

基于车致振动响应的无缝线路温度力识别研究

马超^{1,2}, 安子旭², 张晓东²

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:无缝线路温度力过大会导致胀轨或断轨, 现场需实时监测钢轨温度力。以钢轨在温度力作用下受到的车致振动加速度为研究对象, 提出一种利用多元回归算法拟合温度力特征指标反向识别钢轨温度力的新方法。通过对温度力作用下车致钢轨振动加速度进行希尔伯特黄变换, 提取钢轨加速度的 HHT 灰度时频直方图方差和边际谱在 1 300~1 500 Hz 内的瞬时幅值变化率作为温度力特征指标, 将 2 指标分别输入到回归算法和灰色算法中, 对比钢轨温度力识别误差。结果表明, 钢轨所受温度力越大, 识别结果的相对误差越小; 利用多元回归算法识别温度力的平均识别误差可达到 3.24%, 相比于灰色预测模型降低了 3.54%, 为现场实时监测钢轨温度力提供借鉴。

关键词:无缝线路; 温度力; 车致振动; 希尔伯特黄变换; 回归分析

中图分类号: U216; U213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0099-07

0 引言

无缝线路消除了轨缝, 减少了轮轨冲击作用, 大大降低了线路维修工作量, 但轨温变化会导致无缝线路钢轨内部产生温度力。为防止无缝线路在温度力作用下产生胀轨或断轨, 需实时掌握其温度力。现场常用的传统检测方法为位移观测桩法^[1], 通过观测长钢轨位移量的变化计算钢轨内部温度力的变化情况, 该方法不能实时掌握钢轨温度力变化。近年来, 一些实时监测钢轨温度力的方法得到应用, Kjell et al^[2]提出基于超声导波测量钢轨温度力作用下的弯曲波长变化来检测温度力; Maurin et al^[3]利用光栅光纤传感器对钢轨温度应力进行实时监测, 超声波可实现实时对钢轨温度力的非接触式检测, 但测量精度受钢轨内部损伤影响较大; 光栅光纤监测通过监测钢轨应变从而推算出钢轨锁定轨温变化, 但成本较高且测量精度低^[4-5]。

近年来, 部分学者提出基于钢轨振动特性的温度力监测方法, 该方法是通过分析激励作用下钢轨振动特性与温度力的关系识别钢轨温度力。Aikawa et al^[6]基于 Floquet 变换理论分析了无缝线路钢轨在温度力作用下的各阶共振频率变化情况, 并将横向振动第一阶共振频率作为识别温度力的评价指标; Abe et al^[7]研究钢轨受到简谐激励时第一阶竖向共振频率与温度力的关系, 并确定不同轨枕间距会对钢轨共振频率识别温度力产生影响; 罗雁云、董国鹏、刘艳等^[8-10]通过建立温度力作用下的无缝线路钢轨谐响应分析模型, 得到钢轨共振频率与温度力之间的关系, 提出利用钢轨竖向共振频率识别温度力; 金寿延等^[11]通过分析不同温度力作用下的钢轨横向振动频率特征, 证明钢轨横向共振频率也可预测温度力; 冯青松等^[12]通过分析不同轨枕间距对温度力作用下钢轨竖向共振频率的影响, 得到了轨枕间距会影响共振频率变化规律, 从而影响温度力识别精度。以上研究均分析了钢轨自振频率与温度力之间的关系, 验证了基于钢轨振动特征识别温度力的可行性, 但无缝线路钢轨模态频率不易测得且受轨枕间距的影响较大, 较难实现现场实时监测钢轨温度力。而列车荷载作用下产生的钢轨振动加速度较易测得, 因此, 可将温度

收稿日期: 2022-10-20 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220318

基金项目: 国能新朔铁路有限责任公司科技创新项目(SHXS-2020-06)

作者简介: 马超(1974—), 女, 副教授, 研究方向为铁路轨道结构与养护维修理论与技术。E-mail: mach_74@stdu.edu.cn

马超, 安子旭, 张晓东. 基于车致振动响应的无缝线路温度力识别研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023, 36(1): 99-105.

