

误差补偿的精确运动系统研究

王湘江,曾庆生

(南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:构建了以滚珠丝杠传动提供宏观运动,以超磁致伸缩驱动器(GMA)进行微观运动误差补偿的单坐标数控工作台精确运动实验系统.提出所设计的GMA的系统模型由频率无关迟滞特性与机电系统传递函数串联构成.由Lyapunov稳定性理论推导出滑模变结构控制方案的自适应控制规律.实验结果显示,GMA通过动态补偿控制可以很好的补偿滚珠丝杠的运动误差,使工作平台的运动精度显著提高.

关键词:误差;补偿;超磁致伸缩驱动器;GMA;微观运动;自适应

中图分类号:TH165 **文献标识码:**B

Error Compensation Research for Precise Kinematic Scheme

WANG Xiang-jiang, ZENG Qing-sheng

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The experiment system with numerical control working platform is built. The ball screw drives the working platform macroscopic motion. The giant magnetostrictive actuator (GMA) is used to compensate the microcosmic motion error. It is proposed that the transfer function of the GMA cascaded the rate-independent hysteresis model to structure GMA system model. The variable structure control based on the decomposition is proposed, and the adaptive control law for the variable structure control is deduced from the Lyapunov stability theorem. The experiment results show that the motion error of ball screw is compensated after a dynamic compensation control is operated to the GMA, and the motion precision of the working platform is markedly improved.

Key words: error; compensation; giant magnetostrictive actuator (GMA); GMA; microcosmic motion; adaptive

微位移驱动器一般是指运动操作尺度从毫米到纳米量级范围内的微小机电装置.微驱动器既可构成微机械的动力部分,亦可对宏观位移误差

进行微观补偿.所以微驱动器是精密机械发展的关键,在一定程度上标志着一个国家的精密机械发展水平.国内外的著名大学及实验室都将有关

收稿日期:2009-01-08

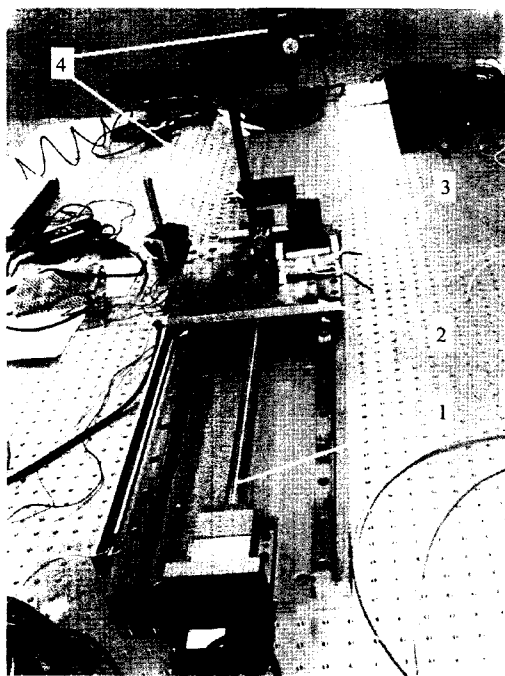
基金项目:湖南省科技厅基金资助项目(2008GK3133)

作者简介:王湘江(1972-),男,湖南邵东人,南华大学机械工程学院副教授,博士.主要研究方向:智能机构与技术研究.

微位移驱动器的设计、加工制造技术、测控技术的研究^[1-4]作为精密机械研究的一个重要突破口。目前,用于制作微位移驱动器的主要智能材料有:压电陶瓷、形状记忆合金和超磁致伸缩材料。

1 滚珠丝杠传动工作平台精确运动实验系统

滚珠丝杠传动工作平台精确运动实验系统采用模块化结构,主要由电机驱动系统模块、滚珠丝杠传动的数控工作台模块、GMA 控制系统模块和位移传感器测量系统模块组成,各模块相对独立。实验系统结构如图 1 所示。在数控工作台精确运动实验中,采用预期的运动信号驱动电机,电机带动滚珠丝杠旋转,滚珠丝杠副带动工作平台进行直线进给,由位移传感器进行运动位移的测量,从而得到实时的位移误差,将位移误差信号作为 GMA 控制系统的输入信号,由 GMA 系统对位移误差进行补偿,从而达到数控工作台运动的精确控制。



