



中国航空工业集团自控所

高安全智能飞控助力绿色飞行

2026年06月



目录

CONTENTS

01 低空经济需求

02 智能安全考虑

03 技术产品体系



低空经济下飞控系统的变与不变



低空经济飞行器不是传统航空的技术降维，而是结合航空与汽车产业链优势的**升维重塑**，相对于传统航空来说，面向低空经济的飞控系统有**一条底线**（安全）**三个革命**（投入、成本、智能）

安全标准不变

- 依旧是安全等级最高的**适航关键系统**
- 依旧是 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 的载人严格要求

物理规律不变

- 依旧是飞行物理规律的**关键载体**
- 依旧是决策正确飞行的**核心大脑**

空域规则不变

- 依旧是面向融合空域的**高难场景**
- 从隔离空域到城市场景的范式转移

底线

VS

改变

投入要素转移

- “硬件价值主导”到**“软件定义航空”**
- “重资产长周期”到**“轻资产快迭代”**

成本要求重构

- 要求更低的**单架份成本**
- 高可变成本到规模运营下**边际成本**

智能化能力提升

- 从**单一任务**到**多模态复杂任务剖面**的演变
- 从**传统布局**到**颠覆性气动构型**的挑战



安全要求不变

中航工业自控所

eVTOL等低空经济飞行器虽载客量小，但飞行区域涉及城市稠密区，事故代价昂贵，因此根据局方要求，载人飞行器灾难性失效概率与大型运输类有人机相同，需满足 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 要求，货运无人可降低至 10^{-5} 。

EASA SC-VTOL-01

	Maximum Passenger Seating Configuration	Failure Condition Classifications			
		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category Enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category Basic	7 to 9 passengers	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	2 to 6 passengers (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1 passenger (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C

[Quantitative safety objectives are expressed per flight hour]

EASA SC-VTOL-01 适航安全性要求

增强型不论座位数统一要求 10^{-9} (FDAL A)

CAAC AC-21-AA-2022-40 适航安全性要求

无人航空器要求可放宽至 $\leq 10^{-5}$

FAA的 PS-AIR-21.17-01 适航安全性要求

非商业运营要求可放宽至 $\leq 10^{-6}$ (FDAL C)



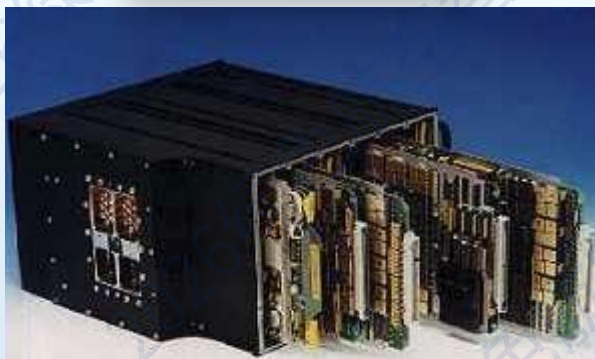


投入要素转移

中航工业自控所

eVTOL平均项目投入**不足10亿**，由软件定义平台，研制周期**小于5年**。对比大型客机项目研制投入**超千亿**，全机由硬件价值主导，研制周期超**10年**。

大型客机项目



“硬件价值主导”



“重资产长周期”

VS

eVTOL 项目



“软件定义航空”



“轻资产快迭代”



成本要求改变

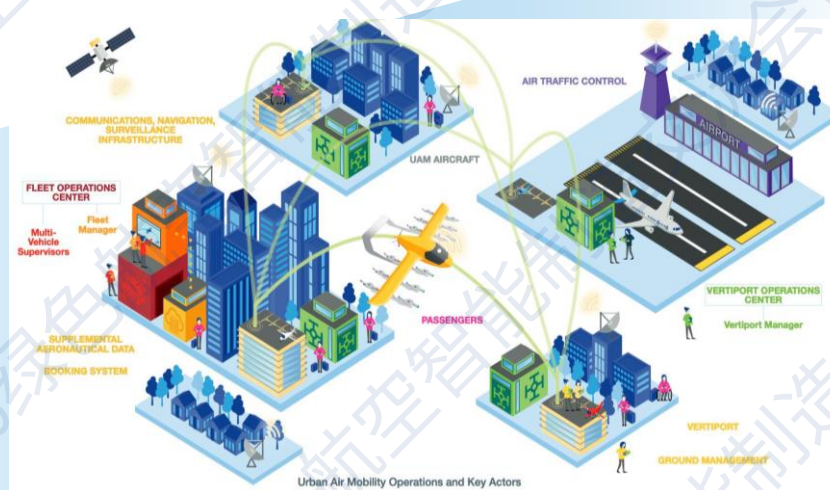
中航工业自控所

低空经济飞行器单机价值一般在**数百万至千余万**之间，售价为同等安全性等级大型载人飞行器的**20%~50%**，成本压力大，对机载各系统的成本要求也会同步压降，但仍需保证可靠性维持高水准。

