



在线传感器

性能评估与故障诊断方法研究

ZAIXIAN CHUANGANQI
XINGNENG PINGGU YU GUZHANG ZHENDUAN
FANGFA YANJIU

刘志成◎著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013062524

TP212
303

在线传感器性能评估与 故障诊断方法研究

刘志成 著



TP212
303

国防工业出版社

·北京·



北航

C1670903

013085254

内 容 简 介

本书以过程工业传感器为研究对象,系统阐述了在线性能评估的原理、方法与目标,主要内容有:在线传感器性能评估的含义和指标,传感器输出时间序列的实时小波滤波方法,基于神经网络的传感器输出时间序列的实时预测方法,同时对传感器突变信号的识别方法和基于强跟踪滤波的故障诊断方法进行了研究。

本书可作为过程装备与控制、自动化、测控技术与仪器等专业研究人员的参考书,也可供生产企业一线从事传感器与检测技术的工程师和技术人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

在线传感器性能评估与故障诊断方法研究/刘志成
著. —北京:国防工业出版社,2013.7

ISBN 978-7-118-08734-5

I. ①在... II. ①刘... III. ①传感器-性能分析
②传感器-故障诊断-研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 059213 号

※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5 字数 123 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 46.00 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

前 言

智能传感器技术是一门正在蓬勃发展的现代传感器技术。智能传感器的功能包括:复合敏感功能,自检验、自校准和自诊断功能,自补偿和计算功能,自确认(评估)功能,通信功能。遗憾的是,目前智能传感器通常只具有自补偿和计算功能及通信功能,很少传感器具有自检验、自校准、自诊断功能,极少有自确认(评估)功能。因此,在传感器外部,对其进行在线性能评估与故障诊断的研究具有重要的现实意义。

事实上,研究人员和工程技术人员都知道传感器性能监视与评估的重要性。这是因为,传感器作为自动化系统的一个必不可少的组成环节,在系统中起着“耳目”的作用,它每时每刻都在监测着生产对象的运行状况,并为进一步的决策提供依据,所以其检测信息的准确性、传递信息的及时性、运行的可靠性至关重要,只有自身运行良好,才能对生产对象进行有效的监视与评估,为生产、决策提供准确可靠的依据。

由于传感器通常安装在现场,而现场环境往往比较恶劣,一般在使用一段时间后,其性能将受到很大影响,甚至发生故障。据统计,在控制系统的各种故障中,传感器和执行器的故障占 80% 左右。所以,在控制系统的故障诊断中,首先应进行传感器的故障诊断,对其运行状态进行有效的监视与评估。遗憾的是,在性能方面的研究内容基本上都只限于控制器、执行器或过程本身的监视与评估。虽然研究人员和工程技术人员都知道传感器性能监视与评估的重要性,但是,目前这方面的研究工作还没取得实质性进展。其主要原因是,缺乏解决传感器监视与评估中存在的问题的关键性技术。这是因为传感器的输

入是一个未知量,而输入到控制回路的是设定值,该值是一个已知的被用于监视系统输出和评价控制回路的参考值。这就是传感器性能监视与控制器性能监视不同的关键所在。

本书研究了一种在传感器外部对其性能评估的方法,希望在传感器性能变差但还未达到故障限时,能对传感器输出数据的有效度做出评估,而在传感器故障时,又能及时检测与诊断。所以研究内容综合了传感器的性能评估和故障诊断两个方面。主要包括:

(1) 通过分析传感器测量误差产生的特征,研究不确定度产生的原因及评定方法,探讨了重复性不确定度与传感器故障之间的关系,论述了传感器测量值的重复性标准不确定度作为传感器在线性能评估指标的合理性和可行性。运用传感器的重复性不确定度分量在线评定传感器性能,提出了小波滤波与神经网络相结合的在线传感器性能评估方法,并在理论分析的基础上,仿真验证了在应用神经网络预测前对传感器输出时间序列进行滤波处理的必要性。

