



高新科技译丛



Springer

Fault Diagnosis of Nonlinear Systems
Using a Hybrid Approach

非线性系统 故障诊断的混合方法

【加】 Ehsan Sobhani-Tehrani Khashayar Khorasani 著
胡 芑 庆 胡 雷 秦国军 程 哲 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

非线性系统故障诊断的混合方法

Fault Diagnosis of Nonlinear Systems Using a Hybrid Approach

【加】Ehsan Sobhani – Tehrani Khashayar Khorasani 著

胡莒庆 胡雷 秦国军 程哲 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2012-026号

图书在版编目(CIP)数据

非线性系统故障诊断的混合方法/(加)德黑兰尼
(Sobhani - Tehrani, E.), (加)霍拉桑尼
(Khorasani, K.) 著;胡莺庆等译. —北京:国防工业
出版社, 2014. 10

(高新科技译丛)

书名原文: Fault diagnosis of nonlinear systems
using a hybrid approach

ISBN 978 - 7 - 118 - 09220 - 2

I. ①非... II. ①德... ②霍... ③胡... III. ①非线
性系统(自动化) - 故障诊断 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 139444 号

Translation from the English language edition:

Fault Diagnosis of Nonlinear Systems Using a Hybrid Approach by Ehsan Sobhani - Tehrani, Khasha-
yar Khorasani

© Science + Business Media, LLC2009

All Rights Reserved

本书中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行。

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 3/4 字数 257 千字

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

当前,非线性动态系统在其传感器、执行器和其他部件发生故障或者失效时能够自治运行或者做出适当的维护保障决策的需求日益增长,从而使非线性动态系统中的故障检测、隔离和辨识以及在此基础上的故障预测与健康管理工作备受关注。

原著作者在若干领域(包含系统辨识、鲁棒和自适应控制、计算智能和系统健康监测)现有方法的基础上,系统地研究了系列新颖方法,用以发展当前非线性系统故障诊断的新能力、放宽/去除当前非线性系统故障诊断方法的限制。其研究的出发点是:由于目前大多数可用的故障诊断技术,缺乏适应故障特征不全面及特征不断变化的故障模式能力,而经典方法对这些知识特性的描述和处理缺乏灵活性,因此并不适用于如卫星和航天器这样的复杂系统。为此本书通过利用基于模型方法的高效数据处理能力及智能系统适应不全面、非形式化甚至不确定知识的能力,提出了一个集成混合方法,以发展更灵活实用的解决方案。该方案包括多级分布式故障诊断系统,据此针对复杂系统中的每个子系统或部件、独立的诊断模块都可以进行设计、测试和验证。如此,故障分析可以深入到系统物理和操作特性层面。然后,智能及高层次的方法就能以监督控制的方式对所有故障诊断模块的结果进行组合。

翻译本书的目的就是将非线性系统故障诊断的混合方法介绍给国内有关从事该领域研究开发的技术人员。在翻译本书的过程中,译者所在课题组的博士研究生王珉、张晓飞、范彬、张新鹏、何德雨,硕士研究生杨圣龙、邓玉泉、王茂、李俊瑶、侯维宇做了大量基础性的工作,在此对他们的付出表示感谢。

由于时间仓促,译者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,欢迎读者批评指正。

译者

前 言

像卫星这样的空间飞行器的日益复杂化以及减少卫星操作人员的成本费用约简措施,迫切需要卫星的诊断和控制系统具有高度的自主性。目前航天器上的异常检测及修复同地面上一样,主要是人工进行,属于劳动密集型的工作,效率比较低。地面操作员采用各种统计技术和模型,通过分析遥测数据来确定卫星当前的健康状态,但是分析与评价巨量数据仍然需要大量的人为干预和专业知识,且易于出错。另外,对于航天器和大多数卫星来说,它们在与地面站间往返通信时可能存在延时过长的问題。鉴于此,拥有一个无需操作员参与或干预就能自主检测、隔离、辨识分类系统中故障的机载故障诊断系统就显得十分必要了。为此,首要目标就是通过利用基于智能和基于混合的方法来提高趋势分析和诊断技术的效率、准确性和可靠性。

