

Study on the plan of rail transport vehicle for integrated track replacement and overhaul in subway

Haijian Lin¹ Silei Liu² Wenbin Luo³ Chenghua Li³

1. Shanghai Metro Maintenance and Assurance Co., Ltd. Engineering Branch, Shanghai, 201100, China

2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. Technical Center, Shanghai, 201103, China

3. Baoji CRRC Times Engineering Machinery Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721000, China

Abstract

For domestic integrated rail replacement and overhaul column rail transport existing construction programme of high cost, low efficiency and other issues, with the mature DPC-30 rail flat car as a carrier, put forward a long rail based on the form of the vehicle conveyor line of the ordinary flat car transport programme, the rail conveyor roller torque and the longitudinal displacement of the rails for the calculation and analysis, and finally, according to the construction process, the Based on the finite element analysis software ANSYS to establish the rail finite element model, Simulation analysis of loading and reinforcement of rails during transportation. Simulation analysis shows that when the rail transporter passes through the curve track with a small radius, the maximum von Mises stress on the long rail is always lower than the material yield limit, verifying the safety and reliability of rail transportation under this condition.

Keywords

long rails; ordinary flat cars; rail transportation; finite element analysis

地铁一体化换轨大修运轨车方案研究

林海剑¹ 刘思磊² 罗文彬³ 李成华³

1. 上海地铁维护保障有限公司工务分公司, 中国·上海 201100

2. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 中国·上海 201103

3. 宝鸡中车时代工程机械有限公司, 中国·陕西 宝鸡 721000

摘 要

针对国内城市轨道交通线路钢轨大修中钢轨运输现有施工方案成本高、效率低、安全风险大等问题, 以成熟的轨道平车为载体, 提出了一种基于车载输送线形式的长钢轨普通平车运输方案, 对钢轨输送装置辊筒驱动力矩以及钢轨纵向位移进行分析计算, 最后根据施工流程, 基于有限元分析软件ANSYS建立钢轨有限元模型, 对钢轨在运输过程中的装载加固进行仿真分析。仿真分析表明, 运轨车通过小半径曲线轨道时, 长钢轨所受最大von Mises应力始终低于材料屈服极限, 验证了该工况下钢轨运输的安全可靠性。

关键词

长钢轨; 普通平车; 钢轨运输; 有限元分析

1 引言

随着城市轨道交通的持续发展, 运营规模与年限同步增长, 早期开通线路已逐步进入集中换轨周期。在钢轨运输领域, 早期为了提升运输效率, 我国研发制造出长钢轨专用车用于长钢轨运输。然而, 这种运输方式暴露出诸多弊端, 例如保有量偏低, 难以满足日益增长的运输需求; 运能不足, 限制了单次运输量的提升。为攻克长钢轨专用车存在的这些难题, 我国科研人员持续钻研, 成功研发出长钢轨普通平车

连挂运输长钢轨技术 [1]。目前, 国内普遍采用多个普通轨道平车搭载 T 型吊编组连挂的方式运输长钢轨, 有效解决了过往运输方式的缺陷, 使钢轨运输更加高效、经济 [2]。如何在多车辆协同施工, 多部门协同配合的作业模式下, 在规定天窗内实现长钢轨的高效运输及准确输送卸载, 成为当下地铁一体化换轨大修作业的重要一环。

因此, 为提高输送效率以及输送精度, 实现运 - 焊 - 卸一体化作业模式, 本文以成熟应用的轨道平车为载体, 基于输送线形式, 提出了普通平车长钢轨运输方案。在现场卸轨作业时, 由钢轨横移装置、钢轨输送装置、存轨架、安全门等装置协同控制与焊轨车和卸轨车配合, 完成长钢轨的现场输送卸载。

【作者简介】林海剑 (1989-), 男, 蒙古族, 中国河北承德人, 本科, 工程师, 从事道路与铁道工程研究。

2 运轨车方案设计

运轨车是具备运输、存储、输送长钢轨功能的平车，由锁定车，若干节运输车，以及安全车首尾连挂组成。通过

调整运输车编组数量，可满足 25m、75m 或 100m 钢轨的运输，满载能够一次运输 8 根长钢轨。在钢轨的运输过程中，运轨车能够实现钢轨的锁定、保护、防溜，在钢轨的焊接过程中，运轨车能够保证钢轨输送的平稳、顺滑。

