

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241737

山火环境下架空导线热-力学状态模拟

罗汶雯¹, 王孟夏¹, 张强², 杨明¹, 王明强¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力调度控制中心, 山东 济南 250022)

摘要: 模拟山火环境下架空导线的热-力学状态, 对评估输电走廊山火故障概率及电网运行风险具有重要价值。针对火灾环境下架空导线热-力学状态的仿真需求, 提出了山火环境下架空导线热-力学状态模拟方法。首先, 分析了山火对架空导线热-力学状态的影响机理。然后, 将火焰和烟气对导线的热辐射和热对流传热量融入架空导线的热平衡模型中。在此基础上, 结合架空导线力学方程, 构建了综合描述山火、导线载流及运行环境对架空导线热-力学状态影响的数学模型并求解, 从而模拟了山火蔓延过程中给定时段内架空导线的温度、应力及弧垂。最后, 通过算例分析验证了所提方法的有效性, 并分析了山火环境下线路载流对导线热-力学状态的影响, 为山火环境下输电线路对地放电概率估计、电网运行风险分析和安全控制决策提供支持。

关键词: 山火; 架空导线; 热-力学状态; 热特性; 弧垂

Thermal-mechanical state simulation of overhead conductors under wildfire conditions

LUO Wenwen¹, WANG Mengxia¹, ZHANG Qiang², YANG Ming¹, WANG Mingqiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Power Dispatching and Control Center, Jinan 250022, China)

Abstract: Simulating the thermal-mechanical state of overhead conductors under wildfire conditions is of great value for evaluating the probability of wildfire-induced faults in transmission corridors and assessing power grid operational risks. To meet the simulation requirements for the thermal-mechanical state of overhead conductors in wildfire environments, a thermal-mechanical state simulation method for overhead conductors under wildfire conditions is proposed. First, the influence mechanism of wildfires on the thermal-mechanical state of overhead conductors is analyzed. Then, the thermal radiation and convective heat transfer from flames and smoke are incorporated into the conductor thermal balance model. On this basis, the mechanical equations of the conductors are coupled to construct and solve a comprehensive mathematical model that describes the combined effects of wildfire, current loading, and environmental conditions on the thermo-mechanical state of overhead conductors. This allows the simulation of conductor temperature, stress, and sag within a given time period during wildfire spreading. Finally, case studies verify the effectiveness of the proposed method and analyze the impact of line current loading on the conductor's thermal-mechanical state under wildfire conditions. The results provide technical support for estimating ground discharge probability, assessing power grid operational risks, and developing safety control strategies for transmission lines exposed to wildfires.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377106).

Key words: wildfire; overhead conductors; thermal-mechanical state; thermal characteristics; sag

0 引言

为了满足日益增长的供电需求, 工程中大量架空线路需跨越丛林山地。然而, 一旦发生山火, 植被燃烧产生的烟尘会显著降低空气的绝缘能力^[1-4],

同时山火的加热效应会使导线温度升高, 进而引起弧垂增大。这两者的共同作用导致架空导线气隙击穿概率增大^[5-9], 从而成为导致线路跳闸停运的重要原因之一, 严重威胁电网的安全稳定运行^[10-13]。鉴于架空导线的热-力学状态是确保其安全运行的关键因素, 模拟山火环境下架空导线的热-力学动态过程对于实现山火环境下输电走廊的安全预警和电网

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377106)

运行风险评估具有极其重要的意义^[14-16]。

针对电网运行环境下架空导线热-力学状态模拟的研究一直受到学者的广泛关注。例如,文献[17]将架空导线的热平衡方程与潮流方程有机结合,提出了一种电热耦合潮流计算方法,实现了伴随电网潮流变化的架空导线运行温度模拟。文献[18]进一步提出了一种考虑架空导线热动态过程的电网安全分析方法,该方法实现了预想故障下架空导线热动态过程的快速计算,并以导线温度作为电网载荷安全的重要判据。在此基础上,文献[19]综合考虑电网运行环境下架空导线的电-热-力关联规律,将架空导线力学模型融入潮流计算中,提出了电网运行环境下架空导线力学状态模拟方法;文献[20]基于架空导线热-力学状态模拟,提出了一种针对高温环境下架空线路运行温度和弧垂越限的预警方法;文献[21]进一步考虑架空导线所处气象环境的不确定性,提出了一种能够计算架空导线热-力学状态概率分布的概率潮流计算方法。

在山火环境下,火焰可以通过热辐射或热传导直接加热架空导线,亦可通过燃烧植被产生的烟气与导线间接产生热交换。具体而言,火焰的热辐射能够透过空气在整个山火蔓延过程中持续加热导线,而热传导则仅在火焰与导线直接接触时发生。本文的研究暂不考虑热传导情形。若山火在蔓延过程中经过线路下方而未与导线接触,则上升的烟气将与导线产生对流和辐射热交换。针对这一现象,文献[22]建立了火焰与烟气对导线的热辐射、热对流热计算模型,并在仅考虑山火对导线加热量的假设下,推导得出山火蔓延刚好经过导线前后的导线温升量计算式。进一步地,文献[23]基于上述导线温升计算结果,以导线温度越限为依据,提出了山火环境下输电线路故障概率的评估方法。

然而,文献[22]和文献[23]的研究主要关注山火蔓延刚好经过导线前后时导线温升的计算,且山火蔓延过程中(通常持续十几分钟至数十分钟)忽略了导线温升的动态过程,以及除山火外导线电阻发热、日照辐射等其他因素对导线热平衡的影响。虽然该简化处理极大降低了计算的复杂度,但缺乏合理性,且无法体现山火蔓延接近导线过程中导线的发热情况,模拟结果具有一定局限性。此外,伴随导线的热动态过程,其力学状态也在变化;模拟该过程中导线弧垂的变化,可用于线路故障概率的评估。

针对上述问题,本文在深入分析山火对架空导线热-力学状态影响机理的基础上,按照山火蔓延的不同阶段构建了架空导线热-力学状态模拟模型,模拟伴随山火蔓延的导线热-力学动态过程,从而为运

行人分析山火环境下架空线路及电网安全运行风险提供支持。

1 山火对架空导线热-力学状态的影响机理

图1为山火向线路方向蔓延的示意图。其中, x 轴代表沿线路方向, z 轴垂直于 $x-y$ 平面向上且通过线档 s 的弧垂最低点 c (设 c 点所在的单位长度导线为热-力学状态模拟对象)。 h_f 为火焰高度; d_f 为火线深度; l_f 为火线长度; δ_f 为火线与 x 轴的夹角; v_w 为风速,方向垂直于 xoz 平面; v_f 为山火蔓延速度,方向与风向相同。

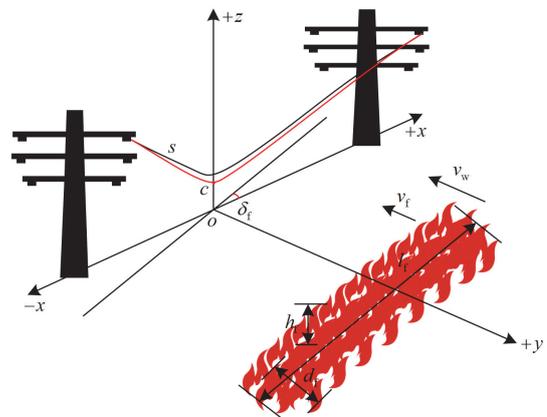


图1 山火与导线空间位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial position of wildfire and conductor

