

赠阅

地球物理实验

北京大学地球物理系 编
地球物理教研室



地震出版社

高等学校教学用书



高等学校教学用书

地球物理实验

北京大学地球物理系 编
地球物理教研室

地震出版社

1987

内 容 提 要

本书是指导学生进行地球物理观测实验，培养实验技能和素养的一本教科书。书中包括地震、重力、地电、地磁等方面的实验共49个。通过这些实验大体上可解决常用地球物理仪器操作、仪器常数测定、地球物理观测、资料的分析处理方法等方面的问题。地震、重力、地电、地磁台站的观测人员也可参阅此书。

地球物理实验

北京大学地球物理系 编
地球物理教研室

责任编辑：姚家榴

地质出版社出版

北京复兴路63号

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 8.5印张 217千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数 0001—4400

统一书号：13180·396 定价：1.40元

编写说明

为加强实验课教学，培养和提高学生实验技能与素养，在北京大学地球物理专业实验教材的基础上，经整理和补充写出这本《地球物理实验》。本书包括地震、重力、地电和地磁四个部分。通过这些实验，大体上可解决常用地球物理仪器操作、仪器常数测定、地球物理观测、资料的分析和处理方法等方面的问题。

本书是在国家地震局教育处组织领导下，由北京大学地球物理教研室负责编写的。其中第一部分由刘宝诚、傅淑芳执笔；第二部分由曹其平、于淑筠执笔；第三部分由孙正江、王丽华执笔；第四部分由张德华执笔。全书由曹其平、张德华审校定稿。

本书在编写过程中，曾征得中国科学院地球物理研究所，国家地震局地球物理研究所、分析预报中心、地震仪器厂和一些大专院校有关同志的许多宝贵意见，并蒙秦馨菱先生的关心指导，在此一并致谢。

编 者

序 言

地球物理学的研究是以观测数据为基本素材的。没有大量的、足够可靠的数据是无法作出高质量的研究成果的。仅从地球物理学的发展历史看，每逢取得新的观测资料，都导致了地球物理学的新进展。这些新资料或者是由于仪器的发明或改进，使观测内容扩展或观测精度提高而获得的；或者是由于观测范围的扩大，例如由平原而及于高山，由陆地而及于海洋，由赤道而及于两极，或由地面而及于高空或外层空间而取得的。把这些新的观测资料加以适当的处理，才可能引出新的模式或模型、新的设想或理论，而这些新的设想或理论又需用新的观测仪器或观测技术去取得新的数据来检验或证实。就这样，人类一步一步地加深了对地球的了解。

例如公元十四、五世纪时当哥伦布从西班牙出发向西航行希望能找到一条到东方（印度）的航路时，发现了磁偏角是因地而异的，这个意外的发现曾使他对罗盘的可靠性发生怀疑，但大量的观测证实了磁针所指的北和真北的差异。又如麦克斯韦根据他推出的电动力学方程组预言电磁波的存在之后，过了二十余年赫兹在实验室内作了证实，并证明它与光波有相似的特性。在实现全球电磁波通讯后，科学家们曾设想太阳发出的紫外线有可能在地球高空引起大气电离而形成电离层。以后利用无线电的实践使人类对电离层有了仔细的了解。1958年美国发射的第一颗人造卫星提示了在电离层之上还可能有一个带电的辐射带。不久人造卫星观测证实了范阿伦（Van Allen）辐射带的存在，它是一些带电离子被地球的磁力线所陷俘而形成的。当时人们曾以为这个辐射带的形状象个“苹果”，地球在其中心。以后经过许多宇宙探测器的探测才知道这个“苹果”不是对称的：它向着太阳的

一面被太阳风所压缩，而背着太阳的一面则形成个长尾巴。现在的教科书上对此都有所描述，这些知识都是经过实地考察和探测才得到的。类似的事实在地球物理学各个领域的发展进程中，无论过去和现在都还有很多。它说明了实验和观测工作在推动地球物理学的发展中是处于怎样不可缺少的地位，不断改进和提高实验和观测技术对地球物理学的发展又是何等重要！

