

DOI: 10.3901/JME.2016.09.129

多生物效应技术实现方法研究*

刘 伟^{1,2} 曹国忠^{1,2} 檀润华^{1,2} 于 菲^{1,2}

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130;

2. 河北工业大学国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心 天津 300130)

摘要: 经亿万年进化的生物已经具备了完善的结构、性状、原理和行为等生物特性, 这些特性能为现实多种复杂问题提供有效解决机制。生物为产品设计尤其是仿生设计提供了原始素材, 是创新的灵感之源。为充分利用已知的生物原型, 进行系统化的产品仿生技术结构设计。建立多生物效应的描述模型, 基于灰色聚类提出了生物-技术系统的特征聚类方法; 研究生物功能技术实现的类比方法, 提出了基于属性的生物-技术功能映射模型及多生物效应驱动的产品原理解构过程, 给出了基于特征聚类的多生物效应技术实现方式; 集成上述研究成果形成了面向产品系统设计的多生物效应技术求解模型, 并以纽扣电池扣圈装置创新设计为例, 验证了本方法的有效性。

关键词: 多生物效应; 特征聚类; 创新方法; 电池设备

中图分类号: TH122

Research on Measures to Technical Realization of Multi Biological Effects

LIU Wei^{1,2} CAO Guozhong^{1,2} TAN Runhua^{1,2} YU Fei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. National technological Innovation Method and Tool Engineering Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: After evolution of hundreds of millions years, the organism has obtained features such as the optimal structure, character, principle and behavior to adapt to their living environment. These features provide effective solutions mechanisms to all kinds of complicated problems. Organism provides the raw material for product design, especially the bionic design, which can be the source of inspiration. To make full use of existing human biological prototype to conduct systematically product bionic technology structure design. Descriptive model for multi bionic is established and combining the gray feature cluster method then biology-technology feature cluster method is proposed. Provide the analogy method of biological function, technology function and biological - technology function mapping model and establishment process of products principle solution based on multi bionic based on attribute, proposed implementation of multi biological effects technology based on feature cluster. Combine the above research results to establish the product system design-oriented multi biological effects technology solving model. Finally, the validity of the methodology is proved by innovation design of button battery buckle ring device.

Key words: multi biological effects; feature cluster; innovative method; battery equipment

0 前言

日益激烈的市场竞争使企业越发深刻地认识到创新已成为自身存亡的关键^[1]。经数十亿年进化形形色色的生物物种是人类创新知识宝库^[2]。生物包含了丰富的系统信息, 人类很早就意识到了自然中的生物是发明创造的导师, 从简单的模仿生物的

特性起形成了最初仿生设计的产品^[2-3]。仿生学的出现, 为利用生物进行创新提供了理论的支撑^[4-5]。半个多世纪以来, 仿生学催生了一批杰出的创新成果^[6]。近年来, 随着环境压力的增加, 仿生设计因继承了生物原型的优越性, 优于传统方法, 因此围绕仿生设计的研究成果越来越丰富。由 Biomimicry Guild 团队组建的 Asknature 的生物知识平台, 提供了面向生物信息应用的网络知识数据平台^[7]; 英国 Bath 大学研究者创建了基于 TRIZ 的生物效应知识库^[8]; HELMS 等^[9]利用类比原理提出了生物驱动设计方法, 总结出问题驱动与求解驱动两种生物信息

* 国家自然科学基金(51275153, 51475137)和科技基础性工作专项(2013IM030400)资助项目。20150608 收到初稿, 20151210 收到修改稿

工程应用的方法。CHIU 等^[10]提出了应用自然语言分析手段整合生物信息进行创新的方法,将生物信息应用转化成为语言概率问题求解。上述方法均适用于设计目标单一的单元仿生,即设计流程围绕某一特定的生物特性进行技术转化进而成为产品,其中存在着诸多不利因素,效率低下,结果质量不稳定。任露泉等^[11-13]经过十余年对传统仿生学的研究,提出了生物耦合概念,指出生物通过两个或两个以上不同部分的协同作用或不同因素的耦合作用有效地实现生物的各种功能,充分展现对其生境的最佳适应性。

