

文章编号: 1000-8055(2007)02-0180-07

基于旋转多圆柱的冰风洞水滴 参数分析方法

朱春玲¹, 李宇钦², 张 泉³

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 北京航天科工集团, 北京 100000;

3. 陕西飞机工业(集团)有限公司, 汉中 723213)

摘 要: 阐述了基于旋转多圆柱测量仪的冰风洞水滴参数分析方法. 对二维圆柱的水滴撞击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, 编制了由旋转多圆柱测量结果分析计算冰风洞水滴参数的软件, 最后用国外试验数据对软件分析结果进行了验证, 结果表明: 计算方法正确, 可以实现冰风洞水滴参数快速测量.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 冰风洞; 液态水含量; 平均容积直径; 旋转多圆柱

中图分类号: V 245; TK 83

文献标识码: A

Analysis method of droplets parameters based on rotating multicylinder in an icing wind tunnel

ZHU Chunling¹, LI Yuchin², ZHANG Quan³

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100000, China;

3. Shaanxi Aircraft Industry (Group) Limited Company, Hanzhong 723213, China)

Abstract: An analysis method based on the droplets parameters calculated by the rotating multicylinder in an icing wind tunnel is presented. The impingement characteristic of the droplets on the two-dimension cylinder was calculated and the rime ice accumulation on the two-dimension rotating cylinder was numerically simulated. According to the influence to the icing accumulation of the rotating multicylinder and the mathematical approach methods, the software that uses the results derived from the rotating multicylinder measurements to analyze and calculate the droplets parameters in the icing wind tunnel was programmed. Eventually, the analytical result was validated by the overseas experimental data. The results indicate that the method in this paper is correct and the fast measurement of the droplets parameters in an icing wind tunnel can be achieved.

Key words: aerospace propulsion system; icing wind tunnel; liquid water content; medium volume diameter; rotating multicylinder

收稿日期: 2006-09-11; 修订日期: 2006-12-15

作者简介: 朱春玲(1968), 女, 江苏南京人, 南京航空航天大学航空宇航学院副教授, 硕士, 主要从事飞行器环境控制方面的研究.

冰风洞的 2 个水滴参数液态水含量(ω)和平均体积直径(d)对结冰试验的冰形结果有重要的影响. 进行大型冰风洞的研制, 开展冰风洞结冰试验, 必须对水滴参数进行测量, 从而对冰风洞喷雾系统进行校正, 确定真实结冰试验条件.

水滴参数测量方法可以归为积冰法、热线法和液滴统计法 3 类^[1,2]. 积冰法的应用以旋转单圆柱和旋转多圆柱为典型代表. 热线法以 Johnson-Williams 热线仪、CSIRO-King 热线仪为典型代表. 液滴统计法以滑板式水滴收集器、光学测量仪为典型代表. 常用的测量仪器中, 光学测量装置和旋转多圆柱测量仪都具备同时测量 2 个参数的能力. 光学测量仪涉及一套复杂精密的电子装置, 成本较高, 并且需要专业的标定, 而它用于水滴参数测量的精度也还有待进一步研究. 旋转多圆柱测量仪成本更低, 而测量精度也很可靠. 过去旋转多圆柱测量仪采用作图法, 通过人工对比曲线进行数据处理, 因此耗费时间长, 主要用于对时间没有太高要求的气象测量^[3]. 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, 可以大大提高处理速度, 能够满足冰风洞试验在几分钟内快速分析水滴参数的要求. 本文对基于旋转多圆柱测量仪的新的水滴参数分析方法进行了详细的阐述.

