

## 闭环系统故障诊断技术综述

周东华<sup>1,2</sup> 刘洋<sup>1,2</sup> 何潇<sup>1,2</sup>

**摘要** 本文着眼于闭环环境下动态系统中的故障诊断问题. 介绍了目前闭环系统故障诊断的研究意义, 特别关注了开闭环故障诊断的不同, 并概述了现有的闭环系统故障诊断方法. 通过仿真实验比较了典型开环系统和闭环系统中故障诊断的不同性能. 最后探讨了闭环系统故障诊断研究中亟待解决的问题以及未来可能的研究方向.

**关键词** 闭环系统, 反馈控制, 故障检测, 故障分离, 故障诊断

**引用格式** 周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述. 自动化学报, 2013, 39(11): 1933–1943

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.01933

### Review on Fault Diagnosis Techniques for Closed-loop Systems

ZHOU Dong-Hua<sup>1,2</sup> LIU Yang<sup>1,2</sup> HE Xiao<sup>1,2</sup>

**Abstract** Fault diagnosis for closed-loop systems is reviewed in this paper. The research background of fault diagnosis problem for closed-loop systems is introduced, and special attentions are paid to the study on the differences between fault diagnosis for open-loop systems and closed-loop systems. Existing fault diagnosis methods for closed-loop systems are also summarized. Some simulation examples are employed to illustrate the different fault diagnosis performances between typical open-loop systems and closed-loop systems. Finally, some challenging problems and promising research directions are pointed out.

**Key words** Closed-loop systems, feedback control, fault detection, fault isolation, fault diagnosis

**Citation** Zhou Dong-Hua, Liu Yang, He Xiao. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1933–1943

随着科学技术的发展, 现代工业系统的规模和复杂程度都在日益提高. 这类复杂大系统一旦发生故障, 就可能带来重大的财产损失和人员伤亡. 因此, 如何提高系统在运行中的安全性与可靠性, 减少生产生活中的安全隐患, 成为现代工业系统中的重大问题. 故障诊断技术是提高系统运行可靠性、降低系统运行风险的重要方法. 故障诊断技术对系统运行状况进行监测, 判断是否有故障发生, 同时确定故障发生的时间、位置、大小和种类等情况, 即完成故障检测、分离和估计. 在过去的数十年时间里, 故障诊断技术得到了广泛研究, 大量研究成果得到发表<sup>[1–12]</sup>.

在真实工业系统中, 为了使设备实现某种预定

的生产目标, 同时满足系统运行的稳定性、鲁棒性等要求, 通常需要对系统施加反馈控制. 目前在工业生产中已有大量的闭环控制律得到了广泛的应用, 如比例积分微分控制、最优控制、鲁棒控制等. 然而, 目前很多故障诊断研究都是针对开环系统进行的, 没有考虑反馈控制律对于系统故障诊断的影响, 这种不足局限了这些方法在实际系统中的应用. 由于闭环控制律的引入, 系统的运行特性发生变化, 不同变量之间的函数关系发生了更改, 因此针对开环系统的故障诊断方法在闭环系统中可能不再适用或需要重新设计. 因此有必要在闭环前提下研究故障诊断方法, 以符合实际的工业需求, 解决更实际的生产安全性问题.

目前有部分学者认为, 与开环系统相比, 闭环系统中的故障诊断性能下降主要由于如下两个原因<sup>[13]</sup>: 1) 反馈系统的引入通常会使得系统对于外部扰动更鲁棒, 因此当故障处于早期阶段或幅值较小时, 所带来的影响可能会被控制量所掩盖. 发生故障时残差信号可能仍在较小范围内变动, 使得故障难以被检测到, 导致了更高的漏报率. 2) 反馈控制可能使得故障在系统内传播, 导致多处信号发生异常. 以传感器故障为例, 在开环系统中, 某传感器发生的故障不会对系统中其他传感器造成影响, 其他传感器的测量信号仍然处于正常范围之内. 而在闭环系统

收稿日期 2013-06-02 录用日期 2013-06-26  
Manuscript received June 2, 2013; accepted June 26, 2013  
国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2010CB731800, 2009CB320602), 国家自然科学基金 (61210012, 61290324) 资助  
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB731800, 2009CB320602) and National Natural Science Foundation of China (61210012, 61290324)  
庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿  
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of *Acta Automatica Sinica*  
1. 清华大学自动化系 北京 100084 2. 清华信息科学与技术国家实验室 北京 100084  
1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 2. National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

中, 由于引入了反馈信号, 某个异常的测量值被反馈控制器采用之后, 可能导致控制信号偏离正常值, 进而通过反馈使得系统整体脱离正常工作范围, 此时其他传感器测量得到的也同样是异常信号. 这种故障传递现象也增加了故障分离的难度.

目前闭环系统的故障诊断研究内容主要是在给定的控制律下, 按照某种指标, 利用特定的方法对故障进行检测和分离. 但是与开环系统的故障诊断方法相比, 目前闭环系统的故障诊断研究成果仍然比较有限, 尤其是闭环反馈控制对故障诊断的影响这一问题, 还处于初步的探索阶段, 有待进一步深入研究. 本文旨在通过总结现有闭环系统故障诊断研究成果, 并通过仿真实验研究说明开闭环系统故障诊断的区别, 引起对于闭环系统故障诊断这一实际问题的重视, 为这一问题未来的研究提供一定的参考.

本文首先介绍了目前闭环系统故障诊断的研究现状, 特别关注了开闭环故障诊断的不同, 并概述了现有的闭环系统故障诊断方法. 之后基于三容水箱系统进行仿真实验研究, 分析开环系统故障诊断与闭环系统故障诊断效果的不同之处. 最后指出了闭环系统故障诊断存在的一些待解决问题以及未来可能的研究方向.

## 1 闭环故障诊断的研究现状

目前已有部分研究表明, 由于反馈控制的存在, 部分基于开环系统的故障诊断方法在闭环系统下无法取得很好的效果.

文献 [14] 研究了闭环控制对于感应电动机故障诊断的影响. 在开环系统中, 转矩电流功率谱可用于检测电气故障, 其中的负序部分可以用于检测定子故障, 边带部分可用来检测转子故障. 但是在闭环控制下, 这两部分频域特征被控制信号所掩盖. 该文通过仿真实验发现, 当电动机使用磁场定向控制时, 励磁电流的谱密度可以作为故障检测的指标. 该谱密度函数在两处特殊频率的频谱值与控制参数几乎无关, 但是与转子故障和定子故障有极强的相关性. 而转矩电流的功率谱都与控制增益和负载大小相关, 因此不能用作闭环系统的故障诊断.

基于线性化的四容水箱模型, 文献 [15] 考虑了系统中可能出现的加性故障和乘性故障, 在开环系统和闭环系统中分别进行了仿真实验, 以分析闭环控制对于故障诊断的影响. 文中使用基于观测器的故障诊断方法, 观测器的设计参考了文献 [16] 中的解耦观测器, 控制器使用了较为简单的比例积分控制, 故障类型包括四类加性故障、四类乘性故障. 仿真结果图表明, 在采用文献 [16] 中观测器进行故障状态估计和故障检测时, 针对加性故障, 闭环系统和开环系统得到的残差信号几乎一致; 而发生乘性故

障时, 闭环系统产生的残差信号绝对值与开环残差信号绝对值之间呈比例关系. 文章最后从理论上分析造成以上现象的原因: 利用解耦观测器进行估计时, 若线性时不变系统中发生加性故障, 从故障到残差的传递函数是由系统参数矩阵确定的, 与控制量无关; 但是发生乘性故障时, 这一传递函数显含系统的状态量和控制量, 因此闭环控制下的残差会发生变化.

