



突破有限元分析的极限

- MD Nastran 成功求解超出 4 亿自由度问题

MSC.Software 公司

有限元法 FEM 分析变得日益复杂，同时有限元分析模型的大小和细节设计要求也在不断增加。尤其是在汽车行业，这一趋势非常明显，也正因为如此，德国汽车制造商宝马公司提出了这样一个问题，“有限元分析还能应对这一增长趋势多长时间？”，用“后天之模型（Model of the Day After Tomorrow）”作为考题的目的是如何突破近十年间所要面临的硬件和软件极限问题。MSC.Software 公司和美国国际商用机器 IBM 公司合作已成功地通过了这一测试。

由数百万个单元和数百万的自由度组成的有限元网格的模型已经变得司空见惯，然而模型的尺寸仍在不断地增加。由于数学方法和软件工程技术改进，有限元法程序的工作效率和计算能力也在不断提升，同时构建模型和网格划分软件技术的飞速进步使模型的生成变得更加方便快捷。数年前，发动机引擎汽缸体的网格划分需要几个月的时间，而现在只是几个小时的问题。

德国汽车制造商宝马公司是大范围使用虚拟仿真技术的公司之一。在宝马公司和其它一些制造商中，为了缩短研发周期，减少物理样机和物理试验的次数，完整的汽车模型得到了最优化的使用，其基础便是日益复杂的有限元仿真模型，包括对噪音和舒适度的刚性评定、乘客安全性和空气动力学仿真等。在数值计算方法方面，使用了隐式线性分析和显式非线性瞬态分析。

早在 2007 年初，宝马公司便对计算机辅助工程 CAE 的流程重新进行了检测，以便发现将来可能由仿真模型尺寸增加引起的瓶颈问题。宝马公司的车体和零部件设计小组开发了迄今为止最大的有限元法模型作为基准测试的考题模型，被冠以“后天之模型（Model of the Day After Tomorrow）”的名称。

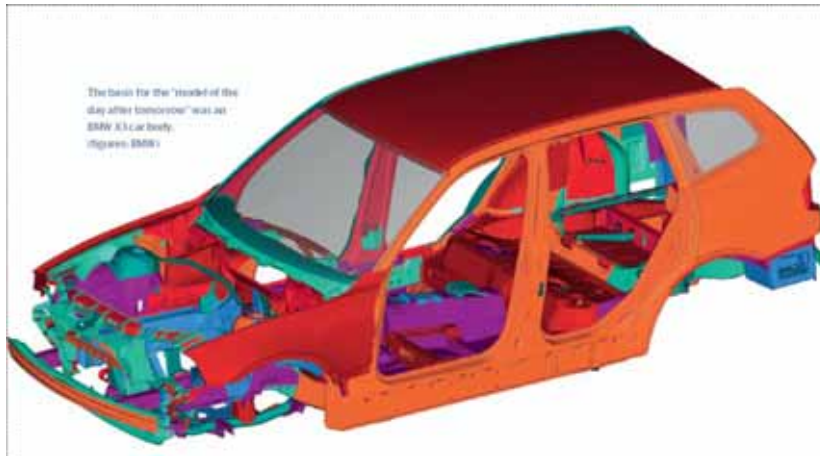
小组成员丹尼尔·海泽尔博士表示，“对我们来说，在标准的硬件和软件设备上此次基准测试是非常重要的，使用当前的基础设施解决基准模型问题的目的，并不是为了要减少计算时间，而是为了识别理论极限和当前方法的瓶颈。”

基准考题的目的是为了寻找标准分析（双载荷工况条件下的线性静态分析）中进行有限元法分析基本步骤的极限和时间：

- 读取输入数据，对它们进行分类并制成表格，并进行一致性检查；
- 计算单元刚体矩阵，并集成一个整体刚体矩阵；
- 计算位移和应力数据；
- 输出结果。

MSC.Software 公司同美国国际商用机器 IBM 公司合作，能够在短短的几个月的时间内解决这一问题。在一份用该模型分析的详细报告中，项目成员彼得·沙

尔茨和杰拉德·希姆莱（MSC.Software 公司），丹尼尔·海泽尔（宝马汽车制造公司）和 D·皮特施（IBM 公司）详细介绍了他们实现宝马公司苛刻要求的方法。