作用下的车致钢轨振动加速度作为研究对象,通过提取温度力作用下的加速度特征指标,实现钢轨温度力的识别。

1 不同温度力下钢轨加速度特征研究

希尔伯特黄变换(HHT)是常用的处理振动信号的时频分析方法^[13],钢轨温度力作用会改变 HHT 时频图中的像素点分布,通过分析温度力作用下车致钢轨振动加速度信号的 HHT 时频图在不同时间段内像素点的分布情况推算出温度力变化规律;Hilbert 边际谱是对信号中各个瞬时频率成分幅值的整体表达,当钢轨温度力发生变化时会导致钢轨的物理参数发生改变,进而引起边际谱幅值的变化,可利用钢轨的加速度边际谱特征反映温度力变化^[14],这 2 种特征分析方法将频率的瞬时成分分析与信号的时域分析相结合,可实现温度作用下的车致钢轨振动加速度的特征提取。

1.1 无缝线路车致钢轨振动加速度的获取

建立由 P60 钢轨、Ⅲ型混凝土枕和道床组成的无缝线路力学模型,如图 1 所示。在有限元模型中,选用弹簧阻尼单元模拟扣件,轨枕与道床采用接触单元模拟,定义道床质量块之间的剪切刚度和剪切阻尼来模拟道砟颗粒之间摩擦阻力。将钢轨两端沿纵向约束,设置初始锁定轨温为 10 °C,对钢轨施加变化的温度场来模拟温度力;在轨顶施加 100 kN 的垂向移动荷载模拟列车移动荷载,移动速度为 80 km/h。

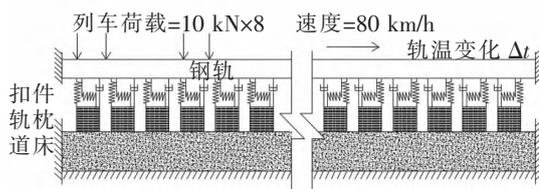


图 1 无缝线路轨道力学模型

结合线路轨温变化情况,模拟轨温变化区间控制为-40~40 °C,以每 5 °C 为一个工况,设置轨温升降幅度,选择提取在不同温度力作用下两轨枕跨中轨底处的振动加速度作为研究对象^[15]。数据采集自列车第一轮对经过前 1 s 开始至列车通过后结束,在全程加速度数据中提取中间 1 s 范围内包含 2 个峰值信号的加速度时程数据进行分析,截取钢轨在温升 20 °C 下的振动加速度信号如图 2 所示。

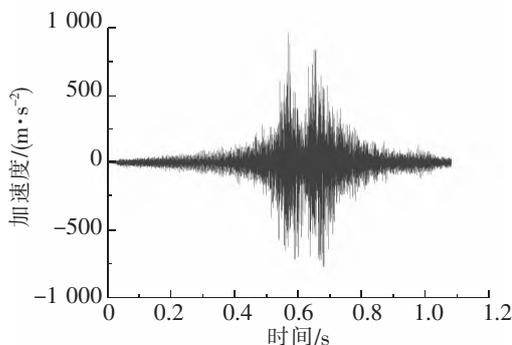


图 2 轨底车致振动加速度时域图

1.2 钢轨加速度的 HHT 时频图特征分析

为定量分析钢轨温度力对 HHT 时频图不同频率段内的像素点分布情况,将时频图量化为 8 位的灰度图,从灰度图中可以清晰看到每个像素点所在的位置和数量,再经均衡化处理,可得到加速度信号经 HHT 时频处理得到的灰度直方图(以下简称 HHT 灰度时频直方图)。通过分析不同温度力下钢轨加速度的 HHT 灰度时频直方图随温度力变化规律,提取对应的时频图特征,钢轨在温升从 0~40 °C 下加速度的 HHT 灰度时频直方图如图 3 所示。

