

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221577

一种电力光传输网运行状态评估方法

姜万昌^{1,2}, 黄松^{1,2}, 郭健³

(1. 东北电力大学计算机学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学吉林省智能电网信息技术工程实验室, 吉林 吉林 132012; 3. 吉电集团有限公司丰满配电网施工处, 吉林 吉林 132000)

摘要: 针对现有电力光传输网评估方法考虑方面单一、主观性占比多等问题, 提出了一种电力光传输网运行状态评估方法。首先从设备、光缆和系统3个维度选取指标, 从网络规模、运行质量和管理因素3个方面建立评估指标体系, 设计重叠信息分析法对评估指标体系进行优化。其次改进基于区间模糊层次分析法和熵权法的主客观组合权重赋值法计算指标权重。然后设计基于模糊综合评价法、效用函数法、可拓耦合评价法以及组合评估方法的运行状态评估算法评估光传输网运行状态。通过真实实例分析, 验证了该方法能够更加全面、客观地评估光传输网的运行状态, 辨识电力光传输网薄弱环节, 为运维、检修和规划建设提供参考。

关键词: 电力光传输网; 重叠信息分析法; 区间模糊层次分析法; 主客观组合权重; 运行状态评估

A running state evaluation method for a power optical transmission network

JIANG Wanchang^{1,2}, HUANG Song^{1,2}, GUO Jian³

(1. School of Computer Science, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Jilin Engineering Laboratory for Smart Grid Information Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Fengman Power Distribution Construction Office of Jidian Group Co., Ltd., Jilin 132000, China)

Abstract: There are problems of single aspect and subjective proportion in existing power optical transmission network evaluation methods. Thus this paper proposes a power optical transmission network running state evaluation method. First, the indices are selected from the three dimensions of equipment, cable and system, and an evaluation index system is established from the three aspects of network scale, running quality and management factors. The overlapping information analysis method is designed to optimize the evaluation index system. Second, the subjective and objective combination weight assignment method based on an interval fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method is improved to calculate the index weight. Then a running state evaluation algorithm based on a fuzzy comprehensive evaluation, utility function, extension coupling evaluation and combination evaluation methods is designed to evaluate the running state of the network. Through the analysis of real examples, it is verified that this method can evaluate the running state of an optical transmission network more comprehensively and objectively, identify the weak links, and provide a reference for operation, maintenance and planning construction.

This work is supported by the Science and Technology Development Project of Jilin Province (No. 20210203044SF).

Key words: power optical transmission network; overlapping information analysis; interval fuzzy analytic hierarchy process; subjective-objective combination weight; running state evaluation

0 引言

电力通信网负责指挥调度、行政管理和自动化信息传输等业务, 是电力系统有效运行的支撑与保

障^[1-2]。电力通信传输网由各种通信设备、光缆线路和各种异构网络交织而成, 是一个庞大复杂的网络, 属于多技术多层次网络^[3-4]。建设可靠的通信传输网络已成为保证电力行业安全可靠的重要研究课题^[5-6]。现有对于电力光传输网的评估研究主要集中在两个方面: 一类基于网络运行, 提出各类电力光传输网可靠性评估指标^[7]; 另一类方法主要基于设

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助(20210203044SF); 吉林省教育厅科学技术研究项目资助(JJKH20220111KJ)

备、光缆的角度,对电力光传输网进行风险评估^[8],从网络业务运行安全方面考虑,从业务通道的角度分析网络可靠性。

现有的电力光传输网络一方面缺乏长期统一的规划^[9],早期摊饼式粗放型的网络架构稳定性和安全性较差、逻辑系统结构复杂、管理难度大^[10-11],一旦核心节点出现故障,处理起来相对较困难^[12]。存在网络建设不均衡、保护子网繁乱无规划的问题^[13],不同类型的业务、时隙分配缺乏统一的规划,占用大量空余带宽资源、利用率较低^[14]。另一方面,现有电力光传输网一旦发生故障就会面临失去监控、无法调度的运行风险^[15]。由此可见,对电力光传输网的网络规模和管理因素进行评估^[16]也很重要。基于评估目标构建网络规模、运行质量、管理因素评估指标体系,通过综合评估方法来反映电力光传输网的状况具有特别而重要的意义。

本文从线路、设备、系统3个维度选取指标,运用层次分析法从网络规模、运行质量和管理因素3个方面构建电力光传输网运行状态评估指标体系,并设计重叠信息分析法对指标体系进行优化。其次,采用区间模糊层次分析法计算指标主观权重,采用熵权法计算指标客观权重,采用主客观组合权重赋值法计算指标组合权重。然后,根据准则层里不同方面的指标特征确定相应的评估方法,计算网络规模、运行质量以及管理因素评估结果,并采用组合评估方法计算电力光传输网运行状态评估结果。

1 评估指标体系的建立

首先,采用层次分析法确定电力光传输网运行状态评估指标体系的四层结构。其次,参照国家电网导则,从设备、光缆和系统3个维度选取指标并确定三级指标以及构成三级指标的四级指标的计算公式。然后,从网络规模、运行质量和管理因素3个方面初步建立指标体系。最后,设计重叠信息分析法对评估指标体系进行优化。

1.1 初步构建运行状态评估指标体系

本文按照AHP的层次结构将电力光传输网运行状态评估指标体系分为四层,目标层位于顶层,表示网络的运行状态评估;准则层反映目标特性,由网络规模、运行质量和管理因素构成;索引层表示每个详细指标的索引;因子层位于底层,表示每个详细指标索引的元素。

本文从线路、设备、系统3个维度选取指标。目前,已有的电力光传输网络指标来源于现有的电力通信规范、月度报告以及国家电网公司在应用中的指标^[17-18],如光缆总长度、光缆年增长率等。在

对各个维度进行不断细分的过程中,加入市供电公司关注方向的指标,如备品备件存量比例等。在此基础上,设计一些反映电力光传输网络运行状况的复合指标^[19],如网络连通性等。

电力光传输网发展的目标是建设成具有规模、设备水平高、覆盖面更广、承载能力更强、支撑基础更强的网络^[20-21]。从光纤规模、设备规模和业务规模3个方面选取网络规模评估指标,如图1所示。

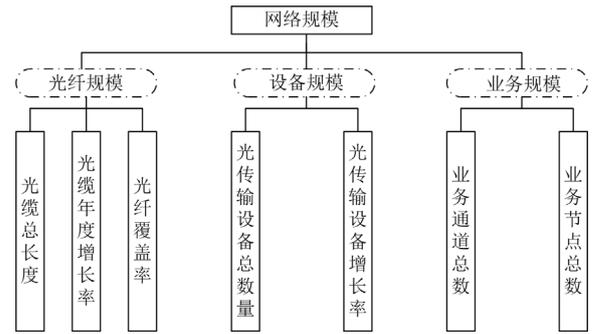


图1 网络规模评估指标

Fig. 1 Network size evaluation index

从网络结构、安全运行水平、资源利用状况和网络故障4个方面选取运行质量评估指标,如图2所示。

国家电网导则对于电力通信网的管理主要分为通信运维管理和专业化管理。通信运维管理主要从电缆和设备缺陷消除以及故障修复两个方面进行。通信专业管理主要考虑技术人员的专业水平和任务完成情况。管理因素评估指标如图3所示。

为便于后文计算,对二级指标和三级指标分别进行编号:二级指标为 $B_l(l=1,2,3)$,其中,网络规模为 B_1 ,运行质量为 B_2 ,管理因素为 B_3 ;三级指标为 $X_{i_l}(i_l=1,2,\dots,n_l)$,其中,网络规模下的光缆总长度等三级指标分别为 $\{X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}\}$,运行质量下的网络连通度等三级指标分别为 $\{X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n_2}\}$,管理因素下的光缆缺陷消除及时率等三级指标分别为 $\{X_{31}, X_{32}, \dots, X_{3n_3}\}$ 。

1.2 优化运行状态评估指标体系

为了进一步优化指标体系,本文设计重叠信息分析法^[22]删除重叠信息较多的指标。对于网络规模下的每个三级指标,首先明确网络规模下三级指标 X_{i_l} 的定义,分析构成网络规模下三级指标 X_{i_l} 的四级指标 $F_{i_l}^{j_h}$,三级指标 X_{i_l} 的因子构成计算如式(1)所示。

$$X_{i_l} = \alpha_{i_l 1} F_{i_l}^1 + \dots + \alpha_{i_l j_h} F_{i_l}^{j_h} + \mu_{i_l} \quad (1)$$