1 旋转多圆柱结构及工作原理

图 1 为旋转多圆柱(RMC)测量仪装配示意图^[4]. 它的结构比较简单: 一般由多个金属圆柱段装配而成, 每个圆柱的两端有 2 个法兰, 便于结冰后把各个圆柱工作段分解, 取出工作段冰柱称重. 进行结冰试验时各圆柱装在一个电机驱动的轴支架上, 伸入测量区域, 严格保证其轴线垂直于来流方向放置, 当电机带动多个圆柱体以一定的速度(80 ± 20) r/min 绕轴心旋转时, 圆柱表面收集的过冷水滴会均匀地在其表面结冰. 由于圆柱体始终在转动, 因此结冰后的圆柱外形仍保持圆柱形, 便于测量各圆柱结冰后的尺寸. 在结冰条件下暴露的时间应根据结冰强度而定, 一般为 1~ 5 min, 结冰强度越大, 相应的暴露时间要减小, 以防止结冰厚度超过连接处的法兰尺寸. 采集结束后收回, 拆开各个圆柱, 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

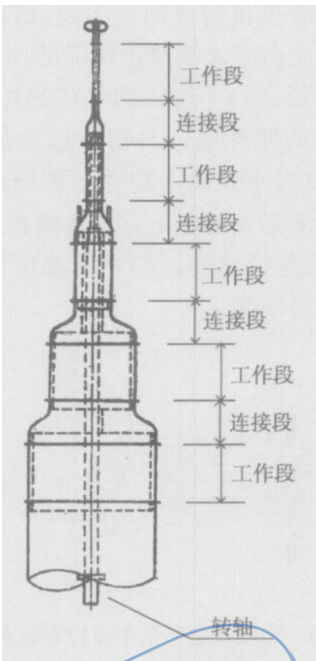


图 1 RMC 装配示意图

Fig. 1 RMC assembly sketch

推算出水滴参数. 圆柱结冰量 m 与自由来流速度 V_0 、环境温度 t_0 、环境压力 p_0 、结冰时间 t 、圆柱初始直径 D 、圆柱长度 L 以及 2 个水滴参数 ω 和 d 有非线性关系:

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

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

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

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 均为冰风洞试验测量值. 理论上讲只有 2 个未知数 ω 和 d , 只需要 2 个圆柱工作段的试验数据即可求解上述方程, 实际应用中为提高测量精度, 一般选择 $N \geq 3$, 此时, ω 与 d 的求解成为一个超静定问题.

用新的数据处理方法, 根据旋转多圆柱结冰测量结果分析冰风洞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定方程组的最佳逼近求解.

2 圆柱水滴撞击计算

结冰现象的发生是由于前方来流中携带的过

冷水滴撞击在飞机迎风面而引起, 因此进行结冰计算的首要工作是水滴撞击情况的计算研究.

模型假设: (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, 可忽略其对水滴撞击特性的影响; (3) 气流场不受过冷水滴运动的影响; (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.

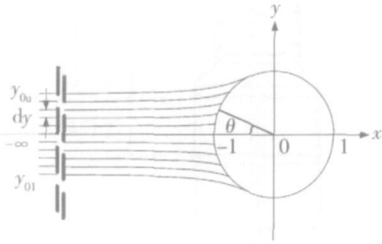


图 2 无因次坐标系中圆柱表面水滴撞击轨迹簇示意图
Fig. 2 Impingement track of water droplet in nondimensional coordinate system

对随气流运动的水滴进行受力分析, 忽略水滴所受重力和浮力、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, 建立无因次运动方程^[1]为:

$$\frac{du_x}{d\tau} = \frac{1}{K} \times \frac{C_D Re}{24} (v_x - u_x) \quad (1a)$$

$$\frac{du_y}{d\tau} = \frac{1}{K} \times \frac{C_D Re}{24} (v_y - u_y) \quad (1b)$$

式中: u_x, u_y, v_x, v_y 分别表示水滴和空气在 x, y 方向相对于自由来流速度 V_0 的无因次速度分量, $u_x = U_x/U_0, u_y = U_y/U_0$; $d\tau$ 为无因次时间, $d\tau = \frac{V_0 t}{R}$; K 为水滴惯性参数, $K = \frac{\rho_w V_0 d^2}{18\mu R}$; Re 为

水滴相对空气运动的雷诺数 $Re = \frac{\rho_a |V - U| d}{\mu}$; C_D

为水滴运动的粘性阻力系数, 根据不同的雷诺数范围由公式 (2a) ~ (2c) 计算. t 为水滴运动时间, R 为圆柱半径, 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 分别为气流和水滴的速度矢量.

