

机车车辆车轮多边形检测算法研究

高德阳¹, 解亮¹, 王玉龙¹, 戴永刚¹, 谢宣¹, 贾军战¹, 陆波¹,
王栋¹, 赵波²

¹中国铁路兰州局集团有限公司, 甘肃 兰州

²成都铁安科技有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月24日

摘要

车轮不圆度作为机车车辆车轮运行安全检测的最重要的参数之一, 其是否能被准确的检出决定着列车的行车安全。文章介绍了一种机车车辆领域的非圆度检测系统, 针对周期不圆的特殊情况 - 多边形做了详细的研究。该系统通过测量车轮的轮缘高度变化量, 进而得到反应车轮不圆度状况的波形, 针对波形中电噪声及钢轨磨损及安装偏差等起伏干扰, 提出基于传统谱减算法的改进方法, 对波形进行去噪预处理, 去噪效果明显, 降低了多边形漏报风险, 提高了多边形检测准确率。

关键词

机车车辆, 接触测量法, 车轮多边形, 谱减算法

Algorithm Research on Locomotive Wheel Polygon Detecting

Deyang Gao¹, Liang Xie¹, Yulong Wang¹, Yonggang Dai¹, Xuan Xie¹, Junzhan Jia¹, Bo Lu¹,
Dong Wang¹, Bo Zhao²

¹China Railway Lanzhou Group Co. Ltd., Lanzhou Gansu

²Chengdu Railway Safety Science & Technology Co. Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Nov. 6th, 2023; accepted: Jan. 16th, 2024; published: Jan. 24th, 2024

Abstract

The out of roundness of wheels is one of the most important parameters for the safe operation of locomotive and vehicle wheels, and whether it can be accurately detected directly determines the safety of train operation. This article introduces a non circularity detection system in the field of

文章引用: 高德阳, 解亮, 王玉龙, 戴永刚, 谢宣, 贾军战, 陆波, 王栋, 赵波. 机车车辆车轮多边形检测算法研究[J]. 交通技术, 2024, 13(1): 60-66. DOI: 10.12677/ojtt.2024.131007

locomotives and vehicles, and conducts detailed research on the special case of periodic non circularity—polygons. The system measures the height variation of the wheel flange to obtain a waveform that reflects the out of roundness of the wheel. In response to fluctuations such as electrical noise, rail wear, and installation deviation in the waveform, an improved method based on traditional spectral subtraction algorithm is proposed to preprocess the waveform for denoising. The denoising effect is significant, reducing the risk of polygon miss reporting, and improving the accuracy of polygon detection.

Keywords

Locomotive Wheel, Contact Measurement, Wheel Polygon, Spectral Subtraction Algorithm

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

铁机辆〔2020〕90号文中定义车轮多边形是指车轮表面沿圆周方向出现的周期性磨损。车轮多边形是车轮不圆顺的一种特殊表现形式，并规定1~13阶称为低阶多边形，14阶及以上称为高阶多边形。机车车辆领域中，轮对作为车辆的载重部件，车轮若存在多边形会产生周期的轮轨作用力，并引起轮轨及车辆减振部件受力激增，给行车安全带带来重大隐患。车轮多边形目前已是动车运维及日常检修重要指标，在机车车辆日常安全检测中也必不可少，如何准确快速的检测出不圆度超限车轮，做到车轮多边形及时报警检修，关系着车辆行车安全和运营效率[1]。

目前对于车轮多边形检测的方法主要包括顶转轮测量、车载检测、轨边检测三种类型[2]。顶转轮测量如德国BBM高精度多边形测量设备为静态测量，对转动平台要求高，对车轮监测频率低；车载间接地测量多边形产生的轮轨振动，准确性不高且安装量大。轨边非接触式检测，如德国DB、澳大利亚TrackIQ研制的系统，目前已进入国产化阶段(铁科院TPDS)。同车载一样为间接测量，要求较高的过车时速，且振动干扰大[3][4]。

