

EWM-PSOBP神经网络在抽水蓄能电站进场公路方案评价中的应用

张望舒 陈培

长江勘测规划设计研究有限责任公司, 中国·湖北 武汉 430010

摘要: 抽水蓄能电站进场公路对于前期工程建设和后期运行维护工作的顺利开展具有关键作用。本文根据抽水蓄能电站的工程布置特点, 耦合技术、经济与环境因素, 构建进场公路设计方案的评价指标体系, 并提出了一种基于熵权法 (EWM) 和粒子群优化-反向传播神经网络 (PSO-BP) 模型的评价方法, 改进了 EWM 法在数据样本和数据质量上的依赖性。以贵州省凤冈贾壳山抽水蓄能电站进场公路为例, 应用该模型对进场公路方案进行了比选。结果表明, EWM-PSOBP 神经网络模型能够准确、可靠地对进场公路设计方案进行评估, 从而有效提升了方案设计的效率和质量。

关键词: 抽水蓄能电站; 进场公路; 熵权法; 数据增强; PSO-BP 神经网络

The Application of EWM-PSOBP Neural Network in the Evaluation of Access Road Schemes for Pumped Storage Power Stations

Zhang Wangshu¹, Chen Pei¹

Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, China HuBei Wuhan 430010

Abstract: The access road of a pumped storage power station plays a crucial role in the smooth implementation of the preliminary engineering construction and the later operation and maintenance work. Based on the engineering layout characteristics of the pumped storage power station, this paper constructs an evaluation index system for the design scheme of the access road by coupling technical, economic and environmental factors, and proposes an evaluation method based on the entropy weight method (EWM) and the particle swarm optimization-back propagation neural network (PSO-BP) model, which improves the dependence of the EWM method on data samples and data quality. Taking the access road of the Jiakeshan Pumped Storage Power Station in Fenggang, Guizhou Province as an example, the model is applied to compare and select the access road schemes. The results show that the EWM-PSO-BP neural network model can accurately and reliably evaluate the design schemes of the access road, thus effectively improving the efficiency and quality of the scheme design.

Keywords: Pumped storage station; Access road; Entropy weight method; Synthetic Minority Over-sampling Technique; PSO-BP neural network.

1 研究背景

抽水蓄能电站进场公路是连接场内外交通的重要纽带, 不仅是工程机械设备、大宗物资材料和人员进入施工现场的必经之路, 在电站建成运行后, 也是运行管理人员定期进行检查、维护和修理的重要通道, 在紧急情况下, 如设备故障或自然灾害, 进场公路也是救援和维修团队快速响应抢修的关键路径。因此, 合理的公路方案设计是抽水蓄能电站施工组织中的重要环节。当前的公路方案评价方法多依赖专家咨询法 (Delphi 法)^[1]、层次分析法 (AHP)^{[2][3][4]}、熵权法 (EWM)^[5] 和多层次模糊综合评价

法 (AHP-FCE)^{[6][7]} 等传统方法, 或以基于 BP 神经网络^{[8][9]} 的评价方法等。然而, 针对抽水蓄能电站这种复杂项目, 传统方法在应对多指标间的非线性关系时存在局限性, 尤其是数据样本有限且分布不均时, 容易导致结果偏差。

为解决这些问题, 本文提出了一种基于熵权法和粒子群优化-反向传播神经网络 (EWM-PSOBP) 的评价模型。该模型通过 EWM 法初步分析进场公路方案, 并使用 SMOTE 算法扩充和平衡训练数据, 增强了模型的预测精度。PSOBP 神经网络则通过优化学习过程, 克服了传统方法在处理非线性问题和数据依赖性上的不足。通过对贵州

省风冈贾壳山抽水蓄能电站进场公路的实际应用，本研究证明了该模型在方案比选中的高效性与可靠性，为类似项目的公路方案设计提供了有力支持。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

