

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.015

# 基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警

徐文宝, 周建华

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**输电线路舞动严重影响电网的安全运行。文中从造成输电线路舞动的影响因素出发,将模糊数学理论运用到输电线路舞动预警研究中,构建基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警模型。文中首先筛选出垂直风速、雨量、相对湿度、气温、导线张力5个主要影响指标,构建预警评判因素集以及Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅰ级4种评判目标集。然后,将监测数据代入模型计算,根据模糊综合评判结果发布预警信息,为工作人员感知线路风险、做好防灾准备提供指引。最后,开发基于ArcGIS Engine的输电线路舞动预警辅助决策系统,可视化展示预警信息,并选取实际线路数据验证所提方法的有效性,结果表明所提预警方法与技术可为输电线路安全运行提供决策支撑。

**关键词:**输电线路舞动;模糊层次;ArcGIS Engine;辅助决策系统;舞动预警;辅助决策

**中图分类号:**TM726

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2021)05-0107-07

## 0 引言

随着社会与经济的不断发展,电能供应需求不断提升。输电线路作为电力系统中最庞大的组成单元,承载着电能传输的重要任务。中国是世界上自然环境最复杂的国家之一,输电线路在日常运行时,易受大风、覆冰、暴雨等极端恶劣自然环境的影响而发生舞动<sup>[1-5]</sup>。由输电线路舞动造成的线路跳闸、断线、故障停电等事故极大影响社会正常运行和居民日常生活。研究输电线路舞动预警方法可为线路工作人员提供参考依据,提前做好应对线路舞动的准备,将灾害损失降至最低。

在输电线路舞动机理研究中,文献[6]将造成输电线路舞动的主要原因归为三方面:线路覆冰、风偏激励以及线路结构参数。文献[7]从线路舞动运动本身出发,研究线路舞动轨迹,通过数学推导建立架空输电线路舞动单自由度及三自由度数学模型。文献[8-10]研究基于加速度传感器的输电线路舞动在线监测技术,利用传感器获取线路实时数据,并通过通信模块远程传输数据,实时监测线路信息。在输电线路预警方法研究中,文献[11]采用基于反向传播(back propagation, BP)神经网络的机器学习算法,并结合区域历史舞动频次数据,预测舞动发生概率。文献[12]从风险理论出发,采用风速、舞动时间等参数计算风险系数,定量计算输电线路舞动风险。文献[13]运用灰色关联理论,提前确定3个参考指标集,对实时数据与参考数据进行灰色关联分析,选出关联度最高的指标集,确定

线路舞动状态。现有研究仍缺乏切实有效的输电线路舞动预警方法,在预警结果、预警信息发布的规范性、实用性方面存在不足,因此亟需开展适用于工程应用的输电线路舞动预警方法研究。

文中将模糊数学理论运用到输电线路舞动预警研究中,建立基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警模型。依据风险事件的形成原因筛选影响指标,构建评判因素集;依据风险事件的严重程度设定预警等级,构建评判目标集。采用主客观结合的方法计算权重,并基于最优理论优化权重。预警结果可为工作人员及时感知线路风险、做好防灾准备工作提供参考依据。最后,文中通过算例分析对所提方法的有效性进行验证,并结合开发的辅助决策系统,实现输电线路舞动预警的可视化展示。

## 1 基于最优理论的改进模糊层次综合评判

### 1.1 权重计算

传统模糊层次法是将层次分析法引入模糊评估法中,改进层次分析法的不足。但在利用模糊层次法计算权重时,由专家经验确定一致性判断矩阵,无法完全克服主观因素造成的影响。文中综合考虑主客观方法计算权重,基于最优理论优化权重,并结合模糊数学原理构建综合评判模型。

#### 1.1.1 基于模糊层次法的主观权重计算

根据专家和线路工作人员经验,筛选影响指标,构建影响因素集。采用数量标度法,对每两个影响因素进行重要程度比较,比较原则及标度方法如表1所示。标度完成后确定模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , $n$ 为影响因素总数。

表1 模糊层次数量标度原则  
Table 1 The principle of fuzzy level quantitative scaling

标度	说明
0.5	两元素的重要程度相等
0.6	两元素相比, $i$ 比 $j$ 稍微重要
0.7	两元素相比, $i$ 比 $j$ 明显重要
0.8	两元素相比, $i$ 比 $j$ 强烈重要
0.9	两元素相比, $i$ 比 $j$ 极端重要
互补标度	$a_{ji} = 1 - a_{ij}$

