

磁悬浮振动传感系统及误差分析

李凯^{1,2}, 王晓飞¹, 韩焱^{1,2}

(1. 中北大学 信息探测与处理技术研究所, 太原 030051; 2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘要: 利用磁悬浮技术设计一款惯性振动传感器, 对传感系统进行受力分析, 得出系统二阶运动方程; 同时进行磁路分析得到系统刚度表达式, 涡流分析得到系统的阻尼表达式, 进而计算出传感系统的各部分参数, 其刚度值为 140 N/m, 固有频率为 11.2 Hz, 阻尼为 2.56 N·s/m; 通过分析传感系统的温度误差与非线性误差, 提出误差补偿方法: 对温度误差进行热磁分流补偿, 对非线性误差进行线圈补偿; 标定得出传感器的灵敏度高达 220 V·s·m⁻¹; 使用该传感器对爆炸冲击信号进行测量, 实验结果表明该传感器能较好地描述爆炸振动信号; 并且该传感器有灵敏度高、结构简单、防电磁干扰等优点。

关键词: 磁悬浮传感器; 误差分析; 振动测量; 非线性; 磁路分析

Vibration Sensing System Based on Magnetic Levitation and Error Analysis

Li Kai^{1,2}, Wang Xiaofei¹, Han Yan^{1,2}

(1. Institute of Signal Capturing & Processing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Using magnetic levitation technology to design a inertia vibration sensor, by analyzing sensing system's force, the second order equations in dynamics of sensor system can be derived. Sensing system's stiffness expression is derived by magnetic circuit analysis, and its damping expression is derived by eddy current analysis, then parameters of sensor are calculated, stiffness value is 140 N/m, natural frequency is 11.2 Hz, damping value is 2.56 N·s/m. By analysis of the temperature error and nonlinear error of the sensor system, error compensation method is put forward; thermal magnetic shunt can compensate the temperature error, compensating coil can compensate the nonlinear error. The sensitivity verified by experimental calibration method is 213 V·s·m⁻¹. Explosion signals are collected by magnetic levitation vibration sensor, the experimental results show that the sensor can be better used in collecting explosion vibration data. The sensor has advantages of high sensitivity, simple structure and preventing electromagnetic interference ability.

Key words: magnetic levitation sensor; error analysis; measurement of vibration; nonlinear; magnetic circuit analysis

0 引言

振动传感器是测量振动系统的关键, 可以广泛地应用于航空、能源、地质、石油、军工和科研等领域。根据不同的测量原理, 振动传感器分为电阻式、电容式、电感式、电涡流式、压电式、光纤式、磁电式等。磁电式传感器具有结构简单、造价低、高频特性好等优点, 因而得到了广泛的应用。由于磁电式传感器内部结构包含质量块, 也被称为惯性式振动传感器^[1-3]。传统的磁电式传感器大都采用动圈式结构, 这种传感器存在以下几点不足: 由弹簧提供系统的刚度, 因此会有一定的机械损耗; 传感器在工作状态时, 线圈会持续运动, 容易发生损坏, 降低传感器的使用寿命^[4-5]。

本研究利用悬浮磁铁代替弹簧, 为系统提供刚度; 并且改进传感器的结构, 使线圈保持静止, 而质量块发生相对运动, 避免线圈运动时容易发生断裂的缺点; 对系统进行磁路设计, 提高传感器的抗电磁干扰的能力。由于惯性式传感器内部都存在一个 $m-k-c$ 系统^[6-7], 本文着重从 $m-k-c$ 系统分析其运动特性。同时通过误差分析, 得到温度误差对灵敏度的影响, 并使用热磁分流技术补偿温度误差, 以及使用补偿线圈的方法进行非线性误差补偿。

收稿日期: 2013-12-29; 修回日期: 2014-01-26。

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础专项(61227003)。

作者简介: 李凯(1979-), 男, 山西人, 讲师, 博士研究生, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

1 磁悬浮惯性传感器

1.1 工作原理

磁悬浮惯性传感器以电磁感应原理为基础, 当线圈切割磁力线时产生感应电动势:

$$E = -NB_0 l_0 v \quad (1)$$

式中, B_0 为线圈所在位置的磁感应强度, 单位 T; l_0 为单匝线圈的平均长度, 单位 m; N 为线圈工作匝数; v 为悬浮磁体与壳体的相对运动速度, 单位 m/s。

