



电动航空用高性能动力系统的研发及应用

卧龙电气全球中央研究院

WOLONG 卧龙

目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：电动航空高功率密度电机本体设计

第三部分：电动航空高功率密度驱动本体设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

一、航空及动力系统电动化发展趋势

1、全球碳排放法规

目前，全球已有超过130个国家和地区提出了“零碳”或“碳中和”的宏伟目标，已实现碳中和国家2个，已立法国家6个，处于立法中国家地区6个，有20个国家发布了正式的政策宣示。

进展情况	国家和地区（承诺年）
已实现	苏里南共和国、不丹
已立法	瑞典（2045）、英国（2050）、法国（2050）、丹麦（2050）、新西兰（2050）、匈牙利（2050）
立法中	欧盟（2050）、加拿大（2050）、韩国（2050）、西班牙（2050）、智利（2050）、斐济（2050）
政策宣示	芬兰（2035）、奥地利（2040）、冰岛（2040）、美国（2050）、日本（2050）、南非（2050）、德国（2050）、巴西（2050）、瑞士（2050）、挪威（2050）、爱尔兰（2050）、葡萄牙（2050）、巴拿马（2050）、哥斯达黎加（2050）、斯洛文尼亚（2050）、安道尔（2050）、梵蒂冈城（2050）、马绍尔群岛（2050）、中国（2060）、哈萨克斯坦（2050）

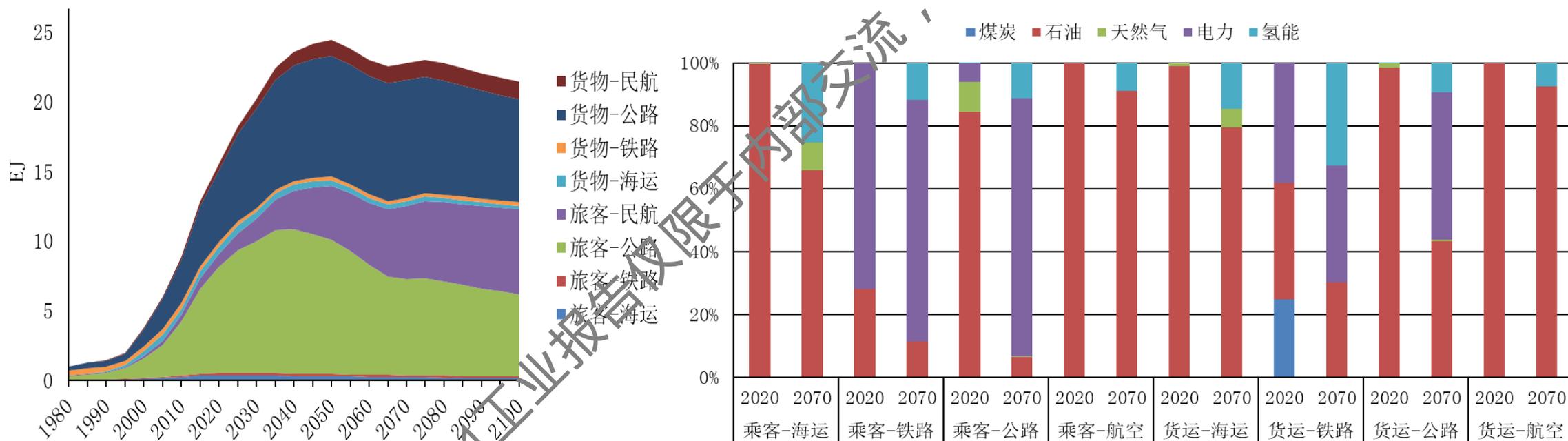
在《巴黎协定》对零碳排放的约束下，无碳未来势在必行

一、航空及动力系统电动化发展趋势

2、电气化交通发展趋势

据IEA统计2017年，全球碳排放总量328亿吨，交通行业占24%；中国碳排放总量93亿吨，交通行业占10%。

电气化交通是实现碳中和的必经之路，电力、氢能、生物质燃料是最佳能源策略。



公路和铁路是最容易电气化的行业，船舶次之，航空业是最难减排的行业

一、航空及动力系统电动化发展趋势

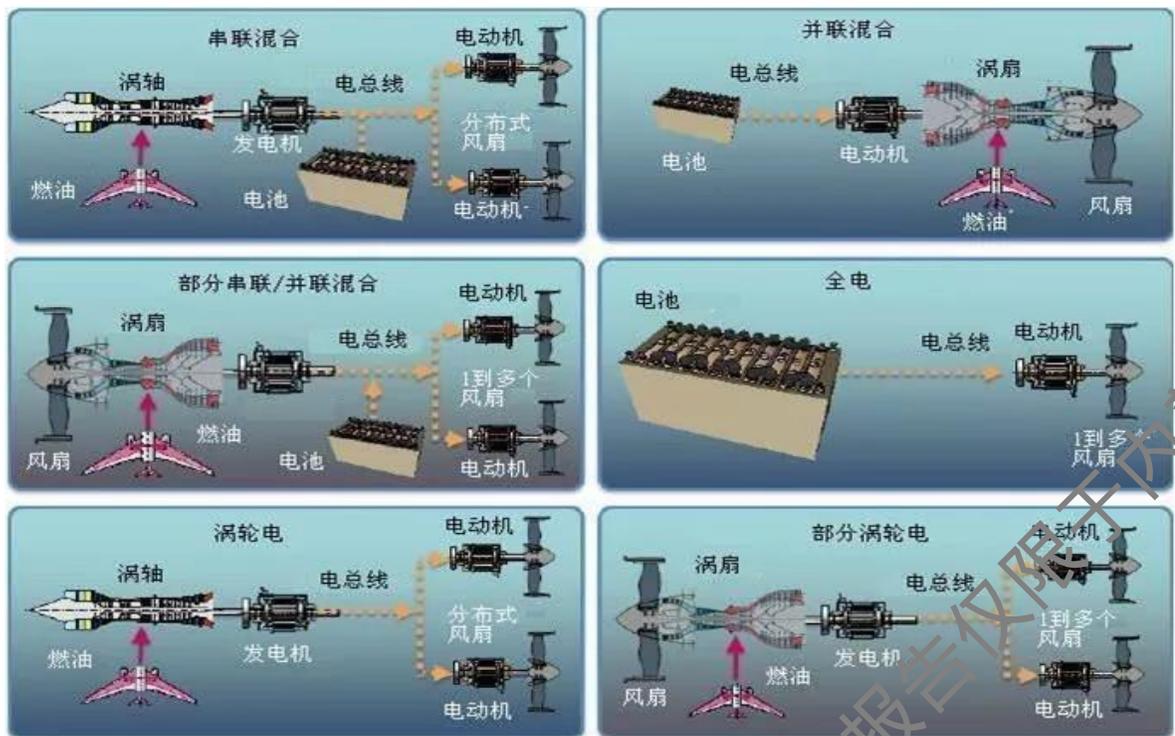
3、国内外电动航空发展趋势



- 全球范围内，目前有超过240型电推进飞机正处于开发阶段。
- 从使用模式来看，大多数电动飞机都在朝着通用航空（0-19座固定翼飞机）或城市空中出租车（垂直起降UAM）方向发展；从项目来源地区看，大部分的开发都发生在传统的航空市场，即欧洲（45%）和美国（40%）。
- 国内主要以中大型电动无人机和飞行汽车为主。

