



开放原子开源基金会
OPENATOM FOUNDATION

开源工业软件白皮书

CAE软件集成框架

开源工业软件工作委员会

OpenAtom openCAX

2023年6月

编写说明

CAE (Computer Aided Engineering, 工程设计中的计算机辅助工程) 软件是制造业核心工业软件, 被誉为工业软件领域“皇冠上的明珠”, 是一种综合性、知识密集型信息产品, 融合了物理学、数学、工程学、计算机科学等多学科算法和技术, 具有开发难度大、研发周期长等特点。

在工业软件自主化、产业化紧迫形势下, 国内科研院所、高校、企业纷纷投入自主工业软件研发, 掀起了自主工业软件研发与应用热潮。对于如何降低行业低价值重复, 发挥领域各主体关键作用, 加速 CAE 软件产品化进程, 开源无疑是当下最优模式之一。通过整合基础共性技术, 制定开源共创协同机制, 形成开源底座平台, 依托开源底座平台构建 CAE 软件研发与应用生态, 实现 CAE 软件共创高质量发展创新路径。

2022年7月, 在开放原子开源基金会指导下, 成立了开源工业软件工作委员会 (OpenAtom openCAX, 以下简称“工委”)。工委致力于构建一个国际化的开源工业软件工具链, 推动我国开源生态有序发展, 加速工业软件关键核心技术的积累和产业商用的迭代, 为工业软件开源使用者、开发者、研究者提供国际化交流平台。工委组建了10个SIG兴趣组, 凝聚了国内工业软件开源力量, 围绕工业软件关键

内核技术开展研究，探索开源项目孵化培育。其中SIG7组聚焦CAE求解器集成框架领域，组织相关专家力量将研究成果汇编成本白皮书。

本白皮书的主要目的是阐述开源的背景和必要性，给出开源CAE软件的发展思路和技术路线，探索开源盈利模式，并通过FastCAE开源集成平台，给出CAE软件协同研发的具体实例，引导和激发工业软件研发企业、服务厂商、用户企业等主体投身开源，构建开放、共享、协作的研发与应用生态，打造中国特色CAE软件产品化路径。

本白皮书共分为五部分内容。第一部分介绍CAE软件定义、应用场景及国内外发展现状；第二部分介绍CAE软件集成关键技术；第三部分介绍CAE开源集成框架模式思考；第四部分介绍FastCAE-CAE开源集成框架功能、架构设计及相关文档；第五部分介绍基于FastCAE的生态建设情况；第六部分介绍FastCAE未来发展规划。

本白皮书适用于自主工业软件研发、咨询与应用的组织机构，包括但不限于政府部门、制造业企业、工业软件企业、工业互联网平台企业、高校以及社会化工业技术与IT技术人才。期待和大家一起探讨、分享开源模式在自主工业软件发展中关键作用与价值，并和各位一同推动我国工业软件开源生态的发展和壮大。本白皮书的编写仅仅是开始，其中还有很多未及深入研究、清晰阐述和完整论述之处，恳请各位专家批评指正。

指导单位

开放原子开源基金会

组织单位

开源工业软件工作委员会 (OpenAtom openCAX)

编写单位

哈尔滨工程大学

青岛数智船海科技有限公司

工业和信息化部电子第五研究所

青岛海洋地质研究所

珠海格力电器股份有限公司

编写人员

唐 滨

冯光升

吴艳霞

李宝君

王昊东

王海峰

杨成明

马贵蛙

万义钊

陈宗衍

卞孟春

邓敬韬

目 录

1 CAE 软件概述	1
1.1 CAE 定义.....	1
1.2 CAE 应用场景.....	2
1.3 CAE 国内外发展现状.....	3
2 CAE 软件集成关键技术	5
2.1 图形交互界面技术.....	6
2.2 几何建模技术.....	6
2.3 网格生成技术.....	7
2.4 后处理可视化技术.....	8
2.5 工程数据管理技术.....	9
2.6 CAE 软件架构技术.....	10
2.7 云计算和 HPC 技术.....	10
3 CAE 开源集成框架模式思考	11
3.1 我国 CAE 软件研发面临挑战.....	11
3.2 开源框架研发模式探索.....	13
3.2.1 开源框架模式优势.....	14
3.2.2 研发与应用开源框架.....	14
3.3 CAE 开源集成框架路径.....	15
3.4 CAE 开源集成框架目标.....	17
4 FastCAE-CAE 开源集成框架概述	19
4.1 FastCAE 框架简介.....	19
4.2 框架总体设计.....	20

4.2.1 系统架构体系	20
4.2.2 系统功能介绍	21
4.3 架构设计说明	29
4.3.1 基础数据结构设计	29
4.3.2 主要功能模块设计	32
4.4 求解器集成流程	36
4.5 相关文档和示例	38
5 FastCAE 生态构建	40
5.1 生态构建流程	40
5.2 研发生态与应用生态	41
5.3 开源协议及托管平台	42
5.4 FastCAE 生态成效	43
5.5 FastCAE 集成案例	44
5.5.1 并行有限元压印成形仿真软件 CoinFEM	45
5.5.2 船舶复杂海况下耐波性预报软件 VEROM	46
5.5.3 等离子体仿真软件 EasyPSim	47
5.5.4 计算力学降维方法软件	48
6 FastCAE 发展规划	49
6.1 技术发展规划	49
6.2 产品发展规划	50
7 结束语	53
8 附录：参考文献	54

1 CAE 软件概述

1.1 CAE 定义

计算机辅助工程 CAE (Computer Aided Engineering), 泛指包括分析、计算和仿真在内的一切研发活动。传统的 CAE 主要是指工程设计中的分析计算和分析仿真, 其核心是基于计算力学的有限元分析技术。制造工程协会 SAE 将计算机辅助工程 (CAE) 作为 CIM 技术构成的一部分, 进行如下定义: 分析设计和进行运行仿真, 以决定它的性能特征和对设计规则的遵循程度^[1]。

CAE 技术是计算机技术和工程分析技术相结合形成的新兴技术。CAE 软件是由计算力学、数字仿真技术、计算数学、结构动力学、工程管理学与计算机技术相结合而形成的一种综合性、知识密集型信息产品。在近 20 年来市场需求的推动下, CAE 技术有了长足的发展。作为一项跨学科数值模拟分析技术, 它不断地受到科技界和工程界的重视。21 世纪, 随着计算机技术向更高速和更小型化的发展, 分析软件的不间断开发和完善以及网络通讯的普及, CAE 技术的应用将越来越广泛, 成为衡量一个国家科学技术水平和工业现代化程度的重要标志。

CAE 的特点是以工程和科学问题为背景, 建立计算模型并进行计算机仿真分析。一方面, 计算机辅助分析使大量繁杂的工程分析问题简单化, 使复杂的过程层次化, 节省了大

量的时间，避免了低水平重复的工作，使工程分析更快、更准确；另一方面，CAE技术的应用使许多过去受条件限制无法分析的复杂问题，通过计算机数值模拟得到满意的解答。它在产品的设计、分析、新产品的开发等方面上发挥了重要作用。同时，CAE这一新兴的数值模拟分析技术在国外得到了迅猛发展，技术的进步也推动了许多相关的基础学科和应用科学的发展^[2]。

1.2 CAE 应用场景

在当今的复杂工业品的设计过程中，CAE 已经成为一个必需的工具。CAE 技术在许多领域得到了广泛的应用和认可，比较有代表性的应用场景包括以下几种：

(1) 结构分析：结构分析是利用 CAE 技术对物体的强度、刚度等机械特性进行研究的过程。它可以用于评估物体的强度、稳定性、振动特性以及疲劳寿命等属性。结构分析是最常用的 CAE 分析技术，广泛应用于汽车、航空器、船舶、重工装备、桥梁建筑等结构与校验优化。

(2) 流体分析：流体分析是一种应用 CAE 技术来模拟物体周围流体行为以及流体在物体上的作用的方法。它可以用于预测水流、空气流、温度和压力等非稳态物理现象影响，可对船舶、汽车、航空航天器以及各种流体设备进行模拟和优化。

(3) 电磁分析：电磁学是研究电场、磁场和电磁波等现

象的分支学科。CAE 技术在电磁学研究过程中的应用主要是对物体和电磁场之间的相互作用进行模拟。电磁分析可以用于设计和优化电子产品、电动机、变压器、电源以及其他各种电子设备。

(4) 热分析：热分析是一种用 CAE 技术研究物体内部温度分布和热传导的方法。它广泛应用于各种工业场合，如锅炉、电子元器件、热机引擎、航空航天器等，它可以帮助工程师研究物体周围的热流和温度分布。

(5) 声学分析：声学分析是一种通过 CAE 技术模拟噪声传播和声波传播的方法。声学分析在设计和优化机器、车辆、飞机、建筑和消费者产品等方面发挥着重要作用。

(6) 多体运动分析：多体运动分析是指对由多个物体组成的系统进行运动学和动力学分析的一种方法。通过多体运动分析可以得到多体系统的运动轨迹、速度、加速度以及受力情况等信息。多体运动分析广泛应用于机械工程、航空航天、机器人及自动化控制等领域。

1.3 CAE 国内外发展现状

目前世界上最先进的通用 CAE 软件均属于欧美发达国家，主要集中在美国、德国、英法和加拿大这几个国家。CAE 软件始于 20 世纪 50 年代末期，以有限元理论的提出与发展为标志，60 年代美欧投入大量人力物力研发 CAE 软件。其中以 NASA 委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的

Nastran 有限元分析系统最为著名。经过三十年的不断迭代与发展，到 20 世纪的九十年代，已经形成了完备的学科体系，能够满足工业工程的实际分析需求，并开始了大范围的工程应用。近年来，国外的企业开始了大规模的并购进程，如 Dassault、SIEMENS、ANSYS、MSC 等。在并购的过程中，这些企业的 CAE 软件越来越成熟，但也各具特色。比如，Dassault 公司的 Abaqus 软件在处理非线性问题领域十分出色，能够分析复杂的固体和结构力学问题，并且对于非常庞大的高度非线性问题也能够进行准确分析求解。ANSYS 公司则形成了庞大的产品体系，涵盖结构、流体、温度、电磁、噪声等学科，能够处理多物理场耦合分析问题，尤其擅长弱耦合情况。MSC 公司的 Nastran 软件是美国国家航空航天局为满足航空航天领域的结构分析问题而开发的，具有较高的计算精度^[3]。

总体来说，先进的 CAE 软件的发展经历了三个阶段，即以技术提升为主的发展阶段、以市场工程应用为主的壮大阶段和以并购整合为主的成熟阶段。国外的 CAE 软件能够发展到今天的水平，一是离不开国外工业化进程快、计算机普及程度高，其国内企业对 CAE 软件具有极大的应用需求；二是离不开国外政府的高度重视和大量投入，给 CAE 软件的发展提供了强有力的支持；三是离不开技术研发、软件厂商的市场营销和应用验证相配合，三者形成良性循环，进一步促进了 CAE 软件的发展^[4]。

我国 CAE 软件的起源可以追溯到 20 世纪 60 年代，当时我国数学家冯康就提出了独立于西方理论的基于变分原理的差分方法^[5]，标志着有限元法在我国的诞生。从 20 世纪 70 年代起，我国开始出现专门的数值计算程序，逐渐形成了第一代国产 CAE 软件。比如，中国飞机强度研究所研发的用于飞行器结构强度分析的 HAJIF 软件^[6]和大连理工大学工程力学系钟万勰院士领衔研发用于有限元分析与优化设计的 JIFEX 软件^[7]。进入新世纪后，国内出现了一些依托于高校和科研院所的自主知识产权的软件。例如，北京大学研发的用于微机结构分析的 SAP84 软件^[8]，郑州机械研究所研发的用于对机械产品进行结构分析计算的紫瑞 CAE 软件，华中科技大学研发的用于铸造领域的华铸 CAE 软件，吉林大学研发的用于覆盖件弹塑性大变形领域的 KMAS 软件^[9]，中国工程物理研究院研发的用于结构冲击响应领域的 DynPack 软件，大连理工大学研发的面向 CAE 工程与科学计算集成化的 SiPESC 软件平台^[10]以及大连英特仿真的 INTESIM 系列仿真软件。

