

## APM(自动旅客捷运系统)轨道错台检测研究及应用

滕星权

(中国铁建重工集团股份有限公司, 410100, 长沙)

**摘要** [目的]为解决传统 APM(自动旅客捷运系统)轨道错台人工检测方法的检测效率低、精度低等问题,需对 APM 轨道错台检测技术进行研究。[方法]利用线激光传感器获取轨道数据,基于多维图像处理技术和点云处理技术对错台进行识别和测量。对轨道轮廓数据进行图像化处理,通过图像处理技术识别轨道错台并定位,同时融合动态数列,判断在连续的时间段内图像识别算法识别的轨面状态是否一致,解决单个轨道断面误判的干扰,提高错台识别定位的准确性;错台精准识别和定位后,扫描获取轨道的点云数据,对数据进行滤波、平面拟合等处理,获取错台值的大小。[结果及结论]上海地铁浦江线的实际线路试验结果表明,采用多维图像处理技术和点云处理技术能够实现轨道错台的准确识别和定位,且识别的错台值的测量精度高、重复性好,满足轨道巡检要求。

**关键词** 轨道交通; APM; 轨道错台检测; 图像处理; 动态数列

中图分类号 U213.4:U239.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.061

## Research and Application of Track Misalignment APM Detection Technology

TENG Xingquan

(China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited, 410100, Changsha, China)

**Abstract** [Objective] In order to solve the problems of low efficiency and poor precision of traditional APM (automated people mover system), it is necessary to study the APM technology for track misalignment detection. [Method] The line laser sensor is used to obtain the track data, and track misalignment is identified and measured based on multi-dimensional image processing and point cloud processing technologies. Track contour data is firstly visualized, and image processing is then used to identify and locate track misalignment. Meanwhile, dynamic sequence is fused to determine whether the track status recognized by image recognition algorithm is consistent in a continuous period of time, thus solving the interference of single track section misjudgment and improving the accuracy of misalignment identification and positioning. After accurate identification and positioning of the misalignment, the

track point cloud data obtained by scanning is processed by filtering and plane fitting to obtain the misalignment value. [Result & Conclusion] The test results from the actual line of Shanghai Metro Pujiang Line show that the multi-dimensional image processing technology and point cloud processing technology can realize accurate identification and positioning of track misalignment with high precision and good repeatability, meeting the requirements of track inspection.

**Key words** rail transit; APM; track misalignment detection; image processing; dynamic sequence

APM(自动旅客捷运系统)是一种新型的城市轨道交通全自动运行系统,主要用于短距离旅客运输<sup>[1]</sup>,目前已在广州及上海等城市应用<sup>[2-3]</sup>。轨道错台是指在轨道接缝位置发生错位而导致的轨道不平顺现象。当 APM 列车在轨道上运行时,轨道若发生错台,则会直接影响乘车的舒适性,严重时还会造成脱轨,影响行车安全。可见,在 APM 日常巡检工作中有必要进行轨道错台检测,以确认错台是否在合理的范围内,进而制订相应的养护措施。

## 1 轨道错台场景

APM 轨道的截面如图 1 所示。本文以供电轨为例,对错台检测方法及过程进行说明。

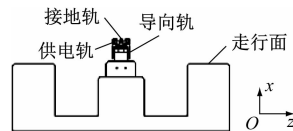


图 1 APM 轨道截面图

Fig. 1 APM track section

对 APM 供电轨轨面而言,轨道错台主要分为垂向( $x$ 向)错台和水平( $z$ 向)错台。供电轨垂向错台如图 2 所示。图 2 中  $\Delta d$  为垂向错台值。

## 2 错台检测

APM 轨道错台检测主要包括错台识别定位和

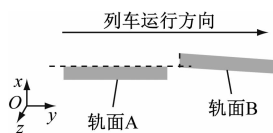


图2 供电轨垂向错台

Fig. 2 Vertical misalignment of power supply rail

错台测量。为了能够便捷、连续、快速、准确地进行错台检测,错台检测系统利用线激光传感器获取轨道数据,并通过多维图像处理技术和点云处理技术完成错台识别定位与错台测量。