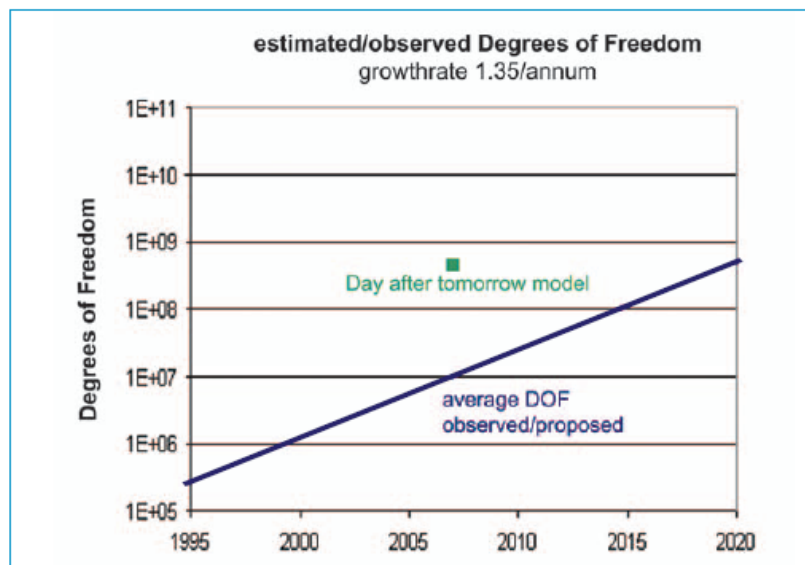


“后天之模型”的基础是宝马 x3 汽车的车体。（图片提供：宝马公司）

大多数有限元法分析程序都存在计算能力不在最佳状态的情形。

1957 年，雷·W·克拉夫和他的学生在一台内存只有 16 位的 IBM701 计算机上开发出了后来成为有限元法的程序。方程式大约在 40 个以上的问题需要 out-of core（即数据不全部存储在内存中，而是存储在硬盘的临时文件夹中）求解逻辑，这意味着要借助二级存储介质。10 年之后，Nastran 软件被开发出来之后，要求条件也非常类似。软件客户美国国家航空航天局（NASA）要求开发一种能够对 2,000 自由度以上（包含 2,000 自由度）问题进行静态和动态分析的程序。

现在，这似乎已成为了历史。随着中央处理器（CPU）处理速度和效率的提高，以及内存容量的增加，类似有限元矩阵生成和集成的基本操作已经可以不需要借助二级存储介质的操作方法进行处理。



预测有限元模型大小（图片提供：宝马公司）

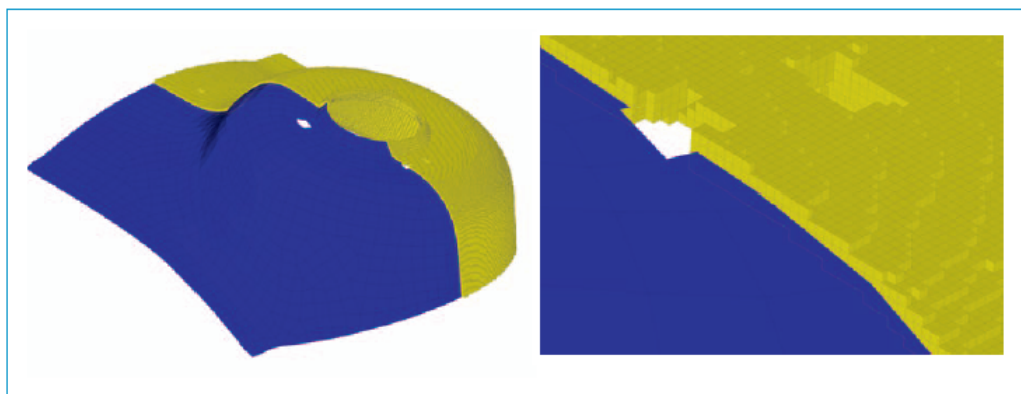
即使是现在的 MSC.Software 公司的 MD Nastran 软件也仍体现出早期软件设计的理念，例如计算机内存的保留和通过“out of core”技术或“溢出”（spill）算法实现的 I/O（即输入/输出）磁盘亚系统的高效使用。这些特性对项目整体刚性和质量矩阵的生成非常有帮助。

宝马 x3 模型

宝马公司模型生成的基础是 2004 年的宝马 x3 白车身模型，也就是没有装饰元件的基本金属板车体。对于模型的尺寸，工程师们根据对经验取值的推断进行了调整，并预测在 2020 年自由度约达 800 兆。

