

ICS 49.050

CCS V 31

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

低空飞行器螺旋桨气动设计与试验 规范

Aerodynamic design and test specifications for Low-Altitude aircraft

propellers

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 通用要求 2

 4.1 基础输入条件 2

 4.2 设计方法选择 2

 4.3 桨叶几何参数设计 2

 4.4 计算要求 2

 4.5 可变距桨四级安装角匹配设计 2

5 数值仿真校核 3

6 试验要求 3

 6.1 气动试验 3

 6.2 特殊环境适应性 4

7 综合判定 4

 7.1 气动设计校核 4

 7.2 风洞试验 4

 7.3 飞行试验 4

8 制造与安装公差 4

 8.1 制造公差 4

 8.2 安装公差 5

9 资料档案管理 5

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

低空飞行器螺旋桨气动设计与试验规范

1 范围

本文件规定了低空飞行器螺旋桨气动设计与试验的通用要求、数值仿真校核、试验要求、综合判定、制造与安装公差及资料归档管理。
本文件适用于低空飞行器螺旋桨气动设计与试验。

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 38930 民用轻小型无人机系统抗风性要求及试验方法
- ASTM F2502 用于内固定植入物的吸收板和螺钉的标准规范和测试方法（Standard Specification and Test Methods for Absorbable Plates and Screws for Internal Fixation Implants）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

低空飞行器螺旋桨 low-altitude aircraft propeller
最大工作高度不超过 1000 m，由电机驱动，依靠桨叶旋转产生升力或推力的桨毂、桨叶成套组件，分为定距螺旋桨、可变距螺旋桨两类。

3.2

可变距螺旋桨 variable-pitch propeller
配备角度调节驱动机构，可切换小距、中距、顺桨、反桨四种安装角度，适配启动、巡航、故障停机、降落制动多类工况的螺旋桨。

3.3

常规工作状态 normal work status
飞行器正常悬停、起飞、爬升、巡航、平飞工况，螺旋桨正向输出推力。

3.4

风车状态 windmill status
动力系统停机、未执行顺桨操作，来流带动桨叶被动旋转，产生附加气动阻力的故障工况。

3.5

顺桨状态 in sync with the paddle
动力失效后桨叶切换至最小迎风角度，桨盘投影面积最小、滑行阻力最低的安全工况。

3.6

反桨状态 counter-rotating state

桨叶设置负安装角，输出反向推力，用于飞行器降落制动的工作状态。

4 通用要求

4.1 基础输入条件

开展气动设计前，应编制完整设计输入文件，作为全部设计、仿真、试验的依据。输入参数包含飞行器最大起飞重量、额定电机输出功率、全段设计飞行速度、螺旋桨最大允许直径、额定工作转速、变距机构行程极限、极限侧风、结冰环境约束、桨叶材料强度限值、整机噪声控制指标；可变距螺旋桨需同步明确四级角度使用边界。

4.2 设计方法选择

应符合：

- 螺旋桨初步几何方案设计优先采用叶素动量理论（BEMT）、片条理论（SBAC）完成快速性能预估，两种方法均为国内航空低空推进装置通用工程计算手段；
- 完成初步几何方案后，必须采用计算流体动力学（CFD）开展高精度流场校核；共轴、多旋翼阵列布局螺旋桨，计算过程需计入桨盘之间尾涡气动干涉损耗修正；
- 产品定型不应仅依靠单一理论计算，必须完成理论计算、数值仿真、实物风洞/台架试验三级验证流程。

4.3 桨叶几何参数设计

4.3.1 弦长分布

桨叶沿径向弦长连续光滑无突变拐点；设计遵循等环量气动优化思路，0.2 倍半径位置相对弦长比不低于 0.35；可变距桨设计阶段需要校核全角度调节行程内桨叶与电机整流罩无运动干涉。