当地面形成稳定的火线并逐渐向导线蔓延的过程中(忽略点火到火线形成的过程,认为烟气在风速的作用下持续抵达导线),线档 s 导线被烟气持续笼罩。由于烟气中的主要成分为二氧化碳和水蒸气,其具有向外热辐射的能力^[24],将通过热对流和热辐射两种方式与导线进行热交换。在此阶段(山火接近导线阶段),山火对线档 s 导线热过程的影响包括火焰热辐射对导线的加热以及烟气与导线间的热对流和热辐射换热。在火焰与烟气的共同作用下,导线温度逐渐升高,弧垂逐渐增大。随着火线继续接近导线,火焰热辐射加热效应不断增强,导线周围烟气的温度逐渐升高。当火线抵达线路下方时,火焰与导线间的距离达到最短,此时火焰热辐射加热量最大。此后,随着火线完全通过线档 s 并逐渐远离(山火远离导线阶段),烟气对导线的影响消失,导线所受到的火焰热辐射量也会随之因火线的远离而逐渐减弱,导线升温速度和弧垂增长速度均放缓。

可见,在山火蔓延的过程中,随着火线与架空导线相对位置的变化,山火与导线间的热交换以及

导线的热-力学状态均处在动态变化之中。同时, 导线热-力学状态的变化又会反过来影响导线与外界的热交换。山火环境下导线热-力学状态的模拟即是对这一复杂动态过程的模拟。

2 山火环境下架空导线的热-力学状态模拟模型

2.1 山火模型

火线强度 ψ_f 是描述山火特性的关键参数之一, 表示单位长度火线在单位时间内所释放的热量, 单位为 kW/m, 可由式(1)计算^[25]。

$$\psi_f = 273h_f^{2.17} \quad (1)$$

在风的作用下, 山火沿风向蔓延。山火在平地上的蔓延速度 v_f 可由式(2)计算^[26]。

$$v_f = k_f(1 + v_w)/\rho_b \quad (2)$$

式中: k_f 为山火类型的经验系数, 荒地火灾取 0.07, 木垛火灾取 0.05; ρ_b 为燃料密度。

设导线与火源间距离为 R , 则导线周围烟气的温度 T_o 可由式(3)计算^[27]。

$$T_o = T_a + 22\psi_f^{2/3}/R^{5/3} \quad (3)$$

式中: T_a 为烟气之外的正常气温。

2.2 山火接近导线阶段的导线热平衡模型

以图 1 中的 c 点所在的单位长度导线为例(在实际计算中, 可以选择导线上任意点为研究对象, 例如选取弧垂最低点 c 所在的单位长度导线的温度作为线档 s 温度的保守估计。代表点的选取并不影响模拟方法的有效性)。在山火接近导线阶段, 导线除了受到火焰热辐射加热以及与烟气间的热对流和热辐射换热的影响外, 还受到导线电阻发热、日照辐射加热的影响。考虑到火焰产生的烟气会在一定程度上削弱导线受到的日照辐射, 因此引入烟浓度系数 γ_f ^[10] 来描述烟气对日照辐射的削弱效果。当火焰洁净, 无烟气时, $\gamma_f = 1$; 反之, $\gamma_f = 0$ 。

综合来看, 在山火接近导线阶段, c 点所在单位长度导线的热平衡方程可表示为

$$m_1 C_1 \frac{dT_c}{dt} = q_j + \gamma_f q_s + q_{r,fire} - q_{c,fume} - q_{r,fume} \quad (4)$$

式中: m_1 为单位长度导线质量, 单位为 kg/m; C_1 为导线热容, 单位为 J/(kg·K); T_c 为导线温度; q_j 、 q_s 、 $q_{r,fire}$ 、 $q_{c,fume}$ 和 $q_{r,fume}$ 分别为单位长度导线电阻发热量、日照辐射加热量、火焰对单位长度导线的热辐射加热量、单位长度导线与周围烟气间的热对流换热量和热辐射换热量, 单位为 W/m。

根据 IEEE 标准^[28], q_j 、 q_s 和 $q_{c,fume}$ 可由式(5)~式(7)计算。

$$q_j = I^2 R_{ref} [1 + \alpha(T_c - T_{ref})] \quad (5)$$

$$q_s = \beta_s Q_{se} \sin(\xi_s) \sigma_c \quad (6)$$

$$q_{c,fume} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.754 \left(\frac{D_c \rho_f v_w}{\mu_f} \right)^{0.6} K_w K_f (T_c - T_o), \\ \left[1.01 + 1.35 \left(\frac{D_c \rho_f v_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] K_w K_f (T_c - T_o) \end{array} \right\} \quad (7)$$

式中: I 为导线载流; R_{ref} 为导线在参考温度下的单位长度电阻, 单位为 Ω/m ; α 为电阻温度系数; T_{ref} 为参考温度; β_s 为导线的日照辐射吸收率; Q_{se} 为日照强度, 单位为 W/m^2 ; ξ_s 为太阳光的有效入射角; σ_c 为单位长度导线投影面积; D_c 为导线直径; ρ_f 为烟气密度; μ_f 为烟气动态黏度, 单位为 $kg/(m \cdot s)$; K_w 为风向因子, 与导线的夹角有关; K_f 为烟气导热系数, 单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

若导线周围烟气的温度高于导线温度 ($T_o > T_c$), 则热对流传热的方向为烟气到导线, 此时 $q_{c,fume}$ 计算结果为负值; 反之, 则热对流传热方向为导线到烟气, 此时 $q_{c,fume}$ 计算结果为正值。因此, 导线与周围烟气间的热辐射换热量 $q_{r,fume}$ 的计算可分为以下两种情况。

1) 若 $T_c > T_o$, 则式(4)中 $q_{r,fume}$ 为单位长度导线向烟气的热辐射散热量, 其表达式为

$$q_{r,fume} = 17.8 D_c \varepsilon_1 \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

式中: ε_1 为导线发射率, 新导线的发射率通常约为 0.2~0.3。

2) 若 $T_c < T_o$, 则式(4)中 $q_{r,fume}$ 为烟气对单位长度导线的热辐射加热量, 其表达式为

$$q_{r,fume} = 17.8 D_c \varepsilon_{fume} \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

式中: ε_{fume} 为烟气发射率^[24], 计算式详见附录 A 中式(A1)。

对于图 1 中的山火情况, 假设火线两端在 x 轴上的投影坐标值分别为 a 和 b , 在 y 轴上的投影坐标值分别为 c 和 d 。将山火沿火线中线方向分成 n_f 段长度为 Δl 的火线微元, 则 $q_{r,fire}$ 可以表示为各火线微元对单位长度导线的热辐射加热量之和, 如式(10)所示^[22]。

$$q_{r,fire} = \frac{1000\eta D_c \psi_f l_f \cos(\delta_f)}{4n_f} \sum_{j=1}^{n_f} \frac{1}{x_j^2 + y_j^2 + z_c^2} \quad (10)$$

