

近代航海导航技术的见证

——六分仪

司宏伟^①

【摘要】六分仪是一种测定地平线与天体之间角度的光学仪器，是 18 世纪末至 20 世纪中期航海的主要导航仪器，在人类认识地球、利用海洋的伟大事业中发挥了重要作用，在科学史上具有一定地位。本文通过这件藏品，介绍六分仪的构造原理和发明历史，揭秘藏品及其捐赠者背后的故事，为同行研究提供一定参考。

【关键词】六分仪；光学仪器；航海；科学史

2019 年 4 月 24 日至 5 月 3 日，“百年器象——清华大学科学博物馆筹备展”在清华大学举行，展出了多件清华科技文物和国内外百年来的科技发明，此中不乏清华校友的珍贵捐赠。其中，有一架造型奇特、小巧精致的六分仪受到众多观众的青睐。本文对该六分仪藏品进行整体描述，介绍六分仪的构造原理、使用方法和发明历史，揭秘这架六分仪背后的故事，以飨读者。

一、藏品基本情况

（一）整体描述

清华大学科学博物馆收藏的这架六分仪长 24cm，宽 24cm，高（厚）12cm，重 1.58kg；材质主要是黄铜、光学玻璃、铝等；仪架整体为黑色，刻度盘则是黄白相间（见图 1）。六分仪上注明“Made in Great Britain”，制造商为英国伦敦的 Henry Hughes & Sons，是当时英国两家最



图 1 六分仪藏品

大的六分仪制造商之一（另一家是同在伦敦的 Heath and Co.），注册商标铭牌标着“HUSUN”，这种六分仪在 20 世纪上半叶的英国海军中装备极多。英国生产六分仪的仪箱箱盖内部，均有英国国家物理实验所（National Physical

① 司宏伟：清华大学科学史系博士后，清华大学科学博物馆（筹）助理研究员；研究方向：计算机技术史、军事科学仪器史；通讯地址：北京市海淀区清华大学蒙民伟科技大楼南楼 211 室；邮编：100084；Email: howes@mail. tsinghua. edu. cn。

引用格式：司宏伟. 近代航海导航技术的见证——六分仪[J]. 自然科学博物馆研究, 2019(4): 59-65. [Si Hongwei. Sextant: A Witness of Modern Navigation Techniques[J]. Journal of Natural Science Museum Research, 2019(4): 59-65.]. DOI: 10.19628/j.cnki.jnsmr.2019.04.009

Laboratory) 颁发的检验证书, 其上会载明编号和制造商, 在需要送厂修理时, 可根据这一信息追溯其来源。这架六分仪出厂编号为“**No. 58006**”, 具体的制造时间没有标识, 但从仪器包装箱中一张检测记录(原装检验证书已改为国内检修卡)上记载的“**1950. 10. 10**”来推测, 肯定是在此时间之前。因此, 这架六分仪的历史至少应该有**70**年以上, 是那一时期英国航海仪器制造水平的直接见证。

这架六分仪保存完好, 虽然缺少望远镜和望远镜套圈, 但其它部分仍可正常使用。2018年10月17日, 清华大学校友、1975级建工系地下建筑专业原海军学员袁帆先生将其捐赠给清华大学科学博物馆入藏。

(二) 构造原理

六分仪(Sextant), 是一种用来测量远方两个目标之间夹角的光学仪器。通常用它测量某一时刻太阳或其他天体与地(海)平线的夹角, 以便迅速得知舰船所在位置的地理纬度^[1]。

六分仪具有扇状外形, 其组成部分主要包括一个圆弧形的角度刻度盘, 一根铰接在圆心处的活动指标臂, 一个半透明半反射的平面镜即地平镜, 一个与指标臂相连的反射镜即指标镜, 一架小望远镜。六分仪的名字源自拉丁语 *sextus* (六分之一)^[2], 因为其刻度弧有 60° , 恰为圆周的六分之一。为提高读数精度, 实际的六分仪活动指标臂上附有刻度滚轮和游标尺。地平镜、指标镜旁边还配有滤光镜片, 供测量太阳等明亮天体时使用。六分仪的特点是轻便, 可以在摆动中的物体如船舶甲板上观测, 缺点是阴雨天不能使用。

六分仪一般构造如下(见图2):

