

DOI: 10.3724/SP.J.1219.2012.00356

## 基于解析模型的非线性系统故障诊断方法综述

贾庆贤<sup>1</sup>, 张迎春<sup>1,2</sup>, 管宇<sup>1</sup>, 陈雪芹<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 深圳航天东方红海特卫星有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 对基于解析模型的非线性系统故障诊断方法进行了综述. 基于解析模型的非线性故障诊断方法主要包括 4 大类: 基于非线性观测器的方法、基于滤波器的方法、微分几何方法和自适应学习方法. 文中详细介绍了各种方法的基本思想和近 10 年的研究成果, 并指出各方法的优缺点以及热点研究方向. 最后, 给出了一些应用实例, 并讨论了非线性系统故障诊断遇到的若干问题以及未来的研究方向.

**关键词:** 故障诊断; 非线性观测器; 滤波器; 微分几何方法; 自适应学习方法

中图分类号: TP277

文献标识码: A

文章编号: 1002-0411(2012)-03-0356-09

### Fault Diagnosis of Nonlinear Systems Based on Analytical Models: A Survey

JIA Qingxian<sup>1</sup>, ZHANG Yingchun<sup>1,2</sup>, GUAN Yu<sup>1</sup>, CHEN Xueqin<sup>1</sup>

(1. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shenzhen Aerospace Dongfanghong HIT Satellite Company Ltd, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** A survey on analytical model-based fault diagnosis of nonlinear systems is presented. The analytical model based nonlinear fault diagnosis methods are summarized into four categories: nonlinear observer-based approaches, filter-based approaches, differential geometry approaches and adaptive learning approaches. The basic ideas and main research results of each approach in recent 10 years are reviewed in detail, and the advantages and the disadvantages of the methods and the hot research topics are introduced. Finally, some application examples are discussed, and some open issues in fault diagnosis of nonlinear systems and its future research directions are pointed out.

**Keywords:** fault diagnosis; nonlinear observer; filter; differential geometry approach; adaptive learning approach

## 1 引言 (Introduction)

随着系统规模不断扩大, 复杂性日益提高, 系统一旦发生故障, 将造成巨大财产损失, 甚至带来灾难性后果, 因此切实提高复杂系统安全性和可靠性显得尤为重要, 而故障诊断技术为提高系统可靠性和降低事故风险开辟了一条新的途径<sup>[1]</sup>. 特别是, 1971 年 Beard 在其博士论文中提出利用解析冗余代替硬件冗余的思想, 这标志故障诊断技术的开端<sup>[2]</sup>. 故障诊断技术在过去几十年发展迅速, 并取得了丰富的研究成果<sup>[2-10]</sup>. 随着故障诊断方法的大量涌现, 专家学者对故障诊断方法进行了分类<sup>[1,3-6]</sup>. 其中, Frank 教授将故障诊断方法大致分为 3 类: 基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法<sup>[3]</sup>. 基于解析模型的方法是研究最早、最深入、最成熟的方法, 此方法研究成果主要针对线性系统, 然而绝大部分实际系统是复杂的非线性系

统, 所以研究基于解析模型的非线性系统故障诊断具有重要现实意义.

近 10 年来, 基于解析模型的非线性故障诊断方法受到国内外学者的广泛关注, 已有大量文献出现. 然而关于基于解析模型的非线性故障诊断方法的综述性文献较少: 文 [11-12] 对非线性未知输入观测器 (NUIO) 和自适应非线性观测器方法进行了综述; 文 [13] 主要对 NUIO 和自适应学习方法进行了综述, 且侧重于诊断方法的鲁棒性. 有鉴于此, 本文对基于解析模型的非线性故障诊断方法在近 10 年来的研究成果进行较全面综述.

基于解析模型的故障诊断方法分为: 状态估计方法、参数估计方法、等价空间方法. 针对非线性系统, 参数估计方法主要有强跟踪滤波器 (STF) 方法<sup>[14]</sup>, 然而参数估计方法需要比较准确的数学模型. 等价空间方法主要针对线性系统, 较难推广到

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20090450126); 国家 863 计划资助项目 (2008AA702101); 微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金资助项目 (HIT.KLOF 2009092).

通讯作者: 贾庆贤, jqxnjut@126.com 收稿/录用/修回: 2011-04-11/2011-08-12/2011-08-22

非线性系统<sup>[13]</sup>。其中, 状态估计方法是研究成果最多的方法, 对大量文献归纳总结, 基于解析模型的非线性故障诊断方法可归纳为 4 大类: 基于非线性观测器的方法、基于滤波器的方法、微分几何方法、自适应学习方法。

## 2 基于非线性观测器的方法 (Nonlinear observer-based approaches)

基于非线性观测器的故障诊断方法的基本思想与基于观测器的方法类似, 此方法主要针对某一类特殊非线性系统, 如仿射非线性系统、Lipschitz 非线性系统、能够利用 T-S 模糊模型近似或代替的非线性系统等。对于上述非线性系统, 设计的观测器主要有: NUIO、自适应观测器以及滑模观测器 (SMO) 等。