(2) 为满足不同测控系统中传感器输出时间序列的实时滤波要求,基于小波滤波原理,针对小波变换不能实现时间序列的递推和存在边缘效应的弱点,研究基于 Mallat 快速离散小波变换的三种实时滤波方法(冗余采样频率法、有滞后的浮动数据窗法和对称添加的浮动数据窗法)。分析小波滤波中的几个关键因素对实时性的影响。通过仿真实验表明:合理选择小波函数、分解尺度、阈值选择算法和信号长度可以提高实时性,通过调整数据采集频率或适当转换时间序列可以克服边缘效应的影响,使上述三种实时滤波方法具有较强的适应性、较好的实时性和滤波效果。

(3) 通过分析传统的时间序列预测法的基本原理、收敛性、适应性及预测精度,指出了传统的时间序列预测方法存在的缺点,重点研究了基于人工神经网络的预测方法。通过实测信号和仿真信号的实验结果表明:在获得较完备的样本集的条件下,经过训练的 BP 有很高的预测精度,同时有很高的实时性;自适应线性神经网络对样本的要求不高,其预测精度和实时性较高,具有良好的适应性。

(4) 通过分析突变原因与其引起的突变信号的频率成分之间的关系,研究小波变换或小波包的频率分辨力,提出用基于小波变换或小波包的频带分析技术来区分传感器信号突变原因的方法。该方法对系统数学模型的精度要求不高,能够有效地检测出传感器的故障,为传感器的故障诊断与性能评估提供了新的思路。

本书在写作过程中,受到北京理工大学陈祥光教授的悉心指导,在此表示衷心感谢!由于作者的水平和经验有限,书中的错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 传感器的重要性	1
1.1.2 智能传感器技术及发展现状	2
1.2 传感器性能评估与故障诊断的重要性	4
1.2.1 故障的定义	4
1.2.2 故障诊断的任务及其研究的内容	5
1.2.3 性能评估的含义	6
1.2.4 传感器故障及性能变化原因	6
1.2.5 传感器性能评估与故障诊断的意义	7
1.3 传感器故障诊断的方法及研究现状	9
1.3.1 基于解析模型的方法	10
1.3.2 基于信号处理的方法	12
1.3.3 基于知识的方法	14
1.3.4 目前主要存在的问题	15
1.4 本书研究的主要内容	17
第2章 在线传感器性能评估指标和评估方法的确定	19
2.1 传感器的性能指标分析	19
2.1.1 传感器误差分析	19
2.1.2 传感器静态性能指标的分析	21
2.1.3 传感器的测量不确定度	26
2.2 在线传感器性能评估方法	30
2.2.1 传感器性能评估基本方法的提出	30

2.2.2	神经网络预测前小波滤波的必要性分析	31
2.2.3	小波滤波对神经网络预测精度影响的仿真	32
2.3	本章小结	37
第3章	传感器输出时间序列的实时小波滤波方法	38
3.1	小波变换的基本理论	38
3.1.1	连续小波变换	39
3.1.2	离散小波变换	39
3.1.3	正交小波变换的快速算法——Mallat 算法	40
3.1.4	离散时间序列的正交小波变换	43
3.2	小波变换在信号滤波中的应用研究	45
3.2.1	小波滤波原理	45
3.2.2	小波滤波的常见方法	46
3.2.3	传感器输出时间序列的小波域阈值滤波的 基本原理	47
3.2.4	小波域阈值滤波的实时性方法研究	47
3.3	实时滤波效果的实验分析	54
3.3.1	实测信号的实时滤波效果分析	54
3.3.2	典型信号的实时滤波效果研究	57
3.3.3	仿真信号的实时滤波效果研究	60
3.4	本章小结	63
第4章	基于神经网络的传感器输出时间序列预测方法	65
4.1	预测的基本理论	65
4.1.1	预测的特点	66
4.1.2	预测性能评价指标	67
4.2	时间序列预测的常用方法	68
4.2.1	传统的时间序列预测方法	69
4.2.2	基于神经网络的时间序列预测方法	71
4.3	自适应线性神经网络在时间序列预测中的应用	74
4.3.1	自适应线性神经网络简介	74

