文章编号:1674-2974(2024)02-0045-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024225

导线倾角与覆冰过程扭转因素对覆冰形状特性影响研究

周超[1,2†],孟凡泽[1],黄钢[1],姬昆鹏[3]
(1. 华北电力大学 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室,北京 102206;
2. 华北电力大学 河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室,保定 071003;
3. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘 要:输电导线覆冰严重威胁电网运行安全,准确预测导线覆冰形状和增长趋势,可以有效预防次生灾害的发生.已有输电导线覆冰增长预测模型较少考虑覆冰偏心扭转对导线表面覆冰形状的影响.为此,综合考虑覆冰偏心、风速等对导线的耦合扭转特性,建立输电导线动态扭转覆冰预测模型.基于预测模型对导线表面覆冰形状进行预测模拟并与文献实验数据对比,验证了模型的有效性.利用预测模型,进一步讨论导线倾角及温度、风速和MVD(水滴中值直径)对冰形和扭转速度的影响.研究发现,导线迎风面覆冰厚度随着倾斜角度的增加,分层现象逐渐明显.与水平布置(零倾角)导线对比,倾斜角度为60°时,导线覆冰面积分别增加18.26%(覆冰125 min)、26.30%(覆冰245 min),扭转角度分别增加10.4°(覆冰125 min)、16.2°(覆冰245 min),冰形呈"沟壑"状.

关键词:输电导线;覆冰偏心;冰形;倾斜;积冰面积;角度
中图分类号:TM751 **文献标志码**:A

Study on Influence of Conductor Inclination Angle and Twisting Factors of Icing Process on Ice Shape Characteristics

ZHOU Chao[1,2†], MENG Fanze[1], HUANG Gang[1], JI Kunpeng[3]
(1. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Transmission conductors icing is a critical threat to the safety of power grid operation. Accurate prediction of the ice shape and growth trend of conductors icing can effectively prevent the occurrence of secondary disasters. Existing models for predicting the ice growth of transmission conductors seldom consider the effect of ice

* **收稿日期**:2023-06-22
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52075169), National Natural Science Foundation of China(52075169);北京市自然科学基金面上项目(8202043), Beijing Natural Science Foundation(8202043)
作者简介:周超(1980—),男,陕西汉中人,华北电力大学教授,博士
† 通信联系人,zhouchao@ncpeu.edu.cn

eccentricity torsion on the ice shape of transmission conductors. Therefore, the dynamic torsional icing prediction model of transmission conductor is established by considering the coupling torsional properties of transmission wire, such as ice eccentricity and wind speed. Based on the prediction model, the ice shape on the conductor's surface is simulated and compared with experimental data in the literature, and the validity of the model is verified. The effects of conductor inclination and temperature, wind speed, and MVD (median diameter of raindrops) on ice shape and torsional speed are further discussed with predictive models. It is found that the stratification of the ice thickness on the windward side of the conductor is gradually obvious with the increase of the tilt angle. Compared with the horizontal arrangement (zero inclination) conductor, when the inclination angle is 60°, the ice area of the wire increases by 18.26% (ice covering 125 minutes) and 26.30% (ice covering 245 minutes), and the torsion angle increases by 10.4° (ice covering 125 minutes) and 16.3° (ice covering 245 minutes), respectively, and the ice shape is "ravine".

Key words: transmission conductors; ice eccentric; ice shape; incline; iced area; angle

输电导线重覆冰导致的输电线路倒塔、断线及舞动等次生危害时有发生,对跨区域输电造成严重威胁[1-3].由于覆冰环境因素、导线自身运动特性的复杂性,现有实验及预测模型仅限于准静态导线,较少涉及运动导线覆冰形状数值模拟计算[4-5].因此,亟需建立考虑扭转因素的输电导线覆冰预测模型.

覆冰模型主要分为三类:经验模型、理论模型和数值计算模型[6].Langmuir等[7]研究了水滴在无限长圆柱体上的运动轨迹,提出水滴碰撞系数概念.Makkonen等[8]通过研究覆冰表面热平衡过程建立覆冰时变物理模型,结合导线直径、风速、温度等环境参数确定了导线覆冰质量与时间的函数关系.Myers等[9]提出基于润滑理论的水膜流动模型,研究了冰层内部的传热效应。Fu等[10]利用边界单元法建立简化二维圆柱导线覆冰仿真计算模型,并计算了导线局部水滴碰撞系数。蒋兴良等[11]提出覆冰预测最优时间步长模型,研究了风速、温度等气象参数对雾凇覆冰质量和冰形的影响.侯硕等[12]基于润滑理论建立了任意二维截面上积冰数值模型,并与Messinger模型预测结果进行了对比.刘春城等[13]建立雨凇覆冰模型,研究了覆冰质量与水滴中值直径、风速及导线直径等参数随时间的变化规律.梁曦东等[14]利用边界单元法建立了导线时变覆冰预测模型,计算时可以针对覆冰过程中环境参数的变化进行更新.何青等[15]提出考虑碰撞系数、焦耳热和导线表面温度的冻结系数计算方法,并指出考虑碰撞系数和导线表面温度使得冻结系数变大.周超等[16]建立了三维时变导线覆冰预测模型,基于多步积冰算法计算得到的覆冰预测精度较单步积冰算法提高8%.

覆冰过程中,导线受覆冰偏心和风载荷等的影响,容易发生扭转位移.导线扭转后,由于冰形的影响,等效直径增大,可捕获更多水滴,覆冰冰形由单侧覆冰逐渐转变为近似圆形[17].韩兴波等[18]研究发现,相同冰期内导线中心点扭转角度最大,两端最小且呈对称分布.樊社新等[19]对不同覆冰厚度导线扭转刚度进行实验测量,使用最小二乘法得到了导线扭转刚度随冰厚变化的公式.李嘉祥等[20]提出了一种考虑覆冰偏心的分裂导线扭转刚度计算方法,认为不均匀的覆冰会对导线扭转刚度有显著影响.傅观君等[21]实验研究发现,分裂导线覆冰具有强不均匀性的特点,且随着覆冰厚度的增加,不均匀性更加明显.胡琴等[22]对比了分裂导线和单导线的覆冰扭转特性,发现分裂导线扭转角度仅为单导线的10.2%.

准确预测导线覆冰扭转后的冰形,对预防线路灾害具有重要意义,现有研究较少考虑导线扭转覆冰时冰形的演变过程.因此,本文通过考虑覆冰偏心、风速等对导线的耦合扭转特性以及冰形对导线扭转过程中刚度的影响,建立导线动态扭转覆冰预测模型,并与实验数据对比.基于新建立的预测模型,研究导线不同倾斜角度下冰形的变化及温度、风速等环境参数对导线扭转速度的影响.

1　导线覆冰扭转计算模型

1.1　导线覆冰计算

1)空气流场计算

空气流场计算采用基于RNG(重整化群)方法的$k\sim\varepsilon$湍流模型,该模型对覆冰导线空气流场计算具有较高的精度[23].将导线周围的流场看作黏性不可压缩的流体,使用N-S方程计算空气流场的速度分布[24],即

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}=f_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}+v\frac{\partial^2\bar{u}_i}{\partial x_j\partial x_j} \tag{1}$$

$$\sum\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_i}=0 \tag{2}$$

式中:$\bar{u}_i$为平均速度,f_i为单位体积流体所受的外力,$\bar{p}$为压力,v为空气运动黏度.

