

当代量子技术的诠释学分析

沈 健^{1,2}

(1.嘉应学院 科研处,广东 梅州 514015; 2.湖南师范大学 科技与社会发展研究中心,湖南 长沙 410081)

摘要:对当代量子技术的诠释学分析,首先需要理解量子技术的研究范式,进而找出量子技术研究中有待诠释的哲学问题:量子技术内在语言与逻辑问题、量子技术主体与客体、量子技术与经典技术、量子技术与科学实在等关系问题。对这些问题的哲学解答,有助于找出一条当代量子技术的诠释学新路径。量子技术的诠释学不能仅限于对量子技术文本及其背后意义的解读,而是应该瞄准通过诠释使量子技术这种新技术获得更为夯实的认知基础,从而推动技术理性、技术实践、技术文化的一体化进步。

关键词:量子技术;诠释学;量子技术逻辑;量子文化

[中图分类号]N03 [文献标识码]A [文章编号]1672-934X(2023)01-0034-07

DOI:10.16573/j.cnki.1672-934x.2023.01.004

Hermeneutic Analysis of Contemporary Quantum Technology

Shen Jian^{1,2}

(1.Department of Academic Research, Jiaying University, Meizhou, Guangdong 514015, China; 2.Institute of Science, Technology and Social Development, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China)

Abstract:For the hermeneutic analysis of contemporary quantum technology, the most important is to understand its research paradigm, and then find out the philosophical issues to be interpreted in its research, including the internal language and logic of quantum technology, the relationship between the subject and object of quantum technology, the relationship between quantum technology and classical technology, and quantum technology and scientific reality, etc. The philosophical interpretation to these issues are helpful to find a new hermeneutic path of contemporary quantum technology. The hermeneutics of quantum technology should not be limited to the interpretation of the text of quantum technology and the meaning behind it, but should aim at obtaining a more solid cognitive foundation via interpreting this new quantum technology, so as to promote the integration of technical rationality, technical practice and technical culture.

Key words: quantum technology; hermeneutics; quantum technology logic; quantum culture

量子技术离大众化的实用阶段越近,从哲学上去诠释它就显得越发紧迫和必要。诠释当代量子技术,究竟是沿袭科学哲学里关于科学诠释的现存理论,比如逻辑实证主义、历史主义

理论,还是借鉴科学哲学之外的现存诠释学理论,比如伽达默尔哲学诠释学、戴维森诠释理论呢?中国社会科学院大学张江认为,需要研究出一套量子技术内在的新诠释理论,而不能

收稿日期:2022-11-08

基金项目:国家社会科学基金重大项目(19ZDA038)

作者简介:沈 健(1974—),男,教授,哲学博士,主要从事科学哲学和物理学哲学研究。

其他现存的诠释学理论生搬硬套去理解当代量子技术。^①张江的观点是有一定道理的,当代量子技术是一个新事物,以旧有的诠释学理论去诠释当代量子技术,就好比以16—17世纪近代机械自然观去诠释当代的分子生物学一样,这种生硬套搬,或许能够带来一些新启迪,但肯定诠释不了新科技的新特质。鉴于此,对于量子技术的诠释,研究者不能只是局限在狭隘地理解和分析量子技术文本上,诠释主体的首要工作是踏进当代量子技术的范式(进入范式),然后对量子技术概念、原理和设计过程进行批判性反思,并找出需要在哲学层面予以诠释的技术问题(找到待释问题)并加以分析,进而自然而然提出一套解答这些待释问题的合理性诠释理论(提出诠释理论)。

一、当代量子技术范式下的量子技术

为了解当代量子技术的范式,首先需要系统理解量子技术领域的科学知识。目前,这方面的知识已经充分展示在各种规范化的教科书当中,例如《量子信息论——物理原理和某些进展》^[1]《量子计算与通信加密》^[2]《量子信息物理原理》^[3]《量子通信原理与技术》^[4]等;如果有机会,我们更可以走进量子技术实验室,直接了解技术专家的设计流程。只有如此,我们才可能真正进入当代量子技术范式,从而对量子技术的实质有一个准确把握。

量子技术是基于量子力学之上的技术,是将量子力学、计算机技术、信息与通信技术相结合的一种新技术,主要包括量子计算技术、量子通信技术,而量子计算与量子通信事实上又是密不可分的,一般将量子计算和量子通信统称为量子信息技术。量子通信技术,其技术原理是量子态的性质和演化与经典的物理态遵循完全不同的物理规律,因而将信息编码在量子态上,便会诞生具有超越经典通信技术功能的新技术。所谓量子通信技术就是研究如何应用量子系统进行信息编码、传输、处理和提取的技术。

