

冯锐,2016,地动仪研究中的五个地震学基本概念,中国地震,32(4),571~583。

地动仪研究中的五个地震学基本概念

冯锐

中国地震局台网中心,北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

摘要 地动仪的研究涉及历史和科学的统一。古籍文字的主要部分是对测震现象的描述,研究的学术观点和模型尽可不同,但地震学基本概念和原则是需要遵循和坚持的,方能正确把握和解读史料。针对一些专业认识上的误解,本文以地震学的基本概念和学科发展史为依据作了必要的澄清和纠正,诸如地动仪的反应方向、对地震和非地震的不同反应、陇西地震的量化分析、地震学的实验检验、在地震科学史上的作用等。还对个别的脱离实际却被媒体高调宣传的模型实验,指出了其原则性失误。地动仪研究的重点并不局限于重建一个模型,更要探寻古人如何发现和利用了自然规律,学习和掌握地震学的基本知识。

关键词: 地动仪 地震学 科学研究史

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0571-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地动仪不同于一般的古代青铜礼器,是具有地震学属性的专业仪器,反映了古人对真理的探求及对科学观念的突破。对它的研究,自然要有历史和科学的良好统一。

现存的地动仪古文记载中,涉及其外部造型约占 15%,内部结构仅占 10%,其中大部分即约 70%是对测震现象的描述。因中国传统科学是实用性的,表述是现象学的,分析是哲理性的,这使得古人的科学认识不大可能或很难通过史书准确、完整地传递下来。现象学的表述,表面上看并不难,但欲准确把握文字深层的科学含义和量化关系就决非《释名》、《说文》能够界定的,更不能“阴阳地气、八卦对应”等哲学概念替代自然科学的专业内容。那种摒弃现代地震学的严谨理论与实践,用主观臆想的什么“地震风”(曹励华,2011)、“三型地震波循序演变”(王鹏飞,2005)来研究地动仪,则通不过实践的检验。

对地动仪的研究,学术观点和模型尽可以不同,但地震学的基本概念和原则是需要遵循和坚持的。比如地动仪的触发震相,不少史学研究仍在坚持是“直达纵波 P 的初动”(程军,2009;胡宁生,2014;张正严等,2015),这就完全错误了。因为陇西地震在洛阳处的 P 波初动的信号极其微弱,其纳米级的位移量、微伽级的加速度值是不可能观测到的,仅有的垂直方向振动又不含地震位置的方向信息。而触发震相的改变并非替换个名词那么简单,必然要随之改变地动仪的内部结构,才有可能与古文记载一致。显而易见,揭示文字底层的科学含

[收稿日期] 2016-07-26; [修定日期] 2016-09-13

[作者简介] 冯锐,男,1941年生,毕业于中国科学技术大学,研究员,主要从事地震学和地球内部物理学的研究。

E-mail: fr97214@sina.com

义,要力戒望文生义。即便开展地震学的模型实验,对振动台振动方式和数量级的掌控,也有严格严谨的专业要求。对于个别否定的观点,如“张衡设计的地动仪与近代地震学没有承继关系,它从一个侧面,说明中国古代科学无法与西方现代自然科学相衔接”(李强,2008),亦需加以匡正。

毋庸赘述,厘清地震学的基本概念和发展史实属非常必要。

本文并不是对地动仪史料的全面分析,仅从地震学的角度剖析几处古文的科学含义,选择其中5个具有代表性的基本概念做解释和澄清,指出个别模型实验当中的原则性失误。这些内容不是为了取代、也取代不了史学考证,旨在纠正研究中的某些主观曲解。希望有助于正确地、科学地研究地动仪。

1 地动仪的反应方向

古文“虽一龙发机,而其余七首不动……,寻其方面,乃知震之所在。”(《后汉书》,下同)被长期解读成“地动仪能定地震方向,指向震中”当为首先需要澄清的。

1.1 史料的表述是不全面、不严谨的,解读不可绝对化

地动仪定过地震方向吗?

地动仪于公元132年问世后,张衡在京仅遇过3次地震。第一次为公元133年6月18日京师地震,史料没提及反应。第二次为公元134年12月13日陇西地震,震中位于洛阳西偏北方向,史载“尝一龙机发,而地不觉动”并未指明具体龙首方向,张衡自己也不知道“震之所在”。是在尴尬地历经了“京师学者,咸怪其无征”的数日责问后,他和别人一样都是从驿报中得知是陇西地震。第三次为公元136年2月18日京师地震,张衡已升迁侍中,继任的史官亦无“记地动所从方起”的行动。其后三百年间地震百余次,仅有过二次地声方向的记载:三国魏明帝234年12月9日地震,“京都地震,从东南来,隐隐有声,摇动屋瓦”(《魏书》);东晋孝武帝390年4月2日地震,“地震东北,有声如雷”(《晋书》),都没有记述地面震动方向。

青史并无震例,史学辩解声却不时发出(孙机,2014),坚持说古文“言之凿凿,应可信据”。“能定震中、判方向”。理之依据,仅仅这几个字,颇似考据研究有了什么新发现。

