

doi: 10.15936/j.cnki.1008-3758.2018.03.001

技术人工物发展的生态逻辑

罗玲玲, 魏春艳

(东北大学 科学技术哲学研究中心, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 根据可供性理论分析了技术人工物的发展逻辑是生态与非生态转换, 阐释了技术人工物经历了以工具为核心的发展阶段、动作机器为核心的发展阶段到智能人工物的三个阶段。以工具为核心的人工物是有机(身体)技术与无机技术的结合, 属于非生态技术系统的萌芽期。以动作机器为核心的人工物代表了非生态技术系统的形成。智能人工物从身体动作替代转为智能替代, 但其非生态的本质尚未改变, 智能人工物今后的发展瓶颈就是如何解决其生态性存在。

关 键 词: 技术人工物; 可供性; 非生态性; 人造智能

中图分类号: N 031

文献标志码: A

文章编号: 1008-3758(2018)03-0221-06

On the Ecological Logic of Technical Artifacts' Development

LUO Ling-ling, WEI Chun-yan

(Research Center for Science and Technology Philosophy, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

Abstract: The development logic of technical artifacts is the transformation between ecology and non ecology on the basis of affordance theory, which explains that technical artifacts undergo three stages—the core development stage of instrument, the core development stage of action machine and the intelligent artificial tool. Technical artifacts taking instrument as the core are the combination of organic (body) and inorganic technologies, which belong to the bud of the non-ecological technology system. Technical artifacts taking action machine as the core represent the formation of the non-ecological technology system. Intelligent artifacts, which move from body movement replacement to intelligent replacement, haven't changed their essence of non ecology. Accordingly, the development bottleneck of intelligent artifacts is how to solve their ecological existence.

Key words: technical artifact; affordance; non ecology; artificial intelligence

技术人工物就是人创造出来的自然界原本没有的物品。自然界原有的有机物, 如农作物和家畜, 即使人的力量介入了, 但它们仍然是靠自然的力量生成、成长, 只不过人类遵循目的性对其过程有所干预, 这类物, 不被纳入纯人工物。因此, 本

文所定义的狭义的技术人工物与人工自然不是划等号的。人工自然包括人工物, 也包括人改造过的自然物。与人工物相近的概念还有人工性。人工性是指人为性, 即通过技术实现人的目的性, 而不是靠自然的力量实现。到目前为止, 人还没有

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家社会科学基金重点资助项目(16AZX007)。

作者简介: 罗玲玲(1950-), 女, 湖南新邵人, 东北大学教授, 博士生导师, 主要从事科技创造方法论、设计哲学和环境心理学研究;
魏春艳(1983-), 女, 黑龙江密山人, 东北大学博士研究生, 主要从事技术创新、科技创造方法论研究。

达到自然(在某些人心里是上帝)的能耐,创造出具有生态自我^①的人工物。在人工智能技术大热的当下,技术人工物的发展趋势是什么?本文根据可供性理论分析,认为技术人工物的发展是从生态的身体与工具的融合,向非生态的技术系统发展,再向生态的人类智能逐渐逼近,其中的逻辑是生态与非生态的不断转换。生态(eco-)一词源于古希腊字,意思是指家(house)或者我们的环境。通常理解的生态就是指生物与环境之间环环相扣的关系。其实生态的本质是指生物鲜活的生活状态。鲜活意即自然生长的生命,生物能够保持生命离不开其生活的环境。人工物是靠人为力量创造出来的无生命物体,所以本文定义的生态,更强调其生命性,即靠自然力量的生长性。

一、以工具为核心的技术人工物——生态的有机体与非生态的无机物融合

工具是最古老形态的技术人工物。工具的具身性很强,工具的发明、使用都可发现可供性机制。以工具为核心,并非排斥器具类技术人工物,后者的形成在人类文明史上发挥着重要作用。工具的无机性决定了它是非生态技术系统的萌芽。这个时期,人与人工物的关系是生态与非生态均势结合的产物。

1. 以工具为核心的人工物的强具身性

可供性“affordance”是美国生态心理学家吉布森(James J. Gibson)创造的词,“意味着动物和环境之间的协调性(complementarity)”^[1],指有机体在环境中直接知觉到的利用环境的可能性。在吉布森看来,人天生就具有直接提取环境信息、预测行动的知觉。affordance是在某种状况下对有机体来说的价值,人几乎是毫不自觉地从环境中撷取(pick-up)出来,为我所用。人每天都在知觉到可供性,并自然做的事,却全然没有意识到,因为这是人与环境的协调,是几百万年来进化的结果。可供性知觉离不开动作,知觉与整个身体的动作相联。可供性是环境潜在的“行动的可能性”,与有机体的能力有关。因此,可供性理论为具身性认知奠定了基础。以工具为核心的技

