



装备科技著作出版基金

 Springer

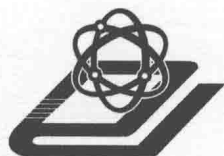
故障诊断与容错控制系统 的数据驱动设计

Data-driven Design of Fault Diagnosis
and Fault-tolerant Control Systems

[德] Steven X. Ding 著
贾继红 郭雪琪 王力影 译
魏 智 曲云霞 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

故障诊断与容错控制 系统的数据驱动设计

Data – driven Design of Fault Diagnosis and
Fault – tolerant Control Systems

[德] Steven X. Ding 著

贾继红 郭雪琪 王力影 译

魏智 曲云霞 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-086号

图书在版编目(CIP)数据

故障诊断与容错控制系统的数据驱动设计/(德)史
蒂文·X. 丁(Steven X. Ding)著;贾继红,郭雪琪,王力影译.

—北京:国防工业出版社,2017.5

书名原文:Data-driven Design of Fault

Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems

ISBN 978-7-118-10454-7

I. ①故… II. ①史… ②贾… ③郭… ④王…

III. ①数据管理 IV. ①F279.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第140263号

Translation from English language edition:

Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems

by Steven X. Ding

Copyright © 2014 Springer London

Springer 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 插页 4 1/16 印张 16 字数 295 千字

2017年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 89.00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

笔者在数据驱动过程的监测和诊断领域的研究始于2003年 Alberta 大学教授 B. Huang 作为我院 Alexander von Humboldt 基金会研究员的来访。我已经学到了一些数据驱动方法,实验室的一台测试机床的数据驱动算法中给我留下了深刻印象,据此,杜伊斯堡-埃森大学于2004年成立了本研究工作小组。工作组目前承担着欧洲研究项目 NeCST(2004—2007)和 PAPHYRUS(2010—2013)、国家研究基金 ZIM-EVA(2010-2012)及一些工业合作项目。

研究小组成立3年以来,动态自动控制系统基于模型的故障诊断一直是学院的一个研究热点。这一传统对数据驱动过程的监测与诊断领域产生强烈影响,动态过程的数据驱动故障诊断方法和数据驱动方法与模型方法之间的联系因受到重视而得到大力发展。随着与汽车工业界的合作,目前我们致力于自动控制系统容错与寿命管理的数据驱动设计研究。

本书是本人过去10年工作的总结。从2013年夏季学期开始,本书的草稿也作为杜伊斯堡-埃森大学电气工程与信息技术系(EIT)硕士研究生课程“故障诊断与容错系统”的讲稿。值得一提的是,书中提到的主要结论与方法都以算法形式给出,并在大多数章节中配以详细的案例。因此,本书也可作为自动控制领域的工程人员自学之用。

在这里我想说的是假如没有大家切实的支持,本书的完成是不现实的。首先要感谢 Huang 教授在我们开展本研究之初给予的大力帮助;还要感谢 P. Zhang 教授在这10年里卓有成效的工作,感谢研究小组第一任成员 Naik 博士和 Yin 博士的出色工作,感谢 Aalto 大学的 Jämsä-Jounela 教授和 Lorraine 大学的 Sauter 教授在欧洲项目中难忘的合作,感谢 Jeinsch 教授和 Engel 博士在国家基金项目中的合作。

这里还要专门感谢我的博士生和同事,他们是 L. Li(第11、12和15章)、Z. Chen(第6、7和11章)、H. Hao(第2、3、5和第6章)、H. Luo(第2~4和第9

章)、K. Zhang (第 4、6 和第 7 章)以及 Y. Zhang (第 10、14 和第 15 章)。此外, 感谢 T. Königs 先生精心的编辑校对工作。

