

机车制动机故障模糊诊断方法研究*

张忠海, 欧长劲, 丁建波*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:为解决机车制动机故障诊断的滞后性问题,将小波分析与模糊产生式规则方法相结合应用于机车制动机故障诊断中。开展了对机车制动机气路系统故障诊断过程中内部管道压力变化速率与故障发生的因果关系的分析,提出了采用小波多尺度边缘检测法提取故障征兆,并与多征兆加权模糊产生式规则相结合的故障诊断方法,建立了故障征兆与故障原因之间的关系,进行了机车制动机故障诊断系统的试验。研究表明,该方法于机车制动机故障诊断中是有效的,可以提高机车制动机故障诊断的实时性和准确性。

关键词:制动机;压力变化速率;小波变换;加权模糊产生式规则

中图分类号:TH137;TP277

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)03-0301-04

Research on fuzzy diagnosis method for air brake of diesel locomotive

ZHANG Zhong-hai, OU Chang-jin, DING Jian-bo

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of diagnosis method for air brake of diesel locomotive hysteresis-free, a diagnosis method to combine the wavelet analysis with the expression of fuzzy production rule was investigated. After the analysis of relationship between the brake of diesel locomotive's varying rate of internal pipeline pressure and its fault cause, a method was presented to combine the wavelets multiscale edge detection for extracting the symptom of the failures with the expression of multiple symptom fuzzy diagnosis knowledge. The diagnosis methods for air brake of diesel locomotive were tested. The experimental results show that the diagnosis system can improve the real-time and veracity of the diagnosis for air brake of diesel locomotive effectively.

Key words: brake; varying rate of pressure; wavelet transform; weighted fuzzy production rules

0 引言

列车不断提速,必然会对其制动性能提出更高要求,因而制动机的安全性、稳定性越来越受到重视,研制精度高、性能稳定的机车制动机故障诊断系统已迫在眉睫。目前国内外机车制动机故障诊断技术的研究尚处在起步阶段,国内学者所采用的故障诊断方法主要有故障树诊断法^[1]、专家系统诊断法^[2-5]等,这些诊断方法取得了较好的效果,具有一定的实用性。但这些方法由于未考虑制动机系统中压力变化的影响,存在一定滞后性,很难在早期发现故障,影响了诊断的实

时性。专家系统的知识表示方式一般都采用产生式规则表示法,故障特征的描述采用压力值与门限值来作为故障判断的依据,未考虑压力变化速率与故障之间的因果关系,存在着明显的局限性。

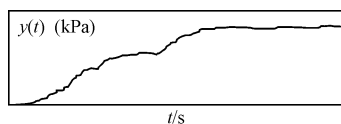
为此,本研究采用小波多尺度边缘检测来提取故障征兆,并用加权模糊产生式规则表示法来描述气路系统压力变化过程的故障特征,实现了机车制动机系统的故障诊断。

1 故障征兆提取

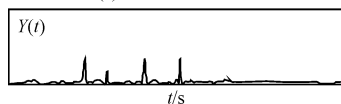
从对制动机制动性能指标和所做的实验结果分析

可知,机车制动机在制动过程中内部气路管道压力是一个阶跃变化的过程,而小波分析对这类边缘信号有很好的处理效果,不仅有滤波作用,并且可以从阶跃型信号中提取信号的突变点^[6],本研究采用“小波多尺度边缘检测”方法分析制动机系统的压力信号,并从中提取压力阶跃上升、减小和保持过程中的一些突变点,从中来提取故障征兆。通常采用小波变换的极值点来检测信号的突变点^[7-8]。如图 1 所示,以压力阶跃上升为例, $y(t)$ 表示气压原始信号, $Y(t)$ 表示经小波变换后的模极大值。 t_a 、 t_b 代表压力信号上升沿的两个关键的拐点,其模极大值分别为 Y_a 、 Y_b ,则压力上升速率特征量(征兆):

$$\lambda = \frac{|Y_a| + |Y_b|}{t_b - t_a} \quad (1)$$



(a) 采样点气压信号



(b) 小波变换模极大值

图 1 小波变换

2 专家系统知识表示

制动机系统的气路比较复杂,使得故障产生时系统中各部分的压力变化表现的错综复杂,其某一个阀件、气缸发生故障时,不仅其内部气压变化率会发生异常,而且与之相连的其他阀件、气缸的气压变化率也会发生异常,产生“连锁故障效应”,换句话说,一种故障引起多种征兆,但这些征兆对这一故障的灵敏度、贡献度各不相同,且相对于其他故障而言,这些征兆的灵敏度、贡献度又不尽相同。模糊集理论能够利用模糊集合的运算和变换对这一类故障进行复杂自动诊断和推理^[9],为此本诊断系统引入了模糊知识表示法—加权模糊产生式规则^[10]。

