

计算机辅助工程（CAE）的现状和未来

崔 俊 芝
中国工程院 院 士

本报告受到国家自然科学基金项目（90405016和10590353）资助

2006-4-18

摘要

- 计算机辅助工程（CAE）是一种迅速发展的信息技术，是实现重大工程和工业产品的计算分析、模拟仿真与优化设计的工程软件，是支持工程科学家进行创新研究和工程师进行创新设计的、最重要的工具和手段。本报告将扼要叙述CAE技术及其软件的现状，并展望最近十年的发展趋势。

- 计算机辅助工程（CAE），从字面上讲它包括工程和制造业信息化的所有方面，但是传统的CAE主要指用计算机对工程和产品功能、性能与安全可靠性进行计算、优化设计，对未来的工作状态和运行行为进行模拟仿真，及早发现设计缺陷，改进和优化设计方案，证实未来工程/产品的可用性与可靠性。

- 工程和制造企业的生命力在于工程/产品的创新，而对于工程师来说，实现创新的关键，除了设计思想和概念之外，就是采用最现代化的设计工具和技术手段，即先进可靠的CAE软件。

- CAE软件还是科学家进行科学和技术研究的三大手段之一。它可以帮助科学家揭示用物质实验手段尚不能表现的科学奥秘和科学规律。
- 它也是工程科学家的研究成果--理论、方法和科学数据--的归属之一，做成软件和数据库，成为推动工程和社会进步的最新生产力。

- 
- CAE软件是迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程科学、工程管理学与现代计算机科学和技术相结合，而形成的一种综合性、知识密集型信息产品。

CAE软件分类

- 针对特定类型的工程/产品所开发的用于产品性能分析、预测和优化计算的软件，称为专用CAE软件。
- 可以对多种类型的工程/产品的性能和行为进行性能预测、计算分析，模拟仿真，评价与优化的软件，称为通用CAE软件。
- 通用CAE软件主要由有限元软件、优化设计软件、计算流体软件、电磁场计算软件、最优控制软件和其它专业性的计算软件组成。



CAE与CAD / CAM / CAPP / PDM / ERP

一起，已经成为支持工程行业和制造企业信息化的主导技术，它们已经在提高工程/产品的设计质量，降低研究开发成本，缩短开发周期方面发挥了重要作用，成为实现工程/产品创新的支撑技术。

CAE是迅速发展中的信息技术:

- 实现多体耦合分析、多物理场耦合分析以及多目标优化设计;
- 实现多尺度和多模型耦合分析, 以及结构、构件及其材料的一体化设计与模拟仿真;
- 基于巨型并行机群系统、Internet、Grid Computing 的高性能的计算机辅助工程;
- CAE 与CAD / CAM / CAPP / PDM / ERP 的集成化、网络化、智能化。

一. 现状

- 计算机辅助工程起源于上个世纪五十年代中期。
- 实用的CAE软件诞生于上个世纪七十年代初期。
- 从上个世纪七零年到八五年的十五年，是CAE软件的功能和算法的扩充和完善期，到八十年代中期，逐步形成了商品化的通用和专用CAE软件。

- 到上个世纪八十年代后期国际上知名的CAE软件有NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, DYN—3D, MARC, ASKA, DYNA, MODULEF、FASTRAN 等。
- 国内的CAE软件主要是JIFEX, SAP, FEM, FEPS, ...等。