4.3.2	自适应线性神经网络用于时间序列预测的步骤	75
4.3.3	自适应线性神经网络进行时间序列预测的效果	76
4.4	BP神经网络在时间序列预测中的应用	79
4.4.1	BP神经网络概述	79
4.4.2	BP神经网络用于时间序列预测的方法	80
4.4.3	运用BP神经网络进行时间序列预测的效果	82
4.5	本章小结	84
第5章	在线传感器突变信号的检测与识别	86
5.1	突变信号的产生及特征分析	87
5.2	基于小波变换及小波包的频带分析	89
5.2.1	小波变换与小波包的频率分辨力	89
5.2.2	频带分析方法	92
5.2.3	小波频带与能量积分	92
5.2.4	分析步骤	92
5.3	频带分析中的小波函数选择	93
5.4	仿真分析	94
5.5	实验研究	97
5.6	本章小结	100
第6章	在线传感器性能评估与故障诊断方法的实验研究	101
6.1	性能评估与故障诊断方法流程	101
6.2	原油储罐液位传感器的性能评估与故障诊断	102
6.2.1	MT2000原油储罐液位测量仪的工作原理简介	102
6.2.2	MT2000原油储罐液位测量仪的性能评估与 故障诊断实验	102
6.3	原油含水率测量传感器的性能评估与故障诊断	105
6.3.1	CM-3电容式含水分析仪测量原理简介	106
6.3.2	CM-3电容式含水分析仪性能评估与 故障诊断实验	106
6.4	原油储罐温度传感器的性能评估与故障诊断	108

6.5	恒压供水系统的压力与流量传感器评估实验	110
6.5.1	压力传感器的性能评估实验	110
6.5.2	流量传感器的性能评估实验	111
6.6	本章小结	112
第7章	基于强跟踪滤波的传感器故障诊断方法的改进	114
7.1	基本卡尔曼滤波算法	114
7.2	扩展卡尔曼滤波算法	116
7.3	强跟踪卡尔曼滤波及其在传感器故障诊断中的 应用	118
7.3.1	强跟踪卡尔曼滤波的基本原理	119
7.3.2	基于强跟踪卡尔曼滤波的传感器故障 诊断方法	122
7.3.3	存在的问题	123
7.4	强跟踪卡尔曼滤波与小波滤波相结合的改进方法	123
7.4.1	传感器故障模型的简化	124
7.4.2	仿真实验	124
7.5	双强跟踪卡尔曼滤波器的改进方法	129
7.5.1	基本原理	129
7.5.2	仿真实验	129
7.6	本章小结	135
第8章	结论与展望	136
参考文献	140

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 传感器的重要性

在今天的信息时代里,信息产业的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器完成信息的获取、传递与转换,是信息技术的基础。传感器的性能与质量决定了信息系统的功能和可靠性,正如国外一些著名专家评论说“征服了传感器就等于征服了科学技术”^[1]。

传感器是信息采集系统的首要部件,是构成测控系统的重要环节,传感器性能的优劣将直接影响测控系统的品质。随着电子技术和计算机技术的飞速发展,对传感器的精度、可靠性、响应速度、获取的信息量要求也越来越高。当前,世界许多发达国家都在加快对生物传感器、化学传感器、微纳传感器等新型传感器的研究与开发,并且已取得很大的突破。美国曾把 20 世纪 80 年代称作传感器时代,把传感器技术列为 90 年代 22 项关键技术之一;日本曾把传感器技术列为各项技术之首;我国的“863”计划、科技攻关等计划中也曾把传感器的研究放在重要的位置^[2,3]。美国、日本、德国等发达国家的传感器技术发展迅速。我国由于起步较晚,传感器技术与这些发达国家相比还有较大的差距^[4,5]。

传感器的应用范围几乎覆盖所有的工程系统和非工程系统,如化工系统、电力系统、机械系统、智能建筑系统、军事作战与防御系统、气象系统、海洋系统、人口系统、环保系统、医药卫生系统等。传感器是仪器仪表的关键部件,广泛应用于家用电器、汽车、机器人、航天器、医