### 2.1 基于 NUIO 的方法

基于 NUIO 的方法利用观测器中富裕自由度, 生成鲁棒性残差对不确定性和干扰解耦。文 [15] 最早将 UIO (unknown input observer) 干扰解耦思想应用到非线性故障诊断中, 文中观测器设计方法和干扰解耦条件与 UIO 类似; 文 [16] 首次提出基于 NUIO 的故障诊断方法, 缺点是一般非线性系统很难转换成所要求的形式; 文 [17] 考虑了一般非线性系统故障诊断问题, 基本思想是找到一个非线性状态变换满足干扰解耦条件, 然而此变换的存在条件苛刻, 且对于新系统, 设计观测器也是较难的<sup>[18]</sup>; 文 [19-20] 考虑非线性是状态和输入的函数, 提出了一种基于 NUIO 的鲁棒故障诊断方法, 文中对于非线性无特殊要求, 但此方法对生成残差进行了局部线性化, 当系统强非线性时, 此方法不再适用。

由于大部分实际系统可建模成 Lipschitz 非线性形式, 专家学者利用 NUIO 对此类系统故障诊断问题进行了研究。文 [21] 提出一种降维 NUIO 的故障诊断方法; 文 [22] 提出一种 NUIO 的故障诊断方法, 利用 Riccati 方程证明了动态误差系统渐近稳定, 但文中只考虑输出维数不小于未知输入维数的情况; 文 [23] 提出了一种 NUIO 的故障分离方法, 并给出了 NUIO 存在的充分必要条件以及基于 LMI (linear matrix inequality) 系统化设计观测器的方法; 文 [24-25] 考虑系统出现干扰和不确定性, 提出了基于 NUIO 的鲁棒故障诊断方法; 不同之处在于文 [25] 所针对的非线性不仅是状态的函数, 并且与输入相关。

T-S 模糊模型可以近似甚至代替一般非线性系统, 从而一般非线性系统故障诊断问题可转化为 T-S

模糊系统的故障诊断问题。文 [26] 提出了基于 T-S 模糊模型的 NUIO 故障诊断方法, 并给出了 NUIO 存在的充分条件, 但条件保守性有待提高; 文 [27] 则提出了基于 T-S 模糊模型的降维 NUIO 方法, 但上述文献都未考虑模型不确定性的影响。

基于 NUIO 的故障诊断方法建模简单, 易于理解且对于干扰和不确定性具有鲁棒性, 但对于一般非线性系统, 设计 NUIO 是较难的; 此方法对干扰和结构化不确定性解耦, 但对于出现非结构化不确定的实际系统, 无法设计 NUIO 对不确定性进行解耦。

### 2.2 基于自适应观测器的方法

基于自适应观测器方法的非线性故障诊断研究相对较晚, 20 世纪 90 年代后期, Frank 教授才在文 [11-12] 中对基于自适应观测器方法的非线性故障诊断进行简述。此方法的基本思想是: 设计带有故障估计项的非线性观测器估计系统状态, 利用故障估计算法估计系统故障。此方法结构简单、实用性强且能够同时估计状态和故障, 从而成为学者研究的热点。

文 [28] 考虑非线性是状态和输出的函数, 并创造性假设故障是输入、输出以及不可测状态的 Lipschitz 函数, 提出了一种自适应故障诊断观测器 (AFDO) 方法; 文 [29] 针对 Lipschitz 非线性系统, 在严格正实 (SPR) 条件下, 提出了一种故障估计算法估计执行机构故障; 文 [30] 在文 [29] 基础上设计了更一般的故障估计算法, 放松了自适应观测器存在条件; 针对不确定双线性系统, 文 [31] 利用系统分解方法将系统分解成两个子系统, 对故障解耦子系统设计自适应观测器估计状态和未知参数, 利用另一子系统检测和辨识故障; 针对多输入多输出非线性不确定系统, 文 [32] 提出一种基于高增益自适应观测器的故障诊断方法, 优点是观测器增益明确给出而不用求解任何等式; 文 [33] 提出一种基于 AFDO 的快速故障估计算法对 Lipschitz 非线性系统出现的乘性故障进行估计; 文 [34] 针对非线性离散系统出现的不确定性和离散误差, 提出一种基于自适应观测器的故障检测方法, 文中利用自适应学习率估计了模型不确定性; 文 [35] 针对出现干扰和不确定性的非线性离散系统, 利用自适应观测器对故障进行重构; 文 [36] 针对非高斯动态随机系统, 提出一种基于非线性自适应观测器的故障诊断方法。

基于自适应观测器的故障诊断方法遇到的主要问题是观测器的误差系统需要满足 SPR 条件; 对测量噪声和高频干扰具有鲁棒性, 并且还需要具有持

续性激励、学习率选取的随意性等。针对上述问题的研究主要有：为了扩展自适应观测器的适用范围，利用较弱条件代替严格的 SPR 条件；将自适应学习率和参数矩阵整合作为待求参数矩阵，利用优化方法求解参数矩阵，如 LMI 方法，从而避免了选取学习率的随意性；利用鲁棒控制思想设计观测器增益抑制扰动对故障估计的影响；无持续激励时，利用基于自适应观测器的方法估计故障。对于线性系统，这些问题的理论研究已经有了一定成果，对于非线性系统，上述问题还有待进一步的研究。

### 2.3 基于滑模观测器 (SMO) 的方法

基于滑模观测器 (SMO) 的故障诊断方法是滑模技术在故障诊断领域的成功应用。此方法因其不仅能够重构故障，而且对不确定性以及干扰具有鲁棒性，因而受到广泛关注。文 [37] 针对仿射非线性系统，最早利用 SMO 对非线性系统进行故障诊断，文中利用滑模运动的变化来判断故障的有无；文 [38] 提出一种 SMO 方法重构故障，当故障出现时，SMO 维持原有滑模运动，利用等效输出注入信号对故障以任意精度进行重构，但文中考虑的是线性系统。此后专家学者一直致力于将此方法应用于非线性系统故障诊断中。根据 SMO 对滑模运动处理方法的不同，基于 SMO 的故障诊断方法主要可以分为以下 2 类：

