

爆炸振动分析

G. A. 波林格 著

科学出版社

爆炸振动分析

G. A. 波林格 著

刘锡荟 熊建国 译

科学出版社

1975

内 容 简 介

本书主要叙述爆炸振动的测量及其分析方法,对固体介质中弹性波的成因、传播及其类型,以及爆炸引起的地震波的一般性质作了介绍,对地震波的记录、测量方法,测量设备,地震仪以及记录的分析等作了比较详细的叙述。

本书可供地球物理、地震和工程力学等方面的研究工作者和工程技术人员参考。

G. A. Bollinger

BLAST VIBRATION ANALYSIS

Feffer & Simons, Inc.

1971

爆 炸 振 动 分 析

G. A. 波 林 格 著

刘锡荃 熊建国 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝内门大街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

*

1975年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1975年8月第一次印刷 印张: 4 3/16

印数: 0001—6,900 字数: 91,000

统一书号: 13031·338

本社书号 517·13—2

定 价: 0.45 元

原 序

编写这本有关爆炸振动分析的论著是希望对于从事爆炸振动的测量及解释工作者有所助益。本书在理论上作梗概陈述的同时，并就 Sprengnether 地震仪有关的若干特例和某些要点作了介绍。我们认为读者已经具备工程和自然科学方面的高等学校的基础知识。

本书自始至终力求能够概括地介绍地球物理学、地震学和工程学理论方面的成果以及涉及本书主题的文献。对于这些学科，我们围绕分析爆炸引起的振动中的特定问题作了系统的叙述。因为考虑到读者对于其中某些方面并不熟悉，这样或者更能有所裨益。全书还力求自初等水平开始，继而引向中等深度，最后指出进一步深入考虑的方向。

本书所考虑的爆炸振动是指由于开矿、采石以及工程作业所引起的。虽然所介绍的理论及分析技术同样适用于地震及核爆炸引起的振动，但并未包括因研究地震和核爆炸现象而发展起来的理论、观测、仪器等等。虽然二者有相重的领域，然而地震和核爆炸所释放的能量和振动持续时间比本书所考虑的爆炸振动常常要大若干个数量级。关于房屋在其基础的强迫振动下的反应则仅在概略论述反应谱时作了介绍。

(下略)

G. A. 波林格

符 号 表

- A ——地震图波形的振幅(常量);
 a ——标量加速度
 B, C, C_1, C_2, D, F ——常数
 c_s ——视表面速度
 c ——地震计阻尼系数
 c_c ——地震计临界阻尼系数
 D ——震源到检波器的距离;微分算子
 E ——杨氏模量
 E, R ——能量比
 f ——频率
 f_s ——地振动频率
 f_n ——地震计自振频率
 f_{n_1} ——振子的自振频率
 g ——重力加速度
 G ——刚度或剪切模量
 h ——覆盖层厚度
 H, β ——对于给定场地的地震波传播常数
 I ——声强
 J ——泊松比
 K ——体积压缩模量;弹簧刚度系数
 k ——波数
 L ——地动的纵向分量
 l ——地震计的折算摆长
 p ——压力(磅/吋²)
 r ——频率比 (f_c/f_n)

S_d ——相对位移反应谱

S_v ——相对速度反应谱

t ——时间

T ——周期;地动的横向分量

v ——速度

v_G ——群速度

v_p ——相速度或波速

V_o ——机械-光学式地震仪的静态放大倍数

V ——稳态正弦运动的动态放大倍数

V_B ——突然开始的正弦波形动态放大倍数,本多夫 [Benndorf] 放大倍数

W ——装药重量,以磅计

x ——距离;地位移

x_m ——正弦地动的最大振幅

y ——地震计质量的绝对位移

z ——地震计质量相对于框架的位移;地动的垂直分量

z_m ——地震计质量的最大相对位移

z ——振动物质量相对于框架的位移

α —— P 波速度 $\left(\sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}\right)$

β —— S 波速度 $\left(\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}\right)$

ξ ——地震计的临界阻尼比(地震计阻尼因数)

ξ_o ——简单振动子的临界阻尼比(振动子阻尼因数)

ξ_i ——振子的临界-阻尼比(振子阻尼因素)

