

功能-行为-结构(FBS)模型方法研究综述

白仲航^{1,2}, 张资恒^{1,2}, 李晨辉^{1,2}, 张新新¹, 丁潇颖¹

(1. 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300131;

2. 河北工业大学国家技术创新方法与实施工具工程技术中心, 天津 300400)

摘 要: 功能-行为-结构(FBS)模型通过引入行为变量(Behavior), 丰富了传统功能-结构(FS)模型, 目前已被广泛应用于设计领域。对 FBS 模型的发展和应用进行综述。首先, 从 FBS 模型的定义、相关变量概念的提出和发展、及优化和完善等方面对 FBS 模型进行介绍; 其次, 通过对国内外相关文献的分析, 对 FBS 模型的研究及应用进行分类, 总结现有主要研究集中于: FBS 模型自身的发展、基于 FBS 模型的方法集成和映射机制的应用等方面; 最后, 提出 FBS 模型目前仍存在的问题, 并给出研究建议, 为 FBS 模型的研究和应用提供参考。

关 键 词: 创新设计; 创新方法; FBS 模型; 集成; 映射

中图分类号: TH 122

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2022050765

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2022)05-0765-11

Review on research of FBS model method

BAI Zhong-hang^{1,2}, ZHANG Zi-heng^{1,2}, LI Chen-hui^{1,2}, ZHANG Xin-xin¹, DING Xiao-ying¹

(1. School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China;

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Method and Tool, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: The function-behavior-structure (FBS) model has enriched the traditional function-structure (FS) model by introducing behavioral variables (Behavior), and has been widely utilized in the design field. The development and application of the FBS model were reviewed. Firstly, the FBS model was introduced from the definition of FBS model, the proposal and development of the concept of relevant variables, and the optimization and improvement of the FBS model, etc. Secondly, through the analysis of relevant domestic and foreign literature, the research and application of the FBS model were classified. The existing research was mainly concentrated on the development of the FBS model itself, the integration of methods based on the FBS model, and the application of the FBS model mapping mechanism, etc. Finally, for the future research and application of the FBS model, the existing problems of the FBS model were presented and some research suggestions were provided.

Keywords: innovative design; innovative method; FBS model; integration; mapping

通过对设计过程的分析, 国内外学者提出了不同的产品设计模型和方法, 其中 GERO^[1]提出的

FBS (function-behavior-structure)模型作为一种设计过程模型, 目前已经被广泛应用于设计领域。

收稿日期: 2022-03-21; 定稿日期: 2022-06-23

Received: 21 March, 2022; Finalized: 23 June, 2022

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575158); 河北省自然科学基金项目(E2021202079)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51575158); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2021202079)

第一作者: 白仲航(1978-), 男, 教授, 博士。主要研究方向为创新设计、功能设计和工业设计等。E-mail: baizhonghang@hebut.edu.cn

First author: BAI Zhong-hang (1978-), professor, Ph.D. His main research interests cover innovative design, function design and industrial design, etc.
E-mail: baizhonghang@hebut.edu.cn

通信作者: 张新新(1991-), 女, 讲师, 博士。主要研究方向为感性工学、工业设计理论及方法等。E-mail: zhangxinxin@hebut.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Xin-xin (1991-), lecturer, Ph.D. Her main research interests cover Kansei engineering, industrial design theory and methods, etc. E-mail: zhangxinxin@hebut.edu.cn

FBS 模型自提出后，一直被作为一个用于阐述概念设计早期过程和任务的模型，并处于不断发展和完善的过程之中。FBS 模型通过分析设计过程中 3 个主要变量，即功能、行为和结构，利用逐级映射将概念设计问题由抽象转换为具体，从模糊转换到精确，建立了设计概念与产品结构之间的映射机制。FBS 模型将各层次的设计过程按照不同地推理机制进行，创新设计过程更具逻辑性和指向性，优化了产品设计的流程。

目前，国内外学者对于 FBS 模型已展开了广泛地研究，本文将从 FBS 模型的定义、相关变量概念的提出和发展、FBS 模型的优化和完善等方面对其进行介绍，并对国内外 FBS 模型的应用进行综述，并给出需要思考的问题和进一步研究的方向。

1 FBS 模型定义及其发展

1.1 FBS 模型的初始定义

FBS 模型是由 GERO^[1]在 1990 年首次提出的产品创新设计方法论。可看作是设计人员将设定的功能转换为能够执行这些功能的人工制品的设计描述过程。设计人员并未直接进行这种转换，而是采用许多中间步骤，并且人工制品的行为和结构也起到关键作用。

在 FBS 模型映射过程中，功能被转换为可以执行该功能的预期行为。将预期行为用于结构的选择和组合，此过程称为合成。在合成时，结构会产生自己的实际行为，从而改变预期行为的范围，且通过这些行为可重新设计功能。过程如图 1 所示。

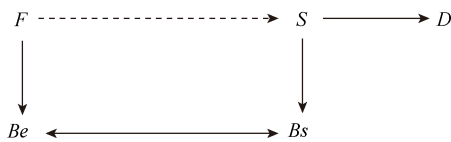


图 1 FBS 模型过程图
Fig. 1 FBS model flow chart

文献[1]将 FBS 流程划分了 8 个步骤。第一，将功能 F 转换为可以执行该功能的预期行为 Be ；第二，将预期行为 Be 转化为执行该行为的结构 S ；第三，根据结构 S 推导出实际行为 Bs ；第四，将预期行为 Be 和实际行为 Bs 进行比较，判断设计的结构方案是否可行；第五，若可行，则生成设计描述 D ；反之，则返回之前步骤重新选择。通过

这些步骤，设计人员将人工制品的既定功能 F 转换为设计描述 D ，见表 1。

表 1 FBS 模型中的步骤
Table 1 Steps in FBS model

步骤	功能	定义
步骤 1	$F-Be$	将设定的功能转换为可以执行这些功能的行为
步骤 2	$Be-S$	将预期行为转换为执行这些行为的结构
步骤 3	$S-Bs$	推导出结构的实际行为
步骤 4	$Bs-Be$	实际行为与预期行为的比较
步骤 5	$S-D$	生成设计描述
步骤 6	$S-S'$	选择新结构
步骤 7	$S-B'$	选择新的预期行为
步骤 8	$S-F'$	选择新功能

文献[1]将设计人员用于实现以上 8 个步骤的知识描述称为经验知识，即设计人员在早期设计收集的知识。这些设计知识被整合为初始 FBS 模型。

FBS 模型的优点在于可清楚地描述和定义设计过程所包含的 8 个步骤。但文献[1]对于该模型的关键概念：功能、行为和结构，并未提出明确的定义。需要通过文献[1]给出的例子来理解功能、行为和结构的含义。由于这些定义在进行详细分析时缺乏精确性，因此需要在一定范围内进行解释。

GERO 等^[2]在 1992 年提出了功能、结构和行为之间的显式推理，指出行为在设计中提供了功能和结构之间的重要联系，并为两者之间的推理起到桥梁的作用。同时，提出了功能、行为和结构的初始定义，见表 2。

表 2 FBS 模型的初始定义(1992)
Table 2 The definition of original FBS model (1992)

