

震研究所发展基金资助
测预报司资助

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

地震大地测量学

Earthquake Geodesy

周硕愚 吴 云 江在森 申重阳 薄万举 乔学军 王庆良
李 辉 刘文义 谭 凯 王 伟 周义炎 饶扬誉 等 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

中国地震局地震研究所发展基金资助
中国地震局监测预报司资助
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

地震大地测量学

Earthquake Geodesy

周硕愚 吴 云 江在森 申重阳 薄万举 乔学军 王庆良
李 辉 刘文义 谭 凯 王 伟 周义炎 饶扬誉 等 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震大地测量学/周硕愚等著. —武汉:武汉大学出版社,2017.10

中国地震局地震研究所发展基金资助 中国地震局监测预报司资助
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

ISBN 978-7-307-19517-2

I. 地… II. 周… III. 大地测量学 IV. P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 187602 号

责任编辑:鲍 玲

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:武汉市宏达盛印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:51 字数:1203千字 插页:2

版次:2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19517-2

定价:260.00 元



版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

序 一

在自然科学领域中，地球科学的活力不弱于其他学科。在外部，地球科学与物理学、天文学、数学、化学乃至生命科学相互交叉融合，产生出诸如地球物理学、地球化学等边缘学科；在内部，地球科学各学科之间也相互交叉融合，产生出一些生机勃勃的新兴学科，例如，研究地球本身的结构与发展时，作为用物理学的原理和方法研究固体地球的运动、物理状态、物质组成、作用力和各种物理过程的综合性学科的地震物理学与利用地面上直接观测到的数据研究地下浅层构造与变化过程和资源情况的地质学关系密切，产生出地震科学的一个重要的分支学科——地震地质学；地球物理学又与研究地球表面形状的大地测量学有许多共同关注的研究对象，如地球的重力场、地球形状、地球固体潮、地震，等等。

在许多情况下，地球物理学家是用天然或人工地震激发的瞬态地震波来研究地震与地球内部结构的。地震时产生的巨大的、急剧变化的形变是由大范围、长时间、复杂的形变场所产生的，所以，通过测量缓慢的地面形变可望增进对地震及产生地震过程的认识，为此就要用到检测布设在地面上观测点的位置移动的大地测量学方法。

作为地球物理学重要分支学科的地震学与大地测量学的密切关系至少可以追溯到 20 世纪初。1910 年，里德(F. Reid)根据他对 1906 年 4 月 18 日旧金山(面波震级 M_s 7.8，矩震级 M_w 8.0)地震的研究提出关于地震直接成因的弹性回跳理论主要观测依据之一便是地震前、后的三角测量结果。1961 年，钦纳里(M. Chinnery)利用 1927 年 3 月 7 日日本丹后(Tango)地震(M_s 7.3， M_w 7.1)前后三角测量点的位移变化，即地面水平形变推断地震断层的位置、大小和错动量等工作是大地测量结果在地震震源研究成功应用的经典例证。1965 年普雷斯(F. Press)强调了大地震在震中区直至远震距离产生的残余(持久)位移、应变与倾斜对于地震震源研究的重要意义。他指出，地震的动态监测与静态监测的区别是人为的，“应当把地震静态场的监测和解释工作视为‘零频地震学’”。普雷斯的研究开创了零频地震学。在大地测量学中，与零频地震学相应的学科便是地震大地测量学。

长期以来，一直到半个世纪以前，大地测量基本上是依靠三角测量、三边测量和水准测量三种方法。三角测量是用经纬仪测量测线之间的夹角，三边测量是用激光测距仪测量点位之间的距离，而水准测量则是靠精密水准仪瞄准远处的标尺进行测量。这些方法费时、费力，并且精确度不高，极大地限制了大地测量学方法在地震研究中的应用。

运用来自空间的信号进行大地测量的方法的出现，使得测量位置的精确度达到毫米级成为可能，现在可以比过去容易得多地由大地测量资料获得前所未有的高精度度地震前、后与同震运动。

在地球科学领域中，空间技术属于最复杂的科学技术之一。不过，在理论方面它所运用的电磁波传播理论本质上与地震波传播理论是类似的。目前，空间技术用于大地测量的主要有三种方法，即甚长基线干涉术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、人造卫星

激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR), 以及全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)。VLBI 运用来自遥远的类星体辐射的无线电波到达地球上不同地点的走时差, 由走时差求出两点间的距离; SLR 运用由地基激光仪发出的激光经由人造卫星反射的双程走时; 而 GPS 则是运用卫星与地面观测站之间的无线电信号的走时。

