

# CAE软件架构设计

原创 邓子平 [多物理场仿真技术](#)

收录于合集

#仿真研发工具 25

#软件研发测试工程师 17



这篇文章最早发表于2014年，是多次技术培训的基础。五年多过去了，回头来看，在仿真技术领域，除了AI对其有一定影响外，其它并无实质性的发展。依旧是已有软件每年更新版本；硬件要求换代升级；行业巨头进行收购。这也从侧面说明了长期技术积累，开发硬核产品，是发展工业仿真软件唯一可行的路径。

-----正文-----

这里的CAE是广义的，包含了传统意义上的 CAD/CFD/EDA/CAE/CAPP等

本文的设计主要覆盖软件工程流程中的[概要设计和详细设计](#)。因为客观原因，CAE软件与软件标准开发流程有所不同，设计文档更倾向基于可快速实现的[原型开发](#)。

设计中并不强调某一模块的功能，也不追求某一方面的性能效率，而是基于软件工程，着重搭建一个通用性，可靠性，稳定性，扩展性，可测试性，维护性优秀的CAE软件平台。基于此平台，既可以开发大型通用有限元软件，也可以快速开发出行业CAE软件产品。

## 第一部分：模块划分

根据功能分以下几大[模块](#)：

1. 输入输出（Input/Output或 I/O）
2. 几何
3. 有限元模型
4. 后处理器
5. 求解器
6. 图形

- 
7. 公共模块
  8. 高性能计算（HPC）
  9. 参数优化设计
- 用例图（略）

## 第二部分：详细设计

### 1. 输入输出模块(Input/Output)

1.1.文件的读入与写出。文件类型包括：

1>. 软件自定义的工程文件

2>. 标准的CAD文件 (DWG/Step/IGS/SAT/X\_T/STL/Model/等)

3>. 标准有限元模型文件 (bdf/cdb/inp/k/NEU/ModelFlow/I-deas/Ansa/Mar/Admin等)

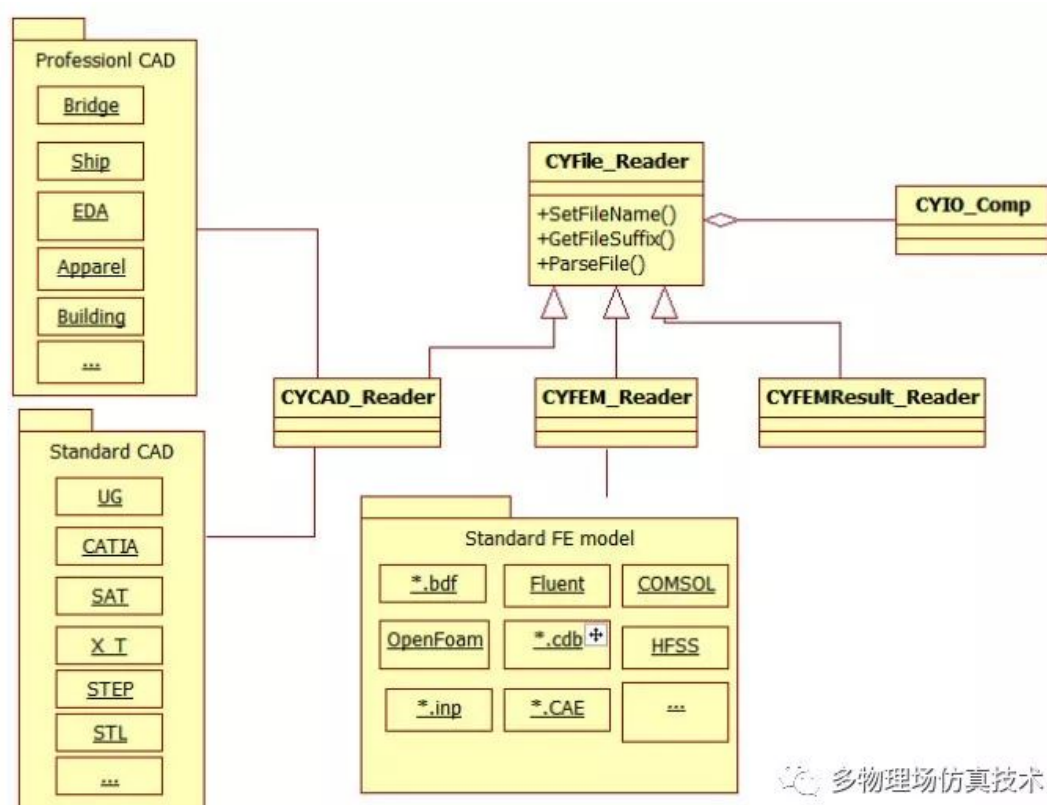
4>. 标准的行业CAD文件 (制衣CAD格式, PCB板CAD格式等)

