

文章编号:1000-8055(2012)05-0986-07

水滴撞击特性参数的动态图像测量方法

刘丹阳, 韩雅慧, 丁立, 杨春信

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以染色法为基本原理, 实验采集试件表面不同位置的染色过程视频. 通过对视频数据的分析获取试件表面色度随时间增长的时序信号. 实验过程可以划分为欠饱和区、平衡区和过饱和区. 平衡区的比色值分布即为局部水收集系数分布的归一化结果. 通过比色积分曲线的极限行为确定水滴撞击极限和总收集系数与最大局部水收集系数的比值. 将实验结果与数值仿真结果和 NASA(美国国家航空航天局)实验结果对比表明:水滴撞击特性参数与动态视频图像的 RGB(rad-green-blue)色度空间可以建立较好的关联, 实验重复性误差率小于 $\pm 15\%$;水滴撞击特性参数之间存在内在关联.

关 键 词: 防冰; 水滴撞击特性; 图像处理; 动态测量; 圆柱

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

Dynamic image processing measurement method of droplets impingement characteristics

LIU Dan-yang, HAN Ya-hui, Ding Li, YANG Chun-xin

(School of Aeronautics Science and Engineering,

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

Abstract: Image processing method was applied to analyze the dying process at different locations on test cylinders in order to examine the variation of the surface chroma during the test. A complete test was divided into three stages: sub-dyed, balanced and over-dyed. The chroma distribution of balanced stage was normalized and defined as local water collection efficiency. Droplet impingement limits and the ratio of total impingement to the maximum local impingement efficiency can therefore be analyzed by the colorimetric integration curves. Comparing to the numerical simulation and the experiment of NASA (National Aeronautics and Space Administration), the current results indicate that water droplets impingement characteristics can be correlated with the dynamic RGB (rad-green-blue) color space, with $\pm 15\%$ repeatability error. Interrelation among the three characteristics was also observed.

Key words: anti-icing; water droplet impingement characteristics; image processing; dynamic measurement; cylinder

飞机结冰是导致事故和空难的重要原因之一, 因此美国 NTSB (National Transportation Safety Board) 将结冰条件下的飞行安全和适航问

题列为航空安全领域内最迫切需要研究的问题之首^[1-3]. 飞机结冰过程分为过冷水滴撞击和气动表面结冰两个阶段, 其中冰型增长的影响因素较多,

收稿日期: 2011-06-10; 网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.986_005.html

作者简介: 刘丹阳(1986—), 女, 内蒙古通辽人, 博士生, 主要从事人机与环境工程研究.

通讯作者: 杨春信(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事人机与环境工程研究. E-mail: yangchunxin@sina.com

结冰成核的随机性也较大,即使同种工况下冰型的重复性也难以保证。水滴撞击特性主要受来流速度、水滴尺度以及防冰部件外形等因素的影响,在一定的外界条件下属于防冰部件本身的特性,在实验测量中比较容易控制和再现。因此,水滴撞击特性的实验研究是进行飞机防冰技术研究的基础工作,能够为飞机结冰及防冰提供理论依据。

国外对水滴撞击特性的实验研究最早始于上世纪50年代,主要是在美国国家航空航天局(NASA)Lewis研究中心冰风洞中进行的,实验采用染色的方法,即将防冰部件表面覆盖一层吸水纸,染色溶液通过喷雾系统雾化成水滴喷在防冰试件表面,再将吸水纸从试件表面剥落后提取染料的量。数据的提取方法先后经历了比色计法^[4-6]、激光反射光谱法^[7]和CCD(charge couple device)反射计法^[8-10]。我国在水滴撞击特性方面的研究主要局限于数值模拟方法,实验测量方法尚未出现。

