

文章编号: 1007-4929(2018)09-0098-04

# 基于改进粒子群的电水转换关系特征曲线研究

邬智俊<sup>1</sup> 胡 钢<sup>1</sup> 沈 波<sup>2</sup> 刘美华<sup>3</sup> 章梅娟<sup>3</sup>(1. 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 南通市水利局, 江苏 南通 226018;  
3. 南通市供排水管理站, 江苏 南通 226018)

**摘 要:** 电水转换法是一种经济有效的农业用水计量方法, 构建合理的电水转换模型, 提出适宜的模型参数优化方法对于提高计量精度具有重要的研究意义。对传统的电水转换模型进行优化改进, 并提出了一种基于自适应调整惯性权重和变邻域混沌搜索的改进粒子群的模型参数寻优方法。最后分别采用最小二乘法、粒子群算法、改进粒子群算法进行模型参数拟合, 结果表明改进粒子群算法寻优精度更高、有更好的收敛速度, 拟合的特征关系曲线能够更真实的反应耗电量和供水量的关系, 为农业用水计量设备的研制提供理论基础。

**关键词:** 电水转换; 农业用水计量; 自适应调整惯性权重; 变邻域混沌搜索; 粒子群算法

**中图分类号:** S274.4 **文献标识码:** A

## Research on the Characteristic Curve of Electricity-Water Conversion Relationship Based on Improved Particle Swarm Optimization

WU Zhi-jun<sup>1</sup>, HU Gang<sup>1</sup>, SHEN Bo<sup>2</sup>, LIU Mei-hua<sup>3</sup>, ZHANG Mei-juan<sup>3</sup>(1. College of the IOT Engineering of Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu Province, China;  
2. Nantong Water Conservancy Bureau, Nantong 226018, Jiangsu Province, China;  
3. Nantong Water Supply and Drainage Management Station, Nantong 226018, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** Electricity-water conversion is an economical and effective method for measuring agricultural water. Building a reasonable transformation model of electricity-water and proposing an appropriate optimization method for model parameters is important for improving the accuracy of measurement. In this study, the traditional electricity-water conversion model is optimized and improved. An improved particle swarm optimization algorithm based on self-adaptive adjustment of inertia weight and variable neighborhood chaotic search is proposed. At last, LSM, PSO and IPSO are used to optimize the model parameters. The results show that the IPSO has higher optimization precision and better convergence speed; the fitting characteristic curve can reflect the relationship between the power consumption and the water supply more truly. This study provides a theoretical basis for the development of agricultural water metering equipment.

**Key words:** electricity-water conversion; measurement of agricultural water; self-adaptive adjustment of inertia weight; variable neighborhood chaotic search; PSO

“十三五”是全面建设小康社会的关键期,也是加快转变水资源利用方式、提升国家水安全保障能力至关重要的五年。长期以来,农业灌溉用水占我国用水总量的比例最高,实际利用效率往往很低,造成了水资源的严重浪费<sup>[1-2]</sup>,对农业用水进行计量收费是解决上述问题的有效途径。

目前,国内农业用水计量方式主要有直接计量和间接估算两大类,具体包括<sup>[3-5]</sup>:采用灌溉渠系上的水工建筑物测量;对

于断面稳定没有回水影响的渠道内采用水尺观测;利用水堰、量水槽等特设量水设备进行测流;采用电磁流量计、超声波流量计等仪表设备进行计量;采用时间法、电水法、油耗法进行间接估算。

江苏某市农用电灌站数量庞大,水泵基本为中小型混流泵,这些泵站由于历史原因均未修建超声波流量检测围堰,且修建工作面临工程量大、经费需求高等难题,使得农业用水计

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: 江苏水利科技项目“南通市农业水费智能化计量征收技术研究”(2017070)。

作者简介: 邬智俊(1994-),男,硕士研究生,从事信息感知与智能系统研究。E-mail: wuzhijun\_947@163.com。

量非常困难。综合该市实际情况和现有的农业用水计量方式,电水转换的间接测量方法更适合于该市农业灌溉用水的计量,其计量的精准程度与耗电量-供水量的关系特征曲线密切相关。

