

# 软测量技术 原理及应用

● 李海青 黄志尧等 编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心



# 软测量技术原理及应用

李海青 黄志尧等 编著

化 工 工 业 出 版 社  
工业装备与信息工程出版中心  
·北 京·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

软测量技术原理及应用/李海青 黄志尧等编著. —北京: 化学工业出版社, 2000.9  
ISBN 7-5025-2907-1

I. 软… II. 李… 黄… III. 高技术-应用-测量 IV. P2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 31121 号

---

**软测量技术原理及应用**

李海青 黄志尧等 编著

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 马燕珠

封面设计: 郑小红

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 9¼ 字数 221 千字

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—3000

ISBN 7-5025-2907-1/TP·271

定 价: 20.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

软测量是一门有着广阔发展前景的新兴工业技术。随着控制理论和计算机技术的发展,对其研究已经历了从线性到非线性、静态到动态、无校正功能到有校正功能的过程,已发展成为过程检测技术与仪表研究的主要方向之一。

软测量是一种利用较易在线测量的辅助变量和离线分析信息去估计不可测或难测变量的方法。软测量通常是在成熟的硬件传感器基础上,以计算机技术为核心,通过软测量模型运算处理而完成的。以软测量技术为基础,实现软测量功能的实体可称为软仪表,具有功能强、通用性好、灵活性强、性能价格比高、适用范围宽等独特优点。

软测量技术及软测量仪表发展的重要意义在于:

① 能够测量目前由于技术或经济的原因无法或难以用传感器直接检测而又十分重要的过程参数,如精馏塔产品组分浓度、化学反应器中反应物浓度及反应速率、生物发酵罐中的生物量参数、多相流系统中的特殊参数等;

② 能够综合运用多个可测信息对被测对象作出状态估计、诊断和趋势分析,以适应现代工业发展对被测对象特性日益提高的测量要求;

③ 能够在线获取被测对象微观的二维/三维时空分布信息,以满足许多复杂工业过程中场参数测量的需要;

④ 能够对测量系统进行误差补偿处理和故障诊断,从而提高测量精度和可靠性;

⑤ 能够为测量系统动态校准和动态性能改善提供一种有效手段;

⑥ 能够为一些由于测量障碍,目前停留在理论探讨而不能工业实用化的控制策略和方法,提供一条有效的解决途径。

90年代以来,有关软测量技术方面的研究十分活跃,在理论研究和实际应用方面均取得了迅速发展,显示了良好的工业应用前景。但正如国际著名专家 T.J. Mcavoy 在其 1992 年提交 IFAC 的重要报告中所指出的:软测量具有广阔的应用前景,但至今尚缺乏系统的开发思路。目前国内外有关软测量技术的资料大都散布于多种期刊和论文集中,少有专题书册出版。为了促进软测量在理论研究和实践中不断完善和发展,本书参考国内外近期研究进展,结合近十年来我们在国家自然科学基金项目和原国家教委博士点基金项目资助下,所做过的一些软测量技术方面的研究工作,着重介绍工业应用实例,并适当系统化地加以总结,撰写成此书,作为抛砖引玉的铺路石,奉献给读者。

本书部分研究内容由国家自然科学基金重大项目(59995460—5)和国家青年自然科学基金项目(29706008)资助。本书由科研课题组群体编写:李海青(前言),黄志尧(第1章、第2章),史志才(第3章、第5章),晏颖(第4章),赵昀(第6章),赵付涛(第7章),王保良(第8章),黄志尧、郑建英(第9章),陈珙、冀海峰、钟兴福、吴贤国(第10章)。全书由李海青、黄志尧校阅整理。

由于软测量技术是初次编写成书,加上作者水平有限,书中一定存在不少错漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1999年12月于浙江大学

## 内 容 提 要

本书介绍过程检测技术及仪表研究的主要发展趋势之一——软测量技术的基本概念、方法及应用实例,包括软测量概述、基于工艺机理分析、回归分析、状态估计、模式识别、人工神经网络、模糊数学、过程层析成像技术、相关分析技术以及现代非线性信息处理技术(小波分析技术和分形技术)的软测量方法。本书可供从事控制科学与工程、工业自动化、检测技术与自动化装置领域学习和工作的高年级本科生、研究生及有关的科技人员参考。

