

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230503001

张衡地动仪工作原理探究*

卢永¹, 孙振强², 郑江蓉¹, 朱庆和¹, 殷翔¹, 孙雷¹

(1. 江苏省地震局, 江苏南京 210014; 2. 金陵图书馆, 江苏南京 210019)

摘要: 张衡地动仪至今仍未得到公认的复原模型, 通过对张衡的哲学思想、科学成就等史料研究, 对袁宏著《后汉书》中描述地动仪的文字内容进行分析, 对张衡研制的“地动仪”和“水运浑象”进行比较, 认为地动仪为自动运行一体化精密仪器, 可实现对微弱地振动信号感知、放大和记录功能。结合当时的历史背景和科技水平, 提出了三点悬挂复合物理摆+机械杠杆放大的地动仪复原技术方案, 详细介绍了地动仪摆锤的悬挂方式、八个方向地振动信号的提取、机械杠杆放大机构和擒纵机构的设计思路, 并研制了实验样机, 证实地动仪工作原理具有科学性, 且能与文献中描述地动仪的文字内容相互验证。

关键词: 张衡地动仪; 复原模型; 三点悬挂复合物理摆; 机械杠杆放大

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1176-07

Exploration of Mechanical Principles of the Zhang Heng Seismograph

LU Yong¹, SUN Zhenqiang², ZHENG Jiangrong¹, ZHU Qinghe¹, YIN Xiang¹, SUN Lei¹

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 2. Jinling Library, Nanjing 210019, China)

Abstract: The restoration model of Zhang Heng's seismograph has remained unverified so far. By studying Zhang Heng's philosophical thoughts, scientific achievements and other historical materials, this paper analyzed the text description of the seismograph in Hou Han Ji proposed by Yuan Hong, compared the "seismograph" and "Water-Powered Celestial Globe" developed by Zhang Heng. This investigation discerned that the seismograph was a sophisticated, autonomously functioning instrument capable of detecting, amplifying, and recording weak seismic vibrations. Considering the historical background and scientific and technological level of the era, this research introduces a restoration methodology for the seismograph, featuring a three-point suspension composite physical pendulum and a mechanical lever amplification system. The suspension mode of the seismograph pendulum, the extraction of eight direction ground vibration signals, the design ideas of the mechanical lever amplification mechanism and anchor-escapement mechanism were introduced in detail. Furthermore, an experimental prototype was developed to validate the scientific viability of the seismograph's operational principles, which can be verified with descriptions found in historical literature.

Keywords: Zhang Heng Seismograph; restoration model; three-point suspension composite physical pendulum; mechanical lever amplification

* 收稿日期: 2023-05-03; 修回日期: 2023-08-28

基金项目: 江苏省重点研发计划-产业前瞻与关键核心技术(BE2020116)、江苏省重点研发计划-产业前瞻与关键核心技术(BE2022154) 资助

作者简介: 卢永(1973—), 男, 正高级工程师。主要从事地震观测技术研究。E-mail: njluyong@163.com

0 引言

张衡地动仪是世界上第一个能感知地震的仪器,复原地动仪在工作原理、结构、形状、功能等方面,学术界分歧较大^[1-2]。在各种复原方案中,主要的学术观点分两种,一种主张采用直立杆或倒立摆结构,如王振铎^[3]于1951年设计的直立杆结构模型,胡宁生^[4]于2019年设计的倒立摆结构模型;另一种则主张采用悬垂摆结构,如冯锐等^[5]于2005年设计的悬垂摆结构模型。在前人基础上,本文提出全新的三点悬挂复合物理摆+机械杠杆放大复原方案,摆锤具有“倒立”和“悬垂”的复合特点,结合机械杠杆放大装置,显著提高地动仪的灵敏度,同时研制了实验样机,证实了张衡地动仪的科学性和真实性。

