

引用格式:陈蜀鹏,陈娟,黄顺昊,等. LS-SVM 算法在无缝线路锁定轨温检测中的应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 87-92.

CHEN ShuPeng, CHEN Juan, HUANG ShunHao, et al. Application of LS-SVM algorithm in detecting the stress-free temperature of continuous welded rail[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(3): 87-92.

LS-SVM 算法在无缝线路锁定轨温检测中的应用

陈蜀鹏¹ 陈娟^{1*} 黄顺昊¹ 祁欣¹ 李帅² 邱锦玉² 李鹏博²

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国铁路北京局集团有限公司 保定工务段, 保定 071000)

摘要: 提出一种改进的基于磁巴克豪森噪声(MBN)技术的无缝线路实际锁定轨温检测方法。该方法使用 MBN 技术检测钢轨温度应力, 使用轨温计检测表面轨温, 并采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法建立线路的钢轨温度应力随钢轨表面轨温与实际锁定轨温差值变化的预测模型, 最后将预测模型得到的温差和钢轨的表面轨温用于计算实际锁定轨温。通过对河北保定的一段无缝线路进行钢轨温度应力及表面轨温检测, 证明该方法能提高检测的精度。

关键词: 最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法; 磁巴克豪森噪声(MBN); 温度应力; 锁定轨温

中图分类号: U213.9+13 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.03.013

引言

随着铁路运营规模及技术的日益发展, 对无缝线路的可靠性和稳定性提出了更高的要求。无缝线路在设计时按照各个铺设地点的强度和稳定性等因素会选择一个适当的铺设无缝线路的轨温范围, 称为设计锁定轨温范围^[1]。在设计锁定轨温范围内用扣件锁定钢轨, 此时的轨温称为施工锁定轨温。在火车不断行驶以及温度、湿度等外界环境的影响下, 线路钢轨各个截面的锁定轨温会发生相应的变化, 与原施工时的锁定轨温不同, 称为实际锁定轨温^[2]。在极端条件下实际锁定轨温会与原施工锁定轨温相比会发生较大偏移, 如夏季由于气温升高, 无缝线路内部产生的温度压应力增大, 可能发生线路钢轨胀轨; 冬季气温降低时温度拉应力增大, 可能发生断轨。两种情况均会造成重大铁路交通事故^[3], 因此实现对无缝线路实际锁定轨温的快速精

确测量具有重要的现实意义。

目前国内无缝线路实际锁定轨温的检测方法主要有观测桩法^[4]、机械应变计法和温度补偿钢尺法等, 但检测精度不高。近年来国内外科人员提出了应变温度法^[5]、X射线法^[6]和磁畴法^[7]等新方法来检测无缝线路实际锁定轨温, 但应变温度法和 X射线法只有在无缝线路固定区钢轨产生形变时检测钢轨实际锁定轨温才会有效。针对此问题, 本课题组提出了基于磁巴克豪森噪声(magnetic Barkhausen noise, MBN)信号的无缝线路实际锁定轨温检测方法^[8], 该方法属于磁畴法的一种, 不需要考虑钢轨是否发生形变, 相比其他检测方法局限性较小, 但是需要考虑钢轨弹性模量、线胀系数等参数的影响。本文通过分析基于 MBN 信号的无缝线路实际锁定轨温检测方法, 对原有检测方法进行了改进, 即采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法^[9], 通过训练检测数据组成的样本集建立线路的钢轨温度应力随钢轨表面轨温与实际锁定轨温差值变化的预测模型, 再用得到的温差和表面轨温计算出实际轨温, 实例验证结果表明本文方法是有效可行的。

1 实际锁定轨温检测方法

基于 MBN 信号的无缝线路实际锁定轨温检

收稿日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(51275029/60971019)

第一作者: 男, 1993 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: jchen@mail.buct.edu.cn

