

DOI: 10.7667/PSPC170894

## 多因素驱动架空线路故障率模型

杨才明<sup>1</sup>, 项中明<sup>2</sup>, 谢栋<sup>1</sup>, 马光<sup>3</sup>, 陈哲<sup>3</sup>, 郭创新<sup>3</sup>

(1. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027;  
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 架空线路故障停运将严重影响电力系统的稳定安全运行, 建立全面量化内外部影响因素的架空线故障率模型对评估电力系统运行风险起到了至关重要的作用。根据架空线路故障机理, 提出了多因素驱动的架空线路故障率模型(Multi-Drive-PHM, MDPHM)。以比例风险模型为基础, 基准故障概率函数考虑导线老化, 连接函数中的协变量选择设备健康状态、负载率和天气状况, 各影响因素与故障率的相关性通过假设检验验证。最后采用Levenberg-Marquardt法进行模型的参数估计。算例分析定量展现了各因素对架空线路故障率的影响, 验证了模型的有效性。

**关键词:** 架空线路; 多驱动; 比例风险模型; 故障率; 假设检验

### Multi-drive overhead-line failure rate model

YANG Caiming<sup>1</sup>, XIANG Zhongming<sup>2</sup>, XIE Dong<sup>1</sup>, MA Guang<sup>3</sup>, CHEN Zhe<sup>3</sup>, GUO Chuangxin<sup>3</sup>

(1. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310027, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The outage of overhead-lines seriously affects the stability of power system operation, so the establishment of overhead-lines' failure rate model considering internal and external factors is the key to the risk assessment of power system operation. Based on the failure mechanism of overhead lines, this paper proposes the Multi-Drive-PHM (MDPHM). This model is based on the Proportional Hazard Model (PHM). The model's baseline hazard function adopts aging failure model and the covariates of connected function include the equipment health status, load rate and weather conditions, and the correlations between these covariates and the failure rate are calculated through the testing statistical hypotheses. The Levenberg-Marquardt method is used to estimate the parameters of this model in the final step. The case study quantitatively shows the impact of different factors on the overhead-line failure rate, verifying the validity of this model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51537010).

**Key words:** overhead-line; multi-drive; PHM; failure rate; testing statistical hypotheses

## 0 引言

架空线路作为电力传输的重要通道, 在电网安全中占据着重要地位, 由于其运行环境复杂多变, 极易受到内外部因素的共同影响而发生故障停运, 严重影响人民的正常生活秩序<sup>[1-6]</sup>。因此, 建立一个可以全面量化内外部影响因素的架空线故障率模型, 对于了解电力系统运行风险、提高输电可靠性

具有重要意义。

架空线路可看作是由多元件构成的复杂可修复系统, 任意元件状态的改变均会影响整条线路运行的风险, 所以在基于故障机理的故障率建模难以入手的情况下, 目前的故障率模型主要基于历史数据处理, 通过数理统计的方法给出统计模型<sup>[7]</sup>, 可分为完全历史故障率统计模型和部分历史故障率统计模型两种。完全历史故障率统计模型<sup>[8]</sup>, 仅需要线路故障率与相应服役时间的历史统计数据, 忽略内外部影响因素的复杂作用机理, 虽然操作简单, 但是存在忽略个体设备的差异性、考虑因素过少、精

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目资助(51537010); 国网浙江省电力公司科技项目资助(5211SX1500R4)

度差的天然缺陷。部分历史数据模型的建立可以很好地弥合上述模型的缺点。在电力设备精细化管理的要求下,国内外学者首先对各种故障率影响因素进行了单一建模,提出了基于健康状况诊断的设备故障率模型<sup>[9]</sup>、改进健康指数法的设备故障率模型<sup>[10]</sup>和计及天气状况影响的故障率模型<sup>[11]</sup>等,并将模糊理论<sup>[12]</sup>应用到相关研究中,这些研究虽然对于单一故障因素的理解更加深刻,但不能全面反映各影响因素之间的耦合关系。故又有学者提出了多维时空状态驱动模型,如基于比例风险模型(Proportional Hazard Model, PHM)的 ALHW-PHM 模型<sup>[13]</sup>、条件相依的输电设备短期可靠性模型<sup>[14]</sup>等,提出了整合多种影响因素建模的方法,但这些模型中对于影响因素的选择更多依靠直觉判断,客观性不足,还需进一步研究。