(1) 系统出现故障，滑模运动被破坏，根据滑模变化判断故障有无，利用自适应学习方法对故障进行估计。文 [39] 针对一类出现干扰的 Lipschitz 非线性系统，利用 SMO 对故障进行检测；文 [40] 提出一种神经滑模观测器 (neural SMO, NSMO) 方法，其中的滑模用来消除状态不确定性和干扰的影响；文 [41-43] 针对能够采用 T-S 模糊模型近似或代替的非线性系统，提出了基于 SMO 的故障诊断方法；文 [41] 提出一种 SMO 故障检测方法；文 [42] 提出一种基于滑模未知输入模糊观测器 (sliding mode unknown input fuzzy observer, SMUIFO) 的故障检测和分离方法，优点是观测器参数可利用 LMI 系统化求解；文 [43] 提出一种基于神经模糊滑模观测器 (neural fuzzy SMO, NFSMO) 的故障诊断方法。从上述文献可得，滑模不仅可以用来检测故障，且可以消除不确定性和干扰的影响。

(2) 设计 SMO 维持原有滑模运动 (即使出现故障)，利用等价输出注入信号操作重构故障，其中等价输出注入信号可通过低通滤波器或通过文 [38] 所提方法求得。文 [44] 针对出现不确定性的 Lipschitz 系统，提出一种 SMO 方法对系统进行鲁棒故障重

构，优点是此方法能够以较高精度重构故障；文 [45-46] 针对非线性微分代数系统，提出了微分代数和 SMO 结合的方法，不足之处是非线性系统需要满足代数可观测条件；文 [47] 针对仿射非线性系统，设计了具有在线信息交互的积分 SMO，同时对故障和未知输入进行重构，所提方法无需牺牲精确度，且解决了 SMO 抖振问题；文 [48-49] 提出自适应 SMO (ASMO) 方法对故障进行检测和重构，文 [48] 研究了系统非线性是输入和输出的函数的函数的情形，但要求部分输出微分可测；文 [49] 考虑单输出非线性系统中测量方程是非线性的情况，所研究的系统运行在局部操作点周围。

上述方法考虑的是非线性系统相对阶为 1 的情况，但许多机械系统的相对阶大于 1。从而上述 1 阶 SMO 方法将不再适用，针对此情况，学者对基于高阶 SMO (high-order SMO, HOSNO) 的非线性故障诊断方法进行了研究。然而有关此方法的研究主要针对特定非线性系统，利用此方法对于一般非线性系统故障诊断的理论研究有待深入。基于 SMO 的非线性故障诊断发展较晚，但因其不仅能够对故障进行重构且对干扰和不确定性具有鲁棒性，近 10 年来，此方法发展较快。

除了上述观测器之外，设计的观测器还有：非线性  $H_2/H_\infty$  观测器、高增益观测器等。虽然基于观测器的方法研究较早、成果最多，但仍是未来非线性故障诊断的重要研究方向。此方法遇到的问题：对于仿射非线性系统的故障诊断，基于观测器的方法实质是利用微分同胚或伪线性化方法将仿射非线性系统转化为由状态线性部分和状态 (或输出) 非线性部分组成的非线性系统，再对新系统设计观测器，但非线性状态变换并不容易，且伪线性化操作对参数不确定性敏感；对于 T-S 模糊模型近似的非线性系统故障诊断问题，基于观测器方法的实质是将非线性故障诊断问题转化为线性故障诊断问题。然而，对于强非线性系统，为了达到较高拟合度，表示非线性系统线性局部输入输出的 IF-THEN 规则增加，带来了计算量问题，且线性模糊模型的选择具有一定的随意性。

### 3 基于滤波器的方法 (Filter-based approaches)

基于滤波器的非线性故障诊断主要针对非线性离散系统，传统的基于滤波器的非线性故障诊断方法主要是扩展卡尔曼滤波器 (EKF) 方法。EKF 的主要思想是：在系统平衡点或稳定点，生成残差进行

局部线性化, 所以线性化误差不可避免, 且需要求解雅可比矩阵, 对于强非线性系统, 此方法造成较高故障误报率. STF 方法虽具有鲁棒性好、跟踪能力强等优点, 但仍是一种局部线性化方法且自适应能力较差. 近 10 年来, 随着滤波器技术的发展, 出现了多种基于滤波器的故障诊断方法, 主要有: 基于 UKF 的方法、基于粒子滤波 (PF) 的方法、基于预测滤波的方法等.

### 3.1 基于 UKF 的方法

针对 EKF 出现的问题, 文 [50] 提出一种新的非线性滤波方法, 此方法采用确定的 sigma 点表征输入随机分布, 进一步提高了非线性滤波的精度, 此方法的出现标志着 UKF 的诞生. 自此, 专家学者对基于 UKF 的故障诊断方法进行了研究. 文 [51] 提出了基于平方根 UKF (SR-UKF) 的故障诊断方法, 其中 UKF 收敛速度和滤波稳定性得到提高. 文 [52] 在文 [51] 基础上, 提出降维 sigma 点 SR-UKF 方法, 此方法在维持高精度的同时, 降低了计算量. 文 [53] 提出了基于强跟踪 UKF 的故障诊断方法, 此方法增强了故障跟踪能力, 提高了故障估计的稳定性、收敛性. 文 [54-55] 分别提出基于 IMM-UKF 的故障诊断方法, 不同之处在于: 前者采用了无增广 UKF 结构, 后者采用增广 UKF 结构. 文 [56] 针对系统状态期望和方差未知的情形, 提出了基于自适应 UKF (AUKF) 的故障诊断方法, 从而提高状态估计准确度.

