

*Fault Detection and Diagnosis
in Industrial Systems*

工业系统的故障检测 与诊断

(美) 蒋浩天 等著
段建民 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工业系统的故障检测与诊断

(美) 蒋浩天 E.L. 拉塞尔 R.D. 布拉茨 著

段建民 译



机械工业出版社

Translation from the English language edition:
Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems by L. H. Chiang,
E. L. Russell and R. D. Braatz
Copyright © Springer - Verlag London Limited 2001
Springer - Verlag is a company in the Bertelsmann Springer publishing
group. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由施普林格出版公司授权机械工业出版社独家
出版。版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字 01-2002-2726

图书在版编目 (CIP) 数据

工业系统的故障检测与诊断/ (美) 蒋浩天等著; 段建民译. —北
京: 机械工业出版社, 2003.9

ISBN 7-111-12575-4

I. 工… II. ①蒋…②段… III. 过程控制 - 自动控制系统 - 故
障检测 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 057625 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 周国萍 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉
封面设计: 陈 沛 责任印制: 闫 焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
890mm × 1240mm A5·9 印张·261 千字
0 001 - 4 000 册
定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

译 者 序

故障检测与过程监控是过程控制学科中新增的研究领域之一，其得以迅速发展的原因是实际应用的需求同相关学科理论相互融合作用的结果。在工程实际中，新型仪表和通信技术已经在现有的和新的生产装置中产生了大量的过程实时数据。设备操作员希望能利用这些数据来减少停车时间，优化设备的运行。传统的故障检测途径是基于模型的，因此，要使用这些方法，必须首先对过程进行深入的了解。于是，就出现了另外一种可供选择的方法，这些方法不需要使用过程的解析模型。这是数据驱动范例的关键构架。故障检测、过程优化和控制设计的无模型和非参数方法正处于特别活跃的发展时期。

《工业系统的故障检测与诊断》是美国三位学者蒋浩天、拉塞尔 E.L. 和布拉茨 R.D. 继《数据驱动技术在化工过程故障检测与诊断中的应用》之后的又一力作。该书给出了过程监控的理论背景和实用技术。面对的读者对象是过程、化工和控制专业的高年级学生、研究生和已工作的工程师。

该书最明显的特点，是把过程监控的数据驱动方法、解析方法和基于知识的方法有机地融合在一起进行了系统的论述。为了对各种方法进行分析比较，书中还给出了大量的简单例子和一个大型工业设备仿真器。该仿真器被称为田纳西-伊斯曼 (Tennessee-Eastman) 仿真器，可以通过 <http://brahms.scs.uiuc.edu> 网站得到。每章之后都有作业题，便于读者加深对各种故障检测与诊断方法的理解，并且有利于自学。

在此书翻译过程中，得到了北京工业大学电子信息与控制工程学院研究生傅春霞、王盛军的帮助，同时还得到了吴斌教授、阮晓钢教授和张忠占教授的关心和支持，在此一并深表感谢。

译者在翻译过程中力求准确理解作者的思想，尽量使译文忠实于原文。但由于译者水平有限，谬误难免，恳请读者批评指正。

译 者
2003 年 6 月

前 言

现代制造业设备具有规模大、复杂性高、变量多，并在闭环控制下运行的特点。对这些设备进行早期的和准确的故障检测与诊断可以减少停产时间，增加设备运行的安全性，并减少制造成本。设备正在不断地仪表化，从而使得越来越多的数据可用于故障检测和诊断。单变量控制图（例如施瓦德图（Shewhart））在检测和诊断这种多变量过程的故障中的能力是有限的。这就导致了学术和工程研究的大量涌现，并集中开发更有效的过程监控方法。其中很多方法正在应用到实际工业系统中，因此，把这些技术放在本科生和研究生课程中是合适的。

本教科书给出了过程监控的理论背景和实用技术。面对的读者对象是工科学生和已工作的工程师。本书适用于作为一年级研究生或高年级本科生的过程监控课程。为了说明各种方法，书中使用了大量的简单例子和一个大规模工业设备仿真器。由于学习这些技术的最有效的方法是应用它们，因此，可以通过 <http://brahms.scs.uiuc.edu> 网站得到田纳西-伊斯曼（Tennessee-Eastman）仿真器。鼓励读者从仿真器中收集过程数据，然后应用一系列的过程监控技术来检测、分离和诊断各种故障。过程监控技术可以用商用软件包，如 MATLAB PLS 工具箱和 ADAPT_x 来实现。

