

技术人工物设计中的功能分解

李秀波

(贵州中医药大学 马克思主义学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:技术人工物的设计遵循功能推理的逻辑,通过功能分解方法实现。文章通过梳理功能分解的三种方法,分析功能分解的内在逻辑,认为功能分解的逻辑基础来自技术人工物的工作机制及其与使用者的互动方式,其实现的基础条件是功能的可分隔性和性能的可降层性。功能分解作为一个桥梁,帮助设计者连接了“意向图景”与“物理/机械图景”,在部分与整体的结构/功能之间获得一种逻辑上的互通性。功能分解思维帮助设计者得到了易于理解的,具有可预测性、可靠性、稳定性、可控性的牛顿机器,并通过设计方案说明设计对象的性能/行为是严格可预测的,与预期运行效果是一致的。这实质上是机械论和还原论在设计思维中的反映。

关键词:技术人工物;工程设计;功能推理;功能分解

[中图分类号]N02 [文献标识码]A [文章编号]1672-934X(2021)01-0033-07

DOI:10.16573/j.cnki.1672-934x.2021.01.004

Functional Decomposition of Technical Artifact Design

LI Xiu-bo

(School of Marxism, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The Technical artifact design realized by functional decomposition follows the logic of functional reasoning. By combing the three methods of functional decomposition and analyzing the inherent logic of functional decomposition, the paper advocates that the logical basis of functional decomposition comes from the operating mechanism of technical artifacts and the way they interact with users, and that the basic conditions for functional decomposition are the separability of function and the degradability of performance. As a link, functional decomposition helps designers connect "intentional picture" and "physical/mechanical picture" so that they can obtain a logical interoperability between the structure/function of the part and the whole. Functional decomposition thinking helps designers to get Newton machines that are intelligible, predictable, reliable, stable and controllable, and shows that the performance/behavior of the design object is strictly predictable and consistent with the expected running effect through design schemes. Essentially, functional decomposition thinking is the reflection of reductionism in technical artifacts design thinking.

Key words: technical artifacts; engineering design; functional reasoning; functional decomposition

收稿日期:2020-10-15

基金项目:河南省教育厅人文社会科学研究一般项目(2019-ZZJH-103);湖南省教育厅科学研究重点项目(20A031);贵州中医药大学博士启动项目([2019]108号)

作者简介:李秀波(1985—),男,山东新泰人,讲师,哲学博士,主要从事技术与工程哲学研究。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

自技术哲学的“经验转向”以来,技术哲学的荷兰学派试图打开技术设计的黑箱,聚焦于技术是如何产生、使用和起作用的,并试图建立一种体现技术实践的情境化和描述性的技术哲学理论。克罗斯(P. Kroes)等人基于“结构—功能”的概念框架,将工程设计描述为“一个将功能翻译或转换为结构的解题过程。该过程起始于收集所需的功能知识,终结于一个可实现预想功能的物理客体、系统或过程的设计蓝图”^[1]。要打开这个“解题过程”的黑箱,需要解释设计者在实践中是如何以“功能”为核心展开推理的,又是何以确定某个结构能够实现某个功能的,即功能推理(functional reasoning)的过程。在该过程中,功能分解是主要的思维工具,是功能推理的实现方法。通过设计任务的“分而治之”,设计者将任务转换为便于设计和制造的具体结构。设计者通过对结构的分析和具体化,将设计问题分解为各个零部件的制造。然后,根据部分之间的某种逻辑重新集成和综合为结构整体。但问题在于,如何分解设计任务才合理?如何集成和综合才能保证结构与功能相一致?这就涉及分解和集成过程中使用的思维与方法,是概念设计和详细设计阶段的核心问题。

一、功能推理与功能分解

在技术人工物设计中,设计者需要回答技术人工物如何实现某种功能,又为何能够实现该功能,并围绕“功能”展开对技术人工物的解释和分析^[2]。要打开工程设计的黑箱,需要描述工程设计活动的推理链,发现推理活动中的关键概念,并尝试建立这些概念之间的关联,建立描述功能推理过程的模型。

