

## 基于阵列技术的 MEMS 陀螺温度补偿方法

沈强, 刘洁瑜

(第二炮兵工程大学控制工程系, 西安 710025)

**摘要:** 为了减少温度对 MEMS 陀螺测量精度的影响, 提出了一种采用阵列技术的 MEMS 陀螺仪温度误差补偿新方法。该方法不需要进行温度测量, 通过对多陀螺输出进行数据融合以消除温度对陀螺仪输出的影响, 达到正确检测角速率的目的, 简化了系统结构。采用遗传算法优化的 BP 神经网络来进行陀螺阵列数据的融合, 抛开通常把零偏和标度因数分开建模补偿的思想, 将两者统一进行补偿。实验结果表明, 该方法能够大幅度降低温度造成的陀螺误差, 从而满足工程应用需要。

**关键词:** MEMS 陀螺仪; 阵列技术; 温度补偿; 数据融合; 神经网络

**中图分类号:** V241.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0093-05

## An Array Technique Based Method for Temperature Compensation of MEMS Gyroscopes

SHEN Qiang, LIU Jie-yu

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to decrease temperature related errors in MEMS gyroscope, a novel method based on array technique is proposed for temperature compensation of the gyroscope. The advantage of this method is that it is not need to measure the temperature, in stead, data fusion of the output of several gyroscopes is used to reduce the influence of temperature, and the system structure is simplified. The BP neural network optimized by genetic algorithms is used in data fusion of the gyroscope data, which compensates the error of the output of gyroscopes directly, while the zero bias and scale factors are compensated separately in general. The results of the experiments show that the method proposed can significantly reduce the error of gyroscope caused by temperature, and thus can improve the accuracy.

**Key words:** MEMS gyroscope; array technique; temperature compensation; data fusion; neural network

### 0 引言

由于微机械(MEMS)陀螺成本低、体积小、功耗低、抗冲击能力强,近年来得到了快速的发展<sup>[1-2]</sup>,但因其精度易受温度等环境因素的影响,限制了它在很多领域的应用<sup>[3-4]</sup>。因而,如何在充分发挥 MEMS 陀螺优势的前提下进行温度补偿一直是研究的重点。常用的 MEMS 陀螺温度误差补偿方法有回归分析法<sup>[5]</sup>、曲线拟合法<sup>[6]</sup>和智能算法<sup>[7]</sup>,这些方法的共同之处在于:为消除温度对陀螺仪输出特性的影响,系统中必须相应地设置温度传感器,以测量当前温度的实际值,然后根据陀螺仪输出以及事先标定或学习的陀螺零偏

和标度因数随温度的变化特性,从而得到实际的陀螺输出。然而,在很多场合温度测量是难以实现的,而且这些方法的使用会增加系统的复杂程度,目前,阵列技术在传感器领域正受到广泛的重视<sup>[8]</sup>。本文将阵列技术应用到 MEMS 陀螺的温度补偿中,提出一种不需要测量温度的补偿方法。通过对多个陀螺在相同温度下的输出进行融合来消除温度的影响,并不再区分零偏和标度因数,而是直接通过遗传算法优化的 BP 神经网络对陀螺输出进行校正,由于不需要温度测量装置,可以降低系统复杂程度,扩大陀螺的应用场合,实验结果验证了该方法的有效性。

### 1 MEMS 陀螺仪温度实验

本文首先通过温度实验,研究 MEMS 陀螺仪零偏和标度因数的温度特性。

收稿日期:2014-08-15

修回日期:2014-08-30

作者简介:沈强(1989—),男,山东高密人,硕士生,研究方向为 MEMS 陀螺仪误差补偿技术。

### 1.1 陀螺阵列和采集系统设计

本文采用6陀螺方案,将6个ADXR300微机械振动陀螺芯片焊接在同一块电路板上,使其测量轴同向,并对周围电路进行了设计。

数据采集系统采用基于PXI总线的PXI4070 DMM板卡和PXI2503继电器板卡以及Labview编程语言实现。

6路信号的采样通过PXI2503低压多路复用器/矩阵继电器开关进行切换;A/D转换采用NI公司生产的PXI4070DMM板卡,并最终通过PXI/PCI-8570 延伸套件实现PC与PXI总线及板卡的通信。本文使用的陀螺阵列及数据采集结构如图1所示。