为了构建更加客观、全面的故障率模型,本文首先通过历史统计数据,从故障发生部位与致故障原因两个角度确定架空线路运行风险强相关指标,然后选用 PHM 模型进行整合,最后基于 Levenberg-Marquardt 法进行模型的参数估计,建立非灾变因素主导的多因素驱动架空线路故障率模型,即 Multi-Drive-PHM (MDPHM)模型。算例分析定量展现了各因素对架空线路故障率的影响,验证了模型的有效性。

## 1 架空线路故障率建模

为了合理量化非极端天气条件下多因素驱动架空线路故障率模型,基于我国架空线故障常用分类方法以及相关历史统计数据<sup>[15]</sup>,本文从故障发生部位以及致故障因素两个角度出发,在非极端天气研究背景下,将现有所有故障原因分类并重新整合后整理出设备服役时间、设备健康状态、天气状况和负载率等四个强相关因素,最终构建了以 PHM 模型为基础的多驱动比例故障率模型(Multi-Drive-PHM, MDPHM)。

### 1.1 基础模型—比例故障模型

PHM<sup>[16]</sup>由 D. R. Cox 于 1972 年首次提出,近年来逐渐被应用于电力系统输变电设备的故障率建模中<sup>[17-18]</sup>。根据定义,比例故障率模型给出的函数表达式为

$$h(t) = h_0(t)\psi(Z(t)) \quad (1)$$

式中:  $t$  为当前时刻;  $h_0(t)$  为基准故障率函数;  $\psi(Z(t))$  为连接函数,可量化多种因素对于故障率的影响,其中  $Z(t)$  由多个协变量  $Z_i(t)$  构成,每个协变量代表并量化一种影响因素。最常用的连接函数为

$$\psi(Z(t)) = \exp\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i z_i(t)\right) \quad (2)$$

式中,  $\gamma_i$  为每个协变量的对应协系数。

MDPHM 模型中,基准故障率由设备服役时间确定,协变量包括设备健康状态、负载率和天气状况。

### 1.2 基准故障率函数建模

历史统计发现,电力设备故障率随服役时间的延长,一般经过早期故障期、偶发故障期与损耗故障期,形状与浴盆曲线相似<sup>[19]</sup>。由于 Weibull 分布通过参数值改变可以充分契合浴盆曲线的变化规律,已经广泛应用于设备老化失效的模型中<sup>[20]</sup>,也适合在本文中用作基准故障率函数建模。

$$h_0(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为形状参数,决定函数图像形状;  $\eta$  为尺寸参数,在这里描述设备寿命参数。

2015 年我国输变电设备可靠性指标显示,220 kV、330 kV 和 500 kV 3 个电压等级的架空线路非计划停运发生在导线上的比例分别为 80%、78.26%和 83.73%<sup>[15]</sup>,所以本文选择导线作为老化失效建模的对象。文献[14]给出了导线期望寿命  $L$  的经验公式为

$$L = \exp\left\{\frac{1}{B} \left[ \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - W_{\max} / W_a} \right) \right) - A - D \ln \left( \frac{R}{80} \right) \right] \theta - \frac{C}{B} \right\} \quad (4)$$

式中:  $W$  为导线抗拉强度损失百分比,即导线损失强度与初始强度的比值;  $W_a$  为导线完全退火后抗拉强度损失百分比;  $W_{\max}$  为导线完成服役退出运行时抗拉强度损失百分比;  $\theta$  为导线开尔文温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  和  $R$  为对应导线的属性常数。

令:

$$K = \frac{1}{B} \left[ \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - W_{\max} / W_a} \right) \right) - A - D \ln \left( \frac{R}{80} \right) \right] \quad (5)$$

$$G = \exp(-C/B) \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(4),根据 Weibull 分布中  $\eta$  的定义可得

$$\eta = L = G \exp(K\theta) \quad (7)$$

式中,  $G$ 、 $K$  为新定义的材料参数。

据此得到架空线路长期老化失效模型为

$$h_0(t) = \frac{\beta}{G e^{K\theta}} \left( \frac{t}{G e^{K\theta}} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

