

文章编号 1004-924X(2006)01-0089-06

# 纳米定位系统动态误差灰色模型补偿方法研究

李鸣鸣, 龚振邦, 程维明, 孙麟治

(上海大学 精密机械研究所, 上海 200072)

**摘要:** 对等步距多工位工作的纳米工作台, 采用灰色模型能够同时对定位误差中的系统误差和随机误差进行动态补偿。讨论了提高灰色模型精度的方法, 建立了改进背景值的等维新息 GM(1,1) 灰色预测模型。用  $5\ \mu\text{m}$  步距定位误差进行了一步预测分析, 结果表明该模型具有较高的预测精度;  $5\ \mu\text{m}$  和  $3\ \mu\text{m}$  步距的定位误差预测补偿实验表明, 工作台的定位误差可以控制在  $40\ \text{nm}$  以内。实验证明了灰色预测模型用于纳米定位系统动态补偿的有效性, 且需要的建模数据很少、计算量小, 适用于具有时变特征的精密定位系统。

**关键词:** 纳米定位; 定位误差; 灰色模型; 预测; 动态补偿

中图分类号: TH703 文献标识码: A

## Research of dynamic error compensation for nano-positioning system based on grey model

LI Ming-ming, GONG Zhen-bang, CHENG Wei-ming, SUN Lin-zhi

(Precision Machinery Institute of Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** For a nano-stage worked in the way of multi-positions and single step, the grey model can be used to compensate the systemic errors and random errors simultaneously. A method of improving the precision of grey model was discussed, and the GM(1,1) model with equal dimension, new-information and improved background value was established. By discussing of one step prediction using the positioning step of  $5\ \mu\text{m}$ , the model proved to be high prediction precision. The compensation tests with  $5\ \mu\text{m}$  and  $3\ \mu\text{m}$  positioning steps proved that the positioning errors of the stage are less than  $40\ \text{nm}$ . The effectiveness of grey model is testified used in dynamic positioning errors prediction and compensation. For having the strong points the grey model needs less modeling data and computing works, so that it is greatly suitable for time-variable precise positioning systems.

**Key words:** nano-positioning; positioning error; grey model; prediction; dynamic compensation

### 1 引言

精密定位系统定位误差的补偿建模方法通常

有两种,一种是基于工作前误差标定的建模方法,另一种是在线实时建模方法。采用前一种方法的前提是工作台的定位误差具有较好的重复性。对微米和亚微米级精度的精密工作台,多数情况下定

值系统误差是定位误差的主要成分,系统具有较高的重复精度。目前对这种工作台定位误差的补偿广泛采用软件方法,通常的做法是用高精度仪器对工作台的使用范围进行全程标定,测得其长度方向若干位置的定位误差值(定值系统误差),然后进行误差分析和建模,得到任意位置上的定位误差值,再用其反向值进行补偿。建立系统误差模型的方法是对实验数据进行曲线拟合或插值。

然而在纳米定位系统中,环境温度、湿度、气流、振动以及各种电参数的影响更加显著,使得变值系统误差和随机误差的成分明显增大,系统具有动态特征,仅对定值系统误差进行补偿是不够的。试验结果表明,尽管纳米定位系统的定位误差值在不同季节或一天中的不同时间变动较大,但其相关性较强,具备较好的建模性能。动态数据的建模可采用基于数理统计方法的时间序列分析理论<sup>[1]</sup>,但这种方法要求具有大样本,样本有较好的分布规律且计算工作量大<sup>[2]</sup>,适用于大批量生产或长期连续工作的设备监控。对测量数据少、速度要求高的定位系统来说,它的应用受到一定的限制,而采用灰色模型则可以较好地解决这样的问题。

## 2 灰色预测模型

灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息不确定问题的新方法,已有 20 多年的发展历史,并在工农业,经济及生态等许多领域中获得了应用。在灰色理论的研究内容中,用于建模、预测的灰色模型(Grey Model, GM)是一种应用广泛的重要方法。本文将不同位置上测量到的定位误差值当作一个灰数序列,用 GM(1,1)(即一次累加,单变量)的形式,对等步距、多位置工作的纳米定位系统的定位误差进行一步预测,进而在下一步定位的同时实现了定位误差的动态补偿。

灰色模型是一个指数模型,因为它将研究对象当作一个广义的能量系统,而能量的积存与释放一般具有指数规律。当定位误差值具有动态特征时,通常就符合上述规律,因为影响定位误差值大小的环境温度、湿度以及定位系统中的电压、电流等因素都具有能量特征。

