

水运仪象台枢轮的两种复原方案探源

徐思源 王哲然

(清华大学科学史系,北京 100084)

摘要 枢轮是水运仪象台复原研究中的重点与难点,依受水壶是否可独立于枢轮转动,形成了“翻斗”与“定斗”两种复原方案。经本文考证,康布里奇所提出的“翻斗”方案,既出于精确计时和保证枢轮正常运转的考虑,同时也受到了李约瑟《新仪象法要》错误译文的误导。伯斯塔尔在添加了于文无据的切断凸轮的基础上,复原出可运转的模型,是为最早“定斗”方案的实现者。康布里奇与伯斯塔尔此后就受水壶是否可动等问题产生了一系列争论。对这段水运仪象台早期研究史的分析表明,无论“翻斗”还是“定斗”,皆有不尽如原始文献之处,这为后续研究水运仪象台的现代复原留出了进一步探索的空间。

关键词 水运仪象台 枢轮 复原 翻斗 《新仪象法要》

中图分类号 N092:P111.1

文献标识码 A **文章编号** 1673-1441(2023)02-0264-10

水运仪象台是北宋元祐年间建造的一座大型天文计时仪器,兼具观测、演示和报时三大功能,是自东汉张衡以来的中国古代水运仪象传统的巅峰之作,后因战乱被损毁。南宋以降,对水运仪象台原理的探究和复原吸引了众多学者的注意。

现代研究始于刘仙洲和李约瑟(Joseph Needham),前者是“以现代科学的观点,对水运仪象台进行研究的第一人”([1],页1),后者于1956年发表的《中国的天文钟》^[2]一文标志着外国学界关于水运仪象台研究的开始。世界上首个水运仪象台复原模型由王振铎等人在北京制成,但“这是一台仅供外观观赏的模型,不能运转”^[3]。

要复原可运转的水运仪象台模型,离不开对枢轮原理与结构的研究。枢轮将水流的连续运动转化为间歇运动,并将动力输出至其他部件,起到类似机械钟内擒纵器的作用。20世纪60年代以来,关于枢轮的运动方式,学界形成了两种意见,一种是“翻斗”方案,主张受水壶可以独立于枢轮而转动,代表人物有康布里奇(John H. Combridge)、李约瑟、胡维佳、土屋荣夫等。二是“定斗”方案,认为受水壶必须固定在枢轮上不能自由活动,代表人物有伯斯塔尔(Aubrey F. Burstall)、李志超等。

“翻斗”方案自提出后便成为了学界的主流观点。《中国科学技术史》^[4]和《中国大

收稿日期:2022-08-25;修回日期:2022-09-20

作者简介:徐思源,1997年生,清华大学科学史系硕士研究生,研究方向为中国古代科学技术史;王哲然,1986年生,清华大学科学史系助理教授,研究方向为西方数理科学史、科学仪器史。

基金项目:唐仲英基金会“苏颂水运仪象台复原”项目。

百科全书》^[5]对枢轮原理的介绍均采用“翻斗”方案的想法。目前全世界按原尺寸成功复原的水运仪象台亦不约而同地基于“翻斗”方案。在当代研究者中,仅李志超对“翻斗”予以明确质疑,他后又与孙小淳、唐晓强等学者合作,依照“定斗”方案,成功复原出一台 1:3 模型。

然而,如果我们细读 20 世纪 60 年代关于水运仪象台的早期文献,便会发现有关“翻斗”与“定斗”之间的选择,恰是当时的两位英国学者——康布里奇与伯斯塔尔争论的焦点。而康布里奇之所以坚持并无明确文本支持的“翻斗”方案,一方面源于他对枢轮连续运动的机械学考虑,另一方面也受到了李约瑟《新仪象法要》错误译文的影响。然而,这些早期争论的细节,在近年发表的一系列水运仪象台的研究中,均被有意无意地忽略了,乃至伯斯塔尔及其“定斗”方案遭到彻底遗忘,完全消失在有关水运仪象台研究的学术史叙事之中。

