ICS 49.020
CCS V 35

T/CS

团 体 标 准

T/CS XXX—2026

民用轻小型无人机系统环境试验方法 冻雨试验

Environmental test methods for civil light and small unmanned aircraft systems—freezing rain test

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布 2026-XX-XX 实施

中国商品学会 发 布

目　　次

前言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 原理 1
5 试验条件 2
6 仪器设备 2
7 样品 3
8 试验步骤 4
9 试验数据处理 5
10 试验报告 5
参考文献 7

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由电子科技大学（深圳）高等研究院提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：电子科技大学（深圳）高等研究院、紫光天际（南京）科技有限公司、天鹰旅(北京)航空科技有限公司。

本文件主要起草人：赵晨、章志华、刘子姣。

民用轻小型无人机系统环境试验方法 冻雨试验

1 范围

本文件规定了民用轻小型无人机系统冻雨试验的原理、试验条件、仪器设备、样品、试验步骤、试验数据处理和试验报告等方面的要求。

本文件适用于最大起飞质量在 0.25 kg～150 kg 之间的民用轻小型无人机系统的实验室冻雨积冰试验和冻雨环境下飞行考核试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 27418 测量不确定度评定和表示

GB/T 38058 民用多旋翼无人机系统试验方法

GB/T 38924.1 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第 1 部分：总则

GB/T 38924.2 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第 2 部分：低温试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

冻雨积冰 freezing rain icing

过冷水滴在温度低于0 ℃的无人机表面撞击并冻结，形成附着冰层的物理过程及其产物。

3.2

积冰厚度 ice accretion thickness

冻雨积冰过程中，在无人机被测表面法线方向上所形成的冰层尺寸，以毫米（mm）为单位。

3.3

飞行考核 flight assessment

在模拟冻雨环境或受控冻雨条件下，使无人机按预定科目实施起飞、悬停、航线飞行和着陆等操作，同时记录飞行参数与操纵响应，以评估无人机在冻雨积冰状态下飞行能力的试验活动。

4 原理

4.1 实验室冻雨积冰试验

4.1.1 冻雨积冰的物理本质是过冷水滴在低于 0 ℃的表面上的“撞击—冻结”竞争过程。冻结发生的快慢与程度取决于表面温度、水滴温度与尺寸、撞击动能及表面传热条件：

a) 过冷水滴撞击后未完全冻结时，剩余液态水在气动力和重力作用下沿表面流动并逐层冻结，倾向于形成表面光滑、透明密实的明冰；

b）撞击后迅速完全冻结时，则形成含气泡较多、表面较粗糙的雾凇或混合冰。

4.1.2 实验室喷雾在静止或低速来流条件下产生积冰，其冰形主要由喷雾的液态水含量（LWC）、水滴中值体积直径（MVD）、风速和样品表面温度决定，与飞行中旋翼或机翼前缘所经历的动态收集过程存在差异。

4.2 冻雨环境下飞行考核试验

4.2.1 冻雨环境下飞行考核试验在模拟冻雨环境或受控冻雨条件下对无人机实施飞行操作，测量并记录无人机在积冰状态下的飞行性能与操纵响应，以评估无人机在冻雨环境中的飞行能力。

4.2.2 飞行考核试验所测量的“积冰状态下的飞行性能与操纵响应”，其退化机理与旋翼（或机翼）前缘的积冰分布直接相关。旋翼桨叶的积冰主要集中在前缘和下表面，积冰会同时降低旋翼拉力并增大扭矩和功率需求。

4.2.3 飞行考核中记录的位置、姿态、电机转速等参数，应能够反映上述退化路径，而非仅记录是否“能飞”。

5 试验条件

5.1 实验室冻雨积冰试验条件

5.1.1 实验室冻雨积冰试验温度应在-6 ℃～0 ℃范围内。当委托方要求扩展至-10 ℃～-6 ℃时，应在试验报告中明确记录实际温度，并将该条件表述为“低温冻雨/混合冰条件”。

5.1.2 冻雨条件下的 MVD 应大于 500 μm。具体 MVD 设定值及对应的水滴谱分布应根据委托方确定的冻雨条件在试验大纲中规定。

5.1.3 自然冻雨模拟时，LWC 应按 CCAR-25《中国民用航空规章第 25 部 运输类飞机适航标准》附录 O 冻雨包线选取，并记录 LWC 及对应温度。加速积冰时 LWC 不应高于 0.8 g/m³，注明“加速积冰条件下获得”，分析冰形可比性并给出相对附录 O 对应值的倍数。

注：附录 O 以水平范围 17.4 海里为基准；水平范围不同时按附录 O 规定的尺度因子修正，报告应注明所取水平范围或基准值。采用 17.4 海里基准时，应明确声明。