2)过冷水滴碰撞轨迹计算

在流场中,过冷水滴在碰撞导线的过程中受到多种力的作用[25],可表示为

$$F=F_N+F_G+F_f+F_M \tag{3}$$

式中:F_N为水滴所受拖拽力,F_G为水滴自身重力,F_f为水滴所受气流的浮力,F_M为其它作用力.使用欧拉法求解气液两相流模型,得到水滴在流场中的速度分布,进而求得导线各位置的局部水滴碰撞系数.局部水滴碰撞系数[26]定义为

$$\beta=\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}L} \tag{4}$$

式中:$\mathrm{d}Y$是流场中相邻两条水滴流径的垂直距离,$\mathrm{d}L$是捕获的相邻水滴在导线表面相隔的长度.实际导线覆冰的环境中,水滴直径大小不唯一,根据文献[10]数值模拟时使用水滴中值直径(MVD)进行计算,水滴分布模型为Monodisperse.

3)导线表面结冰计算

过冷水滴在导线表面经过对流、蒸发、升华和凝固等热量传递后冻结成冰,整个过程中能量守恒.基于导线表面的热交换过程,建立能量守恒方程[27],表示为

$$\begin{aligned}&\rho_f\Big[\frac{\partial h_f c_f\tilde{E}}{\partial t}+\tilde{\nabla}\cdot(\vec{V}_f h_f c_f\tilde{E}_f)\Big]=\\&\Big[c_f(\tilde{E}_\infty-\tilde{E}_f)+\frac{//\ \vec{V}_d\ //^2}{2}\Big]V_\infty\mathrm{LWC}\beta-\\&L_{\mathrm{evap}}\dot{m}_{\mathrm{evap}}+(L_{\mathrm{fusion}}-c_s\tilde{E})\dot{m}_{\mathrm{ice}}+\\&\sigma\varepsilon(T_\infty^4-T_f^4)-c_h(\tilde{E}_f-\tilde{E}_{\mathrm{ice,rec}})+Q\end{aligned} \tag{5}$$

式中:LWC为液态水含量;h_f为水膜高度,c_f和c_s为水和冰的比热容,L_{evap}和L_{fusion}为水的蒸发潜热和冰的融化潜热,E_∞和E_f为流场温度和水膜温度,V_∞和$\vec{V}_d$为液滴运动速度和壁面局部液滴撞击速度,T_∞和T_f为环境温度和覆冰表面温度,Q为防冰热通量.

覆冰密度与环境温度、风速、液态水含量等环境参数有关,根据文献[24]采用Makkonen-Stallabrass密度模型,计算式为

$$\begin{aligned}&\rho_s=378+425\log_{10}(R_M)-82.3\big[\log_{10}(R_M)\big]^2\\&0.2<R_M<170\end{aligned} \tag{6}$$

其中R_M为计算参数,其表达式为

$$R_M=-\frac{d\cdot\left\|\vec{V}_{\mathrm{MVD}}\right\|}{2\tilde{T}_{\mathrm{wall}}} \tag{7}$$

式中:$\vec{V}_{\mathrm{MVD}}$为水滴撞击导线表面的速度,$\tilde{T}_{\mathrm{wall}}$为导线表面温度.

1.2　覆冰扭转控制方程

覆冰开始后,导线在耦合力矩的作用下发生扭转.对于长度为N的导线,将其等分为$2n+1$个节点,中间节点为N_0.相邻节点间长度为x,如图1所示.

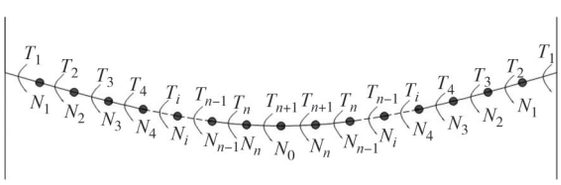


图1　导线扭转示意图

Fig.1　Schematic diagram of conductors torsion

在对称的情况下只需计算其中一半节点的扭转角度,控制公式为[28]

$$\begin{aligned}\Phi_i^k=&\frac{a_1\Delta T_1^k x}{GJ_1^k}+\frac{a_2\Delta T_2^k x}{GJ_2^k}+\cdots+\frac{a_j\Delta T_j^k x}{GJ_j^k}+\\&\frac{a_i\Delta T_{i+1}^k x}{GJ_{i+1}^k}+\ldots+\frac{a_i\Delta T_n^k x}{GJ_n^k}+\Phi_i^{k-1}\end{aligned} \tag{8}$$

式中:k为时间步,i为节点坐标,j为力矩坐,G为导线剪切强度,J_i^k为导线覆冰后转动惯量,ΔT_n为不同时间步作用于导线的扭转力矩增量.各参数计算式为

$$\begin{cases}J_i^k=J+\sum\limits_z m_z r_z^2\\a_j=j-0.5,\ i\geqslant j\\a_i=i,\ i<j\\T_i^k=T_g^k+T_p^k+T_f^k\end{cases} \tag{9}$$

T_i^k为导线所受扭转力矩之和,其计算方程式为:

$$\begin{cases} T_g^k = Wx_c \\ T_P^k = 0.5C_pSV^2l_p \\ T_f^k = 0.5C_f\rho V^2l_f \end{cases} \tag{10}$$

式中:T_g^k为冰载荷偏心力矩,W为冰重,x_c为冰质心横坐标;T_p^k为风载荷力矩,C_p为阻力系数,S为受力面积;V为风速,l_p为风载荷力臂;T_f^k为表面剪切力矩,C_f为摩擦系数,ρ为空气密度,l_f为表面剪切力力臂.

2 数值计算模型验证

2.1 流场建立

根据文献[10],覆冰计算时将钢芯铝绞线简化为圆柱体,数值模拟使用Fluent及Fluent Icing完成.流体域为大小20D×20D×40D(D为输电导线直径)的三维计算域,导线距速度入口及上下边界的距离均为10D.为提高覆冰计算的准确度,在导线表面使用适于流体计算的膨胀网格,并对速度入口处网格进行了加密.网格划分如图2所示,计算域边界面参数见表1.

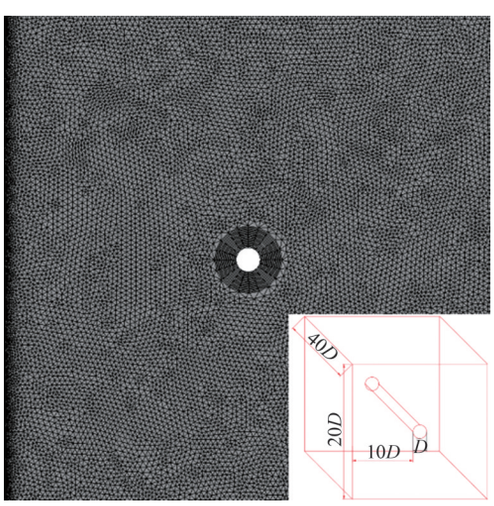


图2 流体模型网格设置

Fig.2 Mesh settings of the fluid model

表1 流场边界参数

名称	尺寸/D	边界类型
左视图	20×40	速度入口
右视图	20×40	压力出口
俯视图	20×40	对称面
正视图	20×40	对称面
底视图	20×40	对称面
背视图	20×40	对称面
导线	40π	无滑移壁面

图3为导线覆冰扭转计算流程.与静态导线相比,导线扭转后其周围空气流场和水滴碰撞导线的轨迹随之发生变化.

