

面向系统层级的城市轨道交通供电设备健康状态评估研究

张明睿¹ 施伟峰²

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 201620, 上海;

2. 上海地铁维护保障有限公司供电分公司, 200070, 上海//第一作者, 本科生)

摘 要 基于可拓云模型,研究面向系统层级的城市轨道交通供电系统健康状态评估。按照城市轨道交通供电设备所实现的功能划分为多个供电子系统,将各供电设备的健康状态划分为健康、亚健康、病态、严重病态 4 个等级。以接触网为例,提出 4 个评估指标,并得到各评估指标、各健康等级的数域区间,确定了供电智能运维系统相对健康度与标准可拓云的关联度。各评估指标的权重采用专家层次分析法和因子分析法相结合得出,并利用反馈神经网络算法调整。将动态组合权重与可拓云模型结合运用,可降低城市轨道交通供电系统健康状态等级划分时的不确定程度。

关键词 城市轨道交通;可拓云模型;供电设备;供电智能运维系统;健康状态评估

中图分类号 U231+.8; U223.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.035

Research on Health Status Assessment of Urban Rail Transit Power Supply Equipment Oriented to System Level

ZHANG Mingrui, SHI Weifeng

Abstract Based on extension cloud, research is carried out on system-level-oriented health status assessment of urban rail transit power supply system. Multiple power supply subsystems are divided for the different functionalities. The health status of each power supply equipment is assessed according to the 4 levels of healthy, sub-healthy, unhealthy, seriously unhealthy. Taking catenary as example, 4 evaluation factors are proposed, and the interval of each evaluation index and health status is obtained, and relation between power supply intelligent operation and maintenance system relative healthy status and standard extensive cloud is identified. The weight of each evaluation index adopts AHP and factor analysis for calculation and is adjusted by recurrent neural network algorithm. By combining dynamic combination weights and extension cloud, the degree of uncertainty in the classification of urban rail transit power supply system health status is lowered.

Key words urban rail transit; extension cloud model; power supply equipment; power supply intelligent operation and maintenance system; health status evaluation

First-author's address College of Information Science and Technology, Donghua University, 201620, Shanghai, China

上海地铁维护保障有限公司供电分公司在 2019 年建立了供电智能运维系统,其运用设备的 PHM(预测健康管理)模型理论,可实现列车运行状态数据的采集(包括直接和间接的状态数据)、设备全生命周期管理和生产业务全流程管控等功能,其健康状态评估主要以供电设备层为评估对象。该系统已运行了两年,提高了上海轨道交通供电设备的维护效率和运维质量。然而,该系统在实践过程中也发现了一些新的问题,如系统覆盖设备范围不足、采集的设备层级直接运行状态数据不充分、专家分析和系统智能诊断结果不一致等^[1]。

为此,本文对 2021 年上半年上海轨道交通线网故障维修数据和供电智能运维系统监测数据进行了梳理,建立了基于组合权重赋值与反馈神经网络纠正的系统健康评估可拓云模型,发挥专家经验法和供电智能运维系统自动评判两方面的优势来确定各个状态指标的综合权重,用以进一步完善和优化面向系统层级的城市轨道交通供电设备健康状态评估方法。

1 供电系统设备健康状态的评估对象和指标

供电智能运维系统采集的状态数据包含智能感知终端数据、红外监测数据、局部放电检测数据、可视化接地数据、能耗数据、杂散电流数据、温湿度数据和中央综合监控系统的遥测数据等,这些数据

大部分只反应系统层级而非设备层级的供电运行状态。为此,需要对供电设备按一定的规则划分为多个子系统。从可实现的系统功能来进行层级划分,每一个子系统可表现为实现一定功能的组合在一起的设备群,如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通供电智能运维系统的类别及其对应的子系统设备群

