

动态系统基于模型的 鲁棒故障诊断

*ROBUST MODEL-BASED FAULT
DIAGNOSIS FOR DYNAMIC SYSTEMS*

(英) Jie Chen Ron J. Patton 著
吴建军 译校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

动态系统基于模型的 鲁棒故障诊断

(英) Jie Chen Ron J. Patton 著
吴建军 译校

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2009-028号

图书在版编目(CIP)数据

动态系统基于模型的鲁棒故障诊断/(英)陈杰,
(英)巴顿(Patton, R. J.)著;吴建军译校. —北京:
国防工业出版社, 2009. 11
ISBN 978-7-118-06332-5

I. 动... II. ①陈... ②巴... ③吴... III. 动态系统:
不确定系统-鲁棒控制-故障诊断 IV. TP277

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第066845号

Translation from the English language edition:

Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems By Jie Chen and R.
J. Patton.

Copyright © 1999 Kluwer Academic Publishers, being a part of Springer Science + Business Media All Rights Reserved.

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 405 千字

2009年11月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 42.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

使动态系统变得更加安全与可靠的要求是持续不断增加的。除了对那些安全至上的系统以及如飞机、核反应堆等通常认为安全第一的系统外,这种要求也波及到系统的可用性是很关键问题的一些系统,如自主交通(运输)系统、高速铁路系统等。很明显,故障诊断(包括故障检测与隔离,FDI)已成为控制理论与实践中的重要研究方向。例如,在许多与控制相关的学术会议上,所发表的有关 FDI 论文的数量在近年来一直稳定增加。故障检测与隔离研究已发展成为控制工程中一个重要的研究领域。

自 1970 年以来,在文献中已积累了有关基于模型故障诊断的大量知识。然而,这些公开发表的文献散布在许多论文及几本所编辑的书中。截至 1997 年底,还没有一本书是在统一的框架内系统地介绍这一研究领域。由此造成的结果是在该研究领域中缺乏“共同语言”,不同的研究人员采用不同的技术术语。这一问题已阻碍了基于模型 FDI 技术的发展,引起该研究领域人们的极大关注。许多已发表的评述性论文都试图解决这个问题。但是,当前更迫切地需要一本书能以系统而统一的方式阐述这些资料,并为基于模型 FDI 研究提供全面系统的基础。这样一本书应能推动基于模型 FDI 的发展,并且使得已研究和发展的 FDI 方法能为工程师和研究生所理解与掌握。这一观点是该研究领域中众多研究者共同的心声。同时,由于该领域中许多重要的定义都已作出,并且建立了不同的基于模型 FDI 方法之间的一致性。因此,撰写这样一本书,不仅是可能的,也是很有条件的。

这本新书在统一的框架下系统地介绍了基于模型的 FDI 这一研究领域。书中包含有许多重要的研究课题和方法。完全覆盖 FDI 研究的所有内容及其完备性,并不是本书主要关心的方面。本书主要专注于介绍一些有关 FDI 的基本问题,如基本定义、FDI 方法中鲁棒性问题等。书中所介绍的 FDI 概念与方法均用教学实例或应用实例来加以验证与说明。本书的第 1 章、第 2 章具有教学性质,为进入 FDI 研究领域的新手提供一个出发点。本书的其余部分则通过讨论许多重要的鲁棒性方法及其应用来介绍基于模型 FDI 的最新发展。后半部分内容对该领域的专家无疑将极具吸引力。

本书受益的对象是那些愿意进入 FDI 研究领域的新手和那些关注 FDI 本质问题并为未来的研究探寻灵感的专家。本书既介绍了理论问题的研究,又广泛探讨了应用问题。因此,无论对学术界的研究人员还是工业界的工程师们都将是有利的。虽然本书是一本研究专著,但作者相信,对于攻读硕士、博士学位的研究生们而言,该书将是他们学习与研究的重要教学参考资料。或许本书最大的市场将是全世界的学术界、图书馆以及工程师与科学家们。

Jie Chen 博士与 Ron J. Patton 教授

致 谢

在与全世界众多同行和专家富有成果的讨论与合作中,作者一直受益良多。在这里虽然不可能一一提及他们每一个人,然而我们愿意感谢德国 Duisburg 大学的 P. M. Frank 教授、美国乔治-梅森(George Mason)大学 J. J. Gertler 教授,作者同他们进行了多次讨论与争论。作者十分感谢英国城市大学的 P. D. Roberts 教授,他的鼓励使作者开始了该专著的撰写。在本书的撰写过程中,作者还得到许多其他的帮助,多谢丹麦 Alborg 大学的 J. Stoustrup 教授、比利时 Libre de Bruxelles 大学的 M. Kinnaert 教授、德国 FH-Lauitz 学院的 X. Ding 教授、英国 UMIST 大学的 H. Wang 博士、英国 Coventry 大学的 D. N. Shields 博士以及美国辛辛那提大学的 M. M. Polycarpou 教授,感谢他们送给作者有关的最新出版物,使作者能够在本书中包含最新的 FDI 研究结果。特别感谢英国 Hull 大学的 Ming Hou 博士,他为作者提供了他的最新研究成果。

