

# 地铁接触线自动打磨系统分析与设计

张晖<sup>1</sup> 吴磊<sup>1</sup> 闫晴<sup>1</sup> 赵宁<sup>1</sup> 高圣伟<sup>2</sup>

1. 天津津铁电子科技有限公司, 中国·天津 301700

2. 天津工业大学电气工程学院, 中国·天津 300382

**摘要:** 随着中国经济的发展, 地铁运营里程不断增长, 地铁弓网供电的安全性越来越受到国家的重视。由于地铁的接触线工作环境恶劣, 所以经常出现异常磨损, 产生拉丝等安全隐患, 为了去除地铁接触线拉丝等异常磨损, 本论文通过对地铁运行工况的分析, 针对地铁接触线的结构特点, 面向接触线打磨的难点, 提出地铁接触线自动打磨系统设计方案, 设计了硬件结构、控制系统, 并通过对比选择了滚刷打磨方式, 完成地铁接触线自动打磨产品。该打磨系统的应用减轻了地铁工人安全运维的工作强度, 并且明显提升了地铁系统的运行安全性, 应用结果表明该系统具有巨大的经济和社会价值。

**关键词:** 地铁; 接触线; 拉丝; 打磨

## Analysis and Design of Automatic Grinding System for Metro Contact Wires

Hui Zhang<sup>1</sup> Lei Wu<sup>1</sup> Qing Yan<sup>1</sup> Ning Zhao<sup>1</sup> Shengwei Gao<sup>2</sup>

1. Tianjin Jintie Electronic Technology Co., Ltd., Tianjin, 301700, China

2. School of Electrical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300382, China

**Abstract:** With the development of China's economy, the operating mileage of metro systems is constantly increasing, and the safety of metro pantograph-catenary power supply has received increasing attention from the state. Due to the harsh working environment of metro contact wires, abnormal wear such as wire drawing often occurs, posing safety hazards. To address the issue of abnormal wear like wire drawing on metro contact wires, this paper analyzes the operating conditions of metro systems, considers the structural characteristics of metro contact wires, and focuses on the difficulties in contact wire grinding. A design scheme for an automatic grinding system for metro contact wires is proposed. The hardware structure and control system are designed, and the roller brush grinding method is selected through comparison. The automatic grinding product for metro contact wires is completed. The application of this grinding system reduces the work intensity of metro workers in safe operation and maintenance, and significantly improves the operational safety of metro systems. The application results show that this system has significant economic and social value.

**Keywords:** subway; contact wire; drawing; grinding

## 1 背景介绍

随着中国经济发展和城市化进程的加速, 城市轨道交通建设快速发展, 投入运营的地铁线路也日益增多。截至 2024 年底, 中国的地铁运营线路总长度已近 9 千公里, 年累计客运量近 200 亿人次。地铁作为一种准时、便捷的交通工具, 已经成为城市发展不可或缺的重要组成部分, 对地铁安全保护需求日益突显。特别是地铁是一种电气化交通设施, 供电的安全性、可靠性, 是地铁列车及整个地铁系统运行安全的首要保证。地铁列车的主要供电方式是接触网的接触线和受电弓碳滑板的有效安全接触, 但是随着地铁运营时间的增长, 接触线会产生如拉丝等异常磨损, 这将对地铁系统运营安全造成严重影响。因此, 对接触线进行定期维护和打磨处置, 去除接触线的异常磨损, 对于地铁安全运行具有重要意义。

但是相关科技资料和研究成果未见有针对地铁接触线

拉丝等异常磨损的自动化打磨维护设备, 因此论文提出设计一套接触线自动打磨系统, 该系统能够适应地铁工况和地铁接触线的特点, 实现接触线异常磨损的自动化打磨, 提高接触线与碳滑板的接触效果, 提高地铁供电质量, 提高地铁运行安全性。

