

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.10.002

引用格式:吴海涛,王谦,肖前波,等.考虑水滴粒径分布的导线覆冰过程中水滴碰撞特征[J].重庆大学学报, 2025,48(10): 11-19.



考虑水滴粒径分布的导线覆冰过程中水滴碰撞特征

吴海涛¹,王 谦¹,肖前波¹,邹岸新²,刘 佳¹,吴 彬¹,郭思华¹,何高辉³

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 400074; 2. 国网重庆市电力公司,重庆 400014;

3. 西南大学 工程技术学院,重庆 400715)

摘要:当前应用较多的导线覆冰模型主要依赖水滴中值体积直径(median volume diameter, MVD)、液态水含量、风速和环境温度这 4 项环境参数,而对水滴粒径分布特性的考虑较少。以 Langmuir 粒径分布谱为模板,建立有限元和解析模型模拟导线表面水滴碰撞特性,对比分析了使用水滴粒径分布谱和水滴中值体积直径计算所得水滴碰撞系数 α_1 的差距,提出了水滴特征中值体积直径 d_x 的概念。研究结果表明:相对于有限元法,解析法在使用便利性和计算速度上具有明显优势,但有 0.1 左右的计算误差。使用 MVD 相对于使用水滴粒径谱下计算所得 α_1 的误差取决于 MVD 和 d_x 的距离,当 MVD 接近 d_x 时, $\Delta\alpha_1$ 较小,反之较大。

关键词:输电线路;覆冰模拟;水滴中值体积直径;环境参数

中图分类号:TM85

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)10-011-09

Collision characteristics of water droplets during conductor icing considering droplet size distribution

WU Haitao¹, WANG Qian¹, XIAO Qianbo¹, ZOU Anxin², LIU Jia¹, WU Bin¹,
GUO Sihua¹, HE Gaohui³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400074,

P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, P. R. China;

3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China)

Abstract: Existing conductor icing models primarily rely on four environmental parameters: median volume diameter (MVD) of water droplets, liquid water content, wind speed, and ambient temperature, while giving limited attention to droplet size distribution characteristics. This study adopts the Langmuir droplet size distribution spectrum as a basis to develop finite element and analytical models for simulating water droplet collision characteristics on conductors. It compares the water droplet collision coefficient α_1 calculated using the droplet size distribution spectrum with that obtained using MVD. Additionally, the concept of the characteristic median volume diameter d_x is introduced. Results show that, compared to the finite element method, the analytical method offers significant advantages in terms of simplicity and computational efficiency, with an average error of

收稿日期:2024-07-17

基金项目:国网重庆市电力公司科技项目(52202324001R)。

Supported by the Science and Technology Projects of State Grid Chongqing Electric Power Company (52202324001R).

作者简介:吴海涛(1991—),男,硕士,主要从事复杂大气环境下输电线路外绝缘及防护方向的研究,(E-mail)978201734@qq.com。

approximately 0.1. The error $\Delta\alpha_1$ between α_1 calculated using MVD and that derived from the size distribution spectrum depends on the distance between MVD and d_v . The closer MVD is to d_v , the smaller the $\Delta\alpha_1$ is, and vice versa.

Keywords: transmission lines; icing prediction; water droplet size; environment parameters

随着全球气候变化,中国南方地区电力架空输电线路在冬季发生覆冰的现象十分常见,覆冰可造成输电线路过载、舞动^[1]、短路、断裂、杆塔倒塌等灾害,对电力输送安全形成巨大威胁。尤其近年来中国超特高压输电线路的快速发展,电网规模不断扩大,使得线路覆冰问题愈发凸显^[2-3]。

为了解决输电线路覆冰问题,国内外学者开展了大量研究,建立准确的覆冰预测模型,揭示导线覆冰机理是导线覆冰研究的重要课题之一。早期覆冰预测模型主要以经验公式为主,例如 Jones^[4]公式和 Langmuir-Blodgett 公式等^[5],但经验公式法需不断根据地形、气候特征进行参数调整,适用范围有限。随着计算机技术的发展,许多基于流体力学和热力学的导线覆冰数值模型被提出,其中应用较广的是 Makkonen^[6]导线覆冰模型。不同于以往的经验公式模型,Makkonen 模型指出导线覆冰主要是空气中的水滴在导线表面冻结形成的,若要实现更为精确的数值计算和模拟,需要从水滴碰撞、捕获和冻结的物理过程出发建立模型。由此,基于流体力学和热力学基本知识,Finstad 等^[5]和 Makkonen^[6]提出了水滴碰撞系数、捕获系数和冻结系数的概念。但不同于常规的气象参数,模型所需空气中液态水含量和水滴粒径大小等参数的获取往往较为困难^[7]。