加权模糊产生式规则是在模糊产生式规则中引入整体权和局部权;对模糊规则前件的每一个命题都制定阈值和局部权,对每一条模糊规则都制定整体权,在模糊规则中引入整体权、局部权、阈值、可信度等知识表示参数,增强了模糊规则的知识表示能力^[11]。在诊断系统中,模糊产生式规则具有一般形式:

$$\begin{aligned} & \text{IF } P_1(\beta_1, \omega_1) \text{ AND } P_2(\beta_2, \omega_2) \text{ AND} \cdots \text{ AND } P_i(\beta_i, \\ & \omega_i) \quad i = 1, 2, \cdots, n \\ & \text{THEN result WITH}(C_F, \tau) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P_i —子前提条件,即模糊性故障征兆(事实); β_i —子前提条件模糊隶属度值,一旦检测到的 $\beta_i' > \beta_i$,则表示子前提条件被激活; ω_i —故障征兆 P_i 的权重系数,即对故障贡献的大小, $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$;result—诊断结论; C_F —诊断规则的隶属度,即诊断结论的置信度; τ —这条规则成立的阈值。

为了在不破坏原有制动机阀件、气缸结构的状况下能够有效地诊断出故障,诊断系统的压力检测位置设置在制动机的关键管道上,在总风缸管、均衡风缸管、中均管、过充管、列车管、作用风缸管、单独作用管、作用阀管、制动缸管等处设置了 10 个压力传感器来监测和分析这些管道上气压的变化,通过压力变化速率的状况,来诊断制动机系统中各阀件、气缸的工作状况。知识表示方法采用模糊产生式规则,例如,作用阀故障知识表示的产生式如下:

IF 制动缸管气压变化率异常($\beta_1 = 0.8, \omega_1 = 0.6$)
 作用阀管气压变化率异常($\beta_1 = 0.7, \omega_1 = 0.2$)
 作用风缸气压变化率异常($\beta_1 = 0.4, \omega_1 = 0.1$)
 列车管气压变化率异常($\beta_1 = 0.2, \omega_1 = 0.1$)
 中均管气压变化率异常($\beta_1 = 0.2, \omega_1 = 0$)
 总风管气压变化率异常($\beta_1 = 0.1, \omega_1 = 0$)
 THEN 作用阀发生故障($C_F = 0.9, \tau = 0.6$)

3 专家系统知识库的构建

知识库是故障诊断专家系统的核心,根据诊断数据关系模型,需要在模糊诊断知识库中建立故障征兆表、规则表、征兆隶属度阈值/权重表、相关参数表。

(1) 征兆表:根据实际情况而定,有几处采样点,就对应几种征兆,当然这些采样点的信号具有典型的特征;

(2) 规则表:存放故障原因规则激活阈值 τ 、规则可信度 C_F 、故障维修建议等,如表 1 所示。

表 1 规则表

项目号	对应值
前提条件 1	1(征兆编号)
前提条件 2	2(征兆编号)
……	……
前提条件 10	10(征兆编号)
规则可信度(C_F)	0.8
规则阈值(τ)	0.6
故障结论	作用阀故障
故障维修建议、解释	……

(3) 征兆阈值、权重表:存放规则表中各个故障相对应的各种征兆的阈值和权值。

①征兆阈值:即确定模糊关系矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。对 10 处采样点的压力变化率进行分析,选择合适的分布特征函数;正态分布,三角分布,升、降半正态分布,升、降半柯西分布等等,根据本系统的特点和经验常选用正态型和柯西型隶属度函数,但柯西分布图形下降至 0 的速度比正态分布慢很多,很适合描述中等部分较窄的概念或现象,且选用柯西型隶属度函数可减少计算量,故一般故障诊断中常采用“升、降半柯西分布公式”型隶属度函数:

$$\mu(x) = \frac{K(x-a)^2}{1+K(x-a)^2} \quad (3)$$

取 $x = 1/\lambda$ (通常取 $a = 0$) 代入,得到本系统隶属度函数:

$$\mu(x) = \frac{K}{\lambda^2 + K} \quad (4)$$

假如气压的变化率特征量 $\lambda = 100$, 其对应的隶属度为 $\mu(x) = 0.5$, 代入式(4), 可求出 K 的值, 利用这个隶属度函数最终得出合适的征兆阈值。

