



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

多模态复杂工业 过程监测及故障诊断

王福利 常玉清 著
王 姝 谭 帅



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

多模态复杂工业过程 监测及故障诊断

王福利 常玉清 著
王 姝 谭 帅

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为多模态复杂工业过程的监测及故障诊断方法提供了较为完整的理论框架支撑。第1章介绍了复杂工业生产过程监测及故障诊断的意义及多模态过程的定义、特点以及国内外研究现状。第2章介绍了常用的多变量统计过程监测及质量预测方法。第3~7章是多时段间歇过程监测及故障诊断方法。第8~10章是多模态连续过程监测及故障诊断方法介绍,针对多模态连续过程,分别从多模型和混合模型两种建模角度对稳定模态与过渡模态的过程监测及故障诊断进行了介绍。

本书可以作为自动控制或信息科学等相关专业本科生及研究生扩充知识领域的教学用书及参考用书,同时也对从事自动化相关领域的科研人员及工程技术人员具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多模态复杂工业过程监测及故障诊断/王福利等著. —北京:科学出版社, 2016

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-048683-7

I. ①多… II. ①王… III. ①工业-生产过程-监测 ②工业-生产过程-故障诊断 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 129603 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:290 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
吴宏鑫 席裕庚 郭雷 周康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员 (按姓氏笔画排序)

于海斌 (中国科学院沈阳自动化研究所)	张纪峰 (中科院数学与系统科学研究院)
王 龙 (北京大学)	陈 杰 (北京理工大学)
王化祥 (天津大学)	陈 虹 (吉林大学)
王红卫 (华中科技大学)	范 铠 (上海工业自动化仪表研究院)
王耀南 (湖南大学)	周东华 (清华大学)
卢建刚 (浙江大学)	荣 冈 (浙江大学)
朱群雄 (北京化工大学)	段广仁 (哈尔滨工业大学)
乔 非 (同济大学)	俞 立 (浙江工业大学)
刘 飞 (江南大学)	胥布工 (华南理工大学)
刘德荣 (中国科学院自动化研究所)	桂卫华 (中南大学)
关新平 (上海交通大学)	贾 磊 (山东大学)
许晓鸣 (上海理工大学)	贾英民 (北京航空航天大学)
孙长银 (北京科技大学)	钱 锋 (华东理工大学)
孙彦广 (冶金自动化研究设计院)	徐 昕 (国防科学技术大学)
李少远 (上海交通大学)	唐 涛 (北京交通大学)
吴 敏 (中南大学)	曹建福 (西安交通大学)
邹 云 (南京理工大学)	彭 瑜 (上海工业自动化仪表研究院)
张化光 (东北大学)	薛安克 (杭州电子科技大学)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以

及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '孙义章' (Sun Yizhang). The signature is stylized and written in a cursive script.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

随着生产水平的不断提高以及自动控制技术的不断发展,为了保证生产的安全、稳定以及更高的经济效益,复杂工业过程监测及故障诊断技术逐渐受到了学术界和工业界的广泛重视。传统的基于工艺机理的过程监测方法,由于难于得到复杂工业生产过程的机理模型,而限制了其在实际工业过程中的应用。近年来发展起来的多元统计技术克服了传统过程监测方法的不足,在工业过程监测领域得到了越来越多的应用,其优点如下:它只需要正常工况下的历史数据来建立模型,同时能够有效地剔除过程数据中的冗余信息、极大地降低数据维数,甚至可以将过程运行状态直接显示于二维的统计量监视图中。主成分分析(PCA)、偏最小二乘(PLS)就是两种典型的多元统计过程监测(MSPM)方法。作为 MSPM 方法的补充,Fisher 判别式分析(FDA)、典型变量分析(CVA)、独立成分分析(ICA)等方法也逐渐被应用于工业过程监测,用以克服 PCA/PLS 方法在应用过程中的一些严格限制(如过程数据必须满足正态分布等)。同时,机器学习(ML)、神经网络(NN)、专家系统、支持向量机(SVM)以及贝叶斯置信网络(BBN)等方法也在复杂工业过程监测中获得了一些成功应用。

