

造纸机不同时滞多变量自校正控制器

缪尔康
(昆明工学院)

袁著祉
(南开大学)

肖功伟
(大连造纸厂)

摘 要

本文针对造纸机的纸张定量及水分,研制了具有不同时滞的多变量自校正控制器,增加了积分器和前馈补偿,用增广最小二乘法估计全部参数,实际运行获得满意的控制效果;还介绍了微机控制系统的构成及自校正控制系统的调试经验.

关键词: 不同时滞,多变量自校正控制器.

一、引 言

造纸机的定量、水分是决定纸张质量的两个重要指标,控制好这两个指标可以保证质量,节约原料、燃料,降低成本.目前国外约有半数造纸机用计算机控制.控制方案多数是用数字PID.随着现代控制理论的发展,六十年代末用最小方差控制器,七十年代初用单输入单输出自校正调节器(SISO-STR),末期用多输入多输出自校正调节器(MIMO-STR),八十年代初瑞典开始利用单输入单输出自校正控制器(SISO-STC),现在已经有人使用多输入多输出自校正控制器(MIMO-STC),但假设不同回路时滞相同,也不带积分器,其中大多数限于仿真或实验室规模,工业应用很少^[1].

笔者在一台日产三十吨的长网纸机上研制了具有不同时滞的多输入多输出自校正控制器,增加了积分器与前馈补偿,用增广最小二乘法估计全部参数,选用INTEL 86/330A工业控制微机实现了对纸张定量及水分的闭环控制.1986年10月投入实际运行以来,系统的控制精度高,具有很强的适应能力和抑制干扰的能力,控制效果达到国外同类产品先进水平,获得了显著的经济和社会效益,在有关专家参加的鉴定会上获得一致好评.

二、造纸机工艺简介

造纸过程的生产工艺流程如图1所示.

进入混浆箱的纸浆浓度为3—4%,兑水后出来到网前箱的纸浆浓度为0.4%.定量和水分是衡量纸张质量的两个重要指标,影响这两个指标的因素很多,主要有纸浆浓度和流量、车速、蒸汽压力和流量以及网前箱液位等.正常工况时车速和网前箱液位不变,一