基于 UKF 的故障诊断方法主要针对高斯非线性系统, 对于非高斯非线性系统, 基于 UKF 的故障诊断方法主要采用均值和方差近似表征状态概率分布来完成, 但会造成近似化误差和滤波性能变差. 虽然基于 UKF 的故障诊断方法相对于 EKF 方法提高了滤波精度并降低了误报率, 但 UKF 遇到滤波易发散、稳定性差、收敛速度慢和故障等情形时对跟踪突变状态的能力较差.

### 3.2 基于 PF 的方法

虽然 UKF 能够对高斯非线性系统进行滤波且成功应用到故障诊断领域, 然而大部分实际系统出现的噪声呈非高斯分布, 利用 UKF 进行故障诊断时, 将造成较高的误报率. PF 方法的出现成功解决了非高斯非线性系统滤波问题, 其在非高斯非线性系统故障诊断问题的应用, 也取得了很好的效果.

文 [57] 最早将 PF 算法引入非线性系统故障诊断中, 文中用样本描述待估计量的后验概率分布, 诊断性能优于 EKF; 文 [58] 提出了基于似然函数的 PF 故障诊断方法; 文 [59] 提出了基于强跟踪 PF 的

故障诊断方法, 将 STF 和 PF 结合, 用 STF 来更新粒子实现重要性采样, 此方法提高了跟踪突变状态的能力; 文 [60] 提出了一种基于 UPF 的故障诊断方法, 利用 UT 变换产生建议分布, 使得似然函数值较高的区域粒子数较多, 改善了粒子匮乏问题; 文 [61] 提出了基于对数似然比的多模型 PF (MMPF) 的故障诊断方法, 此方法不适用于系统模型可转换、信息可交互; 文 [62] 提出了基于交互式多模型 PF (IMPf) 的故障诊断方法, 文中利用 IMPf 对交互状态进行了估计; 文 [63] 利用 PF 对非线性混杂系统进行了故障诊断和故障预测.

基于 PF 的方法因其能够处理非高斯非线性离散系统而受到青睐. 近几年, 基于 PF 的故障诊断方法得到广泛的研究, 遇到的问题主要有: 计算复杂、实时性、稳定性较差、粒子匮乏以及计算量大等问题.

除此之外, 文 [64] 提出了一种基于预测滤波器的故障检测方法, 文中采用预测滤波生成残差, 利用渐进局部方法检测故障的有无, 此方法的优点是模型误差可以在线估计, 能够检测微小故障, 实现实时故障诊断; 但文中只考虑系统出现传感器高斯白噪声和模型误差的情况. 基于预测滤波的故障诊断方法的相关文献较少, 有待进一步研究.

应用鲁棒控制理论, 基于观测器的故障诊断的鲁棒性问题可转化为  $H_2/H_\infty$  滤波问题, 基于  $H_2/H_\infty$  滤波器的故障诊断方法也得到学者的青睐, 由于篇幅原因, 在此不作叙述. 基于滤波器的故障诊断方法主要应用于非线性离散系统, 实际系统运行时, 大部分需要离散化. 所以研究基于滤波器的非线性离散系统的故障诊断问题具有更强实际意义.

## 4 微分几何方法 (Differential geometry approaches)

基于微分几何的故障诊断方法主要思想是: 对系统进行状态变换分解, 分解后的子系统中存在一个仅受一个故障影响的子系统, 通过对其设计观测器, 从而实现故障检测、分离. 很多学者已经证明非线性故障检测和分离问题能够被解决的充分必要条件是可观子空间的存在, 此子空间能够产生仅受一个故障影响的子系统. 在微分几何范畴内, 与可观子空间相对应的是不可观分布. 文 [65] 针对双线性系统, 给出了双线性残差生成基本问题 (BFPRG) 存在的充分必要条件并给予了证明; 文 [64] 提出了基于微分几何方法的仿射非线性系统故障检测和分离问题, 若不可观分布存在, 通过状

态同胚和输出同胚分解系统, 存在仅受一个故障信号影响的局部弱可观子系统, 对此子系统设计观测器, 实现非线性故障检测和分离, 文中给出了非线性 FPRG (NFPRG) 存在的充分必要条件和不可观分布的计算方法, 缺点是仅受一个故障影响的子系统是局部弱可观的, 此条件不是观测器存在的充分条件, 但文中假设子系统可观; 文 [67] 在文 [66] 的基础上, 针对故障不与干扰解耦或 NFPRG 的必要条件不满足的情况, 提出了一种鲁棒故障诊断方法; 文 [68] 在文 [66] 的基础上, 针对系统出现干扰的情形, 提出了基于微分几何的鲁棒故障诊断方法; 文 [69] 综述了基于微分几何的平滑非线性微分系统的故障诊断问题. 虽然利用微分几何能够对非线性系统进行故障诊断, 但当 NFPRG 必要条件不能满足或受故障影响的子系统不可观时, 此方法将不再适用, 且不可观空间的求解复杂, 这也限制了此方法的应用.

