DK-2 制动机的气动系统故障诊断技术研究

南 杰¹, 黄志武²

(1. 中国神华轨道机械化维护分公司,天津 300457; 2. 中南大学 信息科学与工程学院,湖南长沙 410075)

摘要:针对DK-2 制动机气动系统故障的复杂性和不确定性难题,设计了基于等价空间的故障诊断方法。首先利用空气流体理论对制动机的高速电控阀、机械阀等基本部件建立各部件的功能模型;然后分析制动机的多种工作模式特点,获取系统内部各部件的作用关系,建立DK-2制动机在自动制动功能、单独制动功能和后备空气制动下的制动机系统模型;最后利用等价空间故障诊断方法,对系统功能设计残差生成器和阈值函数,构建系统状态布尔向量与故障信息对应关系的故障特征矩阵表,搜索系统故障候选集,实现系统的故障检测和隔离。仿真分析表明,该方法具有运算速度快、准确度高等优点,满足DK-2 制动机的故障诊断要求。

关键词: DK-2 制动机; 故障诊断; 数学模型; 等价空间

中图分类号: U260.352 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373(2013) 03-0061-09

0 引言

DK-2 制动机是我国自主研发的新一代电控空气制动机 遵循智能化、模块化、标准化和信息化的设计 方法 采用先进的微机网络控制技术、整体集成气路管路、空电联合制动等新技术 ,提高了系统的安全性、 可靠性和先进性^[1] ,截至目前 ,DK-2 制动机已在 150 多台 SS4G、SS4B 型机车、出口中东的 TM3 型机车、新 加坡的地铁工程维护车上实现装车 ,至今已累计运行总里程数超过 5 000 万 km ,从未出现因系统故障而 导致的机破。

作为基础制动装置,DK-2 制动机的工作性能和运行参数对列车的安全运行是至关重要的。由于 DK-2 制动机工作模式和部件较多,内部结构复杂多变且具有密切的数据交互和耦合关系,容易引起故障并发、故障传播和故障连锁反应等问题,采用人工智能方法(如神经网络、专家系统^[2]等)、信号处理方法^[3-5](小波变换等),难以有效的达到故障诊断的目的。而目前各大站段采用的故障修、预防修和状态修仅能缓解目前对 DK-2 制动机进行性能维护和安全性保障的压力,再加上拆卸安装费事耗力,检修过程繁杂冗长,直接导致检修时间过长,为列车安全运行埋下了安全隐患。

为此 亟切需要研究 DK-2 制动机的故障诊断方法,针对 DK-2 制动机这一典型复杂的多因素、多变量、多层次混合系统 需要建立精准的数学模型,能够在线实时的对制动机的工作性能进行故障检测和故 障隔离,对确保制动机运行可靠性,增强机车安全,具有重要的现实意义和社会价值。

本文的工作主要分为3部分。首先根据 DK-2 制动机的内部结构和工作原理,利用空气流体理论,分 别对制动机内部的基本部件进行建模;然后根据制动机的系统功能,分别建立制动机的自动制动功能模 型、单独制动功能模型和后备制动功能模型;在3个系统功能模型的基础上分别采用基于模型的等价空 间方法^[6]对每个系统状态设计等价向量,计算系统状态残差,通过残差与阈值的判断,建立故障特征矩 阵 根据故障特征矩阵与故障的对应关系,对发生的故障进行定位。

1 基本气动部件的功能模型

1.1 理想空气流量方程

收稿日期: 2013 - 03 - 28 作者简介: 南杰 男 1961 年出生 高级工程师

当压缩气体在 10 MPa 和 200 ℃以内变化时,可认为是理想气体。此时当气体处于某一平衡状态时, 气体的压力、温度和体积之间的关系为

$$PV = mR_{e}e \tag{1}$$

式中, P 为气体压力; V 为体积; m 为空气质量; R_{e} 为气体常量; e 为热力学温度。

将式(1) 进行微分得

$$dP/dt = (R_{e}edm/dt - PdV/dt)/V$$
(2)

