

DOI: 10.3901/JME.2022.23.227

融合 RE 与 BID 的产品创新方法研究及应用^{*}

刘晓敏 杨栋 陈亮 樊帅
(福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116)

摘要: 针对已有产品的再创新、创新方法选用及创新方向的明确性等问题,提出一种融合逆向工程(Rreverse engineering, RE)和生物启发设计(Bio-inspired design, BID)的产品创新过程模型。首先,通过 RE 对已有产品进行分析,经过结构分解、行为匹配及功能构建等步骤,建立其功能模型;其次,以该模型为基础,搜集产品用户需求,通过需求进化分析、需求重要度计算及功能进化,得到产品概念的功能再创新,进而组合出产品新功能待求解模型;最后,以生物系统逆向工程建模方法为基础,搜索并整理生物案例。利用所建立的生物启发设计辅助系统求解产品新功能,得到产品再创新方案。以方舱医院医护人员用防护服为例,验证了 RE 与 BID 融合的产品创新方法具有较好的可行性。

关键词: RE; BID; 需求进化; 产品创新; 防护服

中图分类号: TH122

Research & Application of Product Innovation Method Incorporating RE and BID

LIU Xiaomin YANG Dong CHEN Liang FAN Shuai
(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

Abstract: Aiming at the re-innovation of existing products, the choice of innovative methods and the clarity of innovative direction, a process model of product innovation combining reverse engineering (RE) with biologically inspired design (BID) was proposed. First, existing products based on RE, their functional models were established through structural decomposition, behavior matching, and functional construction. Secondly, product user needs being collected through demand evolution analysis, importance calculation, and function evolution, the product concept function was re-innovated to form a new function to be solved model. Finally, based on RE modelling method of the biological system to search for and sort out biological cases using the established biologically inspired design auxiliary system, the new functions of system-assisted solution were obtained to make product re-innovation schemes. Taking the protective clothing used by medical staff in the shelter hospital as an example, it is verified that the product innovation methods of RE and BID have a good feasibility.

Key words: reverse engineering; bio-inspired design; demand evolution; product innovation; protective clothing

0 前言

当前,约有 70%的新产品是在已有产品基础上加以改进与创新^[1]。创新方法在产品研发中的广泛应用不仅能大大缩短产品开发周期,还能显著提升产品再创新竞争力。逆向工程(Rreverse engineering,

RE)方法现已成为消化、吸收已有产品设计知识并进行产品再创新的重要手段^[2]。RE 方法是利用扫描及测量已有产品实物或造型的数据,通过构建数字化模型,以有效实现产品的再创新。这为产品研发提供创新思路与技术支持^[3]。

OTTO 等^[4]运用功能模型作为逆向工程对象,对已有产品系统及组件做了深度创新。TANG 等^[5]提出基于功能的逆向设计方法,构建产品原始映射与再设计衍生等功能模型,克服了逆向工程建模与

^{*} 国家科技部创新方法工作专项资助项目(2020IM010200)。20220307 收到初稿,20220916 收到修改稿

再设计的不足。DURUPT 等^[6]提出一种基于知识的逆向工程方法,帮助设计者实现从知识抽象整合到重构 CAD 模型的构建。CALDWELL^[7]提出基于逆向工程方法的剪枝规则,删除相关性弱的功能,生成类比扩展功能模型。刘江南等^[8]基于逆向工程思维,提出由系统目标到内部组件的功能逆推分析方法和基于功能裁剪的系统重构创新方法。

然而,上述逆向工程方法应用存在如下问题。

(1) 该方法虽然能实现产品创新,但获得的产品创新解大多数是针对已有产品的仿制,难以完全消化并吸收原产品设计理念及内在设计知识。

(2) 该方法忽略了产品设计中最重要,也是最富有创造性的概念设计过程。

(3) 该方法缺乏对用户需求的精确把握,使得产品再创新设计导向变得不够明确。

生物启发设计(Bio-inspired design, BID)是将生物系统类比推理到工程设计方案求解的一种创新方法^[9]。它不仅能大大提高产品设计成果的可持续性,还能有效激发设计者产生颠覆性创新思维^[10-11]。

WILSON 等^[12]探索运用逆向工程技术的生物知识转化方法,抽象出基于功能模型的生物仿生策略。

VATTAM 等^[13]建立基于生物功能-行为-结构(Function-behavior-structure, FBS)模型,开发了生物系统功能模型求解的计算机辅助系统。HU 等^[14]基于 FBS 模型与实例推理,将生物原型相关特性类比推理到产品设计,拓展了产品概念仿生结果的深度创新。笔者融合可拓学与多层次知识建模方法,建立基于产品-生物两系统相似性原理的实例可拓集,获取仿生原型^[15]。GRAEFF 等^[16]通过比较工程设计与生物学之间的过程表示,实现了跨学科的仿生设计策略交流。

功能模型是实现生物学知识获取与转化的重要方法,更是 RE 实现再创新的重要基础。自然界的生物实例是基于产品再创新的知识基础。生物策略方案能有效促进产品创新难题的解决。RE 方法为获取用户需求提供便捷条件。为此,以产品功能为切入点,提出一种融合 RE 与 BID 的产品创新方法。以方舱医院医护人员用防护服为工程实例,对所融合的创新方法进行有效验证。

1 逆向工程建模方法

1.1 逆向工程功能建模

逆向工程功能建模可拓展产品创新深度。结构-

行为-功能(Structure-behavior-function, SBF)是一种解决工程技术问题的本体论建模方法^[17]。改进的 SBF 模型是通过描述逆向工程行为信息,添加产品元件特征,实现功能与行为信息冗余的裁剪^[18]。

1.1.1 结构分解

结构是产品设计的突破口与最终表现形式。它是由物质及组件之间的连接来表示的;物质是指与组件相关的实体或非实体^[17]。结构分解并不是将产品拆分为最小的零件或元件,而是通过分析系统来识别各子系统与系统间的装配关系,即通过各子系统的操作来获得子系统元件及系统元件之间的连接关系,最终识别出元件的特征属性。

结构分解示意,如图 1 所示,操作步骤如下。

(1) 利用所收集的产品资料,将产品系统分解为若干子系统的组合。

(2) 分析每个子系统的操作过程,并将该过程用子系统的元件及其相互连接关系表示。

(3) 分析子系统每个元件,提炼元件特征属性。

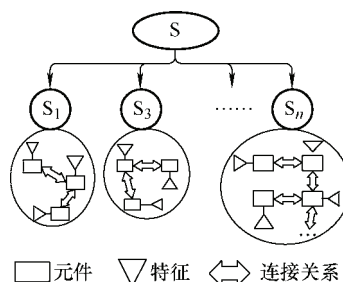


图 1 结构分解示意

1.1.2 行为匹配

产品技术系统伴随着设计信息的变化,表现为物料、能量和信号等 3 种流的传递与转化。结构是 3 种流变化的载体。行为表现为 3 种流变化的具体方式。它是由结构的状态转换来表达功能实现的过程。功能是对 3 种流变化的抽象描述。结构状态变化通过相应的动作实现。利用 3 种流的变化来阐述产品结构、行为和功能相互之间的内在逻辑与依存关系。将 3 种流引入行为匹配过程,用行为链图(<元件及其特征+动作状态词+3 种流>)来描述行为特征信息,如图 2 所示。