需要说明的是第四种文件, 该文件的格式数据通常包含了几何描述信息和属性, 几何描述信息是指无几何的拓扑信息 (比如一个长方体, 几何描述信息是用初始点坐标和长, 宽, 高四个参数来表示, 而没有实际的点线面体拓扑信息), 读入该类文件后, 需要用CAD内核重新建立模型。

类图

## 1.2. 外部接口

通常CAE软件能够供其他软件调用, 或者作为其中一个模块, 也能够实现参数化命令行调用。



## 2. 几何模块 (Geometry)

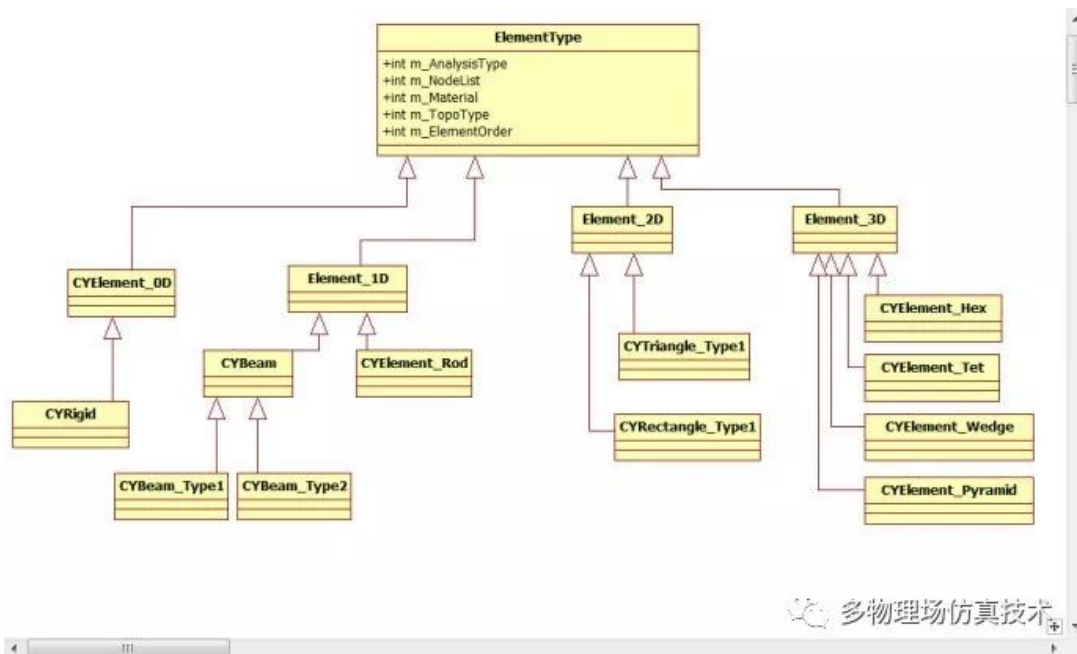
这里的几何指广义上的CAD, 包含了几何的创建, 编辑, 管理等。一般的商业CAE软件提供了CAD功能, 都比较简单。对于复杂的实际工程, 很少在CAE软件中建模, 而是在专业CAD软件 (Catia/UG/ProE/Inventor等) 或者行业CAD软件中建立几何模型, 然后导入到CAE软件中。所以CAD不是CAE软件的重点, 但是好的CAD模块能提高CAE仿真的效率, 避免外部CAD数据与CAE接口之间的损耗 (最典型的的就是CAD数据修补)。CAD建模本身也是一项技术含量很高的工作 (参数建模, 约束建模), 而且Catia/UG/ProE/Inventor这些产品在CAD方面已经做的非常好了。CAD与解方程组数值算法一样, 也是基础性学科领域。

这里不涉及通用的CAD建模, 重点在建立CAD模板。所谓的模板是指可反复使用, 用户输入参数或者导入模板参数文件, 即可建立所需的CAD模型, 不需要用户手工去生成。 (比如用户定义了一架飞机模型参数, 参数可以保存为文件, 生成实体几何后, 修改机翼长度的参数, 可再次生成模型而不用做其他修改)。这也是专业CAD软件的优势所在。