小雷诺数时球体的粘性绕流阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 的关系为 $\frac{C_D Re}{24} = 1$, 但在与结冰相关的流动中雷诺数并不小, 因此采用修正的阻力系数公式^[5]:

$$\frac{C_D Re}{24} = 1 + 0.176 \times Re^{0.9925} \quad (0 \leq Re \leq 1) \quad (2a)$$

$$\frac{C_D Re}{24} = 1 + 0.1667 \times Re^{0.6712} \quad (1 \leq Re \leq 800) \quad (2b)$$

$$\frac{C_D Re}{24} = 1 + 0.02813 \times Re^{0.9323} \quad (Re > 800) \quad (2c)$$

圆柱周围的气流场速度用势流公式计算:

$$v_x = 1 + \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \quad (3)$$
$$v_y = -\frac{2xy}{(x^2 + y^2)^2}$$

通过水滴运动方程组, 求水滴轨迹坐标 (x, y) 实际是二阶常微分方程的初值问题, 可用差分方法求解单个水滴的运动轨迹, 进而得出水滴运动轨迹簇, 进行水滴撞击特性的评估.

评估水滴撞击特性的一个重要的无量纲参数就是: 总水收集系数 E_m , 它表示实际的表面撞击水量与最大可能 (整个迎风面) 收集水量的比值, 用于计算总的结冰量.

$$E_m = \frac{\omega V_0 (y_{0u} - y_{0l})}{2\omega V_0} = \frac{y_{0u} - y_{0l}}{2} \quad (4)$$

3 旋转圆柱霜状冰结冰计算^[6]

冰风洞试验时温度很低, 旋转圆柱工作时表面结霜状冰. 由于圆柱绕转轴做匀速旋转, 可以认为与圆柱迎风面发生撞击的过冷水滴在其表面均匀的结冰, 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.

结冰表面平均水收集率 $\overline{W}$ 为:

$$\overline{W} = \frac{W_m}{\pi R} = \frac{\omega V_0 E_m 2R}{\pi R} = \frac{2\omega V_0 E_m}{\pi} \quad (5)$$

结霜状冰圆柱表面的局部热流关系如图 3 所示.

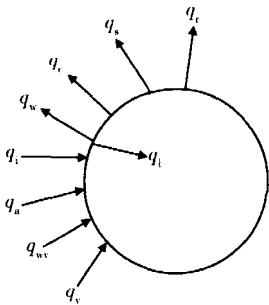


图 3 结霜状冰圆柱表面的热流
Fig. 3 Heat flux of frosted cylindrical surface

圆柱表面的霜状冰结冰过程分为3个步骤: 首先收集的水被温度为 t_s 的表面加热, 由环境温度 t_0 升至 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^[5,6]:

(1) 对流换热热流, 热流密度 q_c :

$$q_c = \alpha(t_s - t_0) \quad (6)$$

式中: α 为圆柱表面与气流的换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); t_s 为表面温度 ($^\circ\text{C}$); t_0 为环境温度 ($^\circ\text{C}$).

(2) 表面上的冰升华带走的热流, 热流密度 q_s :

$$q_s = W_s L_s \quad (7)$$

式中: W_s 为单位时间内单位面积上的冰升华量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); L_s 为表面温度 t_s 对应的冰的升华潜热 (J/kg).