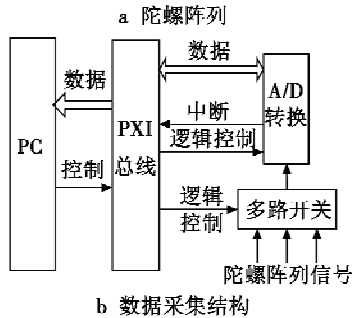
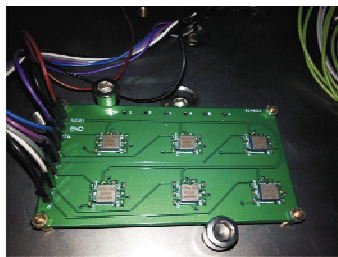


图1 陀螺阵列和数据采集结构框图  
Fig.1 Gyro array and structure diagram of data collection system

### 1.2 全温标定

将实验陀螺仪置于温控转台上,使陀螺输入轴指天。在-30~70℃的范围内每隔10℃选取一个温度标定点进行测试。在每个温度测试点,温度稳定后控制转台分别以0(°)/s,±0.2(°)/s,±0.4(°)/s,±0.6(°)/s,±0.8(°)/s,±2(°)/s,±4(°)/s,±6(°)/s,±8(°)/s,±20(°)/s,±40(°)/s,±60(°)/s,±80(°)/s,±100(°)/s,±200(°)/s,±300(°)/s的速率转动,并测量每个陀螺仪的输出数据,然后计算各陀螺的标度因数和零偏。图2所示为计算得到的标度因数、零偏随温度变化情况。

实验发现:1)受温度变化的影响,标度因数和零偏的变化很大,且各陀螺之间差异较大;2)两者的变化呈现一定的非线性,很难建立准确的温度误差模型;3)温度变化过程中,陀螺零偏与标度因数的相关系数均在-0.3366以上,说明相关性较强。故两者随温度

变化趋势之间具有一定的互补性,为充分利用其互补性,本文抛开将标度因数和零偏分别建模的思想,而是将其作为一个统一的整体进行补偿。

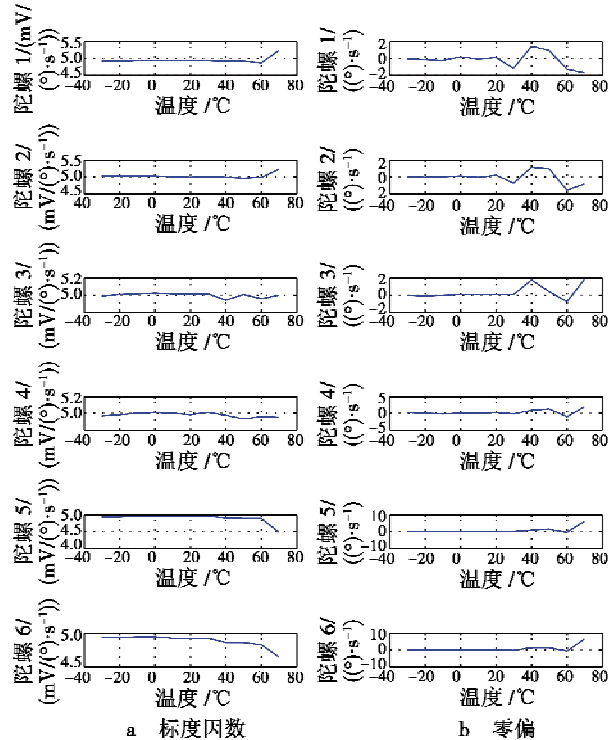


图2 标度因数、零偏随温度变化情况

Fig.2 Change of zero bias and scale factors with temperature

## 2 基于阵列技术的温度补偿原理

陀螺仪的输出可以表示为 $V=f(\omega, T)$ ,其中 $\omega$ 为角速率, $T$ 为温度。可见,由于温度的存在,单纯由陀螺仪输出不能唯一确定输入的角速率值。为实现对角速率的准确测量,需要考虑温度对陀螺仪输出特性的影响,需要测量温度的准确值以及考虑 $\omega, T$ 与 $V$ 的映射关系。

