

## 基于球形模糊 AHP 的增容导线综合评价体系研究

杜志叶<sup>1,2,3</sup>, 李泽文<sup>1†</sup>, 黎鹏<sup>1</sup>, 黄菁雯<sup>2,3</sup>, 甘艳<sup>4</sup>, 吴军<sup>4</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 电网环境保护全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

4. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077)

**摘要:**针对华中地区某 500 kV 线路增容改造过程中选型的问题, 本文基于球形模糊层次法, 提出了考虑实际应用场景的增容导线评价选型方法. 评价指标基于增容导线基本特征, 从电气性能、热力性能、机械性能及经济性四个方面进行分析, 运用球形模糊层次分析法, 构建层次分析体系结构, 并考虑实际应用场景的影响, 将模糊分析理论应用于对比矩阵构建过程, 建立满足工程需求的球形模糊对比矩阵, 依据球形模糊得分函数进行打分, 案例计算结果表明, 在输送容量需求大的区域, 铝包钢芯耐热铝合金线要优于其他导线. 在跨山场景下, 碳纤维复合芯软铝绞线优于其他导线.

**关键词:**增容导线; 导线选型; 输电线路; 球形模糊集; 层次分析法

**中图分类号:**TM726

**文献标志码:**A

## Research on Comprehensive Evaluation System of Capacity Increasing Conductors Based on Spherical Fuzzy & AHP

DU Zhiye<sup>1,2,3</sup>, LI Zewen<sup>1†</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, HUANG Jingwen<sup>2,3</sup>, GAN Yan<sup>4</sup>, WU Jun<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China;

4. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Based on the spherical fuzzy hierarchy method, this paper proposes a method for evaluating and selecting capacity increasing conductors for a 500 kV transmission line in central China, taking into account practical application scenarios. The evaluation indicators are based on the basic characteristics of the capacity increasing wire, and they are analyzed from four aspects: electrical performance, thermal performance, mechanical performance, and economy. The spherical fuzzy analytic hierarchy process is used to construct the hierarchical analysis system structure, and the influence of practical application scenarios is considered. The fuzzy analysis theory is applied to the comparison matrix construction process to establish a spherical fuzzy comparison matrix that

\* 收稿日期:2024-09-19

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51977152), National Natural Science Foundation of China(51977152); 国家电网华中分部科技项目(52140023000K), Science and Technology Project of Central China Branch of State Grid Corporation of China(52140023000K)

**作者简介:**杜志叶(1973—), 男, 河南许昌人, 武汉大学教授, 工学博士

† 通信联系人, E-mail:942471378@qq.com

meets the engineering requirements. The scoring is based on the spherical fuzzy scoring function. The case calculation results show that in areas with high transportation capacity demand, aluminium clad steel core heat-resistant aluminium alloy wire is superior to other wires. In the cross mountain scenarios, carbon fiber composite core soft aluminium stranded wire is superior to other wires.

**Key words:** capacity-enhanced capacitive conductor; conductor selection; transmission line; spherical fuzzy set; analytical hierarchy process

随着社会进步与科技发展,我国的电力需求日益增长.在夏季用电高峰期,用电负荷增加,使得架空输电线路负担加重.同时,夏季环境温度高且风速较小,导线散热慢,线路在重负荷或潮流转移时,导线的温度与弧垂相应增加<sup>[1]</sup>.常规导线难以满足日益增长的用电需求,也无法承受在极端热天气下过负荷输送导致的热稳定风险,继而引发停电、断电等事故,造成经济损失,威胁输电安全.

2022年6月至8月,我国遭遇了持续的高温天气.高温导致输电线路负荷急剧增加,线路输送容量无法满足实际需求,结果在四川大部分地区引发工业断电6天,造成的经济损失超过200亿元<sup>[2-3]</sup>.为此,电网需要采用增容导线对线路进行增容改造,缓解高温及过载对线路运行的影响,提高输电线路输送容量以满足日益增长的用电需求.广东某500 kV输电线路对原钢芯铝绞线进行“温升”改造,采用增容导线,使得单回线路极限输送容量不低于3 460 MVA,单根导线载流量达到1 050 A,当该线路增容达50%时,采用的铝包钢芯耐热铝合金型绞线的载流量和弧垂均能满足线路增容要求<sup>[4]</sup>.案例表明增容导线既能解决输送容量的问题,又能解决导线的弧垂与发热的问题.采用增容导线替换传统钢芯铝绞线是输电增容工程的主要措施之一<sup>[5]</sup>,是缓解电力供需矛盾的一种有效方法.

增容导线有较多类型,在增容改造工程中进行导线选型时,需对比各个导线的性能差异,选择最合适的导线.常见的增容导线有钢芯耐热铝合金线与间隙型耐热铝合金线<sup>[6]</sup>,相较于同尺寸的钢芯铝绞线,该类导线最大允许通过的载流量提高了1.6~2倍,最大承受温度可达150℃.但该导线在输送大容量以及导线温度较高时,依然存在弧垂增大较多的问题,应用此类导线进行增容改造时需要重新建立满足其机械性能的杆塔.此外,还有铝基陶瓷纤维

复合芯导线<sup>[7]</sup>、碳纤维复合芯导线<sup>[8]</sup>.这类导线需要进口,价格昂贵,架线困难,但相较于铝包钢芯耐热铝合金线,这类导线最大允许通过的载流量提高了2~3倍,材质轻,弧垂特性好,很大程度上缩减了杆塔建立的费用.

不同种类的增容导线各方面性能存在差异,在不同的增容改造工程中,根据不同的增容改造需求,会有不同选择,因此需要有合适的方法对导线性能进行评估,从而得到增容改造工程中最优的选择.文献[9]对导线的电气性能<sup>[10]</sup>、机械性能<sup>[11]</sup>进行了分析对比.文献[12]在比较过程中,分析了导线电气性能的载流量<sup>[13]</sup>和电能损耗<sup>[14]</sup>两个指标,机械性能方面对比了导线的机械荷载、弧垂特性<sup>[15-17]</sup>.文献[18]构建了基于全生命周期成本(life cycle cost, LCC)的导线选型函数,对比分析了在不同最大损失小时数及传输容量条件下各个导线的LCC费用.文献[19]将导线的指标分为效益型和成本型<sup>[20]</sup>两类指标,通过灰色关联法综合评价了增容导线的导电性能,得到了导线的最优方案.灰色关联法需要确定部分指标最优值,最优值确定困难,评价过程中也没有考虑增容导线应用场景.