霍克斯(W. Houkes)等人认为,技术人工物的设计推理涉及目的、行动、功能、行为和结构五个范畴,构成了推理过程的五层次结构^[3]。在该描述模型中,功能是技术人工物设计推理中的核心概念,在推理过程中起到链接或融通的作用。他们利用“使用计划”的概念,对设计推理进行理性重建。通过推理,将上一阶范畴

转译为下一阶范畴。当然,每一次转译都不是线性的、单向的,而是一个在设计实践中不断往复迭代的创造性过程。

基于该描述模型,霍华德(T. J. Howard)进一步区分了使用功能(use functions)和工作功能(work functions),提出了一种更为完善的链接模型(the link model)^[4](如图 1 所示)。其中使用功能是描述“拿技术人工物来干什么用的”,与使用者的行为及其与技术人工物的互动有关,指向使用的结果。而工作功能是描述“技术人工物是如何工作和运行的”,与技术人工物的属性和行为有关,指向产品发挥功能的能力。实际上,在设计情景和使用情景的关联中,这种区分是对霍克斯模型中“行动”范畴的细化。

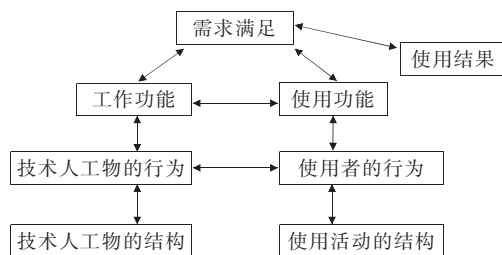


图 1 描述功能推理的链接模型

根据链接模型,技术人工物的功能既与其物性有关,也与使用方式有关,是由技术人工物与使用者在使用情境中的协作行为来定义的。在使用情景中,技术人工物“能否被使用者认为可用”是基于对使用功能的认识而作出的判断。技术人工物具有一种在使用情境中采取适宜行动的能力,传递某种使用者可感知的提示或建议,为使用过程提供一种行动指向。也就是说,技术人工物和使用者都成为了一种行为主体。可以说,链接模型是基于人一物的协作模式描述技术人工物设计的推理逻辑。

遵照功能推理的逻辑,设计者通过功能分解展开设计活动。在设计实践中,设计者“把任务分解成一系列可以单独完成的次级任务,这种方法无论有多复杂,在任何设计活动的组织方面都是切实可行的”^[5]。通过任务的“分而治之”,设计者将设计任务转换为便于设计和制造

的具体结构。在概念设计阶段,设计者以功能为分析原点,将技术人工物看作是由一系列具有子功能的组构成的整体,采用自上而下的思路将总功能(overall functions)划分为一系列子功能(sub-functions),建立起层次化的功能树体系,这种设计思路即为功能分解。遵照功能推理的逻辑,设计者通过功能分解获得具有可操作性的结构单元或部件。根据链接模型,功能推理涉及使用者的使用目的、使用方式和使用结果以及技术人工物的结构、行为等不同侧面的描述,这些描述可以帮助设计者找到不同的分解方法和分解逻辑,为功能分解给出某种设计指向。

需要特别指出,在技术人工物的设计实践中,设计工作不是起始于基础性的技术理论或工程运行的原理,而是基于设计领域中设计者积累的设计案例和经验,从中发现可供效仿和参照的设计方案,以此作为设计起始。然后,根据工程目的对前人与之相近的设计案例加以调整、修改或删减,逐渐向设计目的靠拢。可以说,它是一个包含隐性知识的实践推理过程^[6]。这是设计实践的程序或步骤中体现的时间结构。而本文所讨论的功能推理和功能分解,不是要呈现设计活动的时间结构,而是要呈现设计者面对设计问题时的解题思维和逻辑,并不否认设计经验和效仿案例对设计工作的重要性。