1 史料研究

1.1 地动仪的主要文献

记载张衡地动仪文献,按时间顺序主要有司马彪(?—306年)著《续汉书》、袁宏(328年—376年)著《后汉纪·顺帝纪》和范晔(398年—445年)著《后汉书·张衡传》。刘勰在《文心雕龙》中曰:“后汉纪传,发源东观。袁张所制,偏驳不伦;薛谢之作,疏谬少新,若司马彪之详实,华峤之准当,则其冠也”^[7]。袁宏在《后汉纪·自序》中曰:“其所掇会汉纪、谢承书、司马彪书、华峤书、谢忱书、汉山阳公记、汉灵献起居注、汉名臣奏,旁及诸郡耆旧先贤传,凡数百卷”^[8]。援引《后汉纪》卷第十九有关内容如下:

衡作地动仪,以铜为器,圆径八尺,形似酒樽,合盖充隆,饰以山龟鸟兽。樽中有都柱,傍行八道,施关发机,外有八方兆龙,首衔铜丸,蟾蜍承之,其牙机巧制,皆隐樽中,张讫,覆之以盖,周密无际,若一体焉。地动摇樽,所从来龙机发则吐丸,蟾蜍张口受之。丸声振扬,伺者觉知,即省龙机,其余七首不发,则知地震所起从来也。合契若神,自此之后,地动史官注记,记所从方起。来观之者,莫不服其奇^[9]。

1.2 张衡的哲学思想

张衡推崇扬雄的哲学思想,《后汉纪·孝顺皇帝

纪》中曰:“衡深叹扬雄太玄经。谓崔瑗曰:‘观太玄经,知子云殆尽阴阳之数也。非特记传之属,实与五经相似,汉得天下二百岁之书也。所以作者之数,必显一世,常然之符也。太玄,四百岁,其兴乎?竭己之精思,以揆其义,更使人难论阴阳之事’”^[10]。《后汉书·张衡传》中曰:“尤致思于天文、阴阳、历算”^[11]。《灵宪》中曰:“天体于阳,故圆以动,地体于阴,故平以静。动以行施,静以合化”、“地有山岳,以宣其气”;《思玄赋》中曰:“玩阴阳之变化兮,咏《雅》《颂》之徽音”。可见,扬雄确立的古代元气论的基本思想,阴阳变易的辩证思维,对张衡的思想认知影响至深,也体现在其著作中。

1.3 张衡的科学成就

扬雄著《太玄经》中有很多天文、历法等内容,特别是张衡尤被“浑天说”吸引,并付诸于实践。《晋书·天文志》中曰:“至顺帝时,张衡又制浑象,具内外规、南北极、黄赤道、列二十四气、二十八宿中外星官及日月五纬,以漏水转之于殿上室内,星中出没,与天相应。因其关戾,又转瑞轮蓂莢于阶下,随月虚盈,依历开落”^[12]。张衡在《东京赋》中曰:“盖蓂莢为难蒔也,故旷世而不覩。惟我后能殖之,以至和平,方将数诸朝阶。”张衡制作的水运浑象,采用漏刻原理,用水运作为运转天球仪的原动力,以显示星空的周日视运动,如此复杂的设计体现出张衡在天文学、机械技术领域的非凡成就。之后陆续的浑象、王蕃的浑仪、耿询的浑天仪,都是在张衡水运浑象的基础上发展而来的。

《后汉书·张衡传》中曰:“衡善机巧,……遂乃研核阴阳,妙尽璇玑之正,作浑天仪……阳嘉元年,复造候风地动仪。”张衡完成浑天仪制作十余年后,开始地动仪研制,理应在机械设计及制造上更加精进,从而设计出更精巧的拾取“地气”(地震波)的机械机构,使其对地震具有高敏感性,对其他干扰低敏感性。李澄宇在《读后汉书蠡述·书张衡传》中曰:“张衡作浑天仪已难,而候风地动仪尤难。盖非难其动,难其应地而动,且远地动亦克应之也”^[13]。

1.4 地动仪的研制背景

汉朝“天人感应”学说非常流行,地震等自然灾害被认为是上天对人间罪孽的惩罚,公元125年,“十一月丁巳,京师及郡国十六地震。是夜,中黄门孙程等十九人共斩江京、刘安、陈达等,迎济阴王于

