

基于瑞利波的轨道板表面裂缝深度检测方法^{*}张尧¹ 张辉^{1**} 朱文发^{1,2} 范国鹏¹ 方文平³

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海;

2. 华东理工大学机械与动力工程学院, 200240, 上海;

3. 杭州骖威机电科技有限公司, 311100, 杭州//第一作者, 硕士研究生)

摘要 为能高效精确地检测轨道板裂缝,建立了含有表面裂缝的轨道板二维有限元模型,分析并总结了瑞利波对轨道板表面裂缝的作用规律,研究了不同裂缝深度下接收到的瑞利波时域信号的特点。基于瑞利波传播时间差法的原理,提出了基于瑞利波的轨道板表面裂缝深度检测方法,并利用有限元模型对检测结果进行了验证。验证结果表明:检测结果误差较小,准确高,说明该检测方法具有理论可行性。

关键词 轨道板; 裂缝检测; 瑞利波; 裂缝深度

中图分类号 U213.2*41

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.008

Detection Method of Track Slab Surface Crack Depth Based on Rayleigh Wave

ZHANG Yao, ZHANG Hui, ZHU Wenfa, FAN Guopeng, FANG Wenping

Abstract In order to detect the cracks in track slab effectively and accurately, a two-dimensional finite element model of track slab with surface cracks is established, the action law of Rayleigh wave on surface cracks is analyzed and summarized, and the characteristics of Rayleigh wave time-domain signals received at different crack depths are studied. Based on the principle of Rayleigh wave propagation time difference method, a method for detecting the depth of track slab surface cracks based on Rayleigh wave is proposed, and test results are verified by finite element model. The verification results show that the error of the detection results is relatively small and the accuracy is high, indicating that the detection method is theoretically feasible.

Key words track slab; crack detection; Rayleigh wave; crack depth

First-author's address School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

长期服役的轨道板因其混凝土干缩变形和温度变形,易产生表面裂缝。受不均匀沉降、温度变化及列车动荷载的影响,这些裂缝会进一步延伸,逐渐形成深度裂缝甚至是贯穿裂缝。贯穿裂缝处极易发生渗水,不仅会造成钢筋锈蚀,从而导致绝缘节点失效,还可能会导致基床下沉。这些都会影响轨道板的承载能力及其使用功能,成为行车安全的重大隐患^[1-5]。可见,在轨道板形成贯穿裂缝前及时进行检测尤为重要,其中较为关键的就是对裂缝损伤程度的判别。

由于铁路路况复杂、外部环境的影响大、检测成本较高等因素,轨道板裂缝检测一直是我国高速铁路维护工作的难点。目前,我国轨道板维护主要采取的人工测量判断和记录方法,存在人力成本高、检测时间长、漏检率高、准确率低等问题。近年来,一些研究人员提出了利用图像处理技术对轨道板裂缝进行检测的方法。但是,基于图像处理的检测方法仅能判断裂缝的存在及裂缝定位,无法精确检测裂缝的深度。而且,由于采集图像时缺少自然光,或轨道板长年经受风吹雨淋致使背景颜色有差异等环境原因,现有算法对轨道板的裂缝检测效果并不理想。

为能更加高效且精确地检测轨道板裂缝,本文提出了利用瑞利波的传播规律对轨道板表面裂缝进行检测的方法。

1 瑞利波的基本理论

在均匀介质的表面施加激励时,激励点附近的质点会发生振动。这些质点的振动随后会以应力波的形式传递给相邻的质点,从而导致相邻的质点随之振动,依次循环。在介质内部,这种振动会不

* 国家自然科学基金项目(12004240);中国博士后科学基金项目(2020M671022)

** 通信作者

断得扩散,产生以激励点为中心的弹性应力波。按照传播特性的不同,这种弹性应力波通常可分为瑞利波与体波。体波在介质的内部传播,可分为纵波(即压缩波)和横波(即剪切波)。瑞利波沿介质表面传播,于 1887 年由英国学者瑞利发现并验证。瑞利波通常分布在介质的自由表面。在各向同性的均匀介质中,瑞利波传播时的相速度和群速度保持一致。如图 1 所示的二维平面中,当瑞利波在介质自由表面传播时,质点振动的位移随深度的增加而逐渐衰减^[6]。

