基于故障建模的双余度舵机故障诊断技术

付永领 庞 尧 刘和松 张 晔

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对双余度舵机系统结构复杂、故障诊断困难的问题,提出了根据故障模型反向推理的故障诊断方法.在充分考虑各元件失效机理的基础上,将故障注入闭环系统建立典型故障模型.故障模型仿真了不同元件故障如何导致系统性能下降甚至完全失效.基于故障模型的仿真结果,对可观测到的异常状况进行分类和逆向推理归纳出故障诊断方法,并利用数学公式对一些故障量化评估.该诊断方法涵盖系统各元件,可快速定位故障元件,判断失效原因并进行定量分析,而且算法简单易于工程实现.

关 键 词: 余度舵机; 故障仿真; AMESim

中图分类号: TH 137

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1372-06

Fault detection of dual redundant actuation system based on the fault modeling

Fu Yongling

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Pang Yao Liu Hesong Zhang Ye

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem of fault diagnosis of dual redundant actuation system characterized by complicated structure, a fault diagnosis method based on reverse-reasoning of fault models was proposed. With all the failure mechanism of different components considered, the typical fault models of close-loop system were established through fault injection. It was revealed that how these faults led to degradation of system performance or even total failure. According to the simulation results, the fault diagnosis method was established through classifying and reverse-reasoning of observed abnormalities and some faults were evaluated quantitatively using mathematical formulas. This fault diagnosis method covers all the components of the system. Moreover, it can not only locate the failure part of system rapidly, but also can identify and quantify the faults. Furthermore, the algorithm is easy to realize in project.

Key words: redundant actuation system; fault simulation; AMESim

在飞机的关键舵面采用余度舵机的配置方式可以显著提高可靠性和安全性.余度舵机是一种机-电-液强耦合的动态系统,结构复杂并具有故障相关性,导致故障诊断和系统重构都相当困难.如何能够快速有效判断出系统故障位置和故障类型,降低误报率和漏检率,是对余度舵机设计的重大考验.近年来,故障诊断技术得到了迅速的发展,其中应用了大量的先进算法和理论成果,比如基于解析模型的诊断方法[1]、基于信号处理的诊断方法[2-3]以及基于人工智能、专家系统、神经网络、模糊理论等技术的智能综合故障诊断方法[4-6].这些理论研究较为成熟,但有很大的局限

收稿日期: 2010-09-29; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:19; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1719.003

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1719.003.html

基金项目: 国家科技合作计划资助项目 (S2010GR0522); 国家自然科学基金资助项目(50675009)

作者简介: 付永领(1966 -),男,河北迁西人,教授, fuyongling@126.com.

性:着重于伺服阀、液压缸、传感器等主要元件却忽略了系统整体,对于其他元件的影响分析不足;针对系统开环控制,对闭环系统研究较少[7];以大量的数据和信息为基础;算法结构复杂难以实现;以正常情况为借鉴,缺乏对故障多样性的认识;故障分析多局限于线性模型. 事实上,余度舵机的故障除了发生在主要元件之外,也会发生在其他切换元件之处,同时系统固有的非线性也会导致故障发生. 本文以一种舵机的闭环非线性模型为对象,采用故障注入仿真了各种失效状况,提出基于故障模型的诊断方法,可有效降低误报率,快速定位故障部位确定故障原因.

1　系统结构

图 1 是余度舵机原理图,由 2 个独立油源供油. 每个油源对应 2 个电液伺服阀(EHSV, Electro-Hydrostatic Servo Valve),2 个电磁阀,1 个阀芯作动筒,1 个主控阀,1 个旁通阀和 1 个输出作动筒. 正常时采用主动/主动模式,电磁阀 3,4 处于左位,2 个 EHSV 同时带动各自阀芯作动筒. EHSV2 和 EHSV4 作为冷备份,由电磁阀 1,2 负责切换. 电磁阀 3,4 和阻尼旁通阀 1,2 共同完成工作模式的切换. 输出作动筒和阀芯作动筒两腔设置有压差传感器;主控阀和输出作动筒设置双余度直线位移传感器.

