

基于旋转多圆柱的多功能人工气候试验室 水滴参数分析方法研究

贺兴容¹ 蒋一平¹ 蒋兴良² 胡建林²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 阐述了基于旋转多圆柱测量仪的多功能人工气候试验室水滴参数分析方法。对于二维圆柱的水滴碰撞特性进行了计算分析;对二维旋转圆柱的霜状冰结冰过程进行了数值模拟;根据水滴参数对旋转圆柱结冰量的影响,结合数学逼近的方法,利用试验所得到的数据对计算方法进行验证。结果表明:计算方法是正确的,可以实现对水滴参数的测量。

关键词: 旋转多圆柱测量仪;水滴参数;分析方法

Abstract: An analysis method of droplets parameters in multifunctional artificial climate chamber is presented based on rotating multicylinder measuring instrument. The impingement characteristics of the droplets in the two - dimension cylinder are calculated , and the rime ice accumulation in the two - dimension rotating cylinder is numerically simulated. According to the influence of droplets parameters on the icing accumulation of rotating cylinder and the mathematical approach methods , the calculation method is verified by the obtained results. Eventually , the results indicate that the proposed method is correct and can realize the measurement of droplets parameters.

Key words: rotating multicylinder measuring instrument; droplets parameters; analysis method

中图分类号: X830 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)05 - 0059 - 05

0 引言

在多功能人工气候试验室中进行覆冰试验水滴参数液态水含量(w)和平均体积直径(d)对于覆冰试验的冰形成有重要影响。进行覆冰试验的研究,开展导线防冰、抗冰试验,必须对水滴参数进行测量,从而对覆冰参数进行校正,确定真实覆冰试验条件。

水滴参数测量方法可以归为积冰法、热线法和液滴统计法三类。积冰法的应用仪旋转多圆柱为典型代表。热线法以 Johnson - Williams 热线仪为代表,液滴统计法以滑板式水滴收集器、光学测量仪为典型代表。旋转多圆柱测量仪成本低,而且测量精度可靠。下面引入试探法的思想,结合线性回归的数学逼近方法进行数据分析,可以快速分析出水滴参数。

1 旋转多圆柱结构和工作原理

图 1 为旋转多圆柱测量仪装配示意图。它的结构比较简单:一般由多个圆柱段装配而成,每个圆柱段直径不同,在进行覆冰试验时,将各圆柱段安装在一个由电机驱动的旋转圆盘上,安装在测量区域中,严格保证其轴线垂直于水流方向。当电机带动多个圆柱段以一定速度绕轴心运动时,圆柱表面收集的过冷却水滴会均匀地在其表面结冰,由于圆柱体始终保持旋转,因此结冰后的圆柱体仍然保持圆柱形,便于测量各圆柱结冰后的尺寸。试验结束后收回,拆下各个圆柱段,分别取下其工作段的积冰样本,进行称重,由各工作段的结冰量结果分析计算液态水含量和液滴直径大小。

采用旋转多圆柱测量仪的思路是:通过测量结冰量的结果,可以根据积冰量计算的原理反向推算出水滴参数。圆柱结冰量 m 与自由水流速度 V_0 、环

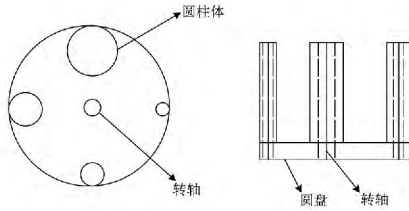


图1 旋转多圆柱测量装配示意图

环境温度 t_0 、环境压强 p_0 、结冰时间 t 、圆柱初始直径 D 、圆柱长度 L 以及两个水滴参数 w 和 d 的非线性关系为

$$m = f(V_0, t_0, p_0, t, D, L, w, d)$$

当旋转多圆柱测量仪由 N 个圆柱段装配而成时,各圆柱段的结冰量与结冰试验条件的非线性关系如下。

$$\begin{cases} m_1 = f(V_0, t_0, p_0, t, D_1, L_1, w, d) \\ m_2 = f(V_0, t_0, p_0, t, D_2, L_2, w, d) \\ \vdots \\ m_N = f(V_0, t_0, p_0, t, D_N, L_N, w, d) \end{cases}$$