一、航空及动力系统电动化发展趋势

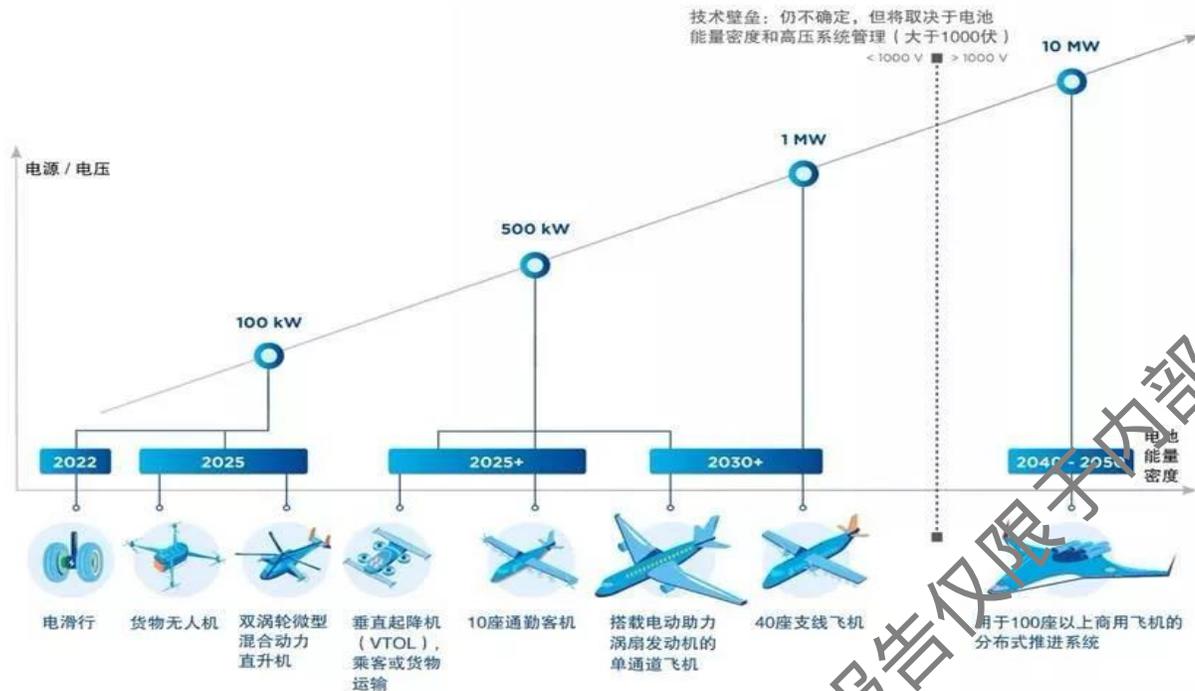
4、电动航空动力形式



■ 根据飞机构型和用途，电动飞机共分为六类，分别是**矢量推力、悬停滑板/私人飞行装备、垂起固定翼、多旋翼无机翼构型、电动直升电动非垂直起降固定翼飞机**。其中，前五种都属于电动垂直起降飞行器（eVTOL），最后一种属于电动常规或短距起降飞行器（CTOL/STOL）。

一、航空及动力系统电动化发展趋势

5、航空动力系统要求



Commercial Aircraft Electrical Capability Growth Forecast



Source: Rolls-Royce

动力系统包括推进和能源系统，主要体现为电动机、电机控制器、螺旋桨和电池等技术。电池决定了飞机的航时、航程。电动机和控制器的功重比直接影响了飞机性能。目前电机和控制器的最大功重比在10kW/kg以下，未来商业化航空要求功重比达到20kW/kg。通过磁性能、热、结构创新设计，有望于2030年左右实现。

目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：电动航空高功率密度电机本体设计

第三部分：电动航空高功率密度驱动本体设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

二、电动航空高功率密度电机本体设计

1. 电动飞机用驱动电机技术

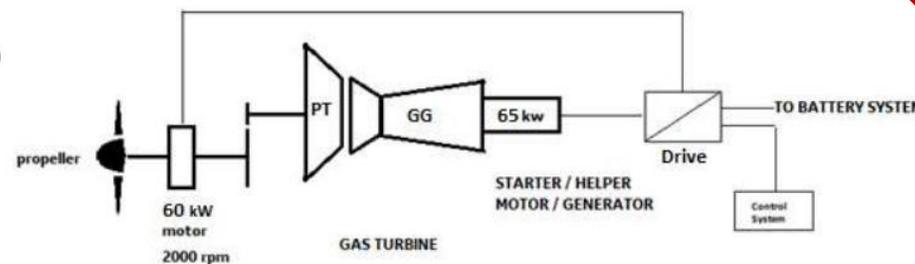
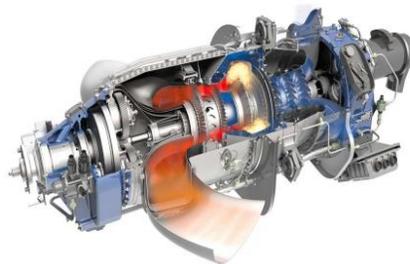
技术要求

- **性能**：高功率密度、高防护等级
- **环境适应性**：高低温、湿热、低温低气压、盐雾、臭氧、电磁兼容、振动等
- **安全可靠**：冗余设计、紧急降额设计

直驱螺旋桨：百十千瓦等级，转速1k-5krpm，最大功率密度要求7-8kW/kg，防护等级IP57以上。



起发一体机：百十千瓦等级，转速3-4krpm，功率密度要求10kW/kg以上。



二、电动航空高功率密度电机本体设计

2. 航空与汽车用驱动电机技术对比

➤ 安全性

紧急情况下冗余50%功率输出，第一指标

➤ 环境适应性

海拔8000-12000m，极冷极热-90°C~70°C

➤ 功率密度要求高

电机重量是电动飞机的设计要求的重要指标。

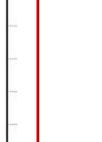
➤ 螺旋桨驱动电机轴承需承受多方向突加载荷

技术指标	国内驱动电机	德国 宝马i3	美国 通用Bolt	美国Remy HVH250-90	日产 Leaf
峰值功率(kW)	128	125	130	82	80
最高转速(rpm)	12800	12800	8810	10600	10390
峰值扭矩(Nm)	270	250	360	325	280
峰值效率(%)	97%	97%	97%	97%	97%
功率密度(kW/kg)	2.3 ^[1] /3.8 ^[2]	2.6 ^[1] /3.8 ^[2]	2.6 ^[1] /4.6 ^[2]	2.44 ^[1]	1.5 ^[1] /2.6 ^[2]
转矩密度(Nm/kg)	4.3 ^[1] /7.1 ^[2]	5.2 ^[1] /7.6 ^[2]	7.1 ^[1] /12.7 ^[2]	9.70 ^[1]	4.7 ^[1] /8.5 ^[2]
电机图片					

