

光导纤维拉丝过程自校正控制系统

朱志祥 戴冠中 危建国

(西北工业大学计算机科学与工程系, 西安)

摘 要

本文讨论光导纤维拉丝过程自校正控制系统的设计与实现。根据系统的设计目标和拉丝过程的动态特性, 提出了基于输出预报的极点配置自校正控制算法, 该算法在微机系统上使用FORTRAN 77语言和汇编语言实现, 并得到成功的应用。

一、引 言

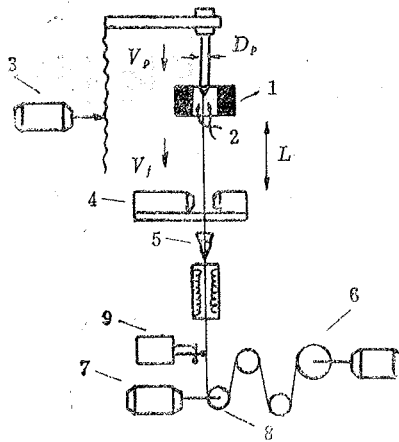
通讯系统中所用光纤的直径的均一性, 对控制光纤的传输损耗、带宽、抗张强度和连接特性是极其重要的。而光纤张力的变化则影响光导纤维强度、色散和损耗等方面的特性。为了满足光通讯对这两项指标的要求, 生产出高质量的光导纤维, 必须对影响这两项指标的因素进行全面控制。基于这样一个问题, 我们设计了光导纤维拉丝过程微机自适应控制系统, 该系统包括光纤丝径的自校正控制, 光纤张力的专家智能控制, 拉丝速度与送料速度的协调控制, 加热炉温度的PID控制, 拉丝过程初始牵引, 故障诊断、处理及实时管理等内容。目前, 该系统已投入实际使用, 性能良好。本文限于篇幅, 主要讨论光纤丝径的自校正控制系统的设计和计算机实现。

二、拉丝过程动态分析

从拉丝机的工作过程可知影响丝径精度的因素很多。确定性因素有: 送料速度 V_p , 拉丝速度 V_f , 炉温 T , 气体流量 R 和预制棒直径 D_p ; 随机因素有: 运动中全套拉丝机构的波动, 石英材料在高温炉中的挥发, 测量误差, 预制棒外径的波动, 电气元件不稳定和时变特性, 发热体老化和性能不均一等。图1示出的是光纤拉丝机的原理示意图。通过实验和观察, 我们发现在这些因素中, 拉丝速度是最重要的。丝径对拉丝速度的阶跃变化响应快, 而输出延迟大, 即从光纤在高温炉口成型到此刻的光纤丝径值由丝径测量仪测出之间有一段延迟 τ , 而且 τ 是随拉丝速度而变。由质量守恒法则可得:

$$D_p^2 V_p = D_f^2 V_f + \int_{-\tau}^t dw, \quad (1)$$

其中 w 是一个随机变量, 表示机械、电和热引起的扰动。其次是炉温 T 对丝径的影响。炉温低, 丝径变细; 炉温高, 丝径变粗。高温炉有一定的热容量, 炉温的惰性较大, 对丝径的影响较慢。这样, 从整体上频繁调节炉温, 对维持丝径的均一性并没有什么好处。显然, 用炉温作为丝径的控制变量是不合适的。为了使炉温相对稳定, 使它对丝径的影



- | | |
|----------|-----------|
| 1. 电加热炉; | 2. 氯气; |
| 3. 送料电机; | 4. 丝径测量仪; |
| 5. 涂敷杯; | 6. 收丝轮; |
| 7. 拉丝电机; | 8. 拉丝轮; |
| 9. 张力测量仪 | |

图 1 光纤拉丝机示意图

响减小到最低程度,我们将炉温作为一个独立的控制回路,并采用 PID 控制方法。

综上所述,拉丝过程具有如下特征:

1. 丝径对拉丝速度的响应上升时间快,而输出延迟大。
2. 输入和输出之间具有明显的非线性。
3. 具有随机干扰和可测干扰,主要来源于测量误差、机械结构波动、电气元件的不稳定;炉温、送料速度和预制棒直径的变化等。
4. 由于高温炉中的石墨电极老化而具有慢时变特性。
5. 对于不同的拉丝速度,系统的时延不同。

