

超精密加工在线检测与误差补偿的理论与方法^{*}

王世民 梁建成

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 超精密加工技术是高新技术、现代机械、电子产业以及国防工业的重要支柱,已成为技术发达国家重要的竞争目标。我系自1982年以来开展超精密加工技术的研究已有十多年了,取得了重要进展和重大突破。本文就所进行的研究工作,综合介绍了超精密加工中的若干理论与方法,包括形状误差在线检测的误差分离、误差补偿控制、微进给机构的非线性建模、微位移检测等内容,最后介绍了我系所取得的主要成果。

关键词 超精密加工; 在线检测; 误差分离; 补偿控制

分类号 TH161.5

超精密加工技术是高新技术、现代机械电子产业以及国防工业的重要支柱,不断开发超精密加工技术已成为技术发达国家的重要竞争目标。从提高加工精度的发展过程来看,主要有两条途径,一是不断提高机床本身的精度,这是大多数国家开发超精密加工技术的主导思想;另一条途径则是在查明机床运动误差的基础上,通过误差补偿技术来提高加工精度,这一技术思想是七十年代初由美籍华人吴贤铭教授提出来的,首先在磨床上进行了原理实验,经过二十年的研究与发展已取得了显著的成功。

自1982年以来的十多年时间里我们系就超精密加工在线检测与误差补偿的理论与方法开展了比较系统的研究与开发。我们的主导思想是在一般精密车床上,附加测量直径、几何形状(圆度、直线度和圆柱度)误差的在线检测装置,同时测得车床主轴回转误差及导轨直线度误差,通过计算机进行数据处理,控制压电陶瓷微动伺服刀具进行误差补偿和精度控制。我系在电容传感器、误差分离、补偿控制以及压电陶瓷微动伺服技术、圆柱度在线检测技术等方面都取得了重要进展和重大突破。研制成功“高精度车削加工精度复合控制系统”,该系统可将尺寸精度控制在1微米以内,圆柱度精度提高50%以上,可以加工出圆度达0.05微米的工件。

1 误差分离的理论与方法

1.1 圆度误差分离理论与方法

三传感器如图1所示布置,则所得测量方程为

* 1993年9月25日收稿

$$\begin{cases} S_A(\theta) = r(\theta) + X(\theta) \\ S_B(\theta) = r(\theta + \alpha) + X(\theta)\cos\alpha + Y(\theta)\sin\alpha \\ S_C(\theta) = r(\theta - \beta) + X(\theta)\cos\beta + Y(\theta)\sin\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中 $S_A(\theta)$, $S_B(\theta)$, $S_C(\theta)$ 为各传感器拾取的位移信号; $r(\theta)$ 为工件圆截面轮廓形状; $X(\theta)$, $Y(\theta)$ 分别为主轴回转误差运动在 X , Y 方向中的投影; α , β 分别为传感器间夹角。

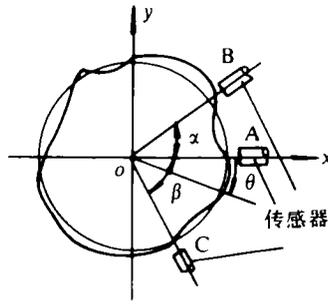


图 1

用消元法得: $S(\theta) = S_A(\theta) + C_1 S_B(\theta) + C_2 S_C(\theta)$
 $= r(\theta) + C_1 r_B(\theta + \alpha) + C_2 r_C(\theta - \beta)$ (2)

式中 $S(\theta)$ 为三传感器组合信号, C_1 , C_2 分别为加权系数, 且

$$C_1 = -\sin\beta/\sin(\alpha + \beta), \quad C_2 = -\sin\alpha/\sin(\alpha + \beta)$$

将(2)式离散化得: $S(n) = r(n) + C_1 r(n + m_1) + C_2 r(n - m_2)$
 $n = 0, 1, \dots, N-1$ (3)

对(3)式作 DFT 得: $S(K) = R(K)(1 + C_1 e^{j2\pi k m_1/N} + C_2 e^{-j2\pi k m_2/N})$
 $= R(K)W(K)$ (4)

式中 $W(K) = (1 + C_1 e^{j2\pi k m_1/N} + C_2 e^{-j2\pi k m_2/N})$ 为权函数, 可得频域内工件半径象函数 $R(K)$ 为
 $R(K) = S(K)/W(K)$ (5)

取(5)式的 IDFT 即可求出工件半径函数 $r(n)$
 $r(n) = \text{IDFT}[S(K)/W(K)]$ (6)