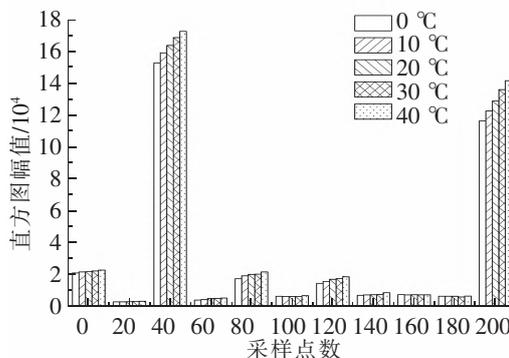


图 3 钢轨温升下加速度的 HHT 灰度时频直方图

从图 3 可知,HHT 灰度时频直方图内的像素数量随钢轨温度力的升高而增加,但仅对比直方图的峰值变化难以全面判断钢轨温度力变化情况,需要一种变量能表示时频图中像素点的分布情况,而方差在统计学中可评价一组数据离散程度,可通过分析直方图方差判断钢轨在温度力作用下的时频图像素偏离程度。因此,可分析钢轨加速度在不同温度力下 HHT 灰度时频直方图方差与轨温变化幅度之间的关系来

确定温度力作用下的加速度特征指标,变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可知,HHT 灰度时频直方图方差随轨温变化幅度的升高呈现增长趋势;在温降阶段,其方差最大变化量为 4.89×10^6 ,其中 $-20 \sim 0$ °C 之间纵坐标变化不明显;在温升阶段纵坐标最大变化量为 9.9×10^6 ,约为温降时的 2 倍,且变化幅度较均匀,说明该特征对温升更敏感。

1.3 钢轨加速度的 Hibert 边际谱特征分析

因钢轨温度力变化会使其刚度、质量发生变化,进而引起边际谱中瞬时频率对应的瞬时幅值发生变化,故可通过分析信号的瞬时变化幅值来评判钢轨加速度信号整体受到温度力的影响。当轨温变化幅度在 0 °C 和 40 °C 时,钢轨加速度 Hibert 边际谱曲线如图 5 所示。

图 5 可知,边际谱幅值在 1 300~1 500 Hz 内的瞬时频率变化明显,说明这段特征频率对钢轨温度力变化较敏感。钢轨受到的车致振动加速度是一种随机信号,不能简单通过对比瞬时峰值变化判断温度力变化情况,需将敏感频率区间内的瞬时幅值总量综合对比,通过分析钢轨温度力下 Hibert 边际谱在 1 300~1 500 Hz 瞬时频率内的幅值总量与无温度力作用时该频率段内的瞬时幅值总量的相对变化率判断温度力损伤情况。在瞬时频率区间(1 300~1 500 Hz)定义对应区域内的瞬时幅值总量 S 为

$$S = \int_{1300}^{1500} h(f) df \quad (1)$$

定义钢轨温度力作用下边际谱在 1 300~1 500 Hz 内瞬时幅值总量与无温度力作用下的相对变化率 R_A 为

$$R_A = \frac{|S_d - S_u|}{S_u} \times 100\% \quad (2)$$

式中, S_u 为钢轨无温度力作用下 Hibert 边际谱在 1 300~1 500 Hz 瞬时频率内的幅值总量; S_d 为其存在温度力时的瞬时幅值总量。不同温度力下钢轨振动加速度的 Hibert 边际谱瞬时幅值相对变化率(R_A) 曲线如图 6 所示。

从图 6 可知,钢轨加速度的 Hibert 幅值变化率在温降各阶段其变化率均高于温升阶段,其中 -40 °C 与 0 °C 时的变化率差值最大可达 7.89%。在温升阶段 0~20 °C 变化不明显;当温升达到 20 °C 以上,其变化率呈现不均匀增长趋势,说明该特征对温降较为敏感。

2 钢轨温度力识别方法研究

根据上述研究得到的 2 个加速度特征指标与温度力的变化关系,可构建 1 个或 2 个特征指标与温度力的函数关系,通过自变量变化反推得到因变量,常用的根据自变量识别因变量的识别方法主要包括回