技术创新已然成为当下激烈市场竞争中企业求存发展的重要途径^[14],高效实用的创新设计策略成为企业技术创新的重要法宝^[15-16]。经验与事实告诉我们,产品设计是一个系统化的工作,设计任务是多目标的^[17],现实的仿生设计中缺少实现多目标同时优化的有效措施,这成为制约其进一步发展的主要因素。提出一种面向系统功能实现的仿生方法,能够在一次设计中完成多个目标生物原型技术实现,在一定程度上可提高设计效率,能有效应用于产品创新设计过程中。

本文提出了多生物效应概念,推导了生物—技术相似性的表达式,提出描述生物系统信息的建模方法;为解决在实际产品设计过程中完成多目标的优化的任务所存在的问题,提出一种利用灰色聚类关联分析的特征聚类分析方法,用来分析、比较、量化生物原型与创新设计目标产品系统之间存在的相似性或关联性,结合一些工具与手段,形成了多生物效应技术实现方法,最后利用纽扣电池生产线中扣圈设备的创新实例对所述方法的可行性与有效性进行了验证。

1 多生物效应概念及其建模

1.1 相关术语界定

为解决生物知识在产品创新设计中的有效利用,研究者提出了生物效应的概念^[18],生物效应是对发明问题解决理论 TRIZ^[19]中效应的扩展,将生物信息转化成为体现功能特性的知识工具。生物耦合原理的发现,促进了生物效应概念的发展,本文提出的多生物效应是生物效应在生物耦合原理概念层面的进一步的延伸。
















多生物效应是生物效应概念的扩展与延伸,是仿生设计中为实现系统的功能,多种相关生物信息的规范描述形式,是一种创新知识工具。多生物效应的应用是以功能的系统实现为目标,能够在—个仿生设计过程中完成多个仿生任务技术实现、优化的方法、策略的统称。

多生物效应的技术实现是指以多生物效应为原型,以面向功能的系统实现为主要目标,以对生物原型的整体技术实现为主要手段的一种可用于产品创新设计过程的方法策略。较传统仿生方法具有更高的设计效率。

1.2 多生物效应建模

多生物效应中包含了生物中的功能信息、系统元件组成信息、生物与环境交互作用信息等,这些信息如果采用传统的基于语言描述方式,无法为多元仿生提供有效地支持。本文提出一种符号化的生物信息建模系统,结合产品功能建模的基本思想,为实现建模方法在生物信息处理中的应用,对现有的方法进行集成与扩展,形成新的系统建模符号系统,包含多个符号集。按照作用不同可分为:功能特性描述符号集、系统构成符号集以及环境交互符号集三类;按照符号的本质不同可以分为实体符号集、关系符号集以及标示符号集三种。面向工程仿生建模方法的符号系统如表 1 所示。利用表 1 中的符号对人的上肢构造为例,如图 1 所示,分析其生物功能实现的过程,本文为规范多生物效应中各效应环节命名,统一为[名词/生物组织名称]+[动词/生物功能]+[效应]的描述形式,能直观地反映特征信息,且易于掌握。建立相应的多生物效应模型如图 2 所示,其中三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate, ATP),二磷酸腺苷(Adenosine diphosphate, ADP)。图 2 中均利用其简称进行表示。

表 1 面向工程仿生建模方法的符号元素表

符 号	名 称	类 别	具 体 含 义
	物质作用	功能-关系	物质变化
	能量作用	功能-关系	能量变化
	信号作用	功能-关系	动作触发
	效应环节	功能-节点	功能单元
	物质节点	系统-节点	系统中物质单元
	作用节点	功能-节点	系统中作用关系
	属性节点	功能-节点	功能作用对象
	导入资源	环境-节点	输入超系统资源
	输出工具	环境-节点	系统末端输出
	系统组件	系统-节点	系统构成组件
	增加作用	功能-标示	对作用结果增加
	减少作用	功能-标示	对作用结果减少
	调节作用	功能-标示	对作用结果调节
	作用过剩	功能-标示	作用过剩
	作用不足	功能-标示	作用不足

