

大学基础物理教学 疑难问题解析

金仲辉 申兵辉 编著
刘玉颖 何志巍



科学出版社

(O-7780.31)

大学基础物理教学 疑难问题解析



科学出版社互联网入口

高教数理分社: (010)64034725 销售: (010)64031535

E-mail: mph@mail.sciencep.com

销售分类建议: 物理学

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-062055-2



9 787030 620552 >

定价: 69.00 元

大学基础物理教学 疑难问题解析

金仲辉 申兵辉 刘玉颖 何志巍 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是中国农业大学的老师在长年讲授“大学基础物理”课程中,作出的一些教学内容和方法的研究成果.这些成果指出了国内外著名教材或有影响的教材中对一些物理概念、物理定律的叙述不够严谨、插图错误、不适当的物理公式推导以及给出的数据不合理等问题,还给出了(其他教材未给出的)一些公式的推导过程.教学方法研究的成果包括双语教学、学生撰写小论文等的实践经验.本书还包含数篇学生在教师指导下所写的并发表在《大学物理》等期刊上的文章.

本书可供讲授“大学基础物理”的教师参考使用,也可作为大学生和自学“大学基础物理”人员以及中学物理教师提高教学水平的参考资料.

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理教学疑难问题解析/金仲辉等编著. —北京:科学出版社, 2020. 1

ISBN 978-7-03-062055-2

I. ①大… II. ①金… III. ①物理学-教学研究-高等学校 IV. ①O4-42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 163529 号

责任编辑:昌盛 龙媛媛 / 责任校对:杨聪敏

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

涿州市京南印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2020 年 1 月第一次印刷 印张:22

字数:441 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

要求一位教师在课堂上讲授内容不出错误,看似要求不高,实则很难,其原因之一,是在一些著名的或有影响的教材中或多或少存在着一些错误,或对一些物理规律的叙述不够严谨.一些著名的教材尚且如此,那些少有影响的教材里存在的问题可能就更多了.对于刚走上教学岗位的青年教师来说,在备课中不太可能参阅许多教材,进行比较,去伪存真,所以,稍有不慎就有可能在课堂讲授中出错.笔者在数十年从事大学基础物理教学工作中,对此深有体会.大学基础物理教学内容虽说相对成熟且并不深奥,但它所涉及的内容却十分广泛.一位勤奋工作的教师,要在数年内比较全面掌握它,也不是一件很容易的事,或许说,一位教师的成长过程,就是不断积累教学经验和克服错误的过程,笔者就经历了这样的过程.

大学基础物理教材中总有许多插图,帮助读者了解正确的物理过程.但是对同一个物理问题的插图,在不同的教材中有不同的绘法.例如对于科纽棱镜插图,在南开大学、北京大学和华东师范大学的教材中就有不同的绘法,那么我们自然要问:哪个插图是正确的呢?如果教师在备课中仅参考一本教材来讲授科纽棱镜,就有可能讲错.再如,对于薄膜等厚干涉插图,在美国哈里德著的《物理学基础(第6版)》中的绘法也是不正确的,其原因可能是作者不了解薄膜等厚干涉定域所致.还有,在教材中列出的一些数据也是值得注意的.例如,对用于计算机记忆元件的矩磁材料圆环,清华大学和北京大学的教材中列出的 H_c 值竟相差 80 倍,哪本教材给出的数据是合适的呢?这就需要教师在备课中予以判别,以免在课堂讲授中出错.笔者在北京大学求学时曾听过叶企孙教授讲授“铁磁学”,他在讲授中常指出教材中哪些数据是可信的,哪些数据是有问题的,给人很深的印象.还有,对同一个物理问题有不同的说法,例如对于日光灯的放电究竟是辉光放电还是弧光放电.北京大学和北京师范大学的教材有不同的说法,也需要我们教师去判断.