坦率地讲,文字本身的确凿性并不必然地说明文字内容的科学性。在《竹书纪年》、《墨子》、《吕氏春秋》甚至《史记》里的地震记载都有这种情况,诸如“地震降雨肉,地生白毛,天纪为地震……”等文字颇为普遍,都要经过专业分析之后方能正确引用,不可望文生义,浅尝辄止。当然,“寻其方面,乃知震之所在”会是张衡曾经遇到过的一种客观现象,作为个例并不错误,但它绝不是地震波场的唯一现象,属于“先见树木,后见森林”的第一步认识。19世纪中叶以后,随着观测资料的增多,人们才逐渐认识到地面震动方向与震中的关系十分复杂,同时存在着指向、背向、垂直震中,甚至混乱的情况。仪器的方向反应绝非地动仪仅有,世界上所有的验震器都有这个功能,不意味着地动仪有什么比现代还高超的技术需要破解和借鉴,科学的研究当力戒“只见树木,不见森林”。

方向问题不要过度解读的原因有二:首先是震源问题,地震不是爆炸类型的点震源,大震的破裂面会延展200~500km,比如2008年汶川地震的震源从映秀镇延伸330km到北川,就谈不上孤立的、单一的点位问题。地震学所用的震中参数 (x, y, z) ,不过是地震台网三维

方程的回归值罢了，“震中”这一名词套不到地动仪上。再有就是传播问题，地震波的偏振面既随距离又随方位而变。即便像图 1 那种最简单的直立断层的走滑位错，纵波初动也有复杂的辐射图样。所谓的“指向震中”，不是测震仪器本身能够解决或需要解决的任务，古今中外的单台仪器都做不到。作为测震功能的科学表述，国际上只讲验震器能够检验地震的发生，从不提其定向作用，更不可能定震中。

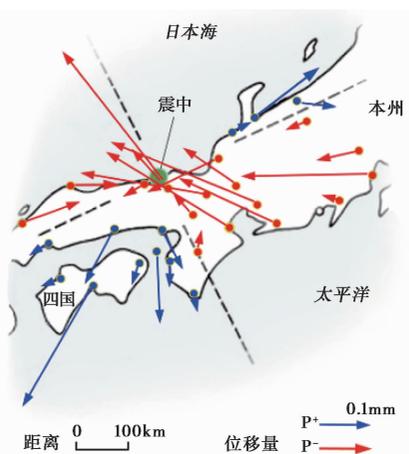


图 1 日本 1927 年丹后 7.5 级地震的实测纵波初动位移分布(根据 Hongda, 1957)

1.2 误解的根源是混淆了冲击波和地震波的差异

最早研究地下波动的是爱尔兰人马莱(R. Mallet)。他在 1857 年后曾利用爆炸——点震源进行过观测，发现冲击波的波形是简单脉冲，质点位移方向与波动传播方向一致，是从源点向外传播的球面波(图 2、3)。后人有过误解：西边来的地震波如气浪般地向东冲来，立柱等物体会因惯性向西倾倒，于是“指向震中”。20 世纪初才查明，这个概念是混淆了冲击波和地震波的差异。

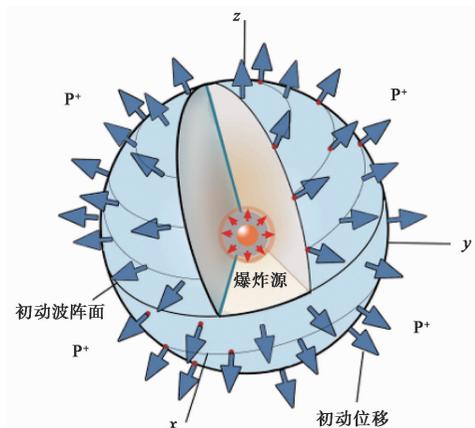


图 2 爆炸源产生球状对称的膨胀纵波 P^+ ，波阵面向外传播

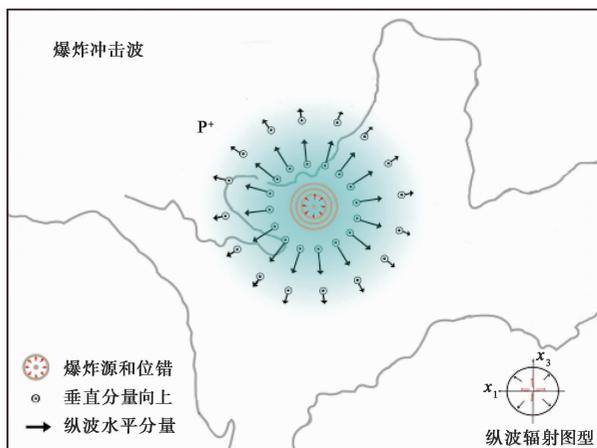


图 3 爆炸冲击波 P^+ 向四周传播的平面分布图样

地震震源不同于爆炸,它是剪切力源——断层两侧岩体的剪切位错(图 4),同时激发纵波和横波。纵波又分为膨胀性纵波 P^+ 和收缩性纵波 P^- ,二者的质点初动方向与波动传播方向是相反的,分别从源点向外(背向震中)和向内(指向震中)传播,如辐射图样(图 5)。横波的质点位移方向更是全部垂直震中。纵横波经过干涉后,又形成了面波。由于岩体位错会历时数十秒,不断辐射出来的地震波经过折射反射后,真实的地面运动早已不是单一脉冲,而形成连续的波组和不同波列了,偏振面也随距离和方位在不断地变化,故而不能套用冲击波的概念去理解地震波的传播。