(3) 撞击水滴的动能转化的热流, 热流密度 q_{wv} :

$$q_{wv} = W_{\beta} c_w \Delta t_w \quad (8)$$

式中: W_{β} 为局部水收集率 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); c_w 为水的比热容 ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$); Δt_w 为由于水滴动能转变成热能而引起的水滴温升 ($^\circ\text{C}$).

(4) 表面气动加热热流, 热流密度 q_v :

$$q_v = \alpha \Delta t_e = \alpha \left(r^* \frac{V_0^2}{2c_p} \right) \quad (9)$$

式中: Δt_e 为由高速气流的压缩引起的动力温升; r^* 为恢复系数.

(5) 加热收集水到 0°C 的热流, 热流密度 q_w :

$$q_w = W_{\beta} c_w (0 - t_0) \quad (10)$$

(6) 收集水在 0°C 结冰时释放的潜热热流, 热流密度 q_i :

$$q_i = W_{\beta} L_f \quad (11)$$

式中: L_f 为 0°C 时水的冻结潜热.

(7) 冰由 0°C 冷却到表面温度 t_s 时向表面放热热流, 热流密度 q_a :

$$q_a = W_{\beta} c_i (0 - t_s) \quad (12)$$

式中: c_i 为冰的比热容.

(8) 表面向外辐射热流, 热流密度 q_r .

(9) 向内部的导热热流, 热流密度 q_1 .

由于表面温度 t_s 较低, 向外辐射的散热热流密度 q_r 比较小, 可以忽略不计; 冰层可以看作绝热材料, 导热损失的热流密度 q_1 亦可忽略, 所有热流密度的单位均采用 W/m^2 .

圆柱表面热流局部热平衡关系为:

$$q_c + q_s + q_w + q_r + q_1 - q_i - q_a - q_{wv} - q_v = 0 \quad \text{即:}$$

$$q_c + q_s + q_w = q_i + q_a + q_{wv} + q_v \quad (13)$$

将上述公式(6)~(12)代入公式(13), 得:

$$\alpha(t_s - t_0) = W_{\beta} \frac{V_0^2}{2} + \alpha \left(r^* \frac{V_0^2}{2c_p} \right) +$$

$$W_{\beta} c_w t_0 + W_{\beta} (L_f - c_i t_s) - W_s L_s \quad (14)$$

在任一时刻, 都只有半个圆柱面正对着气流袭来的方向, 因此只有半个迎风表面受到气流中水滴的撞击, 发生着如上所述的热力学变化. 在该区域内考虑热平衡的平均效应, 对局部热平衡方程在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间内积分求平均, 得到迎风面的平均热平衡公式^[2]:

$$\bar{\alpha}(\bar{t}_s - t_0) = \bar{W} \frac{V_0^2}{2} + \bar{\alpha} \left(r^* \frac{V_0^2}{2c_p} \right) +$$

$$\bar{W} c_w t_0 + \bar{W} (L_f - c_i \bar{t}_s) - \bar{W}_s L_s \quad (15)$$

式中: $\bar{\alpha}$ 为结冰表面的平均对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); $\bar{t}_s$ 为结冰表面的平均温度 ($^\circ\text{C}$); $\bar{W}$ 为结冰表面单位时间内单位面积的平均水收集量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); $\bar{W}_s$ 为结冰表面单位时间内单位面积的平均冰升华量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

结冰表面平均水收集率 $\bar{W}$ 为:

$$\bar{W} = \frac{W_m}{\pi R} = \frac{\omega V_0 E_m 2R}{\pi R} = \frac{2\omega V_0 E_m}{\pi} \quad (16)$$

结冰表面平均冰升华率 $\bar{W}_s$ 为:

$$\bar{W}_s = \frac{\bar{\alpha} R_a}{c_p R_v p_0} (e_s - e_0) \quad (17)$$

结冰表面的平均对流换热系数为:

$$\bar{\alpha} = \frac{0.75 Re^{0.5} \lambda}{D} \quad (18)$$

那么根据来流温度、压力、速度等结冰条件, 由热平衡公式(15)可以迭代求解结冰表面温度 $\bar{t}_s$, 进而计算得出结冰表面平均冰升华率 $\bar{W}_s$.