德阳殿西钟下,即皇帝位,年十一”^[14]。汉顺帝刘保在一天时间里同时经历了大地震和惊心动魄登基过程,更敬畏上天,需时刻掌握天地咎象,因张衡“善机巧”,并制作过“水运浑象”,于是特命张衡重任太史令。公元126年,张衡在《应间》中曰:“间者观余去史职五载而复还,非进取之势也。唯衡内职利钝,操心不改;或不我知者,以为矢志矣。”“君子不患位之不尊,而患德之不崇;不耻禄之不夥,而耻智之不博。”从文字中可以看出,张衡认为任太史令在官职上没得到提升,但能体现出自己的道德修养和真才实学。之后几年间,张衡在其位,却未见谋其政,没有科研成果也没有赋作,推测此期间张衡潜心进行地动仪的研究及相关模型的实验。《后汉书·张衡传》中曰:“时政事渐损,权移于下,衡因上疏陈事曰:‘又前年京师地震土裂,裂者威分,震者人忧也……灾异示人,前后数矣,而未见所革,以复往悔……如恩从上下,事依礼制,礼制修则奢僭息,事合宜则无凶咎。然后神望允塞,灾消不至矣。’”公元130年,张衡此奏章得到刘保的认可,准张衡可调用国家人力、物力等资源,全面开始启动地动仪的研制。

1.5 地动仪的失传

张衡地动仪图样和制法直至唐朝之前仍未失传^[15-17]。主要证据有:南朝虞荔《鼎录》中载:“张衡制地动,图记于鼎,沉于西鄂水中”;《北齐书》中载:“信都芳……芳又撰次古来浑天,地动,欹器,镂刻诸事,并画图,名曰《器准》”;《隋书》中载:“临孝恭……著《欹器图》三卷,《地动铜仪经》一卷”。

地动仪实物最大可能于东汉末年公元190年左右损毁殆尽,分析原因如下:

(1) 张衡在阳嘉元年(公元132年)制作出地动仪四年后,在永和元年(公元136年)出任河间(今河北献县)相,三年后虽返回京都,但只一年(永和四年)就去世。地动仪属于精密仪器,结构复杂,且“周际无际”,很少人能了解到内部结构。当出现故障时,只有张衡能对这个复杂的机械机构进行维护和维修,少数“伺者”只会进行简单的操作使用。因此,张衡去世之后,地动仪虽还能运行,但技术官员没能全面掌握地动仪工作原理,并无法对地动仪进行精细调整,保持其高灵敏度,若稍有损坏,则很难恢复,只能搁置,之后地动仪未能继续“合契若神”亦属合理。

(2) 张衡在研制地动仪后(公元132年),朝政一直在宦官和外戚之间交替把持,无暇顾及到地动仪,因年久失修,也渐渐不能正常使用。此时期,虽朝政腐败,无论皇帝、宦官和外戚,从自身利益考虑,没有理由人为去破坏地动仪。直到董卓公元190年胁迫汉献帝迁都长安,整个洛阳城焚毁。地动仪实体很有可能于此时遭受破坏乃至失传。

2 地动仪的复原研究

据史料记载和研究,简单的直立杆在倾倒后需人工从上方扶正,悬吊重锤推落小球后需人工从侧面放回中心位置,这两种地动仪复原模型均不符合张衡的设计理念。微弱地振动信号的捕捉、传递和放大,自动化运行才是他要思考并解决的。

根据前文献对张衡地动仪的描述,结合东汉时期的科技水平,本文提出三点悬挂复合物理摆+机械杠杆放大的复原技术方案,结构示意图如图1所示,复原模型实物如图2所示,现陈列于淮安恩来防震减灾科普馆。

复原模型总体设计如下:中间为一个很重的大圆柱(“都柱”),通过3根悬杆悬挂于框架上,从圆柱重心处水平引出8道指杆(“傍行八道”),对应八个方向(南、西南、西、西北、北、东北、东、东南),当地振动时,地面水平位移最大的某个方向对应的指杆也位移最大,通过机械杠杆(机)放大(发),将地震波(地气)引起的地面微弱水平位移放大到铜球的限位距离(灵敏度可调),就可以推动龙嘴中的铜球,使之滚落(所从来龙机发则吐丸)。