海泽尔博士在开发网格划分程序时使用了“原始网格划分技术”（RAT），该技术即使在计算机辅助设计几何图形出现不一致或错误情况时也可以高速实现复杂几何图形的六面体单元网格划分。原始网格划分技术建模方法的缺点在于模型尺寸极其庞大，而且只有对基本的刚性性能仿真时才有意义。

用于测试计算的模型最大边长为 1 毫米，最终的有限元模型约为 1 亿 5 千个节点，约 9 亿 1 千万个自由度。去掉旋转自由度，计算方程数达 4 亿 5 千个。



Shell model of shock tower of X3 model (blue), MODAW volume representation (yellow). (figures: BMW)

BMW X3 减震器支座外壳模型（蓝色），MODAW 部分描绘图（黄色）。
（图片提供：宝马公司）

为了确保测试条件以实际情况为导向并将成本限制在一个可控范围内，测试应该同商业软件一起在单处理器的计算机上进行。在 IBM 公司位于波基普西/纽约的美国测试中心，能够找到符合有限元分析 I/O 要求和内存要求的合适计算机。它使用的计算机系统为 IBM p5-595 2.3GHz POWER5+，其内存为 512GB，暂存文件系统（scratch file system）为 6TB，分布在 48 个物理磁盘上，每个磁盘的容量为 146GB。为了达到可利用内存的最佳使用效果，计算软件为 MSC.Software 公司 ILP-64 版本的 MD Nastran 软件。为了分解整体（集成）刚体矩阵，计算机应用了具有嵌套式剖分法重排序功能的稀疏直接多波前算法（sparse direct multifrontal-algorithm）。

整体刚体矩阵是一个包含 95 兆单元刚体矩阵的集合体。最终因子矩阵在预计最大超过 10 万的波前空间上有 5.71011 项（超过 4TB 的数据）亟待处理。计算这些结果需要近一个中央处理器年（CPU-year）的时间。由于时间问题，计算机通过内嵌的 PCGLSS 迭代求解器应用了迭代解算法，这需要少得多的内存和磁盘空间，并且对由三维有限元组成的模型效果尤其明显。分析工作需要大约 50GB

的内存空间，此外“I/O 模块”（MIO）还需要 10GB 的内存空间。

I/O 模块是 IBM 公司开发的智能 I/O 高速缓冲处理器。在 MD Nastran 软件常见的输入/输出密集型操作过程中，它仅使用相对较小的内存空间来储存异步预取数据。

为了解决数据量过大的问题，需要对系统参数和输入数据进行大量的调整和设置，如栅格点坐标内部最大数的运行时间参数被提高到了 160 兆（标准：100 兆），PCGLSS 迭代求解器的参数要根据所使用内存的容量和类型进行调整。

输入数据中去掉了栅格点权数发生器（Grid Point Weight Generator）的输出要求和质量矩阵的生成要求。时间和 I/O 空间节省为 22 分钟/226GB 和 1.4 小时/450GB。由于计算机资源的限制，第二载荷工况条件不在计算范围。



The used computer system IBM p5-595 2.3GHz
POWER5+ (figures: BMW)

所使用的计算机系统为 IBM p5-595 2.3GHz POWER5+（图片提供：宝马公司）

分析结果

对此模型在串口方式下分析计算过程花费了 22 小时 17 分钟的时间，所花费的中央处理器秒（CPU-seconds）的数字为 76254；中央处理器的使用率为 95%。

所需的暂存磁盘空间总容量为 2.27TB，分析过程包括 I/O 磁盘（即硬盘）的 7.8TB。需要进行后处理的二进制输出文件大小为 99.9GB，包括无变形的几何图形和一个载荷工况条件的位移和应力输出。PCGLSS 迭代求解器通过 149 次迭代，并需要大约 230GB 的内存空间。总共使用的内存空间约为 300GB（MD Nastran 软件使用了 60GB，I/O 模块高速缓冲处理器使用了 10GB，PCGLSS 迭代求解器使用了 230GB）。



The project was based on the BMW X3 Modell 2003

该项目基于 2003 年的宝马 X3 模型

尽管对内存、磁盘和 I/O 有极高的要求，计算过程仍然使用了标准软件在标准硬件平台上进行。鉴于其“out of core”性能，MD Nastran 分析软件非常适合进行超大问题的计算工作。除该软件的高效率外，IBM POWER5 的系统结构还拥有统一高效处理速度的大内存空间，经过测试证明 MD Nastran 对过亿自由度的超大模型的求解是完全可以实现的。

更多关于 MSC.Software 公司信息和 MD Nastran 功能，请登录 www.mscsoftware.com.cn 和 www.mscsoftware.com