

海洋地球物理勘探手册

(上册)

地质矿产部海洋地质调查局

21414

海洋地球物理勘探手册

(上册)

黄兆熊等 译

焦荣昌等 校

SY37/34

SY37/03



地质矿产部海洋地质调查局情报资料室

一九八五年十月

内部发行 (总第20期)

编辑: 海洋地质调查局情报资料室

出版: 地质矿产部海洋地质调查局

地址: 上海市延安西路526号

印刷: 江苏省丹阳文教印刷厂

100

编 者 的 话

本书是美国科学研究协作委员会(CRG)海洋科学系列丛书之一的“海洋地球物理勘探手册”一书的全译本。它反映了当今世界从事海洋地球物理调查包括油气勘探,海底底质和工程地质等项调查的地球物理工作的技术发展水平。以地震方法为主,兼有定位、测深,大地电磁、重力等方法。有的从仪器设计要求到资料处理至最终地质解释的作业过程都做了概括的介绍和说明。

二十多年来,我国的海洋地质调查工作经过艰辛的创业与开拓,目前也已初具规模。我们已经基本具备并且掌握了下列现代化装备与技术:综合卫星导航保证海洋定位的精度提高到百余米范围内,回声测深、旁侧声纳地层剖面等地震声学设备能够提供海底地形、地貌的详细资料,核子旋进磁力仪在海洋上的连续测量精度以交点误差衡量可达 ± 8 伽玛,船舷重力仪能实现1—2毫伽范围的连续重力观测,采用现代计算技术对重磁资料进行正反演计算,结合地震反射与地震测深的结果,将能探讨沉积盆地的形成与演化历史,高分辨地震工作能发现海底疏松沉积中天然气的聚集和探测工程地质和灾害地质方面的问题,瞬时浮点数字地震仪具有高达100分贝以上的动态范围和4,200分贝/秒的增益跟踪速度,能够记录作业过程中的各项信息,再通过电子计算机的反复处理,可以卓有成效地用来确定各种背斜、穹窿、潜山、断裂、断块等地质构造。总之,这一系列的地球物理勘探方法和技术的发展已经为我国海洋地质工作提供了有力的调查手段。毫无疑问,这本《海洋地球物理勘探手册》可以作为我国海洋地质调查工作发展相应技术手段的参考和借鉴。

本书除了可供海洋地质工作的各类专业人员参考使用外,还可供陆上各油气勘探部门,地质矿产调查部门的地质学家、地球物理学家、地球化学家们参考,可供地质及石油院校有关专业师生教学的参考。

由于书中各个部分基本上是彼此独立呈单篇文章出现的,因此各篇文章自成系统,横向联系很少。所以,在习惯用语,文理爱好有各自的特点和偏颇,翻译时力求维持原意,但用词上可能略有差别。例如,Array一词,有的章节中译成“阵列”,有的译成“组合”,有的又译成“排列”等,又如Hydrophone一词,有的章节中译成“水听器”,也有的章节中译成“水下检波器”,有的就简译为“检波器”,但联系它的前后词句,读者可体味出笔者的含意。这样,在统一校核时,我们就不强求一律而可根据不同场合进行选用。

鉴于本书篇幅过长,我们决定将本书分为上下二册出版。上册包括第一部分,下册包括第二、第三部分。

参加本书翻译和校核工作的人员有:黄兆熊、焦荣昌、高德章、潘秋霞、张怡志、朱海、李言经、邬庆良、尹文荣、姚正和、张留琴、康继本、马建德、贺稀林、刘万国、方正、朱景尧、汪源、傅妮莉、李维显、徐尚武。全书译文最后由焦荣昌统校定稿。由于译校者水平所限,疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

序 言

海洋地球物理勘探的许多问题中牵涉到的学科领域是相当广泛的，但可划分成两大类，即（a）一类是位场的方法，例如，重力、磁力、电测以及大地电磁的方法；（b）另一类是建立在弹性波理论基础上的方法，藉助声波和地震波的激发、传播、接收和显示，研究它们通过海水进入未固结的和已固结的洋底沉积的情况。

每种方法的成功应用要依据对所调查的介质的这一基本物理特性的测定能力而定，所指的这些参数有如重力法中的密度、磁法中的磁化率、电法及大地电磁法中的电阻率/电导率，地震法中的速度与声波阻抗特性等。实际上，对海底之上、之中或之下须要研究的某些专门问题的解释，纯粹的或者应用科学方面，解决的成功程度取决于要研究的地质目的层位与其围岩之间的物性差异。

为了解决所要调查的问题，对进行调查地点精确定位是首先要解决的，否则就谈不上解决什么问题。因此，精确的导航定位是非常必要的，尤其是在没有陆标的公海地区。所以，我们把提供精确导航定位的卫星作用的详细描述摆在本书最前面的一章，那就不奇怪的了。