复原模型实物虽采用了现代机械加工工艺,但在设计过程中,充分考虑了东汉时期的铸造和工艺

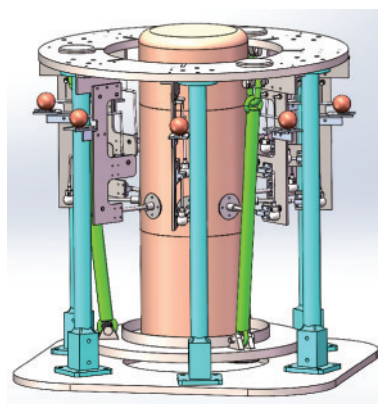


图1 张衡地动仪结构示意图

Fig.1 Structure diagram of Zhang Heng seismograph

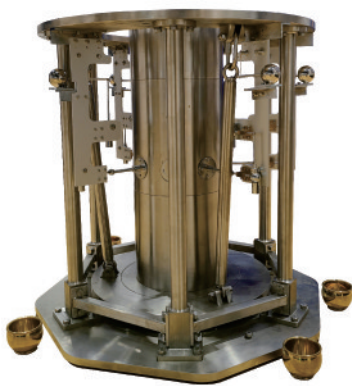


图2 张衡地动仪实物

Fig.2 Physical object of Zhang Heng seismograph

水平,结构上可以做到完全替换。如根据本复原技术方案给地动仪设计外壳的话,“张衡地动仪忆像”^[18]则非常符合,如图3所示。

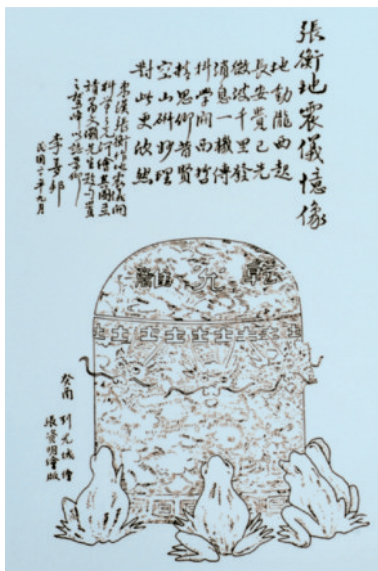


图3 张衡地动仪忆像

Fig.3 Memory image of Zhang Heng Seismograph

2.1 地动仪的摆锤与悬挂

“樽中有都柱”中“都”本意为天子住的城市,引申有大、重、统等义。《中国建筑史》中“都柱”指在秦汉宫室遗址与崖墓中,有的平面中央仅设一根柱子^[19],“都柱”类似现代地震仪中摆锤,为地动仪核心部件,以感知“地气”(地震波),其之后的机械部件受其控制。

《太平御览》卷第七五二引《续汉书》载,“铜形

似倾尊”、“皆隐于樽中”^[20],若“倾尊”误于“酒樽”,则文中连续两字有误,且同一文中,“尊”与“樽”在不同位置出现,理不应该。若将“倾尊”理解为地动仪悬挂结构,“樽”理解为地动仪整体外形,则问题迎刃而解,本文复原模型悬挂方式仅在“倾尊”悬挂方式上增加一条悬挂臂,所以“似倾尊”。值得注意的是,此版本文献无“中有都柱”描述,因为“尊”即为其他相关文献中描述的“都柱”,此版本文献或许已指明张衡地动仪的工作原理。其他文献多载为“形似酒樽”,可能未能理解“倾尊”的真正内涵,在参考了地动仪相关图件及文字描述过程中,图件显示地动仪中间有“都柱”,整体外形似“酒樽”,以为“倾尊”有误,并给予修改。

《荀子·宥坐》中载:“孔子观于鲁桓公之庙,有欹器焉。孔子问于守庙者曰:‘此为何器?’守庙者曰:‘此盖为宥坐之器。’孔子曰:‘吾闻宥坐之器者,虚则欹,中则正,满则覆’”^[21]。“欹器”、“倾尊”二者原理接近,只功用上有所不同。

