

现代测绘科技丛书

海面地形与高程基准

管泽霖 管铮 翟国君 编著

XIANDAICEHUI
KEJICONGSHU

229
0604
G

测绘出版社

责任编辑:宋丽然

封面设计:赵培璧

ISBN 7-5030-0821-0



9 787503 008214 >

定价:10.00 元

现代测绘科技丛书

海面地形与高程基准

管泽霖 管 铮 翟国君 编著

测 绘 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书按四维观点较为系统地介绍了海面地形和高程基准方面的问题。本书主要论述各种确定海面地形的原理、方法和现代结果,并且分析了结果间产生差异的原因;阐明了地球重力场与海面地形之间的关系;讨论了建立高程基准的原理和参考面的选取以及在地壳垂直形变中的高程系统;对用空间技术统一地区性高程基准也作了说明。

本书可以作为大地测量、海洋、地球物理和空间技术有关方面的科研、教学人员以及大学高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海面地形与高程基准/管泽霖等编著. —北京:

测绘出版社, 1996. 3

ISBN 7-5030-0821-0

I. 海… II. 管… III. ①海面: 高程测量-大地测量基准 ②地形测量: 高程测量-大地测量基准 IV. ①P72 ②P216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 19230 号

测绘出版社出版·发行

(100045 北京市复外三里河路 50 号 (010)68512182)

北京市王史山印刷厂印刷·新华书店总店北京发行所经销

1996 年 4 月第一版·1996 年 4 月第一次印刷

开本: 850×1168 1/32·印张: 5

字数: 133 千字·印数: 0001—2000 册

定价: 10.00 元

《现代测绘科技丛书》

编委会委员名单

主任委员：陈俊勇

副主任委员：宁津生 高 俊 张祖勋
楚良才 陈永奇 华彬文

委 员：（以姓氏笔划为序）

于来法	方 恒	田应中
朱华统	李德仁	陈绍光
张清浦	林宗坚	陶本藻
钱曾波	黄杏元	梁宜希
喻永昌	廖 克	潘正风

出 版 说 明

《现代测绘科技丛书》是经国家测绘局批准列入我社“八五”重点出书规划的选题之一。其编写宗旨是对 80 年代以来测绘科技领域在新理论、新技术、新工艺等方面所取得的成果进行总结，整理成册，以期对改造传统测绘生产技术，提高劳动生产率和产品质量，形成我国现代测绘技术体系，发挥科技图书应有的作用；同时也为反映我国测绘科学研究水平，丰富我国测绘学术专著宝库服务。出版本套丛书也是为适应加速测绘科技成果转化为现实生产力的需要。

本套丛书按专题成册。专题有两种类型：一类偏重学术性，主要反映我国测绘各专业近十年来在理论研究方面所取得的、能代表我国先进水平的新成就和某些老专家毕生研究成果的专著，以及测绘前沿填补国内空白的著作；另一类偏重应用技术，是本丛书的主体，其内容是在理论指导下以新技术、新工艺、新材料、新产品研究成果的推广应用为主，个别的配有实用软件。

由于 GPS（全球定位系统）涉及测量界多方面的应用，内容较多，丛书中将分册配套编写，各册主题明确，内容相辅相成，组合起来 GPS 测量内容就显得比较完整，又发挥了各作者的专长。

丛书编委会于 1992 年 1 月成立，全体编委对丛书出版意图、读者对象，乃至每个选题及其内容都作了充分研究和讨论，在全国测绘界选择了有代表性的专家参加各个分册的撰写和审稿工作。按照计划，这套丛书的各分册将根据撰写完成情况先后定稿出版，陆续与读者见面。