参数	定义
功能	设计意图或目的
行为	人工制品的结构如何实现其功能
结构	构成人工制品及其关系的组件

1.2 FBS 模型定义的完善

1998 年，ROSENMAN 和 GERO^[3]提出了一组较为全面的功能、行为和结构的定义。这些定义与初始定义不完全相同，能在人工制品的功能及其目的之间进行区分，导致了模型必须包括将目的转换为功能的步骤。还可将人工制品的目的定义为“为什么人工制品做它所做的(why the artefact does what it does)”的答案，即人工制品的目的是用其来实现用户需求。将功能的定义修改为“人工制品行为的结果”。将行为定义为“人工制品在自然环境中表现出的行为或过程”，该定义同时适用于人工制品的预期行为 Be 和实际行为

Bs。结构的定义在初始定义的基础上通过添加“材料排列(material arrangement)”来强调定义的结构性质。

文献[3]对模型主要概念的定义见表3,尤其是对功能的解释,有助于更清楚地理解设计过程和子过程,如问题的提出、综合、分析和评估等内容。

表3 文献[3]对FBS的定义(1998)

Table 3 The FBS definitions by literature [3] (1998)

参数	定义
功能	人工制品行为的结果
行为	人工制品在特定自然环境下的行为或过程
结构	人工制品的元素、元素的材料排列及其连接性

文献[3]认为设计是一个过程,设计人员在这个过程中将源自用户的目的转换为能够实现这些目的的人工制品的设计描述。为了适应这些目的,文献[3]调整了组成FBS模型的8个步骤的描述如图2所示。将制定步骤扩展到 P - Fe - Be ,将需求目的 P 转化为功能 Fe ,然后再转换为产生这些功能 Fe 的行为 Be ;将分析步骤相应地扩展到 S - Bs - Fs ,在此步骤中确定了结构 S 对应的实际行为 Bs 和实际功能 Fs ;添加了实现步骤 Fs - Ps ,确定了由实际功能 Fs 实现的实际目的 Ps ;将评估步骤扩展到步骤 Ps , Fs , Bs - P , Fe 和 Be ,其中将实际目的、功能和行为与所需目的以及预期功能和行为进行比较。

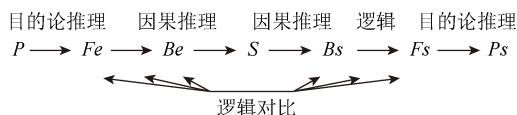


图2 文献[3]提出的FBS模型

Fig. 2 The FBS model by literature [3]

1.3 FBS模型目前的定义

2004年,GERO和KANNENGIESSER^[4]通过引入“情境性”和“构造性记忆”概念的方式扩展了FBS模型。在新的模型中,功能、行为和结构体现在3个“世界”中:客观世界、解释世界和预期世界。最初连接功能、行为和结构的8个步骤通过重构产生了一组包含20个步骤的新过程,这些过程一起构成了情景FBS(SFBS)模型如图3所示。

表4是文献[4]目前正在使用的定义。该定义脱离了1998年文献[3]的定义(表3),部分内容回到了初始的定义(表2)。

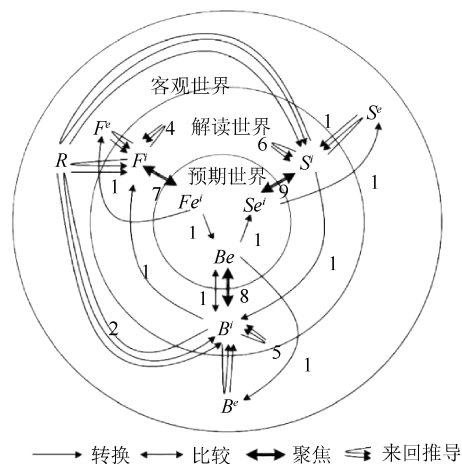


图3 情景FBS模型

Fig. 3 The Situated FBS framework

表4 文献[4]对FBS的定义(2004)

Table 4 The FBS definitions by literature [4] (2004)

参数	定义
功能	设计之所以被设计的目的 (The purposes of the design being designed)
行为	从结构或预期结构派生出的属性
结构	人工制品的组件元素及其关系

1.4 对FBS模型的批评

2005年,DORST和VERMAAS^[5]对FBS模型的发展进行了回顾。在过去十几年中,功能、行为和结构的定义发生了变化,这些变化至少定义了3种不同版本的FBS模型。

文献[5]认为,有一个或多个概念作为意图思维和结构思维之间“中介”的想法是值得研究和进一步发展的。然而,文献[4]过度简化了对设计过程的描述,认为只有一个中介存在。至少在现实世界的设计中,所有类型的转换都是可能的,并非严格遵循从功能到行为再到结构这样简洁的设计步骤。

2007年,VERMAAS和DORST^[6]批判性地分析了文献[4]中提出的情景FBS(SFBS)模型。SFBS模型在设计方法论中存在的2个问题:①缺乏稳定的概念框架,不确定是否要区分目的和功能的概念;②模型具有双重地位:既是描述性模型又是规范性模型,因为功能的概念并非局限于技术领域。

文献[6]将结构定义为构成人工制品的材料、尺寸和几何形状以及拓扑关系,将行为定义为人工制品物理状态的集合,将功能定义为人工制品的物理配置。结构的定义与表1中结构的定义相似,行为的定义与表2中行为的定义相似,不同

点是將行为转变为纯粹的结构概念见表 5。

表 5 VERMAAS 提出的 FBS 定义(2007)
Table 5 The FBS definitions proposed by VERMAAS (2007)

参数	定义
功能	有利于实现人工制品设计目的的物理配置
行为	人工制品的物理配置
结构	人工制品的材料、尺寸、几何形状以及拓扑关系

1.5 FBS 模型的优化

2013 年, CASCINI 等^[7]通过对 SFBS 模型的分析提出了模型存在的问题: 需求识别和要求定义未被完全表示, 并通过扩展 SFBS 模型详细地表示需求识别和要求定义的推理, 以及需求和要求与人工制品功能、行为和结构的关系。

文献[7]认为, 文献[4]明确地提到了设计问题的要求(Requirement), 但并未考虑用户需求(Need)和设计要求(R)之间的区别。尽管设计过程描述的很详细, 但设计要求(R)的定义过于简单, 设计过程主要是完成从设计要求(R)到产品功能的转化, 未考虑到设计人员在满足需求或要求时发生的认知过程。

文献[7]在情境 FBS 模型的基础上, 通过引入需求 N 和 R 2 类新变量, 对需求识别和要求定义阶段进行了明确定义和建模, 如图 4 所示。这 2 个阶段的引入, 使得在原始 FBS 框架(original FBS framework)中提出的制定阶段须按新的过程进行审查, 新的过程取代了从外部世界的 R 变量直接到解释世界的 F^i , S^i 和 B^i 变量的过程。

