

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.007

以 Affordance 和功能为共同基础的功能结构图方法拓展

武春龙¹, 纪杨建¹⁺, 祁国宁¹, 顾新建¹, 李浩²

(1. 浙江大学 机械工程学系工业工程中心, 浙江 杭州 310027;

2. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:当前功能结构图方法仅以意图域概念“功能”为基础,但同时暗含从现实域出发的考虑,这造成了复杂度耦合,使得绘制过程难以下笔。为解决这一问题,吸收现实域的 Affordance 概念与功能概念共同作为方法基础,并基于这两个概念将功能结构图方法的绘制分解为:从功能维度逆向思考“人想要发生什么”的倒逼功能结构图,以及从 Affordance 维度顺向思考“在其环境下可能发生什么”的 Affordance 功能结构图,从而完成复杂度解耦,得到改良功能结构图方法。该方法解除了绘制过程中的思维混乱,降低了绘制门槛,提高了实用性。

关键词:功能; Affordance 概念; 工程设计; 功能结构图; 设计理论; 设计方法学

中图分类号:TH122;TB472 **文献标识码:**A

Reform function structure modeling based on synergistic use of function and Affordance

WU Chun-long¹, JI Yang-jian¹⁺, QI Guo-ning¹, GU Xin-jian¹, LI Hao²

(1. The Center of Industry Engineering, Mechanical Engineering Department,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Mechanical & Electric Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,

Zhengzhou 450002, China)

Abstract:Based on ‘function’ in intention realm but mixed the consideration from physical realm, the current function structure method was complexity-coupled and hard applied. To solve this problem, Affordance concept of real domain and function concept were taken as a common basis to decompose the function structure method. One was the reverse function structure from the function view, which started from the consideration what the people want to do; another was Affordance function structure from the affordance view, which started from the consideration what the environment allow to occur. Thus the decoupling of complexity was accomplished, and a reformed function structure method was obtained. The thinking confusion in the drawing process was eliminated with proposed method, and the practicability was also improved.

Key words:function; Affordance concept; engineering design; function structure; design theory; design methodology

0 引言

在当前工程设计研究领域, Pahl 和 Beitz 所著

的《Engineering Design: A Systematic Approach》^[1]一书最为经典, 每年设计领域的顶尖国际会议上, 约 20%左右的论文都会引用该著作。书中提出的理论

收稿日期:2014-07-31;修订日期:2014-12-06。Received 31 July 2014; accepted 06 Dec. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275456, 51205372); 国家 863 计划资助项目(2013AA041304)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51275456, 51205372), and the National High-Tech. R&D Program, China (No. 2013AA041304).

方法通常被称作系统性工程设计过程理论。该方法第一次系统而细致地介绍了工程设计过程中的阶段划分及各步骤的实施方法,立意于提出一种系统性的结构化方法来引导设计人员,其内涵和基础被当前多种著名产品设计和开发方法的提出者吸收,如 Ulrich & Eppinger^[2], Otto & Wood^[3]和 Hubka & Eder^[4]等,并且已经应用于目前大部分工程设计学教材中。

系统性工程设计过程理论中最具标志性的工具是其中的功能结构图方法。功能结构图的构建以输入输出流来表示功能。通过将产品的整体功能层分解为子功能,直到某一层的子功能可以直观得到解决方案或原理时结束这一过程,得到功能结构图。然而,在诞生后的几十年间,功能结构图却并没有成为企业实践中的日常实用方法,对该方法缺陷的批判开始出现,对其进行规范、挖掘或改良成为当前的研究热点。

近3年来,对功能结构图方法的国内外主要研究成果如下:Tomiyama等^[5]试图寻找到功能结构图在企业实践中不能大规模应用的原因;van Eck^[6]试图深挖功能结构图的哲学基础;Sen^[7]和 Zhang^[8]等试图找到设计人员在使用功能结构图过程中的思维和知识脉络;Eder^[9]加强了功能结构图中流和功能的概念,使其覆盖了更广的范围;Zou^[10]和杨波^[11]等分别提出对功能结构图进行扩展的建模方法;康与云等^[12]致力于将功能结构图转化为计算机能够处理的数据矩阵形式。

然而,以上研究实质上均仅围绕功能概念展开,而设计活动的实质是从意图域到现实域的映射,功能仅代表意图域中的基础概念,现实域中的基础概念长久以来一直缺乏,这正是功能结构图研究中亟待解决的问题。Affordance概念的引入为解决这一问题带来了可能(Affordance详细释义见第2章)。

Affordance概念近几年开始得到工程设计领域的关注,得益于Miaer和Fadel^[13]提出的基于Affordance的设计理论。该理论以Affordance为基础,目的是将其作为系统性工程设计过程理论的替代方法,然而目前理论成熟度并不高,距此目标尚有距离。尽管不能成为替代方法,该理论却可以为系统性工程设计过程理论的改良提供有益的借鉴补充。事实上,Affordance和功能两者之间并不是替代的关系,而是各自反映了工程设计活动中的一部分基础,是互补的关系^[14];同时以Affordance和功

能作为理论基础,是改良系统性工程设计过程理论的可行途径。本文即以两者为共同基础,对功能结构图方法进行拓展研究,提出改良的功能结构图建模方法,从而使其更清晰、完备和易用。

1 系统性工程设计过程理论基础和主要工具

Pahl和Beitz于1977年在其第一版德文版的《工程设计学》^[15]中首次完整详细地提出了系统性工程设计过程理论,以代替过去仅依靠工程设计人员的经验与直觉的设计方法。设计过程分为四个主要阶段:

(1)任务阐明 收集、阐明和编制所设计产品的目标需求。

(2)概念设计 分析识别出目标产品的功能结构,并粗略描绘出设计方案。

(3)具现化设计 在满足多种技术和经济指标要求的情况下,将设计方案细化并具体化到物理结构和几何布局。

(4)详细设计 对已成型的设计方案进行细节修补,并为制造准备进行设计。

在该过程中,功能概念在其中起到了极其重要的基础作用,因此有些学者也将系统性工程设计过程理论称为基于功能的设计理论^[16]。功能结构图方法即为其中概念设计阶段的重要工具,用于识别产品功能模型结构。