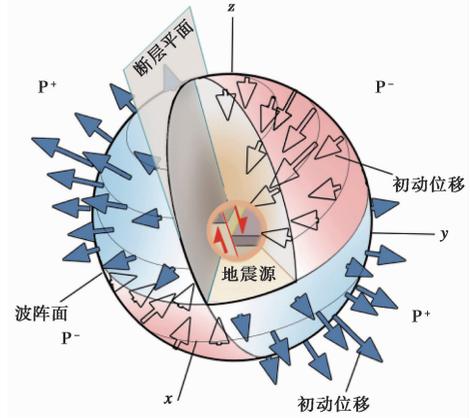


图 4 地震震源同时产生非均匀的膨胀纵波 P^+ 和收缩纵波 P^-

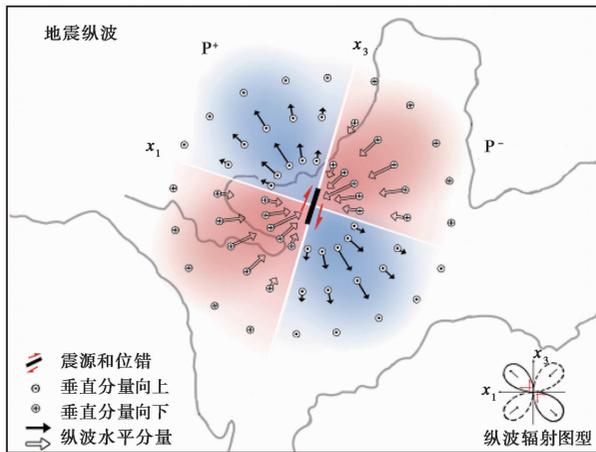


图 5 地震纵波的传播图样,分膨胀性 P^+ 和收缩性 P^-

1.3 秦汉时期对地震位置的认识是区域概念,非点位概念

秦汉时期对地震的认识尚处朦胧阶段,地震和水旱蝗风等灾异的位置多用行政上的州、或者受波及的郡国总数目来表述,史料中有大量的“荆州地震、凉州地震、郡国十八地震”,抑或“郡国八大风、郡国十二蝗、郡国三雨雹、郡国九大水伤稼……”等用语。这种极其原始的、粗糙的表述都属于区域概念,决非点位概念,是由当时的认知水平和人烟稀少所决定的。

对灾异位置的推测,古人一直遵从天文分野观点——“天则有列宿,地则有州域”(《史记·天宫书》),列宿配州域即“分野”(冯锐,2013)。浑天仪、星空二十八宿、地动仪都要统一地划分成八个扇形区位,彼此对应。所以古文的“寻其方面”,不是指初中几何的 360° 的“方向”,而是八个均为 45° 的扇形区位;“震之所在”乃指与该扇形区位相对应的地理州域。这就不难理解,仅在灵台一个点进行的候日、候星、候气、候风等观测,为何一旦发现某一扇形区位里的异常,就能由中央推测全国各地的凶祸灾变,这可能是广义上的“寻其方面,乃知灾之所在”的原始本义。

对张衡遇到的个案,地震学视其反应方向“粗略地发生在沿震中的方位上,即正负 180° 的两个方向之一。”它与地动仪的原理无关,即便是持直立竿原理的王振铎(1976)也持同样观点。

2 对地震和非地震的不同反应

古文“如有地动,地动摇尊,尊则震,则随其方面,龙机发,即吐丸,蟾蜍张口受丸,丸声振扬。”无疑是地动仪对地震的反应。它引出一个重要问题:对于非地震的干扰有没有反应?

2.1 对古文的描述要作正反两方面的理解

古文对现象的描述有个特点:一般只写“有运动、有变化”的正面,不会再对常态情况另行费笔赘述一遍“无运动、无变化”的反面,画蛇添足。“不写则不动、未讲则未变”是为原则,谓之不言自明的逻辑。因此,它的反面即常态情况为“尊不震,机不发,丸不吐,声不响”。否则,它的一系列的连贯动作便会与“如有地动”的前提、与“地动摇尊”的水平运动特征、与“寻其方面,乃知震之所在”的推断全部矛盾。对这个问题,百余年间还无人提出过异议,即便日本、英国、美国、荷兰的学者也都没有出现过误读。

掌握这段古文的反面含义十分重要。因为在没有地震时,大地并不平静,还存在其它可能更为明显的振动——地表噪声。除了张衡指出的山崩、地坼、地陷外,还有人员活动、车马行走、河水流淌、雷电雨雹、风吹树摇等都会无时不刻地产生冲击波,四面传播。控制不了也屏蔽不掉,即便关闭门窗、密封仪器。

灵台的测震条件并不好:一是位于洛河旁的河漫滩上,地基松软,河水冲刷产生大量噪声;二是人为干扰严重,毗邻的明堂辟雍多有朝觐和祭祀活动。公元 126 年太学扩建,共建 2400 栋房屋、1850 间房子,太学人数达 3 万人以上,距离灵台仅 1km 之远。地动仪于 132 年安装后,京师屡发地质事件造成有感冲击波。比如公元 133 年 7 月 22 日“洛阳宣德亭地坼,八十五丈,近地郊。”(《后汉记》卷十八,《后汉书》志十六),距灵台 2km 左右。其后,汉桓帝 167 年 6 月“洛阳高平永寿亭地裂”,汉灵帝 169 年 6 月“河东地裂十二处,裂合长十里百七十步,广者三十余步,深不见底”(《后汉书》五行志四),这些事件都会对仪器造成强烈的干扰振动。但是,史书上没有过一次地动仪被误触发的记录。相比之下,公元 134 年 12 月 13 日的陇西地震时,洛阳“地不觉动,京师学者,咸怪其无征”,地动仪却吐出了铜丸。

