

Analysis of the Innovations and Scientific Value of Guo Shoujing's Zheng Plan

Yongxia Yang

Guo Shoujing Memorial Hall, Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract

This paper systematically studies the Zheng Plan instrument created by the Yuan Dynasty astronomer Guo Shoujing, focusing on its technological innovations. Through the integration of double-scale calibration, horizontal calibration with a heavy hammer, and the design of multifunctional accessories, it breakthroughs the core challenges of traditional instruments, such as directional ambiguity, large shadow measurement errors, and single functionality, achieving a significant improvement in observational precision. As the core equipment of the "Four Seas Survey," this instrument played a crucial role in synchronous observations at 27 stations, providing multidimensional and precise data support for the compilation of the "Shoushi Calendar." Its scientific value is not only reflected in promoting the paradigm shift of Yuan Dynasty astronomical observation technology from "laboratory to field" but also in establishing the design standards of ancient astronomical instruments as "practical, precise, and integrated," which had a profound impact on subsequent astronomical and calendrical research as well as the development of geographic surveying techniques. It is a paradigm of interdisciplinary integration in ancient Chinese science and technology.

Keywords

Guo Shoujing; Zheng Fang'an; Sihai Test; Shoushi Calendar; scientific value

浅析郭守敬与正方案的创新和科学价值

杨永霞

邢台市郭守敬纪念馆, 中国·河北 邢台 054000

摘要

本文围绕元代天文学家郭守敬创制的正方案仪器展开系统研究, 重点探讨其技术创新实践, 通过双层刻度整合、重锤水平校准与多功能附件设计, 突破性解决了传统仪器定向模糊、测影误差大、功能单一的核心难题实现观测精度的量级提升。该仪器作为“四海测验”的核心装备, 在27处观测站的同步观测中发挥关键作用, 为《授时历》的编订提供了多维度精准数据支撑。其科学价值不仅体现为推动元代天文观测技术从“实验室走向野外”的范式转型, 更在于构建了古代天文仪器“实用化、精准化、集成化”的设计标准对后世天文历法研究与地理测绘技术发展产生深远影响, 是中国古代科技跨学科融合的典范之作。

关键词

郭守敬; 正方案; 四海测验; 《授时历》; 科学价值

1 引言

元代科学家郭守敬创制的正方案, 是中国古代科技史上首次实现天文观测与地理测量深度融合的标志性仪器。据《元史·天文志》记载, 该仪器以正方形黄铜盘为核心载体, 通过表竿投影、定标定位等精密设计, 可同步完成北极出地高度(纬度)测量、日影长度观测及方位校准三大功能。在至元十六年(1279年)启动的“四海测验”中, 正方案成为覆盖东亚大陆的野外观测主力工具, 其获取的精准数据直接支撑了《授时历》的编制, 使这部历法达到当时世界领先的精度水平。本文结合《元史·郭守敬传》等史料记载与现代科技史复原研究成果, 从创制背景结构创新、实践应用、历史价值等维度展开分析, 阐释郭守敬“需求导向、精准实测、跨域融合”的科研理念。

2 正方案创制的时代背景与科学需求

正方案的诞生, 并非孤立的技术发明, 而是元代大一统政治格局下, 历法修订、疆域测绘双重需求与传统测量技术革新的必然结果, 是郭守敬科学思想与时代条件深度融合的产物。

2.1 历法危机催生的实测需求

元初沿用金代传承的《大明历》, 历经近百年使用已误差累积严重。据《元史·历志》记载, 至元初年“日月交食推算失准逾一时辰, 冬至、夏至时刻偏差达两三日”, 这种误差直接冲击了以农为本的耕种时机失序, 而祭祀时刻不准则被视为“违逆天常”, 动摇王朝统治的合法性基础。元世祖忽必烈深谙“历法为治国之本”, 于至元十三年(1276年)正式下令修订新历, 任命时年四十六岁的郭守敬主持天

文观测工作。

郭守敬在制历过程中提出：“历之本在于测验，而测验之器莫先仪表，然旧仪局限都城，数据孤证难全”。此前历代天文观测多集中于单一都城，如唐代一行的天文测量仪覆盖13处站点，且多局限于中原地区，无法反映不同纬度地区的天象差异。由于北极星高度、太阳赤纬随纬度变化存在显著梯度，若仅以大都（今北京）的观测数据推算全国历法，必然导致偏远地区的节气时刻出现系统性偏差。为此，郭守敬大胆提出“四海测验”计划，主张在全国范围内设立27处观测站，南起北纬15度，北到北纬65度，东起东经128度，西至东经102度，南北长5500公里、东西宽2900公里范围内的天文大地测量工作。这一宏大工程亟需一种兼具“便携性、高精度、多功能”的野外观测仪器，传统圭表仅能测日影、司南仅能定方向、浑仪过于笨重的局限暴露无遗，正方案的研发由此成为当务之急。

