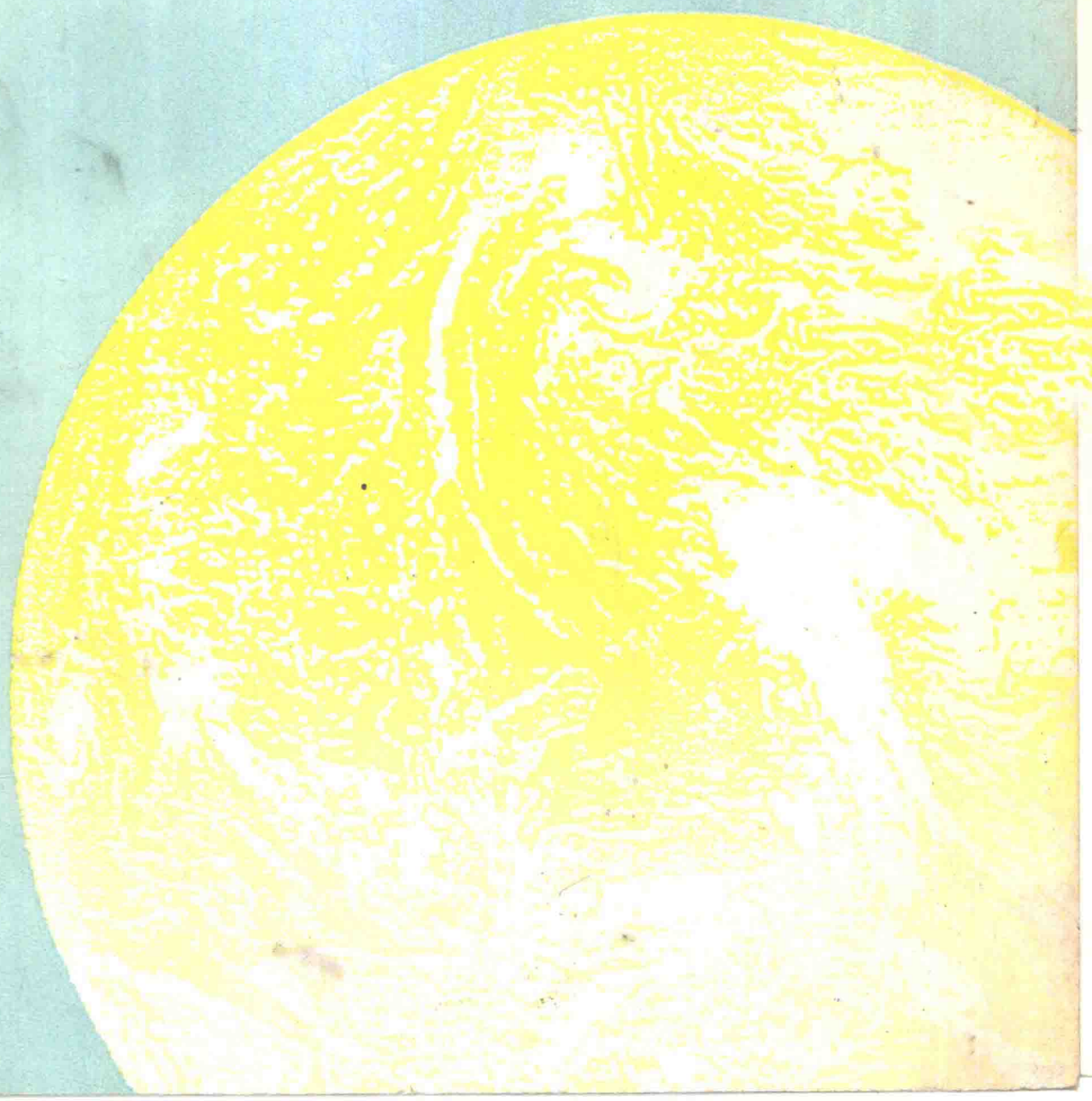


高等学校规划教材

煤田地球物理导论

崔若飞 岳建华 编

中国矿业大学出版社



23

(-677)

高等学校规划教材

煤田地球物理导论

崔若飞 岳建华 编

中国矿业大学出版社

(苏)新登字第 010 号

内 容 提 要

本书以地球物理学的基本理论和基本方法为重点,系统地介绍了地球物理学中各个分支学科的产生、发展过程、现状、存在的问题和未来的发展趋势,以及将其用以研究地球内部状态和结构的最新成果。

全书由两部分组成。第一部分为一、二两章,讨论了太阳系和地球的一般物理、化学、地质性质及地球的年龄。第二部分为三至七章,主要论述了各种研究地球的地球物理学方法,包括地震、重力、地磁、地电与地热。

本书内容简明扼要、通俗易懂,物理概念突出,避免了繁琐的数学推导,具有较大的适用范围,是煤炭高等院校应用地球物理专业的教学用书,同时也可作为其它地学专业师生及工程技术人员了解地球物理学学科的参考用书。

责任编辑:李朝雯

技术设计:姚晓宏

责任校对:周俊平

高等学校规划教材

煤田地球物理导论

崔若飞 岳建华 编

中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 9.5 字数 228 千字

1994 年 12 月第一版 1994 年 12 月第一次印刷

印数:1—2500 册

ISBN 7 - 81040 - 345 - 1

P·14

定价:5.50 元



前 言

随着我国煤田地质勘探的重点由东部向西部、由浅部向深部转移和采煤机械化程度的不断提高,对煤田地质勘探工作提出了更高的要求,即多快好省地解决不同的地质问题。一些传统的地质勘探手段正在迅速地为先进的物探手段所代替,应用地球物理学科已经发展成为一门重要的学科。

