

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.012

基于证据理论的城轨车辆走行系 融合故障诊断*

邢宗义¹, 俞秀莲¹, 程晓卿², 秦 勇²

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094;

2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

摘要: 针对城轨车辆走行系故障诊断只依赖于单一证据源造成的诊断准确率低的问题, 研究利用证据理论进行走行系多证据源融合的故障诊断。经过对高冲突低信任度情况下悖论产生的原因分析, 采用矛盾因子对合成规则进行了改进; 针对城轨车辆走行系, 分析了轴承和轮对所有可能发生的故障, 建立了走行系轴承和轮对的识别框架; 选择轴箱振动诊断、轨旁振动诊断和轴温诊断等3个证据源作为走行系融合诊断的证据源; 采用专家经验法确定了不同证据源的基本信任分配函数。研究表明, 采用单一证据源的故障诊断准确率较低或诊断对象少, 而采用多证据源融合的故障诊断方法(在包含轮对和轴承两个对象情况下)的诊断准确率为80%, 从而有效提高了城轨车辆走行系故障诊断的可靠性。

关键词: 故障诊断; 城轨车辆; 走行系; 证据理论

中图分类号: TH17; TP273; U270.33 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1569-05

Approach for fault diagnosis of the metro vehicle running gears based on evidential theory

XING Zong-yi¹, YU Xiu-lian¹, CHENG Xiao-qing², QIN Yong¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional methods for fault diagnosis of the metro vehicle running gears depend on single evidence and lead to low accuracy, a new fusion fault diagnosis approach was proposed based on evidential theory. The reason of paradox on the condition of high conflict and low confidence was analyzed, and the combination rule was then modified. All the possible faults of bearings and wheels were collected to construct the frame of discernment for running gears. The diagnosis results of axle vibration, wayside vibration and axle temperature are selected as evidences of fusion diagnosis. The belief function was identified using experts' experience. The results indicate that the fault diagnosis based on single evidence may lead to low precise or cover few objects, while the proposed fusion fault diagnosis approach based on multiple evidence sources can reach a high accuracy of 80% for bearings and wheels and improve the reliability of fault diagnosis effectively.

Key words: fault diagnosis; metro vehicle; running gears; evidence theory

0 引 言

城轨交通具有准时、快速、绿色、运量大等优势, 已成为各大城市公共交通的重点发展方向。随着城

轨交通的快速发展及车辆的大量运营使用, 使车辆的运行安全成为近年来关注的焦点。走行系不但承受车体重量, 还传递钢轨与车辆间的制动力及驱动力, 是城轨车辆系统中影响运行安全的重要部件之一, 因

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAG01B05)

作者简介: 邢宗义(1974-), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事机械电子与轨道交通安全等方面的研究. E-mail: xingzongyi@163.com

此走行系必须保持良好的运行状态,否则将严重影响行车安全^[1]。

国内城轨车辆走行系均未安装相关检测装置,停留在以手工测量和经验判断为主的走行系故障诊断阶段,因此存在劳动强度大、检测过程繁琐、检测精度低等缺陷。随着故障诊断及计算机技术的飞速发展,部分专家学者陆续对城轨车辆的走行系展开深入研究。孙鹏冲^[2]通过谐波小波包分解实现了列车轴承故障信号的特定频带选择,然后采用加速度包络技术对分解后的信号进行包络解调,最后通过分析加速度包络谱,提取轴承故障特征频率进行有效的故障诊断,试验结果验证了诊断方法的有效性和实用性。苏大鹏等人^[3]采用非接触式传感器响应故障特征,运用现代数字信号处理技术和模糊识别技术,实现了对车轮扁疤和轴温异常的检测及严重程度分析。宋飞飞^[4]分析了地铁齿轮传动装置的特点及故障模式,研究了振动信号的构成特征及其调理机制,设计了齿轮传动装置的故障诊断试验装置。李建伟^[5]分析了列车轮对踏面擦伤故障的机理,介绍了轮轨振动信号分析方法和车轨耦合动力学模型,并采用频率切片小波变换法实现了轮对轴箱故障诊断。张兴宝等人^[6]对地铁车辆运行时的噪声及其产生机理进行了说明,介绍了地铁车辆在正线运营时走行部出现异响的可能情况及判断方法,并给出了出现异响后的处理建议。许艳华等人^[7]分析了城轨交通车辆走行部关键机械部件的常见故障,基于广义共振和共振解调的故障自动诊断技术实现了走行部轴承、齿轮、踏面等关键部件的故障早期预警和分级报警。

