

# 工程结构设计中的高性能计算

李云贵

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

**摘要:**高性能计算技术以分布式计算资源和网络技术为基础,依托高端并行计算技术和可视化,可高效地解决大型复杂结构高精度分析、优化和控制等问题,从而促进工程结构设计水平和设计质量的提高。近年来,我国土木工程正处于高速发展时期,随着计算机软硬件技术的发展,常规的工程设计有限元分析和设计计算已经普及。而由于超高、超长、大跨度等复杂工程的大量涌现,工程结构设计中高性能计算的需求越来越迫切。高性能计算是指运用有效的算法,快速完成科学研究、工程设计、金融、工业以及社会管理等领域内具有数据密集型、计算密集型和 I/O(数据输入输出)密集型的计算。本文概要地介绍了高性能计算技术的有关概念、国内外发展现状,以及在工程结构分析中应用的最新进展,供工程设计人员参考。

**关键词:**结构;设计;高性能计算;软件

**中图分类号:**TU318 TU311.41 **文献标志码:**A

## High-performance computing in structural design

LI Yungui

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** HPC technology is based on the distributed network technology and computing resource, and depends on parallel computing technology of high-end computing software. Therefore, the use of HPC technology can contribute to solving the problems of high precision analysis, optimization and control for large and complex structures effectively, facilitating the improvement of building design quality. In recent years, people have witnessed the rapid development of civil engineering industry in China. With the progress of computer hardware and software technology, the common methods of finite element analysis and computing for structural design have become more and more widespread. Currently, the need for high-performance computing (HPC) technology shows increasingly urgent in structural design due to the upsurge of complex projects such as super high-rise, super-long span structures. The paper provides a state of the art review on HPC and the application in structural analysis.

**Keywords:** structure; design; high-performance computing; software

## 0 引言

高性能计算是指运用有效的算法,快速完成科学研究、工程设计、金融、工业以及社会管理等领域内具有数据密集型、计算密集型和 I/O(数据输入输出)密集型的计算。高性能计算在国民经济的很多方面都得到了广泛应用。例如,在科学研究领域,大规模生物学(基因测序、人类蛋白质计划)、新药发现(新药筛选)、天文学(宇宙大尺度结构和星系形成理论研究);在资源环境领域,国家地质调查(三维地质结构描述、地质过程描述)、油气勘探、海量遥感数据处理;在制造业,飞机制造、航天仿真、船舶与海洋工程、汽车协同设计;在服务业,气象数值预报、地震预报等。

高性能计算是关系到国家安全和国民经济重要部门的关键技术。在解决我国安全威胁、提高我国产业的自主设计能力和核心竞争力等方面有不可替代的作用,其市场巨大,产业化前景广阔,是各国必争的战略制高点。高性能计算机已成为试验与理论以外的第三种科学发现的工具,与其它学科呈交叉与融合趋势,是科技创新能力建设的关键平台。

近年来,随着计算机软硬件技术的发展,常规的工程设计有限元分析和设计计算已经十分普及。而由于超高、超长、大跨度等复杂工程的大量涌现,工程设计中对高性能计算(high performance computing, HPC)的需求越来越迫切。高性能计算技术以分布式计算资源和网络技术为基础,依托高端计算软件并行计算技术,高效地解决大型复杂结构高精度分析、优化和控制等问题,从而促进工程结构设计水平和设计质量的提高。

高性能计算能有效提高企业的设计生产效率和水平,提升设计产品的品质。奥运工程设计中火灾模拟技术的应用,杭州湾跨海大桥和浦东机场二期航站楼等大跨度工程设计中数值风工程技术的应用,中央电视台新台址工程等重大结构设计中罕遇地震作用下的弹塑性时程分析,以及上海磁悬浮工程温度应力分析等,能够使设计人员更加准确地把握工程设计的安全性和适用性,这也是企业提高产品科技含量,提高自主创新水平的重要方面。