## 5 自适应学习方法 (Adaptive learning approaches)

基于自适应学习的故障诊断方法因其不仅能在在线估计故障, 且能够对一大类非线性系统进行故障诊断而备受关注. 其基本思想是: 建立非线性观测器, 在观测器中加入在线估计器, 利用在线估计器检测和估计故障. 与基于自适应观测器的非线性故障诊断方法相比, 自适应学习方法主要关注在线估计器设计, 而基于自适应观测器的非线性故障诊断方法更侧重于观测器设计. 在线估计器通常是具有自适应参数的非线性多变量估计模型, 如神经网络、模糊逻辑网络、多项式、样条函数和小波网络等.

文 [70-71] 分别研究了基于在线估计器的非线性系统故障分离问题. 文 [70] 针对执行机构故障分离问题, 研究了自适应阈值函数、故障分离条件和分离时间. 文 [71] 基于在线估计器, 研究了传感器偏差故障分离问题. 文 [72] 针对一种非线性不确定性系统, 提出一种基于在线估计器的主动容错控制方法, 其中利用在线估计器实现了系统故障检测和故障估计. 文 [73] 针对非匹配不确定性的非线性系统, 提出一种主动故障补偿控制律, 其中故障信号由神经网络获得. 文 [74] 利用自适应估计方法对分布式非线性系统进行故障诊断, 其中分布式非线性系统可分解为多个状态交互子系统. 文 [75] 针对部分状态可测的 Lipschitz 非线性系统, 提出了自适应估计方法的故障检测和分离问题.

基于自适应学习的故障诊断方法能够估计故

障, 从而用于故障分离和容错控制. 为了准确在线估计故障信号, 一般在学习算法中加入了死区操作, 防止状态误差小于阈值时自适应参数的变化, 使得故障估计对误差信号具有鲁棒性; 为了保证存在近似误差时学习算法的稳定性, 利用投影操作限制估计参数在预定集合中. 但死区操作和投影操作的使用也具有一定的缺陷: 利用死区操作可能影响故障估计的精确度; 投影操作虽然防止了参数漂移, 但投影操作的设计并不容易. 当在线估计器的自适应参数较多时, 需要极高的计算量.

## 6 其它方法 (Other approaches)

等价空间法是线性系统故障诊断的一种方法, 其残差的构造方式完全基于线性系统描述. 虽然将其推广到非线性系统较难, 但不乏成功实例. 文 [76] 将等价空间方法扩展到双线性系统故障诊断中, 使用一个等价检验代替寻找一系列等价方程实现故障分离; 文 [77] 针对弱非线性系统, 利用等价空间方法设计结构化残差进行故障诊断; 文 [78] 针对能够用 T-S 模糊模型近似的非线性系统, 利用 LMI 方法设计基于残差产生器的等价关系从而重构故障.

系统分解方法, 此方法主要对非线性系统进行结构处理, 利用状态变换, 将系统分解为 2 个子系统: 一个子系统受故障影响, 但其状态可测; 另一子系统与故障解耦. 该方法对后者设计观测器, 利用前者实现故障诊断. 状态变换方法主要有线性变换和状态同胚. 文 [31,79] 提出系统分解方法和自适应观测器结合的故障诊断方法, 前者针对不确定双线性系统, 采用线性变换的方法; 后者针对仿射非线性系统, 采用状态同胚的方法; 文 [80] 利用系统分解方法和 SMO 对不确定性仿射非线性系统进行故障重构; 此方法也见于文 [48,75]. 所以此方法需要与其它方法结合才能实现非线性系统的故障诊断.

## 7 应用领域 (Application fields)

非线性系统的故障诊断虽然已经具有丰富的研究成果, 但是大多还处于理论研究和实验仿真阶段, 应用到实际系统中相对较少, 表 1 列出了一些处于实验阶段或者成功用于实际系统的实例.

## 8 结论 (Conclusion)

本文对基于解析模型的非线性系统故障诊断方法进行了较全面的综述, 将基于解析模型的非线性故障诊断方法主要归纳为 4 大类并分别进行了讨论. 虽然近 10 年来, 非线性系统的故障诊断研究取得了丰硕的成果, 但故障检测问题研究较多, 故障

分离和估计研究较少, 且大量文献只针对出现单故障的情况进行了研究, 多故障的分离和估计也是亟待解决的问题. 此外, 故障诊断的鲁棒性、实时在线故障诊断以及故障预测的研究较少, 有待进一步研究. 下面给出一些基于解析模型的非线性故障诊断未来的研究方向和尚需深入研究的领域:

(1) 复杂非线性系统的故障诊断. 复杂非线性系统不具有统一的数学描述且一般具有强非线性、强耦合和时滞等特性, 使得建立精确非线性数学模型和统一的数学描述都难以实现. 目前基于解析模型的方法主要针对一类非线性系统, 在基于观测器的方法中, 也未有像 Luenberg 观测器那样的统一方法, 所以研究基于解析模型的复杂非线性系统故障诊断有待深入.

(2) 非线性系统的融合故障诊断. 基于解析模型的故障诊断方法最大缺点是需要已知系统的精确数学模型, 基于信号处理、基于知识的方法则不需要. 如何将基于解析模型的方法与系统测量信息、定性

认知和人工经验有机结合, 避免单一方法的局限性, 提高非线性故障诊断的性能, 也是未来的一个热点方向.

(3) 非线性系统的集成故障诊断和容错控制. 集成故障诊断与容错控制可以同时考虑故障诊断的性能以及容错控制器的鲁棒性能, 使系统具有更好的容错特性, 然而与线性系统的集成故障诊断和容错控制成果相比, 非线性系统的研究成果甚少.