1. 刻度盘: 六分仪下方带有刻度的圆弧形铜盘, 外缘有齿轮沟, 每一齿轮沟间隔为一度, 以圆弧上面的每一刻度表示。
2. 刻度盘旋钮: 用来固定或活动刻度盘。
3. 指标镜: 固定在指标臂上方, 与仪架平面垂直, 镜的中心恰在指标臂旋转中心上, 天

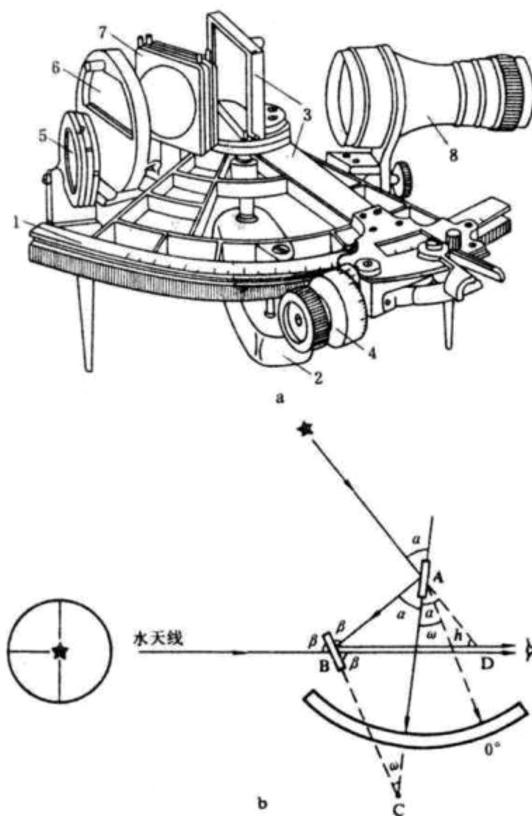


图2 六分仪结构和原理图^[3]

体的光线由此镜导入。

4. 刻度滚轮: 位于指标臂左下方, 上面有刻度 $0 \sim 60^\circ$, 滚轮转一圈恰为一度。

5. 地平镜滤光镜片: 通常有3片, 置于地平镜前方, 观测时可以过滤太强的光线。

6. 地平镜: 固定在仪架平面上, 并与仪架平面垂直, 当指标臂归零时, 地平镜与指标镜应该平行, 且地平镜半边为反射镜, 半边为透明玻璃。

7. 指标镜滤光镜片: 通常有4片, 置于指标镜前方, 观测时也可以过滤太强的光线。

8. 望远镜: 用此可以更清楚地找到所要的天体, 仪架上有一个望远镜套圈, 望远镜可以套栓在其上保持固定。

六分仪的主要原理是几何光学中的反射定律。光线的入射角等于反射角, 那么光线连续经过两个平面镜反射, 光线入射方向与最后反射出来方向的夹角等于两镜夹角的二倍。测量天体的地平高度时, 观测者手持六分仪, 让望

远镜镜筒保持水平，并从望远镜中观察被测天体经地平镜反射所成的像；同时要调节活动指标臂，使被测天体与望远镜中所见的地平线相重合。由反射定律得出，此时该天体高度角等于地平镜与指标镜夹角的二倍，六分仪圆弧标尺上的刻度显示的就是这一结果，这样观测者就可以直接读出天体高度^[3]。

（三）使用方法

使用六分仪实际观测的步骤如下（以航海中观测太阳为例）^[4]：

1. 观测者通过望远镜和地平镜，注视远方海平线，上中天的太阳，其光线射向指标镜。
2. 转动指标臂，让阳光反射到地平镜上。观测者的视野里，开始逐渐出现太阳的影像。
3. 当太阳影像与海平线相切时，指标臂的指针对准的刻度，就是太阳此时的高度角（太阳高度角就是太阳光的入射方向和地平面之间的夹角）。
4. 实际使用时，还要有校准和调整的步骤，就是确保六分仪垂直于地面，即以望远镜的光轴为轴心，让整个六分仪左右摇摆，使得视野中的太阳影像对海平线作钟摆运动时，不会下沉到海平线以下。
5. 当确保六分仪垂直于地面，太阳影像与海平线重新相切后，读取刻度，即太阳高度。

