

张衡候风地动仪原理复原方案初探

王 湔

(新疆工学院)

摘 要

本文依据范曄《后汉书·张衡传》有关记载,明确提出张衡候风地动仪所具有的各项性能及原理复原的目标及方案。按本文提出的原理复原方案,地动仪能够接受地震波中的“首波”,并可以此来确定地震的大致方位,在首波较弱,不足以报警时,则利用它来抑制后续横波,使横波不干扰方位角的测定。

一、百年来复原研究的欠缺

张衡发明的候风地动仪是炎黄子孙的骄傲,不愧为中国地震科学的标志,也是中国机械发明史上一座光辉的丰碑。可惜千年之前就已经失传。近代最早的复原研究者是日本人服部一三(1851—1929),进而作原理复原研究的是英国地震学家米伦(John·Milne, 1950—1913年)。他指出地动仪符合惯性原理,并推断“都柱”类似悬摆。后来,日本地震学家获原尊礼和今村明恒都推断“都柱”类似倒立摆。研究得最深入而且影响最大的学者是王振铎先生。他集国内外研究之大成,先后采纳悬摆和倒立摆观点,并完成具体设计^[1],制成复原模型陈列在中国历史博物馆,得到刘仙洲教授等许多专家的赞同^{[2][8]}。人们普遍认为,候风地动仪已经基本复原。

确认候风地动仪是巧妙地利用了惯性现象,并且制造成陈列展品,这是复原研究的重大突破。须深入探讨的是,史籍明确记载,候风地动仪不仅能察觉到微弱的地震波,更重要的是“乃知震之所在”,即可测出震源所在的大致方位。有一种颇为流行的评价,即认为张衡之后一千多年西方才出现类似仪器——早期验震器。实质上,以验震到测定震源方位尚须翻过几座“高山”。根据地震科学和机械科学的专业知识,可以明白,若拾震器只有单独一个,不论是悬摆还是倒立摆,都不可能实现测定震源方位的功能。所以已公开的种种复原方案,都没有能够也不可能“验之以率,合契若神”,不能作合乎科学原理的演示,也就是说,候风地动仪的原理复原研究尚有待深入。

二、原理复原研究的目标

《后汉书·张衡传》中,对候风地动仪的结构及原理记得很简练。我们至今没有发现更早的记录。

据该书记载,仪器能够及时测定出震源大致方位并自动显示报警,即“如有地动,尊则振,龙机发,吐丸,而蟾蜍衔之。振声激扬,伺者因此觉知。虽一龙发机而七首不动,寻其方面,乃知震之所在”。

其次,它有相当高且适当的灵敏度。后汉书记载“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”。若这一事件是单独的,尚可能是偶然凑巧。而史实是“自此以后,乃令史官记地动所从方起”。记录自然会与实地奏报相印证,倘若屡有差错,就不会留下“验之以率,合契若神,自书典所记,未之有也”的历史性结论。这种验证也意味着,仪器不能有过高的灵敏度,必须可以调试得恰到好处,若测出有地震且在国境之外,或者在边远地区但地震较弱没有导致灾害,所以没有驿者赴京报信,那么“京师学者”及鄙儒又会“咸怪其无征”,群起而攻之了。

第三,张衡为仪器的使用、管理人员——伺者想得很周到。报警时“振声激扬”,伺者用不着寸步不离日夜厮守。“牙机巧制,皆隐在尊中,覆盖周密无际”。因此不用担心仪器因异物落入及意外碰撞而受损,使仪器能持久、正常地发挥作用。仪器的报警与古代弩机的发射颇类同,报警后都须人为恢复“待发”状态。仪器的这种“复位”操作,应该在尊外实施,不能每一次都吊开“合盖”,伸手进去拨弄。这一点对机械的设计要增添一些难度。