文献 [17] 利用仿真表明了反馈控制可能会给故障分离造成影响. 文章考虑了一类含传感器故障的线性时不变系统, 需要对四个传感器进行故障定位. 控制器使用了比例积分控制, 故障诊断则使用了基于数据处理的主成分分析法 (Principal component analysis, PCA). 仿真结果表明, 当系统处于开环状态时, 若传感器 3 发生故障, PCA 方法可以准确的进行故障定位; 而当系统处于闭环状态时, 同样是传感器 3 发生故障, PCA 方法却将故障定位到传感器 1 上. 为了解决这个问题, 文章定义了反馈控制中的反馈不变子空间, 将系统进行线性变换, 在反馈不变子空间中使用 PCA 方法, 就可以得到正确的故障分离结果.

上述研究成果表明, 系统中反馈控制的引入, 会对故障诊断产生影响, 也给故障诊断带来了新的问题. 目前虽然已经有一些闭环系统故障诊断的成果, 但是从理论上分析闭环反馈控制对于故障诊断影响的研究很少. 1997 年, Niemann 等基于传递函数研究了闭环控制对故障诊断的影响<sup>[18]</sup>. 针对于线性时不变系统, 利用对应项一一匹配的方法构造残差. 若对应的控制律也是简单的线性控制, 且参数完全已知, 则开环系统中的残差与闭环系统中的残差之间存在着线性映射关系, 且控制项对残差的影响可以通过完全匹配的方法消除. 如果从系统外部输出到系统外部输入的反馈之间存在不确定性, 则无法实现控制量到残差信号的完全解耦, 此时开环系统残差与闭环系统残差之间的关系比较复杂, 难以直接分析, 而且与模型不确定性紧密相关. 文献 [19] 考虑了闭环控制对于线性系统参数故障的影响. 文中考虑了一种比较简单的故障情形: 系统可能受控于两组参数, 一组代表正常工作状态, 一组代表故障状态. 系统的控制目标是利用尽量小的控制能量, 保证正常系统和故障系统的输出不落到相同的范围中. 控制量分为两部分, 一部分是反馈信号, 另一部分是辅助信号, 前者负责保证系统可以实现某种指标, 如最小二次费用等, 后者则主要保证系统的正常输出与故障下的输出可以完全分开, 即保证故障的可检测性. 系统含加性干扰信号, 在计算费用时使用了针对未知干扰的最差情况. 通过合理地构造反馈增益和辅助信号, 在某些条件下可以保证闭环系统的费

用小于开环系统的费用. 虽然针对闭环系统中反馈控制对于故障诊断的影响已经存在如上少量研究成果, 但是整体来看此问题的研究还不够深入.

当闭环系统中故障参数已知时, 可以利用模型匹配方法进行故障诊断, 如已知卡死范围的执行器卡死故障、执行器或传感器完全失效等故障诊断问题. 文献 [20–23] 针对闭环系统中的传感器/执行器的卡死/漂移故障进行了研究, 并在一定条件下给出了可以进行故障分离的充分条件, 即构造了一组匹配式观测器, 这组观测器不仅保证对应的不同故障发生时生成的残差仍在零点邻域内, 而且保证其他种类故障发生时观测器输出残差的可能范围彼此无交集, 因此可以对于一定幅值的故障进行检测和分离. 文献 [24–28] 从系统层面进行考虑, 即在正常运行时和故障时的系统状态方程系统均已知的情况下, 实现故障的检测、估计和分离.

当系统中的故障完全未知时, 通常需要设计基于某种特定指标的滤波器对系统运行状况进行监测. 最小二乘是一种常见的估计指标, 其代表方法扩展 Kalman 滤波器在 1991 年就被用于解决线性二次型高斯控制下闭环蒸馏过程的故障诊断问题<sup>[29]</sup>, 并且长期得到学者的关注. 文献 [30–33] 基于最小二乘准则, 利用状态估计或参数辨识方法, 判断系统中有无故障发生并估计其幅值. 强跟踪滤波器基于正交原理, 在传统的最小二乘估计中增加渐消因子, 使估计对于系统的动态变化更灵敏, 对于噪声、模型不匹配更鲁棒, 这种优秀性能使得强跟踪滤波理论在闭环故障诊断中有很好的效果. 文献 [34–35] 对于比例积分微分控制下的闭环连续搅拌釜反应器中的执行器和传感器故障进行了研究. 将故障整理成等价偏差, 进而对系统的状态和等价偏差进行联合估计, 利用改进贝叶斯算法对等价偏差进行评价以检测故障. 当系统中存在着大量未知干扰时, 通常利用鲁棒估计的思路, 将各种干扰项对于估计结果的影响控制在一定的范围内. 文献 [36–40] 基于鲁棒估计研究了一类执行器故障诊断问题. 这些文献通过假设系统的未建模动态或外部干扰存在上界, 设计鲁棒故障检测器, 且部分成果涉及了故障分离问题. 文献 [41–43] 考虑了网络化控制系统中的故障检测和诊断问题. 利用 Lipschitz 条件限定非线性函数, 通过范数有界条件限定量化误差, 并采用随机序列描述网络中信号的传输时延.

以上闭环系统故障诊断方法中, 除去少量直接估计故障偏差值的方法之外, 基本思路都是通过构造某种指标的滤波器, 与系统真实输出比较得到残差, 通过对残差进行评价 (多为二次型评价函数) 以得到故障检测结果. 事实上残差评价是故障检测中非常重要的环节, 与故障检测准确率密切相关, 因此

如何选择合适的残差评价方法和阈值非常重要. 早在 1995 年, 文献 [44] 对于闭环非线性系统, 就使用了误差绝对值积分对系统进行监测, 判断系统中是否发生震荡. 文献 [45] 针对飞机的液压执行器故障, 提出了一种物理意义更强的故障检测指标. 由于系统的测量为位移信号, 而输入为力信号, 因此通过简单的计算就可以得出系统整体的能量变化. 考虑到机械内部的耗散, 在系统能量变化与输入能量之间差异较小时可认为系统内部无故障发生, 反之则存在故障. 虽然能量准则不是在所有系统中都适用, 但是在处理一些特殊系统时有很强的借鉴意义.

虽然目前基于模型的闭环故障诊断研究已经有部分成果, 但是在对反馈控制的处理上仍然存在很大不足. 几乎所有的文献都是在线性模型下, 利用完全匹配的方式, 在残差生成器中构造相同的控制项, 实现控制律和残差的完全解耦. 事实上这种方法有很大的局限性. 如果因为其他需要不能构造完全匹配模式的残差生成器, 则无法利用这种完全对应的方法处理控制项. 或者当系统模型参数不能精确已知, 如存在执行器系数矩阵不确定性的线性系统、非线性系统等, 也无法构造控制的完全匹配项. 同时, 计算得到的控制律在真实系统中也往往无法完全精确实现, 执行器也可能引入控制误差. 因此, 基于模型的闭环系统处理方法仍然存在大量问题, 需要进一步解决.

在真实的物理系统中, 往往存在大量强非线性、多变量、且机理极为复杂的情况. 在这一类系统中, 往往无法使用数学模型对系统进行较为精确的描述和近似. 在此情况下, 基于数据和基于知识的方法得到了广泛应用. 这些技术手段充分利用了测量信息和经验知识, 可用于复杂闭环系统的故障检测和诊断问题.

在基于数据处理的方法中, 频域分析是其中较为常见的一种方法, 通过对于系统频域响应的分析来判定系统是否正常运行. 在很多涉及电路的具体系统中, 频域方法都可以很好地进行故障诊断. 文献 [46–49] 针对各种实际系统的具体故障, 分别设计了特定的频域信号处理方式, 以检测和诊断故障. 此外包括定性趋势分析<sup>[50]</sup>, Hilbert-Huang 变换<sup>[51]</sup>等方法也在一些实际闭环系统的故障检测中得到应用.