当 $K \geq 2$ 时, $r(n)$ 值即为截面圆度误差值 $r_K(n)$, 至此工件圆度误差与主轴运动误差已分离。实际应用中还有 $R(K)$ 的一次分量处理等多得多的问题, 这里不再详述。

1.2 直线度误差分离的理论与方法

直线度误差分离方法可从圆度误差分离方法推广而来。假定工件的直径为无限大, 则圆度误差分离方法与直线度误差分离方法具有等效性, 可用前述的方法来分离工件直线度和溜板直线运动误差。但该方法只能运用于工件足够长的情况。在短工件情况下, 由于被测信号的非周期性, 则 Fourier 变换的平移定理在边缘处不再适用, 因此(4)式不成立。工件越长, 这种边缘效应引入的误差就越小。为了适应短、精工件的测量, 我们开发了一种优化误差分离技术(OEST)方法来克服边缘效应的影响。

设 $R(n)$ 为所求的直线度误差, 其估计的指标为 \hat{R}_e , 选取估计函数 $J' = |R_e - \hat{R}_e|$, 这里 R_e 是直线度误差的真值, 是未知的, 因此, 估计函数可以选为两次估计的差, 即

$$J = J_k - J_{k-1} = |R_e - \hat{R}_{e,k}| - |R_e - \hat{R}_{e,k-1}| = |\hat{R}_{e,k} - \hat{R}_{e,k-1}| \leq \epsilon \quad (7)$$

这里 K 是递归次数, ϵ 是一任意小的值。假定工件和机床导轨是平滑的, 则测量边缘区的组合信号可以通过下式进行优化修正:

$$S(N - m + i) = [R(N - m + i) - R(i)]G_1 G_2, i = 0, 1, \dots, m - 1 \quad (8)$$

这里 $G_2 = (G_2 i)/m$, $m = m_1 + m_2$, G_2 是平移因子, G_1 是旋转因子。对 G_1 和 G_2 进行二维 0.618 优化探索, 直到 $J \leq \epsilon$ 。

1.3 圆柱度误差在线测量的数学模型

圆柱度误差的在线测量是基于圆度和直线度误差在线测量基础之上的, 如图 2 示, 在

图 1 所示布置 A, B, C 三个传感器的基础上, 沿 Z 轴方向布置一个传感器 D.

对于第 Z 个截面, 这时由 A, B, C 三个传感器, 可得下列测量方程:

$$\begin{cases} S_A(\theta, Z) = r(\theta, Z) + X(\theta, Z) \\ S_B(\theta, Z) = r(\theta + \alpha, Z) + X(\theta, Z) \cos \alpha + Y(\theta, Z) \sin \alpha \\ S_C(\theta, Z) = r(\theta - \beta, Z) + X(\theta, Z) \cos \beta + Y(\theta, Z) \sin \beta \end{cases} \quad (9)$$

由(9)式, 按圆度三点法误差分离技术, 可分离得工件圆度误差 $r_R(\theta, Z)$. 对任意相位 θ , 由 B, D 二传感器, 可得下列测量方程:

$$\begin{cases} S_B(\theta, Z) = R_z(\theta, Z) - S(\theta, Z) \\ S_D(\theta, Z) = R_z(\theta, Z + L) - S(\theta, Z) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $R_z(\theta, Z)$ 和 $S(\theta, Z)$ 分别为工件直线度误差和溜板直线运动误差. 由(10)式, 按照 OEST 原理, 可分离得 $R_z(\theta, Z)$.

令工件的圆柱度误差为 $C_Y(\theta, Z)$, 则有

$$C_Y(\theta, Z) = r_R(\theta, Z) + R_z(\theta, Z)$$

上式即为工件圆柱度误差的数学模型. 但实用中, 该方法需要用 4 个传感器, 操作使用也比较麻烦, 因此在实际使用中可只用三个传感器沿 Z 轴各截面进行测量而求出圆柱度来, 但需作以下假设:

- (1) 各截面瞬时平均中心连线为一直线, 在某一瞬时该直线在空间位置是唯一的.
- (2) 瞬时平均中心与截面圆心之间的相对位置不变.

