

《考工记》中的实验探索与因果推理：一种对工程哲学的中国源流考

纪阳*, 王宇, 陈瑞琪, 吴振宇

北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876

摘要: 为探究实验探索与因果推理方法在中国古代工程中的存在性, 重新认识中国古代工匠的工程思维与工程方法, 本文对中国首部工程技术典籍《考工记》中周朝百工的测试检验方法进行了研究。通过对《考工记》文本的内容分析发现, 周朝百工已经能够采用基于测量工具的实验法、基于关键模块的实验法和基于运行工况的实验法来进行工程制品质量检验, 有关讨论还涉及制品性能与物理参数之间的因果关系、制品需求与设计的因果关系和制品检验方法与运行方式的因果关系等。文本中的链式因果表述体现出当时的工匠能够有意识有目的地进行因果推理演绎, 而对照式关联现象表述形态则与现代对照受控实验有相似之处。这些信息表明, 实验法与因果推理的结合在古希腊和现代西方科学出现之前就已经作为中国古代工匠工程思维的组成部分而存在。这一事实对于澄清工程思维方法的中国源流具有启示意义。

关键词: 考工记; 实验; 探索; 因果推理; 工程

中图分类号: N02

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2023)06-0547-13

引言

实验探索与因果推理是极为重要的认知方式,

因其在现代科学发展中的基础作用, 得到了爱因斯坦 (Albert Einstein) 的关注, 他在给美国的一位学者斯威策 (J. E. Switzer) 的信中曾经这样写

收稿日期: 2023-06-12; **修回日期:** 2023-09-25

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XY-52); 北京邮电大学研究生前沿课程(2021QY004); 北京邮电大学研究生教育教学改革与研究项目(2021Y046)

作者简介: *纪阳 (1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程教育学、信息与通信系统、工业互联网与物联网。E-mail: jiyang@bupt.edu.cn (通讯作者)

王宇 (1999—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程教育学、信息与通信工程。

陈瑞琪 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为信息与通信工程。

吴振宇 (1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新工科工程教育、工业人工智能与工业大数据。

引用格式: 纪阳, 王宇, 陈瑞琪, 等. 《考工记》中的实验探索与因果推理：一种对工程哲学的中国源流考[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(6): 547-559. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23010612

Ji Y, Wang Y, Chen R Q, et al. Experimental exploration and causal reasoning in *Kao Gong Ji*: A study of the origin and development of engineering philosophy in China[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(6): 547-559. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23010612

道:“西方科学的发展基于两项伟大的成就:希腊哲学家发明了形式逻辑体系(在欧几里得几何学中),以及(在文艺复兴时期)发现可以通过系统实验找出因果关系。在我看来,中国的贤哲没有走上这两步,那是用不着惊奇的。令人惊奇的倒是,这些发现竟然被做出来了。”^{[1]32}。尽管李约瑟(Joseph Needham)在《文明的滴定》(*The Template of Civilization*)一书中对人们使用爱因斯坦的这段话来贬低非欧文明的科学成就的现象进行了含蓄的批评^[1],但这段话流传甚广,在近70年的传播过程中,在全世界产生了广泛的影响。

作为一种认知世界的思维模式,“可以通过系统实验找出因果关系”又是如何出现于16、17世纪的欧洲科学界呢?对此,爱因斯坦在信件中并未进行展开。而在李约瑟对爱因斯坦观点的评述中也认为希腊人实际上并不是实验家,受控实验的确是文艺复兴时期科学革命在方法论上的最大发现^{[1]38}。在中国古代的贤哲是否已经掌握“可以通过系统实验找出因果关系”方法论的问题上,李约瑟并不认为“应当把这项荣誉归功于中世纪的中国人”,尽管他认为“他们在理论上已经非常接近受控实验的思想,在实践上则往往超越了欧洲人的成就”,此外李约瑟仅通过一些中国的炼丹家、声学家、桥梁家的科技成就和推断来说明其判断,并认为“在中世纪的书写文化中,我们不应指望会留下任何写下来的实验记录”。^{[1]38-39}总的来看,李约瑟的这些论证显得并不充分。

实验探索并非是欧洲科学的最初传统。弗洛里斯·科恩(Floris Cohen)在其《世界的重新创造》(*The Scientific Revolution: A Historiographical Inquiry*)^[2]中较为系统全面地探讨了欧洲实验科学的出现历程。他认为,1453年后借助希腊文本翻译开始的欧洲科学主要是哲学与数学的结合,缺少与实践活动的联系,“平衡状态、光线、音程和行星轨道等仍然是亚里士多德和托勒密传统的学者们所研究的仅有的自然现象”。按照科恩的判断,“这一发展迟早会失去动力”。^{[2]103-105}科恩认为实验法的出现与中世纪外来技术涌入欧洲和15世纪地理大发现有关,这使欧洲形成了“经验的-实践

的”自然认知方式^{[2]145-147}。1600年左右,由培根(Francis Bacon)、吉尔伯特(William Gilbert)、哈维(William Harvey)和赫尔蒙特(Jan Baptista van Helmont)等人将之发展成为“探索的-实验的”研究模式^{[2]134-140}。而到了伽利略、牛顿的时代,科学实验思维方式演变为哲学、数学和实验三种主成分。科恩的上述研究揭示了实验研究模式出现的社会背景已经在一定程度上揭示出实验法与工程技术的某些渊源。

如果科恩在对中国的研究中也能够沿着工程技术方向进行前溯,就能够看到实验探索与因果推理方法的中国工程源流。但非常遗憾,科恩、爱因斯坦乃至许多中国学者对于古代工匠群体的工程认识方式了解甚少。科恩的研究在很大程度上是对爱因斯坦观点的一种细节论证,但对于“中国贤哲没有走上这两步”,其论证和例证要简略很多(如《考工记》就未被科恩提及)。科恩将中国的认知方式整体划归为“经验的-实践的”风格,承认了其富有活力,但认为这种以阴阳五行为代表的自然认识方式是一种以“关联思维”为主的自我封闭的“有机唯物论”。他认为《墨经》反映出的思维风格较多地集中于“如果-那么”之类的因果关系,而非“和-和”之类的关联关系^{[2]39}。但尽管墨家最具有发展潜力,最接近于现代意义上的科学,却没有在中国或世界其他地方得到再次复兴的机会。这样,科恩为近代科学为何能够排他性地产生于欧洲而非中国提供了一个解释,对著名的“李约瑟难题”做出了解答^[3]。

国内学术界也不乏对“没有走上这两步”问题的解释者。例如,钱兆华先生认为古代中国不具备产生科学的文化基础,其科技是一种基于经验的技术,而非基于科学的技术,“从经验到技术仅一步之遥。然而从经验到科学和哲学就不那么简单了。认识主体必须通过综合、分析、演绎、归纳、概括和抽象等各种形式的思维过程才能把经验提炼为科学和哲学知识”^[4]。至于经验与科学的思维本质,钱兆华先生认为“科学是猜测或解释,因此它必须依赖人的理性思维或逻辑推理,而经验的本质是人类对以前发生过的自然现象的记

