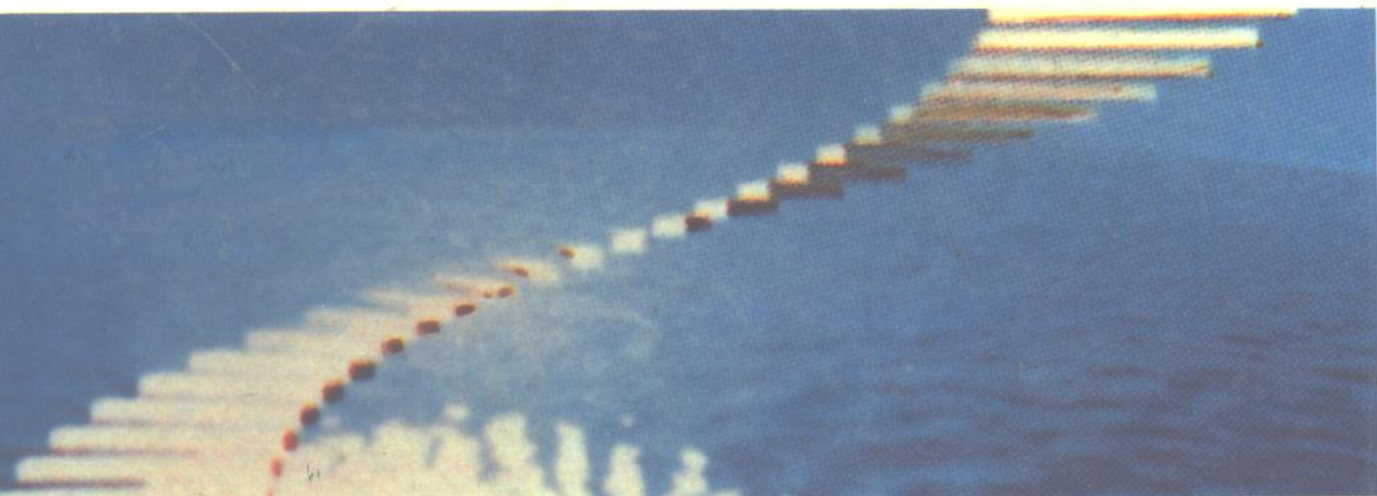


海洋定位 重力测量 及其地质 地球物理解释

宋文尧 刘祖惠 苏达权 张 牙 陈 雪 著

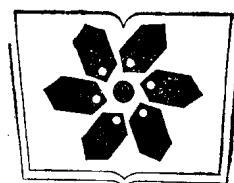
许厚泽 审定



科学出版社

- 071893

7-5014-1416



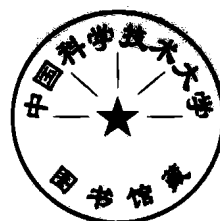
中国科学院科学出版基金资助项目

52159/06

海洋定位重力测量及其 地质地球物理解释

宋文尧 刘祖惠
苏达权 张 牙
许厚泽 审定

陈 雪 著



国家自然科学基金资助项目

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是以国家自然科学基金资助的课题研究成果为基础编写的专著,论述了海洋定位方法、海洋重力测量及海洋重力测量的地质、地球物理解释三个部分的基本理论和方法,并且以南海海域为研究的背景场,在南海、台湾海峡、巴士海峡行程 3 万多公里,取得大量卫星定位和海洋重力数据,编制了我国南海自由空间异常图、布格异常图和均衡异常图,填补了我国某些海域的空白,结合地质和地球物理手段(磁测、人工地震、海洋化探、沉积取样),分析该区域地球内部结构,为寻找含油气资源和海底沉积盆地提供可靠的依据。

本书对海洋资源开发有一定参考价值,可供海洋地球物理学、海洋大地测量学、地质、石油、海洋测绘等部门科技人员和大专院校教师和研究生参考。

海洋定位重力测量及其 地质地球物理解释

宋文尧 刘祖惠 陈 雪 著
苏达权 张 牙

许厚泽 审定

责任编辑 彭 斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1993 年 7 月第一次印刷 印张: 17 1/4 插页: 2

印数: 1—570 字数: 396 000

ISBN 7-03-003263-2/P·638

定价: 13.40 元

前 言

本书是以国家自然科学基金委员会资助的“南海东北部海域大地重力测量及港口定位”课题研究成果为基础编写的专著,是中国科学院测量与地球物理研究所和中国科学院南海海洋研究所的科技人员密切合作下完成的。

