

# 科学 激活了张衡地动仪

冯 锐<sup>†</sup>

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

**摘 要** 张衡在公元 132 年发明的地动仪是人类历史的第一台地震仪器——验震器,失传于东汉末年(大约公元 190—220 年)。为了展现这一伟大的科技成果,国内外自 1875 年以来提出过 13 种概念性的地动仪复原模型,都不能够验震工作。其中王振铎于 1951 年提出的展览模型最为流行,但是存在着原理性的错误和其他的失误,受到学术界的严肃批评和否定。为此,中国地震局和国家文物局组织专家从 2002 年开始了新的科学复原研究。新的研究工作取得了一系列新发现并纠正了过去的误解,证实史料对地动仪的记载并不是孤证。地动仪成功测震的是公元 134 年 12 月 13 日的陇西地震。地动仪的工作原理是悬垂摆,张衡的发明曾经在现代地震学起步阶段起过重要的思想启迪作用。新设计的模型已经于 2008 年定型,内部结构有 5 部分,形似汉代酒樽,蟾蜍为器足,不仅更加符合史料和汉代的历史特征,而且具有良好的验震和抗干扰功能,陇西地震现象得到重现,百年多的复原研究第一次实现了从概念模型到科学仪器的历史性跨越。文章对有关问题进行了介绍。

**关键词** 张衡地动仪, 验震器, 科学复原, 史料研究, 地震学研究, 实验研究

## Science brings back Zhang Heng 's seismometer to life

FENG Rui<sup>†</sup>

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

**Abstract** Zhang Heng 's seismometer invented in A. D. 132 was the first seismoscope in the world but was lost by the end of the Dong Han dynasty( about A. D. 190—220 ). To demonstrate this great scientific invention , since 1875 about 13 reconstructed models have been proposed throughout the world ; however , all of them were conceptual and did not function as a seismoscope. Among these models , the exhibition model reconstructed by Wang Zhenduo in 1951 was the most popular. Unfortunately , this model contained a fundamental mistake and other faults , and so aroused serious criticism from academic circles. In 2002 the China Earthquake Administration and Bureau of Cultural Relics organized experts to carry out a new study of the scientific reconstruction of Zhang Heng 's seismometer. The present study reports some new findings and corrects existing misunderstandings. It has been verified that there is more than one historical record related to the seismometer , it successfully detected an earthquake on 13 December 134 , and its principle of operation was based on a suspended pendulum. Zhang 's invention played an important role in enlightening scientific thinking at the beginning of modern seismology. The new model has now been completed and possesses the following features : its inner structure consists of five parts , the external shape is similar to the warming wine jars of the Han dynasty , and it has toad - shaped feet. In addition to being consistent with historical records and Han culture characteristics , the new model functions well as a robust seismoscope. The phenomenon corresponding to the Longxi earthquake may be reproduced , which indicates a leap from a conceptual model to a reconstruction of the scientific instrument. An overview of the relevant research is presented.

**Keywords** Zhang Heng 's seismometer , seismoscope , scientific reconstruction , historical record research , seismological research , experimental research

\* 国家自然科学基金(批准号:40644019)资助项目

2009-03-13 收到

<sup>†</sup> Email: rfeng\_cn@yahoo.com.cn

在中国乃至世界,提起张衡地动仪,几乎无人不知。那是汉朝科学家张衡在公元 132 年发明的人类第一台测震仪器。这是中华民族的伟大骄傲。地动仪龙首中的铜球一掉到蟾蜍口中就说明地震了。

不过,多数人并不了解,国内外学术界曾对地动仪的可靠性、科学性、历史面貌及在科学史的地位争吵过半个多世纪。为了能够亲眼看到它生命脉搏的跳动,学者们真是费尽了脑筋,开展过远远超过常人想象的深入研究。

话要从 50 多年前讲起。

## 1 传统模型引发的争论

图 1 是国内外最流行的张衡地动仪的外形和内部结构,曾摆放在中国展览界的旗舰——中国历史博物馆,刊登于中小学课本,印刷在邮票上,作为国家礼品赠于海外甚至联合国的有关组织,在弘扬中国文化和开展国际交流方面起过一定的积极作用。经过半个多世纪宣传,许多人都误以为它是定论的、不可更改的惟一模型,引为骄傲地加工成昂贵的工艺品,甚至视为出土文物而予以仿制和收藏。

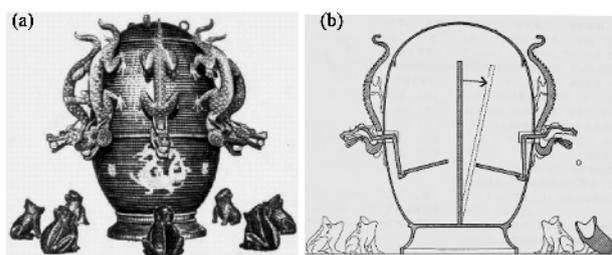


图 1 王振铎 1951 年复原模型 (a) 外部造型 (b) 内部结构

然而,广大公众误解了。

地动仪早在一千多年前失传,今日所见之地动仪既非历史原物又非出土文物,而是后人根据史料做的概念性复原模型,以表达对原物的理解和逼近。在国内外十几种复原模型中,图 1 只是其中之一,是科技考古学者王振铎(1912—1992 年)于 1951 年设计的。他在 1936 年还设计过另一个外形和原理全然不同的地动仪模型。争论就由此而生。既然是对地震学的一种专业仪器——验震器进行的历史复原,就不能自由创作。除了应符合历史记载外,还必须具备两种基本功能:对非地震的干扰振动不反应,只对地震才有反应。也就是说,宏观上要表现出能够自动地区分出地震和非地震的功能,才称得上张衡地动仪,才在世界文明史上具有相应的地位;否则复原模型

所必须蕴含的科学价值和社会影响就会丧失,甚至起反作用。因为制作一个凡有地动就有反应的报警器是非常容易实现的,例如几个鸡蛋擦在一起,啤酒瓶倒立起来,碗边放个筷子,等等,但是所有这类不稳定装置从来不具有任何测震学的价值和科学地位,对地震的反应更没有唯一性,因为即便是人走车行的振动它也会报警,而且会更加敏感。

非常遗憾,传统模型恰恰与“验震”这一实质性功能失之交臂。国家博物馆长期宣传的王氏模型(图 1)无论其展览原件还是全国无以计数的仿制品,没有一件能够工作,全部是作为一个概念展品而非测震仪器供摆设之用的。究其原因,这个模型存在致命性的原理错误——设计人试图凭借一根简单竖立的直杆的随意倾倒来验震(图 1(b))。其实,这种结构早在 18 世纪就已经被严格的地震学计算、实验室试验和地震检验所淘汰,不具有可行性,而工作原理的错误又自然地导致了外形错误。这种把张衡的伟大发明复原成报警器而不是验震器的失误,铸成了千古遗憾:直立杆一直成为不能竖立起来的摆设,外壳也是个空摆设。对这个普遍宣传的测震直立杆,主管单位和设计人居然在几十年间从来没有做过一次科学实验去检验,便列入我国中小学课本中一代又一代昏昏昭昭地讲了半个多世纪,讲者与听者实际上都是处于一种似是而非的满足、似明又暗的迷茫中,背离了科学实践的基本原则。为了演示测震效果,近年来的一些单位甚至发展到在模型内部安放电器和弹簧结构来造假。难怪有的老师惊呼:“不知道成千上万的教师是如何讲解地动仪的”<sup>[1]</sup>。

事实上,对王氏模型的原理性错误以及其他的偏谬,国内外学术界很早就发现了。除科普读物外,自 1969 年后的学术界发表了一系列的批评文章,考古学、历史学和地震学的严肃的学术刊物和科学论著从来不引用这个模型,地震学家也从来没有从严格的科学意义上把它作为地震仪器来接受和肯定过。中国地震学的奠基人傅承义院士(1909—2000 年)曾在 1976 年当面告诉了王振铎先生这个致命性的错误<sup>[2]</sup>。英国李约瑟(J. Needham)院士、美国地震学家博尔特(B. A. Bolt)院士、日本地球物理学家力武常次等均著文指出了这个模型的问题。遗憾的是,由于方方面面的原因,几十年间这些持续不断的、中肯的、专业性的严肃批评和否定意见一直不被重视,即使在今天的国内媒体和教学中依然置若罔闻地做着如旧的宣传,遂导致种种负面社会影响的出现而难以解决。地震紧张时,许多人不知道观察吊

灯的晃动,却试图用倒立的啤酒瓶来验震,误以为这是张衡地动仪的成功经验.殊不知,这是一种非常糟糕而无效的做法,因为它对车行人走等各种人为干扰有着更灵敏的反应,而对地震的反应又总是比人要迟钝!国内把地动仪的历史原件与王氏模型混为一谈的宣传方式,把西方人的头脑搞得更加混乱:“张衡地动仪是华夏科学停滞特点的典型表现.张衡成为华夏科学创造力的模范和象征,主要是因为他的地动仪被视为国宝和国粹”;“但它是不科学的”;“地动仪更多地象征着中国人的想往而不是代表一个完美的现实”<sup>[3,4]</sup>.目前,全世界共存在13种地动仪复原模型,中、美、英、日和荷兰等国各有各自理解的张衡和各自认为合理的地动仪模型.它们的外形和结构都不相同,唯一的共同点仍然是:只做纸面文章,复原模型都不能工作,都没有做科学实验.

