

文章编号: 1000-8055(2010)10-2290-06

降雨对飞机气动性能影响的研究综述

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: 研究了降雨的自然特性, 分析了降雨条件下机翼表面复杂的物理现象. 重点从实验测试和数值模拟两方面论述了国内外关于降雨对飞机气动性能影响的研究进展, 内容涉及降雨条件下机翼的气动性能损失、降雨对机翼气动性能的影响机理和机翼对各种影响因素的敏感度研究等方面. 指出了当前国内外关于这一研究在自然飞行测试、实验相似准则、风洞实验中边界层固定转捩和多相流数值建模等方面所面临的关键问题和重大技术挑战.

关 键 词: 飞机; 气动性能; 降雨; 实验测试; 数值模拟

中图分类号: V211.4

文献标识码: A

Research overview of rain effect on aircraft aerodynamic performance

ZHANG Ruimin, CAO Yihua

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The natural characteristics of rain were studied. The complicated physical phenomena on wing surfaces in rain conditions were analyzed. Emphases were laid on the research progress of experimental tests and numerical simulation of rain effect on aircraft aerodynamic performance at home and abroad. The contents included aerodynamic loss of heavy rain on aircraft wing, the mechanisms of influence of rainfall on aircraft aerodynamic performance and wing sensibility to various influential factors. Some open questions and significant technical challenges in the current research progress at home and abroad involve: natural flight test, scaling laws, the behavior of boundary-layer forced transition in wind tunnel tests and modeling of multiphases flow in numerical study.

Key words: aircraft; aerodynamic performance; rain; experimental test; numerical simulation

降雨是影响飞行安全的重要天气因素. 当飞机在降雨条件下飞行时, 尤其是在起飞或着陆阶段, 降雨会造成机翼的升力系数和临界迎角减小, 阻力系数增加, 严重威胁飞行安全.

关于降雨对飞机气动性能影响的第一份报告发表于1941年, Rhode^[1]指出: 当飞机遭遇降雨时会造成气动性能损失, 但未危及飞行安全. 1981年, 几起重大飞行事故促使航空界人士意识到降雨影响的严重性^[2]. 自此, 国外便开始了降雨对飞

机性能影响的研究, 重点集中于机翼表面的水流特性^[3-6]及其对机翼气动性能的影响机理^[7-10]、降雨条件下机翼的气动损失^[11-16]和降雨实验中的相似准则^[17-18]等. 在国内, 这一研究起步较晚, 研究成果有对国外研究工作的简介和未来研究计划^[19]、降雨对翼型气动性能的影响^[20]和雨滴撞击引起的飞机动量损失^[21]等. 本文综述了国内外关于降雨对飞机气动性能影响的研究进展, 指出了研究中遇到的关键问题和重大挑战.

收稿日期: 2010-01-19; 修订日期: 2010-03-11

作者简介: 张瑞民(1980-), 男, 山西运城人, 博士生, 主要从事飞行器空气动力学和计算流体力学研究.

1 降雨的自然特性

降雨的自然特性可从以下三方面来描述.

1.1 雨滴的尺寸分布

目前, 应用最广泛的雨滴尺寸谱是 Marshall 等人^[22] 在 1948 年给出的, 即

$$N(D) = N_0 e^{-ID}$$

(1)

其中 $N(D)$ 是单位尺寸间隔内每立方米空气中的雨滴数; D 为雨滴直径, 单位为 mm ; N_0 为常数, 单位为 $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$; $I = nR_r^m$, 单位为 mm^{-1} ; R_r 为降雨率, 单位为 mm/h ; n 和 m 为无量纲经验常数, n , m 和 N_0 取决于降雨的类型和强度^[23-24].

1.2 降雨率和液态水含量

降雨率和液态水含量是表征降雨强度的重要参数. 降雨率是指单位时间内降落到水平地面上的雨水深度; 液态水含量是指单位体积空气中所含的液态水质量. 降雨率和液态水含量之间的关系可表示为^[22]

$$L_w = \int_0^\infty \rho_w \frac{\pi}{6} D^3 N(D) dD$$

(2)

其中 L_w 为液态水含量, 单位为 g/m^3 ; ρ_w 为水的密度, 单位为 g/m^3 .

