

基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法

黄世泽, 陈 威, 张 帆, 董德存

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 对现场获得的各种铁路道岔故障曲线进行分析, 获得几类典型故障的参考曲线, 并作为诊断的模板曲线. 根据基于弗雷歇距离定义的相似度函数, 计算待识别曲线与各模板曲线的相似度. 将相似度最大的模板曲线所对应的故障模式作为待识别曲线的诊断结果输出. 实验表明, 该方法无需大量的训练样本, 也不需要动作电流曲线进行分段特征提取, 诊断方法准确率高、速度快、适应性强.

关键词: 道岔; 转辙机; 故障诊断; 弗雷歇距离

中图分类号: U229

文献标志码: A

Method of Turnout Fault Diagnosis Based on Fréchet Distance

HUANG Shize, CHEN Wei, ZHANG Fan, DONG Decun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The consequences of frequent occurrence of turnout fault on the railway, are often very serious, which requires a more complete operation of the state monitoring mechanism and intelligent fault diagnosis methods to improve the safety and reliability of turnout equipment. First, according to the curves of various turnout faults obtained on site, the reference curves of several typical faults were selected as a template curve of diagnosis. Then, according to the similarity based on the Fréchet distance, the similarity degree between the test curve and the template curve was calculated, and the failure mode corresponding to the template curve with the largest similarity was output as the diagnosis result of the test curve. The experiments show that this method does not need a lot of training samples, and it is not necessary to extract the segmentation feature of the action current curve. The diagnostic method has a high accuracy, a high speed, and a strong adaptability.

Key words: turnout; switch machine; fault diagnosis;

Fréchet distance

随着铁路里程的逐年增加以及铁路骨干网络的形成, 铁路已经成为我国运输量最大的交通工具. 其运量的增加以及速度的大幅提高, 对铁路信号控制设备提出了严峻的挑战. 道岔是电务现场关键设备之一, 由于转换运动频繁, 易受外部环境的影响, 所以成为了电务故障的多发设备之一^[1]. 一旦发生道岔转辙设备故障, 轻则发生行车事故, 影响运营, 重则翻车掉道^[2], 造成人员伤亡和财产损失. 因此, 需要更加完备的运行状态监测机制和智能化的故障诊断方法来提高设备的安全性和可靠性, 目前我国主要采用道岔微机监测系统来实现这一功能^[3-4]. 现有的道岔故障诊断主要依靠工作人员观察微机监测系统所采集的道岔动作电流或功率曲线来实现故障识别, 识别准确性主要依赖于相关人员的工作经验, 因此, 使得漏报和误报现象时有发生^[5]. 随着铁路建设规模的不断扩大, 这种人工诊断的方式已经无法满足铁路发展的需求, 需要研究相应的道岔故障智能诊断方法.

目前, 国内外在道岔故障智能诊断方面已经开展了相应的研究. 文献[5]基于灰色系统理论, 通过 Fisher 准则进行特征提取, 实现对道岔故障的诊断. 文献[6]通过对设备电气参数变化规律的分析, 建立专家系统对道岔故障进行诊断并提出维修指导意见. 文献[7]采用遗传算法优化支持向量机的参数从而完成对道岔控制电路的故障诊断. 文献[8]利用相应监测系统的转速和压力等参数, 通过建立道岔的多项式模型函数实现故障诊断. 文献[9-14]将神经网络, 主要是 BP(back propagation)神经网络、RBF(radial basis function)神经网络、模糊神经网络以及

收稿日期: 2018-01-27

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200402); 国家自然科学基金(61703308)

第一作者: 黄世泽(1983—), 男, 助理教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通关键设备状态检测与故障诊断.

