

基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究

王冲冲^{1,2} 胡立发¹ 何斌^{1,2} 穆全全¹ 曹召良¹ 宋宏³ 宣丽¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049;
³ 浙江大学海洋学院, 浙江 杭州 310000

摘要 为了提高自适应光学系统中压电倾斜镜(TTM)的控制精度,提出一种基于神经网络建模对 TTM 的磁滞非线性进行补偿的方法。实验得到 TTM 磁滞响应数据后,选用反向传播(BP)神经网络对磁滞特性建模,并通过软件编程模拟磁滞响应过程,进而实时计算控制量,实现对 TTM 的前馈补偿控制。为了满足自适应光学系统中实时控制的要求,根据 BP 网络内部运算机理得到 BP 网络运算的函数表达形式,以函数运算代替耗时的网络仿真运算。仿真结果显示这种替代在保证运算精度的前提下,提高了运算速度。实验结果表明,通过补偿,TTM 的磁滞非线性减小约 70%,提高了 TTM 的整体线性度和控制精度。

关键词 自适应光学;磁滞补偿;压电倾斜镜;神经网络;磁滞非线性

中图分类号 O439; TP23 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1113001

Hysteresis Compensation Method of Piezoelectric Steering Mirror Based on Neural Network

Wang Chongchong^{1,2} Hu Lifa¹ He Bin^{1,2} Mu Quanquan¹ Cao Zhaoliang¹
Song Hong³ Xuan Li¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ School of Ocean, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

Abstract A method to compensate the hysteresis nonlinearity of piezoelectric steering mirror (tip/tilt mirror, TTM) based on neural network models is presented, which may improve the steering mirror control accuracy in adaptive optics system. The hysteresis of TTM is modeled by using back propagation (BP) neural network via the response data of TTM. We simulate the process of hysteresis response and compute the voltage applied to TTM in real time, so as to achieve the forward compensation control of TTM. In order to meet the real time intention, we use the function form of BP neural network instead of time-consuming simulation operation, which increases the computing speed and insures the operation precision. The results show that by using this compensation approach the hysteresis nonlinearity is reduced by about 70%. Moreover, the global linearity and the controlling accuracy are obviously improved.

Key words adaptive optics; hysteresis compensation; piezoelectric steering mirror; neural network; hysteresis nonlinearity

OCIS codes 010.1080; 000.3860; 230.4040; 200.4260; 200.4740

收稿日期: 2013-05-16; 收到修改稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(11174274, 11174279, 61205021, 11204299)

作者简介: 王冲冲(1989—),女,硕士研究生,主要从事液晶自适应光学系统控制方面的研究。

E-mail: wangcc1989@163.com

导师简介: 胡立发(1974—),男,博士,研究员,主要从事液晶自适应光学系统控制、哈特曼波前传感器算法、大气湍流测量与仿真等方面的研究。E-mail: hulifa@ciomp.ac.cn

1 引 言

自适应光学系统广泛地应用在地基望远镜、激光大气通信、激光武器、人眼成像系统等方面,用来实时测量和补偿系统像差,提高光学系统的成像分辨率^[1-6]。倾斜镜(TTM)是自适应光学系统中的重要元件,用来补偿大气湍流引起的倾斜像差。它利用高分辨率的压电驱动器驱动一块平面反射镜,在光学系统中使光束受控地产生快速精确的小角度变化,具有位移分辨率高、响应速度快、功耗小等优点。

压电陶瓷材料自身存在固有的磁滞特性^[7],实际应用时,这种磁滞给压电倾斜镜的控制造成困难。压电陶瓷的磁滞特性是指压电陶瓷材料在升压和降压过程中两条位移曲线不重合,位移量不一致,存在位移差。其主要特点是:压电驱动器下一时刻的输出位移量不仅取决于当前时刻的输入电压和输出位移量,而且与之前时刻的输入电压有关。研究表明,在无控制开环情况下,由磁滞曲线的不对称性造成的非线性跟踪误差达到 15% 以上。因此磁滞非线性的补偿对实现 TTM 高精度控制至关重要。