2 误差补偿的理论与方法

2.1 确定性误差补偿原理

设已分离的误差信号为 $r_b(n)$, 补偿信号为 $C(n)$, 刀尖位移信号为 $X(n)$, 为取得最佳补偿效果, 应使 $X(n) = r_b(n)$, 但实际上还必须考虑微动伺服机构及

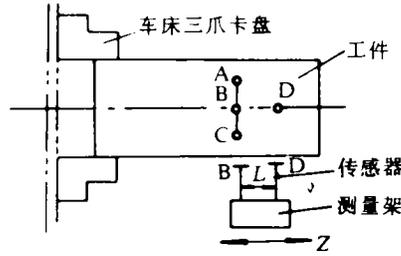


图 2

切削过程传递函数 $G_1(s)$, $G_2(s)$ 的影响. 如图 3 所示, 则有

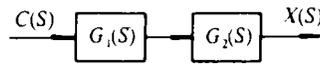


图 3

$$X(S) = G_1(s)G_2(s)C(S) \quad (12)$$

$$C(S) = X(S)/G_1(s)G_2(s) \quad \text{而} \quad X(S) = r_b(s)$$

$$\text{即} \quad |C(S)| e^{j\phi[C(S)]} = |r_b(s)| / |G_1(s)G_2(s)| e^{j[\phi[r_b(s)] - \phi[G_1(s)G_2(s)]]}$$

$$\text{或} \quad |C(S)| = |r_b(s)| / |G_1(s)G_2(s)|$$

$$\phi[C(S)] = \phi[r_b(s)] - \phi[G_1(s)G_2(s)]$$

上式说明, 必须对实测误差信号的幅值和相位进行修正才能得到最佳补偿控制信号. 实际上, 由于 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的影响主要表现为伺服机构时延造成的补偿信号的滞后和切削阻尼作用造成信号的衰减, 为此, 可用超前步数和控制比例系数对实测误差信号的相位和幅值进行修正.

2.2 随机性误差补偿原理

随机性误差补偿有两种方法: 一种是把误差信号 X_i 看成是包含确定性信号的随机信

号,用 Fourier 分析从 X_t 中分离出确定性谐波成分,余下部分 W_t 用时序建模方法建立线性自回归模型 $AR(n_1)$

$$W_t = \phi_1 W_{t-1} + \phi_2 W_{t-2} + \dots + \phi_{n_1} W_{t-n_1} + \sigma_t \quad (14)$$

另一种方法是将 X_t 整体上看成是一平稳随机过程,对 X_t 建立线性自回归模型 $AR(n_1)$

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_{n_1} X_{t-n_1} + a_t \quad (15)$$

实用的随机性误差补偿原理如图 4 所示,图中 $X(t)$ 为连续的误差信号, $D(Z)$ 为超前预报方程的 Z 传递函数,

τ 为计算机在每一采样周期中所用的计算时间, $W_0(S)$ 为零阶保持器的传递函数, $W_1(S)$ 为微进给

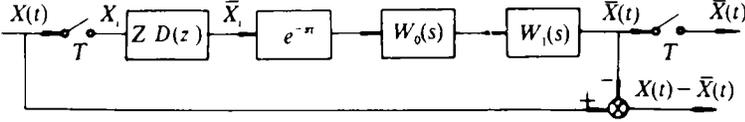


图 4

机构的传递函数, $\bar{X}(t)$ 为刀具位移, $X(t) - \bar{X}(t)$ 为切削中残留的(主轴)误差。其中 $W_1(S) = 1/(TS+1)$, $W_0(S) = (1 - e^{-ST})/S$ 。

$$D(Z) = \phi_{11} Z^{-1} + \phi_{21} Z^{-(1+1)} + \dots + \phi_{n_{11}} Z^{-(1+n_1-1)} \quad (16)$$

因此,补偿系统是一个开环系统,整个系统的 Z 传递函数为

$$W(Z) = \bar{X}(Z)/X(Z) = Z^1 D(Z) \mathcal{L}[W_0(S)W_1(S)e^{-s\tau}] \quad (17)$$

2.3 误差补偿的学习模型

在机床运动误差重复性良好的条件下,可以认为切削加工过程是可重复过程,因此,可以通过学习控制方法克服上述补偿方法中由于伺服机构及切削过程的非线性引起的控制误差,进而提高补偿效果。

自学习控制的原理如图 5 所示,

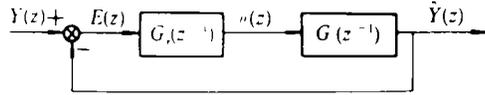


图 5

图中 $G(Z^{-1})$, $G_r(Z^{-1})$ 分别是被控制对象和重复控制器的 Z 传递函数,

$Y(Z)$ 为跟踪输出, $E(Z)$ 为跟踪误差, $U(Z)$ 为控制输入。

采用 P 积分学习控制器的 Z 传递函数如下:

$$G_r(Z^{-1}) = K_r z^{-p+d} / (1 - z^{-p}) \quad (18)$$

式中 K_r 为增益系数,取 $0 < K_r < 2$; p 为控制序列的重复周期; d 为延时步数。其差分方程表示的控制律为

$$U_j(n) = U_1(n) + K_r \sum_{i=1}^{j-1} a^{j-1-i} e_i(n+d) \quad (19)$$

式中 a 为遗忘因子,一般取 $0.95 \sim 0.99$, a^{j-1-i} 为指数加权系数。根据式(19)描述的控制规律,即可实现误差的学习控制补偿。实用中取 $U_1(n)$ 为补偿前测得的误差序列, $e_i(n)$ 为第 i 次补偿后测得的误差序列。

