

滚齿机分度链短周期误差的补偿

陈松· 底建英· 伊胜民· 刘占龙· 吴菊英·

摘要: 以控制理论和时序理论为基础,提出了一种适于生产应用的滚齿机短周期误差动态补偿方法,建立了补偿控制系统。通过实验研究和计算机仿真,认为该方法是可行的和有效的。

关键词: 滚齿机, 控制, 电致伸缩陶瓷微位移器, 计算机仿真

The Compensation Experiment on the Short-period Error in the Gear Hobbing Machine Transmission System

*Chen Song· Di Jianying· Yi Shengmin·
Liu Zhanlong· Wu Juying·*

ABSTRACT: Based on the theory of control and time series, a new dynamic way to compensate the short-period error of the gear hobbing machine is put forward. It is suited for application in production. The control system of compensation is also built up. The feasibility and effectiveness of this way is analyzed with the experiment and simulation test in computer.

KEY WORDS: hobbing machine, control, electrostrictive ceramic micropositioner computer simulation

滚齿机分度链短周期误差主要影响被加工齿轮的工作平稳性精度。由于它的因素复杂,国内大部分滚齿机床都存在分度链短周期误差严重超差的问题,难以满足齿轮生产的质量要

1989-08-17 收稿

· 机械工程系 (Department of Mechanical Engineering)

求。因此如何提高滚齿机分度传动链精度是一个重要的研究课题。本文从控制角度出发,应用时序理论提出了一种新的短周期误差动态补偿方法。以 Y38-I 型滚齿机为对象,对它作了可行性分析和实验研究,建立了补偿控制系统。

1 基本理论

1.1 系统辨识理论^[1]

在系统的输入、输出数据不受观测噪声干扰的情况下,单变量时不变线性离散系统,表示输入 $u(k)$ 和输出 $y(k)$ 关系的一般 n 阶差分方程是:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n)$$

$$\text{即: } y(k) + \sum_{j=1}^n a_j y(k-j) = \sum_{j=0}^n b_j u(k-j) \quad (1)$$

对(1)式两边做 Z 变换,则可得到离散系统的传递函数表达式为:

$$H(Z) = \frac{y(Z)}{u(Z)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_n Z^{-n}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_n Z^{-n}} = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \quad (2)$$

实际上,所得到的观测数据都包含观测噪声。因此模型(1)应表示为:

$$y(k) = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} Z^{-D} u(k) + \frac{D(Z^{-1})}{C(Z^{-1})} V(k) \quad (3)$$

其框图如图 1 所示。

- 其中 $u(k)$ —— 系统输入,
- $y(k)$ —— 系统输出
- $n(k)$ —— 噪音扰动
- $V(k)$ —— 零均值正态白噪声, $V(k) \sim NID(0, \sigma v^2)$

因此,如果人为地变更噪声信号 $n(k)$,便能改变输出信号 $y(k)$ 的值,以达到系统补偿的效果。

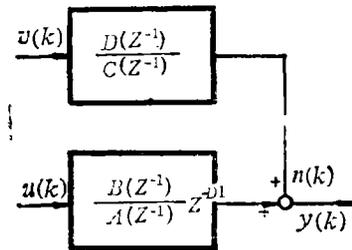


图 1 白噪声干扰系统框图
Fig.1 Block Diagram of system with noise interfered

1.2 时间序列分析理论^[2]

对一维正态分布、零均值平稳随机序列 $\{x_t\}$, 可以表示为时间序列模型的一般形式——ARMA(n, m)模型。即:

$$x_t - \phi_1 x_{t-1} - \dots - \phi_n x_{t-n} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_m a_{t-m} \quad (4)$$

等式两边作 Z 变换,则有:

$$\frac{x_t(Z)}{a_t(Z)} = \frac{\theta(Z)}{\Phi(Z)} \quad (5)$$

这是系统离散形式的动力学方程，因此时序模型可视为输入是白噪声 a_i ，输出是观测值 x_i 的系统描述，从而得到系统的传递函数。

为计算简便起见，用高阶AR模型代替ARMA模型，对系统信号进行处理。

1.3 控制思想

图2是Y38-1型滚齿机分度链传动系统图。显见，滚齿机分度链可分为两段。(1) 滚刀轴到分度蜗杆轴，其误差传递函数为 G_1 ；(2) 分度蜗杆轴到工作台，其误差传递函数为 G_2 。

