

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220958-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220958

三维冰形激光测量技术在结冰风洞中的应用

魏龙涛, 左承林, 郭向东, 刘森云, 郭奇灵

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 介绍了 ROMER 绝对关节臂测量仪在结冰风洞中测量冰形三维结构的原理, 提出了一种模型-冰形快速重构方法, 通过风洞试验获得了典型的霜冰、粗糙冰和羊角冰, 使用 ROMER 绝对关节臂测量仪对积冰三维形貌进行了测量, 获得了模型表面的积冰三维数据。结果表明: 霜冰三维结果与实际冰形结果高度一致, 可以准确地测量出积冰细节特征; 三维扫描可以测量出热刀法无法获取的粗糙冰结果; 与热刀法获取的羊角冰二维轮廓相比, 三维冰形结果在同一剖面的冰形轮廓的结冰范围和冰角高度基本一致, 平均冰形厚度偏差约 2.5 mm。

关 键 词: 冰形三维结构; ROMER 绝对关节臂测量仪; 霜冰; 粗糙冰; 羊角冰

中图分类号: V216.8

文献标志码: A

Application of 3D ice shape laser measurement technology in icing wind tunnel

WEI Longtao, ZUO Chenglin, GUO Xiangdong, LIU Senyun, GUO Qiling

(Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The principle of measuring 3D structure for ice accretion in icing wind tunnel with ROMER measuring instrument was introduced, and a fast reconstruction method for model with ice shape was proposed. Typical rime ice, rough ice and horned ice were obtained by wind tunnel test. The 3D morphology of ice accretion was measured by ROMER instrument, and the 3D data of ice accretion on the surface of the model were obtained. The results showed that 3D results of rime ice were highly consistent with the actual ice shape, and the detailed characteristics of ice accumulation can be accurately measured. 3D scanning technology can measure the rough ice results which can not be obtained by hot knife method. Compared with the ice trajectory of the shorn ice obtained by the hot knife method, the ice trajectory of the 3D ice shape in the same section had the same icing range and icing level, with the average thickness deviation of ice up to 2.5 mm.

Keywords: 3D structure of ice; ROMER measuring instrument; rime ice; rough ice; horn ice

飞机在结冰气象条件下飞行时, 迎风部件会形成结冰。飞机结冰会使飞机质量增大, 同时会破坏飞机的气动外形, 对安全飞行构成严重威胁, 为了提高飞行安全, 需要探索飞机结冰机理^[1-2]。

目前, 常用的飞机结冰研究手段主要有: 仿真计算、飞行试验和地面模拟试验。随着计算机技术的发展, 仿真计算已成为结冰研究的重要手段, 但对于复杂工况下的结冰, 仿真计算尚不能获得

收稿日期: 2022-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(52006235)

作者简介: 魏龙涛(1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事飞机结冰与防除冰试验技术研究。

通信作者: 左承林(1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事低速风洞非接触测量研究。E-mail: zuochenglin@cardc.cn

引用格式: 魏龙涛, 左承林, 郭向东, 等. 三维冰形激光测量技术在结冰风洞中的应用[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220958. WEI Longtao, ZUO Chenglin, GUO Xiangdong, et al. Application of 3D ice shape laser measurement technology in icing wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220958.

准确的冰形;飞行试验可以直接得到结冰外形,但机载设备不能准确地测量结冰环境参数和结冰冰形,主要用来验证防除冰系统性能或评估结冰飞行安全,且飞行试验成本昂贵;地面模拟试验通常是指结冰风洞试验,通过在地面人工制造结冰云雾环境,进行结冰研究,相较于仿真计算和飞行试验,其结果较为准确且成本较低,是开展飞机结冰研究及飞机防除冰系统验证的重要手段,在飞机结冰适航审定和结冰安全评估中扮演着不可或缺的重要角色^[3-5]。

在结冰风洞试验中,结冰外形的几何轮廓是最重要的结冰试验结果之一,是临界冰形选取、防除冰系统性能评估、冰模研制等试验目标的关键参数,结冰冰形的测量方法是开展结冰风洞试验的关键技术之一^[6-10]。目前,国内外各大型结冰风洞中获取冰形几何外形的方法主要是“热刀法”,该方法操作简单,易于实现,通过获得的若干截面的二维冰形轮廓可以拟合出结冰的三维信息;但在使用热刀切割冰形时,会融化切缝周围的结冰,破坏冰形结构,手工绘制冰形轨迹线时,由于

