

# 基于数据驱动轨道电路故障预测及预警方法研究\*

纪玉清<sup>1</sup> 欧冬秀<sup>2</sup> 李永燕<sup>3</sup>

(1. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海; 2. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海; 3. 上海铁大电信科技股份有限公司, 200070, 上海//第一作者, 博士研究生)

**摘要** 针对轨道电路传统维修模式存在的效率低、维修不及时等问题,结合轨道电路的工作原理,分析了轨道电路的故障模式,提出了红光带故障诊断方法。采用随机梯度下降逻辑回归模型,建立了基于数据驱动的轨道电路故障智能预测及预警方法,以实现对具有递增或递减趋势的监测数据的预测及预警。以某站某轨道电路为案例,应用该方法进行趋势预测。试验结果表明:该方法对不同的轨道区段和不同的监测量均有较强的适用性,可同时多个监测量的数值变化情况进行预测,实现对轨道电路的故障预警,提高轨道电路维修的及时性和效率。

**关键词** 轨道电路; 数据驱动; 随机梯度下降逻辑回归模型; 趋势预测; 故障预警

**中图分类号** U284.2; U284.92

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.006

## Research on Data-driven Methods of Fault Prediction and Early Warning for Track Circuits

JI Yuqing, OU Dongxiu, LI Yongyan

**Abstract** In view of the problems of low efficiency and untimely maintenance of the conventional maintenance mode of the track circuit, combined with the working principle of the track circuit, the failure mode of track circuit is analyzed, and the diagnosis method of the 'red band' fault is proposed. Using the stochastic gradient descent logistic regression model, a data-driven track circuit fault intelligent prediction and early-warning method is established to realize the prediction and early-warning of monitored data with increasing or decreasing trends. Taking certain track circuit in certain station as an example, this method is used to predict the trend. Experiments show that the method has strong applicability to different track sections and different monitoring variables and can simultaneously predict the future numerical changes of multiple monitoring variables, realizing the fault early-warning of track circuit, thereby improving the timeliness and efficiency of track circuit

maintenance.

**Key words** track circuit; data-driven; the stochastic gradient descent logistic regression model; trend forecasting; fault early-warning

**First-author's address** Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China

目前,轨道电路故障的发现和维修判定仍在很大程度上依赖人工经验,存在效率低、及时性差等问题。为此,国内外专家进行了大量的研究。文献[1-2]分别将模糊推理原理和偏最小二乘回归与神经网络相结合,实现了轨道电路的故障检测与诊断。文献[3]采用小波变换与神经网络相结合的方法,建立了小波网络轨道电路故障预测模型。文献[4]采用模糊模式识别方法处理和分析数据,建立了 ZPW-2000A 轨道电路的四端网络模型。

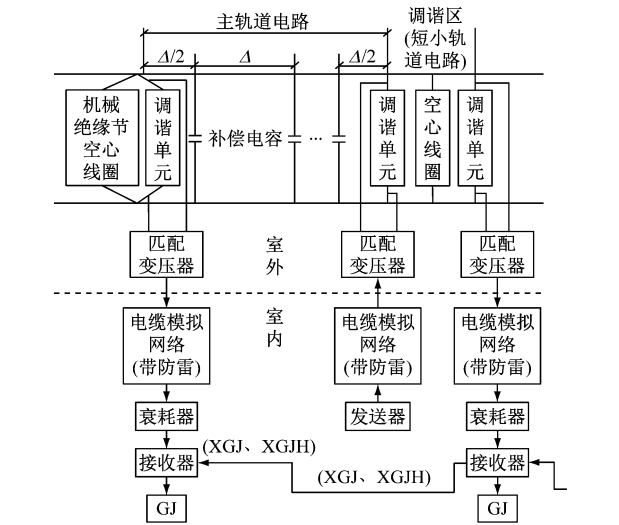
然而,上述研究始终未能充分利用轨道电路集中监测系统所测得的大量历史监测数据。本文结合 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路的工作原理和故障模式,挖掘出大量历史监测数据的特征,提出基于数据驱动的轨道电路故障预警方法。该方法能同时预测多个轨道电路监测量的变化趋势,更加全面地监视轨道电路的运行状态,从而实现轨道电路故障的预测及预警。

## 1 ZPW-2000A 轨道电路原理及故障分析

### 1.1 结构组成及工作原理

图 1 为 ZPW-2000A 无绝缘轨道电路系统的设备组成。由图 1 可知,ZPW-2000A 无绝缘轨道电路分为主轨(主轨道电路)和小轨(调谐区短小轨道电路)。在移频自动闭塞区段,根据运行列车占用闭塞分区的状态,发送器产生相应的移频信号。该信

