

基于干扰补偿和自适应阈值的鲁棒故障检测*

董选明 谭 民

(中国科学院自动化研究所·北京, 100080) (北京航空航天大学自动控制系·北京, 100083)

裘丽华 王占林

U664.4

摘要: 研究某实物液压舵机的鲁棒故障检测, 基于简化模型观测器产生检测残差, 通过提出的干扰补偿方法和自适应阈值来提高检测系统的鲁棒性和敏感性。仿真表明, 该方法能快速有效地检测出舵机的小幅值突变故障和早期缓变故障。

关键词: 观测器; 鲁棒故障检测; 自适应阈值; 干扰补偿; 液压伺服系统

液压舵机

文献标识码: A

Robust Fault Detection for Hydraulic Servo System Using Disturbance Compensation and Adaptive Threshold

DONG Xuanming and TAN Min

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences · Beijing, 100080, P. R. China)

QIU Lihua and WANG Zhanlin

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics · Beijing, 100083, P. R. China)

Abstract: The paper studies model observer-based robust fault detection system for an aircraft hydraulic servo system, presents the disturbance compensation and adaptive threshold design methods, and enhances the robustness and sensitivity using them. Simulations demonstrate that the detection method proposed can robustly and rapidly detect the small abrupt and slow drift faults of the servo system.

Key words: observer; robust fault detection; adaptive threshold; disturbance compensation; hydraulic servo

1 引言 (Introduction)

为了满足日益增长的功能和性能需求, 现代机电液系统的规模越来越大, 结构越来越复杂, 压力和功率越来越大, 精度、集成度和自动化程度越来越高, 执行的任务越来越复杂, 特别是在机电液系统工作过程中, 由于流体的参与, 其状态比较复杂, 发生故障的可能性增大, 而且对故障的诊断和排除也较困难。为了确保电液系统的可靠工作, 近十几年来, 人们在机电液系统的状态监测和故障诊断(CMFD)方面做了许多研究, 提出了一些方法^[1], 但这些研究大多仅限于液压部件或简单的传动系统, 对于液压舵机尚未见到研究, 特别是还有开展基于模型观测器的鲁棒故障检测研究。目前在机电液系统 CMFD 研究中, 存在的普遍问题是没有考虑检测系统的鲁棒性, 以及缺少对实物机电液系统的应用研究。基于模型的鲁棒故障诊断(RFD)研究始于 80 年代初, 经过十几年的研究, 提出了一些方法, 但总的来说, RFD 还是一新的研究方向, 有待深入研究^[2-4]。本文

基于液压舵机简化模型设计观测器和检测系统, 通过自适应阈值和干扰补偿方法来提高检测系统的鲁棒性和敏感性。

2 液压舵机模型 (Model of hydraulic servo)

在考虑干扰和故障: ①泵源干扰 $d_q(t)$; ②控制信号故障 $f_u(t)$; ③伺服放大器故障 $f_i(t)$; ④伺服阀故障 $f_m(t)$; ⑤角位移传感器故障 $f_s(t)$; ⑥总流量压力系统 K_{ce} 变化时, 某实物液压舵机的系统结构如图 1 所示。

在考虑弹性负载和粘性阻尼系数 B_l 很小时, 根据图 1, 可推导出该液压舵机的五阶模型:

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_{f_u}(s)f_u(s) + G_{f_i}(s)f_i(s) + G_{d_q}(s)d_q(s) + G_{F_L}(s)F_L(s) + G_{f_s}(s)f_s(s), \quad (1)$$

其中

$$G_u(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K_x K_j K_v \cdot G_{sv}(s) \cdot G_R(s)}{A + K_x K_{j_s} K_{j_m} K_i \cdot G_x(s) \cdot G_h(s)},$$

* 基金项目: 国家自然科学基金(59675020)和博士后科学基金(1998-6)资助

收稿日期: 1997-10-10; 收修改稿日期: 1999-08-30.