一段古文两层含义,一件仪器两种反应——“不是地震它不动,只对地震有反应”。这是地动仪的科学属性,是它的价值所在,是一条不能逾越的底线。对地动仪原理的争辩,看似是在解读“中有都柱”一句上出现的文字歧义,其实质是如何正确理解整段古文的正反两层含义。正是由于地动仪等一类仪器具有这种特殊的物理属性,经典地震学才将之称为验震器,并促进了现代地震仪的诞生,这决不是报警器所能比肩的。

2.2 三个功能含有具体的科学内涵,揭示了都柱的力学状态

地动仪的 3 个功能均有地震学的具体内涵。

(1)“不是地震它不动”——所有的非地震运动都以上下颠动为主,弱水平分量相伴。对灵台的最保守估算,当年种种非地震事件的垂向加速度要在 $50 \sim 500\text{gal}$ ($1\text{gal} = 10^{-2}\text{m/s}^2$) 量级,个别事件要高达 1000gal ,地动仪的抗干扰能力会大体在这个水平,否则它不可能正常工作,也测不到陇西地震。对复原模型的抗干扰测试,用“在垂直向振动加速度约 100gal 时,

误触发率不超过 1%”来衡量。

(2)“只对地震有反应”——地震运动以水平摇晃为主、垂直分量相伴。陇西地震在洛阳的地震烈度在 III⁺~IV,即水平加速度不会超过 1gal。这个振动量主要是对面波和横波而言的,决不是早已衰减殆尽的纵波 P。对复原模型灵敏度的测试,用“对周期为 1sec 左右的水平振动,灵敏度不大于 1gal”来衡量。

(3)特定的指向性——作为沿震中方位的触发震相,只能是瑞利面波。它的运动轨迹是在射线垂直平面内的逆进椭圆,频率很低,震动的持续时间长。地动仪对它会具有良好反应的特点。

从古文来看,3 个功能紧紧相扣,缺一不可。

鉴于地震波和地表噪声都具有水平和垂直分量,二者又是叠加耦合在一起的,差异仅在于各自的“优势分量”不同(图 6)。非地震并不是绝对的、纯粹的垂直运动,会有“上下颠簸、左右摇摆”现象;地震波也不是纯粹的、单频率的水平运动,会在水平向强振荡的同时伴有垂直分量,偏振面总存在侧向和纵向的倾角。总之,测震仪器既要抗拒强干扰、又要测到微弱地震,这是两难的。

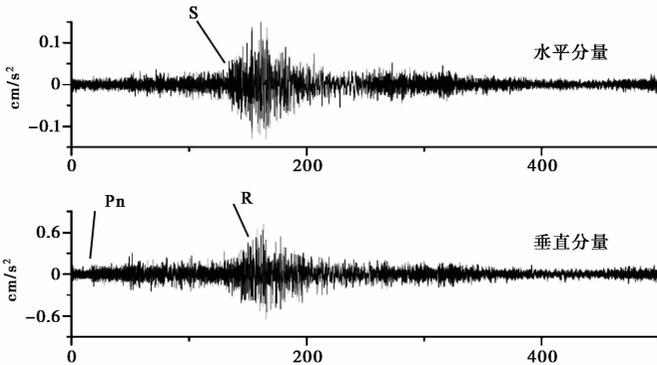


图 6 地表加速度的实际记录图。地震和地表噪声的垂直和水平分量始终处于耦合状态

则解耦,遂成为唯一的出路。

解耦就是把垂直分量和水平分量分离开来,彼此独立,互不干扰。现代测震学采取了一系列的技术和措施,地震仪垂直分量和水平分量的结构完全不同,每个观测点还必须用 3 台仪器单独记录。于是,垂直记录中主要含非地震的噪声和纵波信息,水平记录中则主要是地震横波和面波信息。张衡的地动仪只有 1 台,居然能对地震和非地震出现不同的反应,那么“中有都柱,傍行八道”的力学状况一定是解耦的。不解耦,地动仪的反应就不会出现差异,不能抗拒地表干扰,不可能提高测震的灵敏度,故反应的指向性也就不复存在。

3 陇西地震的量化分析

量化分析“尝一龙机发,而地不觉动,京师学者,咸怪其无征,后数日驿至,果地震陇西”,为模型的实验检验提供了客观标准。

3.1 为什么能用古今资料进行震例对比, 量化陇西地震呢?