1.3 雨滴下落的末速

雨滴下落的末速是雨滴尺寸或高度的函数. 在近地面处, 雨滴的末速 V (m/s) 可表达如下^[23]:

$$V = 9.58 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{1.77} \right)^{1.147} \right] \right\}$$

(3)

在高空, 修正的雨滴末速表达式为^[23]

$$V = V_0 \left[\frac{\rho}{\rho_0} \right]^{0.4}$$

(4)

其中 V_0 为雨滴在空中的末速; ρ 为雨滴在空中的密度; ρ_0 为碰撞点附近的密度.

2 降雨条件下机翼表面的物理现象

在降雨环境下, 机翼表面的物理现象十分复杂, 如图 1 所示. 部分雨滴撞击到机翼前缘溅射出大量小液滴, 形成雾层; 部分雨滴滞留在翼面形成稀薄的水膜层, 受后续雨滴的撞击和气流摩擦力的作用, 其表面会有凹坑和水纹出现; 在水膜层下游, 受气流和表面张力的共同作用, 水膜层分裂成小溪流. 溅射小液滴、水纹、凹坑和小溪流均与边界层气流之间存在强烈的相互作用.

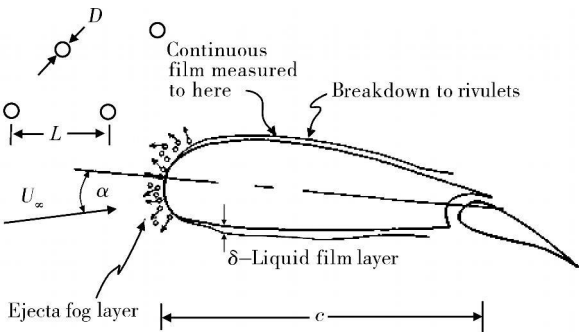


图 1 雨滴与机翼相互作用的模型

Fig. 1 Model of raindrops interacting with an airfoil

3 实验测试

3.1 研究方法

关于降雨条件下飞机气动性能研究的实验方法有飞行测试和模型实验. 飞行测试要求在降雨条件下对飞机性能进行测试, 且须安装设备以记录环境参数, 飞行员还要在仪表飞行条件下探索安全飞行包线. 因此, 危险性高且耗时长, 精确的数据难以测得. 模型实验包括旋转臂测试、模型塔测试和风洞实验. 旋转臂测试有利于揭示雨滴溅射特性^[25]; 模型塔的降雨模拟精度高, 且喷洒范围广; 风洞实验具备模型塔的优势且技术成熟, 但不仅要模拟降雨, 还要确定实验相似准则. 由于两相流环境的复杂性, 相似准则尚未完全确定, 模型实验结果无法用于全尺寸飞机, 因此, 国外建立了飞机着陆动力工厂以便在降雨环境下获得大比例模型实验数据.

3.2 研究成果

3.2.1 降雨对机翼气动性能的影响

Dunham 等人^[7-8] 的研究表明, 降雨造成 NACA 0012 和 NACA 64-210 翼型的最大升力系数分别下降 15% 和 20%. Hansman 等人^[3] 的研究表明, 降雨造成层流翼型最大升阻比最高下降 75%. Campbell 等人^[26] 的研究表明, 降雨造成 NACA 23015 翼型升力系数最大下降 27%, 阻力系数最大增加 39%, 如图 2 所示. Hermanspann^[27] 的飞行测试表明, 降雨导致层流翼型的最大升力系数下降 10%, 升阻比下降 50%.

3.2.2 降雨对机翼气动性能的影响机理研究

Hastings 等人^[4] 的研究表明, 水流严重破坏了翼面光滑度, 引起边界层提前转捩, 阻力系数增加; 在失速前后, 积聚在上表面尾缘的水流引起边界层提前分离, 机翼升阻力比减小. Hansman 等