时间步长t_s的选择影响到覆冰计算的精度和效率,根据文献[11]选定单步步长为360 s,此时覆冰冰形准确度与实验吻合度较好.由图3可知,计算时,首先对模型的初始边界条件及风速、温度、液态水滴浓度及MVD等外部环境参数进行设定.由设定的环境参数对导线外部的空气流场和水滴碰撞轨迹进行计算,获得导线壁面的水滴收集效率.根据所得的水滴收集效率,通过式(5)、式(6)求解得到导线各节点的冰形和覆冰质量,从而得到导线不同位置处覆冰质心的坐标.将上述计算所得覆冰质量、冰质心和风速等相关参数代入式(9)、式(10),得到导线覆冰后各节点所受耦合扭转力矩,从而根据式(8)获得导线各节点扭转角度并加以修正.总覆冰时长范围内,每完成1个时间步的计算后,需对扭转后的覆冰导线重新划分网格,并对模型边界条件及外部环境

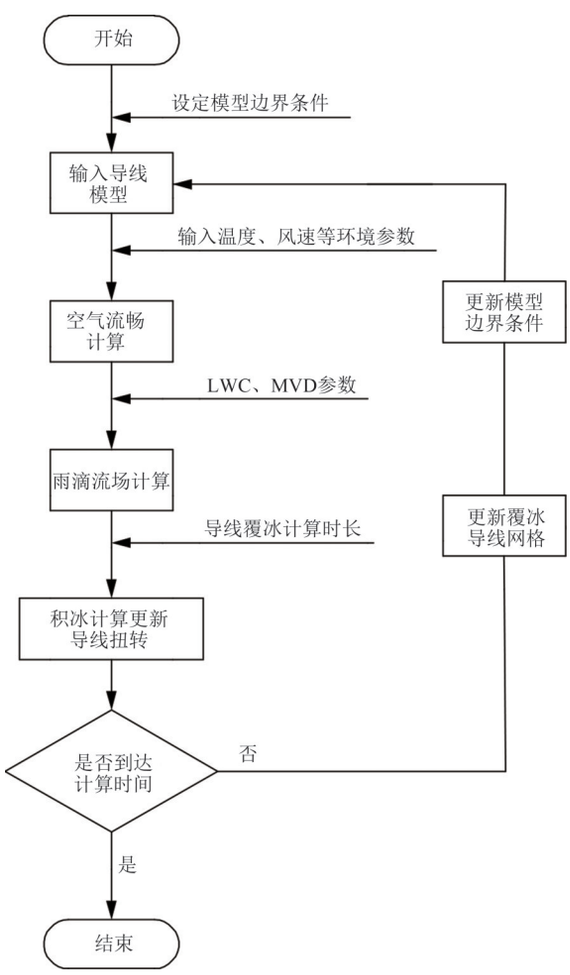


图3 导线覆冰扭转计算流程图

Fig.3 Flow chart of conductor icing torsion calculation

参数进行更新.重复迭代上述计算过程,直至到达计算所设定的总覆冰时长.

2.2　覆冰仿真模型验证

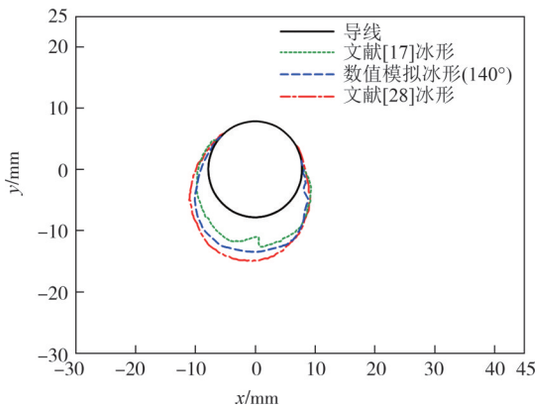
为验证本文导线覆冰计算方法的有效性,对文献[17]所做导线覆冰扭转风洞实验进行验证.实验记录了导线在不同时刻的扭转角度,并分别在第125 min、245 min、363 min和444 min 4个时间节点提取了导线覆冰后的冰形,导线的扭转角度分别为140°、223°、263°和291°.文献[28]采用时不变参数对实验进行了模拟,实验及文献相关参数见表2.

表2　覆冰扭转实验及文献[28]相关参数

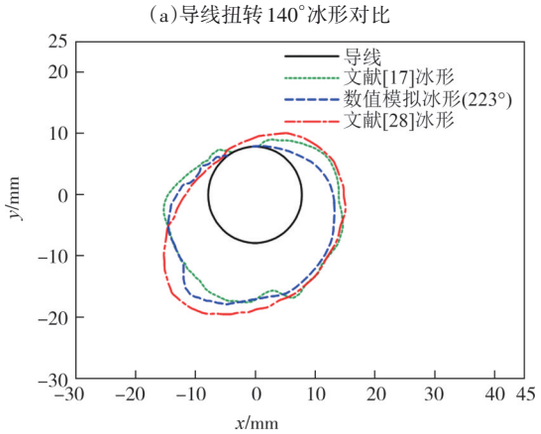
工况	直径/mm	LWC/(g·m^{-3})	风速/(m·s^{-1})	MVD/μm	扭转刚度/(N·m·rad^{-1})
文献[17]	15.7	0.15~0.66	9~12	11~18	4.52×10^{-3}
文献[28]	15.7	0.35	10	15	4.52×10^{-3}

图4为上述4个扭转角度下数值模拟导线中间节点(0.22 m长度处)冰形与文献[17]、文献[28]冰形的对比.对比发现,扭转角度为140°时数值模拟覆冰面积相比文献[17]中导线覆冰面积大16.8%,其余3种角度下数值模拟结果比文献[17]小13.75%、9.56%、7.54%.同文献[28]相比,4种扭转角度下数值模拟计算得到的覆冰截面积精度分别提高36.60%、42.21%、−7.3%和6.0%.

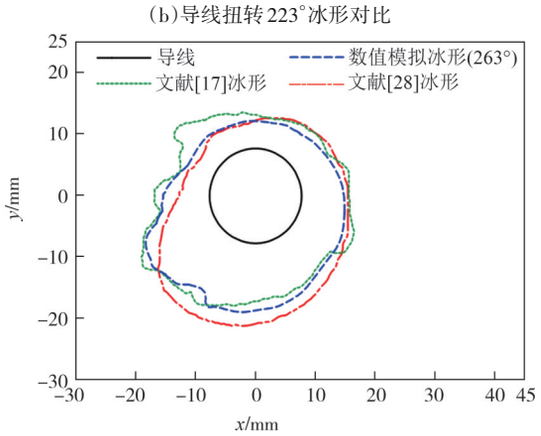
分析图4可知,导线覆冰扭转角度为140°时,数值模拟所得覆冰在导线表面覆盖面积较文献[17]大6.45%,与文献[28]相比,准确度提高11.35%。数值模拟所得覆冰面积大于文献[17]所得,原因是覆冰早期冰质量较小,风载荷力矩对导线扭转影响较大,模拟中风载荷力矩小于实验中的实际值.随着覆冰质量增加,风载荷力矩对导线扭转的影响减弱,数值模拟所得冰形也更接近实验结果.扭转角度为223°时,数值模拟所得冰形在导线迎风面与实验冰形符合较好,迎风面下侧有突起,背风面的厚度略小于实验冰形.扭转角度为263°时,实验中导线迎风面的覆冰厚度均匀,与数值模拟所得结果相比,在迎风面下侧的覆冰厚度接近,迎风面上侧覆冰厚度较大.扭转角度为291°时,数值模拟所预测的冰形与实验得到的冰形整体拟合程度良好.覆冰过程中,数值模拟所预测的冰形与实验得到的冰形相比更为光滑.原因可解释为:实验中水滴直径及风速等环境参数的变