\* 国家重点研发计划基金项目(2018YFB1201403)



注:Δ——全步长,其值等于轨道电路两端距离除以补偿电容总量;  
Δ/2——半步长;GJ——轨道继电器;XGJ——小轨检查输入;  
XGJH——小轨检查回线。

图1 ZPW-2000A 轨道电路组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of ZPW-2000A track circuit composition

号经电缆、匹配变压器等传输至钢轨,并分别沿主轨和小轨传输。当该区段无列车占用(即轨道电路处于调整状态)时,主轨信号最终传输至该区段的接收器,小轨信号最终传输至相邻区段的接收器。当该区段被列车占用(即轨道电路处于分路状态)时<sup>[5]</sup>,主轨信号大部分被列车的第一轮对分路并回流至发送器,其余信号最终仍传输至本区段的接收器。

1.2 故障分析

ZPW-2000A 无绝缘轨道电路故障主要包含红光带(轨道继电器故障落下)故障和分路不良(轨道继电器故障吸起)故障。本文着重针对红光带故障展开分析和研究。通过铁路信号集中监测系统对发送器功出端、接收衰耗器输入端、接收器输入端等监测点进行监测,结合监测数据的分析,得到ZPW-2000A 轨道电路红光带故障包含的主要故障表现及各监测量相应的特征,如表1所示。通过表1中的对应关系,在实现预测监测量变化的基础上,可进一步实现红光带故障的预警。

表1 ZPW-2000A 轨道电路红光带故障表现与各监测量变化的对应关系

Tab.1 Corresponding relationship between the performance of 'red band' fault and the changes of each monitoring variable of the ZPW-2000A track circuit

故障表现	功出电压	送端分线盘电压	受端分线盘电压	主轨入电压	主轨出电压	小轨入电压	小轨出电压	小轨入电压 (前方相邻区段接收端)	小轨输出电压 (前方相邻区段接收端)
发送模拟网络单元故障	正常	降低/升高	降低/升高	降低/升高	降低/升高	正常	正常	偏低/偏高	偏低/偏高
发送器至模拟网络设备侧断线	正常	降低	降低	降低	降低	正常	正常	降低	降低
接收端分线盘至模拟网络设备侧故障	正常	正常	正常	偏低/偏高	偏低/偏高	偏低/偏高	偏低/偏高	正常	正常
接收端衰耗盒故障	正常	正常	正常	正常	偏低/偏高	正常	偏低/偏高	正常	正常
发送端分线盘至室外匹配变压器断线	正常	正常	降低	降低	降低	正常	正常	偏低	偏低
发送端匹配变压器故障	正常	正常	降低/升高	降低/升高	降低/升高	正常	正常	偏低/偏高	偏低/偏高
发送端匹配变压器输出至轨面故障	正常	正常	降低/升高	降低/升高	降低/升高	正常	正常	偏低/偏高	偏低/偏高
轨面开路	正常	正常	大幅降低	大幅降低	大幅降低	正常	正常	升高	升高
接收端轨面至匹配变压器故障	正常	正常	降低/升高	降低/升高	降低/升高	降低/升高	降低/升高	正常	正常
接收端匹配变压器至分线盘断线	正常	正常	降低/升高	降低/升高	降低/升高	降低/升高	降低/升高	正常	正常

注:“偏低”表示监测量的电压值接近报警下限;“偏高”表示这个监测量的电压值接近报警上限;“正常”表示监测量的电压值处在正常范围内;“降低”表示监测量的电压值低于正常值且在持续降低;“升高”表示监测量的电压值高于正常值且在持续升高。

2 基于SGD(随机梯度下降)逻辑回归模型的趋势预测

由监测量数据突变而发生的红光带故障是无法预见的,但是对于红光带故障前监测量呈现出的递增/递减趋势是可以捕捉跟踪的。本文采用SGD

逻辑回归模型<sup>[6]</sup>对监测量数据的递增/递减趋势进行拟合,以预测监测量的变化情况,并实现超限预警。

由于监测数据量庞大,为提高预测效率,以轨道电路的1个调整状态作为1个时间颗粒度。选取1个调整周期内所有数据点的最大值作为代表值

$P_i (i=1,2,\dots,I)$ ,  $I$  是取样时间内所含的调整状态数目。每 10 个连续的  $P_i$  值为 1 组样本,将每个调整状态下的  $P_i$  量纲一化为  $p_i (p_i \in (0,1))$  后作为模型的输出。构建 10 组样本,作为模型的输入。