式中: η 为热源的热辐射热量释放率, 当烟气含量低的燃料燃烧时取 0.6, 火焰中出现黑烟时取 0.20 或 0.15; x_j 、 y_j 分别为各火线微元对应的 xoy 平面坐标值, 其中 $x_j \in [a, b]$, $y_j \in [c, d]$; z_c 为图 1 中点 c 所在单位长度导线的 z 轴坐标值。可见, 在山火接近导线阶段, 随着火线不断靠近, y_j 值逐渐减小, $q_{r,fire}$ 则逐渐增大。当进入山火远离导线阶段后, 随着火线逐渐远离, $q_{r,fire}$ 也随之逐渐减小。

2.3 山火远离导线阶段的导线热平衡模型

当山火蔓延通过导线后, 烟气对导线的影响消失, 导线周围为正常空气。此时, 山火对导线热平衡的影响主要为火焰对导线的热辐射加热。该阶段单位长度导线的热平衡方程可表示为

$$m_1 C_1 \frac{dT_c}{dt} = q_j + q_s + q_{r,fire} - q_{c,air} - q_{r,air} \quad (11)$$

式中: $q_{c,air}$ 、 $q_{r,air}$ 分别为单位长度导线向周围空气的热对流和热辐射散热量, 可由式(12)和式(13)计算^[26]。

$$q_{c,air} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0.754 \left(\frac{D_c \rho_a v_w}{\mu_a} \right)^{0.6} K_w K_a (T_c - T_a), \\ \left[1.01 + 1.35 \left(\frac{D_c \rho_a v_w}{\mu_a} \right)^{0.52} \right] K_w K_a (T_c - T_a) \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$q_{r,air} = 17.8 D_c \varepsilon_1 \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

式中: ρ_a 为空气密度; μ_a 为空气动态黏度; K_a 为空气导热系数。

由上述分析可知, 式(4)和式(11)分别描述了架空导线温度与山火、导线载流及运行环境间的关联关系, 是关于导线温度的非线性一阶微分方程。本文采用隐式梯形法求解上述微分方程, 式(14)和式(15)为对应的隐式梯形差分方程。

$$T_{c,i} = T_{c,i-1} + \frac{\Delta t}{2m_1 C_1} [q_{j,i} + \gamma_f q_{s,i} + q_{r,fire,i} - q_{c,fume,i} - q_{r,fume,i} + q_{j,i-1} + \gamma_f q_{s,i-1} + q_{r,fire,i-1} - q_{c,fume,i-1} - q_{r,fume,i-1}] \quad (14)$$

$$T_{c,i} = T_{c,i-1} + \frac{\Delta t}{2m_1 C_1} [q_{j,i} + q_{s,i} + q_{r,fire,i} - q_{c,air,i} - q_{r,air,i} + q_{j,i-1} + q_{s,i-1} + q_{r,fire,i-1} - q_{c,air,i-1} - q_{r,air,i-1}] \quad (15)$$

式中: $T_{c,i}$ 为第 i 时段的导线温度, $i = 1, 2, \dots, N_t$, N_t 为对整个模拟时间区间的差分时段数; Δt 为差分步长; $q_{j,i}$ 、 $q_{s,i}$ 、 $q_{r,fire,i}$ 、 $q_{c,fume,i}$ 、 $q_{r,fume,i}$ 、 $q_{c,air,i}$ 和 $q_{r,air,i}$ 分别为第 i 时段单位长度导线的电阻发热量、日照辐射加热量、火焰对单位长度导线的热辐射加热量、单位长度导线与烟气的热对流换热热量、热辐射换热热量、单位长度导线向空气的热对流散热量和热辐射散热量。

2.4 架空导线力学模型

伴随架空导线热动态过程, 在材料机械物理特性的作用下, 导线的应力和弧垂会发生变化。为了在架空导线热动态过程模拟的基础上, 进一步考虑其力学状态的变化, 本文运用“力学状态精确计算法”^[29]求解导线应力(水平应力), 从而获得其弧垂。假设初始状态(线路竣工状态)下, 各绝缘子串均垂直悬挂, 线档 k 的应力为 $\sigma_{0,k}$ 。在运行状态下, 线档 k 在第 i 时段的应力可表示为 $\sigma_{k,i} = \sigma_{0,k} \cdot X_{k,i}$, 其中, $X_{k,i}$ 为线档 k 的应力系数, 可通过迭代求解式(16)获得。

$$X_{k,i}^4 [X_{k,i} M_{1,k} + M_{2,k,i}(T_{c,k,i}) - C_{k,i}(X_{k-1,i}, X_{k,i}, X_{k+1,i}) + (X_{k,i} M_{1,k} - E_c / \sigma_{0,k}) \cdot (X_{k,i}^2 M_{3,k,i} + M_{4,k,i}) a_{0,k}^2 / s_{0,k}^2] = 0 \quad (16)$$

式中: $k = 1, \dots, N_s$, N_s 为研究耐张段内线档的总数; $M_{1,k}$ 、 $M_{2,k,i}(T_{c,k,i})$ 、 $M_{3,k,i}$ 和 $M_{4,k,i}$ 为与线档 k 的应力无关的参数, 可由式(17)~式(20)计算(其中, $M_{1,k}$ 不随时段而变化); $T_{c,k,i}$ 为线档 k 在第 i 时段的温度; $C_{k,i}(X_{k-1,i}, X_{k,i}, X_{k+1,i})$ 为与线档 k 及其相邻线档第 i 时段应力相关的变量, 可由式(21)计算; E_c 为导线的弹性模量; $a_{0,k}$ 和 $s_{0,k}$ 分别为线档 k 的水平档距和斜档距。

$$M_{1,k} = \frac{s_{0,k}(1 + \bar{L}_{0,k})}{a_{0,k}} \quad (17)$$

$$M_{2,k,i}(T_{c,k,i}) = -s_{0,k}(1 + \bar{L}_{0,k})^2 / a_{0,k} + E_c \bar{L}_{0,k} / \sigma_{0,k} + E_c \tau_c (1 + \bar{L}_{0,k})(T_{c,k,i} - T_{0,k}) / \sigma_{0,k} \quad (18)$$

$$M_{3,k,i} = \frac{a_{0,k}^2 \gamma_{k,i}^2}{24 \sigma_{0,k}^2} \quad (19)$$

$$M_{4,k,i} = \frac{a_{0,k}^4 \gamma_{k,i}^4}{720 \sigma_{0,k}^4} - \frac{a_{0,k}^6 \gamma_{k,i}^4}{1152 s_{0,k}^2 \sigma_{0,k}^4} \quad (20)$$

$$C_{k,i}(X_{k-1,i}, X_{k,i}, X_{k+1,i}) = \frac{E_c (a_{0,k} \Delta a_{k,i} + h_{0,k} \Delta h_{k,i})}{\sigma_{0,k} s_{0,k}^2} \quad (21)$$

其中

$$\bar{L}_{0,k} = \frac{a_{0,k}^2}{s_{0,k}^2} \left(\frac{a_{0,k}^2 \gamma_{0,k}^4}{24\sigma_{0,k}^2} + \frac{a_{0,k}^4 \gamma_{0,k}^4}{720\sigma_{0,k}^4} \right) - \frac{a_{0,k}^8 \gamma_{0,k}^4}{1152s_{0,k}^4 \sigma_{0,k}^4} \quad (22)$$

