

龙尾车提水效能研究

——兼论明清时期欧洲龙尾车缘何未能取代中国龙骨车

苏云梦 石云里

(中国科学技术大学 科技史与科技考古系,安徽 合肥 230026)

【摘要】明末传教士熊三拔与徐光启合编《泰西水法》，西方水利机械龙尾车藉此传入中国。虽然龙尾车得到徐光启等明清士人的大力赞赏，但始终未能在中国广泛应用。文章从提水效能的角度对龙尾车的提水能力进行了理论分析，对比了龙尾车与中国传统提水机械龙骨车之间的优劣，发现龙尾车的提水能力与其形制大小密切相关，其机械效率远不如龙骨车；在明清时期的个体小农经济生产方式主导下，提水效能的不足很可能是龙尾车未能被广泛应用的重要原因之一。

【关键词】阿基米德提水器；龙尾车；龙骨车；提水效能

【中图分类号】S-09；K207 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1000-4459(2017)02-0125-10

A Research on the Water-lifting Efficiency of the Archimedean Screw: Why It Failed to Take the Place of the Traditional Chinese Water-lifting Device in the Ming-Qing Era

SU Yun-meng SHI Yun-li

(Department of History of Science and Scientific Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract: In the late Ming Dynasty, the Jesuit missionary Sabbatino de Ursis worked with Xu Guangqi in compiling the book *Taixi shuifa* (泰西水法, Water Methods from the Grand West), through which the western water-lifting device longwei che (龙尾车, Dragon-tail Pump), the Archimedean Screw, was introduced into China. Although the device was greatly appreciated by a number of Ming-Qing scholars such as Xu Guangxi, it did not win a wide application in China. This thesis try to conduct a theoretical analysis into the water-lifting capacity of the Archimedean Screw from the perspective of mechanical efficiency. After Comparing this device with the traditional Chinese water-lifting device longgu che (龙骨车, Dragon-bone Pump), it found that the water-lifting capacity of Dragon-tail Pump is closely related to its geometrical shape and structure, and its mechanical efficiency is much worse than that of the Dragon-bone Pump. The lower water-lifting efficiency may well be one of the most important reasons why Dragon-tail Pump was not widely applied during the Ming and Qing period when the social production was still dominated by the small-scale farming of individual land owners.

Key words: Archimedean screw; dragon-tail pump; dragon-bone pump; water-lifting efficiency

【收稿日期】2017-03-16

【基金项目】中国科学院科教结合教育创新基金项目(CX2110240008)

【作者简介】石云里(1964-)，通讯作者，男，中国科学技术大学科技史与科技考古系教授、博士生导师，研究方向为中西科学交流史、天文与物理学史。

明末清初,随着传教士的来华,西方的科学与技术开始传入我国。而此时又是我国水旱灾害最为频发的一个时期^①。面对这种局面,致力于科学传教的利玛窦(Matteo Ricci, 1552-1610)便向一直关注农业和西学的徐光启推荐欧洲的水利机械,以期通过相关知识的引进来解决这些问题。在利玛窦的促使下,徐光启(1562-1633)和熊三拔(Sabbatino de Ursis, 1575-1620)于1612年合作完成了介绍西方水利技术的《泰西水法》一书。徐光启认为,中国本土传统的排灌机械龙骨车提水效能欠佳,故他在《泰西水法》第一卷《龙尾车记》中详细介绍西方提水机械龙尾车的同时,还将其与龙骨车进行了比较,从结构机制、提水效能以及适用性等方面说明了龙尾车的优势。由于徐光启的大力推崇,后世一些学者往往将龙尾车作为抗旱排涝的首推器械。但奇怪的是,文献与文物史料中有关龙尾车在中国实际应用的记录却非常之少,说明这种外来的水利机械在明清两代并未得到广泛使用。

对这一现象产生的原因,学界已经有了一定的研究^②。如有些学者通过对明清史料中相关观点的转述等方式,从技术角度,如龙尾车的制作成本、制造工艺、使用与维护等方面说明了龙尾车未能广泛应用的原因^③。也有学者从文化的角度出发,阐述了中国人对龙尾车设计理念中所蕴含的西方文化的天生抗拒,以及对龙骨车代表的中国传统文化的自然亲近^④。这些当然都是龙尾车未能被广泛应用的重要原因,但通过系统阅读古代文献,笔者发现古代关于龙尾车的记录中存有对于其提水效能较差的评价。这启发我们认为作为水利机械,龙尾车提水效能^⑤的低劣可能是决定其未能被广泛应用的关键因素之一,并且有可能是更加重要的因素。然而,目前学界对此问题尚未进行过专门讨论。因此,本文拟从提水效能的角度对龙尾车进行细致研究,并通过与传统龙骨车的对比,结合明清时期的农业生产方式,来对这一问题进行新的探讨。