根据当前应用地球物理学的迅猛发展及与相关学科的相互渗透加快这一趋势,我们在1989年重新修订了教学计划,为应用地球物理专业增设了《煤田地球物理导论》这门课程。经过几年的教学试用,在原讲义的基础上,做了一定的修改和补充,便写成了这本教材。

《煤田地球物理导论》是按照煤炭高等院校应用地球物理专业本科四年制教学大纲编写的教材,学时数为45,总字数在18万左右。各部分学时分配如下:绪论和第一章为5学时;第二章为4学时;第三章为13学时;第四章为6学时;第五章为6学时;第六章为5学时;第七章为6学时。

设置这门课程的目的是使学生在总体上把握地球物理学的现在与未来,开阔视野,扩大知识面,更加适应今后地质行业的变化。通过对各种方法的初步了解,为下一步系统地学习地球物理勘探方法和技术打好基础。

本教材由中国矿业大学地质系应用地球物理专业崔若飞副教授(绪论、第一、二、三章)和岳建华讲师(第四、五、六、七章)编写。崔若飞副教授任主编。承蒙中国矿业大学李志聘教授审阅了本书第四~七章,在此深表感谢。

由于我们水平有限和时间仓促,教材中的缺点与错误在所难免,诚请读者批评指正。

编者

1993年12月

ABE95/03

目 录

绪论.....	(1)
第一章 太阳系和地球.....	(4)
第一节 太阳系.....	(4)
第二节 地球的转动.....	(7)
第三节 地球的结构.....	(10)
第四节 地球的大气圈和水圈.....	(14)
第五节 地球的演化.....	(16)
第二章 放射性和地球年龄.....	(18)
第一节 放射性.....	(18)
第二节 地球年龄.....	(22)
第三章 地震学.....	(29)
第一节 地震波的基本概念.....	(29)
第二节 地震波传播的基本规律.....	(33)
第三节 走时曲线及应用.....	(40)
第四节 地震面波和地球的自由振荡.....	(52)
第五节 天然地震和震源机制.....	(61)
第四章 地球形状与重力.....	(66)
第一节 重力位和地球的形状.....	(66)
第二节 重力校正和重力异常.....	(73)
第三节 地壳均衡说.....	(75)
第四节 固体潮.....	(80)
第五章 地磁学.....	(85)
第一节 地磁要素.....	(85)
第二节 地球的磁场.....	(88)
第三节 地磁场的长期变化.....	(94)
第四节 古地磁学.....	(96)
第五节 地磁场的成因.....	(102)
第六节 地磁场的短期变化.....	(103)
第六章 地电学.....	(107)
第一节 大地电场.....	(107)
第二节 自然电场.....	(114)
第三节 岩石的电学性质.....	(117)
第四节 地球内部的电性结构.....	(119)

第七章 地热学	(126)
第一节 地球的热场.....	(126)
第二节 岩石的热学性质.....	(127)
第三节 地球内部的热传递.....	(129)
第四节 地球热场的分布特征.....	(131)
第五节 地球的热状态.....	(137)
第六节 地球热历史.....	(143)
参考文献	(145)

绪 论

一、地球物理学

地球物理学(Geophysics)是以地球为研究对象的一门应用物理学。它是天文学、物理学与地质学之间的边缘科学,它和地质学、地理学、地球化学一样在地球科学中占据重要位置。

地球物理学的研究范围甚广,包括从地球最深部的地核到大气圈的边界。它是由地震学(Seismology)、地磁学(Geomagnetism)、地电学(Geoelectricity)、重力学(Gravity)、地热学(Geothermicity)、大地测量学(Geodesy)、大地构造物理学(Tectonophysics)、地球动力学(Geodynamics)等基础科学组成。地球物理学用物理学的原理和方法研究地球的形状、内部构造、物质组成及其运动规律,探讨地球起源、形成以及演化过程,为维护生态环境、预测和减轻地球自然灾害、勘探与开发能源和资源做出贡献。

按照研究的对象——地球的大气圈、水圈和岩石圈,可把地球物理学分为大气物理学、流体物理学(或称海洋物理学)与固体地球物理学。习惯上,人们常说的地球物理学是指固体地球物理学,即狭义地球物理学。按照应用范围,狭义地球物理学又可分为两类:研究宏观现象和基本理论的叫作理论地球物理学(Theoretical Geophysics)或“纯”地球物理学(Pure Geophysics),利用由此产生的方法来勘探有用矿藏的叫作勘探地球物理学(Exploration Geophysics)或应用地球物理学(Applied Geophysics)。本教材所涉及的内容均属于理论地球物理学的范围。

二、地球物理学的发展

人类观察和研究地球物理现象已经有几千年的历史,早在公元前 1177 年的商朝,我国就有关于地震的记载。实际上,现代物理学是从研究地球物理问题开始的。例如牛顿(Newton)通过研究地球和月球的运动发现了万有引力定律,克雷若(Clairaut)研究地球的形状,拉普拉斯(Laplace)研究地球的起源,高斯(Gause)研究地球磁场,开尔芬(Kelvin)研究地球的弹性、热传导和许多其他地球物理问题。18~19 世纪,地球物理学成为物理学中的一门重要分支。到了 20 世纪初,它就自成体系。科学的发展是由生产的需要所决定的,进入 20 世纪 30 年代,由于成功地把地球物理学方法用于矿产资源勘探当中,使它得以迅猛发展,同时地球内部的研究也取得稳步前进。现在,地球物理学已经成为国内、外研究进展十分迅速的学科之一。