众所周知,近十几年来,我国沿海大陆架的海洋资源开发取得了可喜的进展,海洋重力测量与卫星导航定位不仅可以研究地球重力场和地球形状,而且在海洋地球物理勘探方面也是一种重要手段,它与磁测、人工地震、海洋化探、沉积取样等手段相结合,利用各种近代数学模型进行处理,可为寻找含油气资源的海底沉积盆地提供可靠的依据。在课题进行中,我们利用了中国科学院南海海洋研究所实验二号考察船,在南海、台湾海峡及巴士海峡等海域,航行作业达 30 000 多公里,取得大量的定位数据和地球物理参数,结合收集其他资料,编绘了我国沿海重力空间异常图和布格异常图,填补了我国某些海域的空白,为科学研究工作奠定了基础,并对所取得的资料进行重力均衡异常分析和地质、地球物理解释。

全书共分三篇(12 章)。第一篇(1—4 章)海洋定位方法。世界大地测量坐标系和海洋定位与海洋地球物理参数测定(包括海洋重力测量在内)是休戚相关的,它反映了所测定参数的时间-空间关系。我国大陆曾采用 1954 年北京大地坐标系和 1980 年中国大地坐标系,这两种坐标系都属于参心坐标系。随着空间技术的发展,在海洋定位中,采用了美国海军导航卫星系统(NNSS)和全球定位系统(GPS),它们分别为美国国防制图局所精化的世界大地测量系统,即 WGS-1972 和 WGS-1984 模型,这两种坐标系属于地心坐标系。如何将参心坐标系转换为地心坐标系或者逆运算,是海洋重力测量中不可忽视的重要问题,作者给出了详细的转换公式。在第 2,3,4 章中,作者介绍了无线电定位、水声定位、组合导航系统和全球定位系统,说明了组合导航系统仍然是今后发展的方向。由于全球定位系统在 1992 年以后组网成功,将逐渐取代美国海军导航卫星系统,其导航定位精度和数据收集密度将有显著提高,作者详细地介绍了全球定位系统在动态测量中的应用。与海洋定位有关的现代时间系统、协议地球参考系、协议地球参考系以及动态测量中所应用的卡尔曼滤波,作者对此有专门论著^{1,2)}。

第二篇(5—8 章)海洋重力测量。该篇以海底扩张和板块运动学说为依据,说明了海洋重力测量在地质、地球物理解释中的作用,着重介绍了世界各国在海洋重力测量中使用海洋重力仪的结构特征、所能达到的预期测量精度及我国海洋重力仪的研制简况。特别对目前国际上比较先进的、中国科学院南海海洋研究所引进的 KSS-30 型海洋重力仪作了详尽介绍和精度比较,同时引述了改型后的 KSS-50 型海洋重力仪情况。在重力归算及重力异常(第 7 章)中,详细阐述了 1971 年国际重力基准网(IGSN 71)和我国建立的

1) 宋文尧、张儒杰编著:现代时间系统及参考坐标系,测绘出版社,1991 年第二版。

2) 宋文尧、张 牙编著:卡尔曼滤波,科学出版社,1991 年。

“1985 年中国重力基本网”系统,同时列出各个历史时期的正常重力公式,进行了分析比较,使得不同系统所取得资料达到统一和归算。对于海洋重力测量数据的实时处理,作者根据多年来的实践经验,以理论和数据为依据,提出了独特的见解和完善的处理意见,最后介绍了消除海洋重力测量中半系统误差和系统误差的计算方法,论述了海洋重力网整体平差的数学模型和计算步骤。

第三篇(9—12 章)海洋重力测量的地质、地球物理解释。在第 9 章,作者首先详细地论述了普拉特-海福德均衡模型、艾里-海斯坎宁的均衡模型、两维艾里的均衡模型、岩石圈的弯曲均衡模型以及维宁·曼尼兹的区域地壳均衡模型后,以南海海域为研究对象,深入研究了线性均衡异常的特征及其解释,用求解随机积分方程、样条函数回归、贝塞尔函数等方法求得南海地区的一单位体积地形的物质向地球内部的补偿密度函数 $\Delta\rho(Z)$ 、线性系统的随机频率响应函数 $R(K)$ 和它的估计函数 $\overline{R(K)}$,通过它们求得南海地区的均衡重力异常和补偿重力异常,并绘制出平均布格重力异常图、补偿重力异常图和均衡重力异常图。其次,计算出南海地区上地幔的底面深度为 450 公里、250 公里的深处是 B 层的一个界面。南海由于 450—560 公里深的地方密度盈余,因而造成南海地壳凹陷以达到平衡。最后,作者分析表明,南海大部分地区是均衡区,但也有许多地区是不均衡地区,南海地区最大均衡重力异常为 +83 毫伽和 -80 毫伽,给出了定量分析依据。

