

基于HPC的CAE技术在大型盾构施工仿真中的应用

● 丁峻宏 李根国

上海超级计算中心 上海 201203

● 金先龙 曹源

上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240

摘要：

为了更好地促进工程施工的风险提示及防范措施，在对近几年研究成果总结的基础上，建立了模拟盾构施工过程的大规模三维数值仿真模型，该模型对泥水盾构施工中的各种复杂施工步骤和环境因素进行拟实和简化模拟，“曙光”超级计算机和ANSYS并行求解器的使用，保证了大量计算工况的前后处理及求解分析。两条长江隧道的盾构施工数值仿真表明，该方法能有效实现对盾构推进引起的土层沉降、衬砌变形以及盾构姿态等关注对象的预测。

关键词：盾构机，隧道施工，仿真，并行计算，ANSYS

引言

进入21世纪之后的头十年，我国以世界经济领头羊之身份，持续保持蓬勃发展的趋势，目前正处于工业化和城镇化的社会快速转型期。与此同时，城市建设持续升温、城市规模不断扩大，大量人口向城市聚集，机动车数量的攀升，给居住以及出行带来与日剧增的压力。对此，倡导地下空间资源的开发，在改变城市布局，改善交通压力和减轻环境污染等方面，正起着不可或缺的重要作用。以上海为例，2010年轨道交通总里程已超过420公里，雄居世界第一。

包括地铁和越江隧道在内的工程建设，离不开盾构法施工。这种施工法避免了明挖，减少了弃土处理，不仅有利于城市环境保护，也节省工程投资，因此成为了城市隧道工程的一种主要施工方法^[1]。

由于地下工程地质环境的隐蔽性与复杂多变性、施工过程中灾害事故的突发性以及对环境影响的控制难度，决定了盾构地下施工时建设质量、安全性的控制和管理的难度比地上工程高得多，势必引发不同程度上的地层变形，且地层变形与盾构设备性能及盾构施工工艺等诸多因素直接相关。如何预测和避免隧道施工可能遇到的问题并提出解决方案，具有重要指导意义和重大经济价值。

当前，数值仿真CAE技术正被广泛应用于科学研究、工程与生产领域以解决各种复杂问题。在隧道施工仿真方面，专业计算机软、硬件性能持续提升，也引领着CAE技术应用在深度和广度上的不断突破，越来越多地用于解决复杂的大规模工程实际问题^[2-5]。

本文基于“魔方”超级计算机，首先描述了泥水平衡盾构施工的特点，数值模拟的基本思路和方法，为提高计算效率采用的分布式并行计算算法；然后以上海和南京的超大直径越江盾构隧道作为施工仿真应用对象，介绍在高性能计算平台上建立的大规模精细仿真模型和计算结果，及其对工程实际的指导作用。

1. 原理与方法

1.1 泥水盾构施工特点

在长江中下游地区建设越江隧道，开挖难度比较大，问题突出反映在水压高、埋深浅、地层透水和其他地质水文条件的风险上。越江隧道施工一般选用泥水盾构机来穿越江底覆土层，如图1所示，它通过加压泥水来稳定开挖面，其刀盘后面有一个密封隔板，与开挖面之间形成泥水室，里面充满了经过处理后的外来有压泥浆；而开挖土料与泥浆的混

合物则由泥浆泵输送到洞外分离厂，经分离后泥浆重复使用。这种盾构机适用于隧道面可被泥水加压所支撑的土质，可有效地应付各种复杂地层和控制地表沉降。

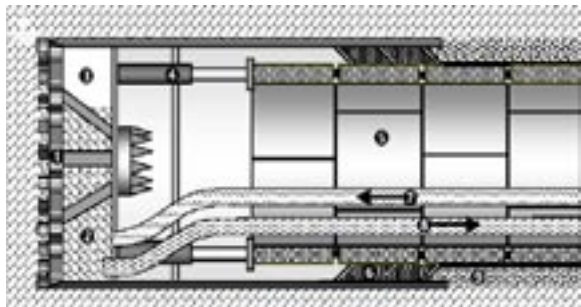


图1 泥水盾构施工工法简图

1.2 精细施工仿真策略

隧道结构及岩土介质的高度非线性决定了地下工程开挖问题亦具有非线性的路径相关性，也即，随着盾构的不断推进或变化，结构的形状也在不断发生变化，作用在结构上的外荷载也随之改变。盾构隧道的推进本质上还是一个三维问题。

