

边界面法----一种真正的等几何分析方法

张见明

汽车车身先进设计与制造国家重点实验室，湖南大学机械与运载工程学院，湖南长沙

Email: zhangjm@hnu.edu.cn

摘要

边界面法(BFM)是边界积分方程(BIE)与计算机图形学相结合的数值计算方法。事实上BFM是BIE的一种建立在几何体上的数值实现。在BFM中，几何体边界上各个连续的曲面片（在计算机图形学种成为Face）作为物理量插值的基本单位。Face相当于边界元法中的一个大的非连续单元，不过这个大单元的内禀坐标不是普通单元的自然坐标，而是和计算机图形学一致的曲面参数坐标。Face还可以进一步划分为一系列连续或非连续的次一级单元。这些单元与边界元法中的单元相似，不过它们处在曲面的参数空间中。BFM继承了边界元法的所有优点。更重要的是，BFM利用CAD实体造型系统中边界表征(Brep)数据结构，直接在CAD几何上进行CAE分析，从而自然地将CAE与CAD融为一体。因此BFM做为一种全新的CAE分析技术，可以克服当前以有限元法为主体的CAE技术所存在的固有缺陷。该技术有如下特点：

1. 从本质上实现CAD造型设计和CAE分析无缝集成；
2. 降低网格生成复杂度，甚至避免网格生成以实现分析自动化；
3. 所有的分析直接在完整的三维几何实体上进行，不使用任何抽象单元，从而避免几何误差对计算精度影响；
4. 结合快速算法提高边界面法的解题规模和速度，可以求解任意几何形状、任意材料构成的大规模复杂工程问题。

综上，我们认为深入开展对BFM的研究是非常有前景的，近年来湖南大学新一代CAE软件研究所对BFM系统地展开了研究，不断发展BFM理论，拓宽应用面，取得了一些初步成果，具体表现为：

1. 结构不断复杂化。通过参数空间的自适应网格划分技术，边界面方法能够分析的结构越来越复杂（如图1、图2所示结构），特别对于一些具有细小特征的结构（如考虑冷却水管的大型重力水坝以及考虑焊缝的钢架结构等），边界面自动分析技术的优势更加明显；

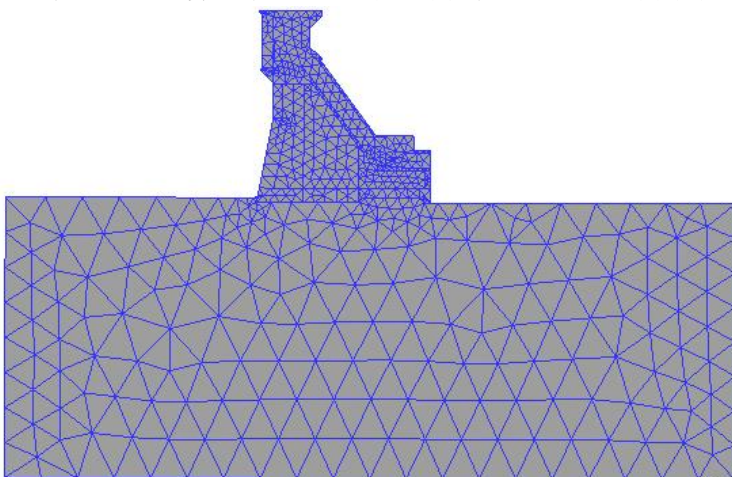


图1：某大型重力坝的边界面分析模型

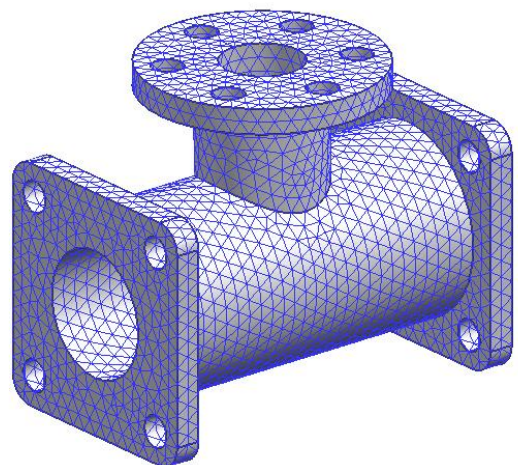


图2：一种机械零件的边界面分析模型

2. 计算规模不断增加。通过结合快速多极算法(FMM)、分级矩阵(H-matrix)以及自适应交叉拟合(ACA)算法等快速算法，将边界面法的内存需求从 $O(N^2)$ 量级降低到 $O(N \log N)$ 量级，现阶段已