另外,原理复原必须用上述记载中说明的结构,如都柱、八道、龙机、蟾蜍等等,所有结构必须是东汉工匠做得出来的。

三、分 析

候风地动仪的功能,相当于现在利用一个地震台站的记录资料来求出震源方位角。对此只有一条途径,即求出首波的振动方向。这是一种空间矢量,须根据三个方向即南北、东西和上下的波形记录图,先人为判别出首波震相,量出三段对应的振幅分量,再通过计算才能得出结论。在候风地动仪中,即没有波形的记录,也无须人为的震相判别与计算,却能迅速、及时而且自动地完成这一全过程。这一奇迹出现在遥远的古代,令近代及现代的地震专家们不可思议,因此在一些地震专业书籍中,候风地动仪仅作为早期的“验震器”来介绍。有的在介绍史籍记载时提及“方位功能”,而作具体结构及原理推断时又回避了“方位”问题,实质上还是验震器^[4-6]。在王振铎先生的论文^[1]中,认为候风地动仪能够“报告地震和记录地震的方向”,没有明确提出震源大致方位问题,“地震的方向”不等于震源的大致方位。在十八—十九世纪,欧洲人发明和改进水银验震器,可以推断地震的方向和强度,但并不能测出震源的方位,就研制的深度和难度而论,实难与候风地动仪同日而语。获原尊礼和今村明恒在他们推断的“倒立摆”结构试验中,都观察到横波起主导作用,而横波恰恰是对测定震源方位起干扰作用的。瑞典地震学家M.巴特认为早期曾引起人们很大注意的问题是柱子倒塌方向,人们曾经相信,这种方向会给出有关震源方向的重要资料。但我们发现在许多相同的场合,倒塌的方向垂直于震源方向。这也说明横波会起作用^[7]。

依据地震学知识及机械原理,是可以使“都柱”以接近1的几率倒向震源所在大致方位的。不过其连结结构要稍为复杂些,用古代就有的材料、工艺来制作、修整得费很多功夫,而它的构思设计,着实要有些不寻常之处。这就使人联想到,一千八百多年前的中国,人们是否具有那么复杂深刻的机械知识,张衡是否对地震及地震波有超于现代的了解。

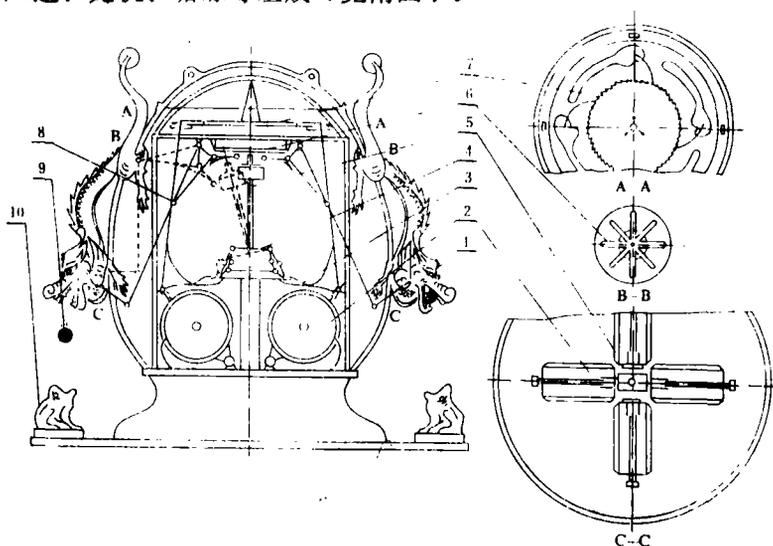
中国人早就能够发明和运用机械，提水的桔槔如今已难见到。车轮和轴，衡量轻重的称，吃饭的筷子等等则沿用至今，司空见惯。到春秋战国时代，出现了相当难度的组合机构——弩机、雨伞等。多次失传又多次被复创造成功的指南车，从发明动机推断最初应在周期之前，神奇的鲁班造木车马，至今仍是个谜。到了张衡那个时代，应用空间四连杆机构的推磨、把旋转运动转化为往复运动的水排，巧妙的空间组合——镂空银熏球，对信息作识别的一匙和锁等都早已相继问世，已积累起相当丰富的“机构学”素材。在技术门类比较小的古代，有趣而卓有成效的机械发明理所当然地吸引着众多喜欢思索又善于思索的杰出人物。在别的技术手段还不多的条件下（例如尚没有电子学手段），将机械的某些潜力（例如对微弱信息的处理能力）发掘得相当深，是合乎情理的。

张衡“善机巧”，是位历史上高超得罕见的机械发明家，有史可查的发明就有记里鼓车、指南车、自飞木雕、瑞轮冀荚、水运浑天仪。他最后一项发明才是候风地动仪，当年他已五十有五了。《应闻》云：“曾何贫于支离，而习其孤技邪”。注曰：“责衡何独妙思于机巧者也”。其实这多少有点自嘲的味道，只有对“机巧”钻研到孤军深入的地步，才真会有“屠龙之技”的感受。