深究起来,各国学者提出的严肃质疑并不是完全针对王振铎的,也并非没有道理.它涉及到一些更深刻而广泛的问题,比如下述5个中几乎每一个都会具有灭顶之灾的难题:

(1) 《后汉书·张衡传》的196个字是目前惟一参照的史料,按照“孤证不立”的原则,就不应该也不能够做复原工作.况且,迄今的所有复原模型都没有对汉代灵台进行过现场考察;

(2) 多年宣传的138年的陇西地震,属于讹传.因为其他汉代史料已经记载了138年地震在京师洛阳是有感觉和损失的,同《后汉书》所记载的“地不觉动”矛盾.此案不明,何谈地动仪的成功测震;

(3) 原理决定外形,原理错误外形必然失误.这就有待汉代酒樽的出土,这既能符合史料,又有别于王氏模型的形制,还能符合新的工作原理的要求;

(4) 地动仪同现代地震学的关系,尚缺乏历史链,遂影响到它在世界科学发展史的地位;

(5) 如果对上述的回答都是“否”,又拿不出合理的模型和事实,恐需默认“地动仪更多地象征着中国人的想往而不是代表一个完美的现实”<sup>[3]</sup>.

随着社会的进步,公众在近些年间对地动仪的王氏模型提出了大量质疑和批评,人们希望看到复原的古船能够航行、复原的地动仪能够测震的客观事实,期待得到文化的真实和知识的升华.人们不能够再接受种种虚无缥缈的概念造型,不满足于那些昏昏昭昭的诠释和开脱,要求搞清楚地动仪的科学道理和工作过程.这就使地动仪的科学复原变得十分尖锐而不能继续回避了,研究的内容也超出了复

原模型所能涵盖的范畴.

2003年10月,中共中央政治局常委李长春做出指示,地动仪是中国古代科技的典范.要组织专家做些研究,把工作的原理直观展演出来,充分发挥文物启迪智慧、普及历史科学知识、开展爱国主义教育的重要作用,让群众通过“仿真”实物感受到祖国历史上的科技成就,增强人们的民族自豪感.在中国地震局和国家文物局的支持下,基于冯锐等人2002年的理论研究成果<sup>[5,6]</sup>,组织了9个单位的地震学家、历史学家、考古学家、自动化学家和美术家等参加的专题研究组,由作者任组长,按照图2的整体思路扎扎实实地开展了多学科的基础性工作.经过几年的努力和严格的科学试验,终于使新的科学复原模型于2008年9月定型问世,它更加逼近历史原貌并具有验震功能,已经通过专家鉴定和国家验收,即由中国科学技术馆在国庆60周年之际首次向社会公布,中国大百科全书(第二版)亦改以它为准对地动仪进行新的介绍.国内外一百多年对张衡地动仪的复原研究,实现了三个里程碑性的跨越:1875年服部一三把史料文字变成了猜想图形;1951年王振铎把猜想图形变成了展览模型;2008年的科学复原把展览模型变成了验震仪器,恢复了地动仪的科学生命.

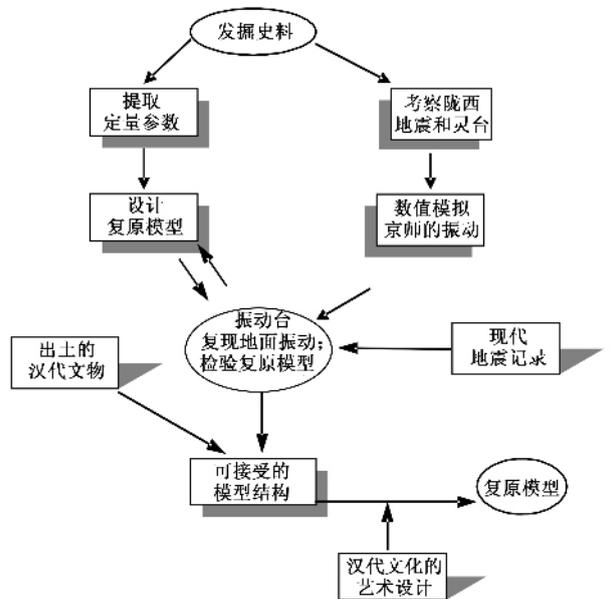


图2 新的复原工作的科学思路

这次科学复原的研究工作吸收了近年文物考古学的许多新成果,融入了现代科学技术手段,发现了大量的新内容,填补了早期研究的诸多空白.本文仅从史料与考古、地震学、复原模型、科学技术史4个

方面扼要地介绍这些新的发现和进展。

## 2 从史料与考古研究上起步

### 2.1 发掘新的史料

在国家图书馆善本特藏库的协助下,找到了国内保存最早的记有地动仪的7份古版刻本(图3),佐证了中国对于地动仪的史料记载不是孤证。

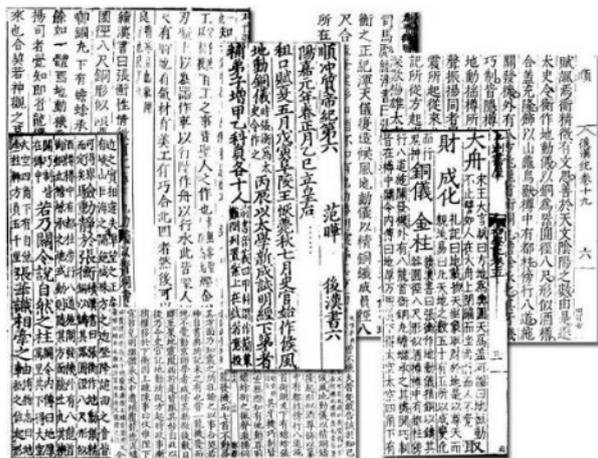


图3 新发掘出来的7种地动仪的史料记载

早在南北朝刘宋范晔(398—445年)撰写《后汉书·张衡传》196个字的70—150年之前,我国就已经存在对地动仪的记载。既有类书的引证,又有纪传体史书,它们是《初学记》、《事类赋注》、《太平御览·工艺部》、《太平御览·职官部》、《后汉书》、《后汉书·张衡传》、《后汉书·顺帝纪》共7种史料。同范晔文相比,西晋司马彪(?—306年)的《续汉书》对地动仪的结构有3点重要限定;东晋袁宏(328—376年)的《后汉记》还有6点重要信息,他对地动仪的151个字的记述要更为严谨,技术内容也更加准确。经过逐字对比,目前共得到了如下238个字:

“阳嘉元年秋七月,史官张衡始作(候风)地动铜仪。

以精铜铸其器,圆径八尺,形似酒尊,其盖穹隆,饰以篆文、山龟鸟兽之形。尊中有都柱,傍行八道,施关发机,外有八方兆,龙首衔铜丸;下有蟾蜍承之。其机、关巧制,皆隐在尊中。张讫,覆之以盖,周密无际,若一体焉。如有地动,地动摇尊,尊则振,则随其方面,龙机发,即吐丸,蟾蜍张口受丸。丸声振扬,司者因此觉知。虽一龙发机,而其余七首不动,则知地震所起从来也。验之以事,合契若神,来观之者,莫不服其奇。自古所来,书典所记,未常有也。

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,于是皆服其妙。自此以后,乃令史官记地动所从方起。”

这些材料,不仅揭示出了范晔《后汉书·张衡传》中某些文字的失实,为新模型的建立提供了重要历史依据,还澄清了至少11项早期研究中长期争论不休的疑点<sup>[7]</sup>。

特别是,从上述古文中提炼、转化、推算出来的定量参数保障了科学复原具有可操作性和检验目标。计有7条:

(1)地动仪的内部结构由柱、关、道、机、丸5部分组成;

(2)都柱处于悬挂状态;

(3)蟾蜍是器足,不是四面散开摆放状;

(4)仪器的直径约1.9—2.0m,推算出的高度约2.7—3.0m,悬垂都柱的固有周期为2.4—3.0s,接近陇西地震波1.9—2.5s卓越周期,会有共振效应;