E-mail: hsz@tongji.edu.cn

通信作者: 张 帆(1995—), 女, 硕士生, 主要研究方向为轨道交通关键设备状态检测与故障诊断. E-mail: zhangfandyq@163.com

快速贝叶斯网络应用于道岔故障的诊断。

目前的研究中,对于道岔故障诊断的问题,主要采用神经网络、支持向量机以及灰关联理论等方法。在这些方法中,神经网络需要大量的训练样本来支持其进行训练学习,支持向量机和灰关联理论等方法则需要对动作曲线进行分段提取特征,而计算机很难对动作曲线进行准确的自动分段。

虽然道岔的故障模式种类繁多,但是它具有一个极其重要的特征,即同一类道岔故障模式的动作曲线都具有相似的变化趋势。这就可以通过计算动作曲线点集之间的距离来判断它们变化趋势的相似程度。因此,本文将弗雷歇距离应用到道岔故障的诊断中,通过弗雷歇距离算法来进行道岔的故障诊断。实验表明,该方法无需大量的训练样本,不需要对动作曲线进行分段特征提取,诊断准确性高,能够完全满足实际应用的需求。

1 道岔转辙机动作电流曲线

道岔的动作是由转辙机来提供动力的。因此,转辙机的工作状态就能够直接反映道岔的工作状态,而转辙机的工作状态则直接体现在微机监测系统采集到的转辙机动作电流曲线以及动作功率曲线上。

目前,铁路上的转辙机设备主要为 ZD6 直流电动转辙机和 S700K 交流电动转辙机。ZD6 直流电动转辙机是我国铁路运用最广泛、装配率最高的电动转辙机,主要用于非提速区段以及提速区段的侧线上;而 S700K 交流电动转辙机主要应用于提速区段。本文针对 ZD6 直流电动转辙机的故障诊断方法进行研究。由于针对 S700K 交流电动转辙机的故障诊断也是依赖其动作电流曲线以及功率曲线,因此,该方法对 S700K 交流电动转辙机的故障诊断也具有一定的参考意义。

图 1 为 ZD6 转辙机正常工作时的动作电流曲线,可分为解锁、转换、锁闭及表示 4 个部分。

由图 1 可知,对于解锁阶段,转辙机开始工作,具有较大的启动电流,使得动作电流由 0 迅速上升,道岔进入解锁阶段,随着设备的运行,道岔解锁完成后动作杆在杆件内有 5 mm 以上空动距离,负载变小,电流迅速回落。在转换阶段,电机转速经过减速器减速后,以匀速作用于动作杆带动道岔平稳转换,此阶段动作电流曲线应为一条平稳曲线。对于锁闭阶段,这一过程为道岔尖轨被带动到另一侧,尖轨与基本轨密贴,动作齿轮锁闭圆弧在动作齿条削尖齿

中滑动锁闭道岔,自动开闭器动接点转换,切断动作电路,其动作电流曲线为尾部平滑迅速回 0^[10]。对于表示阶段,转辙机的动作回路切断,表示回路接通,其动作电流曲线保持为 0。

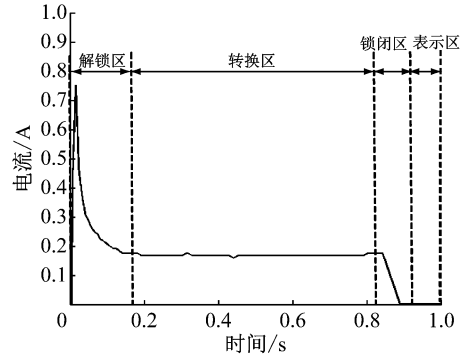


图 1 ZD6 型转辙机正常工作过程的动作电流曲线
Fig.1 Current curve of normal action of ZD6 switch machine

2 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法

2.1 总体设计

道岔故障诊断方法的总体流程如图 2 所示。首先,根据现场获得的大量曲线,按照相关标准对曲线进行分类,获得积累典型的故障曲线。其次,通过对典型故障曲线的分析,得到各类故障的参考曲线作为计算相似度的模板曲线,然后计算待识别曲线与模板曲线之间的弗雷歇距离,从而得到相应的相似度,通过对相似度之间的比较分析,将相似度最大的模板曲线所代表的故障模式作为诊断结果进行输出。

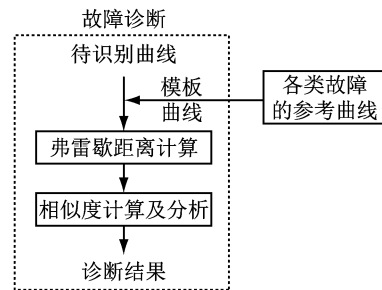


图 2 道岔故障诊断系统的总体流程图

Fig.2 Overall flowchart of turnout fault diagnosis system

2.2 弗雷歇距离算法

距离空间的概念是法国数学家弗雷歇于 1906 年提出的,又称为弗雷歇距离。它将现实空间的距离

概念推广到一般的集合上,为抽象空间之间的距离度量提供了理论基础.