各圆柱工作段结冰量 $m_i (i = 1 \sim N)$ 及结冰条件 V_0, t_0, p_0, t 均为人工多功能气候试验室的测量值。实际运用中为提高测量精度,一般选择 $N \geq 3$,此时, w 和 d 的求解成为一个超静态问题。

根据旋转多圆柱结冰测量结果的分析多功能人工气候试验室水滴参数的工作主要分为两大部分:
①实现旋转圆柱积冰过程的数值模拟;②利用试探法通过回归分析实现超静态方程组的最佳逼近求解。

2 圆柱水滴的碰撞计算

输电线路覆冰现象的发生是由于前方来流中携带的过冷却水滴,碰撞在导线表面引起的,因此进行覆冰计算的首要工作就是水滴碰撞情况的计算研究。

分析计算必须分为以下两步。

第1步:用解析法求解水滴从 $x = -\infty, y = y_0$ 处以与气流相同的速度 V_0 到达 $x = x_1$ 时的速度和轨迹坐标。

第2步:用数值分析法计算水滴从 $x = x_1, y = y_1$ 开始水滴的运动轨迹、速度及与圆柱体碰撞的切线,从而确定切线轨迹,进行水滴碰撞特性的评估。

模拟假设:①不考虑圆柱体的边缘效应,将结冰

做二维问题考虑;②由于圆柱旋转速度较慢,可忽略对水滴碰撞特性的影响;③气流场不受过冷却水滴运动的影响;④水滴在运动过程中无相变,一直保持球形;⑤水滴温度和物性在计算过程中保持不变。

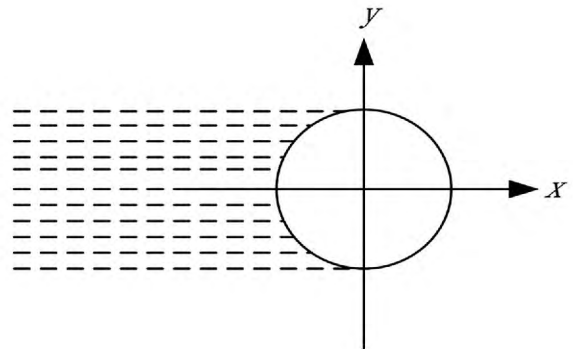


图2 坐标系中圆柱表面水滴碰撞轨迹示意图

2.1 初始条件的计算

对随气流运动的水滴进行受力分析,忽略水滴重力和浮力、加速的水滴表面的涡旋耗散、液滴的诱导质量等小量级因素的影响,那么水滴主要受空气粘性阻力的作用。在图2所示的坐标系中,建立运动方程为

$$\begin{cases} dx_x/d\tau = \frac{1}{k} \times \frac{c_F R_e}{24} (u_x - v_x) \\ dv_y/d\tau = \frac{1}{k} \times \frac{c_F R_e}{24} (u_y - v_y) \end{cases} \quad (1)$$

在旋转多圆柱体覆冰的过程中,水滴质量一般很小,且气流的速度不大,一般在 $0 \sim 3$ m/s 之间,则水滴的雷诺数 ($R_e = \rho_a |V - U| d / \mu$) 不可能太大。很显然在 y 值很大时,携带水滴的气流远离圆柱体,几乎不受圆柱体阻滞力的影响;此外,由于已经忽略重力对水滴产生的影响,因此,可以认为水滴与气流的速度差 $|V - U|$ 非常小。根据水滴与气流相对运动的雷诺数定义可知 $c_F R_e / 24 = 1$,从而可得运动方程为

$$\begin{cases} dv_x/d\tau = (u_x - v_x) / k \\ dv_y/d\tau = (u_y - v_y) / k \end{cases} \quad (2)$$

