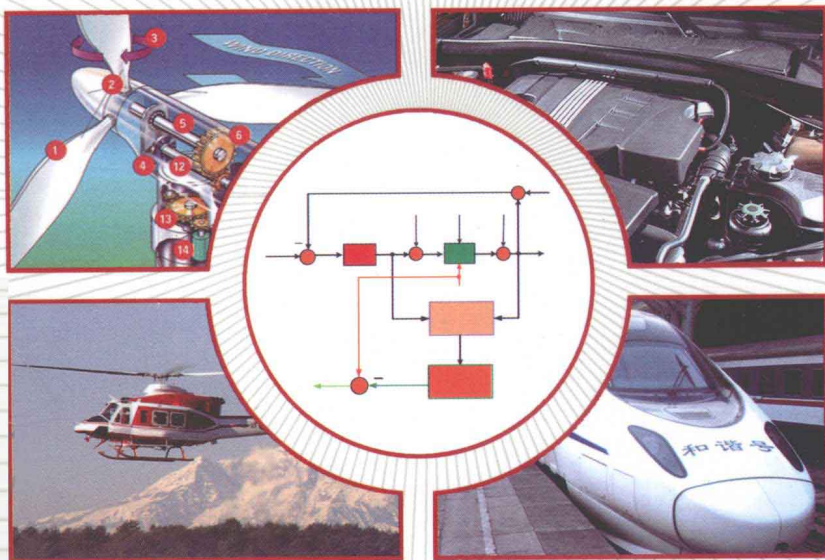


鲁棒故障检测与故障估计 理论及应用

魏秀琨 秦 勇 贾利民 著



科学出版社

鲁棒故障检测与故障估计 理论及应用

魏秀琨 秦 勇 贾利民 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了基于模型的动力学系统故障检测、故障分离、故障辨识和估计以及故障分析等方面的一些鲁棒诊断方法,并介绍了这些方法在轨道交通车辆、风力发电系统以及轨道健康状态识别中的应用等。在故障检测技术方面,基于 GKYP 引理的混合 H_{∞} / H_2 故障检测以及这种方法在线性参数变化系统中的推广应用是本书中理论方面的一个重要部分;在故障估计方面,基于 GKYP 引理的滤波器是主要的技术策略,同时介绍了基于系统辨识技术的故障估计方法;在故障分离方面,本书介绍了基于 SVD 分解和 Eros 方法;在应用方面,介绍了基于 Kalman 滤波器和 GLRT 的故障检测以及基于 CUSUM 和能量法的故障分离等技术。

本书可作为动力学系统故障诊断领域方面研究生的参考书,同时对从事自动化系统研究、复杂机电系统健康状态监测、轨道交通车辆安全状态监测及相关领域的广大工程技术人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒故障检测与故障估计理论及应用/魏秀琨等,秦勇,贾利民著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034465-6

I. ①鲁… II. ①魏… ②秦… ③贾… III. ①鲁棒控制-故障检测-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 108022 号

责任编辑:张海娜/责任校对:刘小梅
责任印制:张倩/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 326 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着生产水平和科学技术的不断发展,现代机电系统的规模日趋大型化、复杂化,自动化的程度也越来越高。自动化程度的提高可以提高生产率、降低生产成本,但系统发生故障的可能性也随之增加,尤其在某些高科技领域,高可靠性的系统是必需的,系统中的任何一个故障都可能会导致一系列的连锁反应,导致整个设备甚至整个过程不能正常运行,轻者造成停机、停产,重者会产生严重的甚至灾难性的人员伤亡。故障诊断技术是提高系统安全性的重要手段之一,它是一门相对独立发展的技术。随着故障诊断技术研究的深入,发现仍有许多急待解决的问题,如鲁棒故障诊断方法。本书针对动力学系统的鲁棒故障诊断这一主题,总结了作者过去几年在故障诊断方面的主要研究成果。对于线性时不变系统,不仅提出了在有限频域范围内设计故障检测器和故障估计器的新方法,还提出了在环境干扰和模型不确定下如何估计系统最小可检测故障大小的估计理论;对于线性参数时变系统,将 H_{∞} 指标引入到这类系统的故障检测中,提出了这类系统的故障检测算法。全书共 11 章,第 1 章介绍了一些故障诊断的基本概念,其中加入了作者对于一些概念的新的认识;第 2 章是一些数学和系统的基础知识;第 3 章是基于观测器的故障检测、分离和辨识的一些基本内容;第 4~7 章是本书的理论主体,系统介绍了模型不确定系统的鲁棒故障检测和故障估计系统的设计方法;第 8~10 章是鲁棒故障诊断技术在风力发电系统和轨道交通车辆系统中的应用;第 11 章介绍了轨道健康状态检测技术。

