

傅承义 陈运泰 祁贵仲 著

# 地球物理学基础

科学出版社

## 内 容 简 介

本书概述了固体地球物理学的基础知识和近十几年来的最重要的研究成果。全书分十二章,重点论述了地球的形状和重力场,地球的转动,地球的年龄、能源和温度,地球的磁场和电场,地震和地球内部构造等。

本书可供地球物理专业研究生、大学地球物理专业高年级学生以及有关地球和行星科学方面的工作者参考。

## 地 球 物 理 学 基 础

傅承义 陈运泰 祁贵仲 著

责任编辑 周文辅

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1985年6月第一版 开本:787×1092 1/16

1995年6月第一次印刷 印张:29

印数:0001—3,850 字数:662,000

统一书号:13031·2900

本社书号:3995·13-15

定价:6.75元

## 序

近二十年来,固体地球物理学有了飞跃的发展。十几年前出版的地球物理教科书,有不小一部分现在都需要重写。我国这方面的教材也是未能赶上时代。1979年,中国科学技术大学研究生院要为地球物理专业的研究生开一门地球物理学基础课,我们借此机会将以前的讲义彻底地改写一遍,本书就是根据这份讲义加以补充而写成的。书中尽可能地介绍了最近十几年的最重要的成果。由于这是一门基础课,而科学的进展是有一定的继承性和连续性的,旧的经典性理论仍应给予应有的位置。这样,作为讲授一学年的教科书,材料就太多了。如何取舍,很大程度上避免不了作者的主观判断。如果不当,希望读者指出,以便再版时修订。

地球物理学可以看作是一门应用物理学。本书是从这个观点来写的,所以不回避较严格的物理和数学的论证,但是我们极力避免不必要的抽象和烦琐哲学。具有我国理工科大学一般数、理知识的读者阅读本书应无困难。

本书是集体编著的,内容的安排和基本观点是一起讨论过的;但在具体编写时,为了便于分工,一、二、四、八、十二等章主要由傅承义执笔;三、九、十、十一等章主要由陈运泰执笔;五、六、七等章由祁贵仲执笔。本书在出版过程中,曾得到吴文京和铁安两同志的协助;杨晓莲同志绘制了全书的图件。谨此致谢。