②征兆权重:根据专家经验初步给定,然后在系统运行中通过自学习,或者通过专家进一步设定,不断的来修正和优化权重,权重的优化可以采用神经网络、层次分析法、最小二乘法等方法来实现^[12],是一个较复杂的过程,限于篇幅,这里不再展开。

(4) 相关参数表:推理运算时需要用到的各种参数,比如隶属度函数系数 K 等参数。

4 专家系统规则推理算法

(1) 前提条件真值 $T(P)$:

$$T(P) = \sum_{i=1}^n \omega_i T(P_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$T(P_i) = 1 - \max\{0, (\beta_i - \beta'_i)\} \quad (6)$$

式中: $T(P_i)$ —证据和模糊子条件的匹配程度。

(2) 规则结论的置信度:

$$E = C_F \cdot T(P) \quad (7)$$

当 $E \geq \tau$ 时,规则激活, $E < \tau$ 时,规则无效。

(3) 初始证据置信度 β'_i :

本系统规则的前提征兆事实中包含状态检测量压力变化率信号,故系统直接调用相应的隶属度函数,代入公式(4)即可求出。

(4) 系统在机车制动机 10 个关键处设置一个压力传感器实时采集压力,规则推理策略如图 3 所示。

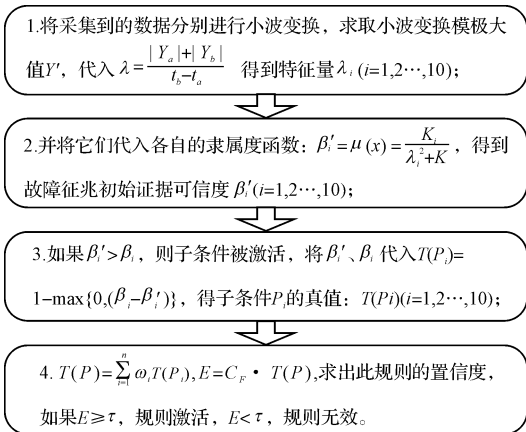


图3 规则推理策略流程图

5 故障诊断实例

将上述方法应用于笔者开发的机车制动机故障诊断专家系统。其系统界面如图 4 所示。系统知识库以表格的形式(征兆表、规则表、征兆隶属度阈值/权重表、相关参数表)存储于 SQL2000 的 SQL 数据库中。以机车制动机自动制动过程为例,10 路压力传感器采集到 10 组离散的压力信号,这里只给出两组关键采样点的气压信号,压力变化曲线如图 5 所示。经过图 3 规则推理算法的第 1、2 步骤,得到初始证据可信度分别为 0.85、0.8、0.5、0.1、0.15、0.1。

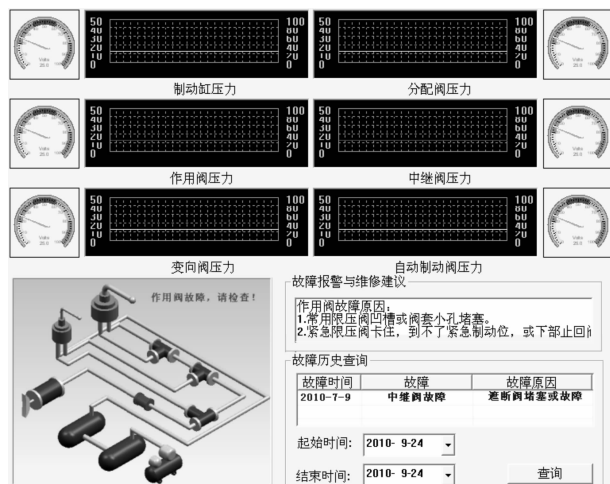


图4 故障诊断专家系统主界面

利用规则 1 作用阀故障规则进行推理,6 种故障征兆都被激活;由图 3 规则推理算法的第 3、4 步得出 $E = C_F \cdot T(P) = 0.7768 > 0.6$, 规则被激活,即诊断结果:作用阀发生故障。利用规则 2 变向阀故障规则进行推理(限于篇幅,这里没有给出规则内容),同理可以得出 $E = C_F \cdot T(P) = 0.690 > 0.65$, 规则被激活,即诊断结果:变向阀发生故障。