教材中给出的一些物理公式是否一定合适呢?这也值得商榷.例如对于杨氏干涉的阐述,许多教材在推导干涉条纹宽度时,给出的光程差公式为 $\Delta L = d \sin \theta$.我们要说,在实验室观察干涉条纹的条件下,它是不正确的,其原因是在推导过程中作了不恰当的近似(需知光的波长是一个很小的长度量).此外,对薄膜等倾干涉中给出的光程差为 $\Delta L = 2nh \cos \gamma$,几乎所有的教材都作了推导,但是据笔者阅读过的众多国内外教材都在未加详细的推导情况下,直接将上述的 $\Delta L = 2nh \cos \gamma$ 公式用于等厚干涉的情况.如果教师在课堂讲授中也是这样做法,有学生问“为什么”,教师将如何应答?

中学物理已有牛顿运动三定律、万有引力定律、库仑定律、欧姆定律、霍尔效应等教学内容,那么在大学基础物理讲授中如何在中学物理基础上深入介绍这些内容就显得十分重要,这是教师在备课中需要认真思考的问题.还有,在讲授中适当地增加一些基础物理的新内容也是必要的.例如,可在讲授一般旋光性(线偏振光通过一般旋光介质后,它的偏振面发生偏转)后,介绍圆二色性(线偏振光通过旋光介质后,出射光是椭圆偏振光),利用圆二色性可确定物质的化学结构和蛋白质的二级结构,所以圆二色性在化学和生物学有着广泛的应用.值得指出的是,在全国的教材中,中国农业大学的教材首先介绍了圆二色性.

虽说笔者从事大学基础物理教学工作数十年,但对有些教学内容至今还不是十分清楚.例如,1809年法国的马吕斯根据光的微粒说推导出马吕斯定律,我们知道用光的微粒说可推导出光的反射定律和折射定律(后来证明后者是错误的),但不知道用光的微粒说是如何推导出马吕斯定律的,如果知道它,不失是一件很有趣的事,也可以丰富教学内容.总之,对基础课教师来说,从事内容的研究是必不可少的,它花费了教师许多的精力,甚至是一生的精力.教学内容的研究成果,不仅使教师在课堂讲授中不出错误,也为提高我国大学基础物理教学水平做出贡献;同时在此过程中,也对学生起着一种潜移默化的教育作用,对知识的探索要孜孜以求,去伪存真.

本书的大部分内容是我校应用物理系教师发表在《大学物理》《物理通报》《现代物理知识》《物理与工程》等期刊上的文章,其中还有三篇文章由我校本科生在刘玉颖副教授指导下写成的,分别发表在《大学物理》和《物理与工程》上.本书的最后一篇文章“物理学在促进农业发展中的作用”,供广大物理教师在课堂讲授时作为参考.如今物理学在农学上的应用也越来越广泛,近年来也有“农业物理”一类图书的出版,可以期待终究会出现一门新的学科,即农业物理学.

本书在编写的过程中,得到我校领导和教务处领导的关心和支持,在此表示衷心的感谢.

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,希望读者不吝指正.

金仲辉

2019年8月

目 录

前言	
如何讲授牛顿第一定律和牛顿第二定律	1
地球两极、赤道和内部的重力加速度	5
质点相对于地球的运动方程	11
均匀物质热力学关系记忆法	13
惯性质量和引力质量	15
万有引力定律是如何被发现的	17
大学物理机械波教学方法探讨	22
推导伯努利方程中的一个问题	27
气体分子平均相对速率与平均速率	29
卡诺定理的物理意义	32
谈谈熵的概念	34
谈谈混沌	39
如何讲授库仑定律	41
静电屏蔽的物理意义	45
静电场电势零点的选择	48
地球是一个等势体吗?	51
地球和大气的静电状态	53
微波遥感的物理基础及其在农业上的应用	57
均匀带电球面上的电场强度如何计算	66
均匀带电球壳球面电场强度计算方法的讨论	67
均匀带电球体的场强分布	72
载有稳恒电流圆柱形导体内外的电场分布	74
欧姆定律是如何发现的	77
独立回路的选择方法比较	79
对“独立回路的选择方法比较”一文的改进意见	81
磁感应强度的多种定义	83
奥斯特实验的历史意义	86
电荷 电荷守恒定律	88
关于电磁学基本定律和方程的一些问题	90