式中 u_x, u_y, v_x, v_y 分别表示空气和水滴在 x, y 方向相对于自由来流的分量, $v_x = dx/d\tau, v_y = dy/d\tau; d\tau$ 为运动速度为 V_0 的水滴前进圆柱体半径 R 的距离所需要的单位时间, $d\tau = V_0 t / R; k$ 为水滴惯性参数 $k = \rho_w V_0 d^2 / (18\mu R); t$ 为水滴运动时间; R 为圆柱体半径; d 为水滴直径; μ 为空气动力粘度; ρ_w 和 ρ_a 分别为水滴和空气的密度; V 和 U 分别为水滴和气流的速度矢量。

圆柱体周围的气流场速度用势流公式计算,并按幂级数展开为

$$\begin{cases} u_x = 1 + \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} = 1 - \frac{1}{x^2} \frac{1}{[1 + (y/x)^2]^2} \\ - \frac{y^2}{x^4} \frac{1}{[1 + (y/x)^2]^2} \\ = 1 - \frac{1}{x^2} + \frac{3y^2}{x^4} - \frac{5y^4}{x^6} + \dots \\ + (-1)^{n-1} \frac{(2n-1)y^{2(n-1)}}{x^{2n}} + \dots \\ u_y = -\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2} = -\frac{2y}{x^3} + \frac{4y^3}{x^5} - \frac{6y^5}{x^7} + \dots \\ + (-1)^n \frac{2ny^{2n-1}}{x^{2n+1}} + \dots \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)的 u_x 、 u_y 代入式(2)中,对方程组分别积分并略去 (k/x^3) 的高阶项,可得

$$\begin{cases} v_x = [1 - f(x/k)/x^2] + \{(k/x^3) \dots\} \\ v_y = y_0 \{ [1 - f(x/k)]/kx^2 + (2/x^5)(1 - 2y_0^2) \} \\ y = y_0 [1 + f(x/k)/x^2 + (1 - y_0^2)/x^4] \\ f(x/k) = 1 - 2!(k/x) + 3!(k/x)^2 \\ - 4!(k/x)^3 + \dots + (-1)^{n-1} n! (k/x)^{n-1} + \dots \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为计算水滴运动轨迹初始条件的解析解。用式(4)可分析计算任一 k 值下水滴从无穷远处运行到距圆柱体截面中心距离为 $x = x_1$ 处水滴的速度及位置。

2.2 水滴碰撞特性的评估

设 $\tau(=w_0/L) = 0$ 时刻,气流位于以上分析计算结果 $x = x_1$ 处。此时,气流已受扰动,水滴随气流沿 X 轴正方向运动过程中,轨迹和速度已发生变化,设初始条件为

$$\begin{cases} v_x(x_1, y_1, \rho) = v_1 \\ v_y(x_2, y_2, \rho) = v_2 \\ u_x(x_1, y_1, \rho) = u_1 \\ u_y(x_2, y_2, \rho) = u_1 \end{cases} \quad (5)$$

用分步积分法,可得任意时刻水滴速度及轨迹坐标。所有与圆柱相切的水滴轨迹中与圆柱相切的轨迹的 Y 坐标可确定水滴在圆柱体的碰撞特性。

3 旋转圆柱霜状结冰计算

在多功能人工气候试验室中进行覆冰试验时温

度较低,旋转圆柱体工作时表面结霜状冰。由于圆柱绕转轴做匀速运动,可以认为与圆柱迎风面发生碰撞的过冷却水滴在其表面均匀结冰,而使其外形一直保持为圆柱不变,霜状冰在圆柱外一层一层累积起来,圆柱的直径不断增加。