压电陶瓷磁滞补偿方法已经有许多的研究,主要的补偿方法分以下几种:基于模型的控制方法、电荷驱动法、电荷反馈与闭环控制相结合的方法。基于模型的控制方法,目前最常用的是基于 Preisach 模型和改进的 Preisach 模型的方法。基于 Preisach 模型的开环控制方法^[8-12],首先通过实验测得磁滞曲线上某些点的输出位移,然后通过插值的方法获得其他点的输出位移。Ge 等^[12]利用改进的 Preisach 磁滞模型估计压电陶瓷驱动器对正弦波或三角波输入的响应,该模型再现了压电陶瓷驱动器的磁滞环,在工作范围 0~15 μm 内的逼近精度在 3% 以内。Preisach 模型建模思想简单,但是建模过程需要大量的实验数据,并且拟合过程计算量比较大,从而使控制方法太过复杂,实现起来困难。研究表明,所加电场较小时,压电陶瓷的输出位移量与压电陶瓷两端的电荷量成正比。电荷驱动法正是基于此原理,用电荷驱动代替电压驱动的方式。电荷驱动可以在很大程度上减小磁滞非线性,然而压电陶瓷内阻大,充电电流小,响应时间长,动态性能差,适合在静态和低频情况应用。同时电荷控制还要求特殊设计的电荷放大器,这增加了系统的硬件负担,同时降低了压电陶瓷的灵敏度。自适应光学系统中低频的 TTM 不足以校正波前畸变倾斜像差,这些局限使得电荷驱动方式并不适用于自适应光学系统中

TTM 磁滞的补偿控制。

近些年,科研工作者利用各种建模工具和理论方法,在磁滞建模方面取得了很大进展,其中主要有多项式函数拟合方法和基于神经网络的建模方法。2007 年合肥工业大学范伟等^[13]应用 Matlab 拟合出压电陶瓷驱动器在往返行程中电压与位移值的多项式拟合曲线,当采用三阶多项式时,拟合误差在往返行程中最大仅为原始磁滞误差的 5.2%。另外有报道根据 Weierstrass 第一逼近定理以多项式函数逼近 Duhem 模型中的分段连续函数 f 和 g ,并最终得到了电压与位移的关系式^[14]。多项式拟合方法虽然建模精度高,但是求逆模型运算复杂。神经网络能够逼近任意的非线性曲线,并且自适应学习能力、容错能力强,这些特点使得神经网络在非线性系统建模中得到广泛应用。反向传播(BP)网络是一种单向传播的多层前向网络,它可以实现从输入到输出的非线性映射。然而由于压电陶瓷磁滞特性是有记忆的,驱动电压和变形量之间是多映射的非线性关系,不能直接用神经网络建模,因此需要把多值映射转换为输入输出一对一的单值映射关系,才能采用神经网络逼近非线性磁滞曲线。党选举等^[15]提出在二维输入输出空间增加时间轴,构成三维空间,使压电陶瓷输入输出特性变成单值对应关系,采用多输入单输出的 RBF 神经网络实现对磁滞的描述。2007 年山东大学魏强等^[16]建立微位移工作台当前输入电压、当前输出位移量以及前一时刻输出位移量相对于下一时刻的输出位移量之间对应的关系,并利用 BP 网络辨识方法,实现微位移工作台的建模,在 80 μm 行程范围内,工作台的定位误差最大为 100 nm。

本文根据压电陶瓷磁滞特性,找到输入输出间单值映射关系,之后采用 BP 网络模拟 TTM 响应的磁滞曲线,并得到磁滞曲线的函数运算形式,结合磁滞响应过程通过编程实时计算倾斜镜的控制量,实现对 TTM 的控制。用于补偿的磁滞逆模型由神经网络训练得到,模型的建立基于数据,精度高,而且神经网络建模方法简单,不需要复杂的运算,容易实现。在得到网络参数后,根据网络结构和参数构造网络矩阵函数运算形式,矩阵函数运算在计算机上运算效率高,有效地提高了运算速度。而且软件编程实现前馈控制,方法简单,执行效率高,能够满足自适应光学实时校正需求。本文还建立了基于 BP 网络建模和控制计算机实时计算的 TTM 控制系统,通过实验验证了补偿效果。