本书的研究成果得到了一些科研项目的支持,其中特别感谢轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题“城市轨道交通列车系统故障诊断和失效预测基础理论研究”(RCS2010ZT003)、“轨道车辆运行安全状态检测与在途预警关键技术与系统集成”(RCS2011ZZ005)、国家“十二五”863 计划课题“基于传感网的列车关键设备在途故障诊断技术”(2011AA110503),以及国家“十二五”科技支撑计划“城轨交通轨道安全状态移动检测系统研制”(2011BAG01B04)。作者在荷兰代尔夫特大学(Delft University of Technology)做博士后期间,得到了 Verhaegen 教授的悉心指导,在此表示感谢。在本书的写作过程中,得到了北京交通大学柳海、郭淑萍、张秀洁、汪煜婷、鞠志强、林帅、郭昆、兰添和张媛等同学的支持,对他们在书稿编辑和纠错方面所做的工作表示感谢。最后,还要感谢作者的父母及妻子对本书的出版给予作者的鼓励和支持。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者不吝指教。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 故障诊断技术的相关概念与任务	2
1.2.1 基本概念	2
1.2.2 故障诊断任务	4
1.2.3 故障诊断系统的性能指标	5
1.3 故障诊断技术分类	6
1.3.1 基于解析模型的故障诊断方法	6
1.3.2 基于信号处理的故障诊断方法	9
1.3.3 基于知识的故障诊断方法	10
1.4 故障诊断有待解决的问题及其发展趋势	12
1.5 本书的工作	13
参考文献	15
第 2 章 矩阵和线性系统基础知识	17
2.1 矩阵基础知识	17
2.1.1 矩阵的奇异值分解	17
2.1.2 凸集	18
2.1.3 一些代数问题的解	18
2.1.4 线性矩阵不等式	25
2.2 系统基础知识	30
2.2.1 线性系统的描述	30
2.2.2 系统的稳定性、可控性和可观性	30
2.3 GKYP 引理	32
参考文献	33
第 3 章 基于观测器的故障诊断理论基础	35
3.1 故障诊断观测器	35
3.2 故障检测系统的鲁棒性及灵敏性	36
3.3 故障检测残差评估及阈值的确定	38
3.4 故障分离	40

3.4.1	完全故障分离	40
3.4.2	故障分离滤波器	46
3.4.3	基于多个 (一组) 残差产生器的故障分离	46
3.5	故障辨识	53
3.5.1	故障辨识滤波器与完全故障辨识	54
3.5.2	最优故障辨识问题	56
	参考文献	58
第 4 章	参数不确定线性时不变系统的鲁棒故障检测观测器和故障估计滤波器设计	60
4.1	引言	60
4.2	无参数扰动时线性系统的鲁棒故障检测观测器设计	61
4.2.1	名义系统的鲁棒故障检测观测器设计	64
4.2.2	鲁棒性条件	65
4.2.3	敏感性条件	66
4.2.4	稳定性条件	67
4.2.5	故障检测滤波器设计	67
4.3	参数不确定系统的鲁棒故障检测观测器设计	72
4.3.1	问题的定义	72
4.3.2	鲁棒故障检测观测器设计	73
4.3.3	初步结果	74
4.3.4	鲁棒性条件	76
4.3.5	敏感性条件	78
4.3.6	稳定性条件	79
4.3.7	设计阈值和最大无法检测故障的估计	79
4.4	参数不确定系统的鲁棒故障估计滤波器设计	81
4.5	实例	88
4.6	结论	92
	参考文献	92
第 5 章	结构不确定线性系统的鲁棒故障检测观测器设计	95
5.1	问题的定义	95
5.2	鲁棒故障检测观测器设计	96
5.2.1	加性不确定性情况	96
5.2.2	乘性不确定性情况	101
5.3	阈值的设计和最难以察觉的检测故障大小估计	102
5.3.1	加性不确定性情况	103