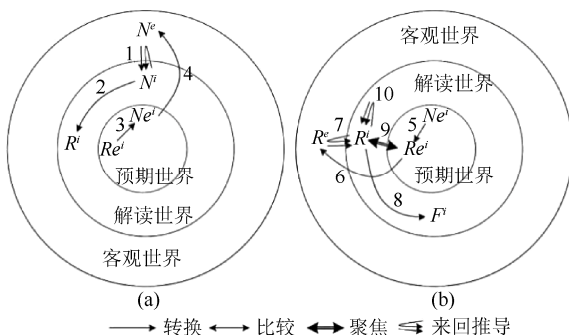


图 4 CASCINI 提出的 FBS 优化模型((a)需求识别;
(b)需求定义)

Fig. 4 The FBS optimization model proposed by CASCINI
(a) Need identification; (b) Requirement definition)

优化后的模型通过将需求和要求变量引入 SFBS 模型, 对新产品开发早期阶段的任务和相关认知过程进行了表示。

2 FBS 模型的研究与应用

通过对国内外相关文献的分析, 总结出 FBS 模型的研究主要集中在: FBS 模型自身的发展、基于 FBS 模型的方法集成和其映射机制的应用等方面, 如图 5 所示。

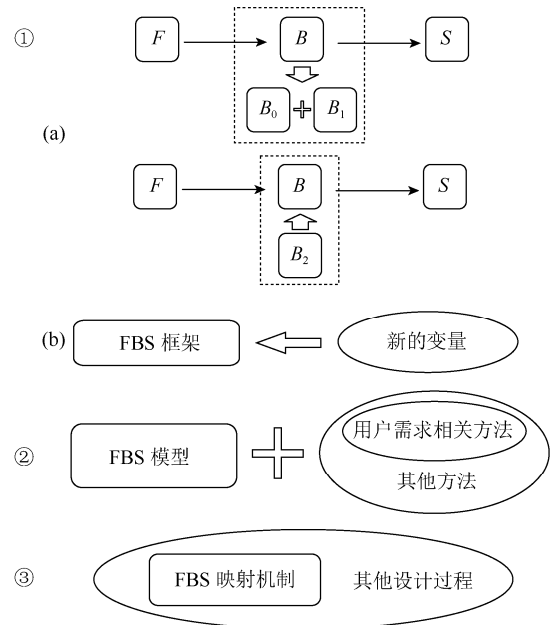


图 5 FBS 模型应用的分类(①FBS 模型自身的发展, 其中 (a)行为层的变换, (b)框架的扩展; ②基于 FBS 模型的方法集成; ③FBS 模型映射机制的应用)

Fig. 5 Classification of FBS model applications

(① Development of the FBS model itself, (a) Behavior layer transformation, (b) Extensions to the framework; ② Method integration based on the FBS model; ③ Application of the FBS model mapping mechanism)

2.1 FBS 模型自身的发展

2.1.1 FBS 模型行为层的变换

“行为 B ”是功能-行为-结构模型与传统功能-结构模型的主要区别。文献[2]认为行为是联系功能与结构的桥梁, 对行为的研究一直是 FBS 研究的重点。现有对行为层的研究主要是通过行为层的变换实现对 FBS 模型的创新, 其中变换可以分为重新划分和增添置换。

一些研究针对特定的领域将行为层进行重新划分为不同子行为, 如 DANTAN 等^[8]提出了一种集成人的因素的 FBS 框架, 将行为层重新划分为制造设备行为和人的操作行为, 并对两种行为进行建模和模拟, 以了解疲劳和其他因素对系统的影响; SADEGHI 等^[9]构建了一个 FBS 和产品服务系统(product service systems)范式之间转换的模型, 将行为划分为服务行为和产品行为, 以识别

和分析工作情况,提高安全性;欧静等^[10]通过运用逻辑性与时序性分析,提出了情境化 FBS 模型,将行为域划分为审美、策略、意象三类,并建立了设计行为模型。

也有一些研究对行为层进行增添、置换以解决设计过程中的问题,如冯立杰等^[11]在 FBS 框架基础上,通过将行为层重构为机理层,并与多维技术创新地图集成为技术创新机会识别方法;卢曼泽等^[12]针对机械装备交互行为复杂、易出错的问题,在实际行为 B_s 的基础上,运用基元模型的事元对行为层进行变换,形成新的期望行为 Be ,映射得出设计方案;王年文和刘蕴华^[13]以熵权法为基础,将可拓学与 FBS 相结合,利用可拓学的增添置换对行为层进行创新,并建立了一种集成设计方法;杨鹏等^[14]在进行小型机械产品再设计时,基于功能行为链,对行为集变型和增加新元素,实现行为层创新,并构建了基于 FBS 模型的可变功能再设计框架。

通过对 FBS 模型行为层进行重新划分和变换可以对行为进行重新表示,针对性地解决特定领域的问题。但是行为的表示包括基于动作和基于过程两种方式,目前的研究并未对动作和过程进行区分,后续可对行为表示进行更深层次地研究。目前对行为的研究主要集中于产品行为,而对用户行为的研究相对较少。

2.1.2 FBS 模型框架的扩展

为解决创新设计过程中遇到的新问题,向 FBS 模型中引入新的变量,形成特定的 FBS 模型。根据引入变量方式的不同,可以分为整体式图 6(a)和局部式图 6(b)所示。整体式为所引入的变量对 FBS 模型中每个映射环节都有影响,如 EE-FBS 模型引入的效应变量为各环节提供桥梁作用;局部式为引入的变量在某一个映射环节介入,如 CFBSS 模型通过在结构 S_T 后引入 S_E ,实现 FBS 融合语义学。

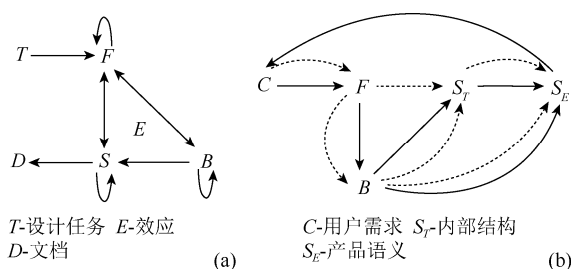


图6 FBS模型扩展的分类

Fig. 6 Classification of FBS model framework extensions
(a) EE-FBS model; (b) CFBSS model

(1) 整体式扩展。WANG 等^[15]采用逆向设计思维,通过引入“约束聚合”,提出了 FBS 的改进模型:CFBS(约束-功能-行为-结构),构建了基于人机界面技术的产品外观设计思维方法;MA 等^[16]通过建立一种约束-功能-行为-结构(CFBS)知识表示模型实现设计知识的重用,并建立了包括设计方案产生和评估的设计知识重用集成方法;QIN 等^[17]通过添加“需求”和“进化”要素,提出 RFBSE 知识表示模型,旨在获取设计过程中的设计知识和经验,以实现有效的重用;曹国忠等^[18]根据效应模型在确定原理解过程中的优势,将多极效应模型与 FBS 模型进行集成,提出了基于扩展效应驱动的 EE-FBS 模型;孙利等^[19]以设计知识流理论为出发点,通过将“需求”和“原理空间”纳入 FBS 模型建立了 PFWBS 模型,并以此为基础构建了产品知识动态建模方法;严波等^[20]为使工程设计和工业设计对 2 个领域知识进行统一描述,将 FES 模型和 FBS 模型的优势相结合,并在 FBS 框架中引入“用户知识 U ”,提出了一种 UEFBS 设计认知模型。