傅承义

1983年12月,北京

# 目 录

## 序

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第一章 概论</b> .....             | 1  |
| 一、什么是地球物理学.....                 | 1  |
| 二、固体地球物理学的发展.....               | 1  |
| 三、地球物理学和其它学科的关系.....            | 3  |
| <b>第二章 地球的形状和重力场</b> .....      | 5  |
| 一、概论.....                       | 5  |
| 二、位论简述.....                     | 6  |
| (一) 牛顿引力场和力位.....               | 6  |
| (二) 常用的积分关系和定理.....             | 10 |
| 1. 格林定理.....                    | 10 |
| 2. 高斯定理.....                    | 10 |
| 3. 格林公式.....                    | 12 |
| 4. 唯一性定理和狄利克雷问题.....            | 13 |
| (三) 球谐函数.....                   | 14 |
| 1. 拉普拉斯方程的解.....                | 14 |
| 2. 勒让德函数和罗巨格公式.....             | 16 |
| 3. 连带勒让德函数.....                 | 17 |
| 4. 面谐函数的正交关系和函数的展开.....         | 18 |
| 5. 加法公式和泊松积分.....               | 20 |
| (四) 谐力位.....                    | 21 |
| 三、地球的重力场.....                   | 22 |
| (一) 一级近似.....                   | 22 |
| (二) 二级近似.....                   | 25 |
| (三) 椭球坐标和索米扬那公式.....            | 27 |
| (四) 重力公式的精确解.....               | 29 |
| 四、重力异常和大地水准面的高度.....            | 33 |
| (一) 布容斯 (H. Bruns) 公式和球面几近..... | 33 |
| (二) 地球以外一点的重力异常.....            | 35 |
| (三) 斯托克斯公式.....                 | 36 |
| 五、重力值的校正.....                   | 37 |
| (一) 自由空气及布格校正.....              | 37 |
| (二) 地壳均衡及均衡校正.....              | 39 |
| 六、固体潮.....                      | 41 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| (一) 引潮力位 .....                 | 41 |
| (二) 勒夫数和志田数 .....              | 42 |
| <b>第三章 地球的转动</b> .....         | 45 |
| 一、岁差和章动 .....                  | 45 |
| (一) 欧拉方程 .....                 | 45 |
| (二) 欧拉角 .....                  | 47 |
| (三) 麦柯拉夫 (MacCullagh) 公式 ..... | 48 |
| (四) 岁差和章动 .....                | 49 |
| (五) 月球的影响 .....                | 50 |
| (六) 地球的动力学扁率 .....             | 51 |
| 二、转动轴的变化 .....                 | 51 |
| (一) 欧拉章动 .....                 | 51 |
| (二) 钱德勒晃动 .....                | 53 |
| (三) 周年变化 .....                 | 56 |
| (四) 纬度变化 .....                 | 58 |
| 1. 地心纬度、天文纬度和地理纬度 .....        | 58 |
| 2. 观测纬度的方法 .....               | 60 |
| 3. 地极移动 .....                  | 61 |
| (五) 钱德勒晃动的衰减和激发 .....          | 63 |
| 三、转速的变化 .....                  | 66 |
| (一) 地球的转动和时间 .....             | 66 |
| (二) 地球转速的变化 .....              | 67 |
| <b>第四章 地球的年龄、能源和温度分布</b> ..... | 70 |
| 一、地质年表 .....                   | 70 |
| 二、放射性衰变和岩石的绝对年龄 .....          | 71 |
| (一) 放射性同位素的衰变规律 .....          | 71 |
| (二) 铅法 .....                   | 72 |
| (三) 钾-氩法 .....                 | 73 |
| (四) 铷-锶法 .....                 | 74 |
| (五) 碳 14 法 .....               | 74 |
| 三、地球的年龄 .....                  | 75 |
| 四、地面热流和地球内部的能源 .....           | 77 |
| (一) 长寿命的放射性元素 .....            | 77 |
| (二) 短寿命的放射性元素 .....            | 78 |
| (三) 地球形成时的引力能 .....            | 78 |
| (四) 地核的形成 .....                | 79 |
| (五) 地球的旋转能 .....               | 79 |
| 五、热传导 .....                    | 79 |
| (一) 一维问题 .....                 | 80 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| (二) 球层问题 .....                 | 82  |
| 六、地球内部的传热机制 .....              | 83  |
| (一) 热传导 .....                  | 83  |
| (二) 热辐射 .....                  | 83  |
| (三) 激子 .....                   | 83  |
| (四) 物质迁移 .....                 | 83  |
| 七、地球内部的温度梯度 .....              | 84  |
| 八、地球上层的温度分布 .....              | 85  |
| 九、地球内部的温度分布 .....              | 86  |
| <b>第五章 地磁场</b> .....           | 88  |
| 一、地球电磁学的物理基础 .....             | 89  |
| (一) 电磁场的扩散方程和拉普拉斯方程 .....      | 89  |
| (二) 介质运动时的电磁方程和动力学方程 .....     | 92  |
| (三) 向量亥姆霍兹方程和贝塞耳函数 .....       | 94  |
| 1. 向量亥姆霍兹方程的解 .....            | 94  |
| 2. 柱坐标系中的亥姆霍兹方程和贝塞耳函数 .....    | 95  |
| 3. 球坐标系中的亥姆霍兹方程和球贝塞耳函数 .....   | 101 |
| (四) “环型”和“极型”电磁场 .....         | 103 |
| 二、地磁场的高斯理论 .....               | 105 |
| (一) 地磁场的数学表述 .....             | 105 |
| (二) 地磁场的高斯(球谐)分析 .....         | 107 |
| 1. 地磁要素及其测量 .....              | 108 |
| 2. 高斯系数的确定和内外源场的区分 .....       | 109 |
| 三、地球的基本磁场及其长期变化 .....          | 116 |
| (一) 地球的基本磁场 .....              | 116 |
| 1. 基本磁场的高斯分析和地磁图 .....         | 116 |
| 2. 中心偶极子磁场和地磁坐标 .....          | 121 |
| 3. 非偶极子磁场和偏心偶极子 .....          | 123 |
| (二) 基本磁场的长期变化 .....            | 127 |
| 1. 长期变化现象 .....                | 127 |
| 2. 偶极子磁矩的衰减 .....              | 129 |
| 3. 非偶极子磁场的西向漂移和偏心偶极子的移动 .....  | 130 |
| 四、地球的变化磁场 .....                | 133 |
| (一) 地磁指数, 国际磁静日和磁扰日 .....      | 134 |