学仪器、测试计量仪器等。传感器是信息系统的“先行官”，它是构成工业生产过程自动化、智能化和网络化系统不可缺少的重要环节。

1.1.2 智能传感器技术及发展现状

随着微型计算机技术的发展,传感器技术与计算机技术的结合,赋予了传感器智能的功能,构成了智能传感器^[6-8]。智能传感器不仅具有信号检测、转换和通信功能,同时还具有记忆、存储、解析、统计处理及自诊断、自校准、自补偿、自适应等功能,不再只是信号的变换器。

智能传感器技术是一门正在蓬勃发展的现代传感器技术,是涉及微机械与微电子技术、计算机技术、信号处理技术、电路与系统、传感技术、神经网络技术及模糊理论等多种学科的综合性技术。智能传感器经历了 20 多年的发展历程,使其智能的功能不断丰富、可靠性不断提高。

(1) 复合敏感功能。有些智能传感器具有复合敏感功能,能够同时测量多种物理量和化学量^[9,10],给出能够较全面反映物质运动规律的信息,如科氏质量流量计,可同时检测出流体的质量流量和密度信息;美国加利福尼亚大学电子研究所实验室研制的一种传感器,芯片尺寸为 8mm × 9mm,集成的敏感元件有气体流量、红外、化学敏、悬臂梁加速度计、声表面波蒸汽敏、触觉阵列和红外电荷耦合器件;美国 Honeywell 公司 ST-3000 型智能传感器,芯片尺寸只有 3mm × 4mm × 2mm,采用半导体工艺,在同一芯片上集成 CPU、EPROM、静压、差压、温度等三种敏感元件。

(2) 自检验、自校准和自诊断功能。检验与校准的主要参数是零位和增益^[11]。普通的传感器需要定期离线检验和标定,以保证其正常使用和足够的准确度。对于智能传感器,有的微处理器内存中带有自校准功能软件,校准工作可以在线自动进行。操作人员只要输入零位和某已知参数,智能传感器的自校准软件就能将随时间变化(或漂移)了的零位和增益校正过来。一般已知参数可通过两种方法产生^[12,13]:一是输入已知的被测量;二是用静电力或磁力产生一等效信

号。自诊断可看作自校准的一个分支,其目的是确定传感器的工作是否正常,如果不正常,则诊断出故障点。

(3) 自补偿和计算功能。多年来,许多工程技术人员一直从事传感器温度漂移和非线性补偿工作,虽然每年都有所进展,但都没有根本性突破。而智能传感器的自补偿和计算功能为传感器的温度漂移和非线性补偿开辟了新的途径^[13]。在有些场合,通过传感器的计算功能也能获得较精确的测量结果,同时对测量结果还能进行统计处理^[14]。

(4) 自确认(评估)功能。自确认传感器是一种不仅能输出测量值,同时能够对自身的工作性能、状态进行在线评估的新一代传感器。自确认传感器与传统传感器相比,在结构上增加了故障诊断单元和输出数据分析单元,使其具有自评估功能,能够实现传感器故障的自诊断和自恢复。除提供确认的测量值之外,还提供测量值的不确定度、测量值的状态等表征传感器输出可信度的参数。这样就可以实时了解传感器的工作情况,及时采取相应的措施。

在 20 世纪 90 年代初期,牛津大学的 Henry 和 Clarke 首先提出了自确认(Self-Validating, SEVA)传感器的概念模型^[15]。自确认传感器模型指出,传感器应该利用各种可用信息,产生可靠度和测量数据类型。通过考虑当前所有可用的信息源,包括原始数据、测量值、辅助信号和设备专用测试的结果,传感器对自身的状态和性能做一个内部评估,得到一个诊断状态。由此产生有效测量数据(Validated Measurement Value, VMV),即当前测量值的最佳估计和有效度指数。接着,牛津大学工程科学系将自确认模式应用于热电偶^[16]、溶解氧传感器^[17]和 Coriolis 质量流量计的设计^[18],从硬件和软件两方面入手,涉及了工程科学的许多领域,包括传感器物理学、先进的信息处理和决策理论、现代电子学等,取得了较为满意的效果。后来,Clarke 教授和 Na, Seung, You 等人在自确认传感器研究的基础上,对自确认传感器在控制系统、控制回路和工厂中的应用进行了深入的研究^[19-21],证明了在系统维护、控制策略选择、保障系统可靠性等方面,自确认传感器比通常的智能传感器具有更大的优势。

