

明末《奇器图说》译介带来的设计新思想

中国艺术研究院 邱春林（研究员、博士生导师）

一、《奇器图说》译介的机械与中国同类机械的比较

《奇器图说》卷三所介绍的西洋机械形制有：1、杠杆；2、等子；3、带滑车、辘轳或绞车的起重机；4带飞轮和曲拐的起重机；5、绳带式输送机；6、鼓轮式脚踏起重机；7、带十字推杆的起重机；8、齿轮系引重机；9、带十字辘轳的引重机；10、双轮式引重机；11、齿轮传动的井上辘轳；12、组合式龙尾车；13、活塞式水泵；14、由塔式风车驱动的念珠式水泵；15、活杓；16、带锥形凸轮的汲水机；17、木杓桔槔汲水机；18、鼓轮式脚踏水泵；19、旋转水泵；20、踏轮式人力磨；21、鼓轮式脚踏转磨；22、双拐曲轴式转磨；23、重锤式转磨；24、马拉车载营地磨；25、卧式风车磨；26、塔式风车磨；27、水力磨；28、水力解木机；29、由摇杆和曲柄推动的解木机；30、弹力解木机；31、畜转轮盘解石机；32、转碓机；33、旋转书架；34、水日晷；35、代耕；36、压力式水銃。

对于明末的中国人而言，以上这些机械哪些是新颖的形制？又凝聚着哪些新技术和新工艺？

1、技术和手法的比较

机械是技术经过人为的努力而形成的物化状态，其物化的过程中设计师可能采取不同的手法，也就有了相同的技术被物化成形制各异的机械的可能。马克思曾把一般的机械分为动力机、传动机构和工作机三部分，¹我们据此来分析比较《奇器图说》所译介的机械与中国同类机械的技术和手法问题。

首先，我们看工作机，《奇器图说》中用来起重的有杠杆、等子、滑车、绞车、输送斗；用于引重的有绞车和辘轳；用于升水的有辘轳和吸筒；用于粮食加工的有石磨；用于解木和解石的有金属锯子；用于耕作的有铁犁。这些工作机的形制以及作用于对象的工作方式与中国古代同类功能的机械大同小异。

其次，从利用动力的技术看，《奇器图说》所译介的西洋机械分别采用了人力、风力、水力、重力、畜力、弹力、浮力和压力来驱动机械，在动力机部分创制了绳带、曲拐、飞轮、十字推杆、鼓轮式脚踏机、水轮、风扇等。就如何开发自然力、节省人工而言，中国当时已有的技术看来也并不比欧洲逊色。

中国很早就开发了人力之外的畜力、水力、风力，弹力、浮力、压力，甚

¹ 马克思：《资本论》第一卷，北京：人民出版社，1975年第一版，第410页。

至还有热力，满足结合生产生活的需求的实用机械可谓应有尽有。利用人体重力而工作的踏碓早于西汉就已出现了。发明船用风帆的时间早于东汉，南宋以后风力驱动的机械被广泛用于农业灌溉、粮食加工领域。畜力用于固定的机械作业约始于汉代。宋元以后，弹力弓被用于棉花加工作坊中。水力的运用最早是用其浮力，水轮发明以后，水的利用最为广泛：水碓、翻车、筒车、春磨等水力驱动的机械很早已用于农事上。

在动力机的结构设计方面，欧洲人创制的动力机中，绳带、曲拐、十字推杆水轮、风扇等都能在中国的传统机械中发现与它们相似的造型和结构。只是飞轮和鼓轮式脚踏机这两种动力机在形制上对于中国的工匠和学者来说有些陌生，因为中国人通常习惯于采用更为轻巧的机械作为动力机，以便于工人操作。从理论上讲，作为动力机，飞轮和鼓轮式脚踏机可以实现机械增效以节省人力，达到以小力转重器的目的。李约瑟对于鼓轮式脚踏机的实际功用提出过怀疑，他认为，此动力机虽然结构新颖，但“对于经常熟练地使用径向踏板的汉民族来说是多余的笨主意。”²

最后，我们来看传动机部分。传动机是复杂机械的核心部分，也是最凝聚技术参数，体现设计者巧思的环节。在传动机构方面，《奇器图说》所译介的几十种机械主要使用的传动方式有绳带传动、链传动、齿轮和齿轮系传动、凸轮传动、杠传动和活塞式传动等。简单机械一般采用一机一式，大部分复杂机械都采用了组合方式。有的是不同性质的传动方式的组合，如“起重”第十一图的传动机包括齿轮系和绳带传动；“取水”第五图的机械采用了凸轮传动和杆传动的组合；有的则属于同一种传动方式的多次重复性组合，如“旋转书架”内部包含三组齿轮的组合关系。

与西洋机械的类似的传动结构在我国古代的文献中也属常见。《天工开物》载牛转绳轮凿井机和琢磨玉石用的磨床都属于绳带传动。《农书》所载高转龙骨车和拔车皆采用了链传动。指南车、计里鼓车以及《新仪象法要》所载的水力天文仪器和计时器等都利用了齿轮来传递动力。连磨、水磨、水碓、船磨等也使用了相当成熟的齿轮传动技术。我国关于凸轮被应用的记载也很丰富，如水碓，水力天文仪器、计里鼓车等传统机械上都有凸轮装置。采用杆传动的机械在我国就更普遍，如《天工开物》所载脚大罗、水击面罗、人力碓等器都采用了杆传动机构的设计。（图 7-1）活塞传动是间歇性的运动，一般认为，用于液体的压力式泵活塞不是中国发明的技术，明末，徐光启特意与利玛窦一道将此机械引入中国，王徵设计恒升车时，也是直接参考《泰西水法》一书。但李约瑟对于此器的发明权问题提出过质疑，他认为，中国传统盐井所用的深水汲筒、水利用的唧筒、军事用的喷火器等都具备与活塞水泵相似的技术原理。至于为何此器没有在明末传

² 李约瑟：《中国之科学技术史》第四卷第二分册“机械工程”，第 236 页。

教士到来之前出现在中国大地上，结论是中国高效的传统水排抑制了人们设计活塞式水泵的热情。据此说来，《奇器图说》所引进的传动机构总体上没有超出中国古人的创制。

但也有例外，那就是西洋古老的升水机械——龙尾车。李约瑟认为，《奇器图说》所涉及的欧洲机械传动技术中，惟有这种产生于古希腊时期的龙尾车对于中国人来说是全新的技术。³

龙尾车的传动机构被包裹在机械内部，其基本的结构是由倾斜的板叶连续而成的螺旋式空间。当整体机械转动时，水由进水口通过内部的螺沟逐步上升到出水口。这种螺旋式传动方式在原理上与齿轮传动是相似的，只不过前者利用了虚空之力，后者利用了金属实体之力。

