



Springer

基于模型的故障诊断技术

——设计方案、算法和工具

(第2版)

[德] Steven X. Ding 著

尹坤 张爱华 杨宏燕 译

Model-Based Fault Diagnosis Techniques
Design Schemes, Algorithms and Tools
Second Edition



国防工业出版社
National Defense Industry Press

基于模型的故障诊断技术 ——设计方案、算法和工具 (第2版)

Model-Based Fault Diagnosis Techniques
Design Schemes, Algorithms and Tools
Second Edition

[德] Steven X. Ding 著
尹 坤 张爱华 杨宏燕 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2018-038号

图书在版编目(CIP)数据

基于模型的故障诊断技术:设计方案、算法和工具:
第2版/(德)史蒂芬·X.丁(Steven X. Ding)著;尹
坤,张爱华,杨宏燕译. —北京:国防工业出版社,
2019.4

书名原文:Model - Based Fault Diagnosis
Techniques; Design Schemes, Algorithms and Tools
(Second Edition)

ISBN 978 - 7 - 118 - 11813 - 1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 048740 号

Translation from the English language edition:

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

by Steven Ding

Copyright © Springer - Verlag London 2013

Springer - Verlag London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media 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)

三河德鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 29 字数 535 千字

2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 119.00 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

从书序

《工业控制发展》系列著作致力于报道和鼓励控制工程中的技术转化。控制工程的快速发展已经对原有的控制领域产生了影响。新的理论、新的控制器、新的执行器、新的传感器、新的工业过程、新的计算机方法、新的应用、新的哲理、……、新的挑战。这一开拓性成果中,有许多都是以工业报告、可行性研究论文以及先进合作项目的报告的形式呈现出来的。为了使工业控制在各个方面更广泛和快速的传播,这一系列教材为研究人员提供了进一步深入研究的契机。

评估控制系统的性能时,有一个基本问题很容易被忽视,即实际系统的配置和建立是否具有控制过程本身所需的所有功能特性和硬件。如果系统可以通过一个合理的线性模型来表示,那么,就可以识别并列出具限实现各种控制指标的特征参数。这样的信息可以用来产生准则,这些准则将对哪些系统在性能方面可以实现给出有价值的参考。在控制系统分析的教材中,这些重要性质经常以诸如“输入-输出可控性”和“动态性”等术语给出。

有趣的是,在故障检测和隔离(fault detection and isolation, FDI)系统的研究中就有类似的问题出现。从根本上讲,首要的问题并不是故障检测分析系统的性能如何,而是基本过程是否具有允许故障被检测、分离和识别的结构和特征。在控制案例分析中,如果系统可以通过一个线性模型来表示,那么就可以给出系统是否是一般故障可检测的、可隔离的以及可识别的定义和条件。故障可检测性是指是否一个系统故障将会引起系统输出的变化,且该变化与故障的类型和大小无关;故障可隔离性是指由不同的(例如与由扰动的出现引起的系统输出变化)可区分的故障引起的系统输出变化的一类问题;故障可识别性是指从系统输出到故障的映射是否唯一的性质,如果是,那么这个故障是可识别的。基于已经被证明了的基本条件,工程师可以深入设计 FDI 系统。在 Steven Ding 教授的《基于模型的故障诊断技术:设计方案、算法和工具》的第 2 版中,随着基于模型的设计技术与实证案例的应用研究将可以找到上述所有问题的解决方案,该书现在已经列入《工程控制发展》专著的系列。

使 FDI 系统的设计变得复杂的关键问题有两个。第一个来自过程:许多装置和设备往往会受到未知干扰,能够从这些扰动中区分出真正的故障是很重要

的。比如类似的过程噪声,在实际系统中伴随着过程产生于机器内部,由传感器测量到的过程噪声通常会显现出来,而这些过程噪声测量值没有引发误报警是极为重要的。第二个是来自于 FDI 设计本身的模型不确定性。这可能会表现为由于缺乏加工作业知识而导致的 FDI 系统过于敏感或缺乏敏感的后果。此外,由于模型不确定性(模型不精确性)的存在,建议设计者采用鲁棒 FDI 方案。Ding 教授在他的书中提出了许多关于这些技术的 FDI 问题的解决方案、分析以及讨论。