## 2.1 错台识别定位

错台识别定位过程:首先,对轨道的轮廓数据进行多维图像化处理,自动识别错台;然后,根据获取的错台里程信息自动调整,确认错台定位。

APM 轨道常见工况如图3所示。由图3可见,APM 轨道的实际工况复杂多变,故错台识别干扰因素众多,易遇到数据缺失、干扰物等问题,从而增大错台识别的难度,降低错台识别的准确率。

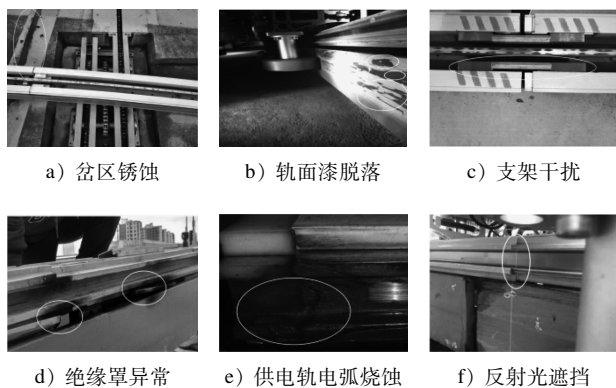


图3 APM 轨道的常见工况

Fig. 3 Common conditions of APM

轨道轮廓数据的处理流程如图4所示。

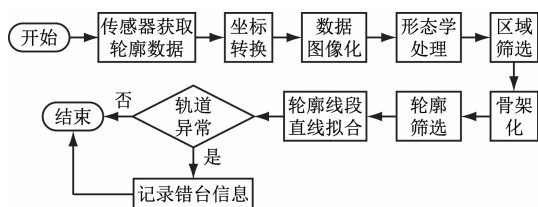


图4 轨道轮廓数据的处理流程图

Fig. 4 Flowchart of the track contour data processing

多维图像化处理后的轨道轮廓数据如图5 a)所示。对于由小部分数据缺失导致的线段不连续,通过形态学处理将图像中线段内的小缝隙弥合,以填补缺失的数据,使轨道线段更完整,处理结果如

图5 b)所示。图5 c)中,孤立跳跃的干扰点和未弥合的小线段会影响轨道错台的识别。因此,以面积为筛选特征进行区域筛选,即将面积小于5像素的连通区域筛选掉,仅保留轨道的主要特征。区域筛选结果如图5 d)所示。

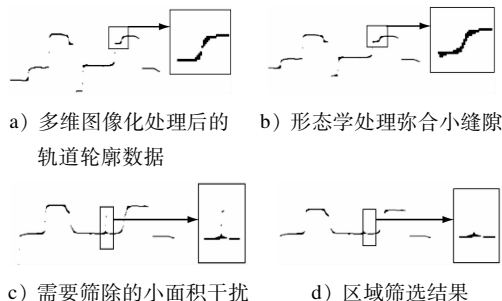


图5 轨道轮廓数据的初步处理

Fig. 5 Preliminary processing of the track contour data

图像自身存在的噪声及线条粗细不均匀等瑕疵都会影响图像的识别,因此需要对图像进行骨架化处理。骨架化前后的图像如图6 a)及图6 b)所示。图像骨架化之后,以长度作为筛选特征,通过图像的轮廓筛选,剔除长度小于10像素的细长区域,轮廓筛选结果如图6 c)所示。最后,通过加权最小二乘法对轮廓线段进行直线拟合,获取轮廓线段的坐标等信息。

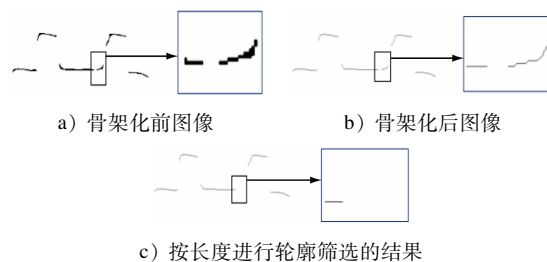


图6 图像的骨架化和轮廓筛选

Fig. 6 Image skeletonization and contour selection

通过一系列处理,去掉了阶跃变化噪声点和干扰物等的影响,仅保留了供电轨的几何特征信息。由此得到的供电轨断面结构为类矩形波结构。根据供电轨断面结构特征,基于拟合得到的轮廓线段数量 $n$ ,对错台识别结果进行判断:

$$p = \begin{cases} 1, & n < 4 \\ 0, & n \geq 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$p$ ——错台判断值, $p=1$ 表示已判断为错台, $p=0$ 表示未判断为错台。

