

地震概论

Date 2023.5.20
by 球球

第一章:

20世纪约200万人死于地震, 预计21世纪有150万人死于地震.

20世纪以来我国发生80多次6级以上地震, 平均每年8次.

史载全球死亡人数超过20万的地震共6次, 中国4次

地震学是关于地震的学问, 是一门应用物理学.
周伟

地球科学 → 地球物理学 → 地球物理学 → 地震学

地震学 — 宏观地震学
— 微观地震学 — 地震波传播理论
— 测震学.

几个概念性名词:

震源 (E): 地球内部发生地震的地方

震源深度 h : 震源到地面的垂直距离.

震中 (E): 震源在地面上的投影点 / 地面上受破坏最重的地区叫极震区.

极震区不一定是震中区 (地质条件原因).

震中距离 Δ // 发震时刻 O/T .

震级 M 、地震波释放能量 E , $\log E = 11.8 + 1.5 M$; (岩层错动)

我国使用12度烈度表: $M = 1 + \frac{2}{3} I$.

地震序列 — 主震型
— 震群型

按震动的性质, 地震 — 天然地震
— 人工地震

按成因
构造地震 (90%以上)
火山地震 (7%)
陷落地震 (3%)

按震动的性质, 地震 — 天然地震
— 人工地震

按震源深度
 $\leq 60 \text{ km}$: 浅源地震 (大部分)
 $60 \sim 300 \text{ km}$: 中源地震
 $> 300 \text{ km}$: 深源地震

按震级
弱震: $M < 3$
有感地震: $3 \leq M \leq 4.5$
中强震: $4.5 < M \leq 6$
强震: $M \geq 6$. ($M \geq 8$ 为巨大地震).

按震中距离
 $< 100 \text{ km}$: 地方震
 $100 \sim 1000 \text{ km}$: 近震
 $> 1000 \text{ km}$: 远震



古代地震成因推测: $\left\{ \begin{array}{l} \text{古希腊: 气动} \\ \text{日本: 地脉} \\ \text{中国: 天成论} \\ \text{高山侯: 地牛} \\ \text{印第安: 马龟} \end{array} \right.$

1755. 里斯本大地震, 地震学从神学禁锢解脱.

1961. 邢台大地震促成了 1971 年国家地震局成立.

what's more

第二章 地震波

1. 地球近似看作完全弹性体.

2. 无限弹性介质中存在两种基本类型的弹性波:

$\left\{ \begin{array}{l} E, K, \mu, \nu \text{ 中} \\ \text{两个是独立的} \end{array} \right.$

纵波 P 波, $V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$, E 为杨氏模量.

横波 S 波, $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, μ 为切变模量.

(绝大多数是各向同性介质)

地球内部 P、S 波速随深度 \nearrow 而 \nearrow , 而由于各向异性, 所以 P、S 波向不同方位

传播有不同速度

地震波类型:

体波: 可在地球内部向任何方向传播的波.

P 波 \Rightarrow 体变 // S 波 \Rightarrow 切变.

对比 (几乎必考): P 波与 S 波的区别.

(1) P 波传播速度快, 地震图上总是先出现 P 波

(2) P 波、S 波质点振动方向相互垂直.

(3) 一般在三分量地震图上, P 波垂直分量较强, S 波水平分量较强.



(4). S波低频成分比P波丰富

(5). 震源向外辐射的S波能量比P波强

(6). P波是无旋波, S波是无散的无容波.

(速记: $V_p > V_s$, $E_s > E_p$, $\Delta \vec{x}_p \perp \Delta \vec{x}_s$, $\nabla \times \vec{P} = 0$, $\nabla \cdot \vec{S} = 0$, $\int S_{\parallel}^2$ 强 / S波低频丰富).

面波: { 瑞利波 (图为逆进的椭圆).
洛夫波. (横波)

振幅在地面最大, 随深度指数衰减.

介质至少两层; $V_{s2} < V_{s1}$.

