

文章编号:1671-1637(2016)02-0037-09

## 高速铁路轨道几何不平顺改进模糊消刺方法

刘金朝,黎国清,孙善超,赵 钢,郭剑峰

(中国铁道科学研究院 基础设施检测研究所,北京 100081)

**摘要:**根据高速铁路轨道几何不平顺毛刺异常值突然变化的特性,设计了改进模糊消刺方法,将差分突然增大或变小的点定义为毛刺异常值的起点,将与起点相近的差分反向突然变化的点定义为毛刺异常值的终点,选取包含毛刺异常值的最小区间的两个端点为插值点,用其近似线性插值代替原来的毛刺异常值。按照单位分解原理构造隶属度函数,并通过增加预判断,避免数据点正常时计算向前差分、规则激发度量函数和模糊基函数。计算结果表明:改进方法的计算精度与原模糊滤波方法相同,但当计算长度大于500 km时,计算时间小于原来的1/300,它更适合在线实现;利用改进方法对包含毛刺异常值的模拟轨道几何不平顺信号进行消刺处理,滤波后的信号与解析信号的误差小于 $10^{-3}$ ;利用改进方法不但能准确识别毛刺异常值的位置并自动修复,而且能完整保留道岔处大轨距和大轨向等有用信息。

**关键词:**铁道工程;轨道几何不平顺;毛刺异常值;模糊滤波方法;单位分解原理;有序中值滤波方法  
**中图分类号:**U212.24      **文献标志码:**A

### Improved fuzzy method of removing abnormal spike data from track's geometric irregularity of high-speed railway

LIU Jin-zhao, LI Guo-qing, SUN Shan-chao, ZHAO Gang, GUO Jian-feng

(Infrastructure Inspection Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the mutation property of abnormal spike data for track's geometric irregularity of high-speed railway, an improved fuzzy method of removing abnormal spike data was designed. The point with unexpectedly increasing or decreasing forward difference was defined as the starting point of abnormal spike data, the following point being close to the starting point and with reversely changing forward difference was extracted as the end point of abnormal spike data, and the abnormal spike data were removed and replaced by the linear interpolation between the two endpoints of the minimum interval including the abnormal spike data. The membership functions were constructed by using the unit decomposition principle, and a pre-judgment was proposed to avoid calculating the forward differences, the functions of firing degree of rules and the fuzzy basis functions when the track geometry data were normal. Calculation result shows that the improved method has the same accuracy as the previously used fuzzy filter method, but its computation time is less than 0.33% of the original one when the computation distance is longer than 500 km, so it is more easily achieved online. The errors between the analog signals and the measured track geometry irregularities are less than  $10^{-3}$  when the improved method is used for detecting and removing the abnormal spike data. The improved method is able to not only accurately identify the locations of abnormal spike data and

收稿日期:2015-11-13

基金项目:国家973计划项目(2013CB329406);国家国际科技合作专项项目(2015DFA81780);中国铁道科学研究院基金项目(2014YJ056)

作者简介:刘金朝(1971-),男,湖南常宁人,中国铁道科学研究院研究员,理学博士,从事铁路检测数据分析与数值仿真研究。

automatically restore the signals, but also retain useful information such as the large alignments and gauges around the switches. 1 tab, 26 figs, 25 refs.

**Key words:** railway engineering; track geometry irregularity; abnormal spike data; fuzzy filter method; unit decomposition principle; ranked order mean filter method

**Author resume:** LIU Jin-zhao(1971-), male, researcher, PhD, +86-10-51893555, liujinzhao\_2010@sina.com.

## 0 引 言

利用轨道几何检测数据可以及时发现轨道几何病害,确保高速列车安全可靠运行,并为轨道调整提供理论依据。轨道几何检测系统采用激光扫描和图像处理等技术,按照惯性基准原理,对位移、加速度和角速度信号进行滤波、补偿和合成,得到轨距、高低、轨向、水平等几何不平顺参数,检测精度可以达到  $0.1 \text{ mm}^{[1-2]}$ 。

安装有轨道几何检测系统的综合检测车或轨道检测车在运行过程中,不可避免受到车辆振动、天气、温度变化等干扰,给检测结果的精度带来影响。通过振动和温度补偿,可以有效提高轨道检测数据的精度。外界阳光反射、传感器和数据传输误差、道岔处激光偏离正常检测点、图像干扰等原因,会导致铁路轨道几何不平顺检测数据中包含毛刺异常值。毛刺异常值产生局部异常大值,容易对轨道状态形成错误的超限判断,因此,应在超限判断与计算广义能量指数、轨道质量指数、轨道谱等状态指标之前对其进行处理。

通常有人工和自动 2 种处理轨道几何数据中的脉冲噪声的方法。人工方法主要借助专家多年积累的经验,只能离线完成,其经验不能直接移植到车上的轨道几何检测系统中。车辆上的检测人员为了实时跟踪和编辑几何检测数据中的脉冲噪声,需要花费大量的时间和精力。此外,不同的检测人员的经验和水平不同,对超限大值和脉冲噪声的分辨能力存在较大差别,以致出现不同检测人员可能给出不同的诊断和处理结果。可以看出,在车辆上依靠人工剔除脉冲噪声存在效率低下和评判结果多样性的问题。

自动滤除脉冲噪声是一个比较普遍的问题,在过程控制、声音信号处理<sup>[3-4]</sup>、图像处理<sup>[5-9]</sup>中也经常碰到。近 20 年来,不少学者对其进行了比较深入的研究,并提出了大量的处理方法,如信号振幅或导数突变法、低通滤波法<sup>[10-11]</sup>、中值滤波法<sup>[12-15]</sup>、非线性滤波法<sup>[16-20]</sup>、模糊滤波法<sup>[21-25]</sup>等。对于长度为 1 的单点脉冲噪声,信号振幅或导数突变法是一种简单而有效的方法,但是当脉冲噪声长度大于 1 时,该方