在目前大量涌现的基于先验知识和机器学习的方法中, 闭环故障诊断中应用较广泛的主要是模糊数学和神经网络. 基于模糊数学的闭环系统故障诊断已经在实际系统中得到了应用, 如电网系统、液体传输设备、电镀气动阀门等<sup>[52–54]</sup>. 模糊数学可以从多个方面应用于闭环故障诊断, 模糊决策可用于进行故障判定<sup>[54–55]</sup>, 模糊单元可用于估计系统中的非线性成分<sup>[56–59]</sup>. 当原系统为模糊系统时, 也可以利

用模糊数学的方法对系统进行处理<sup>[60-61]</sup>. 神经网络可以用于各种复杂非线性系统的估计和逼近, 因此也可用于实际中复杂闭环系统的故障诊断, 如感应马达驱动器等<sup>[62]</sup>. 文献 [63-65] 利用神经网络构成的在线估计器监测系统状态或故障演化, 进而实现故障检测和诊断. 除了模糊和神经网络之外, 还有其他基于知识的方法应用于闭环系统的故障诊断问题中, 如最小二乘支持向量机<sup>[66-67]</sup>、多层感知机<sup>[68]</sup>等.

基于数据的方法让我们可以在无需已知系统精确模型的情况下实现故障诊断, 但是有时得到的诊断结果所对应真实系统的故障不够明确, 意义不清楚. 而且部分方法只针对特定系统的特定故障, 很难得到较为普遍的故障诊断方法与结论. 基于知识的故障诊断方法可以满足一定的要求, 但是这类方法也存在自身的局限. 真实系统运行时往往处于正常工作状态, 这导致了故障情况下的数据量往往有所欠缺, 不能为基于机器学习的方法提供足够多具有代表性的样本; 而且, 在复杂的实际系统中, 可能同时要多种可能的故障进行诊断, 在推理过程中若需要匹配的情况和决策规则数量过多, 可能导致搜索过程速度较慢, 效率较低, 这也限制了基于知识的方法在闭环故障诊断中的应用.

## 2 仿真研究

为了深入探讨开环和闭环控制下系统故障诊断性能的异同, 本节基于三容水箱系统进行了仿真实验研究. 系统在工作点处无故障时线性化离散模型如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = (A + \Delta A)\mathbf{x}_k + (B + \Delta B)\mathbf{u}_k + \\ \quad (D + \Delta D)\mathbf{d}_k \\ \mathbf{y}_k = C\mathbf{x}_k + E\mathbf{v}_k \end{cases}$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0.9908 & 0.0000 & 0.0091 \\ 0.0000 & 0.9856 & 0.0072 \\ 0.0091 & 0.0072 & 0.9836 \end{bmatrix}$$

$$B = D = \begin{bmatrix} 64.6627 & 0.0007 & 0.2978 \\ 0.0007 & 64.4908 & 0.2358 \\ 0.2978 & 0.2358 & 64.4271 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad E = I$$

系统模型不确定性为

$$\Delta A = \delta_A I, \quad \Delta B = \Delta D = \delta_B I$$

其中,  $|\delta_A| < 1.0 \times 10^{-5}$ ,  $|\delta_B| < 1.0 \times 10^{-4}$ .

系统开环控制输入为

$$\mathbf{u} = [3.8 \times 10^{-5}, 2.4 \times 10^{-5}, 1.2 \times 10^{-5}]^T \text{ (m}^3/\text{s)}$$

闭环控制律为

$$\mathbf{u}_k = \sum_{j=1}^3 (K_i + \Delta K_i)(\mathbf{y}_{k-j} - \mathbf{y}_{ref}) + (K_p + \Delta K_p)(\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_{ref})$$

其中, 控制器增益分别为

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.0145 & 0.0435 \\ 0.0007 & -0.0285 \\ -0.1859 & -9.4512 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 0 & -0.0001 \\ 0.0001 & 0 \\ -0.001 & -0.001 \end{bmatrix}$$

控制增益摄动为

$$\Delta K_p = \begin{bmatrix} \delta_{kp} & 0 \\ 0 & \delta_{kp} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta K_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \delta_{ki} & \delta_{ki} \end{bmatrix}$$

其中,  $|\delta_{kp}| < 2.45 \times 10^{-3}$ ,  $|\delta_{ki}| < 0.7 \times 10^{-4}$ .  $\mathbf{y}_{ref}$  为系统在开环控制下的稳态输出值, 即开闭环均使系统稳定在相同的工作点.  $\mathbf{d}_k$  与  $\mathbf{v}_k$  均为具有适当维数, 方差为  $1 \times 10^{-12} I$  的零均值高斯白噪声.

系统加性故障的设置是系统在  $k = 20$  时刻水箱 3 发生幅值为  $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  的泄漏, 执行器乘性故障的设置是系统在  $k = 20$  时刻控制器 1 增益衰减为正常状态的 80%, 传感器乘性故障的设置是系统在  $k = 20$  时刻传感器 1 增益衰减为正常状态的 99%. 分别利用 Kalman 滤波器,  $H_\infty$  鲁棒观测器对开环系统和闭环系统进行故障诊断. 其中 Kalman 滤波器形式为

$$\mathbf{x}_{k+1}^{\text{Kal}} = A\mathbf{x}_k^{\text{Kal}} + B\mathbf{u}_k + L_k(\mathbf{y}_k - C\mathbf{x}_k^{\text{Kal}})$$

其中  $L_k$  利用递推最小二乘方法得出.  $H_\infty$  鲁棒观测器形式为

$$\mathbf{x}_{k+1}^{\text{H}} = A\mathbf{x}_k^{\text{H}} + B\mathbf{u}_k + E\mathbf{f}_k^{\text{H}} - L(\mathbf{y}_k - C\mathbf{x}_k^{\text{H}})$$

$$\mathbf{f}_{k+1}^{\text{H}} = \mathbf{f}_k^{\text{H}} - F(\mathbf{y}_k - C\mathbf{x}_k^{\text{H}})$$

其中,  $L$  和  $F$  可利用文献 [69] 中不考虑非线性的情况设计得到. 残差评价函数为常见的残差向量二范数平方. 其中故障检测阈值为在标称系统中无故障情况下进行 100 次 Monte-Carlo 实验得到的残差评价函数上界, 本节实验中经过仿真得到的开环阈值为  $9.924 \times 10^{-8}$ , 闭环阈值为  $1.017 \times 10^{-7}$ . 得到的残差信号分别如图 1~6 所示, 而通过 1000 次实验得到的观测器故障诊断性能 (误报率、漏报率、平均检测步数) 见表 1~3.