本文细化增容导线电气性能与机械性能两个方面的评价指标,设置的电气性能指标包括载流量、电能损耗;机械性能方面,在杆塔类型相同情况下,比较导线的垂直荷载、机械荷载、弧垂特性;引入导线热力性能指标,主要比较各个导线所耐受的温度;并基于全生命周期成本,从一次投资成本与等年值费用两个方面比较导线的经济性能.运用球形模糊集与层次分析法相结合的方法,考虑增容导线应用场景,通过调整球形模糊优选关系矩阵,提高性能指标的权重占比,进而评价不同场景下各增容导线的性能,选择适合实际工程的最优导线.

## 1 增容导线综合评价体系构建

### 1.1 增容导线基本特征

导线是架空输电线路的主体,主要传输电能。由于导线需要长期暴露在空气外,遭受风、雨、冰等自然环境的侵袭;在输送大电流过程中,导线的运行温度会升高,同时弧垂会降低。针对上述问题,导线需要具备较好的输电性能、承载高温的热力性能、满足要求的机械性能、满足工程需求的经济性能<sup>[21]</sup>,增容导线能很大程度上满足上述要求。增容导线又称节能导线,通过提高线路导体导电率或改变导线内部加强芯等方式,以提高导电能力,减少输电线路损耗<sup>[22]</sup>。因此,构建增容导线综合评价指标体系时,主要应体现其输送能力、节能效果、承载性能、安全特性及经济高效性这五类基本特征。

### 1.2 增容评价体系

增容导线综合评价指标体系如图 1 所示。为了便于后续评价工作的开展,在进行指标选择时,应选取可量化、可分级且统计数据较易获取的指标<sup>[23]</sup>;同时评价指标满足增容导线选择的五类基本特征。根据导线选型的基本方法,从导线的电气性能、热力性能、机械性能、经济性四个方面确定子指标,子指标的选取满足增容导线基本特征。

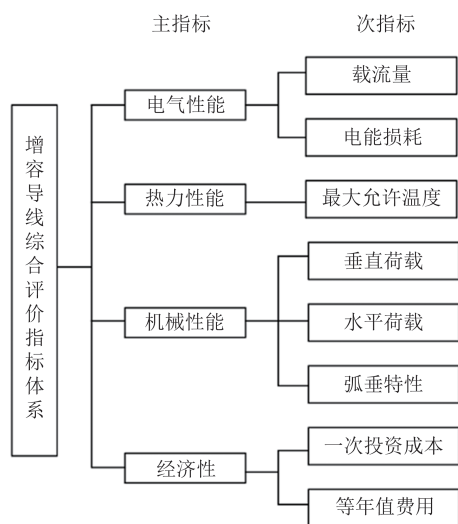


图 1 增容导线综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation index system for capacity increasing conductor

### 1.3 评价指标

#### 1.3.1 电气性能

电气性能评价指标主要选取载流量和电能

损耗。

载流量能直观反映导线承载能力,随温度变化而变化,因此,需要比较增容导线在同一温度运行下的载流量。采用 Morgan 公式<sup>[24-27]</sup>计算架空输电线路的允许载流量,该公式基于热平衡原理提出,计算公式为:

$$I = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R_t} \quad (1)$$

式中: $I$ 为导线载流量(A); $W_R$ 为辐射散热功率(W/m); $W_F$ 为对流散热功率(W/m); $W_S$ 为日照吸热功率(W/m); $R_t$ 为允许温度时的交流电阻( $\Omega/m$ )。

为了便于后续载流量的比较,导线平均运行温度取 80 °C。

增容导线通常选用具有高导电性能的材料制成,确保在电力输送过程中电阻较低,从而有效降低导线自身的运行损耗,并显著提升电力传输效率<sup>[28]</sup>。

电能损耗包括导线电阻损耗和电晕损耗。根据电网历史运行经验,高压输电线路设计中,大截面导线的电晕损耗仅为电阻损耗的 3%~4%<sup>[29]</sup>。因此在导线损耗中电阻的热量损失占据绝对主导地位,故估算线损时可忽略电晕损耗,仅考虑线路电阻损耗。单回路线路电阻损耗公式为:

$$W_0 = 3NI^2R_t \quad (2)$$

式中: $N$ 为导线分裂根数; $I$ 为单回路输电线路每根导线流过的额定工作电流(A)。

#### 1.3.2 热力性能

架空导线温度会随着用电负荷、环境温度和潮流转移等因素的变化而改变,当其超过最大允许温度时,可能会造成一系列安全隐患<sup>[30]</sup>。因此,需要考虑增容导线的最大允许运行温度。在后续性能比较中,主要比较不同导线间同一运行情况下的导线运行温度。

#### 1.3.3 机械性能

机械性能包括机械荷载和弧垂特性。

机械荷载主要包括垂直荷载与水平荷载。垂直荷载是指在输电线路中,导线由于自重、冰重等因素产生的垂直方向的力。水平荷载指的是导线受到的水平方向的作用力。因为在覆冰情况下,导线的迎风面增加,杆塔的水平荷载随之增加,严重情况下,会导致输电线路杆塔倾倒,严重危害安全<sup>[31-33]</sup>,所以需要考虑增容导线在应用后的机械荷载。

弧垂是判断线路改造是否需要更换杆塔的重要因素之一。为了节约杆塔费用,采用的增容导线在



满足条件的输送容量和极限状态的输送容量下的弧垂,应当接近或小于原线路导线的弧垂.弧垂的计算公式如下:

$$f_{\max} = \frac{qL^2}{8T_0 \cos \varphi} \quad (3)$$

式中: $f_{\max}$ 为导线最大弧垂; $q$ 为导线单位载荷; $L$ 为导线档距; $T_0$ 为导线最低点张力; $\cos \varphi = h/L$ , $h$ 为导线两端悬挂点高差.

