

Urban Earthquake Disaster Prevention and Reduction

城市防震



减灾

防灾、青年与教育

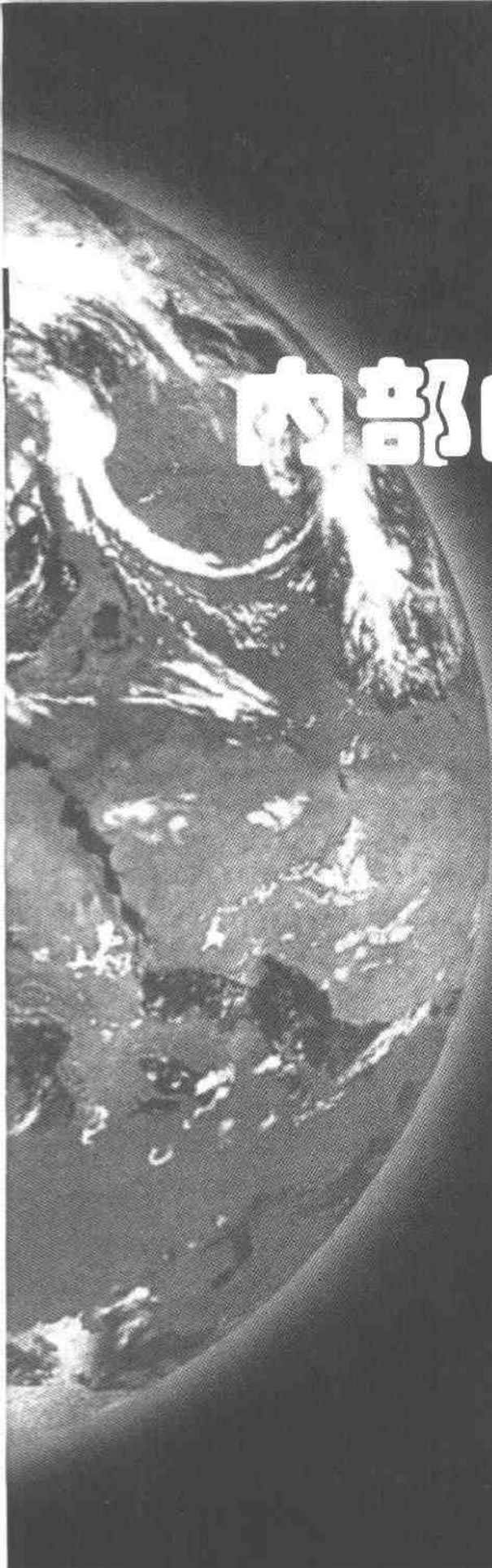
探测地球内部的“雷达”——地震波

军事灾难——人类自己酿就的悲剧

记忆移植不是梦

国内刊号: CN 11-3898/P

国际刊号: ISSN 1007-9300



探测地球 内部的“雷达” ——地震波

曾融生 陈运泰 吴忠良

一、波动

地震波是一种由地震震源发出，在地球内部传播的波。

我们在日常生活中比较熟悉的波是水波，或者确切地说，是在水面上传播的“重力波”。我们之所以对水波比较熟悉，究其原因是人类动作的速度和水波传播速度差不多，人类动作的幅度和水波的幅度差不多，而且人类的身体大小又与水波的波长差不多。这三个“差不多”使得我们可以从容不迫地观察和琢磨。这里“差不多”的意思是具有相同的数量级。

实际上，我们在日常生活中经常接触的波还有很多。比如空气中的声波是我们进行沟通的主要工具之一。但是因为它跑得太快了，声音传播的速度大约是每秒340公尺，而我们人类每秒最多只能跑几公尺，所以在一般的情况下，我们并不觉得声音是一种以有限的速度传播的波。



我们可以把它分解成不同频率的波来进行分析,比如,通过三棱镜,可以把一束白光分解成赤、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等不同颜色的光。在数字化记录和计算机出现以后,我们更经常地用“数字棱镜”来进行这种分解,这种分解的结果就是“波谱”。