在这里作者还要对家人们的支持表示真挚的谢意。Chen 博士非常感谢他的妻子 Ling Hao 女士及女儿 Nancy,她们的耐心和理解使他能够在许许多多夜晚和周末专心于本书的撰写。Patton 教授感谢他的妻子 Ann 和他的孩子们 Libby、Kirstie 与 Stephen,由于他们的理解才使他在许多周末和假日里能随身携带着本书的初稿。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 故障诊断的重要意义	1
1.1.2 故障诊断中的技术术语	1
1.1.3 智能容错控制中的故障诊断	2
1.1.4 基于模型的故障诊断	2
1.1.5 基于模型故障诊断中的鲁棒性问题	4
1.2 基于模型故障诊断的发展简史	5
1.3 本书概要	10
第 2 章 基于模型故障检测与隔离的基本原理	14
2.1 引言	14
2.2 基于模型故障诊断的方法	14
2.3 在线故障诊断	15
2.4 故障系统建模	16
2.5 基于模型 FDI 中残差生成的一般结构	18
2.6 故障可检测性	20
2.6.1 故障可检测性条件	20
2.6.2 故障强可检测性条件	22
2.7 故障可隔离性条件	22
2.7.1 结构化残差集	23
2.7.2 固定方向性残差矢量	24
2.7.3 传感器与调节器故障隔离	24
2.8 残差生成方法	25
2.8.1 观测器方法	26
2.8.2 奇偶矢量(关系)法	29
2.8.3 因素分解法	33
2.9 基于模型 FDI 参数估计法	34
2.10 随机系统故障诊断	35
2.11 鲁棒性残差生成问题	36
2.11.1 关于干扰的鲁棒性	37
2.11.2 关于建模误差的鲁棒性	38

2.11.3	鲁棒 FDI 的讨论	38
2.12	鲁棒 FDI 中自适应阈值	39
2.13	基于模型 FDI 方法的可用性	41
2.13.1	观测器方法	42
2.13.2	奇偶关系方法	42
2.13.3	参数估计方法	43
2.13.4	可用性讨论	43
2.14	故障诊断技术的集成	44
2.14.1	故障诊断中的模糊逻辑技术	44
2.14.2	定性故障诊断技术	45
2.14.3	集成故障诊断系统	46
2.15	本章小结	47
第 3 章	基于 UIOs 的鲁棒残差生成	48
3.1	引言	48
3.2	UIOs 的理论与设计	50
3.2.1	UIOs 的理论	52
3.2.2	UIOs 的设计步骤	56
3.3	基于 UIOs 的鲁棒故障检测与隔离策略	58
3.3.1	基于 UIOs 的鲁棒故障检测策略	58
3.3.2	基于 UIOs 的鲁棒故障隔离策略	59
3.3.3	实例:化学反应装置中调节器故障的鲁棒检测与隔离	61
3.4	鲁棒故障检测滤波器与鲁棒方向性残差	67
3.4.1	故障检测滤波器的基本原理	67
3.4.2	干扰解耦故障检测滤波器与鲁棒故障隔离	69
3.4.3	喷气发动机系统传感器故障的鲁棒性隔离	72
3.5	不确定随机系统滤波与鲁棒故障诊断	76
3.5.1	具有未知干扰和噪声系统的最优观测器	77
3.5.2	鲁棒残差生成与故障检测	80
3.5.3	例子	81
3.6	本章小结	83
第 4 章	基于观测器特征结构配置的鲁棒残差生成方法	85
4.1	引言	85
4.2	残差生成与残差响应	86
4.3	干扰解耦设计的一般原理	87
4.3.1	基于不变子空间的干扰解耦设计	87
4.3.2	基于特征结构配置的干扰解耦设计	88
4.4	干扰解耦的左特征矢量配置方法	90