如果 $p=0$ ,则继续判断线段是否为递减的三层

阶梯形(如图 7 a)所示)。在三层阶梯中,设中间层线段的平均高度为  $Z_k$ , 第一层线段的平均高度为  $Z_{k-1}$ , 第三层线段的平均高度为  $Z_{k+1}$ , 第三层线段水平相邻两线段之间的最短距离为  $d_{k+1}$ , 则判断  $p = 1$  的条件为:

$$\begin{cases} 18 \text{ 像素} < |Z_{k-1} - Z_k| < 32 \text{ 像素} \\ 18 \text{ 像素} < |Z_k - Z_{k+1}| < 32 \text{ 像素} \\ 45 \text{ 像素} < d_{k+1} < 65 \text{ 像素} \end{cases} \quad (2)$$

如图 7 b)所示,在轨道接头处若水平两两相邻线段之间的最短距离  $d_k \in (105 \text{ 像素}, 130 \text{ 像素})$ , 则  $p = 1$ 。

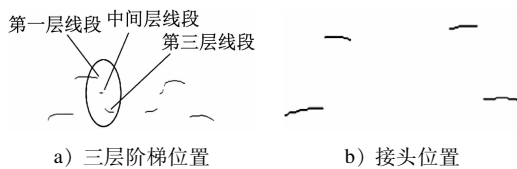


图 7 供电轨错台处轨道断面轮廓线段图

Fig. 7 Line segment diagram of rail section contour at the spot of power supply rail misalignment

通过图像识别算法对轨道断面进行识别。扫描了 811 个轨道断面,含 319 个轨道错台断面和 492 个正常轨道断面,其中第 95、第 98、第 99、第 351、第 798 个断面的识别结果与真实情况不符。由此可知,轨道错台识别仍存在极少数误判。对此,本研究提出在图像识别算法的基础上融合动态数列,通过判断在连续的时间段内图像识别算法识别的轨面状态是否一致,来剔除单个轨道断面的误判,从而有效解决扫描过程中由于数据缺失等造成的孤立断面误判,进一步提高错台识别的准确率。

建立动态数列  $T = \{t_i \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ , 其中  $t_i$  为第  $i$  个时间段的错台识别值,令:

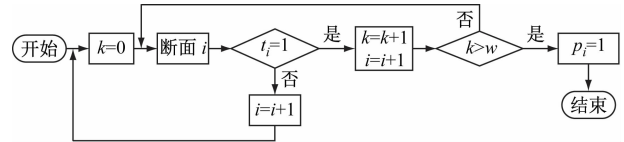
$$t_i = \begin{cases} 1, & \text{断面 } i \text{ 的错台判断阈值 } p_i = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

融合动态数列后的轨道错台识别流程如图 8 所示。

错台准确识别后,错台检测系统根据获取的里程信息,快速进行定位,便于下一步进行错台测量。

## 2.2 错台测量

错台测量:首先,根据定位信息,由线激光传感器对错台前后位置的轨道进行扫描,获取点云数据;然后,对数据进行滤波、平面拟合等处理,进而获得错台值。



注:  $k$  为轨道断面数据连续满足错台条件的次数;  $w$  为轨道连续断面个数的阈值,根据轨道情况取值为 5 个。

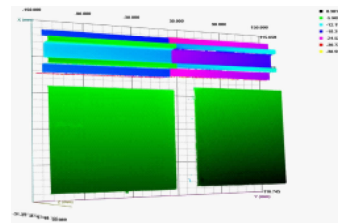
图 8 动态数列下错台识别流程图

Fig. 8 Flowchart of track misalignment identification under dynamic sequence of number

