

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108321

基于相关性的钢轨缺陷漏磁检测提离干扰抑制^{*}许宇帆 贾银亮 张润华 王平
(南京航空航天大学自动化学院 南京 211100)

摘要: 钢轨是铁路交通的基础设施,漏磁技术常用来检测诸如钢轨之类的铁磁性材料的表面缺陷。针对缺陷漏磁检测信号容易受到提离变化干扰的问题,提出了一种基于相关性的滤波算法。先根据缺陷尺寸、巡检速度和采样速度把检测数据分段,然后在每一段中,比较相邻磁敏传感器 x 方向采样数据的相关性、各个磁敏传感器 x 和 z 方向采样数据的相关性的相对大小,确定本段数据中提离干扰的幅值,以此实现滤波。构建了实验系统对钢轨表面的缺陷进行了检测实验,实验结果表明该算法能有效抑制提离干扰,信噪比增益在 1.7 以上。

关键词: 漏磁检测;相关系数;表面缺陷;提离干扰

中图分类号: U216.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Method of lift-off interference suppression for rail defect magnetic leakage detection based on correlation

Xu Yufan Jia Yinliang Zhang Runhua Wang Ping

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Rail is the infrastructure of railway traffic, and magnetic leakage technology is commonly used to detect the surface defects of ferromagnetic materials such as rail. For the problem of the leakage magnetic detection signal, a correlation-based filtering algorithm is proposed. The detection data is segmented according to the damage size, inspection speed and sampling speed, and then the amplitude of the lift-off interference is determined by comparing the correlation of the sampling data of the adjacent magnetic sensitivity sensor x direction and the relative size of the sampling data of each magnetic sensitivity sensor x and z direction. The experimental system is constructed to detect the artificial and natural defects of the rail surface, and the experimental results show that the proposed algorithm can effectively inhibit the lift-off method, the SNR gain is above 1.7.

Keywords: magnetic flux leakage detection; correlation coefficient; surface defect; lift-off interference

0 引言

钢轨是铁路轨道的重要组成部分。在服役过程中,钢轨在承受车轮压力的过程中或者外部环境的长期作用下容易产生局部缺陷,逐渐形成钢轨的断裂,从而威胁到铁路运输过程中的生命财产安全^[1-2]。早期的钢轨缺陷一般集中于轨头顶表面,漏磁技术可以检测铁磁性材料工件表面及近表面伤损,并且具备检测灵敏度高、速度快、对工件表面清洁度要求不高、成本低、操作简单等优点,被广泛应用在铁磁材料,如钢轨、钢管等工件表面伤损的无损检测中^[3]。

在实际钢轨检测中,漏磁信号中夹杂着各种噪声。漏磁信号中的噪声来源由以下构成:检测系统引起的噪声^[4]、空间磁场噪声^[5]、探头振动带来的噪声^[6]、速度效应产生的

噪声^[7]、磁化与材料噪声^[8]等。传感器到被测工件之间的垂直距离称为提离,不同提离下漏磁场的分布不同。当探头在工件表面巡回检测时,受振动等因素影响,提离将发生变化,导致传感器的输出变化,称为提离干扰。提离干扰叠加在检测信号上,造成伤损信号难于分辨,不利于伤损的测量。

由于提离干扰的幅值受到巡检速度等因素的影响,且其频谱往往与缺陷信号重合,一般的数字滤波技术难以有效滤除。针对这一问题,前人作出了许多的努力,从常见的频率滤波、小波变换^[9]、中值滤波^[10-11]、形态学滤波^[12],到针对特定情形的根据随机升降角和倾斜检测角度进行测量误差补偿^[13]。由于提离干扰的频谱与缺陷信号重合,常见的滤波方法难以有效滤除提离干扰。

收稿日期:2021-11-12

^{*} 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB21009)资助

文献[14]提出了一种双垂直分布式磁传感器的探头结构来抑制检测过程中的提离等干扰。文献[15]针对油田钻杆的表面伤损漏磁检测中的噪声问题,采用了新式的检测探头结构来减小噪声干扰。文献[16]结合小波变换和自适应滤波技术提出了一种的去噪声干扰的算法;文献[17]发现高速情况下漏磁场信号会受涡流信号的影响导致表面伤损信号增大而内部埋藏伤损信号减小,为钢轨高速顶面漏磁检测提供新的思路。这些算法在一定程度上抑制了漏磁检测的噪声,但是还不能满足钢轨高速巡检的需要。

