

过程监控技术及其应用

胡峰 孙国基 著

Process Monitoring
Technique and Applications

国防工业出版社

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

前 言

无论是无生命的机械设备还是有生命的动植物生理器官,也无论是规模宏大的自然系统还是设计精巧的人造系统,在其长时间“服役”过程中,都难免发生这样或那样的功能失调、运转失灵、机理病变或故障。

近半个世纪以来,随着制造技术、航天技术、核技术、医电技术和环境科学的高速发展,与生产过程质量控制、工业过程条件维护、运载火箭发射过程安全控制、航天飞行器可靠性检查、核电站运行过程安全保障、自然灾害监测与预报等相关的过程故障检测与处理问题,不仅数量明显增加,而且也日渐引起人们的广泛重视。

诸如此类问题的一个共同特征是:人们关注的重点不是被关注对象在正常运行情况下是否满足某种最优性而是被关注对象运行状态是否正常,或者说判断系统的运行过程是否偏离了正常状态。

过程监控技术就是探索如何准确可靠地检测和识别被关注对象在其运行过程中是否发生异常变化,以及诸如异常变化发生时间、变化机理、异变幅度、影响后果等相关问题的一门新兴技术学科。

自 20 世纪 90 年代初开始,作者以航天测控工程为背景,提出了对过程脉冲型故障具有良好容错能力的有界影响辨识和有界影响滤波方法,建立了检测带故障过程脉冲型故障的稳健-似然比检测算法,并以容错信号处理研究为切入点,对过程的监控技术进行了一系列探索与研究;先后在《自动化学报》、《宇航学报》、《工程数学学报》、《控制理论与应用》、《中国空间科学技术》、《控制与决策》、《测控技术》、《飞行器测控学报》等学术期刊上发表研究论文 60 多篇,完成科研课题 5 项,取得部委级或军队级科技进步奖 9

项。本书既是对作者最近 10 年来研究工作的一个总结,也是对这阶段研究思想的提炼和系统化,并力求在方法和应用诸方面有所提升。

本书重点探讨带故障过程的故障检测、故障幅度辨识与容错处理技术。本书将从过程输出流形、输入-输出关系和涉及系统内部结构的动态-测量系统等三个不同层次,系统阐述过程突发性故障的模型描述形式;分析不同过程模型和不同环节的突发性故障对过程运行状态以及对经典处理方法带来的不同影响;提出一系列能够有效削弱过程脉冲型故障不利影响的轨线容错拟合、特征参数容错辨识、状态容错估计和过程容错预报新方法;基于上述容错处理算法,构造针对过程脉冲型故障和阶跃型故障的离线检测、在线检测与故障幅度辨识方法和算法。另外,本书还系统讨论了过程故障监控方法在航天测控领域的应用。

书中提供的大量仿真示例,不仅从一个侧面证实了书中各种处理方法的有效性和实用性,也有助于相关领域的研究人员参考和借鉴本书方法。

本书是在国防科技图书出版基金委员会热情关怀和支持下完成的。评委会专家对书稿进行了认真的审阅,提出了宝贵的意见和建议。本书完稿过程中,得到西安卫星测控中心李济生院士和西安交通大学范金城教授指导,清华大学周东华教授、北京航天指挥控制中心陈贻迎高工和酒泉卫星发射中心黄家贵高工审阅了全书初稿并提出了宝贵意见和建议,在此一并表示衷心感谢。同时,还要特别感谢西安卫星测控中心的张风翔总师、王建俊政委、董得义参谋长、林芝健主任和该中心外测室的全体同志,谢谢他们的支持和帮助。

由于带故障过程的监控与容错处理尚处于学科发展初期,加之作者水平有限,难免有不妥或者错误之处,敬请读者指正。

著 者

2000.5.2 于西安

目 录

第1章 绪 论	1
§ 1.1 过程监控的对象和任务	1
§ 1.2 过程监控的一般步骤	4
§ 1.3 过程监控的发展历程	6
§ 1.4 几类典型过程监控方法述评	9
§ 1.5 本书的研究内容和特色	23
第2章 故障过程的模型描述	24
§ 2.1 过程的数学建模	24
§ 2.2 过程故障分量的模型表示	34
§ 2.3 故障过程的模型描述	36
§ 2.4 小 结	40
第3章 一维平稳过程突发性故障的监控	42
§ 3.1 过程脉冲型故障与 Outliers	42
§ 3.2 脉冲型故障对 3σ 准则的影响分析	45
§ 3.3 位置-刻度参数的离线容错估计	48
§ 3.4 基于容错估计的故障离线检测与诊断	51
§ 3.5 位置-刻度参数的递推估计	55
§ 3.6 过程脉冲型故障的在线检测与诊断	59
§ 3.7 过程阶跃型故障的检测与辨识	62
§ 3.8 小 结	66
第4章 多维平稳过程突发性故障的监控	68
§ 4.1 协方差阵 Σ 已知时,多元位置向量的容错估计	69