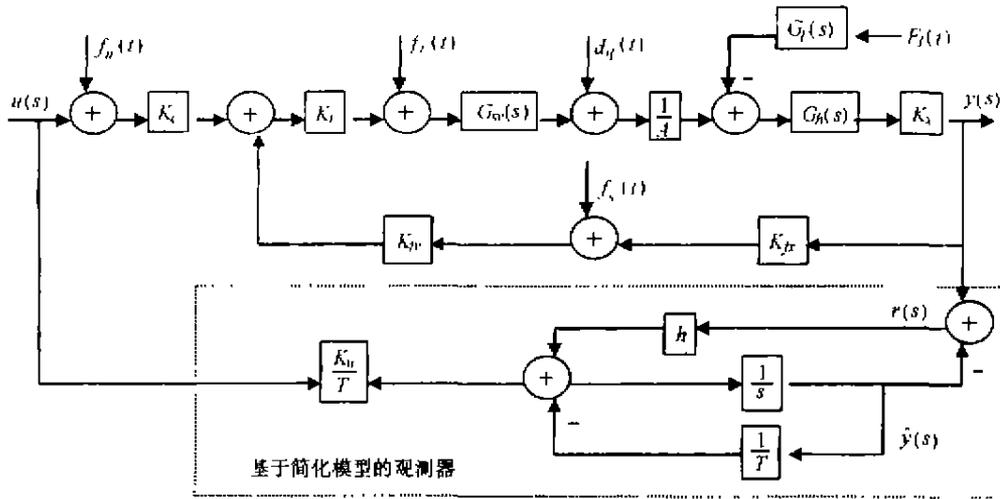


图1 带干扰和故障的舵机系统及基于简化模型观测器结构方框图

Fig. 1 The architecture of an aircraft hydraulic servo system with disturbances and faults, and the scheme of a simplified model-based observer

$$G_{f_u}(s) = \frac{y(s)}{f_u(s)} = \frac{K_c K_f K_x \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}{A + K_x K_f K_{f_s} K_f K_i \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}$$

$$G_{f_i}(s) = \frac{y(s)}{f_i(s)} = \frac{K_x \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}{A + K_x K_f K_{f_s} K_f K_i \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}$$

$$G_{d_q}(s) = \frac{y(s)}{d_q(s)} = \frac{K_x \cdot G_h(s)}{A + K_x K_f K_{f_s} K_f K_i \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}$$

$$G_{F_L}(s) = \frac{y(s)}{F_L(s)} = \frac{AK_x \cdot G_F(s) \cdot G_h(s)}{A + K_x K_f K_{f_s} K_f K_i \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}$$

$$G_{f_s}(s) = \frac{y(s)}{f_s(s)} = \frac{K_f K_i K_x \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}{A + K_x K_f K_{f_s} K_f K_i \cdot G_m(s) \cdot G_h(s)}$$

$$G_m(s) = \frac{K_{sv}}{s^2 + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1}, \quad G_F(s) = \frac{1}{K_i} \left[\frac{V}{4EK_{ce}}s + 1 \right]$$

$$G_h(s) = \frac{A^2/K_{ce}K_i}{\left[\frac{A^2}{K_{ce}K_i}s + 1 \right] \left[\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h}s + 1 \right]}$$

其中, $y(s), u(s)$ 分别是舵机的输出和控制输入信号。 K_c 是控制信号电压放大器增益(V/V), K_f 是反馈信号电压放大器环节(V/V), K_i 是伺服放大器电流放大环节(mA/V), K_{sv} 是伺服阀电流-流量增益(L/mA); K_x 是线性与角位移转换系数($^\circ$ /m), K_{f_s} 是电位计增益(V/ $^\circ$), A 是液压油缸的有效截面积(m^2), $F_L(t)$ 是外负载干扰输入, $G_m(s)$ 是伺服阀传递函数, ω_{sv}, ζ_{sv} 分别为伺服阀的固有频率(rad/s)和阻尼系数, $G_F(s)$ 表示负载传递函数, K_i 是负载弹簧刚度(N·m/ $^\circ$), V 是液压缸总容积(L^3), E 是液压等效弹性系数(N/ m^2); $G_h(s)$ 表示动力机构(油缸和负载)的传递函数, K_{sv} 是阀控液压缸的总流量压力系数($m^5/N \cdot s$), ω_h, ζ_h 分别为动力机构的固有频率(rad/s)和阻尼系数。

