

改进的自适应神经模糊推理系统的角度传感器误差补偿方法

王艳永^{1,2,3}, 邓方^{1,3†}, 孙健^{1,3}

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072;

3. 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 角度传感器测量精度控制在工程应用中非常重要, 直接影响其实际应用的效果. 当被测物理量和角度传感器输出之间为复杂非线性关系时, 传统方法已难以获得满意的结果. 本文引入了一种基于改进的自适应神经模糊推理系统的误差补偿方法, 阐述了模型建立过程与步骤, 并对一个16位绝对式光电编码器进行了精度检测与误差补偿. 实验结果证明, 与多项式拟合法和BP神经网络相比, 改进的自适应神经模糊推理系统可显著提高光电编码器的测量精度; 相比于补偿前, 补偿后光电编码器测量精度可至少提高7.5倍.

关键词: 角度传感器; 自适应神经模糊推理系统; 误差补偿

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A

Improved adaptive neural-network-based fuzzy inference system angular sensor error compensation method

WANG Yan-yong^{1,2,3}, DENG Fang^{1,3†}, SUN Jian^{1,3}

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

3. Key Laboratory of Complex Control and Decision, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

Abstract: The control of the measurement accuracy of angular sensors is very important in engineering applications; and has significant effects on the operation performances of the applications. Traditional methods cannot provide satisfactory results when the input-output relationship of angular sensors is complex and nonlinear. To deal with this problem, we propose the error compensation method based on the improved adaptive neural-network-based fuzzy inference system (ANFIS). The modeling procedures are demonstrated step by step in this paper. This method has been applied to calibrate a 16-bit absolute-type photoelectric encoder based on the accuracy test. The results show that, compared with the polynomial fitting and BP neural network, the improved ANFIS enhances the measurement accuracy markedly. The measurement accuracy of the optical encoder is raised up to at least 7.5 times higher than that of the original value.

Key words: angular sensor; adaptive-neural-network-based fuzzy inference system; error compensation

1 引言(Introduction)

角度传感器是一类可将被测物体的机械旋转角转换成相应的电脉冲信号的数字测角装置, 具有高精度、高分辨力、输出稳定等优点, 广泛应用于仪表测量、现代军事、信号检测、生物工程、工业自动化和航空航天航海等精密检测与控制系统领域^[1-3].

角度传感器在制造装配完毕时、出厂前和安装使用前等情形下都需要进行一系列测试, 以确定所选用角度传感器的实际性能. 角度传感器在使用一段时间后会因弹性元件疲劳、运动机件磨损及腐蚀、电子元器件老化等产生误差, 所以必须定期进行校准, 以保证其测量精度.

角度传感器误差包括机械安装误差、刻线误差、细分误差, 具有成因复杂、分布非线性等特点, 难以用准确的数学模型来表征^[4]. 采用查表法、曲线拟合法、补偿因子法等对其进行误差补偿, 费时、费力并且精度不高. 所以, 很多学者进行了相关研究. Orton等^[5]提出了一种采用3个或更多读数头的方法来消除角度传感器的大部分误差. 张礼松等^[6]采用非线性最小二乘拟合法对圆光栅安装偏心带来的分度误差来进行误差修正. 熊文卓等^[7]设计专门的信号处理电路, 以正弦信号为基准, 通过精密调节确保余弦信号的幅值与正弦信号严格相等来消除高精度光电轴角编码器的细分误差中的正交性偏差. 洪喜等^[8]提出了一种

基于径向基函数网络模型的光电编码器误差修正技术, 该方法以23位高精度编码器为基准来检测16位光电编码器. 赵人杰等^[9]采用误差谐波法来消除稳定的可重复性误差源, 其标校系统由23面棱体和自准直仪组成. 高贯斌等^[10]使用光电自准直仪和金属多面体对圆光栅角度传感器的测量误差进行离散标定, 提出了一种基于正弦函数的圆光栅角度传感器误差补偿模型, 采用了粒子群算法来求解7个模型参数. 黄宗升等^[11]针对编码器使用过程中由安装偏心、安装倾斜等因素引起的测量误差, 提出了用激光陀螺标校编码器.