张衡曾多次亲身经历和考察过地震灾害现场。查《后汉书·五行志》，大约从张衡三十岁直到他逝世这三十余年间，平均每年都有地震灾害的记载，如此频繁的震害不断激励着张衡研制地动仪的决心，也提供了多次观察验证的机合。张衡对地震及地气—地震波的了解，比当今许多地震学家要更多些，而他在机械学上的技能则更高明一些。这位天才又官居太史令，手下不乏能工巧匠，周围又聚集着一批志同道合的朋友，因此可以想象，他所取得的成果，难度是不会低的。

四、原理复原方案

候风地动仪由尊体、合盖、候风（斜摆拾震器）、杠杆、止邪摆盘（抗横波干扰）、都柱座、都柱、八道、龙机、蟾蜍等组成（见附图）。



张衡候风地动仪原理复原示意图

- 1.尊体 2.候风（斜摆拾震器） 3.杠杆 4.都柱座 5.都柱 6.八道
7.止邪摆盘 8.龙机 9.铜丸 10.蟾蜍

候风是四块一样的重锤,它的产生是有一个改进演化过程的。古人擅长“取类比项”,即类比推理,“地气”(地震波)的冲动与风的吹动颇有些类同处,当时,候风铜鸟即风向仪已经发明,比地动仪更早,张衡肯定对此作过仔细观察研究。当候风铜鸟的受风面的运动方向顺着风向时,铜鸟最容易转动,有点微风就能吹动,而当受风面运动方向与风向交叉而且接近垂直时,风微弱了就难以吹动。所以张衡造“候风”以迎地气,它可以看成是一堵短墙向外倾倒了一半(约 45°),再由弓(弹性件)支撑住,使其振动方向正好顺着各方位冲来的地气,因为地在下,天在上,地气从地下而来,所以是自下而上斜着冲来的,而不是象风一样平着吹的。要倾倒一些才能辨明来路去向。铜鸟的受风面大易被风吹动,“候风”则要做得重才易于接受地气,所以“候风”做成重锤,尊体也因此而做得相当庞大。倘若地气(地震首波)从西边来,则西边的重锤感受最多,振动最明显。而东边重锤振动最小,因为东边重锤的振动方向与地气冲动方向交叉,相当于候风铜鸟接近停住的位置。因此东西两边重锤的振动存在比较明显的差异,南边和北边的重锤也受到西方来的地气的冲动,也因运动方向明显交叉,振动不如西边的明显,而且南北两边振动强弱差异也小。这种情况会经过传递使“都柱”向西倾到。倘若地气从西南方来,西、南两边的重锤都会有明显振动,而东、北两边重锤则反应较小,经传递会使“都柱”倒向西南方。

重锤振动拨动杠杆,将位移放大,杠杆有两个末端,其一端伸到上部,当振动达到一定幅度(仍是相当微弱的),它先放开继而拨动止邪摆盘旋转,摆盘上按东西南北开着喇叭状口子,杠杆从中穿过,摆盘旋转后很快使杠杆进入窄缝,所以,只允许杠杆的头几次振动可能有较大振幅,去触动“都柱”,若头几次振动(首波)振幅较小,未能触动“都柱”,则后续的震波(横波)虽然强烈起来,但因杠杆振幅被限制了,不允许它再去触动“都柱”。横波的振动方向与震波传播方向垂直,不能用来测定震源方位。

摆盘类似纺锤,纺锤的发明可追溯到石器时代,半坡遗址中就有发现,至今在边远山村仍可见到。其转动阻力很小,轻微振动或拨动它即可旋转,振动停止一阵后,摆盘才回到原先平静位置,再趁势稍稍越过,被杠杆搁住(造成一个很小的势垒),这样就只允许首波发挥其触动“都柱”的作用。防止了后续横波——“邪气”作祟。