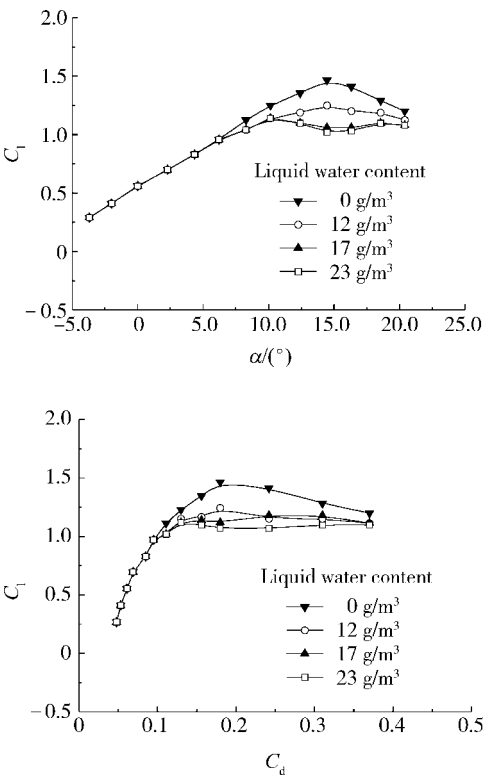


Fig. 2 降雨对翼型升、阻力系数的影响
Fig.2 Impact of rain on lift and drag coefficient

人^[3]认为,降雨造成层流翼型阻力系数的增加缘于边界层提前转捩和雨滴与气流之间的动量转换;升力系数减小是由边界层提前转捩引起. Hansman 等人^[9]确定了不同时间尺度内降雨对三种翼型气动性能的影响机理.一进入降雨环境,翼型前缘边界层便提前转捩,在失速前,三种翼型的气动性能均会恶化.在失速后, NACA 0012 和 NACA 64-210 的边界层提前转捩,气流分离区减小,失速特性改善; WORTMANN FX67-K170 翼型升力减小,但升力曲线平滑.当时间达到 1~10s,水回流改变了翼型外形,但三种翼型的性能变化较小. Hermanspan^[27]认为降雨对层流翼型性能的影响缘于边界层转捩、表面粗糙度和雨滴动能损失等.

3.2.3 机翼对降雨影响因素的敏感度

1985 年, Hansmann 等人^[3]对 Wortman FX-67-K-170 机翼表面做了涂蜡、涂肥皂、涂漆处理后进行了降雨实验研究.结果表明,由于蜡的厌水性,雨滴在涂蜡后的机翼表面无法形成水膜层,而以较大的水珠滚动,因此机翼的性能损失最严重;涂漆后的机翼表面浸润性较好,粗糙度最小,故机翼性能损失最小.实验测试还表明^[3,16],在降雨环境中,多段机翼的气动损失比单段机翼更严重;翼型的弯度越大,气动损失越严重.

4 数值模拟研究

4.1 研究方法

目前,应用于气液两相流的数值方法有拉格朗日法和欧拉法.欧拉法是将流场中的液滴看作与气流相互渗透的拟流体来求解每一相的守恒方程;拉格朗日法首先求解气相的欧拉守恒方程,再建立液滴运动方程进行轨迹跟踪.欧拉法的优势在于三维或复杂外形的研究,但仅适于单尺寸液滴相,且难以捕捉到液滴溅射等物理现象;拉格朗日法适于二维或简单外形的计算,但对于三维或复杂的外形,计算过程较繁琐.

4.2 研究成果

4.2.1 雨滴溅射对翼型气动性能的影响

雨滴撞击机翼后溅射出的小液滴与边界层气流之间相互作用是造成翼型气动性能损失的重要原因. Hsu^[28]的研究表明,雨滴溅射造成层流翼型的升力系数减小,阻力系数增加. Valentine 等人^[13]通过单向耦合的拉格朗日法研究了雨滴的溅射特性,雨滴溅射模型如图 3 所示.研究表明,溅射小液滴可能会迅速蒸发;云雾区每立方米约含小液滴 10⁹ 颗,平均间距约为 1 mm;液滴之间还可能碰撞、聚合等现象;小液滴也可能被湍流驱散. Valentine 等人^[15]还研究了雨滴溅射对翼型气动性能的影响,如图 4 所示.研究表明,在失速前,雨滴溅射对翼型的气动性能几乎没有影响;溅射导致临界迎角减小 1°~2°.