| 1. 磁情记数 $C$ 和 $C_i$ .....      | 135 |
| 2. 磁情指数 $K$ 和行星性指数 $K_p$ ..... | 135 |
| 3. 指数 $A_k$ 和 $A_p$ .....      | 135 |
| 4. 国际地磁静扰日 .....               | 136 |
| (二) 太阳静日变化 $S_q$ .....         | 136 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 1. $S_q$ 的形态和纬度变化 .....      | 137 |
| 2. $S_q$ 场的球谐分析 .....        | 137 |
| 3. $S_q$ 场的电流体系 .....        | 141 |
| 4. $S_q$ 场的经度效应和赤道异常 .....   | 148 |
| (三) 磁暴 .....                 | 149 |
| 1. 暴时变化 $D_{st}$ .....       | 152 |
| 2. 扰日变化 $S_D$ 和 $D_S$ .....  | 153 |
| 3. 极区磁亚暴 .....               | 154 |
| 五、地磁场的空间形态 .....             | 160 |
| (一) 近地面和核内磁场 .....           | 160 |
| (二) 高空磁场 .....               | 160 |
| (三) 磁层 .....                 | 162 |
| 第六章 古磁场及其成因 .....            | 165 |
| 一、岩石磁性 .....                 | 165 |
| (一) 岩石磁性的物理基础 .....          | 165 |
| (二) 岩石天然剩余磁化强度(NRM)的获得 ..... | 167 |
| 1. 等温剩磁 (IRM) .....          | 167 |
| 2. 热剩磁 (TRM) .....           | 168 |
| 3. 沉积剩磁 (DRM) .....          | 168 |
| 4. 化学剩磁 (CRM) .....          | 168 |
| 5. 粘滞剩磁 (VRM) .....          | 169 |
| (三) 岩石磁性的稳定性 .....           | 169 |
| 二、古磁场 .....                  | 170 |
| (一) 史前和史期地磁场的长期变化 .....      | 170 |
| 1. 地磁场方向的变化 .....            | 170 |
| 2. 地磁场强度的变化 .....            | 171 |
| (二) 轴向偶极子的假定和极移 .....        | 174 |
| 1. 虚地磁极的统计分析和地磁极的移动 .....    | 174 |
| 2. 古代极移 .....                | 177 |
| (三) 地磁场的倒转和地磁年表 .....        | 178 |
| 1. 自发反向和地磁场的极性反转 .....       | 178 |
| 2. 地磁场倒转的性质和地磁年表 .....       | 179 |
| 三、地磁场的成因 .....               | 181 |
| (一) 历史上有关地磁场成因的假说 .....      | 182 |
| (二) 地磁场维持的能量图像 .....         | 183 |
| 1. 液核中电磁流体力学的能量方程 .....      | 184 |
| 2. 地核中可能的能量来源 .....          | 186 |
| (三) 液核发电机维持磁场的过程 .....       | 190 |
| 1. 磁场维持的简单图像 .....           | 190 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 2. 布拉德过程的数学表述·····                 | 193 |
| 3. 非稳态发电机·····                     | 198 |
| <b>第七章 地电场和地球电磁感应</b> ·····        | 203 |
| 一、地球电场·····                        | 203 |
| (一) 地电场的各向异性·····                  | 203 |
| (二) 电磁脉动·····                      | 204 |
| 1. $P_c$ 型脉动·····                  | 206 |
| 2. 不规则脉动 $P_i$ ·····               | 207 |
| 二、地球电磁感应基础·····                    | 208 |
| (一) 局部地磁短周期变化异常·····               | 209 |
| 1. 海洋、海岛、海岸效应·····                 | 209 |
| 2. 一些特殊地区的地磁异常变化·····              | 211 |
| (二) 区分内外源场的面积分方法·····              | 211 |
| (三) 电磁感应的理论基础·····                 | 214 |
| 1. 球体问题的电磁感应·····                  | 214 |
| 2. 平面地球的电磁感应·····                  | 216 |
| 3. 源场效应·····                       | 219 |
| 4. 非周期变化场的电磁感应·····                | 222 |
| (四) 薄层导体和上地幔的屏蔽效应·····             | 227 |
| 1. 薄层导体中的电磁感应·····                 | 227 |
| 2. 长期变化场的电磁感应·····                 | 242 |
| 三、地球内部的电导率·····                    | 249 |
| (一) 地壳和地幔的电导率·····                 | 249 |
| (二) 地幔导电机制·····                    | 251 |
| (三) 地核内部的电导率·····                  | 252 |
| <b>第八章 天然地震及其预测</b> ·····          | 255 |
| 一、地震的一些特征及地震成因·····                | 255 |
| 二、地震的强度·····                       | 261 |
| 三、地震的长期预测·····                     | 264 |
| 四、地震的短期预测·····                     | 265 |
| 五、地震成因模式·····                      | 266 |
| <b>第九章 地震波的传播</b> ·····            | 267 |
| 一、弹性理论·····                        | 268 |
| (一) 应力分析·····                      | 268 |
| 1. 体力和面力·····                      | 268 |
| 2. 应力张量·····                       | 268 |
| 3. 应力张量的对称性·····                   | 269 |
| 4. 克朗内克 (Kronecker) $\delta$ ····· | 270 |
| 5. 应力二次曲面·····                     | 270 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 6. 运动方程·····                  | 271 |
| (二) 应变分析 ·····                | 272 |
| 1. 无限小应变理论·····               | 272 |
| 2. 旋转张量·····                  | 274 |
| 3. 应变张量·····                  | 275 |
| 4. 应变二次曲面·····                | 276 |
| 5. 体积膨胀·····                  | 276 |
| 6. 连续方程·····                  | 276 |
| (三) 广义虎克定律 ·····              | 278 |
| 1. 非各向同性的完全弹性体的应力-应变关系 ·····  | 278 |
| 2. 各向同性的完全弹性体的应力-应变关系 ·····   | 278 |
| 3. 用位移表示的运动方程·····            | 280 |
| 4. 几种完全弹性物质·····              | 281 |
| 5. 杨氏模量和泊松比·····              | 281 |
| 6. 完全弹性体的能量·····              | 282 |
| 7. 等温和绝热弹性系数·····             | 284 |
| (四) 地球介质的非完全弹性 ·····          | 286 |
| 1. 偏应力和偏应变·····               | 286 |
| 2. 完全弹性体·····                 | 286 |
| 3. 粘滞体·····                   | 287 |