本文基于动态图像处理,研究了水滴撞击特性的实验测量方法。该方法采用染色的基本原理,以中性红作为染色剂,选取吸水性较好的石膏制作试件。在实验过程中,用摄像头采集试件表面不同位置的染色过程动态视频,再通过处理视频图像数据获取水滴撞击特性参数。本文首先介绍实验测量系统和参数标定方法;然后以直径为15 mm的圆柱为例进行了水滴撞击特性实验测量方法的研究,并将本实验与NASA的实验结果以及计算结果进行对比,验证该方法的准确性;最后得出结论。

1 实验测量系统与参数标定

1.1 实验测量系统

本文的实验测量系统(见图1)由喷雾系统和视频采集系统构成。喷雾系统产生的雾化水滴随风机产生的气流均匀的喷出,气动喷嘴有气路、水路两个入口,水路上连接两个水罐,一个盛放0.5 g/kg的中性红水溶液,另一个盛放清水,用于实验后清洗喷嘴。圆柱视频采集系统的两个摄像头对称置于距离圆柱45 cm,与流场轴线呈30°夹角处,采集的视频文件为avi格式,30帧/s,640像素×480像素的真彩色图像。

实验开始前,首先固定试件,实验系统切换到中性红支路;然后用挡板挡住喷嘴前端,打开风机和喷嘴,待1~2 min至系统喷雾稳定;再启动摄像头,移走挡板开始记录染色视频。

1.2 实验参数的标定和测量

实验中需要控制的参数包括气流速度、水滴粒径分布(平均体积直径 D_{mv})及液态水含量(单位体积云团内含有液态水的质量,记为 L_c)。气流速度靠改变风机频率调节,用皮托管数字风速仪标定;水滴粒径分布通过改变加在气动喷嘴气路和水路的压力比调节(气液压力比增大则水滴粒径减小,反之增大),用LS-2000激光雾化水滴粒径测量仪标定;液态水含量 L_c 是用质量测量法测得的,质量测量法的基本原理是实验时间记为 t ;通过测量气动嘴喷出的水质量 m_0 和管口处由于管道内壁因积水而滴下的水质量 m_1 ,计算两者之

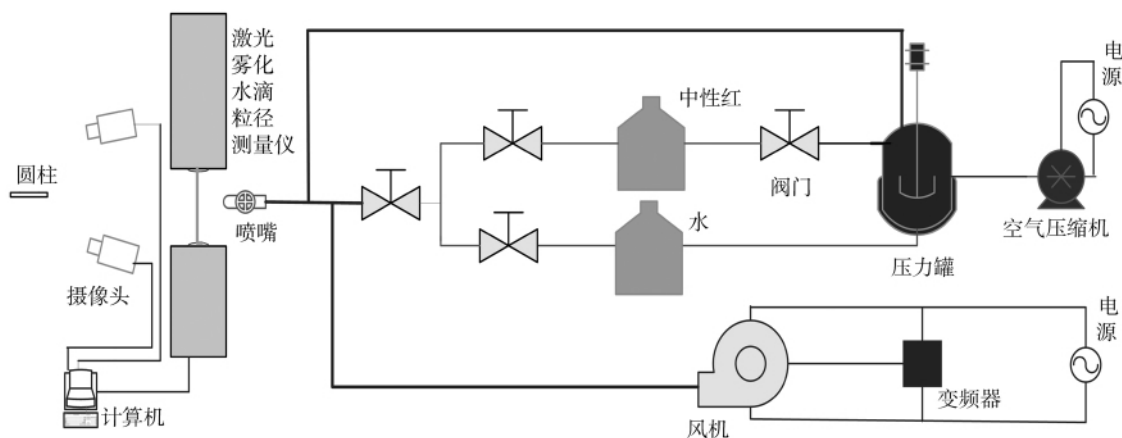


图1 实验测量系统

Fig. 1 Experimental measurement system

差得出管口喷出的实际水质量 m_1 (即 $m_1 = m_0 - m_1$); 通过测量管口的直径 d 和气流速度 v_0 , 得到 t 时间内管口处气体的体积流量 $V_g = \pi d^2 v_0 t / 4$, 两者的比值即为喷雾中 L_c 的平均值, 见式(1).

$$L_c = \frac{m_1}{V_g} (g \cdot m^{-3}) \quad (1)$$

水滴撞击特性仅与气流速度和水滴粒径分布有关, 与 L_c 无关, 但 L_c 与石膏吸水速率相关. 适当的 L_c 可以延长石膏稳定染色的时间段, 使视频中有足够长的有效数据信息, 所以该参数仍需测量和控制.

