

导线覆冰过程中水滴尺寸参数影响的碰撞率分析

李汶江¹,周双勇¹,邹书涵¹,唐 娟¹,吕蓓蕾^{2,3}

- (1. 国网重庆市电力公司检修分公司,重庆 400039;
2. 重庆市山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学),重庆 400045;
3. 重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

摘 要:导线覆冰增长预测中,碰撞率是一项不可忽视的重要参数,该参数的合理获取与实时环境参数如风速、水滴直径、温湿度、气压及导线直径等密切相关。水滴中值直径(MVD)常用来近似整个滴谱,但计算表明,对于不同体积百分比的水滴分布,基于 MVD 的碰撞率与实际滴谱碰撞率相差较大。论文提出了新的体积权重直径(VWD)来近似滴谱,分析三种水滴尺寸参数的碰撞率,基于 VWD 的碰撞率更接近实际滴谱的碰撞率,相对误差较小。解析了基于 VWD 的碰撞率精度更高的数学原理,讨论了该方法的适用范围。同时,通过试验的对比分析,计算碰撞率和实测碰撞率相对误差较小,覆冰质量接近,验证了该方法进行覆冰预测的可靠性,进一步将其应用于实际输电线路的覆冰厚度预测。

关键词:高压输电线路;覆冰;体积权重直径;碰撞率
文章编号:2096-4633(2019)07-0009-11 **中图分类号:**TM752 **文献标志码:**B

随着全球气候变化,大风、冰灾等自然灾害呈现上升趋势。电网作为关系国计民生的重要基础设施,极易受到这些灾害的袭击,而冰灾已然成为威胁其安全运行的重要自然灾害^[1]。众所周知,冻雨覆冰可能导致绝缘子覆冰闪络^[2]、导线舞动乃至断线^[3-6]、杆塔倒塌^[7]等,这些将迫使供电中断,造成重大经济损失和社会责任。随着电网的延伸,线路走廊日益紧张,不可避免地要跨越高山大岭、峡谷、江河等地形地貌、气象条件复杂区域,线路所经区域时常会遭遇气候异常,冰冻事故时有发生,给电网可靠性带来巨大的挑战。如:2008 年,我国南方冰灾导致至少 800 座 35 kV 以上的电站不能正常运行,超过 12 000 座 10 kV 以上的输电塔损坏,造成财产损失超过 250 亿元,1 亿多人遭遇停电停水;2014 年 2 月,湖北宜昌普降中到大雪,秭归、五峰、宜都等地覆冰严重,部分覆冰厚度超过 50 mm,电网运行受到严重威胁。可见,保障复杂赋存环境中输电线路的稳定运行,可靠的输电线路覆冰机理及准确的覆冰预测是关键。

覆冰是空气中的水以各种形式凝固在物体表面

的过程,会受多种环境因素的影响,文献[8]提出:导线覆冰可由环境温度、风速、液态水含量等推导得出,并决定导线覆冰方式及覆冰类型;文献[9]指出:风速是影响导线覆冰厚度的重要因素,而环境温度和液态水含量决定着导线覆冰强度的变化。另外,文献[10-11]等基于环境参数建立了导线覆冰模型,阐明了各项环境参数已知时,实时的导线覆冰冰形和覆冰厚度需完全依赖于准确采集的环境参数。基于当前经典的覆冰增长速率模型 $\frac{dm_i}{dt_i} = \alpha_{li} \cdot \alpha_{si} \cdot w_i \cdot U_i \cdot D_i \cdot L$ (式中 α_{li} 、 α_{si} 、 w_i 、 U_i 、 D_i 分别表示第 i 个时间步内的水滴碰撞率、冻结系数、液态水含量、风速及覆冰圆柱体直径),进一步阐明了覆冰过程与其赋存环境参数密切相关。可见,在覆冰环境条件下,由于外部气流场的差异,水滴在不同直径圆柱导体上的碰撞特性不同,覆冰速率差异显著。因此,水滴碰撞率的精细化描述将对覆冰预测的准确性起到关键作用。文献[12]提出了当前广泛使用的导线覆冰碰撞率公式,利用液滴中值体积直径(MVD)求空气中液滴对导线的总体碰撞率。进一步验证了 Finstad 的碰撞率

计算公式。文献[13]阐明导线形状会影响过冷却水滴的运动,指出碰撞率误差造成的瞬时覆冰增长率误差高达 10.8 kg/h。文献[14]基于水滴碰撞圆柱导线的数学模型,指出碰撞率与导线直径成反比。文献[15]应用量纲分析方法推导了导线覆冰碰撞率的无因次准则方程式,利用实验数据拟合了碰撞率计算公式,其结果与文献[15]的一致。

上述研究成果均表明,碰撞率作为描述空气中的水滴碰撞导线表面的概率,其值在对覆冰预测中不可忽视。由于降水机制不同形成不同的滴谱,选择合适的水滴尺寸参数来表征尤为重要。当前描述滴谱的水滴尺寸参数较多,如水滴中值直径(MVD),Finstad 证明了基于 MVD 的碰撞率可用来近似实际滴谱碰撞率,与基于平均体积水滴直径或平均水滴直径的碰撞率相比具有较高的精确,仍存在一定的误差。可见,表征滴谱特征的水滴尺寸参数不同,其计算碰撞率与实际碰撞率会有较大的差别。论文提出了一种新的水滴尺寸参数即体积权重

直径(volumne weighted diameter,VWD),对比分析基于 VWD 及 MVD 的碰撞率,阐明该方法计算碰撞率的适用范围。并将新方法应用于试验研究,验证了该方法的可靠性。同时,将该方法应用于实际输电线路的覆冰预测,进一步阐明了本文方法的可行性。因此,工程应用中需结合实际赋存环境,针对性地采用合适的水滴尺寸参数计算碰撞率,以获得更准确的覆冰预测。

1 基于 VWD 的水滴碰撞率分析

水滴碰撞率的计算中,水滴直径的准确获得不可或缺,文献[16-17]设计了旋转多导体装置,并依据水滴碰撞率经验公式建立了覆冰参数计算模型,但其采用人工测量方法,数据采集误差高、效率低,继而覆冰预测的精度低。为了深入探讨碰撞率对覆冰的影响,可通过结冰风洞 VTT 的云汽溶胶和降水分光计(CAPS)来获得水滴尺寸分布。基于试验装置,可以获得不同体积百分比的水滴谱,如表 1 所示的 8 种水滴谱。

