



基于模型的控制系統故障診斷技術的 最新進展¹⁾

周東華 王慶林

(北京理工大學自控系 100081)

摘 要

評述了近三年來基於模型的控制系統故障診斷技術的發展狀況。介紹了這一技術在九個方面的最新進展及十一項最新的應用。對故障診斷技術目前的狀況進行了分析和總結，給出了這一領域中值得進一步研究的一些問題和可能的發展方向。

關鍵詞： 控制系統，故障檢測，故障診斷，基於模型的故障檢測。

1 引言

近年來控制系統的故障檢測與診斷技術日益受到控制界的高度重視，一些著名的自動控制學術會議，如 ACC，CDC 等都已設有這方面的專題。從 1991 年起，IFAC 每三年召開一次世界性的控制系統故障診斷專題學術會議。在 1993 年 7 月召開的第十二屆 IFAC 世界大會上，有關故障診斷的專題組就有 6 個，發表有關學術論文約 50 篇，使得故障診斷成為此次大會少數幾個熱門研究方向之一。

本文擬對這門技術近三年來的一些發展狀況進行初步的評述。所引用的文獻都是近三年來發表的一些具有代表性的研究成果。對 90 年以前狀況感興趣的讀者可進一步參閱文獻[1]。

2 故障診斷技術的最新進展

本節將分九個方面介紹基於模型的控制系統故障檢測與診斷技術的一些最新進展。

2.1 魯棒故障檢測問題

近年來魯棒故障檢測問題成為一個主要的研究方向。目前達到魯棒故障檢測的途徑有兩個：1) 設計出魯棒的殘差序列，2) 殘差序列的魯棒評價。

目前魯棒殘差序列的產生方法主要有三種：1) 魯棒故障檢測濾波器。2) 多約束最

1) 國家自然科學基金與博士點基金資助項目，中國自動化學會第十屆青年學術年會大會特邀報告。
本文於 1994 年 7 月 13 日收到

优化方法。3) 带观测器的等价空间法。而残差序列的鲁棒评价方法主要为: 选择适当的阈值、自适应阈值确定方法及阈值选择器法等。

2.2 等价空间法的发展

1) 与多目标优化方法相结合

Staroswiecki (1993) 引入了残差序列灵敏度的新概念。在等价空间的框架下, 采用多目标优化的方法, 使得所得到的残差序列可以对某些故障敏感而对其它故障及未知输入量不敏感。所设计的残差序列也是一种鲁棒残差序列。

2) 具有特定故障方向的残差序列

Gertler (1993) 提出由动态等价方程产生残差序列, 再利用等价方程中参数尚剩余的自由度进行重新设计, 使得残差序列相应于故障方向具有特定的方向性, 因此更有利于多个故障的分离的方法。

3) 连续时间等价空间法

离散形式等价空间法虽利于在线计算, 但易使实际系统参数和模型参数之间的关系复杂化, 不利于系统参数变动的检测。Hofling(1993)给出了一种连续时间的等价空间法, 由辅助变量法来产生输入输出信号的导数, 并由决策表来判别参数是否发生变动。

4) 基于等价空间法的故障及幅值估计

通常的等价空间法只能用于线性系统的故障检测与分离, 不能用于故障幅值的估计。Chen (1993) 等在等价空间法的基础上, 采用逆系统的方法, 对残差序列进行处理, 在一定条件下可以直接估计出故障的幅值。同时还给出了一种故障幅值的近似估计方法。

2.3 未知输入观测器方法

这是一种可以处理非线性系统故障检测与分离的方法。假设通过选择合适的变换阵, 使变换后的系统与由系统的噪声, 参数失配等因素造成的未知输入无关, 则在新模型上建立的观测器所得到的残差序列将具有关于系统模型不确定性的鲁棒性。文[2]给出了变换阵 $T(x)$ 应满足的条件及由新模型建立残差序列的方法, 并指出了进行故障分离的途径。

2.4 自适应非线性观测器方法

文[3]提出了一种自适应非线性观测器方法。在构造残差序列的同时, 可以在线估计出参数 θ (可代表未知的时变参数, 或缓慢漂移型故障等)。从而补偿了未知时变参数对残差序列的影响, 提高了正确检测率。