如在一级修检测棚的擦伤检测设备上实现多边形接触式检测，则可进行多边形日常监测，能保证多边形检出的及时性及准确性，且检出后能立即回库进行检修。

2. 检测原理介绍

其基本原理是：通过测量车轮轮缘下垂量的变化，实现对踏面擦伤及磨损的测量，以此来确定车轮的不圆度。如图1所示，车轮踏面受损后，其圆周的半径将减小 Δh ，也就使得轮缘顶点相对于钢轨的位置将下降 Δh 。上述变化信息包含了车轮踏面不圆度的信息。

如图2所示，接触式测量法使用检测杆来测量轮缘顶点所在圆周(假设半径为 R)与踏面滚动圆圆周(假设半径为 r)的高度差，会产生如图3所示的U字形波形，U字形波形的高度 $h = R - r$ 。而当踏面存在不圆时，检测杆高度变化量 Δh 则反应了踏面的起伏当量，如图4所示为U字形波形底部放大，可看出单个车轮经过单个杆的局部起伏 Δh 及对应当量(纵坐标单位mm)。

图4为车轮存在多边形的U字底部局部放大波形。根据不圆度的定义(不圆度可以定义为滚动圆处，最大半径和最小半径差： $\max\Delta h$)，不圆度(包括多边形)只与图4的局部起伏有关，故检测分析只使用U字形波形底部。

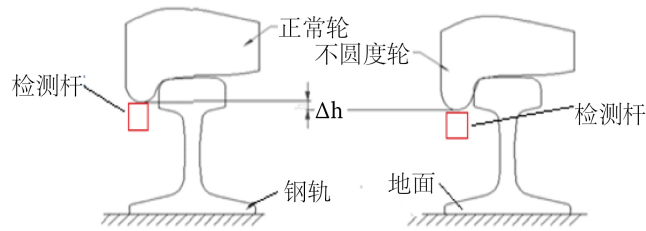


Figure 1. Schematic diagram of the vertical height change of the wheel when the wheel is not round