上述所列角度传感器误差补偿方法均获得很好的补偿结果, 但大多数方法只针对某一种误差源, 就编码器而言, 比如安装偏心、正交性偏差、安装倾斜, 来进行针对性的误差补偿. 另外, 所采取的检测装置均由高精度仪器与转台来配合使用, 存在操作过程较复杂、设备成本较高、不易推广等缺点. 因此, 本文提出一种基于改进的自适应神经模糊推理系统的角度传感器误差补偿方法, 其主要优点是建模精度高、标定操作简单、网络结构简单且易于实现等, 并借助实验室研发的一套高精度检测装置完成对角度传感器测量精度的快速检测.

2 改进的自适应神经模糊推理系统(Improved adaptive neural-network-based fuzzy inference system)

2.1 自适应神经模糊推理系统 (Adaptive neural-network-based fuzzy inference system)

Jang^[12]提出了自适应神经模糊推理系统, 是一种基于Sugeno-type的模糊推理结构, 将模糊逻辑语言和神经网络相结合, 充分发挥两者的优点, 通过对训练数据的学习来确定隶属度函数和模糊规则等^[13-14].

典型的ANFIS结构如图1所示, 是由两个输入、一个输出和两条规则组成的5层网络. 其中: 方形节点是带有参数的自适应节点, 而圆形节点是不带参数的固定节点.

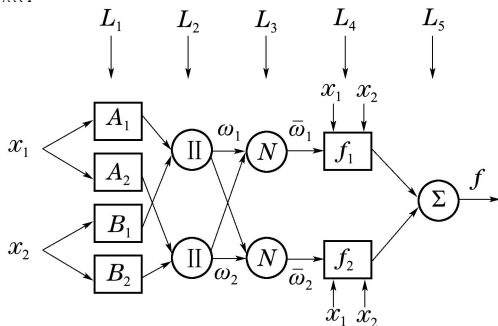


图 1 ANFIS典型结构

Fig. 1 ANFIS typical architecture

第1层: 模糊化输入变量. 该层节点的输出函数为

$$O_i^1(x_1) = \mu_{A_i}(x_1), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$O_j^1(x_2) = \mu_{B_j}(x_2), \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

式中: x_1 和 x_2 是节点的输入; O_i^1 和 O_j^1 是节点的输出, 是模糊变量 A_i 和 B_j 的隶属度函数值, 它决定了变量 x_1 和 x_2 分别属于 A_i 和 B_j 的程度. $\mu_{A_i}(x_1)$ 和 $\mu_{B_j}(x_2)$ 通常为钟形函数或高斯函数, 本文选择高斯函数作为隶属度函数, 如:

$$\mu_{A_i}(x_i) = e^{-\frac{(x_i - c_{i,1})^2}{\sigma_{i,1}^2}}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

$$\mu_{B_j}(x_j) = e^{-\frac{(x_j - c_{j,1})^2}{\sigma_{j,1}^2}}, \quad j = 1, 2, \quad (4)$$

式中 $c_{i,1}$, $c_{j,1}$ 和 $\sigma_{i,1}$, $\sigma_{j,2}$ 分别是隶属度函数的中心和宽度, 这些参数为前件参数(前题参数).

第2层: 对输入变量进行相乘计算, 用 Π 表示. 每个节点的输出代表一条规则的强度.

$$O_i^2 = \omega_i = \mu_{A_i}(x_1) \times \mu_{B_i}(x_2), \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

第3层: 规则强度归一化, 用 N 表示.

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

第4层: 计算每条规则的输出:

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

式中 p_i , q_i , r_i 称为后件参数(结论参数).

第5层: 计算规则总的输出, 用 Σ 表示.

$$O_1^5 = f = \sum_{i=1}^2 \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^2 \omega_i f_i}{\sum_{i=1}^2 \omega_i}. \quad (8)$$

从上述推理过程可知, 在给出前件参数的情况下, ANFIS网络输出是后件参数的线性组合:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} f_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} f_2 = \\ &= \bar{\omega}_1 f_1 + \bar{\omega}_2 f_2 = \\ &= (\bar{\omega}_1 x_1) p_1 + (\bar{\omega}_1 x_2) q_1 + (\bar{\omega}_1) r_1 + \\ &= (\bar{\omega}_2 x_1) p_2 + (\bar{\omega}_2 x_2) q_2 + (\bar{\omega}_2) r_2. \end{aligned} \quad (9)$$

ANFIS的核心思想是采用混合学习算法来更新前件参数和后件参数. 首先给定前件参数初始值, 采用递推最小二乘估计方法来计算后件参数. 然后, 采用梯度下降法, 即误差从第5层反向传播至第1层, 来计算前件参数.

