排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 6 月 June 2020 | 第 38 卷 第 6 期 Vol.38 No.6

基于云模型的梯级泵站系统服役状态综合评估


徐存东

徐存东[1,2],朱兴林[1*],张锐[1],田俊娇[1],王燕[1,3],王荣荣[1]
(1. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046; 2. 河南省水工结构安全工程技术研究中心,河南 郑州 450046; 3. 水资源高效利用与保障工程河南省系统创新中心,河南 郑州 450046)

摘要: 为了准确客观地对高扬程梯级泵站系统服役状态进行定量化评估,以宁夏盐环定高扬程梯级泵站系统为研究对象,通过云理论模型定量化模糊性因素,同时基于云模型数字特征对指标状态进行定量化描述,并构建泵站系统服役状态评估指标体系,构建了评语层标准云模型、要素层隶属度云模型,同时采用排队理论求解指标权重,进而实现泵站系统服役状态的综合评估. 结果表明:泵站系统更新改造前与更新改造后 2 种工况下服役状态综合评价云分别是 C_b(0.626 4, 0.061 4,0.016 8),C_a(0.842 1,0.100 5,0.012 6),改造前其服役状态处于"较好(V_4)"等级,改造后服役状态处于"好(V_5)"等级,验证评估结果符合实际情况. 采用该方法可为梯级泵站系统服役状态评估或类似系统的预测提供有益参考.

关键词: 梯级泵站;云模型;服役状态;综合评估;隶属度
中图分类号: TV68　**文献标志码**: A　**文章编号**: 1674-8530(2020)06-0577-06
Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.19.0087

徐存东,朱兴林,张锐, 等. 基于云模型的梯级泵站系统服役状态综合评估[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(6):577-582.
XU Cundong, ZHU Xinglin, ZHANG Rui, et al. Comprehensive evaluation of service status of cascade pumping station based on cloud model[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2020, 38(6):577-582.(in Chinese)

Comprehensive evaluation of service status of cascade pumping station based on cloud model

XU Cundong[1,2], *ZHU Xinglin*[1*], *ZHANG Rui*[1], *TIAN Junjiao*[1], *WANG Yan*[1,3], *WANG Rongrong*[1]
(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China; 2. He'nan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, Zhengzhou, He'nan 450046, China; 3. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficiency and Protection Engineering, Zhengzhou, He'nan 450046, China)

Abstract: In order to accurately and objectively quantify the service status of the high-lift cascade pumping station system, the Ningxia Yanhuan fixed-height cascade pumping station system was taken as the research object. The ambiguity factors were quantified through the cloud theoretical model and the indicator state was quantitatively described based on the cloud model digital characteristics, and an index system for evaluating the service status of the pumping station was built. The standard cloud model of the comment layer and the cloud model of the membership level of the element layer were constructed. At the same time, the queuing theory was used to solve the index weights, and the compre-

收稿日期: 2019-04-15; **修回日期**: 2019-09-03; **网络出版时间**: 2020-05-27
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.th.20200526.1355.008.html
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579102,31360204);河南省高校创新团队项目(19IRTSTHN030);宁夏回族自治区水利科技专项(TYZB-ZFCG-2017-31)
第一作者简介: 徐存东(1972—),男,甘肃景泰人,教授,博士生导师(xcundong@163.com),主要从事水工结构优化设计研究.
通信作者简介: 朱兴林(1998—),男,甘肃武威人,硕士研究生(zxinglin@yeah.net),主要从事水利工程研究.

hensive evaluation of the service status of the pumping station system was rea-lized. The results show that the comprehensive evaluation clouds of the service status of the pumping station system before and after renovation are C_b(0.626 4, 0.061 4, 0.016 8) and C_a(0.842 1, 0.100 5, 0.012 6). In the "good (V_4)" state, the service status level after the transformation is in the "good (V_5)" state, verifying that the evaluation results are in line with the actual situation. It can be seen that this method can provide a useful reference for the evaluation of the service status of the cascade pumping station system or the prediction of similar systems.

Key words: cascade pumping station; cloud model; service status; comprehensive evaluation; membership

中国西北地区土地资源富饶而水资源十分匮乏,严重制约了中国西北干旱地区的农业可持续发展[1].近年来,建设大规模的提水灌溉工程,对区域的经济发展以及生态环境起到了积极的推动作用[2].因干旱区独特的地形约束和灌水区域广的特点,人民生活用水以及农田灌水主要依赖于梯级泵站的输送.