法不能完整地滤除脉冲噪声。

低通滤波法假定脉冲噪声分布在信号的高频段,通过截断高频部分实现对脉冲噪声的滤波。通常来说,脉冲噪声是全频段的,因此,低通滤波法可以减轻脉冲噪声,但不能完整滤除噪声。此外,与中值滤波法是全区域算法一样,它不能分辨被脉冲噪声污染的信号,造成轨道几何检测数据精度下降,对于需要满足高精度的高速轨道几何检测来说,这是难以接受的。中值滤波法<sup>[12-13]</sup>是一种滑动平均法,它在处理脉冲噪声的同时,也对未被污染的信号进行了改变。有序中值滤波法<sup>[14-15]</sup>是中值滤波法的一种改进,它根据信号与其相邻信号的相似性来判断其是否已被脉冲噪声污染,若是,则用其有序中值代替原信号。由于其采用带符号的原信号与有序中值的差值来识别脉冲噪声,因此,它一般只适合处理局部增大的脉冲噪声,对于局部减小的脉冲噪声的处理可能出错。在声音信号中这种情况一般不会出现,而在轨道几何数据中却大量存在。

脉冲噪声的非线性滤波法虽然可以有效地提高处理精度,但其巨大的计算量让人难以接受。Itagaki 提出了一种用于图像脉冲噪声处理的自适应滤波方法<sup>[16]</sup>,通过多步迭代来提高信号的信噪比;Di Claudio 等在进行信号谱密度估计时,提出采用优化方法来降低脉冲噪声的影响<sup>[20]</sup>。铁路里程长,轨道几何数据量大,而且实时性要求高,非线性滤波法很难满足轨道几何数据脉冲噪声处理的需要。

Naso 等引入 5 点模糊格式来诊断和滤除轨道几何数据中的脉冲噪声,通过去模糊化得到脉冲噪声的长度和系统增益系数,并利用包含脉冲噪声的最小区间的 2 个端点的近似线性插值来代替脉冲噪声的值<sup>[21]</sup>。与多分辨分析的小波基<sup>[10-11]</sup>选取中碰到的问题类似,采用不同的模糊规则和隶属度函数,将得到不同的脉冲噪声的长度和系统增益系数。哪个隶属度函数是最优的,没有统一的判别依据,工程人员一般依靠经验和多次尝试进行选取。此外,模糊滤波器每一个点都需要计算规则激发度量函数和模糊基函数,计算量将随信号长度的增加而呈线性增大。

毛刺异常值的变化过程可以描述为信号首先突然增大或变小,然后稳定变化,最后又突然减小或变大。中间稳定变化的过程较短,对于轨道几何数据来说,持续的长度一般少于 2 m。基于毛刺异常值的数学特征,本文提出检测和处理轨道几何数据中的毛刺异常值的改进模糊消刺方法,它的计算精度与模糊滤波方法相同,但是计算时间不到模糊滤波方法的 1/300;将差分突然增大或变小的点定义为毛刺异常值的起点,与起点最近的差分突然减小或变大的点定义为毛刺异常值的终点,它们的差就是毛刺异常值的长度;最后,选取包含毛刺异常值的最小区间的 2 个端点为插值点,用其近似线性插值代替原来的毛刺异常值。

## 1 模糊滤波方法

记包含毛刺异常值的离散轨道几何不平顺数据为  $x_i$ ,滤波之后的信号为  $f_i, i=1,2,\dots,N$ ,其中  $i$  是数据点编号, $N$  是数据序列的长度。5 输入 2 输出 Takagi-Sugeno 模糊系统<sup>[21]</sup>的第  $i$  个输入向量  $\mathbf{u}_i$  和输出向量  $\mathbf{y}_i$  分别为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = (u_{1,i}, u_{2,i}, u_{3,i}, u_{4,i}, u_{5,i})^T \\ \mathbf{y}_i = (H_i, L_i) \\ u_{1,i} = x_i - f_{i-1} \\ u_{2,i} = x_{i+1} - x_i \\ u_{3,i} = u_{2,i+1} \\ u_{4,i} = u_{3,i+1} \\ u_{5,i} = u_{4,i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}_i, H_i, L_i$  分别为第  $i$  个数据点的向前差分向量、滤波器增益和毛刺异常值的长度; $u_{k,i}$  为第  $i$  个数据点的第  $k$  个向前差分。

去模糊化后,系统输出可写成

$$\begin{cases} H_i = \sum_{j=1}^R \theta_{i,j} \zeta_j(\mathbf{u}_i) \\ L_i = \sum_{j=1}^R \varphi_{i,j} \zeta_j(\mathbf{u}_i) \\ \zeta_j(\mathbf{u}_i) = \alpha_j(\mathbf{u}_i) / \sum_{j=1}^R \alpha_j(\mathbf{u}_i) \\ \alpha_j(\mathbf{u}_i) = \prod_{k=1}^5 \mu_{j,k}(u_{k,i}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\theta_{i,j}, \varphi_{i,j}$  分别为第  $i$  个数据点第  $j$  条规则下的系统增益和毛刺异常值的长度的插值系数; $\mu_{j,k}(u_{k,i}), \alpha_j(\mathbf{u}_i), \zeta_j(\mathbf{u}_i)$  分别为第  $i$  个数据点第  $j$  条规则下的隶属度函数、规则激发度量函数和模糊基函数; $R$  为

模糊规则数。

根据系统输出对信号进行校正

$$\begin{cases} f_{i+p} = x_{i+p} + (1 - K_i)(T_i - x_{i+p}) \\ T_i = f_{i-1} + \frac{(x_{i+L_i} - f_{i-1})(p+1)}{L_i+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p$  为  $x_i$  向前的数据点编号,  $p=0,1,2,\dots, L_i-1$ ;  $K_i$  为信号判别系数。