假设空气是存储在一定体积的容器内,容器体积的细微变化可以忽略,即 dV/dt = 0,式(2) 可简化为

$$dP/dt = (R_{e}edm/dt)/V$$
(3)

将空气通过某截面积管路的模型简化为节流孔, A为节流孔的截面积 P_{uv} 和 P_{dv} 为节流孔两端的压强 G为流过节流孔的流速。空气流入和流出节流孔的流速与孔口的截面积及上下流的压强比有关,气体流速 与气缸压强的关系用下式说明

$$G = c_q A P_{up} \sqrt{2/(R_g e)} \varphi P_{dw} / P_{up}$$
(4)

式中, c_q为流率常数,通常取0.6; e为空气的热力学常数。

在实际计算中空气的流向是固定的 不存在逆回现象 则可将式(4) 改写为

G

$$= 0.6A \sqrt{P_{up}^2 - P_{up}^2} / \sqrt{R_g e}$$
(5)

1.2 基本部件数学模型

分析制动机功能模块和结构 将气动部件分为三类:由电信号来控制其开启或闭合的电磁阀;通过先 导压力和控制压力的差值来控制通断的纯机械阀;控制电磁先导压力的受控机械阀。下面分别对每一类 阀的数学模型进行描述。

1.2.1 高速开关阀模型

图1是一个 Parker P3P-R 型号的高速开关阀气路结构图。 当开关阀的电压大于启动电压 V_k ($V_k = 4.5 \pm 0.2$ V) 时 ,开关阀 V_{LZ} 阀芯移动, K_1 和 K_2 接通,空气从 K_1 流向 K_2 ,或从 A_2 流向 A_1 ,根 据开关阀的结构特性及以上的分析 将接通后的开关阀工作情况 (a)结构图 等效为节流孔。 图1 高速开关阀结构图和简化模型图

假设气流由 K_1 流向 K_2 ,则流速为 $G = 0.6A_1$ • $\sqrt{(P_{K1}^2 - P_{K2}^2)/(R_{\mu}e)}$ 。即开关阀的流速模型为

$$G = g(x) \frac{0.6A_1}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{k1}^2 - P_{k2}^2} g(x) = \begin{cases} 1 & V \ge V_k \\ 0 & V < V_k \end{cases}$$
(6)

1.2.2 机械阀模型

图 2 是中继阀的气路结构图,由均缸和列车管压力决定总 风和列车管的流向。

根据中继阀的原理 其流速为

$$G = \begin{cases} \frac{0.6A_2}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{ER}^2 - P_{BP}^2} \ P_{ER} \ge P_{BP} \\ \frac{0.6A_2}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{BP}^2 - P_{ER}^2} \ P_{ER} < P_{BP} \end{cases}$$



(b)简化模型图

图 2 中继阀结构图和简化模型图

其机械阀前后的空气压力关系

$$G = \operatorname{sign}(P_{ER} | P_{BP}) \frac{0.6A_2}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{ER}^2 - P_{BP}^2} \operatorname{sign}(P_{ER} | P_{BP}) = \begin{cases} 1 | P_{ER} > P_{BP} \\ 0 | P_{ER} \leqslant P_{BP} \end{cases}$$
(7)

1.2.3 受控机械阀模型

图 3 是受控机械阀的气路结构图 其工作原理是通过给先导电磁阀供电 使电磁阀闭合 总风向均缸

内部充风 在内部产生先导压力 使得受控阀闭合。 根据受控阀的原理 其流速公式

$$G = \begin{cases} \frac{0.6A_{3}}{\sqrt{R_{g}e}} \sqrt{P_{MR}^{2} - P_{ER}^{2}} & V \ge V \\ 0 & V < V \end{cases}$$



图 3 受控阀结构图和简化模型图

开关阀两端的压力模型为

$$G = 0.6g(x) A_3 \sqrt{P_{MR}^2 - P_{ER}^2} / \sqrt{R_g e}$$
(8)

