

# 青藏高原的 大地测量研究

Q I N G Z A N G  
G A O Y U A N  
D E D A D I  
C E L I A N G  
Y A N J I U

湖北科学技术出版社

● 许厚泽 等著



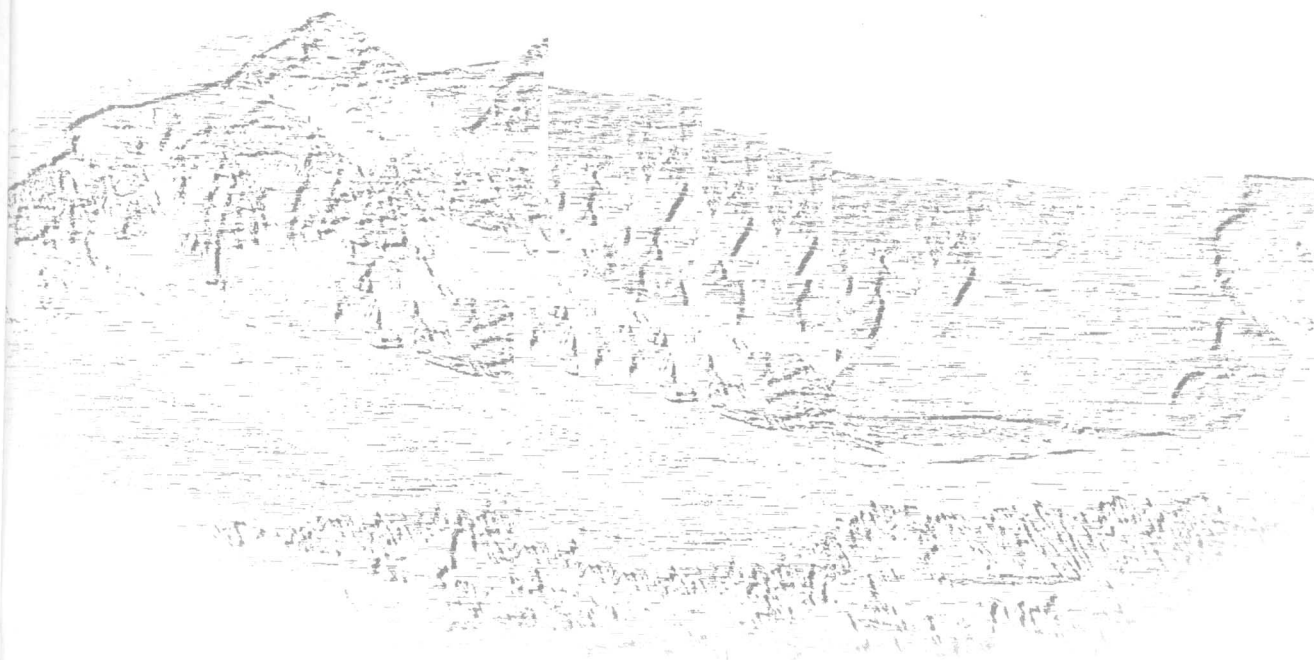


# 青藏高原的 大地测量研究

许厚泽 等著

Q I N G Z A N G  
G A O Y U A N  
D E D A D I  
C E L I A N G  
Y A N J I U

湖北科学技术出版社



青藏高原的大地测量研究

© 许厚泽 等著

责任编辑:高诚毅

封面设计:王 梅

出版发行:湖北科学技术出版社  
地 址:武汉市武昌黄鹤路 75 号

电话: 86782508  
邮编: 430077

印 刷:中科院武汉分院科技印刷厂

邮编: 430071

787mm×1092mm 16 开 8.75 印张  
2001 年 1 月第 1 版

212 千字  
2001 年 1 月第 1 次印刷

ISBN7-5352-2448-2/TD·2

定价:35.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

## 内 容 提 要

本书是一部反映 20 世纪 90 年代以来用大地测量方法研究青藏高原所取得的研究成果及最新进展的论著。全书共分 4 章,主要论述了青藏高原现代地壳运动的观测、重力异常和大地水准面的基本特征及其与地壳内部结构和构造运动关系、并以大地测量观测做约束,对青藏高原隆升的一些动力学机制(青藏高原的冰后隆升和小尺度地幔对流作为动力学的机制)进行了探讨和论述。该书以动力大地测量学的方法对青藏高原的现代地壳运动、内部结构、动力学特征等首次进行了较系统的介绍和论述。书中的大部分内容是几位著者近几年的最新研究成果,同时也吸收了国内外同行的研究成果,内容新颖、实用。本书力求理论和应用紧密结合,深入浅出,具有一定的深度和广度,适合从事大地测量、地球物理和地质的研究人员阅读,也可供大专院校地学类的本科生、研究生和教师参考。

# 前言

印度次大陆与欧亚大陆的碰撞、青藏高原的隆升和喜马拉雅山系的形成无疑是亚洲新生代地球科学史上最伟大的事件,这个第三纪以来最年轻的造山带的形成、演化及隆升机制的问题一直是国际地学研究的中心和热点。目前,我们对于青藏高原构造演化的一些基本问题还缺乏深入的了解,尚存在许多未解决的问题。解决这些问题需要来自地球科学各领域的研究成果和证据。而作为反映构造运动和深部过程地表表现的大地测量观测资料和成果对我们深入理解青藏高原的动力学过程有着非常重要的科学意义。随着现代空间大地测量技术的迅猛发展和多项大地测量观测计划相继在青藏高原实施,青藏高原的大地测量学研究出现了前所未有的发展,对我们认识高原深部结构及隆升的各个方面向纵深发展起到了非常重要的推动作用。