抽水蓄能电站进场公路方案评价指标体系必须结合抽水蓄能电站的特点，综合考虑技术方案在工程建设及运行期的安全性、可达性、经济性、社会影响、环境影响以及运行效率指标。参考国内水电及公路工程的研究成果^{[10][11][12]}，并结合抽水蓄能电站的工程特性，建立了符合抽水蓄能电站工程特点的进场公路方案评价模型。模型评价总目标即为评价抽水蓄能电站进场公路各方案的总体水平，涵盖技术、经济和环境三大总体指标。评价体系遵循相关性、客观性、独立性和适应性原则，分析选取了相应的具体评价指标。技术指标包括进场公路的关键参数如公路长度、平均纵坡、与地方道路交点个数、施工工期以及进场公路与上下库连接路接入点至各施工工区的距离；经济指标考虑了建设投资、征地移民费用和年度养护费用；环境指标则包括的征地面积、占压公益林面积以和水土流失防治直接影响面积，这 11 个关键指标确保了抽水蓄能电站进场公路方案的评价的全面性和准确性，具体见图 1。

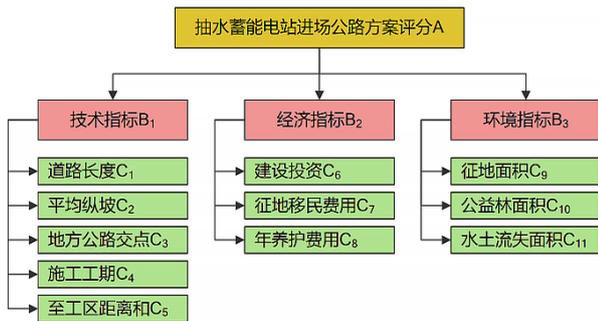


图1 抽水蓄能电站进场公路评价指标体系

2.2 方案评价方法

方案评价应首先依据实测地形图、工程量清单及公益林范围等设计资料，确定各方案的评价指标数据。然后，利用熵权法（EWM）对各方案的指标进行分类分析和权重分配。为解决类别不平衡问题，可采用 SMOTE 数据增强算法对初步分析结果进行平衡处理，将平衡后的数据作为训练集导入 PSOBP 神经网络进行训练。最终，通过训练后的模型，生成各比选方案的综合评分。

2.2.1 熵权法指标分析

熵权法（Entropy Weight Method）是一种客观赋权方法，通过衡量各指标分布的无序程度，科学合理地分配

权重，从而提高决策的客观性。通过区分正向指标和负向指标，分别对不同类型的指标进行归一化处理（式（1）~（2）），然后根据归一化矩阵 X^1 ，计算第 j 个指标第 i 个项目的数值比重 P_{ij}^1 （式（3）），进而计算各指标的信息熵 e_j （式（4）），最终得到各指标的权重 w_j （式（5））和综合评价价值 Z_i （式（6））。

$$X_{ij}^1 = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij}, \dots, X_{mj})}{\max(X_{ij}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{ij}, \dots, X_{mj})} \quad (1)$$

（正向指标）

$$X_{ij}^1 = \frac{\max(X_{ij}, \dots, X_{mj}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{ij}, \dots, X_{mj})} \quad (2)$$

（负向指标）

$$P_{ij}^1 = \frac{x_{ij}^1}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^1} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m P_{ij}^1 \ln(P_{ij}^1) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

$$Z_i = \sum_{j=1}^n w_j X_{ij} \quad (6)$$

2.2.2 PSOBP 神经网络评价模型

PSOBP 神经网络是一种结合了粒子群优化（Particle Swarm Optimization）算法和反向传播（Back Propagation）神经网络的混合神经网络模型。这种网络利用 PSO 算法优化 BP 神经网络的权重和偏置，从而可以高效地搜寻机器学习模型的最优参数^[13]。PSO 作为一种群体智能优化技术^[14]，模拟鸟群搜索行为，具有快速收敛和全局寻优能力。每个解决方案视为一个“粒子”，其位置（式（7））和速度（式（8））在解空间中根据特定公式更新。