与冯锐和王振锋复原模型^[22]有所不同,本复原方案采用三点悬挂复合物理摆结构,兼有“倒立摆”和“悬垂摆”的复合特点。“都”增大转动惯量,“柱”增加稳定性,这些因素作为驱动机械杠杆放大是必要的。“都柱”的重心位置与悬挂点的位置之间距离对其自振周期有关系,合适的距离有利于对地震信号的拾取,如图4所示。

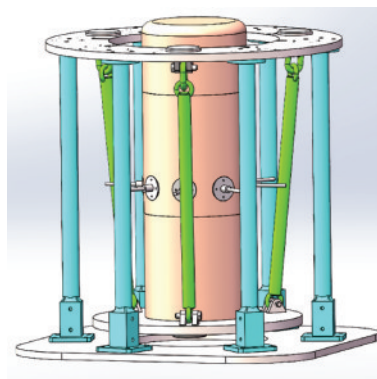


图4 张衡地动仪的摆锤与悬挂

Fig.4 Pendulum and suspension of Zhang Heng seismograph

2.2 地动仪的方向性

“傍行八道”紧接着“中有都柱”,意思是从“都柱”侧旁有“八道”,“八道”汇聚于“都柱”,合理设计为“都柱”和“八道”连成一体,“都柱”重心位置向周

围均匀分布伸出8道指杆,“都柱”相对“樽”在水平方向可任意运动,8道指杆将相对位移分解为8个方向,张衡在《灵宪》中曰“八极之维,径二亿三万二千三百里,南北则短减千里,东西则广增千里。自地至天,半于八极,则地之深亦如之。”为获取微弱的地振动信号,采用“八道”进行“地气”的采集和放大,最后通过铜球掉落提取出地振动位移最大的一道,符合张衡的设计思想。

2.3 地动仪的信号放大机构

“施关发机”紧接着“傍行八道”,因此是“八道”来“施关”,进而“发机”,“机”指的是机械杠杆,“机”常动,所以常与“机关”、“机动”、“机巧”、“机发”联用。当地振动时,通过机械杠杆放大装置,完成对微弱地振动信号的放大。《韩非子·难二》中曰:“舟车机械之利,用力少,致功大”^[23]。

采用机械杠杆放大的地动仪,摆锤(“都柱”)必须足够重,才能有效提高放大倍数。例如我国南京地震台现存的维歇尔地震仪,它的静态放大倍数约2 000倍,而摆锤重约17 000 kg。对于远处地震,地面的位移一般是很微小的,常常只有几十微米,摆锤拾取的微小相对位移经机械杠杆放大后,将铜球从龙嘴中推出。

采用一级机械杠杆放大系统时,实际放大倍数 \bar{V}_0 为^[24]:

$$\bar{V}_0 = \bar{V} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{3} \frac{m_1}{M} \frac{l_0}{R_0} \bar{V}^2} \right] \quad (1)$$

其中, \bar{V} 为计算放大倍数; m_1 为机械杠杆的长臂质量; M 为摆锤的质量; l_0 为折合摆长; R_0 为摆锤转动半径。

由式(1)可得到,要获得较大的放大倍数,且能克服铜球的摩擦力,将之推下去,需要采用很重的摆锤 M (都柱)。我国古代人已基本掌握此结论,并在生活、军事中给予充分应用,如《物源》中载“伊尹始作桔槔”,说明公元1700多年前,杠杆技术已经应用于生活中;战国时期攻城使用的投石机,《汉书·甘延寿传》载“《范蠡兵法》:飞石重十二斤,为机发,行二百步”^[25]。至此,“中有都柱”、“机发”都有了合理的解释。考虑到最后要将铜球推出,本复原方案采用二级机械杠杆放大机构设计,如图5所示。

