

# 遗传神经网络在 GMI 传感器设计中的应用

吴彩鹏, 邓甲昊

北京理工大学机电学院; 机电工程与控制国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 巨磁阻抗 (GMI) 微磁传感器具有灵敏度高、响应速度快等突出优点, 但其输出信号呈高度非线性特性。利用交流偏置方法产生非对称巨磁阻抗效应 (AGMI), 对磁场传感器的线性度有一定改善, 但仍存在线性范围小、线性误差较大的缺点。BP 神经网络具有良好的自学习、自适应和非线性映射能力, 但通常训练速度较慢、易陷入局部极小值; 遗传算法有很强的全局寻优能力, 但其局部搜索能力不足。为充分发挥二者优点, 本研究提出一种基于遗传神经网络的传感器非线性误差校正方法, 并针对所设计的 GMI 传感器, 设计了适合本系统的遗传神经网络, 可通过 Matlab 软件实现。结果表明, 经过训练的网络输出结果有序, 网络的非线性映射性能良好, 能精确反映该传感器系统的函数关系。该方法运算快速、精度高, 对智能 GMI 传感器的设计具有一定工程应用价值。

**关键词** 巨磁阻抗效应; 磁传感器; 遗传神经网络; 非线性校正

**中图分类号** TP212.13, TP183

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)08-0055-05

## Application of Genetic Neural Network in GMI Sensor Design

WU Caipeng, DENG Jiahao

*National Key Laboratory of Mechatronic Engineering and Control; School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** The GMI sensor enjoys many advantages, such as high sensitivity, fast response, but its response characteristics are highly nonlinear. Although by introducing ac bias, with the AGMI effect, the degree of sensor's linearity can be improved to some extent, the linear range and error are still not satisfactory. The BP neural network has the abilities of self-learning, self-adaptation and non-linear mapping, but its convergence is slow and it is easy to fall into a local minimum. Genetic algorithm has a high global optimization ability, but its local search ability is weak. To give full play to the advantages of the two methods, a genetic neural network is proposed to solve the problem of non-linear correction in sensor systems, and according to the designed GMI sensor, using the software of Matlab, we have implemented the designed genetic neural network. Test result shows that the trained network has an ordered data structure and good nonlinear mapping properties, which can accurately reflect the function relation of the sensor system. The proposed method has the advantages of fast calculation and high precision, which may find important applications in designing smart GMI sensors.

**Keywords** GMI effect; magnetic sensor; genetic neural network; non-linear correction

### 0 引言

在现代科技发展中, 磁传感器技术占有重要位置, 在许多工程技术领域都可以看到它们的存在与作用, 如存储技术中的高密度磁盘, 军事安全领域中的导航、制导系统, 民用设

施中的反扒系统、无损检测等<sup>[1]</sup>。随着当代科技的迅速发展, 磁性产品及传感器不断创新, 尤其是近年来在新型敏感材料的研制及新原理、新效应的发现方面取得了可喜的成果。20 世纪 90 年代初, 日本名古屋大学的 K. Mohri 和 L.V. Panina 在

收稿日期: 2010-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60874100); 中国航天科技集团公司航天科技创新基金项目 (CAST200834); 总装预研基金项目 (9140A05070409BQ0116)

作者简介: 吴彩鹏, 博士研究生, 研究方向为磁物理场探测与目标识别, 电子信箱: wucaipeng@bit.edu.cn; 邓甲昊 (通信作者), 教授, 研究方向为目标探测与信号处理及感知与自适应控制, 电子信箱: bitdjh@sohu.com

Co-Fe-Si-B 软磁非晶丝中发现了巨磁阻抗 (Giant Magneto-Impedance, GMI) 效应<sup>[2]</sup>。利用 GMI 效应设计的磁传感器既具有磁通门传感器的高灵敏度, 又具有霍尔传感器的快速响应性, 以及磁阻 (MR) 传感器的低功耗等优点, 使其成为新一代高灵敏度磁传感器的重要发展方向<sup>[3]</sup>。

