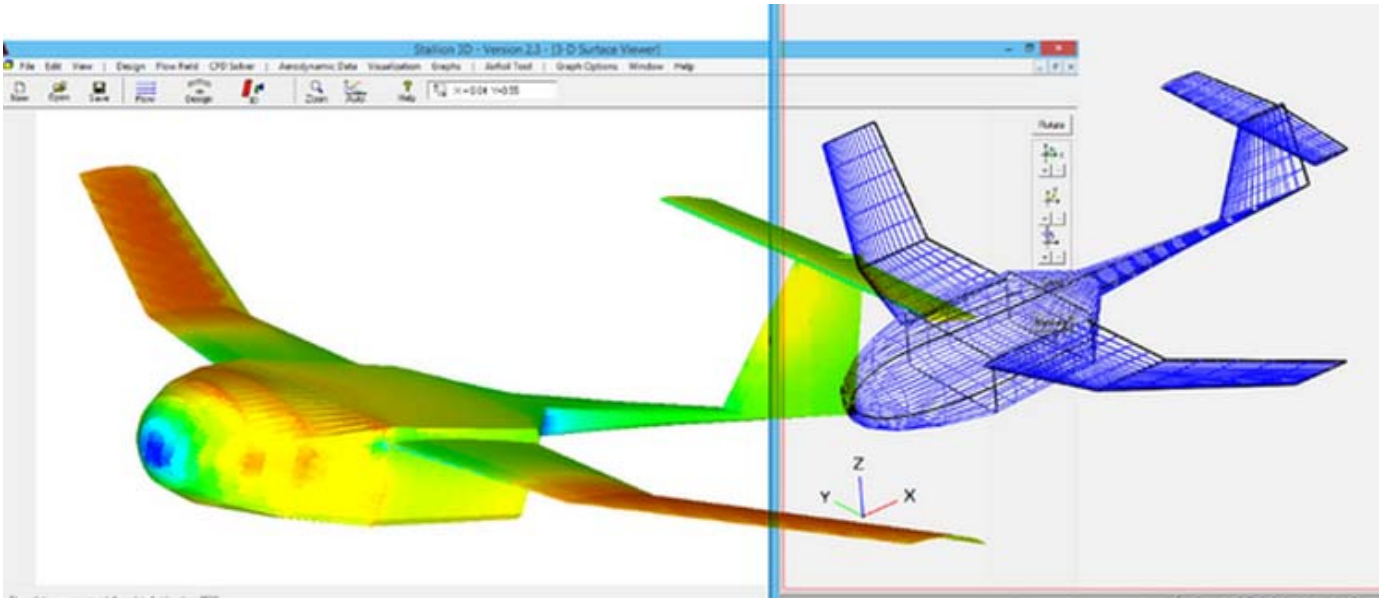
CEASIOM 无人机建模与数值分析解决方案



一、 概述

无人驾驶飞机简称“无人机”，英文缩写为“UAV”，是利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的不载人飞机。从技术角度定义可以分为：无人固定翼机、无人垂直起降机、无人飞艇、无人直升机、无人多旋翼飞行器、无人伞翼机等。无人机按应用领域，可分为军用与民用。军用方面，无人机分为侦察机和靶机。民用方面，无人机+行业应用，是无人机真正的刚需。目前在航拍、农业、植保、自拍、快递

运输、灾难救援、观察野生动物、监控传染病、测绘、新闻报道、电力巡检、救灾、影视拍摄、制造浪漫等等领域的应用，大大的拓展了无人机本身的用途，发达国家也在积极扩展行业应用与发展无人机技术。因此无人机将在未来世界的各行各业中扮演举足轻重的角色，设计研发无人机便显得意义非凡。

随着计算机的发展，数值模拟已经成为最经济且有效的科学研究方法。如数值模拟手段代替了风洞实验用于模拟无人机起飞、巡航和降落实验等。在无人机行业领域，数值模拟方法同样贯穿于无人机研发设计和制造的始终，数值模拟方法与传统无人机设计实验方法相比，不仅节约成本，还可以开展微观尺度上的飞机性能属性影响因素分析，而且对于传统实验难以直接测量的部分属性（如重量分布、升力系数与马赫数关系等），数值模拟具有明显的优势。

二、 无人机设计问题

目前气动设计的主要手段可分为理论分析、计算流体力学、风洞试验和飞行试验。

众所周知，随着计算机软硬件技术和数值计算方法的不断发展，CFD 在气动分析和设计上的应用越来越广泛，手段也越来越精准。

近年来，CFD 分析方法有了巨大飞跃，从面元法、全速势方法、欧拉方法到 Navier-Stokes 方法。CFD 应用范围已涵盖了机翼设计、机翼/发动机综合设计、机身后体设计、尾翼设计和翼身整流鼓包设计等；在各个时期的无人机设计中均起到巨大作用。不同 CFD 分析方法具有各自明显的特点：以 TRANAIR 和 BLWF 为代表的全速势方程程序，能够快速高效地捕捉设计的基本特性，但其准确性和适用范围存在较强的局限性，还不能预测流动分离与失速特性，非设计点的分析能力较差；现在以 Navier-Stokes 为主控方程的计算软件 OVERFLOW、CFX、CFD++等已逐渐成为流场分析的主要手段，它们能够提供准确的计算结果和较清晰的流动细节，但受限于计算硬件资源，将其应用于型号设计始终受到一定局限。在国内，基于雷诺-平均 Navier-Stokes (RANS)方法在气动设计上的应用也已经越来越多。

由于 CFD 计算对一些复杂流动现象的模拟仍然不够成熟，其核心算法特别是湍流模型仍然具有较多的假设，并不能够保证完全模拟真实流动的物理现象，比如流动的转捩、非定常分离现象等。因此在气动设计的关键节点仍然需要进行相应风洞试验进行校核，并最终开展真实飞行试验，以确保无人机的真实气动性能。但是，随着 CFD 技术和计算机技术的不断发展，CFD 分析方法在气动分析和设计上势必扮演更为重要的角色。这一发展趋势使得发展基于 CFD 的飞机气动设计方法和流程对于提高未来型号设计能力具有重要的意义。

传统气动设计方法以设计人员的设计经验为基础，通过“试凑法”逼近设计目标，该设计方法在工程单位被广泛采用。但该方法设计效率较低，且极大地依赖设计人员的经验积累，初学乍练的新设计人员对于那些“只可意会不可言传”的设计经验较难理解和继承。以各种先进寻优算法为基础的现代优化方法已经迅速发展起来，但这些优化方法往往不能将设计经验数字化植入到优化方法中，常常只用于学术研究中，

