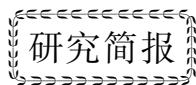


文章编号: 0253-3782(2006)06-0669-04



用于地震数值模拟研究的数据库及应用平台^{*}

罗 毅^{1, 2), *} 郑月军¹⁾ 陈连旺¹⁾ 陆远忠¹⁾ 黄忠贤¹⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

关键词 地震数值模拟 数据库 应用平台开发

中图分类号: P315.8 文献标识码: A

数值模拟已经渗透到地震学研究的各个重大领域, 随着信息时代数字技术的高速发展, 充分利用数字信息资源, 开展多学科的综合研究已成为地震学研究发展的趋势。利用数值模拟的手段, 将多学科的观测资料、实验结果和理论分析有机地结合起来, 将会极大地开拓解决重大地震学问题的能力, 必将推动对危害人类的强地震的预测预报从经验性向物理的、数字的预报转变。该平台提供面波频散信息, 中国及邻区三维速度模型, 中国大陆震源机制解, 断层构造, 地震波形, 地震目录, 地震台站, 以及仪器响应信息等丰富的地震学基础数据和研究成果, 可以利用这些信息构建比较合理的地球模型和尽可能多的约束条件, 并进行地壳形变和地震过程的数值模拟; 可以在该应用平台开展地球介质各向异性分析, 面波层析成像, 面波偏振分析, 面波时频分析, 以及射线追踪等与地球内部结构有关的研究。同时, 这也是一个交流平台, 研究人员可以利用该平台发布自己的研究成果与同行交流。

1 研究概况

近年来, 各种地震学数字观测网络相继建立, 正在不间断地产生大量的数字信息。此外, 对地壳三维速度模型、构造模型等研究已有相当多的成果(Huang, Zhao, 2006; Huang *et al.*, 2003; Li, Mooney, 1998), 为研究地球内部结构和地震孕育过程提供了宝贵的资料。为此, 利用数值模拟手段, 将多学科的观测资料、实验结果和理论分析有机地结合起来, 建立一个主要用于数值模拟的数据库及应用平台是十分必要的, 这也是推动地震预测向前发展的重要途径。

地震预测作为一个世界性的科学难题, 目前还没有取得突破性的进展。地震预测至今还处于经验预报的阶段, 各种前兆手段和预报方法缺乏可靠的物理依据(杨建思, 2005), 不同学科领域的研究缺少相互联系。纵观地震动力学数值模拟预报研究, 其主要困难在于缺少有关地壳上地幔深部结构和物理参数以及结构复杂性的数据, 以致于以往的动力预报研究受到很大的局限性, 尚处于大尺度的或定性的研究阶段(刘启元, 吴建春, 2003; 牟永光, 裴正林, 2005)。利用该数据库中面波速度结构, S波速度结构分布, 地壳厚度, 莫霍面埋深, 断层分布, 构造模型, 地震活动性, 以及震源机制解等研究结果, 可以为建模提供尽可能多的约束, 从而为建立一个合理的地球模型提供强有力的支持。

2003年1月—2005年12月, 在科技部基础性工作专项资金资助下, 我们建立了一个以地震数值模拟研究为应用核心, 集多种研究手段为一体的的数据库及其应用平台。

* 科技部基础性工作研究项目(2002DEB30092)资助。

2006-06-15 收到初稿, 2006-10-12 决定采用修改稿。

◆ 通讯作者。E-mail: luoyang@seis.ac.cn

2 总体设计

总体目标是初步建立包括面波频散信息，中国及邻区三维速度模型及地球介质各向异性信息，中国大陆震源机制解，断层构造，地震波形，地震目录，地震台站，以及仪器响应等信息的综合地震学基础数据库。开发地震波分析，面波层析成像，各向异性分析，面波时频分析，射线追踪以及数据查询等应用功能模块；引进和开发适用于地学领域的有限元分析计算软件系统，并利用数据库提供的各类地震学基础观测数据和研究成果，开展有限元建模和地震数值模拟研究。此外，这些信息可为多种研究共享，不同研究手段相互参考印证，用作联合反演的资料。最终建成一个以地震数值模拟为应用核心，集地球内部结构研究、地应力研究等多种相关学科手段为一体的综合地震学数据库及应用平台。该平台总体设计如图1所示。