(2) 局部式扩展。LI 等^[21]为描述概念设计阶段的关键影响信息,提出了一种融合产品属性(Attribute)的新的功能表达模型,即 FBAS 模型;ZHANG 等^[22]针对概念设计模型中一些变量概念存在争论的问题,总结出一个 FBPS 模型,作为参考模型,对各种流派及设计模型的定义进行评价;DENG^[23]考察了环境影响在设计方案评估中的作用,通过引入“环境 E ”变量,开发了一种 FEBS 模型,其中知识通过集成对象和规则来表示,设计方案通过实现反向路径推理过程来生成;CHRISTOPHE 等^[24]基于模型驱动工程概念,将 FBS 模型与知识模型进行集成,利用本体论和系统建模语言(SysML)将“需求 R ”引入,建立了 RFBS 模型;YANNOU 等^[25]提出了一种 UDIP 过程模型,来解决激进创新设计(radical innovation design)方法映射到 FBS 框架中所遇到的问题,旨在通过现有的设计理论和方法框架来增强对 RID 方法论的理解;文献[26-27]通过向 FBS 模型框架引入“原理 P ”变量,建立了功能-原理-行为-结构(FPBS)模型;文献[26]将 FPBS 和模块化方法相结合,开发了基于 FPBS 模型的机械产品模块化设计流程;文献[27]基于模型的知识系统运算和本体库概念,提出了一种针对机械产品设计的 FPBS 本体系统;张执南和谢友柏^[28]通过引入“意图 P ”和“效应 E ”

2 个变量建立了 PFESB 模型, 将状态空间模型的行为预测与 FBS 相结合完成概念设计与状态空间之间的映射, 作为在概念设计过程预测产品所存在问题的工具; 孟祥斌和孙苏榕^[29]为在概念设计过程加入对人的关注, 在 FBS 原有框架基础上纳入“用户”及“产品语义”2 个新要素, 建立了一种 CFBSS 模型及相关的计算机辅助设计问题解决流程; 张丙辰等^[30]在 FBS 的基础上引入“用户需求”和“用户认知”, 结合“认知行为特征”建立了 RCFBS 模型, 在此基础上提出了融合语义学的儿童玩教具语义网络模型扩散过程。

通过“体式 and 局部式构建的 FBS 扩展模型有效地解决了创新过程中遇到的问题, 但是部分扩展模型并未考虑结构到实际行为的映射以及预期行为与实际行为的对比过程。此外, 如何通过扩展建立通用的 FBS 模型, 使其适用于所有创新设计过程是未来的研究方向之一。

2.2 基于 FBS 模型的方法集成

集成不同创新设计方法, 是设计方法学领域的发展趋势之一。创新方法的集成不仅可以满足创新过程中的现实需要, 而且可以构建出逻辑互联、相互协调的创新方法体系, 提高创新效率。FBS 模型通过集成其他的方法, 不仅弥补了 FBS 自身存在的不足, 而且构建了较为全面的方法体系, 其中与用户需求相关方法的集成是研究的重点。

2.2.1 与用户需求相关方法集成

满足用户需求是产品创新设计的核心和目的。将用户需求信息融入产品设计过程是产品满足用户需求的关键^[31]。针对 FBS 模型在用户需求的获取和转换方面存在不足, 现有研究通过将 FBS 模型和用户需求相关方法进行集成, 实现从需求向功能的转换。张青等^[32]通过集成 FBS 模型与用户需求分析, 建立了 Ra-FBS 模型, 将用户需求经过因子分析转换成满足用户核心需求的功能; 周祺等^[33]利用模糊 Kano 模型获取的关键设计要素引入情景 FBS 模型, 形成新的设计流程; 文献[34-35]通过在 FBS 模型中引入了“弹性界限”的概念, 利用自然交互中上下文分析的方法, 对用户需求进行分析, 求得需求最优解; 樊帆等^[36]利用本体论, 通过建立 FBS 知识组织模型, 将包括效应和专利在内的设计知识应用于 FBS 设计过程, 提出了包含分析模块的 AFBS 知识检索方法, 使设计人员可以依据需求获取设计知识; 覃京燕等^[37]通过集成 CMR 和 FBS 模型, 提出了一种能够同时解决

交互设计过程中功能和内容设计的 CMR+FBS 设计本体论的方法模型, 该模型为用户需求的提取和分析提供了新的研究角度; 文献[38-39]通过集成 QFD 和 FBS 模型, 增强了用户需求向设计转化过程中的客观性, 并形成 QFD 和 FBS 集成应用流程; 秦雄等^[40]利用 FAST, FBS, TRIZ 和 FMEA 4 种模型在创新设计不同阶段所具有的优势, 并通过集成实现了从用户需求的转换到产品结构的设计。

现有研究是利用用户需求相关方法得出需求分析结果, 再与 FBS 模型进行集成来解决 FBS 模型存在的不足, 但并未充分考虑需求分析结果或得出的设计要求与产品功能是否等同, 因此还有进一步研究的空间。

2.2.2 与其他方法集成

根据 FBS 模型应用领域不同, 通过集成 FBS 模型与其他模型或理论, 得到特定领域新的设计方法或流程, 其中集成主要分为结构集成和过程集成, 在此不再做区分。HAMRAZ 和 CLARKSON^[41]利用 FBS 的映射机制, 通过将变化预测方法(change prediction method)和 FBS 相集成, 提出了一个用于工业评价的 FBS 联动方法; ZHANG 等^[42]集成 FBS 和案例推理理论, 提出了一种用于生成模块化机器人构型的计算机辅助系统体系, 利用 FBS 的分层映射完成设计信息的检索, 结合案例推理实现系统的数据表示; LI 等^[43]借助信息描述模型的层次框架, 集成公理设计模型和 FBS 模型, 提出了一个有助于产品多阶段创新的概念设计模型, 并分别讨论了不同设计阶段的创新策略; 张兴法等^[44]通过将概念-知识(C-K)理论与 FBS 模型进行融合, 提出了一种可变功能再设计方法, 利用理论的知识空间对 FBS 映射过程进行指导, 获取新的设计方案; 龚京忠等^[45-46]将产品模块化技术与 FBS 模型进行集成, 利用模糊聚类算法和可拓学, 提出基于功构变换的产品模块可拓变型设计方法; 赵琳等^[47]针对机械系统存在的相似性问题, 将 FBS 与经典相似性理论进行集成, 提出了概念设计相似系统模型, 利用模型得出的相似度数值进行设计; 杜冠男等^[48]通过集成 TRIZ 和 FBS, 利用二者的优势, 建立了一种新的创新设计流程, 可以预测和完善进化方向并更快求得最优解; 胡艳等^[49]利用 QFD 理论、FBS 模型和定制试验设计(custom design of experiment)在概念设计阶段的不同优势, 通过三者集成来弥补六西格玛设计(design

for six sigma, DFSS)存在的问题,提出了基于前3种模型的DFSS设计方法;李从东等^[50]为了对变更传播路径进行描述,将多重网络理论和FBS模型集成,结合改进遗传算法(improved genetic algorithm),构建了多目标0-1整数规划模型;龚京忠等^[51]利用QFD方法求得功构单元特征参数,基于FBS模型建立功构模块,将特征参数与建立的功构模块相结合,实现产品族规划;张智博和李翔龙^[52]基于专利知识库,集成了功能分解、FBS映射求解和形态矩阵等,提出了基于Creap平台的问题求解模块的整体架构。