CAD建模, 首先需要内核, 目前商业的3D CAD内核有Parasolid和ACIS, Granite, 开源的OCC。国内的CAD软件长期没有自主核心技术, 在CAD内核方面也鲜有成熟产品。

## 3. 有限元模型(FE Model)

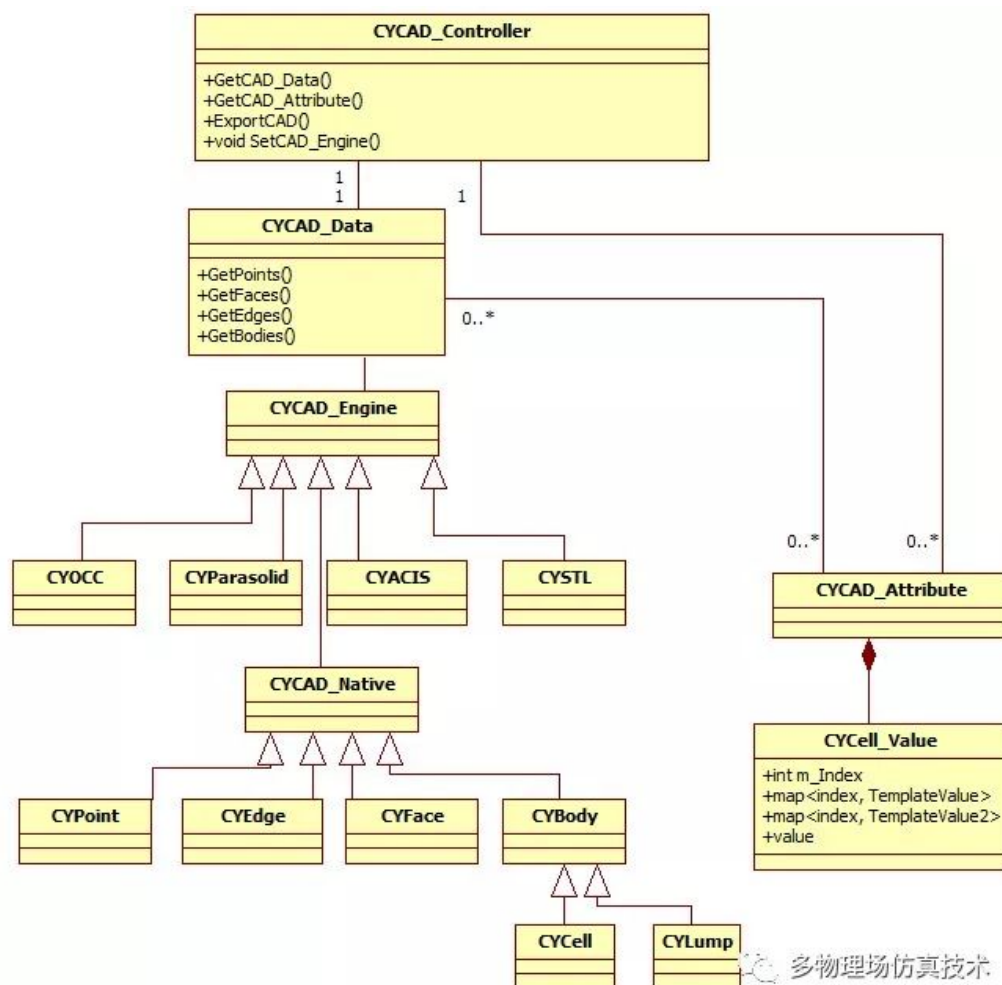
### 3.1. 单元



面向对象方法很适合构造有限元中的单元，ElementType为所有单元的基类。主要方法有：点的集合，材料，分析类型，阶次。根据单元的空间维数将单元划分为 0/1/2/3D单元。如需扩充新单元类型，在相应的单元类型上派生即可。

