

雨雾凇导线覆冰理论模型数值模拟研究

陈百炼¹, 曹双和², 李 昊³

(1. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省电力设计研究院, 贵州 贵阳 550001;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘 要:导线覆冰的理论模型及数值模拟是研究覆冰过程机理的必要手段。本文基于国际公认的导线覆冰理论模型框架,采用合理的覆冰过程物理参数化方法,构建了一套完整的数值计算方案,并利用其对雨雾凇导线覆冰过程进行了数值模拟研究,探讨了雨凇、雾凇及雨雾凇混合覆冰过程的机理及其演变特征。数值模拟结果表明:雾凇覆冰过程的增长曲线呈对数曲线变化特征,覆冰在开始阶段增长很快而随时间逐渐变慢;而雨凇覆冰则随时间持续增长,且覆冰质量增长比覆冰厚度增长更为明显;雨雾凇混合覆冰状态下覆冰的增长与单纯雨凇或雾凇覆冰的增长曲线均不同,由于干、湿覆冰机制的转换使覆冰增长过程呈现复杂的变化,而开始阶段无论是雨凇覆冰还是雾凇覆冰都可能表现出明显的湿增长特征。本文的研究结果揭示了雨雾凇导线覆冰过程的机理及其演变特征,具有一定的理论参考价值。

关键词:雨雾凇;导线覆冰;理论模型;数值模拟

文章编号:2096-4633(2018)08-0073-09 **中图分类号:**TM752 **文献标志码:**B

2008 年初我国南方广大地区发生持续雨雪冰冻天气,造成了极其严重的输电线路覆冰灾害,导致电网大面积损毁、多地电力供应中断,经济损失达上千亿元,对我国经济社会可持续发展提出了严峻的考验。2008 年以来,国内针对该次历史罕见的冰冻灾害从气候学、天气学、灾害学等方面进行了大量研究,然而针对导线覆冰物理过程及其机理的研究却很少。主要由于导线覆冰研究涉及到大气物理学、流体力学、热力学及电工学等学科交叉领域,其理论和观测研究难度较大。但导线覆冰的理论模型及数值模拟仍然是研究覆冰过程机理的必要手段。自 1982 年第一次国际结构物大气积冰会议(IWAIS)以来,导线覆冰研究在描述覆冰机理的动力学和热力学模型方面有了很大发展。例如 Lozowski 等建立了描述固定圆柱导线覆冰的二维理论模型^[1];Makkonen 建立了圆柱导线均匀覆冰理论模型并提出了雨凇覆冰时垂直冰柱的算法^[2-3];Jones 提出的简化的雨凇覆冰模型被广泛应用^[4];PingFu 等基于风洞实验提出了计算局地碰撞率和热传输率并考虑表面水膜流动的精细模型,并进一步将其发展为复杂的 3D 形态模型^[5]。国内在导线覆冰的理论研究方面起步较晚,谭冠日基于前苏联的研究成果,较早地提出了

分析导线覆冰应遵循的理论公式^[6];蒋兴良等分析了三峡地区导线覆冰的特征并提出了雾凇覆冰的理论模型^[7];刘和云等在借鉴国外覆冰模型的基础上提出了一个雨凇覆冰的简单模型^[8];孙才新等通过导线表面热平衡方程分析了覆冰干湿增长转变的临界条件^[9]。总的来说,国内在导线覆冰机理研究方面较为薄弱,对覆冰理论模型的研究和应用尚处于探索阶段。本文基于国际公认的导线覆冰理论模型框架,采用合理的覆冰物理过程参数化方法并构建了一套完整的数值计算方案,应用其对雨雾凇导线覆冰过程进行了数值模拟,揭示了雨雾凇导线覆冰过程的机理及其演变特征,对相关领域的研究有一定的理论参考价值。

1 雨雾凇导线覆冰理论模型

导线覆冰是由于低温条件下空气中的水成物粒子(雾滴、雨滴以及冰水混合物)在风的作用下碰撞导线并在导线表面凝附冻结而造成的物理现象。我国南方地区多以雨、雾凇覆冰为主,根据国内外研究^[10-11],雨、雾凇情况下描述导线覆冰质量增长的理论模型为:

$$\frac{dM}{dt} = EnDWV \quad (1)$$

其中 E 为导线对空气中液滴的捕获率, n 为碰

撞到导线表面的液滴冻结率, D 为导线直径, W 为空气中液态含水量, V 为液滴碰撞导线表面的速度。由于雨、雾滴碰撞导线后没有反弹, 故捕获率也即空气中液滴对导线的碰撞率。当液滴碰撞导线表面后瞬间完全冻结, 这时覆冰机制为干增长, 冻结率为 1; 当液滴碰撞导线表面后瞬间只有部分冻结, 在覆冰形成的过程中表面仍有少量液态水存在, 则覆冰机制为湿增长, 这时冻结率小于 1。空气中的液滴随气流相对导线运动时, 由于导线对气流的分流作用, 有部分液滴将随气流绕过导线而不碰撞到导线表面, 气流中的液滴碰撞到导线表面的效率称为碰撞率。较小的液滴容易随气流绕过导线, 而较大的液滴因运动惯性大其碰撞到导线的几率也大。碰撞率和冻结率是理论模型 (1) 中的两个重要物理参数, 其理论计算相当复杂: 碰撞率需通过求解空气中液滴运动的轨迹方程得到, 而冻结率需通过求解覆冰表面能量平衡方程得到。