走行系故障模式多,检测手段也有所不同,已有研究均是依据单个具体证据进行故障诊断,尚未检索到融合多个证据进行诊断的案例,因此本研究采用一种改进的证据理论进行走行系融合故障诊断。传统的证据理论在进行融合时存在一定的局限性,对于低置信度高冲突的情况往往会得出违背人类推理习惯的悖论,从而直接影响证据理论的正确性和可靠性,为此众多学者相继提出不同的修改方法。部分学者提出把冲突因子作为未知的不确定项加到算法中,但该方法中证据的不确定性会在组合后增大^[8]。部分学者对证据理论的组合规则进行了评价与改进,但该方法中证据组合顺序变化会影响组合结果^[9]。平均法简化组合规则为简单的平均运算过程,但该方法不适用于独立证据的融合^[10]。

本研究提出一种基于证据理论的城轨车辆走行系融合故障诊断方法,该方法可有效提高走行系故障诊断准确率。首先笔者通过根据可信度和证据距离

得到矛盾因子和信任度因子,并据此对基本信任分配函数进行修订,然后采用证据合成对修正后的证据进行融合诊断。

1 证据理论及其改进

1.1 理论概要

证据理论为融合决策的推理方法,可更加客观地对事物的不确定性作评价,在众多故障诊断应用领域受到众多学者的普遍关注^[11]。

假设需要信息融合的某问题的识别框架

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n\} \tag{1}$$

式中: θ_i — 识别框架 Θ 的一个元素或事件; n — 元素的总个数; $i = 1, 2, \dots, n, \theta_i$ 满足互斥原则,即问题的融合结果只能是 Θ 中的一个元素。

对于识别框架 Θ ,若集合 2^Θ 到 $[0, 1]$ 区间的映射满足条件:

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中: m — Θ 的基本信任分配函数;命题 A — Θ 中的任意一个子集; $m(\phi) = 0$ — 不为空集分配信任; $\sum m(A) = 1$ — 所有命题的总信任度。

命题 A 的信度函数是 A 所有子集 B 的基本信任之和:

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \tag{3}$$

信度函数 $Bel(A)$ 不能反映 A 不为真的程度,因此引入似真函数 $Pl(A)$ 来描述怀疑 A 的程度:

$$pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \cap A = \phi} m(B) \tag{4}$$

信度函数与似真函数构成命题 A 的信度区间 $[Bel(A), Pl(A)]$,因此信度函数也称为下限函数,而似真函数称为上限函数。

1.2 合成规则

当同一命题出现多个证据时会得到多个基本信任分配函数,因此需要将多个证据单独的判断结果用证据合成规则进行融合。

设 E_1 和 E_2 是识别框架 Θ 下的两个证据源, m_1 和 m_2 是与两个证据源相对应的基本信任分配函数, A_i 和 B_j 分别为对应焦点,则 D-S 合成规则为:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - K}, & A \neq \phi \\ 0, & A = \phi \end{cases} \tag{5}$$

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) \tag{6}$$

式中: K 反映了不同证据之间的冲突程度, K 值越大表示证据间冲突越大, 如果 K 值接近于1, 则说明证据完全冲突, D-S合成规则不再适用。

多个证据源在经过D-S证据融合后, 形成一个抽象的证据源。在D-S证据合成过程中, 如果证据间存在低信任度高冲突的情况, 则会产生错误的悖论, 从而影响结论的正确性和可靠性。

1.3 规则改进

在D-S证据产生悖论的主要原因是其融合的规则将冲突的成分按等比例分给多个证据源的公共焦点, 因此本研究采用修正证据源的方法来解决不同证据间的高冲突问题, 从而避免悖论的产生。