二、功能分解的三种方法

在设计实践中,“功能”一词在使用中的含义不尽相同。实际上,这种模糊性反映了设计者依据设计任务使用着不同的功能分解策略,从而在实践中给设计者带来某种方法论上的便利^[7]。范·艾克(D. Van Eck)从技术人工物的行为、使用目的和效果三个方面梳理了已有功能分解的方法^[8]。然而,依据霍华德对技术人工物设计推理的描述,“功能”一词的内涵还会涉及使用者的使用行为和使用活动的结构。因此,本文从意向性、物性和互动三个进路梳理功

能分解的方法。

(一)“意向性”进路

技术人工物具有明确的目的性,是“为人之物”。因此,技术人工物的设计可以描述为将使用者的意向性内化为技术人工物结构的过程。设计者需要感知使用者的需求,通过设计将用户的主观意志和目的凝聚到技术人工物中,赋予技术人工物朝向特定现实需求的定向性,从而在使用者的意向性与功能描述之间建立连接。

设计者借助使用者的意向来描述技术人工物的功能,一般描述为:在某种使用情境中,某技术人工物具有功能F,是指该技术人工物能够满足使用者的目的P。如某手机能够发挥其功能,是指它能够满足使用者的拍照、指纹解锁、听音乐、视频聊天等需求。按照这种描述,设计者将使用者的目的分解为一些子目的,进而定义相应的子功能,最终设计出满足该子功能的子结构或模块。如在上述例子中,设计者可将手机分解为一系列子结构:拍照需要摄像头;指纹解锁需要指纹识别、存储器和解码器等;听音乐需要音频解码器;视频聊天需要摄像头、话筒和听筒等,然后,将这些子结构集成为一个整体,就丰富了手机的功能。该分解方法的关键在于是否能够把握子目的之间的逻辑关系。设计者需要在“人—技术人工物—世界”间的相互塑造和相互揭示中梳理子目的之间的分立性、层次性和协调性关系。比如,在特定的使用过程中,手机的拍照和视频聊天之间是否会引起设计上的冲突,如何恰当定义两种子目的以保持它们之间的协调性,需要加以特别考量。

(二)“物性”进路

克洛斯认为,技术人工物的设计就是在功能描述和结构描述之间建立一种映射,这种映射的一端是由几何的、物理的、化学的、机械的、材料的规则所定义出的结构属性,另一端则是由意图的、用途的、目的的规定给出的功能属性^[9]。在工程实践中,设计者不仅能够提供关于所要设计的技术人工物的形式描述,而且还

能给出关于使技术人工物如何发挥所需功能的机制描述^[10]。通过对运行机制的描述,呈现出从结构细节到功能实现路径的映射规则,实现从功能到结构的设计推理。因此,结构的可实现性也是功能分解的根据。

在从功能到结构的设计推理中,设计者借助对技术人工物的期望行为来描述功能,一般描述为:技术人工物具有功能 F,是指该人工物能够做到 X、Y 和 Z 等,而这些预期行为一般用物理属性来描述^[11]。例如,汽车具有运输功能,是指当汽车载货 2 吨行驶在平坦的马路上时,时速可达 120 公里,可爬上 15 度的坡道,并持续行驶 10 小时等。这种功能描述是设计者最常使用的描述方式。在功能的行为分解过程中,设计者首先基于“输入—输出”的黑箱思维,将整体功能与一系列行为建立关系,进而将行为转译为一系列子功能,每一项子功能又用一系列实现该子功能的行为描述,依次类推,直到子功能与具体的结构组件联系在一起,得到可直接处理的结构设计问题^[12]。在这种分解方法中,设计者根据物理因果的逻辑,利用工程知识在物理世界与行为之间建立映射,并从工程学原理中获得结构分解的依据。