近几年来,我们在承担国家攀登计划项目“现代地壳运动和地球动力学”,中国科学院“八五”重点项目“青藏高原的现代地壳运动及动力学机制”,中国科学院“九五”重点项目“中国大陆重力场非潮汐变化的动力学机制”和中国科学院知识创新项目 KZCX2-106,以及多项国家自然科学基金项目的基础上,从动力大地测量的角度对青藏高原的构造演化及其动力学过程进行了研究,取得的一系列的研究成果。为了将这些研究成果以及国内外大地测量界近年来对青藏高原的研究成果呈现给地学界的同行,我们撰写了本书。

全书共分四章:第一章由许厚泽院士、张赤军研究员、许大欣博士、蒋福珍研究员和王勇博士等执笔,主要论述了青藏高原现代地壳运动观测。首先介绍了 20 世纪 90 年代以来中外几个研究单位用 GPS 观测手段在青藏高原开展的青藏高原的地壳运动监测以及观测结果,同时也介绍了中科院测量与地球物理研究所用相对和绝对重力测量方法所获得的高原重力场的非潮汐变化,着重论述了由 GPS 和重力测量结果所获得的青藏高原不同构造块体的现代地壳运动;第二章由蒋福珍研究员、陆洋博士、方剑博士、王勇博士等撰写。主要论述了青藏高原重力异常特征及其与地壳内部结构和构造运动关系。对青藏地区的重力资料作了系统整理并推导了该区的地球重力场和大地水准面模型。利用重力和地形资料做约束,给出了岩石圈有效弹性厚度和均衡补偿机制;将重力资料和地震层析成像的成果相结合,对青藏高原岩石层密度结构和 Moho 界面进行了三维反演。第三章由许厚泽院士、陆洋博士、王勇博士等撰写,主要论述了青藏高原大地水准面。首先论述了青藏高原大地水准面的基本特征及其与内部构造的关系,对大地水准面进行了理论数值模拟,计算了均衡残差大地水准面,并以此为约束,探讨了岩石圈与上地幔的耦合关系。第四章由许厚泽院士、熊熊博士、汪汉胜博士等撰写。以青藏高原的大地测量观测做约束,对青藏高原隆升的一些动力学机制(青藏高原的冰后隆升和小尺度地幔对流作为动力学的机制)进行了探讨和论述。全书最后由许厚泽院士和王勇博士进行了统一审校。

本书在写作过程中得到了中科院测地所领导和中科院动力大地测量学开放研究实验室的支持,并与有关的同行进行了许多有益的讨论,在此表示深切的谢意。

本书的内容不仅是大地测量学内容,同时也涉及了地球物理学、地质学等学科。欢迎对不

妥之处给予指正。我们希望通过本书与地学界同行进行交流,并对青藏高原动力学问题开展多学科联合、交叉和渗透研究起到一定作用。

著者

2000 年 2 月 20 日

# 目 录

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 绪论 .....                        | ( 1 )   |
| 第一章 青藏高原现代地壳运动观测 .....          | ( 3 )   |
| 第一节 地壳运动观测回顾 .....              | ( 3 )   |
| 第二节 GPS 形变监测 .....              | ( 5 )   |
| 第三节 重力场非潮汐变化监测 .....            | ( 19 )  |
| 第四节 现代地壳垂直运动 .....              | ( 30 )  |
| 第二章 青藏高原重力异常特征及其与构造运动关系 .....   | ( 33 )  |
| 第一节 青藏高原局部重力场模型 .....           | ( 33 )  |
| 第二节 重力场特征与构造运动 .....            | ( 41 )  |
| 第三节 岩石圈挠曲和均衡补偿机制 .....          | ( 47 )  |
| 第四节 岩石圈三维密度反演 .....             | ( 51 )  |
| 第五节 莫霍面反演 .....                 | ( 61 )  |
| 第三章 青藏高原大地水准面 .....             | ( 68 )  |
| 第一节 青藏高原大地水准面及其特征 .....         | ( 68 )  |
| 第二节 青藏高原大地水准面的理论模拟 .....        | ( 72 )  |
| 第三节 均衡残差大地水准面和上地幔强度 .....       | ( 82 )  |
| 第四章 青藏高原隆升的动力学机制研究 .....        | ( 90 )  |
| 第一节 青藏高原隆升的各种动力学机制 .....        | ( 90 )  |
| 第二节 更新世晚期冰后均衡调整对高原隆升的影响 .....   | ( 93 )  |
| 第三节 青藏高原的深部结构及其地幔动力学含义 .....    | ( 113 ) |
| 第四节 青藏高原上地幔小尺度对流及其诱发的高原隆升 ..... | ( 117 ) |

## 绪 论

印度次大陆与欧亚大陆的碰撞、青藏高原的隆升和喜马拉雅山系的形成无疑是亚洲新生代地球科学史上最伟大的事件,这个第三纪以来最年轻的造山带一直为国际地学界所瞩目。自十九世纪普拉特和艾利等人创立地壳均衡论以来,青藏高原的形成、演化及隆升机制的问题就一直是国际地学研究的中心和热点。

在众多的地球科学分支学科中,大地测量学对青藏高原的研究具有传统的重要性。众所周知,作为标志地球物理学成为一门独立的分支学科诞生的均衡概念即来自于在印度和西藏的大地测量学工作,以及对巨大测量偏差的深入研究。自 19 世纪以来,青藏高原的研究一直是地球科学研究的重要课题和组成部分。但是,由于青藏高原地质构造的特殊性、测量条件艰苦性和测量手段的局限性,过去对青藏高原进行的大地测量工作以及对我们认识高原深部结构和地球动力学演化过程的作用非常有限。