式中: τ_c 为导线的温膨系数, 单位为 $1/^\circ\text{C}$, 由导线的物理机械特性决定; $T_{0,k}$ 为线档 k 在初始状态下的温度; $\gamma_{k,i}$ 为线档 k 在运行状态下的比载^[30], 单位为 MPa/m ; $\Delta a_{k,i}$ 为线档 k 在第 i 时段与初始状态相比的水平档距变化量, 计算详见附录 B 式(B1); $h_{0,k}$ 为线档 k 两端悬挂点间的高度差; $\Delta h_{k,i}$ 为线档 k 在第 i 时段与初始状态相比的高度差变化量, 计算详见附录 B 式(B2); $\gamma_{0,k}$ 为线档 k 在初始状态下的比载。

已知线档 k 的应力, 代入式(23)和式(24), 可得导线最低点 c 的弧垂 $f_{c,k,i}$ 及其离地高度 $H_{c,k,i}$ 。

$$f_{c,k,i} = \frac{\sigma_{k,i}}{\gamma_{k,i}} \left[\sqrt{1 + \left[h_{0,k} \gamma_{k,i} / (2\sigma_{k,i} \sinh(a_{0,k} \gamma_{k,i} / (2\sigma_{k,i}))) \right]^2} - \cosh \left(\frac{a_{0,k} \gamma_{k,i}}{2\sigma_{k,i}} \right) - h_{0,k} \operatorname{ar sinh} \left(h_{0,k} \gamma_{k,i} \left(2\sigma_{k,i} \sinh \left(\frac{a_{0,k} \gamma_{k,i}}{2\sigma_{k,i}} \right) \right) \right) / a_{0,k} - 1 \right] \quad (23)$$

$$H_{c,k,i} = h_{j,k,i} - (y_{j,k,i} - y_{c,k,i}) \quad (24)$$

式中: $h_{j,k,i}$ 为绝缘子串 k 悬挂点的高度, 可由式(25)计算; $y_{j,k,i}$ 、 $y_{c,k,i}$ 分别为绝缘子串 k 悬挂点和点 c 的纵坐标值, 可由式(26)和式(27)计算。

$$h_{j,k,i} = H_{j,k} - L_{j,k} - \varepsilon_{k,i} \quad (25)$$

$$y_{j,k,i} = \frac{\sigma_{k,i}}{\gamma_{k,i}} \cosh \left(\frac{\gamma_{k,i} x_{j,k,i}}{\sigma_{k,i}} \right) \quad (26)$$

$$y_{c,k,i} = \frac{\sigma_{k,i}}{\gamma_{k,i}} \quad (27)$$

式中: $H_{j,k}$ 为绝缘子串 k 所在杆塔的高度; $L_{j,k}$ 为绝缘子串 k 的长度, 可从线路设计数据中获取; $\varepsilon_{k,i}$ 为绝缘子串 k 在运行状态下的纵向偏移量, 计算详见附录 B 式(B6); $x_{j,k,i}$ 为绝缘子串 k 悬挂点在运行状态下的 x 轴坐标, 计算详见附录 B 式(B10)。

3 导线热-力学状态模拟

将耐张段内各线档的热平衡方程差分式(14)、式(15)与式(16)联立, 构建架空导线热-力学状态的模拟模型, 并采用热-力学状态交替的方式求解。整个模拟过程包括数据准备和导线热-力学状态求解两个关键部分, 模拟流程如图 2 所示。

以下对模拟流程中的两个关键部分展开详细的阐释与说明。

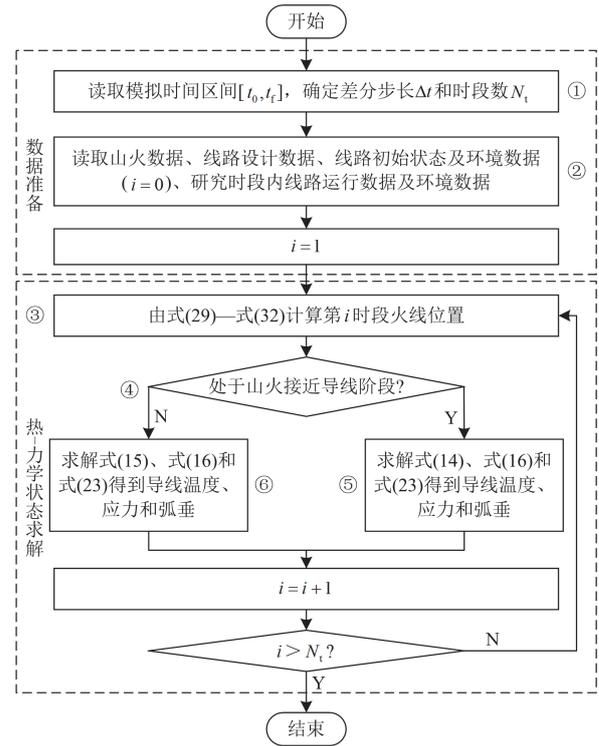


图 2 导线热-力学状态模拟流程

Fig. 2 Simulation procedure for thermal-mechanical state of conductor

1) 数据准备

在图 2 的框①中, 需要读取模拟时间区间 $[t_0, t_f]$ 及差分步长 Δt 。基于上述信息, 将模拟时间区间 $[t_0, t_f]$ 划分为 N_t 个离散时段。在图 2 的框②中, 需要读取以下 4 类重要数据: 山火数据、线路设计数据、线路初始状态及环境数据、研究时段内线路运行数据及环境数据。

具体而言, 山火数据包括 t_0 时刻的火焰高度、火线深度以及火线与导线的空间位置信息(即图 1 坐标系中火线端点坐标和模拟对象导线代表点的坐标值)。线路设计数据涵盖了诸如导线规格、物理机械特性参数(包括重量、弹性模量、温膨系数等)、模拟目标耐张段内各线档的水平档距、线杆塔横担高度、绝缘子串长度、重量以及导线吸收/发射率等关键属性。线路初始状态及环境数据包括导线在 t_0 时刻的载流、温度、气温、日照强度、风速以及风向等关键参数。在线模拟环境下, 这些数据能够通过数据采集与监视控制系统或输电线路在线监测设备实时获取^[31], 或者在假定导线处于热平衡状态的前提下, 依据数值气象信息进行合理估算。研究时段内线路运行及环境数据, 包括导线载流数据与周围气象数据。在线环境下, 这些数据可以借助潮流预测技术以及数值天气预报手段来获取。

2) 热-力学状态求解

设 i 为离散化研究时段的计数,计算开始时进行初始化($i=1$)。图2框③计算第 i 时段火线沿风向蔓延后的位置。在图1所示的 xoy 平面内,将深度为 d_f 的火线用前后两条平行线段 l_1 、 l_2 表示,平行线间距离即为火线深度 d_f ,如图3所示。