4.5	鲁棒故障检测器设计的参数特征结构配置方法	94
4.5.1	鲁棒 FDI 设计的参数特征结构配置	95
4.5.2	例子	96
4.6	干扰解耦的右特征矢量配置方法	99
4.7	鲁棒残差生成中的最小拍设计	102
4.8	基于特征结构配置方法的两个例子	104
4.9	结论与讨论	106
第 5 章	鲁棒残差生成中干扰分布矩阵的确定	107
5.1	引言	107
5.2	干扰分布矩阵的直接确定与优化	108
5.2.1	噪声与加性非线性	109
5.2.2	双线性系统	109
5.2.3	降阶模型	110
5.2.4	参数扰动	110
5.2.5	分布矩阵的低秩近似	111
5.2.6	有界不确定性	113
5.3	干扰与干扰分布矩阵的估计	113
5.3.1	干扰矢量估计的增广观测器方法	114
5.3.2	干扰分布矩阵的推导	115
5.3.3	干扰矢量估计的反卷积方法	116
5.4	多(变)工作点下最优干扰矩阵的确定	119
5.5	喷气发动机系统建模与 FDI	120
5.5.1	喷气发动机系统故障诊断的研究背景	120
5.5.2	喷气发动机系统描述	122
5.5.3	直接计算与优化方法的应用	123
5.5.4	增广观测器方法的应用	125
5.6	本章小结	129
第 6 章	基于多目标优化与基因算法的鲁棒残差生成器设计	131
6.1	引言	131
6.2	残差生成与性能指标	132
6.2.1	残差生成与响应	132
6.2.2	鲁棒残差生成中的性能指标	134
6.2.3	性能指标的说明	135
6.3	观测器设计中的参数化	136
6.3.1	实特征值	137
6.3.2	共轭复特征值	137
6.3.3	特征值的配置	138

6.4	多目标优化与不等式方法	138
6.4.1	多目标优化	138
6.4.2	不等式方法	139
6.5	基于基因算法的优化技术	142
6.5.1	基因算法简介	142
6.5.2	使性能不等式成立的基因算法步骤	145
6.6	飞行控制系统传感器缓变故障的检测	146
6.7	本章小结	150
第7章	基于最优奇偶关系的鲁棒残差生成方法	151
7.1	引言	151
7.2	最优奇偶关系设计中的性能指标	152
7.3	基于多目标优化的最优鲁棒奇偶关系设计	154
7.3.1	求解最优问题的SVD方法	154
7.3.2	多目标优化的求解	155
7.4	数值实例	158
7.5	有关设计最优奇偶关系的讨论	160
7.5.1	鲁棒故障隔离	160
7.5.2	多模型的概率分布	160
7.5.3	正交化奇偶关系	161
7.5.4	基于优化的鲁棒奇偶关系设计	162
7.5.5	闭环最优奇偶关系	163
7.6	本章小结	164
第8章	鲁棒故障诊断的频域设计与H_{∞}优化方法	165
8.1	引言	165
8.2	鲁棒故障检测的因数分解方法	167
8.2.1	基于因数分解的残差生成器设计	167
8.2.2	完全故障检测与隔离及完全干扰解耦	170
8.2.3	最优残差设计	175
8.3	基于标准 H_{∞} 滤波描述的鲁棒残差生成	180
8.3.1	具有干扰抑制的鲁棒残差生成	180
8.3.2	故障估计	182
8.3.3	具有干扰抑制的故障估计	184
8.3.4	鲁棒性问题	185
8.4	鲁棒残差生成的LMI方法	187
8.4.1	问题描述	187
8.4.2	敏感性范数分析	188
8.4.3	H_{∞} 控制的LMI求解方法	191

8.4.4	对偶性与 H_2 估计	192
8.4.5	鲁棒故障检测观测器设计	194
8.4.6	鲁棒 FDI 中有关 LMI 方法的讨论	195
8.5	本章小结	196
第 9 章	非线性动态系统故障诊断	197
9.1	引言	197
9.2	线性与非线性观测器方法	199
9.3	非线性动态系统故障诊断的神经网络方法	206
9.3.1	非线性动态系统 FDI 中神经网络的应用	207
9.3.2	基于神经网络的故障诊断方案	209
9.3.3	基于神经网络的故障诊断方法在实验室系统中的应用	210
9.4	非线性动态系统故障诊断的模糊观测器方法	213
9.4.1	T-S 模糊模型及稳定性分析	214
9.4.2	模糊观测器与残差生成	216
9.4.3	铁路牵引系统中感应电机的故障诊断	219
9.5	非线性动态系统故障诊断的神经模糊方法	224
9.5.1	B-样条神经网络与模糊逻辑解释	224
9.5.2	基于 B-样条网络的残差生成与故障检测	226
9.5.3	基于 B-样条函数网络的故障隔离	226
9.5.4	两箱系统的故障诊断	227
9.6	本章小结	229
附录 A	基于模型故障诊断技术中的专业术语	231
附录 B	倒摆实例	233
附录 C	矩阵秩分解	235
附录 D	引理 3.2 的证明	236
附录 E	低秩矩阵近似	238
参考文献	239