术人工物是最具有具身性特质的人工物。

第一,工具的强具身性。莫斯认为:“一种实用的技艺有两个根源——动作或者工具的发明,以及使用它的传统,确切地说,使用本身——而在这两方面它本质上都是社会性的物。”^{[2]51}早期技术依赖于身体动作,靠人的机体完成的技能没有无机工具的影子。工具的发明,是利用可供性的结果;有了工具之后,工具成为身体的一部分,工具就是身体一部分器官的加强版。工具成熟的标志,是合手、合体,在生手那里,工具与身体的契合还需要磨合。工具发展到顶峰,能工巧匠的身体技艺与工具融为一体,两者焦不离孟,独一无二。

第二,工艺的强具身性。在古代技术中,人的直觉和体悟起到重要的作用,虽然技术工具独立出来,但是工艺作为人的直觉和经验,与人合为一体。离开这个人,技术系统就无法运转。中国传统文化中,直觉是大道,是对自然的领悟。用吉布森的生态理论来解读,即对可供性的知觉。可供性是“身体知道,自己却不知道”^[3]。工艺直觉属于隐性知识,可供性解开了隐性知识为何隐性的机制。我们的身体是我们接收一切外部知识的最终工具,而不仅是大脑。我们通过身体的运动感知同外界事物的接触,身体证实了我們是有生命的物体,这区别于一台计算机与外界的互动。所以,工具作为人工物,它的生态性体现在与人的身体密切关联。

2. 容器的制造、使用与可供性密切相关

史前的技术虽然以工具为核心,对材料的领悟也是人类智力发展的关键,材料属性的认知借以工具为手段,制造了各类器具,所以容器成为另一类工具。容器承载了人类的生产和生活。在史前制造技术中,芒福德推崇容器(utensil)甚于工具。他认为,过去的人类学家过分关注进攻性的武器和掠取性的工具,而忽视了容器在文明史上的地位^[4]。

容器是手工工具的作用对象,也是人类对于环境要素和材料属性的认知后将两者结合做出的用具。如用泥塑造形的能力最早来自于对脚印的知觉。材料形态认知由动作引发,相反,制作时,对材料的认知又引发动作,靠动作实现目的。因

① 生态自我原本是奈斯(U. Neisser)在深层生态学中提出的概念,指在自然生态层面研究自我。生态自我将自我的意义扩展到了生态,是自我向自然的延伸,自然成为自我的一部分。本文根据吉布森建立的有机体知觉行为与环境的生态关系,重新定义了生态自我。所谓生态自我,即可以主动知觉到与环境的生态关系的有机体,自动利用可供性的价值,与环境协调相处的自我。

此器具的制造,也离不开可供性知觉。在笔者看来,容器就是另一类工具。里德(Edward S. Reed)根据一些考古学家的观点认为新石器时代就出现的成套工具至今没有大的变化,容器是排在第一位的重要工具^{[5]120}。容器是另一类具身性工具,使用它的时候需要与人的身体融为一体,但它又不直接用于加工和改变材料。海德格尔也认为:“世界本身又是由各种器具的总体所构成的。我们需要通过器具来应对世界。”^[6]海德格尔的器具,即人工物,包括工具和容器。

无论工具的发明还是容器的发明,都需要从环境中提取与人的动作契合的可能性,这一可能性,就是吉布森所强调的可供性。“所独有的最早的能动心理特征正是产生在使用工具、制造工具的劳动创造人类的过程中,是这一过程所获得的最早的心理成果,是不同于动物的最早的‘理知状态’。正是在这一基础上,劳动操作中的因果联系(如利用工具去取得食物)才有可能在漫长的历史过程中,逐渐反映和最终内化为主观的因果观念。”^[7]