### 2.1 基本原理<sup>[2]</sup>

将  $N$  个等距位置的定位误差数据作为原始序列

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(N)\}$$

对其进行一次累加得

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(N)\}$$

其中  $X^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k X^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, N$ 。

GM(1,1)模型的白化微分方程形式为

$$dx^{(1)}/dt + ax^{(1)} = b, \quad (1)$$

相应的差分方程形式为

$$\begin{aligned} X^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) &= b \\ k &= 2, 3, \dots, N, \end{aligned} \quad (2)$$

记  $\hat{a} = [a, b]^T$ , 按最小二乘法求解得

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N, \quad (3)$$

其中

$$B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(N) & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

背景值

$$\begin{aligned} z^{(1)}(k+1) &= \frac{1}{2}(X^{(1)}(k) + X^{(1)}(k+1)) \\ k &= 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$Y_N = B \cdot \hat{a}. \quad (6)$$

式(1)的离散响应为

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - b/a) \cdot e^{-ak} + b/a, \quad (7)$$

经一次累减得到原始数据的拟合值

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k). \quad (8)$$

### 2.2 预测精度分析

式(7)不但对原始数据的拟合,当  $(k+1)$  的取值大于原始数据个数  $N$  时,还可以用于外推预测,分为短期、中期和长期预测。纳米定位补偿采用的是一步预测,即在下一步定位运动进行之前,预测出应补偿的定位误差值。

从过去的应用情况来看,灰色模型有时会出现拟合精度低或预测偏差过大的情况,原因是 GM(1,1)模型虽具有反映事物发展趋势的特点,然而它的形状简单,是特定的指数曲线,不能反映变化幅度大、波形起伏大的情况。为了提高 GM(1,1)的精度,已经有大量的研究工作<sup>[3-6]</sup>,根据纳米定位系统的实时性要求,采用以下方法具有较好的使用效果。

(1)采用短序列的等维新息模型;纳米定位系

统的影响因数众多,很容易成为时变系统,所以只有较新的测量数据才会对预测值有明显的影响,同时短序列可以弱化模型对局部信息的过滤作用,减小计算量,提高定位补偿的实时性。但建模数据最佳维数的确定目前还无法从理论上得到,对一个具体问题需要通过试验来得到。

(2)改进背景值  $z_n^{(1)}(k+1)$  的表达式:根据参考文献[3]的分析,式(5)的背景值表达式仅适用于序列数据变化平缓(低增长指数)的情况,当序列数据变化剧烈(高增长指数)时,该背景值表达式会产生较大的滞后误差。新的背景值表示为

$$z_n^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2n} [(n+1)X^{(1)}(k) + (n-1)X^{(1)}(k+1)], \quad (9)$$

$n$  的确定有两种方法:第一种是试探法。虽然它能得到最佳值,但需要大量的迭代计算,实时性差;第二种是经验公式法,表达式为

$$n = \left[ \sum_{i=2}^N R_i \right]^{\frac{1}{N-1}} + (N-1), \quad (10)$$

其中

$$R_i = X^{(1)}(i)/X^{(1)}(i-1) \quad i=2,3,\dots,N, \quad (11)$$

经验公式法获得的  $n$  值虽然不一定是最佳值,但计算量小,速度快,通常也能够满足预测精度要求,更适宜于速度要求高的定位补偿。

### 3 实验方法及结果讨论

#### 3.1 实验装置

本文的实验是在宏微两级驱动方式的大行程纳米定位系统上进行的,该系统满足各种微细加工和精密测试的定位精度要求。图 1 是实物照片,图 2 是实验系统的总体构成框图。宏定位系统由交流伺服电机及控制器、宏动工作台等部分组成,实现 150 mm 大范围的粗定位;微定位系统采用的是 PI 公司的 P-750 压电陶瓷微动工作台及驱动器,实现补偿定位(精定位)以及某个步距的连续工作定位。它的行程为 75  $\mu\text{m}$ ,分辨率为 10 nm,非线性度为 0.1%。定位误差的测量采用东京精密公司生产的激光干涉仪 DISTAX L-LM-20B,其测量分辨率也为 10 nm。

P-750 自带了电感传感器作为微位移检测元件,形成了内部闭环,在硬件上已成为一个整体。装在微工作台上的位移检测装置(分辨率为 10 nm 的精密光栅测量系统)只用于检测微工作台的位置,不对其进行实时控制,微定位系统的工作方式是闭环检测、开环控制,因此预测补偿定位具有很好的实际意义。