杠杆的另一末端指向尊体中心,它可以拨动都柱座,都柱座是“牙机巧制”的关键部分,其作用类似弩机中的“悬刀”,枪支中的扳机,是一套“放大、互锁空间组合机构”,它同时接受东西南北四个方面来的信息——微弱位移,自动进行比较,最后输出八种不同的反应。假如地气(首波)从西方来,而且达到了一定强度,使都柱座上西部的机构受到稍强的拨动,都柱座上西部机构与东部机构有一定联系,东西两边只允许一边有动作,这称为互锁,通常是两边同时被拨动,哪一边力量大就哪一边有动作,另一边被锁定。西边的拨动力大,西边有动作,都柱座上托板向西倾斜,固装在托板上的都柱也向西倾倒,重心下降,势能释放成动能比拨动(触动、克服势垒)的能量大得多,这称为“放大”,这不仅是位移的放大,而是能量放大,也就是说用微弱能量来触发释放较大能量。假如地气从西南方来,都柱座西部和南部的机构几乎同时被拨动,而其东部、北部的机构同时被锁定,托板既向西倾斜又向南倾斜,叠加的效果是向西南倾斜,都柱倒向西南方。假如地气从西方又稍稍偏南方冲来,但只能视为西方而不能看作西南方。这样东西两边受拨动的差异大,而南北两边受拨动的差异小,西部机构先发动,都柱倾倒,其上部滑入“八道”的西边导槽,南部机构有发动倾向,由于发动慢了些,被“八道”所制止。“八道”的作用不仅仅是保证都柱顺利正

确地撞击龙机，而且使相邻方位的动作有一种选择性互锁作用。若不设置八道，西南、东南、东北、西北四方便成了都柱偏爱的归宿，违反了八方机会均等之原则。

都柱倾倒沿着八道打击龙机，是再次的信号放大。为达到足够的灵敏度，候风重锤应有相当的重量，因而有相当大体积，而都柱座和都柱则要求做得尽量轻巧，都柱的“都”字是指其居于中心显要位置，向四面八方发号施令，而不是又大又重。都柱上部设置一个八角斗，是在“一龙发机”后，实施复位操作时，把铜丸从蟾蜍口中取出，塞进龙嘴，推上龙下巴，龙机就能将都柱推向中心位置，都柱复位后，龙机尚需再推动一程，使龙机与都柱脱离接触，龙机本身再达到自锁。这样都柱在中心无依无靠，完全由都柱座控制，可以达到较高灵敏度，都柱倾倒时，先走一段空程，碰上龙机时才会有稍大打击力。至此，全部的原理复原要求，从理论上皆可自圆其说了。

五、结 语

这个原理复原方案是许多人长久努力的结晶，本人仅仅是执笔作了概要总结，其间请教于多位专家、学者，进行了多次局部试验。我们一直企望尽早制成一座可以全面演示其测震功能的候风地动仪复原陈列展品。终因力量单薄，经费困难，进展艰难，因此先抛砖引玉，望能引起各界人士的关注。

研制期间，承蒙学院各级领导和各方朋友的热情支持，特别是地震部门的大力合作，新疆地震局周殿英同志做了大量工作，国家地震局柴保平、栾义等同志给予很大帮助，特在此一并致谢。

（本文1989年12月10日收到）

参 考 文 献

- 〔1〕王振铎，张衡候风地动仪的复原研究，文物，No. 2—5，1963.
- 〔2〕刘仙洲，中国机械工程发明史（第一编），1965.
- 〔3〕〔瑞典〕M·巴特，地震学引论，许立达译，地震出版社，1978.
- 〔4〕李善邦，中国地震，地震出版社，1981.
- 〔5〕傅淑芳等，地震学教程，地震出版社，1980.
- 〔6〕中国科学院地球物理研究所，地震仪器概论，科学出版社，1978.
- 〔7〕李学荣，四连杆机构综合概论，1965.

**FIRST TRY ON RESTORATION PLAN FOR PRINCIPLES
OF HOUFENG SEISMOGRAPH INVENTED BY ZHANG HENG**

Wang Jian

*(Department of mechanical engineering,
Xinjiang Institute of Technology, Urumqi)*

Abstract

The following article is based upon the account in Fan Ye's Book of Later Han Dynasty, Biography of Zhang Heng. It clearly puts forward the restoration plan for various functions and principles of the Houfeng seismograph by Zhang Heng. The plan stresses that the Houfeng seismograph can receive the vertical component and the horizontal component of the first seismic wave, and thus can be used to tell the approximate direction of the seismic source. When the first seismic wave is not strong enough for an alarm to be given, it is used to suppress the secondary wave to prevent such secondary wave as the shear wave from interfering the determination of the azimuth. The paper deduces that Zhang Heng had spent several decades for observing, experiment and improvement during the course of inventing this device.