2 DK-2 制动机的功能模型

2.1 自动制动功能建模

DK-2 制动机自动制动功能主要由部署在制动柜内部的制动控制单元实现,其气动图如图4所示,简化模型如图5所示。







图 5 自动制动功能简化模型图

258YV 和 257YV 是高速电空阀,由 BCU 采用 PWM 和 PI 调节方式对均衡风缸进行精准的压力控制, 319YV 是保护电磁阀 253YV 是中立阀,104 是大流量中继阀。除此之外还安装了限压阀、截止阀、若干传 感器和测试孔。

2.1.1 均缸压力控制模块的模型分析

在该功能下,首先 258 YV 得电闭合,总风向均衡风缸内充风,其数学描述为

$$G_{APP} = 0.6g(x) A_{APP} \sqrt{P_{MR}^2 - P_{ERL}^2} / \sqrt{R_g e}$$

总风压力和均缸压力之间的关系为

$$\dot{P}_{ERL} = \lambda_1 P_{ERL} + \lambda_2 P_{MR} \tag{9}$$

式中, $\lambda_1 = -0.201 \frac{A_{APP}}{V_{ERCP}} \sqrt{R_g e}$; $\lambda_2 = 0.633 \frac{A_{APP}}{V_{ERCP}} \sqrt{R_g e}$ 。

从 258YV 电磁阀充入的总风进入均衡风缸内 其数学描述为

$$G_{APP} = 0.6g(x) A_{MVER} \sqrt{P_{ERL}^2 - P_{ERT}^2} / \sqrt{R_g e} \circ P_{ERT} = \lambda_3 P_{ERT} + \lambda_4 P_{ERL}$$
(10)

式中, $\lambda_3 = -0.796 \frac{A_{MVER}}{V_{ER}} \sqrt{R_g e}$; $\lambda_4 = 0.523 \frac{A_{MVER}}{V_{ER}} \sqrt{R_g e}$.

2.1.2 列车管控制模块的模型分析

均衡风缸中的空气在 104 中继阀处与列车管压力进行比较,控制总风的充风量,使得列车管的压力 跟随均衡风缸压力。流速关系:

$$G_{RELAY} = \operatorname{sign}(P_{ERT} P_{BP}) \frac{0.6A_{RELAY}}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{ERT}^2 - P_{BP}^2} \circ$$

压力关系

$$P_{BP} = \lambda_5 P_{BP} + \lambda_6 P_{ERT}$$

$$\vec{x} \oplus , \lambda_5 = -0.796 \frac{A_{RELAY}}{V_{RPCP}} \sqrt{R_g e}; \lambda_6 = 0.523 \frac{A_{RELAY}}{V_{RPCP}} \sqrt{R_g e}$$

$$(11)$$

104 中继阀控制的 BP 压力,在 253 YV 中立电磁阀不得电时,给列车管充风,其流速关系和压力关系 分别为

$$G_{MV53} = g(x) \frac{0.6A_{MV53}}{\sqrt{R_g e}} \sqrt{P_{BP}^2 - P_{BPVV}^2} \circ$$

$$P_{BPVV} = \lambda_7 P_{BPVV} + \lambda_8 P_{BP}$$
(12)
$$A_{MV53} = (12)$$

式中, $\lambda_7 = -0.796 \frac{A_{MV53}}{V_{BP}} \sqrt{R_g e}$; $\lambda_8 = 0.523 \frac{A_{MV53}}{V_{BP}} \sqrt{R_g e}$.