铅笔角度、位置等因素也对冰形的测量结果带入误差^[11-12]。鉴于此,近年来发展了许多基于光学的非接触测量冰形三维结构的方法,本文主要介绍了基于 ROMER 激光测量仪的三维冰形测量技术在 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 结冰风洞中的应用,并介绍了使用 ROMER 激光测量仪获取的霜冰、粗糙冰和羊角冰结果。

1 试验设备

1.1 结冰风洞

中国空气动力研究与发展中心的 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 结冰风洞是一座闭口回流式高亚声速风洞,是目前世界上尺寸最大的结冰风洞,轮廓图如图 1 所示,主要包括动力系统、制冷系统、喷雾系统、高度模拟系统、热气防冰系统、电热防冰系统、发动机进气模拟系统等^[13-16]。其中,喷雾系统由 1 000 个水气内混合喷嘴组成,通过改变喷嘴的水、气压力可控制液滴粒径尺寸和液态水含量大小^[17-18],可覆盖的液滴粒径范围为 $10 \sim 300\text{ }\mu\text{m}$,液态水含量范围为 $0.2 \sim 3\text{ g/m}^3$ 。

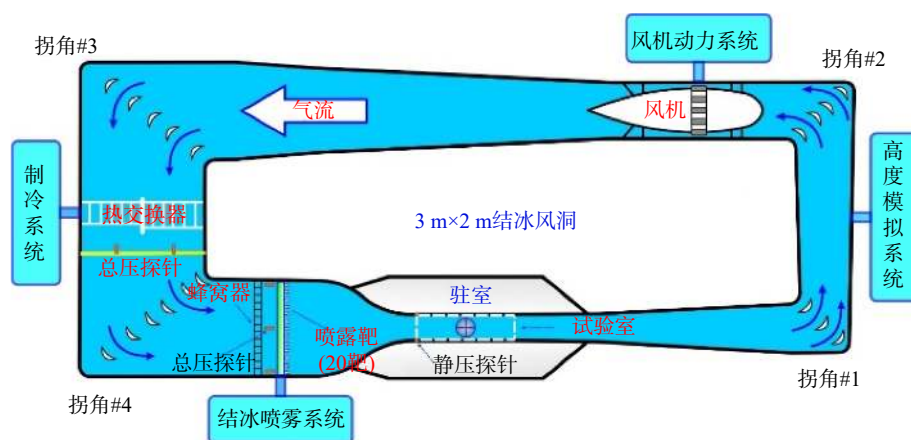


图 1 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 结冰风洞轮廓图

Fig. 1 Configuration of the $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ icing wind tunnel

1.2 测量设备

激光测量冰形原理图如图 2 所示,激光器产生激光片光投射到积冰表面形成一束激光光条,激光光条受积冰调制发生变形,摄像机一定角度拍摄该激光光条,利用图像处理算法提取激光光条中心线,根据事先标定的激光平面与摄像机之间的集合关系,解算激光光条中心线上像素的三维坐标,移动关节臂上的激光扫描探头,使激光光条扫描整个待测积冰表面,通过多次测量结果,从而实现完整的三维冰形形貌的测量。

本文中使用的激光测量设备是瑞典海克斯康公司生产的商用 3D 激光测量仪——ROMER 绝对关节臂测量仪,如图 3 所示。该设备由关节臂和激光扫描探头构成,可实现 2.8 m 范围内的 7 自由度任意测量,测量精度为 $\pm 0.038\text{ mm}$,扫描仪含磁力基座^[19-20],冰形扫描时,可固定在结冰风洞中,保证冰形测量过程中不会发生位移。使用 ROMER 绝对关节臂测量仪扫描冰形外部三维结构,可获得冰形三维结构数据点云,进而通过三维建模和虚拟重现,实现冰形三维结构测量。

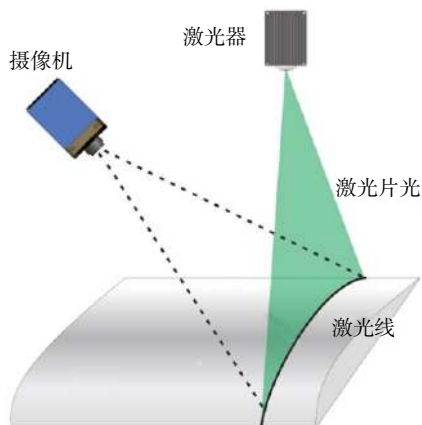


图 2 激光测量冰形原理图

Fig. 2 Principle of laser measurement of ice shape



图 3 ROMER 绝对关节臂测量仪

Fig. 3 ROMER measuring instrument

ROMER 绝对关节臂测量仪的分辨率与扫描时激光探头的移动速度有关, 因此, 在扫描时应尽可能慢地移动激光探头以获得最高分辨率, 并反复扫描同一区域, 以获得完整区域特征。

