

基于观测器的非线性不确定系统鲁棒故障检测新方法

朱喜华[†], 李颖晖, 李 宁, 韩建定

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对非线性不确定系统的鲁棒故障检测问题, 提出了一种采用统计理论的新方法. 通过设计全阶故障观测器产生残差信号, 将鲁棒故障检测观测器设计问题转化为 H_∞ 优化问题; 利用 H_∞ 范数描述故障检测的鲁棒性, 保证系统的抗干扰能力, 同时引入 H_2 范数, 确保对故障信号的灵敏度; 应用线性矩阵不等式技术给出了该设计问题解存在的条件和求解方法. 将统计理论用于故障检测阈值的确定, 充分考虑了残差信号的随机特性, 使故障决策更加准确和可靠. 最后通过仿真实例验证了本文方法的有效性.

关键词: 观测器设计; 非线性不确定系统; 线性矩阵不等式; 统计理论; 鲁棒故障检测

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A

Novel observer-based robust fault detection method for nonlinear uncertain systems

ZHU Xi-hua[†], LI Ying-hui, LI Ning, HAN Jian-ding

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China)

Abstract: For the robust fault detection in nonlinear uncertain systems, we propose a novel method based on the statistical theory. The residual is generated after the full-order fault observer is designed, and the robust fault detection problem is formulated as an H-infinity optimization problem. The robustness of the fault detection is described by H-infinity norm, so the capacity of resisting disturbances is ensured. Besides, the H_2 norm is introduced to ensure the sensitivity to faults. By using the linear matrix inequality techniques, we derive the solvable conditions of this optimization problem and obtain the solutions as well. Statistical theory is used for determining the threshold of the fault detection. Taking account of the randomness of the residual makes the fault detection results more exact and credible. The validity of this proposed approach is illustrated by a numerical example.

Key words: observer design; nonlinear uncertain system; linear matrix inequality; statistical theory; robust fault detection

1 引言(Introduction)

故障诊断是一门综合性的技术, 其研究涉及多门学科, 如现代控制理论、可靠性理论、信息处理和模式识别等, 故障诊断的任务包括故障检测、故障隔离、故障识别和故障评价与决策等, 其中故障检测就是根据一定的准则判断系统是否发生了故障^[1-2]. 现有故障检测方法主要可以分为基于信号处理的方法、基于知识的方法和基于模型的方法3种. 基于模型的方法是一种广泛应用的故障检测方法, 近20年来受到了国内外控制界的高度重视和广泛研究, 并取得了大量研究成果^[3-6]. 其中, 基于观测器的故障检测方法在众多的方法中实用性最强, 因而得到了广泛的研究和发展, 常见的方法有基于未知输入观测器的故障检测、基于自适应观测器的故障检

测、基于滑膜观测器的故障检测以及基于线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)或 H_∞ 鲁棒观测器的故障检测等^[7-10].

线性系统都是经过一定的简化处理得到的理想模型, 并不能准确描述系统的实际动态, 即使是非线性模型, 在实际运行过程中也不可避免地要受到各种不确定性因素的影响, 如建模误差、测量噪声和外界干扰等, 因而鲁棒的故障检测方法受到了日益重视和广泛关注^[11]. 然而, 目前关于故障检测的研究目前主要集中于线性系统, 已取得了不少理论成果, 但实际中几乎所有的系统都存在不同程度的非线性, 因此, 研究非线性系统的故障检测具有重要的科学意义和工程实用价值. 近年来对非线性系统的故障诊断研究也有很大进展: 文献[12]采用微分几

何的方法设计状态观测器, 以检测非线性系统的故障; 文献[13]采用迭代线性矩阵不等式(LMI)的方法, 对带有非线性摄动不确定线性系统的故障诊断问题进行了研究; 文献[14]设计了 H_∞ 鲁棒故障检测滤波器对一类受时变时滞影响的非线性不确定系统进行故障检测, 将故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题.

本文针对一类典型非线性不确定性系统, 将故障检测观测器的设计问题转化为 H_∞ 优化问题, 通过 H_∞ 范数和 H_2 范数描述残差信号对模型误差、外界扰动等的鲁棒性和对故障的灵敏性. 该问题解的形式和观测器增益矩阵的求解方法通过线性矩阵不等式给出. 对于故障检测阈值的确定, 本文采用了统计理论的方法, 充分考虑残差信号的随机特性. 文章最后的仿真实例说明了本文方法的有效性.