（四）计算方法

使用六分仪测量纬度的计算方法如下：

1. 用六分仪测量出某天体（一般选用太阳）上中天时的地平高度。
2. 查阅天文年历了解当天该天体的赤道坐标。
3. 代入公式： $\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$ 即可得出该地的纬度 φ 。

式中 z 是天体天顶距（ 90° 减去地平高度）， δ 是天体的赤纬， t 是时角，可以由地方恒星时与天体赤经相减得出，恒星时也可以通过简单计算得到。

如果是由太阳位置计算地理纬度，粗略但更

简便的算法是：

$$\varphi = z + \delta$$

当然，更精确的结果还需要扣除六分仪视差、蒙气差、眼高差、天体的半径差等误差后才能得出。

二、六分仪发明历史

（一）航海导航早期探索

纵观人类航海史，早期的航海活动非常依赖陆地。这不仅出于船只补给和安全的需要，也是导航的需要。船只一旦远离了陆地，那么依靠陆上参照物判别方位和确定航线的地文导航方法就无法发挥作用。随着人类不断驶向更遥远更广阔的海洋，如何在茫茫大海中给自身定位成为首先要解决的问题。在没有陆地和已知岛屿作为参考点时，只有天体是最好的参照物。虽然日月星辰等天体随时都在运行，但它们毕竟有客观规律可循，人们可以根据自己相对天体的位置推算出自己在海上所在何处。当人类懂得了这个道理之后，就一直在寻求航海时通过观测天体确定自身位置的方法。

在六分仪出现以前，人们曾使用过多种精度较低的测天工具。据史料记载，早在宋元时期，中国的航海者就使用“量天尺”测量天体高度^[5]。明代郑和下西洋，使用过一种叫做“牵星板”的器具，以“星斗高低，度量远近”。一套牵星板由 12 块正方形木板构成，材质一般为乌木，最大一块每边长约 24 厘米，称“十二指”，这样每块递减 2 厘米，到最小的一块每边长约 2 厘米，称“一指”；木板的中心穿一根绳子，绳子长度是自眼到板之间的距离（手臂伸直），大约是 72 厘米^[6]。测量时，测量者一手持牵星板，手臂水平伸直，另一手持住绳端置于眼前，眼看牵星板上下边缘，将下边缘与水平线取平，上边缘与被测的天体重合，然后根据所用的木板属于“几指”，就可以得出天体高度的指数，这种测量方法被称为“过洋牵星

术”^[7]。而“牵星板与海平面垂直，上缘与被观测天体相切，便可由板高和臂长计算出天体仰角”的基本原理源自中国古代数学“勾股定理”（见图3）。

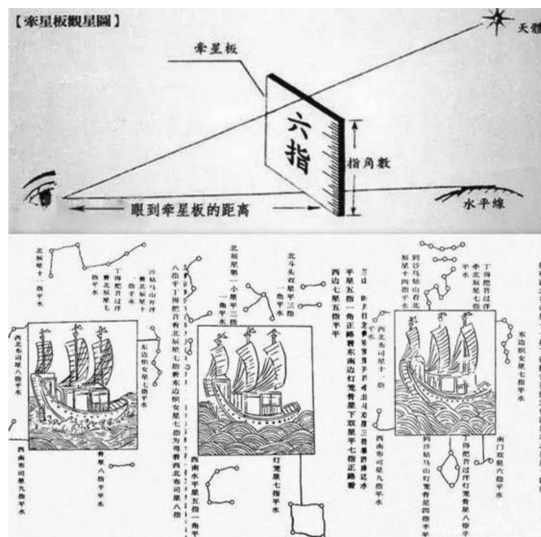


图3 郑和下西洋使用“牵星板”测天定位^[6]

阿拉伯人则在15世纪前后的数百年间使用“拉线板”（Kamal）进行导航。“拉线板”由一块木片和一根穿过木片中央的绳子组成，绳子上打若干绳结，使用时左手执木板，右手拉直绳子，使木板上边缘对准北极星，下边缘与海天连接线相切，可以大约测出所在地北极星距水平的高度，并根据木板宽度和绳长计算海船所处的地理纬度。