2 理论模型参数化方案

2.1 碰撞率

Langmuir&Blodgett 基于风洞实验数据分析发现, 气流中液滴相对圆柱体的运动轨迹与空气粘性、液滴大小、气流速度以及圆柱尺寸等有关, 并建立了气流中液滴相对圆柱体运动的轨迹方程^[12]:

$$K \frac{dV'd}{dt} = \frac{C_d Re_r}{24} (V'_a - V'_d) \quad (2)$$

其中 K 为液滴运动的惯性参数, Re_r 为液滴运动的雷诺数, C_d 为液滴运动的拖曳系数; V'_a 、 V'_d 分别是气流速度和液滴速度的无量纲参量 ($V'_a = V_a / |V_a|$, $V'_d = V_d / |V_d|$)。气流速度矢量 V_a 通过气流绕圆柱体运动的势流方程计算, 通过计算每个液滴的运动轨迹, 最后可以求得气流中液滴对圆柱体总的碰撞率。由于碰撞率的理论计算十分复杂, Finstad 等通过对实验数据的拟合, 提出了较为简化的计算碰撞率的经验公式^[13]:

$$E = A - 0.028 - C(B - 0.0454) \quad (3)$$

$$\text{其中: } A = 1.066K^{-0.00616} \exp(-1.103K^{-0.688})$$

$$B = 3.641K^{-0.498} \exp(-1.497K^{-0.694})$$

$$C = 0.00637(\varphi - 100)^{0.381}$$

其中 K 、 φ 为无量纲参量 ($K = \rho_w d^2 v / 9\mu D$, $\varphi = Re^2 / K$); D 为导线直径, d 为液滴直径, Re 为液滴运动的雷诺数 ($= \rho_a dv / \mu$); ρ_w 、 ρ_a 分别为液滴和

空气的密度, v 为气流运动速度, μ 为空气的绝对粘度。Finstad 通过实验数据分析进一步指出^[14], 利用液滴中值体积直径可以较为准确地求得空气中液滴对导线的总体碰撞率, 而不必分别求取液滴滴谱上每一直径的碰撞率。应用 (3) 式, 我们计算分析了碰撞率随液滴直径和导线直径变化的情况。

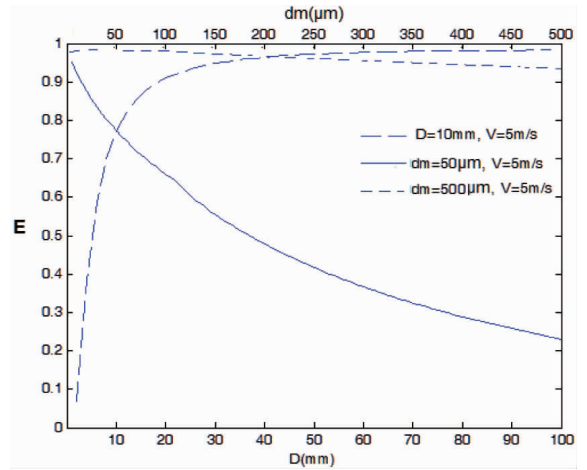


图 1 碰撞率随液滴大小和导线直径的变化

Fig. 1 Variation of collision rate on size of droplets and conductor diameters

图 1 给出了当导线直径为 10 mm、气流速度 5 m/s 时, 计算得到的碰撞率随空气中液滴直径的变化, 以及当取液滴直径分别为 50 μm 和 500 μm 、气流速度 5 m/s 时碰撞率随导线直径的变化情况。可见碰撞率随着液滴直径增大而迅速上升, 当液滴直径增大到 500 μm 时碰撞率已接近于 1。在液滴直径较小 (50 μm) 的情况下碰撞率是随导线直径增大而迅速下降的, 导线直径增大将使气流受扰动影响程度增加, 更多的液滴将随气流绕过导线而使碰撞率降低; 当取液滴直径较大 (500 μm) 时得到的碰撞率很高, 且导线直径增大导致碰撞率下降的效应不大。雾滴的直径一般小于 50 μm , 因此雾凇覆冰情况下碰撞率将随导线覆冰后直径增大而迅速下降; 而雨滴的直径一般在 500 μm 左右, 其碰撞率很高且导线直径增大对其影响不明显。从以上结果分析可知, 雨凇覆冰与雾凇覆冰的碰撞率及其变化特征是有很大差异的。后面我们对覆冰过程的数值模拟结果分析将会看到, 正是这样的差异导致了雾凇覆冰和雨凇覆冰的增长表现出明显不同的特征。

2.2 冻结率

碰撞到导线表面的液滴是否冻结及其冻结效率如何由导线表面能量平衡状态决定,理论上冻结率需通过求解覆冰导线覆冰表面能量平衡方程得到。根据国内外研究^[2,11],导线覆冰表面能量平衡方程可表示为:

$$Q_f + Q_v + Q_k + Q_a = Q_c + Q_e + Q_l + Q_s + Q_i \quad (4)$$

在方程左边的热源项中, Q_f 为水滴冻结释放的潜热; Q_v 为气流与冰面摩擦产生的热, Q_k 为液滴撞击动能转化产生的热量, Q_a 为液滴从冻结温度降温到表面温度放出的热量。在方程右边的热汇项中, Q_c 为气流带走的表面感热; Q_e 为覆冰表面挥发或蒸发损失的热量; Q_l 为过冷水升温到冰点消耗的热量; Q_s 为长波辐射损失的热量, Q_i 为覆冰表面向内部的传输的热量。设 F 为空气中液态水质量通量($F = wv$),在干增长时 $Q_f = EFL_f$,其中 E 为碰撞率, L_f 为水的冻结潜热;由于

$$n = \frac{1}{F(1-\lambda)L_f} - \left[-(h + \sigma a)t_a + \frac{h\varepsilon L_e}{C_p P_a}(e_0 - e_a) - \frac{hrv^2}{2c_p} - FC_w t_a \right] \quad (5)$$