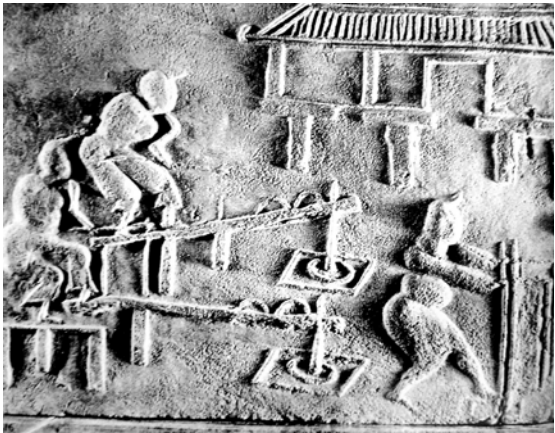


图 7-1 四川彭山出土东汉舂米画像砖，采自《中华古文明图集·神农卷》

螺旋与齿轮有一种天然的亲缘关系，我们注意到，欧洲中世纪的工匠和学者对于螺旋和齿轮传动技术有相当程度的着迷。欧洲用于时间计量的仪器十分发达，古代和中世纪有日晷、漏壶等，中世纪后期开始出现粗笨的摆轮钟，13 世纪以后哥特式教堂尖顶上已流行安置“齿轮套齿轮”的机械摆钟了（如现存于伦敦南肯辛顿科学博物馆的多佛报时钟就属于此类）（图 7-2）。欧洲人在近代机械设计时表露出对螺旋和齿轮的着迷与长期的摆钟的应用史有关。A·P·厄舍认为，“一般说来，在 16、17 世纪，值得注意的是齿轮和螺纹使用的巨大进步，有效的机械作用代替了器械重力或人力操作产生的运动。”⁴

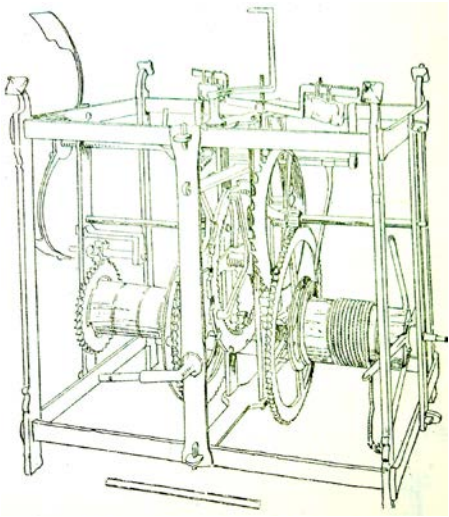


图 7-2 多佛钟，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

在蒸汽动力尚未广泛利用的年代，动力资源主要靠水力、人力和畜力，但欧洲人在使用齿轮系和螺旋传动方面有层出不穷的创意。就《奇器图说》所译介的机械类型看，欧洲人频繁利用螺旋和齿轮传动技术来设计各类复杂机械：鼓轮式脚踏起重机、带十字推

³ 李约瑟著：《中国之科学技术史》第四卷第二分册“机械工程”，科学出版社、上海古籍出版社，1999 年，第 236 页。

⁴ 查尔斯·辛格等主编，戴吾三等主译：《技术史》第三卷，科技教育出版社，2004 年，第 224 页。

杆的起重机、齿轮系引重机、双轮式引重机、齿轮传动的井上辘轳、组合式龙尾车、由塔式风车驱动的念珠式水泵、旋转水泵、踏轮式人力磨、鼓轮式脚踏转磨、双拐曲轴式转磨、重锤式转磨、马拉车载营地磨、水力解木机、由摇杆和曲柄推动的解木机、畜转轮盘解石机、旋转书架等这些机械皆是以齿轮或螺旋作传动机，使小的动力转化成大的机械力。

《奇器图说》所译介的机械从一个侧面反映了 16、17 世纪欧洲机械设计大量使用齿轮和螺纹的特点。这一独特做法提高了机械部件的精度和各部件之间的咬合程度，由此而增强了机械内部结构的系统性，保证机械运动有较好的稳定性。马克思曾高度评价过水磨在机器发展史上的重要地位，⁵其原因是水磨自发明之日起就具备完整的机器结构，并且其传动机构使用齿轮系。

虽然齿轮机构在中国的发明时间不能确定，但据考古和文献资料所示，“可以推定发明年代当不晚于汉代。”⁶可能秦时中国就已经使用过齿轮，它在东汉时则使用得较为普遍，水磨、计里鼓车、指南车、浑天仪等机械都必不可少齿轮。可是齿轮这一出现很早的机件在后来的日用机械设计中没有扮演重要角色，中国的学者和工匠似乎没有表现出欧洲人对齿轮技术的那种偏向。英国学者白馥兰女士指出，虽然中国的耕作技术对 17 世纪的欧洲农业改革产生过重大影响，具体表现为引进和发展了中国的曲面铁犁壁的犁、种子条播机和中耕机，但欧洲人对来自中国的机械并非采取完全仿制的态度，而是利用不同的机械原理对它们加以重新设计。以种子条播机为例：“它们通常具有坚固的带轮子的矩形架来支撑一个很宽的漏斗形种子箱，给种子开沟的一个或几个铁制开沟器，以及相应数目的排种管以使种子掉落在沟里。……这种供料装置或者构成轮轴的一部分，或者由链条传动装置或齿轮间接驱动。这种一贯使用旋转供料装置的特点正是西方和东方的条播机的最基本的区别。”⁷她很肯定地认为，利用螺旋传动方式是欧洲人的集体偏爱。

张柏春提出，“从达·芬奇的设计和王微等人介绍的机械知识来看，中国机械技术在机械原理、制造工艺等某些方面已经开始落后于西方了。”⁸事实上，在蒸汽动力和电力没有出现之前，中西方的设计师手里掌握的技术其实无太大区别（可能中国某些技术还要更古老和成熟一些），但文艺复兴时代的欧洲设计师着力于在传动机上作文章，他们或增加传动齿轮系，或增加不同传动机的组合，目的都是为获得想象中的强大机械功能。而这种做法的结果有两种：一是可能比中

⁵ 马克思《资本论》卷一云：“罗马帝国已经在水磨形式上，把一切机器的原素形式流传下来。（注：机器的全部发展史，可以在谷磨的历史上追踪出来。在英国，工厂还总是叫做 mill，在 9 世纪初叶德国工艺学的著作上，我们发觉，muhle 这个字，不仅被用来表示一切自然力推动的机器，而且它还被用来表示一切使用机器装置的手工制造厂。）”（见《资本论》，北京：人民出版社，1963 年，第 307 页。）

⁶ 陆敬言、华觉明主编：《中国科学技术史·机械卷》，第 86 页。

⁷ 白馥兰著，梁英明译：《中国对欧洲农业革命的贡献：技术的改革》，上海：古籍出版社，1986 年，第 595 页。

⁸ 张柏春：《中国近代机械简史》，北京：北京理工大学出版社，1992 年，第 2 页。

古时代的机械有较好的功效；二是有的因传动比太大，或机构太复杂而难以正常运转。尽管有诸多的问题尚未解决，欧洲设计师已然在探索新方向，这是值得注意的历史现象。

总之，透过《奇器图说》这一著作，我们似乎可以说 16、17 世纪中国与欧洲民用机械的设计所反映的技术水平基本一致，但对一些关键技术的应用手法不尽一致，突出的差异表现在欧洲工匠和学者十分信赖螺旋和齿轮传动技术，他们在这方面的创造力表现得较充分。