3. 非生态技术系统萌芽

技术源于有机(身体)技术向无机工具过渡。人与工具的关系是生态与非生态均势结合的产物。生态是指人身体的自然生长性和智能发展性,非生态是指工具的非自然生长性,完全是在人为的作用下修改、完善。在此阶段,生态人与非生态工具相互影响。这是因为,第一,工匠的技艺也是生态与非生态完美结合。根据《说文》的解释,“支”是“手拿竹枝”之意,表示手的动作。如果施于器物的技能不是恰到好处,那么器物就是粗劣的,这就说明技巧同样是拙劣的^{[8]107},物与技能是相匹配的。第二,人的身体和智能发展,都与工具匹配,出现了共同进化的趋势,在此意义上,人的生态性已经受到非生态的工具的影响。

人与有机工具(身体)的不可分割性,在无机工具的出现后,发生了一些微妙的变化。使用工具时,工具与身体的一体性,动物与人无差异,而不使用工具的携带性,是人与动物在行为特征的巨大差异。占物为奴,人将工具作为有机工具的外延已经扩展成为主体的一部分。人在动物界脱颖而出,是因为技术建立了新的关系性,新的关系性建立的过程是对可供性的领悟;其结果,又蕴涵着新的可供性,即人与工具之间的可供性,人与器具之间的可供性。人可以将工具保留下来,于是

文明被传递,也由此发展了默会知识(身体与工具/对象的协调),成为技术的重要标志。工具可以脱离人的动作单独存放,也可以脱离某个特定的人而传递给别人,标志着非生态系统技术人工物已经萌芽,一方面,它的独立性较弱,另一方面,它替代人的身体这一生态系统还不尽人意。

众所周知,人类早期大多数的工具是手动工具。柳宗锐曾说:“‘手’直接意味着‘人’。”^{[8]102}手作为人类有机工具的典范,任何动物的肢体无法与之相比。手的精巧性创造了唯一可与大自然相媲美的物品,“与自然的手相比,再精致的机械还是显得粗糙”^{[8]67}。在以工具为核心的技术体系中,工具和工匠的技能决定了效率,最能体现这个思想的是“能工巧匠”一词,“能”是“能耐”“本己所能”,工则指使用工具的人,巧则指巧思,省去笨拙的功夫时间,匠则指那个能使用工具、有巧思和技能之人。技术人工物只能替代人手吗?技术发展的进程说明,技术人工物的进化要替代人的身体其他器官,包括人的大脑。这就是以动作机器为核心的非生态技术系统的建立和智能人工物的出现。

二、以动作机器为核心的技术人工物——非生态的技术系统形成

自从工具这种非生态的无机物出现,并融入人的技能中,就开辟了人工世界的建造历史,形成了一个独立的技术人工物世界,又被称为第二自然。人工自然复杂多样,但是最能代表这个人工世界理念的就是动作机器。所谓动作机器,即以实现人的动作替代为主要目的的机器。这时虽然有自动控制的智能化技术出现,但以控制动作为主要目标,为了完成动作,同样需要能量的支持。以动作机器为核心的技术人工物体系与以工具为核心的技术人工物体系有着不同的特点。工具是与人的机体技能协调的人工物,而动作机器是靠新的能源驱动和控制的系统。以动作机器为核心的技术人工物系统与可供性有什么关系?这种技术体系是不是越来越脱离身体技能?动作机器的效率是不是让掌握机器的人开始怀疑人的能力?

动作机器系统是巨大的人工物系统,它的特点包括以下几方面:第一,机器是独立的非生态系统,具有不同于有机体系统的运动规律,只服从于物理化学规律。功效性与人的身体技能关系不及

与技术知识的关系密切。第二,动作机器的具身性仅限于通过动作或信息与人相互作用的界面。可供性机制在界面设计和身体技能两方面发挥重要作用。第三,动作机器表达了非生态系统极强的扩张性,靠自然力量的生长性日渐式微,就是这一阶段人工自然的状态。

1. 动作机器建构了独立的非生态系统

以动作机器为核心的人工物建构了与人形成映像的非生态系统,它可以独立运作,完成功能,实现技术目的。

动作机器的一个特征是运用科学知识解决技术问题。从工业革命开始,产品的复杂性及对效率的追求下,技术仅靠直觉不够了,只有手段的复杂——机器的出现才能应对,科学用数学的、精确的、探究的方式和言传知识解读了部分技术直觉背后的默会知识,蕴藏于工程师和工人身上的技术知识不再只是现场的经验积累。机器可以作为技术系统中的要素,独立存在,并实现了技术效率的巨大飞跃。

以动作机器为核心的技术人工物超越了有机体潜能所达到的高效率。工业流水线是按生产流程组织的机器系统,在人机界面上,工人的动作遵循动作经济原则,流水线的工人成为非生态——机器的附属品,技术人工物已经离生态的自然越来越远了。

“一旦从事科学,人类就从本质上和目的上感知物,而不是单纯从物与他自身和他行动的关系上来认识物,也不是用某种‘魔镜’,以及无用的神话图式来表征物了。”^{[2]55} 科学是对自然的认识,技术有了科学的帮助,人就越来越接近上帝了,与人的天性联结少了会使通达宇宙的悟性少了,人只能远离“上帝”这个自然,仰望它,那么,人是离自然更近了,还是更远了?