1. 滚珠丝杠 2. 工作平台 3. GMA 4. 激光干涉仪
图 1 滚珠丝杠传动工作平台精确运动实验系统

Fig. 1 Precise kinematic system of the ball screw working platform

1.1 滚珠丝杠副

滚珠丝杠是传统滑动丝杠的进一步延伸和发展,它由丝杠、带螺母的工作平台、滚珠等零件组成。滚珠丝杠副因其优良的摩擦特性使其广泛地运用于各种精密仪器中。尤其是近年来,滚珠丝杠

副作为数控机床直线驱动执行单元,在机床行业得到广泛运用,极大地推动了机床行业的数控化发展。这些都取决于其具有以下几个方面的优良特性:精度高、效率高、寿命长、磨损小、节能低耗、摩擦系数小、结构紧凑、通用性强。本实验所采用的滚珠丝杠副的主要技术参数如下:

型号:DZHT550

丝杠导程:5 mm

丝杠轴颈:φ20 mm

最大工作行程:550 mm

通过测量表明:工作平台的最大定位误差为 0.14 mm,而本研究所设计的 GMA 控制系统完全可以对它进行更精确地补偿。

1.2 雷尼绍激光干涉仪

高性能激光干涉仪具有快速、高准确测量的优点,是校准数字机床、坐标测量机及其它定位装置精度及线性指标最常用的标准仪器,本实验使用的是英国 RENISHAW 公司生产的 ML10 激光干涉仪,具有性能稳定、使用方便等特点。位移测量原理如图 2 所示,ML10 激光器的光束会射入线性干涉镜,再分为两道光束。一道光束(称为参考光束)射向连接分光镜的反射镜,而第二道光束(测量光束)则通过分光镜射入第二个反射镜。这两道光束再反射回分光镜,重新汇聚之后返回激光头,其中会有一个探测器监控两道光束间的干涉。在线性测量时,其中一个光学元件保持不变,而另一个则沿着线性轴移动。测量是通过监控测量及参考光束间光路差异的变化来执行的(请注意,两个光学元件间的差分测量与 ML10 激光器的位置无关)。此激光干涉仪的线性位移测量精度可达到 $\pm(1.1 \times 10^{-3})$ mm。

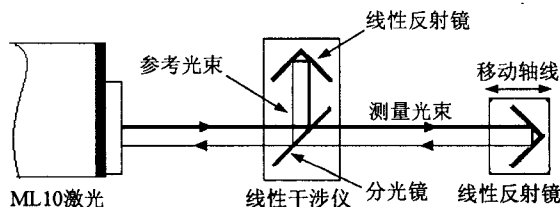


图 2 激光干涉仪位移测量原理

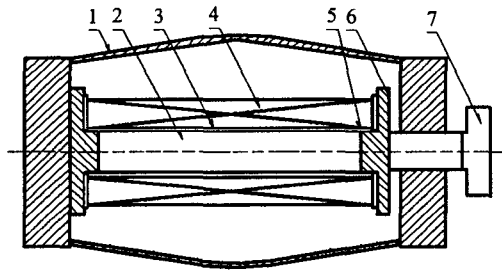
Fig. 2 Measuring principle of laser interferometer

1.3 超磁致微位移驱动器

智能材料驱动器多为直动式驱动,这种驱动器的特点是结构紧凑、可连续进给、且输出力大,但行程范围相对较小。为解决行程范围小这一缺

陷,目前普遍采用的是利用柔性铰链机构放大位移.柔性铰链机构的特点是结构紧凑、无间隙、无摩擦、体积小、无颤振与爬行,分辨率高,容易实现级的超精密定位,同时不产生噪声和发热,适于多种工作环境.但柔性铰链机构也有自身的缺陷,本研究设计了压曲放大机构进行超磁致伸缩棒的输出位移的放大.

超磁致伸缩驱动器的设计涉及电、磁、机械及热等方面,包含电-磁和磁-机两种耦合过程,根据本研究的应用领域和驱动特性,设计了超磁致微位移驱动器.图 3 即为本研究所设计的超磁致伸缩微位移驱动器的结构示意图.它主要由内部的超磁致伸缩结构和外部的压曲放大机构组合而成.其工作原理为:励磁线圈通入电流,产生驱动磁场.驱动电流改变将改变驱动磁场,超磁致伸缩棒在图 3 所示水平方向产生微位移,通过压曲机构在图 3 所示垂直方向放大位移并输出,使电磁能转变为机械能.