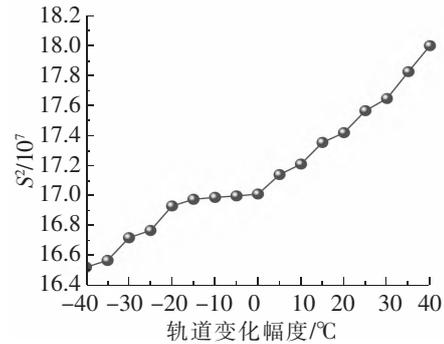


图 4 HHT 灰度时频直方图方差与轨温变化幅度的关系

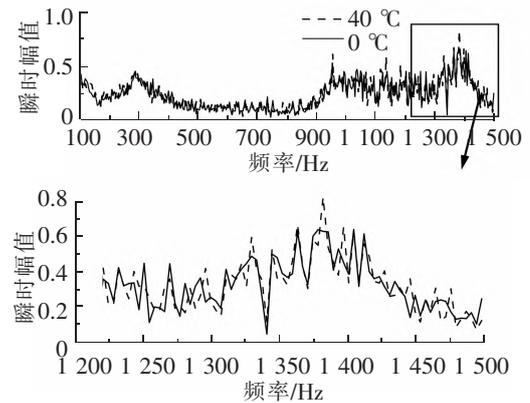


图 5 钢轨温升下加速度 Hibert 边际谱特征曲线

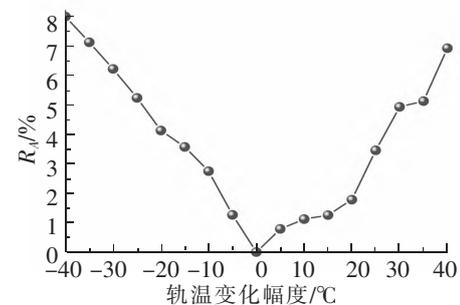


图 6 钢轨加速度边际谱瞬时幅值变化率与轨温变化幅度之间的关系

归分析和灰色预测分析。其中回归分析需要建立合适的拟合函数,灰色预测模型是建立在学习算法基础上的非线性识别,通过 2 种方法识别精度的对比确定最终的识别方法。

2.1 基于回归算法识别钢轨温度力

回归分析通过建立自变量与因变量的函数关系,达到利用函数中的自变量识别因变量的目的。从上述的研究可知,在温度力作用下钢轨加速度的 HHT 灰度时频直方图方差(S^2)和 Hibert 谱瞬时幅值变化率(R_A)基本与轨温变化幅度呈现简单的函数关系,且规律明显。但由于 2 个指标在不同温度力变化区间内的敏感程度不同,因此分别采用一元回归和多元回归算法对 2 个指标在温升、温降各阶段进行温度力的识别,2 种回归曲线同时选取 95% 的置信区间和预测区间对 2 种特征分析识别效果进行评价。

钢轨加速度的 Hibert 谱瞬时幅值变化率(R_A)呈现先减小后增大的抛物线曲线,因此通过二次多项式拟合得到该特征与轨温变化幅度(T)之间的回归曲线,多项式回归算法为

$$R_A = 1.26 - 0.03T + 0.004T^2 \quad (3)$$

钢轨加速度的 HHT 灰度时频直方图方差(S^2)与轨温变化幅度(T)呈现明显的线性关系,回归方程为

$$S^2 = 1.72e^5 + 1.67e^5 T \quad (4)$$

多元非线性回归模型考虑将 2 个指标综合分析,构建多元回归模型,以期实现对钢轨温度力的精准识别。其多元非线性回归方程式为

$$T = 13\,900 + 111.19R_A - 1.72e^{-4}S^2 - 0.64R_A^2 + 5.52e^{-13}S^2 - 6.45e^{-7}R_AS^2 \quad (5)$$