注：[1]功率和转矩与总重量比值；[2]数据来源：国家机动车质量监督检测中心、美国阿岗实验室。

电动汽车

电动飞机

生产厂家	EMRAX		MAGicALL	罗罗(西门子)	Lauchpoint
额定功率(kW)	110	53	400	70	82
峰值功率(kW)	260	109	500	92	-
额定转速(rpm)	4000	5500	3200	2600	6200
冷却方式	水冷	水冷	风冷	油冷	风冷
功率密度(kW/kg)	2.6	4.3	4	2.7	6.5
防护等级	IP65	IP65	IP65	IP65	IP21
电机图片					

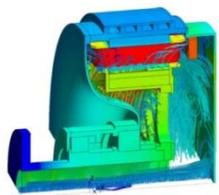
二、电动航空高功率密度电机本体设计

3. 行业竞品分析

罗罗（西门子）

径向磁通永磁电机

集中绕组、永磁体表贴、
风油混合冷却
功率密度可达5kW/kg以上。



斯洛文尼亚EMRAX

轴向磁通盘式永磁电机

双转子、单定子，集中绕组，永磁体表贴，
风水混合冷却（水道直接与绕组换热）
最高转速7800rpm，功率范围15-200kW，
功率密度可达4-5kW/kg。



美国MagiCALL

电机驱动器一体机

系统额定功率密度 ≤ 2.5 kW/kg，
峰值功率密度 ≤ 4 kW/kg。



澳大利亚MagniX

径向磁通永磁电机

电机持续功率280kW，转速1900-
3000RPM，重量71kg。



二、电动航空高功率密度电机本体设计

5. 卧龙产品技术特点

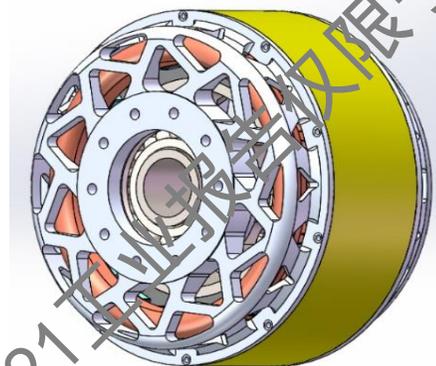
100V平台

- ◆ 径向磁通/轴向磁通
- ◆ 风冷
- ◆ 防护等级IP23



300V平台

- ◆ 径向磁通/轴向磁通
- ◆ 风冷/液冷
- ◆ 防护等级IP23-65



800V平台

- ◆ 径向磁通
- ◆ 液冷
- ◆ 防护等级IP65



起发一体机

- ◆ 径向磁通
- ◆ 定子浸油冷
- ◆ 防护等级IP65



目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：航空高功率密度电机本体设计

第三部分：航空高功率密度电机驱动设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

3. 航空高功率密度电机驱动设计关键技术

01. 宽禁带器件的应用

碳化硅SiC器件具有工作温度高、开关频率高、通态损耗小、热传导率好、可靠性好的优势

02. 高热流密度散热

单位面积内耗散功率提高条件下，适合航空应用并关注冷却系统整体性能的散热技术

03. 电磁兼容与滤波

结合电路拓扑和电路工作模式，从根本上解决高开关速度带来的电磁兼容问题；同时兼顾滤波器质量和体积的要求

04. 高可靠门极驱动

以高可靠性为导向，开发碳化硅MOSFET的门极驱动技术

05. 电子化功率回路

采用SMD封装的基本器件，配合印刷电路板和陶瓷基板工艺实现电子化的功率变换回路

06. 高集成度传感器

基于磁场传感器的电流传感器集成电路提供高集成度、高功率密度的电流传感电路

07. 易扩展高速控制

使用多核处理器硬件架构并合理分配软件资源从而最大化的提高控制系统计算频率，超高输出频率的需求；

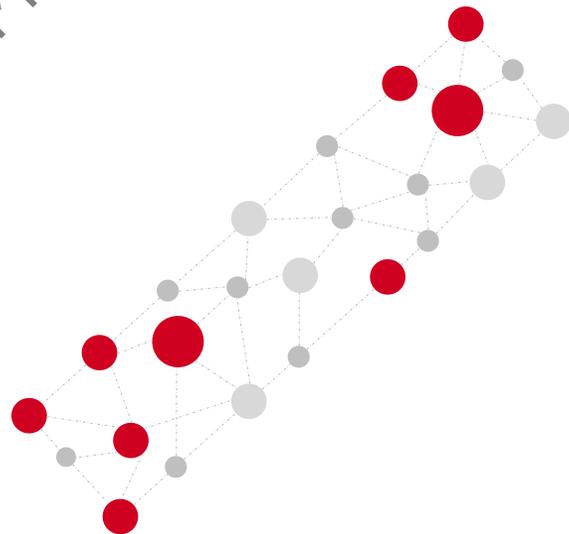
08. 航空标准设计方法

开发准循 DO178、DO254、DO160标准，采用基于V流程的设计方法，保证设计输出的可靠性

09. 集成与控制

针对电机控制器开关频率选取、系统绝缘及热极限、NVH振动优化极限、机械空间及电气设计极限等问题开发相关集成优化控制策略；开关频率优化控制、谐波抑制控制、基于热模型控制等，从软件层面进一步提升产品设计；

