

# 基于不确定型 AHP 的电力光缆线路模糊综合评估

高强, 耿方方, 芦杉

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为了更好地将专家经验与定量计算相结合, 合理地处理电力光缆线路可靠性评估指标存在的不确定性以及专家判断的模糊性, 引入了不确定型层次分析法(AHP)对电力光缆线路进行模糊综合评估。根据多位专家确定的区间判断矩阵, 采用群判断、集值统计与重心决策理论相结合的方法来求解区间权重的最优值, 依据隶属度函数对指标评语进行模糊化处理并构建矩阵, 最后应用模糊综合评估技术得到电力光缆线路的综合量化评估结果。实例分析表明应用不确定型层次分析法进行电力光缆线路的可靠性评估是可行的。

**关键词:** 光缆线路; 不确定型层次分析法; 综合评估; 集值统计; 重心决策理论

## Fuzzy comprehensive assessment in electric power optical cable line based on the uncertain AHP

GAO Qiang, GENG Fang-fang, LU Shan

(Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In order to better combine the expert experience and quantitative calculation, meanwhile, successfully deal with uncertainties in electric power optical cable line reliability assessment indicators and vague of experts' judgment, an Uncertain Analytic Hierarchy Process is introduced and applied to fuzzy comprehensive assessment in electric power optical cable line. According to many experts determined interval judgment matrix, the optimized weight values were made by using the group judgment and collected value statistic and center of gravity decision method. The comment scores are fuzzed through membership function of fuzzy theory and construct fuzzy matrix, finally we will gained the quantities evaluating result by adopting fuzzy comprehensive assessment technology. An instance is given to prove the feasibility of using the method in electric power optical cable line reliability assessment.

**Key words:** optical cable line; Uncertain AHP; synthetic assessment; collected value statistic; center of gravity decision method

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0046-04

## 0 引言

光纤以其大容量、抗干扰、保密性好等优点, 逐渐成为电力系统通信的主要方式。然而, 光缆一旦出现故障, 将引起通信业务中断, 特别是继电保护业务中断, 可能引起电网事故, 造成巨大的经济损失。因此, 光缆线路的可靠性越来越受到人们的关注。在电力通信系统中, 诱发光缆线路故障的原因很多, 如雷击、电腐蚀、外力破坏等。文献[1]研究和验证了光缆线路在雷击作用下的可靠性。文献[2]分析了光缆线路在电腐蚀作用下故障发生的机理及预防措施。然而, 这些方法都是从造成故障的某一因素出发, 不能全面反映光缆运行的情况。

本文综合考虑各种故障因素、光缆故障对业务的影响、故障恢复及光缆类型, 运用不确定层次分析法对电力光缆线路进行可靠性评估。该方法将区

间数特性融入到传统的层次分析法中, 有效地反映了指标的不确定性和模糊性, 并采用群判断、集值统计和重心决策理论相结合的思想求解最优权重, 最后通过评分原则得出光缆线路运行的可靠性等级, 为电力光缆线路进行可靠性评估提供了依据。

## 1 不确定型 AHP

层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 是 1977 年由 Satty 提出的一种实用多准则决策方法。其思想是首先建立清晰的层次结构分解复杂的问题, 其次引入测度理论, 通过两两比较, 用相对标度量化人的判断并建立判断矩阵, 然后求解判断矩阵权重, 最后计算方案综合权重并排序。

由于信息不完备, 在两两比较中易出现不确定主观判断, 用点值来表示不确定性的主观判断, 与实际情况不符。从而, 引入不确定型层次分析法,

把传统的层次分析法和区间数学结合起来, 将区间数代替点值来构成判断矩阵, 然后求解权重向量, 通过区间数矩阵和向量计算得到区间数综合权重, 最后对其排序。当区间数  $X = [x^-, x^+]$ , 上界  $x^+$  和下界  $x^-$  相等时, 区间数就退化为点值, 因此传统的 AHP 可以看作是不确定型 AHP 的一种特例。

## 2 不确定型 AHP 的电力光缆线路综合评估

根据模糊综合评估的运算公式, 即:

$$A = W \circ R \quad (1)$$

因此, 客观地确立权重向量  $W$  和模糊矩阵  $R$  成为电力光缆线路模糊综合评估的关键。

### 2.1 权重的确定

#### 2.1.1 建立层次结构

层次结构的建立是通过对所考虑问题的深入分析, 将其包含的因素划分为不同的层次。光缆在运行中, 受到雷击、电腐蚀等的影响后, 易损坏光纤, 引发线路故障, 进而对传输业务造成不同程度的影响。由于故障地点不同, 光缆受损程度不一, 使得修复时间、费用等有较大差异。同时, 光缆类型的不同也会导致故障的诱因、对业务的影响程度以及维修方式的不同, 影响线路的可靠性。根据对上述问题的分析, 可确定因素集为故障因素、对业务的影响、故障恢复以及光缆类型(图 1)。按照属性不同分组, 每组作为一个层次, 可以分为目标层(可靠性等级)、中间层(一级指标)和最底层(二级指标)。