截至目前,针对排灌站中电水转换关系特征曲线的研究虽鲜有涉及,但电力系统和水土科学中的一些特征曲线的研究具有一定的参考价值。文献[6]采用遗传算法对火电机组的煤耗特性曲线进行拟合,反映了发电量和煤耗量间的关系;文献[7-10]阐述了层次贝叶斯算法、集合卡尔曼滤波算法、粒子群算法、萤火虫算法等改进的参数反演算法对于描述土壤水分特征曲线的VG模型参数优化,都具有很好的反演精度。鉴于此,本文重点研究了电水转换模型的构建,依次采用了最小二乘法(LSM)、粒子群算法(PSO)、改进粒子群算法(IPSO)分别对电水转换关系特征曲线参数进行优化,比较其拟合效果,选取适合的方法,为农业水量计量设备的研制提供理论基础。

## 1 电水转换模型构建

电水转换法主要通过自动化监测设备采集机泵的耗电量,依托耗电量-供水量转换关系特征曲线,间接计量泵站用水量。以往的工程中仅仅是把总供水量和总耗电量的比值视作电水转换经验系数,如式(1)所示。

$$T_C = S_W / S_E \quad (1)$$

式中:  $T_C$  为转换系数;  $S_W$ 、 $S_E$  分别为总供水量和总耗电量。

式(1)理想化供水量和耗电量之间为线性关系且忽略了水泵期间的其他因素的影响,以此作为经验系数易造成较大的计量误差。

水泵在实际工作中的有效功率  $P_E$ , 实际消耗功率为  $P_R$ 。装置效率  $\eta$  为两者之间的比值,根据水泵的有效功率定义<sup>[11]</sup>和能量守恒定律可得:

$$P_E = 9.8 FH = \eta P_R \quad (2)$$

式中:  $F$  为水泵的单位时间供水量  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H$  为水泵净扬程  $\text{m}$ 。

经过化简可得:

$$F = \frac{\eta P_R}{9.8 H} \quad (3)$$

针对其他影响因素的问题,项目前期对江苏某市县下数多个镇上的几十座混流泵站进行了现场测试,得到如下结论<sup>[3]</sup>:

①泵站的流量功率比不会随水泵规格的变化而变化;②在扬程变化不大的情况下,可忽略不计其对流量功率比的影响;③流量功率比和装置效率成正比关系。根据结论中②、③可得出:式(3)中的水泵净扬程  $H$  可视为定值;装置效率  $\eta$  在一个适当的功率区间( $P_{Ri}$   $P_{Ri+1}$ )可认为不变。所以,电水转换关系特性曲线可以采用分段线性函数进行模拟,如式(4)所示。

$$\begin{cases} F = \frac{\eta_1 P_R}{9.8 H} & (P_{R1} \leq P_R < P_{R2}) \\ F = \frac{\eta_2 P_R}{9.8 H} & (P_{R2} \leq P_R < P_{R3}) \\ \vdots \\ F = \frac{\eta_{n-1} P_R}{9.8 H} & (P_{Rn-1} \leq P_R < P_{Rn}) \end{cases} \quad (4)$$

$P_R$  区间的划分以及确定相应的  $\eta$  值是很困难的,并且分段线性函数较为繁琐,在微处理机上实现会增加其运算复杂性。鉴于此,对特征曲线进一步分析,在曲线上任意一点  $P_R$  的瞬时变化率为:

$$\lim_{\Delta P_R \rightarrow 0} = \frac{\frac{\eta(P_R + \Delta P_R)}{9.8 H} - \frac{\eta P_R}{9.8 H}}{\Delta P_R} = \frac{\eta}{9.8 H} \quad (5)$$

式(5)反映了特征曲线的变化趋势,是一个递增函数;而装置效率取决于机泵效率、传动效率、管道效率、进出水池效率<sup>[12]</sup>,其中机泵效率变动范围较大,电机空载时其效率和功率因数很低,随着负载增加而相应的增加,在额定负载下达到最大值。因此,整个特征曲线的变化趋势为递增,变化速率先缓后快。二次函数和三次函数均满足此种变化趋势,可以对式(4)进行简化,避免繁琐的问题,电水转化模型如下式所示,下文会针对这两种模型参数进行优化,选取性能最优的作为电水转换模型。

$$S_W = a_2 S_E^2 + a_1 S_E + a_0 \quad (6)$$

$$S_W = a_3 S_E^3 + a_2 S_E^2 + a_1 S_E + a_0 \quad (7)$$

## 2 模型参数优化

一般的参数优化方法主要由待优化参数选取、目标函数的确定、参数样本空间生成和优化算法3部分组成。本文待优化参数为水电转化模型中的多项式系数,目标函数定义如下式所示。