5.3.2 乘性不确定性情况	104
5.4 实例	104
5.4.1 加性不确定性情况	105
5.4.2 乘性不确定性情况	107
5.5 结论	110
参考文献	110
第 6 章 线性参数变化系统的混合 H_-/H_∞ 故障检测观测器设计	111
6.1 引言	111
6.2 LPV 系统的 H_- 指标	113
6.2.1 LPV 系统的二次 H_∞ 性能	113
6.2.2 LPV 系统的二次 H_- 指标	114
6.2.3 LPV 系统的仿射二次 H_∞ 性能	115
6.2.4 LPV 系统的仿射二次 H_- 指标性能	116
6.3 问题描述	117
6.4 混合 H_-/H_∞ 设计方法 (一)	119
6.4.1 未知扰动的鲁棒性条件	119
6.4.2 故障灵敏度条件	121
6.4.3 LPV 系统的 H_-/H_∞ 故障检测观测器设计	124
6.5 混合 H_-/H_∞ 设计方法 (二)	125
6.5.1 基于参数依赖型 Lyapunov 函数的鲁棒性条件	125
6.5.2 基于仿射二次 H_- 指标的灵敏度条件	128
6.5.3 基于仿射二次 H_∞ 性能和仿射二次 H_- 指标的 H_-/H_∞ 故障 观测器的 LPV 系统设计	130
6.6 最大无法检测故障大小的估计	131
6.7 实例	132
6.8 结论	135
参考文献	135
第 7 章 基于系统辨识的线性时不变系统的故障诊断	138
7.1 引言	138
7.2 问题描述	138
7.3 故障诊断解决方案	140
7.3.1 传感器存在偏差案例	141
7.3.2 执行器偏差故障案例	141
7.3.3 系统部件故障案例	142
7.4 递归的在线辨识算法	142

7.4.1	传感器和执行器偏差估计	142
7.4.2	对部件故障诊断的在线递归参数估计	144
7.4.3	递归最小二乘法求解	147
7.5	仿真研究	148
7.6	结论	153
	参考文献	153
第 8 章	列车悬挂系统的故障检测与故障分离	155
8.1	引言	155
8.2	轨道车辆悬挂系统建模	156
8.3	基于 GLRT 的加性突变故障检测	159
8.4	仿真研究	161
8.4.1	二系垂向阻尼器故障检测	161
8.4.2	二系垂向弹簧故障检测	161
8.4.3	传感器故障检测	164
8.5	基于多元时间序列相似性匹配的故障分离	164
8.6	Eros 算法	165
8.7	故障分离仿真结果	167
8.7.1	故障特征库	167
8.7.2	算法验证结果	168
8.8	结论	171
	参考文献	171
第 9 章	大型风力发电系统故障诊断研究	173
9.1	引言	173
9.2	风力发电控制系统故障模型以及问题陈述	175
9.2.1	风力发电机的结构	175
9.2.2	风力发电机的系统	177
9.2.3	科尔曼域中的时不变线性模型	179
9.2.4	问题陈述	180
9.3	故障建模以及故障检测和分离的原理	180
9.3.1	故障建模	181
9.3.2	故障诊断的原理	182
9.4	观测器与滤波器设计	183
9.4.1	故障检测观测器与故障估计滤波器设计	184
9.4.2	残差估计	186
9.4.3	故障估计滤波器的设计	187

9.5 仿真结果	190
9.5.1 叶片力矩传感器故障检测结果	190
9.5.2 叶片倾斜执行器卡死故障检测结果	192
9.5.3 叶片力矩传感器故障估计	192
9.6 结论	193
附录 I 系统状态方程矩阵	193
附录 II 科尔曼域上的方程	195
参考文献	196
第 10 章 基于 Kalman 滤波和 GLRT 技术的故障诊断在风力发电系统中的应用	198
10.1 问题陈述	198
10.2 基于子空间辨识的风力发电机系统建模	199
10.3 故障检测和分离	202
10.3.1 故障建模	202
10.3.2 基于 Kalman 滤波器的残差产生	203
10.3.3 基于均值观测的加性故障检测	205
10.3.4 基于广义似然比检验的加性突变故障检测	206
10.3.5 基于剩余残差观测的乘性故障检测	208
10.3.6 传感器故障分离推理	209
10.4 仿真结果	211
10.5 结论	217
参考文献	217
第 11 章 基于车辆-轨道系统动态特性的轨道健康状态检测	220
11.1 背景及意义	220
11.1.1 现有轨道健康状态检测指标及评定方法	220
11.1.2 基于车辆-轨道系统动态特性的轨道健康状态评定指标	222
11.2 车辆-轨道系统模型建立	223
11.2.1 轨道激励模型的建立	224
11.2.2 车辆-轨道耦合系统动力学模型的建立	227
11.3 仿真研究	236
11.3.1 单一不平顺条件下的仿真研究	236
11.3.2 复合不平顺条件下的仿真研究	242
11.3.3 不同车速条件下的仿真研究	245
参考文献	248

