

基于软测量的检测技术

黄凤良

(南京师范大学控制科学与工程系, 210042, 南京)

[摘要] 在剖析软测量基本思想的基础上, 通过实例对基于软测量的不同检测技术及应用进行了详细的分析和对比. 结果表明: 基于软测量思想可以形成 3 种不同于间接测量的典型形式检测技术, 它们之间的最大不同是测量模型的输入输出与工业对象输入输出之间关系的差异.

[关键词] 软测量, 检测技术, 间接测量

[中图分类号] TP206.1; TB9, [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292-(2003)01-0005-05

0 引言

在许多工业生产过程中, 存在许多无法或难以用传感器直接检测的变量, 但这些变量同时又是需要加以严格控制、与产品质量密切相关、决定操作过程成败的重要参数^[1]. 典型的例子如: 产品组分的浓度、精馏塔的塔顶/塔底产品质量、化学反应器中的反应速率和反应物浓度、生物发酵罐中的生物量参数、高炉铁水的含硅量、电热连续结晶机槽内的物料组分、多相流动系统特性的各种信息、高温流体的流量、密闭容器内工作过程中的瞬态温度、高参数下(高温、高压、高瞬态)温度的变化规律、冶金企业热轧生产线上加热炉中大型板坯内的温度分布等. 为了解决这类变量的检测, 基于软测量(Soft-sensing)思想的检测技术得到了广泛的应用与重大的发展.

软测量是近年来检测和过程控制领域涌现出的一种新技术, 为无法或难以用传感器直接检测变量的检测与控制提供了手段, 对于生产自动化以及控制产品质量具有重要意义, 是目前检测技术和过程控制研究发展的重要方向. 正确认识该技术的主要思想以及基于此的检测技术与应用, 对于该技术在检测领域的研究、应用与推广均具有重要意义.

1 软测量^[1]

参看图 1 所示对象输入输出关系, 图中 y 代表主导变量, θ 代表可测的辅助变量, d 和 u 分别表示可测的干扰和控制变量. 软测量的目的, 就是利用所有可获得的信息求取主导变量的“最优”估计值 \hat{y} , 即构造从可测信息集 $\bar{\theta}$ 到 \hat{y} 的映射:

$$\hat{y}(s) = K(s)\bar{\theta}(s) \tag{1}$$

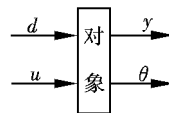


图 1 对象的输入输出

一般地, 可测信息集 $\bar{\theta}$ 包括所有的可测主导变量 y (或主导变量 y 中可能部分可测的量)、辅助变量 θ 、控制变量 u 和可测干扰 d . 在这样的框架结构下, \hat{y} 的性能, 将依赖于过程的描述、噪声和扰动的特性、辅助变量的选取以及“最佳”的含义, 即给定的某种准则.

可见, 软测量是以易测的过程变量(Secondary variable, 辅助变量)为基础, 利用易测过程变量和待测过程变量(Primary variable, 难测的主导变量)之间的数学关系(软测量模型), 通过各种数学计算和估计, 采用软件编程以计算机程序的形式实现对待测过程变量的测量.

收稿日期: 2003-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60201212); 江苏省教委自然科学基金项目(01KJB510004).

作者简介: 黄凤良, 1971-, 南京师范大学控制科学与工程系副教授, 主要从事自动测试技术与智能化测控系统、软测试技术的研究.

2 检测技术及应用

基于软测量的主要思想,根据检测所采用的软测量模型输入输出与对象输入输出之间的关系,可以获得图2所示的3种典型基于软测量的检测技术形式.图中带下标 r 的变量(如 y_r)代表被控变量(即主导变量)的设定值,开关 K 代表输出变量(如 y)的采样,用于对软测量模型进行在线校正,上方带“ \cdot ”标号的变量(如 \dot{y})代表由软测量模型获得的主导变量(如 y)的估计值,以下相同.

图2(a)中软测量模型的输入量为对象的输入量、部分可测的输出量,输出为对象的输出,即输出量为待测量,检测的目的是确定该量,而相关的易测量是输入量以及输出量中部分可测量.这种形式的软测量模型用于检测参量,也是软测量思想提出之初所要求的形式,它不同于一般意义上仅反映输入输出关系的数学模型,但通常以一般意义的数学模型为基础.

图2(b)中软测量模型的输入是对象的输入,输出是对象的输出,它与一般意义上的数学模型意义相同,反映的是输入与输出之间的关系.输出量为待测量,而相关的易测量为输入量.

图2(c)中软测量模型以对象的输出及部分可测的输入为软测量模型的输入、以对象的待测输入为软测量模型的输出,即待测量为对象的待测输入量,而相关的易测量为输出量以及部分可测的输入量.

后两种检测技术是基于软测量思想衍生出的形式.

