

计算机

工业软件底层技术剖析

证券研究报告

2021年11月04日

投资评级

行业评级

强于大市(维持评级)

上次评级

强于大市

作者

缪欣君

分析师

SAC 执业证书编号: S1110517080003

miaoxinjun@tfzq.com

行业走势图



资料来源: 贝格数据

相关报告

- 1 《计算机-行业研究周报:计算机行业2021年三季度报点评》2021-10-31
- 2 《计算机-行业点评:北交所开市在即,金融IT情绪及景气度有望持续提升》2021-10-31
- 3 《计算机-行业研究周报:周观点:华为开发者大会2021总结》2021-10-24

1、工业软件核心模块的国产替代化道路“崎岖难行”

工业软件核心模块包括几何内核、几何约束求解器和网格剖分求解器。国外软件公司在这些领域皆布局运营数十年之久,不仅拥有核心技术,百万级客户群体,更构建了稳健的产业链生态环境。经过数十年迭代,绝大部分工业软件巨头都成为了产业链公司,拥有平台型产品,不仅是模块的供应商,同时也是其他 CAX 软件的供应商,因此国产工业软件的替代之路“崎岖难行”。

2、几何内核:达索、西门子两大阵营平分秋色,中望异军突起

几何内核方面,市场主要由西门子 Parasolid 和达索 ACIS 两大阵营占据,平分秋色。ACIS 的内核模块分为核心模块和可选模块,模块搭配方面更加灵活,另外 ACIS 采用了几何总线的商业模式,鼓励软件公司在 ACIS 上开发与 STEP 标准相兼容的集成制造系统,将软件公司的 CAD 产品绑定在 ACIS 几何总线上。西门子 Parasolid 是目前市面上最成熟的几何内核,相比于 ACIS,Parasolid 功能更加完备,稳定性更强,应用范围更广。中望 Overdrive 作为国产几何内核领头羊,拥有国内少有的实现商业化应用、在工业设计领域被大规模实践验证过的三维几何建模内核技术,发展势态良好。

3、几何约束求解器:国外软件公司市场垄断,DCM 一马当先

几何约束求解器是实现参数化特征建模的关键,参数化特征建模则是当前主流 CAD 的主要建模方式。除了 DCM,俄罗斯 LEDAS 公司开发的 LGS 被认为是仅次于 D-Cubed 的几何约束求解引擎,其已经为达索提供了 12 年的约束求解技术支持。国内方面,华天软件研发的 DCS 是完全自主研发的二维、三维约束求解引擎。

4、有限元分析:国外龙头厂商居多,网格剖分应用领域广阔

网格剖分为有限元分析的核心步骤,应用的领域包括固体力学、流体力学、传热学、电磁学等,应用范围广阔。CAE 的龙头厂商包括 ANSYS、ADINA 和 MSC。ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用类 CAE 软件。ADINA 是老牌通用有限元分析系统,技术成熟,集成环境包括自动建模、分析和可视化后置处理。MSC 软件产品线非常丰富,在 CAE 市场一直处于领导地位,收购了顶尖高度非线性 CAE 软件公司 MARC 等。

5、估值分析

重点推荐中望软件,从长期来看,考虑到中望有望从 CAD 成功拓展至 CAX 全产业链,叠加国产替代不断加速,随着未来公司产品力的进一步增强、品牌认可度不断提升以及大客户战略的持续有效推进,公司未来成长空间将持续向上打开。

风险提示: 市场竞争加剧;国内外疫情加剧;公司业绩不及预期

内容目录

1. 工业软件模块化，国产替代“道阻且长”	4
2. 几何内核：CAD 系统为皇冠，几何内核为明珠.....	5
2.1. 几何建模：产品信息化的源头.....	6
2.2. ACIS：模块化组件灵活搭配，几何总线构建模型共享渠道	7
2.3. Parasolid：西门子阵营成熟内核，功能齐备应用广泛.....	10
2.4. Overdrive：中望 3D 内核，国产内核之光.....	12
3. 几何约束求解器：参数化特征建模的实现者	14
3.1. 参数化特征建模：实体模型的工程特征化、参数化处理	15
3.2. 几何约束求解器：参数化制图和几何约束求解	17
3.3. 当前市场情况：国外市场垄断，DCM 独占鳌头	19
4. CAE 有限元分析：基于 CAD 建模的工程分析与物理仿真.....	20
4.1. 有限元网格剖分：CAD 几何模型离散化处理	21
4.1.1. 有限元网格剖分基本原则	21
4.1.2. 主流的有限元生成方法.....	23
4.2. CAE 软件多领域应用，行业龙头多为国外厂商	25
5. 核心观点.....	27
6. 风险提示.....	27

图表目录

图 1：CAX 软件各核心组件之间关系结构图	4
图 2：全球 CAX 龙头公司规模与成立时间.....	5
图 3：几何内核主要作用为建立、储存和处理几何模型.....	5
图 4：建模是产品信息化第一步	6
图 5：拓扑信息	6
图 6：实体由一组面围成，面由一组边组成，边由一系列点构成	7
图 7：应用通过接口调用相关模块并对底层数据进行修改	8
图 8：实体可以分为拓扑、几何和属性三类，每一类皆可细分	8
图 9：ACIS 构建模型的数据结构.....	9
图 10：ACIS 几何总线上模型数据皆可自由交换	10
图 11：Parasolid 总体结构.....	10
图 12：Parasolid 模型实体分为几何实体、拓扑实体和其他实体.....	11
图 13：Parasolid 数据读写，支持 X_t 文件和 X_b 文件.....	11
图 14：Overdrive 结构	12
图 15：ZW3D 平台业务逻辑.....	13
图 16：建立参数化特征模型.....	15
图 17：特征是一组具有确定约束关系的几何实体	15
图 18：参数化设计中，调整参数即可改变模型.....	16
图 19：参数化设计与特征建模相结合	16

图 20: 几何约束求解器结构.....	17
图 21: 输入一组参数制作圆.....	18
图 22: 几何约束求解流程.....	19
图 23: 参数化绘制二圆, 加入圆圆相切约束, 计算出相切路径并图像化展示, 最后相切.....	19
图 24: LGS 主要客户.....	20
图 25: 有限元分析基于 CAD 几何模型建立 CAE 有限元模型并进行工程分析.....	21
图 26: 网格剖分结果示意图.....	21
图 27: 高应力区局部加密示意图.....	22
图 28: 网格数量增加时, 计算精度提高, 计算规模也会增加.....	23
图 29: 从左到右单元阶次分别为线性、二次、三次, 节点数量和复杂度依次提高.....	23
图 30: 映射法将不规则模型映射成规则参数域, 再进行网格剖分, 最后反映射回去.....	24
图 31: 删除目标区域外的栅格, 再对内部栅格和边界栅格进行更细的栅格剖分.....	24
图 32: 三维与二维类似, 先对三维物体进行栅格剖分, 再对部分栅格进行更深入、细节的栅格剖分.....	24
图 33: 推进波前法通过循环定义前沿, 插入节点并生成新单元, 不断向内部推进.....	24
图 34: 拓扑分解法使用三角化算法将目标区域用尽量少的三角形完全分割覆盖.....	25
图 35: 节点连接法先生成 Dirichlet 图形和部分节点 (左), 再通过算法连接节点生成有限元单元 (右).....	25
图 36: 美国 ANSYS 公司.....	25
图 37: 美国 ADINA 公司.....	26
图 38: 美国 MSC 公司.....	26
表 1: 实体模型功能最全, 涵盖线框模型和表面模型的所有优点.....	7
表 2: ACIS 三接口: DI 函数、API 函数、类.....	9
表 3: ACIS 和 Parasolid 对比.....	12
表 4: ZW3D 核心技术.....	13
表 5: 部分约束以及约束表达.....	17
表 6: 主流几何约束求解方法以及优缺点.....	18
表 7: D-Cubed 2D DCM 与 D-Cubed 3D DCM 对比.....	19
表 8: 网格剖分常用单元和其应用情况.....	21
表 9: CAE 有限元分析软件应用领域.....	26

1. 工业软件模块化，国产替代“道阻且长”

根据财经十一人公众号，汽车装配流水线上，不同的组件由不同的部门专门生产，最后统一装配，如今的工业软件也拥有着这样的生产模式。**工业软件逐渐模块化，拥有复杂且相互关联的组成单元。**常见的工业软件产品中，大多是基于全球供应链开发，企业主要聚焦自己的优势领域，公司之间通力合作而实现。

CAD 软件，如 SolidWorks、Solid Edge、Inventor，一般要用到 70 个组件以上，**核心组件包括几何内核**（主要有西门子 Parasolid, 达索 ACIS），**几何约束求解器**（主要有西门子 DCM），**图形组件**（主要有 TECH SOFT 3D），**数据转换器**（主要有达索与 Tech Soft 3D）等，大部分 CAD 软件的基础框架都是基于这几款基础组件。

CAE 软件需要**网格剖分器的组件**（主要有 Distene 的 MeshGems）。CAM 软件需要涉及到加工路径的组件（主要有德国的 ModuleWorks 与英国的 MachineWorks）。CATIA、NX、Creo 等高端多学科 MCAD 会涉及更多的组件，其中有不少核心组件来自于第三方，甚至有些组件会来自竞争对手。

图 1：CAX 软件各核心组件之间关系结构图



资料来源：天风证券研究所

几何内核：几何内核是 CAD 最基础的核心组件，也是我们国家目前最关注的领域，主要的建模方式包括线框建模、曲面建模、实体建模、特征建模等。目前几何内核的两大主要阵营为西门子的 Parasolid（全球 200 多家客户）和达索的 ACIS（全球 100 多家客户）。

几何约束求解器：广泛应用在草图轮廓表达、零件建模参数表达、装配约束以及碰撞检查等场景中，为快速确定设计意图表达、检查干涉、模拟运动提供了强有力的支持，可帮助最终用户提高生产效率。约束求解引擎也是最基础的核心组件，目前最主要的产品是 D-Cubed DCM。目前正在使用 DCM 的知名 CAD 软件公司包括西门子、PTC、Autodesk 等。

CAE 网格剖分内核：主要用于仿真分析软件的网格划分，网格剖分内核方面主要的软件是法国的 MeshGems。

国产化替代在技术层面有一定难度。SolidWorks，Solid Edge，Inventor 等主流的 CAD 软件，代码量在 3000 万行到 4500 万行代码左右，大约需要 3000~4500 人一年以上的开发工作量。CATIA，NX，Creo 等高端软件是上述主流 CAD 软件开发工作量的 4 倍以上，这些高端软件的开发已经持续了数十年，并在与数十万、百万级最终客户持续迭代的过程中改进和实现。国产替代“道阻且长”。