本文通过将所选导线与原导线进行对比,采用弧垂变化比例来体现增容导线的弧垂特性.而导线的机械性能与增容导线自身参数、杆塔型号、杆塔高度、档距有关,因此在后续增容导线评价分析时,要在同一条件下进行分析.因此取同一杆塔高度下,档距相同进行比较.

### 1.3.4 经济性

经济性包括一次投资成本和等年值费用.

一次投资成本主要包括导线单价及杆塔新建所需材料费用,反映了工程实际所需投入费用,直观突出成本.

增容导线的全寿命周期成本的评估采用等年值费用,全寿命周期成本LCC的计算公式如下:

$$LCC = IC + \sum_{t=1}^T (OC + MC + FC) \times \left( \frac{1 + R_t}{1 + R_A} \right)^t + DC \quad (4)$$

式中:IC表示一次投资成本;OC表示运行损耗成本;MC表示运行维护成本;FC表示故障损失成本;DC表示退役回收成本;以上成本单位为万元/km. $t$ 表示工程使用年限; $R_t$ 表示利率; $R_A$ 表示通货膨胀率.

等年值费用计算公式如下:

$$NF = Z \left[ \frac{r_0(1 + r_0)^t}{(1 + r_0)^t - 1} \right] + \mu \quad (5)$$

式中:NF表示年平均费用(万元); $Z$ 表示折算到第 $m$ 年的总投资(万元); $t$ 表示工程施工年数; $r_0$ 表示电力工业投资回收率; $\mu$ 表示折算年运行费用(万元).

等年值费用是众多方案比选过程中常用的经济性评估方法,它能够有效反映工程投资的合理性与经济性.该方法将参与比较的各个方案在计算期内的全部支出费用折算为等年值费用进行对比,年费用较低的方案在经济上最为优越<sup>[34-35]</sup>.

## 2 增容导线综合评价方法

### 2.1 球形模糊集

球形模糊集(spherical fuzzy set, SFS)是由

Ashraf提出<sup>[36]</sup>,在模糊集的基础上发展研究而来,通过隶属度函数来描述某个事物属于某个集合的程度.球形模糊集是直觉模糊集(intuitionistic fuzzy set, IFS)<sup>[37]</sup>、毕达哥拉斯模糊集(Pythagorean fuzzy set, PyFS)<sup>[38]</sup>、图模糊集(picture fuzzy set, PFS)<sup>[39]</sup>的推广,弥补了其他模糊集决策空间受限的缺点,提供了更大的决策空间.图2为各个模糊集在约束条件下的决策空间几何图.

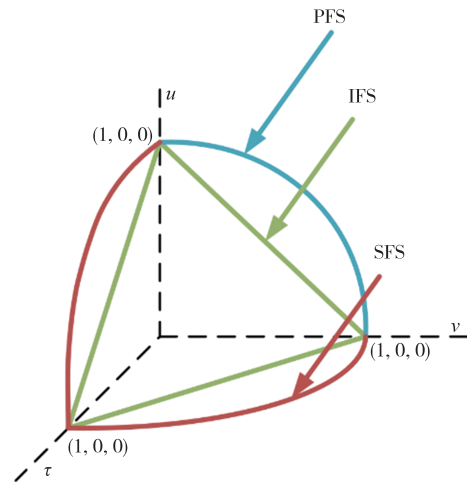


图2 模糊集几何图

Fig.2 Fuzzy set geometry diagram

球形模糊集是一种新型的模糊集,主要包括隶属度、非隶属度、犹豫度.隶属度是指元素对某个集合或类别的归属程度,在模糊评价体系中,能表示评价对象隶属评价准则的程度.犹豫度主要指在决策过程中表现出的迟疑不决或决策困难的状态,犹豫度与隶属度和非隶属度是不相关的.

设 $U$ 为有限论域, $A$ 为论域 $U$ 上的球形模糊集,模糊集 $A$ 的表达式如下:

$$A = \{x, u(x), v(x), \tau(x) | x \in U\} \quad (6)$$

式中: $u(x)$ 表示隶属度; $v(x)$ 表示非隶属度; $\tau(x)$ 表示犹豫度;取值范围均为 $[0, 1]$ ,约束条件为 $0 \leq u^2 + v^2 + \tau^2 \leq 1$ .

球形模糊加权算术平均(spherical fuzzy number weighted averaging aggregation, SFNWAA)算子的具体形式为:

$$SFNWAA_w(A_1, A_2, \dots, A_n) = w_1 A_1 + w_2 A_2 + \dots + w_n A_n = \left( \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_{A_i}^2)^{w_i} \right]^{1/2}, \prod_{i=1}^n (v_{A_i})^{w_i}, \prod_{i=1}^n (\tau_{A_i})^{w_i} \right) \quad (7)$$

式中: $w_i$ 表示模糊集 $A_i$ 的权重.

球形模糊集的得分函数与精度函数:

$$Sc(A) = (u_A - \tau_A)^2 - (v_A - \tau_A)^2 \quad (8)$$

$$Ac(A) = u_A^2 + v_A^2 + \tau_A^2 \quad (9)$$

当  $Sc(A) < Sc(B)$  或者  $Sc(A) = Sc(B)$  且  $Ac(A) < Ac(B)$  时, 表明  $B$  要优于  $A$ .

## 2.2 球形模糊层次分析法

球形模糊层次分析法是利用球形模糊集对层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)进行扩展的方法. 球形模糊层次分析法的基本步骤与层次分析法类似, 图 3 为球形模糊层次分析流程图.

