

# T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXX—XXXX

## 低空飞行器用轻量化高低压连接器设计与 测试指南

Design and testing guidelines for lightweight high- and low-voltage connectors for  
low-altitude aircraft

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国西部开发促进会 发 布



目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 分类与选型 ..... 2

    4.1 按额定工作电压分类 ..... 2

    4.2 按功能分类 ..... 2

    4.3 按安装环境和工作温度分级 ..... 2

    4.4 典型应用的最小选型要求 ..... 3

5 设计要求 ..... 3

    5.1 总则 ..... 3

    5.2 轻量化设计要求 ..... 3

    5.3 电气性能 ..... 3

    5.4 机械性能 ..... 5

    5.5 环境适应性 ..... 5

    5.6 可维护性与一致性 ..... 6

6 试验方法 ..... 6

    6.1 总则 ..... 6

    6.2 外观 ..... 7

    6.3 接触电阻 ..... 7

    6.4 绝缘电阻和耐电压 ..... 7

    6.5 载流温升试验 ..... 7

    6.6 插拔力、耦合扭矩和锁紧保持试验 ..... 7

    6.7 耐久寿命试验 ..... 7

    6.8 温度循环试验 ..... 7

    6.9 湿热试验 ..... 7

    6.10 振动试验 ..... 7

    6.11 冲击试验 ..... 7

6.12 盐雾试验..... 7

6.13 耐流体试验..... 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。

本文件由苏州正北连接技术有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：



# 低空飞行器用轻量化高低压连接器设计与测试指南

## 1 范围

本文件规定了低空飞行器用轻量化高低压连接器的分类与选型、设计要求以及试验方法。  
本文件适用于低空飞行器用轻量化高低压连接器的选型、设计与测试。

## 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 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.4 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Db 交变湿热（12h+12h循环）
- GB/T 2423.5 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ea和导则：冲击
- GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）
- GB/T 2423.17 环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾
- GB/T 2423.54 环境试验 第2部分：试验方法 试验Xc：流体污染
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 5095.2 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第2部分：一般检查、电连续性和接触电阻测试、绝缘试验和电压应力试验
- GB/T 5095.3 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第3部分：载流容量试验
- GB/T 5095.5 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第5部分：撞击试验（自由元件）、静负荷试验（固定元件）、寿命试验和过负荷试验
- GB/T 5095.7 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第7部分：机械操作试验和密封性试验
- GB/T 5095.8 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第8部分：连接器、接触件及引出端的机械试验
- GB/T 16935.1 低压供电系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验
- GB/T 37133 电动汽车用高压连接系统
- GB/T 39339 宇航用电连接器设计准则和方法

## 3 术语和定义

GB/T 39339、GB/T 37133界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**低空飞行器** low-altitude aircraft

在低空空域运行的有人/无人航空器及其系统平台，包括但不限于多旋翼无人机、固定翼无人机、电动垂直起降飞行器（eVTOL）、低空通航航空器等。

### 3.2

**电连接器** electrical connector

由可拆卸地实现电气回路连接的部件组合而成，通常由插头、插座、接触件、绝缘体、壳体、锁紧机构、密封件、屏蔽/接地结构等组成。

3.3

**爬电距离** creepage distance  
沿绝缘材料表面两导电部件之间的最短距离。

3.4

**电气间隙** clearance  
通过空气两导电部件之间的最短距离。

4 分类与选型

4.1 按额定工作电压分类

4.1.1 见表 1:

表 1 额定工作电压分级

| 电压等级 | 额定工作电压范围          | 最大瞬时过电压  | 适用             |
|------|-------------------|----------|----------------|
| LV   | ≤60 VDC或≤30 VAC   | —        | 控制、传感、通信、低压供电  |
| HV1  | 60 VDC~300 VDC    | 432 VDC  | 轻型动力、高压附件、电池支路 |
| HV2  | 300 VDC~600 VDC   | 864 VDC  | 主动力、高压配电、逆变器支路 |
| HV3  | 600 VDC~1000 VDC  | 1440 VDC | 高压主推进、大功率配电    |
| HV4  | 1000 VDC~1500 VDC | 2160 VDC | 预留扩展等级         |