这种分解方法的实现需要工程师从物理、化学、机械、动力等方面对技术人工物的工作机制建立一种“流描述”(物质、能量和信息流)的表征模型^[13],在“流变化”与“行为变化”之间建立“输入—输出”关系。“流描述”的建立一般包含三个步骤^[14]:一是通过“流描述”,将高层功能描述为一系列“输入—输出”关系的黑箱;二是将每一种“流”用时间链条描述为流动的过程,过程描述可能包含“流”的创生、释放、转换、接收和存储等阶段;三是将这些“流”集成为一个整体,实现一个能够实现所有“流”的“输入—输出”关系的整体。按照上述步骤,这种“流描述”被进一步细分,如能量被细分为电力的、热量的、机械的,其中电力能源再分解为直流或交流的、高压或低压的等,最终得到机械意义上的

元结构。元结构以及它们之间的界限被划分清楚后,不同领域的设计人员就要把某种对接要求建立起来。“流描述”所呈现的子结构之间的物理关联预示着整体结构的合理性。

(三)“互动”进路

承载着使用者意向性的技术人工物是否能够在特定使用情境中发挥特定功能,还依赖于对该使用情境的认知和解读。设计者需要深入到使用过程,剖析使用者与技术人工物的互动细节,包括使用者的操作习惯、技能水平、社会规则等,用以制定合乎人工物工作方式的使用方法。依照这方面的信息,设计者通过撰写用户手册来详细阐述技术人工物的使用方法,告诉潜在使用者如何使用技术人工物以实现他们的目标,从而给出包含程序性知识的使用方法以定义技术人工物与使用者间的互动模式,使用者则需要通过使用方法来获得操作知识。

根据技术人工物与使用者在使用过程中的互动协作,可以将功能分解方法概括为功能的“动作”分解和“效果”分解。

“动作”分解,是指在特定使用情境中,使用者会采取一系列使用动作以完成使用过程。技术人工物具有某种功能,可以描述为使用者对技术人工物采取了一系列行动后就达到了他的目的。例如,电梯具有载客功能,意指如果乘客依次按了电梯的上升、关门、楼层指示和开门按钮后,就可以到达预期楼层。设计者可以依据使用动作的分解来确定功能的分解方法,进一步将技术人工物分解为能够支撑每一个操作行动的子结构。如在电梯的例子中,设计者需要将电梯分解为能够实现乘客每一个行动所对应的装置或单元,而当这些装置或单元集成为电梯,就能够实现“载客到特定楼层”的功能。这种分解方法即功能的动作分解^[15]。动作分解的核心在于使用者操作序列的逻辑结构。使用者在使用情境中,有哪些身体的、习惯的或者社会的约束会塑造使用者的操作方式,这种操作方式如何影响使用者与技术人工物间的互动模

式,这些问题都需要认真分析。作为为人之物的技术人工物需要满足合对象性要求,遵循身体尺度把握设计的“度”^[16]。基于这种分析,设计者就可以解读操作序列及其互动模式,并依此划分实现各动作的子功能。

“效果”分解,是指设计者依据技术人工物的效果来描述功能。一般描述为:技术人工物具有某种功能,是指使用者给出了某个操作指令后,技术人工物会产生一系列效果。例如,某机器具有彩色打印功能,意思是说,在室内环境中,使用者放入一张空白 A4 纸,该机器输出了一张彩色图片。技术人工物的使用效果与“构成人工物环境的情境因素”直接相关。在特定环境下,使用者按照用户手册正确地使用技术人工物,在现实世界中就能产生一系列效果。功能被表述为一系列“触发—效果对”(trigger-effect pairs),即使用者的操作作为触发器与技术人工物的使用效果之间的对应关系^[17]。这样,技术人工物可以被描述为能够达到特定效果的一系列子功能的集成。这种分解方法即为技术人工物功能的效果分解。效果分解是从环境要素到内部结构的推理过程,其关注点是技术人工物与使用/运行环境之间的关系。环境因素作为一种约束条件,需要内化为人工物的非功能性属性。因此,设计就可以看作解决技术人工物与其环境之间的张力的活动。正如西蒙(H.A.Simon)所说,“工程设计的任务就是设计一种适应于环境的人工系统。”^[18]设计者试图从对环境的解读中抽离出“环境参数”,并将其作为约束条件来开展设计活动,进而考虑技术人工物的物理和技术上的可能性。