1.1 功能概念辨析

Pahl和Beitz应用术语功能来表述以执行任务为目的、系统的一般输入输出关系,形式上以动词+名词结构表示^[1],却没有详细阐述功能概念的本质和内涵。这也是Miaer和Fadel在试图提出替代理论时,所指出的系统性工程设计过程理论需改善的一点^[13];构建在功能概念基础上的整个理论体系,功能概念本身却没有理论基础。这一点使整个工程设计领域的研究者对功能的理解和定义多种多样,设计理论在研究、沟通和使用中比较混乱,直到最近几年才有哲学领域的以Vermaas为代表^[17]的研究者,对功能的本质开始了初步的理论研究。

Erden等^[18]对工程设计研究领域和企业实践应用研究进行了回顾综述,一共总结归纳出18种不同的功能定义,最终只能大致总结为“功能是在意图域中人的意图/目标向现实域中结构/行为映射过程中一个重要的主观意图意义上的概念”;Vermass等^[19]进一步总结了工程领域研究者和工程师们对

功能赋予的不同涵义,归纳出三种典型的功能概念的认识:

(1)行为意义功能 将功能看作技术产品的意图行为。

(2)效果意义功能 将功能看作技术产品的期望效果。

(3)目的意义功能 将功能看作技术产品的设计目的。

功能包括目的意图的内涵,这一点在三种对功能概念的认识中都有反映。正如 Chandrasekaran 和 Josephson^[20]所言:(功能的)所有含义起因于这样一种理念,即机器、系统或人由某人的打算或渴望驱动去做某事或拥有某种属性。因此,功能属于意图域中的概念,目的意义功能已内嵌于行为意义功能和效果意义功能中。对功能内涵的理清主要集中在行为意义功能和效果意义功能的辨析。

目前最有影响并能清晰反映行为意义功能和效果意义功能的内涵和联系是 Chandrasekaran 和 Josephson 的研究^[20]。他们将设计过程中的功能分为以装置为中心的功能和以环境为中心的功能:装置被使用是由于某人想要装置外的某些他想要的改变发生。功能的一个中心意义就在于作为(期望)效果的功能。然而,功能也经常被描述为装置的属性或行为,而并不提及装置对外部世界造成的改变。因此,功能可以描述为一个以装置为中心或者一个以环境为中心的观点,甚至是两种观点的集合。这里的装置是指所设计的产品,以装置为中心的功能观点实质为行为意义功能,以环境为中心的功能观点实质为效果意义功能。从 Chandrasekaran 和 Josephson 的论述中可以看出,以产品本身边界为着眼的分割线,若着眼于产品边界内,则认为功能是产品本身所期望发生的行为,属于行为意义功能;若着眼于产品边界外,则认为功能是产品本身行为的产出与其环境交互所产生的期望发生的效果,属于效果意义功能。基于这两种认识,对两种意义功能继续进行剖析,以对两者进行统一。

效果意义功能既涉及到产品本身又涉及到产品所在环境中与其交互的部分主体,因此它是属于产品及环境中交互主体的共同属性,将其仅说成产品的功能是不适合的。否则将在设计过程中忽略产品环境中交互主体的特性和变动,限制了设计人员的思维空间。因此,将效果意义功能统一于行为意义功能更加合理。

设计产品时首先要界定所要针对的系统范围,行为意义功能即是该系统的意图行为,而该系统的效果意义功能可被看作是该系统与其环境中参与效果形成的部分主体共同构成的更高层级的系统的意图行为。在这个意义上,将效果意义功能统一于其更高层级系统的行为意义功能。因此,传统的设计过程中对功能不同意义的运用,通过嵌套系统的层级性分解,最终统一为不同层级系统的行为意义功能,从而得到唯一内涵的功能意义。

因此,本文将功能定义为产品本身的意图行为,其出发角度为“人想要发生什么”,属于意图域中的概念。

1.2 功能结构图方法介绍及分析

构建功能结构图,首先是根据客户需求界定所要设计的产品的系统边界,识别出跨越系统边界的输入和输出,用流来表示,分为物料流、能量流和信息流三类,以功能来承载对流的转换。通过对跨系统边界所有输入流和输出流进行分析,得出需要对流进行转换的任务,即产品的整体功能。然后在子系统层级重复这一过程,使整体功能分解为若干子功能。逐级细化,直到某一层的子功能已经细致到设计人员可以直觉对应到已有的解决方案或原理时,结束这一过程。此时,由所有物料流、能量流、信息流和所有分解功能链接起来组成的有向网络图即为功能结构图。功能结构图的绘制方法步骤如下:

(1)识别对应于客户需求的流

列举所有对应客户需求的物料流、能量流和信息流。

(2)生成黑箱模型

将所需设计的产品看作一个黑箱,将第一步识别出的所有输入流绘制在黑箱左侧,所有输出流绘制在黑箱右侧。考虑从输入流转换到输出流需要怎样的产品整体功能,将其以动宾短语的形式标识在黑箱上。

(3)为每个输入流绘制功能链

选定一条输入流,想象这条流从输入到离开产品系统边界的整个过程所经历的各种变换,绘制由流和子功能组成的功能链,确保每一条输入流都进行了这一过程。

(4)将各条功能链聚合为网状的功能结构图

依据各条功能链间流的交互关系,将所有功能链聚合为功能结构图。这一过程中有时需要添加新的辅助子功能。

(5) 比对客户需求核实功能结构图

对功能结构图进行核查,确保每项客户需求都由至少一项子功能对应。如果仍有部分客户需求没有得到满足,则从步骤(2)开始迭代这一过程。

由以上步骤可见,绘制的思维过程不只从意图域的功能维度出发,还不自觉地杂糅了从现实域出发的考虑(如步骤(3))。同时思考两个维度容易引起思维混乱,造成复杂度耦合,难以描述绘制过程,提高了使用门槛,阻碍了工具在企业实践中的普及。