空客 H125



- 乘员数：1（飞行员）+6（乘客）
- 飞机构型：直升机
- 安全性：灾难性事件概率低于 10^{-9}
- 价格：约3000万元



规模化运行与高周转率并举，摊薄运行成本

Joby S4



- 乘员数：1（飞行员）+4（乘客）
- 飞机构型：分布式倾转旋翼
- 安全性：灾难性事件概率低于 10^{-9}
- 价格：约1000万元



智能要求更高



低空经济的目标运行场景为城市稠密区，操作难度大，且飞行器驾驶员多为一般水平飞行员，因此需要具备符合**极简操作 (SVO)** 理念的操纵控制能力，以及复杂区域内**高安全智能驾驶**（着陆与避障）能力。

极简操纵 (SVO)



民航客机：飞行员训练、晋升为机长一般需要**5~10年**
VS
低空经济：普通人可独立安全驾驶飞行器要求**5~10天**

高安全智能驾驶



民航客机：航线飞行空域开阔，主要依靠**空管调度**
VS
低空经济：城区稠密区飞行情景复杂，需具备**应急能力**



evtol智控系统的泛化与专业化



飞控系统作为支持飞行器安全与智能飞行的核心关键系统，专业化需求驱动泛化能力的产生，泛化能力使能专业化产品的实现。

货运/双座： 10^{-5}



7座以下： 10^{-7}



8座以上： 10^{-9}



通用架构“1” + 选用服务“Δ”

可灵活配置的系统架构

可定制选用的服务模块

系统

系统整体解决方案
高安全保证机制

功能

极简操纵控制
安全增强先进功能

产品

低成本高可靠
T4/T5级模块复用

服务

通用化技术架构
适航支持体系

高安全

核心系统 安全兜底

关联全机40%以上的灾难性事件

智能化

智能赋能 简易飞行

降低飞行难度，提供安全保证

低成本

成本为匙 撬动市场

成本要求低，但产品可靠性要求高

通用化

快速移植 赋能行业

资源、进度紧张，客户需求差异大

目 录

CONTENTS

01

低空经济需求

02

智能安全考虑

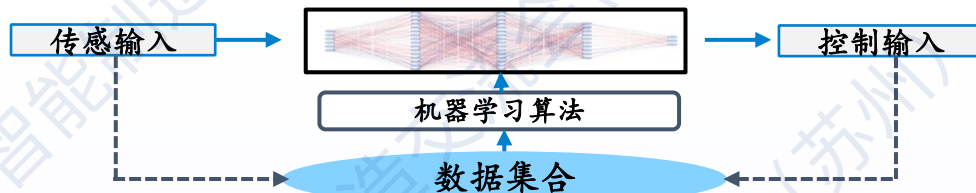
03

技术产品体系



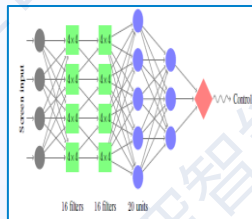
AI技术在航空飞行控制问题的应用范式

◆ 基于数据驱动的AI方法



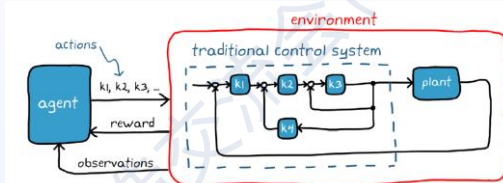
◆ 数据/知识混合驱动：通过AI方法，将人类行为特征迁移到经典控制结构

◆ 基于AI的飞行员行为特征挖掘

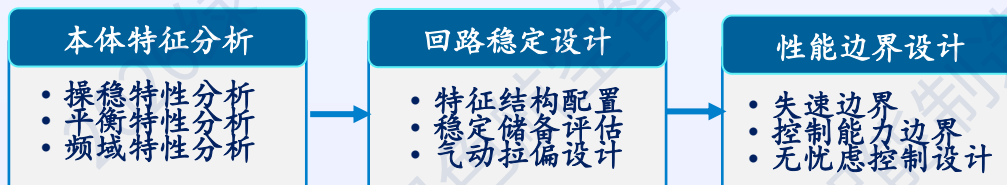


特征迁移

◆ 基于经典控制结构的行为模仿



◆ 基于知识驱动的反馈控制方法



神经网络化程度

安全关键度



军用、传统飞行器相关标准

- 面向传统构型、燃油动力、机械、液压以及早期电传飞控的飞行器
- 以军事应用场景为主

- MIL-F-83300 (早期S/VTOL规范, 曾用于V-22)
- ADS33E (旋翼机用, 基于MTEs的量化+定性评估)
- MIL-F-8785C (固定翼用, 模态参数标准化)
- MIL-STD-1797B (固定翼用, 提供替代标准的清单)
-

面向低空经济的新兴标准

- EASA SC-VTOL (VCA全链条专用适航认证标准)
- FAA AC 21.17等 (将eVTOL归入Power Lift飞行器, 并不断进行规范补充)
- RTCA DO-365 (城市空中交通有/无人飞行运行管理)
-

- 考虑升力+巡航、倾转旋翼等新构型
- 强调更简易、高自动化的驾驶
- 面向电力、电传飞控飞机
- 考虑城市空中交通场景

演变驱动：新规范 = 旧条款 + Δ事故教训 + Δ技术能力 + Δ商业诉求 + Δ治理理念 + Δ...