国内外学者针对泵站系统评估已做了相关研究,田媛等[3]通过建立各级泵站的矩阵分析模型对泵站系统进行模拟,分析了各级泵站老化隶属度评价指标,并与实际结果进行对比,得出模拟结果与实际结果相吻合.朱丽楠等[4]应用模糊数学相关理论构建了泵站工程老化评价模型,提出了适用于泵站系统的新评价系统,通过算例验证了该模型的可靠性,为泵站系统老化评估提供了新思路.周琪慧等[5]采用遗传投影寻踪模型(GA-PP)将泵站运行评价指标的线性投影与最佳投影方向相融合得到投影指标值,以此作为评价泵站系统运行优劣程度的依据,为泵站经济运行和联合优化调度提供了参考.潘志军等[6]以杭州八堡泵站为研究对象,基于三维湍流数值模拟方法优化泵站出流管道的水力设计.SARBU 等[7]针对供热站变速泵送系统,通过闸阀系统和变速装置对热水排放的能量比对分析,将泵送流量与热量需求相关联,设计了1个全新自动系统,变速泵在最优控制方法下可以节省20%~50%的能量.

这些研究为泵站工程设备更新与维护提供了有益的参考,但对于泵站系统服役状态综合评估却鲜有研究.由于影响泵站系统的指标繁多且量化困难,其中各个指标管网布置、配电装置等定性指标以及泵站效率、闸阀效率等定量指标均具有较大的模糊性和随机性,因而很难用一般的评估方法实现对其服役状态的评估.

鉴于此,文中将云模型理论引入高扬程梯级泵站服役状态的综合评估中,云模型理论由李德毅院士等[8]于1995年提出,其应用已经成为解决不确定性问题的主要手段,并得以广泛应用.云理论的引入,可实现将不确定指标的定性描述定量化[9].李琳琳等[10]通过云理论将作战指挥控制系统评价指标云与权重云相融合得出了耦合云,为作战系统探明随机性因素提供了新思路.QIN 等[11]使用云模型将一型及二型模糊集关联起来,提出了一种考虑直方图分析的模糊性和随机性的图像分割方法,该方法对于图像分割具有独特优越性.

综上可知,云模型在众多工程技术领域已经得到了较为深入的发展,并随着研究精度的不断提升,云模型也得到了相应的改进,但仍需要对存在的问题作更深入的研究.

为了准确客观地对高扬程梯级泵站系统服役状态进行定量化评估,文中以陕甘宁扬黄工程高扬程梯级泵站输水系统为分析目标,充分考虑其结构特点与技术功能,以云模型为技术平台构建适用于高扬程梯级泵站服役状态的评估体系.首先通过大量调研构建高扬程梯级泵站效率评估指标体系,同时依据评价指标对系统运行效率影响的特点,构建指标评价标准云.然后采用排队理论确定指标权重,依据专家评价值采用逆向云发生器确定各指标层的隶属度云模型;最后将隶属度云模型与权重融合得到综合评价云,依据云相似度原理求得相应的评价结果.为保证评价结果的准确性,同时采用模糊理论综合评判法及云重心判别法对评价结果进行核准.通过文中研究,期望可对梯级泵站系统服役状态评估或类似系统的预测提供有益参考.

1 云模型

1.1 云模型概念

云模型是一种以模糊数学理论及概率统计为

基础，用于定量化解决定性问题的技术模型[12]，通过期望（E_x）、熵（En）、超熵（He）这 3 个云数字特征来刻画其特性，其中 E_x 是定性概念定量化后的均值；En 是对不确定性概念的度量，反映定性概念的模糊程度；He 是对熵的不确定性度量，反映指标的稳定性.

1.2　云发生器

云发生器（cloud generator，CG）[13]是定性指标与定量指标互换的算法工具，它揭示随机性和模糊性的内在关联性.正向云发生器实现将指标由定性向定量转换，逆向云发生器实现将指标从定量向定性转换，如图 1 所示.

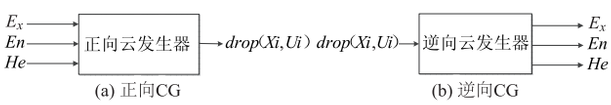


图 1　云发生器

Fig.1　Cloud generator

2　基于云模型梯级泵站服役状态评估

2.1　评价指标集的建立

为了客观准确地评价当地泵站系统的服役状态，需要构建一套客观合理的评估指标体系.因此，在现场调研了泵站系统的实际运行特点与专家指导意见的基础上，构建评估体系.首先整理影响系统服役状态的各项因素.文中将泵站系统分为输水、管理维护、泵站和运行调度这 4 个子系统.在泵站服役状态评估体系中，将其状态分为 V_1（差）、V_2（较差）、V_3（中等）、V_4（较好）、V_5（好）这 5 个等级.然后根据各子系统在泵站系统中的参与要素与具体特点再进行划分.基于所有的影响因素并结合泵站实际运行状况和专家意见，将泵站系统服役状态评估体系划分为 4 个层级：要素层、系统层、目标层和评语层.图 2 为泵站系统服役状态评估指标体系.