得到的设计方案也只实现了数值优化，设计目标顾此失彼，难于做到工程实用。

近年来，由于计算机辅助设计(Computer Aided Design，CAD)软件的快速发展，翼型越来越多地使用能够自动保持翼型的光滑性的参数化曲线表示，如非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational B-Splines，NURBS)曲线和类别/形状函数变换(Class Shape Transformation，CST)方法。CST 方法通过一个基本的类别函数调整形状函数的各个基函数的权重，可以获得光滑的翼型曲线。该方法具有设计参数少，外形光滑，可以表示曲线与曲面等特点。通过调整类别函数的系数，可以获得机翼、机身、短舱、挂架等不同部件的形状。对于复杂的外形更多地采用整体参数化技术，如 NURBS 和自由变形(Free-Form Deformation，FFD)。NURBS 对标准解析曲线(如圆锥曲线、二次曲面等)提供了统一的数学表示，且可以通过控制权因子灵活地变化形状，是三维 CAD 格式初始化图形交换规范(The Initial Graphics Exchange Specification，IGES)的曲面描述标准。FFD 是几何变形方法的典型代表，是一种与物体表示无关的变形方法，被广泛地应用于几何建模和计算机动画领域中，在飞机曲面外形设计初期，可以直观、简洁、方便地获得高阶连续的曲面实体。根据不同的设计需求，选择合适的参数数量。在设计初期可根据设计经验，针对主要影响参数，开展气动设计，从而确定大参数；在进行下一步优化的过程中，可有针对性地控制参数的选择。如可先增加内翼的参数，减少外翼的参数，实现内翼的精细化优化设计；而后再对外翼实施精细化设计。

三、 无人设计和数值模拟解决方案 CEASIOM

基于数值模拟技术的飞速发展，无人机从设计阶段到试验阶段都可以在计算机上完成，实现真正的无纸化流程。欧盟第六次框架项目(6th EU framework programme) SimSAC 历时三年开发了一款集结构分析、气动计算、飞行模拟于一体的飞机概念设计软件，CEASIOM(Computerised Environment for Aircraft Synthesis and Integrated Optimisation Methods)是集成飞行器设计、仿真和模拟为一体的多物理分析综合仿真平台。将高保真度物理模型和多学科设计优化引入飞机概念设计早期阶段；采用现代化软件开发技术，高效集成了参数化飞机模型设计模块、自动化网格生成系统模块、空气动力学数据库生成模块、仿真与动态稳定分析模块、飞机控制系统设计工具包模块、气动弹性和结构分析模块等多种先进软件工具；有助于降低设计风险、提高设计质量和缩短设计周期。CEASIOM 遵循国际通用飞机数据标准 CPACS，利用虚拟飞机模型将多学科分析技术应用在飞机设计阶段，兼容众多概念设计和分析工具，支持飞行模拟等广泛应用，提供一个完整的飞机设计平台、软件模拟平台和决策制定环境。

(一) 软件相关模块简介

CEASIOM 包含众多子模块，有设计模块、模拟模块，以满足实际工程需要。CEASIOM 软件采用虚拟飞机模型将多学科分析技术应用在飞机概念设计阶段，同时软件提供一个完整的交互式、一体化飞机设计平台和决策制定环境。模块包括：

- 参数化飞机模型设计模块（CEASIOM/CPACScreator）

- 自动化网格生成系统模块（CEASIOM/SUMO）
- 空气动力学数据库生成模块（CEASIOM/AMB-CFD）
- 仿真与动态稳定分析模块（CEASIOM/SDSA）
- 飞机控制系统设计工具包模块（CEASIOM/FCSDT）
- 气动弹性和结构分析模块（CEASIOM/NeoCASS）
- 自适应网格超声速气动分析（CEASIOM/ARC）
- 飞行控制仿真及模拟系统（CEASIOM/FSS）
- 总体气动及流体仿真计算（CEASIOM/CFD）
- 飞机防冰仿真分析(CEASIOM/ANTICE)

