

# 地铁车辆轮对外形尺寸在线检测系统

程中国

(青岛地铁集团有限公司, 266045, 青岛//高级工程师)

**摘要** 在地铁车辆运行过程中, 车轮受环境影响磨损较为严重, 易导致外形尺寸超限。实现轮对外形几何尺寸的自动检测是关系车辆行车安全和正常运营的关键。采用光截图像法, 设计了轮对外形尺寸检测系统, 实现了轮缘高度、轮缘厚度、车轮内距、车轮直径的在线自动测量。该系统采用 LS-SVM 预测模型实现了对地铁车辆车轮磨损趋势的精确预测分析; 并将轮对外形尺寸测量参数结合预测模型运用到轮对检修中, 产生了较好的经济效益。

**关键词** 地铁车辆; 轮对; 车轮踏面; 在线检测; 光截图像法; LS-SVM 预测模型

**中图分类号** U270.331<sup>+</sup>.1

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.09.050

## Online Detection System of Metro Vehicle Wheelset Profile Size

CHENG Zhongguo

**Abstract** Wheels are severely worn out due to environmental impact during metro vehicle operation, leading to profile over-size. Realizing automatic detection of wheelset geometry is the key to safe and normal operation of vehicles. By means of optical section image method, wheelset profile size detection system is designed, realizing online automatic measurement of wheel flange height, wheel flange thickness, wheel inner distance and wheel diameter. LS-SVM prediction model is used in the system to conduct accurate prediction and analysis of wheel wear tendency of metro vehicles. By incorporating wheelset profile size measurement parameters into the prediction model during wheelset overhaul, better economic benefits have been achieved.

**Key words** metro vehicle; wheelset; wheel tread; online detection; optical section image method; LS-SVM prediction model

**Author's address** Qingdao Metro Co., Ltd., 266045, Qingdao, China

地铁车辆运行中轮对承受着车辆自重及载重, 同时还要传递车辆与钢轨间的驱动力和制动力, 致使车轮踏面及轮缘会出现磨损, 易导致外形尺寸超

限, 影响行车安全<sup>[1-2]</sup>。

目前车辆轮对尺寸检测主要分为静态检测和动态检测<sup>[3]</sup>。静态检测工具主要是第四种检查器和轮径尺。动态检测分为两类: 一类是通过镟轮设备在镟轮过程中兼顾的轮对尺寸测量功能进行检测; 另一类是通过轮对外形尺寸在线检测系统<sup>[4-5]</sup>进行检测。本文介绍“轮对外形尺寸在线检测系统”。该系统采用光截图像法对运行车辆轮对尺寸进行在线检测, 实现轮缘高度、厚度、轮对内侧距、车轮直径的自动测量。基于 LS-SVM 预测模型实现对车轮磨损趋势的预测分析, 并与 BP 神经网络算法预测模型进行对比分析。基于尺寸检测系统的数据与 LS-SVM 预测模型的研究成果, 将其运用到车轮经济镟修中, 产生了较好的社会经济效益。

## 1 轮对外形尺寸在线检测系统

### 1.1 系统组成

轮对外形尺寸在线检测系统主要由现场基本检测单元、车辆信息检测单元、轨旁综合数据处理单元及远程数据分析单元组成, 如图 1 所示。

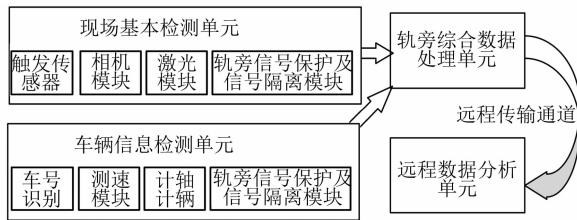


图1 轮对外形尺寸在线检测系统组成结构

### 1.2 轮对外形尺寸在线检测原理

轮对外形尺寸在线检测系统的数据采集主要由分布在轨道两侧的 8 个线光源和相机实现, 检测系统传感器现场布置方式如图 2 所示。车辆经过时, 激光线投射到车轮踏面上, 轨道外侧 LD 投射在车轮的上方, 内侧 LD 投射在车轮的下方, 如图 3 所示。CCD 相机获取上述光截线图像, 并使获取的图像凸显出踏面轮廓线, 如图 4 所示。相机获取到踏

面轮廓曲线后,通过拟合算法,实现内外侧曲线自动拼接合成一条完整的踏面轮廓曲线,系统再将实际完整的踏面轮廓曲线与标准的轮廓曲线进行对比分析,最终计算得出车轮的轮缘高度、厚度、轮对内侧距、车轮直径等参数。车轮外形关键参数如图5所示。