本文认为,为了填补当前研究中的这一段空白,重新激活水运仪象台复原研究的多种可能性,有必要回到问题的起点,复盘两种方案提出的初衷与背景,并分析它们各自的局限性。为此,文章将首先交代康布里奇设想“翻斗”方案所基于的文本及其考虑,其次介绍伯斯塔尔利用切断凸轮(interrupter cam)的“定斗”方案,继而分析康、伯二人的一系列交锋观点。在文章的最后,将给出本文作者针对两种方案的一个临时性的评价。

1 康布里奇的“翻斗”方案

康布里奇和伯斯塔尔的复原都是建立在李约瑟等人的早期研究和翻译基础上的:1960 年,李约瑟、王铃和普赖斯(Derek J. Price)将守山阁本《新仪象法要》下卷译成英文,收入《天文钟》^[6](*Heavenly Clockwork*)中——该书成为康布里奇和伯斯塔尔开展研究的共同依据。1961 年,康布里奇以其首创的“翻斗”方案制作出世界上第一台可运转的枢轮模型,并于当年 7 月在牛津伍斯特学院(Worcester College, Oxford)的科学史学术讨论会上作了展示。1962 年,康布里奇在“天空之秤:一项实践性复原”^[7]中对该模型及后续改进情况进行了专门介绍。

那么,康布里奇究竟是根据什么提出了“翻斗”方案的呢?

1956 年李约瑟发表《中国的天文钟》时,并未对受水壶的安装方式给出详细说明。直到 1960 年,他才在《天文钟》中叙述了以“定斗”为准的枢轮运动过程。由此可见,前期李约瑟是倾向于“定斗”的。1958 年王振铎制作的模型也属“定斗”,但也因此导致枢轮并不能“持续地做等时转动”^[8]。原因是:固定于枢轮上的受水壶在“天关”或“左天锁”挡住枢轮时,只能随枢轮保持静止。这样一来,“无论它受水多少,都不可能独自下落,因而也就无法压下格叉、拨动关舌,无法拉动天条,打开左天锁,放过枢轮”^[9]。换言之,倘若不辅以附加部件,定斗方案中的水斗下落和枢轮转动构成的系统自由度就会小于零,导致过约束,使得机器无法运转。

康布里奇在复原中遭遇了类似困境。他抱怨道:

水斗(scoop)和水斗架(scoop-holders)以前被认为是轮子的固定部分,但这并不能给出令作者满意的解释,即这样形成的刚性水轮如何能够通过加权杠杆定期启动

和停止,以及怎样控制其旋转速度来达到计时目的。^[7]

因此,为使枢轮正常运转和更精密地计时,康布里奇作出了如下推测:

考虑到要对装满水的水斗进行精确称重,并且要对枢轮的启动和停止进行控制,水斗架实际上必须以带有转轴的方式安装(mounted pivotally upon)在枢轮辐板的加固环(reinforcing rings)上,或者可能用绳索支撑在上面。此外,当水斗空着的时候,它们的运动必将被抵消,静止在逆止器(back-stops)上。^[7]

以上就是对“翻斗”方案的最早表述。图1是康布里奇用以说明其原理的示意图,李约瑟后来为之撰写了详细的说明,重点阐述了“翻斗”的过程:

当水从平水壶进入水斗时,先要胜过水斗柄上的配重(scoop-holder counterweight),然后以水的余重压在左端的枢衡控制叉上。当此超重又胜过配重时,秤杆的左端迅速被压下,水斗支架(scoop-holder)就围绕其轴(pivot)转动而迅速撞向关舌,使关舌突然下降。^①([4],页460)

结合图1可以看到,“水斗架”就是“水斗柄”,即与图1中“水斗”(即受水壶,图1中标号3)相连的长柄。“水斗架”被安装在枢轮最外侧的轮辋(即“加固环”)上,可以绕中间的轴转动;“水斗架”末端有一个“配重”(counterweight,图1中标号5),用来让水斗在受水未足时得以靠在下方的“逆止器”(back-stops)上保持静止。