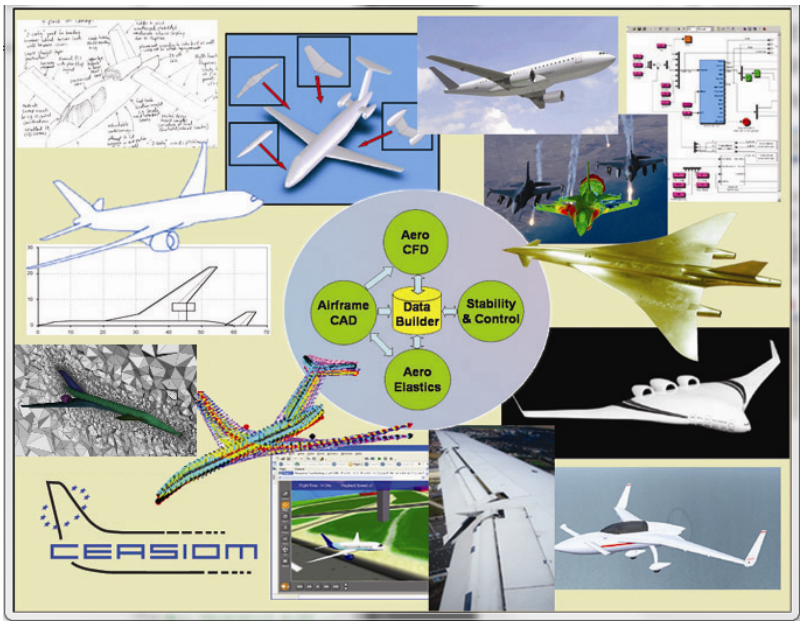


图 1：CEASIOM 启动界面

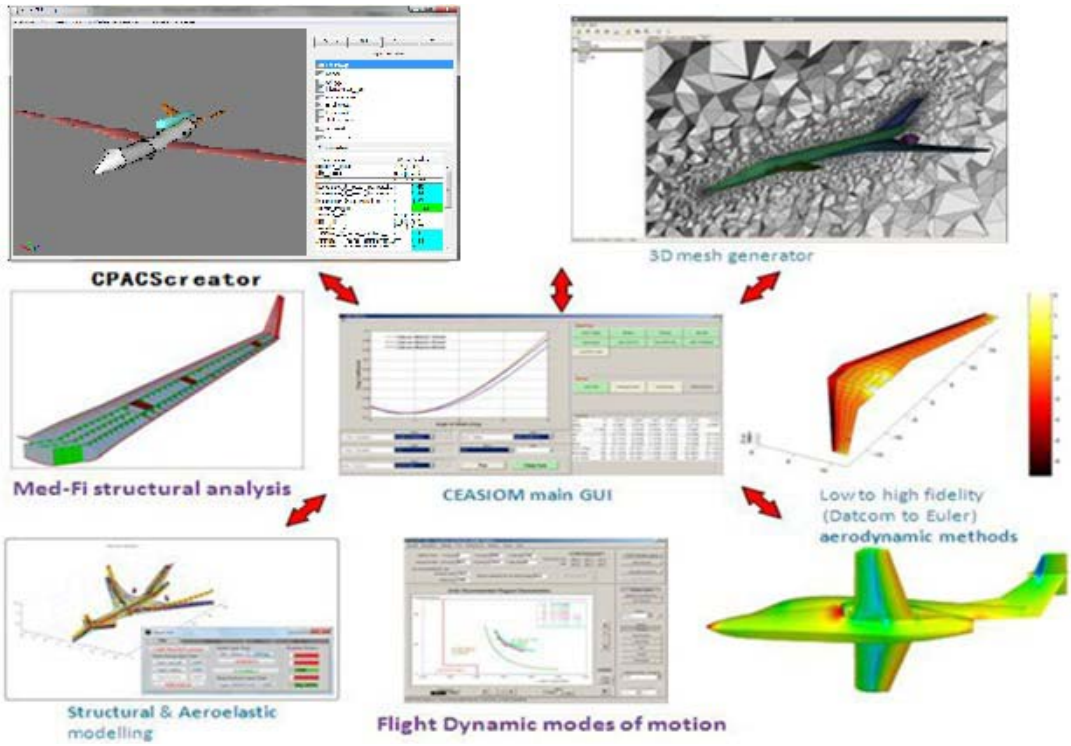


图 2：CEASIOM 功能模块结构图

1. 参数化飞机模型设计模块（CEASIOM/CPACScreator）

参数化飞机模型设计模块 CEASIOM/CPACScreator（The Common Parametric Aircraft Configuration Schema）是 CEASIOM 软件中的模块之一，该模块可以完成飞机概念设计过程中的以下工作任务：

1. 飞行器几何外形的参数化
2. 可视化的飞机外形构造
3. 众多的飞机参数输入
4. 输出 XML 形式的文档，用于后续模块的应用。

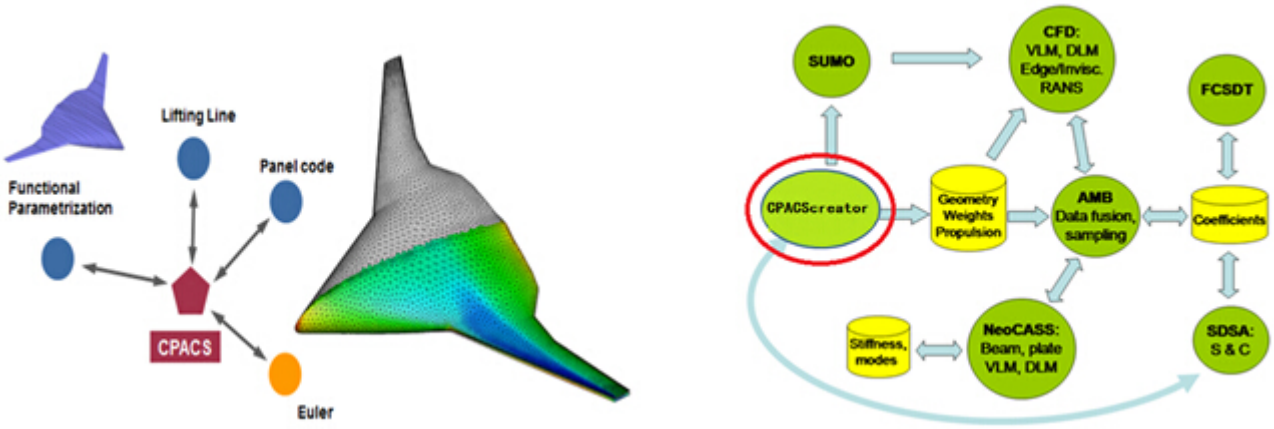


图 3：CPACScreator 结构分布图和在数据流中的位置

应用案例：某型号无人机为例，使用 CPASCScreator 模块进行参数化建模：

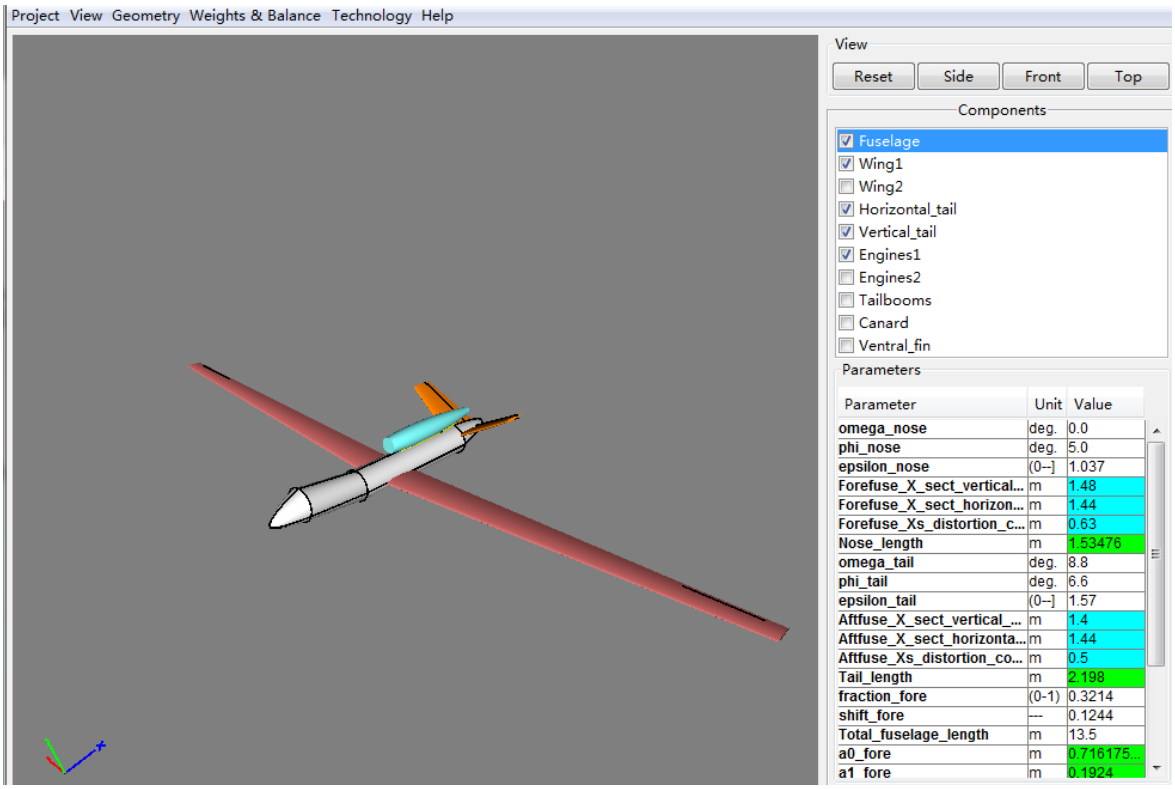


图 4：某型号无人机参数化建模

2. 自动化网格生成系统模块（CEASIOM/SUMO）

CEASIOM 软件中的 CEASIOM/SUMO 模块可以用来对飞机结构进行网格划分。该模块包含了模型的面网格和体网格生成器，可由 IGES 格式的模型导入。图 3.10 (a)为利用该模块划分的飞机结构面网格，图 3.10 (b)为利用该模块划分的飞机结构体网格。