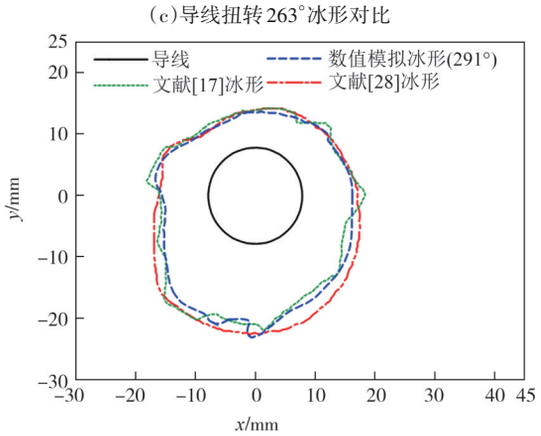
(a)导线扭转140°冰形对比



(b)导线扭转223°冰形对比



(c)导线扭转263°冰形对比



(d)导线扭转291°冰形对比

图4　不同扭转角度下覆冰形状对比

Fig.4　Comparison of ice cover shapes at different torsion angles

化使得水滴与导线表面碰撞轨迹发生改变,导致实验中冰形表面凹凸程度超过数值模型.

以导线直径为19.6 mm、档距100 m为例进行覆冰扭转模拟,相关参数如表3所示.提取8个不同时间点的导线中间节点(50 m长度处)冰形进行分析,结果如图5所示.

表3 覆冰模拟参数

工况	温度/℃	LWC/(g·m^{-3})	风速/(m·s^{-1})	MVD/μm	扭转刚度/(N·m·rad^{-1})
1	−10	0.8	10	20	57.9

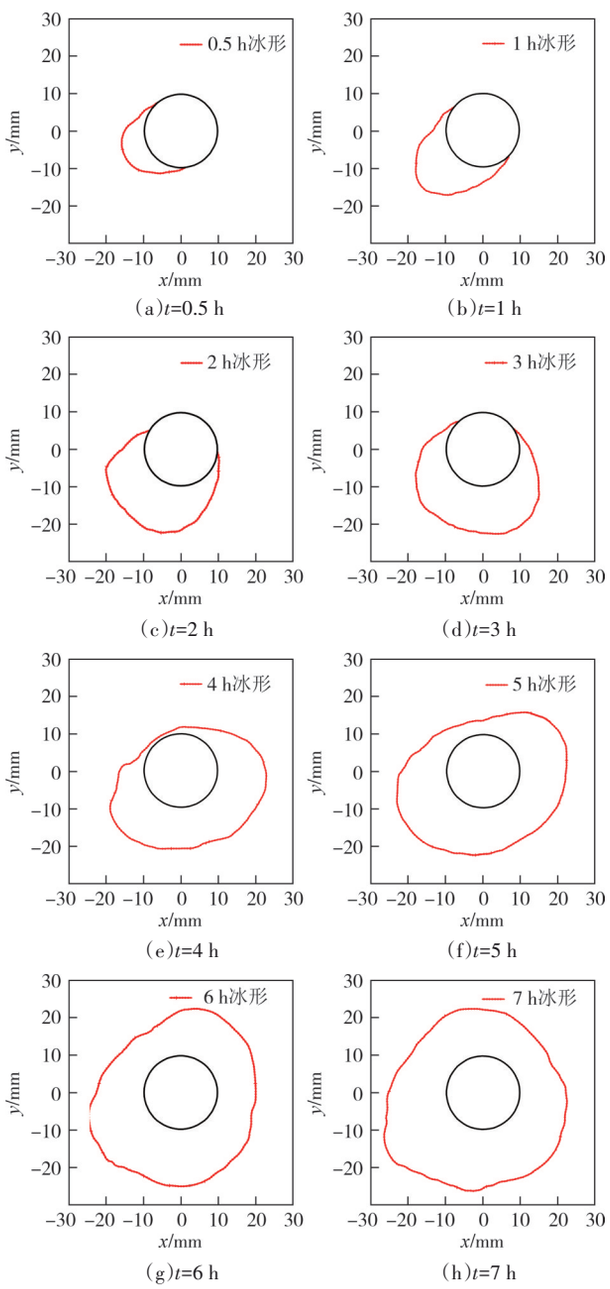


图5 导线覆冰扭转冰形变化

Fig.5 Conductor ice covering and twisting ice shape change

分析图5可知,导线受到覆冰偏心的作用逐渐扭转.随着数值模拟时间的增加,覆冰向背风侧移动,冰形由单侧覆冰变为近似圆形.

2.3 倾斜导线覆冰扭转计算

在役运行输电线路中,受弧垂、高差等因素影响,输电导线必然存在一定程度的倾斜.短时间内导线倾角不会对覆冰特性产生明显的影响.然而,随着覆冰时间的增加,倾斜导线下游则可能出现更多的覆冰.以表2条件为工况参数,设置水平倾角α为30°、45°和60°典型导线倾角工况,研究导线倾角对覆冰扭转的影响,导线倾角定义见图6.导线长度为0.44 m,模拟时长为245 min,提取导线中间节点冰形进行分析.

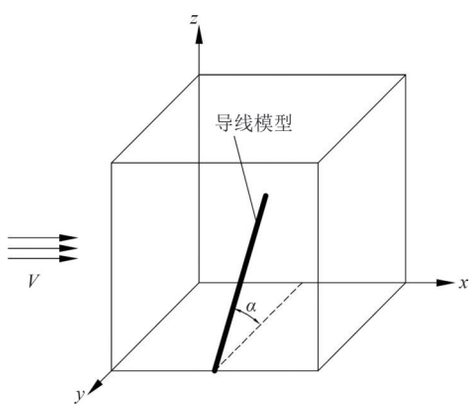


图6 导线倾角定义

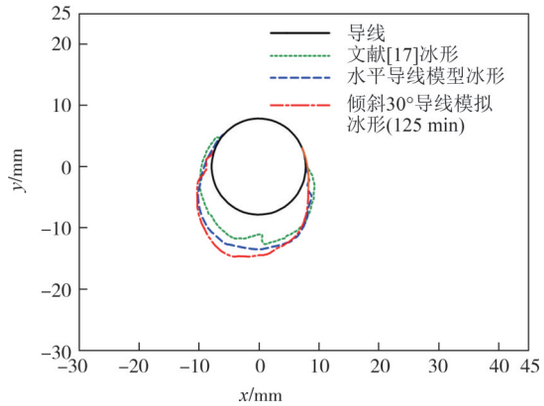
Fig.6 Inclination angle definition for transmission conductor

2.3.1 计算结果分析

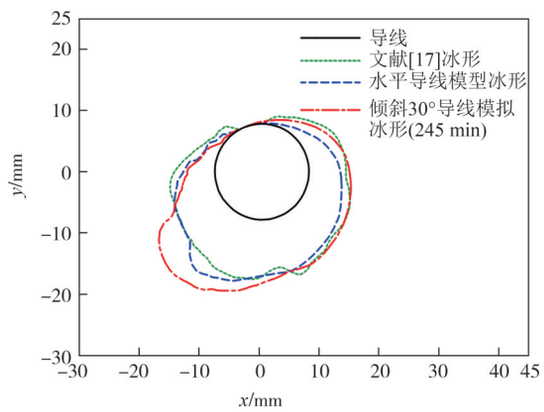
3种工况计算结果如图7~图9所示.