此外,国内许多学者^[8-10]也对导线覆冰数值计算进行了相关研究和应用验证,其研究表明:Makkonen 模型也有其局限性,受到覆冰恶劣条件的影响,导线覆冰增长还受到其他因素的影响,如导线扭转^[11]、振动、载流^[12]、电场^[13]、覆冰类型等。作为优化的方向,何青等^[3]研究了导线直径和电流焦耳热等对覆冰计算参数的影响规律。Zhang 等^[14]研究了不同匝数铝绞线在水滴碰撞系数表现的差异性,并总结了相关规律。He 等^[15]研究了分裂导线分裂间距对水滴碰撞系数的影响特性。何高辉等^[12]的研究指出电晕作用会抑制覆冰的发展,导线覆冰速率会一定程度降低。

尽管如此,导线覆冰主导影响因素仍然是环境温度、风速、空气中液态水含量和水滴粒径这4项环境参数^[8,16]。蒋兴良等^[8]研究了时间步长和导线雾凇计算模型准确度的关系,通过变时间步长实现了计算效率和精确的兼顾。梁曦东等^[17]建立了基于空气中液态水含量 $w(\text{g/m}^3)$ 、环境温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、风速 $V(\text{m/s})$ 和水滴中值体积直径(median volume diameter, MVD)4项环境参数的导线覆冰数值计算模型,导线覆冰形态、重量等仿真结果和试验结果吻合度较好。

随着测量技术的发展,当前对空气中液态水含量和水滴粒径的测量研究也有相关的突破和应用。蒋兴良等^[18]和韩兴波等^[19]设计了旋转多导体装置,并在人工及自然覆冰条件下进行了相关测试,实现了对水滴中值体积直径和液态水含量的测量。Kaikkonen 等^[20]基于全息成像原理设计了 ICEMET 传感器,通过对水滴全息图像的处理获得了空气中水滴粒径分布及液态水含量值。

综上所述,当前大部分对于导线覆冰模型的研究对都是基于包括水滴中值体积直径在内的4项覆冰环境参数上开展的,而少有研究考虑了空气中水滴粒径分布对导线覆冰计算的影响。为提升当前输电线路导线覆冰模型的准确性,并揭示水滴粒径分散性对导线覆冰的作用机制,笔者以 Langmuir 水滴粒径分布谱为模板,建立了导线表面水滴碰撞解析模型和有限元模型,对比分析使用 MVD 和使用水滴粒径分布谱条件下导线表面水滴碰撞系数的差异性,为导线覆冰预测和模拟合理选择水滴粒径参数提供技术参考。

1 导线覆冰过程水滴碰撞系数计算模型

1.1 解析法

根据 ISO12494^[21]标准文件中结冰理论模型,空气中的水滴颗粒物在物体表面碰撞、捕获并冻结是覆冰形

成的直接原因。对于导线而言,需量化水滴在导线表面的碰撞、捕获和冻结速率,进而根据式(1)计算其覆冰增长速率。

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V, \quad (1)$$

式中: A 为物体的横截面积, m^2 ; V 为风速, m/s ;水滴在导线表面的碰撞、捕获和冻结效率分别为 α_1 、 α_2 和 α_3 ,即导线表面整体水滴碰撞系数、捕获系数和冻结系数,3个系数均在0~1区间范围内;若不考虑水滴在导线表面的反弹情况,可假设水滴捕获系数 $\alpha_2 \approx 1$ 。水滴冻结系数 α_3 受到环境温度和风速影响,可根据热平衡方程求解。式(1)可进一步简化为

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_3 \cdot w \cdot A \cdot V. \quad (2)$$