钢轨加速度特征指标与轨温变化幅度回归模型如图 7 所示。

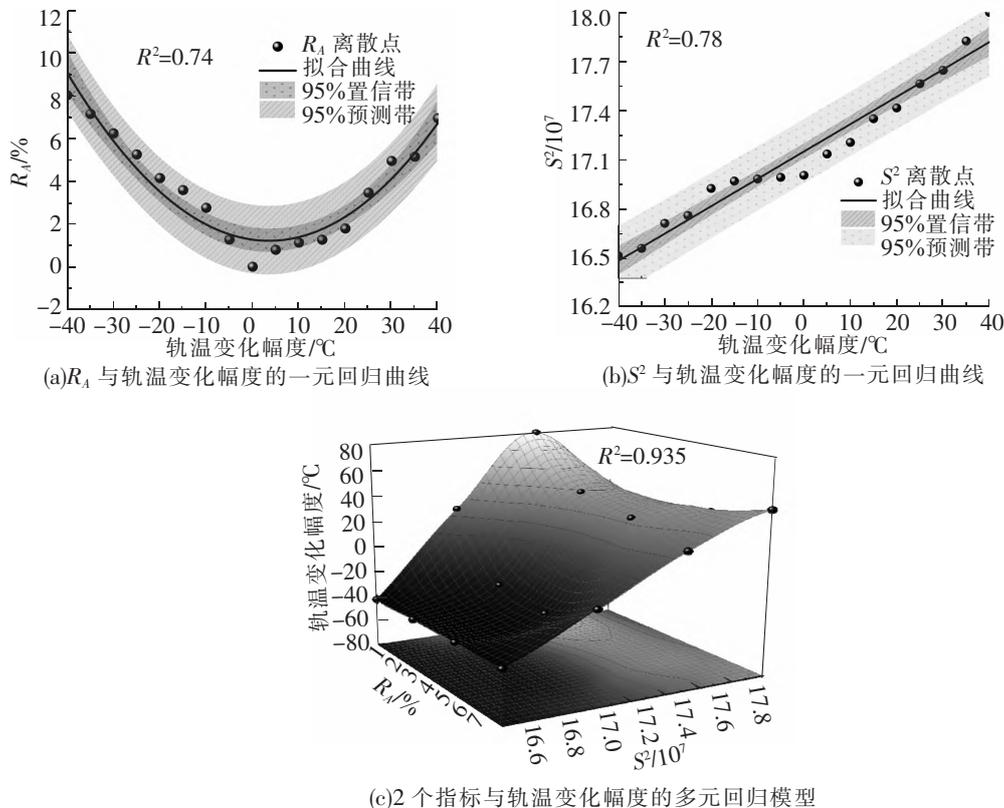


图 7 钢轨加速度特征指标与轨温变化幅度回归模型

从图 7(a)、图 7 (b)可知,2 个一元回归拟合曲线的 R^2 都达到了 0.7 以上,各离散点都在 95% 的置信带和预测带内,其中,将钢轨加速度 HHT 灰度时频直方图方差作为特征指标识别温度力时,温升阶段的识别误差均大于温降阶段,最小误差出现在温升 40 °C 时,其值为 4.3%,说明该特征对钢轨温升阶段识别更准确。将边缘谱特征幅值变化率作为特征指标识别温度力时,温降阶段的识别误差均大于温升阶段,

最小误差出现在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为 6.6% ,说明该特征对钢轨温降阶段更准确。由图 7(c)可知,拟合曲面计算得到的 $R^2=0.935$,对比于单因素拟合曲线 R^2 明显增加,精确度明显高于一元回归结果。因此,在回归算法中应利用多元回归算法对钢轨温度力进行识别,钢轨温度力识别误差如表 1 所示。

2.2 基于灰色预测算法识别钢轨温度力

灰色预测分析可对数据少、序列不完整及可靠性低的数据进行预测,不考虑数据分布规律或变化趋势,适用于指数增长性数据的识别。由上述分析可知,钢轨加速度的 HHT 灰度时频直方图方差与轨温变化幅度呈指数增长,而 Hilbert 边际谱瞬时幅值变化率对钢轨温降呈指数减小,对温升呈指数增长。因此,分别对 2 个指标在温升、温降阶段构建灰色预测模型,灰色预测算法识别结果如表 1 所示。