忆,这些自然现象是人类通过感官感知到的,因此经验的获得必须依赖人类感官感知世界的能力和记忆能力^[5]。根据这样的表述,源自中国的技术活动本质上是一种“知其然不知其所以然”的技术活动,是建立在对自然现象进行感性认知和记忆而后加以模仿的活动,而非从无到有的创造性活动^{[5]3}。

人们对古代工匠群体的忽视或低估反而加深了我们对古代工程思维方式的好奇心。在老子、孔子、墨子、苏格拉底、柏拉图、亚里士多德、伽利略、牛顿等贤哲们出生之前,工匠们烧制陶器、制作弓箭、发明量具、研制乐器、冶炼青铜、兴修水利、建造城市的工程创新就已经开始。由于科恩重点提到的三类自然认知先驱者此时全部都不存在,而工程技术活动又显然在不断进步,这就意味着工程技术活动有着不依赖于科学哲学指导就能取得进步的内在基础。那么,这种基础又是什么呢?在缺少理性思想指导下,中国古代工匠真的可以只凭记忆与模仿就能够完成这些工作吗?工业革命之前,中国工程技术在整个世界长期处于领先水平,实验探索与因果推理的火光真的没有照亮过中国古代工匠探索自然的前行方向吗?或者我们更进一步,作为人类认识方法论的实验探索与因果推理,仅可能存在于科学领域或哲学领域吗?回答这些问题,最重要的还是史料。

《考工记》可以为我们的研究中国古代工匠的工程思维方式和工程方法论提供重要的例证参考。作为中国乃至全球第一部工程技术文献,《考工记》收录了许多先秦时期的科技成就^[6]。虽然《考工记》并非某位类似老子、孔子这样的“中国的古代贤哲”谈论其学术思想的专著,但也终被收录在《周礼》之中,归入到儒家十三经之列,对中国古代科技文化思想的影响不可谓不长久。

在探讨中国古代科技思维方法论的时候,如果忽略了《考工记》与墨家《墨经》的存在就给出结论,那么这些见解都是值得再商榷的。《考工记》不仅收罗了大量源自中国的工程技术,与实验探索和因果推理有关的信息更是散布于字里行

间。通过对这些信息进行鉴别、提取、分类分析,能够让我们对古代工匠认识事物的方式建立新的印象。

综上,本文将从实验探索与因果推理思维方法的中国溯源问题提出开始,研究周朝百工的测试检验方法,以期重新认识中国古代工匠的工程思维方式和工程方法论。

1 《考工记》中周朝百工的实验方法类型学分析

1.1 《考工记》中的测试实验方法

《考工记》^[7]记载了木工、金工、皮革、染色、刮磨、陶瓷等六大类30个工种的内容,涉及到先秦时代制车、兵器、礼器、练染、建筑和水利等手工业的制作工艺和测试检验方法。

《考工记》文本并不区分某一段叙述属于设计、制作还是测试方法,这需要结合原文语义根据自身理解进行标定。考虑到《墨经》中已经有了与系统相关的概念,我们将测试检验方法划分为基于测量工具的实验测试、基于制品关键模块的实验测试和基于特定运行工况的实验测试三种类别,记为E1~E3,对应于系统、子系统和超系统三种视角。以此筛选,得到三类表述文本共计86例(分类统计结果如表1所示)。

1.1.1 E1采用测量工具的实验测试 采用测量工具对工程制品进行测量,然后判断质量,可以视作是一种最简单的实验测试,此类测试实验有33个,占比38.4%。《考工记》关于制造车轮有“故可规、可万、可水、可县、可量、可权也,谓之国工^{[7]8}。(因此所制作的轮子可以经得起圆规、曲尺、水、垂线、黍、称的检验,这样的工匠就可以称之为国工了)”的表述,就是这方面的例子。

《考工记》中特意专题记录了栗氏制作量器的精密工艺,并提及其铭文“时文思索,允臻其极,嘉量既成,以观四国,永启厥后,兹器维则”^{[7]21}。该铭文体现出工匠对测试测量的重视,精确的度量器可作为法则通行各国或启迪后世的标准化思

表1 “测试实验方法”分类统计
Table 1 Classification statistics of “testing experimental methods”

统计项目	“测试实验方法”分类			总计
	采用测量工具的实验测试(E1)	针对制品关键模块与关键性能的实验测试(E2)	依托特定运行工况环境进行的实验测试(E3)	
数量/个	33	39	14	86
占比/%	38.4	45.3	16.3	100

想。进一步考察此类测试方法,可继续细分为两小类:

(1) E1.1采用常规度量工具直接测量物理参数。例如对于部件的形状、重量、长度的测量。如“是故规之,以眡其圜也”^{[7]8},使用圆规来测量车轮是否规整;再如“权之,以眡其轻重之侔也”^{[7]8},称量轮子的重量以判断两轮轻重是否一致;又如“六尺有六寸之轮,纁参分寸之二,谓之轮之固”^{[7]8},使用尺来测量车轮的大小、凿孔的孔位是否合乎规范。

(2) E1.2结合计算间接获取物理参数。以角度测量为例,古人没有360°圆心角概念,也没有量角器,而《考工记》中记录了一些角度测量方法,反映出工匠的智慧。如“筑氏为削,长尺博寸,合六而成规”^{[7]16}(筑氏制作削,长度为一尺,宽度为一寸,六把削合起来,正好围成一个圆),即通过将六只笔刀合在一起是否可以成为圆来判断削的制作是否符合规范。由此可知削的弯曲程度为圆心角60°。《考工记》中还有合五成规、合九成规的说法,均属此类。

1.1.2 E2针对制品关键模块与关键性能的实验测试 工程制品一般由若干模块组成。为了确定某些关键模块对工程制品整体功能或性能的影响情况,就需要进行有针对性的实验,此类与制品关键模块有关的检测实验约有39个,占比45.3%。例如,《考工记》中记录的“桡之,以眡其鸿杀之称也”^{[7]30}(弯曲箭杆以观察它的粗细是否匀称),就描述了针对箭杆(关键模块)设计的测试实验。在这类测试中,百工对性能影响因素的判断是通过子系统分析来完成的,可视作是基于子系统的测试。经过文本分析,此类针对关键模块的测试实验可以继续细分为两类:

(1) E2.1指向模块品质检验的测试实验。例如,《考工记》在箭矢测试方面,有“前弱则俯,后弱则翔,中弱则纤,中强则扬。羽丰则迟,羽杀则趯。是故夹而摇之,以眡其丰杀之节也。桡之,以眡其鸿杀之称也。”^{[7]30}(箭杆前面弱箭头就会向下栽,后面弱箭头就会向上扬,中间弱箭的飞行就纤曲而不直,中间强而两头弱箭就会飘飞;箭羽过密,箭就飞行迟缓,箭羽稀疏,箭就飞行疾速而偏离目标掉落一旁。因此用手指夹着矢的背部摇动它,以观察箭羽的疏密是否合适,弯曲箭杆以观察它的粗细是否匀称)的表述。

此例中,良好的羽箭飞行性能是工匠希望达到的工程目标。“俯、翔、纤、扬、趯”等词语表达的是性能评价。这几类观察结果无法通过度量工具给出,必须进行大量羽箭飞行实验才能总结出其规律。箭杆和箭羽是羽箭系统的两个重要模块,可以看出百工是对箭杆特征(即前弱、后弱、中弱、中强)和箭羽特征(羽丰、羽杀)与羽箭飞行性能(即俯、翔、纤、扬、趯)的关系进行了分类研究。这种分类研究考虑了系统各模块及其模块参数的变化,有系统观的思想。分析手法有“进行所谓‘简化’和‘钝化’处理,以去粗取精和去伪存真”,体现出一种“对客观对象进行有目的、有计划的考察,然后对考察结果进行分析和判断”的意蕴。这些特征与伽利略实验法基本一致。^{[8]112}实验观察结果也符合“规律是两个以上的概念或现象之间相互关系的陈述”;从表述形式上看,具有“如果……则……”这一类描述规律的最普通形式^{[8]195}。事实上,也有学者将百工对于羽箭飞行现象的观察,认为是人类最早的空气力学知识^[9]。

需要注意的是,百工没有将羽箭飞行实验作为其质量评定方法,而是采用了更简单成本也更低

的实验, 即通过“夹而摇之”和“桡之”等操作, 来分辨羽毛和箭杆的特征, 这在实际测试评估中更具效率。“是故”这样的词汇体现出目的性和逻辑性, 表明百工能够有目的地考察现象、获得规律, 并在此基础上进行测试实验方法的设计和遴选。

再如, 《考工记》中记录了检测兵器木柄质量的三组弯曲实验: “凡试庐事, 置而摇之, 以眡其蜎也^{[7]35} (凡是检测长兵器柄的质量, 将后尖插在地上摇动它, 观察它是否弯曲)”; “炙诸墙, 以眡其桡之均也^{[7]35} (将它顶在两墙之间, 观察其弯曲时是否均匀)”; “横而摇之, 以眡其劲也^{[7]35} (将其横放在膝上, 抓住两头摇动它, 观察它是否强劲)”。木柄是长兵器的关键模块, 木柄在受力时如何弯曲变形是其关键品质特征, 不易通过度量工具直接测得。为此, 百工设计了三个检测实验, 通过“置而摇之”、“炙诸墙”和“横而摇之”, 观察木柄在不同受力条件下的弯曲变形效果, 以此来判断柄的质量是否优良。在现代工程中, 弯曲试验是材料机械性能试验的基本方法之一, 广泛用于检测许多机器零件。《考工记》中此类案例有很多, 其中7种主要涉及军备制造 (参见表2)。

(2) E2.2指向模块参数规制的测试实验。例如, “辐广而凿浅, 则是以大扞, 虽有良工, 莫之能固。凿深而辐小, 则是固有余而强不足也。故𡔷其辐广, 以为之弱, 则虽有重任, 𡔷不折。^{[7]8}

(榫眼如果宽度大而深度浅, 辐条安装上去容易动摇, 这种情况下, 即使技术再高超的工匠, 也没办法使其牢固; 榫眼深度深但宽度小, 就会导致虽然安装得很牢固, 但辐条的强度不够。因此安装辐条的榫眼的深度与其宽度要相等, 这样即使车有重载, 𡔷也不会毁坏)”。

对于车轮性能的评测, 百工通过评估榫眼宽度与深度对辐条装配效果的影响, 从而得出“榫眼的深度与宽度要相等”这一指向模块参数规制的结论。不难想到, 工匠此后对榫眼的制作, 以及百工此后对榫眼的检测, 都会以此为依据。通过简单的观察法就可以确定榫眼的深度与宽度是否相等, 但要发现并选择这样的工艺标准, 则必须借助大量实验发现其中的工程规律。相关案例还有许多 (参考表3), 这里不再一一叙述。

1.1.3 E3依托特定运行工况环境进行的实验测试 某些工程制品的质量不易通过度量工具或关键模块评估反映出来, 此时百工倾向于构造特定运行工况环境, 然后通过观察工程制品的实际运行表现来判定质量, 由于工况环境是工程制品的超系统, 因此此类测试也可视作是依托超系统的测试。

如, “良盖弗冒弗紘, 殷亩而驰, 不队; 谓之国工。^{[7]11} (好的车盖上即使不蒙幕、不用绳栓系幕, 车子横驰在垄亩间盖弓也不会脱落, 有这种技艺的工匠就可以称之为国工了)”。这里讨论了

表2 部分指向模块品质的测试实验分析
Table 2 Part of the analysis on testing experiments aiming at module quality

原文	系统	关键模块	操作	观察现象	实验目的
是故夹而摇之, 以眡其丰杀之节也 ^{[7]30}	箭	箭羽	夹而摇	观察箭羽的疏密是否合适	检测箭羽的疏密程度 (确保羽箭的飞行速度和稳定性)
桡之, 以眡其鸿杀之称也 ^{[7]30}	箭	箭杆	弯曲箭杆	观察箭杆粗细是否匀称	检测箭杆均匀程度 (确保羽箭的飞行方向)
凡试庐事, 置而摇之, 以眡其蜎也 ^{[7]34}	长兵器	柄	插在地上摇动	观察柄是否弯曲	检测柄的强度
炙诸墙, 以眡其桡之均也 ^{[7]35}	长兵器	柄	顶在两墙之间	观察柄是否弯曲均匀	检测柄的质量
横而摇之, 以眡其劲也 ^{[7]35}	长兵器	柄	横放在膝间摇动	观察柄是否强劲	检测柄的强度
囊之而约, 则周也 ^{[7]22}	皮甲	革	放入甲囊中	观察皮甲否密实而体积小	检测革的质量
举之而丰, 则明也 ^{[7]22}	皮甲	革	举起来	观察皮甲否显得宽大	检测革的质量

表3 部分指向模块参数规制的测试实验分析
Table 3 Part of the analysis on testing experiments aiming at module parameter regulation