前 言

自 1975 年动力试验海洋卫星 (GEOS-3) 发射后, 国际上的大地测量学者对此产生了极大的兴趣, 因为用它确定海面地形和海洋大地水准面可以获得可喜的结果。这是继验潮站间用几何水准联测和海洋水准之后, 又一种确定海面地形的办法, 也为大地测量提供了研究海面地形的手段, 并且展示了广阔的发展前景。高程基准是测量中确定高程的依据, 随着精度要求的日益提高和已有可能精确地确定海面地形, 已经不能局限于用平均海面来进行定义了; 同时 VLBI 和 GPS 技术的出现, 统一各地区的高程基准也成为可能。因此本书将就海面地形的确定和高程基准的建立进行较为系统地介绍, 并从四维的概念出发进行讨论。

目前系统地介绍上述问题的专著尚不多见, 而且进展很快且多分散在国外的有关期刊中, 鉴于作者阅读的资料和学识所限, 可能叙述得不够完善, 甚至有不妥和错误之处, 请批评指正。

最后感谢澳大利亚新南威尔士大学 C. Rizos 教授寄来了他的著作“地球重力场在海面地形研究中的作用”一书, 以及为本书评审提出许多宝贵意见的专家们, 他们对本书的编写起了很大的作用。

作 者

1994 年 5 月

目 录

第一章	绪论	(1)
第二章	潮汐理论基础	(4)
§ 2.1	概述	(4)
§ 2.2	静力潮汐理论及固体潮	(4)
§ 2.3	验潮站	(12)
§ 2.4	动力潮汐理论及潮汐图	(16)
第三章	平均海面和高程基准	(24)
§ 3.1	概述	(24)
§ 3.2	平均海面	(25)
§ 3.3	海面地形	(30)
§ 3.4	高程基准和深度基准面	(31)
§ 3.5	高程基准的参考面系统	(33)
§ 3.6	大地水准面的定义及其变化	(34)
第四章	用几何水准确定验潮站上的海面地形	(42)
§ 4.1	概述	(42)
§ 4.2	正高、正常高以及海面地形对 Molodensky 问题的影响	(42)
§ 4.3	沿海岸确定的海面地形结果	(46)
§ 4.4	固体潮对几何水准测量的影响	(47)
§ 4.5	海潮负荷对几何水准测量的影响	(51)
§ 4.6	水准测量中的潮汐参考系统	(57)
第五章	用海洋水准确定海面地形	(61)
§ 5.1	概述	(61)

§ 5.2	位距水准的原理	(61)
§ 5.3	地旋水准的原理	(65)
§ 5.4	用位距水准确定海面地形的结果	(67)
§ 5.5	用几何水准和海洋水准确定的海面 地形结果的比较	(71)
第六章	用卫星测高确定海面地形	(78)
§ 6.1	概述	(78)
§ 6.2	卫星测高原理	(82)
§ 6.3	用卫星测高确定海面地形的结果	(90)
§ 6.4	全球主要海流的确定	(98)
§ 6.5	卫星测高和位距水准确定海面地形 结果的比较	(102)
§ 6.6	一并确定海面地形和改善地球位系数模型	(106)
第七章	地球重力场对海面地形的作用	(111)
§ 7.1	概述	(111)
§ 7.2	解算大地测量边值问题的 Mather 方法	(112)
§ 7.3	地球重力场对确定长波海面地形及其 随时变化的作用	(120)
§ 7.4	地球重力场对确定短波海面地形及其 随时变化的作用	(125)
§ 7.5	用卫星测高数据改善地球位系数模型	(127)
§ 7.6	确定地壳垂直运动的高程参考系统	(129)
第八章	用空间技术统一高程基准	(133)
§ 8.1	概述	(133)
§ 8.2	全球海面观测系统 (GLOSS)	(133)
§ 8.3	用 GPS 联接验潮站的平均海面	(140)
参考文献		(145)

第一章 绪 论

现时人们对海面上升问题极为关注，因为它直接影响到人类的生存。1987年 Wind 将海面上升对人类的影响归纳成三个方面，即环境、经济和社会方面的影响。在环境方面包括由于海水入侵对农业作物的生长条件、鱼类养殖及有经济效益的海滩淹没程度的影响以及人类淡水供应等方面的河流和水的管理。在经济方面影响到沿岸基础工程的设置，如海堤防护、海港和道路的建设等，尤其是对沿岸地区的国民经济规划和建设更是如此。在社会方面，因海岸线的变迁将引起人口迁移等等的社会问题。因此了解海面上升的情况，及早地制定相应的对策将是非常重要的。