空间技术 VLBI, SLR, GPS, InSAR 等的出现, 使大地测量学家与地震学家在地震研究方面有了共同的观察手段。地震大地测量学与零频地震学这两个长期以来由于观测手段不同而被认为是性质截然不同的学科, 如今已几乎不加区别。地震大地测量学被视为是甚低频地震学、零频地震学, 而天然地震学则被视为是高频大地测量学。

半个世纪以来, 我国在地震大地测量学方面取得了可喜的进展, 其中主要包括: ①集成当代多种高新技术(空间、信息、数字、超导、激光等), 建立多尺度空-时-频域的具有世界先进水平的中国大陆现今运动-变形监测(探测)系统; ②开拓现今(10^{-2} 秒~ 10^2 年)大陆地壳运动与变形动力学研究新领域; ③参与并促进地震科学的发展; ④参与并支持大陆动力学新理论体系的建立; ⑤持续监测研究中国大陆现今地壳运动、变形及大地震孕育与发生过程; ⑥为地震预测探索提供新思路、新技术、新信息、新模式以及新方法等; ⑦为防灾减灾、环境保护、公共安全、测绘、国土规划、国防提供相关的科学技术服务。

虽然半个世纪以来地震大地测量学已取得令人振奋的进展, 但依然是一门方兴未艾的新兴学科。为使该学科能更坚实、更深入地进入大陆动力学与地震科学基础研究和更有效地持续推进地震预测创新, 周硕愚等专家学者共同撰写了《地震大地测量学》专著。该书系统地总结了国际、国内地震大地测量学半个世纪以来所取得的进展; 并以观测方法为经线, 以认知过程为纬线, 依次论述了空间大地测量学、物理大地测量学、几何大地测量学、动力大地测量学等方法; 从现今大陆地壳变形的角度探讨了大地震孕育、发生的动力学机理; 提出了一些具有前瞻性的科学思路和具有可操作性的预测方法。

该书各章均由活跃在各个分支学科第一线, 在该学科领域执牛耳的专家学者执笔写成。该书既适合于初学者入门, 对于从事地震大地测量学研究教学的专家学者、博士生与硕士生而言, 这是一部很有深度和广度的教科书; 又适合于已有相当经验的专家学者继续深造, 开阔学术视野, 对于从事地震研究的专家学者、从事防灾减灾事业的科技专家与管理专家, 以及其他相关学科领域的专家学者而言, 这也是一部很有参考价值的专著。

我自 1962 年开始从事地球物理学研究工作, 1970 年转向, 主要从事地震震源的理论与应用研究。鉴于地震震源研究与大地测量学的密切关联, 以及个人的研究兴趣, 有幸与周硕愚、黄立人等地震大地测量学专家学者时相过从, 或探讨疑难学术问题, 或合作研究撰写学术论文, 尽享学科交叉融合之乐趣。日前, 周硕愚教授寄来《地震大地测量学》一书文稿, 邀我作序。我慨然允诺, 得以先睹为快。粗读之后, 写下以上感言, 权以当序, 并以此表达对皇皇巨著《地震大地测量学》付梓的衷心祝贺。

陈运泰

中国科学院院士

发展中国家科学院 (TWAS) 院士

2016 年 10 月 14 日

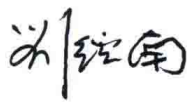
序 二

大地测量学是地球科学中具有悠久历史的学科。在新技术革命(空间、信息,如 GNSS)、地学革命(板块学说、地球系统科学)和社会迫切需求(减灾、环保等)的推进下,从 20 世纪 60 年代始,大地测量学发生了深刻的变化,跃升为现代大地测量学。其主要特征为:①突破时空局限性具有多尺度多时变全球整体测地能力;②由静态测地迈入了动态时变过程对地监测;③由陆地表层测量扩展到对地球内部和外部各圈层关系的综合观测与探测;④由地球扩展到星际测量(月球、火星等)。这些变化使大地测量服务对象从为各类测绘提供参考基准为主,走向探索地球科学基本问题(地球系统及其动力学过程)的道路;并与相关学科交叉融合,强劲推动环境、灾害、资源等领域的科学技术进步与创新。正是经典大地测量学向现代大地测量学的大发展,方使地震大地测量学的诞生成为可能。