一、关于龙尾车提水效能记录的矛盾

《龙尾车记》被作为《泰西水法》的开篇第一卷,由此可见龙尾车在徐光启心中的地位。实际上,在徐光启看来,引进龙尾车主要基于以下两点原因。

首先,龙尾车在理论上具有更好的提水效能。我国自古以农业为本,农业灌溉机械自然多种多样,且以龙骨车最为重要。但徐光启认为,龙骨车提水效能较差:“龙骨之制,日灌水田二十亩,以四三人之力,旱岁倍焉,高地倍焉。”^⑥也就是说,在降雨正常的年份利用龙骨车灌田,三四个人一天才能灌溉二十亩,如遇干旱或者高地灌溉能力还会减半。他认为这样的低效率机械会制约农业生产的发展,以至农家常常处于“独其人终岁勤勤,尚忧衣食”的生活状况^⑦。而按照传教士的介绍以及他的理解,他准备

① 陈翀、张静:《明代苏松地区水旱灾害特点与影响研究》,《改革与开发》2015年第3期。

② 王若昭:《清代的水车灌溉》,《农业考古》1983年第1期。郭怀中:《清代安徽科学家齐彦槐》,《安徽师大学报》1993年第1期。张柏春:《明末〈泰西水法〉所介绍的三种西方提水机械》,《农业考古》1995年第3期。赵丹:《对阿基米德的物理学理论及应用传入中国的研究》,内蒙古师范大学硕士学位论文,2005年;熊丽丽:《耶稣会士熊三拔及其中文著述研究》,暨南大学硕士学位论文,2015年。

③ 这些观点多是根据[清]钱泳:《履园丛话》第三卷及[清]郑光祖:《一斑录》杂述六的内容进行转述。

④ 邱春林:《龙尾车的应用史及文化生态考评》,《信阳师范学院学报》2005年第5期。

⑤ 提水效能:本文主要从提水能力和机械效率两个方面进行说明;水车的提水能力主要是指单位时间或单位距离内(每转一圈,每个周期)的提水量。而在小农经济为主的明清时期,提水能力或机械效率两者中任一者有所欠缺,水车都不实用。故提水能力和机械效率任一者有所缺憾,本文都认为水车的提水效能较差。

⑥ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第1页。

⑦ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第1页。

引进的龙尾车在提水效能上则大不相同：“物省而不烦，用力少而得水多。其大者，一器所出，若决渠焉。累接而上，可使在山，是不忧高田……入水不障水，出水不帆风，其本身无铢两之重，且交缠相发，可以一力转二轮，递互连机，可以一力转数轮，故用一人之力，常得数人之功。”^①即它不仅十分省力，而且提水量大，尤其是大型龙尾车提水能力极强。并且通过齿轮相连，一人可使多架水车同时运转，所以一人运转龙尾车的提水效果相当于多人运转龙骨车。

其次，从结构上来说，龙尾车不像龙骨车有鹤膝^②、斗板^③等容易损坏的部件，故不会被水损坏，更不会“枝节一挫，全车悉败焉”^④。所以，在徐光启看来，使用龙尾车“人力可以半省，天灾可以半免，岁入可以倍多，财计可以倍足。”^⑤

由于徐光启的大力推崇，龙尾车即刻引起了明末学者的关注。明末吏科都给事中曹于汴（1558-1634）在《泰西水法》序中用了“精巧奇绝”、“用力约而收效广”^⑥来形容龙尾车，同时期的翰林院检讨郑以伟（?-1633）在为该书所作的序中也称龙尾车“用以取水力省而功倍。”^⑦万历时担任淮安知府的詹士龙甚至曾亲自制作龙尾车，教导农民用以灌田，以省人力^⑧。天启元年（1621），茅元仪将《龙尾车记》收入《武备志》中，并称赞《泰西水法》一书“甚详且笃”^⑨。明末诸生潘游龙也于崇祯年间将《龙尾车记》收录入他的《康济谱》，转述了徐光启对龙尾车的推崇之辞^⑩。

清代也不乏对龙尾车感兴趣的学者。康熙年间，涨潮为善于制作奇器的扬州人黄履庄所写的小传后面附录有一份节抄的《奇器目录》，列有不少源自欧洲的科学仪器、光学玩具与机械，其中的“水法”下列有“龙尾车，一人能转多车，灌田最便。”^⑪但是，作者并没有明确说明，这些“奇器”究竟是黄履庄实际制作过的，还是只是一份目录而已。另外，纳兰性德也根据徐光启对龙尾车的描述，并结合风车的优点，大力推荐风力龙尾车，称其“数百亩田一人足以致之，大有益于农事。”^⑫戴震更是在《龙尾车记》的基础上写成《赢旋车记》^⑬，大加推介。此外，《泰西水法》还被收入康乾年间官修的《古今图书集成》、《授时通考》和《四库全书》^⑭。

到了嘉庆与道光年间，再出现了多条龙尾车仿制的文字记载。

首先是嘉庆十四年（1809），精研西方数理的徐光启五世孙徐朝俊在松江府据《泰西水法》制成龙尾车，并称一个儿童即可运转，不存在脚踏水车的劳累。据说当地知府唐仲冕还将车制刊刻成图，颁发各县^⑮。