测方法如下:首先对线路每隔一段距离标点,并利用钢轨测温计测量标点处钢轨的表面轨温;再利用 MBN 应力检测系统对标点处钢轨进行温度应力检测,从而得到线路钢轨各点表面轨温 T_i 以及对应的线路钢轨各点的温度应力 σ_i 。当外界因素影响使轨温发生变化时,由于道钉固定在钢轨两端,使钢轨无法自由伸缩,于是在无缝线路钢轨内产生了温度应力。根据虎克定律^[10],产生的钢轨温度应力为

$$\sigma = \beta \alpha \Delta T \quad (1)$$

式中, α 为钢轨的线胀系数, β 为钢轨的杨氏弹性模量, ΔT 为无缝线路现场轨温与实际锁定轨温的差值。

由式(1)可知,无缝线路固定区的钢轨所产生的温度应力与钢轨本身长度无关,而与现场轨温与无缝线路实际锁定轨温的差值 ΔT 有关。根据无缝线路钢轨的温度应力、表面轨温与实际锁定轨温之间的关系,得到实际锁定轨温 T_n

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^n \pm \sigma_i}{n \alpha \beta \gamma} + \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (2)$$

式(2)中, σ_i 为线路钢轨各点的温度应力, γ 为线路钢轨的补偿系数, T_i 为线路钢轨各点的表面轨温, n 为检测点的数量。

在实际计算过程中,由于线路钢轨残余应力、自然环境及其他因素的影响,计算结果可能会不准确;同时不同环境(包括温度、湿度等)下不同型号钢轨的线胀系数、弹性模量、补偿系数等都会发生变化^[11],尤其是补偿系数 γ ,其值很难确定,造成计算结果误差较大。由于所测点的温度应力 σ_i 和该点的表面轨温与实际锁定轨温的差值 ΔT_i 有关,因此本文利用 LS-SVM 算法,提出一种改进方法,该方法将检测到的线路钢轨温度应力作为输入量,以对应的 ΔT_i 作为输出量,组成预测模型的训练样本和测试样本,再用训练样本建立该段线路钢轨温度应力随 ΔT_i 变化的预测模型。

将预测模型求出的 ΔT_i 与该段线路钢轨各点表面轨温 T_i 相结合,推导出该线路的实际锁定轨温如式(3)所示

$$T'_n = \frac{\sum_{i=1}^n \pm \Delta T_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (3)$$

2 MBN 检测钢轨温度应力原理

在铁磁体磁化过程中,会产生相应的磁畴壁位移,磁化磁场作用,包括铁磁体内部的应力、杂质以及晶界结构等方面的变化会产生畴壁的不可逆位移^[12]。在位移 X 方向上,180°畴壁的单位面积畴壁能 v 的变化规律如图 1 所示。

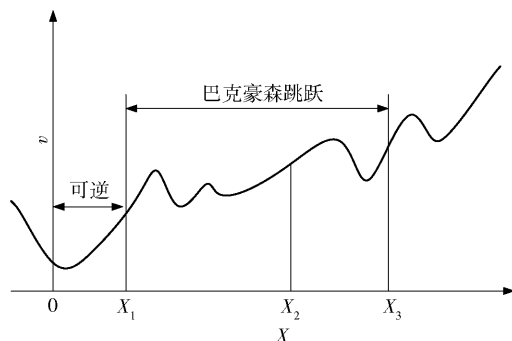


图 1 位移 X 方向上畴壁能的变化以及 MBN 信号的产生

Fig. 1 Variation of domain wall energy in displacement X direction and generation of MBN signal

由图 1 可知,随着磁场的加强,畴壁在磁化过程中会出现多次跳跃式位移,称为巴克豪森跳跃(Barkhausen jump)^[13],通过铁磁线圈检测,可以检测到 MBN 信号。研究表明,在示波器的观察下 MBN 信号的波形大小随压、拉应力的变化而有所不同(图 2),压应力增大,MBN 信号随之减小;拉应力增大,MBN 信号随之增大^[14]。

3 MBN 应力检测系统实现

MBN 应力检测系统结构如图 3 所示,系统由 MBN 传感器(磁化器、MBN 接收器、前置放大器)、信号源、功率放大电路、放大滤波电路、高精度 A/D 转换电路、数据显示电路构成。