(5)尊体震动能被目测出,故推算出地面的位移量至少在2—4mm;

(6)触发震相是地震瑞利面波,反应方向靠近射线平面内;

(7)陇西地震造成的京师洛阳的烈度为III<sup>+</sup>—IV,地面的加速度小于1gal。由此反推出陇西地震的震级约为6.5—7.0,震中距为500—700km。

鉴于这些定量参数已经涉及到了地震波和测震学的特殊细节,数量级彼此吻合,能够得到历史地震和现代地震学的坚实支持,超出了一般人的知识水平和史学家们可能杜撰的内容,属非实践过写不出来的东西。加之,技术部分的文字风格和用词习惯与张衡《漏水转浑天仪注》极为相似。故被认定:技术部分的文字当出自张衡本人,地动仪肯定不止一次的正常工作过,它的真实性和科学性毋庸置疑<sup>[7-9]</sup>。

### 2.2 考察灵台地基

张衡132年发明地动仪后,将之置于京师洛阳城南2里的灵台进行观测。中国社会科学院考古研究所于1975年对灵台地基进行了考古发掘,拍摄了大量照片,我们又对灵台测震的地质条件做了3次现场考察和照片比对,确认了灵台处于洛河南岸的河漫滩地,属一种噪声背景较高的环境。地动仪置放在灵台西侧的第二层平台的两间观测室的北间,室内长10m,宽2.2m,高出地面2m(图4),取得了建立复原模型所必需的一些重要信息:

(1)对这种高噪声背景的场地条件,只有抗

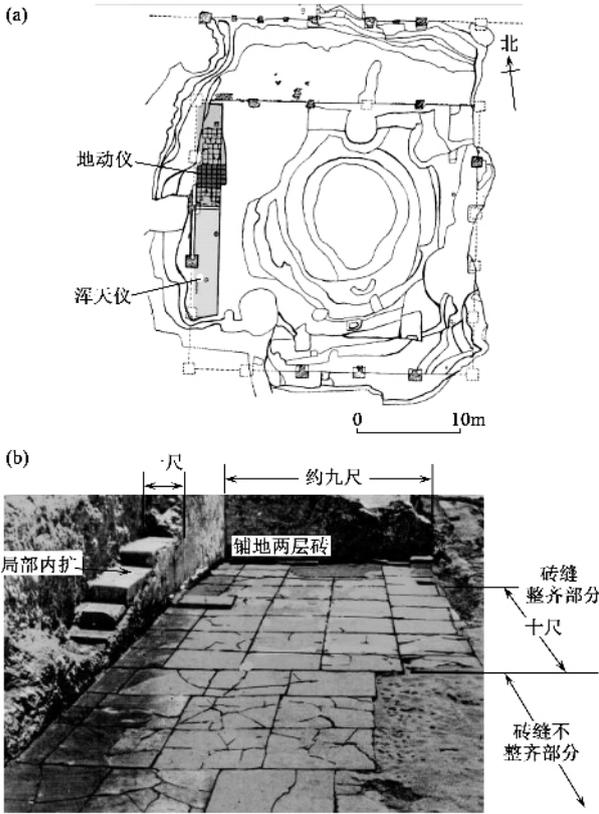


图4 1975年灵台考古发掘 (a)灵台遗迹的平面图 (b)所发现的安放地动仪的房间

干扰能力很强的验震器才可能进行工作. 陇西地震传播到该处的主要震相是瑞利面波, 而高台状地基对地震波存在结构性放大作用, 故其加速度有可能接近  $1g$ , 对地动仪的测震是有利的;

(2) 2.2m 的房间宽度不到九汉尺, 史载地动仪“圆径八尺”, 因此蟾蜍只能为仪器的器足, 室内剩余的宽度空间仅有 20 几公分. 可以确认蟾蜍四面散而放之的模型都是不对的, 否则至少需要 3.5m 宽的空间, 这在灵台的实际结构上全然不存在;

(3) 灵台台基由三合土夯实筑成, 每小层的厚度约 10cm, 属良好的二类土, 置放地动仪的房间很特殊, 地面专门铺设了两层  $1 \times 1$  汉尺的大方砖来承重(图4). 遂测出台基的极限压强为  $30 \text{ t/m}^2$ , 稳定使用的压强为  $15 \text{ t/m}^2$ . 由此反推出地动仪的总重量仅有几吨, 按青铜密度  $8.9 \text{ g/cm}^3$ 、仪器的壁厚约 5—10mm 来估算, 都柱的重量应小于 1 吨, 很可能它的内部是空的.

### 2.3 研究汉代酒樽造型

史载地动仪的外部“形似酒尊, 其盖穹隆”, 但是何为汉代酒尊, 考古界在解放初期是不明确也无

定论的, 这就直接影响了所有复原模型的造型设计原则. 迟至 1962 年 9 月山西右玉的大川村出土了两件刻有铭文的汉代酒尊<sup>[10]</sup>, 铭文分别为“剧阳阴城胡傅铜酒尊, 重百廿斤, 河平三年造”和“中陵胡傅铜温酒尊, 重廿四斤, 河平三年造”(图5(a)). 终于清楚无误地揭开了汉代酒尊形制的谜底, 使后人有了明确的标准. 随后, 1986 年南昌京家山, 1992 年湖南永州, 2001 年广西合浦、广西贵港以及广州和广西盐堆都陆续出土了西汉晚期至东汉晚期的同类造型的酒尊(图5). 至此, 学术界终于掌握到了出土数量众多、造型稳定、地域广泛的汉代酒尊实物, 对汉代酒尊的基本形制也就在近十余年间取得了统一认识, 达到定论阶段<sup>[11, 12]</sup>. 令人诧异的是, 这些汉代酒尊恰恰都具有穹隆状顶盖, 下有器足承托, 表面有山龟鸟兽的纹饰, 几乎活脱脱地展现出了史书对地动仪外形描述的基本形制. 从物理学看, 这种造型非常适合于悬垂摆工作原理, 稳定性也好. 确认了王氏模型的啤酒桶状基型实际上更接近于汉代的“圆壶”, 而不是汉代的“酒尊”造型<sup>[13]</sup>.

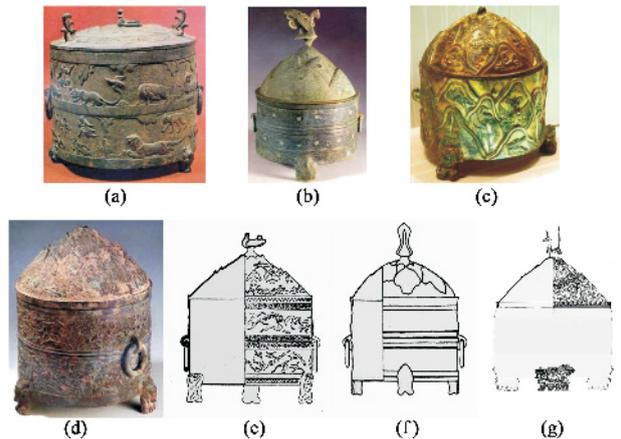


图5 出土的汉代酒樽 (a)山西胡傅鎏金兽纹尊; (b)广州凤钮禽兽纹尊 (c)台湾鎏金山纹兽足尊 (d)平凉神兽纹尊 (e)南昌京家山酒尊 (f)广西合浦酒尊 (g)湖南永州尊

我们随即收集和测量了海峡两岸共计 11 件出土的汉代酒尊的实物或照片资料, 逐一地测量了酒尊的总高度、凤鸟高度、器壁高度、顶盖高度、顶盖弧度等等各部分相对于尊体直径的比例数值, 这些比例关系已经融入到新复原模型的设计中了. 测量中还发现一个有趣的现象, 汉代穹隆形尊的高宽比例竟然也在黄金分割值(0.618)附近(见图5(b), (c)), 与希腊古罗马的审美观十分接近. 看来, 人类在最佳视觉效果上存在着共性.

