

# 地铁列车常用气制动故障特征提取

田 春<sup>1</sup>, 程梦婷<sup>1</sup>, 潘丽莎<sup>2</sup>, 吴萌岭<sup>1</sup>

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 广州市地下铁道总公司, 广东 广州 510320)

**摘要:** 为了对地铁列车常用气制动的隐患进行挖掘, 选择中继阀前端气缸容积(CV)实际压力与目标压力的跟随性能作为故障特征; 利用地铁列车按模式运行的特点, 根据 CV 目标压力变化情况, 将常用气制动过程划分为减速阶段、停车保持阶段和缓解阶段等三个典型阶段。根据各阶段特点, 提出了三种故障特征提取方法: 相关系数法、平均绝对误差法和直接提取法, 得到了 6 个故障特征。最后, 在制动系统可靠性试验台上试验模拟了三类典型隐患故障, 采用对故障隐患的响应准则, 对比各故障特征量在隐患工况和正常工况时的幅值, 探讨了各故障特征对不同隐患工况的识别能力, 初步验证了隐患特征对不同隐患进行挖掘的有效性, 为利用在途数据进行隐患挖掘提供了一个可行途径。

**关键词:** 常用气制动; 跟随性能; 特征提取; 隐患挖掘  
**中图分类号:** O121.8 **文献标志码:** A

## Fault Feature Extraction of Service Air Braking of Subway Train

TIAN Chun<sup>1</sup>, CHENG Mengting<sup>1</sup>, PAN Lisha<sup>2</sup>, WU Mengling<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Railway & Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guanzhou Metro Corporation, Guanzhou 510320, China)

**Abstract:** In order to dig the hidden trouble of subway train's service air braking, the following performance of cylinder volume (CV) actual pressure and CV target pressure is chosen to be the fault feature. According to the change of CV actual pressure of the running train, service air braking process is divided into three typical braking phases: decelerating phase, hold-off brake phase and release phase. For each of the three phases with own characteristic a corresponding method is put forward to extract fault feature, including correlation method, mean absolute error method and direct extraction, and there are totally six fault features extracted. At last, the three kinds of typical faults are tested on the brake system reliability test. By means of the criterion of response to the

faults, amplitudes of the six fault features in hazard conditions and in normal working condition are compared. And recognition ability of the six fault features are discussed. The effectiveness of the six fault features for excavating the different hidden troubles is established via the comprehensive analysis of the running data and the fault simulation data.

**Key words:** service air braking; tracing performance; feature extraction; hidden troubles excavation

城市轨道交通作为一种客容量大、安全、快速、舒适和节能的交通方式, 其载运量大、客流集中的特点, 决定了城市轨道交通设备安全性和可靠性的极端重要性。轨道交通车辆的制动系统是事关列车运营安全的重要系统, 必须确保其本身的安全可靠。制动系统的故障的发展是渐变的<sup>[1]</sup>, 如制动系统中的关键部件中继阀的故障就是以损耗型故障为主, 存在一个性能逐渐劣化的过程<sup>[2]</sup>。在性能开始劣化至故障发生的临界点之前的这段时间将隐患挖掘出来, 进行故障预测, 采取主动安全措施, 是降低事故发生率和减少事故危害的必由之路。同时, 隐患挖掘也能为维修决策提供指导, 节省维护成本。

故障特征提取是隐患挖掘中最关键、最困难的问题之一<sup>[3]</sup>, 采用信号处理的方法对原始信号进行处理以获得有效的故障特征是当前的主要方法。信号处理研究的主要内容包括了频谱分析、统计方法和相关分析等。基于频谱分析的故障特征提取是当前研究的热点, 得到了最广泛的应用, 如傅里叶变换, 小波变换及各种改进型的小波变换、希尔伯特黄变换、walsh 变换等方法<sup>[3-7]</sup>, 但通常仅限于在轴承、电机等旋转机械及电路的故障诊断中应用。而对于制动系统这样具有持续非周期变化的压力、速度、加速度、电流电压以及跳变的开关量等多种信号的复杂系统, 基于频谱分析的故障特征提取方法并不适

收稿日期: 2012-12-21

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2011AA110501)

第一作者: 田 春(1977—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为载运工具运用工程。E-mail: chtian@tongji.edu.cn

用,相关的研究较少.