## 2 地铁接触线的工况分析

接触线异常磨损原因主要包括 3 点: 第一, 接触线拉出值、高度、跨中接触线的微小变化, 会导致碳滑板在接触线中通过的时候受力波动较大, 引起接触线局部异常磨损; 第二, 接触线面出现大幅度歪斜的情况, 进而影响定位线夹的位置, 致使碳滑板与接触线接触不良, 引起接触线局部异常磨损; 第三, 吊弦没有充分受力, 进而出现刮弓情况, 引起接触线局部异常磨损; 此外, 受到风力、温度、湿度等环境因素的影响, 接触线摩擦力、表面张力等特性发生变化, 进而导致引起接触线局部异常磨损。异常磨损使接触线受到

损害，其现象就是接触线会出现金属拉丝，如图 1 所示，当这种金属拉丝脱落或者与地铁其他电气设备接触，将造成车顶短路击穿，或者灼伤接触线等严重短路事故和次生危害，如图 2 所示。因此去掉接触线拉丝，避免出现严重的次生事故，定期对接触线进行打磨工作十分重要。



图 1 接触线拉丝

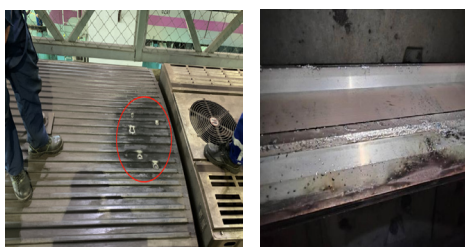


图 2 车顶击穿和接触线灼伤事故

如图 1 所示，接触线拉丝常常会出现于接触线底面两侧棱角处，以毛刺或细铜丝的形式出现，它们一端垂落悬空而另一端与接触线连接，拉丝长度不一，初级拉丝只是几毫米毛刺。在地铁运行过程中，随着碳滑板与接触线的接触摩擦，有的拉丝会延展，形成 200~300mm 长，直径为 0.5~2mm 的铜丝。最终这类拉丝可能导致接触网带电体与电客车车体发生短路造成牵引变电所断路器跳闸，供电臂失电，严重影响地铁运营安全。因此，每年要安排大量的人力去进行接触线的打磨作业，避免短路事故发生。

现有的打磨方式为手动打磨，如图 3 所示，操作人员手持角磨机直接打磨接触线，该方法存在着自动化程度低，工作强度高，工作环境恶劣，安全性差，效率低，打磨质量差，容易对地铁接触线造成次生损坏等诸多弊端，难以满足现在轨道交通发展的需求。为解决以上难题，论文提出开发地铁接触线自动打磨系统。



图 3 现在的手动打磨方式

### 3 打磨系统设计

#### 3.1 技术难点分析

地铁接触线工作环境特殊，同时对于安全性要求高，因此设计接触线自动化打磨装置要克服以下难点。

第一，地铁接触线采用分段供电方式，每 100m 有分段重合交叉点，接触线自动打磨系统要充分考虑到分段衔接处的实际工况，要实现顺利的切换线路，避免打磨装置与分段接口处相互干扰，造成挂线危险。

第二，自动打磨装置的载体是工程车，工程车在运行过程中不可避免的有上下颠簸，因此打磨过程中要充分考虑到以上因素，避免工作过程中给接触线造成强分散性的冲击。

第三，接触线是以“Z”字形架空安装，且基于轨道中心，有左右 25cm 的偏移，在这种复杂工况下设计合理的打磨结构，避免挂线的事故发生。

#### 3.2 打磨系统硬件设计

针对以上三个难点问题，本自动打磨系统将采用以下技术方案。主要包括以下几点：

①采用多打磨轮并行的结构，将固定式精准打磨滚刷与往复式横向打磨滚刷很好的结合，代替人工打磨，实现接触线打磨的无缝衔接和高效精准打磨，保证打磨效果。

②采用缓冲阻尼式升降平台，避免工程车工作过程中振动传导到接触线，使系统对接触网的打磨度更加平稳，打磨力度具有更高的一致性，提高可靠性。

③采用长打磨刷结构，可以满足地铁接触线规范安装范围内的“Z”偏移距离，同时设计了打磨轮横向偏移功能，满足特殊情况下的接触线过大距离偏移。提高打磨系统对接触线的追踪能力和打磨效果。