当然, 学术研究也遇到了社会压力, 经过半个多世纪的宣传, 图1的地动仪外形已经深入人心, 为了

照顾群众的印象和习惯,能不能对外形将错就错地不予改动呢?国家博物馆的专家们表达了坚决的态度:不行。专门撰文:“王振铎模型的外形从根本上、从总体上来说都是不对的,不能继续用这个模型的外形再进行广泛的社会宣传。……,坚持不改,拖延下去将有损于中国古代文化乃至今天中国的形象”<sup>[14]</sup>,遂决定了新模型的造型要从头起步。

### 3 地震学研究

#### 3.1 确认陇西地震参数

大约自1933年起,人们便把公元138年2月28日的金城—陇西地震视为地动仪的测震实例<sup>[9]</sup>,至今仍是国内各种科普材料的宣传内容。但是,这一认识被近年的学术研究坚决否定和批评,因为这次地震在京师洛阳地区是有感的。司马彪在《五行志》中已经明确记载了“京都、金城、陇西地震,裂城廓,室屋坏,压杀人”,范晔在《后汉书·顺帝纪》中有“京师及金城(今甘肃省允吾县)、陇西地震,二郡二岸崩、地陷”。这就与范晔在《后汉书·张衡传》中所述的“地不觉动,京师学者咸怪其无征”彼此矛盾,说明138年的陇西地震不是地动仪所对应的震例。这个严重的失误,居然是由两位外国学者——荷兰和美国的 Sleeswyk 和 Sivin 在1983年首先发现的,曾质疑中国学者是否存在学术做假问题,否则为何长期坚持这种不难发现的错误而至今仍然进行着官方宣传<sup>[15]</sup>。中国地震局于2003年组织了专项现场调查,终于查清<sup>[16]</sup>:138年陇西地震的震中在兰州西北的湟水、黄河交汇地区(36.1°N, 103.2°E),早期的推断实属误解,需要订正。

新的研究表明,地动仪所对应的陇西地震是汉顺帝阳嘉三年十一月壬寅(公元134年12月13日)的地震事件,震中在陇西地区的天水一带(汉朝为汉阳郡),震级  $M \approx 7.0$ ,造成洛阳地区的烈度约  $III^+ - IV$ ,震中距600km。这个结论的得出比较复杂,它是根据《后汉书》对陇西地震的描述,多种史料揭示的历史背景,司马彪—袁宏—范晔三人对东汉历史地震记载的差异,本纪与列传对地震表述的差异,汉代郡名的更改历史,张衡年谱,张衡诗文,历史地震对比,地震烈度衰减规律等地震学专业研究做出的,有专门的论文作详细阐述<sup>[17]</sup>。其实,这个地震的资料以前便有<sup>[18]</sup>,也了解当中的问题<sup>[19]</sup>,只不过当时研究工作的深度不够,震中不明,也没有联系到张衡地动仪的历史背景。

#### 3.2 用其他历史地震来对比当年的陇西地震

《后汉书·张衡传》中“果地震陇西”的地点所指,系地域概念。陇西,谓陇山之西也;不是严格意义上的震中位置,既非东汉的陇西郡(治狄道,今甘肃临洮),更非今日之陇西县城。对于汉代陇山以西的人烟稀少的广袤地区,陇西地震区实际上位于南北地震带,至今仍地震频发。

在新的研究中,首先需要检查其他的陇西地震是否也在京师洛阳产生过相似的地震效应,以确认《后汉书》等史料记载的可靠性和上述对134年地震推断的合理性。我们分析了载有极其详细史料的清朝1654年、1709年、1718年、1765年和1879年5次发生于陇西地区的历史地震<sup>[6,17]</sup>,结果令人震惊。这些地震的震级在7.0—7.5,居然都在洛阳产生了十分相似的结果——人员无感或者刚刚有感觉,即烈度为  $III^+ - IV$  度(图6)。这无疑是对张衡地动仪可靠性的有利旁证,说明史料所描述的陇西现象——“地不觉动,京师学者咸怪其无征”确实是合理的,也为今天的科学复原提供了陇西地震震级的参考范围。

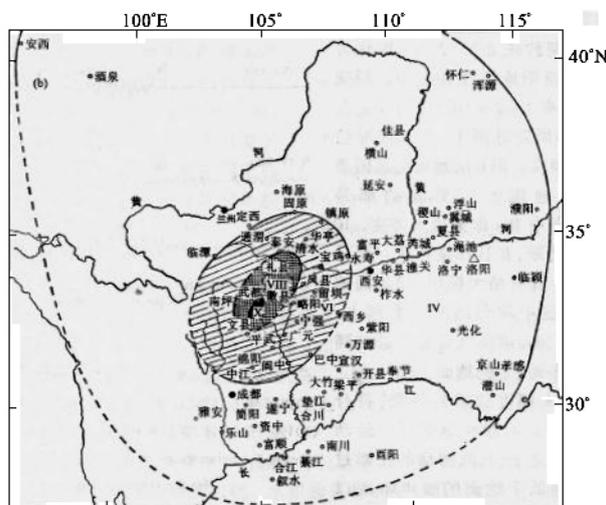


图6 清朝1879年的陇西地震在洛阳的烈度属人员刚有感觉

#### 3.3 考察汉代天然验震器,追溯诞生科学思想的物质基础

地面的振动分为地震波动和非地震波动两大类。地震是剪切性力源——断层两侧的岩体呈反方向剪切位错,所以地震波的能量以横波为主,地面以水平方向的摆动和摇晃为主;非地震的震源(如人走车行、人工爆破等)是膨胀性力源,波动能量以纵波为主,地面以上下颠动和颤抖为主,不产生或仅有

微弱的水平向分量.因此,任何一个成功的验震器必须只对地面的水平运动有反应而不怕垂直运动的干扰,也就是说,验震器是一种“只有地震我才动,不是地震我不动”的特殊仪器.迄今,人类只发现了两种物体可以用作天然验震器:一类是吊灯等悬挂物;另一类是水面等自由液面.

悬挂物就是物理学的悬垂摆.测震学的验震器具有下述独特的宏观属性:

(1) 能自动地区别和检测出地震引起的地面振动.不是地震它不动,抗干扰性能好;

(2) 比人灵敏.人能感觉到的地震烈度在 IV 度以上,而悬挂物却在烈度低至 III 度,甚至 II 度时就会出现摇晃反应;

(3) 容易发现.悬挂物一旦晃动起来,会像秋千般地晃个不停,远远超过地震的瞬间;

(4) 具有普遍性.悬挂物大量的存在于人们

的日常生活当中,随处可见.

汉代的悬挂物很多,吊桶、吊篮、吊灯、吊绳、秋千、编钟、编磬、流苏、方胜以及悬挂的毛笔和字画等举不胜举(图7),于是:“地震发生——悬挂物摇晃”二者间反复出现的、大量的、稳定的对应关系,就会被千百万群众察觉,更因地震时的心理恐惧而留下深刻印象.事实上,世界各国都走过首先观察悬挂物晃动来判断地震的历史道路,中国也不例外.汉代的人们已经察觉到地震以水平运动为主,所以在史料中几乎从来不用“颠、颤、抖”等以垂直运动为主要特征的文字来描述地震,而是频频地使用“摇、晃、荡”等具有水平运动特征的词汇,如“地动摇尊,地摇京师,今兹震摇,屋宇摇荡,江海晃荡”等<sup>[18]</sup>.鉴于人类最早的创造发明都是对自然现象的简单模仿,故可以推断张衡地动仪应该是对悬挂物的模仿和发展,当时存在诞生这种科学思想的物质基础.



图7 汉代的人形吊灯、悬链吊壶、纺锤、悬挂的物品等等都是良好的天然验震器

### 3.4 利用现代陇西地震纪录做分析和检验

地震波有个特点,如果震中和台站位置相对固定,地震记录图的基本特征会稳定不变.于是可以利用今天洛阳地震台的地震仪对现代陇西地震的记录图,通过地震学的分析和计算来模拟出“134年陇西地震的复原地震图”.我们利用了2003—2004年震级 $M_L$ 5.0~5.7级的三次陇西地震在洛阳台的宽频带地震记录(图8),从震级定义、数字宽频带地震记录、小震记录合成大震记录三个方面进行了理论复原,得到了陇西(天水)一带地区7级地震在京师洛阳的合成地震图(图9).这张历史地震图尽管不是严格唯一的,但能够在相当大的程度上反映出当时地面运动的基本特征:洛阳灵台处的水平方向最大地动位移在6—8mm左右,最大加速度约 $1g$ .这个由理论推算出来的数量级居然也符合1.1节中史料所记述的各种现象,用它来检验复原模型的合理性,已经足够用了.

## 4 建立科学复原模型

### 4.1 传统模型在什么地方走错了路

从学术上讲,王氏模型究竟是在什么地方走错了路仍然需要查清.