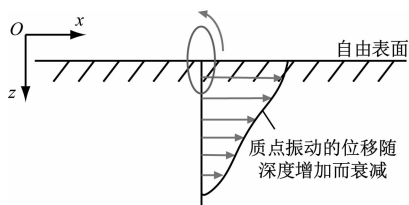


图 1 二维平面中的瑞利波传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Rayleigh wave propagation in two-dimensional plane

由弹性波的理论可知,弹性波的传播速度与弹性介质的泊松比有关。为了方便实际应用分析,根据弹性力学相关知识及理论推导,可以得出纵波、横波及瑞利波的波速与介质的弹性参数有如下关系:

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1)$$

$$v_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} \quad (2)$$

$$v_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} v_S \quad (3)$$

式中:

ρ ——密度;

μ ——泊松比;

λ ——拉梅系数;

G ——剪切模量;

v_P ——纵波波速;

v_S ——横波波速;

v_R ——瑞利波波速;

E ——弹性模量。

根据相关理论研究,瑞利波传播时有如下特性:

1) 瑞利波在沿介质表面传播时,其能量随传播距离的增加而衰减。但和体波相比,瑞利波的衰减要慢得多。若传播距离为 r ,则瑞利波的衰减率为

$1/r$,而体波随距离 r 按 $1/\sqrt{r}$ 衰减。此外,瑞利波的自身能量远远大于体波的能量,故瑞利波的能量衰减更慢。

2) 瑞利波在各向同性的均匀弹性介质中传播时,不会出现频散现象,波速也不会因为频率变化而改变。

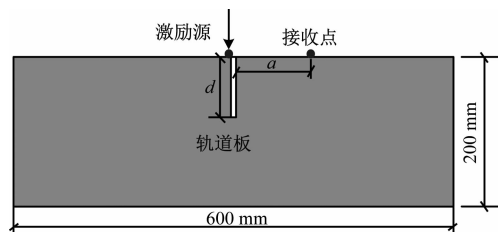
3) 瑞利波在介质表面传播时,其质点振动时的位移轨迹呈椭圆状按逆时针方向运动。

4) 当瑞利波遇到裂缝或缺陷等异常体时,其能量会发生变化,并且可能出现传播时间延长的现象。

由于瑞利波具有沿介质表面传播、能量衰减较慢等特性,因此,相较于横波和纵波,瑞利波更适用于轨道板之类大体积结构的表面缺陷检测。

2 含表面裂缝的轨道板二维模型

受限于实体试验条件,无法获取轨道板裂缝的现场检测数据,故本文仅采用有限元模型方法进行验证。以 ABAQUS 有限元软件为平台,建立含有表面裂缝的轨道板二维有限元模型如图 2 所示^[7]。其中 $L = 600$ mm,裂缝的宽度为 1 mm,在裂缝的左边缘施加激励,裂缝右侧 $a = 60$ mm 处接收信号。



注: d 为裂缝深度; a 为接收点与裂缝右侧边缘的距离。

图 2 含表面裂缝的轨道板模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of track slab model with surface cracks

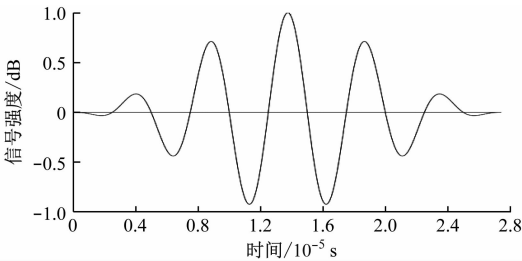
在轨道板有限元模型中,设定主要材料属性,并结合式(1)一式(3),计算可得轨道板中相关弹性波波速。相关参数的计算结果如表 1 所示。