引起海面升降的原因很多，有气候的、气象的，也有海洋的、地球物理的和天文的因素。因此很多学科的科研工作者在各自的学科领域内进行了研究。由于它涉及多种学科，因此也形成了许多边缘科学。

对于大地测量来说，学科的研究目的之一就是确定大地水准面，它是与平均海面密切相关的。从实际应用来说，平均海面是高程测量的依据。因此对平均海面的时空变化的确定，本来就是大地测量的工作范畴。但在长期的常规大地测量中，由于测量手段的限制，只能应用海洋学给出的平均海面，完全处于被动的局面。事实上，平均海面的研究与地球重力场的关系是分割不开的。从地球重力场出发，应当有很多工作可做。由于以往的重力测量多集中于陆地上，海洋重力测点的数量不多，分布又不均匀，同时精度也不高，因此将主要的精力用于大陆的大地水准面研究上，对于海岸大地水准面的研究远远落后于大陆。自从卫星测高技术

获得成功，大地测量学者终于对海洋大地水准面的研究和确定有了突破性的进展。由于可以在短期内连续获得有关海面的信息，为四维的海洋大地水准面的研究提供了条件，并可用于平均海面与大地水准面的差异——海面地形的研究以及海流和潮汐的研究中，也扩大了大地测量的学科范畴。

随着技术的发展，对大地测量也提出了新的精度要求。有些传统的概念，就必须加以修改和重新定义。例如在 10^{-6} 精度下，海面地形可以不顾及；若按 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 精度要求，就必须考虑海面地形的作用。当然也牵涉到大地水准面的定义（§ 3.6）问题。因此 Mather 认为这是对大地测量新的挑战。

海面地形与高程基准是两个相互关联的问题。

确定海面地形大体上可以分为三种方法：即第四章中用几何水准联接各验潮站间的平均海面来确定，称为几何水准方法；第五章中用海洋上的数值，例如温度、含盐度、大气压力和海流速度的数据来确定，称为海洋水准方法；以及第六章中用卫星测定海面高度来确定，称为卫星测高方法。在这三章中分别介绍了它们的原理以及目前所获得的结果。用几何水准和海洋水准确定的海面地形结果，在一些沿海岸地区两者符合得很好，但在另一些地区不仅相差很大，甚至两者的倾斜方向也完全相反，差距远远超出了它们的内部精度。分析其原因有不同的说法：认为海洋水准的理论和实际数据还不尽人意；或认为几何水准中还存在一些尚未被发现的系统误差。看来这两种方法都存在缺陷（§ 5.5）。

有人认为，在上述的差值中，固体潮的影响是几何水准的误差源之一。由于这一问题在一般的大地测量中讲述得较为简单，因此在本书中对此进行了介绍（§ 4.5，§ 4.6）。在水准测量中也应考虑潮汐改正中应采用的长期固体潮形式，这是一个潮汐参考系统问题。采用不同的潮汐参考系统将产生不可忽略的差值，在 § 4.7 中对此问题也进行了讨论。

至于卫星测高的结果与海洋水准和结果比较，还是较为一致

的 (§ 6.5)。

第七章从地球重力场的角度出发来讨论海面地形，这也是上列三章的归纳。在这一章内还谈到了海面地形对确定地球重力场的影响 (§ 7.5)。

确定高程基准主要是决定验潮站上的平均海面，是一个对长期验潮数据进行分析和处理的问题。由于这一问题在一般的潮汐教程中都进行了讨论，本书只作一般介绍（第二章和第三章）。

重复几何水准所测定的高程变化，包含着两部分影响，即海面升降和地壳垂直形变。在研究地壳形变时必须去掉海面升降的影响，反之则要去掉地壳垂直变化的作用。为将两种影响分离开，必须选定一个与研究问题有关的高程系统，§ 7.6 中给出的高程系统是为研究地壳垂直运动应用的，它在理论上考虑得是很周到的。

