

海军新军事变革丛书

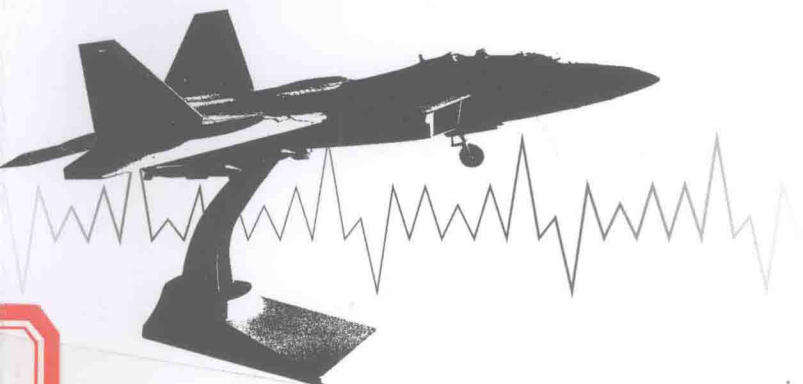


总策划：魏 刚 主 编：马伟明

基于模型的 故障诊断技术

[德] Steven X. Ding 著

郁 军 张永祥 张 献 译
陈福胜 主审



MODEL-BASED FAULT
DIAGNOSIS TECHNIQUES:
DESIGN SCHEMES, ALGORITHMS, AND TOOLS



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

海军新军事变革丛书

总策划：魏 刚 主 编：马伟明

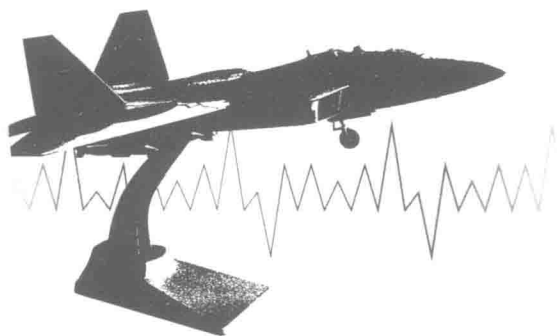


基于模型的 故障诊断技术

*Model-based Fault Diagnosis Techniques:
Design Schemes, Algorithms, and Tools*

[德] Steven X. Ding 著

郁 军 张永祥 张 献 译
陈福胜 主审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

Translation from the English language edition:

Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools

By Steven X. Ding

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版专有翻译出版权由 Springer Science + Business Media 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2013-0850

图书在版编目(CIP)数据

基于模型的故障诊断技术 / (德) 史蒂文·X. 丁著; 郁军, 张永祥, 张献译. —北京: 电子工业出版社, 2017.1

(海军新军事变革丛书)

书名原文: Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools

ISBN 978-7-121-30045-5

I. ①基… II. ①史… ②郁… ③张… ④张… III. ①故障诊断 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 240285 号

责任编辑: 张 毅

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 33.75 字数: 499 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 135.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 57565890, 邮箱 meidipub@phei.com.cn。

海军新军事变革丛书

丛书总策划 魏 刚

编委会主任 马伟明

编委会副主任 敖 然 高敬东 李 安 赵晓哲
邱志明 鲁 明 王航宇 李敬辉
曹跃云

常务副主任 賁可荣

编委会委员 (以姓氏笔画为序)

王公宝 王永斌 王德石 卢晓平
邢焕革 宋裕农 何 琳 吴旭升
张永祥 张明敏 张晓晖 张晓锋
陈泽茂 杨露菁 郁 军 侯向阳
高 俊 夏惠诚 察 豪 蔡志明
黎 放

选题指导 裴晓黎 邹时禧 顾 健 徐 勇
许 斌 吴雪峰

出版策划 卢 强 吴 源 张 毅

《海军新军事变革丛书》第二批总序

当今世界，国际战略格局正在发生深刻变化。传统安全和非传统安全威胁因素相互交织，霸权主义、强权政治有新的表现，恐怖主义、极端主义、民族分裂主义此起彼伏，和平与发展的车轮在坎坷的道路上艰难前行。