2.5 最优辅助输入信号法

文[4]提出了在不对原系统产生大的影响的条件下, 在系统的输入信号中引入辅助输入信号来提高故障检测速度的新思想。可以先用 Kullback 信息准则, 采用多约束优化方法在线求解辅助输入信号, 然后再用后向 SPRT 方法进行故障的检测。仿真结果表明, 此方法显著加快了故障检测速度, 并且故障的漏报率和误报率基本上维持不变。

2.6 用于故障分离的“设定输入”法

对线性系统, 假定已检测出系统发生了故障(故障的类型可能是: 1) 系统转移矩阵发生变动; 2) 执行器偏差; 3) 校正漂移等)。如何正确分离故障类型是一个比较困难的问题。若可以利用系统的输入量, 而不必考虑对系统的影响, 就可以设计出特殊的“设

定输入”,来达到故障分离的目的^[5]。

2.7 人工神经网络方法的深化

近年来,利用人工神经网络(ANN)进行控制系统故障检测与诊断的研究进一步深化。人工神经网络(ANN)已分别被用于:在线参数估计以补偿系统参数的变动、根据参数的变动产生适当的阈值(相当于自适应阈值发生器)、故障的分类等方面。

2.8 修正的累积和算法

属于统计处理方法的范畴。其基础是不变的序列概率比(SPRT)方法,适用于系统的输入输出关系可以由线性时变随机系统来描述的系统。由于算法简单,可用于系统回路或测量回路中所出现的缓慢漂移型故障的快速检测^[6]。

2.9 强跟踪滤波器方法

近三年来,强跟踪滤波器的理论得到进一步发展,并被应用于一类非线性时变随机系统,得到了一套系统地检测并诊断这类系统部件、执行器和传感器故障的有效方法。故障的类型可以是阶跃型,缓慢漂移型,在特定的条件下还可以是脉冲型。并且在国际上首次得到了一种非线性系统故障幅值的在线估计方法^[7-10]。

3 故障诊断技术的最新应用

表1列出了基于模型的控制系统故障检测与诊断技术的一些最新应用实例(包含只进行到仿真阶段的非实际应用)。

表1 基于模型的 FDD 技术应用实例一览表

| 序 号 | 应用对象 | 所用方法 | 论文作者及发表时间 |
|-----|-------|-----------|-------------------|
| 1 | 汽车发动机 | 非线性自适应观测器 | Frank P M, 1991 |
| 2 | 高压预热器 | 未知输入观测器 | Clemens D, 1991 |
| 3 | 机床 | 参数估计 | Isermann R, 1991 |
| 4 | 机器人 | 强跟踪滤波器 | 周东华,1992 |
| 5 | 核反应堆 | ANN | Hwang B C, 1993 |
| 6 | 化学反应器 | ANN | Sorsa T, 1993 |
| 7 | 高架起重机 | 未知输入观测器 | Seliger R, 1993 |
| 8 | 造纸机 | 强跟踪滤波器 | Zhou D H, 1993 |
| 9 | 导航系统 | 修正的累积和方法 | Nikiforov I, 1993 |
| 10 | 水轮机 | 参数估计 | Wang H, 1993 |
| 11 | 感应电动机 | 强跟踪滤波器 | 周东华,1994 |

4 结束语

从第二节对各种新方法的介绍,不难得出如下结论:

1) 各种方法的有机结合,相互渗透,导致了許多新方法的产生。第二节中的許多新方法都是已有方法相结合的结果。

2) 鲁棒故障检测问题已日益受到重视,成为研究热点。与多目标优化方法相结合的

等价空间法具有一定的关于外部干扰的鲁棒性; 未知输入观测器方法则具有关于外部干扰和系统参数变动的鲁棒性; 自适应观测器方法和人工神经网络方法具有一定的关于系统参数变动的鲁棒性; 强跟踪滤波器方法也是一种鲁棒故障检测与诊断方法, 它具有很强的关于系统参数变动、外部随机干扰, 以及噪声未建模动态的鲁棒性。