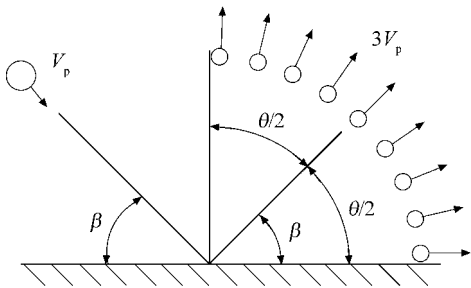


图 3 雨滴溅射模型
Fig. 3 Two dimensional impact model

雨滴溅射是一个复杂的时变过程,简单的数值模型难以捕获真实的物理现象,如气流边界层的提前转捩和三维影响效应.为了能够实现数值研究和实验测试的一致,一方面需要加强实验测试以完全理解雨滴溅射对翼型气动性能的影响;另一方面则需要建立三维的雨滴溅射模型.

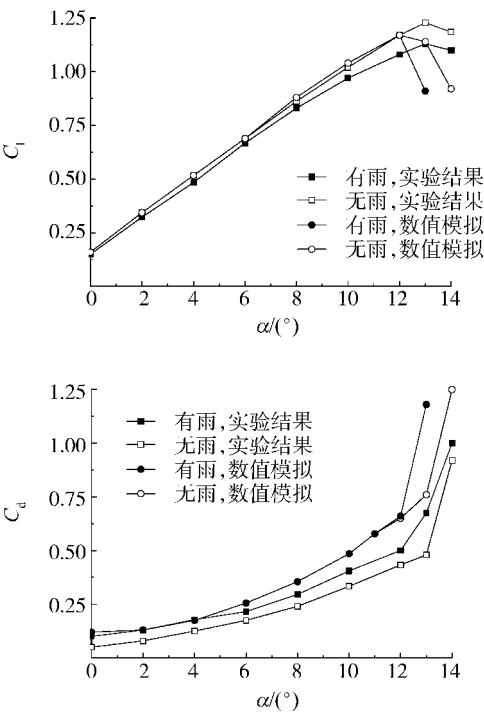


图 4 雨滴溅射引起的升、阻力系数
随迎角的变化关系

Fig. 4 Lift and drag coefficient vs. angle of
attack due to raindrops

4. 2. 2 水膜层粗糙度对翼型性能的影响

1) 凹坑粗糙度

Haines 等人^[11-12]采用当量沙粒粗糙度的方法得到了凹坑粗糙度造成的飞机气动损失. 研究表明, 凹坑粗糙度造成机翼和机身的摩擦阻力系数增加, 最大升力系数和失速迎角减小, 结果如表 1 和表 2 所示. 2003 年, 宛同等人^[20]采用数值方法研究了水膜层粗糙度对 NACA 64-210 翼型气动特性的影响, 结果如图 5 所示.

表 1 凹坑粗糙度引起的机翼和机身摩擦阻力增量
占总阻力增量的百分比

Table 1 Increment percent of wing and fuselage friction
drag in total drag due to craters roughness

降雨率/(mm/h)	($\Delta C_d / C_{d0}$) / %
100	1.6
200	2.3
500	3.5
1000	4.6
2000	5.9

目前, 用来研究凹坑粗糙度的数学模型主要有当量沙粒粗糙度^[11-12]和离散粗糙度^[20]. 当量沙

粒粗糙度模型通常借助于经验关系, 比较成熟, 且应用广泛; 离散粗糙度模型则依据实验测试参数, 因相似准则未完全确立, 该方法受到限制.

表 2 凹坑粗糙度引起的最大升力系数和
失速迎角减小量

Table 2 Reduction in maximum lift coefficient and
angle of attack at stall due to craters roughness

降雨率/(mm/h)	($\Delta C_l / C_l$) / %	$\Delta \alpha_{C_{lmax}} / (^\circ)$
100	7	1~ 2
200	13	1~ 3
500	25	2~ 5
1000	29	3~ 5
2000	34	3~ 6