近十年来,现代空间大地测量技术发生了突飞猛进的进展,使得我们可以通过一系列不同的途径检测地球的动力学过程。这些途径的范围包括从绝对板块运动和大尺度板内形变研究,到在地震和新构造研究中表现为大面积局部不均匀区域内的特定断层上,测定其现代运动速率。尤其是 GPS 技术的发展使得在一个区域或局部地区尺度上众多研究成为可能。相应地,随着现代空间大地测量技术的迅猛发展和在青藏高原的应用,青藏高原的大地测量学研究出现了前所未有的发展,对我们认识高原深部结构及隆升的各个方面起到了非常重要的推动作用。

目前,我们对于青藏高原构造演化的一些基本问题还缺乏深入的了解,尚存在许多争议。如印度板块对欧亚大陆的碰撞及持续的北向漂移作用是否被青藏高原内部各块体地壳增厚和南北向缩短所吸收?青藏高原的走滑断层和物质侧向流动与高原地壳缩短、增厚相比,哪个过程占主导地位?青藏高原现今隆升速率为多少?等等。对这些问题的回答需要来自地球科学各领域的研究成果和证据,而作为反映构造运动和深部过程地表表现的大地测量资料和成果对我们了解上述问题并深入理解青藏高原的动力学过程有着非常重要的科学意义。一方面,大地测量数据本身就反映了高原构造运动的特征,尤其是贯穿青藏高原、跨断层、跨构造块体的大地测量网的建立和连续观测,可为我们提供高原整体和各块体间相互运动的基本特征。另一方面,地表的大地测量数据又为我们研究高原深部结构和动力学演化过程提供了重要的定量数值边界条件。

正是因为大地测量观测数据对我们研究青藏高原构造运动及深部结构的重要作用,近年来多项大地测量观测计划相继在青藏高原实施。如在青藏高原进行了多项 GPS 监测计划,建立了多个 GPS 区域监测网,并进行了多期的 GPS 连续观测。中国科学院测量与地球物理研究所还实施了连续十年的成都——拉萨重力联测。这些观测计划的实施和深入,使我们拥有的青藏高原大地测量基础观测资料状况大为改观,为揭示了青藏高原隆升及构造演化的一些主要特征,并为进一步研究高原深部结构和动力学演化过程提供了重要的基础观测资料保障。

GPS 测量给出了现代地壳运动和高原隆升速率的最直接和定量的证据。进行地球动力学

的研究,地表的运动学状态是极其重要的表面约束条件,本书在这一部分中归纳和给出了近年来在这一方面的最新结果。

作为地球物理学和大地测量学传统方法之一的重力学方法,在青藏高原构造运动和隆升进程的研究中发挥着重要的作用。一方面,测定重力的时间变化对于研究高原现代地壳垂直运动和高原隆升有着重要的意义;另一方面,重力信息对我们了解青藏高原下地幔一级流变反差具有突出的贡献,因而对圈定高原现代等温线和地幔的流动形式也极有意义。

地面重力测量是表征地表重力场以及用地壳密度异常来解释这一场的传统基础。精度为亚毫伽的高分辨率重力覆盖使我们能够确定由于动力机制的多样性引起的地壳和地幔异常。尽管我们无法单纯依赖二维的大地测量观测结果唯一地确定地球内部的物理、力学状态分布,也不可能完全据此反推远古演化地史。但是,重力测量的观测结果对于我们研究地球内部结构和动力学演化过程仍起着非常重要的作用,它构成了我们反演地球内部结构、研究动力学演化过程一种重要的地表约束条件。

本书中,我们对青藏地区的重力资料作了系统整理并推导了该区的地球重力场和大地水准面模型。利用重力资料,并结合地震层析成像的成果,我们对青藏高原岩石层密度结构进行了三维反演。反演结果反映了青藏高原不同构造块体下内部结构的差异,并显示出青藏高原物质东流的深部迹象。同时,作为动力学的机制,我们探讨了关于青藏高原的冰后隆升和小尺度地幔对流等问题。

# 第一章 青藏高原现代地壳运动观测

## 第一节 地壳运动观测回顾

大地测量学科发展的总趋势是不断地向地球科学的广度和深度扩展,并与地学中的其他学科相互交叉和渗透,其主要任务之一是监测和研究地球在各种动力作用下在地表的反映。以空间大地测量为标志的现代大地测量手段,结合高精度重力测量技术,不论在测量的空间尺度上还是在时间尺度上,已经有能力监测地球动力学过程中产生的形变场和重力场的微小变化,如板块运动、地壳形变、构造活动及地球的极移、自转的变化和海平面变化等。目前,现代大地测量正在更深的层次上与相关学科交叉发展、互相渗透,为解决当代地球科学重大问题起着越来越重要的作用。

青藏高原位于亚洲大陆的南部,地处巨型特提斯—喜马拉雅构造域的东段。它是世界上形成时代最晚,面积最大的高原。总面积达 200 多万平方公里,平均海拔近 5000m,是地球上一个十分独特的地理单元,其巨厚的地壳,活跃的新构造运动,强烈的地震活动和多变的环境,对我国乃至亚洲大陆的自然环境和人类生活产生巨大的影响。高原的崛起,是我们这个星球近地质时代最伟大的地质事件之一。长期以来特别是近期这一地区一直吸引着国内外地学家的关注。本世纪以来,国内外许多大地测量学者,相继在该地区开展了大地测量工作,这为研究青藏高原有关地学问题,特别是在认识高原地壳运动规律、高原增厚隆升机制,以及对本区矿产资源的开发、国土整治和环境预测、防灾减灾等都有重要的科学意义和现实意义。

19 世纪中叶,英国人 Everest 在喜马拉雅山南麓的印度实施了弧度测量,他发现了按地形质量进行引力计算,得到地形垂线偏差大大超过了天文大地垂线偏差。随即,Pratt 和 Airy 从流体静力平衡出发,提出了地壳均衡的理论,即地球表面地形质量的过剩与由下面质量的不足互为补偿,他们从不同角度解释了上述现象,从而受到大地测量学家、地质学家和地球物理学家的重视。由于 Airy 的均衡理论比较接近于地震测深的结果,再经过其后的一些学者的改进,使之在确定补偿面深度和岩石层强度中发挥了作用。