设 A 和 B 是 S 上的两条连续曲线,即 $A:[0,1] \rightarrow S, B:[0,1] \rightarrow S$;又设 α 和 β 是单位区间的两个重新参数化函数,即 $\alpha:[0,1] \rightarrow [0,1], \beta:[0,1] \rightarrow [0,1]$;则曲线 A 与 B 曲线的弗雷歇距离 $F(A, B)$ 定义为

$$F(A, B) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d(A(\alpha(t)), B(\beta(t)))\}$$

其中: d 是 S 上的度量函数^[15].

基于以上弗雷歇距离的思想,本文采取适合于计算机的离散弗雷歇距离算法来刻画两条曲线之间的距离,并作为其弗雷歇距离,其具体实施过程如下:

(1) 待识别曲线 L_1 可表示为

$$P = \{P(1), P(2), \dots, P(n), \dots, P(N)\}$$

式中: $P(n) = (x_n, y_n)$; n 为曲线 L_1 上的采样点的序号, $n=1$ 为起始采样点, $n=N$ 为末尾采样点; x_n 为第 n 个采样点的横坐标; y_n 为第 n 个采样点的纵坐标.

(2) 模板曲线 L_2 可表示为

$$P' = \{P'(1), P'(2), \dots, P'(m), \dots, P'(M)\}$$

式中: $P'(m) = (x'_m, y'_m)$; m 为曲线 L_2 上的采样点的序号, $m=1$ 为起始采样点, $m=M$ 为末尾采样点; x'_m 为第 m 个采样点的横坐标; y'_m 为第 m 个采样点的纵坐标.

(3) 计算 L_1 上各采样点到 L_2 上的各采样点之间的距离,得到距离矩阵 D

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} & \dots & d_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mm} & \dots & d_{mN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{M1} & \dots & d_{Mn} & \dots & d_{MN} \end{pmatrix}$$

式中: $d_{mn} = \sqrt{(x'_m - x_n)^2 + (y'_m - y_n)^2}$, 表示曲线 L_2 上的第 m 个采样点到曲线 L_1 上的第 n 个采样点的距离, $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$.

(4) 找出距离矩阵 D 中的最大距离 $d_{\max} = \max(D)$ 以及最小距离 $d_{\min} = \min(D)$, 初始化目标距离 $f = d_{\min}$, 并设置循环间隔

$$r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{100}$$

(5) 将距离矩阵 D 中小于或等于 f 的元素设置为 1, 大于 f 的元素设置为 0, 从而得到二值矩阵 D' 如下:

$$D' = \begin{pmatrix} d'_{11} & \dots & d'_{1n} & \dots & d'_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d'_{m1} & \dots & d'_{mm} & \dots & d'_{mN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d'_{M1} & \dots & d'_{Mn} & \dots & d'_{MN} \end{pmatrix}$$

$$\text{式中: } d'_{mn} = \begin{cases} 1, & d_{mn} \leq f \\ 0, & d_{mn} > f \end{cases}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N.$$

(6) 在二值矩阵 D' 中搜索一条满足以下条件的路径 R : R 的起点为 d'_{11} , 终点为 d'_{MN} ; 路径在通过点 d'_{mn} 后, 其下一个通过点只能为 $d'_{(m+1)n}, d'_{m(n+1)}, d'_{(m+1)(n+1)}$ 中的一个; 路径 R 中所有点的值都必须为 1.

用数学表达式的形式为, 存在一条路径 $R = \{d'_{11}, \dots, d'_{mn}, \dots, d'_{MN}\}$, 满足

$$d'_{11} \cdot \dots \cdot d'_{mn} \cdot d'_{(m+k)(n+k')} \cdot \dots \cdot d'_{MN} = 1$$

式中: $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N, 1 \leq m+k \leq M, 1 \leq n+k' \leq N, k = \{0, 1\}, k' = \{0, 1\}$.