1. 压曲机构 2. 超磁致伸缩棒 3. 隔热层 4. 励磁线圈
5. 骨架 6. 端盖 7. 预紧螺钉

图 3 超磁致微位移驱动器结构

Fig. 3 Construction of GMA

2 GMA 机电系统建模与分析

由于智能材料具有迟滞特性,必须对所设计的 GMA 进行迟滞非线性分析,为下一步的迟滞建模与补偿控制提供基础.迟滞系统的复杂特性使得常用的经典控制理论和现代控制理论都难以对其实施有效控制^[5-6],研究出新的行之有效的控制方法显得十分必要.

2.1 具有迟滞特性的 GMA 系统总体模型

由分析可知,输入信号频率增加时,输入输出间的迟滞环增大只是由于滞后相位角的增大引起的,而滞后相位是由 GMA 系统的机电系统传递函数形成的.由此可知超磁致智能材料内部迟滞

特性和输入信号、传递函数都没有直接关系,是超磁致材料本身所固有的特性.驱动器的最后输出信号是由迟滞特性和传递函数对输入信号共同作用的结果.为了能够更直观地分析 GMA 迟滞系统,可以人为的将共同发生的两个过程,分解成先后发生的两个过程.首先输入信号经历的是一个迟滞过程,这一过程中输入信号发生变形;然后经历机电系统传递函数,传递函数使信号发生滞后,同时对幅值也有一定影响(在工作频率内可以忽略),最后得到输出信号.

综上所述,可以将迟滞特性与机电系统传递函数共同构成 GMA 的系统模型,如图 4.它是一个频率无关的纯迟滞特性.这一 GMA 的系统模型的建立,使得迟滞特性和机电系统传递函数的关系清晰明了,并合理地解释了迟滞模型与频率相关性问题的.结合其机电传递函数可将 GMA 具有迟滞特性的总体方程表示为:

$$T\dot{u} + u = H[v](t) \quad (1)$$

其中 T 为一阶系统时间常数, $H[v](t)$ 为迟滞模型, v 为系统输入, u 为系统输出.

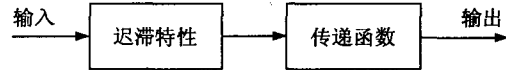


图 4 GMA 系统模型组成

Fig. 4 GMA system model with hysteresis

2.2 基于 PI 模型的自适应控制

由于 Prandtl - Ishlinskii (PI) 模型具有函数表达式简单,便于通过叠加实现的优点,因此本文采用 PI 迟滞模型.PI 迟滞模型有两种表达算子,且相互关联互补.频率无关的迟滞模型的输出可表示为:

$$w(t) = \int_0^R p(r) E_r[v](t) dr \quad (2)$$

其中 $p(r)$ 为迟滞模型的密度函数, $E_r[v](t)$ 为 PI 模型的迟滞截止算子,其表达式为:

$$\begin{aligned} E_r[v; w_{-1}](0) &= e_r(v(0) - w_{-1}), \\ E_r[v; w_{-1}](t) &= e_r(v(t) - v(t_i) + E_r[v; w_{-1}](t_i)) \end{aligned} \quad (3)$$

公式中 v 为迟滞模型的输入; w 为纯迟滞模型的输出(也是 GMA 机电传递函数的输入);有 $t_i < t \leq t_{i+1}$, $0 \leq i \leq N-1$, $0 \leq r \leq R$, R 取 GMA 位移输出最大值(本试验系统测得为 0.3 mm 左右),可使系统总放大倍数为 1; w_{-1} 为 t_i 时刻的初始值.为简单起见用 $E_r[v](t)$ 表示 $E_r[v; w_{-1}](t)$.