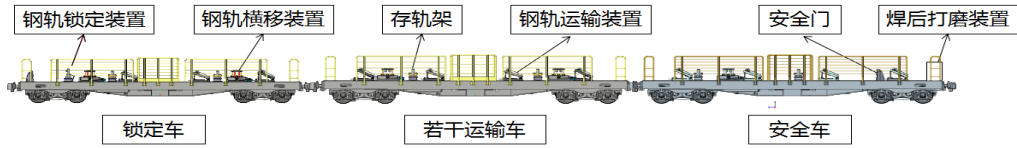


图 1 车辆装置布置示意图

3 仿真分析

3.1 钢轨输送分析

钢轨推送过程可分为启动、减速和恒速推送三个阶段，各阶段对应的辊筒驱动力矩计算方法存在差异。在恒速推送阶段，电动机的发热特性需依据系统稳定运行时的静力矩 M_1 进行校核，而过载能力则需通过分析运行过程中可能出现的最大静力矩 $M_{\max}$ 来验证。具体而言，辊筒平稳运转所需的静力矩计算需综合考量两个关键因素：一是传动轴承产生的摩擦损耗，二是钢轨与辊筒接触面相对运动引发的摩擦阻力。即：

$$M_1 = (Q + G_1)u \frac{d}{2} + Qf \quad (1)$$

式中参数定义如下： M_1 表示系统稳定运行静力矩； Q 为单根钢轨重量； G_1 指单个辊轮单体质量； u 和 d 分别对应辊轮轴承摩擦系数及其轴径尺寸； f 表征钢轨与辊轮接触面的滑动摩擦系数。

钢轨在辊道运行中若因障碍物发生紧急制动，此时产生的最大静力矩 $M_{\max}$ 即为工程术语中的打滑力矩。

$$M_{\max} = (Q + CG_1)u \frac{d}{2} + Qu_1 \frac{d}{2} \quad (2)$$

式中参数定义如下： u_1 表示系统打滑工况摩擦系数，取值范围 0.15~0.18； D 指辊轮直径。经传动比与机械效率修正后，电动机额定力矩 M_e 及峰值力矩 $M_{e\max}$ 需分别满足下列约束条件：

$$M_e \geq \frac{M_1}{i\eta} \quad (3)$$

$$M_{e\max} \geq \frac{M_{\max}}{i\eta} \quad (4)$$

式中参数定义如下： i 表示辊道的传动比参数， η 代表该传动系统的综合效率指标。

在启动、制动工况分析时，除静力矩外，还应考虑辊轮和钢轨间的动力矩 M_2 ，传动系统在启动阶段所需克服的合成力矩 M 表达式为：

$$M = M_1 + M_2 \quad (5)$$

动力矩 M_2 的确定需基于辊轮和钢轨加速阶段的动力矩分析，其计算表达式可表述为：

$$M_2 = \frac{(CG_1D_1^2 + GD_0^2)}{4} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

式中参数定义如下： $G_1D_1^2$ 为单个辊轮的力矩 ($D_1 = D$)； GD_0^2 为钢轨直线运动向辊轮轴的等效力矩，当钢轨质量载荷等效作用于辊轮圆周时，则 $GD_0^2 = \frac{Q}{g}D^2$ ， Q 为钢轨质量， ε 为转动的角加速度， $\varepsilon = \frac{2a}{D}$ 。动力矩 M_2 表达式为：

$$M_2 = \frac{CG_1D_1^2}{2D} u_1g + Qu_1 \frac{D}{2} \quad (7)$$

因此辊筒的启动力矩 M 为：

$$M = \frac{CG_1D_1^2}{2D} u_1g + Qu_1 \frac{D}{2} + (Q + CG_1)u \frac{d}{2} + Qf \quad (8)$$

在系统启动过程中，为实现钢轨输送的动态适配性，电动机初始转矩 M_q 须达到以下要求：

$$M_q \geq \frac{M}{i \cdot \eta} \quad (9)$$

经系统匹配分析，最终选定电动机的配置为 1.5kW/1400rpm，其额定扭矩、最大扭矩及启动扭矩特性均符合输送系统的动态负载需求。考虑到电网电压存在波动的情况，安全储备系数需达到 1.1。

3.2 钢轨纵向位移计算

在运输长钢轨时，当编组列经过曲线时，由于钢轨内外侧的弯曲半径存在差异，会产生不同程度的弯曲变形。其中，伸缩量最大的是最外侧的两根钢轨^[3]。长轨运输车的钢轨加固点设置在车辆端部，这使得另一端钢轨的伸缩量相对较大。为保障运输安全，必须对钢轨的伸缩量进行校验，以确认其是否符合要求。

当列车通过曲线半径为 R 的路段时，内外侧钢轨的半径差 $\Delta = R_1 - R_2 = 1.884m$ ，此时，最外侧钢轨、中间钢轨以及最内侧钢轨的长度可表示为：

$$\hat{a}_1 = R_1 \frac{\pi\phi}{180} - \frac{1}{2}\hat{b} \quad (10)$$

$$\hat{a} = R \frac{\pi\phi}{180} \quad (11)$$

$$\hat{a}_2 = R_2 \frac{\pi\phi}{180} + \frac{1}{2}\hat{b} \quad (12)$$

式中： R_1 为外侧钢轨的弯曲半径， R_2 为内侧钢轨的弯曲半径， ϕ 为中间钢轨的弯曲角度。

由于 $\hat{a}_1 = \hat{a} = \hat{a}_2$ ，则 $\hat{b} = \frac{\phi}{180}\pi(R_1 - R_2)$ ；