文献[6,18]从缺陷漏磁信号的特点出发,通过构建一个只含振动干扰信号的虚拟通道来实现滤波,区别在于文献[6]在 y 方向布设多个传感器,通过比较其信号幅值来构建虚拟通道,而文献[18]在 x 方向布设多个传感器。这两种方法可以在一定程度上抑制提离干扰,但是它们的判断是基于单次采样的,容易受到其他干扰的影响。

为了提高滤波效果,受文献[6,18]启发,提出了一种滤波算法,通过相关性构建虚拟通道实现滤波。

1 漏磁信号相关性滤波

1.1 信号相关性分析

钢轨漏磁检测时噪声来源复杂,包括振动噪声、磁轭振动噪声以及白噪声等,且缺陷位置未知,因此找到一个只有噪声的位置不切合实际,用这种方法不能很好地解决钢轨顶面高速巡检的噪声问题。

漏磁场的产生如图 1(a)所示,钢轨局部磁化后,当磁力线遇到钢轨表面缺陷,由于钢的磁导率明显优于缺陷内部的空气,磁力线会发生畸变,部分磁力线会折射到钢轨外部形成漏磁场^[19-21]。

实际应用中,钢轨轨头表面伤损一般分布在轨距角处或顶面中部,一般不会出现横跨整个钢轨顶面的缺陷,即使出现这种缺陷,其方向一般不会水平于 y 方向,所以本文认为在钢轨的任意位置上,图 1(b)所示的传感器阵列在巡检时,至少会有一路传感器没有测到缺陷漏磁场,其输出只受干扰的影响。本章提出了一种基于相关性的方法,从多路传感器信号中提取出参考信号,并用该参考信号进行自适应滤波方法。而单个传感器检测到的典型缺陷的漏磁场如图 1(c)所示。

显然,一排磁敏传感器中,测到伤损的各个磁敏传感器的采样数据之间相关性较高,没有测到伤损的各个磁敏传感器的采样数据之间相关性也较高,但是测到伤损和没有测到伤损的磁敏传感器的采样数据相关性较低。由于 x 方向的信号幅值较大,对各路磁敏传感器 x 方向的数据分段,将 N 路磁敏传感器的第 i 段数据的 x 轴分量上的数据依次放入第 i 组数据组中,计算第 i 组数据组中相邻两路磁敏传感器的第 i 段数据之间的相关性, $i=1,2,3,\dots,I,I$ 为每一路磁敏传感器的数据段的总数;得到斯皮尔曼相关性最小的一对相邻磁敏传感器 $P_A、P_B$ 。认为如果在这一个