众所周知,现在的卫星地面支持系统都需要一个采用先进决策支持系统的自动化卫星健康监测与故障诊断系统。对于卫星的地面操作员来说,在超负荷进行卫星的指挥和控制任务时,拥有一个能够及时给出早期预警的系统也是十分必要的。由于计算技术的进展,采用了如基于规则的专家系统和人工智能(Artificial Intelligence, AI)等方法的先进决策支持系统,能够使卫星的健康监测和故障诊断实现自动化。调查表明,基于人工神经网络的软计算技术正在这些领域得到越来越多的应用。

为了实现这一目标,本书已经开发并实现了新的技术用以准确地监测卫星姿态控制子系统(Attitude Control Subsystem, ACS)的遥测数据,从而找出执行器异常和故障的潜在原因,并便于利用和优化操作资源以解决关键事件的维护问题。为了准确地预测执行器故障,以检测执行器在关键变量或特征点上的异常或偏离其正常使用范围的微小偏差,有必要研究和开发一系列不同的方法。我们相信这些增强的诊断能力与自主故障检测、诊断和修复技术结合在一起,必将有利于卫星现有的和未来的空间任务规划,也将增加当前卫星的预期寿命或改进其未来的设计。

传统的故障容错控制系统是通过硬件冗余来实现和保证的,也就是说系统中

包含冗余的执行器和传感器。硬件中的控制和测量通道通常有两重或者三重冗余备份。但物理冗余存在的主要弊端是增加额外费用和操作的复杂性,而且系统的重量和维修需求也随之增加。因此,人们提出了基于系统数学模型和执行器输入、传感器输出关系的解析冗余分析方法,且越来越多地应用于复杂控制系统中。

在卫星或者空间飞行器等大型复杂系统中,并不是对每一个过程或子系统都可以建立精确的数学模型。因此,我们着眼于以计算智能方法作为对系统描述的替代手段。神经网络在这方面的潜力非常大,因为该网络能够产生输入/输出的映射关系,在适度假设的前提下,它能以任意设定的准确度逼近任意的非线性过程。此外,神经网络已被证实是静态和动态行为模式的卓越模式表征器。本书的一个重点内容就是开发相应的神经网络方法,以提取和表征这些行为模式。本书也开发了使空间飞行器能够做出各种决策及能够自主规划和执行诊断活动的有效方法。

大体上,现在有三种不同的故障诊断方法可供研究:

- (1) 基于卫星物理模型和基于通过估计和控制域解决问题的传统技术。
- (2) 采用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、模糊逻辑及遗传和进化算法的模型开发技术,以及将这些模型与其他的智能网络结合在一起以检测和隔离故障的相关技术。
- (3) 最后,有可能将上述两种方法结合作为一种模型开发和建立故障诊断逻辑的混合方法。

在若干领域(包含系统辨识、鲁棒和自适应控制、计算智能和系统健康监测)现有方法的基础上,本书研究了相关新颖创新技术,用以发展当前非线性系统故障诊断的新能力、放宽/去除当前非线性系统故障诊断技术的限制。研究的出发点是:由于目前大多数可用的故障诊断技术,缺乏适应故障特征不全面及特征不断变化的故障模式能力,而经典方法对这些知识特性的描述和处理缺乏灵活性,因此并不适用于如卫星和航天器这样的复杂系统。本书所提出的方法和感兴趣的点是集成采用计算智能的解析方法。通过利用基于模型方法的高效数据处理能力及智能系统适应不全面、非正式甚至不确定知识的能力,本书提出了一个集成混合方法的设想以开发更灵活实用的解决方案。该方法包括多级分布式故障诊断系统,据此针对复杂系统中的每个子系统或部件,独立的诊断模块都可以进行设计、测试和验证。如此,故障分析可以深入到系统的物理和操作特性层面。然后,智能及高层次的方法就能以监督控制的方式对所有的故障诊断模块的结果进行组合。这里所提出的智能方法既可以用于局部系统,也可以用于整个系统。

本书主要内容如下:

第1章,对故障诊断相关文献特别是故障检测方法进行了概述,对故障诊断问题的更规范的表达及其所涉及问题的细节,以及文献中关于故障诊断尤其是故障隔离及识别的一些方法进行了概述。

第2章,正式定义了非线性系统的故障诊断问题,对线性和非线性系统故障检测、隔离和辨识(Fault Detection, Isolation, and Identification, FDII)的不同方法进行了较为全面的文献综述和分析。对基于模型和基于计算智能的故障诊断方法进行了全面的评述和分析,进一步说明了各个框架内一些众所周知的方法并评述了它们各自的利弊。