表 1 轨温变化幅度的识别结果及误差

模拟轨温 变化幅度/ $^{\circ}\text{C}$	回归算法识别结果				灰色预测算法识别结果				
	R_A 模拟 值/ $\%$	S^2 模拟 值/ 10^8	多元回归 识别结果/ $^{\circ}\text{C}$	相对 误差/ $\%$	模拟轨温 变化幅度/ $^{\circ}\text{C}$	R_A 识别 温差/ $^{\circ}\text{C}$	相对 误差/ $\%$	S^2 识别 温差/ $^{\circ}\text{C}$	相对 误差/ $\%$
-40	7.991	1.65	-39.23	1.93	-40	-38.20	4.50	-36.84	7.89
-35	7.121	1.66	-34.68	2.11	-35	-33.40	4.57	-32.04	8.45
-30	6.214	1.67	-29.64	2.20	-30	-31.40	4.67	-27.26	9.12
-25	5.231	1.68	-24.26	2.76	-25	-26.20	4.80	-22.62	9.54
-20	4.126	1.69	-19.45	2.95	-20	-18.70	6.50	-17.95	10.23
-15	3.569	1.70	-15.32	3.13	-15	-16.10	7.33	-13.41	10.65
-10	2.745	1.70	-10.56	5.60	-10	-9.12	8.80	-8.86	11.43
-5	1.265	1.70	-5.28	5.60	-5	-5.62	12.40	-4.44	11.23
5	0.124	1.70	5.23	4.60	5	4.37	12.54	5.52	10.40
10	0.787	1.71	10.43	4.30	10	8.88	11.23	10.85	8.50
15	1.120	1.72	15.45	3.96	15	13.38	10.78	16.11	7.33
20	1.256	1.74	20.62	3.90	20	18.07	9.67	18.64	6.80
25	1.781	1.74	26.23	3.12	25	22.67	9.34	26.53	6.12
30	3.452	1.76	29.46	2.80	30	27.34	8.87	28.42	5.27
35	4.930	1.76	34.13	1.49	35	32.01	8.54	36.45	4.14
40	5.123	1.78	39.65	1.38	40	37.02	7.45	41.23	3.07

由表 1 可知,2 种方法识别误差均随轨温变化幅度的增大而减小,多元回归算法在整个轨温变化区间内的平均识别误差为 3.24% ,远小于一元回归算法的 8.26% 和灰色预测模型的 6.78% ,因此多元回归模型对钢轨温度力有较好的识别效果。

在多元回归算法中,最小误差出现在温升 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其值为 1.38% ;最大的误差出现在钢轨温降 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化区间内,其值为 5.60% ,在温升阶段的温度力平均识别误差都小于温降阶段。

2.3 无缝线路温度力的识别方法

上述研究确定了多元回归作为无缝线路温度力的识别算法,以下将依据该方法提出一种现场基于车致振动加速度的无缝线路温度力识别新思路,具体方法如下:

(1)传感器选择。选取量程为 500g 的压电式加速度传感器,采样频率设置为 $2\ 048\text{ Hz}$,全程监测列车通过时的钢轨振动加速度。

(2)建立样本数据库。①采集现场加速度数据。每月的月初、月中、月末分别采集当天在平均气温下钢轨受列车荷载作用的加速度数据,并记录现场温度力;连续采集 1 a ,得到 36 组不同温度力作用下的钢

轨加速度信号。②提取温度力作用下的钢轨加速度特征。截取每个加速度时域图中间时间段 1 s 内包含 2 个峰值的数据进行特征分析,通过 HHT 时频分析得到温度力作用下的 HHT 时频图,再经灰度变化提取得到 HHT 灰度时频直方图方差;利用 Hilbert 谱变化获得在 1 300~1 500 Hz 瞬时频率内的幅值总量,与全年平均气温下钢轨受温度力作用时加速度的 Hilbert 谱在此频率区间内的幅值总量计算得到 Hilbert 谱在该区间内的瞬时幅值相对变化率。③构建钢轨加速度特征与温度力拟合曲面。对钢轨加速度 2 个特征与温度力进行多项式拟合,得到如式(5)的钢轨加速度 HHT 灰度时频直方图和 Hilbert 谱瞬时幅值总量变化率与温度力的拟合曲面。

(3)监测钢轨温度力。选择步骤(1)中的测点及加速度传感器,采集在列车通过时的钢轨加速度;截取加速度时域图中间时间段 1 s 内包含 2 个峰值的数据进行特征分析,经 HHT 变换后,得到步骤(2)②中 2 个加速度特征指标;将 2 个特征输入样本数据的拟合曲面中,即可实时监测钢轨温度力。

3 结论

无缝线路温度力过大会导致轨道产生胀轨或断轨,引起安全事故,需实时掌握无缝线路温度力。因此,基于车致振动加速度提出一种无缝线路温度力识别的新方法,结论如下:

(1)选取 HHT 灰度时频直方图方差作为钢轨温升阶段的加速度特征指标、边际谱 1 300~1 500 Hz 内的瞬时幅值总量相对变化率作为钢轨温降阶段的加速度特征指标。