# 目 录

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 软测量概述</b> .....                  | 1  |
| 1.1 软仪表构造与软测量技术分类 .....                   | 2  |
| 1.1.1 基于工艺机理分析的软测量 .....                  | 3  |
| 1.1.2 基于回归分析的软测量 .....                    | 3  |
| 1.1.3 基于状态估计的软测量 .....                    | 3  |
| 1.1.4 基于模式识别的软测量 .....                    | 4  |
| 1.1.5 基于人工神经网络的软测量 .....                  | 4  |
| 1.1.6 基于模糊数学的软测量 .....                    | 4  |
| 1.1.7 基于过程层析成像的软测量 .....                  | 4  |
| 1.1.8 基于相关分析的软测量 .....                    | 5  |
| 1.1.9 基于现代非线性信息处理技术的软测量 .....             | 5  |
| 1.2 影响软仪表性能的因素 .....                      | 5  |
| 1.2.1 辅助变量的选择 .....                       | 5  |
| 1.2.2 测量数据的处理 .....                       | 6  |
| 1.2.3 软仪表的在线校正 .....                      | 7  |
| 1.3 软测量技术的应用 .....                        | 7  |
| 1.4 展望 .....                              | 8  |
| 参考文献 .....                                | 9  |
| <b>第 2 章 基于工艺机理分析的软测量方法</b> .....         | 11 |
| 2.1 流化催化裂化 (FCC) 装置中的软测量 .....            | 11 |
| 2.1.1 反应再生系统催化剂循环量和焦炭的氢含量的软测量 .....       | 11 |
| 2.1.2 吸收稳定系统中汽油饱和蒸气压的软测量 .....            | 14 |
| 2.2 气力输送固相流量的软测量 .....                    | 17 |
| 2.2.1 差压-速度法 .....                        | 19 |
| 2.2.2 差压-浓度法 .....                        | 19 |
| 参考文献 .....                                | 21 |
| <b>第 3 章 基于回归分析的软测量方法</b> .....           | 22 |
| 3.1 回归分析 .....                            | 22 |
| 3.1.1 线性回归 .....                          | 22 |
| 3.1.2 回归函数系数的估计 .....                     | 23 |
| 3.1.3 回归系数的显著性检验 .....                    | 24 |
| 3.1.4 线性回归分析中自变量的选择 .....                 | 24 |
| 3.2 回归分析的应用 .....                         | 24 |
| 3.2.1 喷射塔中 $\text{SO}_2$ 吸收传质系数的软测量 ..... | 25 |
| 3.2.2 筛板精馏塔点效率的软测量 .....                  | 27 |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 参考文献 .....                           | 28        |
| <b>第4章 基于状态估计和辨识的软测量方法 .....</b>     | <b>30</b> |
| 4.1 状态估计和辨识概述 .....                  | 30        |
| 4.2 基于状态估计的软测量 .....                 | 31        |
| 4.2.1 基本原理 .....                     | 31        |
| 4.2.2 输送管道泄漏定位及诊断 .....              | 34        |
| 4.2.3 转炉钢水的含碳量估计 .....               | 37        |
| 4.3 基于参数辨识的软测量 .....                 | 39        |
| 4.3.1 基本原理 .....                     | 39        |
| 4.3.2 铝电解生产过程阳极效应的判定 .....           | 40        |
| 4.3.3 管式热交换器故障检测 .....               | 40        |
| 4.3.4 低定量纸张水分的软测量 .....              | 42        |
| 参考文献 .....                           | 44        |
| <b>第5章 基于模式识别的软测量方法 .....</b>        | <b>45</b> |
| 5.1 判别分析法 .....                      | 45        |
| 5.1.1 判别分析的基本概念 .....                | 45        |
| 5.1.2 影响判别函数判决效果的因素 .....            | 46        |
| 5.1.3 工业过程测量数据中过失误差的侦破 .....         | 47        |
| 5.1.4 间歇精馏塔塔板效率的在线软测量 .....          | 49        |
| 5.2 聚类分析 .....                       | 50        |
| 5.2.1 样本间的相似性度量和聚类准则函数 .....         | 51        |
| 5.2.2 动态聚类算法 .....                   | 52        |
| 5.2.3 运用模糊聚类分析评价石油产品质量 .....         | 53        |
| 5.2.4 流化床内颗粒尺寸的在线软测量 .....           | 56        |
| 参考文献 .....                           | 58        |
| <b>第6章 基于人工神经网络的软测量方法 .....</b>      | <b>59</b> |
| 6.1 基于神经网络的软测量技术概述 .....             | 59        |
| 6.2 神经网络与软测量建模 .....                 | 60        |
| 6.3 基于神经网络的软测量通用模型 .....             | 63        |
| 6.4 基于神经网络的软测量技术应用实例 .....           | 64        |
| 6.4.1 流化催化裂化单元中粗汽油干点、轻柴油倾点的软测量 ..... | 64        |
| 6.4.2 两相流流量及浓度的软测量 .....             | 66        |
| 6.4.3 生化反应过程中的软测量建模 .....            | 69        |
| 6.4.4 化学药品的分类识别 .....                | 71        |
| 参考文献 .....                           | 72        |
| <b>第7章 基于模糊数学的软测量方法 .....</b>        | <b>74</b> |
| 7.1 模糊检测技术概述 .....                   | 74        |
| 7.1.1 模糊集合与模糊推理 .....                | 74        |
| 7.1.2 模糊检测系统的基本结构 .....              | 75        |
| 7.2 模糊检测技术应用研究实例 .....               | 76        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 7.2.1 克服过程大纯滞后的模糊检测器·····             | 76         |
| 7.2.2 气体成分模糊识别·····                   | 80         |
| 7.2.3 精馏塔产品纯度模糊测量·····                | 81         |
| 参考文献·····                             | 83         |
| <b>第8章 基于过程层析成像技术的软测量方法</b> ·····     | <b>84</b>  |
| 8.1 过程层析成像技术概述·····                   | 84         |
| 8.1.1 过程层析成像技术的起源及发展简介·····           | 84         |
| 8.1.2 PT 技术基本原理·····                  | 85         |
| 8.2 电容层析成像技术的应用·····                  | 86         |
| 8.2.1 电容层析成像技术简介·····                 | 86         |
| 8.2.2 模拟井油气两相流成像·····                 | 87         |
| 8.2.3 流化床流型成像·····                    | 91         |
| 8.2.4 发动机火焰点燃过程成像·····                | 94         |
| 8.3 电阻层析成像技术的应用·····                  | 95         |
| 8.3.1 电阻层析成像技术简介·····                 | 95         |
| 8.3.2 搅拌反应的混合过程成像·····                | 96         |
| 参考文献·····                             | 98         |
| <b>第9章 基于相关分析的软测量方法</b> ·····         | <b>100</b> |
| 9.1 相关流量软测量·····                      | 100        |
| 9.1.1 相关流量软测量系统原理·····                | 100        |
| 9.1.2 相关流量软测量系统算法·····                | 102        |
| 9.1.3 纸浆光学相关流量计·····                  | 104        |
| 9.2 管道泄漏诊断·····                       | 105        |
| 9.2.1 互相关法·····                       | 106        |
| 9.2.2 波敏法·····                        | 107        |
| 参考文献·····                             | 108        |
| <b>第10章 基于现代非线性信息处理技术的软测量方法</b> ····· | <b>110</b> |
| 10.1 小波分析技术·····                      | 110        |
| 10.1.1 小波分析简介·····                    | 110        |
| 10.1.2 多分辨率分析·····                    | 112        |
| 10.1.3 小波在气液两相流流型辨识中的应用·····          | 114        |
| 10.1.4 小波在流化床和鼓泡塔流型辨识中的应用·····        | 118        |
| 10.1.5 小波在湍流中的应用·····                 | 120        |
| 10.2 混沌、分形技术·····                     | 123        |
| 10.2.1 混沌和分形简介·····                   | 123        |
| 10.2.2 混沌振子在微弱信号检测中的应用·····           | 127        |
| 10.2.3 混沌、分形在流态化研究中的应用·····           | 130        |
| 10.2.4 混沌、分形在多相流流型辨识中的应用·····         | 134        |
| 参考文献·····                             | 136        |