分度链误差信号是各传动副运动误差在工作台上的反映，由于结构复杂，我们无法一一测得各传动副的误差，只能得到它们在工作台上的综合反映值。依据时序理论，可以把该误差信号 $e_1(t)$ 看做是由白噪声 a_i 激励信号的结果。

加工齿轮齿数不同，调整挂轮 e/f ，分度挂轮 a/b 、 c/d 都要作相应地调整，从而改变了滚刀到分度蜗杆轴的误差传递关系，使误差信号发生了变化。但分度蜗轮副的传动误差不随被加工齿轮齿数而变化，具有相对的稳定性，且是影响短周期误差的主要因素。因此选择分度蜗轮副作为主要补偿对象，设想有一补偿控制装置作用于分度蜗杆轴上，使其附加一轴向补偿运动，通过蜗轮副使工作台多转或少转一点，从而达到短周期误差补偿的效果，其原理如图3所示。图中 G_4 为补偿控制装置的传递函数。 $e_2(t) = a_i \cdot G_1 G_2 + x(t) \cdot G_4 \cdot G_2$ 。从而获得使 $e_2(t)$ 的方差为最小时的控制信号 $x(t)$ ，即：

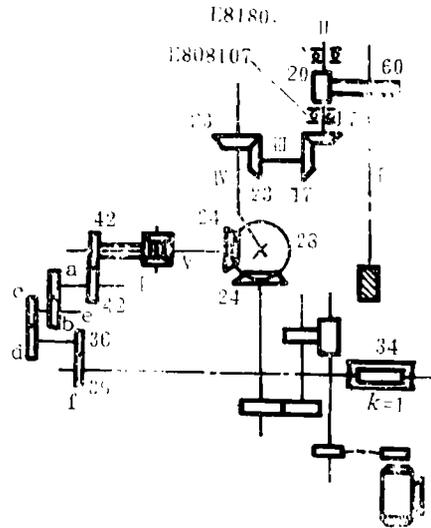


图2 Y38-I型滚齿机分度链系统
Fig.2 The graduation train system of Y38-I gear hobbing machine

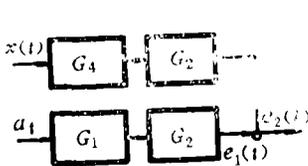


图3 控制原理的等效形式
Fig.3 The equal form of the controlled principle

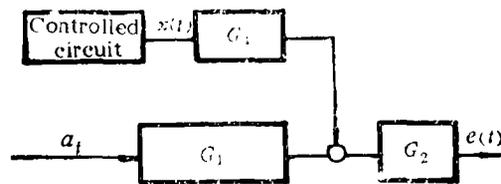


图4 分度链误差补偿控制系统
Fig.4 The control system the index-chain error compensation

$$x(t) = -\frac{G_1 G_2}{G_4 G_2} a_i = -\frac{e_1(t)}{G_4 \cdot G_2} \quad (6)$$

依据上述，提出滚齿机分度链短周期误差的补偿控制系统。为便于生产应用，该系统为开环控制系统，如图4所示。控制电路设计，根据式(6)得到的补偿控制信号 $x(t)$ 。因为，分

度链传动系统误差都是运动的有关零部件误差的综合反映, $a_i \cdot G_1 G_2 = e_1(t)$ 平稳性随机过程。故对任一机床可由一个平稳的随机误差 $e_1(t)$ 求得相应的 $x(t)$, 然后以一工作台一转为周期而复始地进行控制, 便能获得较满意的结果。

2 实验研究

根据上述思想, 要实现所设想的补偿控制系统, 需要(1) 精确测定分度链传动误差 $e_1(t)$ 和分度蜗轮副的误差, (2) 分析补偿执行元件的特性及求出其传递函数。