最后,对 Springer - Verlag 的 Oliver Jackson 与 Charlotte Cross 以及其他编辑的大力支持表示由衷的感谢。

Steven X. Ding

2013 年 12 月于 Duisburg

主要符号表

$\forall$	对所有;对任意;对任一
$\in$	属于
$\equiv$	恒等于或同余
$\approx$	约等于
$:=$	定义为
$\Rightarrow$	推出
$\Leftrightarrow$	当且仅当
$\gg(\ll)$	远大于(远小于)
$\max(\min)$	最大值(最小值)
$\sup(\inf)$	上确界(下确界)
$\mathcal{R}$	实数域
$\mathcal{R}^n$	实 n 维向量空间
$\mathcal{R}^{n \times m}$	实 $n \times m$ 矩阵空间
X^T	矩阵 X 的转置
$X^\perp$	子空间 X 的正交补
X^{-1}	矩阵 X 的逆矩阵
X^-	矩阵 X 的伪逆矩阵(包括左伪逆矩阵或者右伪逆矩阵)
$X(i:j, p:q)$	矩阵 X 的从第 i 行到第 j 行及第 p 列到第 q 列的子矩阵
$\text{col}(X)$	矩阵 X 的向量化,即对 $X = [x_1, \cdots, x_m] \in \mathbf{R}^{n \times m}, x_i \in \mathbf{R}^n (i = 1, \cdots, m)$,
	有 $\text{col}(X) = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{nm}$
$\text{rank}(X)$	矩阵 X 的秩
$\text{trace}(X)$	矩阵 X 的迹, X 的主对角元素之和
$\det(X)$	矩阵 X 的行列式
$\lambda(X)$	矩阵 X 的特征值
$\bar{\sigma}(X)(\sigma_{\max}(X))$	矩阵 X 的最大奇异值
$\underline{\sigma}(X)(\sigma_{\min}(X))$	矩阵 X 的最小奇异值

$\sigma_i(X)$	矩阵 X 的第 i 个奇异值
$\text{diag}(X_1, \dots, X_n)$	准对角矩阵
$\ \cdot\ _E$	向量的 Euclidean 范数
$\ \cdot\ _F$	矩阵的 Frobenius 范数
$\text{prob}(a < b)$	a 小于 b 的概率
$\mathcal{N}(a, \Sigma)$	均值向量和协方差矩阵的高斯分布
$x \sim \mathcal{N}(a, \Sigma)$	x 服从于 $\mathcal{N}(a, \Sigma)$
$\chi^2(m)$	自由度 m 的卡方分布
$\varepsilon(x)$	x 的期望值
$\text{var}(x)$	x 的方差

第一部分 引言、基本概念和预备知识

第1章 引言	3
1.1 基本概念	3
1.2 写作动机	4
1.2.1 数据驱动和基于模型的故障检测与诊断	4
1.2.2 容错控制与寿命管理	5
1.2.3 信息基础设施	5
1.3 内容大纲	6
1.4 注释和参考文献	8
参考文献	8
第2章 案例研究和应用实例	10
2.1 三容系统	10
2.1.1 过程动力学及其描述	11
2.1.2 典型故障的描述	12
2.1.3 闭环动力学	13
2.2 全混流加热器	14
2.2.1 设备动力学及其描述	14
2.2.2 所考虑的故障	16
2.3 工业实例:田纳西过程	16
2.3.1 过程描述和仿真	16
2.3.2 TEP 中的模拟故障	19
2.4 注释和参考文献	20
参考文献	20

第3章 故障的统计检测	21
3.1 基本概念	21
3.1.1 一个简单的检测问题及其直观的解决方案	21
3.1.2 故障检测的基本概念	22
3.1.3 问题公式化	23
3.2 基本方法与算法	23
3.2.1 直觉解决方案	23
3.2.2 检验统计量 T^2	24
3.2.3 似然比和广义似然比	24
3.2.4 广义似然比的向量值	26
3.3 检测问题中的数据驱动解决方案	27
3.3.1 有足够大 N 的故障检测	27
3.3.2 用霍特林的 T^2 检验统计进行故障检测	28
3.3.3 用 Q 统计进行故障检测	30
3.4 案例:三容系统的故障检测	31
3.4.1 系统设置和仿真参数	31
3.4.2 操作结果和阈值设置	31
3.4.3 故障检测结果	33
3.5 基本故障检测问题的变化	37
3.5.1 变化1	37
3.5.2 变化2	38
3.6 注释和参考文献	38
参考文献	39
第4章 确定性扰动过程的故障检测	40
4.1 优化配置和基本概念	40
4.1.1 简单的检测问题与其直观的解决方案	40
4.1.2 基本概念	41
4.1.3 问题的表述	42
4.2 基本方法和算法	43
4.2.1 一个直觉策略	43
4.2.2 一种替代方案	44
4.2.3 对比研究	45
4.2.4 基于未知输入估计的检测方案	46
4.2.5 通用解决方案	46