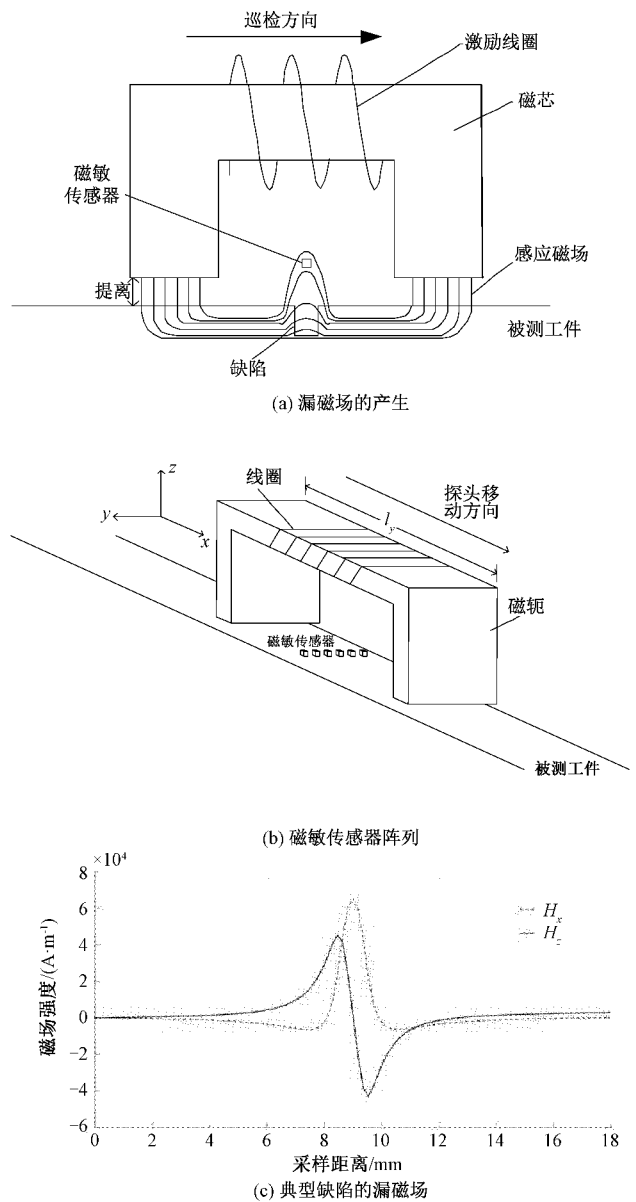


图 1 漏磁检测原理

分段中,有的传感器的输出数据中包含缺陷数据,则 $P_A、P_B$ 中必有一个包含缺陷数据,另一个不包含缺陷数据,进一步可以在这两个传感器的数据中找出不包含缺陷数据的参考信号;如果在这一个分段中没有缺陷,则传感器的输出数据都不包含缺陷数据,则 $P_A、P_B$ 可以任取一个作为参考信号。

如果第 i 段数据内包含伤损,则 $P_A、P_B$ 一对相邻磁敏传感器中一个的数据受伤损和提离影响;另一个的数据没有受到伤损影响,只受到提离影响;如果第 i 段数据内不包含伤损,则 $P_A、P_B$ 检测到的都是提离干扰的数据。

为了区分这两个传感器中哪一个测到了伤损,可以利用缺陷 x 和 z 方向的漏磁场的明显区别:缺陷的漏磁信号 x 方向信号为单峰信号, z 方向信号为双峰信号,如图 1(c)

所示。而提高引起的信号变化与伤损不同, x 方向和 z 方向皆为单峰值信号, 提高越小数据越大, 提高越大数据越小, x 和 z 方向的漏磁场变化相似。分别求 P_A 、 P_B 这两个磁敏传感器 x 和 z 方向数据的相关性, 以其相关性绝对值较大的磁敏传感器的采样数据为参考信号。

1.2 信号分段方法

为了准确找到参考信号, 分段应使测到伤损漏磁场和没有测到的漏磁场的两个传感器采样数据的相关性尽可能的小。显然, 如果在一个分段内, 某个传感器的采样数据全部是伤损漏磁场数据, 则这段数据与另一个没有测到伤损漏磁场的传感器的采样数据的相关系数较小。如果分段过长, 则测到伤损漏磁场的传感器的一段数据中可能既包括伤损漏磁场的的数据, 也包括无伤损处的漏磁场数据, 则这段数据与另一个没有测到伤损漏磁场的传感器的采样数据的相关系数较大, 不利于区分伤损和非伤损数据。如果分段过小, 一段之内的采样点数量较少, 受随机干扰的影响较大, 也不利于区分伤损和非伤损数据。

伤损上方某点 $P(x, y)$ 的漏磁场强度为 $H(x, z)$, 其 x 方向分量为 $H_x(x, z)$, z 方向分量为 $H_z(x, z)$, 可分别由式(1)、(2)求得^[18]。

$$H_x = H_x(x, z) = \frac{\sigma_{ms}}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{b+z}{a-x} + \tan^{-1} \frac{b+z}{a+x} - \tan^{-1} \frac{z}{a-x} - \tan^{-1} \frac{z}{a+x} \right] \quad (1)$$

$$H_z(x, z) = \frac{\sigma_{ms}}{4\pi} \ln \frac{[(x+a)^2 + (z+b)^2][(x-a)^2 + z^2]}{[(x-a)^2 + (z+b)^2][(x+a)^2 + z^2]} \quad (2)$$

$$\sigma_{ms} = 5.3 \left(\frac{b/a + 1}{b/(a\mu) + 1} \right) H \quad (3)$$

其中, $2a$ 为伤损宽度, b 为伤损深度, σ_{ms} 为伤损侧面的面磁荷密度, 可由式(3)计算。式(3)中, μ 为材料的磁导率, H 为外加的磁场强度。