(2)多元回归作为钢轨温度力的识别算法,平均识别误差为 3.24%,比一元回归算法降低了 4.38%,比灰色预测算法降低了 3.54%,且随着轨温变化幅度的增加,识别误差逐渐减小,最大识别误差为 5.60%,最小为 1.38%,理论上可实现对无缝线路温度力较高精度的识别。

(3)提出的现场基于车致振动加速度识别无缝线路温度力的新思路,可实现对钢轨振动加速度与轨温的实时监测,后期只需输入特征指标到回归曲面中即可得到较高的无缝线路温度力识别精度,且不受轨道结构影响。本方法的实用性还需进一步验证。

参 考 文 献

- [1]练松良. 轨道工程[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [2]Kjell G, Johnson E. Measuring axial forces in rail by forced vibrations: experiences from a full-scale laboratory experiment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(3): 241-254.
- [3]Maurin L, Boussoir J, Rougeault S. FBG-based smart composite bogies for railway applications [J]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, 15(1): 91-94.
- [4]张兆亭, 闫连山, 王平, 等. 基于光纤光栅的钢轨应变测量关键技术研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 65-69.
- [5]孙高盼, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于光纤光栅的钢轨受力状态监测技术研究[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(1): 69-71.
- [6]Aikawa A, Sakai H, Abe K. Numerical and experimental study on measuring method of rail axial stress of continuous welded rails based on use of resonant frequency[J]. Quarterly Report of RTRI, 2013, 54(2): 118-125.
- [7]Abe K, Shimizu S, Aikawa A, et al. Theoretical study on a measuring method of rail axial stress via vibration modes of periodic track[R]. [S. l.]: Proceedings of WCRR, 2011.
- [8]罗雁云, 朱剑月, 冯奇. 不同温度力下无缝线路钢轨振动特性分析[J]. 力学季刊, 2006(2): 279-285.
- [9]董国鹏, 朱剑月, 罗雁云. 无缝线路钢轨振动特性谱响应有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2005(20): 1518-1521.
- [10]刘艳, 罗雁云. 无缝线路纵向温度力作用下的动力特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(5): 21-25.
- [11]金寿延, 朱剑月, 罗雁云, 等. 无缝线路轨道的温度力与振动特性关系的研究[J]. 机械强度, 2002(1): 144-147.
- [12]冯青松, 汪玮, 刘庆杰, 等. 轴向温度力影响下周期离散支承钢轨竖向振动特性分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 122-129.
- [13]Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition method and the hilbert spectrum for non-stationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(8): 903-995.
- [14]杨智春, 张慕宇, 丁燕, 等. Hilbert 边际谱在框架结构损伤检测中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 26-29.

[15]游林涛,王立志,梁军生,等. 无缝轨道钢轨温度力的有限元分析及实验研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(11): 1119-1121.

Research on Temperature Force Identification of CWR Track Based on Vehicle-Induced Vibration Response

Ma Chao^{1,2}, An Zixu², Zhang Xiaodong²

- (1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Excessive temperature force of CWR (Continuously Welded Rail) will lead to rail expansion or broken rail. So real-time monitoring of rail temperature force is needed on site. The acceleration of rail vibration caused by moving vehicle under the action of temperature force was taken as the research object, and a new method for reverse identification of rail temperature force was proposed by fitting the characteristic indicators of temperature force with multiple regression algorithm. Through Hilbert-Huang Transform of the rail vibration acceleration signal caused by moving vehicle under the temperature force, the variance of HHT time-frequency gray histogram and the instantaneous amplitude rate of marginal spectrum in 1 300~1 500 Hz were obtained to serve as the characteristic indices of temperature force. Then, the two indicators were input to compare the rail temperature force identification error through the regression model and gray model. The results show that the greater the temperature force on the rail, the smaller the relative error of the identification results. The average identification error of temperature force identified by the multiple regression algorithm is 3.24%, which is 3.54% lower than that of the gray prediction model. The results might provide reference for real-time monitoring of rail temperature force on site.

Key words: CWR; temperature force; vehicle induced vibration; Hilbert-Huang Transform; regression analysis