嘉庆十八年，江苏吴县的沈培也按《泰西水法》制成龙尾车，试车时让两人转动即可日灌一百亩田地。当地举人沈钦韩将此事记入其《幼学堂诗文稿》，并作《龙尾车歌》一首，赞叹其“一吸可尽万夫川，

① [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》卷1，1612年北京刻本，第2页。

② 鹤膝与斗板是龙骨车提水的关键部件，常与水接触，易被水损坏。

③ [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》卷1，1612年北京刻本，第1页。

④ [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》卷1，1612年北京刻本，第2页。

⑤ [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》曹于汴序，1612年北京刻本，第2页。

⑥ [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》郑以伟序，1612年北京刻本，第1页。

⑦ [清]孙云锦：《淮安府志》卷27，光绪十年刻本，第49页。

⑧ [明]茅元仪：《武备志》卷136《屯田水利一》，明天启刻本，第1页。

⑨ [明]潘游龙：《康济谱》水利卷24，明崇祯刻本，第25页。

⑩ [清]涨潮：《奇器目略》卷6《虞初新志》，康熙三十九年刻本，第24页。

⑪ [清]纳兰性德：《通志堂集》卷17《绿水亭杂识三》，康熙三十年徐干学刻本，第11页。

⑫ [清]戴震：《戴震全集》第2册《赢旋车记》，清华大学出版社，1992年，第703页。

⑬ 曹增友：《传教士与中国科学》，宗教文化出版社，1999年，第170页。

⑭ [清]诸联：《明斋小识》卷10，清刻本。

旱人涝出功不专”^①。

道光十三年(1833),江苏金匱县大旱,习研算学、倡导中西会通的知县齐彦槐因此仿照《泰西水法》制成龙尾车,据称其“一车当翻车之五,人一当十,迅捷奔腾,靡有渗漏。”这项工作甚至还受到时任江苏巡抚林则徐的重视,他亲自试车,结果发现,戽干十亩、深七寸的水塘只需三刻。此次试车影响较大,齐彦槐曾作下《龙尾车歌》以记录当时全城士女观看试车的浩大场面。据说林则徐对试车结果也十分满意(“大喜”),并试图上报朝廷,但却没有结果^②。次年,林则徐领导了白茆河的疏浚^③。据郑光祖《一斑录》记载,这次疏浚曾经使用过龙尾车,但却作出了“机虽巧而终藉人力,且制造匪易,倘有损伤修葺为难,不如当地水车为便易”的评价^④。

同样据《一斑录》记载,道光十六年,江苏淮安清江浦在治河中需要抽水工具,便花费三千金,造成“可以自为运动”的大型龙尾车,虽然“试于池沼,立刻告涸”,但试车时不但扛抬需要百人,而且“运转甚重,推挽亦必多人,才试一二而关键已坏”,所以终遭废弃^⑤。

另外,同时期江苏吴门的沈狷鸥也按古法制作了风力龙尾车。金匱县学者钱泳一方面称其“不须人力,令车盘旋自行,一日一人可灌田三四十亩”,但又说此车“只可用之北地,不可施之江南,且一车需费百余金,一坏即不能用……若是日无风便不得水,总之不如水车之妙。”^⑥

咸丰七年十月二日(1857),赞同对西学采取“师夷之长技以制夷”策略的冯桂芬(1809-1874)在苏州永仓试验龙尾车^⑦,并称赞龙尾车为垦荒必备之具^⑧。

当然,这一时期也有一些对龙尾车进行纯文字性转述的学者。例如,长于水利的吴邦庆在他的水田耕作专著《泽农要录》中就介绍了龙尾车,并依循《泰西水法》赞誉其“一人用之可当数人,若以灌畦约省工夫五分之四。”^⑨他希望将其引入北方。到了光绪三年(1877),善化知县吴兆熙在《善化县志》中也转述徐光启描述龙尾车的原话,并予以推崇。

从以上这些记载和仿制的案例可以看出,对龙尾车仅进行纯文字转述的人,都承袭了徐光启的观点,认为龙尾车不仅省力而且提水量大,一人对其做功相当于多人对龙骨车做功,机械效率较高。但在实际仿制的过程中,后世对龙尾车的看法却出现了分歧。试车者本人和推崇它的人都赞叹龙尾车提水效能极好,尤其是做过试车实验的齐彦槐和沈培。前者称他仿制的龙尾车“一车当翻车之五,人一当十”,后者说他的两人用龙尾车每日可灌溉一百亩。但另外一些人认为龙尾车本身存在不少缺陷。尤其是郑光祖,他称龙尾车除了制作困难、成本较高、笨重易坏之外,而且运转十分费力,需要耗费过多人力,不及本土的龙骨车。

那么龙尾车的提水能力到底如何,运转起来是否省力,与龙骨车相比机械效率究竟谁高谁低,要解答这些问题,还需对龙尾车的提水效能进行更深入的研究。只有这样,才能对龙尾车在中国为何长期没能得到广泛推广作出更全面、准确的解释。