结霜状冰圆柱表面的局部热流关系如图3所示。

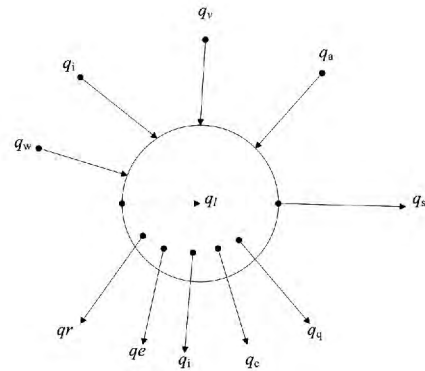


图3 结霜状冰圆柱表面的热流

圆柱表面的霜状冰结冰过程分为3个步骤:首先收集的水由环境温度 t_a 降至 0°C ;然后在 0°C 下,所有的收集水凝结成冰,放出凝结潜热;最后 0°C 的冰降至表面温度 t_s ,对外放热,也可能有部分冰在温度 t_s 下发生升华。因此结霜状冰的圆柱表面的热流有

(1) 对流热损失 q_c 与 q_q

$$q_c = 2\pi Rh(T_s - T_a) \quad (6)$$

$$q_q = 2\pi Rh_p(T_s - T_a) \quad (7)$$

式中 h 和 h_p 分别是覆冰自然对流和强制对流的换热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 为环境温度, K ; T_s 是覆冰动态平衡时固态冰表面温度,在湿增长过程中 $T_s = 273.15 \text{ K}$,而干增长过程中 $T_s < 273.15 \text{ K}$ 。

(2) 液水蒸发或冰升华产生的潜热损失 q_e

由液态水蒸发或冰的升华产生的潜热损失 q_e 为

$$q_e = 2\pi Rx [e(T_s) - e(T_a)] \quad (8)$$

式中 $e(T)$ 表示温度为 T 时覆冰表面的水面或冰面的饱和水压, kPa ; x 为蒸发或升华系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{kPa})$ 。

(3) 加热收集水到 0°C 的热流 q_l

$$q_l = 2R\alpha_1\alpha_2v\omega c_w T_F(T_F - T_a) \quad (9)$$

式中 c_w 为水的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; α_1 为碰撞率; α_2 为捕获率; v 为气流速度, m/s ; w 为液态水含量, g/m^3 ; T_F 为水滴凝结温度, K 。

(4) 水离开冰面带走热损失 q_f

$$q_l = 2R\alpha_1\alpha_2\omega v(1 - \alpha_3)(T_s - T_a) \quad (10)$$

式中 α_3 为水滴冻结率。

(5) 空气摩擦加热 q_v

$$q_v = 2h_p r_c v^2 / 2c_a \quad (11)$$

式中 r_c 为圆柱体表面局部恢复系数; c_a 为空气比热。

(6) 冰由 0 °C 冷却到表面温度时对表面加热

q_a

$$q_a = 2R\alpha_1\alpha_2\alpha_3\omega v c_i [(T_s + T_s) / 2] (T_F - T_s) \quad (12)$$

式中 c_i 为冰在膜温度下的比热。

(7) 收集水在 0 °C 结冰时释放的潜热 q_i

$$q_i = 2R\alpha_1\omega\alpha_2\alpha_3 v L_f \quad (13)$$

式中 L_f 为冰融化潜热 J/kg。

(8) 水滴动能引起的温升 q_w

$$q_w = \alpha_1\alpha_2\omega R v^3 \quad (14)$$

(9) 表面向外辐射热流 q_s

(10) 向内部的导热热流 q_1

由于表面温度 t_s 较低,向外辐射的散热热流 q_s 较小。可以忽略不计;冰层可以看作绝热材料,导热损失的热流 q_1 亦可忽略,所有热流的单位均为 J / (m² · s)。