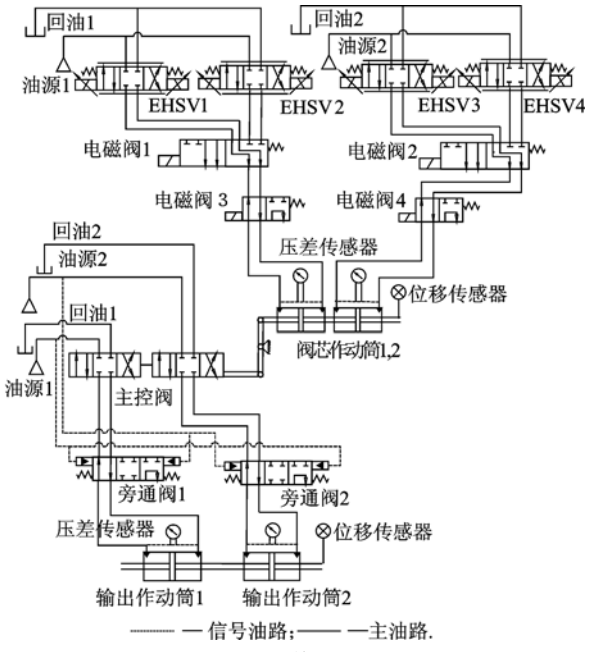

图 1　系统原理图

当一路油源的 2 个 EHSV 均失效时,电磁阀 3 或 4 切换右位旁通该路阀芯作动筒,由另一油路负责控制. 本路油源有效时,旁通阀处于左位;仅另一路油源有效时,旁通阀处于右位旁通输出作动筒;双油源都失效时,2 个旁通阀都处于中位,舵面保持最后位置不变.

2　系统故障仿真

考虑图 1 所示的余度舵机系统,做如下假设. 假设 1:主控阀的机械串联可靠;假设 2: 传感器可靠无失效. 系统故障主要发生在控制器,EHSV,电磁阀,主控阀,旁通阀,作动筒等元件上. 电磁阀故障模式为复位弹簧失效、卡死和线圈断线;电磁阀 1,2 失效无法隔离故障 EHSV 通道;电磁阀 3,4 失效无法旁通主控阀小作动筒,导致主控阀芯的运动阻力增大甚至卡死. 旁通阀为液控,可能出现阀芯卡死和复位弹簧失效,导致输出作动筒运动阻力过大和卡死. 电磁阀和旁通阀的故障最终表现为主控阀和作动筒的性能下降或失效,故不单独考虑. 综上所述,故障现象分为 4 类:控制器故障,作动筒故障,主控阀故障,EHSV 故障. 下面针对 4 种故障在 AMESim 上作仿真研究,参数如表 1.

表 1　系统参数

模型参数	数值
作动筒杆径/mm	40
作动筒活塞直径/mm	90
作动筒活塞重量/kg	2
作动筒行程/mm	80
主控阀阀芯作动筒杆径/mm	6
主控阀阀芯作动筒活塞直径/mm	10
主控阀额定流量/(L·min^{-1})	20
旁通阀额定流量/(L·min^{-1})	20
EHSV 额定电流/mA	40
EHSV 额定流量/(L·min^{-1})	5
电磁阀额定流量/(L·min^{-1})	5
负载质量/kg	40

2.1　控制器故障仿真

控制系统为双闭环结构,主控阀芯位移 x_v 作为系统内环,作动筒位移 x 为系统外环. 如表 2 所示,控制系统存在 3 种典型故障模式:内路开环外路闭环;内路闭环外路开环;内、外路均开环.

表 2　控制器故障

故障情况	指令信号	主控阀输出	作动筒输出
内路开环 外路闭环	正指令	全行程震荡	到正向位置后,震荡不止
	负指令	全行程震荡	到负向位置后,震荡不止
内路闭环 外路开环	正指令	正向某位置	无震荡,正向最大位置
	负指令	负向某位置	无震荡,负向最大位置
内路开环 外路开环	正指令	无震荡,正向最大位置	无震荡,正向最大位置
	负指令	无震荡,负向最大位置	无震荡,负向最大位置

针对比较复杂的内路开环外路闭环故障进行仿真. 给定指令为 0 s 时刻的 -0.01 m, -0.02 m, -0.03 m 和 -0.04 m 阶跃信号,主控阀阀芯位移 x_v,作动筒位移 x 响应如图 2 所示. 可以看到,此时系统无法稳定,主控阀表现为全行程震荡,而作动筒响应为同频率的三角波震荡.