2 CAE 软件集成关键技术

CAE 软件技术涵盖计算机科学、数学、物理学、工程学等多个领域，是一门涉及多领域多学科的综合性技术。CAE 软件的内核是求解器，包括结构、流体、电磁、传热等问题。此外，形成一款 CAE 软件产品还需要前后处理、交互界面等功能模块。本篇白皮书的重点在于如何通过统一开源框架快

速组装 CAE 软件产品。因此，下面给出一些集成 CAE 软件产品时所需的共性关键技术。

2.1 图形交互界面技术

CAE 软件的图形交互界面是用户和软件进行交互的重要桥梁，是 CAE 软件研发过程中的关键技术之一。它需要充分考虑用户的需求和体验，能够提供直观、易用、功能丰富的界面，使用户能够方便地进行模型构建、仿真设置、结果查看等操作。

C/S 架构的 CAE 软件，考虑软件跨平台部署和图形运行性能，一般采用 C++ 语言和 QT 界面框架进行开发，并会调用 OpenGL 等图形库。B/S 架构的 CAE 软件一般采用 Java 语言，并采用 Spring+SpringMVC+MyBatis 组合框架进行开发，同时使用 WebGL 作为最常用的浏览器端图形引擎。

2.2 几何建模技术

几何建模技术需要解决模型的数字化表达问题。准确完整的几何模型表达是进行数值仿真计算的基础。通常，在 CAD 阶段使用专门的 CAD 建模软件完成几何模型的创建。在 CAE 仿真分析的领域中，通常使用导入在 CAD 软件中已建好的模型，对其进行清理、简化和修复等操作，以满足网格划分的要求。因此，在 CAE 领域中更关注几何建模技术中的模型编辑与简化相关技术与功能。参数化建模是一种基于输入参数

创建指定几何体的建模技术，在模型构建过程中，设计者可以通过指定尺寸、材料特性和外形等参数来创建几何模型。

CAE 软件可以集成典型的几何引擎来完成几何建模模块。国内几何建模引擎有中望 3D CAD、山大华天 CAD 等；国外有 OpenCASCADE、C3D、ACIS、Parasolid 等。

2.3 网格生成技术

网格划分的过程是对几何连续空间离散化处理。网格的质量将会直接影响仿真计算的速度和计算精度。随着算法的不断创新和发展，CAE 网格生成方法的研究领域和主题在不断扩大和深入研究，重点已经从二维平面问题转移到三维曲面和三维实体问题上。从三角形四面体网格自动生成增加到四边形六面体网格自动生成，在并行网格生成、自适应网格生成、各向异性网格生成等方面亦取得许多重要进展。

根据国内外学者对 CAE 网格剖分技术有关研究成果的概括总结，CAE 网格生成的通用方法根据操作特点可分为五种：Delaunay 剖分法、拓扑分解法、推进波前法、映射法和基于栅格法的有限四八叉树法。其中前三种最为常用。Delaunay 三角剖分（简称 DT）是目前三大最流行的全自动网格生成方法之一。该方法的最主要的优点之一是自动避免了生成小内角的长薄单元。拓扑分解法假设最后网格顶点全部由目标边界顶点组成，那么可以用一种三角化算法将目标用尽量少的三角形完全分割覆盖，这些三角形主要是由目标的拓扑结构

决定。这样，目标的复杂拓扑结构被分解成简单的三角形拓扑结构。推进波前法的基本思路是从待剖分区域边界开始，由一条分界线分界面作为前沿，向内部逐渐延伸，节点和单元同时生成，直到整个待剖分区域剖分完毕。

从软件层面来看，网格剖分由网格剖分器实现。目前各大 CAE 软件均包含了自己特有的网格剖分器。开源的网格剖分器主要包含 Gmsh、NetGen、TetGen、SMesh 等。国内的 CAE 软件厂商，如云道、格宇、英特仿真、十沣科技、安世亚太等，也都致力于发展自主可控的网格剖分器。

2.4 后处理可视化技术

后处理可视化技术是指通过对数值模拟或实验数据进行加工处理和视觉展示，以便于对数据进行理解和分析的一种技术。运用计算机图形学和图像处理技术，将科学计算的输出数据和一些其他领域通过观察测试生成的数据转换为图形和图像，最终在屏幕上显示出来并进行交互处理的理论、方法和技术。科学计算可视化极大地提高了科学计算数据的处理速度和质量，是帮助科学家深入理解科学数据的最有力的工具之一。

后处理可视化技术包括了三维可视化、流线可视化、矢量场可视化、等值面可视化等多种可视化手段。广泛应用于各个领域，如工程、医学、生物、环境等领域。

目前大多数商业软件中都包含特有的后处理可视化模

块，也有像 Tecplot、Enight、HyperView 等相对通用的商用后处理软件。在开源软件中，VTK、OSG、OpenInventor 等专业的 3D 图形渲染引擎可以实现二维与三维数据可视化。其中基于 VTK 的科学计算可视化软件 ParaView 是应用比较广泛的后处理软件，支持并行可视化与在线数据可视化。

2.5 工程数据管理技术

CAE 工程数据管理主要负责 CAE 软件计算过程中输入输出数据，以及软件计算过程中内外存的数据交互等。数据规范化、标准化是为了实现 CAE 软件之间或者 CAE 软件内部为了信息交换及资源共享的目的。需要进行数据标准化以及模型之间的数据格式标准统一等，例如 STEP、IGES 等几何数据标准格式。软件集成需要进行数据的交互与共享，一些常见的数据接口技术有 XML，JSON，JavaScript 等。大规模工程数据处理方面，随着仿真模型不断发展，数据量也会越来越大。这就需要应用大数据处理技术来快速、高效地处理海量的仿真数据，比如采用 HDF5 格式。HDF5 是一种用于存储和管理大量科学和工程数据的数据格式、库和应用程序接口。它支持不同数据类型和维度，并提供了非常强大和灵活的数据结构，适用于需要存储大量复杂数据和深度层次结构的科学和工程应用。

2.6 CAE 软件架构技术

在研发国产自主 CAE 软件过程中，随着分析仿真功能增加、规模增大，系统复杂性越来越大。现有分析仿真软件开发与集成方法已经不能适应未来的发展。为了能够充分支撑 CAE 软件开发与优化，亟需研发面向主干设计的 CAE 软件一体化、开放式架构。通过结合 IT 领域架构设计原则和模式，结合软件实施过程的优秀实践经验等，为开发具备自主知识产权的 CAE 软件提供一体化支撑架构。架构的目标之一是解决传统 CAE 软件开发分散独立、各自为政的状态，实现在平台内各类符合集成标准 CAE 软件模块能够灵活组织及数据互通，满足不同行业 CAE 工程应用需求。依托平台能够持续汇聚应用反馈及验证数据，从而推动 CAE 软件模块的持续完善与升级，促进国产 CAE 良性发展生态的形成。

综上，软件架构作为一项至关重要的工作，它涉及整个软件系统的设计和组织的，直接关系到 CAE 软件的性能、可维护性、可扩展性等方面。

2.7 云计算和 HPC 技术

CAE 云化是未来发展的趋势。另外，CAE 在超算计算也是解决复杂工程问题关键。随着计算资源的不断增长和云计算技术的发展，数据中心、服务器和云端平台等技术被广泛使用，以加速计算、提高数据可靠性和处理能力。云计算和 HPC 技术在 CAE 软件领域的应用主要体现在：

(1) 计算资源利用。CAE 软件可以方便地调用云服务器的 CPU、GPU、FPGA 等计算资源，进行并行计算、集群计算，大大提高仿真速度。这使得 CAE 软件可以设计更大规模的仿真模型，开展更真实的多物理场耦合分析等。

(2) 存储与计算分离。CAE 软件可以将大量仿真数据存储在云存储中，并随时调用云计算资源进行后处理计算，实现存储与计算的弹性伸缩。这为 CAE 软件提供了高度灵活的部署方式。

(3) 云原生架构。新一代 CAE 软件可以采用云原生架构，从设计之初就全面考虑云计算，实现微服务化、云桌面、DevOps、弹性伸缩、Serverless 等技术。软件更加贴近云计算发展趋势，具有更强的前瞻性。

3 CAE 开源集成框架模式思考

3.1 我国 CAE 软件研发面临挑战

近年来，我国研究院所、高校、企业纷纷投身功能软件研发。虽然也开发出了一些 CAE 软件，但由于我国起步较晚，在 CAE 软件产品化方面仍缺乏大量经验和生态基础。CAE 软件研发过程中还存在以下挑战：

(一) 多团队协同困难。CAE 软件具有开发难度大，周期长，涉及学科多等特征。一款具有工程能力的 CAE 软件产品需要多学科技术团队协作，甚至企业间优势技术的合作，比如几何建模引擎。目前，从事 CAE 相关技术研发的团队还未

形成清晰的专业化分工，各自优势技术还无法以标准模块快速共享。需要一套工业软件研发标准体系，统一数据规范、模块接口、集成标准等，加速专业化分工及提升多团队协作效率。

（二）缺少复合型人才。大部分 CAE 软件研发是以力学、物理等学科背景的求解器开发团队主导。以追求计算求解效率及精度为目标，缺乏面向用户和市场端的重视。CAE 软件是承载大量工业知识的软件产品，最终形态还是软件。所以，仍需按照软件工程思想来开发 CAE 软件。当下同时具备软件工程经验和仿真经验的复合型人才较少。如 CAE 软件产品经理是几乎缺失。要解决复合型人才紧缺问题，一方面加强人才培养，另一个方面是细化人才分工。可以通过工业软件产品化平台，将软件进行分层架构。顶层架构设计由复合型高端人才完成，通用模块由 IT 人才来完成，专业内核开发由专业学科团队完成。

（三）运营体系不健全。CAE 软件应用推广也要较长的周期才能建立用户信心，需要融入上下游研发设计工具链条，才能获得用户更多的工程验证数据，以加速迭代产品。目前国内 CAE 软件大多是具体某个领域的专用软件，用户缺少获取这些软件的渠道和这些软件的客观评价。通过工业软件商品化生态，可以按照应用领域进行分类管理，给出软件成熟度评级，按照评级估算软件价格，设定软件能力边界等。这样可以降低用户获取 CAE 软件的成本，同时也加强各软件之

间的链接关系。



图 1 CAE 软件研发挑战

因此，当下为了加快 CAE 软件产品化，需要从三个方面入手：建立工业软件研发标准体系，研发工业软件产品化的平台，构建工业软件商品化的生态。

3.2 开源框架研发模式探索

传统 CAE 软件开发方式是由 CAE 研发企业从头开始设计架构，并逐步开发相应的功能模块。当需要引入外部的技术时，需花费大量时间进行适配，或者由技术提供方进行大量的定制开发工作。另外，针对企业定制化需求，从服务商购买软件二次开发或者从头定制开发方式，可能存在较大隐患，如开展一段时间发现服务商能力有限，需要更换服务商的情况，则浪费了巨大的时间和资金成本。基于开源框架底座+增量开发的模式，可以有效提高研发企业间的技术合作效率，同时可以降低用户与研发企业间合作风险。

3.2.1 开源框架模式优势

基于开源框架底座+增量开发的模式，可以最大程度地利用已有资源，实现面向企业特征需求的增量开发，降低成本，减小风险以及提高多人协同的效率。围绕开源底座平台，形成开发者之间、用户与开发者之间的高效协作生态；可以统一研发标准和规范，吸引大量开发者接入生态，开发丰富的功能组件，为商业交易提供良好的基础。