循此思路,康布里奇制成了他的第一台枢轮模型(图2),该模型用细沙驱动,共有12个水斗,运动周期为20s,计时精度在1%左右。他指出,如果按照原尺寸复原,计时精度会更好。至此,枢轮运转问题似已被康布里奇圆满解决。

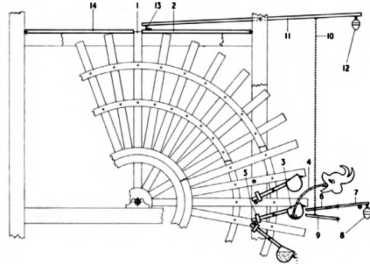


图1 康氏方案说明图

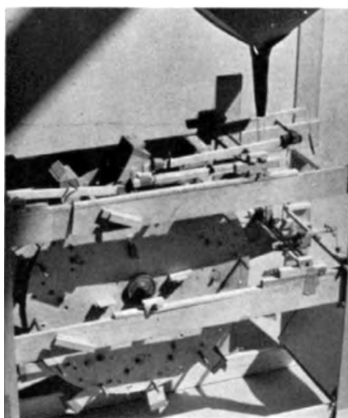


图2 康布里奇的第一台枢轮模型(1962)

然而,其论述中存在几处与《新仪象法要》原文明显不合的地方。且不论“逆止器”之

① 译文参考了鲍国宝等人1999年的中译本,关键词语“水斗柄”“水斗支架”等均沿用不改。

类已是于文无据,他所反复提及的“水斗架”又是什么?又为什么要“安装”在“加固环”上?

康布里奇在 1964 年的论文中补充说明了“水斗架”的来历和“‘水斗架’安装于‘加固环’上”这一说法的依据:

根据李约瑟等人的翻译,原初的擒纵轮有“七十二根辐板和三十六个水斗架”,它们被安装在该轮子的三个加固环上,并且“每个水斗架夹持着一个水斗,水斗总共有三十六个”。李约瑟评论道:“水斗架没有被仔细描述,但它们可能是一个简单的架子(shelf),固定在两边的辐板上。”但我认为这并不能解释它们为什么是被安装在加固环上的。1962 年发表的一篇论文里指出,从实际角度出发,考虑到每个水斗需要单独称重,如此产生了一种设想,即水斗架,“洪”(hung), (部首 85 加上 6 画,在现代汉语中意为“广大”等)是水斗的支撑杠杆(supporting lever),以转轴方式安装在外侧加固环上,并被图 2 模型中固定在一个内侧加固环(图 1 中未显示)上的逆止器限制在一定范围内,且水斗被加以略大于空勺重量的配重。该设想成功实现了对擒纵机构的复原,且无需更多进一步的实验。^[10]

由这段文字可以看出,“水斗架”是李约瑟对“洪”的翻译,且他认为“水斗架”是一个简单的“架子”(shelf),固定在辐板上。同时,也是李约瑟本人提出“水斗架”是“安装”在“加固环”上的。

那么,李约瑟的这些说法有何根据呢?

康布里奇所引李约瑟译文的第一句出自 1960 年版《天文钟》第 31 页,其在李书中的完整原句是:

枢轮安装在前面提及过的八个轮子的后面。它有七十二个辐板和三十六个水斗架,水斗架被安装(mounted)在枢轮的三层加固环上,水被倒入水斗中。([6],页 31)

这句译文对应《新仪象法要》下卷第一节“水运仪象台”中的“其轮以七十二辐为三十六洪,束以三辘,夹持受水三十六壶”([11],页 193)。两相对照,可以看出,李约瑟不仅将“洪”译为“scoop-holders”,还将“束”翻译成了“安装”(mounted),“辘”翻译成了“加固环”。