本书的价值在于:采用了五种课题案例以说明理论、算法和实现的本质。这些案例研究系统是:

- 一个 DC(直流)电动机的速度控制;
- 一个倒立摆控制系统;
- 一个三容水箱系统;
- 一个车辆横向动态系统;
- 一个连续的搅拌釜式加热系统。

这些案例研究系统的价值在于其中的四个案例可以在实验室实现,由此使学术和工程读者有机会获得所描述的 FDI 技术直接应用的经验。

本书的第 1 版非常成功,自其 2008 年出版以来,基于模型的 FDI 领域的研究得到了广泛而深入的发展。Ding 教授借此机会更新了本书,其中增加了最新研究成果和来自工业过程领域的崭新案例。《工业控制发展》系列中,本书的新版将备受瞩目。

M. J. Grimble

M. A. Johnson

工业控制中心

英国,苏格兰,格拉斯哥

序 言

基于模型的故障诊断是科研和工程领域的一个重要研究方向。本书第1版出版以后的几年间,一些新的诊断方法和成功应用实例不断涌现。在这期间,我也收到了关于本书的很多邮件,得到了建设性的评论以及宝贵的意见。同时,我在课堂上、会议上和研讨会中与学生和同事进行了有趣并有益的讨论。这些促使我致力于本书新版本的研究。

本书第2版保留了第1版的原始结构。内容上增加了鲁棒残差生成问题和案例研究的最新成果。将第14章内容进行了扩展,包括了新增的故障识别方案。在新的1章中,反馈控制系统的故障诊断和容错控制架构得以解决。根据收到的评论和意见,本书进行了大量修正。

本书的部分内容作为杜伊斯堡·埃森大学电子工程与信息技术系开设的硕士课程“故障诊断与容错系统”的教材。在这门硕士课程中建议包括该版本的第1~3,5,7(部分),9,10,12~15章(部分)。特别地,本书结构合理,也可以用来作为自动控制应用领域工程师的自学用书。

感谢我的博士生和同事们对案例研究的宝贵贡献。他们是 Tim Könings(倒立摆), Hao Luo(三罐系统和 Csth), Jedsada Saijai and Ali Abdo(车辆横向动力系统), Ping Liu(DC 马达)和 Jonas Esch(Csth)。

最后,由衷地感谢 Springer 出版社的 Oliver Jackson 和丛书编辑的大力支持。

Steven X. Ding
德国,杜伊斯堡

目 录

符号表	1
-----------	---

第 1 部分 绪论、基本理论及前言

第 1 章 绪论	5
1.1 故障诊断技术的基本概念	6
1.2 历史发展过程和一些相关问题	9
1.3 说明及参考文献	12
第 2 章 基于观测器的 FDI 方法的基本思想、主要问题和工具	13
2.1 关于基于观测器的残差生成器的结构	13
2.2 对未知输入的解耦以及故障隔离问题	14
2.3 基于观测器的 FDI 方法的鲁棒性问题	15
2.4 关于等价空间 FDI 方法	16
2.5 残差估计以及阈值的计算	16
2.6 FDI 系统综合与设计	17
2.7 说明与参考文献	17
第 3 章 工业系统建模	19
3.1 标称系统行为的描述	19
3.2 互质分解技术	20
3.3 有扰动的系统的表示法	22
3.4 含有模型不确定性的系统模型的表示方法	23
3.5 故障的建模	25
3.6 闭环反馈控制系统里的故障建模	27
3.7 案例研究以及应用实例	28
3.7.1 DC 电动机的速度控制	28
3.7.2 倒立摆控制模型	31
3.7.3 三容水箱系统	36
3.7.4 车辆横向动力学系统	39