(7) 若在步骤(6)中未找到满足条件的路径, 则设置目标距离 $f = f + r$, 之后重复步骤(5)和(6); 若在步骤(6)中找到满足条件的路径或者目标距离 $f = d_{\max}$, 则进入下一步.

(8) 待识别曲线与模板曲线之间的弗雷歇距离 $F = f$.

2.3 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断

通过弗雷歇距离, 可以得到两条曲线点集之间的距离. 弗雷歇越小, 说明两条曲线之间的相似程度越高; 弗雷歇越大, 说明两条曲线之间的相似程度越低. 因此, 对相似度 S 的定义如下:

$$S = \frac{1}{F}$$

式中: F 为两条曲线之间的弗雷歇距离.

本文中的故障诊断方法是基于相似度的原理, 首先计算待识别曲线 L 与各个模板曲线 W_i 之间的相似度 S_i , 然后将相似度最大 S_{\max} 的模板曲线所代表的故障模式作为诊断结果进行输出, 具体如图 3 所示. 正常模板曲线用 W_0 表示, 故障模板曲线依次用 W_1, \dots, W_t 表示, t 表示故障模式总数.

3 实例验证

3.1 样本数据说明

根据济南铁路局的调研报告以及相关文献, 将 ZD6 型转辙机的故障模式分为 8 种, 如表 1 所示的, 其相应的转辙机动作电流曲线如图 4 所示.

表 1 ZD6 型转辙机故障模式分类

Tab.1 Fault mode classification of ZD6 switch machine

故障模式	故障现象	故障原因
W_1	道岔转换时间很短,且没有形成锁闭线	转辙机动作电流过小,转辙机电机特性不良,1DQJ 自闭电路故障、1DQJ 吸起后保持不住
W_2	电流没有形成抛物线下降趋势,电流持续较高	转辙机定、转子混线
W_3	电流曲线末端基本稳定在一个较高水平上,一直持续	道岔尖轨与基本轨之间夹有异物,或者转辙机故障电流过小
W_4	曲线上没有启动线, 电流值很低,或者没有	道岔动作电路没有启动,一般出现了断线故障
W_5	曲线在锁闭段电流突然升高	道岔调整过紧、滑床板太脏、滑床板缺油、道岔吊板、基本轨横移等
W_6	整条曲线呈锯齿状	电机碳刷与换向器间接触不良,电机换向器有断格或表面不良,摩擦带表面不光滑等
W_7	曲线在道岔启动前有一段时间(<1 s)道岔动作电流为 0	道岔启动电路中的某一个继电器接点接触不良或继电器插接不良
W_8	曲线锁闭线较长,电流值较高	道岔机械已经锁闭,自动开闭器的几个轴(拐轴、自动开闭器速动爪轴、连接板轴)动作不灵活(缺油),导致开闭器接点动作异常,启动接点断不开

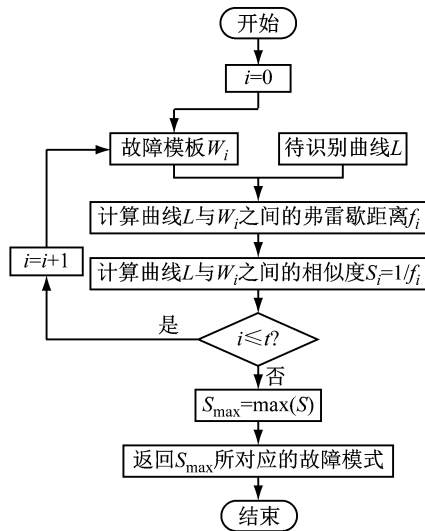


图 3 基于弗雷歌距离的道岔故障诊断流程图

Fig. 3 Fault diagnosis of turnout based on Fréchet distanceosis system

3.2 功能测试

选择一种道岔故障模式确定为 W_5 类型的动作电流曲线,如图 5 所示.将图中的动作电流曲线作为待识别曲线,应用本文中的道岔故障诊断方法对其进行诊断,其相似度计算结果如表 2 所示.