(1) 工作原理的错误源于直接照抄了日本人的直立杆原理(图1).这个原理本是萩原尊礼和今村明恒于1937年提出,又被他们后来的实践所否定而放弃的东西<sup>[20,21]</sup>.Milne在1883年研究张衡地动仪时,就已经通过试验明确地排除了地动仪采用直立杆原理的可能性<sup>[22]</sup>.原因在于:地震波不同于爆炸引起的冲击波,主要的波动能量不是在纵波上,而是在续至的横波和面波上;其次,直立杆简单地竖立在地面上属不稳定平衡结构,倾倒方向的随机性和对波动过程的迟钝反应决定了它实现不了史书所讲的验震作用.看来,作为历史学家的王振铎存在地震学基本概念的误区.令人不解的是,王先生竟将这个简单的直立杆结构做了“理论拔高”,将它命名为

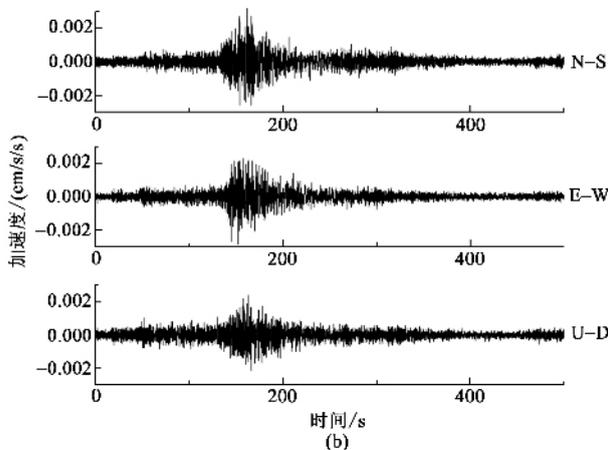
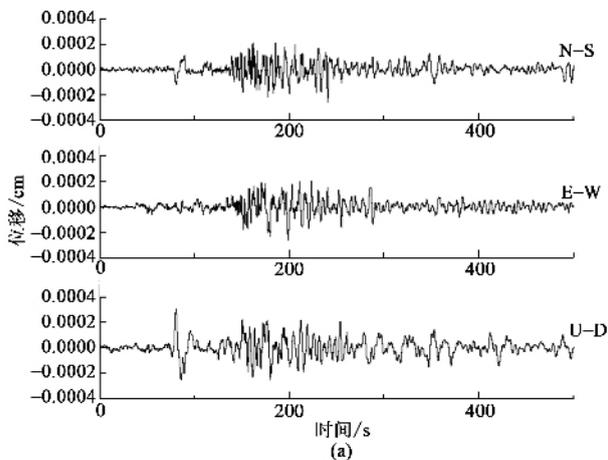


图8 2004年9月7日地震在洛阳地震台的三分向地震记录图  
(a)地动位移时程 (b)加速度时程

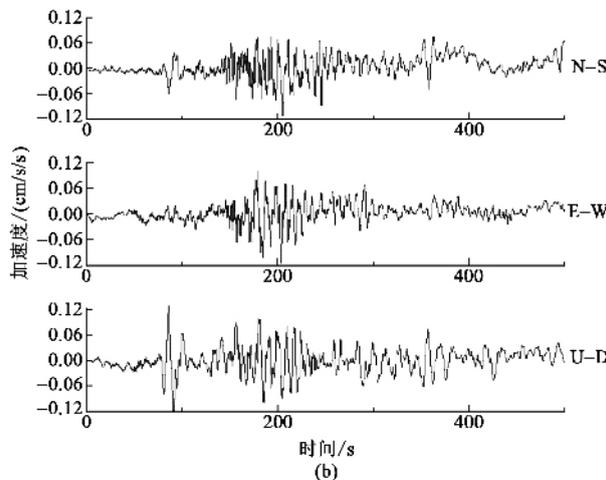
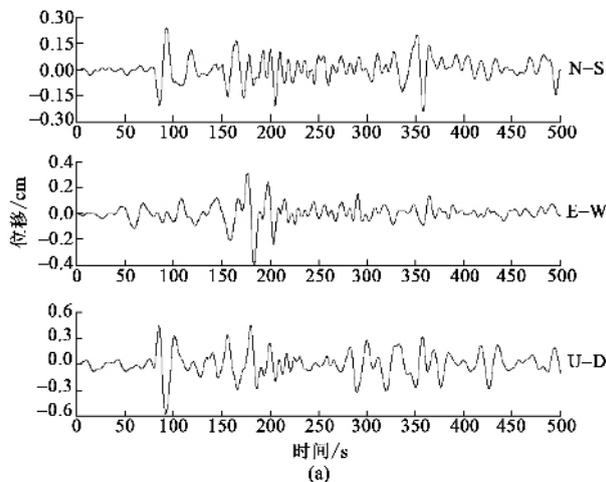


图9 利用图8的真实地震纪录复原出的“历史陇西地震”  
(a)地动位移时程 (b)加速度时程

“无定向倒立摆”,还说是世界的“倒立摆之祖”,遂使荒谬流传于全国中小学,连倒立的啤酒瓶竟也被称为“张衡倒立摆”。为此,中国地震局黄浩华研究员于1999年专门做了地动仪的倒立摆结构实验<sup>[13]</sup>,以确凿的实验数据说明倒立摆对弹簧的材料、制造工艺和结构设计都有极高要求,既不符合史书记载也绝不是东汉的技术水平能达到的。不过,纠正这种在社会上已广为流传的糊涂概念,很需时日;

(2) 啤酒桶状的外形更接近于汉代圆壶,背离了汉代酒尊造型和地震仪器的稳定性要求(图5)。这种失误出现在1962、1986年汉代酒尊出土之前,自然是正常现象;

(3) 艺术造型不符合中国传统,存在拼凑情况。蟾蜍的四面离散摆放不符合灵台考古和史料记载,源于王振铎照抄了日本人服部一三1875年的原创设计<sup>[21]</sup>(图10(b))。立雕龙的风格是明清龙,不是汉代龙,“全龙倒栽葱”状有悖中国青铜器传统,把瓦当上的四神图案直接照搬到青铜器上,很不协调。



图10 (a)服部一三,张衡地动仪的首位复原人,1880年任日本地震学会的首任会长 (b)服部一三于1875年绘制的复原模型,蟾蜍被设计成四面散放状,为后人长期效仿

简言之,这些早期研究中存在的问题需要在新的复原模型中一并解决<sup>[14]</sup>。

#### 4.2 工作原理和内部结构通过严谨的科学实验在北京工业自动化研究所的液压中心实验室,

对原大模型结构进行了严格的地震学专业试验(图 11),振动台在计算机系统控制下可以准确地复现出各种地面运动状态.利用振动台技术测试了原大模型的固有周期、频率响应、负载效应、转动惯量、反应方向、位移幅度等等一系列参数,改进和优化了悬挂结构、都柱设计、质量分配等内部结构的细节,最后确定了符合史料记载、满足汉代制造工艺、测震灵敏度极高的简单结构.地动仪的工作原理见图 12(a):置于底部锥形台尖上的小关铜球极其不稳定,但又完全被十分稳定的悬挂都柱控制住,组成一个触发机构.当地面静止或垂直运动时,小关铜球不会脱出,但是在地震波水平运动的作用下,都柱与尊体间会出现微小相对位移,于是小关铜球迅即脱落,撞击龙机,出现“一龙发机,而七首不动”的现象.对于 600km 远的陇西地震,地震的瑞利面波在射线方向偏振,导致地震方位上的龙首铜球掉在蟾蜍口中.张衡的验震思想得到重现.

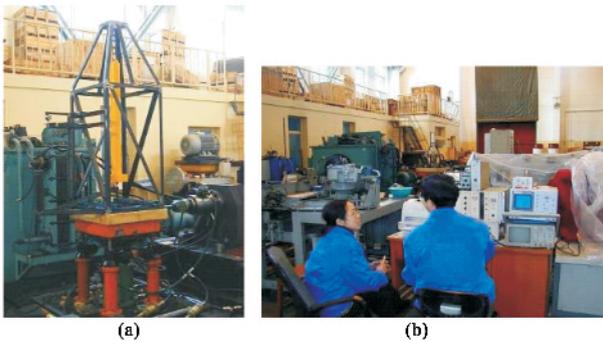


图 11 (a) 地动仪的原大结构置于振动台上,中间是悬挂的都柱;(b) 在计算机控制系统下进行专业试验

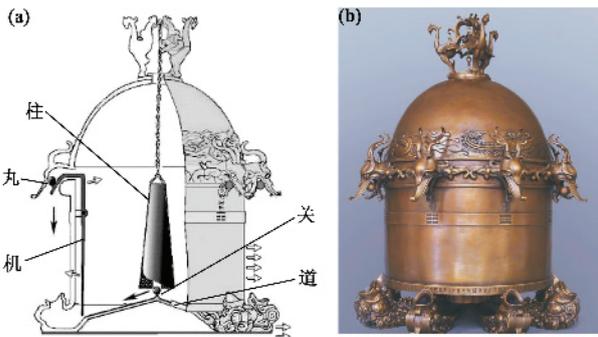


图 12 地动仪新模型 (a) 内部结构和工作过程 (b) 外部造型

这个验震过程不仅使模拟的陇西地震得以实现,而且还对五次现代的真实地震记录(河北唐山、云南泸西、越南孟艺三个地震事件)实现了合理验震,重复性很好,灵敏度甚高.又对非地震源进行了

连续 2 个月的强烈干扰试验,实现了人员可以感知非地震性的地面振动但仪器没有出现误触发的预期结果.由此,工作原理和内部结构通过了严谨的专业试验.