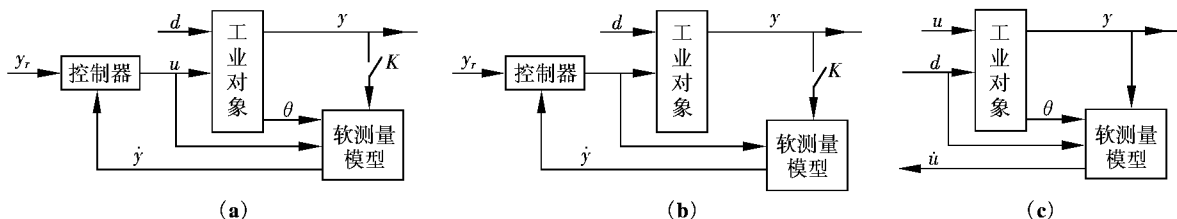


图2 基于软测量形成的3种检测形式

可见,上述3种检测形式的不同在于所采用模型的输入输出与工业对象输入输出之间关系的不同,它们在实际中的具体应用分别如下.

2.1 应用一

冶金行业的锌精馏过程中,液态粗锌从熔化炉经过一个中间流槽加入到精馏塔,其流量的稳定与否是影响精馏塔寿命的重要因素之一,提高流量的稳定,将使精馏塔的寿命得到极大提高,给企业带来巨大经济效益,因此有必要对这种高温流体的流量进行在线检测.

文献[2]从流体力学的理论出发,利用小孔流量公式:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH} \quad (2)$$

式中: Q 为流体的流量; μ 为流量系数; A 为孔口面积; H 为流体的高度,即位头.

可以直接由测量得到的位头获得流体的流量,但在实际生产中,液态锌的表面会有一层固态的氧化锌,这层氧化锌在锌液表面的分布不均匀,也就是说其厚度不便于测量,这样就会给液位高度的测量带来比较大的测量误差^[2].

锌液表面的氧化锌虽然厚度不均匀,不便于测量,但是它的重量很轻,相对于测量流槽中的锌液重量来说非常小,所以通过测量锌液重量比直接测量液位高度的误差要小得多.同时,考虑到流量系数 μ 的影响,文献[2]在实验测定的基础上,采用回归分析的方法获得了该高温流体在线测量的软测量模型:

$$Q = 2686.9 + 643.9G + 15.9G^2 \quad (3)$$

式中: G 为流体的重量.

从而利用易测的重量实现了高温液态粗锌流量的在线测量.

在该应用中待检测量为输出的液态粗锌流量 Q ,可测的变量为输出的液态粗锌重量 G ,图3表示该

应用中软测量模型的输入输出与工业对象输入输出之间的关系, 即该应用中首先检测的是工业对象输出的液态粗锌重量 G , 利用软测量的模型获得待测量——液态粗锌流量 Q .

2.2 应用二

冶金企业大型板坯热轧生产线上, 板坯加热炉是长三十几米、宽十几米、高近十米的巨大温度场。钢坯入炉后, 以一定速度向前移动, 同时接受来自炉气和炉墙的辐射、对流换热, 当钢坯历经炉膛到达出炉口时, 温度分布应满足后续轧机要求^[3]。因此需要对钢坯的温度进行在线检测。

目前工业中对炉内加热状况和钢坯加热质量的判断, 主要通过分布于炉体上、下部的炉温测点和钢坯出炉后的开轧温度红外检测。由于燃料燃烧产生了大量烟雾和灰尘, 以及高温、富氧的炉内环境使钢坯表面生成厚厚的氧化铁皮, 非接触测温效果很差^[3]。

文献[3]采用软测量的技术, 将钢坯的炉内加热过程分为遵循斯蒂芬——波尔兹曼四次方定律及牛顿冷却定律的炉墙、炉气到钢坯表面的辐射和对流传热, 以及服从傅立叶定理的钢坯表面到内部的导热过程。并假设: (1) 同一炉段内的传热特性系数, 如辐射角系数、黑度系数、对流传热系数等等, 作集中参数处理; (2) 炉温沿炉长按一维分布, 并由有限的炉温检测点的分段线性函数决定; (3) 钢坯温度视为沿炉长方向和厚度方向的二维分布; (4) 钢坯传热的端部效应忽略不计。在此基础上, 基于机理分析的方法, 采用二维不稳定导热方程:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{C_s \rho_s} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) \right] - V(t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \quad (4)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L$$