上述三种进路梳理了功能分解的不同方法。在工程设计实践中,不同阶段和层次的设计任务涉及不同维度的推理过程,功能分解也相应有所不同。根据设计任务的层级、环节与设计知识的不同,设计者会识别出其中包含的子功能之间目的的、行为的、操作的或效果的逻辑,选用合适的功能分解,最终获得了一系列子

功能,并得到相应的子结构,形成“结构—功能子”。在工程实践中,不同功能分解方法的关联应用更加符合工程价值。

三、功能分解的内在逻辑

在设计者的实践推理中,功能分解是主要实现方式。那么,功能分解有效性的内在逻辑是什么呢?根据弗马斯(P. Vermaas)等功能分解的分析^[19],可以将技术人工物的设计描述为下述过程(如图 2 所示)。图中, Φ 代指总功能, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 代指一系列子功能, S 代指总结构, $s_1, s_2, \dots, s_n$ 代指一系列子结构, ϕ_m 是元功能, s_m 是元结构, Org 代表所包含子项的组织逻辑。

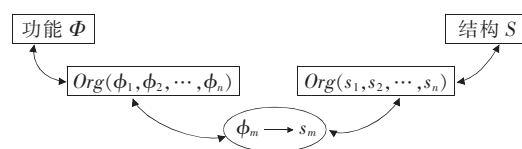


图 2 功能分解的逻辑过程

在图 2 中,通过功能分解,技术人工物的功能 Φ 被分解为一系列子功能 ϕ_n ,子功能被继续分解直至元功能 ϕ_m 。设计者利用设计经验和知识找到元功能 ϕ_m 对应的元结构 s_m ,形成“结构—功能子”($\phi_m \rightarrow s_m$),是连接结构 S 与功能 Φ 的基本单元。“结构—功能子”起到了一种桥梁作用,帮助设计者将“功能描述”转译为“结构描述”^[20]。最终,设计者通过功能分解将设计任务还原为元结构的设计,通过“结构—功能子”最终将最高层次的结构与功能联接起来。当然,工程设计的逻辑分析不是一个单向的从功能走向结构的,而是一个不断往复迭代的过程。在工程设计实践中,设计师对功能分解方法和方式的选择是在不断认知、协商和妥协中以某种社会形式展开的,功能推理中也是在设计者对功能和结构的一再认识中进行的。通过认识迭代,确保各子功能的实现就意味着总功能的实现,各子结构的合目的性就意味着总结构的合目的性。

这样一来,分解后子功能之间的组织逻辑

“Org”成为功能分解有效性的关键,其中也正蕴含着功能分解得以实现的逻辑基础。这种逻辑基础来自技术人工物的工作机制及其与使用者的互动方式,蕴含在功能分解方法中关涉技术人工物功能性的、物理的、目的的、行为的或操作的关系序列中。概括起来,总功能与子功能之间可以形成两种关系:一是子功能 f 的决定因素是功能 F 的决定因素的一部分;二是子功能 f 是功能 F 得以实现的序列中的组成部分^[21]。

那么,功能分解实现的基础条件是什么呢?