事故教训

- 例：B737 Max系列事故（狮航 JT610 空难等）引发的直接修正：
- FAA PL. 2300 中新增(a)(3) 强制要求：“确保主飞行操纵接近控制权限的极限时，能够被机组适当的感知”

事故教训推动条款向更严格的安全边界迭代

技术能力

- 电传飞控：算法定义，实现多模态统一的极简操纵指令响应以及边界保护能力
- 智慧座舱：智能交互，提供简单舒适的操纵方案与清晰无误的界面显示；

新的功能——新的合规验证？

技术能力为飞行安全提供更有保障，也为合规性验证带来新的挑战

商业诉求

- 例：为压缩取证周期，FAA 在 AC 120-114 中允许通过高置信度的数字孪生替代部分实飞测试
- Archer Midnight 与 Joby S4 通过数字孪生分别实现近半的需求确认和测试验证替代，显著降低成本与周期。

商业诉求促使规则在安全前提下寻求可执行性与经济性的平衡

治理理念

- 欧：法典化传统，规定穷尽风险；
 - 美：“普通法”逻辑，一事一议，条款可弹性进化，用合理风险换取商业化效率。
- 以控制律验证要求为例：**
- 欧：要求覆盖全故障耦合，HIL+PIL仿真
 - 美：试飞/仿真/分析均可，功能达标即可

未来：超越二元对立，建立兼顾安全与效率的第三极标准体系

深入剖析适航要求背后的设计哲学与工程实质，确保安全的前提下，将合规性约束转化为产品定义与市场竞争力的核心优势



架构安全 —— 可用性和完整性设计

中航工业自控所

可用性

失效-安全

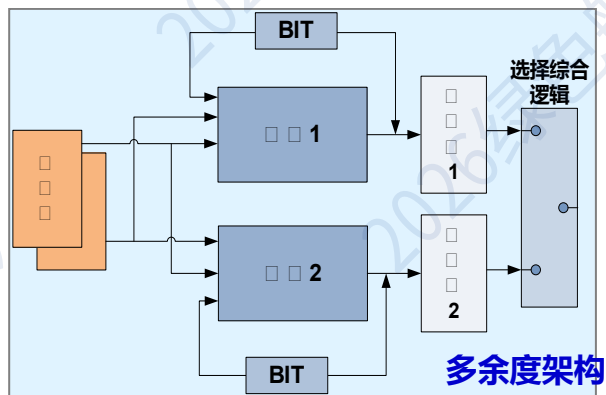
架构
故障容忍能力

非指令-安全

完整性

功能失效的概率小于 $10^{-9}/\text{fh}$

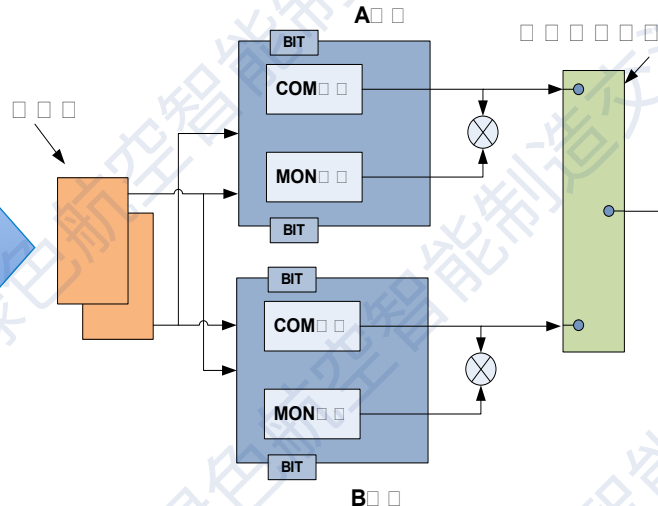
高可用性设计——余度配置



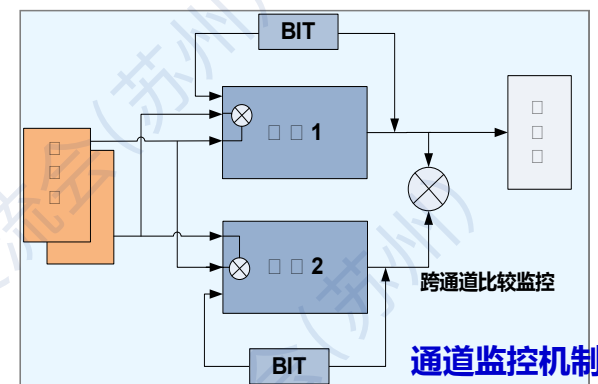
系统余度架构/安全等级

单余度连接MAC、非相似余度、终极备份等

“多余度”+通道内“高完整”



高完整性设计——跨通道监控



跨通道监控提升指令完整性

通道内“指令+监控”“Lock-Step”