4.1.2 采用交流供电时，可按等效绝缘水平和最大峰值电压换算选用相应等级。

4.2 按功能分类

连接器按功能分为：

- a) P 类：动力/供电连接器；
- b) S 类：低压信号/控制连接器；
- c) H 类：高速传输连接器；
- d) B 类：快拆/应急分离连接器；
- e) E 类：屏蔽/电磁敏感专用连接器。

4.3 按安装环境和工作温度分级

4.3.1 环境等级

见表2:

表 2 安装环境分级

| 环境等级 | 典型安装位置           | 环境特征             | 最低配合状态防护等级        |
|------|------------------|------------------|-------------------|
| E1   | 舱内、受控设备舱         | 低污染、低淋雨、低盐雾      | IP54              |
| E2   | 半暴露设备舱、机腹、起落装置附近 | 冷凝、溅水、粉尘、油液、较强振动 | IP67              |
| E3   | 舱外暴露区、强冲洗区、易涉水区  | 雨水、粉尘、盐雾、强温变、强振动 | IP67；涉水/冲洗工况为IP68 |

4.3.2 温度等级

见表3:

表 3 工作温度分级

| 温度等级 | 规定工作温度范围   | 适用位置                |
|------|------------|---------------------|
| T1   | -40℃~+85℃  | 受控舱内、一般低压非关键回路      |
| T2   | -40℃~+125℃ | 一般低空飞行器默认等级         |
| T3   | -55℃~+125℃ | 舱外、强暴露区、飞行安全关键回路    |
| T4   | -65℃~+150℃ | 靠近推进电机、逆变器、发动机舱或高热区 |



4.4 典型应用的最小选型要求

见表4:

表 4 最小选型要求

| 典型应用        | 推荐电压等级     | 最低环境等级 | 最低温度等级     | 最低防护等级        | 最低耐久寿命                |
|-------------|------------|--------|------------|---------------|-----------------------|
| 动力电池至高压配电箱  | HV2/HV3    | E2     | T2         | IP67          | 200 次                 |
| 高压配电箱至逆变器   | HV2/HV3    | E2     | T2         | IP67          | 200 次                 |
| 逆变器至电机      | HV2/HV3    | E2/E3  | T3         | IP67          | 200 次                 |
| 充电/地面保障高压接口 | HV1~HV3    | E2/E3  | T2         | IP67, 涉水为IP68 | 500 次                 |
| 飞控、航电、导航、通信 | LV         | E1/E2  | T2; 关键回路T3 | IP54/IP67     | 500 次                 |
| 任务载荷、快拆设备接口 | LV/HV1     | E2/E3  | T2/T3      | IP67          | 1000 次                |
| 应急分离/拉脱连接器  | LV/HV1/HV2 | 按安装区   | 按安装区       | 不低于安装区要求      | 正常插拔250 次;<br>拉脱100 次 |

5 设计要求

5.1 总则

5.1.1 连接器设计应按照“连接器本体+端接件+线缆/线束+屏蔽接地+密封件+应力释放结构”作为完整连接系统进行设计和验证。

5.1.2 轻量化设计不应以牺牲电气安全、机械保持力、密封性能、屏蔽连续性、耐腐蚀能力和可维护性为代价。

5.2 轻量化设计要求

5.2.1 轻量化设计应进行量化评估。制造方应建立同等功能、同等额定电流、同等防护等级和同等屏蔽等级基准样机或对标型号。

5.2.2 对宣称为轻量化的产品，配对连接器总质量相较基准型号宜降低 10%及以上。

5.2.3 轻量化设计宜采用：

- a) 薄壁加强筋、一体成形壳体、复合材料或高性能工程塑料绝缘体；
- b) 模块化插芯和集成式屏蔽终端；
- c) 降低非功能性紧固件数量；
- d) 缩短电流路径、减少过渡界面。

