

关于张衡水运浑象的考证和复原*

李志超 陈宇

(中国科学技术大学, 合肥, 230026)

P1-092

内 容 提 要

张衡水运浑象是科学史大事, 前有刘仙洲作过复原, 但有重大异议。本文先考张衡之前的文献以求源, 论证张衡之作的目的和历史地位; 再考其后的文献以循流, 既为后来史料进行诠释, 也返证张衡工作的内容。在此基础上, 我们讨论张衡可能采用的技术设计, 证明不是齿轮传动装置, 而是浮子控制的绳轮传动装置。最后报告我们所作模拟实验和复原模型。

关键词: 张衡、浑象、浑仪 天仪

一、水运浑象的源起

汉代是中国科学史上发生重大变革和急剧发展的时代。汉武帝太初改历, 以洛下閼为首的浑天派战胜了以司马迁为首的盖天派, 使中国天文学史进入浑天时期^①。然后浑天家们在盖天方法的基础上改进和创新了一系列仪器, 奠定了后世仪象体制的基础。其中以张衡的贡献为最大^②。

唐初李淳风作《晋书》和《隋书》的天文志, 首开仪象史研究之先河。显然他对很多史实已属茫然, 虽极力澄清仪象概念之异同, 毕竟未能使人昭昭。至北宋乃有《梦溪笔谈》所述“举人皆杂用浑象事”去说明浑仪的现象。迄今对张衡所制究属何物, 一直未弄清楚, 竟成仪象史上的千古疑案。

浑仪和浑象是浑天说的产物。浑天说始于洛下閼。现存最早提到“浑天”字样的史料是扬雄《法言》: “或问浑天, 曰落下閼营之, 鲜于妄人度之, 耿中丞象之。”而“浑仪”之名则始自张衡, 一切涉及张衡之前的浑仪的记述(包括纬书史料)都要谨慎审核, 大概或为伪托, 或为后人传述的混淆和误解。

《法言》的“象之”二字并不等于说耿寿昌造了浑象, 画图也是“象之”。即使在球面上画天文图, 那球也不一定有转轴和刻度。桓谭《新论》: “黄门作浑天老工……但随尺寸法度, 殊不晓达其意。”可见所作“浑天”远非表意鲜明之物, 很可能就是极简单的球形天文

收到文稿日期: 1992年6月。

* 本文工作得到国家教委博士点基金支持, 中国科技馆的协助, 苏州博物馆和苏州天文和计时仪器研究所的关注。

① 李志超、华同旭: 《司马迁与太初历》, 《中国天文学史文集》第5集, 科学出版社, 1989年, 第126页。

② 李志超: 《仪象始研究》, 《自然科学史研究》第9卷, 第4期(1990年), 第340—345页。

图。又，父子相承毕生事之，能制成多少件？供何人之需？或者他们是承作多种天文仪器？“作浑天”不是“作浑仪”，可以解为“承担浑天诸器之制作”。桓谭、杨雄之文不见以浑象作说明的内容，全部张衡以前的其它史料也没有涉及浑象的。

《续汉书·天文志》贾逵论历提及：“耿寿昌奏：以圆仪度日月行，考验天运状。”圆仪是测度之器，相对于而后贾逵所造黄道铜仪，可以叫它“赤道仪”。汉晋史书所谓“二仪”有时是指这二种仪器。这种赤道仪不是现代意义的赤道仪，它是直接继承《周髀算经》之法，把周长 365.25 尺的地面大圆缩为小圆，斜置而与赤道平行的板，圆周有 365 个小孔可以插置小型“游仪”——一种瞄准用的小标杆(见图 1)①、②。这圆仪——赤道仪——肯定不是后来的有旋转圆环的浑仪，否则就无须另作什么黄道仪，因为在旋转圆环上加装黄道环是很容易的。永元十五年(公元 103 年)贾逵造成黄道铜仪。《续汉书》说：“仪、黄道与度转运，难以候……”转运而难以可作原来赤道仪不转运的旁证。句首一个“仪”字不当解作整体装置之名，那是不合当时行文习惯的。“仪”是与“黄道”、“度”并列的名词，是指整机结构中的一种部件，是瞄准的，但又不同于圆仪中的小游仪。这里是对应经星七曜的每个天体分别设置的、与黄道及其上的刻度相对固定的瞄准部件。星形如点，日月如盘，皆可设一模型物。它们与设在球心的标志物连线并指向所代表的实际天体(这里说的“连线”是瞄准的视线，不是结构的线，见图 2)。在保证极轴准正的条件下，只要对任一恒星作“参相直”操作，则二十八宿的“仪”连同黄道环及其上的刻度，便都与天相合。然后再测定日月五星的位置，移正七曜之“仪”，由此追踪它们的行迹而预测交会。这对早期天文学家不