表 1 不同滴谱的水滴直径及体积百分比分布表

Tab. 1 Distribution table of water droplet diameter and volume percentage of different droplet spectra

水滴直径 μm 百分比/%	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	0.70	18.40	23.90	33.20	12.70	5.10	2.10	1.70	1.10	1.10
2	0.50	10.10	12.90	24.00	18.00	14.40	8.10	5.50	3.80	2.70
3	1.80	19.21	23.70	27.40	10.90	6.10	3.50	3.00	2.30	2.10
4	0.80	12.80	19.80	23.80	10.00	11.60	6.40	5.80	6.60	2.40
5	0.30	11.30	19.00	29.10	15.00	9.50	5.30	4.30	3.30	2.90
6	0.40	10.80	20.40	30.10	15.00	8.20	4.80	4.30	3.10	2.90
7	0.60	11.20	22.10	32.50	13.30	7.20	4.70	3.80	2.80	1.80
8	0.70	10.90	23.20	33.70	12.80	7.40	3.90	3.30	2.50	1.60

根据 Finstad(1988)的研究成果,基于水滴中值直径(MVD)并不能完全真实地表征实际碰撞率,主要是基于 MVD 的碰撞率相当于一元 Gauss-Legendre 积分值,而多元 Gauss-Legendre 积分可改善其计算结果。

图 1~图 4 描述了不同导线直径组合不同风速的碰撞率变化曲线,对比基于 MVD、多元 Gauss-Legendre 积分法的碰撞率可知,多元积分得到的碰撞率更接近实际碰撞率。同时,结合表 2 的不同工

况下四种积分碰撞率的相对误差,可知四点 Gauss-Legendre 积分的计算精度更高。但数值计算中,积分点越多,计算越繁琐,耗时越多。为了获得更准确的碰撞率来进行覆冰预测,探讨一种可靠的且简单易行的水滴尺寸参数来近似滴谱尤为重要,论文提出一种新的水滴尺寸参数即体积权重直径(VWD),其表达式如下:

$$VWD = \sum_{i=1}^n x_i d_i \quad (1)$$

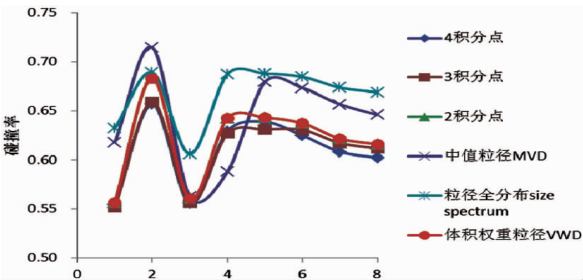
式中, x_i 表示第 i 个容器中的水滴体积百分比, d_i 是对应第 i 个容器的中值体积直径 (MVD)。

基于试验获得的滴谱如表 1 所示,根据水滴直径对应的不同体积百分比,可以计算 8 种工况的 MVD 及 VWD,根据公式(2)得到不同工况的碰撞率。

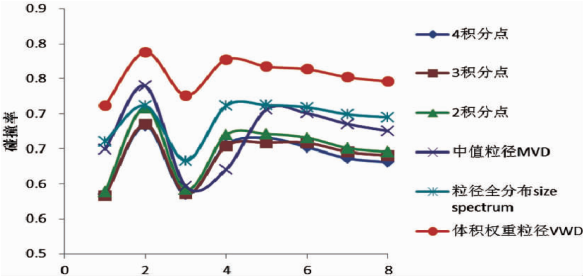
$$\alpha_1 = A - C(B - 0.0454) - 0.028 \quad (2)$$

式中, $A = 1.066 K^{-0.00616} \exp(-1.103 K^{-0.688})$; $B = 3.641 K^{-0.498} \exp(-1.497 K^{-0.694})$; $C = 0.00637(\varphi - 100)0.381$; $K = \rho_w d^2 v / 9 \mu D$; $\varphi = \text{Re}^2 / K$; Re 为液滴运动的雷诺数 ($\text{Re} = \rho_a d v / \mu$), D 为导线直径, d 为液滴直径, ρ_w 、 ρ_a 分别为液滴和空气密度, v 为气流运动速度, μ 为空气的绝对粘度。

8 种不同体积分布的滴谱碰撞率如图 1 ~ 图 4 所示,描述了基于 MVD、VWD、粒径全分布 (滴谱)、多点 Gauss-Legendre 积分的碰撞率变化趋势。其结果表明,不论采用哪种水滴尺寸参数,同一工况下的变化趋势基本一致。图中还显示水滴直径对应的体积百分比不同,碰撞率的数值有差异,如第 3 种工况中对应体积百分比较大的水滴直径较小,则较小水滴直径占的比重大,根据公式(2)可知,整体的碰撞率就小;第 2 种工况中对应体积百分比较大的水滴直径相对较大,则较大水滴直径占的比重大,则整体的碰撞率就大。这一规律表明,碰撞率与水滴直径大小及水滴直径对应的体积百分比均有关,水滴尺寸参数的不同选择会导致不同的碰撞率计算结果。



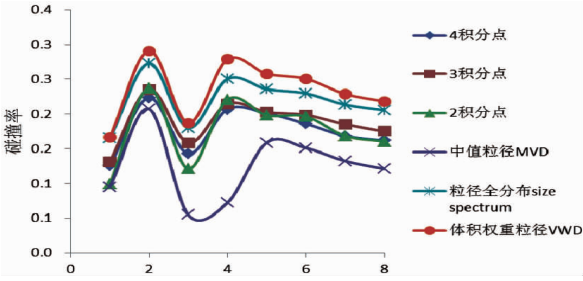
(c) 风速 25 m/s



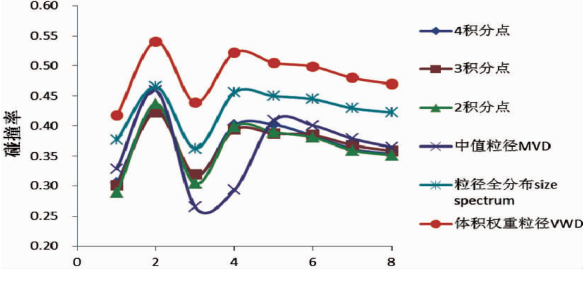
(d) 风速 30 m/s

图 1 导线直径 10 mm 组合不同风速的水滴碰撞率比较

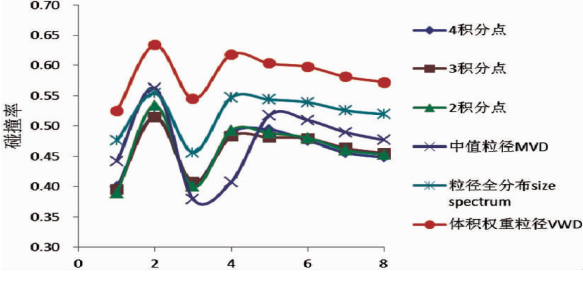
Fig. 1 Comparison of water droplet collision rates with different wind speeds combined with conductor diameter 10 mm