其中对流热交换系数 $h = k \times Nu/D$, k 为空气导热系数, Nu 为气流相对圆柱运动的努塞数,这里采用 Makkonnen 的经验公式^[2]: $Nu = 0.032 \times Re^{0.85}$,其中 Re 为导线圆柱雷诺数($Re = \rho_a \times DV/\mu$)。

3 数值计算方案

根据雨雾淞导线覆冰理论模型(1),单位长度导线上时间 T 内的覆冰质量增量为:

$$\Delta M = \int_0^T n(t) E(t) F(t) D(t) dt \quad (6)$$

其中 $n(t)$ 、 $E(t)$ 分别为冻结率和捕获率, $F(t)$ 为空气中液态水质量输送通量($F = W \times V$), $D(t)$ 为包含导线本身直径在内的覆冰直径,均随时间变化。在每一时间步计算 n 、 E 、 F :取(6)的差分形式,考虑圆柱导线均匀覆冰,相应的覆冰厚度增量为:

$$\Delta h = \sqrt{\left(\frac{D_{i-1}}{2}\right)^2 + \frac{\Delta M}{\pi \rho_i}} - \frac{D_{i-1}}{2} \quad (7)$$

其中 ρ_i 为覆冰密度,通过 Macklin 数计算。

$$(FC_i + h + \sigma a)ts + \frac{h\varepsilon L_s}{C_p P_a}(es - ea) - \frac{hrv^2}{2c_p} - (FC_w + h + \sigma a)t_a - FL_f = 0 \quad (8)$$

这是一个关于表面温度 ts 的非线性方程,只能通过数值方法近似求解。我们采用二分法数值求解该方程,从而得到覆冰表面温度 ts 在每一时间步的变化。

观测实验表明,在湿增长时有少量未及时冻结的液态水被包裹到冻结而成的冰晶体结构中,形成所谓海绵冰^[15],故这时 $Q_f = (1 - \lambda)nEFL_f$,其中 n 为冻结率, λ 一般取 0.3; $Q_v = hrv^2/(2C_p)$,其中 h 为对流热交换系数, r 为局部恢复系数(一般取 0.79), v 为风速, C_p 为干空气的定压比热;在自然气象条件下, Q_k 可忽略不计; $Q_a = FC_i(0^\circ\text{C} - ts)$,其中 C_i 为冰的比热, ts 为覆冰表面温度; $Q_c = h(ts - ta)$,其中 ts 、 ta 分别为冰面温度和环境气温; $Q_e = h\varepsilon L_e(es - ea)/(C_p Pa)$,其中 $\varepsilon = 0.622$; L_e 是水的蒸发或挥发潜热, es 、 ea 分别是冰面饱和水汽压和环境空气水汽压, Pa 为环境大气压; $Q_l = FC_w(0^\circ\text{C} - ta)$,其中 C_w 为水的比热; $Q_e = \sigma a(ts - ta)$,其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2 \text{ K}^4$, $a = 8.1 \times 10^7 \text{ K}^3$ 。在导线本身发热很小的情况下 Q_i 可忽略不计。在湿增长情况下,根据覆冰表面能量平衡方程,可以得到其冻结率为:

Macklin 数的定义为^[16]: $R = -v_0 d_m/2ts$;其中 v_0 为液滴撞击速度, d_m 为液滴中值体积直径, ts 为覆冰表面温度。我们采用 Bain&Gayet 的计算方案^[17]:

$$\begin{aligned} \rho_i &= 0.11 R^{0.76} & R \leq 10 \\ \rho_i &= R/(R + 5.61) & 10 < R \leq 60 \\ \rho_i &= 0.92 & R > 60 \end{aligned}$$

其中液滴撞击速度的计算方案为^[2]:

$$\begin{aligned} v_0 &= v(-0.174 + 1.464K_0 - 0.816K_0^2) & K_0 \leq 0.55 \\ v_0 &= v[0.561 + 0.592\ln K_0 - 0.26(\ln K_0)^2] & K_0 > 0.55 \end{aligned}$$

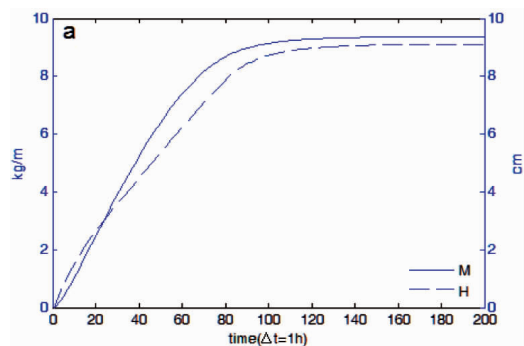
其中 $K_0 = K/(0.087Re^{(0.76Re-0.027)} + 1)$, K 为液滴运动惯性参数($K = \rho_w v d^2/9\mu D$), Re 为液滴雷诺数($\rho_a dv/\mu$)。覆冰表面温度是反映干、湿增长机制的重要指标,在湿增长时覆冰表面温度 ts 固定为 0°C ,而在干增长时 $ts < 0^\circ\text{C}$,具体通过求解覆冰表面热平衡方程得到。干增长时的覆冰表面能量平衡方程可以写为:

4 数值模拟试验结果

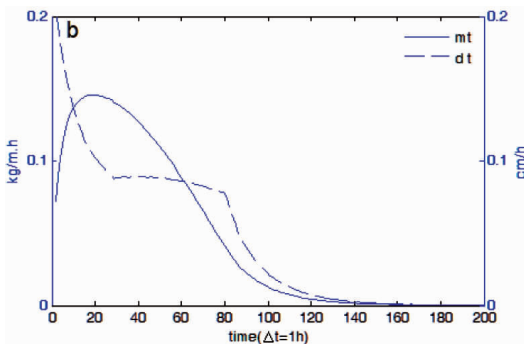
4.1 雾淞覆冰过程数值模拟

按照以上参数化方法及数值计算方案,我们对

典型雾凇天气条件下的导线覆冰过程进行了数值模拟试验。取环境气温为 -3°C 、相对湿度 100%、风速 10 m/s 、空气液态水含量 0.3 g/m^3 、雾滴中值体积直径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、导线初始直径 $\varphi = 10\text{ mm}$ ，计算时间步长为 $\Delta t = 1\text{ h}$ ，覆冰过程持续 200 h 。图 2 给出了对雾凇覆冰增长过程的模拟结果。



(a) 覆冰质量 M 与覆冰厚度 H



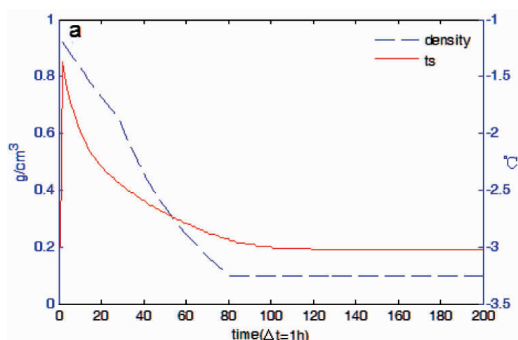
(b) 质量增长率 mt 与厚度增长率 dt

图 2 雾凇覆冰过程模拟

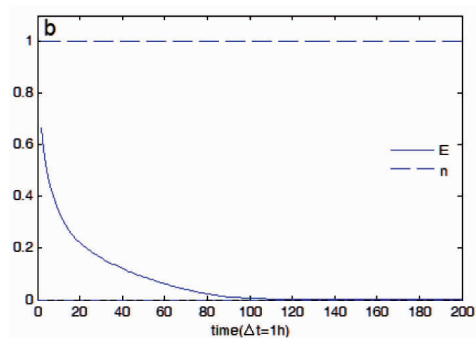
Fig. 2 Modeling of rime icing

从图 2(a) 可见，模拟得到的覆冰质量和覆冰厚度增长曲线大体上呈对数曲线特征，覆冰在刚开始一段时间内增长很快，随时间推移增长逐渐变慢，到 120 h 后覆冰增长已不明显。图 2(b) 是覆冰质量和厚度增长率随时间的变化，可见在覆冰过程初期 20 h 内覆冰质量增长率有一个快速上升，此后逐渐下降；而覆冰厚度增长率在开始最大，然后随时间快速下降，但其下降在 25 h 到 85 h 之间变得平缓，此后又迅速下降，到 120 h 以后两者都向 0 趋近。以上结果表明，虽然雾凇覆冰时覆冰质量和覆冰厚度的增长曲线大体上相似，但其增长率却呈现较为复杂的变化。随着覆冰以后包含导线的整个直径增大，其碰撞率持续下降，这是导致覆冰增长越来越慢的主要原因。图中可见 120 h 后覆冰几乎停止增长，这说明在一定的气象条件下，雾凇覆冰的增长是

有限的，不会随时间无限增长，这已为实际观测所证实。



(a) 覆冰密度与覆冰表面温度 ts



(b) 碰撞率 E 与冻结率 n

图 3 雾凇覆冰过程模拟

Fig. 3 Modeling of rime icing

图 3(a) 给出了覆冰密度与覆冰表面温度变化的模拟结果。可见覆冰密度在覆冰开始时最大，此后迅速下降，到 80 h 以后维持在最小值。而覆冰表面温度在一开始因为冻结潜热的释放达到最高，以后迅速下降， 100 h 后基本与环境气温一致。在整个雾凇覆冰过程中，覆冰表面温度都维持在 0°C 以下。图 3(b) 是计算得到的碰撞率和冻结率的变化，可见覆冰过程中碰撞率是随时间迅速下降的，而冻结率始终维持在 1，表明整个雾凇覆冰为干增长过程。

4.2 雨凇覆冰过程数值模拟

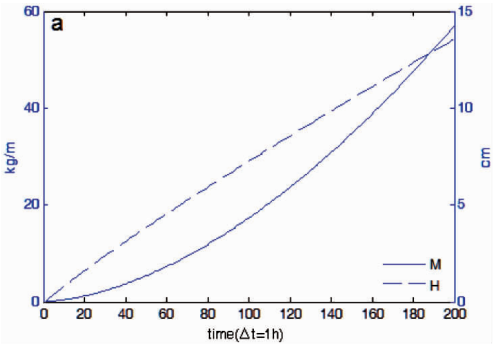
雨滴的直径远远大于雾滴，相对于雾滴来说，由于其运动惯性大，雨滴在垂直方向下落对覆冰的作用不能忽略，因此需要同时考虑来自水平方向和垂直方向的过冷雨滴对导线覆冰的贡献。我们设空气中降雨导致的液态含水量为 W ，雨滴垂直下落速度为 V_1 ，则垂直方向上的液水质量通量为： $F_1 = W \times V_1$ （单位 $\text{kg/m}^2/\text{s}$ ），根据量纲分析原理，我们可以将其与降水强度 P （单位 mm/h ）的关系写为：