在更多的情况下,尽管一种特定的波并不是单一频率的,在这种波的波谱中却有一个或几个起主要作用的“优势频率”。对于光波来说,不同的优势频率决

定了不同的颜色,而对声波来说,不同的优势频率决定了不同的音调。在以后的介绍中,凡是涉及“频率”或“周期”的时候,我们指的一般都是这种“优势频率”或“优势周期”。

一般说来,我们可以用波前来描述波的传播。在高频近似的情况下,我们也可以使用波射线来描述波的传播。这种情况与在光学中所见到的情形是相似的;在那里,我们可以使用光线来描述光波的传播,我们中国的古人还有一个非常形象的说法:光芒。光芒中的“芒”与麦芒中的“芒”是一个意思,可见古人在很早以前对光线就有所了解。光线不仅能描述光的传播,而且还可以很好地描述光在不同介质的分界面上的反射和折射。但是,如

再比如光,其实光也是一种波,一种电磁波,但是我们太“大”了,光波的波长比我们的身体小得多,比如说零点几微米,所以,我们并感觉不到光是一种波动,我们只知道光线。历史上,光的波动说和微粒说争论了很长时间,这是大家都知道的事实。

还有一种波与我们的日常生活密切相关,但是定量地理解它,却仅仅是近年来的事情,在拥挤的公路上行车的时候,有时拥挤本身也会以一定的速度沿着公路传播,这是一种非线性波。这种波动与我们站成一排,再从后面猛推一下的游戏是颇为类似的。但是在这里,我们又太“小”了,我们自己仅仅是这种“传播介质”中的一个“分子”。因此,

在你为塞车着急的时候,你并不感觉自己是处在一种以有限的速度传播的非线性波动之中,正是“不识庐山真面目,只缘身在此山中”。

波动有三个特征参数,一个是波速,一个是波长,另一个是周期或频率。如果波动的参数与我们人类的特征参数差得太远,那么我们直观地理解这种波动就会有比较大的困难。但是另一方面,一旦我们了解到一种运动可以被理解为一种波,我们就可以把已有的关于波动的知识“移植”到这种波动上来。在相当多的情况下,这种类比还是很有效的,当然并不总是有效。

实际上,我们见到的波动很少是单频率的,它们通常是不同频率波动的混合。这时,

果涉及到光波的下涉、散射和衍散,那么光线的概念就不灵了,我们还得回到光波的概念。

二、从候风地动仪到数字地震仪

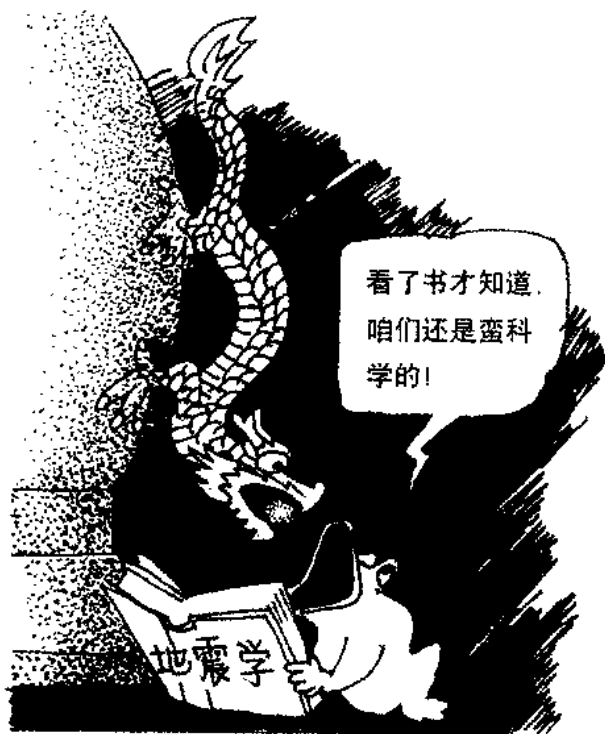
望远镜是接收光波的仪器,听诊器是接收声波的仪器,那么接收地震波的仪器是什么呢?

