

国内动态系统故障诊断技术的一些最新进展

Some Latest Developments on Fault Diagnosis of Dynamic Systems in China

(清华大学自动化系) 周东华



周东华 (1963—)

男, 河北邯郸人, 博士后, 现为清华大学自动化系副主任, 博士生导师。

1 引 言

当今社会, 复杂军用和民用系统的规模在不断扩大, 人们对这类系统的可靠性、可维护性与安全性提出了越来越高的要求, 致力于大大减少灾难性事故的发生、减少环境污染和人身财产损失, 以提高经济效益或军事效益。动态系统的故障诊断技术为解决上述问题提供了一种重要的技术手段。

该技术在过去的三十多年来得到了长足的发展, 尤其是近十几年来, 随着计算机科学、计算智能等新技术的快速发展, 许多新方法和新技术被引入到该领域^[1]。各种故障诊断方法大体上可以分为三大类^[2]: 基于解析模型的方法, 基于定性模型/知识的方法和基于过程历史数据的方法。后两类方法, 例如向图、故障树、专家系统、神经网络及主元分析等, 在近年来发展很快, 但以控制理论为基础的基于解析模型的方法仍然具有很重要的研究意义。然而, 基于解析模型的大部分研究都是针对线性系统的, 文^[1]明确指出了非线性系统的故障诊断和故障诊断的鲁棒性都是研究中值得关注的问题。

基于解析模型的故障诊断方法的鲁棒性问题具有重要的实用意义, 因为许多实际生产过程由于各种未知扰动、噪声等因素, 很难得到精确的数学模型。由于建模不确定和故障实际上

都是不期望的动态特性, 如果不能很好处理建模不确定的影响, 原有的故障诊断方法甚至会完全失效。鲁棒故障诊断指的就是在具有建模不确定的情况下, 故障诊断系统能在一定程度上区分扰动和故障, 仍然具有较好的性能。关于线性系统的鲁棒故障诊断已经有很丰富的成果^[3-5]。文^[3、4]指出, 故障诊断的鲁棒性体现在两方面: 残差生成和残差评价。鲁棒残差产生的方法^[3-5]主要有未知输入观测器、特征结构划分、扰动解耦的等价空间检验、频域优化等方法; 鲁棒残差评价的方法^[3、4]主要有似然比检验、自适应阈值、残差选择器、模糊逻辑等方法。文^[3、4]中提到了一些针对非线性系统鲁棒故障诊断的方法, 但内容不多。文^[5、6]对非线性系统的故障诊断方法均有简要的概述, 但没有深入讨论其鲁棒性问题。关于非线性系统鲁棒故障诊断已有一些相应的综述文章^[7、8], 其中主要有非线性/双线性未知输入观测器和自适应观测器方法。近年来, 该领域又有不少新的发展。

基于模型的故障诊断方法主要有观测器、等价空间、滤波器、参数估计和频域等方法^[2-4]。其中, 等价空间和频域方法都是针对线性系统设计的, 难以推广到非线性系统; 对非线性系统, 参数估计的方法主要有强跟踪滤波器方法^[6], 但参数估计方法的一个弱点是需要比较准确的数学模型, 且计算量偏大^[2]。因此, 现有的非线性系统鲁棒故障诊断方法大多是基于观测器的状态估计方法, 其中最主要的方法有两类: 对结构化未知扰动解耦的方法和自适应学习的方法。

2 发展现状

如下几个子方向属于本学科的热点研究方向, 在过去的几年中, 都取得了一些重要的进展。

混杂系统的故障诊断 混杂系统的状态估计与故障诊断均是具有挑战性的问题, 针对一类既有未知输入也有故障的混杂系统, 文^[9]提出了一种新颖的鲁棒混杂观测器, 把模型的不确定性, 干扰与故障均描述成结构化的扰动。鲁棒混杂观测器由一个模态观测器, 及一个连续观测器组成, 用于分离出系统的

模态,并估计出系统的状态。文^[9]证明了,所得到的状态估计误差是指数一致有界的,采用干扰解耦技术,保证了对未建模动态的鲁棒性。此外,文^[9]还严格分析了故障可检测性与模态的可辨识性。基于此鲁棒混杂观测器,文^[9]随后给出了一类混杂系统的故障检测与分离方法,并采用一个4容水箱系统,验证了所提出了方法的有效性。

鲁棒故障诊断文^[10]将参数自适应率与滑模控制引入到Polycarpou的估计器中,提出了一种具有更快速率的非线性系统的鲁棒故障诊断方法。参见如下系统:

$$\dot{x} = \xi(x, u) + \varphi(x, u) + B(t-T)f(x, u, t)$$

其中状态 $x \in R^n$; $u \in R^m$; $\xi(x, u) \in R^n$; 是非线性系统的标称模型; $\varphi(x, u) \in R^n$ 代表模型不确定性;