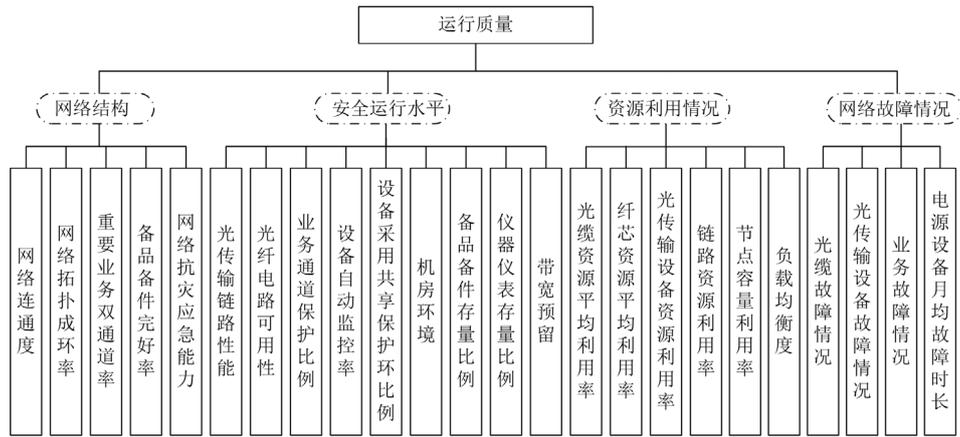


图2 运行质量评估指标

Fig. 2 Operation quality evaluation index

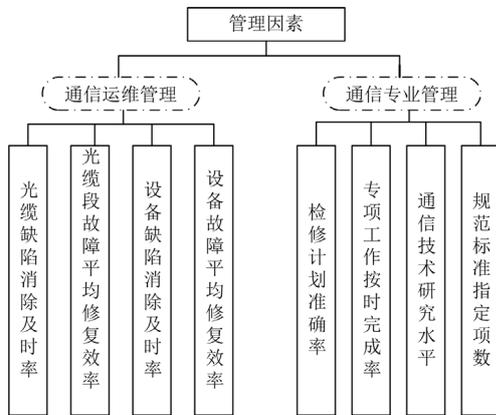


图3 管理因素评估指标

Fig. 3 Management factor evaluation index

式中： $F_{i_1}^{j_1}$ 表示网络规模下第 i_1 个三级指标中第 j_1 个因子 ($j_1 = 1, 2, \dots, m_{i_1}$, m_{i_1} 为第 i_1 个三级指标对应的因子个数)； α_{i_1, j_1} 表示第 j_1 个因子在网络规模下第 i_1 个指标所有四级指标 $F_{i_1}^{j_1}$ 中所占的比重； μ_{i_1} 为仅影响网络规模下的三级指标 X_{i_1} 的特殊因子。

然后，对网络规模下第 i_1 个三级指标 X_{i_1} 和第 k_1 个三级指标 X_{k_1} ($k_1 = 1, 2, \dots, n_1$) 进行比较，得到信息重叠矩阵中的元素值进而构建信息重叠矩阵，网络规模下三级指标间比较计算如式(2)所示。

$$\frac{X_{i_1}}{X_{k_1}} = \frac{\alpha_{i_1, 1} F_{i_1}^1 + \dots + \alpha_{i_1, j_1} F_{i_1}^{j_1} + \mu_{i_1}}{\alpha_{k_1, 1} F_{k_1}^1 + \dots + \alpha_{k_1, j_1} F_{k_1}^{j_1} + \mu_{k_1}} \quad (2)$$

式中，若存在 $F_{i_1}^{j_1} = F_{k_1}^{j_1}$ 的重复公因子，则将分子中的因子 $\alpha_{i_1, j_1} F_{i_1}^{j_1}$ 和分母中的因子 $\alpha_{k_1, j_1} F_{k_1}^{j_1}$ 同时去掉，去掉之后分子中的剩余因子个数与分母中的剩余因

子个数的比值即为网络规模下各三级指标的信息重叠矩阵 I 中的元素值。信息重叠矩阵 I 为

$$I = \begin{bmatrix} \frac{X_{11}}{X_{11}} & \frac{X_{12}}{X_{11}} & \dots & \frac{X_{1i_1}}{X_{11}} \\ \frac{X_{11}}{X_{12}} & \frac{X_{12}}{X_{12}} & \dots & \frac{X_{1i_1}}{X_{12}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{11}}{X_{k_1}} & \frac{X_{12}}{X_{k_1}} & \dots & \frac{X_{1i_1}}{X_{k_1}} \end{bmatrix}$$

最后计算信息重叠矩阵 I 的特征值向量 $(A_1, A_2, \dots, A_{n_1})$ ，最大特征值为 A_{\max} ($\max \in \{1, 2, \dots, n_1\}$)，根据矩阵最大特征值 A_{\max} 对应的特征向量 $W_1 = (w_1, w_2, \dots, w_{i_1})$ (w_{i_1} 为网络规模下第 i_1 个三级指标在所有网络规模下三级指标中所占比重， w_{i_1} 的值越大，代表该指标越重要)，将特征向量 W_1 中 w_{i_1} 小于 0.1 的指标去除，得到优化后的网络规模下的三级指标 $X'_{i'_1}$ ($i'_1 = 1, 2, \dots, n'_1$)。

重复以上过程，得到优化后的运行质量下的三级指标 $X'_{2i'_2}$ ($i'_2 = 1, 2, \dots, n'_2$) 以及管理因素下的三级指标 $X'_{3i'_3}$ ($i'_3 = 1, 2, \dots, n'_3$)。

2 评估指标组合权重的计算

权重对评估结果具有导向性。首先，改进了区间模糊层次分析法计算主观权重；其次，采用熵权法计算客观权重；最后，采用主客观组合权重赋值法计算组合权重，从而得到更加科学合理的权重值。

2.1 区间模糊层次分析法计算主观权重

为降低层次分析法专家打分差异性对权重计算准确性的影响，设计区间模糊层次分析法。对层次

分析法进行改进, 引入区间数^[23]的概念, 专家通过区间数的形式对优化后网络规模下的三级指标 $X'_{li'}$ 来构建判断矩阵, 进而缩小网络规模下的三级指标 $X'_{li'}$ 间主观权重的误差。

首先, 确定指标相对重要程度标度。采用标度 0.1~0.9 的方法, 定量描述网络规模下的三级指标 $X'_{li'}$ 与另一三级指标 $X'_{lk'_i}$ ($k'_i=1, 2, \dots, n'_i$) 相对重要程度, 指标相对重要程度标度说明如表 1 所示。

表 1 指标相对重要程度标度表

Table 1 Index relative importance scale table		
标度 $r_{i'k'_i}$	定义	说明
0.5	同等重要	$X'_{li'}$ 与 $X'_{lk'_i}$ 同等重要
0.6	稍微重要	$X'_{li'}$ 比 $X'_{lk'_i}$ 稍微重要
0.7	明显重要	$X'_{li'}$ 比 $X'_{lk'_i}$ 明显重要
0.8	非常重要	$X'_{li'}$ 比 $X'_{lk'_i}$ 非常重要
0.9	极端重要	$X'_{li'}$ 比 $X'_{lk'_i}$ 极端重要

其中, $r_{i'k'_i}$ 为 $X'_{li'}$ 与 $X'_{lk'_i}$ 比较得到的标度值。通过 $r_{k'_i i'} = 1 - r_{i'k'_i}$ 计算得到 $X'_{lk'_i}$ 与 $X'_{li'}$ 比较的标度值 $r_{k'_i i'}$ 。

其次, 邀请专家分别为优化后的网络规模下的三级指标 $X'_{li'}$ 与 $X'_{lk'_i}$ 进行比较打分得到标度值 $r_{i'k'_i}$, 用区间数的形式表示进而得到 $a_{i'k'_i} = [a_{i'k'_i}^-, a_{i'k'_i}^+]$, 构造区间判断矩阵 $J_1 = (a_{i'k'_i})_{n'_i \times n'_i}$, J_1 的下边界矩阵记为 $J_1^- = (a_{i'k'_i}^-)_{n'_i \times n'_i}$, J_1 的上边界矩阵记为 $J_1^+ = (a_{i'k'_i}^+)_{n'_i \times n'_i}$ 。将区间判断矩阵 J_1 中 $X'_{li'}$ 的区间数向量记为 $O_1 = (o_1, o_2, \dots, o_{n'_i})$, 其中, $o_i = (o_i^-, o_i^+)$, O_1 的下边界矩阵记为 $O_1^- = (o_1^-, o_2^-, \dots, o_{n'_i}^-)$, O_1 的上边界矩阵记为 $O_1^+ = (o_1^+, o_2^+, \dots, o_{n'_i}^+)$ 。

然后, 利用区间特征根法分别求出 J_1^- 和 J_1^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x_1^- 和 x_1^+ , 并计算网络规模下三级指标的权重系数 g_1 和 h_1 , 如式(3)和式(4)所示。

$$g_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k'_i=1}^{n'_i} \frac{1}{\sum_{i'=1}^{n'_i} a_{i'k'_i}^+}}{n'_i}} \quad (3)$$

$$h_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k'_i=1}^{n'_i} \frac{1}{\sum_{i'=1}^{n'_i} a_{i'k'_i}^-}}{n'_i}} \quad (4)$$

最后, 计算优化后网络规模下的三级指标的区

间数形式的权重向量 α_1 , 如式(5)所示。

$$\alpha_1 = ([g_1 o_1^-, h_1 o_1^+], [g_1 o_2^-, h_1 o_2^+], \dots, [g_1 o_{n'_i}^-, h_1 o_{n'_i}^+]) \quad (5)$$