表 2 图 5 所示动作电流曲线的相似度计算结果

Tab.2 Similarity calculation results of Fig. 5

故障模式	相似度	模板类型	相似度
W_0	2.05	W_5	4.80
W_1	1.78	W_6	2.16
W_2	1.35	W_7	1.85
W_3	1.02	W_8	1.95
W_4	1.19		

由表 2 可知,图 5 所示的动作电流曲线与故障

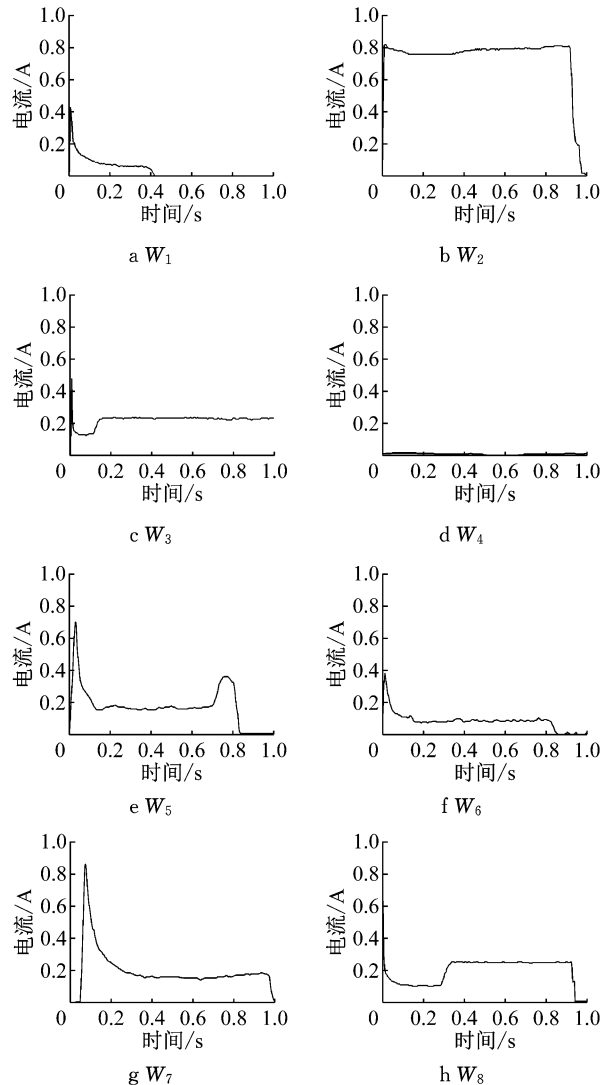


图 4 ZD6 转辙机典型道岔故障对应的动作电流曲线

Fig. 4 Current curves of typical turnout fault of ZD6 switch machine

模式 W_5 的相似度远高于其与其他模板的相似度, 因此判定图 5 所示的动作电流曲线的故障模式为 W_5 , 与实际情况相符.

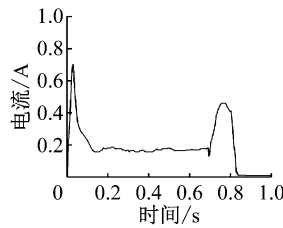


图 5 现场某次道岔故障的动作电流曲线

Fig.5 Action current curve of a switch fault on the spot

同时, 由表 2 可知, 虽然故障模式 W_7 与正常曲线 W_0 的差异性很小, 但是图 5 所示的动作电流曲线与正常曲线 W_0 、故障模式 W_7 的相似度计算结果分别为 2.05 和 1.85, 仍存在着差异性, 说明基于弗雷歇距离的相似度通过比较曲线的变化趋势对细小的差别也有很好的识别效果.

3.3 性能测试

将从济南铁路局调研获得的转辙机故障时微机监测系统采集到的动作电流曲线作为测试集合, 利用本文的道岔故障诊断方法对其进行诊断, 其诊断结果如表 3 所示.