随着重力测量的广泛开展,均衡重力异常的概念也应运而生,由此可利用 Stokes 公式来计算大地水准面的形状。此外,均衡异常又包含了动态信息,它反映了由于地壳运动产生的对静力平衡的偏离。因此,可以通过均衡异常的研究来了解地壳及至上地幔内发生的动力作用,并可获得有关新构造运动的信息。自 20 世纪 60 年代以来,由于国内外在青藏及喜马拉雅一带开展了为数较多的重力测量,不少人利用均衡异常讨论了该地区地球内部密度的分布,地壳构造和地壳运动,我国还利用了重复重力观测来研究青藏高原的隆起。

从以上可以看出,在大地测量手段上,除用三角测量、弧度测量、水准测量、GPS 测量确定地壳的水平和垂直运动外,重力测量也起着重要作用,因此,把形变与重力测量的结果有机结合起来,是研究青藏高原现代地壳运动较好的一种方法。

在形变测量方面,本世纪 10~20 年代,在喀喇昆仑山区,印度测量局于 1912~1913 年进行了三角测量。后于 1980 年由国际喀喇昆仑计划的测量队进行了重复测量,目的在于检测 60~

70 年来的大陆运动。从计算结果中发现,有两点(喀喇昆仑山脉两侧各一个点)存在显著的运动。但这些结果的可靠性受到了限制,因为旧三角锁的精度较低,而 1980 年的观测又不完全。关于喜马拉雅山区的高程变化;根据印度测量局 1974 年的报导,在喜马拉雅山的西南的局部地区作过水准测量。1992 年以前在尼泊尔也作过精密水准测量,测线的高程均在 1600m 以下。意大利人于 20 世纪 60 年代在喀喇昆仑作过重力测量。美国科罗拉多大学还在加德满都等地进行了一次绝对重力测量。此外法国人还利用卫星影像及地质调查结果,作了形变分析。

在 1972~1973 年期间,印度测量局用三角测量和精密水准测量方法监测北方邦乌塔尔卡希地区的主喜马拉雅俯冲运动,1977~1978 年和 1985~1986 年又进行了重复观测。

近年来,该国又利用 GPS 水准及重力场模型研究了印度拉达克(Ladak)与西藏交界处的大地水准面较低的原因,并推测在岩石层内部可能插入了一个厚度为 25km 低速层。

1991 年国际地球动力学 GPS 服务组织,在相距 1800km 的尼泊尔的加德满都和印度南部的班加罗尔进行了 GPS 观测,以后于 1992 年和 1994 年又重测了这两个站。结果表明,上述两站之间没有显著的会聚。根据 M. Jackson 等人的估计,印度、西藏之间缩短速率为每年 9~18mm。

我国早在 1684 年就对喜马拉雅及青藏地区进行了控制测量,但大规模高精度的大地测量工作始于 1959 年。国家测绘局、中科院等单位在那里进行了精密导线、水准、天文和重力测量,根据本世纪 80 年代和 50 年代两期水准测量结果编制了垂直形变速率图。在 1966~1986、1975 和 1992 年还对珠穆朗玛峰的高度进行了重复观测,与此同时还开展了重力测量。发现珠峰每年以 37mm 上升,且每年向西南移动达 183mm。90 年代前后地矿部、中科院为配合地震、地质测量在格尔木到亚东等剖面上开展了重力测量。1991 年至今,已有几个单位从格尔木到拉萨以及聂拉木的一条三角锁上进行了 GPS 观测,发现该区在南北方向缩短,东西方向拉长现象,并表明,西藏块体和喜马拉雅块体分别大约以 28.5mm/yr 和 46.0mm/yr 北偏东向西比利亚块体运动,且以上二块体分别以 14.8 和 21.1mm/yr 向东运动。

为检测喜马拉雅与拉萨两块体的隆升与它们间的会聚率以及探讨构造运动的地质地球物理解释,中科院测量与地球物理研究所在 1992~1996 年期间,对青藏和喜马拉雅一带开展了形变场和重力场的研究。GPS 的工作范围:南到加德满都,北到拉萨,东到帕里,西到昂仁和聂拉木,并在以上各点和定结、昂仁、楠木林共八个点上进行了 GPS 测定。该网南北长约 600km,东西长约 400km,GPS 测量的相对精度:1992 年为  $4.8 \times 10^{-8}$ ,1996 年为  $2.3 \times 10^{-8}$ ;在格尔木~亚东进行了高精度重力测量,重力测量段差的精度一般在  $\pm 10 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}(\text{u gal})$  左右,(由于 GPS 测点受到破坏等原因,个别点未能进行重测)。在所作的 GPS 测量中,不仅测点较多,覆盖范围较大,且在一些点上作了高精度重力测量,其精度同前。由两期 GPS 结果求得了喜马拉雅和拉萨块体约以 5.3mm/yr 上升,上升两块体在接近于南北方向以 12mm/yr 会聚,他们还开展了成都—拉萨的重复相对重力测量以及拉萨点的重复绝对重力测量,结果表明拉萨的重力值在减少,表明那里确在隆升中。

为便于比较,现将国内外在该区及邻近形变观测结果列表于下:

| 地区范围 | 年代         | 方法   | 结果 mm/yr  | 备注    |
|------|------------|------|-----------|-------|
| 喀喇伦  | 1913~1980  | 三角测量 | 发现地壳有运动   | 精度差   |
| 喜山山前 | 1974(12 年) | 水准   | $4 \pm 1$ | 测区范围小 |