随着现代社会对多品种、多规格和高质量产品迫切的市场需求,工业生产更加倚重于可以生产多种产品的高效过程。但是,过程生产方案的变动或者产品类型的改变会导致生产过程出现具有不同潜在过程特性的多种模态。多模态复杂过程的多变量、多工序、变量时变性以及模态转换时间不确定等多种原因,导致面向多模态生产过程的统计分析及在线应用更具挑战性。

所谓多模态过程,是指由于外界环境等条件的变化、生产方案变动,或是过程本身固有特性等因素,导致生产过程具有多个稳定工况。当生产过程运行于不同的生产模态时,正常操作数据的均值、方差、相关关系等特征变量会有明显的变化。在这种情况下,数据分布的多峰性将使传统的多元统计过程监测方法无法直接应用于这类具有多模态特性的复杂工业生产过程的监测或故障诊断。针对复杂工业生产过程的多模态特性,如何区分识别不同的生产模态,建立能够实时动态地评估多模态复杂工业系统的运行状态,成为保证多模态生产过程安全可靠运行的关键难题。

本书作者王福利教授和其科研梯队长期从事复杂工业过程监测、故障诊断及质量预测的理论方法及应用研究,陆续提出了一系列多模态复杂工业过程的模态

划分方法、模态识别方法、多模态过程监测及故障诊断方法,且在连续退火过程、湿法冶金过程中取得了较为成功的应用。本书在介绍常用多元统计方法的基础上,首先从多时段间歇过程监测及故障诊断方法角度,阐述了间歇过程的时段划分方法、具有非高斯分布特性以及非线性特性的间歇过程监测方法等。然后,针对多模态连续生产过程监测及故障诊断,阐述了连续生产过程的模态识别方法、基于过程数据相关关系变化以及基于过程数据分布特性变化的多模态连续过程监测及故障诊断方法。

本书为多模态复杂工业过程的过程监测及故障诊断方法提供了较为完整的理论框架支撑,对间歇过程和连续过程监测及故障诊断都提供了较为实用的方法介绍。第1章介绍了复杂工业过程监测及故障诊断的意义及多模态过程的定义、特点以及国内外研究现状。第2章介绍了常用的多变量统计过程监测及质量预测方法。第3~7章是多时段间歇过程监测及故障诊断方法介绍,特别针对建模数据不足和具有非线性特性的间歇过程介绍了相应的监测及故障诊断方法,并针对“时段型质量指标”和“过程型质量指标”介绍其相应的质量预测方法。第8~10章是多模态连续过程监测及故障诊断方法介绍。这部分针对多模态连续过程,介绍了离线数据模态识别和在线数据模态识别的方法,分别从多模型和混合模型两种建模角度对多模态过程监测及故障诊断进行了介绍。

本书涉及的研究成果得到了国家自然科学基金面上项目(No. 61074074, No. 61174130, No. 61374146)、国家自然科学基金重点项目(No. 61533007)、863计划(2011AA060204)、流程工业综合自动化国家重点实验室自主创新项目(No. 2013ZCX02-04)的支持与资助。在本书作者王福利教授的指导下,四位博士研究生陆宁云、赵春晖、谭帅和张淑美针对本书中的复杂工业过程监测及故障诊断方法做了一定的科研工作。另外,赵露平老师、博士研究生刘炎、邹筱瑜以及硕士研究生韩泽峰等为书稿的编辑及校对等方面做了很多工作。在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,以及所做研究工作的局限性,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2016年1月于东北大学