2、制造工艺的比较

16、17 世纪的欧洲机械是以木材和铁、铜等材料的混合，《奇器图说》所介绍的机械在材质反映了这个情况。阿格里科拉《矿冶全书》详细记载了复杂机械的工艺做法：不仅大型的水轮、轮盘、滚轴、木齿、支架、绞车、足踏鼓形轮等都是采用坚木制成，而且有些小型齿轮如水平转轮上的凸齿也是用硬木制成，金属铁和铜的使用显得相当谨慎，仅用于做轴颈、轴座、钻头、小型齿轮，有时也用金属来箍鼓形小齿轮的边缘，以防其破裂。亚·沃尔夫肯定以自然材质为主、以金属为辅的做法是 16 世纪机械工艺的一个特征，而且在农业机械中一直沿用到 19 世纪。⁹

据史料载，当时欧洲铁的产量还没有达到能使它的成本降到很低的程度。约翰·W·哈尔《Transactions of the Newcomen Society》说：“1591 年时，一个铁工场每星期出不了两吨铁；常常由于缺水，只能年产五十吨。”¹⁰低产量的铁在当时毫无疑问是稀有物，价格的杠杆决定了当时的机械无法广泛地使用这一金属材料。因此，当时欧洲一般农业和采矿业的机械器具依然是以木制为主，金属只是用于关键部件。

明末，中国机械工艺与欧洲没有大的区别，同样体现出木材和金属材质混用的传统特征。木材选料和加工技艺在中国有着值得骄傲的历史，明代的冶铁技术较之欧洲还要发达一些，据利玛窦的见闻，明末中国人使用铁的情况比欧洲要普遍的多，中国人使用熔化的铁可以制造出比欧洲更多的物品，比如大锅、壶、锣、钵、栅门、熔炉、刑具等都采用铁制。¹¹即使如此，明末所制的机械依然是以木材为主，机械齿轮依照用途和大小而选定材质，形状大而精度要求不高的齿轮一般用硬木制成，小而关键的齿轮用铜和铁制成。除了受实用观念的限制之外，封建礼制也控制了金属的使用范围。民用机械多为木制，皇室用机械多用金属。

所以，单纯从金属材质的使用程度上看，16、17 世纪的欧洲并不比中国先进。但是，有一点值得注意的是，欧洲 17 世纪在齿轮和螺旋纹的加工工艺上已

⁹ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，商务印书馆，1997 年，第 573 页。

¹⁰ 转引自亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 603 页。

¹¹ 利玛窦著，何高济等译：《利玛窦中国札记》，桂林：广西师范大学出版社，2001 年，第 12 页。

取得长足进步。

虽然《奇器图说》只标出各西洋机械部件的尺寸、形状，没有详细说明加工制作的工艺细则。《奇器图说》“凡例”中却开列了十九种机械设计和制造中常用的工具，它们是度数尺、验地平尺、合用分方圆尺、阖闢分方分圆各由一分起至十分尺、规矩、两足规矩、三足规矩、两螺丝转阖闢定用规矩、单螺丝转阖闢任用规矩、画铜铁规矩、画纸规矩、作鸡蛋形规矩、作螺丝转形规矩、移远画近规矩、写字以大作小以小作大规矩、螺丝转母、活锯、双翼鑽、螺丝转铁钳十九种。这套工具功能全面，从一个侧面反映出欧洲的机械制造工艺的精确度已较有保障，适应工业化时代生产的规范化、标准化意识已在酝酿中。

此外，当时的欧洲已出现了车床，据沃尔夫的《十六、十七世纪科学技术和哲学史》载，贝松个人在 16 世纪中叶就拥有一台专门加工螺纹的车床。（图 7-3）车床的出现对于提高齿轮和螺纹在机械动力机构中的效率无疑具有重要意义。

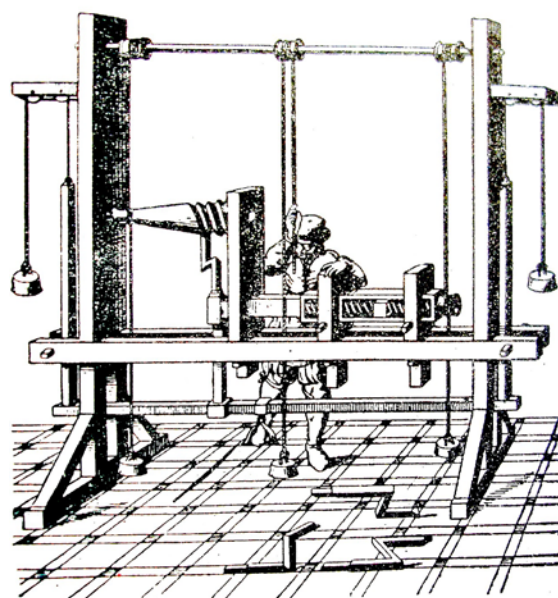


图 7-3 贝松的螺纹车床，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

欧洲机械设计师对齿轮和螺纹的集体偏爱也是建立在金属齿轮和螺纹加工工艺水平提高的基础之上，否则，当精度不够时没法保证整具机械的平稳运行。

但事情刚刚处于起步阶段，欧洲人在螺纹、齿轮的加工工艺上并没有一下子就与中国拉开距离。据沃尔夫考证，贝松的设计中“广泛采用了螺杆和蜗轮，而这些机件的制造在当时很难达到足以有效工作的精度。贝松自己的螺纹车床只能加工小型工件。”¹²由于精密加工技术尚不完善，《奇器图说》所译介的大量使用齿轮和螺旋的机械图，至少有一部分在当时的技术和工艺条件下无法变成现实。¹³

3、设计目标的比较

如上所述，从纯技术角度看，16、17 世纪时代欧洲机械设计师虽然对齿轮

¹² 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 598 页。

¹³ 如亚·沃尔夫认为，16 世纪那些不适合制成实际大小机器的模型，其共同特征是其中有些零部件需要精密加工，而那时的设备是无法使之满足的。拉梅利的旋转泵即属于这一类。李约瑟也曾提出，《奇器图说》中的某些机械很不现实。

和螺旋技术有相当程度的偏爱，但总体应用技术与中国相比并没有拉开距离，在开发动力、发明关键性传动机构以及加工工艺方面皆大同小异。为何王徵以及当时的许多人都把西洋机械视为奇异之器？答案可能在于欧洲机械的设计目标有别中国的传统，并由此造成了视觉造型方面与中国机械有鲜明的差异性。