$$\min F(a_0, K, a_k) = \sum_{i=1}^n [f^*(x_i) - y_i]^2 \quad (8)$$

式中:  $f^*(x_i)$  为拟合曲线上在  $x = x_i$  对应的值;  $y_i$  为样本空间中在  $x = x_i$  所对应的实际值。

### 2.1 最小二乘法

最小二乘法(LSM)作为一种数学优化方法,在曲线拟合中有着广泛的应用。给定一组散点( $x_i, y_i$ ) ( $i=0, 1, \dots, m$ )且  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$ ,  $\Phi$  为  $C[a, b]$  上线性无关的函数集合  $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n$  ( $n \leq m$ ) 所张成的线性空间。最小二乘法即求在  $f(x) \in \Phi$  条件下,使得残差平方和最小化。

$$U = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - y_i]^2 = \min_{f \in \Phi} \sum_{i=0}^n [f^*(x_i) - y_i]^2 \quad (9)$$

本文所需拟合的曲线为二次或三次曲线,为多项式拟合,则上述问题实际是求解  $U = U(a_0, a_1, a_2, a_3)$  的极值问题。由多元函数求极值的必要条件可知:

$$\frac{\partial U}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=0}^m \left( \sum_{j=0}^3 a_j x_i^j - y_i \right) x_i^k = 0 \quad (k = 0, 1, 2, 3) \quad (10)$$

对式(10)进行化简,并整理成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 \\ \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 & \sum_{i=0}^m x_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 y_i \\ \sum_{i=0}^m x_i^3 y_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

矩阵方程(11)的系数矩阵为4阶实对称矩阵,根据其性质可推出系数矩阵为正定矩阵,固矩阵方程存在唯一解。求解上述矩阵方程即可求出电水转换关系特征参数。

## 2.2 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是由James Kennedy和Russell Eberhart共同提出的,其本质上是一种多代理算法<sup>[13]</sup>。PSO基于鸟类觅食的基本思想(即一种信息共享机制,通过个体间的经验共享,以达到整个群体的发展和进化的目的),采用了“速度一位移”搜索模型。初始化时,每个粒子的位置和速度随机分布于解空间,然后根据个体最优极值和全局最优极值来动态调整自身的位置和速度,个体其迭代公式如下式所示。

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + r_1 c_1 (P_{besti}^t - x_i^t) + r_2 c_2 (G_{best}^t - x_i^t) \quad (12)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$ 为粒子群体数量; $t=1, 2, \dots, n$ 为迭代次数; $v_i^t, x_i^t$ 分别为第*i*个粒子在*t*时刻的速度和位置; $P_{best}^t$ 为第*i*个粒子在*t*时刻的单体最优值; $G_{best}^t$ 为*t*时刻粒子群体的全局最优值; $\omega$ 为粒子群动态权重值; $c_1, c_2$ 均为学习因子,表征调节粒子向最优解方向飞行的步长,一般取值区间为(0, 2); $r_1, r_2$ 是介于(0, 1)之间的随机数。

PSO算法中需要调整的参数不多,实现简便,搜索速度快,但其具有陷入局部最优的问题。

## 2.3 改进粒子群算法

### 2.3.1 自适应调整惯性权重

$\omega$ 惯性权重的选取关系到PSO算法的收敛能力,需要随着当前粒子与全局最优粒子之间的距离动态调整。算法前期 $\omega$ 应该有较大的取值,会有较强的搜索能力;在后期 $\omega$ 需要较小的取值,以便于全局最优解的收敛。因此,本文提出了一种自适应调整惯性权重的方法, $\omega$ 惯性权重的取值取决于当前粒子与全局最优粒子之间的欧式距离以及算法迭代次数。当前粒子与全局粒子之间的距离差值 $D_i^t$ 以及惯性权重 $\omega_i^t$ 的计算如下式所示。

$$D_i^t = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{d=1}^N (G_{best}^{t,d} - x_i^{t,d})^2} \quad (14)$$

$$\omega_i^t = \omega_{\max} - \frac{t}{t_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) (1 - D_i^t)^2 \quad (15)$$