根据 Finstad^[5]结冰模型,粒径为 D_d 的水滴在圆柱体上的碰撞系数 α_1 的计算公式为

$$\alpha_1(K, \phi) = \left[C_{x1} K^{C_{x2}} e^{(C_{x3} K^{C_{x4}})} + C_{x5} \right] - \left[C_{x6} (\phi - 100)^{C_{x7}} \right] \times \left[C_{x8} K^{C_{x9}} e^{(C_{x10} K^{C_{x11}})} + C_{x12} \right], \quad (3)$$

式中: $C_{x1} \sim C_{x12}$ 为常数; K 和 ϕ 分别表示水滴运动过程中的惯性参数和朗缪尔参数,

$$K = \frac{D_d^2 \rho_d V}{9 \mu D}, \quad (4)$$

$$\phi = \frac{18 \rho_a^2 D V}{\rho_d \mu}. \quad (5)$$

式中: ρ_d 和 ρ_a 分别为水滴和空气的密度, kg/m^3 ; V 为风速, m/s ; D 表示导线(或覆冰后可被视为圆柱体的导线)的直径, m ; μ 是空气的运动黏度, m^2/s 。

此外,当常数系数 $C_{x1} \sim C_{x12}$ 取不同值时, α_1 也可表示导线中心线处的局部液滴碰撞系数 β_0 、最大碰撞角 α_0 (rad)和水滴碰撞速度 V_0 (无量纲), $C_{x1} \sim C_{x12}$ 的详细值可参考文献^[6]。如果考虑水滴分散特性,使用水滴尺寸分布谱来计算导线上的水滴碰撞系数 α_1 ,则将空气中水滴粒径的直径划分为 n 个区间,每个区间中液滴直径的平均值为 d_i ,体积分数为 P_i 。直径为 d_i 的水滴在导线上的碰撞系数为 $E(d_i)$,则总的水滴碰撞系数 α_1 的计算式为

$$\alpha_1 = \sum_{i=1}^n P_i E(d_i). \quad (6)$$

1.2 有限元法

如图1所示,除解析法外,还可利用有限元法对导线外流场进行仿真模拟,并通过对气液二相流的计算或水滴轨迹的跟踪获得导线表面的局部和整体水滴碰撞系数 β_i 和 α_1 。

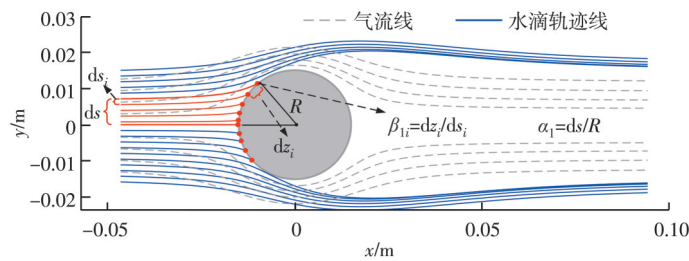


图1 基于拉格朗日法的水滴碰撞系数计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of water droplet collision coefficient calculation based on Lagrangian method

假设导线表面 i 位置处的局部水滴碰撞系数为 β_i ,则有

$$\beta_i = \frac{dz_i}{ds_i}, \quad (7)$$

$$\alpha_1 = \frac{\int_{C_i} \beta_i ds}{D \times L} \quad \text{或} \quad \alpha_1 = \frac{ds}{R}, \quad (8)$$

式中: dz_i 和 ds_i 分别是导线 i 位置处 2 个相邻碰撞水滴间的距离及其初始间距, m; D 和 L 分别为导线直径和长度, m; ds 为导线表面水滴碰撞区域面积单元, m; C_s 为导线表面有水滴碰撞区域面积, m^2 。模型求解过程如图 2 所示, 按式 (8) 中求解方式不同, 有限元法也分为积分法和极限碰撞点求解法, 后者仅利用水滴在导线两侧的极限碰撞点位置坐标即可求得 α_1 。

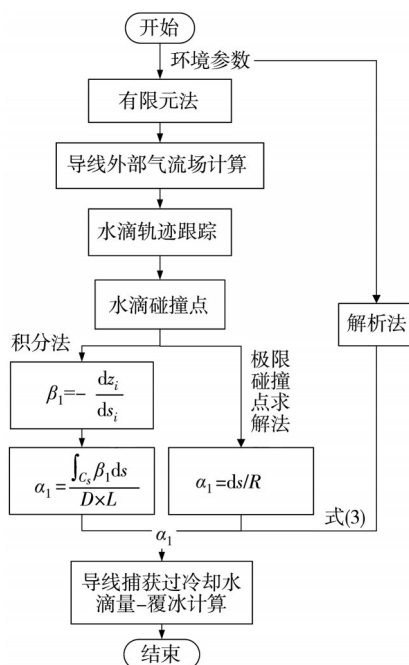


图2 导线表面水滴碰撞系数 α_1 计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of water droplet collision coefficient α_1 on conductor surfaces