## 第1章 软测量概述

随着现代工业过程对控制、计量、节能增效和运行可靠性等要求的不断提高,各种测量要求日益增多。现代过程检测的内涵和外延较之以往均有很大的深化和拓展。一方面,仅获取流量、温度、压力和液位等常规过程参数的测量信息已不能满足工艺操作和控制的要求,需要获取诸如成分、物性等与过程操作和控制密切相关的检测参数的测量信息。同时对于复杂的大型工业过程,还需要获知反映过程二维/三维的时空分布信息(例如化学反应器内的介质浓度和速度的局部分布等)。另一方面,仪表测量的精度要求越来越高,测量从静态或稳态向动态测量发展,在许多应用场合还需要综合运用所获得的各种过程测量信息,才能实现有效的过程控制、对生产过程或测量系统进行故障诊断、状态监测等<sup>[1~4]</sup>。

由于工业过程生产系统涉及物理、化学、生化反应,物质及能量的转换和传递,系统的复杂性、不确定性导致了过程参数检测的困难,虽然过程检测已有长足的进步,但目前实际工业过程中仍存在许多无法或难以直接用传感器或过程检测仪表进行测量的重要过程参数,例如炼油工业中的流化催化裂化(Fluid Catalytic Cracking,简记为FCC)装置,众所周知它是一个极其重要的操作单元,然而该装置工艺过程复杂,目前仍存在诸如粗汽油干点、轻柴油凝点、催化剂循环量、烧焦比、剂油比、产率分布以及裂化反应热等难以在线测量或测量滞后大而难以进行有效控制的关键过程参数<sup>[5]</sup>。

无论是过程控制中先进过程控制算法和策略的具体实施,还是过程优化、生产协调、故障诊断、状态监测等,其工程实现的前提是能有效地获取反映过程的信息。过程检测技术发展水平的限制,导致了許多先进的控制算法和策略目前只能停留在理论探讨上,难以工业实际应用,许多工业生产系统也无法依靠故障诊断和状态监测等措施来提高系统运行的安全性和可靠性。

一般解决工业过程的测量要求有两条途径:一是沿袭传统的检测技术发展思路,通过研制新型的过程测量仪表,以硬件形式实现过程参数的直接在线测量;另一就是采用间接测量的思路,利用易于获取的其他测量信息,通过计算来实现被检测量的估计,近年来在过程控制和检测领域涌现出的一种新技术——软测量技术(Soft-Sensing Technique)正是这一思想的集中体现。

软测量技术也称为软仪表技术(Soft Sensor Technique)。概括地讲,所谓软测量技术就是利用易测过程变量(常称为辅助变量或二次变量 Secondary Variable,例如工业过程中容易获取的压力、温度等过程参数),依据这些易测过程变量与难以直接测量的待测过程变量(常称为主导变量 Primary Variable,例如炼油厂精馏塔中的各种产品组分浓度,化学反应器的反应物浓度和反应速率,生物发酵罐中的生物参数,化工、石油、冶金、能源等领域广泛存在的两相流和多相流参数等)之间的数学关系(软测量模型),通过各种数学计算和估计方法,从而实现对待测过程变量的测量<sup>[1~12]</sup>。

传统过程检测仪表的研制和应用过程涉及传感器传感机理研究、硬件仪表检测电路设计、仪表制造和定型、仪表的使用和维护以及成本核算等各个环节。这几个环节是相互影响和制约的,例如若无合适的传感机理作为测量仪表的理论基础,则仪表的研制是天方夜谭,

若一种仪表虽研制成功但成本过高,则其工程应用也将是有限的。同时该类仪表的针对性非常明确,测量对象、范围和功能均具有一定的局限性,且难以适应被测对象的多种变化。而采用软测量技术构成的软仪表(Soft Sensor),是以目前可有效获取的测量信息为基础,其核心是用计算机语言编制的各种软件,具有智能性,可方便地根据被测对象特性的变化进行修正和改进,因此软仪表在可实现性、通用性、灵活性和成本等各方面均具有无可比拟的优势,其突出的优点和巨大的工业应用价值不言而喻。