2 基于神经网络的磁滞补偿方法

压电陶瓷的磁滞特性是进行神经网络建模和软件编程控制的关键。TTM 磁滞响应过程具有三个基本特性^[5,9]。1) 记忆特性: 当输入信号在两个极值之间变化时, 输出曲线形成一个封闭的回线; 2) 擦除特性: 当输入局部极大值大于历史某些极大值或者输入极小值小于历史某些极小值时, 新的局部极值将会替代这些历史极值, 相应的历史过程会被擦除, 不再影响该时刻以后的输出; 3) 同余特性: 当输入信号在不同时间段内具有相同极值时, 在输入输出平面上形成的封闭回线形状基本一致。典型的磁滞响应曲线如图1所示, 图中 U_1 、 U_2 分别为施加的

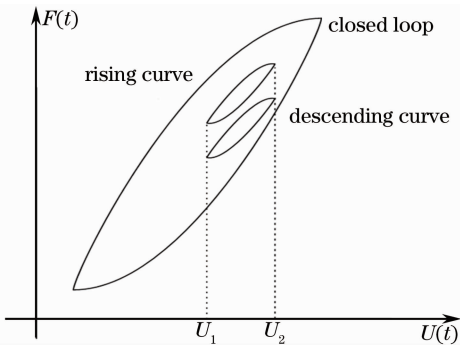


图1 典型磁滞响应曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical response of hysteresis

局部极小值和极大值电压。

2.1 基于神经网络的磁滞曲线模型

神经网络实现磁滞建模的难点在于驱动电压和变形量之间是多映射的非线性关系。因此需要找到输入输出之间单值映射的关系, 才能用神经网络进行建模。压电陶瓷变形量与驱动电压之间不是一一对应的, 但是由磁滞曲线的同余特性可知, 当驱动电压在相同的极值对之间变化时, 压电陶瓷变形量唯一, 对应的 TTM 输出偏移量的差值唯一, 当 TTM 输出偏移量在相同极值对之间变化时, 所对应的驱动电压差值唯一。神经网络可以模拟这种输入输出对应关系^[17-18]。神经网络模拟的关键是用于训练网络的输入输出数据的确定、网络结构和参数的选择。

控制系统中已知 TTM 的期望输出偏移量, 需要计算应该施加的驱动电压信号。因此选用偏移量极值对作为网络输入, 对应的驱动电压差值作为网络输出。选取如图2所示的两层 BP 网络, 隐含层 10 个神经元, 神经元传递函数为双曲正切函数, 输出层神经元传递函数为线性函数。其中 (α, β) 是输入的极值对, $P(\alpha, \beta)$ 为对应的输出量, W_1 、 W_L 分别表示第一层、第二层神经网络的权重向量, b_1 、 b_2 分别表示第一层、第二层的阈值向量。

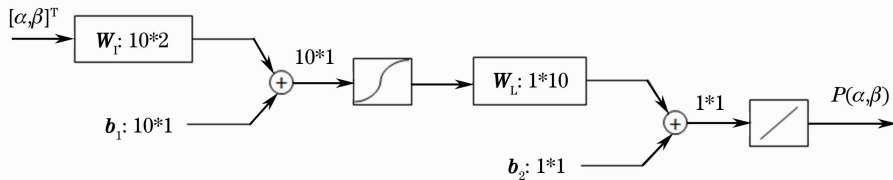


图2 两层神经网络模型

Fig. 2 Schematic representation of two-layer neural network

自适应光学系统实时校正光波畸变过程中, BP 网络仿真计算时间较长, 无法满足实时在线计算要求。计算机处理函数运算过程速度很快, 为了提高运算速度, 用函数计算代替 BP 网络仿真运算过程。

根据 BP 网络内部神经元的运算机理, 网络输出 $P(\alpha, \beta)$ 与输入 (α, β) 之间的关系由以下矩阵运算方程决定:

$$P(\alpha, \beta) = W_L \tanh(W_1 * [\alpha, \beta] + b_1) + b_2. \quad (1)$$

由此得到 TTM 输出偏移量极值对 (α, β) 与控制电压差值 $P(\alpha, \beta)$ 之间的函数关系。

2.2 数据的实时存储更新与控制电压计算

基于 TTM 磁滞响应过程的特性, TTM 控制量的实时计算过程^[17,19]如下: 首先确定输入的局部极值并存储极值对信息即图中标识的 (α_i, β_j) , 然后