(1) 根据结构分解后的元件及其特征,结合其操作过程,确定元件的动作状态。

(2) 根据 3 种流方向及时序,获得动作状态对应的动作链。

(3) 对动作链抽象化操作,形成行为链。

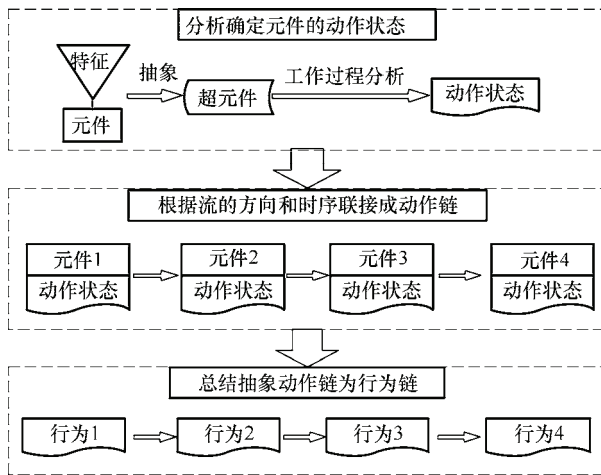


图2 行为匹配过程示意

1.1.3 功能构建

功能是由单个行为、一组同时或顺次发生的行为为集来实现。SBF模型是运用系统初始与最终状态来描述功能，这与3种流时序表示结构元件动作状态变化的行为链相类似。然而，两者均缺少功能建模规范化表示与功能原理实现过程描述。为此，借助于元功能(meta-Function, mF)^[19]描述功能间的关系，以实现产品功能描述的规范化。元功能为功能单元间的逻辑推理提供依据。它描述了两个功能之间的相互作用，并由执行功能(executive Function, FE)和目标功能(target Function, FT)来表述两个功能在行为层面上的客观因果关系，反映了行为与功能之间的内在联系。功能原理实现模型，如图3所示。

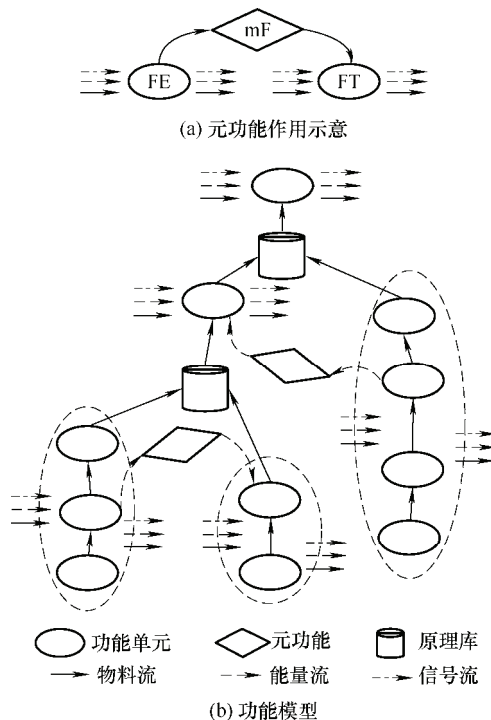


图3 功能构建示意

(1) 分析行为链中的行为与输入/输出流。在功能本体库中查找产品功能释义，实现功能体辨识，得到行为特征所对应的各个功能单元模型。

(2) 分析不同功能单元链间的关系。利用元功能实现不同功能单元链间的相互作用与因果联系的搭建。元功能作用示意，如图3a所示。

(3) 搜寻功能实现原理。元功能合并功能链，产生父功能与子功能，进而搜寻功能实现原理，获得最终的功能原理实现模型，如图3b所示。

1.2 生物系统逆向工程建模

在应对自然界生存挑战时，生物所展现的“智慧”是获得产品启发创新的知识源泉。用工程可理解的知识表征模型分析并表示生物知识是跨越工程与生物知识壁垒的重要基础。功能模型承载知识信息并实现跨域转换，这已被学术界普遍认可。由RE分解生物系统功能架构，使得功能模型建立与生物策略求解变得切实可行^[12]。然而，这要求设计者需具备一定的生物学知识，否则会使创新方法运用时间过长及学习成本过高。由DANE^[13]来建立生物结构、动作、功能模型，缺少描述生物体结构状态变化的动作架构对多种生物功能的表达。为此，基于产品-生物两系统的相似性，建立生物系统结构-动作-行为-功能(Structure-action-behavior-function, SABF)模型，以有效实现功能类比和生物启发创新。生物系统SABF的RE模型，如图4所示。

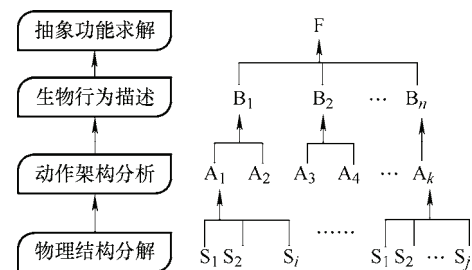


图4 生物系统SABF的RE模型

2 需求进化与功能进化

设计者运用RE方法对已有产品消化及吸收，建立产品功能模型，这有助于从功能角度分析产品的用户需求。通过对需求与功能间关系的分析来进一步明确产品再设计的创新方向。

2.1 需求进化

功能设计的核心^[20]是为了满足用户需求。产品功能是为了满足需求而存在。通过已有功能和新功能来满足用户对于产品的已有需求和新需求。根据用户需求，PETROV^[21]提出处于进化状态的5条需

求进化定律及进化方向, 如表 1 所示。

表 1 需求进化定律及进化方向

需求进化定律	需求进化方向
需求理想化	提高产品性能, 减少生产时长, 增加新功能
需求动态化	在材料、结构与人机协同等方面使产品更具有适应性
需求协调化	产品设计参数、结构在时间与空间上更加协调, 新功能、附加功能与主要功能之间相互协调运作
需求集成化	用于多功能产品, 增加新功能与强化产品特征
需求专门化	针对特殊人群与产品特殊使用资源, 产生多用途需求

根据产品需求进化方向, 将其分为 4 类。

(1) 用户提出已满足的需求。这类需求是属于产品被设计出来, 并立即满足用户的主要需求(即产品主功能)。

(2) 用户未提出但已满足的需求。这类需求属于兴奋需求, 主要针对短期内出现的潜在需求进行功能设计, 属于产品附加功能。产品若能实现该类需求, 则会给用户带来意外收获, 提高产品竞争力。