三、数学模型和自校正控制算法

设计控制系统的一项重要任务是建立被控对象的数学模型。对于这样一个复杂系统,用分析方法建立模型有一定困难。由于变量多,而它们之间大多存在耦合,即使建立了数学模型,或由于模型形式太复杂或由于精度太差而不能使用。所以在这里,我们采用系统辨识方法。根据系统的输入、输出数据和有关系统模型的先验知识,在线确定系统的离散时间数学模型。

我们知道,该过程的输入、输出之间具有明显的非线性关系。在预制棒外径均匀,送料速度稳定,预制棒在高温炉中无挥发的条件下,丝径与拉丝速度的关系是

$$D_f^2 V_f = C, \quad (2)$$

其中 $C = D_p^2 V_p$ 是常数。众所周知,非线性系统控制问题的一般解是困难的,尚无可直接应用的结果。为了避免这一困难,我们设法选择合适的工作点,并在工作点附近用线性模型来近似这一非线性过程。在这里,工作点的选择是十分重要的,它关系到模型的近似精度和线性工作范围的大小。在不考虑随机扰动的情況下,考察方程(2),在不同的额定工作点下,丝径与拉丝速度的关系是一族非线性曲线。拉丝速度的额定工作点越低,丝径对拉丝速度的变化就越敏感,而可以用来近似的线性工作区就越小。将方

程(2)展开成泰勒级数

$$D_f(V_f) = D_f(V_f^*) + D_f'(V_f^*)(V_f - V_f^*) + \dots \quad (3)$$

其中 V_f^* 表示额定工作点。当 $V_f^* = 60,000 \text{ mm/min}$, 拉丝速度在 $\pm 500 \text{ mm/min}$ 范围内变化时, 模型的最大近似差 $\varepsilon_{\max}$

$$\varepsilon_{\max} < 0.467 \mu\text{m}.$$

如果取 $V_f^* = 10,000 \text{ mm/min}$, 拉丝速度在同样的范围内变化, 则用线性模型近似这一非线性过程的最大近似误差 $\varepsilon_{\max}$

$$\varepsilon_{\max} < 11.718 \mu\text{m}.$$

虽然上述分析是在一定的假设条件下, 是粗略和不完全的, 但它却是我们将模型线性化的依据。当选取 $V_f^* = 100,000 \text{ mm/min}$ 时, 线性模型的近似误差在控制系统设计中可以忽略不计。这样, 我们就有理由用一个线性的、离散的差分方程来描述该过程

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})\xi(t), \quad (4)$$

其中, $y(t)$ 为过程的输出; $u(t)$ 为控制输入; $\xi(t)$ 是均值为零, 方差为 σ^2 的高斯白噪声; k 是过程时延; $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 是后移算子 z^{-1} 的多项式

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a},$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b},$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c}.$$

在这里, 对 $B(z^{-1})$ 不作要求, 可以是最小相位, 也可以是非最小相位。但要求 $C(z^{-1})$ 是稳定的多项式, 满足一定的正实条件。

由于拉丝过程具有时变、非线性、纯时延和随机干扰等特征, 采用模拟控制和数字 PID 控制都未达到理想的控制精度。其原因是拉丝过程的纯时延对丝径控制精度影响很大, 且上述控制算法没有输出预报和模型在线建立能力。对于一个具有较大纯时延的光纤拉丝过程, 输出预报环节对提高丝径控制精度是必不可少的。由于它的时变和非线性特性, 输出预报只有建立在数学模型的在线辨识基础上才有意义。为了使拉丝系统能够长期、稳定、有效地工作, 所用的控制方法应能自动适应拉丝过程环境的变化, 能够预报光纤在炉口成型时的丝径, 并针对变化的数学模型和丝径预报偏差施加最优控制。为此, 我们应用控制理论的最新研究成果——自校正控制, 采用系统辨识技术, 在线确定拉丝过程的数学模型, 并在所得模型的基础上进行预报和设计控制器。无论环境是否在变化, 自校正控制器总是能够有效、稳定和精确地控制拉丝过程。

本文基于输出预报提出极点配置自校正控制算法。这种算法进一步发展了 Clarke 和 Wellestead 等人提出的算法^[2,4]。文[5,6]提出的算法与本文提出的算法有相似之处, 但讨论问题的出发点不同。该算法是基于输出预报, 其特点是输出预报误差反馈, 控制

结构具有明显的物理意义。

由方程(4)可得

$$y(t+k) = A^{-1}(z^{-1})B(z^{-1})u(t) + z^k A^{-1}(z^{-1})C(z^{-1})\xi(t). \quad (5)$$