《奇器图说》反映当时的欧洲机械设计的目标有极力追求大功率化的趋势，这是当时的社会需求在设计行为中的一种有力投射。

15 至 17 世纪欧洲农业经济的发展步伐总体来说十分缓慢，资本主义萌芽最早出现在矿业和冶金业，也正是为配合采矿的需要，在机械设计领域出现了许多功能各异的新发明。法国历史学家费而南·布洛代尔说：“随着十五世纪采矿业的飞跃发展，最完美的动力机为矿山工作：升降矿斗的绞车，坑道中的通风机，各种抽水机（水斗、连环水斗、吸气或压气唧筒）通过杠杆传动、结构相当复杂的吊车，这最后一种设施几乎原封不动地保留到十八世纪，甚至更晚的时间。”¹⁴ 贝尔纳也说：“文艺复兴时代工艺学上最大的进步是在采矿、冶金和化学三个密切相连的部门内。因需要金属，就迅速开矿，先在德国中部，后在美洲。”¹⁵因为这个现实原因，近代欧洲机械设计发展最为迅猛的不是在农业机械方面，而是在与矿冶业相关的实用机械上。（图 7-4）

随着欧洲对煤和金属矿石（主要是铜和银）的需求猛增，发展深井采矿势在必行，现实的需要使得两个机械设计任务变得很突出，（这些问题的最终解决加速了此后 200 年的工业革命。）第一个任务就是如何从矿井深处排除积水；第二个任务就是如何从深井中提升矿石，并将矿石运送到冶炼场。

为了排干深井中的渗水，欧洲的学者和工匠为此设计出了各种大型而奇巧的机械。A·P·厄舍说：“公元 1500 年以后，抽水机械变得比中世纪更加重要了。这一时期没有发明新的设备，但在设计上出现了很多变化。”¹⁶露天采矿不需要通风设备，简单的农用绞车和水泵就可以作为采矿的机械装备，而深井采矿不仅要求排水机械有强劲的势能，而且因地理环境的千变万化，排水机械在形制上也要因地制宜。于是，升水机械成为设计师的实验场。当时的设计师

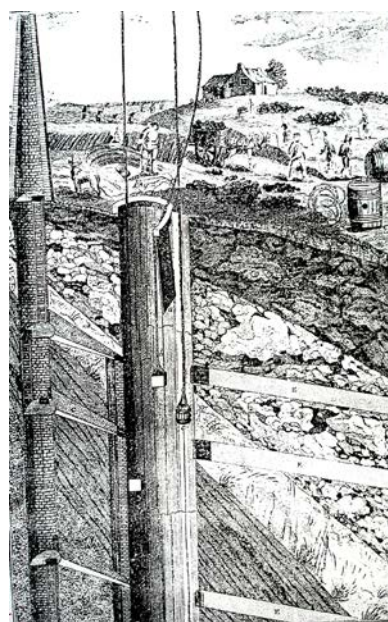


图 7-4 不列颠煤矿，采自查尔斯·辛格《技术史》第三卷

¹⁴ 费而南·布洛代尔著，顾良、施康强译：《15 至 18 世纪的物质文明、经济和资本主义》第一卷，北京：三联书店，1992 年，第 420 页。

¹⁵ J.D. 贝尔纳著，伍况甫译：《历史上的科学》，北京：科学出版社，1983 年，第 224 页。

¹⁶ 查尔斯·辛格等主编，戴吾三等主译：《技术史》第三卷，第 228 页。

应矿主的要求，在满足地理条件下，皆以追求更强劲的机械功效作为他们的设计目标。

《奇器图说》“取水”诸器中的飞轮式水泵、足踏行轮式水泵、鼓厢式水车、风车式水泵、龙尾车的组合机等都有别于中国传统的升水机械，它们都打上了那个时代矿业生产需求的烙印。水泵以气压升水，所占地下空间不大，人力在飞轮所产生的机械增效的协助下，能很方便地将深井中的水引流到地面上。足踏式行轮所创造的动力要大过飞轮，它与水泵组合之后产生的机械功效非常大，这是一款专为采矿业设计的机械。风车式水泵虽有多种用途，它也适用于山谷、峡口、平原等风力较集中处的矿井。此机械解放了人力，自然可以帮助矿主节约人力成本。图谱中所绘龙尾车的组合机是用水轮来驱动，它的主要用途是作为中世纪城市供水系统，但它也可以用于矿井，只需把水轮改换成人力驱动盘即可。龙尾车的级数越多，该组合机提升水的高度也就越明显。

中国传统升水机械一般都是服务于农业，其结构的简约和轻巧以及操作的简易性特点都与小农经济生产条件下的社会需求关联密切。《奇器图说》“取水”诸器的设计明显地追求大功率，这一设计目标与农耕文明的制度和需求等不甚吻合，说明资本主义萌芽时代的社会需求正在悄然发生着变化。

什么机械能从深井中提升矿石，在当时的技术条件下非绞车莫属。《奇器图说》所载“引重”和“转重”机械大多数都使用了绞车，其变化多样的形制也反映出当时的设计目标与社会需求之间的紧密关系。

“引重”第七图、第八图、第九图具备露天采矿用搬运机械所需要的强势功能，“引重”第三图、第四图、第五图、第六图和“转重”第一图和第二图等都具有竖井升矿功能。尤其是“转重”第一图和第二图与中国同类机械具有可比性，因为这两款机械几乎就是在中国式辘轳基础上作出的技术改进，它采用的方法是做加法，即在辘轳上增加了飞轮和齿轮传动机构，目的也是为获得比中国式辘轳更大的机械势能。

《奇器图说》所载“转重”和“引重”机械有一部分采自 1556 年出版的《论金属》，作为当时最权威的矿冶学家，阿格里科拉（图 7-5）在该书第六篇中绘制了他当时亲眼所见的矿业机械，其中既有简单工具和简单机械如锤、镐、锄、铲、桶、滑轮、绞车等，也有复杂机械如手推车、载重车、链斗提水机、带阀门的活塞式水泵、风箱等。《奇器图说》的编者并没有从中选择那些最能反映矿业需求的机械，那些被有意遗漏的大型升矿

图 7-5 阿格里科拉像，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

机械其实更能反映当时的设计师对强劲机械势能的着迷。

以引重绞车为例：“带飞轮的绞车”（图 7-6）与典型的中国式的井口辘轳有些不同，它一边保留了曲拐装置，另一边则换成了一个十字推杆，而且在有曲拐的一边加设了一个巨大的飞轮。亚·沃尔夫认为，增设飞轮的意图似乎是认识



图 7-6 带飞轮的绞车，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》



图 7-7 踏车驱动的绞盘，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

到“飞轮的稳定功能能实际增加资用功”。¹⁷

“踏车驱动的绞车”对于中国人而言也是新鲜事物，在一个机器房中，由两人操作一具踏盘，由踏盘带动竖轴上方的一个水平大转台，其边缘处凸起的木齿又拨动水平轴上的小鼓轮，最终通过绳传动将深井中的吊桶提升至井口。这一机械比一般的井口辘轳更适合一次性从深井中提升重物。（图 7-7）