续表

| 地区范围          | 年代          | 方法     | 结果 mm/yr             | 备注          |
|---------------|-------------|--------|----------------------|-------------|
| 青藏            | 1959 ~ 1982 | 水准     | 4 ~ 20               | 范围大,由北向南增大  |
| 尼泊尔           | 1992(15年)   | 水准     | 2 ~ 3, 4 ~ 6         | 海拔低         |
| 印、帮乌地区        | 1973 ~ 1986 | 三角、水准  | 6 ~ 10(—), 2 ~ 15(⊥) | 精度不高        |
| 印、帮乌地区        | 1978 ~ 1986 | 三角、水准  | 1 ~ 14(⊥)            | 精度不高        |
| 尼泊尔           | 1991 ~ 1992 | GPS、重力 | 11(—)                | 仅有水平        |
| 拉萨 - 格尔木      | 1991 ~ 1993 | GPS、水准 | 12 ~ 17(—)           | 仅有水平        |
| 安多 - 拉萨       | 1980 ~ 1991 | 水准     | 3.3                  | 高程变化        |
| 定日 - 绒布奇      | 1966 ~ 1975 | 水准     | 1.5                  | 高程变化        |
| 珠峰            | 1966 ~ 1992 | 测距高程   | 37(⊥)183(—)          | 珠峰顶上        |
| 帕米尔 - 天山      | 1992 ~ 1993 | GPS    | 25                   | 塔里木 - 欧亚    |
| 喜山 - 西藏       | 1993 ~ 1995 | GPS    | 28.5 46.0(NE28°)     | 相对于西北利亚     |
| 青藏(L - W - G) | 1992 ~ 1994 | GPS    | 39.2, 18.4, 14.3(N)  | 分别为 L、W、G 点 |
| 喜山 - 拉萨       | 1992 ~ 1996 | GPS、重力 | 12(G), 5.3(⊥)        | 既有(—)又有(⊥)  |

(—)表示水平方向(⊥)表示垂直方向, L. W. G 分别为拉萨、温泉、格尔木。

## 第二节 GPS 形变监测

### 一、GPS 系统

全球定位系统 GPS(Global Positioning System)是一种全天候、高精度、实时、全球覆盖的高精度卫星导航系统。该系统由空间部分、地面监控部分及用户部分三个部分组成。到目前为止,该系统已全部投入使用。

空间部分有 BlockI 实验卫星 BlockII 和 BlockIIA。BlockI 的卫星空间飞行器编号 SVN(space vehicle numbers)为 1 至 13。BlockI 卫星在距地面约 22000km 的高度,配置六个轨道面上,周期为 12 小时,卫星的轨道与赤道的倾角为 63°。每一个 BlockI 卫星装有一台铯钟和两台铷钟,BlockI 的设计寿命为 5 年,目前 BlockI 卫星已经不再使用。BlockII 是 BlockI 的替代产品,它的 SVN 为 13 至 21,是在 1989 年至 1990 年发射的。BlockII 卫星轨道与 BlockI 基本一致,BlockII 的轨道与赤道的倾角为 55°。BlockII 卫星在没有操纵中心控制时仍然可进行 14 天的轨道预报。BlockIIA 的 SVN 为 22 至 40,它在没有操纵中心控制时仍然可进行 180 天的轨道预报。自 1990 年 11 月以来已发射了 18 颗 BlockIIA 卫星。BlockII 和 BlockIIA 的设计寿命为 7.3 年。每颗卫星装有两台铯钟和两台铷钟。美国已计划在下个世纪发射 BlockIIR 卫星,BlockIIR 的 SVN 为 41 至 62,这些卫星具有卫星之间测距和通信等功能。它的设计寿命为 7.8 年,每颗 BlockIIR 卫星上装有两台铷钟和一台铯钟。

GPS 卫星连续发射两个波段的载波信号, GPS 的振荡器产生 10.23MHz 的基准频率,  $L_1$  和  $L_2$  两个载波频率分别由基准频率乘以 154 和 120 得到  $L_1 = 1575.42\text{MHz}$ ,  $L_2 = 1227.60\text{MHz}$ (波长

分别约 19 厘米和 24 厘米)。卫星信号由 C/A 码、P 码和 Y 码三种伪随机噪声码(PRN)进行调制,一般情况下 C/A 码提供民用,P 码和 Y 码只限定特殊用户使用。

地面控制部分由一个主控站,三个注入站和五个监控站组成,对卫星进行监控并提供卫星星历。GPS 主控站每半年对 GPS 卫星上的铯钟进行一次维护,每次维护时间为 18 个小时。另外由于卫星受重力场及其他因素的影响,往往会偏离原来的设计轨道,主控站每年还要对卫星轨道进行一次校正。每次校正时间为 12 小时,校正其间 GPS 用户接收不到卫星信号。

GPS 为用户提供两个级别的服务:精密定位工作 PPS(Precise Positioning Service)和标准定位工作 SPS(Standard Positioning Service)。精密定位工作主要为美国军方和特殊用户提供高精度定位服务。标准定位服务对全球所有 GPS 用户开放,并提供导航信息,其平面坐标约为 100 米(95%的置信水平),垂直精度为 156 米(95%置信水平),时间传输精度 340 纳秒(95%置信水平)。

美国政府为了限制一般用户的高精度实时动态定位,对 GPS 系统实行了“SA”(Selective Availability)政策。“SA”政策包括下面两个部分: $\epsilon$  及  $\delta$  部分。