① [清]沈钦韩:《幼学堂诗文稿》诗稿卷4,嘉庆十八年刻道光八年增修本,第20页。

② [清]方浚颐:《二知轩文存》卷34,光绪四年刻本,第18页。

③ 姜正成主编:《林则徐年谱》,《禁烟英雄林则徐》,海潮出版社,2013年,第235页。

④ [清]郑光祖:《一斑录》杂述六,道光舟车所至丛书本,第5页。

⑤ [清]郑光祖:《一斑录》杂述六,道光舟车所至丛书本,第5页。

⑥ [清]钱泳:《履园丛话》卷3,道光十八年述德堂刻本,第13页。

⑦ 冯芳缙:《冯申之先生日记手稿》第1册,藏上海图书馆。

⑧ [清]刘锦藻:《清续文献通考》卷2,民国景十通本,第20页。

⑨ [清]吴邦庆:《泽农要录》卷5,道光刻本,第1页。

二、龙尾车提水效能的分析

要弄清龙尾车的提水效能,不仅需要考察龙尾车在一个单位限度内提水量的大小,还需了解提一定量的水要对龙尾车所做功的多少。前者体现了龙尾车的提水能力,可以通过理论计算得出,而后者则关乎龙尾车在实际操作中的实用性问题。即使水车提水量很大,但如果需要外力对水车做过多的功,即机械效率很低,那么在生产力不发达的社会背景下水车也难以实用。所以本文将分别就此两点展开研究。

龙尾车作为提水机械因其形似龙尾,且龙尾是水宛委而上的象征,故得此名^①。根据徐光启在《泰西水法》中的介绍,龙尾车的形制架构主要分为六个部分,即:轴、墙、围、枢、轮、架^②。先以圆木做轴,在轴上借助勾股定理、等分线等几何方法绘成阿基米德螺旋线,沿螺旋线建立螺墙,用窄木板围之形成围筒,再根据河岸以一定角度设立枢架即可。顺着龙尾车螺旋转动时进入水的方向转动车身,水即可从底部沿着螺墙反向螺旋上升。所以当龙尾车稳定运行时,其内部水的轨迹是阿基米德螺旋线,即可以理解为水同时在做匀速圆周运动和匀速直线运动。

要定量研究龙尾车的提水能力,就需要考察单位时间或单位距离内,龙尾车的提水量。由于水在龙尾车内部做螺旋运动,当转速增加时,单位时间内提升的水量同样会增大;并且当龙尾车的外半径相对于内半径增大时,单位时间内的提水量也会不断增大。因此要对龙尾车的提水能力做定量研究,则既要确定转速,又要确定其几何形制。故本文将考察龙尾车每旋转一个周期的提水量大小,以此来判定龙尾车的提水能力。由于此种情况下,内外半径比、周期比、叶片数以及安放的斜率都是影响龙尾车提水能力的重要因素,所以本研究将在这四个几何参数确定的情况下进行。

然而《泰西水法》中龙尾车的这四个几何参数并未都完全确定,如其中对龙尾车墙高的描述:“八分其轴长,以其一为墙之高,可减也不可加也……—以下任意作之”^③,墙高直接影响着外径的大小,墙高不固定外径大小就不确定,那么内外半径比就无法确定。此外,关于墙的数量(即叶片的数量)也是:“或二之或三之四之”^④,没有唯一的数值。所以,要定量研究龙尾车的提水能力,就必须先确定这四个几何参数,而 Michela Cigola 和方一兵的研究^⑤为解决这一问题提供了重要线索。他们通过对比《泰西水法》中有关龙尾车的记叙与插图和拉丁文版《建筑十书》第十书第六章中螺旋提水机的内容^⑥,发现《泰西水法》中的龙尾车是从《建筑十书》中的螺旋提水机翻译而来,且维特鲁威螺旋提水机^⑦中影响提水效能的几个几何参数都是唯一确定的。又经过比对,《泰西水法》中对龙尾车几何形制的规定是通过对比维特鲁威螺旋提水机某些部件几何数据的扩展而得出,如墙高的规定,《建筑十书》中要求其高度能

① [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第2页。

② [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第2页。

③ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第5页。

④ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷1,1612年北京刻本,第5页。

⑤ Michela Cigola and Yibing Fang, Preliminary Study of the Work of Xu Guangqi in the Technical Knowledge in the 17th Century: from the Perspective of Drawing and Representation, Proceedings of 2015 IF To MM Workshop on History of Mechanism and Machine Science, May26-28, 2015.

⑥ 《建筑十书》中的螺旋提水机是阿基米德螺旋提水机的一种。Michela Cigola 和方一兵对比的版本主要包括1513年版 Giocondo 所著与1521年版 Cesariano 所著。

⑦ 由于《建筑十书》的原始作者是维特鲁威,所以本文将《建筑十书》中这种尺寸的螺旋提水机称为维特鲁威螺旋提水机。

使筒径达到轴长的八分之一,而《泰西水法》规定墙高为八分之一及以下即可。此外,关于叶片的数量《泰西水法》给出的数值也是涵盖了维特鲁威螺旋提水机的数值。可以说维特鲁威螺旋提水机是《泰西水法》中龙尾车的原型。所以可通过对维特鲁威螺旋提水机每周期提水量的理论推算,来考察龙尾车的提水能力。