图 2：全球 CAX 龙头公司规模与成立时间

公司	营收 (\$M)	人数	统计时间	公司成立时间	国家	来源
Siemens PLM	~\$4,600M	22,000	2019	1963	美国	数字化企业/CIMDATA
Dassault System	\$4,018M	20,000	2019	1981	法国	Yahoo Finance/ Wikepeida
Autodesk	\$3,274M	10,100	2019	1982	美国	Yahoo Finance/ Wikepeida
PTC	\$1,255M	6,169	2019	1985	美国	Yahoo Finance/ Wikepeida
Ansys	\$1,515M	4,400	2019	1970	美国	Yahoo Finance/ Wikepeida
MathWorks	\$1,050M	3,000(2018)	2019	1984	美国	Wikepeida
Altair Engineering	\$458.9M	2,950	2019	1985	美国	Yahoo Finance/ Wikepeida
MSC (Hexagon AB)	~\$280M	512(Linkedin), 1,300(2017 Wiki)	2020	1963	美国	Wikepeida/CIMDATA
ESI Group	\$139.4M	1,200	2019	1973	法国	Yahoo Finance/ Wikepeida
Siemens PLM (NX/CAM)	\$210M	-	2019	1963	美国	CIMDATA
Dassault System(DELMIA)	\$232.5M	-	2019	1981	法国	CIMDATA
Autodesk	\$115.3M	-	2019	1982	美国	CIMDATA
OPEN MIND	\$82.5M	300	2019	1994	德国	Homepage/CIMDATA
Tebis	\$61.4M	290	2019	1984	德国	Wikepeida
CNC Software	\$50.8M	329	2020	1983	美国	LinkedIn

资料来源：财经十一人公众号，天风证券研究所

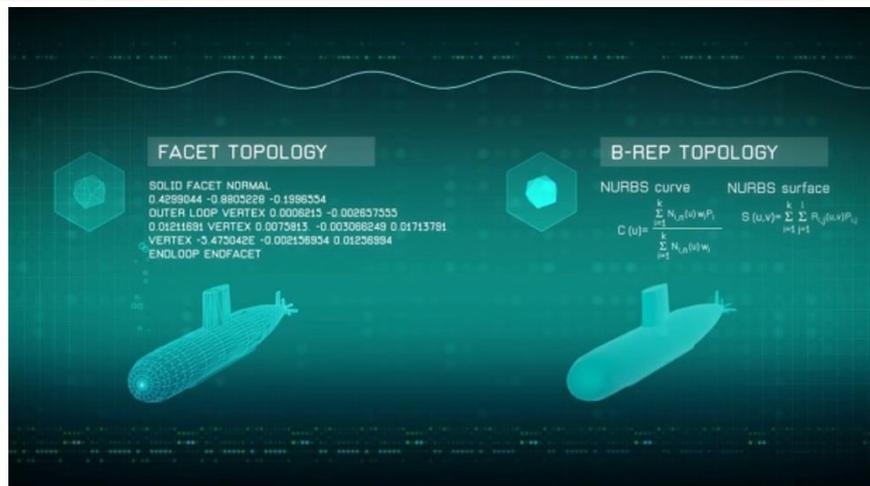
国外龙头公司经过几十年迭代，不仅技术层面“炉火纯青”，产业链生态环境也更加稳健。产业链生态环境不仅仅是模块的扩展，还包括专家团队，服务商，以及供应链，Siemens PLM 全球有 150 家技术合作伙伴，Solid Edge 有 289 家第三方合作伙伴，Dassault System 全球有 934 家技术合作伙伴，这些合作伙伴不仅是模块的供应商，同时也是其他 CAX 软件的供应商，在工业设计软件的巨头绝大部分都是产业链公司，其产品也是平台型产品，已经形成非常稳健的产业链生态。

2. 几何内核：CAD 系统为皇冠，几何内核为明珠

当下，工业主流的数字化设计与制造都需要用到 CAD 系统这样的工具，而 CAD 系统的基础底层支撑就是 CAD 平台，又称几何内核。几何内核本身市场很小，但它是所有 CAD 系统的基石，如果将 CAD 系统比较为皇冠，几何内核就是皇冠上的明珠。

几何内核的主要作用在于建立、储存并处理几何模型，对外提供接口以方便上层 CAD 应用的开发。维度方面，几何内核最早只支持简单的二维图素，到 70 年代中期开始可以表达复杂拓扑结构的三维图素；建模方面，几何内核从简单的线框模型过渡到曲面模型和实体模型，再到目前广泛使用的 B-Rep 模型和参数化特征模型。

图 3：几何内核主要作用为建立、储存和处理几何模型

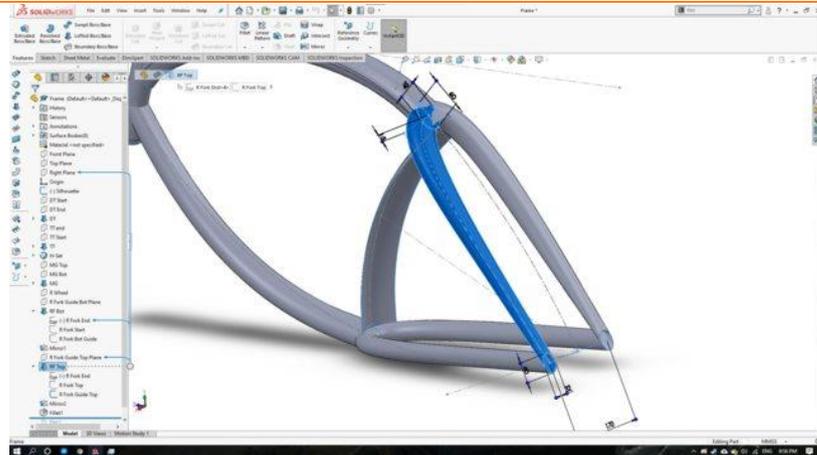


资料来源：Siemens 官网，天风证券研究所

2.1. 几何建模：产品信息化的源头

几何建模是将现实世界中的物体及属性转化为计算机内部可数字化表示、可分析、控制和输出的几何形体的方法。在 CAD 中，几何建模是产品信息化的第一步，它为产品设计分析、工程图生成、数控编程、数字化加工与装配中的碰撞干涉检查、加工仿真、生产过程管理等提供有关产品的信息描述与表达方法，是实现计算机辅助设计与制造的前提条件。

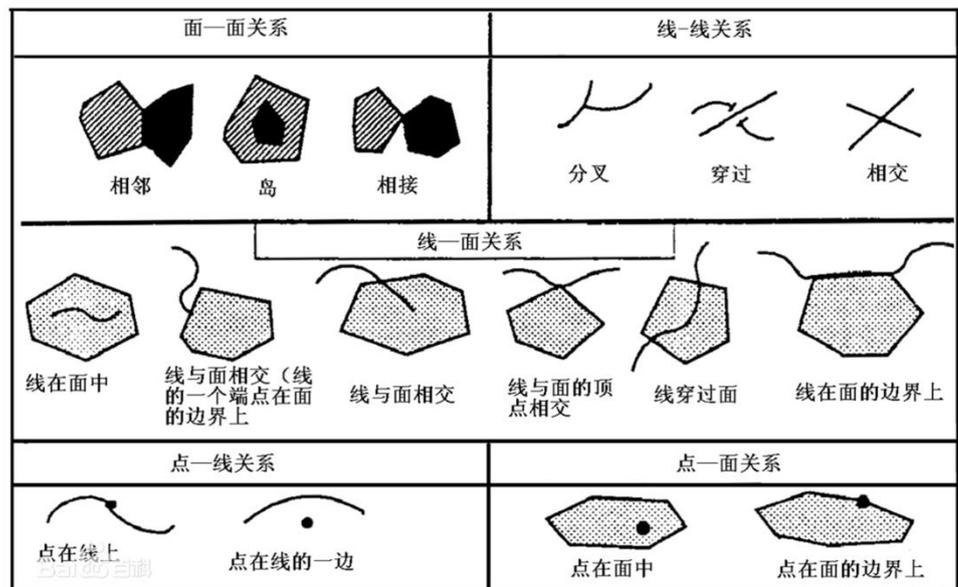
图 4：建模是产品信息化第一步



资料来源：Reddit，天风证券研究所

几何建模即是**将物体的几何信息和拓扑信息转化成数字化模型的过程**。几何信息一般是指物体在欧氏空间中的形状、位置和大小，这些信息可以用几何分量的方式表示，例如空间里的一点可以用坐标值 x,y,z 表示，空间里的一条直线可以用方程式 $Ax + By + Cz + D = 0$ 来表示。拓扑信息则是指物体各分量的数目及其相互间的连接关系，主要关系包括点、线、面之间的相邻、相交、相切、包含等关系。

图 5：拓扑信息



资料来源：CSDN，天风证券研究所

几何建模构造的模型一般有三种：**线框模型、表面模型和实体模型**，现有的 CAD 系统常采用**实体模型**。

线框模型定义了点和线，适合线框图的显示，同时所需数据量小，但缺点在于存在二义性，无法描述含有曲面的物体，且无法用于工程分析和物理计算。

表面模型定义了点、线和面，可以描述物体的表面特性，从而进行数控加工程序计算，在数控加工中刀具轨迹的计算和物体表面特性有很大关系，直接影响到刀具轨迹的生成，但缺点在于不具备零件的实体特征，不能在工程分析、物理特性计算方面使用。

实体模型定义了点、线、面、环和体，是以“体-面-环-棱边-点”的五层结构信息表示的模型。体是由表面围成的封闭空间，表面是由棱边围成的区域，其内部可能存在环，例如一个孔在一个表面形成了一个环，这些环也是由棱边组成。**实体模型包含线框模型和表面模型所有优点，并且还能满足物理性能计算和工程分析**，例如质量、质心和重力等计算。在产品设计中，实体建模技术更符合人们对真实产品的理解和习惯。

表 1: 实体模型功能最全，涵盖线框模型和表面模型的所有优点

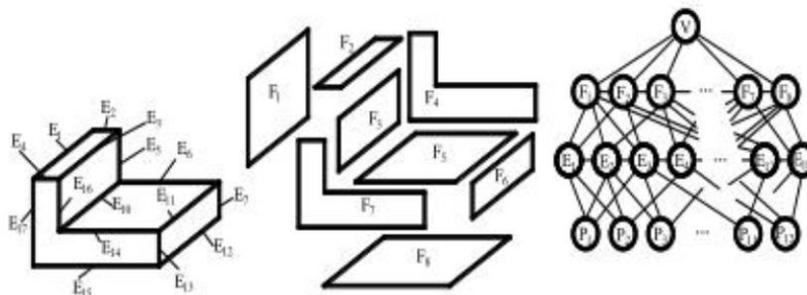
	线框模型	表面模型	实体模型
数据结构	顶点表、边表	“面-棱边-点”三层信息	“体-面-环-棱边-点”五层信息
能否消隐处理	否	能	能
是否存在二义性	是	否	否
能否描述有曲面的物体	否	能	能
能否工程分析/物理特性计算	否	否	能

资料来源：薛九天《CAD/CAM 技术基础及应用》，天风证券研究所

边界表示法 (B-rep) 是构造实体模型最常用的方法之一，著名的 ACIS 和 parasolid 几何内核都使用的是边界表示法。

边界表示法 (B-rep) 是通过描述三维物体的边界来表示物体。构建时使用一组面围成一个表面形体来表示三维实体，面由一系列的边组成，边一般通过两个点（曲线例外）来描述。边界表示法强调实体外表的细节，详细记录了构成物体的所有几何信息和拓扑信息，将面、边、顶点的信息分层记录，建立层与层之间的联系。