4.3.2 相对厚度分布

桨根部加厚满足结构强度，桨尖减薄降低桨尖涡气动损失；翼型前缘半径与最大厚度比值控制在 12%~15%，根部、桨尖厚度结合复合材料成型工艺合理取值。

4.3.3 扭角分布

桨叶径向扭角连续平缓变化，无局部突变；基准悬停工况下各径向截面工作攻角控制在 8° ~ 12° 最优区间。

4.4 计算要求

4.4.1 常规工况

覆盖悬停、起飞、爬升、巡航、最大平飞五类飞行状态，采用片条理论或叶素动量理论计算不同前进比下推力系数、功率系数、气动效率。

4.4.2 风车工况

模拟动力停机被动旋转工况，以二元翼型试验基础数据修正阻力系数，输出被动转速区间、附加滑行阻力数值。

4.4.3 顺桨工况

计算最小阻力对应桨叶安装角度，预估故障停机滑行阻力，理论数值后续通过风洞、飞行试验修正优化。

4.4.4 反桨工况

匹配电机最大反向输出功率区间，严格限制反阶段桨尖最高转速，不应超过电机额定超转阈值。

4.5 可变距桨四级安装角匹配设计

4.5.1 小距角

电机启动阶段基准角度，保证启动负载处于电机允许范围。

4.5.2 中距角

巡航基准工作角度，全正常飞行区间无负拉力输出，同时满足复飞爬升推力需求。

4.5.3 顺桨角

动力失效安全工况，桨盘迎风投影面积最小，最大限度降低整机滑行气动阻力。

4.5.4 最大反桨角

降落制动专用极限负角度，匹配电机最大反推功率输出上限。

5 数值仿真校核

应符合：

- 采用片条、叶素理论完成初版几何方案后，必须建立完整 CFD 仿真模型，覆盖常规、风车、顺桨、反桨全部工作工况；可变距螺旋桨针对四级角度分别建立独立计算模型。
- 仿真统一选用 SST $k-\omega$ 湍流模型、多重参考系 MRF 旋转域计算方案；桨叶壁面第一层网格 $y^+ \leq 1$ ，桨尖、翼前缘位置加密处理。
- 开展网格无关性验证，网格加密前后推力系数、功率变化幅度不超过 2%，方可判定网格划分满足计算精度要求。
- CFD 仿真输出气动效率与风洞实测效率偏差不得超过 5%，判定计算模型有效；偏差超出限值，需要重新优化桨叶几何外形与网格划分方案。
- 共轴、多旋翼布局仿真模型完整建立全部桨盘几何结构，不应采用单桨计算结果直接叠加估算整机气动性能。

6 试验要求

6.1 气动试验

6.1.1 基础环境与设备

应符合：

- 标准试验环境温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，大气压 $98\text{ kPa} \sim 102\text{ kPa}$ ，试验区域无外来侧向气流干扰；
- 推力、扭矩六分量天平测量精度 $\leq 0.5\%$ FS；动态采集系统单次工况完整采集不少于 200 个桨叶旋转周期数据。

6.1.2 翼型二元风洞试验

应符合：

- 全新自研低空专用翼型必须开展二元风洞吹风试验；试验雷诺数设置 5×10^4 、 1×10^5 、 2×10^5 、 3×10^5 四档，攻角范围 $-8^{\circ} \sim +16^{\circ}$ ，步长 1° ；
- 试验输出不同雷诺数、不同攻角下升力系数、阻力系数、俯仰力矩系数，作为螺旋桨理论计算原始输入；无二元翼型试验数据不应开展螺旋桨整体气动设计；
- 二元风洞试验设备、数据处理流程参照 ASTM F2502-2017 的规定执行。

6.1.3 螺旋缩尺模型风洞试验

应符合：

- 新研制定距、可变距螺旋桨定型前均应开展缩尺模型风洞试验；可变距桨分别对四级安装角度完成全套测试；
- 试验前进比 J 覆盖 0 至飞行器最大巡航前进比，间隔取值 0.05；单独设置风车、顺桨故障工况专项测试；