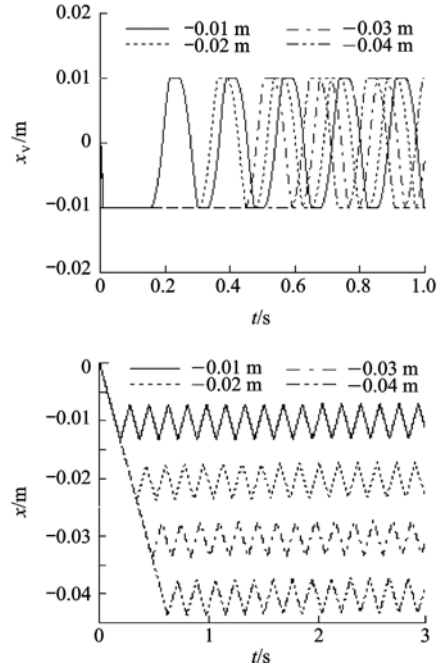

图 2 内路开环外路闭环故障仿真

2.2 作动筒故障仿真

作动筒故障有卡死、泄漏和动态性能下降. 卡死故障较简单不再详述,下面仅仿真动态性能下降和泄漏故障. 当旁通阀故障处于右位时旁通面积过小,于是作动筒无法有效旁通两腔导致运动阻力过大,系统动态性能下降. 此时被旁通的作动筒动力学方程如下:

$$Q = C_q A_v \sqrt{\frac{2 \mid p_1 - p_2 \mid}{\rho}} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}t} = (Q - A\dot{x}) \frac{B}{V_{01} - Ax} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}p_2}{\mathrm{d}t} = (A\dot{x} - Q) \frac{B}{V_{02} + Ax} \tag{3}$$

$$F = \mid p_2 - p_1 \mid A \tag{4}$$

其中,Q 为旁通流量;p_1, p_2 为作动筒两腔压力;ρ 为油液密度;A_V 为旁通阀开口面积;C_q 为旁通阀流量系数;A 为作动筒有效面积(两腔相等);V_{01}, V_{02} 为两腔初始体积;B 为油液体积弹性模量;F 为运动阻力.

下面仿真这种故障情况,设 A_V 分别为 1.5 mm^2, 2 mm^2, 3 mm^2 和 4.5 mm^2,指令信号为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,x_v 和 x 的响应如图 3 所示. A_V 狭小导致 x_v 和 x 快速性下降;A_V 越小,两腔压差越大,F 也就越大,快速性下降越明显.

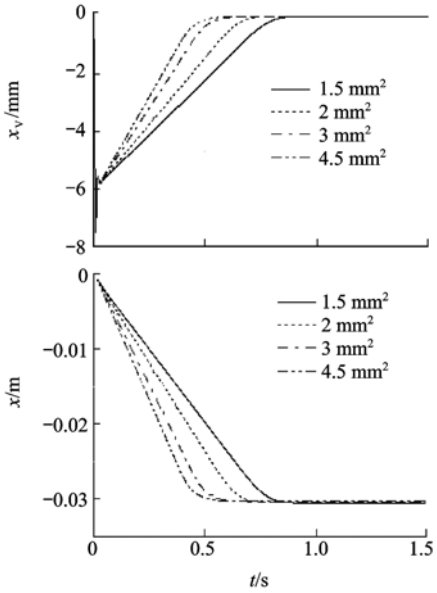

图 3 A_V 狭小故障仿真

AMEsim 软件提供了泄漏模块可以设置在作动筒两腔之间,模型的计算公式如下:

$$Q_l = \Delta p \frac{\pi D c_r^3}{12 \mu l_c} \tag{5}$$

其中,Q_l 为泄漏流量;Δp 为作动筒两腔压力差;D 为活塞直径;c_r 为活塞间隙;μ 为油液运动粘度;l_c 为接触长度. 对该故障作仿真,设置 c_r 分别为 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 和 0.4 mm,指令为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,x_v 和 x 的响应如图 4 所示. 可以看到存在少量泄漏时,x_v 和 x 的稳态误差和快速性都有所下降. 稳态时,主控阀无法正常关闭,产生的流量用来补偿作动筒泄漏. 若泄漏继续

