



电动飞机对传统飞机设计的挑战

The Challenge that E- flight brings to Traditional Aircraft Design

清华大学航天航空学院

飞机研究与设计实验室 (AEROLab)

陈海昕

2017. 11. 8



电动飞机的时代悄然来临



阳光动力二号



辽宁锐翔 RX1E



剑桥大学混合动力飞机

专业飞机设计机构的关注

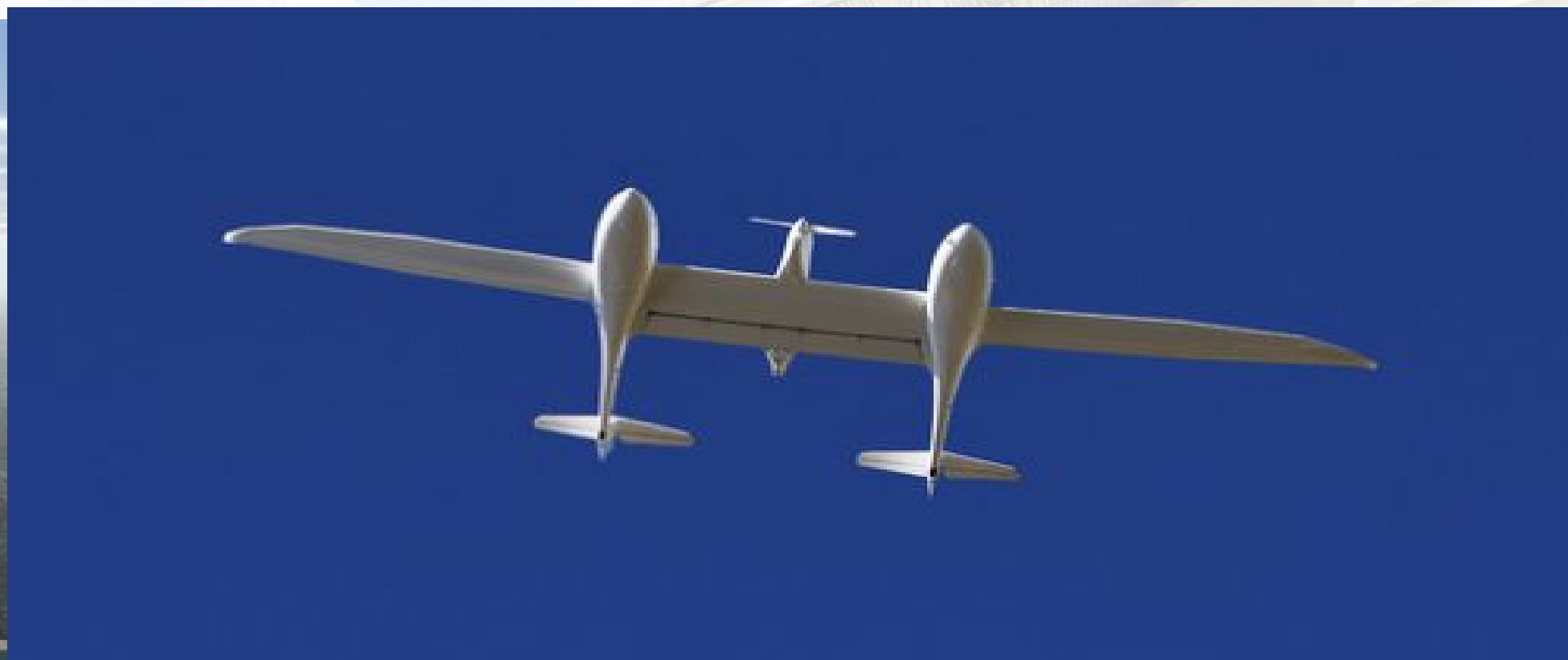
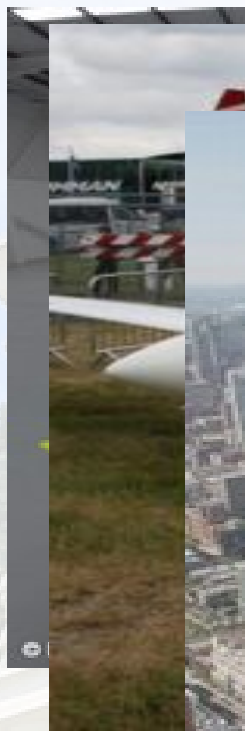
空客？

波音？

NASA ？

ONERA ？

DLR ？



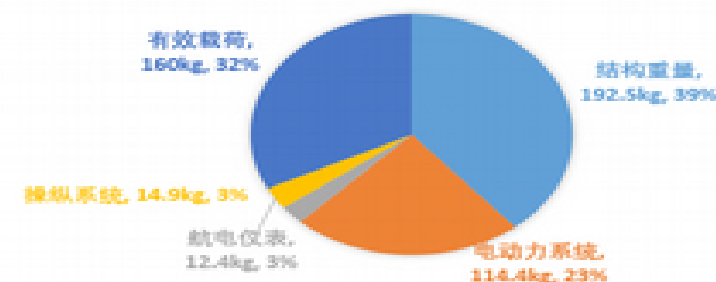
电动飞机当下的困难

电动力系统的不足制约了飞机性能

分别采用燃料电池和活塞动力的 Rapid 200 飞机性能比较

性能	燃料电池动力	活塞动力
功率 /kw	46	60-85
空重 /kg	221	282
最大起飞重量 /kg	554	475
商载 /kg	75	126 或 147
巡航速 / (km · /h)	100-150	180-240
最大续航时间 /h	1.0-1.2	3.5-5.5
最大航程 /km	100-120	760-1050

某型双座电动飞机各部分重量及所占百分比（预估）
整机起飞重量494KG



数据来源：赵长辉，陈立玮，卢黎波，张勤满，孙璐．电动飞机技术进展[J]．科技导报，2012，30(12)：62-70．

科技导

体重，力气，耐力……

电动飞机当下的困难

近年来涌现种类繁多的电动飞机

太阳能动力	阳光动力二号, “太阳神”系列, “秃鹰”, “西风”, Aquila
蓄电池动力	E-Fan, RX1E, EXA, E430, eSpyder, 赛斯纳 172, Elektra One, APEV Pouchelec, Cri-Cri
燃料电池 / 混合燃料电池动力	DLR-H2, Boeing Demonstrator, DLR-HY4, 国产 20KW 燃料电池飞机

电动飞机仍停留在低速, 轻型阶段

飞机类型	巡航速度 km/h	最大起飞质量 kg	发动机功率 kW	最大功重比 W/kg	翼载荷 Kg/m ²	续航时间 h	航程 km
太阳能飞机	<140	<2300	<52	<30	<10	很高	很高
蓄电池 / 燃料电池飞机	<250	<1500	<150	<120	<60	<5	<750