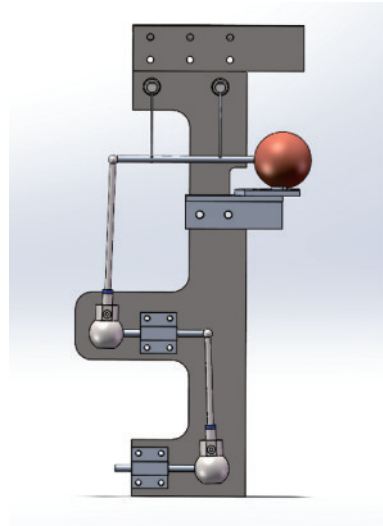


图5 两级机械杠杆放大机构

Fig.5 Two-stage mechanical lever amplification mechanism

2.4 地动仪的擒纵机构

“其牙机巧制”中的“牙机”为一组杠杆,起于龙嘴内部,主体部分隐于樽中。地动仪这种“牙机”设计,也许可以从浑天仪中的“擒纵器”找到答案。从东汉张衡制造的“水运浑象”,到唐代高僧一行和梁令瓚制造的“水运浑天”,再到宋代苏颂制造的“水运仪象台”,其中最核心的机构就是“擒纵器”,即利用一系列杠杆机构,将水的连续运动变成枢轮的间歇式运动,形成一个自动运行的一体化系统。《旧唐书·天文志》中载:“又诏一行与梁令瓚及诸术士更造浑天仪,铸铜为圆天之象,上具列宿赤道及周天度数。注水激轮,令其自转,一日一夜,天转一周……立二木人于地平之上,前置钟鼓以候辰刻,每一刻自然击鼓,每辰则自然撞钟。皆于柜中各施轮轴,钩键交错,关锁相持。既与天道合同,当时共称其妙。铸成,命之曰水运浑天俯视图”^[26]。苏颂水运仪象台中“枢轮”和“擒纵器”机构如图6所示^[27]。

地动仪中“擒纵器”设计方案如图7所示。地振动位移经机械杠杆放大后,超过阈值的某个方向铜球被推下,铜球沿杠杆臂(龙舌)向龙嘴方向滚动,杠杆的平衡被进一步打破,龙舌离开龙牙,铜球从龙嘴吐落。同时,连接杠杆一端的牵引绳拉着8个机械杠杆放大机构的最后一级的连杆脱离原位置,从而达到“其余七首不发”的目的,当掉落的铜球重新放回龙嘴中后,杠杆又处于弱平衡状态,此时,龙舌与龙牙处于接触状态,8个方向的最后一级连杆因为没有受到牵引绳的拉力,在重力作用下复位,地动仪又自动进入候“地气”工作状态。

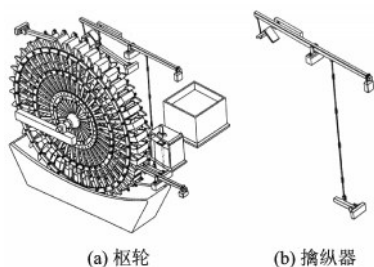


图6 水运仪象台中“枢轮”和“擒纵器”机构示意图

Fig.6 Structure diagram of “driving-wheel” and “anchor-escapement” mechanism in the water-powered armillary sphere and celestial globe tower

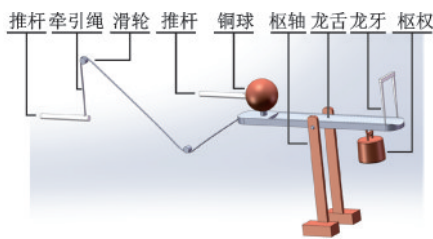


图7 张衡地动仪中“擒纵器”机构示意图

Fig.7 Structure diagram of the “anchor-escapement” mechanism in the Zhang Heng seismograph

