

当前地下水流有限元系统关键问题的探讨

毕振波¹, 郑爱勤²

(1. 浙江海洋学院 数理与信息学院, 浙江 舟山 316004;
2. 西安科技大学 地质与环境工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:有限元分析法在地下水领域中得到了越来越广泛的应用。地下水流有限元分析系统如 Feflow、Visual Groundwater 变得越来越流行,然而它们在几何建模功能与有限元分析功能集成方式基本上沿袭传统模式,效率低下。此外有限元分析系统的网络功能微弱或甚至没有,难以适应未来的发展。文中这些问题进行了深入的探讨研究,提出地下水有限元分析系统应该采用基于特征的几何建模功能与有限元分析功能集成,并通过数据模型简化和协同安全访问控制达到有限元分析系统的网络化。

关键词:地下水有限元分析;基于特征建模;网络化;数据简化;协同安全

中图分类号:P641;TP311.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)07-0190-04

Research of Key Questions in Current Finite Element Analysis System in Groundwater

BI Zhen-bo¹, ZHENG Ai-qin²

(1. School of Mathematics, Physics & Information Science, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China;
2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract:Finite element analysis is more widely applied in the field of groundwater. Finite element analysis softwares in groundwater flow, such as Feflow, Visual Groundwater, is becoming increasingly popular. However, in integration methods of geometric modeling capabilities and finite element analysis, they are basically followed the traditional work mode and inefficient. In addition, network functions of finite element analysis softwares are weak or no, it is difficult to adapt to their future development. In this paper, the issues are discussed and studied in depth, finite element analysis system in groundwater should be used through the integration of feature-based geometric modeling and finite element analysis capabilities, and network function for finite element analysis system is achieved through data reduction and cooperative and security access control.

Key words:finite element analysis of groundwater;feature-based modeling;network;data reduction;cooperative and security

0 引言

有限元分析在地下水领域中得到了越来越多的应用,以有限元为计算方法的水流模拟软件如 Feflow、Visual Groundwater 现在应用很流行^[1-4]。随着应用的逐渐深入,这些模拟软件的功能也变得越来越强大。然而它们在几何建模功能与系统集成方式、有限元分析系统工作模式基本上沿袭传统模式,效率低下,难以适应功能扩展。尤其今天的工程问题变得越来越复杂,这些问题将会阻碍这些有限元分析系统的深层的发展和应用。文中就当前这些关键问题进行了探讨研究。

1 几何建模和有限元分析的集成

有限元单元法是地下水流等领域中主要的数值计算方法之一,然而当前有限元分析系统的前处理与对象的几何建模通常是割裂开的,如 Feflow 主要通过数据输入接口将用户已有的 GIS 空间多边形数据做为低图生成有限单元网格,或者在初步生成网格的基础上用鼠标设计和调整网格几何形状,增加和放疏网格密度。这在某种程度上会造成几何建模数据向系统输入的不流畅^[5]、几何建模数据和前处理需剖分的模型数据格式不完全一致,会产生后面的有限元分析误差,不得不重新建模、重新修改参数、重新剖分、再计算和再评价分析等重复工作。产生此问题的根源是由于几何建模功能和 FEA(Finite Element Analysis)集成不紧凑和几何建模采用的数据模型的局限性造成的。

文中在分析现有几何建模技术优缺点、其和 FEA

收稿日期:2010-12-27;修回日期:2011-02-20

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Y5100054)