原文	系统	关键模块	实验	观察现象	实验目的
辐广而凿浅, 则是以大抓, 虽有良工, 莫之能固。凿深而辐小, 则是固有余而强不足也。故兹其辐广以为之弱, 则虽有重任, 毂不折 ^{[7]8}	毂	榫眼	榫眼宽度大而深度浅	容易动摇	获得规制: 榫眼的深度与其宽度要相等
			榫眼宽度小而深度深	强度不够	
毂小而长则枰, 大而短则挚。是故六分其轮崇, 以其一为之牙围, 参分其牙围而漆其二 ^{[7]8}	车轮	毂	毂上下尺度小而轴向尺度大	不坚固	获得规制: 车轮各部位要按一定的比例制作(书中有详细描述, 此处为略写)
			毂上下尺度大而轴向尺度短	不坚固	
凡居材, 大与小无并。大倚小则摧, 引之则绝 ^{[7]11}	车	三材	小材支撑大材	小材被摧毁	获得规制: 大材和小材不能直接装配
			小材与大材衔接牵连	小材被拉断	
已倨则不入, 已句则不决。长内则折前, 短内则不疾, 是故倨句外博 ^{[7]17}	戈	援和胡	援和胡之间的角度太钝	不易啄入目标	获得规制: 援和胡之间的夹角应该稍微大于直角
			援和胡之间的角度太锐	不能割断目标	

一种“弗冒弗紘, 殷亩而驰”的运行工况, 而车盖质量好坏可以通过盖弓是否脱落的差异体现出来。需要认识到的是, 这类测试往往以制品能够在特殊工况环境中正常运行作为质量标准, 而至于被测制品的内在结构与制品性能的关系该如何把握, 则完全交给工匠去处理。这种测试标准的制定思路非常类似今天许多汽车制造商通过越野实地测试来评定汽车越野性能的做法^[10]。能够达到“谓之国工”标准的工匠必然是稀少的, 可见能够通过此类工况测试并不容易。《墨子·小取》中有“其然也同, 其所以然不必同”^{[11]360}的观点, 对应于达到同样功能或性能可以有多种工程解决方案。比较可知, 采用E2类标准, 技术路径是固定的, 而采用E3类测试标准, 能够包容能工巧匠“百花齐放”, 通过尝试多种技术路径达成标准要求, 可以促进创新与发展。

越是复杂的工程, 其组成模块也越复杂, 工程质量评估所涉及到的因素越多, 就越难采用E1、E2类的测试方法来反映制品的整体性能, 此时将不得不考虑采用E3类方法。由于涉及到运行环境搭建和运行工况实施, 采用E3类方法有可能意味着较高的测试成本。例如, 进行“殷亩而驰”的测试, 很可能需要驾驶员在测试试验场驾车驰骋几十分钟, 才能完成质量检验。车辆属于大型工程制品, 数量也不是太多, E3类方法的测试成本是

可以承受的。而对于羽箭这一类数量极大制品, 断无可能针对每一支羽箭进行一次E3类测试, 所以百工只能在借助E3类实验发现质量原理后, 采用简化的“夹而摇之”和“桡之”等E2类方法来应对大规模制品检验。相对而言, E1和E2类测试实验的效率更高, 也更为经济, 有利于百工进行规模化的测试评估, 或可从此种角度理解E3类方法占比较低(约16.3%)的原因。

工况越复杂, 越需要百工对工程问题有深刻的洞察力。例如《考工记》在探讨水利工程时有“善沟者, 水漱之; 善防者, 水淫之。”^{[7]38}(好的沟渠, 可以通过水的冲刷避免淤积; 好的堤防, 可以通过水的淤积而使堤防更加坚厚)”的论述。挖掘沟渠与筑建堤防主要表现为土方工程, 涉及到的质量因素非常多, 而周朝百工寥寥数语, 仅仅将是否善于利用工况环境中的水流泥沙特点作为工程水平是否高明的判断依据。这让人联想到都江堰水利工程的例子。历史上有无数沟渠堤防工程已经消失不见, 而都江堰水利工程却历经2200年仍然在用, 其工程持久性的秘密恰在于合理利用了自然力进行排沙^[12-13]。古代工匠注重“天人合一”, 确有许多感性的成分, 但也有对自然现象的考察测算, 对复杂因果联系的分析思辨, 对利弊得失的权衡取舍, 否则很难做出这样简明而深刻的判断。古人著书尚简, 求学尚悟, 呈现此类工

程智慧, 也只寥寥数语, 直陈要旨, 乍看似乎是一种经验之谈。真正解析这些工程作品, 揣摩其思维, 会发现这种“经验”很可能也是依托于某些必然性之上的推理、测算、感悟、想象、推演、调试等多种思维方式的有机综合。还有其他测试实验的案例, 也与依托特定运行工况相关(见表4)。

1.2 与对照受控实验相关的对照式关联现象表述

《考工记》中的有些文字呈现出将相互关联的现象进行对照的记录风格, 这种文字表述类型可称为“对照式关联现象表述”。有了对照式关联现象表述, 就可以据此进行因果逻辑推理, 得出规律性见解。经统计, 《考工记》中至少有24例对照式关联现象表述。

在现代, 对照受控实验一般被视作是发现现象之间存在因果联系的判断依据之一。但对照受控实验的核心结果, 也是对照式关联现象表述。大量出现于《考工记》中的对照式关联现象表述, 意味着当时有可能已经出现了对照受控实验, 或至少人们已经能够将积累起来的经验与观察以对照方式加以有序的整理和呈现以呈现因果规律。即便参照钱兆华先生界定经验与科学的标准^[5], 这种有逻辑推理内涵的经验, 不能将之简单划归为普通的经验, 而应当算作是一种被科学化加工的经验。这样, “对照式关联现象表述”这一概念就可以成为将古代的科学化经验、古代对照受控实验和现代受控实验联系起来进行讨论的纽带。

从逻辑角度考察《考工记》中对照式关联现象

表述的语言风格, 还可以得到以下一些细分的类别:

1.2.1 通过有无对照呈现必要条件 《墨经》中的“小故, 有之不必然, 无之必不然”和“大故, 有之必然, 无之必不然”^{[11]287}, 其语言形式可以概括为“有 X , 则 Y ; 无 X , 则 Z ”。有 X 与无 X 构成了有无对照, 再加上小故大故内在的因果逻辑概念, 能够呈现出对照式关联现象表述的完整形态和内在含义。《考工记》文本中, 一般给出的是缺省形态的有无对照, 语言形式往往是“无 X , 则无 Y ”, 以呈现必要条件。如, “凡察车之道, 欲其朴属而微至。不朴属, 无以为完久也; 不微至, 无以为戚速也^{[7]11} (大凡检验车子的方法, 一般希望它要坚固而且轮子接触地面的面积要小。不坚固, 使用就不能持久; 轮子着地面积不小, 就不会运转迅捷)”。这里的“不……, 无……”可以对应于“无 X , 则无 Y ”, 体现出一种因果逻辑关系, 意味着“朴属”是“完久”的必要条件, “微至”是“戚速”的必要条件。