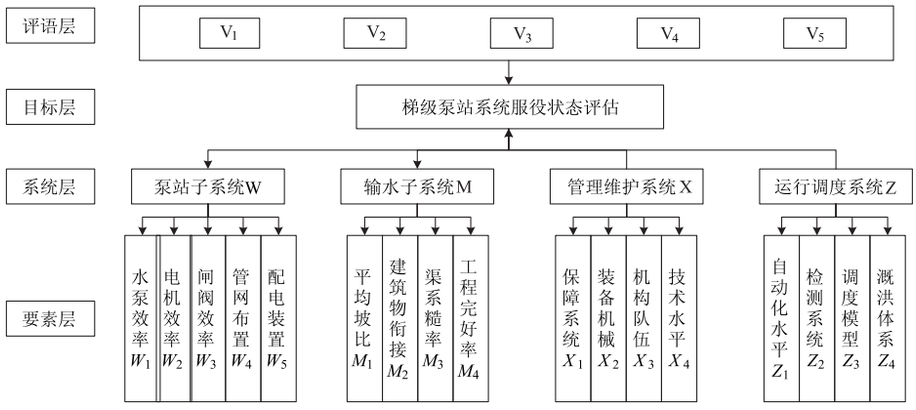


图 2　泵站系统服役状态评估指标体系

Fig.2　Evaluation index system of service status of pumping station system

2.2　评语集生成评价标准云

泵站系统服役状态的定量化评价基础是建立评语集，目前针对泵站系统效率和评价指标属性的定性划分存在着一定的模糊性.一般情况下研究者会采用传统的定量分析方法来消除这种模糊性，同时文中拟采用黄金风格云生成法[14]来提高评价结果的客观性.根据图 2 中确定的评估体系，建立泵站系统服役状态评估等级标准云模型，设 E_x 的评价标准论域为[0，1]，当接近论域的中心位置时取 E_{x3} = 0.5.熵与超熵可依据黄金分割率规则（较小值/较大值 = 0.618）进行确定.暂定泵站系统服役状态“中等 V_3”的云模型参数分别为 $E_{x3} = 0.5$，$He_3 = 0.005$，以“较好 V_4”为例，计算过程如下：

V_4 云数字参数：

$$E_{x2} = E_{x3} + (1 - 0.618)(x_{\max} + x_{\min})/2 = 0.691,$$

$$En_2 = (1 - 0.618)(x_{\max} - x_{\min})/6 = 0.064,$$

$$He_2 = He_3/0.618 = 0.008\ 1.$$

以此类推，可得到各评估等级的云数字参数并通过 Matlab 可视化表达.

2.3　指标赋权

泵站系统服役状态评估的基础为确定各个指标的权重，通常有主观赋权法和客观赋权法 2 种方法.客观赋权法求得的指标权重具有极高的客观性，但有时会因为指标选取和模型自身问题导致客观权重法求得的结果偏离实际.主观权重法以专家经验为基础，由专家给出评估指标权重或指标间的重要性程度确定，往往主观性较强.因此，为了客观准确地反映指标的重要性等级，将主观与客观 2 种权

重确定方法相结合，通过式(1)确定各评估指标的权重[14].

$$\omega_i=\begin{cases}\dfrac{1}{2}+\dfrac{\sqrt{-2\ln\left[\dfrac{2(i-1)}{n}\right]}}{6}, & 1<i\leqslant\dfrac{n+1}{2},\\ \dfrac{1}{2}-\dfrac{\sqrt{-2\ln\left[2-\dfrac{2(i-1)}{n}\right]}}{6}, & \dfrac{n+1}{2}<i\leqslant n,\end{cases}\tag{1}$$

式中：n 为指标个数；i 为排队等级，按照指标的重要程度排列，若 2 个指标的重要性相同，则 i 的取值相同.