电动飞机当下的困难

电池的储能密度和功率密度的提高仍任重道远

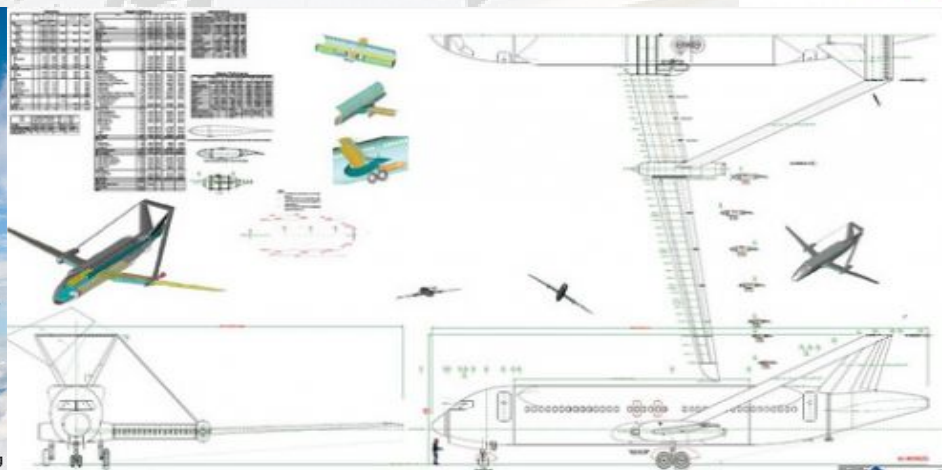
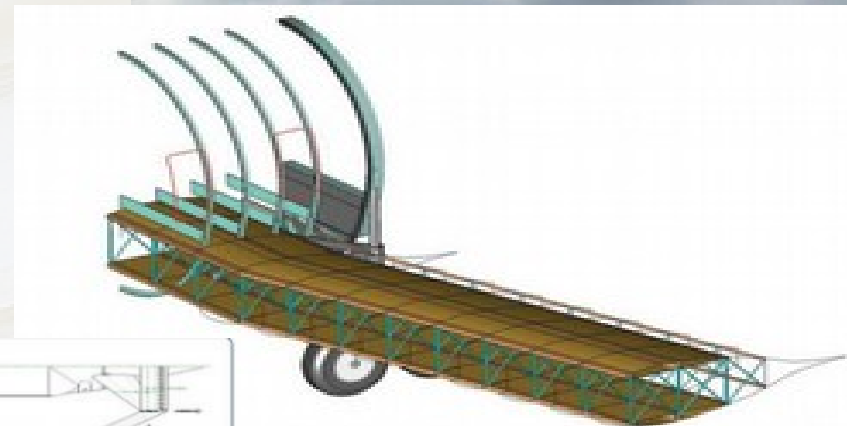
理想电池能量密度与现有水平的差距 单位:Wh/kg					
现有的 锂电池	在研的 空气电 池	20年后 有望达 到的水 平	混合电 动单通 道大飞 机的动 力需求	全电动 单通道 大飞机 的动力 需求	航空燃 料
200	>300	400~600	800	1800	13000

数据来源：吴蔚． 电推进飞机离我们还有多远 [J]． 大飞机，2017，(08)：30-33.

电动飞机带来的改变——挑战

利用飞机设计的改进弥补目前动力系统的不足

- 气动设计
 - 高升、低阻、安全、易控
- 推进系统设计
 - 高效，附面层吸入，失效安全性，集成
- 结构设计
 - 轻质、高强度、高刚度、容积



电动飞机带来的改变——机遇

推进方式

- 很好支持新的高效推进方式（分布式推进，附面层吸入式推进，超涵道比推进）
- 与机体的融合
- 混合推进（储能，工况适配）
- 电缆连接，布置灵活
- 旋转方向灵活
- 冗余容错

控制方式

- 控制灵敏，取代气动舵面
- 与主动流动控制协同
- 反推



传统飞机总体设计方法的改变

- 耗油率——放电曲线
- 重量因子——1
- 布雷盖公式——?
- 重量、体积估算
- 重心位置空间利用
- 重心变化
-

如何应对电动飞机对飞机设计的挑战

现有布局：抓住痛点，深挖效率

创新布局：紧扣推进，大胆突破

设计方法：系统研究，深入积累

深挖效率——充分开展优化设计

气动优化设计平台
AERO-OPT

需要解决的矛盾

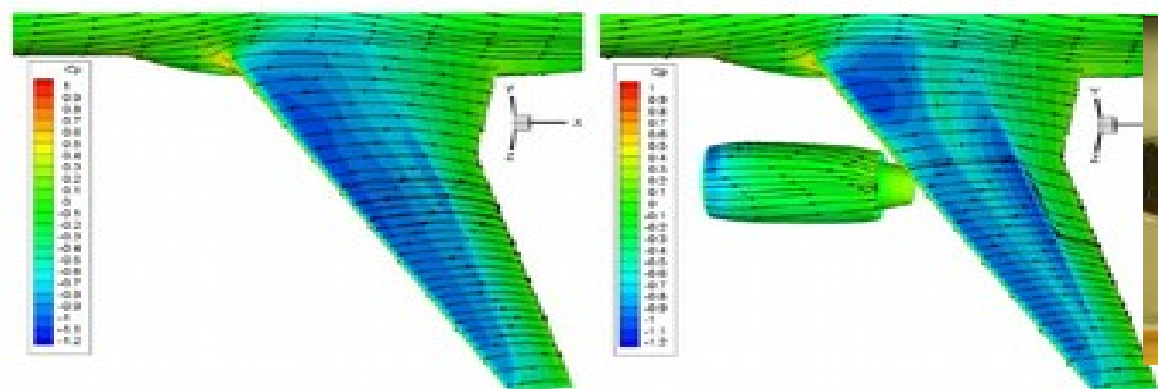
- 单部件设计与一体化设计
- 全局寻优与局部寻优
- 人工经验与自动优化
- 设计效率与设计质量
- 设计点与非设计点

解决办法

- 流场分析 / 设计变量模块化
部件优化 / 整体分析
从翼型到翼 / 身 / 舱组合体
- 先 **NSGA-II** 全局寻优 / 再局部寻优
- 人在回路**
超临界压力分布形态约束
- 以精度获得速度
NSAWET 高效计算，一日设计循环
NURBS 增量修型
- 两点优化，局部手动修型**
弱激波超临界压力分布形态