$\epsilon$  部分和轨道数据有关,轨道和钟参数加入  $\epsilon$  信号使得其精度降低,根据 Breuer(1993)研究经  $\epsilon$  信号处理后的 GPS 卫星轨道径向最大误差可达 130 米(24 小时的结果)。 $\delta$  部分是在基准频率上加入短周期和长周期的扰动项,这一结果使得 GPS 的码频率和载波频率直接受到影响。根据 Brzuc(1993)、Leick(1995)研究, $\delta$  部分处理结果使得距离测量的精度降低,码测量误差可达到 60 米。这些过程对相位组合的模糊度求解没有影响(Gianniuo 1996)。但在不同的观测条件下“SA”的误差影响仍然存在,这些残余误差是由于接收机之间距离较大及接收机之间的同步误差造成的。由于卫星位置使得卫星信号到达两测站距离明显不同,两台接收机同时接收的信号是由不同的时刻发射出来的,因此“SA”误差和时间相关,所以两个测站“SA”的影响是不同的。另外接收机和 GPS 时间的同步误差也是产生误差的主要原因,这就要求在高精度测量时应该采用性能稳定的信器。

美国政府除了实行“SA”政策,还于 1994 年实行了“AS”(Anti-Spoofing)政策。“AS”是将 P 码和保密的 W 码进行“模二和”得到 Y 码,这个码只对特殊的用户使用。特殊的用户是将接收机加一个辅助芯片 AOC(Auxiliary Output Chip)以消除“AS”的影响。“AS”对大地测量的最大影响是不能直接测量  $L_2$  载波相位,对此大地型 GPS 接收机的生产者研制了不同的方法来补偿“AS”的影响。当然这些方法是以牺牲一些信息为代价的。这些方法有:平方技术、码平方技术、 $L_1/L_2$  互相关技术及 P-W 技术。

平方技术的研制首次再现出  $L_2$  载波。但平方技术具有很高的噪声,只具有半波波长的数据。码平方技术则降低了测量噪声,恢复的是整波波长。 $L_1/L_2$  互相关技术的  $L_2$  载波数据是通过二个信号的互相关技术产生,这种技术的观测噪声较低,恢复的是整波波长。P-W 技术是对  $L_1/L_2$  互相关技术的发展,它可得到  $L_2$  恢复的 P 码伪码,其精度与原接收 P 码的精度基本相同,观测噪声也较低。需要说明的是虽然这些技术能够恢复  $L_2$  载波,它的精度仍然不如 P 码直接调制的结果,由于这些原因在“AS”下的双频数据解和接收机类型是有关的。

随着 GPS 技术的发展,一些 GPS 的国际机构也相应产生。1991 年起国际上筹建全球地球动力学 GPS 服务 IGA(International GPS Service for Geodynamics)计划,于 1992 年进行一次为期二周的 GPS 连续观测,共有 600 多个站参加这次联测(EPOCH'92)。这次会战的结果表明 GPS 测定地球自转参数精度为 0.5mas,轨道精度为 15cm 至 30cm。

IGS 于 1994 年 1 月正式开始工作,IGS 目前的主要工作是:监测地壳形变、地球自转变化、

海平面变化及冰盖变化、低轨卫星轨道确定、电离层监测和大气中水气含量的监测。IGS 现已有 3 个全球数据中心和 7 个全球数据分析中心,见表 1.2.1,另外,还有一些地区性的数据中心。

表 1.2.1 IGS 全球数据中心和数据分析中心

| 简 称   | 类 型  | 研 究 机 构                                         | 国 家 |
|-------|------|-------------------------------------------------|-----|
| IGN   | 数据中心 | Institute Geographique national                 | 法国  |
| CDDIS | 数据中心 | Goddard Space Flight Center                     | 美国  |
| SIO   | 数据中心 | Scripps Institution of Oceanography             | 美国  |
| CODE  | 分析中心 | Center for Orbit Determination in Europe        | 瑞士  |
| EMR   | 分析中心 | Formerly Energy, Mines and Resources            | 加拿大 |
| ESA   | 分析中心 | European Space Agency                           | 德国  |
| GFZ   | 分析中心 | Geo Forschungs Zentrum                          | 德国  |
| JPL   | 分析中心 | Jet Propulsion Laboratory                       | 美国  |
| NGS   | 分析中心 | National Oceanic and Atmospheric Administration | 美国  |
| SIO   | 分析中心 | Scripps Institution of Oceanography             | 美国  |

这些中心向 GPS 用户提供 IGS 全球跟踪站的观测数据,以及数据处理结果。它主要包括:  
(1)7 个数据中心的 GPS 精密星历和 IGS 对 7 个数据中心的星历进行加权处理的结果。(2)每颗 GPS 卫星的钟差及 IGS 站钟信息。(3)地球自转参数。极移精度为 0.2 至 0.7mas,日长精度为每天  $50\mu\text{s}$ 。(4)IGS 跟踪站坐标及速度。(5)提供 IGS 测站天顶延迟改正和局部电离层格网数据。

IGS 发展较快,至目前为止,分布全球的 IGS 测站总数已达 200 多个,这些测站为局部空间大地测量精度提供可靠的保证。目前 GPS 基线测量精度在局部范围内具有毫米级的重复精度,这就为监测地球形变提供了十分理想的手段。

GPS 对地壳运动的监测在大范围和大尺度下是由 VLBI、SLR、IGS 测站为主要控制框架,对局部的构造运动的重点地区布设密集的 GPS 阵列,这些阵列主要是为了更加仔细的描述板块边界及火山地震活动等构造运动重点地区上的应变积累和变化信息。目前局部和区域性的 GPS 地壳监测网已分布全球。如监测太平洋和北美两大板块的美国加州南部 GPS 网(SCIGN),监测加勒比板块和南美板块相互作用的中、南美洲 GPS 监测网,日本的国家 GPS 阵列,我国的国家地壳运动观测网络,京津塘地区,川西龙门山鲜水河,青藏地区 GPS 监测网系列等,这些监测网的数据处理及 GPS 基线解算必须顾及各种误差源的影响,要求高精度计算软件。