量子计算主要包含量子算法、量子计算模型、量子计算的物理实现。量子算法的核心是如何处理量子并行计算,Deutsch-Jozsa 算法、Shor 整数因式分解算法、Grover 量子搜索算法是典型代表。量子计算模型是将不同的量子逻辑门按照一定逻辑顺序(量子线路)作用于量子比特(量子位)之上,而这些量子逻辑门通过改变和非定域操控量子比特,使其具有强大的计算能力。量子计算的物理实现,有离子阱方案、腔量子电动力学、量子点方案,这些方案都生成了量子计算必需的量子纠缠(quantum entanglement)。实现量子技术的关键是制备量子纠缠态,量子纠缠既反映量子世界的基本特征:相干性、概率性、空间非定域性,又是量子技术设计所依赖的宝贵资源,量子密钥分发、量子并行计算、量子隐形传态、量子密集编码无不源自量子纠缠。可以说,没有量子纠缠,则不可能有量子技术。量子纠缠可以存在于单个系统波函数的不同自由度之间,也可存在于多体系统的量子态之间。本质上,量子纠缠态就是不能分解为子系统状态直积的态。物理上,为制备量子纠缠态,一般是利用泵浦光子穿过一块偏硼酸钡晶体,通过参量下变换过程产生孪生光子对。孪生光子对的偏振态彼此正交,但单个光子的偏振态无法确定,而且未知的偏振态不可克隆。量子纠缠态的最重要特征是它的非定域性,非定域性颠覆了传统的因果律准则。基于纠缠光子信号的非定域性,可以获得实现任意未知量子态传输的通信协议;基于单光子信号的海森堡测不准原理、量子不可克隆定理、单光子不可分割性,可以获得基于量子密钥分发的量子保密通信协议;基于连续变量信号的光场量子态,可以获得量子隐形传态、量子密集编码、相干态量子通信协议等。^②

为了在物理上实现上述量子通信协议,则需要研制量子信号产生、调制、测量、中继以及组网等技术。纠缠光子信号的产生技术包括参量下转换纠缠光子产生技术和光子晶体光纤纠

缠光子产生技术;单光子信号产生技术包括单光子枪(处于实验阶段)和基于弱相干光脉冲产生的准单光子源(为量子通信的主流光源)。

单光子量子信号的常用调制技术包括偏振调制、相位调制和频率调制。连续变量量子信号的常用调制技术包括高斯调制和离散调制。单光子信号的探测,主要采用基于雪崩光电二极管的单光子探测器和基于超导体材料的超导单光子探测器。连续变量量子信号的探测,主要采用平衡零拍探测器。量子中继技术的原理是利用量子纠缠的可交换性,通过多级纠缠交换操作,从而使得长距离的两个节点之间产生纠缠,以解决量子信号的信道损耗问题。

目前,不管是有线还是无线,经过实验已经获得众多成功的量子通信系统。以我国为例,2007年,清华—中科大联合团队成功实现102 km(利用双探测器)和75 km(利用单探测器)有线诱骗态量子密钥分发。2010年,中国科学技术大学潘建伟院士团队成功实现16 km(北京八达岭长城地区—怀来古要塞)自由空间的量子隐形传态;同年,搭建了全通型量子保密电话网络。2016年,该团队成功研制并发射了世界上第一颗量子科学实验卫星“墨子号”。2020年12月,潘建伟院士团队同中科院上海微系统与信息技术研究所、国家并行计算机工程技术研究中心进行合作,成功构建76个光子的量子计算原型机“九章”。2021年1月,中国科学技术大学正式对外宣布,潘建伟院士团队在量子通信领域已成功实现距离4600 km的星地量子密钥分发,这标志着已完成构建天地一体化广域量子通信网络的雏形。2021年6月,潘建伟院士团队实现了创纪录500 km量级现场无中继光纤量子密钥分发^[5]。目前,虽然量子技术在许多方面还处于研究阶段,但量子加密技术已进入可广泛应用的成熟阶段。

二、当代量子技术的待释问题

当代量子技术被学界称为第二次量子革

命,第一次量子革命主要是指物理理论上的革命(从经典物理到量子物理),而第二次量子革命主要是指技术上的革命(从经典技术发展量子信息技术,力图开发基于量子特征属性的量子器件)^[6]。作为一种新技术,在透彻理解量子技术文本知识的基础上,站在哲学视角,我们认为有以下四个需要诠释的问题。