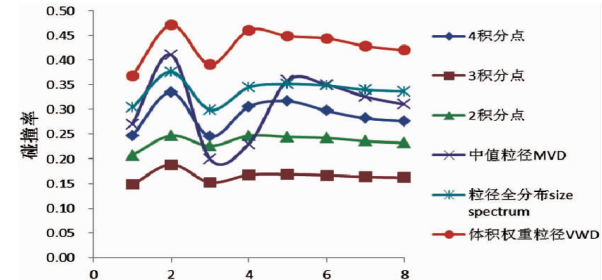
(a) 风速 5 m/s



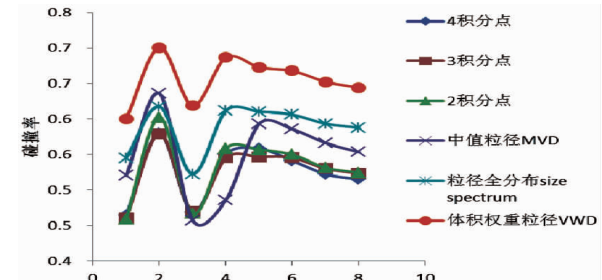
(b) 风速 15 m/s



(c) 风速 25 m/s



(a) 风速 5 m/s



(b) 风速 15 m/s

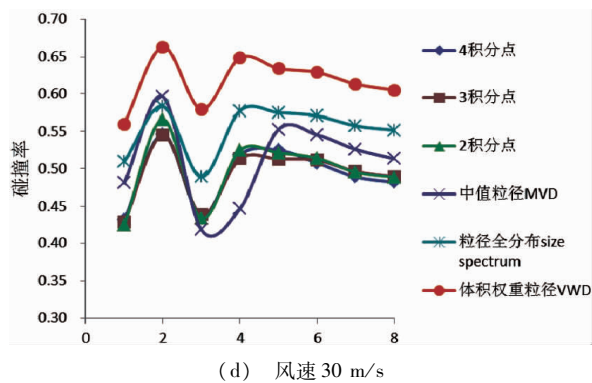


图 2 导线直径 20 mm 组合不同风速的水滴碰撞率比较

Fig. 2 Comparison of water droplet collision rates with different wind speeds combined with conductor diameter of 20 mm

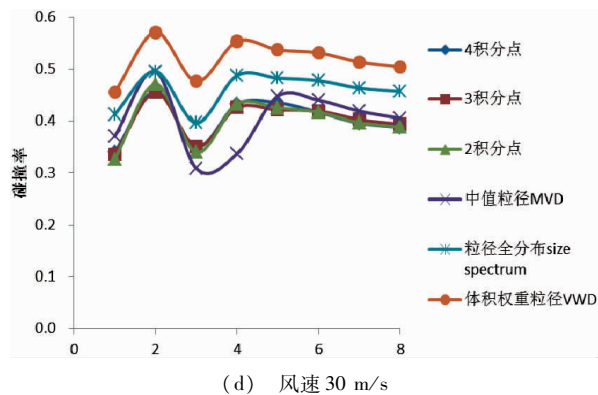
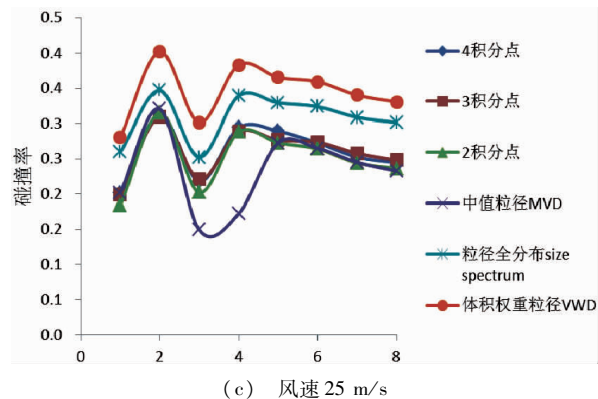
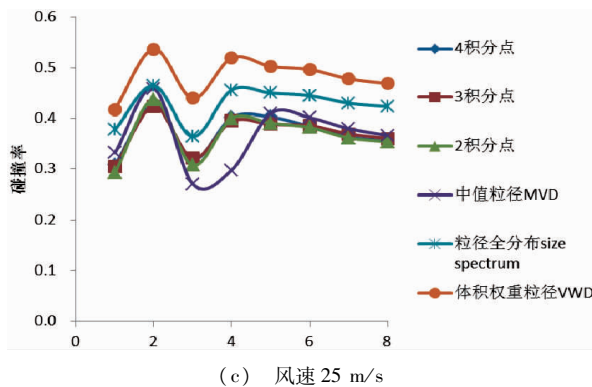
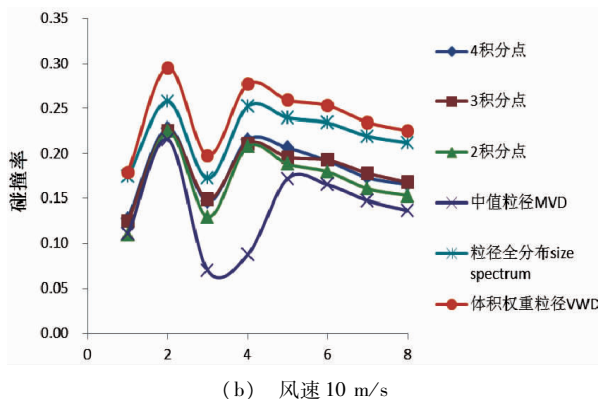
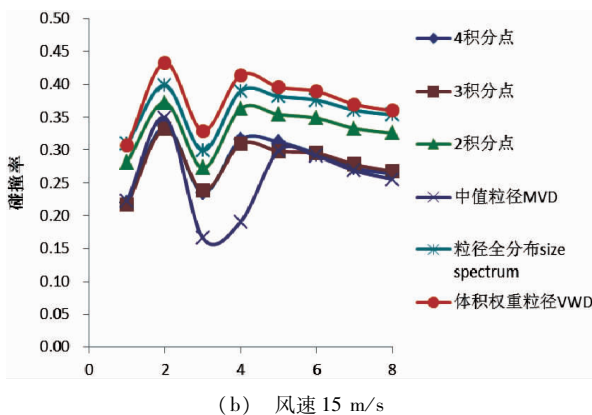
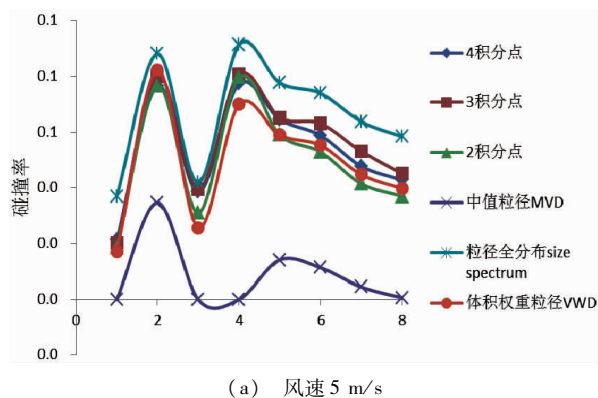
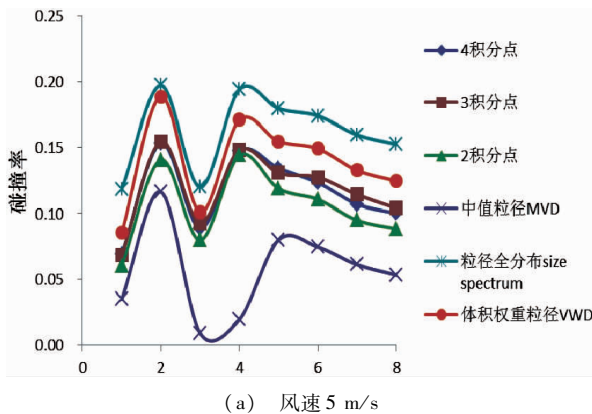