作者简介:毕振波(1978-),男,讲师,博士研究生,研究方向为数字建筑中的信息处理技术,水文地质应用。

的集成模式的基础上,认为基于特征的建模与 FEA 集成是一种有效的模式,两者应该紧密耦合地集成在一起,从而能消除传统地下水流有限元分析系统发展的“瓶颈”问题。

1.1 几何建模

几何建模是解决 FEM 问题的起点。通常几何建模系统主要分为基于线框模型建模、基于表面模型建模和基于实体模型建模三种,当然还有曲面实体建模、分数维(Fractal)建模、体绘制技术以及从二维图像信息或二维正投影图构造形体的算法^[5-9],这些建模方法极大地扩大了传统几何建模方法的应用范围,但這些方法主要针对于特殊的领域,不具有普适性。早期建模多采用较单一的模型,现在常将几种模型有机结合起来,集成在一个系统中,共同完成对象几何模型的创建。随着 CAD/CAE 技术的发展,FEA 与几何建模系统在某种程度上实现了一定的集成,但还存在某些局限性,如:线框模型没有构成面的信息,多数情况下会对物体形状的判断会产生多义性;采用表面模型,形体的实心部分在边界的哪一侧是不明确的;实体建模及后来的曲面建模只是提供对象的几何信息,非几何信息、高级的工程语义信息等都是缺失的。麻省理工学院的 Gossard 教授在 1978 年首次提出了特征的概念。经过几年发展,出现了特征模型和基于特征的建模思想。特征建模是上述建模技术的发展,它从实际工程的角度出发,对对象的各个组成部分及其特征定义,使所描述的对象信息更符合工程意义。特征模型既包含了研究区的几何信息,又包括能为后续的有限元分析提供的高层语义信息^[5,8,9],基于特征的几何建模与 FEA 系统集成是 FEA 系统发展的趋势。

1.2 当前几何建模和有限元分析的集成模式

1.2.1 基于中间文件模式

几何建模和 FEA 系统的集成要解决的问题是如何实现从几何模型到有限元分析模型的转换,图 1 表示地下水流有限元分析在计算机上的解决方案。为进行有限元网格剖分,许多有限元分析系统与通用 CAD 软件进行了“集成”。即在用以 CAD 软件完成计算空间或研究区的几何建模后,运用 FEM 的网格剖分功能对导入的几何模型进行剖分离散化,然后进行计算。如果分析的结果不符合工程要求,则重新进行建模和网格剖分及计算,直到满意。因此许多商业有限元软件提供了和流行的 CAD 软件(如 Pro/ENGINEER、SolidWorks 和 AutoCAD)的接口(如 IGES、STL、DXF 等),有的还提供了通用 GIS 的接口。这种接口不是网格剖分模块与 CAD 软件的直接接口,是基于某种特定格式的中间文件的数据传递与转换。由于标准 CAD 格式种类多、各有所长,所以在转换过程中会存在不足

之处,如传递和转换数据导致的信息丢失、误解和失真等缺陷,有时会导致无法剖分出所需的网格。

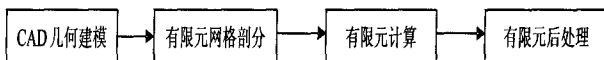


图 1 地下水流的有限元计算机上的解决方案

1.2.2 几何建模嵌入 FEA 系统模式

由于利用中间文件模式的缺点,现在多数 FEA 系统在前处理中加入了自己的几何建模功能,采用统一的数据格式文件、统一的工作界面,实现几何建模和 FEA 的无缝集成。这种方式的优点是明显的,且易操作。在这种系统集成模式中,可采用参数化建模和变量化建模。前者可以定义建立对象的参数且可以参数化对象模型,使 CAD 系统具有交互式建模功能。后者在前者的基础上做了进一步的改进,它保留了前者的基于特征、尺寸驱动设计修改、全数据相关的特点,而在全尺寸约束方面做了重大的修改,它将形状约束和尺寸约束分开来单独考虑,这样既具有了参数化建模技术的优点,又克服了它的许多不足之处,但其几何建模采用的数据模型易忽略一些高层的语义信息和非几何信息。

1.3 基于特征的几何建模功能与有限元分析集成

传统的几何建模方法一方面侧重于反映对象的几何信息和拓扑信息,而与流场、水量分布、开采、抽取、入侵分析有关的等非几何信息往往是用文件、符号来表示,难以在模型中进行统一的考虑和处理;另一方面传统方法不是直接用井、温度和盐分等具有工程实际意义的概念来描述,这与实际问题差别较大,容易导致在工程信息处理中断、人为干预量大。因此基于参数化特征的几何建模技术,即特征技术,把特征作为对象描述的基本单元,将对象描述成特征的集合,并以特征的属性参数作为操作的匹配元素^[8,9]。