倾斜30°导线:覆冰125 min时覆冰扭转角度为143.6°,覆冰面积较水平导线计算结果大8.4%.覆冰245 min时覆冰扭转角度为230.2°,覆冰面积较水平导线计算结果大15.16%.覆冰早期,30°倾斜导线与水平导线冰形相比没有明显差异.随着计算时间增加,倾斜导线迎风面的覆冰厚度较水平导线不均匀性增大.原因可解释为:未冻结的水滴在重力和气流的作用下,由导线上游向斜下方流动,更多的水滴在导线迎风面的下侧发生冻结,并累积.

倾斜45°导线:覆冰125 min时扭转角度为146.2°,覆冰面积较水平导线计算结果大15.31%。覆冰245 min时扭转角度为234.4°,覆冰面积相较水平导线大20.5%.与导线倾角为30°时相比,导线倾角为45°时,覆冰在迎风面下侧积累更多,覆冰在导线



(a)t=125 min覆冰冰形



(b)t=245 min覆冰冰形

图 7　倾斜 30° 导线与水平导线冰形对比

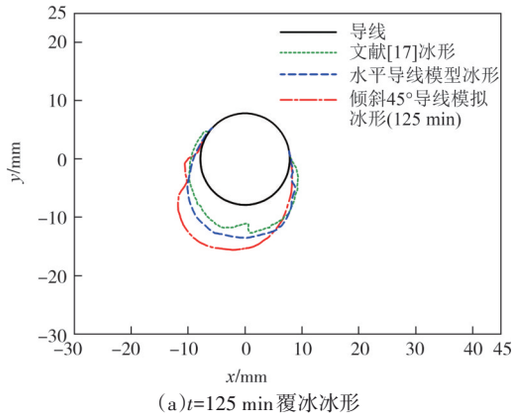
Fig.7　Comparison of tilted 30° conductor and horizontal conductor

表面的覆盖面积更大,但整体覆冰形貌类似.

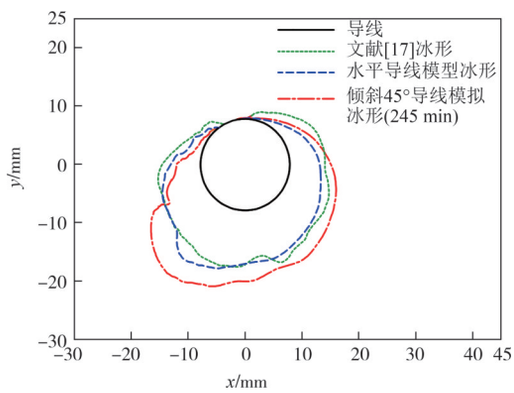
倾斜 60° 导线:覆冰 125 min 时扭转角度为 150.4°,覆冰面积较水平导线大 18.26%.覆冰 245 min 时扭转角度为 239.2°,覆冰面积较水平导线大 26.3%.倾斜导线迎风面的冰形呈“沟壑”状,覆冰在迎风面上侧的厚度略小于水平导线,下侧的厚度则出现了明显的增加.

对比图 7、图 8 和图 9 可知,覆冰时间较短时,倾斜导线和水平导线的覆冰计算结果不会出现显著差异.随着时间的增加,覆冰在导线迎风面厚度出现分化,上侧较小,下侧明显增加.导线倾斜角度较小时,冰形表面较为光滑,倾斜角度增大后,覆冰形状逐渐粗糙,并在导线的迎风面出现了“沟壑状”分层.原因可解释为:导线倾斜角度的增加使未冻结水滴受到重力、离心力和气流的影响增大,并随着水膜更快地向导线的斜下方流动,迎风面上侧的水滴减少,下侧增多,覆冰出现了分层,导致“沟壑”的出现.

由中间节点向两侧各取 50 mm 长导线(60° 倾



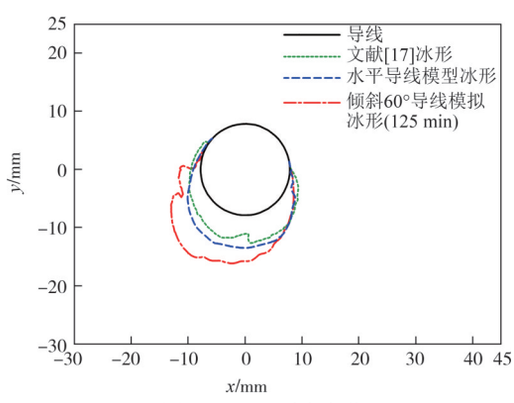
(a)t=125 min覆冰冰形



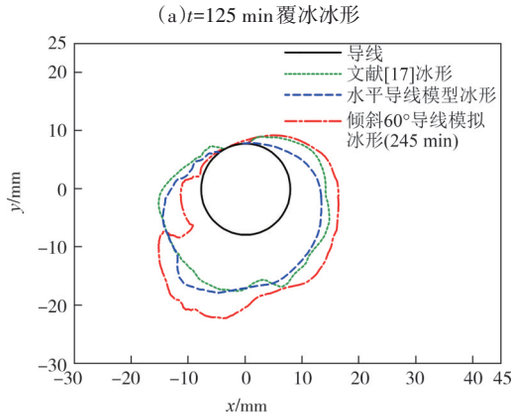
(b)t=245 min覆冰冰形

图 8　倾斜 45° 导线与水平导线冰形对比

Fig.8　Comparison of tilted 45° conductor and horizontal conductor



(a)t=125 min覆冰冰形

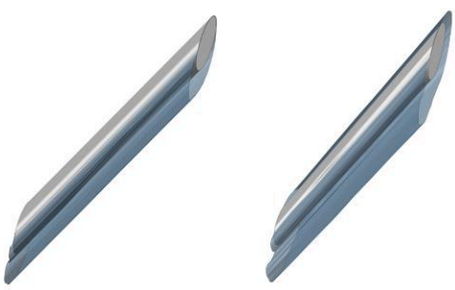


(b)t=245 min覆冰冰形

图 9　倾斜 60° 导线与水平导线冰形对比

Fig.9　Comparison of tilted 60° conductor and horizontal conductor

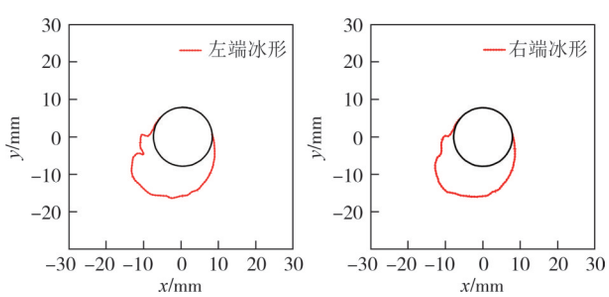
角)展示三维扭转覆冰形貌[29],结果如图10所示.覆冰125 min时导线上游覆冰厚度较为均匀,下游迎风面下侧的覆冰厚度大于上侧.覆冰245 min时导线覆冰厚度的不均匀性加剧,上下游覆冰均出现了分层.原因可解释为:覆冰过程中,多数未冻结水滴随着水膜的流动在导线下游冻结,使导线下游覆冰厚度更早出现分层.剩余部分未冻结水滴在流动过程中冻结,因此随着时间的增加,导线上游覆冰也逐渐呈"沟壑"状.图11和图12分别为图10所示覆冰形貌左右两端冰形剖面图.