智慧监控及诊断系统



3.1 电驱技术趋势 – 宽禁带器件的应用



卧龙一代SiC航空电驱系统：
38000rpm@650V, 150kW
控制器：15kW/kg
电机：4.5kW/kg

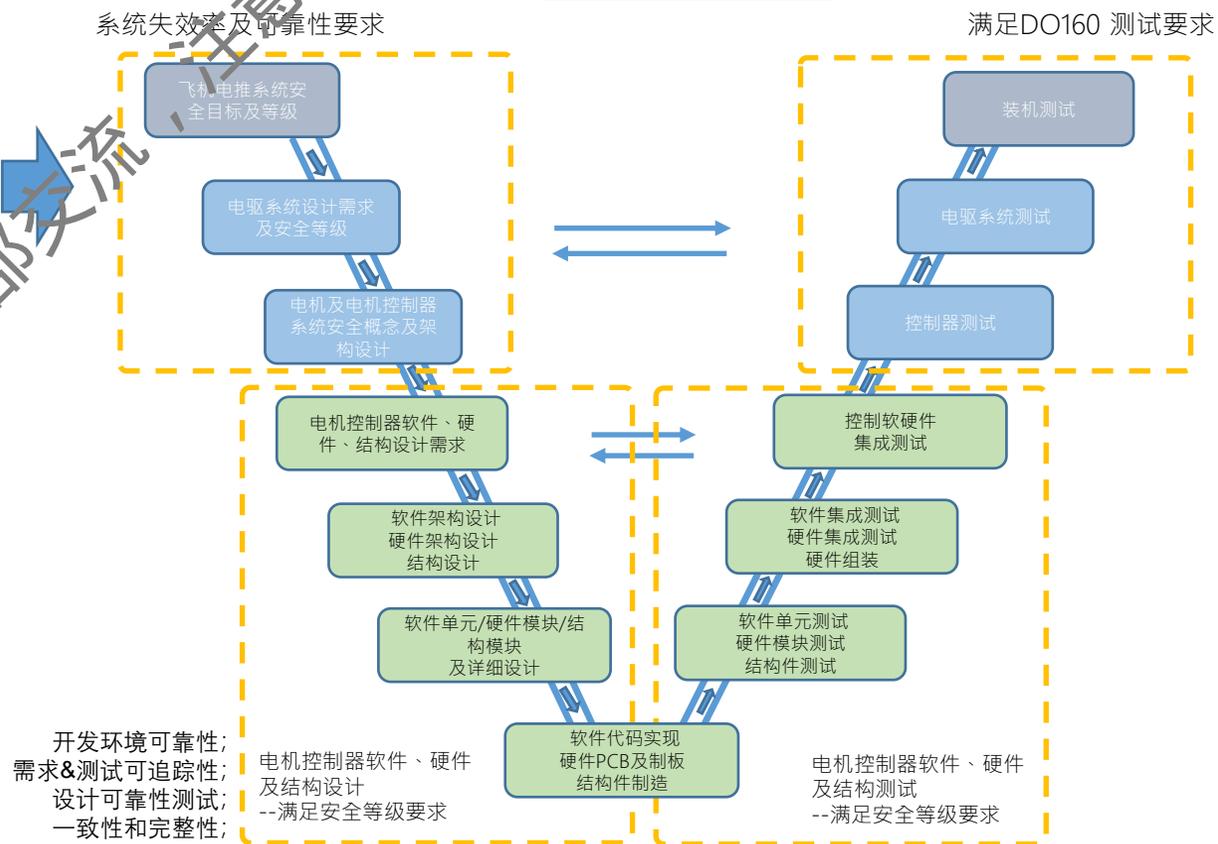
3.2 航空高可靠电机驱动系统设计

- 满足适航标准航空电驱系统正向开发流程：遵循 DO178 · DO254 · DO160
- 满足高可靠性要求的航空电驱系统设计：控制软硬件高可靠性设计

系统安全分析



电机控制器适航开发



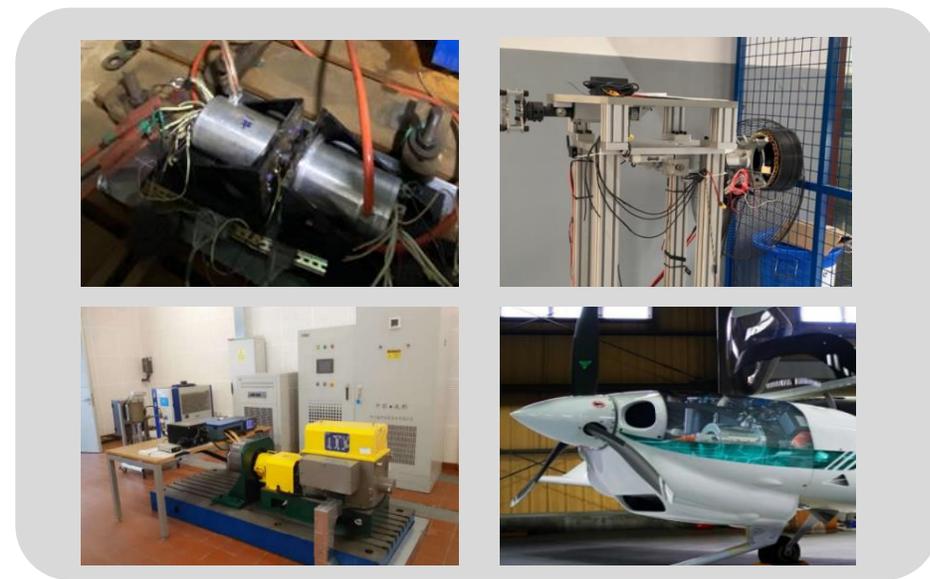
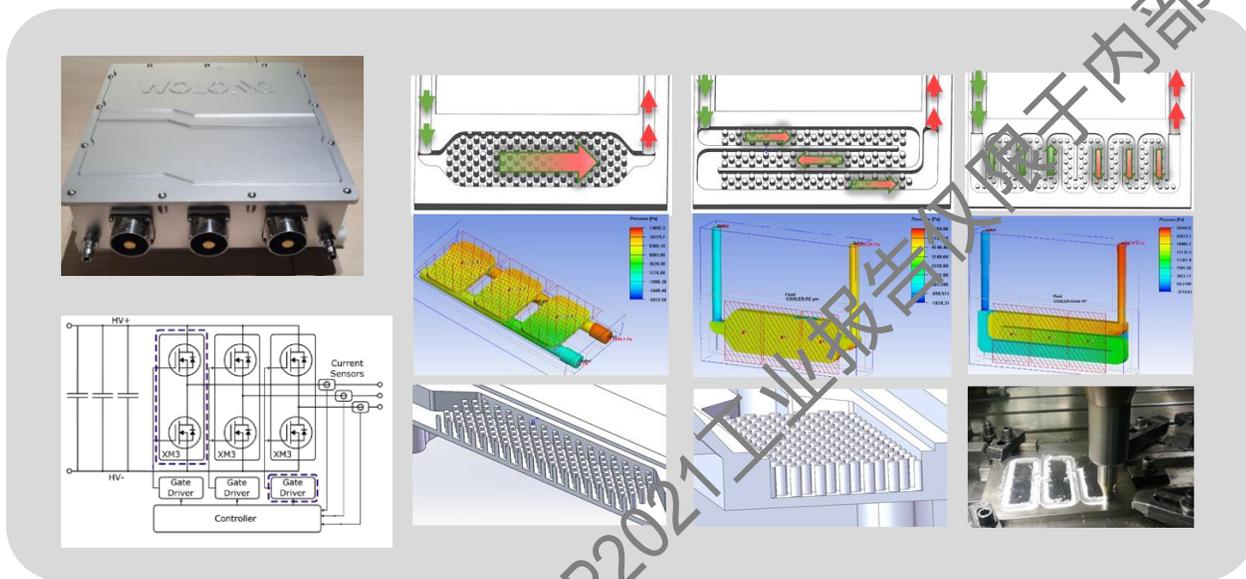
3.3 集成设计、控制及测试能力