一个地球物理工作者不应把地球物理学看成是一堆数学例题，也不能局限于前人已经探索到的知识，而应该走出“大楼”去认识地球，向地球发问题，向地球要数据，探索新的领域。在学校中要学会实际观测的本领。不要片面地迷信精密仪器。仅有了好仪器，如使用不当或观测方法安排得不合理，也不能取得关键的数据。

目前在我国的地球物理教学中尚缺少一本教导学生作观测、测试的书。现在北京大学地球物理专业积多年教学经验写成“地球物理实验”一书，以教导学生作观测实验，培养动手能力。书中包括关于地震、重力、地电、地磁等方面的观测实验共49个；从目的要求、方法原理、仪器安装调整、操作步骤，至数据如何登记及初步处理和应注意事项及误差来源等皆有所介绍。相信此书不但对本专业学生是一份良好的教材，而且对初作地球物理观测工作的人员也有参考价值。

秦馨菱

1986.3.

目 录

第一部分 地震实验

实验一	拾震器折合摆长和转动惯量的测量	(1)
实验二	测定拾震器的电流常数 P	(6)
实验三	测定拾震器的电动常数 G	(10)
实验四	用阻尼振荡法测拾震器的临界电阻 a_{12}	(13)
实验五	测定放大器和记录笔系统的电压灵敏度 S_{23}	(17)
实验六	测定 $\Gamma K-VI$ 电流计常数 T_2, D_2	(23)
实验七	基式仪拾震器常数 T_1, D_1 及放大倍数 V_0 的测定	(28)
实验八	数字磁带地震仪的校验	(34)
实验九	震相识别和近震发震时刻的测定	(44)
实验十	近震震源位置的测定	(52)
实验十一	单台方位角法测定远震震中位置	(58)
实验十二	交切法测定远震震中位置	(63)
实验十三	远震发震时刻及震源深度的测定	(67)
实验十四	近震震级及面波震级的测定	(69)
实验十五	在吴尔夫网上用 P 波初动符号测定震源参数	(73)
实验十六	震中快速修定法	(74)

第二部分 重力与固体潮实验

实验一	用重力仪测定点间的重力差	(76)
实验二	测定重力仪水泡曲线和调节水泡	(81)
实验三	倾斜对重力仪灵敏度的影响及灵敏度的调节	(83)
实验四	用倾斜法测定重力仪格值	(87)
实验五	标定水平摆倾斜仪的常数	(90)

实验六	用图解法划分局部重力异常与区域重力异常·····	(95)
实验七	平面重力异常场向上半空间的解析延拓·····	(98)
实验八	地面重力观测值的布格校正·····	(105)
实验九	计算任意形状三维体在地面上产生的重力异常·····	(113)
实验十	计算重力和地倾斜固体潮理论振幅与相位·····	(118)

第三部分 地电实验

实验一	测量岩石标本电阻率·····	(129)
实验二	不极化电极间的电位差随硫酸铜 溶液浓度的变化·····	(137)
实验三	用不极化电极观测球体极化的电场分布·····	(139)
实验四	电测深法模型实验·····	(142)
实验五	球体模型的联合剖面法测量·····	(148)
实验六	偶极电测深模型实验·····	(152)
实验七	激发极化法模拟实验·····	(155)
实验八	岩石电阻率随压力变化·····	(163)
实验九	两层模型的频率电磁测深·····	(168)
实验十	电测深曲线定量解释·····	(173)

第四部分 地磁实验

实验一	磁偏角的绝对测量·····	(180)
实验二	磁倾角绝对测量·····	(185)
实验三	地磁场水平分量的测定——高斯绝对法·····	(194)
实验四	用水平分量扭力磁力仪测地磁场水平分量·····	(200)
实验五	使用质子旋进式磁力仪测地磁场总强度·····	(207)
实验六	用核旋分量仪测地磁场垂直分量·····	(214)
实验七	使用磁通门式磁力仪测地磁场垂直分量·····	(221)
实验八	水平分量磁变仪定向·····	(229)
实验九	磁变仪的温度补偿和温度系数的测定·····	(232)