以及边界条件:

$$K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_b(y, t) \quad (5)$$

$$K_s \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \Big|_{x=d} = Q_t(y, t) \quad (6)$$

$$Q_b(y, t) = \varepsilon_b(y) \sigma (U_b^4(y, t) - T^4(0, y, t)) + h_{cb} (U_b(y, t) - T(0, y, t)) \quad (7)$$

$$Q_t(y, t) = \varepsilon_t(y) \sigma (U_t^4(y, t) - T^4(d, y, t)) + h_{ct} (U_t(y, t) - T(d, y, t)) \quad (8)$$

$$\varepsilon_b(y) = (1 - \eta_F) \left[F_{swb} \varepsilon_s + \frac{1}{2} (\varepsilon_s + \varepsilon_g(y)) \right] \quad (9)$$

$$\varepsilon_t(y) = F_{swt} \varepsilon_s + \frac{1}{2} (\varepsilon_s + \varepsilon_g(y)) \quad (10)$$

式中: T 为钢坯温度分布; x, y, t 分别为空间、时间坐标; C_s, ρ_s, K_s, K_y 分别为钢坯比热、密度、导热系数、沿炉长方向导热系数; V 为钢坯移动速度; U_t, U_b 分别为上、下部炉温分布; h_{ct}, h_{cb} 分别为炉气对钢坯上、下表面对流传热系数; $\varepsilon_s, \varepsilon_b$ 分别为钢坯上、下表面的综合黑度系数; $\varepsilon_s, \varepsilon_g, \varepsilon_w$ 分别为钢坯表面、炉气、炉墙黑度系数; F_{swt}, F_{swb} 分别为钢坯对上、下部炉墙辐射角系数; Q_t, Q_b 分别为钢坯上、下表面热流密度; η_F 为水冷滑管有效遮热系数; σ 为斯蒂芬——波尔兹曼常数; L 为炉长; d 为钢坯厚度。

在(5)~(10)条件下, 对(4)式的不稳态导热方程进行数值求解, 可以获得钢坯内部温度场的分布, 从而实现板坯温度的在线测量。文献[3]通过数据误差分析, 表明计算值与实测值最大相对误差小于5%, 能够满足工业应用的精度要求。

在该应用中待测量为钢坯内温度分布 T , 易测变量为加热炉炉温 U , 图4表示了该应用中软测量模型的输入输出与工业对象输入输出之间的关系。软测量首先检测工业对象的输入量——加热炉炉温 U , 通过软测量模型, 采用计算机软件的形式获得钢坯内部温度的分布, 从而实现钢坯内部温度的在线

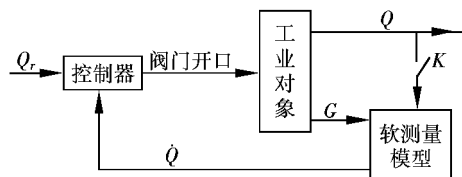


图3 软测量模型的输入输出与对象的输入输出

检测。

2.3 应用三

温度是很常用而又重要的参数,但温度的测量在某些场合下却不是一件简单的事,如对表面不能安装和焊接测温传感器的火炮内壁温度的测试问题。这种场合的测温要求用现有的测温方法难以实现,而解决这类温度的测定,对国防具有非常重要的意义。文献[4]从软测量的思想出发,提出了温度测试的外推方法。在一定假设的基础上,基于机理分析,采用了直角坐标下的一维不稳态导热微分方程,利用控制方程与初边条件:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \\ T(X, 0) &= T_0 \\ T(L_0, \tau) &= T_0 \\ T(X_P, \tau) &= T_P(\tau)\end{aligned}\quad (11)$$

式中: a 为膛壁材料的导温系数; L_0 为厚度; T_0 为初始温度; $T_P(\tau)$ 为离膛面 X_P 处等温面上的实测温度随时间的变化。

求解获得了描述表面过余温度的软测量模型为:

$$\theta(0, t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n t^n \quad (12)$$

式中: θ 为过余温度, $\theta = T(X, \tau) - T_0$; t 为无量纲时间, $t = \frac{a\tau}{L_0^2}$; b_n 为系数,由下式描述的 X_P 处温度规律确定:

$$\theta(x_P, t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (4t)^n \Gamma(n+1) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x_P}{2\sqrt{t}}\right) \quad (13)$$

式中: $\Gamma(n+1)$ 为伽马函数; $\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{t}}\right)_{2n}$ 为高斯误差补函数的 $2n$ 重积分; $x_P = \frac{X_P}{L_0}$ 为无量纲坐标。

X_P 处温度在实际中为易测量,因此由(13)式可以确定出系数 b_n ,代入(12)式即可获得内壁温度值,从而实现该温度的测量。文献[4]通过实验表明,实测值与计算值的时域曲线在变化规律、平稳段以及最大值处的重合程度非常理想。

在该应用中其待测量为内壁温度,易测变量为 X_P 处温度,软测量模型以 X_P 处温度为输入,以内壁温度为输出。图5表示了这种关系。即在测试过程中首先检测对象的输出—— X_P 处温度,再通过软测量模型,以计算机程序的形式获得待测量——内壁温度,实现非易测内壁温度的测量。