为了满足传播时间差法测量的要求,瑞利波波长需小于裂缝深度,因此需要高频激励源进行激发,以保证瑞利波传播时先经过裂缝的 2 个侧面,然后到达裂缝右侧的轨道板上表面^[8-10]。本研究采用汉宁窗调制的、3 个周期的正弦波信号,其中心频率为 200 kHz,具体波形如图 3 所示。对应的瑞利波波长约为 10 mm。对模型采用四边形网格进行划分,网格尺寸为 1 mm(即约为瑞利波波长的 1/10)。

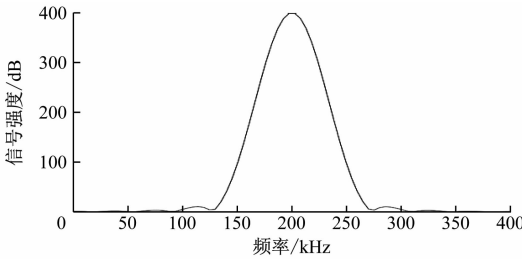
表 1 轨道板模型主要属性参数取值

Tab.1 Values of main property parameters of track slab model

模型属性参数	参数取值
E/GPa	36.5
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 500
μ	0.2
$v_p/(\text{m}/\text{s})$	4 027
$v_s/(\text{m}/\text{s})$	2 466
$v_R/(\text{m}/\text{s})$	2 248



a) 信号强度-时间



b) 信号强度-频率

图 3 激励源信号图

Fig.3 Signal diagram of excitation source

3 超声波在轨道板中的传播规律

本文选取裂缝深度为 60 mm 的轨道板二维模型波场云图(见图 4)进行定性研究。当时间 $t = 2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时,在激励源的作用下,激发出了纵波、横波及瑞利波 3 类弹性波。由图 4 可见,纵波和横波在轨道板内部呈圆弧状扩散,瑞利波则呈地滚式沿着轨道板表面及裂缝左侧表面传播。此外,瑞

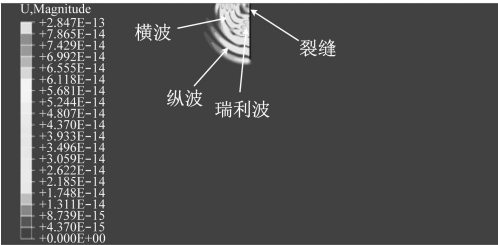


图 4 $t = 2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时弹性波激发

Fig.4 Elastic wave excitation at $t = 2.0 \times 10^{-5} \text{ s}$

利波、横波及纵波的能量各不相同。其中,纵波的传播速度最快,且能量较弱;横波和瑞利波的传播速度相差较小;瑞利波的能量较强,明显要高于横波。

如图 5 所示,当 $t = 4.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时,瑞利波沿着裂缝表面传播到裂缝底部。当经过裂缝底端时,部分瑞利波会在此处发生模态转换的现象,通过衍射转换为衍射体波。从图 5 中能量的变化可以看出,衍射出的体波能量较大。由于此时传播到裂缝底部的瑞利波刚刚发生模态转换,衍射的时间较短,所以很难将衍射体波中的横波和纵波区分出来;其余部分瑞利波则绕过裂缝的底端,向上沿着裂缝的右侧表面继续传播。

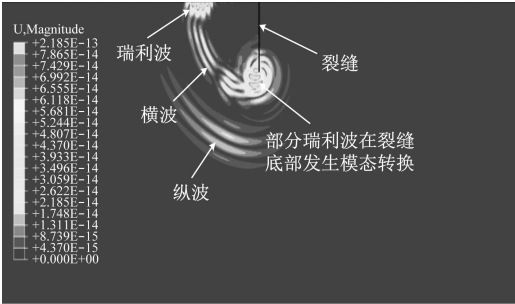


图 5 $t = 4.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时瑞利波发生模态转换

Fig.5 Rayleigh wave mode conversion taking place at $t = 4.0 \times 10^{-5} \text{ s}$