浅谈地球磁场	96
日光灯气体放电是辉光放电还是弧光放电	101
无限长密绕载流螺线管磁场方向的分析	110
从磁滞回线图来了解铁磁性材料的性能	112
磁畴和畴壁结构的主要特征	115
场的观点是如何提出的	123
讲授法拉第电磁感应定律中的一个问题	125
拉莫尔进动解释抗磁性和磁致旋光效应	127
推导位移电流的一种方法	131
在耗损介质中的电磁波	133
讲授“狭义相对论”的一些意见	138
水中点物的虚像位置讨论	146
用惠更斯几何作图法导出光的折射定律中的一个问题	148
用初等数学推导棱镜的最小偏向角	150
也谈光具组成像的一些问题	152
理想光具组是否存在?	156
透射光的振幅和强度可以大于入射光的振幅和强度	160
杨氏干涉实验教学中的几个问题	163
光学教学中的两个问题	168
杨氏干涉条纹宽度公式的推导	172
推导杨氏干涉条纹宽度公式中的两个近似条件问题	175
提高干涉条纹清晰度的条件	178
杨氏双缝干涉图样的理论模拟	181
单色点光源双光束干涉可见度的理论模拟	187
劳埃德镜实验条件的讨论	190
薄膜干涉光程差公式推导过程中的近似问题	193
谈谈薄膜干涉中的半波损问题	196
单层增透膜的反射光强问题	201
透镜的等光程性	205
等倾干涉和等厚干涉的差别	207
从单缝夫琅禾费衍射的图形来看衍射的定义	209
对透射光栅光强极值位置的探讨	211
用线偏振光产生椭圆(或圆)偏振光的另两种方法	215
维纳实验证明了光波中电矢量的作用	219
关于科纽棱镜的插图	220

马吕斯定律的意义·····	223
如何讲授旋光性·····	225
关于美国哈里德教材《物理学基础》中几个问题的商榷·····	227
圆二色性——另一种旋光现象·····	233
一篇教学参考的好文章——简评“光学史上的一段佳话”·····	236
结合物理教学讲授一些物理学史的体会·····	238
在普通物理教学中加强物理前沿内容·····	243
电子自旋的概念是如何提出的·····	245
优化大学物理教学的一点思考——以光学原理教学为例·····	248
大学物理学教学方法实例分析·····	251
突出文化特色的大学物理教学模式·····	256
大学物理课程中引入小论文撰写环节的教学实践·····	261
农业院校“大学物理”多层次国际化教育教学模式·····	265
大学物理双语教学实践与研究·····	270
对接国际一流,大学物理双语课程建设与实践·····	276
普通激光笔的辐射对人的眼睛有害吗·····	282
杨氏双缝干涉实验与飞机安全着陆系统·····	288
登陆火星飞船“推进系统”的遴选及其物理学性能·····	294
巴西坚果效应之谜·····	303
人是怎样定位声音的·····	309
野外地物反射光谱的测试原理及其在农业上的应用·····	316
网球拍中的几个物理问题·····	326
物理学在促进农业发展中的作用·····	331

如何讲授牛顿第一定律和牛顿第二定律

金仲辉

在初中和高中的物理学课程中都讲授了牛顿第一定律和牛顿第二定律,那么在大学基础物理课程中如何进一步讲授这两个定律就值得商讨了.如果简单地重复中学教材讲授的内容就显得不足.为了解决这些问题,先来看看国内外教材是如何叙述它们的.