5.2.4 壳体和附件采用异种金属时，应采取绝缘隔离、防腐镀层、密封或排水设计，避免电化学腐蚀。

5.2.5 对复合材料和工程塑料壳体，应验证其在湿热、耐液体、耐振动、耐燃和尺寸稳定性条件下满足要求。

5.2.6 轻量化产品宜采用质量效率指数进行评估，见公式（1）：

$$K_m = \frac{m}{I_r} \dots\dots\dots (1)$$

式中：  
*m*——配对连接器总质量，单位为 g；  
*I<sub>r</sub>*——额定电流，单位为A。

5.3 电气性能

5.3.1 额定值与降额

应满足：

- a) 连接器应明确额定电压、额定电流、峰值电流、短时过载能力和适配线规；
- b) 额定电流应在规定环境温度、规定线规和规定安装方式下确定；

- c) 当环境温度高于 85℃、线束成束安装、相邻回路满载率超过 50%或壳体密封散热较差时，应给出降额曲线；
- d) 高压连接器的额定电压应覆盖系统最大持续工作电压及最大瞬时过电压。HV 类连接器额定电压宜覆盖系统最高工作电压及可能出现的瞬态过电压裕度。

### 5.3.2 接触电阻

除产品详细规范另有规定外，接触电阻宜满足下列推荐值：

- a) 功率触点：初始接触电阻不大于 2.0 mΩ/对；
- b) 信号/控制触点：初始接触电阻不大于 15 mΩ/对；
- c) 经耐久、振动、冲击、湿热和盐雾试验后，接触电阻增量不宜超过初始值的 50%，且绝对值分别不宜超过 3.0 mΩ/对和 20 mΩ/对。

### 5.3.3 绝缘性能

应满足：

- a) 绝缘电阻与耐电压应满足额定电压等级要求；
- b) 爬电距离与电气间隙应按 GB/T 16935.1 的方法确定污染等级、过电压类别、海拔修正等，并形成可追溯计算记录；
- c) 初始绝缘电阻不宜低于：1000 MΩ（LV 连接器），500 MΩ（HV 连接器相间及相对壳体）。

### 5.3.4 耐电压

5.3.4.1 耐电压试验值应按额定电压等级、污染等级、材料组别和最大使用高度计算确定，并在产品详细规范中给出。

5.3.4.2 对未制定详细规范的新产品，耐电压试验值可按最大工作电压的 2 倍且不低于 1000 VDC 取值，施加 60 s，试验过程中不应发生击穿、闪络和不可恢复损伤。

### 5.3.5 载流能力与温升

5.3.5.1 在规定额定电流下，连接器最高温度不应超过其声明的上限工作温度，且接触区、端接区和密封件附近温度应留有安全裕度。

5.3.5.2 除产品详细规范另有规定外，连接器在额定电流下的稳态温升不宜超过 45 K；对密封式高压大电流连接器，在绝缘材料热等级允许且最高绝对温度至少低于声明上限 10℃的条件下，温升可放宽至 50 K。

5.3.5.3 当连接器用于持续高热区时，应声明持续载流能力与间歇载流能力，不应以短时峰值能力替代额定载流能力。

### 5.3.6 屏蔽、接地与电磁兼容

5.3.6.1 屏蔽连接器应采用 360° 屏蔽终端，不应采用仅靠单根引线接地的替代结构。

5.3.6.2 屏蔽连接器壳体与壳体、壳体与屏蔽终端之间的直流连续性电阻不宜大于 5 mΩ。

5.3.6.3 高速连接器应在产品详细规范中声明：差分阻抗、插入损耗、回波损耗、串扰、屏蔽效能或有效转移阻抗。

### 5.3.7 高压安全

5.3.7.1 用于人员可接触区域的 HV 连接器，其未配合插座端的防触电等级不应低于 IP2X。

5.3.7.2 可拆卸高压连接器应具备 HVIL 或等效互锁检测功能。

5.3.7.3 高压连接器宜采用以下任一安全结构：

- a) 保护地/屏蔽触点先接触、后断开；
- b) 先导触点实现 last mate/first break 或 first mate/last break 时序；
- c) 带电部件完全封闭，且拆分时不暴露危险带电体。

5.3.7.4 高压连接器应设置明显的高压警示标识，外观颜色宜采用橙色、红橙色或与整机高压识别系统一致的警示色。

## 5.4 机械性能

### 5.4.1 插拔力、耦合扭矩与锁紧

- 5.4.1.1 连接器应在产品详细规范中规定插入力、拔出力或耦合扭矩范围。
- 5.4.1.2 锁紧机构应具有明确的锁止状态指示，宜采用视觉、触觉或机械到位双重确认。
- 5.4.1.3 除详细规范另有规定外，配对状态下的轴向保持力推荐值为：
  - a) LV 连接器不低于 50 N；
  - b) HV 动力主回路连接器不低于 150 N；
  - c) 任务载荷快拆连接器按产品详细规范规定。
- 5.4.1.4 在规定轴向保持力作用下，连接器不应自行解锁、退针、松动或产生影响功能的瞬断。