4.3	故障检测问题的数据驱动解决方案	48
4.4	基本故障诊断问题的变化	50
4.5	案例研究	51
4.5.1	实验室系统 C _{STH} 的案例研究	51
4.5.2	三容系统中的案例研究	53
4.6	注释和参考文献	55
	参考文献	56

第二部分 多元分析方法在静态过程故障诊断中的应用

第5章	主元分析在故障诊断中的应用	59
5.1	PCA 应用于故障检测的基本形式	59
5.1.1	算法	60
5.1.2	基本思想和特性	61
5.2	SPE 的修正算法:霍金的 T_H^2 统计	62
5.3	故障敏感性分析	63
5.3.1	偏置故障的敏感性	63
5.3.2	扩展故障的敏感性	64
5.4	多元统计指标和综合指标	65
5.5	动态主元分析	67
5.6	故障识别	67
5.6.1	偏置故障的识别	67
5.6.2	扩展故障的识别	68
5.6.3	故障识别过程	68
5.7	TEP 应用	69
5.7.1	故障场景 4 下的案例研究	69
5.7.2	对于其他故障场景的案例研究结果	72
5.7.3	比较多元指标和综合指标	73
5.8	注释和参考文献	74
	参考文献	75
第6章	偏最小二乘回归在故障诊断中的应用	76
6.1	偏最小二乘算法	76
6.2	PLS 回归算法	78
6.2.1	基本思想和性质	78

6.2.2 故障检测和过程监控的应用	81
6.3 LS 和 PLS 之间的关系	82
6.3.1 LS 估计	82
6.3.2 PLS 回归算法的 LS 解释	83
6.4 基于故障诊断的 PLS 评估	87
6.5 在 TEP 中的案例研究	88
6.5.1 测试设置	88
6.5.2 离线训练	88
6.5.3 在线运行	88
6.6 注释和参考文献	91
参考文献	92
第 7 章 基于过程监测和故障诊断的典型变量分析	93
7.1 CCA 简介	93
7.2 CVA 的系统辨识	94
7.3 过程监测和故障诊断的应用	98
7.3.1 过程监测	98
7.3.2 故障检测方案	98
7.4 案例研究:TEP 的应用	100
7.4.1 测试设置和训练	100
7.4.2 测试结果和对比研究	100
7.5 注释和参考文献	103
参考文献	104

第三部分 动态过程中故障诊断系统的数据驱动设计

第 8 章 简介、预备知识与 I/O 数据集模型	107
8.1 简介	107
8.2 基于模型的 FDI 方案预设与评估	108
8.2.1 系统模型	108
8.2.2 基于模型的残差生成器方案	111
8.3 I/O 数据模型	117
8.4 注释和参考文献	119
参考文献	119

第 9 章 数据驱动的故障诊断方案	122
9.1 动态过程中故障诊断的基本概念与设计研究	122
9.2 残差生成器的数据驱动设计方案	123
9.2.1 方案一	123
9.2.2 方案二	124
9.2.3 方案三	125
9.2.4 一种数值可靠的可实现算法	126
9.2.5 比较与讨论	128
9.3 检验统计, 阈值设置和故障检测	129
9.4 故障隔离与识别方案	129
9.4.1 问题形成	130
9.4.2 故障隔离方案	131
9.4.3 故障识别方案	132
9.5 案例研究: 故障检测在三容系统中的应用	134
9.5.1 系统和测试的设置	134
9.5.2 测试结果	134
9.5.3 Σ_{res} 病态的处理	135
9.6 注释和参考文献	138
参考文献	139
第 10 章 基于观测器的故障诊断系统数据驱动设计	140
10.1 问题的提出与动机	140
10.2 基于观测器的残差生成器奇偶向量构建	140
10.2.1 标量残差信号的生成	140
10.2.2 m 维残差向量的生成	143
10.2.3 基于卡尔曼滤波器的残差生成器的数据驱动设计	146
10.3 故障诊断、隔离与识别	147
10.3.1 故障检测	148
10.3.2 故障隔离方案	148
10.3.3 一个故障识别方案	149
10.4 基于观测器的过程监控	150
10.5 在 CSTH 中的案例研究	151
10.5.1 系统的建立	151
10.5.2 基于卡尔曼滤波器的残差生成器	151
10.5.3 m 维残差向量的生成	152