本文针对某型地铁列车制动系统,结合车载传感器得到的在途运行数据,对常用气制动故障进行分析,提出了通过对 CV 压力(中继阀前端的压力)的跟随性能进行描述来提取故障特征,针对 CV 目标压力的变化情况,将制动全过程划分为几个特点明显的典型阶段,并根据各自特点的不同采取了不同的特征提取方法:相关分析法、平均绝对误差法和直接提取法.以系统处于健康状态时的连续 28 次正常制动工况和试验台模拟的 3 类 5 种典型隐患工况为对象进行了故障特征提取,分析不同故障特征对不同隐患识别的有效性,说明提取出的故障特征能够有效地表征系统当前性能,为隐患挖掘提供判据,为晚点事故、安全事故的减少及维修决策提供指导.

### 1 常用气制动气路分析

本文以某型城轨列车制动系统为对象分析常用气制动,气控制单元气路如图 1 所示,气路走向为:主风管/主风缸→制动风缸单向阀→制动风缸→EP 阀(电空转换阀)→紧急阀→紧急保护阀→空重车阀→中继阀→防滑阀→制动缸.

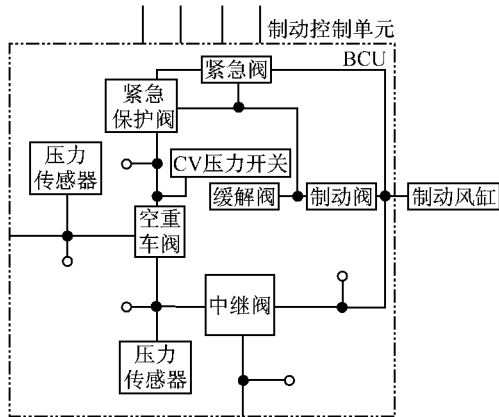


图 1 制动系统常用气制动控制气路图

Fig.1 Control pneumatic diagram of service air braking system

CV 压力即中继阀前压力信号,对应着车辆气制动动力的大小,是制动系统的中间控制变量,它能够反映常用气制动中制动控制系统的性能.若常用气制动控制系统存在隐患时, CV 实际压力与 CV 目标压力之间的跟随性能将变差,本文对如何利用在途数据从 CV 压力跟随性能中提取出能够表征系统当前性能状态的故障特征进行了探索.

图 2 显示了一次典型的常用气制动过程中 CV 目标压力和 CV 实际压力的变化过程.由图 2 可见,制动系统在车速  $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时接到常用制动信号,制动电子控制单元(BECU)结合当时的载重信号和制动级位以及与电制动配合的需要,计算 CV 目标压力,在初始阶段渐渐上升至  $150 \text{ kPa}$  左右,后于地铁列车防止冲动和精确停车的需要,存在一段目标压力大范围变化的反复过程:先逐渐减小为 0,接着进行保持制动,施加 70% 的常用全制动力(约  $200 \text{ kPa}$ ),期间制动力也有减小,最后再返回并稳定在保持制动力所需的压力值附近,直到列车启动且起动力矩足够大时,才进行制动缓解,压力下降为 0.

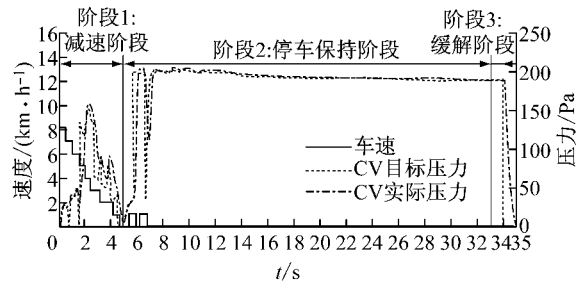


图 2 一次常用气制动 CV 压力变化过程及典型阶段划分  
Fig.2 Change progress of CV pressure in one service air braking and typical stages divided

### 2 基于 CV 压力跟随性能的故障特征提取

故障特征提取中如何将快速性和精确性两个存在于同一过程中的耦合故障特征进行解耦从而提取出较准确的延迟时间和误差是关键问题.如第 1 节分析,按模式运行的地铁列车一次常用气制动全过程具有几个特点明显的部分,本节据此进行了典型制动阶段划分,针对各阶段不同的特点采用不同的方法进行解耦从而提取故障特征,提取出的故障特征应能反映系统的当前性能状态.