θ ——振子线圈的转角;相位角

λ ——波长

Λ ——拉梅常数

μ ——刚度或剪切模量

π ——圆周率

ρ ——密度

目 录

原序

符号表	iv
第一章 波动物理学	1
I-1. 引言——本章目的	1
I-2. 波的一般性质	1
I-3. 弹性——应力与应变	7
I-4. 运动方程和波动方程	10
I-5. 弹性波类型——体波和表面波	11
I-6. 波的传播路径——反射与折射	17
I-7. 波动运动学	21
参考文献	24
第二章 爆炸产生的地震波	26
II-1. 引言	26
II-2. 产生区	27
II-3. 记录场地	31
参考文献	32
第三章 爆炸振动测量	34
III-1. 测量的目的	34
III-2. 测量的基本问题	35
III-3. 所测振动的大小范围	35
III-4. 测量装置的灵敏度	36
III-5. 地震仪的部件	37
III-6. 地震计的数学理论	38
III-7. 静态和动态放大倍数	47

III-8. 爆炸地震仪的类型	48
III-9. 指示器方程	54
III-10. 地震计的耦合与共振	56
参考文献	58
第四章 爆炸地震图的分析	60
IV-1. 前言	60
IV-2. 解释的目的	60
IV-3. 仪器因素	60
IV-4. 地震图波形的特征	61
IV-5. 振幅与频率的读数	62
IV-6. 振动分析种类的讨论	65
IV-7. 稳态正弦分析	66
IV-8. 突然开始的正弦的分析	71
IV-9. 数字分析	76
IV-10. 反应谱	82
IV-11. 波形匹配分析	86
参考文献	86
第五章 破坏判据——振动效应	89
V-1. 振动烈度的规定	89
V-2. 爆炸振动的结构效应	90
V-3. 爆炸引起的地面振动程度的估计	93
V-4. 振动的生理效应——人对于机械振动的灵敏度	95
V-5. 振动的生理效应——人对声振的灵敏度	100
参考文献	105
工程地震文献目录	108

第一章 波动物理学

I-1. 引言——本章目的

波动现象是每个人切身经验中都熟悉的一部分。水波也许是最形象的一种。但是，声波、光波、无线电和电视的电磁波的存在也是人们所熟知的。地震波的破坏作用也日益为更多的人所了解。由此可见，波动可由气体、液体和固体来承载。为了了解和分析爆炸振动，我们必须对波动现象有一个比较透彻的了解。我们将主要讨论固体介质中的弹性波的成因、传播及其类型。我们也还将考虑在了解和分析波动时所必需涉及的物理定律。最后，我们还需要运用数学工具来描述在自然界中所遇到的各种波动现象和进行必要的分析。

有关这一课题的详尽讨论超出了本书的范围，我们所叙述的将只是些基本原理，且仅停留在入门的深度。更深入的研究可参阅所介绍的参考文献。

I-2. 波的一般性质

从物理意义上来讲，弹性波乃是一个行进的扰动，也是能量从介质中的一点传递给另外某一点的反映。因此，在介质中必须有一个初始扰动，必须作用有某些力以扰动介质，使它离开其平衡位置，从而在介质中引进新的能量。假若，介质对该能量引进的反应不是弹性的，那么，它将吸收能量，而且仅有阻尼波从扰动区辐射出来；假若介质是弹性的，那么，力的

作用将引起在其附近部分的介质围绕静止位置发生振动，就象是一个弹簧-质量系统那样。由于介质的弹性，振动型的扰动就从一个“元素”传到下一个“元素”，再下一个“元素”，如此以往，从而引起一个波状运动在介质中传播开来。除了指明相反的情况以外，今后在本书中我们将仅限于完全弹性（当变形力移去后其大小和形状完全恢复）、均质（弹性模量与位置无关）、各向同性（各个方向的弹性性质相同）的介质，同时假定组成物体的质点之间的相对位移小到其平方可略去不计。

波动过程有若干重要方面。首先，波动过程中没有容积运动或物质传输。组成介质的质点仅仅围绕在非常有限的空间中的路径进行振动和（或）转动，决不会穿过介质而逸出。钓鱼线上的浮漂便可说明这一点。由于这一特点，而必须考虑两种速度：一种是“波”速度或“相”速度，它描述扰动通过介质传播的速度；一种是质点速度，它描述质点在受到波动能量扰动时，围绕平衡位置所作的微小振动。波速度一般比质点速度大几个数量级。在爆炸振动分析中，通常我们所关心的是质点速度而不是波速度。