Tab.1 Urban rail transit power supply intelligent operation and maintenance system categories and subsystem equipment group	
系统类别	子系统设备群
主变电所	变压器系统、隔离开关、接地系统、避雷系统、电缆及槽桥等
牵引变电所	变压器系统、整流器组、上网隔离、钢轨限位装置、单向导通装置等
降压变电所	变压器系统、电源、钢轨限位装置等
接触网	隧道接触网、地面主线接触网、停车场接触网等
电力监控系统	控制中心设施设备、变电站电脑工作站、通信光缆、复示系统等
能耗监控系统	电能量采集器、交换机、串口服务器、光电转换器、能耗管理服务器、能耗管理工作站等
杂散电流防护	迷流测试箱、参比电极、传感器等
环控配电	通风空调配电、给排水配电等
场段配电系统	场段动力配电、场段动力控制、场段照明配电等
车站与区间动力照明	车站动力控制、车站动力配电、车站照明配电、区间动力配电、区间照明配电等
接触轨	隧道部分接触轨、地面主线接触轨等
电力电缆	主变电缆、变压器电缆、环网电缆、负载电缆、上网电缆、回流电缆等

供电智能运维系统依据供电专业的工作特点,对不同类别设备的不同指标进行监测。其中:牵引供电系统的监测指标主要包括可靠度、故障率、修复率、平均无故障运行时间、平均修复时间、可用度等;接触网的监测指标主要包括接触线拉出值、接触线导高、硬点、弓网压力、坡度、弓网离线时间等。

2 供电智能运维系统健康状态评估模型

供电智能运维系统健康状态评估方法有大数据分析法、人工神经网络分析法、层次分析法、可拓云分析法、基于贝叶斯网络法等。考虑到供电系统故障的发生具有较大的随机性,因此采用指标综合权重与可拓云理论相结合的方法来构建其设备的

健康状态评估模型,并综合利用层次分析法和因子分析法来确定其组合权重。

可拓云模型是以基元理论和可拓集合理论为基础、以可拓逻辑为支柱与理论框架的特有可拓方法,是一种有效解决信息的模糊性和随机性、实现定性和定量信息间不确定性转换的模型。正态云模型用 (E_x, E_n, H_e) 表示,其中: E_x 表示云的分布中心; E_n 表示熵,用于度量属性概念的不确定性; H_e 是超熵,用于度量熵的不确定性、反映云滴的离散程度^[2]。

物元是在可拓学中描述研究对象的基本元,是由对象名称 N 、对象特征 C 以及与 C 对应的特征量值 v 构成的有序三元组,可以表示为 $R = (N, C, v)$ 。利用高斯云模型代替式中的 v 值,可以得到可拓云模型如下:

$$R_{cl} = \begin{bmatrix} N & C1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ N & C2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & Cr & (E_{xr}, E_{nr}, H_{er}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

R_{cl} ——健康度等级物元;

C_r ——评估指标;

(E_{xk}, E_{nk}, E_{ek}) ——云量值,是 C_r 对 R_{cl} 的云描述;

r ——自然数序列。

2.1 设备健康度等级计算

采用可拓云模型来计算供电智能运维系统设备的健康度等级。首先确定设备健康状态等级的界限,再分析该系统的相对健康度与标准可拓云的关联度,最后得到该系统设备的健康度。

2.1.1 确定设备健康状态等级的界限

系统健康状态是一个相对的概念,得到不同系统的健康状态后,可以进行相互对比,为更新系统和维护计划的安排提供定量依据。

根据运营生产实际及专家评判的意见,对供电智能运维系统的健康状态进行等级划分,分为健康、亚健康、病态、严重病态 4 个等级,分别表述为等级 4、等级 3、等级 2、等级 1,并用 $[0, 100]$ 数值区间来划分各个评估指标不同等级的数值范围。针对接触网系统的特点,选取硬点、接触点导高、坡度、接触线拉出值 4 个指标作为接触网系统健康度的评估指标,各指标所对应的不同等级的数域范围如表

2 所示。

表 2 接触网部分指标的健康度等级划分
Tab.2 Health status level of some indicators of catenary

评估指标	各健康度等级的数域范围			
	等级 4(健康)	等级 3(亚健康)	等级 2(病态)	等级 1(严重病态)
硬点	90 ~ 100	75 ~ <90	55 ~ <75	0 ~ <55
接触线导高	85 ~ 100	60 ~ <85	45 ~ <60	0 ~ <45
坡度	75 ~ 100	60 ~ <75	40 ~ <60	0 ~ <40
接触线拉出值	90 ~ 100	70 ~ <90	50 ~ <70	0 ~ <50