2.2 疆域治理驱动的地理测量革新

元朝作为中国历史上疆域最辽阔的王朝，其统治范围横跨欧亚大陆，“东尽辽左，西极流沙，南越海表，北逾阴山”，统治者亟需精准的疆域地图以实现有效治理。但传统地图绘制多依赖“经验步量”与“文字描述”，缺乏科学的坐标参照体系，导致“疆界模糊不清，距离测算失真”，严重影响赋税征收与军事部署。

郭守敬创新性地提出“以天定地”的地理测量理念，主张通过天文观测确定地理坐标：以“北极出地高度”（即现代地理学中的纬度）界定南北位置，以日影方位校准东西方向，构建起“天球坐标—地理坐标”的转换桥梁。这一理念对观测仪器提出了严苛要求——必须同时具备纬度测量、日影观测与方向校准三重功能。而当时的观测工具均存在功能短板：圭表虽能精确测量日影长度，却无法确定方位与天体高度；司南仅能大致定向，精度远不能满足测量需求；阿拉伯传入的星盘虽可测天体高度，但结构复杂且需专业操作，难以适应野外大范围作业。在此背景下，正方案的“多功能整合”设计应运而生，成为实现“以天定地”理念的核心载体。

2.3 技术积累奠定的物质基础

正方案的精准制造与高效运行，离不开元代手工业技术与学科发展的坚实支撑。在手工业领域，黄铜铸造与金属加工工艺已达到成熟水平：元代官营手工业作坊能够铸造出厚度均匀、表面平整的大型黄铜盘，盘面刻度雕刻精度可达0.1度，满足了观测仪器对基准载体的严苛要求；表竿加工采用“冷锻抛光”技术，使直径1厘米的铜竿表面光滑度误差小于0.1毫米，有效避免了投影变形导致的观测误差。

3 正方案的结构设计与科学原理

根据《元史·天文志》“正方案，方四尺，厚一寸，四周有栏，栏高一寸。中心立表，长二尺，阔二寸，厚五分。

表顶横木，长四尺，阔一寸，厚五分，以准四方。表之四周，刻周天度分，外方刻方隅”的记载，结合南京紫金山天文台等机构的复原研究，正方案的结构可分为“主体部件”与“辅助附件”，各部分设计均围绕“精准测量”与“便捷操作”展开。

正方案的核心是一块边长约1.2米（元代“四尺”，1元尺约合今31.6厘米）、厚约3厘米的正方形黄铜盘，盘面平整光滑，刻有“双层刻度”，实现“方位、角度、尺寸”的功能整合：

3.1 外层方位刻度

铜盘边缘刻有“二十四向”方位标识，由“十二地支”（子、丑、寅、卯等）、“八干”（甲、乙、丙、丁等）与“八卦”（乾、坤、巽、艮）组成，每向对应15度（360度/24），对应现代地理学的“方位角”，用于快速校准东西南北方向，继承了中国古代“罗盘”的方位传统。

3.2 内层角度与尺寸刻度

铜盘中心向外绘制19组同心圆，最内侧小圆直径10厘米，外侧同心圆间距5厘米，各组圆之间刻有“周天度数”（365.25度，对应回归年长度）与“元代尺寸”（1元尺约31.6厘米）。其中，“周天度数”用于测量天体高度角（如北极星高度），“尺寸刻度”用于测量日影长度（如冬至、夏至日影），实现“一器两用”。

为实现精准观测，正方案配备三组核心附件，各附件设计均体现“细节决定精度”的理念：

表竿：一根高度约2米、直径1厘米的铜质标杆，通过铜盘中心的小孔垂直固定（与盘面绝对垂直），作用是“生成投影”——白天，表竿在阳光下形成的影子投射于刻度盘，可测日影长度与方向；夜晚，通过表竿顶端瞄准北极星，可测北极星高度角。表竿表面经抛光处理，避免因粗细不均导致的投影误差。

定标针：两根可移动的铜针（直径0.5厘米），用于“标记投影位置”——白天测日影时，将定标针垂直插在日影顶端，通过读取针在刻度盘上的位置，精确记录日影长度与方位；夜晚测北极星时，通过“人眼、定标针、表竿顶端、北极星”的四点一线，读取北极星高度角，避免视线偏移误差。

4 正方案的功能应用与“四海测验”中的核心作用

正方案并非局限于天文台的实验仪器而是郭守敬为“四海测验”量身打造的“野外移动观测站”，在这场中世纪世界规模最大的天文大地测量工程中，承担了“纬度测量、节气推算、方向校准”三大核心任务，其获取的精准数据直接奠定了《授时历》的科学基础。