§ 4.2	均值-协方差阵(μ, Σ)的联合容错估计	80
§ 4.3	最优 ϕ 函数的容错能力分析	96
§ 4.4	参数(μ, Σ)容错估计的迭代算法	97
§ 4.5	过程脉冲型故障的离线检测与辨识	99
§ 4.6	过程脉冲型故障的在线检测与辨识	100
§ 4.7	过程阶跃型故障的检测与辨识	103
§ 4.8	小结	103
第 5 章	均值非平稳过程突发性故障的监控	104
§ 5.1	均值非平稳过程的模型逼近	104
§ 5.2	几类典型的回归诊断方法述评	106
§ 5.3	模型系数的离线容错估计	112
§ 5.4	过程脉冲型故障的离线检测与辨识	117
§ 5.5	模型系数的递推容错估计	122
§ 5.6	过程脉冲型故障的在线检测与辨识	128
§ 5.7	模型系数的滑动容错估计	131
§ 5.8	基于滑动递推容错估计的脉冲型故障检测	138
§ 5.9	过程阶跃型故障的检测与辨识	141
§ 5.10	小结	144
第 6 章	输入-输出过程突发性故障的监控	145
§ 6.1	脉冲型故障的模型分析	145
§ 6.2	几类典型统计诊断方法评述	149
§ 6.3	输出环节脉冲型故障的容错检测与辨识	153
§ 6.4	输入环节脉冲型故障的检测与辨识	158
§ 6.5	过程阶跃型故障的检测与辨识	164
§ 6.6	仿真计算	166
§ 6.7	小结	168
第 7 章	动态系统动作发生器突发性故障的监控	170
§ 7.1	动作发生器突发性故障的影响分析	171

§ 7.2	状态向量的 M 型滤波	176
§ 7.3	M 型滤波的抗扰性与容错能力分析	181
§ 7.4	M 型滤波的迭代算法	184
§ 7.5	动作发生器脉冲型故障的检测与辨识	187
§ 7.6	动作发生器阶跃型故障的检测与辨识	192
§ 7.7	小结	195
第 8 章	测量系统传感器突发性故障的检测与容错滤波	196
§ 8.1	开环系统非线性模型的线性展开	196
§ 8.2	测量系统突发性故障对 Kalman 滤波影响的分析	198
§ 8.3	容错滤波族的设计	205
§ 8.4	Kalman 滤波算法的容错修正	208
§ 8.5	递推 MSE 滤波算法的容错修正	213
§ 8.6	测量系统突发性故障的检测与辨识	222
§ 8.7	仿真计算及结果分析	226
§ 8.8	小结	229
第 9 章	过程监控技术在航天测控工程中应用	231
§ 9.1	跟踪测量数据的野值点识别	232
§ 9.2	运载火箭动力系统突发性故障的检测	239
§ 9.3	航天器遭受空间碎片碰击的监视	248
§ 9.4	结束语	258
参考文献		259

Contents

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Objects and Mission of Process Monitoring	1
§ 1.2	General Approach for Process Monitoring	4
§ 1.3	Course of Development for Process Monitoring	6
§ 1.4	Review of Several Typical Process Monitoring Approaches	9
§ 1.5	Content and Style of This Book	23
Chapter 2	Modelling for Process with Faults	24
§ 2.1	Mathematical Models of Process	24
§ 2.2	Modelling Description of Fault Components in Process	34
§ 2.3	Modelling Description of Process with Faults	36
§ 2.4	Summary	40
Chapter3	Monitoring for Abrupt Faults in stationary 1-dimensional Process	42
§ 3.1	Pulse-Type Faults and Outliers	42
§ 3.2	Influence of Pulse-Type Faults on 3σ -Principia	45
§ 3.3	Fault-Tolerant Off-Line Estimators of Location & Scale Paramters	48
§ 3.4	Off-Line Detection and Diagnosis Based on Fault-Tolerant Estimators	51
§ 3.5	Recursive Estimators for Location & Scale	