图 9 为供电轨现场图像和获取的点云数据的图像。



a) 轨道现场图像



b) 三维点云数据图像

图 9 供电轨现场图像和点云数据图像

Fig. 9 On-site picture and point cloud data image of power supply rail

通过边缘定位算法识别供电轨边缘,将供电轨的点云数据提取出来。

由于轨面的光泽度、粗糙度等都有可能造成少量光点随机性镜面反射,从而出现噪声点,因此需要对供电轨轨面数据进行双向标准差滤波处理。

沿着车辆行进方向,选取上一平面端部的轨面数据进行平面拟合,作为测量基准面,以下一平面端部轨面中间区域数据的平均值作为测量点。拟合平面的方程为  $ax + by + cz = 1$  (其中  $a, b, c$  为拟合参数),若测量点的坐标为  $(x_M, y_M, z_M)$ , 则有:

$$\Delta d = \frac{|ax_M + by_M + cz_M - 1|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4)$$

## 3 实际线路的试验验证

在上海地铁浦江线三鲁公路站—闵瑞站(以下

简为“三闵区间”)上下行线路中,选取一段包含3个供电轨错台(错台1、错台2、错台3)的线路区段进行轨道错台检测试验,反复测量5次,以验证错台检测的准确性。

三闵区间轨道错台检测试验的测量数据如表1所示。采用高精度激光跟踪仪对数据进行复核,结果如表2所示,其中测量值为5次测量数据的算术平均值。

表1 三闵区间轨道错台检测试验的测量数据

Tab.1 Measurement data of track misalignment detection test between Sanlu Highway and Minrui Road

测量次数	$\Delta d/\text{mm}$		
	错台1	错台2	错台3
1	2.178	0.231	0.324
2	2.008	0.283	0.247
3	1.907	0.291	0.241
4	2.005	0.323	0.231
5	2.083	0.290	0.180

表2 采用高精度激光跟踪仪的数据复核结果

Tab.2 Results of data review using the high-precision laser tracker

错台	$\Delta d$ 的测量值/mm	$\Delta d$ 的跟踪仪数据/mm	差值
错台1	2.036	2.148	0.112
错台2	0.284	0.495	0.211
错台3	0.245	0.340	0.095

由试验结果可见,本文提出的基于多维图像处理技术的错台识别方法能准确识别并定位错台,且错台测量的重复性极差均小于0.500 mm,说明测试结果稳定;与采用高精度跟踪仪测量数据相比,差值小于0.500 mm。测量精度满足表3中的检测要求。

表3 错台检测指标及要求

Tab.3 Indicators and requirements of track misalignment detection

检测项	错台类型	允许值/mm	精度/mm
供电轨	供电轨垂向错台	1.500	0.500

## 4 结语

针对APM新型轨道交通的错台检测,本文基于线激光传感器获取的轨道数据,提出基于多维图像处理技术和点云处理技术的方法对错台进行检测。通过图像处理识别轨道错台,同时融合动态数列,解决了单个轨道断面误判导致错台识别不准的情况,大大提高了错台识别的准确率;通过对三维点云数据进行滤波、平面拟合等处理获取轨道错台值。

在上海地铁浦江线的试验结果表明,本方法能够准确高效地实现错台的识别定位,错台测量的重复性精度小于0.500 mm,与高精度测量数据复核的差值小于0.500 mm,有效解决了错台检测精度差的问题,可以有效指导线路养护维修。

## 参考文献

- [1] 邱鹏,孙思南.自动旅客运输(APM)系统信号系统的设计特点[J].城市轨道交通研究,2022,25(1):216.  
QIU Peng, SUN Sinan. Design features of automated guide rail system APM signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 216.
- [2] 梁俊.广州珠江新城旅客自动输送系统AFC系统设计探讨[J].通讯世界,2017(8):235.  
LIANG Jun. Discussion on AFC system design of Guangzhou Zhujiang new town passenger automatic transportation system[J]. Telecom World, 2017(8): 235.
- [3] 朱蓓玲.从上海轨道交通8号线三期工程车辆选型看胶轮轨道APM系统应用[J].地下工程与隧道,2016(4):25.  
ZHU Beiling. Application study of rubber tired APM system from train selection in third phase project of Shanghai rail transit line 8[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(4): 25.

· 收稿日期:2021-11-29 修回日期:2022-02-17 出版日期:2024-06-10

Received:2021-11-29 Revised:2022-02-17 Published:2024-06-10

· 作者:滕星权,工程师,15671675938@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821