“带闸轮的马力绞盘”（图 7-8）更是巧妙地利用了机械传动将畜力作了有效地发挥。处于地面上的动力机体积庞大，由马力驱动笨重的绞盘，驱动传动机的竖轴，通过地下中井的传动机齿轮组和铁吊链，将矿石从下层深井中逐级提升。传动机长达 40 英尺的竖轴深入中井，加上下井吊链的长度，该机械升物的高度可超过一百英尺。此机械的设计最能反映当时矿业机械的设计特点。

一旦为采矿业服务的机械设计调动了当时学



图 7-8 带闸轮的马力绞盘，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

¹⁷ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 572 页。

者和工匠的创造激情，就势必导致发明其他与矿业无关的机械。这种技术革新产生的连锁反应在 16、17 世纪欧洲城市供水机械、粮食加工机械以及载重机方面都有所体现。在缺乏新的动力源（如蒸汽机、电力）的情况下，在传动方式机构没有新的发明的情况下，要加大机械效能，必然要靠多种传动方式的组合来实现，因此，16、17 世纪出现的欧洲新机械在结构组合和视觉造型上都有复杂化、大型化的特点。

《奇器图说》中较新颖的复杂机械都整合了三、四种力传动方式，结构相当复杂。如“解木”第一、第二图所示的机械皆属于多种传动方式的组合机，它们

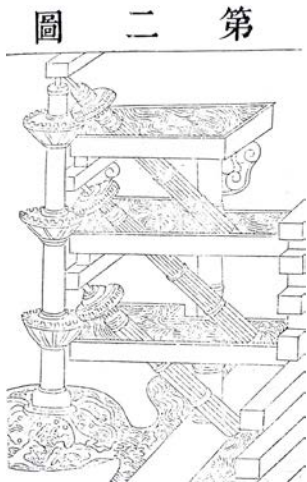


图 7-9 龙尾车组，采自《奇器图说》

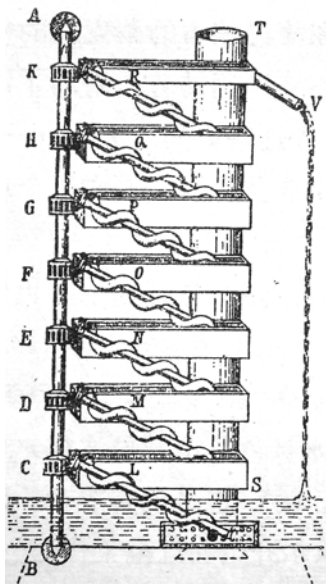


图 7-10 龙尾车组合机，采自李约瑟《中国科学技术史》

包括齿轮系、棘轮（斜铁齿轮和锯齿齿轮）、棘爪、配装飞轮的曲柄等。这是解木机的中心机构，至于如何使木料自动来就锯子的工作面也有复杂的传动设计，它综合运用了连杆、绳传动和齿轮传动的工作原理。

“转重”第二图的关键技术与辘轳无异，但欧洲的设计师在传动方式上增加了不少机件，如手摇曲柄与滚筒之间增加了两个一大一小的齿轮，使人力在传到滚筒之前先通过齿轮，利用轮径与轴径之差来实现力的加速。显然，它同时使用了绳传动和齿轮传动，从而至少在理论上增加了辘轳的取水的动能。

机械结构的复杂化有时还表现在对同一传动机构的多次组合上，如取水第二图所绘的是阿基米德螺旋式水车。在一大立柱上由低到高装有三个齿轮，柱底连着一卧式水轮，三部龙尾车一端分别与立柱上的齿轮相合，接受齿轮传动，另一端伸入不同高度的水池中汲水，将水逐级旋入高处。这三部龙尾车的工作原理完全相同，被组合到同一机械上，成为一个工程机械系统。（图 7-9）可以设想，假如水流能提供足够的动力，甚至还可增加单部龙尾车的数量，将水提升到一个惊人的高度。（图 7-10）

因此，16、17 世纪欧洲机械留给人的粗略印象是体积庞大，搬运困难，结构复杂。产生这些造型特点的根本原因是设计师在当时社会需求的刺激下极力地追求机械功率。（图 7-11）当然，这种追求尚未达到尽善尽美的地步：一来许多机械传动机构的稳定性不高；二来设计师对人的因素考虑不多。据阿格里科拉亲眼所见，人力“踏车驱动的绞车”的木轮不仅

率的改型号的科学公式。它的大小和复杂性方面受到的限制很快就显露出来了。欧洲的农业发明家从一开始就按照机器而不是按照工具、按照科学而不是按照技艺来考虑问题的。起初，人们甚至可能指责他们雄心太大。在第一次采用新工具和使它在机械上趋于完善之间是有很大大差距的。”²⁰欧洲机械设计的科学化特点并非如白馥兰女士所言“一开始”便如此，它实际经历了长达几个世纪的酝酿期。16、17 世纪欧洲产生的新机械正是处于这个过渡期中，设计师在传统工艺技术的基础上极力追求大功率，既取得了可喜的成绩，也存在着一些问题，说明当时的机械设计远非白女士所云科学精神已经起到了决定性的作用。

只是通过比较，我们应该承认，来自于社会变革的力量对于机械设计的目标和形制的变化有多大的推动力，而设计观念意识的改变又是如何隐含在这种看得见的物质变化中！

二、《奇器图说》反映的设计新观念

1、近代设计师：学者传统与工匠传统的结合

现在所谓的科学是 16 世纪才具体形成的事物，它的源头可追索到文明的萌芽时期。贝尔纳认为，现代科学具有双重的起源，它起源于巫师、僧侣或者哲学家的有条理的思辨，也起源于广大工匠的技艺。²¹文艺复兴之前（尤其是中世纪世代）的欧洲，从事思辨和文字工作的学者鄙视技艺，从事技艺工作的工匠不懂得将自己的所知上升为理论，学者与工匠是疏远的，学理性知识与个人技艺之间存在着明显的界限。这一点与中国的情况相比无本质的差异，但随着欧洲文艺复兴、科学革命、资本主义萌芽等一系列重大社会变革的到来，学者对手工技艺之学有了新的认识，并有了去学习的动力，他们中有不少人成长为具有近代意义的机械设计师。这些设计师身上所释放出来的创造力强有力地推动着欧洲传统产业向工业化的过渡。

文艺复兴世代是欧洲从封建主义向资本主义过渡的第一阶段，即要把固定的社会关系变成一种依据商品和劳力的社会制度。整个时代属于经济迅速扩张期，中国人发明的指南针帮助了欧洲人对海外的地理发现和经济掠夺，海外贸易的巨大利润为资本主义工场企业的兴盛积聚了原始资本。文艺复兴和宗教改革是同一运动的两面，作为高举人文旗帜的精神革命，它们意味着神圣思想和至高的封建君主观念开始淡化，对社会人生的态度更接近于世情。文艺复兴创造新文化、新观念，其中经济是资本主义的；文学艺术是古典趣味的；科学知识的是直接面向