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 故障诊断的重要意义

现代控制系统正在变得越来越复杂,控制算法也越来越复杂。相应地,系统的可用性、费用、效率、可靠性、安全性和环境保护等问题变得越来越重要。这些问题不仅对那些安全第一的系统如核反应堆、化工系统、飞机等而言是重要的,而且对于像汽车、高速运输火车等系统而言也很重要。对于安全至上的系统而言,故障的后果往往是极端严重的,如人身伤亡、对环境的冲击破坏以及经济损失等。因此,为了提高安全至上系统的可靠性,一直迫切地需要在线监控和故障诊断技术能在故障发展的早期发现指示出故障,以避免系统破坏、任务流产以及灾难性事故的发生。对于一些非安全至上的系统而言,在线故障诊断技术可用于提高系统的效率,改善系统的可维护性、可用性与可靠性。的确,工业部门正在重新考虑预防性维护工具对其的意义,并寻求各种方法来保证系统可用性和安全性,同时以避免工厂停机期间高花费的维护工作。为了深入掌握系统的状态以保证正确的在线维护计划实现,可考虑采用现代故障诊断技术。

20世纪70年代以来,有关故障诊断理论与应用的研究一直受到广泛的重视(Patton & Chen,1998;Frank & Ding,1997)。自动化装置趋于复杂的发展趋势以及控制系统不断增长的高可用性和高可靠性的要求,一直刺激着故障诊断技术的发展。现代控制理论的进步,包括有效的数学建模方法、状态估计技术、系统辨识技术以及计算机技术的神奇发展与进步,则是故障诊断技术发展更为强大的推动力。

1.1.2 故障诊断中的技术术语

浏览一下专业文献,人们可以很快发现,在故障诊断领域其技术术语是不太一致的。这就使得人们很难了解每一篇论文的目标,也很难比较不同的方法。针对这个问题,国际自动控制联合会(IFAC)下属的“技术过程故障检测、监控与安全(SAFEPROCESS)”专业委员会已积极主动开始确定公用的技术术语。附录A给出了其针对有关技术术语所给出的建议性定义。在其他文献中,如Isermann & Ballé(1997)与Van Schrick(1997),也进一步讨论了有关技术术语的定义。本书所采用的术语与SAFEPROCESS建议的基本一致。

“故障”一词可理解为系统功能发生了意外的变化^①,尽管这一变化也许并不能表明

^① Isermann (1984)给“故障”的定义是:故障是指系统特性出现不允许的偏差,它导致系统不能达到预期的目标。

系统的物理破坏或失灵。故障或失效阻碍或干扰了自动系统正常的工作,并由此引起了系统性能不可接受的恶化,甚至导致了危险的状态。用“故障”(fault)而不用“失灵”(failure)是为了表示系统仅仅是不正常的工作而不是发生了灾难。“失灵”意味着系统组件完全的物理破坏或系统功能的完全丧失,而“故障”常常用于表明系统不正常的工作状态在一定程度上是可以接受的。故障,即便是在其发生的早期阶段可以忍受,也必须尽早地诊断出,这样可以防止其引起更加严重的后果。

用于检测故障、诊断故障发生的位置及其对系统影响的监控系统称为故障诊断系统。它通常应能完成如下任务。

- (1)故障检测:作出二元决策,即判断出系统要么出现了异常,要么一切正常。
- (2)故障隔离:确定故障发生的位置,如是哪一个传感器或调节器发生了故障。
- (3)故障辨识:估计故障的大小、类型与属性。

虽然上述三方面任务相对重要性的划分明显具有主观性,但是仍然需要指出的是,故障检测对任何一个实际系统而言是绝对必须完成的任务,故障隔离同样也十分重要,而故障辨识或许并非是一定要做的事情。因此,在文献中,故障诊断常常是指故障检测与隔离,其英文缩写为 FDI(Fault Detection and Isolation)。

1.1.3 智能容错控制中的故障诊断

被控系统或控制器发生故障后,要求其具有继续工作在某种可接受功能下的能力一直是迫切的。将具有这种容忍故障能力的控制系统定义为容错控制系统。在允许的性能退化条件下,容错系统可以在故障状态下工作,因为系统主要的目标是维持系统运转并给操作者(或自动监控系统)合理的时间去修复系统或用其他合适的措施避免灾难性事故的发生。近年来,容错控制已引起研究人员广泛关注,其主要目标是为了获得高可靠性、可维护性及高性能,因为在一些情况下如果被控系统的组件发生故障,被控系统就可能对环境产生破坏性影响(Patton,1997a)。例如,在有潜在危险的化工厂、核电厂,控制系统元件发生故障后,其不适当的控制动作的结果可能是极具危害性的。对于飞行控制系统而言,安全性极其重要,它要求即使飞机元件发生了失效,飞机仍必须能够安全着陆。

设计容错控制系统时,应预留出专门针对可能的一组元件故障或类似于故障的系统工作点大范围变化情况下的控制措施。这种要求也仅仅是将控制系统作为自动重构系统的一个组件并且异常工作状态已发现与隔离的情况下。故障诊断在容错控制中起着十分重要的作用,因为在任何可能的控制律重构之前,故障必须已得到可靠地检测与隔离,同时这些信息也已传送给监控机构以采取适当决策。