大地测量技术作为地震研究重要技术途径之一,如 1911 年 Reid 提出的国际上第一个地震理论模型——弹性回跳说就是以大地测量资料为主要观测证据的。我国从 1966 年邢台大地震后组织大规模地震监测预报工作,一批批大地测量学专业人员的投身于地震监测预报科学探索之中,大地测量学技术、理论和方法在这一领域应用研究中逐步发展形成为今天中国的地震大地测量学体系。由于地震预测紧迫的社会需求与科学挑战性,在半个世纪地震监测预报探索中,无论从观测技术还是研究内容,原有的大地测量学范畴都有了诸多拓展和延伸。如 20 世纪 70 年代后就发展了为捕捉地震孕育过程地壳形变微动态信息的高精度、高灵敏度的定点连续地壳形变测量技术,使小尺度形变测量精度达到 10^{-10} 以上;针对孕震断裂带断层活动的精密跨断层测量等(短水准测量、短基线测量、蠕变测量等);20 世纪 80 年代起就将 GNSS 等空间大地测量新技术应用到地震监测研究中,以及地面精密重力测量、卫星重力测量和合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)等技术的应用和发展,逐步形成了从大区域到地震断层带及定点多尺度的地壳形变场、重力场动态过程及瞬态变化的观测能力,在精确测定地震孕育、发生及震后过程的多尺度地壳形变、动态时变重力场及其研究中发挥了不可替代的作用。一方面,大地测量学在地震科学研究中与地震学、地震地质学、岩石力学和复杂动力系统理论等交叉相融,并把系统科学新理论率先引入到地震科学研究中,逐渐成长为一门精确测量和研究现今大陆变形动力系统演化及其地震行为的前沿交叉新兴学科。而另一方面,现代大地测量学在诸多方面的发展,如空间大地测量学提供了在 ITRF 参考框架下各部分运动-变形-地震孕发的相互关联和整体演化过程,包括 GNSS 地震学、GNSS-重力水准等;物理大地测量学可提供从地表至深部各不同层面上的密度变化(物质运移);几何大地测量学对垂直运动和断层系及断层等不同尺度的精确的远近场观测;动力大地测量学提供了甚宽频域的数字化信息,已基本实现测量时频延伸覆盖到地震学频域,又开拓出新的生长点等。从地表至深部及高空,从全球到某定点,

全时空和全频域的现今整体动态精确观测，地震大地测量学已成为地球系统新时期推进大陆动力学、地震科学和地震预测发展的具革命性和可操作性的科学技术之一。现代大地测量学，将为地震大地测量学源源不断地提供新理论和新技术支撑。而地震大地测量学通过整体与局部、浅部与深部、线性与非线性，图像与模式相结合的途径研究复杂变形动力演化及其灾变地震行为的探索性开拓，不仅丰富了地球系统科学时代动力大地测量学的研究，并在大陆地震监测预测等研究中又从动力学预测的需求和问题出发，反过来促进现代大地测量学理论和观测技术的发展。

地震大地测量学作为一门新学科是在地震科学研究中大地测量学与地震学、地质学等众多学科交叉融合中发展起来的，更是靠一批批大地测量学专业人员的全身心投入这一社会需求紧迫而又颇具科学挑战性的研究探索之中推进的。如以本书作者周硕愚研究员为代表的一些满怀热情、挚爱地震减灾科学事业的先行者们，正是由于他们长期坚持不懈地努力，地震大地测量学才取得若干令人振奋的进展。本书由地震大地测量学不同领域的十多位研究者共同撰稿，作为首部具有探索性的地震大地测量学专著，较全面反映了五十年来地震大地测量学取得的主要进展和他们自己的研究创见。全书共 15 章，按不同观测技术（空间大地测量、物理大地测量、几何大地测量、动力大地测量）与观测→理解→模型→预测的认知过程等方式论述。既重视从大量翔实的各类观测资料中发现和证实客观存在的自然现象，也重视方法、模型模式的建立和预测及检验等，促进了理性认识的不断深入。本书的研究揭示了诸多过去未能认知的可能与地震孕育过程有关联的复杂现象及其动力学机理，提出了一些具有前瞻性的科学思想、模式和具有可操作性的预测方法，如“大陆现今变形动力系统演化及其地震行为”，“大陆现今变形动力学”，“现今变形图像动力学”，“地震预测的科学思路”等。本书的出版可望充实地球系统科学基础研究，促进地震监测预测科技创新，对与地壳形变相关的多种自然灾害监测预测和国民经济建设应用也有借鉴作用，对推进学科建设和人才培养更有重要意义。



中国工程院院士

2016 年 12 月 25 日

前 言

地球科学已进入地球系统科学新时期，以解决人类面临严峻挑战的资源、环境和灾害难题为己任；以系统组成部分之间的相互作用和演化过程为焦点；倡导学科交叉和系统集成，催生了一批前沿交叉新兴学科，地震大地测量学(Earthquake Geodesy)即为其中之一。