发端于 20 世纪 70 年代的世界新军事变革，从酝酿、产生到发展，经历了近四十年由量变到质变的过程。海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争及伊拉克战争这几场高技术条件下局部战争确定了世界新军事变革的发展轨迹和基本走向，展现了未来信息化战争的主体框架。这场新军事变革就是一场由信息技术推动，以创新发展信息化的武器装备体系、军队编制体制和军事理论为主要内容的世界性军事变革。

世界军事变革大势促使军队改革步伐加快。世界范围的军事变革正在加速推进，这是人类军事史上具有划时代意义的深刻变革。美国凭借其超强的经济和科技实力，加快部队结构重组和理论创新，大力研发信息化武器装备，积极构建数字化战场与数字化部队。目前正大力深化军事转型建设，通过发展航空航天作战力量等 40 多项措施，进一步提高军队信息化程度和一体化联合作战能力。俄军也以压缩规模、优化结构、组建航天军、争夺制天权等为重点，全面推行军事改革，着力恢复其强国强军地位。英、法、德等欧洲国家和日、印等亚洲大国，则分别推出军队现代化纲领，努力发展最先进的军事科技，谋求建立独立自主的信息化防务力量。

世界新军事变革的发展趋势是：在人才素质方面，加速由简单操作

型向复合知识型转化；在军事技术方面，加速由军事工程革命向军事信息革命转化；在武器装备方面，加速由机械化装备向信息化装备过渡；在战争形态方面，加速由机械化战争向信息化战争转变；在作战理论方面，正在酝酿着全方位突破；在军事组织体制方面，正朝着小型化、一体化、多能化的方向发展。此外诸如战争本质、军事文化、军事法规等方面都在悄然发生变化。

胡锦涛同志指出：“我们要加强对世界新军事变革的研究，把握趋势、揭示规律，采取措施、积极应对，不断加强国防和军队现代化建设，为全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化提供可靠的安全保障。”今天的人民海军正承担着完成机械化和信息化建设的双重历史任务，时不我待，形势逼人，必须顺应潮流，乘势而上，积极推进中国特色军事变革，努力实现国防和军队现代化建设跨越式发展。

信息时代的人民海军，责无旁贷地肩负着国家利益拓展、保卫领土完整的历史重任，我们只有以大胆创新和求真务实的精神全面推进军事技术、武器装备、作战理论、体制编制、人才培养等方面的变革，才能赶上时代的步伐，逐步缩小与西方强国之间的差距，最终完成信息化军队建设的重大任务，打赢未来的信息化战争。

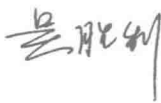
根据海军现代化建设的实际需求，二〇〇四年九月以来，海军装备部与海军工程大学以高度的政治责任感和思想敏锐性，组织部分学术造诣深、研究水平高的专家学者，翻译出版了《海军新军事变革丛书》。丛书着重介绍和阐释世界新军事变革的“新”和“变”。力求讲清世界新军事变革进入质变阶段后的新变化、新情况，讲清信息化战争与机械化战争、信息化军队建设与机械化军队建设在各个领域的区别和发展。其中，二〇〇四年至今陆续出版的第一批丛书，集中介绍了信息技术及其应用，出版以来深受读者好评。为更好地满足读者的需求，丛书编委会编著出

版了第二批系列丛书。与第一批丛书相比，更加关注武器装备、军事思想、战争形态、军队建设编制等全局性问题，更加关注大型水面舰艇、新型潜艇、作战飞机、远射程导弹等新一代武器装备，是第一批系列丛书的发展深化。

丛书编委会和参加编写的同志投入了很大精力，付出了辛勤劳动，取得了很好的成果。相信第二批丛书为深入学习领会军委国防和军队建设思想、了解和研究世界新军事变革提供有益的辅助材料和参考读物，在加速推进中国特色军事变革的伟大实践中发挥应有的作用。

中央军委委员

海军司令员



二〇〇九年七月十五日

译者序

可靠性一直是机械设备评价体系当中非常重要的一个方面。无论一台机械设备的设计和制造质量多么高，在不同的工况下如果长时间运行都会随时出现故障。及时的故障诊断能够延长机械设备使用寿命和提高生产效益。目前，关于故障诊断技术的学术研究非常多，根据不同的应用领域和应用对象，有着不同的诊断方法。