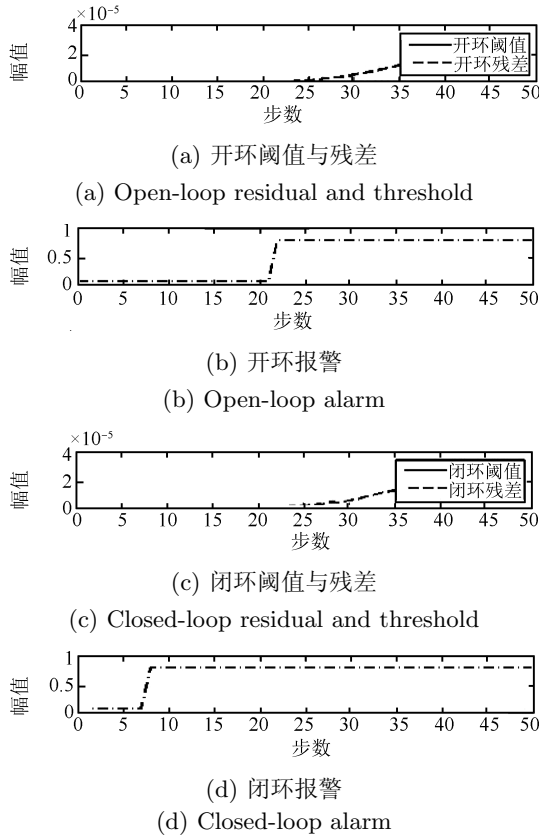


图 1 Kalman 滤波器生成的加性泄漏故障残差信号  
Fig. 1 Residuals generated by Kalman filter with additive leakage fault

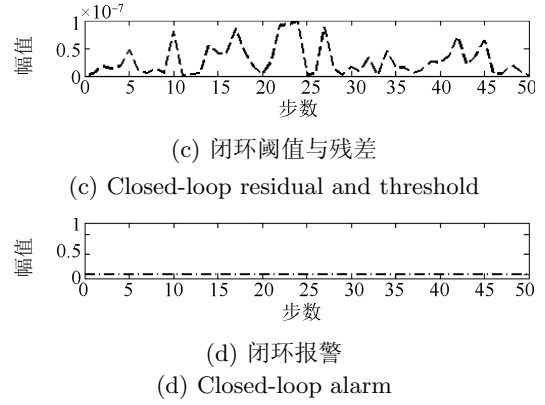
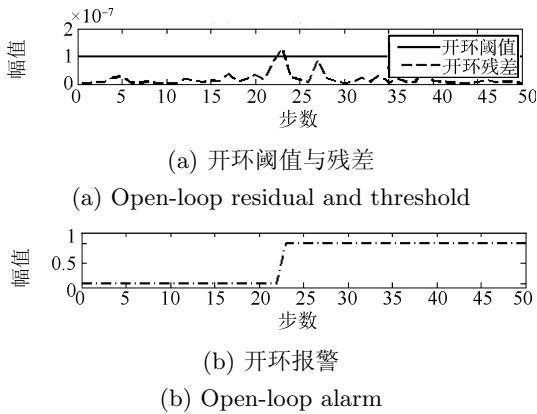


图 2  $H_{\infty}$  鲁棒观测器生成的加性泄漏故障残差信号  
Fig. 2 Residuals generated by  $H_{\infty}$  robust observer with additive leakage fault

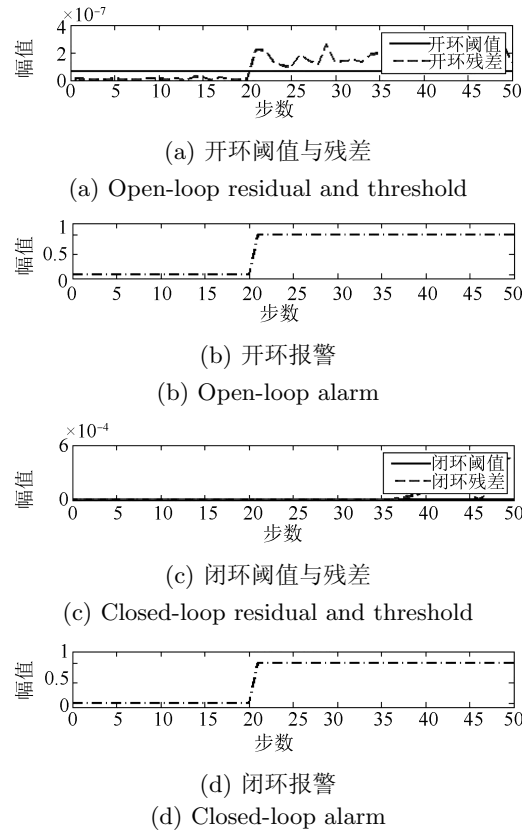
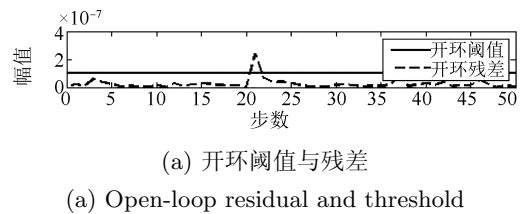


图 3 Kalman 滤波器生成的乘性执行器故障残差信号  
Fig. 3 Residuals generated by Kalman filter with multiplicative actuator fault



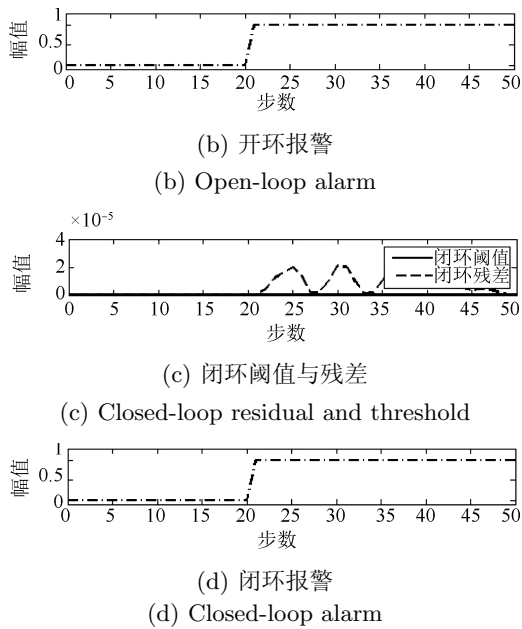


图 4  $H_\infty$  鲁棒观测器生成的乘性执行器故障残差信号  
Fig. 4 Residuals generated by  $H_\infty$  robust observer with multiplicative actuator fault

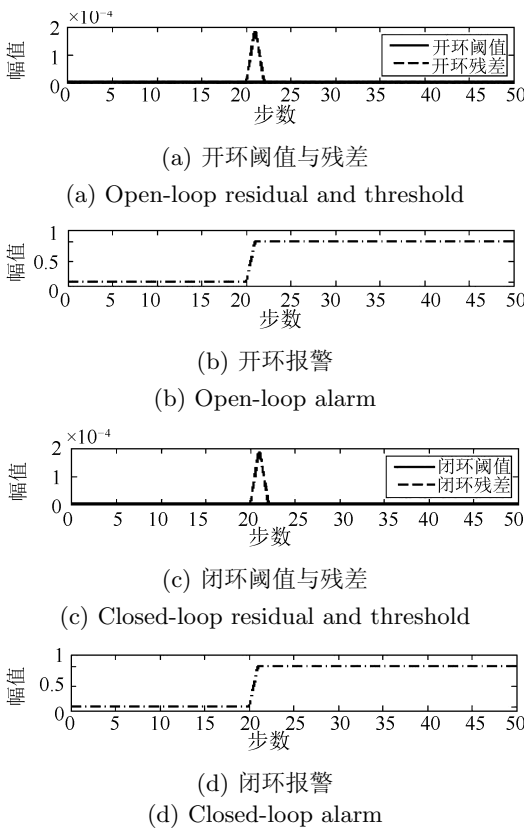


图 5 Kalman 滤波器生成的乘性传感器故障残差信号  
Fig. 5 Residuals generated by Kalman filter with multiplicative sensor fault