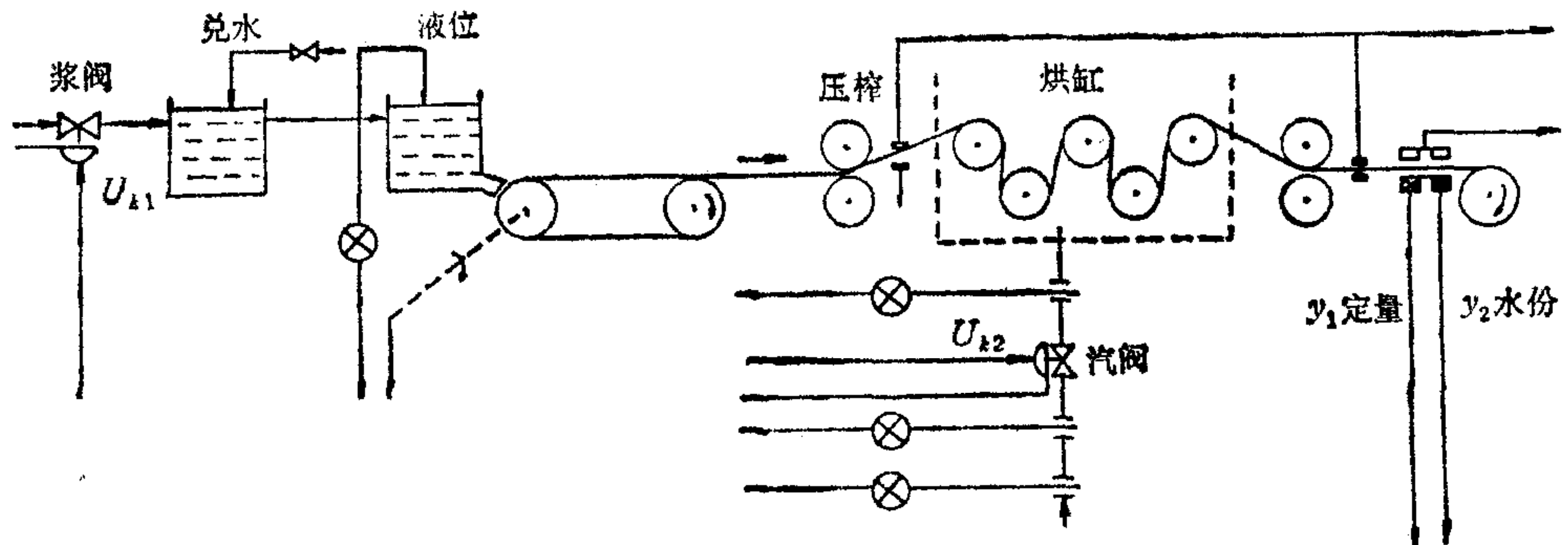


图1 纸机工艺流程图

般选浆料门和蒸汽阀位作为控制变量,它们对定量和水分都有影响。因此,造纸机可以视为一个双输入双输出耦合系统。从浆料门和蒸汽阀位的改变,引起定量和水分的变化有大的时滞,两个回路的时滞是不同的。由于纸机的铜网和毛布不断磨损变旧,环境温度和湿度经常变化,所以造纸过程的动态特性随时而间变化,而且有随机干扰。

三、具有不同时滞的多变量自校正控制

由于造纸过程是一个工艺比较复杂、随机干扰多、滞后大且为不同时滞、多输入多输出耦合的时变系统,因此用常规 PID 调节器很难达到要求的指标。六十年代和七十年代使用最小方差控制器 (MVC) 与自校正调节器 (STR),改善了控制性能,但是还存在一些问题,如控制动作过大等。本文基于造纸过程的特点,推广了文[2]的结果,提出了具有不同时滞的多变量自校正控制器 (STC),增加了积分器与前馈补偿,用增广最小二乘法估计全部参数,考虑了多变量耦合与不同时滞,能消除稳态偏差与已知干扰的影响,用在线估计的滤波多项式抑制随机干扰,因而具有优良的性能。

造纸机定量、水分系统可以用多输入多输出线性向量差分方程模型描述为

$$A(z^{-1})Y(k) = Z^{-d_{ij}}B(z^{-1})U(k) + Z^{-d'_{ij}}D(z^{-1})V(k) + C(z^{-1})\xi(k), \quad (1)$$

式中 $Y(k)$ 、 $U(k)$ 与 $V(k)$ 分别为输出、控制与前馈向量, $\{\xi(k)\}$ 为白噪声向量序列, $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $D(z^{-1})$ 与 $C(z^{-1})$ 为向后移位算子 z^{-1} 的多项式矩阵, $A(z^{-1})$ 、 $D(z^{-1})$ 与 $C(z^{-1})$ 为对角矩阵:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= I + A_1z^{-1} + \dots + A_{n_a}z^{-n_a}, \\ B(z^{-1}) &= B_0 + B_1z^{-1} + \dots + B_{n_b}z^{-n_b}, \\ C(z^{-1}) &= I + C_1z^{-1} + \dots + C_{n_c}z^{-n_c}, \\ D(z^{-1}) &= D_0 + D_1z^{-1} + \dots + D_{n_d}z^{-n_d}, \end{aligned}$$

$\det C(z^{-1})$ 的根在 z 平面的单位圆内, d_{ij} 与 d'_{ij} 分别为第 i 个 Y 对第 j 个 U 与对第 j 个 V 的响应滞后。当 $d_{ii} > d_{ij}$ 时,取 $d_{ij} = d_{ii}$; 当 $d'_{ii} > d'_{ij}$ 时,取 $d'_{ij} = d'_{ii}$ 。这样简化的原因是为了在计算式(10)时,不至于利用未知的控制 U 与前馈 V ,局限性表现在采用了时滞的近似值代替真实值上,实际上是把时滞 d_{ij} 、 d'_{ij} 增大了。这样会增加辨识时的计算量,但对多通道时滞不同基本上没有影响,因为 d_{ii} (对不同的 i)是不同的,当 $d_{ii} \leq$

d_{ij} 与 $d'_{ii} \leq d'_{ij}$ 时, 则不必利用 $d_{ij} = d_{ii}$ 与 $d'_{ij} = d'_{ii}$ 的限制. 实践证明, 做这样的代换是可行的.