长面波振幅一般比体波大, 能量大部分集中于地面附近.

面波的能量被捕获在表面才能沿着或近地表传播.
(如天坛回音壁, "耳语长廊").

洛夫波, 瑞利波速度 $< V_p$, 与S波相当或小一些.

长周期越大, 渗透深度越大. (利用频率可以探得地下成层结构).

(注: 半无限均质介质中无洛夫波, 且瑞利波无频散.

自由振荡: (几分钟~几小时).
长周期、大振幅.

球型振荡 \rightarrow S振型. (前后、径向振动)

扭转型振荡 \rightarrow T振型/环型振荡 (前后振动).

地震波到达次序: P波 \rightarrow S波 \rightarrow 洛夫面波 \rightarrow 瑞利波 \rightarrow 尾波.

震感: 先上下, 后左右.

What's more ...



第2章 地震波传播理论

首波：介质分层时，地震波由低速一方高速一方入射。

Fermat 原理：地震波在介质中传播的路径为走时最短的路径。
(不是求远成立，是高频下波功方程的近似解)。

首波能量小，我们一般从面波入手了解地震，往往找得到 P 首波，S 波首波找不到。

振幅衰减 $A = A_0 e^{-\delta t}$

$$\left(\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta E}{E} = \frac{2\delta}{\omega}, Q \text{ 品质因子} \right)$$

地震中距：1度 $\approx 110 \text{ km}$ 。

射线理论：短波近似，高频近似。

地震射线能量束，能量分布呈高斯分布，宽度 $d \propto \frac{1}{f} \rightarrow$ 频率。

地壳是固体，地幔介于固态与液态之间，外核是液体。

V_p 7.8 km/s \rightarrow 8.4 km/s \sim 8 km/s \rightarrow 13.6 km/s.

V_s 3.7 km/s \rightarrow 4.7 km/s \sim 7.2 km/s \rightarrow 0.

P 波入射产生 P、SV 波；SV 波入射产生 P、SV 波。

SH 波入射产生 SH 波 (水平面内振动无法引起垂直振动形成 P/SV 波)。

近震，入射时 $\frac{\sin i}{V} \equiv p$ (每一条射线只有一个射线参数)

远震 (书 P31) $\frac{R \cdot \sin i_0}{V_0} = \dots = \frac{R_k \sin i_k}{V_k} \equiv p$ 。

$X = \frac{V_s V_p}{(V_p - V_s)} \cdot (T_s - T_p)$ // 临界震中距 $\Delta C_1 = \frac{2H\alpha_1}{\sqrt{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}}$ α_1, α_2 为波沿界面传播速度。

真正意义上的首波与第二临界震中距 $\Delta C_2 = 2H \sqrt{\frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}}$



是P.S两层的零序层反

Date

地震学家用 P 和 P/S 的到时差决之震源深度，
用 P 、 S 的到时差决之震中距。

$\left\{ \begin{array}{l} P: \text{向下的纵波} / p: \text{向上的} // S: \text{同左} \\ K: \text{纵波在外核中走的一段} \\ I, J: \text{内核中的纵、横波} \end{array} \right.$

$\Delta P_4, T_2$ 掌握之!

($V = 8 \text{ km/s}; h = 41 \text{ km}$)

第四章 - 地球内部结构.

1522. 9. 6 麦哲伦环球航行证明地球是圆的.

大陆平均地壳厚度 35 km 但厚薄不均; 海洋 $5 \sim 8 \text{ km}$.

1906. 奥尔德姆(英)发现外核

1909. 首脑 \rightarrow 发现地壳 (M面, V 值突然加快).

1914. G面发现. 深度 $2900 \text{ km} \Rightarrow$ (古登堡(德))

1936. 盲区中发现信号 \Rightarrow 实际 2891 km 内核发现 (丹尼, 莱曼).

通过面波区别洋壳和地壳

地幔: 上地幔. 过渡层(中地幔). 下地幔.

可以沿水平方向流动的物质层为软流层, 不是符合上地幔存在的低速层.