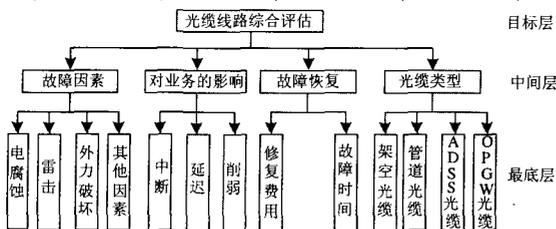


图 1 AHP 层次结构

Fig.1 AHP hierarchy of the case

#### 2.1.2 建立区间数判断矩阵

判断矩阵的值反映了人们对各因素相对重要性的认识, 一般采取 1~9 及其倒数的标度方法。区间判断矩阵符合以下构造原则<sup>[4]</sup>:  $A = (A_{ij})_{n \times n}$  为一区间判断矩阵, 其中, 元素  $A_{ij}$  表示第  $i$  个与第  $j$  个因素间的相对重要程度, 用  $[a_{ij}, b_{ij}]$  表示, 满足: (1)  $1/9 \leq a_{ij} \leq b_{ij} \leq 9$ ; (2)  $A_{ii} = [1, 1]$ ; (3)  $A_{ji} = [b_{ij}^{-1}, a_{ij}^{-1}]$ 。

在专家两两比较判断中, 可能出现不一致的情况, 以此为依据进一步计算可能导致错误的决策结果。因此, 采用文献[3]中的方法进行一致性校验。

#### 2.1.3 确定区间的权重

为了保证评估结果的准确性, 任意两个指标间的相对重要性都经过多个专家评判。为将权重向量转化为最优权重, 本文在采用 IEM 法<sup>[4]</sup>进行权重向量的求解后, 利用群判断、集值统计<sup>[5]</sup>和重心决策理论相结合的方法来确定本次评估的最优权重。

##### 1) 群判断

(1) 将区间数判断矩阵  $A$  进行一致性逼近形成一个新的满足互反性的一致性数字矩阵

$$M = (m_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

$$m_{ij} = \left( \prod_k^n \frac{a_{ik} b_{ik}}{a_{jk} b_{jk}} \right)^{\frac{1}{2n}}$$

(2) 计算群判断的相似性  $u^{(i)}$ 。  $\eta_{ij}$  表示专家评判的相似性,  $\eta^{(i)} = \sum_{j=1}^n \eta_{ij} - 1$  表示向量  $\alpha_i$  与其他向量相似性之和, 把  $\eta^{(i)}$  归一化, 得到描述第  $i$  个专家的评判相似程度的量  $u^{(i)}$ ,  $u^{(i)}$  越大,  $\alpha_i$  的可信度越高。

$$\eta_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \alpha_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (\alpha_j)^2}} \quad (3)$$

$$u^{(i)} = \eta^{(i)} / \sum_{j=1}^n \eta^{(j)} \quad (4)$$

(3) 计算群判断的差异性  $\delta^{(k)}$ 。

$\alpha_k = (\alpha_{k1}, \alpha_{k2}, \dots, \alpha_{km})$  表示第  $k$  位专家对  $m$  个评判目标所做的评判值。当  $\delta^{(k)}$  越大, 可信度越低, 反之可信度越高。

$$\delta^{(k)} = \sum_{i=1}^m \left| \alpha_{ki} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \right| / \left| \sum_{i=1}^m \left| \alpha_{ki} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \right| \right| \quad (5)$$

(4) 计算专家的可信度  $w_k$ 。若  $\sum_{k=1}^n u^{(k)} \delta^{(k)} \neq 1$ ,

则

$$w_k = u^{(k)} (1 - \delta^{(k)}) / \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n u^{(i)} \delta^{(i)} \right\} \quad (6)$$

否则:  $w_k = u^{(k)}$  (7)

##### 2) 集值统计和重心决策理论

设有  $n$  个专家, 对某个指标进行评价, 共得到  $n$  个区间值, 形成一个集值统计序列  $U$ 。第  $k$  个专家的权重为  $w_k$ , 且  $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ , 则考虑专家权重的样本落影函数为:

$$\bar{X}(U) = \sum_{k=1}^n w_k x_{[u_1^{(k)}, u_2^{(k)}]}(u) = \sum_{k=1}^n w_k p_k \quad (8)$$