设证据 E_i 的信任度因子为 α_i , 则所有信任度因子可组成证据集的信任度向量:

$$\alpha = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_M)$$

式中: M — 证据的个数, $\alpha_i \in [0, 1)$ 。

采用证据间距离表征证据间的相似程度, 针对两个证据源 E_1 和 E_2 , 定义其距离为:

$$D_{12} = \sqrt{\frac{1}{2}(\langle m_1, m_1 \rangle + \langle m_1, m_2 \rangle + \langle m_2, m_2 \rangle)} \quad (7)$$

式中: $\langle \rangle$ — 内积运算; m_1, m_2 — 与两个证据源相对应的基本信任分配函数。

鉴于冲突度和证据距离均无法单独描述证据间的冲突程度, 本研究采用证据矛盾因子^[12]描述证据 E_i 和 E_j 间冲突:

$$c_{ij} = \sqrt{D_{ij} K_{ij}} \quad (8)$$

式中: D_{ij} — 证据 E_i 和 E_j 间距离; K_{ij} — 冲突程度。

针对 n 个证据, 则可以进一步构造 n 阶矛盾因子矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 0 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

证据 E_i 与其他证据的总矛盾因子为:

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (10)$$

式中: c_i 越大, 说明证据 E_i 同其他证据的冲突越大, 其信任度因子 α_i 越小; 反之, 说明证据 E_i 同其他证据较一致, 其信任度因子 α_i 应越大。

可见, 信任度因子 α_i 和矛盾因子 c_i 之间存在某种联系, 可用下式描述:

$$\alpha_i = (1 - c_i) \beta^{c_i} \quad (11)$$

当 $\beta = e^{-1}$ 时, 信任度因子 α_i 和矛盾因子 c_i 关系曲线最为合理^[14], 因此得:

$$\alpha_i = (1 - c_i) e^{c_i} \quad (12)$$

设原来的基本信任分配函数为 $m^i(A^j)$, 则经过改进后的基本信任分配函数为 \hat{m}_i 为:

$$\begin{cases} \hat{m}_i(A_j) = m_i(A_j) \alpha_i A_j \neq \Theta \\ \hat{m}_i(\Theta) = 1 - \sum_{j=1}^n m_i(A_j) \alpha_i A_j \neq \Theta \end{cases} \quad (13)$$

2 走行系融合故障诊断

本研究以城市轨道交通车辆的走行系为研究对象, 采用证据理论对走行系的不同故障诊断方法进行融合诊断, 其诊断过程如图1所示。

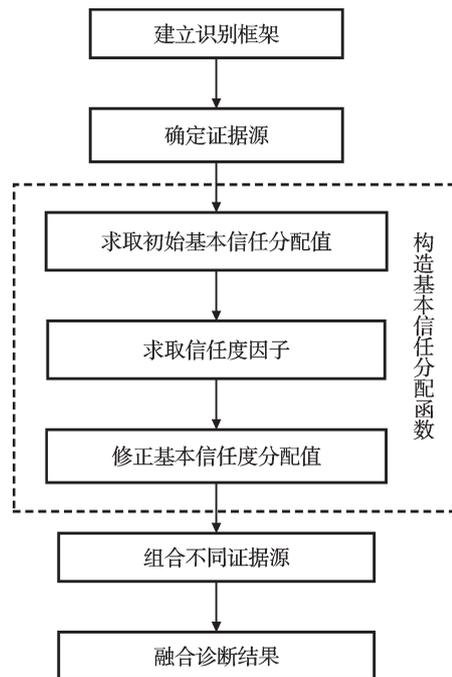


图1 基于D-S证据的融合诊断步骤

2.1 识别框架建立

本研究针对城轨车辆走行系的轴承及轮对建立故障集合, 则走行系所有可能发生的故障均与识别框架 Θ 的一个子集相对应。根据实验数据建立的识别框架 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8\}$ 。

式中: θ_1 — 轴承内圈故障+轮对踏面故障, θ_2 — 滚动体故障+轮对踏面故障, θ_3 — 轴承外圈故障+轮对踏面故障, θ_4 — 轴承正常+轮对踏面故障, θ_5 — 轴承内圈故障+轮对正常, θ_6 — 滚动体故障+轮对正常, θ_7 — 轴承外圈故障+轮对正常, θ_8 — 轴承正常+轮对正常。