位场方法和地震声波方法这两大类方法又可进一步划成两个亚类，为了讨论上的方便，把它分成：（1）在海洋环境下获取资料的专用仪器和设备的设计；（2）能有效地用于对海洋地球物理勘探结果进行可靠解释的理论和应用技术的开发。这样，在应用它们了解海洋地质构造、组分、发展史以及探查海底上及海底下各类资源时，更便于人们对海洋各种现象和过程的理解。还要强调的是，这样所获得的许多资料也可用于帮助解决除海洋外占地球面积百分之二十一，可以从陆地上进行研究的一些科学问题。

为本书各章编写海洋地球物理的最新成果，基本的和应用的研究结果以及工作方法的单位有科学院的，政府部门和工业团体。它们各自都有其特长并提供为大家所共享的重要资料。这三个部分都是很受欢迎并达到了本书的要求目的，以工作实例形式给出的资料也包括在内，因为它提供了解决各种方法所应解决的问题，地貌问题，海洋地质区问题的完整途径的例子。本书中还着重强调了地震声学方法。因为不管是纯粹的或者是应用的海洋地球物理工作，该法都已经并将继续占主导地位。此外，在解决区域性的和局部性的地球物理和地质问题的广度和深度方面，它都展示了比位场方法有较大的优越性。

专用仪器和设备系统的设计也是要着重强调的，这是因为在海上会遇到的特殊灾害条件。在海上进行调查与在陆上进行调查截然不同，前者开阔、工作效率高得多。例如，在陆上进行地震调查时，检波器电缆，不能象海上那样连续地进行移动作业，电法和大地电磁法测量有与之相同的情况，而重力和磁法则差别较少。磁法能在陆上作低高度的航磁。重力测量也可以在陆上进行连续测量，不过，如果要想得到精确的结果，常受公路交通的限制。

许多国家都从事海洋地球物理研究和作业活动。因此，我们曾致力于尽可能的有世界大洋各个国家和地区的代表参与此书提供情况，所以，本书的各个章节是由埃及、加拿大、联合王国（英国）以及美国的科学家们编写的，与此相似，这些章节包括了在大西洋、太平洋既有浅海区（大陆架）也有较深的水域，有墨西哥湾、阿拉斯加湾和苏伊士湾所做的研究工

作和方法作业的成果。

安排这三个独立的部分是要给出：(a)对主要工作的地球物理方法作一般回顾，这些方法用来获得精确的资料，并对这些海洋地球物理勘探结果作出确定性的解释，(b)对特殊的装备，为了取得必须的精度要求提供特殊的资料信息，例如在非常困难的海况条件下诸如压力，腐蚀效应和快速的海水流动情况下开展工作。如前已述，这第三部分是工作实例，它包括区域性的研究，给出对特殊问题求解的完整性的分析方法。

各个部分有专门章节以描述最新的研究成果和作业技术的成果，这些都会明显地改进资料采集、资料解释和显示过程，这些工作成果会逐步有助于对理论上和应用上的一直在增加着的广泛的问题的解决，这样，就能对海洋地质知识的更好了解，从而在那里探寻更多所需要的资源。

理查德 阿·盖耶

目 录

編者的話

序 言

第一部分 通论

人造卫星对海洋地球物理勘探的贡献.....	1
海上地震数据采集.....	64
单通道、高分辨率的地震反射剖面法(基本原理和勘探手段的回顾).....	72
墨西哥北部海湾大陆架和大陆坡构造及地质灾害和工程地质条件.....	108
海底冻土的地球物理探测.....	145
海底声学分类.....	161
洋底测震术.....	166

人造卫星对海洋地球物理勘探的贡献

M · A · Khan

我们行星的最有趣的特点之一是，在它的 5.1×10^{14} 平方米总面积中，只有约 1.48×10^{14} 平方米是陆地，余下 3.62×10^{14} 米²或面积的71%是海洋。这样辽阔的海洋区域的资源的探查、成图和编录提出了大量的课题。这不仅由于所述及区域的辽阔，而且还由于所期望的地质和地球物理方面的多样性和资源的丰富。尽管最近的努力和推进，我们对海洋潜力和远景的了解只是建立在小的，分散的采样上，大部分海区尚未探查，这是由于它的辽阔、精巧、昂贵和麻烦的技术，承办这种探查的财政上和后勤的耗费，我们有限的海洋环境的知识，以及，直到最近，我们有限的海洋技术能力。

最近廿年，用于科学研究的人造地球卫星的出现在海洋科学中（事实上，同样在别的学科中）开辟了新的前景，也提出了新的课题。卫星无疑地减少了海洋勘探所需要的巨大的财政开支，而更重要的是，它本质上解决了采样和定位的困难问题，对于进行连续的、全球范围的各种可能有的海洋资源的同时成图，几乎指数般地减少了探查资源的财源需要，并且对海洋技术的发展作出巨大的贡献。