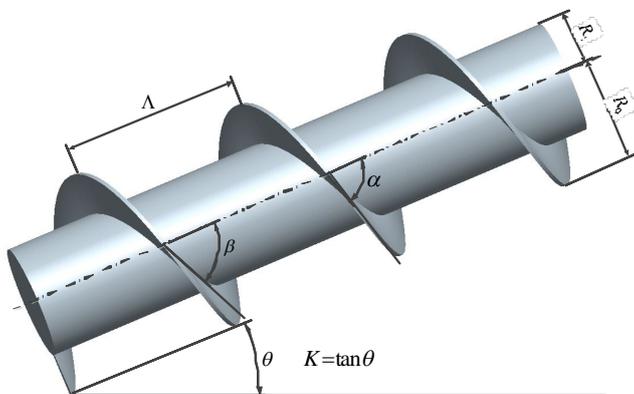


图1 螺旋提水机内部结构图

说明:为螺旋提水机叶片的周期, θ 为提水机与水平面夹角, R_1 为轴的半径即内半径, R_0 为外半径, R_1/R_0 为半径比, K 为斜率。

实际上,早在 2000 年,德国德雷塞尔大学数学系教授 Chris Rorres 就已经利用数学方法对阿基米德螺旋提水机的机械性能做了深入的研究^①。他根据维特鲁威螺旋提水机的几何形制,忽略掉螺旋叶片的厚度、机器提水时产生的泄露、水车运转时底部刚要进入的水与顶部即将排出的水,以及围筒部分的厚度,将其简化为一个理想的几何模型,并规定水车以适当转速匀速旋转,利用数学建模的方法对维特鲁威螺旋提水机每周期的提水量进行计算。取斜率 $=3/4$, 半径比 $=1/2$, 叶片数 $=8$ 以及周期比^② $=3/8$, 最终得出提水机每周期所能提升的水的体积为 $V_t=1.68R_0^3$ (其中 V_t 表示螺旋提水机内部每个周期包含的水的体积, R_0 为外半径)。并且维特鲁威螺旋提水机运转一个周期等于提水机旋转一周,所以此即提水机每转一圈的提水量。并且该文作者通过计算机模拟得出,无论螺旋提水机的叶片为多少,要使螺旋提水机的提水能力最优,半径比都应保持在 0.53。由于维特鲁威螺旋提水机的周期比也在最优值 0.3 附近,所以其提水能力已经相对完美。

《泰西水法》中对龙尾车的安置方法和相应的大小有以下描述:“言句四,股三,弦五,则岸高九尺者,轴之长当一丈五尺也。凡作轴,皆度岸高,以三五之法准之。二十五分之二者,如轴长一丈,则径八寸。”^③可见,其中龙尾车的架设与维特鲁威螺旋提水机相同,都是沿边长为 3、4、5 的直角三角形的斜边架设,斜率都为 3/4。并且,二者的周期也相同,都是以轴周长的八分之一来等分轴长得到等分点,继而画成螺旋线来确定的周期。不过,其叶片数可以是 8,也可以如原文中所说的那样变化:“轴得一墨焉,则得一墙焉,一沟焉,水得一道焉,或二之,或三之四之以上同于是。多则均,一则专,惟所为之。”^④另外,该水车半径比也是变化的。由于其内径做法为“圆木为轴……二十五分其轴之长,以其二为直径”^⑤,所以内半径大小是轴长的 1/25。书中关于墙高的规定是“八分其轴长,以其一为墙之高,可减也,

① Chris Rorres, The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw, Journal of Hydraulic Engineering, January 2000, p.72-80.

② 周期比是指:螺旋本身的周期与螺旋提水机能够圈入水的情况下的螺旋的最大周期的比值。

③ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷 1, 1612 年北京刻本,第 3 页。

④ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷 1, 1612 年北京刻本,第 3 页。

⑤ [明]熊三拔、徐光启:《泰西水法》卷 1, 1612 年北京刻本,第 3 页。

不可加也”^①；又“一以下，任意作之，故曰可减不可增；一法，若欲为长轴，则墙之高与轴之径等”^②；而外半径是内半径加上墙高，所以，外半径的大小也取决于轴的长短。当轴长较短时，外半径的取值不大于轴长的 $33/200$ ，则半径比一定小于 0.24 ；而轴长较长时，外半径则不能大于轴长的 $3/25$ ，那么龙尾车的半径比必小于 0.33 。总而言之，《泰西水法》中龙尾车的半径比与最优值 0.53 相离甚远。所以其理想模型每周期的提水量一定小于 $1.68R_0^3$ 。但是由于这种龙尾车的几何结构与维特鲁威螺旋提水机完全一致，并且其斜率、周期都与该提水机相同，唯有叶片数和半径比是不确定值，所以无论龙尾车到底有几个叶片，半径比具体又是多少，其每周期提水量与外半径的函数关系都是 $V_t=aR_0^3$ ，其中 a 是任意常数。