若  $K_i=1$ ,则表明轨道几何数据点没有被污染,保留原来的值;若  $K_i=0$ ,则表明轨道几何数据点已被毛刺异常值污染,并用毛刺异常值前后两点的近似插值代替异常值;若  $0 < K_i < 1$ ,则用输入值和插值的线性组合代替异常值。

综上所述,利用模糊滤波方法诊断和滤除轨道几何数据中的毛刺异常值的算法可描述如下。

- (1)对轨道几何数据点进行循环,  $i=2,3,\dots, N-5$ 。
- (2)按式(1)计算 5 步向前差分,得到  $\mathbf{u}_i$ 。
- (3)按式(1)计算系统的输出,得到  $\mathbf{y}_i$ 。
- (4)若  $L_i > 0$ ,则根据式(3)对包含数据点  $x_i$  被污染区段进行修正,得到  $f_{i+p}$ 。

## 2 改进的模糊消刺方法

不管信号是否被毛刺异常值污染,模糊滤波方法都需要计算向前差分、规则激发度量函数和模糊基函数的函数值,导致较大的计算量。本文将从数学理论上详细分析系统输出与输入的关联关系,探索在保持计算精度的条件下简化计算的原理和方法,以求节省计算时间。

模糊系统的输出与隶属度函数的选取直接相关,这里提出按照单位分解原理<sup>[24-25]</sup>选取隶属度函数  $M_1(x) \sim M_3(x)$ ,定义如下

$$\begin{cases} M_1(x) = \begin{cases} \frac{C_2+x}{C_2-C_1} & -C_2 < x \leq -C_1 \\ 1 & -C_1 < x \leq C_1 \\ \frac{C_2-x}{C_2-C_1} & C_1 < x \leq C_2 \\ 0 & C_2 < x \end{cases} \\ M_2(x) = \begin{cases} \frac{x-C_1}{C_2-C_1} & C_1 < x \leq C_2 \\ 1 & C_2 < x \\ 0 & x \leq C_1 \end{cases} \\ M_3(x) = \begin{cases} \frac{C_1+x}{C_1-C_2} & -C_2 < x \leq -C_1 \\ 1 & x \leq -C_2 \\ 0 & -C_1 < x \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $C_1, C_2$  为预先给定的隶属度函数的阈值;  $x$  为数据点的向前差分。

可以证明上述隶属度函数具有和为 1 的性质, 即

$$M_1(x) + M_2(x) + M_3(x) = 1 \quad (5)$$

于是可得规则激发度量函数之和为 1, 即

$$\sum_{j=1}^R \alpha_j(\mathbf{u}_i) = 1 \quad (6)$$

毛刺异常值的数学特征可简单描述为在非常短的时间内信号中出现了 2 次反向的突然变化, 因此, 关于其长度的模糊规则如下。

(1) 如果  $u_{1,i}$  正常, 则  $\varphi_{i,j} = 0$ 。

(2) 如果  $u_{1,i}$  局部增大或变小,  $u_{2,i}$  局部减少或变大, 则  $\varphi_{i,j} = 1$ 。

(3) 如果  $u_{1,i}$  局部增大或变小,  $u_{2,i}$  正常,  $u_{3,i}$  局部减少或变大, 则  $\varphi_{i,j} = 2$ 。

(4) 如果  $u_{1,i}$  局部增大或变小,  $u_{2,i}, u_{3,i}$  正常,  $u_{4,i}$  局部减少或变大, 则  $\varphi_{i,j} = 3$ 。

(5) 如果  $u_{1,i}$  局部增大或变小,  $u_{2,i}, u_{3,i}, u_{4,i}$  正常,  $u_{5,i}$  局部减少或变大, 则  $\varphi_{i,j} = 3$ 。

(6) 如果  $u_{1,i}$  局部增大或变小,  $u_{2,i}, u_{3,i}, u_{4,i}, u_{5,i}$  正常, 则  $\varphi_{i,j} = 0$ 。

类似可以表示关于系统增益的模糊规则。结合上述模糊规则和式(4)~(6), 系统输出的毛刺异常值的长度可写为

$$\begin{aligned} L_i = & M_2(u_{1,i})M_3(u_{2,i}) + M_3(u_{1,i})M_2(u_{2,i}) + \\ & 2M_2(u_{1,i})M_1(u_{2,i})M_3(u_{3,i}) + 2M_3(u_{1,i}) \cdot \\ & M_1(u_{2,i})M_2(u_{3,i}) + 3M_2(u_{1,i})M_1(u_{2,i}) \cdot \\ & M_1(u_{3,i})M_3(u_{4,i}) + 3M_3(u_{1,i})M_1(u_{2,i}) \cdot \\ & M_1(u_{3,i})M_2(u_{4,i}) + 4M_2(u_{1,i})M_1(u_{2,i}) \cdot \\ & M_1(u_{3,i})M_1(u_{4,i})M_3(u_{5,i}) + 4M_3(u_{1,i}) \cdot \\ & M_1(u_{2,i})M_1(u_{3,i})M_1(u_{4,i})M_2(u_{5,i}) \end{aligned} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 当  $u_{1,i}$  正常时, 有

$$\begin{cases} M_1(u_{1,i}) = 1 \\ M_1(u_{1,i}) = M_3(u_{1,i}) = 0 \\ L_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

则上述关于向前差分、规则激发度量函数和模糊基函数的函数值的计算是不必要的, 因此, 若增加关于  $u_{1,i}$  是否正常判断, 在发现  $u_{1,i}$  异常时, 再进行模糊降噪分析, 可以节省大量的计算时间。

