

# 基于键合图模型的机车制动系统故障检测与隔离

牛 刚, 赵亚君

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 针对机车制动机列车管压力控制模块, 采用键合图理论开展了动态建模分析, 由建立的故障键合图模型推导出相应的解析冗余关系, 提取出完整的故障特征矩阵. 利用序贯概率比检验方法对采集的监测数据进行连续判读, 实时跟踪识别工况下的系统异常状况, 并将得到的残差状态向量同故障特征矩阵进行匹配, 实现对故障部件的检测与隔离. 仿真实例验证了建议方法的技术可行性.

**关键词:** 制动系统; 故障检测与隔离; 键合图; 序贯概率比检验

**中图分类号:** U279

**文献标志码:** A

## Bond Graph Model Based Fault Detection and Isolation for Locomotive Brake

NIU Gang, ZHAO Yajun

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The train locomotive brake pneumatic equalizer control (PEC) unit was analyzed using the bond graph dynamic modeling. The created fault bond graph was utilized to deduce analytical redundancy relations (ARRs). The whole fault signature matrix (FSM) was extracted. Besides, online monitoring using sequential probability ratio test (SPRT) was exerted to check the anomaly occurrence of the unit components. When any alert was triggered, the generated synthesized non-null coherence vector was matched with the FSM to detect and isolate the possible faulty components. A simulation experiment was conducted to illustrate the feasibility of the proposed methodology.

**Key words:** brake system; fault detection and isolation; bond graph; sequential probability ratio test

性、维修性和安全性提出了更高要求. 制动系统作为机车(尤其是重载组合货运机车)的关键设备, 对其进行状态监测和故障隔离是列车运行安全的重要保障. 新一代机车制动系统的微机控制水平有了显著提高, 具有分布化、网络化、智能化和模块化的设计特点, 它从传统的机械系统逐渐转变为复杂的“机-电-气”耦合系统, 并朝着具备自调节、自诊断和自动保护等功能趋势发展<sup>[1]</sup>. 目前的机车制动系统中虽然实现了一定的自诊断功能, 然而虚警和漏警问题仍十分突出, 关联故障难以清晰辨识, 尚不足以满足实际性能要求.

机车实际行驶过程中, 制动机在保压维持阶段表现为稳态随机特性, 在制动过程中表现为瞬态离散特性, 属于典型的混杂动态系统. 动态系统的故障诊断技术主要对系统中出现的故障进行检测、分离和辨识, 即判断故障是否发生, 定位故障发生的部位和种类, 以及确定故障的大小和发生的时间等<sup>[2]</sup>. 故障检测与隔离方法主要分为基于数学模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法三大类<sup>[3]</sup>.

就复杂系统而言, 如机电系统、流体系统, 往往采用基于数学建模的诊断途径, 因为诊断建模能够同系统优化设计相关联, 把握系统内部的故障因果传递与转换关系, 易于发展出面向工业应用的在板诊断系统. 基于数学模型的诊断是近年来发展较快的一种技术途径, 目前混杂动态系统基于数学模型的诊断方法主要有基于自动机模型诊断方法、基于Petri网的方法、基于键合图的方法和基于分布式结构诊断方法等<sup>[4]</sup>. 其中基于键合图的方法, 可以用统一的符号将各种物理场的系统进行模型构建, 这些模型以工程学领域的各分支为基础, 在能量和信息流的基础上使用“键合图”的符号表示系统, 便于动态系统建模. 在键合图理论应用研究方面, 姜涛等<sup>[5]</sup>基于功率键合图理论建立了调桅机构的液压系统模

现代机车正朝着智能、重载、高速方向发展, 加之行驶距离长, 环境工况差异大, 对其可靠性、可用

收稿日期: 2014-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51205291); 上海市浦江人才计划(12PJ1408400)

第一作者: 牛 刚(1978—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为复杂系统故障诊断、寿命预测、人工智能.