Parameters	55
§ 3.6 On-Line Detection and Diagnosis of Abrupt Faults in Process	59
§ 3.7 Detection and Identification of Step-Type Faults	62
§ 3.8 Summary	66
Chapter 4 Monitoring of Abrupt Faults in Stationary Multi-dimensional Process	68
§ 4.1 Fault-Tolerant Estimators of Location Vectors When Covariance Matrix Σ is Known	69
§ 4.2 Fault-Tolerant Joint Estimators of the Location & Covariance(μ, Σ)	80
§ 4.3 Fault-Tolerant Performance Analysis of the Optimal ϕ -Function	96
§ 4.4 Iterative Algorithms of Fault-Tolerant Estimators for Parameters(μ, Σ)	97
§ 4.5 Off-Line Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Process	99
§ 4.6 On-Line Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Process	100
§ 4.7 Detection and Identification of Step-Type Faults in Process	103
§ 4.8 Summary	103
Chapter 5 Monitoring of Abrupt Faults in Non-Stationary Process	104
§ 5.1 Model Approximation of Non-Stationary Process	104
§ 5.2 Review of Several Typical Regression Diagnostics Approaches	106

§ 5.3	Fault-Tolerant Off-Line Estimators of Model Coefficients	112
§ 5.4	Off-Line Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Process	117
§ 5.5	Fault-Tolerant Recursive Estimators of Model Coefficients	122
§ 5.6	On-Line Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Process	128
§ 5.7	Fault-Tolerant Sliding Estimators of Model Coefficients	131
§ 5.8	Detection of Pulse-Type Faults Based on the Fault-Tolerant Sliding Estimators	138
§ 5.9	Detection and Identification of Step-Type Faults in Process	141
§ 5.10	Summary	144
Chapter 6	Monitoring of Abrupt Faults in Input-Output Process	145
§ 6.1	Modelling Analysis for Pulse-Type Faults	145
§ 6.2	Review of Several Typical Statistics Diagnostics Approaches	149
§ 6.3	Fault-Tolerant Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Output	153
§ 6.4	Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Input	158
§ 6.5	Detection and Identification of Step-Type Faults in Process	164
§ 6.6	Computer Simulation	166
§ 6.7	Summary	168
Chapter 7	Monitoring of Abrupt Faults in Actuators of	

Dynamic System	170
§ 7.1 Influence Analysis of Abrupt Faults in Actuators	171
§ 7.2 M-Type Filters for State Variables	176
§ 7.3 Analysis of Resistance and Fault-Tolerance for M-Type Filters	181
§ 7.4 Iterated Algorithms of M-Type Filters	184
§ 7.5 Detection and Identification of Pulse-Type Faults in Actuators	187
§ 7.6 Detection and Identification of Step-Type Faults in Actuators	192
§ 7.7 Summary	195
Chapter 8 Monitoring of Abrupt Faults in Sensors of Measurement System	196
§ 8.1 Linear Approximation for Nonlinear Model of Open Loop System	196
§ 8.2 Influence Analysis of Abrupt Faults of Meas- urement System on Kalman Filter	198
§ 8.3 Design for Fault-Tolerant Filters	205
§ 8.4 Fault-Tolerant Improvement on KalmanFilter	208
§ 8.5 Fault-Tolerant Improvement on Recursive MSE Filter	213
§ 8.6 Detection and Identification of Abrupt Faults in Measurement System	222
§ 8.7 Simulation and Results Analysis	226
§ 8.8 Summary	229
Chapter 9 Application of Process Monitoring Techniques in Spaceflight Engineering	231

§ 9.1	Detection of Outliers in Tracking and Measurement Data	232
§ 9.2	Detection of Abrupt Faults in Dynamic System of Carrier Rocket	239
§ 9.3	Monitoring Fragments Collision on Spacecraft	248
§ 9.4	Concluding	258
References		259

第 1 章 绪 论

过程监控(Process Monitoring)是以过程异变检测^[1,2]和动态系统故障检测与诊断^[3,4]技术为基础发展起来的一个新兴研究领域。其主要研究对象包括过程的异常变化或动态系统功能性故障,研究内容涉及过程故障检测、故障幅度辨识、故障时间推断、故障机理诊断、故障影响分析以及针对不同类型故障应该采取的处理措施或对策,等等。