现有FBS与其他方法集成的研究主要是为解决创新过程中的问题或对新方法不足的相互补充,缺少对构建产品完整生命周期的创新设计模型框架的考虑。此外通过构建相互协调、逻辑互通的创新设计过程模型框架来实现计算机辅助创新设计也是未来发展趋势之一。

2.3 FBS模型映射机制的应用

分层逐级映射是FBS模型设计过程的主要内容,对FBS分层映射机制的研究已经较为广泛。其中一些研究是按照FBS分层逐级映射的设计思路对其他设计过程进行分层研究,KANNENGISSER和GERO^[53]提出了一种定量分析和比较设计模型的方法,通过将设计模型映射到场景化的FBS框架中来实现对设计过程的模拟;FILIPPI和BARATTIN^[54]将一种设计符号化交互设计集成方法(interaction design integrated method)的设计过程映射到FBS框架进行分析,通过扩展框架涵盖人机交互(human-machine interaction)领域;殷习等^[55]利用FBS框架的映射思路进行关联性分析,建立了变更设计流程图,并建立结构体关联矩阵,分析总结了变更传播规律;杨琨等^[56]基于FBS3个层次的映射关系,构建了复杂知识网络模型,结合复杂网络理论,提出了设计知识网络分析方法;张伟社等^[57]基于情景要素分析,利用FBS模型的映射思路进行情景描述,并构建了未来情景的未预见FBS模型;梁嘉宝等^[58]将FBS应用于感性工学,利用FBS对获取的用户需求映射到功能、行为和结构3个层次进行建模,将得到的单元基与感性词汇映射匹配,通过知识库进行需求的呈现;黄晨曦等^[59]利用VR技术建立支架三维模型,利用FBS3个层次的映射关系对支架植入过程进行调整,提出了血管支架植入模型框架。

也有一些研究是将FBS的映射机制作为一种工具或方法,对创新设计中的问题或产品设计过程进行研究。BAI等^[60]针对裁剪过程资源挖掘的不足,利用FBS对系统资源进行知识表征,并结合相似度计算构建了一种新的资源挖掘方法;BOKIL和RANADE^[61]将FBS模型应用于平面设计中的常用工具——网格,利用FBS对视觉布局过程的知识进行了表示;LEE等^[62]基于日常设备的数据,建立了设计案例的集成模型,并将FBS模型作为案例表示方法,提出了一种人工智能系统;TAMA和REIDSEMA^[63]提出了一种新的产品信息识别和建模方法,利用FBS将产品信息分为初级和次级,并基于产品信息进行识别,建立了一个通用产品信息模型;LI等^[64]将FBS作为桥梁,将设计特征和能耗联系在一起,建立了一种能耗建模方法;KOH^[65]利用FBS的映射机制分析了工程变更及其传播机制,以识别支持准确预测工程变更传播所需的建模信息;BOTT和MESMER^[66]建立了一个基于建模和仿真方法的设计团队模拟模型,利用FBS框架来评估大型软件程序的瀑布式和敏捷式设计过程的有效性;EICHHOFF和MAASS^[67]利用FBS映射机制进行了贝叶斯网络表示,并建立了应用程序解决设计决策的不确定性;POURMOHAMADI和GERO^[68]基于FBS提出了设计问题编码方案,并开发了LINKOgrapher软件工具,实现了对标准化分析工具包的开发;FILIPP和BARATTIN^[69]提出了一种基于形式的设计方法,利用FBS模型的映射机制对方法进行描述;GUI^[70]提出了一种机械系统和装配(mechanical systems and assemblies)表示方案,将FBS作为表示方法,对机械系统中的组件等元素进行表示;QIAN和GERO^[71]利用FBS框架提出一种设计知识表示,构建了基于类比的设计框架,并将其开发为使用类比的设计支持系统(design support system using analogy);GERO和KANNENGISSER^[72]提出了基于SFBS框架的协同设计模型,用于描述设计师和协同设计师在共同设计中发生的认知过程;刘一川等^[73]利用FBS对装备进行特征分析,提出了基于FBS的新型装备概念设计模型。

此外一些研究是利用FBS映射过程进行具体产品的设计研究,如BAQAI等^[74]将FBS模型应用于可重构机床的设计,提出了一种基于FBS模型的制造上层本体集成方法;文献[75-76]基于用户需求分析的结果,利用FBS分层映射来描述设

计任务和指导设计步骤,求得符合要求的设计方案;王超等^[77]将 FBS 模型应用于室内在线自动布局算法的设计,完成对房间的功能、行为、结构的建模,并根据得出的约束规则来确定房间各个环节的布局。

现有关于 FBS 模型映射机制的研究主要是将映射机制应用于其他设计方法或过程中,缺少对于映射机制本身的改进或优化研究,如何利用计算机工具或人工智能方法对映射过程进行优化是未来的发展趋势之一。

3 存在的问题及研究建议

3.1 存在的问题

(1) FBS 模型“行为 B ”的表达分为基于动作和过程两种方式,目前的研究并未对这 2 种方式进行区分和比较,对于将行为表示为“动作”还是“过程”存在争议。对包括用户的操作行为、认知行为在内的用户行为的研究较少。

(2) 在应用 FBS 模型的过程中,设计前端的用户需求具有不确定性。虽然 GERO 和 KANNEN-GIESSER^[4]在 2004 年将要求引入 SFBS 框架,但仍存在用户需求要素获取不足,在重要程度排序上较为模糊等问题,优化后的 FBS 模型并未解决需求向功能映射过程中的问题。

(3) 由于 FBS 模型应用领域的不同,相关定义的表述会发生变化。FBS 模型中的功能、行为、结构缺乏一个标准化、结构化的表达方式,不利于设计进程的推进以及经验知识的挖掘。

(4) 运用 FBS 模型进行映射、评判和筛选最优解等工作时,决策主要依靠设计人员自身的经验,设计人员的主观性很大程度影响了最终设计方案的质量。

(5) FBS 模型映射和求解过程中所利用的设计知识是设计人员在早期设计任务中收集的关于所改良产品的知识,但对于在设计前期定义了新功能的设计,在映射求解的过程中,可能会由于产品设计知识检索范围的限制,影响设计方案质量。

3.2 研究建议

根据上述问题,综合 FBS 模型在国内外研究及应用发展情况,提出如下建议:

(1) FBS 模型的分类研究。目前的研究是从 FBS 创新方式的角度进行分类的,便于分析创新方式的种类,得出进一步研究的方向,对各类别

未进行更详细地细分,因此所分类别和内容仍有进一步深化的空间。此外还可以从 FBS 模型所应用领域的角度进行分类研究,分析 FBS 在各个设计领域应用的现状,以及各领域设计方法现有问题和未来发展的趋势。