仔细分析公式 $V_t=aR_0^3$ 可以发现，当 R_0 取值非常小时，龙尾车每周期的提水量会很小，那么其每转一圈的提水量也就很小。以在贫困地区所使用的最古老的阿基米德螺旋提水器为例，为了保证其在实际生产应用中的提水效率，埃及人至今用它所达到的提水高度被限制在在 1m 以下（通常为 0.75m ）^③。为了考察小型龙尾车的提水能力，笔者选定其提水高度 0.75m ，那么轴长为 1.25m ，并采用 $V_t=1.68R_0^3$ 的理想模型公式。根据《泰西水法》中的规定，若将其当成较短的轴长，因龙尾车内半径为轴长的 $1/25$ ，即 5cm ，则外半径必小于 0.20m ，所以理想状态下每周期提升水的体积是绝对小于 0.013m^3 。加之实际使用时，会有摩擦阻力、漏水、叶片等部位占据空间等因素，所以龙尾车每转一圈的提水量是远远小于 0.013m^3 ；若将其当成长轴计算，则外半径为 0.15m ，理想状态下每周期的提水量必小于 0.005m^3 ，那么每转一圈的实际提水量则远远小于此数值。可见，在生产力低下的地区，用于日常提水的小型龙尾车的提水能力相当有限。

但有趣的是，当 R_0 取值较大时尤其大于 1m 以后，随着 R_0 的增长， V_t 会以 R_0 的立方倍速度增长。也就是说，当龙尾车直径很大时，每转一圈的提水量就会非常之大。所以形制大的龙尾车确实可以达到“一器所出，若决渠焉”的效果。由此可见，历史上有关龙尾车此类的评价是比较贴合实际的。但是，形制大的龙尾车是否真的十分节省人力，以至于一人一天对龙尾车做功使龙尾车提水量是相同情况下龙骨车的数倍？要回答这个问题就需要先弄清龙尾车的机械效率。

由于机械效率是在实际操作过程中输出能量比上输入时做功得出的，而提水机械在运行过程中必定存在摩擦、漏水等因素，所以机械效率只能通过实际实验测得。1986年，联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO)^④出版了一本名为《提水器》(Water lifting devices)的著作，里面详细介绍了世界各地提水装置的性能与使用情况，以帮助贫困地区解决农业灌溉问题。书中对自古以来世界各地的传统提水机械做了详细的调研和实验研究。其中第三章对于出现在罗马时代以前，从埃及流传下来的木制阿基米德螺旋提水机进行了详细介绍。根据联合国粮农组织成员在埃及的调研和反复实验，作为低水头水利机械的螺旋提水机，使用时所摆放角度应在 30° 到 40° 之间，且机械效率在 30% 以内^⑤。由此可见，龙尾车的实际机械效率确实较低。

① [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》卷 1，1612 年北京刻本，第 5 页。

② [明]熊三拔、徐光启：《泰西水法》卷 1，1612 年北京刻本，第 6 页。

③ W.K.Kennedy and T.A.Rogers, Human and Animal-powered Water-lifting Devices: a State-of-the-art Survey, Intermediate Technology Publications 1985, p.15.

④ 该组织为帮助提升发展中国家的农业生产而建立，拥有遍布世界各地的机械学家、农艺学家、社会学家、统计人员等为其工作。

⑤ P. L. Fraenkel, Water Lifting Devices, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986, p.86.

三、龙尾车与龙骨车提水效能的比较

龙骨车在早期被称为翻车,是中国明清时期应用最为广泛的提水机械。翻车自东汉出现后经不断改进,至宋代时已大体定型,其结构、功能在此后基本未变。从驱动力上来说,龙骨车主要分为人力、畜力、水力、风力四种类别。由于地理环境和经济条件的限制,人力龙骨车成为南方最常见的灌溉机械,人力龙骨车又以脚踏型最为普遍^①。关于龙骨车的提水能力,明清时期的著作中给出了一些定量的记载。如明末宋应星《天工开物》在介绍龙骨车时提到:“大抵一人竟日之力,灌田五亩。”^②清初方以智《物理小识》中则说:“龙骨之制,日灌水田二十亩,以四三人之力。”^③清中晚期的《松江府志》中也说:“凡一车用三人至六人,日灌田二十亩。”^④但至于其一天工作几小时,具体提水至多高,灌溉一亩田需要多少水,上述文献对这些数据均未作交代。