模型中的变量与参数规定为: $i, j = 1, 2; n = 2; n_a = n_c = n_d = n; n_b = n + d_{ij}; d_{21} = d_{11} = 3; d_{12} = d_{22} = 1$.

$$Y(k) = \begin{bmatrix} Y_1(k) \\ Y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{定量} \\ \text{水分} \end{bmatrix}, \quad U(k) = \begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{中浓阀位} \\ \text{蒸汽阀位} \end{bmatrix},$$

$$V(k) = \begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{浆浓} \\ \text{车速} \end{bmatrix}, \quad \xi(k) = \begin{bmatrix} \xi_1(k) \\ \xi_2(k) \end{bmatrix} \text{ 噪声.}$$

$A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 与 $D(z^{-1})$ 都是 2×2 维多项式矩阵. 控制系统的性能指标为

$$J[U(k)] = E\{[P(z^{-1})Y(k + d_{ii}) - W(k)]^T[P(z^{-1})Y(k + d_{ii}) - W(k)] + [Q'(z^{-1})U(k)]^T[Q'(z^{-1})U(k)]\}, \quad (2)$$

其中 $W(k)$ 是 2 维设定值向量, $P(z^{-1})$ 与 $Q'(z^{-1})$ 均为 2×2 维对角传递函数矩阵.

$$W(k) = \begin{bmatrix} W_1(k) \\ W_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{定量设定值} \\ \text{水分设定值} \end{bmatrix},$$

$$P(z^{-1}) = P_n(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}.$$

由于 $A(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 、 $D(z^{-1})$ 、 $P(z^{-1})$ 与 $Q'(z^{-1})$ 都是对角矩阵, 从而保证了有关矩阵的可交换性. 记

$$\varphi(k) = P(z^{-1})Y(k) \quad (3)$$

引入对称多项式矩阵 $E(z^{-1})$ 、 $F(z^{-1})$ 、 $\partial F(z^{-1}) = n_a - 1$ 和 $\partial E(z^{-1}) = d_{ii} - 1$ 满足恒等式

$$C(z^{-1})P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + Z^{-d_{ii}}F(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}, \quad (4)$$

用 $E(z^{-1})$ 乘模型(1), 利用式(4)得:

$$\varphi(k + d_{ii}) = \{F(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}Y(k) + Z^{d_{ii}-d'_{ij}}H(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}V(k) + G(z^{-1})Z^{d_{ii}-d_{ij}}U(k)\}[C(z^{-1})^{-1} + E(z^{-1})\xi(k + d_{ii})]. \quad (5)$$

式中, $G(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1})$, $H(z^{-1}) = E(z^{-1})D(z^{-1})$. 对 $k + d_{ii}$ 时刻, $\varphi(k + d_{ii})$ 的最小方差预测值为

$$\varphi^*(k + d_{ii}|k) = \{F(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}Y(k) + Z^{d_{ii}-d'_{ij}}H(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}U(k) + G(z^{-1})Z^{d_{ii}-d_{ij}}U(k)\}[C(z^{-1})]^{-1}. \quad (6)$$

预测误差为

$$\varphi(k + d_{ii}) - \varphi^*(k + d_{ii}|k) = E'(k + d_{ii}). \quad (7)$$

将式(7)代入式(2), 并把式(2)最小化, 得最小方差控制律:

$$\theta(z^{-1})U(k) + \varphi^*(k + d_{ii}|k) - W(k) = 0. \quad (8)$$

将式(6)代入式(8), 得

$$[\theta(z^{-1})C(z^{-1}) + G(z^{-1})Z^{d_{ii}-d_{ij}}]U(k) = C(z^{-1})W(k) - F(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}Y(k) + Z^{d_{ii}-d'_{ij}}H(z^{-1})[P_d(z^{-1})]^{-1}V(k), \quad (9)$$

