

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA—XXXX

航空混合电推进系统通用技术规范

General technical specifications for hybrid electric propulsion systems for aircraft

（征求意见稿）

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 系统架构	1
4.1 串联架构	1
4.2 并联架构	1
4.3 混联架构	2
5 技术要求	2
5.1 总体性能要求	2
5.2 关键部件要求	2
5.3 安全要求	2
5.4 可靠性要求	3
5.5 电磁兼容性要求	3
5.6 环境适应性要求	3
5.7 接口要求	3
5.8 控制与监控要求	3
6 试验方法	4
6.1 通用试验环境条件	4
6.2 性能试验	4
6.3 安全试验	4
6.4 可靠性试验	4
6.5 电磁兼容性试验	5
6.6 环境适应性试验	5
6.7 接口兼容性试验	5
6.8 控制功能验证试验	5
7 安装与维护	6
7.1 安装通用要求	6

7.2 日常及定期维护要求.....	6
7.3 维护管理要求.....	6

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

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：

航空混合电推进系统通用技术规范

1 范围

本文件规定了航空混合电推进系统的系统架构、技术要求、试验方法、安装与维护。
本文件适用于航空混合电推进系统。

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 2423.5 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 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱
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
GJB 151B 军用设备和分系统 电磁发射和敏感度要求与测量
GJB 899A 可靠性鉴定和验收试验
GJB 2374A 锂电池安全要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

航空混合电推进系统 aerospace hybrid electric propulsion system

由电机、电池、功率控制器、传动装置、燃油发动机（选配）及控制单元组成，通过化学能、电能协同耦合输出动力，为航空器提供拉力或推力的成套推进装置。

3.2

功率控制器 power control unit

实现电能变换、功率分配、充放电管理，实时调节电机转矩、转速的核心电气控制部件。

3.3

混合度 hybridization degree

系统额定稳态输出工况下，电能输出功率占系统总输出功率的比值，以百分比计。

4 系统架构

4.1 串联架构

燃油发动机仅驱动发电机产生电能，电能经功率控制器分配至储能电池或驱动电机；电机直接驱动螺旋桨/旋翼输出推力，燃油发动机不参与机械动力直驱输出。

注：本架构宜用于低空长航时旋翼航空器。

4.2 并联架构

燃油发动机与驱动电机通过机械传动机构并联耦合，二者可独立输出动力或协同输出动力驱动螺旋桨/旋翼；电能由机载电池或发动机配套发电机补充供给。

注：本架构宜用于固定翼通航航空器。

4.3 混联架构

融合串联、并联两种架构工作模式，可根据飞行高度、载荷、功率需求自动切换动力耦合方式，实现燃油、电能能量动态分配。

注：本架构可用于多工况可变载荷航空器。

5 技术要求

5.1 总体性能要求

5.1.1 额定输出功率工况下，系统综合效率不应低于 85%；50%额定功率部分负荷工况下，系统综合效率不应低于 82%。

5.1.2 系统整机重量功率比不应大于 2.5kg/kW，体积功率比不应大于 3.0L/kW。

5.2 关键部件要求

5.2.1 驱动电机应符合以下要求：

- a) 功率密度不应低于 5kW/kg；
- b) 最高持续工作温度不应高于 150°C；
- c) 额定稳态转速运行噪声不应大于 85dB (A)；
- d) 定子绕组绝缘等级不应低于 H 级。

5.2.2 储能电池应符合以下要求：

- a) 单体能量密度不应低于 200 Wh/kg；
- b) 标准充放电循环 1500 次后容量保持率不应低于 80%；
- c) 正常工作温度区间为-20°C~60°C；
- d) 同组电池单体电压偏差不应大于±2%；
- e) 电池包整体安全性能应符合 GJB 2374A 全部要求。

5.2.3 功率控制器应符合以下要求：

- a) 可适应额定电压±10%波动范围稳定工作；
- b) 额定功率工况变换效率不应低于 97%；
- c) 具备 1.2 倍额定电流过载能力，持续过载时长不低于 30 s；
- d) 采用液冷冷却方案，冷却介质允许最高进水温度不应高于 65°C。

5.2.4 传动装置应符合以下要求：

- a) 额定转矩工况传动效率不应低于 98%；
- b) 额定载荷运行噪声不应大于 80dB (A)；
- c) 长期工作温度不应高于 120°C；
- d) 整机疲劳设计寿命不应低于 10000h；
- e) 配套圆柱齿轮精度等级不应低于 GB/T 10095.1 规定的 6 级精度。

5.3 安全要求

5.3.1 电气安全应符合以下要求：

- a) 采用 500V 直流电压测试，系统整机对地绝缘电阻不应小于 100MΩ；
- b) 输出短路保护响应动作时间不应大于 10ms；
- c) 直流母线过压保护动作阈值为 1.15 倍额定电压；
- d) 过流保护动作阈值为 1.5 倍额定工作电流。