在施工仿真策略的制定上，施工过程细节考虑地越多，越有利于准确反映隧道施工过程中围岩和结构的变形和受力状态，从而更为准确地预测地表的移动与变形。本文总结后提出的精细施工仿真策略主要包括以下要点：

(1) 仿真策略整体上充分体现盾构实际施工推进过程的三维空间特征和时序特性。如图2所示，随着盾构机的逐步推进，力学模拟对象逐步体现出土体开挖、盾构推进、衬砌安装、壁后注浆等最主要施工步骤，拟实表现环环推进的施工效果。在细节上，还要模拟地应力场、盾构超挖、泥室压力、注浆硬化、拖车前行等多个施工细节。图3通过几幅连续剖面示意图详细描述了盾构机开挖的时序施工过程。

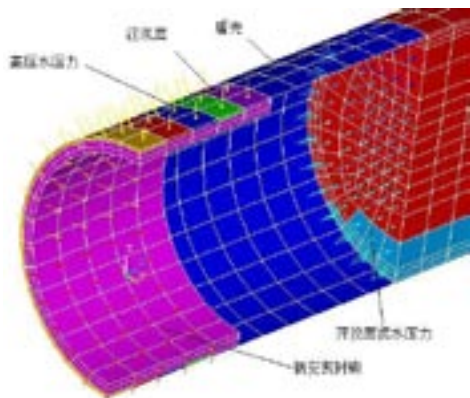


图2 盾构三维掘进过程模拟示意

盾构机与土体接触模型采用无厚度接触单元，单元法向与切向接触均采用罚函数方式描述。除了土体采用Drucker-Prager弹塑性本构模型外，其他施工参与对象采用不同的弹性本构模型来模拟。

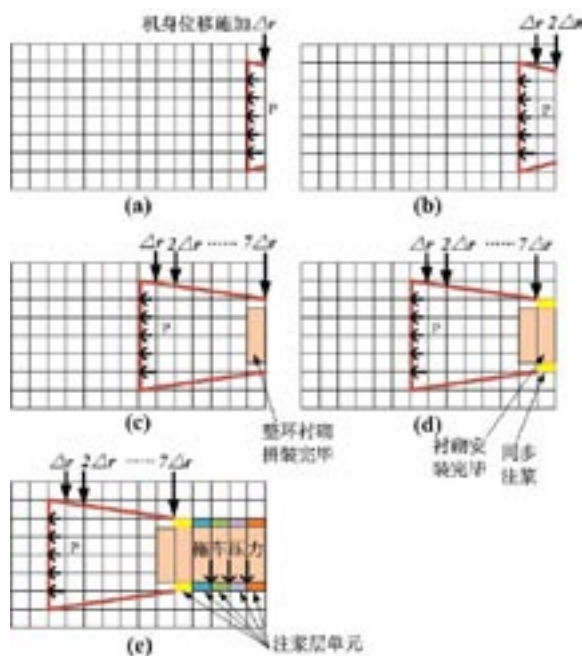


图3 掘进过程模拟细节描述

(2) 对于图2和图3中诸多仿真细节及其技术实现手段，可以从以下一些方面来展开描述：

- 地质模型中的地应力场通过单独进行重力场计算得到的单元初应力文件来转化施加；
- 土体开挖、盾构前行和衬砌施加等通过单元刚度迁移法来实现；
- 盾构机机头直径大于机尾直径，因此导致盾构机机身普遍具有一定坡度。盾构超挖及机身坡度通过施加径向位移 Δr 来体现；