运动,并在记录地面运动以后可以最终回到原来的状态,一个直观的实例是一个由弹簧和重锤组成的垂直摆。为了提高回到原来状态的效率,还需要有阻尼。阻尼就是使地震仪的传感器很快地回到原来的状态,而不是让它振动起来没个完的阻力。在地震仪的发展史上,首先要解决的一个关键性

也说明传统的地震仪所记录到的地面运动是频带较窄的。机械元件的“灵敏程度”和“结实程度”是一对矛盾,灵敏和结实“妥协”的结果是大大地限制地震仪的动态范围,就是所能记录到的最大的地面运动和最小的地面运动的比值(在地震学中通常使用这一比值的对数,它乘以20就是“分贝数”)。70年代以来,两项关键性的技术引入到地震仪的制造,在相当程度上解决了这两个问题。一个是电子反馈技术,就是无需“劳动”传感器自己振动,而是用试图阻止这种振动所必须提供的电流来作为地震仪的输出,这就避免了传感器自身的“自振周期”的限制,从而使宽频带的地震观测成为可能。另一个是数字化技术。数字化技术的采用使得地震仪可以“聪明地”根据地面运动的大小来调整自己的放大倍数,这就使得大动态的地震观测成为可能。此外,便于与计算机联接和比较高的精度使数字化的地震记录受到普遍的欢迎。由此而发展起来的宽频带、大动态、高精度的数字化地震仪成为目前地震学家研究地震波、地球内部结构和地震本身的常规武器。

三、地震波

我们知道空气中的声波是纵波,就是质点振动的方向和波传播的方向一致的波;而光是横波,就是质点振动的方向和波传播方向垂直的波。地震



最早的记录地震波的仪器是张衡在公元132年(东汉阳嘉元年)发明的。这一伟大发明要比欧洲类似的发明至少早1500年。

近代意义上的地震仪主要是利用惯性原理和弹性原理来记录地震引起的地面运动,这里惯性原理和弹性原理的结合使得传感器能够记录到地面的

的技术问题就是如何提高地震仪的放大倍数以记录到比较微弱的地面运动。地震学家为此想了很多办法,但最有效的办法是电子放大和照相记录的引入。弹簧和重锤或者其他的机械元件都有它自身的“自振周期”,因此机械传感器的结构和性能决定了地震仪能够记录到的地面运动的优势周期。这

波既有纵波又有横波,纵波反映的是地球介质的体应变,而横波则反映地球介质的剪切应变。流体不能承受剪切型的变形,所以,流体只能传播纵波而不能传播横波。在地震波中,还有一类沿着地球表面传播的波,称为面波。它与水面上传播的波看上去类似,但实际上却完全不是一回事。与面波不同的,在地球内部传播的波相应地称为体波。纵波和横波都是体波,对于地震波的传播速度而言,纵波最快,横波次之,而面波最慢。比如在地壳里纵波波速为每秒6km,横波波速为每秒4km,而面波波速为每秒3km。

严格地说,真正意义上的平面波是不存在的,但是平面波经常可以作为一个非常好的简化。在地球的尺度上看,地震震源可以被当成一个点,因此地震体波是一种球面波,而地震面波则是一种柱面波。地震波在地球内部传播的时候,同时经历着两个物理过程,一个是几何扩散,就是随着波传播的范围越来越大,分配到每个单位体积中的能量变得越来越小,但总能量是守恒的。另一个过程是衰减,就是在地震波传播的过程中,要“损耗”掉一些能量。“损耗”主要是通过两种方式进行的,一种是机械能变成热能,另一种是沿直线传播的地震波在地球内部小的非均匀体上发生散射,从而使传播方向发生变化。波的传播过程中,波长是一个重要的特征尺度。如果波遇到的障碍物的尺度比波长大得多,那么波就沿着射线传播,并在障碍物上发生反射和折射,如果波遇到的障碍物的尺度比波长小得多,那么障碍物对波本身来说可以忽略不计;而如果波遇到的障碍物的尺度和波长相差不多,那么波就在这个障碍物上发生散射,因此,直观地讲,多大的障碍物就散射多大波长的地震波。地球内部非均匀体的特点是小的多大的少。如果我们随便拿起一块石头,分析一下它的非均匀性的话,我们也会得到类似的结论。实际上,这种分布是分形的。