图 6: 实体由一组面围成，面由一组边组成，边由一系列点构成

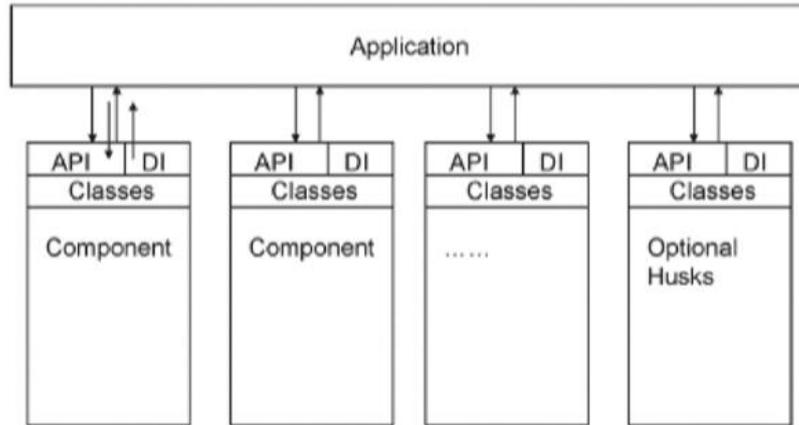


资料来源：SlideServe，天风证券研究所

2.2. ACIS: 模块化组件灵活搭配，几何总线构建模型共享渠道

ACIS 是美国 Spatial Technology 公司推出的采用 C++ 语言构造的三维几何造型平台，后被达索集团收购。它集曲面、线框和实体造型于一体，并允许这三种表示模型共存于统一的数据结构中。ACIS 提供从简单实体到复杂实体的造型功能，还提供了实体的数据存储功能 SAT 文件的输入、输出功能。ACIS 使用边界表示法 (B-rep) 建立实体模型。

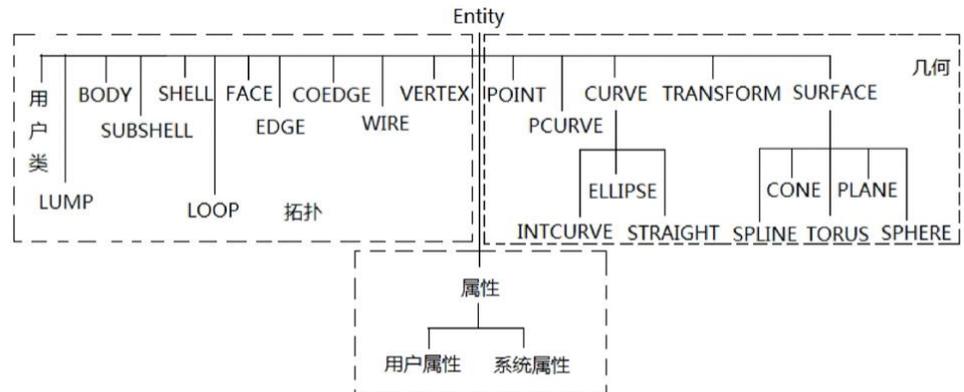
图 7：应用通过接口调用相关模块并对底层数据进行修改



资料来源：田建立、何留杰《基于 ACIS 几何平台的 CAD 软件开发的研究》，天风证券研究所

实体 (entity) 是 ACIS 中最基本的单元，为模型中所有的永久对象提供了基本的模型管理功能，实体可以分为拓扑、几何体以及属性三种，共同构成 ACIS 的底层数据结构。实体通过 C++ 语言的 ENTITY 抽象类实现代码方面的定义以及数据的储存、恢复、回溯等。

图 8：实体可以分为拓扑、几何和属性三类，每一类皆可细分



资料来源：王牌《基于 ACIS_HOOPS 三维电磁中的模型构建和网格剖分研究与实现》，天风证券研究所

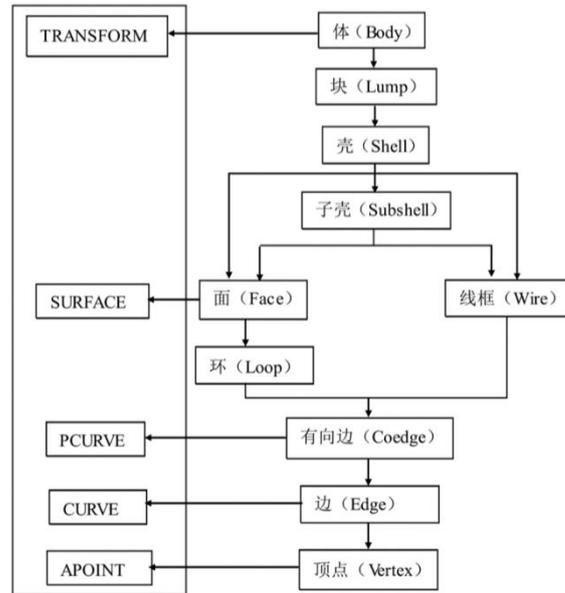
拓扑实体记录了组成几何体不同元素之间的连接关系，拓扑实体的类型包括体 (body)、块 (lump)、壳 (shell)、子壳 (subshell)、面 (face)、环 (loop)、线框 (wire)、有向边 (coedge)、边 (edge) 和顶点 (vertex)。

几何实体记录了几何体不同元素的几何形状和物理数值，几何实体的类型包括面、线、点等。

属性实体通过给实体附加属性的方式附加系统或者用户的信息，属性可以是简单的数据结构、指向其他实体的指针或者是与应用程序定义的变长度数据的连接等。

ACIS 构建模型时会使用实体分别储存拓扑信息和几何信息，再使用属性实体记录物体的非形状信息。

图 9：ACIS 构建模型的数据结构



资料来源：王牌《基于 ACIS_HOOPS 三维电磁中的模型构建和网格剖分研究与实现》，天风证券研究所

拓扑实体组合形成拓扑结构树并储存拓扑信息。如图 8 所示，拓扑结构树中最顶层为体拓扑实体，体拓扑实体又关联到若干个块拓扑实体，块拓扑实体又关联到若干壳拓扑实体，每一层的拓扑实体会记录本层的拓扑关系并指向相应的几何实体和下一层的拓扑实体，最终形成拓扑结构树。

拓扑实体指向相应的几何实体，几何实体记录几何形状与物理特性。几何实体是为构造何体增加模型操作功能的 C++ 类，它和模型一起被保存在 SAT 文件中。模型操作功能包括模型数据的保存和恢复、模型操作历史记录及其回溯、变换以及为模型附加系统定义属性和用户定义属性的功能。

ACIS 的接口主要分为 C++ 接口、MFC 接口和 Scheme 接口。其中 C++ 接口为最主要接口，C++ 应用接口主要有三个：DI 函数、API 函数和类。

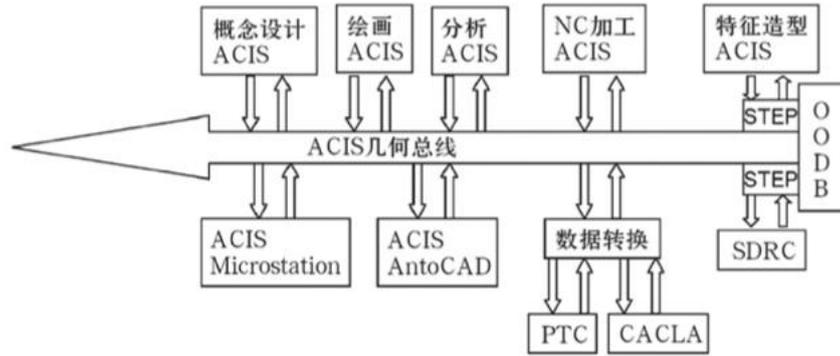
表 2：ACIS 三接口：DI 函数、API 函数、类

	DI 函数	API 函数	类
接口特性	不依赖于 API 而对 ACIS 造型功能可直接访问	应用与 ACIS 间的主要接口	以 C++ 类的形式提供的开发接口
使用场景	不能访问 ACIS 中的所有功能，通常用于不改变模型的操作，如查询等功能	创建、修改或恢复数据；将造型功能与应用支持特性集成起来，如变量错误检查和回溯	定义模型的几何、拓扑以及实现其他功能。在应用中，可直接通过类的某些函数与 ACIS 直接相互作用
是否随版本发生变化	是	否	是

资料来源：田建立、何留杰《基于 ACIS 几何平台的 CAD 软件开发生的研究》，天风证券研究所

ACIS 采取几何总线的商业模式，鼓励软件公司在 ACIS 上开发与 STEP 标准相兼容的集成制造系统。在 ACIS 上开发的 CAX 系统可以共享几何模型，以及可以直接交换产品数据。

图 10：ACIS 几何总线上模型数据皆可自由交换



资料来源：田建立、何留杰《基于 ACIS 几何平台的 CAD 软件开发生态研究》，天风证券研究所

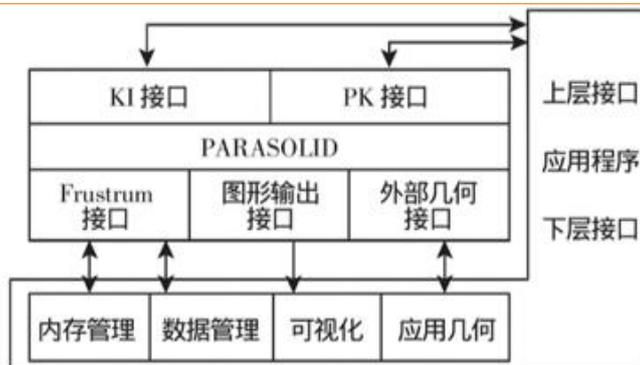
ACIS 几何总线由其开放体系结构和它的 SAT 构成，其核心提供了一个几何总线(ACIS geometry bus)，以连接其它的外壳(Husk)与应用程序。它使线框、曲面、实体的几何与拓扑模型数据能够自由交换，当 SAT 模型在总线上流动时，不需任何翻译与解释。产品模型从概念设计到制造过程，可能使用多个商家提供的的应用，通过几何总线摆脱了数据翻译的负担。

2.3. Parasolid：西门子阵营成熟内核，功能齐备应用广泛

Parasolid 现隶属于德国西门子，Parasolid 由 130 多家软件供应商集成，为最终用户提供 350 多个基于 Parasolid XT 数据格式的应用程序之间 100% 的 3D 模型兼容性。Parasolid 是严格的边界表示法 (B-rep) 几何建模器，即用实体的边界来表示这个实体，Parasolid 支持实体建模、直接编辑和自由曲面建模，并且同时将其强大的 B-rep 建模功能扩展到基于面表示的模型。

图 11 是 Parasolid 的总体结构，接口是应用程序和 Parasolid 的桥梁，分为上层接口和下层接口。

图 11：Parasolid 总体结构



资料来源：朱虎、扶建辉《Parasolid 应用平台研究》，天风证券研究所

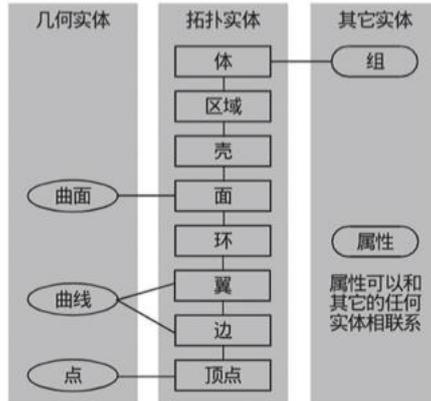
PK 接口和 KI 接口是 Parasolid 的上层接口，由一组位于内核内而由外部调用的函数组成，应用程序通过他们可以进行建模、操作对象和控制建模器的功能。

Frustrum (用户写的函数集) 接口、图形输出 (GO) 接口和外部几何 (FG) 接口是 Parasolid 的下层接口，由一组位于内核外而由内核调用的函数组成。Parasolid 通过 Frustrum 接口进行计算机的内存管理及文件访问等方面的数据管理；图形输出接口用于计算机图形设备的驱动，实现三维模型的显示；外部几何接口用于应用程序中几何模型的处理。