图 1. 车轮不圆下车轮的垂向高度变化示意图

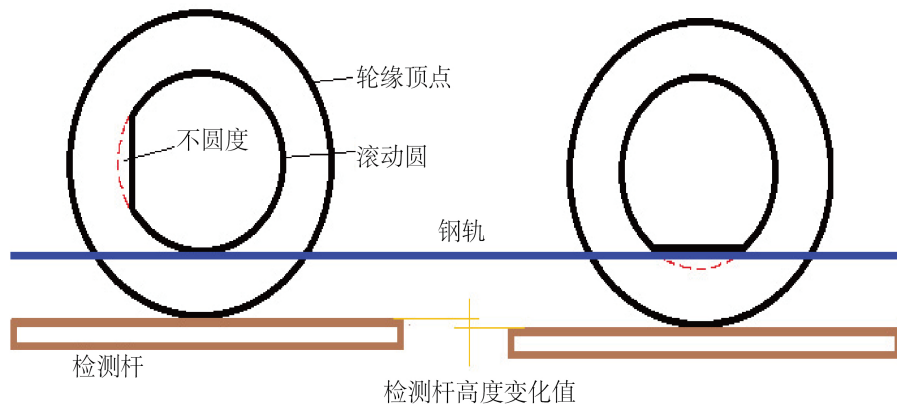


Figure 2. Principle of wheel out-of-roundness detection

图 2. 车轮不圆度检测原理

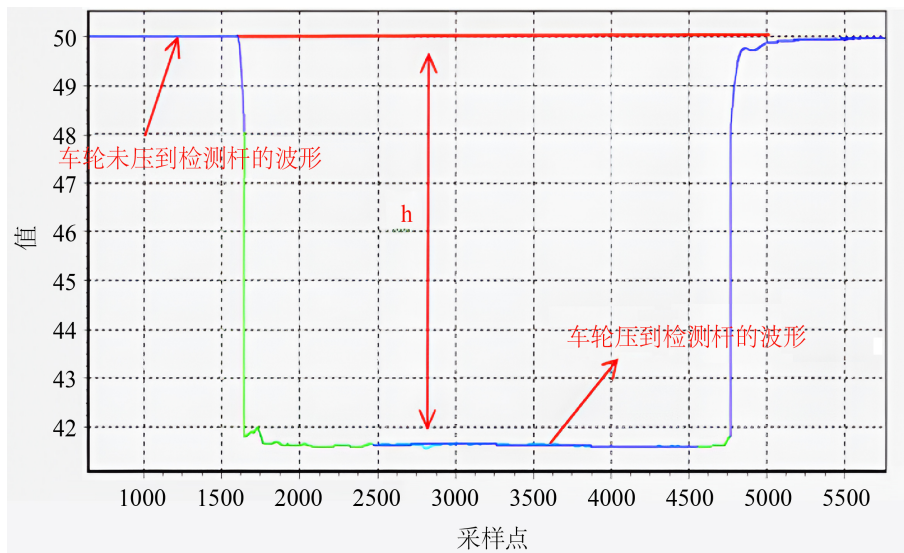


Figure 3. Original waveform of a single detection rod

图 3. 单根检测杆的原始波形

“轮对不圆度动态检测系统”安装在整体道床上，如图 5 所示，按照过车方向，钢轨内侧分别有 8 个检测杆，其中过车方向右侧为 CS1、CS2、CS3、CS4 四根检测杆，左侧由 CS5、CS6、CS7、CS8 四根检测杆。通过单侧 4 根杆的 U 字形底部段拼接，即可得到一个车轮整圈的起伏波形。

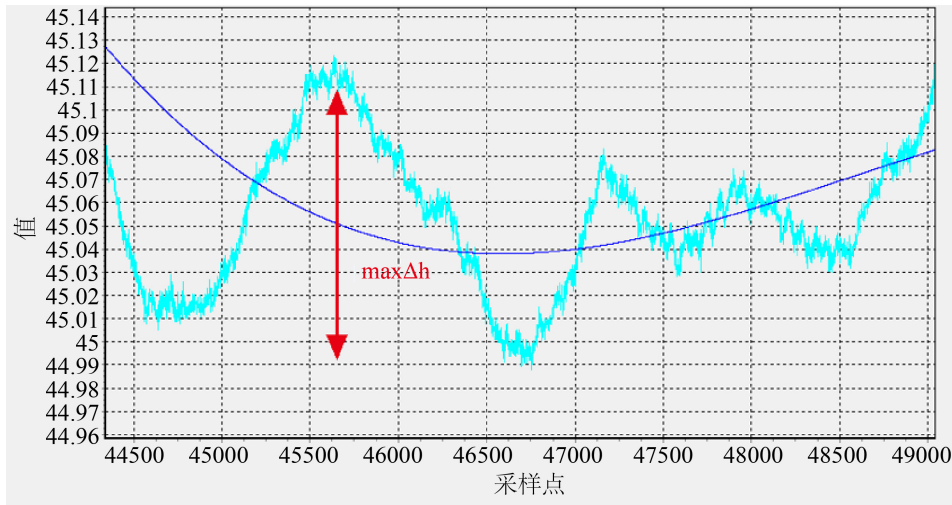


Figure 4. Polygonal waveform of a single detection rod
图 4. 单根检测杆的多边形波形

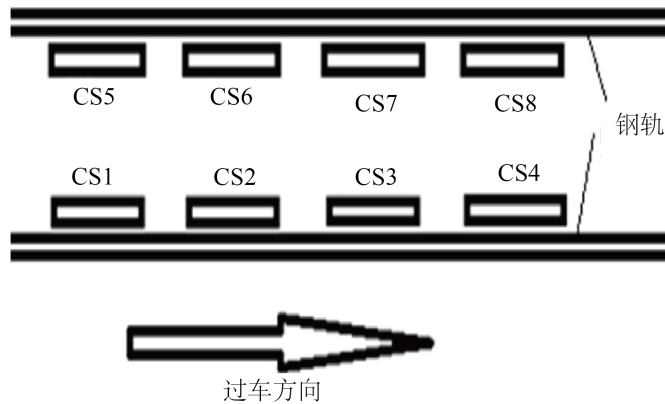


Figure 5. Contact measurement method detection rod layout diagram
图 5. 接触式测量法检测杆布局图