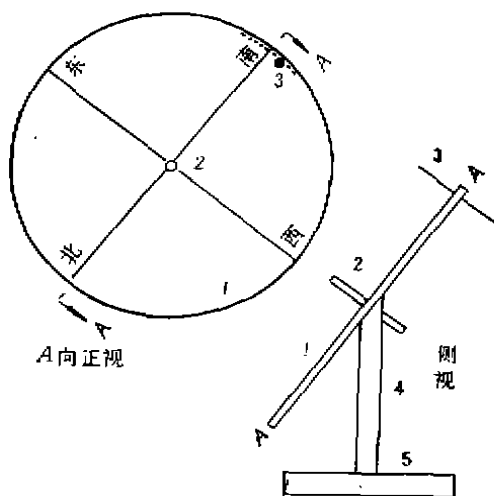


图1 西汉圆仪(赤道仪)示意图

- 1.赤道面板(或环); 2.中心仪(瞄准柱); 3.游仪(活动标杆); 4.东西二柱; 5.底座
(注意: 插游仪的小孔, 只示意地标绘南端一小段, 实为一周。)

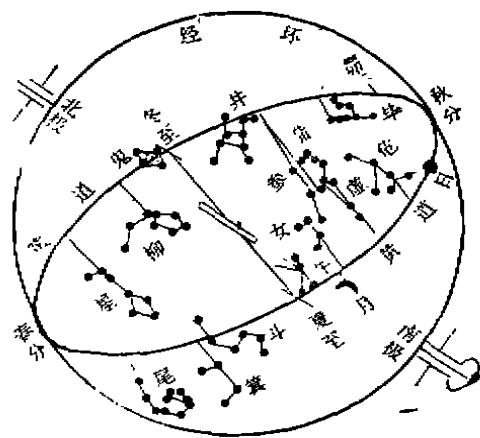


图2 贾逵黄道铜仪示意图

- [经环(框架)上设转轴(北极、南极), 内设黄道环, 上装二十八宿和七曜模型。图中仅绘出 15 宿, 即南陆: 尾、箕、斗、牛、女、虚、危, 北陆: 昂、毕、觜、参、井、鬼、柳、星, 以及日月。]

① 李志超:《周髀数术议》, 第三届全国数学史年会论文(1988年, 合肥); 刘金沂:《从圆到浑》, 第二次全国天文学史交流会论文(1978年, 厦门)。

② 李志超:《射仪考》, 1989 成都物理学史会议论文。

失为一个好办法。二十八宿距星再带上为识别所必需的邻星,都做成固定的“仪”,这实际上不就是个现代意义上的天球仪,或古人所谓浑象吗!只是因为它要作瞄准用,不能用实球面,星标都是用细条支架着的。笔者在《仪象创始研究》一文中所说“黄道上带着支支叉叉的星象”,指的就是这个。这东西虽类同浑象,却又用“仪”作瞄准,故名“黄道铜仪”,这就造成后世仪与象名义的混乱。