2 实验结果

由于文献中关于水滴撞击特性参数的定义尚未统一, 本文应用的参数定义^[7]如下:

1) 水滴撞击极限 S_m ——水滴能撞击在形体表面最远位置对应的长度与形体特征尺寸之比.

2) 局部水收集系数 β ——物体微元表面实际水收集率与最大可能水收集率之比(见图 2).

3) 总收集系数 E_m ——单位翼展长度的翼型表面实际水滴撞击率 W 和翼型可能的最大水滴撞击率 W_{max} 之比.

以上 3 个无量纲参数之间的关系见式(3). S_m 描述的是翼型上的水滴撞击范围, 是积分限; β 是描述局部的水收集量沿翼型表面分布的函数, 是被积函数; E_m 描述的是翼型表面收集水的总质量, 是积分值.

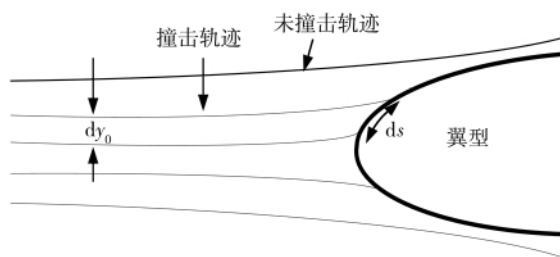


图 2 局部水收集系数 β 定义

Fig. 2 Definition of local water collection efficiency β

本文测量的水滴撞击特性参数包括数值参数 S_m 、比值参数 β/β_m 分布和 E_m/β_m .

$$\beta = \frac{dy_0}{ds} \quad (2)$$

$$E_m = \int_0^{S_m} \beta(s) ds \quad (3)$$

2.1 视频数据处理

本实验方法直接获得的数据是试件表面染色

过程的视频, 视频数据处理流程见图 3. 时间截取功能是为了去掉实验前后多余的帧数据, 截取后两个视频开始时间一致; 选框截取是截取图像中试件表面的有效像素点, 去掉图像中背景的像素; 展开表面是指将图像中三维圆柱表面转换为平面的二维数据, 由于摄像头到圆柱的距离(45 cm)相对杆直径(15 mm)较大, 所以可近似认为摄像头采集了半圆柱表面的数据.

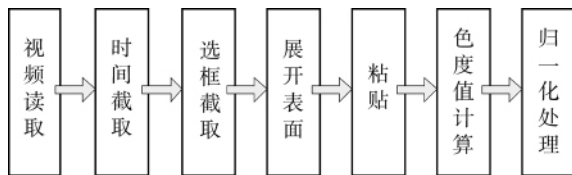


图 3 数据处理流程

Fig. 3 Video data processing flow

粘贴是将两个摄像头中表面展开后的圆柱图像按照空间几何关系粘贴成为圆柱正面的展开图. 为了确保粘贴后的图像与实际相符, 应保证两个摄像头都能摄取的位置加权系数之和为 1. 本实验采用角度加权和线性加权相结合的方法(见图 4), 先根据角度加权法确定左边的加权基数为 $a = \sin \alpha$, 右边为 $b = \sin \beta$, 再根据线性加权得到两个摄像头对应的加权系数为 $a/(a+b)$ 和 $b/(a+b)$.