当然，在包括海洋勘探的科学考察上还存在卫星寿命的重要的附加影响。由于他的科学任务的全球性和多样性，对于来自高度专业化和各自独立的科学世界的各种部门的信息和重要的、互相补充的部份进行综合，卫星技术在引导我们进入这全球性跨学科的研究方面已经作出了贡献。

假如卫星带有专用的科学仪器部件，这些仪器是用于测量专门的物理参数的，卫星是主动的，反之是被动的。被动卫星只作为空间的瞬时参照点，这些位置的测量用在位于空间或地面上任何地方的追踪和数据采集系统中。

大多数卫星应用需要确切知道卫星在空间的位置。卫星位置可以用摄影、光电的、激光、或者别的电子追踪系统来追踪确定它，这些追踪系统多半是在地面上。一个卫星可以是完全被动，或者发出一种光学信号帮助摄影和光电追踪，带有为激光追踪的反射器以及一般地带有为别的电子追踪设备的发射部件。

卫星在地球物理学和海洋学、大地测量学中的使用习惯上分成动力的和几何的。动力的使用处理作用在轨道中卫星上的力，企图通过观察在力影响下卫星的行为来测定这些力；几何的技术在专门的地面点——一般是追踪站的几何定位中把卫星作为空间的瞬时参照点使用。然而，动力的技术也解决追踪站位置一类几何量，几何的技术必须处理象大地水准面高度一类动力量。在若干最新的使用中，一个卫星可用于若干参数或特性的就地成图或照相，这类使用可归类为简要的，可以是几何的，动力的或者两种性质，这样，划归到动力的或者几何的是不明显的，由于兼顾了两类的新的卫星技术的迅速发展，它变得更不明显。

这篇论文，限于它所定的范围，将只描述卫星对海洋科学许多重要贡献中的一小部份，进而言之，它只集中在这些贡献中在海洋科学中传统上不是清楚了解的方面。

卫星轨道摄动的地球重力场

在地球物理学和海洋学中卫星的主要动力学贡献之一是从人造地球卫星的轨道运动测定地球重力场，尤其是它的长波成份。这种使用，当然不只限于海区，同样用于大陆区，然而，由于海洋重力测量控制区比大陆稀少得多，它在海区的使用价值特别提高了。根据这种观点，卫星在获得海区重力场的长波分量方面作出了重要贡献。

重力矢量是重力位的梯度，重力位 U 是地心引力位 V 和地球自转位的和。自转位是简单的解析函数，在点 (r, ϕ) 的值可用公式 $\frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2 \phi$ 计算，其中 ω 是地球自转的角速度。这样，测定地球重力场的问题就归结为测定地球表面的 V 的问题，事实上从卫星轨道分析中测定的就是引力位 V 。

轨道要素

因为卫星在围绕地球的轨道中的位置其中取决于地球的万有引力 V ，假如地球人造卫星的位置作为时间的函数是知道的话，原则上是能够测定的。能确定卫星在空间的位置，作为时间的函数的量就称为轨道要素。这些图示在插图1中。图中XYZ是惯用坐标系，原点在地球质量中心，它的Z轴和地球旋转轴重合，X—Y平面和赤道平面重合，它的X轴指向春分点—赤道平面和黄道的交点。这个坐标系可以根据目标或与瞬时方向或者平均方向相匹配。轨道面和赤道平面的交点叫节点，卫星向北横穿赤道面的交点叫上升点，向南穿过赤道面的交点叫下降点，连接这些交点的直线称为节点线。轨道大小由它的长半轴 a 来决定，它的形状由它的偏心率 e 来决定，X轴（指向春分点）和节点线之间的夹角叫上升点的正升值，用 Ω 表示，它按逆时针方向度量并且确定轨道面在空间的位置。赤道面和轨道面的夹角