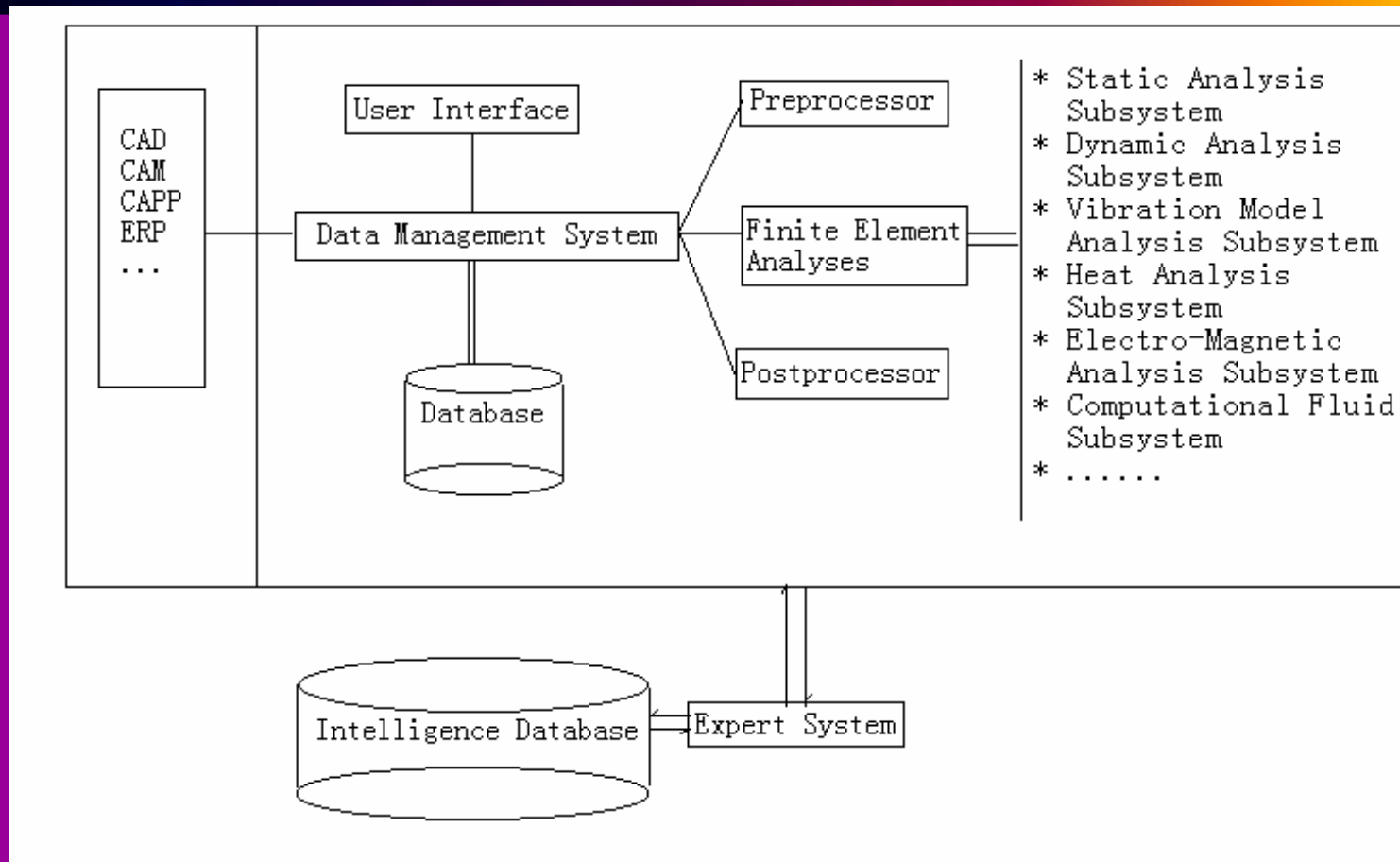


早期的**CAE**软件都是采用结构化
软件设计方法、用**FORTRAN** 语
言和数据文件管理技术，开发的
结构化软件。

- 近十五年CAE的发展，不仅是扩充了软件的功能、性能，更重要的是扩充了用户界面，前、后处理能力；对数据管理和图形部份，进行了重大的改造。新增的软件成分大都采用了面向对象的软件技术和C++语言。

- 近十五年CAE软件发展很快，目前市场上的CAE软件，在功能、性能、可用性、可靠性方面，基本上满足了用户的当前需求，它们可以运行在超级并行机，大、中、小、微等各类计算机系统中。

通用CAE的算法与软件模块



前处理

- 三维实体建模与参数化建模,
- 构件的布尔运算,
- 有限元自动剖分与节点自动编号,
- 节点参数自动生成,
- 荷载与材料数据输入与公式化导入,
节点荷载自动生成,
- 有限元模型信息自动生成, ...。

有限元分析

- 有限单元库,
- 材料库及相关算法库,
- 约束处理算法,
- 静力、动力、振动、线性与非线性解法库及相应的有限元系统组装模块库,
- 单元内物理场计算等, ...。

有限元分析子系统

根据工程问题的物理、力学和数学特征，有限元分析可以分解成若干子系统：

- 线性静力分析子系统，
- 动力及高速碰撞分析子系统，
- 振动模态分析子系统，
- 非线性分析子系统，
- 多体耦合与接触分析子系统，
- 热分析与热-力耦合分析子系统，...