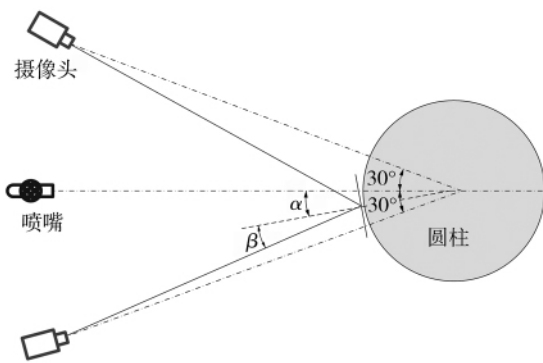


图 4 粘贴表面原理图

Fig. 4 Sketch of paste surface principle

实验对比了 RGB(red green blue) 和 HSV(hue-saturation-value) 两种色度空间. 由于中性红染料是红色, 而红色在 HSV 色度空间里占据了两个区域, 因此试件表面色度分布曲线出现了双峰或多峰值现象, 与事实不符; 而 RGB 色度空间刚好可以避免这一缺点, 实验对每一帧图片中圆柱上的像素点计算 RGB 空间的色度值, 记为 C (无量纲), 见式(4). 视频数据分析至此, 得到圆柱

表面 C 值分布随时间增长的曲线.

$$C = \begin{cases} R - \min(G, B), & R \geq \min(G, B) \\ 0 & R < \min(G, B) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 数据归一化处理

视频数据处理得到的是试件表面 C 值分布随时间的增长曲线,如图 5(a). 后续数据处理中根据圆柱最前端 C 值增长曲线的线性特征,结合实验现象,将实验过程分为欠饱和区、平衡区和过饱和区 3 个阶段,见图 5(b).

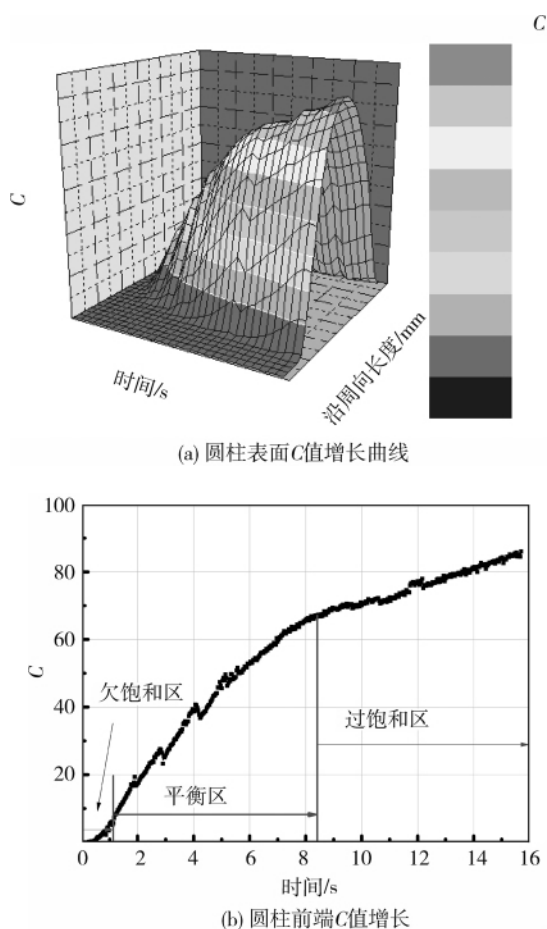


图5 圆柱表面 RGB 色度值增长曲线

Fig. 5 RGB color growth curve of cylinder surface

实验初始的 0~1s 内,石膏吸水性尚未稳定,表面色度较浅,易受外界光线影响,会造成实验结果失真,该区域数据应不予考虑. 实验 2~8s 的时间段内, C 值呈明显线性增长的区域称作平衡区,这段区域 C 值增长率较稳定,且石膏吸水特性平稳,平衡区的数据应作为水滴撞击特性分析的有效数据. 平衡区之后 C 值增长率逐渐变小的区域称作过饱和区,这一区域内石膏吸水特性明显变差,且实验后期出现圆柱前端吸水饱和,水滴溢流到非撞击区现象.