考虑到伺服阀的固有频率 ω_{sv} 远远大于动力机构的固有频率 ω_h , 又 ω_h 大于惯性转折频率 $A^2/K_{ce}K_i$, 以及较大的液压弹簧刚度时, 把五阶模型(1)简化为一阶模型:

$$y(s) = G_u'(s)u(s) + G_{f_u}'(s)f_u(s) + G_{f_i}'(s)f_i(s) + G_{d_q}'(s)d_q(s) + G_{F_L}'(s)F_L(s) + G_{f_s}'(s)f_s(s), \quad (2)$$

其中

$$G_u'(s) = \frac{K_u}{T \cdot s + 1}, \quad G_{f_u}'(s) = G_u'(s),$$

$$G_{f_i}'(s) = \frac{K_{f_i}}{T \cdot s + 1}, \quad G_{d_q}'(s) = \frac{K_x \cdot T_h}{T \cdot s + 1},$$

$$G_{f_s}'(s) = -\frac{K_{f_s}}{T \cdot s + 1}, \quad G_{F_L}'(s) = -\frac{T_L \cdot s + K_L}{T \cdot s + 1},$$

$$T_h = \frac{A^2}{K_{ce} \cdot K_i}, \quad T = \frac{AT_h}{A + K}$$

$$K_u = \frac{K_c K_f K_x K_{sv} T_h}{A + K}, \quad K_{f_i} = \frac{K_x K_{sv} T_h}{A + K},$$

$$K_{f_s} = \frac{K_{f_s} K_i K_x K_{sv} T_h}{A + K}, \quad T_L = \frac{AVK_x T_h}{4EK_{ce}}, \quad K_L = \frac{AK_x T_h}{K_i}$$

3 故障检测模型观测器设计(Design of fault detection observer)

基于模型的故障检测有两个过程:残差产生和残差评价. 本文的检测残差是由简化模型观测器产生, 残差评价是基于自适应阈值. 根据无干扰和故障时的一阶模型 $y(s) = G_u'(s)u(s)$ 和 Luenberger 观测器理论和图 1, 可推导出基于简化模型的观测器输出响应为:

$$\hat{y}(s) = \frac{K_u}{T \cdot s + (T \cdot h + 1)} u(s) +$$

$$\frac{T \cdot h}{T \cdot s + (T \cdot h + 1)} y(s), \quad (3)$$

其中, $y(s)$ 是系统实际(五阶模型)的输出响应,由式(1)产生。 $\hat{y}(s)$ 是模型观测器的估计输出响应。 h 是观测器的增益。 $T = AT_h/(A + K)$ 是惯性常数,由式(3)可推导出普遍形式的检测观测器的残差响应:

$$r(s) = y(s) - \hat{y}(s) = g_1(s)y(s) + g_2(s)u(s), \quad (4)$$

其中

$$g_1(s) = (T \cdot s + 1) / [T \cdot s + (T \cdot h + 1)],$$

$$g_2(s) = -K_u / [T \cdot s + (T \cdot h + 1)],$$

$g_1(s), g_2(s)$ 是与简化模型和观测器增益 h 等参数有关的传递函数。 $g_1(s)$ 是一最小相位系统, $g_2(s)$ 是一低通滤波器系统。

把式(1)代入式(4),并化简可得下面形式的残差表达式:

$$r(s) = \bar{G}_u(s)u(s) + \bar{G}_{f_u}(s)f_u(s) + \bar{G}_{f_i}(s)f_i(s) + \bar{G}_d(s)d_q(s) + \bar{G}_{F_L}(s)F_L(s) + \bar{G}_{f_j}(s)f_j(s), \quad (5)$$