本书是一部系统论述基于模型故障诊断技术的专著。本书的英文原著作者 Steven X. Ding 是控制领域的专家，其所从事的研究方向有基于模型的故障诊断、基于数据驱动的故障诊断、容错系统，以及将这些方法应用到工业自动化系统和化工过程当中。本书是他们在 1998—2007 年所著，内容涉及一些基本的故障诊断方法和控制理论，其中故障诊断方法包括基于冗余硬件的故障诊断方法、基于信号处理的故障诊断方法、真实性测试方法及本文的重点——基于模型的故障诊断方法。基于模型的故障诊断方法早在 20 世纪 70 年代就已经被提出，其实用性已经在工业设备系统领域得到验证。

所谓基于模型的故障诊断技术，是从基于冗余硬件的诊断技术发展而来。基于冗余硬件故障诊断技术的主要思想是设置一个与被监测部件相同且没有故障的参照部件，当对被监测的部件进行故障诊断时，将两个部件都置于总系统中运行，通过对比两个部件的相关参数，进而可以进行故障诊断。这种方法的优点是拥有较高的可靠性和稳定性，误诊率很低；其缺点是成本非常高。特别是对于价格昂贵的设备来说，这是一个很沉重的负担。因此，这种方法只适用于若干非常重要的部件。为了

解决这个问题，基于模型的故障诊断技术越来越受到重视。基于模型故障诊断技术的基本思想与基于冗余硬件故障诊断的方法相似。它主要是研究被监测部件的运行过程，将此部件运行的过程转化成一个模型，将模型的输出与被监测部件的输出对比，就可以进行故障诊断了。在这个过程中，会引入观察器和残差生成器等相关概念。基于观察器的故障诊断方法实际上就是构建一个观察器来替代部件运行过程模型。而残差生成器则是一个真实性测试，它将过程模型产生的输出与被监测对象的真实输出进行比较。无论是基于过程模型的故障诊断方法，还是基于观察器的故障诊断方法，最终都是通过对残差的分析处理而得到故障诊断的结果的。因此，残差生成器具有很重要的作用。本文针对基于模型的故障诊断方法从四个大方面进行了详细的论述，分别是观察器、残差生成器、残差评价与阈值计算，以及对基于模型的故障诊断隔离识别系统的综合设计。

从控制理论的角度看，观察器比过程模型具有更多的优点，比如有较强的鲁棒性、能够更好地对输出进行估计。基于观察器的故障检测与隔离（FDI）系统设计有很多问题，比如未知输入解耦和故障隔离问题、基于观察器 FDI 框架的鲁棒性问题、FDI 框架问题，以及残差评价和阈值计算问题等。同时，还要引入一些基本的数学理论，比如线性代数、矩阵理论、线性系统理论、鲁棒性控制理论、统计方法，以及线性矩阵不等式（LMI）技术。这些理论将贯穿全书。同时，为了能够更好地使读者阅读本书，该书还引入了一些与线性动态系统相关的数学模型，比如输入输出描述法、状态空间描述法、包含扰动和模型不确定性的不同形式的模型、描述故障影响的模型。通过引入这些模型人们能够对基准系统和故障系统的概念进行定义。在实际应用中，基于观察器的 FDI 系统肯定会受到环境的干扰及系统当中未知的改变的影响，这些都是扰动系统的组成部分，同时，我们构建的系统与真实的系统之间也存在着相应的差别，这也是影响 FDI 系统正常工作的重要因素。本文主要从三个

方面对基于观察器的残差生成器框架问题进行论述：观察器/残差生成器设计方法、简化阶数的观察器/残差生成器设计方法、最小阶数观察器/残差生成器设计方法。关于基于观察器的残差生成器框架问题经常会造成两个方面的误导：其一，误使一些学者认为状态可观测性与状态空间理论知识是分开的；其二，误使一些学者更多地去研究基于观察器的残差生成器，而很少去考虑残差评价问题。关于未知输入解耦和故障可检测性问题，最早被提出是为了解决残差信号与未知输入的独立性问题。