对实验时间段划分 3 个区域,提取出平衡区

作为有效的数据部分进行分析,为水撞击特性参数的提取和保证实验精度提供依据.

将实验结果划分区域后,在 3 个区域内分别进行归一化处理. 归一化处理的横坐标是以圆柱表面迎风方向最前端为原点,当前位置与圆柱半圆弧长的比值即为该位置归一化的坐标值,记为 x (无量纲);纵坐标是选取每一帧中 C 值分布曲线上的最大值作为 1,其他位置的 C 值以该值做归一化处理的坐标值,记为比色值 $\bar{C}$ (无量纲).

图 6 是在平衡区和过饱和区内不同时刻的归一化结果,由图可见平衡区 2~8s 这一相当长的时间段内,不同时刻的 $\bar{C}$ 分布曲线具有非常好的一致性. 说明平衡区内的水滴流速和石膏吸水速度刚好平衡,染色过程平稳,因此该区域的比色值信息可以较好地反映水滴撞击特性. 进一步证明以平衡区信息分析水滴撞击特性的有效性. 而在过饱和区由于圆柱前端吸水性变差,其他位置尚未饱和,出现水滴溢流至非撞击区,因此归一化结果比平衡区的较宽.

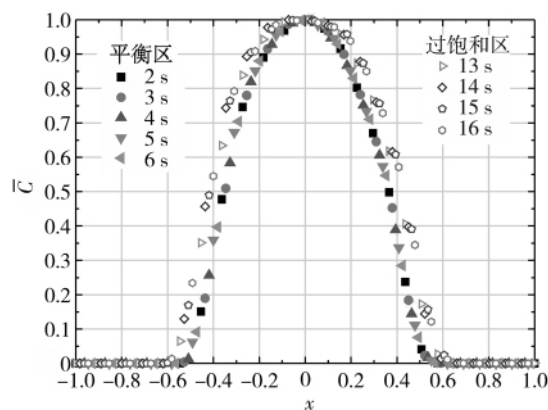


图6 圆柱归一化结果

Fig. 6 Normalize results curve of cylinder

数据分析至此,已将圆柱表面的染色过程视频数据转化为表面比色值 $\bar{C}$ 分布数据,下面将介绍如何将色度分布数据与水滴撞击特性参数建立关联,获取水滴撞击特性参数实验结果.

2.3 实验结果

本实验进行以下两个基本假设:

- 1) 试件远前方流场均匀,水滴速度、粒径均一.
- 2) 试件表面 C 值正比于单位面积上染料的数量.

由基本假设和水滴撞击特性参数的定义,图 6 中平衡区内不同时刻比色值 $\bar{C}$ 分布的平均值即为试件表面的局部水收集系数归一化值 β/β_m (β_m 为圆柱表面最大局部水收集系数)的分布.

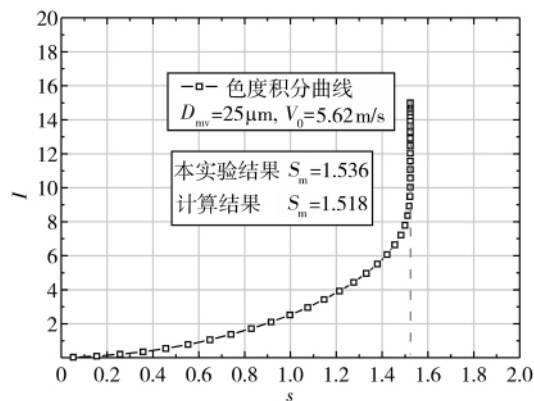
S_m 和 E_m/β_m 是描述水滴撞击极限行为的两个参数. 本实验对 S_m 确定方法是将比色值 $\bar{C}$ 沿圆柱表面向侧面的投影积分, 见式(5)和式(6), 式中 l 表示圆柱表面弧长, D 表示圆柱直径.

