

文章编号: 1000-6893(2002) 02-0173-04

水滴撞击特性的数值计算方法研究

杨 倩, 常士楠, 袁修干

(北京航空航天大学 505 教研室, 北京 100083)

STUDY ON NUMERICAL METHOD FOR DETERMINING THE DROPLET TRAJECTORIES

YANG Qian, CHANG Shi-nan, YUAN Xiu-gan

(Faculty 505, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 对水滴撞击特性的数值计算方法进行了研究。在对防冰部件流场进行计算的基础上, 通过对水滴所在单元的判断和单元内流场速度的插值求解以及水滴运动轨迹计算边界的判断, 采用差分法对水滴运动方程进行了数值求解, 得到了水滴运动轨迹, 从而确定了水滴的撞击极限、总收集系数和局部水收集系数等水滴撞击特性参数, 为飞机防冰系统的设计奠定了基础; 此外, 以发动机进气道的水滴撞击特性的计算为算例, 研究了飞行高度、飞行速度及水滴半径对水滴撞击特性的影响。

关键词: 防冰; 水滴撞击特性; 数值方法; 流场; 差分

中图分类号: V244.1+5; V211.3 文献标识码: A

Abstract: Numerical methods for determining the trajectories of the water droplets are studied for anti-icing system design. Based on the calculation of flowfield around the icing surface, through judging the droplet location and determining the insert value of flowfield velocity at the droplet location in a given cell and judging the boundary of the droplet trajectories, numerical results of the equations of motion for the droplets are presented by using a difference method, and the droplet trajectories are obtained. Then, the impact range on the inlet surface, the total collection efficiency, and the local collection efficiency are determined. In addition, the droplet trajectories of an engine inlet, as an example, are calculated, and the effects of flight height, flight velocity, and radius of water droplet on droplet trajectories are also investigated. These results show that the numerical method in this paper is effective.

Key words: anti-icing; trajectories of the water droplets; numerical method; flowfield; difference method

为防止飞机在结冰气象条件下飞行时结冰, 应设置结冰防护系统^[1], 主要的防冰位置有机翼、尾翼、风挡玻璃、发动机进气道、螺旋桨、重要测量传感头等。在设计这些部件的防冰系统时, 首先必须确定结冰区及结冰量, 这主要取决于水滴对部件表面的撞击特性。在我国的防冰系统设计中, 水滴撞击特性通常由图解法确定。而在国外, 随着计算技术的发展及水滴撞击特性有关实验数据的积累, 水滴撞击特性的数值计算方法已有较大的发展^[2~4]。本文对二维问题的水滴撞击特性的数值计算方法进行了研究, 在防冰部件流场计算的基础上, 采用差分法求解水滴运动方程, 确定水滴运动轨迹, 进而求得水滴绕形体表面运动的轨迹族, 直至求出水滴对形体表面的相切轨迹, 得到水滴撞击区域和形体表面上的局部水收集系数, 确定水滴的撞击特性。

1 水滴运动方程

在建立水滴运动方程时, 作如下假设: ①气流不因含有过冷水滴而影响气流流过型面的流场; ②水滴在运动过程中, 既不凝聚也不分解, 即水滴尺寸保持不变; ③温度、粘性、密度等介质参数, 在水滴运动中保持不变。

悬浮在运动空气中的水滴, 重力、表观质量力等与粘性阻力相比可忽略。粘性阻力由下式确定

$$D = 0.5C_D\rho_a(V - U)^2F_w \quad (1)$$

式中: F_w 为水滴迎风面积, $F_w = \pi r^2$ 。所以, 根据牛顿第二定律, 水滴的运动方程为

$$m_w du/dt = 0.5C_D\rho_a(V - U)^2F_w \quad (2)$$

将式(2)无量纲化后得到水滴运动方程^[5]

$$\left. \begin{aligned} du_x/d\tau &= (C_D Re_w/24)(\varphi Re_w)(v_x - u_x) \\ du_y/d\tau &= (C_D Re_w/24)(\varphi Re_w)(v_y - u_y) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: φ 为水滴尺寸系数, 表征物体特征尺寸和水滴尺寸之间的比例关系, 且 $\varphi = 9\rho_a L / (\rho_w r)$; Re_w