此外, 由于  $\theta_{i,j}$  一般都取比较小的值, 这里假定取值为  $K$ , 代入式(2)可得

$$\begin{aligned} K_i = & \sum_{j=1}^R \theta_{i,j} \zeta_j(\mathbf{u}_i) = K \sum_{j=1}^R \zeta_j(\mathbf{u}_i) = \\ & K \sum_{j=1}^R \alpha_j(\mathbf{u}_i) = K \end{aligned} \quad (9)$$

综上所述, 利用改进的模糊滤波方法诊断和滤除轨道几何数据中的毛刺异常值的算法如下。

(1) 对轨道几何数据序列进行循环,  $i = 2, 3, \dots, N-5$ 。

(2) 计算差分  $u_{1,i}$ , 若  $|u_{1,i}| \geq C_1$ , 则转步骤(3); 否则, 转步骤(6)。

(3) 按式(1)计算 5 步向前差分, 得到  $\mathbf{u}_i$ 。

(4) 按式(1)计算系统的输出, 得到  $\mathbf{y}_i$ 。

(5) 若  $L_i > 0$ , 则取  $K_i = 0$ , 根据式(3)对信号  $x_i$  被污染区段进行修正, 得到  $f_{i+p}$ 。

(6) 保留原来的信号值  $f_i = x_i$ 。

### 3 试验结果分析

利用改进的模糊滤波(消刺)方法对含有毛刺异常值的周期性模拟信号和实测轨道几何不平顺信号进行滤波, 分析其滤波精度、计算效率和实用性。

#### 3.1 模拟信号滤波结果分析

轨道几何不平顺的采样频率一般是每米 4 个点, 模拟 2 个波长分别为 20、10 m 的周期性轨道几何不平顺信号组合形成的模拟信号, 其解析形式为

$$w(t) = 3\sin(0.1\pi t) + 2\sin(0.2\pi t) \quad (10)$$

式中:  $w(t)$  为模拟信号;  $t$  为时间。

在其上叠加 6 个局部先突然变大然后突然变小的毛刺异常值, 加噪轨道几何不平顺信号、模拟信号和冲击噪声信号分别见图 1~3。

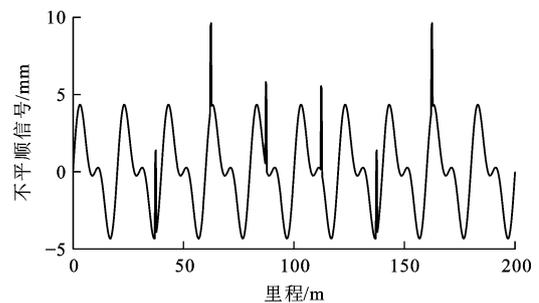


图1 加噪轨道几何不平顺信号

Fig. 1 Noise-imposed signal of track geometry irregularity

利用改进后的模糊滤波方法诊断和滤除图 3 中的毛刺异常值, 滤波后的周期性轨道几何不平顺与原周期性轨道几何不平顺的差值分别见图 4、5。从它们的差值几乎是零可以看出, 滤波后的信号和原始周期性模拟信号完全重合, 新滤波方法能完整地还原周期性轨道几何不平顺信号。

利用式(10)构造长度分别为 0.5、1、5、10、50、100、500 km 的周期性轨道几何信号, 在 0~200 m 范围内叠加图 3 的毛刺异常信号。分别利用有序中

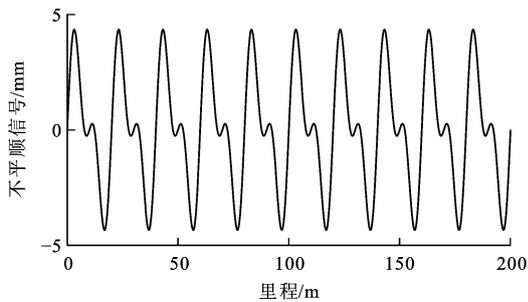


图 2 轨道几何不平顺模拟信号

Fig. 2 Simulation signal of track geometry irregularity

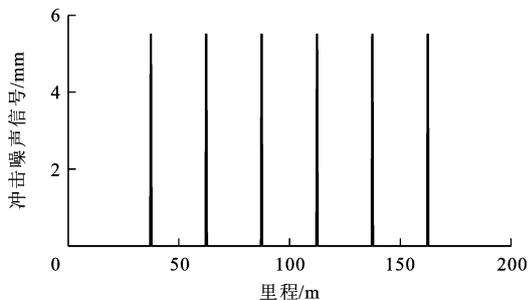


图 3 冲击噪声信号

Fig. 3 Impulse noise signal

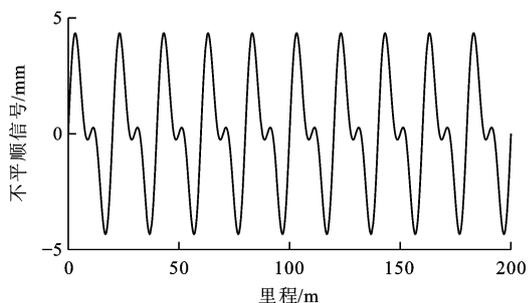


图 4 滤波后的模拟几何不平顺信号

Fig. 4 Simulation signal of geometry irregularity after filtering

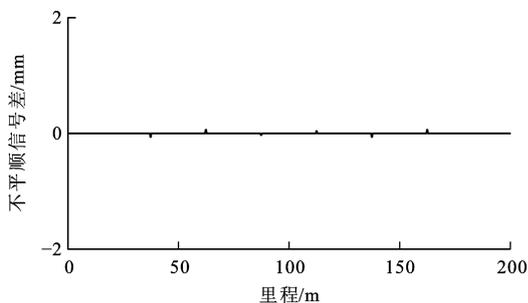


图 5 几何不平顺信号的误差曲线

Fig. 5 Error curve of geometry irregularity signal

值方法、模糊滤波方法、改进的模糊滤波方法对其进行毛刺异常值诊断和滤除分析,计算时间见表 1,可以看出:改进的模糊滤波方法计算时间远远小于模糊滤波法的计算时间,若整条线的长度是 500 km,模糊滤波法的处理时间约为 736 s,而改进的模糊滤波法的处理时间约为 2 s,低于原方法的 1/300;