康布里奇所引李约瑟译文的第二句来自《天文钟》第 39 页,完整原句是:

每个水斗架夹持着一个水斗,水斗总共有三十六个,每个水斗有 1 英尺长,0.5 英尺宽和 0.4 英尺深。([6],页 39)

这句译文对应《新仪象法要》下卷“枢轮”一节中的“每洪夹持受水壶一,总三十六壶。每壶长一尺,阔五寸,深四寸”([11],页 214)。

康布里奇引用的李约瑟的评论出自《天文钟》第 31 页的脚注 1,所注对象正是译文中的“scoop-holders”一词,脚注全文为:

枢轮由一对并排的 36 个辐板组成。每对辐板都支撑着一个水斗架,上面放着一个水斗。水斗架没有被详细描述,但它们可能是一个简单的架子(shelf),固定在两侧的辐板上。([6],页 31)

该脚注反映了李约瑟对他翻译为“scoop-holders”的“洪”字的理解,即一个“架子”(shelf)。所以,从一开始就是李约瑟本人认为“水斗架”(scoop-holders)具有“架

子”(shelf)的含义,并认为“水斗架”固定于辐板上,和辐板不是一回事。

然而,“‘洪’是一个‘架子’(水斗架)”和“水斗架‘安装’在加固环上”这两项理解是正确的吗?

首先来看“洪”究竟是什么。胡维佳在给“洪”字的注释中写道:“指称两块相对的、用来夹持受水壶(水斗)的辐板”([11],页195)。陆敬严对“三十六洪”解释称:“洪,原意洪水,指三十六股水头”^[12]——“水头”这一说法令人困惑,不过读其译文则不难发现,他实际上和胡维佳观点一致,就是把成对的两条木辐合称为“洪”。山田庆儿和土屋荣夫也持类似看法,但解释得更细致:

由轂上呈放射状南北对称安装的木辐又称‘洪’,‘洪’由三重轱支撑固定……据史料称,把南北对向成对的木辐称为‘洪’。单根木辐时则称为‘辐’。‘洪’,意似出自佛像背后的光环……([1],页267)

由此可见,“洪”只是对成对木辐的统称,绝非李约瑟本人所理解的“架子”或“水斗架”。

其次,“轱”原指“车轮的外周”([11],页195),“束以三轱”是说用三层轮圈“加固”轮辐。但李约瑟却将“束以三轱”中的“束”理解为“安装”(mounted),这才制造出“水斗架‘安装’在加固环上”这一错误观点。

至此,“翻斗”创制始末已被澄清:康布里奇为了消除枢轮的过约束状态而增加了转轴,形成“翻斗”,提升了机器整体的自由度,从而使其能够正常运转。而他之所以会想到从水斗中寻求突破点,乃是基于李约瑟两处不甚准确的英文译文,从而貌似合理地将“洪”理解为“水斗架”,将“束”理解为“安装”。

随后,既为了更好地解释“水斗架‘安装’在加固环上”这一情况,也为了更精确地称量水重,他在实际复原过程中将“安装”在加固环上的“水斗架”制作成一根形似长柄的“支撑杠杆”,让它通过一根转轴“安装”在外侧轮轱上,带着水斗绕轴旋转。

在康布里奇提出“翻斗”仅一年后,伯斯塔尔在《自然》上介绍了自己研制的枢轮模型。与康氏模型不同,这台装置中的水斗是固定在枢轮上的,并加入了一项伯斯塔尔发明的新设计——切断凸轮。

2 伯斯塔尔的切断凸轮方案

伯氏方案的要点有二:一是令水斗处于受水位置时,顶部轮辐和“天关”之间有一段空隙(图3)。这样当水斗受水已满、压下格叉的同时,枢轮就不会被锁死,而是可以转动一小段距离。随后水斗击开关舌、拉动天条、抬起天关,枢轮在天关抬起的短时间里不受阻挡地继续转动,直到受枢衡或复位的天关阻挡而停下。这和《天文钟》中所描绘的动程相似。