一、牛顿第一定律

福里斯著的《普通物理学》是这样表述牛顿第一定律的:“任何物体都保持静止的或匀速直线运动的状态,直到其他物体的作用迫使它改变这种运动状态为止.”在这个定律里,是把物体看作是质点,也就是不考虑物体的转动,因为一个物体不受其他物体作用时,它也可以处于匀速的转动状态中.

《伯克利物理学教程(第1卷 力学)》是这样表述的:当无外力作用于物体上时,物体保持静止或保持恒定速度(加速度为零)不变,即

$$\text{当 } \mathbf{F}=0 \text{ 时, } \mathbf{a}=0$$

哈里德著的《物理学基础(第6版)》是这样表述的:如果没有外力作用在一物体上,则该物体的运动速度就不能改变,即物体不可能加速.

在国内的众多教材里,对牛顿第一定律的表述基本上和上述三种教材里的表述是类似的.例如,较早期的教材(严济慈著的《普通物理学》)中,对牛顿第一定律表述和哈里德的表述是类似的,马文蔚等编的《物理学》中对牛顿第一定律的表述和《伯克利物理学教程》中的表述是类似的.

在上述的三种表述中,哪一种更妥当呢?笔者认为福里斯的表述更可取些,因为在建立牛顿第一定律之前,人们并没有对力作出严格的定义,什么是“力”并不清楚,如果不知道什么是“力”的话,在定律中提到“力”似乎就没有什么意义了.为了避免提前使用“力”这个应加以严格定义的概念,将不受外力的物理条件说成是不受外界影响要妥当些.爱因斯坦对牛顿第一定律曾多次这样表述过:“物体在远离其他物体都足够远时,一直保持静止状态或匀速直线运动状态.”这样的表述具有更普遍的意义,它的有效性超出了经典力学的范畴,不论是质点、刚体、电磁场还是基本粒子,当它们不受外界干扰时,都不改变其运动状态.在赵凯华著的《力学》里写道:“‘力’这个词是牛顿力学最基本的概念之一,也是日常生活和物理学史中用得很滥的词儿,可是本书到现在还没有给它下过严格的定义.有鉴于此,不妨改用

下列较为现代化的说法来表述惯性定律:‘自由粒子永远保持静止或匀速直线运动的状态’.所谓‘自由粒子’是不受任何相互作用的粒子(质点).”由此可看出,赵凯华对牛顿第一定律(即惯性定律)的表述最为简明.

值得指出的是,《伯克利物理学教程》中对牛顿第一定律的数学表述最为不可取,即 $F=0$ 时, $a=0$, 它会使人认为牛顿第一定律是牛顿第二定律的一个特例,从而有牛顿第二定律可推导出牛顿第一定律的错误理解. 我们要知道,牛顿第一定律是牛顿第二定律的基础,因为牛顿第一定律确立了两个很重要的概念,即惯性和力的概念,一个物体在没有其他物体的干扰下,它保持静止或做匀速直线运动,那么这个物体运动所依据的参考系就是惯性系. 如果这个物体受到另一物体的干扰(作用),它的运动状态发生变化,即获得加速度,我们就说这个物体受到另一物体力的作用. 由此可看出,如果没有牛顿第一定律就根本谈不上有牛顿第二定律了.

牛顿第一定律又称惯性定律,它先由伽利略通过斜面实验得出. 从实验中他得出一个普遍的结论:力不是维持物体作机械运动的原因,力是与物体运动状态的改变相联系的. 在伽利略之前的两千余年,人们都信奉亚里士多德的主张,在他的《物理学》著作中有一条原理:“凡运动着的事物必然都有推动者在推动着它运动.”总之,伽利略的惯性定律的确立,成为旧物理学(亚里士多德物理学)的终点,同时也成为新的力学起点.

牛顿第一定律,即惯性定律无法直接用实验证实,也不可能通过物理学的其他定义或定律得出,它是理想化抽象思维的产物. 所以,惯性定律具有公理性的性质,就像数学上的公理一样,只能依靠以它为出发点得出的大量推论而得到验证.