## 二、GPS 的资料处理

用于监测地壳运动的 GPS 阵列,为保证高精度的要求无疑都使用双频载波相位作为基本观测测量并顾及各项模型及环境影响的改正,其观测资料的处理包括两个部分,一是基线解算,二是整网平差。

基线解算是 GPS 资料处理最重要一环,目前世界上发展有三套较完整和通用的软件,即 GAMIT(美国 MIT),BEUTLER(瑞士)及 GIPSY(美国 JPL),其中以 GAMIT 软件在我国应用最广,

现仅就此作一简述。

GAMIT 软件是美国麻省理工学院(MIT)开发研制的高精度 GPS 数据处理软件。该软件是用 FORTRAN77 和 C 语言编写,并在 SunOS/4, Solaris2.5, HP-UX 系列工作站上调试运行。

该软件在处理全球 GPS 网的基线解精度达  $10^{-9}$ (ppb)的相对精度,对于区域网也能达到  $10^{-8}$ 量级的相对精度。

该软件主要有下列程序组成。

Makej——由导航数据产生卫星星钟文件。

Makex——产生 GAMIT 的输入数据格式。

Bctot——由广播星历产生 GAMIT 格式的 G-文件。

Sh-sp3fit——由精密星历 sp3 格式产生 GAMIT 格式的 G-文件。

Fixdrv——产生批处理文件和多项式拟合的 I-文件。

Arc——轨道积分,由卫星运动方程产生轨道文件,时间是每隔 15 分钟。

Model——计算 O-C 残差值,产生参数估计的准备文件。

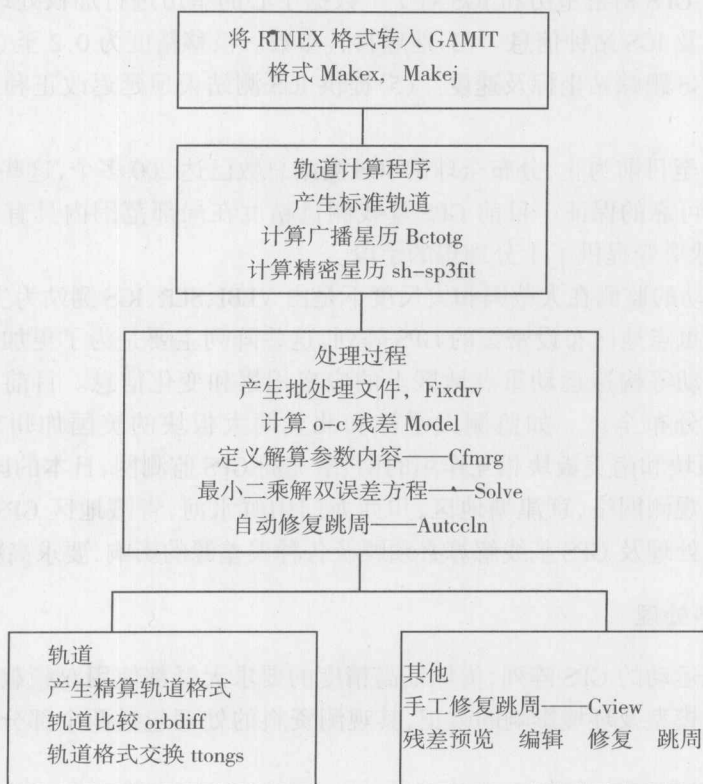
Autcln——自动修复跳周。

Cfmrg——定义解算参数。

Solve——最小二乘解双差误差方程。

Cview——手工修复跳周。

程序流程图



通常使用的基线解算模型和待估参数如下:

| 软 件       | 待改进的 GAMIT                                           |
|-----------|------------------------------------------------------|
| 1.基本观测量   | $L_1, L_2$ 双频载波相位, P 码伪距公同于接收机钟差和相位模糊度估算等权重          |
| 2.模制观测量   | 双差, 消除电离层影响的线性组合                                     |
| 3.天线相位中心  | 卫星和接收机相位中的改正, 接收机天线 $L_1, L_2$ 相位中的偏差采用 GAMIT 软件的设定值 |
| 4.对流层析射改正 | Saastamoinen 大气改正模型                                  |
| 5.潮汐位移改正  | 固体潮和海潮负荷导致台站位移改正按 IERS 规范(1995)                      |
| 6.卫星轨道    | IGS 精密轨道                                             |
| 7.地球定向参数  | IGS 的 EOP                                            |

| 估 算 参 数         |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| 1.台站坐标          | 取全球 ITRF 的 GPS 站作为基准站赋予先验约束, 其它台站不加约束 |
| 2.卫星轨道根数和太阳辐射参数 | 采用松弛的轨道解                              |
| 3.对流层延迟改正       | 对每测站每 2 小时估算一天预延迟改正                   |
| 4.相位模糊度         | 不加先验约束, 作为关时值进行估算                     |
| 5.站钟偏差          | 包括历元钟差及其速度、加速度, 由 P 码伪距求得             |

利用这套软件, 在我国的实践表明, 其精度一般为: 南北方向 3 ~ 5mm; 东西方向 5 ~ 7mm; 垂直方向 15 ~ 20mm; 基线 4 ~ 6mm。

由基线的矢量和它们的方差——协方差阵作为观测量, 即可进行整网平差, 对多天的综合解可通过卡尔曼滤波器来完成。此外, 有效期应统一在某 ITRF 框架中, 以维持一个自恰的地球参考架。

### 三、青藏高原的 GSP 形变监测

青藏高原是地球科学研究最重要的地区之一, 由于 45ma 以来印度板块和欧亚板块连续的碰撞形成了今天世界上最高的, 规模最大的高原。根据马宗晋等的研究, 青藏高原的演化历史中变形运动表现为三个时期的形式, 即南北向压缩和向北推移、地壳加厚快速隆升以及东西向伸展, 并把青藏高原的新构造运动划分为西藏、羌塘和柴达木三个构造区, 其中西藏构造以雅鲁藏布江断裂为界, 分为喜马拉雅和冈底斯(拉萨)两个地块, 羌塘构造包括喀拉昆伦——嘉黎断裂和东昆仑活动断裂带之间的青藏高原主体, 又以金沙江——鲜水河活动断裂为界, 为羌塘地块和可可西里——退颜喀拉二个地块见图 1.2.1。