$$F1 = WV1 = 0.001\rho_w P/3\ 600 \tag{9}$$

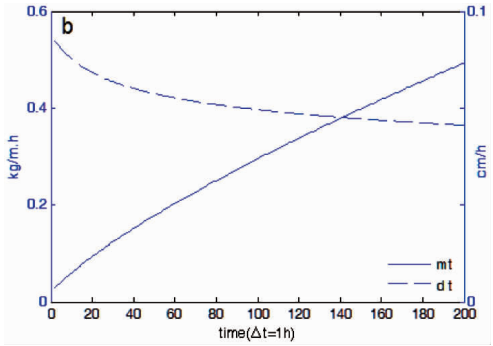
其中 ρ_w 为水的密度。同时水平方向上在风的作用下输送的液水质量通量为 $F2 = W \times V$, 其中 V 为与导线垂直的水平风速。将两个方向上的液水质量通量作矢量合成, 则雨淞覆冰情况下导线捕获的总液水质量通量为: $F = \sqrt{F1^2 + F2^2}$ 。对于降雨造成的空气液态含水量, 这里采用 Best 的计算方案^[4]:

$$W = 0.067P^{0.846} \tag{10}$$

其中 W 的单位为 g/m^3 , P 为降水强度(单位 mm/h)。当(9)中的 $V1$ 取 $5\ m/s$ 时, 其计算得到的 W 与 Best 方案的结果基本一致。当(10)中的 P 取 $2\ mm/h$ 时, 对应的 W 约为 $0.12\ g/m^3$ 。我们取典型雨淞天气下环境气温为 $-1\ ^\circ C$ 、相对湿度 95% 、水平风速 $5\ m/s$ 、降水强度 $2\ mm/h$ (空气液态水含量 $0.12\ g/m^3$), 液滴中值体积直径 $500\ \mu m$, 导线初始直径 $\varphi = 10\ mm$, 计算时间步长为 $\Delta t = 1\ h$, 覆冰过程持续 $200\ h$ 。图 4 给出了对雨淞覆冰增长过程的模拟结果。



(a) 覆冰质量 M 与覆冰厚度 H



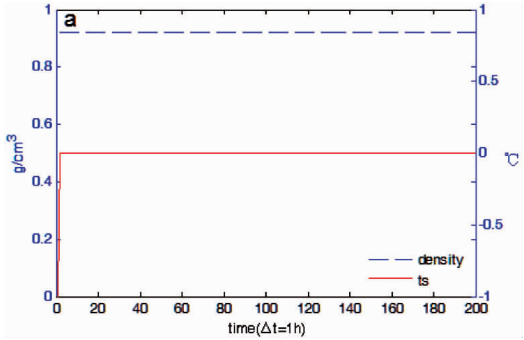
(b) 质量增长率 mt 与厚度增长率 dt

图 4 雨淞覆冰过程模拟

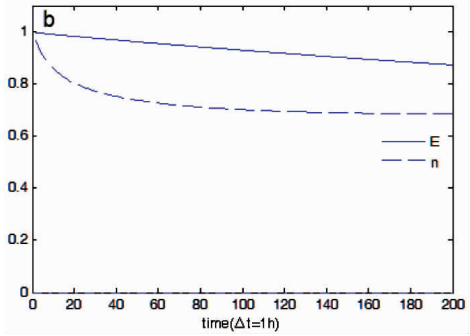
Fig. 4 Modeling of glaze icing

从图 4(a) 可见, 雨淞覆冰情况下覆冰质量和覆冰厚度增长曲线与雾淞覆冰时的增长曲线图 3(a) 特征是完全不同的, 其覆冰质量和厚度都随时间持续增长。覆冰质量刚开始增长较慢而后随时间呈指

数增长, 持续 $200\ h$ 后覆冰质量已接近 $60\ kg/m$; 而覆冰厚度随时间则几乎是呈线性增长。由于雨淞覆冰的危害性远大于雾淞覆冰, 这个现象应引起我们的高度重视。从图 4(b) 中可见, 雨淞覆冰时覆冰质量增长率是随时间增大的, 而覆冰厚度增长率则是随时间减小的, 这与雾淞覆冰时的情况也有所不同。



(a) 覆冰密度与覆冰表面温度 ts



(b) 碰撞率 E 与冻结率 n

图 5 雨淞覆冰过程模拟

Fig. 5 Modeling of glaze icing

图 5(a) 给出了覆冰密度与覆冰表面温度变化的模拟结果。可见整个雨淞覆冰过程中覆冰密度都维持在其最大值 ($0.92\ g/cm^3$), 而覆冰表面温度一直维持在 $0\ ^\circ C$, 尽管这时环境气温为 $-1\ ^\circ C$ 。模拟结果正确反映了雨淞覆冰湿增长过程的特征。图 5(b) 中是碰撞率和冻结率的变化情况, 可见整个雨淞覆冰过程中维持很高的碰撞率, 虽然也随时间缓慢下降, 但相比雾淞覆冰情况下碰撞率随时间迅速下降的幅度小得多。而冻结率 n 始终维持在小于 1 的数值, 开始阶段随时间下降较为明显, 随时间持续逐渐趋于稳定, 维持在 0.7 左右。

4.3 雨雾淞混合覆冰过程数值模拟

雨雾淞混合覆冰主要是由于覆冰过程中气象条件变化导致雨淞覆冰和雾淞覆冰交替出现所造成的, 皆有雾淞覆冰和雨淞覆冰的作用。我们取环境气温在 $-2\ ^\circ C \sim 0\ ^\circ C$ 变化, 风速在 $3 \sim 5\ m/s$ 变化; 雨

淞时空气相对湿度 90%，空气中液态含水量 0.12 g/m^3 ，雨滴中值体积直径 $500 \text{ }\mu\text{m}$ ；雾淞时空气湿度饱和，空气中液态含水量 0.3 g/m^3 ，雾滴中值体积直径 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 。假设覆冰过程以环境气温降到 0°C 以下的雾淞覆冰开始，持续 40 h 后变为雨淞覆冰，持续 40 h 再变为雾淞覆冰，如此雨、雾淞交替覆冰过程共持续 200 h。