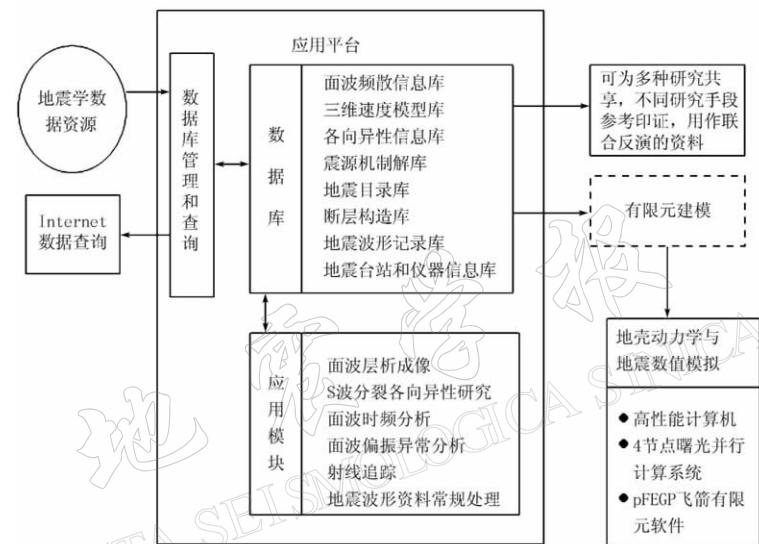


图 1 数据库平台总体设计

3 数据库建设

数据库建设从需求分析出发，通过各阶段的设计，在充分考虑了最小的数据冗余和最快的查询速度的基础上，构造最优的数据库模式，建立各类地震学数据库及其应用系统，使之能够有效地存储数据，满足各种应用需求。数据库包括有面波频散信息库，面波群速度信息库，中国及邻区三维速度模型库，断层构造库，中国大陆震源机制解库，地球介质各向异性信息库，地震波形库，地震目录库，以及地震台站和仪器信息库。并开发了相应的数据入库、维护等数据库管理系统，数据库查询系统，以及各种数据的应用功能模块，方便用户根据需求获取数据，把分析中间结果保存在数据库中，对数据库中的数据进行更新、删除等各种操作。

1) 面波频散信息库。包含约 7 000 条路径上测定的瑞利波群速度混合路径频散曲线，提供进一步层析成像研究的基础资料；中国及邻区($68^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$, $13^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{N}$) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格各结点的纯路径频散曲线，是深入研究 S 波速度结构(如与接收函数联合反演等)的有用资料。

2) 面波群速度信息库。中国及邻区 7.9~180 s 瑞利波群速度分布，面波反演及 S 波分裂研究得到的地球介质各向异性信息，是研究地球结构和变形的有用资料。

3) 地球模型库。由面波层析成像得到的中国及邻区($15^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格结点的速度模型。可提供每个点的深度-速度值，显示各种 S 波速度剖面，供有限元建模应用或参考。

4) 震源机制解库. 包含中国大陆 1920—2003 年共 2 765 个震源机制解, 可服务于地壳动力学研究中分析构造块体的受力和运动.

5) 断层构造库. 包含中国大陆地区全新世活动断裂、全新世隐伏断裂、晚更新世活动断裂、晚更新世隐伏断裂、第四纪活动断裂、第四纪隐伏断裂等, 可用于有限元建模.

6) 地球介质各向异性信息库. 包含中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究所得的上地幔各向异性分布以及面波反演得到的各向异性分布结果. 地壳上部的各向异性可以反映受力情况, 地壳下部和上地幔各向异性则反映构造力作用下的变形和物质流动. 各向异性信息为地球动力学模拟提供重要的背景资料.

7) 地震波形、地震目录、台站和仪器信息库. 地震波形主要针对特定应用, 如面波层析成像、SKS 波分裂分析、滇西面波偏振研究, 对原始波形数据经过筛选、截取、去均值、去线性趋势、仪器极性改正等预处理后的数据. 来源于国家台网、IRIS 和 GEOSCOPE 等台网提供的中国及周边台站从各台站建立以来大于 5 级地震的波形. 目前收入的地震目录也是针对特定应用, 主要是用于地球内部结构研究的一些目录, 如 PDE 目录、云南小震目录等区域台网测定的目录. 台站和仪器信息包括所有波形记录对应的地震台站地理坐标和仪器响应参数及其随时间的变化情况.

数据库中数据的使用方案是将数据访问组件设计为统一的用户接口, 可以提供给不同类型的客户端使用: Windows 窗体应用程序、Web 应用程序、XML Web services. 数据库的安全通过数据库角色分配来实现.

4 应用平台开发

数据库建成之后, 围绕着读取和更新数据库中的信息, 开发分布式应用程序, 建设一个结合地球内部结构研究, 地形变研究, 以及地应力研究等多种相关学科手段为一体的应用平台. 目前该应用平台可以利用地震学数据库中丰富的基础资料和研究成果进行介质各向异性分析, 面波层析成像, 面波时频分析, 偏振分析, 射线追踪, 以及地震波形资料常规处理, 可以输出用于数值模拟的三维地壳结构、构造断裂、断层破裂模型、地震活动性等研究成果, 为构建比较合理的地球模型和尽可能多的约束条件提供坚实的基础数据支持. 同时, 这也是一个交流平台, 用户可以利用这个平台发布自己的研究成果与同行交流, 更多的研究人员可以通过 Web 查询系统共享平台数据库提供的各种信息.