遗憾的是自确认传感器技术发展缓慢,生产中广泛使用的智能传感器没有自评估功能。

(5) 通信功能。早期的智能传感器(或变送器)可以通过装在传感器(变送器)内部的电子模块来实现通信,也可以通过智能现场通信器(SFC)来交换信息^[22]。SFC的外观像一个袖珍计算器,将它挂在变送器两信号输出线的任何位置,可通过键盘的简单操作进行远程设定或变更传感器(变送器)的参数,如测量范围、线性输出或平方根输出等。这样就无需把传感器(变送器)从危险区拆下来,极大地节省了维护时间和费用。

智能传感器的最新发展趋势是网络化^[23-28]。传感器技术与计算机技术结合发展了智能传感器,在此基础上,再与通信技术相结合发展为网络传感器。网络传感器除具有上述的智能传感器的功能特点外,还在它自身内部嵌入了通信协议(HART, TCP/IP, Lon Talk等),从而使其具有强大的通信能力。随着网络化传感器的发展应用,会逐步改变传统传感器和变送器的概念,将敏感元件、转换电路和变送单元结合为一体,直接传送满足通信协议的数字信号,满足了网络化的测控系统的要求。此时,网络化传感器就成为测量控制网络中的一个节点。现阶段网络化传感器以HART协议为主,可同时输出4~20mA的直流信号和满足协议的数字信号,实际上是由智能化向网络化发展的过渡阶段。

以上介绍的智能传感器的功能在不断发展和完善,但在工程实践中,目前智能传感器通常只具有自补偿和计算功能及通信功能,很少传感器具有自检、自校准、自诊断功能,极少有自评估功能。因此,对传感器进行在线性能评估与故障诊断的研究具有重要的现实意义。

1.2 传感器性能评估与故障诊断的重要性

1.2.1 故障的定义

凡使传感器(系统)表现出不希望特性的任何异常现象,或传感器

(系统)中部分元器件功能失效而导致整个传感器(系统)相应的输出超过允许范围,发生失常、功能不达标或完全失效的情况或事件,称为传感器(系统)故障。

1.2.2 故障诊断的任务及其研究的内容

故障检测的任务是当系统发生故障时能够及时发现并报警。任何故障检测系统都不可能百分之百地正确检测出控制系统的各种故障,因此提高故障的正确检测率,降低故障的漏报率和误报率一直是故障检测与诊断领域的前沿课题。

当系统发生故障时,系统中的各种量(可测的或不可测的)或它们的一部分表现出与正常状态时不同的特性,这种差异包含着丰富的故障信息。如何找到这种故障的特征描述,并利用它来进行故障的检测与分离是故障诊断的主要工作。故障诊断过程包括特征提取、故障的分离与估计和故障评价与决策等几个方面的内容。

(1) 故障的特征提取:通过测量和一定的信息处理技术获取反映系统故障的特征描述的过程。表征系统故障的特征量可以是:①可测的系统输入/输出信息;②不可测的状态变量;③不可测的模型参数向量;④不可测的特征向量;⑤人的经验知识。获取这些特征量的方法有三种:①直接观测和测量;②参数估计、状态估计或滤波与重构;③对测量值进行某种信息处理。

(2) 故障的分离与估计:根据检测的故障特征确定系统是否出现故障及故障程度的过程。

(3) 故障的评价与决策:根据故障分离与估计的结论对故障的危害及严重程度做出评价,进而做出是否停止任务进程以及是否需要维修更换的决策。

故障的决策与分离方法有域值逻辑法、多重模型假设检验法、贝叶斯决策函数法、特征量统计检验法(如 SPRT、GLR 等方法)、人工神经网络法、专家系统法、模式识别法、模糊数学法、逻辑代数法等。