2.2 改进的自适应神经模糊推理系统 (Improved adaptive neural network based fuzzy inference system)

为了避免梯度下降法训练速度慢且容易陷入局部极小等缺点, 采用附加动量法来不断优化自适应神经模糊推理系统前件参数, 这样就可以达到同时考虑目标误差在梯度上的作用和目标误差在误差曲面上变化规律所带来的影响, 等同于一个低通滤波器, 使系

统具有忽略网络上微小变化的能力,即该系统可顺利滑过误差曲面的局部极小值^[15],如下列公式所示:

$$c_i(k+1) = c_i(k) + \Delta c_i(k), \quad (10)$$

$$\Delta c_i(k) = \lambda \Delta c_i(k-1) - (1-\lambda)\beta(k) \frac{\partial E(k)}{\partial c_i(k)}, \quad (11)$$

$$\sigma_i(k+1) = \sigma_i(k) + \Delta \sigma_i(k), \quad (12)$$

$$\Delta \sigma_i(k) = \lambda \Delta \sigma_i(k-1) - (1-\lambda)\beta(k) \frac{\partial E(k)}{\partial \sigma_i(k)}. \quad (13)$$

式中: k 为迭代步数; $\beta(k)$ 为第 k 步的学习率; λ 为动量因子,取值范围为 $0 \sim 1$,通常取 0.90 左右.

3 角度传感器测量精度表示(Approximation accuracy evaluation of angular sensor)

角度传感器测量精度是指测量数据相对于理论角真值的偏离程度.常见的测量精度表示方法有标准偏差和极限误差^[16].为了能反映误差在整个量程范围内的情况,本文亦选用误差绝对值的平均值和最大值来表征精度的高低.分别记标准偏差、误差绝对值的最大值和误差绝对值的平均值为 σ , e_{\max} 和 e_{mean} .

标准偏差 σ 为

$$e_i = \theta_{i,T} - \theta_{i,L}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (14)$$

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i, \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}}. \quad (16)$$

式中: $\theta_{i,T}$, $\theta_{i,L}$ 和 e_i 分别是待测角度传感器在第 i 个测量点上的测量值或修正值,理论值和误差; \bar{e} 是待测角度传感器整圈测量中的误差平均值; n 是整圈测量时的测量点数.

误差绝对值的最大值 e_{\max} 的定义为

$$e_{\max} = \max |\theta_{i,T} - \theta_{i,L}|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (17)$$

误差绝对值的平均值 e_{mean} 的定义为

$$e_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (18)$$

4 角度传感器误差补偿实验(Angular sensor calibration experiment)

4.1 角度传感器检测装置(Angular sensor measuring device)

为实现角度传感器的精度检测,邓方等^[17]研制了专门的检测装置.该装置具有硬件结构简单、人机交互方便、系统精度高、自动记录检测数据等优点.大量实验表明,该装置能对不高于18位的各类角度传感器进行快速、高精度的精度检测.

角度传感器检测装置如图2所示,采用PC作为上位机,单片机C8051F040作为下位机.其工作原理为:通过人机交互界面设置测量次数、角度间隔、电机转动方向等参数,如图3所示;将设置信息由数据通讯模块按既定通讯协议传送给控制器,控制器按设置信息控制步进电机转动,并通过高精度的蜗轮蜗杆带动待测角度传感器工作;控制器与待测角度传感器由多功能接口连接,将采集到的角度传感器位置信息通过数据通讯模块传送给上位机;最后对测量数据进行数据分析和误差补偿操作.另外,采用增量式编码器来监控电机运转.