5.3.2 防火安全应符合以下要求：

- a) 外壳、电池舱、功率控制器壳体应采用阻燃等级不低于 V0 级材料；
- b) 电池包应集成热失控阻断防护结构，单电芯热失控后，热蔓延至相邻电芯时长不应小于 30min。

5.3.3 机械安全应符合以下要求：

- a) 整机结构应耐受 X、Y、Z 三向 10g 加速度冲击，每个方向冲击 3 次，试验后无永久变形、功能失效；
- b) 旋转运动部件外壳防护等级不应低于 IP65；静止电气箱体防护等级不应低于 IP54。

5.4 可靠性要求

- 5.4.1 系统平均无故障工作时间（MTBF）不应低于 5000h；平均故障修复时间（MTTR）不应大于 2h。
- 5.4.2 整机设计使用寿命不应低于 10000h，累计安全启动循环次数不应少于 5000 次。

5.5 电磁兼容性要求

5.5.1 电磁发射

整机传导发射性能满足 GJB 151B CE102 要求；辐射发射性能满足 GJB 151B RE102 限值要求。

5.5.2 电磁敏感度

整机静电放电抗扰度满足 ESD2000 标准：接触放电 $\pm 8\text{kV}$ ，空气放电 $\pm 15\text{kV}$ 。

5.6 环境适应性要求

5.6.1 温度适应性

整机工作环境温度范围 $-55^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ；存储温度范围 $-65^{\circ}\text{C} \sim 95^{\circ}\text{C}$ ，试验方法按照 GB/T 2423.1、GB/T 2423.2 执行。

5.6.2 湿热适应性

工作环境相对湿度 10%~95%（无凝露）；存储相对湿度 5%~98%（无凝露），恒定湿热试验按照 GB/T 2423.3 执行。

5.6.3 振动适应性

正弦振动试验频段 10Hz~2000Hz，振动加速度 10g，扫频速率 1 oct/min，X/Y/Z 三向各循环 2 次，按照 GB/T 2423.10 执行。

5.6.4 气压适应性

整机可在 5kPa~101kPa 气压区间稳定工作，对应海拔 0m~15000m，气压变化过程中不应出现功能异常、结构破损。

5.7 接口要求

5.7.1 电气接口应符合以下要求：

- a) 直流动力供电采用标准航空连接器，单对接点接触电阻不应大于 $10\text{m}\Omega$ ，连接器插拔寿命不少于 1000 次；
- b) 控制信号采用 CAN 总线通信，通信速率 250kbps~1Mbps，单次通信延迟不应大于 10ms。

5.7.2 机械接口应符合以下要求：

- a) 整机安装基准面平面度公差不大于 0.1mm/m；
- b) 安装连接孔位置尺寸公差不大于 $\pm 0.1\text{mm}$ ；
- c) 连接螺栓紧固扭矩按照 GB/T 3098.1 规定执行。

5.7.3 冷却接口应符合以下要求：

- a) 冷却介质进水温度不高于 65°C ，出水最高温度不高于 80°C ；
- b) 管路接口压力损失不大于 0.1MPa；
- c) 冷却回路密封防护等级不应低于 IP67。

5.8 控制与监控要求

5.8.1 控制功能应符合以下要求：

- a) 电机转速闭环控制稳态偏差不大于额定转速的 $\pm 1\%$ ；

- b) 多源功率分配控制误差不大于 5%。

5.8.2 状态监控

整机实时采集电压、电流、温度、转速、输出功率等运行参数，参数监测精度不大于 $\pm 2\%$ ；具备过压、过流、超温、绝缘衰减等故障自动识别功能。

5.8.3 故障处置

轻微故障输出分级声光报警信号；严重动力故障自动切断功率输出并存储故障全量数据；故障报警响应时间不应大于50ms。

6 试验方法

6.1 通用试验环境条件

无特殊规定时，整机试验环境满足：

- a) 环境温度： $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：45%~75%；
- c) 环境气压：86kPa~106kPa；
- d) 试验区域无高强度电磁干扰源；
- e) 全部检测仪器经法定计量机构检定合格并在有效期内。