工程实用性

AEROLab, Tsinghua U

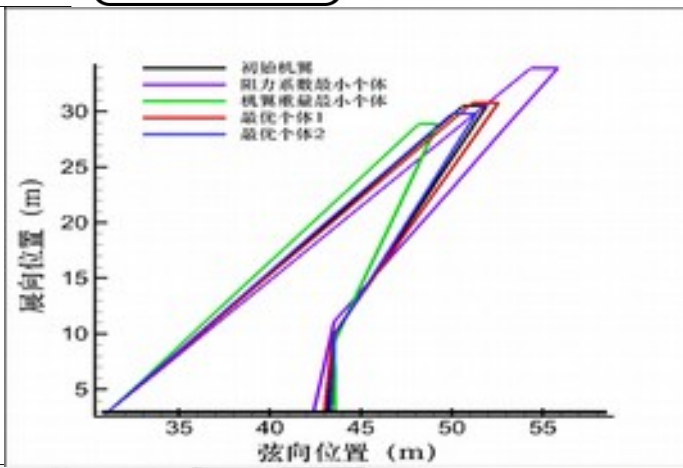
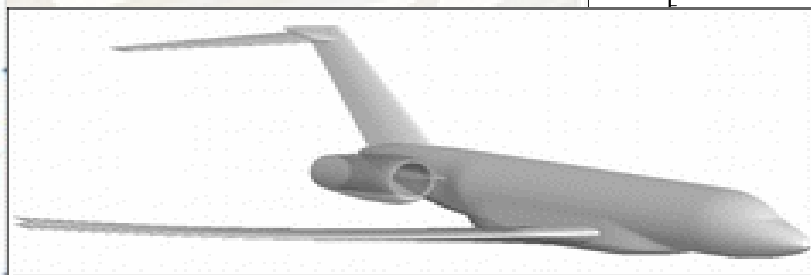
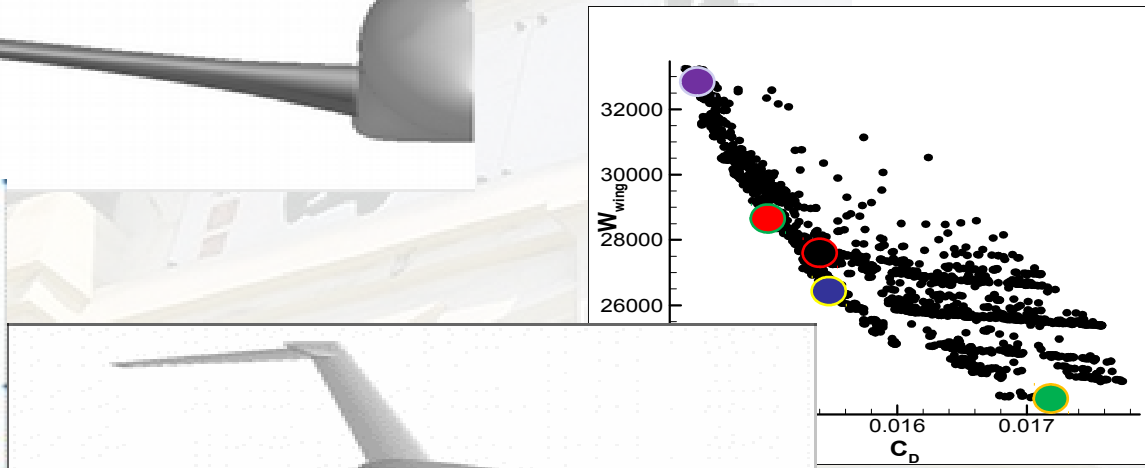
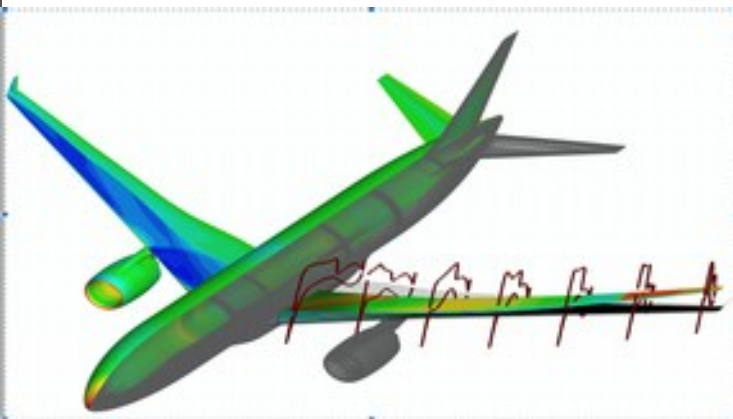
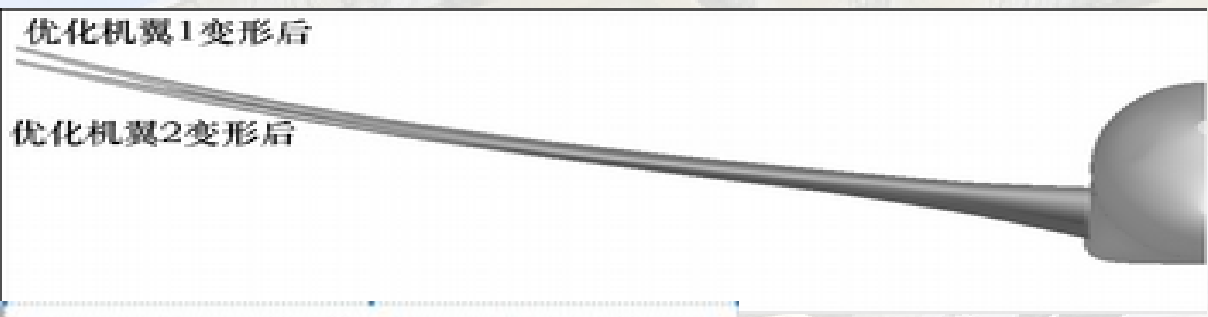
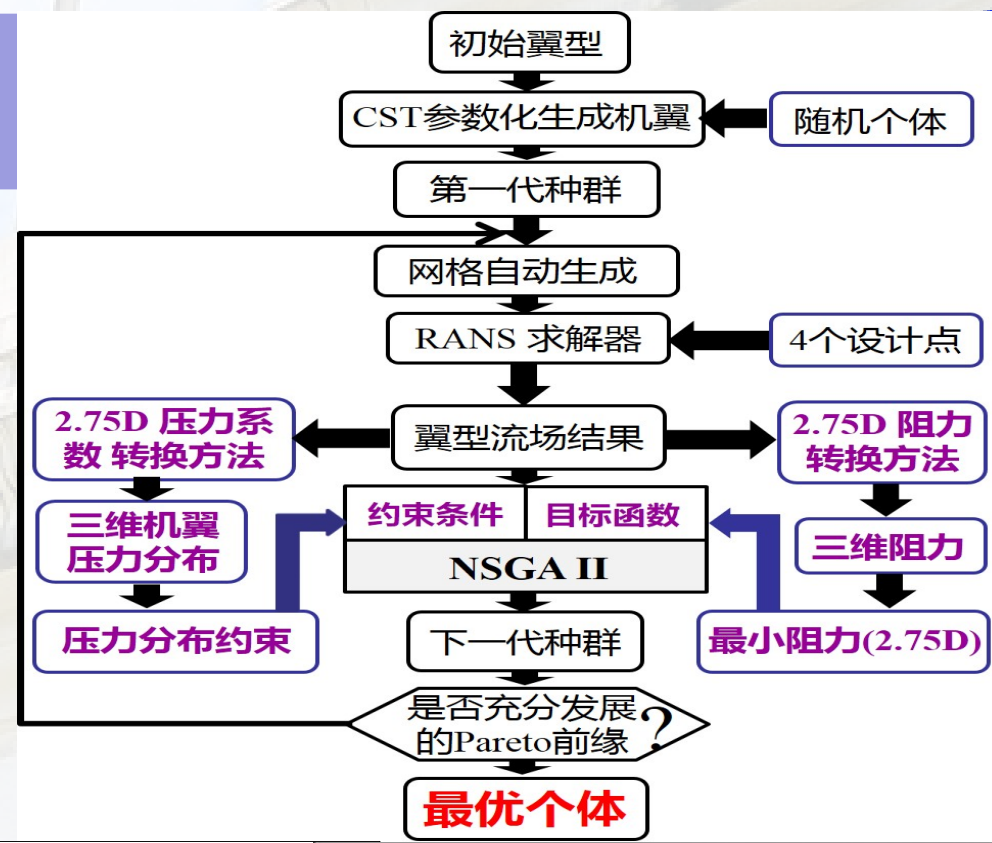