²⁰ 白馥兰著，梁英明译：《中国对欧洲农业革命的贡献：技术的改革》，上海：古籍出版社，1986 年，第 603 页。

²¹ J.D. 贝尔纳著，陈体芳译：《科学的社会功能》，北京：商务印书馆，1982 年，第 49 页。

自然取得的；对物质的享受是坦然的。在这种文化环境下，身怀技艺的工匠的地位有明显的提高，个别能工巧匠甚至能博得教皇和君主的赏识。社会舆论鼓励学者去钻研各种技艺、推进新技术。

尤其在采矿业，具备发明和设计才能的工匠被矿主赏识，因为他们的工作可能创造了可观的经济效益。当优秀的工匠依靠自己的技能出名并获得丰厚的经济回报时，具有高尚社会地位的知识阶层对造物设计的热情也随之空前高涨。如贝尔纳所言：“当封建王侯或巨商变成矿山、铸造厂和船只的主人时，他们自然要求助于有教养的人们，即技匠和数学教授们，或者不如说后者乘这个机会毛遂自荐。”²² 高层知识群体介入到传统工艺领域，给传统手工业带来崭新的前景。因为学者和贵族肯对造物领域的技能性知识感兴趣，学者传统与工匠传统的知识鸿沟才有了一定程度的弥合。

近代实验科学的先驱弗·培根（F. Bacon 1561-1626）注意到了这一变化所具有的现实意义，他打出“知识就是力量”的旗帜，主张把学者的研究成果应用于工场手工业，他还建议打破知识阶层与劳工阶层的壁垒，将科学与工匠们的力量结合起来，真正让知识服务于社会。知识来源于实践，并服务于实践，知识是经验和学理的调和，类似这样的观念逐渐成为学者的共识，整个文艺复兴时代学者的兴趣中心基本是数学——机械工艺。

当打破学问与技艺的壁垒成为一股时代风潮之后，更有一些科学研究组织把这一思想写入章程。1663年，胡克为“法兰西皇家学会”拟订章程时写道：“皇家学会的任务是：靠实验来改进有关自然界诸事物的知识，以及一切有用艺术、制造、机械实践发动机和新发明。”²³ 雷恩在英国“皇家学会”章程中提议：“通过把好几种技术和工业生产方法汇集起来，就可以用互相交流的办法使全体都学会每个人的特殊才能；因而脆弱人生的种种痛苦和劳累就可以通过同样多的各种现成的办法，来消除或者减轻；于是财富和富足便会按照每人的勤劳，也就是按每人的功绩，公平分配给每个人。”²⁴ 学会鼓励自然科学家动手实验，积极介入传统手工艺和传统造物设计，这对于将几千年来的应用技艺提升为普遍知识创造了条件。

文艺复兴时代工匠地位的提高以及学者不以技艺为耻的态度很容易使人联想起明末的风气，但不同的是，明末文人学者参与造物设计只是少数人的行为，他们没有得到广泛的社会力量的支持。换句话说，传统文化价值的基础没有改变，整个社会的文化环境并不鼓励学者与工匠的结合。欧洲的情况显然要比中国好得多，当时的高层知识群体介入传统造物工艺有这样几个特点：首先，他们都受过数学、静力学等科学公理知识的训练，通晓历史，同时还能熟练掌握着各种实用

²² J. D. 贝尔纳著、陈体芳译：《科学的社会功能》，商务印书馆，1982年，第57页。

²³ 转引自J. D. 贝尔纳著、伍况甫译：《历史上的科学》，第260页。

²⁴ J. D. 贝尔纳著、陈体芳译：《科学的社会功能》，第60页。

技艺。其次，他们所进行的机械设计和发明基本上都得到保护人的支持，这些保护人（赞助人）或是矿主，或是王公贵族，他们与保护人之间是被雇佣关系，也就是说，他们的设计行为是职业化、半职业化的。再次，他们的研究成果得到专利制度的保护，这使得他们的工作可以按照计划推进，他们的成果可以公诸于世，而不需要顾及手工行会的保守观念的约束。欧洲 1500—1750 年间颁发了大量的关于各类机械器具的发明专利，《技术史》记载了当时获得专利较多的工程师的名字，这在明末清初的中国是没有的现象。

将学者传统与工匠传统结合起来的典型的例子是雷奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci），这位文艺复兴时代的巨子成功地在现实生活中扮演着艺术家、机械师、建筑师等多种角色。他毕生设计了不计其数的巧妙机械，从碾压机到可移动的挖河机再到各类军用机械，在机械器具的发明和设计上取得了一系列重要成果。“达·芬奇所设计的那些装置，其雏形大都来自于古老的风车、风磨。”²⁵从他的笔记里可看出他曾细心观察和研究过冶金工人和机械工人的各种工艺。

另一位文艺复兴时期的著名学者雷翁·巴替达斯·阿尔贝第（Leon Battista Alberti 1404-1472）同样委身于技艺或向工匠学习，“他要向一切人学习，向金属匠、营造匠、造船匠、甚至鞋匠询问，惟恐任何人可能抱有他本行上某些不平常的或秘密的知识，并且时常假装不懂来发掘别人的优长。”²⁶还有象斯宾诺莎（Spinoza）这样的大哲学家一度靠磨镜为生。达·芬奇、阿尔贝第、斯宾诺莎是学者，也可以说是受过科学知识熏陶的新手工艺人，他们身上既表现出对传统技艺的继承意识，也体现了用科学改变传统设计过于依赖经验性知识的状态，用科学知识来推进实用技术和造物设计。

伽利略的制器实践说明科学公理和传统技艺的结合如何激发了设计思维。（图 7-12）他在《恒星的使者》（1610 年）一书中说：“大约 10 个月以前，我听到消息说，一个荷兰人发明了一种仪器，用它可以观察远处的物体，就象近在眼前一样清楚。这使得我思考起来，我怎样也能制造一架仪器。光学定律指导我想出一个主意，把两个透镜固定在一个管筒的两端，一个是平凸透镜，另一个是平凹透镜。当我把眼睛凑近后一个透镜时，我看到的物体的距离，只有它



图 7-12 伽利略像，采自沃尔夫《十六、十七世纪的科学、技术与哲学史》

²⁵ 诺伯特·维纳著、赵乐静译：《发明：激动人心的创新之路》，上海：上海科学技术出版社，2002 年，第 44 页。

²⁶ 转引自 J.D. 贝尔纳著、伍况甫译：《历史上的科学》，第 221 页。

实际距离的三分之一左右，而大小是实际的 9 倍。”²⁷伽利略在没有看到仿样的前提下，依然能成功地制成望远镜，这一事实说明科学知识 with 工匠经验性知识的结合对于机械设计所具有的重要应用价值。

