

基于熵权-TOPSIS的智能监测感知 设备端适用性研究

宋琳月¹, 彭直²

(1. 河南经贸职业学院智能财经学院, 郑州 450046; 2. 黄河水利委员会信息中心, 郑州 450000)

摘要: 研究数字孪生黄河建设背景下,作为数字孪生黄河立体化监测感知体系,即“天空地水”(OSSGW)一体化智能监测感知体系基本组成单元的各类智能设备的适用性。将设备端作为目标层,建立特征指标层用以评价设备的性价比与适用度。特征指标层包括性能、经济性、易用性3个二级评价维度共计8个指标因子,建立6个层次的指标因子赋分准则,建立指标层赋分矩阵,然后利用熵值法对各指标因子进行权重计算,通过TOPSIS(优劣解距离法)进行综合适用性计算得到方案层,为设备选配提供决策支持。

关键词: 数字孪生黄河; 智能监测感知网; 设备端; 熵权-TOPSIS(优劣解距离法); 适用性

中图分类号: TV877 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0085-05

“数字孪生+黄河”是自黄河流域生态保护和高质量发展战略提出以来,在智慧水利建设背景下,孕育出的新发展形态。通过运用信息技术、理论和方法提升黄河流域水旱灾害防御“预报、预警、预演、预案”能力^[1-2],赋能黄河水行政管理各项工作。在数字孪生黄河建设体系中,数据作为核心,需要融合多源智能感知设备在数据采集、传输、处理、分析、存储等流程中的特点和优势,创建丰富的数据资源池,构建“天空地水”一体化智能监测感知体系。

与此同时,对于数字孪生黄河立体感知网具体建设实施过程中,如何科学规划新建、统筹在建、整合已建的多源数据采集设备,还缺乏从结合设备本身性能、黄河水利管理业务工作特点及需求、数字孪生黄河建设的重点工程需求等方面对设备适用性进行综合评价。结合水利工作的特点,将“水”这一层维度纳入立体感知网的考量,提出“天空地水”一体化智能监测感知体系概念,利用改进后的熵权法和TOPSIS(优劣解距离法)模型,构建合理的指标层,确立指标因子,计算得到组成立体感知网的主要类别传感器综合得分和排序,并进行定性和定量分析,为数字孪生黄河建设实施中,在不同业务需求、不同建设项目下,综合考量各类设备的取舍、数量和规模提供决策参考。

1 理论与方法

智能监测感知设备具有不同的设备特性,在不同的水利业务管理部门之间具有不同层次的需求强度,在数字孪生黄河重点工程中也具有不同的应用需求。为将主观的、感性的需求进行明确和量化,采用熵权法和TOPSIS结合的方法,先对指标因子进行确权,然后根据各项指标因子(分为正因素和负因素)的权重,使用TOPSIS方法进行综合计算,得到设备在该场景下的综合排序结果。

1.1 熵值法确权

指标因子的基准率定和评价具有不确定性,引入信息论中熵的概念,能够很好地对不确定性进行客观赋值与度量验证。其原理为:用熵值来判断某个指标因子的离散程度,其熵值越小,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的权重贡献也越大^[3]。步骤及计算方法如下。

(1) 将各指标数据进行归一化处理。假设给定 k 个指标: $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ 对各指标数据归一化后的值为 X_1, X_2, \dots, X_k 。

正向指标:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (1)$$

负向指标:

收稿日期: 2024-07-16

作者简介: 宋琳月(1996—),女,河南平顶山人,硕士,助教,研究方向为经济统计分析、人工智能与大数据分析;通信作者彭直(1995—),男,河南郑州人,硕士,工程师,研究方向为水利信息化、工程管理。

$$Y_{ij} = \frac{\max X_j - X_{ij}}{\max X_j - \min X_j} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为标准化指标; X_{ij} 为第 i 个年份第 j 项评价指标的数值; $\min X_j$ 和 $\max X_j$ 分别为所有年份中第 j 项评价指标的最小值和最大值。

(2) 计算第 i 个项目在第 j 个指标下的指标值比重 p_{ij} 。

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (3)$$

(3) 计算第 j 项指标因子的信息熵 E_j 。

$$E_j = -\ln n^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

式中: $\ln n^{-1} > 0$, 且 $E_j \geq 0$ 。

(4) 计算各项指标的权重 W_j 。

$$W_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j} \quad (5)$$

式中: $1 - E_j$ 为信息熵冗余度。

1.2 TOPSIS 综合评价

TOPSIS(优劣解距离法)是一种多目标决策分析方法^[4-5]。针对目标层不同的对象,根据评价指标因子,选择每个指标的理想值,并计算每个方案与理想值之间的距离。步骤及计算方法如下。