则圆柱迎风表面单位时间内单位面积的平均结冰量 $\bar{W}_{ice}$ 为:

$$\bar{W}_{ice} = \bar{W} - \bar{W}_s \quad (19)$$

所以圆柱表面霜状冰结冰质量 m 的增长率为:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\bar{W}_{ice} L \pi D}{2} \quad (20)$$

式中: m 为圆柱结冰量; L 为圆柱长度; D 为圆柱直径; t 为结冰时间.

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, 同样可利用差分方法对旋转圆柱霜状冰结冰质量进行数值求解.

4 水滴参数对结冰量的影响

图4和图5分别表示了对应于某一固定的 ω 下, 旋转圆柱单位长度上的结冰量受 d 的影响情况, 计算的结冰条件为 $t_0 = -12^\circ\text{C}$, $p_0 =$

101 325 Pa, $V_0 = 85.4 \text{ m/s}$, 结冰时间 $t = 216 \text{ s}$. 从图中可以看出, 直径大的圆柱受 ω 和 d 的影响更大. 当圆柱直径比较小时, 如图 4 所示, 当 $\omega \leq 1$ 时, 对应于一定的 ω 值, 结冰量 m 几乎不随 d 的变化而变化; 当 $\omega > 1$ 时, 对应于一定的 ω 值, 仅当 $d \leq 30 \mu\text{m}$ 时结冰量 m 随 d 的增大而增大, 当 $d > 30 \mu\text{m}$ 时, 结冰量 m 几乎不随 d 的变化而变化, 此时, 在计算过程中, 结冰量受 d 的影响不大. 而对于图 5 所示的直径较大的情况, 旋转圆柱的结冰量随 d 和 ω 的增大而明显增大. 总之, 在相同的结冰条件下, 当 d 增大时, 旋转圆柱的总收集系数 E_m 增大, 因此结冰量也会增加.

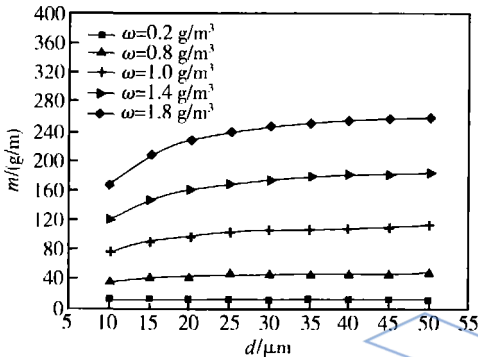


图 4 $D = 1.52 \text{ mm}$ 圆柱结冰量受 d 的影响
Fig. 4 Icing quantity influence with d on cylindrical surface ($D = 1.52 \text{ mm}$)

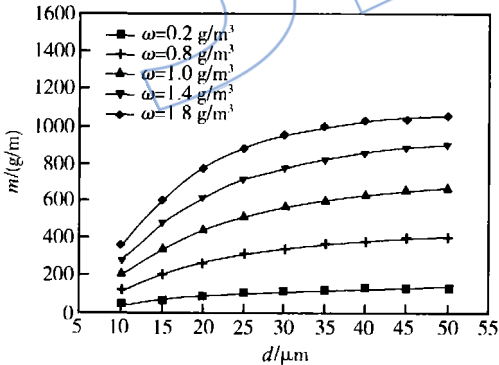


图 5 $D = 42.04 \text{ mm}$ 圆柱结冰量受 d 的影响
Fig. 5 Icing quantity influence with d on cylindrical surface ($D = 42.04 \text{ mm}$)