2.5 地动仪的一体化结构

“张訖，覆之以盖，周密无际，若一体焉”说明张衡地动仪为主体和盖子构成的一体化结构，如要了解地动仪内部结构，需要将盖子打开，进行上视角察看。“周密无际”不是为了防止看到内部机关，目的是让地动仪内部尽可能不受到外部环境干扰。《后汉书·律历志》中曰：“候气之法，为室三重，户闭，涂衅必周，密布缦。室中以木为案，每律各一，内庠外高，从其方位，加律其上，以葭苴灰抑其内端，案历而候之。气至者灰动。其为气所动者其灰散，人及风所动者其灰聚。殿中候，用玉律十二。惟二至乃候灵台，用竹律六十。候日如其历”^[30]。张衡对地震的理解，并未超越所处时代，为捕捉到远方地震的微弱信息，“周密无际”是候“地气”（风）的一个关键条件。张衡的这些想法虽受时代的局限，但和现代地震仪设计殊途同归，均采用密封外壳，且对安装环境有较高要求。

2.6 其他一些说明

“地动摇樽”指的是樽的整体与大地紧密耦合，当地振动时，樽体随地而动，“都柱”在中间保持相对静止。“樽体”与“都柱”之间发生相对微小位移。

张衡推崇的学者扬雄在《法言义疏》中曰：“譬之于蚁磨石之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉”^[31]。“蚁旋磨”理论是高明的，表明古人不仅看到了相对运动，而且还能以相对运动的概念来确定运动的“真实”情况。

《灵宪》中曰：“羿请不死之药于西王母，姮娥窃之以奔月。将往，枚筮之于有黄，有黄占之曰：‘吉。翩翩归妹，独将西行，逢天晦芒，毋惊毋恐，后其大昌。’姮娥遂托身于月，是为蟾蜍”、“月者，阴精之宗”。当张衡制作地动仪时，选择蟾蜍放于地面“张口受丸”体现阴阳和合万物生的朴素观念，同时暗喻嫦娥窃药“丸”永生的美好愿望。《太平御览·卷九百四十九》转引《玄中记》载“蟾蜍头生角，得而食之，寿千岁”。东汉郭宪《汉武帝洞冥记》记载了汉武帝时修建的观赏月影的高台名为“眺蟾台”，说明“嫦娥变蟾”这个故事早于张衡时期流传，张衡只是最早以文字记载于《灵宪》中。

3 结 语

(1)司马彪、袁宏和范曄作为史学家，虽没能直接从科学原理的角度对地动仪进行阐述，但对其结构、形状、功能等描述是准确严谨的，复原模型需严格符合文献中描述张衡地动仪的文字内容。同时，文字内容和工作原理相互验证，才能真正接近张衡地动仪的设计思想。

(2)张衡设计了8个方向吐丸装置，本意是记录到哪个方向地振动最先达到设定阈值，从而研究这个方向与地震发生地点的关系。因为地震成因和传播的复杂性，很难仅一个地动仪精确判断地震发生地点及类型，但是，对于某地区相似类型的地震，同者在站点长期进行观测，可通过每次地震吐丸的特点积累出一些经验。

(3)张衡地动仪已具备现代地震仪的关键特征，比西方人做出同类原理的地震仪早了1700多年。张衡地动仪名副其实当为“地震仪的鼻祖”，在世界地震仪发明史上占有特殊地位。