面向不同飞机平台，基于安全性分析，综合任务可靠性要求，确定飞控系统的余度和自监控架构



设计安全 —— 全生命周期安全性评估能力

中航工业自控所

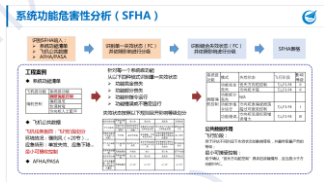
系统设计全生命周期过程



飞机级FHA

- 飞控相关飞机级I类失效状态占全机**40%**

系统级FHA

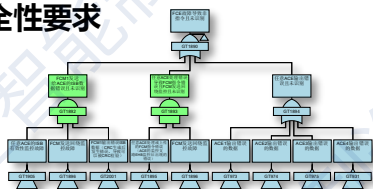


依据**CCAR25.1309**
对系统设计提出要求

PSSA

评估系统架构是否满足安全性要求

1. FTA
 - 依据故障树逻辑门分配概率需求
 - 形成独立性需求



按照功能失效状态影响等级得出功能研制保证等级

2. DAL分配

通过FDAL及功能实现所需软硬件分配出IDAL

系统功能	FDAL	部件配置项	IDAL
脚踏偏航控制	A	FCM CPU	A
		"OR"	
		ACE FPGA	A
			

对架构合理性予以评估

CMA

评估系统架构是否存在共模风险

- 独立性需求分析

根据故障树，进行与门分析，析出独立性需求

- 共模源筛选

依据飞控系统共模检查单进行共模源筛选

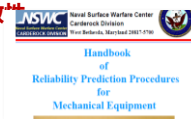
- CMA需求检查

- 评估设计风险
 - 独立备份控制系统
 - 非相似REU FPGA选型
 - ...

识别系统**共模风险**
满足**CCAR25.671**要求

FMEA

- 数据来源于可靠性手册 (GJB-299C、MIL-217F、NPRD、NSWC等) **数据具备有效性**



- 自底向上分析
- 完成设备的**功能FMEA**
- 识别元器件失效模式

识别系统的潜在失效模式
采取改进预防措施，提高系统可靠性

识别系统薄弱环节

依据ARP 4761A，开展全生命周期安全性评估，满足顶层安全性需求，配合审查方开展安全性审查



验证安全 —— 全系统安全性验证能力

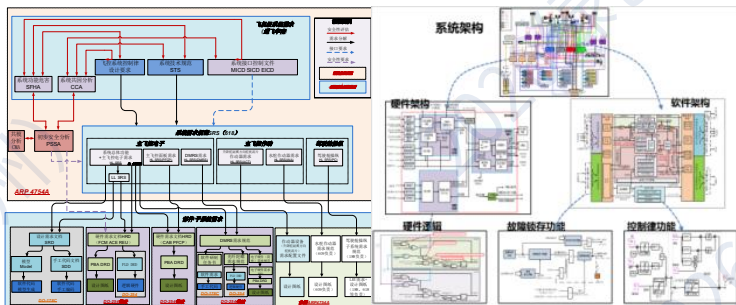
中航工业自控所



依托自控所多型民机课题适航实践，按照ARP4754A要求，建立了“计划-开发-验证-总结-过程保证”系统研发工作体系

系统需求正向设计

- 基于安全性评估开展迭代式架构设计
- 基于架构的功能模块化分解进行功能设计
- 基于需求条目化规范性开发



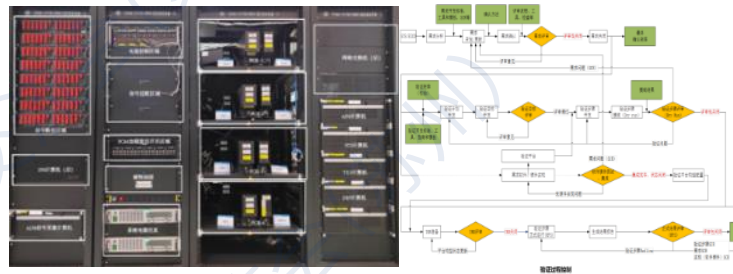
条目化需求确认

- 基于需求管理平台sys.RE建立需求追踪
- 基于评审管理平台CTRS开展需求评审活动
- 基于仿真和试验的RAD分析，形成分析报告
- 基于正确性和完整性建立多份检查单