模糊一致矩阵  $M = (h_{ij})_{n \times n}$  的计算步骤如下。将  $A$  中各元素按行求和, 记为  $h_i$ 。

$$h_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

计算  $M$  中各元素为:

$$h_{ij} = (h_i - h_j) / (2n) + 0.5 \quad (2)$$

采用模糊层次法计算各影响因素主观权重为:

$$\begin{cases} w_i = \frac{1}{n\beta} \sum_{j=1}^n h_{ij} + \frac{1}{n} - \frac{1}{2\beta} \\ \beta = (n - 1) / 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w_i$  为各影响因素指标权重;  $\beta$  为差异因子, 决定权重的差异度,  $\beta$  按式(3)取值时权重差异最为合理。

### 1.1.2 基于熵权法的客观权重计算

作为计算客观权重的常用方法, 熵权法用于比较各个指标之间的离散程度或方差, 计算各个指标的熵值和差异系数, 从而得出权重<sup>[14]</sup>。根据信息熵理论, 可将熵值表示为:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^k [p(x_i) \ln p(x_i)] \quad (4)$$

式中:  $k$  为信源消息的个数;  $p(x_i)$  为事件  $i$  出现的概率。

客观权重计算步骤如下。

(1) 构建评价指标矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times k}$ , 其中  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价对象第  $j$  项指标的特征值。

(2) 将指标进行归一化处理。

(3) 计算第  $j$  项指标下, 第  $i$  个评价对象指标所占的比重。

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

(4) 计算第  $j$  项指标的熵值。

$$e_j = - \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

(5) 计算表征指标  $j$  相对重要性的熵值  $E_j$ , 当所有指标相等的时候, 选取最大的熵值, 并进行归一化。

$$E_j = e_j / e_{j, \max} = - \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) / (- \ln p) = \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) / \ln p \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

(6) 计算第  $j$  项指标的差异系数, 指标熵值越小, 指标的变异程度越大。

$$g_j = 1 - E_j \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

(7) 计算第  $j$  项指标的权重。

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j = (1 - E_j) / \left( k - \sum_{j=1}^n E_j \right) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

### 1.1.3 基于最优理论的综合权重计算

得到以上 2 组权重后, 基于最优化理论, 以综合权重与已知指标权重偏差最小为目标, 构建最优化模型<sup>[15]</sup>, 计算步骤如下。

(1) 计算综合权重向量  $W_0$  与第  $h$  组权重  $W_h$  的偏差。

$$W_0 - W_h = [w_{1,0} - w_{1,h} \dots w_{i,0} - w_{i,h} \dots w_{n,0} - w_{n,h}] \quad (10)$$

式中:  $w_{i,0}$ ,  $w_{i,h}$  分别表示综合权重向量集和第  $h$  组权重向量集中第  $i$  个影响因素的权重;  $h$  最大值为  $s$ 。

(2) 构建最优化模型。

$$\begin{cases} \min \sum_{h=1}^s \|W_0 - W_h\|^2 = \min \sum_{h=1}^s \sum_{j=1}^n (w_{j,0} - w_{j,h})^2 \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n w_{j,0} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

(3) 构造拉格朗日函数对模型进行求解。

$$L(w_{j,0}, \lambda) = \sum_{h=1}^s \sum_{j=1}^n (w_{j,0} - w_{j,h})^2 + \lambda \left( \sum_{j=1}^n w_{j,0} - 1 \right) \quad (12)$$

分别对  $w_{j,0}$  和  $\lambda$  求一阶偏导并令其为 0, 求得综合权重向量  $W_0$ , 对应的  $w_{j,0} (j = 1, 2, \dots, n)$  即为由最优化模型计算得到的综合权重。

## 1.2 模糊综合评判

### 1.2.1 构建评判因素集与评判目标集

评判因素集是对评判对象有影响的众多因素组成的集合, 需全面筛选具有代表性的影响因素组成评判因素集。评判目标集需提前设置好分级化的评判结果, 文中的预警研究与应用可将评判目标集设置为 I 级、II 级、III 级、IV 级风险。