如图 6 所示,当 $t = 5.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时,经过模态转换后的衍射体波呈圆弧状向轨道板内部四周传播。此时可明显区分转换后的衍射横波和衍射纵波。由于衍射纵波的传播速度较快,故其此时传播的距离最远,位于波场云图的前端;衍射横波的传播速度较慢,位于衍射纵波之后。从能量变化可以看出,衍射横波的能量要远远大于衍射纵波。另一部分瑞利波已沿着裂缝表面,绕过了裂缝底端,呈地滚式向上沿着裂缝右侧表面继续传播。此外,在轨

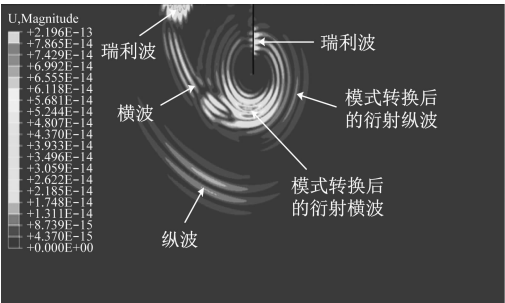


图 6 $t = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时模态转换产生衍射体波

Fig.6 Diffracted volume wave generated by mode conversion at $t = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$

道板内部的纵波和横波呈圆弧状继续按照原来的轨迹传播扩散,而沿着轨道板表面的瑞利波也呈地滚式继续向左侧传播。

如图7所示,当 $t = 6.0 \times 10^{-5}$ s时,衍射纵波已传至裂缝右侧的轨道板表面。在轨道板表面可接收到衍射纵波的波形;同时,衍射横波仍然在轨道板内部继续传播。从图8中可以看出,衍射横波的传播速度与裂缝右表面瑞利波的速度相近。从能量变化可以看出,衍射出来的横波和纵波的能量随着传播时间的增加逐渐发生衰减,且相较而言,衍射纵波的衰减幅度较大。

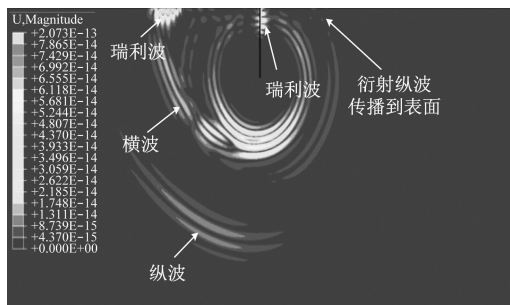


图7 $t = 6 \times 10^{-5}$ s时衍射纵波传播到表面

Fig. 7 Diffracted longitudinal wave propagating to the surface at $t = 6 \times 10^{-5}$ s

如图8所示,当 $t = 8.0 \times 10^{-5}$ s时,衍射横波传至裂缝右侧的轨道板表面,经过裂缝后的瑞利波也到达轨道板表面。因此,在轨道板表面的接收点处可以同时接收到该部分瑞利波的波形及衍射横波的波形。

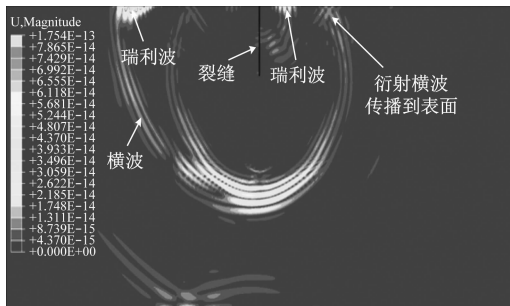


图8 $t = 8 \times 10^{-5}$ s时瑞利波传播到表面

Fig. 8 Rayleigh wave propagating to the surface at $t = 8 \times 10^{-5}$ s

由图5—图8,可以得出瑞利波的传播规律:在裂缝的左侧边缘施加激励时,激发出的瑞利波先向下沿着裂缝的左侧表面传播,之后绕过裂缝的底端,再向上沿着裂缝的右侧表面传播到轨道板上表面。由于这部分瑞利波的传播过程可反映出裂缝