从功能的可分隔性来看,在功能分解的物性主义方法中,由于子功能之间的关系/机制在逻辑上具有某种线性、稳定性和可预见性,子功能之间的关系转换为一种固定界面的建构。尤其是在模块化设计中,整体结构被分割开来,设计者只需通过产品之间的界面处理组分之间残存的依存性就可以确保整体结构的属性。通过界面化处理,子功能之间的关系可以切除而予以悬置。这样一来,子结构的“流描述”恰恰是决定总结构的“流描述”的一部分,技术人工物的总结构被分隔为子结构加以设计。结构的这种可分隔性决定了功能被“分隔”实现的可能性。又由于“界面”的稳定性,子结构可以按照界面所定义的关系组装成为总结构,子结构并置设计后拼接成整体结构符合功能的设计预期。这种操作只需设计者关注部分的性能。设计者所需要专注的变量减少,可操作性增强。

从性能的可降层性来看,在技术人工物的设计中,性能是连接结构描述和功能描述之间的概念,它既涉及技术参量或指标,也涉及功用的效果。在功能分解中,总功能/结构的性能描述降回到“结构—功能子”层次的性能描述中。这里的降回包含解释降回和方法降回,解释降回是指通过各部分性能及其关系的分析解释整体性能的合理性;方法降回是指整体性能通过具有相关性能的部分按照既定秩序和关系加和来实现。在总功能的行动的或者使用动作的实现序列中,子功能具有一种可区分性,使得总功

能具有了可分解性。设计者将总功能对子功能的约束和选择作用搁置起来,专注于“结构—功能子”的实现。“结构—功能子”作为结构和功能之间的桥梁,搭建起一种整体性能和部分性能之间的对应规则。设计者可以将子功能从功能的实现序列中隔离出来予以实现。

四、讨论

一般而言,技术人工物的设计分为三个方面:一是将用户的需求转换为技术人工物的功能,解决意向性问题;二是将环境约束转换为技术人工物的参数,解决适应性问题;三是利用功能分解得到具体结构,解决制造问题。在展开功能分解前,在逻辑上需要先完成前两个方面,使用户意向和环境约束以参数形式进入设计视野,从而将技术人工物与用户意向和环境约束分隔,使技术人工物孤立地出现在设计视野中。最终把思维中的技术构思规范化、定量化,以标准的图纸或说明书的形式展现出来^[22]。功能分解得以实现存在两个前提:一是设计者已经对部分之间的关系产生了清晰明确的认识,甚至可以表达为确定的数学公式;二是部分之间的这种关系是线性的、稳定的,不会随时间发生显著变化。基于此,设计对象成为既定的,被描述为线性因果关系驱动下的确定性系统。

首先,功能分解作为一个桥梁,连接了“意向图景”与“物理/机械图景”。“意向图景”关涉用户的意向性投射、具身认知和使用方式等,而“物理/机械图景”则关涉物理因果、数学语言以及分解—组合的操作方式等。这个桥梁也说明,两个图景的分隔不是因为他们之间没有关系,而是因为这种关系是稳定的、可预见的,能够简化为一种“界面”,这样,功能分解才得以搭建,并让机械世界得以被“孤立”地面对,营造了一个价值无涉的物理设计领域。

其次,通过功能分解,技术人工物在结构/功能的部分与整体之间具有了一种逻辑上的互通性。这种互通性让设计方案具有了关于“技术人工物何以具有某种功能”的解释力,暗示整

体在逻辑上依赖于它的部分,整体因部分而合理化,失去了某个部分的整体也不再续存。这是一种功能解释的还原方法,即根据部分的性质解释或预言整体的性质。设计者可以通过部分获得整体,依靠自下而上的因果力对整体作出解释。通过来自“部分”的解释理由帮助设计者获得了一种反事实理解,即“如果不是如此这般的部分,整体也会有所不同”。这种反事实理解对于功能失效现象有很强的解释力。在人类的设计观念中,设计者已经熟知了这种将整体还原为部分加以处理的技术和思维,并发展起来一套完整而有效的分析、设计、测试、生产和评估的方法体系,也形成了与“还原思维”相适应的沟通语言和说明方式。