$f(x, u, t) \in R^n$ 代表故障函数。故障的发生时刻 $B(t-T) = \text{diag}\{\beta_1(t-T_1), \dots, \beta_n(t-T_n)\}$ 由表示, 其中 $\beta_i(\tau) (i=1, \dots, n)$ 是单位阶跃函数, 第*i*个子系统的故障在 T_i 时刻发生 ($i=1, \dots, n$)。

文^[10]在理论上严格证明了所给出的方法具有更快的故障检测速率,并进行了仿真验证。

文^[11]研究线性不确定系统的鲁棒故障诊断问题,提出了最优残差产生器参考模型的概念,将鲁棒故障诊断滤波器设计归结为模型匹配问题,得到了问题求解的线性矩阵不等式方法。

采样系统的故障诊断文^[12]在频域采用所提出的新算子,给出了一种新的故障检测方法。此方法考虑了采样器本身的动态特性对系统的影响,因此由此得到的采样系统跟原连续系统相比没有做近似处理。由此设计的故障检测器就具有更好的性能。当采样频率不够高时,与通常的间接故障检测方法相比,所提出的方法可以取得更好的检测效果。

文^[13]对于多速率数据采样系统,首先应用提升技术建立了系统的提升模型,然后通过求解Riccati方程设计了基于观测器的故障诊断滤波器,并进一步利用解的非唯一性得到了满足因果关系的最优解。最后应用逆提升技术实现了多速率数据采样系统的快速残差产生,为多速率数据采样系统的快速故障诊断提供了解决方案。

基于定性仿真的潜在故障分析技术 文^[14, 15]提出了拓扑模式划分与定性仿真相结合的大型复杂系统智能化潜在问题识别方法、建立了基于定性仿真的潜在问题分析理论,研制了国内第一个具有完全自主知识产权的计算机辅助潜在问题分析系统,应用该系统,发现我国某三个新研导弹武器设计中的13个问题并提出设计更改意见。该项目2002年获军队科技进步二等奖。

网络化系统的故障诊断 网络化控制系统与传统结构的系统相比有许多优点,但控制信号经网络传输所产生的随机时延、丢包、异步等现象会影响闭环控制系统的特性,因此需要发展新的理论。我国学者在国际上最早开展了网络化控制系统故障诊断与容错控制的系统研究工作,提出了多种基于信息调

度模型、时延模型的网络化控制系统故障诊断与容错控制算法,提出了适用于描述线性和非线性带随机多时延的网络化控制系统模型及其基于此类模型的故障诊断与容错控制方法^[16-17]。

基于自适应技术的故障诊断 自适应技术可以有效地处理状态不可测动态系统的故障诊断和容错控制问题。针对非线性系统,在观测器中加入故障估计项,并设计相应的鲁棒自适应律诊断故障。基于观测器的容错控制器补偿故障对系统的影响从而使故障系统镇定^[18]。此外,还可运用微分几何手法将原系统分解为两个子系统,使得一个子系统对故障解耦,再对该子系统设计自适应观测器从而诊断故障。类似的分解思想也可用于多输入多输出随机系统,对不受故障影响的子系统设计扩展Kalman滤波器从而诊断故障,进而设计容错控制器使故障系统镇定^[19]。

频域故障诊断方法的定量分析文^[20, 21]首次定量研究了基于H2的(频域)故障诊断方法和基于等价空间的(时域)故障诊断方法的关系,提出了两种基于观测器和小波变换的故障诊断方法,利用信号时频分析的优点,提高了传统基于观测器的故障诊断方法的性能。

满意容错控制器设计文^[22, 23]在容错控制中融入多目标优化和满意控制等思想,提出了多约束条件下满意容错控制的设计理论与方法,使设计出的容错控制系统能同时满足多个性能指标和约束条件的要求;针对线性不确定系统及一类T-S模糊模型非线性系统,解决了系统故障下具有区域极点指标约束、稳态方差指标约束、H指标约束和控制器能耗约束的满意容错控制问题,给出了满意容错控制器的设计方法与步骤。

3 与国外的对比分析

上述8个子方向上的成果基本上都处于国际领先地位,代表了我国在动态系统故障诊断方向上近年来的一些主要成果。

4 国家需求与重要研究方向

在2006年2月国务院发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要2006-2020年》中,已将“重大产品和重大设施寿命预测技术”列为需要重点研究的前沿技术之一,而故障诊断与预测技术正是其核心技术之一。一些重要的研究方向包括:

基于数据驱动的复杂系统故障诊断与预测技术 这里的复杂系统是指具有高维、非线性、强耦合、随机噪声和输入时延的控制系统,这类系统的特点是很难建立起精确的数学模型。但通过DCS等数据采集装置,我们可以得到其大量的历史和实时数据。如何根据这些数据建立预测预报系统运行状态的数学模型,基于这些预测模型动态地评估系统的可靠性和安全性,就成为保证复杂系统安全可靠运行的关键难题。

基于半定量信息的复杂系统故障诊断与预测技术系统运状

态的监测数据客观地反应了系统运行的安全性与可靠性，但人们对系统工作状态的评价不仅仅依赖于这些数据，还依赖于人们在长期实践中积累起来的经验认识，如何综合利用这些客观信息和主观经验，即：半定量信息，对复杂系统的运行状态及其可靠性与安全性进行评估，实现故障诊断与预报，提高诊断和预测的性能也是迫切需要解决的问题。

基于多源信息的复杂系统故障诊断与预测技术当所获取的系统的输出信息具有本质区别时，如：既有压力、流量、温度等常规信息，又有部分图像信息时，如何对这些信息进行有效融合，提取系统本质信息进行诊断与预测，仍是一个有待解决的问题。

5 结束语

近年来，信号处理、人工智能、模式识别等学科的发展促进了故障诊断向故障预测方向的发展。基于解析模型的方法能够很好地跟踪系统的变化趋势，而且故障预测的结果也比较准确，但是使用这种方法的前提是系统模型已知，这一条件对于复杂系统通常是难以达到的，因此使这一方法的适用范围受到了限制。基于信号处理的方法不需要系统的解析模型，但是利用这种方法所得到的预测结果如何与实际系统的故障模式建立对应关系是一个难点问题。基于定性知识的方法同样不需要系统的解析模型，而且引入了预测对象的许多信息，因此在许多领域有着特殊的作用，但是不同的定性方法适用的范围也不相同。因此，在实际使用的时候必须根据所获得系统知识的情况来选择合适的方法。基于混合方法的故障预测能够结合各种单一方法的优点，很好地实现对系统的故障预测。例如，结合系统的一些先验知识，利用基于信号处理的方法对系统进行故障预测。因此这是一种很有前途的方法。但是如何将这些单一的方法进行有效结合，结合之后，故障预测效果的分析也有待进一步的研究。

另外，故障预测技术还需同实际相结合，如何利用故障预测的结果来指导复杂系统的设计和维护也是一个值得研究的课题。

参考文献

[1] Frank P M, Ding S X and K?ppen-Seliger B. Current Developments in the Theory of FDI. 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS' 2000. Budapest, Hungary, 2000: 16-27.

[2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K and Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis Part I: quantitative model-based methods. Computer & Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293-311.

[3] Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection. International Journal

of Control, 1994, 59(4): 955-981.

[4] Frank P M and Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. Journal of Process Control, 1997, 7(6): 403-424.

[5] Chen J and Patton R J. Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2000.

[6] 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.

[7] Frank P M. On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: a survey. International Journal of Systems Science, 1994, 25(12): 2129-2154.

[8] Garcia E A and Frank P M. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis a survey. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 663-670.

[9] Wang W. H., Zhou D.H., Robust state estimation and fault diagnosis for uncertain hybrid systems. Nonlinear Analysis-THEORY METHODS & APPLICATIONS, 2006, 65: 2193-2215.

[10] Li L. L., Zhou D. H., Fast and robust fault diagnosis for a class of nonlinear systems: Detectability analysis. Computers and Chemical Engineering. 2004, 18(12): 2635-2646.

[11] Zhong Maiying, Steven X. Ding, James Lam, Wang Haibo. LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems. Automatica, 2003, 39(3): 543-550.

[12] Zhang P, Ding S. X., Wang G. Z, Zhou D. H., A frequency domain approach to fault detection in sampled-data systems. Automatica. 2003, 39(8): 1303-1307.

[13] Zhong Maiying, Ye Hao, Steven X. Ding, Wang Guizeng. Observer-based fast rate fault detection for a class of multirate sampled-data systems, IEEE Trans. Automatic Control, 2007, 52(3): 520-525.

[14] Hu Changhua, Xiaoping Cao and Hongdong Fan. Fault Prediction Based on Bayesian MLP Neural Networks. GESTS International Transactions on Computer Science and Engineering, 2005, 16(1): 132-139.

[15] Zhou Z. J., Hu C. H., An effective hybrid approach based on grey and ARMA for forecasting gyro drift. Chaos Solitons & Fractals, 2007, 34 (6): 1-5.

(下转第63页)