条目化需求验证

- SITP验证计划 (FVP)
- SITP验证
- 自动化SITP
- TRR测试
- RFS测试



构型管理

Git/jira工具平台

PDQA保证

SYS RE需求综合管理平台

评审管理

CTRS评审工具平台

PDM数据管理平台

依托型号适航取证实践，完善了面向ARP4754A的活动过程规范，通过适航DAR1-2审查，形成宝贵型号适航实践经验



体系安全 —— 系统研制过程保证



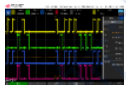
部件级

系统级

飞机级

功能性能验证

电子硬件



- PLD-板卡/LRU逐层验证
- 测试、分析、仿真、检查不同方法
- PLD-硬件测试+功能仿真+时序仿真
- LRU-基于需求的验证工作

软件



- CTP/STP
- HLR/LLR/模型仿真测试
- 需求覆盖、脆弱性、目标码、数据耦合、WCET分析、结构覆盖、控制耦合、堆栈

基于需求开展部件及以下层级验证

面向功能性能集成验证



面向需求SITP验证

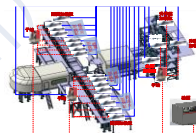


- 稳定储备试验
- 闭环时域仿真
- 余度管理试验
- 维护BIT试验
-

需求基于脚本的自动化全覆盖验证，完成系统级品模试验

面向飞控系统功能

- BIT功能测试
- 伺服回路特性测试
- 模拟器验证



完成14类飞机级铁鸟验证试验，飞控系统符合要求

飞行边界保护功能

- 操稳特性试飞
- 包线保护试飞
-

飞控系统交联功能

- 航电系统
- 液压系统
- 起落架系统
-

环境验证

依据DO160标准的部件环境试验

- 振动试验
- 冲击试验
- 动刚度试验
- 动阻尼试验
-



完成部件MOC9鉴定试验

基于25.1316和25.1317条款要求

- 系统MOC9鉴定试验
- HIRF/Lighting

- 射频传导敏感度试验
- 射频辐射敏感度
- 线缆束试验



特殊环境条件试飞验证

高寒、大侧风、电磁兼容（整机）



完成7大类试飞科目，操稳检查均为一级品质，系统状态稳定，飞行员超出预期，适航代表高度评价

故障注入验证

基于设备FMEA故障验证试验

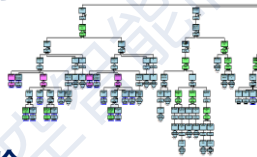


- 主飞控电子电源故障模式注入试验
- 主飞控作动阀组件故障注入试验...

从设备到信号再到元器件故障注入逐步细化

基于FTA的组合故障模拟试验

- 电源、液压源故障组合试验
- 外部传感器故障组合试验
- 主飞控电子故障组合试验
- 伺服振荡非指令故障组合试验.....



基于边界场景系统鲁棒性试验

- 系统总线鲁棒性试验
- 航电输入信号边界试验.....

故障模拟试飞验证



包括液压源失效、系统降级、舵面备份模式、舵面卡阻、拉平模式等功能试飞故障注入验证

围绕适航符合性验证规划，针对部件级-系统级-飞机级，逐级开展安全性验证

目录

CONTENTS

01

低空经济需求

02

智能安全考虑

03

技术产品体系



技术体系 —— 1.灵活余度高完整性架构

中航工业自控所

通过硬件高完整性设计与高覆盖度监控保证**单余度完整性**满足 10^{-9} 要求，通过架构安全管理功能灵活配置余度满足不同**可用性指标**（ 10^{-5} 单余度、 10^{-7} 双余度、 10^{-9} 三余度）。

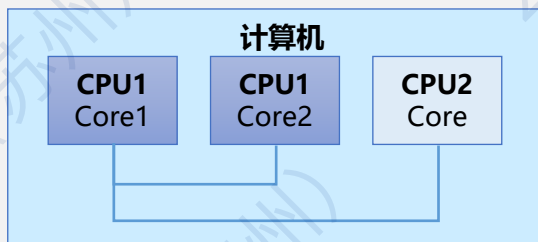
高完整性设计

◆ 指令支路锁步机制设计

- 指令支路采用锁步核，针对计算输出进行**位对位 (bit-to-bit)** 比较

◆ 监控支路完成指令级比较

- 采用单独处理器进行监控，针对指令支路输出进行**指令级**比较



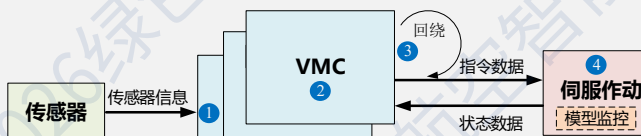
高覆盖度监控

◆ 适航级 (C919、AG600) 监控面设计沿用

- 复用适航级飞控系统监控思路，**四层23级**监控设计

◆ 信息链路完整覆盖

- 完整监控覆盖传感端、处理端、执行端与总线传输端，**全链路覆盖**



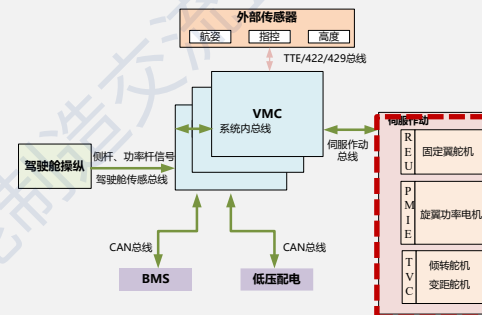
架构安全管理

◆ 多余度确定性总线交联

- 系统内总线采用**所内自研高确定性总线 (AG600复用)**，支持灵活余度配置

◆ 操纵分组保证MAC (最小操纵舵面)