### 3.2. CAD和CAD属性（边界条件）

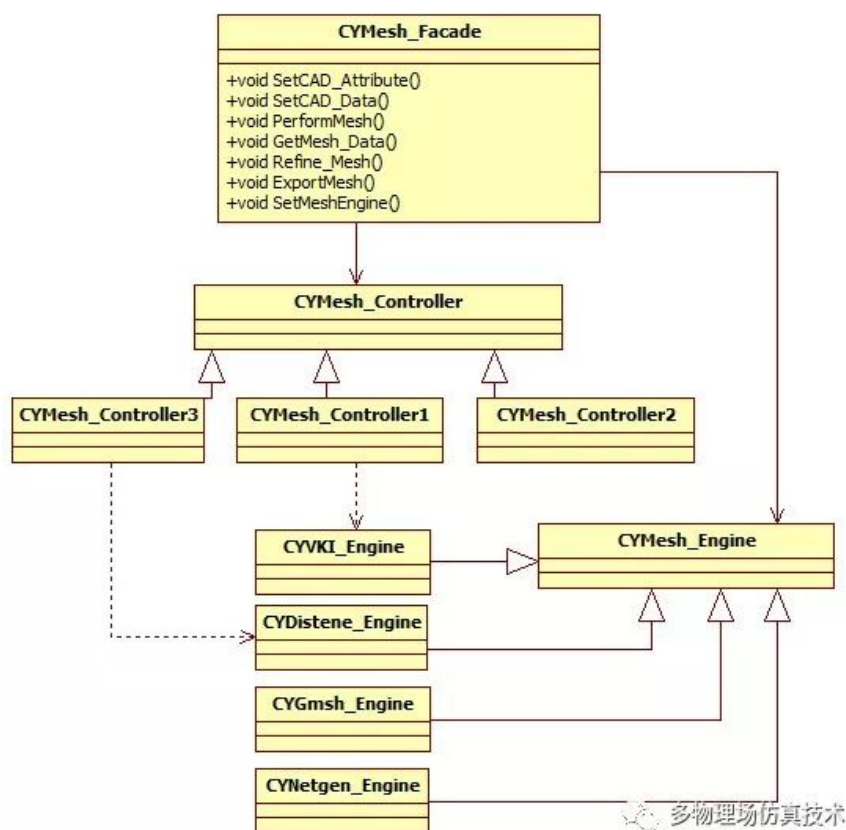
这里边界条件泛指任何在几何（点，线，面，体）上的属性（位移/荷载/温度/吸收边界/约束等）



CYCAD\_Controller 负责获得几何数据和附加在几何上的属性（边界条件）。CYCAD\_Data存储几何数据，CYCAD\_Attribute存

储与几何对应的属性。CYCAD\_Engine是CAD内核的接口，通过接口也可以调用自己开发CAD内核。基于该结构，实现了CAD与MESH的解耦，对于已有的CAD/Mesh接口，能实现最小限度的修改。

### 3.3. 网格划分



从名称可以看出采用了Factory和Facade模式，CYMesh\_Facade负责与外部的接口，主要是设置1. CAD数据，2. CAD属性（材料，荷载，温度，边界等），3.网格划分参数和策略。Controller主要负责Mesh流程，CYMesh\_Engine 是执行Mesh引擎的接口，可以根据实际需要选用网格引擎，以上选取了Gmsh，NetGen，Distene，VKI等，在此结构上，开发人员可以方便的对网格划分流程和网格引擎进行扩展。

### 3.4.网格属性

网格划分完成后，通常做法是把网格数据保存为规定的文件格式以供求解器调用。也有直接在内存中供求解器调用的，虽然提高了效率，但是不利于调试。对于自主开发的求解器，可以把网格导出为Ansys/Nastran等求解器的格式，以方便做Benchmark。

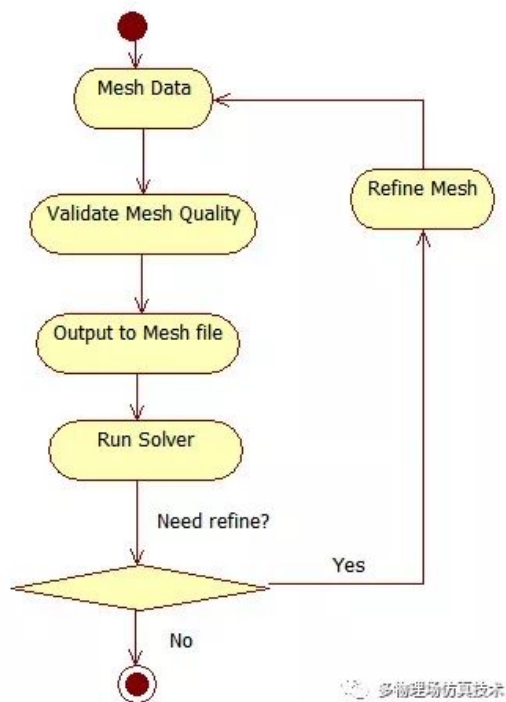
网格的数据包含了如下信息：

1. 节点信息：索引和坐标（Vertex）
2. 边信息：索引和点索引（Edge）
3. 面片信息：索引和边索引（Face）
4. 单元信息：索引和节点索引（Element）