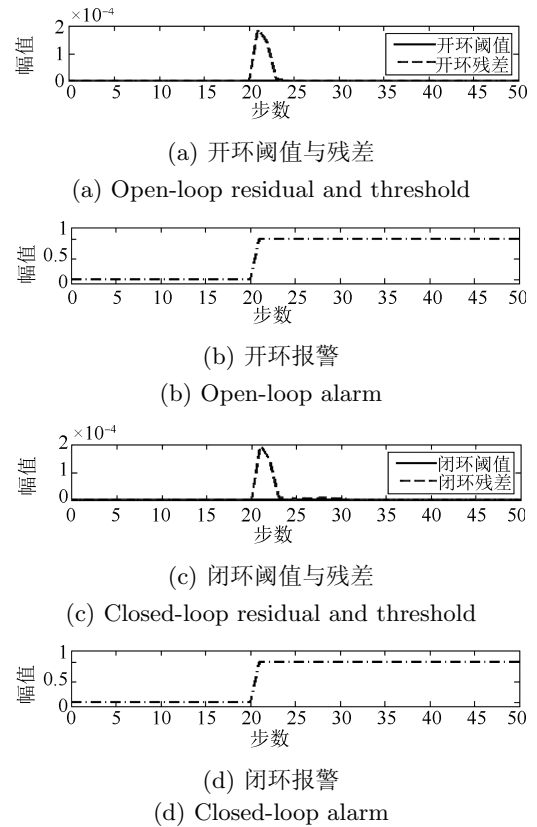


图 6  $H_\infty$  鲁棒观测器生成的乘性传感器故障残差信号  
Fig. 6 Residuals generated by  $H_\infty$  robust observer with multiplicative sensor fault

表 1 开/闭环系统加性泄漏故障检测性能

Table 1 Performances of fault detection for open/closed-loop system with additive leakage fault

残差生成方法	误报率 (%)	漏报率 (%)	平均检测步数
开环 Kalman 滤波器	1.6	0	1.9420
闭环 Kalman 滤波器	2.5	0	1.9169
开环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	1.8	31.2	3.0483
闭环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	2.6	33.1	3.0476

表 2 开/闭环系统乘性执行器故障检测性能

Table 2 Performances of fault detection for open/closed-loop system with multiplicative actuator fault

残差生成方法	误报率 (%)	漏报率 (%)	平均检测步数
开环 Kalman 滤波器	1.7	0	1.0142
闭环 Kalman 滤波器	2.6	0	1.0298
开环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	2.0	0	1.0258
闭环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	2.5	0.7	1.0367

表 3 开/闭环系统乘性传感器故障检测性能

Table 3 Performances of fault detection for open/closed-loop system with multiplicative sensor fault

残差生成方法	误报率 (%)	漏报率 (%)	平均检测步数
开环 Kalman 滤波器	1.3	0	1.0000
闭环 Kalman 滤波器	1.6	0	1.0000
开环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	1.7	0	1.0000
闭环 $H_\infty$ 鲁棒观测器	2.4	0	1.0000

文献 [16] 中形如

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{z}(t) + \mathbf{G}\mathbf{y}(t) + \mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{e}(t) &= \mathbf{K}\mathbf{z}(t) + \mathbf{P}\mathbf{y}(t) \end{aligned}$$

的 Luenberger 解耦观测器只能处理系统故障和执行器故障, 因此只针对水箱泄漏故障和执行器增益下降两种情况进行了仿真. 针对原连续三容水箱系统进行参数设计再进行离散化, 可得针对离散化之后线性系统的解耦观测器参数, 得到的残差信号分别如图 7 和图 8 所示.

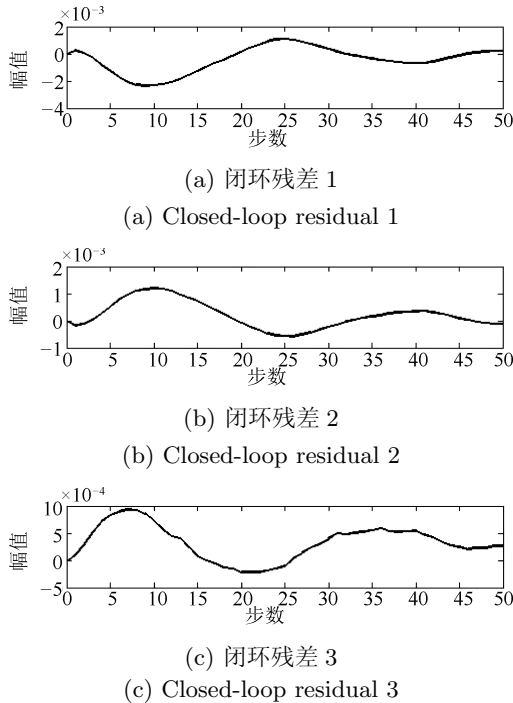


图 7 Luenberger 解耦观测器生成的加性泄漏故障残差信号

Fig. 7 Residuals generated by Luenberger decoupling observers with additive leakage fault

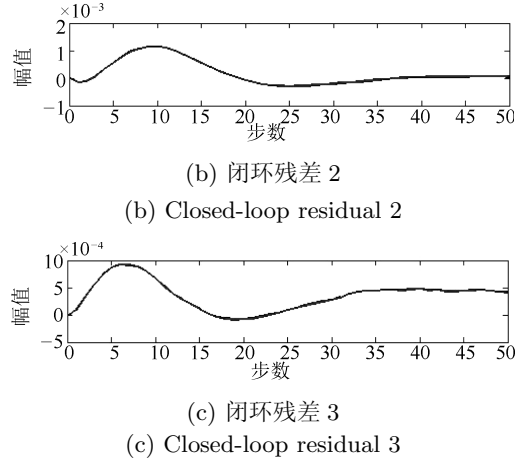
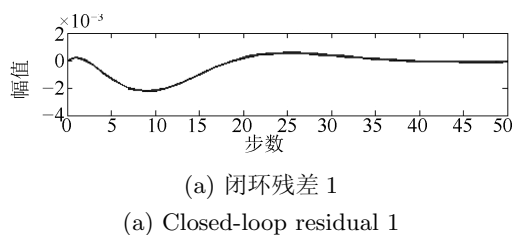


图 8 Luenberger 解耦观测器生成的乘性执行器故障残差信号

Fig. 8 Residuals generated by Luenberger decoupling observers with multiplicative actuator fault

由以上的仿真结果我们可以得到如下结论:

1) 闭环反馈下, 几种故障检测及定位方法的性能均出现了明显下降. 其中, Kalman 滤波器和  $H_\infty$  鲁棒观测器对于系统加性故障和乘性故障的正确检测概率与开环相比总体来说出现降低. 而 Luenberger 解耦观测器也无法像开环系统中一样实现故障检测和分离.

2) 本实验中针对 Kalman 滤波器和  $H_\infty$  鲁棒观测器的故障检测阈值是在无故障情况下利用多次 Monte-Carlo 实验得到的残差评价函数最大值, 保守性已经比较强. 但是在闭环控制下, 仍然出现了非常严重的误报现象. 这表明闭环控制的引入可能带来更多的不确定性, 进而导致残差幅值在一个较大的范围内波动 (即便在无故障情况下), 这种波动无疑使得故障检测会遇到更大的干扰, 无法准确地判定残差的变化是源于故障的发生还是闭环反馈引入的波动.

3) Luenberger 解耦观测器在闭环反馈控制下的三容水箱系统中无法保证可以实现故障检测与分离. 在理想情况下, 当状态 1 发生故障时, 该观测器的残差信号 1 应无变化, 而残差信号 2 和残差信号 3 发生明显波动, 进而实现故障诊断, 因为该方法设计的原则即为每个残差信号对一个部件的故障鲁棒, 而对于其余部件的故障均敏感<sup>[16]</sup>. 但是由图 7 和图 8 可以看出, 三组残差信号在故障发生时均无明显变化, 此时观测器无法检测到故障的发生, 自然也无法进行故障定位.