E-mail: gniu@tongji.edu.cn

型,并进行动态特性分析。王安麟等<sup>[6]</sup>利用键合图理论构建了热沥青管路模型,并进行了动态特性分析。在键合图的故障诊断研究方面,樊久铭等<sup>[7-8]</sup>利用键合图方法对动态系统开展了建模,针对液体火箭发动机键合图模型推导出了解析冗余关系,实现了对故障部件的检测与隔离。为了实现鲁棒的监测与可靠的隔离,国外近年来广泛开展了面向不确定性键合图模型的研究和探索,技术路线可以分成两类:一类是测量不确定性的研究<sup>[9-11]</sup>;另一类是系统参数不确定性的研究<sup>[12-14]</sup>。测量不确定性往来源于传感器测量误差、数据衰减、噪声干扰、运行工况等<sup>[15]</sup>,造成了系统测量数据的不确定性,如何在考虑该不确定性的情况下对制动系统开展合理的建模,以及如何对包含噪声叠加的输出测量数据进行鲁棒的在线监测和故障隔离是本文的研究重点。

为此,本研究提出利用键合图理论对制动系统列车管压力控制模块开展动态建模和故障仿真,通过增加测量参数不确定性因素并添加虚拟传感器元件,创新性地构造了模拟测量工况的系统故障键合图模型。在异常检测方面,本研究提出利用序贯概率比检验(SPRT)方法对相应测点开展连续异常检测,从而实现对故障部件的检测与隔离。首先,分析制动系统中列车管压力控制模块以及部件间相互结构与功能流关系,建立正常保压工况下的键合图模型,通过分析解析冗余关系得到故障特征矩阵(FSM);其次,开展故障键合图仿真分析,在 Matlab/Simulink 环境中仿真中继阀气压泄露故障;最后,利用连续性 SPRT 检测手段,对系统相应部件测量残差进行记录分析,得出相应工况下的状态向量,并与 FSM 表匹配以实现对故障部件的异常检测与故障隔离。

## 1 系统分析与建模

### 1.1 列车管压力控制模块分析

本文建议的方法流程如图 1 所示。首先开展列车管压力控制模块物理结构分析。列车管压力控制模块(图 2a)是 DK-2 型机车制动系统的关键功能单元,担负着控制列车管的初充风和再充风、常用制动排风和紧急制动排风、列车管前后遮断等功能,该模块主要包括总风遮断阀、紧急阀、列车管遮断阀、放风阀、中继阀、电空阀、流量计、滤尘器、传感器以及塞门等部件,其功能原理如图 2b 所示。列车管的充风与排气由中继阀根据均衡风缸压力控制,中继阀能保证列车管压力在均衡风缸压力 $\pm 10$  kPa 范围

