

纸张定量的组合自校正控制*

李清泉 刘海一

(清华大学自动化系, 北京)

摘 要

本文提出了一种新的纸张定量的组合自校正控制方案, 给出了这种控制方案的设计原理, 分析了这种方案的性能。本文所提出方案的鲁棒性和数值稳定性都优于现有的纸张定量的自校正控制方案, 具有直接的工程实用价值。文中给出了本方案成功用于一台普通长网纸机的结果。

一、引 言

纸张生产过程十分复杂, 其特点是过程延迟时间长, 参数随时间变化, 随机干扰比较严重。因此, 实质上可把它视为一个时变随机系统。为了保证纸张成品质量, 需要控制的量很多, 但其中最重要的受控量是纸张的定量(纸张单位面积重量)和水份(含水量)^[1]。早期是用模拟仪表间接控制定量和水份, 效果较差。从造纸工业采用计算机控制后, 出现了多种直接控制方案, 已从PID控制、解耦控制、最小方差控制, 发展到最小方差自校正控制^[2], 其中以自校正调节器方案比较引人注目, 因为它能在对象参数未知的条件下使输出方差最小。不过, 这种控制策略的一个重大缺点是鲁棒性很差, 有时甚至闭环稳定性都无法保证, 这就限制了它的工程应用价值。

本文提出的方案除了能保证纸张成品质量外, 其鲁棒性和数值计算的稳定性都非常良好, 是一种具有实用价值的工程控制方案, 它已成功地用于一台长网纸机中, 获得了明显的效果。

二、纸机模型特点

图1是纸张生产过程的示意图。贮浆池中的浓浆(例如, 3%的浓度)通过浓浆阀与

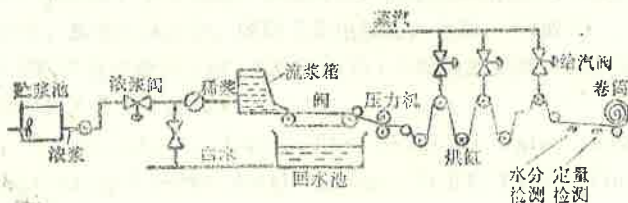


图1 纸张生产过程示意图

* 中国科学院科学基金资助的课题。

本文于1986年10月5日收到, 1987年2月10日收到修改稿。

白水混合成为稀浆（例如，0.3~0.7%的浓度），经除砂、过筛和配料（例如加入填料滑石粉）后送入流浆箱。流浆箱以恒速将纸浆喷到铜网上，再经脱水、烘干和压光等工序而最后成为纸张成品。

影响纸张定量和水份的因素很多。纸浆浓度和流量，白水流量，填料浓度和流量，流浆箱液位和压力，纸机网速和网宽，以及烘缸温度和压力，等等，都影响纸张定量和水份。这些内部的和外部的因素都有较大的不定性，因此通常只能用概率密度函数来描述这两个量的特性，如图2所示。

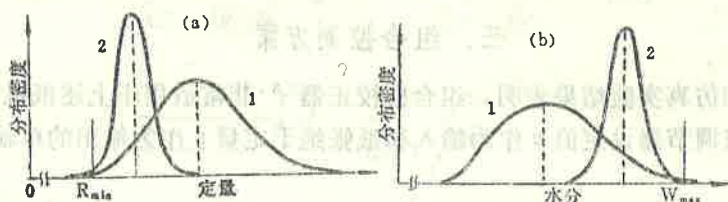


图 2 定量和水份的分布密度

对于纸张成品的合格率要求是，定量不能低于下限 R_{min} ，水份不能高于上限 W_{max} 。因此，如果定量和水份的方差可通过控制使其减少，即如果能把图2中的特性1控制到特性2，则定量和水份的设定值就可分别靠近 R_{min} 和 W_{max} 。这样做显然不会影响产品的合格率，但却可降低原材料的消耗，或以同样的原料生产更多的合格产品。此外，还可以简化后外理工序。所有这些都带来明显的经济效益^[1]。