总体来看,功能分解思维能够帮助设计者得到易于理解的,具有可预测性、可靠性、稳定性、可控性的牛顿机器,并通过设计方案说明设计对象的性能/行为可严格预测的,与预期运行效果是一致的。实质上,这是机械论和还原论在设计思维中的反映,说明还原论思维不仅仍占据着技术的认识领域,更占据着实践领域。

[参考文献]

- [1] Kroes P. Design Methodology and the Nature of Technical Artefacts[J]. Design Studies, 2020, 23(3): 287-302.
- [2] Far B H, Elamy A H. Functional Reasoning Theories: Problems and Perspectives [J]. AIE EDAM, 2005, 19(2): 75-88.
- [3] Houkes W, Vermaas P E. Technical Functions: On the Use and Design of Artefacts[J]. Pacific Journal of Mathematics, 2010.
- [4] Howard T J, Andreasen M M. Mind-Sets of Functional Reasoning in Engineering Design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2013, 27(3): 233-240.
- [5] [荷]路易斯·L·布西亚瑞利. 工程哲学[M]. 安维复, 等, 译. 沈阳: 辽宁人民出版社, 2012: 25.
- [6] 李秀波, 赵亮. 论工程设计中的实践推理[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版), 2018(3): 1-7.
- [7] Vermaas P E. The Coexistence of Engineering Meanings of Function: Four Responses and Their Methodological Implications[J]. AI EDAM, 2013, 27(3): 191-202.
- [8] Van Eck D. Explaining and Relating Different Engineering Models of Functional Decomposition[A]//Proceedings of the Proceedings of Design Research Society (DRS) International Conference[C]. 2010: 121-122.
- [9] Kroes P. Technological Explanations: The Relation Between Structure and Function of Technological Objects[J]. Society for Philosophy and Technology, 1998, 3(3): 124-134.
- [10] Eekels J. On the Logic and Methodology of Engineering Design[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2002, 80(6): 615-624.
- [11] Umeda Y, Kondoh S, Shimomura Y, et al. Development of Design Methodology for Upgradable Products Based on Function-Behavior-State Modeling[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing, 2005(19): 161-182.
- [12] Yaner P W Y, Goel A K. From Form to Function: From SBF to DSSBF[A]//Gero J S(ed). Design Computing and Cognition[M]. Berlin: Springer, 2006: 423-441.
- [13] AL-Fedaghi S. Design Functional Decomposition Based on Flow[A]//Proceedings of the Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2016 IEEE International Conference[C]. IEEE, 2016.
- [14] Stone R B, Wood K L. Development of A Functional Basis for Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2000(122): 359-370.
- [15] Deng Y M. Function and Behavior Representation in Conceptual Mechanical Design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2002(16): 343-362.
- [16] 王义, 罗玲玲. 可供性具身认知的设计方法论意义[J]. 自然辩证法通讯, 2018(2): 122-128.
- [17] Bell J, Snooke N, Price C. A Language for Functional Interpretation of Model Based Simulation[J]. Advanced Engineering Informatics, 2007, 21(4): 398-409.
- [18] [美]司马贺. 人工科学 复杂性面面观[M]. 武夷山, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2004.
- [19] Vermaas P, Garbacz P. Functional Decomposition and Mereology in Engineering [J]. Handbook Philosophy of Technology and Engineering Sciences Elsevier, Amsterdam, 2009: 235-271.
- [20] 吴国林. 论技术人工物的结构描述与功能描述的推理关系[J]. 哲学研究, 2016(1): 113-120.
- [21] Burek P(et al). Ontological Analysis of Functional Decomposition[J]. New Trends in Software Methodologies, Tools and Techniques, 2009: 428-439.
- [22] 程海东, 陈凡. 技术设计: 技术认识的形象化[J]. 长沙理工大学学报(社会科学版), 2015(4): 23-28.