### 1.2.2 设置隶属度函数

依据评判目标集中不同等级的模糊阈值设定隶属度函数, 将各影响因素指标值代入不同等级的

隶属度函数进行计算,得到模糊判定矩阵  $\mathbf{R}$ 。相邻评判等级之间在判断时存在模糊性,采用三角隶属分布构建隶属度函数。影响指标分为正向和反向指标 2 类,2 类指标的隶属度函数确定法则不同。以正向指标为例,三角隶属度函数  $y$  关于评判指标  $x$  的分布如图 1 所示,设置 IV 级、III 级、II 级、I 级风险的隶属度函数分别如式(13)—式(16)所示。

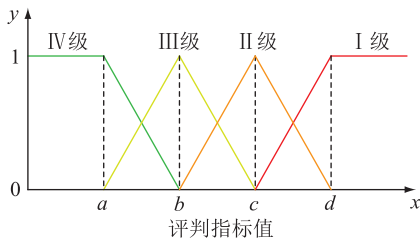


图 1 正向指标三角隶属度函数分布  
Fig.1 Triangular subjection function distribution of positive indicator

$$y_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (13)$$

$$y_2(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \\ 0 & x \leq a, x \geq c \end{cases} \quad (14)$$

$$y_3(x) = \begin{cases} \frac{x-b}{c-b} & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x < d \\ 0 & x \leq b, x \geq d \end{cases} \quad (15)$$

$$y_4(x) = \begin{cases} 0 & x \leq c \\ \frac{x-c}{d-c} & c < x < d \\ 1 & x \geq d \end{cases} \quad (16)$$

式中: $a, b, c, d$  分别为指标不同等级的模糊阈值。

反向指标通过逆序排列正向指标的 4 个隶属度函数获得。

### 1.2.3 模糊综合评判

将模糊判定矩阵  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$  和计算得到的各影响因素综合权重  $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]$  进行矩阵积运算。

$$\mathbf{B} = \mathbf{w} \times \mathbf{R} = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n] \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m] \quad (17)$$

式中: $m$  为评判目标集元素总数; $\mathbf{B}$  为模糊评判结果,元素最大数值对应的评判目标即为模糊综合评判的最终结果。

### 1.2.4 模糊综合评判有效性指标检验

根据有效性指标检验,可对模糊综合评判的评估结果进行判定。

$$\alpha = \frac{r\varepsilon - 1}{2\delta(r - 1)} \quad (18)$$

式中: $r$  为评判结果  $\mathbf{B}$  的元素个数; $\varepsilon$  为  $\mathbf{B}$  中第一大隶属度; $\delta$  为  $\mathbf{B}$  中第二大隶属度; $\alpha > 0.5$  时,评判结果有效。

## 2 基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警模型

### 2.1 输电线路舞动影响因素确定

输电线路舞动是一种复杂且危险的线路振动,因输电线路舞动造成的故障停电、线路跳闸、断线等事故严重影响社会的正常秩序<sup>[16]</sup>。线路覆冰、风的激励等是引起输电线路舞动的重要因素。文中根据输电线路的舞动机理,从造成输电线路舞动的原因出发,筛选出垂直风速、雨量、相对湿度、气温、导线张力 5 个主要影响指标。其中相对湿度和气温指标主要反映了覆冰因素对线路舞动的影响情况<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 输电线路舞动预警等级确定

根据输电线路实际舞动的严重程度,设置不同的预警等级反映事故的严重性,以便工作人员提前采取不同的应对措施<sup>[19-21]</sup>。4 种输电线路风险预警等级:IV 级、III 级、II 级、I 级,按系统风险严重度逐渐升高。I 级预警为最高级别预警,此时工作人员应采取最高级别的准备措施应对风险。输电线路舞动预警信息发布格式如表 2 所示。

表 2 输电线路舞动预警信息发布格式

Table 2 Information release format of transmission line galloping warning

参数	内容
编号	20200526-1
时间	2020-05-26 13:00:00
线路电压等级/kV	500
区域	XX 市
分段	XX 段
预警线路	XX 线
预警等级	IV 级、III 级、II 级、I 级