#### 2.1 CV 压力变化典型阶段划分

针对常用气制动全过程的特点,将一次常用气制动全过程分为三个特点明显的典型阶段,如图 2 所示:

(1) 阶段 1: 减速阶段. 车速从  $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  降为 0,目标压力和实际压力均上升至一峰值再下降到 0 的快速动态变化过程.此阶段目标压力变化大而迅速,对系统的快速性和精确性都提出了较大的要求,可通过延迟时间、误差等指标对系统当前性能做出

评价;

(2) 阶段 2: 停车保持阶段. 为了防止车辆冲动, 也由于精确对门的需要, CV 目标压力从 0 跃升至一较大值后有若干点急剧回落, 最后又上升并稳定在该值附近. 跳变点很少, 影响可忽略不计, 该阶段的 CV 目标压力基本维持不变, 而 CV 实际压力向着一目标值持续增长, 类似控制系统中阶跃输入的系统响应, 借鉴调整时间和稳态精度以求得延迟时间和误差来对系统的快速性和精确性两个方面的性能进行评价;

(3) 阶段 3: 缓解阶段. 列车缓解时, CV 压力下降至 0 的阶段. 此阶段与停车保持阶段有相似之处, 但目标值向反方向跳变, 由于空气制动系统充放气特性并不相同, 因此对其进行故障特征提取仍是有必要的, 但它的目标压力和实际压力的最终值都为 0, 计算稳态误差没有意义, 所以仅对本阶段提取缓解时间作为故障特征.

## 2.2 减速阶段特征提取方法

互相关函数是描述两个随机信号在任意两个不同时刻的取值之间的相关程度的函数, 当它出现极大值时, 说明该点输出信号和输入信号的匹配程度最高. 基于互相关函数这一特点, 本文在减速阶段采用互相关系数法对 CV 目标压力和 CV 实际压力之间的关联性进行度量来对减速阶段进行解耦从而提取故障特征, 提取出延迟时间  $M_1$ , 误差  $E_1$  和最大相关系数  $C_c$  三个故障特征. 具体公式如下:

$$m_1 = m_{R(m)=R(m)_{\max}} \quad (1)$$

$$M_1 = \Delta t \cdot m_1 \quad (2)$$

$$E_1 = \frac{1}{N - m_1} \sum_{i=1}^{N-m_1} |p_{\text{实际}, i+m_1} - p_{\text{目标}, i}| \quad (3)$$

$$C_c = R(m)_{\max} \quad (4)$$

式(1)~(4)中:  $m$  为 CV 实际压力和 CV 目标压力之间延迟的采样点数;  $R(m)$  为 CV 目标压力与 CV 实际压力的互相关函数;  $R(m)_{\max}$  为互相关函数的最大值;  $m_1$  为互相关系数取最大值时对应延迟的采样个数;  $\Delta t$  为采样间隔时间,  $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ ,  $N$  为采样点总个数;  $i$  为采样点次序,  $p_{\text{实际}, i+m_1}$  为该第  $(i+m_1)$  个采样点的 CV 实际压力;  $p_{\text{目标}, i}$  为第  $i$  个采样点的 CV 目标压力.

## 2.3 停车保持阶段故障特征提取方法

如第 2.1 节中分析, 选取延迟时间和误差作为本阶段的故障特征, 在控制系统中, 调整时间指的是实际输出收敛至目标值的一定范围(通常为  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$ ) 内的最小时间, 稳态误差是实际输出的收敛

值与目标值之间的误差, 借鉴此调整时间和稳态误差的选取及计算方法, 在本阶段, 取 CV 实际压力与 CV 目标压力的误差值第一次达到目标值的  $\pm 5\%$  之内所需的时间为延迟时间  $M_2$ , 取进入稳态之后的所有点计算平均绝对误差作为误差  $E_2$ , 如图 3 所示.

## 2.4 缓解阶段故障特征提取方法

如第 2.1 节中分析, 直接选取制动缓解时间作为故障特征  $M_3$ , 为了消除缓解初始时刻压力大小对缓解时间的影响, 选取压力从指定压力值(180 kPa)降至 0 所需的时间为缓解时间  $M_3$ , 如图 4 所示.

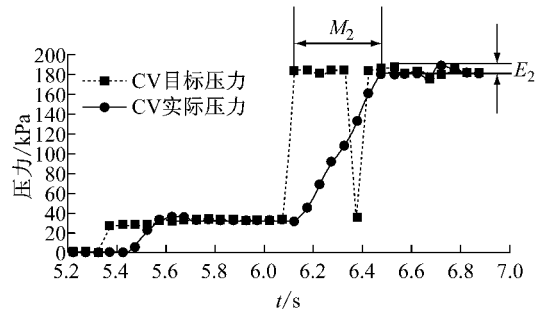


图 3 停车保持阶段(阶段 2)故障特征提取方法示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of fault feature extraction method in hold-off brake phase (Phase 2)