对权重向量 α_1 中的每一个区间元素取中位数并进行归一化得到对应优化后网络规模下三级指标 $X'_{li'}$ 的权重 $\alpha'_{li'}$, 构成优化后网络规模下所有三级指标的权重向量 $\alpha'_1 = (\alpha'_{li'}, \alpha'_{lk'_i}, \dots, \alpha'_{li'}, \alpha'_{lk'_i})$ 。

重复以上过程, 得到优化后运行质量与管理因素下所有三级指标的主观权重向量 $\alpha''_2 = (\alpha''_{li'}, \alpha''_{lk'_i}, \dots, \alpha''_{li'}, \alpha''_{lk'_i})$ 与 $\alpha''_3 = (\alpha''_{li'}, \alpha''_{lk'_i}, \dots, \alpha''_{li'}, \alpha''_{lk'_i})$ 。

对于二级指标主观权重的确定, 首先采用表 1 相同的数量标度, B_l ($l=1, 2, 3$) 与 B_c ($c=1, 2, 3$) 进行比较得到标度值, 用区间数的形式表示进而得到 $B_{lc} = [B_{lc}^-, B_{lc}^+]$, 构造区间判断矩阵 $J' = (B_{lc})_{3 \times 3}$, J' 的下边界矩阵记为 $J'^- = (B_{lc}^-)_{3 \times 3}$, J' 的上边界矩阵记为 $J'^+ = (B_{lc}^+)_{3 \times 3}$ 。将区间判断矩阵 J' 中 B_l 的区间数向量记为 $O' = (o'_1, o'_2, o'_3)$, 其中, $o'_i = (o'_i^-, o'_i^+)$, O' 的下边界矩阵记为 $O'^- = (o'_1^-, o'_2^-, o'_3^-)$, O' 的上边界矩阵记为 $O'^+ = (o'_1^+, o'_2^+, o'_3^+)$ 。

然后, 利用区间特征根法分别求出 J'^- 和 J'^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x'^- 和 x'^+ , 并计算二级指标的权重系数 g' 和 h' , 如式(6)和式(7)所示。

$$g' = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^3 \frac{1}{\sum_{l=1}^3 B_{lc}^+}}{3}} \quad (6)$$

$$h' = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^3 \frac{1}{\sum_{l=1}^3 B_{lc}^-}}{3}} \quad (7)$$

最后, 计算二级指标的区间数形式的权重向量 α' , 如式(8)所示。

$$\alpha' = ([g' o'_1^-, h' o'_1^+], [g' o'_2^-, h' o'_2^+], [g' o'_3^-, h' o'_3^+]) \quad (8)$$

对 α' 中的每一个区间元素取中位数并进行归一化得到对应二级指标的权重 α_i , 构成所有二级指标的主观权重向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 。

2.2 熵权法计算客观权重

首先, 对电力光传输网评估对象建立优化后网络规模下的三级评估指标矩阵, 其中, 优化后网络规模下的三级指标 $X'_{li'}$ 为 n'_i 个, 评估样本数据共有 γ 组, 每组共有 f 个指标值, 形成网络规模下三级指标初始评估矩阵 Y_1 为

$$Y_1 = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1i'_1} & \cdots & x_{1n'_1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{u1} & \cdots & x_{ui'_1} & \cdots & x_{un'_1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{\gamma 1} & \cdots & x_{\gamma i'_1} & \cdots & x_{\gamma n'_1} \end{bmatrix}$$

其中, $x_{ui'_1}$ ($i'_1=1,2,\dots,n'_1, u=1,2,\dots,\gamma$)为第 u 组评估样本数据中第 i'_1 个网络规模下的三级指标值。

其次, 网络规模下各三级指标 $X'_{1i'_1}$ 的量纲和数量级不同, 对它们进行标准化处理, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} x'_{ui'_1} = \frac{x_{ui'_1} - \min\{x_{ui'_1}\}}{\max\{x_{ui'_1}\} - \min\{x_{ui'_1}\}} \text{ (正向指标)} \\ x'_{ui'_1} = \frac{\max\{x_{ui'_1}\} - x_{ui'_1}}{\max\{x_{ui'_1}\} - \min\{x_{ui'_1}\}} \text{ (负向指标)} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\max\{x_{ui'_1}\}$ 、 $\min\{x_{ui'_1}\}$ 分别代表矩阵 Y_1 中第 i'_1 列所有数据中的最大值和最小值。

将网络规模下的三级指标 $X'_{1i'_1}$ 进行量纲化处理之后, 得到的评估指标矩阵 Y_1^* 为

$$Y_1^* = \begin{bmatrix} x'_{11} & \cdots & x'_{1i'_1} & \cdots & x'_{1n'_1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x'_{u1} & \cdots & x'_{ui'_1} & \cdots & x'_{un'_1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x'_{\gamma 1} & \cdots & x'_{\gamma i'_1} & \cdots & x'_{\gamma n'_1} \end{bmatrix}$$

计算网络规模下三级指标 $X'_{1i'_1}$ 的权重向量 $Z'_{i'_1}$, 如式(10)所示。

$$Z'_{i'_1} = \frac{x'_{ui'_1}}{\sum_{u=1}^{\gamma} x'_{ui'_1}}, (i'_1=1,2,\dots,n'_1; u=1,2,\dots,\gamma) \quad (10)$$

然后, 计算网络规模下三级指标 $X'_{1i'_1}$ 的信息熵 $E'_{i'_1}$, 如式(11)所示。

$$E'_{i'_1} = -\frac{1}{\ln f} \sum_{u=1}^{\gamma} Z'_{i'_1} \ln Z'_{i'_1} \quad (11)$$

最后, 计算网络规模下三级指标 $X'_{1i'_1}$ 的客观权重 $\omega'_{i'_1}$, 如式(12)所示。

$$\omega'_{i'_1} = \frac{1 - E'_{i'_1}}{\sum_{i'_1=1}^{n'_1} (1 - E'_{i'_1})} \quad (12)$$

通过上述计算得到优化后网络规模下的三级指标客观权重向量 $\omega'_1 = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_{i'_1}, \dots, \omega'_{n'_1})$ 。

重复以上过程, 得到优化后运行质量与管理因素下所有三级指标客观权重向量 $\omega''_2 = (\omega''_1, \omega''_2, \dots, \omega''_{i'_2}, \dots, \omega''_{n'_2})$ 与 $\omega''_3 = (\omega''_1, \omega''_2, \dots, \omega''_{i'_3}, \dots, \omega''_{n'_3})$ 。

对于二级指标客观权重的确定, 首先建立二级评估指标矩阵, 其中二级指标 B_l 为 3 个, 评估样本数据共有 γ 组, 每组共有 f 个指标值, 形成二级指标初始评估矩阵 Y_2 为

$$Y_2 = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{u1} & x_{u2} & x_{u3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{\gamma 1} & x_{\gamma 2} & x_{\gamma 3} \end{bmatrix}$$

式中, x_{u1} 、 x_{u2} 、 x_{u3} 分别为第 u 组评估样本数据中网络规模、运行质量、管理因素指标数据。

其次, 对二级指标 B_l 指标值进行标准化处理, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} x'_{ul} = \frac{x_{ul} - \min\{x_{ul}\}}{\max\{x_{ul}\} - \min\{x_{ul}\}} \text{ (正向指标)} \\ x'_{ul} = \frac{\max\{x_{ul}\} - x_{ul}}{\max\{x_{ul}\} - \min\{x_{ul}\}} \text{ (负向指标)} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\max\{x_{ul}\}$ 、 $\min\{x_{ul}\}$ 分别代表矩阵 Y_2 中第 l 列所有数据中的最大值和最小值。

将二级指标 B_l 进行量纲化处理之后, 得到的评估指标矩阵 Y_2^* 为

$$Y_2^* = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & x'_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{u1} & x'_{u2} & x'_{u3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{\gamma 1} & x'_{\gamma 2} & x'_{\gamma 3} \end{bmatrix}$$

计算二级指标 B_l 的权重向量 Z_l , 如式(14)所示。

$$Z_l = \frac{x'_{ul}}{\sum_{u=1}^{\gamma} x'_{ul}}, (l=1,2,3; u=1,2,\dots,\gamma) \quad (14)$$

然后, 计算二级指标 B_l 的信息熵 E_l , 如式(15)所示。

$$E_l = -\frac{1}{\ln f} \sum_{u=1}^{\gamma} Z_l \ln Z_l \quad (15)$$

最后, 计算二级指标 B_l 的客观权重 ω_l , 如式(16)所示。

$$\omega_l = \frac{1 - E_l}{\sum_{l=1}^3 (1 - E_l)} \quad (16)$$

通过上述计算得到所有二级指标的客观权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 。

2.3 主客观组合权重赋值法计算组合权重

综合优化后网络规模下所有三级指标的主观权重向量 α'_i 和客观权重向量 ω'_i , 计算优化后网络规模下三级指标 X'_{i_i} 的组合权重 λ'_i , 如式(17)所示。

$$\lambda'_i = \frac{\alpha'_i \omega'_i}{\sum_{i'=1}^{n'_i} \alpha'_{i'} \omega'_{i'}} \quad (17)$$