$$\Delta r = H_1 \times (D - d) / 2L \quad (1)$$

式中： D 为盾构机刀盘超挖刀外直径； d 为盾尾外直径； L 为盾构机总长度； H_1 表示一环衬砌长度。

d). 在开挖面土体表面，施加与垂向坐标有关的开挖面泥水压力 P ：

$$P = P_0 - \rho_s \cdot g \cdot (y - y_0) \quad (2)$$

式中： P_0 、 y_0 分别为开挖面中心点位置设定的泥水压力和竖直向坐标； ρ_s 为泥水密度； g 为重力加速度； y 为压力施加位置竖直向坐标。

e). 在隧道四周，由于地下水产生的高压水压力将基于水重度并且按照高潮位进行梯度分布施加。

f). 开挖面处刀盘对土层产生切削作用，为体现切削时产生的摩擦力，将刀盘扭矩转化为极坐标下的切向力来模拟。

g).考虑油缸压力的影响，将油缸推力按照分布情况转换成不同压力，分别施加其前后联接的盾构机和衬砌支撑表面。

h).为模拟壁后注浆材料的时变特性，将注浆考虑成非线性弹性材料，其弹性模量随时间逐渐增加并最终趋于稳定。

i).盾构逐步开挖的同时，后方拖车随之前行，其重力由已安装衬砌来支撑：

$$P_{\text{衬砌}} = W_i / A_i \quad (3)$$

式中： $P_{\text{衬砌}}$ 表示按照拖车轮组的空间分布在相应衬砌作用面积上施加的压力； W_i 为拖车总重量； A_i 为拖车轮组对衬砌的总作用面积。

1.2 并行仿真求解

本文采用大型通用有限元程序ANSYS来进行盾构施工仿真的模拟，该程序自带的APDL命令流程序，给用户灵活快捷地使用各项软件功能以模拟盾构施工力学行为提供了便利。

所建立的大规模仿真模型，可以模拟数百米长的盾构施工复杂过程，计算模型自由度达百万数量级以上，使用并行计算将大大减少计算时间，一般可选用共享内存式(SMP)或者分布内存式(DMP)的并行方式，见图4。

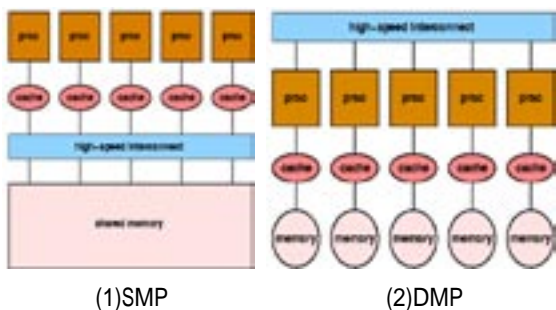


图4 两种并行模式及体系结构

在ANSYS中，具有代表性的SMP求解器是稀疏矩阵求解器（简称SPARSE），而具有代表性的DMP求解器是分布式预条件求解器（简称DPCG）。SPARSE使用以消元法为基础的直接求解法，它计算稳健性最好，支持所有软件功能，适合多载荷步求解，但是并行扩展性能有限；DPCG适合更大的模型，减少了I/O开销，并行扩展性更好，但是求解稳定性难保证，软件功能并行有限。

除此之外，ANSYS还有其他一些求解器，如AMG和DSPARSE等。实际计算时，可以结合计算平台特点，通过分别测试不同求解算法得到的加速并行效果对比，选用最适合的并行仿真策略。