2. 动作机器的具身性和界面

在以动作机器为核心的技术系统中,人仍然与人工物接触和互动,但起核心作用的机械系统都有一个共同点,即通过开动其外部影响介质就会引发其运作。“心理学的核心问题就在于了解人们自身也处于某种运动状态——这一问题并不能很好地用机械论语言表述出来。”^{[5]9} 这是由于生态与非生态的差异性所决定,用非生态的机械来描述生态的人,总是不能尽意。以动作机器为核心的技术人工物已经通过机械这种非生态系统的逐渐完善达到人类动作的完全替代,因此必然

出现机器向非具身性逐渐泛化的趋势。

首先,具有非生态特征的人工物系统是一个多层次复杂的世界,人与人工物的关系多数已经不再通过具身性技能把握,只需要手脑来间接操纵。这个复杂的机器系统就是芒福德所称的“巨技术”。人工物通过递归的关系表达,越来越脱离身体技能。以动作机器为核心的技术人工物系统是超结构的层级,也表现为身体延伸的持续重叠,已经脱离生态为支点的世界。

第二,人与动作机器进行反复的互动,人塑造了技术结构,技术结构也塑造了人的使用行为。这种互动,在某种程度上确定了对技术使用结构的生产。“世界是有效性或身体行动能力的‘镜像’。‘社会性’和‘物质性’出现无可救药的纠缠。利用这一点,我们可能会辩称,技术人工物的‘社会性’和‘物质性’之间的关系是德里达(1976)所说的一个相互的决定和补充。”^[9]

第三,技术的标准化脱离身体尺度已成大势所趋。可测量是工业化的重要条件,非生态系统的建立还有一个标志就是脱离身体度量的新标准建立。技术标准化在某种程度上可不以人的身体指标而单独存在,只在局部的人机界面参考到人的尺度。脱离人的身体的量化也就限制和压抑了本能,由此可见非具身性的趋势。

第四,技术人工物的使用界面必然遵循可供性的理论。无论怎样,现代技术人工物超结构的层级呈现可递归关系,最终人都要在人机界面上实现对机器的操控。人与人工物的生态性关系即使被压缩到很小的层面,但仍然建立在具身性的基础之上。人工物的使用建立了新的人与物的可供性;在不同界面中,显示屏的窗口也可以承载显示内容的行为,滚动窗口的知觉可供性依赖于拖拽滚动框揭示窗口内容的可供性^[10]。

对机器的支配曾经使人类获得了巨大的满足感,从支配他人,转而支配物。然而,随着有机的意识形态发展和成熟,对于机械的机器系统的崇拜已经弱化了,对智能的崇拜开始强化。

三、智能人工物的出现是否预示技术向生态系统迈进?

人类认知革命的出现大致源于7万年前,认知革命使人类具有智能,即有能力谈八卦,想象不存在的事物,让陌生人开始合作、建立组织。这是

人类从动物界脱颖而出的关键。人类光会制造工具还不行,如果没有组织合作和想象预测能力,人类也不会从动物界中占据顶峰^[11]。智能是人类最具特色的能力。

以计算机为代表的智能人工物的出现,实现了技术系统迈向第三个发展阶段:智能替代。在新的发展阶段,动作替代与智能替代综合的智能人工物(机器人)的出现是否标志着技术正向着生态技术系统的迈进呢?

1. 技术系统的进化类似于生物界的进化

贝尔纳·斯蒂格勒认为技术已经发展为一种体系。“把技术作为体系的条件就是不能把它当作手段来认识,……和手段范畴格格不入的技术体系性在现代技术之前就已经存在,它是构成一切技术性的基础。”^{[12]29-30}笔者认为,以工具为核心的技术人工物体系,已经显露这些特征,到了以动作机器为核心的技术人工物,体系性成为一个重要特征,即技术不再是存在自然中的个别手段,技术已经成为嵌入自然的一个系统,它是否也像自然系统一样进化呢?