图 6 和图 7 分别表示了对应于某一固定的 d 下, 旋转圆柱单位长度上的结冰量受 ω 的影响情况, 计算的结冰条件为: $t_0 = -12 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$, $V_0 = 85.4 \text{ m/s}$, 结冰时间 $t = 216 \text{ s}$. 可以看出, 当 d 一定时, ω 对结冰量有很大的影响,

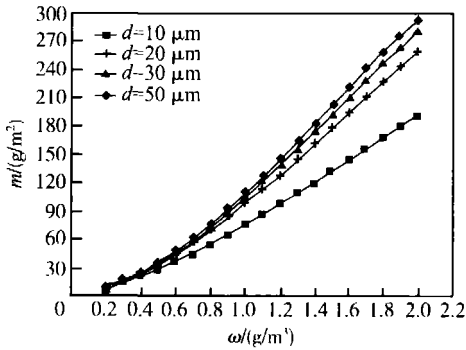


图 6 $D = 1.52 \text{ mm}$ 圆柱结冰量受 ω 的影响
Fig. 6 Icing quantity influence with ω on cylindrical surface ($D = 1.52 \text{ mm}$)

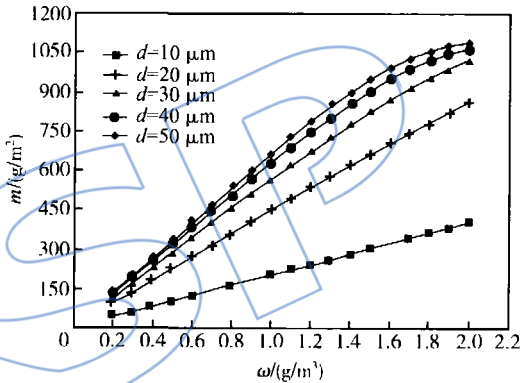


图 7 $D = 42.04 \text{ mm}$ 圆柱结冰量受 ω 的影响
Fig. 7 Icing quantity influence with ω on cylindrical surface ($D = 42.04 \text{ mm}$)

且圆柱直径越大, ω 对结冰量的影响就越大. 由圆柱表面平均水收集率 $\overline{W}$ 计算公式 (1b) 可知, $\overline{W}$ 与 ω 呈线性关系, 因此随着 ω 的增加圆柱结冰量迅速增大, 结冰量的计算结果与 ω 也近似呈线性增长的关系.

5 旋转多圆柱数据分析

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 ω 有近似线性的关系. 由于旋转多圆柱测量仪的各段圆柱暴露在相同的 ω 环境下, 所以当 d 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 ω 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^[4]:

- (1) 先假设 2 个较小的 ω 和 d 的初值;
- (2) 根据已知结冰条件, 计算各个圆柱上的结冰量 m_i ;
- (3) 由 N 个圆柱工作段结冰量的测量值和计

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_1 ; (4) 给 d 一个微小的增量 $0.01 \mu\text{m}$, 重复步骤 (2) 的计算, 如果线性相关系数 r_1 增加, 则继续加大 d 值; 当线性相关系数 r_1 开始减小, 则做步骤 (5); (5) 如果回归线的斜率 k_1 与 1 相差不大, 则估计的 ω 即为所求结果; 否则以 ω/k_1 为新一轮计算的 ω 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工作段的结冰测量结果 m_i^* 与计算结果 m_i 具有最佳直线拟合效果的水滴参数 ω 和 d 的结果。

6 水滴参数分析软件

本文利用上述方法, 编制了旋转多圆柱测量仪相应的水滴参数分析软件, 界面如图 8 所示. 输入冰风洞试验条件、所使用旋转多圆柱的结构尺寸及其结冰量测量结果, 可进行冰风洞水滴参数实时分析。



图 8 RMC 水滴参数分析界面

Fig. 8 Analysis interface of RMC water droplet parameter

利用 1991 年 Makkonen 在芬兰 Mount Washington 气象台的旋转多圆柱测量数据对编制的分析软件进行验证计算, 软件的水滴参数分析结果与 Makkonen 分析结果相比, 结果见表 1。