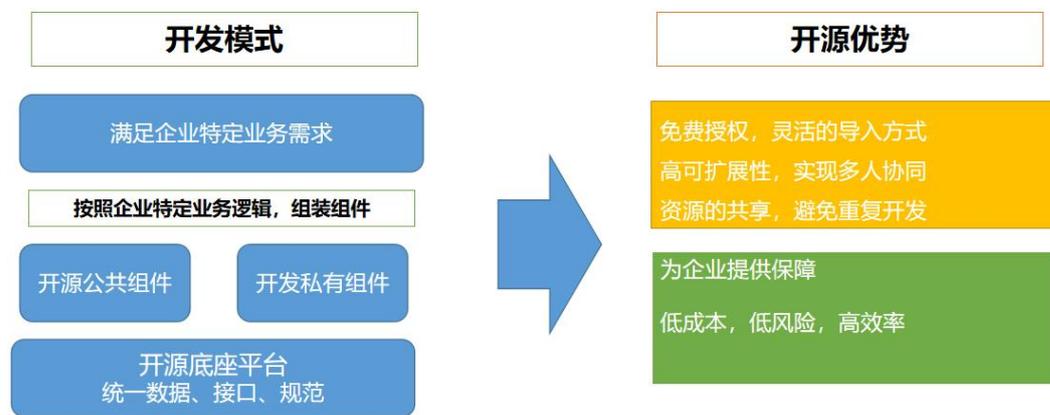


图 2 开源模式优势

3.2.2 研发与应用开源框架

软件框架的搭建是标准的更进一步的开发工作，具有天然的驱动力，是切实可提高效率的具体手段。针对 CAE 软件研发过程，求解器框架平台可以提升求解器协同研发的效率，优化内核的可测试性，以及延展产品的可扩展性等。产品集成平台可以有效将软件产品功能模块解耦，从而通过

实现技术团队明确分工来提升产品化集成效率。自动化测试平台是提升 CAE 软件质量的有效工具，可实现单元级、算例级的自动测试。大型研发设计企业，要实现 SaaS 模式多款 CAE 软件联合应用，可以基于开源底座平台，如仿真 workflow 平台、仿真数据管理平台 and 在线云仿真平台等，进行定制开发，以实现目标。



图 3 开源研发与应用底座平台

3.3 CAE 开源集成框架路径

本框架从国家和行业需求出发，紧扣自主工业仿真软件研发，通过构建工业软件研发体系、提出统一行业标准的指导思想、提供配套框架平台与工具链、落实体系提升协同效率、推动开源研发社区聚众力集星火智催生共建新生态，已获得面向行业应用场景整合成熟软件持续服务能力。



图 4 开源框架路径

工业软件研发体系是将软件工程思想融入工业软件研发流程的统一体系，提出统一的研发规范、集成标准、数据标准和服务标准等，为不同领域学科的团队合作提供标准规范依据。

框架平台工具将标准与规范平台化、工具化，进一步降低不同技术和功能的融合，方便优势资源的共享与多团队的协同，同时加速技术理论到工程软件的迭代效率。

开源研发社区以平台工具和统一规范标准为基础，打造开放、共享的开源生态社区，汇聚优质的人才，整合先进技术到开源框架，以开放的思维寻求探索创新商业模式。

行业解决方案随着自主工业软件产品的日益成熟，应用于工程领域的验证中，按照行业归类软件打造中国自主的软件上下游产业链。

3.4 CAE 开源集成框架目标

（一）集成框架必要性

目前，自主 CAE 软件研发主要集中在求解器研发集成阶段。许多来自高校科研院所的团队已经研发了大量各学科求解器，急迫地需要形成完整的 CAE 软件产品。因此，当务之急是需要解决软件快速集成，并通过灵活可扩展的框架实现软件快速迭代，并最终达到软件产品成熟度。

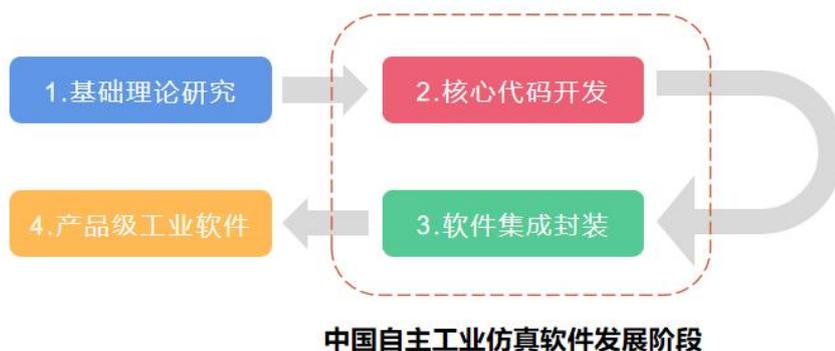


图 5 中国自主工业仿真软件阶段

（二）发展理念

本发展理念迎合自主 CAE 软件产品阶段发展需求，借助 CAE 软件集成框架平台开源模式，整合 CAE 软件关键技术及参与主体，形成开放、共享、协作的研发与应用生态，打造中国特色 CAE 软件产品化路径。

- 解决行业低价值重复，追求 CAE 软件共创高质量发展；
- 底座共性技术坚持开源，分阶段探索开源营收模式。

(三) CAE 开源集成框架目标

虽然 CAE 开源集成框架虽然是面向 CAE 软件研发而设计，但是由于 CAE 软件有较长的成熟周期，一个良好的集成框架也必须以软件应用迭代为基础进行设计。因此，需要从研发目标与应用目标两方面展开分析。



图 6 CAE 集成框架目标

(1) 研发目标

初期设计目标是使软件框架逐渐灵活，提高标准化程度，并提供大量的基础模块，为核心求解器服务，如流体、力学、电磁、电磁等等，在面向汽车、航空航天、船舶等专用工程领域时，能够快速研发专用的 CAE 软件。同时，还整合一些数据管理和软件授权等模块，通过 FastCAE 平台将这些模块整合起来，最终形成一款专用的工业软件产品。

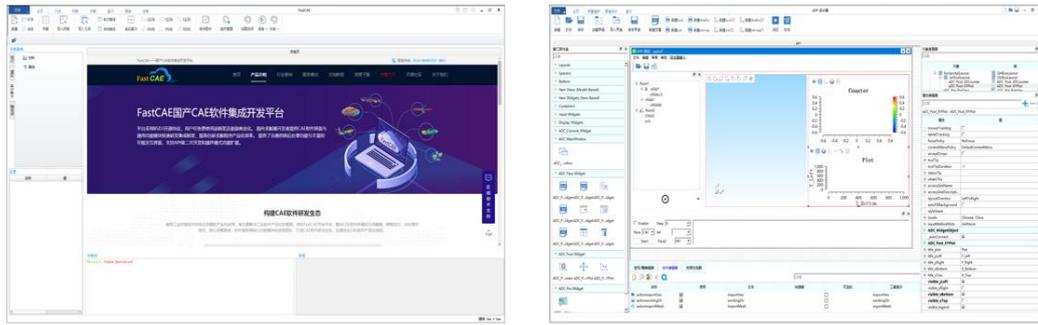
(2) 应用目标

在形成大量的自主化工业软件过程中，自主软件需要通过不断地在软件的实际应用中自我迭代，并在软件相对成熟后再上云。此时，FastCAE 平台已经积累了几百个甚至上千个成熟的自主化工业软件，并在此基础上考虑建设中国自主 CAE 软件服务云平台。在基于 FastCAE 平台的自主化工业软件积累可以满足各种行业对于专业化软件的使用需求目标的前提下，平台的价值才得以充分发挥。例如在汽车设计领域，该领域对于工业软件的需求又可以细分到强度、流体等专用技术方向，在满足领域内专业化需求的前提下，相应软件就很容易被用户使用，并且形成了体系化的工作模式。用户在平台上可以找到自己需要的专业化平台模块，这样可以将平台以用户为基础运营起来。届时，平台就以云平台的运行，并且后台对接超算、集群等服务内容。

4 FastCAE-CAE 开源集成框架概述

4.1 FastCAE 框架简介

CAE 开源集成框架平台 (FastCAE) 本质是一套专为 CAE 软件内核开发者打造的前后处理快速集成工具。该平台封装大量前后处理功能组件，并通过可视化设计器将这些模块组合成完整的 CAE 软件。平台包含软件开发平台和软件设计平台。



软件开发平台

独立软件产品开发、传统CAE系统应用集成

软件设计平台

软件快速原型设计、个性化分析流程

图 7 集成框架主页面

4.2 框架总体设计

4.2.1 系统架构体系

FastCAE 采用分层架构模式，以 FastCAE 核心架构为基础，构建数据管理、信息交换、界面生成、求解器集成等基础架构，同时提供丰富的组件库。该平台支持用户快速构建个性化界面，包括对于几何、网格、求解器等核心模块的灵活扩展，为自主 CAE 软件产品化迭代提供健壮底层平台。



图 8 开源集成框架架构

在架构体系设计中，规划了以下四种开发方式，以方便

用户使用和二次开发:

(1) 可视化方式: 用户可以通过可视化的方式, 在界面上直接配置自己需要的功能点和流程, 并通过鼠标键盘等操作进行实现。同时, 对于具有更高级研发能力的用户团队, 他们可以直接在源代码上进行修改, 以实现更为复杂的功能。

(2) 所见即所得方式: 例如想配置属性节点, 用户可以直接右键呼出配置菜单, 并配置参数的名称、类型、范围、默认值等, 配置保存后就可以自动生成属性窗口。其他功能则可以通过复选框等简单的方式进行配置。

(3) 基于 Python 脚本的集成拓展: 用户可以通过编写脚本实现模块数据和功能点的驱动, 而无需通过界面进行操作。这类似于传统软件中的宏录制和执行功能, 可以通过扩展指令来丰富和定制自动化脚本, 以实现流程录制和自动执行。

(4) 基于插件的集成拓展: 该方式方便用户开发增量程序, 将开发完的插件加载到插件管理器中, 可以生成用户自定义的界面。同时, 用户还可以开发多个插件, 如一个系统中有多个求解器, 都可以集成到一个软件中, 并通过插件的形式进行动态加载和卸载。