3.7.5	连续搅拌釜式加热器	43
3.8	说明和参考文献	47
第4章	故障的可检测性、可隔离性与可识别性	48
4.1	故障可检测性	48
4.2	乘性故障的激励与检测	52
4.3	故障可隔离性	53
4.3.1	系统故障可隔离性的概念	53
4.3.2	故障可隔离的条件	54
4.4	故障的可识别性	61
4.5	说明和参考文献	63

第2部分 残差生成

第5章	基本的残差生成方法	67
5.1	解析冗余	67
5.2	残差和残差生成器的参数化	70
5.3	残差生成器的设计和实现问题	74
5.4	故障检测滤波器	75
5.5	诊断观测器方法	76
5.5.1	基于诊断观测器的残差生成器的构建	76
5.5.2	解的描述	77
5.5.3	一种数值解法	85
5.5.4	一种代数方法	90
5.6	等价空间法	92
5.6.1	基于等价关系的残差生成器的构建	92
5.6.2	等价空间的特性描述	95
5.6.3	应用举例	96
5.7	联系、比较及总结	97
5.7.1	等价空间方法和诊断观测器	97
5.7.2	诊断观测器和残差生成器的一般形式	101
5.7.3	相互关系的应用及其评论	105
5.7.4	实例	106
5.8	说明和参考文献	108
第6章	未知输入的完全解耦	110
6.1	问题的描述	110

6.2	PUIDP 的存在条件	111
6.2.1	一个一般存在条件	111
6.2.2	用 Rosenbrock 系统矩阵表示的检查条件	113
6.2.3	代数型的检查条件	114
6.3	频域方法	117
6.4	UIFDF 设计	120
6.4.1	特征结构配置法	120
6.4.2	几何方法	123
6.5	UIDO 设计	131
6.5.1	代数方法	131
6.5.2	未知输入观测器方法	132
6.5.3	用矩阵束方法设计 UIDO	136
6.5.4	用于 UIDO 设计的数值方法	139
6.6	未知输入等价空间法	142
6.7	另一个方法——零矩阵法	142
6.8	讨论	143
6.9	最小阶残差生成器	143
6.9.1	基于几何方法的最小阶残差生成器设计	144
6.9.2	另一个解决方法	145
6.10	说明和参考文献	148
第 7 章	对未知输入有强鲁棒性的残差生成	150
7.1	数学和控制的理论基础	151
7.1.1	信号范数	151
7.1.2	系统范数	153
7.1.3	\mathcal{H}_2 范数和 \mathcal{H}_∞ 范数的计算	156
7.1.4	奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)	157
7.1.5	共同输入输出因式分解	157
7.1.6	模型匹配问题	160
7.1.7	LMI 技术的要点	161
7.2	基于 Kalman 滤波器的残差生成	163
7.3	鲁棒性、故障敏感性和性能指标	166
7.3.1	鲁棒性和敏感性	166
7.3.2	性能指标:鲁棒性 VS 敏感性	167
7.3.3	性能指标间的联系	167