MBN 传感器由 MBN 接收器、磁化器和前置放大器构成。采用晶相单一的 $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ 系尖晶石柱形铁氧体作为接收磁芯,在磁芯上缠绕接收线圈作为 MBN 接收器;磁化器使用门型磁芯,磁芯两侧缠绕漆包粗铜线,调节信号源电路产生频率为 10 Hz 的正弦波信号,经过功率放大电路将磁化器磁化;前置放大电路中使用两级 LF356 系列放大器,用以抑制传感器到系统主机的信号衰减。主放电路中包含一阶带通滤波器,再由检波电路进行峰值检波。使用 A/D 转换电路将检波出来的 MBN 信号进行

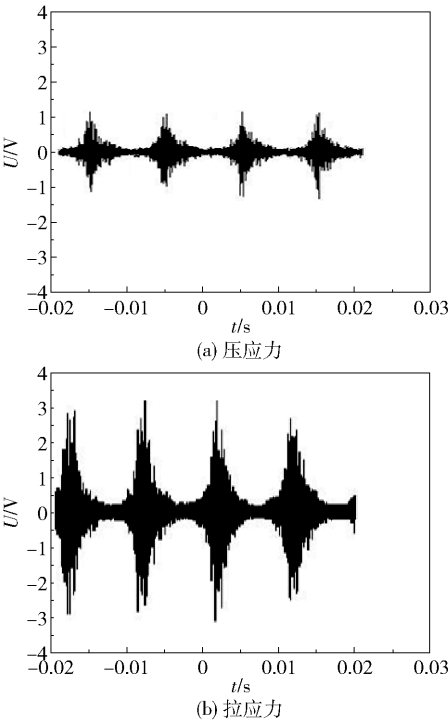


图 2 压、拉应力作用下 MBN 信号的波形

Fig. 2 Waveforms of MBN signal under compressive stress and tensile stress

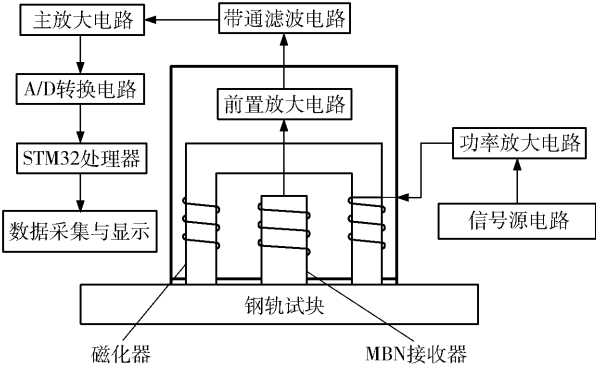


图 3 MBN 应力检测系统的结构框图

Fig. 3 Block diagram of the MBN stress detection system

A/D 转换。系统采用高性能 STM32 系列处理器进行数据采集,最终将电压及应力数据显示在屏幕上。

采用 HYW-1000KN 电液伺服万能材料试验机、U71Mn 型钢轨枕腰上截取的拉伸试块和压缩试块进行检测系统标定。标定过程为:首先进行拉伸试验,将 MBN 应力检测系统的传感器用橡皮筋固定在拉件检测试块表面,通过试验机的液压夹紧试块,从 0 MPa 开始为拉件检测试块提供拉应力,每隔 10 MPa 从仪器面板上读取一次数据,直到 200 MPa 时停止计数;然后进行压缩试验,通过试验机的压盘压紧试块,从 0 MPa 开始为压件检测试块提供压应

力,每隔 10 MPa 从仪器面板上读取一次数据,直到 200 MPa 时停止计数。

图 4 是由拉伸试块和压缩试块过程得到的相应标准试件的 MBN 信号特征值 (U_{MBN}) 随应力变化的标定曲线,图 4 表明 MBN 信号特征值随压应力的增加而减小,随拉应力的增加而增大。