图 3 导线直径 30 mm 组合不同风速的水滴碰撞率比较

Fig. 3 Comparison of water droplet collision rates with different wind speeds combined with conductor diameter 30 mm



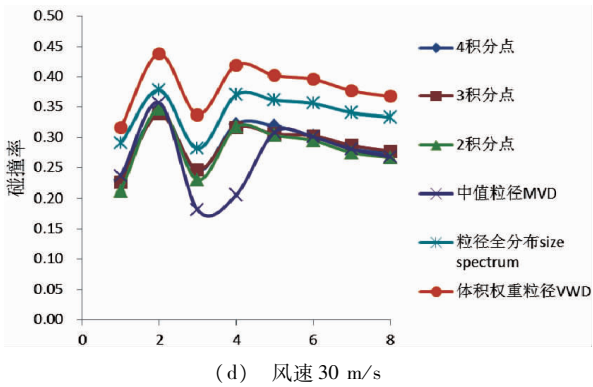
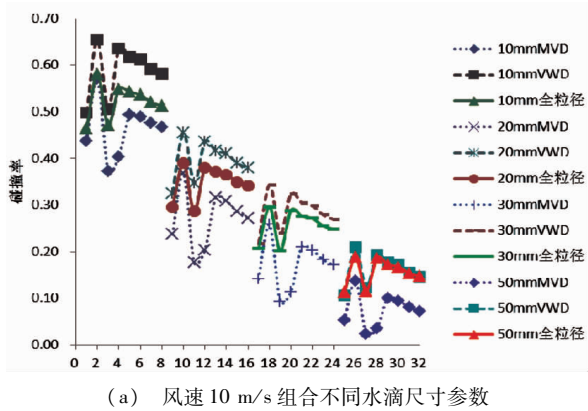
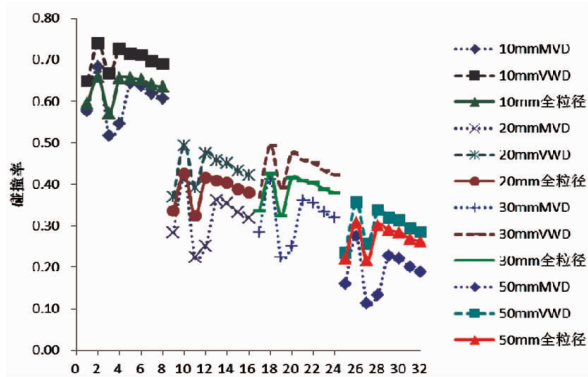


图 4 导线直径 50 mm 组合不同风速的水滴碰撞率比较
Fig. 4 Comparison of water droplet collision rates with different wind speeds combined with conductor diameter 50 mm

图 5(a) ~ (c) 对比了风速 10 m/s、20 m/s 及 30 m/s 组合不同导线直径的碰撞率,其结果表明:当导线直径相同时,风速越大,碰撞率也越大;当风速相同时,导线直径由 10 mm 变化为 20 mm、30 mm 及 50 mm 时,同一风速下的导线直径越小,碰撞率越大;当导线直径过大且风速较小时,碰撞率可能过小,不利于碰撞率的理论分析及实际覆冰的监测,基于 MVD 的碰撞率不能真实表征实际碰撞率,也说明 MVD 近似实际滴谱的可靠性不够。