将式(9)~式(12)联立可得自动制动功能的状态方程为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_4 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_6 & \lambda_5 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_8 & \lambda_7 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \lambda_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \ y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x.$$

其中, $x = [P_{MR} P_{ERT} P_{BP} P_{BPVV}]^{T}$ 是系统的状态变量 P_{MR} 是系统的输入(总风压力),列车管压力 P_{BPVV} 是 系统的输出。

2.2 单独制动功能建模

单独制动功能的气动图如图 6 所示,其核心部件为 101 分配阀,根据直接制动控制阀(244 YV 和 246 YV)和列车管压力产生制动缸压力。将单独制动功能的气动图简化为标准模块,如图 7 所示。分别计 算先导压力、直接制动压力、制动缸压力的状态方程

$$P_{16L} = \lambda_9 P_{16L} + \lambda_{10} P_{MR} \lambda_9 = -0.166 \frac{A_{APP}}{V_{16CP}} \sqrt{R_g e} \lambda_{10} = 0.600 \frac{A_{APP}}{V_{16CP}} \sqrt{R_g e}$$
(13)

$$P_{16T} = \lambda_{11} P_{16T} + \lambda_{12} P_{16L} \lambda_{11} = -0.253 \frac{A_{MV16}}{V_{16\#}} \sqrt{R_g e} \lambda_{12} = 0.601 \frac{A_{MV16}}{V_{16\#}} \sqrt{R_g e}$$
(14)

$$\dot{P}_{20L} = \lambda_{13} P_{20L} + \lambda_{14} P_{MR} \lambda_{13} = -0.166 \frac{A_{APP}}{V_{20CP}} \sqrt{R_g e} \lambda_{14} = 0.600 \frac{A_{APP}}{V_{20CP}} \sqrt{R_g e}$$
(15)

$$\dot{P}_{20T} = \lambda_{15} P_{20T} + \lambda_{16} P_{20L} \lambda_{15} = -0.253 \frac{A_{MVLT}}{V_{20\#}} \sqrt{R_g e} \lambda_{16} = 0.601 \frac{A_{MVLT}}{V_{20\#}} \sqrt{R_g e}$$
(16)

$$\dot{P}_{BC} = \lambda_{17} P_{BC} + \lambda_{18} (P_{16T} - P_{20T}) \quad \lambda_{17} = -0.223 \frac{A_{BCCP}}{V_{BC}} \sqrt{R_g e} \quad \lambda_{18} = 0.583 \frac{A_{BCCP}}{V_{BC}} \sqrt{R_g e}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \lambda_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{12} & \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0\lambda_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{16} & \lambda_{15} & 0 \\ 0 & \lambda_{18} & 0 & -\lambda_{18} & \lambda_{17} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \lambda_{10} \\ 0 \\ \lambda_{14} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \circ$$

其中, $x = [P_{MRT} P_{BC1} P_{BC2} P_{BCEP}]^{T}$ 是系统的状态变量; P_{MRT} 是系统的输入(总风压力);制动缸压力 P_{BC} 是系统的输出。

3 基于等价空间方法的故障诊断方法



首先结合制动机系统功能模型,构建了制动机故障诊断 MR 框架。分别为系统状态变量设计独立的等价向量,通过阈值 判断,生成故障布尔向量,并结合具体的系统功能结构,建立 故障布尔向量与故障信息对应的故障特征矩阵表,根据实际 系统产生的故障布尔向量,结合故障特征矩阵表,定位相应的 故障。本节以自动制动功能的故障诊断为例说明基于等价空 间故障诊断方法。

3.1 功能模型离散化

由 2.1 节并同时考虑扰动和非线性特征,可得制动机自动制动功能模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Fw + \zeta \\ y = Cx + Gl + \xi \end{cases}$$
(17)

制动机自动制动功能模型的输出是列车管的压力,即通过中继阀的作用,制动机控制列车管的压力 与指令值一致。为了能够检测出整个控制通路中的可能故障,对系统中的中间状态变量的诊断是十分有 必要的,因此将自动制动功能模型的系统状态也作为输出,其输出修改为 *y* = *I*_{5×5}*x* + *Gl* + *ξ*,其中,*I*_{5×5} 为 5 阶单位矩阵。将 DK-2 制动机的自动制动功能数学模型离散化(周期为 100 ms) 为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Fw(k) + \zeta(k) \\ y(k) = I_{5\times 5}x(k) + Gl(k) + \xi(k) \end{cases}$$