将表 2 各等级的数域范围作为一个双约束空间 $H_e = s$ (4)
[C_{\min}, C_{\max}], 则云模型的 E_x, E_n, H_e 可由界限数值与 式中:

$$E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \tag{2}$$

$$E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \tag{3}$$

C_{\max} ——该等级数域范围的上限;
 C_{\min} ——该等级数域范围的下限;
 s ——常数,可结合实际情况进行调整。
经式(2)—(4)转换计算后得到的结果如表 3
所示,其中,4 个云模型分别对应上述 4 个等级。

表 3 接触网部分指标健康度等级的云模型
Tab.3 Cloud model of health status level of some indicators of catenary

指标	云模型(等级 4)	云模型(等级 3)	云模型(等级 2)	云模型(等级 1)
硬点	(95.00,1.67,0.50)	(82.50,2.50,0.40)	(65.00,3.33,0.40)	(27.50,9.17,0.50)
接触线导高	(92.50,2.50,0.30)	(72.50,4.17,0.50)	(52.50,2.50,0.50)	(22.50,7.50,0.70)
坡度	(87.50,4.170,0.10)	(67.50,2.50,0.50)	(50.00,3.33,0.20)	(20.00,6.67,0.40)
接触线拉出值	(95.00,1.67,0.40)	(80.00,3.33,0.30)	(60.00,3.33,0.20)	(25.00,8.33,0.80)

2.1.2 确定供电智能运维系统相对健康度与标准
可拓云的关联度

由于可拓云模型的引入,确定性数值的物元与
云模型表示的物元之间的关联度用该数值相对于
云模型的确度表示。根据供电智能运维系统工
作的特点,将待评估的各项指标值 x_{ij} 作为一个云滴
(x_{ij}, k_{ij}), k_{ij} 为云关联度,则 k_{ij} 的计算式如下^[3]:

$$k_{ij} = \exp\left[-\frac{(x_{ij} - E_x)^2}{2(E_{r,n})^2}\right] \tag{5}$$

式中:

- i ——第 i 个评价指标;
- j ——第 j 个评估等级;
- $E_{r,n}$ ——期望值为 E_n 、标准差为 H_e 的正态随
机数。

本文的评估等级有 4 个,则 $j = 4$ 。由 k_{ij} 可得到
综合评判矩阵 Z , 即:

$$Z = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & k_{m3} & k_{m4} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:
 m ——评价指标的总个数。

2.1.3 确定系统健康度等级

设各评估指标 i 的权重为 ω_i , 综合权重向量为
 $W = [\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_i]$, 通过向量 W 和矩阵 Z 相乘得
到综合评判向量 $T = WZ$ 。通过加权平均法得到综
合评判分数:

$$D = \frac{\sum_{j=1}^4 T_j d_j}{\sum_{j=1}^4 T_j} \tag{7}$$

式中:
 D ——综合评判分数;
 T_j ——向量 T 的最大分值;

d_q ——等级 j 对应的分值。
表 4 给出 D 与健康等级的对应关系。

表 4 综合评判分数与健康度等级对应表
Tab. 4 Correspondence between comprehensive evaluation scores and health status levels

综合评判分数取值范围	健康度等级
$0 < D \leq 1$	严重病态
$1 < D \leq 2$	病态
$2 < D \leq 3$	亚健康
$D > 3$	健康

2.2 各个评估指标的组合权重

针对城市轨道交通供电系统复杂的状况、较低的相关数据准确性,单一的方法很难确定权重值,且主观赋权与客观赋权均有一定的局限性。基于层次分析法的主观权重易受业内专家专业水平的影响,基于因子分析法的客观权重易受数据质量的影响。因此,为有效规避两者的不足,本文采用主观权重与客观权重相结合的方法。文中选用以下动态权重公式确定最终权重结果:

$$\omega_i = \mu \varepsilon_i + (1 - \mu) \rho_i \tag{8}$$

式中:

- ω_i ——第 i 个指标的最终组合权重;
- μ ——比例系数;
- ε_i ——利用层次分析法得到的主观权重;
- ρ_i ——利用因子分析法得到的客观权重。

其中, $\mu = 0$ 为仅采取因子分析法计算得到的客观权重; $\mu = 1$ 表示仅采取层次分析法计算得到的主观权重。本文采用反馈神经网络的方法确定 μ 的取值,具体步骤如下:① 随机初始化神经网络权重的 μ ;② 将第一组计算权重与实际样本提供给神经网络,正向传播以获得输出值;③ 计算下一层的误差与权重和输出值的梯度乘积获得当前层输出值对误差的梯度;④ 根据误差值仿照梯度下降对权重进行更新;⑤ 对于训练集中的每个输入值,重复步骤②到④;⑥ 当整个训练集训练达到规定次数后,通过神经网络输出,本文就得到了调整后的动态权重^[4]。

2.2.1 利用层次分析法计算主观权重

层次分析法利用对复杂的多目标决策进行层次化、规范化处理,通过两两比较确定其重要程度,然后逐层检验比较结果的合理性,以提供具有可信度的分析结果。本文采用层次分析法对各指标的

影响进行分析,可得到主观的权重系数^[5]。
首先设有 n 项指标需要比较其重要性,行业内专家按照一定规则对这些指标的重要程度进行打分,通过两两比较的方式构建出判断矩阵 A ,如式(9)所示。其中, a_{is} 为第 i 项指标相对于第 s 项指标的重要程度。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & \cdots & a_{pm} \end{bmatrix} = (a_{is})_{mm} \tag{9}$$

其次,计算在该目标下各状态指标的近似权重 ε_i ,并对得到的权重进行一致性检验。

2.2.2 利用因子分析法计算客观权重

因子分析法是统计工作中常用的方法之一,其目的是从变量群中提取共性因子,描述隐藏在一组测量到的变量中的一些更基本的,但又无法直接测量到的隐性变量。在对系统的健康评估中,无法直接观测各个状态指标如何影响最终的评估结果,只能观测到各个指标的综合影响。因此,采用因子分析法可以将状态指标对健康影响的重要程度进行区分,作为客观权重应用到最终的评价中。

具体分析步骤如下:① 输入原始数据 U_{fy} ,计算其样本均值和方差,进行标准化计算;② 求样本相关系数矩阵 $R_{co} = (r_{a,b})_{yy}$, $r_{a,b}$ 为原始数据矩阵第 a 列与第 b 列的相关系数;③ 求相关系数矩阵的特征根 $\lambda_i (\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_p > 0) \lambda_a (\lambda_a > 0)$ 和相应的标准正交特征向量 I_a ;④ 确定公因子数 m_p 并计算公共因子的共性方差 $h_{2,a}$;⑤ 对负荷矩阵进行旋转,以更好地解释公共因子;⑥ 对公共因子作出专业性解释。

采用主成分法对步骤④中确定的公因子进行因子提取,计算式为:

$$t_{ae} = \sqrt{\lambda_e} l_{ea}, a = 1, 2, \cdots, y \tag{10}$$

$$g_{2,e} = \lambda_e = \sum_{i=1}^y t_{ie}^2, e = 1, 2, \cdots, m_p \tag{11}$$

式中:

- e ——第 e 个公共因子;
- t_{ae} ——第 e 个公共因子在第 a 列评估指标下的因子负荷;
- t_{ie} ——第 e 个公共因子的负荷系数;
- g_{ea} —— e 因子对第 a 列健康评估指标的贡献度;
- l_{ea} ——单位转换向量;
- λ_e —— e 因子对应的特征值。