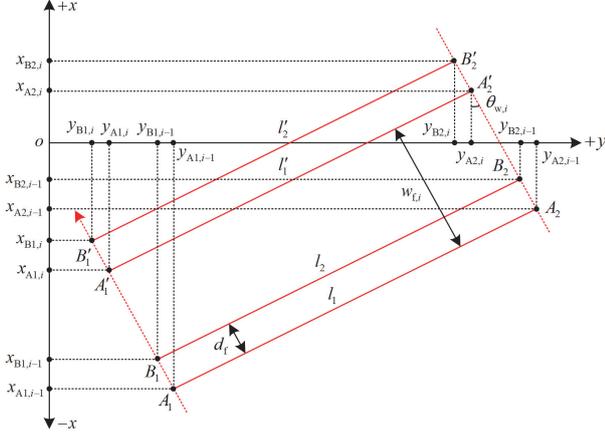


图3 山火蔓延示意图(xoy 平面)

Fig. 3 Schematic diagram of wildfire spread (xoy plane)

已知第 i 时段的风速 $v_{w,i}$ 和风向 $\theta_{w,i}$,可由式(28)计算第 i 时段火线沿风速方向蔓延的距离 $w_{f,i}$ 。

$$w_{f,i} = v_f \Delta t = \frac{k_f (1 + v_{w,i}) \Delta t}{\rho_b} \quad (28)$$

图3中,第 i 时段火线 l_1' 、 l_2' 两端点 A_1' 、 A_2' 、 B_1' 和 B_2' 的坐标分别为 $(x_{A1,i}, y_{A1,i})$ 、 $(x_{A2,i}, y_{A2,i})$ 、 $(x_{B1,i}, y_{B1,i})$ 和 $(x_{B2,i}, y_{B2,i})$,如式(29)~式(32)所示。

$$x_{Aq,i} = x_{Aq,i-1} + w_{f,i} \cos(\theta_{w,i}), \quad q=1,2 \quad (29)$$

$$y_{Aq,i} = y_{Aq,i-1} - w_{f,i} \sin(\theta_{w,i}) \quad (30)$$

$$x_{Bq,i} = x_{Bq,i-1} + w_{f,i} \cos(\theta_{w,i}) \quad (31)$$

$$y_{Bq,i} = y_{Bq,i-1} - w_{f,i} \sin(\theta_{w,i}) \quad (32)$$

确定第 i 时段火线的位置后,由图2框④判断当前山火蔓延所处阶段。若处于山火接近导线阶段,则进入流程⑤。在此流程中,通过求解式(14),得到第 i 时段的导线温度。然后,将该温度代入式(16),计算得到第 i 时段的导线应力。再将此应力代入式(23),求得第 i 时段的导线弧垂。反之,若处于山火远离导线阶段,则进入流程⑥。在该流程中,通过求解式(15)获取导线温度,接着再逐步求解其在第 i 时段的应力和弧垂。完成上述计算后,更新研究时段,即 $i=i+1$ 。若 $i \leq N_t$,则返回框③,继续计算第 $i+1$ 时段导线的热-力学状态。若 $i > N_t$,则结束循环计算。

4 算例分析

对图1所示线档 s 在 c 点的单位长度导线(型号为 $4 \times \text{LGJ500}$)的热-力学动态过程展开模拟研究。模拟时间区间为 $0 \sim 90 \text{ min}$,差分步长 Δt 为 30 s 。假定在山火蔓延的全过程中,导线载流和气象环境参数维持恒定不变。线档 s 的跨度为 300 m ,其两端杆塔的高度均为 21 m 。导线的物理参数和环境参数详列于表1,其余模型参数(如空气及烟气的物性参数^[32])详列于附录C表C1。山火的初始状态设定为:火焰高度 h_f 为 1.5 m ;火线强度 ψ_f 为 658 kW/m ;火线深度 d_f 为 8 m ;火线长度 l_f 为 300 m (限于目标线档范围内);火线与线路方向(x 轴方向)所成夹角 δ_f 为 0° ,即火线与 x 轴相互平行;山火蔓延速度 v_f 为 0.0228 m/s ,移动方向与风向一致。初始时刻,代表火线的两条平行线段 l_1 、 l_2 ,与 x 轴的距离分别为 68 m 和 60 m 。平行线段两端的坐标依次为: $A_1(-150, 68)$, $A_2(150, 68)$, $B_1(-150, 60)$ 和 $B_2(150, 60)$ 。

表1 导线及环境参数

Table 1 Conductor and environmental parameters

导线电阻/ (Ω/m)	导线重量/ (kg/m)	导线 载流/ A	发射率	吸收率
0.059×10^{-3}	1.688	400	0.5	0.5
导线外径/ m	导线初始 温度/ $^\circ\text{C}$	导线热容/ ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	弹性模量/ MPa	温膨系数/ ($1/^\circ\text{C}$)
0.03	26.76	798	65×10^3	20.5×10^{-6}
电阻温度系数/ ($1/^\circ\text{C}$)	正常 气温/ $^\circ\text{C}$	风速/ (m/s)	日照强度/ (W/m^2)	风向角/ ($^\circ$)
4.03×10^{-3}	19.8	12	800	90

注:表中导线参数为单根导线参数。

在上述条件下,按照图2所示模拟流程,得到导线温度和山火加热量(火焰热辐射加热量)与总加热量(火焰热辐射加热量、烟气对导线的热对流及热辐射加热量、电阻发热量和日照辐射加热量之和)的比值变化曲线如图4所示。导线应力及弧垂曲线如图5所示。

初始时刻,火线与线路间的距离较远。因此,热辐射热量 $q_{r,\text{fire}}$ 相对较小,其在总加热量中的占比约为 62% 。此时,导线应力达 128.77 MPa ,弧垂为 2.94 m 。伴随山火的蔓延并逐渐靠近导线,火焰对导线的热辐射加热量大幅提升,使得导线温升及弧垂增长速度加快。导线温度于第 39 min 达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (架空导线长期运行的最高允许温度),此时导线应力为 119.75 MPa ,弧垂为 3.16 m 。图4中的红色方

框内, 导线温升速度逐渐变慢。这是因为火线较远时, 导线与烟气温差较小, 导致导线对烟气的散热量较小。在火焰辐射热的作用下, 导线的温升速度较大。随着火线的靠近(火焰辐射热作用加强), 导线温度与烟气温差逐渐增大, 导致导线对烟气的散热增大, 导线温升速度有所下降。第 44 min 时, 火线蔓延至导线下方, 此时火焰热辐射加热量在总加热量中的占比升至最高(约 86%), 导线应力为 118.17 MPa, 弧垂为 3.20 m。