2 试验方法

2.1 显影剂

ROMER 绝对关节臂测量仪发射的激光光线照射到积冰表面(特别是明冰表面)时, 由于积冰对激光光束的透射作用, 激光中心线难以确定, 会严重影响冰形测量精度, 因此, 在扫描前需要在积冰表面喷涂显影剂, 增强积冰表面的漫反射; 显影剂由具有高反射性能的二氧化钛(TiO_2)粉末和高挥发性的二氯甲烷(CH_2Cl_2)溶液组成, 二氧化钛和二氯甲烷按照一定的比例混合, 形成悬浊液, 使用喷枪均匀地喷涂在待测积冰表面, 喷涂显影剂前后的积冰表面如图 4 所示。



(a) 喷涂显影剂前



(b) 喷涂显影剂后

图 4 喷涂显影剂前后积冰表面对比

Fig. 4 Comparison of ice surface before and after spraying the ice with white paint

2.2 试验步骤

使用 ROMER 绝对关节臂测量仪测量模型表面积冰的试验步骤如下:

1) 结冰试验前, 将模型调整至试验状态, 选取合适位置固定 ROMER 绝对关节臂测量仪, 确保机械臂能够覆盖待测区域和对齐参考特征块, 将对齐参考特征块固定在风洞下转盘特定位置上。

2) 利用 ROMER 绝对关节臂测量仪激光扫描探头扫描模型前缘待测区域处模型干净表面轮廓, 获得模型点云数据, 然后利用 ROMER 扫描仪硬质接触探头测量三维扫描对齐参考特征块上的 3 个特征面。

3) 扫描结束后, 检查模型点云数据, 确保数据充分覆盖待测区域, 减少数据断层出现。

4) 结冰试验结束后, 在待测位置积冰上均匀喷涂显影剂, 然后选取合适位置固定 ROMER 绝对关节臂测量仪, 确保机械臂能够覆盖待测区域, 将对齐参考特征块固定在风洞下转盘特定位置上。

5) 使用 ROMER 绝对关节臂测量仪激光扫描探头测量待测区域内积冰三维轮廓, 然后利用 ROMER 扫描仪硬质探头测量对齐参考特征块上的 3 个特征面。

6) 扫描结束后, 检查冰形点云数据, 确保数据充分覆盖待测区域, 减少数据断层出现。

7) 分别将干净模型表面点云数据和冰形点云数据进行重构,形成模型重构曲面和冰形重构曲面,将两者对齐匹配得到模型-冰形重构曲面。

2.3 点云数据处理

扫描完成后会形成有序点云数据和无序点云数据,只保留有序点云数据,对其进行曲面重构。点云数据处理的第一步是减少噪声,在扫描时,由于扫描仪自身的不确定性,会有部分点偏移扫描曲面,成为孤点,使用减少噪声命令,可以将点移至统计的正确位置,使点的排列更平滑。然后是合并,将点云数据转换为三角形曲面网格,在合并过程中会出现不同数量和大小的孔洞,这是因为扫描仪上的相机和激光之间是有偏移的(通常是 30°),在扫描过程中,当积冰具有一定深度或者被其他积冰特征遮挡时,相机不能“看到”投

射的激光线,便不能扫描到冰形特征,因此会形成大小不一的孔洞,需要使用工具手动修补这些孔洞。相对而言,明冰的结构最为复杂,点云数据转换成三角形曲面网格后产生的孔洞的大小、数量都是最大和最多的,修补难度最大;在对孔洞进行修补时,较小的孔洞可直接使用“内部孔”命令进行填充,对于较大的孔洞需要使用“边界孔”“搭桥”等命令,将大孔分割成小孔,然后修补,应尽量减少使用“内部孔”命令将大孔直接填充,图 5 是将大孔直接填充与分割填充的结果对比图,从图中结果可以看出,分割填充的结果与周围的冰形结果更加接近。将点云数据处理完成后,分别形成模型重构曲面和冰形重构曲面,如图 6 所示。最后使用网格医生,对曲面网格内的缺陷进行修复。