其中

$$Q(z^{-1}) = [B(0)^T]^{-1}[E(0)^T]^{-1}Q'(0)^T Q'(z^{-1}).$$

实际上, 令 $P(z^{-1}) = I$, 由式(5)得参数估计模型:

$$Y(k) = F(z^{-1})Y(k - d_{ii}) + G(z^{-1})U(k - d_{ij}) + H(z^{-1})V(k - d'_{ij}) + [I - C(z^{-1})]Y^*(k|k - d_{ii}). \quad (10)$$

式中 $F(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 为对角矩阵:

$$\begin{aligned} F(z^{-1}) &= F_0 + F_1 z^{-1} + \dots + F_{n_a-1} z^{-(n_a-1)}, \\ H(z^{-1}) &= H_0 + H_1 z^{-1} + \dots + H_{n_h-1} z^{-(n_h-1)}, \quad n_h = n + d_{ii}, \\ G(z^{-1}) &= G_0 + G_1 z^{-1} + \dots + G_{n+2d_{ii}-1} z^{-(n+2d_{ii}-1)}, \\ C(z^{-1}) &= I + C_1 z^{-1} + \dots + C_{n_c} z^{-n_c}. \end{aligned}$$

令 $d_{ij} = d'_{ij}$, 参数矩阵:

$$\begin{aligned} \theta &= [F_0, F_1, \dots, F_{n_a-1}, G_0, G_1, \dots, G_{n+2d_{ii}-1}, \\ &H_0, H_1, \dots, H_{n+d_{ii}-1}, C_1, \dots, C_{n_c}]^T = [\theta_1, \theta_2]. \end{aligned} \quad (11)$$

数据向量:

$$\begin{aligned} X_i(k) &= \{Y^T(k + d_{ii}), \dots, Y^T(k - d_{ii} - n_a + 1), \\ &U^T(k - d_{ij}), \dots, U^T(k - d_{ii} - d_{ij} - n_b + 1), \\ &V^T(k - d_{ij}), \dots, V^T(k - d_{ii} - d_{ij} - n + 1), \\ &[-Y^*(k - 1|k - d_{ii} - 1)]^T, \dots, [-Y^*(k - n_c|k - d_{ii} - n_c)]^T\}. \end{aligned} \quad (12)$$

递推增广最小二乘法($i = 1, 2$):

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k - 1) + \frac{P_i(k - 1)X_i(k)}{\lambda_i + X_i^T(k)P_i(k - 1)X_i(k)} [Y_i(k) - X_i^T(k)\hat{\theta}_i(k - 1)], \quad (13)$$

$$P_i(k) = \left[P_i(k - 1) - \frac{P_i(k - 1)X_i(k)X_i^T(k)P_i(k - 1)}{\lambda_i + X_i^T(k)P_i(k - 1)X_i(k)} \right] / \lambda_i. \quad (14)$$

式中 λ_1 与 λ_2 分别为定量与水分回路的遗忘因子, 将式(13)与(14)得到的参数估计值 $\hat{F}(z^{-1})$ 、 $\hat{H}(z^{-1})$ 、 $\hat{G}(z^{-1})$ 与 $\hat{C}(z^{-1})$ 代入控制律(9), 得:

$$\begin{aligned} [Q(z^{-1})\hat{C}(z^{-1}) + \hat{G}(z^{-1})Z^{d_{ii}-d_{ij}}]U(k) &= \hat{C}(z^{-1})W(k) \\ &- \hat{F}(z^{-1})Y(k) - Z^{d_{ii}-d_{ij}}\hat{H}(z^{-1})V(k). \end{aligned} \quad (15)$$

取

$$Q(z^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{1 - z^{-1}}{1 - \alpha_1 z^{-1}} & 0 \\ 0 & \frac{1 - z^{-1}}{1 - \alpha_2 z^{-1}} \end{bmatrix},$$

将上述矩阵方程求解得:

$$U(k) = [U_1(k), U_2(k)]^T.$$

由目标函数(2)最小化得到的自校正调节器, 往往产生稳态偏差, 这是由于加权矩阵 $Q(z^{-1})$ 引起的, 有多种消除稳态偏差的方法. 此处采用了加一个积分器的办法, 有效的克服了稳态偏差.