3. 谱减算法的改进

谱减算法(Spectral Subtraction)是最早出现的语音增强算法之一, 由于实现简单且实时性较好, 获得了广泛的应用。它假设语音和噪声是加性混合, 且噪声是缓慢变化的, 通过在静音段估计和更新噪声频谱, 从带噪语音谱中减去噪声来增强语音[5] [6]。

假设估计的噪声的幅度谱为 $\hat{D}(\omega)$, 则降噪后的语音信号谱可以表示为:

$$\hat{X}(\omega) = (|\hat{Y}(\omega)| - |\hat{D}(\omega)|) e^{j\varphi_y(\omega)} \quad (1)$$

其中, $\hat{X}(\omega)$ 为降噪后信号, $\hat{Y}(\omega)$ 为原始信号, ω 为信号相位角。

信号的幅度谱总是非负的, 因此要做一下保护, 即:

$$|\hat{X}(\omega)| = \begin{cases} |\hat{Y}(\omega)| - |\hat{D}(\omega)|, & \text{if } |\hat{Y}(\omega)| > |\hat{D}(\omega)| \\ 0, & \text{if } |\hat{Y}(\omega)| \leq |\hat{D}(\omega)| \end{cases} \quad (2)$$

上述为传统的幅度谱减算法, 当处理接触式擦伤波形时, 如图 4 可知下压波形除了车轮多边形导致

的局部起伏波形外,还存在低频起伏偏差,该低频起伏偏差由钢轨上表面不平顺磨耗、擦伤杆机械安装轻微偏斜等非车轮因素导致。此外,擦伤波形还存在机车高压部件电干扰等。使用谱减算法是为了滤除上述干扰成分,而传统的幅度谱减算法中对噪声进行估计再相减的方式,只能估计出电干扰一类与擦伤起伏波形差异及统计特征偏差大的噪声,故不太适用于上述擦伤波形存在的干扰滤除场景。

针对擦伤波形干扰特征,如除高频电干扰毛刺等,钢轨磨耗起伏及擦伤杆机械安装轻微偏斜导致的低频起伏波形,理论上在每个车轮的U字形下压波形中均固定不变。特针对此特征进行算法改进设计,将估计的噪声的幅度谱 $\hat{D}(\omega)$ 替换为所有车轮下压波形的幅度谱的中值幅度谱,中值幅度谱即每个 ω 对应的幅度为单侧所有车轮在该 ω 对应的所有幅度的均值组成的中值幅度谱(如式3所示),最后同公式1及公式2计算每个车轮幅度谱分别减去所有车轮计算的中值幅度谱,实现改进的幅度谱减算法。此方法即可滤除频率成分相同的电噪声,也可滤除同一个擦伤杆所有轮波形中起伏相同的钢轨磨耗及安装偏差,以实现高精度检测。

$$\hat{D}(\omega)_{\text{new}} = \text{median}(\hat{Y}_{\text{wheel}}(\omega)) \quad (3)$$

其中, $\hat{D}(\omega)_{\text{new}}$ 为改进算法中噪声估计,即为中值幅度谱, $\hat{Y}_{\text{wheel}}(\omega)$ 为同一根杆所有车轮的幅度谱, wheel为车轮序号。

如图6所示为一例多边形车轮案例的原始单杆波形滤波前后对比。图6(a)的原始波形中含明显毛刺电噪声及低频起伏噪声,无法分辨是否含有多边形成分,容易造成车轮多边形漏报。经过本文改进谱减算法滤波后,如图6(b)所示,得到干净的多边形波形。