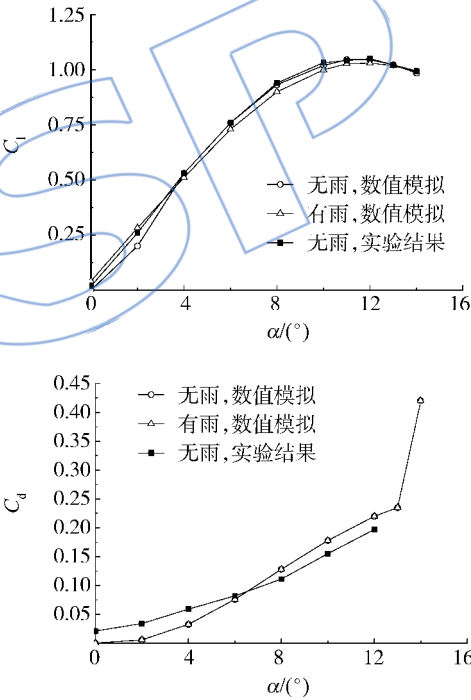


图 5 水膜层粗糙度引起的升、阻力系数
随迎角的变化关系

Fig. 5 Lift and drag coefficients vs. angle of attack
due to water film layer roughness

2) 波纹粗糙度

Haines 和 Luers^[11-12]应用工程算法研究了波纹粗糙度造成的机翼和机身气动性能的损失, 如表 3 和表 4 所示.

目前, 关于波纹粗糙度的研究, 仅建立了简单的当量粗糙度模型, 且使用范围有限. 今后, 还需要进行实验测试来获得波纹粗糙度特征数据库, 进而建立准确的数值模型.

表 3 波纹粗糙度引起的机翼和机身摩擦阻力增量
占总阻力增量的百分比

Table 3 Increment percent of wing and fuselage friction
drag in total drag due to waviness roughness

降雨率/(mm/h)	($\Delta C_d/C_{d0}$)/ %
100	2.1
200	3.2
500	3.8
1000	4.2
2000	4.6

表 4 波纹粗糙度引起的最大升力系数和
失速迎角减小量

Table 4 Reduction in maximum lift coefficient and angle
of attack at stall due to waviness roughness

降雨率/(mm/h)	($\Delta C_l/C_l$)/ %	$\Delta\alpha_{C_{lmax}}/ (^{\circ})$
100	11	1~ 3
200	20	2~ 4
500	25	2~ 5
1000	28	3~ 5
2000	30	3~ 5

4.2.3 小溪流

研究表明^[29],翼型的气动系数取决于小溪流的初始位置、粗糙度及其覆盖范围. Thompson 等人^[30]采用数学分析方法预测了机翼表面小溪流的初始位置.但要建立准确的小溪流数学模型,还须确定小溪流的覆盖范围.

5 关键问题

通过以上综述,并结合本课题组的工作实践,有以下关键问题和重大技术挑战亟需突破.

5.1 自然飞行测试

飞行测试最接近实际,但风险较大;受环境限制,很难获取精确的性能参数.因此,应先用工程算法和理论分析来确定自然降雨条件下飞机的安全飞行包线,以降低飞行测试的风险.

5.2 实验相似准则

因多相流环境的复杂性,实验相似准则还没确定,模型测试数据无法应用于全尺寸飞机.例如,若模型尺寸减小,则测试速度必须成比例增加,使气流雷诺数保持一致;而水的韦伯数无法同时保持一致.因此,还需开展多尺寸模型实验来进

行相似准则研究.

5.3 风洞实验中的边界层固定转捩

为了将模型测试数据应用于实际飞行,通常在风洞实验中在机翼前缘施加边界层转捩以提高有效的雷诺数. Thompson 等人^[6]认为,在模拟的降雨条件下,对机翼前缘施加边界层转捩不能有效地提高雷诺数,也无法改进飞行测试和模型实验数据之间的关系.因此,还需深入探索降雨对飞机气动性能的影响机理.

5.4 多相流数值建模

由于降雨条件下多相流环境的复杂性,已建立的数学模型仅考虑了水膜层粗糙度或雨滴溅射等因素之一,难以准确地模拟真实的物理现象,因此,须建立全面的、高精度的三维数学模型,来准确地预测降雨对飞机气动性能的影响.

6 结 论

近三十年来,国内外关于降雨对飞机气动性能的影响研究取得了许多成果.然而,由于降雨实验相似准则尚未完全确立,模型测试数据无法用于全尺寸飞机;自然飞行测试也很难进行;现有的数学模型难以综合所有的影响因素.因此,目前的研究工作进展缓慢.随着各国对飞机全天候飞行要求的提高,降雨对飞机气动性能的影响会更加引起航空界的高度关注.