2 解析法和有限元法的差异性

导线整体水滴碰撞系数 α_1 通常用于计算导线整体覆冰质量, 局部水滴碰撞系数 β_1 则主要用于覆冰形态、质量的综合模拟。对比解析法和有限元法不难发现, 解析法只能用于的求解 α_1 而不能求解 β_1 , 而有限元法则两者均可求解。但有限元法包括网格绘制、流场求解、水滴跟踪等复杂步骤, 如图 3 所示, 在使用上不如解析法便捷。为对比 2 种方法在计算结果上的差异性, 以直径 $D=30$ mm 的导线为例, 设置 3 m/s 和 12 m/s 这 2 种风速, 假设空气中水滴粒径为 MVD 在 10~60 μm 范围内变化, 分别利用上述 2 种方法求解导线表面的整体水滴碰撞系数 α_1 , 结果如图 4 所示。

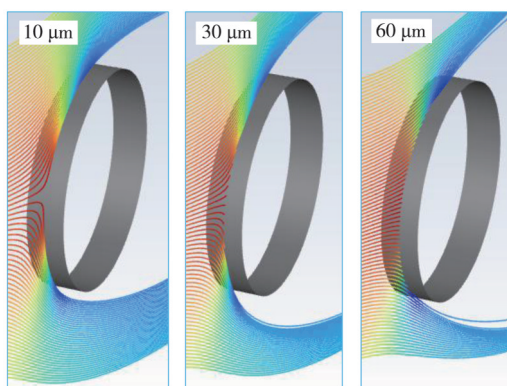


图3 基于有限元法的导线外部水滴跟踪计算

Fig.3 Calculation of external water droplet tracking on wires based on finite element method

2 种有限元法(积分法和极限碰撞点求解法)所获得的导线整体水滴碰撞系数 α_l 均随着 MVD 和风速的增大而增大,且数值十分接近,平均绝对误差均小于 0.01。而解析法误差略微偏大,2 种风速下解析法相对有限元法的平均绝对误差分别是 0.08 和 0.07,但仍在可接受范围内。此外,风速和水滴粒径越大时,解析法相对于其他方法所获得 α_l 的相对误差越小。

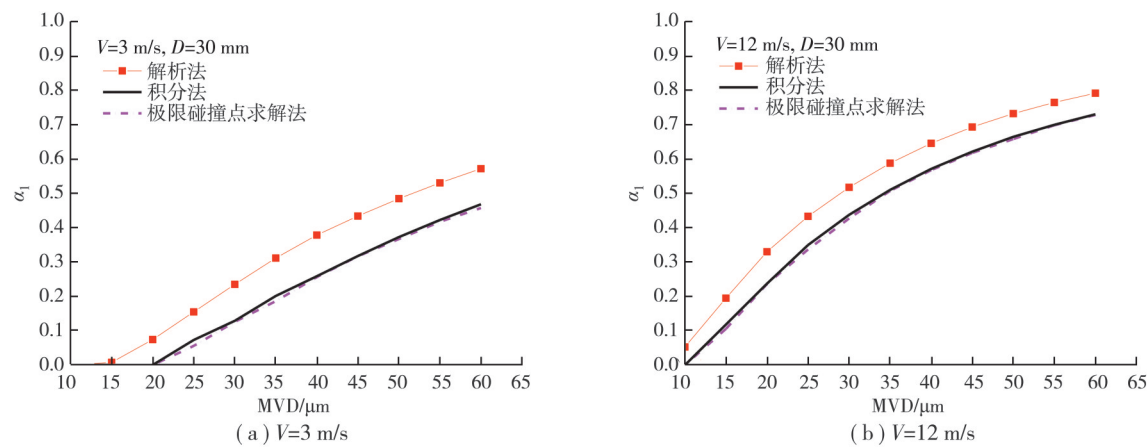


图 4 不同环境条件下导线表面整体水滴碰撞系数 α_l

Fig.4 The overall water droplet collision coefficient α_l on conductor surfaces under different environmental conditions