与张衡工作关系密切的是黄道仪的旋转问题。贾逵的黄道仪不可能用贯穿球心的直杆极轴,那样会妨碍瞄准,可能用圆环(类似经环的单环)装架极轴,也可能不用极轴只在固定的赤道圆上滑动。不论转动机构如何设计,贾逵之仪总是手动。实际天象旋运不息,操作者也要不断地均匀转运这套“仪、黄道”,这当然是颤动不稳“难以候”的了。如果只在读取数据(黄道度数)那几个断续瞬间完成瞄准,对非固定的日月行星而言,没有一个活动的可以对准待测天体的经圈,又没有赤道圈,那就很难取得准确的黄道度数。结果便是所谓“少循其事”,行不通。

既然天运是匀速的,就不难设想令黄道仪自动转运,实际上是设想一个天文钟机构。那样的话,一次对准恒星,人只要盯住待测的日月行星,它们在瞄准背景上相对稳定,不动不颤,就好多了。这应是张衡继续贾逵的工作,研制“漏水转之”的“黄道铜仪”的动因,而他果然成功了。可是,有了自动旋运的漏水转黄道仪,人们立即会发现:这套装置其实不必与观测操作拴在一起,把它放到密室里去才更有利于漏水的精确运作。室外的观测只要简单地测定某曜与邻近恒星的相对位置,把这测定结果反映到室内的仪器上也就行了。室内物不作观测之用,也就可以改用实球面,那么就可以尽量详细地标绘全天星图了,这就成了一个不能再叫“仪”的浑象。如晋志所言:“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。”或如《灵宪》所言:“中外之官可名者三百五十,为星二千五百。”都标上去。由邻星定位,月亮五星在浑象上标记,可有半度的精度。至于太阳方位,则要测定出没的地平方位,加以漏刻校正,也足够精密。

由此,我们得以说明张衡所制“以漏水转之”的黄道铜仪和水运浑象的关系,如果强言二者的差别,则仅是室内室外、实球虚球而已。后人不见其物,资料也佚失了。正如蔡邕《朔方上书》所言:“求其旧文,连年不得。”遂致混淆。

二、水运浑象的流传

张衡之后第一个研究仪象的重要人物是王蕃(公元228—266年,三国时吴国人)。在他之前的陆绩就不讨论了。《宋书》引王蕃言:

“古旧浑象以两分为一度,凡周七尺三寸半分。张衡更制,以四分为一度,凡周一丈四尺六寸(一分)。蕃以古制局小,星辰稠概;衡器伤大,难可转移。更制浑象,以三分为一度,凡周天一丈九寸五分四分之三也。”

照这样说,张衡之先应有个“古旧浑象”。但张衡《浑天仪注》言及他为测量黄赤道距而特制小浑,则这个古旧浑象为何不用?或因不圆?或因无黄赤道?或因无轴?……也许并不存在。也不排除王蕃所言实为贾逵黄道仪之数。无论如何,王蕃大概未见前人实物,所知皆得自传闻。但从他评价尺寸大小之利弊来看,他有个技术标准,这标准超过了

简单天球仪的要求，应该是水运浑象的标准。二分一度的球面仅作标绘天文图之用应已足够，2500个星平均距离有三、四度，合一、二厘米之长，并非稠密。但若考虑由轴配合误差传递到球面的度数误差随半径减小而加大，再考虑在球面上标记日月五星运动的方式，则可说二分一度小球仍不可取。而所谓“衡器伤大”，不在其造价，而在“难可转移”，对非自动的天球仪来说，这不是理由。大了，精密度和稳定性倒好些。只当考虑自动化时钟式运行时，原动力大小是重要因素，转移之难易才成为问题。是否王蕃已做了一个（或至少是想做成一个）水运浑象？

王蕃之后有葛衡，也是吴人，《三国志》裴松之的注引《晋阳秋》文：

“吴有葛衡，字思真，明达天官，能为机巧，作浑天，地体居于中，以机动之，天转而地止，以上应晷度。”

