

T/EJCCCSE

团 体 标 准

T/EJCCCSE XXXX—2025

航空垂直起降器 (eVTOL) 无人机用减速器技 术要求

Aeronautical vertical take-off and landing vehicle (eVTOL) UAV reducer technical
requirements

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2025 - XX - XX 发布

2025 - XX - XX 实施

中国商业股份制企业经济联合会 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 技术要求 1

 4.1 材料与工艺 1

 4.2 设计与结构 2

 4.3 性能要求 2

 4.4 噪声 2

 4.5 环境适应性 2

 4.6 防尘防水等级 2

 4.7 抗振动性能 2

 4.8 安全要求 2

5 试验方法 2

 5.1 材料力学性能 2

 5.2 设计与结构 3

 5.3 性能试验 3

 5.4 噪声 3

 5.5 环境适应性 3

 5.6 防尘防水 3

 5.7 抗振动 3

 5.8 安全试验 3

6 检验规则 4

 6.1 检验分类 4

 6.2 检验项目 4

 6.3 出厂检验 4

 6.4 型式检验 4

 6.5 抽样方法 5

 6.6 判定规则 5

 6.7 复检规则 5

7 标志、包装、运输和贮存 5

 7.1 标志 5

 7.2 包装 5

 7.3 运输 5

 7.4 贮存 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××××提出。

本文件由中国商业股份制企业经济联合会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

航空垂直起降器 (eVTOL) 无人机用减速器技术要求

1 范围

本文件规定了电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 用减速器的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于eVTOL无人机传动系统中齿轮箱、行星减速器及其他类型减速器的设计、制造与验收。

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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 1031 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值

GB/T 3768 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 采用反射面上方包络测量面的简易法

GB/T 10095.1 圆柱齿轮 ISO齿面公差分级制 第1部分:齿面偏差的定义和允许值

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 4208 外壳防护等级 (IP代码)

GB 8624 建筑材料及制品燃烧性能分级

GB/T 38152 无人驾驶航空器系统术语

GJB 150.16A 军用装备实验室环境试验方法第16部分:振动试验

3 术语和定义

GB/T 38152界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

航空垂直起降器 (eVTOL) electric vertical take-off and landing

能够垂直起降并具备飞行能力的航空器,通常通过电力驱动并配备多组旋翼或推进器。

3.2

减速器 reduction gear

用于降低转速、增加扭矩的传动装置,通常由齿轮、轴承、箱体等部件组成。

3.3

额定转矩 rated torque

减速器在额定工况下能够传递的最大转矩。

4 技术要求

4.1 材料与工艺

4.1.1 减速器主体材料应选用航空级钛合金 (TC4 及以上) 或高强度合金钢,其力学性能应符合以下要求:

- 抗拉强度 ≥ 1000 MPa;
- 屈服强度 ≥ 850 MPa;
- 冲击韧性 (夏比 V 型缺口) ≥ 40 J/cm²。

4.1.2 齿轮材料表面硬度应达到 HRC 58~62,芯部硬度 HRC 30~35,齿轮副表面粗糙度 $Ra \leq 0.8$ μm 。

- 4.1.3 关键部件应采用渗碳淬火、真空离子氮化等工艺处理，硬化层深度 ≥ 0.3 mm。
- 4.1.4 禁止使用含铅、镉等有害物质的表面处理工艺，镀层耐盐雾性能 ≥ 500 h，应符合 GB/T 10125 的规定。

4.2 设计与结构

- 4.2.1 减速器传动效率在额定工况下应大于 96%（实测值），瞬时峰值效率应大于 92%。
- 4.2.2 齿轮精度等级不低于 GB/T 10095.1 的 5 级，行星轮系径向跳动公差不应超过 0.02 mm。
- 4.2.3 箱体设计应满足轻量化要求，比功率密度应大于 3.5 kW/kg，集成式润滑系统泄漏率不应超过 0.01 mL/h。
- 4.2.4 输入/输出轴同轴度误差不应超过 $\Phi 0.05$ mm，端面跳动不应超过 0.03 mm。