其中

$$\bar{G}_u(s) = g_1(s)G_u(s) + g_2(s),$$

$$\bar{G}_{f_u}(s) = g_1(s)G_{f_u}(s), \quad \bar{G}_{f_i}(s) = g_1(s)G_{f_i}(s),$$

$$\bar{G}_d(s) = g_1(s)G_d(s), \quad \bar{G}_{F_L}(s) = g_1(s)G_{F_L}(s),$$

$$\bar{G}_{f_j}(s) = g_1(s)G_{f_j}(s).$$

从式(5)可看出:观测器残差包括由各个输入(包括干扰和故障)和模型降阶、阀控液压缸的总流量压力系数 K_{ce} 变化等产生的残差。观测器参数 h 的设计要满足下面三个任务:① h 决定滤波器($g_1(s), g_2(s)$)的截止频率 f_c 。 h 越小, f_c 越小,抑制高频噪声效果越好,但故障检测速度变慢。假如 f_c 选择太低,系统将变得不敏捷。② h 确定故障信号时间偏移的稳态增益。 h 越大,故障对残差的作用越小,不利于检测故障。③ 增益 h 的确定还要考虑系统的稳定性。

4 自适应阈值设计(Design of adaptive threshold)

在检测残差评价中,是以阈值作为决策的门限。因此阈值是故障检测敏感性和误报漏报的分界线。由于实际系统中存在不确定性和干扰等影响因素,即使在无故障时,检测残差也不等于零,因此需要根据阈值来判断是否发生故障。阈值的选取是否适当,将直接关系到故障检测系统的可信性。通常,凭经验

或试凑的方式来确定阈值,且确定为常值。目前,对阈值的确定问题,远远没有解决,且相对研究很少^[5]。对鲁棒故障检测系统设计来说,作者认为不仅要从残差发生器的鲁棒性方面着手,而且也要从阈值的鲁棒性和敏感性方面考虑,这样才能提高整个检测系统的性能。本文提出自适应阈值的概念和设计方法。采用自适应阈值是实现鲁棒故障检测的一种有效途径。特别是对液压舵机这样的单输出系统,因无法实现检测观测器残差的干扰解耦,而采用自适应阈值是一最有效方法。

在无故障时,根据式(5),可得检测观测器的残差响应为:

$$r_0(s) = \bar{G}_u(s)u(s) + \bar{G}_d(s)d_q(s) + \bar{G}_{F_L}(s)F_L(s). \quad (6)$$

那么,自适应阈值可设计为:

$$J_{ad}(t) = |r_0(t)| + \alpha. \quad (7)$$

其中, α 是一正修正参数,它表示无故障残差数据偏离程度,通常选择为残差的均方根值或最大残差的三分之一或残差的标准偏差。

从式(6)和(7)可看出,自适应阈值也是与控制信号及其传递函数、干扰信号及其传递函数、模型降阶误差、简化模型参数和观测器增益 h 等因素有关。在已知各输入信号的前提下,可以采用式(6)和(7)直接求出自适应阈值。在许多实际系统中,往往由于未知干扰输入信号不可测量,这时可采用多项式拟合方法对无故障残差响应进行拟合并综合标准偏差及修正系数得到自适应阈值。对液压舵机系统,可以通过分别测量液压泵的流量脉动和动力油缸的压力而获得干扰信号。在控制信号和简化模型及观测器增益 h 确定的情况下,自适应阈值将取决于总流量压力系数 K_{ce} 、干扰信号 $d_q(t)$ 和 $F_L(t)$ 的特征。

5 干扰补偿方法设计(Design of disturbance compensation)