所以,一个直接的结论就是,“短波”在地

球内部传播时更容易被“损耗”掉。或者换句话说,“损耗”的结果,是使波逐渐地失去了它的高频成分。对于机械能变成热能式的衰减,我们也有类似的结论:“折腾”的越欢,就越容易“疲劳”。

现在我们可以用上面的认识来构制我们的第一张“理论”的地震图。如果只考虑损耗和传播的话,我们可以把震源和地震台站作为一个椭球面的两个焦点,这样椭球面上的所有非均匀体的散射都“聚焦”在焦点上。时间越长,椭球面就越大,波传播的距离就越长,因此散射波的几何扩散效应也就越大。椭球面自身的增长是面积的增长,而几何扩散效应是三维空间中的变化,所以椭球面大小的增长所引起的增加被几何扩散抵消掉了,地震台站上记录到的散射波的振幅应该越来越小。这样,我们将得到一个随时间衰减的随机振荡的形象。比较一下真实的地震图就会发现,尽管这种考虑非常简单,却抓住了地震图的“主要矛盾”。这里我们只考虑散射,至于把机械能变成热能的衰减,我们暂且认为它所调节的只是整个波列的振幅。

由于非均匀体的分布是随机的,所以在地震图上的震动也必然是随机的。长期以来,工程地震学家正是用随机的时间序列来作为地震引起的地面运动的一个近似。但是地震学家似乎并不喜欢这种随机的图像,所以在相当长的一段时间内,他们的注意力并不是放在“占主要地位的”随时间衰减的“尾巴”上,而是放在“带动”这一“尾巴”的“龙头”上,他们认为这些“龙头”是来自地球内部或震源的某种确定性的信息,这些“龙头”被称为“震相”。运用前面刚提到的关于纵波、横波、面波的知识,我们还可以构造第二张包括了纵波、横波、面波三种波的“理论”的地震图。从频谱上看,体波(包括纵波和横波)通常具有比较连续的、比较宽的频谱;而面波通常具有比较窄的甚至离散的频谱。从时间上看,体波通常具有比较短的甚至脉冲状形状,而面波通常具有比较

长的、甚至简谐式的形状。这种特性可以从一个极端简单的模型中得到理解，拿一个均匀的二维盘当作“地球”，可以看到体波的传播是“直截了当”的，因为在震源处的运动本身就比较“干脆”——那是岩石的断裂——所以体波的持续时间也比较短。而面波的传播则要满足一定的条件，就是必须“首尾能够相顾”。这样，只有少数几个波长的振动可以满足这一条件，所以面波的频谱是很窄的，甚至是离散的；同时，面波的持续时间可以比较长，其形状接近于简谐运动。

比较一下真实的地震图，就会发现我们的理解至少在一定程度上是正确的。这种理解本身为我们提供了一个研究地震波的原则性的方法。我们可以在理论上知道地震图是什么样子的，我们的理论最初是针对均匀的地球的，确切地说，这是一个均匀的、没有结构的地球再加上一个随机散射的背景，如果真实的地震图

与这个图像有偏离，那一定是地球内部特定的结构造成的。我们可以用这种偏离勾画出地球内部的结构，再回过头来与真实的地震图进行比较，以发现新的结构。这样的故事，我们在天文学中是很熟悉的，我们有了只考虑天王星的理论结果，它与真实情况的偏差导致了海王星的发现，而同时考虑天王星和海王星的理论结果与实际情况的偏差又导致了冥王星的发现。事实上，地震波一直是探测地球内部结构的主要手段，也是最有效的手段。用“逐次逼近”的研究方法，用地震记录来研究震源、地球内部结构和地震波本身，是地震学的主要内容。地震学家伽利津说“可以把一次地震比作一盏灯，它点燃的时间很短，却为我们照亮了地球的内部，使我们了解到在地球内部发生了些什么……”（待续）

（插图 李松涛）

