

地面参照系的 现代定向理论 和 地球自转运动

陈俊勇 编著



测绘出版社

P183.5

CJY

地面参照系的现代定向 理论和地球自转运动

陈俊勇 编著

测绘出版社

107117

内 容 提 要

本书介绍了为建立和保持高精度大地参照坐标系的原理、现状和它的发展，论述了与大地参照系定向有紧密联系的地球自转运动的近代和现代理论，其中着重阐述了弹性地幔、不均匀地核这一现代地球模型及莫洛琴斯基（Molodensky）和瓦尔（Wahr）对地球自转运动的解算原理。

本书可供大地测量、地球物理、地球动力、地震和天文等专业的科技人员及高等院校有关专业的师生参考。

地面参照系的现代定向 理论和地球自转运动

陈俊勇 编著

*

测绘出版社出版

北京顺义牛栏山一中印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

*

开本 787×1092 1/32 · 印张10.25 · 字数223千字

1991年6月第一版 · 1991年6月第一次印刷

印数0,001—1,000册 · 定价 11.00元

ISBN 7-5030-0060-0/P·20

前 言

本书是《地面参照系定向理论基础》(以下简称〔1〕)一书的续篇,但保持相对完整性,单独参阅本书也不会感到困难。〔1〕是经典理论,而本书则介绍了近代和现代的地球自转运动的理论,其中不仅涉及了地球自转轴的定向,包括进动(岁差)、章动和极移,而且也概述了地球自转速率变化的机制。本书着重介绍弹性地幔、不均匀地核这一现代地球模型和地球自转运动的关系。

本书在第一章中阐述了建立参照系的重要意义及其步骤,接下来介绍了两种参照系——地面参照系和惯性参照系的原理、现状以及它们的发展沿革,最后给出了这两种参照系之间的基本转换关系。这对读者了解参照系的各方面情况较有帮助。

第二章着重介绍了解析力学和弹性力学的主要概念以及旋转群的主要性质,后者是解析力学应用于地球自转运动时要涉及的专门数学知识。

第三章主要补充引潮力位和引力位的一些知识,这是在〔1〕的基础上加以扩充的。它对于现代地球模型的地球自转运动的公式推导是必要的。

这一章中还引入了由于地球形变而产生的附加离心力位和附加转动惯量的知识。此外本章还介绍了地球引力位与地球转动惯量、引潮力位间的关系,从而导入勒甫数*的概念。本章的最后,列出了与本书内容有关的地球的一些物理和几何

参数，这些参数的数值基本上都是引用目前国际组织正式承认的值。这些数值将给读者一个数量上的概念，特别是对以后公式推导的精度、某些量的作用大小等有一个定量的概念。

第四章分为两大部分。第一部分介绍弹性体在旋转坐标系中的运动方程，既给出了弹性体处于平衡状态时的方程，也给出了处于非平衡状态的方程。这是将弹性运动理论应用于地球自转运动的实际而给出的一系列具体公式。在本章第二部分中，首先给出地球本体的弹性运动方程，然后将该方程中的有关物理量，如位移矢量、体膨胀、弹性应力张量、重力位增量等转换为球谐函数表达式。这部分的理论和公式推导，主要是为本书第五章讨论地幔和地核的弹性运动作准备的，是第五章的理论基础。

第五章则应用第四章给出的弹性体运动方程，分别导出了地幔、地核的弹性运动方程及其微分形式。这是一切研究不同模型的地幔和地核的基础公式，实用性比较强。迄今为止，在这方面的研究基本上还没有超过这一范围。本章导出地幔、地核弹性运动方程时，一是采用了频率域转换技术，将各种物理量转换为球谐函数；二是采用了静态球近似，将地幔和地核都视作圆球（在以后必要时，加椭圆改正），将地幔、地核的应力和应变作为静力学范畴内的问题加以讨论；三是在推导过程中，有时用某些物理量的说明代替数学证明。这三方面的简化免去了冗长的推导和艰深的数学知识，却无损于读者对今后地幔和地核弹性运动方程的理解、掌握和应用。

* 勒甫数 (Lovés number) 曾译作洛夫数。

第六章是本书比较重要的一章，它环绕的一个中心问题就是如何解算在第五章中导出的地幔和地核的弹性运动的微分方程。解算微分方程中的关键问题是确定它的边界条件。因此 § 6.1 和 § 6.2 就是导出解算方程所必需的八个边界条件。本章用一定的篇幅介绍了瓦尔的解算方法。瓦尔关于推导地球进动、章动和极移的一系列解算结果，已得到了全世界的承认。因此，在 § 6.4 中介绍了瓦尔解算方法中所用弹性力学的一些专门知识，在 § 6.5 中则介绍了他的解算方法的思路。本章最后归纳性地介绍了从始至终都与本书有密切关系的两类参数即勒甫数与位参数，由于它们与本章内容联系最为密切，故放置于此处叙述。