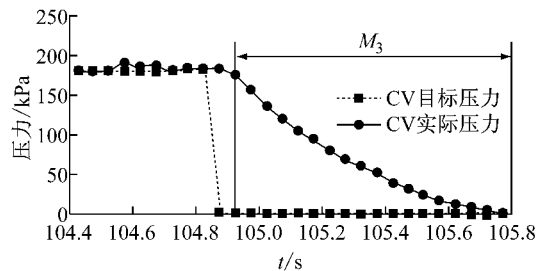


图 4 缓解阶段(阶段 3)故障特征提取方法示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of fault feature extraction method in release phase (Phase 3)

## 3 故障特征分析

为了研究上述 6 个故障特征对常用气制动故障隐患识别能力, 本节结合正常工况数据和多种类型的隐患工况的数据对故障特征进行对比分析. 正常工况数据来源于某型地铁列车在途运行的 28 次常用制动工况数据, 该 28 次工况在系统健康状态良好时连续发生, 经历了该地铁线路的始发站到终点站的完整过程, 包含了每个站点各自的复杂条件, 具有代表性, 下文中将这些制动工况简称为正常工况. 隐患工况的数据通过故障模拟试验的手段获得, 为此课题组在该型地铁列车可靠性试验台(图 5)上进行了故障注入, 模拟典型的隐患工况.

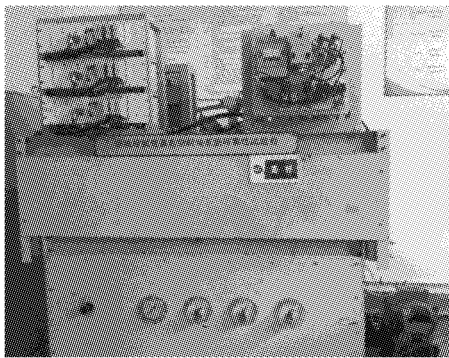


图 5 某型地铁列车可靠性试验台

Fig.5 Reliability test rig of a subway train

### 3.1 故障模拟

由轨道交通维保部门对故障的统计结果和相关研究显示<sup>[8-12]</sup>,导致 CV 压力跟随性能劣化的常用气制动故障的原因主要有电空转换中继阀(包括 EP 阀、紧急阀、空重车阀、中继阀)的故障、由密封件老化或热胀冷缩等原因造成的泄漏及管接头等处的气路泄漏等。

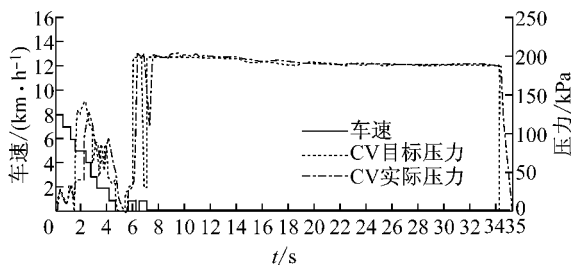


图 6 制动阀间歇性失灵发生在阶段 1(隐患工况 A1)时 CV 压力变化过程

Fig.6 CV pressure change process while brake valve failing intermittently in Phase 1 (hidden trouble A1)

隐患工况 B1、B3:EP 阀中的缓解阀间歇性失灵分别发生在阶段 1 和阶段 3,此种隐患工况下 CV 实际压力与 CV 目标压力的变化过程如图 8 和图 9 所示。因阶段 2 为停车保持阶段,CV 压力向着一较大目标上升,缓解阀几乎不起作用,缓解阀是否有隐患对性能几乎无影响,故对阶段 2 的该类隐患工况不予分析。

隐患工况 C:中继阀前管路漏气,发生在整个气制动过程中。此种隐患工况下 CV 实际压力与 CV 目标压力的变化过程如图 10 所示,由图中可见:CV 实际压力对目标压力跟随的滞后性较大。

### 3.2 结合正常工况和隐患工况的故障特征分析

用第 2 节所述各方法对所有正常工况和模拟隐患工况进行故障特征提取,得到各故障特征量。为了

本文通过模拟 EP 阀间歇性故障和漏气故障来观察隐患工况下 CV 实际压力与 CV 目标压力的跟随状况,分别得到三类典型隐患工况,包括 EP 阀中的制动阀间歇性失灵类隐患,记为 A;EP 阀中的缓解阀间歇性失灵类隐患,记为 B;中继阀前的管路漏气类隐患,记为 C。又按隐患发生阶段的不同,分为以下 5 种工况:A1、A2、B1、B3 和 C,其中,字母代表隐患类别,数字代表发生阶段(1、2、3 分别对应阶段 1、阶段 2 和阶段 3,无数字代表发生在全程)。5 种隐患工况分别进行 10 次试验,记为  $X-n$  ( $X$  为隐患种类标识, $n \in [1, 10]$ ,为相应隐患的试验次序)。具体如下:

隐患工况 A1、A2:EP 阀中的制动阀间歇性失灵分别发生在阶段 1 和阶段 2,此种隐患工况下 CV 实际压力与 CV 目标压力的变化过程如图 6 和图 7 所示。因阶段 3 为缓解阶段,并未使用制动阀,制动阀是否有隐患不会影响性能,因此无需对阶段 3 的该类隐患工况进行分析。

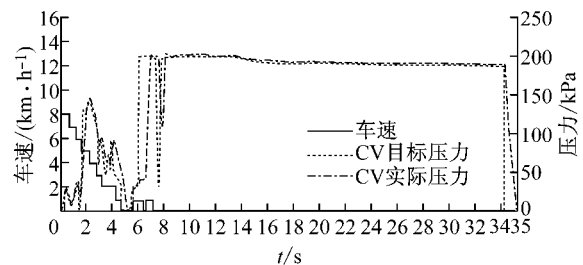


图 7 制动阀间歇性失灵发生在阶段 2(隐患工况 A2) CV 压力变化过程

Fig.7 CV pressure change process while brake valve failing intermittently in Phase 2 (hidden trouble A2)

消除量纲产生的影响,分别将各阶段不同故障特征归一化到 $[0, 1]$ 上,使得各故障特征均为随性能劣化递增的量纲一值,分别记为:延迟时间  $M'_1$ 、误差  $E'_1$ 、相关系数  $C'_1$ 、延迟时间  $M'_2$ 、误差  $E'_2$  和缓解时间  $M'_3$ 。得到归一化后的各阶段故障特征分别如图 11~13 所示,图中制动工况的序号即连续 28 次常用制动的次序,A1、A2、B1、B3 和 C 分别代表相应隐患工况。

为评估故障特征量的有效性,采用对故障隐患的响应准则,即当存在故障隐患时,特征量幅值偏离正常状态时的值。本文通过对比 28 次正常工况和 5 种隐患工况,评估 6 个故障特征量的有效性和适应性。图 11 为归一化后的阶段 1 故障特征:延迟时间  $M'_1$ 、误差  $E'_1$  和相关系数  $C'_1$ 。在 28 次正常工况(1~

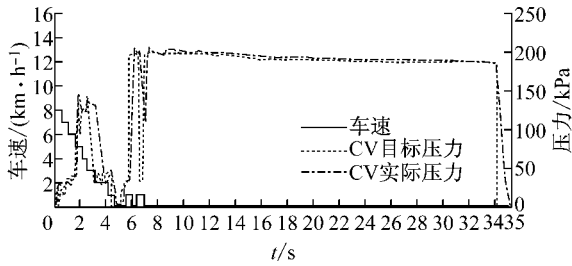


图 8 缓解阀间歇性失灵发生在阶段 1(隐患工况 B1) 时 CV 压力变化过程

Fig.8 CV pressure change process while release valve failing intermittently in Phase 1 (hidden trouble B1)

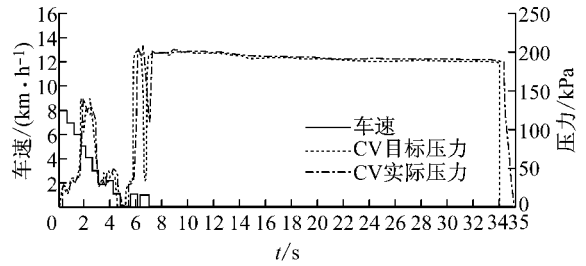


图 9 缓解阀间歇性失灵发生在阶段 3(隐患工况 B3) 时 CV 压力变化过程

Fig.9 CV pressure change process while release valve failing intermittently in Phase 3 (hidden trouble B3)

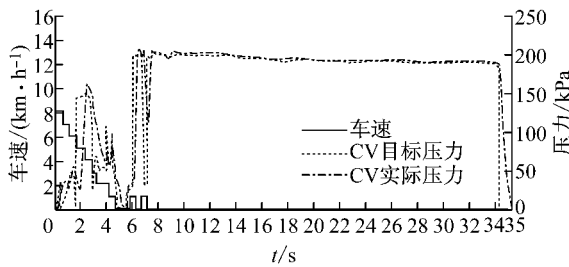


图 10 中继阀前管路漏气(隐患工况 C)时 CV 压力变化过程

Fig.10 CV pressure change process while the pipeline of the front relay valve leaks (hidden trouble C)