(3) 用户提出但未满足的需求。这类需求是用户所期望的, 但未实现, 有一定研发价值。然而, 后期产品设计若仅限于满足该类需求, 则会使产品始终滞后于用户期望, 产品竞争处于劣势。

(4) 用户未提出但未满足的需求。这类需求有极高的研发价值, 须对用户需求挖掘, 以获得此类隐性需求。该类需求可产生高级别的创新成果。

2.2 需求重要度计算

用户需求重要度计算可大大减少用户对理想产品描述的模糊性。层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)^[22]用于处理复杂决策问题的定性与定量分析。基于该方法的需求重要度计算步骤如下。

(1) 建立层次结构模型, 分析用户需求进化的不同层次。

(2) 建立判断矩阵。设需求进化有 n 个指标, 用 1~9 整数表示指标间的相对重要度。整数表示的重要度等级, 如表 2 所示。

表 2 整数与重要度等级对应关系

整数值	重要度
1	重要度相等
3	稍微重要
5	一般重要
7	非常重要
9	极端重要

注: 2、4、6、8 表示各重要度等级的中间值。

设判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, a_{ij} 表示第 i 个指标相对第 j 个指标的比较结果, 其中 $a_{ij} > 0$; $a_{ji} = 1/a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$, $a_{ii} = 1 (i = j)$ 。

(3) 层次单排序及一致性检验。计算判断矩阵的特征向量 ω_i 。利用乘法计算特征值的公式为

$$\omega_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{k=1}^n \left\{ \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{1/n} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

计算矩阵最大特征值 λ_{\max} , 以检验一致性。 λ_{\max} 为

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j / \omega_i \right) \quad (2)$$

判断矩阵的一致性检验公式为

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

查对应表得平均一致性指标值 R_I 。一致性比例 $CR = CI / R_I$ 。当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵 A 的一致性可接受, 否则需调整判断矩阵指标赋值。

2.3 功能进化

产品功能随客户需求的变化而调整, 使其始终处于进化状态。先对用户需求及分类分析, 计算未满足需求的重要度; 再依据功能进化定律^[20]选择相应的功能进化方向; 最后确定产品新功能。

产品功能再创新方向预测过程, 如图 5 所示。未满足需求主要分为用户已提出与未提出 2 类。第 1 类需求为已提出。需求重要度差异主要涉及产品性能人性化、适应性与稳定性等方面, 这是通过功能自适应与功能动态来改进; 涉及产品主功能的补充及用户个性化需求, 这是通过功能人性化定律来

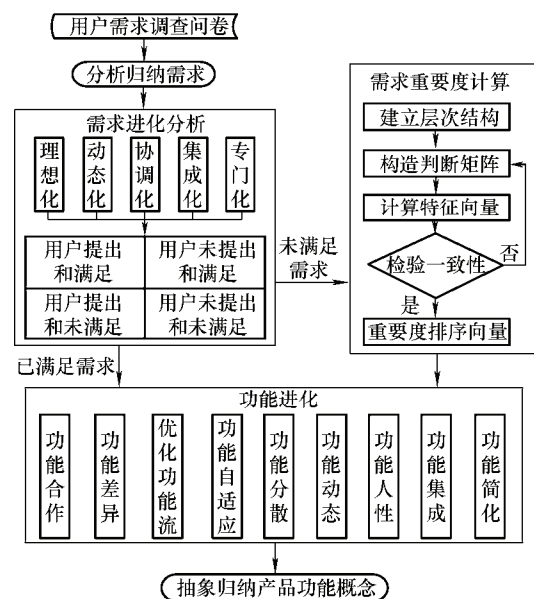


图 5 产品功能再创新方向预测过程

改进。第 2 类需求为未提出, 这需要基于技术、方法及知识等对潜在需求进行挖掘, 是通过功能理想化来实现。将挖掘需求与已提出的需求作为产品再设计的实现目标, 以达到驱动产品创新的目的。

3 BID 创新过程模型

BID 是由 3 部分内容^[23]来实现产品创新: ① 工程技术标准的生物知识转换及表征方法; ② 大量生物案例数据库; ③ 科学而高效的 BID 流程。产品-生物两系统功能相似性是生物知识类转移的主要依据^[24]。通过抽象生物功能扩展语义, 实现产品功能类比, 进而搜寻生物案例库, 获取生物原型。将生物原型结构、动作与行为等属性特征与产品待设计目标相对应, 最终获取生物启发创新方案。

为了提高生物案例获取效率、降低设计者生物知识学习成本及实现 BID 创新提效, 利用 Python 软件, 开发 BID 辅助查询系统, 如图 6 所示。该系统从 AskNature 网站(www.asknature.org)与维基物种(www.species.wikimedia.org)中获取生物案例, 将其转化为工程技术知识表达。利用 MySQL 数据库, 整理生物原型 SABF 各层次信息。



图 6 BID 辅助查询系统

由 RE 方法实现 BID 框架的生物知识表达。基于功能类比原理^[25]与产品-生物两系统多层次映射关系, 构建基于 BID 的创新过程模型, 如图 7 所示。