由于地下水水头分布主要与研究区的含水层构造特征、水文地质条件特征有关,这些特征决定了该区域实际的地下水的分布和水资源量,因此研究区的特征实际包含着工程分析的最终信息,实际水文地质工作者完全可以利用这些信息进行研究区的水资源模拟,而无须太关心研究区的一些细节上的几何特征。特征的定义较多,在不同的生产环境下有不同的含义。在地下水模拟中,特征是工程全周期中的研究区信息的载体,要实现几何建模与其后续网格剖分等过程的集成,特征应载有和传递更丰富的与研究区域有关的信息。文献[10]提出了广义特征的概念,因此笔者认为特征应是与开采、地下水量分析等活动密切相关的具有功能语义的地质条件和分析、开采等属性信息的集成单元。特征可以分为研究区形状特征和面向分析过程的特征。形状特征又分为主特征和辅助特征。主特

特征是指构成研究区主要形状的特征,辅助特征是指用来修改基本特征的特征。面向过程的特征可细分为:精度特征、技术特征、水文特征、有限元网格单元密度、分析特征和方法特征等。基于特征几何建模可以采取交互式特征定义、特征自动识别与提取、基于特征的设计等方法^[8]。非流形技术^[7]的目标是要用统一的数据结构表示线框、表面、实体和曲面等模型,在特征技术帮助下,可以进一步扩大几何建模的应用覆盖域。传统的集成模型的目标是采用统一的数据格式在不同应用系统之间实现数据共享,无法体现不同应用模型在一个模型中的集成。非流形模型是目前几何建模模型中要采用和某种程度上已采用的数据模型,具有较强的对象描述和便捷操作的能力^[10-12]。因此在水文地质中,要用一个模型中统一表示多个不同应用模型,可以考虑采用类似于非流形模型的适合于地下水的数据库模型。

基于特征的地下水流有限元分析的另一个重要方面是与有限元分析相关的地下水类型、压力、边界条件等非几何信息在特征建模系统中的表示和操作^[8]。在传统的 FEA 中,非几何信息的指定是在网格划分之后进行的,其实这种方式会使网格剖中丢失很多与之相关的信息,得到的离散数据在有限元计算中会产生较大的误差,甚至得到非想要的结果。基于特征几何建模要求非几何信息在网格划分之前指定,并且与几何建模是同时进行,这样使得后续的网络划分、模型简化都能考虑到非几何信息的影响,使得最终建立的分析模型更加合理。在特征建模系统中,非几何信息可以依附于具有某种形状的研究区进行保存。但是非几何信息的建模必须采用虚几何的相关技术^[10,11]。非几何特征在计算机内表示采用虚几何与实几何相结合的表示方法,非几何特征的操作包括非几何特征的添加、修改和删除等操作。具体实现可以考虑采用内嵌式、外挂式和更改系统表示机制等方法。实际上为了

更好地实现特征建模与有限元分析的集成,还需在几何模型向分析模型的转换过程中和分析结果向几何模型的反馈过程中增加起控制和能起某种影响的方法和因子。可以考虑参考文献[13]所述的面向对象技术、支持建模模型和分析模型的统一数据库机制、两种模型的映射机制和基于人工智能的推理技术的实现机制,但考虑到未来的有限元分析系统很可能会采用 B/S 结构的运行模式,笔者认为还应该采用贯穿基于特征建模和有限元分析过程的协同和动态访问控制机制的技术。面向特征的建模和地下水流有限元分析集成的总体框架如图 2 所示。图 2 实际工作中特征的识别和提取是关键,且随其地下水分析目的不同,其相似过程中的特征往往不一一对应^[10],通过建立特征库,借助各种知识库和专家系统可以非常方便且有效地进行地下水的有限元工程分析。

2 地下水流有限元分析系统的网络化

增加网络服务功能是现在有限元分析系统发展的一种必然的趋势,这是由于科研或工程人员一方面要进行有限元分析过程中的数据共享,另一方面要进行工程分析中的经验交流和便捷的异地操作。地下水流有限元分析系统实现网络化关键技术主要包括数据模型简化和协同安全访问控制。