需要说明的是式(8)中的  $t$  是架空线保持  $\theta$  温度

持续运行时间, 而非架空线服役时间, 为此需要定义“架空线路等效服役时间”的概念: 将导线温度处在波动状态下实际服役时间折算到基准温度  $\theta$  下的等效运行时间。由于导线温度变化是连续函数, 所以先将整个服役期  $T$  划分为  $n$  个小的时间区间  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 各区间导线运行温度取区间初始时刻温度, 由于沿线穿越多个不同气候区域, 区间温度取全线温度最高值。由式(7)可知, 导线在  $\theta(t_i)$  温度下运行  $t_i$  的等效运行时间  $t_{ei}$  为

$$t_{ei} = t_i e^{K(\theta - \theta(t_i))} \quad (9)$$

累加得到的等效服役时间为

$$T_{eq} = \sum_{i=1}^n t_i \exp[K(\theta - \theta(t_i))] \quad (10)$$

### 1.3 设备健康状态协变量建模

国家电网公司于 2008 年初颁布的《架空输电线路评价导则》<sup>[21]</sup>, 针对架空线路的状态量(包括实验数据、运行情况等)给出了相应的扣分标准, 用于指导各电网公司对于架空线路状态的评价。评价对象包括: 基础、杆塔、导地线、绝缘子串、金具、接地装置、附属设施和通道环境等八大线路单元, 适合本模型中对于除导线外其他装置的状态对于运行风险的影响研究, 故选定线路单元状态扣分值加权和作为线路健康状态值, 即

$$Z_1 = HI \quad (11)$$

式中,  $HI$  为线路健康状态综合扣分值, 其值越大说明其余设备的运行状况越差, 可以很好地量化不同部件的状态与运行风险间的关系。需要说明的是, 由于不同地区的架空线路均包括以上八大线路单元, 各单元对架空线路故障率的影响也大致相同, 因此这里不进行相关性检验, 而是统一采用线路健康状态综合扣分值的方式进行建模。

### 1.4 负载率协变量建模

文献[7]通过算例证明了负载率对于故障率模型有直接、重要的影响, 所以本文采用负载率  $k$  作为协变量, 即

$$Z_2 = k \quad (12)$$

### 1.5 天气状况协变量建模

考虑到各地气候条件不同, 主要致故障天气因素差异巨大, 所以建立统一而不乏个性化考虑天气状况评价的模型尤为重要。需要注意的是, 这里所说的天气状况指的是一般天气情况。当出现如大风、雷电、冰雹、覆冰以及山火、泥石流等极端环境下, 架空线的故障原因发生质变, 故障率将急剧增大, 这时前面提到的老化失效、设备健康状态、负载率等因素对故障率造成的影响几乎可以忽略不计, 模

型将退化成单一因素主导的灾变故障率模型。

为了避免人为主观盲目性的影响, 建立个性化的故障率模型, 本文从历史统计数据出发, 引入假设检验  $p_-$  值, 根据不同区域的特点给出各气象参数的差异化权重计算方法。在统计学中,  $p_-$  被定义为当原假设为真时所得到的样本观测结果或更极端结果出现的概率<sup>[22]</sup>, 其反映了实际观测到的数据与原假设不一致程度的一个概率值<sup>[12]</sup>,  $p_-$  值越小说明观测到的实际数据与原假设之间不一致程度越大, 拒绝原假设的理由也就越充分。

为了消除各天气参数单位及数量级差异对结果的影响, 在整合多气象参数为一个天气状况值前, 需对数据进行离差标准化。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}{\max\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}} \quad (13)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $i$  个观测样本的第  $j$  个气象参数指标;  $x'_{ij}$  为对应因素归一化后数值, 落在  $[0,1]$  范围内;  $n$  为观测样本数量。

本文采用 Pearson 相关系数的概念计算影响因素与架空线故障之间的相关系数。

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

式中:  $x_i$  为第  $i$  个观测样本对应影响因素归一化后的数值;  $y_i$  为第  $i$  个观测样本的故障率。后采用  $t$  分布检验法对与  $r$  相应的总体相关系数  $\rho$  进行假设检验。假设  $H_0: \rho = 0$ ;  $H_1: \rho \neq 0$ ,  $t$  检验法的检验统计量为

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \sim t(n-2) \quad (15)$$

根据  $p_-$  的定义, 计算公式为

$$p_- = \begin{cases} 0 & r^2 = 1 \\ 2P(\tau > |t|) & r^2 \neq 1 \end{cases} \quad (16)$$