Parasolid 的模型实体包括几何实体、拓扑实体和其他实体。

几何实体记录了元素的物理信息和形状，包括曲面、曲线和点。拓扑实体记录了不同元素之间的拓扑和连接关系，包括了体、区域、壳、面、环、翼、边和顶点。其它实体记录了元素的属性和非物理信息。

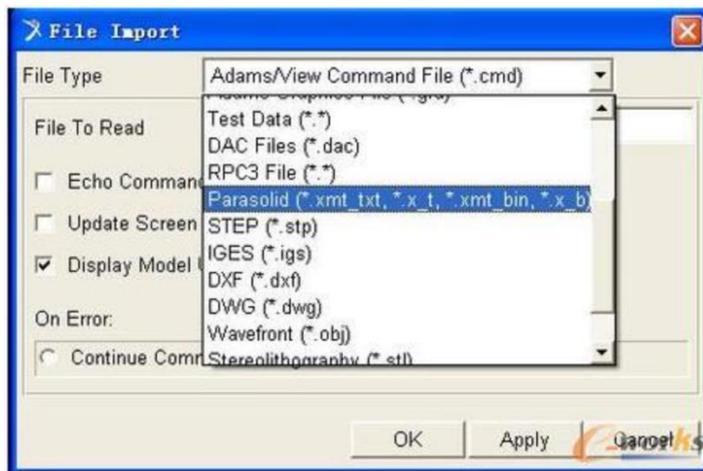
图 12：Parasolid 模型实体分为几何实体、拓扑实体和其它实体



资料来源：朱虎、扶建辉《Parasolid 应用平台研究》，天风证券研究所

Parasolid 数据读写：Parasolid 建模核心提供了文本（ASCII）和二进制（Binary）的文件格式，即 X_t 文件和 X_b 文件。其中 X_t 文件的数据格式是公开的，所有的应用程序不必借助 Parasolid 内核，就可以直接访问 Parasolid 模型文件的所有信息，同时可以将零件模型存储为过去的任何一个版本。

图 13：Parasolid 数据读写，支持 X_t 文件和 X_b 文件



资料来源：e-works，天风证券研究所

Parasolid 数据可视化：实体生成的图形数据先通过一系列图形输出（GO）接口函数输出，再通过 PK 接口的渲染函数输出实体图形。

Parasolid 拓扑实体的屏幕拾取功能：屏幕拾取功能是 Parasolid 的一项重要功能，用于从一批给定的实体中拾取面、边和顶点等拓扑实体。

Parasolid 实体测量：Parasolid 在屏幕拾取提取边的拓扑信息后，可以使用 PK 接口提供的函数在屏幕上测出实体边的长度和任意方向上的实体厚度。

西门子的 parasolid 和达索的 ACIS 是目前世界上两大主要的内核阵营。Parasolid 是目前市场上最成熟、应用最广的造型内核之一，功能完备，系统稳定。

表 3: ACIS 和 Parasolid 对比

内核	开发者	特点及优势	典型软件	注释
ACIS	spatial technology	平面造型;对比较简单的三维模型节省计算资源和存盘空间	AutoCAD、CATIA、proe、ABAQUS、Fluent、Nastran 等	从平面造型发展起来
Parasolid	UGS	对造型复杂、碎面较多的实体具有优势	UG、solidedge、solidworks、ANSYS、Comos、FEMAP、Adams、Adina 等	最成熟，应用最广泛的几何造型内核

资料来源：慧都科技官网，天风证券研究所

2.4. Overdrive：中望 3D 内核，国产内核之光

中望于 2010 年收购 VX 公司，拥有了自主 Overdrive 几何建模内核，是国内少有的实现商业化应用、在工业设计领域被大规模实践验证过的三维几何建模内核技术。

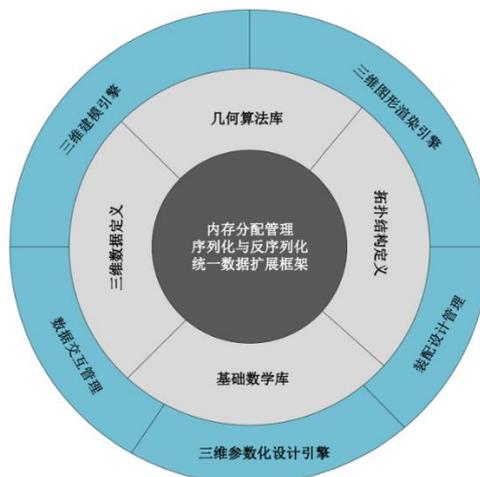
ZW3D 的几何建模内核 Overdrive 主要由三个层次构成：**内存与数据管理层、几何对象数学算法层和三维造型实现层。**

第一层为内存与数据管理层，包含内存分配与管理、序列化与反序列化、统一数据扩展框架等模块，负责数据增、删、改，序列化与反序列化;为各种不同类型的数据库对象提供访问方法，包括对象的遍历、查询等。**实现了内存池管理和数据优化，以及全平台统一的数据管理和数据访问功能，是整个几何建模内核架构的基础。**

第二层为几何对象数学算法层，包括基础数学库、几何算法库、拓扑结构定义以及三维数据定义等模块，实现几何向量计算、矩阵变换;实现点、线、面的基础求交算法、投影算法、相切性判断;实现非均匀有理 B 样条(NURBS)算法;实现拓扑几何布尔运算、拓扑变化接口支持等功能。**为 ZW3D 几何建模内核提供数学支撑。**

第三层为三维造型实现层，包括三维建模引擎、三维图形渲染引擎、三维参数化设计引擎、数据交互管理、装配设计管理等模块。**实现各种基础建模算法，如实体建模、自由曲面成型、圆角处理、实体分割、曲面裁剪等，同时为模型校验、模型修复等功能提供支持。**

图 14: Overdrive 结构

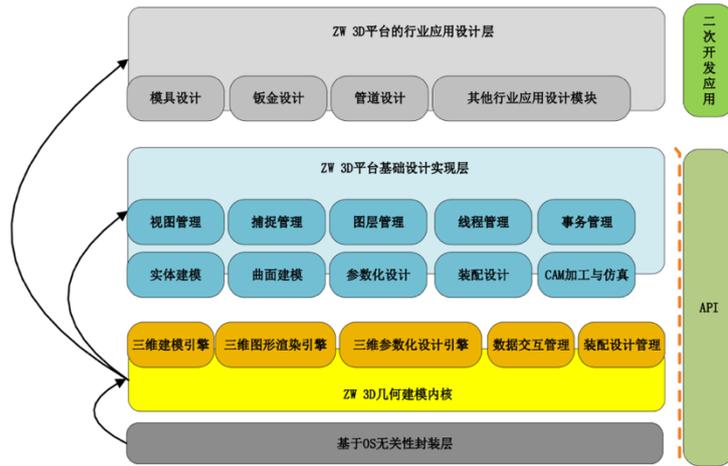


资料来源：中望招股书，天风证券研究所

中望 Overdrive 内核主要应用于中望自研的 ZW3D 平台。

ZW3D 平台的软件架构可分为四层,第一层是基于 OS (Operation System)的无关性封装层,第二层是 ZW3D 几何建模内核 Overdrive, 第三层为 ZW3D 平台基础设计实现层, 包括实体建模、曲面建模、参数化设计、CAM 加工与仿真、视图管理等模块, 实现 ZW3D 平台软件的各种设计功能。第四层是基于 ZW3D 平台的行业应用设计层。第一层至第三层构成 ZW3D 平台, 第四层基于 ZW3D 提供的标准 API 框架, 结合典型行业应用为 ZW3D 实现各种二次开发功能。

图 15: ZW3D 平台业务逻辑



资料来源: 中望招股书, 天风证券研究所

表 4: ZW3D 核心技术

对应技术	技术简介及创新性	技术来源	技术水平	处于国内领先的依据
三维几何建模内核	ZW3D 三维几何建模内核能够支持各类自由曲面及实体设计, 建模精度高, 幅度大。支持三维设计前沿领域的容差建模及同步建模技术, 是目前国内少有的在核心技术方面拥有自主知识产权、并经过大量工业生产验证的三维几何建模内核。	2010 年收购 VX 公司技术后创新发展	国内领先	建模精度可达 10^{-5} , 尺寸幅度可达 10^{+9} ; 曲面建模支持一阶、二阶连续性, 支持多核多线程并行计算技术。目前未发现国内其他竞品具备相同水平的自主三维几何建模内核。
三维参数化设计引擎	采用基于历史特征的参数化建模技术, 通过时间线对历史特征进行串联, 实现对用户设计过程中的关键操作的记录, 并利用该历史特征链表的部分修改, 重复执行等行为, 实现对用户设计模型参数化驱动, 局部修改, 模型重构; 借助自动化脚本技术达成对同类批量设计的自动化实现, 极大地满足了用户在三维设计过程中的各种需要。	2010 年收购 VX 公司技术后创新发展	国内领先	三维参数化设计引擎是 ZW3D 三维实体及曲面建模的基础技术, 支撑设计模型的再编辑。与国内主要竞品相比, ZW3D 的三维参数化设计技术完整度、稳定性高。基于增量式的快速回滚技术属于首创, 使得 ZW3D 参数化编辑效率较高。
基于永久命名的对象追溯技术	在三维 CAD 系统中, 由于基于历史特征的三维参数化技术可实现对设计模型的反复重构, 导致三维设计模型结果可动态变化, 为有效追溯模型元素及元素间关联关系, 公司通过自主设计, 实现了一套基于对象唯一标识技术, 覆盖体模型、面模型、线模型等模型元素的永久命名加密技术, 并基于该套对象命名的加密技术, 实现了一套完整的精确、非	2010 年收购 VX 公司技术后创新发展	国内领先	该技术和三维几何建模内核技术直接相关, 目前国内竞品大都使用国外厂商授权的三维几何建模内核, 在实体对象命名技术的自主研发能力不强。