必须注意，波动是由随时间变化的应力所构成的力系的作用所引起的。这些应力是介质对于所引进的扰动的反应。它们的时间和空间性状由介质的弹性性质所决定。此外，还应注意扰动所引进的能量是以波动过程中质点运动的动能和质点位移的位能的形式在介质中行进的。动能和位能与波动振幅的平方成正比，波动在传播时要向各个方向扩展，这样便对波阵面单位面积所包含的能量产生一种几何效应。为了说明这一效应，我们考察一完全弹性的无限介质。在这样介质中的一个点状能源将引起球面波，其波阵面面积随 r^2 而增加， r 为从能源算起的距离。因此，单位面积的能通量将随 r^{-2} 而减小。一个线状能源则将引起柱面波，其面积随 r 而增加。

这时单位面积的能通量则随 r^{-1} 而减小。若离能源很远，则可将这些波近似地作为平面波处理，这时则没有象球面和柱面波那种情况下的几何扩展效应。

实际上，自然界并没有完全弹性的介质，因此在波传播时会有额外的能量损耗。如前所述，会有吸收损耗。它使波幅随距离和（或）时间而衰减，后一类型的损耗常常是按指数规律的。

在讨论波动过程中某一部分弹性介质的振动时，我们所说的是该部分介质在前述大小和（或）方向都变化的力的作用下的性状。在这一方面，将这种运动与机械振动子（例如一个弹簧-质量体系）或电振荡器（例如一个电感-电阻-电容回路）进行对比是有益的。波动对于这三种体系都是相当的，但是对于机械振动子和电振荡器来说，只有时间上的振荡，而对于我们所讨论的弹性介质，却兼有时间和空间上的振动。然而，应注意就空间的一个固定点而言，则与单自由度体系的情形没有什么区别了。

波动可能是瞬态的、周期性的或随机的。瞬态运动是介质对一突加的脉冲式扰动的反应的特征，并且随时间的增长而迅速消逝。周期运动具有重复的性质，每经一定的时间间隔，又以完全相同的形式重复出现。简谐运动是周期运动中最简单的一种形式，并以正弦或余弦函数来描述。噪声通常表现随机性为主要特征，也就是说，只有以概率为基础才能预示其任一瞬间的幅值。

为了解析地表达前述各项概念并引进某些必要的定义，我们假定在“ x ”方向有以定速“ v ”传播的、形状保持不变的扰动 D 。因此， D 是距离（ x ）和时间（ t ）两者的函数，它的一般表达式为

$$D(x, t) = D(x - vt) \quad (\text{I-1})$$

为了证明上式所表示的为一种行进的扰动，令 x 和 t 分别增大一个增量 Δx 和 Δt 。于是式 (I-1) 的右边成为

$$D[x + \Delta x - v(t + \Delta t)] \quad (\text{I-2})$$

由于我们假定形状不变，因此，式 (I-1) 必须等于式 (I-2)，为此要求

$$\Delta x = v\Delta t \quad (\text{I-3})$$

上式为速度的常用的定义。

这类函数的一个简单和非常有用的例子是由下式给出的传播着的谐和波

$$D(x - vt) = A \sin k(x - vt) \quad (\text{I-4})$$

式中

A = 最大波幅

k = 量纲为 (1/长度) 的参数，引入这个参数是为了使变量成为无量纲的。

参数 k 具有一定的物理意义。为了说明此意义，我们注意到对于某一给定的 x ，当变量增加 2π 时，波将重复出现，也就是说，假若

$$k(x - vt_1) = k(x - vt_2) + 2\pi \quad (\text{I-5})$$

于是

$$kv(t_2 - t_1) = 2\pi \quad (\text{I-6})$$

波重复的时间，根据定义，是波的周期

$$t_2 - t_1 = T \quad (\text{I-7})$$

周期的单位是秒/周，它是频率 (f) 的倒数，频率的单位是赫兹或周/秒。

由式 (I-6) 或 (I-7) 得到

$$T = \frac{2\pi}{kv} \quad (\text{I-8})$$

通常我们还知道

$$T = \frac{\lambda}{v} \quad (\text{I-9})$$

式中 λ 为波长。因此, 参数 k 和波长有下列关系:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (\text{I-10})$$