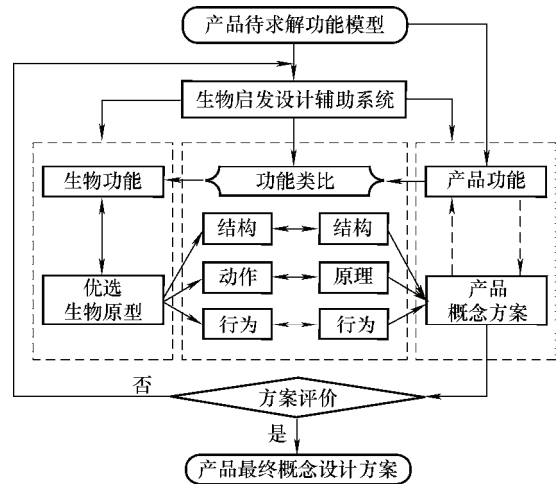


图 7 基于 BID 的创新过程模型

4 融合 RE 和 BID 的创新过程模型

综合前述各方法及模块, 建立融合 RE 与 BID 的产品创新设计过程模型, 如图 8 所示。

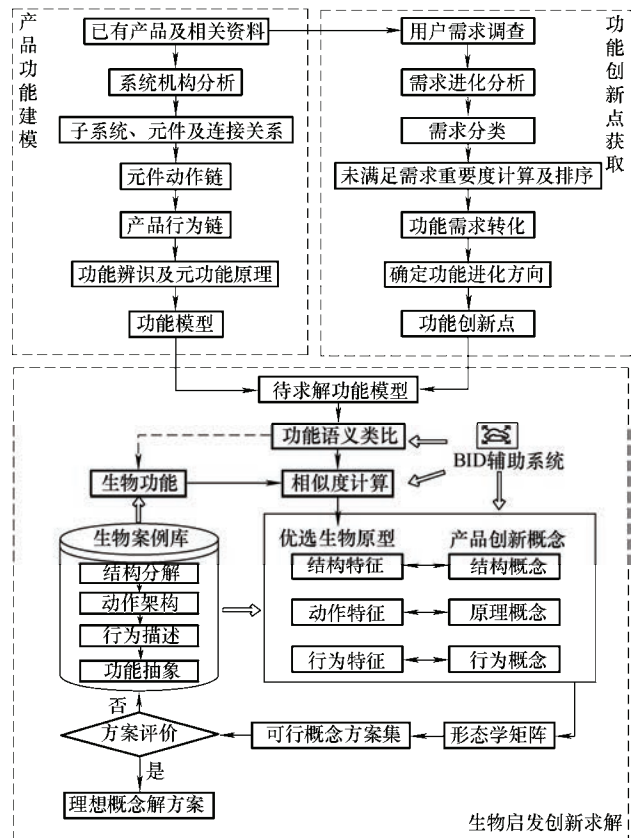


图 8 融合 RE 与 BID 的产品创新设计过程模型

(1) 产品相关资料收集。通过搜集已有产品资料, 初步了解产品主要组成要素、主要功能等, 以明确产品的目标需求。

(2) 产品功能建模。先基于 RE 方法, 分析产品各子系统元件间的相互连接关系, 分解产品系统;

再描述元件特征的动作状态,引入 3 种流信息,构建元件动作链、产品行为链等;最后根据功能辨识及元功能原理,实现产品功能逆向建模。

(3) 确定产品再创新方向。先根据需求进化定律,分析用户需求进化方向并将需求分类;再利用 AHP 法,计算用户未满足需求的相对重要度,进行排序;最后将用户需求转化为功能需求,确定功能进化方向,得到产品功能创新点。

(4) BID 求解。由产品功能模型与功能创新点得到待求解功能模型。依据 BID 辅助查询系统,搜索功能标准词;接着基于功能类比法,求得生物功能,计算产品与生物的功能词语相似度,优选生物原型,获得生物各属性特征;最后由多层次类比映射及评价方法,依次得到产品创新概念形态学矩阵、可行的概念方案集及评价后的理想概念解方案。

5 应用实例

2020 年底,席卷全球的新冠病毒对世界各国人民生命财产安全带来严重破坏。为保障医务工作者生命健康,更好地阻击新冠病毒传播,医用防护服产品研发及应用显得迫在眉睫。现以方舱医院医护人员用防护服为例(如图 9 所示),进行再创新。

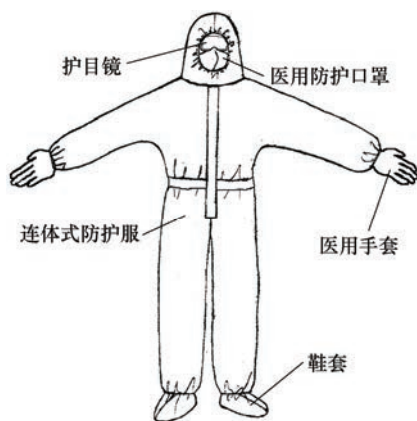


图 9 方舱医院用防护服示意

医用防护服包括护目镜、防护口罩及连体防护服等。其使用时会造成医护人员不同程度的皮肤浸渍、接触性皮炎及医疗器械压力损伤等。主要诱因是与防护时形成密闭空间的潮湿与密封有关。

5.1 产品逆向建模

利用 RE 建模方法,对医用连体防护服、防护口罩及护目镜进行结构分解,如图 10 所示。

(1) 连体防护服。它主要由主体防护服与密闭胶条组成。密闭胶条置于防护服前襟处;使用者穿戴防护服后,较强的黏附作用使得整体防护服形成

密闭的独立空间,以达到隔离病毒的目的。

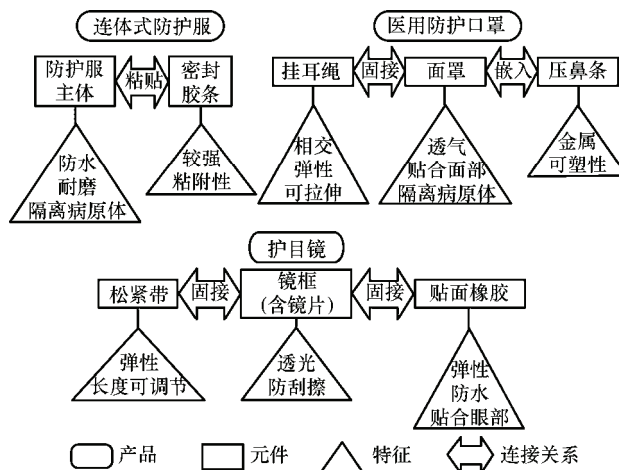


图 10 医用防护服的结构分解示意

1) <密闭胶条的强粘附性+黏附+(能量流)人体的动作>。行为表现为:“形成封闭空间”。

2) <防护服表面隔离病原体+保持+(物料流)携带病毒的空气>。防护服是由符合标准的材料制成,确保隔离病毒。行为表现为:“隔离病毒”。

(2) 医用防护口罩。它主要由挂耳绳、压鼻条与罩体组成。挂耳绳与压鼻条分别以固接和嵌入方式与面罩相连,确保面部形成阻隔病毒的独立空间。

1) <挂耳绳弹性可拉伸+拉伸+(能量流)人力>与<压鼻条金属可塑性+按压+(能量流)人力>。通过“拉伸挂耳绳”与“挤按压鼻条”两个动作将口罩调整至适当位置。行为表现为:“贴合面部”。

2) <面罩透气、阻隔病原体+过滤+(能量流)人力/呼吸作用、(物料流)携带病毒的空气>。使用者主动呼吸,使得面罩外侧携带有病毒的空气经面罩的过滤动作被分离为未携带病毒的空气与病毒,其中未携带病毒的空气进入面罩内侧,病毒被吸附在面罩外侧表面。行为表现为:“过滤空气”。

(3) 护目镜:它主要包括头部松紧带、贴面胶体、防刮擦镜片及镜框组成。松紧带两端固接在镜框上,贴面胶体固接在镜框周围。

1) <松紧带可调节长度+拉伸+(能量流)人力>与<贴面橡胶贴合眼眶+压紧+(能量流)人力>。拉伸动作束紧松紧带,贴面胶体压紧眼眶周围,确保眼部周围形成密闭空间。行为表现为:“贴合眼部”。