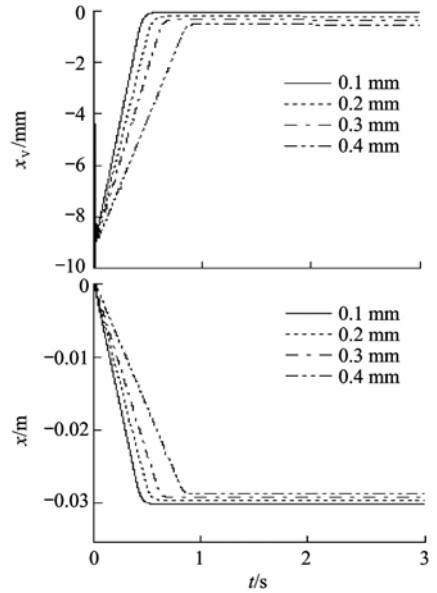

图 4 作动筒泄漏故障仿真

增大,系统响应越慢,稳态误差也就越大,当主控阀有效流量都用于补偿泄漏时,会导致作动筒无响应.

2.3　主控阀故障仿真

主控阀的故障分为泄漏、单向运动、死区增大、动态性能下降和卡死. 主控阀卡死故障分 3 种情况讨论:卡死在中位,作动筒保持不动;卡死在左位,作动筒运动到正向最大位置;卡死在右位,作动筒运动到负向最大位置. 主控阀单向运动故障将导致主控阀和作动筒都运动到极限位置. 以下主要仿真主控阀泄漏、死区增大、动态性能下降等故障.

设置指令为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,主控阀泄漏间隙分别为 0 mm,0.1 mm 和 0.2 mm,泄漏模型如式(5). x_v 和 x 的响应如图 5 所示,主控阀泄漏不影响 x_v 和 x 的快速性,仅造成稳态误差,此时主控阀的稳态流量用于补偿自身的泄漏.

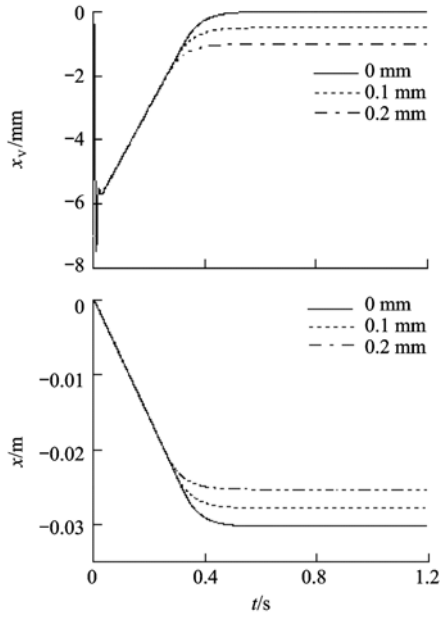

图 5　主控阀泄漏故障仿真

主控阀阀芯的静摩擦力会造成运动死区,导致控制精度下降. 设置指令为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,主控阀阀芯的静摩擦力分别为 400 N,600 N,800 N 和 1 000 N,仿真结果如图 6 所示. 主控阀呈现锯齿波震荡,而作动筒呈现同频率的三角波震荡,摩擦力越大,震荡频率和幅值也越大.

主控阀动态性能下降的原因是自身运动阻力过大或电磁阀 3,4 无法有效旁通对应阀芯作动筒. 设置指令为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,电磁阀 3,4 的旁通直径分别为 0.1 mm,0.2 mm,0.3 mm和 0.4 mm. x_v 的响应如图 7 所示,电磁阀 3,4 的旁通直径越小,主控阀快速性就越差.

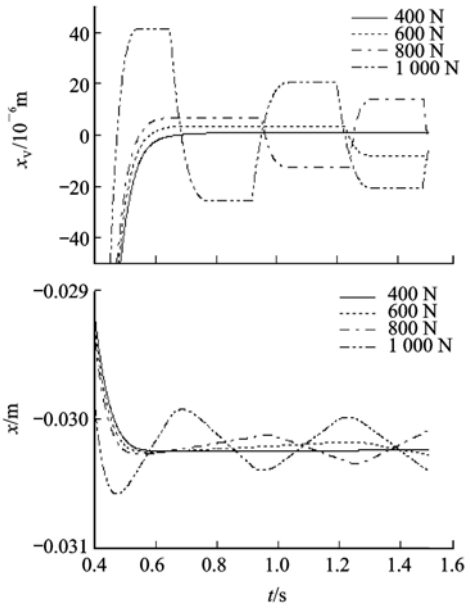

图 6　主控阀死区故障仿真

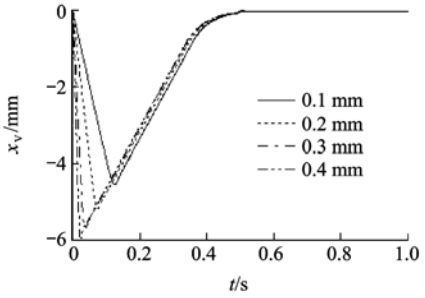

图 7　电磁阀旁通面积狭小故障仿真(x_v响应)