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着生产水平和科学技术的不断发展,现代机电系统的规模日趋大型化、复杂化,自动化的程度也越来越高。自动化程度的提高可以提高生产率、降低生产成本,但系统发生故障的可能性也随之增加,尤其在某些高科技领域,高可靠性的系统是必需的,系统中的任何一个故障都可能会导致一系列的连锁反应,导致整个设备甚至整个过程不能正常运行,轻者造成停机、停产,重者会产生严重的甚至灾难性的人员伤亡。最典型的灾难性故障有:第二次世界大战期间,美国空军由于飞机故障而损失飞机达 21000 架,是整个大战期间被击落飞机的 2.5 倍;而从 1998 年 8 月到 1999 年 5 月的短短 10 个月间,美国的三种运载火箭:“大力神”、“雅典娜”和“德尔它”就发生了 5 次发射失败,造成了近 30 亿美元的直接经济损失;我国卫星发射的多次失利和多次的飞行事故(如 2002 年国航“4·15”和华航“5·25”空难)造成了巨大的经济损失和重大的人员伤亡;1986 年 4 月,苏联切尔诺贝利核电站放射性泄漏事故,损失达 30 亿美元,核污染波及周边各国;1986 年 1 月,“挑战者”号航天飞机由于固体燃料助推火箭密封泄漏而引起燃料箱爆炸,导致 7 名宇航员全部遇难,总计损失达 12 亿美元;1984 年 12 月,印度博帕尔农药厂毒气泄漏事故,造成 2000 多人死亡,成为目前为止世界工业史上空前的特大事故;更近的如 2003 年 2 月 1 日,载有 7 名宇航员的美国“哥伦比亚”号航天飞机,在结束了为期 16 天的太空任务之后,返回地球,在着陆前发生意外故障,航天飞机全部解体坠毁,不仅造成巨大的经济损失,而且使人类探索太空的航天事业遭受重大影响;2011 年的日本福岛核电站事件起因是由于强烈地震和海啸,使得核电厂断电、外部冷却系统完全失效,导致核反应堆快速升温爆炸,安全壳破裂,部分人工放射性核素外溢到大气或随着冷却水流入海洋,造成了巨大的污染和损失。这些灾难性的事件无时无刻不在警示人们,现代设备系统运行的安全性和可靠性是极其重要的,而故障检测与诊断(fault detection and diagnosis, FDD)技术则为提高系统可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新的途径。

故障诊断技术是提高系统安全性的重要手段之一。它是一门相对独立发展的技术,最早起源于采用硬件冗余方法的人工诊断,即利用冗余部件提供的信息,按照少数服从多数的原则确定故障部件。但硬件冗余方法在提高系统可靠性的同时,

也增加了系统的成本、重量和空间。对大型复杂系统,采用硬件冗余的故障诊断方法是不现实的。因此,基于解析冗余的故障诊断技术应运而生。1971年,美国麻省理工学院 Beard 教授在他的博士论文中,提出了通过比较观测器的输出得到系统故障信息的思想,标志着解析冗余故障诊断技术的开端。由于解析冗余不需要增加额外硬件设备,具有成本低、易实现的特点,一直都是故障诊断技术研究的主要方法。到 20 世纪 90 年代中后期,针对线性系统的解析冗余故障诊断技术已形成了较为完整的体系,对非线性系统故障诊断的研究成为人们关注的焦点。随着故障诊断技术研究的深入,人们发现仍有许多急待解决的问题,如鲁棒故障诊断方法、非线性系统的故障诊断,特别是考虑到外部干扰和模型不确定性时非线性系统的鲁棒故障诊断方法、时滞系统以及网络控制系统的故障诊断方法、数据驱动的鲁棒故障诊断方法、复杂大系统的分布式鲁棒故障诊断方法以及网络控制系统的故障诊断方法等。