(1) 数据同趋势化处理。区分指标体系中的指标类别(高优或低优),并根据不同类型的指标需要按照不同的公式进行正向化处理。构建 n 行 m 列的矩阵 $X[X_{ij}]$, X_{ij} 为第 i 个对象的第 j 个指标的值。

(2) 建立标准化矩阵 $[Z_{ij}]$, 其中

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n X_{kj}^2}} \quad (6)$$

(3) 计算各评价指标与最优及最劣向量之间的差距 D_i 。

正向距离 D_i^+ :

$$D_i^+ = \sqrt{\omega_j (Z_{ij}^+ - z_{ij}^+)^2} \quad (7)$$

负向距离 D_i^- :

$$D_i^- = \sqrt{\omega_j (Z_{ij}^- - z_{ij}^-)^2} \quad (8)$$

式中: ω_j 为第 j 个属性的权重(重要程度)。

(4) 测度评价对象与最优方案的接近程度 C_i 。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (9)$$

2 评价对象与指标体系

2.1 概念提出

数字孪生黄河建设过程中,构建具备自动化、

智能化的立体智能监测感知网是关键所在^[1]。一般认为,立体智能监测感知网是由相当规模的、不同类型和特征的智能传感器设备组成,设备作为感知网的基本单元,要求能够根据业务应用场景进行独立或协同工作。根据传感器设备布设的空间层次来区分,提出“天空地一体化”监测感知体系的概念,较早地在自然资源、林业、住建、应急管理等部门得到应用和发展。在当今智慧水利的语义下,广义的数字孪生黄河立体监测感知网不仅要在传统的空间维度加强新式传感器的应用研究,强化各类智能传感器的布设^[1-2,6-9],还应结合黄河水利发展实际,将水面和水下的传感器设备纳入范围,考量智慧水文基础设施建设需求^[6-7,10],进一步丰富数字孪生黄河智能监测感知网内涵,统称为“天空地水”立体化智能监测感知体系,这一概念不仅融合了水利工作的特征,且能体现数字孪生黄河监测感知网的立体性、完整性和全面性。

2.2 方案层

智能化的采集端是建设智能感知层的基础^[6],多源数据采集设备在黄河治理保护中和研究中已经有了不少成熟的应用案例,卫星遥感、航空遥感等技术手段较早地就在河势变化监测、河道清障、滩区治理、水文监测、工情险情监测等业务领域取得了较好的应用成果^[10-12]。随着信息技术的发展,智能视频监控设备、无人机设备、无人船、电子水尺、手持无线终端等设备也在黄河水利各级管理和支撑服务单位中配备使用^[13-18]。根据在黄河治理与保护中的研究应用现状和空间维度特征,梳理出广义的数字孪生黄河立体智能感知体系对应维度的典型智能传感器设备。传感器设备既有在黄河水利管理各项业务工作中得到成熟广泛应用的设备,也有处于一定范围内实验和应用探索阶段的设备。例如,无人机航拍器,因其机动性强,成像效果好,可挂载多种传感器等特性,在基层河务管理部门中得到普遍应用,在黄河水行政执法工作、河道巡查、河势查勘、险情观测等业务中有相对成熟的应用案例和工作场景^[13-14]。而水下探测设备,尽管有学者和业内开展了一定研究^[15],也有对于水下根石走失监测等方面的研究^[16],但受限于技术成熟度与适用性,以及黄河特殊水文情况,在凌汛期、高泥沙含量的河段监测效果受到较大干扰。在水资源管理日趋严格以及智慧水文建设背景下,“水”这一维度的智能设备应用和研究应成为重要关注点。“天空地水”感知网典型传感器设备见表 1。

表1 “天空地水”感知网典型传感器设备

基层	主要设备
天 Y_1	卫星 Y_{11}
空 Y_2	无人航拍器 Y_{21}
地 Y_3	视频监控设备 Y_{31}
	手持移动终端 Y_{32}
	埋深型振动与位移探测器 Y_{33}
水 Y_4	多功能测流仪(测流、测深、测速、水量监测等) Y_{41}
	无人船,无码头 Y_{42}
	牵引式水下机器人 Y_{43}
	水下探测仪 Y_{44}

2.3 赋值原则

采用模糊赋值的方法解决各因子的量化标准、衡量单位不一致问题。模糊赋值的方法主要根据方案层设备对某一因子的趋向程度进行划分,包含了设备相互间的横向比较,趋向性越强,则分值越大。综合专家学者的研究,将趋向程度分为6个层次计10个刻度并进行计量赋值。为增加模型精确度,基于偏弱性和偏强性,对弱程度和强程度进行二次刻度细分。步骤为,先判断设备的趋向程度落在哪一层判断区间,再判断设备在此区间下的偏向性并赋值,若两个以上的设备分值趋向程度相同,则比较偏向性。模糊赋值规则见表2。