最后一章（第八章）介绍了应用 VLBI 和 GPS 技术联接地区性高程基准（或验潮站）使其成为统一的高程系统的工作。这种方法对统一高程基准将起主导作用。

由于本书内容牵涉范围较广，对一般教科书上已经详细讲述过的问题，不再重复地叙述，而只作一般介绍。对一些超出于本书范围的专题性的问题（例如 § 7.2），也只作概括性的说明，不去推导其公式，并标有参考文献编号供查阅。

第二章 潮汐理论基础

§ 2.1 概 述

平均海面是确定大地水准面、海面地形以及高程基准的基本依据。它是按瞬时海水面的长期观测结果平均而得。瞬时海水面受众多的物理因素影响，例如天文、地理、水文和气候等等的影
响。“平均”的实质是对这些影响加以消除或改正。其中潮汐现象是主要考虑的问题。为了本书后继问题的讨论，在这一章内对潮汐的一些基本理论，作一简略的介绍。详细情况请参阅有关海洋潮汐和固体潮的书籍，例如参考文献〔4〕〔5〕和〔6〕。

潮汐理论从两个方面来考虑：一是静力潮汐；另一是动力潮汐。本章主要讲述静力潮汐，因为它与验潮站上平均海面的确定以及固体潮现象有关。对动力潮汐只简单地进行介绍，因它与海潮的潮汐图有关。这些内容在后继的章节中将会遇到。

§ 2.2 静力潮汐理论及固体潮

地球表面的海水受日月引潮力的作用而产生的潮汐称为海潮，地球固体部分的潮汐称为固体潮。

约在 1687 年，Newton 应用他建立的万有引力定律，按照日月的质量及其距地面点之间的距离，计算了该点的海水升降。这种现象完全取决于日月的引潮力作用。

选定一个地固地心坐标系，原点位于地球的质心 O 点上（图 2.1），假设天体（太阳和月亮）的质量全部集中在质心 C 处，它

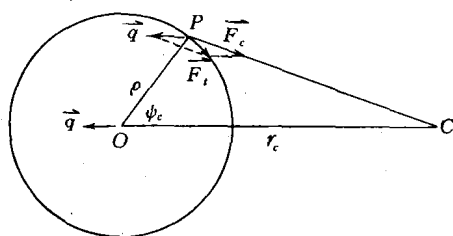


图 2.1

对地球内任一点 P 的引力为 $\vec{F}_c$ 。此外由于地球和天体还绕其公共质心旋转，因此在 P 点上还有一个惯性离心力 $\vec{q}$ 存在。这两个力的合力即为 P 点的引潮力 $\vec{F}_t$ ，可以写成：

$$\vec{F}_t = \vec{F}_c + \vec{q} \quad (2.1)$$

在月地系统中，地球绕其公共质心的旋转运动，可以看成是一种平动，因此它在地球内部各点所产生的离心力都为 $\vec{q}$ ，并等于 C 处天体的总质量作用在地球质心 O 点的吸引力（符号相反）。

在讨论保守力场时，往往引入位的概念，以简化问题的讨论。为此引入引潮力位 V_t ，即

$$\vec{F}_t = \text{grad} V_t \quad (2.2)$$

式中引潮力位为天体对 P 点的引力位 V_c 与离心力位 Q 之和，可写成：

$$V_t = V_c + Q \quad (2.3)$$

将上式展开成 Legendre 多项式，有

$$V_t = \frac{GM_c}{r_c} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{\rho}{r_c}\right)^n P_n(\cos\psi_c) \quad (2.4)$$

式中 G 为万有引力常数， M_c 为吸引天体的质量， r_c 为天体质心 C 距地心 O 的距离， ρ 为 P 点距地心的距离， ψ_c 为 P 、 C 之间所对的地心角距（见图 2.1）， $P_n(\cos\psi_c)$ 为 Legendre 函数， n 为其阶数。