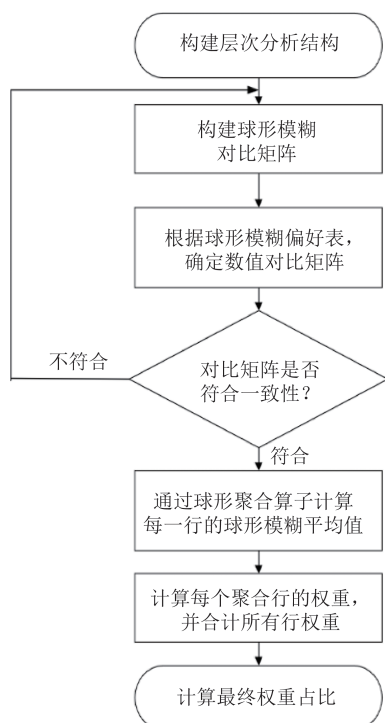


图 3 球形模糊层次分析流程图

Fig.3 Flowchart of spherical fuzzy analytic hierarchy process

依据层次分析法构建的层次体系结构, 确定目标、准则、方案; 判断同一层次的某个元素关于上一层次中某个准则的重要性, 利用球形模糊优选表构建两两比较的球形模糊对比矩阵, 验证了对比矩阵的一致性并计算权重.

球形模糊层次分析法应用于增容导线的综合评价中, 能够根据增容改造项目的主旨目标以及实际线路工况确定导线在性能方面的选择偏好. 而在次指标方面, 根据具体数值, 确定不同方案间在同一指标下的比较矩阵. 根据具体数值构造的比较矩阵可靠性高, 而主指标的比较矩阵是主观构造, 在主旨目标中涉及模糊性词语, 类似于“需要较高电气性能导线, 线路存在较低弧垂, 需要优秀的机械性能导线”这类要求时, 使用模糊性理论能够灵活构

建适应工况的主指标对比矩阵.

### 2.2.1 球形模糊优选关系

有方案集  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 该方案的优选关系由矩阵  $R = [r_{ij}]_{n \times n}$  表示. 其中方案集  $X$  是不同的增容导线集合,  $x_i$  表示各个增容导线,  $r_{ij}$  表示增容导线  $x_i, x_j$  之间优选关系比较.

$$r_{ij} = \left( (x_i, x_j) \mid u(x_i, x_j), v(x_i, x_j), \tau(x_i, x_j) \right) \quad (10)$$

或

$$r_{ij} = (u_{ij}, v_{ij}, \tau_{ij}), \forall i, j = 1, 2, \dots, n$$

式中:  $u(x_i, x_j)$  表示备选方案  $x_i$  优于备选方案  $x_j$  的程度;  $v(x_i, x_j)$  表示备选方案  $x_j$  优于备选方案  $x_i$  的程度;  $\tau(x_i, x_j)$  表示无法表达优选关系的程度, 优选程度存在下列关系:

$$u_{ij}, v_{ij}, \text{ and } \tau_{ij} \in [0, 1]; u_{ij}^2(u) + v_{ij}^2(u) + \tau_{ij}^2(u) \leq 1$$

$$u_{ij} = v_{ji}, v_{ij} = u_{ji}, \tau_{ij} = \tau_{ji},$$

$$u_{ii} = v_{ii} = \tau_{ii} = 0.5, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

偏好关系矩阵中的元素有乘法传递, 即

$$r_{ij}/r_{ji} = (r_{ik}/r_{ki})(r_{kj}/r_{jk}), \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

备选方案  $x_i$  与备选方案  $x_j$  偏好程度的比值  $r_{ij}/r_{ji}$  等于使用中间备选方案  $x_k$  的偏好比率的乘积. 根据乘法传递性验证球面模糊偏好关系(spherical fuzzy preference relation)的一致性. 如果满足式(13)乘法传递性, 则模糊优选关系有乘法相容性.

$$u_{ij}u_{jk}u_{ki} = u_{ik}u_{kj}u_{ji}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

由式(11)可知, 由于  $u_{ij}=v_{jk}, u_{jk}=v_{ij}, u_{ki}=v_{ik}$ , 代入式(13)可推导出  $u_{ij}v_{kj}v_{ik}=v_{ik}u_{kj}v_{ij}$ , 整理可得:

$$\frac{u_{ij}}{v_{ij}} = \frac{u_{ik}}{v_{ik}} \frac{u_{ki}}{v_{ki}} \quad (14)$$

式(14)简化为:

$$\rho_{ij} = \rho_{ik}\rho_{kj}, \rho_{ij} = \frac{u_{ij}}{v_{ij}}, \rho_{ik} = \frac{u_{ik}}{v_{ik}}, \rho_{kj} = \frac{u_{kj}}{v_{kj}} \quad (15)$$

由式(15)可知, 由于犹豫度与隶属度和非隶属度是无关的, 因此犹豫度对该公式没有任何影响. 由式(10)~式(15)可知, 对比矩阵的一致性检验只考虑隶属度和非隶属度, 将球形模糊判断矩阵转换为数字矩阵, 将其替换为  $\rho_{ij}$ , 使矩阵类似于层次分析法中常用的 Saaty 权重法中  $a_{ij}=1/a_{ji}$ ,  $a_{ii}=1$  这种两两正倒数比较矩阵.

构造对比矩阵时需要参数标度, 表 1 所示为球形模糊优选表, 用于每个标准之间的成对比较, 以及在每个标准或次标准下的备选方案之间的成对比较.

表1 球形模糊优选表  
Tab.1 The spherical fuzzy preference scale

语言术语	$(u, v, \tau)$
extremely preferred(EXP)极优选	(0.9, 0.1, 0.1)
very strongly preferred (VSP)非常强烈偏好	(0.8, 0.2, 0.2)
strongly preferred(SP)强烈首选	(0.7, 0.3, 0.3)
moderately preferred(MP)中度首选	(0.6, 0.4, 0.4)
equally preferred(EP)同等优先	(0.5, 0.5, 0.5)
moderately not preferred(MNP)中度不首选	(0.4, 0.6, 0.4)
strongly not preferred(SNP)强烈不首选	(0.3, 0.7, 0.3)
very strongly not preferred (VSNP)非常强烈不首选	(0.2, 0.8, 0.2)
extremely not preferred(ENP)极不首选	(0.1, 0.9, 0.1)

球形模糊优选表语言术语表示的隶属度、非隶属度、犹豫度的数据符合实际. 语言术语中的极优选与极不首选是相对的, 其数据表示隶属关系的程度. 而犹豫度反映语言术语的不确定性、模糊性, 在两个极端的语言术语中, 犹豫度最低, 越往中立选项, 犹豫度会提高. 同等优选的中立会减少数据间的对比, 而这刚好从犹豫度来突出, 符合数据信息模糊性.