但是, 目前人们对于青藏高原形变运动的一些重大问题尚存在着争议和分歧, 基本上有两种观点: 一种认为青藏高原的变形沿一些巨大断裂的走滑运动和块体的滑移为主要方式, 特别是沿阿尔金断裂的近代大规模滑移运动, 由这些断裂所围限的块体的侧向输出是调节构造变形的机制。从全球板块运动看, 印度向欧亚板块大致以每年 50 多 mm 速率沿 NNE 方向运动, 其中, 这一侧向挤出量可高达会聚总量的一半(Peltren, Tapponnier 1988; Avouac, Tapponnier, 1993); 另一种观点则认为, 印度板块和欧亚大陆的会聚所引起的构造变形是以地壳的缩短和

增厚为主要特征,走滑运动只是发生在变形后期的次生现象。因此,高原物质的侧向挤出不是主要的,只占到会聚总量的小部分(Houseman, England, 1993; England, Molnar, 1997)。

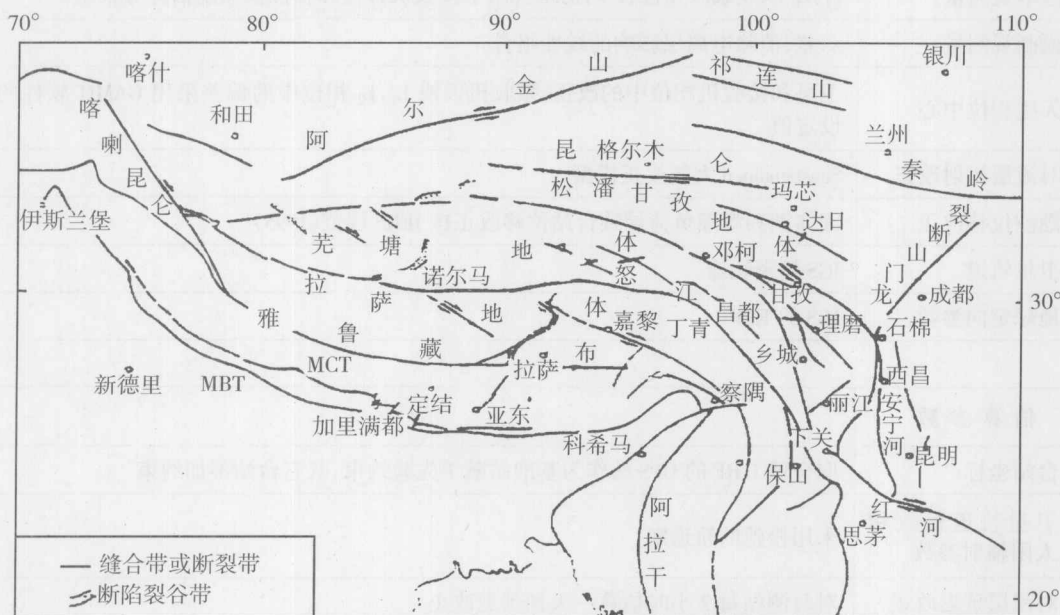


图 1.2.1 青藏高原地质构造图(曾融生等, 1992)

显然,为了更好地完善高原的变形运动的理论模型和机制解释,必须解决以下的问题:

- 1) 印度板块对欧亚大陆的碰撞和北向运动有多少在高原内部不同地块内被地壳增厚和南北向缩短所吸收?
- 2) 青藏高原沿各断层的走滑和物质侧向挤出与高原地壳增厚和南北向缩短相比,哪个过程占主导地位?

青藏高原的地质研究对高原的变形运动作了估计,图 1.2.2 给出了印度—欧亚板块碰撞带各主要单元估计的形变率(见 Molnar 和 Lyon - Caen, 1989; Freymueller 等, 1998; Larson 等, 1999),其中穿过喜马拉雅的汇聚挤压为  $18 \pm 7 \text{ mm/yr}$ , 青藏高原北部的挤压缩短为  $5 \pm 3 \text{ mm/yr}$ , 在喜马拉雅块体中段呈雁形排列的正断层,表明该区现代地壳运动的引张特性,其东西拉伸速率为  $10 \pm 6 \text{ mm/yr}$ 。此外,沿高原主体北边界阿尔金—祁连山构造带的左旋滑动速率达到  $20$  至  $30 \pm 20 \text{ mm/yr}$ , 沿高原主体南边界喀拉昆仑—嘉黎断裂的右旋滑动速率为  $32 \pm 8 \text{ mm/yr}$  及  $15 \pm 7 \text{ mm/yr}$ 。

要对此作出定量的回答,我们需要对穿过青藏的南北缩短侧向挤出及沿阿尔金等大断裂的滑动给出新的观测资料,也就是说,须要有在不同块体以及穿过主要的各走滑断裂广泛分布的重复 GPS 测量来约束。

正是因为 GPS 测量在青藏高原构造运动研究中的重要作用,最近几年已在青藏地区开展了一系列重要的 GPS 观测计划,包括:

1. 国际 GPS 服务网站(IGS),这是全球 48 个核心站组成的连续 GPS 观测网,分布世界各地,其中在青藏高原及其邻近地区包含有拉萨、班加罗(印度)、KITZ(乌兹别克斯坦)、IRKT(俄罗斯)等,这些站的数据为我们提供了青藏高原构造运动的全球地壳运动构造框架。