第3章,在全状态测量的假设前提下,说明了混合非线性FDII方案的串并联结构和鲁棒并联结构,这也是本书的核心内容。这一章还介绍了基于参数化故障模型(Parameterized Fault Models, PFM)库将非线性系统的FDII问题作为一个非线性参数估计问题的具体表述方法,另外还对基于模型和基于智能计算的非线性参数估计方法进行了简要的叙述。

第4章,首先全面分析了状态估计和滤波的相关理论,以此设计和开发了一种故障容错状态估计器使FDII在部分状态测量条件下成为可能,然后设计了一个具体的自适应神经元状态估计器(Neural State Estimator, NSE),另外还介绍了NSE与所提出的混合FDII方案的集成问题。

第5章,说明了本书中提出的故障诊断算法应用于航天器姿态控制系统和反作用飞轮执行器中的有关问题。利用仿真结果对FDII算法的有效性进行了演示与特性验证(如鲁棒性)。

第6章,讨论了结论及未来的研究方向。

本书中的主要研究经费来源于加拿大自然科学和工程研究委员会(Natural Sciences and Engineering Research Council, NSERC)的“发现与决策项目”的支持及康科迪亚大学工程与计算机科学学院的支持,在此表示衷心的感谢。

Ehsan Sobhani-Tehrani

Khashayar Khorasani

致 谢

真诚地感谢我的学术导师——K. Khorasani 教授(加拿大蒙特利尔康科迪亚大学电子与计算机工程学院),在完成本书的过程中,他始终给了我悉心的支持和指导。我在蒙特利尔生活的这些年,Khorasani 教授鼓励性的建议和批评总是时时刻刻指导着我,如果没有他的卓识远见、丰富的经历和独到的见解,我想我是不可能完成本书的撰写工作的。

我还要特别感谢 Dr. Ali Talebi 副教授(伊朗德黑兰 Amirkabir 技术大学),他以讨论、建议以及指导性和启发式的反馈等方式对本书倾注了大量心血。我对他无条件的支持和永远积极的态度表示深深的感谢。

我还要感谢我在康科迪亚大学和 GlobVision 公司所有的朋友和同事,尤其是 Hani Khoshdel、Nicolae Tudoroiu 博士、Nader Meskin 博士、Farzaneh Abdollahi 博士以及 Tao Jiang。在各种场合和项目中进行富有成效的讨论的同时,我从他们身上学到了许多非常宝贵的东西。我还要感谢我的伙伴 Reza Pedrami、Aidin Mehdipour、Houman Zarrabi 和 Vahid Raissi,他们总能为我带来愉快美妙的轻松时刻,并且为我营造了非常理想的工作环境。

我还要感谢 GlobVision 公司的董事长 Armineh Garabedian 女士,感谢她最近三年来对我的理解、支持和鼓励。她对待工作的耐心和激情,以及积极乐观的态度是鼓舞我前进的榜样和源泉。

最后也是最重要的,我要为我的父母、哥哥 Hessam、姨母 Nahid 献上最真挚的感谢。他们对我都极其慈爱,乐于自我牺牲并始终非常支持我的工作,我很幸运能拥有这样一个美好、友爱及相互支持的家庭。特别地,我真心感谢哥哥 Hessam,在我离开家的期间,他无私地陪伴于我们父母的身边以减轻他们对我的思念之苦。

加拿大蒙特利尔

Ehsan Sobhani – Tehrani

缩 写 词

ACS	Attitude Control Subsystem	姿态控制子系统
ADCS	Attitude Determination and Control Subsystem	姿态确定和控制子系统
ARR	Analytical Redundancy Relations	解析冗余关系
ART	Adaptive Resonance Theory	自适应共振理论
BP	Back – Propagation	反向传播
CBM	Condition – Based Maintenance	状态基维修
C&DH	Command and Data Handling	指令和数据处理
CI	Computational Intelligence	计算智能
DBP	Dynamic Back – Propagation	动态反向传播
DES	Discrete Event System	离散事件系统
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
DOS	Dedicated Observer Scheme	“特定”(专用)观测器方案
DPHM	Diagnosis, Prognosis, and Health Management	诊断、预测和健康管理
DTW	Dynamic Time Warping	动态时间规整
DWT	Discrete Wavelet Transform	离散小波变换
EKF	Extended Kalman Filter	扩展卡尔曼滤波器
FA	Fault Accommodation	故障调节
FD	Fault Diagnosis	故障诊断
FDA	Fault Diagnosis and Accommodation	故障诊断和调节
FDAE	Fault Detection and Approximation Estimator	故障检测与近似估计器
FDI	Fault Detection and Isolation	故障检测与隔离
FDII	Fault Detection, Isolation, and Identification	故障检测、隔离和辨识
FDIR	Fault Detection, Isolation, and Recovery	故障检测、隔离及修复