地球物理学发展的总趋势有两种:一是多学科的综合,二是科学的国际合作。从 20 世纪 50 年代末期起,在各国地球物理学家的倡导和努力下,制定了一系列国际性研究计划,先后组织了 4 次多学科的国际性大协作。第一个国际间的协作计划是 1957~1958 年的地球物理年。60 年代初,近 50 个国家参加了上地幔计划,主要研究内容包括:(1)全球性的地壳断裂系统;(2)大陆边缘地带及岛弧的构造;(3)地幔的物质组成及地球化学过程;(4)地壳及地幔的结构及其横向不均匀性。这个计划延续了 10 年,于 1970 年结束,其最重要的成果就是建立了“板块大地构造假说”。这个假说的出现是地学发展史上的一个里程碑,其重要性及

影响可与近代科学的任何重大发现相媲美。70年代以后,国际间围绕着地球动力学、岩石圈结构等问题开展了一系列的多学科综合研究。1974~1979年,国际地球动力学计划作为上地幔计划的延续,主要解决板块构造假说所遗留下来的问题,特别是板块运动的驱动力问题。国际岩石圈计划(1980~2000年)也正在实施中,这个计划的四个研究领域是:(1)全球变化的地球科学;(2)现代动力学和深部作用过程;(3)大陆岩石圈(层);(4)大洋岩石圈(层)。

地球物理学的研究方向,从总体上说,不是朝着对个别事件和单学科的观测与研究发展,而是朝着全球性多学科的综合探测与研究发展。这是因为各国学者一般只能在本国进行观测与研究,各国间的资料往往不能相互利用,这就需要开展广泛的国际合作。另一方面,人类认识自然现象是不受国界限制的,联合行动也就成为必然。国际间按照统一规化和统一的工作方法来进行工作,使研究成果成为人类的公共财富,正是这些国际合作才大大推动了地球物理学的发展。

三、地球物理学的特点

1. 交叉学科

现代科学的一个重要特点是不同学科之间的相互结合、交叉和渗透。地球物理学是由地质学和物理学发展而来的,随着学科本身的发展,它不断产生新的分支学科,同时促进了各分支学科之间的相互交叉,加强了地球物理学与地球科学各学科之间的紧密联系。例如大地构造物理学和地震学、地热学、重力学、火山学、古地磁学等有关。再如地震学、火山学、高空大气物理学、气象学和海洋学已在共同的减灾工程中紧密地结合起来。

现代地球物理学,已不是过去人们所理解的那么窄的范围,无论是从它本身各学科间和与其它自然科学间的相互结合,相互渗透进行研究,还是解决科研的重大基础课题和人类活动的需要上,仅靠单一科学都将不能达到预期的目的。

2. 间接性

地球物理学方法在解决地质问题时,都是通过观测和研究不同物理场的信息内容,以实现地质勘查为目标的。人们研究的不是地质体本身,而是它的某些物理学性质,即各种地球物理学方法都是通过间接途径来解决地质问题的。

3. 多解性

地球物理的正演解是单一的,而反演解则存在多解性,产生反演多解的原因是多方面的。

不同的地质体具有不同的物理性质,但产生的物理场可能是相同的。因此,在地面观测到的物理场不能得到单解。

不同的地质体具有相近的物理性质,或者说,其性质有一定变化范围,而不是一个确定的值时,由于观测存在误差,物理场的观测不完整及对物理场的特点研究不够,都会产生多解。

不同的地质体具有相同的物理性质,在这种情况下,即使知道了地质体的物性分布,也不能确定它的地质属性。

四、迎接挑战

在地球物理学作为全球性地球科学迎来新的挑战的时候,为了使我国在这一领域里取得重大突破和作出国际贡献,最重要的是培养适应今后地球物理学发展的人才。作为勘探地

球物理学家,其主要任务是利用所掌握的地球物理学理论基础、勘探方法、仪器设备来进行资源勘探。但是鉴于目前青年勘探地球物理工作者的知识面较窄,很多人仅仅了解自己所接触的局部,不了解地球全局和各种地球物理方法的特点,不会将各学科的知识进行综合,而单靠某一种地球物理方法来解决各种地质问题是绝不可能的。这就需要从现在起充分注意地球物理人才的培养,这也是应用地球物理专业的本科学生学习《煤田地球物理导论》的原因之一。我们的目的是为我国煤炭行业培养出一批具有全球观念、综合研究意识、通晓新技术、能进行跨学科研究的人才。

第一章 太阳系和地球

第一节 太 阳 系

现代科学证明,太阳系是在同一时期形成的。地球仅是太阳系中的一个行星,研究地球的形成和演化,不是一种单项研究,而是一种整体研究,这对解释太阳系的起源具有普遍意义。反之,把地球放在整个太阳系起源的背景上去研究它的形成和演化也是很必要的。

一、太阳系

太阳是银河系中众多恒星中的一颗,而银河系外尚有无数个河外星系,目前用最先进的天文望远镜能观察到 100 亿光年远的河外星系。太阳系包括太阳、九个行星和它们的卫星、数以万计的小行星、数十亿的慧星、无数的陨石以及巨量的尘埃和气体。