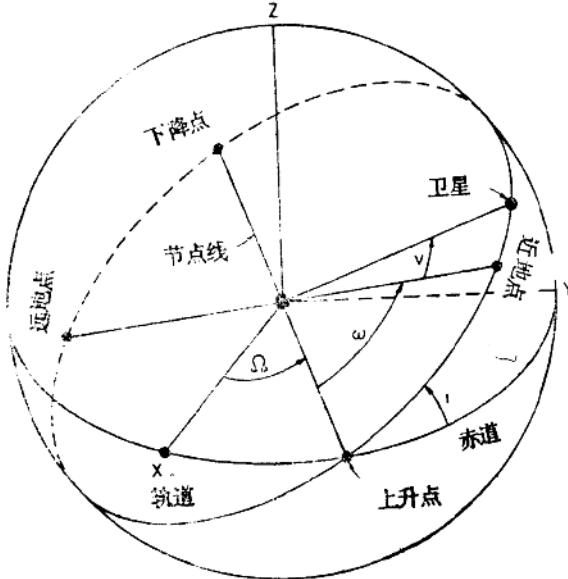


图1 卫星在空间的位置

叫倾角*i*，它确定了轨道面在空间的倾向，倾角在0到π间，当0 ≤ *i* ≤ π/2，轨道称顺行，当π/2 ≤ *i* ≤ π，就称逆行。轨道主轴与轨道椭圆相交于两个点，其中卫星和地球最接近的点叫近地点，最远的点叫远地点。轨道在轨道面中的方位用节点线和轨道主轴的夹角确定，它称近地点幅角，用ω表示。卫星在轨道中的位置用相对于近地点的时刻已确定。这六个轨道要素完整地确定了卫星在给定时间的空间位置。

原理

假如地球是一个均匀球体，它的引力位将是

$$V = \frac{GM}{r}$$

其中，*r* = 径向距离，*G* = 引力常数，*M* = 地球质量。围绕这样一个地球的卫星轨道那么将是椭圆，并设运动在真空中进行。在这轨道上的卫星的运动可用在有心力场中运动的开普勒定律来描述。进一步说，轨道椭圆将不随时间变化，确定轨道的轨道要素*a*、*e*、Ω、*i*、ω和τ将不随时间变化。而地球引力位不象均匀球体那样，它是下列形式：

$$V = \frac{GM}{r} + R \quad (1)$$

其中，*R*是由于地球的非球形对称引起的摄动势，它表示了重力场相对于球体引力的中心项的不规则性。因为它比中心项小，它的影响可以迭加到中心项上。因而，卫星轨道仍可看作是椭圆，而它不是长期不变的，由于*R*的摄动影响，它连续地变化。在某一给定时间，在该瞬间描述卫星轨道的瞬间椭圆仍可用特有的一组开普勒要素来表示，在紧接的一瞬间，卫星的位置可以在这些要素中引进微小的变化来描述。这样，轨道要素是连续变化，在轨道要素中相对一些参考轨道要素的变化称为摄动。使我们能够测定地球重力场变化的就是这些摄动。

摄动势*R*和卫星轨道要素随时间变化之间的关系可以用运动的拉格朗日方程来表示。

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i} \\ \frac{di}{dt} &= \frac{1}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \left(\frac{\partial R}{\partial \omega} \cos i - \frac{\partial R}{\partial \Omega} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{-\cos i}{na^2 \sqrt{1-e^2} \sin i} \frac{\partial R}{\partial i} + \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e} \\ \frac{da}{dt} &= \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M} \\ \frac{de}{dt} &= \frac{1-e^2}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial M} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial \omega} \\ \frac{dr}{dt} &= \frac{1-e^2}{na^2 e} \frac{\partial R}{\partial e} + \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a} \end{aligned}$$

上述方程式中, \bar{m} 量是平均运行量, 定义为 $\bar{m} = \frac{2\pi}{T} = \left[-\frac{GM}{a^3} \right]^{1/2}$, 其中T是卫星完成一个循环所需时间, 别的符号同以前说明。平均运行量 \bar{m} 与另一个称为平均异常的量M有关, 即 $M = \bar{m}(t - \tau)$, 其中t是时间, τ 在前面已定义过。有时上面公式组(2)中最后一个表达式可用变量M的表达式来替代, 所以

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \bar{m} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial u}{\partial \phi} \frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial t}$$

这可以从上面对M变量的定义和(2)中最后一个表达式直接得到。

函数R在公式(2)中最初形式是总扰动函数而对这篇论文我们的目的而言, 我们可以用摄动势R来代替。

摄动势R可以被展开为球面谐函数形式, 所以,

$$R = \left(\frac{GM}{r} \right) \left[\sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \right] \quad (3)$$

其中, a_e = 地球的赤道半径

(γ, ϕ, λ) = 计算R的点的球坐标

$P_{nm}(\sin \phi)$ = 有关的拉格朗日函数

C_{nm}, S_{nm} = n次和m阶的球面谐系数G, M量已在前面说明。

$m=0$ 时的球谐函数叫带状的, $m \neq 0$ 的称为镶嵌的, $m=n$ 的镶嵌谐函数称为扇形的。带状谐函数与经度无关, 镶嵌谐函数定义了与经度的依赖关系。

公式(3)中n累加到 ∞ , 而实际上它必须在某一合理的波长截断。要注意的是 $n=1$ 和 $m=0, 1$ 的项在公式(3)中缺失, 这是因为我们坐标系的原点和地球质心相重合, 这样就使系数 C_{10}, C_{11} 和 S_{11} 为0。此外, 假如使坐标轴和惯性主轴重合, C_{21} 和 S_{21} 也可使之成为0。