### 2.3 输电线路舞动预警体系

设定输电线路舞动预警评判因素集与评判目标集,构建预警体系如图 2 所示。

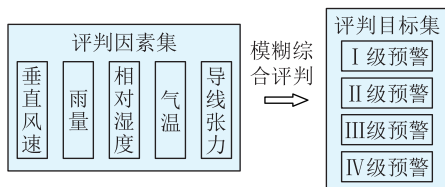


图2 输电线路舞动预警体系  
Fig.2 Early warning system of transmission line galloping

### 2.4 输电线路舞动影响因素隶属度函数计算

输电线路舞动预警评判目标集中有4个预警等级,根据舞动影响因素与不同预警等级之间的数值关系,经专家分析确定输电线路舞动预警模型中各个影响因素的阈值<sup>[22-24]</sup>,如表3所示。

表3 输电线路舞动预警阈值  
Table 3 Early warning threshold of transmission line galloping

参数	IV级	III级	II级	I级
横向风速/(m·s <sup>-1</sup> )	1	4	15	25
雨量/(mm·h <sup>-1</sup> )	3.3	4.2	8.4	34.6
相对湿度/%	60	70	80	90
气温/℃	5	0	-5	-10
导线张力/kN	70	85	95	110

根据表3中不同等级影响因素的阈值,设置各影响因素的隶属度分布函数并计算隶属度。由于影响因素过多,文中以正向指标垂直风速为例,利用式(13)一式(16)设置隶属度分布函数为:

$$y_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ \frac{4-x}{4-1} & 1 < x < 4 \\ 0 & x \geq 4 \end{cases} \quad (19)$$

$$y_2(x) = \begin{cases} \frac{x-1}{4-1} & 1 < x \leq 4 \\ \frac{15-x}{15-4} & 4 < x < 15 \\ 0 & x \leq 1, x \geq 15 \end{cases} \quad (20)$$

$$y_3(x) = \begin{cases} \frac{x-4}{15-4} & 4 < x \leq 15 \\ \frac{25-x}{25-15} & 15 < x < 25 \\ 0 & x \leq 4, x \geq 25 \end{cases} \quad (21)$$

$$y_4(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 15 \\ \frac{x-15}{25-15} & 15 < x < 25 \\ 1 & x \geq 25 \end{cases} \quad (22)$$

### 2.5 输电线路舞动预警步骤

基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞

动预警具体步骤如下。

(1) 根据线路舞动机理和期望评判结果,构建输电线路舞动影响因素集和评判目标集;

(2) 将输电线路按照杆塔编号分段处理,监测并获得各段线路舞动影响因素的数值;

(3) 采用模糊层次法、嫡权法分别计算指标主观权重和客观权重,基于最优理论计算综合权重;

(4) 确定评判目标集隶属度函数,并根据隶属度函数计算模糊评判矩阵;

(5) 根据模糊综合评判结果发布输电线路舞动分段预警信息。

## 3 算例验证

### 3.1 算例介绍

以Y市500 kV输电线路M为例,采用文中所提改进模糊层次综合评判法进行输电线路舞动预警。线路M被6个监测点分为5段,分别标记为线路M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>,M<sub>3</sub>,M<sub>4</sub>,M<sub>5</sub>。用ArcGIS绘制线路及分段情况,如图3所示。



图3 输电线路及线路分段

Fig.3 Transmission line and line segmentation

某日线路M所在地受由北向南强冷空气影响,天气突变,气象条件为中雨、局部暴雨。采集某一时刻线路M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>,M<sub>3</sub>,M<sub>4</sub>,M<sub>5</sub>各影响指标,如表4所示。

表4 分段输电线路指标

Table 4 Index of sectioned transmission lines

线路分段	横向风速/(m·s <sup>-1</sup> )	雨量/(mm·h <sup>-1</sup> )	相对湿度/%	气温/℃	导线张力/kN
M <sub>1</sub>	15.3	20.2	85	-5.5	92
M <sub>2</sub>	8.3	18.7	77	-2.0	84
M <sub>3</sub>	7.5	16.7	82	1.0	82
M <sub>4</sub>	16.5	19.6	81	-3.0	96
M <sub>5</sub>	18.7	19.4	87	-8.0	105

### 3.2 计算步骤

#### 3.2.1 权重计算

采用数量标度法构建模糊判断矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.8 & 0.7 & 0.8 \\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.2 & 0.3 & 0.6 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (23)$$

