

# 地铁车辆上智能弓网在线检测系统的主要技术

梁汝军 江巧逢 时 蒙

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 智能弓网在线检测系统可针对地铁列车的受电弓结构、弓网接触点温度、接触线结构等故障, 实现在线动态实时检测。该方法融合了深度学习技术、图像智能识别技术、红外热成像技术、双目测量技术等前沿检测方法, 可实现对弓网运行状态进行全面检测, 从技术实现角度确保地铁线路的运营安全和效率。

**关键词** 地铁; 车辆; 弓网在线检测; 红外检测

**中图分类号** U225.4<sup>+</sup>1; U264.3<sup>+</sup>4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2020.06.041

## Main Technologies of Pantograph Catenary On-line Detection System for Metro Vehicles

LIANG Rujun, JIANG Qiaofeng, SHI Meng

**Abstract** The intelligent pantograph catenary on-line detection system can implement the on-line dynamic real-time detection of the main faults in metro train pantograph structure, pantograph contact point temperature, contact line structure and so on. The system combines the deep learning technology, image intelligent recognition technology, infrared thermal imaging technology, binocular measurement technology and other advanced detection methods, and therefore can realize the comprehensive detection of the pantograph and catenary operation state, ensure the operation safety and efficiency of metro line from the technology realization angle.

**Key words** metro; vehicle; pantograph catenary on-line detection; infrared detection

**Author's address** CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

地铁列车一旦发生供电事故, 轻则造成车辆受电弓损坏而无法前行, 重则因接触网损坏导致整条线路长时间停运、旅客大面积滞留。因此, 为保证地铁列车安全运行, 智能的弓网在线检测系统也逐渐成为保证列车安全运行的必要监测手段。

## 1 智能弓网在线检测系统介绍

智能弓网在线检测系统运用了深度学习技术、

图像智能识别技术、红外热成像技术、双目测量技术等非接触式的检测方式, 可实时检测受电弓结构、弓网接触点发热情况、接触线磨耗及几何参数、接触网硬点等参数。当检测到异常状态时, 该系统可在车辆上实现自动报警, 并通过车载无线网络及时把异常状态以视频、图像、检测数据的方式发送到地面显示终端和地面分析服务器。地面分析服务器可对检测数据进行分析及统计, 指导弓网关系的维护及改善。

系统的主要功能为: ① 列车受电弓结构异常检测功能。系统可实时监控弓网状态并保留高清视频记录, 以便后续的复查和分析; 系统能实时检测受电弓及羊角的变形及缺损, 发现异常可实时报警。② 受电弓与接触线接触点温度检测功能。系统可实时监测受电弓与接触线接触点位置的温度, 温度超过限定值时将自动报警。③ 接触线磨耗及几何参数检测功能。系统可检测接触线的磨耗、拉出值、导高、接触线坡度等参数, 当参数超过限定值时将自动报警。④ 接触网硬点检测。系统检测到沿线的接触网硬点后会自动进行报警。

智能弓网在线检测系统主要由车顶数据采集与传输设备、车内分析服务器、车底补偿设备以及地面数据中心系统等组成, 如图 1 所示。

车顶数据采集与传输设备内分为高清视频采集模块、结构异常采集模块、红外热成像模块、接触线磨耗和几何参数检测模块以及接触网硬点检测模块。所有模块采集到的数据通过网线传输到车内的分析服务器内。车顶数据采集与传输设备的接触网定位检测如图 2 所示。

车内分析服务器对各个设备传来的数据进行分析处理并与车内 TCMS(列车控制和管理系统)、运营控制中心(OCC)进行通信。车内分析服务器分为六大模块: TCMS 通信模块、数据采集模块、数据智能分析模块、供电模块、网络交换模块、数据存储模块。