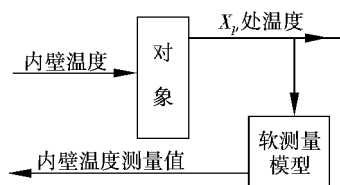


图5 软测量模型的输入输出与对象的输入输出

3 讨论

基于软测量形成了3种典型形式的检测技术,它们的核心都是以易测的过程变量为基础,利用易测过程变量和待测过程变量之间的数学关系,通过各种数学计算和估计,以计算机软件的形式实现对待测过程变量的测量。它们在测量模型建立方面具有一些相同的方法,常用的有基于机理分析的方法、基于对象数学模型的方法(包含基于状态估计的方法、基于线性模型与非线性模型的方法)、基于回归分析的方法、基于人工神经网络(ANN)的方法、基于模式识别的方法以及基于模糊数学的方法等^[1]。它们的最大不同在于所建立模型的输入输出不同。一种是以工业对象的输入变量与输出变量中的可测部分为模

型的输入, 工业对象的输出量为模型的输出; 一种是以工业对象的输入变量为模型的输入, 以工业对象的输出为模型的输出; 另一种是以工业对象的输出变量以及部分可测输入量为模型的输入, 而工业对象的待测输入为模型的输出. 从图 2 可以明显的看出这种不同.

3 种形式的检测技术容易被认为是间接测量的一种, 其实不然. 3 种技术的关键在于软测量思想的核心, 即构造一个以易测变量为自变量, 主导变量为因变量的软测量模型, 并通过各种复杂的数学计算和估计, 用计算机程序获得主导变量的值. 其特点在于基于易测信息实现难测被检测量的估计, 采用软件编程以计算机程序的形式来实现, 具有很强的可实现性、适用性、灵活性和低成本性等^[6]. 而间接测量是在使用仪表进行测量时, 先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量, 将测量值代入函数关系式, 经过计算得到所需要的结果, 之中不涉及到复杂的数学计算与估计, 结果通常也不以软件形成获得, 而且其确定的函数关系在软测量中一般也不存在, 这一点在上文 3 种形式检测技术的应用中可以清楚地看出. 此外在间接测量过程中, 手续较多, 花费时间较长, 多用于科学实验中的实验室测量.

5 结束语

随着科技向生产力的转化, 高新技术在工业中得到了越来越广泛的应用, 在将来很长一段时间内, 为了提高生产过程的自动化程度以及提高产品的质量, 工业过程中必将出现更多需要检测的参量, 其难检性也逐渐增加, 寻求合适的检测手段进而研制新型的软硬测试仪器将成为科技工作者追求的目标.

软测量的思路给人们留下了巨大的发展空间, 基于软测量的检测技术借助于计算机的强大计算功能, 以及计算机软件的多样性, 为各行各业中参量检测奠定了基础, 有着诱人的前景, 但还远非成熟, 正如 Macvoy 所说的: 软测量方法作为今后的一大研究热点还刚刚起步, 尚缺乏系统的开发思路, 以及与控制系统相集成的途径^[9].

[参考文献]

- [1] 于静江, 周春晖. 过程控制中的软测量技术[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 137~ 144.
- [2] 孙强, 桂卫华, 李勇刚, 等. 一种高温流体流量在线检测的新方法[J]. 计算技术与自动化, 2001, 20(4): 10~ 13.
- [3] 梁军. 大型板坯加热炉中钢坯温度分布的软测量研究及实现[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(1): 81~ 83.
- [4] 黄凤良, 夏春梅, 周彦煌, 等. 温度测试的外推方法[J]. 计量学报, 2003, (2): 116~ 119.
- [5] 黄志尧, 王保良, 史志才, 等. 软测量技术在多相流检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2001 增刊, 22(3): 421~ 424.
- [6] T J Macvoy. Contemplative Stance for Chemical Process[J]. Automatic, 1992, 28(2): 441~ 442.

Measuring Techniques Based on Soft-sensing

Huang Fengliang

(Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: Soft-sensing, developed in the field of measuring and process control, is a new technique. Some parameters that couldn't be sampled or had no methods to measure in industry can now be acquired with the measuring techniques based on soft-sensing adopted, which is very important to production automation and quality control. On the basis of the analysis of soft-sensing and some actual cases, the measuring techniques adopting soft-sensing idea and their application are discussed in detail. It is concluded that three kinds of measuring techniques using soft-sensing which are different from indirect measurement are developed. And the biggest difference among the three measuring techniques is introduced, which involves the different relationship between the input-output variables in the measuring model and the input-output variables in the industrial object.

Key words: soft-sensing, measuring technique, indirect measurement

[责任编辑: 刘健]