| 4. 完全塑性体·····                 | 287 |
| 5. 宾干姆 (D. K. Bingham) 体····· | 288 |
| 6. 粘弹性体·····                  | 288 |
| 7. 弹滞性体·····                  | 289 |
| 8. 一般的线性体·····                | 290 |
| 9. 固体的强度·····                 | 291 |
| 10. 固体和流体 ·····               | 292 |
| (五) 波动方程及其基本解 ·····           | 292 |
| 1. 体膨胀和旋转量所满足的波动方程·····       | 292 |
| 2. 直角坐标下的波动方程·····            | 293 |
| 3. 柱坐标下的波动方程·····             | 294 |
| 4. 球极坐标下的波动方程·····            | 295 |
| (六) 地球介质的品质因子 ·····           | 296 |
| 二、地震射线理论·····                 | 298 |
| (一) 费马原理 ·····                | 298 |
| 1. 费马原理·····                  | 298 |
| 2. 射线方程·····                  | 298 |
| 3. 球对称情形下的地震射线·····           | 299 |
| 4. 特征函数和惠更斯原理·····            | 300 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 5. 波动方程向射线方程的过渡          | 303 |
| 6. 斯内尔 (Snell) 定律        | 306 |
| (二) 层状介质中的地震射线           | 307 |
| 1. 走时方程                  | 307 |
| 2. 射线的曲率                 | 308 |
| 3. 地震波在单个水平层中的走时         | 308 |
| 4. 多层介质中地震首波的走时          | 310 |
| (三) 地震射线在斜界面的折射和反射       | 310 |
| 1. 首波                    | 310 |
| 2. 反射波                   | 311 |
| (四) 球对称介质中的地震射线          | 312 |
| 1. 射线参数                  | 312 |
| 2. 本多夫 (Benndorf) 定律     | 313 |
| 3. 射线的走时                 | 313 |
| 4. 射线的曲率                 | 314 |
| 5. 地球内部的速度异常区对地震射线的影响    | 316 |
| 6. 震相                    | 316 |
| 7. 走时曲线和震源位置的确定          | 318 |
| (五) 地球内部的地震波速度分布         | 318 |
| 1. 古登堡 (Gutenberg) 方法    | 318 |
| 2. 赫格洛兹-维歇特-贝特曼方法        | 320 |
| 3. 数值结果                  | 321 |
| 三、地震波的反射和折射              | 321 |
| (一) 平面波在自由表面的反射          | 321 |
| 1. 平面波                   | 321 |
| 2. $P$ 波入射到自由表面          | 323 |
| 3. 位移的反射系数和位移位的反射系数的关系   | 324 |
| 4. 视出射角                  | 325 |
| 5. $SV$ 波入射到自由表面         | 325 |
| 6. $SH$ 波入射到自由表面         | 326 |
| (二) 平面波在两种介质分界面上的反射和折射   | 327 |
| 1. $SH$ 波的反射和折射          | 327 |
| 2. $P$ 波和 $SV$ 平面波的反射和折射 | 328 |
| 3. 能量的分配                 | 330 |
| 四、地震面波                   | 332 |
| (一) 瑞雷 (Rayleigh) 波      | 332 |
| (二) 勒夫 (Love) 波          | 334 |
| (三) 频散方程的相长干涉解释          | 336 |
| (四) 面波的频散                | 337 |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 1. 波的频散·相速度和群速度·····                            | 337 |
| 2. 爱里 (G. B. Airy) 震相·····                      | 341 |
| 3. 面波的频散·····                                   | 342 |
| 4. 确定相速度和群速度的原理·····                            | 343 |
| <b>第十章 地球的振荡</b> ·····                          | 347 |
| 一、地球振荡的理论·····                                  | 347 |
| (一) 基本方程·····                                   | 347 |
| (二) 边界条件·····                                   | 350 |
| (三) 运动方程的解·····                                 | 351 |
| (四) 环型振荡和球型振荡·····                              | 354 |
| (五) 地球的振荡和地震面波·····                             | 356 |
| 二、地球的自由振荡的观测·····                               | 357 |
| 三、地球自转和扁率对地球振荡的影响·····                          | 360 |
| (一) 地球自转的效应·····                                | 360 |
| (二) 地球扁率的效应·····                                | 363 |
| 四、地球自由振荡的应用·····                                | 364 |
| (一) 地球模式·····                                   | 364 |
| (二) 地球的非完全弹性·····                               | 366 |
| (三) 地震的震源机制·····                                | 368 |
| <b>第十一章 地震位错和震源物理</b> ·····                     | 369 |
| 一、地震断层和震源区的应力状态·····                            | 369 |
| (一) 地震的直接成因·弹性回跳理论·····                         | 369 |
| (二) 断层面解·····                                   | 369 |
| (三) 震源区的应力状态·····                               | 371 |
| 二、地震位错·····                                     | 373 |
| (一) 位错·····                                     | 373 |
| (二) 弹性动力学位错理论·····                              | 373 |
| 1. 集中力引起的位移·····                                | 373 |
| 2. 位移表示定理·····                                  | 374 |
| 3. 索米扬那 (Somigliana) 位错和伏尔特拉 (Volterra) 位错····· | 374 |
| 4. 均匀、各向同性和完全弹性的无限介质中的位移表示式·····                | 374 |
| 5. 位错谱表示式·····                                  | 376 |
| 6. 位错元和力偶系的等效性·····                             | 376 |
| (三) 剪切位错点源辐射的地震波·····                           | 378 |
| 1. 剪切位错点源辐射的地震波远场位移的频谱·····                     | 378 |
| 2. $P$ 波和 $S$ 波的辐射图型·····                       | 379 |
| 3. $S$ 波的偏振·····                                | 380 |
| 三、破裂过程和震源参数·····                                | 381 |
| (一) 有限移动源·····                                  | 381 |