为进一步展开, 公式(3)中R球谐函数表达式必须用轨道要素来表示。这种变换虽然不复杂, 但相当冗长。得到:

$$R_{nm} = \frac{GM a_e^n}{a^{n+1}} \sum_{p=0}^n F_{nmp}(i) \sum_{q=-m}^{+m} G_{npq}(e) Z_{nmpq}(\omega, M, \Omega, \theta) \quad (4)$$

$$R = \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n R_{nm}$$

这里, θ 是格林威治恒星时, 函数 $F_{nmp}(i)$, $G_{npq}(e)$ 和 $Z_{nmpq}(\omega, M, \Omega, \theta)$ 用下式定义:

$$F_{nmp}(i) = \sum_t \frac{(2n-2t)!}{2^{2n-2t}(n-m-2t)! n!} \binom{n}{t} \sin^{n-m-2t} i \sum_{s=0}^m \binom{m}{s} \\ \cdot (-1)^k \cos^s i \sum_c \binom{n-m-2t+s}{c} \binom{m-s}{p-t-c} (-1)^c$$

其中各种变量累加指标在下面定义:

P—累加 $0 \leq P \leq n$

C—累加

$$\left. \begin{array}{l} p-t < m-s, 0 \\ p-t > m-s, p-t-m+s \end{array} \right\} < c < \left[\begin{array}{l} n-m-2t+s, p-t > n-m-2t+s \\ p-t, p-t < n-m-2t+s \end{array} \right]$$

t—累加: $0 \leq t \leq \begin{matrix} p, p \leq k \\ k, p \geq k \end{matrix}$

函数 $G_{npq}(e)$ 必须分别对长周期和短周期项定义, 对长周期项, 它有 $n-2p+q=0$ 或 $q=2p-n$, 这样, 对长周期项

$$G_{np(2p-n)}(e) = \frac{1}{(1-e^2)^{n-1/2}} \sum_{d=0}^{p'-1} \binom{n-1}{n+2d-2p'} \binom{n+2d-2p'}{d} \left(\frac{e}{2}\right)^{n+2d-2p'}$$

其中 $p' = p$ 当 $p \leq \frac{n}{2}$ 和 $p' = n-p$ 当 $p \geq \frac{n}{2}$

对短周期项, G_{npq} 的展开变得稍许复杂, 而最终表达式为

$$G_{npq}(e) = (-1)^q \left[1 + \frac{e^2}{(1+\sqrt{1-e^2})^2} \right]^n \left(\frac{e}{1+\sqrt{1-e^2}} \right)^q \sum_{k=0}^{\infty} P_{npqk} \\ \cdot Q_{npqk} \left(\frac{e}{1+\sqrt{1-e^2}} \right)^{2k}$$

其中 $P_{npqk} = \sum_{r=0}^h \binom{2p'-2n}{h-r} \left[\frac{(n-2p'+q')(1+\sqrt{1-e^2})}{2} \right]^r \frac{(-1)^r}{r!}$

$$Q_{npqk} = \sum_{r=0}^g \binom{-2p'}{g-r} \left[\frac{(n-2p'+q')(1+\sqrt{1-e^2})}{2} \right]^r \frac{1}{r!}$$

函数 $Z_{nmpq}(\omega, M, \Omega, \theta)$ 由下式给出

$$Z_{nmpq}(\omega, M, \Omega, \theta) = \begin{cases} C_{nm} & n-m \text{ even} \\ S_{nm} & n-m \text{ odd} \end{cases} \cos[(n-2p)\omega + (n-2p+q)M \\ + m(\Omega - \theta)] \\ + \begin{cases} S_{nm} & n-m \text{ even} \\ C_{nm} & n-m \text{ odd} \end{cases} \sin[(n-2p)\omega + (n-2p+q)M \\ + m(\Omega - \theta)]$$

公式(4)中摄动势代到公式(2)中, 在进行适当的微分步骤后得出:

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega_{nmpq}}{dt} &= \frac{GMa_e^n F'_{nmp} G_{npq} Z_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3}(1-e^2)^{1/2} \sin i} \\ \frac{di_{nmpq}}{dt} &= \frac{GMa_e^n F_{nmp} G_{npq} Z'_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3}(1-e^2)^{1/2} \sin i} [(n-2p) \cos i - m] \\ \frac{d\omega_{nmpq}}{dt} &= GMa_e^n \left[\frac{(1-e^2)^{1/2}}{e} F_{nmp} G'_{npq} - \frac{\cot i}{(1-e^2)^{1/2}} F'_{nmp} G_{npq} \right] \frac{Z_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3}} \\ \frac{da_{nmpq}}{dt} &= \frac{2GMa_e^n F_{nmp} G_{npq} Z'_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3}} (n-2p+q) \\ \frac{de_{nmpq}}{dt} &= \frac{GMa_e^n F_{nmp} G_{npq} Z'_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3} e} [(1-e^2)(n-2p+q) - (1-e^2)^{1/2}(n-2p)] \\ \frac{dM_{nmpq}}{dt} &= \frac{GMa_e^n F_{nmp} Z_{nmpq}}{\bar{n}a^{n+3}} \left[2(n+1)G_{npq} - \frac{1-e^2}{e} G'_{npq} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