从现象对照角度看, 只有给出有 X 与无 X 两组条件以及相关的现象, 才能形成完整对照。《考工记》中省略一组条件, 或许是出于行文尚简, 节约文字的考虑。对于缺省的条件, 又存在两种可能性: ①默认“有 X , 则 Y ”成立, 因此不必要给出。②“有 X , 则 Y ”不见得成立, 所以不写。具体到本例中, “有 X , 则 Y ”如果对应于“得朴属, 可以为完久; 得微至, 可以为戚速”^{[7]30}, 是可以成立的。

表4 部分依托特定运行工况进行的测试实验分析
Table 4 Part of the analysis on testing experiments conducted under specific operating conditions

原文	特定的运行工况	优良制品运行标准
终日驰骋, 左不榘; 行数千里, 马不契需; 终岁御, 衣衽不敝; 此唯辂之和也 ^{[7]13}	终日驰骋、行数千里、终岁御	左侧的马不疲倦、马蹄不受伤、御者的衣服不破烂
良盖弗冒弗紘, 殷亩而驰, 不队; 谓之国工 ^{[7]11}	车子横驰在垄亩间, 车盖不蒙幕、不用绳栓系幕	盖弓不脱落
善沟者, 水漱之; 善防者, 水淫之 ^{[7]38}	水的冲刷	好的沟渠, 可以通过水的冲刷避免淤积; 好的堤防, 可以通过水的淤积而使堤防更加加厚
六建既备, 车不反覆, 谓之国工 ^{[7]35}	五种兵器和旌旗在车上插好行驶	车驰行时它们不歪斜倾倒
凡试梓饮器, 乡衡而实不尽, 梓师罪之 ^{[7]33}	饮器平置	爵中还留有余沥

1.2.2 通过分级对照呈现突变条件 语言形式往往为“ X_0 , 则 Y_0 ; X_1 , 则 Y_1 ; X_2 , 则 Y_2 ”。如“羽丰则迟, 羽杀则趣。是故夹而摇之, 以眊其丰杀之节也”^{[7]30}。文字给出了两组条件, 即羽毛过密和羽毛稀疏, 可以设为 X_1 和 X_2 , 它们所对应的状态不是过慢, 就是不稳, 都不是理想的飞行状态, 分别用 Y_1 和 Y_2 表示。从上下文的意思看, 应当还有一种缺省了的理想条件, 即羽毛疏密适中的区间, 可以设为 X_0 。在 X_0 情况下, 箭的飞行应当是又快又稳, 可用 Y_0 表示。有了三组条件, 就可以考虑从理想解向两极变化的情况: $X_0 \rightarrow X_2$ 的方向, 百工会观察到随着羽毛越来越稀疏, 箭的飞行越来越不稳; 而 $X_0 \rightarrow X_1$ 的方向, 百工会观察到随着羽毛越来越密集, 箭尽管飞行稳定, 但却越来越慢。

从工程角度看, 给箭添加羽毛的主要目的是增加稳定性。过于稀疏的羽毛达不到增加稳定性的目的, 所以在现实中应当有稳定性不可接受的突变条件, 可以用 X_1 来表征。使用丰密的羽毛能够增加稳定性, 但过于丰密就会带来不必要的阻力, 使速度不可接受, 所以在现实中应当有速度慢到不可接受的突变条件, 可以用 X_2 来表征。

从量化角度看, “有无对照”可以视作是二值化的研究, 而“分级对照”则意味着向三值化方向乃至多值化方向迈进了一步。但需要注意, 无论是“有无对照”, 还是“分级对照”, 《考工记》文本对现象的描述和研究都更加侧重于定性, 而非定量。即便是“分级对照”中的三值化分析, 也是采用某种术语来表征羽箭飞行性能的几类突变, 主要关注点仍然在定性的方面。

百工对羽箭飞行、钟形声效、樨眼宽深等工程现象的研究和观测, 仅就“通过系统的实验法发现因果联系”的意义而言, 与伽利略在斜面上观察小球滚动的实验相比, 在本质上并无不同, 其核心是通过实验法完成对某种重要现象的筛选, 使规律特征凸显呈现出来。伽利略以公式形式揭示自然规律给人们留下了深刻的印象, 以至于很多人认为在实验中探讨量化联系显得更为高级, 或探讨数学联系是实验的基本特征。而其实即便在西方现代科学领域, 巴斯德 (Louis Pasteur) 采用鹅

颈瓶确认微生物存在的实验、孟德尔 (Gregor Johann Mendel) 通过豌豆杂交确认基因存在的实验, 也都属于定性研究而非定量研究, 同样对科学形成了巨大的推动, 可见是否探讨量化问题并非实验法的核心特征或核心贡献。

探讨实验法的工程价值应以能否很好地解决工程问题来进行考量。揭示出上述羽箭飞行姿态问题所涉及到的空气动力学因素极为复杂, 即便是伽利略牛顿时代的科学家也无法给出细致的方程式来描述其飞行原理。在西周, 人们所掌握的数学物理知识自然更为有限。但百工能够因地制宜, 将羽箭飞行姿态与系统模块的变化关系进行规律性研究, 并使之转化为简单高效的测试检验方法, 使普通工匠也能把握提升羽箭品质的工艺原理, 从创新突破与工程智慧角度看是值得肯定的。

研究工程原理的第一步, 就是甄别诸多工程因素对整体制品系统产生何种影响以及如何产生影响。因此, 《考工记》中大量对照式关联现象表述的出现, 绝非偶然, 而是百工进行工程原理探究活动的必然成果。提出任何一则“对照式关联现象表述”并使之在《考工记》文本中稳定存在几百年, 都绝非易事。竹简时代的古文经典通常言简意赅, 只给出结论, 至于如何获得这些结论的过程, 当时或许有人讲授, 后人只能自悟揣摩。

从众多现象之中, 排除其他因素的影响, 而确定某两组现象之间存在必然的因果联系, 往往是很大的挑战, 也最能体现实验法的价值所在。在这一阶段, 工程研究与科学研究在方法论层面应当并无什么本质不同, 但人类的工程实践却远早于科学研究。

从《考工记》文本来看, 对照式关联现象表述出现在许多工程领域, 这说明这一形式背后的逻辑思维和实验方法在百工群体中有着普遍的接受度。百工群体没有在《考工记》中将这种探究工程现象因果联系的方法进一步理论化, 但墨子在《墨经》等著作中进行了相关理论建构, 给出了光学八条更贴近近代科学实验形态的例证。这些