通常以上信息只需得到 点和单元的信息，其它都可以求出。

5. 属性标签：加在几何上的属性会分配在相应的网格单元或者节点上。（边界条件/荷载/材料 等）

网格活动图：



说明：

1. Mesh Data为 网格数据
2. Validate Mesh quality 验证网格的质量，网格质量指单元的的形状的好坏，有通用的公式计算（比如最大角度，长宽比，Aspect ratio/Skew 等）。网格质量的好坏直接影响到求解精度
3. Output to Mesh file导出为网格文件
4. Run Solver 调用求解器
5. Need refine:根据求解器反馈的结果和预定义的收敛准则，判断是否需要加密网格
6. Refine Mesh: 加密网格

## 4. 后处理

后处理是对仿真结果的处理，包括可视化，归纳分析，导出报告，与实验数据对比等。技术上来讲没有太多瓶颈，主要是数据的组织，再就是大数据显示的效率。

- 3.1. 可视化主要包括等值线，云图，XYplot，动画等，
- 3.2. 归纳分析，是指对仿真的原始数据进行加工，得到所需要的参数，比如VonMises应力，S参数等。
- 3.3. 与实验数据对比，这个也是以后CAE仿真的一个发展方向：即如何将仿真得出的数据与实验数据，保证仿真数据具有实际参考价值。

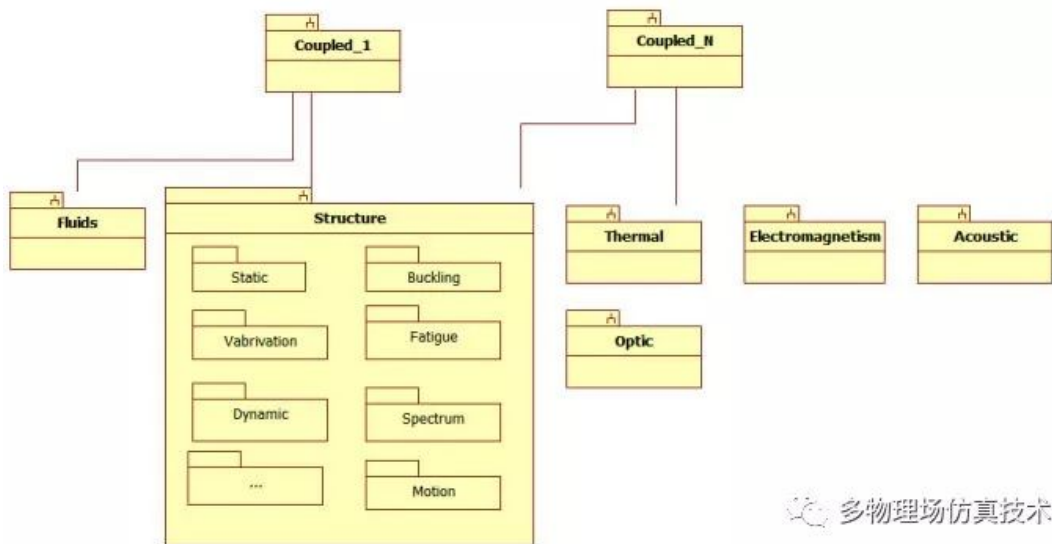
后处理主要用到**图形显示模块**。

目前市场上比较通用的商业后处理器：Enight, HyperView, Femap。

## 5. 求解器

求解器核心是求解偏微分方程(PDE)，有限差分/有限元/有限体积等数值方法二三十年前就已经很成熟，功能上没有太多难点。开发求解器主要在稳定性，扩展性，效率以及定制化等方面还有很多改进余地。开发求解器面临的主要问题是非技术问题，就跟键盘布局一样，大家用习惯了，再出来新的除非特别优秀或者有足够多的亮点，否则用户很难认可。拿求解器Radioss来说，Altair声称兼容Nastran，但是行业认可度并不高。另一个例子是COMSOL，COMSOL在求解器，前后处理上并无太多亮点，但打出了多物理场的旗号，并且在多物理场建模方面也确实提供了一些便利。