哥白尼(Copernicus, 1473~1543)以前,地球被认为是宇宙的中心,其它星体包括太阳、月球和行星均围绕着地球而转动。哥白尼提出地球和其它行星围绕太阳而转动的日心说理论,并且被伽利略(Galileo, 1564~1642)的天文观测所证实。开普勒(Kepler, 1571~1630)发现了行星运动的三个规律:(1)行星围绕太阳在一椭圆形轨道(实际上是接近于正圆形)上运行,太阳为椭圆的一个焦点;(2)行星在轨道上运行有一定规律,当靠近太阳时,运行速度就变快,当远离太阳时,运行速度就变慢;(3)行星的旋转周期取决于行星与太阳的距离,距离太阳越远,行星旋转的越慢。牛顿发现了万有引力定律,从理论上证明了开普勒定律,准确地解释行星运动的规律。后来发现观测的天王星位置与计算的数据不符,亚当(Adams, 1819~1892)和李维利厄(Le Verrier, 1811~1877)都认为这是由于另一个行星的引力所产生的影响,他们计算了该行星的位置,这就是后来在 1846 年用望远镜观测到的海王星。

行星,按其与太阳的距离,其顺序依次为水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。行星可以分为两类,水星、金星、地球和火星是内行星,也称类地行星,其特点是体积小、密度大、自转速度慢、卫星数目少、物质组成同地球相似。木星、土星、天王星和海王星是外行星,鉴于外行星都在木星之后,故也称类木行星,其特点是体积大、密度小,自转速度快、卫星数目多、主要由轻的气体元素如氢、氦所组成。冥王星则是外行星中的一个例外,它更象类地行星而不象类木行星。根据外行星的性质,它们还可再分为巨行星(木星、土星)和远日行星(天王星、海王星、冥王星)两类。除九大行星以外,现已发现在火星和木星轨道之间至少有 30000 个小行星存在,其中最大的一颗叫谷神星,是 1801 年发现的,直径约 730km。根据小行星的大小、密度以及陨石的物理化学特性,得知小行星的性质与内行星较为相似,而与外行星不同。

此外,行星(主要指大行星)的周围还有一些卫星。卫星的运转与这些行星围绕太阳的运转一样。

慧星和小行星一样,都是在围绕太阳的轨道上运转的一些小星体。根据慧星的轨道,可

将其分为两类:长周期慧星(周期大于 200 年)和短周期慧星(周期小于 200 年)。慧星的数量是如此巨大,但人类每年能够观测到的只有 10 个左右,例如著名的哈雷(Halley)慧星,它的周期是 76 年。

整个太阳系就像一座走时准确的时钟,遵循一定的规律不停地运转着。太阳系的这种结构是怎样产生的?如此庞大的体系又是怎样组织的如此完美呢?这就是人们所说的“大自然的规律”,看一下表 1-1 中所给出的行星、太阳和月球的某些天文数据,从中可以发现太阳系有以下这些规律性:

1) 轨道的规律性

行星都以同一方向围绕太阳旋转,而且在自转方向与太阳一致(金星和天王星例外),通常称为同向性。

行星的偏心率都很小,运行轨道都接近圆形,通常称为近圆性。行星的轨道均位于大约与太阳的赤道面成 6°倾斜的同一平面上,通常称为共面性。

2) 轨道半径的规律性

行星轨道半径遵循一定的规律,即所谓波特(Bode)定律。如以天文单位表示行星到太阳的距离,则行星轨道半径为

$$r_n = 0.4 + 0.3 \times 2^n \tag{1-1}$$

式中, n 是行星距太阳的序数,水星的 n 为 $-\infty$,金星的 n 为 0,地球的 n 为 1,其余类推。

表 1-1 太阳系内一些星球的天文数据

星 体	距日平均距离 天文单位	公转周期 年	轨道对黄道的倾角 弧度	自转周期 天	平均半径 公里	总质量 地球质量	平均密度 g/cm ³	卫星 数目	轨道 偏心率
太阳	——	——	——	25.36	696 600	333 441	1.4	—	——
水 星	0.3871	0.241	0.1221	59.7	2 434	0.0556	6.03	0	0.1221
金 星	0.7233	0.615	0.0591	243.09	6 056	0.8161	5.11	0	0.0591
地 球	1.0000	1.000		1.00	6 370	1.0123	5.52	1	
火 星	1.5237	1.881	0.0322	1.03	3 370	0.1076	4.16	2	0.0322
木 星	5.2037	11.865	0.0228	0.40	69 900	318.3637	1.34	12	0.0288
土 星	9.5803	29.650	0.0434	0.43	58 500	95.2254	0.68	10	0.0434
天王星	19.1410	83.744	0.0135	0.89	23 300	14.5805	1.55	5	0.0135
海王星	30.1982	165.451	0.0309	0.53	22 100	17.2642	2.23	2	0.0309
冥王星	39.4387	247.687	0.2995	6.39	3 000	0.926(?)	4.(?)	0	0.2995
月 球		0.0748	0.0899	27.32	1 738	0.0123	3.34	—	0.0899

【注释】 (1)一个天文单位是地球到太阳的平均距离,为 149598000km。地球到月球的平均距离为 384403km。

(2)黄道面是地球绕日轨道的平面。

(3)地球的质量为 $5.975 \times 10^{27} \text{g}$,记为 1.0123 单位,用它计算各星体的质量。

当波特定律开始(1772)提出的时候,还不知道有小行星带,但波特定律指出:一定有一个行星位于火星和木星之间,其轨道半径应是 2.8 天文单位。寻找这个行星的结果是发现