第3章介绍了动态体系建模的构成，以及如何描述基准和故障系统行为，分别从系统行为描述、互质分解技术、干扰系统表示、包含不确定性模型的系统表示、故障建模，以及故障建模的闭环反馈控制模型系统等方面进行了论述。由于线性时不变系统简单的结构及其应用的广泛性，本书中大部分的无扰动和无故障系统都利用线性时不变系统表示。简单地讲，就是利用一个传输矩阵表示线性时不变系统的输入输出空间。为了能够进一步研究系统结构，本章利用互质分解，将传输矩阵分解成两个稳定的互质传输矩阵进行分析。在第3.4~3.5节中，作者对干扰系统和系统模型不确定性进行了相关分析，将实际应用当中的环境干扰、处理过程噪声作为未知输入。故障建模是故障检测的一个重要环节，通过故障建模可以得到若干类型故障的基本形式，比如常见的类型有传感器故障、激励器故障、过程故障。这些故障又被划分为加性故障、乘性故障等。在实际中，典型的加性故障，如传感器和执行器的偏移，或传感器的漂移。前者可表示为常数，而后者则可表示为斜坡函数。在实际中，过程或传感器和执行器中出现的功能异常往往会引起模型参数的变化，这类故障被称为乘性故障。乘性故障的特点是（可能）直接影响到系统的稳定性。在采用状态反馈或基于观测器状态反馈控制的情况下，也可以看到其对系统稳定性的影响。而基于模型的故障诊断系统通常是嵌入到闭环反馈控制系统中的，反馈控制回路中的故障检测是重点研究的专题。本章节最后利用几个基准事例对已经讲过的理论方法进行分析

演示。

在 FDI 框架当中,结构的故障可检测性、可隔离性和可辨识性是从 FDI 的角度描述系统的结构的性能。由于故障可检测性对于 FDI 框架的重要性,本书在第 4 章分别从不同的方面对它们的概念进行了详细论述。目前,很多文献从所研究的系统结构方面对结构的故障可检测性、可隔离性和可辨识性的概念进行了描述,并与基于性能的可检测性、可隔离性和可辨识性的概念进行了区分。对故障可检测性、可隔离性和可辨识性的概念进行定义会受到对故障方式定义的影响。在第 3 章中已经介绍了加性故障和乘性故障的相关理论,而故障可检测性对于加性故障与乘性故障也是有明显差别的。第 4.1 节给出了结构故障可检测性的直观定义,并通过相关系统模型进行了论述。由于检测乘性故障需要激励信号,作者在第 4.2 节中对激励和充分激励系统进行了系统的说明。而对于结构故障可隔离性,本章节从可隔离性的概念和条件进行了论述,通过由简到繁的系统模型对其进行了数学定义,然后利用前面提到的传递矩阵对可隔离性的条件进行了分析,同时利用特殊事例进行了分析,得到出结论:当且仅当故障的个数不大于传感器个数时,加性故障才可以进行隔离。而对于乘性故障来说,同样也需要额外的传感器才能进行故障隔离。因此,本章节提出了一种针对乘性故障的弱隔离。随后又对结构故障的可识别性进行了研究,分别从一般的角度和数学的角度对故障可识别性进行了相关的定义,并且本章从故障传递矩阵的角度对故障可识别性进行分析。

残差生成器是基于模型故障检测的关键组成部分,故障检测的最终结果要通过对残差的分析才能得到。本书重点介绍了三种常用的残差生成器模型:故障检测滤波器、诊断观察器、基于奇偶关系的残差生成器。同时,还详细地论述了这些残差生成器的设计、实施的方式、解的特征,以及不同类型的残差生成器相互之间的联系。在残差的生成过程中,引入了冗余分析这一概念。由于残差是由实际系统的测量值与设计的模型

产生的输出进行对比产生的,而所设计的模型与实际无故障状态下的系统特性是完全一样的,那么这个过程就叫作冗余分析。通过冗余分析可知,系统的输入输出是残差生成的重要组成部分,而系统的可观测性和可控制性不是基于观察器故障检测隔离框架的必要组成部分。在 FDI 研究的意义下,残差信号被看作为故障指标。通过检测残差变化可以判断是否存在故障及故障程度。残差一般都是以信号的形式产生,本书给出了残差生成器的参数化模式,同时也带来相应的问题:如何选取这些残差生成器模型参数。此问题直接影响着残差信号对故障的灵敏性,以及针对系统不确定性的鲁棒性。第 5.2 节对此问题进行了详细的论述。解决了残差生成器的参数化问题,又迎来了另一个问题:如何设计一个参数化形式的线性残差生成器。而与之相关的两个重要参数是增益矩阵和后置滤波器,第 5.3 节从这两个方面针对残差生成器的设计问题进行论述。第 5.4 节介绍了故障检测滤波器,给出了全阶观察器的数学模型。随后,第 5.5 节论述了用途和研究比较广泛的残差生成器框架,分别从基于观察器的诊断残差生成器的构建、解的特征、标准解法及代数方法四个方面进行了分析。第 5.6 节对奇偶空间方法进行了三个方面的论述:基于奇偶关系的残差生成器的构建、奇偶空间的特征及相关事例。最后在第 5.7 节中对本章中的主要内容之间的联系和相关的比较进行了分析。