第七章、第八章均介绍莫洛琴斯基地球自转运动方程及其解算。第七章重点在于导出莫洛琴斯基地球自转运动方程（一共十个偏微分方程式）。本章的推导是以适合波因卡地球模型（刚性地幔、匀质液核）的波因卡地球自转运动方程（一共六个偏微分方程式）为基础，再利用第六章的各种结果，引入表征莫洛琴斯基地球模型特征的地幔、地核弹性运动的四个广义变量，即地球和地核的四个惯性积。这样便于按本学科的历史发展，从近代到现代，从易到难，由简而繁地来理解地球自转运动方程的发展。此外，地球自转运动方程是解决涉及地球三轴定向的解析基础，因此重点采用物理说明的方法给出推算结果，非常简明，便于理解，因而给出的结果是严密的，而又避免了冗长的推导。

第八章是阐述莫洛琴斯基地球自转运动方程的解算，它是与第六章地幔、地核弹性运动方程的解算紧密结合进行的，是互为条件的。第八章着重介绍真正具有实用价值的近似解算（在规定精度下）方法，并将各种地球模型的解算结

果列表进行了比较。在第八章中引进了一个大地测量和地球物理中的重要参数，即品质因子。这使各种地球模型、在各种频谱时的解算结果，通过品质因子而相互联系起来。

第九章中导出了相应于莫洛琴斯基地球模型的地球三轴（自转轴 ω 、形状轴 F 、动量矩轴 H ）之进动、章动、极移的理论和实用公式。重点介绍了其中的受迫运动部分。

第十章首先介绍与负载有关的一些基本物理知识，特别是负载数及其和勒甫数的关系。然后介绍大气和海洋负载对地球自转轴指向变化的关系。

第十一章是介绍地球自转速率变化的机制。地球自转速率变化和自转轴指向变化在本质上是一个事物的二个表现形式。由于本书主要关心参照系的定向问题，因此，自转速率变化的情况及其机制只以一般介绍的形式在本书中出现，有助于读者对影响地球自转运动的作用因素及其机制的深入理解。

第十二章是本书结束语，作者从二个方面来加以小结，一是从五大作用因素，即日月引力、惯性、陆潮、海潮，大气对地球自转运动的影响及其互作用来加以归纳。二是从地球自转运动的谱分析，即从各周期变化来分析它们与外部及自身运动的联系。

作者试图通过这个小结对地球自转运动变化的机制及其规律作一个综合性的评述，以便于读者在繁杂的公式推导中对地球自转运动变化的规律和机制有一个较完整的印象和理解。

陈俊勇

1990年4月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 地面参照系	(1)
§ 1.1.1 模式和参照框架	(3)
§ 1.1.2 地面参照系的地面极和极移	(6)
§ 1.1.3 国际极移测量的沿革	(6)
§ 1.1.4 地面极的选定	(10)
§ 1.1.5 地面参照系的经度原点	(14)
§ 1.2 惯性参照系	(16)
§ 1.2.1 恒星——协议惯性参照系	(17)
§ 1.2.2 射电源——协议惯性参照系	(18)
§ 1.3 地面参照系和惯性参照系之间的转换	(20)
§ 1.4 地面参照系的今后发展趋向	(24)
第二章 预备知识	(26)
§ 2.1 解析力学原理	(26)
§ 2.1.1 广义坐标和动能	(27)
§ 2.1.2 哈密顿原理和拉格朗日方程	(32)
§ 2.2 旋转群	(40)
§ 2.2.1 旋转群的性质及其结构方程	(41)
§ 2.2.2 旋转群的微分形式不变性	(44)
§ 2.2.3 旋转群的生成元	(48)
§ 2.3 弹性力学概念	(53)
§ 2.3.1 弹性应变与应力	(53)