了小行星带，这个带里的小行星平均距日距离为 2.8 天文单位。

从表 1-2 可以看出，按波特定律计算的行星轨道半径 r_n 值(除海王星和冥王星)与观测值十分接近。

表 1-2 行星轨道半径值

行 星	r_n 观测值	r_n 计算值	行 星	r_n 观测值	r_n 计算值
水 星	0.387	0.4	土 星	9.52	10.0
金 星	0.723	0.7	天王星	19.2	19.6
地 球	1.000	1.0	海王星	30.2	38.8
火 星	1.523	1.6	冥王星	39.5	77.2
木 星	5.203	5.2			

3) 质量和密度的分布规律性

行星的大小和质量分布是两头小、中间大，即类地行星和远日行星小，巨行星大。内行星的平均密度较大，为 $4.0 \sim 5.5 \text{ g/cm}^3$ ，其主要成分是铁、硅、氧、锰、硫、镍等。外行星的平均密度很小，约为 $0.7 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ ，所以估计是由轻的气体元素如氢、氦等组成，并且挥发物质丰富。

4) 自转规律

类地行星和远日行星自转慢，而巨行星自转快。太阳的自转呈现表面“赤道加速”现象，即自转速度随纬度增加而递减，在赤道处自转最快。与其质量相比，太阳的自转速度太慢。太阳系中星体的自转规律也可用角动量(转动惯量 $\times$ 角速度)的分配来描述。太阳的质量占了整个太阳系质量的 99.9%，但其角动量还不到整个太阳系的 2%，绝大部分角动量都分配到了行星上。

二、太阳系的起源

长期以来，关于太阳系起源的问题一直争论不休，从 18 世纪中叶以来，许多著名科学家先后提出过三十多种假说。主要有康德(Kant)的“星云假说”；拉普拉斯(Laplace)的“星云假说”；布封(Buffon)的“灾变假说”；张伯伦(Chamberlin)和莫尔顿(Moulton)的“星子假说”；金斯(Jean)和杰弗里斯(Jeffreys)的“潮汐假说”；卫塞克尔(Weizsacker)的“尘埃云假说”等。这些假说可归纳成两类：(1)演化论或一元论；(2)灾变论或二元论。演化论或一元论的太阳系起源模式，是假设太阳和行星形成于同一尘埃和气体云——星云，行星是恒星形成过程中必然的伴生物，这个形成过程是缓慢且连续不断的。灾变论或二元论的模式，则设想行星形成于太阳之后，是由于第二个或第三个星体(通常是另一个恒星)的卷入而产生的某种灾变，或者是一些意外事件的结果。这个第二或第三星体从太阳中将物质带出来，再由这些物质形成行星。

直到 20 世纪 40 年代，所有的太阳系起源假说集中在试图解释已观测到的关于行星间距、行星轨道和它们的运转等规律上。太空时代的到来为各种假说提供了大量新的信息并附加了许多约束条件。新的资料来源于对陨石的研究；来自行星体的信息(特别是宇宙飞船送回地面的信息)；天文物理学的进展(特别是关于恒星形成和演化的资料)。因此，关于行星起源的模式变得更加完善。

这里简单介绍一下太阳系起源的当代观点——综合模式。它涉及约 46 亿年前一个星际气体和尘埃云的崩解,崩解的云分裂成若干块,其中之一可能约为太阳质量两倍的云继续崩解。由于星际云中的涡流运动,使每个云的碎块或星云发生了旋转或自转。云收缩后其旋转速度加快并呈现圆盘形。到达某种程度后,云变得足够致密,足以吸收它自己的红外线辐射。当收缩继续时则变得热了起来,中心的温度可达 2000°C 致使星云中心所有的尘埃气化,而圆盘的外缘,仍保持低温(约数十度)。

星云基本上具有太阳的成分,元素或化合物以固体颗粒还是以气态出现,主要取决于温度,而温度又取决于距星云中心的远近。挥发性最大的元素如氢和氦,在行星形成的全部过程中无论处于太阳星云的何处均为气态。

星云中的固体颗粒聚集起来形成了尘埃至小行星大小的物体(星子)。引力使星子碰撞,形成了类地行星和外行星的石质核。外行星因为处于低温下(由于它们距离原始太阳很远),很多化合物可从星云中凝结出来,从而长成较大的星体。因为外行星的质量较大,它们吸引和保留了星云中较多的挥发性组分,如氢和氦,它们最后构成了这些行星的主体。

当事件按上述顺序发生的某个时刻,星云中心的尘埃和气体变得非常致密和炽热(约 1000000°C),开始了核反应,导致太阳成为一颗恒星。太阳形成一段时间后,射出了大量的物质,因而使其旋转慢了下来,并且吹出了没有参与行星体形成的大量气体与尘埃物质。

上述的太阳系起源的一般概念已为该领域的大多数研究者所接受,只是事件的详情和发生的时间仍有争议。太阳系的形成和演化是一个长期以来非常引人关注的问题,历代许多科学家曾讨论了太阳系的成因。至今,关于行星形成的许多细节仍不十分清楚,有待于今后进一步研究探讨。