7.4	鲁棒性、故障敏感性和性能指标	168
7.4.1	$S_{f,+}/R_d$ 作为性能指标	169
7.4.2	$S_{f,-}/R_d$ 作为性能指标	172
7.4.3	J_{S-R} 作为性能指标	174
7.4.4	最优的性能表现和系统阶数	175
7.4.5	小结和备注	177
7.5	\mathcal{H}_∞ 最优故障识别方案	179
7.6	残差生成器的 $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_2$ 设计	181
7.7	$\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_2$ 设计和奇偶向量的最优选择间的联系	184
7.8	FDI 的 LMI 辅助设计	189
7.8.1	FDF 的 \mathcal{H}_2 对 \mathcal{H}_2 权衡设计	190
7.8.2	关于 \mathcal{H}_- 指标	195
7.8.3	FDF 的 \mathcal{H}_2 对 \mathcal{H}_- 权衡设计	201
7.8.4	FDF 的 \mathcal{H}_∞ 对 \mathcal{H}_- 变换设计	204
7.8.5	FDF 在有限频域范围内的 \mathcal{H}_∞ 对 \mathcal{H}_- 权衡设计	206
7.8.6	另一个 FDF 的 \mathcal{H}_∞ 对 \mathcal{H}_- 变换设计	206
7.8.7	要点总结与讨论	209
7.9	统一解	210
7.9.1	$\mathcal{H}_i/\mathcal{H}_\infty$ 指标和问题描述	210
7.9.2	FDF 的 $\mathcal{H}_i/\mathcal{H}_\infty$ 最优设计: 标准形式	211
7.9.3	统一解的离散时间版本	214
7.9.4	一个广义的解释	215
7.10	统一解的一般形式	217
7.10.1	扩展的 CIOF	217
7.10.2	统一解的推广	219
7.11	说明和参考文献	224
第 8 章	对抗模式不确定性的增强鲁棒性残差生成	227
8.1	预备知识	227
8.1.1	系统边界的 LMI 辅助计算	228
8.1.2	随机不确定性系统的稳定性	229
8.2	将模型不确定性转化为未知输入	229
8.3	基于参考模型的方法	231
8.3.1	基本理念	231
8.3.2	范数有界不确定性系统中基于参考模型的解	232

8.4	多面体不确定性系统的残差生成	238
8.4.1	基于参考模型的方法	238
8.4.2	\mathcal{H}_∞ 到 \mathcal{H}_2 设计方法	242
8.5	随机不确定性系统的残差生成	243
8.5.1	系统动态特性与统计特性	244
8.5.2	基本概念和问题描述	245
8.5.3	LMI 解	245
8.5.4	另一种方法	253
8.6	说明和参考文献	255

第3部分 残差评估和阈值计算

第9章	基于范数的残差评价和阈值计算	259
9.1	准备工作	260
9.2	基本概念	261
9.3	一些标准评价函数	262
9.4	阈值设置和问题描述的基本思路	264
9.4.1	残差生成器的动态特性	265
9.4.2	阈值定义和问题阐述	266
9.5	计算 $J_{th,RMS,2}$	268
9.5.1	计算范数有界不确定性系统的 $J_{th,RMS,2}$	268
9.5.2	计算多面体不确定性系统的 $J_{th,RMS,2}$	271
9.6	计算 $J_{th,peak,peak}$	273
9.6.1	计算范数有界不确定性系统的 $J_{th,peak,peak}$	273
9.6.2	计算多面体不确定性系统的 $J_{th,peak,peak}$	277
9.7	计算 $J_{th,peak,2}$	278
9.7.1	计算范数有界不确定性系统的 $J_{th,peak,2}$	278
9.7.2	计算多面体不确定性系统的 $J_{th,peak,2}$	280
9.8	阈值生成器	282
9.9	说明和参考文献	284
第10章	基于统计方法的残差评价和阈值设定	285
10.1	引言	285
10.2	基本的统计方法	285
10.2.1	基本假设检验	286
10.2.2	似然比和广义似然比	287