3 微进给机构的非线性建模

3.1 微进给原理

在微进给机构中,我们采用了具有大电致伸缩效应的 $(Pb, La)ZrTiO_3$ 陶瓷作位移发生器件,其产生位移的原理是:当电压施加在电致伸缩元件上时,它由于感应极化引起

原子或离子从平衡位置的位移，于是就产生了不依赖于电场方向而与电场平方成正比的变形，其位移方程为

$$S = ME^2 \quad (20)$$

式中 S 为应变变量， M 为电致伸缩常数， E 为电场强度。

为了获得较大伸长量，采用多片迭起来使用，其机械位移是串联的，电路是并联的，总伸长量 f 为

$$f = ((nM)/h)v^2 \quad (21)$$

式中 n 为片数， h 为每片厚度， v 为电压。

由(21)式知，其电压一位移特性上表现出二次抛线性曲线，且其中的磁滞环曲线又是一多值非线性问题，所以采用电致伸缩型压电材料的微进给机构的非线性特征表现十分复杂。因此，需要建立精确的微进给机构的动态数学模型。

3.2 微进给机构的非线性建模

微进给机构的动态模型是采用非线性动态数据系统(NLDDS)建模方法而得到的，该方法是基于泰勒展开理论，其模型如下：

$$Y(R) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{j=0}^m b_j u(k-j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \phi_{ij} y(k-i) y(k-j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m \tau_{ij} u(k-i) u(k-j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m \pi_{ij} y(k-i) u(k-j) + e(k) \quad (22)$$

这种非线性模型比用 DDS 方法得到的线性模型，其建模精度要提高 14% 左右。

除了用 NLDDS 建模方法外，微进给机构的非线性特性还可采用基于神经网络的辨识器来反映，这方面也已取得了很好的效果。

4 微位移检测理论与方法

超精密加工中在线检测的关键之一是位移检测。十多年来，我们先后就微位移的气动、电感、电容等检测理论与方法进行了研究，并研制了相应的仪器，限于篇幅，在此仅介绍数字式电容测微仪的原理。

如图 6 所示，测头端面和与之平行的被测工件表面形成一个电容器，其电容量 C 可表示为

$$C = \epsilon S/d \quad (23)$$

式中 ϵ 为空气的介电常数， S 为测头端面面积， d 为测头到工件表面的距离。此电容与一固定电容 C_0 和一固定电感 L 构成测量振荡器的谐波回路，测量振荡器输出信号的频率可由下式求出。

$$f = 1/2\pi \sqrt{L(C_0 + C)} \quad (24)$$

随着 d 的变化， C 成反比变化，从而改变了 f 。设测头与工件相距无穷远时振荡器频率为 f_0 ，则有

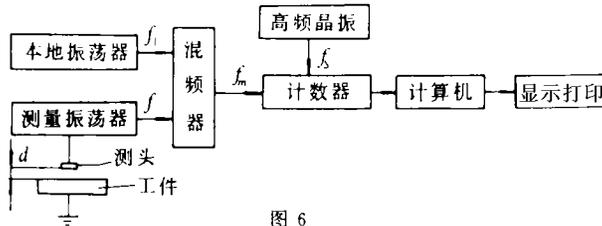


图 6

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC_0} \quad (25)$$

混频器的输出频率 f_m 与输入频率 f 的关系为

$$f_m = f - f_1 \quad (26)$$

式中 f_1 为本振频率。假设该频率为一定值，则 d 的变化最终会引起中频 f_m 的变化，只要测出 f_m 偏移量，就可获得距离的变化量。在混频器输出信号的两个周期内，可计算出高频晶振产生的计数脉冲的个数。若计数值为 D ，那么 f_m 可由 D 和脉冲频率 f_s 表示