将方程(5)右边最后一项,即噪声项,分解成两部分,使其第一部分是 $\xi(t+1), \xi(t+2), \dots, \xi(t+k)$ 的线性函数,并与观测值独立;第二部分是 $\xi(t), \xi(t-1), \dots$,线性函数,可以由已得到的观测值 $y(t), y(t-1), \dots, u(t-k-1), u(t-k-2), \dots$ 精确地计算出来

$$\xi(t) = C^{-1}Ay(t) - z^{-k}C^{-1}Bu(t). \quad (6)$$

为此引入恒等式

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-k}F(z^{-1}), \quad (7)$$

其中 $E(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{k-1} z^{-(k-1)}$,

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{n_f} z^{-n_f},$$

这里 $n_f = \max \{n_c - k, n_a - 1\}$ 。由方程(7)和方程(4)可得

$$y(t+k) = C^{-1} [Ey(t) + Gu(t)] + E\xi(t+k),$$

其中, $G = EB$ 。因为 $E\xi(t+k)$ 是 $\xi(t+1), \xi(t+2), \dots, \xi(t+k)$ 的线性函数,且与观测数据 $y(t), y(t-1), \dots$ 和控制输入 $u(t), u(t-1), \dots$ 互不相关。所以 K 步超前最优输出预报为

$$y^*(t+k|t) = F(z^{-1})y(t) + G(z^{-1})u(t) - [C(z^{-1}) - 1]y^*(t+k|t), \quad (8)$$

输出预报误差为

$$\begin{aligned} e(t+1) &= y(t+k) - y^*(t+k|t) \\ &= E(z^{-1})\xi(t+k). \end{aligned} \quad (9)$$

引入控制规律

$$P(z^{-1})u(t) = Q(z^{-1}) [R(z^{-1})w(t+k) - y^*(t+k|t)], \quad (10)$$

其中 $Q(z^{-1}), P(z^{-1})$, 和 $R(z^{-1})$ 分别为 n_q, n_p 和 n_r 阶的多项式

$$Q(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{n_q} z^{-n_q},$$

$$P(z^{-1}) = p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_p} z^{-n_p},$$

$$R(z^{-1}) = 1 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_r} z^{-n_r},$$

$w(t)$ 为设定值。控制器结构如图2所示。

将方程(10)代入方程(4)可得闭环系统方程

$$(AP + BQ)y(t) = BQRw(t) + (BQE + PC)\xi(t). \quad (11)$$

系统的特征多项式为

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}). \quad (12)$$

闭环系统的稳定性由特征多项式的零点来确定。如果特征多项式的零点位于 Z 平面单位圆内,则系统是稳定的。否则系统是不稳定的,对于任意给定的多项式 $T(z^{-1})$ 。

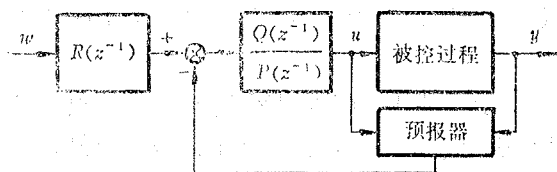


图 2 自校正控制器结构

$$T(z^{-1}) = t_0 + t_1 z^{-1} + \dots + t_{n_t} z^{-n_t},$$

如果选取 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 满足 Diophantine 方程

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) = T(z^{-1}), \quad (13)$$

则 $T(z^{-1})$ 的零点即为闭环系统的极点。可以证明 Diophantine 方程 (13) 有解的充要条件是 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 互质。

通过适当选取具有指定零点的多项式 $T(z^{-1})$ ，可以改变闭环极点的分布，解决此类系统的闭环稳定性问题。所以多项式 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 可以通过预先给定闭环系统极点来得到。而 $R(z^{-1})$ 则根据零稳态偏差的要求来确定。

上面讨论了基于 K 步超前预报和求解 Diophantine 方程的控制结构。在这样一个结构中，输出预报和极点配置具有一定的可分离性，就像随机最优控制中 Kalman 滤波与最优控制之间所具有的可分离性一样。控制信号的计算可以基于在线极点配置，也可以基于离线极点配置，即事先选取或计算 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 。输出预报和极点配置可进行适当的组合，从而减少在线计算。下面，我们讨论上述控制算法在光纤拉丝计算机控制实现中的几个问题。