4. 多边形粗糙度计算

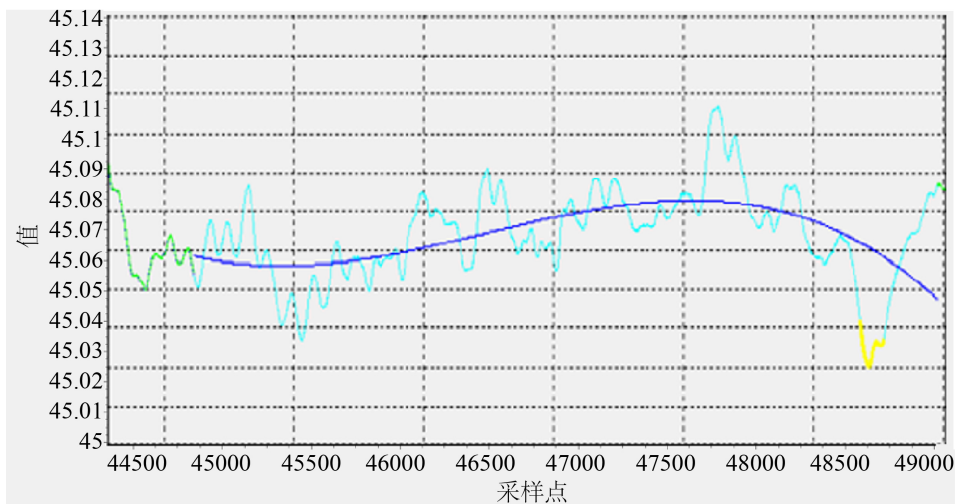
参考标准 ISO 3095:2005,也是国内动车及机动车辆车轮不圆度指标运用的公式[7]:

车轮粗糙度水平 L_r^k 定义如公式(4),单位为dB re 1 μm

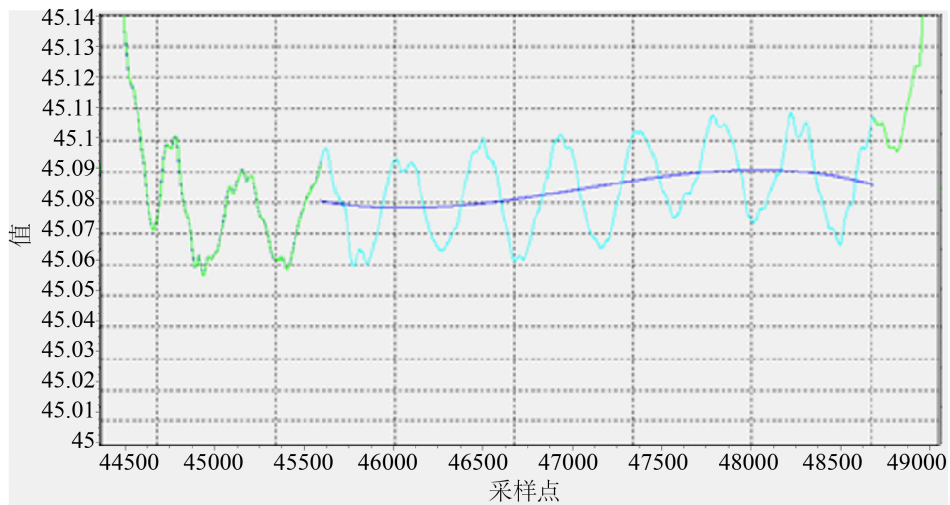
$$L_r^k = 10 \times \log_{10} \left(r_k^2 / r_{\text{ref}}^2 \right) \quad (4)$$

式中, r_k^2 是车轮不圆度波形转频域后在1/3倍频程 k 中进行量化的值。 r_{ref}^2 为车轮粗糙度的参考值(1 μm 不圆度波形转频域后在1/3倍频程 k 中进行量化的值)。在国际标准单位下频带中心波长为:

$$\lambda_k = 0.01 \times 10^{k/10}, \quad k = -10, -9, \dots, 14, 15 \quad (5)$$