第二节 地球的转动

在宇宙空间中,地球不仅绕着一条轴线由西向东自转,而且也带着自己的卫星沿着近于圆的轨道绕着太阳公转,同时随太阳系不停地向前运动,称为地球的平动。由于日、月对地球赤道凸出部分的吸引力随日、月位置而变化,在它们的作用下,地球转动轴在空间的取向发生变化,称为地球的进动。地球作为一个整体也相当于其转动轴在摆动,称为地球的章动。总之,由于作用在地球上的力种类很多,地球的运动形式是多种多样和不均匀的。在地球物理学中,研究地球转动有助于了解地球内部的构造和运动,地球内部的密度、弹性和非完全弹性以及地壳、地核、海洋和大气的运动。

一、地球的自转

地球自转是一种旋转运动,在赤道上自转线速度为 465m/s ,自转方向是由西向东。地球的自转轴叫做地轴,地轴和地球表面的两个交点叫做地极,即南极和北极。地轴的无限延长就是天轴。如果以地心为球心,以无限大为半径构成的球面叫做天球,则天轴与天球的两个交点叫做天极,即南天极和北天极。在地球上,天极是天空中不动的两个点。

时间标准是根据地球的自转来确定的,地球自转一周的时间叫做一日。由于观测周期所采用的参考点不同,“一日”的定义也略有不同。若取恒星为标准,把地球中心与一个遥远的恒星连成一线,那么地球自转一周的过程中,这条直线先后同地球的每一经线相割,两次相割同一经线所需的时间称一恒星日。若取太阳为标准,这条直线连接地球中心和太阳中心,

这段时间就叫太阳日。若取月球为标准,这条直线连接地球中心和月球中心,这段时间就叫太阴日。地球不但自转,而且绕太阳公转,公转的轨道是椭圆的,所以太阳日在一年中不是等长的。取其一年的平均值,就得到一平均太阳日,这就是日常生活中所用的日,每日有 86400 平均太阳秒。但在天文观测中仍用恒星时。如果用 24h 表示太阳日的长度,则恒星日的长度为 23h56min,太阴日的长度为 24h50min。

根据地球自转确定的时间叫世界时,它以英国格林尼治的地方时间为起点,按照各地的经度向后推移,所用的单位是平均太阳时。显然,若要以地球自转来确定时间,自转速度就必须很均匀。其实不然,通过天文测量和原子钟发现,地球的转速并不是真正均匀的,而是有微小的变化。所以从 1955 年起,在精密的天文测量中引用了原子时。原子时是由原子的振动频率确定的,与地球的自转无关。

二、地球的公转

地球绕太阳公转的轨道是个接近正圆的椭圆。轨道全长是 939120000km,长半轴 $a = 149600000\text{km}$,短半轴 $b = 149578630\text{km}$,半焦距 $c = 2500000\text{km}$ 。地球轨道的扁率 $(a-b)/a$ 和扁心率 c/a 分别为 1/7000 和 1/60。地球公转线速度约为 30 km/s,角速度为每日 $99'$ 。

由于太阳位于地球公转轨道的一个焦点上,因此日地距离的变化以一年为周期。如图 1-1 所示,每年 1 月经过近日点,7 月经过远日点。

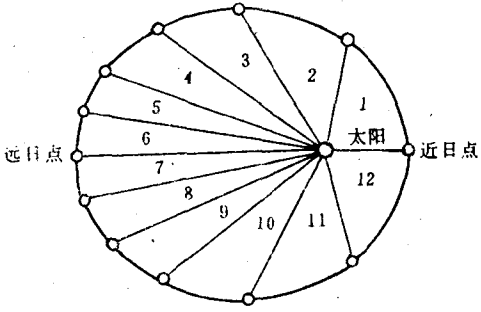


图 1-1 日地距离和公转速度的周年变化
(数字表示月份)

地球绕太阳公转的轨道面称为黄道面(图 1-2)。垂直于黄道面的方向叫做黄极方向,它与天球的交点就是黄极。地球赤道面与天球的交线为天赤道。黄道与天赤道的交点,即春分点和秋分点,代表地球赤道平面和轨道平面的相交线在天空中所指的方向。黄道上距天赤道最远的两点,就是夏至点和冬至点。

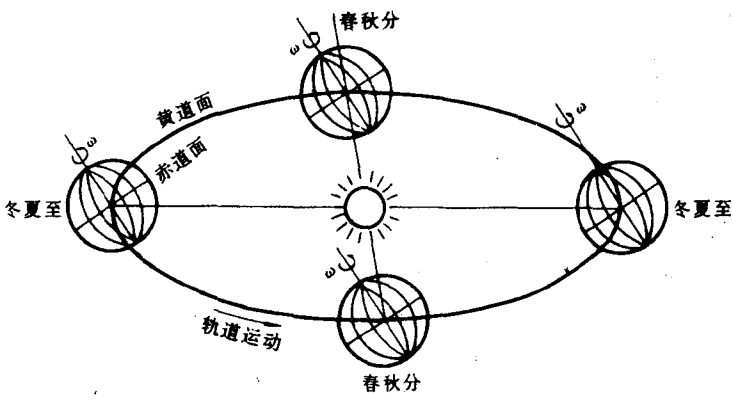


图 1-2 地球绕太阳运动

由于赤道面与黄道面并不平行,它们之间的夹角为 23.5° ;因此地球在黄道上绕太阳公转时太阳光直射地面的位置就会周期性的变化。太阳由南向北通过赤道的时间就是春分,此时黄道上所对应的点就是春分点;太阳由北向南通过赤道的时间就是秋分,此时黄道上所对应的点就是秋分点。同理,太阳通过北回归线和南回归线的时间就是夏至和冬至,此时地球在黄道上的位置就是夏至点和冬至点。