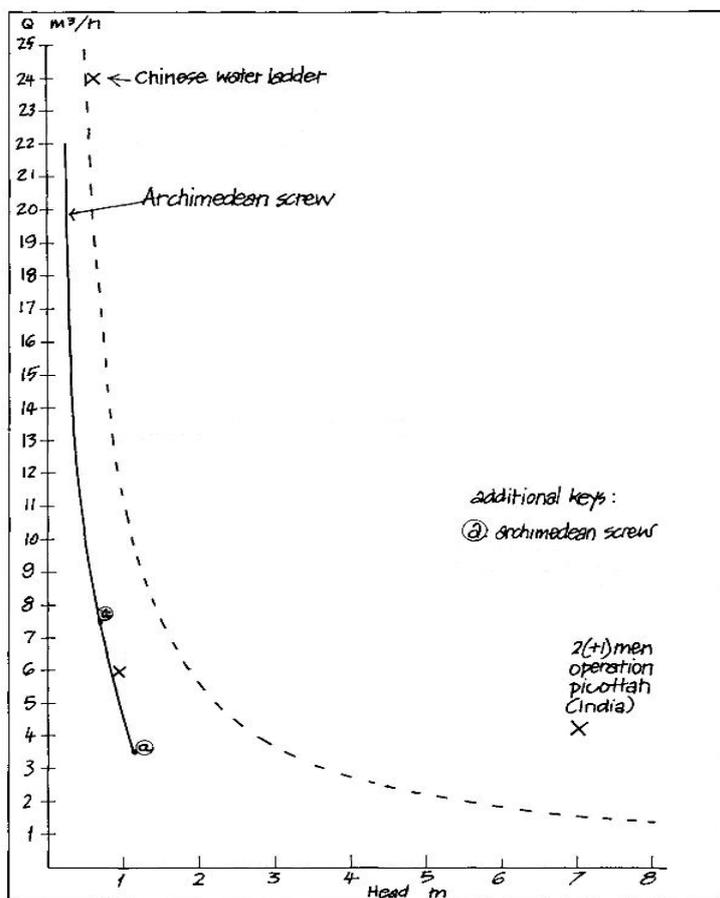


图2 不同种类的提水机单位时间内提升的水量 Q 与提水高度 Head 的关系图

说明:图来自于 Human and Animal-power Water-lifting Devices: a State-of-the-art Survey 一书第 5 页,笔者清除了原图中与龙尾车和龙骨车不相关的实验曲线)

- ① 方立松、惠富平:《中国传统水车应用与推广的地域环境因素》,《中国农史》2010 年第 1 期。
- ② [明]宋应星:《天工开物》上卷“乃粒第一·水利”,商务印书馆,1930 年,第 83 页。
- ③ [清]方以智:《物理小识》卷 8,清光绪刻本。
- ④ [清]宋如林修,孙星衍等撰:《松江府志》卷 5,嘉庆刻本,第 516 页。

由于世界各地仍有很多贫困地区需要依靠人力进行农业生产,所以传统水车的提水能力问题在当代依然受到重视。总部在英国的“中间技术开发集团”(Intermediate Technology Development Group, ITDG)就是一家致力于援助贫困地区解决农业水利问题的慈善机构。20世纪80年代,该机构对发展中国家农村地区农业活动中需要使用的人力、畜力提水机开展了详细调查,并在印度进行了相应的实验研究。调查和实验的结果于1985年编著出版^①。他们以发展中国家农村地区成年人在提水机上连续工作数小时可输出的功率作为提水实验的输入功率,利用控制变量法,让同样两位成年男性去踩踏不同种类的脚踏式水车,由此得出多组实验数据,并分析绘制成图(图2)。

图中恰好包含了双人脚踏提水机提水实验中脚踏式龙骨车与脚踏式龙尾车的实验曲线。观察它们的Q-Head关系图不难看出,在提水高度相同的情况下,龙尾车的提水量一直低于龙骨车;且随着扬程的增加,两种水车的提水量都下降迅速,尤其是龙尾车;并且龙尾车的最佳提水高度在一米之内,超出一米时单位时间内的提水量过小,而在两米的提水高度之内,龙骨车单位时间的提水量都较为可观。可见,作为日常使用的小型人力水车,龙尾车的提水能力不及龙骨车。

此外,由于是同样的两人进行提水实验,所以水车的输入功率相同,那么单位时间内人对水车做的功也相同;而提水高度相同时,龙尾车的提水量低于龙骨车。所以,从此处也可看出,龙尾车的机械效率低于龙骨车。联合国粮农组织已经通过实验测得龙尾车的机械效率为30%,所以本文接下来将讨论龙骨车的机械效率问题。

在2004到2006年之间,台湾南台科技大学机械工程系古机械研究中心曾参与了苏北地区传统立轴式大风车与龙骨水车的复原项目。其后,该中心于2011年延续了对龙骨车的复原实验研究。他们按照古代农书中对龙骨车的记载,根据苏北地区传统工匠复原龙骨车的技术经验,从材质、构造、尺寸等方面对龙骨车进行1:1复原。复原试车成功后,再模拟古代的用车条件,对不同种类的龙骨车进行机械效率测量实验,经分析得出,龙骨车的平均机械效率为50%。并且通过多组实验对比发现,槽筒缝隙、刮板高度对水车的机械效率有着较大影响^②。而联合国粮农组织成员于60年代在泰国用2-3马力的发动机作动力对槽深19cm,宽19cm,刮板高18cm、宽15cm、间隔20cm的传统木制龙骨车进行机械效率测量实验,其测量得出的平均机械效率为40%以上。但该实验中利用的龙骨车刮板高度小于槽的深度,且刮板与槽两侧之间的间隙过大,这些因素造成了实验测得的机械效率大大降低^③。很明显,这两次实验的数据基本上互相吻合、相互印证。实际上,中国在80年代也进行过相关的实验^④。