第 10—12 章,作者根据海上重力测量的数据,结合地质、地磁、人工地震、海底热流量和取样等地球物理资料,分析引起重力异常的地质因素,确定海底下物质分布状态。首先,作者阐述了海洋重力解释中的正、反演分析方法,深入研究了线性反演方法(即傅里叶方法、褶积方法和矩阵方法)和非线性反演方法(即迭代拟合法和最优化法),给出了详细数学模型。以南海地区为研究的背景场,对海洋重力测量进行地质、地球物理的综合解释。将重力异常与陆缘盆地、洋-陆分界带、海沟、中央海岭以及海上进行对比分析。作者认为:南海北部边缘为 NE 向的华南大陆架,由于受张力作用,南海北部陆缘内发育一系列阶梯状正断层及其所围限的基底地堑和地垒。基底的地堑控制新生代含油气断陷盆地形成并发展成拉张型或离散型边缘构造。这种扩张型边缘盆地由于陆源物质和有机物质丰富、沉积速度快、沉积厚度大,为油气的形成和富集创造十分有利条件。南海北部大陆架发育了珠江口、琼东南、莺歌海和北部湾等地堑拉张型盆地。盆地内沉积有厚达几千米至一万米新生界,个别盆地最下部有晚白垩世的沉积,说明这些盆地从晚白垩世时便开始发育。在这些地层内发育着多套油气生、储、盖组合,并含各类型的油气圈闭。南海北部陆缘盆地是远景很好的含油盆地。南海北部陆架中著名的珠江盆地一直伸展到南海东北部陆架地区,珠江口盆地的珠一拗陷在东沙群岛以东地区沉积厚度可达 5 000 多米,盆地的基底埋藏较深,构造较复杂,是一个含油丰富的地区。作者深入分析和解释了南海地区的海洋地质、地球物理特征和地壳内部结构,对今后油气开发具有重要的参考价值。

本书第一篇(1—4 章)由宋文尧、张牙撰稿;第二篇 5,6,8 章由刘祖惠撰稿,第 7 章由宋文尧、刘祖惠撰稿;第三篇第 9 章由陈雪撰稿,第 10,11,12 章由苏达权撰稿。全书由许厚泽、宋文尧统稿,许厚泽审定,全部插图清绘及稿件校正由张牙负责。

在撰写和出版本书时,曾经得到我们的导师、学部委员方俊教授的热情支持和指导,张儒杰教授审阅了本书书稿,并提出很多宝贵意见,国家自然科学基金委员会朱志文、项永仁两位高级工程师认真指导和检查课题的进展,中国科学院南海海洋研究所“实验二

号”考察船实验部的全体科技人员和中国科学院测量与地球物理研究所朱才连助理研究员和刘大江助理实验师参加了出海考察,科学出版社姚岁寒编审和彭斌编辑为编辑、出版本书付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请国内同行专家及读者批评指正。

作者于武昌、广州

1991年11月

目 录

第一篇 海洋定位方法

第一章 世界大地测量坐标系	3
1.1 1972 年世界大地坐标系	3
1.2 1984 年世界大地坐标系	13
1.3 不同空间大地直角坐标系的换算	19
1.4 不同大地坐标系的换算	26
第二章 无线电定位与水声测量定位	33
2.1 无线电定位方法	34
2.2 水声测量与定位	44
第三章 组合导航系统	64
3.1 组合导航系统的基本原理	64
3.2 卡尔曼滤波器	67
3.3 MX-200 型组合导航系统	72
第四章 全球定位系统	78
4.1 全球定位系统概况	78
4.2 GPS 信号特征和电文结构	90
4.3 全球定位系统的定位基本方法	99
4.4 载波相位测量法	104
4.5 全球定位系统的误差分析	115
4.6 全球定位系统在动态定位中的应用	129
第一篇参考文献	136

第二篇 海洋重力测量

第五章 海洋重力测量概况	141
5.1 引言	141
5.2 海浪的运动	146
第六章 海洋重力测量仪器	150
6.1 石英水平扭丝型海洋重力仪	153
6.2 弦线重力仪	154
6.3 拉科斯特-隆贝格海洋重力仪	156
6.4 格拉夫海洋重力仪 GSS	157
6.5 KSS-30 型轴对称结构海洋重力仪	160
6.6 拉科斯特-隆贝格(L&R)轴对称重力仪	163
6.7 贝尔(Bell)重力仪	164

6.8	麻省理工学院(MIT)或文氏振弦重力仪	164
6.9	中国的海空重力测量仪器简介	165
第七章	重力归算及重力异常	167
7.1	重力测量的基准系统	167
7.2	重力归算	170
7.3	重力校正	180
7.4	重力异常	188
第八章	海洋重力测量的数据处理	189
8.1	海洋重力测量数据的预处理	189
8.2	海洋重力测线的系统误差调整	192
8.3	海洋重力测量网的平差	197
第二篇参考文献		203