## 1 国内外高性能计算技术发展现状

### 1.1 高性能计算技术

有关高性能计算,严格地讲,应该分三个层次:超级计算(supercomputing)、高性能计算(high performance computing, HPC)和高效能计算(high

productivity)<sup>[1-4]</sup>。超级计算的名词出现于上世纪 20 年代,概念形成于上世纪 70 年代,与 Cray Research 公司同步发展。而 Cray Research 的任务是制造世界上最快的计算机。因而在上世纪 80~90 年代,Cray Research 成为计算机最高水平的代表。计算速度是其追求的第一目标。最快的速度、最大的存储、最庞大的体积、最昂贵的价格是超级计算的重要特征。高性能计算更倾向于追求综合性能。随着超级计算需求和应用面的扩大,上世纪 80 年后期出现了高性能计算的概念,把超级计算推向了各个领域,对超级计算追求单一计算指标转变为追求高性能的综合指标。同时,高性能计算也更倾向于走产业化发展道路。用户群的扩大,价格的敏感度,PC 机产品化的成熟,迫使高性能计算采用高性能的产品化部件构成高性能的产品化计算机系统,也促使高性能计算技术走向开放。超级计算和高性能计算反映了能够进行并行数值计算和数据处理的大规模运算,但超级计算和高性能计算还是有一定的区别。一方面,超级计算是高性能计算的一个子集;另一方面,高性能计算是超级计算进一步发展的结果。

在科学计算领域,复杂的应用分析需要依靠硬件计算平台的强大支撑。更快的运算速度一直是业界的终极目标。但现在这种趋势正在悄然发生变化,正在从“高性能”(high performance)走向“高效能”(high productivity)。美国 DARPA HPCS 计划中指出“high productivity”的综合含义是指提高超级计算机系统的计算性能、可编程性、可移植性和坚固性,同时努力降低系统的开发、运行及维护成本。高性能计算应该包括两方面:一方面用多个 CPU 完成同一个问题的计算,也就是并行计算;另一方面使用互联网,计算时不仅可以用到本地的计算机,还可以用到异地的计算机,这个技术通过互联网的形式进行高性能计算,也就是可能用多个并行机同时做计算,即网格技术。网格技术是指通过互联网整合一台巨大的超级计算机,实现计算资源、存储资源、数据资源、信息资源、知识资源、专家资源的全面共享。

实现高性能计算的两个途径:一是基于大型计算机,二是基于网格计算平台。在过去 30 年里,大型计算机的性能提高了 360 万倍。1976 年第 1 台商业巨型机(Cray-1)出现,Cray-1 为向量机,浮点峰值速度 133 megaflops,8MB 内存,880 万美元,安装在美国 Los Alamos 国家实验室。而到 2005 年,IBM 研制的 Blue Gene/L,浮点峰值速度 267 Tflops,32 TMB 内存,安装在 LLNL 国家实验室。各国对网格计算平台的研究都十分重视。过去 5 年中,美国联邦政府已投入 5 亿多美元研究经费,实施了 10 多个大型的网格和网格应用项目。美国国家科学基金会在 2005—2009

年期间保持每年 1.2 亿美元的投入,用于支持网格的研究、开发、应用、平台建设和维护。欧盟第六框架研究计划把先进网格技术和网格技术设施作为研究重点,各投入 1 亿多欧元,用于支持两个科研项目:包括 EGEE 网格基础设施研究项目,以及 CoreGrid、NextGrid、SIMDAT 等网格技术项目。我国“十一五”高技术研究发展计划(863 计划)信息技术领域实施了“高效能计算机及网格服务环境”项目,研究经费为 6.86 亿元。重点研制百万亿次高效能计算机系统;突破千万亿次高效能计算机关键技术;构建基于自行研制的高效能计算机和网格软件的网格服务环境;开发面向行业应用。

高性能计算对计算机硬件和操作系统的要求有如下特点:

(1)大内存与 64 位操作系统。大内存不仅求解规模的问题,还能有效提高求解速度。对于稍微复杂一些的结构有限元问题,一百万自由度、几百万自由度甚至上千万自由度是比较常见的,内存的需求往往超过 2GB。32 位操作系统一般只允许应用软件使用 2GB 内存,64 位计算成为当今 HPC 的必要条件,相应地 64 位 CPU 已经成为 HPC 的主流,目前基于 x86-64(AMD64 和 Intel EM64T)的系统是目前性价比较高的 64 位 CPU。

(2)高性能 I/O。高性能 I/O 对高性能计算的效益很明显。以 SPARSE 求解器为例,每百万自由度需要处理 10~15GB 信息,对以较常见的 300 万左右自由度的中型问题,大约需要处理 30~45GB 信息。如此大内存的机器目前尚不多见,一般都需要频繁的内外存交换,因此,模型越大,输入文件、数据库文件、中间文件和结果文件等就越大,高性能 I/O 的效果越显著,目前性价比较高的硬盘有 SATA 和 SAS 两个系列,其中 SATA 系列主要应用于 PC 机,转速相对较慢(5.4K 转/分和 7.2K 转/分),SAS 系列主要应用于服务器,转速较快(10K 转/分和 15K 转/分)。

(3)高性能互联。并行有限元算法的原理是将有限元模型切分为多个小的域,分配到多个计算进程中求解。多个计算进程之间通过 MPI 进行通讯交换数据。有限元规模越大,对 MPI 通讯的要求越高。对于由多 CPU 组成的服务器,SMP 系统由于具有并行进程间高带宽、低延迟、低 CPU 占用、主进程可获得更多的内存等特点,用于高性能计算效率相对更高,但其造价也高于同样配置的 Cluster 系统。

## 1.2 大型计算机

解读《规划纲要》中关于计算机产业的规划部分,可以发现,国家倡导的攻关计划越来越“现实”,越来越贴近市场,越来越关注科技在社会民生中的实际作用,并首次把“高效能可信计算机”列入信息

产业优先发展的主题。

高性能计算机从市场应用角度大致分为两个类型,一类是用于科学研究、军事航天、地质勘探等领域的高端科学计算,对计算机的计算性能提出了很高的要求;一类是用于政府、金融、电信、财税等的商用计算,对服务器事务处理能力,包括计算、交换和存储在内的系统综合性能应用有着极高的要求。尽管商用计算占到整个市场份额的 95%,但这部分市场一直为国外大公司的大型机和小型机垄断,国内企业很难做出成绩。在当时,集群技术相对比较成熟,国内服务器厂商相继投入了研发,尤其是在科学计算方面的应用。在国际各种版本的 TOP100 高性能计算机评选中,开始逐渐出现中国计算机的名字,舆论对中国高性能计算机行业充满了期望。新千年前后的高端计算领域,TOP 争夺之声此起彼伏,国内几家公司加入了其中。在高端科学计算领域,2008 年 9 月我国成功研制出曙光 5000A,安装在上海超级计算中心,其系统峰值运算速度可达到每秒 230 万亿次浮点运算,这标志着中国成为继美国后世界上第二个自主设计并制造百万亿次高性能计算机的国家,并在当年成功跻身世界超级计算机前十。在商用计算领域,从 2002 年开始由浪潮研发的“天梭工程”,瞄准的就是“高效能可信计算”的商用应用领域。如今,浪潮“天梭”撬开了高端商用计算机的大门。截至 2005 年底,浪潮“天梭”产品累计销售量已近千套。在此之前,国内用户采用的都是国外进口的小型机产品,价格也一直居高不下。而现在,每套“天梭”的价格比国外同档小型机要低 100 万元。