|                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| 1. 单侧破裂·····                                              | 381        |
| 2. 双侧破裂·····                                              | 384        |
| (二) 震源参数·····                                             | 385        |
| 1. 点源的参数·····                                             | 385        |
| 2. 运动学参数·····                                             | 385        |
| 3. 静力学参数·····                                             | 385        |
| 4. 动力学参数·····                                             | 389        |
| 四、震源物理·····                                               | 389        |
| (一) 地震前兆·····                                             | 389        |
| 1. 地震预报·····                                              | 389        |
| 2. 确定性的地震前兆·····                                          | 390        |
| (二) 震源物理·····                                             | 401        |
| 1. 概述·····                                                | 401        |
| 2. 震源物理实验研究·····                                          | 402        |
| 3. 震源物理理论·····                                            | 407        |
| <b>第十二章 地球内部构造</b> ·····                                  | <b>413</b> |
| 一、地球的表面形态和内部的主要分层·····                                    | 413        |
| 二、地壳、地幔和地核·····                                           | 415        |
| (一) 研究地壳的地震方法·····                                        | 415        |
| (二) 大陆和海洋下面的地壳·····                                       | 416        |
| (三) 上地幔和低速层·····                                          | 420        |
| (四) 地核·····                                               | 422        |
| 三、地球内部的物质组成·····                                          | 423        |
| 四、地球的密度·····                                              | 426        |
| (一) 经典的地球密度分布规律·····                                      | 427        |
| 1. 勒让德-拉普拉斯定律·····                                        | 427        |
| 2. 若氏(E. Roch),李普希次(R. O. Lipschitz)和雷维(M. Llévy)的定律····· | 428        |
| 3. 达尔文(G. H. Darwin, 1884)定律·····                         | 430        |
| 4. 维歇特(E. Wiechert, 1897)定律·····                          | 430        |
| (二) 布伦的方法·····                                            | 431        |
| (三) 地球的自由振荡·····                                          | 433        |
| 1. 横波的模式与地核半径·····                                        | 433        |
| 2. 基线问题·····                                              | 434        |
| 3. 反演问题和密度分布的争论·····                                      | 434        |
| 五、状态方程·····                                               | 435        |
| (一) 伯奇-莫尔那汗状态方程·····                                      | 435        |
| (二) 球层的均匀性·····                                           | 436        |
| (三) 速度与密度的关系·····                                         | 438        |
| 六、地球的非弹性·····                                             | 440        |