2 Affordance 概念介绍及辨析

Affordance 概念形成至今,广泛应用于生态心理学、认知心理学、人工智能、工业设计以及工程设计等领域,其概念内涵比上文所述功能概念的情况更为复杂,因此有必要理清 Affordance 的概念内涵。

生态心理学家 Gibson^[21]从动词 Afford 引申创造了 Affordance 名词,他将 Affordance 表述为“环境对动物的 affordance 就是它能供给或提供给动物什么,无论好的还是坏的”,“affordance 暗示了动物和其环境的互补性”。Chemero^[22]补充说明 affordance 是一种动物能力和环境特性间的交互关系。简单来说,原始意义上的 Affordance 是指动物在其所处环境中的行为可能。

Norman^[23]第一个将 Affordance 引入产品设计领域,他将 Affordance 定义为“Affordance 来源于事物的精神诠释,基于人们用来感知周围事物的过往经验和知识”。可以看出,Norman 和 Gibson 的概念阐述完全不同,这是因为 Norman 将 Gibson 原始意义上的 Affordance 看作实际 Affordance,用来表述事物在其环境中的行为可能;而 Norman 本身引申的 Affordance 实际上是感知 Affordance,用来表述人们感知到的事物的行为可能,两者在设计活动中都有重要作用。遗憾的是,因为 Norman 在其著作中对这一点没有详细说明,使得对 Affordance 概念的理解出现混乱甚至引起误解,以至在人机交互和感知心理学等领域,Affordance 几乎完全偏向于感知的涵义,偏离了其原有的内涵。近年来,Norman 说明了其 Affordance 概念^[24]与 Gibson 的原始 Affordance 概念的区别和联系,也对 Affordance 的概念理清做出了呼吁:当前设计世界中,术语 Affordance 的涵义已经距离它原本涵义十万八

千里了,回归到原始涵义或许会给我们带来帮助。

Miaer 和 Fadel 在试图建立自己的基于 Affordance 的工程理论时,将 Affordance 定义为两个子系统间能够发生的潜在行为^[13]。在这个概念中,将本应表述个体与其环境间交互关系的 Affordance 表述成两个个体间的关系,这显然是个谬误,偏离了原始定义。但 Miaer 和 Fadel 将 Affordance 概念的作用对象从原始涵义的动物引申扩展到非生命体的装置,为 Affordance 概念在工程设计理论中的应用奠定了基础。

因此,结合 Gibson 的原始定义与 Miaer 和 Fadel 的扩展,本文将 Affordance 定义为个体受其环境所支持的行为可能,其出发点为在其环境中什么可能发生,是一个现实域的概念。

3 基于 Affordance 和功能的功能结构图改良方法

当前功能结构图方法需要从每条输入流出发并跟随,直至这条流离开产品系统边界。整个过程中需要同时思考和绘制所有流的转换(即功能)及所带来的所有非期望效果。设计人员在该过程中同时存在两种维度的思考:①从用户需求出发逆向倒逼,考虑“需要有什么”,实质是前文所述的意图域功能意义维度上的思考;②从输入流出发正向思考,每一步的流转换及其与环境交互可能产生的期望和不期望的行为,实质是前文所述的现实域 Affordance 意义维度上的思考。

传统的功能结构图方法名义上是功能角度,形式上图形结构的组织脉络是从现实域 Affordance 维度“穷尽所有可能行为”的角度来绘制的,其中有从功能维度“需要什么行为”的思考,但并没有在绘制过程中明确体现。这是因为传统工程设计理论中并未明确功能和 Affordance 这两个基础维度,设计者在绘制过程中需要同时考虑两个维度,使经验不甚丰富的设计人员难以掌握,从而不愿使用功能结构图方法。因此在企业实践中,功能结构图没有被推广使用。由此可见,对耦合的两个维度进行复杂度解耦,将复杂问题分解为多个简单问题非常必要。因此,新的改良工具既需要意图域功能意义维度上倒逼的“需要什么行为”的结构图,又需要现实域 Affordance 意义维度上顺向的“环境中可能发生什么行为”的结构图,从而使工具简单易用,使人在同一时间只专注于一个维度。下面详细介绍从功能和

Affordance 两个维度交替进行的改良功能结构图绘制过程。

3.1 功能结构图改良工具绘制过程

(1) 意图域功能意义维度结构图的绘制 ①根据客户需求确定所有针对设计的产品的系统边界以及跨越系统边界的输出流,即为了满足客户需求,产品最后需要输出怎样的物料流、能量流和信息流;②根据所需的输出流和客户需求中已经阐明的输入流现状,识别需要添加什么输入流和需要怎样的流的转换,即产品整体功能;③在各子系统层级重复这一过程,将整体功能分解为若干子功能,逐级细化,直到某一层的子功能简单到通过直觉和经验已经可以想到具体方案,得到意图域功能维度的倒逼功能结构图。这一过程只考虑要得到最终满足客户需求的输出时,需要怎样的输入和变换过程,而不考虑输入和变换过程带来的其他效果。

(2) 现实域 Affordance 意义维度结构图的绘制

在功能维度结构图中已经确定为满足客户需求的输出需要怎样的输入和转化,然而这种输入和转化同时也会产生不期望的输出流。因此现实域 Affordance 维度的结构图绘制步骤如下:①在功能维度结构图的基础上,沿着每条输入流直至离开系统边界的整个过程中经历的每个流转换(即子功能),标识所有伴随产生的流。②考虑这些非计划产生的流与系统内其他流及子功能可产生的交互作用,及其与系统所处环境中其他要素可产生的交互作用。若这种交互作用是有害甚至危险的,则需要添加新的子功能来阻止消解。③从这些计划外产生的流和交互作用能否被利用的角度,思考添加新的子功能以优化设计。按该步骤绘制所有伴生的非意图行为对应的流,即可绘制出 Affordance 维度结构图。