由 BP 网络函数运算表达式(1) 式计算极值对 (α_i, β_j) 所对应的电压差 ΔV_{ij} , 下一时刻的控制电压 V 由初始时刻电压 V_0 连续加减这些电压差值得到。依据 TTM 磁滞响应的擦除特性, 存储和更新输入局部极值对信息。如果输入局部极值大于存储的某些历史极大值或者小于存储的某些历史极小值, 这些历史极大极小值对将被新的局部极值对替代, 存储的极值对数据得到更新。如果控制过程不断加长, 存储数据量会不断增多, 因此需要实时清除一些较早出现的、对未来时刻影响小的数据。实际应用中, 根据具体情况选择合适的存储量。

图3给出计算过程的示意图, 图中横轴为期望的 TTM 输出偏移量, 纵轴为施加在 TTM 上的控制电压。

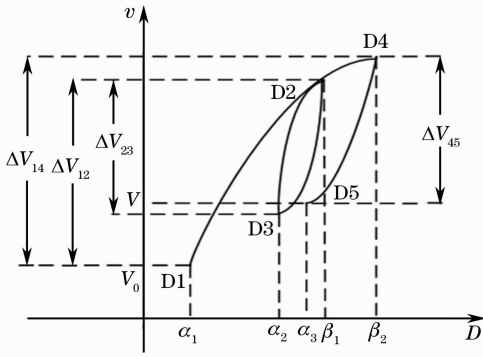


图 3 TTM 控制量计算过程

Fig. 3 Illustration of TTM controlling process

起始时刻状态为 D1, 对应的 TTM 偏移量为 α_1 , 控制电压值为 V_0 。当前时刻处于状态 D4, 对应 TTM 偏移量为 β_2 。由状态 D1 到 D4 过程中, TTM 偏移量经历了由 $\alpha_1 \rightarrow \beta_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \beta_2$ 的变化。假定要求下一时刻 TTM 偏移量为 α_3 , 即到达状态 D5, 需要求得下一时刻应该施加在 TTM 上的控制电压值 V 。从状态 D1 到 D2, 输入局部极小值为 α_1 , 局部极大值为 β_1 , 存储极值对 (α_1, β_1) , 计算此过程所需施加的电压差值 $\Delta V_{12} = P(\alpha_1, \beta_1)$ 。从状态 D2 到 D3, 产生一个新的局部极小值 α_2 , 存储极值对 (α_2, β_1) , 计算电压差值 $\Delta V_{23} = P(\alpha_2, \beta_1)$ 。从状态 D3 到 D4, 产生一个新的局部极大值 β_2 , 由于新的局部极大值 β_2 大于存储的局部极大值 β_1 , 因此用 β_2 代替 β_1 作为新的局部极大值, 相应的局部极小值 α_2 也被擦除, 即擦除局部极值对 (α_2, β_1) 。此时极值信息更新为

(α_1, β_2) , 计算电压差值 $\Delta V_{14} = P(\alpha_1, \beta_2)$ 。从状态 D4 到状态 D5, 同样产生新的局部极小值 α_3 , 存储极值对 (α_3, β_2) , 计算电压差 $\Delta V_{45} = P(\alpha_3, \beta_2)$; 由此得到下一时刻应该施加的控制电压 $V = V_0 + \Delta V_{14} - \Delta V_{45}$ 。控制电压实时计算表达式为

$$V = V_0 + P(\alpha_1, \beta_2) + P(\alpha_3, \beta_2). \quad (2)$$

依据以上过程, 能够推广得到任意所求时刻 TTM 的控制电压。

3 实验结果与讨论

以 PI 公司的 S330.2SL 型 TTM 为控制对象, 工业控制计算机为主控单元, Andor DV860 128 pixel \times 128 pixel 的面阵 CCD 相机为倾斜镜输出偏移量测量单元, 建立 TTM 控制系统, S330.2SL 型 TTM 的响应时间大约在 1 ms, CCD 帧转移模式下采样频率和 TTM 施加电压频率都设置为 300 Hz, 控制系统中控制计算机的数据处理时间大约在 10 μ s 以内, 数据传输时间在 50 μ s 左右, 因此相较于 CCD 采样时间, 数据处理和通讯时间可以忽略。以上参数能够满足自适应光学系统中对校正大气湍流倾斜的要求。实验光路实物如图 4(a) 所示, 图中 L1 为光纤束的准直透镜, L2 为 CCD 的成像透镜, 用于将光纤处的像成像到 CCD 上。对实验室 S330.2SL 型 TTM 的磁滞响应曲线进行测量, 如图 4(b) 所示, TTM 上施加的电压先从 0 增加到 10 V, 然后再降到 0, TTM 响应最大的非线性滞回大约为 17%。