板块构造理论能解释全球构造和板间地震，但难以解释大陆(板内)构造运动、现今变形过程及其地震孕发行为。大陆地震预测既是社会急迫需求，又是世界科学难题；是中国地球科学从大国走向强国，达到国际先进水平必须直面的严峻现实。

1956年我国制定了十二年科学技术远景规划，其中第33项任务为“天然地震的灾害及其防御”，由傅承义院士和刘恢先院士起草，是第一部地震预测国家规划。1966年邢台大地震后，地震预测成为紧迫的国家任务，在方俊院士引领下大地测量学从此进入此领域。在50年漫长、艰辛，甚至忍辱负重的探索实践中，地震工作者既深感复杂性与困难，又窥见到内蕴规律的曙光。基于学科本身的特性和冲破窘境的强烈渴望，从20世纪80年代起就将GPS等新技术和系统科学等新理论率先应用于观测、研究与预测。现代大地测量学(空间大地测量学、物理大地测量学、几何大地测量学和动力大地测量学)通过与地震学、地震地质学、岩石力学和复杂动力系统理论的交融，在地震监测预测和研究中，逐渐成长为一门精确测量和研究现今大陆变形动力系统演化及其地震行为的新兴交叉学科——地震大地测量学。

在50年探索中，地震大地测量学的主要进展为：①集成当代多种高新技术(空间、信息、数字、超导、激光等)，建立了多尺度时(频)-空域的具有世界先进水平的“中国大陆现今运动-变形监测(探测)系统”，为科学创新与自然灾害预测奠定坚实基础。②开拓“现今(10^{-2} 秒~ 10^2 年)大陆地壳运动与变形动力学”研究新领域，基本填补了地震学与地质学之间的时间(频率)空白域。精确揭示出此域内前人未曾知晓的多种复杂自然现象及其相互关系，使研究从过去到现在并可望预测未来的动力学模型与机理成为可能。③基于对“现今大陆变形动力学”的探索，即通过对现今大陆变形的精确测量，揭示其动力学机理的途径，参与并支持大陆动力学新理论体系的建立。④通过“现今大陆变形动力系统演化及其地震孕发行为”的研究，即动力系统(整体论)与震源(还原论)相结合；变形(抵抗力)，物质运移(体积力)和地震(破裂)相结合的途径，作为新兴科学“地震科学”的组成部分之一，参与并促进其发展。⑤持续监测研究中国大陆现今地壳运动，变形及大(强)地震孕发过程，揭示出大陆形变系统是一个类似生命体的能自我演化的复杂系统，即自组织动力系统，其基本状态(常态)是稳定态，地震是局部时空域偏离稳态走向失稳又回归稳态的暂态行为。地震具可预测性又很难实现完全确定性的预测，预测尚存在很大的可进步空间。⑥为地震预测走出困境，提供新思路、新技术、新信息、新模式以及具有可操作

性的预测新方法等。尽管地震预测仍有待长期探索,然而如今在一定条件下,已有可能通过预测为某些地震的预报-减灾做出一些实际贡献。⑦为防灾减灾、公共安全、环保、测绘、国土规划和国防安全提供相关的科学技术服务。

地震大地测量学虽已取得若干令人振奋的进展,但依然是一门正在成长中的稚嫩学科。2006—2008年,在中国地震局“十二五”发展规划研究中,我们提出:有必要整合升华多年积累的新信息和新认知,初步构建地震大地测量学学科体系;使学科能更坚实、更深入地融入大陆动力学和地震科学基础研究,更有效地持续推进地震预测创新,更有利于人才成长。中国地震局地震研究所在所长基金支持下进行了调研与预研究,得到多门学科多位学者专家的鼓励和中国地震局的支持,决定以“展示性、交叉性、创新性和前瞻性”为目标,由周硕愚拟定撰写大纲,协商约请武汉、天津、西安、北京等地在该领域内有多年研究成果积累及预测实践的专家,协同撰写首部《地震大地测量学》专著。全书共15章,采用了“分手段”和“学科整体”相结合的结构。前者包括:GNSS, InSAR;重力(CHAMP, GRACE, GOCE, 绝对与相对测量);精密水准测量与基于GNSS的垂直形变;边界带、断层和断层系的组合观测;GNSS、地应变、地倾斜、重力等高密采样数字台网监测;对地下介质物性(密度、潮汐因子)和电离层物性参量的探测等。后者包含:学术思想、学科框架、研究方法、数据理解、大陆变形动力系统演化及地震行为,地震预测途径的新探索以及观测(探测)→理解→模型(模拟)→预测(检验)认知过程等。纵横交织,相辅相成,整体而又具体地表达学科内涵及未来发展。各章撰稿人分别为:周硕愚撰写第1、第11和第12章;王伟、乔学军撰写第2章;李辉、申重阳撰写第3章;申重阳撰写第4章;王庆良撰写第5章;薄万举撰写第6章;乔学军撰写第7章;吴云、张燕撰写第8章;谭凯撰写第9章;周义炎、吴云撰写第10章;江在森撰写第13章;饶扬誉、刘锁旺撰写第14章;刘文义撰写第15章。其中少数章还有一些新锐科技人才参与(见各章尾末注)。周硕愚、吴云通过与各章撰稿人的交流研讨,统筹全书撰写。饶扬誉统编全书并谋划出版;付燕玲、黄清、贺克锋、鲁小飞、胡敏章等参与编辑。