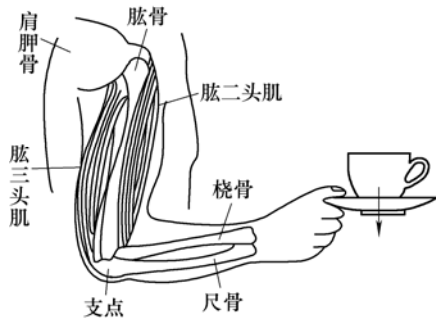


图1 人类手臂构造图

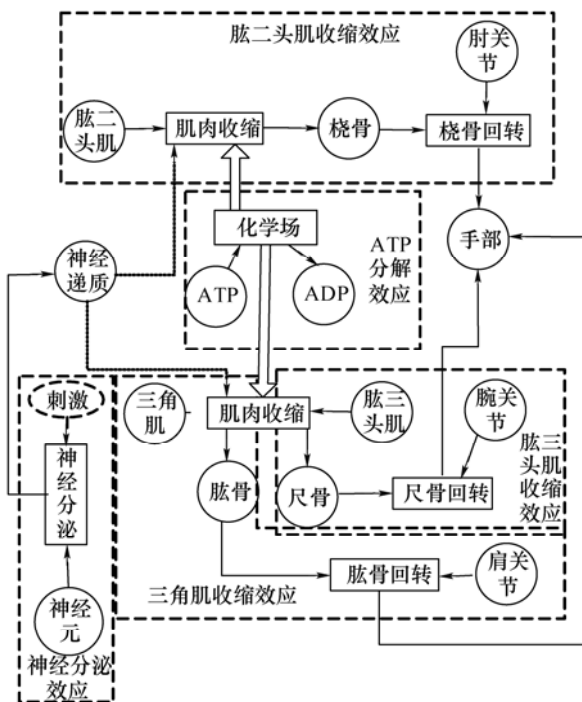


图2 人类手臂构造多生物效应模型

2 生物—技术系统的相似度分析与特征聚类

2.1 灰色聚类关联分析法

灰色聚类关联分析法(Grey cluster relation analysis method, CLA)是将灰色分析与聚类法综合利用的产物^[20-21]。可用于判定在多个指标与分指标下研究对象所属的类型或类别^[22]，可对包含多元属性的系统或对象的特征进行分析。

灰度聚类分析以灰数的白化函数为基础，它可将聚类对象对于不同指标所产生的白化数，按若干灰度进行归纳^[23-24]，从而分析确定聚类对象的归属特性。

设 P 为研究的多生物效应对象元， D_t ($t=1,2,\dots,T$) 为判断研究对象的所属类别， X_i ($i=1,2,\dots,I$) 为对象元 P 的聚类指标，即判断 P 所属 D 归类的评价依据。 X_i 中的聚类指标可以进一步细分，用 $X_{i,j}$ ($j=1,2,\dots,J(i)$) 表示 X_i 下的细化指标。

利用灰色聚类方法分析研究对象的具体步骤可以分为六步^[17]。

(1) 确定 D_t ($t=1,2,\dots,T$) 序列，确定研究对象的归类的类别序列。

(2) 确定评价依据 X_i 的白化函数 f_i ，并针对不同的白化函数进行分类。

(3) 确定聚类权重因子 ω_{ij} 可以利用影响因素法来进行确定。

(4) 利用聚类权重因子 ω_{ij} 、 f_i ，以及各项聚类系数 δ_{ij} ，由 $\delta_{ij} = \sum f_{ij}(d_{ki})\omega_{ij}$ 确定。

(5) 构造研究对象的聚类变量组， $\delta_k = (\delta_{k1}, \delta_{k2}, \dots, \delta_{kt})$ 。

(6) 做研究对象的聚类分析，确定研究对象的类型和类别。

上述基本流程如图3所示。

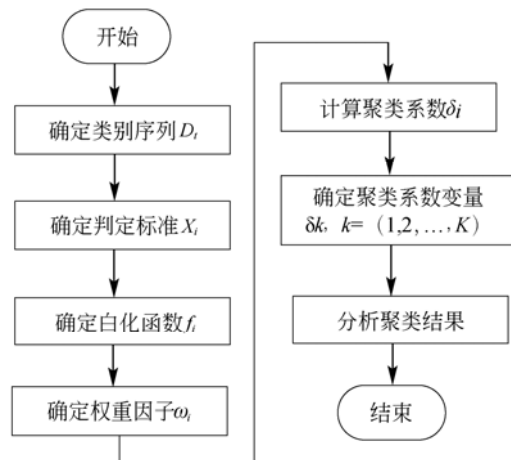


图3 灰度聚类分析法的一般实施步骤

准备工作包括两部分：利用表2中灰色聚类生成信息表对研究对象的特征进行分析；构建不同判定标准的白化函数，根据经验以及前人的分析，常见的白化函数形式大致可以分为五大类：正比例型白化函数，其函数形式如图4a所示；递减型白化函数，其函数形式如图4b所示；反比例型白化函数，其函数形式如图4c所示；带有拐点的白化函数，其函数形式如图4d所示；类似于S曲线的白化函数，其函数形式如图4e所示。常用白化函数如图4所示。