图3所示为不同角速率条件下阵列中两个陀螺输出与温度的关系。

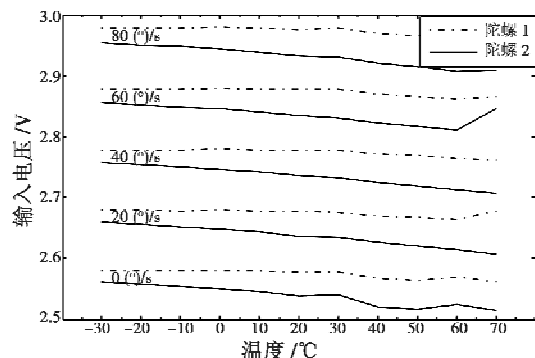


图3 阵列中两个陀螺输出温度特性

Fig.3 Temperature property of two gyros in the array

由图 3 可知,两陀螺在温度变化时表现出不同的输出特性。对于不同的输入量,无论温度为多少(两陀螺所处温度环境相同),都对应着不同的陀螺仪输出对。因此,只要事先建立起不同温度下陀螺仪输出对与真实角速率之间的映射关系,当陀螺仪工作时,仅由陀螺仪输出对  $(V_1, V_2)$  即可推得输入的角速率,此过程中不需要测量陀螺仪当前工作所处的温度。为提高设备的可靠性、容错能力和补偿精度,本文选用 6 个温度特征不同的 MEMS 陀螺仪 ADXRS300 进行实验验证。

首先在不同环境温度下,对陀螺仪进行输入输出标定,得到实验标定数据集:  $\{(V_{11n}, V_{21n}, V_{31n}, V_{41n}, V_{51n}, V_{61n}, \omega_{1n}), (V_{12n}, V_{22n}, V_{32n}, V_{42n}, V_{52n}, V_{62n}, \omega_{2n}), \dots, (V_{1mn}, V_{2mn}, V_{3mn}, V_{4mn}, V_{5mn}, V_{6mn}, \omega_{mn}), \dots, (V_{1Mn}, V_{2Mn}, V_{3Mn}, V_{4Mn}, V_{5Mn}, V_{6Mn}, \omega_{Mn}) \mid n=1,2,\dots,K\}$ 。其中:  $V_{imn}$  为第  $i$  个陀螺仪在第  $m$  个标定点、工作温度为  $T_n$  时的输出;  $\omega_{mn}$  为对应陀螺仪的输入;  $K$  和  $M$  分别为温度和角速率的标定点数,且  $T_{\min} = T_1 < T_2 < \dots < T_K = T_{\max}$ ,  $\omega_{\min} = \omega_{1n} < \omega_{2n} < \dots < \omega_{Mn} = \omega_{\max}$ 。

在这里温度值是温控箱的实时温度,仅作为标定点的标记,而不是输入输出参量。

由于模型复杂,数据量大,且具有非线性,故通过 BP 神经网络进行训练,得到不同温度下陀螺仪输出对与真实角速率之间的非线性映射关系,从而消除温度对检测角速率的影响。

### 3 遗传算法优化的 BP 神经网络

#### 3.1 BP 神经网络

BP 神经网络(BPNN)是一种多层前馈神经网络。信号前向传递,若预期输出值与实际输出值相比误差较大,则误差转入反向传播,根据预测误差修正网络权值和阈值,直到误差减小为设定的最小值时再正向传播,从而实现了网络预测输出对期望输出的逼近<sup>[9-11]</sup>。

BP 算法是一种局部搜索的优化方法,但它要解决的问题往往是求解复杂非线性函数的全局极值,所以该算法容易陷入局部极值,导致收敛速度慢,引起震荡效应。寻求克服 BP 算法不足的思路是采用遗传算法优化 BP 神经网络初始权值和阈值,从而有助于搜索全局最优点,避免陷入局部最小。