(2) 针对行为域的研究。以公理设计为基础,在功能域和结构域之间界定行为域,扩展 FBS 模型行为域相关理论,研究行为域链接功能域、结构域的方法,实现从包括人机交互、用户认知在内的行为角度对产品系统地创新。同时可以研究需求域与行为域之间的关系,面向行为分析研究用户需求,并从行为出发设计能满足不同用户需求的方法或算法。

(3) 基于 FBS 的知识推理。在创新设计过程中实现对设计知识的重用可以提高设计效率。利用 FBS 本体规则进行设计知识的选择和运用,完成设计知识重用是 FBS 未来研究方向之一。利用 FBS 的本体规则进行目标产品设计知识的表示和整合,并利用资源检索方法和计算机工具建立同类产品设计知识库。基于已有的设计知识库和 FBS 的本体规则,将知识推理的过程分为设计知识的获取、组织和表示,以及设计知识如何启发创新设计灵感。

(4) 计算机辅助 FBS 方法。计算机辅助创新设计是设计方法学的趋势之一。对于 FBS 的研究,如何将设计者思维与机器思维相集成,通过建立同类产品的设计知识库,利用计算机辅助 FBS 逐级映射过程是 FBS 未来的研究方向。

(5) 可计算性功构映射。在 FBS 逐级映射中以行为为核心,以功能和结构设计为主要内容,在 F-B 和 B-S 映射过程融合算法或可计算的设计方法,从可计算性角度建立创新设计的功能-行为-结构框架模型,并扩展功构映射求解方法,辅助或替代设计人员依靠自身经验进行决策的过程,减少搜索解过程的随意性,增加功构映射的可计算性,得到更优的结构设计方案。

(6) 人工智能驱动 FBS 方法。人工智能驱动的创新设计是设计方法学的未来趋势之一。人工智能相关方法可以在 FBS 模型全过程介入,进而构建智能化 FBS 设计流程。如,利用人工智能辅助设计者快速定位和分析设计需求和设计目标;基于产品知识库,融合智能化、自动化设计算法进行 FBS 逐级映射过程等。

参考文献 (References)

- [1] GERO J S. Design prototypes: a knowledge representation schema for design[J]. *AI Magazine*, 1990, 11(4): 26-36.
- [2] GERO J, THAM K, LEE H. Behavior a link between function and structure in design[EB/OL]. [2022-08-26]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=5514cd0fb3b21c6bbdc5cb22cffb1a75&site=xueshu_se&hitarticle=1.
- [3] ROSEMAN M A, GERO J S. Purpose and function in design: from the socio-cultural to the techno-physical[J]. *Design Studies*, 1998, 19(2): 161-186.
- [4] GERO J S, KANNENGIESSER U. The situated function-behaviour-structure framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [5] DORST K, VERMAAS P E. John Gero's function-behaviour-structure model of designing: a critical analysis[J]. *Research in Engineering Design*, 2005, 16(1-2): 17-26.
- [6] VERMAAS P E, DORST K. On the conceptual framework of John Gero's FBS-model and the prescriptive aims of design methodology[J]. *Design Studies*, 2007, 28(2): 133-157.
- [7] CASCINI G, FANTONI G, MONTAGNA F. Situating needs and requirements in the FBS framework[J]. *Design Studies*, 2013, 34(5): 636-662.
- [8] DANTAN J, MOUAYNI I E, SADEGHI L, et al. Human factors integration in manufacturing systems design using function-behavior-structure framework and behaviour simulations[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 125-128.
- [9] SADEGHI L, DANTAN J, MATHIEU L, et al. A design approach for safety based on product-service systems and Function-Behavior-Structure[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, 19: 44-56.
- [10] 欧静, 赵江洪, 谭浩, 等. 基于情境 FBS 模型的数控机床 CAID 系统研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(6): 33-35, 54.
OU J, ZHAO J H, TAN H, et al. Research on CNC machine tools CAID system based on scenario-FBS model[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(6): 33-35, 54 (in Chinese).
- [11] 冯立杰, 曹健, 王金凤, 等. 基于 FBS 和多维技术创新地图的技术创新机会识别方法及其应用[J]. *情报理论与实践*, 2020, 43(12): 89-95.
FENG L J, CAO J, WANG J F, et al. Method and application of technology innovation opportunity recognition based on FBS and multidimensional map of technology innovation[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2020, 43(12): 89-95 (in Chinese).
- [12] 卢曼泽, 王新亭, 张峻霞, 等. 基于 FBS 与基元模型的机械装备概念设计研究[J]. *机械设计*, 2018, 35(5): 111-115.
LU M Z, WANG X T, ZHANG J X, et al. Research on mechanical equipment concept design based on FBS model and primitive model[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(5): 111-115 (in Chinese).
- [13] 王年文, 刘蕴华. 基于 FBS 模型与可拓变换的手部康复产品设计方法[J]. *机械设计*, 2020, 37(10): 139-144.
WANG N W, LIU Y H. Design method of hand rehabilitation products based on FBS model and extension transformation[J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(10): 139-144 (in Chinese).
- [14] 杨鹏, 邓益民, 殷习. 基于 FBS 模型的小型机械产品可变动功能再设计[J]. *机械设计*, 2015, 32(7): 77-82.
YANG P, DENG Y M, YIN X. Adaptable-function redesign of small machinery products based on FBS model[J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(7): 77-82 (in Chinese).
- [15] WANG Z, HE W P, ZHANG D H, et al. The creative design research of product appearance based on human-machine interaction and interface[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2002, 41(S1): 152-153.
- [16] MA J, HU J, FENG J F, et al. Constrained FBS knowledge cell model, representation, and applications for conceptual design[J]. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, 230(11): 1773-1786.
- [17] QIN H, WANG H W, JOHNSON A L. A RFBSE model for capturing engineers' useful knowledge and experience during the design process[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 44: 30-43.
- [18] 曹国忠, 檀润华, 孙建广. 基于扩展效应模型的功能设计过程及实现[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 157-167.
CAO G Z, TAN R H, SUN J G. Process and realization of functional design based on extended-effect model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 157-167 (in Chinese).
- [19] 孙利, 张鹏, 吴俭涛, 等. 基于 FBS 拓展模型的可穿戴式康复机械手设计研究[J]. *图学学报*, 2021, 42(1): 150-157.
SUN L, ZHANG P, WU J T, et al. Design of wearable rehabilitation manipulator based on FBS extended model[J]. *Journal of Graphics*, 2021, 42(1): 150-157 (in Chinese).
- [20] 严波, 薛澄岐, 姚干勤. 基于本体的虚拟会展产品信息知识表达[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(1): 42-48.
YAN B, XUE C Q, YAO G Q. Knowledge expression of virtual exhibition product information based on ontology[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2016, 46(1): 42-48 (in Chinese).
- [21] LI P, REN Y Z, YAN Y, et al. Conceptual design method driven by product genes[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2020, 234(3): 463-478.
- [22] ZHANG W, LIN Y, SINHA N. On the function-behavior-structure model for design[EB/OL]. [2022-08-26]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=5b6d5c92155efeebc957b1b154c778a1&site=xueshu_se&hitarticle=1.
- [23] DENG Y M. Function and behavior representation in conceptual mechanical design[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2002, 16(5): 343-362.
- [24] CHRISTOPHE F, BERNARD A, COATANÉA É. RFBS: a model for knowledge representation of conceptual design[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 155-158.
- [25] YANNOU B, CLUZEL F, LAMÉ G. Adapting the FBS model of designing for usage-driven innovation processes[EB/OL]. [2022-08-26]. <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2018/51845/V007T06A011/275225>.
- [26] 李国喜, 吴建忠, 张萌, 等. 基于功能-原理-行为-结构的产品模块化设计方法[J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(5): 75-80.
LI G X, WU J Z, ZHANG M, et al. Approach to product modular design based on FPBS[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(5): 75-80 (in Chinese).
- [27] 刘康, 李彦, 赵武, 等. 基于本体的 FPBS 设计模型研究[J]. *工程设计学报*, 2012, 19(5): 329-334.
LIU K, LI Y, ZHAO W, et al. Research of ontology based FPBS design model[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2012, 19(5): 329-334 (in Chinese).
- [28] 张执南, 谢友柏. 采用状态空间模型的产品设计行为预测[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(1): 54-57, 104.
ZHANG Z N, XIE Y B. Product behavior prediction using