相关机构的调研数据表明,虽然国产服务器在销量上占据了近一半的市场,但在销售额上却处于劣势地位。这是因为在诸多关键应用领域,国外品牌的小型机仍然占据主导地位。在这个市场中,仅 IBM、HP、SUN 三家国外厂商就占据了绝大部分市场份额,其产品覆盖了制造、政府、教育、能源、电信、金融、交通、流通、邮政、科研等众多行业领域。这些都是关系到国家安全、社会民生的核心机构。可以说,高端商用计算对整个国家社会民生影响的深度和广度已经达到了空前的深远。

## 1.3 网络计算平台

网络计算(network computing)是把网络连接起来的各种计算资源和系统组合起来,实现资源共享、协同工作和联合计算,为用户提供各种信息和服务,实现“网络就是计算机”的理想。基于此,人们把企业计算、网格计算、对等计算和普适计算归类为网络计算。网络对于高性能计算系统而言是相对较新的新增内容,网络计算系统的关键元素是网格中的各个节点,它们不是专门的专用组件。在网格中,各种

系统常常基于标准机器或操作系统,而不是基于大多数并行计算解决方案中使用的严格受控制的环境。位于这种标准环境顶部的是应用软件,它们支持网格功能。

网格可能由一系列同样的专用硬件、多种具有相同基础架构的机器或者由多个平台和环境组成的完全异构的环境组成。专用计算资源在网格中并不是必需的。许多网格是通过重用现有基础设施组件产生新的统一计算资源来创建的。不需要任何特别的要求就可以扩展网格,进一步使用节点变得比在典型 HPC 环境中还要轻松。

网格计算平台 (grid computing platform) 能够把分布在不同地理位置的计算资源有效地管理起来,屏蔽这些计算、存储或软件资源的异构性并形成一个虚拟的计算环境,向开发人员提供单系统映象的、全局一致的和安全友好的编程接口,提供解决大型科学问题的超级计算能力和存储能力。网格计算平台目前是国内外计算机领域研究的热点,以美国 Globus 和英国 E-science 项目为代表的网格系统已取得了一系列重要进展,其他国家也制定并实施了各自的网格计划。国内的研究工作也在积极地展开,863/973 计划以及基金委近几年启动了多个重大网格研究项目,并在面向网格的超级计算机、网格系统软件等方面取得了较好的研究成果。网格计算平台是信息化社会的基础设施,对降低信息化建设成本、提高资源利用率、实现跨部门的信息共享和应用集成将发挥巨大作用。

## 2 高性能计算在工程结构分析中的应用

近年来,高性能计算在土木工程中的许多领域都得到了成功应用,如高层、超高层建筑结构抗震性能分析、计算风工程、大型复杂工程施工模拟、混凝土高坝仿真分析以及地下结构的高性能分析等。由于篇幅有限,这里仅介绍几个方面的应用。

### 2.1 强震作用下高层建筑结构性能分析

建筑物遭遇强震袭击时的倒塌破坏一直是造成人员伤亡和设备损毁的主要根源。例如 1976 年唐山 7.8 级地震、1985 年墨西哥 8.1 级地震和 1989 年美国旧金山 7.1 级地震,以及 1995 年日本 7.2 级阪神地震,其中仅日本阪神地震造成的损失总计达 967 亿美元。我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一,6~9 度地震区约占国土面积的 80%,地震灾害对城市所造成的经济损失日趋严重,基于性能的设计方法越来越受到重视。按照我国现行抗震规范的三水准设计思想,大震作用下建筑结构的弹塑性变形

分析是设计的一个重要环节。在建筑结构设计,罕遇地震作用下的非线性变形分析是一项重要工作。GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》<sup>[5]</sup> 第 3.6.2 条规定:不规则且具有明显薄弱部位可能导致地震时严重破坏的建筑结构,应按本规范有关规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析。对各类具体工程,该规范第 5.5.2 条给出了具体规定。受理论水平和计算机软硬件条件的限制,过去在对建筑结构进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析时,一般都要做许多简化。进入新世纪以来,结构的精细化设计已经成为结构工程领域的一种趋势,结构设计中能够对更加精确模拟建筑结构真实受力状态的分析软件的需求越来越迫切。