10.2.3	向量值 GLR	290
10.2.4	方差变化检测	291
10.2.5	在线实现方面	292
10.3	阈值计算准则	293
10.3.1	奈曼 - 皮尔逊 (Neyman - Pearson) 准则	293
10.3.2	最大后验概率 (Maximum a Posteriori Probability, MAP) 准则	294
10.3.3	贝叶斯准则 (Bayes' Criterion)	295
10.3.4	备注	296
10.4	GLR 测试方法的应用	296
10.4.1	基于卡尔曼滤波 (Kalman Filter) 的故障检测	297
10.4.2	基于等价空间的故障检测	302
10.5	说明和参考文献	304
第 11 章	基于范数的方法和统计方法的集成	306
11.1	具有确定性扰动的随机系统的残差评价	306
11.1.1	残差生成	306
11.1.2	问题阐述	308
11.1.3	GLR 解	308
11.1.4	实例	311
11.2	随机不确定系统的残差评价方案	312
11.2.1	问题阐述	313
11.2.2	解决方案与设计算法	314
11.3	概率鲁棒性技术辅助的阈值计算	321
11.3.1	问题阐述	321
11.3.2	基本思想概论	323
11.3.3	用 LMI 求解	324
11.3.4	概率框架下的问题求解	325
11.3.5	一个应用实例	327
11.3.6	结束语	328
11.4	说明和参考文献	329

第 4 部分 故障检测, 隔离和识别方案

第 12 章	故障检测系统的集成设计	333
12.1	FAR 和 FDR	334

12.2	通过给定的 FAR 最大化故障可检测性	336
12.2.1	问题阐述	337
12.2.2	解的基本形式	337
12.2.3	一般解	339
12.2.4	联系和比较	341
12.2.5	例子	345
12.3	通过给定的 FDR 来最小化误报数	350
12.3.1	问题描述	351
12.3.2	解的基本形式	351
12.3.3	状态空间形式	353
12.3.4	扩展形式	354
12.3.5	解的说明和讨论	356
12.3.6	例子	359
12.4	在随机系统的应用	361
12.4.1	给定 FAR 的情况下最大化 FDR	361
12.4.2	给定 FDR 的情况下最小化 FAR	362
12.4.3	卡尔曼滤波器方案与统一解之间的等价性	362
12.5	说明和参考文献	363
第 13 章	故障隔离方案	365
13.1	概要	366
13.1.1	完全故障隔离的存在条件	366
13.1.2	PFI 和未知的输入解耦	368
13.1.3	有未知输入解耦的 PFI(PFIs with Unknown Input Decoupling, PFIUID)	370
13.2	故障隔离滤波器设计	371
13.2.1	基于对偶的解耦控制设计方法	372
13.2.2	几何方法	374
13.2.3	一般的设计方法	377
13.3	故障隔离的一个代数方法	385
13.4	使用一组残差生成器进行故障隔离	389
13.4.1	专用观测器方案(Dedicated Observer Scheme, DOS)	390
13.4.2	广义观测器方案(Generalized Observer Scheme, GOS)	393
13.5	说明和参考文献	396
第 14 章	故障识别方案	398
14.1	故障识别滤波器方案和完美故障识别	399

14.1.1	故障检测滤波器和存在条件	399
14.1.2	伴有度量导数的 FIF 设计	402
14.2	关于优化 FIF 设计	405
14.2.1	问题的提出和解的研究	405
14.2.2	加权矩阵的作用的研究	407
14.3	FIF 设计的方法	411
14.3.1	一个一般的故障识别方案	412
14.3.2	另一方案	413
14.3.3	故障大小的识别	413
14.3.4	在有限频率范围内的故障识别	415
14.4	使用增广观测器的故障识别	416
14.5	一个代数故障识别方案	417
14.6	基于观测器的自适应故障识别	419
14.6.1	问题形成	419
14.6.2	自适应观测器方案	419
14.7	说明和参考文献	422
第 15 章	反馈控制系统和容错结构中的故障诊断	424
15.1	系统和控制回路模型、控制器和观测器参数化	424
15.1.1	系统和控制回路模型	424
15.1.2	稳定的控制器的观测器、参数化和控制器设计的 另一种表达	425
15.1.3	基于观测器和残差生成器的 Youla 参数化的实现	427
15.1.4	控制器设计问题的基于残差生成的表述	428
15.2	在标准反馈控制回路和故障检测方案中的残差提取	430
15.2.1	在控制回路中接入点的信号	430
15.2.2	基于残差信号提取的故障检测方案	431
15.3	2-DOF 控制结构和残差入口	433
15.3.1	标准 2-DOF 控制结构	433
15.3.2	具有残差接入的另一个 2-DOF 控制结构	434
15.4	在 IMC 和基于残差生成器的控制结构中的残差获取	436
15.4.1	有集成残差获取的扩展的 IMC 结构	436
15.4.2	基于残差生成器的反馈控制回路	438
15.5	说明和参考文献	439
参考文献		441