上述方程组提供了由摄动势 R 的 R_{nmpq} 一项的轨道要素的时间变化率, 在这些方程式中, \bar{M} 表示平均异常的摄动, 所以

$$\bar{M} = \int_0^t \bar{n} dt - \bar{n}(t-\tau)$$

$$F'_{nmp}(i) = \frac{dF_{nmp}}{di}$$

$$G'_{npq}(e) = \frac{dG_{npq}}{de}$$

和 Z'_{nmpq} 是 Z_{nmpq} 对于它自变量的导数。

公式(3)(4)(5)表示了轨道要素的时间变化率与势函数 C_{nm} 和 S_{nm} 的关系。因为实际上我们观察在伸展周期的这些时间变化率,我们将公式(5)对时间进行积分,得到下列表达式:

$$\begin{aligned} \Delta \Omega_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{F'_{nmp} G_{npq} \bar{Z}_{nmpq}}{\bar{n} a^{n+3} (1-e^2)^{1/2} \sin i [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \\ \Delta i_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{F_{nmp} G_{npq} [(n-2p)\cos i - m] Z_{nmpq}}{\bar{n} a^{n+3} (1-e^2)^{1/2} \sin i [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \\ \Delta \omega_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{[e^{-1} (1-e^2)^{1/2} F_{nmp} G'_{npq} - \cot i (1-e^2)^{-1/2} F_{nmp} G_{npq}] \bar{Z}_{nmpq}}{\bar{n} a^{n+3} [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \\ \Delta a_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{2F_{nmp} G_{npq} Z_{nmpq} (n-2p+q)}{\bar{n} a^{n+3} [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \\ \Delta e_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{F_{nmp} G_{npq} Z_{nmpq} [(1-e^2)(n-2p+q) - (1-e^2)^{1/2}(n-2p)]}{\bar{n} a^{n+3} e [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \\ \Delta M_{nmpq} &= GMa_e^n \frac{F_{nmp} \bar{Z}_{nmpq} [2(n+1)G_{npq} - (1-e^2)e^{-1} G'_{npq}]}{\bar{n} a^{n+3} [(n-2p)\dot{\omega} + (n-2p+q)\dot{M} + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta})]} \end{aligned}$$

$\bar{Z} = Z$ 对于它的自变量的积分

上述展开式最早由考拉提供,凯恩和英拉作了进一步的讨论。

球谐重力势系数的确定

带状系数

要全部逐字地写出公式(5)或(6)的代数形式是十分麻烦和冗长的。然而,在简化式上,可发现轨道要素中最大的摄动是由带状谐函数的长期的和长周期的影响引起,尤其发现偶带状谐函数系数产生 Ω 、 ω 和 M 的长期变化和 e 、 i 的长周期变化,奇带状谐函数系数产生 Ω 、 ω 、 i 、 e 和 M 的长周期变化。而在 $\Delta\Omega$ 和 $\Delta\omega$ 表达式中,奇带状谐函数系数表现为小因子 e 的倍数,它减弱了它们的长周期的影响。这样, Ω 和 ω 的主要摄动是偶带状谐系数的长期影响。在 Δe 、 Δi 表达式中,偶带状谐系数表现为小因子 e 的倍数,它按比例地减少了 e 和 i 变化的长周期影响。这样, e 和 i 的主要摄动是奇带状谐系数的长期影响。因此,偶带状谐系数一般根据 ω 和 Ω 的长期摄动测定,而奇带状谐系数一般由 e 和 i 的变化测定。

上面的讨论说明了我们称为的线性摄动,而摄动势的特性之一是二次带状重力势系数 $C_{2,0}$,它是别重力势系数的大约 10^3 倍。这样 $C_{2,0}^2$ 大约等于 $C_{4,0}$,所以包含 $C_{2,0}^2$ 、 $C_{2,0}C_{3,0}$ 、 $C_{2,0}C_{4,0}$ 等因子的非线性项引起的摄动也必须加以考虑。实际上有一些说明非线性摄动的方法,这些方法的细节在本文中不提供,对于非线性摄动势的详细论述请参阅 Brouwer 和 Clemence 或者 Kaula 的文献。