精确的命名匹配技术,有效地实现设计模型元素在设计过程中因动态变化的追溯,实现了三维 CAD 系统的稳定可靠的元素追溯能力。

<p>面向三维模型的数据设计与存储技术</p>	<p>通过自主设计, ZW3D 能够支持各种三维设计数据格式,能够储存各种三维实体模型、曲面模型、三维曲线模型、标准对象、模型加工信息,并借助自主设计的数据压缩技术,实现对数据读写过程中的序列化及反序列化,构建了一套完整的、可扩展的、具备向下兼容的数据文件读写机制。借助该数据设计框架及读写技术,ZW3D 实现了服务于不同应用场景的数据格式规范,包括 CAD 数据格式、CAM 数据格式、中性的三维模型数据格式,实现了和国际同类产品相近的功能。</p>	<p>2010 年收购 VX 公司技术后自主研发</p>	<p>国内领先</p>	<p>该技术直接影响 3D CAD 产品的数据规范设计能力,国内竞品的协同主要基于中性文件格式进行,属于流程协同;ZW3D 是基于统一的三维模型表达的对象级协同,避免了数据转换中性格式文件带来的数据损失,并且该技术还保持对 CAE 分析数据一体化兼容能力,具备良好的扩展性,和国内竞品相比具备技术优势。</p>
<p>面向多终端的三维模型渲染与轻量化技术</p>	<p>针对 Windows 客户端、移动端 (Android 和 iOS)、网页端三维设计模型显示及数据协同需要,通过自主设计,并建立在三维设计数据基础上,ZW3D 实现了面向多端渲染的轻量化数据技术,数据压缩比高达 90%以上。轻量化数据可以同时兼容 Windows 客户端、移动端、网页端三端显示及数据同步;并基于该轻量化设计数据,实现一套完整的面向三端的三维模型高速渲染技术,借助该技术可以实现三维设计结果在云端系统的数据协同。</p>	<p>自主研发</p>	<p>国内领先</p>	<p>目前国内竞品在三维图形在多端显示支持方面,主要通过中性 STL 文件实现,而且无法保持与原设计模型联动,仅用于图形查看;ZW3D 的三维模型渲染与轻量化技术支持自主文件格式定义,支持设计模型和轻量化数据联动更新技术,支持增加审阅数据以实现多端设计协同,与国内竞品相比具有更强的功能支撑,具备技术优势。</p>
<p>大场景设计支撑技术</p>	<p>为有效支持复杂产品及大场景产品设计,ZW3D 实现了一系列大场景设计支撑技术,包括:1 大场景下的设计过程中的加速技术,借助增量式备份机制实现对用户设计过程中模型变化的增量式备份,并借此实现复杂模型修改场景的快速复原;2、大场景下模型选择性加载技术,通过引用集技术实现对大场景、超大场景的按需加载技术;3、大场景下的显示加速技术,包括建立分级显示等级的显示数据组织技术,通过八叉树建立空间分区和模型快速剔除技术,通过 CUDA(显卡厂商 NVIDIA 推出的运算平台)硬件加速技术、通过并行化实现模型高速渲染技术等;4、大场景下设计模型关系管理技术,通过数据分层设计、按需加载等方式实现对大场景下模型关系的动态管理,建立了一套可动态扩展的模型关系管理机制。</p>	<p>自主研发</p>	<p>国内领先</p>	<p>目前国内竞品的大场景设计主要集中在相对细分的三维零件设计领域,在装配设计尤其是大体量装配设计的整机设计领域涉及较少。ZW3D 具备在中大规模的整机类应用案例,具备 10 万零部件规模的装配设计能力,与国内竞品相比具备技术优势。</p>

资料来源:中望招股书,天风证券研究所

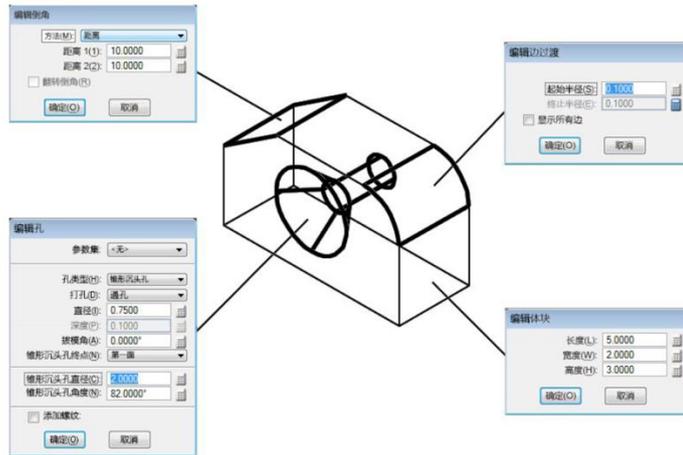
3. 几何约束求解器：参数化特征建模的实现者

参数化特征建模以实体模型为基础,提供用户特征设计手段,以参数驱动模型,设计者可以通过添加、修改参数以达到建立、修改模型的目的,大大简化了产品的造型过程,并且极大的方便了系列产品的设计过程。参数化特征建模是 CAD 发展史上的又一次飞跃,是新

一代 CAD 系统的象征。

几何约束求解器是几何内核的重要组件，几何内核在进行参数化特征建模时，几何约束求解器进行几何约束求解并定义、储存了模型各元素之间的约束关系，实现了参数化特征建模。目前几何约束求解器主要被国外垄断，世界上主流的几何约束求解器为 D-Cubed 公司的 DCM，其次是俄罗斯 LEDAS 公司开发的几何约束求解器 LGS。

图 16：建立参数化特征模型



资料来源：MicroStation，天风证券研究所

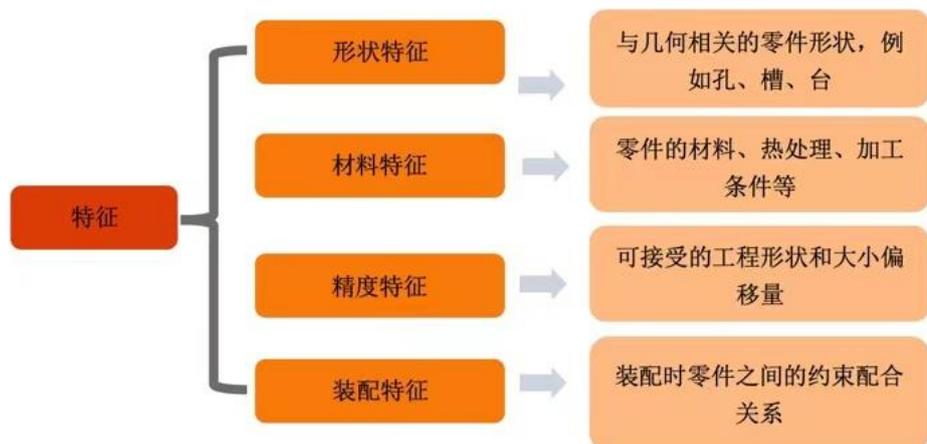
3.1. 参数化特征建模：实体模型的工程特征化、参数化处理

参数化特征建模主要分为两个重要的部分：参数化设计和特征建模。

特征建模是在实体模型的基础上，进行工程特征定义和设计。实体建模在表示物体形状和几何特性方面是完整有效的，但实体模型中的操作主要面向几何（点、线、面）而非工程描述（槽、孔、凸台），特征建模即建立了一个既适用于产品设计、工程分析又适用于制造计划的统一的产品信息模型。

特征是一组具有约束关系的几何实体，约束关系则是由几何约束求解器进行定义。特征通常可以分为形状特征、材料特征、精度特征和装配特征，其中应用效果最好和最成熟的是形状特征设计。

图 17：特征是一组具有确定约束关系的几何实体

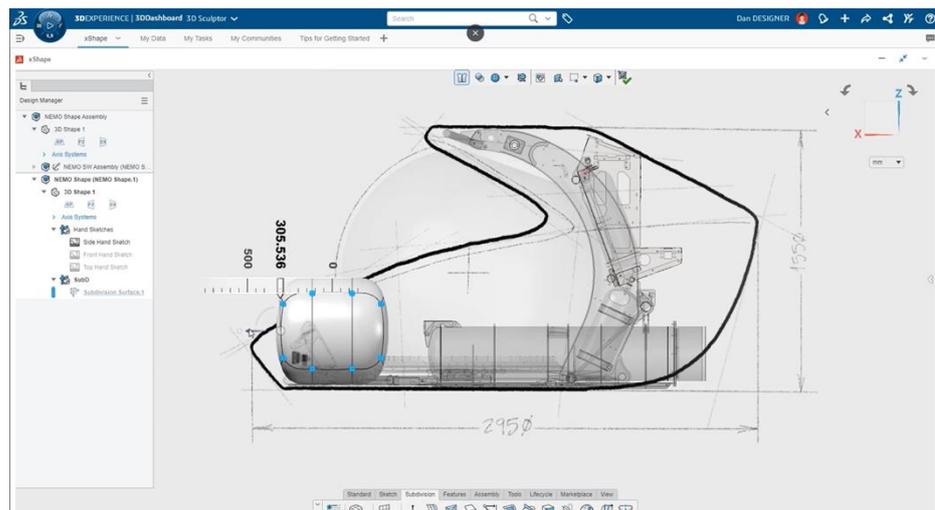


资料来源：薛九天《CAD/CAM 技术基础及应用》，天风证券研究所

形状特征设计是从设计者的意图出发，通过一组预先定义好的具有一定工程意义的设计特征，引导设计者去产品设计，例如工程中常用的孔、槽、凸台、拉伸、旋转等。实体模型应用形状特征的目的在于：**简化产品信息模型中对底层几何元素的访问**。例如，工程中大量使用的孔、型腔、凸台的设计，**简化为形状特征后，已经抽象成一个造型的基本特征单位，而不再是圆柱、矩形这样的几何元素**。建模时可以直接使用形状特征（例如在模型中插入一个孔、插入一个倒角）而不需要用几何建模的方式重新构建。

参数化设计是指设计对象的结构形状基本不变，而用一组参数来约定尺寸关系，设计结果的修改受尺寸驱动。基本原理为：对模型中的一些基本图素施加一定约束，模型建好后，尺寸的修改会立即自动转变为对模型的修改，例如构建一个长方体模型，对其长、宽、高赋值后，它的大小就确定了，当改变长、宽、高时，长方体的大小也会随之改变。

图 18：参数化设计中，调整参数即可改变模型

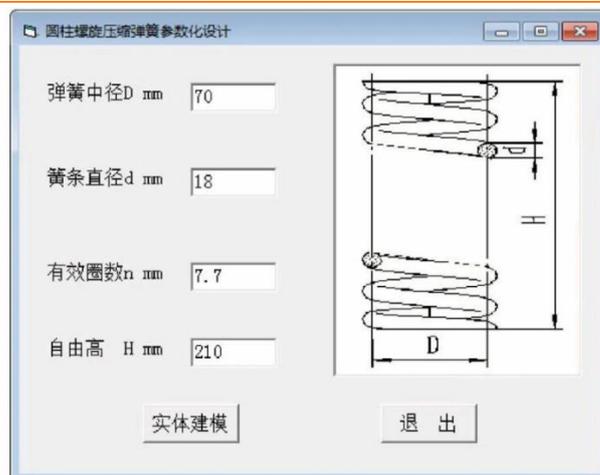


资料来源：Solidworks，天风证券研究所

参数化设计主要解决以下三种问题：1. 零件形状具有相似性，区别仅是尺寸不同，2. 在原有零件技术长做一些小改动来产生新零件，3. 设计经常需要修改。这些需求采用传统建模方法只能重新建模，参数化方法提供了设计修改的可能性。

大部分参数化功能与特征建模结合使用，使特征模型成为参数的载体，提高了特征模型泛用性。图 19 中，特征为圆柱螺旋压缩弹簧，其参数包括弹簧中径、簧条直径、有效圈数和自由高。通过参数化设计，平台可以建造出多个形状相似、尺寸不同的圆柱螺旋压缩弹簧模型，拓宽了特征模型的应用范围和效率。