4.2.2 系统功能介绍

FastCAE 采用统一的交互界面设计, 系统中几何、网格等功能模块均支持底层引擎的替换。平台默认集成了一些开

源的模块，下面是 FastCAE 的主要功能介绍：

4.2.2.1 界面可视化设计

平台提供 APP 设计器，该设计器基于多种可拖拽布局控件与功能组件，并可以无需编写代码即可完成软件界面布局与运行逻辑设计。

■ 方式优点

- 1) 无需编写代码；
- 2) 可视化集成拓展；
- 3) 快速定制修改；
- 4) 所见即所得。

■ 适用情境

- 1) 搭建软件原型；
- 2) 辅助求解器测试；
- 3) 自研计算程序封装。

➤ 软件整体设计

使用 APP 设计器可以对软件进行可视化的整体设计，包括软件界面的设计、运行参数的设置以及软件运行逻辑的设计等。

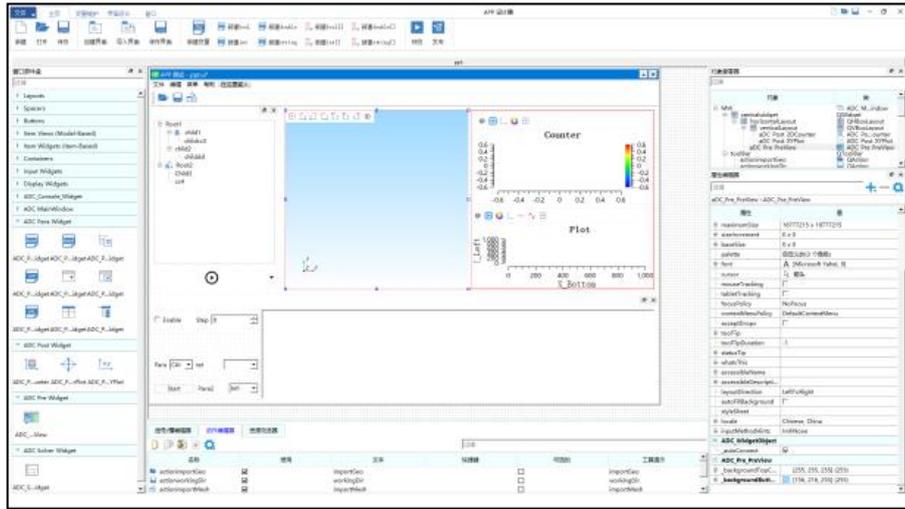


图 9 设计模式主界面

➤ 添加功能拓展

用户可以选择需要的拓展组件，对软件局部功能进行调整。如果组件库无法满足需求，则可以通过软件 API 进行个性化定制开发。

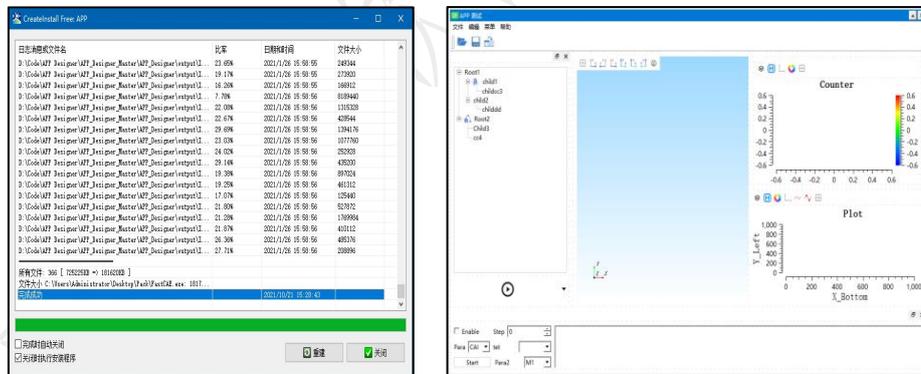


图 10 组件拓展界面

➤ 软件发布与运行

将设计好的软件发布并生成安装包，进行软件的分发，安装与使用运行。

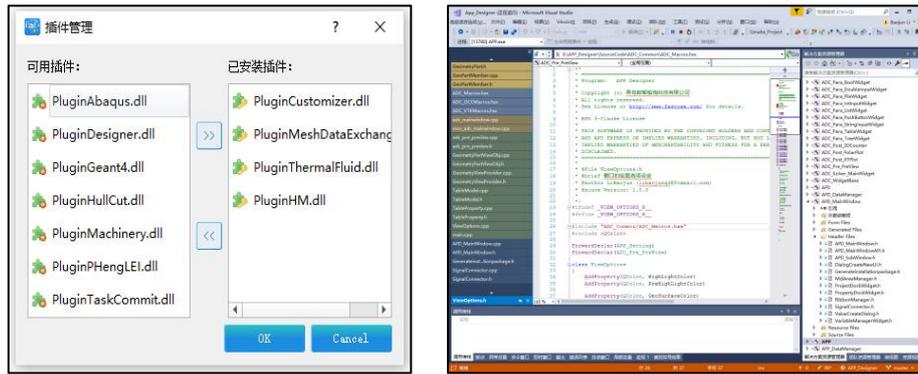


图 11 组件安装与发布

4.2.2.2 几何建模模块

几何建模组件系统默认集成 OpenCASCADE 开源几何引擎。目前，该系统已经实现了多种三维特征建模和操作，以及简单的草图功能。结合平台提供的可视化交互组件，它能够实现复杂几何模型的可视化渲染和交互。

该组件提供标准接口以集成任意几何引擎，因此用户可以根据需要集成和拓展其他商用或开源几何引擎。

基础功能

- 1) 支持立方体、球、圆柱、圆台等快速几何体建模；
- 2) 支持拉伸、镜像、布尔运算、倒角等特征操作；
- 3) 支持任意平面草绘。

■ 高级功能

- 1) 支持通用几何文件导入导出，支持保存工程文件；
- 2) 支持无限步撤销重做操作；
- 3) 支持编辑修改操作。

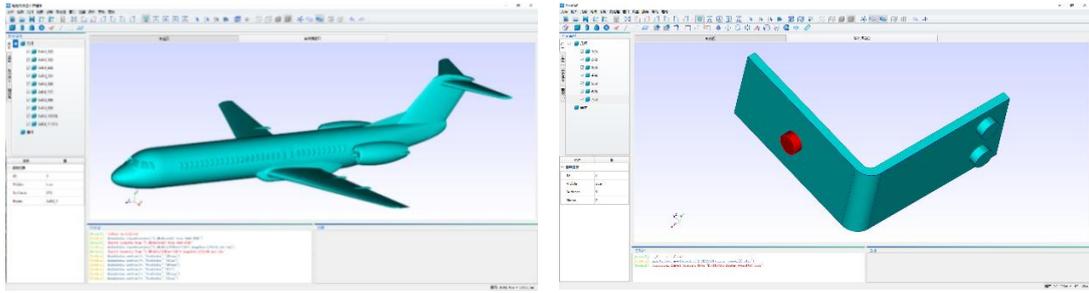


图 12 几何功能界面

4.2.2.3 网格划分模块

网格剖分组件默认集成 Gmsh 网格剖分引擎，支持低阶和高阶网格单元划分，同时支持多种单元类型和多种网格文件导出。结合基于 VTK 的可视化组件，能够实现网格的统一显示模式和多种网格选取交互模式。同时，该组件开辟了多种接口，用户可以根据需要集成商用或其他开源网格划分引擎。

■ 基础功能

- 1) 组件基于脚本和 Python 接口的调用；
- 2) 支持实体局部加密与流体域网格划分；
- 3) 自动修补孔洞；
- 4) 默认封装多种网格划分算法。

■ 高级功能

- 1) 自主开发了二十余种的网络评价方法；
- 2) 自主开发了更友好的交互界面；
- 3) 自主开发了点选框选等网格选取方式；
- 4) 自主开发了基于几何的网格检索方法。

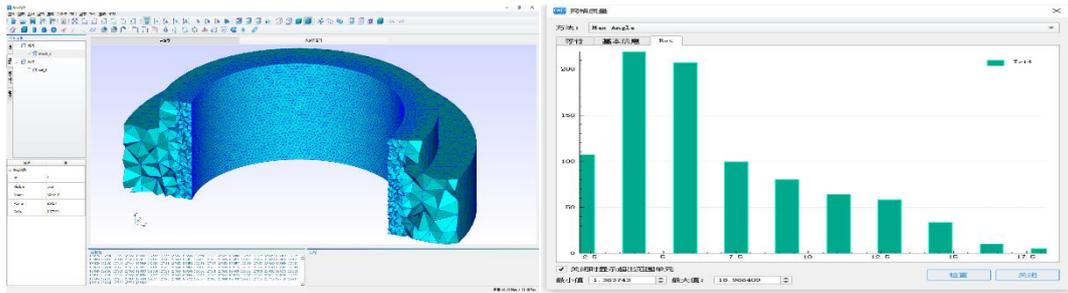


图 13 网格功能界面

4.2.2.4 求解器驱动模块

通用求解器驱动组件支持自研求解器的集成，也支持第三方商业或开源 CAE 软件的驱动集成。它可以通过可视化配置方式和标准输入输出文件来集成自研求解程序；另外，它也可以通过平台提供的二次开发接口来集成功能复杂的自研求解器和第三方 CAE 软件。

■ 主要功能

- 1) 求解器类型支持自研与第三方求解器；
- 2) 灵活的求解器设置，随时修改，即时生效；
- 3) 支持模板与指定文件格式的输入文件；
- 4) 支持自定义的文件转化；
- 5) 支持 Windows、Linux 多系统求解器集成；
- 6) 支持插件式的拓展接口。



图 14 求解器驱动集成模式

4.2.2.5 后处理可视化

通用后处理可视化组件基于 VTK 可视化库开发了三维通用可视化功能，包括绘制云图、矢量图、动画、图像切割、对称、等值面提取和流线等功能。除此之外，它还具备 VR 可视化模块和几何数值耦合运动模块等高级功能。此外，基于 QWT 还开发了通用的二维可视化功能，包括二维云图、XY 图和极坐标等功能，以满足常见 CAE 的后处理需求。

■ 主要功能

- 1) 支持 VTK/Tecplot/CGNS/OBJ 等格式文件；
- 2) 提供接口，轻松集成其他数据格式结果文件；
- 3) 支持云图、矢量图、动画等常规三维可视化功能；
- 4) 支持切割、对称、等值面提取等数据操作功能；

5) 支持多种单元类型，支持低阶与高阶单元。

■ 特色功能

- 1) 支持结果数据 VR 渲染，可输出到 HTC Vive 设备；
- 2) 支持三维空间数值提取，实现曲线与动画同步功能；
- 3) 支持脚本化流程控制，支持报告生成；
- 4) 支持结构、流体、电磁等学科的后处理要求；
- 5) 开放 API，支持自由功能拓展与数据提取。

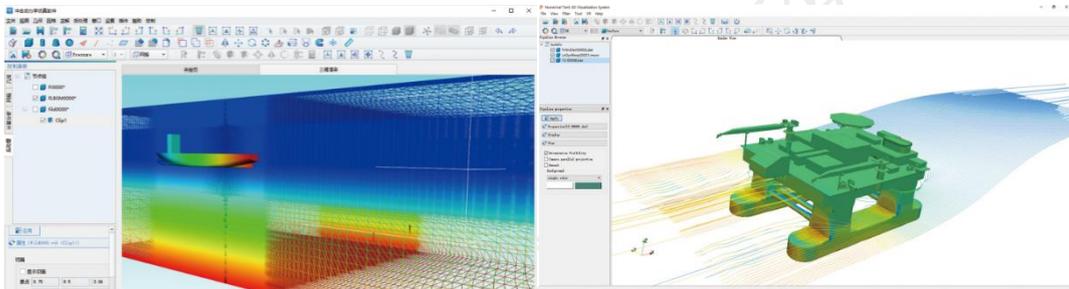


图 15 后处理功能界面

4.2.2.6 脚本功能模块

平台的各个功能组件采用了 C++ 语言开发，其中核心功能封装了 Python 接口，全流程脚本控制组件并对 Python 解释器进行了封装修饰。在平台中，功能组件之间可以通过 Python 命令相互调用，从而降低耦合。此外，用户可以根据需要调用不同粒度的接口，实现仿真全流程的自动控制。



图 16 脚本功能

4.3 架构设计说明

4.3.1 基础数据结构设计

FastCAE 软件中的数据主要分为五个部分：几何数据、网格数据、模型数据、配置数据和环境设定参数。这些数据类及其成员都有共同的基类：DataProperty: DataBase。这个类里面包含了属性和参数两种类型的成员列表。属性是指在软件运行过程中进行分配的，不允许随意更改的信息，例如 ID、可见性和名称等。而参数则是指允许用户修改的信息，例如材料属性相关的参数以及物理模型设置相关的信息。在软件运行的过程中，控制面板下方的属性窗口会有明显的可视化区分，如下图所示：

名称	值
基础信息	
ID	1
Type	测试材料
Name	Material_1
参数	
参数组1	
布尔参数	<input checked="" type="checkbox"/>
字符串	TestChar
枚举选择	选项2
参数组2	
表格类型	Row:2, Col:3
路径参数	
整数参数	0
浮点型参数	100.0000