图 1 宏微定位实验系统

Fig. 1 Experiment system of macro-micro positioning

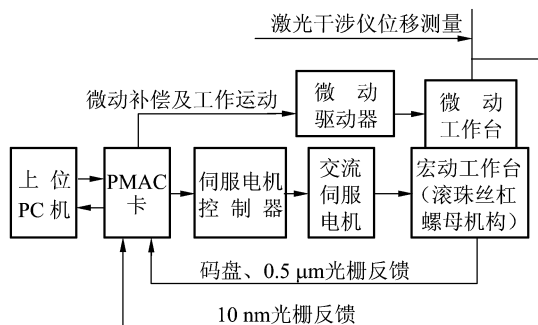


图 2 试验系统总体构成

Fig. 2 Overall diagram of experiment system

#### 3.2 补偿方法

图 3 表示了宏微定位系统的正向工作过程。在单工作位置的应用中(图 3(a)),宏微工作台分别进行一次定位即可完成工作要求。本文研究的灰色预测模型适用于图 3(b)所示的等步距多工作位置的情况。先由宏动工作台实现大行程粗定位(至宏定位位置),宏定位位置到微动工作位置起点的距离用于微动补偿定位和建立灰色预测模型,该距离的大小由宏动工作台的定位精度及灰色预测模型的维数来决定。在微动工作位置起点灰色模型开始定位误差的一步预测,直至微动工作位置终点。

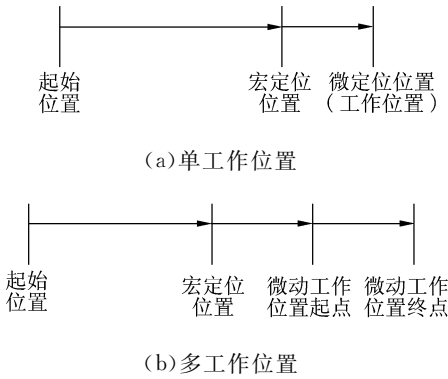


图 3 宏微定位过程

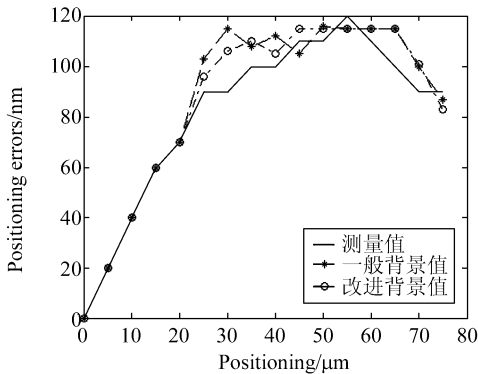
Fig. 3 Process of macro-micro positioning

### 3.3 实验结果

按照 PI 公司提供的产品技术指标控制方法, 微动工作台的位移误差控制点是首尾两点, 即 0 和  $75 \mu\text{m}$  处的位移误差近似为零, 因此它的非线性值与实际定位误差的最大值几乎相等, 约为  $75 \text{ nm}$ 。但在实际使用中, 它的定位误差往往比该值要大得多, 在  $75 \mu\text{m}$  处定位误差往往也不回零, 更重要的是工作台的定位误差重复性很差, 在不同季节甚至一天中的不同时间有较大的变化, 采用事先误差标定的补偿方法效果很差。

本文先对一次测量的定位误差用 GM(1,1) 进行一步预测, 确信模型具有较高的预测精度, 而后用预测值的反向值作为定位补偿值进行补偿实验。

图 4 是 P-750 微动工作台  $5 \mu\text{m}$  步距一次全程测量的定位误差曲线及两种灰色模型的一步预测曲线。用  $0, 5, 10, 15, 20 \mu\text{m}$  5 个位置的定位误差测量值作为灰色模型的起始建模数据, 而后用 5 维等维新息模型作一步预测, 表 1 是图 4 中的具体数据

图 4  $5 \mu\text{m}$  步距定位误差及一步预测Fig. 4 Positioning errors and its one step predicting value with  $5 \mu\text{m}$  positioning step

及其处理结果。可以看出, 最大定位误差达到了  $120 \text{ nm}$  (其他时候的测量值甚至会更大), 远高于 PI 公司所给的指标, 在这种情况下, 不进行定位误差的补偿该工作台无法使用。预测值与实际测量值之差  $(\Delta - \Delta_1)$ 、 $(\Delta - \Delta_2)$  即为预测误差, 若用一步预测值作为补偿值, 则  $(\Delta - \Delta_1)$  及  $(\Delta - \Delta_2)$  也是理论上的残留定位误差, 它们都远远小于原来的定位误差值, 同时可以看出, 改进背景值方法的模型具有更高的精度。