#### 4.3 科学与艺术结合,完成外型设计

造型设计是科学复原的一个重要组成部分,既是仪器功能的需要,又是汉代文化特征和艺术元素的综合体现.

这里的困难很特殊——科学实验有明确标准,艺术设计却因人而异.经常是历史学家建议的造型,艺术家说难看,地震学家希望的结构,考古学家说没有,雕塑家画出的图样,展览学家说不是汉代的东酉等等,费尽了周折.为了实现科学和艺术的结合,专门组织了四个组的美术家们进行彼此隔绝的独立设计和雕塑,再由以考古、展览和地震学家组成的专家组进行全程配合和参谋,历时五年,设计了几十种造型.最终由清华大学美术学院雕塑系王培波教授完成了外部造型的定稿,获得一致通过(图 12(b)).

造型复原有两部分——结构造型和艺术造型.前者对整体基型、都柱上悬挂点、都柱下端结构、整体稳定性和质量分布给出了技术要求,是保障仪器正常工作之必需,实施了严谨的结构静力学和地震动力学的计算.后者即艺术复原,是在满足技术要求、史料描述的基础上吸纳汉代文化特点,完成艺术的表现和升华.我们试图从大量的考古文物和张衡诗文中汲取营养,将三个层次的文化内涵融入到艺术中:

- (1) 华夏远古的神话世界;
- (2) 汉代天地合一的理念;
- (3) 张衡主张的古代宇宙观.

新模型的雄浑大气为专家们一致称赞,但对艺术的理解却是见仁见智的.笔者愿做一点简朴直白的介绍:模型中顶部的凤鸟代表古人的太阳崇拜,穹隆的顶盖为阳,喻意无穷苍天,逆时针翱翔的四神是周而复始的四季和四方,代表万物生灵的精华(图 13(a));八龙、篆文和八卦象征烛龙地震、天地哲理和八个方向,圆状顶部配以平直底边构成了一幅张衡“天圆地平”的宇宙<sup>[23]</sup>,寓意他“天体于阳,故圆以动,地体于阴,故平以静”(《灵宪》)的思想精髓;蟾蜍代表阴,古代所赞美的月亮神——嫦娥,底部的水花浪纹反映张衡的大地“载水而浮”的理念<sup>[24]</sup>.按史料“下有蟾蜍承之”的记述,尊体是以蟾蜍为器足而托起来的,它所形成的局部放空似可诠释史书

“□□张讫”一句,提供了调节仪器、重置小关铜球、传递铜丸击蟾声响的空间,实现“丸声振扬,司者因此觉知”的目的。



图 13 (a)天圆顶盖上的四神之一——朱雀 (b)地平底边上的铭文 阳嘉元年秋七月,史官...

细心人会发现,模型的底边加铸了一圈铭文,是中国文化和美学艺术的需要,特从史料中摘取了最重要的 103 个字(图 13(b)),亦有共勉之意。科学研究,永无止境。

## 5 科技发展史研究

对张衡地动仪的研究和争论远非一个新的复原模型能包括。

一些人看来,伟大发明继而失传,不可理喻。据此,推断张衡地动仪“不科学”、“不可靠”、“反应失灵”、“未达到设计初衷”、“猜测”张衡真的发明了地动仪吗?批评复原研究是在做着“明知不可为而为之”的事,主观地“以先入为主的方式进行一系列的复原工作,并以此来证明地动仪在科技史上的崇高地位”,新的复原模型是“古代仪器现代化”、“有损张衡声誉”、“造成了混乱”、“中国古代科学无法与西方现代自然科学相衔接”等等。近 10 余年间的这类否定观点不一而足<sup>[2,3,4,25,26]</sup>,不过这些文章仅限于文字层面并未在史料研究、考古发现和科学实验上做出实质性的贡献。

问题的出现,原因颇多。除了混淆王振铎 1951 年模型与历史原区的区别外,主要源于科技史的研究程度不够,科普宣传中的过头话也引起了误解,还有些人对历史过程和地震学现象缺乏了解等。迫使我们不得不对二千年前的往事再打一场笔墨官司。

### 5.1 地动仪的发明和历史贡献

地动仪的诞生存在客观的历史条件,比如地震

频发,有大量的悬挂物——天然验震器。张衡任职太史令等等。而就发明地动仪的目的而言,无论后人作何种推测,它同浑天仪的发明一样是“观祲象、察妖祥”。观测自然、辨明凶吉的首要任务是政权所必须而不能推诿的,都属“天人合一”主导理念下的科学行为。远自西周,灵台便有双重功能“天子有灵台者,所以观祲象、察妖祥也”(《诗经·大雅·灵台》,郑玄笺)祲,阴阳相侵。置于灵台的浑天仪和地动仪,必须对灾异的出现实现神圣的知晓、明示和解脱,为国事占卜凶吉,对科学远而求之,即张衡的名言:“天道虽远,凶吉可见”(《上陈事疏》)。在这里,科学和迷信混为一体,唯物观测和宗教崇拜混为一体,探索规律和占卜算卦也同样是混为一体的。应看到,古代的这种自然崇拜并不阻碍观测,恰恰相反,它促进了先民们虔诚地观天察地而不敢有所疏失。张衡的科学实践超越了时代,但他的思想认识顺从了迷信。正如列宁所说:“科学思维的萌芽同宗教、神话之类的幻想有一种联系。而今天呢!同样,还是有那种联系,只是科学和神话间的比例却不同了。”(《列宁全集》38 卷 275 页)

张衡有 4 篇涉及日食地震的文章,全部是用“妖星见于上,震裂着于下,天诚详矣”的占卜观进行解释的,为此主张“明烽火,远斥候,深藏固闭,无令谷畜外露”以“取媚神祇,自求多福”(《张河间集》二),东汉皇帝也是频频依他所报的凶吉祸福来实行政务安排。另外,汉代对震灾的处理方式,多数为祭祀祈祷,个别为减免赋税,罕见的灾情才会于数月后赈济赐钱“宣畅恩泽”。地动仪问世前后的 400 余年汉史,包括张衡在世之时,从没有出现过后人所拔高的事实<sup>[26-28]</sup>,比如什么是因为朝廷想要利用地动仪来快速定震中、抗震救灾、及早采取措施等,更谈不上什么为了“深入探讨地震成因和其他规律”等。

地动仪毕竟是古代的验震仪器,主要是检验地震的发生,不能确定震中,完成不了现代地震台网技术的测震任务;对于地动仪的方向反应,也是粗糙而非唯一的,不宜过分强调。以 134 年陇西地震为例:震中位于京师正西偏北的方向,究竟地动仪的哪个龙首吐丸,史料是没交代的;其次,连张衡也没有做到史书说的“寻其方面,乃知震之所在”(《后汉书》),他也是在历经了“京师学者咸怪其无征”的几日责问后才从驿报中得知陇西地震的消息。该处史料文字的含混,反而恰恰说明了历史事件的真实与可靠,更能够被现代地震学和国际上认可和推崇。科学地评价地动仪就是高的不要说低了,低的也不要

说高了,古文要尊重,现代科学也要尊重.否则适得其反,纠正起来十分困难.我国的社会宣传中存在夸大地动仪功能的提法,比如说什么地动仪是“能测量地震方向的仪器”“能确定震中的仪器”“为了朝廷快速救灾而发明的仪器”等,言辞浮躁而不严谨,对此,国内外的学术界多年来提出过严肃的批评.过头宣传如不纠正,负面效果必然出现,中学生在质疑“地动仪真的那么灵吗?”<sup>[1]</sup>是为其例.

简言之,张衡地动仪的科学价值和历史贡献集中体现在下述五个方面:

- (1) 人类历史的第一个验震器,第一次利用物体的惯性实现了测震;
- (2) 采用触发机构“施关发机”解决了对地震微弱信号的检测;
- (3) 通过“龙首吐丸”实现了记录器的功能;
- (4) 测到公元134年的陇西地震,取得了首次成功验震的实践经验;
- (5) 利用悬挂物的测震思想在现代地震学起步阶段起过重要的启迪作用.