得到优化后网络规模下所有三级指标组合权重向量 $\lambda'_1 = (\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_{n'_1}, \dots, \lambda'_{n'_m})$ 。

重复以上过程, 得到优化后运行质量和管理因素下所有三级指标组合权重向量 $\lambda''_2 = (\lambda''_1, \lambda''_2, \dots, \lambda''_{n''_2}, \dots, \lambda''_{n''_m})$ 和 $\lambda'''_3 = (\lambda'''_1, \lambda'''_2, \dots, \lambda'''_{n'''_3}, \dots, \lambda'''_{n'''_m})$ 。

对于二级指标组合权重的确定, 综合二级指标的主观权重向量 α 和客观权重向量 ω , 计算二级指标 B_i 的组合权重 λ_i , 如式(18)所示。

$$\lambda_i = \frac{\alpha_i \omega_i}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i \omega_i} \quad (18)$$

得到二级指标的组合权重向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 。

3 评估算法的设计

本文设计了电力光传输网运行状态评估算法。首先根据网络规模、运行质量和管理因素下的三级指标特征选取模糊综合评价法、效用函数法以及可拓耦合方法分别对网络规模、运行质量和管理因素三个部分进行评估, 然后改进基于 Vague 集模糊值线性序法计算模糊综合评估值的综合值, 采用组合评估法计算电力光传输网运行状态评估值。

3.1 网络规模评估方法

对于评估网络规模下这些没有清晰界限的指标, 模糊综合评价法^[24]具有一定优势。本文选用岭型分布函数描述光缆总长度、光缆年增长率等指标的隶属函数。

根据“十二五”通信规划执行月报中“光缆增长率”、“光传输设备增长率”、“66 kV/35 kV 变电站光纤覆盖率”的统计数据, 将同一指标的数据按递增顺序排序, 定义排序后数据的前 10% 为该评价因素的优秀, 排序位置处于 10%~40% 为良好, 排序位置处于 40%~80% 为中等, 最后 20% 为差。

对统计数据排序产生的主值区间进行适当调整。“光缆增长率”调整后的主值区间为: 优秀 $[\infty, 0.14]$, 良好 $[0.09, 0.11]$, 中等 $[0.055, 0.08]$, 差 $[0,$

$0.045]$ 。同样, 对“光传输设备增长率”和“光纤覆盖率”调整主值区间, 得到岭型函数的隶属度函数, 如表 2 所示。

根据网络规模下各指标的隶属度函数计算对应指标优秀、良好、中等和差的模糊值, 模糊值最大的等级即为对应指标的评估等级, 由此可得到模糊值矩阵 η 为

$$\eta = \begin{bmatrix} y_1^{11} & y_1^{12} & \cdots & y_1^{1n'_1} \\ y_2^{11} & y_2^{12} & \cdots & y_2^{1n'_1} \\ y_3^{11} & y_3^{12} & \cdots & y_3^{1n'_1} \\ y_4^{11} & y_4^{12} & \cdots & y_4^{1n'_1} \end{bmatrix}$$

式中, $y_1^{1n'_1}$ 、 $y_2^{1n'_1}$ 、 $y_3^{1n'_1}$ 、 $y_4^{1n'_1}$ 分别表示根据网络规模下三级指标 X'_{i_i} 的隶属度函数计算得到的优秀、良好、中等、差 4 个等级的模糊值。

根据网络规模下三级指标的组合权重 λ'_i 计算网络规模的评估值向量, 如式(19)所示。

$$F'_1 = \lambda'_i \eta \quad (19)$$

式中, F'_1 为网络规模的评估值向量, 由优秀、良好、中等和差四个等级的模糊值组成, 模糊值最大的等级即为网络规模的评估等级。

3.2 运行质量评估方法

运行质量下的三级指标间数值差异较大, 运用效用函数法进行评估, 可以将每一个评估指标按照效用函数值进行量化^[25]。根据运行质量下每个三级指标的最佳取值范围确定对应三级指标的效用函数, 采用算术平均法便可计算得到运行质量的评估值。

“网络连通度”、“带宽预留”为适度型指标, 指标的最佳取值区间分别为 $[2.5, 3.5]$ 、 $[90, 160]$, 首先采用 $x_{2i'_2} = C_1 - x_{2i'_2}$ 对该类指标进行转向式逆变换, C_1 为约束总量, 通常取 $C_1 = 1$, 然后将转向式逆变换后的结果代入效用函数计算两指标的评估值。两指标的效用函数分别如式(20)和式(21)所示。

$$y_{21} = \begin{cases} 1 - C_2 |x_{21} - 2.5|, & x_{21} < 2.5 \\ 1, & 2.5 \leq x_{21} \leq 3.5 \\ 1 - C_2 |x_{21} - 3.5|, & x_{21} > 3.5 \end{cases} \quad (20)$$

$$y_{22} = \begin{cases} 1 - C_2 |x_{22} - 90|, & x_{22} < 90 \\ 1, & 90 \leq x_{22} \leq 160 \\ 1 - C_2 |x_{22} - 160|, & x_{22} > 160 \end{cases} \quad (21)$$

式中, C_2 为一个常数, 应根据评估期望的值确定, 上述指标数据范围在 55%~75% 为良好, 取 $C_2 = 4$ 。

表2 网络规模下三级指标隶属度函数
Table 2 Membership function of three-level index under network scale

光缆增长率	
差	$y_4^{I1} = \begin{cases} 1, & x_{11} < 0.045 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{11} - 0.05), & 0.045 \leq x_{11} \leq 0.055 \\ 0, & x_{11} > 0.055 \end{cases}$
中等	$y_3^{II} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{11} - 0.05), & 0.045 \leq x_{11} \leq 0.055 \\ 1, & 0.055 < x_{11} \leq 0.08 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{11} - 0.085), & 0.08 < x_{11} \leq 0.09 \\ 0, & x_{11} < 0.045, x_{11} > 0.09 \end{cases}$
良好	$y_2^{III} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{11} - 0.085), & 0.08 < x_{11} \leq 0.09 \\ 1, & 0.09 < x_{11} \leq 0.11 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.03} (x_{11} - 0.125), & 0.11 < x_{11} \leq 0.14 \\ 0, & x_{11} \leq 0.08, x_{11} > 0.14 \end{cases}$
优秀	$y_1^{IV} = \begin{cases} 0, & x_{11} \leq 0.11 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.03} (x_{11} - 0.125), & 0.11 < x_{11} \leq 0.14 \\ 1, & x_{11} > 0.14 \end{cases}$
光纤覆盖率	
差	$y_4^{I2} = \begin{cases} 1, & x_{12} < 0.6 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.1} (x_{12} - 0.65), & 0.6 \leq x_{12} \leq 0.7 \\ 0, & x_{12} > 0.7 \end{cases}$
中等	$y_3^{II} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.1} (x_{12} - 0.65), & 0.6 < x_{12} \leq 0.7 \\ 1, & 0.7 < x_{12} \leq 0.9 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.05} (x_{12} - 0.925), & 0.9 < x_{12} \leq 0.95 \\ 0, & x_{12} \leq 0.6, x_{12} > 0.95 \end{cases}$
良好	$y_2^{III} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.05} (x_{12} - 0.925), & 0.9 < x_{12} \leq 0.95 \\ 1, & 0.95 < x_{12} \leq 0.99 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{12} - 0.925), & 0.99 < x_{12} \leq 1 \\ 0, & x_{12} \leq 0.9, x_{12} > 1 \end{cases}$
优秀	$y_1^{IV} = \begin{cases} 0, & x_{12} \leq 0.99 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{0.01} (x_{12} - 0.995), & 0.99 < x_{12} \leq 1 \\ 1, & x_{12} > 1 \end{cases}$
光传输设备增长率	
差	$y_4^{I3} = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x_{13}-10}{\sigma}\right)^2}, & x_{13} > 50 \\ 1, & x_{13} \leq 50 \end{cases}$
中等	$y_3^{II} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{15} (x_{13} - 5), & 15 \leq x_{13} \leq 25 \\ 1, & 25 < x_{13} \leq 40 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{25} (x_{13} - 40), & 40 < x_{13} \leq 50 \\ 0, & x_{13} < 50, x_{13} > 15 \end{cases}$
良好	$y_2^{III} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{10} (x_{13} - 10), & 10 < x_{13} \leq 20 \\ 1, & 20 < x_{13} \leq 50 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{10} (x_{13} - 55), & 50 < x_{13} \leq 60 \\ 0, & x_{13} < 10, x_{13} > 60 \end{cases}$
优秀	$y_1^{IV} = \begin{cases} 0, & x_{13} \leq 10 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{5} (x_{13} - 10), & 10 < x_{13} \leq 60 \\ 1, & x_{13} > 60 \end{cases}$