采用自适应阈值后,仿真已证明故障检测系统的鲁棒性和敏感性大大提高。但由于无故障时检测观测器的残差受流量干扰信号 $d_q(t)$ 和负载干扰信号 $F_L(t)$ 的影响较大,从而不能实现对极小幅值故障的有效检测。为了更有效地检测小幅值和早期缓变故障,将要尽力消除干扰引起的残差。本文引入干扰补偿方法来减弱干扰产生的残差。干扰补偿方法的原理是在流量干扰 $d_q(t)$ 和负载干扰 $F_L(t)$ 可测量的基础上,用控制信号 $u(t)$ 、流量干扰 $d_q(t)$ 和负载干扰 $F_L(t)$ 对各自简化模型(2)的响应而产生的

残差去补偿实际系统(五阶模型)下所产生的残差 $r(s)$. 其示意结构如图 2 所示.

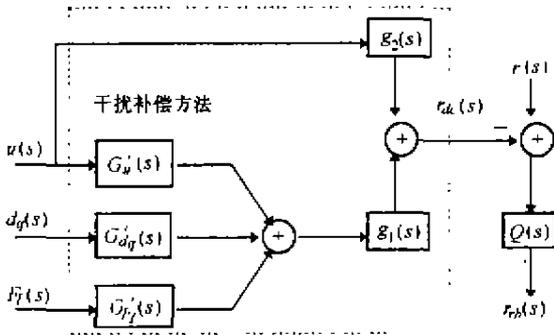


图 2 干扰补偿方法和鲁棒残差产生方框图

Fig. 2 The scheme of disturbance compensation and robust residual generation

根据图 2, 可得补偿残差 $r_{dc}(s)$ 为:

$$r_{dc}(s) = [g_1(s)G_u'(s) + g_2(s)]u(s) + g_1(s)G_{dq}'(s)dq(s) + g_1(s)G_{FL}'(s)F_L(s) \quad (8)$$

和补偿后的检测残差响应 r_{rb} 为:

$$r_{rb}(s) = Q(s)[r(s) - r_{dc}(s)], \quad (9)$$

其中, $Q(s)$ 代表一后置低通滤波器或带通滤波器. 设置该滤波器可增加故障检测设计的自由度. 对多故障和多干扰, 可设计多个滤波器, 使每一个滤波器只对应一特定故障或干扰, 这样可改善检测效果, 同时低通滤波器可过滤噪声. 当然设置该滤波器会延迟对故障的检测, 因此要根据实际系统来设计和选择滤波器 $Q(s)$. 另外, 这里采用简化模型而不是全阶(五阶)模型来补偿, 主要是为了简化设计任务和提高检测时的计算速度. 仿真表明, 简化模型能很好的近似五阶模型和实际舵机系统. 采用干扰补偿方法的舵机鲁棒故障检测能更有效的检测极小幅值故障. 在无故障情况下, 根据式(8)和(9)并考虑式(7), 也可计算出干扰补偿下的自适应阈值.

6 故障检测仿真(Simulations of fault detection)

仿真是在 MATLAB 的 SIMULINK 环境下进行的. 记录舵机的输入和输出. 采样周期为 0.03s, 采样时间为两个周期(6s). 控制信号:

$$u(t) = 0.65\sin(2\pi \cdot t/3). \text{ 滤波器 } Q(s) = 1.$$

6.1 舵机物理参数 (Physical parameters of the hydraulic servo)

已知:

$$P_s = 14(\text{MPa}), \quad q_0 = 4.3(\text{L}/\text{min}), \\ K_v = 4.94 \cdot 10^{-2}(\text{V}/\text{V}), \quad K_{fv} = 1.73 \cdot 10^{-2}(\text{V}/\text{V}), \\ K_i = 1.0 \cdot 10^2(\text{mA}/\text{V}), \quad \omega_{sv} = 628(\text{rad}/\text{s}),$$

$$\zeta_m = \zeta_h = 0.45, \quad A = 1.81 \cdot 10^{-3}(\text{m}^2), \\ E = 7.0 \cdot 10^8(\text{N}/\text{m}^2), \quad m = 90(\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}), \\ K_{fx} = 0.38(\text{V}/(\text{°})), \quad K_t = 4.23 \cdot 10^5(\text{N} \cdot \text{m}/(\text{°})), \\ K_{cr0} = 2.51 \cdot 10^{-11}(\text{m}^5/\text{N} \cdot \text{s}), \\ R = 4.1 \cdot 10^{-2}(\text{m}), \quad K_x = 1.39 \cdot 10^3((\text{°})/\text{m}),$$

其它参数可根据这些基本参数计算出.