(a)125 min覆冰形貌 (b)245 min覆冰形貌

图10 倾斜60°导线三维覆冰形貌

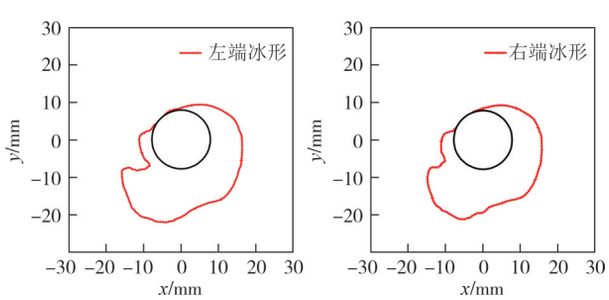
Fig.10 Three-dimensional ice topography of tilted 60° conductor



(a)左端冰形剖面图 (b)右端冰形剖面图

图11 覆冰125 min左右两端冰形剖面图

Fig.11 Ice profile at both ends of the ice cover for about 125 min



(a)左端冰形剖面图 (b)右端冰形剖面图

图12 覆冰245 min左右两端冰形剖面图

Fig.12 Ice profile at both ends of the ice cover for about 245 min

图13为导线覆冰扭转角度随时间变化曲线.由图中可以看出,覆冰初期水平导线及各倾斜角度导线的扭转角度差别不大.随着时间的增加,大倾角导线扭转角度相较小倾角导线更大.

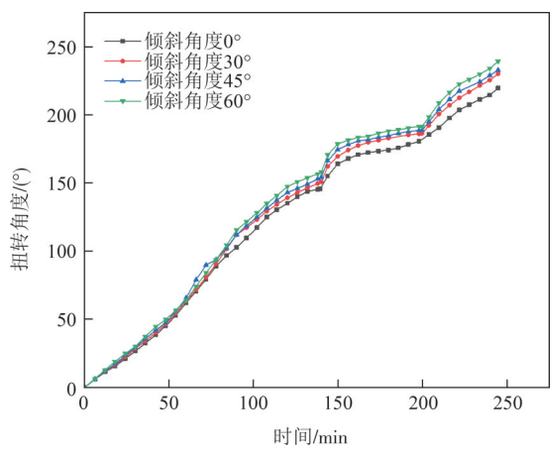


图13 α=0°、30°、45°、60°导线扭转角度随时间变化曲线

Fig.13 α=0°, 30°, 45°, 60° conductor torsion angle change curve with time

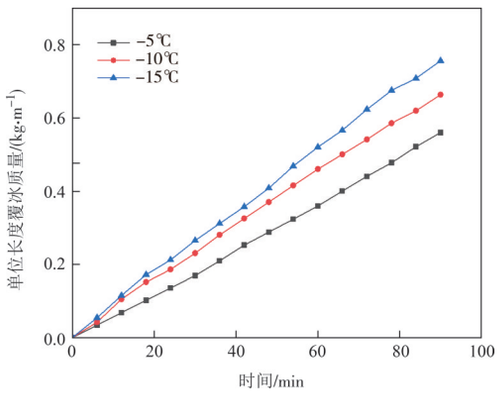
3 导线覆冰扭转数值计算

导线覆冰的结果受到液态水含量(LWC)、液态水滴中值直径(MVD)、温度和风速等因素的影响[30].环境参数的差异改变了导线的覆冰形状和质量,导致扭转过程中扭转刚度及扭转力矩发生变化,最终影响导线覆冰预测精度.以直径34.9 mm、档距100 m导线中间节点(50 m长度处)为对象,对比分析不同温度、风速、MVD影响下的导线覆冰扭转特性,不同工况下的环境参数如表4所示,结果如图14~图16所示.

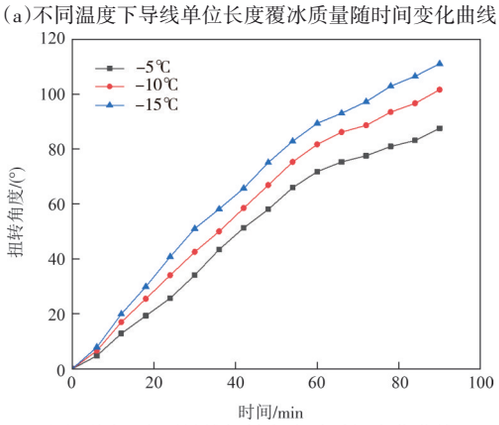
表4 覆冰工况条件参数

工况	风速/(m·s^{-1})	LWC/(g·m^{-3})	MVD/μm	温度/℃
1	5	1.2	20	−5
2	10	1.2	20	−5
3	15	1.2	20	−5
4	10	1.2	25	−5
5	10	1.2	30	−5
6	10	1.2	20	−10
7	10	1.2	20	−15

分析图14可知,导线覆冰质量和扭转角度随着温度降低而增大.原因可解释为:温度降低使得过冷水滴在导线表面的冻结系数增大,单位时间内的覆冰质量增加,冰形外扩,覆冰重心外移.由式(10)可



