 7 所示。

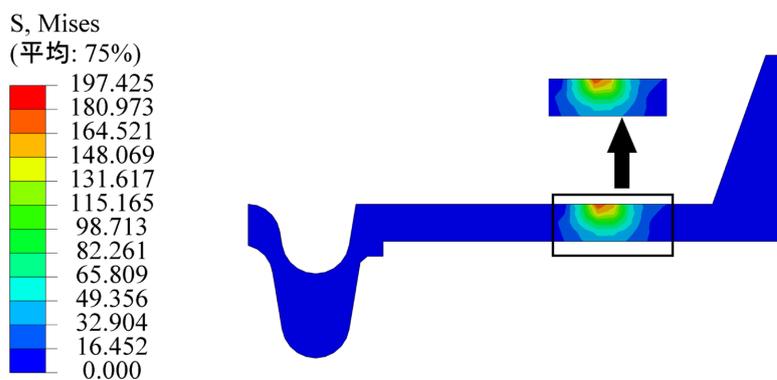


Figure 6. Stress cloud diagram of contact point 1 of 40Cr re-railer  
图 6. 40Cr 复轨器接触点 1 应力云图

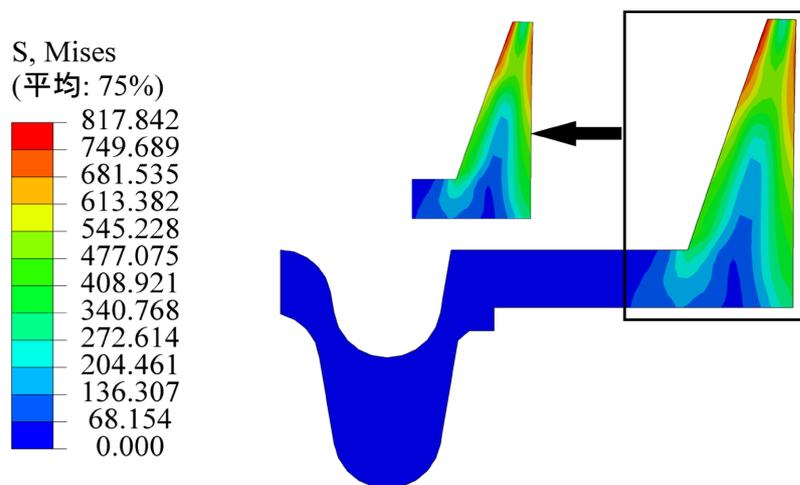


Figure 7. Stress cloud diagram of contact point 2 of 40Cr re-railer  
图 7. 40Cr 复轨器接触点 2 应力云图

由图可知 40Cr 复轨器最大接触应力发生位置与 HT250 复轨器相同其值为 818 MPa，超出了 40Cr 的屈服极限 785 MPa。复轨器接触应力的最大值出现在复轨器的导向筋上，有轨电车轮缘内侧与复轨器导向筋内侧面接触类似与车轮与钢轨接触。在铁路上，列车运行一段时间后轮轨接触应力值趋于稳定即处于干磨损状态，此时轮轨接触最大压应力值会大于钢轨的弹性极限，但此时车轮不发生弹性变形。

弹塑性理论中，对某反复载荷在给定范围内变化时，物体内部局部地区发生塑性变形，逐步形成一个残余应力分布，但在有限次作用后，残余应力趋于稳定，而与时间无关，此后残余应力与外载所引起的应力相叠加处处都在弹性范围以内，不再产生新的塑性变形，则这个给定的最大反复载荷就是安定极限载荷，而此状态一般称为安定状态。当载荷超过了安定极限时，塑性变形就将无休止，物体产生塑性流动，最终发生物体累积塑性塌陷。而对于钢轨即为钢轨压溃[12]。当载荷小于钢轨的安定极限时车轮不会发生性的塑性变形，参照钢轨的安定极限计算公式(1)得出 40Cr 的安定极限约为 1812 MPa 大于 40Cr 复轨器的最大接触压力 818 Mpa，则可以得出 40Cr 复轨器的强度满足使用要求。

$$q_m \leq \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_{0.2} \tag{1}$$

其中  $q_m$  为安定极限， $\sigma_{0.2}$  为屈服极限。

### 3.2. 疲劳寿命计算

上节基于静力安定理论对复轨器的强度进行基本分析，本节利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 联合仿真对 40Cr 的疲劳寿命进行具体计算。

疲劳问题的分类按照是否超过材料的屈服强度可分为两类：高周疲劳和低周疲劳。高周疲劳当材料没有达到其屈服极限时，疲劳寿命在 10 万到 100 万周期之上受到破坏，主要用 S-N 法。低周疲劳当材料没有达到其屈服极限时，疲劳寿命在几万到几十万周期之下受到破坏，主要用 E-N 法。由上节计算结果可知：40Cr 复轨器的局部区域接触应力最大值超过了其屈服强度所以采用 E-N 法对复轨器的疲劳寿命进行分析更加合理。当材料发生塑性变形后应变-寿命曲线即 E-N 曲线更能准确的反应材料的疲劳寿命。在载荷的作用下材料内部组织运动引起循环硬化或软化，应力应变关系与静拉伸的情况下差别较大。Ramberg-Osgood 方程是描述材料在其屈服点附近应力与应变关系的方程如式(2)所示。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (2)$$

其中  $k$  为循环强度系数； $n$  为循环应变硬化指数。从文献[13]中可知 40Cr 的循环强度系数为 810.5，循环应变硬化指数 0.06。将这两个值输入到 FE-SAFE 中系统可通过 Neuber's rule 将为考虑循环硬化的弹性应力应变曲线做适当的转换。将 ABAQUS 计算所产生的 ODB 文件导入到 FE-SAFE 中采用 E-N 法计算得出 40Cr 复轨器疲劳寿命最小的区域为上节接触应力超过 40Cr 屈服极限的区域。最小使用寿命为  $10^{5.521} = 331,895$  次远大于设计使用寿命不低于 10 年(每年使用不少于 12 次)的要求。