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂工业生产过程监测及故障诊断的意义	1
1.2 多模态过程的特征	4
1.3 多模态过程监测的研究现状	5
参考文献	9
第 2 章 常用的多变量统计过程监测及质量预测方法	14
2.1 引言	14
2.2 数据预处理方法	15
2.2.1 数据表的基本知识	15
2.2.2 数据的标准化处理	16
2.3 基于主成分分析的过程监测方法	18
2.3.1 PCA	18
2.3.2 基于 PCA 的多变量统计过程监测	21
2.3.3 基于 PCA 变量贡献图的故障诊断	23
2.4 基于独立成分分析的过程监测方法	24
2.4.1 ICA 的基本原理	24
2.4.2 基于 ICA 的过程监测	26
2.4.3 基于 ICA 变量贡献图的故障诊断	27
2.5 基于高斯混合模型的过程监测方法	28
2.5.1 高斯概率密度函数	28
2.5.2 高斯混合概率密度函数	29
2.5.3 参数估计	29
2.5.4 基于高斯混合模型的监测	31
2.6 基于核主成分分析的过程监测方法	32
2.6.1 引言	32
2.6.2 KPCA 方法的基本原理	33
2.6.3 基于 KPCA 方法的过程监测	35
2.7 基于偏最小二乘分析的质量预测方法	38

2.7.1	PLS	38
2.7.2	基于 PLS 的质量预测	42
	参考文献	43
第 3 章	多时段间歇过程的时段划分	47
3.1	引言	47
3.2	多时段间歇过程数据的表达及预处理	48
3.2.1	间歇过程数据的表达	48
3.2.2	间歇过程数据预处理	49
3.3	子时段的硬划分方法	51
3.3.1	基本思想	51
3.3.2	子时段的硬划分	53
3.4	子时段的软划分方法	55
3.4.1	基本思想	55
3.4.2	子时段的软划分	56
3.5	三水箱系统中的实验研究	61
3.5.1	三水箱系统简介	61
3.5.2	三水箱间歇过程时段硬划分	62
3.5.3	三水箱间歇过程时段软划分	64
	参考文献	67
第 4 章	基于时段的间歇过程监测及故障诊断	69
4.1	引言	69
4.2	基于 MPCA 的间歇过程监测及故障诊断方法	70
4.2.1	MPCA 原理	70
4.2.2	基于 MPCA 的多元统计分析及在线监测	71
4.3	基于时段硬划分的间歇过程监测及故障诊断方法	73
4.3.1	基于时段硬划分的 PCA 建模	73
4.3.2	基于时段硬划分的间歇过程在线监测	74
4.4	基于时段软划分的间歇过程监测及故障诊断方法	75
4.4.1	时段软划分	76
4.4.2	PCA 过程监测及故障诊断建模	76
4.4.3	基于时段软划分的间歇过程在线监测及故障诊断	78
4.5	三水箱系统中的实验研究	79
	参考文献	83
第 5 章	基于少数数据的间歇过程监测及故障诊断	84
5.1	引言	84

5.2 基于一个批次的间歇过程监测及故障诊断	84
5.2.1 滑动窗口 PCA 建模方法概述	85
5.2.2 建模数据预处理	86
5.2.3 子时段划分、PCA 建模和在线监测	87
5.2.4 模型更新	89
5.3 基于有限批次的间歇过程监测及故障诊断	90
5.3.1 基本思想	90
5.3.2 基于有限批次的数据预处理	91
5.3.3 基于有限批次的子时段划分	92
5.3.4 基于时段的 ICA 建模	94
5.3.5 在线过程监测与故障诊断	95
5.3.6 在线更新	96
5.4 青霉素发酵过程中的应用研究	98
5.4.1 过程描述	98
5.4.2 算法验证及讨论	100
参考文献	106
第 6 章 具有非线性特性的间歇过程监测及故障诊断	108
6.1 引言	108
6.2 基于 KPCA 的相似度指标	108
6.3 非线性间歇过程的时段划分	111
6.4 基于 KPCA 的间歇过程建模及在线监测	113
6.5 注塑过程的应用研究	114
6.5.1 注塑过程介绍	114
6.5.2 注塑过程子时段划分	116
6.5.3 注塑过程子时段建模及在线监测	120
参考文献	124
第 7 章 基于偏最小二乘的间歇过程质量分析及在线预测	125
7.1 引言	125
7.2 质量预测中的时段概念	126
7.3 关键时段识别及关键变量选择	128
7.3.1 关键时段的识别	128
7.3.2 关键变量的选择	129
7.4 对“时段型质量指标”的分析和预测	131
7.4.1 实时的 PLS 质量预测模型	131
7.4.2 基于时段平均轨迹的 PLS 质量预测模型	131

