

精密磨床主轴回转误差补偿技术的研究*

王世民 刘炳运 范大鹏

(精密机械与仪器系)

摘 要 本文在分析精密磨床主轴回转误差运动特点的基础上,提出了基于时序建模理论的随机运动误差补偿方案,并介绍了采用信号处理器 TMS32010 实现高速补偿控制的方法及初步实验结果。

关键词 回转误差, 误差补偿, 时间序列

分类号 TH165.3

精密加工技术是金属切削加工的重要方向之一,目的是追求尽可能高的加工精度。目前提高精密加工精度的技术途径有两个:一是高精度机床的设计制造和新的加工工艺的研究开发,二是采用误差补偿技术的方法。两种方法中后者的经济代价较低。因此已引起有关学者的重视。可以预言,未来的超精密加工系统将是新型高精度机床和误差补偿技术的高度综合。

1 精密磨床主轴回转误差运动的特点及补偿控制方案

在切入式外圆磨削加工中,工件表面的形状误差取决于砂轮和工件之间的相对运动。影响相对运动的原因很多,主要有以下几种:

- (1) 砂轮的不平衡所引起的机床结构或部件的受迫振动。
- (2) 头架主轴回转误差运动和砂轮的主轴回转误差运动。
- (3) 加工过程中,工件和砂轮接触所引起的自激振动。
- (4) 外界环境、砂轮的不均匀磨损和工件尺寸误差所引起的振动。

一般认为,(4)所造成的振动都处于较高的频率范围。另外由于磨损量很小,(3)所引起的误差可以忽略。如果在磨削以前对砂轮进行修整,那么砂轮不平衡和砂轮回转误差的影响可以降低,对工件的圆度影响不大。在以上条件下所进行的大量试验分析表明:精密外圆磨削过程中头架的主轴回转误差运动是影响工件和砂轮相对运动的主要因素。如果能对头架的主轴回转误差进行补偿,工件的圆度误差在一定程度上能得到改善。

对头架主轴回转误差进行补偿的思路是:首先用“三点法”分离出基准面的形状误差,将其存入计算机。进行误差补偿时,安装在加工敏感方向的传感器对基准面进行测

* 国家自然科学基金资助项目
** 1991年12月5日收稿

量, 将测量值减去均值、基准面形状误差和由于工件安装偏心引起的一次谐波分量后即可得到在敏感方向上的回转误差值。对回转误差值序列建立 AR 模型, 据模型求出预报值, 最后用预报值驱动微进给装置进行补偿控制。

整个测量补偿控制系统如图 1 所示。

加工敏感方向的主轴回转误差值可通过下式求出

$$x(t) = s(t) - a(t) - e(t) - f(t) \quad (1)$$

式中, $s(t)$ 为电容式位移传感器测量值; $a(t)$ 为电容式位移传感器温时漂移均值; $e(t)$ 为工件安装偏心引起的隐含于测量信号中的一次谐波分量; $f(t)$ 为装在头架卡盘附近作为测量基准面的精密圆环形状误差。

以上各量中 $a(t)$ 、 $f(t)$ 为确定性分量, 可以通过静、动态测量和“三点法”误差分离技术求得。所以据上式可以实时得出头架主轴回转误差在加工敏感方向上的分量。

测量计算出的回转误差值序列为: $x(t), x(t-1), x(t-2), \dots$, 它属于平稳时间序列, 可以用 AR 模型描述如下:

$$x(t) = \Phi_1 x(t-1) + \Phi_2 x(t-2) + \dots + \Phi_n x(t-n) + w(t) \quad (2)$$

式中, $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 为自回归系数。 $w(t)$ 为白噪声, 且 $E(w(t))=0, D(W(t))=\sigma^2$ 。

系统中设计了一个压电陶瓷微小位移产生装置, 用于补偿工件和砂轮间的相对运动。压电陶瓷装置的动态特性近似为一个 L 步纯时延环节, 可以用回转误差运动的 L 步前向预报值驱动压电陶瓷动作, 使第 L 步的回转误差运动刚好得到补偿。

据(2)式, 回转误差 L 步前向预报值可写成:

$$\hat{x}(t+L) = \hat{\Phi}_1 x(t) + \hat{\Phi}_2 x(t-1) + \dots + \hat{\Phi}_n x(t-n) \quad (3)$$

L 步预报方差为:

$$D_L = (1 + f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_{L-1}^2) \sigma^2$$