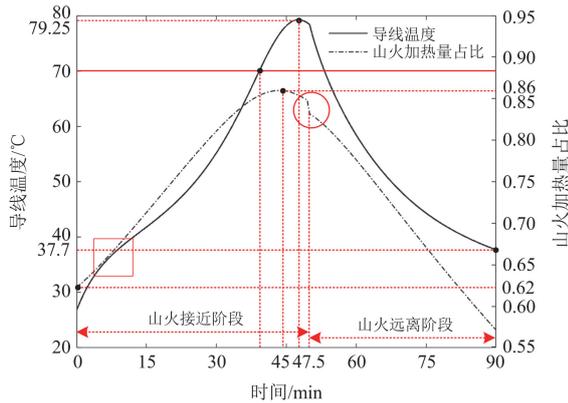


图 4 导线温度及山火加热量占比曲线

Fig. 4 Conductor temperature and wildfire heating ratio curves

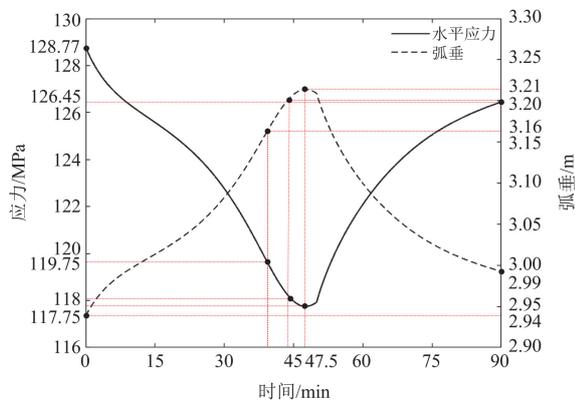


图 5 导线的应力及弧垂曲线

Fig. 5 Conductor stress and sag curves

随着山火从导线下方区域蔓延通过, 山火对导线的热辐射加热量逐渐减小。然而, 在热惯性的作用下, 导线温度仍在升高, 并于第 47.5 min 达到最大值(79.25 °C)。此时, 导线应力为 117.75 MPa, 弧垂为 3.21 m。此后, 随着山火继续蔓延, 导线温度逐渐下降。在山火接近导线阶段, *c* 点所在导线周围烟气温处于 [21.50, 35.69] °C 范围, 始终低于导线温度, 因此导线持续向周围烟气散热。自第 50 min 起, 山火进入远离导线阶段。刚进入此阶段时, 因烟气对导线的遮蔽效应消失且火焰热辐射量

降低, 山火热辐射加热量在总加热量中的占比曲线出现短暂的快速下降(如图 4 中红色圆内曲线所示)。进入山火远离阶段后, 导线向空气的辐射散热和对流散热作用比对烟气的散热作用更强, 导致导线温度加速下降。研究时段末, 导线温度为 37.7 °C, 应力为 126.45 MPa, 弧垂为 2.99 m。文献[22]模型假设山火已蔓延至导线近处、导线温升完全由山火主导(忽略导线载流引起的焦耳热、导线与烟气的热对流及热辐射), 并据此计算山火蔓延至导线前后的导线温升。表 2 给出了不同火焰高度与导线载流参数下, 在火线蔓延通过导线前后 5 m 范围内, 本文模型与文献[22]模型对导线温升计算结果的偏差。

表 2 与文献[22]中模型计算结果的偏差

Table 2 Deviation from calculation results of the model in reference [22]

火焰高度/m	导线载流/A	温升结果偏差 ($\Delta T_{c1} - \Delta T_{c2}$)/°C
1.0	400	5.56
1.5	400	16.91
1.0	0	4.59
1.5	0	16.23

可见, 由于文献[22]中模型未考虑线路载流和烟气与导线间的热传递, 导致其计算结果与本文模型存在一定偏差。烟气对导线主要起散热作用, 因此在火焰高度较低且载流较小的情况下, 导线与烟气间温差较小, 载流和烟气对导线温度的影响也较小, 此时两个模型的计算结果较为接近; 反之计算结果则会出现较大差异。通过对比可知, 文献[22]中模型虽然便于计算, 但对山火环境下导线热平衡规律的考虑较为粗略, 且无法用于山火蔓延的全过程模拟。在此基础上, 本文模型更为全面地考虑了山火环境下影响导线热平衡的因素和导线力学状态的变化, 可以模拟山火蔓延过程中的导线温度、应力和弧垂的变化, 为运行人员开展风险评估和决策提供更为全面的信息。

线路载流产生的焦耳热效应, 会通过导线热平衡方程影响导线温度, 进而改变导线的力学状态。为深入分析线路载流对架空导线热-力学状态的影响, 本文分别计算了线路载流为 1600 A、800 A 和 0 A 时导线的最高温度以及最大弧垂, 如表 3 所示。

由表 3 可见, 随着线路载流的降低, 导线的最高温度和最大弧垂均呈减小趋势; 若火线更长, 随着影响线档数量的增多, 山火对弧垂的影响还会进一步增大。当导线温度和弧垂接近安全限值时, 适当降低线路载流甚至停运线路可以改善导线状态

(温度和弧垂), 提高线路运行的安全性。

表3 不同线路载流下导线的最高温度和最大弧垂
Table 3 Maximum temperature and sag of conductor
under different line current loading

线路载流/A	最高温度/°C	最大弧垂/m
1600	79.25	3.21
800	75.05	3.19
0	73.67	3.18

5 结论

本文提出了山火环境下架空导线热-力学状态模拟方法, 实现了给定时段内伴随山火蔓延过程的架空导线温度、应力和弧垂的模拟。

1) 相比现有方法, 本文建立的导线热平衡模型更完整地考虑了山火蔓延过程中导线载流、烟气热对流和热辐射等因素对导线热过程的影响, 使模型能够满足山火蔓延全过程模拟的需要。

2) 实现了山火环境下导线弧垂的模拟, 为分析山火蔓延过程中导线对地放电概率及运行风险奠定了基础。

3) 在山火环境下, 线路载流对导线热-力学状态存在一定影响, 通过载流调节可在一定程度上控制线路运行风险。本文研究为进一步开展山火环境下的电网运行控制决策研究奠定了基础。

附录 A

由于烟气的主要气体成分为二氧化碳和水蒸气, 故其发射率 $\varepsilon_{\text{fume}}$ 可由式(A1)计算^[24]。

$$\varepsilon_{\text{fume}} = \varepsilon_{\text{C}} + \varepsilon_{\text{H}} - \Delta\varepsilon \quad (\text{A1})$$

式中: $\Delta\varepsilon$ 为修正系数; ε_{C} 和 ε_{H} 分别为二氧化碳和水蒸气的发射率, 可由式(A2)和式(A3)计算。

$$\varepsilon_{\text{C}} = \varepsilon_{\text{C}}^* C_{\text{C}} \quad (\text{A2})$$

$$\varepsilon_{\text{H}} = \varepsilon_{\text{H}}^* C_{\text{H}} \quad (\text{A3})$$

式中: ε_{C}^* 和 ε_{H}^* 分别为二氧化碳和水蒸气在标准压力下的发射率; C_{C} 和 C_{H} 分别为考虑总压力与分压力对二氧化碳和水蒸气发射率影响的修正系数。上述参数均可通过查阅相应的实验测定曲线图获得^[24]。

附录 B

线档 k 在第 i 时段的水平档距和高度差变化量 $\Delta a_{k,i}$ 和 $\Delta h_{k,i}$ 可由式(B1)和式(B2)计算。

$$\Delta a_{k,i} = (\delta_{k+1,i} - \delta_{0,k+1}) - (\delta_{k,i} - \delta_{0,k}) \quad (\text{B1})$$

$$\Delta h_{k,i} = (\varepsilon_{k+1,i} - \varepsilon_{0,k+1}) - (\varepsilon_{k,i} - \varepsilon_{0,k}) \quad (\text{B2})$$

