

文章编号: 1000-8055(2010)09-2064-06

降雨条件下翼型的气动特性

张瑞民, 曹义华
(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用计算流体力学方法对降雨条件下翼型的气动特性进行了研究. 通过求解定常可压的 Navier-Stokes 方程来计算流场, 采用拉格朗日法对流场中的雨滴轨迹进行了模拟跟踪, 得到了翼型表面的雨滴收集率; 建立了水膜层数学模型, 并假定水膜层沿着翼型表面的法向方向增长, 预测了降雨引起的翼型外形的变化, 并得到了水膜层表面的粗糙度高度; 采用 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 两方程湍流模型结合增强的壁面函数, 研究了降雨对翼型气动特性的影响. 结果表明, 在低迎角范围内, 降雨对翼型的升力系数和阻力系数影响很小; 当达到失速迎角后, 降雨会引起上翼面边界层气流的提前分离, 造成翼型气动性能的严重损失.

关 键 词: 降雨; 翼型; 流场特性; 水膜层; 粗糙度; 收集率

中图分类号: V211.4 文献标识码: A

Study of aerodynamic characteristics of an airfoil in rain

ZHANG Ruimin, CAO Yihua
(School of Aeronautic Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The aerodynamic characteristics of an airfoil in rain were studied using computational fluid dynamics method. The flow field was calculated by solving the steady compressible Navier-Stokes equations. The trajectories of raindrops in the flow field were tracked with Lagrange method and the collection efficiency of airfoil surfaces was obtained. The model of water film was also set up, then assuming that water film accumulates layer-by-layer in the direction normal to the airfoil surface and the changes of airfoil shape due to rain and the roughness height on water film were predicted. The influence of rain on aerodynamic characteristics of the airfoil was studied using $k-\omega$ SST (shear stress transport) two equations turbulence model with enhanced wall treatment. The results show that rain effect on the lift coefficient and drag coefficient of the airfoil is little within the low angles of attack; rain can cause boundary airflow separation on upper surface and thus result in serious aerodynamic penalties when the airfoil is nearly stalled.

Key words: rain; airfoil; flow field characteristics; water film; roughness; collection efficiency

降雨是威胁飞机飞行安全的重要天气因素. 当飞机在大雨中飞行时, 部分雨滴会聚集在机翼表面形成稀薄的水膜层, 从而增加了机翼的厚度; 当水膜层受到后续雨滴的撞击时, 其表面会有大量的凹坑出现, 此外, 受边界层气流的摩擦作用, 水膜层表面还会产生波纹. 无论是凹坑还是波纹, 都类似于当量粗糙度, 严重影响机翼表面的光滑性, 改变了翼型周围的流场特性, 造成机翼的升力系数减小, 阻力系数增加^[1-3].

关于降雨条件下机翼性能的气动特性研究,

通常采用试验测试和数值模拟等方法. 在早期, 国外所采用的主要研究方法是模型风洞试验, 一方面通过雨水喷洒装置来模拟实际的降雨环境, 另一方面通过测量设备来确定模型的气动参数^[4-7]. 随着计算机技术和计算流体力学的发展, 数值模拟研究也逐渐被用于这一研究上来. 应用于气-液两相流的数值模拟方法一般有两种, 即拉格朗日轨迹跟踪法和欧拉两相流法. 欧拉两相流是将分布在流场中的液滴看作与气流相互渗透的拟流体, 求解每一相的守恒方程. 拉格朗日法通过求解液滴的运动方程来对流场中的液滴运动轨迹进行模拟跟踪. Calarese 和 Hankey^[8] 采用欧拉法对降雨条件下翼型的气动特性进行了数值模拟研究; Valentine 和 Decker^[9] 采用拉格朗日法对雨滴撞击翼型表面后的溅射特性进行了初步研究. 国内关于降雨研究起步较晚, 数值模拟近几年才出现, 宛同等人^[10] 采用动网格技术模拟了降雨条件下表面水膜层粗糙度对翼型气动性能的影响. 随着我国大飞机事业的发展以及航空界对飞机全天候飞行需求的提高, 开展降雨条件下翼型的气动特性研究意义重大. 本文采用拉格朗日轨迹跟踪法和 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 两方程湍流模型结合增强的壁面函数处理, 对降雨条件下翼型的气动特性进行了研究.