相对于有限元法,解析法不能获得导线表面水滴局部碰撞系数 β_l ,且对导线整体碰撞系数 α_l 的计算准确度也相对较差,但解析法具有操作方便、计算速度快等优点,常被用于快速评估导线覆冰速率。自然条件下覆冰通常主要在导线迎风面累积,使得导线覆冰后形态逐渐偏离标准圆。若使用解析法连续评估导线覆冰速率,需要考虑覆冰形态变化对计算结果的影响。

3 水滴粒径分散性及表征方法

根据解析模型和有限元法关于水滴碰撞系数的计算方法,若考虑空气水滴粒径分散性,则需要计算每一种不同粒径的水滴在导线表面的碰撞系数后进行加权,这会导致计算量巨大而失去可执行性。因此,在实际计算中可采用 Langmuir 分布^[22]去模拟水滴的分散性。表 1 是 Langmuir-A~Langmuir-J 分布参数,每种分布由 7 种水滴粒径组成,表中系数表示各粒径和水滴中值体积粒径的比值。Langmuir-A 分布中 7 种水滴粒径相同,均和水滴中值体积直径 MVD 相等,而对于 Langmuir-B~ Langmuir-J 分布,每种分布中 7 种水滴粒径不同,且粒径最大值和最小值相差逐渐增大,即水滴粒径分散性逐渐增大。

表 1 典型的 Langmuir 分布

Table 1 Typical Langmuir distribution

百分比 P_i	Langmuir-A ~ Langmuir-J								
	A	B	C	D	E	F	G	H	J
0.050	1.000	0.560	0.419	0.314	0.235	0.176	0.131	0.098	0.055
0.100	1.000	0.720	0.611	0.518	0.440	0.373	0.317	0.269	0.193
0.200	1.000	0.840	0.770	0.706	0.647	0.593	0.543	0.498	0.418
0.300	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.200	1.000	1.170	1.266	1.369	1.481	1.602	1.732	1.874	2.192
0.100	1.000	1.320	1.517	1.742	2.002	2.300	2.642	3.036	4.007
0.050	1.000	1.490	1.819	2.220	2.710	3.308	4.038	4.929	7.344

4 水滴粒径分布对水滴碰撞系数的影响

使用MVD即Langmuir-A时计算导线表面水滴碰撞系数时,实际对应假设是空气中所有水滴粒径大小相同,仅需计算1种水滴粒径对应的 α_1 ,计算过程被大大简化,也被广泛采用。而当实际空气水滴粒径分散性较大时,即如Langmuir-B~Langmuir-J更为接近真实水滴粒径分布时(drop size distribution, DSD),单一使用MVD计算得到的 α_1 (后称为 $\alpha_1(\text{MVD})$)的误差将变大。若参照表1中Langmuir-B~Langmuir-J对应的分布数据和MVD,按式(6)计算直径30 mm导线水滴整体碰撞系数 α_1 ,得到结果如图5所示。