图 19：参数化设计与特征建模相结合

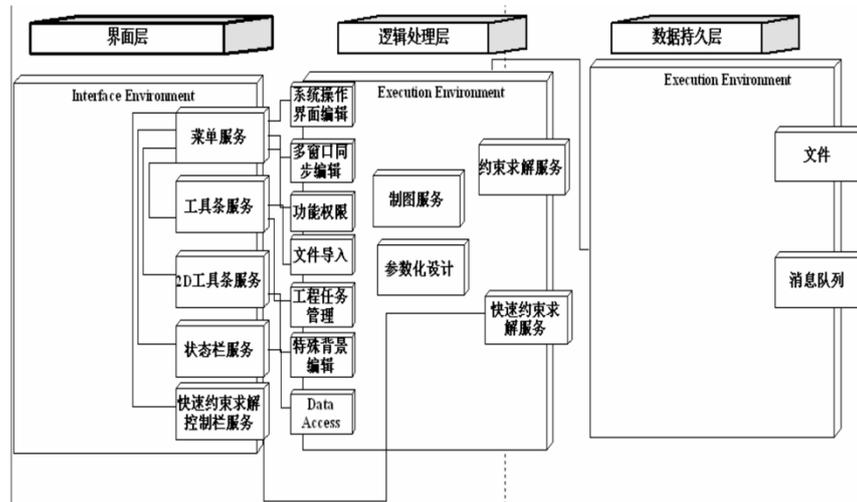


资料来源：看刊宝，天风证券研究所

3.2. 几何约束求解器：参数化制图和几何约束求解

几何约束求解器结构主要分为三层：界面层、逻辑处理层和数据处理层。

图 20：几何约束求解器结构



资料来源：林雷《基于约束的几何模型求解器》，天风证券研究所

界面层是由系统的可视化界面构成，是用户和系统进行交互的接口，用户可以通过界面层直观地对系统操作进行约束求解；逻辑处理层是系统的核心层，所有的操作命令都在这里得以处理和执行；数据持久层主要用来对系统的数据进行保存和传输，这里就是系统的大脑，储存了系统的所有信息。

约束主要分为距离约束和角度约束，常见的距离约束包括点点距离、点面距离等等；常见的角度约束包括线线垂直、面面平行等等。几何约束系统的约束形式是多种多样的，但基本约束形式只有简单的几种，其它所有的约束都可以用基本约束的组合来表达，比如半径已经确定的圆与直线相切的约束可以转化为圆心和直线距离为半径的约束。约束度为 1 的称为基本约束，其他的称为复合约束，复合约束皆可通过基本约束的组合而形成。

表 5：部分约束以及约束表达

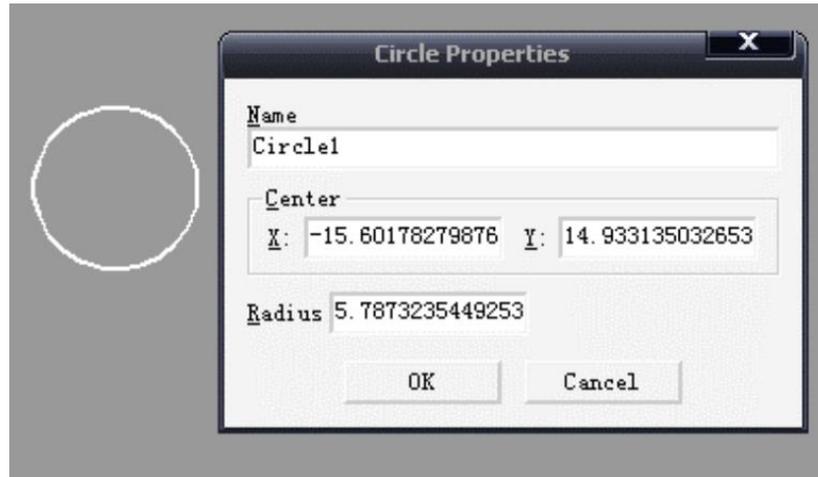
约束名	约束表达	约束度
点点距离	DistPP (P1,P2,D)	1
点在线上	PntOnLine (P,L)	1
圆圆相切	TanCC (C1,C2)	1
共轴	CoLL(L1,L2)	4
面面距离	DistFF (F1,F2,D)	3
面面垂直	PerFF (F1,F2)	2
共面	CoFF (F1,F2)	3

资料来源：石志良《几何约束系统建模与求解方法研究》，天风证券研究所

几何约束求解器的主要功能包括：参数化制图和几何约束求解。

参数化制图：用户使用一组参数来约定尺寸关系，通过添加、修改参数来绘制、修改模型。参数化制图不仅可使 CAD 系统具有交互式绘图功能和自动绘图的功能，还可以使设计人员从大量繁重而琐碎的绘图工作中解脱出来，从而大大提高设计速度，并减少信息的存储量。

图 21：输入一组参数制作圆



资料来源：林雷《基于约束的几何模型求解器》，天风证券研究所

几何约束求解：几何约束求解即在给定一组功能和一组约束的情况下，产生一个或一组部件的详细的结构化描述，方法主要包括：变量几何法，基于规则的构造方法和基于图论的构造方法。

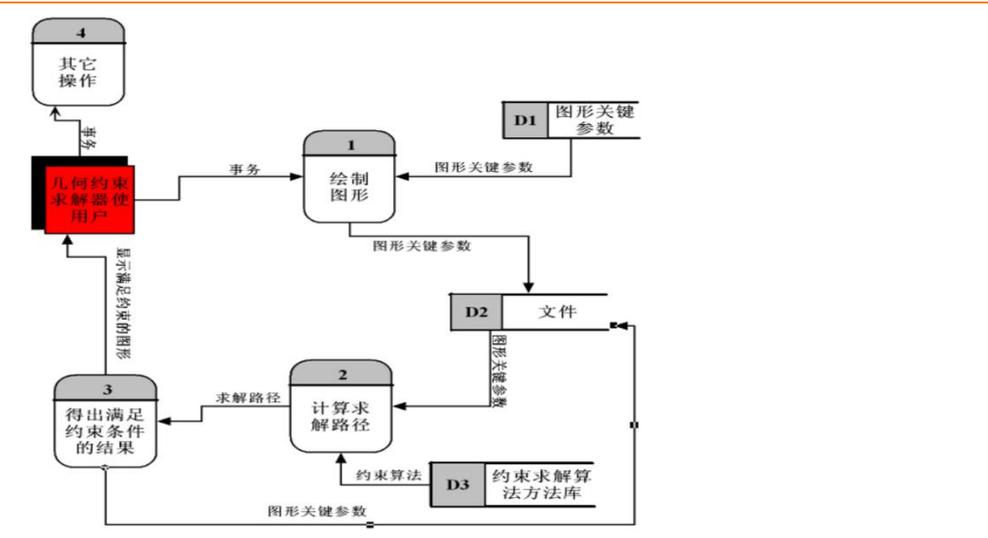
表 6：主流几何约束求解方法以及优缺点

	数值方法	基于规则的构造方法	基于图论的构造方法
求解方法	把几何形状定义成一系列的特征点，约束则表示成以特征点坐标为变元的非线性代数方程组，通过数值迭代方法求解非线性方程组，从而确定出其中的几何细节	该方法分为建立作图步骤和重新构图两个阶段:1. 将几何约束读入事实库，启动推理机，将所有可派生的事实存入系统。2. 推理机输出重建步骤，把规则名翻译成相应的处理过程，形成构造计划，从而构造出整个几何体	该方法分为两个阶段:分析阶段和构造阶段。在分析阶段,通过对约束图的分析得到图的分解和构造序列。在构造阶段,根据前面的构造序列一步步地构造,将几何元素放置在正确的位置。
优点	求解速度快	可构造性强。一旦几何约束问题可以转化成可构造的形式，就可以很快构造出满足约束的几何图形	理论严密，速度快，效率很高
缺点	对初值的选取比较敏感。当初值发生微小的变动时，该方法求解可能会发散或者收敛到一个用户不想要的解	由于推理过程往往要搜索和匹配整个数据库，所以导致用这种方法求解几何约束问题的速度比较慢而且实现起来也很困难	对几何元素类型和约束类型很敏感。当系统中有新类型的几何元素和约束加入时,系统就必须拓展修改

资料来源：林雷《基于约束的几何模型求解器》，天风证券研究所

几何约束求解的过程主要包括以下几步：1. 参数化绘制图形 2. 声明图形之间的约束 3. 引入约束算法 4. 得出求解路径并图形化显示。

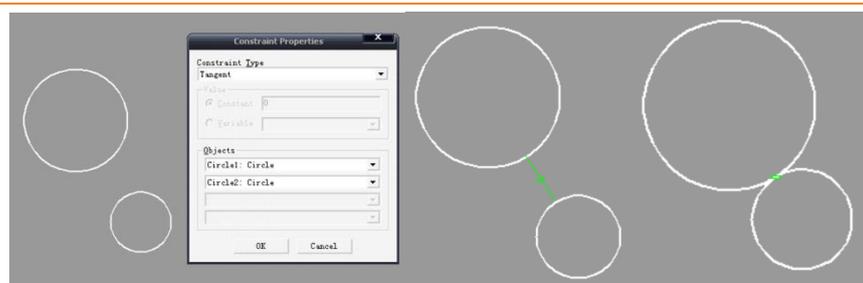
图 22：几何约束求解流程



资料来源：林雷《基于约束的几何模型求解器》，天风证券研究所

几何约束求解示例：以二圆相切为示例，展示二圆相切约束求解的流程。

图 23：参数化绘制二圆，加入圆圆相切约束，计算出相切路径并图像化展示，最后相切



资料来源：林雷《基于约束的几何模型求解器》，天风证券研究所

3.3. 当前市场情况：国外市场垄断，DCM 独占鳌头

几何约束求解器是几何内核的重要组件，虽然市场份额不大，但在产业发展中属于关键工程。国外的主流几何约束求解器有 DCM, LGS, 国内的几何约束求解器有 DCS。

DCM 由 D-cubed 公司研发，2004 年由 UGS 公司收购，随着西门子 2007 年五月收购了 UGS 公司,DCM 目前作为西门子 PLM 软件供使用。DCM 分为 D-Cubed 2D DCM (D-Cubed 二维空间约束管理器) 和 D-Cubed 3D DCM (D-Cubed 三维空间约束管理器)。

表 7：D-Cubed 2D DCM 与 D-Cubed 3D DCM 对比

	D-Cubed 2D DCM	D-Cubed 3D DCM
应用维度	二维	三维
主要功能	用户可以通过应用尺寸和几何约束来更有效地创建和修改 2D 草图，这些约束可以精确地指定和保存 2D 草图中的几何图形位置	零件定位在装配建模中，使用尺寸和装配约束；约束装配体和机构的运动学仿真；在不依赖设计历史的情况下控制零件的形状——有时称为直接编辑或直接建模；配置 3D 草图，以支持 3D 功能，3D 管道/电线路线
作用对象	点、线、圆、椭圆、圆锥曲线、样条曲线和参数曲线	点、线、平面、圆、椭圆、柱面、环面和样条/参数曲线以及曲面

尺寸和约束	距离、角度、半径、平行、垂直、切线、同心、对称、法线和等距离/半径	距离、角度、半径、平行、垂直、切线、同心、对称、法线、中点和模式
先进的功能	约束自由曲线：样条可以配置使用约束包括样条长度，切线方向，切线长度，二阶导数，等方向和等曲率。根据偏好行为可以选择求解模式。求解选项和诊断：可以指定首选的求解结果，例如几何图形的最小移动。反馈总是提供关于草图的状态，包括约束不足或约束过度的几何图形。	自由形几何约束：几何约束可以应用于自由形曲线，包括切线、曲率、一阶和二阶导数以及曲线长度。解决方案和诊断：可以找到不同的解决方案，如移动最小几何图形数量，或移动相互之间的最小几何图形数量。提供了关于模型状态的全面反馈，包括定义良好、定义不足和定义过度的内容。

资料来源：迪融数字官网，天风证券研究所

LGS 由俄罗斯 LEDAS 公司于 2001 年开发，在约束求解方面被认为是仅次于 D-Cubed 的几何约束求解引擎。其计算组件使用了高度优化的内部非线性求解器和几何分解方法，在 3000 多家工厂的测试中实现了最优结果。LGS 已授权给十多家工程软件供应商，包括 Cimatron（现隶属于 3D Systems）、CD-adapco（现隶属于 Siemens PLM Software）和 ASCON。