式中: $N$ 为粒子的维数; $G_{best}^{t,d}, x_i^{t,d}$ 分别为全局最优解和第*i*个粒子在*t*时刻的*d*维分量; $\omega_i^t$ 为第*i*个粒子在*t*时刻的惯性权重; $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为权重的最大值、最小值; $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

初始阶段粒子迭代次数小、距离全局最优点远,速度更新步长大;后期变化规律相反,实现惯性权重的自适应调整。

### 2.3.2 变邻域混沌搜索

为了克服算法陷于局部最优解、求解精度不高的问题,在PSO中引入了变邻域混沌搜索,对算法的性能进行了优化。当全局最优解在一定次数内不再更新的时候,便开始变邻域混沌搜索,即改变寻求最优解的邻域范围,若全局最优解不再改变,说明上次的结果为全局最优解,否则更新全局最优解。变邻域混沌搜索实质上是一种全局最优解的变异过程,以增加获得最优解的可能。变邻域混沌搜索全局最优解具体步骤如下。

(1) 利用logistic函数产生一个混沌变量:

$$U_{i+1,j} = 4 U_{i,j} (1 - U_{i,j}) \quad (16)$$

式中: $U_{i,j}$ 为初始混沌变量值,在(0, 1)之间,且不等于0.25、0.5、0.75; $U_{i+1,j}$ 为下一代混沌变量值。

(2) 将产生的混沌变量映射为变量变化值:

$$\Delta x_i = -\beta + 2\beta U_{i+1,j} \quad (17)$$

$$\beta = (x_{\max} - x_{\min}) \cos \left[ \frac{\pi (t-1)}{2 (t_{\max} - 1)} \right] \quad (18)$$

式中: $\beta$ 为邻域半径; $\Delta x_i$ 为个体最优解或者全局最优解的位置偏移; $x_{\max}, x_{\min}$ 为粒子位置的最大和最小值; $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

(3) 最优个体 $G_{best}^*$ 中以产生的混沌变量映射为变量变化值 $\Delta x_i$ 进行更新,其公式为:

$$G_{best}^* = G_{best} + \Delta x_i \quad (19)$$

(4) 更新全局最优值。

$$G_{best} = \begin{cases} G_{best}^*, f(G_{best}^*) < f(G_{best}^*) \\ G_{best}^*, f(G_{best}^*) \geq f(G_{best}^*) \end{cases} \quad (20)$$

改进粒子群优化算法的流程图如图1所示。

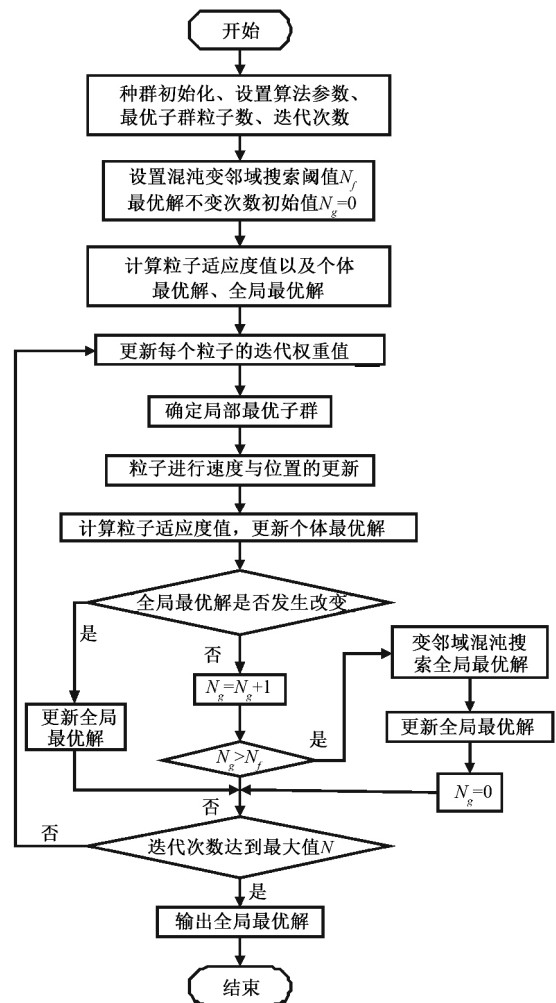


图1 改进粒子群算法流程图

## 3 算例分析

实验数据来源于江苏某市下的电灌站,该泵站装有电表、流量计,在农田灌溉期进行长期实验,获取耗电量和供水量的

数据集。分别采用 LSM、PSO 和 IPSO 这 3 种算法进行优化拟合,分析其算法性能。实验数据共 31 组,粒子群算法的参数设置如下:粒子种群个数  $N=40$ ;学习因子  $c_1=c_2=1.4955$ ;惯性权重  $\omega=0.7298$ ;搜索空间维数为求解参数个数;最大迭代次数  $\text{Iteration}=500$ 。表 1 和表 2 为 LSM、PSO、IPSO 算法对于不同阶数特征参数优化结果比较;图 2 为 PSO 和 IPSO 算法性能比较。