表 3 测试集合的诊断结果
Tab.3 Diagnostic result of the test

故障模式	诊断的曲线数目	成功诊断的曲线数目	准确度/%
W_1	32	32	100.0
W_2	9	9	100.0
W_3	56	56	100.0
W_4	18	18	100.0
W_5	37	37	100.0
W_6	25	25	100.0
W_7	47	47	100.0
W_8	33	33	100.0
总计	257	257	100.0

由表 3 可知, 本文中道岔故障诊断方法针对 ZD6 型转辙机的 8 类故障模式, 均能够准确地诊断出待识别曲线所对应的故障模式, 而且诊断准确度达到了 100.0%. 因此, 本文中的道岔诊断方法对于道岔故障有着很好的识别效果.

4 总结

本文针对道岔故障诊断问题, 提出了一种新的解决思路——相似度函数定义法: 首先根据铁路局定义的各类故障的参考曲线得到模板曲线, 然后根

据基于弗雷歇距离定义的相似度函数, 计算待识别曲线与各模板曲线的相似度, 将相似度最大的模板曲线所对应的故障模式作为待识别曲线的诊断结果输出. 实验表明, 该方法无需大量的训练样本, 也不需要动作电流曲线进行分段特征提取. 同时, 该诊断方法的诊断拥有较高的识别度, 完全能够满足实际应用的需求. 由于调研的数据相对有限, 可能会出现一类异常曲线, 假如与正常曲线的差异性很小, 使用本文方法可能会引起误判. 若现场需要对类似异常曲线进行识别, 可以根据曲线的具体情况, 采取多重辨识以及分段计算相似度的方法, 进行更加深入的研究.

参考文献:

[1] 徐刚. 浅议道岔设备现场运用中的安全风险[J]. 铁道通信信号, 2014(10):41.
XU Gang. Discussion on safety risk management of turnout equipment on site[J]. Railway Signaling and Communication, 2014(10):41.

[2] 张彬. 如何减少道岔转辙设备故障对地铁运营安全的影响[J]. 信息通信, 2015(11):272.
ZHANG Bin. How to reduce the impact of turnout equipment failure in turnout on subway operation safety[J]. Information and Communication, 2015(11):272.

[3] 王瑞峰, 陈旺斌. 基于灰色神经网络的 S700K 转辙机故障诊断方法研究[J]. 铁道学报, 2016(6):68.
WANG Ruifeng, CHEN Wangbin. Research on fault diagnosis method for S700K switch machine based on grey neural network[J]. Journal of the China Railway Society, 2016(6):68.

[4] 张喜, 杜旭升, 刘朝英. 车站信号控制设备故障诊断专家系统的研究与实现[J]. 铁道学报, 2009(3):43.
ZHANG Xi, DU Xusheng, LIU Chaoying. Development of railway station signaling control equipment fault diagnosis expert system[J]. Journal of the China Railway Society, 2009(3):43.

[5] 赵林海, 陆桥. 基于灰关联的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2014, 36(2):69.
ZHAO Linhai, LU Qiao. Method of turnout fault diagnosis based on grey correlation analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2):69.

[6] 薛艳青. 道岔设备故障诊断专家系统实现方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
XUE Yanqing. Research on realization method of turnout equipment fault diagnosis expert system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[7] 杨阳, 陶彩霞, 张睿兴. 遗传算法优化支持向量机的道岔控制电路故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2013(1):48.
YANG Yang, TAO Caixia, ZHANG Ruixing. Fault diagnosis of switch control circuit using support vector machine optimized by genetic algorithm[J]. Computer Measurement and Control,