(a) 风速 10 m/s 组合不同水滴尺寸参数



(b) 风速 20 m/s 组合不同水滴尺寸参数

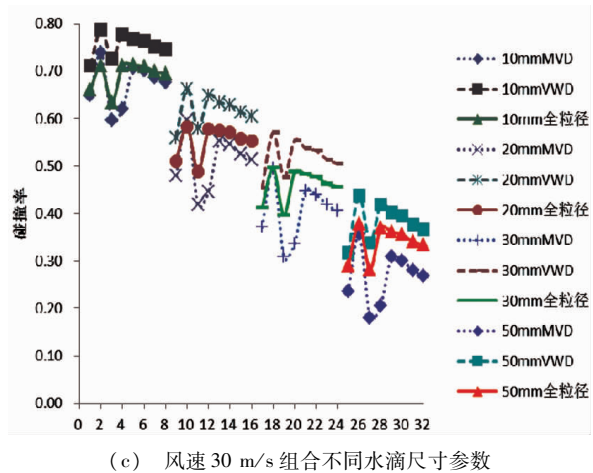


图 5 不同风速组合水滴尺寸参数的水滴碰撞率比较
Fig. 5 Comparison of droplet collision rate of water droplet size parameters with different wind speed combination

另外,针对同一体积百分比的滴谱,当导线直径及风速相同时,基于 MVD 的碰撞率数值变化范围较大,与实际滴谱碰撞率相差较大,而基于 VWD 的碰撞率更接近实际滴谱的碰撞率。

表 2 列出了不同工况下三种水滴尺寸参数对应的碰撞率误差,比较可知前者与实际滴谱碰撞率的相对误差变化范围为 60% - 1%,而后的相对误差波动范围为 20% - 1%,说明基于 VWD 的碰撞率计算更稳定。根据 MVD 及 VWD 的定义可知,前者考虑的是对应体积百分比为 50% 的水滴直径,而后者考虑的是不同体积百分比的加权水滴直径,如第 3 种工况中对应体积百分比比较大的水滴直径较小,采用 MVD 近似滴谱,则体积百分比 50% 对应的水滴直径较小,根据公式(2), Re 、 K 、 A 均较小,碰撞率较小,还有占比 50% 体积百分比的水滴并未考虑到碰撞率计算中,与实际碰撞率就有了误差;第 2 种工况中对应体积百分比比较大的水滴直径相对较大,采用 MVD 近似滴谱,虽然此时体积百分比 50% 对应的水滴直径较大,计算碰撞率大,仍未考虑其余占比 50% 体积百分比的水滴。而 VWD 考虑了不同水滴尺寸的占比,描述了滴谱的精细化分布,则计算碰撞率与实际滴谱碰撞率更接近。

可见,采用新的水滴尺寸参数计算碰撞率是可行的,说明近似滴谱的水滴尺寸参数会对碰撞率的准确性产生一定的影响,进而影响实际覆冰预测。

表 2 不同导线直径对应的碰撞率计算误差

Tab. 2 Calculation error of collision rate corresponding to different conductor diameters

方法 误差	导线直径 30 mm(风速 10 m/s)					导线直径 50 mm(风速 10 m/s)				
	四积分点	三积分点	二积分点	MVD	VWD	四积分点	三积分点	二积分点	MVD	VWD
1	23.10	26.39	34.42	31.64	-5.35	27.91	34.26	37.89	54.07	7.02
2	9.95	12.19	11.77	12.79	-15.92	10.97	13.84	16.00	27.18	-10.99
3	12.62	13.14	23.06	53.99	-17.75	12.22	14.73	21.65	79.94	-5.83
4	12.83	16.00	16.83	60.51	-12.09	13.68	17.16	19.52	81.04	-3.27
5	12.05	17.60	20.09	24.08	-10.19	13.48	19.94	25.61	41.74	-2.28
6	16.24	17.15	21.78	25.27	-10.12	17.76	19.35	28.26	43.29	-2.11
7	18.92	18.24	24.92	28.41	-9.09	21.20	20.91	32.88	47.50	-0.39
8	19.78	20.01	25.82	31.10	-8.44	22.25	23.96	34.28	50.80	0.41

方法 误差	导线直径 30 mm(风速 20 m/s)					导线直径 50 mm(风速 20 m/s)				
	四积分点	三积分点	二积分点	MVD	VWD	四积分点	三积分点	二积分点	MVD	VWD
1	19.96	20.93	25.09	15.37	-10.15	23.86	25.13	32.19	27.51	-6.33
2	8.91	9.77	7.15	3.12	-16.14	10.57	11.65	10.70	10.87	-15.65
3	12.96	12.22	17.34	31.03	-20.88	14.26	12.98	21.84	48.13	-18.17
4	12.44	14.12	13.35	39.74	-14.27	13.81	15.59	16.08	55.73	-12.13
5	11.09	14.60	14.60	11.40	-12.03	12.82	16.92	18.88	21.35	-10.24
6	14.45	14.16	15.63	12.25	-11.95	16.77	16.46	20.42	22.42	-10.17
7	16.47	15.00	17.67	14.35	-11.40	19.38	17.50	23.28	25.20	-9.28
8	17.11	15.92	18.22	16.32	-10.91	20.21	19.07	24.08	27.64	-8.70

2 基于 VWD 估算碰撞率的理论验证

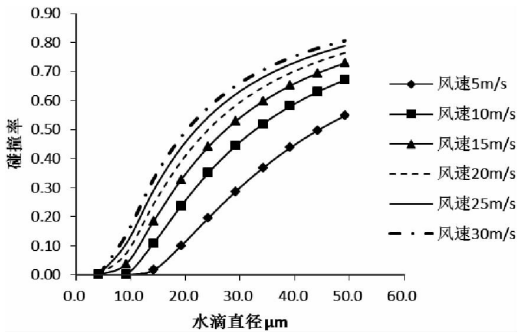


图 6 导线直径 30 mm 组合不同风速的水滴碰撞率
Fig. 6 Water droplet collision rate of conductor diameter 30mm combined with different wind speeds

第 2 节的计算结果表明,基于 VWD 的碰撞率能更好地近似实际滴谱碰撞率,说明该水滴尺寸参数能更真实地表征实际滴谱,下面运用数学方法来阐明该方法的合理性。实际滴谱的碰撞率可以表示为水滴尺寸的权重平均碰撞率:

$$\alpha_{spec} = \sum_{i=1}^n x_i \alpha(d_i) \tag{3}$$

式中, x_i 是第 i 个容器中的水滴体积百分比, $\alpha(d_i)$ 是对应每个水滴直径 d_i 的碰撞率。

根据公式(3)可以计算不同工况下的碰撞率,图 6 为导线直径 30 mm 组合不同风速的水滴碰撞率变化曲线,显示风速相同时,碰撞率大致随水滴直径的增大而线性增大,则公式(3)可改为:

$$\alpha_{spec} = \sum_{i=1}^n x_i \alpha(d_i) = \sum_{i=1}^n x_i (k \times (d_i - d_0) + \alpha(d_0)) \tag{4}$$