4.1 北极出地高度测量：构建地理坐标体系

测量“北极出地高度”（即地理纬度）是正方案最核心的功能，也是郭守敬“以天定地”理念的关键实践。其测量

原理基于简单的三角几何关系：北极星高度角与观测点纬度数值相等，通过测量表竿顶端与北极星的连线同水平面的夹角，即可直接得到当地纬度。

在“四海测验”中，郭守敬团队使用正方案在 27 处观测站完成了系统性的北极星高度测量。在北海观测站（今俄罗斯贝加尔湖附近），因地处高纬度地区，团队遭遇极夜挑战，遂创新性地将正方案与“窥几”（一种带刻度的观测小桌）配合使用，通过多次观测取平均值，最终测得“北极出地六十五度”，较前代数据精度提升一倍。在南海观测站（今西沙群岛），由于北极星接近地平线，观测难度极大，团队利用正方案的 19 组同心圆刻度，结合“景符”的成像放大功能，测得“北极出地一十五度”。将各观测站的北极出地高度数据串联后，郭守敬首次绘制出中国古代首张“纬度分布图”清晰呈现了纬度随南北距离变化的梯度规律，直接推翻了流传千年的“日影千里差一寸”的错误说法，证实实际误差仅为“百里差一寸”。这一发现不仅为地理测绘提供了科学依据，更推动了古代主审观的革新。

4.2 日影观测：精准推算回归年

日影长度的周期性变化是太阳赤纬变化的直接反映，也是推算回归年长度、确定节气时刻的核心依据。正方案通过表竿投影+景符成像+双刻度读数“的组合技术，实现了日影长度的高精度测里。

在“四海测验”中，郭守敬团队在 27 处观测站同步开展“二至二分”（冬至、夏至、春分、秋分）的日影测量。观测时，通过影杆将太阳像聚焦于刻度盘，用定标针标记光斑中心位置，读取对应的尺寸刻度。根据日影长度的变化周期，郭守敬计算出回归年长度为 365.2425 天，与现代天文学计算的 365.2422 天仅相差 0.0003 天，精度远超同时期欧洲《儒略历》（365.25 天），且与现行公历（格里高利历）完全一致，比西方早 300 余年。这一成就的取得，正方案的精准观测功不可没。

5 正方案的历史地位与现代价值

正方案虽不如浑仪、仰仪声名显赫，却以“便携性、多功能性、高精度”成为元代天文大地测量的核心工具，其历史地位与现代价值体现在三方面：

5.1 中国古代“天文、地理”交叉学科的开创者

正方案首次实现“天文观测与地理测量的深度融合”，打破了传统“天文仪器测天、地理工具测地”的界限，开创

了“以天定地”的研究范式。此前，圭表仅能测日影、司南仅能定方向，而正方案通过“纬度测量-日影观测-方向校准”的功能整合，将天文数据转化为地理坐标，为后世“舆图测绘”（如明代郑和下西洋航线测量、清代康熙全国地图测绘）提供了方法论借鉴，是中国古代科技“整体性思维”的典型代表。

5.2 世界古代天文测量仪器的杰出成果

13 世纪的世界范围内，正方案的技术水平处于领先地位：同时期欧洲的地理测量仍以“罗马里程制”（驿站距离估算）为主，缺乏科学的纬度测量方法；阿拉伯世界的“星盘”虽能测天体高度，但结构复杂、便携性差，无法用于大范围野外观测。而正方案仅需 1-2 人携带，观测流程简单（1 人校准水平、1 人读取刻度），适合野外作业，是当时世界上最适合“大范围天文大地测量”的仪器。直到 16 世纪，欧洲才出现类似功能的“纬度仪”，比正方案晚近 300 年。

5.3 当代科技史研究与科学教育的重要素材

在当代，正方案仍是科技史研究与科学教育的优质资源：一方面，通过对正方案的复原研究（如 20 世纪 90 年代中国科学院紫金山天文台复原的正方案，现陈列于北京古观象台），研究者可直观了解元代金属加工与天文测量技术，填补元代科技史细节空白；另一方面，正方案的“相似三角形应用”“水平校准原理”“投影测量技术”，与现代中学数学、物理、地理课程知识点高度契合，通过仿制简易正方案（如纸板、木竿制作模型），可帮助学生理解抽象概念，培养“理论联系实际”的科研思维。

七百余年过去，正方案的实物虽已湮没于历史，但它所承载的科学精神——“立足需求、勇于整合”的创新意识，“严谨求证、精益求精”的科研态度，“跨学科融合”的思维方法——仍具有强大生命力。作为中国科技文化的重要符号，正方案不仅是元代天文测量辉煌的见证，更激励着当代科研工作者以实用为导向、以创新为动力，不断推动科技文明进步。

参考文献

- [1] 宋濂,王祿.元史·郭守敬传[M].北京:中华书局,1976.
- [2] 苏天爵.滋溪文稿·郭守敬行状[M].北京:中华书局,1997.
- [3] 李约瑟.中国科学技术史·天学卷[M].北京:科学出版社,1975.
- [4] 陈美东.郭守敬评传[M].南京:南京大学出版社,2006.
- [5] 潘鼐.中国古代天文仪器[M].上海:上海古籍出版社,2005.
- [6] 席泽宗.中国科学技术史·天文历法卷[M].北京:科学出版,2003.