k 称为波数。对于一给定时间, 根据波的重复性, 我们也可以得到式 (I-10)

$$k(x_1 - vt) = k(x_2 - vt) + 2\pi \quad (\text{I-11})$$

或

$$k(x_1 - x_2) = 2\pi \quad (\text{I-12})$$

以及

$$\lambda = x_1 - x_2 = \frac{2\pi}{k} \quad (\text{I-13})$$

注意式 (I-4) 的变量是

$$(kx - kvt)$$

其中时间的乘数 $k v$, 由 (I-8) 有

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{k v} \quad (\text{I-14})$$

或

$$k v = 2\pi f = \omega \quad (\text{I-15})$$

式中 ω 称为圆频率。

现在我们将式 (I-4) 改写成

$$D(x - vt) = A \sin(kx - \omega t) \quad (\text{I-16})$$

并将 k 和 ω 之值代入, 得到

$$D(x - vt) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (\text{I-17})$$

$$\begin{aligned} &= A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - f t \right) \\ &= A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \end{aligned} \quad (\text{I-18})$$

方程 (I-17) 和 (I-18) 以一种特别清晰的形式表达了我们最

感兴趣的波参数,亦即波长和振动的频率或周期。

在正弦函数的变量中可以加进一个相位角“ ϕ ”

$$D_1 = A \sin k(x - vt) \quad (I-19)$$

$$D_2 = A \sin [k(x - vt) + \phi] \quad (I-20)$$

它表示 D_2 较之 D_1 移动了一个 ϕ 弧度。若 $\phi = 2\pi, 4\pi, \dots$, 则移动量正好等于波长的整倍数,我们称这时的各波为“同相”;若 $\phi = \pi, 3\pi, \dots$, 则称为“相差 180° ”。以上关于 λ, T, f 和 k 的定义不仅对于谐和波,而且对于所有周期波都是适用的。

两个波列的迭加将引起各种特定形式的波的干涉,其中最感兴趣的是“拍”和“驻波”。沿着同一方向传播着的振幅相等,但分别具有不同频率和速度的两个谐和波列的迭加便可产生拍的现象。

$$\begin{aligned} B &= A [\cos(k_1 x - \omega_1 t) + \cos(k_2 x - \omega_2 t)] \\ &= 2A \cos \left[\frac{(k_1 + k_2)x}{2} - \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \right] \\ &\quad \times \cos \left[\frac{(k_1 - k_2)x}{2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} \right] \end{aligned} \quad (I-21)$$

若 ω_1 接近于 ω_2 , 则式 (I-21) 中的

$$\cos \left[\frac{(k_1 + k_2)x}{2} - \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \right]$$

项代表“载”波,其频率与原始波之一的频率十分接近。这种波形的传播速度称为相速度 (v_p), 并表示成:

$$v_p = \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} \cong \frac{\omega_1}{k_1}$$

上式与 (I-15) 所给出的波速 $v = \omega/k$ 属于同一类型,但是式 (I-21) 中的

$$2A \cos \left[\frac{(k_1 - k_2)x}{2} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} \right]$$

给出了一个低频的振幅调制和相位调制, 即“拍”. 调制频率称为拍频 (f_b), 并表示成:

$$f_b = \left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} \right] = (f_1 - f_2) \quad (\text{I-22})$$

“拍”或波群的传播速度称为群速度 (v_G), 它等于

$$v_G = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$$

见图 I-1.

