

光导纤维拉丝过程的微型机 自适应控制

张怀莲

(北京工业大学二分校)

龚为珽 徐家栋

(北京工业大学)

摘 要

本文介绍了光导纤维拉丝这一多输入单输出, 具有测量延迟及非线性特性的随机过程的实验研究情况。讨论了被控过程动态方程的建立、参数的辨识、最小方差闭环控制以及双微型机联机分级处理等问题。实验采用自动计算并实行修正控制参数 β 。以及遗忘因子 ρ 的自适应控制方案。在线控制实验表明收到了预期的效果。

一、被控过程介绍与分析

随着光通讯技术的迅速发展, 对光导纤维拉丝过程的控制提出了更高的要求。在它的各项技术指标中, 丝径精度是重要的一项。为了满足其要求, 本文介绍了用微型机对这一过程的控制进行实验研究的情况。

1. 被控过程介绍

光导纤维拉丝装置如图1所示。送料电机通过丝杠带动光导纤维预制棒缓缓下降, 当进入 2000°C 左右的高温炉时受热呈熔融状态, 再经拉丝电机牵引成细丝下坠, 收丝电机将其排绕在收丝筒上。

本系统采用激光测径仪测量丝的直径^[2]。为防止高温炉内石墨电极氧化, 向炉内连续通入氧气^[1]。

2. 被控过程分析

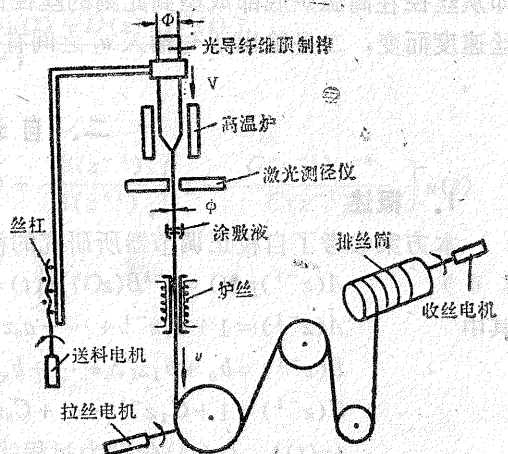


图1 被控过程示意图

从图1可知,影响丝径精度的因素很多。本过程属于多输入单输出过程。输出变量是纤维丝的直径 ϕ (离散值为 $y(t)$)。输入变量有拉丝电机的输入电压 u_l ,送料电机的输入电压 u_1 ,高温炉的温度 T^0 ,氩气的流量 $\bar{Q}$ 与温度 T_l^0 以及预制棒的直径 Φ 。

据质量守恒定律^[1],在其它条件不变的情况下,拉丝电机的线速度 ν 与丝径 ϕ 的关系为

$$\nu\phi^2 = C_1 \quad \text{或} \quad \frac{\delta\phi}{\phi} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\delta\nu}{\nu}.$$

预制棒的直径 Φ 与丝径 ϕ 的关系为

$$\Phi^2 = C_2\phi^2 \quad \text{或} \quad \frac{\delta\phi}{\phi} = \frac{\delta\Phi}{\Phi}.$$

预制棒的下降速度 V 与 ϕ 的关系为

$$V = C_3\phi^2 \quad \text{或} \quad \frac{\delta\phi}{\phi} = \frac{1}{2} \frac{\delta V}{V}.$$

(以上 C_1 、 C_2 、 C_3 均为常数)

这里选择对丝径有决定性影响的 u_l 作为输入变量,其它变量 u_1 、 T^0 、 $\bar{Q}$ 、 T_l^0 、 Φ 对过程的影响综合考虑,在过程方程中由 $V(t)$ 体现。结果本过程被作为单输入单输出过程处理。

收丝机构的波动,高温炉的氧化,测量误差及原材料配比变化等属于随机干扰。因此这是一个数学模型未知的随机过程。

本过程有两个明显的特点:一是输出对输入 u_l 的响应时间短,而输出测量延迟大,即从丝径在高温炉底部成型到此刻的丝径由测径仪测出之间存在一段延迟 τ ,且 τ 随拉丝速度而变。二是输出 ϕ 与输入 u_l 之间有明显的非线性关系。

二、自适应控制

1. 概述

本方案参考了自校正调节器所研究的被控过程^[3]:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + \lambda C(z^{-1})e(t), \quad (1)$$

其中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n},$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n},$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_nz^{-n}.$$

$\{u(t)\}$ 、 $\{y(t)\}$ 分别为过程的输入输出序列。 $\{e(t)\}$ 是随机干扰,为零均值的白噪声序列。 n 是过程的阶次。 λ 为大于零的常数。

在此基础上,我们根据本过程的具体特点作了一些相应的改进。主要有:

(1) 在差分方程(1)中增加一项 $D(z^{-1})V(t)$,以表示 $u_l(t)$ 以外的输入变量的影

响, 进而参数辨识方法采用增广矩阵法。

(2) 控制参数 β_0 不作一次人为取定, 而是由程序自动计算初值, 再根据过程的非线性进行实时修正。

(3) 用预报方法解决测量延迟问题。

改进后的方案可适应过程的非线性特性。

2. 控制方程

把变量 Φ 、 T^0 、 u_1 、 T_r^0 、 $\bar{Q}$ 对过程的影响合起来用 $V(t)$ 统一表示, 记为 $D(z^{-1})V(t)$ 。 $D(z^{-1})$ 是 $V(t)$ 的传递函数。则本过程的差分模型可以写为

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}[B(z^{-1})u(t) + D(z^{-1})V(t)] + \lambda C(z^{-1})e(t). \quad (2)$$

$(k-1)$ 是输出测量值对实际值的滞后时间, 用 $z^k/A(z^{-1})$ 乘方程 (2) 两端, 得预报方程

$$y(t+k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t) + \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})}V(t) + \frac{\lambda z^k C(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(t). \quad (3)$$

方程最右边一项是 $\{e(t)\}$ 的线性组合。用长除法令 $C(z^{-1})/A(z^{-1})$ 的商等于 $F(z^{-1})$, 所得的余式等于 $z^{-k}G(z^{-1})$ 。把这一项分成两项, 则

$$\frac{\lambda z^k C(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(t) = \lambda \left[F(z^{-1})e(t+k) + \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})}e(t) \right], \quad (4)$$

其中 $C(z^{-1}) = A(z^{-1}) \cdot F(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1})$,

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{k-1} z^{-k+1},$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{n-1} z^{-n+1}.$$

由方程 (2) 得

$$e(t) = \frac{A(z^{-1})y(t) - z^{-k}[B(z^{-1})u(t) + D(z^{-1})V(t)]}{\lambda C(z^{-1})}.$$

将其代入 (4) 并整理得

$$\begin{aligned} y(t+k) &= \lambda F(z^{-1})e(t+k) + \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})}y(t) + \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[1 - \frac{G(z^{-1})z^{-k}}{C(z^{-1})} \right] u(t) \\ &\quad + \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[1 - \frac{G(z^{-1})z^{-k}}{C(z^{-1})} \right] V(t). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{令 } \alpha(z^{-1}) = \frac{G(z^{-1})}{C(z^{-1})} = \alpha_1 + \alpha_2 z^{-1} + \dots + \alpha_p z^{-p+1},$$

$$\beta_s(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[1 - \frac{G(z^{-1})z^{-k}}{C(z^{-1})} \right] = \beta_0 + \beta(z^{-1})z^{-k}$$

$$= \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_q z^{-q},$$

$$\gamma(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} \left[1 - \frac{G(z^{-1})z^{-k}}{C(z^{-1})} \right] = \gamma_1 + \gamma_2 z^{-1} + \dots + \gamma_s z^{-s+1},$$

$$w(t+k) = \lambda F(z^{-1})e(t+k).$$

则方程(5)可写为

$$y(t+k) = w(t+k) + \alpha(z^{-1})y(t) + \beta_x(z^{-1})u(t) + \gamma(z^{-1})V(t), \quad (6)$$

其中各参数(除 β_0 外)均由辨识而定。

取控制指标为

$$J = E[y(t+k) - y_H]^2,$$

式中 y_H 为额定丝径。可以得到使 J 最小的控制方程

$$y_H = \alpha(z^{-1})y(t) + \beta_x(z^{-1})u(t) + \gamma(z^{-1})V(t). \quad (7)$$

由(7)可以直接求出控制量 $u(t)$

$$u(t) = \frac{1}{\beta_0} \{y_H - [\alpha(z^{-1})y(t) + \beta(z^{-1})u(t-1) + \gamma(z^{-1})V(t)]\}. \quad (8)$$

3. 被控过程阶的确定

本文采用分析与实验相结合的方法确定过程的阶。

在理论分析与数学推算的基础上,初步确定过程的阶次。再利用从过程采集的输入输出序列做模型拟合实验,分别计算拟合残差的均值、方差和相关函数,取均值、方差、相关性小、计算量少的情况对应的模型阶次为过程的阶。结果确定阶为2。

阶一经确定,根据闭环系统可辨识的条件^[7],可取方程(8)中的 p 等于2;经反复实验比较取 q 等于1, s 等于1;根据采样周期 T 与测量延迟 τ 算得 k 等于2。因此控制方程的具体形式为

$$u(t) = \frac{1}{\beta_0} \{y_H - [\alpha_1(z^{-1})y(t) + \alpha_2(z^{-1})y(t-1) + \beta_1 u(t-1) + \gamma_1 V(t)]\}.$$