通过以上对比可以发现,明清时期应用最为广泛的脚踏式龙骨车在提水能力方面与脚踏式人力龙尾车相比,龙骨车远胜于龙尾车;其次在机械效率方面,龙骨车也高出龙尾车不少。总而言之,作为小型制的人力提水机械,龙骨车的提水效能相对优于龙尾车。

四、讨论

龙尾车通过《泰西水法》传入中国后广受明清知识人的赞赏与推崇。徐朝俊、齐彦槐、林则徐等都对龙尾车进行仿制和使用,但令人意外的是,他们的工作并没有使龙尾车得到进一步地广泛应用,以至取代中国传统的龙骨车。本文从提水能力和机械效率两个方面对龙尾车的提水效能进行细致研究,

① W.K.Kennedy and T.A.Rogers, Human and Animal-powered Water-lifting Devices, Intermediate Technology Publications 1985.

② 李宜伦:《立轴式风力龙骨水车的受力与效率分析》,南台科技大学硕士学位论文,2012年。

③ P. L. Fraenkel, Water Lifting Devices, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986, p.95.

④ 关于这些材料的详细证据,我们将在接下来的工作中做进一步的展示与分析。

发现龙尾车的提水能力直接受到形制、大小的影响。当龙尾车外半径很小时,每周期的提水量较少,提水能力较差。将之与日常应用的小型龙骨车对比,单位时间内龙尾车的提水量远小于龙骨车,同时龙尾车的机械效率也较低,所以小型龙尾车的提水能力相对小型龙骨车较差。而当龙尾车较大时,由于其提水原理的特殊性,随外半径的增加,龙尾车每周期的提水量以立方速度增加,此时龙尾车每周期的提水量巨大,正如徐光启等人认为的:“其大者,一器所出若决渠焉”。但在当时那种生产力水平低下的社会,实际应用过程中更需要关注的是关乎提水机实用性的机械效率。相对于提水量,机械效率是一个固定值,龙尾车的机械效率在30%左右,而龙骨车的机械效率在50%左右,可见龙尾车的机械效率明显低于龙骨车。也就是说,提相同量的水到同样的高度,龙尾车需要的人力输入远高于龙骨车。总体而言,小型龙尾车的提水能力和机械效率都低于龙骨车,所以小型龙尾车的提水效能比不上龙骨车。而当水车形制很大时,虽然龙尾车的机械效率较低,耗费人力较多,但只要有足够的动力输入,龙尾车每转一圈的提水量是龙骨车所无法比拟的。

既然大型龙尾车的提水能力较好,又加之明清士人的大力推崇,其为何在当时的中国未能广泛应用?前人提及的龙尾车制造成本高、工艺难度大、搬运不便、一旦毁坏不易修理等因素当然都是其未能被广泛应用的原因。但本文单就提水效能而言,提水能力强的大型龙尾车也无法取代龙骨车,这是当时中国的个体小农经济生产方式所决定的。中国古代以家庭规模为农业生产单位,人是明清时期最主要的劳动力。周期提水量大的大型龙尾车,由于机械效率较低,所以运行起来需要的动力输入巨大,要使其正常运转就需要依靠多人协作。而个体农民家庭生产处于自给自足的小农经济状态,每家都有自己的农田需要灌溉,这与集体协作的生产方式互相矛盾。也许地方政府进行试车实验时可以召集大量百姓一起协作转动龙尾车,使其达到“迅捷奔腾”的提水效果。但在农民的日常生产中,难以实现。更何况中国本土拥有提水效能稳定的龙骨车,二三人踩踏即可应对正常灌溉需要,加之制作简单,维护容易,制作成本低,每家农户都很容易拥有,龙尾车自然不占很大优势。

所以,当欧洲的龙尾车传入中国后,虽然有像徐光启一样对西方科学技术抱有极大信心和期望的明清士人对其大加夸赞并极力推广,但其终究未能被广泛应用到农业生产中,这样的结果也属正常。

[本课题研究得到了德国汉堡应用科学大学 Constantin Canavas 教授的指点与帮助,论文初稿又曾在上海交通大学科学史与科学文化研究院 2016 年冬至会议上报告,其间曾得到评议老师和与会代表的多方指正,在此一并表示感谢。]

[参 考 文 献]

- [1] 王若昭. 清代的水车灌溉[J]. 农业考古, 1983, (1).
- [2] 张柏春. 明末《泰西水法》所介绍的三种西方提水机械[J]. 农业考古, 1995, (3).
- [3] 赵 丹. 对阿基米德的物理学理论及应用传入中国的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学硕士学位论文, 2005.
- [4] 熊丽丽. 耶稣会士熊三拔及其中文著述研究[D]. 广州: 暨南大学硕士学位论文, 2015.
- [5] 邱春林. 龙尾车的应用史及文化生态考评[J]. 信阳师范学院学报, 2005, (5).
- [6] W.K.Kennedy and T.A.Rogers,. Human and Animal-powered Water-lifting Devices: a State-of-the-art Survey, Intermediate Technology Publications [M]. 1985.
- [7] P. L. Fraenkel,. Water Lifting Devices[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986.