### 5.4.2 耐久寿命

- 5.4.2.1 连接器的插拔/耦合循环次数应按用途分级规定，且不应低于下列要求：
  - a) 高压动力主回路连接器  $\geq 200$  次；
  - b) 一般低压供电、控制与信号连接器  $\geq 500$  次；
  - c) 频繁拆装连接器  $\geq 1000$  次；
  - d) 具有拉脱/应急分离功能的连接器：正常插拔寿命 250 次，拉脱次数 100 次。
- 5.4.2.2 经规定耐久试验后，连接器应保持：
  - a) 电气连续性正常；
  - b) 接触电阻变化量不超过产品规范值；
  - c) 绝缘电阻、耐电压满足要求；
  - d) 锁紧、密封及屏蔽性能满足要求；
  - e) 不应出现影响使用的裂纹、变形、镀层严重脱落、锁止失效等缺陷。

### 5.4.3 端接、拉脱力与应力释放

- 5.4.3.1 端接方式应与接触件、导线规格和使用环境相匹配。压接、焊接和 IDC 端接不应混用未经验证的工艺组合。
- 5.4.3.2 制造方应在产品详细规范中给出最小端子拉脱力、压接高度、推荐工装和复验方法。
- 5.4.3.3 连接器应设置有效的应力释放结构，防止电缆弯折、拉拽和扭转载荷直接作用于接触件。
- 5.4.3.4 屏蔽电缆端接后，屏蔽层不应松散、断丝外露或影响绝缘和密封。

## 5.5 环境适应性

### 5.5.1 温度

连接器应满足其声明的温度等级要求；未声明时，其规定工作温度范围应为  $-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ 。

### 5.5.2 温度循环

- 5.5.2.1 连接器应按其声明的最低和最高工作温度进行温度循环试验。
- 5.5.2.2 温度循环次数不应少于：
  - a) E1、E2：10 个循环；
  - b) E3：20 个循环。
- 5.5.2.3 每个温度极值点保持时间不应少于 1 h，转换时间不宜超过 5 min。试验后不应出现开裂、翘曲、密封失效和电性能异常。

### 5.5.3 湿热试验

- 5.5.3.1 连接器应进行湿热试验，宜按以下条件执行：
  - a) E1、E2： $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，95%RH，96 h；
  - b) E3： $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，95%RH，240 h。
- 5.5.3.2 湿热试验后经恢复，绝缘电阻、接触电阻、锁紧和密封性能应满足本文件要求。

5.5.4 振动试验

5.5.4.1 不同部位的连接器宜采用分级振动验证，见表 5：

表 5 振动试验

| 振动等级 | 频率范围       | 加速度/位移                      | 试验时间  |
|------|------------|-----------------------------|-------|
| V1   | 10~500 Hz  | 49 m/s <sup>2</sup> (5 g)   | 每轴2 h |
| V2   | 10~2000 Hz | 98 m/s <sup>2</sup> (10 g)  | 每轴2 h |
| V3   | 10~2000 Hz | 196 m/s <sup>2</sup> (20 g) | 每轴2 h |

5.5.4.2 E1 连接器不应低于 V1；E2 连接器不应低于 V2；E3 连接器、高压动力主回路连接器和关键回路连接器不应低于 V3。

5.5.4.3 振动试验过程中：

- a) 飞行安全关键回路和高压动力回路的电连续性中断时间不应大于 1 μs；
- b) 其他回路的电连续性中断时间不应大于 10 μs；
- c) 连接器不应解锁、松动、退针或壳体破坏。

5.5.5 冲击试验

5.5.5.1 不同部位的连接器宜采用分级冲击验证，见表 6：

表 6 冲击试验

| 冲击等级 | 峰值加速度                        | 脉冲持续时间 | 适用位置             |
|------|------------------------------|--------|------------------|
| S1   | 294 m/s <sup>2</sup> (30 g)  | 11 ms  | 舱内、受控设备舱         |
| S2   | 490 m/s <sup>2</sup> (50 g)  | 11 ms  | 半暴露设备舱、机腹、起落装置附近 |
| S3   | 980 m/s <sup>2</sup> (100 g) | 6 ms   | 舱外暴露区、强冲洗区、易涉水区  |