应该讲,软测量技术的基本思想早就被潜移默化地得到了应用<sup>[13~19]</sup>。工程技术人员很早就采用体积式流量计(例如孔板流量计)结合温度、压力等补偿信号,通过计算来实现气体质量流量的在线测量,而70年代就已提出的推断控制(Inferential Control)策略至今仍视为软测量技术在过程控制中应用的一个范例<sup>[20~25]</sup>。然而软测量技术作为一个概括性的科学术语被提出是始于80年代中后期,至此它迎来了一个发展的黄金时期,并且在世界范围内掀起了一股软测量技术研究的热潮。1992年国际过程控制专家T. J. Macvoy在著名学术刊物Automatica上发表了一篇名为“Contemplative Stance for Chemical Process Control”的IFAC报告<sup>[1]</sup>,明确指出了软测量技术将是今后过程控制的主要发展方向之一,对软测量技术研究起了重要的促进作用。

经过多年的发展,目前已提出了不少构造软仪表的方法,并对影响软仪表性能的因素以及软仪表的在线校正等方面也进行了较为深入的研究。软测量技术在许多实际工业装置上也得到了成功的应用,并且其应用范围不断地在拓展。早期的软测量技术主要用于控制变量或扰动不可测的场合,其目的是实现工业过程的复杂(高级)控制,而现今该技术已渗透到需要实现难测参数的在线测量的各个领域。最新的研究进展表明,软测量技术已成为过程控制和过程检测领域的一大研究热点和主要发展趋势之一<sup>[1~19]</sup>。

### 1.1 软仪表构造与软测量技术分类<sup>[6~12]</sup>

软测量技术是依据某种最优化准则,利用由辅助变量构成的可测信息,通过软件计算实现对主导变量的测量,软仪表的核心是表征辅助变量和主导变量之间的数学关系的软测量模型,如图1.1所示,因此构造软仪表的本质就是如何建立软测量模型,即一个数学建模问题。相应地,建立软测量模型的过程也就是软仪表的构造过程。

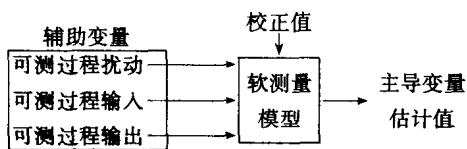


图 1.1 软测量基本框架

需要指出的是,由于软测量模型注重的是通过辅助变量来获得对主导变量的最佳估计,而不是强调过程各输入输出变量彼此间的关系,因此它不同于一般意义上的数学模型。软测量模型本质上是要完成由辅助变量构成的可测信息集 $\theta$ 到主导变量估计 $y$ 的映射,用数学公式表示即为

$$\hat{y} = f(\theta)$$

软测量技术的分类一般都是依据软测量模型的建立方法。建模的方法多种多样,且各种方法互有交叉,目前又有相互融合的趋势,因此很难有妥当而全面的分类方法。在此暂且将软测量技术分为机理建模、回归分析、状态估计、模式识别、人工神经网络、模糊数学、过程层析成像、相关分析和现代非线性信息处理技术等九种。相对而言,前六种软测量技术的研究较为深入,在过程控制和检测中已有许多成功的应用,后三种软测量技术限于技术发展水平,在过程控制中目前还应用较少。

### 1.1.1 基于工艺机理分析的软测量<sup>[6~12]</sup>

基于工艺机理分析的软测量主要是运用化学反应动力学、物料平衡、能量平衡等原理,通过对过程对象的机理分析,找出不可测主导变量与可测辅助变量之间的关系(建立机理模型),从而实现某一参数的软测量。

对于工艺机理较为清楚的工艺过程,该方法能构造出性能较好的软仪表。但是对于机理研究不充分、尚不完全清楚的复杂工业过程,难以建立合适的机理模型。此时该方法就需要与其他参数估计方法相结合才能构造软仪表。

这种软测量方法是工程中常用的方法,其特点是简单,工程背景清晰,便于实际应用,但应用效果依赖于对工艺机理的了解程度,因为这种软测量方法是建立在对工艺过程机理深刻认识的基础上的,建模的难度较大。

### 1.1.2 基于回归分析的软测量<sup>[6~10]</sup>

经典的回归分析是一种建模的基本方法,应用范围相当广泛。以最小二乘原理为基础的一元和多元线性回归技术目前已相当成熟,常用于线性模型的拟和。

对于辅助变量较少的情况,一般采用多元线性回归中的逐步回归技术可获得较好的软测量模型。对于辅助变量较多的情况,通常要借助机理分析,首先获得模型各变量组合的大致框架,然后再采用逐步回归方法获得软测量模型。为简化模型,也可采用主元回归分析法(Principal Component Regression, 简记 PCR)和部分最小二乘回归法(Partial-Least-Squares Regression, 简记 PLSR)等方法。从应用情况看,对于线性系统,采用 PCR 和 PLSR 的效果差不多,对于非线性系统则采用 PLSR 的效果较好。

总的来讲,基于回归分析法的软测量,其特点是简单实用,但需要大量的样本(数据),对测量误差较为敏感。

### 1.1.3 基于状态估计的软测量<sup>[6~12]</sup>

假定已知系统对象的状态空间模型为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ev$$

$$y = Cx$$

$$\theta = C_{\theta}x + w$$

式中  $x$ ——过程的状态变量;

$v, w$ ——分别表示白噪声;

$y, \theta$ ——分别表示过程的主导变量和辅助变量。

如果系统主导变量作为系统的状态变量关于辅助变量  $\theta$  是完全可观的,那么软测量问题就转化为典型的状态观测和状态估计问题。采用 Kalman 滤波器和 Luenberger 观测器是解决问题的有效方法。目前这两种方法均已从线性系统推广到了非线性系统, Kalman 滤波器适用于白色或静态有色噪声的过程,而 Luenberger 观测器则适用于观测值无噪声且所有过程输入均已知的情况。