利用残差生成器对系统的输入和输出进行分析从而得到故障诊断的结果,但在这个过程中会受到未知输入的干扰。为了解决这个问题,本书利用了频域分析法、奇偶空间法等方法,对未知输入解耦问题进行了处理。这些方法虽然能够有效地解决完美未知输入解耦问题,但是在实际应用当中必须有足够数量的传感器才能实现。同时,如果系统的不确定性不可构建,而且输入干扰分布在整个测量空间,那么就会导致完美未知输入解耦方法的失效。因此,在 20 世纪八九十年代,鲁棒性控制论高度发展的时候,很多方法被用来处理 FDI 领域的鲁棒性问题。本书也从三大方面对此鲁棒性问题进行研究解决:利用干扰的知识、利用逼近

和优化方法、在一定的性能指标条件下设计残差生成器。所涉及的数学工具有信号和系统范数、范数计算方法、奇异值分解、互内外分解、模型匹配问题、线性矩阵不等式技术。这些方法都发展得比较完善且动因相似，它们都是受到为增强对扰动鲁棒性的需求所驱动，同时也包括可靠且故障灵敏的残差生成的需求。这些方法背后的思想相似，残差生成问题被描述成鲁棒性和灵敏性的形式，然后在鲁棒控制理论的框架中进行求解。每种方法和设计策略都能与鲁棒控制理论框架中的一种新方法相结合，控制与估计问题间的对偶性促使了先进的控制理论及技术在求解残差生成问题方面的直接应用。第 6.1 节首先针对未知输入解耦提出了五个要解决的问题：针对理想残差生成器的求解问题；针对完美未知输入解耦问题（PUIDP）的频域求解问题；未知输入故障检测滤波器设计问题；未知输入诊断观察器设计问题；未知输入奇偶关系的残差生成器设计问题。然后，在第 6.2~6.6 节中分别对这五个问题进行了详细的论述。

第 6 章讨论的完全解耦技术，由于其应用条件要求严苛，限制了该技术的实际推广。与其不同的是，第 7 章所研究的残差生成器，是在对干扰的鲁棒性与对故障的灵敏性之间进行权衡的意义上设计的。一般来说，鲁棒 FDI 问题的处理，可采取三种不同的方式：利用干扰的知识、通过传递矩阵逼近、在一定的性能指标条件下设计残差生成器。本章依次介绍了这三类方式，但重点将放在第三种方式上，这是因为第三种方式在理论研究和实际应用上都具有重要作用。具体地说，第 7.2 节就第一种方式讨论了基于 Kalman 滤波器的残差生成。第 7.3 节就第二种方式通过逼近未知输入（UI）分布矩阵来处理鲁棒残差生成问题，随后的章节开始在对干扰的鲁棒性与对故障的灵敏性之间权衡的意义下研究 FDI 问题。首先，第 7.4 节定义了鲁棒性、故障灵敏性和性能指标，第 7.5 节在三种不同指标下研究基于奇偶空间关系的残差生成及系统阶数的选择方法，并给出一个演示示例，第 7.6 节简要讨论了 $\mathcal{H}_\infty$ 最优故障辨识问题。

然后,在第 7.7~7.8 节中研究针对基于观测器的残差生成器最优设计而提出的 $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_2$ 设计方法,分析了其关注度较低的原因,以及与最优选择奇偶向量之间的关系。第 7.9 节则在不同性能指标下探讨了时兴的故障检测滤波(FDF)最优设计问题。由于需要将多目标优化问题简化为带约束的单目标优化问题,作者使用了成熟的鲁棒控制理论和 LMI 技术。最后,为了在不同情形下公平地评价故障对残差信号的影响,第 7.10 节介绍了一种针对故障灵敏性实际评价的指标,并利用此指标得到了实现基于观测器的故障检测系统最优设计的统一解。随后的第 7.11 节对统一解的一般形式和广义化进行了讨论。本章结尾处还分析了上述技术和方法发展的主要原因,概括了本章的研究思路和内容构成,给出了相关参考文献。