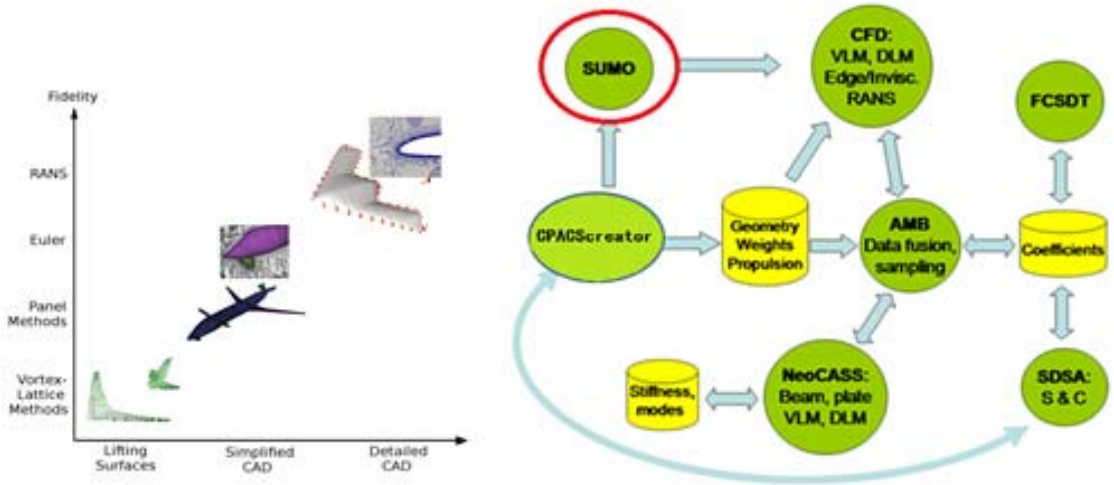


图 5：CEASIOM/SUMO 模块不同层次几何体的网格划分和在数据流图中的位置

应用实例：以某无人机为例，通过 SUMO 模块对飞行器结构进行网格划分。

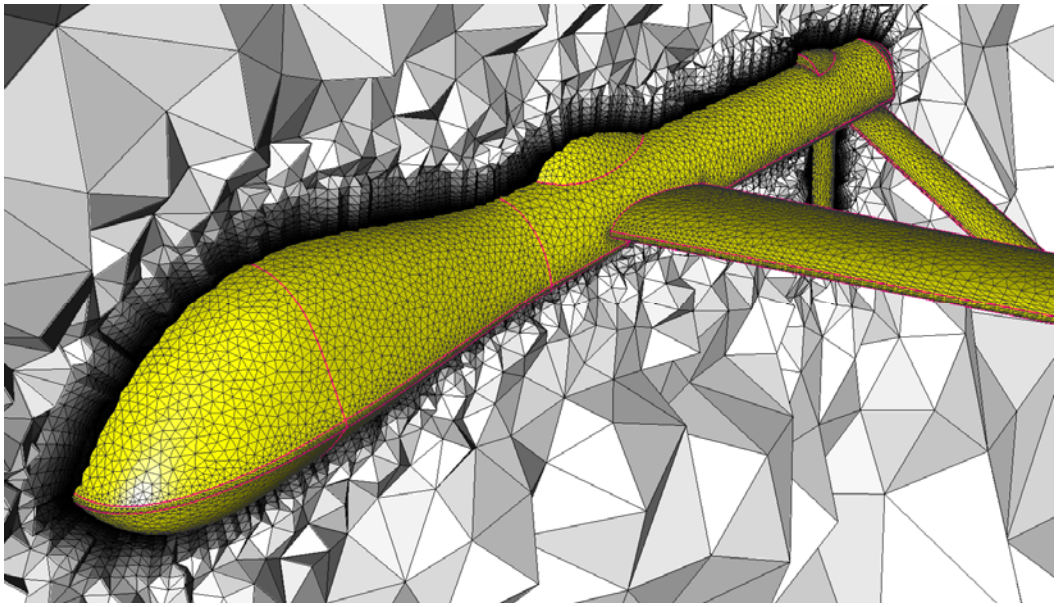


图 6：某型号无人机网格生成

3. 空气动力学数据库生成模块（CEASIOM/AMB-CFD）

空气动力学数据库生成模块 CEASIOM/AMB-CFD（Aerodynamic Model Builder computational fluid dynamics）包含了不同的空气动力学求解方法，这些求解方法具有自适应高保真特点。

- 稳态和非稳态的 TORNADO 求解模型用于求解低速空气动力学和启动弹性问题。
- 集成了边界 CFD 方法用于求解高速空气动力学及气动弹性问题。
- RANS 求解器用以仿真高精度飞行条件分析。

飞机的各不同阶段的质心分布经过重量与平衡控制计算模块计算完成以后，就可以对飞机的空气动力特性进行初步的估计。CEASIOM 采用 DATCOM 来计算结构的初步空气动力学特性。该软件在飞行器初级设计阶段具有较高的使用价值。