深度。因此,通过裂缝右侧轨道板表面接收到的瑞利波波形,就可获取瑞利波到达接收点的时间,结合传播路径对应的几何关系,便可计算出裂缝的深度^[11-13]。

4 基于时差法的轨道板裂缝深度表征方法

将 d 分别设置为0.03 m、0.06 m、0.09 m、0.12 m,建立轨道板有限元模型,测得波形图如图9所示。

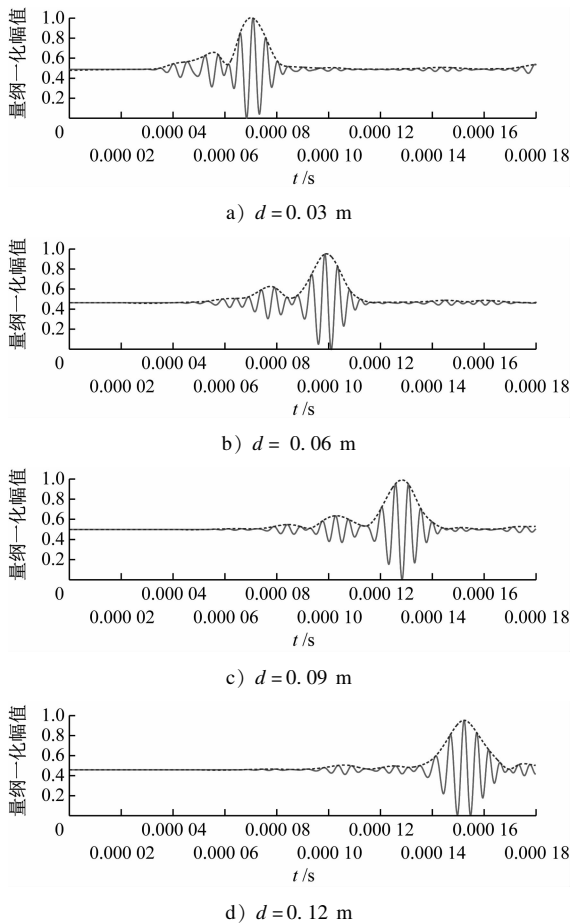


图9 不同深度裂缝的波形图

Fig. 9 Waveforms of cracks at different depths

结合弹性波场云图可知:瑞利波在传播中先经过裂缝的左右两侧表面,再传播到轨道板的上表面。因此,瑞利波的传播时间最长。此外,由于瑞利波自身的能量较强,故可较为方便地找到波形图中瑞利波到达接收点时波形峰值对应的特征点。

由图9可知,随着轨道板表面裂缝深度的增加,特征点对应的时间也会随之增加。这说明裂缝深度对相应波形峰值的到达时间产生了较大影响,有一定的滞后效应。由此,可通过特征点的时间来计

算裂缝深度。

以图 2 中模型为例,在裂缝左侧边缘施加激励源,则:

$$d = \frac{v_R(t_R - t_0) - a}{2}$$

(4)

式中:

- t_R ——瑞利波峰值到达接收点的时间;
- t_0 ——激励源的滞后时间。

基于瑞利波传播时间差法的原理,分别取各波形图中的 t_R ,利用式(4)即可计算出 d 。由图 4 可知 $t_0 = 1.4 \times 10^{-5}$ s;由轨道板材料介质参数计算可得 $v_R = 2\,248$ m/s;结合图 5—图 8 波形图中 t_R ,得到 d 值计算结果如表 2 所示。

表 2 d 值计算结果

Tab. 2 Calculation results of d value

d 设置值/m	a /m	t_R /s	d 计算值/m	相对误差/%
0.03	0.06	6.96×10^{-5}	0.032 5	8.33
0.06	0.06	9.73×10^{-5}	0.063 6	6.04
0.09	0.06	12.43×10^{-5}	0.093 9	4.42
0.12	0.06	15.16×10^{-5}	0.124 6	3.89