地球绕太阳一周的时间叫做一年。若以恒星为标准,这段时间叫做一恒星年,它有 365.25636 个平均太阳日,每百年约增加 0.01s,这是地球公转的真正周期。若以春分点为标准,就得到回归年。由于春分点在天球上不是固定的,因此回归年不是地球公转的真正周期。回归年比恒星年约短 20min,它有 365.2422 个平均太阳日,每百年约减少 0.53s。因为季节变化取决于太阳相对于春分点的位置,所以民用和纪年一般都采用回归年。

三、地球的平动

太阳同地球一样,除本身的自转外,也带着它的行星族(包括地球)以每秒约 20km 的速度向织女星方向前进。地球随整个太阳系在宇宙太空中不停地向前运动,即所谓平动。

从相对论的观点来看,地球在宇宙太空中的运动并没有到此为止。太阳系(包括地球)随着它周围的恒星群以大约每秒 30km 的速度绕银河系的质心旋转,其转动周期大约是 250000000 年。而银河系本身又正以大约每秒 600km 的速度向长蛇星座运动。

四、地球的进动

由于旋转,地球的形态象一个扁球体,赤道附近向外凸出,而太阳和月球对此凸出部分的吸引力使地轴绕黄轴(黄道面的法线)转动,其方向与自转方向相反,即由东向西(图 1-3)。这种地球在运动过程中,地轴方向发生的运动叫做地球的进动。

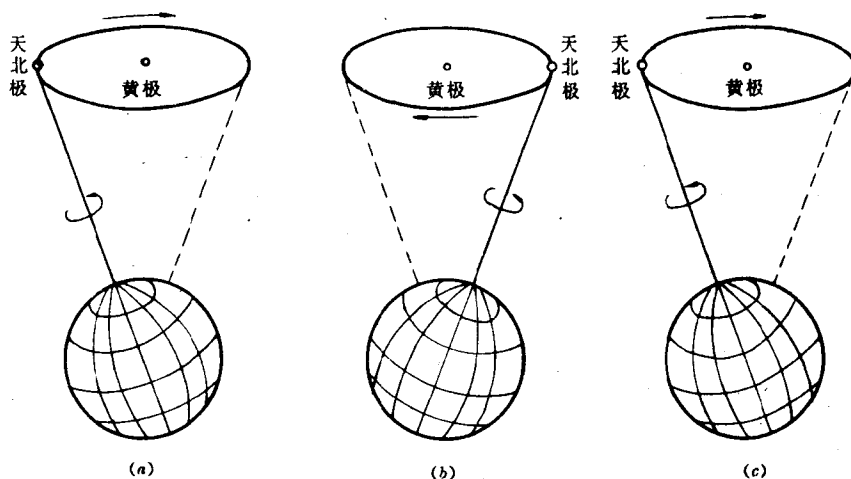


图 1-3 地球的进动及其周期

a—公元前 12900 年;b—公元 0 年;c—公元 12900 年

从图 1-3 中看出,转动的地轴在空间画出一个圆锥面,其半顶角为 23.5° 。地轴进动的速度是每年 $50''.26$,所以地轴旋进的周期为 $360^\circ \times 60' \times 60'' / 50''.26 = 25786$ 年。由于地轴的不断进动,所以其指向也在发生极其微小的变化,现在它指向北极星,公元 13600 年,它就会

指向织女星。如图 1-4 所示。

地球进动的另一后果是赤道平面的位置也会相应地发生变化,其结果将导致春分、秋分、夏至、冬至四个点的改变,它们在黄道上也以每年 $50''.26$ 的速度向西进动着。

五、地球的章动

我们已经了解到地球进动的原因是由于太阳和月球对地球赤道隆起部分所施加的吸引力。但实际上,太阳、月球和地球的位置是在不断发生变化的。太阳每年两次通过赤道,月球每月两次通过赤道,因而作用到地球上的

引力十分复杂。由于这个缘故,在地轴长期旋进的过程中,又在它平均值的位置上附加了一个短周期的摆动,其主要部分的周期为 18.6 年。也就是说,地球转动轴在空间的运动不能简单地描述为沿一平滑圆锥面上的转动,地轴以很小的振幅在锥面内、外摆动,使锥面带上一个“荷花”式的花边,其摆动的振幅最大不超过 $9''.206$ 。如果在一转动陀螺上轻轻一击,我们就会看到类似的效应。地球的这种运动叫章动。

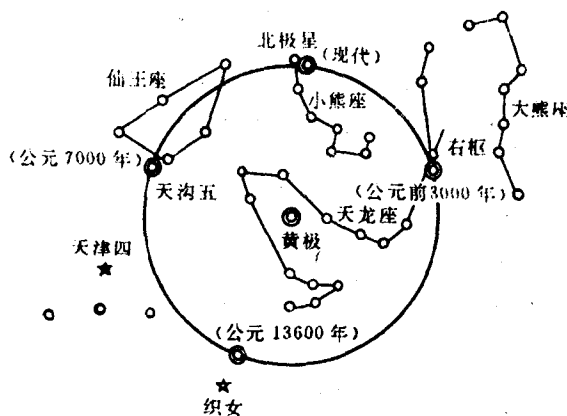


图 1-4 北极星的变迁

第三节 地球的结构

一、地球的形状

确定地球形状的问题,从早期人们认为地球是平坦的时候就已经吸引了科学家的注意。后来人们意识到地球是圆的,直到 17 世纪才察觉到地球并非正圆,而是扁圆的。现代大地测量学上所谓的地球形状是指一个理论曲面的形状,这个曲面叫做大地水准面。它的定义就是平均海洋平面最逼近的那个重力等位面。实际上,它在海洋上与平均海面重合,但在大陆地区,它的一部分可能切入地下。因此从全球看,大地水准面并不是完全包在地球外面,而在某些地方被假想“海面”所覆盖。