其打磨系统的硬件设计图如图 4 所示：图中的标号对应的功能如表 1 所示。

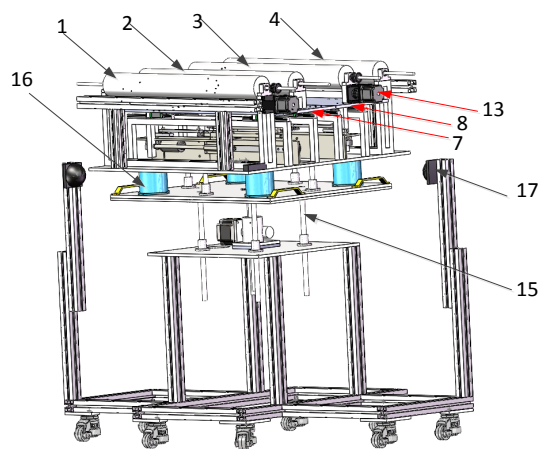


图 4 打磨系统结构示意图

在如图 4 所示的自动打磨系统结构中，其设计难点主要包括往复式打磨机构的设计如图 5 所示和缓冲机构设计。

表 1 图 4 和图 5 结构图中的部件标号对应的名称

标号	名称	标号	名称
1	打磨装置前固定打磨轮	10	打磨装置打磨轮往复平台往复推拉杆固定孔
2	打磨装置前往复打磨轮	11	打磨装置前往复打磨轮往复平台运动滑块
3	打磨装置后往复打磨轮	12	打磨装置前往复打磨轮往复平台运动滑道
4	打磨装置后固定打磨轮	13	打磨装置前往复打磨轮旋转驱动电机
5	打磨装置前往复打磨轮往复驱动电机	14	复平台推拉杆与打磨轮往复平台连接器
6	打磨装置前往复打磨轮回转机构	15	打磨平台稳定杆
7	打磨装置前往复打磨轮往复平台	16	缓冲器
8	打磨装置后往复打磨轮往复平台	17	摄像机
9	打磨装置打磨轮往复平台往复推拉杆	18	打磨平台升降电机

为了更好的实现对接触线的打磨效果，在该系统中采用了往复式打磨滚刷与固定式打磨滚刷相结合的打磨机构。在固定式的打磨滚刷部分，打磨轮可以实现沿着接触线顺向打磨或者逆向打磨，该种打磨方法对沿接触线的切向打磨效果较好，但是由于打磨过程中还缺乏横向的打磨力，即沿接触线的法向打磨力，因此对接触线的边沿微小拉丝打磨效果欠佳，因此具有横向往复打磨功能的接触网打磨系统，提高接触网打磨效果。如图 4 所示，本系统主要配置有四个打磨轮，如部件标号 1、2、3、4，其中部件 1、4 为前后两个固定打磨轮，部件 2、3 为中间两个具有左右移动横向打磨功能的打磨轮，该组合提升了接触线底面及底面两侧棱角处的打磨效果，其左右往复移动的横向打磨轮设计结构如图 5 所示。

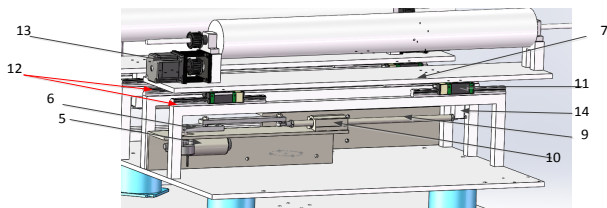


图 5 打磨装置往复结构局部放大图

图 5 中的部件 13 驱动打磨轮正转或者反转，图 5 中的其他部件相互协调，实现打磨轮往复运动。

如图 4 中的部件 16，是打磨装置中的缓冲器，它形成了系统中的一个缓冲层，保证将打磨装置承载工程车运行的颠簸造成的瞬态冲击进行阻尼，使其在打磨过程中，不会由于外界工况和干扰造成接触线的直接力冲击，提高了打磨装置的可靠性。