内。总风遮断阀受中立电空阀控制,用来切断常用制动与紧急制动工况下的列车管补风通路。列车管遮断阀受遮断电空阀控制,用于制动机重联工况下切断中继阀与列车管的通路。

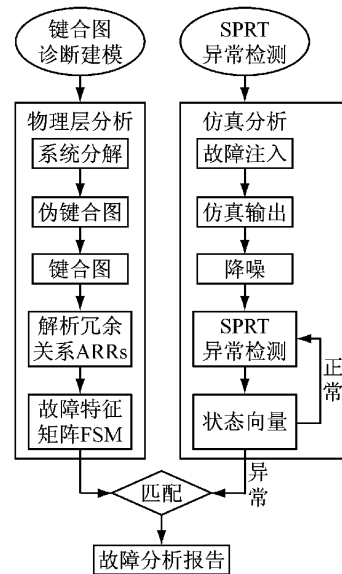


图1 系统故障诊断流程

Fig.1 Scheme diagram of system fault detection and isolation

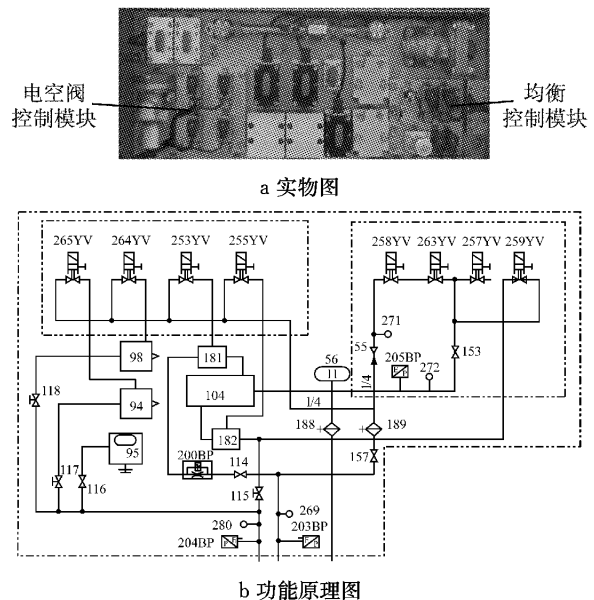


图2 列车管压力控制模块及功能原理图

Fig.2 Pneumatic equalizer control(PEC) unit and function flow

### 1.2 键合图建模

在不同的工作模式下,制动系统各主要部件之间的相互关系和作用规律有所不同,某些阀在不同工况下维持特定的开启或闭合状态。因此,本文将工作模式约束为自动制动作用下的保压工作状态,对

部件的容阻特性进行分析. 表1列出了各部件参数及容阻类别. 在大闸运转位, 小闸运转位情况下, 根据图2中列车管压力控制模块中的气路原理图, 能够掌握各部件之间的相互作用关系, 建立出伪键合图, 如图3所示. 进而根据建立的伪键合图和部件的容阻属性, 得到图4所示的压力控制模块键合图模型. 图4中,  $De$  和  $De^*$  分别表示势传感器和虚拟势传感器, 用于测量压力残差;  $Df^*$  表示虚拟流传感器, 用于测量流量残差;  $\xi_{sse}$  和  $\xi_{ssf}$  分别表示虚拟势和虚拟流建模测量不确定性;  $MSe^*$  和  $MSf^*$  分别表示虚拟势源和虚拟流源;  $Se$  表示势源.

## 2 解析冗余关系分析

基于定性或半定性建模途径的故障诊断知识体现在模型参数的解析冗余关系中. 根据图4已建立的键合图模型及其因果关系, 在0共势点处所有的势都相等, 在1共流点处所有的流都相等. 根据能量守恒原理, 共势点处所有的流加起来和为零; 而共流点处, 所有的势加起来为零. 进而, 可推导出系统的残差解析冗余关系式 (analytical redundancy relations, ARR) 如下:

表1 列车管压力控制模块参数

Tab.1 Parameters of PEC unit

元件名	压力/kPa	元件容阻性
总风遮断阀	750	$R$
中继阀	500	$R_1$
列车管遮断阀	480	$R_2$
调节阀 55	600	$R_3$
258YV 电磁阀	580	$R_4$
263YV 电磁阀	550	$R_5$
153 电空转换阀	500	$R_6$
总风管	800	$C$
265YV 电磁阀	800	$C_1$
264YV 电磁阀	800	$C_2$
253YV 电磁阀	800	$C_3$
255YV 电磁阀	800	$C_4$
调节阀到 258YV 管路	600	$C_5$
总风遮断阀到中继阀管路	750	$C_6$
中继阀到列车管遮断阀管路	500	$C_7$
列车管	500	$C_8$
紧急阀	480	$C_9$
放风阀 1	480	$C_{10}$
放风阀 2	480	$C_{11}$
分配阀	480	$C_{12}$
调节阀 55 到 258YV 管路	600	$C_{13}$
258YV 到 263YV 管路	580	$C_{14}$
均衡风缸	500	$C_{15}$
263YV 到 153 电空阀管路	550	$C_{16}$