以功能和 Affordance 为共同基础的改良功能结构图的绘制步骤如下:

(1) 倒逼识别客户所需的流 列出对应于满足客户需求的所有所需输出流,从而找到要得出这些输出流需要怎样的输入流。

(2) 生成倒逼黑箱模型 将第(1)步中识别出的输出流、输入流以及所需怎样的流转换(即产品主要功能)绘制成图,得到倒逼的黑箱模型。

(3) 为每条输出流绘制倒逼功能链 选定一条输出流,确定这条流对应的输入流之间需要的各种转换,绘制由流和子功能组成的功能链,确保每一条输出流都进行了这一过程。与传统的功能结构图方

法绘制功能链环节不同的是,这里是从输出流出发,按“要有这样的输出流需要怎样的输入和转换行为”的逻辑来绘制,不考虑每个输入流转换带来的除所需输出流外的其他输出。

(4) 在倒逼功能链的基础上绘制顺向 Affordance 功能链 从每条倒逼功能链的输入流绘制其经历的每个流转换(即子功能)得到的非计划产生的流。考虑其与系统内及系统所处环境中要素的交互,若交互是有害的,则绘制添加对其阻止消解的子功能;若有利用非计划产生的流提升产品主功能的方案,则绘制添加此类辅助子功能。

(5) 聚合倒逼功能结构图和 Affordance 功能结构图 依据各条倒逼功能链间流的交互关系,将所有倒逼功能链聚合为网状的倒逼功能结构图,用来反映产品直接与用户需求挂钩的主要功能骨干架构。依据各条 Affordance 功能链间流的交互关系,将所有 Affordance 功能链聚合为 Affordance 功能结构图,用来反映产品的全面整体架构。

(6) 核实 Affordance 功能结构图 对 Affordance 功能结构图进行核查,确保每项客户需求都由至少一项子功能对应,确保可能对环境或人体产生危害的非意图行为对应的流都得到了处理或再利用。如果仍有部分客户、环境、安全等需求没有得到满足,则从第(2)步开始迭代这一过程。

3.2 详细实例演示

为使以功能和 Affordance 为共同基础的改良功能结构图的绘制过程的步骤更明晰易懂,并对改良方法进行充分展示,以手提式吸尘器为实例,对改良功能结构图的绘制过程进行详细展示。