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (7)$$

$$v_i^{(t+1)} = w \cdot v_i^{(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{best,i} - x_i^{(t)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best} - x_i^{(t)}) \quad (8)$$

式中， $v_i^{(t)}$ 为粒子 i 在时间 t 的速度； $x_i^{(t)}$ 为当前位置； $p_{best,i}$ 为粒子经历的最优位置； g_{best} 为全局最优位置； w 为惯性权重； c_1 和 c_2 为学习因子； r_1 和 r_2 为 [0,1] 区间内的随机数。

BP 神经网络是一种多层前馈网络，采用反向传播算法训练，包含前向传播和误差反向传播两部分。前向传播是输入依次通过各层至输出层，节点输出按（式（9））计算。误差反向传播为计算输出层误差，将误差通过网络反向传播，逐层调整权重和偏差，按（式（10））计算。

$$y = f\left(\sum_i (w_i \cdot x_i + b)\right) \quad (9)$$

$$\Delta w = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w}, \Delta b = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial b} \quad (10)$$

式中, w_i 为权重, x_i 为输入, b 为偏差, f 为激活函数, E 为误差函数, η 为学习率。在 PSOBP 混合神经网络中, PSO 用于优化 BP 神经网络的初始权重和偏差。具体步骤如图 2 所示。

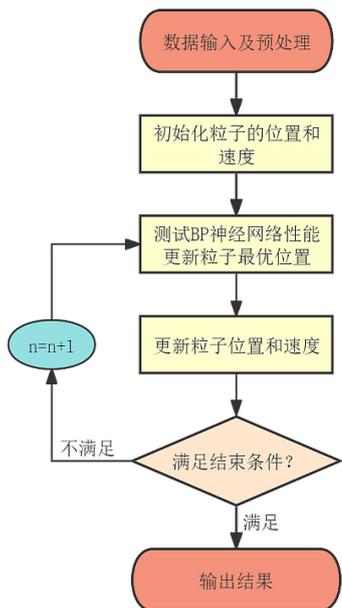


图2 PSOBP神经网络流程图

BP 神经网络中隐藏神经元数量的确定取决于问题复杂性、数据维度和性能需求。虽无固定规则,但可通过实验或经验公式(式(11))估计。常用方法包括交叉验证测试,或通过调整神经元数量,观察模型在训练集和验证集上的表现以确定最优值。

$$N_h = \sqrt{(N_i + N_o)} + a \quad (11)$$

式中, N_h 为隐藏神经元数量, N_i 和 N_o 分别为输入层和输出层神经元个数, a 为整数且 $a \in [1,10]$ 。在抽水蓄能电站进场公路方案评价中,输入层神经元为 11、输出层为 1,因此确定采用隐藏神经元数为 13 的 3 层网络模型。BP 神经网络的循环次数、学习率和误差值分别设定为 1000、0.01 和 1×10^{-6} ,隐藏层传递函数采用正切 Sigmoid 函数 tansig,输出层为线性传递函数 purelin,训练函数为自适应学习速率动量梯度下降反向传播算法 traingdx。

PSO 算法参数主要包括种群规模、惯性权重 w 、个体学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 。种群规模直接影响算法的

搜索能力和计算成本,一般取 20~50,复杂问题可增至 100 以上。惯性权重 w 用于平衡全局与局部搜索,较大的 w 值有利于全局搜索,较小的值则有助于局部搜索,一般取 0.4~0.9。学习因子 c_1 和 c_2 决定了粒子是更依赖个体经验还是群体经验,通常设置为相等,常取 1.5~2.0。因此,结合评价指标体系的复杂性和维度大小,本模型中种群数量设为 30,惯性权重设为 0.7,学习因子设为 2.0。