- CAE软件的计算分析与模拟仿真能力，主要决定于单元库和材料库的丰富和完善程度，单元库包含的单元类型越多，材料库包括的材料特性种类越全，对工程/产品的分析与仿真能力就越强。
- 知名CAE软件的单元库一般都有百余种单元，并拥有一个比较完善的材料库。

- CAE软件的计算效率和结果的精度，主要决定于解法库；如果解法库包含了各种不同类型的高性能求解算法，它就会对不同类型、不同规模的问题，以较快的速度和较高的精度给出计算结果。先进高效的求解算法与常规的求解算法相比，在计算效率上可能有几倍、几十倍，甚至几百倍的差异，特别是在并行计算机环境下运行时。

后处理



- 有限元分析结果的数据平滑，
- 各种物理量的加工与显示，
- 根据设计要求对工程/产品按工程规范进行设计数据检验，
- 优化设计，
- 配筋设计与绘制设计图，

- 
- 前、后处理是伴随信息技术发展最快的CAE软件成份，它们是CAE软件满足用户需求，使通用软件专业化、属地化，实现与CAD、CAM、CAPP、PDM等软件无缝集成的关键成份.

- 
- 计算机辅助建筑工程施工(CAC)
 - 计算机辅助橡塑制品成型(CAD-Mold)
 - 计算机辅助模具设计与加工
 - 计算机辅助工艺优化与机械加工
 - ...○

用户界面



- 用户界面包括交互式图形界面，
- 数据导入与导出宏命令，
- CAE相关的GUI图符，
- 智能化用户界面支持系统(专家系统)。

- 
- 有些CAE软件拥有专用的智能化用户界面，能够帮助用户选择单元形态，分析流程，判断分析结果等，使用户使用CAE软件，就像使用“傻瓜”相机一样，具有一按即得的功效。
 - 有限元软件自动生成系统：集开发环境与应用系统（科学与工程计算）于一体的CAE系统。

数据管理系统与数据库

- 不同的CAE软件采用的数据管理技术不同：十五年前主要是文件管理系统，关系型数据库管理系统，目前主要是面向对象的工程数据库管理系统等；
- 数据库：标准构件库，典型工程 / 产品的结构图形库，常规材料特性数据库，相关的国家 / 国际标准与规范库，以及有关的知识库等。

- 数据管理系统和数据库已经成为大型应用软件实现系统集成的核心，它们为CAE软件的功能扩充，实现与CAD、CAM...软件的无缝连接奠定了基础。
- 数据管理系统和数据库的优劣，对大型CAE软件的运行效率影响极大。统计资料表明，在CAE软件运行中，70%左右的时间是在进行数据交换。

目前CAE软件功能

- 静力和拟静力的线性与非线性分析
- 线性与非线性动力分析
- 稳态与瞬态热分析
- 电磁场和电流分析
- 流体计算
- 声场与波的传播计算
- 结构优化
- 多学科优化，...