2.1 数据模型简化

水文地质工作者要借助网络进行协作和数据共享,或在异地客户端之间引用工程分析进行中的模型数据,这在传统的有限元分析系统中是做不到的。随着网络技术的发展,有限元分析系统需要具有网络化环境下的 B/S 运行模式和相关能力,实际快速有效的数据传输且能满足网络传输的实时性要求是实现这种运行模式和能力的重要条件。但由于当前网络带宽和计算能力仍具有某种限制,要达到这些条件需要进行网络中数据模型的简化。数据模型简化可以通过对模型

数据进行不同程度的简化和压缩,从而减少数据传输量,加快传输速度。当前数据模型简化技术多是基于多分辨率技术的,在水文地质中,主要是针对多边形网格模型、后处理中的动画和有限元分析可视化结果进行简化。

LOD (Levels of Detail) 意为细节多层次,LOD 技术能根据物体模型的节点在显示环境中所处的位置和重要度,决定物体渲染的资源分配,降低非重要物体的面数和细节度,从而获得高效率的渲染运算。

当前 LOD 技术在虚拟现实及 3D 游戏场景、虚拟地形、Google 卫星地图或其他电子地图中都得到了应用。由

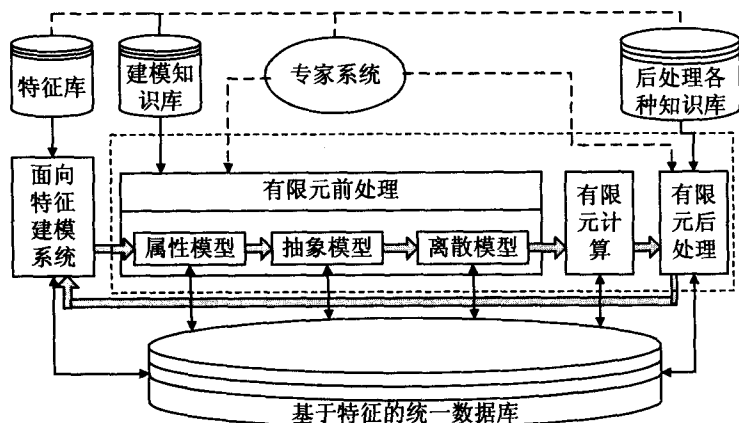


图 2 基于特征技术的建模系统和有限元分析集成的总体框架

于 LOD 技术符合人类视觉认知的原则,在不影响人的视觉效果的前提下,通过减少网格单元数目和逐步简化图形或动画细节有效地降低地下水研究区模型和三维真实感图形的复杂度,所以可以在有限网络带宽和网络计算能力条件下,大幅提高网络环境下实时图像传输和共享操作,而且可以提高网络环境下模型的实时显示、预览和基本操作的速度。但在地下水中,应用 LOD 的主要因素包括:实际需求精度、研究区数据模型的大小、含水区域地貌变化程度和水头分布密度等。LOD 多分辨生成算法主要有基于小波的多分辨率分析算法和基于网格简化操作的多分辨率的算法^[14]。前者为细节层次模型提供了一个完美的数学表达方式,方法简单高效,但它只适用于具有细分连通性的三角形单元网格;后者多采用序列结构组织网格简化,通过合并冗余元素或重采样模型实现模型的简化^[15]。由于传统的几何建模模型缺乏一些高层的语义信息,因此需要采用基于网络的面向特征的 LOD 技术方法。Lee J Y 等提出了渐进实体模型,是基于单元拓扑表示的^[16,17]。该方法利用单元拓扑表示的某些特性,通过搜索并传输每次特征建模操作过程中所增加和删除单元集,实现实体模型的渐进传输。Lee S H 提出了一种特征模型的多分辨率建模方法,根据体积大小,重新组织特征的建模次序,得到模型的多层次表示^[18,19]。该方法基于单元拓扑表示,删除或隐藏特征不需要布尔操作就可以实现,可快速简化模型到所需的细节层次。结合上述方法的优点,文献[15]提出了一种新型的三维 CAD 特征模型的多分辨率建模方法,通过高层的特征操作实现模型的多层次简化,该方法只与高层的特征信息相关,与具体的底层表示无关,可适用于任何底层表示形式的 CAD 特征模型。针对地下水流的有限元模型特点,借鉴上述各种面向特征模型的数据模型简化方法并将其有效地应用到地下水流有限元分析的模型简化中是不难的。