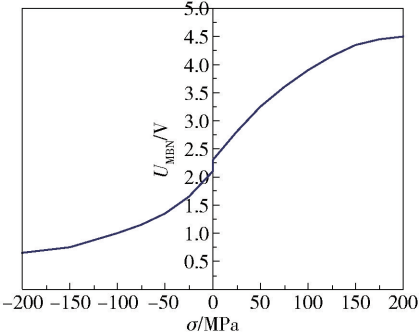


图 4 MBN 信号特征值和应力的标定曲线

Fig. 4 Calibration curve of the MBN signal characteristic value and stress

4 LS-SVM 算法

4.1 LS-SVM 算法的建立

SVM 是针对有限样本情况,根据结构风险最小化原则设计的一种统计学习理论,用于解决分类和回归问题。LS-SVM 与基本 SVM 的区别是其优化目标的损失函数以误差的二范数表示,用等式约束代替了 SVM 中的不等式约束条件,从而提高了收敛速度。

假设 $(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i)$ 为训练样本集, $x \in \mathbf{R}^n$ 为输入量, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为输入空间维数, $y \in \mathbf{R}$ 为输出量,则线性回归函数为

$$y = \mathbf{w}^T \Phi(x) + b \tag{4}$$

式中, \mathbf{w} 是连接输出空间和特征空间的线性回归权值的集合, $\Phi(x)$ 是 x 从原始空间到高维特征空间的映射, b 为偏置。

现要求输出量 y 使结构风险 $R(W)$ 最小,并且引入松弛变量因子 $\xi_i \geq 0, \xi'_i \geq 0$, 以确保函数有解,即得到如下优化问题

$$\begin{cases} \min R(W) = C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi'_i) + \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \\ y_i - \mathbf{w}^T \Phi(x_i) - b = \varepsilon + \xi_i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中, C 是惩罚参数; ε 为不敏感系数,反映拟合函数的精确度。采用拉格朗日法将优化问题转化为求解线性方程组

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b \tag{6}$$

式中, a_i 为拉格朗日乘子, $K(x, x_i)$ 为满足 Mercer 定理的核函数。

利用 LS-SVM 数据回归分析的方法, 以一段线路的钢轨温度应力为输入量, 以对应的 ΔT_i 作为输出量, 通过训练样本集便可建立该段线路的钢轨温度应力随 ΔT_i 变化的预测模型。

4.2 预测模型的建立

于 2018 年 7 月 20—22 日, 从已开通使用多年、正在服役中的河北保定工务段保满线选取下行的一段长度 1 100 m 的无缝线路。河北保定工务段提供的相关数据显示, 这 3 天期间该段无缝线路的实际锁定轨温为 27.0 ℃, 相对于其施工锁定轨温 31.0 ℃ 有所下降。利用 SGW-II + 数显轨温计和 MBN 应力检测系统进行轨温和温度应力检测。该线路所用钢轨规格为 U71Mn 型 50 kg/m 钢轨, $\beta = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\alpha = 1.18 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。此段线路中间的固定区长度为 900 m, 在固定区右股钢轨上每隔 20 m 进行标点, 共计 46 个测试点, 并用钢丝刷对标点处轨腰进行打磨, 除去铁锈。为了保证检测数据的丰富性, 在每天中午的不同时间点进行标点处轨腰的表面轨温和温度应力检测, 共检测 3 次。利用 SGW-II + 数显轨温计检测得到的表面轨温范围分别为 45.3 ~ 52.4 ℃、50.3 ~ 54.6 ℃、35.4 ~ 41.7 ℃, 得到线路固定区的 46 × 3 组右股钢轨上各点的表面轨温和温度应力数据。将该组表面轨温与实际锁定轨温相减, 可得到右股钢轨各点表面轨温与实际锁定轨温的差值 ΔT_i , 这样便得到了 46 × 3 组右股钢轨各点的温度应力和对应的 ΔT_i 数据。

选取表面轨温范围为 35.4 ~ 41.7 ℃、50.3 ~ 54.6 ℃ 的两天 46 × 2 组数据作为训练样本集, 以钢轨温度应力为输入量, 以对应 ΔT_i 为输出量, 得到该段线路钢轨温度应力随 ΔT_i 变化的 LS-SVM 预测模型。

4.3 仿真结果分析

选取表面轨温范围为 45.3 ~ 52.4 ℃ 的 46 组数据进行检验, 以线路钢轨各点的温度应力为输入量, 得到钢轨表面轨温与实际锁定轨温差值的仿真结果 $\Delta T'_i$ 如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 训练结果的最大相对误差为 17.35%, 这是由钢轨温度应力的迁移以及残余