§ 2.3.2 弹性体运动方程.....	(58)
第三章 引潮力位和离心力位	(62)
§ 3.1 引潮力位和外力矩.....	(62)
§ 3.1.1 引潮力位.....	(62)
§ 3.1.2 外力矩.....	(65)
§ 3.2 附加离心力位和附加转动惯量.....	(68)
§ 3.2.1 离心力和附加离心力.....	(68)
§ 3.2.2 附加离心力位.....	(70)
§ 3.2.3 附加转动惯量.....	(72)
§ 3.3 地球引力位的二个关系式.....	(74)
§ 3.3.1 地球引力位和转动惯量的关系.....	(74)
§ 3.3.2 地球引力位和引潮力位的关系.....	(75)
§ 3.4 地球的某些物理和几何参数.....	(76)
第四章 地球的弹性运动方程	(81)
§ 4.1 弹性体运动方程的应用.....	(81)
§ 4.1.1 弹性体在旋转坐标系中平衡状态时的 运动方程	(81)
§ 4.1.2 在非平衡状态时的地球弹性运动方程	(84)
§ 4.2 地球弹性运动方程中有关量的球谐函数表达式	(93)
§ 4.2.1 地球弹性运动方程中有关量的坐标分量 表达式.....	(93)
§ 4.2.2 地球弹性运动方程中有关量的球谐函数 表达式	(98)
第五章 地幔和地核的弹性运动方程	(108)
§ 5.1 地幔的弹性运动方程.....	(108)

§ 5.1.1	静态球近似	(108)
§ 5.1.2	地幔的弹性运动方程及其不同表示形式	(110)
§ 5.2	地核的弹性运动方程	(117)
§ 5.2.1	地核的扰动位和地核的弹性运动	(117)
§ 5.2.2	地核弹性运动方程的微分形式	(120)
第六章	地幔、地核弹性运动方程的解算及其边界条件	(126)
§ 6.1	地幔弹性运动方程在地幔外边界的条件	(127)
§ 6.1.1	外部扰动位 E 和附加引力位 V_d 的改化	(127)
§ 6.1.2	函数 M 、 N 、 P 、 $\bar{R}$ 在地幔外边界的条件	(132)
§ 6.2	地幔、地核弹性运动方程在核幔边界的条件	(134)
§ 6.2.1	函数 H 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}$ 在核幔边界的条件	(134)
§ 6.2.2	函数 M 、 N 、 P 在核幔边界的条件	(136)
§ 6.3	地幔、地核弹性运动方程的一般解算方法	(142)
§ 6.4	球振荡和环振荡	(144)
§ 6.4.1	概述	(144)
§ 6.4.2	球振荡和环振荡的解析表达式	(147)
§ 6.4.3	球旋转和欧拉角的关系式	(151)
§ 6.5	地幔、地核弹性运动方程的现代解算方法——瓦尔方法	(152)
§ 6.5.1	瓦尔解算方法的原理	(152)
§ 6.5.2	瓦尔解算方法中的章动位移和形变位移	(156)

§ 6.6	勒甫数和位参数·····	(158)
第七章	莫洛琴斯基地球自转运动方程·····	(166)
§ 7.1	波因卡地球自转运动方程·····	(166)
§ 7.1.1	波因卡地球自转运动方程的推导·····	(166)
§ 7.1.2	波因卡地球自转运动方程的应用·····	(171)
§ 7.2	莫洛琴斯基地球自转运动的动能·····	(175)
§ 7.2.1	地球自转运动的速度分解·····	(176)
§ 7.2.2	地心坐标系和梯氏轴系中地球自转运动的动能·····	(178)
§ 7.3	莫洛琴斯基地球自转运动和地幔地核弹性运动的关系·····	(186)
§ 7.3.1	地球自转运动的转动惯量和动能的分量表达式·····	(186)
§ 7.3.2	附加转动惯量和地幔地核弹性运动的关系式·····	(188)
§ 7.4	莫洛琴斯基地球自转运动方程·····	(196)
§ 7.4.1	莫洛琴斯基地球模型中的外部引力位·····	(196)
§ 7.4.2	莫洛琴斯基地球自转运动方程·····	(200)
第八章	莫洛琴斯基地球自转运动方程的解算·····	(205)
§ 8.1	解算莫洛琴斯基地球自转运动方程的原理·····	(205)
§ 8.1.1	莫洛琴斯基地球自转运动方程的复数形式·····	(205)
§ 8.1.2	解算莫洛琴斯基地球自转运动方程的一般方法·····	(210)
§ 8.2	解算莫洛琴斯基地球自转运动方程的萨索方法·····	(213)