# 第一章 概 论

## 一、什么是地球物理学

顾名思义,地球物理学就是以地球为对象的一门应用物理学。这门学科自本世纪之初就已自成体系。到了六十年代以后,发展极为迅速。它包含许多分支学科,涉及海、陆、空三界,是天文、物理、化学、地质学之间的一门边缘科学。

作为一个天体来研究地球,地球物理学和天体物理学是分不开的;研究地球本身的结构和发展时,地球物理学又和地质学有很密切的联系。但地球物理学所探讨的范围远不止此,它还包括研究地面形状的大地测量学,研究海洋运动的海洋物理学,研究低空的气象学和大气物理学,研究高空以至行星际空间的空间物理学,研究地球本体的固体地球物理学(或叫做地体学),还有一些较小的分支,如火山学、冰川学、大地构造物理学等等。这些学科中,有的又各有独立的分支。人造卫星出现后,地球物理现象的观测扩展到了行星际空间。行星物理学是地球物理学的一个引伸,但它所要解决的问题,离地球越来越远了。

地球物理学,如果狭义地理解,指的就是固体地球物理学。这一般又可分为两大方面:研究大尺度现象和一般原理的叫做普通地球物理学,利用由此发展出来的方法来勘探有用矿床和石油的,叫做勘探地球物理学(或物理探矿学)。后者因为工业上的需要,发展极快,已经自成体系。勘探地球物理学虽然导源于普通地球物理学,但勘探地球物理学所发展的方法现在反过来又对于研究普通地球物理现象有很大的帮助。

## 二、固体地球物理学的发展

地球物理问题的探讨从远古就开始了。我国东汉的张衡和唐朝的僧一行都可以算是地球物理学家:前者是地震学家,后者是大地测量学家。现代物理学也可以说是从研究地球物理问题开始的。只是由于研究地球和月球的运动,牛顿才发现了万有引力定律。牛顿以后的许多数学家和物理学家都对地球物理的研究作出过重要的贡献。克雷若(A. C. Clairaut)研究地球的形状,拉普拉斯(P. S. Laplace)研究地球的起源,高斯(C. F. Gauss)研究地磁,开尔芬(Lord Kelvin)研究地球的弹性、热传导和许多其他地球物理问题。当代的诺贝尔奖金获得者有好几位都致力于地球物理问题的探讨。尤瑞(H. C. Urey)和阿尔芬(H. Alfvén)都对地球起源的研究有贡献;阿普尔顿(E. V. Appleton)是研究电离层的,里贝(W. Libby)是研究 $C^{14}$ 的,这些人都是杰出的地球物理学家。

一门科学的中心课题在科学发展的进程中时有起伏变化,这是由生产的需要和科学本身的发展条件所决定的。有些问题只是由于新概念的提出或新技术的突破才得到长足的进展。二十世纪初叶,物理学接连出现许多引人注目的发现,但地球物理学的成就并不

突出,以致许多物理学家几乎忘记物理学中还有这一门分支。其实它在十八、十九两世纪里却是响当当的物理学科。到了三十年代,由于物理勘探方法显示出优异的效果,地球物理学才又开始为人注意。物理勘探方法原是地球物理学的一种应用,但有一个时期,物理探矿学竟成了地球物理学的代名词,直到现在,我国地学界仍有人持这种看法。这是一种误解。比如说,有这样一种说法:“地质学与地球物理学最大的差别是地质学注重时间观念,而地球物理学是不管时间的。”这是混淆地球物理学与物理探矿方法的典型例子。作为一门物理学,地球物理学不但研究地球物理的时空变化,而且给予地学的时间概念以更明确的含义。

在物理探矿学大踏步发展的同时,地球内部的研究也取得稳步的进展。这是一项综合性的研究,但地震学(固体地球物理学的一个分支)起着最显著的作用。到了五十年代,根据地球物理研究的结果,人们已经对于地球内部的分层结构、物质组成和物理状态有了一个大致地了解。此时人们逐渐认识到许多地学现象,特别是地下资源分布问题,若不研究地壳深处以至地幔上部(即地球最外层约七、八百至一千公里深度)是不能完满解释的。由于问题是全球性的,所以在六十年代之初,国际间就组织了一个约有五十个国家参加的协作计划,叫做“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。