二是引入“切断凸轮”(图4)。按原书记载,枢轮是间歇性地做等时运动的。这就要求天关必须在一辐通过之后及时下落以挡住下一轮辐。为此,切断凸轮被设计出来,用于在天关抬起之后拉起关舌,使关舌和铁拨牙不能接触。直到天关靠自重回落在“限位器”(图3,H)上、枢轮受阻挡而归于静止后,切断凸轮和关舌才回复原位。

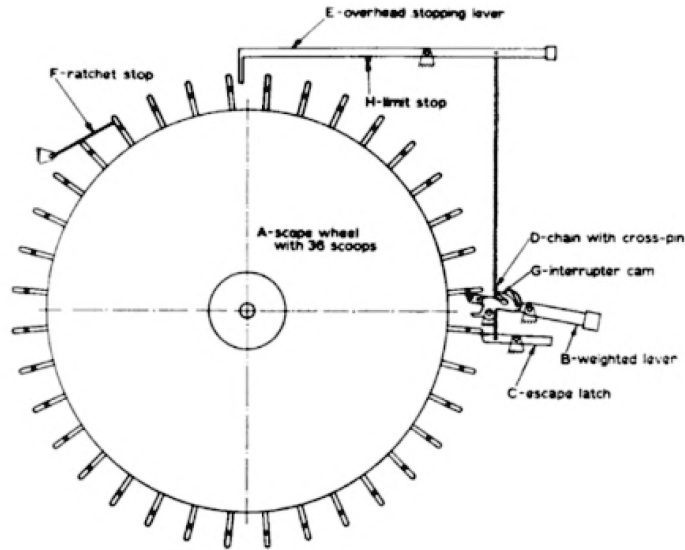


图3 伯斯塔尔设计的枢轮原理示意图

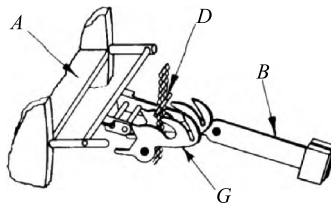


图4 切断凸轮(G)

然而,这些理论设想实际上根本未获实现。据伯斯塔尔自述:

在枢轮被缓冲器阻挡并反弹之前,位于杠杆上的叉子之间的钉子拨动切断凸轮……这个模型(可能就是原始设计)有一个固定在链条上的插销,当加权杠杆倾斜时,它就插入下端的切断凸轮中,链条的下端因而被拉起,使得擒纵门无法在枢轮回弹之前接触到下一个钉子;而在枢轮停下、回弹并归于静止之后,这个钉子就能够拨动擒纵门了。^[13]

这里提到枢轮会被“缓冲器”(天关)“阻挡并反弹”,且切断凸轮发挥作用的时间段正是“枢轮停下、回弹之前”。但在文末他却改口说:

在我们发现切断凸轮的功能并把它添加到模型之中后,该装置(正如《天文钟》里所描述的)最令人困惑的地方在于,携带着缓冲器(buffer)的上止动器(upper stop)从来就不能使轮子停下,因为每次在轮子将要停止转动之前,它都还被抬在枢轮之上,这意味着,缓冲器不能“缓冲”。^[13]

由此可见,在实际运行中,“天关”从未与轮辐接触,枢轮的停转完全是靠枢衡的阻挡。天关既然不能发挥作用,“切断凸轮”帮助天关复位的功能就更无从谈起,和天关一起沦为虚设。

显然伯氏模型问题众多甚至自相矛盾,特别是“切断凸轮”这种于文无据的表述。这

直接导致了1964年康布里奇和伯斯塔尔在《自然》上展开的论战。

3 康布里奇与伯斯塔尔的论战

康-伯论战的焦点主要有三：一是切断凸轮是否存在，二是受水壶是否可以活动，三是如何理解“天关”的“关”字。

3.1 凸轮是否存在？

伯斯塔尔坚信“切断凸轮”存在的理由主要是它和原书“天衡”一节插图中的“星形小玩意儿”(star-shaped gadget)的相似性(图5a)。康布里奇对此不以为然,他认为“星形小玩意儿”不过是出水管的装饰,因为它嘴里伸出的棱柱体(图6)刚好和“天河”(图7)中的出水管形状一致。