欧洲的水手在15世纪中期时曾使用过陆地观测天体的工具“直角象限仪”（Quadrant），但是这种简单的象限仪在船上非常不实用，领航员经常需要上岸观察；15世纪后期发明了“航海星盘”（Mariner's astrolabe），使用时将星盘悬挂成铅直，零度标记与水平面齐平，移动指针指向要测量高度的天体，即可测出天体高度（仰角），从而得出船舶所在的纬度位置，但由于船舶甲板上下颠簸，这样的仪器极难操作，测量误差很大。1515年左右，海员们从东方的同行那里得到启发，制作了一种“十字杆”（Cross-staff）。它由一根长木杆和一个短方木片

组成，二者构成十字架型。木杆两侧光滑，上面标有刻度；木片中间有一个方形的洞，可以让木杆穿过并与之保持直角。观测时，木片垂直放置在木杆上，眼睛尽可能靠近木杆一端，另一端指向天空中的一个定点（大约在选定天体和地平线之间的正下方）。木片沿着木杆滑行，直到它的上缘“触到”天体，下边缘“触碰”地平线，然后用螺丝钉将木片固定在木杆上，并从刻度上读出天体高度。16世纪末，英国航海家戴维斯（John Davis）发明了“竿式投影反测器”（Back-staff），航海者无需像使用星盘、十字杆时所要求的那样直接目视太阳，而是利用棍棒投射到刻度计上的影子，其影子端的位置表明了太阳的高度，这样纬度就可以计算出来了。

这些发明无论出自哪个民族、哪个时期，都充分显示了航海先行者们的不懈探索与高度智慧。

（二）六分仪的发明

17—18世纪，英国积极开拓海外殖民地、争夺海上霸权，成立于1660年的英国皇家学会一项重要任务就是为英国海军和商船队远洋导航寻求新技术。1665年，担任英国皇家学会秘书和实验管理员的胡克（Robert Hooke）设计了一个三角形框架、带有反射镜的天文观测象限仪（reflecting quadrant），在伦敦圣保罗大教堂进行了测试^{[8]23-24}。不久后，英国科学巨擘牛顿（Isaac Newton）也独立设计出一种用于测量高度的反射式天文仪器，他也是第一个应用两种反射镜制成象限仪（double-reflecting quadrant）的人^{[9]386-391}。根据胡克、牛顿等人的设计，各大天文台纷纷建造固定式大型反射象限仪（后来也称为六分仪），以便在陆地上测量天体。例如，1676年英国格林威治天文台建造了一架大六分仪，由首任皇家天文学家弗拉姆斯特德（John Flamsteed）亲自安装并使用^[10]；又如，1687年荷兰天文学家赫维留斯（Jan Heweliusz）把一个南天小星座（狮子座和长蛇座之间的暗星座）

命名为“六分仪座”，以此纪念他长期用于测量天体高度的固定六分仪^[11]。

但是，真正用于航海、可手持移动的“六分仪”这时还没有诞生。1670年，皇家学会对胡克的设计进行了审查，并下令进行了海上试验，然而这种反光仪器并未产生什么效果和影响。17世纪末，航海家们仍然满足于使用十字杆和反测器。直到1714年，英国国会成立了经度委员会并颁布《经度法案》，开始重金悬赏解决远航航海的导航定位问题，新的航海仪器和方法才迅速得到开发和使用。1730—1731年，英国人哈德利（John Hadley）和美国人戈弗雷（Thomas Godfrey）分别发明了用于航海的“八分仪”（Octant）^[12]。它用两块镜子将太阳或某颗星辰的投影与地平线排成一条直线，从而确定纬度，这种光学仪器因其刻度弧约为圆周的八分之一而得名。两人都把设计方案提交英国皇家学会，而哈德利于1734年又提交了一个改进方案，得到普遍采用。哈德利是英国天文学家、数学家，同时也是一位发明家和机械师，后来担任过英国皇家学会副会长。他曾制出第一批有足够精度和放大率的天文反射望远镜。哈德利发明的八分仪是一种弓形双反射象限仪，观察者可通过一面镜子同时看见地平线和所测天体，它们之间的角度可用边缘标有刻度的象限仪量出，测角范围可达90°，比简单的象限仪（测角范围45°）增加了一倍，成为一种测纬度的理想仪器。它的另一优点是能使星辰天体的反射图像与地平线成一直线，而且所测读数更为精确。

1732年，英国海军部把这种能量90°夹角的八分仪放在一只快艇上作实验，结果非常精确。但是，航海者导航定位还需要用到“月角距”（月球与某一天体的角距），而90°标度的八分仪还是不能满足测量的需求。德国天文学家梅耶尔（Tobias Mayer）提出一个360°整圆标度的“反射圈”（Circle of reflection）构想，并委托英