(a) 原始波形



(b) 改进谱减算法滤波后

Figure 6. Original single-pole polygon wheel waveform before and after filtering
图 6. 原始单杆多边形车轮波形滤波前后

在每个 $1/3$ 倍频程中将所得的窄带频谱幅值的平方再求和，并除以计算点数即可获得 r_k^2 。

图 7 为一例 19 阶多边形波形在极坐标下的展示。经过上述公式计算得到图 8 粗糙度谱，其中横坐标为多边形阶次，纵坐标为粗糙度幅值，单位 dB。可看出 19 阶处有明显超限波峰，表明该车轮存在 19 阶多边形。

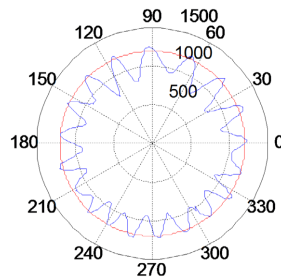


Figure 7. Polar coordinates
图 7. 极坐标

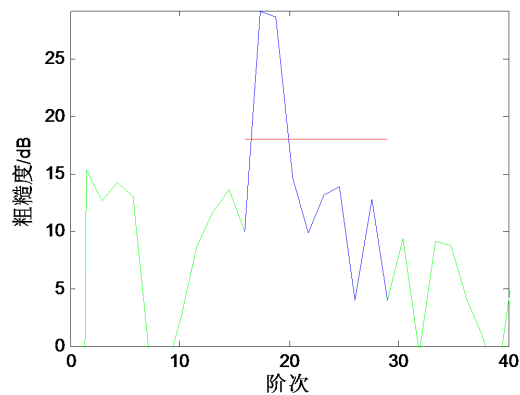


Figure 8. Roughness spectrum-peak at 19th order
图 8. 粗糙度谱-峰值在 19 阶

5. 结论

轮轨关系一直是国内外学者关注的热门话题,而如何实现定量的检测车轮多边形,是铁路安全检测的重要课题。本文以接触式测量法的擦伤检测系统数据为研究对象,开展多边形检测的深入研究,特别是针对擦伤工况的干扰问题,如电噪声、钢轨不平顺及擦伤杆与钢轨不平行等带来的干扰,导致无法分辨是否含有多边形成分。基于干扰特性,结合多个车轮波形,提出了谱减算法的改进方法。

经上百趟过车数据验证,有较好的效果,多边形实车轮检测波形使用此改进滤波后能得到干净的多边形波形并准确检出(本文中均为实车波形),表明本文方法提高了实际运用中多边形检测的准确性及当量精度。本文算法无论对接触式擦伤系统或对于其他技术路线的多边形检测系统,在提高检测车轮多边形当量及报警准确率上均具有较好的参考作用。

基金项目

兰州局集团公司科技研究开发计划课题(LZJKY2023009-2)。

参考文献

- [1] 金学松, 吴越, 梁树林, 温泽峰. 车轮非圆化磨损问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 1-14.
- [2] 王媛媛. 擦伤信号的时频分析研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [3] 杨凯. 车轮踏面擦伤及不圆度检测技术的研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015: 101-102.
- [4] 张庆, 赵延安. 铁路车辆轮对轴承不解体检测系统[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 65-69.
- [5] 武鹏鹏, 赵刚, 邹明. 基于多窗谱估计的改进谱减法[J]. 现代电子技术, 2008, 31(12): 150-152.
- [6] 林琴, 张道信, 吴小培. 一种基于改进谱减法的语音去噪新方法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(7): 63-66.
- [7] Johansson, A. (2006) Out-of-Round Railway Wheels-Assessment of Wheel Tread Irregularities in Train Traffic. *Journal of Sound & Vibration*, **293**, 795-806. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.048>