写本教科书的目的是什么呢？尽管人们已经在学术界和工程界对过程监控付诸了许多努力，但该学科的书所涵盖的内容仍有限。这些书通常把重点全部放在一类方法上，例如统计质量控制（Statistical Quality Control）（Montgomery（1991），Pan 和 Vining（2000））或解析方法（（Analytical Methods）（Chen and Patton（1999），Gertler（1998），Patton, Frank 和 Clark（1989））。某些书论述统计法和解析法这两种方法（Himmelblau（1978），Basseville 和 Nikiforov（1993）），但不包括基于知识的方法，Wang（1999）包含了统计和基

于知识的方法，但没有涉及解析方法。许多具有实用意义的过程监控方法，如基于规范变量分析（Canonical Variate Analysis）和费舍尔判别分析（Fisher Discriminant Analysis）法，几乎没有在任何关于过程监控的书中有过论述（Russel, Chiang 和 Braatz（2000）一书例外）。

尽管许多书已就其作者所期望的主题作了非常优秀的论述。但我们认为把数据驱动、解析和基于知识的过程监控方法放在一本书中论述是有必要的。此动机的一部分是许多工科课程大纲没有足够的空间来对各种主题进行单独论述。但所有这些方法在实践中变得越来越重要，打算在工业界工作的工科学生应该学习。这些包括机械、电气、工业、化工、原子能、制造、控制、航空、质量和可靠性工程师，以及应用统计师。

每个主题所占的篇幅是根据作者的经验（3 位作者都已将过程监控方法应用到具有上百个被测变量的工业系统中），以及其他工程师的经验或出版物来确定的。第 1 章给出了过程监控步骤和方法的综述。第 2 章提供了多变量统计学的数学背景，包括单变量控制图和一个关于数据必备条件的讨论。第 3 章讨论了模式分类法，包括判别分析法和特征提取，这些是故障诊断技术的基础。

第 4 章 ~ 第 7 章包括数据驱动过程监控方法，主元分析（Principal Component Analysis, PCA）和部分最小二乘法（Partial Least Squares, PLS）是多变量统计方法，它们扩展了已经应用了几十年的单变量控制图方法。费舍尔判别分析（FDA）是一种基于模式分类学的故障诊断方法。规范变量分析（CVA）是一种用于过程监控的类似于 PCA 和 PLS 的子空间辨识方法。这 4 种方法代表着当前数据驱动过程监控方法的技术发展水平，它们在许多化工和制造业得到了大量的应用。数据驱动方法受欢迎的原因之一就是这些方法不需要基本原理模型，该模型通常造价很高或很费时。由于这个原因，这些方法也是应用于大系统的主流方法。第 8 章 ~ 第 10 章对各种方法在大系统中的应用——田纳西-伊斯曼仿真器进行了比较，从而让读者了解各种方法的优点和弱点，还给出了一些实用的作业题。

第 11 章描述了解析方法，包括参数估计、状态估计和等价关系。虽然不如数据驱动方法在工业中应用得那样普遍，但在基本原理模型

可以得到的情况下，解析方法就适合于用这些模型作过程监控。而且，在大多数工科课程中，正是解析方法与其他控制课程所包含的主题关系最紧密。第 12 章描述了基于知识的方法，包括因果分析、专家系统和模式识别。基于知识的方法特别适用于这些系统，它们因系统的数据不充分而不能采用数据驱动方法，但从系统的因果模型、专家知识或故障症状的举例中可以得出定性的或半定性的模型。数据驱动、解析的和基于知识的方法各有其优势和局限性。将几种技术结合起来用于过程监控，在许多应用中会有很多益处。第 12 章还讨论了各种过程监控技术的结合。

作者感谢在该书写作过程中，国际纸业（International Paper）、杜邦（DuPont）和国家超级计算中心（the National Center for Supercomputing Applications）在过去的 3 年里所给予的资助。