表 2 灰色聚类生成信息表

聚类指标	聚类子项	权重因数	
		D_1	D_i
X_1	$X_{1,1}$	$Y_1(X_1, 1)$	$Y_i(X_1, 1)$
	\vdots	\vdots	\vdots
	$X_{1,j(1)}$	$Y_1(X_1, j(1))$	$Y_i(X_1, j(1))$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
X_i	$X_{i,1}$	$Y_1(X_i, 1)$	$Y_i(X_i, 1)$
	\vdots	\vdots	\vdots
	$X_{i,j(i)}$	$Y_1(X_i, j(i))$	$\dots Y_i(X_i, j(i)) \dots$

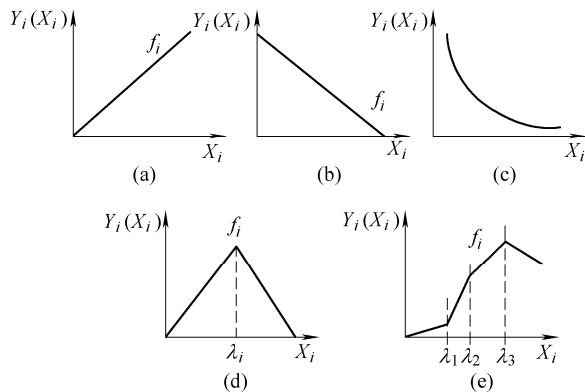


图 4 常用白化函数的一般形式

2.2 生物—技术系统相似度评价与特征聚类

生物原型与技术系统存在的差异性，造成了工程设计人员进行仿生设计中无法直接对生物原型进行转化。但是生物原型存在着系统内的输入/输出转化、对外界资源的应用的特性与产品技术系统是相似的，这种相似性决定了通过一种合理转化方法可以将多生物效应转化成为产品技术系统原理解，灰色聚类分析方法提供了多目标相关性的评价衡量手段，因此可将灰色聚类用于多生物效应与产品技术系统的相似度分析与衡量，因灰色聚类具有多目标同时分析的优势，与传统方式相比有更高精度和效率。

定义 1：多生物效应(Multi biological effects, MEB)可以描述为不同属性的输入/输出流的变化以及对系统外部资源的需求，可用于对生物系统(Biological system, BS)的描述，由式(1)表示

$$BS = MBE = P(F, R)$$

$$F = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n); R = (r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n) \quad (1)$$

式中， F 为不同属性的流变量； R 为系统外部需求资源变量； P 为流变量与资源的作用关系变量。

定义 2：产品技术系统(Technical system, TS)也可用不同属性的流与需求外部资源的集合进行表示如式(2)

$$TS = Q(F, R); F = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n) \\ R = (r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n) \quad (2)$$

式中， F 为不同属性的流的变量； R 为系统外部需求资源的变量；量化函数 Q 表示 F 与 R 作用的函数关系。

定义 3：生物—技术系统的相似度可通过系统不同层次信息的相似程度进行量化和判定，设有 2 个类 BS 和 TS, 设其特性集分别为 $P(\text{BS})$ 和 $P(\text{TS})$, 各自特性数目的大小记为 $|P(\text{BS})|$ 和 $|P(\text{TS})|$ 。若它们各自的特性集 $P(\text{BS})$ 和 $P(\text{TS})$ 中相同特性越多, 则认为 BS 和 TS 较为接近, 反之则较远, 由式(3)表示

$$\text{Sim}_i(\text{BS}, \text{TS}) = \frac{|P_i(\text{BS}) \cap P_i(\text{TS})|}{|P_i(\text{BS})| + |P_i(\text{TS})| - |P_i(\text{BS}) \cap P_i(\text{TS})|} \quad (3)$$

$$\text{Sim}(\text{BS}, \text{TS}) = \sum_{i=0} \omega_i \cdot \text{Sim}_i(\text{BS}, \text{TS}) \text{ 满足 } \sum_{i=0} \omega_i = 1$$

式中， $\text{Sim}_i(\text{bs}, \text{ts})$ 表示生物与技术系统在第 i 层次上的相似度； $\text{Sim}_i(\text{BS}, \text{TS})$ 表示生物与技术系统整体相似度； ω_i 为第 i 层次上的相似度权重因子。