← 属性

← 参数组

← 参数

图 17 数据分类

属性类与参数类的组织和继承关系如图 18 所示。属性类和参数类的数据类型大致相同，但是它们继承自不同的基类。不同类型的参数还各自派生拓展，形成了完整的属性与参数体系。

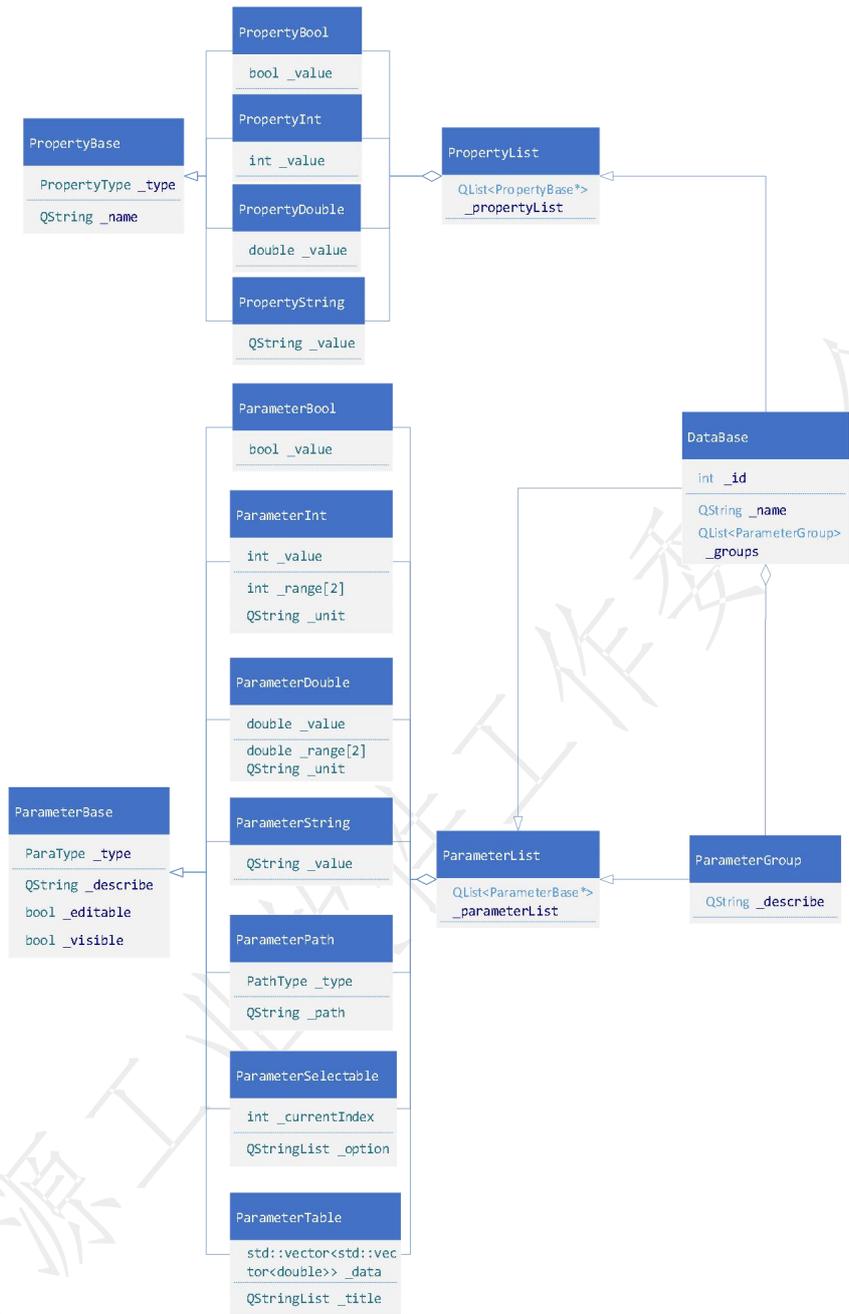


图 18 基础数据继承关系

FastCAE 物理模型参数系统支持基于配置文件的自定义拓展。对于参数系统的算例类型、参数数量和参数层级关系都可以通过配置文件进行个性化拓展。此外，该系统本身

支持多算例，采用两级缓存的内存管理方式。首先，它会读入配置文件，形成内存模板参数，然后在配置数据中进行管理。在具体的算例创建后，它会通过内存拷贝的形式对配置数据中的模板进行拷贝。拷贝出来的副本对象会被放入算例模型数据管理中进行管理与维护。不同算例的参数修改会直接修改存储在该算例中的副本对象。

4.3.2 主要功能模块设计

(1) 几何部分

几何数据是所有几何相关操作的最终操作对象，保存了操作过程中产生的大部分源数据。这些数据包括导入的几何文件以及几何建模过程中产生的所有数据。几何模块基于 OpenCasCade 编写，因此在数据结构中涉及了 OCC 的数据结构。目前，平台采用的 OCC 版本为 7.4.0。

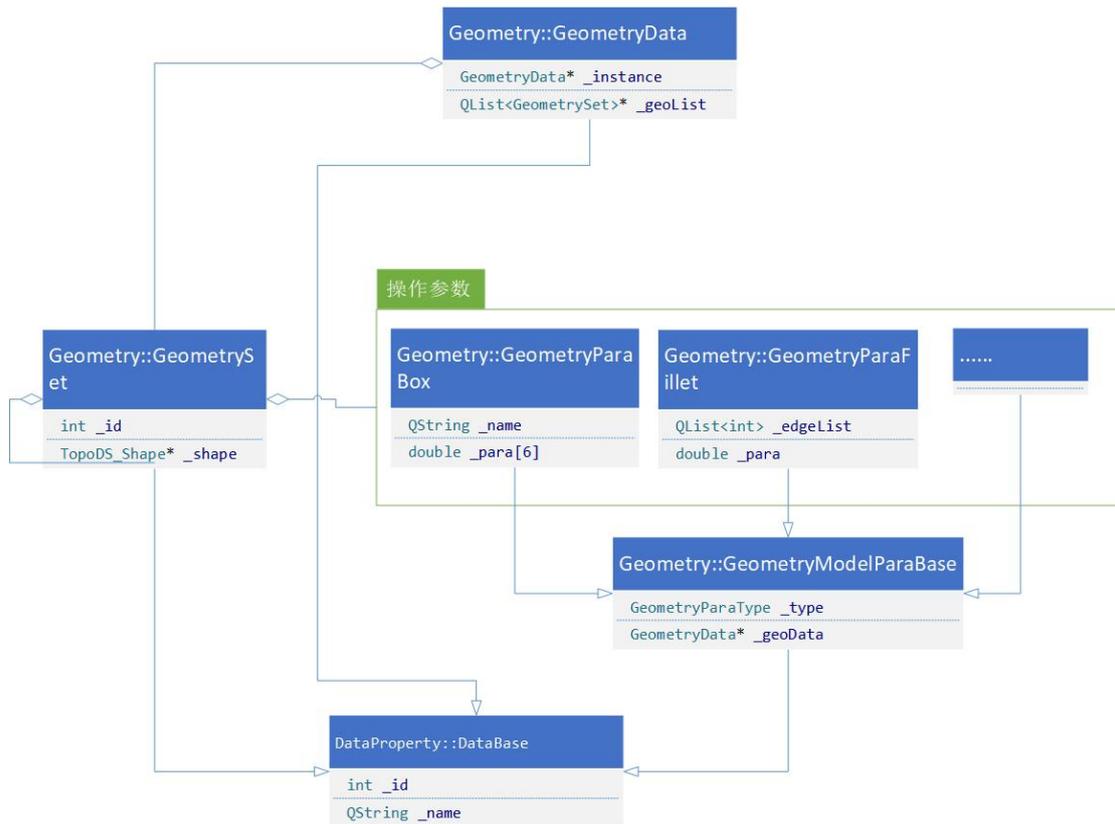


图 19 几何数据模块

(2) 网格部分

网格数据保存了所有网格的节点、连接关系与组件信息。网格模块对数据的检索要求很高，需要既能够根据节点查找单元，也能够根据单元查找节点。为了方便起见，我们直接采用了 VTK 的网格表示方法。该方法支持多种网格类型、支持低阶和高阶网格单元表示，而且 VTK 提供了多种网格处理算法和转换方式，我们可以直接调用。当前我们采用的 VTK 版本为 9.0.1。

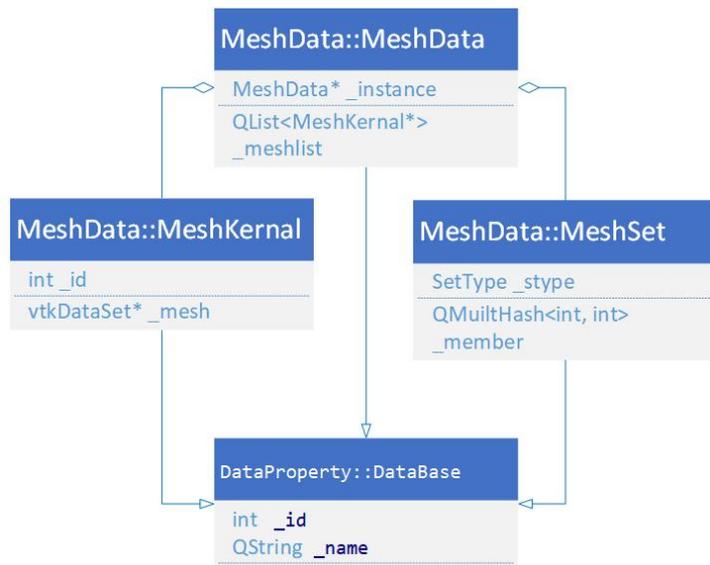


图 20 网格数据模块

(3) 模型部分

模型数据指的是与计算相关的物理参数和计算参数的集合，其中包括了材料参数和边界条件的设置。因此，模型数据的组织关系相对较为复杂。模型数据和控制面板的算例树相互关联，它们之间的接口较多，逻辑关系也较为复杂。

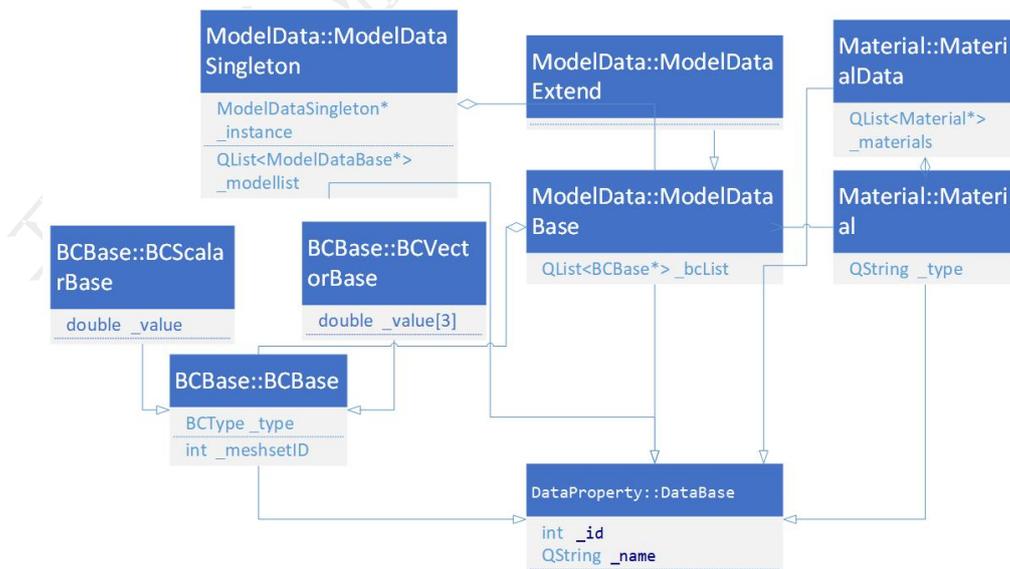


图 21 模型数据模块

(4) 主界面部分

主界面是整个软件运行时的大脑，负责信息的收集和分发。所有重要的交互操作都通过信号的形式传递到主窗口，然后由主窗口负责将信号下发到相关的功能模块或视图类进行渲染。例如，当点击网格组件的某一个子节点时，会产生一个点击事件的信号。此信号传递到主窗口后，由两个窗口进行响应。一个是控制面板中的属性框，它会显示对应节点属性；另一个是绘图界面，它会对该部分组件进行高亮显示。这个消息的分发是通过主窗口实现的。