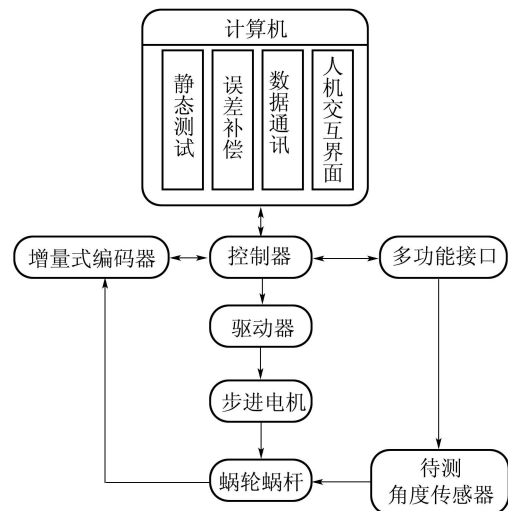


图2 角度传感器检测装置

Fig. 2 Angular sensor measuring device

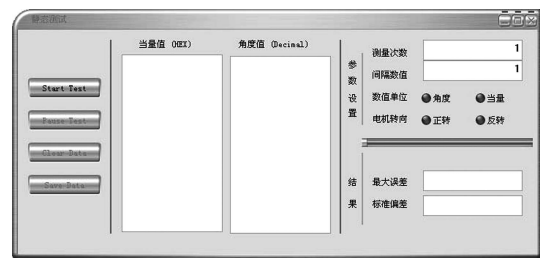


图3 人机交互界面

Fig. 3 Human machine interaction

4.2 误差补偿实验(Calibration experiment)

本文研究对象是一个16位绝对式编码器,记为En-A.在人机交互界面中设定转动间隔为 10° ,测量点数为36,电机正转.在一段时间内,按同样的设定模式,进行多次精度检测,其在整个量程上具有很好的测角重复性.图4所示是编码器En-A的两次检测误差分布,两次检测过程中对应点上的最大误差仅为 0.04° ,部分精度检测的实验数据如表1所示.但是在单次检测中,最大误差值为 3.79° ,标准偏差为 1.157° ,其测量精度很低,测量结果见表2.

另外, 重新设定转动间隔为 1° , 测量点数为360, 电机正转, 进一步检测编码器En-A, 计算标准偏差为 1.0685° . 通过两次测量可以发现, 在 n 较小时, 增加测量次数, 可减小标准偏差. 但是如果继续增大 n , 其减小的程度将更加不明显. 这说明增加测量次数 n 不仅使数据采集时间和数据处理的工作量会明显增加, 而且由于测量时间不断增大使得等精度的测量条件无法保持, 将引入新的误差. 因此, 在实际测量中, 测量次数 n 一般取10~36次.

表 1 精度检测实验数据($^\circ$)
Table 1 Experimental data ($^\circ$)

No.	第1圈			第2圈		
	θ_T	θ_L	e	θ_T	θ_L	e
1	1.37	1.37	0	1.36	1.36	0
2	11.54	11.37	0.17	11.52	11.36	0.16
3	22.01	21.37	0.64	21.99	21.36	0.63
4	31.96	31.37	0.59	31.93	31.36	0.57
5	41.21	41.37	-0.16	41.19	41.36	-0.17
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
32	311.2	311.37	-0.16	311.18	311.36	-0.18
33	320.44	321.37	-0.93	320.42	321.36	-0.94
34	329.63	331.37	-1.74	329.61	331.36	-1.75
35	339.64	341.37	-1.73	339.61	341.36	-1.75
36	350.48	351.37	-0.89	350.45	351.36	-0.91

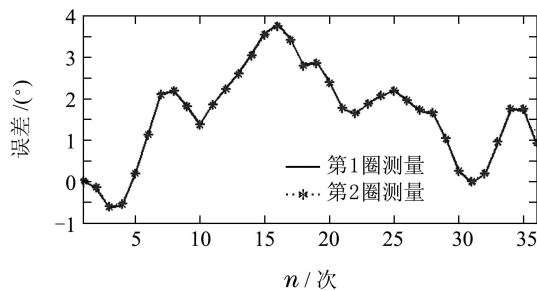


图 4 精度检测误差分布

Fig. 4 Accuracy testing error curves

在任何一次测量中, 系统误差和随机误差一般都是同时存在, 而重复性误差是属于随机误差性质的. 由前可知, 系统误差是造成该编码器测量精度低的主要原因. 由光栅的刻线位置误差、机械加工装配误差等因素造成的在全量程上具有累积效应的误差, 以及由尺面的均匀性等质量缺陷因素造成的周期性变化的误差是编码器的系统误差的主要组成部分^[8]. 若要进一步提高测量精度, 一种比较可行的办法是从软件补偿方面着手进行, 即采用改进的ANFIS对编码器En-A误差补偿来降低系统误差.