苏联发明学家阿奇舒勒(Genrich Saulovich Altshuller,1926—1998)把技术系统与生物系统作了类比。他认为,技术世界的发展从一个“细胞”至“系统”。第一阶段为技术系统选择子系统的阶段。第二阶段为技术系统改善阶段。第三个阶段为技术系统动态化。第四个阶段为技术系统自我发展阶段,如太空火箭系统可自我操作,摆脱火箭助推器重新组织等以适应变化的环境^[13]。技术系统的自我发展,是否就具有了自然生长性呢?这是判断技术系统进化为生态技术系统的关键。

然而,技术人工物的进化毕竟不是生物进化,只是类似生物进化的一种隐喻。“进化隐喻通过聚焦于选择作用而非有意识的设计,强调了有利的社会经济环境在促进技术变化中的重要作用”^{[14]■},但是人的主观能动性对技术的介入,总是比没有自我意识的其他生物更易张扬自己的创意、美感和价值观。即便人类把自己的创意融入了人工物,但人工物本身并没有获得人的创造性。“生物进化支持盲目的过程,而人类探索者则可以针对不同的场合以不同的风格航行。虽然如此,人类发明大都缺乏生物进化的两大优势:大规模并行和地质时标。……人类发明扮演了一个倾向于灵巧的达尔文过程及灵巧的拉马克过程。两

者缺一不可。”^{[14]187}

技术人工物的进化是技术知识、技术物和技术文化的传递。随环境的选择和变异,其生态性只能从技术附身于人的角度谈论。智能人工物的出现只不过是赋予机器某些智能而已,它仍然不具备生物的自然生长性。

2. 智能人工物并未改变其非生态系统的本质

技术的发展趋势就是不断向人与人工物的耦合发展。柏格森在《创造性进化》一书中关于有机物与无机物关系的分析,进一步确证了人和物质的耦合为特征的技术趋势概念已经包含在他的物质趋势的概念之中,勒鲁瓦古兰在他的《人与物质》一书中受到柏格森的影响,提出了建立在第一物质基础上的技术形态学。“技术进化是人与物的耦合的结果,这种耦合尚待澄清。在此技术的体系性建立在‘动物的技术学’的决定论之一:由于这种关系的一方(人)具有动物的属性,所以耦合的现象必须从生命历史的角度来考察。”^{[12]55}人物耦合在动作机器阶段达到了动物层次,新的智能人工物标志着人与物的耦合达到了新的高度——人类的高度。如今这种耦合关系已经可用可供性理论加以澄清和说明。智能人工物物化了可供性提供的可能性,传递着超出本能的经验、智慧。

智能人工物的本质是人造智能。人造智能是人工物发展的高级形态。动作机器只是模仿了人的操作行为,部分地实现智能化,而“人造智能是人造系统所具有的一种模仿、拓展和超越人类智能的能力”^[15]。就是说人造智能是模仿人类智能的同时,还会模仿自然界的一切智能,用以拓展、增强人类甚至(某方面)超越人类智能。这个定义区分了人造智能与人类智能的不同,有助于明确智能发展的方向,找到让人工物更具有智能的切入点;但还是没有回答“人类智能是什么”的问题。人类智能是人类有机体所独有的属性,是与动作融为一体的感知、直觉、思维、情感、创造过程,以达到与外界环境(自然环境与社会环境)的协调。人造智能如能完全模仿人类智能,那就要具有人类的本能、情感和理性,能够进行创造,如果只是模仿了理性思维,那还是“人类智能”吗?

机器人设计始终存在一个元问题:人为什么设计机器人,是因为对人不满意,还是对人最满意。所谓不满意,就要设计出比人还要优秀的机

器人(如计算速度和反应更快)。所谓最满意,就是向上帝(自然)挑战,人类也可设计出自然界最高级的事物——人。机器作为人类创造的无机物的典范,代表着一种理念:用无机世界的效率代替有机世界,以实现人类成为第二自然主宰的理想。尽管技术发展到机器人时代,这个核心理念并没有改变。

同样,人为什么要设计人造智能?是对人类智能不满意,还是最满意?所谓不满意,就是能克服人类大脑疲劳和智能出错的障碍,要让这个人工物兼具其他生物的智能,从而超越人类智能。所谓最满意就是:人类制造的人工物可模仿最高级的人类智能。