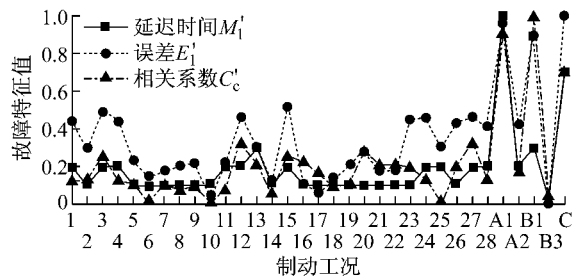


图 11 归一化后的阶段 1 故障特征:延迟时间  $M'_1$ 、误差  $E'_1$

Fig.11 Normalized fault features of Phase 1: delay time  $M'_1$ , error  $E'_1$

28)和三类典型故障模拟的 5 种隐患工况(A1、A2、B1、B3 和 C)时的取值. 由图中可见,对比各故障特征量在隐患工况和正常工况时的幅值,故障特征量延迟时间  $M'_1$  在隐患工况 A2、B1 和 B3 时的幅值与正常工况一致,即延迟时间  $M'_1$  对与隐患工况 A2、B1 和 B3 相对应的隐患无响应,因此不能识别这三种故障隐患. 相反,此故障特征量在隐患工况 A1 和 C 时的幅值偏离正常工况,因此它能够识别隐患 A1 和隐患 C 这两类故障. 同理分析可知:故障特征量误差  $E'_1$  能够对隐患 A1、隐患 B1 和隐患 C 进行识别,相关系数  $C'$  也能够对隐患 A1、隐患 B1 和隐患 C 进行识别.

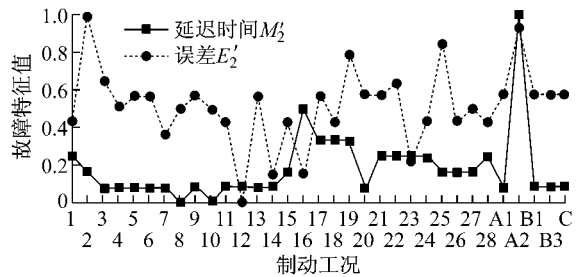


图 12 归一化后的阶段 2 故障特征:延迟时间  $M'_2$  和误差  $E'_2$  和相关系数  $C'$

Fig.12 Normalized fault features of Phase 2: delay time  $M'_2$ , error  $E'_2$  and correlation coefficient  $C'$

图 12 为归一化后的阶段 2 故障特征:延迟时间  $M'_2$  和误差  $E'_2$  在 28 次正常工况(1~28)和三类典型故障模拟的 5 种隐患工况(A1、A2、B1、B3 和 C)时的取值. 如图 12 所示:故障特征量误差  $E'_2$  在 5 种隐患工况时的幅值均与正常工况一致,即误差  $E'_2$  对与本文讨论的 5 种隐患工况相对应的三类故障隐患均无响应,因此它不能识别本文所讨论的任何隐患. 同理分析可知:延迟时间  $M'_2$  能够识别隐患 A2.

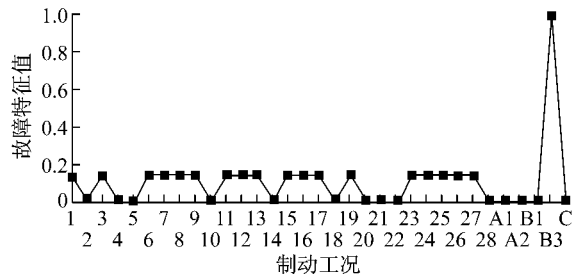


图 13 归一化后的阶段 3 故障特征:缓解时间  $M'_3$

Fig.13 Normalized fault features of Phase 3: release time  $M'_3$

图 13 为归一化后的阶段 3 故障特征:延迟时间

$M'_3$ 。在28次正常工况(1~28)和三类典型故障模拟的5种隐患工况(A1、A2、B1、B3和C)时的取值。从图中可见:对比故障特征量缓解时间 $M'_3$ 在隐患工况和正常工况时的幅值,它在隐患工况B3时的幅值明显高于正常工况,即此故障特征量对隐患工况B3对应的故障隐患有响应,因此它能够识别隐患B3。

将上述分析的归一化的各阶段故障特征与对应识别隐患的列出表格形式,见表1,从表中分析可知:①各阶段的故障特征能够对发生在相应阶段的隐患进行识别,为了尽可能多地识别隐患,有必要对每