➤ 集成优化控制技术设计

针对电机控制器开关频率选取、系统绝缘及热极限、NVH振动优化极限、机械空间及电气设计极限等问题开发相关集成优化控制策略：开关频率优化控制、谐波抑制控制、基于热模型控制等，从软件层面进一步提升产品设计；

➤ 高速电机控制软硬件设计技术

- 多核软硬件架构
- 非线性控制技术，无位置传感器控制技术等



3.4 卧龙航空变频器产品

◆ 5kW - 250kW 航空永磁直驱变频器产品

- ✓ 无人机、载人飞行器、航空启发一体机
- ✓ 高功率密度轻量化设计；
- ✓ 连续功率：5-250kW；
- ✓ 输出基波频率最高为1400Hz；
- ✓ 功能样机验证完成，实现系统38000rpm稳定运行

□ 2022年完成**适航**高可靠电驱动产品设计与验证；

□ 2023 产业化；

250kW 载人飞行器永磁直驱系统

150kW 载人飞行器永磁直驱系统

65kW 航空启发一体永磁直驱系统

<15kW 无人机永磁直驱系统



目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：电动航空高功率密度电机本体设计

第三部分：电动航空高功率密度驱动本体设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

四、电动航空动力系统方案设计

1. 固定翼/多旋翼飞行器动力系统结构

Fixed-Wing Aircraft



X-57 Maxwell
All Electric



STARC-ABL
Partial Turboelectric



N3-X
Distributed Turboelectric

Rotorcraft



Quadrotor
All Electric



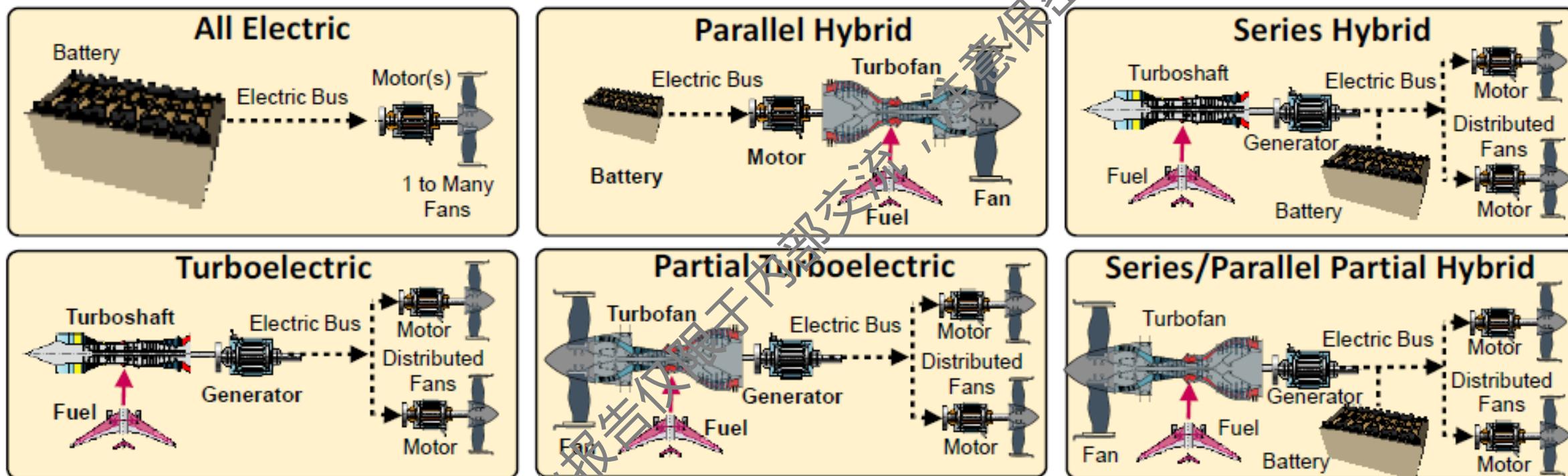
Side-by-Side Helicopter
Hybrid Electric



Tiltwing