欧洲有一种观点认为,电脑通过了“图灵测试”等事件带来了悲观论盛行:人类终将被自己制造的机器所代替。然而反对理由也很简单:工匠的巧思和独特的技能也能替代吗?相对“低下”的身体部分决定相对“高尚”的大脑(如中医观点所强调的那样)——手、口、足等身体器官的直觉还远未被代替,那么,由于身体其他部分对大脑的决定作用,电脑在可预见的未来仍然无法完全代替人脑。

目前,计算机技术和网络技术所带来的认知革命不仅产生于人脑中,还发生于人脑之外。数字化生存的人类,处于物质实体、人类意识和数字虚体中。人类可通过虚拟网络技术在虚拟网络中极大地扩展认知空间,个体可以获得世界各个角落的信息,与各个层次的物、人互动。所以,智能人工物的出现并非只是人工物的革命,而是人类与技术系统一起进化。在一起进化的过程中,智能人工物越来越向人类靠拢,人类越来越向技术人工物靠拢。

智能人工物虽然具有模仿、拓展和部分超越人类智能的功能,却没有达到人类智能的高度。智能人工物动作与智能兼备,甚至已经可以应对动态的、不可预测的环境,可以满足一系列随时间变化的目标或动机的系统,能基于已有的经验改进其能力,并且具有行为的进化能力^[16]。这说明此类智能人工物是具有部分成长性的人工物,智能人工物正在从非生态的系统向生态系统迈进。但是智能人工物无限逼近人类智能,却不可能实现完全替代人类智能,究其根本原因在于人类的有机性本原和创造性本质。有机性本原决定了人

类的自然生长性,智能人工物或许可以成长,却不能生长,只有有机物才能自然生长。至于创造性本质,则是涉及社会动机、情感等更复杂的心理活动。所以,技术人工物今后的发展瓶颈首先就是如何解决其生态性存在,即自然生长性。或者走向一个极端,通过生物途径发展智能人工物;或者走向另一极端,把非生态性发展到极致,用数字性代替生物性。无论哪个途径,都这不仅是一个科学问题,还存在着巨大社会伦理危机,有待科学家、工程师和哲学家共同探讨。

参考文献:

- [1] Gibson J J. The Ecological Approach to Visual Perception [M]. Boston: Houghton-Mifflin, 1986.
- [2] 马塞尔·莫斯,施郎格. 论技术、技艺与文明[M]. 蒙养山人,译. 北京:世界图书出版公司,2010.
- [3] 后藤武,佐佐木正人,深泽直人. 设计生态学[M]. 黄友玫,译. 桂林:广西师范大学出版社,2016:61.
- [4] 吴国盛. 芒福德的技术哲学[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版),2007,44(6):30-35.
- [5] Reed E S. Encountering the World: Toward an Ecological Psychology[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [6] Turner P. Affordance as Context[J]. Interacting with Computers, 2005,17(6):787-800.
- [7] 李泽厚. 批判哲学的批判:康德述评[M]. 北京:三联书店,2007:178.
- [8] 柳宗悦. 工艺文化[M]. 徐艺乙,译. 南宁:广西师范大学出版社,2006.
- [9] Bloomfield B, Lathan Y, Vurdubakis T. Bodies, Technologies, and Action Possibilities: When Is an Affordance[J]. Sociology, 2010,44(3):415-433.
- [10] Buxton W. Chunking and Phrasing and the Design of Human-Computer Dialogues[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995:475-480.
- [11] 尤瓦尔·赫拉利. 人类简史[M]. 林俊宏,译. 北京:中信出版社,2014:37.
- [12] 贝尔纳·斯蒂格勒. 技术与时间——爱比米修斯的过失[M]. 裴程,译. 南京:译林出版社,2000.
- [13] Биография[EB/OL]. (2015-08-28)[2017-04-20]. <http://www.altshuller.ru/photo/Биография>.
- [14] 约翰·齐曼. 技术创新进化论[M]. 孙喜杰,曾国屏,译. 上海:上海科技教育出版社,2002.
- [15] 胡虎,赵敏,宁振波. 三体智能革命[M]. 北京:机械工业出版社,2016:7.
- [16] Rome E, Hertzberg J, Dorffner G. Towards Affordance-Based Robot Control [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008:vi.

(责任编辑:李新根)