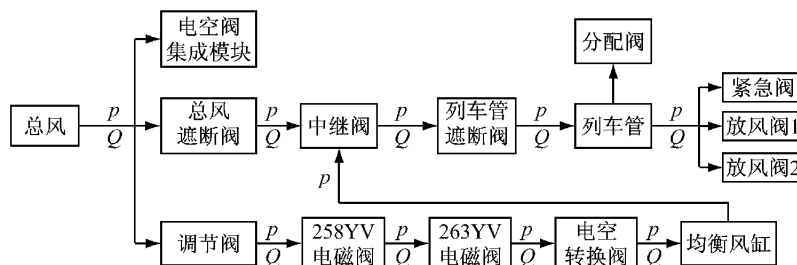


图3 列车管压力控制模块伪键合图

Fig.3 Bond graph of PEC unit

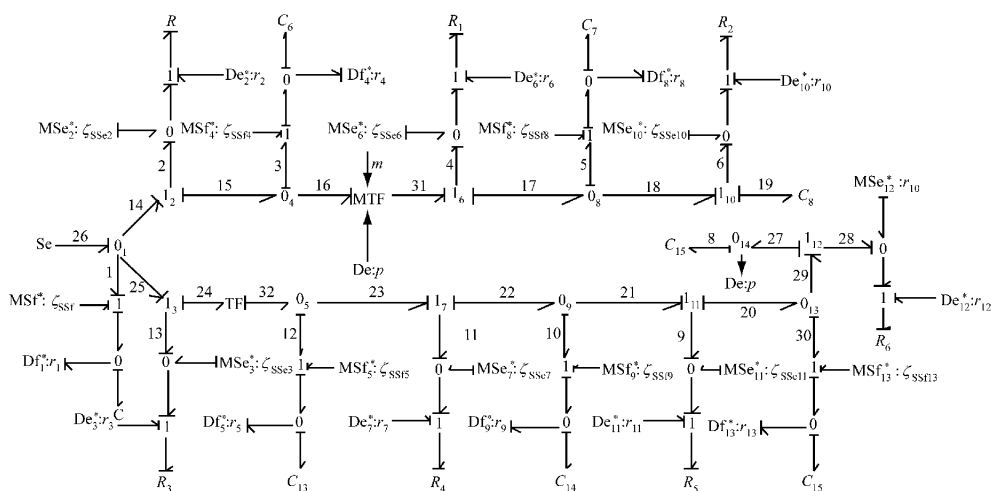


图4 列车管压力控制模块键合图

Fig.4 Bond graph of PEC unit

共势点  $0_1$ 

$$r_1 = Q_{26} - C \frac{dp_1}{dt} - C_q A_1 \sqrt{p_{14}^2 - p_{15}^2} / \sqrt{R_g e} - C_q A_3 \sqrt{p_{25}^2 - p_{24}^2} / \sqrt{R_g e} \quad (3)$$

共流点  $1_1$ 

$$r_2 = p_{14} - p_2 - p_{15} \quad (4)$$

共流点  $1_2$ 

$$r_3 = p_{25} - p_{13} - p_{24} \quad (5)$$

共势点  $0_4$ 

$$r_4 = C_q A_1 \sqrt{p_{14}^2 - p_{15}^2} / \sqrt{R_g e} - C_6 \frac{dp_3}{dt} - \frac{\left[ \frac{C_q A_2 \sqrt{p_{31}^2 - p_{17}^2}}{\sqrt{R_g e}} \right] p_8}{p_3} \quad (6)$$

共势点  $0_5$ 

$$r_5 = n C_q A_3 \sqrt{p_{25}^2 - p_{24}^2} / \sqrt{R_g e} - C_{13} \frac{dp_{12}}{dt} - C_q A_4 \sqrt{p_{23}^2 - p_{22}^2} / \sqrt{R_g e} \quad (7)$$

共流点  $1_6$ 

$$r_6 = p_{31} - p_4 - p_{17} \quad (8)$$

共流点  $1_7$ 

$$r_7 = p_{23} - p_{11} - p_{22} \quad (9)$$

共势点  $0_8$ 

$$r_8 = C_q A_2 \sqrt{p_{31}^2 - p_{17}^2} / \sqrt{R_g e} - C_7 \frac{dp_5}{dt} - C_q A_5 \sqrt{p_{18}^2 - p_{19}^2} / \sqrt{R_g e} \quad (10)$$

其余共势点和共流点解析冗余关系推导以此类推。式(3)~(10)中,  $r_i (i=1, 2, \dots, 8)$  为共势点和共流点的残差;  $C_q$  为流率常数, 通常取 0.6;  $e$  为空气热力学常数;  $A_i (i=1, \dots, 5)$  为对应阀截面积;  $n$  为转换系数(TF);  $R_g$  为气体常量;  $p$  和  $Q$  分别为列车管压力控制模块中的空气压力和流量。