“网络负载均衡度”为逆指标，指标的值越大代表网络负载越不均衡，业务安排越不合理，其效用函数如式(22)所示。

$$y_{23} = 1 - x_{23} \quad (22)$$

因“电源设备月均故障时长”指标数值较大，不利于直接用于评估，对该类指标采用非线性对数效用函数，得到可量化的指标效用函数值，非线性对数效用函数如式(23)所示。

$$y_{24} = \frac{\ln x_{24} - \ln x_{上}}{\ln x_{下} - \ln x_{上}} \times a + b \quad (23)$$

式中： x_{24} 为指标实际值； $x_{上}$ 和 $x_{下}$ 分别为指标的上、下限值， a 、 b 为常数，一般取 $a = 0.4$ 、 $b = 0.6$ 。则“电源设备月均故障时长”效用函数如式(24)所示。

$$y_{24} = \frac{\ln x_{24} - \ln 1550}{\ln 1550 - \ln 650} \times 0.4 + 0.6 \quad (24)$$

本文采用算术平均法计算运行质量评估值，如式(25)所示。

$$F_2'' = \sum_{i_2'=1}^{n_2'} \lambda_{2i_2'}'' y_{2i_2'} \quad (25)$$

式中： F_2'' 为运行质量的评估值； $\lambda_{2i_2'}''$ 为三级指标 $X'_{2i_2'}$ 的组合权重； $y_{2i_2'}$ 为各指标的效用函数值。根据 F_2'' 值得出的结果进行评判， F_2'' 值越高，说明电力光传输网运行质量越好。

3.3 管理因素评估方法

可拓学评价方法^[26]从满意程度的角度进行评估，通过关联函数进行定量计算。在管理因素评估中，选择对立差异函数作为一种特殊的关联函数，构建耦合评估模型，对通信运维管理和通信专业管理进行评估，具体步骤如下。

第一步：确定方案集 $u_j (j=1,2,\dots,m)$ 和评估指标 $X'_{3i_3'} (i_3'=1,2,\dots,n_3')$ ，用矩阵 $\mathbf{X} = \{x_{3i_3'j}\}_{n_3'm}$ 表示。为消除各指标量纲不同，对矩阵 \mathbf{X} 进行标准化处理，根据管理因素下三级指标的数据特征，各指标的映射区间设为 $[0.002,0.096]$ 。

对于“越大越优”型指标的计算，如式(26)所示。

$$x'_{3i_3'j} = 0.002 + 0.994 \frac{x_{3i_3'j} - \min\{x_{3i_3'j}\}}{\max\{x_{3i_3'j}\} - \min\{x_{3i_3'j}\}} \quad (26)$$

对于“越小越优”型指标的计算，如式(27)所示。

$$x'_{3i_3'j} = 0.002 + 0.994 \frac{\max\{x_{3i_3'j}\} - x_{3i_3'j}}{\max\{x_{3i_3'j}\} - \min\{x_{3i_3'j}\}} \quad (27)$$

得到 X 的标准化矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} x'_{311} & x'_{312} & \cdots & x'_{31m} \\ x'_{321} & x'_{322} & \cdots & x'_{32m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x'_{3n'_31} & x'_{3n'_32} & \cdots & x'_{3n'_3m} \end{bmatrix}$$

式中, $x'_{3n'_3m}$ 为方案 u_j 的指标 $x_{3i'_3}$ 的标准化值。

第二步: 根据评估方案和指标情况, 构建待评估物元矩阵 R_j 和物元经典域 R_{oh} (h 为评估等级, $h=1,2,\dots,p$)。待评物元矩阵 R_j 和物元经典域 R_{oh} 分别为

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & x'_{31} & x'_{31j} \\ & x'_{32} & x'_{32j} \\ & \vdots & \vdots \\ & x'_{3n'_3} & x'_{3n'_3j} \end{bmatrix}$$

$$R_{oh} = \begin{bmatrix} N_{oh} & x'_{31} & (a_{31h}, b_{31h}) \\ & x'_{32} & (a_{32h}, b_{32h}) \\ & \vdots & \vdots \\ & x'_{3n'_3} & (a_{3n'_3h}, b_{3n'_3h}) \end{bmatrix}$$

第三步: 计算渐变式质变点矩阵 K , 如式(28)所示。

$$k_{3i'_31} = a_{3i'_31}, k_{3i'_3p} = b_{3i'_3p}, k_{3i'_3h} = \frac{p-h}{p-1} a_{3i'_3h} + \frac{h-1}{p-1} b_{3i'_3h} \quad (28)$$

第四步: 待评物元 N_j 的第 i'_3 个指标 $x'_{3i'_3j}$ 与物元经典域 R_{oh} 的相对隶属度矩阵 $\mu(N_j)$ 为

$$\mu(N_j) = \begin{bmatrix} \mu_{311} & \mu_{312} & \cdots & \mu_{31p} \\ \mu_{321} & \mu_{322} & \cdots & \mu_{32p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{3n'_31} & \mu_{3n'_32} & \cdots & \mu_{3n'_3p} \end{bmatrix}$$

第五步: 运用可变集中的对立差异函数计算各方案对于不同评估标准的关联度。方案 u_j 的第 $3i'_3$ 个指标关于 $h > h+1$ ($h=1,2,\dots,p-1$) 级的对立差异度为 $D_{3i'_3j(h>h+1)} = \mu_{3i'_3jh} - \mu_{3i'_3j(h+1)}$ 。其中, $h > h+1$ 表示第 h 级比第 $h+1$ 级等级高。

第六步: 根据确定的评估指标权重, 则可得方案 u_j 关于 $h > h+1$ ($h=1,2,\dots,p-1$) 级的综合对立差异度为 $D_{j(h>h+1)} = \sum_{i'_3=1}^{n'_3} D_{3i'_3j(h>h+1)} \lambda_{i'_3}^m$ 。

第七步: 根据量变与质变原则, 确定各方案的优先等级, 当 $D_{3i'_3j(h>h+1)} \times D_{3i'_3j((h+1)>(h+2))} < 0$ 时, 即

若从第 h 级到第 $h+1$ 级发生了质变, 则根据优秀、良好、中等和差之间的对立差异度确定评估等级。

3.4 组合评估方法

采用组合评估法将隶属度函数、效用函数以及可拓耦合函数得到的评估结果进行综合, 计算电力光传输网运行状态评估值。首先改进基于 Vague 集模糊值线性序法计算网络规模评估值的综合值。

第一步: 根据网络规模下三级指标的隶属度函数计算得到的模糊值, 构建模糊值矩阵 η 为

$$\eta = \begin{bmatrix} y_1^{11} & y_1^{12} & \cdots & y_1^{1q_1} \\ y_2^{11} & y_2^{12} & \cdots & y_2^{1q_1} \\ y_3^{11} & y_3^{12} & \cdots & y_3^{1q_1} \\ y_4^{11} & y_4^{12} & \cdots & y_4^{1q_1} \end{bmatrix}$$

其中, $y_1^{1q_1}$ 、 $y_2^{1q_1}$ 、 $y_3^{1q_1}$ 、 $y_4^{1q_1}$ 分别表示根据网络规模下三级指标 X'_{1q_1} 的隶属度函数计算得到的优秀、良好、中等、差 4 个等级的模糊值。

第二步: 对模糊值矩阵 η 中某一行元素值 $d_{i'_3}$, 对应指标 X'_{1q_1} , 模糊值为 $y_{q_1}^{1q_1}$, $i'_3=1,2,\dots,n'_3$; q_1 代表矩阵 η 的第 1 列, q_2 代表矩阵 η 的第 2 列, q_3 代表矩阵 η 的第 3 列, q_4 代表矩阵 η 的第 4 列。按如下方案排序:

- 1) 若 $\eta_{d_1q_1} > \eta_{d_2q_1}$ ($d_1=1,2,\dots,y_{q_1}^{1q_1}; d_2=1,2,\dots,y_{q_1}^{1q_1}$ 且 $d_2 \neq d_1$), 则方案 D_1 排在方案 D_2 前面。
- 2) 若 $\eta_{d_1q_1} = \eta_{d_2q_1}$, 那么如果 $\eta_{d_1q_2} > \eta_{d_2q_2}$, 则方案 D_1 排在方案 D_2 前面。
- 3) 若 $\eta_{d_1q_1} > \eta_{d_2q_1}$, 且 $\eta_{d_1q_2} = \eta_{d_2q_2}$, 那么如果 $\eta_{d_1q_3} > \eta_{d_2q_3}$, 则方案 D_1 排在方案 D_2 前面。

对模糊值矩阵 η 中每一行按数值大小对各方案进行排序, 形成 4 个模糊值线性序, 分别记为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。

第三步: 构造方案集 X 中的模糊优先矩阵 Q , 如式(29)所示。

$$\sum_{d=1}^{n'_3} L_i(U_{d_1}, U_{d_2}) = \begin{cases} 1, & \text{线性序 } L_i \text{ 中 } U_{d_1} \text{ 优先于 } U_{d_2} \\ 0, & \text{线性序 } L_i \text{ 中 } U_{d_2} \text{ 优先于 } U_{d_1} \end{cases} \quad (29)$$