4.3 性能要求

- 4.3.1 额定转矩范围覆盖 50~500 N·m，瞬时过载能力应大于 200%额定转矩（持续 10 s）。
- 4.3.2 在环境温度 25 °C 下，连续工作 4 h 后，箱体表面温升应小于 45 K。

4.4 噪声

距箱体 1 m 处测量的声功率级应小于 75 dB(A)。

4.5 环境适应性

4.5.1 工作温度范围

应能在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，湿热环境（温度 40°C 、湿度 95%RH）下持续运行应大于 500 h。

4.6 防尘防水等级

防尘防水等级不应小于 IP67，在颗粒浓度 5 g/m^3 沙尘环境下运行无卡滞。

4.7 抗振动性能

- 4.7.1 随机振动：5~2000 Hz，功率谱密度 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$ （按 MIL-STD-810G）。
- 4.7.2 正弦扫频：10~2000 Hz，加速度 5 g。

4.8 安全要求

- 4.8.1 设置机械式过载保护装置，在 150%额定转矩时触发自动脱离机构。
- 4.8.2 紧急制动响应时间不应超过 50 ms，制动后输出轴残留转速应小于应 5 rpm。
- 4.8.3 防火性能：箱体材料阻燃等级达到 UL94 V-0，耐受 1100°C 明火大于 30 s 无结构失效。

5 试验方法

5.1 材料力学性能

5.1.1 抗拉强度和屈服强度

按 GB/T 228.1 测定抗拉强度和屈服强度。

5.1.2 冲击韧性

按 GB/T 229 测定冲击韧性。试样取样方向与零件实际受力方向一致。

5.1.3 齿轮表面及芯部硬度

按 GB/T 230.1 测定齿轮表面硬度（HRC 58~62）和芯部硬度（HRC 30~35），每个齿轮至少检测 3 个点，取平均值。

5.1.4 表面粗糙度

按 GB/T 1031 规定，使用轮廓仪测量齿轮副表面粗糙度。

5.1.5 镀层耐盐雾性能

按GB/T 10125进行中性盐雾试验，持续500 h后检查镀层腐蚀情况，无起泡、剥落为合格。

5.2 设计与结构

5.2.1 传动效率

在额定工况下，输入功率与输出功率的比值即为传动效率。使用高精度转矩转速传感器（精度±0.5%）测量输入/输出轴转矩及转速，按公式计算效率：

$$\eta = \frac{P_{\text{输出}}}{P_{\text{输入}}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (1)$$

5.2.2 齿轮精度

按GB/T 10095.1检测齿轮精度等级应不低于5级，使用齿轮测量中心或三坐标测量仪测定齿廓偏差及径向跳动。

5.2.3 轻量化与泄漏率

称量减速器质量并计算比功率密度。泄漏率试验：在额定转速下运行4 h，使用精密量杯收集泄漏润滑油，泄漏量应小于0.01 mL/h为合格。

5.3 性能试验

5.3.1 额定转矩与过载能力

在试验台上施加50~500 N·m额定转矩，记录连续运行稳定性；施加200%额定转矩（持续10 s），检查减速器无变形、异响或失效。

5.3.2 温升试验

环境温度25℃下连续运行4 h，使用红外热像仪或热电偶测量箱体表面温度，温升应小于45 K。

5.4 噪声

按GB/T 3768执行，在距箱体1 m处布置声级计，测量声功率级，结果应符合4.4的规定。

5.5 环境适应性

5.5.1 工作温度范围

将减速器置于高低温试验箱中：

- a) 低温试验：-40℃下启动并运行至稳定；
- b) 高温试验：125℃下连续运行 500 h；
- c) 湿热试验：40℃、95%RH 条件下运行 500 h，检查性能无衰减。