1 计算过程

1.1 网格生成

网格生成是进行翼型流场计算的基础. 本文针对 NACA 64-210 翼型, 采用适合求解 N-S (Navier-Stokes) 方程的 C 型结构化网格. 为了避免边界的干扰, 计算边界到翼型表面的距离为弦长的 20 倍. 为提高计算精度, 翼面附近网格进行局部加密, 第一层网格距壁面 1×10^{-5} . 翼型周围的网格划分见图 1.

1.2 净翼型流场计算

流场计算采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法来求解定常可压黏流的时均 N-S 方程. 边界条件选用压力远场和无滑移壁面边界条件; 湍流模型取 $k-\omega$ SST 两方程模型; 方程的离散采用有限体积法, 为了保证求解稳定和收敛, 所有求解方程的对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式.

为了将风洞测试结果推向实际的飞行环境, 早期的降雨风洞试验在翼型前缘附近进行强制转

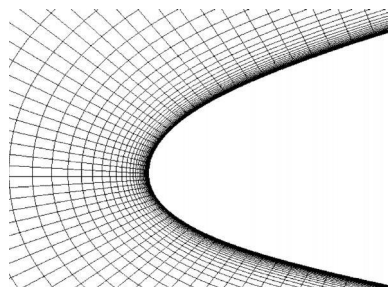


图1 翼型周围网格的局部放大图

Fig. 1 Partial enlarged drawing of mesh of an airfoil

捩, 以增加有效的雷诺数. 然而, 近来的试验研究表明^[7], 在降雨条件下, 在翼型前缘附近进行强制转捩并不能增加有效的弦长雷诺数, 无法改进降雨条件下的自然飞行和风洞测试数据之间的关系. 故本文在研究过程中选用全湍流模型.

1.3 雨滴收集率计算

本文采用拉格朗日法对雨滴的运动轨迹进行模拟跟踪. 在计算过程中, 主要考虑重力和阻力对雨滴运动的影响; 同时假设大气中的雨滴不影响翼型周围的速度场, 雨滴在运动过程中不发生变形、聚合或分裂、冷却或蒸发, 雨滴近似为球体, 雨滴的初始速度与来流速度相等.

根据牛顿第二定律, 雨滴的运动轨迹方程为

$$m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = (\rho_w - \rho_a) v_d g + \frac{1}{2} \rho_a A_d C_d |u - u_d| (u - u_d) \quad (1)$$

式中 m_d 为雨滴质量, x_d 为水滴位移, ρ_a 为空气密度, ρ_w 为水的密度, g 为重力加速度, A_d 为雨滴的迎风面积, v_d 为雨滴体积, C_d 为雨滴的阻力系数, u 为当地气流速度, u_d 为雨滴速度.

在气流场中球的阻力系数是 $C_d = \frac{24}{Re}$, 而在降雨研究中采用修正的阻力系数, 如下所示:

$$\frac{C_d Re}{24} = 1.0 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38} \quad (2)$$

其中 $Re = \rho_a |u - u_d| d_{ave} / \mu_a$, 为雨滴相当于气流运动的雷诺数; d_{ave} 为雨滴的代数平均直径, 单位为 mm; μ_a 为气流的动力黏度. 故方程 (1) 可变为

$$\frac{d^2 x_d}{dt^2} + \frac{C_d Re}{24} \frac{18 \mu}{d_{ave}^2 \rho_w} \frac{dx_d}{dt} = \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_w} g + \frac{C_d Re}{24} \frac{18 \mu}{d_{ave}^2 \rho_w} u_d \quad (3)$$