定义影响因素的重要度水平为  $(1-p_-)$ , 根据上述算法, 给出影响因素的重要度, 通过设定阈值, 选择出需纳入整体天气状况评价的指标, 并根据重要度计算各分量权重。

$$q_j = \frac{1-p_{-j}}{\sum(1-p_{-j})} \quad (17)$$

式中:  $q_j$  为第  $j$  个影响因素权重;  $(1-p_{-j})$  为对应因素重要度。

最终得到天气综合状况评分值  $Z_3$ , 即

$$Z_3 = 100 \times \left( \sum_j q_j \times x'_j \right) \quad (18)$$

### 1.6 MDPHM 模型建立

综合基础故障率函数与协变量建模, 可得非极端天气状态下架空线的故障率函数为

$$h(t, Z) = \frac{\beta}{G e^{K\theta}} \left( \frac{T_{eq}}{G e^{K\theta}} \right)^{\beta-1} \exp(\gamma_1 Z_1 + \gamma_2 Z_2 + \gamma_3 Z_3) \quad (19)$$

式中:  $G$ 、 $K$  为新构造线路参数;  $t$  为服役时间;  $T_{eq}$  为对应等效服役时间, 通过式(10)折算得到;  $\theta$  为基准温度;  $Z_1$ 、 $Z_3$  分别代表设备健康状态与天气状况评分值, 可通过查询电力及气象统计数据计算得到;  $Z_2$  代表负载率, 可直接从电力调度部门获取;  $\beta$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  为待估计参数。

根据历史样本数据进行参数估计, 得到以拟合值作为参数值的故障率模型, 实用中只要代入待估计时刻的折算等效服役时间、设备健康状态评分值、负载率、天气状况评价值便可以预测对应时刻的架空输电线路故障率。MDPHM 模型构造流程如图 1 所示。

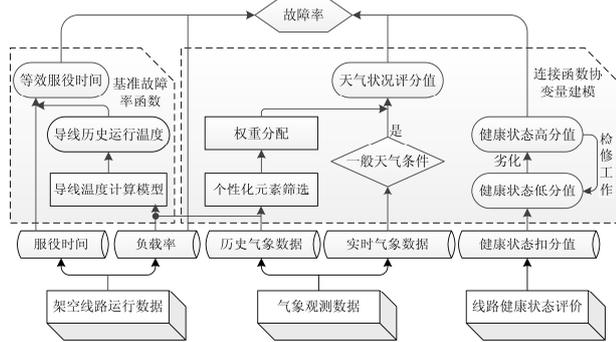


图 1 MDPHM 模型构架流程图

Fig. 1 Frame of MDPHM model

## 2 基于 Levenberg-Marquardt 法的模型参数估计

LM 法是估计非线性关系式参数的重要方法<sup>[23]</sup>, 拟合精度高, 本文采用该方法进行参数值估计, 将式(19)化为非线性函数的一般形式, 得

$$y = f(T_{eq}, Z_1, Z_2, Z_3; \beta, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) + \varepsilon \quad (20)$$

式中:  $f$  为 MDPHM 模型构建的函数关系式;  $T_{eq}$  与  $Z$  为自变量;  $\beta$  与  $\gamma$  为待估计参数;  $\varepsilon$  为随机误差分量。通过多次观测, 得到  $n$  组历史数据  $(T_{ieq}, Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

给定一组参数初值  $c^{(0)} = (\beta^{(0)}, \gamma_1^{(0)}, \gamma_2^{(0)}, \gamma_3^{(0)})$ ,

将第  $i$  组观测数据  $x_i = (T_{ieq}, Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3})$  代入式(20)

并在  $c^{(0)}$  处进行泰勒展开, 略去高次项, 根据最小二乘原理得整体方差为

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \left[ f(x_i, c^{(0)}) + \sum_{j=1}^4 \frac{\partial f(x_i, c)}{\partial c_j} \right] \right\}^2 + d \sum_{j=1}^4 (c_j - c_j^{(0)})^2 \quad (21)$$

式中,  $d \geq 0$ , 称为阻尼因子, 用于改善系数矩阵的性质, 防止奇异阵出现, 同时根据迭代的进程自动调整迭代步长, 加快收敛速度。令  $\sigma$  对  $\beta$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  分别求一阶偏导数并等于零, 可得到一组四参数的非线性方程, 之后采用 LM 法反复计算  $c_j$ , 直至两次计算结果之差可以忽略, 最终得到参数的数值解。

## 3 算例分析

文献[24]给出了某地区 220 kV 架空线故障率的 10 组历史统计数据, 包括对应的服役时间、负载率、天气状况以及相应的故障率。导线选用常用的 LGJQ-400, 为铝制导线, 其材料参数见附录。