6.2 干扰信号设置(Definitions of disturbances)

a) 模型降阶误差; b) 流量压力波动干扰: $dq(t) = 10^{-6}q_0\sin(10 \cdot t + 0.25)$; c) 负载干扰 $F_L(t)$: 负载干扰信号设置为一组方波信号; d) 总流量压力系数 K_{cr} 变化, 其变化规律为: $K_{cr} = K_{cr0} \pm a_{hcr}\sin(10 \cdot t)$. K_{cr0} 是标称总流量压力系数, a_{hcr} 是一表示变化强度的系数.

6.3 故障设置(Definitions of faults)

仿真仅考虑舵机中三处故障: 控制信号故障 $f_u(t)$, 伺服放大器故障 $f_i(t)$ 和测量传感器(电位计)故障 $f_s(t)$. 故障信号 $f_u(t)$ 和 $f_i(t)$ 设置为突变故障, 其数学表达式省略. 故障 f_s 设置为缓变故障. 其表达式省略.

6.4 采用自适应阈值但无干扰补偿时, 故障检测结果 (Simulation results using adaptive threshold in case of no disturbance compensation)

对多种干扰和故障情况做了仿真和实验研究, 由于篇幅有限, 这里仅给出部分故障检测的结果. 图 3 和图 4 分别表示, 在故障幅值非常小时, 检测系统对伺服放大器故障和角位移传感器故障的检测结果.

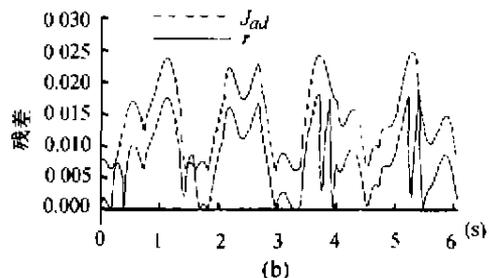
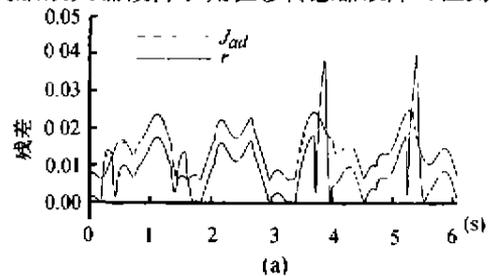
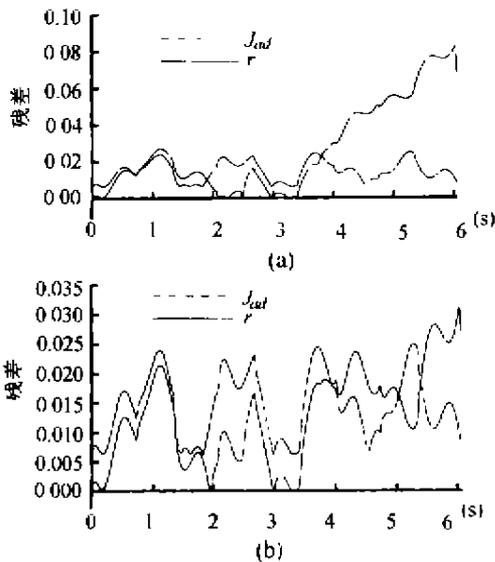


图 3 伺服放大器故障 f_i 下的残差

Fig. 3 The detection residuals in case of the servo amplifier fault f_i

图 4 角位移传感器故障 f_a 下的残差Fig. 4 The detection residuals in case of the angular-displacement sensor fault f_a