应用案例：以某型号无人机为例，可以通过 AMB 模块计算出 3D 机翼和分布（左上）、升力线方法（右上）、面元法（左下）和三视图与等视图（右下）。

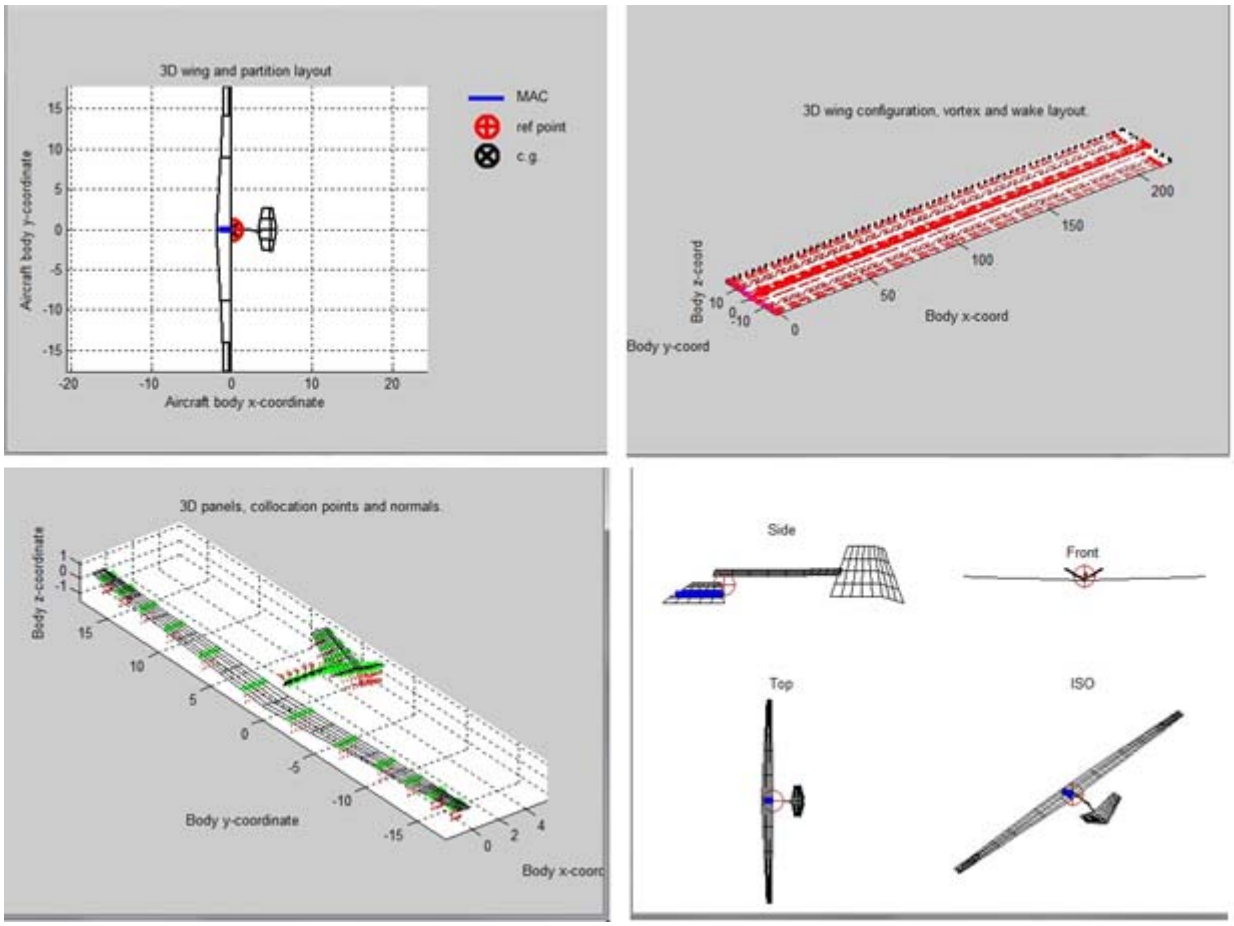


图 7：CEASIOM/AMB-CFD 模块计算所得到的飞行器结构及初步空气动力学性能（以某型号无人机为例）

4. 仿真与动态稳定分析模块（CEASIOM/SDSA）

仿真与动态稳定分析模块 CEASIOM/SDSA（(Simulation and Dynamic Stability Analyser）使用六自由度数学非线性模型模拟飞机的运动。飞行仿真模块可以用来执行测试飞行并记录实时飞行参数，记录的数据可用于识别典型的动作模式及其参数(阻尼系数,相移)。CEASIOM/SDSA 是一个独立的应用程序集成到 CEASIOM，作为 CEASIOM 的一个仿真和动态稳定模块。