式中, $f_i (i=1, \dots, L-1)$ 为滞后 i 步的格林 (Green) 函数。

由(3)式可以看出, 步长 L 越大, 预报误差越大, 补偿效果越差, 步长 L 与工件转速有关, 可通过系统辨识方法预先确定。

对于主轴回转误差运动, 如果描述其变化规律的 AR 模型参数随时间变化不大, 那么用确定参数的 AR 模型就可以对回转误差运动值进行一定精度下的预报。但当磨削条件改变引起 AR 模型参数变化时, 则应对模型参数进行实时修正。这里采用的是递推最小二乘法, 其最小二乘递推公式为:

$$r(t) = \frac{1}{(\lambda + X_{t+1}^T P(t) X_{t+1})}$$

$$\Phi(t+1) = \Phi(t) + r(t+1) \cdot P(t) X_{t+1} (x_{t+1} - X_{t+1}^T \Phi(t))$$

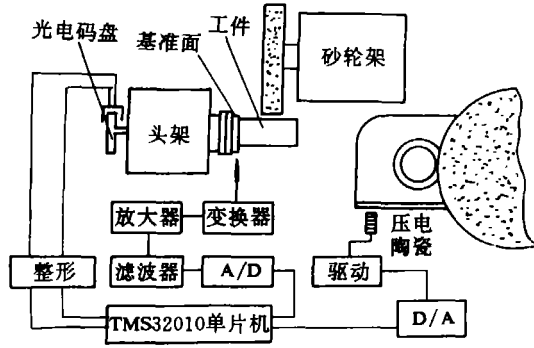


图 1 检测补偿系统

$$P(t+1) = P(t) - r(t+1)P(t)X_{t+1}X_{t+1}^T P(t)$$

式中, $X_{t+1} = [x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-n}]$ 为误差测量值向量; $\Phi(t) = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n]$ 为 t 时刻模型参数向量; $P(t)$ 为中间矩阵, $P(0)$ 随机; $r(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的误差测量值; λ 为衰减因子。

从理论上讲,用确定参数的 AR 模型进行预测和实现最小二乘法并不困难。但在实际加工补偿系统中会对计算机的运算速度提出很高的要求。若仍用普通的微机系统就满足不了实时性的要求。这里采用了高速信号处理器 TMS32010,使得确定参数的 AR 模型预报值计算时间大大降低,并能在一定转速,一定模型阶数的条件下完成递推最小二乘法,实现模型参数自适应。

程序设计时遇到的问题及解决方法:

(1) 内存的分配

由于 TMS32010 的数据 RAM 只有 144 个单元,况且其指令系统并非十分丰富。虽然可以利用递推算法中的某些特点(如对称性)来存贮 $P(t)$ 矩阵和过程变量。但同时也带来了缺点,即在进行运算时需要用很多指令进行数据位置的判断和调整,使得 TMS32010 所具有的流水线运算指令的效率不能充分发挥。

在线辨识 AR 模型参数时,对模型参数更新的计算速度有要求(应在一个采样间隔内完成一次更新),因此要尽可能地减少运算时间。对 $P(t)$ 矩阵数据采用全矩阵存贮,以提高计算效率。为了使递推程序适用于较高阶数的 AR 模型,对过程动态变量所占用的数据 RAM 单元应做到最大限度的复用,且其在数据 RAM 中的位置应预先确定。

(2) 数据的表示方法及有限字长对计算精度的影响

TMS32010 的数据运算建立在以 2 的补码表示数的基础上。每个字节有 16 位,表示一个数据,包括一个最高位, i 位整数位和 $15-i$ 位小数。

例如二进制数 0000 0010 · 1010 0000,用 Q_8 格式表示时说明其有 8 位小数,对应的十进制数据为 2.625。用 Q_6 格式时表明其有 6 位小数,对应的十进制数据为 10.5。

单字节 16 位二进制数所能表示数据的最高精度格式为 Q_{15} ,最低为 Q_0 。

在编程时,递推运算过程的中间结果都根据不同的动态范围要求分别规定不同的格式,这样在一个程序中会有多种数据格式。

进行运算时不可避免地会出现截尾问题,截尾误差服从均匀分布。设截尾后的小数位数为 b ,则截尾误差均值为 $m_e = -2^{-b-1}$,方差为 $\sigma_e^2 = 2^{-2b-1}$,由于误差的传递会使计算结果也出现误差,解决的方法是严格规定数据的动态范围,以尽量高的精度来表示数据。

(3) 计算初值的选取

为了保证定点运算的精度,必须对计算数据的动态变化范围加以限制。这当然也包括进行递推运算所需要的初值($P(0)$ 矩阵, $\Phi(0)$ 参数向量),应先计算初值,再

表 1 计算时间估计

阶 数	10	9	8	7	6	5
指令周期数	4034	3342	3716	2156	1662	1234
运算时间 (μs)	690	668	543	431	332	246