表 1 仿真结果对比
Table 1 Comparison of simulation results

表面 轨温 T_i / ℃	实际 温差 ΔT_i / ℃	仿真 结果 $\Delta T'_i$ / ℃	相对 误差/ %	表面 轨温 T_i / ℃	实际 温差 ΔT_i / ℃	仿真 结果 $\Delta T'_i$ / ℃	相对 误差/ %
45.3	18.3	17.2	4.24	46.7	19.7	21.3	6.35
45.5	18.5	17.1	5.70	46.9	19.9	22.7	10.88
45.6	18.6	17.1	5.82	47.1	20.1	21.4	5.04
45.7	18.7	17.4	5.15	47.0	20.0	21.7	6.50
46.0	19.0	17.5	5.93	47.6	20.6	22.4	7.20
45.7	18.7	20.1	5.63	47.4	20.4	22.0	6.12
45.1	18.1	19.4	4.93	47.8	20.8	22.2	5.48
44.8	17.8	19.3	5.84	47.8	20.8	18.9	7.30
45.3	18.3	20.3	7.87	48.0	21.0	19.5	6.09
45.9	18.9	20.8	7.50	48.1	21.1	20.5	2.22
46.4	19.4	22.6	12.59	48.7	21.7	20.2	5.92
46.6	19.6	19.6	0.00	48.8	21.8	21.2	2.45
46.8	19.8	19.1	2.83	49.7	22.7	20.7	7.99
46.9	19.9	19.2	2.82	49.7	22.7	24.0	5.05
46.5	19.5	22.3	10.86	49.8	22.8	23.7	3.73
46.7	19.7	21.2	6.08	49.9	22.9	24.3	5.59
46.2	19.2	20.4	4.59	50.0	23.0	24.9	7.33
46.7	19.7	20.5	3.15	50.1	23.1	22.4	2.78
46.4	19.4	21.2	7.00	49.8	22.8	24.3	5.99
46.7	19.7	22.9	12.74	51.4	24.4	20.0	17.35
46.6	19.6	20.3	2.62	51.9	24.9	22.5	9.60
45.9	18.9	20.7	6.97	52.1	25.1	22.4	10.79
46.4	19.4	22.1	10.59	52.4	25.4	21.6	14.89

应力的影响造成的, 故相对误差处于可接受范围。仿真结果表明, 本文所建立的 LS-SVM 回归模型具有较高的精度。

利用本文所提出的方法, 将表 1 中线路钢轨各点表面轨温数据、预测得到钢轨各点表面轨温与实际锁定轨温的差值数据代入公式(3), 计算出该线路的实际锁定轨温为 26.7 ℃; 利用原有方法, 由公式(2)计算出的实际锁定轨温为 26.4 ℃。可见本文方法检测结果更接近实际锁定轨温数值, 结果更准确。

5 结束语

本文利用 LS-SVM 算法,建立线路的钢轨温度应力随钢轨表面轨温与实际锁定轨温差值变化的预测模型,进而利用预测模型、钢轨各点温度应力和表面轨温求出线路的实际锁定轨温。由于本文方法不需要考虑钢轨弹性模量、线胀系数等参数的影响,因此更高效、便捷。对河北保定的一段无缝线路进行了钢轨温度应力及表面轨温检测,分别利用本文提出的方法和原有方法求出该段无缝线路的实际锁定轨温,检测结果表明本文方法更准确。

参考文献:

- [1] 李冕梧. 地铁无缝线路锁定轨温变化及应对方法探讨[J]. 科技创新与应用, 2015(20): 27.
LI M W. Discussion on the change of rail temperature of subway seamless line and its countermeasures[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2015 (20): 27. (in Chinese)
- [2] 翟峰, 孙国钧. 无缝线路钢轨轨温和钢轨温度力实时监测系统的研制和应用[J]. 铁道建筑, 2012(10): 128-129.
ZHAI F, SUN G J. Development and application of real-time monitoring system for rail track temperature and rail temperature force of seamless line[J]. Railway Engineering, 2012(10): 128-129. (in Chinese)
- [3] 郭磊, 雷鸣, 祁欣. 基于 DSTFT 的无缝线路稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(1): 46-51.
GUO L, LEI M, QI X. Research on stability of continuous welded rail based on DSTFT[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2017, 30(1): 46-51. (in Chinese)
- [4] 李锐. 无缝线路锁定轨温研究[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2011, 10(4): 13-18.
LI R. On the research of the orbital temperature locking of seamless lines[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2011, 10(4): 13-18. (in Chinese)
- [5] ZHANG S D, YANG J G, LI Y Y, et al. Identification of bearing load by three section strain gauge method: theoretical and experimental research[J]. Measurement, 2013, 46(10): 3968-3975.
- [6] MATSUI M, KAMIYA Y. Evaluation of material deterioration of rails subjected to rolling contact fatigue using X-ray diffraction[J]. Wear, 2013, 304: 29-35.
- [7] DENG Y, LI Z, CHEN J, et al. The effects of the structure characteristics on magnetic Barkhausen noise in commercial steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 451: 276-282.
- [8] SHU D, YIN L, BU J, et al. Application of a combined metal magnetic memory-magnetic Barkhausen noise technique for on-site detection of the stress-free temperature of a continuous welded rail[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(3): 774-783.
- [9] 叶永伟, 陆俊杰, 钱志勤, 等. 基于 LS-SVM 的机械式温度仪表误差预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 57-66.
YE Y W, LU J J, QIAN Z Q, et al. Study on the temperature error prediction of mechanical temperature instrument based on LS-SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 57-66. (in Chinese)
- [10] 刘孟琼, 陈上仿. 广义虎克定律[J]. 湖南冶金职业技术学院学报, 2004, 4(2): 175-177.
LIU M Q, CHEN S F. Generalized Hooke's law[J]. Journal of Hunan Metallurgical Professional Technology College, 2004, 4(2): 175-177. (in Chinese)
- [11] 徐志东, 范子亮. 金属材料的弹性模量随温度变化规律的唯象解释[J]. 西南交通大学学报, 1993, 28(2): 87-92.
XU Z D, FAN Z L. A phenomenological explanation of the variation of elastic modulus with temperature for metallic materials[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993, 28(2): 87-92. (in Chinese)
- [12] CASTÁN-GUERRERO C, HERRERO-ALBILLOS J, SESÉ J, et al. Submicrometric 2D ratchet effect in magnetic domain wall motion[J]. Physica B, 2014, 455: 76-78.
- [13] QI X, HOU Z L, TIAN J L. Application of magnetoelastic technology to the measurement of stresses in rails for high-speed trains[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2004, 32(3): 234-239.
- [14] SHU D, GUO L, YIN L, et al. The effect of stress and incentive magnetic field on the average volume of magnetic Barkhausen jump in iron[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 394: 195-199.

Application of LS-SVM algorithm in detecting the stress-free temperature of continuous welded rail

CHEN ShuPeng¹ CHEN Juan^{1*} HUANG ShunHao¹ QI Xin¹ LI Shuai²
DI JinYu² LI PengBo²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Baoding Works Business Section, China Railway Beijing Group Co. Ltd, Baoding 071000, China)

Abstract: Magnetic Barkhausen noise (MBN) technology has been used to detect the actual stress-free temperature of continuous welded rail. The method uses MBN technology to detect the rail temperature stress, and uses the rail thermometer to detect the surface rail temperature. Using the least squares support vector machine (LS-SVM) algorithm, a predictive model has been established to predict the relationship between the rail temperature stress and the difference between the surface rail temperature and the actual stress-free temperature. Finally, the temperature difference obtained by the predictive model and the surface rail temperature of the rail have been used to calculate the actual stress-free temperature. The rail temperature stress and surface rail temperature have been tested on a section of continuous welded rail in Baoding, Hebei Province, and the results show that the method improves the accuracy of detection.

Key words: least squares support vector machine (LS-SVM) algorithm; magnetic Barkhausen noise (MBN); temperature stress; stress-free temperature

(责任编辑:汪 琴)