4. 辨识方法

本文采用增广矩阵参数辨识方法。其在线递推方程为^[7]

$$\hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + K_{N+1} [y(N+1) - \Psi^T(N+1) \hat{\theta}_N], \quad (9)$$

$$K_{N+1} = P_N \cdot \Psi(N+1) \cdot [\rho + \Psi^T(N+1) P_N \Psi(N+1)]^{-1}, \quad (10)$$

$$P_{N+1} = \frac{1}{\rho} \left[I + P_N \cdot \frac{\Psi(N+1) \cdot \Psi^T(N+1)}{\rho + \Psi^T(N+1) \cdot P_N \cdot \Psi(N+1)} \right] P_N, \quad (11)$$

其中 $\Psi^T(N) = [y(N-k) \dots y(N-p-k+1) u(N-k-1) \dots u(N-k-q) V(N-k) \dots V(N-k-s+1)]$.

计算过程中 $V(N-k)$ 用预报误差代替。

$$\hat{\theta} = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_p \beta_1 \dots \beta_q \gamma_1 \dots \gamma_s]^T$$

其初值设为0.

P_N 是 $n \times n$ 的对称矩阵, 初值等于 $c^2 I$ (c 为充分大的整数, I 是单位矩阵).

5. 控制参数 β_0 的确定

为了闭环情况下参数的可辨识性^[4], 控制参数 β_0 不由辨识而定. 根据过程的非线性及不同额定丝径的要求, 我们做了一些仿真和在线实验, 确定了本过程 β_0 的近似变化规律, 即

$$\beta_0 = \beta_{00} [1 + y(t) \cdot h], \quad (12)$$

其中 h 为修正因子, 实验确定约为 0.2. β_{00} 为 β_0 的初值, 由程序的初值部分自动计算. 再根据 (12) 式在线修正 β_0 .

6. 遗忘因子 ρ 的确定

遗忘因子 ρ 的作用是突出新数据的作用而逐渐忘记老数据的影响. 对于本过程, 我们做了一些仿真和离线实验. 结果表明 ρ 值对预报误差影响较大. 这里 ρ 值不宜一次取定. 初步确定在线修正 ρ 的近似依据为

$$\rho = \rho_0 [1 - |y(t)| \cdot x],$$

其中 ρ_0 为 ρ 的初值, 取为 0.98. x 是修正因子, 实验定为 0.007.

三、在线控制实验

为了验证理论分析及处理方法的正确性, 观察在线闭环控制的效果, 特设计了这一实验. 实验所用硬件联接简图如图 2 所示.

所用程序由 Z80 汇编语言程序与 BASIC 程序两部分组成. TP-801 机运行汇编语言程序, 主要承担现场数据的采集、滤波工作. TP-802 机运行 BASIC 程序, 主要承担参数的辨识与控制量的计算任务. 主程序框图如图 3 所示.

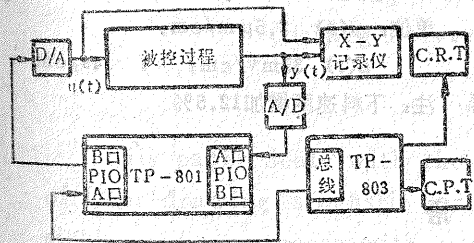


图 2 在线控制实验硬件联接简图

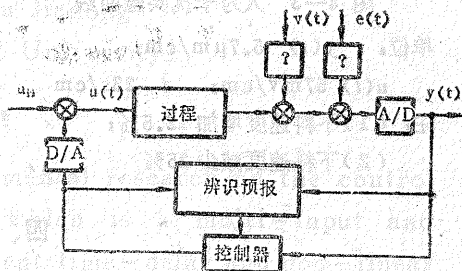


图 3 系统原理框图

初始化部分包括置初值 P_0 、 Q_0 、 h 、 x 、 v_H 及 ρ_0 . 初始运行程序中, 控制量不由辨识及预报的结果计算, 而是直接根据测得的输出误差给出控制增量. 当参数渐趋稳定后, 自动转入正式运行程序. 当丝径偏差超过 $\pm 2\mu\text{m}$ 时, 重新开始辨识; 当超过 $\pm 5\mu\text{m}$ 时 (一般是预制棒将要拉伸完毕时), 自动停机.

实验内容主要有:

- (1) 在线控制实验;
- (2) 人为干扰实验.

实验结果详见图 4.