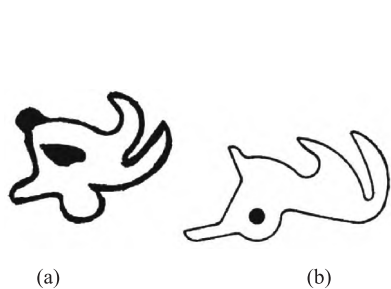


图5 切断凸轮(b)与原书插图
部件(a)的对比

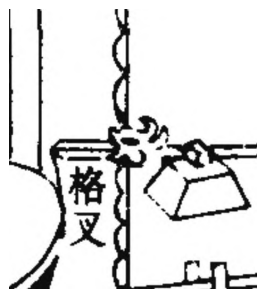


图6 《新仪象法要》“天衡”
一节插图(局部)

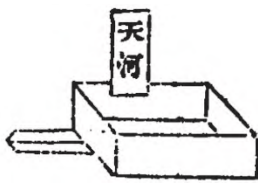


图7 《新仪象法要》“河车、天河”
一节插图(局部)

伯斯塔尔在一定程度上接受了康布里奇对“切断凸轮”的批评：

我们承认对我们早期文章中的切断凸轮的反对意见,但是自发表后,我们已意识到了凸轮的作用可以被格叉(checking fork)所替代……^[10]

3.2 受水壶是否可以活动？

伯斯塔尔认为康布里奇所设计的带转轴式受水壶在原书中既缺乏文字依据,也没有图示,因此“很难相信它竟然会出现在原作中”^[10],并指出“其他的每个转轴都被描述过”^[10]。对此康布里奇辩解称报时系统中的内部构造也没有被详细描述。这一辩解是乏力的——即使原书没有详细说明报时木人是如何被带动的,但毕竟有“昼夜机轮轴”这一明确记载,但对于受水壶的转轴则是只字未提。因此,康布里奇始终没能为“翻斗”作出文本上的有效辩护。

3.3 “天关”的“关”应作何解？

李约瑟等人将“天关”译为“upper stop”,“关轴”译为“shutting axle”。康布里奇对后一例子的好奇促使他查阅了《新仪象法要》上卷(李约瑟未翻译)。他在“浑仪”一节中发现,苏颂用“天柱关轮”来命名其新创制的传动系统。他认为这里的“关”不能被译为“stopping”或者“shutting”,而应理解为“结合”(coupling)或“连接”(link)。故此他将“天关”译为“upper link”(图8),即“天衡”和“左天锁”之间的连接机构。

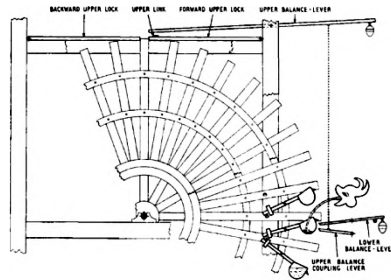


图 8 康布里奇复原的枢轮模型(1964)

伯斯塔尔反对这一新译,并援引了杜伦大学(University of Durham)的汉语言讲师 A. C. 巴尔内斯(A. C. Barnes)等人的看法:“关”字不能被翻译成“stop”以外的词。然而,后来的复原者大多还是接受了康布里奇的看法,直到土屋荣夫发明新的“天关”设计后,康布里奇式“天关”才逐渐被淘汰。

3.4 论战影响及评价

早期持“定斗”观点的李约瑟在康-伯论战后彻底转向了“翻斗”观点——在 1964 年 11 月致王振铎的信中,他指出伯斯塔尔“必定更加背离了苏颂的原意”^[14],还提到自己在新年出版的《中国科学技术史》第 4 卷第 2 分册中“明确采纳了 Cambridge 的模型”^[14]。同年 12 月发表的康布里奇的论文中也谈到了李约瑟态度的转变过程:

李约瑟博士告诉我,他已经和鲁桂珍博士(Dr. Lu Gwei-Djen)一起重新审阅了中文文本,确认其中没有任何内容表明需要保留那个自然的最初假设,即水斗及其架子是牢牢地固结于轮子上的。^[10]

如李约瑟 1964 年的信中所言,1965 年,他将康布里奇的模型载入《中国科学技术史》机械工程卷正文中予以肯定,对擒纵过程的介绍也是完全按照翻斗方案展开。在该书 459 页的脚注 a 第一句话中,他盛赞康布里奇的模型是“美妙的”(beautiful),最后用两句话质疑了伯斯塔尔的模型是否能够工作。

康伯论战之后,一方面由于李约瑟的影响,另一方面也因为康布里奇的模型在计时精度和与原文的相符程度等各方面的确都较伯斯塔尔的模型更优,故南肯辛顿科学博物馆(the Science Museum, South Kensington)、伍珀塔尔钟表历史博物馆(Historisches Uhren-Museum Wuppertal)、利物浦市博物馆(Liverpool City Museum)等单位所建造的水运仪象台模型均以康布里奇的设计为准,伯斯塔尔本人则在水运仪象台研究史上销声匿迹,几乎无人继续或引用其研究。

康布里奇曾指出,这场论战根本上源于二人的不同动机:伯斯塔尔仅仅是为了完善李约瑟的早期方案,而他本人则旨在探寻中国古人原初的设计。这一评价是切中要害的:伯斯塔尔在他的论文中总是反复强调其模型是如何满足了《天文钟》的记载,甚至用“接受(李约瑟的)挑战”^[13]这样的字眼来形容自己开展这项研究的原因。事实上,正是因为继承了早期李约瑟“锚式擒纵器”的思路,伯斯塔尔才将天关置于两轮辐之间的空隙,导致“缓冲器无法发挥作用”的困境——这也是《天文钟》中的设计所面临的问题。康布里奇则未囿于《天文钟》,而是进一步研究了李约瑟未翻译的《新仪象法要》上卷,较伯斯塔

尔更具尊重古人原作的态度。

4 结语

康布里奇所提出的“翻斗”方案,既出于精确计时和保证枢轮正常运转的考虑,同时也受到了李约瑟对原书中“洪”“束”等关键术语的错误翻译的误导。因此,“翻斗”在最初提出时并不具备可靠的文献证据。伯斯塔尔沿袭早期李约瑟的思路,在添加“切断凸轮”的基础上,制成了世界上第一台可运转的“定斗”模型,与原文背离程度更大。

由于与同时期的“定斗”方案相比,康氏“翻斗”方案能够更好地解决枢轮运转问题,与《新仪象法要》中对枢轮运动过程的描述也更接近,再加上李约瑟的肯定,因而逐渐占据上风,而伯斯塔尔则被学界遗忘。

伯斯塔尔之后,从事“定斗”研究的主要是李志超。李志超虽未在《中国水钟史》中引用伯斯塔尔的文献,但二人的设计实属大同小异——都是让枢衡来承担枢轮静止时的全部重量。主要区别在于李志超没有“切断凸轮”,而是发明了“兔头”来帮助枢轮运转。和“切断凸轮”一样,“兔头”在《新仪象法要》中也没有任何文字记载,均系发明者根据原书插图作出的猜想。

对两种方案的溯源可以看出,虽然二者在与原文的吻合程度上有高低之别,但都有不尽如人意之处,即二者都无法在完全不添加于文无据的新设计的前提下实现枢轮的正常运转。朱熹曾说:

元祐之制极精,然其书亦有不备。乃最是紧切处,必是造者秘此一节,不欲尽以告人耳。^[15]