(4) 非线性系统的故障预测. 为了进一步提高系统可靠性, 专家学者一直致力于系统出现微小异常征兆时, 预测系统是否发生故障以及故障发生的时间和位置, 从而避免事故的发生, 但 2000 年以后, 此方向的研究进展缓慢.

(5) 特定非线性系统故障诊断问题. 对于一些特定非线性系统, 如: 分布式非线性系统、混杂系统、非线性耗散系统和网络控制系统等, 一般非线性故障诊断方法很难适用. 对这类系统的研究也是非线性系统故障诊断的一个重要研究方向.

表 1 基于解析模型的非线性故障诊断的应用实例

Tab.1 Application examples of analytical model-based fault diagnosis on nonlinear systems

方法	应用实例	文献
基于 NUIO 的方法	飞行模拟实验, 三容水箱	[19-20,81]
基于自适应观测器的方法	飞行控制系统, 工业机械臂	[30-31,82]
基于 SMO 的方法	水下无人飞行器, 实验发电机组垂直三容水箱	[83-85]
基于 UKF 的方法	舵机控制实验系统, 旋翼飞行机器人	[51,86]
基于 PF 的方法	移动机器人, 低温推进系统, 高压直流系统	[87-89]
微分几何方法	液压轧机控制系统, 飞行控制系统	[68,90]
自适应学习方法	卫星姿控系统, 航空发动机	[91-92]

### 参考文献 (References)

- [1] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-758.  
Zhou D H, Hu Y Y. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 748-758.
- [2] Beard R V. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization[D]. Massachusetts, USA: Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, 1971.
- [3] Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - A survey and some new results[J]. Automatica, 1990, 26(3): 459-474.
- [4] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K. A review of process fault detection and diagnosis. part I: Quantitative model-based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293-311.
- [5] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis. part II: Qualitative models and search strategies[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 313-326.
- [6] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis. part III: Process history based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 327-346.
- [7] Isermann R. Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006.
- [8] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms, and tools[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [9] Wang H, Chai T Y, Ding J L, et al. Data driven fault diagnosis and fault tolerant control: Some advances and possible new directions[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 739-747.
- [10] Hwang I, Kim S, Kim Y. A survey of fault detection, isolation and reconfiguration methods[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 636-653.
- [11] Frank P M. On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey[J]. International Journal of Systems Science, 1994, 25(12): 2129-2154.

- [12] Garcia E A, Frank P M. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: A survey[J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 663-670.
- [13] 李令莱, 周东华. 基于解析模型的非线性系统鲁棒故障诊断方法综述[J]. *信息与控制*, 2004, 33(4): 451-456.  
Li L L, Zhou D H. Robust fault diagnosis of nonlinear system based on analytical models: A survey[J]. *Information and Control*, 2004, 33(4): 451-456.
- [14] 周东华, 席裕庚. 一类非线性系统参数偏差型故障的实时监测与诊断[J]. *自动化学报*, 1993, 19(2): 184-189.  
Zhou D H, Xi Y G. Real-time detection and diagnosis of parameter bias faults for nonlinear systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(2): 184-189.
- [15] Watanebe K, Himmelblau D M. Incipient fault diagnosis of nonlinear processes with multiple causes of faults[J]. *Chemical Engineering Science*, 1984, 39(3): 491-508.
- [16] Wunnenberg J. Observer-based fault detection in dynamic systems[D]. Duisburg, Germany: University of Duisburg, 1990.
- [17] Frank P M, Schreier G, Alcorta Garcia E. Nonlinear observers for fault detection and isolation[J]. *Control and Information Sciences*, 1999, 244: 399-422.
- [18] Pertew A M, Marquez H J, Zhao Q.  $H_\infty$  synthesis of unknown input observers for nonlinear Lipschitz systems[J]. *International Journal of Control*, 2005, 78(15): 1155-1165.
- [19] Amato F, Cosentino C, Mattei M. A direct/functional redundancy scheme for fault detection and isolation on an aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006(10): 338-345.
- [20] Amato F, Cosentino C, Mattei M. A nonlinear UIO scheme for the FDI on a small commercial aircraft[C]//*Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 235-240.
- [21] Koeing D, Mammari S. Design of a class of reduced order unknown inputs nonlinear observer for fault diagnosis[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 2143-2147.
- [22] Sedighi T, Koshkouei A J, Burnham K J. Nonlinear unknown input observer design for nonlinear systems: A new method[C]//*Proceedings of the 18th IFAC World Congress*. New York, NY, USA: Elsevier, 2011: 11067-11072.
- [23] Chen W T, Saif M. Fault detection and isolation based on novel unknown input observer design[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 5129-5134.
- [24] Mondal S, Chakraborty G, Bhattacharyya K. Robust unknown input observer for nonlinear systems and its application to fault detection and isolation[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2008, 130(4): 1-5.
- [25] Mondal S, Chakraborty G, Bhattacharyya K. LMI approach to robust unknown input observer design for continuous systems with noise and uncertainties[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2010, 8(2): 210-219.
- [26] Chen W T, Saif M. Fuzzy nonlinear unknown input observer design with fault diagnosis applications[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2010, 16(3): 377-401.
- [27] Lee K S. Design of a fuzzy model based reduced order unknown input observer for a class of nonlinear systems[J]. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2008, 57(7): 1247-1253.
- [28] Jiang B, Chowdhury F N. Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observer[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2005, 342(7): 725-736.
- [29] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [30] Meng L Y, Jiang B, Xu Y F. Observer-based robust fault diagnosis for a class of uncertain nonlinear systems[C]//*Chinese Control and Decision Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 885-889.
- [31] Jiang B, Wang J L. Actuator fault diagnosis for a class of bilinear systems with uncertainty[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2002, 339(3): 361-374.
- [32] Ma H J, Yang G H, Wei L. Adaptive observer-based fault diagnosis for a class of MIMO nonlinear uncertain systems[C]//*Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1044-1049.
- [33] Zhang K, Jiang B, Shi P. Fast fault estimation and accommodation for dynamical systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(2): 189-199.
- [34] Caccavale F, Villani L. An adaptive observer for fault diagnosis in nonlinear discrete-time systems[C]//*Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2463-2468.
- [35] Caccavale F, Pierri F, Villani L. Adaptive observer for fault diagnosis in nonlinear discrete-time systems[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2008, 130(3): 1-9.
- [36] 姚利娜, 王宏. 基于有力平方根逼近的非高斯随机分布系统的故障诊断和容错控制[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(4): 563-568.  
Yao L N, Wang H. Fault diagnosis and tolerant control for non-Gaussian stochastic distribution control systems based on the rational square-root approximation model[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 563-568.
- [37] Sreedhar R, Fernandez B, Masada G Y. Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Control Application*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 715-721.
- [38] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 541-553.
- [39] Ma L L, Yang Y H, Wang F L, et al. A sliding mode observer approach for fault detection and diagnosis in uncertain nonlinear systems[C]//*Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 2714-2717.
- [40] Wu Q, Saif M. Robust fault detection and diagnosis in a class of nonlinear systems using a neural sliding model observer[J]. *International Journal of Systems Science*, 2007, 38(11): 881-899.
- [41] Castillo-Toledo B, Anzures-Marin J. Model-based fault diagnosis using sliding mode observers to Takagi-Sugeno fuzzy model[C]//*Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 652-657.
- [42] Akhenak A, Chadli M, Ragot J, et al. Fault detection and isolation using sliding mode observer for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy model[C]//*16th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 286-291.