由力学知识可知,地球的自引力是造成地球形状的唯一因素。如果没有其它外力的影响,地球只能是正球体。但是自转却使得地球变成了一个扁球体,赤道半径为 6378km,极向半径为 6357km。如果没有其它因素的影响,地球会是一个标准的扁球体,即赤道和所有纬线都是正圆,所有经线都是椭圆。但地球不是一个回转扁球体,它的纬线(包括赤道)不是严格的正圆,经线也不是真正的椭圆。地球的南北半径并不对称,其几何中心并不位于赤道平面。北半球较细、较长;南半球较粗、较短,如图 1-5 所示。

造成地球为一不规则回转椭球体的原因是地球内部物质分布不均匀。地球内部物质分布情况,即不是单纯地因纬度或经度不同,也不是简单地因高度或深度而异。正是由于地球内部物质分布的不均匀,所以尽管地球有自转,它也不会形成严格的回转椭球体。概括地说,在北半球的高纬度地区和南半球的低纬度地区,大地水准面高于回转椭球面;反之,在北半球的低纬度地区和南半球的高纬度地区,大地水准面低于回转椭球面。

二、地球的表面形态

地球表面最大的两个构造单元是大陆和海洋。海平面以上的大陆部分占地表面积的 29.2%，如果考虑包围大陆的大陆架，这一比例可增加到 35%。陆地表面形态的变化范围可从最低 -392m 的洼地到最高 8848m 的山峰，但平均高度不足 1000m。海底地形也不平坦，有高达几千米、绵延几万公里的峻峭海岭，也有海底峡谷、高地、平顶山、珊瑚岛、深海沟等。海洋的平均深度稍小于 3.8km。

大陆与海洋之间的过渡带可分为活动的与不活动的两类。不活动的大陆边缘同海洋（如大西洋）扩张有关，通常称大西洋式的大陆边缘。边缘处常有大陆架和大陆坡。大陆架是由海岸线向海洋中延伸直到

200m 左右的坡度平缓的地带，海水下面的地壳性质和大陆是相同的，所以大陆架应是大陆的一部分。由大陆架再往深海延伸，海底的坡度突然增加（陡度大于 1/10），在不到 50km 的宽度内就达到深海，这个地带称做大陆坡。大陆地壳的性质经由大陆坡向海洋地壳的性质过渡。活动的大陆边缘同海底（如太平洋）扩张有关，通常称太平洋式的大陆边缘。在大陆边缘以外存在着深海沟，海沟与大陆之间则有岛弧或边缘山脉。大陆架在此处很窄或不存在，而岛弧所包围的海域可能很大（如日本海）。深海沟是极重要的一种地表形态，大多数在太平洋，其它各洋较少，海沟最深处约为 10000—11000m，位于西太平洋。

以上各种表面形态，绝大部分是可以直接观测的，若涉及到地球内部的结构，就必须借助于地球物理的方法，尤其是地震的方法。

三、地球的内部构造

1. 地球内部的分层

根据地震波走时资料，可以计算地球内部 P 波和 S 波速度随深度的分布，它们是地球内部分层的最主要依据。地球内部的其它物性参数大多是利用速度资料推导出来的，因此讨论地球内部的速度分布是十分必要的。这里给出杰弗里斯 (Jeffreys, 1939) 和古登堡 (Gutenberg, 1957) 计算的地球内部的速度分布，见图 1-6。

1963 年，布伦 (Bullen) 根据不同深度地震波速度的特征，把地球内部分为 A、B、C、D、E、F、G 七层。A 层相当于地壳；B、C、D 三层为地幔；E、F、G 三层属地核。后来他又根据新的资料把 D 层分成 D' 和 D'' 两层，见表 1-3。这些分界面均位于速度或速度梯度有明显变化的部位。应该指出，上述这种划分是非常粗略的，现代的地球模型远比这详细和科学，但布伦的分层模式一直沿用至今。

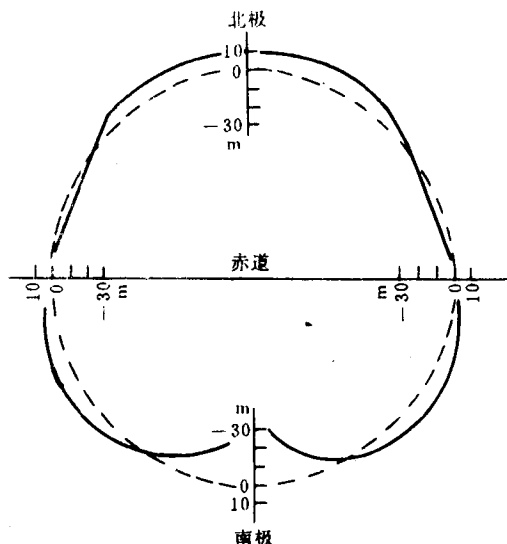


图 1-5 大地水准面对参考扁球体的偏离