2) <(含镜片)镜框透光、防刮擦+保持+(物料流)携带病毒空气>。保护眼部时,需保持镜片透光及完整状态,以确保使用者视线清晰并密封阻隔。行为表现为:“隔离病毒”。

通过分析防护服、口罩和护目镜中各结构的动作状态,以行为链表示其行为特征。依据 3 种流的时序及方向将行为链连接起来,构建行为链图,如图 11 所示。其中,行为单元是对结构动作的简述。3 种流的时序和方向是根据结构的动作状态变化来决定的。如佩戴口罩时经过挂耳绳的拉伸和压鼻条的形变才能实现口罩对人体口鼻的防护。

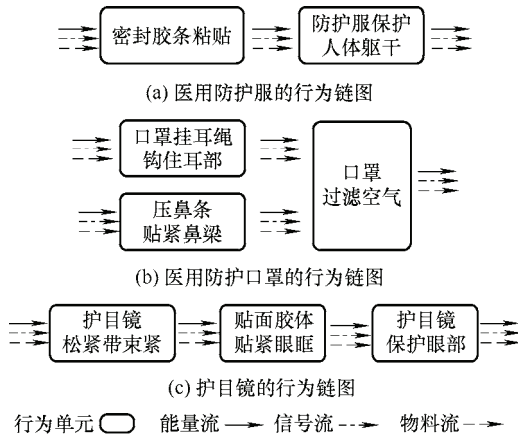


图 11 医用防护服的行为匹配示意

利用元功能原理,结合防护服结构分解与行为匹配的分析,形成对防护服行为的较完整性功能描述。通过 3 种流的分析,构建医护人员防护服功能模型,如图 12 所示。口罩功能实现是利用空气压强差。护目镜和防护服功能的实现是依靠空气隔绝原理。

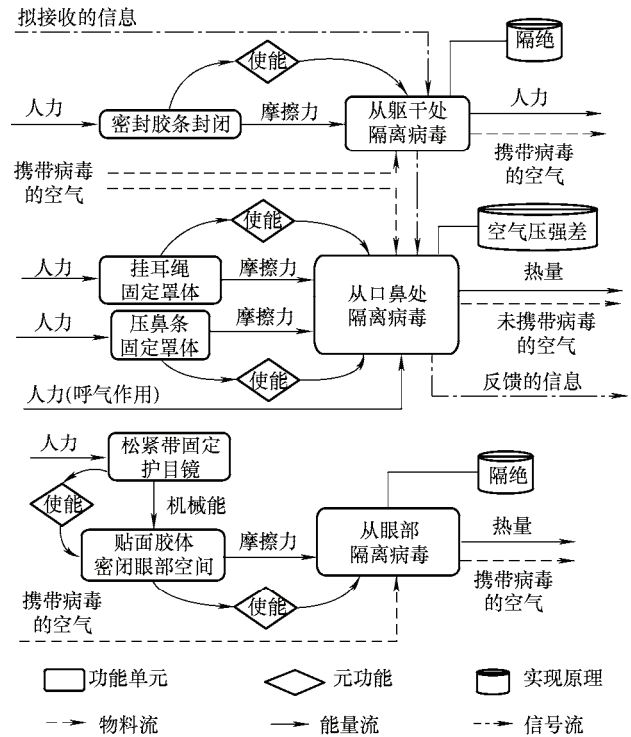


图 12 医用防护服的功能模型

5.2 产品再创新方向的确定

5.2.1 需求进化

经过对医用防护服市场调查及问卷分析,获取该产品的用户需求。结合方舱医院疫情防控管理情况^[26],归纳整理出医用口罩、护目镜及医用防护服等的各类需求及满足情况,如表 3 所示。

表 3 医用防护服用户需求及需求满足情况

防护设备	用户需求	需求内容	需求满足情况
医用防护口罩	过滤飞沫和气溶胶	有效阻隔病毒	已满足
	透气性更好	保持呼吸通畅	未满足
	方便交流	提高工作人员沟通及交流效率	未满足
医用护目镜	保护眼部	防止病毒经眼睛侵入人体	已满足
	防雾/视野宽阔	有效防止镜片起雾且干扰使用者视觉	未满足
	减少皮肤损伤	提高穿戴舒适性,降低皮肤压力	未满足
医用防护服	防止感染病毒	保护人体不沾染病毒,防止病毒扩散至舱外	已满足
	透气、散热	提高使用者舒适度,保持体感温度正常	未满足

根据分析及预测未满足防护服用户需求进化方向的结果,提取用户隐性需求为:“穿戴舒适性更好,更具人性化”。设定其为需求理想化的结果。

设 R_i 为用户未满足需求,根据需求进化方向预测结果,得到用户隐性需求为 H_d 。两者之间的相互关系,如图 13 所示。

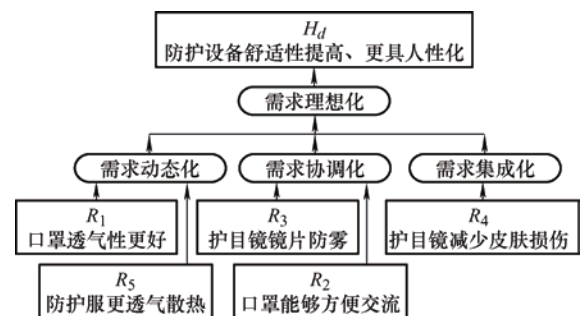


图 13 医用防护服的需求进化示意

5.2.2 需求重要度计算

利用 AHP 法, 计算 $R_i(i=1,2,3,4,5)$ 未满足需求的相对重要度。

(1) 建立层次模型。根据需求的动态化、协调化与集成化等 3 个层次, 结合未满足需求 R_i 的求解结果, 获得隐性需求 H_d 。

(2) 建立判断矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 7 & 1/3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 3 & 1/7 \\ 1/3 & 3 & 1 & 5 & 1/5 \\ 1/7 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/9 \\ 3 & 7 & 5 & 9 & 1 \end{pmatrix}$$

(3) 一致性检验。利用公式(1)计算判断矩阵特征向量 $\omega = [0.261\ 5, 0.063\ 4, 0.129\ 0, 0.033\ 3, 0.512\ 8]$; 利用公式(2)计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.237\ 5$ 。

由公式(3)计算 $C_I = 0.059\ 37$ 。查表知 $R_I = 1.12$ 。判断矩阵一致性检验 $C_R = C_I/R_I = 0.053\ 01$ 。这里 $C_R < 0.10$, 说明判断矩阵 A 的一致性可接受。防护服未满足需求的相对重要度, 如表 4 所示。

表 4 未满足需求相对重要度

序号	需求内容	相对重要度
R_1	口罩透气性更好	0.261 5
R_2	佩戴口罩后能方便交流	0.063 4
R_3	护目镜镜片防雾	0.129 0
R_4	减少护目镜带来的皮肤损伤	0.033 3
R_5	防护服更透气散热	0.512 8