从图 3 和图 4 看出,除了对极小幅值故障图 3(b),4(b)没有检测出来或延迟检测出来外,故障检测系统能快速、有效和可靠地检测出突变性和缓变故障.总之,检测结果表明:基于舵机简化模型观测器的故障检测方法是有效故障检测方法,能检测出故障的大小和形状等特征.采用自适应阈值,可在一定程度上实现鲁棒故障检测,可快速地检测出较小的故障,不但能检测出突变故障,也能检测出缓变故障发生.但由于观测器残差信号受控制信号周期特征、模型降阶误差、负载干扰、流量压力干扰等影响,在故障检测过程中,还存在极小故障难以检测出或有漏报和延迟,因此还须寻求更有效的检测方法.

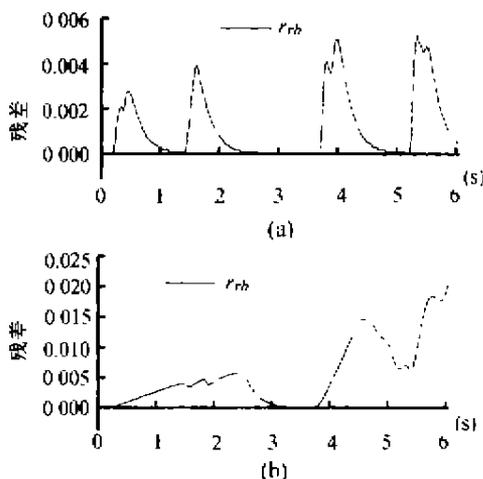


图 5 干扰补偿下,突变和缓变故障下的残差

Fig. 5 After using disturbance compensation, the detection residuals in case of the abrupt and drift faults

6.5 干扰补偿下的故障检测结果 (Simulation results using both disturbance compensation and adaptive threshold)

在同样的仿真条件下,采用干扰补偿方法,对图 3(b),图 4(b)所示情况进行再检测,结果如图 5 所示.

从图 5 看出,采用干扰补偿方法,即使不采用自适应阈值,检测系统也能更快速、有效地检测出极小幅值和缓变故障,特别是能检测出多故障及故障的形状特征,为实现故障的诊断和分离提供可靠的条件.因此,在干扰信号可测量的情况下,采用干扰补偿方法的检测方法是一有效方法.

7 结论 (Conclusion)

仿真结果表明:基于舵机简化模型观测器和自适应阈值的故障检测方法是有效的.该检测方法,不仅能检测出小幅值突变、缓变故障,而且能检测出多故障.采用干扰补偿方法,可更有效快速的检测出极小幅值故障,特别是可检测出故障的形状特征,为故障的诊断和容错提供有效途径.

参考文献 (References)

- [1] Watton J. Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Fluid Power Systems[M]. Wales Cadif, 1992
- [2] Chow E Y and Willsky A S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1984, 29(7):603-614
- [3] Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection[J]. International Journal Control, 1995, 59(4):955-981
- [4] Chen J, Patton R J and Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters[J]. International Journal Control, 1996, 63(1):85-105
- [5] Emami-Naeini A, Akhter M M and Rock S M. Effect of model uncertainty on failure detection—the threshold selector[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(12):1106-1115

本文作者简介

董选明 1963 年生,现为中国科学院自动化所复杂系统开放实验室博士后.目前研究方向:可重构容错控制,鲁棒故障诊断,FDIA 等.

谭民 1962 年生,现为研究员,博士生导师,中国科学院自动化研究所复杂系统工程学开放实验室主任.研究兴趣为故障诊断与可靠性、复杂系统控制理论及应用,制造系统以及先进机器人控制等.

袁丽华 1935 年生,现为北京航空航天大学自动控制系教授,博士生导师.研究方向:状态监测与故障诊断,优化设计,流体传动及控制等.

王占林 1935 年生,现为北京航空航天大学自动控制系教授,博士生导师.研究方向:自动控制,流体传动及控制等.