4) 开闭环系统对于传感器故障影响不明显, 两种情况下的故障检测均保持着很高的灵敏度. 由表 3 可以看出, 即使传感器发生幅值很低的乘性故障, 开闭环故障检测单元仍能快速且较为准确地检测到故

障的发生,而执行器故障则要在发生大幅值故障的情况下,故障检测单元才能得到与传感器故障性能接近的检测效果。

综上所述,闭环反馈控制的引入导致了系统故障诊断性能的退化,正确检测故障的概率降低,而常用的故障定位方法也可能失效。因此,目前的闭环故障诊断方法尚存在很多不足,需要进一步考虑真实闭环系统中存在的不理想情况,以得到具有更强实际意义的研究成果。

### 3 总结与展望

本文对闭环系统故障诊断进行了概述,对相关的研究成果进行了分类和分析,并通过大量的仿真实验来分析典型开闭环系统故障诊断性能的异同。与开环系统的故障诊断研究相比,闭环系统的故障研究还处于一个相对初步的探索阶段。不仅研究成果数量比较少,而且大多针对某一特定控制下的闭环系统,缺乏较为系统性的研究和分析。

目前,基于模型的闭环系统故障诊断研究还很不充分。已有的研究成果大多对于系统的形式和模型精确程度要求较高,基本上都要求系统针对控制是线性的,而且控制矩阵参数和控制量精确已知。如果以上要求不能满足,则无法保证残差信号与闭环控制之间完全解耦。而在更加复杂,难以实现残差与控制完全解耦的系统模型中,定量分析控制量与残差之间的关系很复杂,这个问题目前还没有得到很好的解决。

基于数据的闭环系统故障诊断方法多应用于某些具体的工业部件中,如电机系统。基于数据的方法无需对系统复杂的机理模型有过于严格的要求,而直接对于系统的测量信号进行一定的处理,提取某些特征,分析故障的位置和类型。但是这类方法大多都是针对特定系统提出的,难以得到具有普遍性的方法和结论。

基于知识的闭环系统故障诊断方法大多应用于结构复杂,规模庞大,难以模型化的复杂系统中。这类方法充分利用了系统的历史信息,参考先验知识对系统运行的状态进行评估。但是在实际工业生产中,闭环系统通常不会在故障状态下运行,进而导致了故障下的历史数据不够充分,难以作为机器学习方法提供足够的样本。这种缺陷也限制了基于知识的方法在闭环系统故障诊断当中的应用。

目前,对于闭环系统的故障诊断研究还很不充分,处于探索阶段,缺乏系统性的研究成果,目前尚存在以下几个问题亟需解决:

1) 闭环控制对于故障诊断的影响尚不明确。虽然现在已经有一部分研究表明在某些情况下,闭环控制对于故障检测和诊断会带来一定的影响,但是目

前关于闭环控制对系统的故障诊断会带来怎样的影响,还没有系统性的研究成果,也缺乏定量分析与理论研究。而且在闭环系统中,控制量与系统外部干扰、噪声对于系统的影响是难以完全分开的。这三种信号的性质不尽相同:控制量多为控制器设计得到的已知信号,能量有上界;噪声多为服从一定概率分布的随机信号,某些统计特性可以认为已知;而外部干扰通常指一类能量有界的干扰信号,其余均未知。在反馈系统中,我们希望降低噪声和干扰对于闭环系统的影响,而引入控制信号的目的是提高系统的某方面性能,因此这几类信号特性不同。但是,在闭环系统中,这三类信号对于系统的影响方式相类似,如在线性系统中,这三种信号通常都是加性作用在系统动态中。在基于残差生成器的方法中,这三种信号也以相同的方式影响残差的值。因此,对于给定的系统模型和控制律,反馈是否影响故障诊断效果、如何在闭环故障诊断中分辨出控制信号、噪声和干扰的影响都是待解决的重要问题。

2) 闭环系统故障检测中残差评价函数和阈值的确定也还没有得到很好的解决。由于反馈控制的影响,闭环系统的残差信号在幅值上与开环系统残差之间通常存在一定的差别,因此对于闭环系统来说,需要对故障检测阈值进行合理的调整才能保证较好的检测性能。同时,目前的残差评价函数大多都还是比较简单的二范数函数,这种评价方式比较粗糙,也无法保证对故障的灵敏程度,因此设计合理的残差评价函数并构造恰当的阈值来判断故障是否发生,也是闭环系统故障诊断中一个有待进一步研究的问题。

3) 控制量对故障诊断精度的影响难以定量分析。影响闭环控制律对故障诊断影响的因素有很多:系统中控制律的作用方式、控制律的设计形式、残差生成器的设计方法等。这些因素都可能改变控制律对于残差的影响。而且由于反馈的引入,在故障检测中残差评价函数的阈值需要在开环系统的基础上进行调整,该阈值的调整会直接影响到故障检测的误报率、漏报率等检测精度指标。同时,即使在开环系统中,对于时变系统要如何设计合理的残差评价阈值也是一个有待研究解决的问题,在时变闭环系统中这个问题依然存在。若使用时变阈值对残差进行评价,会导致故障诊断精度研究难度的进一步加大。

4) 目前基于模型的方法对于系统假设条件过强,难以满足。基于模型的闭环系统故障诊断方法为了实现残差与控制的完全解耦,通常假设系统对于控制是线性的且对应的系数矩阵已知。但是在真实的工业流程中,系统参数往往受到多种因素的干扰,与标称值之间存在一定的偏差,控制对于系统动



态也会起到非线性的作用, 而且在真实的物理系统中, 控制器计算得到的控制律往往无法由执行器精确实现, 尤其是当控制律快速剧烈变化时, 如控制律切换. 典型的例子是卫星姿控系统中的喷气式控制器, 通过一定量的气体排放以实现卫星的姿态调整, 但是喷出气体的流量流速难以精确测量, 这就导致了喷气式执行器的控制效果与控制器计算得到的精确结果之间不可能完全一致. 由于客观条件限制, 这种误差普遍存在于各种控制器中. 闭环系统往往需要具有一定的非脆弱性, 保证对控制量误差鲁棒. 但是这种误差为分析闭环反馈对故障诊断的影响增加了新的不确定性, 也加大了闭环系统中故障诊断研究的难度. 在这些更为复杂的条件下如何合理的设计故障诊断方法, 也是目前基于模型的故障诊断方法可发展的方向之一.

5) 闭环反馈对于系统的复杂综合影响还没有得到全面分析. 目前的研究大多认为控制量对于系统施加的影响是确定性的, 可以用精准的数学模型刻画, 但是事实上反馈控制的引入通常还会对系统施加额外的干扰. 卫星姿控系统中的喷气式控制器在实际使用的时候, 若卫星的帆板同时处于张开状态, 喷发出的气流往往会对帆板造成一定冲击并对卫星的姿态产生一定的干扰, 而这一类干扰是难以精准建模的. 类似情况也广泛存在于各类机械执行器中. 可见, 反馈控制对于闭环系统的影响是多方面的, 尤其是系统为非线性且复杂程度高时. 因此, 如何合理建模, 以便更加全面精确地描述系统中反馈控制的综合影响, 目前也是有待解决的问题.

6) 闭环系统下微小故障和间歇故障的诊断还有待进一步研究. 目前闭环故障诊断研究的基本都是永久性故障和幅值较为明显的故障. 但是在实际系统中, 有可能出现大量持续时间短, 可反复出现, 未经处理可自行消失的间歇故障<sup>[70-72]</sup>; 同时存在能量较小, 不易于检测分离的微小故障. 而在闭环反馈控制的掩盖下, 这两类故障的检测和诊断变得更加困难. 但是在闭环系统中考虑间歇故障和微小故障, 可以有效提高系统运行的可靠性和安全性, 具有重要的现实意义.

