

超精加工中压电陶瓷刀具位置的自学习控制*

李圣怡 梁建成

(精密机械与仪器系)

摘 要 本文介绍了两种自学习控制方法——P 积分学习控制和自校正调节器的参数学习控制, 及它们在压电陶瓷刀具控制中的应用。本文的研究表明, 用这种先进控制方法可以克服压电陶瓷的非线性和磁滞, 实现很高精度的定位和零误差跟踪控制。

关键词 学习控制系统, 刀具, 超精加工, 压电陶瓷

分类号 TH161.5

压电陶瓷材料作为一种超精电控执行器已广泛地运用于超精加工。特别是在超精加工的误差补偿控制中, 要求刀具不仅可实现精密定位还要可实现精密的跟踪控制。但是由于压电陶瓷本身的非线性, 磁滞回线及延时等特性给建立数学模型带来困难。尽管一些建模方法^{[1][2]}都可以取得较好效果, 但在实际运用中情况更为复杂, 影响了模型的准确性。例如在切削过程中, 刀具体的切削刚度还取决于工件的材料, 切削条件, 刀具几何参数以及机床动力学参数等。

学习控制是基于控制过程可以重复的假设。大部分机械加工过程是可以重复的或可以分解为重复的动作的。所谓可重复过程是指在重复域中每次过程控制的初始条件是相同的, 而且造成动作误差的“干扰”也是周期性可重现的。因此前一次的加工过程可为后一次提供“经验”。学习控制策略能在对系统模型知识不足或不可知条件下, 通过学习来改善其过程控制的精度。P 积分学习控制和自校正调节器的参数学习控制是简单、易实现和有应用前景的两种学习控制方法。

1 P 积分学习控制

P 积分学习控制器实际上是零相位误差跟踪控制器在重复域的推广。

设被控系统的模型为

$$A(Z^{-1})y(z) = Z^{-d}B(z^{-1})u(z) + W(z) \quad (1)$$

式中, $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$; $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}$; $u(z)$ 为输入, $y(z)$ 为输出; $w(z)$ 为周期性干扰; d 为延时步数; n 为阶数。

重复控制器可以用一个具有正反馈的延迟链结构来实现。文献[3]指出解的不唯一性, 推荐了一组特征方程的特解来建立重复控制器的脉冲传递函数, 其传递函数如(2)式所示:

$$G_r(Z^{-1}) = \frac{K_r Z^{-n+d+m} A(Z^{-1})(Z^{-m} B^{-1}(Z))}{B^+(Z^{-1})b} \quad (2)$$

$$b \geq \max_{m \in [0, n]} [B^{-1}(e^{jm})]^2$$

* 国家自然科学基金资助项目
1991年1月14日收稿

式中, $B^+(Z^{-1})$ 为 $B(Z^{-1})$ 中所有零点在单位圆中的项, $B^-(Z^{-1})$ 为所有零点在单位圆外的项, $B^-(Z)$ 为 $B^-(Z^{-1})$ 中用 Z 替代 Z^{-1} 的结果, K_r 为增益系数, nu 为 $B^{-1}(Z^{-1})$ 的阶数, N 为 W 采样数表示的基本重复周期。

实际运用中, 往往很难求出被控系统的模型, 一种不需要系统模型的简化的重复控制器如 (3) 式所示^[4], 它所带来的控制误差可用增加重复学习次数来作部分的弥补。

$$G_r(Z^{-1}) = \frac{K_r Z^{-N+d}}{1 - Z^{-N}} \quad (3)$$

系统的控制框图如图 1 所示。

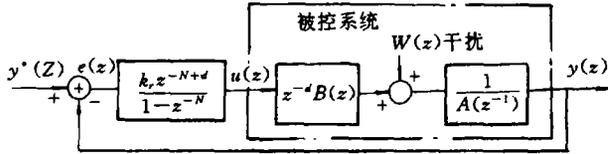


图 1 带重复控制器的控制系统框图

(3) 式变换为重复域差分方程如下:

$$u_j(k) = u_1(k) + K_r \sum_{i=1}^{j-1} e_i(k+d) \quad (4)$$

式中, j 为重复次数; $\{u_1(k)\}$, $\{u_j(k)\}$ 分别为第一次和第 j 次时控制器的输出; $\{e_i(k)\}$ 为第 i 次控制过程的误差序列。