二、牛顿第二定律

在国内外的众多教材中,对牛顿第二定律的表述都比较简单,若以数学表述来说,多半是直接给出以下两个式子:

$$f = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1-1)$$

或

$$f = ma \quad (1-2)$$

在质点的速度远小于光速时,上述两个表示式实际上是相同的. 式(1-2)确立了力 f 、质量 m 和加速度 a 之间的关系. 但是,牛顿第一定律仅引入物体惯性和力的定性定义,并不涉及它们的定量量度. 所以,我们在学习牛顿第二定律之前,首先要解决物体惯性和力的定量量度. 我们知道力的重要特征是使物体获得加速度,力的量度也正是以这一基本事实为基础的.

选一个标准物体,实验说明施于它的力 f 大,它获得的加速度 a 也大; f 小, a

也小. 我们规定: 标准物体所受作用力的方向与所产生的加速度方向相同, 标准物体所受作用力的大小与所产生的加速度的大小成正比. 于是, 对于标准物体有

$$f \propto a \quad (\text{标准物体}) \quad (1-3)$$

我们再规定: 当标准物体的加速度大小为 a_0 时, 所受作用力为一个单位力.

根据上述规定, 就可以通过标准物体的加速度, 定量地确定作用到标准物体上的任何作用力. 例如, 当标准物体获得加速度为 a 时, 所受作用力为

$$f = \frac{a}{a_0} (\text{单位力}) \quad (1-4)$$

上述规定仅可量度作用在标准物体上的力, 为了可以量度作用在其他物体上的力, 可利用弹簧作为一个测力器, 这个测力器须经校正, 使其所示力的大小与前述规定一致. 校正的方法是: 把弹簧与标准物体相连, 拉长弹簧便有弹性力作用在标准物体上, 使之产生加速度 a , 由 a 的大小和 $f = a/a_0$ 得出 f 的大小, 作为弹簧的一个刻度, 以此类推. 这样就得到了一个经过校正的弹簧测力计, 利用它就可以量度作用在其他物体上的力了. 解决了力的量度后, 就可以进行实验来确定加速度与力的关系. 实验表明, 对于任何一个物体, 其加速度 a 与所受的力 f 成正比, 即

$$f \propto a \quad (1-5)$$

要强调的是, 上述普遍性的结论必须由实验来验证.

实验还证明: 几个力同时作用在一物体上时, 物体所获得的加速度与相当于这些力矢量和的单个力作用在物体上时, 获得的加速度相同, 即

$$\sum f_i \propto a \quad (1-6)$$

为了定量地描述物体的惯性, 引入质量. 质量是物体运动时惯性的量度. 质量大小的量度规定如下: 各物体的质量和它们在大小相等的外力作用所获得的加速度大小成反比. 如以 m 表示物体的质量, 根据上述的规定, 有

$$m \propto \frac{1}{a} \quad (1-7)$$

这样, 只要选定一个标准物体, 规定它的质量为 1 单位, 然后用相等的力作用在标准物体和另一物体上, 测定它们的加速度比值, 就可确定另一物体的质量.

实验证明, 当外力的大小改变时, 尽管两物体的加速度大小随之改变, 但二者的比值却是恒量. 这一方面说明质量是物体本身性质决定的, 与外力无关. 另一方面还说明, 加速度与质量成反比的关系是具有普遍性的宏观规律.