深挖效率——气动 / 布局 / 结构一体化设计

根据平面形状，相应优化翼型，获得“极致气动性能”
根据受载变形，相应优化机翼和结构，获得气动和结构双赢

由气动性能和平面形状给出总体性能评估

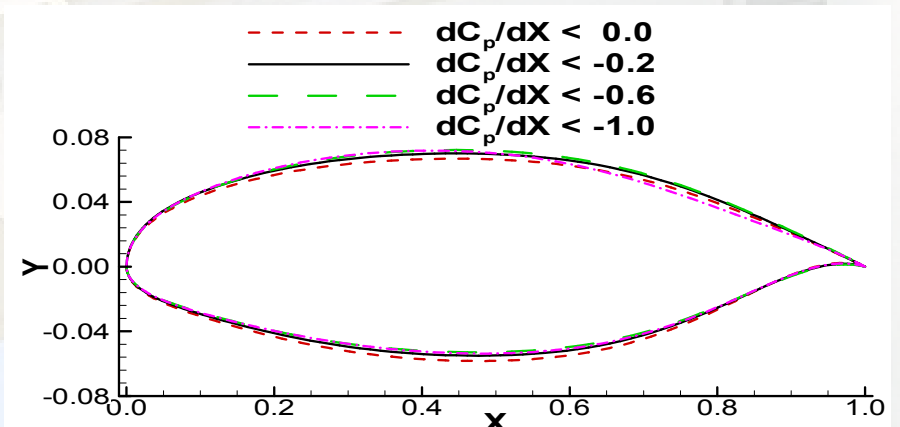
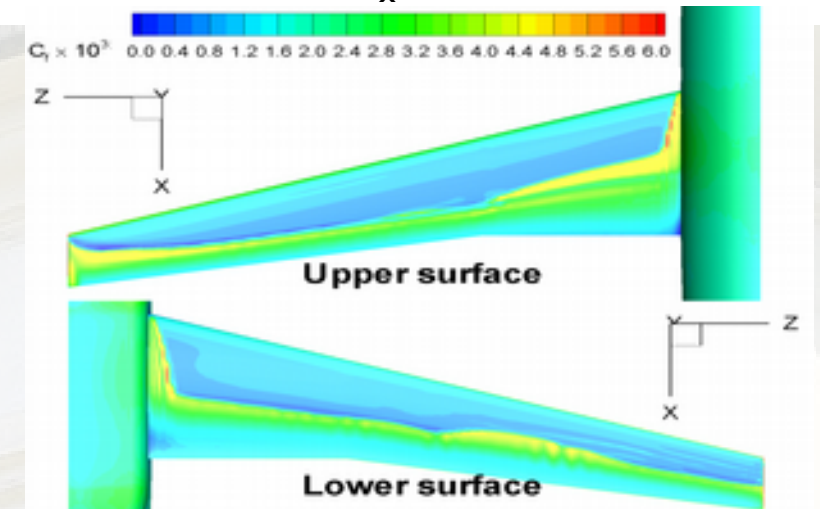
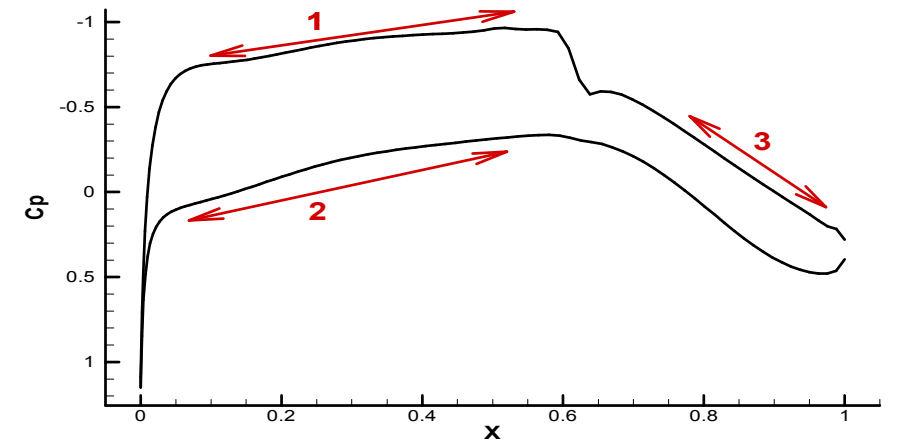
- 固定有效载荷和航程的耗能
- 固定有效载荷和航程的最小起飞重量



深挖效率——自然层流减阻与增稳

- 层流机翼
 - 摩擦阻力小
 - 工作不稳定，易于失效，易于失速
- 由压力分布形态约束实现不同顺压梯度大小和长度
 - 定量分析顺压梯度和失速特性与稳定性之间的矛盾与边界
- 优化寻求最佳妥协
- Yufei ZHANG, 2015

$$\begin{aligned}
 &\min \quad C_{d,p} \\
 &s.t. \quad \begin{aligned} &Ma = 0.739; & Re = 1.0E7; & C_l = 0.55 \\ &t/c = 12.35\% \\ &R_{LE} < 0.035; & R_{LE} \geq 0.010 \\ &C_m \geq -0.10 \\ &C_{d,f} \geq 0.0025 \end{aligned} \\
 &\max \left(\left. \frac{dC_p}{dX} \right|_{\text{Upper}, X < 0.50} \right) < 0.0, -0.2, -0.4, \\
 &\quad \quad \quad -0.6, -0.8, \text{ or } -1.0 \\
 &\max \left(\left. \frac{dC_p}{dX} \right|_{\text{Lower}, X < 0.60} \right) < -0.05 \\
 &\max \left(\left. \frac{dC_p}{dX} \right|_{\text{Upper and Lower}, X > 0.70} \right) < 3.0
 \end{aligned}$$