地震大地测量学是一门前沿交叉稚嫩学科,在其成长过程中有幸获得傅承义、陈运泰、陈颙(地球物理学);方俊、许厚泽、宁津生、刘经南(大地测量学);丁国瑜、马宗晋、马瑾、张培震(地质学);叶淑华(天文学)等院士的关注和鼓励,学术启导与合作研究支持。陈运泰院士多年来一直在推动此交叉学科的发展,明确提出地震大地测量学是当代新兴学科地震科学(Earthquake Science)的组成部分之一,在本书撰写过程中给予指导,审阅书稿和撰写序言;刘经南院士基于现代大地测量学母学科,持续关注、推进此新兴子学科的成长,直接参与某些关键科技问题研究,为学科培养高素质博士人才,在本书撰写过程中给予指导并撰写序言。

在地震大地测量学形成过程中,周江文、陈鑫连、梅世蓉、赖锡安、李延兴、陶本藻、郭增建、李瑞浩、吴翼麟、邵占英、张祖胜、黄立人、王琪、许才军、朱文耀、贾民育、蔡唯鑫、夏治中、杜瑞林、秦小军、龚守文、丁平、欧吉坤、杨国华、王敏、王若柏、车兆宏、谢觉民、杜方、王双绪、祝意青、李盛乐、李正媛、陈志瑶等教授(研究员);朱煜城、邢灿飞、余绍熙、刘本培、宋永厚等高级工程师和薛宏交、柳建桥编审,

等等，都作出了自己的贡献。

在学科专著形成过程中，中国地震局地震研究所姚运生研究员给予了极大支持，全程协调并以所长基金为本书提供了持续的资助；中国地震局第一监测中心龚平研究员、中国地震局第二监测中心张尊和研究员、中国地震局预测研究所任金卫研究员、中国地震局地球物理研究所吴忠良研究员给予了热情支持与鼓励。

本书的出版得到中国地震局监测预报司的支持和资助，中国地震局地震研究所发展基金的资助，武汉大学出版社的支持与帮助，有幸获得湖北省学术著作出版专项资金资助。

本书的形成与撰写均经历较为艰难的过程，有幸获得了上述专家和领导的指导、帮助、支持与鼓励，否则难以完成。值此地震大地测量学五十年之际，向抚育我们的祖国和人民，向指导帮助学科成长的各学科的多位学者专家，向踏遍崇山峻岭和坚守台站的众多战友，致以诚挚的感谢与崇高的敬礼！

鉴于研究对象的高度复杂性，虽历经数十年探索和五年撰写，由于作者认知水平所限，必有欠深入、全面，有待在今后研究与实践中接受检验。恳请专家、学者和相关领域的同行批评指正。

世界永恒的奥秘就在于它的可理解性(爱因斯坦)，如果你走的是一条认知世界的路，那么任其遥远艰难都要前进(菲尔岛西)。众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处(辛弃疾)。