在 (2.4) 式中展开从 $n=2$ 开始。当 $n=0$ 时， $P_0(\cos\psi_c)=1$ ，这时 V_t 为常数，常数位将不会产生力，因此将它略去。当 $n=1$ 时，天

体的引力位 V_c 中的相应项正好与离心力位抵消, 因此在 (2.4) 式中也无 $n=1$ 项。

由于太阳和月亮的引潮情况类似, 因此以后只讨论月亮的引潮力和引潮力位, 并用上标或下标 “ m ” 来代替上列各式中的下标 “ c ”。如果要讨论太阳, 则用符号 “ s ” 来表示。

在引潮力位中 $n=2$ 是主项, 本书为了叙述方便起见, 只讨论 $n=2$ 项。如果要顾及其它项 (例如 $n=3$), 也可按相应的方法求得。

已知 $P_2(\cos\psi_m) = \frac{1}{2}(3\cos^2\psi_m - 1)$, 按 (2.4) 式月亮的二阶引潮力位 V_t^m 为

$$V_t^m = \frac{1}{2} \frac{GM_m}{r_m} \left(\frac{\rho}{r_m}\right)^2 (3\cos^2\psi_m - 1) \quad (2.5)$$

当海水静止时, 它应当是一个重力位等位面, 重力处处垂直于该等位面。在引潮力的作用下, 重力的方向和大小都产生变化, 海水也随之而流动, 这时海水面将不可能保持平衡状态。为了研究在引潮力作用下海水运动的一般规律, 假定地球是刚体, 在其表面外覆盖着一层海水, 认为海水是不可压缩的, 不去顾及海水的质量, 并且认为海水在每一瞬间都处于重力位和引潮力位之和为常数的等位面状态。在上述的情况下讨论海水面的潮汐变化称为平衡潮, 即静力潮汐问题。

下面就来讨论平衡潮的垂直和水平分量。

当 P 点在地球表面上时, $\rho=R$ (R 是地球的平均半径)。将上式向垂直方向和水平方向取偏导数, 就可以得到引潮力在垂直方向的分量 F_v^m 和水平方向的分量 F_h^m , 即

$$F_v^m = - \left. \frac{\partial V_t^m}{\partial \rho} \right|_{\rho=R} = \frac{GM_m R}{r_m^3} (1 - 3\cos^2\psi_m) \quad (2.6)$$

$$F_h^m = - \left. \frac{\partial V_t^m}{\partial \psi_m} \right|_{\rho=R} = \frac{3}{2} \frac{GM_m R}{r_m^3} \sin^2\psi_m \quad (2.7)$$

(2.7) 式还可以分成子午和卯酉分量 F_x^m 和 F_y^m , 即可写成:

$$\left. \begin{aligned} F_x^m &= F_h^m \cos A \\ F_y^m &= F_h^m \sin A \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

式中 A 为月亮的方位角, X 轴向南为正, Y 轴向西为正, ρ 指向地球的外法线方向。

引入月亮的 Doodson 常数 D_m :

$$D_m = \frac{3}{4} \frac{GM_m R^2}{\bar{r}_m^3} \quad (2.9)$$

式中 $\bar{r}_m$ 是地心 O 距月心 m 的平均距离, 它是常数, 因此 (2.9) 式右边均为已知量, D_m 也是常量。将 (2.9) 式右边各量的数值代入, 可得 $D_m = 26277 \text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ 。

将 (2.5)、(2.6) 及 (2.7) 式用 Doodson 常数来表达, 即为

$$V_t^m = \frac{2}{3} D_m \left(\frac{\bar{r}_m}{r_m} \right)^3 (3 \cos^2 \phi_m - 1) \quad (2.10)$$

$$F_v^m = \frac{4}{3} \frac{D_m}{R} \left(\frac{\bar{r}_m}{r_m} \right)^3 (1 - 3 \cos^2 \phi_m) \quad (2.11)$$

$$F_h^m = \frac{2D_m}{R} \left(\frac{\bar{r}_m}{r_m} \right)^3 \sin 2\phi_m \quad (2.12)$$