根据键合图推导出的系统解析冗余关系得到故障特征矩阵 FSM, 如表 2 所示。其中,  $M_b$  表示部件的故障可检测性,  $I_b$  表示部件的故障可隔离性, 1 表示是, 0 表示否。残差  $r_1 \sim r_{13}$  中, 1 表示部件与被检测位置残差相关, 反之不相关。由表 2 可以看出, 列车管压力控制模块键合图中的所有部件具有异常检测能力, 大部分具有故障隔离能力, 而两个部件对 ( $R_2$ ,  $C_8$ ) 和 ( $R_6$ ,  $C_{15}$ ) 因具有同样的故障特征向量而无法清晰隔离。

表 2 故障特征矩阵 FSM 表

Tab.2 Fault signature matrix of PEC unit

1	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$M_b$	$I_b$
$R$	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$R_1$	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1
$R_2$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
$R_3$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$R_4$	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1
$R_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
$R_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
$C$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$C_6$	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$C_7$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1
$C_8$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
$C_{13}$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
$C_{14}$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1
$C_{15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
$C_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

### 3 键合图故障仿真分析

根据列车管压力控制模块的键合图以及各个部件的参数(表 1), 在 Matlab/Simulink 环境下建立相应的动态仿真方块图, 如图 5 所示。仿真过程中, 总风以正常的压力值 800 kPa 供给列车制动系统, 采样频率设为  $10 \text{ s}^{-1}$ , 采样时间持续 100 s, 共获取了

1 000 个样本观测值。其中, 在仿真过程的第 9 秒, 注入中继阀泄露仿真故障, 使中继阀的压力值由正常范围内 ( $500 \pm 10$ ) kPa 降到 480 kPa。在键合图的数学模型中, 中继阀的压力异常会通过因果路径传递到其他相关性部件, 导致连锁异常响应输出; 此外, 为模拟真实噪音工况下的测量不确定性, 在各测点处添加了均值为 0, 方差为 0.6 的白噪声干扰, 然后通过虚拟传感器获得各测点的信号叠加响应输出值。