有序中值的滤波方法的时间不到模糊滤波方法的 1/10,但是比改进模糊滤波方法多出不少。

表 1 计算时间比较

Tab. 1 Comparison of computation times

数据长度/ km	有序中值法 计算时间/s	模糊滤波法 计算时间/s	改进的模糊滤波法 计算时间/s
0.5	0.06	0.73	0.02
1.0	0.11	1.49	0.03
5.0	0.56	7.39	0.03
10.0	1.11	14.80	0.05
50.0	5.56	73.63	0.20
100.0	11.17	146.52	0.39
500.0	55.42	735.98	1.95

### 3.2 实测高低不平顺信号滤波结果分析

利用改进的模糊滤波方法对实测的 K0~K545 范围内高速铁路高低不平顺信号进行滤波分析,其中 K150~K480 区段分析结果见图 6~8。图 6 为实测的高低不平顺,图 7 为滤波后的结果,图 8 是它们的差值。实测信号的长度是 545 km,有 218 万个样本点,滤波时间为 2.75 s,说明该方法完全满足在线运行的要求。滤除毛刺异常值前后的局部高低不平顺信号见图 9~12。从图 6~12 可知:毛刺异常值和正常几何不平顺的幅值相差不大,因此,利用幅值差别难以将它们分辨开,利用改进的模糊滤波方法可以有效识别并处理单个的或相邻多个毛刺异常值。异常值出现的概率较小,从图 8 滤波前后信号差可以看出:新方法只替换了毛刺异常值,对于正常信号没有进行任何改变。

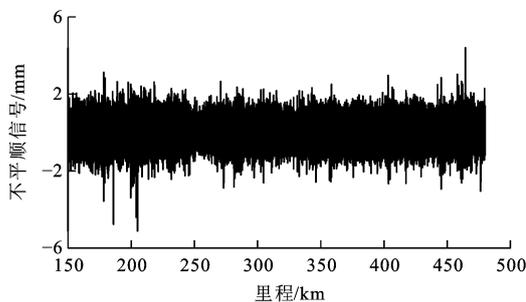


图 6 滤波前高低不平顺信号

Fig. 6 Profile irregularity signal before filtering

### 3.3 实测轨向不平顺信号滤波结果分析

利用改进的模糊滤波方法对实测的 K0~K545 范围内高速铁路轨向不平顺信号进行滤波分析,其中 K150~K480 区段分析结果见图 13~15。图 13 表示实测的轨向不平顺信号,图 14 表示滤波后的结果,图 15 是它们的差值。

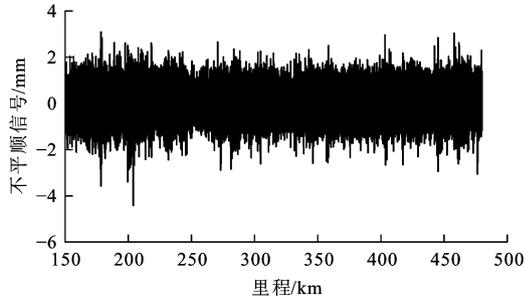


图7 滤波后的高低不平顺信号  
Fig. 7 Profile irregularity signal after filtering

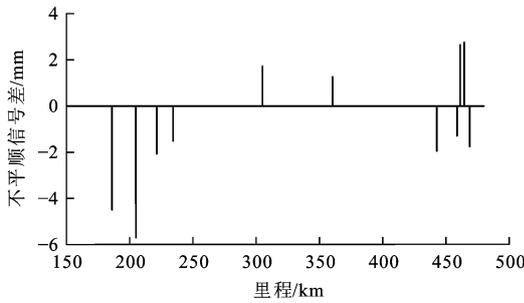


图8 滤波前后高低不平顺信号差  
Fig. 8 Profile irregularity signals' difference before and after filtering

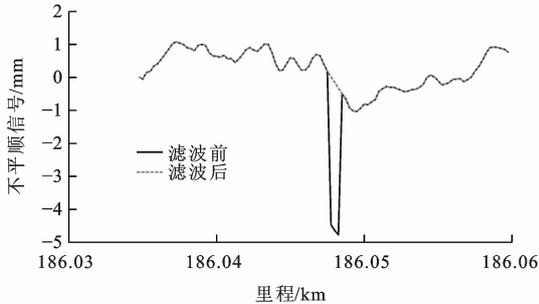


图9 K186+030~060处滤波前后的高低不平顺信号  
Fig. 9 Profile irregularity signals before and after filtering at K186+030-060

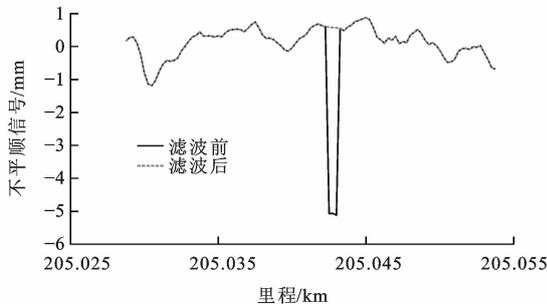


图10 K205+025~055处滤波前后的高低不平顺信号  
Fig. 10 Profile irregularity signals before and after filtering at K205+025-055

滤除毛刺异常值前后的局部高低不平顺信号见图16~19,可知:K201+697、K468+182、K200+240与K404+624处出现了相当大的幅值,K201+697和