5.2.3 功能进化

运用功能集成与简化^[19]进行决策分析。利用功能人性化及自适应来决策分析未满足的用户需求。

(1) 功能集成: 分析每个功能特征, 集合相同或相似功能, 并由一个功能载体实现。例如: 为满足“防止病毒经由面部侵入人体”的用户需求, 防护口罩“从口鼻处隔离”和护目镜“从眼部隔离”功能具有相似性。防护服帽子具有阻隔人体头部沾染病毒的功能, 与上述两功能属性相似, 均能防护人体头、面部。将这 3 个功能集合, 用一个功能载体“整体式面罩”实现。

(2) 功能简化: 通过需求分析, 去除不必要且不满意的功能。产品有用功能是由改变功能实现方式得到。例如: 将“从口鼻处隔离”与“从眼部隔离”进行功能集成。关于罩体固定形式, “挂耳绳固定”与“压鼻条固定”则变成不必要的功能, 需剔除。同时, 护目镜“松紧带固定”与眼部空间“贴面胶条密闭”则变成不满意的功能, 也要剔除。

(3) 功能自适应: 增加新功能以满足不同的用户需求, 同时优化主要功能。例如: 以“整体式面罩”为功能载体, 集成“从口鼻出隔离”、“从眼部隔离”到防护服帽子防护头部, 发现防护口罩“过滤飞沫和气溶胶”、“透气性好”、“方便交流”与护目镜“防雾”的需求虽然不能满足, 但护目镜“减少皮肤损伤”与“视野宽阔”的需求得以满足。在传统防护中, 未被口罩与护目镜包裹的头部区域均由防护服帽子保护。在整体式面罩保护头、面部时, 面罩与防护服之间如何形成密闭空间, 已成为该产品创新亟需解决的新问题。可见, 利用功能自适应原理, 通过增加“整体式面罩”方式满足用户需求。

(4) 功能人性化: 通过挖掘用户潜在需求, 使得产品功能更加有利于客户的人性化使用。例如: 医用防护服“透气/散热”相较于其他需求是最受关注的未满足需求。为此, 以提高人性化为出发点, 开展医用防护服的研发创新。采用整体式面罩替换口罩与护目镜后, 面部防护穿戴方式有所改变, 面罩的人性化穿戴成为待满足的新需求。

经功能进化分析, 得到用户需求与产品新功能之间的对应关系, 如表 5 所示。

表 5 整数值与重要度等级对应关系

用户需求	产品新功能
防护服透气、散热	防护服人性化散热
口罩过滤飞沫和气溶胶	面罩过滤病毒
口罩方便交流	面罩可接收信息
口罩透气性更好	口罩“主动”呼吸
护目镜防雾	面罩防止雾气黏附
—	面罩与防护服之间密闭
—	面罩人性化穿戴

将新型与传统防护设备的功能模型整合, 得到待求解的新型防护服功能模型, 如图 14 所示。

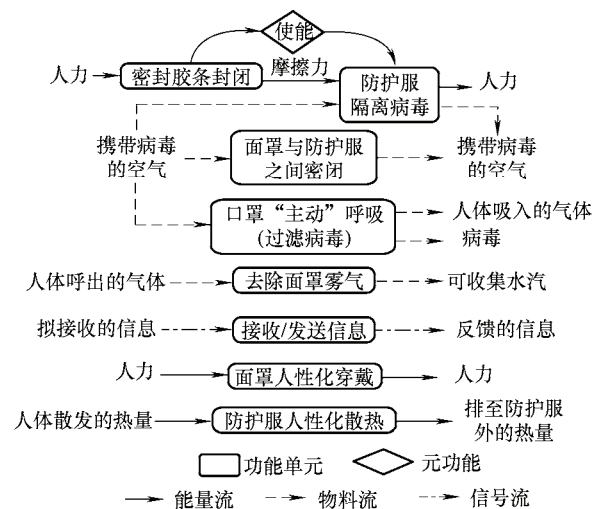


图 14 新型防护服功能模型

5.3 BID 创新概念设计

构建如图 15 所示的 BID 辅助设计系统操作界面，以此查询并获得新产品待求解功能的生物解。

(1) 功能类比与生物原型获取。进入 BID 系统“功能查询及类比”界面，输入待实现的功能，点击

“查询”按钮，得到与输入功能语义相关的产品功能标准词。接着点击“功能类比”按钮，得到生物功能词；再点击生物功能词，得到具有该生物功能的若干生物原型；选择生物原型，点击“确定”，即可查看生物原型的详细信息，如图 15a 所示。



图 15 BID 辅助设计系统操作界面

(2) 进入“生物原型信息”界面，查看所选生物原型的详细描述及生物功能-结构-动作相关图。若对该生物原型不满意或想查看其他生物原型，则点击该页面右下方的“上一步”，进入“功能查询及类比”页面重新选择，如图 15b 所示。点击“下一步”，则进入“生物启发设计”界面。

物原型的基础启发方案，包括方案描述、工作原理和方案结构等详情。同时，在该界面右下方设置有“上一步”、“保存”和“退出”按钮，方便返回、保存当前内容及退出系统等操作，如图 15c 所示。

(3) 进入“生物启发设计”界面，查看所选生

查询新型防护方案的待求解功能，筛选出生物功能与原型。BID 生物原型筛查结果，如表 6 所示。

表 6 BID 生物原型筛查结果

产品功能	产品标准词	生物功能	生物优选原型
防护服人性化散热/透气	输出	分配能量	海豚脂肪充当相变材料吸收热量
		分配气体	蟑螂体内产生单向气流调节体温
面罩过滤病毒	分离	捕获/吸收/过滤生物及非生物	蜜蜂花粉过滤腹部花粉
			鲸鱼用鲸须过滤磷虾以进食
信息交流	交互	群体协调	樽海鞘通过粘液滤网捕获食物
			蚂蚁种群信息非均匀分布交互
口罩“主动”呼吸	变化	分配气体	蜜蜂通过知识共享协作觅食
			鸟类肺部气体单向流动
去除面罩雾气	变化	防止污垢/固体伤害	人类肺部气体经历双向流动
		防止液体伤害	叶蝉的粉末涂层可排斥粘性物
面罩与防护服之间密闭	稳定	防止结构失效	竹叶的疏水和亲水表面引导水
		暂时附着	马兜铃属植物细胞可自我修复
面罩人性化穿戴	定位	调整物理状态	贻贝利用粘性蛋白附着在岩石上
			蛇下颚可扩展以吞下较大食物