(1) 从用户需求出发,最终需求是将散落的碎屑收拾集中起来,吸尘器需要使用的是风能,而不是其他动力(如人力清扫)。因此得到倒逼的黑箱模型,如图 1 所示。



图1 手提式吸尘器倒逼黑箱模型

(2) 从输出物料流——碎屑出发,根据功能维度的倒逼逻辑,即需要怎样的输入和转换来实现这样的输出,建立第一条倒逼功能链,如图 2 所示。

(3) 在这条倒逼功能链的基础上,顺向从输入流考虑除了产生想要的行为还必将伴生哪些非计划行

为。例如,风能的引入伴生了空气物料流,产生了分离空气物料流和碎屑物料流的辅助子功能的需求。

由此对应的 Affordance 功能链如图 3 所示。

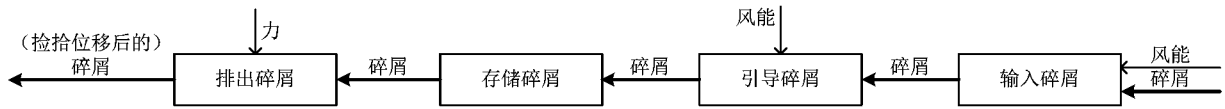


图2 从输出物料流碎屑出发的第一条倒逼功能链

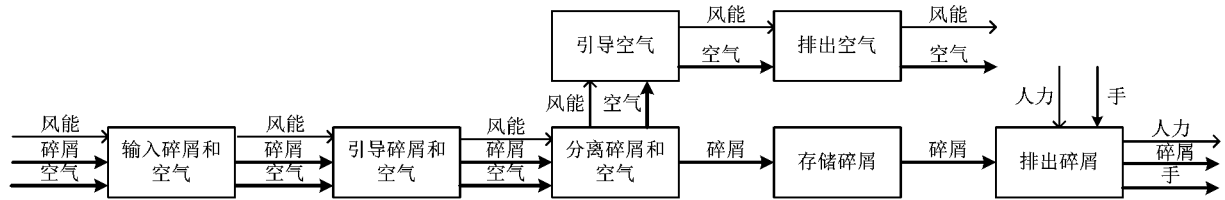


图3 第一条倒逼功能链对应的顺向Affordance功能链

(4)从风能流出发,寻找需要怎样的输入能源流和转换可以实现。当前社会的家庭环境中,电能是合适的来源。因此选择电能为输入流,得到如图 4 所示的倒逼功能链。

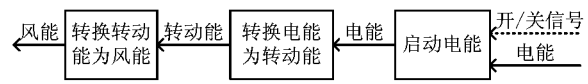


图4 从输出风能流出发的第二条倒逼功能链

(5)顺向考虑输入流经过这种系列转换将产生的非意图行为。例如根据物理定律可知,所有能量转化都不可能是百分之百的。能量转化往往带来热

量或噪声,而热量和噪声可能降低产品的性能,由此产生对其进行处理的辅助子功能的需求。相应的 Affordance 功能链如图 5 所示。

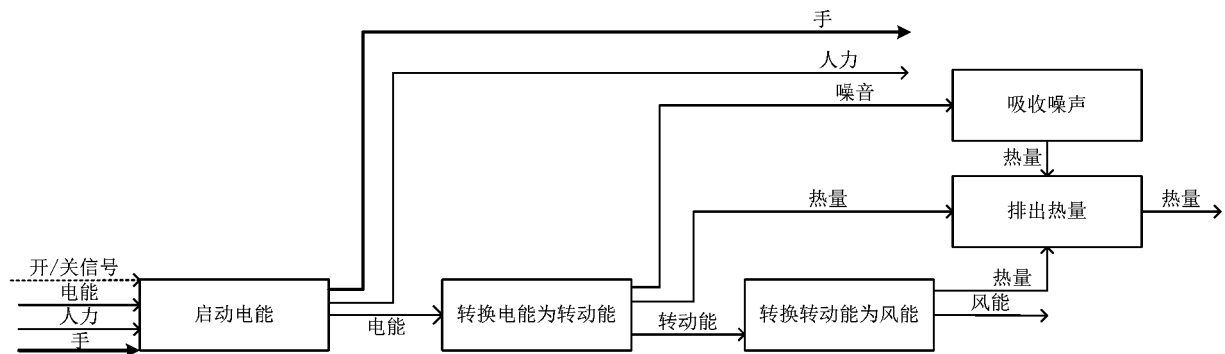


图5 第二条倒逼功能链对应的顺向Affordance功能链

(6)电能的引入带来了对电能存储输送控制的需求,得到如图 6 所示的倒逼功能链。

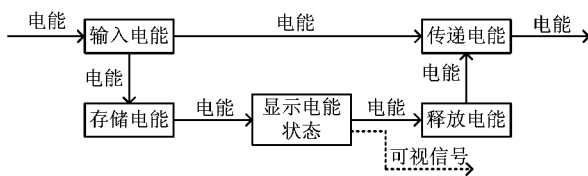


图7 第三条倒逼功能链对应的顺向Affordance功能链

图6 电能存储输送控制的需求对应的第三条倒逼功能链

(7)存储电能伴生了对电量状态展示的需求,对应的 Affordance 功能链如图 7 所示。

从整个实例演示过程中可以看到,通过意图域功能维度的倒逼功能链和现实域 Affordance 维度的 Affordance 功能链的交替绘制,使得整个绘制过程思考逻辑简明清晰,绘制结果完备有序。Affordance 功能结构展示出产品的全面结构,而倒逼功能结构展示出产品与最终客户需求满足直接相关的主体骨干结构。与传统的功能结构图方法相比,整个绘制过程逻辑更加清晰、入手门槛降低,从而提高