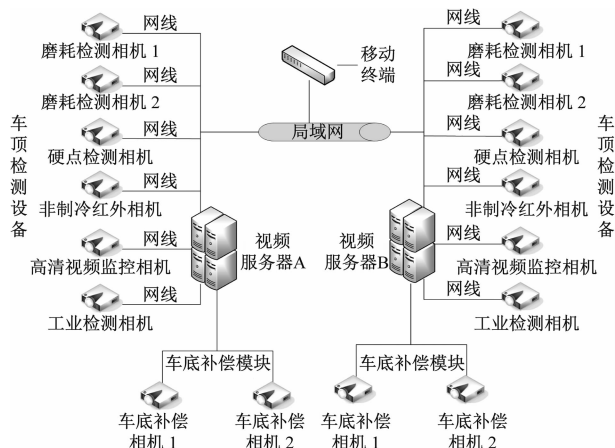


图1 弓网检测系统拓扑图

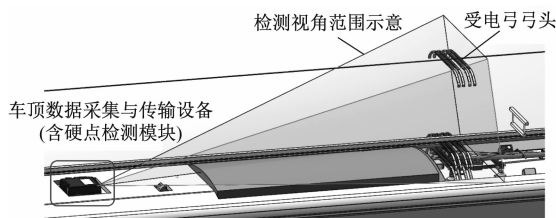


图2 弓网检测定位检测图

## 2 智能弓网在线检测系统的主要技术

### 2.1 受电弓结构异常检测技术

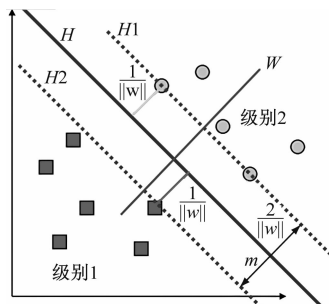
该系统采用智能高清视频监控相机,可对弓网结构局部细节放大,并可以对重要部位进行定时自动检查,记录运行状态,便于后续的图像分析。系统定时将在预置位自动对软件预先设置的观察点进行监控,以达到自动监测的效果。同时,系统可自动识别关键部位,报警时智能截取问题部位图像,减少带宽压力。

受电弓结构异常检测采用神经网络技术对目标图像进行深度学习,自动检测碳滑板断裂、羊角异常或丢失、异物入侵等异常状态并发出报警提示。相比传统算法,此算法精准度高,受环境(如逆光、视窗脏污等)和拍摄角度变化的影响小。

系统采集到受电弓结构图像后,先对图像上的关键结构部位进行定位,再利用分类器算法对定位区域进行分类,并判断是否存在异常。系统采用算法综合评定的方式对受电弓关键结构进行定位:先采用深度神经网络定位算法对相机采集到的第一帧图像进行识别定位,该算法定位准确,但效率较低;后续采用模糊算法跟踪定位,该算法的运行效率较高。通过这两种定位算法的结合,可很好地兼顾定位的准确性和效率。

工业相机采集到的图像,首先通过 SSD(多分类单杆检测器)算法定位到关注的区域,再对跟踪到的各个区域使用 SVM(支持向量机)算法判断羊角异常、异物入侵等预警信息,最后定位到滑板,通过霍夫变换确定滑板是否倾斜。

SVM 算法是一种二分类模型,主要用于区分图像中的不同特征(如从图像背景中分离出受电弓羊角),以便做进一步的分析判定。SVM 算法的基本原理是在给定一个包含正例和反例的样本集合中,寻找一个超平面来对样本进行分类。如图3所示,假定关注样本中存在级别1和级别2两个特征点集,这两个点集的理想分隔面为  $H$ ,各自点集中最近边缘点的分隔面分别为  $H_1$ 、 $H_2$ ,调整向量  $W$  使  $H_1$ 、 $H_2$  的间隔距离  $m$  最大,则此时的  $H$  为最优分隔面。



注:  $W$ ——所需求解的向量;  $\|W\|$ ——向量的范数,其倒数用于评估离散点的稀疏程度

图3 SVM 算法示意图

霍夫变换检测原理如下:每个像素坐标点经过变换都可变成直线特质有贡献的统一度量。例如,一条直线在图像中是一系列离散点的集合,通过一个直线的离散极坐标公式,可以表达出直线的离散点几何等式如下:

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = r \quad (1)$$

式中:

$x, y$ ——图像坐标系任一像素点的坐标;

$r, \theta$ ——图像坐标系任一像素点的极坐标。

该公式的图形表示如图4所示。在图像处理领域,像素坐标  $P(x, y)$  是已知的,而  $r, \theta$  则是要寻找的变量。如果能根据像素点坐标  $P(x, y)$  值绘制出每个  $(r, \theta)$  值,就能把图像从笛卡尔坐标系系统转换到极坐标霍夫空间系统,这种从点到曲线的变换称为直线的霍夫变换。通过量化霍夫参数空间是变换为有限个值间隔等分或者累加格子。当霍夫变换算法开始,每个像素点  $P(x, y)$  被转换到  $(r, \theta)$  的

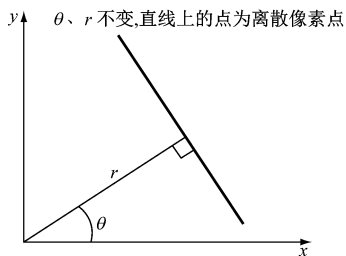


图4 霍夫变换检测示意图

曲线上,当每个像素点的极坐标曲线出现一个波峰时,则可以判定这一系列像素点的排列为直线。

## 2.2 受电弓与接触网接触点温度监测技术

红外热像仪测温精度主要由空间分辨率决定,其分辨物体的能力可理解为测量距离和目标大小的关系。

系统的检测需求为:热像仪距离弓网接触点为4~7 m,检测区域范围为3 m×2 m,最小测温区域直径不小于1.5 cm。根据经验初选热像仪分辨率为640×480,镜头为24°×18°,则其空间分辨率 $R_{\text{IFOV}}$ 为:

$$R_{\text{IFOV}} = \frac{2\pi\sigma}{360\eta} \quad (2)$$

式中:

$\sigma$ ——视场角;

$\eta$ ——分辨率;

经计算可得,该热像仪的 $R_{\text{IFOV}}$ 为0.65 mrad。

在热像仪上 $n$ 个像素点所覆盖的区域中,可观测的最小区域直径 $d_{\min}$ 为:

$$d_{\min} = sR_{\text{IFOV}}\sqrt{n} \quad (3)$$

式中:

$s$ ——热像仪与弓网接触点的距离;

$n$ ——像素点数量。

由式(2)可知,当 $s$ 为7 m时,1个像素点的 $d_{\min}$ 约为5 mm。通常至少需要4个像素点来测量接触点的温度,此时 $d_{\min}$ 约为9 mm;若需要精准测量出接触点的温度,通常至少需要9个像素点,此时的 $d_{\min}$ 约为14 mm。同理,当 $s$ 为4 m时,1个像素点的 $d_{\min}$ 约为2.6 mm,通常至少需要4个像素点来测量接触点的温度,此时 $d_{\min}$ 约为5.2 mm,若需要精准测量出接触点的温度,通常至少需要9个像素点,此时的 $d_{\min}$ 约为7.8 mm。

综上,当热像仪距离弓网接触点约为4~7 m时,可精确测温的分辨率精度为7.8~14.0 mm,即精度最差为1.4 cm,小于设计需求的1.5 cm。故上

述选型符合设计需求,实际运用过程中能满足对弓网接触点的精确测温。

## 2.3 接触线磨耗及几何参数检测技术

系统采用2台线阵相机和大功率结构光激光器来采集接触线的图像信息,并通过千兆网络实时传输到数据处理服务器中。后台图像分析程序可由此计算出接触线的导高、拉出值和磨耗宽度。

### 2.3.1 接触网几何参数测量

系统在双目视觉的基础上搭建双线阵 CCD(电荷耦合器件)相机检测系统,在二维 CCD 交汇的理论基础上建立线阵 CCD 的交汇模型。两台相机参数一致。其测量原理如图5:建立坐标系  $OXYZ$ ,以光心  $C_1$  和  $C_2$  为原点分别建立摄像机坐标系  $C_1X_{c1}Y_{c1}Z_{c1}$  和  $C_2X_{c2}Y_{c2}Z_{c2}$ 。两台相机光敏面中心相距  $2L$ ,焦距均为  $f$ ,且两相机光轴构成平面处在  $XOY$  平面内,即  $P$  点  $Z$  坐标值恒为零,两光轴向内偏离垂直角度均为  $\alpha$ 。空间上一定点  $P$  投影到两台相机光敏面上的点为  $P'$  和  $P''$ ,距离光敏面中心  $O_1, O_2$  的距离分别为  $x_1, x_2$ 。利用数学推导可求得  $P$  点在坐标系中的坐标值,进而求出拉出值和导高。

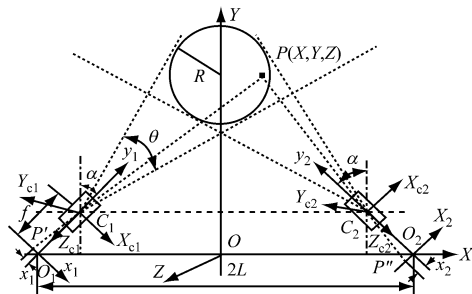
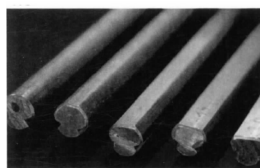