四、计算机控制系统的构成

笔者设计了具有不同时滞多变量自校正控制器来控制造纸过程,需要在线、实时地估

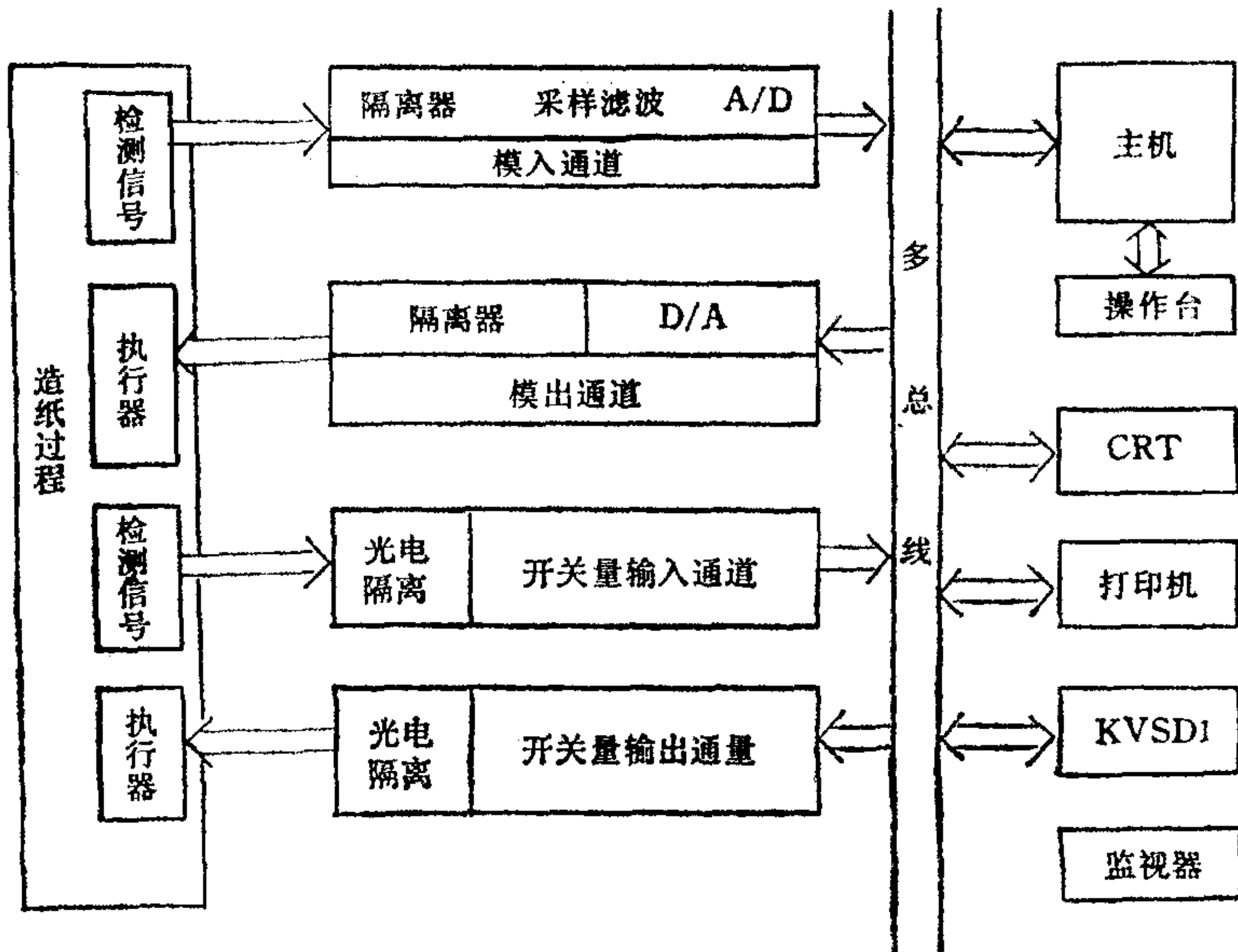


图 2 造纸过程计算机系统

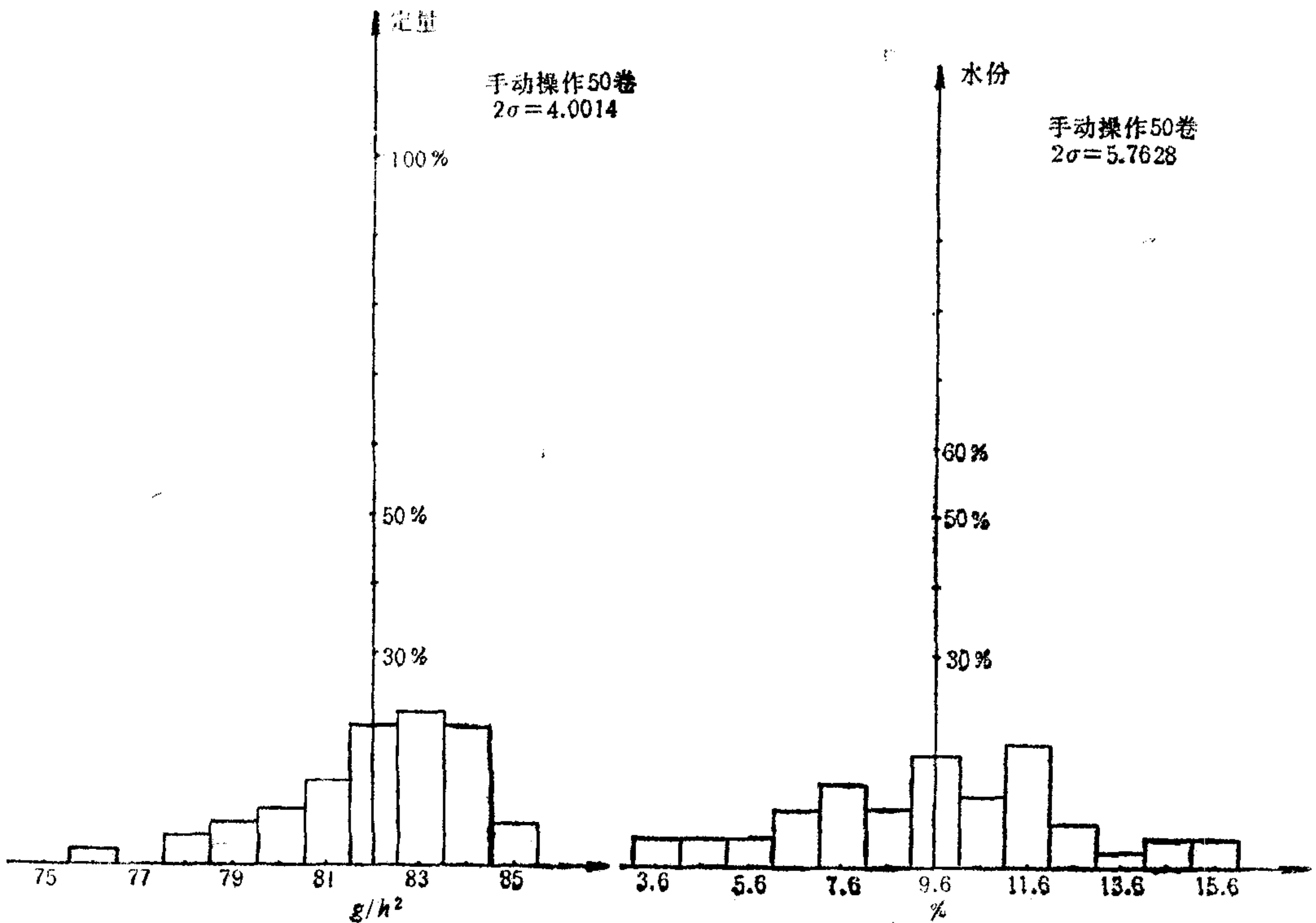


图 3 手动控制直方图

计过程或控制器的参数，并计算广义最小方差控制律和积分器。为了保证实时控制的精度、计算速度和可靠性，此处选用了适于工业控制的 INTEL 86/330A 微机系统。它是一个实时多任务计算机，采用多总线结构，功能模板丰富，便于扩充，配有 iRMX 86 实时多任务操作系统和适合于编写控制软件的 PL/M 86 高级语言，整个计算机系统如图 2 所示。