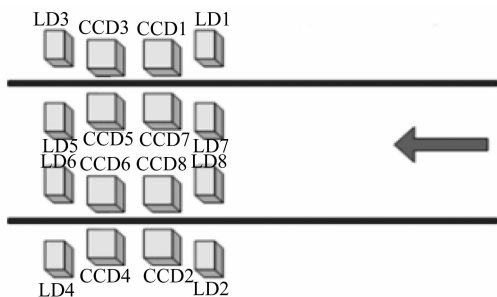


图2 轮对外形尺寸在线检测系统现场布置方式

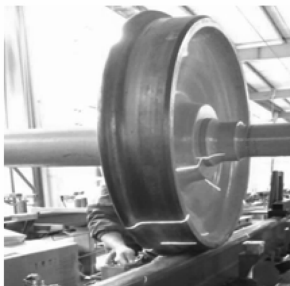
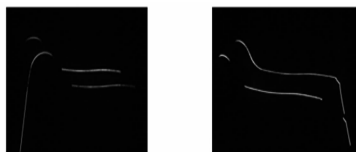


图3 轮对外形尺寸在线检测系统激光线位置



a) 钢轨内侧相机获取 b) 钢轨外侧相机获取

图4 实际踏面轮廓曲线

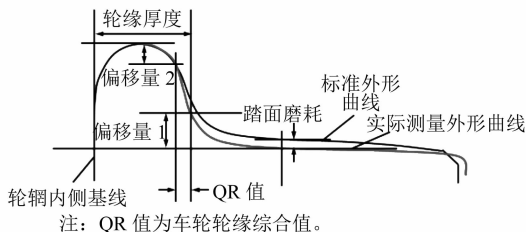


图5 车轮外形关键尺寸

### 1.3 数据展示平台

轨旁综合数据处理单元完成轮对尺寸数据处理后,通过局域网传输至 DCC(车辆段控制中心),传输的信息包含车辆信息及对应车轮的轮对尺寸检测数据。

## 2 数据预测模型及趋势分析研究

### 2.1 LS-SVM 预测模型

最小二乘支持向量机(Least-Squares SVM, LS-SVM)是在 SVM(支持向量机)基础上,通过将限制条件中的不等式约束转变为等式约束,将经验风险值变为偏差的二次方,将复杂的二次规划问题求解转变为常见的线性规划问题求解<sup>[8]</sup>。LS-SVM 改进后的模型计算效率更高,更加适合求解大规模问题,同时得到的训练模型精度也更高。

1) 最小二乘原理:设存在一组实测数据 $(x, y)$ ,且 $x = (x^1, x^2, \dots, x^m)^T \in R^n, y \in R$ ,满足如下一种理论函数:

$$y = f(x_1; w_1, \dots, w_m) \quad (1)$$

其中 $w_i (i=1, \dots, m)$ 是未知待求参数。

为了获取函数 $y = f(x_1; w_1, \dots, w_m)$ 待定参数的最佳取值,根据实际问题,给出另外 $n$ 对实测数据 $(x_i, y_i) (i=1, \dots, n, n \gg m)$ 。使得线性方程组的目标函数:

$$L(w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i; w_1, \dots, w_m))^2 \quad (2)$$

取最小值时的参数 $w_i (i=1, \dots, m)$ ,这类称为最小二乘法问题。用几何语言也可称作最小二乘拟合<sup>[9]</sup>。

公式(2)中,实测数据对中的函数值与公式(1)中的理论函数差值称为残差。即:

$$r_i(w) = y_i - f(x_i; w_1, \dots, w_m) (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

其中, $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T \in R^m$ 。为了提高拟合的准确率,一般采用各个实测数据求残差,计算他们的加权平方和作为最终的函数,即求参数 $w_i$ 使公式(4)取得最小值。

$$L(w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^n \gamma_i r(w)_i^2 = \sum_{i=1}^n \gamma_i (y_i - f(x_i, w_1, \dots, w_m))^2 \quad (4)$$

