

项目编号 S2016789

武汉大学大学生创新创业训练计划

项目科研总结

地壳密度模型的精化

院（系）名 称：测绘学院

专 业 名 称 ：地球物理学

学 生 姓 名 ：王锴 郁畅 易旭懂 李潇 张振

指 导 教 师 ： 申文斌 教授

二〇一七年三月

INNOVATIVE TRAINING PROGRAM'S INTERIM REPORT FOR COLLEGE STUDENTS OF WUHAN UNIVERSITY

The refinement of Crustal density model

College : School of Geodesy and Geomatics

Subject : Geophysics

Name : Kai wang, Chang Yu, Xuchong Yi, Xiao Li , Zhen Zhang

Directed by : Professor Wenbin Shen

March 2017

摘 要

本项目负责人王锴，项目成员郁畅、易旭懂、张振、李潇，均是测绘学院地球物理学专业 2014 级本科生。指导老师是申文斌教授，主要从事物理大地测量、相对论大地测量以及固体地球物理学方面的科研与教学工作。精确的地壳模型的出现可以有效约束帮助构建地球内部的精确结构模型，为多学科研究奠定基础。目前，国际上比较广泛使用的地壳模型是由美国发布的 CRUST 1.0 模型，但其分辨率只有 $1^\circ \times 1^\circ$ ，不能满足多学科发展需求。因此亟需建立高分辨率高精度的地壳密度模型。本次项目利用 EGM2008 团队给出的球谐系数确定出全球分辨率为 $5' \times 5'$ 的大地水准面作为初始参考面，并对 CRUST1.0 模型插值得到分辨率为 $5' \times 5'$ 的模型。对于两种计算全球范围引力位的基本模型，我们对某一例子进行了计算并对两种模型进行了比较。对重力场和 DTM 模型采用的球谐表达，我们编程计算了相关的球谐函数。对适用于大计算量问题的 MPI 技术，我们进行了理论学习并对某一例子进行了编程计算，比较并行与串行的差异。分辨率更高、更精确的地壳密度模型，有利于人们对地球内部进一步的认识，对于地震学领域的研究、矿产勘探等都有重要意义。通过在项目过程中的学习研究，我们体会到科研工作的严谨与乐趣，懂得了团队精神的重要性。虽然中途艰难，但最后经过不断学习，我们也感受到了坚持的力量。总的来说获益匪浅，我们十分庆幸能有这次机会。

一、项目选题的背景及项目意义

地壳密度模型与地震学的研究，能源、矿产分布关系密切，对于板块构造和运动的更深层次认识也有不小的帮助。精确地壳模型的出现可以有效帮助构建地球内部的精确结构模型，从而使得地震学的研究乃至地震预报有较为长足的进步。

目前，国际上比较广泛使用的地壳模型是由美国发布的 CRUST 1.0 模型，但其分辨率只有 $1^\circ \times 1^\circ$ ，不能满足多学科发展需求。分辨率更高、更精确的地壳密度模型，有利于人们对地球内部进一步的认识，对于地震预报以及物理机理，矿产寻找以及板块构造等都有着较好的帮助。因此建立一个较为精确的地壳密度模型无论对于大地测量学，地质学，还是地震学都有着深远的意义。

本小组内成员都对编程有很大的兴趣，在此之前对理论力学、波动理论等有所学习，且掌握 C 语言的基本用法，并自学了 Fortran，在项目的执行过程中都能很快上手，在读写程序上节省了相当一大笔时间。项目过程开始阶段学习的数理方程以及弹性力学与张量分析对于这次的课题的理解和研究也起了很大的帮助，对我们在之后自学地震学和重力学有了知识铺垫。