表 1 不同算法电水转换二次特征曲线参数求解

算法	$a_0$	$a_1$	$a_2$	适应度值
LSM	0.875	0.040	$2.47\times10^{-6}$	50.756 4
PSO	0.876	0.038	$2.51\times10^{-6}$	50.723 1
IPSO	0.876	0.041	$2.52\times10^{-6}$	50.590 8

表 2 不同算法电水转换三次特征曲线参数求解

算法	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	适应度值
LSM	0.132	0.053	$-2.91\times10^{-5}$	$2.61\times10^{-8}$	48.602 3
PSO	0.134	0.050	$-2.87\times10^{-5}$	$2.61\times10^{-8}$	48.435 7
IPSO	0.133	0.051	$-2.92\times10^{-5}$	$2.62\times10^{-8}$	48.020 4

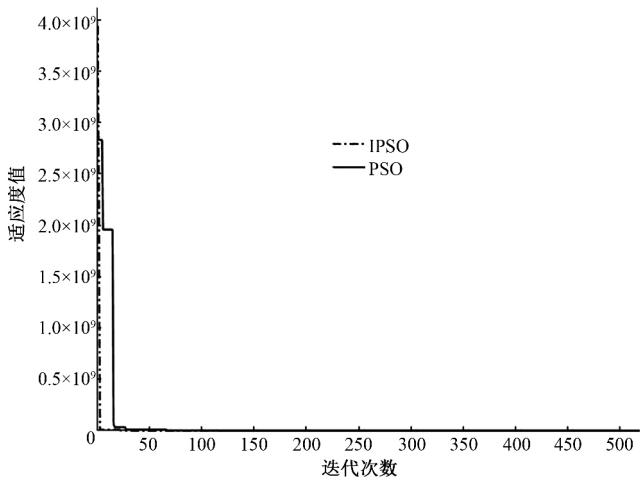


图 2 算法性能比较图

比较表 1 和表 2 中 3 种算法优化拟合到的多项式系数,参数计算偏差值不是很大,但适应度值即最优化准则函数值 IPSO 明显优于 PSO 和 LSM,表明 IPSO 具有很好的寻优精度。由图 2 可知,由于 IPSO 能够进行惯性权重的自适应调整和进行变邻域的混沌搜索,相比于 PSO 能够快速寻优,有更好的收敛速度。采用改进粒子群算法(IPSO)计算电水转换参数,绘制电水转换关系特征曲线,如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 显示,两种曲线都能很好地拟合出供水量随耗电量的变化趋势,数据点都能紧密的分布在曲线附近,结合表 1 和表 2 可知,采用三次函数拟合电水转换关系特征曲线的适应度值(残差平方和)明显小于二次函数拟合效果,表明式(7)更适合作为电水转换模型。