该传感器包含 3 个基本器件: (1) 感应线圈, 它与悬浮磁铁组件产生的恒定磁场发生相对运动, 产生感应电动势; (2) 悬浮磁铁组件与套筒, 悬浮磁铁组件给系统提供刚度值, 套筒给系统提供所需的阻尼; (3) 恒定的磁路, 磁路的稳定性直接影响到传感器的稳定性, 高磁导率外壳可以屏蔽外部电磁信号。传感器结构如图 1 所示。

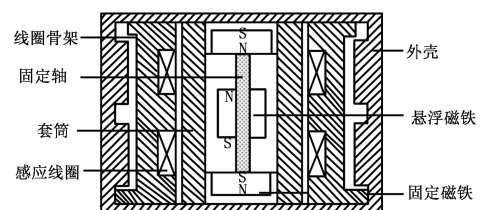


图 1 传感器结构

1.2 传感器系统运动方程

磁悬浮惯性传感器可以简化为图 2 所示的结构, 通过受力

分析得出其运动方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2)$$

式中， m 为质量块的质量，单位 kg； c 为系统阻尼，单位 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ； k 为系统刚度，单位 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ； x 为质量块与壳体的相对位移，单位 m； y 为壳体的位移，单位 m。

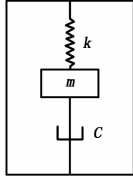


图 2 传感器简化结构

1.2.1 系统刚度^[8]

磁悬浮惯性传感器系统的刚度由两块固定磁铁双重斥力提供，永磁体的磁路模型为：

$$\varphi_m = B_m S = B_r S - \mu_0 \mu_r H_m S = \varphi_r - \frac{F_m}{R_m} \quad (3)$$

式中， B_m 为永磁体工作点的磁感应强度，单位 T； B_r 为永磁体的剩磁，单位 T； μ_0 为真空磁导率； μ_r 为永磁体相对磁导率； H_m 为磁场强度，单位 A/m； Φ_m 为磁通量，单位 Wb； S 为永磁体横截面积，单位 m^2 ； Φ_r 为虚拟内禀磁通，单位 Wb； F_m 为磁动势，单位 A； R_m 为永磁体内磁阻，单位 H^{-1} 。

令 $F_r = \Phi_r \cdot R_m$ ，由式 (3) 得出永磁体可等效为磁动势 F_r 和内磁阻 R_m 的串联。同时得出永磁系统的等效模型：

$$\varphi_m = \frac{F_r}{R_m + R_g} \quad (4)$$

得到气隙的磁感应强度：

$$B_g = \frac{\varphi_m}{S} = \frac{\mu_0 F_r}{L_m + L_g} \quad (5)$$

式中， L_m 为永磁体的长度，单位 m； L_g 为气隙长度，单位 m； R_g 为气隙磁阻，单位 H^{-1} 。由于系统存在磁漏、永磁体非均匀磁化、磁力线分布不规则等问题，根据文献 [9] 对公式 (5) 添加修正系数 $\alpha=0.32$ ，则有：

$$B_g = \frac{\mu_0 F_r \alpha}{L_m + L_g} \quad (6)$$

假设悬浮组件的微小位移为 x ，带入磁力公式 $F = B_g^2 S / 2\mu_0$ ，悬浮组件受到的总磁力为：

$$F(x) = F_2(x) - F_1(x) = \frac{\mu_0 S F_r^2 \alpha^2}{2(L_m + L_g - x)^2} - \frac{\mu_0 S F_r^2 \alpha^2}{2(L_m + L_g + x)^2} \quad (7)$$

对式 (7) 进行泰勒级数展开，得：

$$F(x) = \frac{2\mu_0 S F_r^2 \alpha^2}{(L_m + L_g)^3} x \quad (8)$$

传感器系统的刚度表达式为：

$$k = \frac{2\mu_0 S F_r^2 \alpha^2}{(L_m + L_g)^3} \quad (9)$$

1.2.2 系统阻尼

永磁铁在竖直方向运动时会在金属套筒中产生涡流，在分析时可以将套筒等效为金属环模型，模型如图 3 所示。

悬浮磁铁以速度 v 运动时，套筒的感应电势为：

$$\begin{cases} e = Blv \\ l = 2\pi r \end{cases} \quad (10)$$

这部分金属环的电阻为：

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{2\pi r}{t \cdot dz} \quad (11)$$