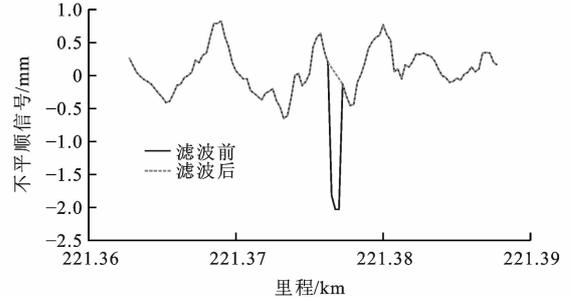


图11 K221+360~390滤波前后的高低不平顺信号  
Fig. 11 Profile irregularity signals before and after filtering at K221+360-390

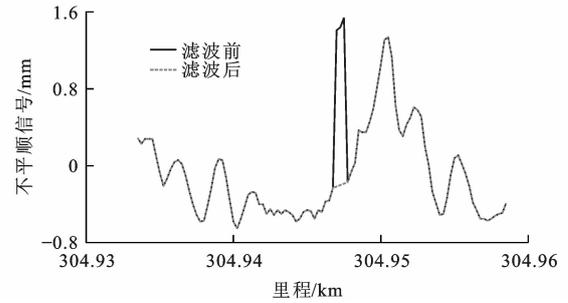


图12 K304+930~960处滤波前后的高低不平顺信号  
Fig. 12 Profile irregularity signals before and after filtering at K304+930-960

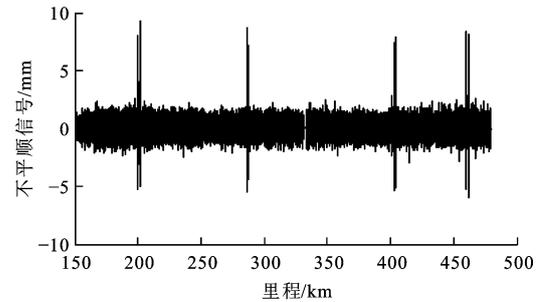


图13 滤波前的轨向不平顺信号  
Fig. 13 Track alignment irregularity signal before filtering

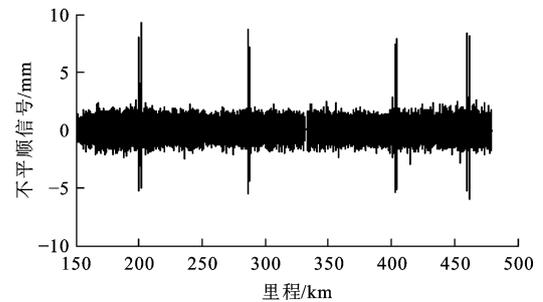


图14 滤波后的轨向不平顺信号  
Fig. 14 Track alignment irregularity signal after filtering

K468+182的大值的长度不到3 m,而K200+240和K404+624的大值大于10 m,根据毛刺异常值的数据特征,K201+697和K468+182的大值对应于毛刺,而K200+240和K404+624的大值是由于道岔

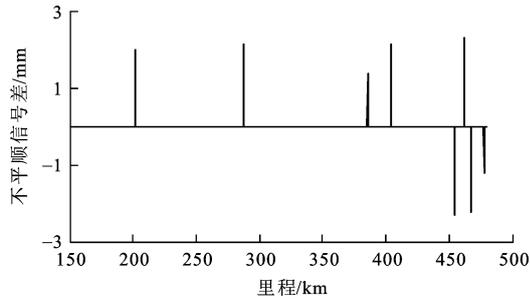


图 15 滤波前后的轨向不平顺信号差  
Fig. 15 Track alignment irregularity signal's difference before and after filtering

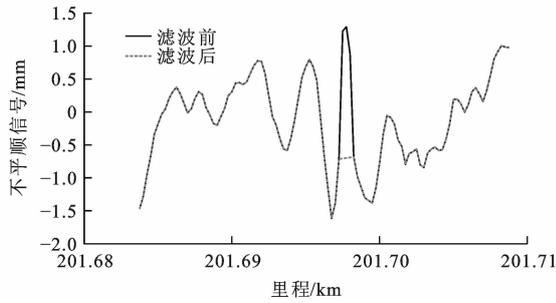


图 16 K201+680~710 处滤波前后的轨向不平顺信号  
Fig. 16 Track alignment irregularity signals before and after filtering at K201+680-710

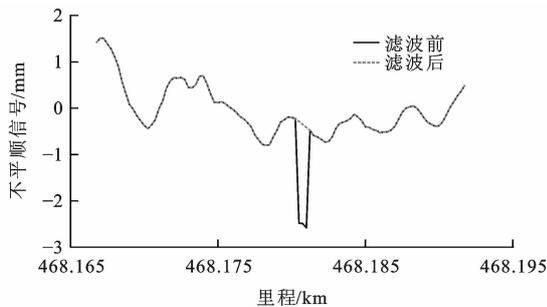


图 17 K468+165~195 处滤波前后的轨向不平顺信号  
Fig. 17 Track alignment irregularity signals before and after filtering at K468+165-195

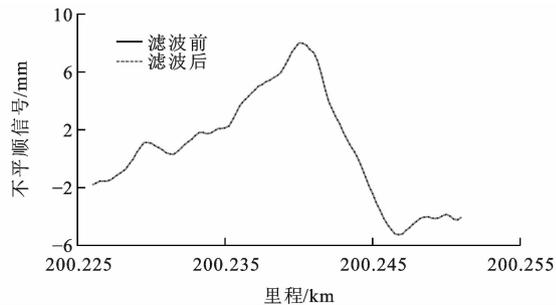


图 18 K200+225~255 处滤波前后的轨向不平顺信号  
Fig. 18 Track alignment irregularity signals before and after filtering at K200+225-255