国机械师伯德（John Bird）设计制作这种仪器。伯德是一位自学成才的天才工匠，年少时就可以自行磨制出近乎完美的消色差透镜，1740年他进入伦敦一家专业的仪器制造商行工作，1745年开始建立自己的业务并逐渐声名远播。1756年，伯德铸造出“梅耶尔反射圈”，由坎贝尔船长（John W. Campbell）带到海上做实验。反射圈测量效果好，但非常笨重，在海上使用极为不便。坎贝尔船长将实验情况告知伯德，并希望在八分仪与反射圈间折衷，设计制造一种新仪器。伯德借鉴了坎贝尔船长的改进建议，以八分仪为模子，把测量范围扩大到120°（弧度板为60°），于1757年制造出世界上第一架真正意义上的“航海六分仪”（Navigation sextant）^[13]。六分仪较之以往测纬度的仪器精度大大提高，最高精确到10角秒（1角秒即1°的1/3600），且简便易用，迅速成为海上测量地理坐标的利器。1767年，伯德因此获得“经度委员会”颁发的500万英镑巨额奖励。1772—1775年，英国皇家海军军官、著名航海家库克船长（Captain Cook）成功完成了第二次环球探险，随身携带的装备就有一架伯德专门为他铸造的六分仪^[13]。

最初的六分仪全铜制作，个头大，分量重，船员不得不把它的下端绑在裤腰带上，才能保持稳定。后来人们为减轻重量改用木材制作，但是体积依然较大。主要是因为六分仪的测量准确与否，与刻度划分是否精确密切相关，而当时工艺水平有限，难以在小型刻度盘上精确地划分刻度，只能做得很大。18世纪末，英国仪器制造商拉姆斯顿（Jesse Ramsden）发明了可以精确划分刻度的“分位仪”（Dividing engine），才解决了这一问题，使六分仪真正实现了小型化^{[8]41-42}（见图4）。1831—1836年，达尔文环球旅行搭乘的“小猎犬号”，能在浩瀚大海上按照既定路线顺利完成科考任务，所装配的船用小型六分仪发挥了关键作用^[14]。



图4 格林威治皇家博物馆所藏拉姆斯顿造六分仪^{[9]346}

六分仪主要是英国人在长期航海实践基础上,利用天文学和测量学原理,凭借先进工业制造能力完成的一项重要发明,标志着人类在认识地球、利用海洋过程中科学意识的不断提升,在科学史上具有一定地位。这种发明已久的航海仪器受外界人为因素干扰小、操作简单、可靠性强,因此具有长久的实用价值。到了现代,它的分度弧刻度多是从 -5° 到 130° 或 140° ,测量范围都明显大于 120° ,实际上已发展到约为圆周五分之一,但习惯仍被称作“六分仪”。20世纪40年代以后,虽然人类发明了现代无线电定位法,以及更为精确的数字化卫星导航定位系统(GPS),但六分仪仍因其可靠性优势而被广泛应用,是世界上所有大中型舰船必须配置的航海装备。

三、藏品背后故事

(一) 制造厂商

该六分仪藏品的制造厂商为英国的亨利休斯父子有限公司(Henry Hughes & Son Ltd.),始建于1828年,坐落在伦敦市芬丘奇街59号^[15]。创始人亨利·休斯曾是一名验光师,他的公司(Henry Hughes Ltd.)制造计时器、光学仪器等设备。亨利于1879年去世,他的儿子亚历山大

·休斯继任董事长,公司于1903年正式成立为家族企业(Henry Hughes & Son)。从1923年起,亨利休斯公司开始为英国工业界生产回声测深仪等水下设备。1935年,史密斯工业有限公司(S. Smith & Son Ltd.)收购了该公司的大部分股权,从而开发生产了一系列航海和航空工业科学仪器。1941年,亨利休斯公司与开尔文公司(Kelvin)进行合作,成立了航海仪器有限公司(Marine Instruments Ltd.),主要为英国海军服务。1947年,两家公司正式合并为开尔文与休斯有限公司(Kelvin & Hughes Ltd),继续从事各类科学仪器设备制造。亨利休斯公司著名的“胡塞”商标(HUSUN)从20世纪20年代开始使用,第二次世界大战期间,“胡塞”牌六分仪大量装备到英国皇家海军舰船上,为反法西斯战争胜利立下功劳。