但是典型的 GMI 效应变化曲线, 随着激励电流频率的不同, 在零磁场附近大致呈对称峰形, 或在材料的磁各向异性场附近呈对称的双峰结构, 此种非线性特征限制了 GMI 效应在高性能微磁传感器领域的应用。目前围绕电路设计及材料处理两大方面, 研究报道了一些改善 GMI 效应非线性特征的方法, 如利用非对称巨磁阻抗效应 (AGMI) 以获得线性度较好的磁场传感器; 另外在三明治薄膜结构和玻璃包裹丝材料中基于非对角阻抗的线性磁传感器的研究也取得了很好的效果。由于磁传感器的精度直接影响整个目标探测系统的精度和性能, 而非线性误差则是 GMI 微磁传感器的主要误差<sup>[4-6]</sup>。为使 GMI 磁传感器能够满足实际探测环境的需要, 本研究在敏感元件线性设计基础上, 采用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 和神经网络 (Neural Network, NN) 相结合的遗传神经网络 (Genetic Neural Network, GNN) 方法, 构造神经网络并对其训练, 对 GMI 传感器系统进行非线性校正。

## 1 GMI 效应原理及其传感器特性分析

GMI 效应指当软磁材料 (多为 Co 基非晶和 Fe 基纳米晶) 的丝或条带通以高频交变电流时, 材料的阻抗随着丝或条带纵向所加的外磁场变化而灵敏变化的现象 (图 1)。

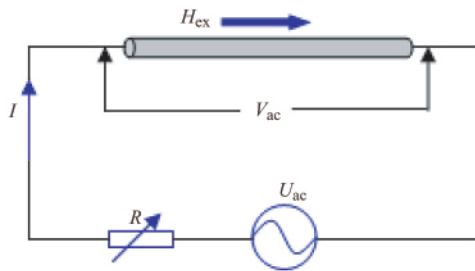


图 1 GMI 效应分析

Fig. 1 The analyzing diagram of GMI effect

GMI 效应源于经典的电磁效应, 可理解为: 由于软磁材料的磁导率显著高于非磁性导体, 使其在较低频率下就能出现趋肤效应, 外界磁场  $H_{ex}$  变化导致磁导率变化, 进而影响趋肤深度, 最终导致非晶丝阻抗的变化。对于丝状软磁材料, 阻抗可表示为

$$|Z| = (a/2\sqrt{\rho}) R_{dc} \sqrt{\omega \mu_0 H_{ex}} \quad \delta \ll a \quad (1)$$

式中,  $a$  为丝状材料的半径,  $\delta$  为趋肤深度,  $\rho$  为电阻率,  $R_{dc}$  为直流电阻,  $\omega$  为激励电流的角频率,  $\mu_0$  为圆周磁导率。当激励电流频率不同, GMI 效应的磁场-阻抗关系也将不同 (图 2)<sup>[7]</sup>。

GMI 的基本特性是非线性的, 阻抗变化与外场在零磁场附近呈对称性, 故 GMI 传感器在零磁场附近不敏感、灵敏度低。

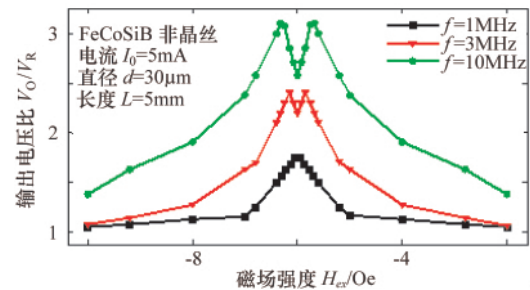


图 2 典型 GMI 效应曲线

Fig. 2 Typical response curves of GMI

AGMI 效应能改善 GMI 效应在零磁场附近的特性, 可提高其线性度和获得高灵敏度的输出信号, 本课题组在前期研究中, 利用加交流偏置的方法对非晶丝进行激励, 得到 AGMI 效应<sup>[8]</sup>。但该传感器存在线性范围小、线性误差较大的缺点。为进一步改善传感器的输出特性, 本研究采用遗传神经网络 (GNN) 算法来构造线性校正单元。

## 2 遗传神经网络原理分析

### 2.1 人工神经网络

神经网络通过模仿脑神经系统的组织结构及某些活动机理, 可呈现出部分人脑的特征, 即具有并行处理、分布式存储与容错性好的结构特征, 同时具有良好的自学习、自适应和非线性映射的能力特征。BP (Back Propagation) 神经网络是目前应用最多的一种前馈神经网络, R. Hecht-Nielsen<sup>[9]</sup>证明, 对于闭区间内的任一连续函数都可用含一个隐层的 BP 网络来逼近。图 3 为具有隐含层的 BP 网络结构。