在微机上实现 500,000 自由度的分析；

3. 计算速度不断提高。通过软件硬件两方面的加速，边界面法的计算速度得到了量级水平的提高，软件方面通过结合快速多极算法、分级矩阵以及自适应交叉拟合算法等快速算法，边界面法的计算复杂度从 $O(N^2)$ 量级降低到 $O(N \log N)$ 量级；硬件方面通过设计并行算法，调用 GPU 计算，边界面法的计算速度得到成倍的提高。
4. 应用范围不断增广。边界面法用于热传导问题[1-2]、线弹性静力问题[3-4]的分析已经可以解决实际工程问题，对声波问题、弹性稳定性问题、断裂问题等复杂物理问题的分析已经初步实现，另外用于分析接触问题、弹性动力学问题的工作已经展开。

现阶段，基于 BFM 的 CAE 软件框架已经设计完成，包括用户界面系统、提示和报错系统、任意曲面网格全自动生成模块、边界面法和快速算法模块、文件和数据库系统、内存管理系统以及图形及后处理系统等七个大的模块和系统。随着研究的逐渐深入，软件的内容将不断丰富，其功能也会越来越强大，一款能与当下流行的有限元软件相媲美的 BFM 软件正一步一步成为现实。

参考文献

1. Zhang JM, Qin XY, Han X, Li GY. A boundary face method for potential problems in three dimensions. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 2008; **80**: 320-337.
2. Qin XY, Zhang JM, Li GY, Sheng XM. A finite element implementation of the boundary face method for potential problems in three dimensions. *Engng. Anal. Bound. Elemt.*, 2010; **34**: 934-943.
3. 张见明, 基于边界面法的完整实体应力分析理论与应用, 计算机辅助工程, 2010 年 9 月, 第 19 卷第 3 期, 5-10.
4. Zhou FL, Zhang JM, Sheng XM, Li GY. A dual reciprocity boundary face method for 3D non-homogeneous elasticity problems. *Engng. Anal. Bound. Elemt.*, 2012; **36**: 1301-1310.

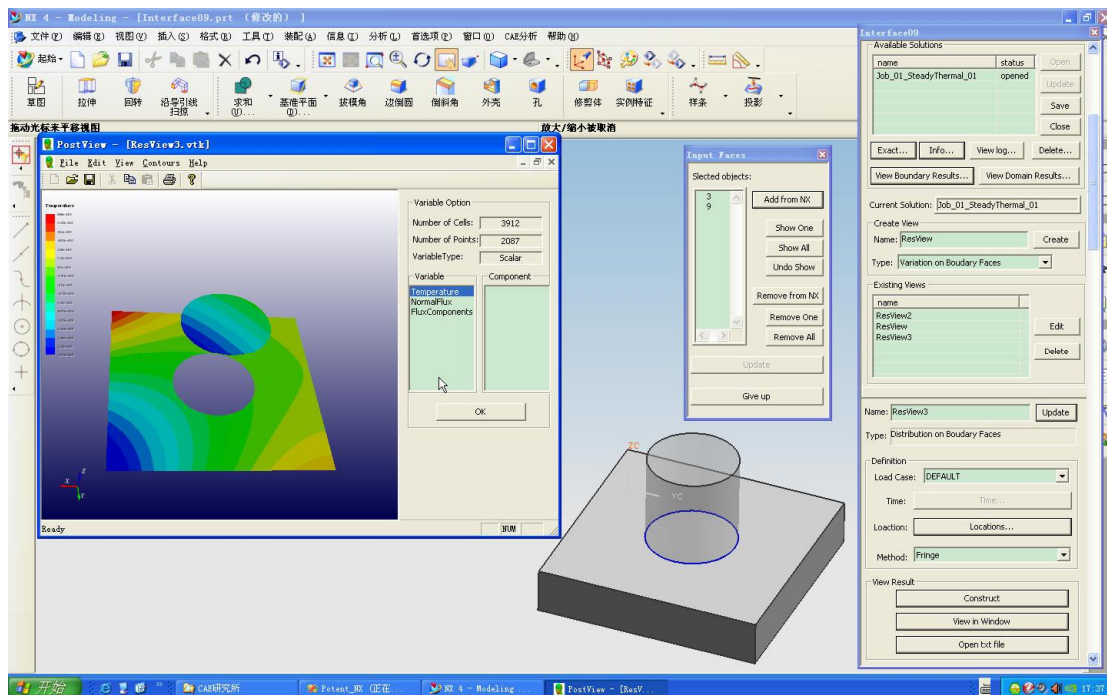


图3: 直接在CAD模型上进行CAE分析的软件用户界面