2. 应用实例

2.1 上海长江隧道盾构施工仿真

崇明越江隧道濒临东海长江口，盾构直径达15.3米，复杂的地质条件和工程环境曾给隧道盾构推进施工带来不少难题。借助高性能计算平台来进行施工仿真，就可以建立对常规而言规模更大更细致的三维仿真模型，充分体现实际隧道轴线曲折起伏特性以及土层分布的非均匀性。如图5所示，针对某施工标段建立的计算模型，利用HyperMesh软件创建的六面体网格能从构形和网格质量上提高计算精度。模型三维尺寸为250m × 150m × 80m，能模拟构建多达125环衬砌的施工步骤，单元和节点数目都超过30万。

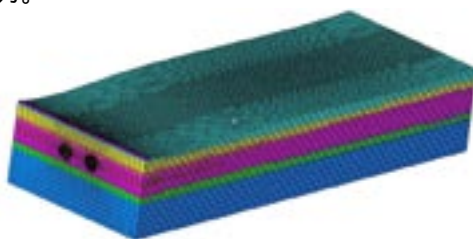


图5 盾构隧道三维施工仿真模型

利用这一计算模型，可以进行单线或者双线盾构施工的模拟，考察对象包括沉降槽、地表沉降、衬砌变形，图6即描述了地表隆沉最大值沿着隧道推进方向分布曲线图。其中横轴0刻度表示开挖面当前位置。

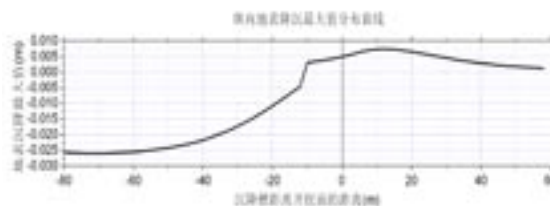


图6 隧道上方地表沉降曲线

此外，还可以考察不同施工参数对施工质量的影响，以便优选施工工序。如图7显示的即为在不同开挖面泥水压力作用下，开挖面前地表最大沉降槽的对比，计算结果给出了明确的影响区域及程度。

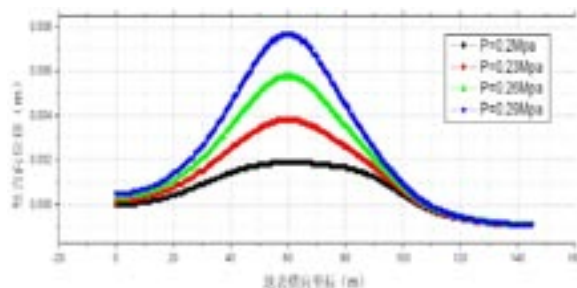


图7 地表沉降槽随开挖面泥水压力变化图

2.2 南京长江盾构隧道施工仿真

已通车的南京长江隧道，在设计建设伊始也遇

到诸多难点,隧道开挖直径近15米,工程地下穿越段地质结构复杂、建设条件差、也没有可以借鉴的成功经验。本文所描述数值模拟方法,对于封门拆除、进出洞、穿越大堤和复合土层等多个关键施工区域的施工方案进行了模拟和优化,对工程可能出现的各种风险进行系统分析,为提高防范能力和科学决策提供了依据^[6,7]。

在结果评判上,除了对地表沉降和衬砌变形进行预测外,还可以掌握盾构机姿态的变化。以盾构机离开始发并进洞计算分析为例,图8中盾构机位移差表述了盾尾盾首的垂直偏差。当按照设计方案实施推进,盾构机位于满堂加固区时,盾构机前后位移差较小,最大值为在9mm左右,在此区域盾构机“磕头”的风险尚可控制;当盾构机开始进入顶篷加固区时,盾构机前后位移差瞬时增加到最大,达到12.8mm。此后随着盾构机逐渐进入该区域,数值趋于减小和稳定;再度进入原状土区时,盾构机姿态变化相对还比较平稳。由于有针对性地采取了有效措施,提前消除了盾构推进时可能出现的“头重脚轻”隐患。