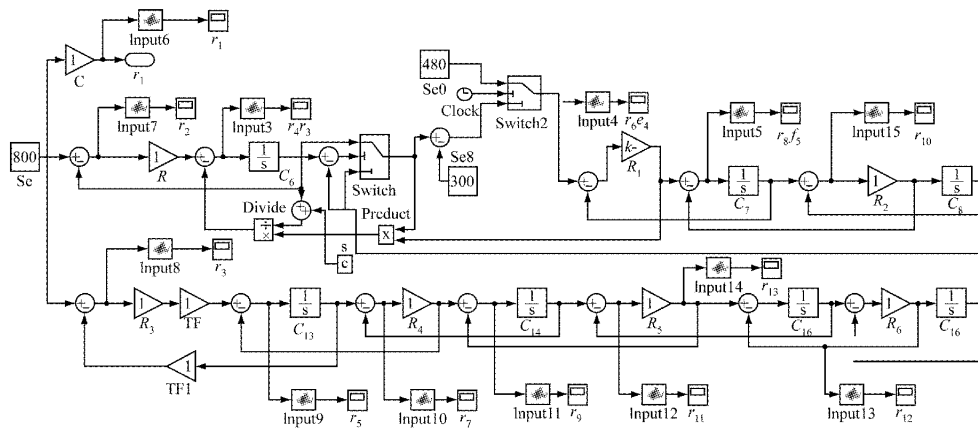
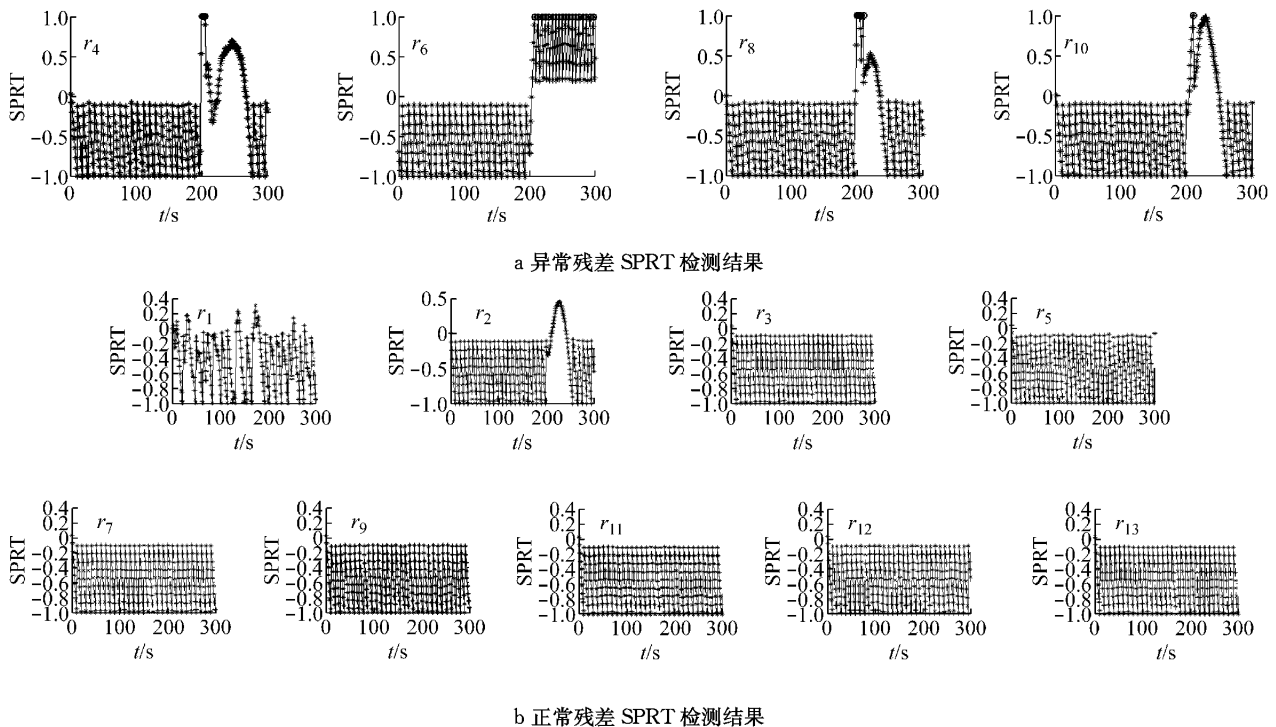


图 5 列车管压力控制模块方块图

Fig.5 Block diagram of PEC unit

采集观测数据的同时,异常在线监测过程也同步进行,本研究采用了序贯概率比检验(SPRT)方法.序贯概率比检验通常用于现场监测和异常隔离<sup>[16]</sup>.从统计的角度看,SPRT方法通过识别随机过程的概率分布变化来判别状态异常,这样可以有效降低漏警率和虚警率.本仿真试验中,首先对方块图得到的残差输出响应做 5 点平滑降噪处理,随后利用 SPRT 进行异常监测,生成的 SPRT 指标正规化到 $[-1,1]$ 范围内,输出 1 表示发生故障异常,−1 表示运行正常,−1 到 1 的区间中对结果表示无法判

断.考虑到状态异常主要表现为统计均值偏移,因此本试验采用 H1 假设检验,即样本均值升高,而方差没有改变.其余有关参数设置分别为:虚警率  $\alpha = 0.001$ ,漏警率  $\beta = 1000$ ,方差因子  $v = 4$ ,均值偏移参考样本统计.检测结果如图 6 所示,可以看出  $r_4, r_6, r_8, r_{10}$  在中继阀  $R_1$  故障注入后均被及时地检测出异常,发生异常时其状态置 1,而其余测点都处于正常或者无法判断的状态,此状态置 0.经过 SPRT 检验后得到的状态向量与 FSM 表对照,提取出  $R_1$  故障,实现了对故障部件  $R_1$  的检测与隔离.