第三篇 海洋重力测量的地质、地球物理解释

第九章	重力的均衡	207
9.1	均衡的一些概念	207
9.2	普拉特-海福德的均衡模型	207
9.3	艾里-海斯坎宁的均衡模型	208
9.4	二维的艾里均衡模型	209
9.5	岩石圈的弯曲均衡模型	210
9.6	维宁·曼尼兹的区域地壳均衡模型	212
9.7	线性重力均衡异常模型	213
9.8	南海地区的线性均衡重力异常	218
第十章	海洋重力解释中的正演分析方法	225
10.1	计算重力异常的一般积分方法	225
10.2	简单形状地质体的正演计算	227
10.3	横截面为多边形的二维物体的重力异常	232
10.4	三维任意形状的物体所产生的重力异常	234
第十一章	海洋重力解释中的反演分析方法	237
11.1	傅里叶方法	237
11.2	褶积方法	241
11.3	矩阵方法	244
11.4	非线性反演方法	246
第十二章	海洋重力测量的地质、地球物理综合解释	248
12.1	陆缘盆地与重力异常	248
12.2	洋陆分界带与重力异常	250
12.3	海沟与重力异常	257
12.4	中央海岭与重力异常	263
12.5	海山与重力异常	264
第三篇参考文献		266

第 一 篇

海 洋 定 位 方 法

第一章 世界大地测量坐标系

本章主要介绍目前美国海军导航卫星系统(U. S. Navy Navigation Satellite System——NNSS)所采用的 WGS-72, 以及全球定位系统(Global Positioning System NAVSTAR——GPS)目前试验阶段所采用的 WGS-84 这两种坐标系,最后叙述不同空间大地直角坐标系的换算及不同大地坐标系的换算。

1.1 1972 年世界大地坐标系

1972 年世界大地坐标系(World Geodetic System 1972, 简称 WGS-72)是由美国空军、国防部制图局、海军武器研究所和海洋局等单位研究建立的,运用了大量的电学观测和光学观测数据。电学观测数据的一部分是由美国海军和进行协作的美国国防部的卫星跟踪站所提供的多普勒结果,以及 1971—1972 年间建立的许多测地接收机观测站的多普勒结果,还有 1970 年建立的西可尔赤道网数据。光学观测数据由全球卫星几何三角

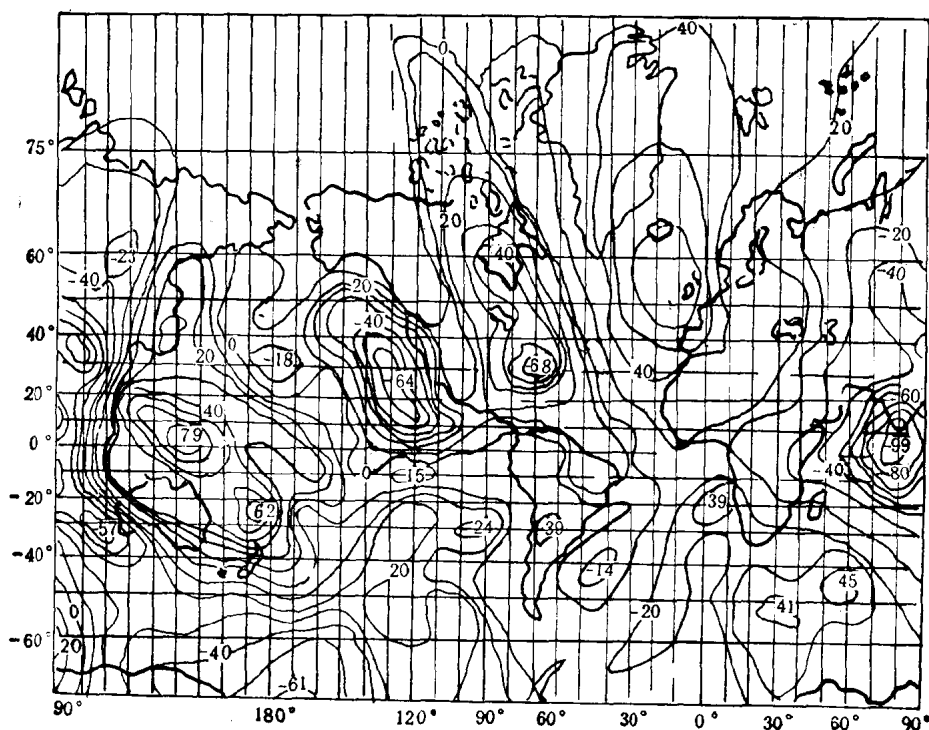


图 1.1 从地球引力场模型获得的大地水准面的高度图
以参考椭球体上面平均海平面的米数量度

测量计划的 BC-4 摄影系统提供,还利用了史密森天文台贝克-纳恩摄影仪的观测数据,在解算中还利用了全球地面天文、大地和重力测量资料。表 1.1 为 WGS-72 椭球参数。