自然科学的研究基础在于客观现象具有可重复性, 即自然规律是不变的, 会在同等观测精度和条件下重演。“白日依山尽, 黄河入海流”千万年来没有变, 地震波也是这样。它的震相、走时、偏振、衰减、频率等基本规律是不随时间和地点改变的。以陇西地震的 3 次洛阳记录为例(图 7), 时间相隔 10 年, 能量差千倍, 但地震波的基本特征一直未变: 震相到达的先后次序、各震相的偏振方向、瑞利面波 Rm 的优势地位、衰减特征、频谱特征都不变。这就允许人们通过古今震例的对比、实证、后验、甚至模拟等手段来理解和检验古书。古文描述的不过是些简单的宏观现象, 诸如“地不觉动, 民甚惧焉”、“屋宇摇曳, 地摇京师”、“地坼山崩, 坏败庐舍”等等, 这些现象很容易重复出现。于是在同等观测精度和条件下, 用明清时代的历史地震, 借助今日的地震记录图, 就能够量化分析汉代的陇西地震。

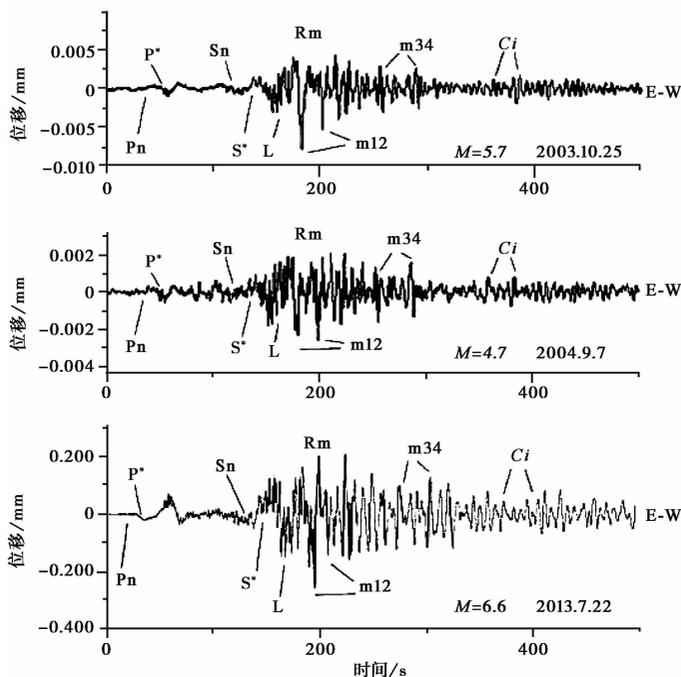


图 7 洛阳地震台记录的 3 次陇西地震位移记录图
时间相差 10 年, 震级 $M=4.7\sim 6.6$, 基本特征一直未变, 表现出可重复性

3.2 陇西地震的资料独立性和量化范围

古文的“地震陇西, 地不觉动”, 可把它量化成: 震中距 500~700km, 洛阳的地震烈度 III⁺~IV。再根据古今地震资料、烈度衰减规律、理论地震学、地质构造及陇西地震记录图, 就能推算出该地震的理论复原地震图以及各参数的数量级(冯锐, 2006):

(1) $M=6\frac{3}{4}\sim 7$, 在甘肃天水一带。洛阳地区的水平运动是横波和面波, 不是纵波。面波加速度小(不超过 1gal)、位移量大(6~8mm)、频率低(优势周期 1~10sec)、持续时间长(约 1min); 横波比面波先到, 频率高出约 10 倍, 加速度和位移量会小约 50%以上;

(2) 纵波初动是首波 Pn, 直达纵波 P 是续至震相, 垂直加速度和位移量分别约为面波的

10^{-3} 和 10^{-6} , 完全观测不到, 没有水平分量;

(3) 洛阳地表噪声的垂向加速度至少在 $50 \sim 500 \text{gal}$ 的量级。

把以上数据集输入计算机, 就能通过振动台技术重现陇西地震时在洛阳的地面运动。当然, 这些参数远不是地震事件的全部, 但就约束和测试复原模型来说足矣。

3.3 触发地动仪的不是直达纵波 P, 而是后续的瑞利面波 R

“直达纵波 P 触发地动仪”, 这是一种最常见的误解。

地震纵波是一种能量很小、衰减很快的高频信号, 只出现在近震中地区。从图 1 可见, 日本丹后 7.5 级大地震, 距震中 200km 的最大位移量仅有 $0.001 \sim 0.2 \text{mm}$, 稍远的区域根本观测不到 P 波初动。而陇西的震中距高达 600km, 震级不到 7 级, 到达京师洛阳的纵波理论位移在 10^{-6}mm 即纳米的量级, 相当于气体分子的大小, 加速度约在 10^{-5}gal 的量级。这样微小的波动, 连现代地震仪都观测不到, 更不会造成古书记载的“地动摇尊, 尊则震”的现象。

其次, 在壳幔边界上会产生一种传播速度极快的首波 P_n , 它在震中距大于 50km 以后一直是首先到达的震相, 能量一般要比直达纵波 P 高出 1~3 个数量级, 直达纵波 P 在洛阳已成微弱的续至震相, 初动作用不复存在(图 8)。

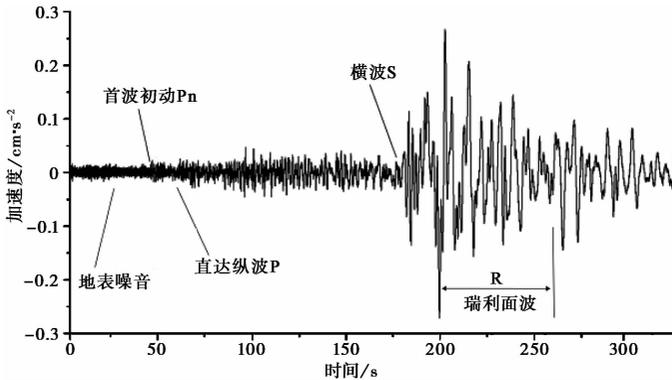


图 8 500km 震中距的真实地震记录图

初动震相为首波 P_n , 不是直达纵波 P

最后, 地震射线是弯曲的, 地表是自由界面。于是纵波的波阵面便会与地表面重合, 波动射线垂直出射于地表。也就是说, P 波只有上下振动, 没有水平分量, 不论东西南北传来的地震纵波, 都不能用它来分辨出震源的方向, 从而与古文“寻其方面, 乃知震之所在”完全相悖。