在建筑结构地震分析中,大震作用下的非线性变形分析是一项技术难度较高的工作。早在上世纪 60 年代初,人们对非线性分析进行了大量研究并提出了各种计算方法,但非线性分析的实际应用却进展缓慢。这是因为一方面在结构分析模型、单元模型、恢复力模型、数值计算方法等方面还存在许多问题有待解决;另一方面,由于结构非线性分析需要消耗大量计算机资源,普通计算机往往无法胜任,需要高性能计算机才能完成任务。近年来,随着有限元技术和计算机软硬件技术的飞速发展,特别是 PC 机性能的不断提升和网格技术的普及,在建筑结构抗震设计中对大震作用下的结构性能进行更加精确的分析已经成为可能。目前,已提出了一些行之有效的结构非线性分析方法和能够较真实反映结构非线性特性的数学模型,并编制了商用计算程序,如 ABAQUS 等<sup>[6]</sup>。

对建筑结构,特别是超高、超长、大跨度等大型复杂结构进行大震作用下的非线性动力分析,面临的主要困难有如下三个方面:一是结构规模大,需要求解自由度达几十万甚至上百万的方程组;二是在材料开始损伤的非线性变形阶段,混凝土的开裂和裂缝扩展对结构性能影响十分敏感;三是单元尺寸和计算步长都不能过大,而且每个时间步内都要进行迭代求解。随着计算技术的发展和计算机软硬件水平的提高,建筑结构非线性分析模型经历了从二维平面模型、层模型到三维空间模型的变化。应用精细的微观模型,采用基于材料动力损伤本构的纤维束模型和弹塑性板壳单元模拟梁、柱、墙、板等结构构件,已经成为大型复杂结构大震作用下非线性动力分析的主导趋势。如文献[7]在 2006 年对 CCTV 新办公楼工程进行了分析,该工程地面以上 48 层,建筑高度 215m。应用 ABAQUS 软件在小型机 SGI 350 上对结构进行弹塑性时程分析,SGI 350 小型机配置 8 个 CPU,内存 32GB,主频 800MHz。结构

计算模型总计有 75849 个单元, 218351 个节点, 711423 个自由度。动力非线性分析采用直接积分法中的显式算法, 时间步长取  $8 \times 10^{-5}$  s, 输入地震波持时 20s, 计算耗时 28h。

广州数力工程顾问有限公司在 2008 年对天津津塔在罕遇地震作用下的动力非线性仿真分析。该工程 88 层, 总高 350m, 是天津市新地标建筑, 采用内筒薄钢板剪力墙外框筒的新颖结构方案(图 1)。由于罕遇地震作用时内筒薄钢板剪力墙进入弹塑性的屈曲状态以耗散地震能量, 因而必须通过对结构进行精细网格分析才能反映出其抗震性能。其内筒薄钢板剪力墙划分至  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 总自由度数接近 1 千万。地震波持时 40s, 显式积分步长为  $2 \times 10^{-5}$  s, 采用 8 台 PC Cluster 共 22 个 CPU 并行计算, 计算耗时 48h。相比文献[7]的计算规模, 总自由度数已经增加了约 14 倍, 计算历程亦增加了 1 倍。由于软件和硬件能力的提高, 总的计算分析能力在两年内增加了约 15 倍。按此速度发展, 进一步的精细模型(如三维实体单元, 钢筋与混凝土的滑移单元等)可在不远将来实现。



图 1 天津津塔工程  
Fig.1 Jin Tower in Tianjin

## 2.2 计算风工程

在高层、超高层建筑、大跨度空间结构的设计中, 风作用是关键的主控作用之一。研究风作用的主要手段有两个: 一是风洞试验, 二是风环境数值模拟, 也称计算风工程 (computational wind engineering, CWE)。风环境数值模拟因其可用原型尺度建立计算模型、周期短、费用低等优点, 近年来应用越来越广泛。调查统计数据表明, 日本重大建筑工程中, 进行数值模拟和风洞试验的比例为 60% 和 40%。