所用的手段包括:地震、地磁、古地磁、重力、海上地球物理测量、地热、地质、深钻等。计划延续了约十年,其重要成果之一就是提出了一个“板块大地构造假说”。这个假说不是闭门造车的结果,而是根据多年积累的大量观测资料(海上地球物理测线长达几十万公里)提出来的。这个假说的出现是地学发展史上一个里程碑。它的意义之重大及影响之深远可以与近代科学的任何重大发现相媲美。板块假说认为地球最上层(岩石层)是由几个大的板块所组成的。这些板块不是固定不动的,而是相对地运动着。地球上各种大地构造活动就是这些大板块互相作用的结果。这个假说是1967年才提出来的,时间不久,还远远不够完善。它来源于实践,还需要经过更多的实践来检验和修正。但应指出,板块构造假说最重要的意义不在于地球岩石层可以分成多少个板块,而在于新假说以大量的观测事实证实了地学中“活动论”的观点。这是在基本概念上的一次重要的进展。关于这个问题,以后还要有专节讲述。

国际上地幔计划到1970年就结束了,但问题并未结束。板块大地构造是一个新的概念,它虽然可以解释许多地学现象,但也存在不少缺陷和困难,需要补充和改进。例如,板块的边界大部分在海洋,关于这部分边界的情况研究得比较多,但在大陆上的情况就研究得比较少。板块运动的动力来源还没有公认一致的解释。板块的活动除在其边缘外,在其内部也有所表现,而这种活动对地震成因和矿产富集都极有影响。还有一些其他的问题都是上地幔计划期间来不及解决的。针对这种情况,国际间又组织了一个“地球动力学计划”作为以前计划的继续,也约有五十个国家参加,期限为1974—1979年。很显然,这个计划和板块构造假说是密切相关的,其主要目的之一是要解决这个假说所遗留下来的问题,特别是板块运动的驱动力问题。如何具体实施这个计划因各国情况不同并无规

定。地球动力学计划的提出并不意味着地壳上地幔研究的终结,它只是固体地球物理长远协作的一个阶段,而这个计划在各个国家的体现是各不相同的。在动力学计划之后,国际上又提出一个八十年代岩石层研究计划,这是合乎逻辑的。这个计划的中心课题是岩石层的现状,形成、演化和动力学,重点在研究各大陆和陆缘,也包括洋底岩石层进一步的研究。

地球动力学这个词在当前国际协作这个意义上讲,是有其特殊含义的——主要是研究板块的动力学问题。但这个词的本义原不限于此。地球内部的物理过程和地球在空间的运动都和动力学密切相关,所以还有天文方面的地球动力学问题。广义地讲,地球动力学几乎涉及到全部的固体地球物理学,这就超出板块运动的问题了。在当代文献上,广义和狭义的理解都是存在的。

六十年代推动地球物理发展的另一重要事件是利用地震方法监视地下核爆炸的问题。为了提高这个方法的水平,美国拟定一个所谓“维拉-U计划”。这个计划除了要改进美国国内的地震观测系统外,还在全球建立了一系列标准地震台网。维拉-U计划的出发点是要通过提高固体地球物理学的全面水平来找到监视地下核爆炸的可靠方法,所以这个计划中的研究项目是极其广泛的,非但有地震学,而且也涉及到地球物理学的许多其它领域,使它们都有所提高。这个计划对推动地球物理学的发展起了积极的作用。

地震学是固体地球物理学的一个重要分支。原来的目的是为了研究和防御天然灾害,但后来却主要沿着地震波物理学这个方面大大发展起来,而对于天然地震本身的研究反而进展不大。到了六十年代,情况才有了很大的变化。我国在1971年成立了国家地震局,专门进行地震预测预防方面的工作。但地震不是一个孤立的现象,它和许多其他的地质现象,特别是其它的地球物理现象有内在的联系。脱离了一般的地球物理背景而去单独地解决地震预报问题是很难办到的。地球物理工作者也必须将地震预测问题作为自己的问题来对待。

### 三、地球物理学和其它学科的关系

此处仅限于讨论固体地球物理学。地面观测数据,一部分来自地质调查,所以地球物理工作者必须能正确理解地质学的语言。地球内部物质所处的温、压环境与地面物质不同。在短暂力的作用下,它基本上是弹性的,在长期力的作用下,它又可以发生流动。所以弹性学和流变学的知识对于地球内部物理现象的研究是需要的。地球物理现象的研究不仅涉及到力学问题,而且也涉及到所有其他物理部门和某些化学部门。

解决地球物理的理论问题,不能忽视空间和时间的条件(即数学上所谓的边值问题和初值问题)。任何地球内部构造或地球演化的假说都必须使得到的结论与现在所见到的地球相符合。即是说:现在的地球为地球演化假说提供一个时间条件;地面观测为地球内部物理过程提供一个边界条件。这些条件虽不能确定一个假说,但却可大大限制一些无边际的幻想。