基于状态估计的软仪表由于可以反映主导变量和辅助变量之间的动态关系,因此有利于处理各变量间动态特性的差异和系统滞后等情况。该种软测量方法存在的缺点在于对于复杂的工业过程,常常难以建立系统的状态空间模型,这在一定程度上限制了该方法的应用。同时,在许多工业生产过程中,常常会出现持续缓慢变化的不可测的扰动,在这种情况下该种软仪表可能会导致显著的误差。

#### 1.1.4 基于模式识别的软测量<sup>[7,12,26]</sup>

该种软测量方法是采用模式识别的方法对工业过程的操作数据进行处理,从中提取系统的特征,构成以模式描述分类为基础的模式识别模型。

基于模式识别方法建立的软测量模型与传统的数学模型不同,它是一种以系统的输入、输出数据为基础,通过对系统特征提取而构成的模式描述式模型。该方法的优势在于它适用于缺乏系统先验知识的场合,可利用日常操作数据来实现软测量建模。在实际应用中,该种软测量方法常常和人工神经网络以及模糊技术结合在一起。

#### 1.1.5 基于人工神经网络的软测量<sup>[6~12,27~32]</sup>

基于人工神经网络(Artificial Neural Network, 简记 ANN)的软测量是近年来研究最多、发展很快和应用范围很广泛的一种软测量技术。由于人工神经网络具有自学习、联想记忆、自适应和非线性逼近等功能,基于人工神经网络的软测量可在不具备对象的先验知识的条件下,根据对象的输入输出数据直接建模(将辅助变量作为人工神经网络的输入,而主导变量则作为网络的输出,通过网络的学习来解决不可测变量的软测量问题),模型的在线校正能力强,并能适用于高度非线性和严重不确定性系统,因此它为解决复杂系统过程参数的软测量问题提供了一条有效途径。

采用人工神经网络进行软测量建模有两种形式:一种是利用人工神经网络直接建模,用网络来代替常规的数学模型描述辅助变量和主导变量间的关系,完成由可测信息空间到主导变量的映射,如图 1.2 (a) 所示;另一种是与常规模型相结合,用人工神经网络来估计常规模型的模型参数,进而实现软测量,如图 1.2 (b) 所示。

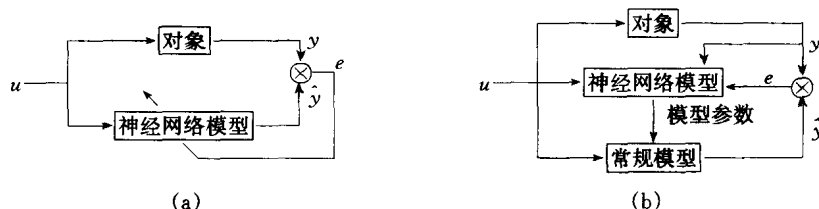


图 1.2 基于神经网络的软测量建模

需要指出的是人工神经网络的种种优点,使得基于人工神经网络的软测量是目前倍受关注的热点,具有巨大的潜力和工业应用价值,但该种软测量技术不是万能的。在实际应用中,网络学习训练样本的数量和质量、学习算法、网络的拓扑结构和类型等的选择对所构成的软仪表的性能都有重大影响。

#### 1.1.6 基于模糊数学的软测量<sup>[7,10,12,33]</sup>

模糊数学模仿人脑逻辑思维特点,是处理复杂系统的一种有效手段,在过程软测量中也得到了大量应用。基于模糊数学的软测量所建立的相应模型是一种知识性模型。该种软测量方法特别适合应用于复杂工业过程中被测对象呈现亦此亦彼的不确定性,难以用常规数学定量描述的场合。实际应用中常将模糊技术和其他人工智能技术相结合,例如模糊数学和人工神经网络相结合构成模糊神经网络,将模糊数学和模式识别相结合构成模糊模式识别,这样可互相取长补短以提高软仪表的效能。

#### 1.1.7 基于过程层析成像的软测量<sup>[15,16,34~37]</sup>

基于过程层析成像(Process Tomography, 简记 PT)的软测量与其他软测量技术不同的是,它是一种以医学层析成像(Computerized Tomography, 简记 CT)技术为基础的可

在线获取过程参数二维或三维的实时分布信息的先进检测技术，即一般软测量技术所获取的大多是关于某一变量的宏观信息，而采用该技术可获取关于该变量微观的时空分布信息。

国内外对过程层析成像的研究始于 80 年代中后期，目前在解决两相流/多相流系统参数（例如气液或气固两相管流的流型判别、分相流量的测量，流化床反应器的空隙率及其分布的检测等）测量这一检测难题上已取得了不少进展，是现代过程检测技术领域中的一个重要的研究方向。由于技术发展水平的制约，该种软测量技术目前离工业实用化还有一定距离，在过程控制中的直接应用还不多。

#### 1.1.8 基于相关分析的软测量<sup>[15,16,34,38~41]</sup>

基于相关分析的软测量技术是以随机过程中的相关分析理论为基础，利用两个或多个可测随机信号间的相关特性来实现某一参数的在线测量。

该种软测量方法采用的具体实现方法大多是互相关分析方法，即利用各辅助变量（随机信号）间的互相关函数特性来进行软测量。目前这种方法主要应用于难测流体（即采用常规测量仪表难以进行有效测量的流体）流速或流量的在线测量和故障诊断（例如流体输送管道泄漏的检测和定位）等。

#### 1.1.9 基于现代非线性信息处理技术的软测量<sup>[15,16,42~46]</sup>

基于现代非线性处理技术的软测量是利用易测过程信息（辅助变量，它通常是一种随机信号），采用先进的信息处理技术，通过对所获信息的分析处理提取信号特征量，从而实现某一参数的在线检测或过程的状态识别。