现象都说明春秋战国时期的百工与工匠,对于采用实验法进行研究并不陌生。

2 《考工记》中周朝百工的因果思维与推理演绎思维

工程系统是一个复杂系统,与工程系统相关的内部因素和外部因素对于该工程系统的最终品质都有可能产生影响。《考工记》中有大量带有“故”和“则”等词语的表述,体现出百工对多种工程因果关系的思考与把握。百工对工程关键因果联系的考察范围涉及到需求、设计、工艺、技术、现象、运行、测试、分类、原料、原理、生产和管理等多个方面,体现出百工群体对于工程综合本质的深刻理解。我们归纳其因果关系至少有以下五种类别,记为C1~C5:

2.1 因果思维与简单因果关系表述

2.1.1 C1物理参数与制品性能之间的因果关系 由前述关于对照式关联现象的分析,可以发现百工已经能够通过对照实验,找到现象与现象、现象与方法的因果联系。如,“钟大而短,则其声疾而短闻;钟小而长,则其声舒而远闻。^{[7]18} (钟体大而短,发出的声音就急促而短暂。钟体小而长,发出的声音就舒缓而持久。)钟已厚则石,已薄则播,侈则柞,弇则郁,长甬则震。(钟体太厚就会像石头一样发不出声音,钟体太薄发出的声音就会播散,钟口太宽发出的声音就过于迫促,钟口太窄发出的声音就抑郁回旋难出,甬过长发出的声音就会有震颤的感觉)。”

这一类工程因果关系表述与自然科学规律的联系最为密切。示例给出了钟的多种工程参数如“大、小、长、短、厚、薄、侈、弇和长甬”,对声音也有“声疾、短闻、声舒、远闻、石、播、柞、郁、震”的分类表述。这同样意味着古人已经对所观察现象进行了有目的有意识的分析研究,意识到这些工程参数与钟的声效之间存在因果联系,并提炼出一些规律性的认识。如果当时的百工能够掌握频率测试方法,那么得出声学规律也就只

是数学问题了。

2.1.2 C2需求与设计的因果关系 如,“故攻国之兵欲短,守国之兵欲长。攻国之人众,行地远,食饮饥,且涉山林之阻,是故兵欲短;守国人之寡,食饮饱,行地不远,且不涉山谓林之阻,是故兵欲长。^{[7]34} (因此攻国的兵器要短,守国的兵器要长。攻国的人员多,行路远,饮食短缺,而且要跋涉山林险阻,因此兵器要短;守国的人员较少,饮食充足,行路不远,而且不用跋涉山林险阻,因此兵器要长)。”

这一类工程因果联系表述与社会运行规律的联系较为紧密。示例体现出因果网络:兵器长短是一种物理特征,并且非常容易判断。而这里对兵器制品物理特征的取舍延伸到了社会需求层面。具体而言,兵器长短选择取决于作战处于守方还是攻方。而进一步分析原因,是由于攻守涉及到行路长短、饮食饥饱、山川障碍多少等因素,而这些几类因素决定了长兵器和短兵器在实战中的优劣。此类因果联系鲜明地体现出工程活动的目的性、社会性和复杂性。

2.1.3 C3检验方法与制品运行方式之间的因果关系 如,“凡察车之道,必自载于地者始也,是故察车自轮始。^{[7]6} (观察车子的方法,是从承载于地面的部分开始,故察车看时应从轮子开始)。”

C3类因果联系和E3类实验方法都指向了制品运行方式,说明百工对于制品运行方式有浓厚的兴趣。制品在实际工况中能否顺利运行涉及到众多工程因素。对制品运行状态的观察和分析是发现、理解和解决工程问题的必由之路,因此制品运行和检验方法之间存在因果联系,也就不难理解。

2.2 推理演绎思维与链式因果表述

《考工记》文字中有许多由两级因果关系句构成的链式因果表述形态,体现出百工能够在获得某种规律之后进行推理演绎的思维特征。这些链式因果表述往往与设计、工艺或测试有关,体现出百工的推理演绎带有鲜明的目的性。

2.2.1 C4制品性能因果与制品设计方案之间的因果关系 如,“已倨则不入,已句则不决。长内则折前,短内则不疾,是故倨句外博。^{[7]17} (援和胡之

间的角度太钝, 战斗中用前锋啄人就不容易啄入; 角度太锐, 战斗中不能割断目标。内太长就容易折断援, 内太短啄击就不迅捷, 因此使援与胡之间的角度稍向外张)”。

不难看出, 此文本所体现的思维逻辑是: 由于事物在 X_0 条件时展现出 Y_0 属性(一级因果), 在 X_1 条件时展现出 Y_1 属性(一级因果), 所以我采用某种设计方法, 使事物能够在 X_2 条件时展现出 Y_2 属性(二级因果)。也可以采用递进提问的方式来还原出百工的工程思维过程:

为什么有些戈并不便于使用, 啄割效果不好?

——这类问题是戈的援与胡之间的角度不适宜所致。如果援和胡之间的角度太钝, 战斗中用前锋啄人就不容易啄入; 角度太锐, 战斗中不能割断目标。

那么戈的援与胡应当怎样设计?

——援和胡之间的夹角以稍微大于直角为宜, 这样既容易啄入又容易割断目标。

那么如何从可用性角度对戈的质量进行检验?

——观察援和胡之间的夹角, 以此角稍微大于直角为宜, 过钝或过锐都不合格。

百工给出上述制品设计方案的思维过程, 非常符合现代设计学的要旨。设计学之父赫伯特·西蒙(Herbert Alexander Simon)认为“必须从某些逻辑的问题入手进行设计”^[14]。示例中, 百工通过“已倨则不入, 已句则不决”^[7]¹⁷这样一组对照式关联现象表述给出了影响制品功能的两组因果关系, 同时也提示出解决方案的“备选空间”; 而通过“是故倨句外博”给出了最终制品设计方案, 这显然是一种“手段-目的”分析的思维逻辑, 旨在寻求“令人满意的行动”。虽然文字言简意赅, 但却非常符合西蒙对于设计逻辑推理的理论概括^[14]¹¹⁵⁻¹²⁸。

2.2.2 C5制品性能因果与工艺方法之间的因果联系 如, “阳也者, 稊理而坚; 阴也者, 疏理而柔。是故以火养其阴, 而齐诸其阳, 则毂虽敝不蔽。^[7]⁸”(阳面部分纹理细密, 木质坚实; 阴面部分纹理粗疏, 木质柔软, 所以要用火烘烤阴面, 使其坚实, 与阳面性质一致, 这样车毂即使用旧了, 也不会变形。))。

此例给出了使车轮不发生变形的工艺原理。可以用递进提问的方式还原出百工的工程思维过程:

为何有些车轮用旧会变形?

——因为这些车轮所用的木头变形了。

为何这些车轮所用的木头会变形?

——因为木头生长过程有向阳和背阴两面, 木质坚实程度不一致。木制车轮使用时间久了, 阳面坚实所以变形程度小, 阴面柔软所以变形程度大, 就会出现整体的形状畸变。

如何才能避免车轮所用的木头的变形?