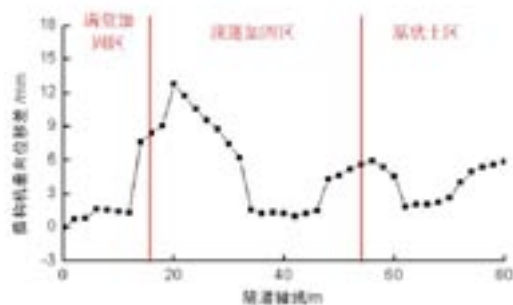


图8 推进过程中的盾构机首尾位移差

3. 高性能计算平台上的并行求解

盾构隧道施工的仿真,曾在“曙光4000A”超级计算机上完成大量计算工况。以该机单计算节点

为例,它包涵4个CPU,可以最大共用8GB内存。曾经完成的并行计算策略比较(见文献[5]和[8]),以及后续的改进完善工作都清楚地表明,对于这样一个复杂模型,构建一环衬砌所需单载荷步计算,SPARSE求解器最多需要将近3小时,但是DPCG等分布式迭代求解器可以缩短到2小时以内,如果以总计开挖100环而言,就可以省却4天多时间。但是分布式求解器计算稳定性值得关注,长时间求解时会偶发如MPI异常等原因引起的计算中断,又带来了重复性计算消耗。总之,若无HPC平台的支撑,多计算工况和施工参数优化所需大计算量很难实现。

计算机软硬件的发展给仿真求解带来新的思路,ANSYS软件的前后处理模块也逐渐支持并行处理,对于目前上海超算使用的“魔方”计算平台(曙光5000A)来说,单节点内可使用8CPU共32核,最大使用内存128GB。完全能够满足超大规模盾构施工仿真计算模型选用SPARSE in-core求解模式时所需的高内存诉求,此时基本不需要磁盘的输入与输出,能大幅度提高求解速度,在保证计算稳定性的同时,取得了与以往相比提升不少的并行计算效率。

4. 小结

本文以目前在各地兴起的盾构隧道建设为研究对象,结合近年来的课题和项目经验,详细阐述了在高性能计算平台基础上,如何创建复杂的大规模泥水盾构施工精细仿真计算模型,该仿真方法已经在沪、宁两条盾构越江隧道的设计建设中得到了很好的应用,最后结合不同发展阶段的HPC计算平台,指出了如何在兼顾计算稳定性和并行求解效率时所需注意的要点。实践表明,虽然有一些实现难度,但是利用全三维大规模计算模型来模拟复杂地层中盾构的长距离推进施工过程,能充分弥补二维计算分析的不足,得到更为精确和丰富的关于施工质量和沉降控制的评价。

参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑出版社, 2004.
- [2] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 盾构法隧道施工的精细模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 280 - 284. [ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. Elaborate simulation of shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanic, 2004, 25(sup.): 280 - 284.]
- [3] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. Tunnelling & Underground Space Technol, 2006, 21(2): 160 - 171.
- [4] SCHMITT J, FRITSCH M, GATTERMANN J, et al. Numerical investigations to the influence of rearrangement of ground pressure for shield tunneling[C] // Proc ICOSSAR 2005, Millpress, Rotterdam, 2005: 1317 - 1323.
- [5] 沈建奇, 金先龙, 王吉云. 泥水平衡盾构机掘进并行数值模拟方法研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(1): 132 - 138. [SHEN Jian-qi, JIN Xian-long, WANG Ji-yun. Study on parallel numerical simulation of slurry shield tunneling process[J]. Chinese

Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(1): 132 - 138.]

[6] 钱维, 梅世友, 唐姜. 应用数量工程技术诊断南京长江隧道工程施工浅覆土层穿越风险与措施研究[J]. 改革与开放, 2008, (6): 45 - 46.[QIAN Wei, MEI Shi-you, TANG Wei. Application of quantitative engineer technology to risk diagnosis and measure research on the Nanjing Yangtze River tunnel construction crossing over ground base during [J]. Reform & Openning, 2008, (6): 45 - 46.]