- 保证单余度连接完整MAC，降低余度损失后安全风险





技术体系 —— 2.自主规划导引功能



通过自主规划导引功能的赋能，提升飞行器自主飞行能力，为智能驾驶打下坚实基础。

电子围栏技术

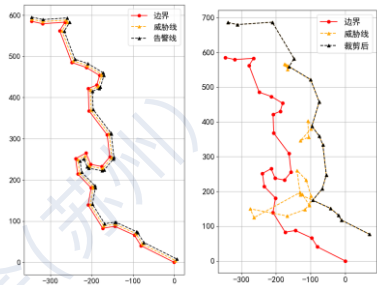
需求

- ◆ 具备不规则/凹凸并存、半封闭电子围栏生成能力
- ◆ 实现不同区域内的预警、盘旋、绕行自主处置逻辑

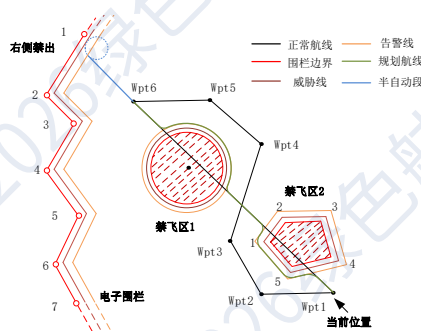
难点1. 实际地形场景不规则

难点2. 处置复杂度与实时性要求矛盾

技术途径



等距偏移
+
角点平滑
+
拓扑裁剪
+
区域提取



✓ 复杂边界围栏/禁飞区生成

✓ 复用航线导引遥控盘旋逻辑

四维制导技术

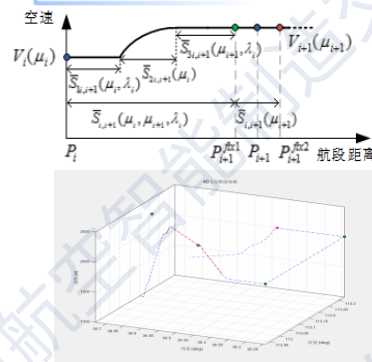
需求

- ◆ 具备飞行航线与飞机性能不匹配情况下的四维航迹规划能力
- ◆ 实现飞机早到情况下的准确耗时机动策略

难点1. 航线灵活，三维轨迹难预测

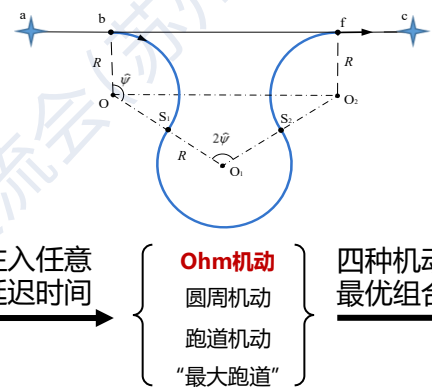
难点2. 传统盘旋策略耗时估计不准

技术途径



性能数据库
+
高度剖面
+
速度剖面
+
水平航迹

✓ 在线多层嵌套搜索的三维轨迹



注入任意延迟时间 → { Ohm机动, 圆周机动, 跑道机动, "最大跑道" } → 四种机动最优组合

✓ 精确控时的延迟机动策略



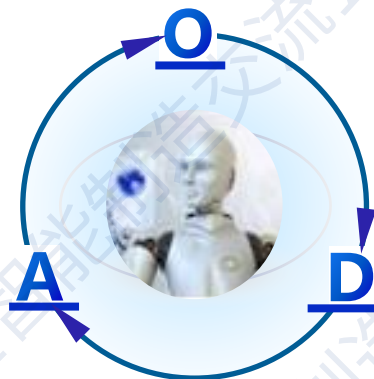
技术体系 —— 3.高安全智能驾驶功能



针对飞行任务感知（O）决策（D）执行（A）三个环节进行智能化升级，在确保高安全性与机载可实现性的基础上完成安全关键智能功能的开发。



自主起降



自动避障

感知融合

多源异构的自主信息融合

惯导：强连续性 视觉：多环境信息
卫星：高定位精度 雷达：精距离探测

完好性提升3个数量级

决策规划

基于模糊推理的辅助决策

可解释性好 可应对场景多
可扩展性强 易适航验证

具备100%可解释性

极简控制

面向能量管理的自适应重构控制

统一指令极简操作 综合能量管理
异常情景自适应控制 增量式动态逆

降低飞行员工作负荷60%

在研
项目



团队承研的视觉起降技术已完成半物理验证与搭载试飞验证，技术成熟度达到TRL5，安全性分析满足1E-9/FH的最高等级安全性要求



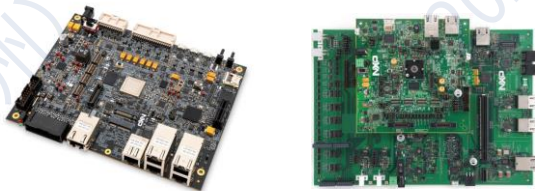
产品体系 —— 4.高可靠低成本核心平台



核心平台通过车规级器件使用、集成优化设计与操作系统复用三项举措，实现计算核心平台成本相对于同等安全等级产品**成本下降90%，体积缩小50%，重量减轻40%。**