深挖效率——表面肋条薄膜减阻

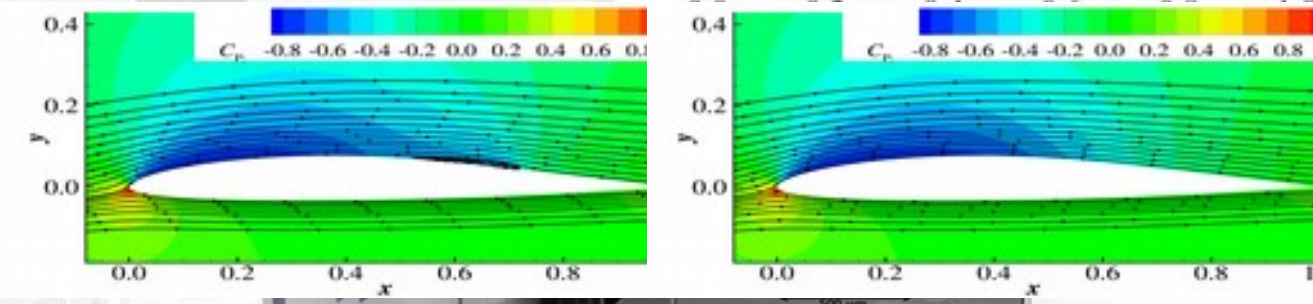
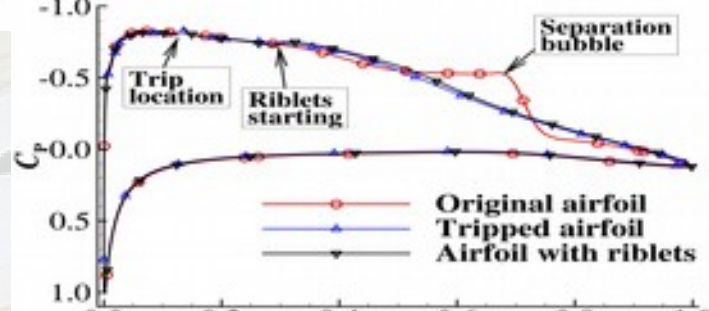
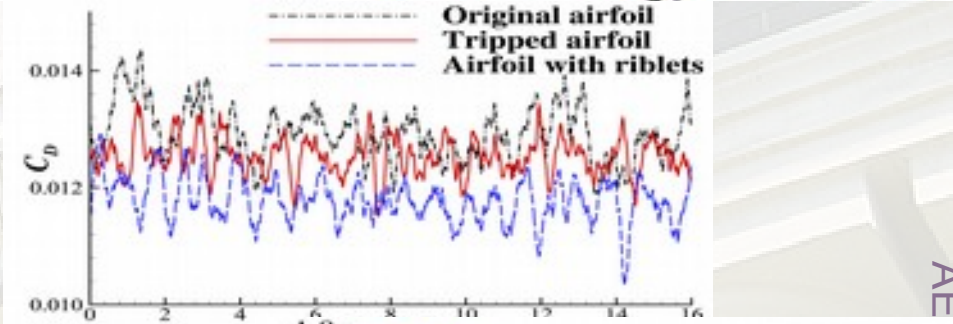
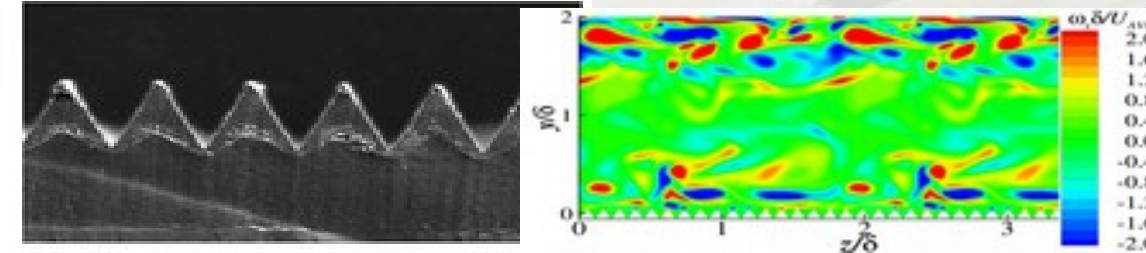
表面减阻肋条是行之有效的湍流减阻手段

- 抑制湍流的能量耗散机制，降低摩擦阻力

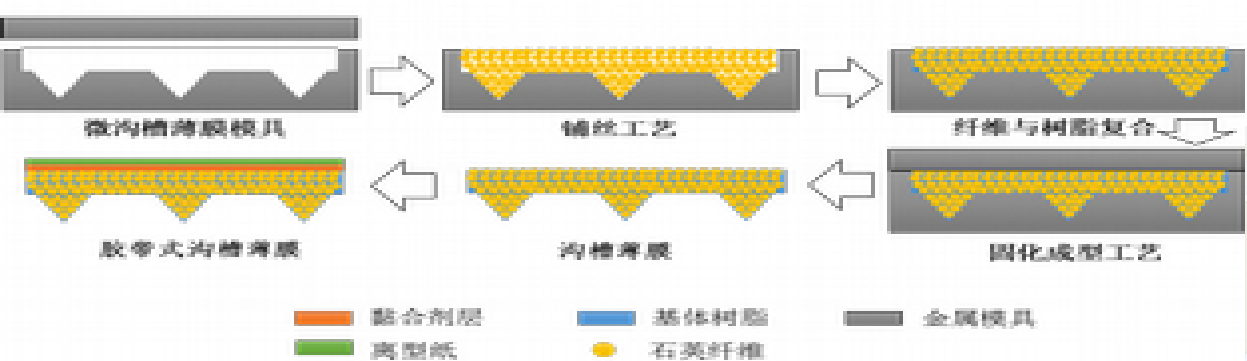
肋条（小肋）减阻技术已有大量应用验证

- 空客 A320 飞机的飞行实验 (1990)：减阻 4.8%
- 波音公司运输机实验 (1995)：减阻 2- 3%
- 德国汉莎航空公司 (2003) 将肋条应用在常规商务飞行的 A340- 300，减阻大约 3~5%