对生物原型信息及对应的生物启发设计概念解分析与综合, 构建防护服待求解功能的生物概念解

形态学矩阵, 如表 7 所示。

表 7 新型防护服功能的生物概念解形态学矩阵

产品新功能	生物概念解		
	1	2	3
防护服散热/透气	相变材料降温	单向出气口+供气装置	
面罩过滤病毒	静电吸附过滤	须状刷毛过滤	粘性吸附过滤
信息交流	信息非均匀分布式交互	信息共享式交互	
口罩“主动”呼吸	呼吸双气囊式气体交换	呼吸单气囊式气体交换	
去除面罩雾气	粉末状疏水涂层	疏水层集水+亲水层引水	
面罩和防护服密封连接	自修复材料填补密封间隙	粘性可逆胶密封	
面罩人性化穿戴	多连杆结构实现大小调节		

所组合的防护服概念方案数为

$$N = 2 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 1 = 96$$

将防护方案应用对象作用于概念方案实现机理, 对生物概念解方案进行筛选, 如下:

(1) 病毒主要借助飞沫与气溶胶进行传播。因概念解“须状刷毛”与“粘性吸附”无法对气体中的物质进行有效过滤, 故未能满足要求。

(2) 在穿戴防护工作服时, 身心都承受较大压力。为减缓此压力, 以确保医治救治工作高效运行, 需对外界信息合理布局。在概念解“信息共享式交互”将所有信息传达给医护人员时, 会导致信息利用率偏低, 且冗余信息较多, 未能满足要求。

(3) 整体式面罩会因医护人员呼吸与热辐射而产生雾气, 影响视线。概念解“粉末状疏水涂层”可实现雾气去除, 但粉末状涂层易扩散, 会对医护人员面部造成污染, 未能满足要求。



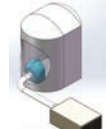
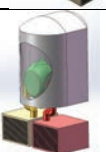


(4) 整体式面罩是由防护服帽子、护目镜与防护口罩集成一起, 只提供头面部保护。此时, 仍需防护服防护人体躯干, 以完全隔离病毒。概念解“自修复材料填补密封间隙”是在传统衣物连接基础上, 利用自修复材料的拟合间隙特性实现完全密封, 但该方案不可逆。在医护人员卸去防护服时, 无法回收与循环利用, 造成资源浪费, 未能满足要求。

筛选后的 4 种可行方案, 如表 8 所示。

相变材料^[27]通过固液态相互转化以储存和放出热量, 对外界冷暖刺激做出双向温度调节的反应, 能大大改善服装的舒适性。方案 1 采用相变材料嵌入防护服夹层方式为穿戴者散热, 并由单个气囊配合呼吸频率监测来实现穿戴者的顺畅呼吸; 方案 2 采用方案 1 的防护服散热方式, 但采用双气囊供气-排气方式, 提供平稳的持续单向气流, 以保持穿戴

者顺畅呼吸; 方案 3 在防护服腋下等位置布置单向阀, 并配合戴在腰间的供气装置, 实现防护服内、外空气流动, 以达到透气与散热目的; 方案 4 采用方案 3 的防护服透气、散热方式, 但在实现口罩“主动”呼吸功能上与方案 2 采用相同的概念解。

表 8 防护服创新概念方案形态学矩阵(部分)

防护设备功能	生物概念解示意	方 案 1	方 案 2	方 案 3	方 案 4
防护服 散热/透气	 防护服内部对应人体主要散热部位设置相变材料	√	√		
	 防护服对应人体腋下和后背等位置布置单向阀, 通过腰间供气装置将热量排出			√	√
口罩 “主动”呼吸	 利用单个气囊配合人体呼吸频率为口罩内部供气	√		√	
	 利用双气囊向口罩内部供给持续的单向气流以实现呼吸		√		√
去除 面罩雾气	 面罩内表面纵向亲水槽和横向倾斜的疏水槽可收集水珠	√	√	√	√
面罩 人性化穿戴	 仿蛇下颚面罩头部穿戴装置可调节大小以适应不同人群	√	√	√	√

水槽实现面罩水汽的收集与引导。面罩与防护服之间利用粘性可逆胶进行密封。头部面罩配戴方式适配不同人群头部形状大小, 以实现人性化穿戴。

上述可行方案共同点为: 面罩过滤装置利用静电吸附过滤空气中的病毒。面罩内的通信模块是基

于不同岗位实现信息的不均匀分享, 减少信息冗余并降低医护人员心理压力。利用横向疏水槽, 从需求分析及功能进化出发, 建立方案评价因素集。

$$M = \begin{cases} M_1 = (\text{需求满足度}, V) \\ M_2 = (\text{功能实现度}, V) \\ M_3 = (\text{系统复杂度}, V) \\ M_4 = (\text{人性化程度}, V) \\ M_5 = (\text{使用维护性}, V) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $V \in (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$, 表示方案评分标度值。评价因素中完全满足、基本满足、局部满足、不满足和极不满足分别用 1、0.8、0.6、0.4 和 0.2 表示。

运用 AHP 法, 得到评价因素各权重系数 $\alpha = (0.3, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15)$ 。各方案评分计算式为

$$S = \sum \alpha_i p_{ij} \quad (2)$$

式中, S 表示方案最终得分; α_i 表示评价因素权重系数; p_{ij} 表示第 i 个方案的第 j 个评价因素得分。由专家对各方案打分, 其结果如表 9 所示。

由式 5 及表 9, 计算方案 1、2、3 和 4 的最终分值分别为 0.72、0.65、0.76 和 0.83。其中, 取最终分值最大的方案 4 为最优概念方案。为了避免设计冗余, 将面罩过滤病毒装置设置在口罩“主动”呼吸装置与供气装置进气端。先过滤病毒, 输出清洁空气, 再将清洁空气提供给用户。防护服上半身概念创新方案, 如图 16 所示。由于下半身与传统防护设备基本相同, 故未做展示。

表 9 方案评价因素专家打分结果

因素	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	S
α	0.3	0.2	0.2	0.15	0.15	
方案 1	0.8	0.6	0.6	1	0.6	0.72
方案 2	0.6	0.8	0.8	0.6	0.4	0.65
方案 3	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.76
方案 4	1	0.8	0.8	0.8	0.6	0.83

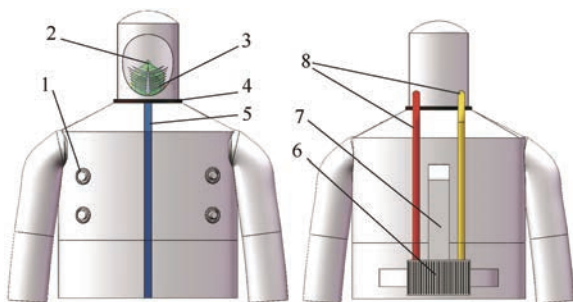


图 16 医用防护服上半身防护概念方案创新示意

1. 单向气阀; 2. “呼吸”口罩; 3. 除雾面罩; 4. 可逆密封胶体; 5. 防护服密封胶条; 6. 过滤-供气装置; 7. 防护服进气管; 8. 口罩进/排气管