5.6 防尘防水

按GB/T 4208进行IP67测试：

- a) 防尘：在 5 g/m³ 沙尘浓度下运行 1 h，无卡滞；
- b) 防水：浸水深 1 m 持续 30 min，内部无渗水。

5.7 抗振动

5.7.1 随机振动

按GJB 150.16A执行，频率5~2000 Hz，功率谱密度0.04 g²/Hz，持续1 h后检查结构完整性。

5.7.2 正弦扫频

频率10~2000 Hz，加速度5 g，扫频速率1 oct/min，记录共振点及异常振动。

5.8 安全试验

5.8.1 过载保护触发

施加150%额定转矩，检测机械式过载保护装置是否在5 s内触发脱离机构。

5.8.2 紧急制动响应

使用高速摄像机（≥1000 fps）记录制动动作，响应时间应小于50 ms，制动后输出轴残留转速应小于5 rpm。

5.8.3 防火性能

按GB 8624进行垂直燃烧试验，明火（1100℃）灼烧箱体30 s，撤去火源后火焰应在10 s内自熄，且无结构失效。

6 检验规则

6.1 检验分类

减速器的检验分为出厂检验和型式检验两类。

6.2 检验项目

检验项目应符合表1的规定。

表 1 检验项目

序号	项目	出厂检验	型式检验
1	材料力学性能	√	√
2	齿轮表面及芯部硬度	√	√
3	表面粗糙度	√	√
4	镀层耐盐雾性能	—	√
5	传动效率	√	√
6	齿轮精度等级	√	√
7	轻量化比功率密度	—	√
8	输入/输出轴同轴度误差	√	√
9	润滑系统泄漏率	—	√
10	额定转矩	—	√
11	瞬时过载能力	—	√
12	连续工作温升	—	√
13	噪声	√	√
14	工作温度范围	—	√
15	湿热环境运行	—	√
16	防尘防水等级	√	√
17	抗振动性	—	√
18	过载保护触发	—	√
19	紧急制动响应时间	—	√
20	防火性能	—	√

注：√表示需检验，—表示不适用。

6.3 出厂检验

每台减速器在交付前均应进行出厂检验，出厂检验的项目应符合表1的规定。

6.4 型式检验

检验项目应符合表1的规定。在以下情况下应进行型式检验：

- a) 新产品定型或设计重大变更；
- b) 材料、工艺变更可能影响性能；
- c) 连续生产每满 2 年；
- d) 停产 1 年以上恢复生产。

6.5 抽样方法

从同一批次中随机抽取3台样品，按GB/T 2828.1正常检验一次抽样方案（AQL=1.0）执行。

6.6 判定规则

所有样品均通过型式检验项目时，判定该批次合格；若1台不合格，则加倍抽样复检；复检后仍有不合格，则判定该批次不合格。

6.7 复检规则

对于不合格批次，允许生产方对不合格项进行整改后重新提交检验。复检仅针对不合格项进行，且复检次数不得超过2次。

7 标志、包装、运输和贮存

7.1 标志

每台减速器应在明显位置标注以下信息：

- a) 产品名称及型号；
- b) 额定转矩、转速范围；
- c) 制造商名称或商标；
- d) 生产日期及批次编号；
- e) 防尘防水等级。

7.2 包装

7.2.1 包装要求

7.2.1.1 采用防潮、防震的密闭包装箱，内部填充缓冲材料。

7.2.1.2 包装箱内应附产品合格证、使用说明书及检测报告。

7.2.1.3 外包装标明“易碎物品”“防雨”“向上”等符合 GB/T 191 的标识。

7.2.2 包装检验

包装完成后进行跌落试验（高度1.2 m，自由跌落3次），开箱检查产品无损伤。

7.3 运输

7.3.1 运输过程中应避免剧烈震动、碰撞及雨雪直接淋袭。

7.3.2 堆码高度不超过2层，禁止与腐蚀性物品混装。

7.3.3 装卸时使用叉车或起重机，严禁抛掷。

7.4 贮存

7.4.1 贮存环境：温度-20℃~+50℃，湿度应小于80%RH，通风干燥，无腐蚀性气体。

7.4.2 贮存期限：自生产之日起不超过2年，超期需重新检验合格后方可使用。

7.4.3 产品应离地存放，避免直接接触地面，定期检查防锈涂层状态。