$$D = 2f_s/f_m \quad (27)$$

于是，根据式(23)~(27)，有

$$K = \epsilon_s/C_0 \quad (28)$$

进而推导出测微仪的数学模型如下：

$$d = K/[(Df_0/2f_0 + Df_1)^2 - 1] \quad (29)$$

5 理论与方法的应用成果

作为理论与方法的实际应用，十多年来，我们研制了一系列实用系统，取得了水平较高的科研成果，主要成果简介如表 1 所示。

表 1 主要研究成果

序号	项目名称	功能	性能指标		
			测量范围/ μm	分辨率/ μm	重复精度/ μm
1	压电陶瓷微进给装置	微量进给,可用于车削磨削等方面	0~30	0.1 0.01	0.1
2	气动位移传感器	非接触微位移测量	0~40	0.08	0.5
3	电感测微仪	微位移测量	0~100	0.01	0.3
4	数字式电容测微仪	非接触微位移测量	0~40	0.005	0.01
5	高精度车削加工复合控制系统	在线测量尺寸,圆度,直线度,圆柱度,并进行补偿控制加工	外径 25~75mm	0.1	0.8
			内径 5~25mm	0.1	0.8
			长度 \leq 160mm	1	2
			圆度 0~40	0.005	0.02
			直线度 0~40	0.005	0.09
圆柱度 0~40	0.005	0.1			
6	滑阀副配磨参数测量系统	可测量重迭量,单边零位高度,零位总高度,配磨曲线,重合度,弯曲度,节流边圆角半径和径向间隙	位移 \pm 100	0.1	0.5
			流量 0~1600L/h		2.5%
			系统		0.5
7	伺服阀阀芯轴向尺寸磨削控制	伺服阀阀芯轴向台阶尺寸的精度控制	0~20	0.05 0.1	0.5 0.5
			0~200		
8	刚度测量仪	伺服阀关键零件的刚度测试	位移 0~200	0.01	
			变形 80		
			刚度 0.0036N/ μm 0.38N/ μm	0.01	5%

参 考 文 献

- 1 欧阳昌宇等. 超精密加工技术的发展及其对策. 见: 中国机械工程学会三十五周年年会论文
- 2 梁建成. 误差补偿—提高机械加工精度的重要途径. 机械工程, 1987, 3
- 3 王世民等. 压电陶瓷车削微量进给装置. 航天工艺, 1986
- 4 袁洪祥等. 超精密加工中圆度的在线测量与补偿技术. 航空学报, 1988, 9(4)
- 5 李均等. 在线圆度测量装置. 仪器仪表学报, 1989, (1)
- 6 王浩藩等. 超高精度机床直线运动误差的检测与补偿系统的理论与实验研究. 国防科技大学学报, 1987, (4)
- 7 梁建成. 在线检测机床直线运动误差的数学模型与参数选择. 计量技术, 1988, (12)
- 8 Li Shenyi, et al. The Optimum EST—a New Method for On-line Measurement of the Straightness of Precision Machine Tools and Machined Workpiece. Proc. of 7th International Precision Engineering Seminar, 1993
- 9 Li Jun, et al. The In-situ Measurement of Roundness and Straightness and Cylindricity. COMADEM'91
- 10 LI Shenyi, et al. Ultra-precision Tracking Control Via P-Integrator Learning Control. Proc. of CIRP Conf. on PE & MS. Sept. 1991
- 11 王世民等. 高精度尺寸在线测量与控制系统. 航天工艺, 1992, (5)
- 12 李圣怡等. 超精加工中压电陶瓷刀具位置的自学习控制. 国防科技大学学报, 1992, 14(3)
- 13 李圣怡等. 压电执行器 NLDDS 及神经网络非线性建模与控制. 国防科技大学学报, 1992, 14(2)
- 14 李均等. 数学式电容测微仪的研制. 国防科技大学学报, 1992, 14(2)
- 15 王世民等. 滑阀副配磨参数微机控制测量系统的研究. 国防科技大学学报, 1991, 13(1)
- 16 王世民等. 精密磨床主轴回转误差补偿技术的研究. 国防科技大学学报, 1991, 14(2)
- 17 梁建成. 圆柱度误差在线测量方法的理论研究. 计量技术, 1990, (2)

Theory and Methods of On-line Measurement and Error Compensation of Ultraprecision Machining

Wang Shimin Liang Jiancheng

(The Department of Mechantronics and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract

Some theory and methods in ultraprecision machining are presented. Error separation and error compensatory control of roundness, straightness and cylindricity are included. And nonlinear modeling of micro-driven equipment and micro-displacement measurement are also comprised. Finally some main achievements in scientific research are briefly introduced.

Key words ultraprecision machining; on-line measurement; error separation; compensatory control