5.1.4 实验室风速用于控制喷雾输运和撞击收集，不等同于飞行空速；以积冰形态考核为主时，实验室风速不应低于 5 m/s，可在 5 m/s～10 m/s 范围内选取，并在报告中记录实际风速；研究收集效率影响时，应设置至少 3 个风速水平并记录各水平值。

5.1.5 除终止厚度外，应记录积冰增长速率及关键性能参数随时间的变化，避免仅以最终厚度确定持续时间。

5.1.6 实验室在降温或升温过程中的温度变化速率不应大于 3 ℃/min。

5.2 冻雨环境下飞行考核试验条件

5.2.1 飞行考核中无人机运动状态下的有效 LWC 和收集效率可能与实验室标定不同；报告应说明冻雨条件参考测量位置及其与实验室喷雾标定的对应关系。

5.2.2 地面结冰影响起飞滑跑、着陆冲击和地面操纵，应纳入 8.2.6 观察记录。

5.2.3 除记录风速外应标注风向；侧风可造成不对称积冰，分析操纵响应时需区分积冰不对称与风扰动的影响。

6 仪器设备

6.1 实验室

喷雾用水应为去离子水或等效纯水；喷嘴及管路应伴热防冰堵；喷雾应覆盖样品前缘、上表面及侧面等关键区域；喷雾稳定后 10 min 内箱温应恢复至 5.1.1 规定区间并保持±2 ℃；样品架应刚度足够、低热导率、角度可调；观察窗应防雾，满足 8.1.4 每 10 min 观察记录要求。

6.2 温度测量仪器

温度测量仪器范围为-20 ℃～40 ℃，最大允许误差±0.5 ℃；测点应代表样品关键表面附近气温，飞行考核记录机体附近或地面站环境温度。

6.3 LWC 测量仪

LWC 测量仪最大允许误差不应大于测量值的±10%。LWC 测量仪应采用热线法或冰生长法，校准应覆盖试验所采用的风速、温度、MVD 区间，并在校准证书中明确上述区间及不确定度评定结果。

6.4 MVD 测量仪

MVD 测量仪范围为 40～1000 μm，最大允许误差不应大于测量值的±10%；MVD 测量仪应阵列成像或多普勒干涉法，校准覆盖实际 MVD 范围并关注 500 μm 以上区间。

6.5 风速计

风速计范围为 0～15 m/s，最大允许误差±0.5 m/s；应抗液滴干扰或经含水滴条件校准；喷雾前标定，喷雾期间记录实测风速。

6.6 积冰厚度测量工具

积冰厚度测量工具的分辨力不应大于 0.1 mm，具备非接触或微接触测量能力；透明冰可优先采用激光/光学测厚，不透明冰应辅以机械或探针式测量交叉验证；测量位置试验前标记，保证与 9.1 位置一致。

6.7 飞行数据记录设备

飞行数据记录设备应记录位置、速度、高度、姿态角、电机转速、飞行模式切换、电池电压/电流、旋翼转速指令与实际值差值及飞控告警；各参数统一时间戳，同步误差不应大于 0.1 s，采样率不应低于 20 Hz。

6.8 外部跟踪测量设备

外部跟踪测量设备的数据更新率不应低于飞行数据记录设备；覆盖起飞、悬停、航线飞行和着陆全过程；飞行前统一坐标基准并验证。

6.9 计量检定或校准

LWC、MVD 测量仪校准证书应明确风速、温度、MVD 区间；试验条件超出校准区间时，应重新校准或补充核查，无法补充核查的应按 9.4 评定并报告测量不确定度；冻雨实验室应定期进行喷雾均匀性和温度场均匀性期间核查。

7 样品

7.1 初始状态

试验前逐项确认结构、可动部件、动力、飞控导航通信、地面站均处于正常状态；记录电池状态；明确样品是否带载。

7.2 基线数据

应在无降水、无积冰条件下，按 8.2.2 相同或等效科目获取悬停精度、航线误差、爬升率、姿态响应和电机转速。基线试验与冻雨试验的环境差异应在试验报告中说明。

7.3 清洁与预冷

样品表面清洁干燥、无污染物；记录防护涂层并保持前后一致；关键表面与环境温差不应大于 1 ℃。

7.4 模拟件

模拟件的几何外形应与真实样品一致或明确对应；材料及壁厚使表面热流可比。热惯性不满足相似条件时，应评估并报告其对积冰厚度的影响，且该评估结果不应作为整机冻雨适应性的唯一判据。采用静止模拟件获得的结果应表述为“静止积冰试验结果”。