雨滴运动方程的求解可看作一阶常微分方程的初

值问题, 可通过四阶龙格-库塔法来求解。

将翼型的上下撞击极限之间沿纵向均分成 n 等分, 根据求出的相应运动轨迹, 雨滴的局部收集率 β 可表示为

$$\beta = dy_i/ds_i \quad (1 \leq i \leq n) \quad (4)$$

式中 dy_i , ds_i 分别表示相邻两条轨迹之间起始位置纵向距离以及翼面微元弧长。

1.4 水膜层厚度和粗糙度高度计算

1.4.1 水膜层厚度

本文在建立数学模型过程中, 忽略了压力梯度和其他热力学方面的影响, 则每一段弧长内达到平衡的水膜层厚度可表示为^[11]

$$h_i = \frac{m_i + (dm_i/dt) \Delta t}{\rho_w A} \quad (5)$$

式中

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{\rho_w}{A} \int_{x=0}^{x=h} u dz - \frac{\rho_w}{A} \int_{x=0}^{x=h} u_w dz + \frac{\partial m_i}{\partial t} \quad (6)$$

代表每一段弧长内的质量平衡。 u_w 为水流层的流动速度, 假设呈线性分布, 由气流的剪切应力和水的黏性特性来确定; 式(6)右边的第一项和第二项分别表示弧长为 ds_i 的第 i 段内的水流进、出流量; 第三项代表进入第 i 段内的雨滴质量流量, 即

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = L_w \cdot \beta \cdot V_{\text{free}} \quad (7)$$

式中 V_{free} 为自由气流速度; L_w 为液态水含量, 单位为 g/m^3 , 它与降雨率之间的关系可表示为^[9,10]

$$L_w = 0.054 R_r^{0.84} \quad (8)$$

式中 R_r 为降雨率, 单位为 mm/h 。

通常, 雨滴的最大直径不超过 $6 mm$ ^[12]。本文在研究过程中取连续的雨滴直径分布代数平均值, 表达式如下:

$$d_{ave} = \frac{\int D_p N(D_p) dD_p}{N(D_p)} \quad (9)$$

其中 $N(D_p)$ 为雨滴的尺寸分布函数; D_p 为实际雨滴的直径, 单位为 mm ; 目前应用最广泛的是由 Marshall 等人在 1948 年给出的^[13], 即

$$N(D_p) = N_0 e^{-I D_p} \quad (10)$$

其中 $N_0 = 1400$, 单位为 $m^{-3} mm^{-1}$; $I = n R_r^m$, 单位为 mm^{-1} , 其中, n 和 m 为无量纲经验常数, 大小分别为 3.0 和 -0.21 ^[4,14]。

1.4.2 水膜层粗糙度

实验研究表明, 一旦水滴撞击到稀薄的水膜层上便会形成凹坑, 原来滞留在凹坑里的水全部

形成凸膜层^[15]。

本文关于水膜层粗糙度的计算基于 Macklin 和 Metaxas 的实验研究, 假设雨滴撞击翼型表面的水流层后形成圆柱形凸膜层。

要评估雨滴撞击翼型表面形成的凸膜层, 须确定三个特征参数, 即凸膜层半径 R_c 、凸膜层的平均高度 $\bar{k}$ 以及凸膜层之间的平均间隔距离 $\bar{D}$, 可分别表示为^[11]

$$R_c = R_d \cdot R_c^* \quad (11)$$

$$\bar{k} = \frac{\int_{D=0}^{\infty} k(D) N(D) dD}{\int_{D=0}^{\infty} N(D) dD} \quad (12)$$

和

$$\bar{D} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (13)$$

式中 R_d 为雨滴半径; R_c^* 为无因次凸膜层半径, $k(D)$ 为雨滴撞击形成的凸膜层的平均高度, N 为给定时间内雨滴撞击形成的凸膜层总数, 均由试验研究中的经验关系来确定。

根据 dirling 的研究, 当量砂粒粗糙度高度可表示为凸膜层平均高度 $\bar{k}$ 的函数, 即^[11]

$$\begin{cases} k_s = 0.0164 \Lambda^{3.78} \bar{k}, & \Lambda \leq 4.93 \\ k_s = 139 \Lambda^{-1.9} \bar{k}, & \Lambda \geq 4.93 \end{cases} \quad (14)$$