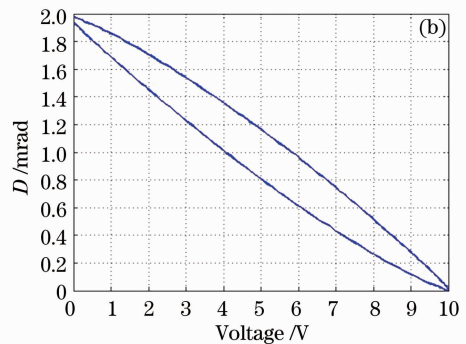
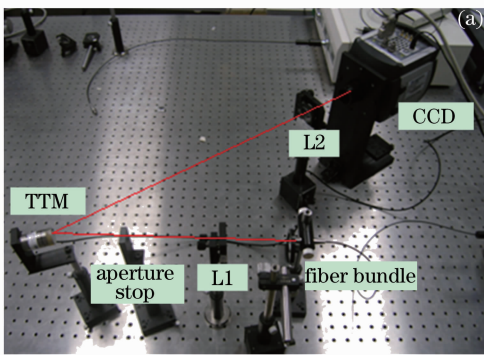


图 4 (a) TTM 磁滞测量系统与 (b) 磁滞回线

Fig. 4 (a) Measurement system of the hysteresis of TTM and (b) measured hysteresis curves

用于训练 BP 网络的数据由以下过程测得: 在 TTM 上施加如图 5(a) 所示的振幅逐渐减小的类似正弦信号, 输入信号要求频率较低, 以保证测得的 TTM 磁滞响应数据不受系统其他元件特性的影响, 如 CCD 采样的影响。测得的 TTM 磁滞响应曲线如图 5(b) 所示。

实验中发现如果由上述 TTM 输出偏移量 D 和施加的电压数据经归一化处理分别作为输入输出训练 BP 网络, 训练得到的 BP 网络仿真输出曲线会出现很多毛刺, BP 网络模型精度较低。这可能是由于实验条件限制, 实验测得数据点不精确造成的。通过分析采用以下方法解决了这个问题, 首先训练

得到电压极值对作为输入, TTM 输出量差值作为输出的 BP 网络, 称为正向 BP 网络。然后用电压极值对作为正向 BP 网络的输入, 网络仿真得到 TTM

输出量。最后用正向 BP 网络仿真得到的 TTM 输出量极值对作为输入, 相应的电压差值作为输出训练 BP 网络, 得到网络参数并由(1)式得到 P 函数。

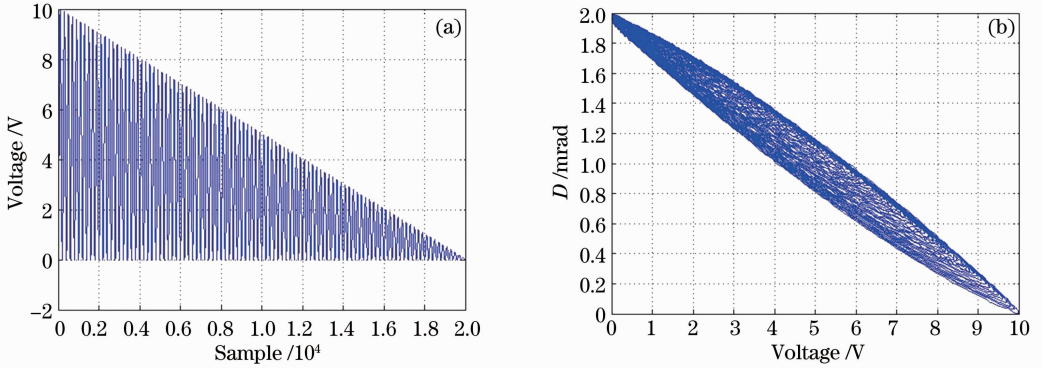


图 5 TTM 在不同电压极值区间的磁滞响应特性。(a) TTM 上施加的幅值逐渐减小的电压; (b) TTM 响应曲线
Fig. 5 Hysteresis characteristics of TTM responding to different extremum. (a) Voltage with decreased amplitude applied to the TTM; (b) response curves of TTM