2.4　EHSV 故障仿真

EHSV 采用喷嘴挡板式,常见线圈故障、喷嘴堵塞故障、滑阀卡滞故障、泄漏故障和死区过大故障. EHSV 由 2 组线圈并联而成,当 2 组线圈都失效时,伺服阀失效. EHSV 单侧喷嘴堵塞时,无论控制输入电流为多少,均输出额定流量[8]. EHSV 阀芯卡死则无法跟随控制电流,输出恒定流量. 卡死在左位,主控阀和作动筒都运动到正向最大位置;卡死在右位,两者都运动到负向最大位置;卡死在中位,主控阀停留不动,作动筒响应取决于主控阀位置(主控阀正开口则作动筒运动到正向最大位置;主控阀负开口则作动筒运动到负向最大位置;主控阀无开口则作动筒停止不动). 以下仿真泄漏故障和死区故障.

设置 EHSV 的间隙分别为 0 mm,0.05 mm,0.08 mm和 0.1 mm,指令为 0 s 时刻的 -0.03 m 阶跃信号,x_v 和 x 的响应如图 8 所示. 稳态时,伺服阀输出流量用于补偿泄漏,导致主控阀产生稳态误差(随泄漏量增大而增大),此误差进一步导致作动筒到达指令位置不能停止而继续运动,速度取决于主控阀的稳态误差.

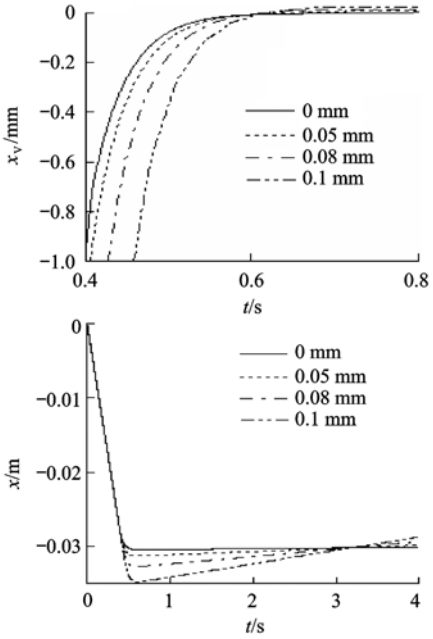

图 8 EHSV 泄漏故障仿真

死区故障的成因是喷挡阀故障、伺服阀节流孔堵塞、反馈杆头的小圆球磨损等. 设置死区分别为 EHSV 额定电流的 1%,2% 和 3%,指令仍然是 0 s 时刻的 −0.03 m 阶跃信号,x_v 的响应如图 9 所示. 可以看到,死区导致控制精度下降:x_v 呈矩形波震荡而作动筒呈同频率三角波震荡. 这种故障和主控阀死区故障(如图 6)很相似,均发生震荡,但震荡频率较小.

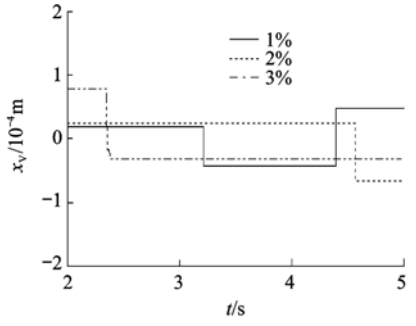

图 9 EHSV 死区故障仿真(x_v 响应)

3 系统故障诊断

不同的原因导致的系统失效现象差别甚大,根据作动筒和主控阀的异常现象进行反推可以判断故障的实际部位和原因. 记油源压力为 P_s,作动筒 1 的压差为 Δp_1,作动筒 2 的压差为 Δp_2,指令位置为 x_c,实际位移为 x;阀芯作动筒 1 的压差为 Δp_3,阀芯作动筒 2 的压差为 Δp_4;主控阀的指令位置为 x_m,实际位移为 x_v.