实验十 磁变仪的安装和调整·····	(235)
实验十一 磁变仪格值和基线值的选定·····	(241)
实验十二 磁照图的量算·····	(245)
实验十三 方位角的测量·····	(248)

第一部分 地震实验

实验一 拾震器折合摆长和转动惯量的测量

一、目的与要求

了解拾震器周期与折合摆长和转动惯量的关系并掌握这些基本参数的测量方法。

二、仪器与工具

短周期或中长周期拾震器；特制摆架；特制刀口（根据所用拾震器选择不同的刀口）；辅助重锤；测高计；秒表一只或双测频率计；游标尺；照明台灯；称量 1 kg 以上天平。

三、实验原理与内容

（一）测量折合摆长 l_0

拾震器摆的摆动周期 T_0 与摆长 l_0 的关系为

$$T_0 = 2\pi \sqrt{l_0/g} \quad (1.1.1)$$

g 是当地的重力加速度， l_0 应是它的折合摆长。为了测出拾震器的折合摆长，最常用的方法是将拾震器的摆动部分从仪器底座上卸下来，在联结簧片的地方换上特制的刀口，图

1.1.1 绘出的是各种仪器使用的刀口。如果测定基式仪垂直向或维开克型拾震器的折合摆长，则选用图 1.1.1 中 (a), (b) 两个刀口；对 DS-1 型水平向拾震器选用 (b), (c) 两个；对 DS-1 型垂直向

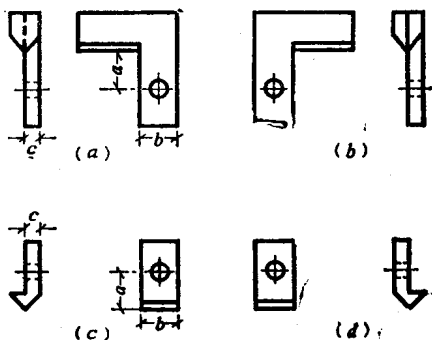


图 1.1.1

则选用(c), (d)两个。各种仪器所用刀口虽然形状相同但尺度各异,图 1.1.1 中 a 表示自刀口到螺孔中心的距离, b 是刀口的宽度, c 是刀口的厚度。对基仪水平向 $a = 10 \text{ mm}$, $b = 14 \text{ mm}$, $c = 2 \text{ mm}$, 垂直向则 $a = 14 \text{ mm}$ 。维开克仪 $a = 10 \text{ mm}$, $b = 7 \text{ mm}$, $c = 1 \text{ mm}$ 。DS-1 型拾震器水平向 $a = 7 \text{ mm}$, $b = 7 \text{ mm}$, $c = 1 \text{ mm}$, 垂直向则 $a = 10 \text{ mm}$ 。

装好刀口后刀刃的位置相当于原来簧片一半的地方即拾震器摆动轴线的位置。将装好刀口的摆置放在具有光滑平面的摆架上, 形成一个铅直摆, 如图 1.1.2, 其中(a)为某种中长周期摆, (b)为某种短周期摆。令其作微小摆动, 测其自由摆动周期 T_0 , 由公式 (1.1.1) 求出 l_0 。