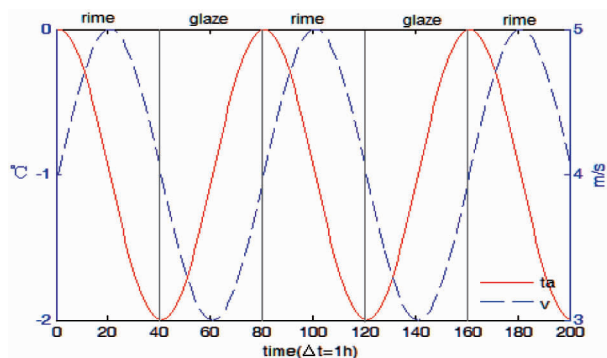
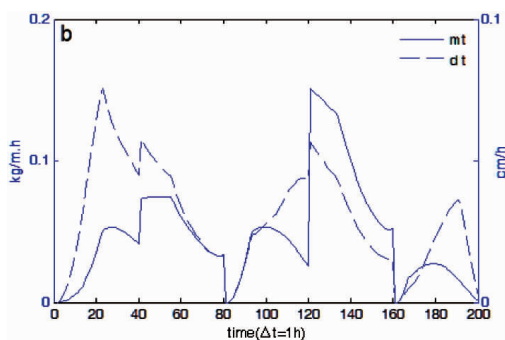


图 6 雨雾淞交替覆冰过程设计方案及环境气温和风速
Fig. 6 Design of icing process alternately with rime and glaze and variation of temperature & wind speed

图 6 是对雨雾淞交替覆冰过程及环境气温、风速变化的设计方案。其中雨、雾淞覆冰过程每持续 40 h 交换一次，环境气温变化取余弦函数形式，风速变化取正弦函数形式。以导线初始直径 $\varphi = 10 \text{ mm}$ ，我们模拟了雨、雾淞交替覆冰过程持续 200 h 的变化情况。

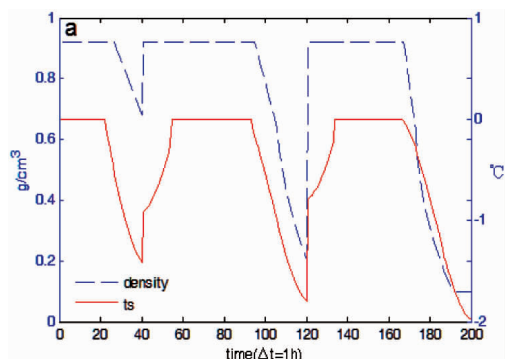
从图 7(a) 可见，雨雾淞混合覆冰情况下覆冰质量和覆冰厚度的增长与单纯雨淞或雾淞覆冰时的增长曲线均不同，其增长速度随时间变化持续呈现复杂的变化。而图 7(b) 中模拟得到的覆冰质量和厚度增长率的变化则更加复杂，并不按照每 40 h 雨、雾淞交替覆冰而简单变化。由于自然环境下覆冰气象条件更加复杂多变，可以预见真实的导线覆冰覆冰过程的变化将是非常复杂的。



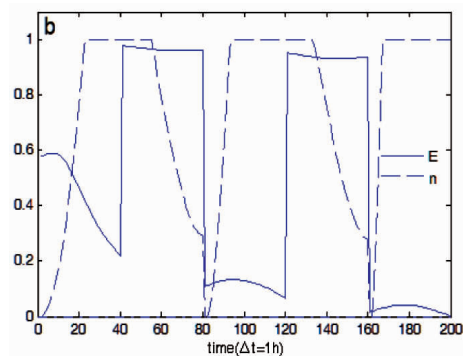
(b) 质量增长率 mt 与厚度增长率 dt

图 7 雨雾淞混合覆冰过程模拟

Fig. 7 Modeling of mixed icing



(a) 覆冰密度与覆冰表面温度

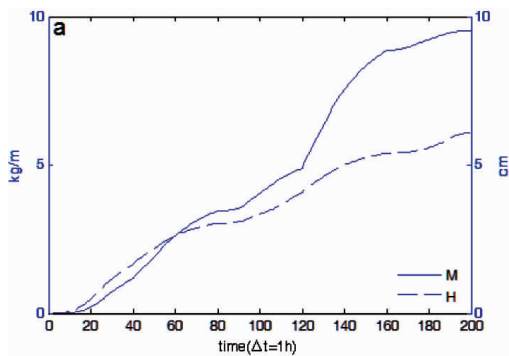


(b) 碰撞率 E 与冻结率 n

图 8 雨雾淞混合覆冰过程模拟

Fig. 8 Modeling of mixed icing

图 8(a) 给出了覆冰密度与覆冰表面温度变化的模拟结果。可见雨雾淞混合覆冰过程中覆冰密度和覆冰表面温度都随雨、雾淞交替的顺序而变化，当雨淞覆冰时密度达到最大，覆冰表面温度达到 0°C ；而在雾淞覆冰时覆冰密度和覆冰表面温度迅速下降，但其变化并不是以每 40 h 雨、雾淞交替为界的简单变化，而是在雨、雾淞覆冰之间存在一个复杂的转变过程。图 8(b) 中的碰撞率和冻结率随覆冰类型的转换在 0 ~ 1 之间变化，而干、湿增长的覆冰机制转换使冻结率的变化比较复杂。