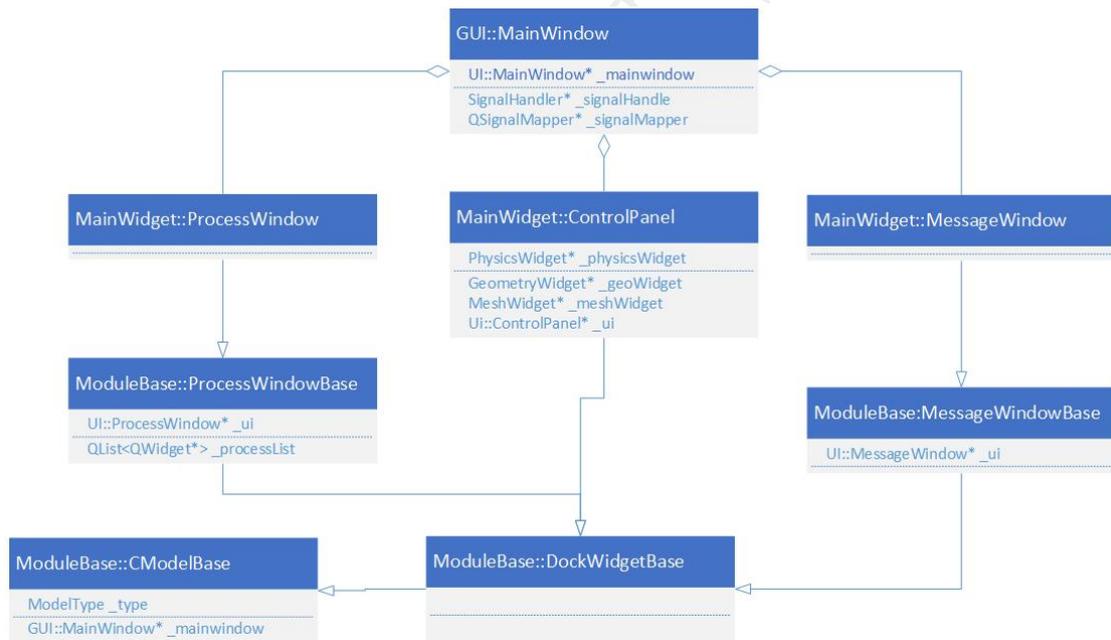


图 22 主界面模块

(5) 前后处理部分

前后处理窗口指的是数据的可视化窗口。前处理为一个单独的窗口，实现对几何和网格的可视化，以及选取和高亮

等交互操作。后处理分为两部分。一部分为二维可视化部分，通常可视化对象为曲线等二维数据信息。此外，该部分还包含动态曲线功能，能实时可视化数据变化。另一部分为三维可视化渲染部分，包含云图、矢量图、切线和切面等功能，也包含动画功能。前处理部分的代码实现位于 MainWidgets 文件夹，而后处理部分的代码实现则位于 postWidgets 文件夹。为了方便窗体的统一管理，该部分的组织关系相对较为复杂。

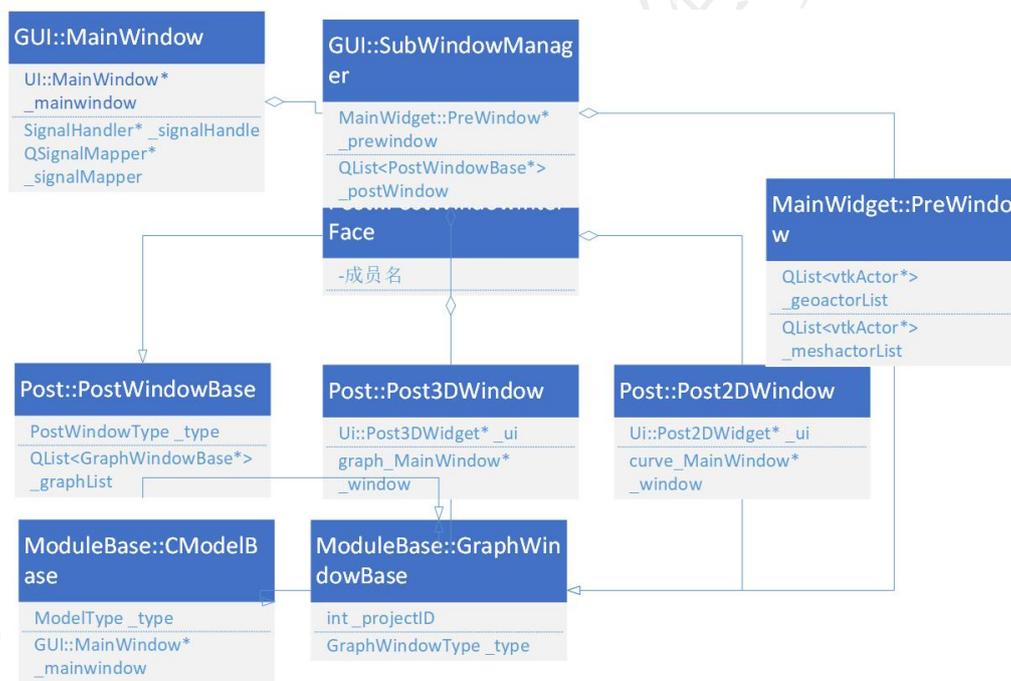


图 23 前后处理模块

4.4 求解器集成流程

在与求解器程序进行集成工作时，平台通过外存文件的形式与求解器进行信息交换。平台将有限元模型以及其他参

数通过统一数据接口写出结构化的文本，对于输入简单的求解器，平台还可以提供参数模板。求解器通过读入输入文件获取信息并进行解算，将结果以文件的形式传递给平台，平台则自动读取结果。

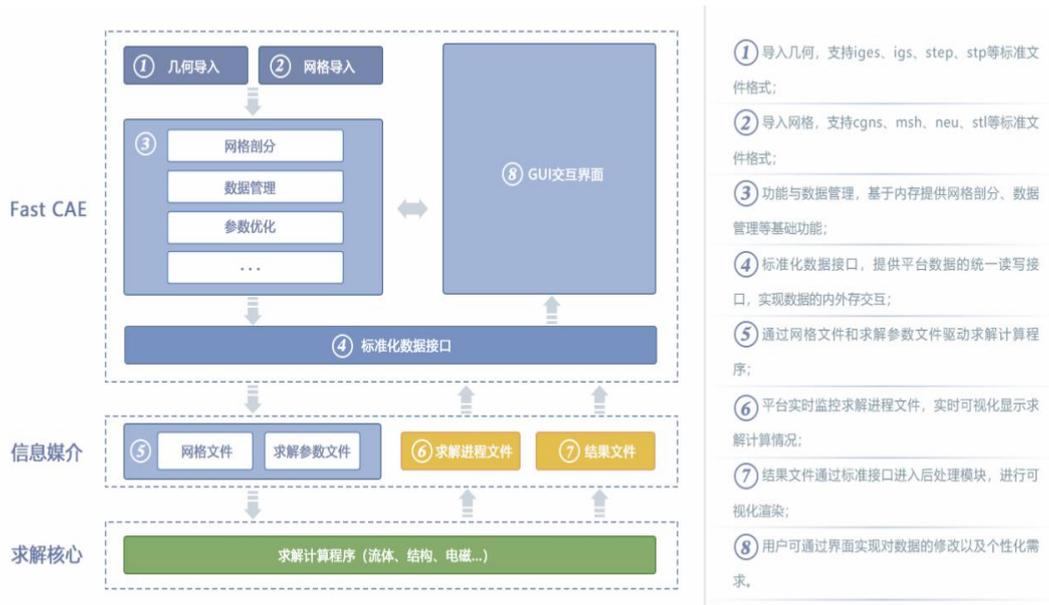


图 24 求解器集成流程示意图

标准的求解器程序集成过程可以简单地通过以下 8 个步骤完成。这些步骤包括基础的前处理、求解器参数设置、求解器程序的驱动，以及求解结果文件的后处理等。

(1) 导入几何文件，当前 FastCAE 框架平台支持 iges、igs、step、stp 等标准文件格式，导入后几何文件可以在前处理窗口显示；

(2) 导入网格文件，当前 FastCAE 框架平台支持 cgns、msh、neu、stl 等标准文件格式，导入后几何文件可以在前处理窗口显示；

(3) 功能与数据管理，基于内存操作，提供网格划分、数据管理等基础功能，高效提供数据转换和传输需求；

(4) 标准化数据接口，提供平台数据的统一读写接口，实现数据的内外存交互；

(5) 通过网格文件和求解参数文件驱动求解计算程序，求解计算程序支持以黑盒方式提供，包括可执行程序 and 代码类库等方式；

(6) 平台实时监控求解进程，实时可视化显示求解计算情况，通过 UI 端日志输出端口打印求解程序日志，通过进度条显示求解器求解进度信息；

(7) 结果文件通过标准接口进入后处理模块，进行可视化渲染；

(8) 用户可通过界面实现对数据的修改以及个性化需求。

4.5 相关文档和示例

(1) FastCAE 官网地址如下，可以查找相关文档及案例资源：

<http://www.fastcae.com/index.php>

(2) FastCAE 使用相关文档

FastCAE 使用文档主要包含《功能使用说明》和《定制插件使用说明》两部分。其中，《功能使用说明》详细介绍了 FastCAE 平台搭载的前后处理功能及其操作方式。该部分

还包括 FastCAE 在使用层面上的设计思路。另外，《定制插件使用说明》则详细介绍了定制插件的操作使用方式。使用定制插件无需编写代码，即可基于 FastCAE 实现个性化定制。

详细的文档已在 FastCAE 官网发布，请参考下面提供的链接：

<http://www.fastcae.com/index.php?mod=document>

(3) FastCAE 开发相关文档

FastCAE 开发相关文档主要包含以下四个：

- 《代码结构与 API 说明》详细介绍了 FastCAE 代码结构与设计思想，将代码中重要的 API 进行了汇总说明。
- 《Python 命令说明》介绍了目前 FastCAE 平台封装的 Python 接口，以及各个接口的功能。
- 《Python 功能拓展》介绍了如何利用 Python 语言进行自定义的功能拓展，以及如何调用新拓展的功能，并通过具体示例具体说明。
- 《插件开发指南》介绍了 FastCAE 开发的插件接口和插件类型，并通过具体示例的形式对开发流程进行说明。

详细的文档已在 FastCAE 官网发布，请具体参考下面的链接：

<http://www.fastcae.com/index.php?mod=document>

(4) 开发示例

FastCAE 开发示例包含两类：自研求解器集成和第三方求解器集成。其中，自研枪炮内弹道计算程序集成示例（可视化定制）从基本的框架平台使用入手，通过集成弹道计算程序，实现了基于 FastCAE 的定制软件，包含基本的前处理、求解和后处理等功能。

另外，Fluent、OpenFoam 和 Abaqus 集成示例则是对主流常用商业软件的封装和定制化集成。通过 FastCAE 自身的集成能力，配合平台前后处理模块驱动计算软件，并最终实现了界面和流程的定制化需求。