#### 4. 试验研究

整车复轨试验在直线线路上进行，新型复轨器采用拉复法进行复轨，有轨电车的超级电容为复轨过程提供牵引力。

有轨电车停在直线线路上，采用液压复轨器将其脱轨，放置好新型复轨器，司机驾驶时切断受电弓使用超级电容供电，从 0%，25%，50%，75%，100% 依次加至有轨车行驶。有轨电车缓慢经过 HT250 复轨器。试验发现 HT250 承受不了有轨电车带来的载荷发生破损如图 8 所示。证明 HT250 复轨器的强度不符合复轨要求。



Figure 8. Damage diagram of HT250 re-railer  
图 8. HT250 复轨器破损图

按上述相同步骤对 40Cr 复轨器进行试验，有轨电车成功复轨并且复轨过程十分平稳未对有轨电车造成损伤。40Cr 复轨器复轨后无破损和大变形，仅在导向筋内侧留下一块轻微接触变形区域如图 9 所示。这是由于导向筋内侧的接触应力超过了 40Cr 的屈服极限，发生的轻微的塑性变形。基于静力安定定理求出 40Cr 复轨器的安定极限为 1812 MPa 大于仿真计算得出的最大接触压力 818 MPa，这表明 40Cr 复轨器发生塑性变形的区域，会逐渐形成一个残余应力分布，在有限次复轨作用后，残余应力趋于稳定，这片区域将不再产生新的塑性变形，即 40Cr 复轨器达到安定状态。结合仿真分析和试验验证可以得出 40Cr 复轨器强度满足车辆复轨的要求。



Figure 9. 40Cr re-railer after re-railing  
图 9. 复轨后的 40Cr 复轨器

## 5. 结论

(1) 在传统人字型复轨器的基础上, 基于低地板有轨电车车下结构紧凑等特点, 设计出了一种新型的复轨器。在现场复轨试验中, 新型复轨器重量较轻单人即可搬运, 操作简便, 复轨效率高复轨过程仅需 30 分钟左右, 复轨过程平顺且对有轨电车无损伤。相比之前液压复轨器优势明显。

(2) 为所设计的复轨器选取了两种材料, 并采用仿真分析和试验验证相结合的方式对两种复轨器的强度进行了校核。仿真分析中 HT250 复轨器最大接触应力为 600 MPa 远超出了 HT250 的屈服极限 250 MPa。40Cr 复轨器的最大接触应力为 818 MPa, 基于静力安定理论计算出 40Cr 复轨器的安定极限为 1812 MPa 大于仿真计算出的最大接触应力。对 40Cr 复轨器采用 E-N 法在 FE-SAFE 中对其疲劳寿命进行计算的得出结果远大于复轨器的使用要求。

(3) 对设计的两种复轨器进行了现场试验, HT250 复轨器在试验中直接破损, 40Cr 复轨器成功复轨, 完成复轨后 40Cr 复轨器仅在表面留下轻微变形, 这与仿真结果相符合, 证明设计出的 40Cr 复轨器在功能和强度上均满足其使用要求。

## 基金项目

国家自然科学基金青年项目: 列车侧向过道岔时轮轨共形接触建模及界面动态力学行为研究 (52108418), 2021.01-2023.06。

## 参考文献

- [1] 关鸣飞. 新型有轨电车的发展现状与应用前景[J]. 交通世界, 2020(17): 28-32.  
<https://doi.org/10.16248/j.cnki.11-3723/u.2020.17.012>
- [2] 周旋, 杨辉. 国内低地板车辆的发展现状及趋势[J]. 机车车辆工艺, 2020(3): 13-15.  
<https://doi.org/10.14032/j.issn.1007-6034.2020.03.005>
- [3] 韩宝明, 习喆, 孙亚洁, 等. 2022 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 1-8.
- [4] 黄勇. 铁路车辆顶复救援效率与安全性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.

- 
- [5] 沈岳, 李月琳, 郭忠. 新型单人便携式矿车复轨器的研究与探索[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 73-74+76.  
<https://doi.org/10.16107/j.cnki.mmte.2020.0558>
- [6] 张驰, 王磊, 王昊. 铁路机车车辆液压起复机具机械装置研究[J]. 甘肃科技纵横, 2023, 52(1): 30-32+45.
- [7] 韩吉元. 城市轨道交通车辆起复救援方案分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(3): 87-90.
- [8] 范晓云. 100%低地板有轨电车复轨救援模式分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 129-132.  
<https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2015.07.030>
- [9] 白付维, 马林, 周康, 等. 高速铁路救援拉复装备研究[C]//中国铁道学会. 京沪高铁运营 10 周年学术论文集. 北京: 中国铁道出版社有限公司(CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO.), 2022: 239-246.  
<https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.031106>
- [10] 严国希, 李向红, 孙永全, 等. 一种有轨电车单边导向复轨装置[P]. 中国专利, CN218839442U, 2023-04-11.
- [11] 蔡仲恒, 吴平景, 何厅. 五模块有轨电车牵引性能研究[J]. 科学技术创新, 2023(6): 189-192.
- [12] 刘启跃. 钢轨的安定状态研究[J]. 西南交通大学学报, 1995(4): 466-471.
- [13] 王镇, 董遇泰. 40Cr 低周疲劳性能试验研究[J]. 机械强度, 1988(4): 64-66+52.  
<https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.1988.04.014>