蒋浩天 E.L. 拉塞尔 R.D. 布拉茨
于伊利诺斯州，阿巴那

目 录

译者序

前言

第 1 篇 绪论

第 1 章 概论	2
1.1 过程监控的步骤	3
1.2 过程监控的量度	4
1.3 过程监控的方法	6
1.4 本书概况	9

第 2 篇 背景知识

第 2 章 多变量统计	12
2.1 引言	12
2.2 数据预处理	13
2.3 单变量统计监控	14
2.4 T^2 统计	17
2.5 T^2 统计量的阈值	18
2.6 数据必要条件	20
2.7 作业题	21
第 3 章 模式分类	23
3.1 引言	23
3.2 判别分析	24
3.3 特征提取	26
3.4 作业题	27

第3篇 数据驱动方法

第4章 主元分析法	30
4.1 引言	30
4.2 主元分析	31
4.3 降阶	36
4.4 故障检测	37
4.5 故障识别	40
4.6 故障诊断	43
4.7 动态 PCA	47
4.8 其他基于 PCA 的方法	49
4.9 作业题	50
第5章 费舍尔判别分析法	52
5.1 引言	52
5.2 费舍尔判别分析	52
5.3 降阶	54
5.4 故障检测与诊断	57
5.5 PCA 与 FDA 的比较	59
5.6 动态 FDA	65
5.7 作业题	65
第6章 部分最小二乘法	67
6.1 引言	67
6.2 PLS 算法	68
6.3 降阶和 PLS 预测	73
6.4 故障检测、识别与诊断	74
6.5 PCA 与 PLS 的比较	76
6.6 其他 PLS 方法	78
6.7 作业题	79
第7章 规范变量分析	81
7.1 引言	81
7.2 CVA 定理	83

7.3 CVA 算法	85
7.4 状态空间模型与系统可辨识性	87
7.5 滞后阶次的选择与计算	88
7.6 状态阶次选择与 Akaike 信息判据	90
7.7 子空间算法解释	91
7.8 过程监控统计	92
7.9 作业题	94

第 4 篇 应用

第 8 章 田纳西-伊斯曼过程	98
8.1 引言	98
8.2 过程工艺流程图	98
8.3 过程变量	100
8.4 过程故障	102
8.5 仿真程序	103
8.6 控制结构	103
8.7 作业题	106
第 9 章 应用描述	108
9.1 引言	108
9.2 数据集	108
9.3 采样间隔	109
9.4 样本大小	111
9.5 滞后与阶次选择	112
9.6 故障检测	113
9.7 故障识别	114
9.8 故障诊断	115
第 10 章 结果与讨论	116
10.1 引言	116
10.2 故障 1 的个案研究	116
10.3 故障 4 的个案研究	121
10.4 故障 5 的个案研究	127

10.5 故障 11 的个案研究	131
10.6 故障检测	135
10.7 故障识别	141
10.8 故障诊断	144
10.9 作业题	163

第 5 篇 解析法与基于知识的方法

第 11 章 解析法	168
11.1 引言	168
11.2 故障描述	170
11.3 参数估计	174
11.4 基于观测器的方法	185
11.4.1 全阶状态估计器	186
11.4.2 降阶未知输入观测器	189
11.5 等价关系	191
11.5.1 残差的产生	191
11.5.2 残差的检测特性	195
11.5.3 残差的指标	197
11.5.4 残差的实现	198
11.5.5 观测器和等价关系间的联系	203
11.5.6 残差的分离特性	205
11.5.7 残差的评价	209
11.6 作业题	212
第 12 章 基于知识的方法	217
12.1 引言	217
12.2 因果分析	218
12.2.1 符号定向图	218
12.2.2 症状树模型	221
12.3 专家系统	222
12.3.1 浅知识专家系统	222
12.3.2 深知识专家系统	223

12.3.3 浅知识和深知识专家系统的结合	224
12.3.4 机器学习技术	224
12.3.5 知识的表示	224
12.3.6 推理机	225
12.4 模式识别	226
12.4.1 人工神经网络	226
12.4.2 自组织映射	233
12.5 各种技术的结合	236
12.5.1 神经网络和专家系统	236
12.5.2 模糊逻辑	237
12.5.3 模糊专家系统	238
12.5.4 模糊神经网络	242
12.5.5 模糊符号定向图	243
12.5.6 模糊逻辑和解析法	243
12.5.7 神经网络和解析法	244
12.5.8 数据驱动法、解析法和基于知识的方法	245
12.6 作业题	245
参考文献	248