问题一:量子技术文本里的量子技术新概念、新原理和新方案,并据此构建的量子人工世界,其内蕴的技术语言与逻辑是怎样的?这些语言和逻辑与传统的技术语言和逻辑有什么异同?这一问题涉及量子技术文本的意义问题。

问题二:身处经典世界的技术主体(人类),如何能从局限性的经典视角理解和诠释纯粹的量子技术世界。是否永远只能设计出经典+量子的“量子”技术,而无法触及纯粹的全量子技术?这一问题涉及量子技术主体与量子技术客体的属性问题。

问题三:现有的世界体验、现有的逻辑、现有的语言、现有的文化,是否能够跟得上量子技术发展的步伐?是否需要改造现有知识体系中一些最为基质的东西?比如什么是经验、什么是时空、什么是实在?以规避出现对量子神秘性、量子神奇性、量子佛学等的偏好。这一问题涉及量子技术所引发的实在论问题。

问题四:能否从哲学视角,开启解决当前量子技术问题的新路径?从而在哲学诠释与量子技术研发之间架设一座“形而中”的桥梁,提出有益于推进量子技术进步与发展的新思想、新知识。

三、量子技术的语言与逻辑诠释

(一)量子技术的语言表达

“所谓语言诠释,就是语言交流中诠释者通过考察言说者的言语行为来确定其话语的意义。”^[7]量子技术的语言诠释则是诠释者通过考察量子技术言说者(技术专家)的语言表达来确定其语言的意义。在这种诠释当中,本质上需

要弄清量子技术语言背后所包含的量子技术专家的语词含义、技术行为、意向和信念等问题。在量子技术的语言表达中,存在不少量子技术的专用术语,如量子比特、量子纠缠、量子隐形传态等。在众多的量子技术语词当中,对量子技术产生核心作用的是量子纠缠,以量子纠缠为例,可进一步分析该术语所涉及的意义、行为和意向等问题。

量子纠缠,是指当几个粒子在彼此相互作用后,由于各个粒子所拥有的特性已综合成为整体性质,无法单独描述各个粒子的性质,只能描述整体系统的性质。它是“存在于多子系统量子系统中的一种奇妙现象,即对一个子系统的测量结果无法独立于对其他子系统的测量参数”^[8]。“纠缠”一词最早是因为量子力学诠释上的争议(爱因斯坦和玻尔之争)而引入。1935年,爱因斯坦等人提出著名的“EPR 佯谬”,在提出“EPR 佯谬”的那篇文章当中,爱因斯坦等人还提出了这样一种量子态:

$$\Psi(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[i/ \text{书版无字符:} \\ 0x210f(x_1 - x_2 + x_0)p] dp$$

其中,这个量子态的基本特征是它不能写成两个子系统量子态的直积形式,即 $\Psi(x_1, x_2) \neq \varphi(x_1)\varphi(x_2)$,爱因斯坦等人提出这一量子态的本意是为了指出:“在承认局域性和实在性的前提下,量子力学的描述是不完备的”^[9],当时薛定谔最早将这种量子态称为纠缠态。纠缠态让玻尔意识到在考虑多粒子时量子理论会带来量子效应,但当时不管是玻尔还是爱因斯坦,对纠缠态意义的理解都是非常有限的。1964年,贝尔提出的“贝尔不等式”首次将 EPR 与玻尔的争论转化为可以直接为物理实验所验证。经过多年的物理实验,1982年首次证实了贝尔不等式被违背,从而否决了决定论的局域隐变量理论,进而肯定了量子力学所揭示的量子

子世界存在着许多反直观效应。后续科学家们设计的更为先进的实验,不断证实存在这些反直观效应,即存在两个或多个量子系统之间的非定域非经典的关联。自此,量子纠缠态这一语词从检验量子力学这一科学理论的完备性转向作为一种资源被应用于开发量子密钥分配、量子隐形传态、量子计算等量子技术领域,其内含的叠加性和非局域性被用于服务人的新技术意志。在从量子力学诠释到量子技术应用过程中,纠缠态的意义是不断发展和变化的,不同时代该语词的言说者,关于该词的所指和意向也是不同的。