为水滴具有自由流速度时的雷诺数, $Re_w = 2rV_0\rho_a/\mu_0$

2 水滴运动轨迹的确定

(1) 水滴运动方程的数值求解 为便于编程计算,将水滴运动方程改写为

$$\left. \begin{aligned} dU_x/dt &= (3C_D Re_w/16)(\mu/(\rho_w r^2))(V_x - U_x) \\ dU_y/dt &= (3C_D Re_w/16)(\mu/(\rho_w r^2))(V_y - U_y) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: U_x, U_y, V_x, V_y 分别表示水滴和空气在 x, y 方向的速度; ρ_w 为水的密度; μ 为动力粘度; r 为水滴半径; 组合参数 $C_D Re_w$ 可由下式确定^[5]

$$C_D Re_w/24 = 1 + 0.197 Re_w^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re_w^{1.38} \quad (5)$$

Re_w 为水滴相对气流运动的雷诺数,且

$$Re_w = 2r|V - U|/\nu \quad (6)$$

式中: ν 为空气的运动粘度,且 $\nu = \mu/\rho_a$; $\rho_a = 3.484 \times 10^{-3} P_0/T_0$; $\mu = (2.686 \times 10^{-6} T_0^{1.5})/(1.8T_0 + 216)$ 。将水滴运动微分方程化成差分格式

$$\left. \begin{aligned} (U_x)_{i+1} - (U_x)_i &= K_i[(V_x)_i - (U_x)_i] \Delta t \\ (U_y)_{i+1} - (U_y)_i &= K_i[(V_y)_i - (U_y)_i] \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: 下标 x, y 表示气流及水滴在 x, y 方向的分速度; 下标 i 表示在第 i 时刻的速度,且

$$K_i = 4.5\mu[1 + 0.197(Re_w)_i^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4}(Re_w)_i^{1.38}] / (\rho_w r^2) \quad (8)$$

式中:

$$(Re_w)_i = (2r/\nu) \cdot$$

$$\sqrt{[(V_x)_i - (U_x)_i]^2 + [(V_y)_i - (U_y)_i]^2} \quad (9)$$

从流场左侧开始计算第 1 个水滴($x = 0, y = 0$)的运动轨迹。初始条件为: 在离防冰部件无穷远处,水滴和空气速度相等,即 $t = 0$ 时, $(U_x)_0 = (V_x)_0, (U_y)_0 = (V_y)_0$ 。当 $t = t_{i+1}$ 时, $x_{i+1} = x_i + \Delta t (U_x)_i; y_{i+1} = y_i + \Delta t (U_y)_i$ 。此时,流速 $(V_x)_{i+1}, (V_y)_{i+1}$ 可由坐标 (x_{i+1}, y_{i+1}) 判断水滴在流场中所处单元,然后由单元节点处的流速插值得到。如果水滴遇到流场右边界或防冰部件边界,则开始计算下一水滴($x = 0, y = y + \Delta y$)。为了保证计算精度, Δy 应较小。

(2) 水滴所处单元的判断 计算绕防冰部件空气流场时,网格单元为四边形。水滴运动轨迹的计算需要判断水滴在每一个 Δt 后所处单元位置,再插值得该点空气流速。其判断方法如下:

假设一个网格单元由 1, 2, 3, 4 这 4 个节点构成(点 1, 2, 3, 4 按逆时针方向排序)。它们的坐标

分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ 。当一点 (x_0, y_0) 在四边形内时,点 0, 1, 2 构成逆时针回路,同时,点 0, 3, 4 也构成逆时针回路。而当点 (x_0, y_0) 在四边形外时,如图 1 所示,点 0, 1, 2 构成逆时针回路,点 0, 3, 4 却构成顺时针回路。

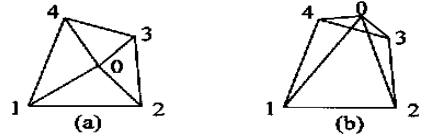


图 1 一点和任意四边形的相对位置关系

Fig. 1 Location relation between a point and a quadrangle

在编程时,对给定的任意 3 点 $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$,如果是逆时针排列的,则行列式

$$\begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix} > 0 \quad (10)$$

否则该行列式小于 0。因此,如果点 (x_0, y_0) 在四边形 1234 内时,有

$$\begin{vmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} > 0 \quad (11)$$