——采用火来烘烤阴面, 就能使木质坚实程度一致化。这样的木制车轮使用时间久了, 阳面和阴面的变形程度也会保持一致, 就不会出现整体形状畸变。

如何从耐久性角度判断车毂质量?

——检查车毂所用木材的工艺, 未使用烘烤工艺的制品有可能久用变形。

这一例子体现出制品质量评测、制品制作工艺、制品用材处理、材料自然原理之间的内在逻辑联系。而人们最初发现轮子经过长时间使用会出现变形以后, 可供怀疑探究的因素可以有很多。如果百工或工匠没有对于复杂因果联系的追问、思考和实验, 就难以将如此多的现象以严密的因果逻辑联系在一起。而如果将诸多现象以因果逻辑联系在一起, 就必然会用到链式因果的表达模式。

3 工程思维方法的中国源流及其工程哲学史意义

科技史的一般观点是伽利略等16、17世纪的科学家将这种“通过系统的实验可能找出因果关系”的方法论带入到人类文明史之中。^[15]《考工记》成书年代的主流推定在春秋时期^[6, 16], 不晚于公元前5世纪中期的战国早期^[17], 而如果综合考古学和历史学研究成果, 则可发现与百工制度相关的官营手工业和“工不族居, 不足以给官”^[18]¹⁷⁵、“工商食官”^[19]制度可追溯至夏商时期, 在春秋中期的公元

前6世纪后逐步消解, 大约存在了1400年之久。^[19-21]这一时期, 百工以一种非常稳定的族居、家族氏传承体系进行专业化的工匠技艺积累。采用实验法和因果逻辑解决工程问题的思维方法很可能在公元前5世纪之前至公元前20世纪之间就已经出现。

科技史的一般观点是16、17世纪的弗朗西斯·培根最早开始提出成体系的实验科学理论, 而形式逻辑体系则可以追溯至公元前4世纪亚里士多德的“三段论”。对《墨经》的研究则显示, 公元前5世纪的墨子就已经完成了逻辑理论建构和实验理论建构, 这些理论简要概括起来包括: ①给出了故、大故、小故等与因果逻辑相关的概念定义; ②给出了兼、体、偏、损等与系统理论相关的概念定义; ③对闻、说、亲、名、实、合、为等认知方式进行了论述, 强调通过亲身动手实践来进行认知, 并要力求使理论与实践能够相合; ④给出了通过逐步去除偏体的偏去法实验步骤; ⑤提出了“假必悖, 说在不然。假必非也而后假^[11]³¹²”等通过实验现象检验命题是否为假的实验思想; ⑥《墨经》中所记载的实验与具体工件制品无关, 如小孔成像实验、杠杆实验等, 与《考工记》中的实验相比, 这些实验更加接近于纯科学实验的风格; ⑦《墨经》中有明确的分类理论和同异理论, 关于光学、力学、经济学规律的条目也相对集中, 可视作分科分类研究的雏形。

百工的工程思维方式与墨家工程认识论存在共性特征且有延续发展的现象, 说明实验法和因果逻辑存在着极为清晰明确的工程源流。先秦诸子多出身于士大夫阶层, 而仅有墨家学派的创始人及大量弟子皆为“农与工肆之人”, 且规模庞大。先秦诸子很少提及百工, 而仅有墨家在论著如法仪、节用等篇中对百工从事之道如数家珍; 先秦

诸子百家争鸣的话题多涉社会、政治和伦理等方面, 而仅有墨家以工程创新、科学发现、逻辑推理和实验研究为其鲜明特色。这些都意味着到了战国初期, 百工与工匠的工程智慧, 伴随着墨家学派的兴起, 从生产领域进入到学术领域, 并借助百家争鸣时期空前热烈的学术氛围, 得到了发展与升华。

4 结语

在《考工记》中有“知者创物, 巧者述之守之, 世谓之工。百工之事, 皆圣人之作也。烁金以为刃, 凝土以为器, 作车以行陆, 作舟行水, 此皆圣人之所作也”的论述。将“百工”称为圣人, 将“百工之事”称为“圣人之作”, 百工又是善于采用实验法与因果推理的, 这就与爱因斯坦认为的“中国的贤哲没有走上这两步”形成了鲜明而有趣的对照。《考工记》被收录在《礼记》之中, 是周礼的组成部分, 这说明至少在周朝是尚工的。中国古代文化中并不缺少尚工文化的元素。考察燧人钻木取火、伏羲制网罟、神农制耒耜、黄帝作舟车、大禹治水……等就会发现, 中国有许多与造物发明相关的上古圣贤, 这一点与古希腊等地区的文明有很大不同。总体来看, 《考工记》作为中国乃至全球第一部工程技术文献, 写成于科学概念出现之前, 它极为独特的价值之一, 或在于能够让后人由此找到那种最本真的工程认识论视角, 了解到实验法和逻辑推理的结合也曾是古代工匠工程创新思维的重要组成部分。重视对《考工记》、《墨子》等文献的研究, 可以重新认识中国古代工匠的工程思维方式和工程方法论, 证成工程哲学在中国的源远流长的传统和历史。

参考文献

- [1] 李约瑟. 文明的滴定: 东西方的科学与社会[M]. 张卜天, 译. 北京: 商务印书馆, 2016.
Needham J. The Grand Titration: Science and Society in East and West[M]. London: Routledge, 2005.
- [2] H.弗洛里斯·科恩. 世界的重新创造: 现代科学是如何产生的[M]. 张卜天, 译. 北京: 商务印书馆, 2020.
Cohen H F. De Herschepping van de Wereld[M]. Amsterdam: Uitgeverij Bert Bakker, 2008.