镶嵌系数

镶嵌谐系数产生短周期摄动。对公式(5)或(6)的详细的考核表明短周期变化是由

带有 $m(\Omega - \dot{\theta})$ 的频率的所有项引起的。一个 m 阶镶嵌系数将产生每天 m 周期的振动，这样，阶 $m = 1$ 的镶嵌谐系数的最长期是1天。所以在分析中使用的计算方法和卫星弧必须对适当的短周期振动是足够灵敏的。

从公式(5)或(6)中可以看到，重力势系数取决于 i 。因此，为保证观察方程式的相互独立性，使用倾斜度变化大的卫星的资料是重要的，此外，资料在时间上必须相当均匀地分布。

特殊问题

假如倾斜度 i 和偏心率 e 很小，在这种情况下， Ω 、 ω 、 M 的确定可能是困难的。假如卫星运行处于和选择的球谐系数的谐振中，或者当倾角 i 和临界倾角($i = 63^\circ 26'$)很接近或相等，特殊的问题可能出现，这些能够用专门的设计的技术来解决，如看参考资料3和那儿引用的文字部份。

其它的振动来源

到目前为止我们已经考虑了由振动势 R 引起的振动，然而尚有一些产生轨道要素振动的因素，它们的影响必须识别和说明。这类因素中最主要的是大气阻力，日一月效应，太阳的幅射压力等。在实际的计算方案中，这些需要用模拟或者用别的方法说明。

实际计算程序的评述

以上叙述提供了振动势各个分量和轨道振动关系的分析基础。在数据的处理和准备中以及观察方程和变差方程的解释中，实际计算程序需要采用数值计算和统计的先进技术，它们从数学分析理论到运行的微分方程的数值积分，后者提供的结果用于精确的模拟参数所需要的微分改正量计算中。镶嵌谐系数的复原通常连同追踪站座标以及其它测地参数一起进行，这就需要掌握大量的资料，导致了大量计算时间和计算存储的需要。在这些程序中，需要特别注意的问题是公式(3)中给出的球谐函数数列的截项，轨道弧的长度和站座标的原点、方位和比例。通过掌握这些资料的实践取得的见解在处理这些和另一些问题时常常是有益的。

综合解法

由于势随着高度的衰减和重力势系数随着级次增加而渐渐减小，卫星轨道对高次项不是很灵敏的，除了特殊状况(如谐振)以外。这样，卫星轨道数据更适合于回收地球重力场的长波部分。另一方面，地面重力资料对高次项成份灵敏，因此，它们被利用来和卫星轨道资料结合扩大回收的频率范围。依据卫星和地面重力资料两者的重力模式就称为综合模式。最近，综合模式也利用卫星测高资料、它也包含了高次项成分的有用信息。

主要的重力模式发展成果

卫星轨道的地球重力场球谐函数模式发展的主要成果，一开始包括欧洲的King—Hele和Cook，以及美国的Kozai, Iszak, Anoleile, O'Keefe, Kaula, Guier和Newton。由于卫星资料的积累和重力模式增长的规模要求大量计算时间和人人力资源的支持，美国的成果已主要地转到局限于Smithsonian宇宙物理观察台和NASA的Goddard空间飞行中心，以及与防御有关的使用海军地面武器中心。这些成果的主要焦点是得到依据卫星和地面重力资料的两者优势的综合重力场模式。在最近十年中，这些模式的总精度和频率范围方面已有很大的进展。在这阶段一般认为重力场的长波部分能较好地确定到 $n = 14$ 。

一种最新的综合模式是GEM10B，由罗茨等人建立。它除了利用卫星轨道和地面重力

资料外，还用了卫星测高资料，它完成到 $n = 36$ 次和 $m = 36$ 阶，这意味着小于约550公里的特征的影响（在赤道）不反映到重力场现象中，而较大的特征则反映出来。

表1列出了GEM10B中的球谐系数 C_{nm} 和 S_{nm} 直到36, 36。图2表示了这些系数的作为频率函数的精度的近似水平。表2列出了GEM10B系数的能谱和它们的估计误差。注意在图2和表2中，这些估计仅提供到 $n = 22$ ，这是因为和估价的GEM10B比较的标准只可利用到 $n = 22$ ，进而言之，它所比较的标准本身可能自身存在某些误差，尤其在高次项中，因而，这儿引用的误差仅仅是估计误差。另外，注意到系数 C_{10} 、 C_{11} 和 S_{11} 被调到零，对系数 C_{21} 和 S_{21} 作的估计仅仅用于度量低次项系数的误差。

大地水准面起伏和重力异常

一旦系数 C_{nm} 和 S_{nm} 被确定，大地水准面起伏和重力异常就能容易地计算出。

重力异常 g 由下式得出：

$$g = \left(\frac{GM}{a_e^2}\right) \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r}\right)^{n+1} (n-1) (\delta C_{nm} \cos m\lambda + \delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (7)$$