选择表1中第2列的

$1.37^\circ, 22.01^\circ, 41.21^\circ, \dots, 320.44^\circ, 339.64^\circ,$

共18个测量值作为训练数据, 采用改进的ANFIS建立误差模型. 改进的ANFIS网络学习能力曲线如图5所示. 可见, 对于训练数据网络的逼近误差已经极其小.

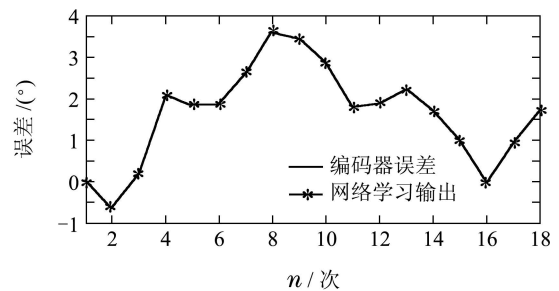


图 5 改进的ANFIS学习能力

Fig. 5 Learning ability of the improved ANFIS

然而, 评价一个网络性能的好坏主要取决于其泛化推广能力的强弱. 选择表1中第2列的

$11.54^\circ, 31.96^\circ, \dots, 311.21^\circ, 329.63^\circ, 350.48^\circ,$

共18个测量值作为校验数据来检验网络是否能映射出正确的输出. 改进的ANFIS模型网络泛化推广能力如图6所示.

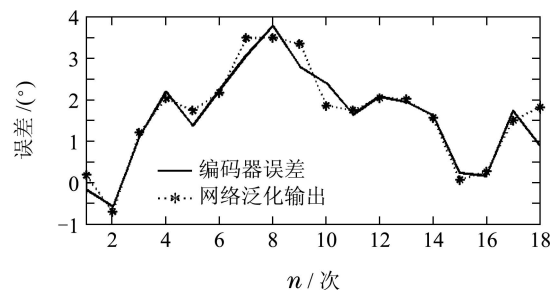


图 6 改进的ANFIS泛化推广能力

Fig. 6 Generalization ability of the improved ANFIS

补偿后的编码器En-A系统误差曲线如图7所示, 其系统误差基本上在零值附近波动.

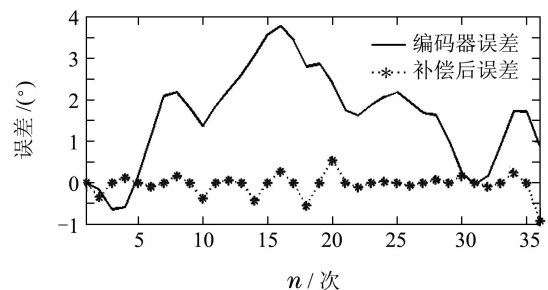


图 7 补偿前-补偿后系统误差

Fig. 7 System error comparison of before and after compensation

另外, 分别采用多项式拟合法和BP神经网络对En-A进行误差补偿. 其中, BP神经网络为 $1 \times 15 \times 1$ 型结构, 选择双曲正切Sigmoid函数为隐含层激活函数, 迭代算法采用Levenberg-Marquardt法. 相比于补偿前, 改进的ANFIS将编码器En-A系统精度 σ 提高

7.5倍, e_{\max} 和 e_{mean} 也分别提高8.9倍和12倍, 补偿效果显著. 相比于多项式拟合法和BP神经网络, 改进的ANFIS同样具有很好的补偿效果, 测量精度对比如表2所示.

表2 补偿前-补偿后编码器测量精度对比($^{\circ}$)

Table 2 Encoder measurement accuracy comparison of before and after compensation ($^{\circ}$)

条目	σ	e_{\max}	e_{mean}
补偿前	1.157	3.79	1.6781
BP	0.3277	0.9738	0.4590
多项式拟合	0.6249	1.2648	0.5098
改进的ANFIS	0.1541	0.4257	0.1125

5 结论(Conclusions)

本文提出了改进的ANFIS误差补偿法. 利用一套高精度的角度传感器检测装置对编码器进行精度检测, 并利用改进的ANFIS对其进行误差补偿. 实验证明, 该方法可有效地提高其测量精度. 另外, 角度传感器的误差补偿实验是在其重复性比较好的前提下进行的. 如果重复性较差即随机误差所占比重较大, 则应考虑对初始数据滤波, 以减少随机误差对初始数据的影响.