故障诊断技术发展几十年来,在工业领域得到了广泛的应用^[1~3]。从诊断技术的各分支技术来看,美国占有领先地位。美国的一些公司,如 Bently、HP 等,他们的监测产品基本上代表了当今诊断技术的最高水平,不仅具有完善的监测功能,而且具有较强的诊断功能,在宇宙、军事、化工、能源、汽车等方面具有广泛的应用。美国西屋公司的三套人工智能诊断软件(汽轮机 TurbinAID、发电机 GenAID 和水化学 ChemAID)对其所产机组的安全运行发挥了巨大的作用。还有美国通用电器公司研究的用于内燃电力机车故障排除的专家系统 DELTA、美国 NASA 研制的用于动力系统诊断的专家系统、Delio Products 公司研制的用于汽车发动机冷却系统噪声原因诊断的专家系统 ENGING COOLING ADCISOR 等。近年来,由于微型计算机特别是便携机的迅速发展,基于便携机的在线、离线监测与诊断系统日益普及,如美国生产的 M6000 系列产品。

1.2 故障诊断技术的相关概念与任务

本节将给出故障诊断技术领域的一些概念与名词,它们是了解与研究动态系统故障诊断技术的基础。这些概念同样适用于线性系统和非线性系统的故障诊断问题。

1.2.1 基本概念

(1) 故障 (fault): 系统至少有一个特性或者参数出现较大偏差,超出可接受的范围。此时系统的性能明显低于其正常水平,所以已难以完成其预期的功能。故障按照不同的标准可分为多种,如按故障发生的部位有传感器故障、执行器故障和元部件故障等;按故障的性质有突发性故障、缓变性故障和间隙故障等;按故障的特

续时间有间断性故障和永久性故障等；按故障的相关性有关联故障和非关联故障等；从建模角度按故障发生的形式可分为加性故障和乘性故障等；另外，故障还可以分为单故障、多故障、独立故障和局部故障等。

(2) 故障检测 (fault detection): 利用一定的技术手段，确定系统是否发生故障。故障检测根据被诊断对象的性质，可以采用不同的故障检测方法。对于同一个故障采用不同的方法，诊断效果往往很不一样，这就需要根据一定的性能指标对不同的方法进行评价。

(3) 残差 (residual): 故障检测单元对系统被监测量 (如系统的输出) 的预测值和系统的实际输出值之间的差值。监测残差是故障检测的主要方法之一，采用一定的残差度量指标 (如残差信号的范数)，并设立相应的阈值，就可以进行故障检测。当系统中没有故障发生时，它的变化主要反映了系统外界干扰、模型不确定性对系统输出的影响，此时残差的度量输出值小于设定的阈值；当系统发生故障时，系统的实际输出发生明显变化，而故障检测单元预测输出仍然为无故障时的输出，残差会有明显的变化，残差的度量输出值会大于无故障时的情形，当其值大于阈值时，认为系统发生了故障。

(4) 故障分离 (fault isolation): 在故障检测之后，确定故障的种类和故障发生的部位。在有些实际应用中，故障被检测到之后，就可以满足实际要求，维修人员经过复查后就可以对元器件的故障进行维修或直接更换元器件。但在有些自动化程度要求较高的系统中，只检测出系统的故障往往是不够的，还需要进一步确定是哪个部件发生了故障，以便在线的故障容错系统对其进行补偿或者维修人员可以准确地找到发生故障的元部件。相对于故障检测来讲，故障分离具有更大的难度，因为各种不同的故障都可以引起残差度量值超出阈值，要区分开是哪一个故障引起的，往往需要更多的工作。

(5) 故障辨识 (fault identification): 在故障分离之后，确定故障的大小以及故障发生的时间、位置和故障性质，并对故障加以评价等。故障辨识是故障诊断中最难和最复杂的一个问题，一般在故障检测和故障分离之后，主要完成故障的幅值大小等的确定和识别。对于一些可参数化的故障，如传感器的恒定偏差故障、弹性元器件参数的变化等，其故障幅值大小的识别可以用一些滤波方法和估计方法加以确定。

(6) 故障诊断 (fault diagnosis): 广义上通常作为故障检测、分离和辨识的通称；狭义上特指故障分离与故障辨识，在一些文献中故障诊断特指故障分离。在本书后续的叙述中可根据上下文加以判断。