(二)量子技术的内在逻辑

在对量子技术的理解过程中,关于量子技术的内在逻辑主要涉及这样几个问题:量子技术与量子理论的逻辑关系、量子技术的演化逻辑、量子技术的技术设计逻辑、量子技术的符号表达逻辑,在关于这些量子技术逻辑的理解过程中,可以得到如下具有启发性的结论。

关于量子技术的演化存在六个阶段:一是量子力学展示的量子世界具有异于经典世界的特征(科学认知);二是技术主体意识到这些特征可以让人们获得超越传统通信技术的技术目标(技术目标);三是为了达及新技术目标,技术主体设计出合适的技术方法(技术方法);四是初级技术目标的物理实现(目标实现);五是由初级技术目标拓展到次级技术目标(目标更新);六是目标更新带来对新技术方法或技术改进的需求。简单而言,量子技术的演化逻辑链:科学认知→(技术目标—技术方法—技术实现—技术目标)₁→(技术目标—技术方法—技术实现—技术目标)₂……。成熟技术方法的获得,需要经历基础理论——技术原理——模型构造——实验演示——工程实践——技术产业化这样一个技术的发展环节。

科学理论带来的本体论争议,不会妨碍据此理论进行技术设计的基本进程。通过技术方法所获得的技术效果,可以验证理论的科学性,

并获得新的本体论认识;技术效果的实现,可以验证技术方法的合理性;技术的物理呈现,永远是驳斥那些对新技术及其原理等持怀疑态度者的最强利器。

量子技术目标的实现,并不需要技术手段的全量子性,量子隐形传态就是量子通信手段和经典通信手段的结合体。初级量子通信系统也不是直接传输量子态,而是安全地传输经典信息而已。

新技术源自新理论+旧技术,旧技术或旧技术群是创建新技术的基础,新理论是开启技术改造的思想火花。旧技术的交叉融合和自我改造不可能带来颠覆性的新技术,新基础理论才是技术革新的根本。

技术手段具有多选择性,技术手段的每个构造细节具有多选择性;理想的技术手段永远在路上;技术手段设计细节的确定,有时只是技术主体权衡利弊后的无奈选择,比如纠缠源的亮度和纠缠源的纠缠质量是相互矛盾而不可兼得的。

理论上的技术效果,永远取决于现实中技术器件和技术流程设计的完美性程度,而器件和流程设计的非完美性所带来的技术瑕疵,可以通过增加技术环节来加以克服。量子通信的绝对安全,需要理想的单光子源予以保证,但是理想单光子源技术难度极高,现实中是以单一强度弱相干态来替代单光子,为克服潜在的光子数分流攻击,则增加了诱骗态协议环节。

四、量子技术“经典属性与量子属性”的关系诠释

目前,关于量子技术的诸多争议和制约其发展的基本问题是:身处经典世界的技术主体(人类),如何能从局限性的经典视角理解、诠释和构建纯粹的量子技术世界?经典性的量子技术主体,如何跨入非经典的量子技术世界?人类是否永远只能设计出经典+量子的“量子”技术,而无法触及纯粹的全量子技术?关于这些

问题的诠释,基本观点表现为两个方面。

一方面,量子元器件的外在实物呈现都是宏观经典的。安全传输经典信息是量子通信技术应用初期的首要目的。量子隐形传态的技术构建中包含了经典信息通信和量子信息转移。其中,经典信息只涉及粒子的么正变换操作,而不涉及任何有关未知态的内容。在 1984 年 Bennett 和 Brassard 所提出的量子保密通信协议(BB84 量子通信协议)^[8]里,明确需要一个辅助的经典公共信道传输经典的基矢比对等信息。

另一方面,在量子通信技术构造中,必须用宏观经典材质(如 BBO 晶体)去构建能产生量子纠缠的宏观经典元器件,是宏观元器件将一个微观光子劈裂为两个纠缠的微观光子。这意味着,量子世界的创建需要宏观工具的介入。经典技术主体以宏观工具为桥梁对量子世界进行构造,这种构造并不是去构建完完全全的量子世界,而只是构造能产生量子效应的宏观装置(宏观世界)。利用这些量子效应,能以异于经典通信技术的方式去安全地传输经典信息。工具是经典的,构造工具的材质是经典的,工具传递的内容也是经典的(要传递的经典信息只是编码在量子态上),测量量子态的工具也是经典的,只是通过一系列宏观装置,产生了微观光子量子纠缠态,并且发生了微观光子量子态的转移而已。而微观光子也不可能是理想的单个光子,而是通过宏观的单光子枪发射激光脉冲,所谓的单光子的质量是非常差的,因为要实现完全的单光子发光,就必须单独地操纵一个特定的二能级系统,这在实验实现上难度会非常大。一般是采用弱相干光脉冲产生技术,而这种技术本质上是宏观发射的相干光束衰减到微弱的单光子量级(获得准单光子),它本质上是大量原子跃迁的宏观集体行为。