(8)将所有倒逼功能链连接起来,得到产品整体倒逼功能结构图,如图 8 所示。

(9)将所有 Affordance 功能链连接起来,得到产品整体 Affordance 功能结构图,如图 9 所示。

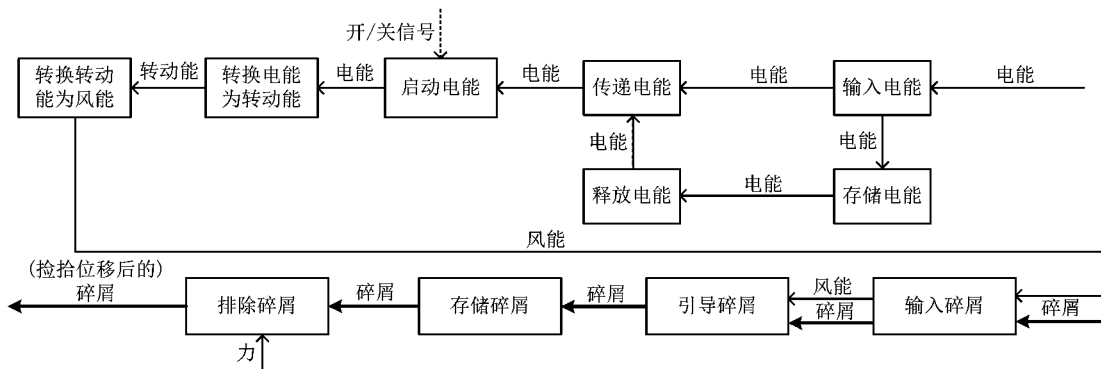


图8 手提式吸尘器产品整体倒逼功能结构图

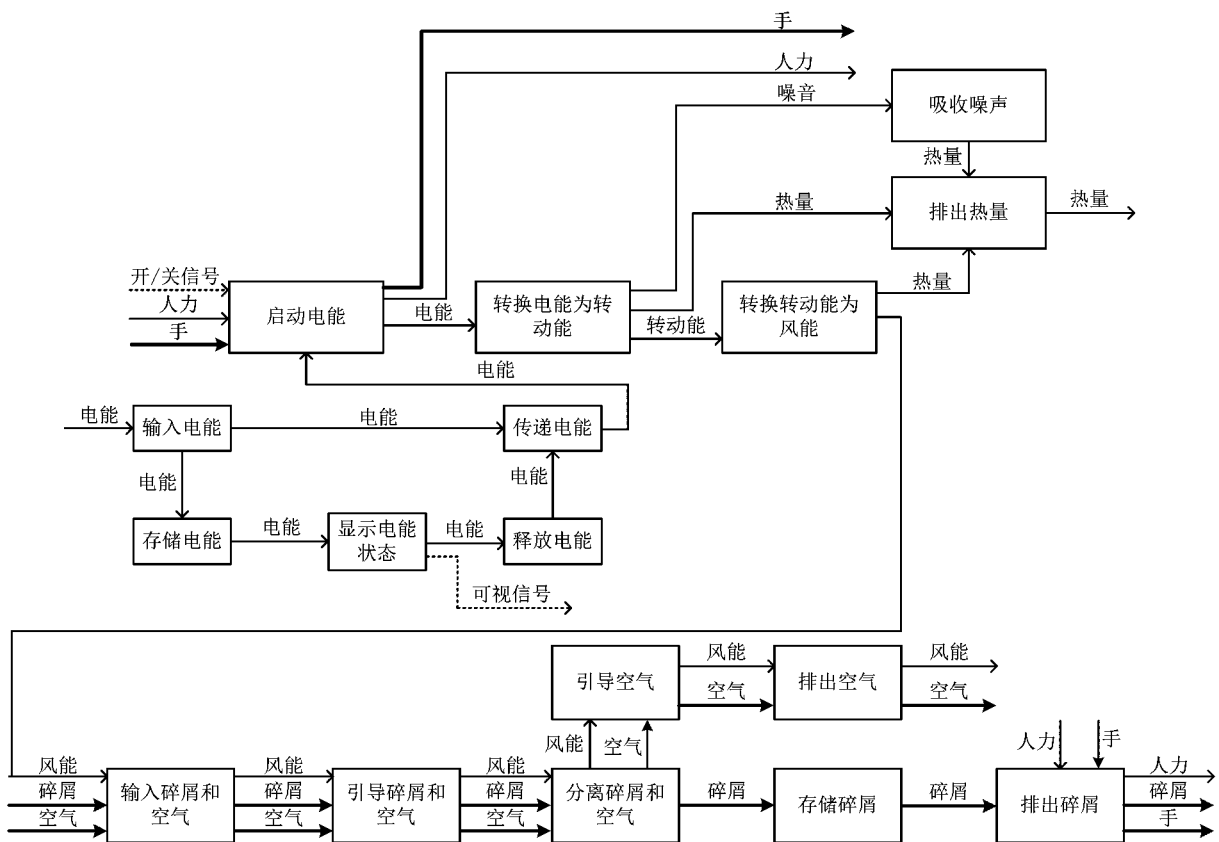


图9 手提式吸尘器产品整体Affordance功能结构图

了工具的实际可操作性，为企业实践普及打下了基础。

3.3 改良功能结构图与原始功能结构图对比

为凸显改良功能结构图的效果，引入豆浆机作为一个新的实例对象。将按传统方法绘制得到的原始功能结构图的最终结果(如图 10)与按照上述步骤绘制得到的改良功能结构图的最终结果(如图 11)进行对比，其中原始功能结构图基于梁艳红等^[25]绘制的豆浆机功能结构图。

通过对两图进行对比可以看出，豆浆机的改良功能结构图与原始功能结构图的区别主要表现在以

下几方面：

(1)原始功能结构图中作为输入物质流的刀具在改良功能结构图中并未出现。这是因为原始功能结构图同时考虑了意图域和现实域，使得已存在的解决方案不可避免地影响功能结构图的求解空间。例如本例中通过旋转刀具切割豆子只是粉碎豆子的一种解决方案，将其固化到功能结构图中将大大限制设计人员对粉碎豆子其他方式的求解。在改良功能结构图中，绘制倒逼功能链只能通过每一步需要怎样的流和流的转化来满足，不从现实域产品结构的角度来考虑，因此在功能求解时不易受现有解决