事实上, 当震中距逾 200km 后, 各地最稳定的强信号只有一个——瑞利面波 R。它具有频散特征, 不存在体波那种初动明显的起始位移, 质点运动沿震中方位(图 9)。7 级以上地震的面波一般会持续摇晃十几分钟以上, 宽泛的频带很容易引起结构的共振。史载陇西地震时人不觉动, 却有“地动摇尊, 尊则振…, 龙机发”现象。既然人们已经看到约 3m 高的地动仪出现了“地动摇晃尊, 尊体来回振动”现象, 但人体自身却“不觉其动”。那么, 这肯定是, 也只能是地震学里的典型的瑞利面波现象, 仿佛不可思议但千真万确, 它普遍出现在烈度为 III~IV 区域内。动作次序上, 又是先出现“尊则振”然后才“龙机发”现象(而相反的次序), 更成为进一步的旁证。

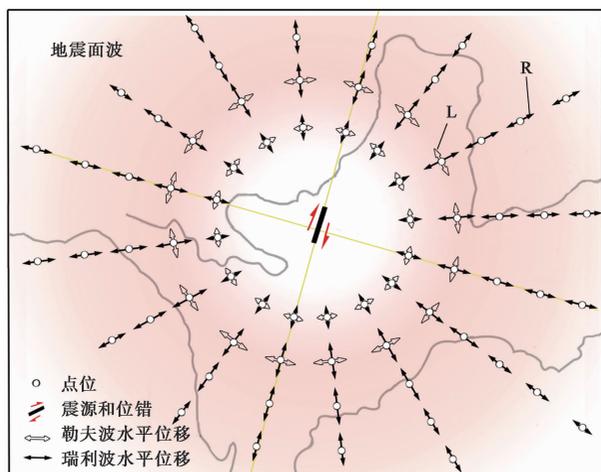


图9 地震面波的震动方向和传播图样

4 地震学专业实验的检验

“验之以事，合契若神，来观之者，莫不服其奇”说明地动仪经过了多次实践检验才成功。

4.1 为什么一些看似成功的模型却通不过专业检验？

近些年，屡有文章和小报对一些“直立竿复活的实验”做高调宣传。殊不知，这些模型突破了“不是地震它不动”的底线，将虚高的灵敏度变成惟一的追求目标，于是始终通不过（或完全没有做过）严格的地震学专业检验，更没有用真实的三维地震记录做过实验。胡宁生（2014）的实验尤为典型，他把一根高 1.90m、直径 3.8mm 的直立竿竖立起来，在水平振动中倾倒了，著书自称“破解了全世界 1800 年来没有一个人能解决的谜，是中外科技史研究中百年来所取得的最大成就之一”。为此，有必要指出其原则性失误。

直立竿是一种非稳定平衡结构，以支撑底面的极端狭小为特征，高灵敏度是靠弱摩擦力和重力矢量的偏斜失稳来实现的（图 10）。记直立竿质量 M ，底面水平向摩擦力 f ，垂向重力 Mg_0 ，稳定条件为

$$f = \mu \cdot Mg_0 \quad (1)$$

g_0 静态重力加速度 980gal, μ 摩擦系数（铜钢等金属间的静系数为 0.5~0.7，动系数为 0.44~0.34），即青铜间的静摩擦力 f 约为立竿重力之半。式（1）表明，直立竿的水平 and 垂直作用力紧密耦合在一起，二者不是相互独立的 2 个物理量，它的力学状况不解耦。于是，直立竿对水平和垂直向振动都能够出现反应，即不具有分辨非地震与地震的物理属性，无法用于验震。比如动态时候，若地表噪声的垂向加速度为 N ，式（1）的静态重力加速度 g_0 就要改变为 g ，

$$g = g_0 - N$$

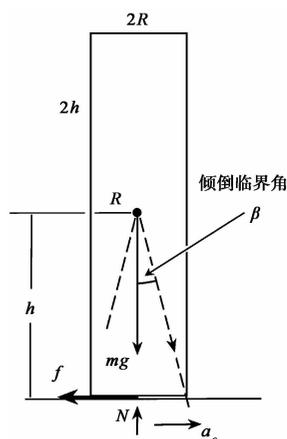


图10 立柱体的力学关系

$$(2)$$

摩擦力 f 便会随之变小。作为时变量的地表噪声,其垂向 N 的值很容易达到 50~500gal 的量级(山崩、地陷时更会超过 1000gal 以上),又含有一定的水平分量。于是,摩擦力 f 会瞬间降低 5%~50% 以上,相当于摩擦系数已经从静态值降低到动摩擦范围以下,于是底界面便不可避免地要出现层间滑动,直立竿的稳定条件式(1)遭到破坏,结构的倒塌便具有随机性。在震害工程专业实验室,我们曾对高径比分别为 5、10、20、40、62 的直立竿做过 400 余次测试(冯锐等,2006),垂向振动确实更容易使直立竿倾倒,其垂向倾倒的临界加速度甚至会比水平向的低 500gal 以上,而且高径比愈大者愈容易发生,误触发率高达 97% 以上,完全不适用于测震。