这也是一个张衡式的制作，只是“地体居于中”。

南朝宋太史令钱乐之元嘉十三年（公元496年）造浑仪，《宋书》记：

“径六尺八分少，周一丈八尺二寸六分少（‘少’的意思是在‘六分’上加一不足半分的量）。地在天内，立黄赤二道，南北二极规、二十八宿、北斗极星，五分为一度，置日月五星于黄道之上，置立漏刻，以水转仪，昏明中星与天相应。”

这与我们描述的张衡之作几乎全同，只是地在天内，尺寸大些。四年后钱乐之再作“小浑天”，“以两分为一度，以三色珠为三家星，亦象天运，而地在中。”

南朝梁陶宏景于私家自制自动浑象，《南史》谓其：

“造浑天象，高三尺许，地居中央，天转而地不动，以机动之，悉与天相会。”

以上这些接连问世的创作，都是继承张衡之制。所可注意者，都是“地居于内”。若使地居于内，当然增加些麻烦，一是球壳必须镂空，使人看得见内部地体；二是地体模型不动，其支撑方式只能是用南极轴，那么球壳上装的就是轴套。无论如何，比起用外框代表地平面要复杂。然则其用意何在呢？只是简单地追求逼真吗？

我们推测，“地居于内”的模型更有助于研讨天地形状。这一作用是地在外的模型取代不了的。两汉浑天说以大地为平面，而以中原某地为球心（地中，也是天中）。但江南人不难发现，南方天象与北方不同——天顶离北极远许多，常显圈小许多。这就造成理论上的难题。当时没有地球观念，至多只能以“地中高外卑”强解。中国古代几何学不发达，张衡用小浑实测球面三角学数据的实验方法成了惯用方法。用自动浑象模拟中高外卑的大地，以期由观察寻求善解，是一种很自然的思路。这正象李四光用稀泥模拟地质过程一样。

整个南北朝时期，天地形状的讨论极为盛大，即所谓“四天鼎沸”者也。这一系列的自动化时钟式模型的制作，又力求逼真，正是与这种讨论局面相呼应的研究实践。《隋书·天文志》引何承天语：

“详寻前说，因观浑仪，研求其意，有悟天形正圆，而水居其半，地中高外卑，水周其下，……”

这里所说“浑仪”当即为此类浑象。他能由此悟得“地中高外卑”，当然是地在中天的模型了。何承天这些话正是以水运浑象与天地形状讨论相关联的典型判断。

至于隋以后的创制，我们选择了与张衡设计之考证有关的内容留在下节讨论。

三、张衡设计的考证

《晋书·天文志》记:

“至顺帝时,张衡又制浑象,……以漏水转之于殿上,室内星中出没与天相应,因其关戾,又转瑞轮莫莢于阶下,随月虚盈,依历开落。”并且“令伺之者闭户而唱之,其伺之者以告灵台观天者曰:‘璇玑所加,某星始见,某星已中,某星今没’,皆如合符也。”

“莫莢”原为传说中的植物。《白虎通·封神》记:“莫莢,树名也,月一日生一莢,十五日毕,至十六日去莢,故莢阶生似日月也。”它可以记日。郝懿行《竹书纪年校正》也有此记载。张衡《东京赋》提到,“盖莫莢为难蒔也,故旷世而不覩,惟我后能殖之,以至和平。方将数诸朝阶。”

依晋志所述情况,若按张衡时可达到的天文观测精度估计,张衡水运浑象的运转精度大致在半度左右。张衡用何种机械构造来转动浑象,史料阙如,考证颇难。刘仙洲认为:张衡是用稳定的漏水去推动水轮,而传动机构则采用了齿轮系。所据的理由是:“把一定的水量继续加到一个水轮,就能够获得一定的等速运动”;把水轮的原动力传达到浑象,“中间的传动机构如果不采用逐渐减速的齿轮系是很难作到的”,而张衡时齿轮早已发明^①。

刘仙洲的具体设计发表于1959年^②,水轮经四级变速齿轮系的传动而带动浑象。另立一根轴,上面自上而下置十五个拨板,每个拨板位置依次错开24°,轴转动时,通过拨板的作用使十五个莫莢叶依序升落。后来复制出的实物收藏于中国历史博物馆。这是现代研究中,复原张衡水运浑象的首次尝试。但此推想设计臆测成分太大,极不可靠。试析如下:

首先,若无其它控制转速装置(例如擒纵器),水轮难以稳定转动,运转精度得不到保证。最早记载以水轮带动的浑象,是唐一行、梁令瓚所造。《旧唐书·天文志》称它:

“注水激轮,令其自转,……每天西转一币,日东行一度,月行十三度十九分度之七,凡二十九转有余而日月会,三百六十五转而日行币。……又立二木人于地乎之上,前置钟鼓以候辰刻,……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,命之水运浑天俯视图,置于武成殿前,以示百僚。无几而铜铁渐涩,不能自转,遂收置于集贤院,不复行用。”

《新唐书》也有此记载。“铜铁渐涩”的说法含糊,究竟何意?如果是锈蚀,短期内必不甚严重,只须擦拭一番即可复原,也可用涂油的方法防锈兼润滑,如果因气温下降导致漏水量减少,致使浑象转速变慢,也可调整漏壶水头高度以纠正,何以对此珍稀仪器随便弃置?“铜铁渐涩”而“不能自转”可能另有隐情。我们可作如下推想:此仪器置于武成殿前“以示百僚”,非为天文工作专用,精度原本不高。它的妙处主要是在连续的转动中演示多种天文现象,且具报时功能。“与天道合同”在此应理解为每当浑象日转一周,则“日行一度,月行十三度十九分度之七”等精巧的机械构思能与天运相合,而并非意味着浑象自

① 刘仙洲:《中国古代在计时器方面的发明》,《清华大学学报》,3卷2期(1957年),第60页。

刘仙洲:《中国机械工程发明史》,科学出版社,1962年,第99页。

② 刘仙洲:《中国古代对于齿轮系的高度应用》,《清华大学学报》第6卷4期(1959年)。

转时特别准。若这浑象转动精度只能应付一般民间要求,并不太准,设计和制作上的缺陷再加上气温变化所致漏水量改变,多种因素引起的误差,的确就难校正了。不能找出失准的原因所在,校正愈繁,只得报告“不能自转”,不再使用了事。可以初步判断,水轮驱动的浑象,到唐一行、梁令瓚时,仍处于尝试阶段,其中并无擒纵器之类的控制部件,转速难以稳定。如此构造的自动浑象到唐代尚连民间所需精度也达不到,张衡又怎能使它经受“灵台”职业天文观测者的检验?

唐徐坚《初学记》记:

“张衡漏水转浑天仪制曰:以铜为器,再叠差置,实以清水。下各开孔。以玉虬吐漏水入两壶。左为昼,右为夜……”

依水轮驱动方式,不能解释在漏水转浑天仪中要两只箭壶作何用。漏水流进了箭壶,又如何去带动水轮?另外,为何箭壶要两只?刘仙洲对动力方式的设计显然不能与这一史料相合。

推想张衡采用了精密齿轮系作传动,也大有疑问。从已发掘的汉代齿轮看,形状都不很规整,中心孔多有明显偏心,齿间距离也大小不一^①。用这种齿轮绝不能做精密传动。当时齿轮究竟何用,尚待研究。现在所知最早用到齿轮系的机械,大约就是记里鼓车和指南车。这两种车的创始尚未弄清,而其精度也远不及天文仪器要求。能确定将齿轮系用于水运浑象传动者,可靠的追索只能早到北宋。前推至汉,无论从考古还是史料的角度都不可信。从浑象到蓂莢的传动,刘仙洲设想为长杆。但从密室到室外殿下,必有弯曲迴转的路径,距离也太长,用长杆并不合理。他的蓂莢机构也太复杂和现代化。

依上分析,刘仙洲的设计多不合理,受人非难是当然的。我们经多方探讨,断定张衡当时不是采用水轮和齿轮。我们的推想如下:

张衡时既已有了浮漏,张衡就可以利用浮箭壶中浮子的稳定上升来控制浑象转动。浮子经绳索与一重锤相连,中途绕过固定于浑象轴上的驱动轮。浮子上升则重锤下降,从而带动驱动轮转动浑象(见图3)转速受浮子的控制而有较高的稳定度。这种动力方式可称为“浮子控制”。由浑象到蓂莢的传动也用绳轮。我们的具体设计是:浑象轴的转动经二级变速的绳轮传动传至蓂莢转轴。第一级变速比为1/6,第二级变速比为1/5。恰好使浑象轴每转动30周,蓂莢轴转动一周。逢小月则以手动调节一次。对于“瑞轮蓂莢”,我们认为它主要应具有通过点数叶片来计日期的(“数诸朝阶”)功能,倒不见得一定直立。据其功能,它确乎应该用到凸轮装置(刘仙洲设计中的“拨板”也起凸轮作用)。从凸轮装置最方便而直接的应用来看,蓂莢轴以横置为妥。因此采用这种方案:15个大致为半圆形的凸轮沿一横轴安置,顺序各错开12度,依次推动15个蓂莢叶顺序升降。

以此新的推想设计,可以保证浑象以较高精度转动。对于前述《初学记》引文,也很容易解释箭壶的作用。至于为何用两只箭壶,可能有两方面的原因:一是为满足连续转动的需要。如果仅用一只承水筒,则在每次给承水筒退水时操作不太方便:浑象球要暂停转动,给承水筒退水,再将驱动轮上绳索拉回初始位置。这种操作还必然给转动带来干扰。若用二只承水筒,则可在一只承水筒中浮子上升到头时,即刻将绳索从这只浮子摘挂

^① 见《考古》,1959年第12期;《考古》,1960年第1期;《科技日报》,1990年7月21日第3版。

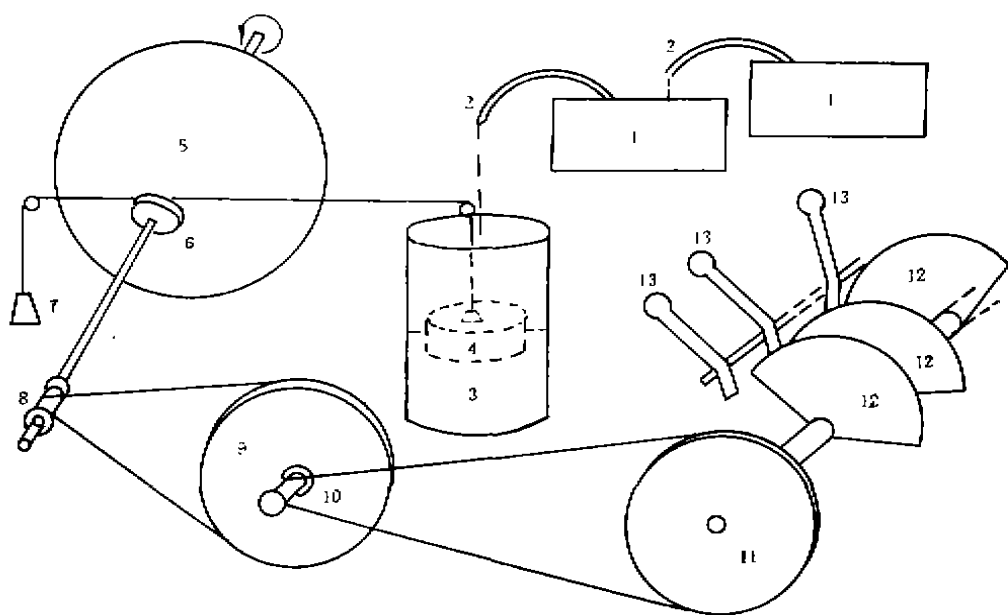


图3 张衡水运浑象原理示意图

- 1.漏壶; 2.虹吸管; 3.承水筒 4.浮子; 5.浑象球; 6.驱动轮; 7.重锤; 8.小传动轮;
9.大传动轮; 10.减速小轮; 11.冀荚轮; 12.凸轮; 13.冀荚叶。