总之，学者与手工艺人的结合是值得注意的历史现象，这一结合在艺术、技术、科学等领域所能引发的社会效能，贝尔纳已作出过高度评价，他说：“手工艺工人能在经典古代的旧技术上，增加一些中古时代发生的新器物；而学者能贡献世界观、思想见解，尤其可能贡献最多的是通过阿拉伯的和经院派的哲学而导自希腊的逻辑辩论法，以及新演出来的计算方法。”手工艺人对传统器物形制的经验性把握能力，加上学者的理论思维和精确计算方法，可能产生设计方法论的变革。贝尔纳认为这种结合是一发而不可遏止的，是“一种爆炸性的结合”。²⁸象达·芬奇这样的人，他带给学术界“一种深刻的观念，即自然界的种种操作可用机械来阐明。”²⁹当这种观念深入人心时，就会有层出不穷的新设计不断地推动社会经济和制度变革的步伐，设计对于社会历史进程的重要性令所有人都无法忽视。奥特加·伊·加西特曾从技术主体的角度划分人类造物史，他用三个概念来分别对应史前世界、古代和中世纪世界、现代世界，它们是：1、机会的技术；2、工匠的技术；3、工程师和技师的技术。³⁰也就是说，他认为，现代世界的技术主要由工程师和技师掌握。

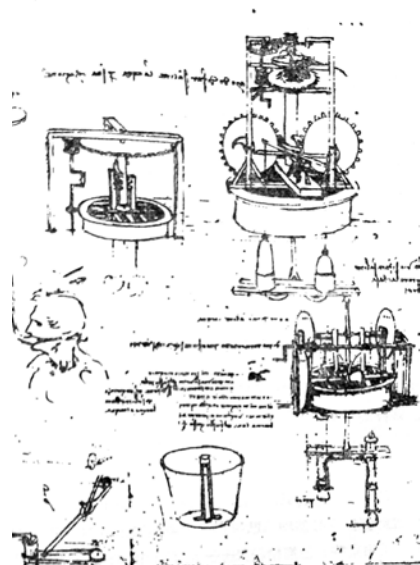


图 7-13 达·芬奇设计的压力泵草图，
采自贝尔纳的《历史上的科学》

当然应该看到，技艺与科学联姻成为一种时代风习之后，学者们的过渡热情也使得一些设计暂时脱离现实需要，不排除其中有不少设计纯粹出自设计师的丰富想象力。以达·芬奇为例，“他能发明差不多任何用途的机器，并把它们绘制得精良无比，但是几乎没有任何一件，而其中最重要的更绝无一件，真会起作用，即使他真能弄到足够的钱来制造它们的话。”³¹（图 7-13）贝尔纳注意到当时的机械设计师在动力学知识和新的动力机缺乏的情况下过早地追求机械大功率，事实上它们绝不能超越传统技术的限度。虽然 16、17 世纪欧洲的发明申请书中出现的新机械并未完全得到试制和应用，有些甚至如《奇器图说》所抄录的那样不太切合应用，但他们的设计雄心不

²⁷ 转引自亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 91 页。

²⁸ J.D. 贝尔纳著、伍况甫译：《历史上的科学》，第 218-219 页。

²⁹ J.D. 贝尔纳著、伍况甫译：《历史上的科学》，第 223 页。

³⁰ F. 拉普著、刘武等译：《技术哲学导论》，辽宁科技出版社，1982 年，第 23 页。

³¹ 同上。

容小视，他们的勇敢尝试为稍后的蒸汽动力革命作了充分的思想和技术准备。

总之，16、17 世纪欧洲在社会环境的大变革中诞生了近代第一批机械设计师，他们有意识地将科学公理与工匠技艺性知识结合到一起。赞助人制度和专利制度的出现有效地刺激了学者的创造力，保护了学者的劳动成果，通过精妙的机械制图和书籍出版，各种设计的巧思得以在公共知识的场景中及时地传播和交流。尽管当时王徵等学者通过自己的努力也虚心向工匠学习，但文艺复兴时期欧洲的社会环境明显地呈现出比中国更有助于工匠与学者交流的社会氛围。这一切都在改变欧洲传统以工匠为机械设计主体的社会局面，从此以后，机械设计的主体不是工匠，而是工程师。工程师的出现，标志着机械设计走上了一条新道路，即逐步改变以往的经验主导型，转向个人经验与科学公理的结合型。

2、设计新基础：经验与学理知识的结合

如前所述，王徵时代中国的器械设计依然延续着以经验性知识为基础的传统，尽管有徐光启和王徵等已经意识到这一知识基础的不足，但总体的局面是经验主导型设计，设计主体是工匠，而非学者。16、17 世纪欧洲近代工程师的出现是设计史上的大事，它标志机械设计有了一个新的知识基础。A·P·厄舍说：“16 和 17 世纪标志着工程技术从纯粹的经验主义朝着充分以数学和应用科学为基础的方向转变。”³²但我认为，转变的最终结果是经验性知识与学理性知识的结合，而不是用一个取代另一个。

在古代造物史上，许多事物可以被创造出来，却不能很清楚地说明其技术原理。美国学者 H.A.西蒙(Simon)在《关于人工事物的科学》一书中说，科学家关注的是“事物是怎样的(how things are)”，工程设计师关注的则是“事情应当怎样做(how things ought to be)”，两者有不同的焦点。但科学公理可以指导设计的创新，甚至可以产生新的工艺法则和新的动力机。如柳冠中所云，设计解决现实问题是“需要建立在科学研究的基础上，即懂得自然是‘怎样’之后再来设计事物应该怎样。”³³“知识使人产生正确的行动”，这不只是文艺复兴时期学者们才有的共识。

据李约瑟等人考证，西蒙·斯蒂文(Simon Stevin,1548-1620)是《奇器图说》中几款升水机械的原创者。L·E·哈里斯认为，“西蒙·斯蒂文在排水机方面的声望是牢固建立在他的著作《论排水机》(Van de molens)的基础上的，在书中，他通过静力学和动力学的独创性理论研究来支持他的实践活动。”³⁴与西蒙·斯蒂文类似，拉梅利、贝松等人的设计同样在科学公理的指导下而表现出大胆、新颖的品质，他们的机械设计具有技术开发性特点，与传统工匠造物以“适应性设

³² 查尔斯·辛格等主编：《技术史》第三卷，科学教育出版社，2004 年，第 238 页。

³³ 柳冠中：《工业设计学概论》，黑龙江科学出版社，1997 年，第 40 页。

³⁴ 查尔斯·辛格等主编：《技术史》第三卷，第 212 页。

计”和“变异性设计”为主的特点不同。开发性设计带着工程师对未来生产方式的大胆设想和预见，对近代工业化进程产生的作用力不容忽视。

科学固然重要，但上千年传统积淀下来的工匠技艺同样是不可或缺的。近代科学的产生远比各种技艺要晚得多，对于文艺复兴时代的工程师来说，传统技艺是技术宝库，始终是他们取之不尽的灵感源泉。《奇器图说》中各种传动机和工作机构几乎都是中世纪甚至更早些时候的产物，其机构的设计大都是摹仿传统手艺，尤其是从钟表匠、风轮匠和水轮匠的传统技巧中派生出来的。正因为如此，虽然工程师已经诞生，但 16、17 世纪的机械设计体现出过渡期的诸多特征，其技术要素与早期时代没有很大的不同。