由式(4)可得出 d 的理论曲线如图 10 所示,并将表 2 中的 d 的计算值标注在图 10 中。

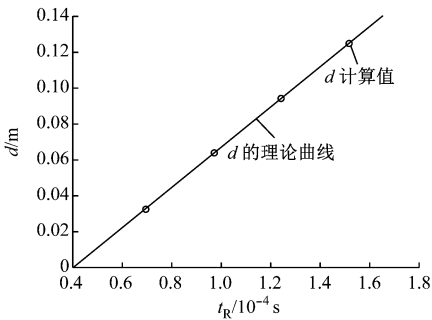


图 10 d 的理论曲线及计算值

Fig. 10 Diagram of theoretical curve and calculation results of d

由表 2 及图 10 可见: d 计算值与模型设置值较为接近;随着裂缝深度的不断增加,相对误差也越来越小。这说明该轨道板表面裂缝深度检测方法较准确,有一定的应用价值。与传统的检测方法相比较,该方法无需对轨道板结构造成损伤,即可实现对表面裂缝深度的检测,且检测方便、成本低、效率高,计算所得的 d 值相对误差较小。该方法还可应用于大体积结构的无损监测。

5 结语

针对目前轨道板裂缝检测方法存在的人力成本高、检测时间长且准确率较低等问题,本文提出了一种基于瑞利波的轨道板裂缝检测方法。通过建立含有表面裂缝的轨道板二维有限元模型,得到轨道板的波场云图。分析波场云图可知,瑞利波在遇到裂缝时会沿着裂缝表面呈地滚式传播。利用瑞利波的传播时间差,可实现对轨道板表面裂缝的深度检测。模拟计算结果显示, d 的计算较为精确,相对误差能满足工程要求,且随着 d 的增加,相对误差也越来越小。

参考文献

[1] 赵林,刘学毅,赵华卫,等. CRTS II 型板式轨道宽接缝开裂对轨道受力的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报,2016(1):9. ZHAO Lin, LIU Xueyi, ZHAO Huawei, et al. The study of influence on track stress caused by the cracking at wide juncture of CRTS II prefabricated slab track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016(1): 9.

[2] 刘永. 郑西高铁轨道板裂缝成因分析及维修技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013. LIU Yong. The study on forming reasons of track plate crack and maintenance technology of Zhengzhou-Xi'an High-speed Railway [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.

[3] 周彩荣. 武汉某地铁盾构隧道运营期常见病害原因分析及治理措施[J]. 城市轨道交通研究,2018(12):153. ZHOU Cairong. Analysis of common diseases in metro shield tunnel during operation period and the control measures[J]. Urban Mass Transit, 2018(12): 153.

[4] 孙旭. CRTS II 型轨道板裂缝产生与裂缝扩展规律研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017. SUN Xu. Study on the law of crack generation and propagation of CRTS II track slab [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2017.

[5] 奚绍良,熊永亮,单傲,等. 温度应力作用下无砟轨道板的竖向变形特征分析[J]. 城市轨道交通研究,2020(6):54. XI Shao liang, XIONG Yong liang, SHAN Ao, et al. Analysis of ballastless track plate vertical deformation characteristics under thermal stress[J]. Urban Mass Transit, 2020(6): 54.

[6] 张大洲,熊章强,顾汉明,等. 高精度瑞雷波有限差分数值模拟及波场分析[J]. 地球物理学进展,2009(4):1313. ZHANG Dazhou, XIONG Zhangqiang, GU Hanming, et al. Numerical modeling of Rayleigh wave using high-accuracy finite-difference method and wave field analysis[J]. Progress in Geophysics, 2009(4): 1313.