第四步: 进行方案排序, 取 $\tau = 0.5$ 对模糊优先矩阵 Q 进行截割, 得到截矩阵 $Q_{\tau(d,q)}$, 如式(30)所示。

$$Q_{\tau(d,q)} = \begin{cases} 1, & Q_{\tau(d,q)} > \tau \\ 2, & Q_{\tau(d,q)} < \tau \end{cases} \quad (30)$$

计算模糊综合值, 如式(31)所示。

$$F_1' = \frac{\xi_1 \sum_{d=1}^{n_1'} \mathcal{Q}_{\tau(1,d)} + \xi_2 \sum_{d=1}^{n_2'} \mathcal{Q}_{\tau(2,d)} + \xi_3 \sum_{d=1}^{n_3'} \mathcal{Q}_{\tau(3,d)} + \xi_4 \sum_{d=1}^{n_4'} \mathcal{Q}_{\tau(4,d)}}{n_1'} \quad (31)$$

式中, ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 代表优秀、良好、中等、差的权重。

采用皮尔曼等级作为方法一致性的判断依据,对模糊综合评价方法、效用函数法、可拓耦合评价法进行事前一致性检验,用 ρ 表示,如式(32)所示。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n \Delta r_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (32)$$

式中: Δr_i 为不同方法下样本等级差值; $\rho \in [0,1]$, 当 $\rho \rightarrow 1$ 时,方法间的一致性较好,说明方法间的关联性较大,反之,关联性较小;如果计算结果超出区间范围,应该重新考虑选取方法。

然后,根据样本组合评估值与 ε 种单一评估方法之间偏差之和最小为优化目标来得到最优评估值的方法。对于 ε 种单一评估方法 $V = (V_1, V_2, \dots, V_\varepsilon)$, e 个待评估对象 $P = (P_1, P_2, \dots, P_e)$, 第 t 种评估方法下得到的评估向量如式(33)所示。

$$Z_t = (z_1^{(t)}, z_2^{(t)}, \dots, z_\varepsilon^{(t)})^T, t = 1, 2, \dots, \varepsilon \quad (33)$$

组合评估值向量如式(34)所示。

$$Z_0 = (z_1^{(0)}, z_2^{(0)}, \dots, z_\varepsilon^{(0)})^T \quad (34)$$

组合评估值向量和第 t 种评估值向量的偏差如式(35)所示。

$$Z_0 - Z_t = (z_1^{(0)} - z_1^{(t)}, z_2^{(0)} - z_2^{(t)}, \dots, z_\varepsilon^{(0)} - z_\varepsilon^{(t)})^T \quad (35)$$

构造偏差平方和最小的最优化模型,计算得到电力光传输网运行状态综合评估值 F , 如式(36)所示。

$$F = \min \sum_{t=1}^{\varepsilon} \|Z_0 - Z_t\|^2 \quad (36)$$

4 仿真结果与分析

根据国家电网有限公司吉林某地区 2019 年案例数据,首先对评估指标体系进行优化,删去冗余指标,其次计算评估指标主客观权重,然后根据三级指标值计算网络规模、运行质量、管理因素以及运行状态评估结果。将计算得出的评估结果与该地区 2019 年真实现状进行对照进而达到验证的目的。

4.1 评估指标体系的优化

首先,明确每个三级指标的定义,分析构成每个三级指标的四级指标,网络规模下三级指标的四级指标如表 3 所示。

表 3 网络规模下三级指标的四级指标构成表
Table 3 Four-level index composition table of three-level index under network scale

三级指标	四级指标
光缆 总长度 X_{11}	ADSS 光缆长度 C_{111}
	OPGW 光缆长度 C_{112}
	OPPC 光缆长度 C_{113}
光缆 增长率 X_{12}	起始时间 ADSS 光缆总长度 C_{121}
	终止时间 ADSS 光缆总长度 C_{122}
	起始时间 OPGW 光缆总长度 C_{123}
	终止时间 OPGW 光缆总长度 C_{124}
	起始时间 OPPC 光缆总长度 C_{125}
	终止时间 OPPC 光缆总长度 C_{126}
光纤 覆盖率 X_{13}	500 kV 以上变电站具有自有光纤的变电站数量 C_{131}
	500 kV 以上变电站数量 C_{132}
	330 kV/220 kV 变电站具有自有光纤的变电站数量 C_{133}
	330 kV/220 kV 以上变电站数量 C_{134}
	110 kV 变电站具有自有光纤的变电站数量 C_{135}
	110 kV 以上变电站数量 C_{136}
	66 kV/35 kV 变电站具有自有光纤的变电站数量 C_{137}
	66 kV/35 kV 以上变电站数量 C_{138}
	地市供电公司具有自有光纤的变电站数量 C_{139}
	地市供电公司变电站数量 C_{1310}
	县供电公司具有自有光纤的变电站数量 C_{1311}
	县供电公司变电站数量 C_{1312}
营业网点具有自有光纤的变电站数量 C_{1313}	
营业网点变电站数量 C_{1314}	
直属单位、直调电厂具有自有光纤的变电站数量 C_{1315}	
直属单位、直调电厂变电站数量 C_{1316}	
光传输设 备总数量 X_{14}	SDH 设备数量 C_{141}
	OTN 设备数量 C_{142}
	PDH 设备数量 C_{143}
光传输设 备增长率 X_{15}	起始时间 SDH 设备数量 C_{151}
	终止时间 SDH 设备数量 C_{152}
	起始时间 OTN 设备数量 C_{153}
	终止时间 OTN 设备数量 C_{154}
	起始时间 PDH 设备数量 C_{155}
终止时间 PDH 设备数量 C_{156}	
业务通道 总数 X_{16}	—
业务节点 总数 X_{17}	—

其次,根据式(1)得出三级指标 $X_{11} \sim X_{15}$ 因子构成,光缆总长度 X_{11} 、光缆增长率 X_{12} 、光纤覆盖率 X_{13} 、光传输设备总数量 X_{14} 、光传输设备增长率 X_{15} 指标的因子构成如下:

$$X_{11} = 0.6 \times C_{111} + 0.2 \times C_{112} + 0.2 \times C_{113}$$

$$\begin{aligned}
X_{12} &= 0.6 \times C_{121} + 0.6 \times C_{122} + 0.2 \times C_{123} + \\
&\quad 0.2 \times C_{124} + 0.2 \times C_{125} + 0.2 \times C_{126} \\
X_{13} &= 0.1 \times C_{131} + 0.1 \times C_{132} + 0.2 \times C_{133} + 0.2 \times C_{134} + \\
&\quad 0.1 \times C_{135} + 0.1 \times C_{136} + 0.1 \times C_{137} + 0.1 \times C_{138} + \\
&\quad 0.2 \times C_{139} + 0.2 \times C_{1310} + 0.1 \times C_{1311} + 0.1 \times C_{1312} + \\
&\quad 0.1 \times C_{1313} + 0.1 \times C_{1314} + 0.1 \times C_{1315} + 0.1 \times C_{1316} \\
X_{14} &= 0.5 \times C_{141} + 0.3 \times C_{142} + 0.2 \times C_{143} \\
X_{15} &= 0.5 \times C_{151} + 0.5 \times C_{152} + 0.3 \times C_{153} + \\
&\quad 0.3 \times C_{154} + 0.2 \times C_{155} + 0.2 \times C_{156}
\end{aligned}$$

根据 $X_{11} \sim X_{15}$ 因子构成公式以及式(2), $X_{11} \sim X_{15}$ 每两个指标之间进行比较得到信息重叠矩阵的元素值进而构建重叠信息矩阵, 如表 4 所示。

表 4 重叠信息矩阵

Table 4 Overlapping information matrix

	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_{11}	1	3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
X_{12}	1/3	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
X_{13}	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5
X_{14}	0.5	0.5	0.5	1	3	0.5	0.5
X_{15}	0.5	0.5	0.5	1/3	1	0.5	0.5
X_{16}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5
X_{17}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1

通过计算重叠信息矩阵的最大特征值的特征向量并进行归一化, 可得网络规模下各三级指标对于评估目标的权重向量如下: $W_1 = (0.0008, 0.1478, 0.1474, 0.1141, 0.1577, 0.16, 0.1733)$ 。其中, 指标光缆总长度的权重小于 0.1, 进一步优化删除。

利用上述重叠信息分析法, 得到备品备件完好率、光传输链路性能、光缆资源平均利用率等三级指标的权重小于 0.1, 进一步优化删除。

4.2 评估指标组合权重的计算

4.2.1 主观权重的计算

根据区间模糊层次分析法确定的标度, 邀请专家采用区间数的形式为二级指标 B_i 构造判断矩阵。电力光传输网运行状态评估指标体系中二级指标——网络规模 B_1 、运行质量 B_2 、管理因素 B_3 的区间判断矩阵 J' 为

$$J' = \begin{bmatrix} [0.5, 0.5] & [0.6, 0.7] & [0.25, 0.4] \\ [0.3, 0.4] & [0.5, 0.5] & [0.2, 0.4] \\ [0.6, 0.75] & [0.6, 0.8] & [0.5, 0.5] \end{bmatrix}$$