详细的示例已在 FastCAE 官网发布，请具体参考下面的链接：

<http://www.fastcae.com/index.php?mod=document>（开发示例分享）

5 FastCAE 生态构建

5.1 生态构建流程

FastCAE 的生态建设分为三个阶段，分别是：开源底座平台、构建开放生态和服务应用场景。

在开源底座平台阶段，FastCAE 致力于解决软件产品的持续迭代升级基础问题，为多学科团队的协作提供标准和规范。

在构建开放生态阶段，FastCAE 致力于建立复杂产品不同阶段合作创新平台，为先进技术整合模式创新提供机制。

在服务应用场景阶段，FastCAE 着重于服务于工业应用场景。该阶段的目标是检验工业应用场景产品的功能和质量，并提供一个试验田，以实现从产品到商品的转化。



图 25 生态构建流程

5.2 研发生态与应用生态

FastCAE 平台建立了两个生态体系：研发生态和应用生态。

在研发生态方面，基于 FastCAE 平台架构与标准，并通过开源协作模式以调动开源社区开发者和开源资源的力量，为拥有 CAE 内核的用户提供了前后处理、GUI 定制等集成服务。最终，这将形成 CAE 软件产品。

在应用生态方面，FastCAE 为不同工业领域用户需求量身定制，可快速整合基于 FastCAE 平台研发的国产 CAE 软件，并形成完整的国产化行业仿真解决方案。同时，在工程应用过程中，FastCAE 验证软件能力并听取用户对软件的新需求，以此实现正向迭代软件产品。



图 26 开源研发与应用生态示意

5.3 开源协议及托管平台

FastCAE 的开源宗旨是希望更多的 CAE 核心算法开发团队能够快速将其基础理论成果转化为产品。因此，FastCAE 采用了比较宽泛的开源协议，鼓励用户自由使用。

表 2 FastCAE 项目开源托管地址

程序源码 (Windows)	GitHub	https://github.com/DISOGitHub/FastCAE
程序源码 (Windows)	码云 (Gitee)	https://gitee.com/DISOGitee/FastCAE
程序源码 (Linux)	GitHub	https://github.com/DISOGitHub/FastCAE_Linux
程序源码 (Linux)	码云 (Gitee)	https://gitee.com/DISOGitee/FastCAE_Linux

FastCAE 采用 BSD-3 开源协议，基于 FastCAE 开发 CAE 软件版权归开发者所有，并可自由进行商业推广。在使用过程中，如需技术支持可以选择购买相关服务。

- 开源免费：任何个人及单位均可以使用本平台进行学习研究以及开发商业程序。

- ✓ 平台使用过程中遵守 BSD 开源协议;
- ✓ 包含系统所有源码、功能及文档等内容;
- ✓ 可通过文档及社区进行学习交流。

- 去除版权: 对自主研发 CAE 软件, 想在发布的产品中去除开源协议声明的用户。

- ✓ 可去除开源代码中的版权声明文件;
- ✓ 包含系统所有源码、功能及文档等内容;
- ✓ 可通过文档及社区进行学习交流。

- 技术支持: 对在平台使用过程中, 希望获得开发团队深度技术支持的用户。

- ✓ 提供 5 × 8 小时的在线技术支持;
- ✓ 提供 20 小时平台使用培训课程;
- ✓ 每年赠送一个软件去除版权声明授权。

5.4 FastCAE 生态成效

经过三年的积累, FastCAE 采用开源模式, 实现了业务、技术和人才的协同快速发展。在过程中, FastCAE 积极参与组织开源学院培训、开源工业仿真软件集成大赛以及多次的主题演讲与宣传。FastCAE 通过工业仿真软件集成服务供需平台, 推送了 27 期近 50 余项开源项目, 并吸引了军工单位、高校院所以及企业用户 40 余家。FastCAE 拥有 600 余位开源

用户及潜在开发者，并形成了 240 余款自主 CAE 软件。FastCAE 的开源项目参与了国家重大项目中的 8 项，并参与了工业软件领域国家标准及专著 2 项。FastCAE 还参与了 20 余个自主 CAE 及开源组织。同时，FastCAE 的公众号关注度近 3000，微信和 QQ 社群用户达到 2000 余人。



图 27 开源生态取得成果

5.5 FastCAE 集成案例

FastCAE 经过多年的发展，目前已经完成了 240 余款国产 CAE 软件，涵盖了结构、流体、热传、电磁等多个领域，并被广泛应用于 40 余家高校、研究所和企业等单位。FastCAE 通过不断的创新和开源合作，为行业带来了丰富的产品和先进技术，并为行业的发展做出了积极的贡献。

5.5.1 并行有限元压印成形仿真软件 CoinFEM

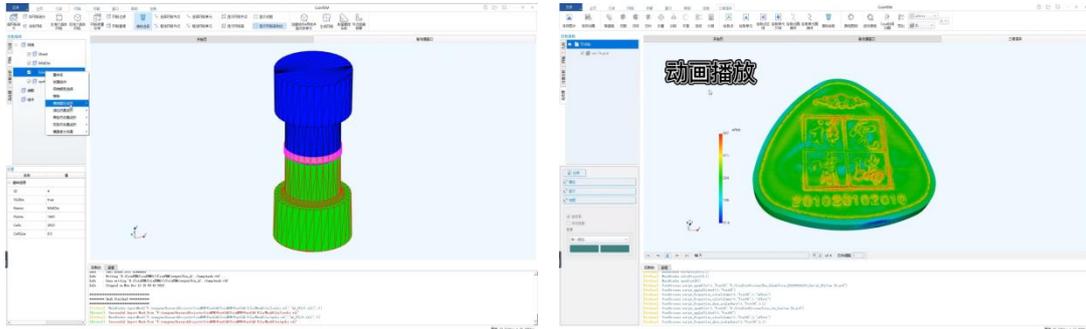


图 28 CoinFEM 软件界面

这个案例来自江苏大学的许江平老师团队。他们基于开源国产工业软件集成开发平台 FastCAE，从锻造行业“十四五”中，发现了数字化和具有独立知识产权的压印成形软件的需求，开发了并行有限元法的压印成形仿真软件 CoinFEM。

CoinFEM 软件通过多次现实试验积累了经验，利用有限元虚拟试模，实现了精密浮雕压印成形仿真分析。同时，针对模拟时间较长的问题，改进了有限元法的并行求解，显著提高了软件的模拟效率。

并行有限元压印成形仿真软件 CoinFEM 具备很多个性化功能，比如坯饼、模具创建，pvd 文件动画生成等，并且基于 Gmsh 开发了六面体网格算法，实现了模型六面体划分等功能。

CoinFEM 运用 MPI 并行和 OpenMP 并行技术，大幅提高了有限元求解器的计算效率。与已经商业化的两款软件相比，

CoinFEM 的并行加速比要高于商业软件，并且 CoinFEM 已经达到了商业化水平。

5.5.2 船舶复杂海况下耐波性预报软件 VEROM

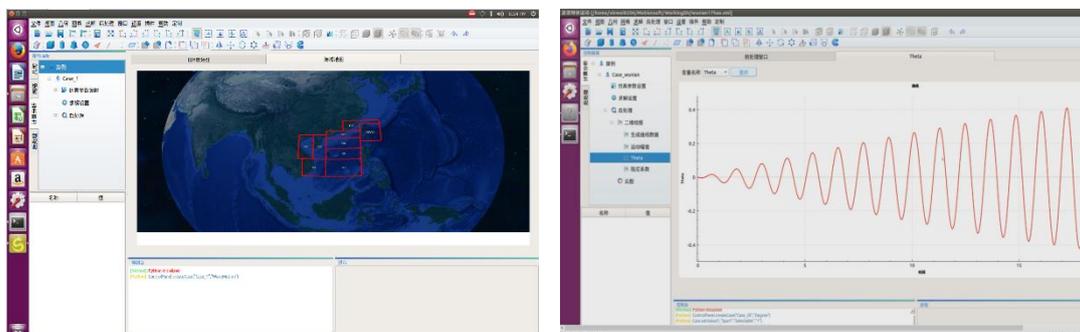


图 30 VEROM 软件界面

这个案例来自于大连理工大学姜宜辰老师团队，他们基于 FastCAE 集成 OpenFOAM 和自研求解器等内容，研制了船舶复杂海况下耐波性预报软件“VEROM”，实现了船舶耐波性预报、水动力阻尼预报业务流程的集成，以及软件计算结果的可视化，能够支撑波浪物体运动系统的推广和应用。

船舶在海上航行时，经常遇到强风巨浪等恶劣海况，这对船舶稳定性和航行安全构成了巨大的威胁，甚至会导致船舶倾覆。船舶在随机波浪中的动力特性也会受到一些非线性和随机效应的影响，这种非线性随机运动对船舶倾覆机理的分析有重大的帮助。

科学计算的结果往往是抽象的、专业性很强的图表和数据等，然而借助可视化技术，对海浪中船舶的运动进行模拟，

可以帮助设计人员更直观地分析科学计算的结果，进一步掌握波浪中船舶的运动响应情况，最终达成船舶安全航行的目标。

波浪物体运动软件使用了 OpenFOAM 字典参数设置，并对工程树节点和参数界面进行了定制化研发。这个项目意识到了软件需求分析在软件开发中的至关重要地位。合理的数据结构能够减少软件开发的工作量，使软件的逻辑性更具清晰性。

5.5.3 等离子体仿真软件 EasyPSim

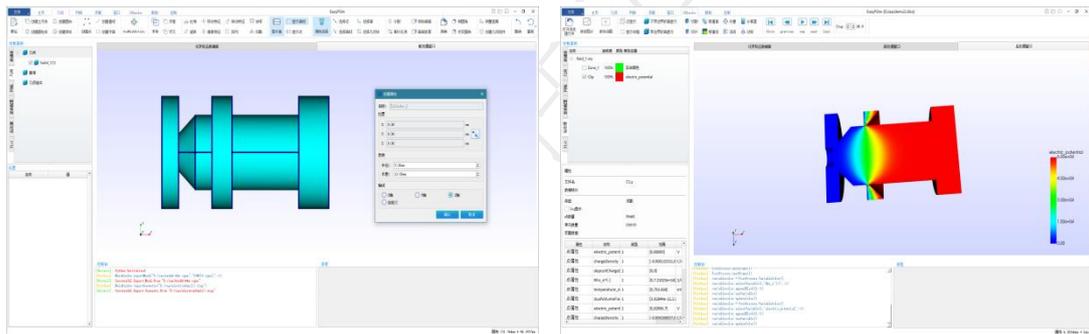


图 31 EasyPSim 软件界面

这个案例来自上海普莱斯麦科技有限公司。他们基于开源国产工业软件集成开发平台 FastCAE，自主研发了等离子体仿真软件。软件采用三维/二维非结构化网格，核心算法是三维非结构化网格 PIC-MCC（粒子云 - 蒙特卡洛碰撞）。

这款软件具有易于使用的前后处理器；非结构化非均匀网格，适应复杂几何形状；边界面分组定义，方便模拟粒子

壁面反应等特点，同时还能处理二次粒子发射、溅射等多种碰撞反应，实体及属性分组定义，方便设置金属和不同介质材料属性，以及区域并行，适应大规模并行计算等要求。

EasyPSim-PIC3D 求解器能够仿真带电粒子和电磁场相互作用，以及带电粒子之间和带电粒子与中性气体之间的多种碰撞反应。它有助于科学工作者和工程师掌握非线性复杂等离子体物理过程中的物理图像以及背后的物理机制。