(a) 覆冰质量 M 与覆冰厚度 H

值得注意的是,虽然我们的设计方案中整个覆冰过程以雾淞覆冰开始(0~40 h),但在环境温度较高的条件下(-2°C ~ 0°C),开始阶段的雾淞覆冰仍然呈现湿增长的特征,在图8(a)中可见在覆冰过程开始20多小时内覆冰密度都很大,而覆冰表面温度维持在 0°C 。由于自然条件下覆冰一般于环境温度下降到 0°C 后开始,因此开始阶段无论是雨淞覆冰还是雾淞覆冰都会表现出明显的湿增长特征。以往研究在对雨雾混合淞覆冰进行剖面分析时发现,紧贴导线表面的最内层覆冰也即最初的覆冰层大多都为类似雨淞的覆冰。覆冰在开始阶段多是湿增长过程,而随时间演变逐渐向干增长过程过渡,很多观测研究也指出这是自然环境下覆冰过程演变的普遍特点^[18-20],而本文的数值模拟结果从理论上解释了这个现象。

5 结论

本文基于国际公认的导线覆冰理论模型框架,结合覆冰物理过程参数化构建了一套完整的数值计算方案,通过对雨雾淞导线覆冰过程的数值模拟研究,揭示了雨雾淞导线覆冰过程的变化特征及其机理。主要得到以下结论:

(1)雾淞覆冰的覆冰质量和覆冰厚度增长曲线大体上呈对数曲线特征,覆冰在刚开始增长很快但随时间逐渐变慢;而雨淞覆冰的覆冰质量与覆冰厚度都随时间持续增长,且覆冰质量增长比覆冰厚度增长更为明显,这与雾淞覆冰的情况是不同的;

(2)雾淞覆冰的碰撞率随导线覆冰后直径增大而迅速下降,导致其覆冰增长越来越慢,最后几乎没有明显增长,因此雾淞覆冰的增长是有限的,理论模拟结果很好的解释了这一现象;

(3)雨淞覆冰的碰撞率接近于1且导线覆冰后直径增大对其影响不大,这使雨淞覆冰的覆冰质量和覆冰厚度都随时间持续增长,加之雨淞覆冰的密度大、附着力强,因此雨淞覆冰的危害性远大于雾淞覆冰;

(4)雨雾淞混合覆冰状态下覆冰的增长与单纯雨淞或雾淞覆冰时的增长曲线均不同,由于干、湿覆冰机制的转换使覆冰增长曲线呈现复杂的变化,而开始阶段无论是雨淞覆冰还是雾淞覆冰都可能表现

出明显的湿增长特征。

值得指出的是,本文只是从理论模型数值模拟入手探讨了雨雾淞覆冰过程的演变特征,而真实环境中影响导线覆冰的因素是十分复杂的,试图通过简单的经验统计方法建立有效的覆冰预测预报模型是十分困难的,这方面国内已经作了大量的尝试^[21-24]。准确的导线覆冰预测预报必须建立在较为完备的覆冰理论模型基础之上,并结合气象条件变化建立基于过程判别的导线覆冰气象模式,这方面国内也已有了较深入的研究^[25]。要将覆冰气象模式应用到实际输电线路的覆冰预测上,还需在理论模型中增加考虑电流和电场对覆冰的影响,并有赖于输电线路在线式覆冰自动监测技术的发展^[26-28],这将是我们下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] LOZOWSKI EP, STALLABRASS JR, HEARTY PF. The icing of an unheated; nonrotating cylinder. Part I: A simulation model [J]. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22(12): 2053 - 2062.
- [2] MAKKONEN L. Modelling of ice accretion on wires [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 23(06): 929 - 939.
- [3] LASSE M. A model of icicle growth [J]. Journal of Glaciology, 1988, 34(116): 64 - 70.
- [4] JONES KF. A Sample model for freezing rain ice loads [J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1-2): 87 - 97.
- [5] FU P, FARZANEH M, BOUCHARD G. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors [J]. Cold Regions Science and Technology 2006, 46(02): 132 - 146.
- [6] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨 [J]. 气象学报, 1982, 40(01): 13 - 23.
TAN Guanri. On the microclimatological characteristics of icing on wires [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1982, 10(01): 13 - 23.
- [7] 蒋兴良, 孙才新. 三峡地区导线覆冰的特性及雾淞覆冰模型 [J]. 重庆大学学报, 1998, 21(02): 16 - 19.
JIANG Xingliang, SUN Caixin. Power lines icing characteristics of the Three Gorges District and a model of the accumulation of ice on electric power lines [J]. Journal of Chongqing University, 1998, 21(02): 16 - 19.
- [8] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(04): 44 - 47.
LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(04): 44 - 47.
- [9] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(03): 141 - 145.
SUN Caixin, JIANG Xingliang, XIONG Qixin, et al. Analysis of