第 1 篇

绪 论

第 1 章 概 论

在加工业和制造业，人们正在努力生产高质量的产品，降低产品的不合格率，以满足不断增强的、严格的安全和环保规章。过去认为可以接受的过程操作方法现在已不再适用。为了满足更高的标准，现代工业过程包含大量的闭环控制变量。设计的标准过程控制器（PID 控制器、模型预测控制器等）常常通过补偿过程中产生的干扰或变化的影响来维持满意的运行。尽管这些控制器能够补偿许多类型的干扰，但对有些过程的变化，这种控制器就不能恰当地处理。这些变化被称为故障。更准确地说，故障被定义为系统中至少一个特性或变量的一种不允许的偏离^[140]。

工业系统中发生的故障类型包括过程参数的变化、干扰参数的变化、执行器的问题和传感器的问题^[162]。催化剂中毒和热交换器结垢就是过程参数变化的例子。干扰参数的变化可能是过程进料流的浓度或周围温度发生极端变化导致。执行器的问题可能是阀门被卡住，传感器的问题则可能是测量有偏差。为了确保过程运行状况满足给定的性能指标，需要对故障进行检测、诊断和消除。这些任务就与过程监控联系起来了。统计过程控制（SPC）也把这些问题的称为过程监控，但是为了避免与标准的过程控制混淆，本书中提到的方法将称为过程监控方法。

过程监控的目标是通过识别不正常行为来确保过程成功地按计划运行。这些信息不仅保持系统操作员和维护人员不断了解过程的运行状态，而且还帮助这些人员作出适当的补救措施，以消除过程的不正常行为。其结果是，正确的过程监控使停车时间最小化，设备运行的安全性得以改进，生产成本得以减少。由于工业系统已经变得更加高度集成化和复杂化，现代过程中出现的故障就向监控提出了挑战，这些监控问题是不易用单变量控制图（例如施瓦德图，参见 2.3 节）来解决的。单变量控制图在用于多变量过程的故障检测时所表现出的弱

点,导致了大量的研究文献集中于寻找更好的方法来解决过程监控问题。这种研究活动的增加可以用如下事实来说明,即工业系统正在变得更加仪表化,从而产生了大量的可用于过程监控的数据;现代计算机的功能变得越来越强大。从各种不同的运行状态和故障状态下采集的数据的可用性对故障监控而言是至关重要的。现代计算机的存储容量和计算速度使得过程监控算法用于大量数据的运算成为可能。

1.1 过程监控的步骤

过程监控的四个步骤是故障检测、故障识别、故障诊断和过程恢复。这些步骤似乎没有标准的术语,其原因是由于它们随不同的学科而变化。这里采用的是莱奇(Raich)和西纳(Cinar)^[272]给出的术语。故障检测就是确定故障是否发生了。及早进行检测可以对将会出现的问题提出非常有价值的警告,并采取适当措施,从而避免严重的过程颠覆。故障识别就是把那些与诊断故障最有关联的观测变量识别出来。该步骤的目的是把设备操作员和工程师的注意力集中到与故障诊断最相关的子系统上来,以便最有效地消除故障所带来的不良效应。故障诊断就是确定哪一种故障发生了,换句话说,就是确定所看到的故障状态的原因。依色曼(Isermann)^[138]更加明确地将故障诊断定义为,确定故障的类型、位置、量级和时间。故障诊断这一步也是抵抗或消除故障所必需的。过程恢复,也称作干预,就是去除故障的影响,这是使过程监控环闭合所必需的一个步骤(见图1-1)。一旦检测到故障发生了,故障识别、故障诊断以及过程恢复程序就会按照各自的顺序执行。否则就只重复执行故障检测程序。

虽然上述4个步骤可以在一个过程监控方案中实施,但这并不总是必需的。例如不用识别受故障直接影响的变量(故障识别),也可以把故障诊断出来(故障诊断)。此外,也没有必要把全部4个步骤自动化。例如故障识别自动化这一步可用于帮助设备操作员和工程师们诊断故障(故障诊断),恢复设备正常运行。过程监控的目标通常是把设备操作员和工程师有效地溶入到过程监控环路中,而不是使整个监控系统自动化。