(1) $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 的计算

由方程 (9) 可以看出，控制信号的计算由两部分组成：第一部分是由给定的闭环系统极点和零稳态偏差条件确定 $F(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ 和 $R(z^{-1})$ ；第二部分是由输入、输出数据 $u(t)$ ， $u(t-1)$ ， $\dots$ ； $y(t)$ ， $y(t-1)$ ， $\dots$ 计算输出预报 $y^*(t+k|t)$ 。 $P(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ 和 $R(z^{-1})$ 可以在线方法确定，也可采用离线方法确定，而 $y^*(t+k|t)$ 则要求实时在线计算。方程 (13) 可写为

$$\begin{bmatrix} b_0 & & & 1 & & & 0 \\ b_1 & \ddots & & a_1 & \ddots & & 0 \\ & \ddots & & & \ddots & & 1 \\ & & b_0 & & & & \\ & & b_1 & & & & \\ & & & a_0 & & & \\ b_{n_b} & & & & & a_1 & \\ & & & & & & \\ & & 0 & b_{n_b} & 0 & & a_{n_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ \vdots \\ q_{n_q} \\ p_0 \\ \vdots \\ p_{n_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_{n_t} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

这里要求：

- 1) 如果 $n_b = 0$ ，则 $n_q = n_a + 1$ ， $n_p = 1$ ， $n_t \leq n_a + 1$ ，并附加 $P(1) = 0$ 和 $q_0 = 1$ ；
- 2) 如果 $n_b > 0$ ，则 $n_q = n_a$ ， $n_p = n_b$ ， $n_t \leq n_a + n_b$ ，附加 $P(1) = 0$ 或 $q_0 = 1$ 。

求解方程(14)就可得到 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 的各个系数。另外,将方程(13)展开,按同次项系数相等的原则,也可求得满足闭环极点要求的 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 。

(2) 稳态偏差

在一些算法中^[3],由于不能任意配置闭环极点,引入积分器后,往往导致闭环系统动态特性变坏,甚至引起系统不稳定。结合上述极点配置方法,我们给出一个更合理、实用的消除稳态偏差的方法。闭环系统方程重写如下:

$$(AP + BQ)y(t) = BQRw(t) + (BQE + PC)\xi(t).$$

要使稳态偏差为零,系统必须具有单位增益,即

$$[A(1)P(1) + B(1)Q(1)]^{-1}B(1)Q(1)R(1) = 1. \quad (15)$$

当 $P(1) = 0$, $R(1) = 1$,则上式成立。这就意味着在 $P(z^{-1})$ 中包含一个积分器。当系统进入稳态时就有

$$E[y(t) - w(t)] = 0.$$

取 $P(z^{-1}) = (1 - z^{-1})P^*(z^{-1})$,则Diophantine方程(13)可写为

$$(1 - z^{-1})P^*(z^{-1})A(z^{-1}) + Q(z^{-1})B(z^{-1}) = T(z^{-1}). \quad (16)$$

求解上式,就可得包含一个积分器,并满足闭环极点要求的 $P^*(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 。

(3) 自校正情况

当系统参数未知或随时间缓慢变化时,首先用递推最小二乘法(RLS)辨识系统模型参数,然后根据上面讨论的方法设计控制器。假设在线模型为

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + \xi(t), \quad (17)$$

定义数据向量和参数向量

$$X^T(t) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, u(t-k), u(t-k-1), \dots],$$

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, \dots],$$

这时方程(17)可以表示为

$$y(t) = X^T(t)\theta + \xi(t). \quad (18)$$

对方程(18)可以直接应用递推最小二乘算法。

将控制规律(10)展开可得

$$u(t) = (p_0 + q_0 g_0)^{-1} \{ q_0 [R(z^{-1})w(t+k) - \underline{y}^*(t+k|t)] - \underline{P}(z^{-1})u(t) + \underline{Q}(z^{-1}) [R(z^{-1})w(t+k) - \underline{y}^*(t+k|t)] \}, \quad (19)$$