- [43] Wu Q, Saif M. A neural-fuzzy sliding mode observer for robust fault diagnosis[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4982-4987.
- [44] Yan X G, Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer[J]. *Automatica*, 2007, 43(9): 1605-1614.
- [45] Rincon-Pasaye J J, Martinez-Guerra R. Fault diagnosis by means of sliding mode techniques[C]//4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 318-321.
- [46] Martinez-Guerra R, Rincon-Pasaye J J. Fault reconstruction for nonlinear systems using sliding mode observers[C]//Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4323-4328.
- [47] Sharma R, Aldeen M. Design of integral sliding mode observers with application to fault and unknown input reconstruction[C]//Joint 48th Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 6958-6963.
- [48] Yan X G, Edwards C. Adaptive sliding mode observer based fault reconstruction for nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 4029-4036.
- [49] Yan X G, Edwards C. Fault estimation for single output nonlinear systems using an adaptive sliding mode estimator[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(10): 841-850.
- [50] Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A new approach for filtering nonlinear systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1628-1632.
- [51] 张鹏, 黄金泉. 航空发动机气路故障诊断的平方根 UKF 方法研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(1): 169-173.  
Zhang P, Huang J Q. SRUKF research on aeroengines for gas path component fault diagnosis[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(1): 169-173.
- [52] Zhang P, Huang J Q. Aero engine performance monitoring and fault diagnosis based on transient measurements[C]//2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-4.
- [53] 葛哲学, 杨拥民, 温熙森. 强跟踪 UKF 方法及其在故障辨识中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(8): 1670-1674.  
Ge Z X, Yang Y M, Wen X S. Strong tracking UKF method and its application in fault identification[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(8): 1670-1674.
- [54] Tudoroiu N, Zaheeruddin M. Fault detection and diagnosis of valve actuators in discharge air temperature (DAT) systems using interactive unscented Kalman filter estimation[C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 2665-2670.
- [55] Tudoroiu N, Zaheeruddin M, Tudoroiu E-R, et al. Fault detection and diagnosis (FDD) in heating ventilation air conditioning systems (HVAC) using an interactive multiple model augmented unscented Kalman filter(IMMAUKF)[C]//2008 Conference on Human System Interactions. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 334-339.
- [56] Mosallaei M, Salahshoor K. Comparison of centralized multi-sensor measurement and state fusion methods with an adaptive unscented Kalman filter for process fault diagnosis[C]//4th International Conference on Information and Automation for Sustainability. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 519-524.
- [57] Kadiramanathan V, Li P, Jaward M H, et al. A sequential Monte Carlo filtering approach to fault detection and isolation in nonlinear systems[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 245-250.
- [58] Kadiramanathan V, Li P, Jaward M H, et al. Particle filtering-based fault detection in non-linear stochastic systems[J]. *International Journal of Systems Science*, 2002, 33(4): 259-265.
- [59] Liu S R, He W B. Strong tracking particle filter based fault diagnosis for nonlinear systems[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 539-543.
- [60] 葛哲学, 杨拥民, 胡政. 非高斯噪声下基于 Unscented 粒子滤波器的非线性系统故障诊断方法[J]. *兵工学报*, 2007, 28(3): 332-335.  
Ge Z X, Yang Y M, Hu Z. Unscented particle filter-based fault diagnosis of nonlinear system with non-Gaussian noises[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3): 332-335.
- [61] Li P, Kadiramanathan V. Particle filtering based likelihood ratio approach to fault diagnosis in nonlinear stochastic systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, 2001, 31(3): 337-343.
- [62] Wang X D, Syrmos V L. Interacting multiple particle filters for fault diagnosis of nonlinear stochastic systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 4274-4279.
- [63] Liu Y T, Jiang J P. Fault diagnosis and prediction of hybrid system based on particle filter algorithm[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1491-1495.
- [64] Li J, Chan C W, Zhang H Y. Asymptotic local approach in fault detection based on predicative filters[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, 28(6): 1112-1122.
- [65] Hammouri H, Kabore P, Kinnaert M. A geometric approach to fault detection and isolation for bilinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1451-1455.
- [66] Persis C D, Isidori A. A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(6): 853-865.
- [67] Floquet T, Barbot J P, Perruquetti W, et al. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer[J]. *International Journal of Control*, 2004, 77(7): 622-629.
- [68] Dong M, Liu C, Li G Y. Robust fault diagnosis based on nonlinear model of hydraulic gauge control system on rolling mill[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(2): 510-515.
- [69] Bokor J, Szabo Z. Fault diagnosis and isolation in nonlinear systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2009, 33(2): 113-123.
- [70] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576-593.
- [71] Zhang X D, Parisini T, Polycarpou M M. Sensor bias fault isolation in a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(3): 370-376.