假定 TTM 期望输出偏移量 D_D 为幅值不断增加的三角波, 如图 6 实线所示。利用上述补偿方法计算得到 TTM 控制信号后, 将此控制信号施加于 TTM, 测得 TTM 实际输出偏移量 D_A 如图 6 虚线所示。

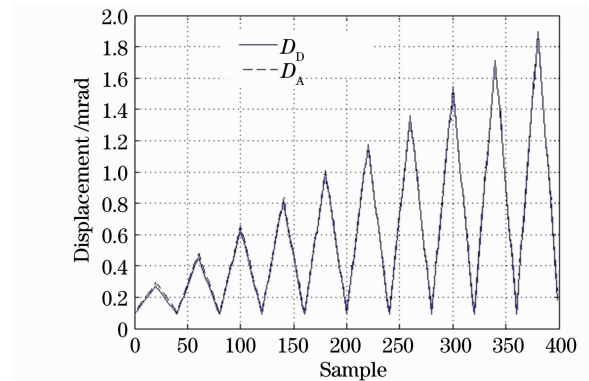


图 6 TTM 偏移量
Fig. 6 Displacements of TTM

另外测得忽略磁滞(Hysteresis compensation off, HC OFF), 将 TTM 响应作为线性处理条件下 TTM 实际输出偏移量, 对比忽略磁滞特性和磁滞补偿(Hysteresis compensation on, HC ON)两种情况下 TTM 的控制精度。图 7(a)给出两种情况下 TTM 实际输出偏移量与期望输出偏移量的误差, 图 7(b)给出了两种情况下 TTM 最大非线性滞回量。

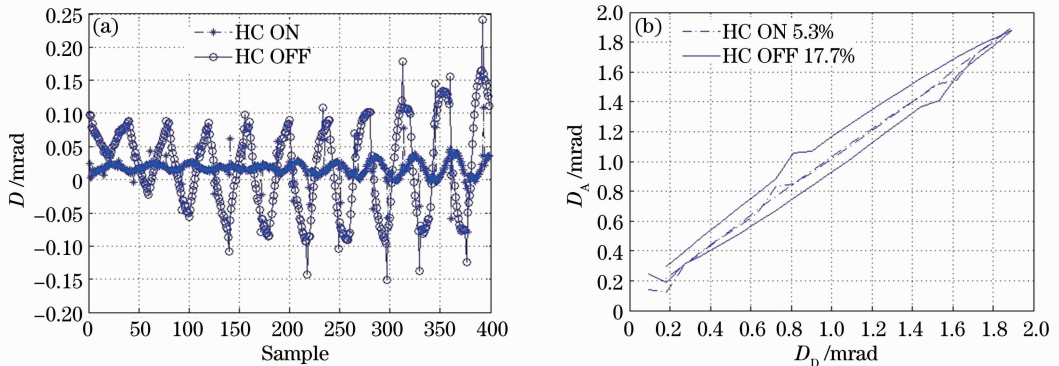


图 7 忽略和补偿磁滞两种情况下 TTM 输出(a)偏移量误差和(b)非线性滞回曲线

Fig. 7 (a) Output displacements' error and (b) hysteresis nonlinear curves with and without compensation

忽略磁滞和补偿磁滞两种情况下, TTM 期望输出偏移量和实际输出偏移量偏差的均方根值分别为 0.0689 mrad 和 0.0158 mrad。通过磁滞补偿, TTM

响应的最大非线性滞回量由 17.7% 降低到 5.3%, 减小约 70%。

4 结 论

TTM 磁滞效应的补偿是提高 TTM 控制精度的关键,本文采用基于 BP 网络的补偿方法对 TTM 的磁滞效应进行前馈补偿。根据磁滞的同余特性将输入输出之间多值映射关系转化成单值对应关系后,采用神经网络建立磁滞模型,并且得到网络模型的函数运算形式。神经网络建模方法相较于传统的 Preisach 模型,建模方法简单且容易实现,网络模型的函数运算形式易于在计算机上实现高速运算,有利于满足实时控制要求。相较于电荷驱动法,本文提出的补偿方法能够适用于 300 Hz 的高频情况,满足自适应光学系统的校正速度要求。在不增加系统硬件负担和保证系统校正速度的前提下,经磁滞补偿,TTM 期望输出量与实际输出量偏差明显减小,控制精度提高约 70%。TTM 响应的最大非线性滞回量由原来的 17.7%降为 5.3%,整体线性度提高,磁滞得到较好补偿。