4 结 语

本文首先研究了电水转换模型,对传统的电水转换模型进行了优化改进;其次针对粒子群算法的缺陷,提出了基于自适应调整惯性权重和变邻域混沌搜索的改进粒子群算法;最后采

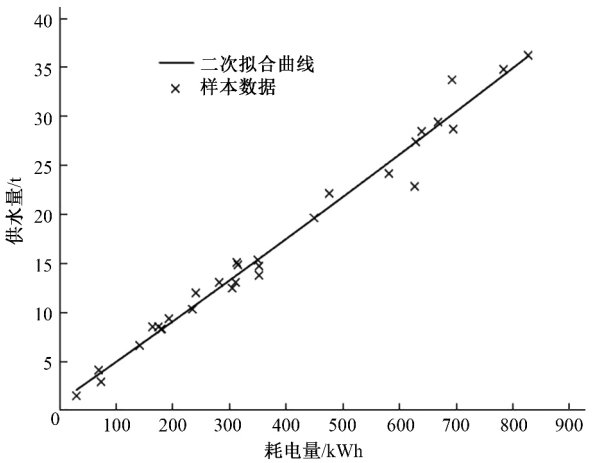


图 3 IPSO 拟合电水转换关系二次特征曲线

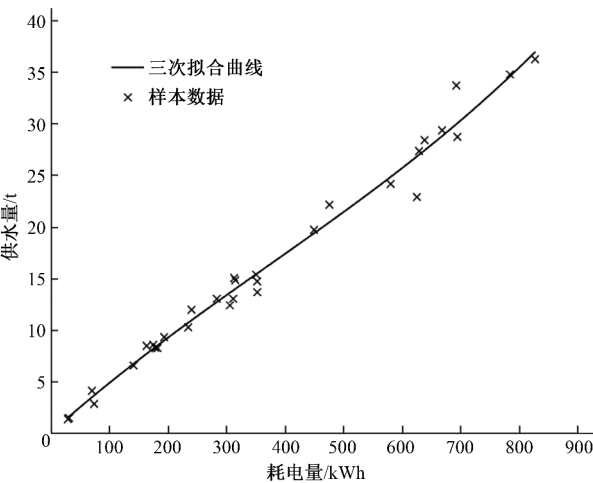


图 4 IPSO 拟合电水转换关系三次特征曲线

用 LSM、PSO、IPSO 对模型参数进行寻优,仿真结果表明 3 种算法都适用于模型参数拟合,IPSO 寻优精度更高、有更好的收敛速度,拟合的特征关系曲线能够更真实的反应耗电量和供水量的关系,为农业用水计量设备的研制提供理论基础。

参考文献:

[1] 田宏武,申长军,郑文刚. 农用灌溉机井水电双重计量系统设计[J]. 节水灌溉,2013 (1): 44-47.

[2] 王明飞,田宏武,张石锐,等. 远程农用机井水电计量设备设计与研制[J]. 江苏农业科学,2017 45(13): 177-180.

[3] 沈 波,吉庆丰,张玉建,等. 农业灌溉用水计量方法研究[J]. 江苏水利,2017 (4): 13-17.

[4] 徐 进,罗 尖,耿清蔚. 加强太湖流域农业用水计量的思考[J]. 中国水利,2016 (1): 39-41.

[5] 王成福,罗 浩,景少波. 浅析我国农业灌区用水量测技术的现状与发展[J]. 陕西水利,2016 (4): 167-168.

[6] 缙新科,崔乐乐,巨圆圆,等. 火电厂机组煤耗特性曲线拟合算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2014 (10): 85-89.

[7] 王 正,孙兆军,王 旭. 智能算法反演土壤水分特征曲线参数的应用[J]. 节水灌溉,2017 (10): 92-95.

[8] 马 亮. 基于改进粒子群的土壤水分特征曲线参数优化研究[J]. 节水灌溉,2014 (11): 17-20.

(下转第 107 页)

通过表 7 可以看出枝江市乡镇节水灌溉效益的优劣顺序为百里洲>七星台>顾家店>马家店>董市>安福寺>仙女>白洋>问安,节水灌溉效益最好的为百里洲,其次为七星台,再次为顾家店。百里洲镇位于湖北省宜昌市枝江市长江中游荆江段首段,是万里长江第一大江心洲,七星台镇与百里洲镇隔长江相望,雨量充沛,水资源丰富,这两个乡镇节水灌溉效益在枝江市名列前茅,评价结果与实际情况相符。

为了验证本文所提方法的有效性和可行性,现把文献[6]和文献[4]所提方法应用于本文实例,对所得结果进行对比分析,对比结果如表 8 所示。

表 8 3 种不同方法下的各乡镇节水灌溉效益排序对比

方法	节水灌溉效益排序
文献[6] 所提方法	百里洲>七星台>顾家店>马家店>董市>安福寺>仙女>白洋>问安
文献[4] 所提方法	百里洲>七星台>马家店>安福寺>董市>问安>仙女>白洋>顾家店
本文方法	百里洲>七星台>顾家店>马家店>董市>安福寺>仙女>白洋>问安

通过表 8 可以看出,本文所提方法与文献[6]所提方法结果一致,与文献[4]所提方法结果略有些差别,但节水灌溉效益排名前 2 的乡镇一样。分析了产生差异的原因,数据标准化处理方式不一样,文献[4]只单一用熵值法确定权重系数,求得的评价指标权重也不一样,完全通过隶属度去得到各乡镇节水灌溉效益综合评价价值,显得有些不合理。