应用案例：以某型号无人机为例，可以通过 SDSA 模块计算出振动特性和空气动力学特性等曲线。

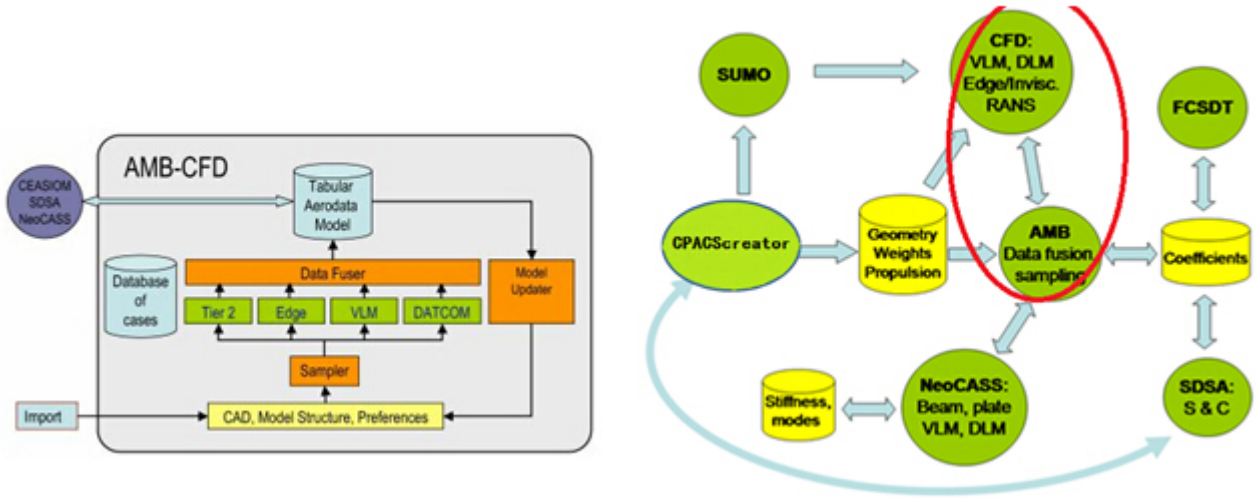


图 8：CEASIOM/SDSA 模块的结构和数据流图中的位置

振动特性

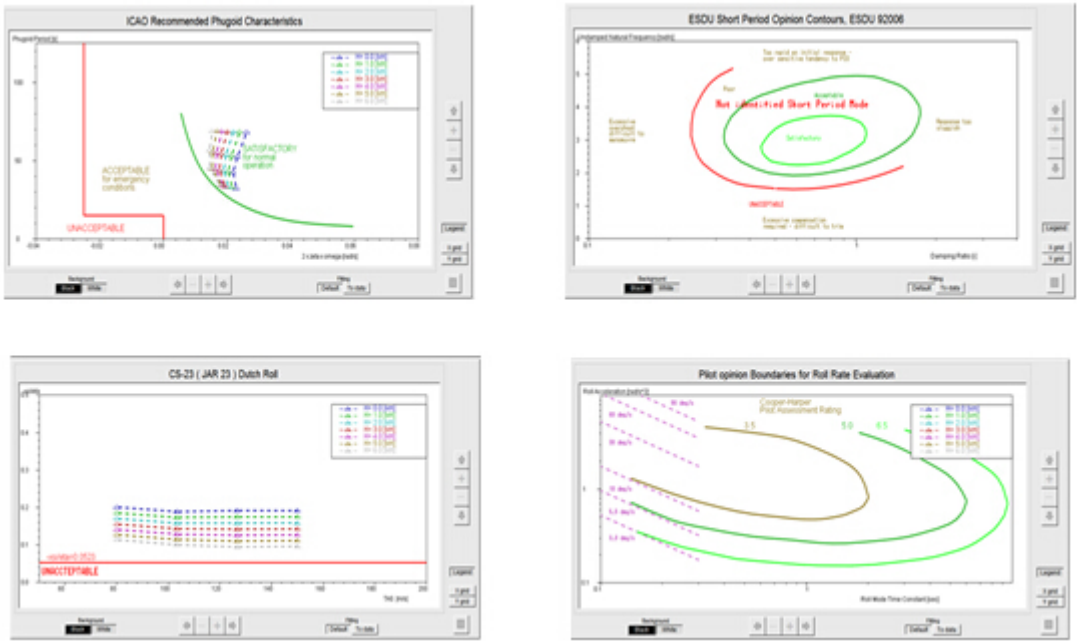


图 9：某无人机振动特性

空气动力学特性

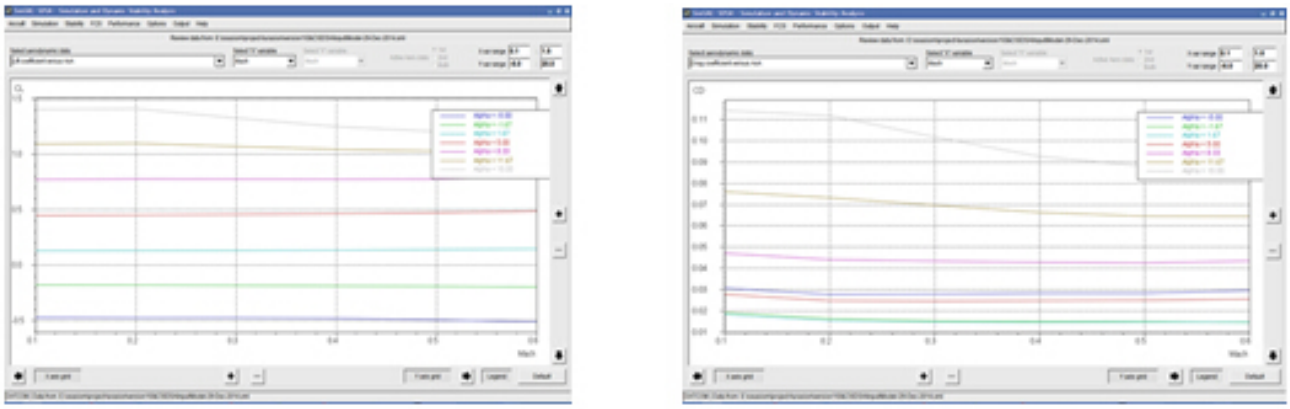


图 10：某无人机升力系数、阻力系数随着马赫数的变化关系图

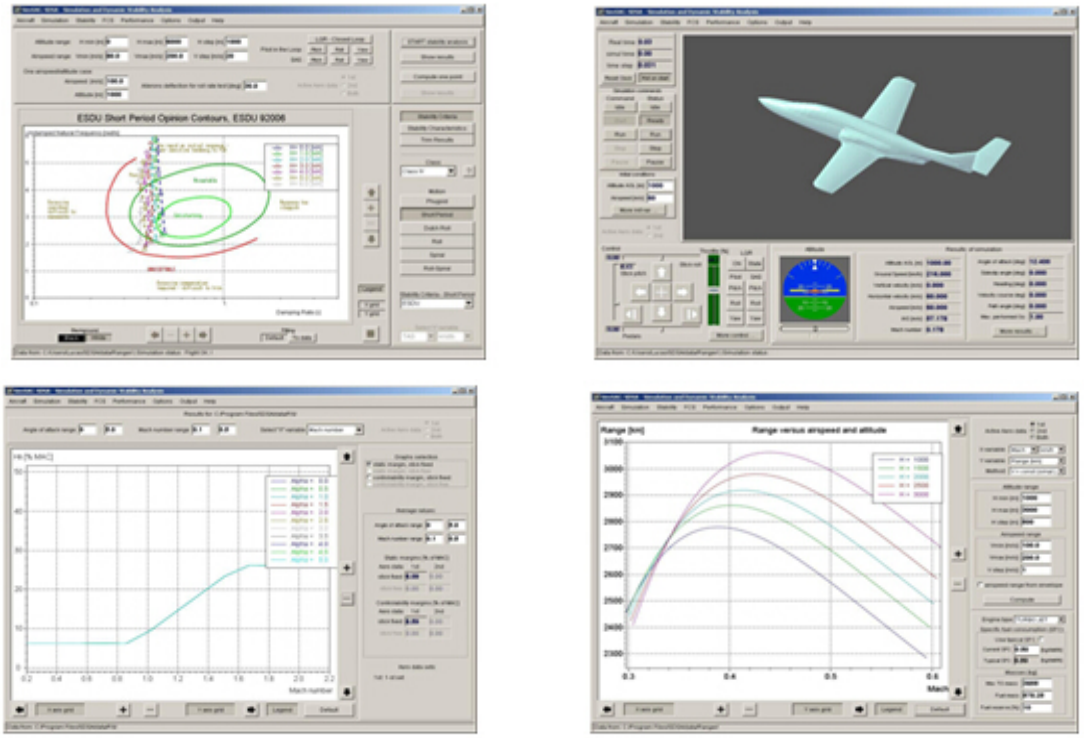


图 11：CEASIOM/SDSA 模块动力学仿真

5. 飞机控制系统设计工具包模块（CEASIOM/FCSDT）

飞机控制系统设计工具包模块 CEASIOM/FCSDT（Flight Control System Design Toolkit）有两个主要功能：

1. 飞机控制系统本身设计
2. 飞机空间设计分析

飞机控制系统设计工具包模块（CEASIOM/FCSDT）的设计和分析的功能有：

- ✧ 飞机控制系统架构设计
- ✧ 可靠性分析
- ✧ 失败模型研究
- ✧ 控制分配
- ✧ 响应模拟
- ✧ 稳定与控制分析
- ✧ 处理质量评估

- 飞行模拟

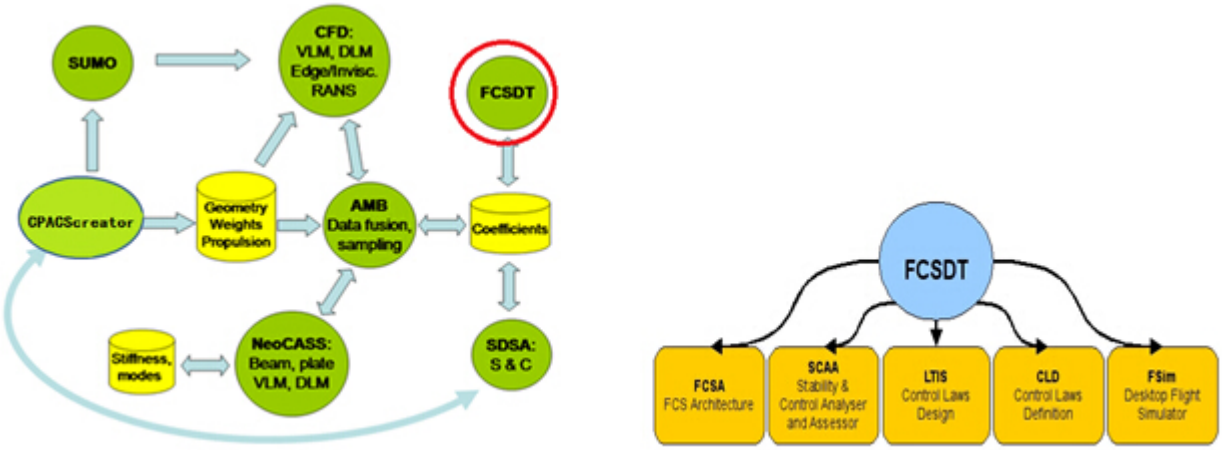


图 12：CEASIOM/FCSDT 飞行在数据流图中的位置和控制系统子模块

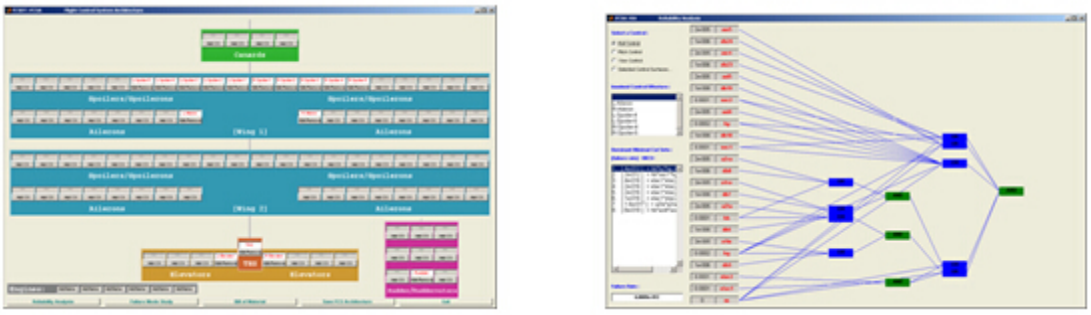


图 13：CEASIOM/FCSDT 飞行控制系统结构布局图可靠性分析

6. 气动弹性和结构分析模块（CEASIOM/NeoCASS）