式中, d_0 表示最小容器内的水滴直径, k 为碰撞率变化曲线的斜率, $\alpha(d_0)$ 为对应 d_0 的碰撞率。

$$\alpha_{spec} = k \times \sum_{i=1}^n (x_i d_i) = k \times VWD = \alpha(VWD)$$

(5)

公式(5)解释了当碰撞率大于 0 时,基于 VWD 的碰撞率可直接表征实际滴谱的碰撞率。也就是说当水滴直径 $d = d_0$ 的碰撞率 α 大于 0 时,可认为碰撞率与水滴直径成线性关系。由此也阐明了该水滴尺寸参数近似实际滴谱的适用范围,即对应某一水滴直径的碰撞率无限接近 0 或等于 0 时,基于公式(5)的碰撞率就不能代表整个滴谱的碰撞率。为了说明这一特殊情况,论文考虑导线直径 50 mm 及风速 5m/s,如表 3 所示的不同水滴尺寸参数的计算碰撞率。此时的计算碰撞率很小,接近于 0,基于 MVD 和 VWD

当最小容器内的水滴碰撞率不为 0 时,则公式(4)可改写为:

的计算碰撞率与实际滴谱碰撞率的相对误差都较大,特别是前者的相对误差达到了 60% 以上,有多个工况的计算碰撞率完全偏离实际滴谱碰撞率,误差为 100%。基于 VWD 的碰撞率计算误差虽然也增大,但计算精度相对更高。其主要原因在于此时的计算碰撞率与水滴直径不再是线性增长,也就是当导线直径过大或风速过小时,实际碰撞率很小,MVD 或 VWD 不能正确表征实际的水滴尺寸分布,计算碰撞率就不能描述实际滴谱碰撞率,只有基于整个滴谱计算的碰撞率才可应用于实际覆冰预测。

表 3 导线直径 50mm 组合风速 5m/s 的碰撞率比较

Tab. 3 Comparison of collision rate of wire diameter of 50mm combined with wind speed of 5m/s

方法工况	MVD		VWD		滴 谱
	碰撞率	相对误差/%	碰撞率	相对误差/%	碰撞率
1	0.000	100.000	0.017	53.796	0.037
2	0.035	60.682	0.082	6.765	0.088
3	0.000	100.000	0.026	38.300	0.042
4	0.000	100.000	0.070	23.459	0.091
5	0.014	81.815	0.059	24.047	0.078
6	0.011	84.722	0.055	25.153	0.074
7	0.004	92.993	0.045	29.854	0.064
8	0.001	98.915	0.040	32.024	0.058

为了进一步解释碰撞率较小时的计算碰撞率(基于 MVD 或 VWD 的碰撞率)不能真实描述实际滴谱碰撞率,根据 Finstad 的碰撞率数学解释可知,

基于 MVD 的碰撞率近似实际滴谱碰撞率只引用了一个 Gauss-Legendre 积分点,也即公式:

$$\alpha_{spec,1} = \int_{-1}^1 0.5 \times E\left(\frac{y+1}{2}\right) dy = 0.5 \int_{-1}^1 w_i \times \alpha\left(\frac{x_i+1}{2}\right) = \alpha(D_{50})$$

(6)

$$\alpha_{spec,2} = 0.5(\alpha(D_{79}) + \alpha(D_{21}))$$

(7)

$$\alpha_{spec,3} = 0.444\alpha(D_{50}) + 0.278(\alpha(D_{89}) + \alpha(D_{11}))$$

(8)

$$\alpha_{spec,4} = 0.326(\alpha(D_{67}) + \alpha(D_{33})) + 0.174(\alpha(D_{93}) + \alpha(D_7))$$

(9)

式中, $y = 2f - 1$, f 表示水滴直径的体积百分比。

函数会有较好的拟合结果,而对非线性函数的估算就会误差较大。虽然论文中将碰撞率与水滴直径描述为线性关系,但此时某水滴直径对应的体积百分比并不与水滴直径构成线性函数,也就是说碰撞率与水滴直径对应的体积百分比不能确定

公式(6)~(9)也验证了第 2 节中的计算结果,即:

(1)采用 1 点 Gauss-Legendre 积分时,对线性

为线性函数,则计算碰撞率与实际碰撞率就会存在误差,当某水滴直径对应的体积百分比变化范围很大时,则体积百分比 50% 的 MVD 并不能代表整个区间范围内的水滴尺寸,此时的碰撞率计算误差就会更大。

(2)基于 1 点 Gauss-Legendre 积分的碰撞率结果精度较低,考虑 2 点、3 点或 4 点积分的碰撞率可用来近似整个滴谱的碰撞率,公式(7)~(9)阐明了多点积分考虑了不同体积百分比对应的水滴,这部分水滴产生的碰撞率并未忽略,对实际滴谱的描述更准确,则计算精度相对较高。特别是,当基于 MVD 的计算碰撞率为 0 时,也即累计体积百分比 50% 时水滴直径对应的碰撞率为 0,而实际碰撞率并不为 0,此时基于 MVD 的计算碰撞率就不合理,不能用于实际滴谱的碰撞率计算。因此,该方法只能作为近似实际滴谱碰撞率的优选,而不是作为所有覆冰预测中水滴尺寸参数的选择。

(3)不论基于 MVD 或 VWD 来近似实际滴谱的碰撞率,为了提高其覆冰预测精度,当碰撞率较小

时,如小于 0.5,可采用 VWD 近似整个滴谱,而碰撞率较大时,则基于 MVD 的碰撞率计算更准确,特别是当碰撞率接近于 0 时,也即导线直径很大,风速较小时,两者的碰撞率计算误差均较大,最好采用滴谱碰撞率。因此,为了得到更精确的覆冰质量和厚度,可根据不同水滴尺寸参数的适用范围来分区计算碰撞率,再进行覆冰预测。