容错控制是智能控制系统显著的特征之一。按照 Stengel(1991)的定义,智能系统是设计实现的容错控制系统。Aström(1991)认为,故障诊断是智能控制系统的—个基本特征。从 Patton(1997a)最近的综述文章中也可以了解到有关容错控制系统的众多重要研究课题。

1.1.4 基于模型的故障诊断

在工程实际中,最常用的诊断方法是监控某特殊信号的大小或发展趋势,当信号到达给定的阈值时就采取相应的措施。这种门限检测方法虽然简单实用,但存在很严重的缺

陷。第一个缺点是在噪声、输入变化以及工作点改变时有可能造成大的误报警。第二个缺点是单一故障可能引发系统许多信号超过阈值,发生许多故障,因此故障隔离十分困难。采用多信号一致性检验技术可以克服上面提到的问题,也是提高自动化系统故障诊断能力的重要途径。如果需要给出系统不同信号之间的功能关系,则需要系统数学模型。

在十分广泛的各种应用领域中,传统的故障诊断方法一般是基于硬件(物理或并行)冗余,其利用多路传感器、调节器、计算机及软件来测量或控制某一变量。通常,硬件冗余系统采用表决策略来决定故障是否发生、何时发生以及故障在冗余系统元件中可能的位置。这种硬件冗余形式在实际应用中很普遍;例如,在数字 fly-by-wire 飞行控制系统即 AIRBUS320 及其改进型中(Favre,1994),以及其他应用如核反应堆中等。基于硬件冗余的主要问题是设备花费与维护费用大,另外对冗余装置的安装需要额外空间等。

为了解决系统可靠性的提高与冗余硬件花费之间的矛盾,采用对不同的测量值之间进行交叉测试^①而不是增加同一硬件冗余也许是一种明智的选择。这就是“解析(功能)冗余”的思想,其利用了监控过程各种测量变量之间的解析或功能冗余关系,如输入与输出之间,输出与输出之间,以及输入与输入之间的功能关系。图 1.1 说明了硬件冗余与解析冗余的概念。在解析冗余方案中,由于无需多余的硬件,所以也就不存在由于附加硬件所引发的故障,因此合理设计的解析冗余方法比硬件冗余更为可靠(Van Schrick,1991;1993)。

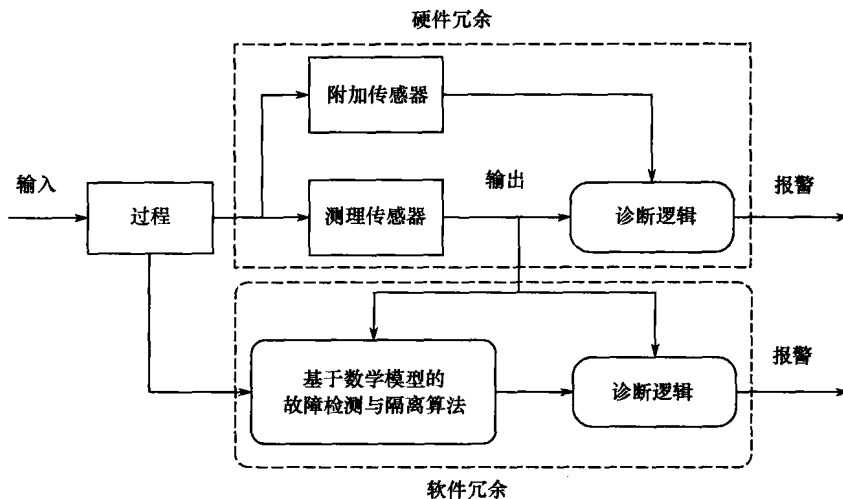


图 1.1 硬件冗余与解析冗余

在解析冗余方案中,由不同变量一致性检验而生成的差称作残差信号。在系统正常时,残差应当是零均值的;在系统故障时,残差应当偏离零均值。用残差的这种零与非零特性来确定系统是否已经发生故障。解析冗余利用了被监控过程的数学模型,因此常常称之为基于模型的故障诊断方法。

解析冗余中的一致性检验通常是对测量信号与其估计值进行比较。估计值由系统的数学模型产生。通过比较生成残差量,即被测信号与数学模型生成的估计值之间的差别。

① 这一步骤有时称为数据调和。

因此,基于模型的故障诊断可以定义为:通过将系统可获得的测量值与系统数学模型所表示的相应变量值的先验信息比较,生成残差,并通过分析残差来确定系统故障的方法。残差是故障指示器或报警信号,其反映被监控系统是否发生故障。

基于模型方法的最主要优势在于实现 FDI 算法而无需冗余硬件。基于模型的 FDI 算法可以以软件的形式在过程控制计算机上实现。同时,在大多数情况下,控制过程所必需的测量量对于 FDI 而言也已足够,因此不需要安装额外的传感器。实现基于模型的 FDI 算法,唯一附加的要求就是大容量、高性能的计算机,而对于计算机技术迅猛发展的今天,这一要求不仅容易满足而且也相当实际(Frank,1990)。