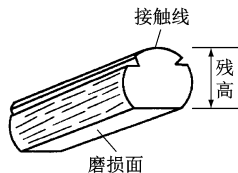
图5 双线阵 CCD 相机测量原理图

### 2.3.2 接触线磨耗测量

根据接触线的结构特性,其下部呈圆弧状,在受到不同程度的磨耗时,磨损面宽度不同,对应的残高也不同。图6为不同磨损程度的接触线。因此,找寻磨损面边界点成为计算磨耗的关键。



a) 接触网磨耗面实物图



b) 接触网磨耗面示意图

图6 接触网磨耗面

接触线经常与受电弓摩擦,磨耗面不易氧化,光反射强度较高,在边界处光反射强度变化明显。

如图7所示,图7 a)为未磨耗的接触线,其横截面下表面呈圆弧形;图7 b)为磨耗的接触线,A、B两点为待识别的磨耗面边缘点。

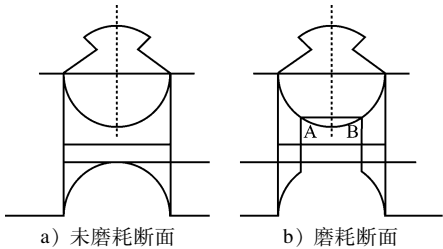
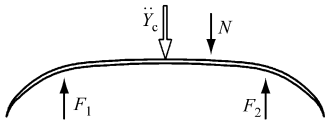


图7 接触网磨耗断面示意图

在光源的配合下,未磨损的接触线光照梯度无明显变化,而磨损接触线的边缘点A、B两处的梯度有明显的变化。然后,通过图像处理可提取出A、B两点,再利用P点的双目视觉方法分别求出世界坐标系下A、B两点的坐标 $A(X_a,Y_a)$ 、 $B(X_b,Y_b)$ ,便可求出接触线的磨耗大小和磨损深度。

2.4 硬点检测技术

硬点发生时,弓网间的作用可以近似看作一次弹性碰撞过程。此时弓头的冲击加速度最大值高于正常行驶时的加速度值。可通过检测冲击加速度来评定是否出现硬点。在出现硬点的同时,弓头会有大幅度位移,由此可以对检测结果进行复验。车辆行驶状态下的弓头受力分析如图8所示。



注: $\ddot{Y}_c$ ——受电弓弓头冲击加速度; $F_1$ 、 $F_2$ ——受电弓弓头左右两侧弹簧所受到的力; $N$ ——弓网接触压力,即接触网硬点对受电弓的冲击力

图8 运行状态下的车辆受电弓弓头受力图

这些力之间的相互关系为:

$$m\ddot{Y}_c = N - F_1 - F_2 \tag{4}$$

式中:

$m$ ——受电弓弓头质量。

实测数据的统计分析结果见表1。车辆正常行驶过程中,无硬点情况下的冲击加速度小于0.2 g,有硬点的情况下的冲击加速度平均值为1.54 g,最大为2.04 g。有硬点时振幅>250 mm。通过测定振幅和振动周期可进行冲击加速度核算。

表1 弓网硬点检测值统计表

项目	最小值	最大值	均值
弓头振幅/mm	250.0	287.0	286.5
弓头冲击加速度 $\ddot{Y}_c/g$	0.26	2.04	1.54

系统在受电弓开口方向架设高速工业相机,对弓头区域进行高速连续监拍。通过图像识别提取每帧图像中弓头的位置信息,计算帧间的像素偏差值,即可得到弓头振动的完整数据。根据实测数据可绘制弓头的振动曲线,筛选振幅大于某一阈值(与线路工况有关)的振动情况,可初步判定是否为硬点,最后通过校验冲击加速度数据可确认是否为硬点。冲击加速度可通过振幅对时间的二次微分推算,应大于0.26 g。另外,结合燃弧检测模块查验是否同步有燃弧报警,可提高硬点检测的准确率。

3 结语

通过多技术融合,列车受电弓与接触网的智能检测系统实现了对地铁列车的在线实时监测,能自动识别并检测绝大部分弓网异常状态,极大提高了地铁运营的安全性,提升了管理和维护效率。

参考文献

[1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社,2003:51.

[2] 任时光. 新型滑板磨耗检测及自动降弓装置[J]. 铁道运营技术,2000(4):4.

[3] 罗鹏,王泽勇,高晓蓉,等. 电力机车入库受电弓滑板磨耗检测[J]. 光电工程,2004,31(增刊1):88.

[4] 张德. 受电弓滑板磨损自动测量装置的开发[J]. 电气化铁道,1995(1):22.

[5] 梅桂明,张卫华,刘红娇. 不同结构类型接触网动态特性[J]. 交通运输工程学报,2002(2):27.

[6] 王平均. 基于MATLAB图像增强算法的应用[J]. 辽宁高职学报,2013(7):83.

[7] 袁丽婷. 基于MATLAB的医学图像增强与边缘检测算法的实验研究[D]. 西安:第四军医大学,2009.

[8] 张芳,姚懋许. 受电弓自动监视装置[J]. 国外机车车辆工艺,2001(2):47.

[9] 朱晓恒. 受电弓典型故障图像检测算法的研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.

[10] 孙爱玉. 检测受电弓接触磨损的新方法[J]. 电力机车与城轨车辆,2001,24(4):46.

(收稿日期:2018-06-05)