(7) 故障检测与分离 (fault detection and isolation, FDI): 故障检测与故障分离之和。

(8) 故障检测与诊断 (fault detection and diagnosis, FDD): 故障检测与故障诊

断之和。这时的故障诊断特指故障分离。

(9) 误报 (false alarm): 系统没有发生故障而报警。这主要出现在当诊断阈值过低, 对系统的外部扰动估计不足, 故障检测所设计的残差度量阈值太小, 从而在系统扰动较大或者系统的运行工况发生明显变化时, 残差度量值超出系统的阈值而误报警。“误报率”是衡量故障诊断系统性能的基本指标之一。

(10) 漏报 (missing alarm): 系统发生了故障而没有报警。“漏报率”是衡量故障诊断系统性能的又一个基本指标。残差度量的阈值设计得过大或过于保守, 对系统的外部扰动或者系统的不确定性估计过大, 就会导致在系统有明显的故障时故障检测单元不报警, 一些幅值较小的故障无法被检测到。

(11) 诊断模型 (diagnosis model): 是一组静态或动态关系, 把特定的输入变量——“症状”与特定的输出变量——“故障”或者“故障的表征量”联系了起来。诊断模型可以有許多不同的表示方法, 与不同的故障诊断方法相对应。例如, 解析模型是一种人们熟悉的诊断模型, 而神经网络、模糊逻辑系统等以其特有的方式存储、表示诊断模型。

(12) 解析冗余 (analytical redundancy): 与硬件冗余相对应, 指通过用解析方法表示的系统数学模型来产生冗余的信号。冗余信号的产生往往是成功实现故障诊断的一个关键。

(13) 故障决策 (fault decision-making): 在故障发生后, 根据故障的类别、严重程度、变化趋势等, 决定采取的相应措施。

(14) 故障预报 (fault prediction): 根据系统的残差和症状等动态信息, 在故障尚未发生时对其运行状态趋势的估计。一般通过对系统的运行参数或残差进行预测来实现。准确的故障预报可以有效地避免或降低故障发生带来的损失。

1.2.2 故障诊断任务

当系统发生故障时, 如何找出故障的特性描述, 并利用它进行故障检测、预报、分离、辨识, 进而实现故障决策是故障诊断的主要任务。它包括故障特征提取、故障建模、故障检测、故障分离与辨识、故障预报和故障评价与决策等几个方面的内容, 其中故障检测、故障预报、故障分离与故障辨识可以包含在故障诊断方法的研究中。

1. 故障特征提取

通过数据测量和一定的信息处理技术获取反映系统故障的特征描述的过程。故障特征提取的主要方法有: 直接观察和测量; 参数、状态估计或滤波与重构; 对测量值进行信息处理, 如 FFT、谱分析、小波分析等信号处理、神经元网络 (ANN)、粗糙集 (RS) 理论等。

2. 故障建模

按照先验信息和输入输出关系,建立系统故障的数学模型,作为故障诊断的依据。同时它也包括故障树、有向图、定性推理等故障检测与诊断方法中非数学模型的建立。

3. 故障检测

从可测或不可测的估计变量中,判断运行的系统是否发生故障,一旦系统发生意外变化,应发生警报。

4. 故障分离与辨识

如果系统发生了故障,给出故障源的位置,区别出原因是传感器、执行器和被控对象等或者是特大扰动。故障辨识是在弄清故障性质的同时,计算故障的程度、大小及故障发生的时间等参数。

5. 故障评价与决策

判断故障的严重程度,以及故障对系统的影响和发展趋势,针对不同的工况采取不同的措施,其中包括保护系统的启动。

1.2.3 故障诊断系统的性能指标

评价故障诊断系统的性能指标大体上可分为以下三个方面。

1. 故障检测系统性能指标

故障检测系统性能指标大体上可分为以下“精、准、快”三个方面:

(1) 对故障的灵敏程度:指故障检测系统对“小”故障信号的检测能力。故障总是从微弱的故障发展成为严重的故障,最终到元部件的失效。故障检测系统检测到的故障信号越是微弱,则故障诊断系统对该故障的灵敏度越高,表明它能精确地检测到的系统的“小”故障。

(2) 故障检测的准确性:误报是指系统没有发生故障却被错误判定出现了故障的情形;漏报是指系统中出现了故障却没有被检测出来的情形。一个可靠的故障检测系统应当保持尽可能低的误报率和漏报率,保证故障检测的“准确性”。

(3) 故障检测的快速性:是指当诊断对象发生故障后故障检测系统在尽可能短的时间内检测到故障发生的能力。故障检测的及时性越好,说明故障从发生到被正确检测出来之间的时间间隔越短。