2.2.3 数据增强与类别平衡

由于训练集样本较少且类别不平衡,模型易偏向多数类,忽视少数类。因此,需扩充并平衡训练集。合成少数类过采样技术(SMOTE)^[15]通过生成新的少数类样本来平衡类别分布,从而提高模型对少数类特征的捕捉和预测能力。其主要参数包括邻居数 k (通常取 5),过采样比例(根据类别不平衡度设置),以及用于生成新样本的线性插值方法。新的合成样本 x_{new} 可以表示为

$$x_{new} = x_i + \alpha(y_i - x_i) \quad (12)$$

式中, α 为[0,1]范围内的随机数; x_i 为少数类样本集中的根样本; y_i 为除根样本以外的其他样本。

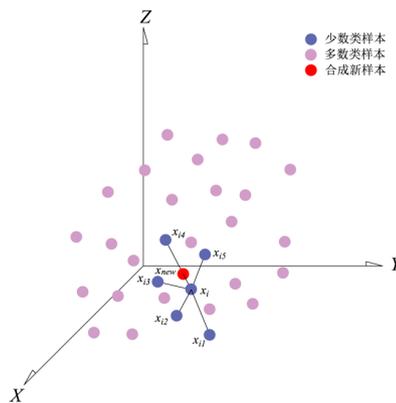


图3 SMOTE算法计算原理图

3 实例分析

3.1 项目概况

贵州凤冈贾壳山抽水蓄能电站位于遵义市凤冈县,是《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》中贵州“十五五”重点项目。电站距凤冈县 45km、遵义市 75km、贵阳市 155km,主要任务包括调峰、储能、调频等,装机容量 1400MW,采用 4 台 350MW 可逆式水泵水轮发电机组,属日调节型 I 等大(1)型工程。上、下水库高差约 632m,上库位于乌江左岸洼地,下库利用乌江思林水库。

3.2 基于 EWM 法的进场公路方案初步评价

贾壳山抽水蓄能电站的工程布局与 X356 县道大致平行,该县道为 8 米宽的双车道沥青路。由于地形限制,进

场公路只能从县道南侧引出。南侧村庄分散，多条乡村道路交错分布。为减少施工影响、节约投资并兼顾居民出行，方案初选遵循“改扩建为主、新建为辅”的原则。本文选取了 8 个具有代表性的方案进行初步分析，方案与 X356 县道及主体工程的位置关系如图 4 所示。

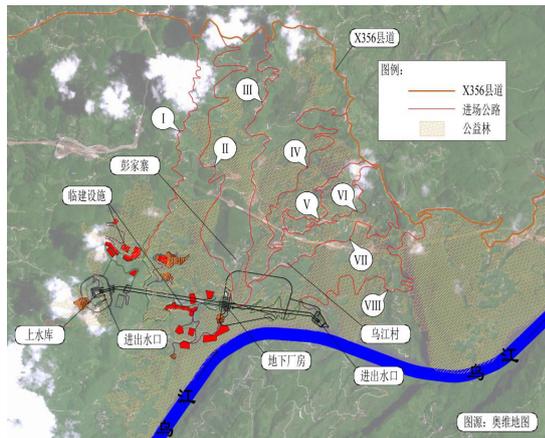


图4 各候选方案线路图

将建立好的指标矩阵通过公式 (1) ~ (2)，计算得到归一化后的指标矩阵 X' ，再经公式 (3) ~ (5)，可得各评价指标的熵权 w_j ，指标参数及权重见表 1。方案 I 线

路最短，因其与上下库连接公路相接近上水库处，路线顺直且高差小；其他方案接入点靠近下水库，高差和路线长度增加。方案 II 投资最高，因后段地形陡峻，需采用隧洞连接。其余指标与地形、地质条件和公益林分布等特性密切相关。