1.1.5 基于模型故障诊断中的鲁棒性问题

基于模型的 FDI 方法需要被监控系统的数学模型,可是对任一物理系统而言,获得其完全完备精确的数学模型是不可能的。系统的参数通常是以非确定的形式随时间变化,系统的干扰和噪声的特性也常常是未知的,因此也无法准确建立它们的数学模型。所以,即使系统没有发生过程故障,系统的实际工作过程与其数学模型之间也总是存在着失配问题。撇开用于控制目的的建模问题不谈,这种模型失配会引起 FDI 技术在应用中的困难。模型失配是 FDI 系统误报警和漏报警的根源,而严重的误报警和漏报警将使 FDI 系统完全无用。建模的不确定性是基于模型的 FDI 技术中最重要的一个概念,该问题的解决与否决定着基于模型 FDI 技术的实用性(Frank,1991a;Patton & Chen,1996b;1997)。

为了克服建模不确定性带来的问题,基于模型 FDI 必须具有鲁棒性,即对系统建模不确定性不敏感甚至无变化(反应)。有时,对建模不确定性的敏感性的减弱并不能解决问题,因为这一敏感性的减弱或许同时伴随着对故障敏感性的减弱。针对鲁棒 FDI 问题,更有意义、更加明确的阐述是增加对系统建模不确定性的鲁棒性,同时不损失(甚至增加)对故障的敏感性。

把具有令人满意的故障敏感性与对建模不确定性所必需的鲁棒性等指标同时应用于 FDI 方案设计的方法称为鲁棒 FDI 策略(Frank,1991a;Patton & Chen,1996b;1997)。关于基于模型 FDI 鲁棒性的重要性目前已得到学术界和工业界的广泛认同。基于模型的鲁棒 FDI 方法研究在近 10 年一直是一个十分关键的研究课题,已经提出了大量的方法,如未知输入观测器方法、特征结构配置方法、最优鲁棒奇偶关系法等,来处理和解决这一问题。工程上实用的方法目前仍处于研究阶段。

基于模型 FDI 系统的一个重要任务是在系统缓变(软)故障^①发展到需要操作者或自动化系统干预之前能够及时得到诊断。系统突变故障和硬故障的诊断相对容易,因为对于 FDI 系统而言,它们的故障效应大于模型不确定性,进而可以采用适当选取的残差阈值来检测与诊断。然而,缓变故障在残差上的反应较小,其反应有可能被系统建模不确定性所掩盖,这充分表明了鲁棒 FDI 技术的必要性。缓变故障在被监控系统上引发的故障效应是非常小的,当其出现时几乎无法觉察。但是,尽管在其发生的早期阶段或许可以让人接受,但它缓慢的发展却能够引起非常严重的后果。值得注意的是,软故障是一种不正常的工作状态,它在现阶段可能不严重,但它常常是以连续方式发展变化的(即它不包含如

^① 缓变故障通常是指幅值小且缓慢发展变化的故障,有时也称作软故障。

突变产生的不连续的信号特征)。虽然软故障的出现不一定使系统性能明显退化,可是这类故障却提醒人们传感器或其他元件应当更换,或者已表明在系统发生更为严重的异常状况之前应当对系统进行重构。缓变故障的及时检测与报警可以为操作者(或自动监控系统)提供充分的时间和信息,采取决策以防止系统发生更加严重的破坏。因此,在安全至上环境中工作,软故障的成功检测与诊断是设计和评价算法最艰巨的挑战。

1.2 基于模型故障诊断的发展简史

1. Beard - Jones 故障检测滤波器

早在 20 世纪 70 年代初期,基于模型的故障诊断方法就在世界各地不同的研究部门得到了研究。美国麻省理工学院(MIT)的 Beard(1971)最早提出了用解析冗余代替硬件冗余的思想,并研究了用故障检测滤波器生成 FDI 所需的方向性残差的方法。该方法后来由 Jones(1973)与 Massoumnia(1986b)用几何描述的方式得到再次阐述。沿着这一研究路线形成了著名的 Beard - Jones 或 Beard 故障检测滤波器方法。其中有关的设计问题由后来的研究者如 White & Speyer(1987)、Park & Rizzoni(1994a)等解决。该方法在最近的文献中,如 Douglas & Speyer(1996)、Liu & Si(1997)、Chung & Speyer(1998)等,得到再次进一步的研究。