式中 Λ 为当量砂粒粗糙度高度的关系参数, 它与间隔参数 $D/7\bar{k}$ 以及沿自由流方向的凸形薄膜的投影面积 A_p 和迎风面积 A_s 的比值有关, 即

$$\Lambda = (A_p/A_s)^{-\frac{4}{3}} D/7\bar{k} \quad (15)$$

1.5 降雨条件下翼型的气动特性计算

根据预测的水膜层厚度, 使其沿翼型表面的法向方向增长, 从而生成得到降雨后的翼型外形。为考虑水膜层粗糙度的影响, 本文采用带有增强壁面函数的 $k-\omega$ 模型。在翼型表面, ω 为当量粗糙度高度的函数, 可表示为^[16]

$$\omega = \left[\frac{u_\tau^2}{\nu} \right] S_r \quad (16)$$

式中 u_τ 为壁面的剪切速度, ν 为空气的运动黏度, S_r 为粗糙度因子, 是当量粗糙度高度的函数, 可表示为

$$S_r = \begin{cases} (50/k_s^+)^2, & k_s^+ < 25 \\ 100/k_s^+, & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (17)$$

式中 $k_s^+ = \frac{k_s u_\tau}{\nu}$, k_s 即为当量砂粒粗糙高度。

2 算例与分析

以 NACA 64210 翼型为例, 对净翼型气动

数据进行了验证, 预测了不同的降雨率和迎角下翼型的外形变化, 并分别计算了无雨和有雨条件下翼型的升力和阻力系数, 计算条件如表 1 所示.

表 1 计算条件
Table 1 Computational conditions

变量	数值
降雨率/(mm/h)	0/ 424/ 1486
液态水含量/(g/m ³)	0/ 8. 7/ 25
雨滴平均直径/ mm	1. 15
自由马赫数	0. 128 88
空气密度/(kg/m ³)	1. 225
翼型弦长/ m	1
雷诺数/ 10 ⁶	3. 0

2.1 净翼型气动数据的验证

图 2 和图 3 分别给出了净翼型的升力系数和阻力系数随迎角的变化关系, 并与风洞试验结果进行了对比. 从图中可以看出, 本文的计算结果与文献[17] 的试验结果吻合较好.

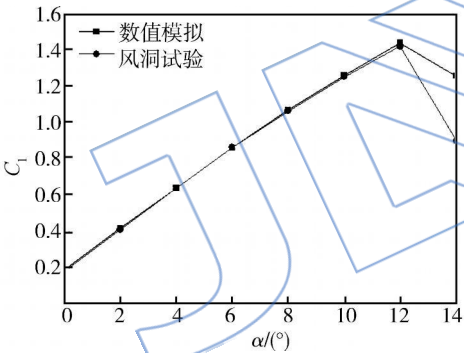


图 2 升力系数随迎角的变化

Fig.2 Lift coefficients vs. angle of attack

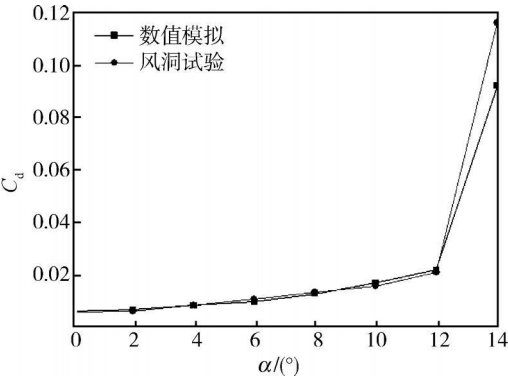


图 3 阻力系数随迎角的变化

Fig.3 Drag coefficients vs. angle of attack

2.2 不同的降雨率和迎角下翼型的外形变化

图 4 给出了 4°迎角下降雨率分别为 0, 424 mm/h 和 1 486 mm/h 时翼型局部外形的对比图. 从图中可以看出, 在降雨条件下, 翼型表面积聚了稀薄的水膜层; 随着降雨率的增加, 水膜层厚度明显增加. 图 5 给出了当降雨率为 1 486 mm/h 时翼型迎角分别等于 4°, 8°和 12°的情况下翼型轮廓的局部放大图. 从图中可以看出, 在一定的降雨条件下, 随着翼型迎角的增加, 翼型表面附着的水膜层厚度越大, 且下翼面的水膜层厚度增加量略大于上翼面. 这是因为随着翼型迎角的增大, 下翼面雨水的收集量逐渐增加.