5.5.5.2 冲击试验应在三个相互垂直方向的正、反两个方向分别进行，每个方向不少于 3 次。

5.5.5.3 冲击后，连接器不应出现裂纹、解锁、退针或功能失效。

5.5.6 耐盐雾

5.5.6.1 连接器宜进行盐雾试验，试验时间不应少于：

- a) E2：48 h；
- b) E3：96 h；
- c) 海滨、海岛、低空海事平台等强腐蚀环境：240 h。

5.5.6.2 试验后，功能表面不应出现影响使用的红锈、锁紧卡滞、密封失效或电性能异常。

5.5.7 耐流体性

5.5.7.1 连接器暴露于燃料、润滑油、液压油、清洁剂、冷却液等时不应出现开裂、膨胀、密封失效或绝缘显著下降。。

5.5.7.2 经 24 h 浸泡、喷淋或擦拭暴露后，连接器不应出现开裂、溶胀、软化、密封失效和绝缘下降至不合格状态。

5.6 可维护性与一致性

5.6.1 连接器应具有清晰、耐久的型号、键位、极性、高压警示和装配方向标识。

5.6.2 同一产品的壳体尺寸、接触件位置、键位编码和装配工装应保持一致性。

5.6.3 制造方应建立可追溯记录，至少包括：材料批次、镀层批次、压接参数、检验结果和装配批号。

6 试验方法

6.1 总则

6.1.1 试验样品应采用实际端接方式、实际线规、实际密封件、实际屏蔽终端和实际附件装配。

6.1.2 试验前应在标准大气条件下放置不少于 24 h。

6.1.3 试验前、试验中和试验后应记录外观、电连续性、接触电阻、绝缘电阻、耐电压、锁紧状态和必要的温度数据。

## 6.2 外观

采用目视和量具检查，不得有裂纹、毛刺、明显镀层脱落、密封件缺失、标识不清、端子退位等缺陷。

## 6.3 接触电阻

按GB/T 5095.2的要求进行试验。试验前、试验后以及必要时在中间状态下测量接触电阻，结果应符合5.3.2的规定。

## 6.4 绝缘电阻和耐电压

按GB/T 5095.2的要求进行试验，结果应符合5.3.3和5.3.4的规定。

## 6.5 载流温升试验

按GB/T 5095.3的要求进行载流容量和温升试验，试验过程中应测量接触区、端接区和壳体关键部位温度，结果应符合5.3.5的规定。

## 6.6 插拔力、耦合扭矩和锁紧保持试验

按GB/T 5095.8的要求进行插拔力、耦合扭矩试验；按GB/T 5095.7的要求进行机械操作和锁紧保持试验，结果应符合5.4.1的规定。

## 6.7 耐久寿命试验

按GB/T 5095.5的要求进行试验，结果应符合5.4.2的规定。

## 6.8 温度循环试验

按GB/T 2423.1的要求进行低温试验，按GB/T 2423.2的要求进行高温试验；按上述两项标准组合实施温度循环试验，结果应符合5.5.1和5.5.2的规定。

## 6.9 湿热试验

按GB/T 2423.3的要求进行恒定湿热试验；按GB/T 2423.4的要求进行交变湿热试验，结果应符合5.5.3的规定。

## 6.10 振动试验

按5.5.4的规定选取振动等级，按GB/T 2423.10的要求进行试验，结果应符合5.5.4.3的规定。

## 6.11 冲击试验

按5.5.5的规定选取冲击等级，按GB/T 2423.5的要求进行试验，结果应符合5.5.5的规定。

## 6.12 盐雾试验

按5.5.6的规定选取盐雾试验时间，按GB/T 2423.17的要求进行试验，结果应符合5.5.6.2的规定。

## 6.13 耐流体试验

选取代表性流体（燃料、油液、清洁剂等）、暴露方式和暴露时间，按GB/T 2423.54的要求进行流体污染试验，结果应符合5.5.7的规定。