$$l_0 = \frac{g}{4\pi^2} T_0^2, \quad (1.1.2)$$

其中 g 为当地重力加速度, 如北京的 $g = 9.8014 \text{ m/s}^2$ 。

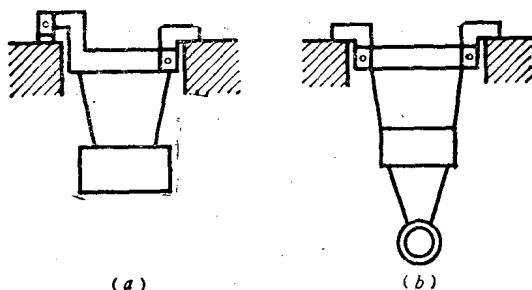


图 1.1.2

(a) 某种中长周期摆; (b) 某种短周期摆

测量 100 个周期 T_0 的时间, 重复 3—5 次求 T_0 的平均值, 各次测量相对误差不得超过 1%, 否则须重测。

(二) 测量转动惯量 J_0

已知折合摆长 l_0 与转动惯量 J_0 的关系为

$$l_0 = J_0 / MR_0, \quad (1.1.3)$$

将 (1.1.3) 式代入 (1.1.1) 式得

$$T_0 = 2\pi\sqrt{J_0/MR_0g}. \quad (1.1.4)$$

式中 T_0 已由前边测得, 但 J_0 和 MR_0 是两个未知量, 为解出 J_0 需在摆上附加一个已知转动惯量为 j 的圆饼 m , 并测量附加圆饼 m 后自由摆动周期 T_1 。如基式仪或 KS-1 型拾震器其装置见图 1.1.3。

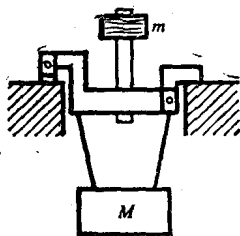


图 1.1.3

与 (1.1.4) 式类同写出周期 T_1 的表达式如下:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{(J_0 + j_0)/(MR_0 - mr)g}. \quad (1.1.5)$$

式中 j_0 取正号, mr 取负号, 这是由转动惯量的增减和力矩方向的正反来定的。

将 (1.1.4) 式和 (1.1.5) 式联立求得:

$$J_0 = \left(j_0 + mr \frac{g}{4\pi^2} T_1^2 \right) / (T_1^2/T_0^2 - 1). \quad (1.1.6)$$

根据平行轴定理 $j_0 = j_{c0} + mr^2$, 式中 r 是附加圆饼和连接杆折合质心到刀口的距离, m 则是它们两者之和, 即

$$\left. \begin{aligned} m &= m_1 + m_2, \\ r &= \frac{m_1 r_1 + m_2 r_2}{m_1 + m_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1.1.7)$$

其中 m_1 , m_2 分别为附加圆饼和连接杆的质量, r_1 是附加圆饼中心至刀口的距离, r_2 是连接杆中心至刀口的距离。 j_{c0} 是附加圆饼和连接杆各自转动惯量之和, 即

$$j_{c0} = m_1 \left(\frac{h_1^2}{12} + \frac{d_1^2}{16} \right) + m_2 \left(\frac{l_2^2}{12} + \frac{d_2^2}{16} \right), \quad (1.1.8)$$

$$\text{因此 } j_0 = mr^2 + m_1 \left(\frac{h_1^2}{12} + \frac{d_1^2}{16} \right) + m_2 \left(\frac{l_2^2}{12} + \frac{d_2^2}{16} \right). \quad (1.1.9)$$

将 (1.1.9) 代入 (1.1.6) 式中得出摆的转动惯量

$$J_s = \frac{mr^2 + m_1 \left(\frac{h_1^2}{12} + \frac{d_1^2}{16} \right) + m_2 \left(\frac{l_2^2}{12} + \frac{d_2^2}{16} \right) + mr \frac{g}{4\pi^2} T_b^2}{T_b^2/T_a^2 - 1} \quad (1.1.10)$$

式中 h_1 是附加圆饼的厚度, d_1 是它的直径, l_2 是连接杆的长度, d_2 是它的直径。

为了精确地测定 J_s 值, 需要将附加圆饼到摆动轴的距离 r 改变三次, 使每次改变 r 后 T_b 有明显的变化, 并依次测量相应的周期 T_b , 分别求出 J_s 值后再取平均值。

以上是对某种中长周期拾震器适用的测量转动惯量的方法。

图 1.1.4 是适用于测量某些短周期拾震器转动惯量的示意图。将拾震器摆装上合适的刀口放置在具有光滑平面的摆架上, 测自由摆动周期 T_0 , 同样用

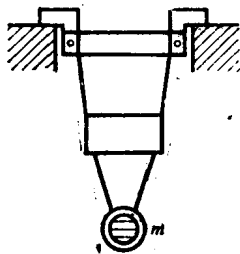


图 1.1.4

(1.1.2) 式求算折合摆长 l_0 。

为了求得转动惯量 J_s 需在摆下的线圈中装入一个和线圈内径大致相同且有一定高度和质量的小圆柱, 此时其摆动周期为:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{J_s + j_s}{(MR_0 + mL)g}}, \quad (1.1.11)$$