为了强调最近的新数据的作用而削弱老数据的作用, 采用加权控制律如下:

$$u_j(k) = u_1(k) + K_r \sum_{i=1}^{j-1} \alpha^{j-1-i} e_i(k+d) \quad (5)$$

式中, α^{j-1-i} 为指数型加权系数, α 称遗忘因子, 一般在 0.95~0.99 中选取。(5) 式为 P 积分学习控制器。

2 自校正调节器的参数学习控制^[5]

自适应控制可以在系统动态特征改变或外界条件改变情况下自动地调整和修正自己的动作。自校正调节器 (STR) 的调整效果取决于参数估计的准确与否。一般来说, 过程参数估计的开始阶段, 由于缺乏先验信息, 参数估计的误差较大。自校正调节器的参数学习控制就是利用前一次任务所得到的估计参数作为“经验”, 来改善后一次参数估计的准确性。

设系统模型为:

$$Y(t) = \theta^T(t)\Phi(t) + V(t) \quad (6)$$

式中, $\theta(t)$ 为 t 时刻参数矢量, $\theta^T(t) = [Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_{n+m}(t)]$, $\Phi(t)$ 为 t 时刻的线性回归矢量, $\Phi^T(t) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n), u(t-1-d), u(t-2-d), \dots, u(t-m-d)]$, n 为输出矢量的阶数, m 为输入矢量的阶数, $V(t)$ 为噪声。

最小二乘参数估计算法的原理是在整个时间历程内使残差 $W(t)$ 的平方和最小, 即有:

$$W_k(\theta) = \sum_{t=0}^k \lambda^{k-t} [y(t) - \theta^T(t)\Phi(t)]^2 \quad (7)$$

式中, λ 为遗忘因子, 求 $W_k(\theta)$ 最小即可推出递推最小二乘 (RLS) 算法的公式如下:

$$L(K+1) = \frac{P(K+1)\Phi(K)}{\lambda + \Phi^T(K)P(K)\Phi(K)} \quad (8)$$

$$\theta(K) = \theta(K-1) + L(K)[y(K) - \Phi^T(K-1)\Phi(K)] \quad (9)$$

$$P(K) = \frac{[1 - L(K-1)\Phi^T(K)\Phi(K)]P(K-1)}{\lambda} \quad (10)$$

式中, L 为避免矩阵求逆的中间矢量, P 是表示参数估计精度可信度的协方差矩阵, 它的初值选择为足够大的数值的对角矩阵以减小由于参数初值设定不准确所造成的影响, 1 为单位矩阵; λ 为遗忘因子。

处理非线性系统的方法之一是将其作为线性时变系统来处理。但因非线性系统建模时相邻两步的参数变化往往很大而导致参数估计不准确, 所以往往要求加密采样点。这样做的缺点是增加了计算量和计算机软件开销。

STR 参数学习控制方案能克服上述缺点。假设控制过程在时间域经历 K 个采样间隔, 其非线性模型可用一线性时变模型等效, 在重复域上的第 r 次重复控制过程的模型为:

$$y^r(K) = \theta^T(K)\Phi^r(K) + V^r(k) \quad (11)$$

式中, $\theta^T(K) = [\theta_1(K), \theta_2(K), \dots, \theta_{n+m}(K)]$; $\Phi^T(K) = [-y^r(K-1), -y^r(K-2), \dots, -y^r(K-n); u^r(K-1-d), u^r(K-2-d), \dots, u^r(K-m-d)]$ 。

新的指标函数如下:

$$W_1^r(\theta) = \sum_{j=0}^{K-1} \lambda^{-j} [y^r(K) - \theta^T(K)\Phi^j(K)]^2 \quad (12)$$

对 (12) 式求最小, 即可推出新的递推最小二乘算法公式如下:

$$L^{-1}(K) = \frac{P^{r-1}(K)\Phi^T(K)}{\lambda + \Phi^T(K)P^{r-1}(K)\Phi(K)} \quad (13)$$

$$\theta^r(k) = \theta^{r-1}(K) + L^{-1}(K)[y^r(K) - \theta^{r-1}(K)\Phi^T(K)] \quad (14)$$

$$P^r(K) = \{[I - L^{-1}(K)\Phi^T(K)]P^{r-1}(K)\} / \lambda \quad (15)$$

新的 RLS 公式的意义在: 重复域中, 第 r 次控制过程参数 $\theta^r(k)$ 的识别是根据第 $r-1$ 次控制过程所识别的参数 $\theta^{r-1}(K)$ 来进行递推修正的, 因此这种参数学习方法获得的新参数更接近于真实模型的状况。