二、项目成员的组成、特长、分工及成员间相互协调配合的情况，导师指导情况

本小组汇集测绘学院地球物理学专业成绩优秀、编程能力强、富有合作意识的五位同学。王锴，项目负责人，成绩优秀，编程能力突出，组织能力强，用 Fortran 实现模型构建的编程以及 MPI 并行技术的学习，负责小组成果交流以及与导师的沟通；易旭懂，成绩优秀，基础扎实，进行地震学、重力学理论研究，并运用 GMT 绘制精化的地壳密度模型；郁畅，成绩突出，编程能力强，认真负责，主要工作是收集数据并用 MATLAB 对数据作初步处理；李潇，负责分析已知重力场模型与数字高程模型，结合所需数据，实现构建地壳模型的部分编程；张振，编程能力突出，用 Fortran 进行模型的编程，学习 surfer 以便实现对项目成果的展示。

指导老师申文斌教授首先向我们介绍了项目实施的大致过程以及基本原理，并向我们推荐了相关文献。在我们实施过程中遇到一些问题时，我们咨询申老师都能得到及时有效的解答。而且，我们有机会参加申老师的科研讨论会并对本课题进行了展示，这既是对我们交流能力的锻炼，同时也促进了我们项目的实施进度。本项目的顺利完成，离不开感谢申老师的悉心指导和帮助。

三、项目的创新点与特色

（一）、项目创新点

1. 传统确定大地水准面，往往基于 stokes 理论，或者 Molodensky 理论进行解算。而我们采取仅提出几年的一种新的计算方法——地表浅层法进行确定。即利用高精度地球重力场模型 EGM 2008、高精度数字高程模型 DTM 2006.0 以及全球地壳密度模型 CRUST 1.0 等模型综合使用，将地球分为内部与地表浅层两部分，利用牛顿积分以及解析延拓法等方法结合重力观测数据进行求取。

2. 我们在确定大地水准面中，利用的是搜索迭代法来确定大地水准面的离散模型，而传统方法则是利用 stokes 公式，需要进行重力归算，而我们这方法则避免了在解算 stokes 问题中因重力归算导致质量分布发生变化从而使大地水准面发生变形这一问题。

3. 利用“剥离法”，即利用已有的密度模型计算出大地水准面后，与实际的地表观测（如水准测量）等进行比较，从而从上而下逐层依次调整地壳各层密度，使计算出的大地水准面与 GPS 水准点数据符合最好，从而精化地壳密度模型。在实际运算过程中，采用 MPI 并行运算技术，大大提高了运算效率。

（二）、项目特色

地壳密度模型与能源、矿产分布的关系密切，对于板块构造和运动的更深层次的认识也有不小的帮助。在许多学科的研究中，都需要精确的地壳密度模型数据，例如地震学中，如果有了高分辨率的地壳数据模型，对于地震形成以及传播规律就会有更加清晰的认识。精确地壳模型的出现可以有效帮助构建地球内部的精确结构模型。然而目前最精确的 CRUST1.0

分辨率只有 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，远远不能满足需求。因此，建立一个较为精确的地壳密度模型无论对于大地测量学、地质学，还是地震学都有着深远的意义。我们这次的精化，可以作为一次有意义的尝试。

四、项目进展与结果

（一）进展情况

1. 首先对弹性力学、重力学、地震学以及涉及地球物理学原理的知识进行了先于学院教学计划的学习，对项目进展有了一些初步知识铺垫。
2. 小组成员分别侧重学习了 Fortran、C 语言、MATLAB、GMT、surfer、MPI 等计算机软件及技术。并将这些软件技术运用到以后的研究实践中。
3. 根据 EGM2008 团队发布的球谐系数，计算了 EGM2008 大地水准面在 $5' \times 5'$ 分辨率情况下数据，并利用 GMT 将其绘制成图。
4. 对计算大地水准面的地表浅层法中比较重要的两组模型——柱体模型和楔形体模型，进行了初步的分析和计算，并在特定的情况下计算出了对应的引力位，并对二者进行了比较分析。
5. 利用已知的分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 CRUST1.0 模型，利用三次样条插值对其进行内插，得到初步的分辨率为 $5' \times 5'$ 的 9 层地壳密度数据，为接下来计算产生的引力位以及进行进一步的调整打下了基础。
6. 对缔合勒让德函数进行了改良，并进行了编程实现。并利用 MATLAB 对其在特定的阶数下进行了绘图。
7. 我们已经研究出精化地壳密度模型的具体实施过程，并作出了程序框图
8. 由于最后的计算程序需要在服务器上运行，且整个过程需要较长时间，所以并没有得到最后的结果。但对于 MPI 并行计算，我们学习了相关理论并进行了初步的调试，对其性质在 PC 机上进行了初步的测试。