式中 mL 取正号, L 是小圆柱质心至刀口的距离, 其中 $j_s = j_{s0} + mL^2$, j_{s0} 是小圆柱绕其直径为轴的转动惯量。由 (1.1.4) 和 (1.1.11) 式得拾震器摆的转动惯量

$$J_s = \frac{m \left(L^2 + \frac{h^2}{12} + \frac{d^2}{16} - L \frac{g}{4\pi^2} T_b^2 \right)}{T_b^2/T_a^2 - 1}, \quad (1.1.12)$$

其中 m 是小圆柱的质量, h 是它的高度, d 是它的直径。为了精确地测定 J_s , 选取三种不同 m 和 h 的小圆柱以使 T_b 有明显的变化并依次测量相应的周期 T_b , 分别计算 J_s 并求它们的平均值。

表1.1.1 测折合摆长数据表

地区:					$g =$ cm/s ² , 仪器编号:				
100T _a (s)					$\overline{100T_a}$ (s)	T_a (s)	T_a^2 (s ²)	$g/4\pi^2$ (cm/s ²)	l_0 (cm)
1	2	3	4	5					

观测者 年 月 日

表1.1.2 测转动惯量数据表 (方法一)

次	100T _b (s)				100T _b	T _b	T _b ²	m _{1,2}	h _{1,2}	h _{1,2} ²
数	1	2	3	4	(s)	(s)	(s ²)	(g)	(cm)	(cm ²)
1										
2										
3										

次	h _{1,2} ² /12	d _{1,2}	d _{1,2} ²	d _{1,2} ² /16	m _{1,2} ($\frac{h_{1,2}^2}{12} + \frac{d_{1,2}^2}{16}$)	r ₀	r ₁ '	r ₁ ²
数	(cm ²)	(cm)	(cm ²)	(cm ²)	(gcm ²)	(cm)	(cm)	(cm)
1								
2								
3								

次	r ₁ = $\frac{r_1' + r_1''}{2} - r_0$	r ₂ '	r ₂ ''	r ₂ = $\frac{r_2' + r_2''}{2} - r_0$	r = $\frac{m_1 r_1 + m_2 r_2}{m_1 + m_2}$
数	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1					
2					
3					

次	m = m ₁ + m ₂	mr	r ²	mr ²	J _s	J _s
数	(g)	(gcm)	(cm ²)	(gcm ²)	(gcm ²)	(gcm ²)
1						
2						
3						

四、注意事项

1. 用测高计测刀口位置时,左右两个刀口如不在同一水平面上,必须用水平尺调平。

2. 确定附加圆饼的中心位置是测其上沿 r'_1 和下沿 r''_1 , 对连接杆的中心是测其上端 r'_2 和下端 r''_2 , 然后求平均值与刀口位置 r_0 的差。

3. 把上述测量结果,根据能读出的有效数字分别列入表 1.1.1 和表 1.1.2 中,或表 1.1.1 和表 1.1.3 中,计算出最后结果。

表 1.1.3 测转动惯量数据表 (方法二)

仪器编号:

次数	m (g)	d (cm)	d^2 (cm ²)	$d^2/16$ (cm ²)	h (cm)	h^2 (cm ²)	$h^2/12$ (cm ²)	$m \left(\frac{h^2}{12} + \frac{d^2}{16} \right)$ (gcm ²)
1								
2								
3								

次数	L (cm)	mL (gcm)	L^2 (cm ²)	mL^2 (gcm ²)	$mL \frac{g}{4\pi^2} T_0^2$ (gcm ²)	J_0 (gcm ²)	ΔJ_0 (gcm ²)
1							
2							
3							

(测 T_0 , T_0 数据表同前)