2.2 协同安全访问控制

网络环境下,有限元分析的协同指计算机在不同任务和空间的情况下,协同、协调和协作工作组的应用。核心是全域数据的共享和局部的小组协同合作,前者保证了有限元分析数据的统一性和相容性,后者使用户能在线共享模型数据。实时有限元网络化协同分析应能使空间上分布的计算机群体成员通过网络实时共享设计模型,并通过提供的协同分析支持工具进行协同编辑和观察。快速共享是保证协同分析的关键要素,但要求有良好的模型数据传输机制,因为良好的传输方式可以提高数据传输速度,所以对于分析模型可以考虑采用以下传输方式:在每一次操作之后只传输更新部分的相关数据,将更新的数据与客户端旧数

据合并得到新的模型数据,这种方式传输数据量小,具有较好的传输效率,可满足协同分析、模型编辑及各种可视化要求,但系统算法和实现相对传统传输方式复杂,客户端需要有一定的数据管理和模型数据更新合并能力;二是模型以数据流的方式连续不断地传送到客户端,客户端在接收数据的同时可以对分析模型部分显示和操作,这种传输方式可以不必等整个模型完全下载完后才能观察和操作,但是对完整数据模型的快速传输较有效。从系统结构上看,有限元分析系统应该采用 B/S 结构,结合这两种方式的优点来设计网络环境下数据的传输方式。

通过互联网浏览或引用分析中文档或 GIS 空间多边形数据,或者异地随时了解项目的进展和变化,或者协作完成工程中的有关问题等是经常的事情。因此有限元分析系统除具有良好协作能力,良好的安全存取访问控制也是必要的。访问控制机制决定用户的程序能做什么及能做到什么程度。访问控制一方面可以通过身份认证来检验主体的合法身份;另一方面可以通过授权来限制用户对资源的访问级别。可以参考 Clerk Wilson 安全模型,它的实现基于事务处理机制。

图 3 为访问控制模型的基本结构图,通过访问控制决策功能模块实现主体对客体的访问控制。实现中访问控制模型可以采用分布式的工作平台,访问控制权限设计成通用的,还可以自定义的配置,同时要提供不同类型数据的不同粒度的等级的保护^[15]。

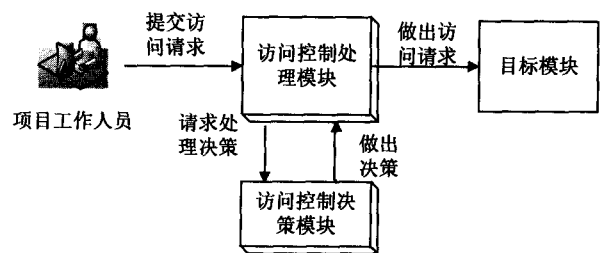


图3 访问控制模型的基本结构图

参考文献:

- [1] 薛禹群. 中国地下水数值模拟的现状与展望[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 1-6.
- [2] 徐艳杰, 常利武, 黄会平. FEFLOW 在地下水数值模拟中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(2): 86-88.
- [3] 丁继红. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[EB/OL]. 2004-08-16. <http://www.cigem.gov.cn/readnews.asp?newsid=1037>.
- [4] Hydrological Modeling Community - 水文建模社区[EB/OL]. 2009-12-02. <http://forum.westgis.ac.cn/viewforum.php?f=6&start=0>.
- [5] 宋玉银, 蔡复之, 张伯鹏, 等. 基于特征设计的CAD系统