## 4 结 语

本文旨在为节水灌溉综合效益评价提出一种新的评价方法,在评价方法及理论上有所创新,综合本文主要做了以下几个方面的工作。

(1) 以一种新的视角来建立区域节水灌溉综合效益评价指标体系,从经济层面、资源层面、技术层面、社会层面和环境层面 5 个方面全方位考虑,丰富和完善了节水灌溉效益评价指标体系内容。

(2) 针对传统熵权法的不足和局限,对熵权法进行改进,使其应用范围更广,更加合理和实用。

(3) 采用改进熵权法与群决策相对熵集结方法求得的组合权重相比其他组合权重方法能更加全面反映评价指标的相对重要性,放大评价指标之间重要性差异,求得的评价指标权重向量更合理。

(4) 对 TOPSIS 方法与灰色关联分析分别作改进,并把这两者有机地结合在一起,给出一种新的相对贴近度度量方式,同时还引入一个考虑决策者偏好的变量,比单独使用 TOPSIS 方法或灰色关联分析更具优越性,且实用性和应用性更强。

本文的研究工作不仅丰富了属性的赋权方法,而且丰富了节水灌溉效益评价理论与方法。此方法不仅能够应用到节水灌溉效益综合评价中,而且能够应用到其他方面的评价中,所提方法值得借鉴和推广。

## 参考文献:

- [1] 冯保清.我国节水灌溉利益相关者关系分析[J].农村水利,2013,(21):32-34.
- [2] 尤 敏,吴凤平,沈俊源.常年灌溉地带节水灌溉效益评估——基于动态可拓 TOPSIS 法[J].节水灌溉,2017(6):73-76.
- [3] 张晓琳,霍再林,佟 玲.石羊河流域主要作物节水灌溉效益评价[J].中国农村水利水电,2014(8):15-17,21.
- [4] 杜发兴,戈春华,吴贺林.基于改进模糊综合评价模型的节水灌溉效益评价[J].节水灌溉,2017(11):77-79,83.
- [5] 阳眉剑,吴 深,于赢东,等.农业节水灌溉评价研究历程及展望[J].中国水利水电科学研究院报,2016,14(3):210-218.
- [6] 肖俊龙,刘永强,田 浪,等.熵权模糊物元模型在节水灌溉综合效益评价的应用[J].排灌机械学报,2016,34(9):809-814.
- [7] 张玉玲,迟国泰,祝志川.基于变异系数-AHP 的经济评价模型及中国十五期间实证研究[J].管理评论,2011,23(1):3-13.
- [8] 武春友,郭玲玲,于惊涛.基于 TOPSIS-灰色关联分析的区域绿色增长系统评价模型及实证[J].管理评论,2017,29(01):228-239.
- [9] 宁宝权,陕振沛.基于改进熵和灰关联分析的模糊物元分析模型及应用[J].数学的实践与认识,2016,46(20):280-284.
- [10] 费良军,王锦辉,王光社,等.基于改进熵权-G1-博弈论法的灌区运行状况综合评价[J].排灌机械工程学报,2015,33(10):895-900.
- [11] 赵 萌,陈亚男,沈 哲.两型社会动态评价模型及其应用——基于熵权法-相对熵集结模型的组合赋权[J].技术经济,2014,33(11):103-109.
- [12] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:135-141.
- [13] 鲁春阳,文 枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断——以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.
- [14] 张 阳,张 橙.基于 TOPSIS-灰色关联度分析的水资源配置方案综合评价[J].统计与决策,2017(18):62-65.

(上接第 101 页)

- [9] 付 强,蒋睿奇,王子龙,等.基于改进萤火虫算法的土壤水分特征曲线参数优化[J].农业工程学报,2015,31(11):117-122.
- [10] 高雄飞,刘元会,郭建青,等.土壤水分特征曲线模型参数识别的多邻域粒子群算法[J].干旱地区农业研究,2014(6):48-52.
- [11] 刘竹溪,刘景植.水泵及水泵站[M].北京:中国水利水电出版

社,2009.

- [12] 王梅仙,张钦扬.提高中小型混流泵装置效率技术初探[J].江苏水利,2014(3):20-21.
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 4(4):1 942-1 948.