其中, $\gamma_i > 0$ 为在点 $(x_i, y_i)$ 处的权因子。该权值 $\gamma_i$ 一般解释为该测量点在实际中出现的频数。

2) 最小二乘支持向量机:用最小二乘法建立最优化模型,没有不敏感损失函数,计算难度降低。其优化模型如下:

$$\begin{cases} \min_{w, e} J(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ \text{s.t. } y_i = w^T x_i + b + e_i, \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $C$  为正则化参数(惩罚因子),  $e$  为实际值与回归函数间的误差;  $w$  为权值向量,  $b$  为偏置向量。为求最优化问题的解, 构造一个拉格朗日函数, 其中  $a_k$  为拉格朗日乘子:

$$L(w, b, e, a) = J(w, e) -$$

$$\sum_{k=1}^N a_k \times \{w^T \varphi(x_k) + b + e_k - y_k\} \quad (6)$$

根据最优化问题的 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 条件, 将式(6)对  $w, b, e, a_k$  求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=0}^n a_i x_i \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=0}^n a_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 \Rightarrow a_k = C e_k \\ \frac{\partial L}{\partial a_k} = 0 \Rightarrow w^T x_k + b + e_k - y_k = 0 \quad k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

消除变量  $w, e$ , 即可得到式(8):

$$\begin{bmatrix} 0 & \vec{1}^T \\ \vec{1} & \Omega + C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\Omega \in R^{n \times n}$ , 且  $\Omega_{ij} = x_i^T x_j, i, j = 1, \dots, n, I$  为  $\gamma_i$  阶单位矩阵,

$$\vec{1} = (1, \dots, 1)^T \in R^n,$$

$$a = (a_1, \dots, a_n)^T, y = (y_1, \dots, y_n)^T.$$

因为方程组(8)是非奇异矩阵, 可以求出  $a, b$  的解。因此, 得到最小二乘支持向量机的回归估计函数:

$$f(x) = \sum_{k=1}^N a_k K(x_k, x_l) + b \quad (9)$$

其中,  $K(x_k, x_l)$  为满足 Mercer 条件的核函数, 作用是从原始空间中抽取特征, 映射到高能特征空间, 解决原始空间线性不可分的问题。综合上述公式推导分析, 公式(9)即为本文预测轮对磨损趋势需要用到的函数模型。

## 2.2 车轮磨损趋势分析

利用青岛地铁 2 号线 1 年内的轮对历史检测数据作为训练样本进行 LS-SVM 模型训练, 对最近一次检测数据进行预测。为了验证 LS-SVM 模型的精度, 选取了 BP 神经网络预测模型进行对比, 两种预测模型预测结果如图 6~7 所示。

选取前 300 个样本为模型训练样本数据, 最后 8 次数据为预测值。车轮直径 LS-SVM 的预测值平

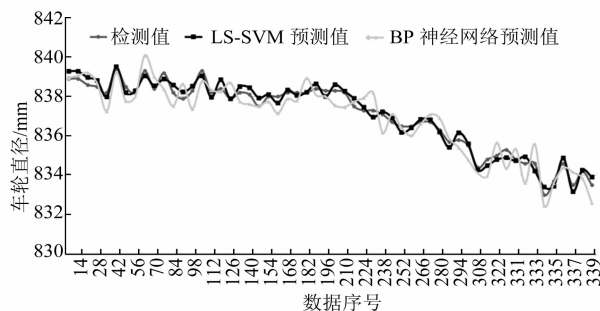


图 6 利用 LS-SVM 和 BP 神经网络预测车轮直径

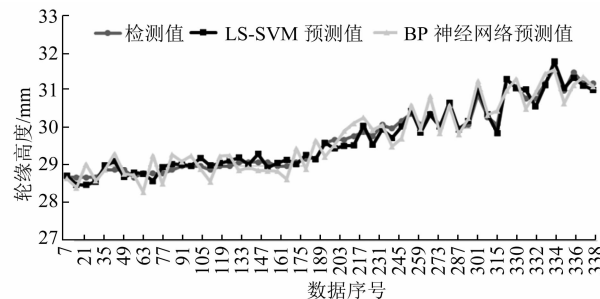


图 7 利用 LS-SVM 和 BP 神经网络预测轮缘高度

均误差为 0.3 mm, BP 神经网络的预测值平均误差为 0.5 mm。轮缘高度 LS-SVM 的预测值平均误差为 0.1 mm, BP 神经网络的预测值平均误差为 0.2 mm。因车轮磨损存在一定的周期重复性。本文目前预测基于 1 年周期内的时间预测, 该周期内车轮直径从 839.4 mm 磨损到 833.0 mm, 轮缘高度从 28.7 mm 增长到 31.9 mm, 车轮磨损特征均体现明显。基于 1 年周期的特征可扩展至更长周期的车轮尺寸参数预测。因此, 本文研究的 LS-SVM 预测模型对于车辆轮对外形尺寸预测具有较好的长周期适应性和较高的精度。