通过模糊层次法计算影响因素的主观权重为:

$$W_1 = [0.25 \quad 0.21 \quad 0.18 \quad 0.185 \quad 0.175] \quad (24)$$

通过熵权法计算影响因素的客观权重为:

$$W_2 = [0.250 \quad 0.142 \quad 0.167 \quad 0.259 \quad 0.182] \quad (25)$$

基于最优理论对主客观权重进行优化并计算综合权重为:

$$W = [0.250 \quad 0.176 \quad 0.174 \quad 0.222 \quad 0.179] \quad (26)$$

#### 3.2.2 模糊综合评判

由于计算量较大,文中仅取一段线路进行计算。以线路  $M_1$  为例,将监测数据分别代入式(19)一式(22)进行计算,得到  $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.97 & 0.03 \\ 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

基于  $W$  和  $R$ ,运用式(17)计算得到:

$$B = [0 \quad 0.067 \quad 0.742 \quad 0.191] \quad (28)$$

由式(18)对模糊综合评判有效性进行指标检验,可得  $\alpha = 1.717$ ,即模糊综合评判结果有效。

#### 3.2.3 预警信息发布

由式(28)可知,此时线路  $M_1$  的舞动预警等级为 II 级,应发布预警信息如表 5 所示。

表 5 输电线路舞动预警信息发布  
Table 5 Information release of transmission line galloping warning

参数	内容
编号	20200526-1
时间	2020-05-26 13:00:00
线路电压等级/kV	500
区域	Y 市
分段	$M_1$
预警线路	$M$
预警等级	II 级

进一步计算得到线路  $M_2, M_3, M_4, M_5$  段的预警等级分别为 III 级、III 级、II 级、I 级。

### 3.3 可视化预警信息展示

基于 .NET 平台和 ArcGIS Engine 开发输电线路舞动预警辅助决策系统,实现在线计算、预警信息可视化展示、风险统计等功能。结合文中算例,将输电线路舞动预警等级可视化,如图 4 所示。

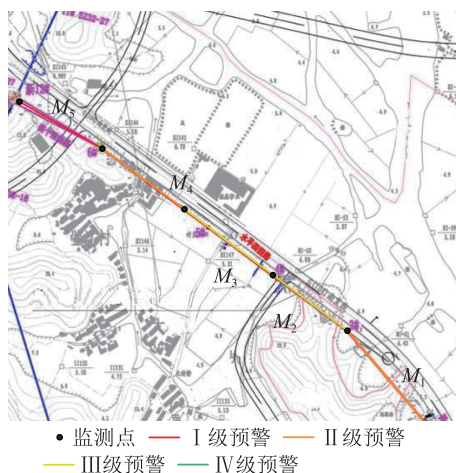


图 4 辅助决策系统预警等级发布

Fig.4 The early warning level release of auxiliary decision-making system

输电线路舞动预警辅助决策系统经后台计算评估和图层渲染等处理后,自动将线路  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$  标识为橙色、黄色、黄色、橙色、红色,对应 II 级、III 级、III 级、II 级、I 级预警。根据可视化平台发布的线路分段预警信息,为工作人员及时应对线路舞动风险提供建议和参考。

线路工作人员当日观测到输电线路  $M$  各段的舞动情况为:线路  $M_1$  和  $M_4$  出现了低幅舞动;线路  $M_5$  舞动较为严重,舞动幅值为 3.8 m,且出现了相间闪络放电和线路跳闸故障。文中预警模型所得预警结果与实际情况基本一致,验证了所提方法和辅助决策系统的有效性和实用性。

## 4 结论

文中基于改进模糊层次综合评判法开展输电线路舞动预警研究,从舞动形成原因出发筛选影响指标,构建评判因素集,依据模糊综合评判结果发布预警等级实现分级预警,主要结论如下。

(1) 在指标权重的计算上采用了主客观结合的方法,采用模糊层次法计算指标主观权重,采用熵权法计算指标客观权重,基于最优理论确定综合权重,对传统的模糊层次法进行了改进,避免完全依靠主观判断确定权重。