地震层析成像的基本思路是根据穿过模型中每个位置的地震射线的路径, 走时, (反演) 出模型的波速, 从而推断出地球构造.

What's more ...

内外核分界面, 称为 I 面;

PREM 包含 P、S 波速度及密度.



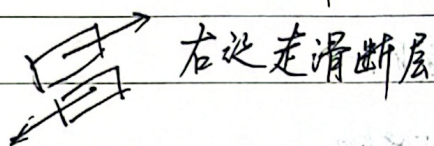
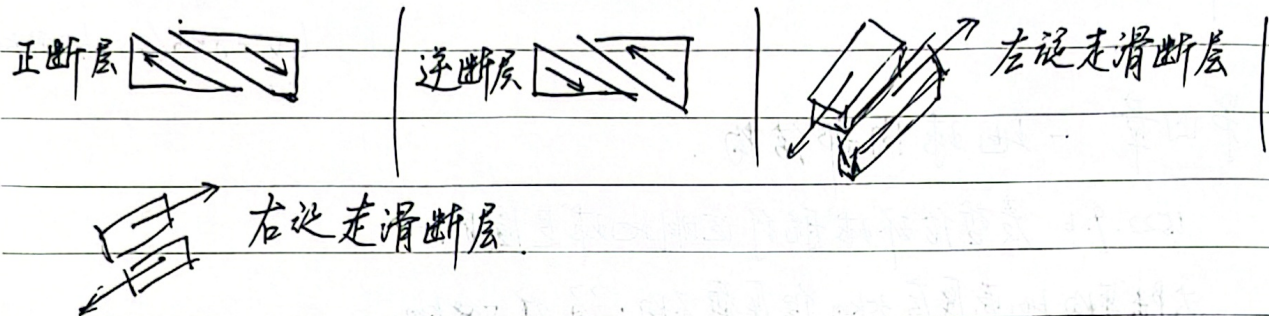
第五章 地震机制

19世纪末：火山是地震的首要原因，迅速。

20世纪：地表岩石的大规模错动

沿地质断裂的突然滑移是地震波被激发的直接原因。

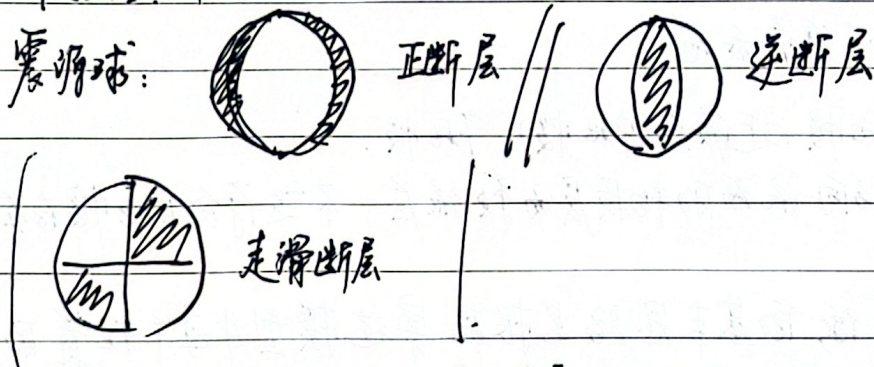
地球深层构造力造成地球外层大规模变形是地震根源。



断层面上应力超过摩擦阻力，断层发生滑动。三种主应力两个水平一个垂直。

正 ~ 压力最大，逆 ~ 最小。
垂向

弹性回跳：岩石体相对地壳的位置不是在破裂时突然产生的，而是
是模型！不是定理！在较长周期内逐渐达到最大值的。



判断哪一面是断层面

极震区等震线长轴方向
大地测量数据
前、余震分布
S波偏振方向
有限移动源位移谱



地震能量大部分为克服摩擦力转换成热能消耗

$$\text{地震效率} = \frac{\text{地震波能量}}{\text{地震能}} = 7.5\% \sim 15\%, \quad \text{核爆炸地震效率远低于自然地震}$$

(E_波 + Q)

热流悖论: 观测热流值比理论值小十倍.