将各状态指标进行横向比较,根据其贡献度的大小确定客观权重,其计算公式如式(12)。

$$\rho_i = g_{2,e} / \sum_{i=1}^m g_{2,e} \tag{12}$$

3 算例分析

下面将以某城市轨道交通线路接触网系统的健康状态评估为例,对上述算法进行模型验证。

表 5 案例接触网健康状态的主观权重
Tab.5 Subjective weighting of case catenary health status

评估指标	专家对主观权重的打分值						ε_i
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	
硬点	0.134 3	0.147 3	0.143 4	0.133 2	0.137 5	0.144 8	65
接触线导高	0.279 6	0.384 7	0.277 4	0.281 3	0.343 3	0.279 4	41
坡度	0.305 3	0.148 6	0.299 5	0.311 4	0.186 5	0.299 3	32
接触线拉出值	0.280 9	0.319 4	0.279 7	0.274 1	0.332 7	0.276 5	90

表 6 案例接触网动态检测数据

评估指标	2021-11-14 的检测数据	2021-11-15 的监测数据
硬点/g	45.0	48.0
接触线导高/mm	6 537.0	6 450.0
坡度/‰	2.5	1.5
接触线拉出值/mm	405.0	412.0

表 7 案例接触网健康状态客观权重

评估指标	ρ_h
硬点	0.139 7
接触线导高	0.313 5
坡度	0.271 4
接触线拉出值	0.275 4

3.3 μ 的调整及计算结果

根据经验分析,组合权重将先全部采用专家评价和规章准则,即 $\mu=1$,可以得到 $\omega_h=\varepsilon_h$ 。

将各个指标权重算出综合权重向量 W ,将指标值代入式(5),可以得到各个指标的云关联度 k_{ij} ,进而得到综合评判矩阵 Z 。将 W 与 Z 相乘,可得到综合评判向量 T 。并将 T 代入式(7),可计算得到 $D=0.792\ 1$ 。因为 $D<1$,根据表 4 可以判定该接触网的健康等级为等级 1、状态为严重病态。

3.1 主观权重 ε_h 的求解

利用层次分析法,邀请某公司 6 位专家,对接触网评估指标中的 4 个指标进行打分,计算各状态指标的主观权重。各指标值和主观权重如表 5 所示。

3.2 客观权重 ρ_h 的求解

表 6 是该接触网 2021-11-14 和 2021-11-15 2 d 检测得到的相关数据。先采用无量纲化公式将所有数据进行无量纲处理,再采用因子分析法求出各指标的客观权重,如表 7 所示。

与实际情况相对比后,进一步调整参数 μ ,采用反馈神经网络法进行权重的更新,采用类似梯度下降的更新公式,经过 100 轮反馈学习后得到 $\mu=0.981$ 。此时对应的 $D=0.881\ 4$ 。根据该计算结果,该接触网的健康状态依旧为严重病态。经若干次学习调整参数 μ 所得的计算结果表明,该结果是可信的。

3.4 通过云关联度验证结果

根据评估结果,由式(5)、式(6)建立接触网健康状态云关联度关系,如表 8 所示。由表 8 可以得到 T 的最大值为 0.296 87,属于严重病态,与评估结果一致。由表中不同指标云关联度最大分值可以看出,该接触网急需检查整修的是接触线导高和坡度。

表 8 接触网健康状态评估云关联度 k_{ij}
Tab.8 Health status assessment cloud relevance of catenary

评估指标	等级 4 (健康)	等级 3 (亚健康)	等级 2 (病态)	等级 1 (严重病态)
硬点	0.001 04	0.027 04	0	0
接触线导高	0	0	0.000 03	0.442 75
坡度	0	0	0.02 142	0.669 33
接触线拉出值	0.884 25	0	0	0
T	0.263 76	0.00 378	0.004 84	0.296 87

(下转第 179 页)

连续刚构桥的设计方案进行比选,并对该桥的关键部件施工技术及 BIM 技术在建造过程中的应用进行研究,得到结论如下:

1) 繁华城区内的桥梁建造受施工空间限制、建/构筑物干扰及景观协调标准等因素的影响,应尽可能减少交通疏解及拆迁改造的工作量,大倾角、大跨径的 Y 型连续构桥梁是具有可行性的设计方案之一。

2) 在 150 m 大跨径 Y 型连续刚构桥梁施工过程中,大张角 Y 型墩的施工质量控制是整个桥梁建设成败的关键,Y 构施工中混凝土浇筑顺序、Y 型墩受力及变形控制是需要重点关注的环节。

3) BIM 技术可应用于大型复杂桥梁建造的干扰分析、支架验算、工程量分析及施工场地布置中。通过应用 BIM 技术,可开展施工的精细化管理,规避施工风险,提高施工效率。本工程 BIM 技术的应用可为后续类似大型复杂桥梁建设提供参考。

参考文献

- [1] 付小军. 商合杭高铁淮河特大桥总体设计研究[J]. 中国铁路, 2020(6):52.
FU Xiaojun. Research on overall design of Huai River super long bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou High Speed Railway[J]. China Railway, 2020(6):52.