FFNN	Feedforward Neural Network	前馈神经网络
FIE	Fault Isolation Estimator	故障隔离估计器
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis	失效模式与影响分析
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis	故障模式、影响与危害性分析
FMSLF	Finite Multi – Severity Level Faults	有限多级严重度故障
FP	Faults Parameters	故障参数
FPF	Fault Parameter Function	故障参数函数(功能)
FSM	Finite State Machine	有限状态机
FTC	Fault Tolerant Control	故障容错控制
FTO	Fault Tolerant Observer	故障容错观测器
FTSE	Fault Tolerant State Estimator	故障容错状态估计器
GLR	Generalized Likelihood Ratio	广义似然比
GNC	Guidance, Navigation and Control	制导、导航与控制
GOS	Generalized Observer Scheme	“泛定”(广义)观测器方案
HMM	Hidden Markov Models	隐马尔可夫模型
HOF	Hard – over Failure	急偏故障(信号过强故障)
IMM	Interacting Multiple Models	交互式多模型
ISLF	Infinite Severity Level Faults	无级严重度故障
KF	Kalman Filter	卡尔曼滤波器
LEO	Low Earth Orbit	低地球轨道
LIP	Lock – in – Place	卡死(故障)
LISP	Linear Structure Preserving Principle	线性结构保持原理
LMI	Linear Matrix Inequality	线性矩阵不等式
LOA	Loss of Accuracy	准确度丢失
LOE	Loss of Effectiveness	效率损失
LQ	Linear Quadratic	线性二次型
LS	Least Squares	最小二乘
LSE	Least Squares Estimator	最小二乘估计器
ME	Mean of Error	误差均值
MIMO	Multi Input Multi Output	多输入多输出
MIMOSA	Machinery Information Management	

	Open Systems Alliance	机器信息管理开放系统联盟
MISO	Multi Input Single Output	多输入单输出
MLE	Maximum Likelihood Estimator	极大似然估计器
MLP	Multi Layer Perceptron	多层感知器
MM	Multiple Model	多模型
MSLF	Mono Severity Level Faults	单级严重程度故障
MWMF	Moving Window Mean Filter	移动窗口均值滤波器
NARX	Nonlinear Autoregressive Exogenous	非线性含输入自回归
NN	Neural Network	神经网络
NPE	Neural Parameter Estimator	神经元参数估计器
NSE	Neural State Estimator	神经元状态估计器
NUIO	Nonlinear Unknown Input Observer	非线性未知输入观测器
OEM	Original Equipment Manufacturer	原设备制造商
ONA	Online Adaptation	在线自适应
OSA – CBM	Open System Architecture-Condition Based Maintenance	开放式系统结构—状态基维修
PDF	Probability Distribution Function	概率分布函数
PFM	Parameterized Fault Models	参数化故障模型
PID	Proportional, Integral, Derivative	比例、积分、微分
PNN	Probabilistic Neural Network	概率神经网络
QTA	Qualitative Trend Analysis	定性趋势分析
RBF	Radial Basis Functions	径向基函数
RHE	Receding Horizon Estimator	滚动时域估计器
RLS	Recursive Least Squares	递归最小二乘
RMLP	Recursive Multi – Layer Perceptron	递归多层感知器
RMSE	Root Mean Square of Error	误差均方根
RPY	Roll – Pitch – Yaw	横滚—俯仰—偏航
RUL	Remaining Useful Life	剩余使用寿命
SML	Simulated Maximum Likelihood	仿真极大似然比
SNR	Signal – to – Noise Ratio	信噪比
SOC	State of Charge	电池中电量状态
SOM	Self – Organizing Map	自组织映射
SPRT	Sequential Probability Ratio Test	序贯概率比检验

STDE	Standard Deviation of Error	误差标准偏差
SVM	Support Vector Machines	支持矢量机
TDL	Tapped Delay Line	抽头延迟线
TDNN	Time Delay Neural Network	时间延迟神经网络
T& TC	Telemetry and Telecommand	遥测和遥控
TTF	Time to Failure	失效前时间(无故障时间)
UIO	Unknown Input Observer	未知输入观测器
UKF	Unscented Kalman Filter	无迹卡尔曼滤波器
UT	Unscented Transform	无迹变换
VSC	Variable Structure Control	变结构控制