静力和拟静力的线性与非线性分析

- 各种单一和复杂组合结构的弹性、弹塑性、塑性、蠕变、膨胀、几何大变形、大应变、疲劳、断裂、损伤，以及包括多体弹塑性接触在内的变形与应力、应变分析。

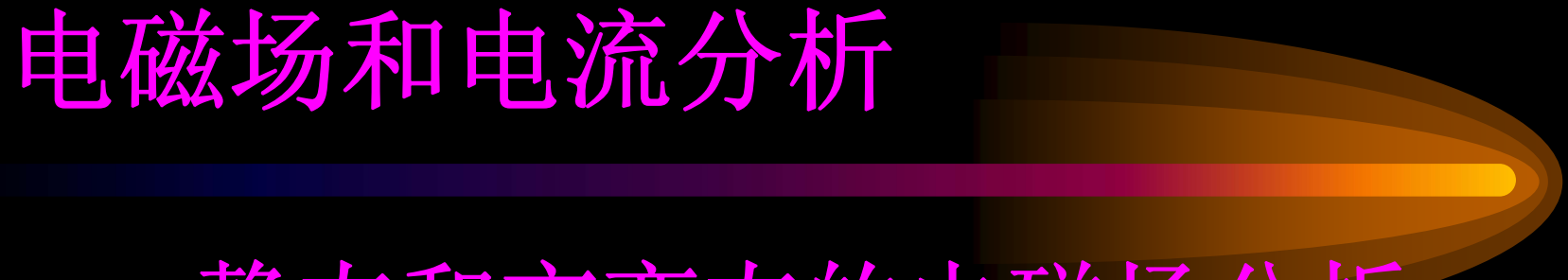
线性与非线性动力分析

- 各种动荷载、爆炸与冲击荷载作用下的时程分析，
- 振动模态分析，
- 交变荷载与谐波响应分析，
- 随机地震荷载及随机振动分析，
- 屈曲与稳定性分析等。

稳态、瞬态热传导与热-力耦合分析

- 热传导分析,
- 对流和辐射状态下的热分析,
- 相变分析,
- 热-结构耦合分析, ...。

电磁场和电流分析



- 静态和交变态的电磁场分析,
- 电流与压电行为分析,
- 电磁-结构耦合分析, ...。

流体计算



- 常规的管内和外场的层流与端流分析，
- 热/流耦合分析，
- 流/固耦合分析， ...。

声场与波的传波计算

- 静态和动态声场及噪声计算,
- 固体、流体和空气中波的传播计算, ...。

- 
- 伴随着CAE的发展，CAE 与 CAD/CAM /CAPP/PDM 一起已经形成了一个包括研究、开发、营销、咨询、培训服务在内的信息产业，这是一个对工程和产品制造业的技术创新有重大影响的信息产业，它已经并会继续对国民经济发展和国家安全做出重要贡献。

二. 发展趋势



- 功能
- 性能
- 软件技术
- 用户界面与智能化
- 网络化与CAE网上连锁店

2.1 功能

- 可变形体与多体耦合分析,
- 多相多态介质耦合分析,
- 多物理场耦合分析与多目标优化设计,
- 多尺度耦合分析与材料-结构一体化计算、仿真与优化设计,
- 微机电系统分析。
- CAI – 计算机辅助创新技术和工具

可变形体系与多体耦合分析

- 形体变化与荷载变化并发状态下可变形体系的动力与振动分析。例如，卫星天线、机器人、起落架。
- 多体耦合状态下的静力、动力与振动分析：多体接触分析，多体耦合动力分析与多体耦合振动分析。例如，车辆与路轨，车辆与桥梁等。

多相多态介质耦合

—复杂的工程/产品大都是处在多物理场与多相多态介质非线性耦合状态下工作，其行为绝非是多个单一问题的迭加。

- 多物理场（力场、渗流场、温度场、电磁场等）非线性耦合分析，
- 多相与多态（流、固、气）介质耦合分析。

多物理场耦合分析与多目标优化

- 多物理场(热、力、电、磁, ...) 耦合作用下物理和力学性能组合优化的多目标优化分析与设计。
- 材料-结构性能一体化分析与优化设计计算

多尺度耦合分析

- 从基本材料的组份及其局部就位性到制成复合材料，从复合材料做成构件，再由构件装配成工程/产品，存在着从微观、细观到宏观的多尺度现象；不同的尺度服从于不同的物理、力学模型；通过对宏观模型的细分，不能导致细观和微观模型；相反，通过微观和细观模型的无限迭加，也难导致宏观模型。因此，在工程/产品的精细分析中，一定会遇到多尺度模型的耦合问题。目前的CAE软件，基本上局限于宏观物理、力学模型的工程/品分析。