处轨距加宽引起的大轨向,是有用信息,因此,新滤波方法能有效诊断并滤除毛刺异常值,同时完整保

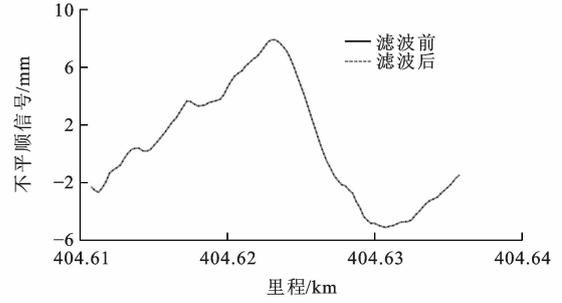


图 19 K404+610~640 滤波前后的轨向不平顺信号  
Fig. 19 Track alignment irregularity signals before and after filtering at K404+610-640

留轨距加宽引起的大轨向信息。

### 3.4 实测轨距信号滤波结果分析

利用改进的模糊滤波方法对实测的 K0~K545 范围内高速铁路轨距进行滤波分析,其中 K10~K220 区段分析结果见图 20~22。图 20 为实测的轨距,图 21 为滤波后的轨距,图 22 是它们的差。滤除毛刺异常值前后的局部轨距信号见图 23~26。高速铁路无砟轨道若采用 18 号道岔,在道岔处将轨距被加宽到 15 mm,经带通滤波后轨距值一般约为 12 mm。从图 20~26 可明显看到:K67+232、K200+545 两处由于道岔加宽引起的轨距幅值达到 12 mm 左右,在 K64+684、K76+083 出现了相对大幅值轨距是毛刺异常值,因此,新滤波方法不但能有效诊断并滤除轨距中毛刺异常值,而且能完整保留道岔处轨距加宽引起的大轨距信息。

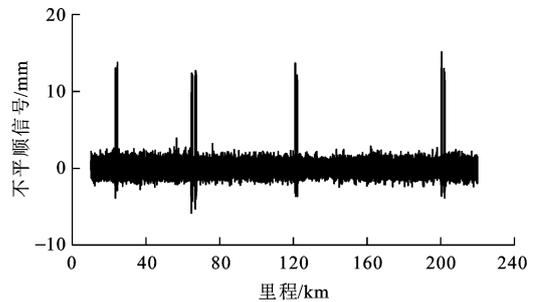


图 20 滤波前的轨距信号  
Fig. 20 Track gauge signal before filtering

## 4 结 语

铁路轨道几何数据中的毛刺异常值不但容易产生虚假的超限信息,而且影响广义能量指数、轨道不平顺谱等轨道质量参数的计算和分析,因此,应在检测过程中自动删除。本文在对模糊滤波方法的隶属度函数、模糊规则,以及输出与输入的关联关系进行数学推导的基础上,提出了诊断和滤除毛刺异常值的改进模糊滤波方法,并成功应用于模拟和实测轨