表2 模糊赋值规则

趋向程度	偏向性(↓:偏弱;↑:偏强)	分值
几乎无	—	0
较弱	↓	1
	↑	2
弱	↓	3
	↑	4
一般	—	5
较强	↓	6
	↑	7
强	↓	8
	↑	10

2.4 特征指标层

特征指标层是指依据智能设备的主要性能特征建立的评价指标,用于评价设备在多要素条件下的综合性能,即性价比。依据传感器的特性,选取3个维度的评价指标:性能指标、经济指标、易用性指标,包括8个二级评价因子。根据因子特征,确立经济指标因子为负向因子,性能指标、易用性指标为正向因子,指标解释见表3。实际应用中,卫星端主要以影像服务的形式出现,因此, X_{21} 、 X_{31} 以单次的服务计。进行经济指标评价时,取同类设备均值。特征指标层赋分矩阵见表4。

3 结果与分析

利用熵权法对特征层各项指标进行熵权计算,得到各项指标权重,见表5。其中指标层8个评价因子权重最大为通用性(X_{32}),最小为时效性(X_{14}),且通用性和便携性的权重占比超过1/3。分层次来看,性能指标中,设备的功能丰富性权重最大,时效性权重最低;易用性指标中,通用性权重最大,便携性权重占比较小;经济指标中,后期的使用成本权重重要高于前期的购置费用。

在一定程度上说明,在进行智能感知网设备端方案比选时,应着重作以下几点考量:①作为智能感知端,对设备的功能丰富性和智能化程度需求高;②设备要具备良好的易用性,尽可能多地满足数字孪生黄河背景下不同的业务、不同的使用场景需求;③需要重视设备后期的使用成本。

通过TOPSIS计算公式整理得到表6指标层综合评价排序。可以得出,在综合评价因素约束下,适用性排名靠前的智能设备依次为手持移动终端、无人航拍器、卫星(以服务形式)、视频监控设备,而多功能测流仪、埋深型振动与位移探测器、无人船、水下探测仪、牵引式水下机器人等在特征层综合评价中排名靠后。

表3 评价指标

指标名称	指标解释	指标因子	因子解释	属性
性能指标 X_1	评价设备的主要性能	信息质量 X_{11}	单次采集的数据所包含的信息总容量,设备成像清晰度及采集数据值的准确度	正向
		功能丰富性 X_{12}	设备自带的功能丰富度	正向
		智能程度 X_{13}	在数据采集、处理、传输、存储等环节中的智能化程度	正向
		时效性 X_{14}	数据的采集时间效率,与业务需求的实效匹配	正向
经济指标 X_2	评价设备的经济性	购置费用 X_{21}	采购时产生的单套设备/服务购置费	负向
		使用成本 X_{22}	包括布设和操作设备产生的人力、物力成本,以及设备维护成本等综合成本	负向
易用性指标 X_3	评价设备的易于使用程度	便携性 X_{31}	设备在野外作业时是否易于携带,机动性是否较好	正向
		通用性 X_{32}	设备在多个业务领域或场景中应用;设备易于理解和操作的程度	正向

表 4 特征指标层赋分矩阵

指标	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₂₁	X ₂₂	X ₃₁	X ₃₂
Y ₁₁	7	4	5	7	5	0	7	8
Y ₂₁	8	8	8	7	6	6	8	10
Y ₃₁	8	8	7	8	7	7	1	8
Y ₃₂	7	10	10	7	1	1	10	10
Y ₃₃	5	4	4	8	6	6	1	3
Y ₄₁	4	4	3	8	4	3	1	3
Y ₄₂	6	5	4	5	7	7	4	3
Y ₄₃	5	5	4	4	8	8	3	3
Y ₄₄	6	5	4	5	7	7	4	3

表 5 特征指标层权重

指标	信息熵值	信息效用值	权重/%
功能丰富性 X ₁₂	0.705	0.295	17.873
时效性 X ₁₄	0.902	0.098	5.921
信息质量 X ₁₁	0.898	0.102	6.177
智能程度 X ₁₃	0.815	0.185	11.192
通用性 X ₃₂	0.625	0.375	22.725
便携性 X ₃₁	0.757	0.243	14.700
购置费用 X ₂₁	0.839	0.161	9.764
使用成本 X ₂₂	0.808	0.192	11.648

表 6 特征指标层综合评价结果

指标	正理想解距离 D ⁺	负理想解距离 D ⁻	综合得分指数	排序
手持移动终端 Y ₃₂	0.051	0.629	0.925	1
无人航拍器 Y ₂₁	0.275	0.462	0.627	2
卫星 Y ₁₁	0.391	0.384	0.496	3
视频监控设备 Y ₃₁	0.412	0.357	0.465	4
多功能测流仪 Y ₄₁	0.565	0.224	0.284	5
埋深型振动与位移探测器 Y ₃₃	0.580	0.149	0.204	6
无人船 Y ₄₂	0.546	0.132	0.195	7
水下探测仪 Y ₄₄	0.546	0.132	0.195	7
牵引式水下机器人 Y ₄₃	0.588	0.088	0.131	8