### 2.2.2 球形模糊对比矩阵

根据球形模糊优选表构建球形模糊对比矩阵, 构建的对比矩阵的第  $i$  行表示指标  $B_i$  与其他主指标之间的一个对比偏好关系, 对角线上的元素表示相同指标之间的对比, 因此都是同等重要, 记为 EP. 而矩阵中不同指标间的对比, 例如  $B_1$  与  $B_3$  的偏好关系为 SP, 表示指标  $B_1$  要比  $B_3$  具有强烈首选性,  $B_3$  与  $B_1$  的偏好关系为 SNP, 表示  $B_3$  要比  $B_1$  具有强烈不首选性.

### 2.2.3 一致性检验

根据球形模糊对比矩阵, 形成清晰的数学表达的对比矩阵  $R=[\rho_{ij}]$  后, 为了检验矩阵构造的合理性, 避免构造的对比矩阵出现矛盾, 例如在某一准则下, 方案  $A$  优于方案  $B$ , 方案  $B$  优于方案  $C$ , 方案  $C$  又优于方案  $A$  这类矛盾. 运用特征值法计算对比矩阵的一致性, 一致性检验方法为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (16)$$

式中:  $CI$  为一致性指标;  $\lambda_{\max}$  表示矩阵最大特征值;  $n$  表示矩阵大小, 即矩阵为  $n$  行  $n$  列的矩阵.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(RW)_i}{W_i} \quad (17)$$

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (18)$$

式中:  $W_i$  为权重, 权重计算方法为算数平均;  $RW$  表示对比矩阵  $R$  与权重的  $n$  维向量  $W$  的乘积, 再计算一致性指标  $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (19)$$

式中:  $RI$  为平均随机一致性指标, 需要对照一致性指标表格查表, 据判断矩阵的大小确定  $RI$  的值. 若  $CR$  小于 0.1, 则认为判断矩阵的一致性可以接受, 否则需要重新调整判断矩阵.

### 2.2.4 得分函数

根据球形模糊优选关系, 得到一个  $n$  维向量  $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ . 权重  $w_i$  表示一个标准与其他标准比较的相对优势, 或者指在某个标准下备选方案的优势. 因此需要确定一个函数来确定准则和备选方案的权重.

由式(8)、式(9)所示的得分函数与精度函数, 有可能存在得分函数为负数, 精度函数还可以为两个不同的球形模糊集提供相同值. 在直觉模糊集中应用的排名函数为  $F(A)=0.5(1+\tau)(1-u)$ , 犹豫度  $\tau$  越小, 隶属度  $u$  越大,  $F(A)$  越小, IFS 越优. 根据以上经验提出了关于 SFS 的得分函数:

$$F(A) = u(1-v)(1-\tau) \quad (20)$$

SFS 最理想的选择为  $(1, 0, 0)$ , 即 100% 隶属, 0 非隶属, 0 犹豫. 备选方案与  $(1, 0, 0)$  的距离越小, 该方案越优. 因此, 备选方案的权重随着与  $(1, 0, 0)$  的距离减小而增大. 对于备选方案  $(u, v, \tau)$ , 其离理想方案  $(1, 0, 0)$  的距离的基本项是  $|u-1|, v, \tau$ ; 两者距离随着隶属度的增大而减小, 非隶属度犹豫度越小距离越小, 式(20)的得分函数不会存在计算结果是负数的情况.

### 2.2.5 权重计算

使用聚合算法计算第  $i$  行的球形模糊加权几何平均值:

$$r^i = \left( \prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} \quad (21)$$

基于式(7)球形模糊加权几何平均算子, 结合式(20)中的得分函数计算每个聚合行的得分, 即计算每一行总和的得分  $\sum F(r^i)$ , 并计算权重  $w_i = F(r^i) / \sum F(r^i)$ ,  $i$  表示行数, 该权重表示第  $i$  行的事物在总事物中的权重. 最终的权重计算为



$$W_{ei} = \sum w_j w_{ij} \tag{22}$$
式中: $w_j$ 表示准则层的权重,即准则之间相互的权重; $w_{ij}$ 表示准则层下,不同方案所占权重.

3 算例验证及结果分析

3.1 导线比选方案

以华中电网某 500 kV 输电线路增容改造工程为例,原线路存在热稳定极限风险,未来输送负荷大,线路总长 25 km,为经济发达地区的重要通道,且线路经过跨山区域,因此需要分段进行增容改造,以满足不同线路段的改造需求.算例中线路原最大输送容量为 1 250 MVA,所使用的原导线为 LGJ-630/45,线路增容 25% 在“N-1”情况下的输送功率及相电流如表 2 所示.

表 2 线路在“N-1”情况下的输送功率及相电流

Tab.2 Transmission power and phase current of the line under “N-1” conditions

增容类型	输送功率/MVA	相电流/A
原线路每回线	2 620	4×756
增容 25% 后每回线	3 270	4×945

依据原线路输送容量与增容后的线路载流量,选择导线横截面小于或等于原有导线横截面的增容导线.结合市场及近几年的增容改造工程所选导线,本文选择铝包钢芯耐热铝合金线 JNRLH60/LB1A-500/35( $P_1$ )、碳纤维复合芯软铝绞线 JLRX1/JFB-480/52( $P_2$ )、铝包殷钢芯耐热铝合金绞线 JNRLH1(3)/LBY-345/55( $P_3$ )作为备选方案.

计算各比选导线在线路增容 25% 及“N-1”情况(最大输送容量,环境温度 35 ℃)下的导线运行温度及交流电阻如表 3 所示.