b 正常残差 SPRT 检测结果

a 异常残差 SPRT 检测结果

图 6 残差的 SPRT 异常监测

Fig.6 SPRT-based residual anomaly monitoring

## 4 结论

本研究开展了包含测量参数不确定性的键合图建模与故障诊断技术. 其中,异常监测过程采用序贯概率比检验方法,对残差输出响应进行统计分析,得到的状态向量同由键合图解析冗余关系得出的故障特征矩阵相匹配,实现了制动系统中故障部件的检测与隔离. 建议的研究方法通过中继阀泄露故障仿真与辨识得到了验证. 对于不能检测和隔离的部件,可以进行解析冗余算法的改进,由独立的解析冗余关系变为非独立的解析冗余关系,通过增加参变量以实现故障部件的检测和隔离. 考虑到建模过程中的物理参数存在一个合理的不确定范围,为实现更好的鲁棒检测能力,可以在测量参数不确定性的基础上,引入系统本身的结构参数不确定性问题.

## 参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011—2020)[M]. 北京:科学出版社,2010.  
Engineering and Materials Science Department of the National Natural Science Foundation of China. Development strategy report of the mechanical engineering discipline (2011—2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 周东华,胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748.  
ZHOU Donghua, HU Yanyan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatic Sinica, 2009, 35(6): 748.
- [3] 赵剑,欧阳丹彤,王晓宇,等. 混成系统的分布式诊断方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(6): 1498.  
ZHAO Jian, OUYANG Dantong, WANG Xiaoyu, et al. Method to distributed diagnosis of hybrid systems[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2012, 42(6): 1498.
- [4] Karnopp D C, Margolis D L, Rosenberg R C. System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems [M]. New York: Wiley, 2006.
- [5] 姜涛,游义平,杨虎,等. 旋挖钻机调桅机构动态特性的一体化建模分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(5): 729.  
JIANG Tao, YOU Yiping, YANG Hu, et al. Integrated model-based analysis of mast mechanism of rotary drilling rig and its dynamic characteristics [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(5): 729.
- [6] 王安麟,岳滨楠,周鹏举,等. 工程机械液压泵和马达模型的非线性改进[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(8): 1212.  
WANG Anlin, YUE Binnan, ZHOU Pengju, et al. Nonlinear improvement on hydraulic pump and motor models for construction machinery [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(8): 1212.
- [7] 樊久铭,王秋生,徐敏强,等. 诊断键合图在液体火箭发动机故障诊断中的应用[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 977.  
FAN Jiuming, WANG Qiusheng, XU Minqiang, et al. Application of diagnostic bond graph to fault diagnosis for liquid-propellant rocket engine [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 977.
- [8] 樊久铭,王秋生,徐敏强,等. 基于模态区间分析的半定性故障诊断方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(5): 774.  
FAN Jiuming, WANG Qiusheng, XU Minqiang, et al. Semi-qualitative fault diagnosis method based on modal interval analysis [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(5): 774.
- [9] Touati Y, Merzouki R, Bouamama B O. Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach: application to intelligent autonomous vehicle [J]. Mechatronics, 2012, 22(8): 1148.
- [10] Samantaray A K, Medjaher K, Ould Bouamama B, et al. Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, 14(3): 237.
- [11] Sankararaman S, Mahadevan S. Uncertainty quantification in structural damage diagnosis [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(8): 807.
- [12] Sié Kam C, Dauphin-Tanguy G. Bond graph models of structured parameter uncertainties [J]. Journal of the Franklin Institute, 2005, 342(4): 379.
- [13] Gu J, Barker D, Pecht M. Uncertainty assessment of prognostics of electronics subject to random vibration [C]// AAAI Fall Symposium on Artificial Intelligence for Prognostics. Arlington: Springer, 2007: 50-57.
- [14] Djeziri M A, Ould Bouamama B, Merzouki R. Modelling and robust FDI of steam generator using uncertain bond graph model [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(1): 149.
- [15] Cheng S, Pecht M. Using cross-validation for model parameter selection of sequential probability ratio test [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 8467.
- [16] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.  
ZHOU Donghua, YE Yinzong. Fault diagnosis and fault tolerant control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.