当 $z = z_0$ 时, 将式(2)求导并令其为 0, 即:

$$H_z(x, z_0) = 0 \quad (4)$$

解得 $x = \pm \sqrt{b^2 + z_0^2}$ 时, 式(4)成立, 即 $x = \sqrt{b^2 + z_0^2}$ 时 $H_z(x, z_0)$ 为极大值; $x = -\sqrt{b^2 + z_0^2}$ 时 $H_z(x, z_0)$ 为极小值。取 $l = 2\sqrt{b^2 + z_0^2}$ 为分段长度。

为了保证在一个分段内, 某个传感器的采样数据全部是伤损漏磁场数据, 且分段尽可能长, 取 l 为分段长度, 即把传感器的数据每 m 个采样点分成一段。

$$m = \left\lfloor \frac{l \times f}{v} \right\rfloor \quad (5)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整; f 为采样速度, 单位为 Hz, 设计系统时应保证 $f \geq 2v/L$, 否则无法计算相关系数; v 为巡检速度, 单位为 m/s。

1.3 滤波步骤

步骤 1: 对多路传感器中每一路传感器采集的钢轨顶

面的数据进行小波滤波, 然后分段, 每段长度为 l , 每段中都有 m 个数据, 并按照步骤 2~4 进行处理。

步骤 2: 每一个分段中, 计算相邻两路传感器的 x 方向数据之间的相关系数, 得到相关系数绝对值最小的一对相邻传感器 P_A 、 P_B 。

步骤 3: 计算 P_A 、 P_B 该段数据中 x 方向分量和 z 方向分量之间的相关系数, 以相关系数绝对值较小的传感器输出数据作为该段的参考信号。

步骤 4: 将各路传感器该段数据减去参考信号, 得到去除提高干扰后的信号。

2 实验验证

实验所用探伤车为金鹰重工大型钢轨探伤车 GTC-80II, 对加工有表面伤损的钢轨进行了巡检。该漏磁检测系统由工控机、信号调理电路、数据采集卡和检测探头组成。其中传感器、放大器和数据采集卡的性能如表 1 所示。在信号调理电路中采用 AD620 仪器放大器, 利用 AD8403 数字电位器调节放大倍数。传感器的长宽均为 1.5 ms。当多个传感器紧密排列时, 两个传感器中心之间的最小距离为 2 mm。钢轨和漏磁检测探头如图 2(a)、(b) 所示, 该探头由沿 y 方向依次排列的 12 个传感器和一个激励磁轭组成, 传感器覆盖整个轨头顶面。

表 1 实验系统规格

元件规格	型号	属性
传感器	SI-106C	输出电压约几十毫伏
放大器	AD620	放大倍数为 100
数据采集卡	DAQ2208	每通道采样频率为 10 kHz