符号表

\forall	对于所有
\in	属于
\subset	子集
\cup	并集
\cap	交集
\equiv	恒等于
\approx	约等于
$:=$	定义为
\Rightarrow	推出
\Leftrightarrow	等价于
\gg (\ll)	远大于(远小于)
\max (\min)	最大值(最小值)
\sup (\inf)	上界(下界)
\mathcal{R} 和 \mathcal{C}	实数域和复数域
\mathcal{C}_+ 和 $\overline{\mathcal{C}_+}$	右半面的开和闭(RHP)
\mathcal{C}_- 和 $\overline{\mathcal{C}_-}$	左半面的开和闭(LHP)
$\mathcal{C}_{j\omega}$	虚数轴
\mathcal{C}_1 和 $\overline{\mathcal{C}_1}$	单位圆外的开区域和闭区域
\mathcal{R}^n	n 维实数向量空间
$\mathcal{R}^{n \times m}$	$n \times m$ 的矩阵空间
$\mathcal{RH}_\infty, \mathcal{RH}_\infty^{n \times m}$	$n \times m$ 的稳定转换矩阵集, 具体定义见文献[198]
$\mathcal{RH}_2, \mathcal{RH}_2^{n \times m}$	$n \times m$ 的稳定、严格真的转换矩阵集, 具体定义见文献[198]
$\mathcal{LH}_\infty, \mathcal{LH}_\infty^{n \times m}$	$n \times m$ 的转换矩阵集, 具体定义见文献[198]

X^T	X 的转置
X^\perp	X 的正交补集
X^{-1}	X 的逆
X^-	X 的伪逆(包含左伪逆或者右伪逆)
$\text{rank}(X)$	X 的秩
$\text{trace}(X)$	X 的迹
$\det(X)$	X 的行列式
$\lambda(X)$	X 的特征值
$\bar{\sigma}(X) (\sigma_{\max}(X))$	X 的最大奇异值
$\underline{\sigma}(X) (\sigma_{\min}(X))$	X 的最小奇异值
$\sigma_i(X)$	X 的最小奇异值
$\text{Im}(X)$	X 的复数域空间
$\text{Ker}(X)$	X 的零空间
$\text{diag}(X_1, \dots, X_n)$	由 X_1, \dots, X_n 组成的分块对角阵
$\text{prob}(a < b)$	$a < b$ 的概率
$\mathcal{N}(a, \Sigma)$	以 a 为均值向量, Σ 为协方差矩阵的高斯分布
$x \sim \mathcal{N}(a, \Sigma)$	x 按 $\mathcal{N}(a, \Sigma)$ 分布
$\mathcal{E}(x)$	x 的平均值
$\text{var}(x)$	x 的方差
$G(p)$	传递矩阵, 对于连续时间系统 p 是 s , 对于离散时间系统 p 是 z
$G^*(j\omega) = G^T(-j\omega)$	$G(j\omega)$ 的共轭矩阵
(A, B, C, D)	状态空间的简写表示形式
$\text{rank}(G(s))$	$G(s)$ 的标准秩, 具体见文献[105]的定义

第 1 部分

绪论、基本理论及前言

- 第 1 章 绪论
- 第 2 章 基于观测器的 FDI 方法的基本思想、主要问题和工具
- 第 3 章 工业系统建模
- 第 4 章 故障的可检测性、可隔离性与可识别性