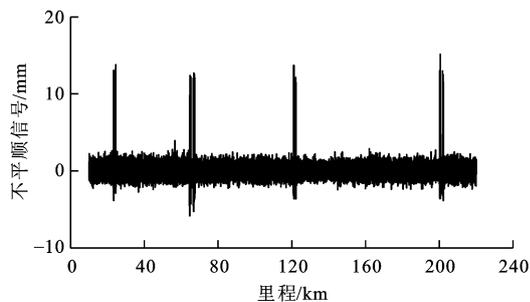


图 21 滤波后的轨距信号

Fig. 21 Track gauge signal after filtering

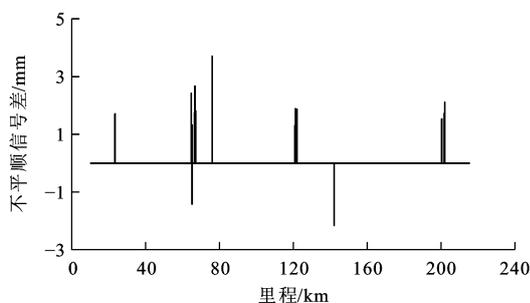


图 22 滤波前后的轨距信号差

Fig. 22 Track gauge signal difference before and after filtering

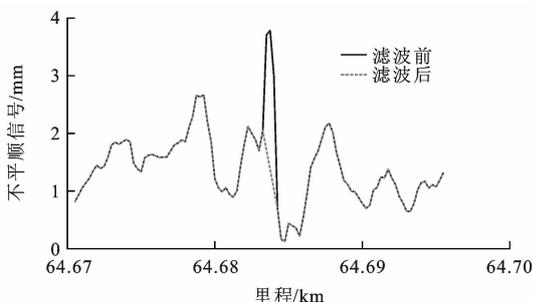


图 23 K64+670~700处滤波前后的轨距信号

Fig. 23 Track gauge signals before and after filtering at K64+670-700

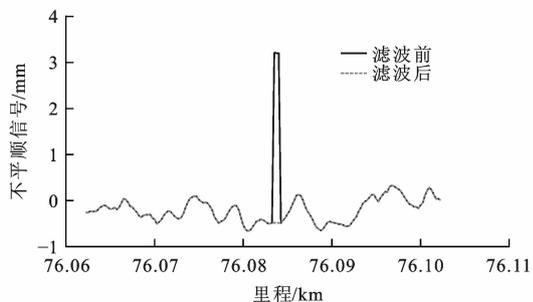


图 24 K76+060~110处滤波前后的轨距信号

Fig. 24 Track gauge signals before and after filtering at K76+060-110

道几何数据的降噪分析中。新算法与原来的模糊滤波方法的精度相当,计算时间不到原来的 1/300,而且易于操作和实现,特别适合于在线实现和运行。

本文提出的毛刺异常值自动滤除方法除了用于

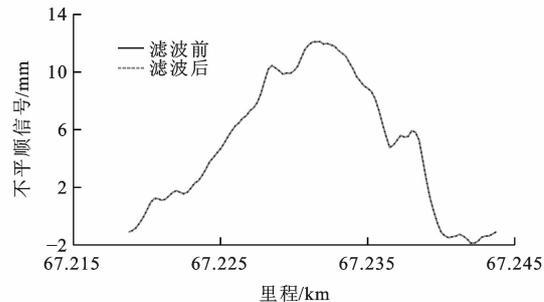


图 25 K67+215~245处滤波前后的轨距信号

Fig. 25 Track gauge signals before and after filtering at K67+215-245

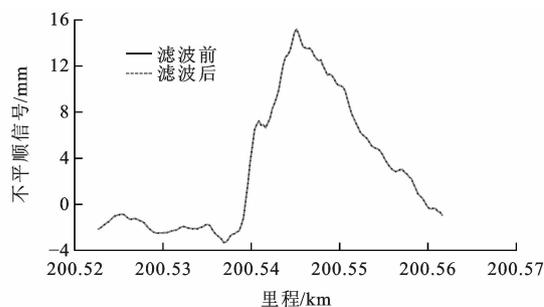


图 26 K200+520~570 滤波前后的轨距信号

Fig. 26 Track gauge signals before and after filtering at K200+520-570

自动滤除轨道几何不平顺毛刺异常值之外,还可用于其他基础设施检测数据分析中,如接触线拉出值的降噪分析、钢轨廓形和磨耗检测数据的滤波分析与轨道状态变化自动识别等,具有广阔的推广前景和应用价值。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] MADEJSKI J. Autonomous track geometry diagnostics system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158: 194-202.
- [2] 柴东明,魏世斌,夏亮光,等. 轨道状态确认车检测系统的研制[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 34-40.  
CHAI Dong-ming, WEI Shi-bin, XIA Liang-guang, et al. Research on measurement systems of track status confirmation car[J]. China Railway Science, 2004, 25(1): 34-40. (in Chinese)
- [3] CHANDRA C, MOORE M S, MITRA S K. An efficient method for the removal of impulse noise from speech and audio signals[C]//IEEE. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New York: IEEE, 1998: 206-209.
- [4] 王旌阳,张 潇,朱俊敏,等. 基于时频谱图的脉冲噪声抑制方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 149-153, 192, 227.  
WANG Jing-yang, ZHANG Xiao, ZHU Jun-min, et al. Impulsive noise suppression based on time-frequency

- spectrogram[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2): 149-153, 192, 227. (in Chinese)
- [5] ABREU E, LIGHTSTONE M, MITRA S K, et al. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(6): 1012-1025.
- [6] CIVICIOGLU P. Removal of random-valued impulsive noise from corrupted images[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2097-2104.
- [7] ALIS A, MAN Hong, KHASHANAH K. Cascade window-based procedure for impulse noise removal in heavily corrupted images[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(1): 1-10.
- [8] SCHULTES, NACHTEGAEL M, WITTE V D, et al. Fuzzy impulse noise detection and reduction method [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(5): 1153-1162.
- [9] RUSSO F, RAMPONI G. A fuzzy filter for images corrupted by impulse noise [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1996, 3(6): 168-170.
- [10] 范磊,黄双华.一种基于小波去噪的脉冲噪声抑制方法[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(9): 104-106.  
FAN Lei, HUANG Shuang-hua. An impulse denoising algorithm based on wavelet denoising[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(9): 104-106. (in Chinese)
- [11] MALLATS G. A theory of multiresolution signal decomposition, the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [12] YIN Lin, YANG Rui-kang, GABBOUJ M, et al. Weighted median filters: a tutorial[J]. *IEEE Transactions Symposium on Circuits and Systems*, 1996, 43(3): 157-192.
- [13] CHAN R H, HO C W, NIKOLOVA M. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(10): 1479-1485.
- [14] ASTOLA J T. Performance analysis of the two-state signal-dependent rank order mean filter [J]. *Nonlinear Image Processing*, 1999, 1(2): 56-66.
- [15] 刘金朝,王卫东,孙善超,等.铁路轨道几何数据冲击噪声小波-有序中值滤波方法[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(10): 29-33.  
LIU Jin-zhao, WANG Wei-dong, SUN Shan-chao, et al. Removing spike noise in railway track geometric data with a wavelet-rank order mean filter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(10): 29-33. (in Chinese)
- [16] ITAGAKI H. Improvements of nuclear magnetic resonance image quality using iterations of adaptive nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1993, 12(2): 322-327.
- [17] CHEN Tao, WU Hong-ren. Adaptive impulse detection using center-weighted median filters [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2001, 8(1): 1-3.
- [18] AKKOUL S, LÉDÉE R, LECONGE R, et al. A new adaptive switching median filter [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(6): 587-590.
- [19] CHAN R H, HU C, NIKOLOVA M. An iterative procedure for removing random-valued impulse noise [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(12): 921-924.
- [20] DI CLAUDIO E D, ORLANDI G, PIAZZA F, et al. An improved LS algorithm for the estimation of an impulsive noise corrupted signal by linear programming[C]//IEEE. *Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1991. New York: IEEE, 1991: 714-717.
- [21] NASO D, SCALERA A, AURISICCHIO G, et al. Removing spike noise from railway geometry measures with a fuzzy filter[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, 2006, 36(4): 485-494.
- [22] RUSSO F. Impulse noise detection and filtering using fuzzy models[C]//IEEE. *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. New York: IEEE, 2000: 1041-1044.
- [23] ZHANG D, WANG Z. Impulse noise detection and removal using fuzzy techniques[J]. *IEEE Electronics Letters*, 1997, 33(5): 378-379.
- [24] BABUSKA I, MELENK J M. The partition of unity method[J]. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 1997, 140(4): 727-758.
- [25] MELENK J M, BABUSKA I. The partition of unity finite element method: basic theory and application[J]. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 139(1-4): 289-314.