7.5 安装确认

喷雾前确认样品姿态朝向符合 8.1.1；整机确认突出物不形成非代表性遮蔽；部件确认夹具不遮挡前缘、不优先积冰。

7.6 样品数量与后检查

飞行考核样品通常不应少于 1 架完整系统；两类试验应同一样品依次进行或技术状态相同。试验后应区分并记录积冰直接损伤与积冰脱落/解冻造成的二次损伤。

8 试验步骤

8.1 实验室冻雨积冰试验

8.1.1 将样品安装在冻雨实验室内的试验架上，使无人机的前缘表面朝向喷雾气流方向。
8.1.2 关闭实验室门，启动制冷系统，将箱内温度降至 5.1.1 规定的温度值，箱内温度稳定至少 10 min，并保持至受试设备达到温度稳定；受试设备温度稳定时间应按 GB/T 38924.1 的规定确定。
8.1.3 启动喷雾系统和风速调节装置，调节 LWC、MVD 和风速至 5.1.2 和 5.1.3 规定的值。待参数稳定后开始计时。
8.1.4 在试验过程中，每隔 10 min 观察并记录一次积冰形态和积冰厚度。若积冰厚度达到委托方规定值或试验持续时间达到预定值，停止喷雾并记录实际持续时间。
8.1.5 当试验条件为 5.1.1 所述低温冻雨/混合冰条件时，喷雾非计划中断后的低温保持与恢复应按 GB/T 38924.2 规定执行。恢复喷雾前应记录中断时长、箱温及样品表面温度变化、积冰状态，并确认试验条件重新稳定至 5.1.1 规定值；若中断导致积冰状态显著变化，应终止本次试验或重新开始。
8.1.6 试验结束后，将样品在试验环境温度下解冻，检查并记录积冰脱落后的表面状态，检查旋翼转动、舵面偏转、传感器信号等是否正常。

8.2 冻雨环境下飞行考核试验

8.2.1 飞行考核前，按 8.1 的规定对无人机进行冻雨积冰预处理，使关键表面形成委托方规定厚度的积冰；或者将无人机直接置于 5.2 规定的冻雨环境中进行起飞。
8.2.2 飞行考核科目应包括：

a）起飞；
b）悬停；
c）航线飞行；
d）着陆。

8.2.3 飞行考核应按试验大纲预先规定的科目顺序实施，并持续至全部科目完成或出现下列任一终止条件时提前终止，以先到者为准：

a）关键表面任一标记测点的积冰厚度达到委托方规定值；
b）姿态控制偏差持续超出委托方规定的安全阈值；
c）旋翼转速指令与实际值的差值持续增大至委托方规定的限值；
d）出现不可接受的异常振动或动力系统功能异常；
e）达到委托方规定的最长观察时间。

8.2.4 飞行考核不以达到某一最短有效飞行时间为合格条件。因终止条件触发而未实施的科目，应在报告中注明触发终止条件时所处的科目、终止原因及未实施科目清单，不视为试验无效。报告中应记录：

a）实际有效积冰飞行时间；
b）终止原因；
c）终止时刻关键性能参数相对于基线值的变化率。

该终止时刻的数据应作为评估样品冻雨条件下性能退化与安全边界的依据。

8.2.5 在飞行过程中，使用飞行数据记录设备和外部跟踪测量设备连续记录位置、速度、高度、姿态角、电机转速等参数。记录数据更新率不应低于 20 Hz。

8.2.6 观察并记录无人机的操纵响应、异常振动、积冰脱落、动力系统状态和任何功能异常。

8.2.7 飞行考核结束后，检查无人机结构完好性，记录着陆后的表面状态和积冰残留情况。

9 试验数据处理

9.1 实验室冻雨积冰试验记录以下数据：

a）试验温度；
b）LWC；
c）MVD；
d）风速；
e）试验持续时间；
f）积冰厚度；
g）积冰形态。

积冰厚度取样品关键表面不少于 3 个测量点的算术平均值。

9.2 飞行考核试验的悬停精度、航线跟踪误差和爬升率等性能参数，按 GB/T 38058 的规定进行计算。

9.3 将冻雨环境下的飞行性能数据与同一无人机在无冻雨环境下的基线性能数据进行对比，计算性能参数的变化率，以百分数表示。

9.4 试验结果的不确定度应根据 6.2～6.8 所列测量仪器的校准不确定度，按 GB/T 27418 规定的方法进行评定，并在试验报告中给出。

10 试验报告

10.1 试验报告应至少包括以下内容：

a）试验对象：无人机型号、名称、序列号、最大起飞质量、关键部件状态及供应商信息；
b）试验依据；
c）试验条件：温度、LWC、MVD、风速、试验持续时间的实测值或设定值；

d）试验设备及测试设备：测量仪器的型号、校准有效期；
e）受试设备安装和布置照片；
f）实验室冻雨积冰试验的积冰厚度、积冰形态、试验参数控制数据及试验后功能检查结果；
g）飞行考核的科目、飞行参数记录、性能参数计算结果及与基线数据的对比；
h）试验过程；
i）试验中观察到的异常现象及处置措施；
j）试验结果或结论，以及存在的问题与建议；
k）试验日期、试验地点和试验人员。

10.2 试验报告保存期限不应少于 6 年。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局.中国民用航空规章第 25 部 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S].北京:中国民用航空局,2016.