区间判断矩阵 J' 的下边界矩阵 J'^- 为

$$J'^- = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.25 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.6 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

区间判断矩阵 J' 的上边界矩阵 J'^+ 为

$$J'^+ = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 \\ 0.75 & 0.8 & 0.5 \end{bmatrix}$$

利用区间特征根法分别求出 J'^- 和 J'^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x'^- 和 x'^+ , 分别为

$$x'^- = (0.3253, 0.2384, 0.4363)$$

$$x'^+ = (0.3203, 0.2669, 0.4129)$$

根据式(6)和式(7), 计算得到二级指标的权重系数 g' 和 h' 的值为 $g' = 1.5347$, $h' = 1.3694$ 。

根据式(8)计算得出所有二级指标的区间数形式的权重向量为

$$\alpha' = ([0.4455, 0.4916], [0.3264, 0.4096], [0.5975, 0.6336])$$

取中位数并进行归一化得到所有二级指标的主观权重向量为

$$\alpha = (0.3227, 0.2543, 0.4239)$$

4.2.2 客观权重的计算

对该地区电力光传输网的真实数据进行处理, 得到二级指标 B_i 的数据, 如表 5 所示。

表 5 该传输网二级指标数据

Table 5 Transmission network secondary index data

B_1	B_2	B_3
0.9116	0.9725	0.9033
0.9329	0.9743	0.9322
0.9178	0.9742	0.8425

根据式(13)对二级指标 B_i 数据进行标准化处理, 得到将 B_i 量纲化后的评估指标矩阵 Y_2^* 为

$$Y_2^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6778 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0.2911 & 0.9444 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(14)计算 B_i 的权重向量 Z_i 为

$$Z_1 = (0, 0, 0.4040)$$

$$Z_2 = (0.7745, 0.5143, 0.5960)$$

$$Z_3 = (0.2255, 0.4857, 0)$$

根据式(15)计算 B_i 的信息熵 E_i 为

$$E_1 = 0.4858, E_2 = 0.6305, E_3 = 0.6140$$

根据式(16)计算 B_i 的客观权重 ω_i 为

$$\omega_1 = 0.4050, \omega_2 = 0.2910, \omega_3 = 0.3040$$

则二级指标的客观权重向量为

$$\omega = (0.4050, 0.2910, 0.3040)$$

4.2.3 主客观组合权重的计算

根据式(18)可以计算出二级指标 B_1 、 B_2 、 B_3 的

组合权重 $\lambda = (0.3890, 0.2202, 0.3836)$ 。

根据以上计算得到的主观权重值、客观权重值和组合权重值，分析可知： B_1 在主观和客观权重求解中分别处于第二和第一的位置，且相差 0.1 以上， B_2 在主观和客观权重求解中分别处于第一和第二的位置，且相差 0.1 以上，经过主客观组合求解，缩小了 B_1 和 B_2 的差异，使得权重结果更加科学合理。

4.3 评估结果的计算

该地区的光缆增长率等评估指标的统计数据如表 6 所示。

表 6 该传输网三级指标数据

Table 6 Transmission network three-level index data

指标名称	数值	指标名称	数值	
网	光缆总长度	5352.68	光缆年度增长率	0.3682
络	光纤覆盖率	0.9256	光传输设备总数	341
规	光传输设备增长率	0.1056	业务通道总数	213
模	业务节点总数	324	—	—
	网络连通度	2.12	网络拓扑成环率	0.9524
	重要业务双通道率	0.8412	备品备件完好率	0.8632
	网络抗灾应急能力	0.9654	光传输链路性能	0.8412
	光纤电路可用性	0.6541	业务通道保护率	0.4561
运	设备自动监控率	0.9854	设备共享保护环比例	0.6578
行	机房环境	0.9874	备品备件存量比例	0.6547
质	仪器仪表存量比例	0.8631	带宽预留	0.4597
量	光缆资源平均利用率	0.7436	纤芯资源平均利用率	0.7964
	光传输设备资源利用率	0.7936	链路资源利用率	0.8647
	节点容量利用率	0.7896	负载均衡度	0.634
	光缆故障率	0.012	光传输设备故障率	0.001
	业务故障率	0.004	—	—
管	光缆缺陷消除及时率	0.719	光缆故障平均修复效率	0.453
理	设备缺陷消除及时率	0.804	设备故障平均修复效率	0.002
因	检修计划准确性	0.834	专项工作按时完成率	0.626
素	通信技术研究水平	0.874	规格标准规定物品数量	0.996

分别计算对应隶属函数值、效用函数值以及可拓耦合函数值并评定等级。

根据网络规模指标的数据，采用确定的隶属函数计算网络规模下各个指标的隶属函数值分别为

$$\eta_1 = \{0.7176, 0.2824, 0, 0\}$$

$$\eta_2 = \{0, 0.6847, 0.3126, 0\}$$

$$\eta_3 = \{1, 0, 0, 0\}$$

$$\eta_4 = \{1, 0, 0, 0\}$$

$$\eta_5 = \{0.4867, 0.1979, 0, 0\}$$

$$\eta_6 = \{0.4867, 0.1979, 0, 0\}$$

$$\eta_7 = \{0, 0.7129, 0.2871, 0\}$$

对以上隶属函数值进行归一化处理，得到综合模糊矩阵 η 为

$$\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6874 & 0.3126 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2890 & 0.7110 & 0 & 0 \\ 0.7110 & 0.2890 & 0 & 0 \\ 0.7110 & 0.2890 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7129 & 0.2871 & 0 \end{bmatrix}$$

根据得到的权重向量 $\lambda'_i = (0.3016, 0.2562, 0.4422, 0.3405, 0.4731, 0.1883, 0.4800, 0.5200)$ ，与模糊值矩阵 η 进行模糊综合计算得到模糊综合评估结果向量 $F'_1 = (0.5833, 0.3188, 0.0856, 0)$ 。根据最大隶属度原则，得出该地区电力光传输网网络规模评估结果为优秀。

根据运行质量指标的数据，采用确定的效用函数计算运行质量下各个指标的效用函数值，如表 7 所示。

表 7 该传输网运行质量指标数据

Table 7 Transmission network operation quality index data

指标名称	评估数据	指标名称	评估数据
网络连通度	1	网络拓扑成环率	0.87
重要业务双通道率	1	备品备件完好率	0.86
网络抗灾应急能力	0.91	光传输链路性能	0.96
光纤电路可用性	0.86	业务通道保护率	0.93
设备自动监控率	0.82	设备共享保护环比例	0.74
机房环境	0.92	备品备件存量比例	0.89
仪器仪表存量比例	0.86	带宽预留	0.79
光缆资源平均利用率	0.74	纤芯资源平均利用率	0.79
光传输设备资源利用率	0.79	链路资源利用率	0.86
节点容量利用率	0.78	负载均衡度	0.95
光缆故障率	0.94	光传输设备故障率	0.96
业务故障率	0.91	—	—

根据得到的权重向量，利用算术平均法求得运行质量的评估值： $F'_2 = 0.9126$ ，得出该地区电力光传输网运行质量评估结果为优秀。

根据该地区电力光传输网的具体要求和实际数据情况，将等级分为 4 级，评价标准矩阵如表 8 所示。

计算渐变式质变点矩阵 K 和该地区电力光传输网管理因素指标的相对隶属度矩阵，如表 9 所示。

该地区电力光传输网管理因素指标对于不同评价标准的对立差异度，如表 10 所示。

结合得到的指标权重，得到该地区电力光传输网相对于评价等级的对立差异度，如表 11 所示。

表 8 评价标准矩阵

Table 8 Evaluation criteria matrix

	优秀	良好	中等	差
X_{31}	1~0.721	0.721~0.328	0.328~0.220	0.220~0
X_{32}	1~0.914	0.914~0.862	0.862~0.707	0.707~0
X_{33}	1~0.947	0.947~0.922	0.922~0.844	0.844~0
X_{34}	1~882	0.882~0.757	0.757~0.502	0.502~0
X_{35}	1~0.651	0.651~0.498	0.498~0.408	0.408~0
X_{36}	1~0.671	0.671~0.637	0.637~0.306	0.306~0
X_{37}	1~0.628	0.628~0.486	0.486~0.358	0.358~0
X_{38}	1~0.771	0.771~0.612	0.612~0.380	0.380~0

表 9 相对隶属度矩阵

Table 9 Relative membership matrix

	优秀	良好	中等	差
X_{31}	0.492	0.508	0	0
X_{32}	0	0	0.320	0.680
X_{33}	0	0	0.476	0.524
X_{34}	0	0.962	0.038	0
X_{35}	0	0	0.498	0.502
X_{36}	0	0	0.003	0.997
X_{37}	0.479	0.521	0	0
X_{38}	0	0	0.353	0.647

表 10 对于不同评价标准的对立差异度

Table 10 Opposite difference for different evaluation criteria

	优秀 > 良好	良好 > 中等	中等 > 差
X_{31}	-0.015	0.508	0
X_{32}	0	-0.320	-0.359
X_{33}	0	-0.476	-0.047
X_{34}	-0.962	0.924	0.038
X_{35}	0	-0.498	-0.005
X_{36}	0	-0.003	-0.993
X_{37}	-0.042	0.521	0
X_{38}	0	-0.353	-0.295