- [72] Zhang X D, Parisini T, Polycarpou M M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: An information-based diagnostic approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(8): 1259-1274.
- [73] Zhang Y W, Joe S Q. Adaptive actuator/component fault compensation for nonlinear systems[J]. *AIChE Journal*, 2008, 54(9): 2404-2412.
- [74] Errari R, Parisini T, Polycarpou M M. Distributed fault diagnosis with overlapping decompositions: An adaptive approximation approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 794-799.
- [75] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. Fault diagnosis of a class of nonlinear uncertain systems with Lipschitz nonlinearities using adaptive estimation[J]. *Automatica*, 2010, 46(2): 290-299.
- [76] Yu D L, Shields D N. Extension of the parity-space method to fault diagnosis of bilinear systems[J]. *International Journal of Systems Science*, 2001, 32(8): 953-962.
- [77] Gertler J, Staroswiecki M. Structured fault diagnosis in mildly nonlinear systems: Parity space and input-output formulations[C]//Preprints of IFAC 16th Triennial World Congress. Laxenburg, Austria: IFAC, 2002: 439-444.
- [78] Nguang S K, Zhang P, Ding S X. Parity relation based fault estimation for nonlinear systems: An LMI approach[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2007, 4(2): 164-168.
- [79] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault diagnosis based on adaptive observer for a class of nonlinear systems with unknown parameters[J]. *International Journal of Control*, 2004, 77(4): 415-426.
- [80] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault estimation in nonlinear uncertain systems using robust/sliding-mode observers[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 151(1): 29-37.
- [81] Zolghadri A, Henry D, Monson M. Design of nonlinear observers for fault diagnosis: A case study[J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(11): 1535-1544.
- [82] Antonelli G, Pierri F, Villani L. Adaptive discrete-time fault diagnosis for a class of nonlinear systems: Application to a mechanical manipulator[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 667-672.
- [83] Alessandri A, Hawkinson T, Healey A J, et al. Robust model-based fault diagnosis for unmanned underwater vehicles using sliding mode-observers[C]//11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 1-8.
- [84] Goh K B, Spurgeon S K, Jones N B. Fault diagnostics using sliding mode techniques[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(2): 207-217.
- [85] Orani N, Pisano A, Usai E. Fault diagnosis for the vertical three-tank system via high-order sliding-mode observation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2010, 347(6): 923-939.
- [86] 齐俊桐, 韩建达. 基于 MIT 规则的自适应 Unscented 卡尔曼滤波及其在旋翼飞行器机器人容错控制的应用 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 115-125,  
Qi J T, Han J D. Adaptive UKF and its application in fault tolerant control of rotorcraft unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 115-125.
- [87] Liu Y T, Jiang J P. Fault diagnosis and prediction of hybrid system based on particle filter algorithm[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1491-1495.
- [88] Koutsoukos X, Kurien J, Zhao F. Estimation of distributed hybrid systems using particle filtering methods[M]//Lecture Notes in Computer Science: vol.2623. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000: 298-313.
- [89] Liu X M, Zhang C, Guo H M. Fault diagnosis of high voltage direct current system based on particle filter[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1217-1222.
- [90] Meskin N, Jiang T, Sobhani E, et al. Nonlinear geometric approach to fault detection and isolation in an aircraft nonlinear longitudinal model[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 5771-5776.
- [91] Talebi H A, Khorasani K, Tafazoli S. A recurrent neural-network-based sensor and actuator fault detection and isolation for nonlinear system with application to the satellite's attitude control subsystem[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, 20(1): 45-60
- [92] 江传尚, 樊丁, 马冲. 小波网络在某型航空发动机故障诊断中的应用 [J]. *航空动力学报*, 2009, 24(4): 892-895.  
Jiang C S, Fan D, Ma C. Application of the wavelet network in fault diagnosis for some kind of aeroengine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(4): 892-895.

### 作者简介:

贾庆贤 (1986-), 男, 博士生. 研究领域为非线性系统的故障诊断, 容错控制, 卫星姿态控制.

张迎春 (1961-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为故障诊断, 卫星姿态控制, 计算机系统仿真.

管宇 (1981-), 女, 博士生. 研究领域为卫星姿控系统故障诊断与容错控制.