### 3.3 控制系统设计

整个打磨系统的控制拓扑如图 6 所示：主要包括横移电机、升降电机、滚刷电机三类运动部件，系统配备相应的电机控制器，打磨系统的控制核心是 PLC；触摸屏增加了人机交互的友好性；报警装置在特殊的危险工况下发出报警信号；以上各部分的组合完成了打磨系统的机构运行。

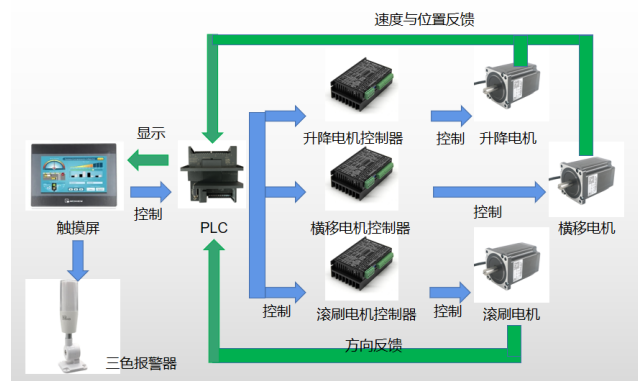


图 6 打磨装置控制系统

### 3.4 打磨轮与打磨带方式对比

在已有的文献中，对于金属缆索的打磨有两种方式，分别是打磨带打磨或滚刷打磨，在某些工况下，打磨带是一种很好的打磨方式，但是地铁接触线的打磨是在工程车承载条件下的高速行进中打磨，针对这一工况，论文选取的是滚刷打磨方式，其工作模型如图 7 所示，图 7 中标号 1 为接触线、3 为打磨滚刷、4 为滚刷轴；图 8 为打磨带打磨的示意图，图中标号 2 为打磨带，x 为打磨带的运行方向、y 为承载打磨装置的机车运行方向。为了证明对地铁接触线打磨中滚刷打磨方式的优势，以下对打磨带打磨接触线的受力情况进行分析。

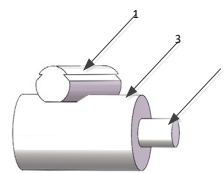


图 7 滚刷打磨示意图

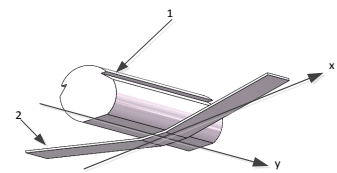


图 8 打磨带打磨示意图

#### 3.4.1 接触线没有拉丝的情况，打磨带打磨方式的受力分析

假设接触线打磨接触面需要 1kg (10N) 压力，一般打磨带与金属表面之间的摩擦系数  $\mu$  在 0.6~1.0。若假设其摩擦系数  $\mu$  为 1.0。依据摩擦力计算公式  $f=\mu N$ ，则摩擦力为  $f=\mu N=1.0*1*10=10N$  的力。

在该状态下，接触线没有拉丝，即假设其表面光滑，垂直于打磨带的摩擦力与工程车速度无关。

### 3.4.2 当遇到拉丝的情况时，打磨带打磨方式的受力分析

工程车在高速运动，边沿拉丝对打磨带造成垂直冲击力，设打磨带沿 x 轴的线速度为 314cm/s，即 3.14m/s；（打磨带设备参数为：打磨带设备中驱动轮直径 10cm，打磨驱动轮周长为 31.4cm，转速为 600r/min，即每秒钟 10 转）