1.2.3 性能评估的含义

传感器性能评估是通过所有可用的信息源,包括原始数据、测量值、辅助信号和设备专用测试的结果,对传感器的运行状态和性能进行综合分析,并由此产生有效测量数据,即当前测量值的最佳估计和有效度指数。

1.2.4 传感器故障与性能变化原因

引起传感器性能变化的主要原因如图 1.1 所示。

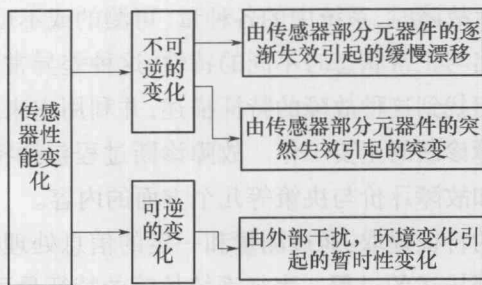


图 1.1 引起传感器性能变化的主要原因

元器件在工作过程中的某一时刻突然失效,如电容的击穿、电路的断开,机械部件的卡死等。突然失效的出现是偶然的,其发生是随机的、无法预测的,表现为传感器的突发性故障。元器件的逐渐失效是指元器件在工作过程中由于老化、磨损、疲劳等原因引起的性能逐渐退化,主要表现为传感器的缓慢漂移性故障或性能变差。元器件参数的瞬间变化,是指来自周围环境(如机械振动、强电磁场等)的影响或工作条件(如温度、湿度、)的改变而引起的暂时性漂移,主要表现为传感器输出信号发生突变、性能变差。

显然,不可逆的变化是传感器的结构故障,可逆的变化是由外部环境变化而引起的,表征了传感器的抗干扰能力(即稳定性)。所以,故障诊断是分析传感器有无故障发生及故障发生的时间与严重程度;而性能评估则是研究以有效度指数表示传感器性能的变化,是故

障诊断任务的深化和细化。

1.2.5 传感器性能评估与故障诊断的意义

随着电子技术、通信技术、计算机技术和控制技术的飞速发展,使得各类自动控制系统广泛应用于军事、工业生产、交通、能源、通信、金融、航海、航天等领域,并正向复杂化和大规模方向发展,任何一个环节出现的某些微小故障若不能得到及时的检测和排除,将会使整个系统失效,甚至导致巨大的灾难。如美国“挑战者”号航天飞机的失事;苏联切尔诺贝利核电站的泄漏事故;1988年,秦岭电厂的200MW汽轮发电机组的严重断轴毁机事件;1980年,美国宇航局在一次地面实验中,由于火箭发动机主燃烧室控制回路中压力传感器的失灵而出现了爆炸事故^[29];河北沧州市化肥厂曾因电涡流传感器的线圈短路造成重大停产事故^[30]等。这与系统的规模和复杂性形成了尖锐的矛盾。因此,如何提高系统的安全性、可靠性,预防和杜绝影响系统正常运行的故障的发生和发展就成为一个重要的有待解决的问题。事实上,要完全杜绝故障的发生是不现实的,所以,当系统发生故障时,及时检测、报警、分离和准确估计,进一步进行容错控制,防止事故蔓延显得更为重要。但是仅通过人力去发现和修复故障很难做到及时有效,人们迫切需要提高自动化系统的安全性和可靠性,有必要建立一个监视系统来监督整个控制系统的运行,其中之一就是控制系统的故障诊断。

传感器作为自动化系统的一个必不可少的组成环节,在系统中起着“耳目”的作用,它每时每刻都监测着生产对象的运行状况,并为进一步的决策提供依据,所以其检测信息的准确性、传递信息的及时性、运行的可靠性至关重要,只有自身运行良好,才能对生产对象进行有效的监视与评估,为生产、决策提供准确可靠的依据。然而由于传感器通常安装在现场,而现场环境往往比较恶劣,一般在使用一段时间后,其性能将受到很大影响,甚至发生故障。据统计,在控制系统的各种故障中,传感器和执行器的故障占到80%左右。所以,在控制系统