## 5.2 地动仪问世后的影响和失传

古代的“天诫观”成就了地动仪,也毁了地动仪.严重的社会后果为张衡始料不及.

132年地动仪问世后,张衡四次上书,三次都借“上天惩诫”之凶兆议论朝纲,强调对地震要遵从礼制、祭天祀地,“修政恐惧,则转祸为福”.迫使顺帝在133年京师地震后的次日首次下罪己诏,并且连续两年“以地震免”掉了四位高官,尽然都是权倾朝野的最高长官——三公(司徒、太尉、司空),搞得满朝文武“叩头谢罪,朝廷肃然”.这种做法,开创了历史上因地震而查处、策免高官的先河.后来演化成随时“借口地震,惩戒官员”的官场倾轧,愈演愈烈,一直延续到东汉灭亡,共计16次.

于133年被升迁为侍中的张衡陷入被动,且134年地动仪的成功测震和再次查撤高官,更加剧了矛盾,张衡和地动仪迅即被迁怒成众臣共讨伐和谴责的对象,“宦官惧其毁己,皆共目之”.阉竖恐终为其患,遂共谗之(《后汉书》),张衡人生道路从此逆转直下.136年的京师地震又迫使顺帝第二次下罪己诏,在举行了隆重的拜祖先、登灵台、祭上天、改年号、大赦天下的礼仪之后,重新启用曾经“以地震免”的太尉和司空,遂将张衡逐出京师到边远的河间,直到139年降为尚书才调回京师,数月后去世.从此以后,顺帝及其以后的冲、质、桓、灵、献帝再不

去安放地动仪的灵台了.尽管在张衡晚年的136—139年间,京师地区每年都遭遇过地震的强烈波及,个别的震灾更为严重,但随着张衡政治地位的下降,地动仪已被视为不祥之物而摒弃,史料再也没有地动仪的只言片语.同1400多年后的哥白尼和伽利略相比,张衡早已遭遇了伟大发明之后的惨痛悲剧.

东汉末年,中国社会极不稳定.从190年董卓大火焚烧洛阳、破坏灵台、毁铜铸钱开始,京师国都屡遭搬迁,六年间在洛阳—长安—洛阳—许昌间漂泊,贵重器物大量丢失损坏,全国人口急剧下降至1/3,黄河流域成为一片无人的荒原.地动仪大体失传于此时.

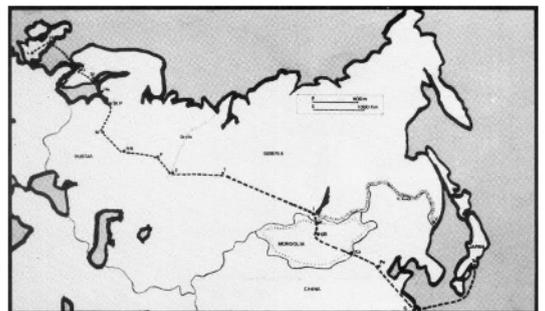
一些研究者仅凭仪器失传就贸然断定“地动仪不科学”<sup>[2,3]</sup>,显然是把仪器自身的科学性和失传的历史背景混为一谈,没有区分科学技术的自然属性和社会属性.

## 5.3 地动仪对现代地震学发展所起到的历史作用

从历史上看,地动仪发挥的直接测震作用确实短暂.但张衡的科学思想和实践经验,作为科学继承性发展的核心东西,并没有随着仪器的失传而泯灭.目前所见,至少在张衡去世后的百余年已经被西晋司马彪于306年成书的《续汉书》记载下来,通过文字留



(a)



(b)

图14 (a)米尔恩,现代地震学的奠基人 (b)米尔恩1876年历经203天徒步穿经俄国和中国到达日本

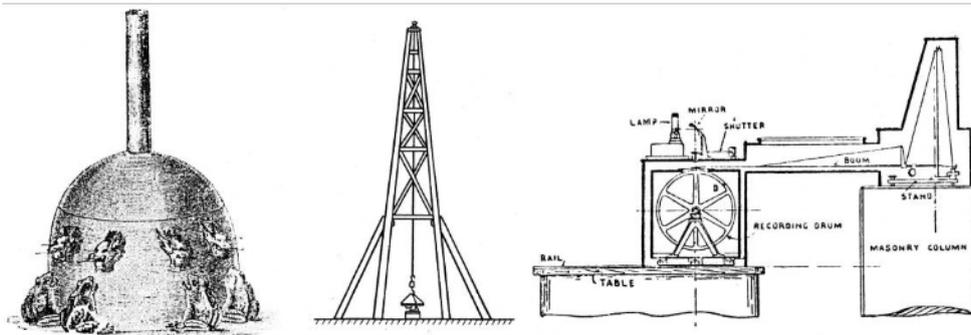


图 15 米尔恩对张衡地动仪和现代地震仪的研究 (a) 米尔恩复原的张衡地动仪(1883 年); (b) 米尔恩与 Ewing 设计的第一架地震仪(1892 年); (c) 米尔恩设计的世界第一架现代地震仪(1892—1894 年)

传于世,并在现代地震学的起步阶段发挥过重要的思想启迪作用。这一重要的历史链,是在这次课题研究中查明的。

1868 年,日本明治维新,邀请英国矿物学家米尔恩(J. Milne)赴日讲学,他后来成为世界公认的现代地震学的奠基人<sup>[29]</sup>。Milne 在 1876 年到达日本前曾途经中国(图 14),对北京、天津、镇江、上海以及长城和大运河留下深刻印象,了解中国文化的悠久底蕴。服部一三 1875 年绘制的张衡地动仪复原模型并在图画四周写下的《后汉书》中的 196 个汉字(图 10(b))给了米尔恩以很大启迪和鼓励,遂在中日文化同源的影响下转向于地震学研究。那时还没有发明地震仪,能够借鉴的只有验震器。在张衡“悬挂都柱”的思想启迪下,他首先做了 50 余种悬垂摆的模仿和试验,通过实验发现了直立杆原理的根本性错误,遂于 1883 年出版了世界最早的地震学专著<sup>[22]</sup>,开篇便介绍了张衡和他自己的地动仪复原模型(图 15(a)),对张衡给予了破格的篇幅和高度评价:“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东西。”他最早地将地动仪的 196 个汉字翻译成英文介绍到西方,还特别说明人类的第一架地震仪器是中国人张衡发明的,他明确认定地动仪是按照“悬垂摆”原理工作的,以至于今天的西方国家还普遍地把张衡地动仪直接称之为“中国验震器”。Milne 先仿照张衡地动仪成功地设计了悬垂摆地震仪(图 15(b)),后来又于 1894 年发明了世界第一套能够在地震台站普遍架设的现代水平摆式地震仪(图 15(c))。他先研究张衡,后发明地震仪,开创了近代地震学,二人对地震科学的贡献是创新—继承—再创新的过程。从这个意义上讲,张衡既是久远的又是近代的,

既是中国的又是世界的,他的伟大是永恒的。

有意思的是,自张衡地动仪问世后,再次出现在中国的第一台地震仪器竟然恰恰就是 Milne 刚发明的地震仪,那是 1895 年 6 月 Milne 返回英国组建全球地震台网期间由日本于 1897 年在台北架设的<sup>[30]</sup>,所记录到的第一次大震是 1906 年 3 月 17 日的台湾梅山 7.1 级地震<sup>[31]</sup>。

面对 Milne 的否定张衡地动仪直立杆原理而采用了悬垂摆,继而从这个思路发展起现代地震学的历史过程,不难看清:直立杆原理坚持者的论断“张衡设计的地动仪与近代地震学没有承继关系”“中国古代科学无法与西方现代自然科学相衔接”<sup>[2]</sup>何等荒谬,同样地,西方个别学者的论断“地动仪没有给后人以科学灵感”“有无地动仪,法国人会照样地发明他们的地震仪器,世界科学史、地震科学史是一样的”<sup>[3]</sup>又何等无知。任何承认以现代地震学奠基人 John Milne 为代表的地震学史的严肃科学家,明确反对上述错误论断。

## 6 结束语

一件二千年前的古老仪器何以引起国内外如此巨大的兴趣,它的魅力究竟是什么?