其中, $x(k) = [x(t)]_{t=KT} \mu(k) = [u(t)]_{t=KT} y(k) = [y(t)]_{t=KT} A = e^{AT}, B = \overline{B} \int_0^T e^{\overline{A}T} dt, F = \overline{F} \int_0^T e^{\overline{A}T} dt$ 。 3.2 自动制动功能模型等价向量的设计

(1) 一般等价向量设计方法。考虑该离散化的系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Fw(k) + \zeta(k) \\ y(k) = Cx(k) + Gl(k) + \xi(k) \end{cases}$$
(18)

式中, $x(k) \in R^{n}$; $u(k) \in R^{n}$; $y(k) \in R^{m}$ 分别是过程状态向量、输入向量及需检测的输出向量; $w(k) \in R^{r} l(k) \in R^{p}$ 是系统非线性部分; $\zeta(k) \in R^{n} \xi(k) \in R^{m}$ 是系统的扰动; $A \mid B \mid C \mid F \mid G$ 是具有适当维数的矩阵。

该离散系统的可观测判别矩阵为

$$Q_{ok} = \begin{bmatrix} C^{\mathrm{T}} & (CA)^{\mathrm{T}} & \cdots & (CA_{n-1})^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(19)

系统可观测的充要条件为 $Rank(Q_{ok}) = n$ 。



图 6 单独制动功能气动图



图 7 单独制动功能简化模型图

可观测指标的定义:考虑系统的状态矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和输出矩阵 $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$,令 $\overline{Q}_{\sigma} = [C^{T} (CA)^{T} \cdots (CA^{\sigma_{i}-1})^{T}]^{T}$,可观测指标值 σ_{i} 为使得 Rank(\overline{Q}_{σ}) = n 的正整数值集 满足 $\sum_{i=1}^{m} \sigma_{i} = n$ 。

对于完全可观测多输出线性时不变系统 系统的状态维数为 n 输出维数为 q ,设 Rank(C) = m ,则可 观测指标值满足关系

$$n/q \leqslant \sigma \leqslant n - m + 1 \tag{20}$$

不考虑扰动和非线性部分时,诊断系统在数据窗 [(k - s) T kT]中的s + 1个测量数据{y(k - s),y(k - s); y(k - s), y(k - s), y(k - s); y(k - s);

$$\begin{cases} y(k-s) = Cx(k-s) \\ y(k-s+1) = CAx(k-s) + CBu(k-s) \\ \cdots \\ y(k) = CA^{s}x(k-s) + CA^{s-1}Bu(k-s) + CA^{s-2}Bu(k-s+1) + \cdots + CBu(k-1) \end{cases}$$
(21)

将上面公式合并,且加入扰动和非线性部分可得

$$y_{s}(k) = H_{o_{s}}x(k-s) + H_{u_{s}}u_{s}(k) + H_{w_{s}}w_{s}(k) + H_{l_{s}}l_{s}(k)$$
(22)

$$\vec{x} \oplus , y_{s}(k) = \begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix}; u_{s}(k) = \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix}; H_{os} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{s} \end{bmatrix};$$

$$H_{us} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ CB & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ CA^{s-1}B & CA^{s-2}B & \cdots & CB & 0 \end{bmatrix}; H_{ws} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CF & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CAF & CF & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ CA^{s-2}F & \cdots & CF & 0 & 0 \\ CA^{s-1}F & CA^{s-2}F & \cdots & CAF & CF & 0 \end{bmatrix}; H_{ls} = \begin{bmatrix} G \end{bmatrix} \circ$$

等价空间的残差公式为

 $r(k) = v_s(y_s(k) - H_{u_s}u_s(k)) = vs[H_{o_s}x(k-s) + H_{w_s}w_s(k) + H_{l_s}l_s(k)]$ 。 其中, v_s 为等价向量 $v_s \in P_s$, $P_s = \{v_s | v_sH_{o_s} = 0 \ v_sH_{w_s} = 0 \ v_sH_{l_s} = 0\}$, $\ln v_s$ 为方程 $vs[H_{o_s}H_{w_s}H_{l_s}] = 0$ 的解。通过 $v_sH_{o_s} = 0$ 消除残差中系统初始状态变量 x(k-s)的影响,且通过 $v_sH_{w_s} = 0$ 和 $v_sH_{l_s} = 0$ 消除残差中系统的残差只与故障有关,而与系统的初始状态没有影响。