这种软测量技术的基本思想与基于相关分析的软测量技术一致，都是通过信号处理来解决软测量问题，所不同的是具体信息处理方法不同。该种软测量技术的信息处理方法大多是各种先进的非线性信息处理技术，例如小波分析、混沌和分形技术等，因此能适用于常规的信号处理手段难以适应的复杂工业系统。

相对而言，基于现代非线性信息处理技术的软测量的发展较晚，研究也还比较分散。该种软测量技术目前一般主要应用于系统的故障诊断、状态检测和过失误差侦破等，并常常和人工神经网络或模糊数学等人工智能技术相结合。

## 1.2 影响软仪表性能的因素

### 1.2.1 辅助变量的选择<sup>[6~12,20~25]</sup>

辅助变量的选择包括变量的类型、数目和测点位置。这三个方面是相互关联的，并由过程特性所决定，同时在实际应用中还应考虑经济性、可靠性、可行性以及维护性等额外因素的制约。

#### (1) 变量类型的选择

辅助变量的选择要基于对过程的机理分析和实际工况的了解。有关文献建议辅助变量的选择应符合如下若干原则<sup>[9,12,20~25]</sup>：

- ① 过程适用性，工程上易于在线获取并有一定的测量精度；
- ② 灵敏性，对过程输出或不可测扰动能作出快速反应；
- ③ 特异性，对过程输出或不可测扰动之外的干扰不敏感；
- ④ 准确性，构成的软测量仪表应能够满足精度要求；
- ⑤ 鲁棒性，对模型误差不敏感等。

辅助变量类型的选择范围是过程的可测变量集，软测量中使用最广泛的是与主导变量动

态特性相近、关系紧密的可测参数。由于对某一具体的对象而言，其可测参数的数量毕竟不会太多，因此实际应用中辅助变量的选择范围仍是较为有限的。

### (2) 变量数目的选择

辅助变量的个数的下限值为被估计主导变量的个数，但直接使用过多辅助变量会出现过参数化 (Overparameterization) 问题，其最佳数目的选择与过程的自由度、测量噪声以及模型的不确定性等有关。至于如何选取最佳个数仍是一个有待研究的问题，至今尚无较为统一的结论。一般建议从系统的自由度出发，先确定辅助变量的最小个数，再结合实际过程的特点适当增加，以便更好地处理动态特性等问题。

### (3) 检测点位置的选择

对于许多工业过程，与各辅助变量相对应的检测点位置的选择是相当重要的。典型的例子就是精馏塔，因为精馏塔可供选择的检测点很多，而每个检测点所能发挥的作用则各不相同。一般情况下，辅助变量的数目和位置常常是同时确定的，用于选择变量数目的准则往往也被应用于检测点位置的选择。

已有基于 SSV (Structured Singular Value) 理论进行精馏塔和化学反应器检测点位置的选择的应用研究报告。根据投影误差最小的原则，采用试差法可实现对精馏塔温度检测点位置的选择，但该法难以适用于大型精馏塔。奇异值分解 (Singular Value Decomposition, 简记 SVD) 原理也是一种精馏塔检测点位置选择的方法，该方法准确性较高，并且能适应操作点的变化，但过于繁琐。

#### 1.2.2 测量数据的处理<sup>[6~12, 47~50]</sup>

软仪表是根据过程测量数据经过数值计算从而实现软测量的，其性能在很大程度上依赖于所获过程测量数据的准确性和有效性，因此对测量数据的处理是软测量技术实际应用中的一个重要方面。

测量数据的处理包括测量误差处理和测量数据变换两部分。

##### (1) 测量误差处理

在实际应用中，过程数据是来自现场的，受测量仪表精度、可靠性和现场测量环境等因素的影响，不可避免地要带有各种各样的测量误差，采用低精度或失效的测量数据可能导致软仪表测量性能的大幅度下降，严重时甚至导致软测量的失败，因此对测量数据的误差处理对保证软仪表正常可靠运行非常重要。

测量数据的误差可分为随机误差和过失误差 (Gross Errors) 两大类。

随机误差是受随机因素 (例如操作过程的微小扰动和测量信号的噪声等) 的影响，一般不可避免，但符合一定的统计规律，因此可采用数字滤波方法来消除，例如算术平均滤波、中值滤波和阻尼滤波等。随着系统对精度要求的不断提高，近年来又提出了数据协调 (Data Reconciliation, 也称为数据一致性) 处理技术，其主要的实现方法有主元分析法和正交分解法等。

过失误差包括常规测量仪表的偏差和故障 (例如堵塞、校准不正确、零点漂移甚至仪表失灵等)，以及不完全或不正确的过程模型 (泄漏、热损失等不确定因素影响)。在实际过程中，虽然过失误差出现的几率很小，但将会严重恶化测量数据的品质，破坏数据的统计特性，导致软测量甚至整个系统优化控制的失败，因此过失误差侦破、剔除和校正是误差处理的首要任务。常用的方法有统计假设检验法 (如整体检验法、节点检验法、测量数据检验法等)、广义似然比法、贝叶斯法等。统计假设检验法主要应用于测量过程中过失误差的侦破；

广义似然比法能处理模型化过失误差,且可应用于非稳态过程;而贝叶斯法则提供了利用过去的错误数据来改进过失误差侦破的手段。同时基于人工神经网络进行过失误差的侦破近年来也越来越受到重视。然而上述种种方法在理论和实际应用之间目前还存在一定距离,有待今后进一步深入研究。对于特别重要的参数,如采用硬件冗余方法(如采用相同或不不同的多台检测仪表同时对某一重要参数进行测量),可提高系统的安全性和可靠性。