表 3 25% 增容所选导线“N-1”时线温及交流电阻

Tab.3 The wire temperature and AC resistance of the selected wire under the condition of 25% capacity increase and “N-1”

导线型号	导线温度/℃	子导线交流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
$P_1$	82.05	0.075 25
$P_2$	84.89	0.076 63
$P_3$	102.28	0.115 3

所选导线均满足线路增容需求,根据图 1 中的增容导线评价指标体系,搜集与计算各个增容导线子指标数据,如表 4~表 6 所示.其中,载流量为平均

运行温度下所选导线的载流量;运行温度为“N-1”情况下增容 25% 所选导线运行时的温度;机械性能中的数据根据实际情况,选择典型档距 400 m 计算.经济性计算中,根据导线全寿命周期成本的敏感度分析,导线损耗费用敏感度系数最高,若导线的电能损失低,在年利用小时数越大的情况下,对经济性有较大的影响,因此年利用小时数取 5 000 h,电价取当地的 0.65 元/(kW·h).

表 4 电气及热力性能指标数据

Tab.4 Electrical and thermal performance index data

导线型号	载流量/A	电能损耗/(kW·km <sup>-1</sup> )	运行温度/℃
$P_1$	915	881	729
$P_2$	111.232	106.531	162.407
$P_3$	82.05	84.89	102.28

表 5 机械性能指标数据

Tab.5 Mechanical performance index data

导线型号	垂直荷载/(N·m <sup>-1</sup> )	水平荷载/(N·m <sup>-1</sup> )	弧垂特性/%
$P_1$	15.698	25.059	1.77
$P_2$	13.930	22.052	-20.90
$P_3$	13.435	21.751	-2.16

表 6 经济性指标数据

Tab.6 Economic indicator data

导线型号	一次投资成本/(万元·km <sup>-1</sup> )	等年值费用/(万元·km <sup>-1</sup> )
$P_1$	133.460	56.04
$P_2$	269.308	67.11
$P_3$	292.076	91.45

3.2 构建对比矩阵

设上述增容导线选择方案的电气性能、热力性能、机械性能、经济性分别为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ . 电气性能中载流量、电能损耗分别为  $b_{11}$ 、 $b_{12}$ ;热力性能中导线耐受温度为  $b_{21}$ ;机械性能中垂直荷载、水平荷载、弧垂特性分别为  $b_{31}$ 、 $b_{32}$ 、 $b_{33}$ ;经济性中一次投资成本、等年值费用为  $b_{41}$ 、 $b_{42}$ .

参照表 1 球形模糊优选表中的刻度构建对比矩阵.华中地区某 500 kV 线路所选导线的准则层球形模糊对比矩阵为  $R_1$ ,矩阵  $R_1$  工况主要为经济发展区域,未来负荷需求大,又为潮流转移重要线路,选择的增容导线需要优异的电气性能,因此在对比矩阵设置过程中,电气性能要优于其他性能指标,具体如表 7 所示.

表 7 准则层球形模糊对比矩阵  $R_1$   
Tab.7 Criteria layer spherical fuzzy comparison matrix  $R_1$

指标	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_1$	EP	MP	SP	MP
$B_2$	MNP	EP	MP	EP
$B_3$	SNP	MNP	EP	MNP
$B_4$	MNP	EP	MP	EP

在第 1 行中电气性能比热力性能与经济性要中度首选,取 MP;热力性能与经济性取同等重要,因此热力性能与经济性相互比较时都取 EP.由于机械性能的偏好程度最低,因此在  $B_3$  列中的取值皆要往 EP 以下进行取值,如 SNP 与 MNP,该取值表示电气性能要比机械性能强度首选,热力与经济性要比机械性能中度首选.该取值需要根据工程实际需求确定,若增容比例较高,通过的载流量大,线路运行温度高,在所有指标都满足工程需求的情况下,则电气性能的偏好程度更高,而热力性能的对比数值也需要作出调整.

对于跨山区域,存在大面积树林,当跨度较大时,弧垂较大,存在山火威胁.在冬季会出现覆冰等情况,因此对机械性能指标要求高.所选导线的准则层球形模糊对比矩阵为  $R_2$ ,如表 8 所示.

表 8 准则层球形模糊对比矩阵  $R_2$   
Tab.8 Criteria layer spherical fuzzy comparison matrix  $R_2$

指标	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_1$	EP	EP	MNP	MP
$B_2$	EP	EP	MNP	MP
$B_3$	MP	MP	EP	SP
$B_4$	MNP	MNP	SNP	EP

该矩阵中机械性能最优,电气性能与热力性能同等重要,考虑到跨山区域可能需要重建部分杆塔,因此经济性的重要程度较低.在  $B_3$  行中,机械性能相较于电气与热力性能中度首选,取 MP,相较于经济性强列首选,取 SP.根据一致性,电气与热力性能相较于经济性中度首选,而不能选择强烈首选,否则会与机械性能平级.

通过 2.2 节一致性检验公式计算两种工况下的准则层 CR 均为  $6.192 \times 10^{-5}$ ,通过一致性检验.

3.3 计算结果

为了比较工况对导线选择的影响,这里引入矩阵  $R_3$ ,  $R_3$  为平均分配主指标性能的权重,即 1/4.根据球形模糊计算流程,计算不同工况下各性能间的权重结果如表 9 所示.

表 9 准则层权重  
Tab.9 Criteria layer weight

各工况下对比矩阵	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$R_1$	0.370 1	0.233 4	0.163 0	0.233 4
$R_2$	0.233 4	0.233 4	0.370 1	0.163 0
$R_3$	0.25	0.25	0.25	0.25

主指标的准则层权重是不同工况条件下各个子指标的权重系数,也反映了决策者对各个性能的偏好程度.

各个导线方案在各个性能间的权重如表 10 所示.

表 10 各个性能间导线所占权重  
Tab.10 Weight distribution of wires between different performance indicators

子指标	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$b_{11}$	0.479 5	0.309 9	0.210 5
$b_{12}$	0.337 0	0.519 9	0.143 1
$b_{21}$	0.594 8	0.302 3	0.102 9
$b_{31}$	0.143 1	0.337 0	0.519 9
$b_{32}$	0.143 1	0.337 0	0.519 9
$b_{33}$	0.092 6	0.682 9	0.224 5
$b_{41}$	0.682 9	0.224 5	0.092 6
$b_{42}$	0.479 5	0.309 9	0.210 5

根据准则层权重及各个性能间的权重计算结果,在不同工况下,各个导线最终权重计算结果如图 4 所示.