计算风工程是一门综合气象学、空气动力学和气动弹性力学、结构力学、振动工程学等多学科的新

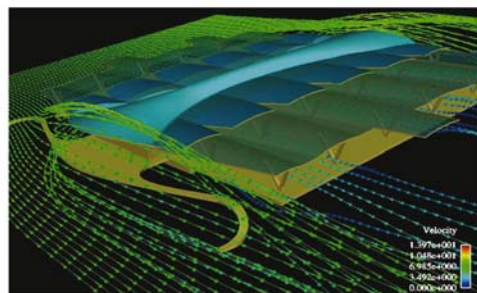
兴交叉学科。数值模拟软件是 CFD 技术与数据可视化技术、网络技术、数据库技术相结合的产物。前置几何处理及 CFD 求解器、CFD 数据可视化、图形用户界面 (GUI) 以及相关的网络通信和数据库是数值风工程模拟软件系统的核心技术。数据可视化子系统是计算风工程的重要组成部分。其作用是用计算机图形学的可视化方法把 CFD 数值模拟的抽象计算结果直观地表现出来, 使设计人员能够方便地对这些数据进行分析、比较和研究。

计算风工程研究解决的是围绕建筑物的风速场分布问题。采用的主要手段是 CFD 技术, 有诸多因素直接影响模拟分析的收敛性和结果的精确性, 如湍流模型、平衡边界层、数值离散格式、边界条件、计算域、网格划分等。大量常见建筑物外形为钝体, 建筑风环境数值模拟所涉及的是钝体绕流问题, 因此与分离流动特性紧密相关的湍流模型的合理选择非常关键。因大型复杂工程的规模较大, 其计算域一般要取工程本身的 4~10 倍, 离散的网格通常要达到数百万以上, 数值模拟计算量巨大, 对计算设备要求较高, 目前的模拟软件都是在工作站上运行的。

文献[8-9]对广州新火车站风荷载和风环境进行了数值模拟和风洞试验研究。新广州火车站属大跨度屋盖结构, 结构复杂, 体量庞大, 总建筑面积为 37.78 万平方米, 车站南北纵向长约 448m, 东西横向长约 398m(图 2)。风工程数值模拟仿真方法应用于这一大型复杂建筑工程的结构抗风研究过程中。



(a) 建筑效果图



(b) 绕流场数值模拟仿真

图 2 广州新火车站

Fig.2 New Railway Station in Guangzhou



在“结构风荷载”专题研究中,采用新的“数值模拟引导下的复杂结构抗风优化设计”研究方案<sup>[8]</sup>;在初步设计阶段,首先利用“数值风洞”计算机仿真手段,模拟结构整体风荷载分布,为方案优化设计提供建议。在方案确定后,参考数值模拟结果,合理设计风荷载风洞测压试验方案,以准确捕捉结构的最不利风荷载分布,提高试验结果的有效性和准确性。数值预测结果和风洞试验对比显示,由于在数值模拟中采用新的来流边界条件模拟平衡边界层<sup>[9]</sup>,数值风洞模拟仿真的精度得到提高,数值模拟结果和风洞试验结果吻合较好。在进行“建筑风环境评估”专题研究中,采用数值模拟方法计算 16 个典型风向的绕流场风速分布,并结合当地气象统计资料和评估标准给出了定量的评估结果。

在建立数值风洞计算模型中,采用了内、外域分区流域构造和网格划分方法,整体上数值风洞分成内、外域两部分,建筑模型附近的内域空间采用四面体非结构网格单元离散,外域空间采用具有规则拓扑结构的六面体单元离散。这种混合网格划分方案可适应复杂建筑模型的离散,同时对网格分布和数量进行合理控制,减小数值扩散误差,提高数值迭代过程的收敛性。数值模型体网格单元总数约为 435 万,数值仿真计算在中国建筑科学研究院 IBM p630 工作站上进行,工作站 CPU 配置 IBM P41.0G × 4,内存为 8G,每个风向角工况迭代计算约需 14h。