拉丝对打磨带的冲击力计算公式为：

$$F=(m*(v_2^2-v_1^2))/(2*d)$$

设：飞丝质量为： $m=1g=0.001kg$ ；

车速即沿 y 轴方向的速度： $10km/s$ ，即  $V_2=2.8m/s$ ；

拉丝与接触线同向速度为： $V_1=0m/s$ ，即拉丝相对接触线静止；

d 是冲击过程中拉丝移动的距离，设为 1cm 即 0.01m，实际移动距离可能还要小。

假设在 y 轴方向上，拉丝与打磨带的侧面接触面积为拉丝直径，即 0.25 平方毫米，（设拉丝直径大约为 0.5 毫米），则打磨带侧面受力为：

$$F=(0.001*(2.8^2-0))/(2*0.01)*10=3.92N$$

打磨带侧面压强为：

$$3.92N/0.25=15.68N/平方毫米=15680000N/平方米$$

由于假设打磨带在运动的工程车上，因此相对于接触线的打磨位置，具有法向运动和切向运动，所以拉丝对于打磨带侧边的压强可以认为是 x 轴和 y 轴上的合力产生。

基于速度矢量的受力夹角计算：

$$\text{Arctan}(2.8/3.14) = \text{Arctan}(0.89) = 42 \text{度}$$

y 轴方向冲击力压强的计算：

$$15680000 * \text{Sin}(42) = 10491967N/平方米$$

其受力矢量图如图 9 所示。

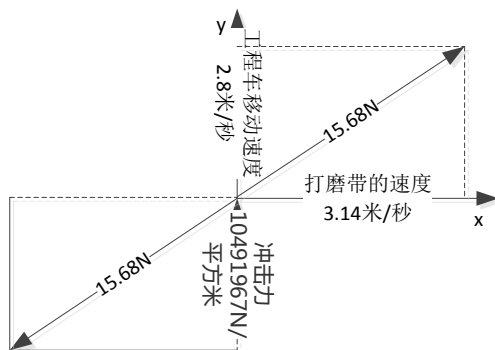


图 9 受力分析矢量图

### 3.4.3 分析结论

经过计算，垂直于打磨带的冲击力压强为 10491967N/m<sup>2</sup>。

从以上计算可以知道，在工程车高速运行过程中，打磨带与拉丝进行接触时，其垂直于打磨带的作用力压强非常大，可以理解是用钢针去刺打磨带，或者用刀去切割打磨带。所以当工程车在运行中，用打磨带直接去打磨接触线，打磨带的损耗会非常大，并且存在很大安全隐患。

本项目针对地铁接触线特点，采用的打磨轮方式进行打磨，本质是一种高密度的清扫方式，其依靠硬质铜丝，与接触线侵入式接触，如图 7 所示，该方法可以清扫掉飞丝，同时打磨轮铜丝的韧性使自身不会受损，因此打磨轮的打磨方式具有明显优势，最终形成的样机，如图 10 所示。



图 10 样机照片

## 4 结论

地铁接触线自动打磨系统可高效、安全的实现接触线的飞丝打磨，能有效避免由于接触线拉丝导致的地铁短路事故，从而提高地铁运营的安全性。并且该系统打磨工作依靠 4 个打磨滚刷来实现，4 个滚刷并行排放，两端是固定滚刷，形成预打磨及后打磨功能，中间两个不仅自滚动，而且还具有垂直接触线横移打磨功能，这就对接触线形成了全方位打磨效果。打磨过程中，接触线与打磨滚刷侵入式接触，当打磨系统安装在工程车上随车运行时，车辆的自身震动可能导致滚刷轴对接触线产生过大冲击压力，打磨系统增加的缓冲机构，可以对随机的震动产生阻尼，提高打磨装置可靠性。

### 参考文献：

- [1] 刘开峰.地铁接触网覆冰的影响及其处置措施[J].城市建设理论研究(电子版),2024(36):168-170.
- [2] 寇鸿博,张文轩,王婧,等.基于数据特征的接触线拉出值变化识别方法[J].铁道机车车辆,2024,44(6):123-130.
- [3] 冯帆,吴积钦,梁中林,等.高速铁路接触网电连接有限元建模与振动载荷谱获取[J].电气化铁道,2024,35(6):13-17.
- [4] 芦志广.高速铁路42号道岔接触网无交叉线岔优化探讨[J].电气化铁道,2024,35(6):26-30+45.
- [5] 鞠克康.城市轨道交通弓网异常磨耗及调整预防措施研究[J].现代城市轨道交通,2024(12):129-135.