3.3 基于 EWM-PSOBP 的模型训练与测试

从 8 个进场公路方案中，选取前 5 个作为神经网络训练集，剩余 3 个作为测试集。训练集经 SMOTE 算法扩充平衡后，输入 EWM-PSOBP 神经网络模型（拓扑结构为 11:13:1）。训练集评价指标标准化处理后导入网络，最大训练步数设为 1000，实际仅 227 步便达到预设精度。

测试结果（见表 2~ 表 3）显示，训练后的神经网络模型对训练集和测试集的预测准确性良好，与 EWM 法的最大误差在 2% 以内，验证了 EWM-PSOBP 神经网络模型在抽水蓄能电站进场公路评估中的可行性及误差控制能力。保存模型后，评估类似项目时，只需导入相关指标即可快速得出结果。

根据 EWM-PSOBP 模型和传统熵权法的计算结果，方案 I 为最佳，方案 V 评分最低，主要因方案 I 在路线长

表1 进场公路各方案评价指标和熵权值

评价指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	km	%	个	月	km	万元	万元	万元	亩	亩	亩
I	4.8	2.5%	3.0	12.0	5.5	3360.0	2911.6	96.0	309.6	14.2	331.2
II	6.2	6.7%	2.0	17.8	6.5	8900.0	3154.2	124.0	335.4	10.3	315.9
III	6.8	6.1%	2.0	16.3	6.5	4760.0	4124.8	136.0	438.6	20.3	384.9
IV	7.0	5.9%	2.0	16.5	7.2	4900.0	4246.1	140.0	451.5	38.4	395.4
V	7.8	5.3%	4.0	18.8	7.2	5460.0	4731.3	156.0	503.1	41.3	432.9
VI	6.4	6.5%	5.0	14.3	6.5	4480.0	3882.1	128.0	412.8	55.8	324.7
VII	6.2	6.7%	2.0	14.2	6.5	4340.0	3760.8	124.0	399.9	49.0	314.2
VIII	6.4	6.5%	3.0	14.3	7.2	4480.0	3882.1	128.0	412.8	67.1	324.7
熵权值	0.06513	0.24708	0.05598	0.07824	0.16778	0.04321	0.06956	0.06513	0.06956	0.07730	0.06103

表2 训练集预测值和真实值对比表

方案编号	I	II	III	IV	V
真实值	0.96735	0.46384	0.39889	0.28782	0.16093
预测值	0.95759	0.46539	0.40077	0.29214	0.16355
相对误差/%	1.01%	-0.33%	-0.47%	-1.50%	-1.63%

表3 测试集预测值和真实值对比表

方案编号	VI	VII	VIII
真实值	0.36397	0.44278	0.31496
预测值	0.36875	0.44153	0.31476
相对误差/%	-1.31%	0.28%	0.06%

度、纵坡、工期和投资等关键指标上占优，而方案 V 在这些指标上表现不佳。总体来看，评价结果与实际情况一致，较为客观，EWM-PSOBP 模型为最终决策提供了科学可靠的依据。

4 结语

本文结合 PSO-BP 神经网络与 SMOTE 算法，改进了传统熵权法 (EWM) 对数据质量依赖性强的问题，构建了融合技术、经济、环境指标的抽水蓄能电站进场公路评价模型 (EWM-PSOBP)，为方案评估提供了全新思路。在贾壳山抽蓄项目中的应用结果表明，该模型具备较高的评价准确性和稳定性，弥补了 EWM 法在数据波动下的不足，显著提升了设计评价效率。

未来可以结合更先进的数据增强技术 (如 GAN (生成对抗网络) 等) 和自适应参数调节方法，进一步提升模型的泛化能力和自动化水平，从而在更广泛的工程评价中发挥更大作用。

参考文献:

[1] 陈浩元, 郑进保, 李兴昌. 科技书刊标准化 18 讲[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1998:5-7. (CHEN Hao-yuan, ZHENG Jin-bao, LI Xing-chang. 18 Lectures of Standardization for Sci-Tech Books and Journals)[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 1998: 5-7. (in Chinese).