(2) 依据线路舞动的严重程度设定 IV 级、III 级、II 级、I 级 4 种预警等级,分级预警方案精确反映了线路的实际舞动状态,方便指引工作人员采取不同

级别的应对措施。

(3) 通过算例分析对模型的合理性和正确性进行了验证。开发了基于 ArcGIS Engine 的舞动预警辅助决策系统,实现了舞动预警在线分析、预警信息可视化展示、数据统计等功能,为保障输电线路安全运行提供实用工具。

参考文献:

[1] 卢明,赵书杰,刘振声,等. 基于灰色投影优化随机森林算法的输电线路舞动预警方法[J]. 电测与仪表,2020,57(9):45-51,57.  
 LU Ming, ZHAO Shujie, LIU Zhensheng, et al. Early warning method of transmission line galloping based on random forest optimized by grey relation projection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9):45-51, 57.

[2] 叶保璇,王康坚,余盛达,等. 计及数据时效性的输电线路状态综合评估方法[J]. 广东电力,2020,33(11):109-116.  
 YE Baoxuan, WANG Kangjian, YU Shengda, et al. Comprehensive evaluation method of transmission line status considering data timeliness[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(11):109-116.

[3] 李黎,华奎,姜昀芃,等. 输电线路多源异构数据处理关键技术研究综述[J]. 广东电力,2018,31(8):124-133.  
 LI Li, HUA Kui, JIANG Yunpeng, et al. Research review on key technology for multi-source heterogeneous data processing for transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8):124-133.

[4] 阎东,吕中宾,林巍,等. 湍流度对覆冰导线气动力特性影响的试验研究[J]. 高电压技术,2014,40(2):450-457.  
 YAN Dong, LYU Zhongbin, LIN Wei, et al. Experimental study on effect of turbulence intensity on the aerodynamic characteristics of iced conductors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2):450-457.

[5] 赵振兵,齐鸿雨,聂礼强. 基于深度学习的输电线路视觉检测研究综述[J]. 广东电力,2019,32(9):11-23.  
 ZHAO Zhenbing, QI Hongyu, NIE Liqiang. Research overview on visual detection of transmission lines based on deep learning[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9):11-23.

[6] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.  
 WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing:Chongqing University, 2016.

[7] 聂永. 架空输电线路舞动监测装置的研究与设计[D]. 无锡:江南大学,2014.  
 NIE Yong. Research and design of monitoring device for overhead transmission line galloping[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2014.

[8] 耿亮,王峥,王海宝,等. 基于加速度传感器的输电线路舞动监测系统研发及应用[J]. 电气时代,2018(4):80-84.  
 GENG Liang, WANG Zheng, WANG Haibao, et al. Development and application of transmission line gallop monitoring system

based on acceleration sensor[J]. Electric Age, 2018(4):80-84.

[9] 周瑞. 基于光纤光栅应变传感器的输电线路舞动监测装置研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.  
 ZHOU Rui. Transmission line galloping monitoring device based on fiber grating strain sensor[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[10] 张港. 基于 MEMS 九轴传感器的导线舞动监测算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.  
 ZHANG Gang. Transmission line galloping monitoring based on MEMS nine-axis sensor[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2016.

[11] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等. 计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(9):86-93.  
 CHU Shuangwei, XIONG Xiaofu, LIU Shanfeng, et al. Short-term risk assessment of power grid considering galloping prediction of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):86-93.

[12] 王津宇,李哲,刘善峰,等. 基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警方法[J]. 高压电器,2019,55(9):194-199.  
 WANG Jinyu, LI Zhe, LIU Shanfeng, et al. Early warning method of iced transmission line galloping based on risk coefficient[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9):194-199.

[13] 胡钊,徐则诚,金哲,等. 基于灰色关联模型的输电线路舞动预警方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):117-122.  
 HU Po, XU Zecheng, JIN Zhe, et al. Early warning method of transmission line galloping based on grey relational model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):117-122.

[14] 李刚,焦亚菲,刘福炎,等. 联合采用熵权和灰色系统理论的电力大数据质量综合评估[J]. 电力建设,2016,37(12):24-31.  
 LI Gang, JIAO Yafei, LIU Fuyan, et al. Comprehensive evaluation of big data quality in power systems with entropy weight and grey system theory[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12):24-31.