2. 17% 降到了 1. 08%。

表 2 0. 24Mpa 下映射后检测值对比

序号	P=0. 24MPa 时流量 Q(l/h)		
	映射值 C	设备 B	(C-B)/B
1	10. 9986	10. 6000	3. 76%
2	11. 4393	11. 3000	1. 23%
3	11. 2192	11. 3000	-0. 72%
4	11. 1552	11. 3000	-1. 28%
5	11. 0005	10. 7000	2. 81%
6	11. 1072	10. 7000	3. 81%
7	10. 7849	10. 5000	2. 71%
8	11. 4169	11. 4000	0. 15%
9	11. 1185	11. 1000	0. 17%
10	10. 5244	11. 0000	4. 32%

仿真结果证明,以上算法建立的 Q_A 到 Q_B 的映射网络 f_{AB} 反映了 Q_A 与 Q_B 之间的复杂的函数关系,通过映射,在误差允许范围内,做到了两者的统一。

4 结束语

通过对两台检测设备检测原理、管道特性的分析建立模型,找出影响检测结果的因素,得出两者之间存在复杂的非线性关系的结论。

选用合适的神经网络算法给出了两者之间的映射关系,仿真结果显示,在误差允许的范围内,通过映射使两台设备对同一喷嘴流量特性的检测结果得到了统一,满足了工程检测的需要。

参考文献:

[1] 甘小华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[2] 国防科学技术工业委员会. HB 7667-2000 中华人民共和国航空工业标准:航空发动机燃油喷嘴性能试验[S]. 中国航空集团 301 所,2000.

[3] 陈冬雪,燃油总管试验器压力-流量控制系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.

[4] 侯凌云,侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京:中国石化出版社,2002.

[5] 李 芝. 液压传动[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[6] 潘卫国,池作和,廖永进,等. 粉体气力输送时弯管的阻力特性及计算方法研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1997,31(6):805-810.

[7] 阎平凡. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[8] Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. Neural Network Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

[9] 柴亚民. 用改进的模拟退火遗传算法优化 BP 神经网络的研究[D]. 长春:吉林大学,2008.

[10] 罗 烨,李秉璋,柳益军,等. 基于贝叶斯正则化网络的绿色创新战略选择[J]. 计算机与数字工程,2010,38(8):126-128.

[11] 祁伟丽,秦新强. 基于 B 样条的平面轮廓重构闭合曲面算法[J]. 计算机技术与发展,2008, 18(7):112-115.

[12] 夏 玫,陈立潮,王新波. 一种提高 BP 神经网络泛化能力的改进算法[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):62-64.

(上接第 193 页)

[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1998,10(2):145-151.

[6] 孙家广,许隆文. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社,2003:398-478.

[7] Hearn D, Baber M P. Computer Graphics with OpenGL[M]. Third Edition. 北京:电子工业出版社,2004.

[8] 张玉峰. 特征造型技术在有限元分析建模中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2004.

[9] Nakajima N, Tokumasu S, Kunitomo Y. Feature-based heuristic for finite element meshing using quadtrees and octrees [J]. Computer Aided-Design, 1992, 24(10):677-690.

[10] Sriram R D, Wnag A, He L H. GNOMES: An object-oriented non-manifold geometric engine[J]. ACD,1995,27(11):853-868.

[11] 冯 力,叶尚辉. 非流形几何造型技术与应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,1998,10(5):393-399.

[12] 唐荣锡. 对 CAD 标准化的再认识[J]. 航空制造工程,1998(5):32-34.

[13] 虞 春,周雄辉,张永清. 面向有限元分析的特征建模技术[J]. 工程设计,1999(3):34-39.

[14] 成迟惹,潘志庚,石教英. 一种新的多分辨率模型表示方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(7):1-7.

[15] 方萃浩. 网络化几何造型关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[16] Lee J Y, Lee J H, Kim H, et al. Progressive solid models for Internet-based design and collaboration[C]// In: Proceedings of ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference. Montreal, Canada: [s. n.], 2002.

[17] Lee J Y, Lee J H, Kim H, et al. A cellular topology-based approach to generating progressive solid models from feature-centric models[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(3):217-229.

[18] Lee S H. Feature-Based Multiresolution Modeling of Solids [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(4):1417-1441.

[19] Lee S H. A CAD-CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(9):941-955.