社会的发展从来是在“温故知新”的过程中完成的,我们需要了解自己,读懂历史。中华民族的辉煌是炎黄子孙奋勇前进的无比动力,世界文明的前进离不开前人的贡献和历史教训。正是需要这个历史认识,今后的道路才会更趋明朗和稳健。

地动仪的复原研究改变了我们思考问题的长期狭隘和固执。看似简单的远古发明竟然要求今天的不同学科诸如历史、考古、文物、地震、机械、美术、铸造等广大学科的联合攻关和学科渗透,竟然要求我

们尽可能充分地使用一切现代科技手段进行探索,前进才有可能,历史的逼近才会更加合理;反衬出我们以前单门独户的喧嚣呐喊是何等的孤陋寡闻和浅薄浮躁,所有先行者又是何等的令人敬仰,他们居然在那样简陋的条件下迈出了一步又一步,给了我们以极大的思想启迪。早期研究中所出现的偏谬和失误都是正常的,我们以同样的心情期盼后人纠正我们的错误。也许,这就是求真务实、追求真理的无穷魅力和永恒价值。

实践是检验真理的唯一标准。科学仪器的复原必须经受科学实验的检验,动手做实验会纠正我们头脑中的误区,帮助我们读懂古籍和理解文物,而科学研究的失足往往就是从那些极其细微的、定性而不定量的主观认识处跌落下去的。参加研究工作的所有专家们绝不认为今天已达终点,只不过是会心地为年轻后生们铺了一块石子罢了。

### 参考文献

- [ 1 ] 吴非. 基础教育 2004 3 :1 [ Wu F. Basic Education 2004 3 1 ( in Chinese ) ]
- [ 2 ] 李强. 自然科学史研究 2008 27( 3 ) 378 [ Li Q. Studies in the History of Natural Sciences 2008 27( 3 ) 378( in Chinese ) ]
- [ 3 ] 雷立柏, 张衡. 科学与宗教. 北京: 社会科学文献出版社, 2000. 249 - 254 [ Lei L B, Zhang H. Science and Religion. Beijing : Social Science and Document Publishing House 2000. 249 - 254 ( in Chinese ) ]
- [ 4 ] Qian Wenyuan. The Great Inertia. Scientific Stagnation in China. Sydney : Croom Helm , 1985. 50
- [ 5 ] 冯锐. 防灾博览 2003( 1 ) :5 [ Feng R. Overview of Disaster Prevention 2003( 1 ) 5( in Chinese ) ]
- [ 6 ] 冯锐, 武玉霞. 中国地震 2003 19( 4 ) 358 [ Feng R, Wu Y X. Earthquake Research in China 2003 19( 4 ) 358 ( in Chinese ) ]
- [ 7 ] 冯锐, 武玉霞, 朱涛. 自然科学史研究 2006 25 ( 增刊 ) :34 [ Feng R, Wu Y X, Zhu T. Studies in the History of Natural Sciences 2006 25 ( Suppl ) 34( in Chinese ) ]
- [ 8 ] 冯锐, 朱涛, 武玉霞等. 自然科学史研究 2006 25 ( 增刊 ) :1 [ Feng R, Zhu T, Wu Y X *et al.* Studies in the History of Natural Sciences 2006 25 ( Suppl ) :1( in Chinese ) ]
- [ 9 ] 孙文青. 张衡年谱. 上海: 商务印书馆, 1956. 60 - 177 [ Sun W Q. Chronicle of Zhang Heng's Life. Shanghai : The Commercial Press , 1956. 60 - 177( in Chinese ) ]
- [ 10 ] 郭勇. 文物, 1963( 11 ) :4 [ Guo Y. Cultural Relics , 1963 11 4 ( in Chinese ) ]
- [ 11 ] 孙机. 汉代物质文化资料图说. 北京: 文物出版社, 1991. 313 - 315 [ Sun J. The Documents of Material Culture in Han Dynasty with Pictures. Beijing : Cultural Relics Press , 1991. 313 - 315( in Chinese ) ]
- [ 12 ] 吴小平. 汉代青铜容器的考古学研究. 长沙: 岳麓书社, 2005. 126 - 133 [ Wu X P. Archaeological Research on Bronze Vessels in Han Haynasty. Changsha : Yuelu Press , 2005. 126 - 133( in Chinese ) ]
- [ 13 ] 冯锐, 武玉霞, 朱涛等. 自然科学史研究 2006 25 ( 增刊 ) :16 [ Feng R, Wu Y X, Zhu T *et al.* Studies in the History of Natural Sciences 2006 25 ( Suppl ) :16( in Chinese ) ]
- [ 14 ] 李先登. 地震地磁观测与研究, 2008 29( 2 ) :50 [ Li X D. Seismological and Geomagnetic Observation and Research 2008 , 29( 2 ) :50( in Chinese ) ]
- [ 15 ] Sleeswyk A W, Sivin V. Chinese Science , 1983( 6 ) :1
- [ 16 ] 袁道阳, 雷中生, 刘小凤等. 地震地质 2004 26( 1 ) 52 [ Yuan D Y, Lei Z S, Liu X F *et al.* Seismology and Geology , 2004 26 ( 1 ) 52( in Chinese ) ]
- [ 17 ] 冯锐, 俞言祥. 地震学报 2006 28( 6 ) :656 [ Feng R, Yu Y X. Acta Seismologica Sinica 2006 28( 6 ) :656( in Chinese ) ]
- [ 18 ] 谢毓寿, 蔡美彪主编. 中国地震历史资料汇编( 第一卷, 王会安, 闻黎明编). 北京: 科学出版社, 1983. 14—32 [ Xie Y S, Cai M B. Documents of Historical Earthquakes in China( Vol. 1 , Wang H A, Wen L M ). Beijing : Science Press , 1983. 14—32 ( in Chinese ) ]
- [ 19 ] 国家地震局兰州地震研究所, 甘肃省地震资料汇编. 北京: 地震出版社, 1989. 12 - 15 [ Lanzhou Institute of Seismology , Seismological Bureau , Documents of Historical Earthquakes in Gansu Province. Beijing : Seismological Press. , 1989 , 12 - 15 ( in Chinese ) ]
- [ 20 ] 今村明恒. 千八百年前の地震計. 见除村一學編, 支那文化談業, 1942. 17 - 22 [ Imamura A. Seismometer before 1800 years ago. In : Yosui I ( editor ), Research on Chinese Culture , 1942. 17 - 22( in Japanese ) ]
- [ 21 ] 萩原尊礼. 地震学百年. 东京: 东京大学出版会, 1982. 1 - 50 [ Hagiwara T. Hundred Years in Seismology. Tokyo : Press of Tokyo University , 1982. 1 - 50( in Japanese ) ]
- [ 22 ] Milne J. Earthquakes and Other Earth Movements. London : Kegan Paul Trench, Trubner and Co. Ltd , 1883. 1 - 80
- [ 23 ] 唐如川. 张衡等浑天家的天圆地平说. 见: 刘永平( 主编 ). 张衡研究. 北京: 西苑出版社, 1999. 169 - 186 [ Tang R C. Research on Zhang Heng's Idea of Round Heaven and Plate Ground. In : Liu Y P ( editor ) Research on Zhang Heng. Beijing : Xiyuan Press , 1999. 169 - 186( in Chinese ) ]
- [ 24 ] 许结. 张衡评传. 南京: 南京大学出版社, 1999. 1 - 390 [ Xu J. Study of Zhang Heng 's Thoughts. Nanjing : Press of Nanjing University , 1999. 1 - 390( in Chinese ) ]
- [ 25 ] 赵冠峰. 自然科学史研究 2006 25( 3 ) 300 [ Zhao G F. Studies in the History of Natural Sciences 2006 25( 3 ) 300( in Chinese ) ]
- [ 26 ] 王鹏飞. 自然科学史研究 2005 24( 4 ) 291 [ Wang P F. Studies in the History of Natural Sciences 2005 24( 4 ) 291( in Chinese ) ]
- [ 27 ] 李约瑟. 中国科学技术史( 第五卷地学, 第二分册). 北京: 科学出版社, 1976. 50 - 80 [ Needham J. History of Science and Technology in China ( Vol. 5 , No. 2 ). Beijing : Science Press , 1976. 50 - 80( in Chinese ) ]
- [ 28 ] 黄瑞棠. 数术穷天地, 制作侔造化——浅谈张衡. 见: 刘永平( 主编 ). 张衡研究. 北京: 西苑出版社, 1999. 300—308 [ Huang R T. Preliminary Study of Zhang Heng , In : Liu Y P ( editor ). Research on Zhang Heng. Beijing : Xiyuan Press , 1999. 300—308( in Chinese ) ]
- [ 29 ] Herbert - Gustar L K, Nott P A. John Milne : Father of Modern Seismology. Tenterden Kent : Paul Norbury Publications Ltd , 1980. 1—90
- [ 30 ] 阿部胜征著, 李毓昭, 张佳微译. 大地震. 台中: 晨星出版有限公司, 2000. 9 [ Abe K. Great Earthquakes. Taizhong : Morning Star Publishing House , 2000. 9( in Chinese ) ]
- [ 31 ] Omori F. Bull Imp Earthq Invest Comm , 1907 , ( 2 ) 53