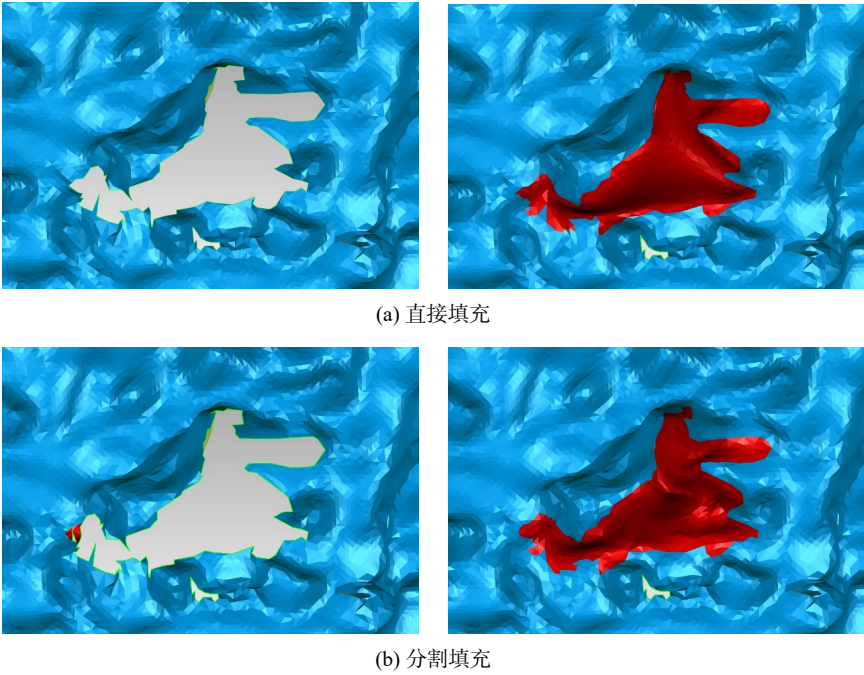


图 5 直接填充与分割填充结果对比
Fig. 5 Comparison of direct filling and split filling results

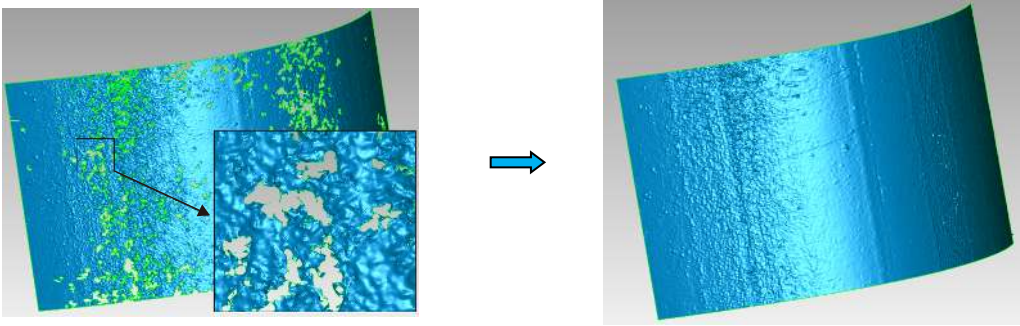


图 6 曲面重构过程
Fig. 6 Process of surface reconstruction

2.4 模型冰形对齐组合

得到模型重构曲面和冰形重构曲面后, 还需将两者组合在一起, 最终获得模型-冰形组合曲面, 即“积雪在模型上”。然而, 在两次扫描的过程中, ROMER 绝对关节臂测量仪的位置并不固定, 因此, 模型曲面和冰形曲面初始位置并不在同一坐标系中, 需要手动对齐组合。对齐之前和对齐之后的模型与冰形重构曲面如图 7 所示, 可以看到, 对齐之前的模型曲面和冰形曲面有明显的错位。

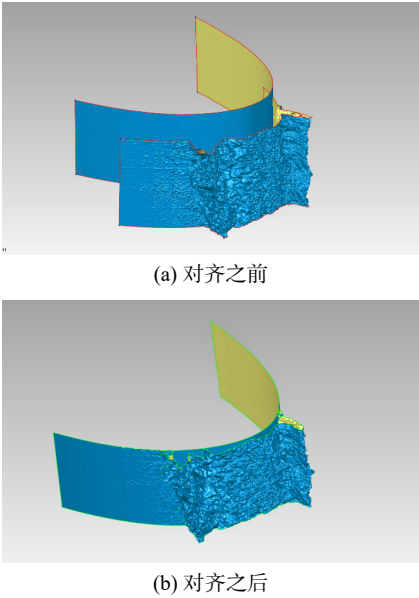


图 7 对齐前后的模型-冰形重构曲面
Fig. 7 Alignment before and after model-ice shape reconstruction surface