其中 $Q(z^{-1}) = q_0 + \underline{Q}(z^{-1})$,

$$P(z^{-1}) = p_0 + \underline{P}(z^{-1}),$$

$$\underline{y}^*(t+k|t) = g_0 u(t) + \underline{y}^*(t+k|t).$$

注意到, $p_0 + q_0 g_0 = t_0$ 。如果取 $t_0 = 1$,则 $p_0 + q_0 g_0 = 1$ 。方程(19)可得到简化。

(4) 自校正控制的初始投入

系统开始运行时,首先投入PID控制器控制拉丝过程。计算机系统采集输入、输出数据,为辨识模型参数作准备。在PID控制初始投入时,过程的波动较大。自校正控

制器恰好利用这一段较强的激励,快速辨识参数。经过若干控制周期,参数达到一定精度时,系统自动地将PID控制切换到自校正控制。

四、自校正控制器的计算机实现

我们选择IBM-PC作为主控机,以Z80为CPU的DJS-041单板机作为前端机。对于光纤拉丝这样一个比较复杂的过程控制问题,IBM-PC微机在实时性和输入/输出能力方面显得有些不足。为了克服这一矛盾,我们从计算机结构上加以改进。首先在IBM-PC微机上安装8087高速数字协处理器,它能与8088CPU并行工作,其运算速度可提高五倍左右。其次将DJS-041单板机作为IBM-PC微机的前端机,通过串行接口将双机联接起来。将原来由主机完成的数据采集、数据处理、键盘中断和控制信号输出等工作交给DJS-041单板机来完成,减轻了主机的负担,从而进一步提高系统的实时性。在DJS-041单板机上配置了8路12位A/D和D/A转换器,这样增强了系统的输入/输出能力。

系统的控制算法和实时管理工作比较复杂和庞大。如果使用汇编语言编写实时控制和管理软件,其实时性固然好,但这会大大增加编程的工作和难度,延长研制周期,更重要的是实时软件的可靠性难以保证,且不利于现场调试和修改。由于有了上述硬件结构,我们大胆地尝试使用高级语言FORTRAN77编写实时控制软件和实时管理软件,其优点是:软件可靠性高,编程容易,便于现场调试和修改。另外,FORTRAN77语言的逻辑和推理功能较强,便于编写智能程度较高的控制软件。

采用自校正控制后,光纤丝径可控制在 $125 \pm 1 \mu\text{m}$ 范围内,满足了设计要求。图3给

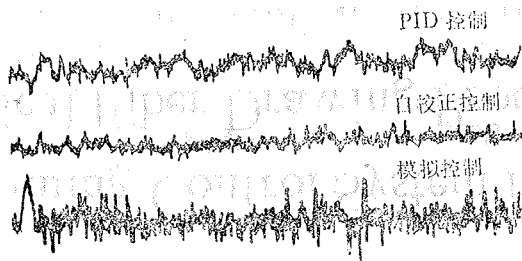


图3 使用不同方法得到的控制结果

出了采用自校正控制、模拟控制和PID控制得到的丝径控制曲线。可以看出自校正控制明显优于模拟控制和PID控制。

五、结束语

我们研制的光导纤维拉丝过程微机自校正控制系统结构合理,算法先进。经实际运行考核,性能指标已经达到或超过设计要求。该系统于1987年2月通过电子工业部组织的技术鉴定。

参 考 文 献

- [1] Åström, K.J. and Wittenmark, B., On Self-tuning Regulators, *Automatica*, 9, (1973), 185—199.
- [2] Clarke, D.W. and Gawthrop, P.J., Self-tuning Controller, *IEE, Proc.-D*, 122, (1975), 929—934.
- [3] Koivo, H.N., A Multivariable Self-tuning Controller, *Automatica*, 16, (1980), 351—360.
- [4] Wellstead, P.F., Preager, D. and Zanker, P., Pole Assignment Self-tuning Regulation, *IEE, Proc.-D*, 126, (1979), 781—787.
- [5] Åström, K.J. and Wittenmark, B., Self-tuning Controller Based on Pole Zero Placement, *IEE, Proc.-D*, 127, (1980), 120—130.
- [6] Medermott, P.E., and Mellichamp, D.A., Pole Placement Self-tuning Control of Unstable Non-minimum Phase Systems, 1983 American Control Conference, 825—831.
- [7] 朱志祥、郑政谋, 多变量极点配置自校正控制器, *控制理论与应用*, 4:2, (1987), 29—36.
- [8] 朱志祥, 一类输入和输出维数不同的多变量自校正控制器, *西北工业大学学报*, 4, (1986), 469—479.

Self-tuning Control System for an Optical Fiber Drawing Process

Zhu Zhixiang, Dai Guanzhong, Wei Jianguo

(Department of Computer Science and Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xian)

Abstract

This paper discusses the design and realization of self-tuning control system for an optical fiber drawing process. According to the design objectives of system and dynamic properties of the process, a pole-assignment self-tuning algorithm based on output prediction is presented. The self-tuning control algorithm has been realized on a microcomputer, and the successful application has been achieved.