### 2.3 大型复杂工程施工模拟

建筑结构的施工方法、施工工艺、施工进度控制等因素对结构受力有着重要影响。以自重为主的恒荷载随主体结构的施工逐渐施加。在施工荷载作用下,结构变形基本在施工过程中逐渐形成。对于一般的施工过程,施工模拟分析需考虑如下 4 个要点:①变刚度,结构刚度随施工进展而逐渐形成;②变荷载,施工荷载随着施工进展而逐渐施加;③施工找平,这是钢筋混凝土结构的一项特殊施工工艺,结构局部改变了力与变形的规律;④基础沉降,施工过程中的基础不均匀沉降导致结构内力重分布。

施工模拟分析实质上是一种分阶段变刚度的计算方法。对应于施工过程的每一个阶段,分别对该状态的结构施加该阶段的荷载并进行分析;不同施工阶段之间状态叠加,即后一阶段的起始状态是前一阶段结束状态,结构变形和内力分别在各阶段叠加,从而实现实际结构施工过程的模拟。上海现代建筑设计(集团)公司在 CCTV 新办公楼的设计与施工控制中进行了详细的施工模拟分析。CCTV 新办公楼是由两个倾斜的塔楼在顶端各伸出一个 70m 的大悬臂,两悬臂的端部相互连接使两塔楼形成一个连体结构(图 3)。塔楼倾斜、高空大悬臂和连体结构

是该结构的突出特点。该工程的施工模拟包括设计阶段的施工模拟和施工配合阶段的施工模拟。



图 3 CCTV 新办公楼工程

Fig. 3 Now building of CCTV Office

设计阶段的施工模拟将整个施工过程分成三个阶段:第一阶段两塔楼分别施工至屋顶;第二阶段安装连接构件直至完成悬臂段钢结构;第三阶段完成所有构件。为了将结构内力控制在一定水平内,同时也考虑实际可能出现的施工过程,将施工进度设定为上限和下限,分别计算了这两种施工进度下结构内力和位移。在施工第一阶段,按施工阶段多遇地震作用下结构不出现损坏要求,故按抗震规范的小震设计。设计中采用反应谱分析检查,结果表明对上限、下限荷载对应情况,结构构件承载力均满足要求。

施工阶段的模拟将实际施工阶段分为 28 个阶段,分别计算了各阶段的变形和内力。选取第 37 层角点作为变形控制的关键点。根据设计要求实际施工过程的结构内力应在设计上限、下限内力包络之内,通过施工过程中构件内力变化与累计及设计内力的比较,确定是否满足要求。计算分析及构件承载力校核表明,主要受力构件的支撑内力与原设计相比,基本包含在原上限、下限之内,说明施工过程中内力控制满足原设计要求

悬臂段合拢方案分为三个阶段:第 1 阶段悬臂段开始从塔楼向外悬挑施工至第 1 阶段 7 根杆件合拢前;第 2 阶段所有悬臂段第 37~39 层转换层完成;第 3 阶段所有悬臂段钢结构连接完成。整个悬臂段合拢的施工模拟共计算 18+1 个施工阶段。计算中考虑了施工期间的温度作用,包括均匀温差影响及局部温差影响。后者包括合拢构件可能承担较大温度变化的不利情况,即夜间焊接完毕后白天升温 10℃,随后太阳直射钢结构表面升温 30℃。由于合拢过程持续时间在两个月左右,故考虑 10 年一遇的风荷载已偏于安全。悬臂段连接最多持续两周,可根据地震预报尽量避免在地震时间合拢,考虑一年