目 录

缩写词	XI
第 1 章 引言	1
1.1 本书中有关概念的说明	1
1.2 撰写本书的动因	3
1.3 研究目的	6
1.4 文献综述	7
1.5 所提出的故障诊断方案	11
1.6 本书的贡献	13
1.7 本书概要	15
第 2 章 故障检测与诊断	16
2.1 问题的描述	16
2.2 故障诊断系统的目标属性	20
2.3 基于解析冗余的 FDI 方法回顾	21
2.3.1 基于模型的 FDI 方法	22
2.3.2 基于智能计算的 FDI 方法	30
2.4 本书中发展的 FDII 混合方法	35
2.5 FDI 对不确定性因素的鲁棒性	37
2.6 本章小结	38
第 3 章 全状态可测的非线性系统 FDII	40
3.1 故障建模和健康指示参数	41
3.2 采用参数估计的 FDII	44
3.2.1 常规的线性和非线性参数估计	45
3.2.2 基于神经网络的参数估计	47
3.3 神经网络参数估计器的 FDII 串并混联框架	48
3.3.1 串并混联方案的权值更新律	49

3.3.2	串并混联方案的 FDI 决策逻辑	50
3.4	使用 NPE 并联框架的鲁棒 FDII	51
3.4.1	鲁棒并联方案的权值更新律	53
3.4.2	并联方案中的故障隔离策略	53
3.5	本章小结	53
第 4 章	部分状态可测的非线性系统 FDII	55
4.1	部分状态可测时应用串并混联方案的 FDII	56
4.2	部分状态可测条件下采用并联方案的 FDII	57
4.3	故障容错状态估计	58
4.4	非线性动态系统的状态估计	59
4.4.1	非线性滤波的概率激发方法	60
4.4.2	非线性滤波的统计激发方法	61
4.5	基于模型的状态估计	63
4.6	基于学习和计算智能的状态估计	63
4.6.1	基于神经网络滤波的概率激发方法	64
4.6.2	基于神经网络滤波的统计激发方法	65
4.7	卡尔曼滤波器结构保持 NSE	68
4.8	本章小结	74
第 5 章	故障诊断混合方法应用于卫星姿态控制系统	75
5.1	航天器子系统	76
5.2	卫星 ACS	77
5.2.1	卫星 ACS 中的故障诊断	78
5.2.2	卫星姿态动力学	78
5.2.3	外部姿态干扰的数学模型	87
5.3	姿态控制	89
5.4	三轴稳定卫星姿态控制系统的仿真结果	90
5.4.1	三轴姿态稳定	90
5.4.2	反作用飞轮中可能故障场景特性	99
5.5	全状态可测 FDII 的仿真结果	100
5.5.1	采用串并混联方案的 FDII 仿真结果	103
5.5.2	串并混联 FDII 方案对测量噪声的鲁棒性分析	115
5.5.3	并联 FDII 方案的仿真结果	127

5.5.4 并联 FDII 方案对测量噪声的鲁棒性分析	137
5.6 部分状态可测的 FDII 仿真结果	148
5.6.1 健康状态运行情况下的状态估计	149
5.6.2 故障情况下的状态估计	151
5.6.3 采用 NSE 的电流估计的 FDII	153
5.7 本章小结	164
第 6 章 结论	166
附录 A 定阶偏导数	170
附录 B 姿态参考系统和坐标系	172
附录 C FDII 分析结果附图	174
参考文献	192

第1章 引言

人工动态系统在其传感器、执行器和其他部件发生故障或者失效时能够自治运行的需求日益增长。故障检测和辨识是自治系统的基本组成部分。因而对开发复杂动态系统的不同部件中故障自动检测与隔离的智能系统的需求很高。尤其是对控制回路中的故障要格外重视,因为它们可能会立即导致控制系统的不稳定性。因此,当系统运行时能够有效而及时地检测并隔离故障就显得至关重要。这在本质上就是在线健康监测的内涵,尽管一般来说,健康监测是依靠后处理能力并利用存储的数据而离线执行的,以确定系统是否有必要进行维护。通常,自治在线健康监测和故障诊断对于任务和安全攸关的系统来说是基本的要求;与此相对的是,对于即使存在故障也可运行的系统来说,为了进行维修,离线健康监测和故障识别已经足够了。本书主要关注于开发一种能够对非线性系统实现在线健康监测的故障诊断方法;当然,所提出的方法也能应用于离线监测目的。