- [3] 邢兆良. 从爱因斯坦论断到李约瑟难题: 从科学形态的角度进行的理论思考[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2004, 12(2): 31-36.
Xing Z L. From Einstein's arguments to Needham thesis—some theoretical thoughts in terms of the form of science[J]. Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao (Shehui Kexue Ban), 2004, 12(2): 31-36.
- [4] 钱兆华. 对“李约瑟难题”的一种新解释[J]. 自然辩证法研究, 1998, 14(3): 55-59.
Qian Z H. A new explanation of Needham problem[J]. Studies in Dialectics of Nature, 1998, 14(3): 55-59.
- [5] 钱兆华. 对“李约瑟难题”的再剖析[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2003, 30(5): 10-13.
Qian Z H. Reanalysing of “N. Joseph puzzle”[J]. Journal of Henan Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2003, 30(5): 10-13.
- [6] 李秋芳. 20世纪《考工记》研究综述[J]. 中国史研究动态, 2004(5): 10-17.
Li Q F. A summary of the research on *Kao Gong Ji* in the 20th century[J]. Trends of Recent Researches on the History of China, 2004(5): 10-17.
- [7] 关增建. 考工记: 翻译与评注[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
Konrad Herrmann. Guan Z J *Kao Gong Ji*: Translation and Commentary[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.
- [8] 王沛民, 顾建民, 刘伟民. 工程教育基础: 工程教育理念和实践的研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 112-195.
Wang P M, Gu J M, Liu W M. Essentials of Engineering Education[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 112-195.
- [9] 王燮山. “考工记”及其中的力学知识[J]. 物理通报, 1959(5): 197-200.
Wang X S. *Kao Gong Ji* and its mechanical knowledge[J]. Physics, 1959(5): 197-200.
- [10] 侯金钟. 浅析军用越野汽车的越野性能[J]. 重型汽车, 1997(2): 8-10.
Hou J Z. Analysis on off-road performance of military off-road vehicles[J]. Heavy Duty Truck, 1997(2): 8-10.
- [11] 孙诒让. 墨子间诂[M]. 北京: 中华书局, 2021.
Sun Y R. Mozi Jiangu[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2021.
- [12] 刘大为. 都江堰: 优美的工程诗篇[J]. 力学与实践, 2011, 33(3): 97-101.
Liu D W. Dujiang Yan-a beautiful engineering poem[J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(3): 97-101.
- [13] 李可可. 从都江堰看我国传统水利科技与文化[J]. 中国水利, 2020(3): 28-32.
Li K K. Viewing traditional water science and technology and culture from the prospect of Dujiang Weir[J]. China Water Resources, 2020(3): 28-32.
- [14] 赫伯特·A·西蒙. 关于人为事物的科学[M]. 杨砾, 译. 北京: 解放军出版社, 1985: 115-128.
Simon H A. The Sciences of the Artificial[M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [15] 炎冰. 实验逻辑与力学宇宙: 伽利略科学哲学思想新探[J]. 自然辩证法通讯, 2008, 30(5): 32-37, 110.
Yan B. Experiment logic and mechanics universe[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2008, 30(5): 32-37, 110.
- [16] 宣兆琦. 《考工记》的国别和成书年代[J]. 自然科学史研究, 1993, 12(4): 297-303.
Xuan Z Q. The native land and the writing time of *Kao Gong Ji*[J]. Studies in the History of Natural Sciences, 1993, 12(4): 297-303.
- [17] 闻人军. 考工记译注(修订本)[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2021.
Wen R J. Translation and Annotation of *Kao Gong Ji* (the Artificers'record)[M]. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2021.
- [18] 黄怀信, 张懋镠, 田旭东. 逸周书汇校集注(修订本) [M]. 上海: 上海古籍出版社, 2007.
Huang H X, Zhang M R, Tian X D. Yizhou Shuhui Jiaoxiang (Revised Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Ancient Books Publishing House, 2007.
- [19] 陆德富. 战国时代官私手工业的经营形态[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
Lu D F. The management form of official and private handicrafts in the Warring States period[D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [20] 汤洁娟. 中原地区两周手工业遗存研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
Tang J J. A study on the handicraft industry remains of Zhou period of the central Plains[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [21] 韩香花. 史前至夏商时期中原地区手工业研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
Han X H. On the handicraft industry in central plains from prehistoric to Xia and Shang periods[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

Experimental Exploration and Causal Reasoning in *Kao Gong Ji*: A Study of the Origin and Development of Engineering Philosophy in China

Ji Yang^{*}, Wang Yu, Chen Ruiqi, Wu Zhenyu

School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In order to explore the existence of experimental exploration and causal reasoning methods in ancient Chinese engineering, and to re-conceptualize the engineering thinking and engineering methodology of ancient Chinese craftsmen, this study examines the methods of testing and inspection of Baigong in the Zhou Dynasty from *Kao Gong Ji*, the first text on engineering and technology in China. This study adopts the content analysis method, in which, first of all, textual content related to experimental exploration and causal reasoning in *Kao Gong Ji* is identified and the analysis units are selected; secondly, classification to delineate the categories of experimental methods and causal-reasoning thinking is given; thirdly, a quantitative process is carried out by coding the text according to the above categories; fourthly, statistics and analyses of the coding results are carried out; finally, the result explanations and the study conclusions are presented.

This study finally identifies and extracts 86 cases of analysis units. And the statistical analysis shows that at least three types of experimental methods exist in the text of *Kao Gong Ji*. First, the experimental method based on measuring tools, that is, through conventional metrological tools or calculating indirect metrics to obtain physical parameters to test the quality of engineering products. This method reflects the standardization thoughts of Baigong, and can be regarded as the simplest experimental test. Second, the experimental method based on the key modules, that is, through the design of the targeted experiments to determine the impact of the key modules on the overall functionality or performance of the engineering products. This method is often used by Baigong to test the quality of a key module or to determine the parameter regulation of a key module. Third, the experimental method based on operation conditions, that is, to determine the quality of engineering products by observing the actual operation performance of engineering products. This method is often used by Baigong to complete the inspection of complex engineering products. In addition, it is found that some of the texts in *Kao Gong Ji* show the recording style of phenomena relation contrast (*i.e.*, the formulation of phenomena relation contrast). This kind of expression reflects the similarity to the expression of modern controlled experiments, and there are at least 24 cases of this kind of expression in *Kao Gong Ji*, which means that Baigong of the Zhou Dynasty were already able to organize and present their accumulated experiences and observations in an orderly manner in order to show the laws of cause and effect.

The text of the above discussion on product quality issues presents Baigong's thinking on grasping a variety of causal connections in engineering. This study summarizes these causal relationships into five categories, which include three types of simple causal expressions, such as the causal relationship between product performance and physical parameters, the causal relationship between product demand and design, and the causal relationship between product quality check methods and operation modes, and which also includes two types of causal chain expressions, such as the causal relationship between product performance's causal and product design program, and the causal relationship between product performance's causal and process method. Among them, the chain causal expression form reflects the thinking characteristics of Baigong's conscious and purposeful causal reasoning and deduction.

Albert Einstein believed that the scientific methodology of finding cause and effect through systematic experimentation was the basis for the development of modern Western science; and that this way of thinking did not exist in ancient China. This view has had a wide impact around the world. This study analyzes the texts of *Kao Gong Ji* and finds that there were experimental methods and logical thinking of causal reasoning in *Kao Gong Ji* which is the first book on engineering and technology in China, also worldwide. And the relevant textual cases that show the expression "finding out causal relationships through experiments" are similar to modern controlled experiments. This study questions Einstein's viewpoint, and this challenge sheds new light on how to analyze and answer "Joseph Needham's problem". At the same time, this study has certain research significance and reference value for the rethinking of today's engineering epistemology and engineering ontology, as well as the reflection of ancient engineering philosophy in China.

Keywords: *Kao Gong Ji*; experiment; exploration; cause-and-effect reasoning; engineering