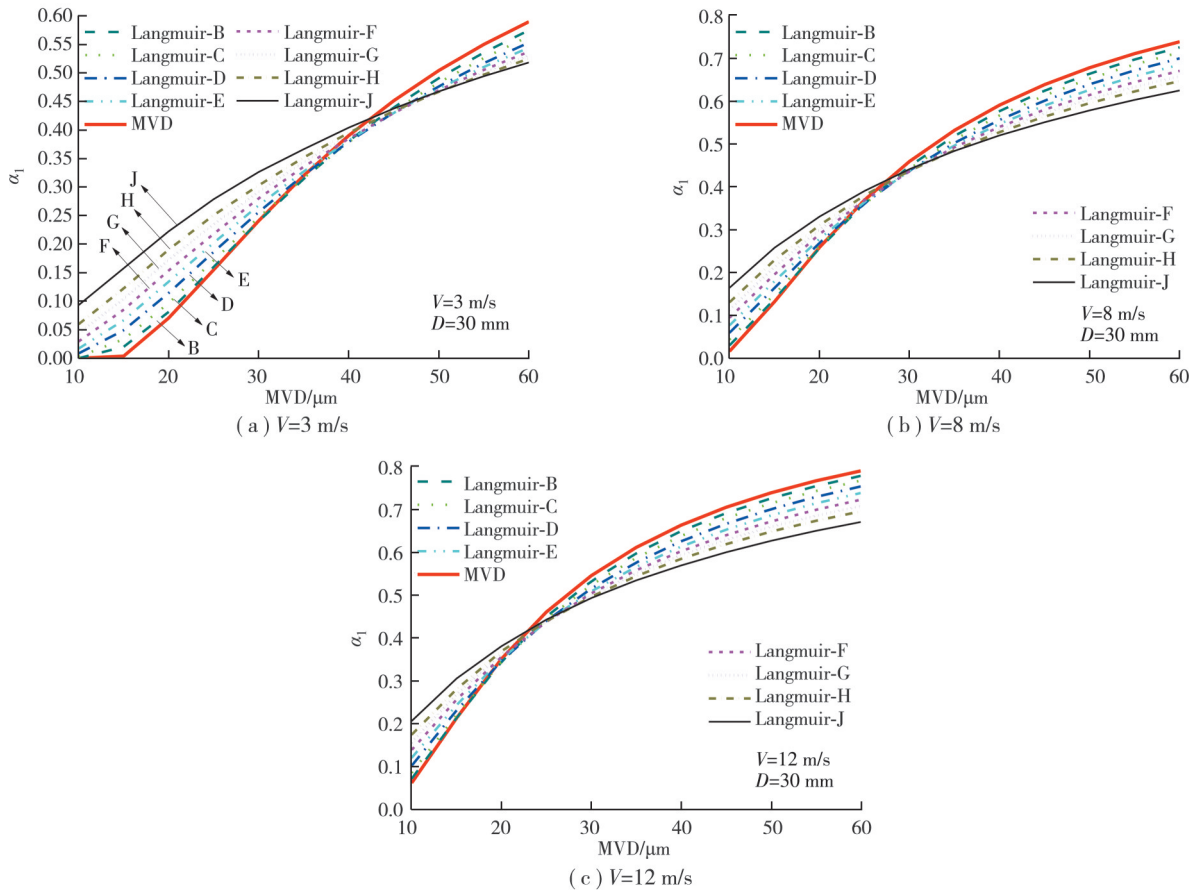
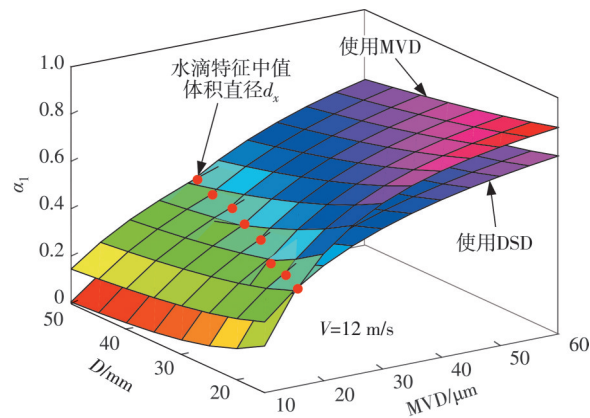


图5 利用不同水滴分布计算导线 α_1

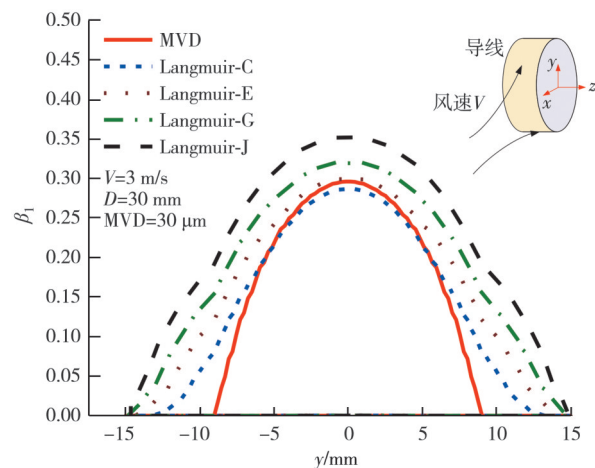
Fig.5 Calculation results of α_1 under different droplet distributions