- 对于多物理场的强耦合问题、多相介质耦合问题，特别是多尺度耦合问题，目前尚没有统一、可靠的理论和方法，处于基础性前沿研究阶段，它们已经成为国内外科学家主攻的目标，由于其强烈的工业背景，基础研究的任何突破，都会被迅速纳入CAE软件，以支持新兴工程/工业产品的技术创新。

材料-结构一体化的性能预测和服役行为分析是十分困难和复杂的，问题的主要特征是：

1. 多尺度特征，材料的微观、介观和宏观性能及工作行为，不仅依赖于组成成分，同时也强烈地依赖于各个尺度（层次）的结构；2. 多模型耦合特征，不同层次（尺度）的物理力学行为服从于不同的数学物理模型，评价材料与结构的性能和行为，必须解决多尺度模型耦合的难题；3. 多物理场（力、热、电、磁、光）耦合的时变特征，材料和结构在成型过程中产生的各种相变，形成的各个层次结构，是在复杂的物理和力场耦合作用下发生的；材料和结构在服役环境下的微观结构演变是在极短的时间内完成的，因此在考虑不同尺度微结构演变时，必须同时处理时间和空间的多尺度耦合；4. 随机不确定性。

计算材料科学与材料信息学

- 材料模拟—Materials Studio :

Materials Visualizer — 分子、晶体及高分子材料结构模型设计和前后处理模块

Discover, Forcite — 分子力学及分子动力学计算模块

DMol, CASTEP — 密度泛函(DFT)及量子力学计算

MesoDyn — 高分子熔体及高分子共混体系

COMPASS, Amorphous, Reflex and Reflex plus, Equilibria, VAMP, DPD, X-Cell,....

- 材料模拟—Cerius-2

- 材料信息学软件: Ms Matinformatics

- 
- 生命科学
 - 化学信息学
 - 生物信息学,。

从材料设计到工程/产品设计、仿真、优化于一体的CAE系统

- 随着计算材料科学的发展，不久的将来，计算机辅助于材料设计将会纳入CAE软件，实现从材料性能的预测、仿真，到构件与整个产品的设计、性能预测、系统仿真，形成集计算机辅助于材料设计、制备，到工程或产品的设计、仿真、优化于一体的新一代CAE系统。

微机电系统分析与纳米计算

- 随着多物理场、多相介质耦合理论与亚微米、纳米科学和技术的发展，以及微机电系统开发的强烈需求，专门用于微机电系统设计计算和系统仿真的CAE 软件正在开发，不久将会问世。

CAI – 计算机辅助创新技术和工具

- **TRIZ**（发明专利解决理论）理论；
- 本体论（创新知识的关联性）；
- 多个工程科学领域解决相似技术问题的有效方法；
- 现代设计方法学；
- 自然语言处理技术；
- 计算机软件技术； ...

Pro/Innovator

TRIZ理论

G.S. Altshuller(1946)在研究和处理世界各国发明专利的过程中，通过总结各种技术发明的演化规律模式，解决各种技术矛盾和物质矛盾的创新原理和法则，建立起一套由解决技术问题实现创新开发的各种方法、算法组成的综合理论体系，并结合各种工程学科的原理和法则，创建了‘发明问题解决理论’-TRIZ



工程/产品创新应该是基于知识和技术的创新，特别是基于专业和系统知识的创新。基于发明专利的知识发掘创新理论为支撑的CAI软件为工程师实现工程/产品创新提供了最前端的支持。

2.2 性能



- 基于超级计算机和计算机群的并行计算CAE系统,
- 基于网格计算的CAE系统,
- 基于互联网的集成化与支持协同工作的CAE系统

适应于超级计算机和机群并行计算CAE系统

- 每秒百万亿次(135万亿次)的计算机系统已经问世,每秒千万亿次的计算机与机群系统即将诞生,适应这些大规模并行计算平台的新型高精度和高效率算法正迅速发展。
- 新一代的CAE系统将能够解算上千万阶级方程组,能够实现对复杂工程 / 产品的实时和真三维仿真。