新型的小肋薄膜工艺改善实用性，耐久性，维护性
精细的小肋设计可以更加有效减阻（CFD 和风洞试验验证）



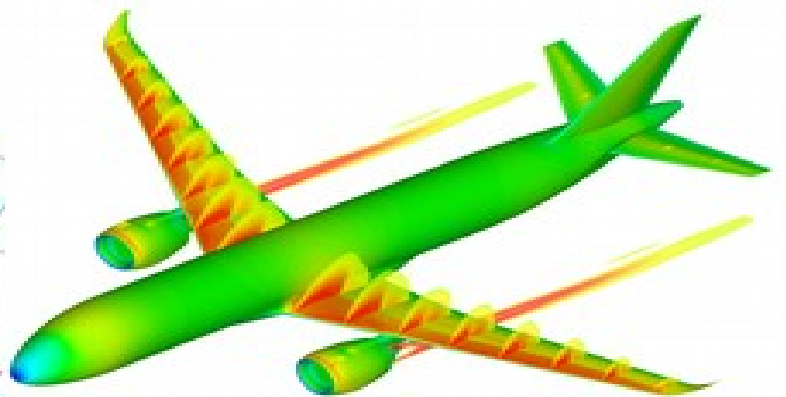
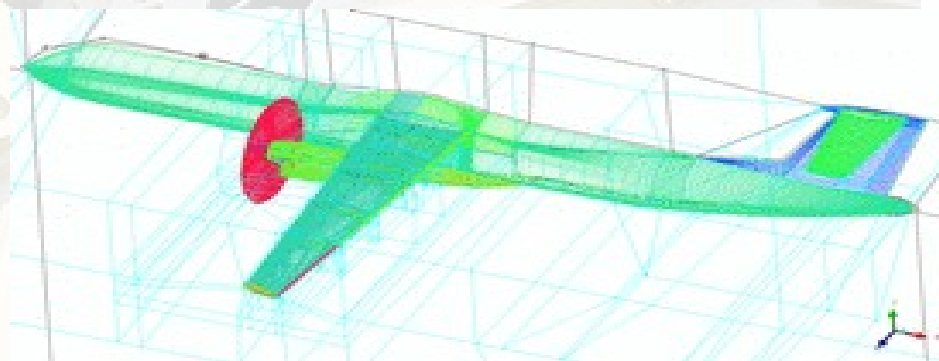
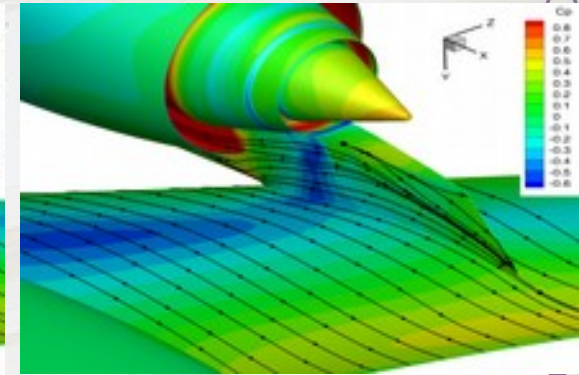
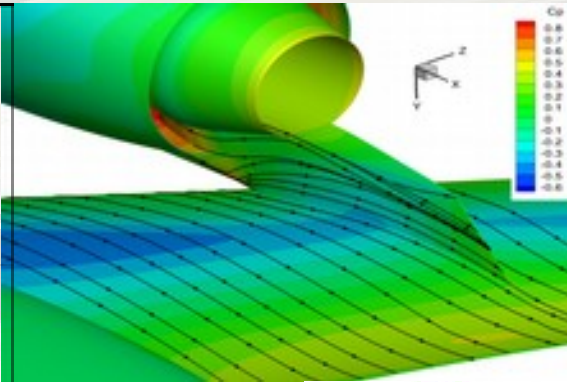
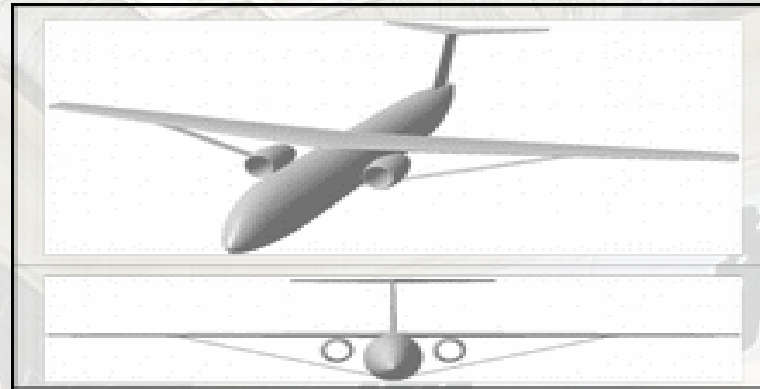
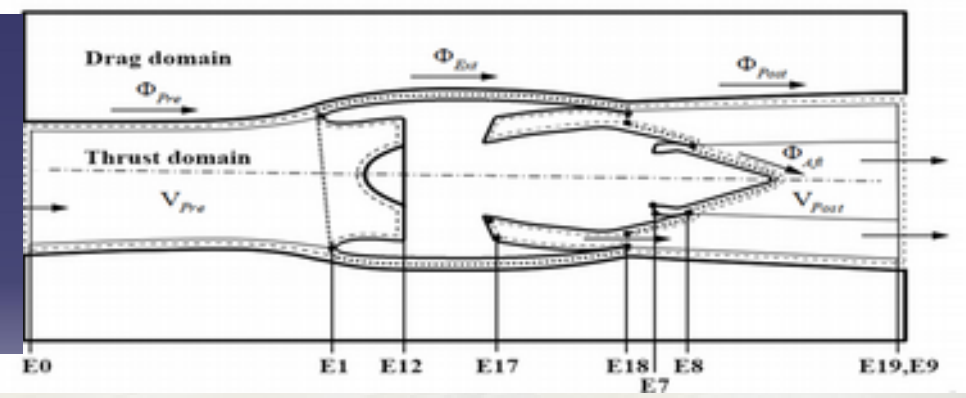
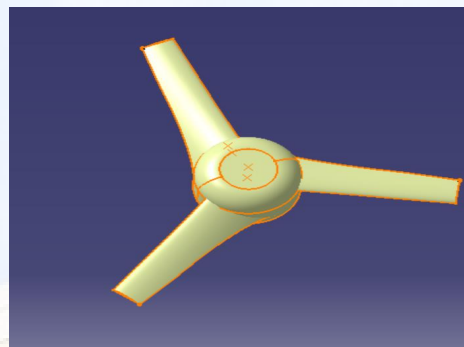
纤维增强沟槽薄膜固化成型工艺流程图



创新布局——紧扣电动推进的特点与优势

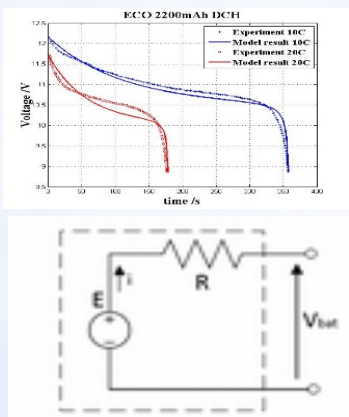
推进 / 气动一体化
推阻划分
螺旋桨与涵道设计
新型布局

- 盒式翼
- 支撑翼
-

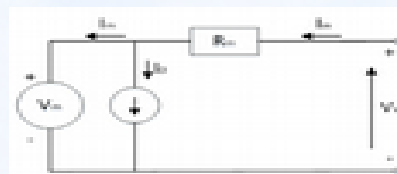


设计方法——各级系统建模与评估

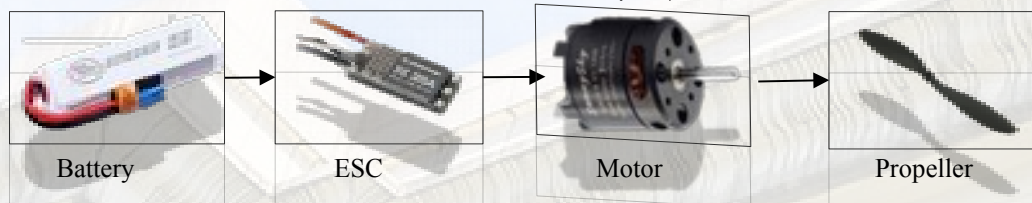
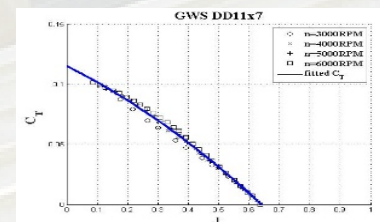
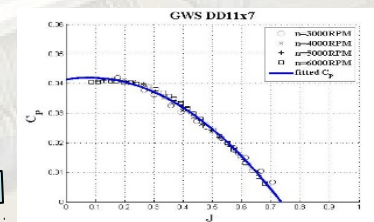
电池模型