当故障发生后,常常可以通过重新配置、修改过程或重新调整控制器,使正常运行得以恢复。一旦把故障正确地诊断出来,克服故障的最优方法可能还不明确。一种可行的方法就是把标准控制器作重新调整。现在已经研究出多种评估控制器性能的方法^[66,111,162,274,295,312],这些方法可以用来确定过程中的哪些控制器需要作重新调整,以恢复满意的性能。在传感器发生问题的情况下,可以采用传感器重构技术来恢复正常运行^[77]。虽然过程恢复是过程监控环路中的一个重要且必要的部件,但本书并不把重点放在过程恢复上。

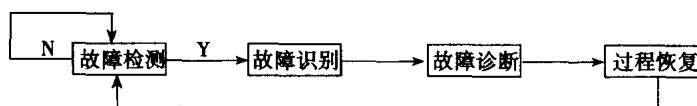


图 1-1 过程监控环示意图

1.2 过程监控的量度

一个典型的过程监控系统通常包括一个或多个量度,它们是从系统论、模式分类理论、信息论和系统论发展而来的。这些量度在某种程度上代表了过程的状态或行为。现在的想法是,把从过程中采集的在线数据转换成几个有意义的量度,从而帮助操作员确定设备运行的状况,必要时,还能帮助诊断故障。就故障诊断而言,可以给某些量度施加一些界值,一旦计算出来的某个量度超出了这些界值,就认为检测到了一种故障。这样,量度就能定义正常的过程行为,相应地,也可以定义失控的状态。通过求解能准确地表征各个观测变量行为的量度,就可以把一个变量的量度值与其他变量的量度值进行对比,以确定受故障影响最大的变量。通过推导和比较能准确表示不同的过程故障的量度,也可以把故障诊断出来。

过程监控的目标就是要推导出对所有可能的故障都具有最大灵敏度和鲁棒性的量度。故障固然可以用许多方法证实,但是仅用少数几个量度就想把过程中的所有故障检测和诊断出来是不大可能的。因为

每个量度主要表征一种形式的故障，一个量度可能对某些故障具有较高的灵敏度，而对与其他量度相关联的故障就不灵敏了。这就促使人们在熟悉每个量度用于确定某一特定过程或可能发生的故障的情况下，去使用多重过程监控量度。

过程监控量度可以按其与三种方法中的一种或多种相关联的情况来分类，即数据驱动的、解析的和基于知识的方法。数据驱动量度是直接由过程数据中导出的。现代工业系统，无论是整个工厂还是单独一台造纸机，都是大系统。由于典型的现代过程都有大量的仪器仪表，大系统会产生大量的数据。虽然可以从这些过程中获得许多信息，但是要从观测的数据中实现对过程运行情况的评估，已超出了操作员或工程师的能力范围。数据驱动技术的优势在于它们能够将高维的数据转换成低维，并从中获取重要的信息。通过给过程操作员或工程师计算出一些有意义的统计数字，就可以大大地改善大系统的过程监控系统。数据驱动量度的主要缺点是，它们的效果高度依赖于过程数据的数量和质量。

解析法不像数据驱动方法，它使用根据基本原理构造的数学模型。解析法可用于信息丰富的系统，这些系统有满意的模型和足够多的传感器可以利用。大多数解析量度都是基于参数估计、基于观测器设计和等价关系的。解析法大多应用在输入、输出和状态数目相对较小的系统。将解析法应用于大系统（即包括大量的输入、输出或状态的系统）是有困难的，其原因在于这种方法需要使其奏效的详细模型^[73,141,360]。即使知道了与多变量系统关联的全部交叉耦合关系，要获得大系统的详细模型也是很昂贵的^[137]。解析法的主要优点是，它能够把对过程的物理认识同过程监控系统结合起来。换句话说，当有详细的解析模型可以利用时，解析量度就会大大地好于数据驱动量度。

基于知识的方法使用定性的模型来获得过程监控的量度。基于知识的方法特别适合于不能获取详细数学模型的系统。大多数基于知识的量度都是基于因果分析、专家系统和模式识别的。像解析法一样，基于知识的方法大多应用到输入、输出和状态数相对较小的系统中。要构造一个大系统的故障模型需要付出巨大的努力^[8,360]。人们正在