式中， r 为金属环平均半径，单位 m； l 为金属环平均周长，单位 m； B 为金属环处磁感应强度水平分量，单位 T； ρ 为金属环电阻率，单位 $\Omega \cdot \text{m}$ ； t 为金属环的厚度，单位 m； dz 为金属环高度，单位 m；得出套筒中的感应电流为：

$$I = \frac{e}{R} = \frac{Btv dz}{\rho} \quad (12)$$

套筒所受的洛伦兹力为：

$$dF = BIl = B \frac{Btv dz}{\rho} 2\pi r = \frac{2\pi r B^2 tv dz}{\rho} \quad (13)$$

以圆柱形永磁铁的中心为原点建立柱坐标系如图 4 所示， p 为永磁体内任意一点，该点与 z 轴距离为 r ，与 x 轴夹角为 θ ，与 xy 平面距离为 z 。

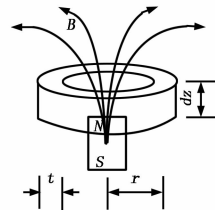


图 3 金属套筒等效结构

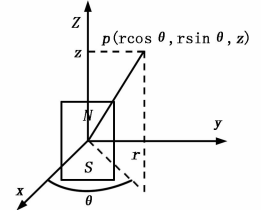


图 4 永磁体的柱坐标系

将永磁体等效为磁偶极子模型，则 p 点处的磁感应强度的分量为：

$$\begin{cases} B_x = \frac{3\mu_0 M z r \cos \theta}{4\pi(z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} \\ B_y = \frac{3\mu_0 M z r \sin \theta}{4\pi(z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} \\ B_z = \frac{\mu_0 M(2z^2 - r^2)}{4\pi(z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} \end{cases} \quad (14)$$

式中， $M = 4\pi r_m^3 B_r / 3\mu_0$ 。M 为永磁体的磁偶极距，单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2$ ； r_m 为永磁体的半径。则可以得出水平分量的磁感应强度：

$$B = \frac{3\mu_0 M z r}{4\pi(z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (15)$$

把式 (15) 代入式 (13)，且假定金属套筒长为 L ，从 0 到 L 积分可得到阻尼力和阻尼表达式为：

$$F = 9\mu_0^2 M^2 r^2 t / 8\pi\alpha \cdot [(15L^8 + 60r^2L^6 + 90r^4L^4 + 60r^6L^2 + 15r^8) \arctan(L/r) + 15rL^7 + 55r^3L^5 + 73r^5L^3 - 15r^7L^2] / (384r^7L^8 + 1536r^9L^6 + 2304r^{11}L^4 + 1526r^{13}L^2 + 384r^{15} \cdot v) \quad (16)$$

$$c = 9\mu_0^2 M^2 r^2 t / 8\pi\alpha \cdot [(15L^8 + 60r^2L^6 + 90r^4L^4 + 60r^6L^2 + 15r^8) \arctan(L/r) + 15rL^7 + 55r^3L^5 + 73r^5L^3 - 15r^7L^2] / (384r^7L^8 + 1536r^9L^6 + 2304r^{11}L^4 + 1526r^{13}L^2 + 384r^{15}) \quad (17)$$

根据传感器系统的实际尺寸以及式 (9) 和式 (17) 给定的系数表达式, 计算得到传感器的刚度 k 为 140 N/m, 固有频率为 11.2 Hz, 阻尼为 2.56 N · s/m, 阻尼比为 0.64。

2 传感器系统误差分析

磁悬浮惯性振动传感器的误差主要有永磁材料的稳定性误差、温度误差、非线性误差等。

2.1 稳定性误差

稳定性误差是由于永磁体的磁感应强度 B 发生变化引起的误差, 引起磁感应强度 B 变化的原因有 3 个方面: (1) 环境温度变化引起 B 值的变化, 可以采用温度补偿措施; (2) 永磁体内部组织不均匀产生内应力, 可对永磁体进行稳定性处理; (3) 永磁体受到振动冲击作用使材料分子排列发生变化, 要进行老化处理。由于后两个方面为工艺问题, 所以只讨论温度对 B 的影响, 随后在温度误差中讨论。