为了满足实时控制和管理的要求，除了配置 CRT 显示器和宽行打印机以外，还加配了 KVS-D 高分辨率智能彩色汉字及图形显示控制板。

五、实际运行结果及调试经验

在造纸机上实际应用不同时滞多变量自校正控制器之前，曾经在现场采集了一些数据，建立了造纸机定量与水分系统的数学模型，对模型阶次、时滞、采样间隔、遗忘因子和辨识方法进行了选择，并且对控制方案进行了数字仿真，对积分常数、加权因子与滤波多项式等进行了试验；然后在造纸机上进行控制系统的开环跟踪和闭环试验，进一步调试各参数，最终使闭环控制达到满意的效果。

该系统自 1986 年 10 月在造纸机上闭环投运以来，系统运行稳定可靠，控制精度高，提高了纸张质量，降低了消耗，节约了能源，改善了劳动条件，预计总经济效益每年六十多

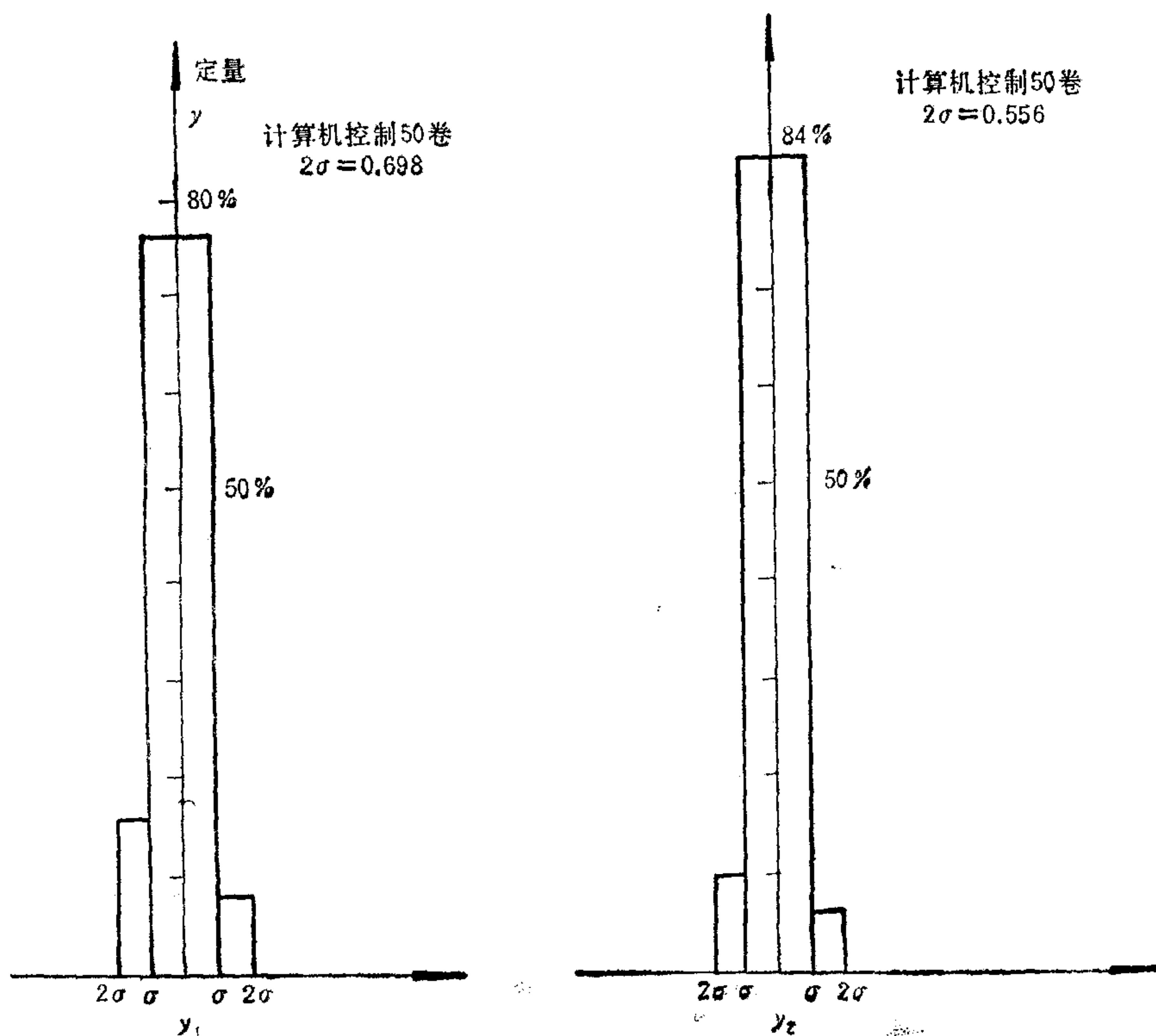


图 4 计算机控制直方图

万元。

(1) 控制精度

通过手动控制与计算机控制各 50 纸卷的对比分析,可以看出计算机自校正控制的精度明显高于手动控制。

定量的离差 2σ : 手动控制为 4.0014, 计算机控制为 0.6980。

水分的离差 2σ : 手动控制为 5.7628, 计算机控制为 0.5560。

用手动控制和计算机控制各 50 卷纸的数据作直方图,加以比较,从图 3 和图 4 中可见,计算机控制的分布很集中,没有超标的,从而大大提高了一级品率。

(2) 动态跟踪性能

在系统正常工作时,改变定量、水分设定值,从现场彩色监视器上观察定量和水分的跟踪情况,并在每卷纸结束时,打印过渡过程曲线。动态跟踪性能见表 1。

表 1 动态跟踪性能

定量变化量	变化范围	调节时间	超调量
+ 2g/m ²	79→81g/m ²	10 分	1.2%
- 2g/m ²	81→79g/m ²	11 分	0
+ 3g/m ²	79→82g/m ²	14 分	1.5%
水分变化量	变化范围	调节时间	超调量
+2%	10%→12%	8 分	0.3%
-2%	12%→10%	4 分	0

(3) 抗干扰性能

在系统正常情况下,改变大浆门、车速与浆浓度等,从现场彩色监视器上观察定量和水分的最大偏差和恢复时间,并在每卷纸结束时打印过渡过程曲线。抗干扰性能见表 2。

表 2 抗干扰性能

扰动量	变化范围	最大动态偏差	恢复时间
大 浆 门	开浆门 10 圈	2g/m ²	10 分
	关浆门 10 圈	3g/m ²	10 分
车 速	155→169 米/分	定量: 4g/m ²	11 分
		水分: 4%	11 分
浆 浓 度	3.8%→3%	定量: 5g/m ²	10.5 分
		水分: 6%	9.5 分

六、结 束 语

对造纸机的定量与水分回路设计的不同时滞多变量自校正控制器,在工厂实际运行