当作动筒卡死($\dot{x}=0$)时,需进一步判断主控阀阀芯的位置,如图 10. 主控阀处于零位 $x_v=0$ 故障分析如下:若 $\Delta p_3, \Delta p_4 \approx P_s$ 为主控阀卡死;若 $\Delta p_3, \Delta p_4 = 0$ 则故障发生在主控阀上油路,可能原因有 EHSV 卡死封油,泄漏失效和电磁阀 3,4 卡死封油. 主控阀有开口 $x_v \neq 0$ 则检查作动筒压差:若 $\Delta p_1, \Delta p_2 \approx P_s$ 判定作动筒卡死;若 $\Delta p_1, \Delta p_2 = 0$ 则可能是旁通阀故障封油,主控阀或作动筒发生较大泄漏,输出流量全部用于补偿泄漏. 此时 Q_l 等于主控阀输出流量,可以通过式(6)计算得

$$Q = K_Q x_v - K_C P_L \tag{6}$$

其中,K_Q 为主控阀流量系数;K_C 为主控阀压力系数;P_L 为负载压力. 将泄漏量 Q_l 代入式(5)可计算出接触间隙.

仅有作动筒单向运动($\dot{x}<0$ 直到 $x=x_{min}$ 或者 $\dot{x}>0$ 直到 $x=x_{max}$)是由于主控阀处于非零位 $x_v \neq 0$ 无法关闭油路,与上面分析相同进一步判断故障原因(如图 10). 作动筒和主控阀均单向运动原因有 2 种:控制器内外回路都开环;电磁阀无法隔离卡死非零位的 EHSV.

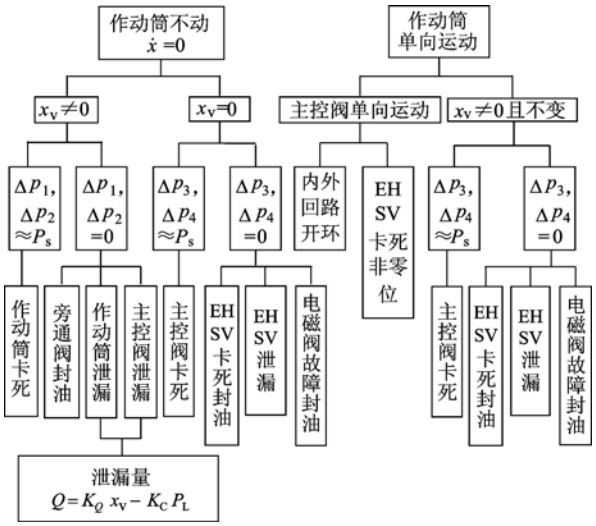

图 10 作动筒卡死和单向运动故障诊断

作动筒虽到达指定位置,但故障导致系统性能下降,例如稳态误差存在或快速性下降等. 作动筒和主控阀稳态误差分别表示为 $x - x_c$,$x_v - x_m$. 在阶跃指令的跟随阶段,作动筒正常速度为 $v_c = Q_m/A$,主控阀芯正常速度为 $v_m = Q_E/A_m$(其中,Q_m 为主控阀工作流量,Q_E 为伺服阀工作流量,A_m 为主控阀阀芯作动筒面积). 故障判定逻辑如图 11 所示,详述如下. 若作动筒的快速性下降 $\dot{x} < v_c$ 说明 F 过大,可能是作动筒磨损或 A_V 过小. 设主控阀芯位移 x_v 不变,式(6)的前一项 $K_Q x_v$ 相同,仅考虑第 2 项计算增加的 F 为

$$F = (v_c - \dot{x})A^2/K_C \tag{7}$$

若发生旁通面积狭小的故障,可以根据式(1)近似计算此时的旁通面积:

$$A_{\mathrm{V}} = \frac{A\dot{x}}{C_{\mathrm{q}}}\sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P_{1,2}}} \tag{8}$$

作动筒和主控阀快速性都下降且存在稳态误差,判定为作动筒泄漏,仅有稳态误差可判定为主控阀泄漏,稳态泄漏量可通过式(6)计算,利用式(5)可以得到接触间隙. 作动筒到达指令位置后继续运动是由于 EHSV 泄漏导致主控阀存在稳态误差. 作动筒发生震荡时需要进一步判断主控阀的位移:若主控阀不震荡判定为作动筒静摩擦力与动摩擦力差值过大;若主控阀全行程震荡可判定为内回路开环;若主控阀小幅值震荡是由于 EHSV 或主控阀死区过大. 但这两种故障的震荡频率和幅值不同,通过实验设定阈值可以区分 2 种故障. 仅主控阀快速性下降的原因可能是电磁阀 3,4 的旁通面积较小或主控阀阀芯动阻力增大.