综上所述, 得出 $a \propto \frac{f}{m}$, 将它写成等式, 有 $f = kma$, 式中比例系数 k 取决于质量、加速度和力的单位. 如果选用适当的单位, 可令 $k = 1$, 于是就有了牛顿第二定律的数字表示式

$$f = ma \quad (1-8)$$

顺便说一句,牛顿在他所著的《自然哲学的数学原理》书中从未出现过 $f=ma$ 形式的方程,牛顿在书中以“运动”(意指动量)的改变且把它同力乘以时间的值联系起来,换句话说,牛顿关于第二定律的表述为

$$\sum f_i \Delta t = \Delta(mv) \quad (1-9)$$

或写成

$$\sum f_i = \frac{d}{dt}(mv) \quad (1-10)$$

地球两极、赤道和内部的重力加速度*

金仲辉

地球赤道处的重力场强度 g 值约为 $g_e = 978.0 \text{ cm/s}^2$, 两极处的 g 值约为 $g_p = 983.2 \text{ cm/s}^2$. 两者数值上相差约为 $\Delta g = g_p - g_e = 5.2 \text{ cm/s}^2$. 对这个差值在一些基础物理教科书(例如 C. 基特尔等著的《伯克利物理学教程(第 1 卷 力学)》和福里斯等著的《普通物理学(第一卷)》)作了解释, 归之于下述两个原因: 第一, 由于地球自转, 赤道处存在着一个较大的离心力, 而地极两处位于地球的自转轴上, 不存在离心力; 第二, 地球不是真正的球形, 而呈椭球形, 在两极处略为扁平. 本文主要说明, 在这两个原因中前者是正确的, 后者值得商榷, 并且介绍地球内部重力加速度分布的特点.

我们知道, 地球上某点的重力加速度 g 定义为该点的引力场强度 f 和离心力场强度 p 的矢量和, 如图 2-1 所示. 在两极处, $p = 0$; 在赤道处, p 的方向恰好和 f 的方向相反, 其值为

$$p = \omega^2 R_{\text{赤}} = \left(\frac{2\pi}{86164\text{s}} \right)^2 \times 6.378 \times 10^8 \text{ cm} \approx 3.4 \text{ cm/s}^2 \quad (2-1)$$

其中赤道半径 $R_{\text{赤}} = 6.378 \times 10^8 \text{ cm}$, 地球绕轴每一恒星日(86164s)旋转一周, 其角速度为 $\omega = 2\pi/86164\text{s}$. 上述计算说明, 由于地球自转的缘故, 两极处的重力加速度值要比赤道大 3.4 cm/s^2 .

如前所述, 两极处和赤道处重力加速度的差值为 5.2 cm/s^2 , 5.2 cm/s^2 与 3.4 cm/s^2 之间尚有 1.8 cm/s^2 的差值, 这个差值是否像这些基础物理教科书上所说是由于地球呈椭球状, 两极处略为扁平引起的呢? 这种解释无疑给人这样一种印象, 两极处比赤道处有更强的引力场强度, 从而有更大的重力加速度值是由于两极比赤道更接近地球质心(地心)的缘故. 我们现在要指出这种看法是不正确的, 其理由如下: 第一, 我们知道牛

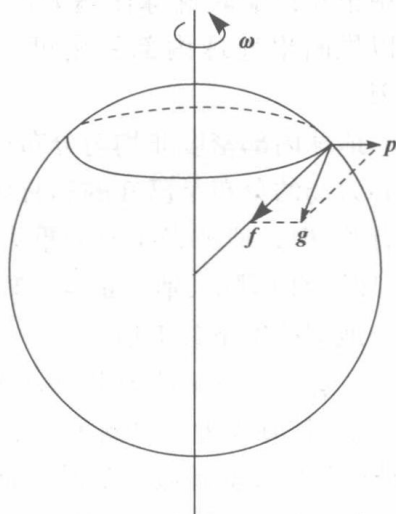


图 2-1

* 本文刊自《大学物理》1986 年第 5 期, 收录本书时略加修订.