目前, 针对模型与冰形重构曲面对齐问题, 主要有两种方法: 一种是利用模型上积雪无法覆盖的公共特征(如螺丝孔、沉头孔等)来实现对齐; 另一种是在模型表面上钻取特征孔或粘贴特征点建立公共特征来实现对齐, 如美国 IRT(icing research tunnel)结冰风洞便采取这种方式。但这两种方法主要存在以下缺点: 受限于模型加工精度, 公共特征并非标准的圆形或点, 在对齐过程中会出现偏差, 导致模型和冰形匹配效果差; 而在模型上钻取特征孔或粘贴特征点, 不但难以准确固定特征结构的设置位置, 影响匹配效果, 甚至会破坏试验模型, 且增加了模型准备周期, 降低试

验效率。

基于此, 设计了三维扫描对齐参考特征块(如图 8), 发展了一种模型-冰形快速组合对齐方法, 可快速完成模型重构曲面与冰形重构曲面的对齐组合, 其适应性好、精度高、效率快。使用方法如下: 在扫描模型轮廓和积雪三维轮廓时, 将对齐参考特征块固定在风洞下转盘的同一位置上, 完成模型曲面扫描和积雪曲面扫描后, 扫描特征块上 3 个特征平面, 对齐模型曲面和冰形曲面时, 只需分别将 3 个特征平面相匹配对齐即可。

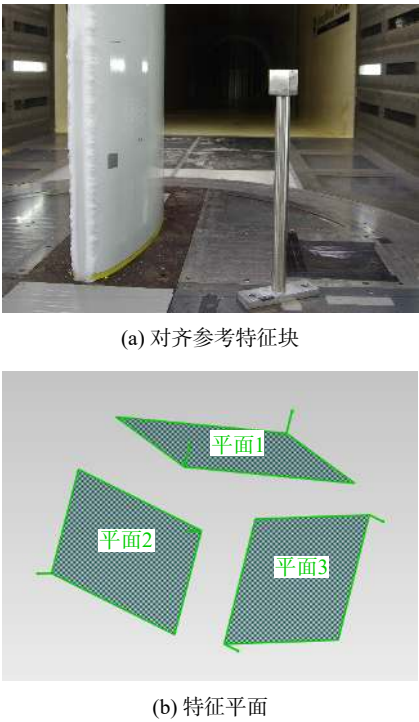


图 8 三维扫描对齐参考特征块及特征平面
Fig. 8 Reference feature block and the feature plane with 3D scanning alignment technology

3 试验结果与分析

3.1 试验设置

试验在中国空气动力研究与发展中心 3 m × 2 m 结冰风洞开展, 试验模型为某飞机机翼模型, 模型前缘具有与真实飞机前缘相同的气动外形。试验中获得了典型的霜冰、粗糙冰和羊角冰, 试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

冰形	海拔高度/m	气流速度/(m/s)	气流总温/K	攻角/(°)	液滴粒径/ μm	液态水含量/(g/m^3)	喷雾时间/s
霜冰	当地高度	60.0	251.15	0	20.0	0.80	1 200
粗糙冰	1 900	80.0	266.15	2.15	24.0	0.65	120
明冰	1 900	80.0	266.15	2.15	24.0	0.65	1 343

常温显影剂喷涂到冰形表面时,会造成部分积冰融化,影响试验结果,因此,试验时将显影剂放在风洞驻室中,提前预冷显影剂溶液。喷雾结束,将风洞静温降至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,降低因人员及设备进入试验段带入热量而造成的影响,并且,在冰形扫描过程中保持风洞制冷系统开启。

3.2 试验结果

3.2.1 霜冰测量结果

霜冰冰形结果比较规则,冰形之间孔隙较少,三维扫描难度相对较低,试验工况模型迎角为 0° ,且模型为左右对称结构,因此只对模型上一半的积冰进行了三维扫描,图 9 给出了霜冰照片与三维扫描结果视觉对比,从对比结果中可以看出,实际的霜冰结果与三维扫描结果高度一致,并且三维扫描可以比较准确地扫描出积冰细节特征。

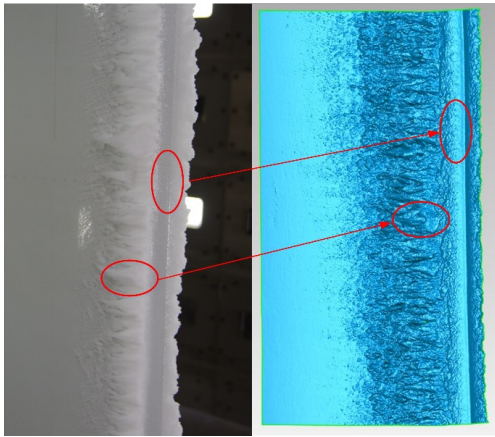


图 9 霜冰照片与三维扫描结果视觉对比

Fig. 9 Visual comparison of photographs and 3D scanning of rime ice

3.2.2 粗糙冰测量结果

粗糙冰是指在模型表面形成的颗粒状积冰冰层。图 10 和图 11 分别给出了结冰风洞试验粗糙冰冰形照片和粗糙冰三维扫描结果,从图中可以看出,重构后的冰形三维扫描结果可以清晰地反