（二）结果

1. 从理论上对如何利用剥离法精化地壳密度模型进行了梳理和分析，比较清楚准确的阐述了如何利用剥离法一步一步完成对地壳密度模型的精化。
2. 完成对楔形模型和柱形模型两种模型的引力位的理论分析，并得到了对应的表达式，并对给定条件下的引力位进行了编程计算，并将两种计算模型进行比较分析。
3. 解算了 $5' \times 5'$ EGM2008 的大地水准面离散模型，并将其绘制成图，分析了全球大地水准面的分布特征。
4. 完成了对缔合勒让德函数的改良，并对其进行了编程实现，并对其中几阶进行了画图。
5. 对 MPI 并行计算的运行进行了一定的分析和测试，并对一例子进行了编程计算分析，为未来的研究奠定了一定的基础。
6. 对 CRUST1.0 的 9 层进行了内插，并绘制成图，为未来进行计算以及调整进行准备。
7. 我们已经研究出了精化地壳密度模型的具体实施过程，并作出了程序框图
8. 由于程序较复杂且计算量巨大，运用 MPI 技术且需要在服务器中运行，目前尚未成功运行出结果。因此对于其不适定性以及计算量巨大等问题，仅有初步讨论，待后续研究。

五、收获和体会

王锴：经过一年的学习研究，我们从仅仅学习书本上的知识，到能够开始按照自己的想法来做一些初步研究。在这个过程中，我们阅读英文书籍和论文从吃力到流畅，对于项目原理的理解从浅显表面到细致深刻，对于计算机语言语法的掌握从苦恼到得心应手，对于地学画图工具 GMT 的学习从无力到喜欢。随着项目的进展，我们逐渐能够将已经学习的重力学等基础知识，与课题原理相结合，从而形成对课题的自己的理解。在已有的 C 语言的基础上，我们对于 Fortran 的理解相对顺利，学习得很快，也掌握的更好，这对于自学 MATLAB 与 GMT 都有着很强借鉴意义。我想，我们不只是在在学习知识，更是在提升自己的自学能力。在相互交流的过程中，我们交换对课题的看法和建议，从而使得课题能够基本按照计划顺利进行，同时不同思想的碰撞也使我们灵感互相激发，提升了我们的创新能力，也是成员之间的感情更加深厚。另外，在与指导老师申文斌教授的交流接触中，我们感受到了教授的严谨与开明，以及对于学术的认真态度，学习了科研生活的一些基本规范，比如开学术讨论会，与教授的邮件、会面交流。总之，我们的收获体现在了学习、科研的方方面面。

易旭懂：回顾这一年的科研经历，我们感触良多。我们的项目是有关地壳模型的精化，通过整个研究过程，我们对地球物理学有了更好的了解，大大加固了我们的数理基础绘图基础英语基础，也拓宽了知识面。要处理好众多且复杂的事情，团队合作是必不可少的，我们相互帮助相互鼓励。这一年的合作使我们真正认识到了团队的力量，并知道了怎么与工作伙伴交流沟通。在此过程中，我们也发现我们需要掌握的很多知识还是没有学扎实，需要进一步学习和加深理解。