设  $u_{\max}$  和  $u_{\min}$  分别为指标取得的最高值和最

低值, 则有:

$$G(U) = \frac{\int_A \bar{X}(U)u du}{\int_A \bar{X}(U)du} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^n w_k [(u_2^{(k)})^2 - (u_1^{(k)})^2]}{\sum_{k=1}^n w_k [u_2^{(k)} - (u_1^{(k)})]} \quad (9)$$

当指标可以定量计算时, 对所有的  $k$ ,  $u_1^{(k)} = u_2^{(k)} = e$  (某一常数), 则

$$\bar{X}(U) = \begin{cases} 1 & u = e \\ 0 & u \neq e \end{cases} \quad (10)$$

指标的评估值为:  $G(U) = e$  (11)

### 2.2 模糊矩阵的构建

对底层各个指标计算其隶属函数值, 即构建底层评语模糊向量。由于底层指标评语的评估标准不同, 需无量纲化处理<sup>[4]</sup>, 获得无量纲得分, 利用模糊隶属度函数进行模糊化处理。采用模糊统计方法计算底层指标的隶属函数, 并得到相应的模糊向量  $(r_{ij})_{n \times s}$ , 形成底层指标的模糊矩阵  $R$ ,  $r_{ij}$  为第  $i$  个指标对应第  $j$  个等级的比重, 反映该指标所属等级。

按照以上步骤, 确立权重向量和评语模糊矩阵后, 即可利用式(1)进行多层次的模糊综合评估。

### 3 算例分析

以某电网通信系统光缆线路的运行情况为例, 用上述的评估方法对其进行评估。首先构造层次结构(图 1)。以光缆线路故障使通信业务造成中断、削

弱和延迟为例, 根据区间数判断矩阵的互反性, 三位专家构造的区间判断矩阵  $U_{21}$ 、 $U_{22}$ 、 $U_{23}$  如下:

$$U_{21} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [6,13/2] \\ [1/3,1/2] & [1,1] & [7/2,11/2] \\ [2/13,1/6] & [2/11,2/7] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$U_{22} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [5,6] \\ [1/3,1/2] & [1,1] & [4,9/2] \\ [1/6,1/5] & [2/9,1/4] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$U_{23} = \begin{bmatrix} [1,1] & [2,3] & [5,13/2] \\ [1/3,1/2] & [1,1] & [4,9/2] \\ [2/13,1/5] & [2/9,1/4] & [1,1] \end{bmatrix}$$

其他判断矩阵的构造同上, 根据上文提到的检验一致性的方法, 进行一致性校验。运用 IEM 法求解其区间权重, 再利用公式(2)~(11)将区间数转化为最优权重, 通过 Matlab 计算, 结果如表 1 和表 2。

建立评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  {高、较高、中等、较低、低}, 及相应的决策值集  $X = \{100, 99, 98, 97, 95\}$  然后对底层指标进行单指标评估, 根据光缆线路实际运行情况, 构建模糊化向量, 从而形成各要素底层评语模糊矩阵  $R_i (i = 1, 2, 3)$ 。再应用公式(1)计算出各要素的二级模糊向量, 结果如表 1。最后经过两级模糊运算, 得出该光缆线路可靠性的模糊综合评估, 如表 2 所示。

表 1 模糊综合评估过程

Tab.1 Processes of fuzzy comprehensive assessment

编号	二级因素集	权重	二级模糊化向量	二级模糊运算结果
$U_1$	电腐蚀	0.0636	(0.36, 0.64, 0, 0, 0)	(0.43, 0.57, 0, 0, 0)
	雷击	0.1349	(0.25, 0.75, 0, 0, 0)	
	外力因素	0.6873	(0.48, 0.52, 0, 0, 0)	
	其他因素	0.1142	(0.33, 0.67, 0, 0, 0)	
$U_2$	中断	0.6071	(0, 0.56, 0.44, 0, 0)	(0, 0.46, 0.54, 0, 0)
	削弱	0.3061	(0, 0.29, 0.71, 0, 0)	
$U_3$	延迟	0.0868	(0, 0.37, 0.63, 0, 0)	(0.05, 0.77, 0.18, 0, 0)
	修复费用	0.2633	(0.19, 0.81, 0, 0, 0)	
	故障时间	0.7367	(0, 0.76, 0.24, 0, 0)	
$U_4$	架空光缆	0.0118	(0.26, 0.74, 0, 0, 0)	(0.61, 0.39, 0, 0, 0)
	管道光缆	0.3545	(0.43, 0.57, 0, 0, 0)	
	ADSS 光缆	0.3962	(0.75, 0.25, 0, 0, 0)	
	OPGW 光缆	0.2375	(0.67, 0.33, 0, 0, 0)	