§ 8.3 解算莫洛琴斯基地球自转运动方程的近	
似方法	(216)
§ 8.3.1 地球自转为自由运动时角频率的特征	
根	(216)
§ 8.3.2 地球自转为受迫运动时 u 、 v 的解	(221)
§ 8.3.3 与其他地球模型解算 u 、 v 结果的比较	
及品质因子	(224)
第九章 地球三轴的进动、章动和极移	(230)
§ 9.1 章动坐标系 x''	(232)
§ 9.2 地球三轴的绝对和相对运动	(234)
§ 9.2.1 自转轴和形状轴的绝对运动	(235)
§ 9.2.2 自转轴和形状轴的相对运动	(238)
§ 9.2.3 动量矩轴的绝对和相对运动	(239)
§ 9.2.4 相应于莫洛琴斯基地球模型的地球	
三轴运动公式	(241)
§ 9.3 地球三轴的进动、章动和极移的受迫运动	
.....	(242)
§ 9.3.1 地球三轴进动、章动的受迫运动的	
计算公式	(243)
§ 9.3.2 地球三轴极移的受迫运动的计算公式	
.....	(249)
第十章 大气和海洋负载对参照系定向的影响	(253)
§ 10.1 负载效应和负载数	(253)
§ 10.1.1 负载效应	(253)
§ 10.1.2 负载数	(257)
§ 10.1.3 负载数和勒甫数的关系	(259)
§ 10.2 大气效应	(261)

§ 10.2.1	拉维勒方程的一般形式及其解算	··· (261)
§ 10.2.2	大气对于刚性地球极移的影响	···· (267)
§ 10.2.3	大气对于弹性地球极移的影响	···· (273)
§ 10.2.4	大气对极移影响的讨论	····· (278)
§ 10.3	海洋对地球自转运动影响的概述	····· (280)
第十一章	地球自转速率的变化	····· (282)
§ 11.1	日月对地球自转速率的影响	····· (283)
§ 11.1.1	弹性地球惯性张量的迹	····· (284)
§ 11.1.2	弹性地球自转速度的潮汐变化	···· (286)
§ 11.2	弹性地球的液核对地球自转速率的影响	····· (291)
§ 11.3	大气对地球自转速率的影响	····· (294)
§ 11.4	潮汐摩擦对地球自转速率的影响	····· (296)
第十二章	关于地球自转运动的结束语	····· (304)
§ 12.1	影响地球自转运动的主要因素	····· (304)
§ 12.2	地球自转运动变化的谱分析	····· (308)

第一章 绪 论

§ 1.1 地面参照系

近几十年来，地球动力学成了国际科技学术界广泛注视和研究的对象之一。地球动力学主要探讨地球的各种动力现象及其机制，例如，探索地球板块之间和板块内部的运动规律；寻求地球自转运动的模式；研究地壳升降；以及研究陆海潮汐的作用和影响等等。地球动力学中所研究的这些动力现象，一般都是变化期长、变化量小、作用因素复杂。因此，对这些动力现象的发现、量度、理论或模型的检核和改进都需要有一个长期稳定的、能精确度量的地面参照系。建立这种参照系的理论和实际一方面必须和大地动力现象的时间尺度和几何尺度相应，另一方面又应与当前及今后的研究水平和应用范围一致。只有采用以先进理论指导、以先进科学技术方法建立的地面参照系，才有可能量测各种地球动力现象，正确反映地球动力的规律和模型，合理表示地球动力的机制和理论。特别是与这些动力现象的变化、模型、理论等有关的量测、计算、评估、预测等涉及定位和定量方面的问题，若没有一个模式完善、精密实用的地面参照系作为依据，是无法解决的。

地面参照系除了满足地球动力现象定位和定量方面的需要外，它与地球自转速度一起，在反映地球内部构造、内部物质运动、内部物理特征和各种结构层次（大气层、水层、地壳、地幔、地核）之间的相互作用等方面也有重要意义，它为地球动力学、地球物理学提供了丰富的有价值的信息。

各种学科和技术应用，对地面参照系的要求，从范围来说，可以分为涉及全球性的问题和涉及地区性的问题两类。前者要求地面参照系能保障全球性的大地测量工作和监测地球的自转运动，以及其他全球性的地球动力现象。后者则主要涉及局部地区的地壳运动。局部地区地壳运动的研究，在短期内不一定需要和全球性的地面参照系联系起来，但从长远来看，各种地区性地球动力问题的研究若能和全球性的地球动力问题联系起来，将这些局部的地球动力现象纳入全球性的地面参照系统；其研究和分析往往会更全面，结论所适用的范围可能更具有普遍意义。