6.2 性能试验

6.2.1 系统效率测试

分别在25%、50%、75%、100%额定功率稳态工况下采集系统输入总功率、输出有效推力功率，计算各工况综合效率，结果应符合5.1要求。

6.2.2 重量、体积测试

采用分度值 $\leq 0.1\text{kg}$ 电子衡器测量整机总质量；激光测距设备测量整机外形尺寸，计算整机体积，核算重量功率比、体积功率比。

6.3 安全试验

6.3.1 绝缘电阻测试

采用500V直流兆欧表，持续施加电压1min读取整机对地绝缘电阻，测量结果满足5.3.1要求为合格。

6.3.2 短路保护试验

设备加载额定工作电压，输出端人为制造三相短路故障，记录保护动作响应时间，验证保护功能有效性。

6.3.3 阻燃试验

对电池包、功率控制器壳体开展水平燃烧试验，核查材料阻燃性能与热失控阻断时长。

6.3.4 机械冲击试验

按照GB/T 2423.5规定开展三向10g冲击试验，试验完成后核查结构外观、整机功能，无损坏、无故障判定合格。

6.4 可靠性试验

6.4.1 MTBF 验证试验

依据GJB 899A定时截尾试验方案，额定工况连续运行采集故障数据，核算平均无故障工作时间。

6.4.2 加速寿命试验

设备在80%额定功率下开展加速老化试验，等效累计运行时长覆盖10000h设计寿命，试验后检测性能衰减幅度。

6.4.3 启动循环试验

按照“启动运行30min—停机冷却30min”单循环模式，累计完成5000次完整启停，全程无功能故障判定合格。

6.5 电磁兼容性试验

6.5.1 传导发射测试

依据GJB 151B，测试10kHz~10MHz频段整机传导发射水平。

6.5.2 辐射发射测试

半电波暗室内开展整机辐射发射测试，测试频段10kHz~18GHz。

6.5.3 电磁敏感度试验

按照GJB 151B完成静电放电、电快速脉冲群、浪涌抗扰度测试。

6.6 环境适应性试验

6.6.1 高低温试验

按照GB/T 2423.1、GB/T 2423.2，整机在-55℃、85℃环境下保温4h，满载运行30min，功能正常为合格。

6.6.2 恒定湿热试验

40℃、95%相对湿度环境持续放置96h，试验结束检测绝缘电阻、外观密封状态。

6.6.3 正弦振动试验

按GB/T 2423.10完成全频段扫频振动，试验后检查紧固件、线缆、壳体无开裂松动。

6.6.4 低压模拟高空试验

低压试验箱模拟15000m海拔气压，保温2h后满载运行30min，无泄漏、无功能异常判定合格。

6.7 接口兼容性试验

6.7.1 电气接口试验

在额定电压±10%波动区间连续运行24h；CAN总线不间断通信24h，无丢包、误码为合格。

6.7.2 机械接口试验

按标准扭矩紧固螺栓，完成100次完整拆装循环，检测安装孔磨损、配合精度变化。

6.7.3 冷却接口密封试验

额定流量、压力下持续24h密封试验，管路、接头无渗漏判定合格。

6.8 控制功能验证试验

6.8.1 转速控制精度试验

分段设定目标稳态转速，对比实测转速与设定值偏差，验证控制精度。

6.8.2 功率分配试验

切换不同混合度工作模式，分别采集电机、燃油发动机输出功率，核算功率分配误差。

6.8.3 故障诊断验证

人为模拟过压、过流、超温、绝缘衰减故障，核查故障识别准确率、报警响应时间。

7 安装与维护

7.1 安装通用要求

7.1.1 安装基座平面平整，基座承载能力不应低于系统整机重量的 5 倍；整机连接螺栓强度等级不应低于 8.8 级，紧固扭矩严格遵循产品配套技术文件。

7.1.2 动力线缆弯曲半径不应小于线缆外径 10 倍；接线端子紧固力矩不应大于 $1.5\text{N} \cdot \text{m}$ ，杜绝虚接发热。

7.1.3 液冷冷却管路安装保证额定流量、压力需求，所有密封接头装配到位，无渗漏风险；冷却介质型号符合产品规范。

7.1.4 整机装配完成后，先开展绝缘电阻、全部接口连通性检查，全部检测合格后方可上电试运行。

7.2 日常及定期维护要求

7.2.1 日常维护

检查整机外观壳体破损、冷却管路渗漏；线缆连接器紧固状态；机载监控仪表参数显示是否正常。

7.2.2 周期性定检

周期性定检应符合以下要求：

- a) 每运行 500h：检测电池单体电压、实际可用容量；
- b) 每运行 1000h：检查电机轴承润滑状态、清理功率控制器冷却回路杂质；
- c) 每运行 2000h：整机全性能复测，核对效率、绝缘、控制精度指标。

7.3 维护管理要求

7.3.1 开展内部检修、深度维护前，必须完全切断整机高低压电源，落实绝缘、防火安全防护措施。

7.3.2 所有维护工作留存完整记录，记录内容包含：维护日期、设备编号、检测项目、实测数据、作业人员；维护原始记录保存期限不应少于 5 年。