2.4 隶属度云模型

采用逆向云发生器求得下一层指标对上一层指标的隶属度模型.首先聘请专家、泵站管理人员和工作人员，依据图 2 中的评语层进行打分；然后采用逆向云发生器确定指标的隶属度云数字特征值及评价值，并界定评价值范围为[0,1]；最后依据图 3 隶属度云模型流程图逆向生成评价指标的云数字特征[15].当超熵过大时，正态云会出现严重的雾化现象，使生成的云数字特征失去意义.因此在研究过程中，依据雾化性质与 3δ 原则，确保超熵的取值范围为 $He<1/3En$，以得到分布良好的正态云图.

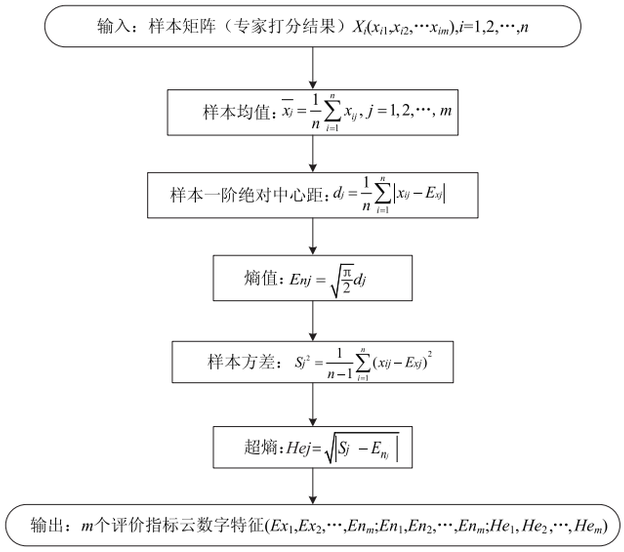


图 3 隶属度云数字特征生成图

Fig.3 Digital feature generation map of chembership degree cloud

2.5 综合评价云

根据 2.4 节中确定的各指标权重及相应的隶属度模型，通过式(2)求解综合评价云 $C(E_x,En,He)$.

$$\begin{cases}E_x=\sum_{i=1}^{m}E_{xi}\omega_i,\\ En=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(En_i^2\omega_i)},\\ He=\sum_{i=1}^{m}He_i\omega_i,\end{cases}\tag{2}$$

式中：m 为指标个数；ω_i 为各指标权重.

按照最大相似度原则，将 $C(E_x,En,He)$ 与各标准云进行相似度计算，确定最大相似度所对应的高扬程梯级泵站效率等级.设云向量 $V_i=(E_{xi},En_i,He_i)$，$C_j=(E_{xj},En_j,He_j)$，V_i 与 C_j 的余弦称为云相似度，可通过式(3)计算：

$$CS(i,j)=\cos(\boldsymbol{V}_i,\boldsymbol{C}_j)=\frac{\boldsymbol{V}_i\cdot\boldsymbol{C}_j}{\|\boldsymbol{V}_i\|\cdot\|\boldsymbol{C}_j\|}.\tag{3}$$

3 实例分析

3.1 研究区概况

盐环定扬黄灌区高扬程梯级泵站系统由陕甘宁 3 省区共用工程和省区内专用工程组成，泵站系统承担宁夏和甘肃共 4 县的提水灌溉任务，灌溉面积 1.36 hm^2，建设有梯级泵站 12 座、渠系建筑物 192 座.2016 年 2 月宁夏回族自治区水利厅提出对泵站进行更新改造，将原来的 12 级泵站及干渠调整为 8 级，更新 11 台套主要机电设备，各类渠系建筑物 171 座，改造后干渠总长 99.01 km，改造防渗砌护干渠 57.13 km，压力管道更换 2 897 m，更新改造于 2018 年 3 月基本完成并全面投入运行.

3.2 基于云模型的效率综合评估

3.2.1 指标权重求解

基于上述已构建指标体系，根据相关指标的重要程度，多次采纳行业专家的建议和意见，确定每个指标隶属单元的排队等级，由式(1)求得权重，进而确定“系统层”“要素层”的权重.

3.2.2 要素层隶属度云模型

通过聘请 10 位专业人员评价要素层的各个指标的实际情况，并且给出处于[0,1]的评价值，其中，相关专家学者 3 人，综合管理人员 3 人，运行工作人员 4 人.按照评语层评价准则对泵站改造前后的状态进行评价，利用逆向云发生器将评价值生成云数字特征，最终获取有效评价值.按照图 3 所示隶属度生成流程图，求得要素层各指标的隶属度云模型.