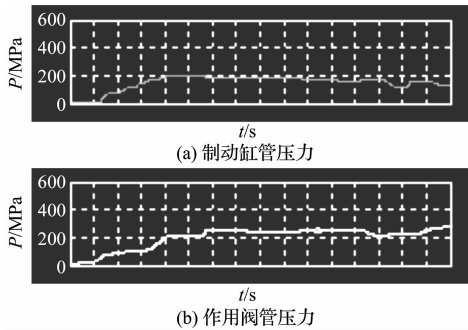


图 5 压力变化曲线

逐条匹配,其他规则都没有生效,此时共出现两种故障,需要通过结论的置信度,进一步推出最终的结论,也就是置信度最高的结论,比较可知作用阀故障的置信度高于变向阀故障的置信度,故得出最终诊断结果:作用阀发生故障。结果与实际情况相符,如图 4 所示,作用阀出现闪烁报警,在故障报警栏中显示报警原因与维修建议^[13-14]。

6 结束语

本研究以制动机系统压力速率作为研究对象,采用小波多尺度边缘检测法提取出 10 种故障征兆,并结合多征兆加权模糊产生式规则的知识表示方法,解决了机车制动机故障诊断系统中不确定性的求解,在保证故障诊断准确性、实时性要求的同时,实现了预知故障的效果,有很大的使用价值和应用前景。

参考文献 (References):

[1] 丁建波,欧长劲. 内燃机车空气制动机故障树的建立[J]. 机车电传动,2007(5):60-62,65.

- [2] 刘 泉,高殿柱,陈爱军. 电空制动机故障诊断系统设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2007,30(6):8-10.
- [3] 陈广程,陈特放. 电力机车空气制动系统的控制与故障诊断[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院,2004.
- [4] 梁建辉,王旭东,李庆全,等. 阵地降温机实时故障诊断专家系统研究[J]. 机电工程技术,2010,39(6):61-62.
- [5] 张 琴. 饲料加工设备故障诊断专家系统知识库的设计研究[J]. 机电工程技术,2009,38(11):16-18.
- [6] 杜文正. 基于小波多尺度边缘检测的液压缸内泄漏故障诊断[J]. 液压与传动,2003(3):52-53.
- [7] STEPHANE M. A Wavelet Tour of Signal Processing[M]. 2nd ed. USA: Academic Press,1999.
- [8] NUNEZ J, FORS X O, PRADES A, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition[J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1999,37(3):1204-1210.
- [9] SLANG W. Scheduling as a fuzzy multiple criteria optimization problem[J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 1996(77):197-222.
- [10] YEUNG D S, TSANG E C C. Weighted fuzzy production rules[J]. **Fuzzy Sets and Systems**,1997(88):299-313.
- [11] 刘晓波,黄其柏. 水轮发电机组故障诊断模糊专家系统研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(1):71-73.
- [12] 胡文兵,孟 波,王少梅. 基于贝叶斯网络的权重自学习方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(12):1781-1784.
- [13] 黄亚勤,冯剑威,王会强. 可拆式板式换热器故障分析及结构优化[J]. 轻工机械,2010,28(2):100-102.
- [14] 周将坤,陆森林. 基于 EHD 平均能量法的滚动轴承故障诊断[J]. 轻工机械,2010,28(2):36-40.

[编辑:张 翔]

(上接第 274 页)

[16] FOGEL D B. A parallel processing approach to a multiple traveling salesman problem using evolutionary programming [C]//Proceedings on the Fourth Annual Parallel Processing,1990:318-326.

[17] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Approach by localization and multi-objective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problem[J]. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Application and Reviews**,2002,32(1):1-13.

[18] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic [J]. **Mathematics and Computers in Simulation**,2002,60(3-

5):245-276.

- [19] 袁 坤,朱剑英. 一种求解多目标柔性 Job Shop 调度的改进遗传算法[J]. 中国机械工程,2007,18(2):156-160.
- [20] 张国辉,高 亮,李培根,等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械工程学报,2009,45(7):145-151.
- [21] 董玲娇. 基于遗传算法的 RBF 神经网络在铂电阻温度传感器非线性补偿中的应用[J]. 轻工机械,2010,28(1):60-63.
- [22] 杜海霞. 锥齿轮减速器的遗传算法优化设计[J]. 现代制造技术与装备,2010(4):22-23.
- [23] 葛惠民,蔡炯炯. 皮革类专用冲裁设备的控制策略和关键算法[J]. 轻工机械,2008,26(4):70-72.

[编辑:张 翔]