顿万有引力定律在应用于球形对称(形状和密度均为球对称)的物体时,质心的概念是可取的,而在研究非球状的扩展物体(即使它的密度是均匀的)的万有引力问题时,一般说来讨论质心是没有意义的,对于这类物体必须考虑它的质量分布;第二,反过来看,如果我们对地球这样一个扁平的旋转椭球体,在应用万有引力定律时,使用质心的概念来计算两极和赤道处的重力加速度,将会得到怎样的结果呢?我们在此引用目前国际上公认的一些地球物理学常数如下:

$$\text{赤道半径 } a = 6.378\,139 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\text{极半径 } c = 6.356\,75 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\text{万有引力常数和地球质量的乘积 } GM = 3.986\,005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2.$$

由这些常数可计算出

$$g_{\text{赤}} = GM/a^2 = 979.828 \text{ cm/s}^2$$

$$g_{\text{极}} = GM/c^2 = 986.433 \text{ cm/s}^2$$

两者之差约为 $\Delta g = g_{\text{极}} - g_{\text{赤}} = 6.6 \text{ cm/s}^2$. 显见,此结果远大于 1.8 cm/s^2 ,说明了在讨论两极和赤道处的重力加速度时,地球质心的概念是完全不可取的.

我们是否可以认为地球是一个内部密度均匀的扁平椭球体,由普遍的万有引力定律出发来计算两极和赤道处的重力加速度值呢?对此也曾有人作了计算,其结果是在不计地球自转效应时,两者的差值远小于 1.8 cm/s^2 . 这个计算结果清楚说明了若将地球视为一个内部等密度的旋转椭球体时,虽然两极比赤道更接近地心些,但两者(重力加速度值)之差却远小于 1.8 cm/s^2 . 又由于地球可视为一个扁率很小的旋转椭球体是大地、海洋和卫星等测量结果所确认的,所以我们由此可以推断出地球内部的密度一定是非均匀的,它是造成差值 1.8 cm/s^2 的真正原因.

地球内部密度非均匀分布还可以从所谓“重力异常”得到证实,我们知道地球离心力场的分布是已知的和有规则的,在地球自转速度不变情况下,它仅和地理纬度有关,但是地球表面上的重力加速度却无此规律可循,出现所谓重力异常的情况. 1971年国际大地测量及地球物理协会决议采用如下的重力加速度公式,作为某一地理纬度下参考值

$$g_0 = 978.031\,8(1 + 0.005\,302\,4 \sin^2 \phi_1 - 0.000\,005\,9 \sin^2 \phi_1) \text{ cm/s}^2$$

其中 g_0 是海拔为零时的重力加速度, ϕ_1 是地理纬度,将地面实测的重力加速度值 g 经过高度及其他校正后减去同一地点的 g_0 值称为重力异常值,测量表明,即使同一纬度地区,重力异常值也有很大差别,这种差别正是由于不同地点地表以下物质密度分布的差异引起的.

地球浅表层有陆地、山脉、海洋、湖泊等,它们的密度各不相同,地球内部的密度分布我们无法直接测量,但我们可以根据地震波在地下各深度的速度变化和在某些特定的假设下推导出来. 由于所作的特定的假设各不相同,所以产生了形式繁

多的地球内部模型,据说地球内部模型竟有百种以上,国际上还专门设有地球模型委员会.总之,由于直接观测的困难,至今无统一的模式.我们在此介绍国际上公认较好的 Haddon-Bullen 模式(K. E. Bullen, 1970),此模式将地球内部大致分成地壳、上地幔、下地幔、外地核、过渡层和内地核几个层次,如图 2-2 所示,其中除了外地核是流体(地震横波不能通过外地核区域)外,其余部分均为固体.随着地球表层以下深度的增加,地球的密度也逐渐增大,由地球表层岩石的密度不超过 $3\text{g}/\text{cm}^3$,直到内地核处密度为 $13\text{g}/\text{cm}^3$.国际上现在确认地球的平均密度约为 $\rho_m = 5.517\text{g}/\text{cm}^3$.表 2-1 列出布伦模式下地球内部的密度分布.