3.2.3　综合评价

根据式(2)计算出系统层各指标云数字特征，如表 1 所示.

表 1　系统层各指标云数字特征值
Tab.1　Digital characteristic values of each index cloud in system layer

指标	Z_a	X_a	M_a	W_a	Z_b	X_b	M_b	W_b
E_x	0.87	0.87	0.79	0.85	0.62	0.69	0.57	0.64
En	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06	0.05	0.07	0.06
He	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.02	0.02	0.02

注：以上数字结果均保留了 2 位有效数字

由上述系统层所得的云数字特征可得综合评价值 $C_b(0.63,0.06,0.01)$，$C_a(0.84,0.10,0.01)$.依据最大相似度原则，泵站系统改造前后服役状态综合评估等级分别为“较好(V_4)”和“好(V_5)”.图 4 为综合评价云模型与标准云 Matlab 仿真显示，图中 L 为隶属度，G 为梯级泵站系统服役状态等级.同时，综合评价云 C_b，C_a 的期望值 E_x 亦分别处于“较好(V_4)”与“好(V_5)”的区间，改造后的系统状态值明显提高.

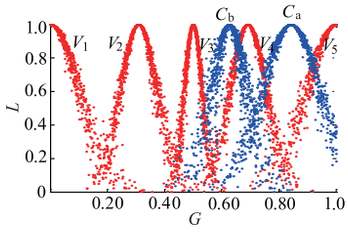


图 4　综合评价结果云图
Fig.4　Comprehensive evaluation result cloud map

4　讨　论

根据盐环定泵站系统的服务状态评估结果，系统的服役状态由“较好(V_4)”变为“好(V_5)”，状态评估值由 0.63 变成 0.84.为了检验该云模型评估准确性，采用基于模糊理论的评价方法对泵站系统服役状态的评估结果为 0.63 和 0.83，同时根据云重心判别法评估得到的结果是 0.64 和 0.81.由此可见，采用了 2 种不同的评估方法得到的评估值误差较小.高扬程梯形泵站系统在实际中的服役状态主要由云模型得到的 3 个指标，即特征期望 E_x、熵 En、超熵 He 来反映，同时也结合了最大相似度法来获取服役状态，而不是根据单一的数值来判定.这些使云模型的评估过程更为客观完整，评估内容也更加丰富.

黄金分割率云生成法是确定标准云的一种方法，它的优势在于能处理一些获取数据困难且数据量不足的问题，并消除了指标从定量向定性转化中带来的随机性和模糊性.采用排队理论求解指标权重时虽然存在一定的主观性，但与传统的权重确定方法相比，该方法仅有排队等级的确定是人为参与因素，所以仍具有客观性[16].通过专家打分来确定隶属度云模型，存在一定程度上的主观性，通过引进专家打分约束机制，能有效地消除打分过程中产生的数据离散性，实现定性指标与定量指标统一化描述.

5　结　论

1）文中提出了一种新型的评价模型，为梯级泵站系统服役状态评估提供了一种新思路.云模型在解决系统性、模糊性以及不确定性问题方面具有优势，代入梯级泵站系统服役状态评估中，构建了一种基于要素、系统、目标和评语 4 个方面的评估体系、基于黄金分割率法的评价层标准云模型和要素层隶属度云模型，并依据排队理论确认各指标权重.通过 3 个云数字特征生成的综合评价云使结果的客观性和可信度有所提升.

2）运用综合评价云运算法则将采用排队理论所求解得出的各级指标权重和隶属度云模型相融合得到综合评价云，与标准云进行相似度对比，以最大相似度原则为准，采用模糊理论综合评判值法和云重心判别法对其结果进行验证，得出最终的评价结果.

3）高扬程梯级泵站系统服役状态在更新改造前后，其综合评价云分别是 $C_b(0.63,0.06,0.01)$，$C_a(0.84,0.10,0.01)$，改造前后的服役状态等级分别为“较好(V_4)”和“好(V_5)”，综合评价云的 En，He 数值均较小，证明其评价结果具有较高的可靠性.

参考文献(References)

[1]　刘恒，钟华平，顾颖.西北干旱内陆河区水资源利用与绿洲演变规律研究——以石羊河流域下游民勤盆地为例[J].水科学进展，2001，9(3)：378-384.
LIU Heng, ZHONG Huaping, GU Ying.Water resources development and oasis evauation in inland river basin of arid zone of northwest China—a case study: Mingqin Basin of Shiyang River[J].Advances in water science, 2001,9(3):378-384.(in Chinese)

[2]　徐存东.景电灌区水盐运移对局域水土资源影响研究

[D].兰州:兰州大学,2010.