#### 3.2 遗传算法改进 BP 神经网络

遗传算法(Genetic Algorithms, GA)由 John Holland 创建,它是一种模拟自然遗传机制和进化论而成的过程搜索最优化方法。遗传算法以适应度作为搜索信息,通过交叉、变异、选择运算进行个体筛选,不受搜索空间是否连续或可微的限制,适用于复杂的非线性和多维空间优化问题<sup>[12]</sup>。

遗传算法优化 BP 神经网络(GA-BPNN)分为 3 个部分,即确定网络结构、遗传算法优化和预测。其算法流程图如图 4 所示。

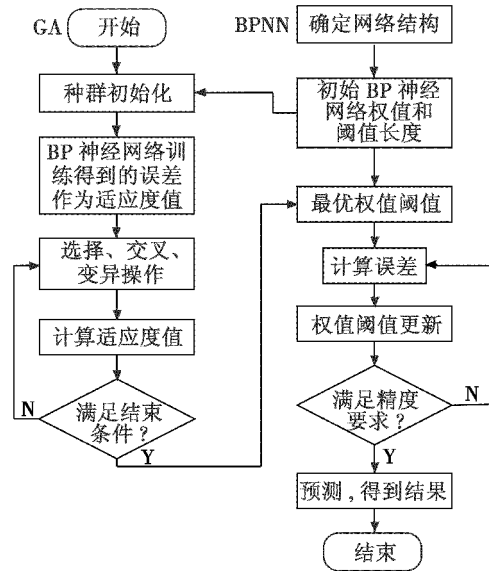


图 4 GA-BPNN 算法流程图

Fig.4 The flow chart of GA-BPNN

1) 根据映射参数个数确定网络结构,进而得到遗传算法个体长度。

2) 使用遗传算法优化 BP 神经网络的权值和阈值。具体过程为:种群中每个个体包含了一个网络所有的权值和阈值,并把预测输出和期望输出之间的差值和作为个体适应度值  $F$ 。算式为

$$F = k \left( \sum_{i=1}^n abs(y_i - \omega_i) \right) \quad (1)$$

式中:  $n$  为网络输出节点数;  $y_i$  为第  $i$  个节点预测输出;  $\omega_i$  为第  $i$  个节点期望输出;  $k$  为系数。

遗传算法通过选择、交叉和变异以及个体适应度函数找到最优适应度值对应个体,从而得到最优的权值和阈值。

3) BP 神经网络将上面得到的权值和阈值作为网络结构参数初始值进行网络的训练和预测输出。

### 4 补偿结果及分析

从 1.2 节试验中选取  $0 (^{\circ})/s, 20 (^{\circ})/s, 40 (^{\circ})/s, 60 (^{\circ})/s, 80 (^{\circ})/s$  转速下的陀螺数据作为测试样本,其他数据作为训练样本,按照上面的 GA-BP 神经网络实现过程进行网络的训练和测试。由于本实验有 6 个输入参数,1 个输出参数,因而采用 3 层网络结构,其神经元个数分别为 6,5,1。隐层、输出层传递函数分别采用双曲正切 S 型函数和线性函数。为了加快网络训练收敛速度,采用 Levenberg-Marquardt 算法。

遗传算法参数设置为:种群规模为10,进化次数为30,交叉概率和变异概率分别为0.5和0.4。图5所示为遗传算法的进化曲线。

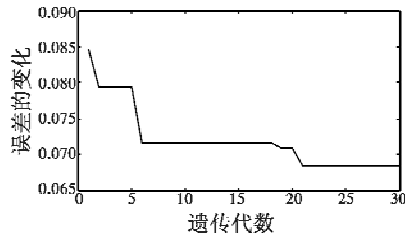


图5 遗传算法进化曲线

Fig. 5 Evolution curve of GA

由图5可以看出,当遗传算法进化到30代时,样本通过进化得到的最小误差为0.0685,将遗传算法进化得到的权值阈值用于BP神经网络的训练和测试,得到补偿结果。图6和图7所示分别为测试样本中各陀螺原始误差和补偿之后陀螺输出的误差,具体数据如表1所示。