此外,故障严重度的精确辨识对于系统的维修以及可靠自治恢复规程的开发来说是非常有价值的。更确切地说,如果处在潜在故障情况下就能对故障严重度进行精确估计,一方面能使得系统操作和控制人员快速地为故障部件安排维修服务,如果不能维修就将其切换到冗余备份部件上去;另一方面也能理智地提前计划和执行有预见性的措施以防止发生灾难性故障。

1.1 本书中有关概念的说明

本书主要瞄准非线性动态系统的故障检测、隔离和辨识(Fault Detection, Isolation, and Identification, FDI)问题。“故障”被认为是系统行为的一种未预见或不期望的变化,而这种变化劣化了系统的性能或者破坏了系统的正常运行,通常前一种效应称作潜在故障,后一种效应则被认为是系统的失效。失效通常是早期故障随时间演化并可能导致危险的情形。系统中的故障通常按照它们的时间历程演化和严重度(换言之,即它们对系统性能的影响)进行分类。从时间历程演化的角度来说,故障可以分为以下两大类。

(1) 间歇性故障:这些故障在产生后仅持续一段有限的时间。不过,应当注意的是,甚至在故障结束后,系统都有可能以不同于故障产生前的方式运行。

(2) 持续性故障:一旦出现,这些故障将永远存在,除非在可能情况下故障部

件被检修/维修或者被冗余的部件更换。

至于考虑到故障的严重程度时,依据被监测的系统或者部件,以下三种故障可能在系统中发生。

(1) 单级严重度故障(MSLF):仅以单种状态出现的故障。例如,在阀门中的固定闭路故障仅以一种形态出现。其他的例子包括阀门中的固定开路故障、浮动故障和电机中的急偏故障(HOF)。

(2) 有限多级严重度故障(FMSLF):FMSLF基本上是由一系列的MSLF构成的。阀的失效就是FMSLF的一个很好的例子。它有可能是一种双状态失效,即固定开路或者固定闭路。其他的例子包括HOF和执行器的浮动失效。

(3) 无级严重度故障(ISLF):这种类型的故障可能实际上发生在一个连续的、无限级的严重程度。ISLF的例子包括电机的失灵故障/卡死(Lock-in-Place, LIP)故障,以及包括偏置、漂移、准确度丢失(LOA)、冻结和传感器校准误差在内的几乎所有类型的传感器故障。

MSLF和FMSLF通常突然出现,因此称为突发性故障。相反,ISLF通常会由于系统组成部件的磨损和裂纹而随着时间发展(或生长),因此常常称作潜在故障。

“故障诊断系统”是一种能够检测被监测系统的故障存在性,并判断其位置和估计其严重程度的系统。换句话说,故障诊断系统能够执行三方面任务,即故障检测、故障隔离和故障辨识,它们的定义分别是^[1]:

(1) 故障检测:作一个关于每个部件都正常(令人满意)还是有些部件出了问题(不令人满意)的二元判断。

(2) 故障隔离:判定故障位置,换句话说,就是辨识出哪个部件、传感器或者执行器出现了故障^①。

(3) 故障辨识:估计故障的严重程度、类型或性质。

以上三方面任务的相对重要性取决于故障诊断系统的用途和系统操作者的目的。尽管如此,检测对于任何实际应用系统来说都是必不可少的,而隔离几乎同等重要,而辨识对于故障恢复、重构以及健康监测和维修目的来说是至关重要的。本书发展了一种集成式的FDII方案,能够同时对一个非线性系统的组成部件的故障进行检测、隔离和严重度辨识。

由于我们难以深入了解不可避免的测量噪声和扰动的详细特征信息并对其进行建模,因此这些因素会使FDII方案产生虚警,从而劣化FDII方案的性能。降低FDII系统对传感器噪声和系统扰动的敏感性并不能完全解决这个问题,因为这很有可能伴随着对故障的灵敏度降低和由此引发的过多的漏警。所以,人们更加期望在保持FDII系统对故障的灵敏度的同时提高对噪声和扰动的不灵敏度。在本

① 故障隔离的内涵其实就是故障定位。——译者