科学革命所产生的学理性知识究竟给机械设计带来了哪些资源？

首先，初步建立起了有关机械设计的力学基础。公元前三世纪，希腊学者阿基米德运用数学工具分析力学现象，阐述了杠杆原理和浮力定律，开创了欧洲古代理论科学的先河。欧洲中世纪的知识界和民众普遍地被超自然的观念所控制，所有的知识被视作一个整体。“从近代最初开始，人们日益注意起大自然的确凿的事实，并重视经验尤其是实验。”³⁵1638 年，伽利略出版《关于两种新科学的谈话》一书，标志着机械设计理论有了一个坚实基础。亚·沃尔夫说：“伽利略对于落体定律、摆和抛射体的运动的研究，树立了科学地把定量与数学论证相结合的典范，它至今仍是精密科学的理想方法。”³⁶在稍后的时间里，更多的学者重视总结和提炼机械设计的一般性原理，如工程师戴克斯于 1659 年出版《水的提升技术》（*The Art of Water drawing*），他“认识到大气压的本质，以及大气压对空吸装置所造成的限制。他还总结了‘工作原理’：任何提升水的机器，无论其结构如何，所供给的动力都必须超过为提升水的自重所必需的数量。他还认识到，永恒运动是不可能实现的；一切机械有效工作的必要条件是结构简单和运行平稳流畅。”³⁷工程机械理论的产生为机械设计建立在科学基础上创造了可能性。

《奇器图说》的卷一、卷二专门阐述“力艺学”原理，同样是为卷三的机械设计图说建立理论基础。所以，其基本的思路与戴克斯相一致。

其次，修正了关于机械的概念。古希腊维特鲁威曾尝试着从人力和功效角度来区分机械（*mechane*）与工具（*organon*），他说：“机械是以多数人工和很大的力量而使其发生效果的，如重弩炮和葡萄压榨机。而工具则好似一名操纵人员慎重地处理来达到目的的，如蝎形轻弩炮或不等圆的螺旋装置。”³⁸这种分类法并不能很好地说明机械的本质。哲学家卢克莱修则把车床和庖斗比作星球围绕极轴线旋转，依靠直觉建立起来关于机械的初步知识，将宇宙永动的观念比附机械内部

³⁵ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 7 页。

³⁶ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 47 页。

³⁷ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 602 页。

³⁸ 维特鲁威著、高履泰译：《建筑十书》，知识产权出版社，2001 年，第 263 页。

结构的有机性。这只是问题的一面，在事情的另一面，欧洲西方哲人很早就表现出了对机械结构进行分析的热情，如亚历山大里亚城的赫伦第一个对机械要素进行分类，他认为，机械要素可分为五类：轮轴、杠杆、滑车、楔、螺旋和蜗杆。尽管这一分类结果不那么完美，但他留下的缺憾给文艺复兴时代的欧洲学者创造了真正研究的问题。到了 16、17 世纪，自然主义的机械论进一步遇到实验科学的挑战，欧洲学者在依靠力学、几何和数学原理逐步廓清了笼罩于机械之上的神秘主义。培根时代强调人对自然的主导意识，即人要利用自然力来完成人类的设计，个人技艺和创造性的潜力受到广泛重视。至 1816 年，居维叶（Cuvier）给出了“机器是被活跃了的几何学”这一著名论断。³⁹

欧洲学者对机械本质的认识过程反映了科学理性精神如何逐步改造着人们的观念。

此外，改进了制图术。A·P·厄舍说：“16、17 世纪，与一些特殊的创新相比，机器制造技术同样把技术变革的特征揭示得非常清晰。制图和雕刻的新技术使得用草图和设计图来表现很多新想法成为可能，即使这些想法在当时还不能变成现实。”⁴⁰制图水平的高低直接反映了几何学知识的成熟度。亚·沃尔夫认为，拉梅利的制图术代表近代欧洲的最高水平，一直到 18 世纪前，欧洲始终没有出过能与他的著作想媲美的书。⁴¹将《奇器图说》所抄绘的图画与原作对比着看，也会发现仿制者王徵的制图术较拉梅利明显要逊色得多。

3、设计新观念的历史意义

16、17 世纪是欧洲科学诞生、人文精神勃兴的时代，科学理性在技术发明和应用实践中的作用日益增强，人们对统治自然的乐观预期激发起了对工艺技术的无限憧憬，建立在实用立场上的机械设计本身发生着观念的变革。传统以个人经验型知识为主的设计逐渐让位于经验与学理结合型，设计师的主体是具有合理知识结构的工程师。机械设计在推动资本主义工场手工业向大工业化过渡方面起到重要作用。

从 1760 到 1830 年，特别是从 1770 到 1800 年的三十年，是世界史上起决定作用的转折点。“这几十年标志着在新兴的资本主义生产工业的构架中第一次实现了机器的新力量。”⁴²由手工操作的大型机械生产到使用蒸汽动力的机器生产，1844 年恩格斯首次将这种转变命名为“工业革命”。工业革命在生产方式和经济结构上发生了巨变，但有一样是没有太大变化的，那就是设计观念。整个工业革命时期，手艺人学者延续了 16、17 世纪那种相互学习的良好风气，手艺人忙着实制新机械，并尽量吸收可以利用的科学；学者不得不向手艺人学习，为的

³⁹ 转引自李约瑟：《中国科学技术史》第四卷第二分册“物理学及相关技术”，第 64 页。

⁴⁰ 查尔斯·辛格等主编：《技术史》第三卷，第 224 页。

⁴¹ 亚·沃尔夫：《十六、十七世纪科学、技术和哲学史》，第 600 页。

⁴² J.D.贝尔纳著、伍况甫译：《历史上的科学》，第 312 页。

是要更好地总结各类运动原理。当时在设计和发明一线的人都具有工匠和学者的双重身份，如布累马、佐治·斯蒂芬孙、摹德斯雷、瓦特等曾自觉地利用学理性知识来改造他们手中的技艺。

在机械设计的技术水平方面，中国明代与当时的欧洲可以比肩，但在设计观念上，明末社会没能从内部生出变革传统观念的动力。正因如此，王徵所做的引进欧洲机械设计理论的工作在实效上无法与当时的欧洲学者相提并论。王徵所进行的工作基本上还只是作为一种社会责任感所驱使，背后既没有个人利益的需求，也没有保障这种利益的社会制度的支持。所以，明末实学家所进行的科学和设计活动只是与传统的生产生活方式发生了联系，不同于 16、17 世纪的欧洲学者，后者的工作与工业化生产结下了不解之缘。正如诺伯特·维纳上所云：“十七世纪正是实现了新思想与新工艺完美结合的一个时代。……同时也预示着一个新时代的到来，即技术进步不再只是零散随遇的事件，它已完全彻底地纳入了人类文明进步的大潮之中。”⁴³各类实用机械的设计进入了开放、扩张的社会。

该文是从《会通中西：王徵的设计思想》（北京时代华文出版社，2015 年）一书中节录的两个小节内容。

⁴³ 诺伯特·维纳著、赵乐静译：《发明：激动人心的创新之路》上海科技出版社，2002 年，第 48 页。