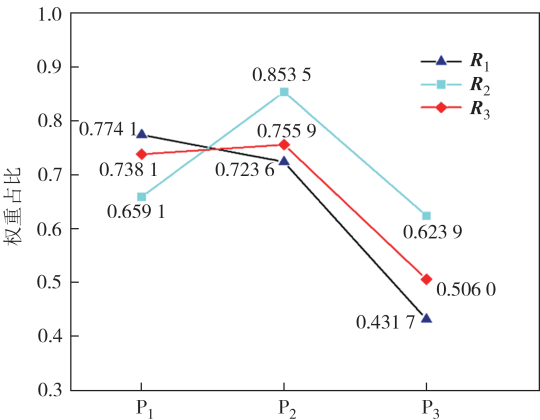


图 4 总权重结果

Fig.4 Total weight result

根据图 4 可知,在未来负荷需求高,潮流转移集中线路,铝包钢芯耐热铝合金线最优.相较于碳纤维导线,铝包钢芯耐热铝合金线能在满足大容量的需求下,还能降低成本.在跨山区域,实际线路对机械性能需求较高,且跨山区域需面临杆塔重建等问题,



因此选用碳纤维复合芯软铝绞线最优.在不考虑工况条件下仅对各个导线的性能进行综合评定,碳纤维复合芯软铝绞线要优于其他导线.

## 4 结 论

本文细化了增容导线评价的基本特征,结合华中地区某 500 kV 输电线路增容改造实际应用,运用球形模糊层次分析法对增容导线综合评价分析.在分析过程中得到主要结论如下:

1) 为了更加准确地评价增容导线,简述了增容导线评价的基本特征,包括输送能力、节能能力、承载能力、安全性能、经济高效这五类,使增容导线的评价体系更加全面.

2) 运用球形模糊层次分析法,构建了层次分析结构,在常规的 AHP 法中引入模糊分析理论,增加了决策者的偏好域.对增容导线在不同工程应用场景下的性能进行分析,设置不同对比矩阵,根据最终的权重计算结果,选择合适的导线.

3) 碳纤维复合芯软铝绞线各方面性能优异,适合跨山区域,尤其在年利用小时数越大、重建杆塔比例越大的场合,该导线的经济性越高,主要原因是该导线能很大程度上降低电能损耗.铝包钢芯耐热铝合金线能满足对容量需求较高的极大部分区域,其工艺成熟,经济性优.

## 参考文献

- [1] 李明明,王建,熊小伏,等.高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(2):25-33.  
LI M M, WANG J, XIONG X F, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 25-33. (in Chinese)
- [2] Europa Publications. The Europa Directory of International Organizations 2022 [R/OL]. (2022-07-28) [2024-09-19]. <https://doi.org/10.4324/9781003292548>.
- [3] 高红均,郭明浩,刘俊勇,等.从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J].中国电机工程学报,2023,43(12):4517-4538.  
GAO H J, GUO M H, LIU J Y, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4517-4538. (in Chinese)
- [4] 邓丽文.铝包钢芯耐热铝合金型线绞线在 500 kV 输电线路中的应用[J].农村电气化,2023(3):53-55.  
DENG L W. Application of aluminum-clad steel core heat-resistant aluminum alloy stranded wire in 500 kV transmission line [J]. Rural Electrification, 2023(3): 53-55. (in Chinese)
- [5] 沈楚莹,尹芳辉,燕秀,等.绞合型碳纤维复合芯导线的弧垂特性研究[J].电网技术,2021,45(12):4964-4970.  
SHEN C Y, YIN F H, YAN X, et al. Sag characteristics of stranded carbon fiber composite core conductor [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4964-4970. (in Chinese)
- [6] 刘建伟,赵枫,郝艳勇.国内钢芯耐热铝合金导线的研究和应用[J].电气时代,2016(12):73-77.  
LIU J W, ZHAO F, HAO Y Y. Research and application of domestic steel core heat-resistant aluminum alloy wires [J]. Electric Age, 2016(12): 73-77. (in Chinese)
- [7] 杨庆华,刘新平,谢小松.新型耐热铝基陶瓷纤维芯铝绞线的应用论述[J].华东电力,2008,36(4):103-105.  
YANG Q H, LIU X P, XIE X S. Application of novel heat-resistant aluminum conductor composite reinforced [J]. East China Electric Power, 2008, 36(4): 103-105. (in Chinese)
- [8] 林芳,刘利林,汤哲,等.特高压直流工程中碳纤维复合芯导线选型研究[J].智慧电力,2020,48(9):96-101.  
LIN F, LIU L L, TANG Z, et al. Selection of carbon fiber composite core conductor in UHVDC engineering [J]. Smart Power, 2020, 48(9): 96-101. (in Chinese)
- [9] 薛磊.高压架空输电线路大跨越导线选型研究[J].科学技术创新,2023(23):190-193.  
XUE L. Research on the selection of large crossing conductor for high voltage overhead transmission lines [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(23): 190-193. (in Chinese)
- [10] 林锐,张礼朝,张培勇,等.1000kV特高压交流输电线路大跨越导线选型[J].电力建设,2015,36(5):91-98.  
LIN R, ZHANG L C, ZHANG P Y, et al. Large-crossing conductor selection of 1 000 kV UHVAC transmission line [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 91-98. (in Chinese)
- [11] 万建成,董玉明,刘龙,等.3类节能导线性能对比与适用范围[J].中国电力,2016,49(1):102-108.  
WAN J C, DONG Y M, LIU L, et al. Performance comparison and application scope of three kinds of energy-saving conductors [J]. Electric Power, 2016, 49(1): 102-108. (in Chinese)
- [12] 张永建,郭志涛,彭续解,等.架空输电线路耐热导线的比选方法研究[J].电力学报,2021,36(5):444-453.