## 3 轮对外形尺寸在线检测系统实际运用

青岛地铁 2 号线已将上述预测结果用来指导车辆轮对检修。在轮对外形尺寸在线检测系统运用之前, 传统车轮检修需要人工使用第四种检查器进行测量, 完成 1 列列车测量需要 2 人工作 4 h, 平均误差约 0.5 mm。采用轮对尺寸在线检测系统后, 轮缘高度、厚度测量精度约 0.2 mm, 轮对内侧距、车轮直径测量精度约 0.5 mm, 完成 1 列列车所有车轮的测量仅需 3 min, 测量效率和质量得到明显提高。

在轮对尺寸在线检测系统基础上, 增加磨损趋势预测模型, 可有效规划轮对总体的使用寿命, 提前预测和规划轮对镟修周期。例如: 在正常情况下, 列车车头和车尾的轮对磨损较为严重, 在镟修

过程中因考虑到镟修模型,须对整列车进行统一规格的镟修,这导致列车中间部分的车轮浪费严重。借助于预测模型后,可实现列车两端车轮轮对与中间车厢轮对不同的寿命周期预测,从而采用两种镟修模型,避免列车中间车厢的轮对重度镟修,可延长中间车厢轮对的使用周期。

## 4 结语

本文介绍了车辆轮对外形尺寸在线检测系统的组成、尺寸检测原理和数据展示平台。同时采用LS-SVM算法对车轮直径、轮缘高度值的变化趋势进行了预测分析,用来指导轮对检修,在实际生产中发挥了较大的作用。因现场的数据训练样本仍然较少,该系统的预测精度还有进步的空间,后续

还需加强对现场实际运用数据的搜集以及训练模型的完善。

## 参考文献

- [1] 陈静,禹建伟,谭志忠. 地铁车辆轮对动态检测系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2014(7): 82.
- [2] 王长庚,邢宗义,黄文. 一种新的地铁车辆轮对尺寸在线检测系统[J]. 铁路计算机应用,2016(5): 62.
- [3] 张渝,彭建平,杨凯,等. 轮对外形轮廓检测中摄像机系统的标定算法[J]. 光电工程,2009(7): 112.
- [4] 丁克良,沈云中,欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010(1): 44.
- [5] 王福昌,曹慧荣,朱红霞. 经典最小二乘与全最小二乘法及其参数估计[J]. 统计与决策,2009(1): 16.

(收稿日期:2019-09-17)

## “维珍超级高铁”发布列车概念视频

维珍超级高铁宣称,公司尖端技术可以让乘客以每小时 670 英里(约合 1 078 km)的速度“安全、舒适、安静”地前进。当地时间 8 月 23 日,维珍超级高铁发布的一段视频解释乘客舱借助车载磁悬浮发动机在不接触轨道的情况下滑行,并通过电力驱动在近乎真空的管道中不断加速。据维珍超级高铁称,公司的专利设计使超级高铁乘客舱的速度比目前速度最快的磁悬浮列车要快几倍。一位公司代表称:“它展示了我们的‘智能设备、安静运行’商业系统架构的细节,包括从未公开展示过的车载悬浮发动机、电力推进发动机和大功率电池。”维珍超级高铁表示,这是一种高效、经济、可持续的交通方式,能够实现零碳排放。如果真能达到 1 078 km 的时速,那将是目前普通列车时速的 10 倍,高铁时速的 3 倍,甚至比大多数商用飞机都要快。与商用飞机不同,维珍超级高铁称这种交通方式的直接碳排放为零。公司称,超级高铁吊舱将成组运行,但不像传统火车车厢那样连接在一起,也不必驶向同一个目的地。每个吊舱可容纳 28 名乘客。维珍超级高铁解释称,“就像一辆汽车离开高速公路匝道一样,在车队继续前进时,某一吊舱可能会脱开编队。”而这种快速的“按需”运输模式“每小时能够向不同方向运送成千上万名乘客”。2020 年 11 月,维珍超级高铁联合创始人乔什·吉盖尔(Josh Giegel)和乘客体验总监萨拉·卢钦(Sara Luchian)在内华达州沙漠的测试设施中进行了首次测试。整个行程只花了大约 15 s,吊舱只加速到每小时略高于 160 km。2013 年,埃隆·马斯克(Elon Musk)在一份开源白皮书中阐述了超级高铁系统的工作原理。一年后,曾在马斯克麾下 SpaceX 公司工作的吉盖尔与理查德·布兰森(Richard Branson)所领导的维珍集团共同创立了“维珍超级高铁”。吉盖尔预计,维珍超级高铁最早将在 2027 年投入商业运营。

(摘录自 2021 年 8 月 27 日上海新闻综合频道 STV“上海早晨”节目)