2.1 传动误差测量及其传递函数

用GD-T81型惯性式回转不均匀误差检查仪在工作状态下对Y38-I型滚齿机分度链及分度蜗轮副进行了误差测试, 在如下工作条件: 滚刀转速: $n = 79r/min$; 被加工齿轮: $m = 5$, $Z = 30$, 45#钢, 调质处理; 挂轮副: $e/f = 36/36$, $(a/b), (c/d) = (40/90)(90/50)$; 进给量: $S_2 = 1mm/r$; 切深 $t = 1.5mm$; 滚刀 $m = 5$, $k = 1$ 。测试结果如图5所示。对蜗轮副误差信号用时序Marple方法建立数学模型, 得到AR(20)模型^[3]即:

$$e_i - \sum_{j=1}^{20} \phi_j e_{i-j} = a_i$$

其参数示于表1, 这样可得到 G_2 为:

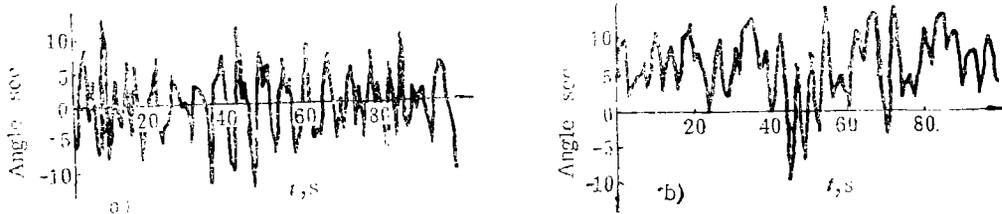


图5 (a) 分度链误差 (b) 分度蜗轮副误差曲线

Fig.5 (a) The curve of the transmission error (b) The error curve of the worm pair

表1 分度蜗轮副时序AR(20)模型参数

Table 1 Parameters of AR(20) model for the worm pair

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ_i	1.0198	-0.3279	-0.0631	0.0296	-0.0553	0.4505	-0.3579	-0.0649	0.1134	-0.0327
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ϕ_i	-0.0483	0.0897	0.1211	-0.2295	0.1303	-0.0763	0.0747	-0.1891	0.2439	-0.1513

$$G_2 = 1/\Phi(Z^{-1}) = 1/(1 - \sum_{i=1}^{20} \phi_i Z^{-i})$$

2.2 补偿执行元件的特性测试

依据补偿要求的特点, 即精度高、频响快、位移量小(约为几十 μm), 我们采用电致

伸缩陶瓷微位移器作为补偿控制执行元件，并对其静动态特性进行了测试^[4]，测试结果示于图6、图7，分析测试数据，可知：

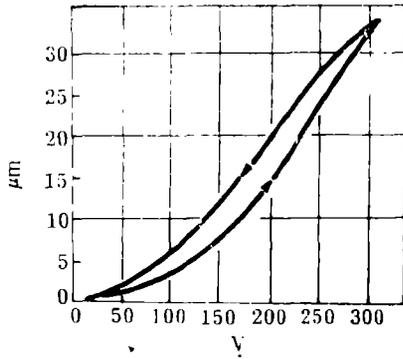


图6 控制元件的静态特性曲线

Fig.6 The static curve of the control element

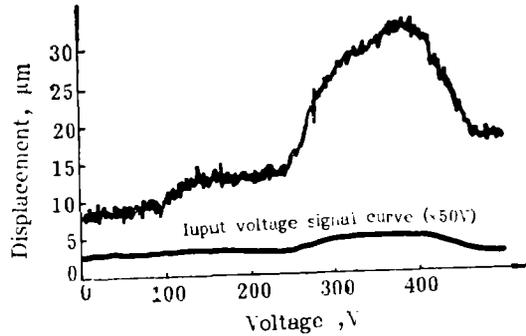


图7 控制元件的动态特性曲线

Fig.7 The dynamic curve of the control element

(1) 最大驱动电压可达300V；最大位移量34 μm ；位移重复精度0.1 μm 且在100~300V范围内，加载曲线和卸载曲线均具有较好的线性度。

(2) 位移输出依电压输入变化而变化，且有较快的频率响应。

为了精确得到传递函数 G_4 ，考虑了观测噪声的影响，利用广义最小二乘方法中的RGLS法^[1]对其动态特性进行辨识，得到如图8所示的模型结构。图中， $V(k)$ 是白噪声， $y(k)$ 是位移输出， $u(k)$ 是控制信号，且 $A(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{N_A} a_i Z^{-i}$