图 2 为采用 SGD 逻辑回归模型对 3 个不同轨道区段主轨入电压的预测结果。对比预测值和实际值,可得到如下结论:SGD 逻辑回归模型对监测量的预测可适用于不同的轨道区段,且拟合结果较好、准确性较高。

进一步选取某一轨道区段,对该轨道区段的不同监测量进行趋势预测,图 3 为各监测量预测值与实际监测值对比情况。从图 3 可以看出,SGD 逻辑回归模型对各监测量均有较好的趋势预测效果。这有利于对轨道电路多个监测量进行超限预测,可辅助工作人员分析轨道电路潜在的故障,并实现故障预警。

障预警。

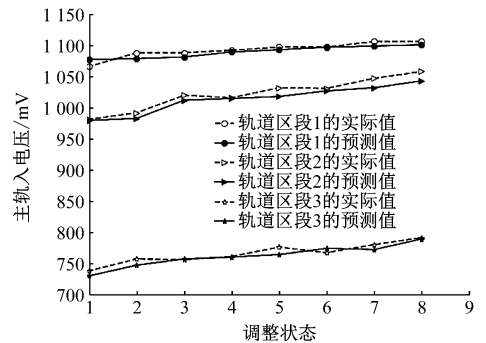


图 2 SGD 逻辑回归模型下不同轨道区段主轨入电压的预测值与实际值的对比

Fig. 2 Comparison between the predicted value and the actual value of main rail input voltage in different track sections using the SGD logistic regression model

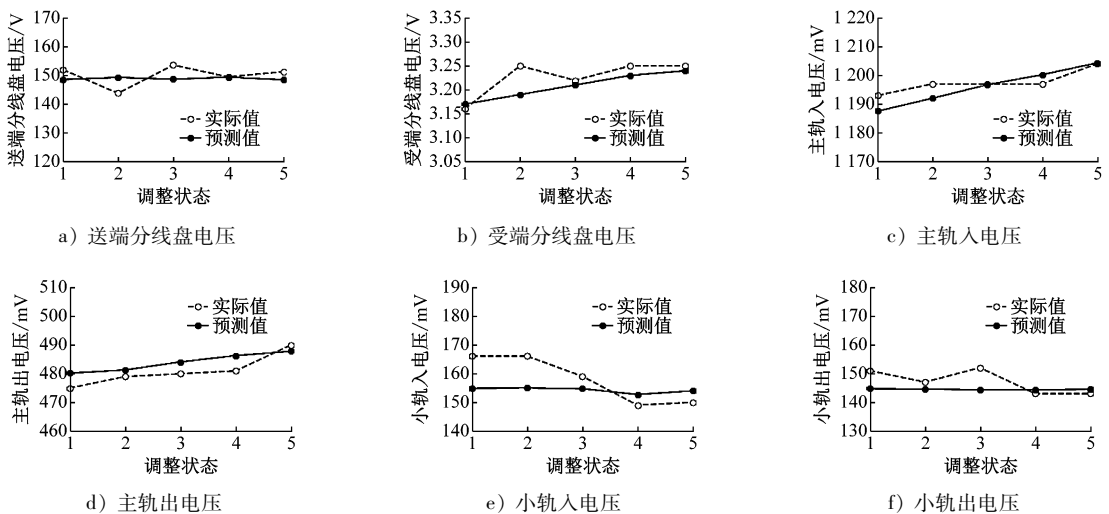


图 3 SGD 逻辑回归模型下不同监测量预测值与实际值的对比

Fig. 3 Comparison between the predicted values and the actual values of different monitoring variables using the SGD logistic regression model

### 3 基于趋势预测的轨道电路故障预警

为判断监测量是否具有递增或递减的超限趋势,本文引入预测阈值这一参数。预测阈值的选取非常重要,阈值若取太高,可能会导致错过一些故障的早期征兆,从而失去预警的时效性;阈值若取太低,可能会导致频繁地进行预测建模并实施预测,从而产生冗余的预警信息,增加现场工作人员的工作量。

本文对某站辖区内轨道电路各监测量的监测值超限报警数据进行统计分析。在超限报警事件的历史数据中,约有 94% 的报警事件发生在超限报

警前的 1 h 内,其监测值落在所对应监测量的标准值  $\pm 6.8\%$  范围外。为及时捕捉这些超限特征,本文设定标准值的  $\pm 6.8\%$  为预测阈值。为了防止监测值突变超过预测阈值后频繁触发趋势预测,本文规定只有在连续 5 min 内所采集的监测值(约为 50 ~ 60 个监测值)均超过设定预测阈值的情况下,方可启动趋势预测。