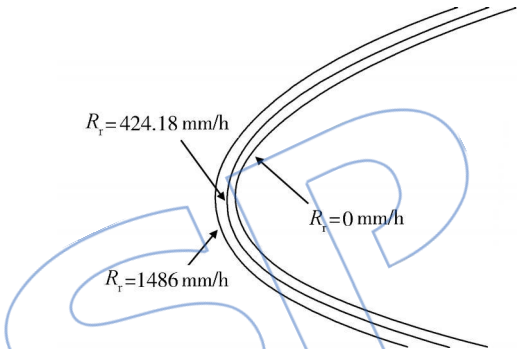


图 4 不同降雨率下翼型轮廓的局部放大图
Fig.4 Partial enlarged drawing of airfoil contour at different rainfall rates

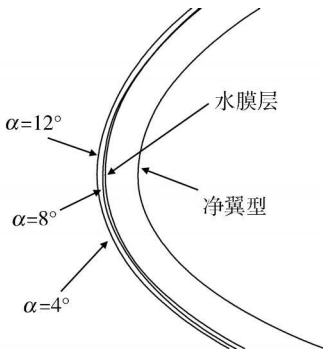


图 5 不同迎角下翼型轮廓的局部放大图
Fig.5 Partial enlarged drawing of airfoil contour at different angles of attack

2.3 降雨对翼型气动特性的影响

图 6 和图 7 分别给出降雨率为 1 486 mm/h 时翼型升力系数和阻力系数随迎角的变化关系. 从图中可以看出, 降雨造成翼型的升力系数减小, 阻力系数增加; 当翼型接近失速时, 降雨对翼型升力系数和阻力系数的影响较大.

图 8 和图 9 分别给出降雨率为 1 486 mm/h 时翼型升力系数和阻力系数的相对变化量随迎角

的变化关系,并与文献[4]中的试验结果进行了比较.结果表明,本文预测的降雨条件下翼型升、阻力系数的变化趋势与试验结果基本一致;仅当翼型失速后,本文预测的升、阻力系数变化量偏大,初步分析认为,本文对翼型失速后的数值模拟精度不够.