[15] 贾骏,谢天喜,陈舒,等. 基于凸优化理论的电力系统主动解列最优断面搜索研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):168-177,353.  
 JIA Jun, XIE Tianxi, CHEN Shu, et al. Controlled islanding method of power system based on convex optimization theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):168-177, 353.

[16] 王少华. 架空输电线路导线舞动及防治技术分析[J]. 高压电器,2010,46(12):63-67.  
 WANG Shaohua. Analysis of conductor galloping phenomena on overhead transmission lines and anti-galloping techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):63-67.

[17] 李新民,朱宽军,李军辉. 输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J]. 高电压技术,2011,37(2):484-490.  
 LI Xinmin, ZHU Kuanjun, LI Junhui. Review on analysis and prevention measures of galloping for transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):484-490.

[18] 李立涅,彭蓉. 智能化平台在输电线路运检系统中的应用

- 研究[J]. 电工技术,2020(3):110-111,113.  
LI Licheng,PENG Rong. Application of intelligent platform in operation and maintenance system[J]. Electric Engineering, 2020(3):110-111,113.
- [19] 刘昌盛,刘和志,姜丁尤,等. 输电线路覆冰舞动研究综述[J]. 科学技术与工程,2014,14(24):156-164.  
LIU Changsheng, LIU Hezhi, JIANG Dingyou, et al. Research overview on galloping of iced transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24):156-164.
- [20] 李帅,梁允,李哲,等. 基于数值天气预报结果的输电线路舞动预测[J]. 智能电网,2016,4(12):1242-1246.  
LI Shuai, LIANG Yun, LI Zhe, et al. Transmission line galloping prediction based on numerical weather prediction results[J]. Smart Grid, 2016, 4(12):1242-1246.
- [21] 方丽华,熊小伏,方嵩,等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42(17):113-119.  
FANG Lihua, XIONG Xiaofu, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):113-119.
- [22] 李清,杨晓辉,刘振声,等. 基于灰色聚类分析的输电线路舞动分级预警方案[J]. 电测与仪表,2020,57(17):45-51.  
LI Qing, YANG Xiaohui, LIU Zhensheng, et al. Graded warning scheme of transmission line galloping based on grey clustering analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17):45-51.
- [23] 李哲,王建,梁允,等. 基于 Adaboost 算法的输电线路舞动预警方法[J]. 重庆大学学报,2016,39(1):32-38,97.  
LI Zhe, WANG Jian, LIANG Yun, et al. An early warning method of transmission line galloping based on adaboost algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1):32-38,97.
- [24] 郭帆,范子健,禹文卓. 基于电力物联网的110 kV 输电线路舞动监测技术研究[J]. 电工技术,2020(22):113-115.  
GUO Fan, FAN Zijian, YU Wenzhuo. Research on 110 kV transmission line galloping monitoring technology based on power internet of things[J]. Electric Engineering, 2020(22):113-115.

作者简介:



徐文宝

徐文宝(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统输变电设备运行与防灾技术(E-mail:506720623@qq.com);

周建华(1968),男,博士,副教授,研究方向为人工智能技术在电气设备试验与故障诊断中的应用。

## Early warning model of transmission line galloping based on improved fuzzy hierarchical comprehensive evaluation

XU Wenbao, ZHOU Jianhua

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The safe operation of power grid is affected seriously by transmission line galloping. Based on the influencing factors of transmission line galloping, the fuzzy mathematics theory is applied in the early warning of transmission line galloping. An early warning model of transmission line galloping based on the improved fuzzy hierarchical comprehensive evaluation method is proposed. Firstly, five major impact indicators including wind speed, rainfall, relative humidity, air temperature and wire tension are screened out to construct an early warning evaluation factor set. Four evaluation target sets including level IV, level III, level II and level I are constructed. Then the monitoring data is substituted into the model calculation. The early warning information is issued according to the fuzzy comprehensive evaluation results, which provides guidance for staff to perceive line risk events and prepare for disaster prevention. Finally, the early warning auxiliary decision-making system of the transmission line galloping based on ArcGIS Engine is developed to achieve the visualization of early warning information, and the actual line data is selected to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed early warning method provides decision support for the safe operation of transmission lines.

**Keywords:** transmission line galloping; fuzzy hierarchy; ArcGIS Engine; auxiliary decision-making system; early warning of galloping; auxiliary decision-making

(编辑 吴楠)