板块构造学说:
 三个阶段:
 1) 大陆漂移 (1)
 2) 海底扩张 (2)
 3) 板块构造 (3)
 提供物理机制和动力来源.

1) 1915 魏格纳: "大陆漂移学说" ~ 1937 南非地质学家提供证据

2) 1960s, Hess / Dietz: 海底地壳不超过 1.8 亿年 (大陆地壳),

大洋中脊喷发形成地磁条带, 其他地方条带. 洋壳消亡从海沟回到地球内部

扩散边界 → 正断层; 汇聚边界 → 逆断层 (如山脉/海沟).
(裂谷, 洋中脊).

转换边界 → 走滑断层.

全球地震概况:

时空分布不均, 全球地震带

环太平洋 (80% 浅, 90% 中深, 10% 深源)

阿尔卑斯—喜马拉雅地震带

海岭地震带

地震每减小一级, 次数多 10 倍.

(约 9% 地震发生在地壳)

$$\lg E = 11.8 + 1.5M, \quad E \text{ 单位 } (10^7 \text{ J}).$$

日本、意大利、智利、秘鲁、土耳其是强震国家.

台湾、西藏、新疆、云南是多震地区 (还有甘肃、四川).



第6章 地震仪、基本参数的测定

候氏地震仪：张衡，132年。

地震仪是验震器。

1880~1890 法国英国人制出第一台有科学意义且较实用的地震仪

现代地震仪的原理：惯性。由拾震器(摆)、放大器、记录系统组成

地震台：早期建在天文台附近获得准确时间；在山脚下、岩石上居多

~ 台网：由各级地震台站构成的观测网络。分微震台网、强震台网。

米尔恩(英)：现代地震学奠基人

一般用三测量法(例题也作此)测震源。

地震中定位精度 10km，震源深度约 20km，地震后第一时间发的“精确数据”都是谣言。

三测震级：

① 里氏 $M_L = \log A + K(\Delta)$ ，在标准距离(100km)测最大地震波振幅。

(单位： μm)。

都属于
里氏
震级
系统

如 1mm $\Rightarrow M_L = 3$ // M_L 不适于大地震，一开始仅用于测南加州地震

② M_S ：面波震级，不适用于深源地震

震级精度 0.3

③ M_b ：根据 P 波定震级，可测任何地震。

地震矩 定义为岩石弹性刚度、施力面积及断裂的位错量之乘积，

有明确物理意义，且不会饱和(记为 M_w ，现在多用)

同台站测同一个地震数值也会有所不同。

What's more...



第七章 地震预报

最大地震：智利 1960.5.21, 8.3 级 (/ 9.5 级 (一说))

唯一成功预报：辽宁海城 7.3 级, 1975.

预测：学者有结果汇报至国务院，⁽⁴⁾ 预报由政府发布 (高争议性)

(1) 三要素：时间、地点、强度；依赖于前兆信息且须有可重复性。

预测基于地震返回周期：精度低，至今没有确定性的。

(2) 方法环方面：地震地质方法

~ 统计法 (互相联系，配合用更好)。

~ 前兆方法。

What's more...

第八章 宏观地震学

影响地震灾害的因素：震级、人口密集度、发生时间、房屋抗震、破坏累积效应(断层)、疲劳效应(多次/长时间振动)、传播效应(近震损坏低矮建筑，远震损坏高层建筑)。

面波
由 $\lg E = 11.8 + 1.5M$, 差一级则能量差 32 倍; 6 级地震 \sim 2 万吨级原子弹。

反映地震实际破坏用烈度(I), 且 $M = 1 + \frac{2}{3}I$.