将初值送入程序进行递推。

(4) 计算时间的估算

根据 TMS32010 指令的条数和指令周期。计算出模型阶数 n 和计算时间关系如表 1 所示。

程序设计仍存在的问题是：由于数据动态范围的限制，必须先用离线算法求出初值后才能进行在线递推，这就限制了程序的应用范围。可以适当降低对计算精度的要求，以换取计算初值所占用的时间，构成具有模块化功能的快速递推最小二乘算法程序。

2 随机补偿控制实验

在自己组建的测控系统上据以上原理进行了误差补偿控制实验。

实验条件为，精密磨床 MMB1412，砂轮型号 GB320IR1，单颗粒金刚石修整砂轮，转速 2230 转/分，工件材料为 45# 钢，淬火 HRC (30~50)，外径 61mm，切入式磨削，光磨，工件转速 $n=90$ 转/分。

由电容式测微仪测得的原始信号波形如图 2 所示。

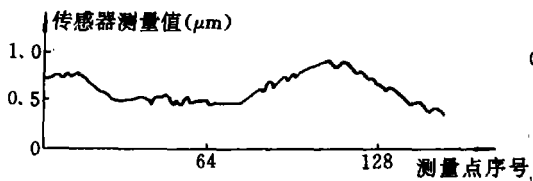


图 2 原始测量信号波形

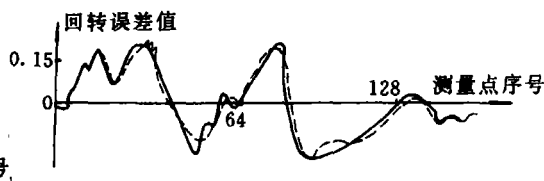
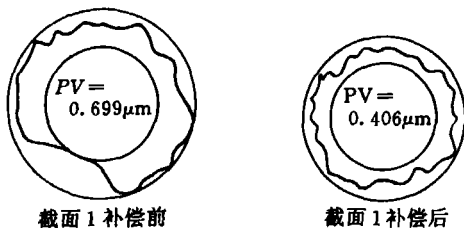
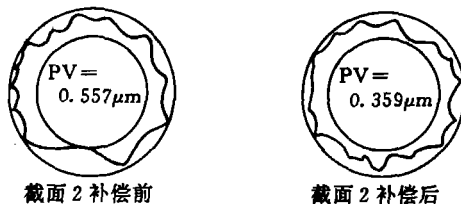


图 3 回转误差测量计算及预报曲线

据前述(1)式，原始信号应减去由偏心引起的一次谐波分量和基准面的形状误差后才能得到主轴回转误差，用 AR 模型进行在线预报。图 3 为一组回转误差测量值和预报值曲线，两者几乎重合，说明了预报的有效性。



对两个截面的回转误差运动进行了补偿，以改善工件的形状误差。图 4 是采用误差预报补偿前后的形状误差圆图象。



从图 4 上可以看出，经补偿控制后工件的圆度形状误差峰谷值明显减小，这说明了补偿控制的有效性。表 2 给出了补偿前后用进口泰勒圆度仪测得的结果。

图 4 补偿前后形状误差圆图象

从实验结果中可以看出：用该系统补偿磨床主轴回转误差运动是可行的，可使工件

形状误差改善程度大致在 35~50%。若经过大量试验并选择最优参数后，还可以使补偿效果稳定在更高的水平上。

表 2

序 号	“三点法”圆度测量值		泰勒—73 测量值	误差改善 百分比
	补偿前	补偿后		
1	工件 0.70 主轴 0.70	工件 0.41	0.42	41.4%
2	工件 0.56 主轴 0.67	工件 0.31	0.38	35.7%

参 考 文 献

- 1 Dr. S. M. Wu Research Projects, Mechanical Engineering Department, University of Wisconsin Madison, July, 1985
- 2 Rao S B. Compensatory Control of form error in Machining. Ph. D. Thesis University of Wisconsin Madison. 1980
- 3 Jonsmith. Mathematical Modeling ,Digital Simulation for Engineering and Scientists. John Wiley Sons Lnc, 1977
- 4 Hsia T C. System identification ,Least-Square Method. Lexington Books, 1977
- 5 黄俊钦. 测试误差分析与数学模型, 国防工业出版社, 1985

Researches on Compensation Technology of Spindle Rotation Error Motion in Precision Grinding

Wang Shimin Liu Bingyun Fan Dapeng
(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

In this paper, characteristics of spindle rotation error motion is analysed. A new error compensation scheme based on Time Series Theory is presented. Digital Signal processor TMS32010 is used in compensation system so that complicated control algorithm can be realized on line. The workpiece roundness, after compensation may, reach around 0.4 μ m , about 35~50% improvement.

Key words spindle error, error compensation , time series