$$s = \frac{l}{D} \quad (5)$$

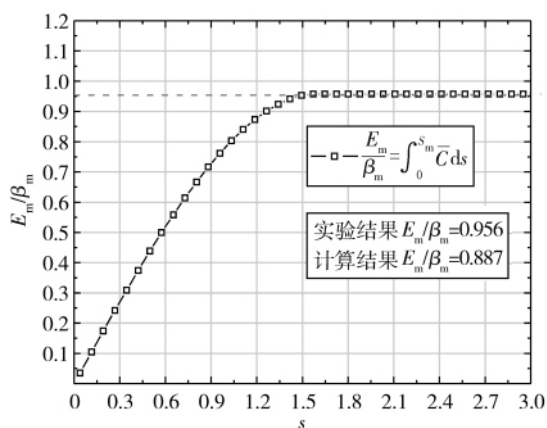
$$I = \int_0^{S_m} \bar{C} \cdot \sin \alpha ds \quad (6)$$

积分曲线 I 的最大处即表示水滴撞击到了极限位置, 对应的弧长与圆柱特征尺寸(直径)的比值即是水滴撞击极限 S_m , 见图 7(a). 再由式(7)将比色值 $\bar{C}$ 沿圆柱表面积分, 比色结果的积分最大值即为 E_m/β_m 的结果, 如图 7(b).

$$\frac{E_m}{\beta_m} = \int_0^{S_m} \frac{\beta(s)}{\beta_m} ds = \int_0^{S_m} \bar{C} ds \quad (7)$$



(a) 实验测量 S_m 结果



(b) 实验测量 E_m/β_m 结果

图7 某工况圆柱水滴撞击特性实验结果

Fig. 7 Droplets impingement characteristics results of cylinder on certain test condition

本实验依据水滴撞击特性参数的定义和参数之间的关系, 以积分曲线的极限行为确定参数 S_m 和 E_m/β_m , 这样确定的数据位置准确, 保证实验参

数提取的精度.

3 实验结果对比与分析

3.1 实验结果对比

为验证该实验方法的准确性, 将本文实验结果分别与 NASA 的实验结果和数值仿真结果进行对比. 本文应用 ANSYS 12.0 软件 FLUENT 模块, 采用欧拉法^[11-12], 求解空气相和粒子相输运方程, 计算圆柱的水滴撞击特性. 图 8 是本实验测量的 $\bar{C}$ 分布分别与欧拉法计算结果和 NASA 实验结果^[7] 的对比. 由于本实验采用圆柱直径为 15 mm, 而 NASA 实验中圆柱直径为 4 inch (101.6 mm), 两者的结果不能直接对比. 因此本文采取了以水滴撞击极限归一化的方法对比, 由图 8 可见三者结果对比一致性较好.