建筑的抗震设计用(烈度) (6 度以上必须进行抗震设计)。

基本烈度：一个地区未来 50 年内一般场地条件下可能遭受的具有 10% 超越概率的地震烈度值，也称 偶遇/中震 烈度，相当于 475 年一遇的最大地震的烈度。



决定任何场地地面震动的强度因素：震源机制、震源与场地间岩石不均匀性、场地土壤条件等；

盆地效应：地震从右边来，左边房子先倒。（反射波与直达波能量叠加）

基岩上地震震幅^顶小，持续短，震害轻。淤泥和填充地放大地震波。

抗震设计时，要考虑建筑与地基土的共振。刚性建筑不建于卓越周期短的地基上。
（自振周期长的建筑不建于深厚松散沉积地震地面运动一般特征：地面运动最大加速度、地面运动周期、强震持续时间）土之上。

传统地震学

优点：①震源近似为点源 ②可以对震相分别进行研究

缺点：丢失了许多近场的高频信息。

面波相速度：衰减慢、振幅大、周期长、传播远。

建筑物破坏主要由面波造成。

what's more...

第九章 勘探地震学 (4)

石油勘探分为地质法、地球物理方法、钻探法。

地震勘探属于

(4) 分为反射/折射地震学，一开始使用折射地震学，最终用反射地震学。
(性价比、确定性)

环节：野外采集 — 室内资料处理 — 地震资料解释 (核心)



后补:

(地震预报精度 15%~30%)

Date

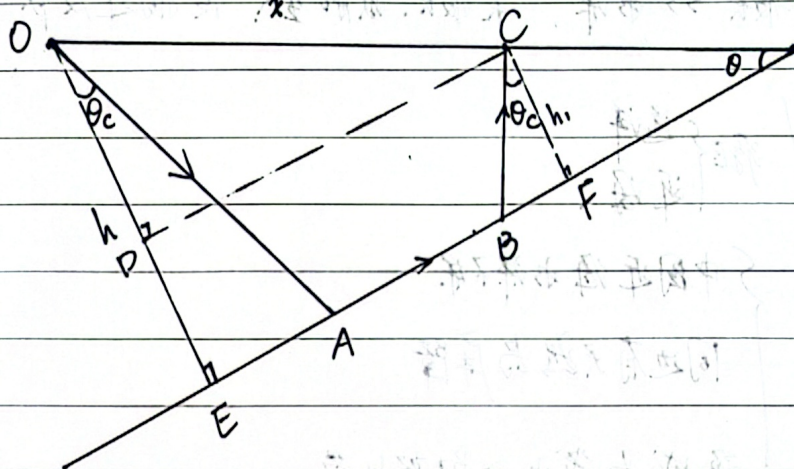
如天然地震与勘探地震学的主要区别?

① 使用震源: 被动源 \rightarrow 主动源

② 尺度: 前者大, 后者小.

③ 仪器差异, 后者较为灵活.

★ 一道计算题⁽¹⁴⁾ 必考!



$$h_1 = h - x \sin \theta, \quad AB = EF - EA - BF = DC - EA - FB$$

$$= \frac{x \cos \theta}{\cos \theta_c} - (h \tan \theta_c + h_1 \tan \theta_c)$$

$$= \frac{x \cos \theta}{\cos \theta_c} - (2h - x \sin \theta) \cdot \tan \theta_c;$$

$$BC = \frac{h_1}{\cos \theta_c} = \frac{h - x \sin \theta}{\cos \theta_c}$$

$$t = \frac{h}{\cos \theta_c \cdot V_1} + \frac{x \cos \theta - (2h - x \sin \theta) \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h - x \sin \theta}{\cos \theta_c \cdot V_1}$$

$$= x \left[\frac{\cos \theta}{V_2} - \sin \theta \left(\frac{1}{\cos \theta_c \cdot V_1} + \frac{\tan \theta_c}{V_2} \right) \right] + \left[\frac{h}{\cos \theta_c \cdot V_1} - \frac{\tan \theta_c \cdot 2h}{V_2} + \frac{h}{\cos \theta_c \cdot V_1} \right]$$

$$\text{由 } \sin \theta_c = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow \frac{1}{\cos \theta_c \cdot V_1} - \frac{\tan \theta_c}{V_2} = \frac{\cos \theta_c}{V_1}$$

$$\therefore t = x \left[\frac{\cos \theta}{V_2} - \frac{\sin \theta \cos \theta_c}{V_1} \right] + \frac{2h \cos \theta_c}{V_1}$$

what's more --



扫描全能王 创建

第十章 海啸

* ① 传播速度 500 miles/h; 海上较安全.