由图 4—1 看出, 不加控制时输出的变化是比较大的. 图 4—2 说明控制作用使丝径基值的变化被限制在约 $\pm 1\mu\text{m}$ 的范围内. 图 4—3 中 $t_1 \sim t_2$ 一段表示在 t_1 时刻使下料速度突然增加 12.5% 的情况, $t_3 \sim t_4$ 一段表示在 t_3 时刻使下料速度突然减少 25% 的情况. 控制效果是比较明显的. 图 4—4 说明使下料速度增加 12.5% 但不加控制的情况, 丝径偏差约为 $11\mu\text{m}$.

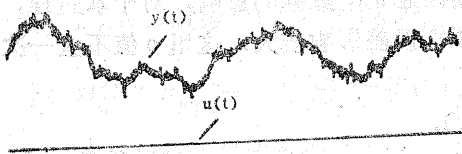


图 4—1 不控曲线

单位: $y(t)$ $4.1\mu\text{m}/\text{cm}$; t $16.6\text{s}/\text{cm}$

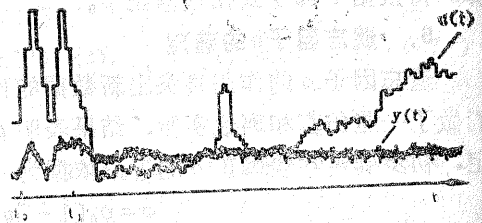


图 4—2 在线控制实验

单位: $y(t)$ $3.8\mu\text{m}/\text{cm}$; $u(t)$ $108\text{mv}/\text{cm}$,
 t $15.2\text{s}/\text{cm}$

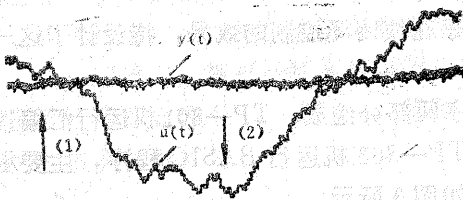


图 4—3 人为干扰实验曲线

单位: $y(t)$ $5.7\mu\text{m}/\text{cm}$;
 $u(t)$ $57\text{mv}/\text{cm}$; t $23\text{s}/\text{cm}$

注: (1) 下料速度增加 12.5%;
(2) 下料速度减少 25%

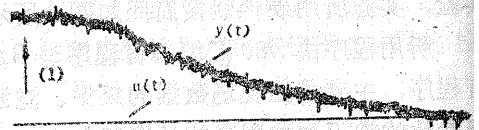


图 4—4 人为干扰且不控制实验曲线

单位: $y(t)$ $3.5\mu\text{m}/\text{cm}$;
 $u(t)$ $35\text{mv}/\text{cm}$; t $14\text{s}/\text{cm}$

注: 下料速度增加 12.5%

四、结 语

根据以上理论分析、离线仿真与在线实验的结果, 可以看出:

1. 本文对过程的分析简化与模型建立、参数辨识及闭环自适应控制的方案是可行的.
2. 可以针对过程的非线性特性自动计算并实时修正控制参数 β_0 和遗忘因子 ρ .
3. 微型机 TP—801 与 TP—803 双机分级处理方式方便、直观, 是一种可取的方案. 这里所设计的硬件接口是正确的.
4. 本方案对预报精度是敏感的. 继续提高预报与控制精度有待于进一步研究.

参 考 文 献

- [1] 中原基波、板口茂树、宫下忠, 光导纤维拉丝技术研究实用化报告, 26, 9(1977).
- [2] Instruction Manual M501 ASLB Diameter Measuring System, Anritsu, Japan(1979).
- [3] Åström, K. J. and Wittenmark, B., On Self-tuning Regulators, Automatica, 9(1973), 185—200.
- [4] Åström, K. J., Borisson, U. B., Ljung, L. and Wittenmark, B., Theory and Application of Self-tuning Regulators, Automatica, 13(1977), 457—476.
- [5] Åström, K. J., Introduction to Stochastic Theory, lund. Sweden (1970).
- [6] Cadzow, J. A. & Martens, H. R., Discrete-time and Computer Control Systems, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc, J (1970).
- [7] 韩光文, 辨识与参数估计, 国防工业出版社(1980).

THE MICROPROCESSOR-BASED ADAPTIVE CONTROL OF THE FIBER DRAWING PROCESS

Zhang Huailian

(The Second Branch College of Beijing Polytechnical University)

Gong Weiting, Xu Jiadong

(Beijing Polytechnical University)

Abstract

This paper deals with the experimental research on the control of fiber drawing stochastic process, which is a multi-input and single-output process with measurement time-delay and non-linear character. The problems discussed are the derivation of the dynamical expression of the process, the identification of parameters; minimal variance control; the connection and hierarchy processing of two microprocessors etc. Adaptive control scheme is derived, which automatically calculates and updates the control parameter β_0 and forgetting factor ρ in real-time. Results of the on-line experiments confirm the anticipated effects.