参考文献:

[1] Rhode R V. Some effects of rainfall on flight of airplanes and on instrument indications[R]. NACA Report No. 803, 1941.

[2] Luers J K, Haines P A. The effect of heavy rain on wind shear attributed accidents[R]. AIAA 81-0390, 1981.

[3] Hansman R J, Barsotti M F. The aerodynamic effect of surface wetting characteristics on a laminar flow airfoil in simulated heavy rain[R]. AIAA Paper 85-0260, 1985.

[4] Hastings E C, Manuel G S. Scaled model tests of airfoils in simulated heavy rain[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(6): 536- 540.

[5] 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): 1049- 1053.

[6] Thompson B E, Jang J, Dion J L. Wing performance in moderate rain[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(5): 1034- 1039.

[7] Dunham R E, Bezos G M, Gentry C L, et al. Two dimensional wind tunnel tests of a transport type airfoil in a water spray[R]. AIAA Paper 85-0258, 1985.

- [8] Dunham R E. Potential influences of heavy rain on general aviation airplane performance [R]. AIAA Paper 86 2606, 1986.
- [9] Hansman R J, Craig A P. Low Reynolds number tests of NACA 64210, NACA 0012, and Wortmann FX67-K170 airfoils in rain [J]. Journal of Aircraft, 1987, 24: 559-556.
- [10] Marchman J F, Robertson E A, Emsley H T. Rain effects at low Reynolds number [J]. Journal of Aircraft, 1987, 24 (9): 638-644.
- [11] Haines P A, Luers J K. Aerodynamic penalties of heavy rain on a landing aircraft [R]. NASA Contractor Report 156885, 1982.
- [12] Haines P A, Luers J K. Aerodynamic penalties of heavy rain on landing airplanes [J]. Journal of Aircraft, 1983, 20 (2): 111-119.
- [13] Valentine J R, Decker R A. Tracking of raindrops in flow over an airfoil [R]. AIAA Paper 93-0168, 1993.
- [14] Valentine J R, Decker R A. Tracking of raindrops in flow over an airfoil [J]. Journal of Aircraft, 1995, 32 (1): 100-105.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Bilanin A J. Scaling laws for testing of high lift airfoils under heavy rainfall [R]. AIAA Paper 85-0257, 1985.
- [18] Bilanin A J. Scaling laws for testing airfoils under heavy rainfall [J]. Journal of Aircraft, 1987, 24 (1): 31-37.
- [19] 孙宏, 王大海. 大雨对飞机气动性能的影响 [J]. 流体力学实验与测量, 1998, 12 (3): 24-28.
SUN Hong, WANG Dahai. Influence of heavy rain on aircraft aerodynamic performance [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1998, 12 (3): 24-28. (in Chinese)
- [20] 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, 2003.
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, 2003. (in Chinese)
- [21] 王永忠. 雷暴低空风切变中大雨对飞行的影响 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29 (1): 136-140.
WANG Yongzhong. Effect of heavy rain on flight in the low-level wind shear of thunderstorm [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29 (1): 136-140. (in Chinese)
- [22] Marshall J S, Langille R C, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of Meteorology, 1948, 5: 165-166.
- [23] Markowitz A M. Raindrop size distribution expressions [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15 (9): 1029-1031.
- [24] Joss J, Waldvogel A. Raindrop size distribution and sampling size errors [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1969, 26 (3): 566-569.
- [25] Feo A. Rotating arms applied to studies of singular drop impacts [R]. AIAA Paper 87-0257, 1987.
- [26] Campbell B A, Bezos G M. Steady state and transitional aerodynamic characteristics of a wing in simulated heavy rain [R]. NASA TP-2932, 1989.
- [27] Hermanspann F. Rain effects on laminar flow airfoils [R]. AIAA Paper 96-0899, 1996.
- [28] Hsu Y K. An analytic study of a two-phase laminar airfoil in simulated heavy rain [R]. N94-23661, 1993.
- [29] Thompson B E, Jang J. Aerodynamic efficiency of wings in rain [J]. Journal of Aircraft, 1996, 33 (6): 1047-1053.
- [30] Thompson B E, Monica R M. Rivulet formation in surface water flow on an airfoil in rain [J]. AIAA Journal, 1999, 37 (1): 45-49.