- ZHANG Y J, GUO Z T, PENG X J, et al. Research on comparison method of heat-resistant conduct for transmission line [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36 (5): 444-453. (in Chinese)
- [13] 李军辉, 贾思棋, 杜冬梅, 等. 考虑径向温差的架空输电导线的动态增容分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 57-66.
- LI J H, JIA S Q, DU D M, et al. Dynamic capacity analysis of overhead transmission lines considering temperature field [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(4): 57-66. (in Chinese)
- [14] 梁涵卿, 邬雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 630-635.
- LIANG H Q, WU X, LIANG X M. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 630-635. (in Chinese)
- [15] 饶玉凡. 中冰区输电线路新型节能导线应用分析[J]. 电气应用, 2014, 33(3): 85-89.
- RAO Y F. Application analysis of new energy saving conductors for transmission lines in moderate ice cover district [J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(3): 85-89. (in Chinese)
- [16] 姚陈果, 张磊, 李成祥, 等. 基于力学分析和弧垂测量的导线覆冰厚度测量方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1204-1209.
- YAO C G, ZHANG L, LI C X, et al. Measurement method of conductor ice covered thickness based on analysis of mechanical and sag measurement [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1204-1209. (in Chinese)
- [17] 侯宇, 王伟, 韦徵, 等. 基于模型校核的输电线路载流量限额动态评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 159-166.
- HOU Y, WANG W, WEI Z, et al. Dynamic evaluation of ampacity limit for transmission line based on model calibration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 159-166. (in Chinese)
- [18] 刘汉生, 刘剑, 李俊娥, 等. 基于全寿命周期成本评估的特高压直流输电线路导线选型[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 310-315.
- LIU H S, LIU J, LI J E, et al. Conductors selection of UHVDC transmission lines based on life cycle cost [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 310-315. (in Chinese)
- [19] Chang X, Yang J, Zhu S. Comprehensive analysis of conductor selection [C]//In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, Jul 1 382(2): 022069.
- [20] 李林, 刘芳芳, 谢光彬. 基于全寿命周期成本理论的架空线选型方法研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 23-28.
- LI L, LIU F F, XIE G B. The research on overhead line selection based on the life cycle cost theory [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2010, 37(6): 23-28. (in Chinese)
- [21] 郭振强, 张勇, 朱超, 等. 架空高压线增容技术研究进展[J]. 电工电气, 2020(5): 6-11.
- GUO Z Q, ZHANG Y, ZHU C, et al. Research progress on capacity-uprating technology of overhead high voltage line [J]. Electrotechnics Electric, 2020(5): 6-11. (in Chinese)
- [22] 魏飞. 节能导线在高压输电线路设计中的应用[J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 248-249.
- WEI F. Application of energy saving conductor in high voltage transmission line design [J]. Application of IC, 2022, 39(12): 248-249. (in Chinese)
- [23] 易俊, 林伟芳, 任莹, 等. 新型电力系统发展水平指标体系构建及综合评价方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3758-3768.
- YI J, LIN W F, REN X, et al. Research on construction of index system and comprehensive evaluation method of development level of new power system [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3758-3768. (in Chinese)
- [24] MORGAN V T. The thermal rating of overhead-line conductors Part I. The steady-state thermal model [J]. Electric Power Systems Research, 1982, 5(2): 119-139.
- [25] MORGAN V T. Rating of bare overhead conductors for continuous currents [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1967, 114(10): 1473.
- [26] CHEN S L, BLACK W Z, LOARD H W. High-temperature ampacity model for overhead conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 1136-1141.
- [27] 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 92-96.
- HAN X Y, HUANG X B, ZHAO X H, et al. Preliminary study on morgan transmission capacity simplified formula of transmission lines [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2009, 21(5): 92-96. (in Chinese)
- [28] 张运周, 李明. 输电线路分裂导线粘连在线监测系统的设计与实现[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(1): 99-102.
- ZHANG Y Z, LI M. Design and implementation of the on-line monitoring system of bundled conductor adhesion [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015, 13(1): 99-102. (in Chinese)
- [29] 张端. 电力输电线路中节能导线对工程造价的影响[J]. 科技风, 2019, (35): 111.
- ZHANG D. The impact of energy-saving conductors in power

- transmission and distribution lines on project cost[J]. Technology Wind, 2019(35): 111.(in Chinese)
- [30] 王刚, 梁影. 探究新型节能导线在高压输电线路中的应用[J]. 节能与环保, 2023(11): 58-62.
- WANG G, LIANG Y. Exploring the application of new energy saving conductors in high voltage transmission lines [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2023 (11) : 58-62. (in Chinese)
- [31] FARZANEH M. Atmospheric icing of power networks [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008:7-9.
- [32] 杜志叶, 何靖萱, 柳双, 等. 考虑后续回击的 500 kV 单回交流线路耐雷水平研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(2):157-164.
- DU Z Y, HE J X, LIU S, et al. Study on lightning resistance level of 500 kV single circuit AC transmission line considering subsequent lightning return stroke [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences) , 2023, 50 (2) : 157-164. (in Chinese)
- [33] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2):215-219.
- HU Y. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid [J] . High Voltage Engineering, 2008, 34(2):215-219. (in Chinese)
- [34] 刘剑, 张勇, 杜志叶, 等. 交流输电线路设计中的全寿命周期成本敏感度分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6):1554-1559.
- LIU J, ZHANG Y, DU Z Y, et al. Life cycle cost sensitivity analysis in AC transmission lines design [J] . High Voltage Engineering, 2010, 36(6):1554-1559. (in Chinese)
- [35] 吴墨非, 柏晓路, 吴高波, 等.  $\pm 1500$  kV 特高压直流输电线路导线选型研究[J]. 电力勘测设计, 2023(6):23-30.
- WU M F, BAI X L, WU G B, et al. Research on  $\pm 1500$  kV UHVDC transmission line conductor selection[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(6):23-30. (in Chinese)
- [36] ASHRAF S, ABDULLAH S, MAHMOOD T, et al. Spherical fuzzy sets and their applications in multi-attribute decision making problems[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36 (3):2829-2844.
- [37] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1):87-96.
- [38] YAGER R R, ABBASOV A M. Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2013, 28(5):436-452.
- [39] CÙÖNG B C. Picture fuzzy sets[J]. Journal of Computer Science and Cybernetics, 2015, 30(4): 409-420.