过程故障检测及其相关技术的研究,在现代化生产过程中有着深刻的理论价值和不容忽视的重要性。已有研究成果证实,技术过程与工程系统中很多与过程异常变化或系统故障有关的问题以及可转化成为这类问题的问题,诸如设备运行过程的状态检测^[2]、计算机集成制造系统维护、生产流水线质量监测^[5~7]、航天器发射过程安全控制、核电站安全保障^[2]、测控系统管理、航天器轨道与姿态监视、导航系统监视^[8~10]、地震等灾变事件预警、控制系统故障检测与诊断(FDD)^[10,13~17]、人体病理检查、心电图和脑电图分析^[2]、图像边界确定^[21]、语音信号分段^[2,6,16,19,20]以及气候与环境监测等,都可以在过程监控理论研究框架下得到解决。

近年来,过程监控已经成为过程自动化与过程控制领域的重要研究方向,并成为构成系统可靠性、安全性、维修性等学科的关键技术之一。

§ 1.1 过程监控的对象和任务

过程监控是以提高系统运行过程可靠性和安全性为主要目的,以过程故障检测、故障幅度辨识、故障时间推断、故障机理诊断

以及故障顺应处理为主要任务的一门新兴的边缘性学科。

§ 1.1.1 过程监控的对象

过程监控主要研究对象是过程运行时出现的异常变化或系统部件非先天性功能性故障。

(1) 过程异常变化

异常变化(简称异变)是一个建立在过程基础之上的概念,主要是指被研究对象所处状态或其本身某一方面特征发生了异常改变。

过程监控领域讨论的异变,通常是指过程状态发生偏离常态的改变。例如,系统运行过程中出现的各种瞬时或持续的、缓慢或突发的、局部或整体的、出乎意料之外的或者并非预期的异常改变。

过程异变,通常划分为渐变和突变两大类型。根据异变持续的时间长短,突变又可以进一步划分为脉冲型突变、阶跃型突变和复合型突变等多种类型。

(2) 系统故障

通常意义下,故障(Fault, Failure)至少有两种不同含义:一是指系统功能部件“先天”固有的缺点、缺陷或瑕疵;一是指系统在使用或者运行过程中发生的功能性异常变化。作为过程监控主要对象的动态系统故障,大多是指后一类情形。

过程的异变与系统的故障之间,既有紧密联系,二者内涵和外延又不尽相同。杨叔子院士等^[22]指出,系统故障是指该系统工作能力的破坏,即在一定时间内系统主要功能指标超出规定的范围。吴今培教授等^[23]指出,系统故障主要是指系统运行处于劣化状态,这种劣化状态可导致系统相应功能失调,或导致系统相应行为(输出)超出允许范围,使系统功能低于预期或规定的水平。

对于大多数工程系统,过程异变通常是由于系统功能部件或分系统发生故障以及操作过失引起的。例如,机械制造、生产加工、电网调度、航天测控、飞行控制、制导与导航等各种人造系统的

运行过程中发生的异常变化。但是,并非所有异变都是由通常意义下所谓的故障引起的。例如,环境、气候、社会、经济、心理、生理等自然系统的异常变化,其根源既可以是因为外界环境灾变或系统内部病变引起的,也可能是其它因素引起的,甚至有些过程其状态或特征的改变既不是“故障”也不是“灾变”的结果,例如,语音信号高低转换、电波信号频率切换、潮汐,等等。

如果将自然系统的各种灾变或病变广义地看成是“故障”,并为数字信号或波谱信号的改变引入“虚故障”的概念,则可以认为过程故障(包含“实故障”和“虚故障”)是动态系统异变的动因,而系统状态或特征量的异变则是动态系统运行过程发生故障时呈现出来的症状。鉴于此,本书后续各章中将结合上下文混合采用过程异变与过程系统故障两种术语,不刻意区分二者语义上的差异。

§ 1.1.2 过程监控的任务

过程监控的目的是监视系统运行状态,检测系统是否发生故障,并对故障系统的异变幅度进行定量分析,判明故障类型、时间、幅度、表现形式、作用方式、影响程度,在必要时提出相应的维护与改进措施。