地球物理学在某些研究领域内和地质学是有密切关系的,但并不相同。地质学是利用地面上直接观测到的数据来对地下浅层构造、变化过程和资源情况作出推断。百余年来,地质学家对人类的经济生活所起的作用是很大的,并仍将起重要的作用,但人类对地

下能直接观测的范围究竟有限(最深的油井不过 9 公里左右),而出露的矿床也越来越少了。地下情况在地面上没有直接的显示时,传统的地质方法就很难奏效,必须借助于物理的方法,如利用地震波、放射性或各种物理场(电、磁、重、热)。但物理方法所给的数据是间接性质的,还必须对它们做理论解释才能换成地质构造或矿藏,而这种解释时常是不够肯定的。间接数据比不上直接数据那样明确,但是没有什么可以选择的,不能不用,因为可能直接观测的范围太小了。由地面上的物理观测来推导地下的情况,在地球物理学上叫做反演问题。反演问题的答案一般是不单一的,但通过多种观测可以将这种不确定性缩小。可以想见,反演问题是地球物理学中一个核心的理论问题。

自然界的情况不象实验室那样可以按人意安排。对实际地球物理问题的计算常是极其复杂的。若不加简化,往往算不出结果。然而怎样简化才能既不失真,又不烦琐,确应有所考虑。一块不规则的矿石若在远处计算它的引力,就可以看做是一个圆球;在近处就不行了。一块地层,若在近处计算它的引力,就可看做是一无穷平面,远处就不行了。计算地震波的传播时,岩石可以看做是弹性体,计算冰川融化后的影响时,地球就表现有某种塑性。条件不同,计算方法大有差异。对于地球物理来说,数据固然是不可缺少的依据,但物理概念也是同样重要的。地球物理学是一门应用科学,它必须密切联系实际。但地球物理的计算有时是非常复杂的。理论地球物理工作者有时会沉湎于复杂的计算,而忘记问题的实际意义,这是应当注意的。

## 第二章 地球的形状和重力场

### 一、概 论

地球形状和重力场的研究是地球物理学最老的两个课题。它们是大地测量学的主要研究对象,但与许多其他地球物理问题都有关系。

地球形状的概念历史上是逐渐演变的。远古的时候,人们就已意识到地球是圆的,并曾企图从测量地面一度的弧长来估计地球的大小。古代的埃及人、中国人和阿拉伯人都对这个问题有过贡献。到了十七世纪,人们才觉察出地球并非正圆,而是扁圆的,但究竟怎样扁法却无从测得准确,因为无论圆与扁都只是笼统的描述,而真实的地面却是崎岖不平、极不规则的。如何将地球形状这个概念精确化,使它能适用于定量的计算还有待于许多先驱者的努力。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。它的定义就是与平均海洋表面最逼近的那个重力等位面。这个等位面的形状和大小是可以用天文测量、几何测量和重力测量来测定的。它是地面各点空间位置的标准。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。因此从全球来看,大地水准面并不是完全包在地球外面,而在某些地方却覆盖着少量的地球物质。这一点实际上虽影响不大,但在理论上却引起一些微妙的问题。大地水准面是大地测量学的基本概念之一,讨论很多。不过近代有人证明,地球表面可以完全由大地测量来确定而不必借助于大地水准面。然而,做为地球物理学的基础知识,以下讨论仍以大地水准面为出发点。

大地水准面虽然比较平滑,但仍是一个极不规则的曲面。要确定这样的曲面,可以分两步走:先选择一个与它同重力位而又很逼近的等位面做为参考面,这个参考面的形状简单,便于计算;然后测定大地水准面与这个简单曲面的偏离。显然最好是选一个旋转椭球面(或扁球面)了。国际间在 1924 年曾选定一个扁球面做为参考面,以后在 1967 年又修订了一次。这个选定的参考椭球面的参数是:长轴  $a = 6,378,160$  米;扁率

$$f = (a - c)/a = 1/298.247;$$

$c$  — 短轴。实测表明,大地水准面与参考椭球面的最大偏离不超过地球半径的十万分之一。也许有人认为,选取一个三轴椭球面做为参考面更逼近些,但这样做对实际的精度并无好处,可是计算上却复杂得多了。

参考椭球面按定义是一个重力等位面。按照位论的定理,这个面上任一点的重力值是可以计算的。这样得到的重力表达式就是所谓的国际重力公式。根据这个公式所计算的重力值是重力测量的标准,叫做正常重力值。实测的重力值减去正常重力值叫做重力异常(在小区域的相对重力测量中,常选取一个合适地点的重力值做为标准,不必按重力公式去计算)。研究重力异常在各种地球物理现象中的意义是重力学的任务。重力异常在地面上的分布和地下物质的密度分布有关系;重力异常区在地面上的大小范围和它所反映