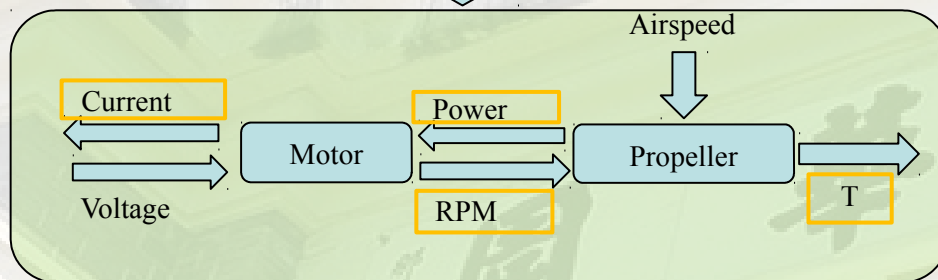
电机模型



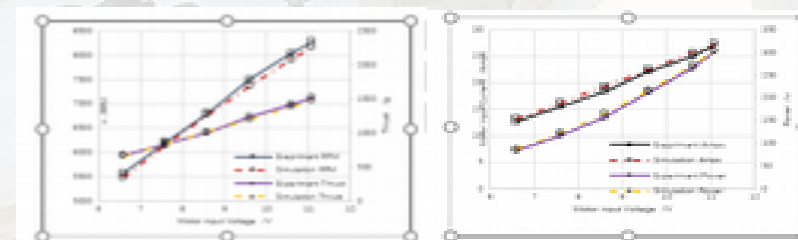
螺旋桨模型



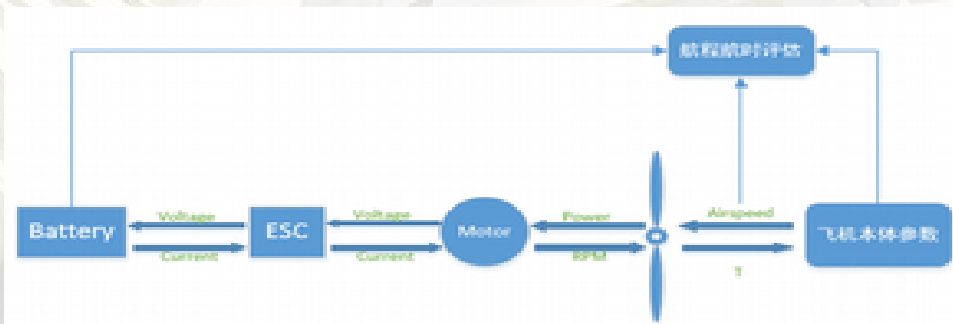
动力系统模型



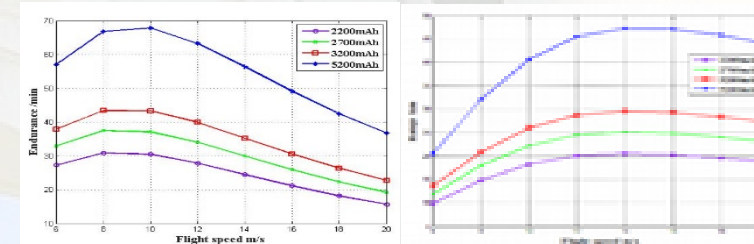
仿真结果



全机模型



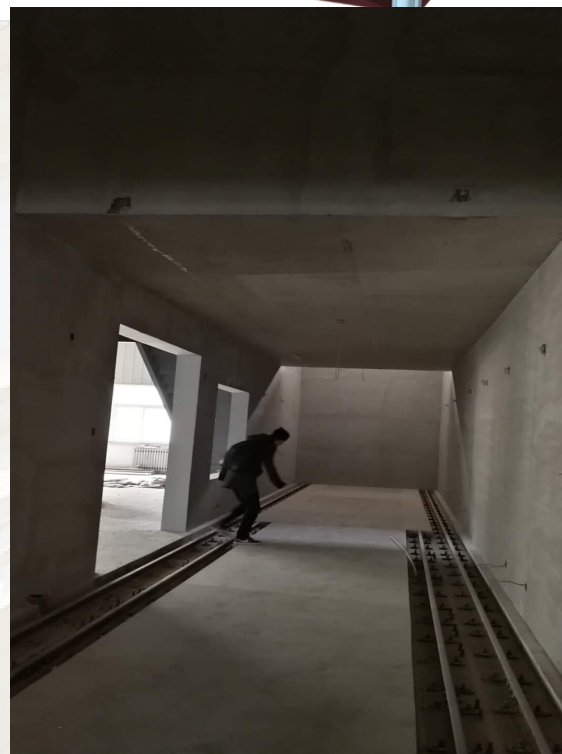
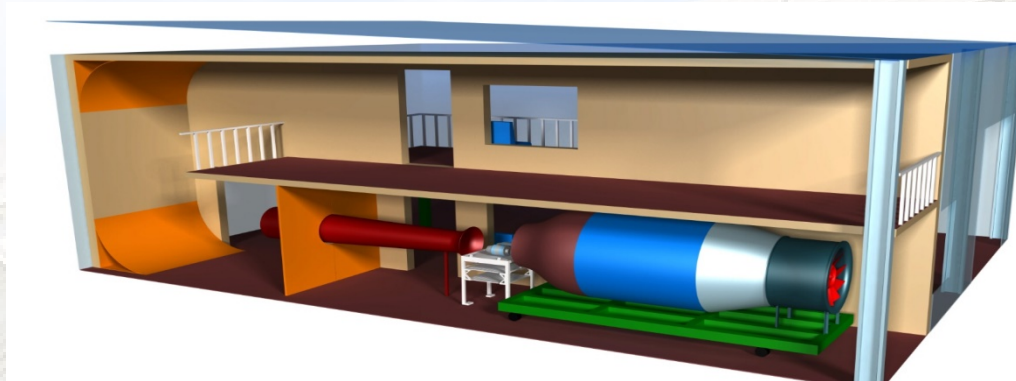
航程航时评估结果