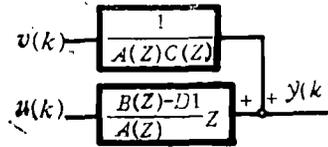


图8 传递函数 G_4 的模型结构

Fig.8 The block diagram of the transfer function G_4

$$B(Z^{-1}) = \sum_{i=D1}^{N_B+D1} b_i Z^{-i}$$

$$C(Z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{N_C} c_i Z^{-i}$$

其参数见表2。

表2 由RGLS法辨识得到的传递函数 G_4 的参数

Table 2 Parameters of transfer function G_4 identified by RGLS method

i	1	2	3	4	5
A (i)	-0.5217181	-0.4241255	-0.2217862	0.1763018	
B (i)	36.23264	-20.30816	-33.46806	-1.617581	19.51954
C (i)	0.9999851E-03	0.9999165E-03	0.9999237E-03	0.1000082E-02	

2.3 仿真实验

利用上述得到的控制模型,我们在计算机上对Y38-I型滚齿机分度链误差进行了仿真实验。图9示出了在不同噪声水平下的控制信号及控后误差。由图可知:(1)不同噪声水平下均可得到满意的控制效果。短周期误差由 $13''$ 衰减到 4×10^{-5} 。

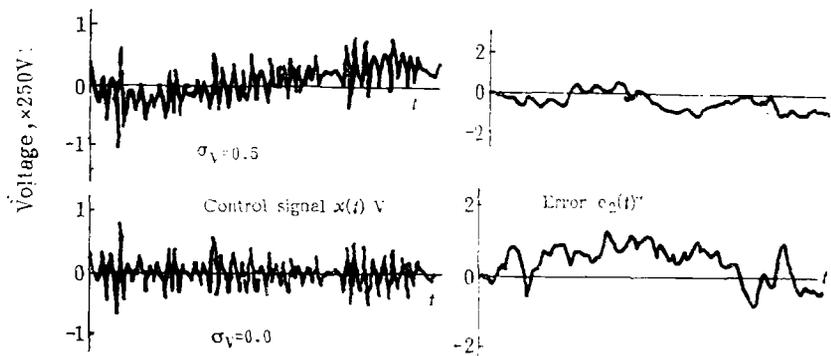


图9 仿真实验的结果

Fig.9 The result of the simulation of test

(2) 噪声信号水平增加,所需控制信号幅度加大,但控后误差变化不明显,即噪声水平对控制效果有影响,但不明显。

3 结 论

由于条件所限,本文所提出的补偿控制系统还未实际应用,但经过上述实验分析表明:

- (1) 通过试验分析,本文所提出的补偿控制方法是可行的。
- (2) 根据计算机仿真,采用这种方法来补偿控制滚齿机分度链短周期误差,得到了满意的结果。
- (3) 电致伸缩陶瓷微位移器具有精度高、响应快的特点,是该补偿控制系统的理想执行元件。
- (4) 要将该装置实际安装在滚齿机上应用于生产还需要在设计与制造等方面作进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 郑维敏。系统工程FORTRAN程序集,北京:清华大学出版社,1986
- 2 Pandit S M, Wu S M. Time Senes and System Analysls with Application, John Wiley and Sons, 1978
- 3 Marple S L. IEEE, ASSP, 1980; 28(4); 453
- 4 底建英。滚齿机分度链短周期误差补偿的研究与分析,北京钢铁学院硕士学位论文,1988