而大地水准面起伏 N 由下式得出。

$$N = \left(\frac{GM}{a_e^2}\right) \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r}\right)^{n+1} (\delta C_{nm} \cos m\lambda + \delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (8)$$

其中

δC_{nm} = 观察的 C_{nm} —参考的 C_{nm}

δS_{nm} = 观察的 S_{nm} —参考的 S_{nm}

在这些方程式中，参考量 C_{nm} 和 S_{nm} 定义了参考图。通用的参考图是一个旋转椭球，由于这种椭球的轴或旋转的对称性，所以它的所有 $C_{nm} = S_{nm} = 0$ （当 $m \neq 0$ ）。另外，由于它的赤道对称性，所以它的奇带状谐函数是零，这样留下来的只有偶带状谐函数。其中，六次或更高次的系数在第二阶理论中很小并可忽略。这样，参考椭球实际上只由二次和四次带状谐函数定义。因此公式（7）和（8）中所有的 δC_{nm} 和 δS_{nm} 等于对应的观察系数，除了 δC_{20} 和 δC_{40} 以外，它们则是相应的观察值和参考值的差值。

注意到卫星轨道理论中的摄动势 R 是与大地测量学和地球物理学中的扰动势是不同的，在轨道理论中， R 是关于球体引力中心项的不规则，而在测地学和地球物理学应用中，干扰势表示了附加在旋转椭球体或参考椭球体上的那些项。

根据表1提供的系数和调整到1980年大地水准参考系统（GRS80）的 C_{20} 和 C_{40} 所得到的大地水准面起伏和重力异常分别由图3和图4表示。它们提供了一张全球性的海区的长波长大地水准面和重力变化图（陆区同样）。由于海洋重力测量一般局限在地壳构造上的有意义的那些区域，而卫星取得的重力资料则第一次提供了一幅完整的海区重力形态，尽管是在相对低频范围。

表1 地球的重力模式 OE M10B^a 的标准球谐系数

n	m	C _{nm}	S _{nm}
2	0	-0.48416551D-03	0.0
3	0	0.95867438D-06	0.0
4	0	0.54111657D-06	0.0
5	0	0.68167394D-07	0.0
6	0	-0.15045905D-06	0.0
7	0	0.93775913D-07	0.0
8	0	0.50380844D-07	0.0
9	0	0.26875950D-07	0.0
10	0	0.52713709D-07	0.0
11	0	-0.47737609D-07	0.0
12	0	0.39140038D-07	0.0
13	0	0.42947460D-07	0.0
14	0	-0.23215176D-07	0.0
15	0	0.25416043D-08	0.0
16	0	-0.62210036D-08	0.0
17	0	0.15687650D-07	0.0
18	0	0.10402509D-07	0.0
19	0	0.17376701D-08	0.0
20	0	0.24493175D-07	0.0
21	0	-0.88998884D-09	0.0
22	0	-0.39052695D-08	0.0
23	0	-0.20440900D-07	0.0
24	0	-0.13466914D-08	0.0
25	0	0.43540233D-09	0.0
26	0	0.18624153D-08	0.0
27	0	0.64896289D-08	0.0
28	0	-0.14464851D-07	0.0
29	0	-0.66105453D-08	0.0
30	0	-0.16060110D-08	0.0
31	0	-0.70988293D-09	0.0
32	0	-0.71650235D-08	0.0
33	0	-0.37622261D-08	0.0
34	0	-0.74545822D-08	0.0
35	0	0.92526737D-08	0.0
36	0	-0.35266714D-09	0.0
2	1	0.97058783D-09	-0.15398455D-10
3	1	0.20310057D-05	0.25346868D-06
4	1	-0.53315357D-06	-0.47316396D-06
5	1	-0.54424306D-07	-0.95999204D-07
6	1	-0.76961200D-07	0.26640402D-07
7	1	0.27402457D-06	0.98011475D-07
8	1	0.27704665D-07	0.50795815D-07
9	1	0.15230509D-06	0.15903089D-07
10	1	0.79394909D-07	-0.12952320D-06
11	1	0.58660808D-08	-0.15778261D-07
12	1	-0.56504103D-07	-0.49494914D-07
13	1	-0.46147243D-07	0.34909745D-07
14	1	-0.17307032D-07	0.32504658D-07
15	1	0.69557499D-08	0.36183436D-08
16	1	0.30058165D-07	0.13989032D-07
17	1	-0.32606451D-07	-0.27289235D-07
18	1	-0.23406836D-08	-0.21494255D-07
19	1	-0.28411719D-07	0.40981065D-08
20	1	0.13019021D-08	-0.12800117D-07
21	1	-0.35608928D-07	0.31656204D-07

a——符号D-xx指的是10^{-xx}单位, 即D-07=10⁻⁷