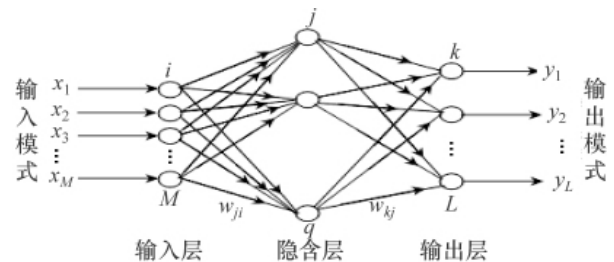


图 3 BP 网络结构

Fig. 3 BP network structure diagram

BP 网络隐含层、输出层输出为

$$O_j = g(\text{net}_j) \quad \text{net}_j = \sum_{i=1}^M w_{ji} x_i \quad j=1, 2, \dots, q \quad (2)$$

$$O_k = f(\text{net}_k) \quad \text{net}_k = \sum_{j=1}^q w_{kj} O_j \quad k=1, 2, \dots, L \quad (3)$$

如果网络输出与期望输出不一致, 则将其误差信号从输

出端反向传播,并在传播过程中对加权系数不断修正,使在输出层节点上得到的输出结果尽可能接近期望输出。对于每一个样本  $P$  的输入输出模式对,可得到二次型误差函数

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (T_k - O_k)^2 \quad (4)$$

式中,  $T_k$  为期望输出,  $O_k$  为实际输出。权系数应按照  $E$  函数梯度变化的反方向调整,使网络输出逐渐接近期望输出。

由于 BP 学习算法采用误差导数指导学习过程,从本质上看,属局部寻优算法,当存在较多局部极小值情况时,运算很容易陷入局部极小值域,且不可避免地存在着学习精度与学习速度的矛盾。而遗传算法(GA)是一种基于生物进化过程的随机搜索的全局优化方法,可同时对搜索空间中的多个个体进行评价,搜索遍历整个解空间而又不依赖梯度信息,具有较好的宏观搜索能力,鲁棒性强。因此本研究在 BP 神经网络中引入遗传算法,可充分发挥各自的长处。

## 2.2 遗传算法原理分析

遗传算法本质是对由数串形成的个体进行一系列运算,是一种高效、并行、全局搜索方法。它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识,并自适应地控制搜索过程以求得最优解。遗传算法操作过程为:①对问题潜在解的遗传基因表达(编码方案);②初始种群产生;③适应度函数选取;④选择操作;⑤交叉操作;⑥变异操作<sup>[10]</sup>。图 4 为基本遗传算法流程图。

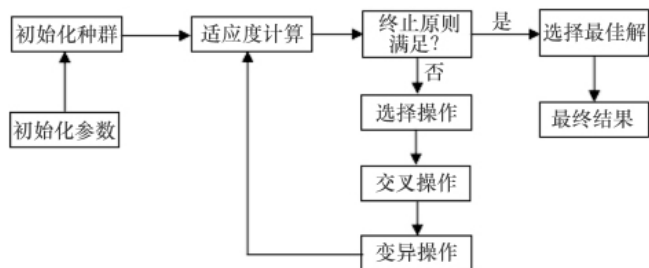


图4 遗传算法流程图

Fig. 4 Genetic algorithm flowchart

遗传算法的出发点是一个简单的群体遗传模型,该模型基于如下假设:①染色体(基因型)由一固定长度的字符串组成,其中每一位具有有限数目的等位基因;②群体由有限数目基因组成;③每一基因型有一相应的适应度,表示该基因型生存与复制的能力。

## 2.3 基于遗传神经网络的 GMI 传感器校正原理

由于 GMI 传感器的特性为非线性,为了校正其非线性误差,可在传感器输出端串联一个补偿环节(图 5)。

设 GMI 传感器输入—输出函数为  $V=f(H)$ ,其补偿环节的特性函数为  $P=F(V)$ ,其中  $P$  为补偿后的输出,若令  $F(V)=f^{-1}(V)$ ,则可实现传感器的非线性校正<sup>[11]</sup>。由于  $V=f(H)$  是非线性函数,则其反函数  $f^{-1}(V)$  也是非线性函数,通常很难求出。遗传

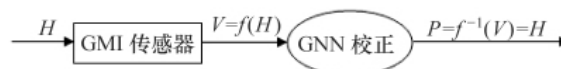


图 5 GNN 校正原理

Fig. 5 The block diagram of GNN correction principle

神经网络具有自进化、自适应能力,能映射非线性函数并具有较强的泛化能力,故可利用网络的函数逼近能力,经过训练后的遗传神经网络可取代  $f^{-1}(V)$ ,即可将系统输出  $P$  与输入  $H$  校正成近似的线性关系。网络的输入、输出样本可通过实验手段测得。