参考文献(References):

- 董莉莉, 熊经武, 万秋华. 光电轴角编码器的发展动态 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 198 – 202.
(DONG Lili, XIONG Jingwu, WAN Qiuhua. Development of photoelectric rotary encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 198 – 202.)
- 郁有文, 常健. 绝对码编码器中的一种新型的编码方法 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 541 – 544.
(YU Youwen, CHANG Jian. A modern coding way of absolute encoder [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 541 – 544.)
- 汤天瑾, 曹向群, 林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望 [J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 90 – 96.
(TANG Tianjin, CAO Xiangqun, LIN Bin. Developing current situation and trend of photoelectric-angular encoder [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 90 – 96.)
- 洪喜, 续志军, 杨宁, 等. RBF网络在编码器误差补偿中的应用 [J]. 光电工程, 2009, 36(8): 139 – 142.
(HONG Xi, XU Zhijun, YANG Ning, et al. Application of RBF networks for error compensation in optical encoders [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(8): 139 – 142.)
- ORTON P A, POLIAKOFF J F, HATIRIS E, et al. Automatic self-calibration of an incremental motion encoder[C] // *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Budapest: IEEE, 2001: 1614 – 1618.
- 张礼松, 管炳良. 关于坐标测量机研制中圆光栅误差修正技术 [J]. 计测技术, 2007, 27(4): 41 – 43.
(ZHANG Lisong, GUAN Bingliang. Error correction and its application to multi-joint CMM research [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2007, 27(4): 41 – 43.)
- 熊文卓, 孔智勇, 张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1745 – 1748.
(XIONG Wenzhuo, KONG Zhiyong, ZHANG Wei. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1745 – 1748.)
- 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 598 – 604.
(HONG Xi, XU Zhijun, YANG Ning. Error compensation of optical based on RBF network [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(4): 598 – 604.)
- 赵人杰, 马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度 [J]. 仪器仪表用户, 2009, 16(3): 69 – 71.
(ZHAO Renjie, MA Wenli. Improving the accuracy of new-type encoders using error harmonic compensation [J]. *Instrumentation Customer*, 2009, 16(3): 69 – 71.)
- 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1766 – 1772.
(GAO Guanbin, WANG Wen, LIN Keng, et al. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1766 – 1772.)
- 黄宗升, 秦石乔, 王省书, 等. 光栅角编码器误差分析及用激光陀螺标校的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1866 – 1869.
(HUANG Zongsheng, QIN Shiqiao, WANG Xingshu, et al. Error analysis of optical angular encoder and its calibration with ring laser gyro [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(10): 1866 – 1869.)
- JANG J R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(3): 665 – 685.
- 张浩炯, 余岳峰, 王强. 应用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)进行建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 47 – 49.
(ZHANG Haojiong, YU Yuefeng, WANG Qiang. Modeling and simulation applying adaptive neural-fuzzy inference system(ANFIS) [J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(4): 47 – 49.)
- 杨延西, 刘丁. 基于ANFIS的温度传感器非线性校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5): 511 – 514.
(YANG Yanxi, LIU Ding. Nonlinear calibration for temperature sensors based on adaptive neural-fuzzy inference system(ANFIS) [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(5): 511 – 514.)
- YU X H, CHEN G A. Efficient backpropagation learning using optimal learning rate and momentum [J]. *Neural Networks*, 1997, 10(3): 517 – 527.
- 王显军, 杨晓霞. 光电编码器的应用—分辨率和精度 [J]. 光机电信息, 2011, 28(9): 6 – 10.
(WANG Xianjun, YANG Xiaoxia. Application of photoelectric rotary encoder - resolution and measuring precision [J]. *OME Information*, 2011, 28(9): 6 – 10.)
- 邓方, 陈杰, 陈文颀, 等. 一种高精度的光电编码器检测方法及其装置 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(11): 977 – 980.
(DENG Fang, CHEN Jie, CHEN Wenjie, et al. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(11): 977 – 980.)

作者简介:

王艳永 (1983–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能以及智能系统的设计、神经网络和模糊系统等, E-mail: wangyanyongdl@126.com;

邓方 (1981–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为高速非线性系统估计与故障诊断、火控系统硬件设计、传感器标定及故障诊断等, E-mail: dengfang@bit.edu.cn;

孙健 (1978–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为网络化控制系统、时滞系统等, E-mail: sunjian@bit.edu.com.