7.4.3	在线质量预测	132
7.5	对“过程型质量指标”的分析和预测	133
7.5.1	MPLS 质量预测模型	134
7.5.2	在线质量预测	135
7.6	仿真验证	135
7.6.1	“时段型质量指标”预报方法在注塑过程中的应用	135
7.6.2	“过程型质量指标”预报方法在青霉素发酵过程中的应用	143
	参考文献	145
第 8 章	多模态连续过程的模态识别	147
8.1	引言	147
8.2	多模态过程的离线模态识别	148
8.2.1	基本思想	148
8.2.2	基于变长度窗口的多模态过程离线模态识别方法	149
8.3	多模态过程的在线模态识别	157
8.3.1	基本思想	157
8.3.2	基于模态转换频度的多模态过程在线模态识别方法	157
8.4	田纳西-伊斯曼过程的仿真研究	160
8.4.1	过程介绍	160
8.4.2	实验设计和建模数据	160
8.4.3	离线模态识别	163
8.4.4	在线模态识别	166
8.5	连续退火机组的仿真研究	167
8.5.1	连续退火机组介绍	167
8.5.2	连续退火机组的离线模态识别	169
8.5.3	连续退火机组的在线模态识别	171
	参考文献	172
第 9 章	多模态连续过程监测及故障诊断	174
9.1	引言	174
9.2	基于不同数据分布的稳定模态建模及在线监测	175
9.2.1	基本思想	175
9.2.2	随机变量的特征提取	176
9.2.3	PCA 的统计特性分析	178
9.2.4	ICA 的统计特性分析	178
9.2.5	多元高斯分布检验方法	179
9.2.6	基于数据分布的稳定模态过程监测	181

9.2.7	实验数据的仿真研究	184
9.2.8	连续退火机组的仿真研究	185
9.3	基于相对变化的过渡模态建模及在线监测	189
9.3.1	基本思想	189
9.3.2	过渡过程数据特点	189
9.3.3	基于差分分段矩阵的过渡子模态划分	191
9.3.4	基于差分分段 PCA 的过渡模态过程监测	193
9.3.5	连续退火机组的仿真研究	194
	参考文献	198
第 10 章	基于高斯混合模型的多模态连续过程监测及故障诊断	200
10.1	引言	200
10.2	基于高斯混合模型的离线建模	201
10.2.1	稳定模态建模	202
10.2.2	过渡模态离线建模	203
10.3	基于高斯混合模型的在线模态识别及过程监测	204
10.4	田纳西-伊斯曼过程实例	207
10.4.1	田纳西-伊斯曼过程介绍	207
10.4.2	田纳西-伊斯曼过程仿真与分析	210
	参考文献	214
索引		216

第 1 章 绪 论

1.1 复杂工业生产过程监测及故障诊断的意义

自从维纳于 1948 年提出控制论以来,自动化理论与技术经过数十年的发展已经日臻完善,已经广泛应用于工业生产、航空、航天、机器人、核电站等各种领域。在过程工业领域,底层自动化水平已经能够满足绝大多数生产的需要,控制理论研究的重点正逐步向更高层次发展。自 20 世纪 90 年代以来,随着经济全球化进程的迅猛发展和市场竞争强度的日益加剧,工业规模在不断扩大,现代化的流程工业不断朝着大规模、复杂化、集成化,以及精细化方向发展。这样的发展方向产生了连续生产过程和间歇生产过程两类重要的生产方式。工业化集成大生产为我们带来了很大的经济效益,与此同时,企业面临着“市场预测、快速响应、柔性生产、创新管理”等非常迫切的任务。面对这些复杂生产过程要求,传统的控制方法显现出不足。主要存在以下问题^[1,2]:

(1) 对象不确定性问题。众所周知,工业过程均存在多种多样的干扰,许多干扰不仅严重而且机理复杂。不仅如此,大多数干扰既无法测量,也无法消除。一般来说,不确定的来源可分为两类:不可预知输入和不可预知动态。通常,控制系统设计所基于的数学模型仅是被控对象的简单近似,一般都忽略掉许多复杂的干扰因素,这样建立的数学模型与实际情况相差甚远,很难取得好的控制效果。