表 1 图 4 中的具体数据及其处理结果

Tab. 1 Data and their processing in Fig. 4

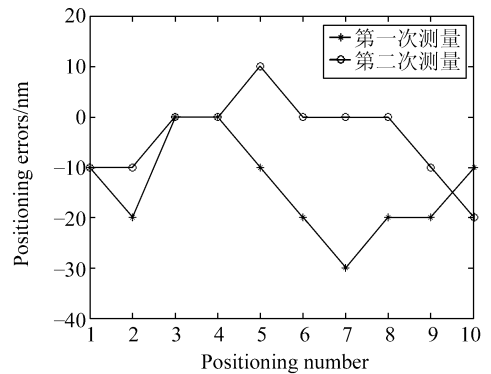
序号	$x$	$\Delta$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta - \Delta_1$	$\Delta - \Delta_2$
1	0	0				
2	5	20				
3	10	40				
4	15	60				
5	20	70				
6	25	90	103	96	-13	-6
7	30	90	115	106	-25	-16
8	35	100	108	110	-8	-10
9	40	100	112	105	-12	-5
10	45	110	105	115	5	-5
11	50	110	116	115	-6	-5
12	55	120	115	115	5	5
13	60	110	115	115	-5	-5
14	65	100	115	115	-15	-15
15	70	90	100	101	-10	-11
16	75	90	87	83	3	7
$\Delta - \Delta_1$  、  $\Delta - \Delta_2$   的最大值					25	16
$\Delta - \Delta_1$  、  $\Delta - \Delta_2$   的平方和					1 447	912

表中  $x$ : 微动台位置 ( $\mu\text{m}$ );

$\Delta$ : 定位误差测量值 (nm);

$\Delta_1$ : 一般背景值定位误差预测值 (nm);

$\Delta_2$ : 改进背景值定位误差预测值 (nm)。

图 5  $5 \mu\text{m}$  步距 10 个定位点两次预测补偿结果Fig. 5 Two predicting compensation results for ten positions with  $5 \mu\text{m}$  positioning step

根据以上预测结论进行了补偿实验,从图 5、6 可以看出,补偿后的定位误差值可控制在40 nm 以内。由于 P-750 的分辨率为 10 nm,得到的纳米定位预测值要进行舍入,因此如果提高微动工作台的分辨率将会获得更加明显的补偿效果。但是,无论是从预测值还是从实际补偿结果都可以看出,灰色模型的预测值多偏大,用其反向值补偿后的定位误差则偏小(多为负值),滞后误差并没有完全消除,这是灰色预测模型本身存在的问题,有待今后解决。

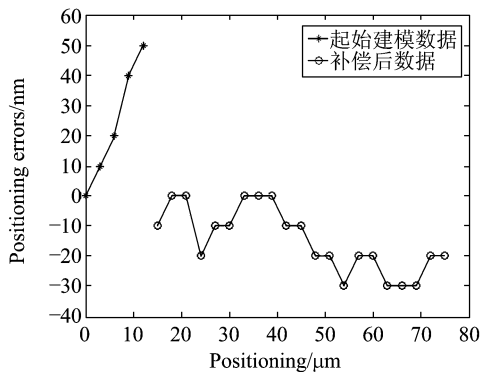


图 6 3  $\mu\text{m}$  步距全程预测补偿结果

Fig. 6 Predicting compensation results of full range with 3  $\mu\text{m}$  positioning step

## 4 结论与展望

本文针对纳米定位系统的定位误差建立了 GM(1,1) 预测模型,讨论了改善模型精度的方法并进行了补偿定位实验。从预测计算结果和补偿后的测量数据可以得出以下结论:(1)对等间距连续定位的纳米定位系统,等维新息灰色预测模型能有效地对其定位误差进行一步预测和补偿,提高系统的定位精度,实时性好、对环境适应性强;(2)改进背景值的预测模型具有更高的预测精度,在实际应用中,经验公式法获得的改进背景值能满足补偿精度与速度(实时性)的要求;(3)灰色模型给出的预测值多偏大,用其反向值补偿后的残余定位误差则偏小,并不是纯粹的白噪声,可以认为还存在一定的系统误差,这是灰色预测模型所存在的不足之处,如何解决有待于今后进一步的研究。此外,对实际应用中更为普遍的不等间距连续定位,研究如何应用灰色预测模型对其进行补偿也是十分必要的。