纸张定量 y_R 由绝干定量 y 和水份重量 y_W 组成，即

$$y = y_R - y_W. \quad (1)$$

十分明显，浓浆流量 u 既影响 y_R 也影响 y_W ，烘干压力 u_P 也同样影响 y_R 和 y_W 。因此，当把 u 和 u_P 作为输入， y_R 和 y_W 作为输出时，纸机模型将是一个双输入—双输出的随机系统。不过，若用绝干定量 y 取代 y_R 作为一个输出，由于 y 只取决于纸浆流量 u 而与烘干压力 u_P 无关，故可将上述双输入—双输出系统解耦为一个单输入—单输出系统和一个双输入—单输出系统。

理论分析和系统辨识结果表明，常用的长网纸机模型具有下列特点：

- 1) 系统具有非零均值的有色干扰。
- 2) 系统的参数和时延是慢时变或时变的。
- 2) 过程零点可能不稳定或阻尼性能较差，即可能是所谓的非最小相位系统。

例如，在一台长网纸机上，在不同的工况下，通过系统辨识得到的典型输入—输出特性为

$$(1 - 0.215z^{-1} - 0.453z^{-2})y(t) = z^{-3}(2.021 + 1.678z^{-1})u(t) + (1 + 0.753z^{-1} + 0.028z^{-2})e(t)$$

$$(1 - 1.272z^{-1} + 0.346z^{-2})y(t) = z^{-3}(1.575 - 1.001z^{-1})u(t) + (1 - 0.768z^{-1} + 0.129z^{-2})e(t)$$

$$(1 - 0.163z^{-1} - 0.427z^{-2})y(t) = z^{-3}(1.206 + 1.697z^{-1})u(t)$$

$$+ (1 + 0.528z^{-1} + 0.458z^{-2})e(t)$$

在系统辨识时,保留了原有的浓浆流量模拟调节器,故上三式中的 $u(t)$ 是该调节器的设定值。 z^{-1} 为后向平移算子

$$z^{-i}x(t) = x(t-i)$$

$\{e(t)\}$ 为零均值不相关随机干扰序列。这些辨识结果反映了上述纸机模型特点。因此,对于这类常用纸机,无法采用最小方差控制和自校正调节器方案^[2],必须寻求更有效的工程控制策略。

三、组合控制方案

理论分析和仿真实验结果表明,组合自校正器^[3]非常适用于上述纸机模型。

考虑由浓浆调节器设定值 u 作为输入和纸张绝干定量 y 作为输出的单输入—单输出系统模型

$$\text{式中} \quad Ay(t) = z^{-k}B'u(t) + Ce(t) + d, \quad (2a)$$

$$\begin{cases} A = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}, \\ B' = b'_0 + b'_1z^{-1} + \dots + b'_{n_b}z^{-n_b}, \\ C = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}, \\ b'_0 \neq 0, k \geq 1, t = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2b)$$

k 为受控过程的延迟拍数, k 乘以采样周期 T 便是纸机的纯延迟时间; d 为常值干扰,它代表填料等变化的影响。为了适应延迟 k 的变化,通常将 B' 多项式扩大,以便将 z^{-k} 包含进来,为此引入记号

$$B = z^{-k_{\max}} B', \quad (3a)$$

式中

$$B = b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}, \quad n_b = n_{b'} + k_{\max}, \quad (3b)$$

$k_{\max}$ 为 k 的可能最大值。当 $k < k_{\max}$ 时,总可将式(3b)中的有关项系数设置为零,而使 B 与 $z^{-k}B'$ 等价。因此,在分析中,取

$$B = z^{-k}B' \quad (3c)$$

不会影响所得结果的一般性。这时,模型(2a)可等价为

$$Ay(t) = Bu(t) + Ce(t) + d. \quad (4)$$

考虑到纸机时间延迟较大,故选用显式组合自校正控制策略^[3]

$$u(t) = \frac{H}{FW} y_r(t) - \frac{G}{F} y(t) - \frac{1}{\hat{B}(1)} \hat{d}, \quad (5)$$