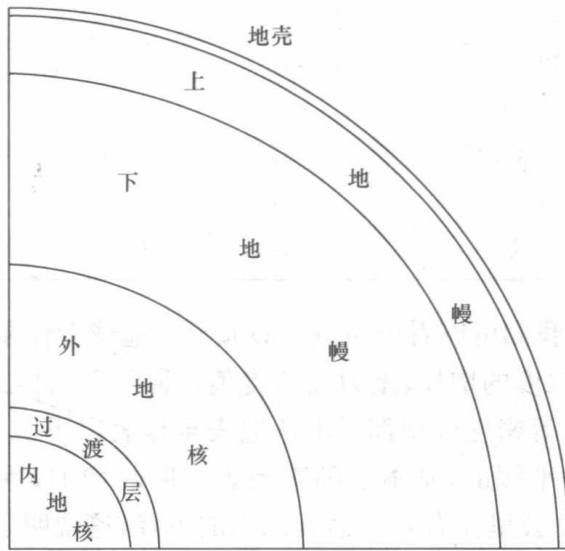


图 2-2

表 2-1 地球内部的密度分布

深度/km	密度/(g/cm^3)
0~15 (地壳)	2.84
15~350	3.31~3.52
350~850	
850~2 878	
2 878~4 711(外地核)	9.89~12.26
4 711~5 161(过渡层)	12.26~12.70
5 161~6 371(内地核)	12.70~13.00

由地球内部的密度分布可以推导出地球内部的重力分布.表 2-2 列出了三个不同地球模型(将地球看作为球体)在不同深度下的重力加速度值分布,同时还列出了均匀密度球模型下的数据作比较.

表 2-2 不同深度下的重力加速度值

深度 /km	Haddon-Bullen 模型/(m/s ²)	Derr 模型/(m/s ²)	Landisman 模型/(m/s ²)	均匀密度球 模型/(m/s ²)
0	9.822	9.824	9.826	9.820
500	9.975	9.985	9.990	9.049
1 000	9.958	9.948	9.989	8.278
1 500	9.941	9.921	9.896	7.508
2 000	10.021	9.997	9.905	6.737
2 400	10.223	10.195	10.125	6.120
2 878	10.736	10.735	10.788	5.384
3 400	4.495	9.655	9.64	4.579
4 000	7.839	8.094	8.11	3.654
5 000	4.699	5.312	5.38	2.113
6 731	0.000	0.000	0.000	0.000

由表 2-2 的数据我们可以看出两点:(a)如果把地球看作是一个均匀的等密度球体,随着地表以下深度的增加,重力加速度值不断下降,此结论不难由高斯定理得出;(b)三个地球非等密度模型都得出从地表至地表以下二千余公里范围内,重力加速度值的变化是平缓的,基本上随着地表深度的增加,重力加速度值略有增加,但深度在约 2 900 公里左右处 g 值有急剧的下降,这说明了地球内部的 g 值有一个极大值.这个结果显然和地球内部均匀密度球模型有很大的差别.

近代地球内部模型已属地球物理学科内专门的研究课题,非本文所能叙述清楚.但是我们可以介绍一种极为简化的模型,由此模型也可得到上述的结论.这个简化的模型是假设地球是一个球体,地球内部的密度 $\rho(r)$ 仅仅是距离的函数(坐标原点选择在球心上).由于密度 $\rho(r)$ 具有球对称性,所以由引力场强度引起的重力加速度 $g(r)$ (即不计地球自转效应)也具有球对称性,由高斯定理不难得出

$$g(r) = GM(r)/r^2 \quad (2-2)$$

其中 G 为万有引力常数, $M(r)$ 为半径 r 球内所包含的质量,它为

$$M(r) = \int_0^r \rho(r') 4\pi(r')^2 dr' \quad (2-3)$$

对式(2-2)取 r 的导数,得

$$\frac{dg(r)}{dr} = \frac{G}{r^2} \frac{dM(r)}{dr} - 2 \frac{GM(r)}{r^3}$$

而 $dM(r)/dr = 4\pi r^2 \rho(r)$, 并且定义 $\bar{\rho}(r)$ 为半径 r 内球体的平均密度,即