参 考 文 献

- 1 J W Hardy. Active optics: a new technology for the control of light [C]. Proceeding IEEE, 1978, 66(6): 651-697.
- 2 Zhang Deliang, Jiang Wenhan, Wu Xubin, *et al.*. Compensation effect of an adaptive optics system for atmosphere induced wavefront perturbation [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(10): 1366-1371.
张德良,姜文汉,吴旭斌,等. 自适应光学对大气扰动波前的补偿效果研究[J]. 光学学报, 1998, 18(10): 1366-1371.
- 3 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy and Sciences [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.
姜文汉,张雨东,饶长辉,等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
- 4 Qi Yue, Kong Ningning, Li Dayu, *et al.*. High resolution open-loop adaptive optics system for retinal imaging based on liquid crystal spatial light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1011003.
齐岳,孔宁宁,李大禹,等. 高分辨率开环液晶自适应光学视网膜成像系统[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1011003.
- 5 Cheng Shaoyuan, Hu Lifa, Cao Zhaoliang, *et al.*. Application of liquid crystal adaptive optics system on human eye fundus imaging with high spatial resolution [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(10): 2524-2527.
程少园,胡立发,曹召良,等. 液晶自适应光学在人眼眼底高分辨率成像中的应用[J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2524-2527.
- 6 Kong Ningning, Li Dayu, Xia Mingliang, *et al.*. Liquid crystal

- adaptive optics system for retinal imaging operated on open-loop and double-pulse mode [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0111002.
- 孔宁宁,李大禹,夏明亮,等. 开环双脉冲液晶自适应光学视网膜成像系统[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 0111002.
- 7 Zhang Tao, Su Lining, Cai Hegao. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 26-32.
张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
 - 8 M Eleueri, O Klein, P Krejčí. Outward pointing inverse Preisach operators [J]. Physica B: Condensed Matter, 2008, 403(2-3): 254-256.
 - 9 Tan Zhibo. Research on Compensation of Hysteresis in Piezoceramic Actuators [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 7-55.
谭志波. 压电陶瓷驱动器迟滞补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 7-55.
 - 10 I D Mayergoz. Mathematical model of hysteresis [J]. IEEE Trans Magnetics, 1986, 22(5): 603-608.
 - 11 I D Mayergoz. Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications [M]. New York: Elsevier Academic Press, 2003. 1585-1660.
 - 12 Ping Ge, Musa Jouaneh. Generalized Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators [J]. Precision Engineering, 1997, 20(2): 99-111.
 - 13 Fan Wei, Yu Xiaofen, Xi Lin. Research on driving systems and controlling means of PZT [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 368-371.
范伟,余晓芬,奚琳. 压电驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 368-371.
 - 14 Chen Hui, Tan Yonghong, Zhou Xingpeng, *et al.*. Identification and control of dynamic modeling for piezoceramic actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 88-95.
陈辉,谭永红,周杏鹏,等. 压电陶瓷执行器的动态模型辨识与控制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 88-95.
 - 15 Dang Xuanju, Tan Yonghong. Study on the RBF neural network hysteresis modeling for piezoceramic actuator [J]. J System Simulation, 2005, 17(1): 144-147.
党选举,谭永红. 压电陶瓷回环特性的 RBF 神经网络建模研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 144-147.
 - 16 Wei Qiang, Zhang Yulin. Modeling method of micro-displacement stage driven by piezoelectric ceramic [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1596-1601.
魏强,张玉林. 压电陶瓷微位移工作台的建模方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1596-1601.
 - 17 Hong Song. Model-Based Control in Adaptive Optics System [D]. Delft: Delft University of Technology, 2011. 23-60.
 - 18 Ping Ge, Musa Jouaneh. Tracking control of a piezoceramic actuator [J]. IEEE Trans Control Systems Technology, 1996, 4(3): 209-216.
 - 19 J D Wei, C T Sun. Constructing hysteretic memory in neural networks [J]. IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2000, 30(4): 601-609.

栏目编辑: 王晓琰