第 8 章着重应用 LMI 技术处理在不确定系统中生成残差信号时遇到的鲁棒性问题。研究鲁棒性论题的主要目的是在不显著地损失故障灵敏性的同时,针对模型的不确定性和干扰,增强残差生成器的鲁棒性。第 8.1 节是一些预备数学知识介绍,第 8.2 节给出了一种将模型不确定性转化为未知输入向量进行建模的方法。从第 8.3 节开始讨论参考模型策略,这是在现有的针对不确定系统的 FDI 策略中关注度较高的方法。基于参考模型的残差生成器策略中一个关键且严格的环节是选择参考模型。在不同的选择策略中,最常用的一种是在 $\mathcal{H}_\infty$ 最佳故障识别问题(OFIP)框架下处理残差生成问题,其中故障本身或加权的故障被定义为参考模型。通过这种方式,原始的残差生成问题基本上被转化成一个标准的模型匹配问题(MMP)问题。第 8.4 节重点介绍了基于参考模型策略求解凸多面体不确定性系统的残差生成,给出了残差生成器最优设计的 LMI 解及相关算法,通过基准示例系统说明上述策略为设计的 FDF 带来显著的性能提升。第 8.5 节研究了随机不确定系统的残差生成问题,首先给出系统的形式化构成,讨论系统动力学和统计特征。然后,考虑模型不确定性的随机特征,引入一个用于比较残差信号与参考模型间差

异的标准评价, 并利用 LMI 辅助设计 FDI。最后, 通过调整目标函数, 给出 FDI 设计的一种替代方法。对比前两章的工作, 本章呈现的研究成果相对有限, 但这依然是基于模型的 FDI 技术中先进的方法。

第 9~11 章构成了全书的第三部分, 研究残差评价和阈值计算问题。前几章已阐述了残差信号通常会被参数变化导致的干扰及不确定性所损坏。为了从可用的残差信号中成功地实现故障检测, 一个被广泛接受的方法是从残差信号中生成一种特征, 并依此区分从干扰和不确定性所产生的不同故障。残差的评价和阈值设定正是为了这个目的。通过残差特征及阈值之间的简单对比, 便可判定一个故障的可能发生事件。依据所考虑系统的类型, 目前存在两种残差评价策略。其中一种是所谓的基于范数的残差评价方法, 另一种是成熟地建立在统计方法框架中的统计检验方法。这两种方法也分别成为第 9 章和第 10 章的研究对象, 而之后的第 11 章研究基于范数方法和基于统计方法的综合。

在实际故障检测中, 目前常用的做法是首先定义一个能确定信号数学特征的评价函数, 然后基于这个评价函数确定阈值, 最后进行故障的判定。依据这样的思路, 第 9 章首先介绍了信号范数、系统范数、极限监测和趋势分析等预备知识和基本概念。在第 9.3 节描述了一些用于残差评价的标准评价函数, 如峰值、均方根值、均值、趋势等。从工程学的角度来看, 一个阈值的确定是为了在无故障运行条件下, 找到关于干扰和模型不确定性的宽容限度。此过程会受到残差生成器动力学、评价不确定性方法及不确定性边界的显著影响。第 9.4 节针对这些因素展开讨论, 并考虑未知输入的能量和最大值, 引入了三种阈值。第 9.5~9.7 节就这三种阈值分别讨论了范数有界不确定性系统和凸多面体不确定性系统中阈值的计算问题, 给出理论推导和算法描述, 并利用一些示例进行了验证和说明。第 9.8 节对上述阈值的特点进行了总结, 引出残差生成器的概念。通过分析得出, 将阈值替换为相应的阈值生成器可增强故障检测的灵敏性。