地震作用已偏于安全。

施工模拟方法是反映恒载对结构作用的准确方法。对于中央电视台新楼主楼结构来说,施工模拟是必要的,这样可以较准确地反映恒载作用下结构的变形和内力分布。实际施工过程与设计时预先考虑的施工过程相比,悬臂段合拢方案变化较大,实际施工进度接近于设计下限,而施工过程变化对结构的影响较小,因此主要构件内力仍在原设计范围内。

### 3 结语

高性能计算作为高科技的前沿,是土木工程行业计算机应用进一步创新的突破口,成为衡量企业、研究机构、高等院校乃至一个国家高科技水平的重要标志。一方面,高性能计算作为辅助工具,能够使设计人员更加准确地把握工程设计的安全性和适用性,这也是企业提高设计产品科技含量,提高自主创新水平的重要方面。工程中超高、超长、大跨度等复杂工程的大量涌现,使设计人员对高性能计算的需求越来越迫切;另一方面,计算机软硬件技术的日新月异高速发展,使过去“贵族化”的高性能计算降低了门槛,特别是PC机性能的不断提高和网络技术的普及,促使高性能计算向“平民化”的过渡,使得土木工程行业推广应用高性能计算技术成为可能,但目前仅仅是开始,真正在全行业普及应用还任重道远。还需要更多、更深入的研究,并开发出更多、更简单实用的软件系统,还需要科研、软件开发和工程设计等人员共同努力,把握时机,引导发展方向,使之能够尽快成为推动行业技术进步与科技创新的动力。

#### 参 考 文 献

- [1] Flynn M J. Very high-speed computing systems [J]. Proceeding of the IEEE, 1996, 54(12): 1901-1909.
- [2] DONGARRA J, SFERLING T, SIMON H, et al. High-performance computing: Clusters, constellations, MPPs, and future directions [J]. IEEE Computational Science & Engineering, 2005, 7(2): 51-59.
- [3] Tremblay F, Habashi W, Aubé M, et al. A CWE/WT study of the flow over high- and low-rise buildings with anisotropic mesh optimization [C]//The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering. Tokyo, Japan; International Association for Wind Engineering, 2006:897-912.
- [4] 杨继张. 高性能计算机软硬件技术发展概述[C]//首届工程设计高性能计算(HPC)技术应用论坛论文集. 北京:中国土木工程学会计算机分会,2007:142-153. (Yang Jizhang. Development of software and hardware technology about HPC [C]// Proceedings of 1st Conference on HPC. Beijing: Computer Application Branch of China Civil Engineering Society, 2007:142-153. (in Chinese))
- [5] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. (GB 50011—2001 Code for seismic design of Buildings [S]. (in Chinese))
- [6] 李云贵, 聂祺. 大震作用下建筑结构非线性分析软件研究[C]//第七届全国地震工程学术会议论文集. 北京:中国建筑学会,2006:552-562. (Li Yungui, Nie Qi, Studies on nonlinear analysis software for building structures under the action of strong earthquake [C]// Proceedings of the seventh Conference on National Earthquake Engineering. Beijing: Architectural Society of China, 2006:552-562. (in Chinese))
- [7] 汪大绥, 卢旦, 李承铭, 等. 应用高性能计算平台进行结构弹塑性时程分析[C]//首届工程设计高性能计算(HPC)技术应用论坛论文集. 北京:中国土木工程学会计算机分会,2007:8-15. (Wang Dasui, Lu Dan, Li Chengming, et al. Elastic and plastic analysis of structures based on HPC platform [C]// Proceedings of 1st Conference on HPC. Beijing: Computer Application Branch of China Civil Engineering Society, 2007:8-15. (in Chinese))
- [8] 金新阳, 杨伟, 金海, 等. 数值模拟引导下的建筑风洞试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(8):104-107. (Jin Xinyang, Yang Wei, Jin Hai, et al. Studies on wind tunnel test of buildings based on numerical simulation [J]. Building Structure, 2007, 37(8): 104-107. (in Chinese))
- [9] Yang Wei, Quan Yong, Jin Xinyang, et al. Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise building [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10-11):2080-2092.