到另一筒中的浮子上,当然它的一段绳长要调好,漏水也跟着导向另一筒,重锤也要提高到绳子的较高一段。为此,绳子应是分段活接,互相钩挂。二是为使转动更灵便,应尽量增大驱动轮,但驱动轮直径受承水筒深度限制。用两个筒比只用一个筒(都是一昼夜)筒深一样则可使轮径加倍,浮子也相应减小(意味筒径减小)。

我们的设计所涉机械技术都较简单,都是当时有了的,比刘仙洲设计的臆想性大大降低,合理性大增。例如,当时有滑轮和轱辘,纺车也有了,那些机械有绳轮传动,也有变速机构。桓谭《新论》记有水碓,那上面有凸轮,与冀荚凸轮工作相同。

刘仙洲设计之失,首先是他不知道东汉二级浮漏已达很高水平;其次是无根据地相信齿轮技术已为张衡掌握;第三是不顾无等时控制的水轮不能保证匀速转动。故其复原未能实现理想之效果。

四、模拟实验和复原模型

张衡浑象“以四分为一度,周一丈四尺六寸一分”,其直径合今制 107 厘米,以铜制成。我们不能一下子做一个一样的东西,为了取得必要的力学数据先做了小型模拟实验。

取商品地球仪的球为浑象球,做一个约当张衡原器 1/6 尺寸的小模型。凡轴、轴承、支架、轮子等部件皆由陈宇手制,不求其甚精,以仿效古代技术水平。

我们把华同旭对刻漏精度的研究成果^①作为定论,不再做漏水均匀性试验。实验主

^① 华同旭:《中国漏刻》,安徽科技出版社,1991年。

要目的是测定：对不同重量的转轴载荷，为获得无跳动的旋转，最小重锤重量及浮子尺寸。改变载荷的方法是在浑象轴上套加不同的钢制圆块，最小块 80 克，最大块 1000 克。用注射器向承水筒注水，可以控制注水量，小到目视浑象旋转可以觉察的下限。

实验结果表明，只要重锤和浮子够大，转动就平稳而无跳跃，完全受漏水控制。以发生小于 1 度的跳动（跳动之先是滞停过程）为准，测出最小重锤重量（这重量乘以驱动轮半径便是最小力矩）以及浮子直径。这里无需列举这些数据。我们以这些数据为依据，粗略外推，求得张衡原器的对应最小力矩。设其铜球壳厚 1 分，即约 2.5 毫米，在驱动轮直径约 30 厘米时，最小重锤 2.4 千克，圆形浮子直径 70 厘米。这实验的详细记述存于陈宇的硕士论文《张衡水运浑象研究》（中国科技大学 86 级硕士生论文）中。应该说明：这种数据是很粗略和保守的，张衡所作只会比这更容易。实验的结论是：浮子控制可以保证水运浑象以高精度运转。

在上述实验之后，我们于 1992 年 5 月完成一个较大的复原模型，球的直径约 60 厘米。此物曾在苏州博物馆展出。

A TEXTUAL RESEARCH AND NEW RECONSTRUCTION OF ZHANG HENG'S WATER-ROTATING CELESTIAL GLOBE

Li Zhichao Chen Yu

Abstract

The creation of Zhang Heng's water-rotating celestial globe is a major event in the history of science and technology. The globe had been looked into and rebuilt by Mr. Liu Xianzhou, whose designs were heavily suspected by some scholars. This paper traces the source of the apparatus from documents before Zhang's time to explain the purpose of his creation and points out its place in history. The paper also tracks the course of the making of the globe, not only to unravel some difficult points in the documents, but also to infer the contents of Zhang's work. On this basis, it discusses the possible technical designs for transmission device adopted by him, and ends with a report of the authors about their recently reconstructed model and the result of some experiments carried out with this model.

Key words: Zhang Heng, celestial globe, armillary sphere