Turboelectric

四、电动航空动力系统方案设计

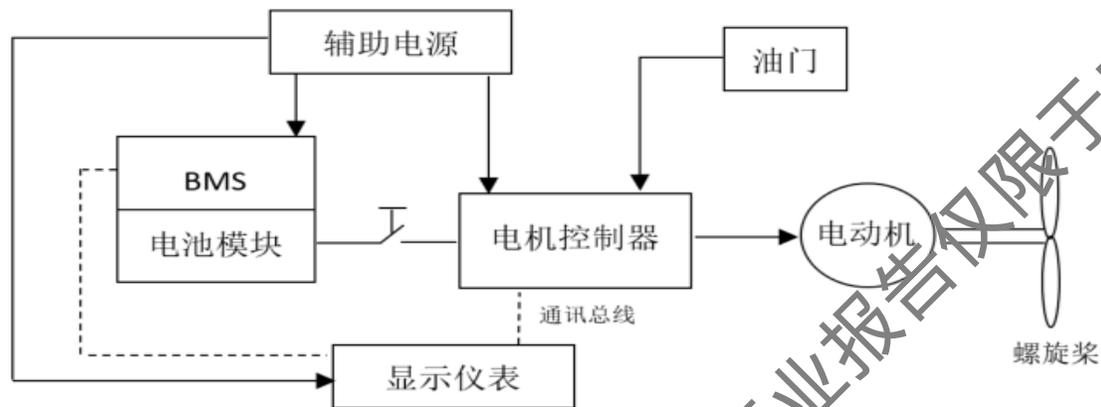
2. 电动飞机推进系统结构



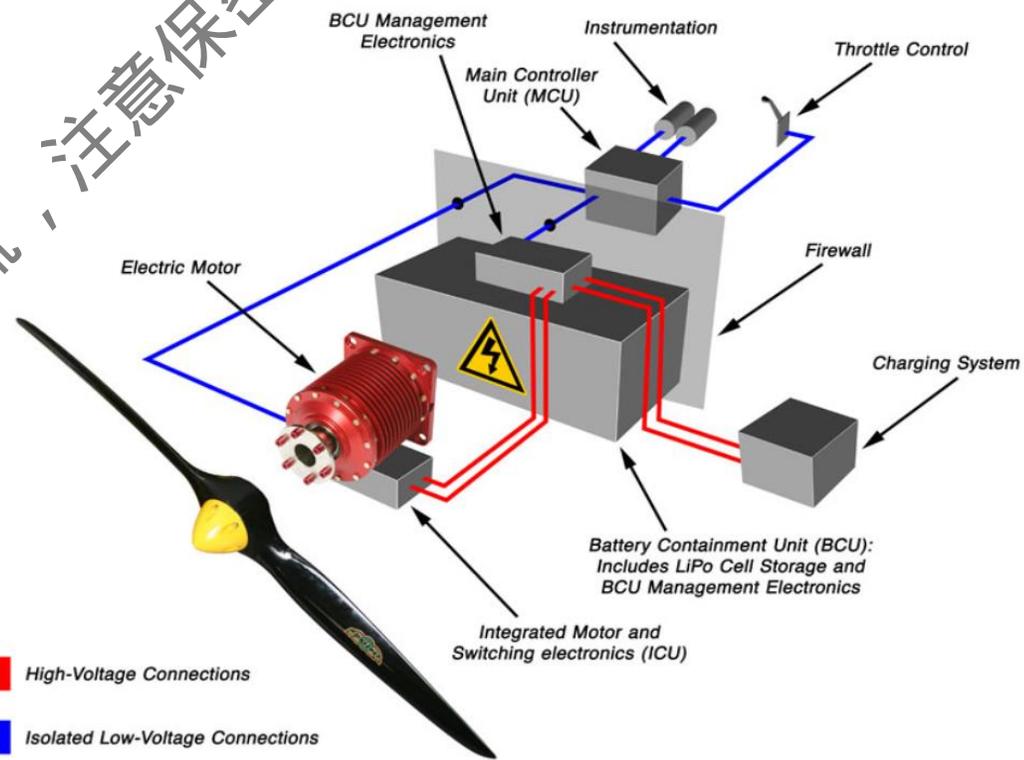
电动飞机推进系统主要分为：全电、并联混合动力、串联混合动力、涡轮发电动力、分布式涡轮发电动力、串联/并联部分混合动力。

四、电动航空动力系统方案设计

3. 电动航空动力系统结构-固定翼飞行器



固定翼飞行器由单台电机驱动构成动力系统。



电动飞行器动力系统主要包括：螺旋桨、电机、电机控制器及电池组模块。

四、电动航空动力系统方案设计

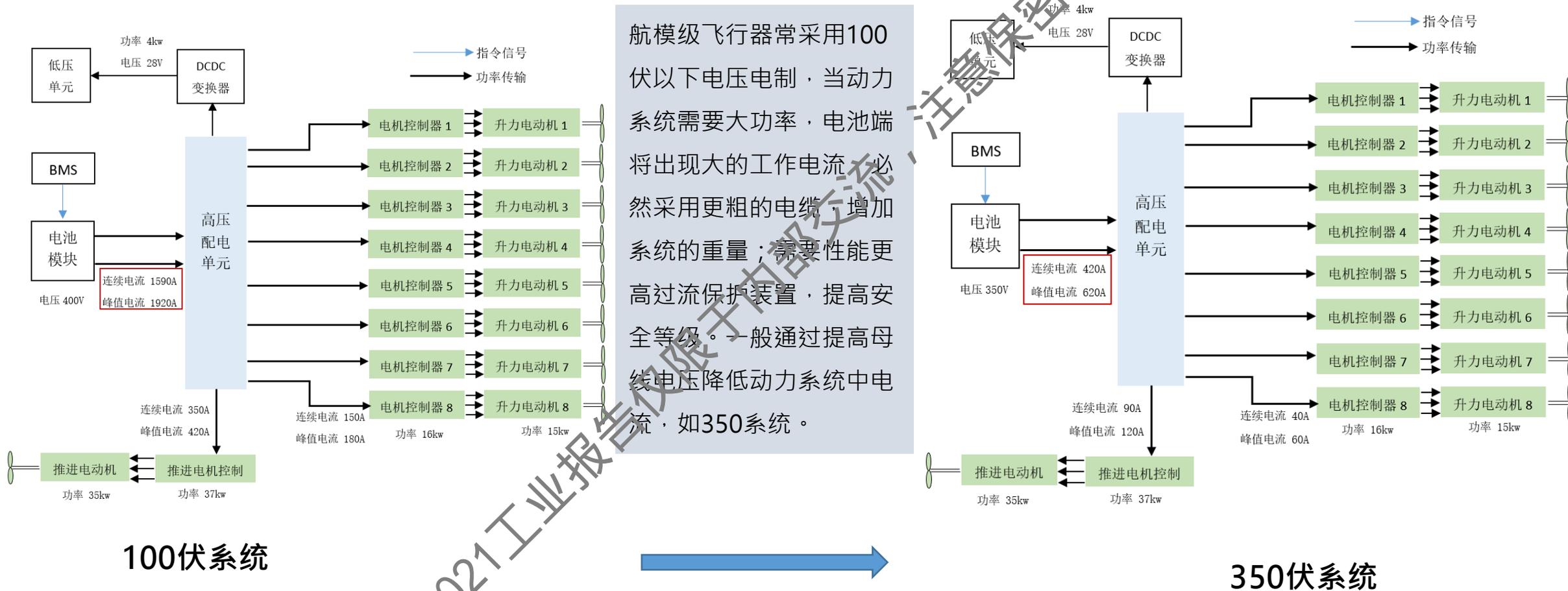
3. 电动航空动力系统结构-多旋翼飞行器



多旋翼飞行器由多台电机驱动构成动力系统。通过飞行姿态调整前进飞行，或者通过单独推进电机提供前进推力。

四、电动航空动力系统方案设计

4. 航空动力系统对比-100 VS 350VDC



四、电动航空动力系统方案设计

4. 航空动力系统对比-350VDC vs. 100VDC

单个电机控制角度，350伏与100伏系统的差别不明显；当整个电动飞机采用不同电制时，对应整体需要155kW的动力系统，可以看出整体电流量是差别非常大。350伏系统总的电流为400A，而100系统电流为1590A，从而对动力系统设计和配电设计等带来诸多问题，当输出功率较大时，建议采用高压系统。

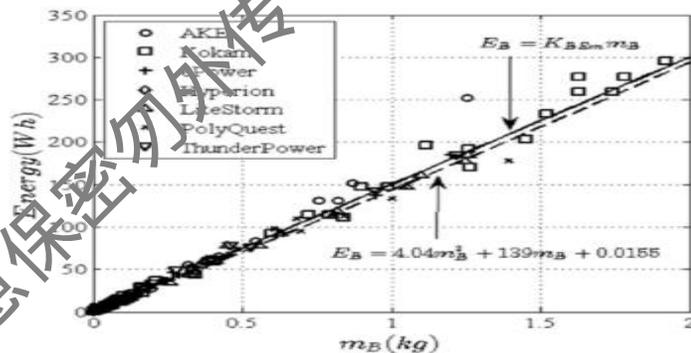
350伏系统特点

- ✓ 系统电流较小，相对100伏系统最大峰值电流可降低75%；
- ✓ 需要电缆耐压等级不高；
- ✓ 配套电气设备容易选型，350伏相对100伏系统电缆截面积可减少50%以上；
- ✓ 系统损耗小，散热系统要求较低；
- ✓ 电磁匹配要求低，短路保护设备等级要求低；
- ✓ 民用通用性较高，匹配工业性产品；