2 故障检测问题描述(Description of fault detection)

考虑如下的非线性不确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + g(t, x(t)) + \\ \quad E_d d(t) + E_f f(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ 分别表示系统的状态和控制输入; $y(t)$ 为系统输出; $g(t, x(t))$ 为已知非线性向量函数且满足 $g(t, 0) = 0$, $\|g(t, x(t)) - g(t, v(t))\| \leq \delta \|x(t) - v(t)\|$, δ 为已知正数; $d(t) \in \mathbb{R}^{n_d}$ 表示包括干扰、噪声或界定在 $\|d\| \leq \Delta_d$ 范围内的模型结构不确定等未知输入; $f(t) \in \mathbb{R}^m$ 表示系统必须检测出来的所有可能的加性故障即执行器故障、元部件故障和传感器故障等未知输入; $A, B, C, D, E_d, E_f, F_d, F_f$ 为已知矩阵或向量.

假设系统(1)满足以下条件^[15]:

- 1) 矩阵 A 渐近稳定;
- 2) (C, A) 可检测;
- 3) $\begin{bmatrix} A - j\omega I & E_d \\ C & F_d \end{bmatrix}$ 对于所有 ω 行满秩.

对系统(1)设计如下的全阶故障观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t), \end{cases} \quad (2)$$

其中 L 为观测器的增益矩阵, 满足 $(A - LC)$ 稳定. 定义系统状态估计误差和残差分别为

$$\begin{cases} e(t) = x(t) - \hat{x}(t), \\ r(t) = y(t) - \hat{y}(t). \end{cases} \quad (3)$$

则残差的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = \bar{A}e(t) + g(t, x(t)) + \bar{E}_d d(t) + \bar{E}_f f(t), \\ r(t) = Ce(t) + F_d d(t) + F_f f(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\bar{A} = A - LC$, $\bar{E}_d = E_d - LF_d$, $\bar{E}_f = E_f - LF_f$.

将式(4)中的非线性项 $g(t, x(t))$ 在 $e(t) = 0$ 处通过泰勒公式展开, 以传递函数的形式表示为

$$r(s) \approx r_d(s) + r_f(s) = T_{rd}(s)d(s) + T_{rf}(s)f(s), \quad (5)$$

其中: $T_{rd}(s) = C(sI - \bar{A})\bar{E}_d^{-1} + F_d$, 表示包括干扰、噪声或界定在 $\|d\| \leq \Delta_d$ 范围内的模型不确定性等未知输入到残差的传递函数; $T_{rf}(s) = C(sI - \bar{A})\bar{E}_f^{-1} + F_f$, 表示系统必须检测出来的所有可能的加性故障即执行器故障、元部件故障和传感器故障等未知输入到残差的传递函数. 这样, 系统(1)故障检测问题即为设计故障观测器式(2)的增益矩阵 L , 使其满足如下性能指标^[16]:

- 1) 无故障时, 系统(4)渐近稳定;
- 2) 对于给定的性能指标 $\eta > 0$, 由干扰、噪声和模型误差等信号 $d(t)$ 到残差 $r(t)$ 的传递函数 $T_{rd}(s)$ 满足 $\|H\|_\infty = \|T_{rd}(s)\|_\infty \leq \eta$;
- 3) 故障发生时, 对于给定的性能指标 $\gamma > 0$, 故障信号 $f(t)$ 到残差 $r(t)$ 的传递函数 $T_{rf}(s)$ 满足 $\|H\|_- = \|T_{rf}(s)\|_- > \gamma$.

其中: $\|H\|_\infty$ 范数描述残差对干扰、噪声和模型误差等信号的抑制作用, 为系统的故障检测鲁棒性指标; $\|H\|_-$ 范数描述残差对故障的最小灵敏度, 为系统的故障检测灵敏度指标.

理想情况下, 系统无故障即 $f(t) = 0$ 时, 残差近似为均值为零的高斯白噪声序列; 系统出现故障即 $f(t) \neq 0$ 时, 残差将不满足白噪声特性, 从而检测出故障. 残差评价的基本思想是设计有效的决策逻辑和阈值, 使决策函数对故障高度敏感, 同时对系统测量噪声等不确定因素具有较强的鲁棒性, 一旦故障残差超出阈值, 立即报警. 一般是利用残差的评价函数 $J(r(t))$ 与选定的阈值 J_{th} 进行比较, 进而判断故障是否发生, 其逻辑决策规则如下:

$$\begin{cases} J(r(t)) \leq J_{th}, \text{ 正常}, \\ J(r(t)) > J_{th}, \text{ 故障}. \end{cases} \quad (6)$$

一般情况下, 阈值都是根据经验取一较小的常数(正数). 然而实际系统存在模型误差、噪声和干扰等不确定性因素, 使残差成为一个随机过程. 在这种情况下, 残差无故障时的条件概率密度曲线与有故障时的条件概率密度曲线存在交叠, 如果阈值取得不恰当, 很容易出现虚警和漏检^[17], 严重影响故障检测的精度. 考虑到实际系统具有很大程度的模型误差等不确定性因素, 其残差是一个近似高斯分布的非平稳随机过程. 基于残差信号的特性, 本文依据随机理论来确定故障检测的阈值.