表 2 模糊综合评估结果  
Tab.2 Results of fuzzy comprehensive assessment

编号	一级因素集	权重	二级模糊运算结果	一级模糊运算结果
U	故障因素	0.2981	(0.43, 0.57, 0, 0, 0)	(0.22, 0.53, 0.25, 0, 0)
	对业务的影响	0.4096	(0, 0.46, 0.54, 0, 0)	
	故障恢复	0.1552	(0.05, 0.77, 0.18, 0, 0)	
	光缆类型	0.1371	(0.61, 0.39, 0, 0, 0)	

最终的评价结果通过使用评分原则来确定。评分原则就是对评语集数性化, 即分别用一组适当的数字来表示评语集, 并划分科学合理的等级, 然后对评价指标加权求和, 进而得出结论。

在本例中, 设定的评语集为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 分别表示{高、较高、中等、较低、低}, 这里将其量化为  $X = \{100, 99, 98, 97, 95\}$ 。对于最终的结果  $P$ , 假定当  $P \in [99.5, 100]$  时, 对应的评价结果可靠性为“高”; 当  $P \in [98, 99.5]$  时, 对应的评价结果为“较高”; 当  $P \in [97, 98]$  时, 对应的评价结果为“中等”; 当  $P \in [96, 97]$  时, 对应的评价结果为“较低”; 当  $P \in [95, 96]$  时, 对应的评价结果为“低”。对本例:

$$P = \sum_{i=1}^5 a_i \times x_i = 0.22 \times 100 + 0.53 \times 99 + 0.25 \times 98 = 98.97$$

因此, 模糊综合评估的结果是: 该条光缆线路的可靠性等级为较高。

目前, 多采用光缆线路运行率来描述电力光缆线路的可靠度。即:

光缆线路运行率 =

$$\left\{ 1 - \frac{\sum [\text{光纤故障芯数 (芯)} \times \text{故障时间 (min)}]}{\text{实用光纤芯数 (芯)} \times \text{全月日历时间 (min)}} \right\} \times 100\%$$

在上例的条件下, 该电网通信系统光缆线路的运行率为 99.6%, 评估结果为: 高。与本文的评估结果存在差异, 这是由于该计算仅考虑了光缆的故障时间, 而本文所采用的基于不确定型层次分析法能够从光缆故障的原因、对业务造成的影响、故障修复以及光缆类型出发, 更符合实际情况。

#### 4 结论

本文引入不确定层次分析法对电力光缆线路进行可靠性评估。该方法充分体现了光缆线路在运行时的实际情况, 能够充分体现专家在评判过程中的不确定性和模糊性。根据多位专家为各项指标构造的区间判断矩阵, 采用群判断、集值统计和重心决策理论相结合的方法求解最优权重, 提高了评估过程中各项指标权重的准确性。应用 Matlab 进行计算, 简化了求解过程, 易于得出结果。实例分析表

明了该模型和算法的正确性和有效性。

#### 参考文献

- [1] 李海泉, 谢书鸿. OPGW 雷击可靠性研究[J]. 电力系统通信, 2004, 25:41-45.  
LI Haiquan, XIE Shuhong. The Discussion About the Dependability of Lightning Strike OPGW[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004, 25: 41-45.
- [2] 李正超, 王红军, 丁玉江. ADSS 光缆电腐蚀机理及预防措施[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(3):37-39.  
LI Zheng-chao, WANG Hong-jun, DING Yu-jiang. The Discussion About the Mechanism and Prevention Method of Electric Corrosion in ADSS Cable[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24, Pa:37-39.
- [3] Ge S Y, Dong Z. Cabling Reconstruction of Urban Electric Network Based on Interval Analytic Hierarchy Process[J]. Electric Power, 2004, 37:34-37.
- [4] 范利国, 牛东晓. 基于区间层次分析法的输电网规划综合评价决策[J]. 继电器, 2007, 35 (12) :47-51.  
FAN Li-guo, NIU Dong-xiao. An IAHP-based MADM Method in Transmission Network Planning[J]. Relay, 2007, 35:47-51.
- [5] 汪新凡. 基于模糊语言评估和加权集值统计的多属性群决策方法[J]. 统计与决策, 2007, (1) :44-45.  
WANG Xin-fan. Multi-attribute Decision Making Based on Fuzzy Linguistic Assessments and Weighted Set-valued Statistics[J]. Statistics and Decision, 2007, (1) :44-45.

收稿日期: 2008-04-02; 修回日期: 2008-07-07

作者简介:

高强 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向为信息安全和通信网络管理及信号处理;

耿方方 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力通信网可靠性评估; E-mail: gfhudian@126.com

芦杉 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与信息处理。