第 10 章着重阐述几种应用于残差评价、阈值设定和决策的基本统计方法。由于本章在处理问题的方式和应用于问题求解的数学工具方面,与前几章有显著的不同,因此首先介绍了一些基本的统计检验方法及其背后的思想,包括基本假设检验、似然比及广义似然比、方差变化检测等。虽然未考虑动态过程,但这些方法和思想却为后续几节的研究奠定了基础。之后在第 10.3 节中,作为似然比方法的替代策略,探讨三种阈值的选择准则: Neyman-Pearson 准则、最大后验概率准则和 Bayes 准则。最后,第 10.4 节利用基于 Kalman 滤波器的故障检测和基于奇偶空间的故障检测处理随机动态过程的残差评价问题。这些方法在先前章节介绍的基于模型的 FDI 方法与统计方法之间起到桥梁作用,并为后续章节的扩展研究奠定了基础。

第 11 章研究基于范数方法和基于统计方法的综合,阐述三种使用不同求解对策和不同技术工具的策略,并利用这些策略解决带确定性扰动和随机不确定性系统的 FDI 问题。延续第 10.4 节的内容,第 11.1 节研究了具有确定性扰动随机系统中的残差评价,通过讨论与示例分析得出,基于范数方法和基于统计方法的综合可帮助我们提高 FDI 系统的性能。实际观察可以发现,模型不确定性的先验知识是有限的,因此第 11.2 节关注了模型参数存在随机不确定变化的系统。与第 11.1 节的研究不同,第 11.2 节只拥有关于均值和方差的信息,而没有随机不确定变量的分布信息。为处理这些系统并求解相应的 FDI 问题,作者针对乘性随机噪声系统采用了基于 LMI 技术的综合方法。概率鲁棒性技术是一种新涌现的研究思路,与成熟的鲁棒控制理论并行,它允许在概率框架中解决鲁棒控制问题,并在成熟的统计检验策略和基于范数的方法间起到了连接作用。第 11.3 节针对概率鲁棒性技术辅助的阈值计算进行了研究,该节叙述的设计策略是概率鲁棒性技术首次应用于故障检测问题后得到的初步结果。

第 12~14 章构建了故障诊断、隔离与识别的设计框架。在第 12 章

中重点介绍了如何对故障检测系统进行综合设计。而设计的关键则是如何使故障诊断系统具备较高的故障检测率,同时具有较低的故障虚警率。要达到这个目的,就必须要将前面几章关于残差生成、残差评价及阈值计算的内容结合起来进行研究。由于每个故障检测系统都会产生误报的情况,因此我们最终要实现的目标是能够使系统在较高的故障检测率和较低的故障虚警率之间达到最优的权衡。为了实现最优权衡,需要通过计算来比较故障检测率和故障虚警率。在此,作者引入了相关的定义:导致误报的干扰集和可检测故障集。导致误报的干扰集可以直接显示可能性很高的错误报警的数量,但是虚警率却很难通过此干扰集的大小进行表示。同样,故障检测率也很难通过撇去故障集的大小进行表示。因此,作者在第 12.1 节中针对故障检测率和故障虚警率提出了简化的表示方法。为了能够使系统的虚警率降到最低,本章节从两个方面进行分析:当给定虚警率时,使故障检测率最大化;当给定了故障检测率时,使虚警率最小。通过对这两个问题进行分析,得到了对应的两种问题的一般解的形式,从而实现了它们之间的最优权衡。为了进一步验证解决最优权衡问题方法的可行性,本节利用此方法针对随机系统进行了相关的最优权衡问题的分析。对于随机系统也是从两个方面进行分析:给定故障虚警率条件下,使故障检测率最大化;给定故障检测率条件下,使故障虚警率最小化。最后,以联合解的方式解决了随机系统的设计问题。利用本节的分析方法可以将前面章节所涉及的故障检测识别系统的基本要素综合考虑到一起。通过本章的分析可知,故障和干扰的影响是能够实现故障检测率与故障虚警率最优权衡的决定因素。

第 13 章是故障诊断系统设计的核心内容,它针对如何设计故障隔离功能进行了详细的论述。而故障隔离实际上是通过信号进行处理分析从而得到相应故障的位置信息。影响故障隔离的相关因素有:可能故障的数量、故障的可能分布、故障特征及可能故障的可用信息。本章首先引入了完美故障隔离的问题,分别对其存在条件及在未知解耦输入的条件