- 2013(1):48.
- [8] ROBERTS C, DASSANAYAKE H P B, LEHRASAB N, *et al.* Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: railway junction case study[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(4):419.
- [9] 田健. 基于模糊神经网络的高速铁路道岔故障诊断方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
TIAN Jian. Fault diagnosis method for railway switch point based on fuzzy neural network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [10] 张凯. 基于神经网络的铁路道岔故障智能诊断研究[D]. 西安:长安大学,2016.
ZHANG Kai. Study of intelligent railway turnout fault diagnosis based on neural network [D]. Xi ' an: Chang ' an University, 2016.
- [11] 张凯,杜凯,巨永锋. 基于 BP 神经网络的提速道岔故障诊断算法[J]. 武汉理工大学学报,2014(11):77.
ZHANG Kai, DU Kai, JU Yongfeng. Algorithm of speed-up turnout fault diagnosis based on BP neural network [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014(11):77.
- [12] 王铁军,董昱,马彩霞,等. 基于 BP 神经网络的道岔智能故障诊断方法[J]. 铁道运营技术,2011(2):4.
WANG Tiejun, DONG Yu, MA Caixia, *et al.* Intelligent fault diagnosis method of switch based on BP neural network[J]. *Railway Operation Technology*, 2011(2):4.
- [13] 梅欢,马艳东,单九思,等. 基于样条插值与 RBF 网络的道岔故障诊断系统[J]. 计算机技术与发展,2017(4):1.
MEI Huan, MA Yandong, SHAN Jiushi, *et al.* Research on switch fault diagnosis system with cubic spline interpolation and RBF neural network [J]. Computer Technology and Development, 2017(4):1.
- [14] 肖蒙,翟琛,潘翠亮. 基于快速贝叶斯网络的 S700K 转辙机故障诊断研究[J]. 铁道科学与工程学报,2015, 12(2): 414.
XIAO Meng, ZHAI Chen, PAN Cunliang. Research on S700K switch machine fault diagnosis based on fast Bayesian network [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12 (2):414.
- [15] BUCHIN K A, BUCHIN-WALTHER M, WENK C. Computing the fréchet distance between simple polygons [J]. Computational Geometry, 2006, 41:80.

~~~~~

(上接第 1627 页)

- [ 4 ] BETTI R, WEST A C, VERMAAS G, *et al.* Corrosion and embrittlement in high-strength wires of suspension bridge cables[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(2): 151.
- [ 5 ] NAKAMURA S-I, SUZUMURA K, TARUI T. Mechanical properties and remaining strength of corroded bridge wires[J]. *Structural Engineering International*, 2004, 14(1): 50.
- [ 6 ] LI S, XU Y, ZHU S, *et al.* Probabilistic deterioration model of high-strength steel wires and its application to bridge cables [J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2014, 11(9): 1.
- [ 7 ] NAKAMURA S-I, SUZUMURA K. Experimental study on fatigue strength of corroded bridge wires[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(3): 200.
- [ 8 ] LI H, LAN C M, JU Y, *et al.* Experimental and numerical study of the fatigue properties of corroded parallel wire cables [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 17(2):211.
- [ 9 ] 孙传智. 索承式桥梁腐蚀吊索安全性能与疲劳寿命评估[D]. 南京:东南大学,2013.  
SUN Chuazhi. Assessment of safety capability and fatigue life of corroded cable for cable-supported bridge [D]. Nanjing: Southeast University,2013.
- [10] 郑祥隆,谢旭,李晓章,等. 锈蚀钢丝疲劳断口分析与寿命预测[J]. 中国公路学报,2017,30(4): 79.  
ZHENG Xianglong, XIE Xu, LI Xiaozhang, *et al.* Fatigue fracture surface analysis and fatigue life estimation of corroded steel wires [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017,30(4): 79.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2012 [S].北京:中国标准出版社,2012.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion tests in artificial atmospheres-salt spray tests: GB/T 10125—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除: GB/T 16545—2015 [S].北京:中国标准出版社,2015.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of metals and alloys-removal of corrosion products from corrosion test specimens: GB/T 16545—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. 桥梁缆索用热镀锌钢丝: GB/T 17101—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Hot-dip galvanized steel wires for bridge cables: GB/T 17101—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [14] 李先立,宋显辉,刘禹钦. 高强镀锌钢丝疲劳可靠性研究[J]. 土木工程学报,1995(2): 36.  
LI Xianli, SONG Xianhui, LIU Yuqin. Investigation of fatigue reliability of high strength ualvanized steel wires [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1995(2): 36.
- [15] 张家男. 桥梁拉吊索用高强镀锌钢丝锈蚀与疲劳性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
ZHANG Jia'nan. Study on corrosion and fatigue properties of high-strength galvanized steel wire used for cable of bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2016.
- [16] 侯晓旦. 锈蚀分级下平行钢丝的疲劳强度试验研究及数值分析[D]. 南京:南京林业大学,2015.  
HOU Xiaodan. Experimental study and numerical analysis on fatigue strength of parallel wire based on corrosion classification [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.