假设某种Langmuir- x ($x=B\sim J$)水滴分布代表空气中真实的水滴粒径分布DSD,使用MVD计算所得 α_1 对应误差 $\Delta\alpha_1$ 即为图中MVD曲线和Langmuir- x 曲线的差距。MVD曲线和Langmuir-B曲线最为接近,和Langmuir-J曲线差距最大。这表明水滴粒径分散性越大,使用MVD计算所得 α_1 的误差越大,且该误差会随MVD和风速的变化而变化。例如,当风速 $V=3\text{ m/s}$, $\text{MVD}=20\text{ }\mu\text{m}$ 时,MVD曲线相对Langmuir-B曲线的 α_1 相对误差可达到13.3%,相对Langmuir-J可达68.5%。随着MVD从 $10\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $60\text{ }\mu\text{m}$, $\Delta\alpha_1$ 先减小后增大,当 $\text{MVD}=42.5\text{ }\mu\text{m}$ 时, $\Delta\alpha_1$ 近似为零,这表明此时使用MVD和使用Langmuir- x ($x=B\sim J$)计算 α_1 并无明显差异。因此,可称 $42.5\text{ }\mu\text{m}$ 为该环境条件下的水滴特征中值体积直径 d_x 。在不同风速下, d_x 值也不同,当风速增大时, d_x 逐渐减小,如风速分别为 8 m/s 和 12 m/s 时, d_x 减小至 $28\text{ }\mu\text{m}$ 和 $24\text{ }\mu\text{m}$ 。

此外,导线直径也会对 $\alpha_1(\text{MVD})$ 和 $\alpha_1(\text{DSD})$ 的间的差异造成影响。以Langmuir-J分布为例,如图6所示,在水滴粒径MVD较小时, $\alpha_1(\text{MVD})$ 相对于 $\alpha_1(\text{DSD})$ 偏小,随着MVD的增大, $\alpha_1(\text{MVD})$ 逐渐大于 $\alpha_1(\text{DSD})$,而表征两者大小关系转变的水滴特征中值体积直径 d_x 随着导线直径的增大而增大。

图 6 分别使用 MVD 和 DSD (Langmuir-J) 计算所得 α_1 Fig.6 Calculation results of α_1 using MVD and DSD (Langmuir-J) respectively

除影响整体水滴碰撞系数值外,水滴粒径分散性还会影响水滴碰撞范围。分别使用 MVD 和 DSD 对导线表面局部水滴碰撞系数 β_1 进行计算,结果如图 7 所示。可以看到:DSD 参数下水滴碰撞范围明显大于使用 MVD 所获结果,随着水滴粒径分散性的增加(由 Langmuir-C 至 J),水滴碰撞范围逐渐增长,导线驻点处 β_1 (DSD) 也逐渐由小于变为大于 β_1 (MVD)。

图 7 分别使用 MVD 和 DSD 计算所得 β_1 Fig.7 Calculation results of β_1 using MVD and DSD respectively

由此可以推论:在导线覆冰数值计算中,就整体水滴碰撞系数 α_1 而言,单一使用 MVD 对导线水滴碰撞系数进行计算的方法并不一定会导致巨大误差,但需根据实际的水滴粒径分布进行校准。当水滴粒径分散性较大,且水滴中值体积直径 MVD 和特征中值体积直径 d_x 相差较大时,需采用 DSD 计算 α_1 。对于水滴局部碰撞系数 β_1 ,相对于使用 DSD,不考虑水滴分散性的 MVD 不仅会带来 β_1 数值上的偏差,也无法准确模拟水滴碰撞范围,即覆冰范围。

5 结 论

1)传统输电线路覆冰模型通常以水滴中值体积直径表征水滴粒径参数,在精细化导线覆冰模拟及相关测量技术快速发展的趋势下,其工程适用性逐渐降低,亟需探索水滴粒径分布谱在导线覆冰过程中的作用机制。

2)水滴粒径直接影响导线覆冰过程水滴碰撞系数 α_1 的变化,建立了解析法和有限元法对比分析了不同水滴粒径下 α_1 的变化规律。有限元计算下利用积分法和碰撞极限点法求解的导线整体水滴碰撞系数 α_1 基本