图 24：LGS 主要客户



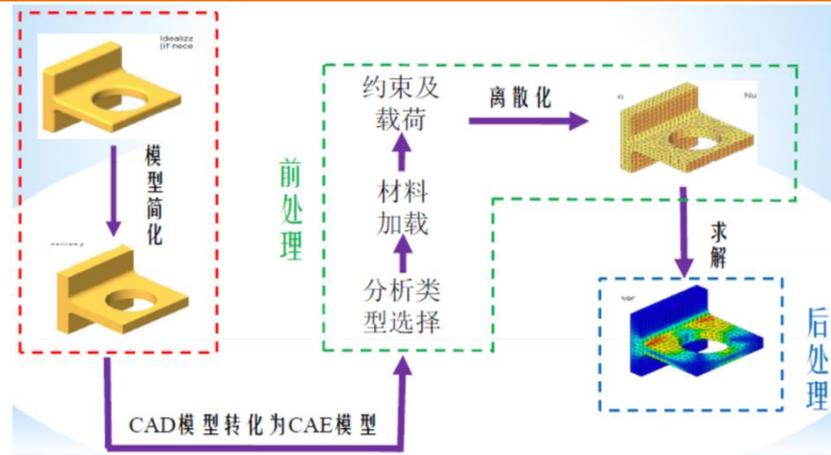
资料来源：LEDAS 官网，天风证券研究所

DCS 由国内的华天软件研发，是完全自主研发的二维、三维约束求解引擎，同时也提供与国际商用约束求解器兼容的 API 接口。DCS 二维约束求解器可实现二维图形参数化设计，满足约束需求及尺寸需求；DCS 三维约束求解器可实现约束三维几何体的需求，在三维 CAD/CAM/CAE 领域中支持装配设计、运动仿真等。

4. CAE 有限元分析：基于 CAD 建模的工程分析与物理仿真

有限元分析是一个基于 CAD 几何模型来建立 CAE 有限元模型的过程，主要分为有限元网格剖分、有限元单元分析、有限元整体分析三个步骤，有限元网格剖分则是整个过程中的重中之重。有限元法是基于固体流动变分原理，把一个原来连续的物体剖分成有限个数的单元体，计算时先对每个单元进行节点分析，再根据变形协调条件把这些单元重新组合起来，进行综合求解。应用场景包括固体力学中的位移场和应力场分析、电磁学中的电磁场分析，振动特性分析，传热学中的温度场分析，流体力学中的流场分析等。

图 25：有限元分析基于 CAD 几何模型建立 CAE 有限元模型并进行工程分析

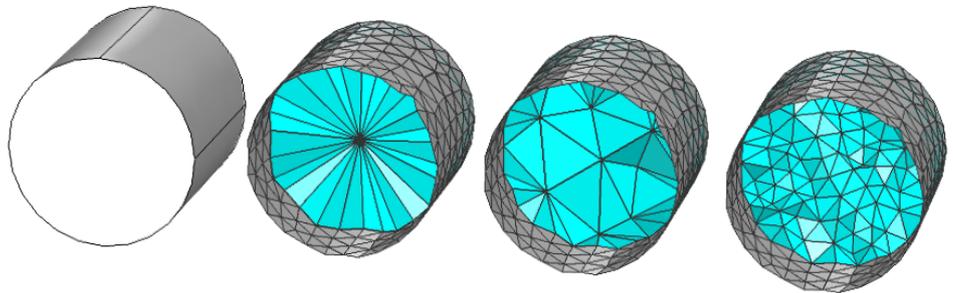


资料来源：宇熠科技官网，天风证券研究所

4.1. 有限元网格剖分：CAD 几何模型离散化处理

许多工程分析问题由于物体的几何形状较复杂或者具有某些非线性特征，很难通过解析方法求助精确解，因此人们借助计算机将 CAD 几何模型拆分成有限个具有不同大小和形状单元体的集合，这一过程称为有限元网格剖分（也称离散化），形成的模型即 CAE 有限元模型，后续的分析皆基于该模型。

图 26：网格剖分结果示意图



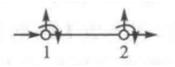
资料来源：Comsol，天风证券研究所

4.1.1. 有限元网格剖分基本原则

有限元网格剖分需要考虑的问题较多，所划分的网格形式对计算精度和计算规模将产生直接影响，需要考虑的主要基本原则包括网格单元类型、网格疏密、网格数量、单元阶次等。

网格单元类型：网格剖分时的单元类型取决于物体结构本身的形状特点、综合载荷、约束等情况，所选的单元类型应能逼近实际的受力状态，单元形状应能接近实际边界轮廓，下表列举了一些常用的典型单元和其应用情况。

表 8：网格剖分常用单元和其应用情况

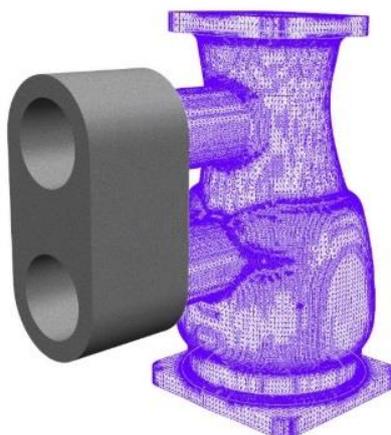
	单元类型	节点数	节点自由度	典型应用	
一维单元	杆		2	1	桁架
	梁		2	3	平面桁架

二维单元	平面问题	三角形		3	2	平面桁架
		四边形		4	2	平面应用
	轴对称问题	三角形		3	2	平面应用
	板弯曲问题	四边形		4	3	薄板弯曲
		三角形		3	3	空间问题
三维单元	四面体		4	3	空间问题	
	六面体		8	3	空间问题	

资料来源：薛九天《CAD/CAM 技术基础及应用》，天风证券研究

网格疏密：通常采取将网格在高应力区局部加密的办法，在计算数据变化梯度较大的部位，为了更好的反应数据变化规律，采用比较密集的网络，而在计算数据变化梯度较小的部位，为了减小模型规模，则划分相对稀疏的网络。如图 27 所示，图中几处交汇点皆为高应力区域，因此采用高密度的网格划分，其他较低应力区域则采用密度较低的网络划分。

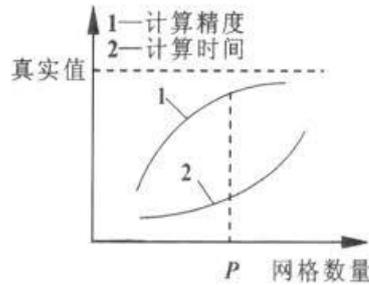
图 27：高应力区局部加密示意图



资料来源：Siemens 官网，天风证券研究所

网格数量：网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小。网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加，所以在确定网格数量时应权衡两个因素综合考虑。

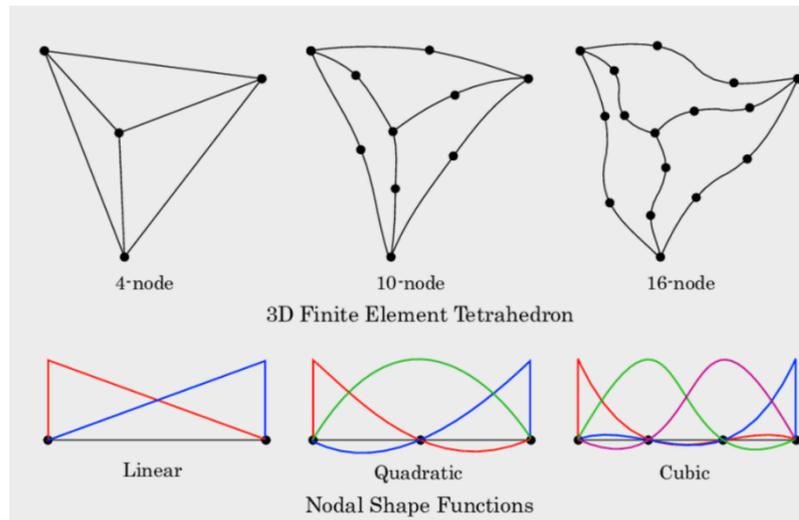
图 28：网格数量增加时，计算精度提高，计算规模也会增加



资料来源：《HyperMesh 有限元前处理关键技术研究》，天风证券研究所

单元阶次：单元阶次主要分为线性、二次、三次等形式，其中二次和三次形式的单元称为高阶单元，选用高阶单元可以提高计算精度，当模型形状不规则、应力分布很复杂时可以选择高阶单元。高阶单元优点在于：1. 单元的曲线或者曲面边界能更好的逼近模型的曲面和曲面边界，2. 高次插值函数可更高精度地逼近复杂场函数。但由于高阶单元节点较多，计算规模也比普通单元大一些。

图 29：从左到右单元阶次分别为线性、二次、三次，节点数量和复杂度依次提高



资料来源：ResearchGate，天风证券研究所

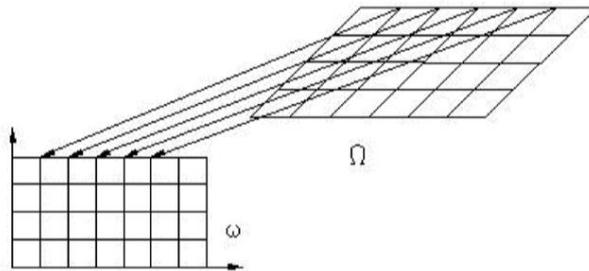
4.1.2. 主流的有限元生成方法

目前主流的有限元网格生成方法包括映射法、基于栅格法、几何分解法、拓扑分解法、节点连接法五种。目前，正在研究的网格生成方法主要是这几种方法的混合使用及现代技术的综合应用。

映射法：基本原理为先通过适当的映射函数将待剖分物理域映射到参数空间中形成规则参数域，对规则参数域进行网格剖分；再将参数域的网格反向映射回物理空间，从而得到物理域的有限元网格。映射法可以分为保角映射法、基于偏微分方程法和代数插值法三大类。

映射法的优点是：算法简单、速度快、单元质量好、密度可控制。它既可生成结构化网格又可生成非结构化网格，既可生成四边形单元网格又可生成六面体单元网格，可用于曲线网格生成，可与形状优化算法集成，也可以和其他算法结合划分网格等。

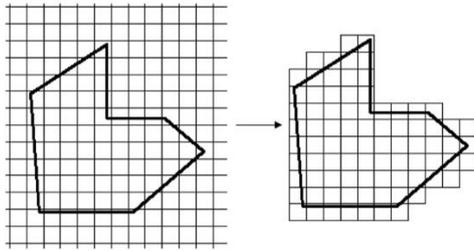
图 30：映射法将不规则模型映射成规则参数域，再进行网格剖分，最后反射射回去



资料来源：傅波海《基于几何分解与铺砌的网格生成算法的研究》，天风证券研究所

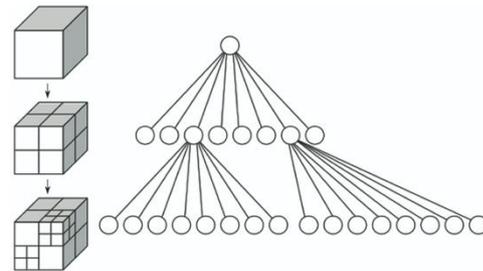
基于栅格法：用栅格覆盖在目标区域，删除完全落在目标区域之外的栅格并对物体边界相交的栅格进行调整、裁减、再分解，最后对内部栅格和边界栅格进行栅格级的网格剖分。基于栅格法主要分为正则栅格法和有限四（八）叉树法。