### 3.1 寿命参数

根据附录 A 中铝材料的参数, 计算得出  $K$  值为  $-0.1197$ ,  $G$  值为  $1.0414 \times 10^{23}$ 。取基准温度  $\theta_0$  为 353 K (80 °C), 代入式(7)可计算得出线路的期望寿命  $\eta$  为 46 698 h, 换算单位后为 1 945.8 d, 约 5.33 年。

### 3.2 等效时间折算

样本实际服役时间需要折算到基准温度  $\theta_0$  下的等效服役时间  $T_{eq}$ , 假设线路按照典型日负荷及环境状况曲线运行(日照辐射值取定值), 可得到与采样数据同间隔的导线稳态温度计算结果, 并完成离散化处理。最终得到导线典型日稳态温度变化曲线, 如图 2 所示。

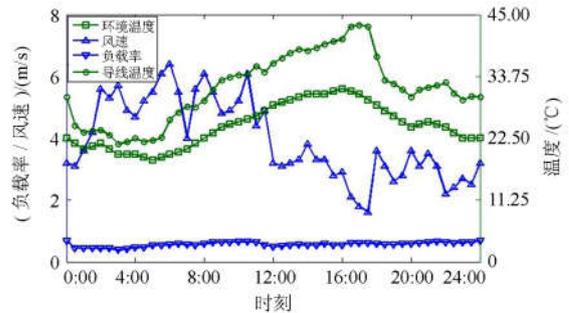


图 2 典型日导线稳态温度变化曲线

Fig. 2 Typical daily wire temperature change curve

按照式(9)计算可得日均等效运行时间比例为  $T_{eq}/t = 0.004$ 。因此在处理样本的等效运行时间时, 只需将实际时间乘以该比例即可。

### 3.3 设备健康状态评分

基于各电力公司对于架空线路维修策略相似、不同地区各线路单元对架空线路故障率的影响大致相同的事实, 本文借鉴文献[13]给出的某地区架空线路健康状态值随等效运行时间增长的统计数据, 得到每一个观测样本的健康状态评分值  $Z_1$ , 具体数据与天气状态评分值共同展示于表 1。

表 1 设备健康状态与天气状态评分值

Table 1 Value of equipment and weather status

样本序号	健康状态评分( $Z_1$ )	天气状态评分( $Z_3$ )
1	4	24.920 2
2	9	32.539 4
3	10	31.565 8
4	10.5	26.475 9
5	10.6	43.594 2
6	12	60.789 1
7	13.4	64.270 5
8	14.1	58.752 7
9	14	52.724 4
10	3	55.603 1

### 3.4 天气状况评分

首先对附录 A 中天气数据按照式(13)进行标准化处理, 然后对四个气象因素进行架空线路故障率的相关性及重要度分析, 并设定门槛值为 0.78, 计算结果如表 2 所示。

表 2 相关性及相关重要度计算结果

Table 2 Results of correlation and important degree

影响因素	相关系数	$p$ 值	重要度
最大风速	0.849 4	0.001 9	0.998 1
平均相对湿度	-0.515 4	0.127 3	0.872 7
瞬时降雨量	0.441 6	0.201 4	0.798 6
平均温度	-0.422 8	0.223 5	0.776 5

从计算结果可以看出, 平均温度这个因素重要度未能达到门槛值, 所以在天气状况综合评分中仅考虑最大风速、平均相对湿度以及降雨量这三个因素, 根据式(18)以重要度为权重分配依据得到各样本的天气状态评分值  $Z_3$ , 如表 2 所示。

### 3.5 负载率处理

由于建模中采取的是将负载率直接代入的方法计算, 为了验证这种方法的有效性, 通过对原始数据的计算得到样本中负载率的重要度为 0.997 8, 其值很高, 证明直接用负载率建模的方法是可靠有效的。

### 3.6 参数拟合结果

根据以上逐步构建的协变量数据, 基于 MDPHM 模型, 采用 LM 法拟合最优参数。为了验证计算结果的准确性, 分别在 Matlab 和 1stOpt 平台上编写程序, 得到了相同的结果, 如表 3 所示。

表 3 参数拟合结果

Table 3 Parameter fitting results

参数	$\beta$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
数值	1.399 8	0.057 4	0.003 7	0.006 4