气动弹性和结构分析模块 CEASIOM/NeoCASS（Next generation Conceptual Aero-Structural Sizing Suite）是一个适合概念和初步设计飞机的数值分析工具。它的主要目的是对早期设计阶段中依靠经验公式计算机体轴承关于结构重量的改进。事实上，软件帮助设计师在飞机的结构发展和通过结构、空气动力学数值方法调查空气弹性变形上有物理基础。因此，气动弹性和结构分析模块用来设计创新和罕见的飞机布局。

气动弹性分析模块 CEASIOM/NeoCASS 主要功能：

- 分析结构大小不同的机动飞行
- 用不同的数值分析方法解决空气弹性变形
- 依据用户的标准对飞机设计结构优化
- 线性或非线性等效板面元素分布
- 集中质量对机身结构做有效分析
- 涡格法(VLM)稳定亚音速气动弹性分析
- 颤振模型解算器
- 在整个不稳定飞行中用颤振解算器有效地评估颤振
- 为变形飞机进行静态空气弹性变形分析计算

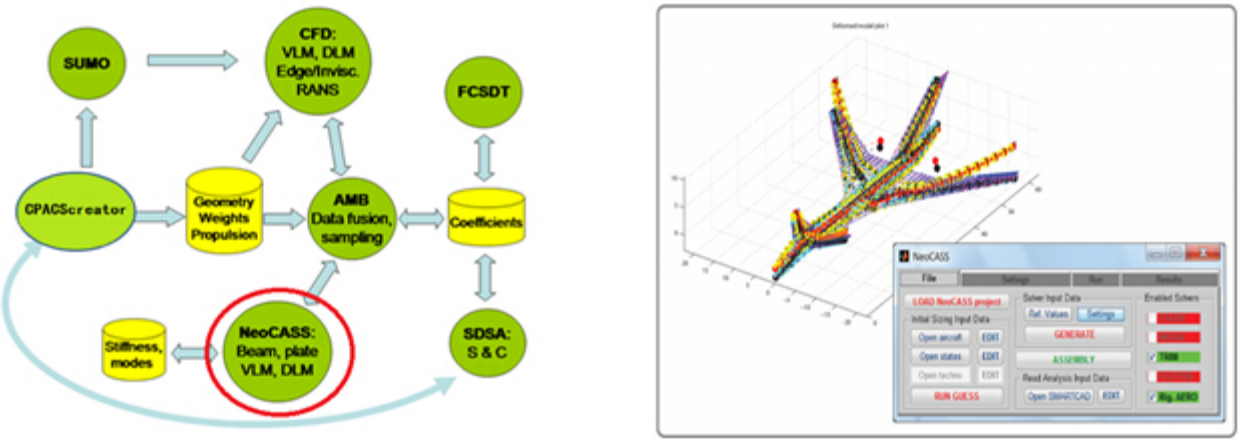


图 14：CEASIOM/NeoCASS 气动弹性在数据流图中的位置和结构分析模块的用户界面

CEASIOM/NeoCASS 可以作为一个独立的应用程序或一个多学科的设计环境。可用于提供初步的细节(如刚度和质量分布、重量)及其静态或动态变形的设计分析。

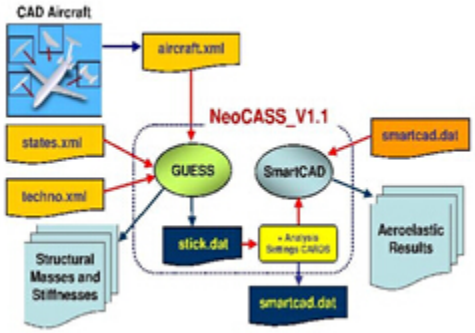


图 15：CEASIOM/NeoCASS 气动弹性模块和结构分析模块与关系图

7. 自适应网格超声速气动分析（CEASIOM/ARC）

自适应网格超声速气动分析 CEASIOM/ARC 模块是为了根据无人机的流场参数梯度较合理地分布网格同时又不增加网格点的数量,提出一种基以总变差为基础的 r 型 3 点逐步自适应网格算法,通过 3 点逐步调整网格点的位置以减小网格线的扭曲,生成质量较好的计算网格.以绕二维圆柱和三维双椭球的超声速流动为算例,用 Euler 方程模拟,以流场的压力总变差来进行自适应,通过分别用所提出的自适应方法生成的自适应网格与用原始网格计算所得的流场结果对比,计算结果表明,用自适应网格计算所得的激波比用初始网格计算所得的激波薄,采用自适应方法所计算出的流场数值解具有更高的分辨率。