(2) 多变量和强耦合特性。流程工业过程中,都包含了较多过程变量,而且过程变量之间相互关联、相互耦合,任何一个变量的变化都可能会引起其他所有变量发生变化,从而使工业流程错综复杂。这就增加了过程控制的困难程度和复杂程度。

(3) 对象的非线性特性。严格地讲,所有工业过程都存在非线性。对于非线性程度较弱的系统,在一定的范围内可以当做线性系统来处理,对于非线性程度较强的系统,采用线性化的处理方法时常会产生很大的偏差,甚至会得出完全相反的结论。

(4) 信息的多样性。现代工业过程的控制和管理系统,信息的传输处理、利用和再现不再是单一的表现形式,而是语言、文字、图形、图像、数字等多媒体信息集成。因而所需采集和处理的数据量非常庞大。

(5) 系统功能的多层次性。控制任务不只是局限于底层反馈系统的调节(定

值)、伺服(跟踪)问题,而且要求监控、优化、诊断、调度、规划以及适应环境变化。系统往往具有多层次、多目标的控制要求。控制中的计算复杂性增加,并且不仅是数学公式的表达和数值计算,还要将人的经验、知识容纳进去。

这些问题的出现,促使理论研究的重点逐步向过程工业的更高层次协调、监督控制和组织管理等方向转移,从而使过程控制从原有的装置控制进入集控制、优化、调度、管理为特征的多层次、多模式、多视图的生产全过程综合自动化模式。即现今的过程工业生产已不再是一个个“自动化孤岛”的简单集合,而是自动化技术、信息技术、计算机技术和各种生产技术的集合。综合自动化就是在计算机通信网络和分布数据库支持下,实现信息与功能的集成,进而充分调动以人为主要因素的经营系统、技术系统及组织系统的集成,最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变的全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统^[3]。图 1.1 给出了工业过程计算机集成过程系统(computer integrated process system, CIPS)结构示意图^[4]。由图可见,过程监控与故障诊断部分是 CIPS 的一个重要组成部分,也是近年来的一个研究热点^[5-8]。



图 1.1 过程操作等级结构图

为了保证生产的安全、稳定以及更高的经济效益,人们开始考虑过程生产的可靠性和安全性。如果过程出现了故障不能及时排除,有可能会造成巨大的经济损失。所谓故障,指系统中至少一个特征或参数出现了较大偏差,超出了可接受的范围,使系统表现出所不期望的特性^[9,10]。系统中故障的发生部位、时间特性、发生形式会呈现出多样性^[11,12]。所谓故障诊断,包含故障检测、故障追溯等内容。故障检测就是判断系统中是否发生了故障以及检测出故障发生的时刻。故障追溯就是在检测出故障后,确定可能导致故障的变量和故障变量时变特性^[13]。总而言之,故障诊断就是指由计算机利用系统解析冗余,完成工况分析,对生产是否正常、什么原因引起故障、故障的程度有多大等问题进行分析、判断,得出结论的过程。

国际故障诊断权威 P. M. Frank 把故障诊断(广义)的方法分为三类^[1]:基于数学模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法。

1. 基于数学模型的方法

基于数学模型的方法也就是基于解析模型的方法,它是最早发展起来的,此方法需要建立被诊断对象的较为精确的数学模型。

麻省理工学院 Beard 于 1971 年提出了使用“解析冗余”代替传统的软件冗余,用于容错控制系统的设计,这为基于解析模型的故障诊断方法奠定了基础。Frank^[1]详细论述了用解析冗余实现故障诊断的思想。该法需要按照过程机理建立输入-输出之间的数学模型,利用观测器或者变量间的解析冗余关系生成残差序列,并通过一定措施增强其中包含的故障信息,抑制模型随机干扰等非故障信息,最后通过对残差序列的统计分析来实现故障的检测和诊断。

进一步,它又可以分为参数估计方法、状态估计方法和等价空间法。这三种方法虽然是独立发展起来的,但是它们之间存在着一定的联系。参数估计法利用标称模型参数和估计模型参数之差作为检测残差,状态估计法利用被测输出和估计输出之差作为检测残差,而等价空间法则利用测量值来检验系统数学方程的一致性。