求解器涉及的领域有结构，电磁，热，声，光，流体等领域，可参考附件。

## 6. 图形

该模块包括以下几部分：

1. 几何模型，有限元模型，结果的可视化
2. 几何有限元模型的图形化编辑
- 3 GUI设计

1. 几何模型，有限元模型，结果的可视化

可视化开发工具首选OpenGL，使用OpenGL需要较深的图形学功底。目前绝大部分可视化工具都是基于OpenGL。也有些公司在OpenGL之上做了封装，提供了更高层次的调用接口。

开源可视化工具VTK，ParaView。

也有提供商业可视化工具的（VKI/HOOPS/Gravies/），价格不便宜。

2. 几何/有限元模型的图形化编辑

涉及到编辑几何，编辑网格。允许用户通过鼠标，输入等方式编辑几何和网格，支持更复杂的功能（比如装配体的网格组合）

CAE软件通常采用卡片式编辑，即在一个ListView中按Index显示所有内容，提供编辑，删除，添加等，在新的窗口中实现功能。

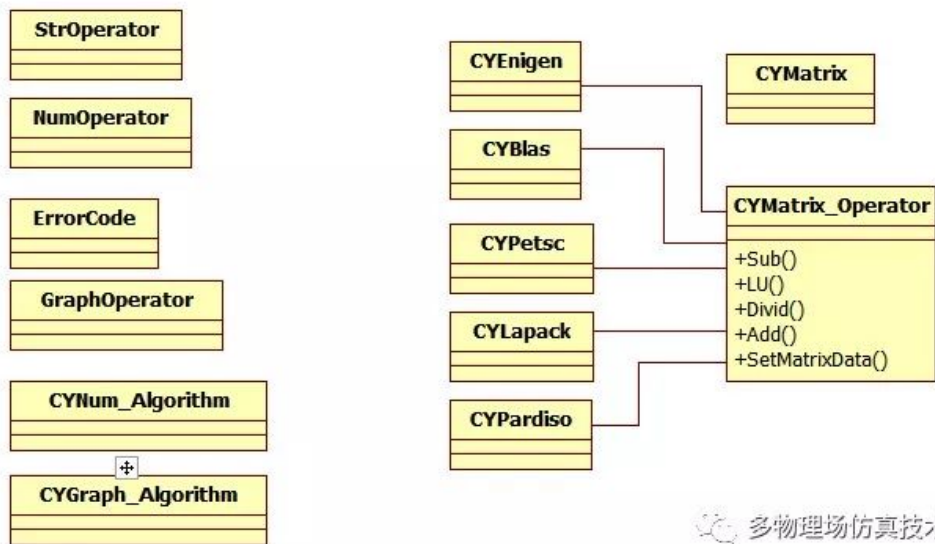
3. GUI

图形化用户接口开发工具有MFC，QT，WPF等。最近十年QT的发展已有超过MFC的势头。作为GUI开发工具，QT具有使用简单，不依赖平台，开发资源丰富等特点，可作为开发的首选。

因为GUI涉及到软件的每个部分，同样，为了建立兼容的CAE开发平台，在开发之初最好能确定GUI工具，以后就不再改动。

## 7. 公共模块

公共模块没有太多核心技术，实现也没有难点，但在CAE开发中相当重要，尤其到开发的中后期，公共模块的重要性更加突出。一个好的公共模块能大大提高开发测试效率。



多物理场仿真技术

公共库主要包括 字符操作，数值计算，基本数据结构，错误返回代码定义，图形算法，常用算法，矩阵类等。

CYMatrix\_Operator是定义的一个中间矩阵类，主要是统一矩阵操作的接口。考虑到求解器用的矩阵库各不相同，通过此接口可以统一，但性能上会有所降低。

## 8. HPC

### (High performance computation)

参考本公众号文章 FEM之求解器加速(1)---HPC简介

## 9. 参数优化设计

参考 FEM之优化算法(1)

总结：

1. 本文只是一个初步的架构设计，其中有很多细节很难用文档来描述。
2. 设计中参考了如下软件：

ANSA/Catia/SolidWork/Patran/Nastran/Ansys/Abaqus/HyperWork/HFSS/FEMAP/LMS/ADMIN/COMSOL/Cubit/SimLab

写文本的目的只想说明，不管是开发大型通用CAE软件，还是行业的CAE仿真软件，在技术上都没有问题。软件要想真正发挥作用，其准确性，稳定性，可靠性，以及性能等需要在实际工程中检验和迭代。