8. 飞行控制仿真及模拟系统（CEASIOM/FSS）

飞行控制仿真及模拟模块 CEASIOM/FSS 是无人机的大脑。无人机飞控是指能够稳定无人机飞行姿态，并能控制无人机自主或半自主飞行的控制系统。随着智能化的发展，当今的无人机已不仅仅限于固定翼与传统直升机形式，已经涌现出四轴、六轴、单轴、矢量控制等多种形式。固定翼无人机飞行的控制通常包括方向、副翼、升降、油门、襟翼等控制舵面，通过舵机改变飞机的翼面，产生相应的扭矩，控制飞机转弯、爬升、俯冲、横滚等动作。传统直升机形式的无人机通过控制直升机的倾斜盘、油门、尾舵等，控制飞机转弯、爬升、俯冲、横滚等动作。多轴形式的无人机一般通过控制各轴桨叶的转速来控制无人机的姿态，以实现转弯、爬升、俯冲、横滚等动作。对于固定翼无人机，一般来说，在姿态平稳时，控制方向舵会改变飞机的航向，通常会造成一定角度的横滚，在稳定性好的飞机上，看起来就像汽车在地面转弯一般，可称其为测滑。方向舵是最常用做自动

控制转弯的手段，方向舵转弯的缺点是转弯半径相对较大，较副翼转弯的机动性略差。 副翼的作用是进行飞机的横滚控制。固定翼飞机当产生横滚时，会向横滚方向进行转弯，同时会掉一定的高度。 升降舵的作用是进行飞机的俯仰控制，拉杆抬头，推杆低头。拉杆时飞机抬头爬升，动能朝势能的转换会使速度降低，因此在控制时要监视空速，避免因为过分拉杆而导致失速。 油门舵的作用是控制飞机发动机的转速，加大油门量会使飞机增加动力，加速或爬升，反之则减速或降低。

9. 总体气动及流体仿真计算（CEASIOM/CFD）

总体气动及流体仿真计算模块 CEASIOM/CFD 飞机总体布局设计涉及到无人机气动、强度、舒适性、噪声、疲劳寿命、结构优化等多方面的工程问题。随着现代 CAE/CFD 仿真技术的日趋成熟，逐渐将先进的仿真研发手段与试验和经验相结合，形成互补，从而提升研发设计能力，有效指导新型号的研发设计，节省开发成本，缩短开发周期，从而大幅度提高企业的市场竞争力。此模块可以对无人机的各大部件如机身、机翼、舵面、发动机短舱、气密舱、起落架等进行常规的结构分析、热分析、空气动力分析、电磁分析，而且其强大的多物理场耦合功能可进行诸如流体－固体耦合、热－结构耦合、磁－结构耦合以及电－磁－流体－热-结构耦合分析，完全能满足飞机设计中对 CAE 分析的需求，下面是此模块仿真技术在无人机总体设计的应用：

- ✧ 概念及方案阶段的气动布局选型计算
- ✧ 无人机全机及整流部件减阻设计
- ✧ 高升力装置气动设计
- ✧ 无人机/机翼大迎角气动特性分析
- ✧ 机翼拓扑优化设计分析
- ✧ 无人机多学科优化分析
- ✧ 外挂物布置及分离过程分析
- ✧ 红外隐身特性分析
- ✧ 进气道/发动机舱气动分析
- ✧ 无人机反推力及进气畸变分析
- ✧ 螺旋桨滑流气动特性分析

10. 飞机防冰仿真分析(CEASIOM/ANTICE)

飞机防冰仿真分析模块 CEASIOM/ANTICE 是针对无人机防冰性能评估仿真计算需求进行研发的专门计算模块。包含流体、传热等多种物理模型，能够进行无人机外部流场、水滴撞击、外部对流换热系数、溢流水、内部管道流、内部流场计算，以及实现内外热耦合计算，完成无人机防冰系统性能的数值模拟，完成与试验数据的对比分析。

总结

无人机的设计过程中建模与仿真非常重要，利用数学近似的方法对真实物理系统（几何和载荷工况）进行模拟。还利用简单而又相互作用的元素，即单元，就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成，对每一单元假定一个合适的（较简单的）近似解，然后推导求解这个域总的满足条件（如结构的平衡条件），从而得到问题的解。这个解不是准确解，而是近似解，因为实际问题被较简单的问题所代替。由于大多数实际问题难以得到准确解，而有限元不仅计算精度高，而且能适应各种复杂形状，因而成为行之有效的工程分析手段。如果没有建模和仿真，我们不能了解到无人机的性能参数，也无法通晓设计过程中的问题。而 CEASIOM 飞机先进

数字设计软件平台是由欧盟第六框架计划项目 SimSAC 的软件成果，该项目投资 500 多万欧元，历时三年，由瑞典皇家工学院 KTH、瑞士 CFS 工程公司、瑞典国防研究院 FOI、德国宇航院 DLR、法国宇航院 ONERA、瑞典 SAAB 飞机公司、欧洲宇航与防务公司 EADS、法国 Dassault 飞机公司等十七家单位联合承担。 CEASIOM 遵循国际通用飞机数据标准 CPACS，利用虚拟飞机模型将多学科分析技术应用在无人机设计阶段，兼容众多概念设计和分析工具，支持飞行模拟等广泛应用，提供一个完整的无人机设计平台和决策制定环境。CEASIOM 可以利用各种模块，将其有机地结合起来达到从无人机设计研发到仿真试验，可以优化整个无人机的质量分布、气动性能等性能参数，特别是在空气动力学分析领域，其独有的 AMB 模块更将分析诸如升力系数随马赫数变化等曲线与性能。并且现代无人机总体设计是从概念设计到初步设计阶段，进而到无人机总体方案详细设计的全过程，其最终的目标是给定最优的无人机总体方案。确定无人机总体参数的过程是非常复杂的，需要经验和反复迭代，因而要花费大量的时间。传统的依据半经验理论和数据进行飞机设计已经满足不了无人机复杂的设计要求。面对当今世界经济和科技的快速发展，如果使用 CEASIOM 这样一款专门用于无人机设计的工业软件系统将这一过程程序化，不仅可以从冗余的计算、迭代中解脱出来，而且还可以在短时间内完成一个或多个满足设计要求的方案设计。从而大大缩短了无人机设计周期，节省费用。