表 1.1

椭球参数	符 号	WGS-72 值	标 准 差
长半轴	a	6 378 135 米	± 5
扁率	f	1:298.26	$\pm 6 \times 10^{-8}$
地球自转角速度	ω	$7.292115147 \times 10^{-5}$ 弧度/秒	$\pm 1 \times 10^{-16}$
二阶带谐项	$\bar{C}_{2,0}$	-4.841605×10^{-6}	—
赤道重力值	ν_e	978 033.26 毫伽	± 1.8
引力常数(包括地球大气质量)	GM	$398\,600.8$ 公里 ³ /秒 ²	± 0.4
引力常数(不包括地球大气质量)	GM'	$398\,600.5$ 公里 ³ /秒 ²	—

图 1.1 的大地水准面高度图是通过观测地球引力场对卫星轨道的影响而绘出的,因此不能反映细部结构,使许多地方的误差可达 ± 20 米。自从 1967 年首次发表该图以来,经过不少改进,但还不能解除由于军事保密造成的限制。

1.1.1 多普勒参考坐标系的形成

众所周知,多普勒测量使用的广播星历或精密星历是根据不同地球重力场模型和跟踪站网的坐标计算出来的。近十几年来,多普勒跟踪站网起了变化(站坐标的修正和站数增加),重力场模型也有所改进。这里,前者称为坐标系,后者称为重力场,并分别给予代号以示区别。

1. 广播星历

广播星历是由美国海军航天大队 (U. S. A. Naval Astronautics Group——NAG) 根据四个跟踪站的观测数据进行轨道计算后,实时提供轨道根数的外推值(预报值)。跟踪站网的坐标系采用了 NWL-10D,重力场参数采用 WGS-72 系统,由于广播星历应用较广,深入了解星历编算过程及同精密星历的差别很有必要。

预报误差 广播星历属于预报性星历,其主要误差是由大气阻力摄动所引起的,它与太阳活动的变化紧密相关。由大气阻力的性质所决定的预报误差,几乎大部分反映到卫星的沿轨(切向)方向上,切向误差不仅表现出天与天之间的随机波动,而且还存在长周期趋势。按切向、法向和径向误差来估算,分别为 19,14,10 米,三维单点定位的精度约为 5 米,比精密星历要差许多倍。为了削弱预报误差,国内外普遍采用短弧法和联测法,卫星经过数达 100—150,并考虑到南—北、东—西经过的对称和次数平衡。

时间改正 NNSS 的时间基准为 UTC,但在编算星历时,NAG 没有考虑 $\Delta = \text{UTC} - \text{UT1}$ 的改正,略去 Δ 值,就引起在地固坐标系中卫星升交点经度误差,这项误差随着 Δ 变率增大而增大,并不能被抵消,其误差量为

$$\delta\lambda = \omega_e(t - t_0) \frac{d\Delta}{dt} \quad (1.1a)$$

式中 ω_e 为地球自转速度, t 为卫星经过时刻, t_0 为轨道预报间隔的起始时刻。由于轨道外推最长时间为 30 小时, 取 $t - t_0$ 为 1.5 天, 其平均经度误差为

$$\delta\lambda = 0.00011\Delta \quad (1.1b)$$

式中 Δ 为 UTC-UT1 的变率, 以秒/日计, 当 Δ 为正时, 经度误差为负(向西), 这使星历包含着经度差, 其差值在赤道上可达 2—3 米。

自 1979 年起, NAG 着手从美国海军天文台每周公报 (U.S. Naval Observatory Weekly Bulletins) 中, 利用 Δ 的外推值进行修正, 以保持与精密星历相一致。

极移改正 NNSS 是以国际协议原点 CIO 来定义 Z 轴的。实际上, 星历在 1974 年 1 月 27 日以前, 采用了瞬时地极, 未加极移改正。此后, NAG 采用了国际时间局 BIH 每月 B/C 通报 (The Monthly B/C Circular of the BIH) 中极坐标的预报值, 而精密星历是通过两天弧段的轨道计算中所解出的极坐标(即 DPMS), 两者相差达 1 米左右, 由此有 1—2 米系统误差保留在广播星历之中。