(4)本复原模型仍不够完美，机械杠杆放大机构、擒纵机构等细节部分仍需根据相关史料及测试进行不断改进及优化。欢迎广大科技工作者给予批评指正。

致谢：在本文的写作与修改过程中，得到陈会忠老师、杨军老师、雷军老师的悉心指导与帮助，在此致以诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 李强. 简评冯锐复原张衡地动仪的设计思路[J]. 自然科学史研究, 2008, 27(3): 378-387.
Li Q. A brief comment on Feng Rui's assumption for his model of seismometer[J]. Studies in the History of Natural Sciences, 2008, 27(3): 378-387. (in Chinese)
- [2] 冯锐, 武玉霞, 朱涛, 等. 对地动仪传统模型的置疑[J]. 自然科学史研究, 2006, 25(增): 16-33.
Feng R, Wu Y, Zhu T, et al. Doubt on the traditional reconstruction model of Zhang Heng's seismometer [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 2006, 25 (Sup): 16-33. (in Chinese)
- [3] 王振铎. 张衡候风地动仪的复原研究[J]. 文物, 1963, (2): 1-8.
- [4] 胡宁生. 张衡地动仪立柱验震的复原与研究[J]. 中国科技史杂志, 2020, 41(3): 425-434.
Hu N S. Zhang Heng's seismograph: research and reconstruction of its pillar detection model [J]. The Chinese Journal for the History of Science and Technology, 2020, 41(3): 425-434. (in Chinese)
- [5] 冯锐, 田凯, 朱涛, 等. 张衡地动仪的科学复原[J]. 自然科学史研究, 2006, 25(增): 53-76.
Feng R, Tian K, Zhu T, et al. Scientific reconstruction of Zhang Heng's seismometer [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 2006, 25(Sup): 53-76. (in Chinese)
- [6] 李约瑟. 中国科学技术史·地震学[M]. 第5卷第2分册. 北京: 科学出版社, 1976.
- [7] 刘勰. 文心雕龙·史传[M]. 北京: 中华书局, 2012.
- [8] 袁宏. 后汉纪·自序[M]. 北京: 中华书局, 2002.
- [9] 袁宏. 后汉纪·顺帝纪[M]. 北京: 中华书局, 2002.
- [10] 袁宏. 后汉纪·孝顺皇帝纪[M]. 北京: 中华书局, 2002.
- [11] 范曄. 后汉书·张衡传[M]. 北京: 中华书局, 1974.
- [12] 房玄龄. 晋书·天文志[M]. 北京: 中华书局, 2015.
- [13] 李澄宇. 读二十五史蠡述·读后汉书蠡述[M]. 北京: 北京图书馆出版社, 2005.
- [14] 范曄. 后汉书·孝顺孝冲孝质帝纪[M]. 北京: 中华书局, 1974.
- [15] 王鹏飞. 张衡候风地动仪功能测试和感震原理的探讨[J]. 自然科学史研究, 2005, 24(4): 291-318.
Wang P F. A Research on the functional test and sensing principle for the ancient earthquake direction detector invented by Zhang Heng in A.D. 132 [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 2005, 24(4): 291-318. (in Chinese)
- [16] 赵冠峰. 张衡地动仪文献蠡读——对地动仪功能的重新认识[J]. 自然科学史研究, 2004, 23(4): 334-344.
Zhao G F. Selected readings of ancient literature concerning Zhang Heng's seismograph: a new consideration of the function of the instrument [J]. Studies in the History of Natural Sciences, 2004, 23(4): 334-344. (in Chinese)
- [17] 冯锐, 李先登, 田凯, 等. 张衡地动仪的发明、失传与历史继承[J]. 中原文物, 2010(1): 88-98.
- [18] 宋臣田. 地震监测仪器大全[M]. 北京: 地震出版社, 2008.
- [19] 潘谷西. 中国建筑史[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [20] 李昉. 太平御览·工艺部[M]. 北京: 中华书局, 2011.
- [21] 荀子. 荀子·宥坐[M]. 北京: 中华书局, 2015.
- [22] 冯锐, 武玉霞. 张衡候风地动仪的原理复原研究[J]. 中国地震, 2003, 19(4): 358-376.
Feng R, Wu Y X. Reconstruction of mechanical principles of the Zhang Heng's seismoscope [J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(4): 358-376. (in Chinese)
- [23] 韩非. 韩非子·难二[M]. 北京: 中华书局, 2015.
- [24] 中国科学院地球物理研究所. 地震仪器概论[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [25] 班固. 汉书·甘延寿传[M]. 北京: 中华书局, 1962.
- [26] 刘昉. 旧唐书·天文志[M]. 北京: 中华书局, 1975.
- [27] 林聪益. 水运时转[M]. 山东: 山东教育出版社, 2020.
- [28] 范曄. 后汉书·张让传[M]. 北京: 中华书局, 1974.
- [29] 李零. 论中国的有翼神兽[J]. 中国学术, 2001, 003(1): 62-134.
- [30] 范曄. 后汉书·律历志[M]. 北京: 中华书局, 1974.
- [31] 扬雄. 法言义疏[M]. 北京: 中华书局, 1997.

(本文编辑: 周小潭)