将拟合的参数代入到 MDPHM 模型中, 可以得到故障率计算值, 计算值与统计值间的对比结果如图 3 所示。

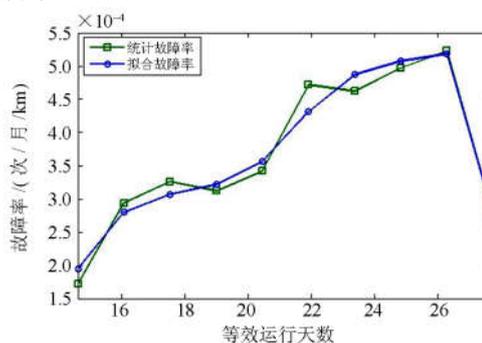


图 3 计算值与统计值对比图

Fig. 3 Picture of the calculated value and the measured

从图 3 可以看出, 随着线路等效运行时间的增长, 导线老化程度逐渐加重, 故障率呈现明显的上升趋势。服役时间为 19 年时, 伴随着设备健康值的骤降出现一个故障率跃变点, 对应于电力部门进行的线路全面检修换新工作。从对比结果来看, 仅有两次计算结果相对误差超过 6%, 其余相对误差均低于 5%。造成误差的主要原因在于: 样本个数较少, 缺少详细的多种类历史数据; 参数估计采用数值求解方法, 与真值间存在一定的误差。但在电网安全可靠运行的角度上, 模型计算精度可以接受。算例分析说明, 新构建的 MDPHM 模型考虑因素全面, 准确度高, 具备量化架空线路故障率的能力。

### 3.7 典型天气状况及运行情况下故障率计算

近年来, 随着电网实时监测系统日臻完善, 在系统发生故障导致输电通道阻塞时, 进行动态应急增容可极大提高供电的可靠性, 减少故障下负荷损失, 考虑到以往研究成果中忽略了对于增容线路的安全性考量, 所以本小节将创新性地运用上述故障率模型, 在较小时间尺度内研究以线路故障率表征运行风险的实时变化状况。

仍以该地区某条同类型已经服役 15 年的线路

L1 为例，假定未来 24 h 线路负载率及天气情况按照该地区某一日的典型数据变化，且 24 h 内线路健康值  $HI$  维持在 10 不变，仍采用表 3 中拟合精度足够高的模型参数代入式(19)，可以推算出线路 L1 故障率的实时变化状况，如图 4 所示。

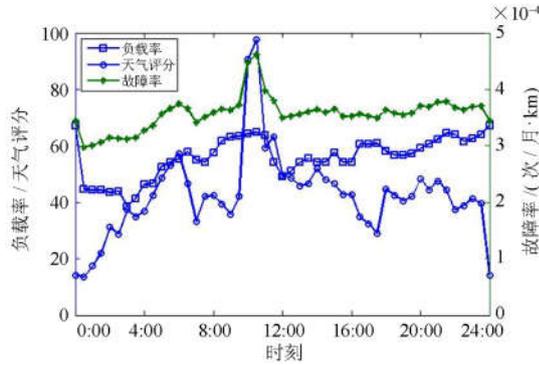


图 4 实时故障率推算结果  
Fig. 4 Real-time failure rate calculation results

从图 4 可以看出，在设备健康状态值不变的情况下，随着等效运行时间的增长，短时故障率呈现缓慢增长的趋势，并随着负载率波动。当天气评分值剧烈变化时，如图中 10:00 时刻，导致短时故障率的剧烈波动。天气评分值与负载率相互耦合，共同决定了架空线路故障率的变化趋势，再次验证了 MDPHM 模型的有效性。需要说明的是，这里得到的故障率值仅为未来假设运行条件下的估计值，用于指导动态应急增容，其计算的准确性取决于模型的准确性，这在前面的案例分析中已经得到验证。

#### 4 结论

本文构建的 MDPHM 模型，能够综合考虑设备服役时间、设备健康状态、天气状况及负载率等影响因素，较为准确地量化了架空线路的故障率。同时，通过假设检验的方式，避免了建模过程中的人为主观盲目性，为设备故障率建模提供了新的思路。同时，随着样本数据的不断积累，设备故障率建模的精度也将不断提高，能够为电力系统相关的风险评估提供重要的技术支持。

#### 附录

表 A 不同材质和温度下的输电线路材料参数

Table A Parameters for different material and temperature

金属	$W_a$	$W_{max}$	$A$	$B$	$-C$	$D$	$R$	$\theta_1$
铝	56	10	9.8	100	5 300	7.5	86	80-200
合金	60	10	19.3	270	10 000	4	91.3	77-160
铜	41	10	13.8	175	6 700	3	90.2	77-160

#### 参考文献

[1] 舒印彪, 汤涌, 孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 2-8.  
SHU Yinbiao, TANG Yong, SUN Huadong. A research on power system security and stability standards[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 2-8.