设残差矢量的均值和方差分别为

$$\begin{cases} \mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r(n), \\ \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [r(n) - \mu]^2. \end{cases} \quad (7)$$

求取均值 μ 的 $(1-\alpha)$ 置信区间,即满足

$$p(\bar{\mu} - \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\mu_{1-\alpha/2}, \bar{\mu} + \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\mu_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha, \quad (8)$$

其中: $(1-\alpha)$ 为置信水平或置信度, $\mu_{1-\alpha/2}$ 为均值 μ 的 $(1-\alpha/2)$ 分位数.在工程实践中,置信度通常取 $0.95 \sim 0.99$.

由此可得残差矢量的阈值函数为

$$J_{th} = \bar{\mu} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\mu_{1-\alpha/2} + r_0. \quad (9)$$

式(9)中 r_0 为系统正常工作由于建模误差和外界干扰等不确定因素引起的无故障残差,理想情况下 $r_0 = 0$.为了降低故障检测的虚警率,本文中阈值取为置信区间的上界.

3 鲁棒故障检测观测器的设计(Design for robust fault detection observer)

引理 1 如果系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bd(t) + g(t, x(t)), \\ y(t) = Cx(t) + Dd(t), \end{cases}$$

满足 $\|g(t, x(t)) - g(t, v(t))\| \leq \delta \|x(t) - v(t)\|$ ($\delta > 0$ 为已知数),且存在常数 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$ 和对称正定矩阵 P, Q ,使如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} M & 0 & P & P & PB+C^T D \\ 0 & -Q & 0 & 0 & 0 \\ P & 0 & -\lambda_1 I & 0 & 0 \\ P & 0 & 0 & -\lambda_2 I & 0 \\ B^T P + D^T C & 0 & 0 & 0 & -(\eta^2 - D^T D)I \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

则系统渐近稳定,且有 $\|y(t)\|_\infty \leq \eta \|d(t)\|_\infty$,其中: $M = PA + A^T P + Q + C^T C + \lambda_1 \delta^2 I$, $\eta > 0$ 为给定常数.

引理 2 如果系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bd(t) + g(t, x(t)), \\ y(t) = Cx(t) + Dd(t), \end{cases}$$

满足 $\|g(t, x(t)) - g(t, v(t))\| \leq \delta \|x(t) - v(t)\|$ ($\delta > 0$ 为已知数),且存在常数 $\rho_1 > 0$, $\rho_2 > 0$ 和对称正定矩阵 V, K ,使如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} N & 0 & V & V & VB-C^T D \\ 0 & -K & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & -\rho_1 I & 0 & 0 \\ V & 0 & 0 & -\rho_2 I & 0 \\ B^T V - D^T C & 0 & 0 & 0 & (\gamma^2 I - D^T D) \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

则系统渐近稳定,且有 $\|y(t)\|_- > \gamma \|d(t)\|_-$.其中: $N = VA + A^T V + K - C^T C + \rho_1 \delta^2 I$, $\gamma > 0$ 为给定常数.

定理 1 对于给定常数 $\eta > 0$,如果存在常数 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$,以及正定对称矩阵 P, Q, V, K ,满足矩阵不等式 $[S_{i,j}]_{10 \times 10} < 0$,则由系统(1)和状态观测器(2)得到的残差系统(4)渐近稳定并满足性能指标 $\|H\|_\infty = \|T_{rd}(s)\|_\infty \leq \eta$.矩阵 $[S_{i,j}]_{10 \times 10}$ 的元素如下:

$$S_{1,1} = P_1 A + A^T P_1 - KC - C^T K^T + Q_{11} + C^T C + \lambda_1 \delta^2 I,$$