2.2 证据源确定

本研究的故障诊断原始数据来自走行系轴箱振动传感器、轨旁振动传感器和轨旁轴温传感器, 其中, 轴箱振动信号和轨旁诊断信号采用EMD+BP神经网络对轴承和轮对进行故障诊断, 其准确率分别为29%

和33%,轴温数据通过阈值分类对轴承进行故障诊断,其准确率为80%^[13]。因此,本研究的证据源为轴箱振动诊断结果(E_1)、轨旁振动诊断结果(E_2)和轴温诊断结果(E_3)。

2.3 基本信任分配函数构造

基本信任分配函数并没有普适的求法,在实践中一般结合具体的故障诊断算法进行具体的基本信任分配值的获取。本研究采用专家经验给出不同证据源的基本信任分配函数。

笔者根据公式(5~13)进行信任度因子及基本信任度值的修正。

2.4 不同证据源组合

本研究根据D-S证据组合规则对3个证据源的局部诊断结果进行融合,从而获取最终诊断结果。

3 实例分析

针对3个证据源 E_1 、 E_2 和 E_3 ,每个证据源所有故障模式所赋予的基本信任度之和为1,因此本研究采用专家经验确定了3种证据源的初始基本信任度,共邀请5位专家进行信任度分配,其中3位相近专业高校教师,2位现场工程师,对其信任度分配求取平均值,3种证据源的基本信任度如表1所示。

本研究根据公式(5~13)进行信任度因子和融合基本信任度的计算,结果如表2、表3所示,可见经过证据理论融合后,除了 θ_1 和 θ_2 出现错误故障诊断外,其它故障模式的判断结果均正确,融合故障诊断的准确率为80%,高于证据源 E_1 的33%和证据源 E_2 的

表1 3种证据源的基本信任度

实际故障模式	证据源	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
θ_1	E_1	0.334	0	0	0	0.333	0	0	0.333
	E_2	0	0.333	0	0	0	0.334	0.333	0
	E_3	0.350	0.050	0.050	0.050	0.350	0.050	0.050	0.050
θ_2	E_1	0	0	0	0	0	1	0	0
	E_2	0	0.333	0	0.333	0.333	0	0	0
	E_3	0.016	0.450	0.017	0.017	0.016	0.450	0.017	0.017
θ_3	E_1	0.333	0	0	0	0	0.333	0.334	0
	E_2	0.334	0.333	0	0	0.333	0	0	0
	E_3	0.017	0.017	0.450	0.017	0.017	0.016	0.450	0.016
θ_4	E_1	0.666	0	0	0.334	0	0	0	0
	E_2	0	0	0.333	0.334	0	0	0.333	0
	E_3	0.033	0.033	0.033	0.400	0.033	0.033	0.033	0.400
θ_5	E_1	0.333	0.333	0	0	0.334	0	0	0
	E_2	0	0	0	0	0.333	0	0.667	0
	E_3	0.350	0.050	0.050	0.050	0.350	0.050	0.050	0.050
θ_6	E_1	0.333		0.333	0	0	0.334	0	0
	E_2	0.334	0.333	0	0	0	0.333	0	0
	E_3	0.017	0.450	0.017	0.017	0.016	0.450	0.017	0.016
θ_7	E_1	0	0	0.333	0.333	0	0	0.334	0
	E_2		0.333	0	0	0	0	0.667	0
	E_3	0.017	0.017	0.450	0.017	0.017	0.016	0.450	0.016
θ_8	E_1	0	0	0	0.333	0	0	0	0.667
	E_2	0	0	0	0	0	0.333	0	0.667
	E_3	0.033	0.033	0.033	0.400	0.033	0.033	0.033	0.400

表2 3种证据源的信任度因子

证据源	实际故障模式							
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
E_1	0.579	0.295	0.199	0.225	0.333	0.248	0.529	0.864
E_2	0.162	0.630	0.086	0.407	0.141	0.734	0.933	0.827
E_3	0.845	0.580	0.909	0.604	0.350	0.498	0.235	0.210