否则其乘积小于 0。

(3) 单元内流场速度的插值求解 假设一点 $A_0(x_0, y_0)$ 在四边形 $A_1A_2A_3A_4$ 内,如图 2。四边形每个顶点的空气流速分别为 U_1, U_2, U_3, U_4 。

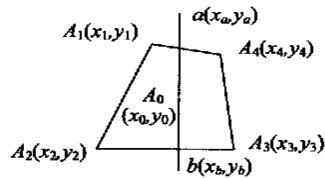


图 2 四边形内流场插值

Fig. 2 The insert value of flowfield velocity in quadrangle

过 A_0 点作一条与 x 轴垂直的直线交 A_1A_4, A_2A_3 分别为 a, b 两点。如图所示。首先对 A_1A_4, A_2A_3 在 x 方向插值求出 U_a 和 U_b 。

$$\begin{aligned} U_a &= (x_a - x_1)/(x_4 - x_1)U_1 + (x_4 - x_a)/(x_4 - x_1)U_4 \\ U_b &= (x_b - x_2)/(x_3 - x_2)U_2 + (x_3 - x_b)/(x_3 - x_2)U_3 \end{aligned}$$

然后对 ab 在 y 方向插值求出 U_0 。

$$U_0 = (y_a - y_0)/(y_a - y_b)U_a + (y_0 - y_b)/(y_a - y_b)U_b \quad (12)$$

式中: $y_a = [(x_a - x_1)/(x_4 - x_1)](y_4 - y_1) + y_1; y_b = [(x_b - x_2)/(x_3 - x_2)](y_3 - y_2) + y_2$ 。

(4) 当水滴运动至防冰部件边界或流场右边界时, 结束该条运动轨迹的计算, 否则继续下一个时间步的计算。

①在防冰部件边界上, 设各点 1, 2, ..., i, i+1, ..., n 按逆时针排列, 如水滴运动到防冰部件边界的内部, 则水滴所在位置的坐标(x₀, y₀)与防冰部件边界上任意相邻两点(x_i, y_i)和(x_{i+1}, y_{i+1})构成的行列式

$$\begin{vmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix} > 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (13)$$

否则水滴还没到防冰部件边界。

②当水滴位置横坐标大于流场右边界横坐标时, 水滴到达流场右边界。

3 水滴撞击特性的确定

求得水滴运动轨迹之后, 可以确定防冰部件的水滴撞击特性参数, 用于防冰系统的设计。

(1) 水滴撞击极限 水滴撞击极限(S_m)是指飞机在飞行中, 水滴所能撞击在形体表面上最远位置的表面长度与形体的特性尺寸之比, 以此表征水滴撞击范围的大小。对于本文的发动机进气道的水滴撞击极限是指水滴与进气道表面上、下两条相切轨迹所包围的表面长度 S 与厚度 L (这里 L = 120mm, 见图 3) 之比。

$$S_m = S/L \quad (14)$$

(2) 总收集系数 总收集系数(E_m)是指形体表面上实际水撞击率 W_m 和其可能的最大水收集系数 W_{max} 之比。

$$E_m = W_m/W_{max} \quad (15)$$

对机翼而言^[5],

$W_m = V_0(y_{0u} - y_{0l})\omega$, $W_{max} = V_0(y_u - y_l)\omega$ 对轴对称部件 (如发动机进气道), W_m 和 W_{max} 据其定义可用以下关系式表示

$W_m = \pi V_0(y_{0u}^2 - y_{0l}^2)\omega$, $W_{max} = \pi V_0(y_u^2 - y_l^2)\omega$ 式中: ω 为云层液态水含量 (g/m³); y_{0u}, y_{0l} 是与撞击极限相对应的水滴起始处的纵坐标; y_u, y_l 是形体表面投影纵坐标的最大和最小值。所以

$$E_m = (y_{0u}^2 - y_{0l}^2)/(y_u^2 - y_l^2) \quad (16)$$

(3) 局部水收集系数 引入局部水收集系数 β 表征撞击水量沿表面的分布情况, 即微元表面的实际水收集率 W_β 与微元表面最大可能的水收集率 W_{βmax} 之比。