在一般的残差生成器中,系统的各个输出的信息作为整体进行残差分析,这样在等价向量的设计上 比较方便,并且任何一个输出发生故障,很快就能在残差中表现出来,进行故障报警,但是这样的简便设 计使得残差序列不能对多个输出信息的具体状态进行表现,然而在实际多输出系统中,每路输出的信息 都代表一定的系统信息,若能够对每路输出信息进行独立的分析,则可以得到更多的系统故障信息。因 此,需要对一般的残差生成器进行改进。

(2) 改进的残差生成器设计。离散系统模型依然采用公式

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Fw(k) + \zeta(k) \\ y(k) = Cx(k) + Gl(k) + \xi(k) \end{cases}$$
(23)

为了将多个输出单独分析 将 C G 重写为如下形式: $C = [c_1 c_2 \cdots c_p]^T G = [g_1 g_2 \cdots g_p]^T$ 。

为了消除初始的系统状态影响 ,为每个输出设计状态矩阵 ,原理同上节 ,可得

$$\begin{cases} H_{o_{s,l}} = [c_1^{\mathrm{T}} (c_1A)^{\mathrm{T}} \cdots (c_1A^{s})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \\ H_{o_{s,2}} = [c_2^{\mathrm{T}} (c_2A)^{\mathrm{T}} \cdots (c_2A^{s})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \\ \cdots \\ H_{o_{s,p}} = [c_p^{\mathrm{T}} (c_pA)^{\mathrm{T}} \cdots (c_pA^{s})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \end{cases}$$
(24)

其等价向量分别为 $v_{s,i}[H_{a,s,i}H_{u,s,i}] = 0$ i = 1 2 ;… p。同时相应的系统输入矩阵为

$$H_{u\,s\,i} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ c_i B & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_i A^{s-1} B & \cdots & c_i B & 0 \end{bmatrix} H_{w\,s\,i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_i F & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_i A F & c_i F & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_i A^{s-2} F & \cdots & \cdots & c_i F & 0 & 0 \\ c_i A^{s-1} F & c_i A^{s-2} F & \cdots & c_i A F & c_i F & 0 \end{bmatrix} H_{l\,s\,i} = [g_i] \circ$$

则对应于每个输出的残差公式为

$$\pi_{i}(k) = v_{s i}(y_{s i}(k) - H_{u s i}u_{s}(k))$$
(25)
$$\pi_{i}(k) = \begin{bmatrix} y_{i}(k-s) \\ y_{i}(k-s+1) \\ \vdots \\ y_{i}(k) \end{bmatrix}; u_{s i}(k) = \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix}_{\circ}$$

由此生成的 p 个残差公式 $r_i(k)$ i = 1.2 $\dots p$ 。每个都包含诊断系统中一定的故障信息 ,通过对某几个残差的异常变化 推断出更多的系统故障。

(3) 自动制动功能等价向量设计。由式(19) 可得 Rank(Q_{ok}) = 5,系统是完全可观测。由式(20) 可 得 σ 可取大于1 的任何正整数,即 s 可以取大于1 的任何正整数,但是随着 s 值的增大,等价向量的计算量 也随着增加,为了兼顾计算量,取 s = 3,可计算出: $H_{u_{3,1}} \sim H_{u_{3,5}}$ 。由此可由式(25) 计算等价向量为 $v_{3,1} \sim v_{3,5}$ 。由公式(24) 与其相应的输入状态矩阵得到残差的计算公式为: $r_1(k) = v_{3,1}(y_{3,1}(k) - H_{u_{3,1}}u_3(k))$, $r_2(k) = v_{3,2}(y_{3,2}(k) - H_{u_{3,2}}u_3(k)) r_3(k) = v_{3,3}(y_{3,3}(k) - H_{u_{3,3}}u_3(k)) r_4(k) = v_{3,4}(y_{3,4}(k) - H_{u_{3,4}}u_3(k))$ 。