2011.3.11 日本仙台地震引发海啸.

海啸要造成伤害, 海岸必须足够开阔^且具备逐渐变浅的条件.

$$v = \sqrt{gh}, \quad h \text{ 为水深.}$$

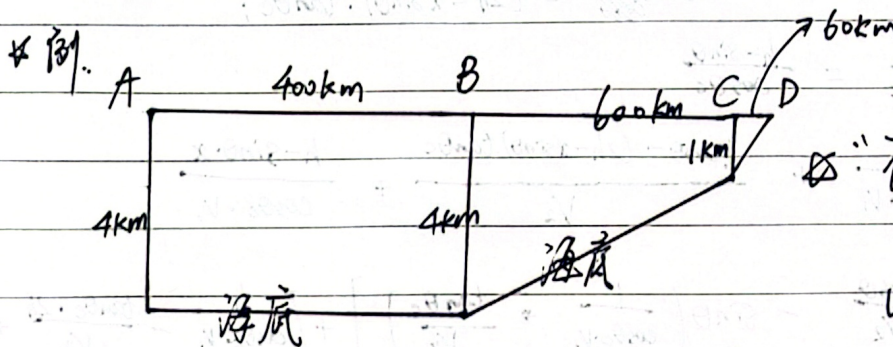
海啸是浅水波, 波长 \gg 水深, 长波长, 能量大, 传播速度快.

成因 { 地震 ~
火山 ~
滑坡 } // 海区 { 远洋
近海 }

中国少有海啸
(平海考)

{ 中国近海水深不深
同边有天然岛屏障
海域为浅水大陆架地带 }

海啸预警基础: 海啸波长长, 地震波传播快.



* "不许 tmd 用微积分!"
用了就有我检查出错
不倒和你几分 — zkc

$$v_A = v_B = \sqrt{gh} = 200 \text{ m/s. 取 } v_{BC} = \frac{v_B + v_C}{2} = 150 \text{ m/s. } v_{CD} = 50 \text{ m/s.}$$

$$t_{\text{总}} = 2000 + 4000 + 1200 = 7200 \text{ s} = 2 \text{ h}$$



周五班:

1. 北大校园内唯一紧急避难场所: 静园草坪

2. 我国的抗震理念: 小震不坏, 中震可修, 大震不倒.

3. 地震好处:

① 稳定地质结构.

② 是照亮地球内部的明灯.

③ 形成了神奇的自然景观

④ 聚集、勘探矿产资源

4. 中国大陆地震时空:

空间: 东少西多 (以横断山脉为界)

时间: 1900~2000 年内有 6 个活跃期.

周五班:

地震灾后重建, 经济与精神救援都必不可少.

心理建设: 必要性: 心理创伤种类多, 情况复杂且危害大.

分类: 大规模的疏导、宣传工作.

调查评估

现场的心理救援工作.

分类分级处理

分层次实施

协助救援 (培训非专业人员等)

应急性后续工作.



① 地震大小 ($M_w \geq 7.5$ 引发海啸预警)

引发地震海啸的主要因素:

② 地震机制

现实中 75% 虚报

③ 震源深度

④ 震源~~深度~~破裂过程

注: ② 逆冲型断层易产生海啸, 走滑型概率为其本。

③ 深源地震的影响不大。

其他诡异考题:

大地震后在城市造成最严重的次生灾害是 火灾。

预测精度最低的主要因素之一: 时间。

我国地震在时间分布上最主要、普遍的规律: 地震活动 周期性、重复性。