设计方法——充分测试、验证，丰富数据和认识

在建的动力 / 气动联合测试设施

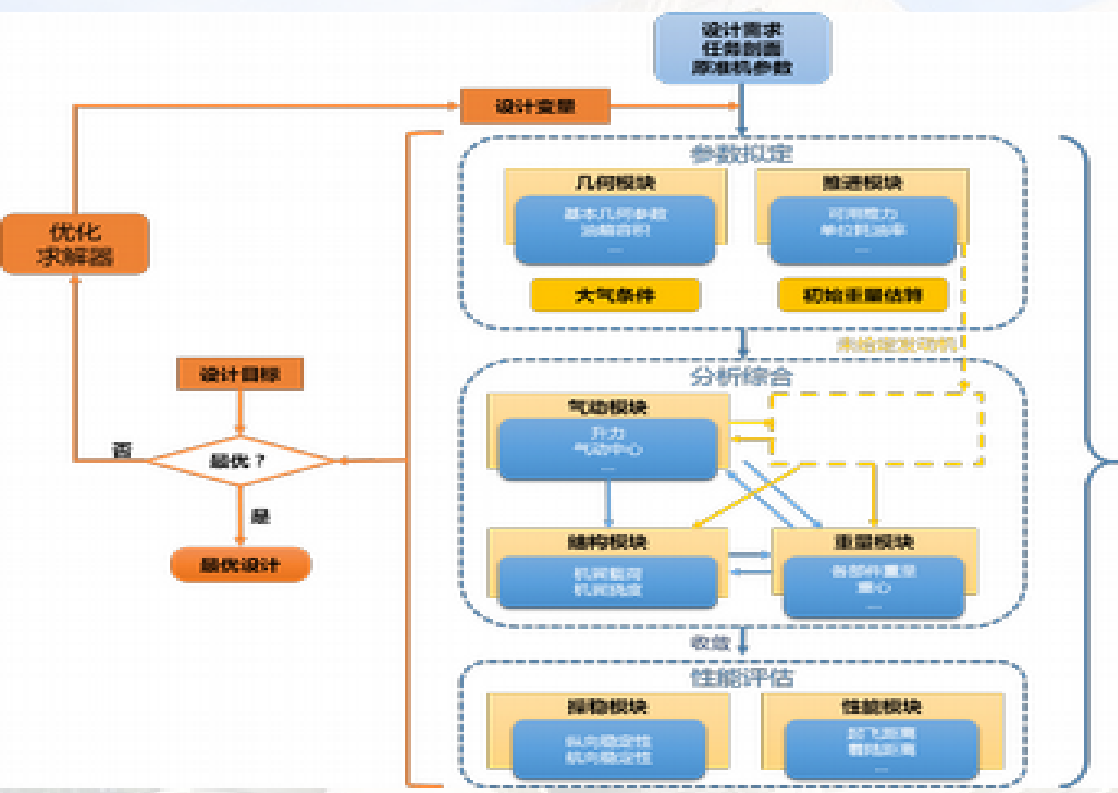
- 风洞 + 试车台
- 电动 + 油动
- 螺旋桨 + 喷气
- 测力 / 测扭 / 测功……
- 样机研制 + 自由飞



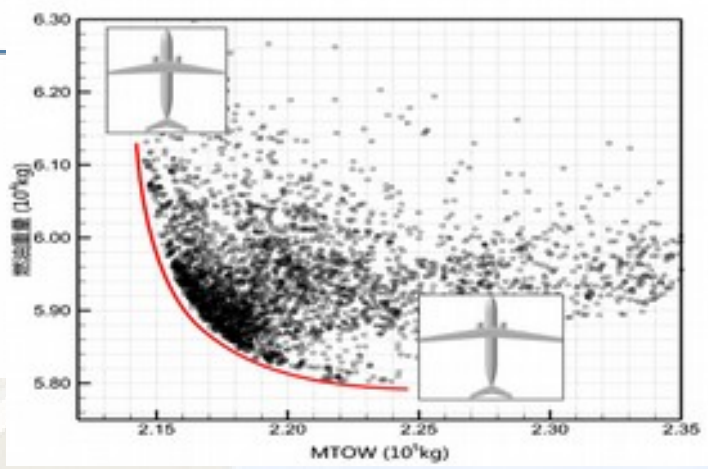
飞机总体设计优化平台 (ACADO)



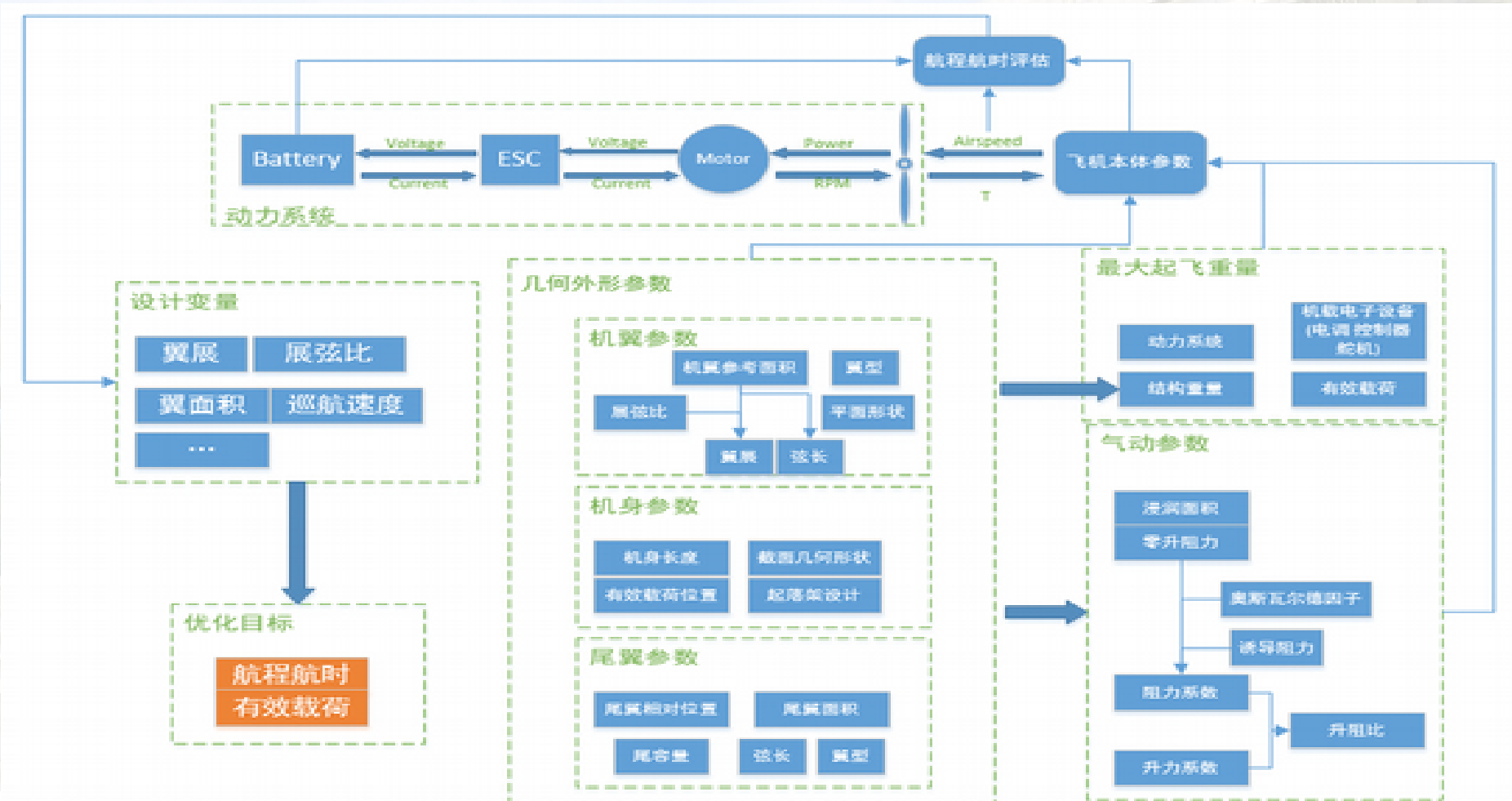
Baidu 贴吧 | 飞机设计吧



AEROLab, Tsinghua University



设计方法——针对电动飞机特点



总结

电力驱动对飞机设计提出了挑战，也带来了机遇

- 精细，极致
- 创新，突破
- 系统，专业



Thanks for your attention!



陈海昕

清华大学航天航空学院

chenhaixin@tsinghua.edu.cn