图 31：删除目标区域外的栅格，再对内部栅格和边界栅格进行更细的栅格剖分



资料来源：傅波海《基于几何分解与铺砌的网格生成算法的研究》，天风证券研究所

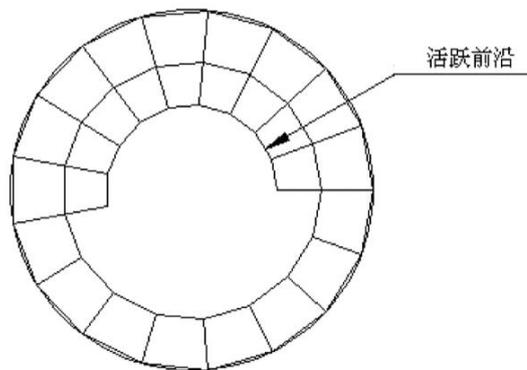
图 32：三维与二维类似，先对三维物体进行栅格剖分，再对部分栅格进行更深入、细节的栅格剖分



资料来源：中国光学期刊网，天风证券研究所

几何分解法：在几何分解法中，近年来形成了一种最为成功的全自动网格生成方法——推进波前法。推进波前法首先离散模型边界并称为前沿；然后从前沿开始，依次插入一个节点，并连接生成一个新的单元；更新前沿并循环向内部推进。推进波前法对复杂的几何形状与边界的网格生成具有很高的灵活性及可靠性，且比较容易实现方向性精细化，但效率有待改进。

图 33：推进波前法通过循环定义前沿，插入节点并生成新单元，不断向内部推进

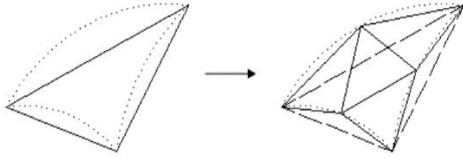


资料来源：傅波海《基于几何分解与铺砌的网格生成算法的研究》，天风证券研究所

拓扑分解法和节点连接法也是目前主流常用和研究的有限元网格剖分算法。网格剖分的实际应用中，由于模型的不规则性和复杂性，往往会根据模型特点进行模型拆分并进行多种

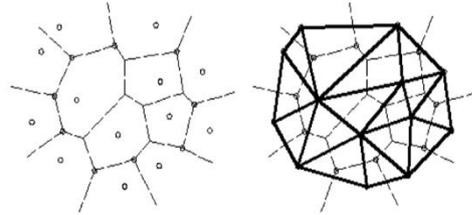
算法的结合以及综合应用。

图 34: 拓扑分解法使用三角化算法将目标区域用尽量少的三角形完全分割覆盖



资料来源: 傅波海《基于几何分解与铺砌的网格生成算法的研究》, 天风证券研究所

图 35: 节点连接法先生成 Dirichlet 图形和部分节点 (左), 再通过算法连接节点生成有限元单元 (右)



资料来源: 傅波海《基于几何分解与铺砌的网格生成算法的研究》, 天风证券研究所

4.2. CAE 软件多领域应用, 行业龙头多为国外厂商

2020 年, 全球 CAE 市场被三大供应商所主导, 分别是西门子、ANSYS 和达索, 市场占有率共计 47%, 前五大 CAE 供应商中另两名分别是 Altair 和 Hexagon。CAE 软件一般可分为通用类软件系统和专用类软件系统。

通用类软件系统: 分析功能覆盖几乎所有工程领域, 功能强大, 用户使用方便, 计算结果可靠而且效率较高。目前广泛应用的大型通用类软件系统包括 ANSYS、ABQUS、MSC/NASTRON、MARC、ADINA 等。

专用类软件系统: 为了解决某一类学科问题或某一类产品基础件计算分析问题而编制的, 如滚动轴承设计分析系统、车厢车架分析系统等, 这类软件解决的问题比较专一, 一般规模较小。

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用类 CAE 软件, 由世界上最大的有限元分析软件公司之一——美国的 ANSYS 公司开发, 它最突出的功能是多物理场分析技术, 另外, 这种软件系统还有显式瞬态动力分析工具 LS-DYNA, 它是显式有限元理论和程序的鼻祖, 被公认为汽车安全性设计、武器系统设计、金属成型、跌落仿真等领域的标准分析软件。

图 36: 美国 ANSYS 公司



资料来源: Ansys 官网, 天风证券研究所

ADINA 是老牌通用有限元分析系统, 它的技术较成熟, 集成环境包括自动建模、分析和可视化后置处理。这种软件可进行线性、非线性、静力、动力、屈曲、热传导分析、压缩、

不可压缩流体动力学计算及流-固耦合分析等，适用于机械工业、土木建筑、桥梁、隧道、水利、交通能源、石油化工、航空航天等。

图 37：美国 ADINA 公司



资料来源：中仿科技，天风证券研究所

Hexagon 公司的 MSC 软件在 CAE 市场一直处于领导地位，收购了顶尖高度非线性 CAE 软件公司 MARC 等，这更为它在 MCAE 行业奠定了霸主地位。MSC 丰富的产品线包括：

1. 目前功能最全面、应用最广泛的大型通用结构有限元分析系统 NASTRAN；
2. 专用的耐久性疲劳寿命分析工具 FATIGUE；
3. 拓扑及形状优化的概念化设计软件工具 CONSTRUCT；
4. 处理高度组合非线性结构、热及其他物理场和耦合场问题的有限元软件 MARC 等。

图 38：美国 MSC 公司



资料来源：MSCSoftware 官网，天风证券研究所

CAE 有限元分析软件应用 S 范围广阔，应用的领域包括固体力学、流体力学、传热学、电磁学等。解决的问题已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题，由静力平衡问题扩展到稳定性问题、动力问题、波动问题，由线性问题扩展到非线性问题。其分析对象已由弹性材料扩展到塑形、黏弹性、黏塑形和复合材料等。

表 9：CAE 有限元分析软件应用领域

研究领域	平衡问题	特征值问题	动态问题
结构工程学、结构力学和宇航工程学	梁、板、壳结构的分析；复杂或混杂结构的分析；二维与三维应力的分析	结构的稳定性、结构的固有频率和振型、线性黏弹性阻尼	应力波的传播；结构对于分非周期线荷的动态响应；耦合热弹性力学与热黏弹性力

土力学、基础工程学和岩石力学	二维与三维应力分析; 填筑和开挖问题; 边坡稳定性问题; 土壤与结构的相互作用等	土壤—结构组合物的固有频率和振型	土壤与岩石中的非定常渗流; 在可变形与多孔介质中的流动—固结应力波在土壤和岩石中的传播
热传导	固体和流体中的稳态温度分布		固体和流体的瞬态热流
流体动力学、水利工程学和水源学	流体的势流; 流体的黏性流动; 蓄水层和多孔介质中的定常渗流	湖泊和港湾的被动频率和振型; 刚性或柔性容器中流体的晃动	河口的盐度和污染研究; 沉积物的推移; 流体的非定常流动
核工程	反应堆安全壳结构的分析; 反应堆核反应堆安全壳机构中的稳态温度分布		反应堆安全壳结构的动态分析; 反应堆结构的热黏弹性分析; 反应堆和反应堆安全壳结构中的非稳态温度分布
电磁学	二维和三维静态电磁场分析		二维和三维时变; 高频电磁场分析

资料来源: 薛九天《CAD/CAM 技术基础及应用》, 天风证券研究所

5. 核心观点

几何内核龙头化, 德国西门子建模技术成熟, 造型内核产品应用广泛、功能完备、系统稳定。国内中望软件技术自研, 以自主 Overdrive 几何建模内核技术为营, 多次于商业化应用、工业设计等领域被大规模实践验证。

中望软件在 ZW3D 层面, 公司拥有 12 项核心技术, 这 12 项技术均为国内领先。这 12 项技术为: 三维几何建模内核、三维参数化设计引擎、基于永久命名的对象追溯技术、面向三维模型的数据设计与存储技术、面向多终端的三维模型渲染与轻量化技术等。不仅如此, 公司深研 ZW3D 并对产品软件持续改进创新, 在产品代码数参数方面相较第一版已经翻倍。公司的核心技术具备自主知识产权, 以底层开发能力为基石, 由技术保障研发自由度, 有效规避工业技术困境。

未来, 中望软件将持续为 ZW3D 软件整体架构设计研发, 致力于开发出能运用于大体量装配的 3D CAD 几何建模内核, 攻克国内航空航天、轨道交通、汽车、船舶、智能制造、电子科技等国家关键领域的工业软件技术难关。

6. 风险提示

- 1) 疫情导致经济波动影响公司经营, 比如公司业绩不如预期。
- 2) 市场竞争加剧, 比如国内企业影响力相对较小, 国内主流企业产品不齐全, 国产企业进入供应链缺乏优势。
- 3) 受疫情影响, 下游制造业客户 IT 预算受限。工业软件主要面对制造业企业, 中小企业占多数, 资金预算有限, 需要投入生产设备或生产材料, 疫情影响下, 公司削减或推迟工业 IT 预算。

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：我们具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，本报告所表述的所有观点均准确地反映了我们对标的证券和发行人的个人看法。我们所得报酬的任何部分不曾与，不与，也将不会与本报告中的具体投资建议或观点有直接或间接联系。

一般声明

除非另有规定，本报告中的所有材料版权均属天风证券股份有限公司（已获中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）及其附属机构（以下统称“天风证券”）。未经天风证券事先书面授权，不得以任何方式修改、发送或者复制本报告及其所包含的材料、内容。所有本报告中使用的商标、服务标识及标记均为天风证券的商标、服务标识及标记。

本报告是机密的，仅供我们的客户使用，天风证券不因收件人收到本报告而视其为天风证券的客户。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但天风证券对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告中的信息、意见等均仅供客户参考，不构成所述证券买卖的出价或征价邀请或要约。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。客户应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，天风证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。

本报告所载的意见、评估及预测仅为本报告出具日的观点和判断。该等意见、评估及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，天风证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

天风证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。天风证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。天风证券的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

特别声明

在法律许可的情况下，天风证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到天风证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突，投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

投资评级声明

类别	说明	评级	体系
股票投资评级	自报告日后的 6 个月内，相对同期沪深 300 指数的涨跌幅	买入	预期股价相对收益 20%以上
		增持	预期股价相对收益 10%-20%
		持有	预期股价相对收益 -10%-10%
		卖出	预期股价相对收益 -10%以下
行业投资评级	自报告日后的 6 个月内，相对同期沪深 300 指数的涨跌幅	强于大市	预期行业指数涨幅 5%以上
		中性	预期行业指数涨幅 -5%-5%
		弱于大市	预期行业指数涨幅 -5%以下

天风证券研究

北京	武汉	上海	深圳
北京市西城区佟麟阁路 36 号	湖北武汉市武昌区中南路 99	上海市虹口区北外滩国际	深圳市福田区益田路 5033 号
邮编：100031	号保利广场 A 座 37 楼	客运中心 6 号楼 4 层	平安金融中心 71 楼
邮箱：research@tfzq.com	邮编：430071	邮编：200086	邮编：518000
	电话：(8627)-87618889	电话：(8621)-65055515	电话：(86755)-23915663
	传真：(8627)-87618863	传真：(8621)-61069806	传真：(86755)-82571995
	邮箱：research@tfzq.com	邮箱：research@tfzq.com	邮箱：research@tfzq.com