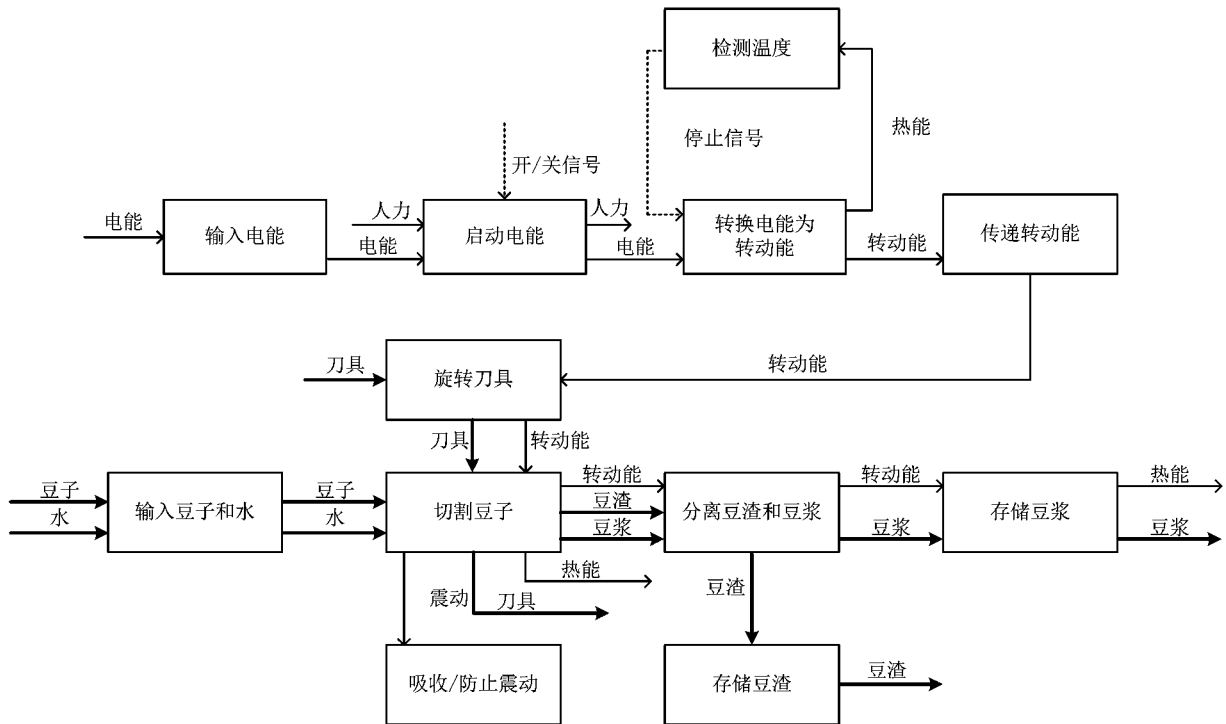


图10 传统方法绘制的豆浆机功能结构图

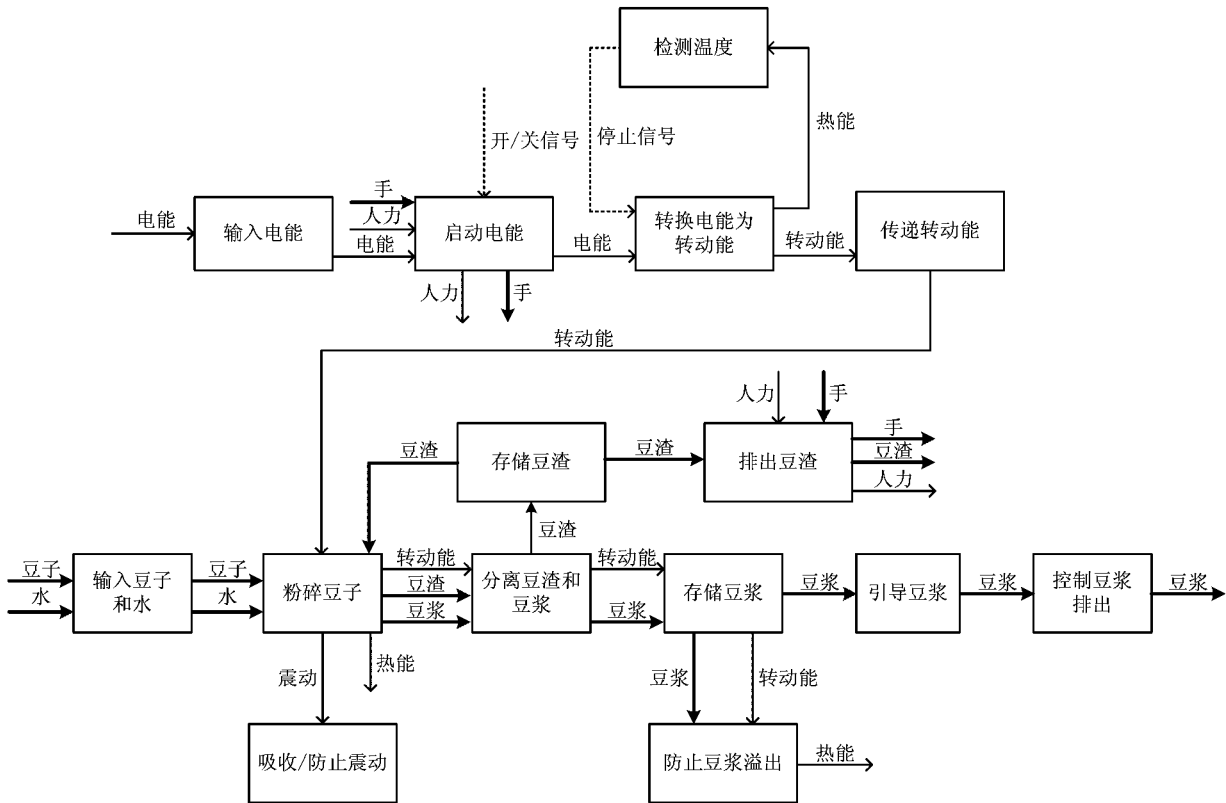


图11 改良方法绘制的豆浆机功能结构图

方案的影响。例如在本例中运用转动能粉碎豆子时不仅可以切割,也可以磨、碾等,甚至运用其他能量(如超声波粉碎豆子等)都可能成为设计人员考虑的

解决方案。因此,在改良功能结构图时,设计人员的求解空间被限制得较少,更容易产生出创新方案。

(2)原始功能结构图同时考虑了意图域和现实

域,这种不明晰的思维有时会忽略某些输入或输出流。例如原始功能结构图中,启动电能的输入中,只有“人力”被绘制出,“手”却被忽略。而在改良功能结构图中,在意图域逆向考虑中发现需要使用“人力”,在现实域顺向考虑中将伴随“人力”的“手”添加到图中。因此,在改良功能结构图中,设计人员可以看见在启动电能时有“手”的输入,从而会考虑防止“手”触电的措施。而在原始功能结构图中,“手”并不存在,这可能导致设计人员忽略这一关乎使用者生命安全的重要的警示。

(3)原始功能结构图中仅考虑需要发生什么行为,而在改良功能结构图的现实域 Affordance 维度还涉及可能发生什么行为。例如,在改良功能结构图中,“存储豆渣”中的较大颗粒豆渣仍可能参与到“粉碎豆子”中,对此过程进行专门设计,在图中引入从“存储豆渣”到“粉碎豆子”的新的流,从而提高豆子的利用率。而对于可能行为,不仅限于以上所述对有利可能行为的利用,还包括对有害可能行为的阻止。例如在改良功能结构图中,“存储豆浆”功能有转动能的输入,实质上存储的是旋转的豆浆,它可能发生溢出的行为,因此在图中添加了“防止豆浆溢出”的辅助功能。

(4)原始功能结构图涉及范围仅限于产品边界内,而在改良功能结构图中则会考虑产品怎样与使用者交互、针对怎样的使用者、处于什么使用场景等。如在图 10~图 11 所示的豆浆机实例中,原始功能结构图以产生豆浆为目的,止步于“存储豆浆”。而改良功能结构图中还考虑了产生豆浆后怎么喝,表现在图中为“引导豆浆”、“控制豆浆排出”的添加;也考虑了喝完如何清洁,表现在图中为“排出豆渣”的添加。

另外,在绘制过程中改良功能结构图比原始功能结构图也有优势。以功能和 Affordance 为共同基础的改良功能结构图,其整个绘制过程的思考逻辑更简明清晰。

综上所述,改良功能结构图与原始功能结构图对比的优点如下:

(1)改良功能结构图不易受现存解决方案的影响,使得求解空间受到了较少限制,更容易产生创新方案。

(2)改良功能结构图使输入和输出流更完备地被考虑,减少疏忽可能。

(3)改良功能结构图考虑“可能行为”的影响,而在设计过程中考虑利用有利可能行为,阻止有害可能行为。

(4)改良功能结构图的考虑范围不仅局限于产品边界内,还考虑使用的人的因素。如考虑产品如何与使用者交互、针对怎样的使用者、处于什么使用场景等。

(5)改良功能结构图绘制过程的思考逻辑简明清晰,入手门槛低。

5 结束语

Pahl 和 Beitz 传统的系统性工程设计过程方法中,以功能为理论基础,忽略了设计活动中另一重要基础概念 Affordance。其功能结构图方法实质上同时考虑功能和 Affordance 两个维度,造成复杂度耦合,使得功能结构图方法难以描述,影响了产品设计空间探索和创新设计。