过程监控的核心是过程故障检测。对于大多数动态系统而言,过程故障检测涉及故障检测、故障幅度辨识、故障类型识别以及故障处理对策等几个方面的内容。

1)故障检测:监视系统运行状态,检测动态系统运行规律或演化趋势是否在某时间点之后发生了异常变化,并推断出发生变化的起始时间 t_c ;

2)故障辨识:如果动态系统发生了异常变化,识别变化类型,估计变化幅度,以便对过程故障程度进行评估;

3)故障识别:判断过程的异常变化是由多维过程的哪个分量、动态系统哪个部件或系统运行过程的哪个环节引起的,以查明故障形成的原因;

4)故障对策:根据过程故障可能带来的不利影响制定相应处

理对策,以确保系统能正常运行或避免系统发生灾变。

显然,问题 1)~4)的分析与研究,对于提高设备或系统运行过程可靠性、强化制造与生产过程的质量控制、准确发现故障、及时进行灾变监测、有效实施维护,都有重要的理论意义和应用价值。

§ 1.2 过程监控的一般步骤

过程故障监控是一项复杂的系统工程。监控任务的完成,主要由信号采集、数据处理、故障检测与诊断以及监控决策等四个阶段组成,如图 1-1 所示。其中,监控信号处理和过程故障检测与诊断(FDD)构成一个集成的整体,其相关理论和方法合称为过程监控技术^[24]。

§ 1.2.1 数据采集

采集数据的主要工具是传感器(或敏感器)。对动态系统运行过程而言,传感器或测量设备输出信息通常是以等间隔或不等间隔的采样时间序列的形式给出的。

监控过程的数据采集,必须同时兼顾到采集过程的工程可实现性和采样数据有效性。此处所谓数据有效性,主要是指采样的测量数据与过程系统故障之间必须有内在关联性。

§ 1.2.2 信号处理

一般地,在对过程进行故障检测与诊断之前必须借助滤波、估计或其它形式的数据处理与特征信息技术对过程系统采样时间序列进行信息压缩,使之更适合于故障检测与诊断。

假定动态系统的控制输入和测量输出分别为 $U = \{u(t) \in R^m, t \in T\}$ 和 $Y = \{y(t) \in R^n, t \in T\}$ 。出于监控目的的过程信号处理,实质上是构造一个算子 $Q: U \times Y \rightarrow R^q$ 使得 $Q(\cdot | \text{运行正常})$ 与 $Q(\cdot | \text{过程故障})$ 之间存在显著差异。算子 Q 称为过程监

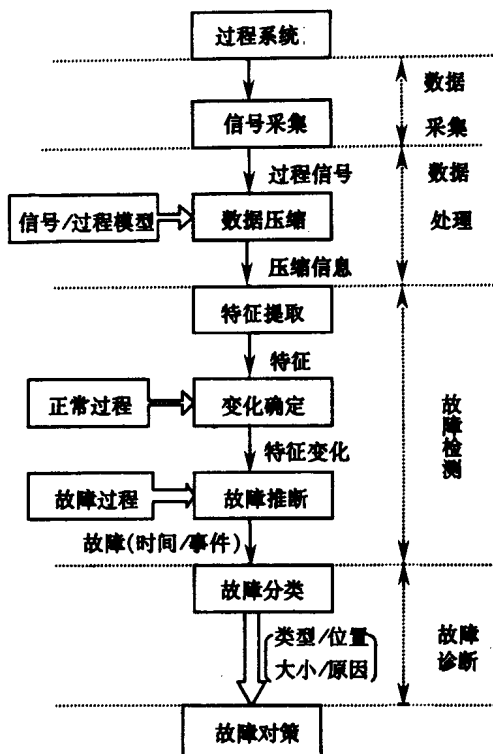


图 1-1 过程监控的一般方案

控的指标函数,简称监控指数^[24]。选择合适的监控指数 Q 是准确、有效地进行过程监控的关键。

§ 1.2.3 故障检测

简而言之,变化检测就是判断并指明系统是否发生了异常变化及异常变化发生的时间。例如,对于正在运行的系统或按规定标准进行生产的设备,辨别其是否超出预先设定或技术规范规定的无故障工作门限。

过程故障检测的首要任务是依据压缩之后的过程信息或借助直接从测量数据中提取的反映过程异常变化或系统故障特征的信