参加大学生科研立项活动，极大的丰富了我们的课余活动，锻炼了我们的科研能力沟通能力表达能力，同时也使我们对于科研工作有了初步的认识，这为我们以后的毕业设计以及研究生阶段的学习工作打下了很好的基础。最直接的得益就是我们学习并掌握了 GMT 等软件，熟悉了处理地球物理问题所需的各种模型，学会了怎么使用 Linux 系统，懂得了如何查阅文献，因为文献很多都是英文的，所以我们的英语水平也有很大提高。

我们的指导老师申文斌教授从我们选题至研究过程中都给予了悉心的指导，他对我们的培养关心和教育使我们获得了很大进步，他渊博的学识、敏锐的科学预见力以及严谨求实的治学态度和献身科学事业的精神深深的感染着我们，我们从心底感激他敬佩他。

回首整个科研过程，我们遇到了不少困难，但在整个团队的齐心协力下，我们克服了一些困难，这个过程是令人兴奋和终身难忘的。要想成为一个有所成就的科研工作者，就一定要有合作精神、奉献精神。做科研是一个艰苦的过程，只有守得了孤独耐得住寂寞的人才能走向成功。

郁畅：这次给我的感受有，一是科研并不是像我们想象中那么简单东西，该怎么做，该用哪些知识，都需要自己去思考，去阅读文献，感觉就像是 RPG 游戏新手教程结束了，接下来需要我们去摸索。而在研究过程中，我们需要学习的东西也非常多，难度也不小。再也不是老师让你们去学什么就去学什么，而是需要什么学什么，这种转变让我也是受益匪浅，感慨良多。第二，在这较短的时间内，我们一起奋斗，相互交流，团队合作，解决了不少问题，让我明白了团队合作的重要性。第三，同时借由此次机会，我们得到了一定的科研训练，对于研究的流程有了一定的认识 and 了解，为以后在研究生阶段打下了一定的基础。第四，同时，正是在这个过程中遇到了不少令人焦头烂额状况，让我们明白了科研的艰难，不禁对从事科研事业，默默奉献的前辈肃然起敬。希望以后能够有机会和他们一起，为国家做出一

定的贡献。

张振：在这次大学生创新创业项目中，我觉得我进步了不少。首先对于自学能力提高了，由于刚开始项目的时候什么都不明白，于是我们每个人都打印了一些资料，只要有时间我们就会阅读理解这些论文和英文课本，最开始速度是不尽人意的，后来慢慢熟练了之后，也能很快地看完理解一片论文；然后是了解了更多的专业知识，例如知道了重力场的表达方式，也知道了解算地球重力场的方法，更重要的是我在这次项目中掌握了 Fortran 这门编程语言，这不仅很大程度上解决了我对项目的理解困难，也在之后的课程中提供了很大的便利，直到现在涉及到编程问题我还是会首选 Fortran。此外，在这次项目中，大家的合作也是必不可少的，同学们互帮互助，不理解的一起聚集起来讨论，这促进了我们小组更快的融合在一起形成一个集体，更好地来进行项目研究。无论最后我们得到了什么了不起的结果，我们在这个为期一年的项目中所学到的东西已经远远超过了它。

李潇：项目从开始的申请到现在已经过了一年的时间，从当初的充满好奇到现在的收获颇丰，其中经历了成功欢笑也有困难和艰辛。第一次，自己认识到了科研并不是什么多遥远的东西，只要有心，愿意钻研，本科生也做得来。同时也认识到了科研也确实不易，不是说像平时的学习一样随随便便能完成任务，更讲究创新，更需要实践和动手能力。整个过程可算丰富多彩，经历过迷茫与浮躁，品尝过收获与欢欣，总之，在老师的悉心指导下，同学们之间相互鼓励中，我们一起走过来了，这其中更是体会到了团结协作的力量，培养了我与队友们的团队合作精神。同时也锻炼了各自的自学能力，加强了对专业知识的学习。我相信这次实验会对我今后的学习、工作和生活产生很重要的影响，真诚地感谢学校给我们提供了这样一个锻炼我们的机会，感谢老师和同学们。谢谢！