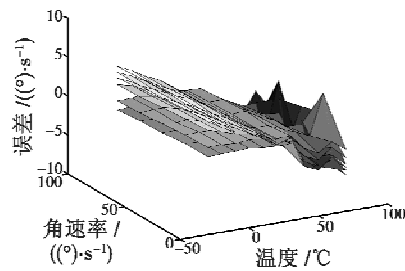


图6 补偿前各陀螺仪的误差

Fig. 6 Error of gyros before compensation

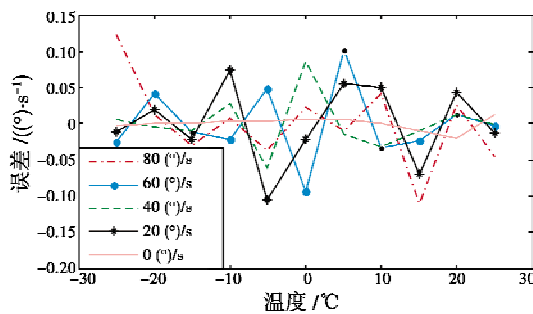


图7 补偿后各陀螺仪的误差

Fig. 7 Error of gyros array after compensation

表1 原始数据和补偿后的误差

Table 1 Error of original data and after compensation

标定值	原始数据		BPNN 补偿		GA-BPNN 补偿	
	误差平均值	误差最大值	误差平均值	误差最大值	误差平均值	误差最大值
0	2.1494	5.5186	0.0164	0.0466	0.0057	0.0194
20	1.8606	6.1011	0.0585	0.1514	0.0439	0.1045
40	1.9022	6.1689	0.0263	0.0617	0.0242	0.0865
60	1.9538	5.4594	0.0789	0.1912	0.0376	0.1011
80	2.0837	5.9870	0.1449	0.4197	0.0425	0.1236

从上述图表可以看出:补偿前角速率最大误差约为6(°)/s,平均误差约为2(°)/s,补偿后最大误差为0.1236(°)/s,平均误差为0.0057(°)/s到0.0439(°)/s,误差降低了1到2个数量级。因此,对于给定的转台转速,无论环境温度怎样变化,采用本文提出的方法都可以较好地识别出陀螺仪的输入角速率,即补偿了因温度变化而造成的陀螺仪输出误差。

表1同时也给出了单一BP神经网络补偿的结果,由图可以明显看出,采用遗传算法优化的BP神经网络补偿精度更高,且方法简便,无需对标度因数和零偏分别进行补偿,更适用于基于阵列技术的MEMS陀螺仪温度补偿。

### 5 结束语

本文将阵列技术运用到MEMS陀螺的温度补偿工作中,通过BP神经网络建立了陀螺阵列输出数据组与输入角速率的非线性映射关系,从而得到准确的输入,补偿了温度变化造成的误差。该方法的显著优点是工作过程中不需要测量温度,这对简化系统结构,优化实验过程,尤其在温度不易测量的场合具有积极的意义。该方法不必考虑标度因数和零偏的建模问题,可以直接得到高精度的输出,为陀螺的应用提供了便利,而且可以推广到其他因素引起的陀螺仪性能变化,理论上可以用于消除多个非目标参量的影响。另外,本文采用遗传算法对BP神经网络进行优化,在发挥其优秀的泛化能力的同时避免了全局搜索方面的不足。

### 参考文献

- [1] 李士心,王晓亮,翁海娜,等. 基于灰色模型和RBF神经网络的MEMS陀螺温度补偿[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(6):742-746. (LI S X, WANG X L, WENG H N, et al. Temperature compensation of MEMS gyroscope based on grey model and RBF neural network[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(6):742-746.)
- [2] LI D C, CHI X Z, CUI J, et al. Research on temperature dependent characteristics and compensation methods for digital gyroscope[C]//The 3rd International Conference on Sensing Technology, IEEE, 2008:273-277.
- [3] XU J M, ZHANG H P, SUN J Z. Periodic error compensation for quartz MEMS gyroscope drift of INS[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(6):539-545.
- [4] 蒋蔚,伊国兴,曾庆双. 基于PSVR的微机械陀螺温度漂移预测[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(3):360-365. (JIANG W, YI G X, ZENG Q S. Temperature drift prediction for MEMS gyroscopes based on PSVR[J].

- Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(3):360-365.)
- [5] 陈维娜, 曾庆华, 李荣冰, 等. 微机械陀螺温度混合线性回归补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1):99-103. (CHEN W N, ZENG Q H, LI R B, et al. Mixed linear regression temperature compensation method for annular-vibrating MEMS gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1):99-103.)
- [6] 许德新, 何昆鹏, 梁海波. 惯性测量组件的温度误差补偿模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(5):607-613. (XU D X, HE K P, LIANG H B. Compensating for non-linear errors caused by temperature changes in MEMS inertial measurement units[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(5):607-613.)
- [7] XIA D Z, WANG S R, ZHOU B L. Temperature compensation method of silicon microgyroscope based on BP neural network[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2010, 26(1):58-61.
- [8] 吉训生, 王寿荣. 硅微陀螺阵列信号处理技术研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1):235-239. (JI X S, WANG S R. Research on procession of silicon micro-gyroscope array [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(1):235-239.)
- [9] 潘华, 李安, 胡柏青. BP混沌混合神经网络在光纤陀螺温度漂移预测中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6):73-75. (PAN H, LI A, HU B Q. Application of chaos-BP combined artificial neural network in predicting FOG temperature drift[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(6):73-75.)
- [10] 高隽. 神经网络原理及仿真实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2005:44-45. (GAO J. Artificial neural network principle and simulation examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2005:44-45.)
- [11] 郭伟, 张栋, 李巨韬, 等. 改进型BP神经网络对电容称重传感器的非线性校正[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10):1354-1360. (GUO W, ZHANG D, LI J T, et al. Nonlinear calibration of capacitance weighing sensor with improved BP neural network model[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10):1354-1360.)
- [12] 金芬. 遗传算法在函数优化中的应用研究[D]. 苏州:苏州大学, 2008. (JIN F. Application research of genetic algorithm in function optimization[D]. Suzhou: Suzhou University, 2008.)
- 
- (上接第92页)
- [2] 韩维, 商兴华, 李成, 等. 舰载机维修保障力量需求研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(6):670-674. (HAN W, SHANG X H, LI C, et al. Research on the requirement of carrier aircraft maintenance support force [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(6):670-674.)
- [3] 苏畅, 张恒喜. 航空装备保障系统效能评估[J]. 空军工程大学学报, 2006, 7(1):13-15. (SU C, ZHANG H X. Effectiveness evaluation of aeronautical equipment support system[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2006, 7(1):13-15.)
- [4] 董景伟, 鲁冬林, 王小龙, 等. 基于模糊层次分析法的工程装备修理机场能力评估[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12):44-48. (DONG J W, LU D L, WANG X L, et al. Repair ability assessment of engineering equipment repair institution based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(12):44-48.)
- [5] 王彦虎, 高潮, 王宁. 基于加权主成分分析的公路工程质量评价研究[J]. 交通科技, 2013(1):120-123. (WANG Y H, GAO C, WANG N. Study on quality comprehensive evaluation of highway engineering based on weighted principal component analysis[J]. Transportation Science & Technology, 2013(1):120-123.)
- [6] 史凤隆, 赵功伟, 祝华远, 等. 灰色聚类法在航空装备保障特性评估中的应用[J]. 装备环境工程, 2013(7):43-47. (SHI F L, ZHAO G W, ZHU H Y, et al. Application of grey cluster method in aviation equipment support characteristics evaluation [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013(7):43-47.)
- [7] 张娜, 朱建军. 三端点区间数互反判断矩阵的排序方法研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(2):152-158. (ZHANG N, ZHU J J. Research on the priority method of three-point interval number reciprocal judgment matrix [J]. Chinese Journal of Management Science, 2012, 20(2):152-158.)
- [8] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. (XU Z S. Uncertain multiple attribute decision making: methods and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [9] HERRERA F, MARTINEZ L, SANCHEZ P J. Managing non-homogeneous information in group decision making[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166(1):115-132.
- [10] 徐泽水. 直觉模糊偏好信息下的多属性决策途径[J]. 系统工程理论与实践, 2007(11):62-71. (XU Z S. Approached to multiple attribute decision making with intuitionistic fuzzy information[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007(11):62-71.)