车规级器件使用

- **环境条件类似**：低空经济在3000m以下，满足车规级元器件的环境条件要求
- **出货量验证充分**：成本低，且具备大量的应用数据有利于适航符合性说明
- **元器件成本 (BOM) 降低80%**



集成优化设计

- **功能集成设计**：单个产品实现C919上FCM与ACE两个设备功能
- **硬件功能软件化**：采用自研 **RISCV** 芯片，提升功能集成度
- **体积缩小50%，重量降低40%**



操作系统复用

- **技术积累深厚**：持续投入20余年，耗资数亿元，拥有专职专家团队
- **经过充分验证**：国产飞机上的飞控系统市占率95%，且已完成适航认证
- **综合成本降低10%** (操作系统授权费)





产品体系 —— 5.高完整性惯导设备



通过MEMS与光纤惯导高低搭配的形式，构成高完整性组合导航系统，为低空飞行器提供可靠位姿信息。

323 光纤捷联惯导

- **最高精度光纤惯导**
- **重量尺寸:** 3.6kg 205×186×135mm
- **纯惯位置精度:** 1.5nmile/h
- **纯惯速度精度:** 1.5m/s
- **姿态航向精度:** 0.02°/0.05°



320 光纤捷联惯导

- **主力光纤惯导**
- **重量尺寸:** 1.8kg 141×128×105mm
- **纯惯位置精度:** 2nmile/20min
- **纯惯速度精度:** 4m/s
- **姿态航向精度:** 0.05°/0.1°



SN102B1 MEMS组合导航

- **主力MEMS惯导**
- **重量尺寸:** 135g 56×48×29.5mm
- **纯惯位置精度:** 100m/100s
- **组合速度精度:** 0.1m/s
- **姿态航向精度:** 0.2°/0.1°





通过激光大气与角加速度计新质传感器的应用，破局低空经济面临的复杂低空流场与倾转控制难题，赋能飞行器安全飞行。

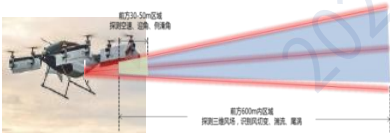
激光大气

需求

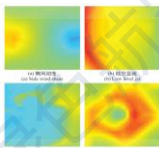
- ◆ 获取飞机周围及航线上的风场参数，提前识别并相关预警紊流信息

关键技术

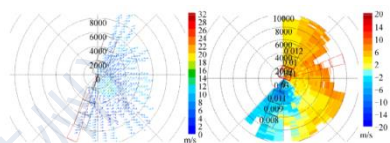
动平台高时空分辨率大气流场探测技术



精细风场高精度重建技术



低空紊流智能识别及预警技术



小型化低成本样机设计及研制



研制基础



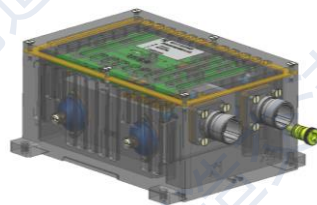
- 空速、风速测量精度0.5m/s
- 更新率优于20Hz
- 攻角、侧滑角测量精度0.5°
- 技术成熟度5级

角加速度计

需求

- ◆ 获取飞机角加速度信号，赋能INDI算法提升控制能力

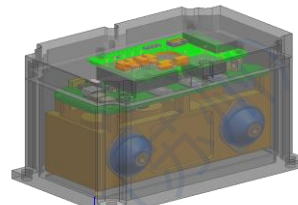
产品参数



双冗余组件：

外形尺寸：123mm×178mm×85mm

重量：1.8Kg



单冗余组件：

外形尺寸：70mm×122mm×78.5mm

重量：1Kg

序号	项目	指标
1	量程（可调）	-800°/s ² ~ 800°/s ²
2	全量程精度	≤0.5%FS°/s ²
3	阈值	≤0.12°/s ²
4	分辨率	≤0.06°/s ²
5	通道一致性	≤1.5% FS



没有成熟的适航能力，就没有eVTOL的商业化落地，而飞控系统是eVTOL适航与安全的核心

适航认证是载人航空器进入商业运营的**唯一通行证**——这是航空区别于汽车等交通工具的根本门槛。构型再新、性能再强，未取得适航许可就无法载人商用。

安全性设计与验证

- ◆ 高等级安全目标（DAL A/B）对系统冗余与容错设计要求严苛。
- ◆ 复杂飞行器构型与多模态飞行增加安全性分析难度。
- ◆ 故障工况组合多，失效传播机理复杂。

系统/部件符合性验证

- ◆ 缺乏统一适航标准，符合性验证路径尚未完全明确。
- ◆ 飞控、动力与能源系统深度耦合，验证边界复杂。
- ◆ 大量试验与仿真结合验证，验证成本高、周期长。