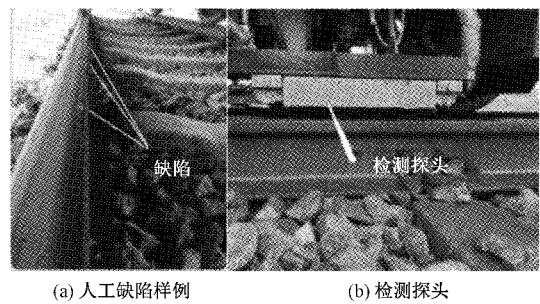


图 2 检测探头与缺陷样例

人工伤损的位置和孔径如图 3 所示。巡检速度为 30 km/h。巡检时轨道上的道岔、接缝、高低轨等都会引起车体振动。

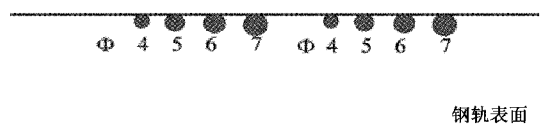


图 3 人工缺陷样例图

图 4 为滤波前 12 路传感器通道的漏磁信号,可以看出,采集到的原始信号噪声成分较为复杂,幅值较大且无规律可循。单个缺陷处多通道漏磁信号如图 5 所示,图中区域 1 各通道都没有测到缺陷,由于所有传感器固定在同一个检测探头中,使得所有传感器均在同一背景噪声影响下,在漏磁信号二维图中表现为所有信号的总体趋势差别不大。而区域 2 处只有 11、12 通道测量到了缺陷,其信号幅值明显大于其他传感器。区域 2 中部分相邻通道信号的相关性系数如表 2 所示,在计算时使用了斯皮尔曼系数。由表 2 可知,都没有测到缺陷的通道 9 和 10、都没有测到缺陷的通道 11 和 12 之间有明显的相关性,通道 10 和 11 之间相关性较低。

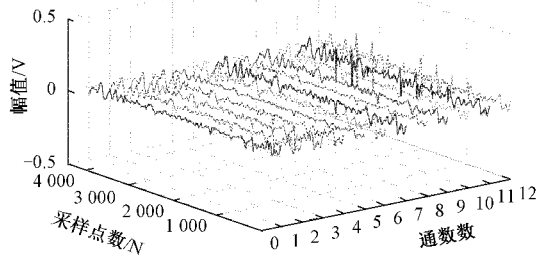


图 4 多通道漏磁原始信号

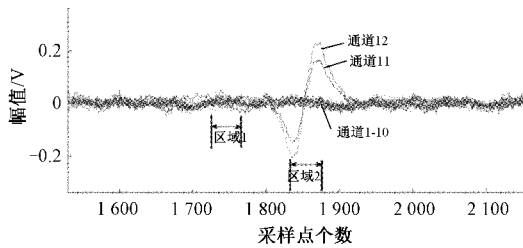


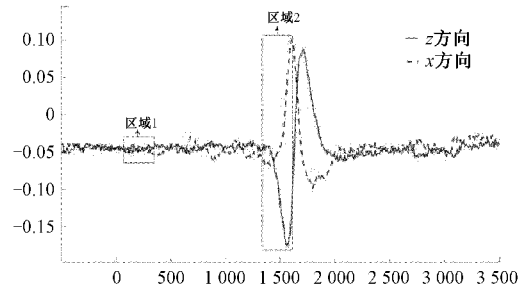
图 5 单个缺陷处多通道漏磁信号二维图

表 2 相邻通道的相关系数

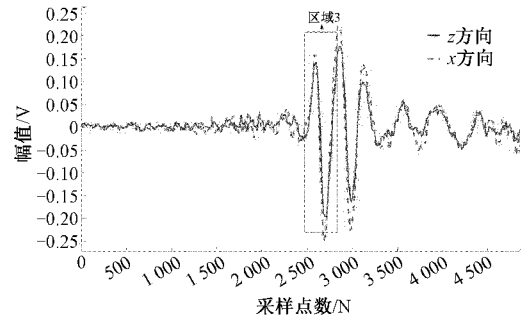
系数通道	通道 9、10	通道 10、11	通道 11、12
相关性系数	0.916 5	0.018 6	0.933 2

图 6 为第 11 通道 x 方向和 z 方向的信号,其中区域 1 为没有明显振动,也没有测到缺陷的信号;区域 2 为缺陷信号;区域 3 为振动信号。3 个区域的 x 方向和 z 方向的信号相关系数如表 3 所示。从表 3 中可知,无缺陷处和振动发生处,同一通道 x 方向和 z 方向信号的相关性较强;缺陷处 x 方向和 z 方向信号的相关性较弱。结合表 2、3 的数据,说明用相关性可以区分出振动干扰信号。