[7] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于 ABAQUS 的有限元分析与应

- 用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [8] 欧阳凯. 基于瑞利波的材料表面缺陷深度检测数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- OUYANG Kai. Numerical analysis of material surface defect depth detection using Rayleigh wave[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [9] 校永志, 余元宝, 李娜, 等. 超声法检测混凝土垂直裂缝缺陷深度应用研究[J]. 山东工业技术, 2018(3): 107.
- XIAO Yongzhi, YU Yuanbao, LI Na, et al. Research on the application of ultrasonic method to detect the depth of vertical cracks in concrete [J]. Shandong Industrial Technology, 2018(3): 107.
- [10] 张小龙, 赵鹏, 徐浩铭, 等. 超声波及表面波法在检测含水裂缝深度中的应用分析[J]. 四川理工学院学报, 2015(4): 66.
- ZHANG Xiaolong, ZHAO Peng, XU Haoming, et al. Application analysis of ultrasonic wave and surface wave for water-filled crack depth detection[J]. Journal of Sichuan University of Science and Engineering, 2015(4): 66.
- [11] ZOIDIS N, TATSIS E, VLACHOPOULOS C, et al. Inspection, evaluation and repair monitoring of cracked concrete floor using NDT methods[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1302.
- [12] 关建飞, 沈中华, 许伯强, 等. 表面垂直裂痕诱发瑞利波散射的数值分析[J]. 应用声学, 2006(3): 138.
- GUAN Jianfei, SHEN Zhonghua, XU Boqiang, et al. Numerical simulation of scattering of Rayleigh wave by a surface-breaking crack[J]. Applied Acoustics, 2006(3): 138.
- [13] 孙宏祥, 张淑仪. 激光激发瑞利波检测表面倾斜缺陷的研究[J]. 声学学报, 2013(4): 405.
- SUN Hongxiang, ZHANG Shuyi. Study on detection of angled surface cracks with laser-generated Rayleigh wave[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2013(4): 405.
- [14] KEE S H, GUCUNSKI N. Use of surface wave measurements to characterize surface-breaking cracks in concrete bridge decks[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2407(1): 3.
- [15] ZENG C, XIA J, MILLER R D, et al. An improved vacuum formulation for 2D finite-difference modeling of Rayleigh waves including surface topography and internal discontinuities[J]. Geophysics, 2012, 77(1): 1.
- [16] 郑慧峰, 呼刘晨, 方漂漂, 等. 基于振动声调制的金属微裂纹定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017(6): 1482.
- ZHENG Hui Feng, HU Liuchen, FANG Piaopiao, et al. Metal micro-crack location method based on vibration-acoustic modulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017(6): 1482.
- (收稿日期: 2020-08-13)
-
- (上接第45页)
- XU Lin. Research on fault diagnosis method of urban rail vehicle passenger compartment door system—based on improved TOPSIS method and Bayesian network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [4] 刘萍, 程晓卿, 秦勇, 等. 基于模糊故障树的塞拉门系统可靠性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(增刊1): 310.
- LIU Ping, CHENG Xiaoqing, QIN Yong, et al. Sliding plug door system reliability analysis based on fuzzy fault tree[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013(S1): 310.
- [5] 周巧莲, 金碧筠, 冒玲丽, 等. 基于贝叶斯网络地铁车门系统可靠性分析和故障诊断[J]. 沈阳工业大学学报, 2014(4): 441.
- ZHOU Qiaolian, JIN Biyun, MAO Lingli, et al. Reliability analysis and fault diagnosis of metro door system based on Bayesian network[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014(4): 441.
- [6] 安琪. 基于扩展Petri网的地铁车门系统故障诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- AN Qi. The research of fault diagnosis method in railway door system based on the extended Petri net[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] SUN Y, XIE G, CAO Y, et al. Strategy for fault diagnosis on train plug doors using audio sensors[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 19(1): 3.
- [8] LYU F, WEN C, LIU M. Representation learning based adaptive multimode process monitoring[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 181: 95.
- [9] 郭云健, 段晓霞, 谈立成, 等. 地铁车门系统失效故障树仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2016(1): 44.
- GUO Yunjian, DUAN Xiaoxia, TAN Licheng, et al. Method of fault tree simulation analysis for subway door system failure[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016(1): 44.
- [10] 李城汐. 地铁塞拉门故障诊断技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LI Chengxi. Research on technologies of fault diagnosis for sliding plug door[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [11] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 基于电机电流检测的高压隔离开关机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015(13): 3459.
- QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage disconnecter based on motor current detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2015(13): 3459.
- [12] SRIVASTAVA N, HINTON G E, KRIZHEVSKY A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting [J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15(1): 1929.
- (收稿日期: 2022-04-27)