周硕愚

2016年10月1日

目 录

第1章 地震大地测量学——一门前沿交叉新学科	1
1.1 地震大地测量学形成的社会需求与科学技术	1
1.1.1 防震减灾——急迫的社会需求与当代科学难题	1
1.1.2 新技术革命——从经典大地测量学到现代大地测量学	2
1.1.3 多门科学新进展——地球科学迈入地球系统科学新时期	3
1.1.4 地震科学的兴起与应运而生的地震大地测量学	5
1.2 地震大地测量学的形成	7
1.2.1 建立局域的地壳形变、重力动态监测系统(20世纪60、70年代)	7
1.2.2 空地深立体监测,地壳形变大地测量学初步形成 (20世纪80、90年代)	8
1.2.3 地壳及相关圈层动力系统现今演化与地震研究新阶段 (进入21世纪后)	9
1.2.4 科学内在逻辑持续作用——地震大地测量学基本形成	11
1.3 地震大地测量学的主要进展	12
1.3.1 组合创新天地深观测新技术,建立精密整体动态监测系统	12
1.3.2 开拓大陆现今(10^{-2} 秒~ 10^2 年)地壳运动与变形动力学研究新领域	14
1.3.3 参与并促进地球动力学,大陆动力学和地震科学基础研究	16
1.3.4 推进地震预测和防震减灾科技进步不可缺失的创新引擎	18
1.3.5 促进多种地质灾害的监测预测(水库地震、滑坡、火山等)	21
1.4 学科发展历程反思——科学方法论	22
1.4.1 经验性预测——归纳法的作用和缺陷	22
1.4.2 “信息金矿上的穷人”——观测数据如何用?	23
1.4.3 如何改变“手段颇多交叉少”——动力系统及其模式研究	25
1.5 地震大地测量学的特色、领域、方法和学科结构	27
1.5.1 地震大地测量学的特色	27
1.5.2 地震大地测量学的研究领域、研究方法和学科结构	29
1.5.3 观测——测量理论、观测技术、观测系统(学科结构1)	31
1.5.4 理解——数据处理、空地深动态图像与理解(学科结构2)	31
1.5.5 模型——模式、模拟、动力学机理(学科结构3)	32
1.5.6 预测——预测、减灾应用与检验(学科结构4)	34
1.5.7 实验室与大自然试验场(地震预测试验场)(学科结构5)	35