2.2 温度误差

实际使用传感器时要接测量电路, 设电路的电阻为 R_L , 线圈内阻为 R_c , 则传感器的输出电流为:

$$i = \frac{E}{R_c + R_L} = \frac{-NB_0lv}{R_c + R_L} \quad (18)$$

则电流灵敏度:

$$S_i = \frac{i}{v} = \frac{-NB_0l}{R_c + R_L} \quad (19)$$

则进行全微分后, 得出由温度引起的相对误差:

$$\gamma = \frac{dS_i}{S_i} = \frac{dB}{B} + \frac{dl}{l} - \frac{dR}{R} \quad (20)$$

当温度变化 Δt 时, 则有:

$$\gamma = \alpha_B \Delta t + \alpha_E \Delta t - \alpha_R \Delta t \quad (21)$$

式中, α_B 为磁感应强度的温度系数, $\alpha_B = -2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$; α_E 为材料的膨胀系数, $\alpha_E = 0.176 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$; α_R 为电阻率的温度系数, $\alpha_R = 0.4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。假设标准温度为 20 °C, 当工作温度为 -20 ~ 80 °C 时, 代入上式可得灵敏度相对误差分别为 -0.89% 和 -1.33%, 在允许的误差范围内。

为了进一步减小灵敏度的相对误差, 可以在空气气隙上搭一个热磁分流器进行温度补偿。热磁分流器的磁感应强度随温度升高而急剧下降, 当温度升高时, 热磁分流器的磁导率急剧下降, 经它分流的磁通占总磁通的比例较正常温度时显著下降, 使得气隙的工作磁通基本不变。设气隙的总磁通为 Φ , 变化量为 $\Delta\Phi$, 热磁分流器的磁通为 Φ_n , 变化量为 $\Delta\Phi_n$, 热磁补偿的目地是使 $\Delta\Phi = \Delta\Phi_n$, 当温度变化 Δt 时, 则有:

$$\alpha_n \Phi_n \Delta t = \alpha_t \Phi \Delta t \quad (22)$$

式中, α_n 和 α_t 分别为热磁分流器和永磁体的磁导的温度系数。磁通的分流比为:

$$\frac{\Phi_n}{\Phi} = \frac{G_n}{G_0 + G_n} \quad (23)$$

式中, G_n 为常温时磁分流器的磁导; G_0 为包括漏磁在内的气隙磁导。根据式 (22) 和式 (23) 得出:

$$\alpha_n = \left(1 + \frac{G_0}{G_n}\right) \alpha_t \quad (24)$$

得出热磁分流器磁导的温度系数 α_n 后, 查表选定相应的温度补偿合金。

2.3 非线性误差

该磁悬浮传感器在工作时, 工作线圈中会产生感应电流,

此电流在线圈中会产生一个与永磁场方向相反的磁场 Φ_i 削弱永磁场, 并且质量块运动速度越快, 产生的感应电动势越大, 因而电流越大, 从而产生的 Φ_i 越大, 使永磁铁磁场减小, 因此感应电动势减小, 造成传感器的非线性。在金属套筒内涡流产生的磁通 Φ_e 也会使永磁体磁场减小而产生非线性误差。通常采用补偿线圈的方法来补偿非线性误差, 如图 1 所示。补偿线圈产生的磁通为 Φ_k , 永磁铁产生的磁场为 Φ , 存在非线性误差后永磁铁产生的磁场为 Φ_δ , 则有:

$$\Phi_\delta = \Phi - \Phi_e - \Phi_i + \Phi_k \quad (25)$$

只要满足 $\Phi_\delta = \Phi$ 即满足补偿要求, 由于涡流产生的磁通 Φ_e 较小忽略不计, 只要满足 $\Phi_k = \Phi_i$ 就达到补偿的效果。

工作线圈与补偿线圈产生的感应电动势为:

$$\begin{cases} \Phi_i = N_i B_i S_i \\ \Phi_k = N_k B_k S_k \end{cases} \quad (26)$$

式中, B_i 、 S_i 、 N_i 为工作线圈的磁感应强度、面积及匝数; B_k 、 S_k 、 N_k 为补偿线圈的磁感应强度、面积及匝数。螺线管产生的磁感应强度的大小与电流成正比, 把工作线圈与补偿线圈串联反接, 则二者电流相同, 因而磁感应强度 $B_i = B_k$ 。得出 $N_k = S_i N_i / S_k$, 所以当工作线圈的匝数和传感器的结构确定之后就可以计算出补偿线圈的匝数。