2. 故障诊断性能指标

(1) 故障分离能力:是指诊断系统对于不同部件发生的故障可以区分和准确定位的能力。这种能力的强弱决定于对象的物理特性、故障大小、噪声、干扰、建模

误差以及所设计的故障分离算法。故障的分离能力越强,表明诊断系统对于不同故障的区分能力越强,对故障的定位也就越准确。

(2) 故障辨识的准确性:是指诊断系统对故障大小、发生时刻及其时变特性的估计的准确程度。故障辨识准确性越高,表明诊断系统对故障的估计就越准确,也就越有利于故障的评价与决策。在容错控制系统中,这一点尤其重要。

3. 故障诊断系统的鲁棒性和自适应性

(1) 鲁棒性:指故障诊断系统在存在噪声、干扰、建模误差的情况下,正确地完成任务,同时保持满意的误报率和漏报率的能力,保证对故障的敏感性。一个故障诊断系统的鲁棒性越强,表明它受噪声、干扰、建模误差的影响越小,其可靠性也就越高。

(2) 自适应性:指故障诊断系统对于变化的被诊断对象所具有的自适应能力,并且能够充分利用由变化产生的新信息来改善自身,如设计相应的故障诊断系统、时变的故障检测阈值等。引起这些变化的原因可以是被诊断对象的外部输入的变化、结构的变化或由诸如生产数量、原材料质量等原因引起的工作条件的变化。对时变系统,保证良好的适应性是非常重要的。只有有了适应性,才可以保证系统的故障检测的“精、准、快”指标,才可以对故障进行可行的分离和辨识。

1.3 故障诊断技术分类

按照故障诊断权威德国的 Frank 教授的观点,故障诊断方法主要可划分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法及基于知识的方法三种,如图 1.1 所示。

1.3.1 基于解析模型的故障诊断方法

基于解析冗余的故障诊断技术被公认为起源于 1971 年的 Beard 发表的博士论文以及 Mehra 和 Peschon 发表在 *Automatica* 上的论文。1976 年,Willsky 在 *Automatica* 上发表了第一篇故障诊断方面的综述文章。Himmelblau 于 1978 年出版了国际上第一本故障诊断方面的学术著作——*Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Process*。随后,论述这方面的重要文章和著作层出不穷。基于解析模型的方法通过将被诊断对象的可测信息和由模型表达的系统先验信息进行比较,产生残差,并对残差进行分析和处理而实现故障诊断。这类方法需要建立被诊断对象的精确数学模型,优点是充分利用了系统内部的深层知识,有利于系统的故障诊断。一般而言,基于数学模型的故障诊断包括残差产生和残差评价两个阶段。根据残差产生形式的不同,这类方法又可分为参数估计法、状态估计法和等价空间法。这三种方法虽然是独立发展起来的,但它们之间存在着一定的联

系。现已证明了基于观测器的状态估计方法与等价空间方法是等价的^[4]。非线性系统的故障诊断的难点在于数学模型难以建立。相比之下,参数估计方法比状态估计方法更适合非线性系统,因为非线性系统的状态观测器的设计有很大的困难。目前,只对某些特殊的非线性系统有研究,如双线性系统,而通常的等价空间方法仅适用于线性系统。