就灵敏度和抗干扰性而言,抗干扰是前提条件,或者说地动仪的“不是地震它不动”的底线,不能突破。若立柱的重心高为 h ,底面半径为 R ,则高径比为 h/R ,Milne 在 1885 年引入了 Charles D West(1847~1908)的近似公式

$$a_0 = \frac{R}{h}g \quad (3)$$

a_0 为倾倒的临界水平加速度(即灵敏度)。高径比越大,倾倒的临界角度 $\beta = \arctan(R/h)$ 就越小,灵敏度自然越高,此时的重力矢量偏斜到柱体底面的外边缘处(图 10)。

但直立竿是一种没有恢复力矩可维系平衡的结构。由于地表噪声同时含有垂直和水平分量,其偏振面是倾斜的(可达到 30° 以上),在洛阳灵台的土层环境下,地面倾斜的瞬态倾角会达到几度至 10 余度的量级。于是重心矢量会瞬态偏离初始平衡位置,继而超越支撑底面之外而引起失衡。实测表明,对正常噪声本底的地倾斜干扰,立柱的高径比(h/R) $\approx 50\sim 60$ 、倾倒临界角 $\beta \approx 1.0^\circ$,已接近抗噪声的极限量。胡宁生(2014)直立竿的高径比为 500,倾倒临界角已然小到 $\beta \approx 0.1^\circ$,它对于通常几度以上的地面动态倾斜干扰是完全抗拒不了的,倾倒方向更是随机的。当然,如此大的高径比值自有虚高的灵敏度值($a_0 = 2\text{gal}$),不过这个值完全没有实际意义,也仍然没有达到陇西地震的不超过 1gal 的最低检测要求。

非地震的干扰与三维测验是基础性实验,十分重要,但胡宁生的实验,对此有意做了回避。只模拟脱离地震学实际的“纯水平向简谐运动”——无垂直方向干扰振动、无地面倾斜干扰、无地震波震相的运动,仅输入了绝对清晰的“纯水平”方向的强烈冲击,加速度竟为真实地震纵波的 10^5 倍。于是,出现了直立柱倾倒的假象,其方向还准确地“指向震中”。这些,自然通不过地震学的专业检验。

对于这类经典地震学已有过明确否定结论的结构,不建议青年人去盲目投入。

4.2 地震学的专业实验

在地震学国家重点实验室,液压振动台能够在计算机系统的控制下精确复现各种三维地面运动,各装置的精度、重复性均有严格的国家标准。通过计算机输入数字地震图之后,便可以完成频率、位移、加速度、结构响应、应力应变等各项参数的标定和测试。小的振动台面约 $1\text{m}\times 1\text{m}$ (图 11),适用于都柱结构测试。大的振动台面约 $3\text{m}\times 4\text{m}$,可对原大地动仪模型进行整体测试。实验控制系统虽然比较复杂,但能严谨地查明问题和验证认识。专业测试主要包含如下 6 方面的内容。

(1) 抗干扰性 测试模型的抗干扰能力,独立的纯垂直方向干扰量 500~1200gal,频率范围为 0.1~200Hz,运动方式为脉冲状和连续波列 2 种,确定 100 次测试的误触发量;



图 11 实验室的小型液压振动台,正在对黄色的悬挂都柱进行测试

(2)灵敏度 测试模型的稳定性和水平向灵敏度,周期约 1sec 的独立纯水平振动信号,加速度在 0.2~5.0gal,水平位移量 0.5~2.0mm;

(3)三维合成检验 将前 2 种水平信号与垂直噪声合成起来,以三维运动的方式重新实验;

(4)宽频带响应 测试结构的自由运动和负荷运动,周期为 0.01~10.0sec。测试模型分辨续至波的能力;

(5)陇西地震 输入复原的陇西理论地震图,按照量化范围进行数量级的约束,检验模型的动力学响应;

(6)真实地震 输入真实的三维数字地震记录图,检验模型的灵敏度、动作顺序、反应方向、稳定性。

只有通过这些严格的专业测试,方能查明模型是否合理。

5 地动仪在地震科学史上的作用

5.1 对现代地震学启步阶段的思想启迪

19 世纪末,现代地震仪发明之前。日本的服部一三(I. Hattori)于 1875 年绘制了地动仪复原图。次年 3 月,刚访问过中国北京、天津、上海的英国地质工程师米尔恩(J Milne)到达日本,很快对张衡的发明产生了兴趣,自 1879 年集中精力到张衡和地震研究方面。根据中国古书记载,他在住所和餐厅里对都柱结构做了大量实验。先设计了直立竿结构,对比了方截面、圆柱、锥形和其他一些形状,均告失败。又设计了 50 余种悬挂装置,还把住房的两层天花板都凿了洞来悬挂。认识到测震的关键在于加大悬垂摆的摆长和自振周期,才能测量相对位移。