- state-space model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 54-57, 104 (in Chinese).
- [29] 孟祥斌, 孙苏榕. 融合语义学的产品概念设计过程模型研究[J]. 机械设计, 2017, 34(2): 110-114.
- MENG X B, SUN S R. Research of product conceptual design process model integrated semantics[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(2): 110-114 (in Chinese).
- [30] 张丙辰, 胥巧巧, 杨俞玲, 等. 基于 FBS 模型扩展的儿童玩具教具创新设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 121-127.
- ZHANG B C, XU Q Q, YANG Y L, et al. Design of children's teaching aids based on expansion of FBS model[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 121-127 (in Chinese).
- [31] 胡东方, 李奕辰, 李彦兵. 基于卡诺和人工免疫系统的顾客需求产品设计[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2536-2546.
- HU D F, LI Y C, LI Y B. Design for customer requirement product based on KANO and artificial immune system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2536-2546 (in Chinese).
- [32] 张青, 陈登凯, 余隋怀. 基于用户需求量化的 Ra-FBS 模型构建应用[J]. 机械设计, 2018, 35(10): 123-128.
- ZHANG Q, CHEN D K, YU S H. Construction and application of Ra-FBS model based on quantified user requirements[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(10): 123-128 (in Chinese).
- [33] 周祺, 李旭, 周济颜. 模糊 Kano 与情景 FBS 模型集成创新设计方法[J]. 图学学报, 2020, 41(5): 796-804.
- ZHOU Q, LI X, ZHOU J Y. Integrated innovative design method of fuzzy Kano and scenario FBS model[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(5): 796-804 (in Chinese).
- [34] 胡志刚, 王延超, 吴群, 等. 基于自然交互的 FBS 设计模型[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 127-130.
- HU Z G, WANG Y C, WU Q, et al. FBS design model based on natural interaction[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 127-130 (in Chinese).
- [35] 张青, 陈登凯, 余隋怀. 产品设计中基于 FBS 模型的用户需求分析方法[J]. 机械设计, 2018, 35(7): 119-123.
- ZHANG Q, CHEN D K, YU S H. User requirement analysis method based on FBS framework in product design[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(7): 119-123 (in Chinese).
- [36] 樊帆, 李彦, 李文强. 基于 FBS 的设计知识组织与应用策略研究[J]. 机械设计, 2012, 29(10): 9-14.
- FAN F, LI Y, LI W Q. Design knowledge organization and application strategy research based on FBS[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(10): 9-14 (in Chinese).
- [37] 覃京燕, 张文昊, 周茉莉, 等. 基于 CMR+FBS 方法模型的家庭智能体交互设计[J]. 包装工程, 2019, 40(16): 108-114.
- QIN J Y, ZHANG W H, ZHOU M L, et al. Interaction design of the family agent based on the CMR+FBS ontology[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(16): 108-114 (in Chinese).
- [38] 陈国强, 戴成, 申正义, 等. 基于 QFD 与 FBS 的可移动电力检测设备创新设计[J]. 包装工程, 2021, 42(2): 43-50.
- CHEN G Q, DAI C, SHEN Z Y, et al. Design of movable electric testing station based on QFD and FBS[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 43-50 (in Chinese).
- [39] 艳秋, 宋端树, 辜俊丽, 等. 基于 QFD 与 FBS 模型的坐便器多适性设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 283-287.
- XU Y Q, SONG D S, GU J L, et al. Multi-suitability design of toilet based on QFD and FBS model[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 283-287 (in Chinese).
- [40] 秦雄, 李文强, 李彦, 等. 基于 FAST/FBS/TRIZ/FMEA 的产品创新流程研究与应用[J]. 制造业自动化, 2015, 37(9): 148-152, 156.
- QIN X, LI W Q, LI Y, et al. The innovation process research and application with FAST/FBS/TRIZ and FMEA[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(9): 148-152, 156 (in Chinese).
- [41] HAMRAZ B, CLARKSON P J. Industrial evaluation of FBS Linkage - a method to support engineering change management[J]. Journal of Engineering Design, 2015, 26(1-3): 24-47.
- [42] ZHANG W J, LIU S N, LI Q. Data/knowledge representation of modular robot and its working environment[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2000, 16(2): 143-159.
- [43] LI W Q, LI Y, WANG J, et al. The process model to aid innovation of products conceptual design[J]. Expert Systems With Applications, 2010, 37(5): 3574-3587.
- [44] 张兴法, 邓益民, 卓凯峰. 融合功能-行为-结构理论与概念-知识理论的电动工具产品可变功能再设计方法[J]. 机械制造, 2018, 56(7): 1-6.
- ZHANG X F, DENG Y M, ZHUO K F. Redesign of power tool products with variable functions based on the interfusion of FBS theory and C-K theory[J]. Machinery, 2018, 56(7): 1-6 (in Chinese).
- [45] 龚京忠, 李国喜, 邱静. 基于功能-行为-结构的产品概念模块设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(12): 1921-1927.
- GONG J Z, LI G X, QIU J. FBS-based product conceptual module design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(12): 1921-1927 (in Chinese).
- [46] 龚京忠, 邱静, 李国喜, 等. 产品模块可拓变型设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(7): 1256-1267, 1312.
- GONG J Z, QIU J, LI G X, et al. Extension approach for product module variant design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(7): 1256-1267, 1312 (in Chinese).
- [47] 赵琳, 贺华波, 邓益民. 可变功能机械系统概念设计的相似模型构建研究[J]. 机电工程, 2014, 31(12): 1530-1534.
- ZHAO L, HE H B, DENG Y M. Similarity model of variable-function mechanical system for its conceptual design[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1530-1534 (in Chinese).
- [48] 杜冠男, 熊艳, 曾雪蕾, 等. 基于 TRIZ 和 FBS 的闭环设计方法[J]. 机械设计, 2013, 30(9): 1-7.
- DU G N, XIONG Y, ZENG X L, et al. Closed loop design method based on TRIZ & FBS[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(9): 1-7 (in Chinese).
- [49] 胡艳, 李彦, 麻广林. 一种基于集成模式的六西格玛设计方法[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(1): 15-18, 23.
- HU Y, LI Y, MA G L. A design method of six sigma based on integration mode[J]. Machine Design & Research, 2009, 25(1): 15-18, 23 (in Chinese).
- [50] 李从东, 章志伟, 曹策俊, 等. 复杂产品设计变更传播路径的多目标优选[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 842-856.
- LI C D, ZHANG Z W, CAO C J, et al. Multi-objective optimization of design change propagation paths in complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 842-856 (in Chinese).
- [51] 龚京忠, 邱静, 李国喜, 等. 基于功构单元的产品族规划方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 52-59.
- GONG J Z, QIU J, LI G X, et al. Planning approach for