图 9 是 12 种工况(见表 1)下圆柱实验和数

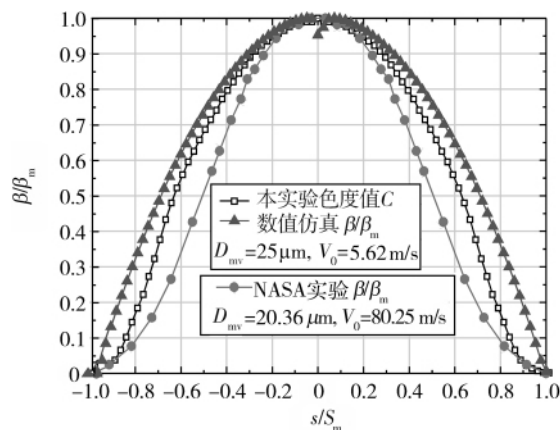


图8 本实验与 NASA 实验结果对比

Fig. 8 Comparison of this experiment result and NASA's

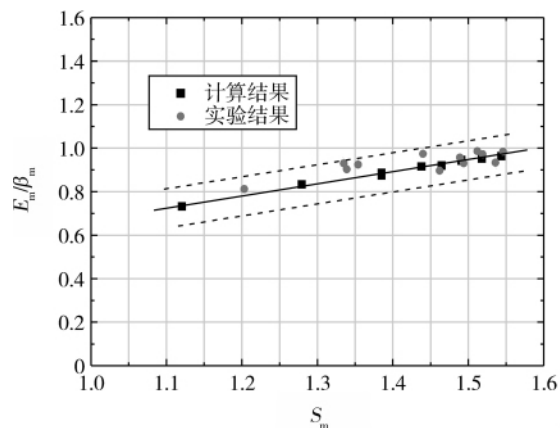


图9 实验结果对比与验证

Fig. 9 Comparison and verification of experiment result

值计算的水滴撞击特性数值 S_m 及 E_m/β_m 结果对比图,由图可见实验与数值计算结果对比一致性较好,如图中虚线所示,实验结果在数值仿真结果的 15% 范围内波动,说明本文实验方法的重复性误差率小于 $\pm 15\%$,并且两个参数之间存在较好的关联性,这说明 S_m , E_m 和 β_m 之间存在内在关联,这将作为后续理论研究内容之一。

表 1 实验工况表
Table 1 Test conditions

工况号	$D_{mv}/\mu m$	风速/ $(m \cdot s^{-1})$	$L_c/(g \cdot m^{-3})$
1	25 ± 5	5.6 ± 0.2	7.1 ± 0.6
2	25 ± 5	11.6 ± 0.3	1.5 ± 0.3
3	25 ± 5	21.6 ± 0.5	1.3 ± 0.3
4	25 ± 5	35.2 ± 0.5	1.2 ± 0.2
5	45 ± 5	5.6 ± 0.2	2.5 ± 1.2
6	45 ± 5	11.6 ± 0.3	2.0 ± 0.3
7	45 ± 5	21.6 ± 0.5	0.8 ± 0.2
8	45 ± 5	35.2 ± 0.5	0.5 ± 0.3
9	65 ± 5	5.6 ± 0.2	7.8 ± 1.5
10	65 ± 5	11.6 ± 0.3	7.1 ± 0.4
11	65 ± 5	21.6 ± 0.5	1.9 ± 0.3
12	65 ± 5	35.2 ± 0.5	0.8 ± 0.3

3.2 实验误差分析

本实验的系统误差包括:

1) 实验仪器造成的误差,如实验系统中喷雾不稳定造成的误差,激光雾化水滴粒径测量仪校准程度导致水滴粒径测量的误差,实验过程中摄像头轻微抖动造成的误差等。

2) 环境因素造成的误差,如实验段的温度、湿度变化造成的误差,以及外界光线不均匀造成的视频色度误差等。

3) 视频图像数据处理中计算机的舍入误差。

本实验的随机误差包括:

1) 气动喷嘴喷雾颗粒不均匀造成的误差。

2) 测量方法造成的误差,如视频数据的图像处理中展开表面和粘贴表面中所做的近似处理造成的误差。

为减少实验系统误差,在正式实验录像之前开启气动喷嘴和风机维持喷雾 3~5 min,然后迅速安装试件并开始实验。这样一方面使喷雾系统达到稳定状态,另一方面使实验段的温度、湿度达

到平衡状态。此外,本实验对相同工况采取重复实验并取平均值的方法减少实验的随机误差。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以圆柱为例研究了水滴撞击特性参数的动态图像测量方法,该方法结合先进的计算机图像处理技术,将水滴撞击特性参数与 RGB 色度空间的比色信息建立关联。将本实验结果与 NASA 实验结果和数值仿真结果进行对比,可以得出如下结论:

1) 水滴撞击特性的动态图像测量方法可以准确的测量水滴撞击特性数值参数 S_m 和比值参数 E_m/β_m 及 β/β_m 分布,参数与动态视频数据 RGB 色度空间的比色信息可以建立较好的关联,实验结果可重复误差率小于 15%。