图 7(a)、(b)分别为对钢轨漏磁缺陷信号滤波前后的对比图。图 7(a)为检测到 8 处缺陷信号的第 12 路通道滤波前后对比图。从图 7(a)中可以看出,在缺陷 8 附近由于振动出现了较大的噪声信号,其幅值与部分缺陷信号相近,干扰缺陷的检测。经过滤波后缺陷 8 附近的噪声信号被滤除。



(a) 缺陷处信号



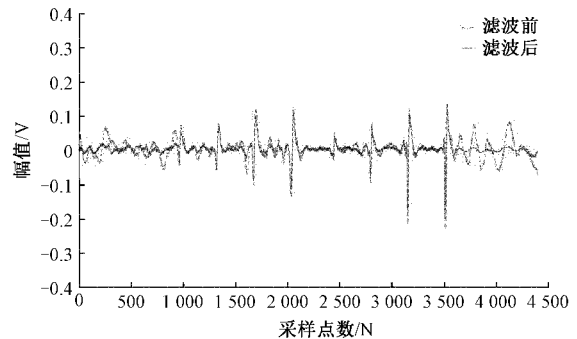
(b) 振动处信号

图 6 第 11 通道 x 方向和 z 方向在缺陷和噪声区域的对比图

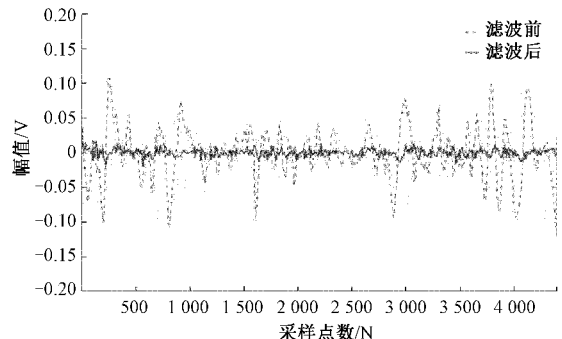
表 3 第 11 通道不同区域的相关系数

系数区域	区域 1	区域 2	区域 3
相关性系数	0.834 5	0.132 7	0.913 3

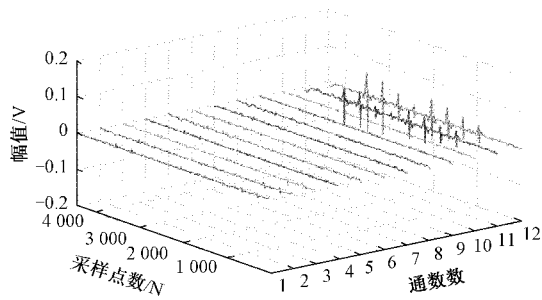
图 7(b)为无缺陷的信号,可见即使没有缺陷,由于振动,传感器的原始输出信号也会有波动,经过滤波后噪声的幅值得到降低,对微小缺陷的检测有利。图 7(c)为多通道



(a) 缺陷处滤波前后对比图



(b) 只含有噪声信号的单通道滤波效果图



(c)多通道滤波效果

图7 滤波前后效果对比图

漏磁信号滤波后三维图,与图4比干扰明显减小。

对于没有测到缺陷的1~10通道采用噪声削减百分比(noise rejection percentage, NRP)衡量滤波效果。

$$NRP = \frac{P_{n_0} - P_{n_1}}{P_{n_0}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_0(i)^2}{T} - \sum_{i=1}^N \frac{n_1(i)^2}{T}}{\sum_{i=1}^N \frac{n_0(i)^2}{T}} \quad (5)$$

式中: n_0 表示滤波前的噪声信号, n_1 表示滤波后的噪声信号, T 表示某段信号的时间, P_{n_0} 表示滤波前噪声信号的功率, P_{n_1} 表示滤波后噪声信号的功率。 $0 \leq NRP \leq 1$, 噪声削减百分比越大, 滤波效果越好。1~10通道采用噪声削减百分比在90.3%~92.1%之间, 平均为91.1%。检测到缺陷信号的11、12通道的滤波效果如表4所示, 可见滤波后信噪比明显提升。