## (2) 测量数据变换

测量数据变换不仅影响模型的精度和非线性映射能力,而且对数值算法的运行效果也有重要作用。测量数据的变换包括标度、转换和权函数三个方面。

实际过程测量数据可能有着不同的工程单位,各变量的大小间在数值上也可能相差几个数量级,直接使用原始测量数据进行计算可能丢失信息和引起数值计算的不稳定,因此需要采用合适的因子对数据进行标度,以改善算法的精度和计算稳定性。转换包含对数据的直接转换和寻找新的变量替换原变量两方面,通过对数据的转换,可有效地降低非线性特性。而权函数则可实现对变量动态特性的补偿。

### 1.2.3 软仪表的在线校正

工业实际装置在运行过程中,随着操作条件的变化,其过程对象特性和工作点不可避免地要发生变化和漂移,因此在软仪表的应用过程中,必须对软测量模型进行在线校正才能适应新的工况。

软测量模型的在线校正包括模型结构的优化和模型参数的修正两方面。通常对软仪表的在线校正仅修正模型的参数,具体的方法有自适应法、增量法和多时标法等。对模型结构的优化(修正)较为复杂,它需要大量的样本数据和较长的时间。为解决软仪表模型结构在线校正和实时性两方面的矛盾,已提出基于短期学习和长期学习思想的校正方法,人工神经网络技术在该领域大有可为。此外还有人提出了分布式神经网络局部学习的方法,以减轻点校正对全局的影响。

软测量模型校正需考虑校正数据的获取问题以及校正样本数据与过程数据之间在时序上的匹配等问题。在可以方便地获取较多校正数据的情况下,模型的校正一般不会有太大的困难。但在校正数据难以获取的情况下(例如需人工离线取样分析的场所),模型的校正较为困难,此时模型校正采用何种方法是一个很值得考究的问题。

为实现软测量模型的长时间自动更新和校正,一般可设置一软测量模型评价软件模块。该模块首先根据实际情况作出是否需要模型校正和进行何种校正的判断,然后再自动调用模型校正软件对软测量模型进行校正。

## 1.3 软测量技术的应用

由于软仪表可以像常规过程检测仪表一样为控制系统提供过程信息,因此软测量技术目前已经在过程控制领域得到了广泛应用。图 1.3 概括地表示了软测量技术在过程控制系统中的应用<sup>[1~12,20~25,51,52]</sup>。

应用软仪表进行工业过程控制的典型代表就是前面提到的推断(理)控制,这也是研究报道较多的一种基于软测量技术的控制系统。推断控制系统的一般结构如图 1.4 所示。在图 1.4 中,各变量均可作为向量, $Y_r$  代表被控变量(系统的主导变量)的设定值,开关  $K$  代表采样输出或人工分析取样,所获数据将用于软仪表的在线校正。同时从图中还可以看出,控制器和软仪表是相互独立的,因而它们的设计可以独立进行。

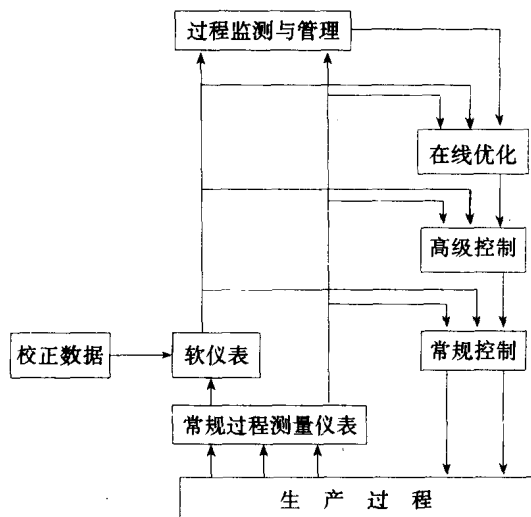


图 1.3 软测量技术在过程控制系统中的应用

基于软仪表的反馈控制系统一般都可以归结为图 1.4 所示的结构。在这种框架下，如果软仪表能达到一定的精度，能够代替硬件仪表实现某种参数的测量，那么软仪表就能够与几乎所有的反馈控制算法结合，构成基于软仪表的控制。更为重要的是软测量技术可以解决高级过程控制实际应用中的测量问题。越高层次的过程控制越是需要关于过程的更多的和更深层的信息，而软仪表可直接为高级过程控制提供被控变量和其他过程信息，从而构成基于软仪表的高级过程控制，例如将推断控制和预测控制策略相结合可构成推断预测控制，将推断控制和自适应控制策略相结合可构成自适应推断控制等。

生产过程的在线优化近年来越来越受到重视，常用的是在线稳态优化。对于实际优化问题而言，其目标函数往往是装置或系统整体的经济效益，同时包含质量指标约束，产品的产率、质量等是优化问题中最重要的独立或非独立变量。采用软测量技术可提供优化问题所需的各变量测量值，从而使在线优化问题的构造和求解成为可能。

由于采用软测量技术一方面可以获取更多过程信息，另一方面由于软仪表的载体是计算机软件，可以通过合理的编程，综合运用各种所获信息实现过程的故障诊断和状态监测等，并对生产过程进行评估和协调，因此软测量技术在过程监测和生产管理等方面也有十分重要的作用。

除了在过程控制领域，软测量技术作为过程检测领域中一种新型的参数测量技术，不仅用于实现众多目前难以用常规检测仪表直接测量的所谓难测参数（不仅仅是那些只用于过程控制的难测参数，有些参数的检测目的不是为了控制，例如化学反应器内二维/三维的微观信息，到目前为止它主要还是用于对化学反应的机理性研究和工艺设计等）的在线检测，还被广泛地应用于常规仪表精度、可靠性、实时性的提高和仪表检测系统的误差处理、动态校准和故障诊断等。目前软测量技术的思想已渗透到过程检测领域的各个方面，对整体参数测量水平的提高和过程检测技术的发展起到了重要的推动作用<sup>[1~19, 53~58]</sup>。