表3 融合后的基本信任分配值及诊断结果

实际故障模式	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	诊断结果
θ_1	0.302	0.146	0.073	0.089	0.547	0.005	0.086	0.098	θ_5
θ_2	0.040	0.678	0.009	0.141	0.033	0.098	0.023	0.012	θ_2
θ_3	0.472	0.007	0.454	0.013	0.010	0.014	0.008	0.011	θ_1
θ_4	0.007	0.152	0.034	0.578	0.090	0.078	0.105	0.067	θ_4
θ_5	0.096	0.087	0.235	0.032	0.614	0.078	0.065	0.036	θ_5
θ_6	0.164	0.045	0.177	0.056	0.098	0.439	0.062	0.056	θ_6
θ_7	0.023	0.055	0.023	0.215	0.032	0.047	0.582	0.012	θ_7
θ_8	0.033	0.075	0.083	0.012	0.085	0.141	0.032	0.744	θ_8

29%。同时可以看出融合诊断的准确率和证据源 E_3 的准确率持平,但证据源 E_3 的对象仅包括滚动轴承,而融合诊断的对象还包含了轮对。

由此可见,与传统的单独故障诊断方法相比,基于证据理论的融合故障能够提高城轨车辆走行系故障诊断的准确性。

4 结束语

本研究提出了一种基于证据理论的城轨车辆走行系融合故障诊断方法,首先笔者根据可信度和证据距离计算矛盾因子和信任度因子,并据此对基本信任分配函数进行修订,然后采用证据合成对修正后的证据进行了融合诊断。

通过对轴箱振动诊断、轨旁振动诊断和轴温诊断3个证据源的融合诊断试验及分析,表明了基于证据理论的融合故障诊断能够提高城轨车辆走行系故障诊断的准确性。

参考文献(References):

- [1] 黄采伦,樊晓平,张 剑. 机车走行部故障在线诊断的特征分析方法研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(6):1007-1011.
- [2] 孙鹏冲. 基于谐波小波和加速度包络的城轨列车轴承故障诊断研究[D]. 北京:北京交通大学交通运输学院,

2012.

- [3] 苏大鹏,王方程,迟宝全. 地铁列车车下走行部状态在线检测系统[J]. 机械工程师,2005(7):92-94.
- [4] 宋飞飞. 地铁齿轮传动装置状态监控系统的研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2010.
- [5] 李建伟. 基于频率切片小波变换的轨道交通轮轨振动信号分析[D],南京:南京理工大学机械学院,2013.
- [6] 张兴宝,张月秀,牟文博. 地铁车辆走行部出现异响的判断方法及对策探究[J]. 2013,51(6):25-26,37.
- [7] 许艳华,黄贵发,唐德尧. 城轨交通车辆走行部故障自动诊断技术应用[J]. 2012,25(5):131-135.
- [8] 宋立军,胡 政,杨拥民. 基于证据理论与粗糙集集成推理策略的内燃机故障诊断[J]. 内燃机学报,2007,25(1):90-95.
- [9] 杨建平. 证据理论及其在早期故障诊断信息融合中的应用研究[D]. 成都:电子科技大学机械电子工程学院,2008.
- [10] 向阳辉. 基于信息融合技术的旋转机械故障诊断研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2007.
- [11] 华 桦,游勇华,杨 勇. 基于证据理论的信息融合技术变压器故障诊断方法研究[J]. 机电工程技术,2013(8):128-131.
- [12] 刘准钊,程咏梅,潘 泉. 基于证据距离和矛盾因子的加权证据合成法[J]. 控制理论与应用,2009,26(12):1439-1442.
- [13] 俞秀莲. 基于信息融合的城轨车辆走行系故障诊断[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2014.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

邢宗义,俞秀莲,程晓卿,等. 基于证据理论的城轨车辆走行系融合故障诊断[J]. 机电工程,2014,31(12):1569-1573.

XING Zong-yi, YU Xiu-lian, CHENG Xiao-qing, et al. Approach for fault diagnosis of the metro vehicle running gears based on evidential theory[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(12):1569-1573.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>