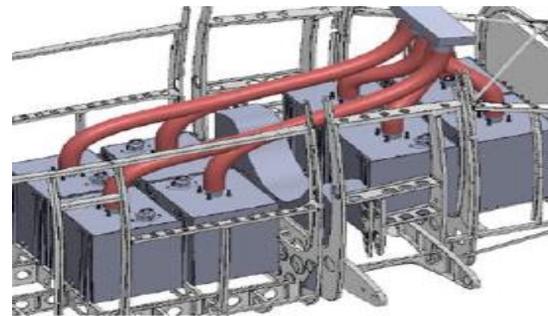
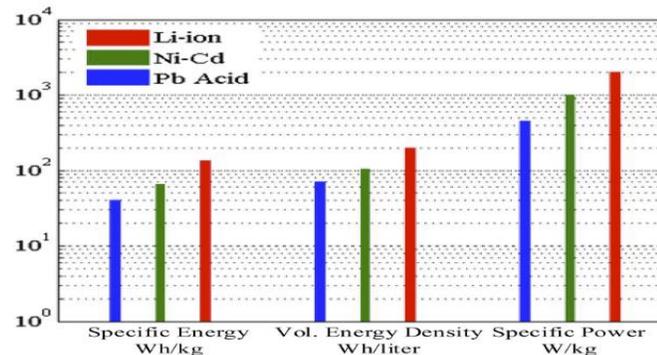
四、电动航空动力系统方案设计

5. 航空电池组选型

- 高功率密度电池组，减少飞行器重量；
- 通常选用锂电池，单体电芯工作电压在3.2-4.1V之间；
- 通过电芯串联实现不同电压组合，通过并联实现不同容量及电流等级；
- 模块化设计，满足电压及容量要求，实现灵活的布局安装；
- 电池模块集成BMS，满足安全监控及冗余要求。



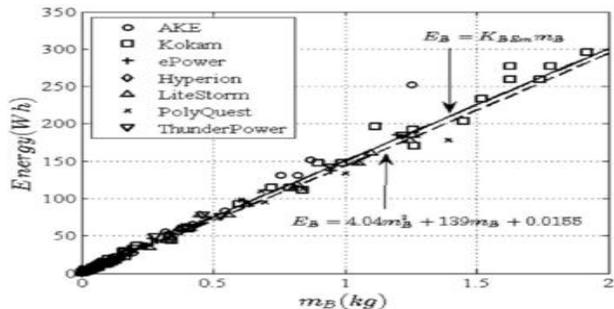
小型 LiPo 电池（组）的能量密度



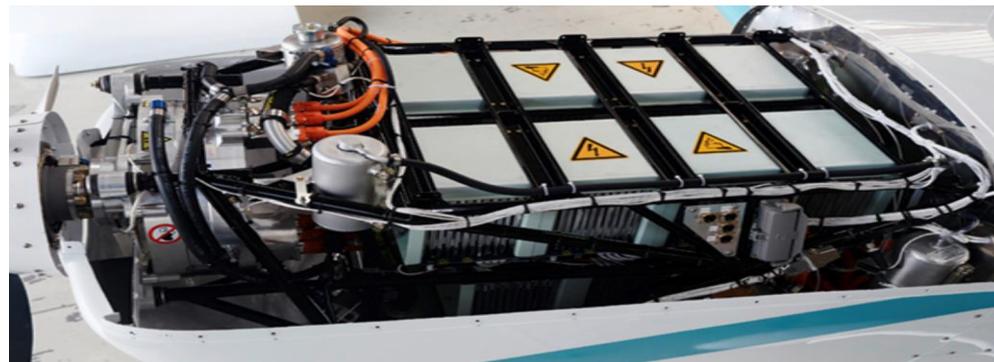
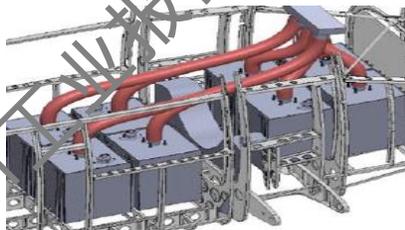
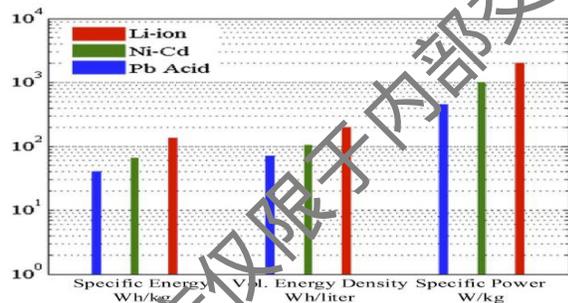
四、电动航空动力系统方案设计

5. 航空电池组选型

1. 电池组能量指标是体现电池价值的最重要参数，是由飞机的飞行剖面来决定的。电池组能量的大小需要对飞行剖面总能量进行计算，电动飞机电池组的总能量为飞行剖面各状态所需电量之和；
2. 容量选择，功率密度，容量大小直接与重量有关；
3. 率密度高的锂电池电池电芯；



小型 LiPo 电池（组）的能量密度



- 高功率密度电池组，减少飞行器重量
- 通常选用锂电池，单体典型的工作电压在 3.2-4.1V 之间
- 模块化设计，通过串联实现不同电压组合；通过并联实现容量及电流需求通过并联

目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：电动航空高功率密度电机本体设计

第三部分：电动航空高功率密度驱动本体设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：公司电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

五、GRC电动航空电驱动系统及案例

1. GRC人员架构



电力电子研究所
系统集成所

电机研究所
电力电子研究所

电机研究所
第三方检测中心

电机研究所
电力电子研究所

电机研究所
电力电子研究所

研究院副总裁

高跃博士

绍兴330计划专家

研发带头人

Gyllensten/Janning博士

国家高层次引进人才

研究院总裁

George Gao博士

国家高层次引进人才

研发带头人

迟颂/张政博士

IEEE Fellow

研发带头人

前谷达男博士

国家高层次引进人才



五、GRC电动航空电驱动系统及案例

2. 测试条件

小型电驱测试中心



大型电驱测试中心



中型电驱测试中心



负载台架测试中心



台架具备全功率段/全类型电机EMC、环境、安规、NVH、理化分析等测试能力，检测中心通过CNAS国家认证

五、GRC电动航空电驱动系统及案例

2. 测试条件



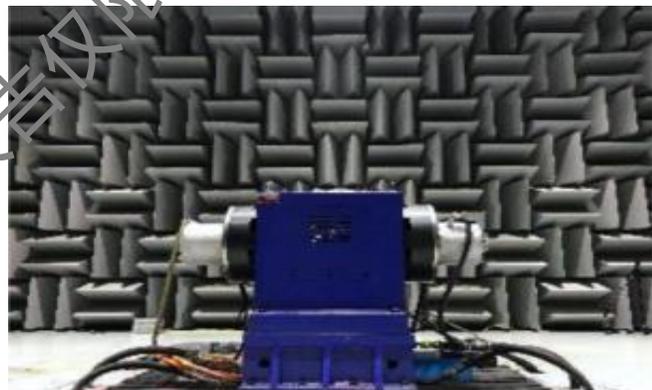
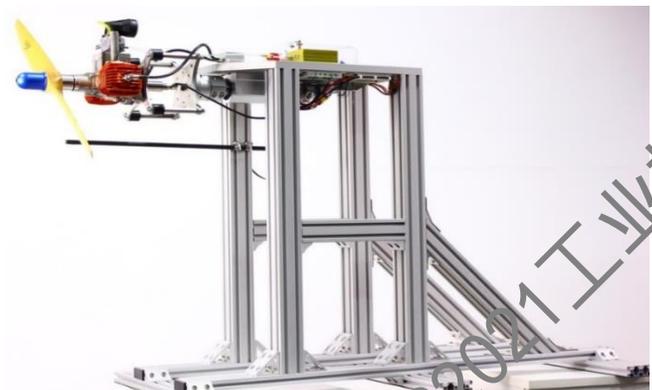
电动航空电驱系统测试台架