2) 水滴撞击特性参数 S_m , E_m 和 β_m 之间存在内在关联。

4.2 讨论

本实验首先进行了两个基本假设,将视频色度数据与试件表面撞击的水量建立关联;然后将实验阶段划分为欠饱和区、平衡区和过饱和区,平衡区内不同时刻归一化结果的一致性说明该区域实验状态稳定,可以较好地反映水滴撞击特性;最后通过比色值 $\bar{C}$ 积分的极限行为,将比色结果 $\bar{C}$ 与水滴撞击特性参数建立关联,精确地确定参数 S_m 和 E_m/β_m 。本文研究的实验方法与 NASA 实验方法相比具有以下优点:

1) 本实验记录下了染色过程的动态图像视频数据,该数据是试件表面色度值的时序信号,数据信息远大于 NASA 的吸水纸染色数据。

2) NASA 的方法是从染色后的吸水纸中提取染料的物理/化学数据,数据处理过程较复杂;本实验方法获得的染色过程视频属于光学数据,结合计算机图像处理等先进技术,提取水撞击特性参数的较方便。

3) NASA 的部分水撞击特性结果是上世纪 50 年代测得的,限于当时技术水平,对水滴粒径分布的标定并不准确;本实验方法应用激光雾化颗粒度测试仪可以方便准确地标定水滴粒径分布。

后续研究中,将把试件表面染色过程视频数据看作试件表面色度随时间增长的时序信号,通过进一步的信号处理和图像处理将比色信息与 β_m 建立关联;或应用实验标定的方法得到 β_m 的

值. 最终获取完整的水撞击特性参数(即 S_m , E_m 以及 β 分布), 并在此基础上研究 S_m , E_m 和 β_m 之间的内在关联. 该实验方法对发动机叶片、帽罩和直升机旋翼等中小尺度防冰部件(与飞机翼型相比)的水撞击特性研究具有重要应用价值.

参考文献:

- [1] Sabri F, Trifu O, Parachivoiu R I. In-flight ice accretion simulation in SLD conditions[R]. AIAA-2007-4282, 2007.
- [2] NTSB. Ntsb team investigation airliner crash near buffalo [EB/OL]. [2009-02-13]. <http://www.nts.gov/pressrel/2009/090213.html>.
- [3] NTSB. Most wanted transportation safety improvements aviation issue areas [EB/OL]. [2008-12-19]. http://www.nts.gov/recs/mostwanted/aviation_issues.htm.
- [4] Gelde T F, Smyers W H, Von Glahn U. Experimental droplet impingement on several two-dimensional airfoils with thickness ratios of 6 to 16 percent[R]. NACA TN 3839, 1956.
- [5] Lewis J P, Ruggeri R S. Experimental droplet impingement on four bodies of revolution[R]. NACA TN 4092, 1957.
- [6] Gelder T F. Droplet impingement and ingestion by supersonic nose inlet in subsonic tunnel conditions[R]. NACA TN 4268, 1958.
- [7] Papadakis M, Elangonan R, Freund G A, et al. An experimental method for measuring water droplet impingement efficiency on two- and three-dimensional bodies[R]. NASA CR 4257, 1989.
- [8] Papadakis M, Kuohsing E Hung, Giao T V. Experimental investigation of water droplet impingement on airfoils, finite wings, and an S-duct engine inlet[R]. NASA/TM-2002-211700, 2002. 10.
- [9] Papadakis M, Rachman A, Wong S C. Water impingement experiments on a NACA 23012 airfoil with simulated glaze ice shapes[R]. AIAA-2004-0565, 2004.
- [10] Papadakis M, Hung K E, Rachman A, et al. Experimental study of supercooled large drop impingement on ice shapes[R]. DOT/FAA/AR-08/13.
- [11] Bourgault Y, Habashi W G, Dompierre J, et al. An Eulerian approach to supercooled droplets impingement calculations[R]. AIAA-1997-0176, 1997.
- [12] Bourgault Y, Boutanos Z, Habashi W G. Three-dimensional Eulerian approach to droplet impingement simulation using FENSAP-ICE Part 1: model, algorithm and validation [J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(1): 95-103.