将 $D_m = 26277 \text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ 代入 (2.11) 和 (2.12) 式, 并假设 $\frac{\bar{r}_m}{r_m} \approx 1$, 则得

$$F_v^m = 55(1 - 3 \cos^2 \phi_m) \quad (\text{单位为 mgal}) \quad (2.13)$$

$$F_h^m = 82 \sin 2\phi_m \quad (\text{单位为 mgal})$$

从上式中可以看出, 当月亮在上下中天时, F_v^m 值最大可达 110mgal; 在 $\phi_m = 90^\circ$ 和 270° 时, F_v^m 值最小为 55mgal, 是最大值的一半。当 $\phi_m = 45^\circ$ 或 135° 时, F_h^m 的最大值为 82mgal, 约为 F_v^m 最大值的四分之三; 当月亮位于上下中天时, $F_h^m = 0$ 。

太阳的引潮力也有类似的情况, 太阳的 Doodson 常数 $D_s = 0.46040 D_m$, 因此太阳的引潮力约为月亮的一半。

平衡潮的潮高 ζ^m 可按 (2.5) 式写成:

$$\begin{aligned}\zeta_i^m &= \frac{V_i^m}{g} \\ &= \frac{1}{2} \frac{GM_m}{gr_m} \left(\frac{\rho_m}{r_m}\right)^2 (3\cos^2\psi_m - 1)\end{aligned}\quad (2.14)$$

式中 g 为重力。

或按 (2.10) 式用 Doodson 常数来表示：

$$\begin{aligned}\zeta_i^m &= \frac{2}{3} \frac{D_m}{g} \left(\frac{\bar{r}_m}{r}\right)^3 (3\cos^2\psi_m - 1) \\ &= 17.8(3\cos\psi_m - 1) \quad (\text{单位是 cm})\end{aligned}\quad (2.15)$$

上式最后一行中仍假设 $\frac{\bar{r}_m}{r} \approx 1$ 。

同样，太阳的平衡潮潮高 ζ_s 为

$$\zeta_s = 8.2(3\cos^2\psi_s - 1) \quad (\text{单位是 cm}) \quad (2.16)$$

由 (2.15) 和 (2.16) 式可以看出，当月亮或太阳在上下中天时 ($\psi_i = 0^\circ$ 或 180°)，潮高分别为 35.6cm 和 16.4cm；当 $\psi_i = \pm 90^\circ$ 时，潮高分别为 -17.8cm 和 -8.2cm。因此潮差分别为 53.4cm 和 24.6cm。月亮引起的潮差要比太阳引起的潮差约大一倍。太阳和月亮的潮差总和为 78cm。

以上的讨论是由 (2.5) 式出发的，它是将引潮力位表达成 ψ_m 的函数，并展成 Legendre 多项式形式，称为引潮力位的 Legendre 展开。

如果将 ψ_m 用月亮的赤纬 δ_m 和时角 t_m 以及地面 P 点的纬度 φ 来表示，称为 Laplace 展开。按图 2.2 所示，则有

$$\cos\psi_m = \sin\varphi\sin\delta_m + \cos\varphi\cos\delta_m\cos t_m \quad (2.17)$$

将它代入 (2.10) 式中得

$$\begin{aligned}V_i^m &= D_m \left(\frac{\bar{r}_m}{r_m}\right)^3 \left[3\left(\frac{1}{3} - \sin^2\varphi\right)\left(\frac{1}{3} - \sin^2\delta_m\right) \right. \\ &\quad \left. + \sin 2\varphi \sin 2\delta_m \cos t_m + \cos^2\varphi \cos^2\delta_m \cos 2t_m \right]\end{aligned}\quad (2.18)$$

或写成：

$$V_i^m = \left(\frac{\bar{r}_m}{r_m}\right)^3 (G_0 H_0 + G_1 H_1 + G_2 H_2) \quad (2.19)$$