个阶段都进行故障特征提取;②延迟时间类故障特征不能对缓解阀故障进行识别;③只有误差 $E'_2$ 不能识别任何隐患,其余故障特征均能识别至少一个甚至三个隐患;④所有隐患都能被至少一个甚至三个故障特征识别,能够被越多故障特征识别的隐患在挖掘时判据将越充分,识别准确率将越高。

综上所述,本文提取的6个故障特征除误差 $E'_2$ 外,各有其适应的隐患类型,能够对全部5种隐患工况进行识别,为隐患挖掘提供了有效判据。

表1 归一化的故障特征与对应识别隐患列表

Tab.1 Mapping table of normalized fault features and hidden trouble

| 故障特征        | 阶段1 隐患   |          | 阶段2 隐患   |          | 阶段3 隐患 | 全过程隐患 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|--------|-------|
|             | A1:制动阀失灵 | B1:缓解阀失灵 | A2:制动阀失灵 | B3:缓解阀失灵 | C:漏气   |       |
| 阶段1         |          |          |          |          |        |       |
| 延迟时间 $M'_1$ | √        | ×        | ×        | ×        | √      |       |
| 误差 $E'_1$   | √        | √        | ×        | ×        | √      |       |
| 相关系数 $C'_c$ | √        | √        | ×        | ×        | √      |       |
| 阶段2         |          |          |          |          |        |       |
| 延迟时间 $M'_2$ | ×        | ×        | √        | ×        | ×      |       |
| 误差 $E'_2$   | ×        | ×        | ×        | ×        | ×      |       |
| 阶段3         |          |          |          |          |        |       |
| 缓解时间 $M'_3$ | ×        | ×        | ×        | √        | ×      |       |

注:打√代表该故障特征能够识别该隐患,打×则反之

## 4 结论

(1)以某型在途运行的地铁列车为分析对象,选择CV压力跟随性能指标作为故障特征。根据在途运行的地铁列车CV目标压力变化特点,将常用气制动过程划分为减速阶段、停车保持阶段和缓解阶段等三个制动阶段。针对各阶段的特点,提出了对各阶段故障特征提取方法。减速阶段采用互相关系数法对CV目标压力和CV实际压力之间的关联性进行度量来对减速阶段进行解耦从而提取出延迟时间 $M_1$ ,误差 $E_1$ 和最大相关系数 $C_c$ 三个故障特征;停车保持阶段采用延迟时间 $M_2$ ,平均绝对误差 $E_2$ 为故障特征量;缓解阶段采用制动缓解时间 $M_3$ 作为故障特征量。

(2)在制动系统可靠性试验台上进行了故障注入,试验模拟了EP阀中的制动阀间歇性失灵类隐患、EP阀中的缓解阀间歇性失灵类隐患以及中继阀前的管路漏气类隐患故障等三类典型隐患故障,采用对故障隐患的响应准则,对比各故障特征量在隐患工况和正常工况时的幅值,探讨了各故障特征对不同隐患工况的识别能力。故障特征量延迟时间 $M_1$ 能够识别隐患A1和隐患C这两类故障;故障特征量误差 $E_1$ 能够识别隐患A1、隐患B1和隐患C进

行,相关系数 $C'_c$ 能够识别隐患A1、隐患B1和隐患C进行。故障特征量误差 $E_2$ 不能识别本文所讨论的任何隐患。延迟时间 $M_2$ 能够识别隐患A2。故障特征量缓解时间 $M_3$ 能够识别故障隐患B3。

(3)提取出的6个故障特征对本文讨论的三类5种典型故障隐患工况识别能力不同,在实际应用中,应根据故障隐患的特点选择合适的故障特征量。

## 参考文献:

- [1] 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.  
LIU Quan, GAO Dianzhu, CHEN Aijun. Design of electro-pneumatic brake fault diagnosis system [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(6):8.
- [2] 吴萌岭,王孝延,田春. 轨道交通车辆制动用中继阀的可靠性[J]. 西南交通大学学报,2009,44(3):365.  
WU Mengling, WANG Xiaoyan, TIAN Chun. Reliability of relay valve of brake system for rail vehicles [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009,44(3):365.
- [3] 段晨东,何正嘉. 一种基于提升小波变换的故障特征提取方法及其应用[J]. 振动与冲击,2007,26(2):10.  
DUAN Chendong, HE Zhengjia. Fault feature extraction method using the lifting wavelet transform and its applications [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2):10.
- [4] Huang E N, Shen Z, Long R S, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the