其中对于算子 $e_r(v)$, 由于本研究中的 GMA 为单向驱动, 因此输出位移始终大于零, 所以将文献[7]中的公式修改为:

$$e_r(v) = \max(0, \min(r, v)) \quad (4)$$

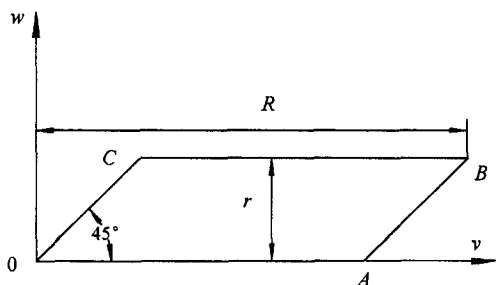


图5 单个截止算子
Fig.5 Single stop operator

如图5所示为单个截止算子的输入输出图形。而由公式(2)可知迟滞输出是由无数个迟滞算子叠加而成, 这种叠加可离散化为:

$$w(t) = \sum_{i=1}^K p(r_i) E_{r_i}[v](t) \Delta r \quad (5)$$

PI 迟滞模型除了公式(3)的截止算子外, 还有一种启动算子, 其表达式为:

$$\begin{aligned} F_r[v; w_{-1}](0) &= f_r(v(0), w_{-1}), \\ F_r[v; w_{-1}](t) &= f_r(v(t), F_r[v; w_{-1}](t_i)) \end{aligned} \quad (6)$$

其中对于算子 $f_r(v, w)$, 由于本研究中的 GMA 为单向驱动, 因此输出位移始终大于零, 所以将公式修改为:

$$f_r(v, w) = \max(v - r, \min(v, w)) \quad (7)$$

所以如果迟滞模型的输出用启动算子计算, 其表达式可写为:

$$w(t) = p_0 v(t) - \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr \quad (8)$$

其中

$$p_0 = \int_0^R p(r) dr \quad (9)$$

由公式(8)可知, 迟滞模型函数可分解为线性部分和表示迟滞特性的非线性部分, 将非线性部分表示为:

$$d[v](t) = \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr \quad (10)$$

则公式(8)可简化为:

$$w(t) = p_0 v(t) - d[v](t) \quad (11)$$

由于传递函数近似于一阶, 所以可得 GMA 的系统方程:

$$T\dot{u} + u = w \quad (12)$$

这里 u 为系统输出, 将公式(11)代入可得整个 GMA 系统的方程:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -\frac{1}{T}u + \frac{1}{T}w(t) \\ &= -\frac{1}{T}u + \frac{p_0}{T}v(t) - \frac{1}{T}d[v](t) \end{aligned} \quad (13)$$

可用系统输出误差作为滑模:

$$s = u - u_d \quad (14)$$

为了保证正常运动段的品质, 可采用如下趋近律:

$$\dot{s} = -k_d s \quad (15)$$

其中 $k_d > 0$.

最终可得到滑模变结构控制规律:

$$v(t) = \frac{T}{p_0} \left(-k_d s + \frac{1}{T}u + \frac{1}{T}B + \dot{u}_d \right) \quad (16)$$

其中

$$B = \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr \quad (17)$$

用李雅普诺夫稳定性理论设计自适应控制规律, 得到:

$$\dot{\hat{a}} = -\gamma \frac{1}{T}us \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = -\eta v_1(t)s \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \hat{p}(t, r) = -q F_r[v](t)s \quad (20)$$

其中 $\phi = T/p_0$, $a = 1$. $\hat{\phi}$ 为 ϕ 的估计值, $\hat{a}/T$ 为 $1/T$ 的估计值, $\hat{p}(r)$ 为 $p(r)$ 的估计值, $\hat{B}$ 为 B 的估计值; 式中 $\gamma > 0$, $\eta > 0$, $q > 0$ 分别为 $\hat{a}$ 、 $\hat{\phi}$ 和 $\hat{p}(r)$ 的自适应率。

3 滚珠丝杠传动工作平台精确运动实验研究

为了验证本论文的迟滞补偿理论, 对滚珠丝杠传动工作平台的运动进行精确补偿控制实验研究。为简单、实用起见, 本研究对工作平台的期望运动采用等速运动规律。由于 GMA 是对滚珠丝杠工作平台的运动误差进行补偿, 因此首先由激光干涉仪测量工作平台的实时位移误差, 然后以得到的位移误差作为 GMA 的输入信号, GMA 需要对所输入的信号进行无迟滞的精确跟踪, 这样就可以实现工作平台运动的精确控制了。珠丝杠工作平台的运动误差主要由步进电机步距角误差、步进电机的动态误差、滚珠丝杠导程误差和滚珠丝杠与螺母间的间隙所组成, 由于误差来源非常复杂, 很难预先做出准确的计算。由前述的迟滞补偿理论可知, 对这样的信号跟踪必须采用动态