3 试验验证及工程案例分析

3.1 试验验证

如上的理论表明了 VWD 可以较好的近似实际滴谱尺寸,为了进一步验证该水滴尺寸参数在覆冰预测中的可靠性,论文对比分析了基于 VWD 的计算碰撞率与实际碰撞率。试验中的导线直径 44 mm,风速 20 m/s,气压 100 kPa,温度、水滴 VWD 如表 4 所示。理论计算中,为了反映环境参数对碰撞率的深入影响,碰撞率计算中考虑了气压、湿度、温度的影响,得到不同环境参数下的空气密度、动力粘度等,则得到空气密度 ρ_a 和动力粘度 μ 的表达式:

$$\rho_a = \frac{3.48 \times p}{273.15 + T_a} \left(1.0 - 0.23 \times \frac{R}{P} \times e^{0.077 \times T_a} \right) \quad (10)$$

$$\mu = 1.711e^{-5} \times \left(\frac{T}{273.15} \right) 1.5 \times \left(\frac{273.15 + 122.00}{T + 122.00} \right) \quad (11)$$

式中, p 为气压(kPa); T_a 为温度(℃); R 为相对湿度; T 为绝对温度(K)。

不同工况的碰撞率如表 4 所示,其结果显示,计算碰撞率与试验碰撞率的相对误差小于 5%。也说明碰撞率的变化范围大约大于 0 且小于 0.5 时,基

于 VWD 的计算碰撞率精度较高,该水滴尺寸参数可用来近似整个滴谱分布,能给出更准确的碰撞率。同时,表 4 给出了 50 分钟后的覆冰质量计算值及试验值,数值非常接近,进一步说明基于 VWD 的覆冰预测精度高。

表 4 不同工况下的碰撞率对比分析

Tab. 4 Comparative analysis of collision rates under different working conditions

工况	温度/℃	水滴 VWD /(10 ⁻⁵ m)	空气密度 /(kg/m ³)	计 算 碰撞率	试 验 碰撞率	相对 误差	试验覆冰 质 量	计算覆冰 质 量
1	-4.5	1.71	1.293 259	0.2382	0.23	-0.815 3	23.17	24.949
2	-4.5	1.44	1.293 259	0.1669	0.19	2.306 6	17.83	18.586
3	-9.5	1.44	1.318 471	0.1657	0.18	1.428 7	16.77	17.385
4	-19.3	1.44	1.371 266	0.1541	0.20	4.589 6	19.03	19.658
5	-4.5	1.31	1.293 259	0.1349	0.14	0.506 1	11.91	13.718

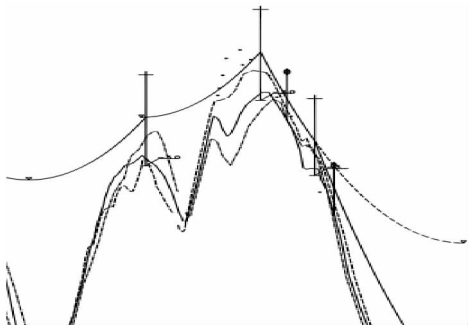
3.2 工程案例分析

重庆市武隆县某 500 kV 输电线路东西走向,如图 7 所示,地形为高山,海拔 1 354.6 m,属于高海拔

地区,常年大雾笼罩,微气象气候变化明显,是设计覆冰为 20 mm 的重冰区,常年主导风为西南风。2014 年 1 月到 2 月,该区域小雨加雪,线路开始覆冰,该塔

A 相/右线外串绝缘子覆冰基本脱落。输电线路的导线等效初始直径 56.08 mm,该区域的多段线路气象监测显示:湿度 92.5%、气压 0.931 hPa,VWD 为 54.3 μm 。不同工况下 24 小时的覆冰厚度如表 5 所

示,表中显示计算覆冰厚度与实际监测冰厚比较接近,且覆冰厚度均小于设计冰厚20 mm,处于设计覆冰范围内。进一步验证了 VWD 在适用范围内的碰撞率计算精度高,可以用于实际覆冰预测。



(a) 输电线路走向



(b) 输电塔覆冰

图 7 输电线路覆冰概况

Fig. 7 Overview of transmission line icing

表 5 不同工况的 500 kV 输电线路覆冰预测

Tab. 5 Prediction of 500 kV transmission line icing under different working conditions

工 况	温度/ $^{\circ}\text{C}$	液态水含量 /(g/m^3)	风 速 /(m/s)	碰撞率	实 测 覆冰厚度 / mm	计 算 覆冰厚度 / mm
1	-3.50	3.58	3.14	0.321 1	9.8	10.18
2	-2.10	3.77	2.5	0.269 8	7.8	7.46
3	-2.05	3.58	2.28	0.249 9	6.4	6.13
4	-0.50	4.66	2.78	0.293 9	10.3	10.69
5	-0.75	3.91	2.15	0.238 9	6.5	6.04

4 结论

论文针对覆冰导线碰撞率计算中的水滴尺寸参数进行了重点讨论,对比分析 MVD、VWD 及滴谱影响的碰撞率变化规律,并通过试验对比及工程应用进一步阐明 VWD 近似滴谱的可靠性。

(1)针对滴谱的尺寸分布,提出了基于体积权重直径(MVD)的碰撞率计算方法,比较了基于MVD和VWD的碰撞率计算结果,并将两者的计算结果与实际滴谱碰撞率进行对比分析。其结果表明,基于VWD的碰撞率计算精度较高,与实际滴谱碰撞率的相对误差较小,且误差波动范围较小。而基于MVD的碰撞率相对误差变化范围较大,且波动较大。由此阐明了论文采用的水滴尺寸参数用于近似滴谱碰撞率是可行的。

(2)基于数学理论验证了基于VWD的碰撞率

计算的可行性,并给出其适用范围。其结果表明,当碰撞率大于0且小于0.5时,基于VWD的碰撞率计算精度更高,而当碰撞率大于0.5时,则基于MVD的碰撞率更准确。当风速较小或导线直径很大时,实际碰撞率接近0,基于整个滴谱的碰撞率才能真正表达实际的覆冰过程。