设计过程不只是将意图的功能具体化的实现过程,为此本文提出以功能和 Affordance 共同作为设计理论基础的观点。以此为基础,对功能结构图方法进行复杂度解耦,分解为从功能维度逆向思考“需要什么行为”和 Affordance 维度“在其环境中可能发生什么行为”来正向考虑的改良工具,使改良后的功能结构图方法循序渐进,更易入手,更符合思维习惯,比原方法在更大程度上扩展了求解空间,并覆盖了原来没有考虑到的对非意图行为的处理和利用。这些优点使得该改良功能结构图方法在企业实践中有更高的使用价值。产品的改良功能结构图方法有助于得到符合产品设计意图的解决方案,然而该方案是否符合使用者的需求与使用者及使用者环境中已有物品的能力和属性有关,进一步将对包括使用者、使用者环境中已有物品和所设计的产品组成的整个系统的功能结构图进行研究。

参考文献:

- [1] PAHL G, BEITZ W. Engineering design: a systematic approach[M]. 2nd ed. London, UK: Springer-Verlag, 1996.
- [2] ULRICH K T, EPPINGER S D. Product design and development[M]. New York, N. Y., USA: Tata McGraw-Hill Education, 2003.
- [3] OTTO K N, WOOD K L. Product design: techniques in reverse engineering and new product development[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [4] HUBKA V, EDER W E. Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1988.
- [5] TOMIYAMA T, VAN BEEK T J, ALVAREZ CABRERA A A, et al. Making function modeling practically usable[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2013, 27(3): 301-309.
- [6] VAN ECK D. Validating function-based design methods: an

- explanationist perspective [J]. *Philosophy & Technology*, 2014(7):1-21.
- [7] SEN C, SUMMERS J D. A pilot protocol study on how designers construct function structures in novel design[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Design Computing and Cognition, College Station, Texas, USA; Krasnow Institute for Advanced Study, 2012; 247-264.
- [8] ZHANG Zhinan, LIU Zelin, CHEN Yong, et al. Knowledge flow in engineering design: an ontological framework[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(4): 222-232.
- [9] EDER W E. Conceptualize - design enhancement of systematic design engineering method[C]// Proceedings of the Canadian Engineering Education Association. École Polytechnique, Montréal, Canada: CEEA, 2013; Paper 007.
- [10] ZOU J, DU Q. A functional reasoning cube model for conceptual design of mechatronic systems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 59(5): 323-332.
- [11] YANG Bo, GAO Changqing, YIN Xiaoling, et al. Extended product function modeling for conceptual design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(15): 153-162 (in Chinese). [杨波, 高常青, 尹晓玲, 等. 面向概念设计的扩展功能建模方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(15): 153-162.]
- [12] KANG Yuyun, TANG Dunbing. Matrix-based conceptual solution generation approach of multi-function product [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 2915-2925 (in Chinese). [康与云, 唐敦兵. 基于矩阵的多功能产品概念方案求解方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(12): 2915-2925.]
- [13] MAIER J R, FADEL G M. Affordance based design: a relational theory for design[J]. *Research in Engineering Design*, 2009, 20(1): 13-27.
- [14] WU C L, CIAVOLA B, GERSHENSON J. A comparison of function-and affordance-based design [C]// Proceedings of ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. New York, N. Y., USA: ASME, 2013; DETC2013-12349.
- [15] PAHL G, BEITZ W. *Konstruktionslehre*[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1977.
- [16] NIX A A, SHERRETT B, STONE R B. A function based approach to TRIZ[C]// Proceedings of ASME 2011 International Conference on Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering. New York, N. Y., USA: ASME, 2011; 285-295.
- [17] VERMAAS P E, GARBACZ P. Functional decompositions and mereology in engineering[M]// *Handbook Philosophy of Technology and Engineering Sciences*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2009; 235-271.
- [18] ERDEN M S, KOMOTO H, VAN BEEK T J, et al. A review of function modeling; approaches and applications[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2008, 22(2): 147-169.
- [19] VERMAAS P E, VAN ECK D, KROES P. The conceptual elusiveness of engineering functions: a philosophical analysis [J]. *Philosophy & Technology*, 2013, 26(2): 159-185.
- [20] CHANDRASEKARAN B, JOSEPHSON J R. Function in device representation [J]. *Engineering with Computers*, 2000, 16(3/4): 162-177.
- [21] GIBSON J J. *The ecological approach to visual perception* [M]. Boston, Mass., USA: Houghton Mifflin, 1979.
- [22] CHERMERO A. An outline of a theory of affordances[J]. *Ecological Psychology*, 2003, 15(2): 181-195.
- [23] NORMAN D A. *The design of everyday things*[M]. New York, N. Y., USA: Basic Books, 1988.
- [24] NORMAN D A. Affordance, conventions, and design[J]. *Interactions*, 1999, 6(3): 38-43.
- [25] LIANG Yanhong, TAN Runhua. Functional analysis in conceptual design of products[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2007, 36(4): 33-38 (in Chinese). [梁艳红, 檀润华. 产品概念设计中的功能分析[J]. *河北工业大学学报*, 2007, 36(4): 33-38.]

作者简介:

- 武春龙(1986—),男,山西大同人,博士研究生,研究方向:设计方法学、模块化设计等, E-mail: wclzju@zju.edu.cn;
- 十纪杨建(1973—),男,江苏如皋人,教授,研究方向:产品数据化设计、模块化设计等,通信作者, E-mail: mejyj@zju.edu.cn;
- 祁国宁(1949—2014),男,浙江杭州人,教授,博士生导师,研究方向:制造业信息化、设计理论等;
- 顾新建(1956—),男,浙江杭州人,教授,博士生导师,研究方向:绿色设计、知识管理等;
- 李浩(1981—),男,河南唐河人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:制造服务、产品设计方法学、网络化协同制造等。