[3] 田媛,苏德荣,李晓铃.高扬程多级泵站系统老化多指标综合评价[J].兰州大学学报(自然科学版),2002,38(1):100-104.
TIAN Yuan, SU Derong, LI Xiaoling. Multi-index evaluation of system aging for multi-gradeand high-lift pumping station[J]. Journal of Lanzhou University(natural sciences), 2002,38(1):100-104. (in Chinese)

[4] 朱丽楠,陈坚,张雷.模糊数学理论在泵站工程老化评价中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(4):32-35.
ZHU Linan, CHEN Jian, ZHANG Lei. Application of fuzzy mathematics to aging assessment of pumping station engineerings[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003,36(4):32-35. (in Chinese)

[5] 周琪慧,方国华,吴学文,等.基于遗传投影寻踪模型的泵站运行综合评价[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):985-989.
ZHOU Qihui, FANG Guohua, WU Xuewen, et al. Comprehensive assessment of pump station operation based on genetic projection pursuit model[J]. South-to-north water transfers and water science & technology,2015,13(5):985-989. (in Chinese)

[6] 潘志军,徐磊,沈晓燕,等.杭州八堡泵站斜式泵装置流道水力优化[J].排灌机械工程学报,2018,36(6):501-508.
PAN Zhijun,XU Lei,SHEN Xiaoyan,et al.Conduit hydraulic optimization of slanted pump system for Babao Pumping Station of Hangzhou[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2018,36(6) : 501-508. (in Chinese)

[7] SARBU I, VALEA E S. Energy savings potential for pumping water in district heating stations[J]. Sustainability,2015, 7(5):5705-5719.

[8] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership cloud and membership cloud generators[J]. Computer R & D, 1995,32(6):15-20. (in Chinese)

[9] 徐存东,程慧,王燕,等.灌区土壤盐渍化程度云理论改进多级模糊评价模型[J].农业工程学报,2017,33(24):88-95.
XU Cundong,CHENG Hui,WANG Yan,et al.Improved multi-level fuzzy evaluation model based on cloud theory for evaluation of soil salinization degree[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(24):88-95. (in Chinese)

[10] 李琳琳,路云飞,张壮,等.基于云模型的指挥控制系统效能评估[J].系统工程与电子技术,2018,40(4):815-822.
LI Linlin, LU Yunfei, ZHANG Zhuang ,et al. Effectiveness evaluation of command and control system based on cloud model[J]. Systems engineering and electronics, 2018,40(4): 815-822. (in Chinese)

[11] QIN K, XU K, LIU F L, et al. Image segmentation based on histogram analysis utilizing the cloud model [J]. Computers and mathematics with applications, 2011, 62(7):2824-2833.

[12] 胡石元,李德仁,刘耀林,等.基于云模型和关联度分析法的土地评价因素权重挖掘[J].武汉大学学报(信息科学版),2006,31(5):423-427.
HU Shiyuan, LI Deren, LIU Yaolin, etc. Mining weights of land evaluation factors based on cloud model and correlation analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2006, 31(5):423-427. (in Chinese)

[13] 张杨,严金明,江平,等.基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J].农业工程学报,2013,29(22):252-258.
ZHANG Yang, YAN Jinming, JIANG Ping, et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei province[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(22):252-258. (in Chinese)

[14] 魏巍贤,冯佳.多目标权系数的组合赋值方法研究[J].系统工程与电子技术,1998(2):14-16.
WEI Weixian, FENG Jia. Study on multiobjective weights combination assigning method[J].Systems engineering and electronics, 1998(2): 14-16. (in Chinese)

[15] 焦彦维,侯德亭,周东方,等.无人机在复杂电磁环境下的效能评估[J].强激光与粒子束,2014,26(7):142-147.
JIAO Yanwei, HOU Deting, ZHOU Dongfang,et al.Efficiency evaluation of unmanned aerial vehicle in complex electromagnetic environment [J]. High power laser and particle beams,2014,26(7): 142-147. (in Chinese)

[16] 王健,肖文杰,王树文,等.一种改进的基于云模型的效能评估方法[J].火力与指挥控制,2010,35(7):139-142.
WANG Jian, XIAO Wenjie, WANG Shuwen, et al. An improved effectiveness evaluation method based on cloud model[J]. Fire control & command control, 2010, 35(7):139-142. (in Chinese)

(责任编辑 朱漪云)