图 10 粗糙冰冰形照片

Fig. 10 Photograph of rough ice

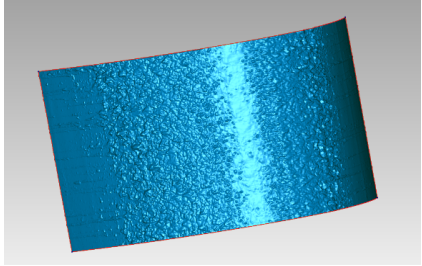


图 11 粗糙冰三维扫描结果

Fig. 11 3D scanning results of rough ice

映出模型上的颗粒状粗糙冰情况。粗糙冰结构相对比较简单,由于结冰时间短,只有薄薄的一层,传统的热刀法无法获取粗糙冰信息,一般采用与砂纸对比的方式来估算粗糙冰的颗粒大小和分布情况,但这种方法只能定性地进行测量;而三维冰形结果可使用其他数据处理软件进行后处理,更加准确地统计出粗糙冰的颗粒大小及分布情况。

3.2.3 明冰测量结果

本次试验中获取的明冰按照结冰形态也称作“羊角冰”。图 12 和图 13 分别给出了结冰风洞试验羊角冰冰形照片和羊角冰三维扫描结果,从图 13 中结果可以看出三维扫描重构后的冰形曲面可以比较准确地体现出“羊角”这一冰形特征,但是由于明冰冰形结构比较复杂,冰形之间孔隙较多,部分积冰特征不能被扫描仪“看到”,重构后



图 12 羊角冰冰形照片

Fig. 12 Photograph of horn ice

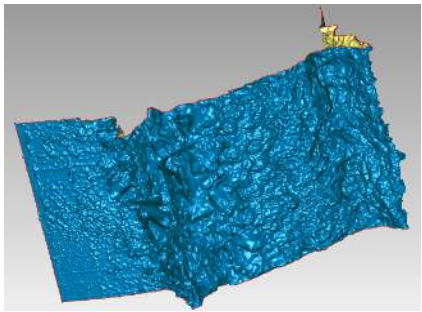


图 13 羊角冰三维扫描结果

Fig. 13 3D scanning result of horn ice

的冰形曲面与实际冰形结构略有差异。

3.2.4 测量精度分析

与霜冰和粗糙冰相比, 羊角冰的结构最为复杂, 采用热刀法获取二维冰形轮廓时的误差最大, 因此, 本文只对羊角冰的测量精度进行了分析。截取三维扫描中间位置剖面(图 14)的冰形二维形状与热刀法获得的同一位置二维冰形进行对比, 结果如图 15 所示, 从对比图中可以看出, 热刀法描绘的冰形轮廓与三维扫描截取的冰形轮廓, 两者的结冰范围、冰角高度基本一致, 但三维扫描结果截取的剖面相比热刀法结果略小, 这是因为热刀法用铅笔描绘冰形时, 铅笔自身具有一定的尺寸, 故而取得的冰形稍微偏大, 同时, 对于一些细小的冰形特征无法描绘, 而三维扫描可以将这些细节完整地保留下来。图 15 中右边二维冰形轨迹相较于三维冰形轨迹显著偏大, 可能是冰形截取截面之上位置有积冰突出, 描绘冰形时阻碍铅笔落点, 导致描绘的该位置二维冰形轨迹略偏大。