(上接第 174 页)

4 结语

本文提出了基于组合权重赋值与反馈神经网络纠正的系统健康评估可拓云模型。基于可拓云模型,结合层次分析、因子分析和反馈神经网络分析法来确定模型的权重,综合评判面向系统层级的城市轨道交通供电智能运维系统的健康状态。通过对电力设备的试验评估,降低了健康度等级划分时的不确定度,验证了该模型预测的结果与专家预测的结果的一致性。本文所建立的模型可以作为供电设备故障的预测和诊断的辅助工具。

参考文献

- [1] 严俊. 基于数据驱动轨道交通供电设备状态评估的研究及应用[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊1):3.
YAN Jun. Research and application of data-driven power supply equipment status assessment for rail transit[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1):3.
- [2] 许自强. 数据驱动电力变压器智能化健康管理关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2020.

- [2] 王安琪,姜恒昌,张光明,等. 高速铁路大跨度连续刚构梁桥预拱度设置对无砟轨道的影响研究[J]. 铁道标准设计,2020(4):73.
WANG Anqi, JIANG Hengchang, ZHANG Guangming, et al. Study of influences of pre-camber setting of long-span continuous rigid frame beam-bridge on ballastless track of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2020(4):73.
- [3] 叶琳. 单拱肋连续梁-拱组合桥的结构设计[J]. 城市轨道交通研究,2021(8):51.
YE Lin. Structure design of single arch rib continuous beam-arch composite bridge[J]. Urban Mass Transit, 2021(8):51.
- [4] 叶刘克,李子奇,王力. 大跨度连续刚构桥波形钢板腹板内衬混凝土承剪比研究[J]. 铁道建筑,2019(5):11.
YE Liuke, LI Ziqi, WANG Li. Study on shear ratio of concrete lining with corrugated steel webs in large span continuous rigid frame bridge[J]. Railway Engineering, 2019(5):11.
- [5] 文强. 高速铁路无砟轨道大跨组合结构桥梁应用研究[J]. 铁道工程学报,2019(2):54.
WEN Qiang. Application research on the long-span composite structure bridge on high-speed railway ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(2):54.
- [6] 胡方健. 桥梁 BIM 模型设计阶段建模方法研究[J]. 中国市政工程,2018(5):56.
HU Fangjian. Research on modeling method to bridge BIM model in design phase[J]. China Municipal Engineering, 2018(5):56.

(收稿日期:2020-07-06)

XU Ziqiang. Research on key technologies of data-driven intelligent health management for power transformer[D]. Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2020.

- [3] 高松,滕克难,陈健,等. 基于 MCM-可拓云的装备体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报,2020(2):20.
GAO Song, TENG Kenan, CHEN Jian, et al. Effectiveness evaluation of equipment system of system based on MCM-extension cloud[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020(2):20.
- [4] 李晓峰,徐玖平,王荫清,等. BP 神经网络自适应学习算法的建立及其应用[J]. 系统工程理论与实践,2004(5):1.
LI Xiaofeng, XU Jiuping, WANG Yinqing, et al. The establishment of self-adapting algorithm of BP neural network and its application[J]. System Engineering Theory and Practice, 2004(5):1.
- [5] 马农乐,赵中极. 基于层次分析法及其改进对确定权重系数的分析[J]. 水利科技与经济,2006(11):3.
MA Nongle, ZHAO Zhongji. The analysis of calculating the proportion based on analytic hierarchy process and the improved AHP[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006(11):3.

(收稿日期:2022-01-18)