三综合及噪音室测试台架

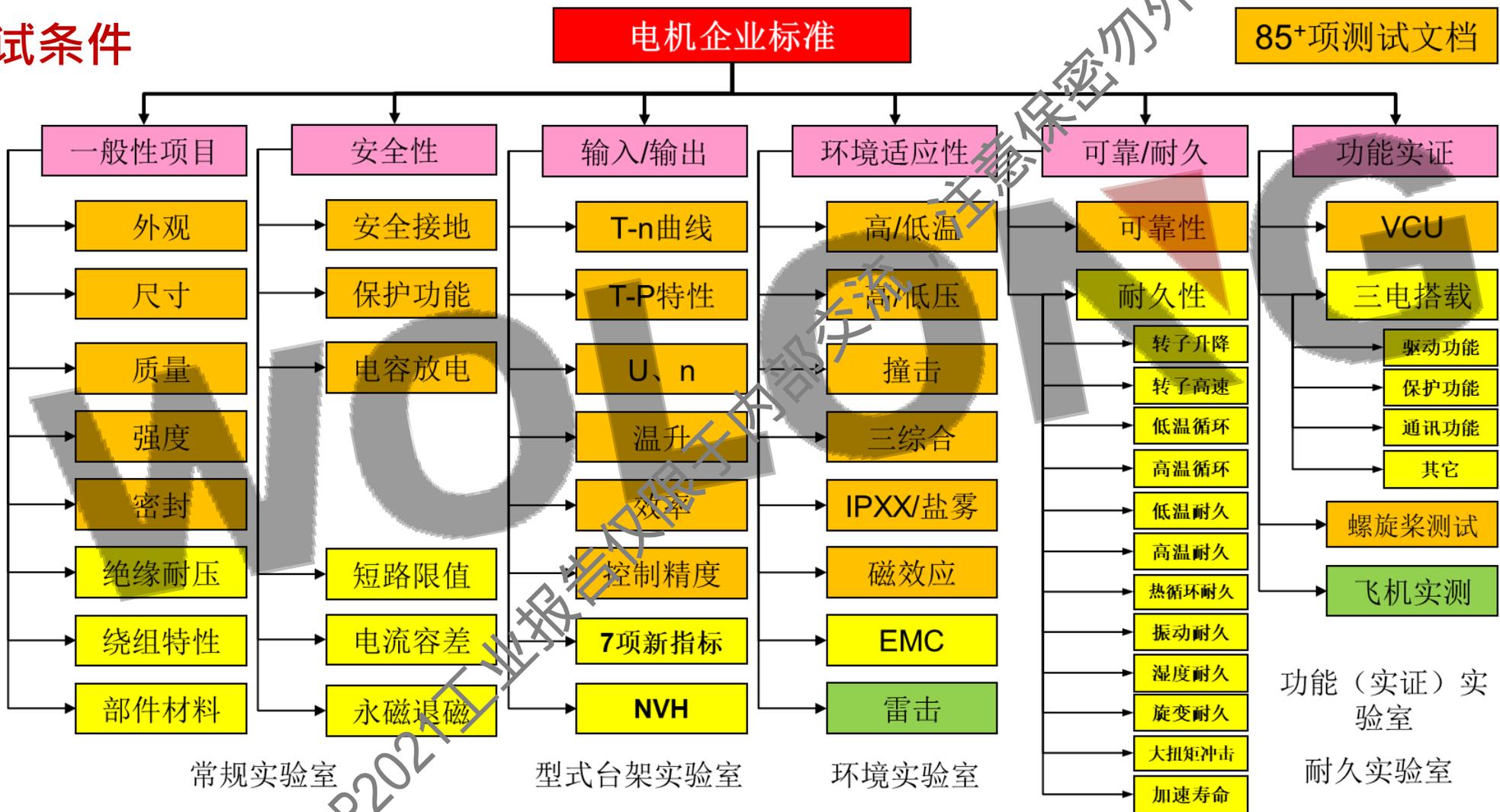


EMC常规测试、环境适应性测试



五、GRC电动航空电驱动系统及案例

2. 测试条件



五、GRC电动航空电驱动系统及案例

3. 小批试制能力



小批量半自动化试制车间，具备1000套/月产能

五、GRC电动航空电驱动系统及案例

4. 合作案例

- 与沃飞长空等公司就工业无人机展开战略合作



- 与钻石飞机等公司就UAM及电动新通航机型展开战略合作

- 公司在国际电动航空论坛发表主体演讲

Wolong Electric - Electric drives for e-Aviation

Leading manufacturer of Motors & Drives with 122 years experience (5.6b sales, 18k employees, HQ in China, 39 factories in Asia, Europe, US)

- Markets: Industry, O&G, Mining, Power, Marine, Water treatment, EV

Activities

- Hybrid propulsion system design based on high speed PMSM
- Ongoing propulsion projects for drones in China
- 2021: Propulsion drives for fixed wing aircraft in Europe

Hybrid Aircraft PM Motor Generator

Propulsion PMSM 200kg / 70kg load

Wolong HQ Shanghai

Wolong EV-25 M automated production line

五、GRC电动航空电驱动系统及案例

4. 部分产品及合作案例-适航审定



电动航空适航标准专业委员会于2019年10月在第三届国际电动航空论坛成立，由包括卧龙电驱在内的12家单位联合发起，**卧龙电驱牵头编写“电动飞机补充要求”第1801条电推进系统标准**，涉及电动飞机用电机和控制器性能指标要求、环境适应性要求、安全可靠要求。该标准的制定，将引领电动航空电推进系统的技术发展。

目录

第一部分：航空及动力系统电动化发展趋势

第二部分：电动航空高功率密度电机本体设计

第三部分：电动航空高功率密度驱动本体设计

第四部分：电动航空动力系统方案设计

第五部分：公司电动航空电驱动系统及案例

第六部分：总结

六、总结

欢迎各位加盟卧龙从事电动航空的事业!