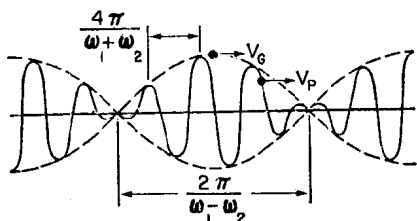


图 I-1. 拍形波动的图形表示

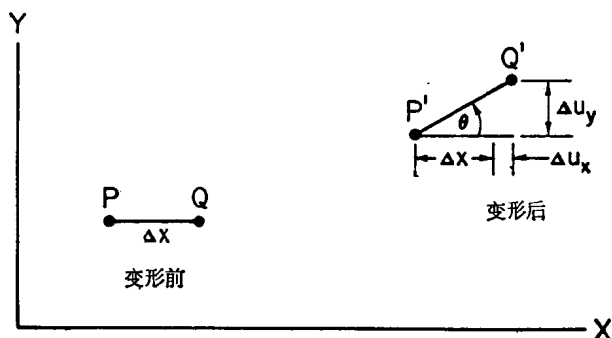
振幅、频率和传播速度均相同但行进方向相反的两个波列的迭加便产生驻波.

$$\begin{aligned} S &= A \cos(kx - \omega t) + A \cos(kx + \omega t) \\ &= 2A \cos(2\pi kx) \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (\text{I-23})$$

I-3. 弹性——应力与应变

可以证明, 在最通常的情况(微小应变)下, 弹性体内一点的位移乃由平移加上刚体转动和变形所组成. 这一变形由压应变和剪应变来规定. 压应变是指单位长度的拉伸和压缩, 剪应变则用转角来表示. 现在来考察 P 与 Q 两点, 它们在变形前相隔一个距离 Δx , 在介质发生位移后, 它们分别处于体内的 P' 和 Q' . 除了当 P 和 Q 分别移到位置 P' 和 Q' 时可能

发生的平移和(或)刚体型转动外,还必须考虑 P 和 Q 间的距离及其连线的方向的可能变化。图 I-2 中所示为假定刚体型转动不存在时的上述情况。可以看出,对于压应变和剪应变两者,我们所涉及的量均是位移的空间变率。



$$\text{拉应变} \approx \text{单位长度的伸长} \approx \frac{\Delta u_x}{\Delta x}$$

$$\text{剪应变} \approx \text{转角} \approx \frac{\Delta u_y}{\Delta x}$$

$$\text{因} \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta u_y}{\Delta x + \Delta u_x}$$

但 Δu_x 与 Δx 相比很小

$$\text{因而} \quad \theta \approx \frac{\Delta u_y}{\Delta x}$$

图 I-2. 拉应变和剪应变的定义

因此,应变是描述一给定点邻域内物体变形的一种几何概念,一般以比值给出,在物理上,是无量纲的。在比例极限以内,也就是说,当引起变形的力移去之后,物体将完全恢复到其原来的大小和形状,而且应力与应变成线性关系。在这个范围之内,我们称这种材料为线性弹性体,并遵守虎克定律(I-24)。虎克定律的比例因子是常数,并叫做弹性模量。当应力增大,我们首先观察到一个非线性弹性区,对于延性材料而言,接着

是具有永久变形的塑性区;对于脆性材料,则刚刚超过弹性极限便立即发生破坏(见图 I-3)

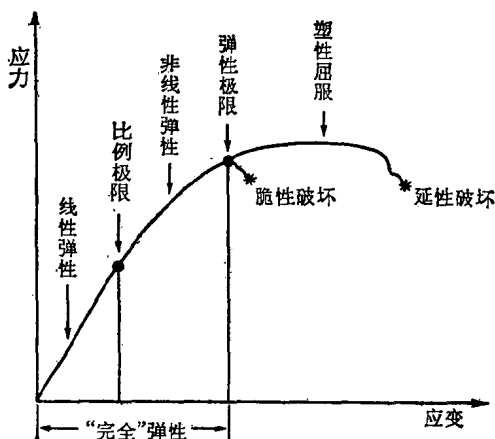


图 I-3. 应力-应变关系图

$$(\text{应力}) \propto (\text{应变}) \quad (\text{I-24})$$

$$(\text{应力}) = (\text{弹性模量}) \times (\text{应变}) \quad (\text{I-25})$$

主要的弹性模量或弹性常数是:

杨氏模量 (E)——简单拉伸或压缩时的应力-应变比

体积压缩模量 (K) (不可压缩性)——简单静水压力作用时的应力-应变比

剪切模量 (μ 或 G) (刚度)——简单剪切时的应力-应变比

拉梅常数 (Λ)——为了数学上的方便而引入的一个特征数,无简单的物理定义

泊松比 (σ 或 J)——横向缩短与纵向伸长之比,不是应力-应变比,而是表征形状变化的一种几何尺度。