3 振动波形测量

使用标准激振台 ACT2000-R0110L-SP600 对传感器进行标定, 设定振动频率为 30~1 000 Hz, 截取一段扫频数据信号如图 5 所示。根据激振台的位移峰值和实验数据的输出电压值, 计算出传感器的灵敏度高达 $220 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, 远大于传统磁电式传感器的灵敏度。

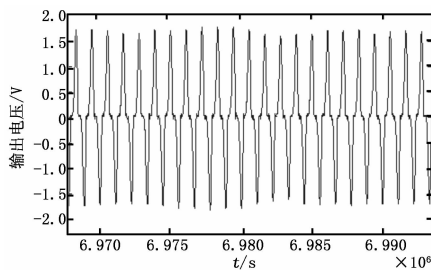


图 5 传感器标定信号

在西安某研究所使用该款传感器测试三发装药 36 克射孔弹对 54 号钢靶冲击实验, 该实验的原始数据如图 6 所示, 从实验数据可以看出, 该传感器可以很好的抓取爆炸冲击的信号。

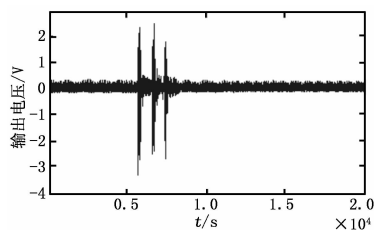


图 6 爆炸信号

4 结论

本文从 m-k-c 系统出发, 分析磁悬浮惯性振动传感系

(下转第 1548 页)

有了好的拟合效果, 再对误差进行分析, 如果预测很好, 自相关数的误差为 0, 即在一个时间内的输出误差和另一个时间内的输出误差无关, 是非常理想的模型结果, 但是实际上达不到, 误差结果在 95% 范围内是可以接受的。其模拟结果如图 4 所示。

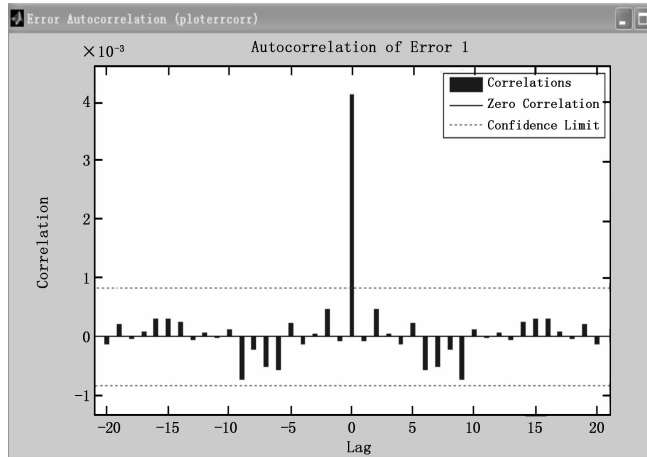


图 4 预测误差

3.3 模型验证

理想模型的训练误差如图 5 所示, 实际上和之前的输入无任何关系, 图中定义的两个曲线段, 位于两条虚线之间的曲线

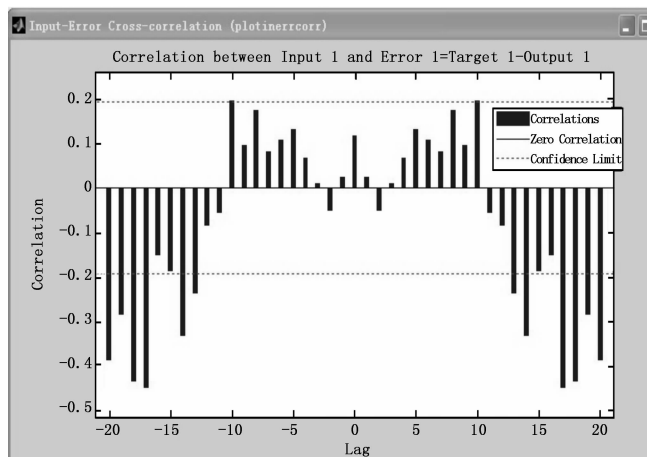


图 5 模型理想输入误差

(上接第 1545 页)