2. 随机系统的 FDI 问题

与 Beard - Jones 故障检测滤波器方法并行同步发展的是随机方法,该方法也早在 20 世纪 70 年代就得到了研究。Mehra 与 Pechon(1971)介绍了基于 Kalman 滤波器生成新息(残差)的 FDI 方法的一般步骤。故障诊断是通过残差的统计测试,如白性检验、均值检验与协方差检验等来完成的。Willsky 与 Jones(1974;1976)研究了基于 Kalman 滤波器生成残差的广义似然比测试方法进行故障诊断的 FDI 策略。Willsky 在其早期著名的综述文章(Willsky,1976)中提出了基于模型 FDI 解析冗余的重要思想,并着重研究了随机系统与阶跃故障的基于模型 FDI 方法。沿着该路线,Basseville(1988)探讨了动态系统或动态特征信号变化的检测、估计与诊断等问题,并重点研究了故障检测的统计方法,为系统和信号变化的检测提供了一个通用的框架。统计方法随后的发展在 Tzafestas 与 Watanabe 的优秀综述论文(Tzafestas & Watanabe,1990)中得到了评述。该文还讨论了其他如基于知识的方法。该文最显著的特点是对随机方法进行了全面的回顾和杰出的评论。在其他文献中,如 Basseville & Nikiforov(1993)、Da & Lin(1995)以及 Keller(1996),也可以了解到统计方法的基本内容及其最新进展。

多模型自适应滤波器方法是一种统计方法,在本质上它是针对一组 Kalman 滤波器生成的残差进行多假设测试(Willsky,1974;1975;Montgomery & Caglayan,1976)。该方法最近的发展可参阅文献 Berec(1998)、Menke & Maybeck(1995)以及 Eide & Meybeck(1996)等。

3. 基于观测器的 FDI 方法

Clark 与他的合作者首次将 Luenberger 观测器用于故障检测问题(Clark, Fosth & Walton,1975),随后他们研究了各种传感器故障隔离方法(Clark,1978a;1978b;1979)。Frank 全面的综述论文(Frank,1987)奠定了观测器方法在基于模型 FDI 方法中的地

位。在该文中,评述了各种不同的线性与非线性观测器策略,并给出了相应的应用例子加以说明。

4. FDI 中的奇偶关系方法

奇偶关系方法是基于系统输入输出在一定的时间窗内的一致性检验而生成残差,它最初是由 Mironovski(1979;1989)提出的,尽管当时他所采用的术语与现在的不同。遗憾的是,由于该文可参考性的限制,它并未得到人们足够的重视。这种方法后来由 Chow 与 Willsky(1984)独立提出,至目前已有各种不同的表达形式。如 Gertler(1988)给出了在 z -域中的奇偶关系设计方法。Chen 与 Zhang(1990)基于硬件冗余中一致性关系矢量思想直接扩展了随机系统 FDI 方法。有关奇偶关系方法的最新进展可参阅文献 Gertler(1997)与 Gertler(1998)。

5. FDI 中的参数故障方法

基于系统辨识技术直接发展而成的参数估计方法是十分重要的 FDI 方法之一。Bakiotis 等(1979)与 Geiger(1982)首先阐述了这类方法。Isermann 与他的合作者从 20 世纪 80 年代早期开始一直沿着这条路线进行研究与发展。在 1984 年, Isermann 在其综述论文中阐述了过程故障诊断可以通过不可测的过程参数估计或状态变量估计而完成。该论文给出了基于过程模型与不可测量量 FDI 方法的一般结构。该结构后来为众多论文如 Frank(1990)所引用。Isermann(1997)介绍了过程 FDI 用参数估计方法的一些经验。Isermann 与 Freyermuth(1990)研究了基于参数估计与启发性过程知识交互的在线 FDI 系统。随后他们发表了另一篇评述性论文(Isermann & Freyermuth, 1991a)与一篇应用性论文(Isermann & Freyermuth, 1991b)。Isermann 在论文中(1991a)针对应用问题,基于大量实际应用验证和实验室验证,评述了参数估计 FDI 方法的实用性。参数估计 FDI 方法的最新进展可参阅文献 Isermann(1997)与 Isermann & Ballé(1997)。

6. 基于模型 FDI 的两步结构

Chow 与 Willsky(1980;1984)首先明确了基于模型的 FDI 方法可以分成两个步骤:①残差生成;②决策(包括残差评价)。这种两步过程如今已看作是基于模型 FDI 的标准过程。

7. FDI 中的鲁棒性问题

Leininger 在 1981 年指出了模型误差对 FDI 性能的影响。首次尝试改进基于观测器 FDI 方法的鲁棒性问题应归功于 Frank 与 Keller(1981)。