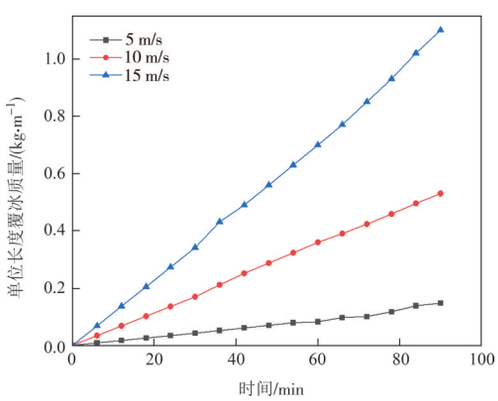
(a)不同温度下导线单位长度覆冰质量随时间变化曲线



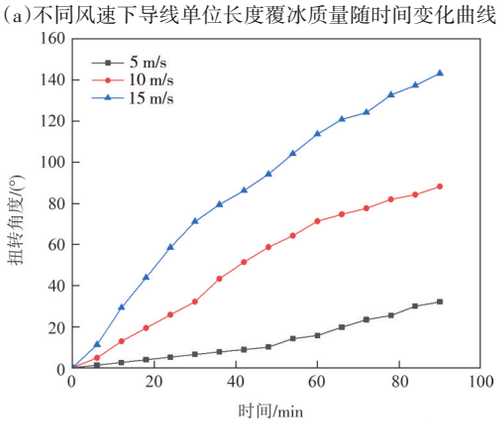
(b)不同温度下导线扭转角度随时间变化曲线

图 14　温度对覆冰质量及扭转角度的影响

Fig.14　Effect of temperature on ice cover mass and torsion angle



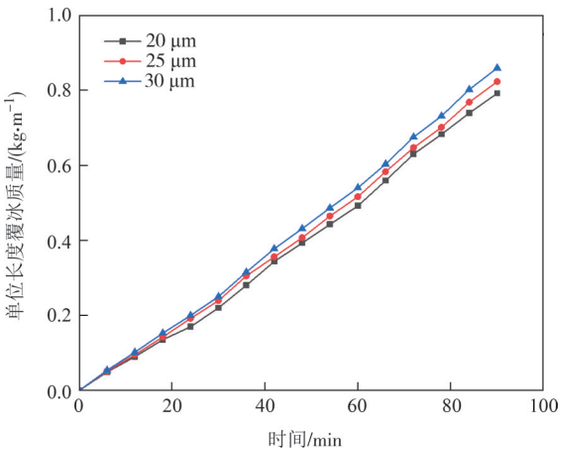
(a)不同风速下导线单位长度覆冰质量随时间变化曲线



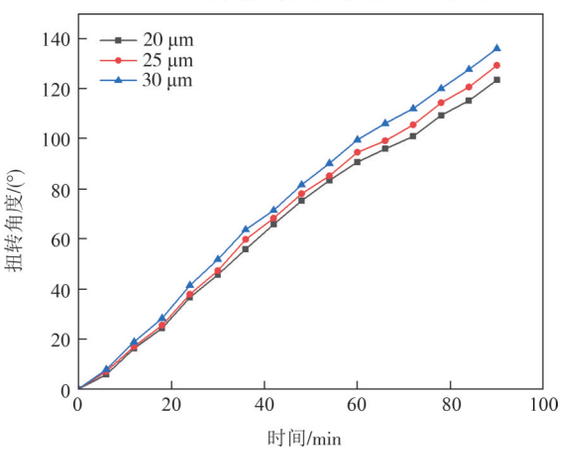
(b)不同风速下导线扭转角度随时间变化曲线

图 15　风速对覆冰质量及扭转角度的影响

Fig.15　Effect of wind speed on ice cover mass and torsion angle



(a)不同 MVD 下导线单位长度覆冰质量随时间变化曲线



(b)不同 MVD 下导线扭转角度随时间变化曲线

图 16　水滴 MVD 对覆冰质量及扭转角度的影响

Fig.16　Effect of MVD of raindrops on ice cover mass and torsion angle

知覆冰质量增加及覆冰重心外移使得冰载荷力矩增加,导线扭转速度加快.但随着温度的降低,温度对冻结系数的影响效果减弱,覆冰质量增速放缓,导线扭转增速随之下降.

分析图 15 可知,导线覆冰质量和扭转角度随着风速增大而增大.原因可解释为:风速增大使得相同时间内导线表面捕获的水滴数量增多,覆冰质量随之增加,导线表面覆冰由驻点位置向两侧生长,覆冰厚度增加.根据式(10)可知冰载荷力矩和风载荷力矩的增加使得导线扭转的速度加快。覆冰早期,风载荷力矩作为导线扭转的主要因素,风速增加对导线扭转速度影响更为明显.

分析图 16 可知,导线覆冰质量和扭转角度随着水滴 MVD 增大而增加.原因可解释为:随着水滴 MVD 增大,水滴受气流扰动效应减弱,导线表面的水滴碰撞系数增加,覆冰质量和面积增大,导线的扭

转速度加快.但随着水滴MVD的增长,导线驻点位置覆冰厚度增加较少.与温度、风速等环境参数相比,对导线扭转速度的影响较弱.

图17为导线覆冰扭转后不同时间收集效率对比.分析可知,导线扭转后覆冰形状的变化,使导线及覆冰表面的局部水滴收集效率降低.但扭转后的导线,等效直径增大,获得更大的水滴捕获面积,整体水滴收集效率提高.工况2条件下,随着导线扭转角度的增加,覆冰60 min和覆冰90 min时导线表面水滴收集效率较覆冰30 min时分别增加6.38%和11.4%.导线扭转使单位时间内覆冰质量增加,结果如图18所示.覆冰初期,静态覆冰和扭转覆冰的覆冰质量没有明显差异,随着覆冰时间的增加,扭转导线的覆冰质量逐渐大于静态导线的覆冰质量.

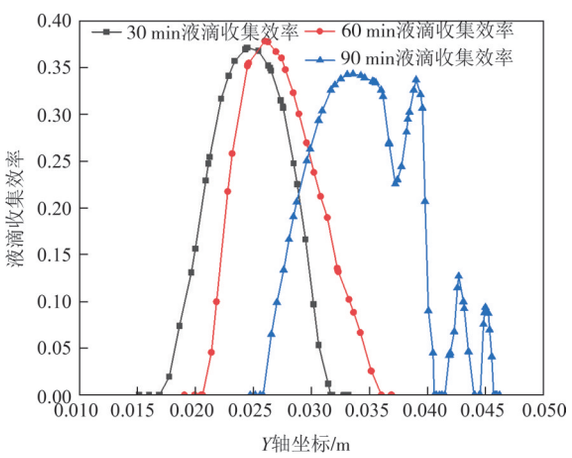


图17 不同时间导线表面液滴收集效率

Fig.17 Droplet collection efficiency on the surface of the wire at different times

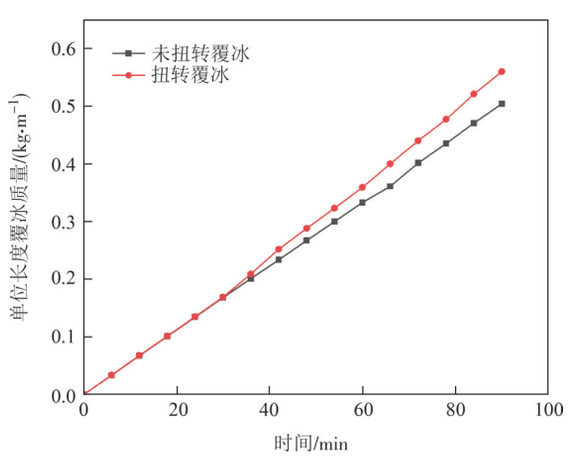


图18 扭转覆冰与未扭转覆冰质量随时间变化曲线

Fig.18 Curve of torsional icing and untorsional icing mass with time

4 结论

本文通过考虑覆冰偏心、风速等对导线的耦合扭转特性及覆冰形状对导线扭转刚度的影响,建立了导线动态扭转覆冰模型.与文献[17]实验数据对比,验证了模型的有效性.在此基础上研究了导线倾角和温度、风速等环境参数对冰形和扭转的影响.得到的主要结论如下:

1)扭转角度为140°时,数值模拟得到的覆冰面积较文献[17]大16.8%;扭转角度为291°时,覆冰面积小7.54%。覆冰早期,导线扭转受风载荷力矩影响较大,随着覆冰质量提升,冰载荷力矩成为导线扭转的主要因素.

2)受导线倾斜角度的影响,未冻结水滴在重力、气流和离心力的作用下向导线下游移动.覆冰245 min时,倾斜导线覆冰面积较水平导线(α=0°)增大15.16%(倾角30°)、20.50%(倾角45°),26.30%(倾角60°).随倾斜角度的增加,冰形呈"沟壑状".