对地面参照系的定义和建立的精度要求，是随着人类对自然的认识及科学技术水平的提高而提高的。在五十年代，定义（模式）、建立和保持地面参照系在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级就可以了。这和当时的科学技术水平是相应的。到了八十年代，随着科学技术的发展，对地面参照系的精度要求已提高到 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 这一量级。这不仅是出于客观需要，而且也有了建立和保持它的可能性。由此可见，不论是基于地球动力学、地质学、大地测量学和地球物理学等地学学科本身的发展需要，还是顾及各种量测技术的长足进步和飞速发展，都需要有一个理论上相对完善的模式、实践上有可能完成、国际上易于接受、使用比较方便的一种全球性的地面参照系。我们通常称它为协议地面参照系(Conventional Terrestrial System, 简称为CTS)。这就要求我们对于地面参照系从定义到建立和日常保持，都需要用新的更符合实际的理实来充实它和改进它，都需要用新的科学技术手段来提高它的精度和可靠性。

§ 1.1.1 模式和参照框架

要建立地面参照系，一般需要两个步骤：第一个步骤是详细确定地面参照系的模式；第二个步骤是实际确定符合这个模式的框架。

第一个步骤，即确定惯用地面参照系的模式。其目的是确定该参照系基本结构的格局、定义参照系坐标的原则，以及提出有关的地球物理和天文方面的相应理论。

以巴黎国际时间局(BIH)所采用的地面参照系为例。在1984年以前，它的模式是按纽康(Newcomb)太阳系的运动理论导出相应的黄赤交角和进动(岁差)常数，而章动则是按武拉德(Woolard)从刚性地球模型得出的公式进行推算^[12]。1984年以后，开始采用1976年国际天文联合会(IAU)给出的进动常数，章动则采用瓦尔(Wahr)从(带核)弹性地球模型(1066A)(IAU1980年章动模型)得出的公式进行推算^[28]。这样就确定了地面参照系的定向及其理论基础。

第二个步骤是从实践上完全按第一个步骤中所规定的模式建立并(长期)保持地面参照系。其实质即是确定和保持参照系的“结构框架”，国外也常称它为“参照框架”(reference frame)。图1.1就是一个参照框架的示意图。

国际地球自转服务局目前(80)是用23个射电源来确定它的惯性参照系的“参照框架”。这23个射电源的赤经赤纬即如图1.1所示，它们点位的实际测定精度目前已高于 ± 1 毫角秒(mas)。从上图可见，这个参照框架的不足之处是南半球的射电源个数较少，尤其是赤纬 -40° 以下，一个射电源也没有，这不能不说是一个严重的缺陷。图1.1虽然只是一个惯性参照系的参照框架，但它的意义和地面参照系的参照

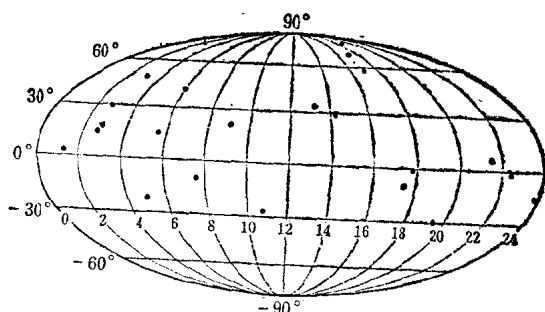


图 1.1 IERS的惯性参照系的参照框架示意图

框架是一样的。

建立参照框架就是为参照系提供一些具体的点，具体的目标物。这些点或目标物具有相应于该参照系模式的坐标和其他参数值。这样一来，该参照系的用户就能利用这些点或目标物作为参考点，将用户所关心的任何对象的位置及其运动参数，定量的纳入于该参照系中去。所以，模式只是从理论上建立地面参照系，而框架才是从实践上建立地面参照系。实际上，有了参照系框架才能真正将地球上任意点的点位及其变化在这个地面参照系中加以定量的描述。

我们仍以前面提到的国际时间局的地面参照系为例，在它已经确定模式的基础上介绍这个参照系的参照框架的确定方法：它的第三极（ z 轴指向）即地面极，采用国际时间局公布的极移原点（或称平均极）；它的第一极（ x 轴指向）即经度原点，是格林尼治平天文子午面和上述地面极相连的子午面与赤道的交点。参照系原点定为地球质心。

然而，这仅仅是参照系框架的一个方面，即只涉及参照系的定向方面。众所周知，国际时间局公布的极移原点和经度原点都是由地面上众多参与测定的天文台站所提供的