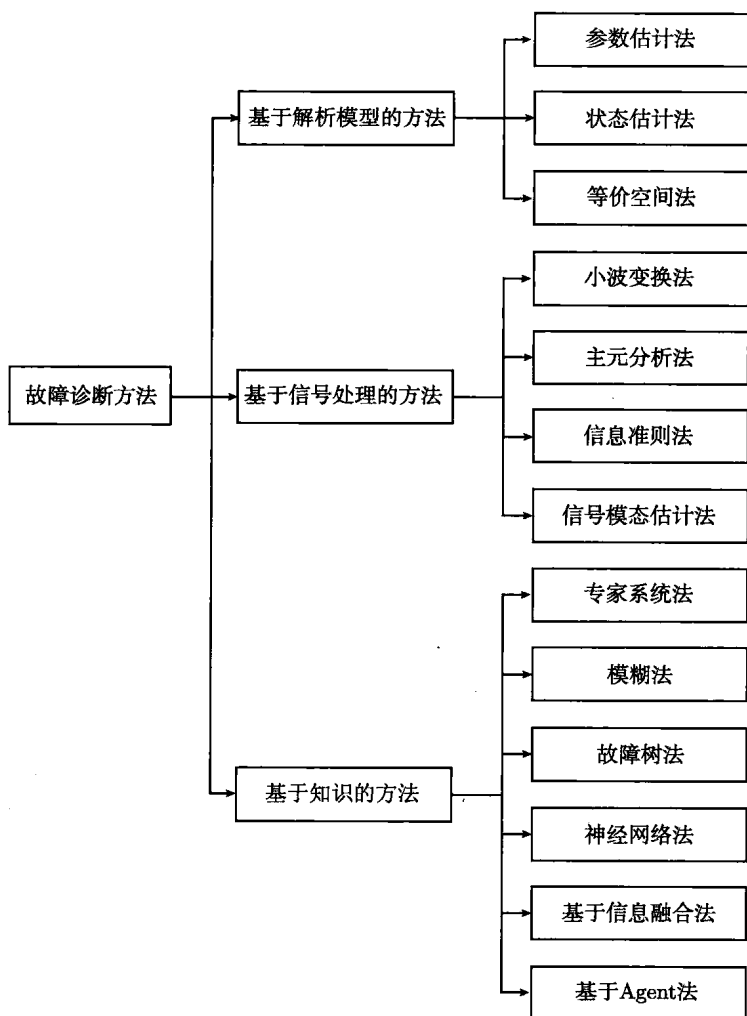


图 1.1 故障诊断技术分类

1. 参数估计法

基本思想是许多被诊断对象的故障可以看做是其过程系数的变化,而这些过程系数的变化又往往导致系统参数的变化。因此,可以根据系统参数及响应的过程

系数变化来检测和诊断故障。基于系统参数估计的故障诊断方法主要有滤波器法和最小二乘法。与状态估计法相比较,系统参数估计法更有利于故障的分离。系统参数估计法要求找出系统参数和过程参数之间的一一对应关系,而且被控过程需要充分的激励。因此,将系统参数估计法和其他基于解析模型的方法相结合,可以获得更好的故障检测和分离性能^[5]。基于系统参数估计的故障诊断方法存在的问题有如下方面:

(1) 基于系统参数估计的故障诊断方法利用系统参数和过程系数关联方程反推物理元件参数,而对于一个实际系统,系统参数和过程系数关联方程的个数不一定等于物理元件参数的个数,而且这种系统参数和过程系数关联方程是非线性的,由此求解物理元件参数是很困难的,有时甚至是不可能的。

(2) 当系统发生故障时,不仅可能引起系统参数的变化,还可能引起模型结构的变化。基于系统参数估计的动态故障诊断面临的是一种变结构变参数的参数估计问题,需要一种同时辨识模型结构和参数的实时递推算法。

(3) 系统故障发生时,系统故障引起系统模型结构和参数变化的形式(是突变还是缓变,是参数变化还是结构变化,或是二者兼而有之)是不确定的,而对不确定时变、变结构、变参数辨识问题,目前还缺少有效的方法。在实际应用中,经常将参数估计法与其他解析模型方法结合起来使用,以便获得更好的故障检测和分离性能。参数估计的故障诊断方法在实际生产中已得到广泛的应用,如机床的故障诊断、造纸机的故障检测及非线性系统的集成故障诊断与容错控制。

2. 状态估计法

被控过程的状态直接反映系统运行的状态,通过估计系统的状态,并结合适当的模型进行故障诊断。它的基本思想是:重构被控过程状态,通过与可测变量比较,构成残差序列,再构造适当的模型,并采用统计检验法,从残差序列中把故障检测出来,并做进一步的分离、估计与决策。在能够获得系统精确数学模型的情况下,状态估计法是直接有效的,但在实际中这一条件往往很难满足。所以对状态估计法的研究主要集中在提高检测系统对建模误差、扰动和噪声等未知输入的鲁棒性及系统对于早期故障的灵敏度等方面。通常用 Luenberger 观测器、Kalman 滤波器和自适应观测器进行状态估计。状态估计法在实际中得到了广泛的应用,如飞机横轴自动驾驶仪采用检测滤波器法,水翼艇、机器人、三容水箱采用观测器法,天然气管线采用自适应状态估计法。

3. 等价空间法

等价空间方法的基本思想是:通过系统的输入、输出(或部分输出)的实际值检验被诊断对象数学关系的等价性(即一致性),从而达到检测和分离故障的目的^[6]。