“翻斗”与“定斗”都难以尽如原文,或许正是古人有意保密所致。也正因为如此,“翻斗”或“定斗”都不宜被看作是唯一正确的,而应被平等地视为两种“试验性”方案——李约瑟1964年致王振铎的信件末尾就表达了这一态度:“不过当然所有复原物在若干年内都应该是试验性的”^[14]。由于后人无从得见苏颂原作之貌,这一“试验性”将会持续存在。

参 考 文 献

- 1 管成学,邹彦群. 苏颂水运仪象台复制与研究[M]. 长春:吉林出版集团有限责任公司,2012.
- 2 Needham, J, Wang L, Price D J. Chinese Astronomical Clockwork[J]. *Nature*, 1956, 177: 600—602.
- 3 陈延杭,陈晓. 古天文钟——苏颂水运仪象台复原模型研制[A]. 计时仪器史论丛:第一辑[C]. 苏州:中国计时仪器史学会,1994. 52—67.
- 4 Needham J. *Science and Civilisation in China*[M]. Vol 4; Part 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1965.
- 5 中国大百科全书编辑委员会《机械工程》编辑委员会. 机械工程 II[A]. 中国大百科全书编辑部. 中国大百科全书[C]. 北京:中国大百科全书出版社,1987. 917—919.
- 6 Needham J, Wang L, Price D J. *Heavenly Clockwork: the Great Astronomical Clocks of Medieval China*[M]. London: Cambridge University Press, 1960.
- 7 Combridge J H. The Celestial Balance: A Practical Reconstruction[J]. *Horological Journal*, 1962, 82—86.
- 8 张柏春,张久春. 水运仪象台复原之路:一项技术发明的辨识[J]. 自然辩证法通讯,2019, 41(4): 46.
- 9 胡维佳. 《新仪象法要》中的“擒纵机构”和星图制法辨正[J]. 自然科学史研究,1994(3): 245.

- 10 Combridge J H. The Chinese Water-Balance Escapement[J]. *Nature*, 1964, **204**: 1176, 1178.
- 11 胡维佳. 《新仪象法要》译注[M]. 沈阳: 辽宁教育出版社, 1997.
- 12 陆敬严, 钱学英. 《新仪象法要》译注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2007. 82.
- 13 Burstall A, Lansdale W, Elliott P. A Working Model of the Mechanical Escapement in Su Sung's Astronomical Clock Tower[J]. *Nature*, 1999: 1242—1243.
- 14 王木南, 李强. 李约瑟关于宋代水运仪象台致王振铎的一封信[J]. 中国科技史料, 2004(2): 156—166.
- 15 李志超. 中国水钟史[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2014. 210.

Revisiting the Two Approaches to the Reconstruction of the Driving-wheel in Su Song's Astronomical Clock-tower

XU Siyuan WANG Zheran

(Department of the History of Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The driving-wheel is one of the most critical and challenging mechanisms in reconstructing Su Song's astronomical clock-tower. Distinguished by whether the scoop could turn independently or not, the two approaches were formed known as “flip-scoop” and “fixed-scoop”. This paper demonstrates that John H. Combridge's conception of “flip-scoop” was not only to meet the necessity for accurate timing and proper motion of the driving-wheel, but also resulted from the misleading of several incorrect translations by Joseph Needham. On the other hand, Aubrey F. Burstall was the first to implement the “fixed-scoop” scheme by reconstructing a functioning model, in which he added an interrupter-cam that was not supported by the text. A series of debates between Combridge and Burstall followed on specific issues, such as the independent motion of the scoops. A review of the early scholarship of Su Song's astronomical clock-tower indicates that the two approaches, the “flip-scoop” and the “fixed-scoop,” were not in conformity with the original text. Accordingly, there are further potential studies for the modern reconstruction of this famous ancient clock-tower.

Keywords Su Song's astronomical clock-tower, the driving-wheel, reconstruction, flip-scoop, *Hsin I Hsiang Fa Yao*