进一步地, 图 16 给出了热刀法获取的二维冰形与三维扫描截面冰形的冰厚分布(图中横坐标表示从下翼面到上翼面点的个数, 下同), 二维与

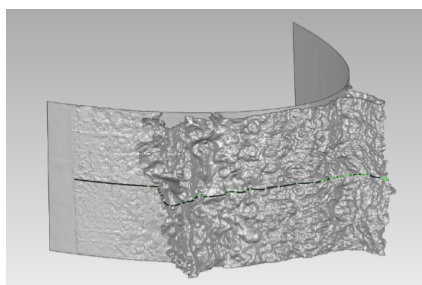


图 14 三维扫描冰形截取位置

Fig. 14 Intercept position of 3D scans

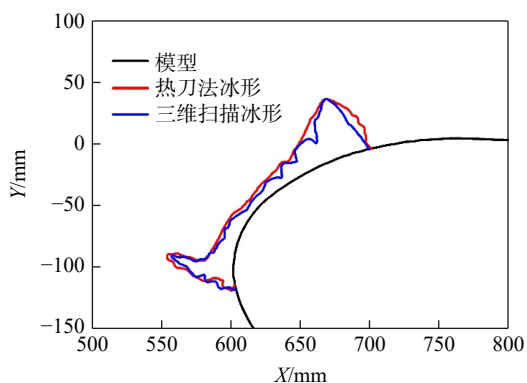


图 15 三维扫描结果与热刀法结果对比

Fig. 15 Comparison between 3D scanning result and hot knife method result

三维冰形左侧冰角高度分别约为 48.2 mm 和 45.1 mm, 偏差为 3.1 mm, 右侧冰角高度分别约为 47.9 mm 和 47.8 mm, 偏差仅为 0.1 mm; 经过计算, 图 17 给出了两种方法在同一位置的冰形厚度偏差, 两种方法获取的冰形厚度最大偏差约 8.1 mm, 平均偏差约 2.5 mm。

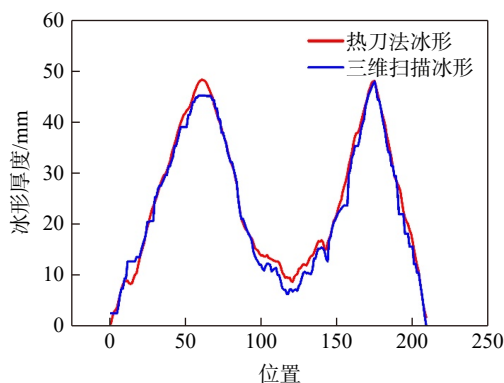


图 16 二维与三维冰形厚度分布

Fig. 16 2D and 3D ice thickness distribution

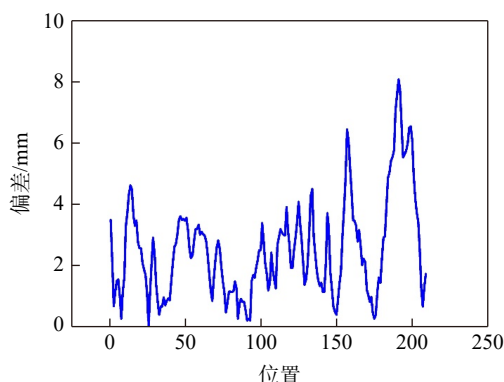


图 17 二维与三维冰形厚度偏差

Fig. 17 2D and 3D ice thickness deviation

4 结 论

三维冰形激光测量技术不同于传统的热刀法, 不会破坏冰形结构, 且扫描的数据信息全、测量精度高, 能够测量出积冰的三维结构, 对于热刀法无法获取的粗糙冰等冰形结果, 三维冰形激光测量技术也能比较准确地获取相应的冰形数据; 但相较于热刀法, 三维冰形激光测量技术耗时较长, 且后处理方法也更加复杂。冰形三维测量技术能够更加准确、直观地测量出积冰的几何特征, 是结冰试验冰形测量技术的发展趋势, 需要进一步完善和发展冰形三维激光测量技术, 为飞机结冰研究提供更准确的数据支撑。

参考文献:

- [1] LYNCH F T, KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(8): 669-767.
- [2] 范洁川, 于涛. 飞机结冰风洞试验模拟研究[J]. *实验流体力学*, 2007, 21(1): 68-72, 92.
FAN Jiechuan, YU Tao. A study of simulation for airplane icing tests in icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1): 68-72, 92. (in Chinese)
- [3] KIND R J, POTAPCZUK M G, FEO A, et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1998, 34(5/6): 257-345.
- [4] 易贤. 飞机结冰的数值计算与结冰试验相似准则研究[D]. 四川 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007.
YI Xian. Numerical computation of aircraft icing and study on icing test scaling law[D]. Mianyang Sichuan: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007. (in Chinese)
- [5] 郭向东, 胡站伟, 丁亮, 等. 大型结冰风洞中冰晶热/力平衡特性数值研究[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(3): 478-491.
GUO Xiangdong, HU Zhanwei, DING Liang, et al. Numerical investigation of thermal and mechanical equilibrium characteristics of ice crystal in large icing wind tunnel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(3): 478-491. (in Chinese)
- [6] 王斌, 刘桂华, 张利萍, 等. 基于线结构光的冰横截面轮廓测量[J]. *实验流体力学*, 2016, 30(3): 14-20.
WANG Bin, LIU Guihua, ZHANG Liping, et al. Ice cross sectional profile measurement based on line structured light[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(3): 14-20. (in Chinese)
- [7] 郭龙, 秦三春, 李强, 等. 基于机器视觉的飞机模型冰形轮廓提取方法研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2020(6): 15-20.
GUO Long, QIN Sanchun, LI Qiang, et al. Research on ice contour extraction of aircraft model based on machine vision[J]. *Automation & Instrumentation*, 2020(6): 15-20. (in Chinese)
- [8] 康含玉, 刘桂华, 王斌, 等. 冰形表面激光光带中心线快速提取方法[J]. *实验流体力学*, 2017, 31(5): 81-87.
KANG Hanyu, LIU Guihua, WANG Bin, et al. A fast method of extracting the laser light bar's centerline in the ice model[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2017, 31(5): 81-87. (in Chinese)
- [9] 柳庆林, 倪章松, 张平涛, 等. 低温环境下复杂冰形快速三维测量技术[J]. *光学技术*, 2020, 46(6): 641-646.
LIU Qinglin, NI Zhangsong, ZHANG Pingtao, et al. Fast 3D measurement technology of complex ice shape in low temperature environment[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(6): 641-646. (in Chinese)
- [10] 李伟斌, 易贤, 杜雁霞, 等. 基于变分分割模型的结冰冰形测量方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(1): 120167.
LI Weibin, YI Xian, DU Yanxia, et al. A measurement approach for ice shape based on variational segmentation model[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(1): 120167. (in Chinese)
- [11] 郭龙, 马军, 李明, 等. 基于三维扫描技术的结冰风洞冰形非接触测量研究[J]. *中国测试*, 2018, 44(9): 18-22.
GUO Long, MA Jun, LI Ming, et al. Non-contact measurement of ice shape in icing wind tunnel based on 3D scanning technology[J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(9): 18-22. (in Chinese)
- [12] 易贤, 王斌, 李伟斌, 等. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. *航空学报*, 2017, 38(2): 520711.
YI Xian, WANG Bin, LI Weibin, et al. Research progress on ice shape measurement approaches for aircraft icing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(2): 520711. (in Chinese)
- [13] 郭向东, 柳庆林, 赖庆仁, 等. 大型结冰风洞气流场适航符合性验证[J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(2): 184-195.
GUO Xiangdong, LIU Qinglin, LAI Qingren, et al. Airworthiness compliance verification of aerodynamic flowfield of a large-scale icing wind tunnel[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(2): 184-195. (in Chinese)
- [14] 郭向东, 张平涛, 张珂, 等. 3 m × 2 m 结冰风洞热流场品质提高及评估[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(4): 41-51.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHANG Ke, et al. Improvement and evaluation of thermal flow-field quality in CARDIC icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(4): 41-51. (in Chinese)
- [15] 郭向东, 张平涛, 赵献礼, 等. 大型结冰风洞热流场符合性验证[J]. *实验流体力学*, 2020, 34(5): 79-88.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHAO Xianli, et al. The compliance verification of thermodynamic flowfield in the large icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, 34(5): 79-88. (in Chinese)
- [16] 倪章松, 刘森云, 王桥, 等. 3 m × 2 m 结冰风洞试验技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(6): 46-53.
NI Zhangsong, LIU Senyun, WANG Qiao, et al. Research progress of test technologies for 3 m × 2 m icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2019, 33(6): 46-53. (in Chinese)
- [17] 王梓旭, 沈浩, 郭龙, 等. 3 m × 2 m 结冰风洞云雾参数校测方法[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(2): 61-67.
WANG Zixu, SHEN Hao, GUO Long, et al. Cloud calibration method of 3 m × 2 m icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(2): 61-67. (in Chinese)
- [18] 郭向东, 张平涛, 赵照, 等. 大型结冰风洞云雾场适航应用符合性验证[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 123879.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHAO Zhao, et al. Airworthiness application compliance verification of cloud flowfield in large icing wind tunnel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 123879. (in Chinese)
- [19] LEE S, BROEREN A P, ADDY H E, et al. Development of 3D ice accretion measurement method[C]// 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. New Orleans, Louisiana, US: AIAA, 2012: 1-17.
- [20] LEE S, BROEREN A P, KREEGER R E, et al. Implementation and validation of 3-D ice accretion measurement methodology[R]. AIAA 2014-2613, 2014.

(编辑: 陈 越)