8. 基于未知输入观测器的鲁棒 FDI

为了解决 FDI 中的鲁棒性问题,Watanabe 与 Himmelblau(1982)引入了基于未知输入观测器(UIO)的鲁棒传感器故障检测方法。基于 UIOs 的鲁棒 FDI 方法得到德国 Duisburg 大学 Frank 教授领导的研究小组的广泛研究,并取得了很大成绩,发表了一系列的研究论文,如 Frank & Wünnenberg(1987;1989)、Wünnenberg(1990)、Frank(1990)、Frank(1991a)、Frank & Seliger(1991)以及 Seliger & Frank(1991a)等。Chen 与 Zhang 在 1991 年提出了调节器故障隔离的鲁棒性方法,并将其应用于化工过程。Ge 与 Fang(1988;1989)采用所谓的鲁棒观测方法研究了元件 FDI 的鲁棒性方法,其在原理上与 UIOs 方法类似。Viswanadham 等(Viswanadham & Sichander, 1987; Phatak & Viswanadham, 1988)提出了一种重要的具有原创性的调节器故障隔离策略,可是他们没有考虑鲁棒性问题。第

3 章将全面介绍基于 UIOs 的鲁棒 FDI 方法。

9. 基于特征结构配置的鲁棒 FDI 方法

Patton、Willcox 与 Winter(1986)提出了基于特征结构配置的 FDI 方法。Patton 教授领导的研究小组对这类方法进行了广泛的研究,取得了许多研究结果和进展,如文献 Patton(1988)、Patton & Kangethe(1989)、Patton & Chen(1991g)、Chen(1995)以及 Patton & Chen(1997)等。第 4 章将详细介绍这种方法。

10. 鲁棒 FDI 的最优奇偶关系方法

Lou、Willsky 与 Verghese(1986)针对由多模型所描述系统的故障诊断问题,提出了设计“最优鲁棒奇偶关系”的策略。基于同样的思想,Wünnenberg 与 Frank 研究了最优奇偶关系的设计问题(Wünnenberg & Frank, 1988; Frank, 1990; Wünnenberg & Frank, 1990; Wünnenberg, 1990)。不同的是,他们采用模型不确定性效应与故障效应之比作为指标。与这种方法类似,Gertler 与他的同事们提出利用“正交奇偶关系”思想进行鲁棒奇偶关系设计的方案(Gertler & Luo, 1989; Gertler, Fang & Luo, 1990; Gertler & Singer, 1990; Gertler, 1991; Gertler & Kunwer, 1993)。第 7 章将介绍最优奇偶关系方法。关于该方法的最新进展也可参阅文献 Wu & Wang(1995)、Kinnaert(1996)Ding & Guo(1998)等。

11. 基于模型 FDI 的频域方法

Viswanadham、Taylor 与 Luce(1987)介绍了基于系统传递矩阵因数分解的残差生成方法。该方法后来为 Ding 与 Frank(1990)采用和进一步研究,Kinnaert 与 Peng(1995)的研究也采用了该方法。该方法称作频域残差生成方法。为了解决在频域中有关 FDI 鲁棒性问题,Viswanadham 与 Minto(1988)提出了基于 H_2 优化技术改进频域残差生成鲁棒性的解决方法。Ding 与 Frank 扩展了对该问题的研究,其结果反映在他们发表的一系列有关该问题的论文中,如 Ding & Frank(1991)、Frank & Ding(1993)、Ding, Guo & Frank(1993)以及 Frank & Ding(1994)等。Qiu 与 Gertler(1993)则用不同的方法解决了该问题。鲁棒性设计中的 μ 综合方法在 FDI 中也得到了应用(Mangoubi, Appleby & Farren, 1992; Appleby, Dowdle & Vander Velde, 1991)。最近,针对频域 FDI 方法的研究,人们表现出浓厚的兴趣。第 8 章将详细介绍这种方法。了解其最新进展则可以参阅文献 Sadriani, Chen & Patton(1997a; 1997b; 1997c)、Santer, Rambeaux & Hamelin(1997)以及 Edelmayr, Bokor & Keviczky(1994; 1997b)。

12. 残差评价与自适应阈值

在残差对系统不确定性不具备鲁棒性时,采用自适应阈值的鲁棒决策方法则可以达到鲁棒的 FDI。Emami - Naeni、Akhter 与 Rock(1988)提出了用阈值选择器来生成自适应阈值的思想。Clark(1989)提出了一种生成自适应阈值的经验方法。Ding 与 Frank 也广泛深入地研究了自适应阈值的确定问题(Ding & Frank, 1991; Frank & Ding, 1993; Ding, 1993; Frank & Ding, 1994; Ding & Guo, 1998)。在有关文献如 Chang, Hsu & Hin(1995)以及 Hofling & Isermann(1996)中则给出了该方法的应用实例。Frank 等人采用模糊逻辑技术进行残差评价和决策,进一步发展了在决策阶段获得鲁棒性的思想。有关的研究情况可以参阅文献如 Frank & Kiupel(1993)、Frank(1994a; 1996)、Schneider & Frank(1996)、Frank & Ding(1997)以及 Frank & Koppen - Seliger(1997a; 1997b)等。

最近,Ding 与 Guo(1998)证实,在故障观测器设计中,通过优化残差评价函数可以获