(二) 捐赠故事

该六分仪藏品的捐赠者袁帆,与这件小小的仪器颇有缘分。袁帆平时爱好收藏,1979年他进入海军航保系统工作,能够直接了解当代海军舰艇各类航海仪器的发展过程与现状,这为他提供了收藏研究的便利。1992年的一天,基地仓库清理废旧物资,前去检查工作的袁帆发现在一堆旧物中有一个木盒子,打开一看竟然是一架老旧六分仪,虽然有些残缺,但精致的造型注定了它的不一般。“慧眼识珠”的他果断将它“截留”在被垃圾车运走之前。当时他就想,将来有一天应该把这架六分仪捐赠给博物馆^[17]。

这架英国制造的六分仪究竟是怎么来到中国的?袁帆多次试图通过各种渠道咨询考证,但由于年代久远、资料档案不健全等原因,始终没有明确结果。但他推测,这应该与新中国人民海军的发展历程有关。“二战”结束后,美国和英国曾援助给国民党海军一批舰艇,成为国民党进行内战的工具。1949年4月23日,中国人民解放军正式成立。但那时中国根本没有现代化造船工业,建军初期的军舰来源大部分是国

民党海军起义后收编的,而这架六分仪可能正是某一艘起义舰艇的装备。随着人民海军舰艇的不断更新,很多历经沧桑、服役几十年的外国造老旧舰艇逐渐退役,其配置的各种舰上装备也就当作废品处理了。而这架六分仪幸运地

被袁帆精心保存,并在 26 年后迎来了它的新生。

致谢:感谢袁帆先生接受采访并提供素材,感谢刘年凯博士、蒋澈博士、马玺博士帮助查找资料。

参考文献

- [1] “Sextant”. Encyclopedia Britannica[M]. Vol 20. Chicago:Encyclopedia Britannica, Inc.1947: 420.
- [2] Seddon, J. Carl. Line of Position from a Horizontal Angle[J]. Journal of Navigation, 1968 (3): 367-369.
- [3] 李志洪.六分仪的垂直观测与天体高度精度[J]. 航海技术, 1998(3): 37-38.
- [4] Dixon, Conrad. “5. Using the sextant”. Basic Astro Navigation[M]. Adlard Coles Nautical Press.1981: 229-231.
- [5] 陈晓珊.“量天尺”与牵星板[J].自然科学史研究,2018(2):139-155.
- [6] 严敦杰.牵星术——我国明代航海知识一瞥[J].科学史集刊,1966(9):77-78.
- [7] 胡德生.郑和下西洋对中国航海技术发展的贡献[J].海军工程大学学报,2005(6): 4-5.
- [8] W.M. Bruyns. Sextants at Greenwich[M].Oxford University Press.2009.
- [9] Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton[M].Cambridge University Press.1962.
- [10] 吴国盛.科学的历程(第二版)[M].北京:北京大学出版社.2013: 248.
- [11] Stephen James. The secret of Sextans[J].Journal of Astronomy,2012(2): 14-28.
- [12] 尚可.航海定位 GPS 前身——六分仪[J].海洋世界, 2013(7): 20-21.
- [13] Moskowitz. The World's First Sextants[J].Journal of The Institute of Navigation,1987(1): 26-30.
- [14] 杜树志.奇特六分仪:见证达尔文时代航海文化[J].航海, 2011(2):73-74.
- [15] “Henry Hughes and Son Limited 1828—1947”[EB/OL]. [2019-7-15]. [http:// collection.sciencemuseum.org.uk/people/cp58792/henry-hughes-and-son-limited](http://collection.sciencemuseum.org.uk/people/cp58792/henry-hughes-and-son-limited).
- [16] 杨洋,袁帆:和长跑的不解之缘[J].清华人, 2009(4): 33-34.
- [17] 袁帆.一架六分仪背后的故事[EB/OL].[2019-7-1]. <https://www.meipian1.cn/>.
- [18] 刘年凯.袁帆校友向科学博物馆捐赠六分仪[EB/OL].[2019-7-1]. <http://www.dhs.tsinghua.edu.cn/2018/10/17/2546/>.

(编辑: 谌璐琳)