1.5.8 地震大地测量学信息系统与数据信息产品(学科结构6) 37

1.6 地震大地测量学的定位与功能..... 39

1.6.1 地震大地测量学与多门学科的关系和学科定位..... 39

1.6.2 地震大地测量学的科学功能与社会功能..... 41

1.6.3 地震大地测量学的学科名称与初步定义..... 44

本章参考文献 45

第2章 GNSS 对现今地壳形变和地震的研究 49

2.1 概述..... 49

2.2 空间大地测量(GNSS)对大陆现今地壳运动与地震研究的新推进 51

2.3 全球板块构造与中国大陆板内运动..... 52

2.4 中国大陆现今地壳运动速度场与应变率场..... 55

2.5 中国大陆活动地块与边界带现今运动..... 62

2.6 地震重点危险区地壳变形场的 GNSS 研究 66

2.7 对大震同震形变与地震破裂过程的精细研究与 GNSS 地震学探索 72

2.7.1 GNSS 结合多种手段对大震同震形变与地震破裂过程的精细研究 72

2.7.2 GNSS 地震学探索 73

2.8 GNSS 正在推进地震科学和地震预测的多种技术与科学创新 80

本章参考文献 80

第3章 中国重力场时间变化监测与地震研究 93

3.1 概述..... 93

3.2 中国流动重力监测与重力场动态变化..... 94

3.2.1 流动重力观测技术与方法..... 94

3.2.2 重力场动态变化计算 111

3.2.3 中国大陆重力场变化特征 114

3.3 中国连续重力监测与潮汐时间变化 128

3.3.1 中国大陆连续重力观测台网概况 128

3.3.2 连续重力观测数据处理 138

3.3.3 超导重力观测与潮汐基准 146

3.3.4 潮汐变化 148

3.3.5 非潮汐时间变化 151

3.3.6 潮汐变化与地震预测研究 155

3.3.7 地球内部动力学研究 158

3.4 中国大陆及邻区卫星重力场动态变化 160

3.4.1 卫星重力观测技术 160

3.4.2 卫星重力动态变化 162

3.4.3 小结 171

3.5 重力场动态变化与强震活动(典型震例分析)	172
3.5.1 概述	172
3.5.2 1975 年海城 7.3 级地震	172
3.5.3 1976 年唐山 7.8 级地震	173
3.5.4 1996 年丽江 7.0 级地震	174
3.5.5 2008 年于田 7.3 级地震	174
3.5.6 2008 年汶川 8.0 级地震	175
3.5.7 2009 年姚安 6.0 级地震	180
3.5.8 2013 年芦山 7.0 级地震	181
3.5.9 前兆机理与预测讨论	184
3.6 问题与展望	186
本章参考文献	187
 第 4 章 地球重力场变化与地球内部运动	199
4.1 概述	199
4.2 重力位场时变与地球内部动力运动	200
4.2.1 基本观测量与边值条件	200
4.2.2 基本原理(动力学关系)	200
4.2.3 动态观测方程(位场关系)	201
4.3 外部重力位场与 Bjerhammar 球面的单层密度时变	202
4.3.1 基于 Bjerhammar 球面的重力位场与单层密度时变的一般公式	202
4.3.2 Bjerhammar 球面位场与单层密度时变的实用迭代算法	203
4.3.3 应用实例	204
4.4 地球(地壳)变形与密度变化的耦合运动理论	206
4.4.1 形变和质量迁移引起的重力变化	207
4.4.2 地球(地壳)变形与密度变化耦合运动的基本方程	208
4.4.3 地球变形与密度变化耦合运动及重力位场变化	209
4.5 地球内部密度结构及物质长期运移变化重力学探测	210
4.5.1 深部密度结构的重力反演方法	211
4.5.2 中国大陆及邻区重力异常场的基本特征	215
4.5.3 中国大陆及邻区地壳厚度分布特征	216
4.5.4 重力探测应用	219
4.6 地球内部介质物性时间变化探测/反演	229
4.6.1 基于岩体生长(Growing Bodies)的三维重力反演方法	229
4.6.2 遗传算法(Genetic Algorithm)	230
4.6.3 紧凑的重力反演(Compact Gravity Inversion)	231
4.6.4 应用实例	232
4.7 构造活动与地震破裂的检测/探测	235

4.7.1 弹性位错效应的理论模拟	235
4.7.2 汶川地震破裂效应的模拟	247
4.7.3 丽江 $M_s7.0$ 地震前区域主要断裂似运动时间分布	252
4.7.4 玉树 $M_s7.0$ 地震前后青藏高原东缘绝对重力变化对破裂运动的检核	254
4.7.5 古断层活动的定量化	258
4.7.6 大震破裂模式研究	260
4.7.7 红河断裂带北段现今活动的重力效应	264
4.8 海底地形研究	266
4.8.1 概述	266
4.8.2 利用卫星测高资料研究海底地形的历史与现状	267
4.8.3 常见海底地形模型	269
4.9 小结	270
本章参考文献.....	271
第5章 中国大陆地壳垂直运动观测与地震.....	282
5.1 中国大陆地壳垂直运动精密水准观测	282
5.1.1 中国大陆精密水准网观测概况	282
5.1.2 基于水准观测资料的地壳垂直运动计算模型	285
5.1.3 中国大陆水准观测垂直运动速度场	287
5.2 中国大陆地壳垂直运动 GPS 观测	290
5.2.1 GPS 垂直位移监测研究概况	290
5.2.2 中国大陆 GPS 垂直位移速度场	292
5.2.3 基于 GPS-水准联合观测资料的区域垂直位移速度场	294
5.3 垂直形变观测资料在地震研究中的应用	295
5.3.1 在弹性回跳理论检验中的应用	296
5.3.2 在地震长期预测中的应用	297
5.3.3 在地震中短期预测中的应用	297
本章参考文献.....	298
第6章 断裂系(带)现今地壳运动过程与地震	301
6.1 中国大陆断裂系(带)的空间分布特征	301
6.1.1 地震地质给出的研究结果	301
6.1.2 现代大地测量用于我国断裂系活动性质的研究与描述	302
6.2 断层形变观测	305
6.2.1 跨断层水准观测	306
6.2.2 跨断层基线测量	309
6.2.3 跨断层综合剖面测量	313
6.2.4 InSAR 在断层形变研究中的应用	313

6.2.5 GNSS 在断层形变研究中的应用	319
6.3 断层形变在活动构造块体划分中的应用研究	323
6.3.1 华北断层形变测点分布区带的划分	323
6.3.2 数据处理方法及结果	326
6.3.3 活动块体边界的确定	326
6.3.4 与地震活动分布的对比分析	329
6.3.5 讨论及结论	330
6.4 断层活动监测与数据处理在地震预测研究中的应用	331
6.4.1 断层形变异常信息的提取与地震活动性	331
6.4.2 断层形变异常的时空有序配套特征	361
6.4.3 独立巨幅断层形变异常事件与强震对应关系的探讨	362
6.5 断层形变的复杂性分析	370
6.5.1 成分的多样性与复杂性	370
6.5.2 信息的敏感性	371
6.5.3 干扰与信息的辩证关系	372
6.6 断层形变时空分布特征与不同类型地震的关系	373
6.7 结语	374
本章参考文献	375
 第 7 章 地壳形变的 InSAR 监测	380
7.1 概述	380
7.2 地壳变形的 InSAR 监测	381
7.2.1 永久反射体法 (PSI)	385
7.2.2 小基线集法 (SBAS)	386
7.3 地震-地壳形变循环的 InSAR 观测	386
7.3.1 震间变形	387
7.3.2 同震变形	388
7.3.3 震后变形	390
7.3.4 InSAR 在地震-地壳形变循环研究中的局限性及其改进方法	392
7.4 InSAR 展望	394
7.4.1 时间分辨率提高	394
7.4.2 空间分辨率提高	394
7.4.3 InSAR 精度提高	394
7.4.4 对现今大陆形变动力学、地震研究和地震预测的促进作用	394
本章参考文献	396
 第 8 章 地形变连续观测与地震的研究	405
8.1 地形变观测系统的特性	405