6 结论

融合 RE 与 BID 的概念设计对已有产品的再创新研发具有一定的参考及应用价值。

(1) 基于逆向工程思想与 SBF 方法, 构建产品逆向工程功能建模规则, 进行结构分解、行为匹配与功能构建等 3 个步骤, 实现产品设计知识的获取及对设计意图的理解。

(2) 基于 AHP 的需求进化与功能进化, 构建了产品功能再创新方向预测模型, 明确产品功能创新方向。获取用户需求后, 预测相应的需求进化方向; 根据需求重要度计算与功能进化规则, 能更好地使产品功能创新向着理想化方向进化。

(3) 构建了融合 RE 与 BID 的创新过程模型。基于产品与生物两系统概念间的功能类比推理关系, 实现产品与生物功能概念解的相互映射, 完成产品功能的再创新。最后, 以方舱医院医护人员防护服为例, 验证了所构建模型的合理与有效。

参 考 文 献

- [1] 朱保廷. 基于重用的产品设计方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
ZHU Baoting. Study on product design method based on design reuse[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [2] 成思源, 杨雪荣. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
CHENG Siyuan, YANG Xuerong. Reverse engineering technique[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [3] 赵文勇, 刘湘波, 吴海江, 等. 基于逆向工程的焊接过程有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 102-109.
ZHAO Wenyong, LIU Xiangbo, WU Haijiang, et al. Finite element simulation of welding process based on reverse engineering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 102-109.
- [4] OTTO K N, WOOD K L. Product design: techniques in reverse engineering and new product development[M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001.
- [5] TANG D, ZHU R, CHEN X, et al. Functional reverse engineering for re-creation design[C]//Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 185-195.
- [6] DURUPT A, REMY S, DUCELLIER G. Knowledge

- based reverse engineering—an approach for reverse engineering of a mechanical part[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2010, 10(4): 1053-1062.
- [7] CALDWELL B W, MOCKO G M. Validation of function pruning rules through similarity at three levels of abstraction[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 134(4): 1-10.
- [8] 刘江南, 杨小娟, 张文博, 等. 融合功能倒推与裁剪法的系统创新设计方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 69-76.
- LIU Jiangnan, YANG Xiaojuan, ZHANG Wenbo, et al. Systematic innovative design by integrating function backtracking with trimming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 69-76.
- [9] HELMS M, VATTAM S S, GOEL A K. Biologically inspired design: Process and products[J]. *Design Studies*, 2009, 30(5): 606-622.
- [10] TOMPSON L S. The gecko's foot: Bio-inspiration: Engineering new materials from nature[J]. *Library Journal*, 2006, 131(5): 96-96.
- [11] BONSER R. Patented biologically-inspired technological innovations: A twenty year view[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2006, 3(1): 39-41.
- [12] WILSON J O, ROSEN D. Systematic reverse engineering of biological systems[C]//ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2008: 69-78.
- [13] VATTAM S, WILTGEN B, HELMS M, et al. DANE: Fostering creativity in and through biologically inspired design[C]// Design Creativity 2010. London: Springer London, 2011: 115-122.
- [14] HU J, MA J, FENG J F, et al. Research on new creative conceptual design system using adapted case-based reasoning technique[J]. *Ai Edam-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 2017, 31(1): 16-29.
- [15] 刘晓敏, 李娇蓉, 陈亮, 等. 融合可拓学与多层次知识建模的仿生原型获取[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 150-160.
- LIU Xiaomin, LI Jiaorong, CHEN Liang, et al. Bionic prototype acquisition incorporating extension and multi-level knowledge modeling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(21): 150-160.
- [16] GRAEFF E, MARANZANZ N, AOSSAT A. A shared framework of reference, a first step toward engineers' and biologists' synergic reasoning in biomimetic design teams[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(4): 1-17.
- [17] GOEL A K, RUGABER S, VATTAM S. Structure, behavior, and function of complex systems: the structure, behavior, and function modeling language[J]. *Ai Edam-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 2009, 23(1): 23-35.
- [18] 贾丽臻, 于菲, 檀润华, 等. 基于改进 SBF 模型的类比设计过程研究[J]. *机械设计*, 2018, 35(11): 22-30.
- JIA Lizhen, YU Fei, TAN Runhua, et al. Research on design-by-analogy based on refined SBF model[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(11): 22-30.
- [19] KITAMURA Y, SANO T, NAMBA K, et al. A functional concept ontology and its application to automatic identification of functional structures[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2002, 16(2): 145-163.
- [20] 梁瑞, 张建辉, 檀润华, 等. 已有产品功能创新设计过程模型及应用[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 50-61.
- LIANG Rui, ZHANG Jianhui, TAN Runhua, et al. Design process model and application of the existing product function innovation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 50-61.
- [21] PETROV V. Laws of development of needs[EB/OL]. (2006-03-03).<https://the-trizjournal.com/laws-development-needs/>.
- [22] 姚海, 金烨, 严隽琪. 产品功能需求的定性及定量分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(5): 191-198.
- YAO Hai, JIN Ye, YAN Junqi. Qualitative and quantitative analysis of requirements on product function[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(5): 191-198.
- [23] TAN R, LIU W, CAO G, et al. Creative design inspired by biological knowledge: Technologies and methods[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(1): 1-14.
- [24] VATTAM S, HELMS M, GOEL A. A content account of creative analogies in biologically inspired design[J]. *AI EDAM*, 2010, 24(4): 467-481.
- [25] 刘晓敏, 黄水平, 王建辉, 等. 基于 TRIZ 及功能类比的产 品概念设计创新[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 34-42.
- LIU Xiaomin, HUANG Shuiping, WANG Jianhui, et al. Conceptual design based on TRIZ & function analogy for product innovation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 34-42.

- [26] 吴文娟, 何丽华, 刘波, 等. 新冠肺炎疫情期间方舱医院院内感染管理探讨[J]. 中华医院管理杂志, 2020, 36(4): 320-323.
- WU Wenjuan, HE Lihua, LIU Bo, et al. Nosocomial infection control strategy in cabin hospitals during the epidemic of COVID-19[J]. Chinese Journal of Hospital Administration, 2020, 36(4): 320-323.
- [27] 贺润音, 吴雨曦, 王朝晖, 等. 相变材料调温服装调温性能研究进展[J]. 国际纺织导报, 2020, 48(11): 47-54.

HE Runyin, WU Yuxi, WANG Zhaohui, et al. Research progress of temperature regulating properties of PCM fabrics[J]. Melliand China, 2020, 48(11): 47-54.

作者简介: 刘晓敏, 男, 1971 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品创新方法、集成创新理论和机械仿生技术等。

E-mail: lxmliu@fzu.edu.cn

杨栋, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品创新设计理论及方法。

E-mail: 505027335@qq.com