- Royal Society of London, 1998, A454: 903.
- [5] 蒋永华, 汤宝平, 刘文艺, 等. 基于参数优化 Morlet 小波变换的故障特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 56.  
JIANG Yonghua, TANG Baoping, LIU Wenyi, et al. Feature extraction method based on parameter optimized Morlet wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 56.
- [6] Rai V K, Mohanty A R. Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical Systems and Transform Processing, 2007, 21(6): 2607.
- [7] 肖洁, 刘树林, 上官长存, 等. Walsh 变换在滚动轴承早期故障特征提取中的应用[J]. 轴承, 2010(2): 44.  
XIAO Jie, LIU Shulin, SHANGGUAN Changcun, et al. Application of Walsh transform for incipient fault feature extraction of rolling bearing [J]. Bearing, 2010(2): 44.
- [8] 张萌. 北京地铁 13 号线列车制动系统故障及预防措施[J]. 现代城市轨道交通, 2009, 3: 58.  
ZHANG Meng. Faults and preventive measures of braking system of trains in Beijing Metro Line 13 [J]. Modern Urban Transit, 2009, 3: 58.
- [9] 朱皓青. 上海地铁一号线 DA01 型列车均衡阀可靠性研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2011.  
ZHU Haoqing. Reliability analysis for the equal valve used in Shanghai Metro Line 1 DA01 vehicles [D]. Shanghai: School of Mechanical and Power Engineering of Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [10] 黄学翀. 广州地铁 5 号线列车制动系统故障分析及改进[J]. 城市轨道交通研究, 2010(4): 88.  
HUANG Xuexuan. Failure analysis and improvement of the friction brake system of Guangzhou Metro Line 5 trains [J]. Urban Mass Transit, 2010(4): 88.
- [11] 程建英, 李欢. 上海地铁车辆一号线制动系统的可靠性分析 [J]. 机械研究与应用, 2009(6): 45.  
CHENG Jianying, LI Huan. Reliability analysis of rolling-stock brake system for Shanghai Line 1 Extension 2 [J]. Mechanical Research & Application, 2009(6): 45.
- [12] 吴萌岭, 王孝延, 严凯军. 微机控制直通电空制动系统的 FMEA 和 FTA 分析[J]. 机车电传动, 2008(1): 32.  
WU Mengling, WANG Xiaoyan, YAN Kaijun. Analysis by FMEA and FTA method of micro-computer controlled directacting electro-pneumatic braking system [J]. Electric Drive for Locomotives, 2008(1): 32.

#### (上接第 35 页)

钢构件绕弱轴弯曲的情况进行了参数分析, 考察了弹塑性局部屈曲性能以及翼缘-腹板相关作用对局部屈曲行为的影响. 得出以下重要结论:

(1) 构件的破坏模式主要由局部失稳控制, 板件局部失稳的发生导致了构件极限承载力的到达, 板件局部变形的累积导致承载力的不断下降.

(2) 屈曲前, 构件的性能主要由翼缘宽厚比决定; 屈曲后, 腹板宽厚比不同时, 腹板对翼缘支撑作用不同, 板件的应力重分布形式显著不同, 即翼缘和腹板在屈曲后存在显著的相关作用.

(3) 根据参数分析结果, 发现现有规范对 H 形截面绕弱轴弯曲的分类准则过于保守, 本文提出了 II 类 H 形截面钢构件绕弱轴弯的板件宽厚比的上限值.

(4) 基于应力发展过程的分析, 提出有效塑性宽度法计算 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的极限抗弯承载力, 该方法概念明晰, 操作简单, 计算准确.

#### 参考文献:

- [1] Bambach M R, Rasmussen K J R. Effective widths of unstiffened elements with stress gradient [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(10): 1611.
- [2] Bambach M R, Rasmussen K J R, Ungureanu V. Inelastic behaviour and design of slender I-sections in minor axis bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(1): 1.
- [3] European Committee for Standardization. EN 1993-1-1 Eurocode 3: design of steel structures—part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [4] European Committee for Standardization. EN 1993-1-5 Eurocode 3: design of steel structures—part 1-5: plated structural elements [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [5] Architecture Institute of Japan. Recommendation for limit state design of steel structures[S]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 2002.
- [6] GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
GB50017—2003 Code design of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [7] Chen Y Y, Cheng X, Nethercot D A. An overview study on cross-section classification of steel H-sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 386.
- [8] Cheng X, Chen Y Y, Nethercot D A. Experimental study on H-shaped steel beam-columns with large width-thickness ratios under cyclic bending about weak-axis [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 264.
- [9] Chick C G, Rasmussen K J R. Thin-walled beam-columns. II: proportional loading tests [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(11): 1267.