以 2016 年 7 月 10 日某车站某轨道区段的主轨入电压在 21:24 时的超限报警为例进行说明。该轨道电路在第 43 个调整状态时,主轨入电压超过预测阈值已持续 5 min,因此启动趋势预测。对后续 7 个(第 44 个至第 50 个)调整状态下的主轨入电压进

行预测,并对这 7 个调整状态下的其余 7 个监测量      同步进行数据预测,得到的结果如表 2 所示。

表 2    启动趋势预测后各调整状态下 8 个监测量的预测电压值

Tab.2    Predicted voltage values of 8 monitoring variables in each adjustment state after starting trend prediction								
调整状态	送端分线盘 电压/V	受端分线盘 电压/V	主轨入 电压/mV	主轨出 电压/mV	小轨入 电压/mV	小轨出 电压/mV	小轨入电压(前方相邻 区段接收端)/mV	小轨出电压(前方相邻 区段接收端)/mV
第 44 个	83.65	6.78	1 089.94	449.75	150.33	144.86	253.92	147.20
第 45 个	83.55	6.79	1 093.72	450.99	150.92	145.60	254.42	147.18
第 46 个	83.55	6.76	1 088.51	448.83	151.68	146.01	254.73	147.25
第 47 个	83.55	6.77	1 093.36	451.12	152.96	146.24	254.98	147.31
第 48 个	83.35	6.76	1 097.27	452.62	152.99	146.95	255.44	147.61
第 49 个	83.28	6.77	1 103.56	450.11	152.84	147.26	255.53	147.65
第 50 个	83.31	6.77	1 109.99	448.61	152.90	147.45	255.48	147.59
报警上限值	180.00	8.90	1 100.00	680.00	163.00	156.00	275.00	220.00
报警下限值	50.00	4.20	535.00	300.00	133.00	131.00	200.00	115.00

由表 2 可看出:对主轨出电压、受端分线盘电压、送端分线盘电压、前方小轨入电压和前方小轨出电压而言,各调整状态下的预测电压相对比较平稳,且均未超过报警限值。主轨入电压、小轨入电压和小轨出电压则均呈现递增趋势,其中:主轨入电压值超过了报警上限;小轨入电压值和小轨出电压值偏高,较接近报警上限值。由此可初步判定该轨道电路可能会在接收端分线盘至模拟网络设备侧出现故障。将该预警诊断结果提供给现场工作人员,提前定位可能会发生的故障,并及时采取维修行为。

4    结语

本文通过挖掘大量的历史监测数据特性,分析了轨道电路的各类故障模式,建立了 SGD 逻辑回归模型,实现了对具有递增或递减趋势的监测量的预测预警。本文所建模型对不同的轨道区段和不同的监测量均有较强的适用性。最后以某车站某段轨道电路为案例,对该轨道区段的多个监测量同时进行预测,分析诊断该轨道电路可能发生的故障,从而实现轨道电路的故障预警。本文的研究方法对提高轨道电路维修的实时性和效率具有一定的积极意义。

参考文献

[1]    CHEN J, ROBERTS C, WESTON P. Neuro-fuzzy fault detection

and diagnosis for railway track circuits[J]. Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 2006, 2: 1366.

[2]    DEBIOLLES A, OUKHELLOU L, AKNIN P. Combined use of partial least squares regression and neural network for diagnosis tasks[C] // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, August 26, 2004. Cambridge, UK. New York: IEEE, 2004: 573.

[3]    王婷. ZPW-2000A 无绝缘轨道电路故障预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

WANG Ting. Research on fault prediction for ZPW-2000A railway jointless track circuits[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[4]    席旭宁. ZPW-2000A 轨道电路分路不良预警研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.

XI Xuning. Research on early warning of poor shunting for ZPW-2000A track circuit[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.

[5]    孔勇, 杜普选, 谈振辉, 等. 铁路轨道信号发送与车载接收模拟系统[J]. 铁道学报, 2011(3): 66.

KONG Yong, DU Puxuan, TAN Zhenhui, et al. The simulation system of railway signal transmission and on-board receiving[J]. Journal of the China Railway Society, 2011(3): 66.

[6]    YANG J, RIBEIRO B, NEVILLE J. Stochastic gradient descent for relational logistic regression via partial network crawls[EB/OL]. (2017-08-21) [2020-04-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.07716>.

(收稿日期:2020-05-09)