## 3 遗传神经网络算法及实现

神经网络的连接权值蕴含着网络系统的全部知识,通常 BP 神经网络权值的获取方法是采用某个确定的权值变化规则,在训练中逐步调整,最终得到一个较好的权值分布。但因 BP 网络学习易陷入局部极值,很可能得不到满足要求的权值分布,而利用遗传算法全局寻优的特点,可将连接权值首先定位于局部空间,进而发挥 BP 网络局部寻优的特点,有望迅速得到满足要求的权值分布<sup>[12-13]</sup>。具体操作步骤如下。

1) 设计 BP 神经网络结构,利用随机产生的初始权值,运行 BP 神经网络,通过不同训练次数,得到不同的权值分布,形成初始群体。

2) 采用实数编码,个体编码长度等于其变量个数。与二进制编码相比,既缩短了染色体编码长度,又具有搜索空间大、稳定性好、精度高等优点。

3) 为使遗传算法在保持群体多样性的同时,并保证其收敛性,需要采用自适应策略,即在同一代中给不同个体赋予不同的交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$ ,对适应值高的个体予以保护,而加大适应值低的个体被改变的机会。

4) 适应度函数选取。适应度函数是遗传算法指导搜索的唯一信息,根据其值能够判别遗传个体的优劣性。此处设计的 GMI 传感器非线性校正的适应度函数为

$$F = E^{-1} = \left[ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (T_k - O_k)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

其中,  $E$  为式(4)所定义的二次型误差函数。

5) 遗传操作,即通过选择、交叉、变异三种操作,重复遗传操作,直到满足终止原则,得到 BP 网络权值。

6) 将 5) 所得权值结果作为 BP 网络的初始权值,运行神经网络,对权值进行局部寻优。

应用上述操作步骤,可对 GMI 传感器的非线性输出特性进行补偿校正。

## 4 GMI 传感器非线性校正

BP 网络是一种具有三层或三层以上的神经网络,本研究中网络输入、输出层的神经元个数均为 1,单隐层结构。一般



- [5] Seok S Y, Pratap K, Dong Y K, *et al.* Magnetic sensor system using asymmetric giant magnetoimpedance head [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45: 2727–2729.
- [6] Zhukova V, Ipatov M, Gonzalez J, *et al.* Development of thin microwires with enhanced magnetic softness and GMI [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44: 3958–3961.
- [7] Panina L V, Makhnovskiy D P, Mohri K. Magnetoimpedance in amorphous wires and multifunctional applications: from sensors to tunable artificial microwave materials [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 272: 1452–1459.
- [8] Wu C, Deng J, Sun J, *et al.* A design of linear AGMI sensor and its application for tank target detection[C]//The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009: 1021–1026.
- [9] Hecht–Nielsen R. Theory of the back propagation neural network[C]//International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1989: 593–605.
- [10] Peter J S, Joe K, Welchons D. Adaptive sensor tasking using genetic

- algorithms[J]. *Proc of SPIE*, 2007, 6567: 65671A.
- [11] Patra J C, Chakraborty G, Meher P K. Neural network–based robust linearization and compensation technique for sensors under nonlinear environmental influences [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2008, 55(5): 1316–1327.
- [12] Turkmen I, Guney K. Genetic tracker with adaptive neuro–fuzzy inference system for multiple target tracking [J]. *Expert Systems with Applies*, 2008, 35(4): 1657–1667.
- [13] Wu D, Huang S, Zhao W, *et al.* Infrared thermometer sensor dynamic error compensation using Hammerstein neural network [J]. *Sensors and Actuators A*, 2009, 149: 152–158.
- [14] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- Li Guoyong. Intelligent control and Matlab implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

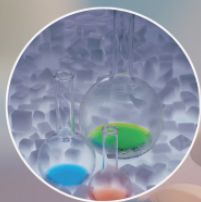
(责任编辑 吴晓丽)

# 中国化学会第27届学术年会

时间: 2010年6月20—23日

地点: 福建·厦门

主办单位: 中国化学会



联系电话: 010–62625584

传真: 010–62568157

电子信箱: maria@iccas.ac.cn

通信地址: 北京2709信箱中国化学会 (100190)