统的二阶运动方程, 得出传感器的刚度表达式与阻尼表达式, 为系统的设计提供理论基础。并且着重分析传感器的温度误差和非线性误差, 提出误差的补偿方法, 这两种方法相对于软件补偿有简单、易于实施的优势。将该传感器用于装有三发炸药的射孔弹对钢靶冲击信号的采集, 实验结果说明磁悬浮惯性振动传感器可以适用于爆炸信号的采集。

参考文献:

[1] 吕公河. 地震勘探检波器原理和特性及有关问题分析 [J]. 石油物探, 2009, 48 (6): 531-543.
 [2] 俞阿龙, 陈华宝. 振动速度传感器的动态性能改进的软件方法 [J]. 淮阴师范学院学报 (自然科学版), 2004, 3 (4): 289-291.
 [3] 郁 专. 石油勘探中的惯性传感器研究 [D]. 太原: 中北大

学, 2008.

段是可以接受的。但是如果误差过大, 可以采用两种办法减少误差, 其一重新训练网络, 使得网络初始值改变, 导致训练结果不一样; 其二改变神经元的个数或者改变参数序列相关的个数。

4 结束语

神经网络控制适用于不确定性、高度非线性和多变量的污水处理系统, 针对污水处理系统, 神经网络黑箱系统模型取得了很好的效果。针对提出的 BP 神经网络模型的建立, 采用试凑法确定节点个数, 建立合理的网络模型。但是神经网络还是有一些缺点, 不很好的利用经验知识, 网络训练时间不能很好的把握。建立精确的数学模型比较困难, 并且很难能够以很高的精度对系统进行预测, 如果精确预测这对于实际应用才有意义。使得污水处理系统过程可能实现水质早期预测得到理想的目标值。

参考文献:

[1] 张群英. 神经网络在工业污水处理建模中的应用 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (3): 258-261.
 [2] 黄明智, 马懿文, 万金泉, 等. 污水处理中人工神经网络应用研究的探讨 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31 (3): 131-135.
 [3] 从秋燕, 柴天佑, 余 文. 污水处理过程的递阶, 神经网络建模 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26 (1): 8-14.
 [4] 张乃尧, 闫平凡. 神经网络与模糊控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
 [5] RI Son-il, 侯得刚, 张振家, 等. 基于 BP 人工神经网络的生化处理水质预测 [J]. 现代化工, 2009, 29 (12): 66-70.
 [6] 张兴吾, 王 勇, 冯丽辉. 基于 BP 神经网络的 SBR 法污水处理 DO 预测模型研究 [J]. 云南大学学报自然科学版, 2009, 31 (S2): 103-105.
 [7] 楼文高, 刘遂庆. 活性污泥系统神经网络建模与仿真 [J]. 环境污染与防治, 2005, 27 (9): 704-709.
 [8] 沈花玉, 王兆霞, 高成耀, 等. BP 神经网络隐含层单元数的确定 [J]. 天津理工大学学报, 2008, (10): 13-15.
 [9] 欧长劲, 吴海列, 李 军. 基于模糊神经网络的 SBR 污水处理控制系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14, (12): 1643-1645.
 [10] 楼文高. 基于神经网络的活性污泥法神经网络建模研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.
 [11] 张文艺, 钟梅英, 蔡建安. 活性污泥法系统人工神经网络模型 [J]. 给水排水, 2002, 28 (6): 12-15.

[4] 沈海平. 用于全自动平衡机的差动动铁型磁电速度传感器研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
 [5] 卢长根, 周友佳. 磁电式速度传感器设计与应用 [J]. 机车电传动, 2008, (5): 48-50.
 [6] 孙传友, 阳成军, 周月霞. 惯性式测振传感器的设计思路和方法 [J]. 传感器技术, 2002, (8): 7-10.
 [7] 杨 洁, 李训明. 单自由度磁悬浮系统的状态反馈控制 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (5): 472-473.
 [8] 王晓飞, 李 凯, 韩 焱, 等. 基于磁悬浮效应的振动传感器设计 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (10): 61-64.
 [9] 刘小英, 王 凌, 赵淑英, 等. 汽车磁悬浮减振系统的结构分析与模型研究 [J]. 武汉汽车工业大学学报, 2000, 22 (3): 14-17.