常数采用 首先在重力场模型方面, NAG 使用了 WGS-72 系数, 而精密星历使用 NSW10E-1 系数, 两者仅在 28 阶共谐项上存在着有效的差异, 它导致星历和定位的微量差别。Anderle 认为, 两种重力模型是根据相同的多普勒标准方程式所产生的, 而 WGS-72 中包含着其它解中所没有的重力测量数据, 模拟表明, 上述差别的影响是局部相关的, 其量级为 1 米, 该差值还可通过强制这两系统用共同引力表达式而达到完成消除。

其次在引力常数 GM 方面, 自 1976 年以来, NAG 采用了 $398\,600.8$ 公里³/秒² (该值为 WGS-72 系统中包含大气质量的 GM 值), 而精密星历采用了 $398\,601.0$ 公里³/秒², 由于两者形成自相容性, 只有在考虑跟踪站坐标不同时, 才可看出两者差值的影响。

最后在地球自转速度 ω_e 方面, 其正确值为

$$\omega_e = 0.7292115855 \times 10^{-4} \text{ 弧度/秒}$$

它是地球相对于瞬时真春分点的旋转速度, 而广播星历采用了 WGS-72 的错误值为

$$\omega'_e = 7.29115147 \times 10^{-5} \text{ 弧度/秒}$$

使用该值引起平均经度差达 3×10^{-7} 弧度, 在赤道上大约有 2 米偏差。

跟踪站坐标 在 1975 年, 当 NAG 采用 WGS-72 重力场模型时, Anderle 及时提供了一系列站坐标, 这些值比较符合于多普勒跟踪所采用的 WGS-72 重力系数, 被命名为 NWL-10 D 坐标系。目前除了经度存在微小偏差外, 广播星历的站坐标相当接近于 NSW10E-2 坐标系。

若顾及平均经度差和坐标、尺度 (GM) 差所引起的间接影响, 则对广播星历的总影响为: Z 轴平移为 2 米, 半径变化为 1 米以及经度差为 3×10^{-7} 弧度, 其公式为

$$\text{经度}_{(9Z-2)} = \text{经度}_{r_{\text{BIH}}} - 3 \times 10^{-7} \text{ 弧度}$$

$$Z_{(9Z-2)} = Z_{r_{\text{BIH}}} - 2 \text{ 米}$$

$$R_{(9Z-2)} = (1 + 2 \times 10^{-7}) R_{r_{\text{BIH}}}$$

值得注意的是, 广播星历所忽略的 UTC - UT1 的影响, 恰好消除了过去几年的经度偏差。同样, $\delta\lambda$ 所引起的 -3×10^{-7} 弧度的平均经度差, 几乎抵消了由于站坐标不

同所引起的经度偏差。

Jenkins 和 Leroy 收集了全球的多普勒数据,按七参数转换公式,求得广历向精历的转换参数,其公式为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{精历}} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_Z & \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z & 1 & -\varepsilon_X \\ -\varepsilon_Y & \varepsilon_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{广历}} \quad (1.2 a)$$

式中 $X_0 = -0.8 \pm 0.5$ 米

$Y_0 = 0.2 \pm 0.5$ 米

$Z_0 = -2.6 \pm 0.5$ 米

$\varepsilon_X = -2.3 \times 10^{-7} \pm 1.2 \times 10^{-7}$ 弧度

$\varepsilon_Y = 9.0 \times 10^{-8} \pm 1.1 \times 10^{-7}$ 弧度

$\varepsilon_Z = -3.0 \times 10^{-8} \pm 1.0 \times 10^{-7}$ 弧度

$m = 2.2 \times 10^{-7} \pm 7.0 \times 10^{-8}$

如果忽略微小量,则 (1.2 a) 式简化为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{精历}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2.6 \end{bmatrix} + (1 + 2.2 \times 10^{-7}) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{广历}} \quad (1.2 b)$$

2. 精密星历

精密星历是由美国国防制图局水文与地形测量中心(U.S.A. Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center——DMAHTC)根据全球 20 多个跟踪站网(亦称 TRANET 网),按 48 小时的多普勒观测数据拟合轨道弧段计算出来的。多普勒系统原先是建立在 WGS-72 系统的基础之上,其后,经历了三次变化(二次重力场和一次坐标系),近十年又作了其他方面的改正,在 80 年代已达到亚米级定位程度。

重力场 表 1.2 列出了多普勒系统的重力场修正,可以估计由不同重力场计算的卫星位置,其变化约为 5 米,随着用新的星历计算跟踪站位置的相应改正,卫星位置误差约为 2 到 3 米。

表 1.2 重力场修正

日 期	重力场	说 明
1967 年 2 月 20 日	NWL 8D	
1968 年 4 月 18 日	NWL 8H	
1970 年 2 月 13 日	NWL 9B	
1973 年 1 月 2 日	NWL 10E	
1977 年 6 月 15 日	NWL 10E-1	在 NWL 10E 重力场模型中增加两个新的谐振重力系数