(3)虽然基于MVD及VWD的碰撞率误差都大,但后者的准确率更高,表明后者计算的稳定性。在实际工程的覆冰预测中,可以根据环境参数的变化趋势,针对性地采用合理的水滴尺寸参数来表征滴谱的分布特征。虽然基于滴谱的碰撞率最准确,但计算效率较低,因此,当实际碰撞率不是接近0时,结合MVD和VWD的适用范围可实现分区碰撞率计算,得到更准确的碰撞率。

(4)根据试验过程中的碰撞率及覆冰质量对比结果、输电线路覆冰厚度预测可知,基于VWD的碰

撞率计算可真实地描述滴谱碰撞率,可用于实际覆冰增长过程的预测。

参考文献:

- [1] 易永亮,徐望圣,胡江,等. 计及电网停电风险的输电线路动态融冰决策方法[J]. 重庆大学学报,2017,40(05):7-18.
YI Yongliang, XU Wangsheng, HU Jiang, et al. A dynamic ice melting decision method for transmission lines considering outage risk of power grid[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(05):7-18.
- [2] MASOUD FARZANEH. Insulator flashover under icing conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014,21(05),1997-2011.
- [3] 胡军,尹立群,李振,等. 基于大数据挖掘技术的输变电设备故障诊断方法[J]. 高电压技术,2017,43(11):3690-3697.
HU Jun, YIN Liqun, LI Zhen, et al. Fault diagnosis method of transmission and transformation equipment based on big data mining technology[J]. High Voltage Engineering. 2017,43(11):3690-3697.
- [4] 严英杰,盛戈皞,陈玉峰,等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(01):52-59.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. An method for anomaly detection of state information of power equipment based on big data analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(01):52-59.
- [5] E. B. LÉBATTO, M. FARZANEH, E. P. LOZOWSKI. Conductor icing: comparison of a glaze icing model with experiments under severe laboratory conditions with moderate wind speed[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 113, 20-30.
- [6] J. HRABOVSKÝ, R. GOGOLA, J. Murín, et al. Modeling of ice-shedding from ACSR power line [J]. Journal of Mechanical Engineering-Strojnicky casopis, 2017, 67(01), 45-54.
- [7] 吴凯峰,刘万涛,李彦虎,等. 基于云计算的电力大数据分析技术与应用[J]. 中国电力,2015,48(02):111-116+127.
WU Kaifeng, LIU Wantao, LI Yanhu, et al. Cloud-computing based power big data analysis technology and its application [J]. Electric Power, 2015, 48(02):111-116+127.
- [8] 吴息,胡欣欣,王彬滨,等. 贵州地区导线覆冰的混合湍覆冰模型[J]. 自然灾害学报,2014,23(03):125-131.
WU Xi, HU Xinxin, WANG Binbin, et al. A hybrid ice coating model for wire icing in Guizhou area [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(03):125-131.
- [9] 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(05):1096-1100.
JIANG Xingliang, SHEN Qiang. Experimental research on influence of environmental parameters on the conductor icing thickness [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(05):1096-1100.
- [10] FU PING, 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.

- [11] 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.
- [12] MAKKONEN L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. Philosophical Transactions Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2000, 358(1776):2913-2939.
- [13] 张暕,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 Jian, HE Qing. Influence of conductor surface shape on collision coefficient during transmission line icing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13):209-217.
- [14] 蒋兴良,潘杨,汪泉霖,等. 基于等效直径的复合绝缘子覆冰特性与结构参数分析[J]. 电工技术学报,2017,32(07):190-196.
JIANG Xingliang, PAN Yang, WANG Quanlin, et al. Research on icing characteristics of composite insulator and structural parameter analysis based on equivalent diameter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(07):190-196.
- [15] 曹双和,陈百炼,赵立进,等. 导线覆冰厚度线径订正系数的理论计算分析[J]. 电力大数据,2018,21(09):71-79.
CAO Shuanghe, CHEN Bailian, ZHAO Lijin, et al. Heoretical calculation and analysis on diameter correction coefficients of the ice-thickness of conductor icing [J]. Power Grid Technology, 2018, 21(09):71-79.
- [16] 陈百炼,胡欣欣,陈林,等. 导线覆冰自动观测实验与覆冰过程分析[J]. 冰川冻土,2016,38(01):129-139.
CHEN Bailian, HU Xinxin, CHEN Lin, et al. Automatic observation experiment of ice coating on ice and analysis of ice coating process[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(01):129-139.
- [17] 朱永灿,郑心心,黄新波,等. 椭圆形覆冰导线的液滴碰撞特性[J]. 广东电力,2018,31(08):118-123.
ZHU Yongcan, ZHENG Xinxin, HUANG Xinbo, et al. Research on droplet collision characteristic of elliptical iced conductor [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(08):118-123.

收稿日期:2019-03-20

作者简介:



李汶江(1972),男,硕士,高级工程师,主要从事输电线路运维等方面的工作。

(本文责任编辑:范斌)

**Collision efficiency considering water droplet size parameter
during icing of transmission lines**

LI Wenjiang¹, ZHOU Shuangyong¹, ZOU Shuhan¹, TANG Juan¹, LV Beilei^{2,3}

(1. Maintenance Branch of Chongqing State Grid Power Company, Chongqing 400039, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University),
Ministry of Education, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing university, Chongqing 400045, China;)

Abstract: Collision rate is an important parameter that cannot be ignored in the prediction of icing growth of wires. The reasonable acquisition of this parameter is closely related to real-time environmental parameters such as wind speed, droplet diameter, temperature and humidity, atmospheric pressure and conductor diameter. The median diameter of droplet (MVD) is often used to approximate the whole droplet spectrum, but the calculation shows that the collision rate based on MVD differs greatly from the actual droplet spectrum collision rate for droplet distributions with different volume percentages. In this paper, a new volume weighted diameter (VWD) is proposed to approximate the droplet spectra. The collision rates of three droplet size parameters are analyzed. The collision rates based on VWD are closer to the actual droplet spectra, and the relative errors are smaller. The mathematical principle of higher accuracy of collision rate based on VWD is analyzed, and the application scope of this method is discussed. At the same time, through the comparative analysis of the test, the relative error between the calculated and measured collision rates is small, and the ice quality is close to each other, which verifies the reliability of the method for ice prediction, and further applies it to the ice thickness prediction of actual transmission lines.

Key words: high voltage transmission lines; icing; volume weighted diameter; collision efficiency