[2] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.  
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.

[3] KHALYASMAA A I, DMITRIEV S A, KOKIN S E. Methods of failure analysis of 35-110 kV overhead transmission lines[J]. Advanced Materials Research, 2013, 732-733: 677-681.

[4] 易永亮, 熊小伏, 徐望圣, 等. 一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 77-84.  
YI Yongliang, XIONG Xiaofu, XU Wangsheng, et al. A dynamic evaluation method of transmission line reliability considering the effects of ground wire[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 77-84.

[5] 刘韶峰, 李碧君, 徐泰山, 等. 平行输电线路可靠性同调指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 24-31.  
LIU Shaofeng, LI Bijun, XU Taishan, et al. Research on reliability coherency indices of parallel transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 24-31.

[6] MALLIKARJUNA B, VARMA P V V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.

[7] MORADKHANI A, HAGHIFAM M R, MOHAMMADZADEH M. Failure rate modelling of electric distribution overhead lines considering preventive maintenance[J]. IET Generation, Transmission, Distribution, 2014, 8(6): 1028-1038.

[8] 张黎, 张波. 电气设备故障率参数的一种最优估计算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 31-34.  
ZHANG Li, ZHANG Bo. An algorithm for optimal parameter estimation of the failure rate of electrical

- equipment[J]. Relay, 2005, 33(17): 31-34.
- [9] 王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 27-31.  
WANG Huifang, YANG Hejuan, HE Benteng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 27-31.
- [10] PAN J, WANG Z, LUBKEMAN D. Condition based failure rate modeling for electric network components[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES, March 15-18, 2009, Seattle, USA, 2009: 1-6.
- [11] ZHOU Y, PAHWA A, YANG S S. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1683-1690.
- [12] 邹欣, 孙元章, 程林. 基于模糊专家系统的输电线路非解析可靠性模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 1-7.  
ZOU Xin, SUN Yuanzhang, CHENG Lin. Non-analytic reliability model of transmission lines based on fuzzy expert system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 1-7.
- [13] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.  
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
- [14] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 39-46.  
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 39-46.
- [15] 国家电力监管委员会电力可靠性管理中心. 2015年全国电力可靠性指标 [EB/OL]. <http://www.chinaer.org/info.aspx?n=20160712094634227835>.
- [16] COX D R. Regression models and life-table[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 1972: 187-220.
- [17] 郭创新, 何迪, 张金江, 等. 考虑热老化的油浸式变压器比例风险模型[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(2): 14-20, 64.  
GUO Chuangxin, HE Di, ZHANG Jinjiang, et al. A proportional hazard model for oil-immersed transformer concerning thermal aging[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(2): 14-20, 64.
- [18] 鹿鸣明, 王逸飞, 郭创新, 等. 一种基于PHM 考虑老化和设备状态的油浸式变压器故障率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 66-71.  
LU Mingming, WANG Yifei, GUO Chuangxin, et al. Failure rate model for oil-immersed transformer based on PHM concerning aging process and equipment inspection information[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 66-71.
- [19] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [20] 潘乐真, 张焰, 俞国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.  
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [21] 国家电网公司科技部. 架空输电线路状态评价导则: QGDW 173—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [22] 陈军科. 假设检验中的P值应用研究[J]. 价值工程, 2011, 30(25): 257-258.  
CHEN Junke. On the P value of testing statistical hypotheses[J]. Value Engineering, 2011, 30(25): 257-258.
- [23] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems[M]. Denmark: Informatics and Mathematical Modeling Technical University of Denmark, 2004: 24-29.
- [24] 李磊. 基于气象环境的电力设备状态检修策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-09-17

作者简介:

杨才明(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化技术; E-mail: ycm2311@163.com

项中明(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行管理; E-mail: 13819179857@qq.com

谢栋(1984—), 男, 硕士, 中级职称, 研究方向为电力系统稳定分析、高性能计算。E-mail: xiedong1984@sytu.edu.cn

(编辑 周金梅)