## 参考文献:

- [1] 赵仲生,张润孝,林其骏. 基于时间序列理论的误差预测补偿技术[J]. 制造技术与机床,1998,(12):36-38.  
ZHAO ZH SH, ZHANG R X, LIN Q J. Error forecast compensating method based on time series theory[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 1998, (12): 36-38. (in Chinese)
- [2] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987.  
DENG J L. *Basic methods of grey system*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [3] 谭冠军. GM(1,1)模型的背景值构造方法和应用(I)[J]. 系统工程理论与实践,2000,(4):98-103.  
TAN G J. The structure method and application of background value in grey system GM(1,1) model (I)[J]. *Theory and Practice of System Engineering*, 2000, (4): 98-103. (in Chinese)
- [4] 周铭,王洪发. 基于遗传算法的灰色 GM(1,1)模型[J]. 南昌大学学报(理科版),2002,26(4):331-333.  
ZHOU M, WANG H F. Grey model GM(1,1) based on genetic algorithm[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2002,26(4):331-333. (in Chinese)
- [5] 王军平,陈全世. 灰色-神经网络综合预测模型[J]. 计算机工程与应用,2004,9:13-15.  
WANG J P, CHEN Q SH. Grey neural network integrated forecasting model[J]. *Computer Engineering and Application*, 2004, 9: 13-15. (in Chinese)
- [6] 陈正平,苏虹,王钟美. 灰色系统建模数据的一种变换方法[J]. 江苏理工大学学报,1999,20(3):91-94.  
CHEN ZH P, SU H, WANG ZH M. Method of the original data transformation for grey systems modeling[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology*, 1999, 20(3): 91-94. (in Chinese)

作者简介:李鸣鸣(1963—),男,河南人,上海大学精密机械研究所博士研究生,主要研究方向为机电系统的定位控制和误差补偿。

文章编号 1004-924X(2006)01-0094-06

## 二自由度微定位平台的研制

田延岭<sup>1</sup>, 张大卫<sup>1</sup>, 闫兵<sup>2</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津工程师范学院 机械工程系, 天津 300222)

**摘要:**研制了一台压电陶瓷驱动和弹性铰链导向的一体化微定位平台,该微定位平台具有高刚度、高响应速度和高分辨率等优点。为了克服压电陶瓷驱动器伸长量较小的不足,采用杠杆放大机构增加微定位平台的位移输出。考虑驱动电路的影响,建立了微定位平台的机电耦合模型。通过试验研究了微定位平台的静动态特性,试验结果表明微定位平台的分辨率为5 nm,固有频率分别为143 Hz和180 Hz。该微定位平台可应用于纳米级的微定位。

**关键词:**微定位平台;压电陶瓷驱动器;动态性能

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Development of a 2-DOF micropositioning table

TIAN Yan-ling<sup>1</sup>, ZHANG Da-wei<sup>1</sup>, YAN Bing<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*  
2. *Department of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China*)

**Abstract:** A piezoelectrically driven micropositioning table with high stiffness and resolution was presented. A flexure hinge mechanism was utilized to guide the moving part and to provide preload for the piezoelectric actuators. The lever amplifiers were used to enlarge the working range of the moving platform. The static and dynamic characteristics of the micropositioning table was investigated and its dynamic model was established for consideration of the driving circuit. From the experimental data, it is shows that the piezoelectrically driven micro-positioning table has a resolution of 5 nm and natural frequencies up to 143 Hz and 180 Hz, respectively, which indicates that the table is useful for nanometer level positioning applications.

**Key words:** micropositioning table; piezoelectric actuator; dynamic performance

### 1 引言

超精密加工技术在航空航天和微电子领域具有重要的地位并有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。微纳米加工和定位技术已成为超精密加工的重要研究内

容之一。由于压电陶瓷驱动器具有高刚度、高分辨率、无摩擦和磨损以及响应速度快等优点,因而在纳米级的微定位装置中得到广泛应用。弹性铰链导轨利用中间弹性元件的变形提供导向功能,避免了运动部件之间的摩擦<sup>[3]</sup>,因此利用弹性铰链导轨作为微定位平台的导向机构,能够克服动

收稿日期:2005-09-21;修订日期:2005-11-18.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50275104),天津市自然科学基金项目(No. 013605311)。