鉴于上面的分析,经典性的技术主体跨入量子技术世界就不足为奇了,毕竟这种量子技术世界只是经典的技术世界所构建的而已。量

子技术家以经典通信技术去创建非经典通信技术(量子通信技术),而这种非经典通信技术只是产生了经典通信技术没有的功效而已。

五、量子技术与科学实在新诠释

量子技术相比经典技术,最重要的新特征是:处于纠缠下的量子态的非定域性、量子态的不可克隆性、非正交量子态的不可区分性、量子计算逻辑中的否定平方根、量子并行计算、光量子的可存储等,这些新技术特征反映了人们对科学实在的新理解和新诠释。在关于技术与科学实在这一问题上,量子技术验证了乔瑞金观点。他认为,科学实在的产生和发展,在其本性上得力于技术的进步,其中具体包括:技术进步通过证实或证伪科学发展过程中所断定的科学实在的真实性与非真实性来推进科学实在思想进步;技术进步通过提供新的技术手段或工艺方法来改造实验操作过程,从而提高科学认识的深度和精度,促使科学实在思想进步和完善;技术进步在其广泛的应用过程中积累起无限的事实材料以供研究者们进行归纳、综合或分析,从而形成新的科学实在思想的过程来促使科学实在思想进步^[10]等方面。可以认为,任何一项新技术的出现,其所带来的对外在世界的新感知、对科学实在的新发展以及所引发的逻辑、语言、文化上的改变是必然的。而这种发展和改变得到认可并最终变成一种科学和文化共识,则往往通过两种模式:一种是通过新技术的强大应用覆盖面而在认识层面上无障碍地快速转变;另一种是由于新技术还处在初级的不成熟阶段、在应用上存在局限性,从而在认识上需要克服旧技术共同体的认识阻碍而缓慢转变。郝刘祥说得非常到位,“今天的物理学家难以接受量子力学中的非定域关联,正如当年的科学家难以接受牛顿的超距作用观念一样。”^[11]量子技术不仅带来科学实在的新发展,而且引发了科学认识论层面上的广泛讨论,其中,量子纠缠的非定域性给人们带来了传统

因果律的新思考。或许,正如内格尔在论述量子力学给因果性原理所带来的冲击时所言,“对因果律的坚定信仰,最终便可能成为理论创新的发现的障碍。”^[12]

第二次量子技术革命中的技术理性和技术方法与(具有经典属性的)人的现实生存经验和生活实践更是渐行渐远,依照高策等的说法是进入到了“后真相”科技时代(高策“后真相”)^[13]。将人们关于世界存在问题的思考(量子技术世界)重新植入到人的基本存在经验上来,要么将量子技术文本还原到人的旧有经验和生活实践;要么将量子技术文本还原到人的某种崭新经验(吴国林所指“超验”)^[14]和生活实践。生活实践的历史性和人类经验的历史性似乎为量子经验的提出提供了某种哲学依据。量子技术中的量子态引发了有关科学表征与物理实在关系的长久争议,而这一争议也让我们对微观量子世界实在以及该实在所展示的新特征有了更为深入的理解。在量子技术的逻辑门设计中,存在一个量子 $\sqrt{\text{not}}$ 逻辑门。在用光子激发原子的操作过程中,通过一个物理 $\sqrt{\text{not}}$ 操作,可以使一个量子位变为叠加态,再进行一次同样操作,则使该原子由叠加态变成激发态。否定平方根也可以用来解释“中等强度的新证据”(medium strength new evidence),连续两次使用这种证据,才可以获得一次完整的逻辑论断。关于量子逻辑以及量子技术中的 $\sqrt{\text{not}}$ 逻辑门哲学问题,在《量子逻辑:一种全新的逻辑构造》^[15]和《试论量子计算中否定平方根的哲学问题》^[16]两篇文章中都有过专门的论述。一般认为,往往是一种竭力拒斥历史内容的人类知识,借助逻辑符号的逻辑运算推演可以完全不附加任何具体的经验内容。然而,量子逻辑以及量子计算逻辑也都揭示了逻辑具有历史性。