该软件可以用于电子枪、离子源、辉光放电、CCP 放电、DBD 放电、潘宁放电、磁控溅射、电推进、航天器表面充电等模型的计算，并支持用户定制开发和新功能扩展。

5.5.4 计算力学降维方法软件

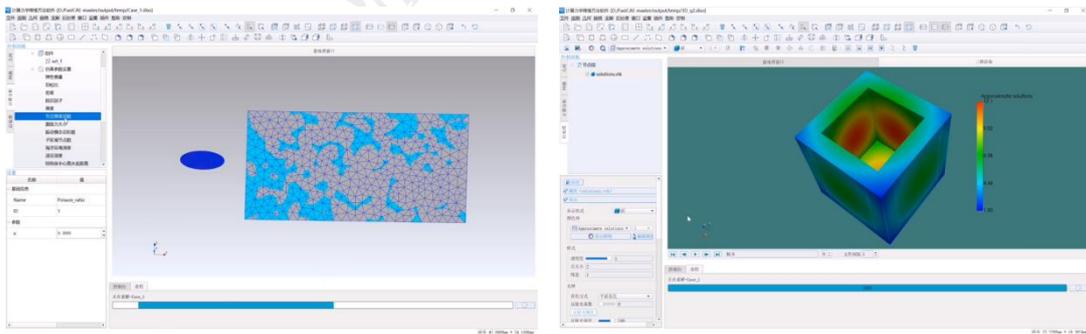


图 32 计算力学降维方法软件界面

这个案例来自河海大学傅卓佳老师团队，团队基于开源国产工业软件集成开发平台 FastCAE，引入团队所发展的计

算力学降维方法作为核心求解器，形成相应的计算力学降维方法软件，可用于曲面扩散动力学和结构振动声辐射分析问题求解。

计算力学降维方法软件基于 Python 脚本语言，采用模块化思路进行开发。以局部配点法和半解析边界配点法两种新型计算力学降维方法为核心算法，开发了自主可控的开源求解器，支持主流计算机语言平台调用。随后将数值求解器封装为 exe 可执行文件，结合 FastCAE 前后处理模块，集成了团队所发展的新型计算力学降维方法，聚焦曲面薄体结构热力学与空天海洋装备振动声辐射分析，形成了自主可控的国产软件。

计算力学降维方法软件可应用于科学研究和工程计算，为相关领域数值方法的比较研究和新算法的验证分析提供数值参考。它可以为曲面薄体结构热力学问题、海洋和空气中环境中荷载作用下复杂结构的振动响应以及水声传播行为的快速预报提供准确可靠的数值计算结果，并为工程操作和设计提供指导信息。

6 FastCAE 发展规划

6.1 技术发展规划

FastCAE 平台采用的是 C/S 架构，并考虑了跨平台运行和集群部署等特性。但目前 FastCAE 框架功能模块的力度相

对较大，后续会进一步细化平台功能单元，为上层应用提供更加灵活的扩展性。同时，还要考虑 B/S 架构的融合，打通软件级和业务级的底层数据。

团队计划制定统一共性的底层数据结构以及核心算法的调用接口。采用统一的定制化引擎发布软件，支持 C/S 与 B/S 异构开发模式。这将有助于形成面向各领域的工业仿真 APP 及多软件协同仿真平台。



图 33 双路线技术架构

6.2 产品发展规划

基于 FastCAE 平台现有的开源模式，进一步寻求商业模式拓展，坚持底座、共性技术开源，并采用专有模块/组件销售的模式。面向自主 CAE 软件的研发、应用、教育，推出系列产品。



图 34 短期产品规划

（一）各学科集成模板。在 FastCAE 运营和服务的过程中，一些用户希望在通用集成框架基础上，针对具体学科领域提供完整的软件集成解决方案，以指导用户的求解器开发及产品化。这些解决方案包括界面布局、交互功能、参数输入和结果可视化等。因此，基于 FastCAE 开源框架，团队推出了面向结构、流体、电磁等不同学科领域推出对应的集成模板，并采取收费模式进行推广。

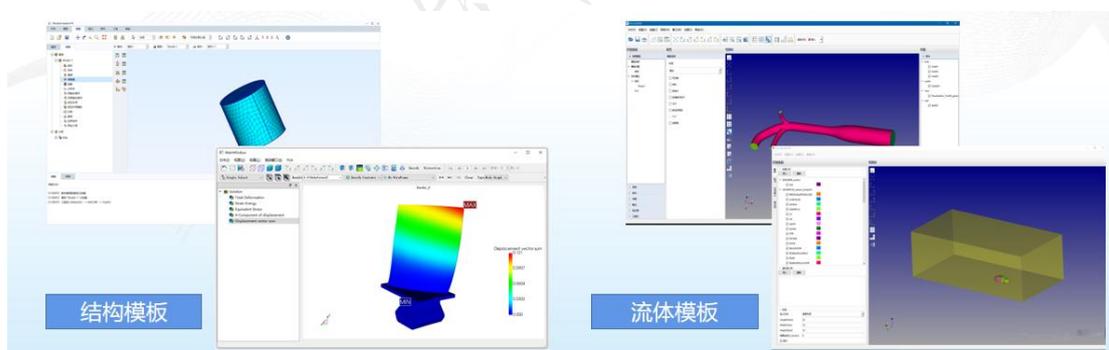


图 35 学科模板界面

（二）低代码设计平台。低代码平台两个核心价值。一个是帮助求解器用户快速开发产品。通过低代码设计平台，采用可视化定制开发模式和逻辑设计器，软件界面 70% 的开发工作可以实现，充分利用平台集成共性功能组件，提高研发效率。平台中将不断补充免费组件和收费的高级功能组件。

另一个价值是，通过低代码设计平台可以辅助快速构建原型，在软件研发初期可快速搭建原型，降低开发者与用户的沟通成本，减少由理解不一致导致后期项目的不确定性。

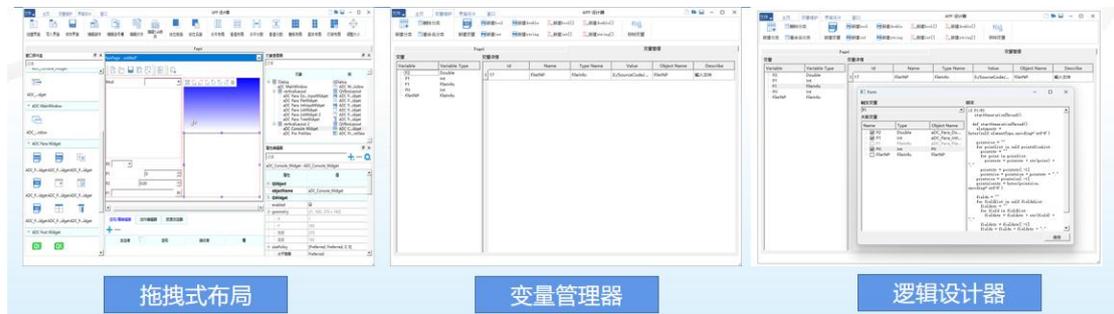


图 36 低代码设计平台界面

（三）CAE 软件能力集成和应用平台。对于大型集团企业来说，在构建自主研发能力的同时，需要一套完善自主软件集成及应用平台。平台能够持续吸收国内优秀的软件产品，同时自主开发的核心程序。它能够实现从单个软件集成封装，到多个软件协同仿真，最终实现数据的统一管理利用。



图 37 集成和应用平台界面

（四）高端工业软件复合人才教学平台。平台主要面向国家工业软件领域紧缺人才培养需求，与高校（特软学院）共建高端工业软件复合人才实践平台。为课程教学和学生能力培养提供一个在线实践实训平台，以提升对自主软件开发和应用的能力。此外，也可作为校内各学科教师科研验证支

撑平台。

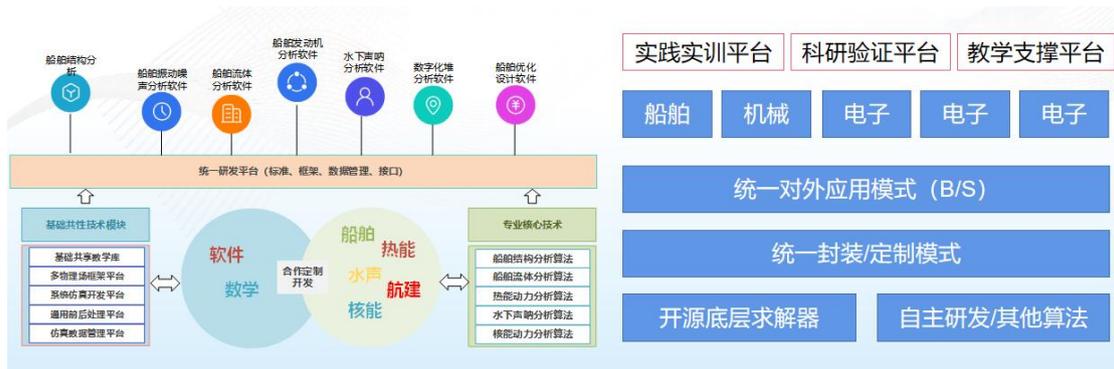


图 38 教学平台架构

7 结束语

本白皮书开头给出了 CAE 的定义，明确开源模式应用目标范围，接着讨论了 CAE 软件相关的关键技术；分析了我国 CAE 软件现状与挑战，探讨 CAE 框架开源模式的必要性、优势、目标和路径等内容；介绍了 FastCAE 架构体系、功能模块及相关文档等；阐述和展示了基于 FastCAE 平台的生态构建流程、代码托管情况、生态成效及典型案例；最后，总结了 FastCAE 未来一段时间产品的规划与盈利模式。

受限于编者知识范围与行业经验的局限性，有些观点与内容难免存在偏差和错误之处还请谅解和指正，更重要的是能否对 CAE 领域从业人员有一定启发作用。同时，呼吁和鼓励大家一同探索和参与 CAE 开源底座平台研发、CAE 开源生态构建、CAE 开源盈利模式实施，集众智，聚众力，加速自主 CAE 软件产品化进程！

8 附录：参考文献

- [1] 孙东印, 司建明, 李郁. 综述 CAE 技术的发展和应⽤ [J]. 现代制造技术与装备, 2011 (2): 25-27.
- [2] 张树桐. 浅谈计算机辅助工程 (CAE) 的发展及应⽤ [J]. 科技传播, 2010 (16): 232-233.
- [3] Kodyalam, G. N. Vanderplaats, H. Miura. Structural shape optimization with MSC/NASTRAN [J]. Computers & Structures, 1991, 40 (4): 821-829.
- [4] 钟万勰, 陆仲绩. 紧密结合工程 实现自主 CAE 软件产业跨越式发展 [J]. 工程研究 - 跨科学视野中的工程, 2009, 1 (01): 34-38.
- [5] Feng Kang. Difference Schemes Based On Variational Principle [J]. Journal of Applied and Computational Mathematics, 1965, 2 (4): 238-262.
- [6] 孙侠生, 段世慧, 陈焕星. 坚持自主创新 实现航空 CAE 软件的产业化发展 [J]. 计算机辅助工程, 2010, 19 (01): 1-6.
- [7] 吴圣川, 吴玉程. ALOF——新一代三维疲劳裂纹扩展分析软件 [J]. 计算机辅助工程, 2011, 20 (01): 136-140.
- [8] 袁明武, 陈璞, 郑东, 张会杰, 石艳华, 孙树立, 黄吉锋, 杨罗宾. 微机结构分析通用程序 SAP84 (版本 4. 0) [J]. 计算结构力学及其应⽤, 1995 (03): 298-30.
- [9] 胡平, 卫教善. 冲压成形模具分析软件——KMAS [J]. 模具制造 2014 (06): 9-11.
- [10] 张洪武, 陈飙松, 李云鹏, 张盛, 彭海军. 面向集成化 CAE 软件开发的 SiPESC 研发⼯作进展 [J]. 计算机辅助工程, 2021, 20 (02): 39-49.