式中 $y_r(t)$ 为绝干定量设定值, $\hat{B}(1)$ 和 $\hat{d}$ 分别为 $B(1)$ 和 d 的估计,这里 $B(1)$ 定义

为

$$B(1) = [B]z^{-1} = 1,$$

F, G, W 和 H 为控制多项式。式 (5) 右边第三项用来补偿模型 (4) 的常值干扰, 这种补偿方法在定态时能达到完全补偿, 并有较好的动态补偿特性。由式 (4) 和 (5) 构成的闭环系统方程为

$$y(t) = \frac{\hat{B}H}{(\hat{A}F + \hat{B}G)W} y_r(t) + \frac{\hat{C}F}{\hat{A}F + \hat{B}G} e(t) + \frac{F}{\hat{A}F + \hat{B}G} \left[d - \frac{\hat{B}}{\hat{B}(1)} \hat{d} \right] \quad (6)$$

式中 $\hat{A}, \hat{B}$ 和 $\hat{C}$ 分别为 A, B 和 C 的估计。为了使式 (6) 右边第二项所代表的输出噪声分量最小, 根据最小方差理论^[4], 应使

$$\hat{A}F + \hat{B}G = \hat{C} \quad (7a)$$

式中 F 为首一多项式, 保证上式有唯一解的条件是

$$\begin{cases} \deg F = n_b - 1, \\ \deg G = n_a - 1. \end{cases} \quad (7b)$$

设若希望的闭环伺服特征多项式为 T

$$T = 1 + t_1 z^{-1} + \dots + t_{n_t} z^{-n_t}, \quad (8)$$

则 H 的选择至少在定态时应保证 $y(t)$ 完全跟踪伺服输入 $y_r(t)$ 。因此, 在 $T = W$ 的条件下, 应选择

$$H = \frac{T(1)\hat{C}}{\hat{B}(1)} \quad (9)$$

根据上述设计原则最后得到的控制策略和闭环系统方程分别为

$$u(t) = \frac{T(1)\hat{C}}{\hat{B}(1)FT} y_r(t) - \frac{G}{F} y(t) - \frac{1}{\hat{B}(1)} \hat{d}, \quad (10)$$

$$y(t) = \frac{T(1)\hat{B}}{\hat{B}(1)T} y_r(t) + Fe(t) - \frac{F}{\hat{C}} \left[d - \frac{\hat{B}}{\hat{B}(1)} \hat{d} \right]. \quad (11)$$

式 (10) 和 (11) 表明, 即使受控系统为非最小相位系统, 组合自校正控制策略不仅能确保闭环系统稳定工作, 而且具有优良的伺服跟踪性能, 很强的抑制随机干扰能力和完全补偿定态常值干扰的能力。

四、参数估计

参数估计必须具有优良的数值性质。这种数值性质包括参数估计一次迭代的计算时间,占用的存储空间,数值精度和稳定性,以及编程工作等,其中又以数值稳定性最为重要,因为它与控制策略的鲁棒性一起直接决定了闭环系统的可靠性。

就一般参数估计的递推方法而言,由于微型计算机的字长有限,其舍入截断误差常使参数估计的协方差矩阵 $\mathbf{P}(t)$ 丧失正定性,从而使数值计算不稳定。考虑到 $U-D$ 分解法不仅能确保 $\mathbf{P}(t)$ 的正定性,而且计算量也增加不多^[6],故采用 $U-D$ 分解法来估计 A, B, C 和 d 。

$U-D$ 分解法是把 $\mathbf{P}(t)$ 分解为 $\mathbf{U}(t) \mathbf{D}(t) \mathbf{U}^T(t)$, 其中 $\mathbf{U}(t)$ 是对角线元全为1的上三角阵, $\mathbf{D}(t)$ 为对角线阵。 $U-D$ 分解法的递推公式为

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(t+1) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) + \mathbf{k}(t+1)[\mathbf{y}(t+1) - \hat{\mathbf{x}}^T(t+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)], \\ \mathbf{k}(t+1) &= \frac{\mathbf{U}(t)\mathbf{g}(t+1)}{\beta(t+1)}, \\ U_{ji}(t+1) &= U_{ji}(t) + \bar{U}_{ji}(t+1) + \sum_{l=j+1}^{i-1} U_{il}(t)\bar{U}_{li}(t+1), \\ D_i(t+1) &= \frac{\beta_{i-1}(t+1)}{\rho\beta_i(t+1)}D_i(t), \\ i &= 1, 2, \dots, n_a + n_b + n_c + 1, \quad j = 1, \dots, i-1. \end{aligned} \right. \quad (12a)$$