表 11 对于评价等级的对立差异度

Table 11 Opposite difference degree of evaluation grade

	优秀 > 良好	良好 > 中等	中等 > 差
B_3	0.09	-0.194	0.0750

由表 11 可以看出: 优秀值高于良好值, 良好值低于中等值, 中等值高于差值, 因此, 该地区电力光传输网管理因素评估等级为中等。

在计算组合评估值之前, 首先要计算模糊综合评估值的综合值, 构造模糊值线性序如下:

$$L_{1(\text{优秀})} = \{x_1, x_3, x_5, x_6, x_4, x_2, x_7\}$$

$$L_{2(\text{良好})} = \{x_4, x_7, x_2, x_5, x_6, x_1, x_3\}$$

$$L_{3(\text{中等})} = \{x_2, x_7, x_1, x_3, x_4, x_5, x_6\}$$

$$L_{4(\text{差})} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$$

其次构造模糊优先矩阵 η 并根据式(30)可得截矩阵 $Q_{\tau(d,q)}$ 为

$$Q_{\tau(d,q)} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(31)可计算得出模糊综合值为 $F'_1 = 0.85$ 。

评估等级为优秀, 与模糊综合评价法的结果一致。

得到模糊综合评估值之后就可以进行组合评估, 首先进行事前检验, 根据式(32)可得

$$\rho_{1 \leftrightarrow 2} = 0.9435, \quad \rho_{1 \leftrightarrow 3} = 0.8907, \quad \rho_{2 \leftrightarrow 3} = 0.9473。$$

由此可见, $\rho \rightarrow 1$, 方法间的一致性较好, 可以进行组合评估。

对于该地区电力光传输网的三种评估向量为 $Z_1 = (0.8500, 0.9126, 0.0750)$, 组合评估值为 Z_0 。

组合评估值向量和第 t 种评估值向量的偏差为 $(Z_0 - 0.8500, Z_0 - 0.9126, Z_0 - 0.0750)$ 。

构造偏差平方和最小的最优化模型并求得组合评估值 $F = 0.6289$, 所以该地区电力光传输网运行状态评估等级为中等。

5 结论

为了达到对电力光传输网运行状态的综合评估目的, 本文采用层次分析法, 从设备、光缆和系统 3 个维度选取指标, 从网络规模、运行质量和管理因素 3 个方面建立了评估指标体系, 设计了重叠信息分析法对评估指标体系进行优化。改进了区间模糊层次分析法计算各指标的主观权重, 采用熵权法计算各指标的客观权重, 采用主客观组合权重赋权法计算各指标的组合权重。根据指标特征选取评估方法, 分别采用模糊综合评价法、效用函数法以及可拓耦合评价法计算网络规模、运行质量以及管理因素评估结果, 采用组合评估方法计算运行状态评估结果。对某地区电力光传输网真实数据进行实例分析, 表明该方法能够更加全面、科学地反映电力光传输网的运行状态。

参考文献

- [1] 程晓荣, 苗云, 李紫君. 基于 D_S 证据理论的电力通信传输网风险评估[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(2): 76-79.
CHENG Xiaorong, MIAO Yun, LI Zijun. Risk assessment of power communication transmission network based on D_S evidence theory[J]. Electric Power ICT, 2016, 14(2):

- 76-79.
- [2] 叶远波, 李端超, 谢民, 等. 基于 SSA-SVM 的继电保护装置状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 171-178.
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. A state evaluation method for a relay protection device based on SSA-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 171-178.
- [3] 汤奕, 韩啸, 吴英俊, 等. 考虑通信系统影响的电力系统综合脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6066-6074.
TANG Yi, HAN Xiao, WU Yingjun, et al. Electric power system vulnerability assessment considering the influence of communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6066-6074.
- [4] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [5] 李果. 电力通信骨干传输网业务风险评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
LI Guo. Research on service risk assessment method of power communication backbone transmission network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [6] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 83-91.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A vulnerable points identification method based on complex network theory and an operation index[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 83-91.
- [7] 李航. 电力骨干通信网可靠性评估分析与软件设计[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LI Hang. Power backbone communication network reliability evaluation analysis and software design[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [8] 何玉钧, 刘毅, 周生平. 基于物元可拓模型的电力通信网风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 64-69.
HE Yujun, LIU Yi, ZHOU Shengping. Risk evaluation for electric power communication network based on matter-element extensible model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 64-69.
- [9] 蓝天宝, 张志海, 蔡晓兰, 等. 基于不良数据挖掘的电力通信传输网实时态势感知与评估[J]. 电子设计工程, 2020, 28(4): 163-171.
LAN Tianbao, ZHANG Zhihai, CAI Xiaolan, et al. Real-time situation awareness and assessment of power communication transmission network based on bad data recognition[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(4): 163-171.
- [10] PATIL S K, KANT R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of knowledge management adoption in supply chain to overcome its barriers[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 679-693.
- [11] ZHANG Geng. Operation quality evaluation of power communication network based on business QOS indicators[J]. Journal of Physics, 2019, 1187(2): 1-8.
- [12] 李明洋, 张利军, 徐宇啸, 等. 电力通信光传输网综合评估方法研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(1): 5-7.
LI Mingyang, ZHANG Lijun, XU Yuxiao, et al. Research on the comprehensive assessment model of electric power communication optical transmission network[J]. Optical Communication Technique, 2016, 40(1): 5-7.
- [13] 刘毅. 电力通信光传输网运行质量综合评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
LIU Yi. Research on comprehensive evaluation method of operation quality of power communication optical transmission network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [14] 马冀, 田锦, 林尚静. 基于深度学习的智能电网通信网可靠性评估方法[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(10): 72-76.
MA Ji, TIAN Jin, LIN Shangjing. Research on reliability assessment of electric power communication networks based on deep learning in smart grids[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(10): 72-76.
- [15] 王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 等. 电力通信网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 44-49.
WANG Wangbing, WANG Xianpei, YOU Zezhong, et al. Research on key node identification method in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 44-49.
- [16] 樊秀娟, 袁兆君, 广泽晶. 基于多策略均衡的电力通信传输网运行状态评估方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(10): 109-112.
FAN Xiujuan, YUAN Zhaojun, GUANG Zejing. Research on the evaluation method of power communication network status based on multi-strategy balancing[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017, 15(10): 109-112.

- [17] 戴国华, 戴睿, 张琪瑞, 等. 基于主客观赋权相结合的省级电网发展诊断分析方法与实证研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 110-118.
DAI Guohua, DAI Rui, ZHANG Qirui, et al. Empirical study and analysis of provincial power grid development diagnosis based on the combination of a subjective and objective weighting method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 110-118.
- [18] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-8.
ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8.
- [19] REN Siyue, FENG Xiao, YANG Minbo. Energy evaluation of power generation systems[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 211: 1-3.
- [20] DONATEO T, SPEDICATO L, PLACENTINO D P. Design and performance evaluation of a hybrid electric power system for multicopters[J]. Energy Procedia, 2017, 126: 1035-1042.
- [21] SONG Zongyun, ZHANG Jian, XIAO Xinli, et al. Multi-energy combined peak dispatching system synthetic benefit evaluation based on variable weight theory and matter-element extension model[J]. International Journal of Energy Sector Management, 2019, 13(3): 713-725.
- [22] 陈洪海, 王慧, 隋新. 基于信息贡献率的评价指标筛选与赋权方法[J]. 科研管理, 2020, 41(8): 240-247.
CHEN Honghai, WANG Hui, SUI Xin. Evaluation indicator screening and weighting method based on information contribution ratio[J]. Science Research Management, 2020, 41(8): 240-247.
- [23] 孙黎霞, 王中一, 戴洪, 等. 计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 64-74.
SUN Lixia, WANG Zhongyi, DAI Hong, et al. The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 64-74.
- [24] 李方媛. 电力光传输网关键指标体系研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.
LI Fangyuan. Study on key index system of power optical transmission network[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2015.
- [25] 张海生, 彭玲艳, 徐昊亮, 等. 基于 BWM-SAW 的甘肃省电力通信网运行质量评价[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(10): 53-59.
ZHANG Haisheng, PENG Lingyan, XU Haoliang, et al. Operation quality evaluation of Gansu power communication network based on BWM-SAW[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(10): 53-59.
- [26] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 等. 可拓集与可变集的相容性辨析及耦合评价方法[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(8): 2137-2146.
YANG Yafeng, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. Compatibility analysis and coupling evaluation method of extension set and variable set[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(8): 2137-2146.

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2022-11-21

作者简介:

姜万昌(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复杂网络与大数据、电力光纤网检测与分析、软件网络; E-mail: jwchang84@163.com

黄松(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力光传输网运行状态评估; E-mail: 1156267551@qq.com

郭健(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为光纤通信网络。E-mail: 1680801@qq.com

(编辑 魏小丽)