相同,而利用解析法获得 α_1 值具有一定误差,且风速越小 α_1 误差越大。

3)使用MVD和使用水滴粒径分布谱DSD计算所得 α_1 的差距 $\Delta\alpha_1$ 取决于MVD值距离水滴特征中值体积直径 d_x 的距离,当MVD距离 d_x 较近甚至等于 d_x 时, $\Delta\alpha_1$ 接近于零,使用MVD和DSD并无明显差距,而当MVD大于或小于 d_x 且距离较远时, $\Delta\alpha_1$ 值较大,且水滴粒径分散程度越大, $\Delta\alpha_1$ 值较大,此时导线覆冰模拟需要采用DSD替代MVD。

4)在MVD和DSD之间进行选择时需参考水滴特征中值体积之间 d_x 和MVD间的差距, d_x 受到环境参数和导线直径等参数的影响,其他环境参数不变时,风速越大时 d_x 越小,导线直径越大, d_x 越大。

参考文献

- [1] 汉京善,吕海平,李丹煜,等.基于GA-BP神经网络算法的输电线路舞动预警方法[J].电网与清洁能源,2021,37(4): 1-7, 14.
Han J S, Lyu H P, Li D Y, et al. Prediction of transmission line galloping using improved BP neural network based on genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 1-7, 14. (in Chinese)
- [2] 蒋兴良,张志劲,胡琴,等.再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J].高电压技术,2018,44(2): 463-469.
Jiang X L, Zhang Z J, Hu Q, et al. Thinkings on the restrike of ice and snow disaster to the power grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 463-469. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Jones K F. A simple model for freezing rain ice loads[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 87-97.
- [5] Finstad K J, Lozowski E P, Gates E M. A computational investigation of water droplet trajectories[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1988, 5(1): 160-170.
- [6] Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2000, 358(1776): 2913-2939.
- [7] 韩兴波,吴海涛,郭思华,等.用于覆冰环境测量的旋转多导体直径选择方法研究[J].电工技术学报,2022,37(15): 3973-3980.
Han X B, Wu H T, Guo S H, et al. Research on diameter selection method of rotating multi-conductor for measurement of icing environmental parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3973-3980. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 郭昊,刘沛清,屈秋林,等.输电线路雾凇覆冰的工程估算方法[J].高电压技术,2011,37(4): 1041-1049.
Guo H, Liu P Q, Qu Q L, et al. Estimation engineering method of rime accretion process on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1041-1049. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 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].电工技术学报,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)
- [12] 何高辉,胡琴,杜茗茗,等.自然覆冰导线直流电晕损失及其可听噪声特性实验研究[J].中国电机工程学报,2022,42(12): 4633-4641.
He G H, Hu Q, Du M M, et al. Experimental research on the DC corona loss and audible noise characteristics of natural icing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4633-4641. (in Chinese)

- [13] 周超, 孙剑峰. 特高压输电导线直流电场下过冷雨滴碰撞系数[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15641-15649.
Zhou C, Sun J F. Collision coefficient of ultra-high-voltage transmission lines under direct current electric field[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(35): 15641-15649. (in Chinese)
- [14] Zhang J, Makkonen L, He Q. A 2D numerical study on the effect of conductor shape on icing collision efficiency[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 143: 52-58.
- [15] He Q, Zhang J, Deng M Y, et al. Rime icing on bundled conductors[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 230-236.
- [16] 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, 2022, 54(11): 11-21. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 蒋兴良, 申强. 环境参数对导线覆冰厚度影响的试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1096-1100.
Jiang X L, Shen Q. Experimental research on influence of environmental parameters on the conductor icing thickness[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1096-1100. (in Chinese)
- [19] 韩兴波, 蒋兴良, 毕聪来, 等. 基于分散型旋转圆导体的覆冰参数预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1096-1105.
Han X B, Jiang X L, Bi C L, et al. Prediction of icing environment parameters based on decentralized rotating conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1096-1105. (in Chinese)
- [20] Kaikkonen V A, Molkoselkä E O, Mäkyinen A J. A rotating holographic imager for stationary cloud droplet and ice crystal measurements[J]. Optical Review, 2020, 27(2): 205-216.
- [21] ISO. Atmospheric icing of structures: ISO 12494: 2001[S]. International Organization for Standardization, 2001.
- [22] Sokolov P, Virk M S. Droplet distribution spectrum effects on dry ice growth on cylinders[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 80-88.

(编辑 郑洁)