$$S_{1,2} = (VC)^T + Q_{12}, S_{1,5} = S_{1,7} = P_1,$$

$$S_{1,9} = P_1 E_d + C^T F_d - K F_d, S_{2,1} = VC + Q_{12}^T,$$

$$S_{2,2} = P_2 A + A^T P_2 + Q_{22} + \lambda_1 \delta^2 I$$

$$S_{2,6} = S_{2,8} = P_2, S_{2,9} = V F_d, S_{2,10} = P_2 B$$

$$S_{3,3} = -Q_{11}, S_{3,4} = -Q_{12}, S_{4,3} = -Q_{12}^T,$$

$$S_{4,4} = -Q_{22}, S_{5,1} = P_1, S_{5,5} = -\lambda_1 I,$$

$$S_{6,2} = P_2, S_{6,6} = -\lambda_1 I, S_{7,1} = P_1, S_{7,7} = -\lambda_2 I,$$

$$S_{8,2} = P_2, S_{8,8} = -\lambda_2 I, S_{9,2} = F_d V^T,$$

$$S_{9,1} = (P_1 E_d + C^T F_d - K F_d)^T, S_{10,2} = (P_2 B)^T,$$

$$S_{9,9} = -(\eta^2 - F_d^T F_d)I, S_{10,10} = -\eta^2 I.$$

其余未列出元素均为零,且有 $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$,观

测器增益矩阵为 $L = P_1^{-1} S$.

定理 2 对于给定常数 $\gamma > 0$,如果存在常数 $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$,以及正定对称矩阵 P, Q, V, K ,满足矩阵不等式 $[Z_{i,j}]_{9 \times 9} < 0$,则由系统(1)和状态观测器(2)得到的残差系统(4)渐近稳定并满足性能指标 $\|H\|_- = \|T_{rf}(s)\|_- > \gamma$.矩阵 $[Z_{i,j}]_{9 \times 9}$ 的元素如下:

$$Z_{1,1} = P_1 A + A^T P_1 - KC - C^T K^T + Q_{11} - C^T C + 2\lambda_1 \delta^2 I,$$

$$Z_{1,2} = (VC)^T + Q_{12}, Z_{1,5} = Z_{1,7} = P_1,$$

$$Z_{1,9} = P_1 E_f - C^T F_f - K F_f, Z_{2,1} = VC + Q_{12}^T,$$

$$Z_{2,2} = P_2 A + A^T P_2 + Q_{22} + 2\lambda_1 \delta^2 I, Z_{2,9} = V F_f,$$

$$Z_{2,6} = Z_{2,8} = P_2, Z_{3,3} = -Q_{11}, Z_{3,4} = -Q_{12},$$

$$Z_{4,3} = -Q_{12}^T, Z_{4,4} = -Q_{22}, Z_{5,1} = -P_1,$$

$$Z_{5,5} = -\lambda_1 I, Z_{6,2} = -P_2, Z_{6,6} = -\lambda_1 I,$$

$$Z_{7,1} = P_1, Z_{7,7} = -\lambda_2 I, Z_{8,2} = P_2,$$

$$Z_{8,8} = -\lambda_2 I, Z_{9,1} = (P_1 E_f - C^T F_f - K F_f)^T,$$

$$Z_{9,2} = (V F_f)^T, Z_{9,9} = \gamma^2 I - F_f^T F_f.$$

其余未列出元素均为零,且有 $P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$,观

测器增益矩阵为 $L = P_1^{-1}S$.

定理 3 如果存在常数 $\gamma > \eta > 0, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 和正定对称矩阵 P, Q, V, K , 使得矩阵不等式 $[S_{i,j}]_{10 \times 10} < 0$ 和 $[Z_{i,j}]_{9 \times 9} < 0$ 同时成立, 且观测器增益矩阵为 $L = P_1^{-1}S$, 则由系统(1)和状态观测器(2)得到的残差系统(4)渐近稳定并满足性能指标 $\|H\|_\infty = \|T_{rd}(s)\|_\infty \leq \eta$ 和 $\|H\|_- = \|T_{rf}(s)\|_- > \gamma$.

受篇幅限制, 以上引理和定理文中不作证明.