- product family based on function-structure unit[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(1): 52-59 (in Chinese).
- [52] 张智博, 李翔龙. 基于 FBS 的创新设计服务平台创新问题求解模块开发[J]. *现代机械*, 2019(5): 83-88.
- ZHANG Z B, LI X L. Development of innovative problem-solving module based on FBS innovative design service platform[J]. *Modern Machinery*, 2019(5): 83-88 (in Chinese).
- [53] KANNENGISSER U, GERO J S. Is designing independent of domain? Comparing models of engineering, software and service design[J]. *Research in Engineering Design*, 2015, 26(3): 253-275.
- [54] FILIPPI S, BARATTIN D. Extending the situated function-behaviour-structure framework to human-machine interaction[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2017, 11(2): 247-261.
- [55] 殷习, 邓益民, 杨鹏. 基于 FBS 的可变功能机械设计变更传播过程及特性分析[J]. *工程设计学报*, 2016, 23(1): 8-13, 21.
- YIN X, DENG Y M, YANG P. Change propagation process and characteristic analysis of adaptable-function machine based on FBS[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2016, 23(1): 8-13, 21 (in Chinese).
- [56] 杨琨, 李彦, 熊艳, 等. 基于复杂网络的知识驱动产品创新设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(9): 2257-2269.
- YANG K, LI Y, XIONG Y, et al. Knowledge driven product innovation design based on complex network[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(9): 2257-2269 (in Chinese).
- [57] 张伟社, 关雷, 许诺琪, 等. 情景与 FBS 在产品创新设计中的应用[J]. *包装工程*, 2018, 39(4): 132-135.
- ZHANG W S, GUAN L, XU N Q, et al. Situation and FBS in product innovation design[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(4): 132-135 (in Chinese).
- [58] 梁嘉宝, 严波, 秦镐. 基于 FBS 模型的儿童电动牙刷知识库设计研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(16): 236-242.
- LIANG J B, YAN B, QIN G. Knowledge base design of children's electric toothbrush based on FBS model[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(16): 236-242 (in Chinese).
- [59] 黄晨曦, 郝锦涛, 邢浩威, 等. 基于 FBS 的虚拟血管支架置入模型[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(7): 2622-2629.
- HUANG C X, HAO Y T, XING H W, et al. Virtual vascular stent implantation model based on FBS[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(7): 2622-2629 (in Chinese).
- [60] BAI Z H, DENG X, YU F, et al. Research on trimming method of resource excavation process based on FBS model[EB/OL]. [2022-08-26]. <https://web.i-sim.org/icsi/archives/award/Paper%20Competition-Awards.pdf>.
- [61] BOKIL P, RANADE S. Function-behavior-structure representation of the grids in graphic design[M]//*Design Computing and Cognition'12*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014: 491-509.
- [62] LEE I, YI T, RHIM J, et al. Case representation of daily routine data through the function behavior structure (FBS) framework[M]//*Communications in Computer and Information Science*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 382-389.
- [63] TAMA I P, REIDSEMA C. Product knowledge identification and modeling for virtual collaboration environment[C]//*Picmet 2010 Technology Management for Global Economic Growth*. New York: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [64] LI L, YU S R, TAO J, et al. A FBS-based energy modelling method for energy efficiency-oriented design[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1-13.
- [65] KOH E C Y. A study on the requirements to support the accurate prediction of engineering change propagation[J]. *Systems Engineering*, 2017, 20(2): 147-157.
- [66] BOTT M, MESMER B. Agent-based simulation of hardware-intensive design teams using the function-behavior-structure framework[J]. *Systems*, 2019, 7(3): 37.
- [67] EICHHOFF J R, MAASS W. Representation and reuse of design knowledge: an application for sales call support[M]//*Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*. Heidelberg: Springer, 2011: 387-396.
- [68] POURMOHAMADI M, GERO J. LINKOgrapher: an analysis tool to study design protocols based on FBS coding scheme[EB/OL]. [2022-08-26]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=a57c31a71584666092f4070787b401bb&site=xueshu_se&hitarticle=1.
- [69] FILIPPI S, BARATTIN D. Definition of the form-based design approach and description of it using the FBS framework[EB/OL]. [2022-08-26]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=dcd15b84e432b7574e8805cb2f85bd49&site=xueshu_se.
- [70] GUI J K. A function-behaviour-structure machine design model and its use in assembly sequence planning[J]. *Journal of Engineering Design*, 1990, 1(3): 239-259.
- [71] QIAN L N, GERO J S. Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1996, 10(4): 289-312.
- [72] GERO J S, KANNENGISSER U. The situated function-behaviour-structure framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [73] 刘一川, 吴建明, 刘彬, 等. 新型装备概念设计 FBS 模型研究[J]. *机械工程学院学报*, 2014, 26(5): 5-8.
- LIU Y C, WU J M, LIU B, et al. Research on new type equipment conceptual design FBS model[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2014, 26(5): 5-8 (in Chinese).
- [74] BAQAI A, SIADAT A, DANTAN J Y, et al. Integration of a manufacturing ontology with the design of reconfigurable machine tool using function-behavior-structure approach[C]//*2007 2nd International Conference on Digital Information Management*. New York: IEEE Press, 2007: 473-478.
- [75] 侯宏平, 朱剑刚. 基于 FBS 模型的下肢支撑力量薄弱人群助行器设计研究[J]. *家具与室内装饰*, 2019(7): 86-88.
- HOU H P, ZHU J G. Study on the design of walker for people with weak lower limb support strength based on FBS model[J]. *Furniture & Interior Design*, 2019(7): 86-88 (in Chinese).
- [76] 阮佳丽. 智能家居的 FBS 模型研究: 以智能化妆镜为例[J]. *数码设计*, 2017, 6(7): 142-143, 148.
- RUAN J L. Research on FBS model of smart home—taking smart makeup mirror as an example[J]. *Peak Data Science*, 2017, 6(7): 142-143, 148 (in Chinese).
- [77] 王超, 宋佩华, 张惠娟, 等. 基于 FBS 的卧室在线自动布局算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2019, 31(2): 266-276.
- WANG C, SONG P H, ZHANG H J, et al. Online automatic placement algorithm of bedroom layout based on FBS[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2019, 31(2): 266-276 (in Chinese).