基于定量模型的故障诊断方法的性能在很大程度上依赖于过程解析模型的准确程度。由于一般工业过程的复杂性、严重非线性以及存在多变量强耦合等特点,一个完整、准确的机理模型很难得到,或者需要很大的代价,因而这种方法在流程工业过程的性能监测中难以得到广泛、有效的应用,它通常局限于变量数目少,且只具有简单动态特性的过程。

2. 基于知识的方法

基于知识的方法与基于信号处理的方法类似,基于知识的方法不需要过程的精确数学模型,而是通过定性的因果关系模型、抽象递阶知识树以及专家系统等模型定性地描述过程中各个单元之间的连接关系、故障传播模式等过程知识,并在故障出现后,通过推理、演绎或模式识别自动完成故障的定位和诊断工作。它引入了诊断对象的许多信息,特别是可以充分利用专家诊断知识等,所以是一种很有前途的方法。

基于知识的方法还可以分为基于症状的方法和基于定性模型的方法。基于症状的方法包括专家系统方法、模糊推理方法、模式识别方法和神经网络方法等;基于定性模型的方法包括定性观测器、定性仿真和知识观测器等。这些定性模型一般通过系统状况的因果分析、症状-原因的枚举、系统描述及专家经验就可获得,并不需要了解过程基本机理。该方法的诊断能力较好,但通用性比较差,通常需

要结合具体的应用对象。

3. 基于信号处理的方法

前两种方法的一个共同点就是在进行过程实时监测前,都需要一些先验知识来建立模型。而基于信号处理的方法,在建立模型时仅仅需要过程中的历史数据,回避了抽取对象的数学模型的难点。即通过各种数据分析处理方法挖掘其中的信息,获取正常操作和故障的特征模式,进而指导生产操作。

按照分析方法的不同,基于数据驱动的方法可以分为定性和定量两种。定性方法一般指动态趋势分析,是现代时间序列分析方法在过程监测领域的扩展;定量数据驱动通过多变量统计方法或神经网络、动态时间规整挖掘出数据中隐含的信息,从而指导操作工进行生产。可见基于数据驱动的方法都是以多变量统计技术为基础的,它只需要正常工况下的历史数据来建立模型,同时能够有效地剔除过程数据中的冗余信息、极大地降低数据维数,甚至可以将过程运行状态直接显示于二维的统计量监视图中等。最常用的有:主成分分析(principal component analysis, PCA)、主成分回归(principal component regression, PCR)、偏最小二乘(partial least square, PLS)、典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA)、费舍判别式分析(Fisher discriminant analysis, FDA)以及隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)等方法。

1.2 多模态过程的特征

尽管在过程监测领域已有大量的相关文献报道,但是大多数 MSPM 方法^[14-19]要求用来建模的正常过程数据必须来自于单一的生产操作范围(即一个稳定的生产工况或一个稳定的生产模态)并且满足独立同分布的假设,例如,PCA/PLS 方法要求操作数据遵从近似单峰高斯分布^[20-23],并且数据正常的操作范围必须满足单一稳定工况,只有这样,才可以根据“小概率事件原则”用一个统计模型准确反映出正常的过程特性,并且用来实现过程监测的统计量才会满足相应的经验分布。然而,在工业生产过程中,生产过程具有多个稳定工况的情况是非常多见的,即同一个生产过程具有多个稳定工作点,并且不同稳定工作点之间变量的相关关系具有不同的特性^[24],这类过程被称为多模态过程(multimode process)。造成生产过程多模态的原因有很多:可能是原料性质、外界环境、过程负荷等条件的变化或设备磨损等因素,导致过程的操作条件发生变化;可能是产品类型的改变、过程生产方案变动等,导致稳态操作点的调整;另外,过程本身的固有特性,也会使得一个生产过程具有多个操作时段,如发酵过程按细菌的生长周期可以分为停滞期、指数生长期、静止期等几个阶段。简而言之,多模态过程是指一个生产过