## References

- Mehra R K, Reschon J. An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamics. *Automatica*, 1971, **7**(5): 637-640
- Willsky A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica*, 1976, **12**(6): 601-611
- Himmelblau D M. *Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Process*. Amsterdam: Elsevier Press, 1978
- Frank P M. Fault diagnosis in dynamic-systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, 1990, **26**(3): 459-474
- Zhou Dong-Hua, Wang Qing-Lin. The latest development of model based fault diagnostics technique of control systems. *Acta Automatica Sinica*. 1995, **21**(2): 244-248 (周东华, 王庆林. 基于模型的控制系统故障诊断技术的最新进展. *自动化学报*, 1995, **21**(2): 244-248)
- Frank P M, Ding S X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of Process Control*, 1997, **7**(6): 403-424
- Patton R J, Frank P M, Clark R N. *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. London: Springer-Verlag, 2000
- Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (周东华, 叶银忠, 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000)
- Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis part I: quantitative model-based methods. *Computer and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 293-311
- Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis part II: qualitative models and search strategies. *Computer and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 313-326
- Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N, Yin K. A review of process fault detection and diagnosis part III: process history based methods. *Computer and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 327-346
- Zhou Dong-Hua, Hu Yan-Yan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*. 2009, **35**(6): 748-758 (周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 748-758)
- Xing Yan, Wu Hong-Xin, Wang Xiao-Lei, Li Zhi-Bin. Survey of fault diagnosis and fault-tolerance control technology for spacecraft. *Journal of Astronautics*, 2003, **24**(3): 221-226 (邢琰, 吴宏鑫, 王晓磊, 李智斌. 航天器故障诊断与容错控制技术综述. *宇航学报*, 2003, **24**(3): 221-226)
- Bellini A, Filippetti F, Franceschini G, Tassoni C. Closed-loop control impact on the diagnosis of induction motors faults. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, **36**(5): 1318-1329
- Jiang Cang-Hua, Zhou Dong-Hua. Performance comparison studies of observer based fault detection methods for linear systems. *Computing Technology and Automation*, 2005, **22**(2): 58-62 (姜苍华, 周东华. 基于观测器的线性系统故障检测方法性能比较研究. *计算技术与自动化*, 2005, **22**(2): 58-62)
- Ge W, Fang C Z. Detection of faulty components via robust observation. *International Journal of Control*, 1988, **47**(2): 581-599
- McNabb C A, Qin S J. Fault diagnosis in the feedback-invariant subspace of closed-loop systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, **44**(8): 2359-2368
- Niemann H H, Stoustrup J. Robust fault detection in open loop vs. closed loop. In: *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*. San Diego, California, USA: IEEE, 1997. 4496-4497
- Ashari A E, Nikoukhah R, Campbell S L. Effects of feedback on active fault detection. *Automatica*, 2012, **48**(5): 866-872
- Deshpande A P, Patwardhan S C, Narasimhan S S. Intelligent state estimation for fault tolerant nonlinear predictive control. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(2): 187-204

- 21 Georges J P, Theilliol D, Ponsart J C, Aubrun C. Networked control system with intermittent observations: FDI/FTC design based on interacting multiple model approach. In: Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control and Automation. Makedonia Palace, Thessaloniki, Greece: IEEE, 2009. 528–533
- 22 Seron M M, Doná J A D. Actuator fault tolerant multi-controller scheme using set separation based diagnosis. *International Journal of Control*, 2010, **83**(11): 2328–2339
- 23 Li X J, Yang G H. Adaptive fault detection and isolation approach for actuator stuck faults in closed-loop systems. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2012, **10**(4): 830–834
- 24 Tornil-Sin S, Theilliol D, Ponsart J C, Puig V. Admissible model matching using  $\mathcal{D}_R$ -regions: fault accommodation and robustness against FDD inaccuracies. *International Journal of Adaptive Control and Signal Process*, 2010, **24**(11): 927–943
- 25 Rahim M A, Khalid H M, Akram M, Khoukhi A, Cheded L, Doraiswami R. Quality monitoring of a closed-loop system with parametric uncertainties and external disturbances: a fault detection and isolation approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, **55**(1-4): 293–306
- 26 Šimandl M, Punčochář I. Active fault detection and control: unified formulation and optimal design. *Automatica*, 2009, **45**(9): 2052–2059
- 27 Niemann H. A setup for active fault diagnosis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(9): 1572–1578
- 28 Wei J, Cen Z, Jian R. Sensor fault-tolerant observer applied in satellite attitude control. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, **23**(1): 99–107
- 29 Li R, Olson J H. Fault detection and diagnosis in a closed-loop nonlinear distillation process: application of extended Kalman filters. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1991, **30**(5): 898–908
- 30 Doraiswami R, Cheded L. Kalman filter for parametric fault detection: an internal model principle-based approach. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(5): 715–725
- 31 Dong J, Verhaegen M. Identification of fault estimation filter from I/O data for systems with stable inversion. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(6): 1347–1361
- 32 Wu N E, Zhang Y, Zhou K. Detection, estimation, and accommodation of loss of control effectiveness. *International Journal of Adaptive Control and Signal Process*, 2000, **14**(7): 775–795
- 33 Chen X, Ma Y, Wang F, Geng Y. Research on improved integrated FDD/FTC with effectiveness factors. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, **23**(5): 768–774
- 34 Zhou D H, Frank P M. Actuator fault diagnosis of a class of nonlinear systems in closed-loops: a case study. In: Proceedings of the 1996 International Conference on Control. Exeter, UK: UKACC, 1996. 311–316
- 35 Zhou D H, Frank P M. Fault diagnostics and fault tolerant control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, **34**(2): 420–427
- 36 Zhong Mai-Ying, Zhang Cheng-Hui, Ding S X. An optimization approach to feedback controller and robust fault detection filter integrated design. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(2): 294–299  
(钟麦英, 张承慧, Ding S X. 一种鲁棒故障检测与反馈控制的最优集成设计方法, 自动化学报, 2004, **30**(2): 294–299)
- 37 Giridha A, El-Farra N H. A unified framework for detection, isolation and compensation of actuator faults in uncertain particulate processes. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA: IEEE, 2008. 3313–3318
- 38 Ghantasala S, El-Farra N H. Actuator fault detection and reconfiguration in distributed processes with measurement sampling constraints. In: Proceedings of the 2009 American Control Conference. Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009. 1523–1529
- 39 Ghantasala S, El-Farra N H. Robust actuator fault isolation and management in constrained uncertain parabolic PDE systems. *Automatica*, 2009, **45**(10): 2368–2373
- 40 Yoo S J. Actuator fault detection and adaptive accommodation control of flexible-joint robots. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(10): 1497–1507
- 41 Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Fast adaptive fault estimation and accommodation for nonlinear time-varying delay systems. *Asian Journal of Control*, 2009, **11**(6): 643–652
- 42 Jiang B, Zhang K, Shi P. Less conservative criteria for fault accommodation of time-varying delay systems using adaptive fault diagnosis observer. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, **24**(4): 322–334
- 43 Corradini M L, Cristofaro A, Giambó R, Pettinari S. Design of robust fault detection filters for MIMO uncertain plants with quantised information. *International Journal of Control*, 2012, **85**(3): 239–250
- 44 Hägglund T. A control-loop performance monitor. *Control Engineering Practice*. 1995, **3**(11): 1543–1551
- 45 Márton L, Ossmann D. Energetic approach for control surface disconnection fault detection in hydraulic aircraft actuators. In: Proceedings of the 2012 IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Mexico City, Mexico: IFAC, 2012. 1149–1154
- 46 Chang Y J, Lee C L, Chen J E, Su C. A behavior-level fault model for the closed-loop operational amplifier. *Journal of Information Science and Engineering*, 2000, **16**(5): 751–766
- 47 Alavi S M M, Izadi-Zamanabadi R, Hayes M J. Robust fault detection and isolation technique for single-input/single-output closed-loop control systems that exhibit actuator and sensor faults. *IET Control Theory and Applications*, 2008, **2**(11): 951–965
- 48 Faiz J, Ojaghi M. Instantaneous-power harmonics as indexes for mixed eccentricity fault in mains-fed and open/closed-loop drive-connected squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(11): 4718–4726
- 49 Cheng S, Zhang P, Habetler T G. An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(5): 1545–1554
- 50 Maurya M R, Paritosh P K, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A framework for on-line trend extraction and fault diagnosis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, **23**(6): 950–960
- 51 Goharrizi A Y, Sepehri N. Internal leakage detection in hydraulic actuators using empirical mode decomposition and Hilbert spectrum. *IEEE Transactions on Instruments and Measurement*, 2012, **61**(2): 368–378
- 52 Unver H O, Wendel G. A fuzzy quality control-decision support system for improving operational reliability of liquid transfer operations in laboratory automation. *Expert Systems with Applications*, 2009, **36**(4): 8064–8070