[2] 胡胜刚, 左永振, 饶锡保等. 基于模型试验的河床砂砾石层基本特性研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(11): 55-58. (HU Sheng-gang, ZUO Yong-zhen, RAO Xi-bao, et al. Model Test on the Physical Property of Riverbed Sand-Gravel Layer of Dam Foundation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(11): 55-58. (in Chinese)).

[3] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005. (LIU Gui-qiu. Basic Load-bearing Behaviors of Masonry Structure[D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)).

[4] 薛果夫, 吕贵芳, 任江. 新滩滑坡研究[C]//新滩滑坡讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1988:39-41. (XUE Guo-fu, LYU Gui-fang, REN Jiang. Research on Xintan Landslide[C]//Proceedings of Discussions on Xintan Landslide. Beijing: Science Press, 1988: 39-41. (in Chinese)).

[5] FOURNEY M E. Advances in Holographic Photoelasticity[C]//American Society of Mechanical Engineers,

Applied Mechanics Division Symposium on Applications of Holography in Mechanics, University of Southern California, Los Angeles, California, August 23-25, 1971 New York: ASME, 1971:17-38.

[6] EWICK D W, BECKMAN T M, HOLY J A, et al. Ignition of HMX Using Low Energy Laser Diodes[C]//Franklin Research Center. Proceedings of the 14th Symposium on Explosives and Protechnics, Philadelphia, February 1-17, 1990: 245-248.

[7] 李迪. 承压板法变形试验分层弹模计算方法: 中国, CN02115567.4[P]. 2002-09-11. (LI Di. A Method of Calculating Layered Elastic Modulus in Deformation Test Using Bearing Plate Method: China, CN02115567.4[P]. (in Chinese)).

[8] GB50010—2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2002. (in Chinese)).

[9] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creder.com/news/20011219/200112190019.html>. (XIAO Yu. Publishing Industry Moving into the Fast Lane of Digitization. [EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. (in Chinese)).

[10] 库恩·M. 科学革命的结构[M]. 胡新和译. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2012:9-10. (KUHN T S. The Structure of Scientific Revolutions[M]. Translated by HU Xin-he. Edition 2. Beijing: Peking University Press, 2012: 9-10. (in Chinese)).

[11] 刘同宦, 郭伟, 范北林. 白鹤滩水电站泥沙推移质输移水槽模型实验报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2007. (LIU Tong-huan, GUO Wei, FAN Bei-lin. Report of Flume Experiment on Bed Load Transport for Baihetan Hydropower Station[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2007. (in Chinese)).

[12] 张加美. 水利水电工程手册[K]. 北京: 中国水利出版社, 1998. (ZHANG Jia-mei. Handbook of Water Conservancy and Hydropower Projects[K]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese)).

[13] 周力峰. 以信息化应用技术促进管理现代化[G]//科技治江成就辉煌. 武汉: 长江出版社, 2011:257-266. (ZHOU Li-feng. Promoting Modernization by Information Technology[G]. Harnessing the River with Science and

Technology. Wuhan: Changjiang Press, 2011: 257-266. (in Chinese).

[14] 谢希德. 创造学习的新思路[N]. 人民日报, 1998-12-25(10). (XIE Xi-de. New Thinking for Creative Learning[N]. People's Daily, 1998-12-25(10). (in Chinese)).

[15] KEEFER D K. Statistical Analysis of an Earthquake-induced Landslide Distribution: The 1989 Loma Prieta,

California Event[J]. Engineering Geology, 2000(5/6): 231-249.

基金项目: 长江设计集团自主科研项目 (CX2023 S027)。

作者简介: 张望舒 (1993-), 男, 重庆梁平人, 工程师, 硕士, 研究方向: 水利水电工程施工组织设计相关研究工作。