4 仿真验证(Simulation for validation)

电动静液作动器(electro-hydrostatic actuator, EHA)因其优越的性能成为未来机载作动系统的发展趋势, 本文对其进行了仿真研究. 电动静液作动器由电气系统和液压系统构成, 是典型的非线性不确定系统. 考虑EHA为一个5阶系统, 状态变量为 $x(t) = [i \ \omega \ \Delta P \ x_t \ \dot{x}_t]^T$, 依次表示驱动电机绕组电流、电机转速、负载压力、作动筒中活塞位置和活塞速度; 输入向量为 $u = (U_c, F_{ex})^T$, 分别表示电枢电压和对活塞施加的外力; 输出为作动筒位置信号. 对其建立式(1)形式的不确定非线性状态空间模型, 可得

$$A = \begin{bmatrix} -434.78 & -86.95 & 0 & 0 & 0 \\ 181.82 & -0.382 & -1.09 & 0 & 0 \\ 0 & 1.058e+6 & -2.204 & 0 & -1.675e+4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 9.5e+10 & 0 & -0.075 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 434.78 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -5.0e-4 \end{bmatrix},$$

$$g(t, x(t)) = \begin{bmatrix} 1.5 \sin t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5 \sin t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 \sin t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.5 \sin t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5 \sin t \end{bmatrix} x(t),$$

$$E_d = [0.2 \ 0.5 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.4]^T,$$

$$E_f = [0.6 \ 0.4 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.2]^T,$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]x(t) + 0.5d(t) + 0.2f(t).$$

根据上文的理论, 在MATLAB中用LMI工具箱进行求解, 得: $\eta = 0.37, \gamma = 2.64$, 观测器增益矩阵 $L = [3.2144 \ 1.3617 \ 5.0532 \ 4.1511 \ 2.0263]^T$.

假设系统的干扰、噪声和模型误差等未知输入扰动信号 $d(t)$ 是能量为0.5的白噪声, 考虑两种故障信号: $f_1(t)$ 是幅值为1的方波信号($2s \leq t \leq 3s$); $f_2(t)$ 为的幅值为1的正弦信号($t \geq 2s$), 仿真时间

均为5s, 系统输入为单位阶跃信号. 每种故障均仿真20次, 为了计算简便, 取无故障残差为理想情况, 即 $r_0 = 0$, 置信度 $(1 - \alpha) = 0.95$. 对每次仿真得到的残差求均值和方差, 并根据所有仿真结果(均值和方差)的均值按式(9)求得故障检测的阈值为 $J_{th} = 1.1945$ (方波故障信号)和 $J_{th} = 1.2166$ (正弦波故障信号). 仿真结果如图1和图2所示.

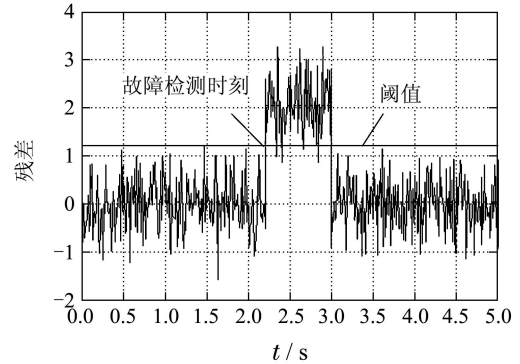


图1 方波故障信号的残差曲线

Fig. 1 Residual curve of square fault signal

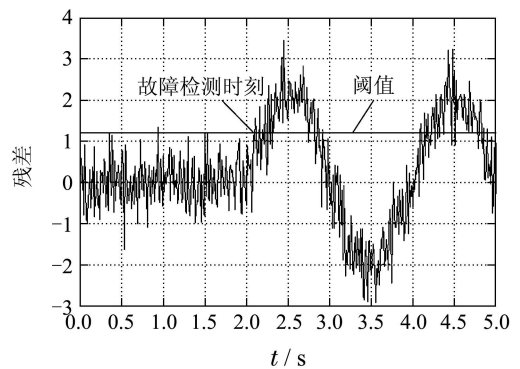


图2 正弦波故障信号的残差曲线

Fig. 2 Residual curve of sinusoidal fault signal

仿真结果表明, 本文所设计的故障检测观测器对故障信号有较强的灵敏性, 同时对外界干扰等未知信号也有较强的鲁棒性. 同时, 本文所设计的故障检测评价函数能及时准确地对故障进行报警, 对单位方波故障信号和正弦故障信号的检测时间分别为0.2s, 0.16s(具体计算方法为故障信号注入时刻与残差超出故障检测阈值时刻的时间间隔, 不考虑延迟), 可满足故障检测的要求.