3)温度降低、风速及MVD增大提高了导线表面水滴收集效率,单位时间内的覆冰质量增加,导线的扭转速度加快.风速增大还进一步提高了风载荷力矩对导线扭转的影响.

4)覆冰扭转后的导线等效直径增大,则水滴捕获面积增大.随着导线的扭转,壁面水滴收集效率相比覆冰30 min时分别增加6.38%(覆冰60 min)和11.4%(覆冰90 min).扭转导线单位长度覆冰质量逐渐大于静态导线.

参考文献

[1] 蒋兴良,易辉.输电线路覆冰及防护[M].北京:中国电力出版社,2002:1-2.
JIANG X L. YI H. Transmission line icing and Protection[M]. Benijing: China Electric Power Press, 2002: 1-2.(in Chinese)

[2] FARZANEH M. Atmosphere icing of power networks[M]. Berlin, German: Springer,2008.

[3] ZHOU C, YIN J Q, LIU Y B. Theoretical study of glaze ice accretion on an oscillating cylinder and its aerodynamic characteristics[J]. Journal of Fluidsand Structures, 2021, 103: 103231.

[4] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等.输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 120-125.
ZHU Y C, HUANG X B, JIA J Y, et al. Numerical simulation for icing and influence on transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015,49(7): 120-125.(in Chinese)

[5] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2004, 30(1): 6-9.
YUAN J H, JIANG X L, YI H, et al. The present study on conductor icing of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2004, 31(1):6 - 9. (in Chinese)

[6] 高晋,蒋兴良,郭思华,等.自然条件下输电线路导线覆冰增长特性[J].重庆大学学报,2021,44(8):1-9.
GAO J, JIANG X L, GUO S H, et al. Characteristics of icing on transmission lines under natural conditions [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 1-9.(in Chinese)

[7] LANGMUIR I, BLODGETT K. A Mathematical investigation of water droplet trajectories[R]. Army Air Force Technical Report, No.5418, 1946.

[8] MAKKONEN L. Heat transfer and icing of a rough cylinder[J]. Cold Regions Science and Technology, 1985, 10: 105-116.

[9] MYERS T G, CHAR PIN J P F, CHAPMAN S J. The flow and solidification of a thin fluid film on an arbitrary three—dimensional surface [J]. Physics of Fluids, 2002, 14 (8): 278-280.

[10] FU P, FARZANEH M, BOUCHARD G. Two-dimensional modeling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 46: 132-146.

[11] 蒋兴良, 姜方义, 汪泉霖, 等. 基于最优时间步长模型的输电导线雾凇覆冰预测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4408-4418.
JIANG X L, JIANG F Y, WANG Q L, et al. Prediction of rime accretion on transmission line based on optimal time step model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4408- 4418. (in Chinese)

[12] 侯硕,曹义华.基于润滑理论的二维积冰数值模拟[J].北京航空航天大学学报,2014,40(10):1442-1450.
HOU S ,CAO Y H .Numerical simulation of two dimensional ice accretion based on lubrication theory [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40 (10): 1442-1450. (in Chinese)

[13] 刘春城, 刘佼.输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.
LIU C C, LIU J. Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 241-248.(in Chinese)

[14] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等.输电导线的覆冰时变仿真模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.
LIANG X D, LI Y J, ZhANG Y B, et al. Time-dependent simulation model of ice accretion on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 336-343. (in Chinese)

[15] 何青, 李军辉, 邓梦妍, 等.架空输电导线覆冰冻结系数计算及其影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4162-4169.
HE Q, LI J H, DENG M Y, et al. Calculation and influencing factors of icing freezing coefficient of overhead transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4162-4169. (in Chinese)

[16] 周超,晁萌.架空输电导线三维时变积冰计算[J].哈尔滨工业大学学报,2023,55(1):116-124.
ZHOU C, CHAO M. Three-dimensional time-varying ice accretion calculation for overhead transmission lines[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(1): 116-124. (in Chinese)

[17] PERSONNE P, GAYET J F F. Ice Accretion on wires and anti-icing induced by Joule effect [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27: 101-114.

[18] 韩兴波, 吴海涛, 郭思华, 等.输电线路单导线覆冰和扭转的相互影响机制分析[J]. 电工技术学, 2022, 37(17): 4508-4516.
HAN X B, WU H T, GUO S H, et al. Analysis of interaction mechanism between icing and torsion of single transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4508-4516. (in Chinese)

[19] 樊社新,何国金,廖小平,等.结冰导线扭转刚度实验[J].中国电力,2005, 38(10):45-47.
FAN S X, HE G J, LIAO X P, et al. Tests on tensional stiffness of iced conductor[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 45-47. (in Chinese)

[20] 李嘉祥, 李宏男, 付兴. 覆冰分裂导线扭转刚度研究[J].大连理工大学学报, 2017, 57(2): 170-176.
LI J X, LI H N, FU X. Study of torsional stiffness of iced bundle conductors[J]. Journal of Dalian of technology, 2017, 57(2): 170-176.(in Chinese)

[21] 傅观君, 王黎明, 关志成, 等.架空输电线路分裂导线扭转刚度及舞动机理分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1273-1280.
FU G J, WANG L M, GUAN Z C, et al. Torsion stiffness and galloping mechanism analysis on bundle conductors foe overhead transmission linesp[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1273-1280. (in Chinese)

[22] 胡琴, 于洪杰, 徐勋建, 等. 分裂导线覆冰扭转特性分析及等值覆冰厚度计算[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3615-3620.
HU Q, YU H J, Xu X J, et al. Study on torsion characteristic and equivalent ice thickness of bundle conductors [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3615-3620. (in Chinese)

[23] 李玲, 李玉梁. 应用基于RNG方法的湍流模型数值模拟钝体绕流的湍流流动[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 357-361.
LI L, Li Y l. Numerical simulation of turbulent flow around bluff bodies using the RNG k- ε turbulent model [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 357-361. (in Chinese)

[24] MAKKONEN L. Modeling of ice accretion on wires [J]. Journal of Climate Applied Meteorology, 1984, 23(6): 929-939.

[25] 陈晶霞. 旋转多圆柱测量仪冰风洞试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 40-41.
CHEN J X. Research on icing wind tunnel experiment of rotating multi-cylinder [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008: 40-41. (in Chinese)

[26] 张睐, 何青. 输电线路覆冰时导线表面形状对碰撞系数的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 209-217.
ZhANG J, HE Q. Influence of conductor surface shape on collision coefficient during transmission line icing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 209-217. (in Chinese)

[27] 王强, 楼文娟, 徐海巍, 等. 考虑时变气象参数的输电导线覆冰数值仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(11): 11-21.
WANG Q, LOU W J, XU H W, et al. Numerical simulation of icing on transmission conductors considering time-varying meteorological parameters [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2023, 55(1): 11-21. (in Chinese)

[28] FU P, FARZANEH M. Simulation of the ice accretion process on a transmission line cable with differential twisting [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 2(34): 147-155.

[29] WRIGHT W B. User manual for the NASA Glenn ice accretion code LEWICE[Z]. Cleveland: NASA, 2002.

[30] PETER Z, FARZANEH M, KISS L I. Assessment of the current intensity for preventing ice accretion on overhead conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 565-574.