基于网格计算的CAE系统

- 互联网已经将千万台各类计算机连接在一起，专家们正在开发将互联网上所有计算机硬件、软件、数据库以其连接的实验设备统一和有效使用的网格计算技术。随着这一技术的成熟，一定会出现基于网格计算的CAE系统

基于互联网的集成化与支持协同工作的CAE系统

- 随着分布式对象集成技术和网格计算技术的发展，以及大型工程和复杂产品开发中实施并行工程和研究设计集团的联合攻关，未来的用户将不再需要单一的**CAD**、**CAE**、**CAM**、**CAPP**、**PDM**和**ERP**产品，它们需要基于互联网(**JAVA**)的、具有行业特色的、集成化与支持协同工作的套装系统。

- 大型工程和复杂产品，例如发电厂、化工厂、飞机、轮船、高速列车以及航天技术产品等，它们由数万到数百万个构件和数以千计的设备组成，其设计、分析、安装模拟和运行仿真，都要涉及数个到数十领域的专业技术人员。因此，基于Internet和Grid computing的异地、异构系统下的设计计算，实现对大型工程 / 复杂产品的全面分析和运行仿真，将成为CAE的一个十分重要发展方向。

2.3 软件技术



- 真三维图形处理与虚拟现实,
- 基于Internet和Grid computing的面向对象的工程数据库管理系统及工程数据库。

真三维图形处理与虚拟现实

- 计算机图形处理能力近年有了上百倍的提高，再加上三维图形算法、图形运算和参数化建模的发展，快速真三维的虚拟现实技术已经成熟。因此，CAE软件的三维实体建模，复杂的静态、动态物理场的虚拟现实技术将会有大发展。

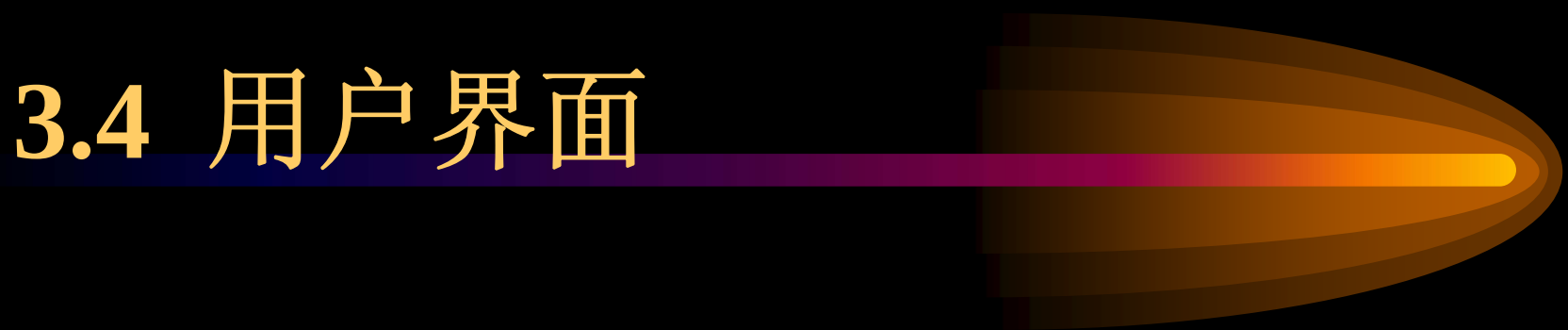
基于Internet和Grid computing 的面向对象的工程数据库管理系统及 工程数据库

- 高性能 / 价格比的大容量的存贮器及高速存取技术在迅速发展，PC机的硬盘容量很快将由GB达到TB量级。
- 用户将要求把更多的计算模型、设计方案、标准规范和知识性信息纳入CAE软件的数据库中。

- 
- **Internet和Grid computing环境下的数据库管理系统**，必须能够管理多用户并发存 / 取的、与时间 / 空间相关的、大量非结构化的、各种类型的数据。
 - 高性能的、基于网格环境的、面向对象的工程数据库管理系统将会出现在新一代的**CAE**软件中。