3.3 残差阈值确定

根据 4 个系统残差 $r_i(k)$,分别对每个残差建立独立的残差评估函数。定义残差序列 $[r_i(k-s), r_i(k-s)] = r_i(k-s)$ s + 1) … $r_i(k)$]^T, 残差的评估函数取残差信号的 2-范数,即

$$|| R_i(k) ||_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{s+1} r_i^2(k)}$$
(26)

将残差向量的 2-范数为等价空间的阈值定义为 J_{th}, 取值为

$$J_{ih i} = \sup_{\text{fault free}} (\|R_i(k)\|_2)$$
(27)

根据确定的阈值 J_{th} ,其检测逻辑为:当 $||R_i(k)||_2 \leq J_{th,i}$,说明残差信号波动较小,没有故障发生;当 $||R_i(k)||_2 > J_{th,i}$,说明残差信号发生较大变化检测到故障。

3.4 故障特征矩阵表

为了应用等价空间生成的残差集合进行故障的定位 需要定义一个布尔向量 $\varphi = [\varphi_1 \cdots \varphi_4]$ 向量 φ 每个元素 φ_i 只有 0 或者 1 两种数值 ,元素取值规则为 $\varphi_i = \begin{cases} 1 , \|R_i(k)\|_2 > J_{ih_i} \\ 0 , \|R_i(k)\|_2 \leq J_{ih_i} \end{cases}$

这4个 φ_i 值分别代表自动制动功能模型中的4个系统状态变量的故障信息,由以上规则可知,当诊断系统正常运行没有故障报警,布尔向量 φ 应该为零向量,当诊断系统中出现报警故障时,布尔向量 φ 为非零向量。

根据自动制动气路结构图可得到等价空间形成的 4 个布尔 ____表 1 自动制动功能故障特征矩阵表 元素与系统故障的对应关系,建立其故障特征矩阵表如表 1。 _____故障部件 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4$

从表 1 中可以得到 ,当 $\varphi = [0, 1, 1, 1]$ 说明制动机排风阀发 生故障 ,当 $\varphi = [0, 0, 1, 1]$ 时 ,说明中继阀发生故障。通过布尔向 量 φ 的取值 根据表中对应的故障信息 ,可以定位出发生故障的

故障部件	$arphi_1$	$arphi_2$	$arphi_3$	$arphi_4$	
充风阀故障	1	1	1	1	
排风阀故障	0	1	1	1	
中继阀故障	0	0	1	1	
中立阀故障	0	0	0	1	

部件。

实验验证 4

实验场景:充风稳定后进入保压过程,在5s时刻模拟中立阀异常得电。测得故障发生后0.5s内检 测到故障。

计算系统状态变量的残差值如图 8 所示 图 8 中(a) (b) (c) 的系统状态变量残差都小于各自的阈 值,即对于的故障特征布尔值均为0,而图8(d)中系统的状态变量 P_{BP}的残差在第5.3 s 超出阈值,其故 障特征布尔值为1。系统故障特征布尔向量为[0,0,0,1],查表1可知中立阀故障。



图 8 自动制动系统状态变量残差值

5 结语

在分析 DK-2 制动机工作模式的基础上 ,利用空气流体理论建立自动制动功能和单独制动功能的数 学模型:利用等价空间算法构建了制动机故障诊断框架。通过设计独立的等价向量和阈值产生方程,建 立故障布尔向量与故障信息对应的故障特征矩阵表,实现 DK-2 制动机的故障检测和隔离。

本文所研究算法已初步在 DK-2 制动机的 BCU 上得到试验应用。实验结果表明对于继电器和电磁 阀失效、截止阀意外动作、充风口排风口阻塞等常见的空气管路故障,能够进行快速的检测和隔离,初步 实现了对 DK-2 制动机气动系统的在线故障诊断 这也为提高我国机车智能装备工作 提升站段机务检修 能力 确保列车运行安全 起到了一定的推动作用。