$$\beta = W_\beta/W_{\beta max} \quad (17)$$

对机翼而言, $W_\beta = V_0(dy_{0u} - dy_{0l})\omega$, $W_{\beta max} =$

$V_0(dy_u - dy_l)\omega$ 对轴对称部件, 有 $W_\beta = \pi V_0(dy_{0u}^2 - dy_{0l}^2)\omega$, $W_{\beta max} = \pi V_0(dy_u^2 - dy_l^2)\omega$ 。式中: dy_{0u}, dy_{0l} 是微元表面上、下两条相交轨迹的水滴起始处的纵坐标; dy_u, dy_l 是微元表面上、下交点处的纵坐标。

4 水滴撞击特性分析算例

(1) 发动机进气道几何模型及网格划分 可处理为轴对称问题, 取一个截面进行分析, 如图 3 所示。其流场计算网格划分结果见图 4。

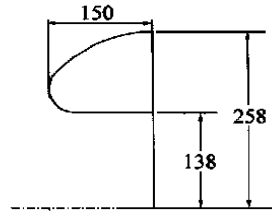


图 3 进气道外形

Fig. 3 The figure of an engine inlet

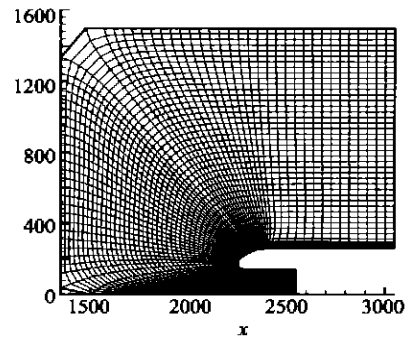


图 4 进气道网格划分

Fig. 4 The gridding partition of the engine inlet

(2) 流场计算 在划分网格之后, 用 Star CD 软件进行流场计算。该流场为二维轴对称型流场, 且流动为定常、不可压、粘性流动。设置流场计算区域的边界条件如下: 前方及上方边界处的流速取无穷远来流速度即飞机飞行速度, 压力为大气压力。右边界处为出口边界条件。下边界处为对称边界条件。下方发动机进气口处给出质量流量 \dot{m} 。进气道表面的附面层取壁面边界条件。

(3) 水滴撞击特性计算结果分析 表 1 给出了飞行速度、飞行高度和水滴半径对撞击极限和总收集系数的影响, 图 5~图 7 分别给出了飞行速度、飞行高度和水滴半径对局部水收集系数 β 的影响, 图中横坐标 s 为水滴撞击点相对进气道最前缘处的弧长 (s 为负时表示撞击点在参考点的上方)。

表 1 不同飞行、气象条件下 S_m 和 E_m
Table 1 S_m and E_m under different flight and weather conditions

算例	H/m	$V/(km \cdot h^{-1})$	$r/\mu m$	S_m	E_m
1	1000	260	5	0.3454	0.0702
2	1000	260	20	1.1930	0.4637
3	1000	260	50	1.6895	0.7722
4	2000	200	20	1.3351	0.7315
5	2000	260	20	1.2689	0.5449
6	2000	320	20	1.2191	0.4399
7	3000	260	20	1.3007	0.6295