式中: $\delta_{0,k}$ 和 $\varepsilon_{0,k}$ 分别为绝缘子串 k 在初始状态下的

水平偏移量和纵向偏移量; $\delta_{k,i}$ 和 $\varepsilon_{k,i}$ 分别为绝缘子串 k 在运行状态下的水平偏移量和纵向偏移量。初始状态下, 各悬垂绝缘子串均处于铅锤状态, 故 $\delta_{0,k}$ 和 $\varepsilon_{0,k}$ ($k=2,3,\dots,N_s$) 为 0。耐张绝缘子串的 $\delta_{0,k}$ 和 $\varepsilon_{0,k}$ ($k=1$ 或 $k=N_s+1$) 可由式(B3)和式(B4)计算。运行状态下, 各绝缘子串的 $\delta_{k,i}$ 和 $\varepsilon_{k,i}$ ($k=1,2,\dots,N_s+1$) 可由式(B5)和式(B6)计算^[29]。

$$\delta_{0,k} = \frac{A_{\text{c}} H_{0,k} L_{J,k}}{\sqrt{G_{J,0,k}^2 + A_{\text{c}}^2 \sigma_{0,k}^2}} \quad (\text{B3})$$

$$\varepsilon_{0,k} = \left[1 - \frac{G_{J,0,k}}{\sqrt{G_{J,0,k}^2 + A_{\text{c}}^2 \sigma_{0,k}^2}} \right] L_{J,k} \quad (\text{B4})$$

$$\delta_{k,i} = \frac{A_{\text{c}} (\sigma_{k,i} - \sigma_{k-1,i}) L_{J,k}}{\sqrt{G_{J,k,i}^2 + A_{\text{c}}^2 (\sigma_{k,i} - \sigma_{k-1,i})^2}} \quad (\text{B5})$$

$$\varepsilon_{k,i} = L_{J,k} - \frac{G_{J,k,i} L_{J,k}}{\sqrt{G_{J,k,i}^2 + A_{\text{c}}^2 (\sigma_{k,i} - \sigma_{k-1,i})^2}} \quad (\text{B6})$$

式中: A_{c} 为导线截面, 单位为 mm^2 ; $L_{J,k}$ 为绝缘子串 k 的长度; $G_{J,0,k}$ 、 $G_{J,k,i}$ 分别为绝缘子串 k 在初始状态和运行状态下的垂向荷载, 单位为 N, 可由式(B7)和式(B8)计算。

$$G_{J,0,k} = \frac{J_{J,k}}{2} + A_{\text{c}} \sigma_{0,k} \sinh \left[\frac{\gamma_{0,k} (a_{0,k-1} + x_{J,0,k-1})}{\sigma_{0,k}} \right] - A_{\text{c}} \sigma_{0,k} \sinh \left(\frac{\gamma_{0,k} x_{J,0,k}}{\sigma_{0,k}} \right) \quad (\text{B7})$$

$$G_{J,k,i} = \frac{J_{J,k}}{2} + A_{\text{c}} \sigma_{k,i} \sinh \left[\frac{\gamma_{k,i} (a_{k-1,i} + x_{J,k-1,i})}{\sigma_{k,i}} \right] - A_{\text{c}} \sigma_{k,i} \sinh \left(\frac{\gamma_{k,i} x_{J,k,i}}{\sigma_{k,i}} \right) \quad (\text{B8})$$

式中: $J_{J,k}$ 为绝缘子串 k 的自重, 单位为 N; $x_{J,0,k}$ 和 $x_{J,k,i}$ 分别为绝缘子串 k 悬挂点在初始状态和运行状态下的 x 轴坐标值, 可由式(B9)和式(B10)计算。

$$x_{J,0,k} = \frac{\sigma_{0,k}}{\gamma_{0,k}} \ln \left[\frac{\sigma_{0,k}}{\gamma_{0,k} (L_{0,k} - h_{0,k})} \left(1 - \exp \left(\frac{\gamma_{0,k} S_{0,k}}{\sigma_{0,k}} \right) \right) \right] \quad (\text{B9})$$

$$x_{J,k,i} = \frac{\sigma_{k,i}}{\gamma_{k,i}} \ln \left[\frac{\sigma_{k,i}}{\gamma_{k,i} (L_{k,i} - h_{0,k})} \left(1 - \exp \left(\frac{\gamma_{k,i} S_{0,k}}{\sigma_{k,i}} \right) \right) \right] \quad (\text{B10})$$

式中: $L_{0,k}$ 、 $L_{k,i}$ 分别为线档 k 在初始状态和运行状态下的线长, 可由式(B11)和式(B12)计算。

$$L_{0,k} = \sqrt{h_{0,k}^2 + \left[\frac{2\sigma_{0,k} \sinh\left(\frac{\gamma_{0,k} S_{0,k}}{2\sigma_{0,k}}\right)}{\gamma_{0,k}} \right]^2} \quad (\text{B11})$$

$$L_{k,i} = \sqrt{h_{0,k}^2 + \left[\frac{2\sigma_{k,i} \sinh\left(\frac{\gamma_{k,i} S_{0,k}}{2\sigma_{k,i}}\right)}{\gamma_{k,i}} \right]^2} \quad (\text{B12})$$

附录 C

表 C1 汇总了本文模型中参数及在算例中的取值。

表 C1 本文模型中参数及其在算例中的取值

Table C1 Sources of the parameters in the model proposed in this paper and their values in case studies

参数	算例中的取值
h_t/m	1.5
$\psi_r/(kW/m)$	658
$k_r^{[26]}$	0.07
$\rho_b/(kg/m^3)$	40
η	0.4
$\delta_f/(\circ)$	0
d_r/m	8
(x_{A1}^0, y_{A1}^0)	(-150,68)
(x_{A2}^0, y_{A2}^0)	(150,68)
(x_{B1}^0, y_{B1}^0)	(-150,60)
(x_{B2}^0, y_{B2}^0)	(150,60)
D_c/m	0.03
$m_l/(kg/m)$	1.688
$C_l/(J/(kg \cdot K))$	798
I/A	400
$R_{ref}/(\Omega/m)$	5.912×10^{-5}
$\alpha/(1/^\circ C)$	4.03×10^{-3}
$T_{ref}/^\circ C$	20
ε_i	0.5
β_s	0.5
E_c/MPa	65×10^3
$\tau_c/(1/^\circ C)$	20.5×10^{-6}
N_s	8
$\sigma_{0,k}/MPa$	141.3
$a_{0,i}/m$	300
$h_{0,i}/m$	0
$s_{0,i}/m$	300
$L_{1,i}/m$	1.6
$J_{1,i}/N$	1274
$T_a/^\circ C$	19.8
$v_w/(m/s)$	12
$\theta_w/(\circ)$	90

续表 C1

参数	算例中的取值
$Q_{sc}/(W/m^2)$	800
$\xi_s/(\circ)$	90
σ_c/m^2	0.03
$\gamma_f^{[10]}$	0.4
$\rho_f^{[32]}/(kg/m^3)$	1.449
$\mu_f^{[32]}/(kg/(m \cdot s))$	9.695×10^{-6}
$K_f^{[32]}/(W/(m \cdot ^\circ C))$	0.041
$\varepsilon_{fume}^{[24]}$	0.5
$\varepsilon_c^{[24]}$	0.17
$\varepsilon_H^{[24]}$	0.33
$\Delta\varepsilon^{[24]}$	0
$\varepsilon_c^{*[24]}$	0.17
$\varepsilon_H^{*[24]}$	0.30
$C_c^{[24]}$	1.0
$C_H^{[24]}$	1.1
$\rho_a^{[28]}/(kg/m^3)$	1.144
$\mu_a^{[28]}/(kg/(m \cdot s))$	1.884×10^{-5}
$K_a^{[28]}/(W/(m \cdot ^\circ C))$	0.027
t_0/min	0
t_r/min	90
$\Delta t/s$	30
N_t	180

参考文献

- [1] 吴田, 阮江军, 胡毅, 等. 500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 163-170.
WU Tian, RUAN Jiangjun, HU Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.
- [2] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.
- [3] 方超颖, 许军, 丁志龙, 等. 山火灾害下输电系统的弹性评估方法及其提升措施[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 239-247.
FANG Chaoying, XU Jun, DING Zhilong, et al. Resilience assessment method and enhancement measures of power transmission system under mountain fire disasters[J].

- Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 239-247.
- [4] 罗昊, 杨琪, 王炜宇, 等. 基于 XGBoost 的输电线路火灾风险等级评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 132-141.
LUO Hao, YANG Qi, WANG Weiyu, et al. XGBoost-based assessment method for fire risk levels of transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 132-141.
- [5] 尹一卓, 王军, 宁鑫, 等. 植被含水率对导线触树单相接地故障特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 119-127.
YIN Yizhuo, WANG Jun, NING Xin, et al. Effect analysis of vegetation moisture content on a tree-contact single-phase-to-ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 119-127.
- [6] 唐瑞, 张文海, 杨淳岚, 等. 基于阻抗渐变特性检测的中压线路树枝碰线故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 148-159.
TANG Rui, ZHANG Wenhai, YANG Chunlan, et al. Tree-contact single-phase-to-ground fault identification for medium voltage distribution lines based on impedance gradient property detection[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 148-159.
- [7] 刘辉, 杨韬, 林济铿, 等. 山火条件下输电线路跳闸概率计算[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 125-133.
LIU Hui, TAO Yang, LIN Jikeng, et al. Calculation of transmission line trip probabilities under forest fire condition[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 125-133.
- [8] 周恩泽, 龚博, 刘淑琴, 等. 南方电网架空线路因山火跳闸故障统计分析[J]. 广东电力, 2022, 35(4): 80-86.
ZHOU Enze, GONG Bo, LIU Shuqin, et al. Statistics and analysis on tripping fault of overhead transmission lines caused by mountain fires in China Southern Power Grids[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(4): 80-86.
- [9] 周恩泽, 饶章权, 刘琦, 等. 典型高风险植被火条件下导线——板间隙击穿特性[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 179-185.
ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.
- [10] 周恩泽, 樊灵孟, 黄勇, 等. 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2778-2785.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Risk distribution assessment of wildfire-induced trips in transmission line based on flame combustion model[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778-2785.
- [11] 文刚, 金晶, 周仿荣, 等. 110 kV 及以上电压等级输电线路因山火跳闸分析及防治[J]. 电工技术, 2020(19): 51-54.
WEN Gang, JIN Jing, ZHOU Fangrong, et al. Analysis and prevention of trip of 110 kV and above transmission lines due to mountain fire[J]. Electrical Technology, 2020(19): 51-54.
- [12] 周特军, 陆佳政, 吴传平, 等. 湖南电网山火告警风险及故障时间间隔分布规律[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 135-142.
ZHOU Tejun, LU Jiazheng, WU Chuanping, et al. Distribution characteristics of wildfire warning risk and fault interval for Hunan power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 135-142.
- [13] 郭伯森, 李天友, 王连辉, 等. 基于层次分析法的中压配电线路森林火灾故障预警辨识模型[J]. 供用电, 2023, 40(3): 55-62.
GUO Bosen, LI Tianyou, WANG Lianhui, et al. An early warning evaluation model for forest fire faults in medium-voltage distribution lines based on analytic hierarchy process[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 55-62.
- [14] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 16-26.
WANG Jian, XIONG Zhangzi, NAN Dongliang, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 16-26.
- [15] 欧阳帆, 余笑龙, 徐彪, 等. 基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 10-19.
OUYANG Fan, SHE Xiaolong, XU Biao, et al. A method for dividing the forest fire risk levels caused by a ground fault risk levels on distribution lines based on multiple index comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 10-19.
- [16] 王开正, 付一桐, 钱国超, 等. 基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 83-91.
WANG Kaizheng, FU Yitong, QIAN Guochao, et al. An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmission line corridors based on spatio-temporal context[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 83-91.
- [17] KUBIS A, REHTANZ C. Application of a combined

- electro-thermal overhead line model in power flow and time-domain power system simulations[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(8): 2041-2049.
- [18] WANG M, YANG M, WANG J, et al. Contingency analysis considering the transient thermal behavior of overhead transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 4982-4993.
- [19] 王孟夏, 韩学山, 韦志清, 等. 电网运行环境下基于电热耦合潮流的架空线路应力预估[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 1078-1087.
WANG Mengxia, HAN Xueshan, WEI Zhiqing, et al. Tension prediction of overhead transmission line based on electrothermal coupling power flow in operating power systems[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 1078-1087.
- [20] 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越限预警方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(2): 25-33.
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, 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.
- [21] WANG Mengxia, YIN Yimin, YANG Ming, et al. Probabilistic power flow calculation considering electro-thermo-mechanical dynamics of overhead conductor[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 143.
- [22] KOUFAKIS E I, TSARABARIS P T, KATSANIS J S, et al. A wildfire model for the estimation of the temperature rise of an overhead line conductor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 1077-1082.
- [23] NAZEMI M, DEHGHANIAN P, DARESTANI Y, et al. Parameterized wildfire fragility functions for overhead power line conductors[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 2517-2527.
- [24] 刘彦丰, 高正阳, 梁秀俊. 传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [25] KAILIDIS D, KARANIKOLA P. Forest fires 1900-2000[M]. Salonica, Greece: Giahoudis, 2004.
- [26] ICOVE D J, DEHAAN J D. Forensic fire scene reconstruction[M]. NJ: Prentice-Hall, 2004.
- [27] DRYSDALE D. An introduction to fire dynamics[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
- [28] IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S]. *IEEE Std 738—2012 (Revision of IEEE Std 738—2006- Incorporates IEEE Std 738—2012 Cor 1—2013)*, 2013.
- [29] KIESSLING F, NEFZGER P, NOLASCO J F, et al. Overhead power lines[M]. Springer, 2002.
- [30] 孟遂民, 孔伟, 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [31] AHSAN F, DANA H N, SARKER K S, et al. Data-driven next-generation smart grid towards sustainable energy evolution: techniques and technology review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(3): 696-737.
- [32] 严和钦, 陈金福. 烟气热物性参数的计算及工程应用[J]. *浙江化工*, 2022, 53(7): 25-29.
YAN Heqin, CHEN Jinfu. Calculation and engineering application of flue gas thermophysical parameters[J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2022, 53(7): 25-29.

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-04-22

作者简介:

罗汶雯(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行和输电元件动态增容等; E-mail: luoww@mail.sdu.edu.cn

王孟夏(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统经济运行、输电能力分析预测等。E-mail: wangmx@sdu.edu.cn

(编辑 张颖)