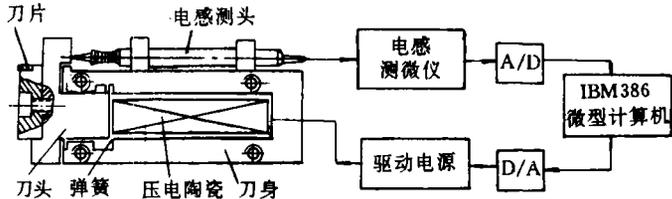


图 2 实验装置

3 压电陶瓷刀具的精密跟踪控制实验

试验装置如图 2 所示。该装置用于超精金刚石车刀的车削动态形状误差补偿控制之中, 伸长量由计算机控制在 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 范围内变化。

图 3 表示一任意给定的期望跟踪的目标曲线 (例如被加工另件形状误差曲线) 和用 PD 控制的跟踪曲线以及经 10 次学习后的 P 积分学习控制跟踪曲线。从 PD 控制曲线中可见由于压电陶瓷的非线性与磁滞回线使跟踪位置产生各处不均匀的位置误差和相位的滞后移动。而 10 次学习后的 P 积分学习控制的跟踪曲线克服了非线性的影响。用 64 点跟踪误差绝对值之和来评价跟踪效果 ($E_r = \sum_{i=0}^{63} |e_i|$), 并把 PD 控制以及以后的第 1 到第 10 次学习控制的 $E_r = (0 \sim 10)$ 绘于图 4。可见经 10 次学习后跟踪误差和从 $4.387\mu\text{m}$ 下降到 $0.6810\mu\text{m}$, 跟踪效果改善了 84.6%。

STR 参数学习控制显示了更优越的跟踪学习效果。我们要求压电刀具对 $\pm 1.1\mu\text{m}$ 振幅, 0.4Hz 的方波进行跟踪。图 5 是分别用 PD 控制, STR 控制以及经 9 次 STR 参数学习控制跟踪期望的方波曲线的结果比较。可见 STR 的跟踪效果明显优于 PD 控制。但由于跟踪开始阶段缺乏系统的先验知识, 参数识别的误差较大。在参数变化较大的区域以及非线性严重的区域, 跟踪的效果也不能令人满意。经 9 次 STR 参数学习控制后的跟踪曲线不仅在开始阶段跟踪精度得到明显改善, 而且在整个跟踪区内的精度也有较大的提高。实验建立的三阶预报方程的控制方程形式如下:

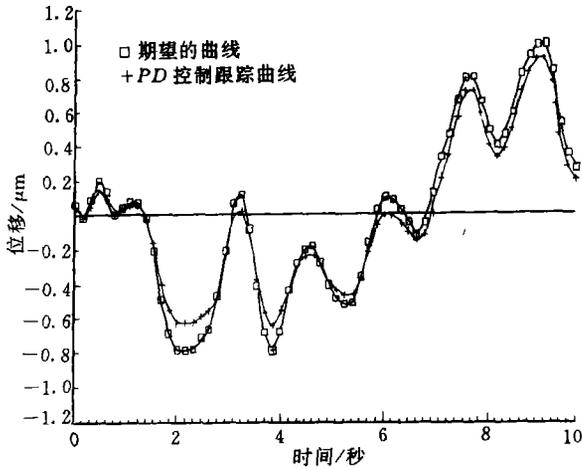


图3 PD控制的跟踪曲线与10次学习后P积分跟踪曲线

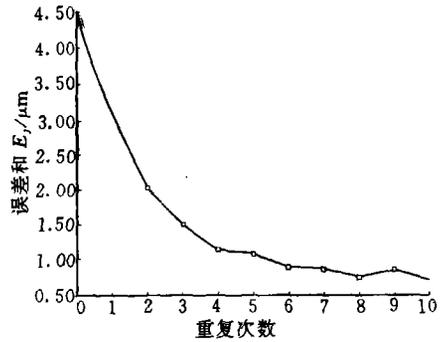


图4 10次P积分学习控制跟踪误差曲线

$$\hat{Y}^T(K) = \hat{\theta}^T(K)\Phi^T(K) \quad K = 3, 4, \dots, N \quad (16)$$

$$u^r(K) = \{\theta_1(K)y^r(K-1) - \theta_2(K)y^r(K-2) + \theta_3(K)y^r(K-3) - \theta_4(K)u^r(K-1) - \theta_5(K)u^r(K-2) + y^*(K)\}/\theta_6(K) \quad (17)$$