补偿控制。

实验中,首先通过步进电机的输入,给定工作平台的运动速度为 4.8738 mm/s 的等速直线运动。由于 GMA 只能补偿单向误差,通过测试,工作平台需超前 0.03 mm 启动,可使误差值始终保持单向。由激光干涉仪测量得到没有 GMA 进行微位移补偿的运动误差,如图 6 所示。将此位移误差信号输入 GMA 控制系统,用基于迟滞模型的滑模自适应控制得到微位移补偿后的位移误差,如图 7 所示,可以明显看出微位移补偿后的位移误差比没有补偿的位移误差有了大幅度减小。

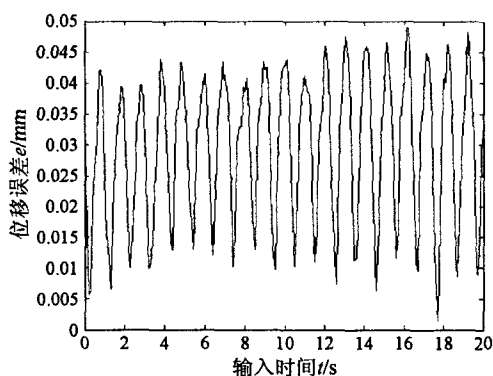


图 6 没有位移补偿的位移误差图

Fig. 6 Diagram of displacement error without compensation

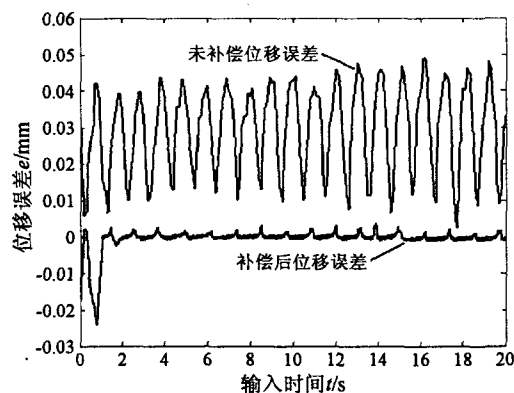


图 7 基于 PI 迟滞模型的位移自适应补偿误差比较图

Fig. 7 Comparing diagram of displacement error adaptive compensation based on PI hysteresis model

4 结论

对数控工作台进行了运动精确控制实验研究。实验结果表明:所提出的控制策略能够很好的系统补偿迟滞特性,实现了宏微数控系统位移输出对输入信号精确地实现,GMA 系统的微观补偿效果非常明显;基于 PI 模型的 GMA 迟滞非线性自适应补偿控制是一种动态补偿,对任意输入信号都能精确跟踪;研究中所提出的迟滞非线性补偿项,是对迟滞非线性从模型本质上进行的补偿,它的存在对迟滞补偿具有决定意义。

参考文献:

- [1] Cavallo A, Natale C, Pirozzi S, et al. Feedback control systems for micropositioning tasks with hysteresis compensation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 876-879.
- [2] Cruz - Hernández J M, Hayward V. Phase control approach to hysteresis reduction[J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 2001, 9(1): 17-26.
- [3] Calkins F T, Smith R C, Flatau A B. Energy - based hysteresis model for magnetostriuctive transducers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(2): 429-439.
- [4] Annunzio D, Camille M Reimers, Chassaing Charles E. Development of a control system for a nonlinear Terfenol - D actuator[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1996(2715): 588-599.
- [5] Kam K Leang, Santosh Devasia. Design of hysteresis - compensating iterative learning control for piezo - positioners Application to atomic force microscopes[J]. Mechatronics, 2006(16): 141-158.
- [6] 吴博达, 鄂世举, 杨志刚, 等. 压电驱动与控制技术的发展与应用[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 79-85.
- [7] Qingqing Wang, Chun - Yi Su, Xinkai Chen. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with Prandtl - Ishlinskii Hysteresis[C]//43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004: 213-218.