坐标系 近年来,随着重力场的修正,TRANET 网的站坐标也有变化,NWL-9C 与 NWL 8 F 所得坐标差约为 3 米;NWL 9 D 与 NSW 9 Z-2 所得坐标差约为 1—2 米。从 NWL 9 D 变换到 NSW 9 Z 的七参数为:

表 1.3 坐标系修正

日 期	坐 标 系	说 明
1967 年 2 月 20 日	NWL 8E	取自七颗 NNSS 卫星的一年数据
1968 年 1 月 19 日	NWL 8F	NWL8E 从 1966.7 平极变换到 CIO 极
1970 年 12 月 20 日	NWL 9C	在 1970 年用了 BIH 初步极坐标的 40 天数据保持不变
1971 年 10 月 18 日	NWL 9D	对 NWL9C 的三个站高度进行改正
1977 年 6 月 15 日	NSWC 9Z-2	NWL9D 转换到 NSWC9Z-2 根据一年的站坐标解算得到 Love 数由 0.26 改为 0.28

表 1.4

平 移 量			欧 勒 角 (弧秒)			尺 度
X_0 (米)	Y_0 (米)	Z_0 (米)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	米
+0.5	-0.5	-0.9	-0.03	-0.01	-0.01	0.2
± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.01	± 0.01	± 0.01	± 0.1

注 1) 根据 NSWC 9Z-2 减去 NWL 9D 坐标。

2) 正轴转向格林尼治东和 CIO。

NWL9 D/NSWC9 Z-2 的地心位置及定向 自 1977 年 6 月起, 利用 NSWC 9Z-2 计算精密星历。为了鉴定 NSWC 9 Z-2 坐标系的地心位置和定向, 将 GM 值由 398 601.0 公里³/秒² 改用为 398 600.5 公里³/秒² 后, 则该项差值影响大地高 H 为 -1.7 米, 同时考虑到地面跟踪站所接收的多普勒信号是由卫星的天线相位中心所发射的, 而不是来自卫星的质量中心, 这样对跟踪站大地高平均影响为 -0.7 米, 两者合并影响为 -2.4 米。现定义 NSWC 11 Z 坐标系为:

$$B_{\text{NSWC11Z}} = B_{\text{NSWC9Z-2}}$$

$$L_{\text{NSWC11Z}} = L_{\text{NSWC9Z-2}}$$

$$H_{\text{NSWC11Z}} = H_{\text{NSWC9Z-2}} - 2.4 \text{ 米}$$

如果采用 IUGG 第 17 届大会推荐值(亦称 GRS80) 并将 NSWC9Z-2 的经度零点改正到 BIH 零子午线, 则采用下列公式:

$$a = 6\,378\,137 \text{ 米}$$

$$f = 1/298.257$$

$$C_{2,0} = -0.10826371527218 \text{ E-2}$$

则定义新的坐标系为:

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{NSWC12Z}} &= B_{\text{NSWC11Z}} + \Delta f \sin 2\phi / \sin 1'' \\ L_{\text{NSWC12Z}} &= L_{\text{NSWC11Z}} + 0''8 \\ H_{\text{NSWC12Z}} &= H_{\text{NSWC11Z}} + a_{\text{GRS80}} \cdot \Delta f \sin^2 \phi - \Delta a \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

上式中

$$\Delta a = a_{\text{GRS80}} - a_{\text{NSWC9Z-2}} = 6\,378\,137 - 6\,378\,145 \text{ (米)}$$

$$\Delta f = f_{\text{GRS80}} - f_{\text{NSWC9Z-2}} = 1/297.257 - 1/298.257$$

如果光速 299 792.5 公里/秒改为 299 792.458 公里/秒, 则对大地高 H 平均影响为 -0.26 米(± 0.02), 并从 H_{NSWC12Z} 中减去, 这样就构成 NSWC13 Z, 显然该坐标系与 RGS 80 十分接近。

另外,为了论证 NSW9Z-2 的地心位置,可在多普勒单点定位中分别用 NSW9Z 和 GRS80 两种系统进行计算,其坐标差为:

$$\begin{aligned}\Delta B &= 0''002(\pm 0''006) \\ \Delta L &= -0''8(\pm 0''003) \\ \Delta H &= 2.97 \text{ 米 } (\pm 0.04)\end{aligned}$$