考 文 献 参

- [1] 刘豫湘. 我国机车制动机的现状与发展 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2005, 28(1): 6-8.
- [2] 王苏敬,王立德,申萍,等.基于神经网络专家系统的机车故障诊断系统[J].机车电传动 2009(5):44-46.
- [3]孔德顺,申永军, 张光明. 基于小波包变换相关性的信号降噪方法及齿轮故障诊断 [J]. 石家庄铁道学院学报: 自然科学 版 2008 21(1):55-60.
- [4] 申永军 涨光明 祁玉玲 等. 基于 Gabor 变换的自适应降噪方法 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版 2010 23(2): 69-73.
- [5]王嘉乐 ,王灿 ,会强. 基于虚拟仪器的机车滚动轴承故障诊断研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版 2012 25(3): 87-91.

Fault Diagnosis Technology on DK-2 Pneumatic Brake System

Nan Jie¹, Huang Zhiwu²

(1. China Shenhua Track Mechanical Maintenance Company, Tianjin 300457, China;

2. School of Information Science and Engineering , Central South University , Changsha 410075 , China)

Abstract: A parity space based method is proposed to diagnosis the pneumatic and electric faults for DK-2 brake pneumatic system with complexity and uncertainty. Firstly, the function models are built based on air fluid theory for the brake basic components such as the high-speed electric-pneumatic values and the mechanic pneumatic values; then the multiple brake operational modes are analyzed to obtain the relation of basic components in brake system , and the entire brake system model is constructed under the auto-brake , independent-brake and pneumatic-brake condition respectively. Based on it , the parity space-based fault diagnosis method is utilized to design residual generator and fault threshold , and the fault character matrix is constructed to relate the Boolean system state vector to fault information. The system fault is detected and isolated by researching the fault candidate set. The simulation presents the high efficiency and accuracy of the proposed method , which can meet the diagnosis requirement of DK-2 pneumatic brake system.

Key words: DK-2 Brake; fault diagnosis; system model; parity space relations (责任编辑 刘宪福)

(上接第52页)

[6] 赵正旭,龙瑞,郭阳,等. 工程软件的小世界效应探究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2010, 23(3): 1-6.

[7] Guo Yang Zhao Zhengxu Zhou Yiqi. Complexity analysis with function-call graph on windows software [J]. International Review on Computers and Software, 2012 7(3):1149-1153.

[8] 王会进 陆裕奇 陈超华. 设计模式和泛型技术在系统重构中的应用研究 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 13(3): 725-728.

[9] Joshua Kerievskya. 重构与模式 [M]. 杨光 ,刘基诚 ,译. 北京: 人民邮电出版社 2010.

[10] 殷定媛 高建华. 软件重构中 Visitor 设计模式和应用[J]. 计算机工程与设计 2006 27(24): 4817-4820.

Eliminating Type Dependence in Observer Design Patterns by Generic Technology

Zhao ZhengXu, Zhang DengHui, Liu Tian

(School of Information Science and Technology ShijiaZhuang Tiedao University Shijiazhuang 050043 China)

Abstract: Observer design pattern is widely used in the user interface design. Although the coupling between subject and observer gets lower in the traditional implementation of observer pattern , the subject still needs to know the type of the observer , i. e. , the observers have to be on the same inheritance system. To introduce observer pattern to the third party library , the usual practice is to use multiple inheritance which is not conducive to the decoupling between objects. For some object-oriented languages , support to multiple inheritance is limited. This paper proposes a container in the strongly typed language which eliminates the type dependence using the generic technology while not changing the object structure , and let any class have an ability to act as the observer. This method is used to refactor the Space Visual Remote Operation Subsystem , which improves the scalability and reusability of the system.

Key words: design patterns; observer; generic technology; object-oriented (责任编辑 刘宪福)