5 结论(Conclusions)

本文研究了非线性不确定系统的鲁棒故障检测问题. 首先通过设计全阶故障观测器获得残差信号, 将基于状态观测器的鲁棒故障检测观测器设计问题转化为 H_∞ 优化问题, 应用线性矩阵不等式(LMI)技术给出了该设计问题解存在的条件和求解方法. 本文设计的故障检测观测器不仅能敏感故障信号, 而且对外界干扰等不确定性输入有较强的鲁棒性. 本

文最大的创新在于将统计理论用于故障检测阈值的确定,充分考虑了残差信号的随机特性,使故障决策更加准确和可靠.文章最后针对机载电动静液作动器的仿真实例证明了所提方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] 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. *Modern Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [2] 黄鹤,谢德晓,韩笑冬,等.具有随机丢包的一类网络控制系统的故障检测[J].控制理论与应用,2011,28(1): 79-86.
(HUANG He, XIE Dexiao, HAN Xiaodong. Fault detection for networked control system with random packet dropout [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(1): 79-86.)
- [3] CHEN J, PATTON R J. *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [4] FRANK P M, DING S X, KOEPPEN S B. Current development in the theory of FDI [C] // *Proceedings of the Safeprocess 2000*. Budapest: Pergamon, 2000: 16-27.
- [5] KINNAERT M. Fault Diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems-a tutorial [C] // *Proceedings of the 15th International Workshop on Principles of Diagnosis*. Washington: Elsevier IFAC, 2003: 37-50.
- [6] 马传峰,钟麦英,何宁.线性时滞系统故障检测滤波器设计 H_∞ 优化方法[J].控制与决策,2006,21(5): 550-554.
(MA Chuanfeng, ZHONG Maiying, HE Ning. H_∞ approach to fault detection filter for linear time-delay systems [J]. *Control and Decision*, 2006, 21(5): 550-554.)
- [7] YAN X G, EDWARDS C. Robust sliding mode observer-based actuator fault detection and isolation for a class of nonlinear systems [C] // *Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference 2005*. Seville: IEEE, 2005, 11: 12-15.
- [8] JIANG B, FAHMIDA N C. Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2005, 342(7): 725-736.
- [9] YAN X G, EDWARDS C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer [J]. *Automatica*, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [10] PERTEW A M, MARQUEZ H J, ZHAO Q. LMI-based senso fault diagnosis for nonlinear Lipschitz systems [J]. *Automatica*, 2007, 43(8): 1464-1469.
- [11] 王洪江,孙保民,田进步.一种非线性系统鲁棒故障检测的方法[J].中国电机工程学报,2007,27(5): 81-86.
(WANG Hongjiang, SUN Baomin, TIAN Jinbu. A new approach to robust fault detection of nonlinear dynamic systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(5): 81-86.)
- [12] ARUN T V, MARIOS M P, AMT R C. Fault diagnosis: of differential-algebraic systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(2): 143-152.
- [13] ZHONG M Y, YE TAO, CHEN G Y, et al. An ILMI approach to RFD for uncertainty linear systems with nonlinear perturbations [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(2): 297-300.
- [14] 邱爱兵,文成林,姜斌.采样数据系统最优诊断观测器设计[J].控制理论与应用,2010,27(8): 979-984.
(QIU Aibing, WEN Chenglin, JIANG Bin. Optimal diagnostic observer for sampled-data systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(8): 979-984.)
- [15] 彭涛,桂卫华, DING S X. 一种故障检测滤波器的多目标优化设计方法[J].控制与决策,2005,20(7): 773-777.
(PENG Tao, GUI Weihua, DING S X. Multi-objective optimal design approach to fault detection filters [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(7): 773-777.)
- [16] 颜秉勇,田作华,施颂椒.非线性摄动时滞系统的 H_∞/H_- 鲁棒故障检测[J].上海交通大学学报,2008,42(2): 253-256.
(YAN Bingyong, TIAN Zuohua, SHI Songjiao. H_∞/H_- robust fault diagnosis for time-delay system with nonlinear perturbations [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2008, 42(2): 253-256.)
- [17] 姜云春.基于模型的控制系统鲁棒故障诊断技术研究[D].长沙:国防科技大学,2006.
(JIANG Yunchun. *Research on robust model-based fault diagnosis technology for control system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology of China, 2006.)

作者简介:

朱喜华 (1985-),男,博士研究生,主要研究方向为非线性系统故障检测、故障预测与健康管理等, E-mail: zhx2004_kgd@sina.com;

李颖晖 (1966-),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为非线性系统控制及故障诊断、健康管理等, E-mail: liyinghui66@163.com;

李宁 (1985-),男,博士研究生,主要研究方向为非线性系统故障诊断与容错控制, E-mail: dorisyu423@yahoo.com.cn;

韩建定 (1971-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机载非线性系统容错控制及故障诊断等, E-mail: hanjd@163.com.