- **Internet和Grid computing环境下的数据库管理系统应该具有关系型数据库，面向对象数据库及其管理技术的优点，支持抽象数据模型定义，分布式、异构、虚拟计算环境与多用户并发I/O状态下的数据管理， Internet和Grid computing环境下的高级存储与查询语言，访问权限与数据所有权的保护，异构数据库的时空一致性和有效性检验，系统异常状态下的数据一致性恢复等。**

3.4 用户界面



- 多媒体用户界面
- 智能化用户界面

多媒体用户界面

- 计算机图形技术正在迅猛发展，狭义的语音输入 / 输出已成现实，计算机视觉系统已能在一定范围内分析体态、眼神和手势，隐含信息请求的数据发掘技术也已冒泡，会听、看、说、写和学习的计算机即将问世，这些多媒体技术一定会使未来CAE软件的用户界面具有更强的直观、直感和直觉性，给用户带来极大便利

智能化用户界面

- CAE软件是一个多学科交叉的、综合性的知识密集型产品，稍大一点的CAE软件都由数百到数千个算法模块组成，其数据库存放着众多的设计方案、标准构件，行业性的标准、规范，以及判定设计和计算结果正确与否的知识性规则。
- 怎么使用软件？怎么判定计算结果？支持用户有效地使用这些软件的专家系统，将成为用户界面的重要组成部分。

3.5 集成化、专业化与属地化

- 目前多数还是单一、孤岛式的CAD、CAE、CAM、PDM产品，集成化程度不高。
- 随着产品的自主创新和新产品开发实施并行工程，企业将需要与CAD、CAE、CAM、PDM无缝连接的、具有专业特色的、CAE系统。

SolidWorks套装产品

CAD: SolidWorks (2-D & 3-D设计工具) →

SolidWorks Office Professional (3-D建模, 协同设计, 设计资源 (标准件库、工具库), PDMWorks) →

SolidWork Office Premium (SolidWorks Routing-制管、配管和布线, COCMOSWorks Designer, COSMOSMotion)。

CAE: COSMOS 分析软件 – COSMOSWorks, COSMOSMotion, COSMOSFloWorks.

基于Internet的咨询服务.....



满足专业化属地用户的需求，即国外**CAD / CAE / CAM / PDM** 软件中国化，以及中国出口软件的属地化，应该成为**CAE**软件开发商的经营之道。

实现初级集成化的若干途径

- 直接的桥式软部件连接.
- 共享数据库+桥式软部件连接.
- 建立基于Internet的、可支持二次开发的智能化信息交换平台。

力元智能信息交换协作平台

- 信息传输与交换平台，
- 企业应用集成平台，
- 协同工作平台。
- （端口池，数据传感器）

3.6 CAE网上链锁咨询业

- 随着互联网的普及， 网格计算的发展， 宽带通信技术的突破， 通信、广播和计算机三网合一正在实现， 一个完全信息化的、充满着虚拟色彩， 而又实实在在的新时代正在到来， 它在改变着现代人的工作、学习、交往和娱乐方式， 实现处处可以学习， 处处可以工作。

- 
- 立足于全社会的网络环境，建立专业化的CAE网上链锁咨询店，实施网上经销、网上培训与咨询服务，以及计算量大的工程设计网上协同进行，使用户能够进行多专业、异地、协同、并行地设计与分析，实施工程与产品创新，这必将成为CAE软件应用的一个发展方向。

- 这种网上连锁咨询店能否生存，关键在于能否建立一个自适应于当前社会环境的、实现知识产权保护 and 合理付费的机制，这种机制应该保证软件与数据产权的拥有者，能够依据合同条款从使用者那里获得合理的收益，并给用户提供一个方便地调用软件和访问数据，以及方便合理的付费途径。

- 这不是一个技术性难题，而是一个涉及到观念和法律的问题；
- 社会需求和潜在的巨额利润，会刺激有志之士，摸着石头过河，一步步地解决这个难题，使CAE网上链锁咨询店走上兴旺发达之路。

- 工程和产品的自主创新为CAE发展提供了强大的动力，信息技术的飞速发展CAE技术的提升提供了技术基础。CAE技术将会随着工程科学技术的飞速发展以及中国的和平崛起，而迎来一个更为辉煌灿烂的明天。



谢谢！

2006-4-18