- c) 试验完成洞壁阻塞、环境温压密度数据修正，绘制全区间推力、功率、效率包络性能曲线。

6.1.4 地面静态动力台试验

应符合：

- a) 试验场地与螺旋桨最小距离不小于 3 倍桨直径，消除地面气流反射带来的推力测量误差；
- b) 设置多档额定转速梯度，分别测试四级安装角悬停推力、轴功率、整机振动水平，作为 CFD 仿真、风洞试验对标基准。

6.1.5 整机飞行气动验证试验

应符合：

- a) 飞行试验数据采样率不低于 200 Hz，完整覆盖悬停、起飞爬升、巡航、最大平飞、风车停机、顺桨滑行、反桨制动全部工况；
- b) 实测整机推力、功耗、滑行阻力，修正理论计算与风洞得出的桨叶安装角度数值；
- c) 飞行抗风试验按照的规定开展，考核 15 m/s 侧风下推力波动指标。

6.2 特殊环境适应性

6.2.1 结冰条件验证

6.2.1.1 结冰试验

螺旋桨应通过连续45分钟结冰试验，试验云液态水含量（LWC）为 $0.5 \text{ g/m}^3 \pm 0.1 \text{ g/m}^3$ ，平均水滴直径（MVD）为 $20 \text{ }\mu\text{m} \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ ，环境温度为 $-2 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

6.2.1.2 除冰响应

配备主动除冰系统的螺旋桨，自结冰检测触发至除冰功能完全生效的时间不应大于30 s；除冰后10 s内，推力恢复率应 $\geq 95\%$ ，且无明显气流扰动诱发的机体姿态振荡。

6.2.2 抗风性能

在风速15 m/s的稳定侧风条件下，螺旋桨应保持额定推力输出，推力波动幅值（峰峰值）不应超过额定推力的10%；测试应于风洞或实测外场完成，并记录风速矢量与推力矢量夹角。

7 综合判定

7.1 气动设计校核

二元翼型风洞气动性能满足低雷诺工况设计目标；CFD 仿真与地面台实测气动效率偏差 $\leq 5\%$ ；可变距桨四级角度调节无机械干涉、桨尖转速不超电机超转限值。

7.2 风洞试验

全前进比区间无大面积气流分离现象；风车、顺桨滑行阻力满足整机安全设计限值。

7.3 飞行试验

常规工况推力、气动效率达标，顺桨停机阻力、反桨制动性能满足整机使用需求；抗风试验推力波动符合设计指标，三项全部合格方可完成气动定型。

8 制造与安装公差

8.1 制造公差

8.1.1 叶型轮廓度

螺旋桨任一径向截面的叶型轮廓度公差不应大于 0.3 %弦长，测量基准应为理论弦线，沿吸力面与压力面分别评定。

8.1.2 动平衡

装配完成后的螺旋桨总成应进行整机动平衡，不平衡相位角重复测量偏差应 $\leq 5^\circ$ 。

8.2 安装公差

8.2.1 桨毂同轴度

螺旋桨安装于电机/减速器输出轴后，桨毂基准面与旋转轴线的同轴度不应大于 0.05 mm/m，测量长度取桨毂全长；检测应使用高精度跳动仪，径向跳动读数 ≤ 0.03 mm。

8.2.2 桨叶角安装误差

各桨叶安装角实测值与设计值偏差绝对值不应大于 0.2° ，相邻桨叶间安装角差不应大于 0.15° ；测量应在常温（ $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ）、无应力释放状态下进行。

9 资料档案管理

应符合：

- a) 翼型二元风洞报告、螺旋缩尺风洞原始数据、地面台试验记录、整机飞行测试曲线、全套 BEMT/CFD 计算模型统一归档；
 - b) 全部原始试验记录、仿真文件、正式试验报告留存期限不少于 5 年。
-