圆柱体表面热流局部热平衡关系为

$$q_v + q_a + q_i + q_w = q_l + q_c + q_q + q_s + q_r \quad (15)$$

将上述公式(6) ~ (14) 代入公式(15)中,设圆柱体覆冰在迎风面增长,且忽略水滴反弹的影响,即取 $\alpha_2 = 1$ 并取温度的单位为 °C,则热平衡方程及其参量分析式为

$$\alpha_1\alpha_3\omega v L_f + h_p r_c v^2 / 2c_a + (\alpha\omega v) v^2 / 2 + \alpha_1\alpha_3\omega v c_i (T_F - T_a) = \alpha_1\omega v c_w (T_F - T_a) + \pi \{ (T_s - T_a) (h + h_p) + \chi [e(T_s - T_a)] \} + \alpha_1\omega v c_w (1 - \alpha_3) (T_s - T_a) \quad (16)$$

$I_m = \alpha_1\omega v$ 为圆柱体最大覆冰强度,它表示单位时间(s)、单位面积(m²)圆柱体表面的覆冰量, g / (m² · s)。

与水滴运动方程类似,已知时间段内的结冰量计算是一个常微分的初值问题。可以对旋转圆柱体霜状结冰质量进行数值求解。

4 旋转多圆柱数据分析与试验验证

由旋转圆柱的结冰特性分析可知,在常见的结

冰条件的范围内,结冰量 m 与液态水 w 含量由近似线性的关系。由于旋转多圆柱测量仪的各段圆柱暴露在相同的 w 环境下,所以当估计准确时,结冰量计算值 m 与测量值 m^* 的比例关系近似地反映了 w 估计值和实际值之间的比例关系。故试探法的核心思想如下。

① 先假设 2 个较小的 w 和 d 的初值;②根据已知结冰条件,计算各个圆柱体上的结冰量 m_i ;③由 N 个圆柱体工作段结冰量值和计算值得到 N 个坐标点(m_i^*, m_i),对其进行过原点的线性回归分析,计算回归线的斜率 k_1 以及线性相关系数 r_i ;④给 d 一个微小的增量 5 μm,重复步骤②的计算,如果线性相关系数 r_i 增加,则继续增大 d 值;当线性相关系数 r_i 开始减小,则做步骤⑤;⑤如果回归线斜率与 1 相差不大,则估计的 w 即为所求结果;否则以 w/k_1 为新一轮计算的 w 估计值,重复步骤②进行新一轮试探。

最终由试探法逐步逼近,即可得到使各个圆柱体工作段的结冰量测量结果 m_i^* 与计算结果 m_i 具有最佳直线拟合效果的水滴参数 w 和 d 。

4.1 试验验证

表 1 第 1 次试验各圆柱体参数分析结果

圆柱体	直径 /m	长度 /m	面积 /m ²	冰重 /g
1	0.042 68	0.102	0.013 64	54.64
2	0.034 9	0.102	0.011 18	48.36
3	0.029 5	0.102	0.009 44	42.10
4	0.025 1	0.102	0.008 04	38.86