因为钢轨采用对称装载方式，所以内侧钢轨的伸长量 L 与外侧钢轨的缩短量相等，即：

$$S = L = \frac{1}{2}\hat{b} = \frac{\hat{a}(R_1 - R_2)}{2R} \quad (13)$$

钢轨长度 $\hat{a} = 75\text{m}$ ，曲线半径 $R=100\text{m}$ ，计算得到钢轨的最大伸缩量 $S = L = 0.7065\text{m}$ 。

因此，当列车通过 100m 的小曲线半径时，钢轨的最大伸缩量为 0.7065m ，钢轨端部与安全门之间留有充足的安全距离，这能够确保钢轨运输过程的安全性。

3.3 小曲线钢轨应力分析

采用普通平车运输长钢轨时，长钢轨在运输过程中的受力情况，与长钢轨的装载加固方式以及弯曲变形密切相关。

当运输车在直线轨道上行驶时，长钢轨在水平面内不会发生弯曲变形，也不会产生纵向位移和横向力。然而，当运输车进入曲线轨道时，长钢轨便会产生纵向位移和弯曲变形。

具体来说，在车组刚进入缓和曲线轨道时，由于轨道曲率是逐渐增大的，所以此时横向力并非最大。而当车组进入圆曲线轨道后，轨道曲率达到最大，长钢轨的弯曲变形也随之达到最大值。

鉴于此，根据车组通过圆曲线轨道时长钢轨的弯曲变形情况，建立钢轨有限元模型^{[4][5]}。 75m 长钢轨普通平车装载加固方案，如图3所示。

在模拟钢轨时，采用Beam188单元。Beam188属于三维大应变梁单元，能够赋予钢轨截面形状，从而有效模拟各种截面梁结构的力学特性。在开展有限元分析时，选取 $R=250\text{m}$ 半径的圆曲线进行计算。计算参数：钢轨弹性模量 $E = 2.05 \times 10^5 \text{MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ，密度 $\rho = 7850 \text{kg/m}^3$ 。计算钢轨在支点处沿坐标轴 z 方向的位移，并根据计算结果在有限元模型的支点上施加远程位移边界条件。

如图4所示，根据有限元计算结果，通过圆曲线轨道时长钢轨最大 von Mises 应力为 534.42MPa ，小于钢轨屈服极限，满足钢轨强度要求。

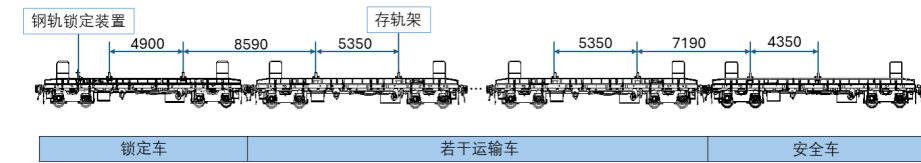


图3 75m长钢轨普通平车装载加固方案示意图

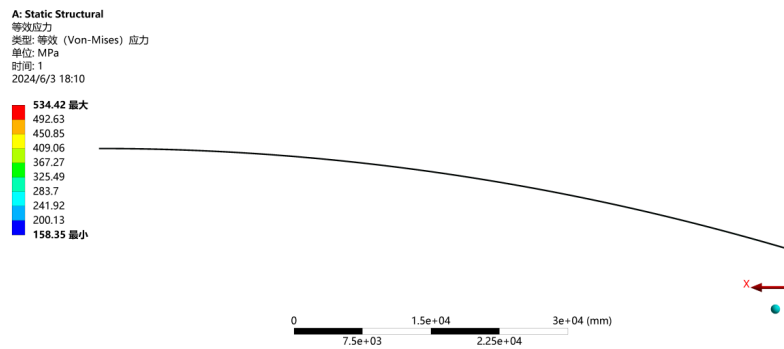


图4 通过250m圆曲线轨道时长钢轨应力云图

4 结论

在本文中，我们提出了一种基于车载输送线形式的普通平车长钢轨输送方案，基于有限元分析软件建立了钢轨的有限元分析模型，对施工方案的关键流程进行有限元分析。通过分析，该施工方案工艺流程可以满足作业要求。

参考文献

[1] 马玉坤. 75m长钢轨采用普通平车运输方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2016, 38(05): 84-90.

[2] 丁文赢, 李善坡, 殷涛, 等. 国内外长钢轨运输技术介绍[J]. 铁道货运, 2010, 28(10): 36-40.

[3] 李善坡, 马玉坤, 张长青, 等. 普通平车运输100m长定尺钢轨新型座架设计及有限元分析[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(09): 80-84.

[4] 杨广全, 张长青, 李善坡, 等. 普通平车运输长钢轨的有限元分析[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(07): 40-42.

[5] 刘振东, 杨广全, 张长青. 长钢轨普通平车运输中加固点的选择[J]. 铁道货运, 2010, 28(06): 28-30.