式中

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}^T &= [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_{n_a} \hat{b}_1 \dots \hat{b}_{n_b} \hat{c}_1 \dots \hat{c}_{n_c} \hat{d}], \\ \hat{\mathbf{x}}^T(t) &= [-y(t-1) \dots -y(t-n_a) \ u(t-1) \dots u(t-n_b) \ \hat{e}(t-1) \dots \hat{e}(t-n_c) \ 1] \\ \hat{e}(t) &= y(t) - \hat{\mathbf{x}}^T(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1), \\ \beta(t) &= \rho + \mathbf{f}^T(t)\mathbf{g}(t), \\ \mathbf{f}(t) &= \mathbf{U}^T(t-1)\hat{\mathbf{x}}(t), \\ \mathbf{g}(t) &= \mathbf{D}(t-1)\mathbf{f}(t), \\ \bar{U}_{ji}(t) &= -\frac{f_i(t)}{\beta_{i-1}(t)}g_j(t), \\ \beta_i(t) &= \rho + \sum_{l=1}^i f_l(t)g_l(t), \\ \beta_0 &= \rho. \end{aligned} \right. \quad (12b)$$

ρ 为遗忘因子, U_{ji} 为上角阵 $\mathbf{U}$ 的 j 行 i 列元素, $\bar{U}_{ji}$ 为上角阵 $\bar{\mathbf{U}}$ 的 j 行 i 列元素, 且

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{U}(t-1) \overline{\mathbf{U}}(t), \quad (12c)$$

D_i 为对角阵 $\mathbf{D}$ 的 i 行 i 列元素, f_i 为向量 $\mathbf{f}$ 的第 i 个元素, g_i 为向量 $\mathbf{g}$ 的第 i 个元素。需要时, 遗忘因子 ρ 可随时间发生变化。

由上述递推公式可知, 在 $\mathbf{U}$ 是对角线元全为1的上三角矩阵的条件下, 只要对角阵 $\mathbf{D}$ 中的对角元大于零就可保证 $\mathbf{P}(t)$ 的正定性。为此只需将 $D_i(o)$ 设置为正数, 就能保证 $D_i(t) > 0$ 。

五、应 用

受控对象为北京造纸包装公司的一台1760长网纸机。系统辨识结果表明, 在采样周期为30秒时, 该纸机的模型具有下列结构形式

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2})y(t) = z^{-3}(b'_0 + b'_1 z^{-1})u(t) + (1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2})e(t) + d,$$

将上式化为组合控制方案的一般形式, 得

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2})y(t) = (b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4})u(t) + (1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2})e(t) + d,$$

这就是该纸机的绝干定量模型。

为了使闭环系统的极点具有良好的阻尼性能, 将希望的伺服传递函数极点多项式选为一次多项式, 并将希望闭环极点设置在 z 平面单位圆内的正实轴上。具体选为

$$T = 1 - 0.8z^{-1}.$$

控制软件的功能包括, 实时控制, 巡回检测, 越限报警和运行数据记录等。软件采用汇编语言, 约占 11K bit。其中实时控制软件占 2.74 K bit, 分配为, 浮点运算程序 0.52K bit, 参数递推估计程序 0.76K bit, 组合自校控制算法程序 0.82K bit。