表 1 水滴参数分析结果对照表
Table 1 Comparison of water droplet parameter analysis result

圆柱序号	初始直径/mm	工作段长度/mm	结冰量测量值/g	Makkonen 结冰量计算值/g 及相对误差/%	本文结冰量计算值/g 及相对误差/%
1#	1.52	103.5	3.209	3.235 0.81	3.063 4.55
2#	5	90	3.834	3.741 2.43	3.73 2.71
3#	10.15	75	3.755	3.812 1.52	3.844 2.37
4#	21.02	75	4.077	4.187 2.70	4.258 4.44
5#	42.04	75	3.464	3.401 1.82	3.344 3.46
试验条件	结冰时间/s	2194	输出 $d/\mu\text{m}$	11.4	11.65
	风速/(m/s)	20.6	输出 $\omega(\text{g}/\text{m}^3)$	0.237	0.222
	来流温度/ $^{\circ}\text{C}$	9.6	结果 r_1	0.9996	0.9993
	来流压力/Pa	78166	结果 k_1	1.001564	0.992166

其中, 相关系数 $r_1^{[7]}$ 是判定无截距项的回归模型线性回归拟合优度的重要指标, 其值越接近于 1, 表示线性相关程度越大, 观测点越靠近拟合回归线, 因此 d 的估计值越接近真实值; k_1 是回归直线的斜率. 如果 r_1 接近于 1, 并且 k_1 也接近于 1, 则表示由水滴参数 ω 和 d 的估计值计算出的各圆柱段的结冰量和试验测量值有很好的吻合性, 即 2 个水滴参数的估计值均接近于真实值。

从表 1 中的数据可以看出: 本文的计算结果

与 Makkonen 分析结果相比, d 的相对误差仅为 2.19%, ω 的相对误差为 6.3%, 从而验证了本文所编制的软件的正确性。

7 结 论

本文根据旋转多圆柱测量仪水滴参数分析方法, 编制了 RMC 水滴分析软件, 可以在试验过程中对圆柱水滴撞击轨迹、圆柱局部结冰状态和水滴参数进行及时的分析, 大大地提高了数据处理

的速度,能够满足我国未来冰风洞试验在几分钟内快速分析水滴参数的要求. 通过与国外试验数据和分析结果对比,验证了本文所编制的软件的正确性. 如果进一步改进结冰量测量方法,例如可结合磁致伸缩材料冰率计结冰量探测原理,实现各个圆柱上结冰量的自动探测,即可能实现旋转多圆柱方法对水滴参数 ω 和 d 的自动化测量,得到新型的自动水滴参数测量仪器.

参考文献:

[1] Ide R F. Comparison of liquid water measurement techniques in an icing wind tunnel[R]. NASA/TM- 1999 209643, 1999.

[2] Mazin I P, Korolev A V, Heymfel A, et al. Thermodynamics of icing cylinder for measurements of liquid water content in supercooled clouds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, (4): 543-558.

[3] Brun R J, Lewis W, Perkins P, et al. Impingement of water

droplets on a cylinder and procedure for measuring liquid water content and droplets sizes in supercooled clouds by multicylinder method[R]. NACA Report 1215, 1955.

[4] Knezevici D, Kind R J, Oleskiw M M. Determination of median volume diameter (MVD) and liquid water content (LWC) by multiple rotating cylinders[R]. AIAA 2005 861, 2005.

[5] 裘燮纲, 韩凤华合编. 飞机防冰系统[M]. 航空专业教材编审组出版, 1985.

QIU Xiangang, HAN Fenghua. Aeroplane anti-icing system [M]. Published by Aeronautic Teaching Material Editing Group, 1985.

[6] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, (6): 929-938.

[7] 古扎拉蒂 D N. 计量经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.

Gujarati D N. Econometrics[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2000.