可以看出:纬度不存在系统差,经度存在 0.8 秒的系统差,大地高存在 -2.97 米系统差,其中 -2.66 米是可以解释的。

Lachapelle 和 Kouba 认为, NWL9D 的地心位置可由卫星多普勒 (NWL9D) 推算的大地水准面起伏 $N(N = H - H_{\star}, H$ 为大地高, $H_{\star}$ 为正高)与不同地球重力场模型所推算的起伏的比较中求解,其值列入表 1.5. 可以看出, NWL9D 坐标系在 Z 分量上确实增大了 4 米的偏差。同样从卫星多普勒测量与甚长基线干涉测量的数据比较中表明, NWL9D 的经度零点增加 $0''8(\pm 0''1)$, 才能使 NWL9D 的大地测量零子午面与 BIH 天文零子午面相平行,同时 NWL9D 的 Z 轴与国际协议原点 CIO 存在 $0''05$ 的系统差。

表 1.5 NWL9D 与 GEM,SAO,SE 和 WGS72模型比较所解出的地心位置
(利用全球分布的 390 个多普勒跟踪站) (以米计)

地球模型	ΔX	ΔY	ΔZ	a
GEM9	0.9	-0.1	3.9	6 378 138.5
GEM10	0.7	-0.2	4.0	6 378 135.7
GEM10B	0.6	0.3	4.3	6 378 136.6
AO SEII	0.6	-0.4	2.7	6 378 138.4
SAO SEIV.3	0.5	0.2	3.4	6 378 138.6
SAO 重力模型	* 1.2	0.1	3.3	6 378 138.2
WGS72 (12.12)	0.8	-0.5	4.8	6 378 139.2

3. 几种坐标系之间的转换

如上所述, NSW-13Z 与 GRS 80 的参数是一致的,并命名为试验坐标系。表 1.6 列出了 NSW9Z-2 与试验系统的八个参数。

表 1.6

项 目	NSWC 9Z-2	试 验 系 统
地球的长半径	6378 145 米	6378 137 米
扁 率	1/298.25	1/298.257
引力常数 GM	398601.0 公里 ³ /秒 ²	398 600.5 公里 ³ /秒 ²
站网经度	$\lambda_{NSWC9Z-2}$	$\lambda_{NSWC9Z-2} + 0''8 = \lambda_{BIH}$
动子形状因子 $C_{2,0}$	-0.108 263 443 685 64E-2	-0.108 263 715 272 18E-2
光 速	299 792.5公里/秒	299 792.458公里/秒
星历的参考点	卫星质心	卫星天线
NAG/OPNET 数据的利用	频率数据	距离差数据

首先,对四种多普勒系统转换。

按照莫洛坚斯基简化公式计算坐标系之间的转换参数，现列出有关系统的椭球参数于表 1.7。

表 1.7

系 统	a	f
NWL9D/NSWC 9Z-2	6 378 145	1/298.25
WGS-72	6 378 135	1/298.26
广播星历	6 378 135	1/298.26
试验系统	6 378 137	1/298.257

注：假定 WGS-72 参数置于“实时”软件中。

表 1.8 为不同多普勒系统之间的尺度因子，其必要变换公式为：

表 1.8 尺度因子 Δr (米)

旧 \ 新	NWL9D/NSWC 9Z-2	WGS-72	广播星历 ¹⁾	试 验
NWL9D/NSWC 9Z-2	0	-5.27	0	-2.97
WGS 72	5.27	0	5.27	2.30
广播星历	0	-5.27	0	-2.97
试 验	2.97	-2.30	2.97	0

1) 假定软件包含 WGS-72 椭球参数。

$$\left. \begin{aligned}
 H_{\text{新}} &= H_{\text{旧}} + \Delta H \\
 \Delta H &= a_{\text{新}} \cdot \Delta f \sin^2 \phi - \Delta a + \Delta r \\
 \Delta a &= a_{\text{新}} - a_{\text{旧}} \\
 \Delta f &= f_{\text{新}} - f_{\text{旧}} \\
 B_{\text{新}} &= B_{\text{旧}} + \Delta B \\
 \Delta B'' &= \Delta f \sin 2B / \sin 1''
 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

表 1.9 为经度旋转因子 ΔL 。

表 1.9

旧 \ 新	NWL 9D/NSWC 9Z-2	WGS-72	广播星历	试 验
NWL9D/NSWC 9Z-2	0	0.26	0	+0.80
WGS 72	-0.26	0	-0.26	+0.54
广播星历	0	0.26	0	+0.50
试 验	-0.80	-0.54	-0.80	0

注：全部经度向东为正。

公式为：

$$L_{\text{新}} = L_{\text{旧}} + \Delta L \quad (1.5)$$

其次，GRS80 参数对 WGS-72 结果的影响。

按照表 1.7, 1.8, 1.9 和公式(1.4), (1.5)，估算从 WGS-72 变换到试验系统对大地经、纬度和大地高度的最大影响为：