结果表明有很好的动态跟踪性能和抗干扰能力,运行稳定可靠,控制精度高,明显地超过了手动控制的水平,定量及水分的离差 2σ 等主要指标,相当于八十年代从国外引进的先进计算机控制的水平。

参 考 文 献

- [1] Dumont, G. A., Application of Advanced Control Methods in the Pulp and Paper Industry—A Survey, *Automatica*, 1986, 143—153.
- [2] G. Z. Lu and Z. Z. Yuan, Self-Tuning Controller of MIMO Discrete Time System, Preprints IFAC 6-th Conference on Digital Computer Applications to Process Control, Vol. 12, 1980, 103—107.

A MULTIVARIABLE SELF-TUNING CONTROLLER FOR PAPER MACHINE WITH UNEQUAL TIME LAG

MIAO ERKANG

(*Kunming Institute of Technology*)

YUAN ZHUZHI

(*Nankai University*)

XIAO GONGWEI

(*Dali Paper Mill*)

ABSTRACT

In order to control the basis weight and moisture in a paper-making process, a new multivariable self-tuning controller with unequal time lag is presented in this paper. Integrators and feedforward compensators are added to the self-tuning controller, and all parameters are estimated by the Extended Least Square method. Based upon the satisfactory control results in a paper mill, some practical problems on the design of a microcomputer control system and the adjustment of the self-tuning controller are discussed.

Key words —— Unequal time lag; multivariable self-tuning controller.