全流程工具链支持

- ◆ 需求、设计、代码、测试需建立完整闭环关联。
- ◆ 工具链需完成适航鉴定。
- ◆ 后期补建合规流程代价高，需从项目初期同步规划。

最终的设计思路，需要靠安全性设计与验证能力和从系统到部件的逐级验证能力来保证



产品体系 —— 8.工具链支撑



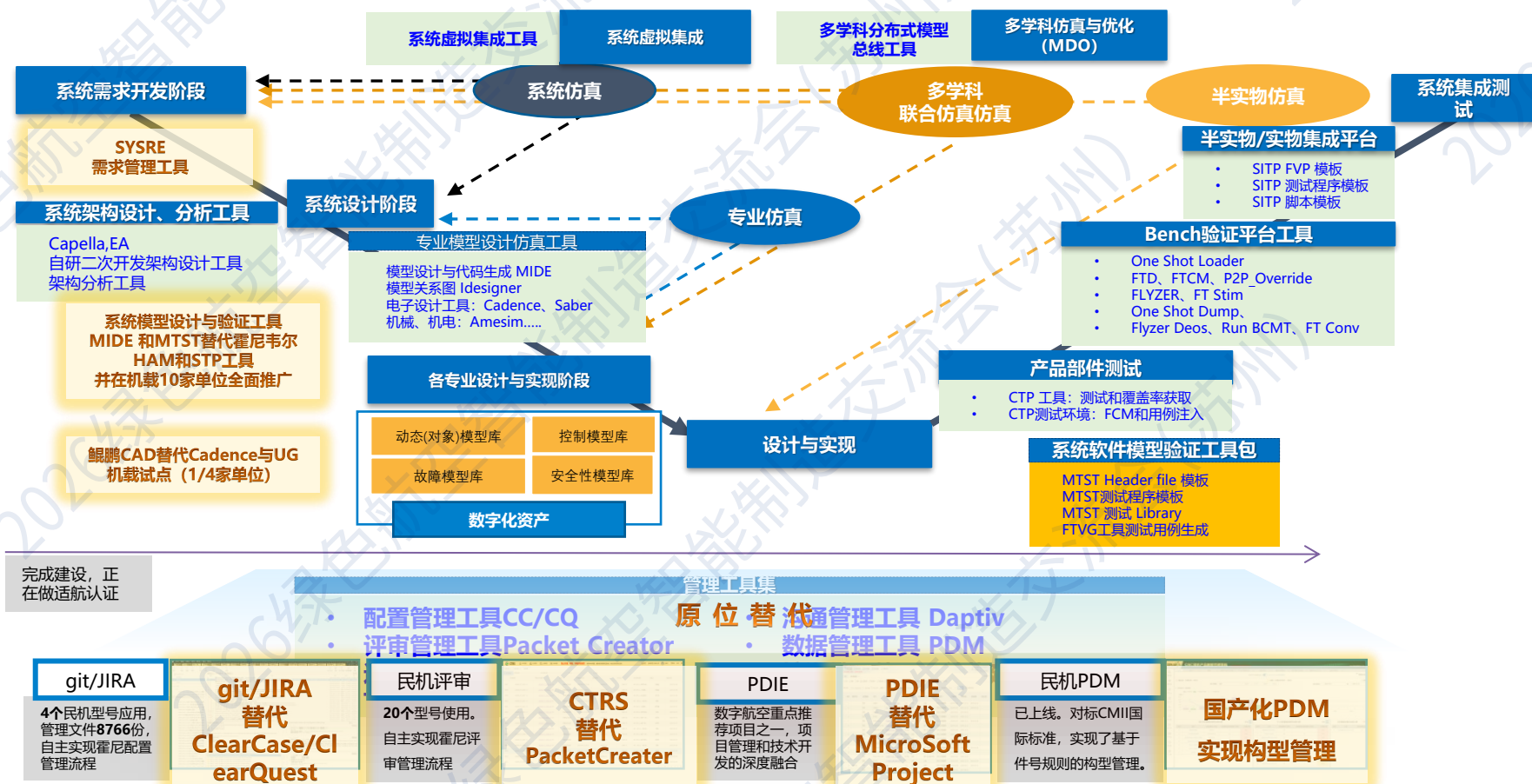
依托C919项目联合设计，汲取外方经验、做法，开发了具有自主知识产权的从“需求管理-构型配置-研发过程管理-产品数据管理”的完整工具链

形成了民机飞控、导航集成产品研制体系



支持L2系统级及L3、L4

部件级产品研制，已形成体系文件1300余份





产品体系 —— 9.基于分层架构的产品服务



按飞控系统技术逻辑，分层级固化适系统核心功能及关键产品，实现依据客户需求的灵活配置模式，快速满足不同客户定制化需求，形成**FCaaS（飞控即服务）**商业模式。





结束语 —— 行业引领，共创共赢，为低空战略提供高质量产品和解决方案

**以飞控导航为根，以自主可控为魂，
用飞翔的智慧实现智慧的飞翔**