表4 滤波效果

通道序号		11	12	平均
信噪比/dB	滤波前	12.8	13.5	13.2
	滤波后	22.1	25.7	23.9
信噪比增益		1.7	1.9	1.9

3 结论

本文通过分析巡检中的常见干扰确定了噪声的来源, 设计了一种基于相关性的滤波算法。该算法在多路传感器中提取出不受伤损影响, 只包含振动的信号, 以此作为参考信号, 把各路传感器的输出减去参考信号来抑制振动干扰。为了提取参考信号, 把传感器输出的信号分段, 在每一段中, 根据相邻传感器信号之间的相关性初步确定没有测到伤损漏磁场的传感器, 再根据伤损信号和振动信号的 x 方向和 z 方向的相关性的差异确定本段的振动信号, 将各段的振动信号连接起来构成参考信号实现滤波。并对通过对金鹰重工钢轨探伤车在实际钢轨线路上测到的多通道原始数据进行实际验证, 发现对噪声信号有着明显的抑制作用, 提高了漏磁信号的信噪比。为钢轨顶面漏磁检测信号滤波技术提出了一种可行性技术方案。

参考文献

- [1] 邵泽龙, 张祥坤, 李迎松. 干涉雷达在高铁桥梁振动检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2019, 42(1): 95-98.
- [2] 霍继伟, 刘泽, 王成飞, 等. 基于幅值特征提取的混频电磁钢轨探伤方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 105-110.
- [3] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [4] 高兵. 管道检测系统噪声分析与自适应噪声抵消研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [5] 陈殷, 李良威, 邓云川, 等. 电气化铁路对油气管道交流干扰及其空间磁场计算[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(5): 11-15.
- [6] JI K, WANG P, JIA Y, et al. Adaptive filtering method of mfl signal on rail top surface defect detection[J]. IEEE Access, 2021, 9: 87351-87359.
- [7] 杨理践, 耿浩, 高松巍, 等. 高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 1-9.
- [8] ZHANG L, BELBLIDIA F, CAMERON I, et al. Influence of specimen velocity on the leakage signal in magnetic flux leakage type nondestructive testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, DOI: 10.1007/s10921-015-0280-1.
- [9] 汶少阳, 朱莉娜, 李忠林. 光电探测目标回波信号去噪研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21): 119-122.
- [10] 李小娟, 李岩松, 田硕文, 等. 基于中值滤波的铁磁材料缺陷漏磁检测信号处理[J/OL]. 电测与仪表, 2022: 1-9 [2022-01-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200630.1609.010.html>.
- [11] 刘金海, 赵贺, 神祥凯, 等. 基于漏磁内检测的自监督缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 180-187.
- [12] 邱忠超, 洪利, 蔡建美, 等. 基于数学形态学滤波的漏磁信号预处理方法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(3): 1-5.
- [13] LONG Y, HUANG S, PENG L, et al. A novel compensation method of probe gesture for magnetic flux leakage testing[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10854-10863.
- [14] LONG Y, HUANG S, PENG L, et al. A new dual magnetic sensor probe for lift-off compensation in magnetic flux leakage detection [C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2020: 1-6.
- [15] YILAI M, LI L, PO G, et al. Improving SNR of MFL detecting defect signal of drill pipe by using pole piece [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(9): 489-492.

- [16] HAN W. A new denoising algorithm for MFL data obtained from seamless pipeline inspection[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, 44(3): 184-195.
- [17] FENG B, KANG Y H, SUN Y, et al. Influence of motion induced eddy current on the magnetization of steel pipe and MFL signal[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2016, 52(1-2):357-362.
- [18] JI K. A method for detecting surface defects in railhead by magnetic flux leakage [J]. Applied Sciences, 2021, 11(20):9489-9489.
- [19] 冯搏, 伍剑波, 邱公喆, 等. 高速漏磁检测方法的发展[J]. 无损检测, 2021, 43(2):57-63.
- [20] 赵森, 翟明, 苏杭, 等. 在役输气管道母材金属损失分析[J]. 内蒙古石油化工, 2021, 47(4):45-47, 65.
- [21] 王博思, 黄子恒, 赵雅, 等. 基于漏磁检测的电梯钢丝绳断丝检测实验研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(8): 29-32.

作者简介

许宇帆, 硕士, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: 2365815516@qq.com