- critical icing conditions of conductor and wet-dry growth [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (03): 141 - 145.
- [10] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [11] 法赞, 黄新波. 电网的大气覆冰 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] LANGMUIR I, BLODGETT K. Mathematical investigation of water droplet trajectories [J]. G. E. Res. Lab. Rep.: 1946, 225 (10): 335 - 347.
- [13] FINSTAD KJ, LOZOWSKI EP, GATES EM. A computational investigation of water droplet trajectories [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1958, 5 (01): 160 - 170.
- [14] FINSTAD KJ, LOZOWSKI EP, MAKKONEN L. On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1988, 45 (24): 4008 - 4012.
- [15] MAKKONEN L. The origin of spongy ice [C] // 10th IAHR Symposium on Ice, Espoo: 20 - 23 Aug. 1990: 1022 - 1030.
- [16] MACKLIN WC. The density and structure of ice formed by accretion [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1962, 88 (375): 342 - 343.
- [17] Bain M, GAYET JF. Contribution to the modelling of the ice accretion process: ice density variation with the impacted surface angle [J]. Annals of Glaciology, 2017, 4 (02): 19 - 23.
- [18] 黄河, 徐光虎, 余畅. 2008 年南方电网冰灾期间孤网运行经验 [J]. 南方电网技术, 2008, 2 (05): 6 - 9.
HUANG He, XU Guanghu, YU Chang. Operation experience of isolated network in CSG during ice disaster (2008) [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2 (05): 6 - 9.
- [19] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析 [J]. 电网技术, 2008, 32 (08): 1 - 5.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, SU Zhiyi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan Power Grid in 2008 [J]. 2008, 32 (08): 1 - 5.
- [20] 黄筱婷, 戴栋, 李昊, 等. 基于在线监测数据的输电线路覆冰形态研究 [J]. 南方电网技术, 2013, 7 (01): 76 - 79.
HUANG Xiaoting, DAI Dong, LI Hao, et al. The online monitoring data based research of transmission line icing form [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7 (01): 76 - 79.
- [21] 黄浩辉, 宋丽莉, 秦鹏, 等. 粤北地区导线覆冰气象特征与标准厚度推算 [J]. 热带气象学报, 2010, 26 (01): 7 - 12.
HUANG Haohui, SONG Lili, QIN Peng, et al. Meteorological characteristics and standard thickness calculations of wire icing over the north region of Guangdong province [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26 (01): 7 - 12.
- [22] 温华洋, 田红, 唐为安, 等. 安徽省电线积冰标准冰厚的气象估算模型 [J]. 应用气象学报, 2011, 22 (06): 747 - 752.
WEN Huayang, TIAN Hong, TANG Weian, et al. Establishment of meteorological model for estimating standard ice thickness in Anhui province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22 (06): 747 - 752.
- [23] 殷水清, 赵珊珊, 王遵娅, 等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型 [J]. 应用气象学报, 2009, 20 (06): 722 - 728.
YIN Shuiqing, ZHAO Shanshan, WANG Zunya, et al. Characteristic analysis of ice accumulation on transmission lines and simulation based on ANN model over China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20 (06): 722 - 728.
- [24] 李伟, 马佳, 王世蓉, 等. 精细化气象要素下输电线路覆冰预测预警研究 [J]. 电力大数据, 2018, 21 (02): 1 - 7.
LI Wei, MA Jia, WANG Shirong, et al. Research on prediction and warning of overhead line icing under refined meteorological [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21 (02): 1 - 7.
- [25] 陈百炼, 胡欣欣, 吴息, 等. 基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式 [J]. 应用气象学报, 2018, 29 (03): 354 - 363.
CHEN Bailian, HU Xinxin, WU Xi, et al. Meteorological model of rime traverse icing based on process discrimination [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29 (03): 354 - 363.
- [26] 吕玉祥, 占子飞, 马维青, 等. 输电线路覆冰在线监测系统的设计和应用 [J]. 电网技术, 2010, 34 (10): 196 - 200.
LV Yuxiang, ZHAN Zifei, MA Weiqing, et al. Design and application of online monitoring system for ice-coating on transmission lines [J]. Power System Technology, 2010, 34 (10): 196 - 200.
- [27] 黄良, 赵立进, 李巍, 等. 基于光纤复合架空地线温度应变的分布式覆冰监测实验研究 [J]. 贵州电力技术, 2015, 18 (04): 39 - 42.
HUANG Liang, ZHAO Lijin, LI Wei, et al. Research on the distributed icing monitoring experimental based on OPGW temperature and stain measurement [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2015, 18 (04): 39 - 42.
- [28] 杨滴, 刘燕, 王世蓉, 等. 输电线路覆冰监测的 OPGW 传感应用研究 [J]. 电力大数据, 2018, 21 (04): 7 - 11.
YANG Di, LIU Yan, WANG Shirong, et al. Research on icing monitoring of OPGW transmission line [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21 (04): 7 - 11.

收稿日期: 2018 - 05 - 13

作者简介:



陈百炼 (1969), 男, 博士, 正高级工程师。主要从事气象灾害机理及预测预报方法研究。

(本文责任编辑: 王 燕)

Theoretical modeling of conductor icing under rime and glaze conditions

CHEN Bailian¹, CAO Shuanghe², LI Hao³

- (1. Guizhou Climate Institute of Mountainous Environment, Guiyang 550002 Guizhou, China;
- 2. Guizhou Electrical Research and Design Institute, Guiyang 550001 Guizhou, China;
- 3. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510080 Guangdong, China)

Abstract:Theoretical model and numerical simulation of icing processes are necessary means to study the mechanism of conductor icing. Based on the theoretical model frame of conductor icing which is universal accepted, and combined with reasonable physics parameterization schemes, a complete numerical calculation scheme is constructed and applied to theoretically simulate the conductor icing processes caused by rime and glaze. Evolution of the icing processes are numerical modeling and the variation characteristics under rime, glaze and rime&glaze mixed conditions are described. The results show that the increasing curve of ice-coat under rime is generally characterized by a form of logarithmic curve, with ice-coat increasing rapidly at beginning and gradually wear off. Whereas the ice-coat increases with icing time under glaze condition, with ice quality growing more obvious than that of ice thickness. Under equivalent rime&glaze mixed condition, the increasing curve of ice-coat is much complicated due to transformation between the dry and wet increasing mechanisms, which is different from either rime or glaze icing. And results show three types of icing have some wet increasing characteristics at the beginning of icing processes. This paper theoretically reveals the mechanisms and evolution characteristics of conductor icing under rime, glaze and rime&glaze mixed conditions and has some theoretical reference values.

Key words:rime and glaze; conductor icing; theoretical model; numerical simulation