观测者

年 月 日

实验二 测定拾震器的电流常数 P_s

一、目的与要求

学习电流常数 P_s 的测量方法, 计算临界电阻值 α_{12} , 阻尼电阻值 R_D , 耦合分压系数 β_{12} 以及电压灵敏度 S_{10} 。

二、仪器与工具

短周期拾震器；微安表（0—100 μ A，0.5级）；读数显微镜；滑线变阻器（0—5 k Ω ）；照明台灯；双刀换向开关；1.5 V 甲电池；秒表。

三、原理

给拾震器工作线圈通以电流 I_1 ，则摆在电磁力矩作用下产生角位移 θ ，当弹性力矩和电磁力矩平衡时，有

$$C_s \theta = G_{12} I_1. \quad (1.2.1)$$

由摆的运动方程得

$$C_s / J_s = n^2 = \frac{4\pi^2}{T_s^2}, \quad (1.2.2)$$

$$\text{则} \quad C_s = 4\pi^2 J_s / T_s^2. \quad (1.2.3)$$

代入 (1.2.1) 式得

$$\frac{4\pi^2 J_s}{T_s^2} \theta = G_{12} I_1. \quad (1.2.4)$$

由电流常数定义

$$P_s = \frac{I_1}{\theta} = \frac{4\pi^2 J_s}{G_{12} T_s^2}. \quad (1.2.5)$$

可以看出电流常数 P_s 表明了摆偏转一弧度所需要的电流值。

(1.2.5) 式也可写成

$$G_{12} = 4\pi^2 J_s / P_s T_s^2. \quad (1.2.6)$$

由临界阻尼定义，得临界电阻值

$$a_{12} = \frac{G_{12}^2}{2J_s n_s} = \frac{G_{12}^2 T_s}{4\pi J_s}. \quad (1.2.7)$$

将 (1.2.6) 式代入 (1.2.7) 式得

$$a_{12} = \frac{4\pi^3 J_s}{P_s^2 T_s^3}. \quad (1.2.8)$$

将 (1.2.6) 代入电压灵敏度 $S_1 = G_{12} / I_0$ 式中得

$$S_1 = \frac{4\pi^2 J_s}{P_s T_s^2 I_0}. \quad (1.2.9)$$

从上面各式中可以看出 P_s , a_{12} , S_1 都是周期 T 的函数, 所以在求这些常数时必须先将拾震器工作周期调好。

在实际工作中, 对于 DS-1 型拾震器, 只有一个换能器线圈没有阻尼线圈, 按照图 1.2.1 方式联接线路, 图中 R_{12} 是换能器线圈内阻, R_i 是放大器输入电阻 (一般为 $50\text{ k}\Omega$ — $1\text{ M}\Omega$), 它与阻尼电阻 R_D 并联, 当 $R_i \gg R_D$ 时 R_i 被约去, 因而阻尼公式可写成

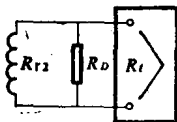


图 1.2.1

$$D_1 = D_{10} + \frac{a_{12}}{R_{12} + R_D}. \quad (1.2.10)$$

D_1 一般定为 0.45 或 0.50, D_{10} 的空气阻尼, 一般小于 0.01, D_{10} 可根据下面公式估算

$$D_{10} = \frac{0.11}{N}, \quad (1.2.11)$$

N 是振幅衰减一半时的周期数, 可用目测法求出。最后由 (1.2.10) 解出 R_D , 再根据 R_{12} 和 R_D 求出耦合分压系数

$$\beta_{12} = \frac{R_D}{R_{12} + R_D}. \quad (1.2.12)$$

四、实验步骤

(一) 调周期 T 。

如图 1.2.2 联接线路, 用电键 K 冲击拾震器, 通过读数显微镜观测摆前端线圈移动的振幅, 可调节 R 以使这个振幅 $2\text{ A} \leq 2-3\text{ mm}$, 每次计数 20 个周期的时间, 测 5 次求平均值填入表 1.2.1 中。

(二) 用目测法估算空气阻尼 D_{10}

在测周期的同时用读数显微镜观测摆的振幅衰减情况, 记下振幅从某一值衰减到一半时, 经过的周期 N , 用公式

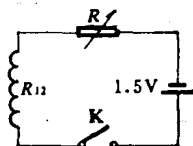


图 1.2.2