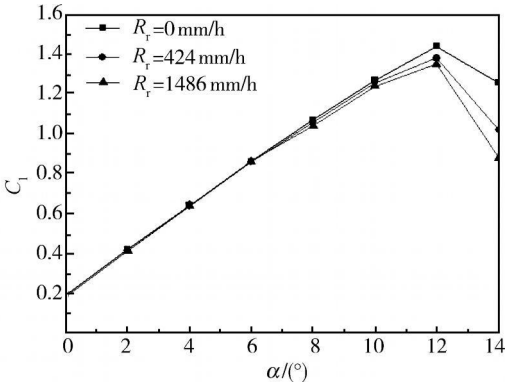


图 6 升力系数随迎角的变化

Fig. 6 Lift coefficients vs. angle of attack

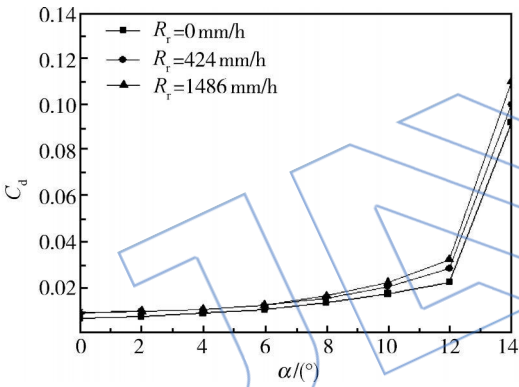


图 7 阻力系数随迎角的变化

Fig. 7 Drag coefficients vs. angle of attack

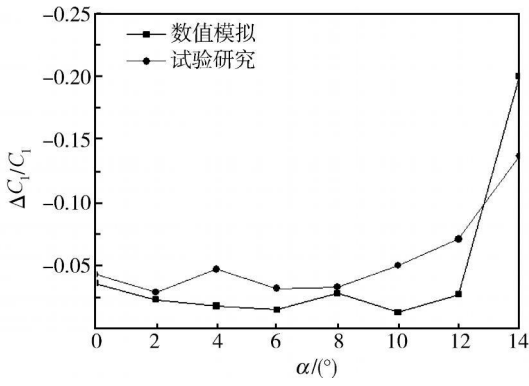


图 8 升力系数变化量随迎角的变化

Fig. 8 Variation of lift coefficients vs. angle of attack

图 10 和图 11 分别给出无雨和有雨条件下迎角为 12° 时翼型周围的绕流流线图. 通过比较可以看出,在给定的降雨率和迎角下,降雨对翼型周

围的流场几乎没影响.图 12 和图 13 分别给出无雨和有雨条件下迎角为 14° 时翼型周围的绕流流线图.通过比较可以看出,降雨造成翼型上表面边界层气流严重地提前分离,这可能是降雨条件下翼型气动性能损失的主要原因.

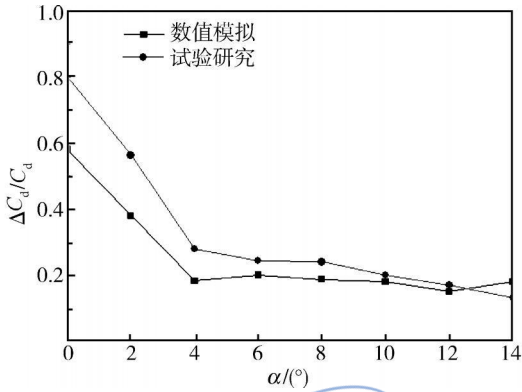


图 9 阻力系数变化量随迎角的变化

Fig. 9 Variation of drag coefficients vs. angle of attack

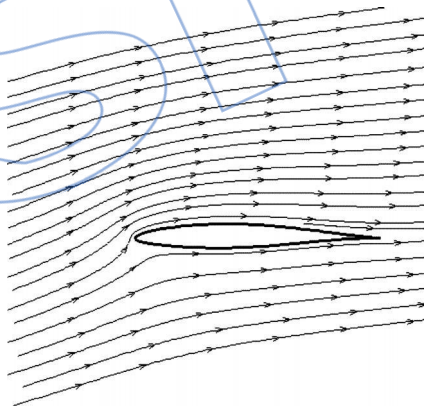


图 10 迎角为 12° 时净翼型周围的绕流流线图

Fig. 10 Streamlines around the clean airfoil at 12°

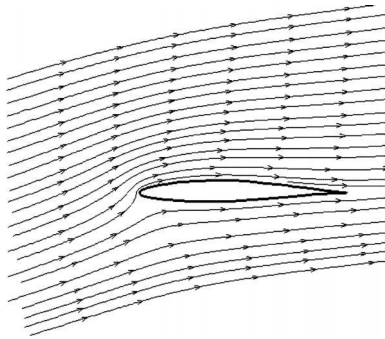
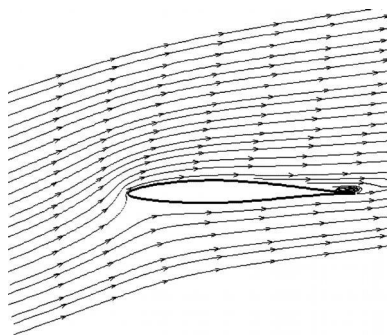
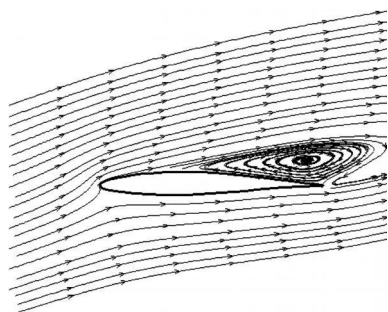