式中, $\hat{\theta}^T(K) = [\theta_1(K), \theta_2(K), \theta_3(K), \theta_4(K), \theta_5(K), \theta_6(K)]$

$$\Phi^T(K) = [-y^r(K-1), -y^r(K-2), -y^r(K-3), u^r(K), u^r(K-1), u^r(K-2)].$$

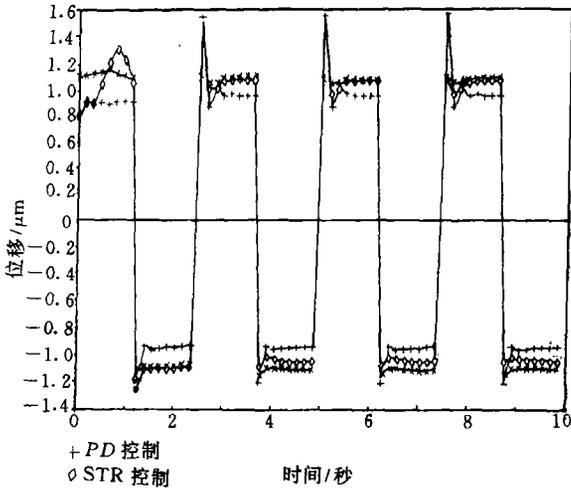


图5 PD控制和STR控制对方波曲线跟踪效果比较
目标方波±1.1μm, 0.4Hz

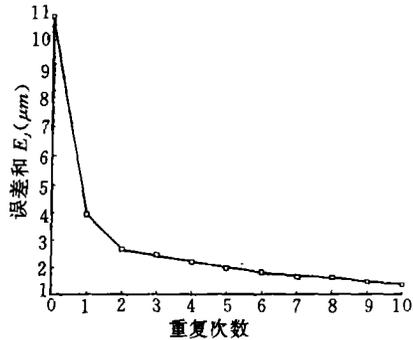


图6 PD、STR以及9次参数学习控制跟踪误差曲线

参数矢量 $\hat{\theta}^T(K)$ 由 (13) ~ (15) 式求得, 其中 $y^*(K)$ 为预期的输出值。

图6是PD, STR, STR参数学习控制随着重复次数的递增, 跟踪精度改善的情况。PD控制的64点跟踪差和 ($E = \sum_{i=0}^{63} |e_i|$) 为 $10.806\mu\text{m}$, STR控制改善为 $3.926\mu\text{m}$, 再经9次STR学习控制改善到 $1.38\mu\text{m}$ 。STR比PD跟踪精度改善了63.6%。第9次STR学习控制分别比PD和STR跟踪精度改善了87.2%和64.8%。

4 结 论

学习控制策略可以广泛应用于对系统模型知识缺乏,或完全不可知的场合,或对非线性模型无法准确建模的场合。P 积分学习控制是一种方法最简单的学习控制方法,容易用低档微机如单片机等实现而不需要知道被控对象的模型。STR 参数学习控制可对非线性系统进行在线识别。通过参数学习过程来修正模型的准确性,其方法也较为简单实用。上述两种学习控制策略应用于具有磁滞非线性特性的压电陶瓷精密跟踪控制,都取得了很好的效果达到很高的精度。这种控制方法在超精加工中具有很好的实用性和运用前景。

参 考 文 献

- 1 Ma Sn, Li Jun, Wang Shimin, The Nonlinear Identification of the compensation System in Precision Machining. ICPE, 1988
- 2 Lee. AC. Modeling of the Dynamics of a Piezoelectric Actuator with Hysteresis Nonlinearity. Ph D Thesis, Dept ME Univ of Wisconsin-Madison, USA, 1986
- 3 Tomizuka M, Tsao T. C and Chew K K Discrete-Time Domain Analysis and Synthesis of Repetitive Controllers Proc Amer Contr. Conf., 1988; 860~866
- 4 Li C J, Li S Y. On-line Roundness Error Compensation Via P-Integrator Learning Control. ASME Winter Annual Meeting, 1990
- 5 LI C J, Beigi H S M, Li Shengyi. A Self-Tuning Regulator with Learning Parameter Estimation. Robotics Research, 1990; 26

Learning Control for Piezoelectric Cutting Tool Location in Ultra-precision Manufacturing

Li Shengyi Liang Jiancheng

(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

This paper presents two kinds of learning control methods — P-Integrator learning control and self-tuning control with learning parameters. Their application of piezoelectric cutting tool to ultra-precision manufacturing is also introduced. By means of using advanced control methods, the non-linear and hysteresis characteristics of piezo-element can be overcome and high precision locating and zero-error tracking control can be achieved easily.

Key words learning control system, cutting tool, ultra-precision manufacturing, piezoelectric