[7] 龚永泉, 申琳. 万里长江新穿越——写在南京长江隧道贯通之际[N]. 人民日报, 2009-05-21(8).[GONG Yong-quan, SHEN Lin. New crossing over the Yangtze River—Writing by the transfixion of the Nanjing Yangtze River tunnel[N]. People ' s Daily, 2009 - 05 - 21(8).]

[8] 丁峻宏, 金先龙, 郭毅之, 等. 基于并行计算的盾构隧道施工三维动态仿真[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(1): 131 - 135. [DING Jun-hong, JIN Xian-long, GUO Yi-zhi, et al. The three - Dimensional dynamic simulation of shield tunneling based on parallel computing[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(1): 131 - 135.

要闻集锦

NCSA与Cray签约再建“蓝水”超级计算机

据www.hpcwire.com网站2011年11月14日消息报道, 美国国家超级计算应用中心(NCSA)于当日宣布, 与美国Cray公司签署了一份价值1.88亿美元的合同, 继续完成由美国国家科学基金会(NSF)资助的“蓝水(Blue Waters)”超级计算机项目。新的“蓝水”系统将是一台采用AMD CPU和NVIDIA GPU的Cray XE6/XK6混合系统, 性能达11.5Pflops。

2007年, NCSA与IBM公司签约启动“蓝水”项目, 按计划IBM将为NCSA制造一台基于Power7处理器的超级计算机, 提供10Pflops的峰值性能和1Pflops的持续性能, 计划于2012年完成部署。此后, IBM公司陆续交付了部分机柜。但在2011年8月, 由于资金和技术投入都大于预期成本, IBM公司决定终止合约, “蓝水”项目就此中断。此后, NCSA与NSF开始重新招标, 希望再次启动“蓝水”项目。

NCSA主任Thom Dunning表示, 除了Cray公司外, 还有三家公司投标, 但他没有透露具体情况。最终选择Cray, 是因为Cray公司的安排处理方式与“蓝水”项目的目标十分一致。NCSA并不看重系统的峰值性能, 而是专注于系统的持续性能以及科学和工程应用领域真正需要的内存和磁盘性能。

Cray公司也对这一观点表示了高度赞同, 认为“蓝水”项目非常适合其自适应异构计算想法, 注重持续性能而不是初始浮点运算次数或Linpack测试性能。

Cray公司估计, 新的“蓝水”系统将有超过235个CPU机柜和30多个CPU-GPU机柜。CPU都将采用AMD公司刚刚正式推出的16核2.3GHz Opteron 6276处理器。

该系统将采用4.9万个这种CPU, 提供大约2/3的总浮点运算能力。另外1/3的浮点运算能力由3千多个NVIDIA最新一代图形处理器“开普勒(Keppler)”GPU提供, 这款GPU预计将在2012年投产。

系统总内存将超过1.5PB, 总I/O带宽超过1TB/s, 有着庞大的互连网络, 近4500千米的电缆。Cray公司还将提供超过25PB的集成Lustre文件系统的外部存储器。

“蓝水”系统的应用领域将包括分子科学、气候/气象预测、地球科学、生命科学以及天体物理学等。

NCSA和Cray公司计划跟上之前IBM公司的部署进度, 希望在明年秋季完成最终系统并运行。总体规划是先部署CPU节点, 在构建最后阶段安装GPU组件。

接下来的几个星期, 将安装一台基于AMD“英特拉格斯(Interlagos)”处理器的小型测试系统, 随后在2012年初将安装一台较大的系统。研究人员至少能用CPU组件优化和扩展其应用。系统将于明年夏天完成除“开普勒”GPU外的完整部署, 预计初秋完成“开普勒”GPU的部署。如果一切按计划进行, 明年底整个系统将投入运行。

(金溪)