图 11 降雨条件下迎角为 12° 时翼型周围的绕流流线图

Fig. 11 Streamlines around the airfoil at 12° in rain

图 12 迎角为 14° 时净翼型周围的绕流流线图Fig. 12 Streamlines around the clean airfoil at 14° 图 13 降雨条件下迎角为 14° 时翼型周围的绕流流线图Fig. 13 Streamlines around the airfoil at 14° in rain

3 结 论

本文通过对降雨条件下翼型的气动特性进行数值研究后,得出结论如下:

1) 降雨不仅会改变翼型的外形,还严重影响了翼型表面的光洁度;

2) 在低迎角范围内,降雨对翼型的气动特性影响不大;当达到失速迎角后,降雨会引起上翼面边界层气流的提前分离,造成翼型气动性能的严重损失。

参考文献:

[1] Hansman R J, Barsotti M F. Surface wetting effects on a laminar flow airfoil in simulated heavy rain[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(12): 1047-1053.

[2] Hansman R J, Jr, Craig A P. Low Reynolds number tests

of NACA 64-210, NACA 0012, and Wortmann FX67-K170 airfoils in rain[J]. Journal of Aircraft, 1987, 24: 559-556.

- [3] Dunham R E. Potential influences of heavy rain on general aviation airplane performance [R]. AIAA Paper 86-2606, 1986.
- [4] Bezos G M, Dunham R E, Gentry G L, et al. Wind tunnel aerodynamic characteristics of a transport type airfoil in a simulated heavy rain environment [R]. NASA TP 3184, 1992.
- [5] Marchman J F, Robertson E A, Emsley H T. Rain effects at low Reynolds number [J]. Journal of Aircraft, 1987, 24 (9): 638-644.
- [6] Bezos G M, Dunham R E, Gentry G L. Wind tunnel test results of heavy rain effects on airfoil performance [R]. AIAA Paper 87-0260, 1987.
- [7] Thompson B E, Jang J, Dion J L. Wing performance in moderate rain [J]. Journal of Aircraft, 1995, 32 (5): 1034-1039.
- [8] Calarese W, Hankey W L. Numerical analysis of rain effects on an airfoils [R]. AIAA Paper 84-0539, 1984.
- [9] Valentine J R, Decker R A. A Lagrangian Eulerian scheme for flow around an airfoil in rain [J]. Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 639-648.
- [10] 宛同, 耿华, 吴士伟, 等. 降雨中飞机空气动力特性分析 [R]. 行政院国家科学委员会专题研究计划成果报告, 台湾: 淡江大学, 2003, 7, 31.
- WAN Tong, GENG Hua, WU Shiwei, et al. Aerodynamic analysis of an aircraft in heavy rain [R]. National Science Board Report on the Outcome of Research Topics, Tamkang University, 2003, 7, 31. (in Chinese)
- [11] Haines P A, Luers J K. Aerodynamic penalties of heavy rain on landing airplanes [J]. Journal of Aircraft, 1983, 20 (2): 111-119.
- [12] Blanchard D C. From raindrops to volcanoes [R]. New York: Doubleday, 1967.
- [13] Marshall J S, Langille R C, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of Meteorology, 1948, 5: 165-166.
- [14] Markowitz A M. Raindrop size distribution expressions [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15 (9): 1029-1031.
- [15] Macklin W C, Metaxas G J. Splashing of drops on liquid layers [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 47 (9): 3963-3970.
- [16] Wilcox D C. Turbulence modeling for CFD [M]. 2nd ed. La Canada, California: DCW Industries, Inc., 2002.
- [17] Abbott I H, Von Doenhoff A E. Theory of wing sections [M]. New York: Dover Publications Inc., 1959.