4 结论与建议

(1)数字孪生黄河智能监测感知网设备端适用性综合评价排名依次为手持移动终端、无人航拍器、卫星(遥感影像与服务形式)、视频监控设备、多功能测流仪、埋深型振动与变形探测器、无人船、水下探测仪、牵引式水下机器人。因此,建议在构建数字孪生黄河智能监测感知体系中,应考虑扩大排名靠前设备端的建设规模和配置数量,同时,兼顾一般性和特殊性原则,不能忽视排名靠后的设备在特定业务领域和场景中发挥的作用,合理配置其规

模并强化应用。

(2)物理维度的水是“治水、管水、用水”的核心,应突出“水”维度在数字孪生黄河一体化监测体系中的位置,以水利管理各项业务为核心,深入研究“天空地水”一体化智能监测感知体系,有利于突出水利行业和水利信息化发展特色,应加强该维度智能设备端与治黄业务的结合,强化该维度智能传感器的应用和研究。

参考文献

- [1] 数字孪生流域建设技术大纲(试行)[R]. 北京:中华人民共和国水利部, 2022.
- [2] 水利业务“四预”功能基本技术要求(试行)[R]. 北京:中华人民共和国水利部, 2022.
- [3] 王美慧,唐德善,尚静. 基于组合权重-物元分析模型的水利改革效果评价[J]. 人民黄河, 2022, 44(10): 84-88, 116.
- [4] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 8-14, 20.
- [5] 陆建红,王小双,肖恒,等. 基于TOPSIS的郑州市水资源综合效益评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 49-54.
- [6] 数字孪生黄河建设规划(2022—2025)[R]. 郑州:水利部黄河水利委员会, 2022.
- [7] 李国英. 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力[J]. 中国水利, 2022(20): 1.
- [8] 李文学. 新时期黄河科研发展的思考[J]. 水利发展研究, 2021, 21(7): 75-78.
- [9] 李文学,寇怀忠. 关于建设数字孪生黄河的思考[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 27-31.
- [10] 胡士辉,刘帅,田水利,等. 黄河水文现代业务管理体系构建方案研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 11-13, 16.
- [11] 毛兴华. 水文信息化思路与总体框架设计探讨[J]. 水利信息化, 2021(5): 69-72.
- [12] 焦瑞峰,葛雷,黄翀. 基于遥感监测的黄河三角洲湿地演变分析研究[J]. 水利信息化, 2022(4): 24-27, 34.
- [13] 张学琴,徐海涛. 无人机技术在防汛减灾工作中的应用浅析[J]. 山东水利, 2022(4): 23-25.
- [14] 辛齐,左婧. 机载激光雷达在黄河下游河道测验中的应用[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 280-281.
- [15] 李广超,朱培民,郭玉松,等. 黄河河道整治工程根石声波场特征和厚度估算[J]. 人民黄河, 2015, 37(5): 45-48.
- [16] 周莉,郭玉松,崔炎锋. 黄河河道整治工程根石探测新技术研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 5-6.
- [17] 罗淑君,陈嘉靖. 河道违采事件预警系统的设计与实现[J]. 水利技术监督, 2022(1): 48-51.
- [18] 魏向阳,祝杰,朱玉坤,等. 黄河流域防汛智能化探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(3): 41-46, 72.

Research on the Applicability of Intelligent Monitoring Perception Equipment Based on Entropy Weight TOPSIS

SONG Linyue¹, PENG Zhi²

(1. Intelligent Finance and Economics College, Henan Institute of Economics and Trade, Zhengzhou 450046, China;

2. Information Center, Yellow River Water Conservancy Commission, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Under the background of the construction of the digital twin Yellow River, the applicability of various intelligent devices as the basic components of the three-dimensional monitoring and perception system of the digital twin Yellow River, namely the integrated intelligent monitoring and perception system of “outerspace- sky-ground- water”(OSSGW) was studied. Using the device end as the target layer, a feature index layer was established to evaluate the cost-effectiveness and applicability of the device. The feature index layer includes three secondary evaluation dimensions, namely performance, economy, and usability, with a total of eight index factors. Six levels of index factor assignment criteria were established, and an index layer assignment matrix was created. Then, the entropy method is used to calculate the weights of each index factor, and the TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution) method was used for comprehensive applicability calculation to obtain the scheme layer, providing decision support for equipment selection.

Keywords: Digital twin of the Yellow River; intelligent monitoring sensing network; device; entropy weight TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution); applicability