10.6 在 TEP 中的案例研究	156
10.7 数据驱动的 FDI 系统应用程序评估	158
10.8 注释和参考文献	159
参考文献	160

第四部分 数据驱动故障诊断中的自适应迭代优化技术

第 11 章 自适应故障诊断方案	165
11.1 基于 OI 的递推 SVD 计算与应用	165
11.1.1 问题的形成	165
11.1.2 DPM: 一个自适应算法	166
11.1.3 在故障检测中的应用	167
11.2 一种自适应 SVD 算法与应用	167
11.2.1 自适应 SVD 算法	167
11.2.2 对故障检测的应用	169
11.3 基于自适应 SKR 的残差生成方法	169
11.3.1 问题的形成	169
11.3.2 自适应残差生成的算法	170
11.3.3 稳定性和指数收敛	171
11.3.4 一个对自适应状态观测器的扩展	173
11.4 案例分析	174
11.4.1 基于自适应 SVD 的 RPCA 方案在三容系统的应用	174
11.4.2 基于自适应观测器的残差生成方案在三容系统的应用	177
11.5 注释和参考文献	179
参考文献	180
第 12 章 过程监测与故障检测系统的迭代优化	181
12.1 迭代广义最小二乘估计	181
12.2 迭代递归最小二乘估计	182
12.2.1 基本思想和方法	182
12.2.2 算法及它的实现和执行	184
12.2.3 一个实例	184
12.3 卡尔曼滤波的迭代优化	187
12.3.1 思想与方案	187
12.3.2 算法与实现	191

12.4 案例研究	195
12.4.1 案例 1: Σ_v 未知而 Σ_w 已知	195
12.4.2 案例 2: Σ_w 未知而 Σ_v 已知	197
12.5 注释和参考文献	198
参考文献	199

第五部分 容错控制系统的数据驱动设计与寿命管理

第 13 章 容错控制架构和 Design 研究	203
13.1 初探	203
13.1.1 图像表示和状态反馈控制	203
13.1.2 稳定控制器的参数化	204
13.2 容错控制架构及相关问题	205
13.2.1 一个基于观测器的容错控制架构	205
13.2.2 设计与最优设置	207
13.2.3 一个基于残差的容错和寿命管理架构	209
13.2.4 系统动态和设计参数	210
13.3 注释和参考文献	213
参考文献	214
第 14 章 基于观测器的控制系统数据驱动设计	215
14.1 问题陈述	215
14.2 图像描述的数据驱动实现形式	216
14.3 一种图像识别方案	217
14.3.1 I/O 数据集模型与其相关问题的简要回顾	217
14.3.2 识别方案	218
14.4 一种基于观测器的控制系统的数据驱动设计方案	221
14.4.1 前馈控制器的数据驱动设计	222
14.4.2 基于观测器的状态反馈控制器的设计	222
14.5 结束语	224
14.6 在实验室 CSTD 系统的试验研究	225
14.6.1 系统建立和过程测量	225
14.6.2 基于观测器的控制器设计	225
14.6.3 容错控制方案	226
14.7 注释和参考文献	227

参考文献	229
第 15 章 自动控制系统寿命管理的实现	230
15.1 H - PRIO 参数的自适应更新	230
15.1.1 问题的形成	230
15.1.2 基本思想	231
15.1.3 自适应方案	233
15.1.4 自适应方案的实现	233
15.2 L - PRIO 参数的迭代更新	234
15.2.1 问题的形成	235
15.2.2 迭代解决方案的算法	236
15.3 寿命管理策略的实施	237
15.3.1 工作综述	237
15.3.2 三容系统的案例研究	237
15.4 注释和参考文献	241
参考文献	242

第一部分

引言、基本概念和预备知识