1880 年 2 月 22 日凌晨,横滨 5.8 级地震把东京的 Milne 晃醒,他清醒地看到吊灯剧烈摇

晃,摇摆方向十分确定,两个实验用单摆振幅竟达2英尺,更从实践中理解了张衡,得到了明确的结论,即“对测震来说,悬垂摆是最精确的结构”。

1883年, Milne(1883)第一个把《后汉书》对地动仪的记载全部译成英文,绘制了复原模型,他在这部地震学奠基之作里强调:“张衡地动仪的价值决不仅仅在于它是一个古老的发明,更重要的在于,它竟以极其相近的思路留给了现今时代的科学仪器以许多有意义的启迪。”他又根据横滨地震500份调查问卷和100多封来信,提出了一个重要概念——地震可能会造成某种波动,使震害程度向外衰减。

5.2 地震波的发现和现代地震仪的诞生

1889年4月17日德国波茨坦的天文台, Rebeur-Paschwitz(1861~1895)用水平摆重力仪观测月球引力作用,突然在17时21分看到了记录的异常。几个月后,从《自然》得知日本熊本发生6.3级地震:波茨坦时间是4月17日17时07分。德-日两地相距8800余千米,波茨坦的记录滞后14min!这一偶然发现不仅证实了地震波的存在,还获得能在远距离观测的过硬记录(Bolt, 1993)。消息轰动了世界,也使张衡地动仪扬名全球——中国人早在1700多年前就测到了远处的地震。正是在这件事情之后,西方才把地动仪称为“中国验震器”(Chinese Seismoscope),并以公元132年作为人类首台地震仪的诞生年份。

受到鼓舞的 Milne 立刻分析了德国的水平摆重力仪。在月球的引潮力缓慢变化时,所改变的是铅垂线相对旋转轴间的夹角 α ,记录了起潮力位的变化;在遇到地震波的迅变信号时,实际上是仪器的旋转轴相对铅垂线发生了改变,即倾角 α 的反方向变化。张衡用的悬垂摆(都柱)与德国用的水平摆存在本质联系,差异仅在于 α 角,悬垂摆就是 α 为直角时的水平摆。

Milne 随即设计了一种新型水平摆,采用硬摆杆、吊丝提拉重锤,从垂直摆演化到水平摆,终于在1893年发明了世界上第一部现代地震仪——高0.5m、长1m,摆锤500g,周期数百秒,配有记录器。1895年返英后,用他的80多台新仪器在全球60多个国家组建了全球地震台网,出版了全球地震报告和专著,成为举世公认的现代地震学的奠基人。

从科学思想的继承和启迪来看,张衡地动仪和现代地震仪的诞生存在确切的历史链,东方与西方的文化联系共同促进了世界文明的发展。

6 结论

地动仪的研究涉及历史和科学的统一。研究的学术观点和模型尽可不同,但地震学的基本概念和原则需要遵循和坚持,同样是工作的基础和底线。目前的研究中存在一些专业认识上的误解。笔者选择了5个具有代表性的地震学基本概念做了解释和澄清,强调了模型实验应该符合客观实际的重要性。希望有助于正确地、科学地认识地动仪。

参考文献

- 程军, 2009, 张衡地动仪文献再研究, 博物馆研究, (4), 68~72。
曹励华, 2011, 张衡地动仪新探, 机械设计与研究, 27(2), 114~118。
冯锐、武玉霞, 2013, 张衡地动仪的诞生, 中国地震, 29(2), 179~197。
冯锐、余言祥, 2006, 张衡地动仪与134年陇西地震, 地震学报, 28(6), 654~668。
胡宇生, 2014, 张衡地动仪的奥秘, 南京: 南京大学出版社。

- 李强,2008,简评冯锐复原张衡地动仪的设计思路,自然科学史研究,27(3),378~387。
- 王鹏飞,2005,张衡候风地动仪功能测试和感震原理的探讨,自然科学史研究,24(4),291~318。
- 王振铎,1976,张衡地动仪补说,文物,(10),67~70。
- 孙机,2014,中国古代物质文化,北京:中华书局。
- 张正严、关增建,2015,对冯锐复原地动仪若干质疑的评述,自然辩证法通讯,37(1),149~154。
- Bolt B A,1993,Earthquakes and Geological Discovery,New York:Scientific American Library.
- Milne J,1885,Earthquakes and Other Earth Movements,London:Kegan Paul Trench,Trubner and Co. Ltd.

Five seismological basic concepts in research on the Zhang Heng's seismoscope

Feng Rui

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract There should be a unity of thinking between history and science in research on the Zhang Heng's seismoscope. The major part in relevant historical literatures was written in a form of describable words for seismic phenomena. In spite of different conclusions made of the studies, the basic concepts and principles of seismology should be observed, which make up research basis and significance for correctly interpretation and analysis of historical documents. Because there are a number of discipline misunderstandings in seismology, clarification and correction are presented briefly based on seismological basic knowledge and history of science development. The discussed topics include: response direction of the instrument, distinction between seismoscope and alarm, quantitative range of parameters of the Longxi earthquake, seismological test and functions in seismology history. The paper also analyzes certain principal mistakes of some experiments which have been highly reported by media. It is worthwhile to point out that the purpose of reconstruction study is not confined on restoring a model; more valuable rewarding comes from searching on how ancients discover and used laws of nature, knowing well and analyzing their experience from the view point of modern science, so that we can have more inspiration and seismology knowledge.

Key words: Zhang Heng's seismoscope; Seismology; History of science