3) 对非线性系统而言, 基于参数估计的方法比基于状态估计的方法更有效。从基本原理来看, 基于模型的控制系统的 FDD 方法可以分成三大类: (1) 基于状态估计的方法。(2) 基于参数估计的方法。(3) 基于等价空间的方法。在第二节中, 只有强跟踪滤波器方法属于参数估计方法的范畴。

随着现代控制理论, 人工智能, 模式识别及计算机科学的发展, 作为交叉学科的控制系统的故障检测与诊断技术也处于发展之中。有待解决的问题和研究方向为:

- 1) 闭环控制系统的在线故障检测与诊断。
- 2) 用于非线性系统故障检测的最优阈值的确定方法。
- 3) 有色噪声干扰下, 控制系统的故障检测与诊断。
- 4) 一般非线性系统系统回路和测量回路脉冲故障的在线检测与诊断方法。
- 5) 非线性系统故障发生时刻的估计方法。
- 6) 与容错控制的有机结合等。

参 考 文 献

- [1] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 故障检测与诊断技术. 控制理论与应用, 1991, 8(1): 1—10.
- [2] Seliger R, Frank P M. Fault diagnosis by disturbance decoupled nonlinear observers. Proc. 30th CDC, 1991, 2248—2253.
- [3] Ding X, Frank P M. An adaptive observer-Based fault detection scheme for Nonlinear Dynamic Systems. Proc 12th IFAC World Congress, 1993, 8: 307—310.
- [4] Uosaki K, Takata N, Hatanaka T. Optimal auxiliary input for on-line fault detection and fault diagnosis. Proc. 12th IFAC World Congress, 1993, 7: 461—466.
- [5] Ribbens W B, Riggins R N. Detection and isolation of plant failures in dynamic systems. Proc. ACC, 1991, 1514—1521.
- [6] Nikiforov I, Varavva V, Kireichikov V. Application of statistical fault detection algorithm to navigation system monitoring. *Automatica*, 1993, 29: 1275—1290.
- [7] Zhou D H, Sun Y X, Xi Y G, Zhang Z J. Extension of friedland's, separate-Bias estimation to randomly time-varying bias for nonlinear systems. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1993, 38: 1270—1273.
- [8] 周东华, 孙优贤, 席裕庚, 张钟俊. 一类非线性系统参数偏差型故障的实时检测与诊断. 自动化学报, 1993, 19(2): 184—189.
- [9] Zhou D H, Sun Y X, Xi Y G, Zhang Z J. Sensor fault detection and diagnostics of nonlinear systems with application to paper machines. Proc. 12th IFAC World Congress, 1993, 1: 497—500.
- [10] 周东华. 基于参数估计的非线性系统的故障诊断技术. 张友民主编: 自动化理论、技术与应用, 西安: 西北工业大学出版社, 1994, 339—342.
- [11] 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术. 北京: 清华大学出版社, 1994.

THE LATEST DEVELOPMENT OF MODEL BASED FAULT DIAGNOSTICS TECHNIQUE OF CONTROL SYSTEMS

ZHOU DONGHUA WANG QINGLIN

(Dept. Automatic Control, Beijing Institute of Technology 100081)

ABSTRACT

The state-of-the-art of model based fault diagnostics technique in the past three years is reviewed. The latest achievements in nine aspects and eleven new applications in this field are introduced. Some problems worthy for further study in this field are presented.

Key words: Control systems, fault detection, fault diagnostics, model based fault detection.

征 文 通 知

1995 年中国智能自动化学术会议暨 智能自动化专业委员会成立大会 CIAC'95

会议主办单位

- 中国自动化学会智能自动化专业委员会
- 中国人工智能学会计算机视觉及智能控制学会
- IEEE 控制系统学会北京分会
- 天津大学

会议地点时间

天津大学 1995 年 8 月 28 日—31 日

会议组织机构

顾 问: 杨嘉墀 张钟俊 戴汝为 杨叔子 卢 强 蒋新松

主 席: 李衍达

副主席: 张 钹 涂序彦 于景元 戴冠中 王 珏 何世忠 李光泉

秘书长: 孙增圻 杜继宏

程序委员会主席: 张 钹

副主席: 王先来

(下转第 253 页)