试验条件:结冰时间为 18 000 s,风速为 3 m/s,气压为 98.7 kPa,环境温度为 -5 °C ~ -7 °C,冰表面温度为 0 °C。

由各个圆柱体工作段结冰量的结冰量计算值 m 与测量值 m^* 的线性拟合直线如图 4。

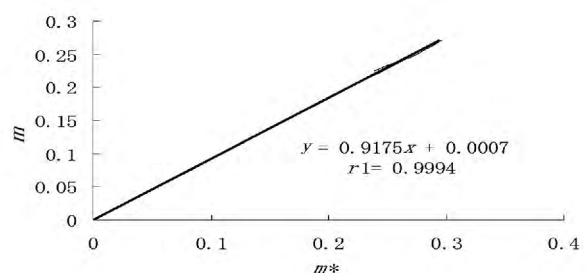


图 4 第 1 次结冰量计算值与监测值的线性拟合直线

其中相关系数 r_1 为 0.999 4,其值接近 1,表示线性相关程度很高。由此可以得到:水滴直径 d 为

50 μm 液态水含量为 3.2 g/m³。

控制多功能人工气候试验室的覆冰参数与第一次的试验条件基本一致,再进行一次试验,得到试验数据如表 2。

表 2 第 2 次试验各圆柱体参数分析结果

圆柱体	直径 /m	长度 /m	面积 /m ²	冰重 /g
1	0.042 68	0.102	0.013 64	60.71
2	0.034 9	0.102	0.011 18	48.97
3	0.029 5	0.102	0.009 44	39.92
4	0.025 1	0.102	0.008 04	37.54

由各个圆柱体工作段结冰量的结冰量计算值 m 与测量值 m^* 的线性拟合直线如图 5。

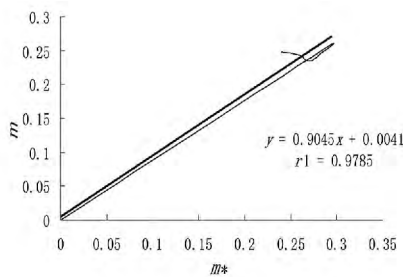


图 5 第 1 次试验结冰量计算值与测量值线性拟合直线
相关系数 r_1 为 0.9785,其值接近 1。

5 总 结

所提出的旋转多圆柱测量仪水滴参数分析方法,可以在试验过程中对圆柱水滴碰撞轨迹、圆柱局部结冰状态和水滴参数进行分析,能够满足中国对于多功能人工气候试验室覆冰试验的要求。通过与试验所得数据进行对比,验证了所提出方法的正确性。

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,2001.

[2] 孙才新,司马文霞,舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社,2002.

[3] 蒋兴良,张志劲,胡建林,等. 高海拔下不同伞形结构 750 kV 合成绝缘子短样交流覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12): 159-164.

[4] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学,1997.

[5] Al-Hamoudi I Y. Performance of High Voltage Insulators under Heavy Natural Icing Conditions [C]. Proceedings

of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance [S. l.], 1995: 25-31.

[6] Farzaneh M, J. Zhang and C. Volat. Effect of Insulator Diameter on AC Flashover Voltage of an Ice-covered Insulator String [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 26(1): 34-41.

[7] Lambeth P J. Variable Voltage Application for Insulator Icing Tests [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1988, 3(4): 2103-2111.

[8] Jiang Xingliang, Shaohua Wang, Zhang Zhijin, et al. Study on AC Flashover Performance and Discharge Process of Polluted and Iced IEC Standard Suspension Insulator String [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 472-480.

[9] Farzaneh M, Baker T. Insulator Icing Test Methods and Procedures: A Position Paper Prepared by the IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2002, 18(10): 1503-1515.

[10] 蒋兴良,苑吉河,孙才新. 绝缘子覆冰及其电气试验方法探讨[J]. 高电压技术,2005,31(5): 4-6.

[11] IEEE Std. 4-1995, IEEE standard techniques for high voltage testing [S].

[12] GB/T 4585-2004, 交流系统用高压绝缘子人工覆冰试验[S].

[13] Ramos N G, Campillo R M T, Naito K. A Study on the Characteristics of Various Conductive Contaminants Accumulated on High Voltage Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1842-1850.

[14] Zhou J G, Dong G, Imakoma T, et al. Contamination Performance of Outer-rib Type Suspension Insulators [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, Yokohama, Japan, 2002, 3: 2185-2190.

[15] 孙才新,舒立春,蒋兴良,等. 高海拔、覆冰、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 115-120.

[16] 司马文霞,蒋兴良,武利会,等. 低气压下覆冰染污 10 kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7): 122-126.

[17] 蒋兴良,武利会,司马文霞,等. 低气压下 XZP/XZWP₄-160 直流绝缘子覆冰闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6): 111-115.

(收稿日期: 2014-07-02)