- 53 Du Xin-Wei, Liu Di-Chen, Li Yuan, Xiong Yuan-Xin, Wang Xiao-Jun. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system in power system fault recurrence. *Power System Technology*, 2006, **30**(6): 82–87  
(杜新伟, 刘涤尘, 李媛, 熊元新, 王晓君. 自适应神经模糊推理系统在电力故障重现中的应用. 电网技术, 2006, **30**(6): 82–87)
- 54 Ballé P, Fuessel D. Closed-loop fault diagnosis based on a nonlinear process model and automatic fuzzy rule generation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000, **13**(6): 695–704
- 55 Mirzaee A, Salahshoor K. Fault diagnosis and accommodation of nonlinear systems based on multiple-model adaptive unscented Kalman filter and switched MPC and  $H_\infty$  loop-shaping controller. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(3): 626–634
- 56 Aubrun C, Robert M, Cecchin T. Fault detection in a control loop. *Control Engineering Practice*, 1995, **3**(10): 1441–1446
- 57 Zhang Y, Wang F, Hesketh T, Clements D J, Eaton R. Fault accommodation for nonlinear systems using fuzzy adaptive sliding control. *International Journal of Systems Science*, 2005, **36**(4): 215–220
- 58 Zhang Ying-Wei, Wang Xiao-Gang, Wang Fu-Li. Fault accommodation for nonlinear systems using fuzzy adaptive sliding control. *Control and Decision*, 2005, **20**(4): 408–412  
(张颖伟, 王小刚, 王福利. 基于模糊自适应滑模的非线性系统的故障调节. 控制与决策, 2005, **20**(4): 408–412)
- 59 Huo B, Tong S, Li Y. Observer-based adaptive fuzzy fault-tolerant output feedback control of uncertain nonlinear systems with actuator faults. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2012, **10**(6): 1119–1128
- 60 Liu Chun-Sheng, Ai Qiang-Yu. Fault detection based on T-S fuzzy model for networked control systems. *Control Engineering of China*, 2009, **16**(6): 775–779  
(刘春生, 艾强玉. 基于 T-S 模型的网络控制系统故障诊断. 控制工程, 2009, **16**(6): 775–779)
- 61 Tian E, Yue D. Reliable  $H_\infty$  filter design for T-S fuzzy model-based networked control systems with random sensor failure. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2013, **23**(1): 15–32
- 62 Tallam R M, Habetler T G, Harley R G. Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, **39**(3): 720–724
- 63 Zhang Ying-Wei, Wang Fu-Li, Yu Ge. Fault accommodation for a class of nonlinear systems using a learning approach. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(5): 758–762  
(张颖伟, 王福利, 于戈. 基于一个学习逼近的非线性系统的故障调节. 自动化学报, 2004, **30**(5): 758–762)
- 64 Thumati B T, Jagannathan S. A model based fault detection and accommodation scheme for nonlinear discrete-time systems with asymptotic stability guarantee. In: Proceedings of the 2009 American Control Conference. Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009. 4988–4993
- 65 Zhang Y, Qin S J. Adaptive actuator fault compensation for linear systems with matching and unmatching uncertainties. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(6): 985–990
- 66 Hu Liang-Mou, Cao Ke-Qiang, Xu Hao-Jun, Dong Xin-Min. Research on fault diagnosis for closed-loop control system based on weighted LS-SVM. *Machine Tool and Hydraulics*, 2010, **38**(9): 128–131  
(胡良谋, 曹克强, 徐浩军, 董新民. 基于加权 LS-SVM 的闭环控制系统故障诊断研究. 机床与液压, 2010, **38**(9): 128–131)
- 67 Hu Liang-Mou, Cao Ke-Qiang, Xu Hao-Jun. Multi-fault diagnosis for electro hydraulic position servo system based on LS-SVM. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(10): 2252–2255  
(胡良谋, 曹克强, 徐浩军. 基于 LS-SVM 的电液位置伺服系统多故障诊断. 系统仿真学报, 2007, **19**(10): 2252–2255)
- 68 Bo Cui-Mei, Li Jun, Zhang Guang-Ming, Yang Hai-Rong. Application of fault detection based on adaptive threshold in the DAMDICS benchmark problem. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, **16**(6): 1279–1285  
(薄翠梅, 李俊, 张广明, 杨海荣. 自适应阈值故障检测方法在 DAMADICS 基准平台中的应用. 计算机集成制造系统, 2010, **16**(6): 1279–1285)
- 69 Zhang K, Jiang B, Shi P. Observer-based integrated robust fault estimation and accommodation design for discrete-time systems. *International Journal of Control*, 2010, **83**(6): 1167–1181
- 70 *The Authoritative Dictionary*. IEEE Standard 100, 2000
- 71 Correcher A, Garcia E, Morant F, Quiles E, Rodriguez L. Intermittent failure dynamics characterization. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, **61**(3): 649–658
- 72 Liu J X, Zhang X. Detection method of intermittent faults in electronic systems based on Markov model. In: Proceedings of the 2011 International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou, China: IEEE, 2011. 216–219

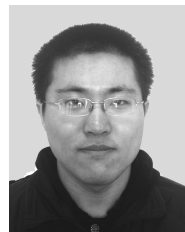


周东华 清华大学教授, 1990 年在上海交通大学获博士学位. 主要研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制, 故障预测与最优维护技术. 本文通信作者.

E-mail: zdh@mail.tsinghua.edu.cn

(ZHOU Dong-Hua Professor in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his

Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 1990. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, fault prediction, and optimal predictive maintenance. Corresponding author of this paper.)



刘洋 清华大学自动化系博士研究生. 主要研究方向为最优滤波, 闭环系统, 故障检测与诊断. E-mail:

liuyang-10@mails.tsinghua.edu.cn

(LIU Yang Ph. D. candidate in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers optimal filtering, closed-loop system, and fault detection and diagnosis.)



何潇 清华大学讲师. 2010 年在清华大学获博士学位. 主要研究方向为网络化系统的状态估计, 故障诊断与容错控制, 无人机的智能自主控制.

E-mail: hexiao@tsinghua.edu.cn

(HE Xiao Lecturer in the Department of Automation, Tsinghua University. He received his Ph. D. degree from

Tsinghua University in 2010. His research interest covers state estimation for networked system, fault diagnosis and tolerant control, and autonomous control for UAVs.)