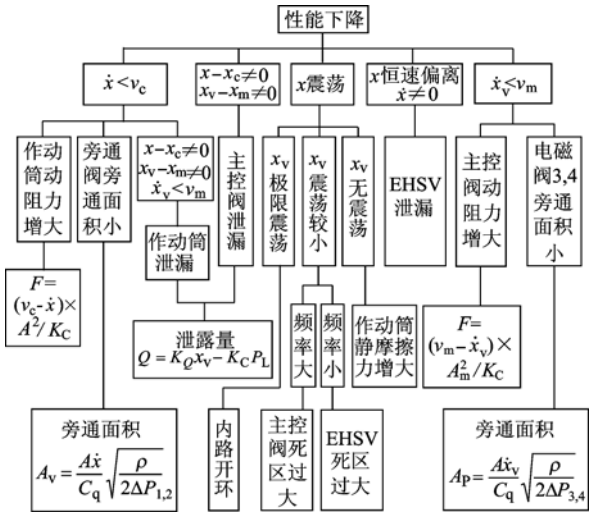

图 11　作动筒性能下降故障诊断

4　结　论

1) 全面考虑余度舵机闭环系统中各个元件的失效模式,建立重现了故障现象,展示了不同失效模式将如何导致余度舵机性能的下降甚至彻底故障,并进行定量分析.

2) 对可观测数据的异常状况进行判断和分类,定位故障部位,明确故障原因,并对故障做量化评估.

故障仿真的结果展示了各元件故障对系统性能的危害程度,有助于在设计之初对整个系统进行评估和优化,减小各元件的故障传播,提高系统整体可靠性. 基于故障模型的诊断方法从传感器的异常数据入手,方法计算简单,思路清晰,易于编程实现.

参考文献 (References)

[1] Puig V, Quevedo J, Escobet T, et al. Passive robust fault detection of dynamic processes using interval models[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(5): 1083 – 1089

[2] Zhong Maiying, Zhou Donghua, Ding S X. On designing H_∞ fault detection filter for linear discrete time-varying systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(7): 1689 – 1695

[3] Kim S, Choi J, Kim Y. Fault detection and diagnosis of aircraft actuators using fuzzy-tuning IMM filter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 940 – 952

[4] Meskin N, Khorasani K. Actuator fault detection and isolation for a network of unmanned vehicles[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(4): 835 – 840

[5] White C J, Lakany H. A fuzzy inference system for fault detection and isolation: application to a fluid system[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1021 – 1033

[6] Saxena A, Saad A. Evolving an artificial neural network classifier for condition monitoring of rotating mechanical systems[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(1): 441 – 454

[7] 张伟,章卫国,杨朝旭,等. 容错飞行控制系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007:197 – 198
Zhang Wei, Zhang Weiguo, Yang Chaoxu, et al. The fault-tolerant flight control system[M]. Xi'an: Xi'an Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 197 – 198 (in Chinese)

[8] 张若青,裘丽华. 基于动态神经网络的电液伺服阀实时故障诊断[J]. 机床与液压,2002(3):140 – 142
Zhang Ruoqing, Qiu Lihua. The real-time fault diagnosis of electric-hydraulic servo valve based on dynamic neural network[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2002(3): 140 – 142 (in Chinese)

[9] 刘立峰. 基于神经网络和证据理论融合的水电机组振动故障诊断研究[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2006
Liu Lifeng. Research on fault diagnosis of hydroelectric sets vibration based on neural network and evidence theory [D]. Xi'an: Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, 2006 (in Chinese)

[10] Karpenko M, Sepehri N. Fault-tolerant control of a servo-hydraulic positioning system with crossport leakage[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(1): 155 – 161

[11] Khan M, Rahman M A. Development and implementation of a novel fault diagnostic and protection technique for IPM motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(1): 85 – 92

[12] An L, Sepehri N. Leakage fault detection in hydraulic actuators subjected to unknown external loading[J]. International Journal of Fluid Power, 2008, 9(2): 15 – 25

(编　辑:刘登敏)