六、构建哲学诠释与量子技术研发之间的“形而中”之桥

当代量子技术发展还存在着如下几个问

题:如何保持量子技术系统的稳定性和可靠性?如何制造出完美的量子元器件以消解器件制造所带来的安全性问题?全量子技术能否实现?宏观实物隐形传态在技术上是否可能?假如前面两个问题可以依靠纯技术的改进去优化解决的话,那么后面两个技术问题实质上是两个哲学问题,需要从哲学诠释角度为解决技术问题提供方向指引。

全量子网络技术,要求直接传输量子态和量子纠缠,而不是经典信息,这需要身处经典世界的人类在认知和操控上,脱离经典的枷锁,以格式塔转变的方式进入一个全新的全量子世界。处于宏观常态下的人类,需要在技术本体的体验上超凡脱俗,并将对微观量子世界的技术知识体会转变成人们的物理技术常识。量子技术研发中对技术主体“人类”所提出的这一新要求,必然使得对哲学问题的诠释成为引领技术发展的知识基础。由此,在哲学诠释与量子技术研发之间构建一座“形而中”之桥成为必须。的确,“如果说数学语言是自然界的句法,那么哲学分析的就是句法背后的语义”^[17]。在量子技术设计当中,包含了大量的数学语言和数学模型,这些抽象的数学语言和数学模型,只有对其进行语义的哲学分析和诠释,量子技术专家们才有可能构建出实在而有用的技术产品。总体上,量子技术有太多的语义问题需要从哲学层面上去进行澄清,这种澄清对当代社会的技术创新是非常必要的。李醒民认为,在科学研究当中,需要更多的“哲人科学家”^[18]。可以说,在技术研发当中,同样需要更多的“哲人技术家”。科学、技术与哲学,必须构建起一个紧密的联盟。

[注释]

- ① 此文章为张江在国家社会科学基金重大攻关项目《量子技术的诠释学研究》开题报告会上的发言,广州,2020年11月。
- ② 这里关于量子技术的概述,主要为作者在理解尹浩、韩阳《量子通信原理与技术》一书的基础上,对量子技术的核心技术要素所作的提炼。

[参考文献]

- [1] 张永德,吴盛俊,侯广,等.量子信息论:物理原理和某些进展[M].武汉:华中师范大学出版社,2002.
- [2] 张镇九,张昭理,李爱民.量子计算与通信加密[M].武汉:华中师范大学出版社,2002.
- [3] 张永德.量子信息物理原理[M].北京:科学出版社,2006.
- [4] 尹浩,韩阳,等.编著.量子通信原理与技术[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [5] Chen J P,Zhang C,Liu Y,et al.Twin-field quantum key distribution over a 511 km optical fibre linking two distant metropolitan areas[J].Nature Photonics,2021,15(08):570-575.
- [6] Jones J.The second quantum revolution [J].Physics World,2013,26(08):40-41.
- [7] 王静,张志林.语言诠释需要什么样的知识[J].哲学研究,2007(4):61-68,128-129.
- [8] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore, India, 1984:175-179.
- [9] 周正威,郭光灿.量子信息讲座 第三讲 量子纠缠态[J].物理,2000(11):695-699.
- [10] 乔瑞金.从技术进步看科学实在的本质[J].科学技术与辩证法,1996(4):23-26.
- [11] 郝刘祥.哲学与物理学相遇在量子世界[J].中国科学院院刊,2021(1):28-36.
- [12] [美]欧内斯特·内格尔.科学的结构:科学说明的逻辑问题[M].徐向东,译.上海:上海译文出版社,2002:386.
- [13] 高策,乔笑斐.后真相时代的科学哲学:物理学哲学的视角[J].中国社会科学,2019(2):26-37,204-205.
- [14] 吴国林.超验与量子诠释[J].中国社会科学,2019(2):26-37,204-205.
- [15] 沈健,桂起权.量子逻辑:一种全新的逻辑构造[J].安徽大学学报(哲学社会科学版),2011(1):51-58.
- [16] 张华春,沈健.试论量子计算中否定平方根的哲学问题[J].自然辩证法研究,2015(9):119-124.
- [17] 郝刘祥.哲学与物理学相遇在量子世界[J].中国科学院院刊,2021(1):28-36.
- [18] 李醒民.哲人科学家:站在时代哲学思想的峰巅[J].自然辩证法通讯,1999(6):2-3.