图 3 示出了绝干定量控制回路的典型运行特性, 图中 (a) 为浓浆流量设定值 $u(t)$, (b) 为绝干定量 $y(t)$ 。

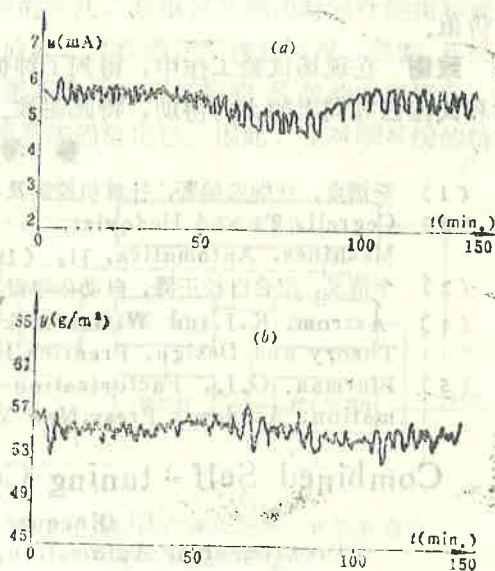


图 3 绝干定量控制回路典型运行特性

为了说明组合自校正器的控制效果, 在图 4 中分别示出了组合控制和手动控制时的绝干定量的直方图。大量试验数据的统计结果表明, 在未采用组合自校正控制策略之前, 该纸机的绝干定量均方差的典型值为 2.4 g/m^2 , 而在采用本控制方案后, 均方差的典型值降到 0.82 g/m^2 , 约为手动控制时的 34%, 其效果是十分显著的。

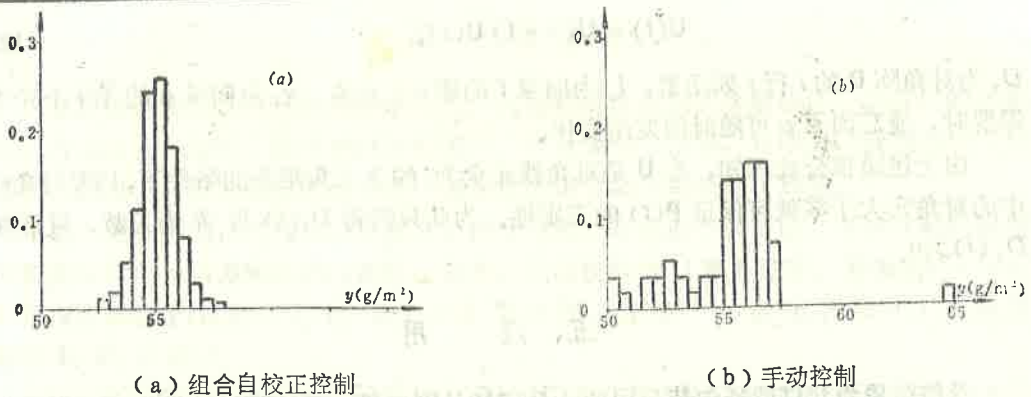


图 4 绝干定量的直方图

六、结 论

本文在纸张定量控制中采用的组合自校正控制策略不仅伺服跟踪和随机调节性能都十分良好,而且鲁棒性也好。这种策略易于补偿生产现场中的常值干扰。把数值稳定性良好的U-D分解法作为组合自校正控制策略的参数递推估计方法,就能在字长有限的微型机甚至单板机上实现这种控制策略,而不会发生数值稳定性问题。因此,在目前的纸张定量控制方案中,本文所采用的方案显然要优越得多,更具有工程应用价值。可以预断,在现场具有较强的随机干扰而又希望加以抑制的其它生产过程中,本文结果有推广价值。

致谢 在现场试验工作中,得到了钟忻敏、黄定先、李建民、张洁、张育民、董孟时和武桂艺等同志的大力协助,特此谢致。

参 考 文 献

- [1] 李清泉, 杜继宏编著, 计算机控制及其应用, 机械工业出版社, 北京, (1988)。
- [2] Cegrell, T. and Hedqvist, T., Successful Adaptive Control of Paper Machines, Automatica, 11, (1975), 53-59.
- [3] 李清泉, 组合自校正器, 自动化学报, 12 (1986), 138-145.
- [4] Åström, K.J. and Wittenmark, B., Computer Controlled Systems—Theory and Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., (1984)。
- [5] Bierman, G.J., Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation, Academic Press, New York, (1977)。

Combined Self-tuning Control of a Paper Machine

Li Qingquan. Liu Haiyi

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing)

A new combined self-tuning control scheme which was applied to the basis weight control loop of a paper machine is presented. The design philosophy and the performances of the control scheme are given. The proposed scheme is superior to the existing self-tuning controller by the robustness and numerical stability, and is of practical value to the engineering. Its successful application to the basis weight control loop of the Long Wire Paper Machine is described.