8.1.1	地形变观测系统的一般特性	405
8.1.2	地形变观测测量及其特性	408
8.2	地形变观测台网的布局、观测环境和参量技术指标	411
8.2.1	地倾斜观测	412
8.2.2	地应变观测	414
8.2.3	GPS 连续测量	416
8.2.4	跨断层定点测量	416
8.3	连续形变观测——地球固体潮与内部物性参量变化	418
8.3.1	地球固体潮	418
8.3.2	地球内部介质物性参量——勒夫数	419
8.3.3	地球内部介质物性参量——潮汐因子	421
8.4	连续形变观测呈现的地形变微动态过程的持续与暂态事件	423
8.4.1	年周期变化	424
8.4.2	暂态事件或非连续短期变化——降雨与气压干扰	424
8.4.3	台风引发的地脉动	427
8.5	地震预测-预警的可能方法	433
8.5.1	潮汐因子法	433
8.5.2	“数据年”时窗法	434
8.5.3	“前兆源”定位法	436
8.5.4	时频分析法	439
8.6	我国连续形变观测台网的信息产品	455
8.6.1	地倾斜和地应变数据的分类分级	455
8.6.2	各级单位的产出要求	455
8.6.3	各类产品的产出内容及格式	456
	本章参考文献	458
第 9 章	岩石圈构造运动和地震破裂过程反演	465
9.1	岩石圈形变模型	465
9.1.1	连续变形模型	465
9.1.2	刚性块体运动模型	466
9.1.3	弹性位错模型	466
9.1.4	震后余滑模型	468
9.1.5	震后孔隙回弹模型	469
9.1.6	震后黏弹性松弛模型	469
9.1.7	地震破裂过程模型	470
9.2	反演算法	470
9.2.1	参数最优值估计	470
9.2.2	联合反演问题	472

9.2.3 约束条件	472
9.2.4 模型分辨率	473
9.2.5 参数置信区间估计	473
9.3 长期构造运动和地震应力对地震活动的综合影响	474
9.4 岩石圈形变反演应用	475
9.4.1 中国大陆块体运动模型	475
9.4.2 汶川地震断层破裂模型	476
9.4.3 汶川震后黏弹性松弛模型	481
9.4.4 高频 GPS 形变约束的汶川地震破裂过程	482
9.4.5 汶川地震对周边断层库仑应力和发震概率影响	483
本章参考文献	483
第 10 章 基于 GPS 的地震-电离层效应研究	488
10.1 电离层概述	488
10.1.1 电离层分层结构	488
10.1.2 电离层的变化	489
10.1.3 电离层的探测	490
10.2 基于 GPS 的电离层信息获取技术	491
10.2.1 地基 GPS 电离层观测技术	492
10.2.2 空基 GPS 电离层掩星观测技术	494
10.3 电离层三维层析重建技术	500
10.3.1 电离层层析原理	501
10.3.2 电离层层析重建方法	502
10.4 地震-电离层效应分析与研究	504
10.4.1 汶川 $M_s 8.0$ 大地震	504
10.4.2 地震-电离层效应的统计分析	508
10.4.3 地震-电离层耦合机理	510
10.5 小结与展望	513
本章参考文献	514
第 11 章 理解地震大地测量学观测数据	520
11.1 地震大地测量学观测数据的新颖性和丰富复杂的动力学内涵	520
11.1.1 地震大地测量学观测数据的新颖性	520
11.1.2 有别于测绘的地震大地测量观测数据内涵与误差理念	521
11.1.3 观测站(监测系统基本单元)——一个多输入单输出的复杂信息系统	523
11.1.4 观测站时间序列的分解、模拟合成与理解	525
11.1.5 地震大地测量学观测数据可能提供的基础信息	527
11.2 地震大地测量学观测结果的启示——动力学内涵及相关问题	529