1) S 波分裂分析模块. 各向异性是反映地球内部介质的岩性、受力状态和流变运动非常有用的资料. S 波分裂是目前研究地壳上地幔介质各向异性最常用的一种方法, 可用来探讨地壳应力分布特征, 上地幔各向异性层分布特征, 探索与过去或现今大规模的构造运动相关的地球内部动力学过程. 用户可以直接从数据库读取所需分析的波形数据, 在该应用模块进行滤波、旋转、自动及手动截取波形、显示质点运动轨迹、计算能量谱、提取各向异性参数并作出各向异性分布图.

2) 面波层析成像模块. 利用地震面波资料研究地壳上地幔速度结构和各向异性, 除反演计算耗时太长需独立进行外, 其余流程均可在平台上完成. 基于多重滤波方法, 通过人机交互的时频分析, 以计算机判断为主、人工干预为辅, 确定频散曲线, 并完成入库、形成反演文件等一系列任务. 减少了频散测量中人为因素的影响, 并适合于处理大量的数据.

3) 数据管理和工具模块. 用于对数据库进行管理维护, 并提供波形浏览、常规处理、计算震相到时等工具, 可以在该模块进行研究成果入库和数据交换.

4) 面波时频分析模块. 提供频散分析、时变滤波、相位适配滤波等比较复杂的功能, 可在平台上调用数据库内资料进行分析处理并将研究结果存入数据库. 可用于方法研究, 但不适于处理大量的数据.

5) 偏振分析模块. 用于对三分量地震信号进行偏振分析, 提供时域、频域、实信号、复信号、能量比曲线、质点运动图等多种方法提取偏振参数.

6) Web 查询系统. 为方便用户能从 Internet 网上获取这些丰富的地震学基础数据, 开发了 Web 查询系统, 使更多的研究人员可以从网上获取基础数据和研究成果.

5 地壳动力学数值模拟实验室的建立

该数据库的核心应用在于地震数值模拟, 利用数值模拟的手段将各种地震学基础观测数据和研究成果相结合, 利用数据库中丰富的各类数据信息进行有限元建模, 构建更为合理的地球模型和尽可能多的约束条件, 并在有限元分析系统上进行地壳形变和地震过程的数值模拟。为此中国地震局地壳应力研究所于2005年组建了地壳动力学数值模拟实验室, 该实验室已初具规模并开始试运算。目前实验室已有4节点(Xeon3.0G CPU)曙光并行计算系统及配套的服务器和终端, 以及pFEGP-飞箭并行计算有限元自动生成系统软件等, 已开始地壳动力学问题的探索研究。

6 数据库使用情况

利用该数据库及应用平台开展了一些研究工作, 在此平台上开展了S波分裂和面波偏振分析以及S波速度结构反演等研究, 给出了中国大陆及邻区 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格各结点的纯路径频散曲线, 7.9~180 s瑞利波群速度分布, 各向异性分布以及地球模型。此外, 正在开展有限元建模并在数值模拟实验室试运算。已发表的相关论文有“中国大陆及邻区SKS波分裂研究”(罗艳等, 2004); “东亚地区瑞利波方位各向异性”(Huang *et al*, 2004)。

参 考 文 献

- 刘启元, 吴建春. 2003. 论地震预测——关于我国地震预测研究发展战略的思考[J]. 地震学前沿, 8(10): 217~224
 罗艳, 黄忠贤, 郑月军, 等. 2004. 中国大陆及邻区SKS波分裂研究[J]. 地球物理学报, 47(5): 812~821
 卞永光, 裴正林. 2005. 三维复杂介质地震数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 4
 杨建思. 2005. 地震预测研究发展简单回顾与建议[J]. 国际地震动态, 2005, (4): 163~167
 Li S, Mooney W D. 1998. Crustal structure of China from deep seismic sounding profiles[J]. Tectonophysics, 288: 105~113
 Huang Z X, Peng Y J, Luo Y, *et al*. 2004. Azimuthal anisotropy of Rayleigh waves in East Asia[J]. Geophys Res Lett, 31: L15617, doi:10.1029/2004GL020399
 Huang J L, Zhao D P. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. J Geophys Res, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
 Huang Z X, Su W, Peng Y J, *et al*. 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions[J]. J Geophys Res, 108(B2): 2073, doi: 10.1029/2001JB0016996

DATABASE APPLICATION PLATFORM FOR EARTHQUAKE NUMERICAL SIMULATION

Luo Yan^{1,2)} Zheng Yuejun¹⁾ Chen Lianwang¹⁾ Lu Yuanzhong¹⁾ Huang Zhongxian¹⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Key words: earthquake numerical simulation; database; application platform development