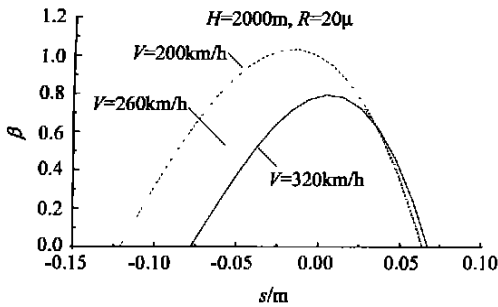


图 5 飞行速度对局部水收集系数的影响

Fig. 5 Effect of velocity on local collection efficiency

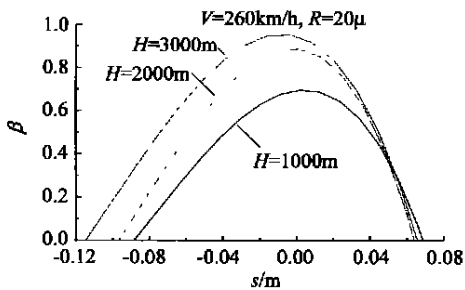


图 6 飞行高度对局部水收集系数的影响

Fig. 6 Effect of height on local collection efficiency

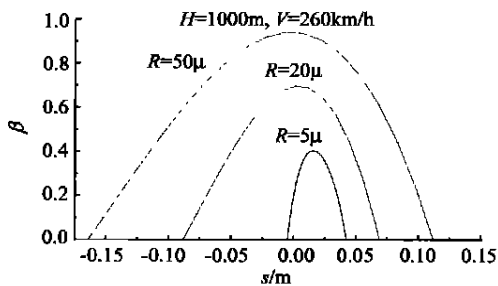


图 7 水滴半径对局部水收集系数的影响

Fig. 7 Effect of droplet radius on local collection efficiency

从表 1 的算例 4~6, 可以看出随着飞行速度 V 增大, S_m 和 E_m 有所减小, 即总的水滴撞击范围和撞击量减小。从算例 2, 5 和算例 7, 可以看出随着飞行高度 H 增大, S_m 和 E_m 有所增大。从算例 1~3 可知随着 R 增大, S_m 和 E_m 明显增大。这是因为 V 较大或 R 较小时, 水滴的惯性力相对较小而粘性阻力相对较大, 而 H 较小时, 空气的密度 ρ 和动力粘度 μ 都增大, 水滴的惯性力也相对减

小, 因而偏离流线小, 水滴大部分绕过了进气道表面(见图 8), 所以总的撞击范围减小, 而相同量的水滴撞击到进气道表面的范围却增大, 从而 β 值减小。反之, 水滴惯性较大时, 水滴运动轨迹受流场影响较小, 几乎作直线运动撞到了进气道表面(见图 9), 因此总的撞击范围增大, 即 S_m 增大, 而且撞击到进气道表面的水量也增加, 从而 β 值增大。

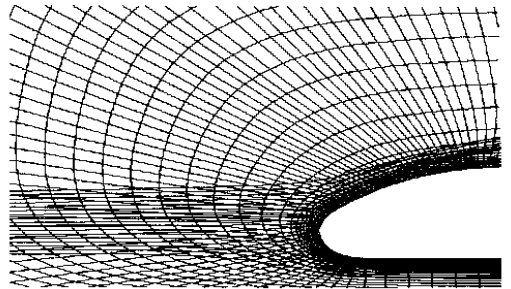


图 8 $r = 5\mu m$ 时的水滴运动轨迹

Fig. 8 Droplet trajectories when $r = 5\mu m$

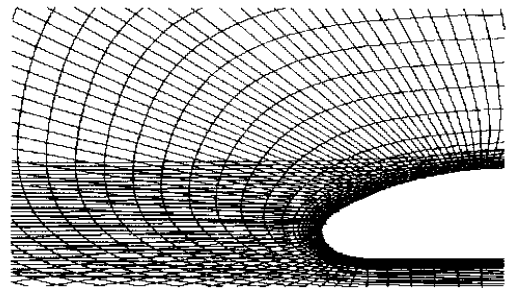


图 9 $r = 50\mu m$ 时的水滴运动轨迹

Fig. 9 Droplet trajectories when $r = 50\mu m$

参 考 文 献

- [1] Tabrizi A H, Keshock E G. Modeling of surface blowing as an anti-icing technique for aircraft surfaces[J]. Journal of Aircraft, 1988, 25(4): 343- 348.
- [2] Thomas S K, Cassoni R P, Charles D M. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(5): 841- 854.
- [3] Ross R. Thermodynamic performance of an airplane wing leading edge anti-icing system [J]. Journal of Aircraft, 1984, 21(7): 536- 537.
- [4] 裘燮纲, 韩凤华. 飞机防冰系统(第一版)[M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985.

(Qiu X G, Han F H. Aircraft anti-icing system (First-edition) [M]. Beijing: Compilation and Examination Group of Aero Specialized Teaching Materials, 1985.)

作者简介:



杨倩女, 23岁, 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系硕士研究生。主要研究方向: 飞行器防冰系统设计研究。

(责任编辑: 吴小勇)