## 1.4 展 望

软测量技术作为一种新型的过程参数检测技术，为解决复杂过程参数的检测问题提供了一条有效的途径。90 年代以来，软测量技术的发展相当迅速，在理论研究和实际应用两方面均取得了多方面的成果，展示了良好的工业应用前景。毫无疑问，软测量技术不仅现在是研究热点，也必将成为未来过程控制和过程检测领域的一个重要研究发展方向<sup>[1~19]</sup>。

虽然软测量技术的研究已从静态发展到动态，从线性发展到非线性，从无校正发展到有校正，但它毕竟是一门新技术，发展还不成熟，系统的理论体系目前也尚未形成，仍有不少

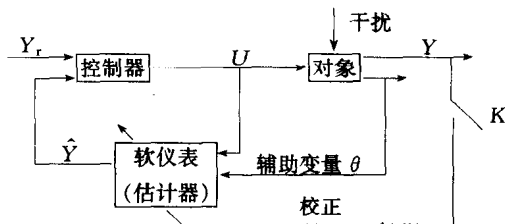


图 1.4 反馈推断控制系统

理论和实践问题有待于今后进一步研究,因此过分夸大软测量技术的作用或忽视软测量技术的重要性都是不正确的<sup>[6~12]</sup>。

根据目前的研究现状和进展,以下三方面将是软测量技术今后研究的重点<sup>[6~12]</sup>。

### (1) 测量数据处理

测量数据的处理,尤其是过失误差的处理,对提高软仪表的准确性和可靠性具有重要的作用。目前对于数据处理的理论研究已取得了不小的成绩,但离实际应用还有较大的距离。如何缩小理论和实践间的差距以提高数据处理水平是今后很值得研究的课题。

### (2) 软仪表在线校正技术

软仪表在线校正技术对软仪表的实际应用具有重大意义,但迄今为止校正方法还十分有限,因此研究更多的实用校正方法以适应复杂过程的要求,亦将是软测量技术研究发展的重要内容。

### (3) 神经网络建模

软测量模型是软测量技术的核心。神经网络技术由于具有非线性逼近和自学习功能,特别适用于复杂非线性系统,同时近年来应用神经网络技术建立软测量模型的研究已显示出该种建模方法的巨大潜力,因此神经网络建模将是很有发展前途的研究方向。

同时由于过程对象的复杂性,很难期望用一种技术来完美地解决目前存在的问题,因此充分应用现代控制理论、人工智能和信息处理技术等先进研究成果,并将它们与软测量技术相结合,也将是软测量技术今后发展的一大潮流。

## 参 考 文 献

- 1 Mcavoy T J. Contemplative stance for chemical process control. *Automatica*. 1992, 28(2): 441~442
- 2 蒋慰孙. 2000 年化工自动化展望. 化工自动化及仪表. 1994, 21(1):1~9
- 3 蒋慰孙, 蒋敏伟. 过程控制 21 世纪展望. 世界仪表和自动化. 1999, 3(4):10~14
- 4 金以慧, 王诗宓, 王桂增. 过程控制的发展和展望. 控制理论与应用. 1997, 14(2):145~151
- 5 古勇, 苏宏业, 王朝晖等. FCCU 软测量综述. 化工自动化及仪表. 1998, 增刊:6~10
- 6 张明君, 皮道应, 孙优贤. 基于工程观点的软仪表开发策略. 化工自动化及仪表. 1996, 23(6):34~36
- 7 于静江, 周春晖. 过程控制中的软测量技术. 控制理论与应用. 1996, 13(2):137~144
- 8 骆展钟, 邵惠鹤. 软仪表技术及其工业应用. 仪表技术与传感器. 1999, (1):32~39
- 9 俞金寿, 刘爱伦. 软测量技术及其应用. 世界仪表和自动化. 1997, 1(2):18~20
- 10 徐敏, 俞金寿. 软测量技术. 石油化工自动化. 1998, (2):1~3, 19
- 11 荣冈, 金晓明, 王树青. 先进控制技术及应用·第三讲. 软测量技术及其应用. 化工自动化及仪表. 1999, 26(4):70~72
- 12 孙欣, 王金春, 何声亮. 过程软测量. 自动化仪表. 1995, 16(8):1~5
- 13 Van den Bos A. Application of statistical parameter estimation methods to physical measurement. *J Phys E: Sci Instrum*. 1977, 10:753~760
- 14 Riviere J-M. Bayart M, Thiriet J-M. Intelligent instruments: some modelling approaches. *Measurement + Control*. 1996, 29:179~186
- 15 Van den Bos A and Eykhoff P. Model building and parameter estimation as means for intelligent measurement. *Measurement*. 1988, 6(1):25~32
- 16 李海青, 黄志尧等编著. 特种检测技术及应用. 杭州:浙江大学出版社, 2000
- 17 李海青, 乔贺堂主编. 多相流检测技术进展. 北京:石油工业出版社, 1996
- 18 蒙建波, 朱林章. 检测理论的现状及发展展望. 化工自动化及仪表. 1994, 31(3):40~41, 45
- 19 赵新民, 陈海军. 模型化测量的发展现状与展望. 计量学报. 1992, 13(4):314~319
- 20 Weber R and Brosilow C. The use of secondary measurements to improve control. *AIChE J*. 1972, 18(3):614~623
- 21 Joseph B and Brosilow C B. Inferential control of processes: Part I Steady state analysis and design. *AIChE J*. 1978,