利用相似度式(3)结合聚类分析的相关原理，对生物—技术系统相似度进行量化。需要建立生物—技术聚类分析表，其形式如表 2。确定分析表中的归类类别，特征项、特征项的白化函数、聚类权重因子等指标。其中，归类类别由用户需求分析可得。

利用特征聚类可对目标设计产品系统与多生物效应相似度量，可对满足设计目标的多个多生物效应择优选取设计原型，相似度的量化能为多生物效应中各环节的技术结构设计提供决策依据，并可在所获的多种技术方案中进行择优。特征聚类与多种创新工具结合形成了多生物效应技术求解的关键使能方法。

3 多生物效应技术求解关键工具研究

3.1 多生物效应信息在产品功能设计中应用

在产品设计中，设计者对设计任务的确定是逐渐明确的。一般而言，设计者会首先确定目标产品的主要功能以及支撑主要功能实现的若干辅助功能，可以将这些功能特性作为检索条件，从多生物效应知识库找到能够满足目标产品的生物原型。设计者对满足检索条件的多生物效应进行分析，利用多生物效应中效应链特征，总结出目标产品的功能结构缺少的必要环节。因生物与技术系统存在差异性，在构建产品功能结构过程中需利用流相容性原则^[25]，进行产品效应链的组合，为保证流的完整性，可能需要补充效应环节，但与传统方法相比仍能在

一定程度上提高设计效率。通过对多生物效应特性的利用得到了完整系统的产品功能结构，与传统的方法相比，设计者免去从用户需求分析中分析功能要求的，功能分解，建立功能结构，将离散功能结

构组合成完整系统等一系列的功能设计工作。利用多生物效应，可以直接从多生物效应中得到产品的功能结构，具有一定的优越性，两种设计流程对比如图5所示。

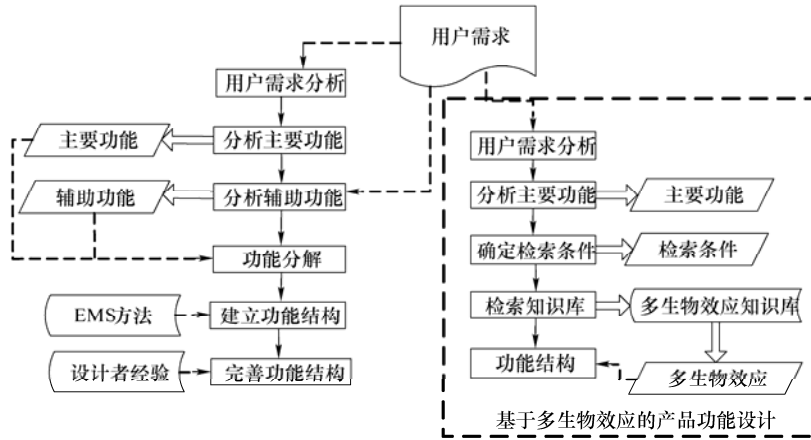


图5 基于多生物效应产品功能设计流程图

3.2 基于属性特征的生物—技术系统匹配

多生物效应中的生物功能信息的描述具有生物学科的专业性和特殊性，与物理、化学、几何等其他自然学科的知识相比，应用到技术系统中的难度较大。利用技术和生物功能之间的相似性，建立一个通用的特征集，可以实现这种快速匹配。这种通用特征集有两部分：属性特征集和操作特征集。利用属性特征实现生物—技术系统匹配原理如图6所示。基于生物属性能够实现从多生物效应中的生

物功能向产品系统的转化，其原理过程如图7所示。

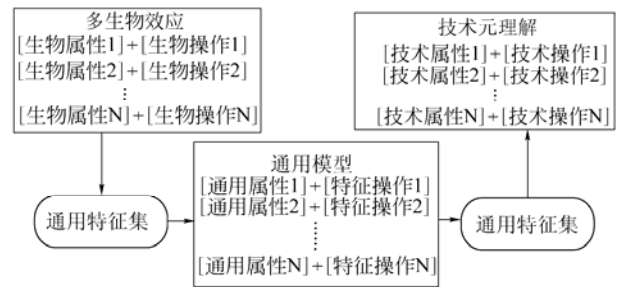


图6 基于属性特征实现生物—技术系统匹配图

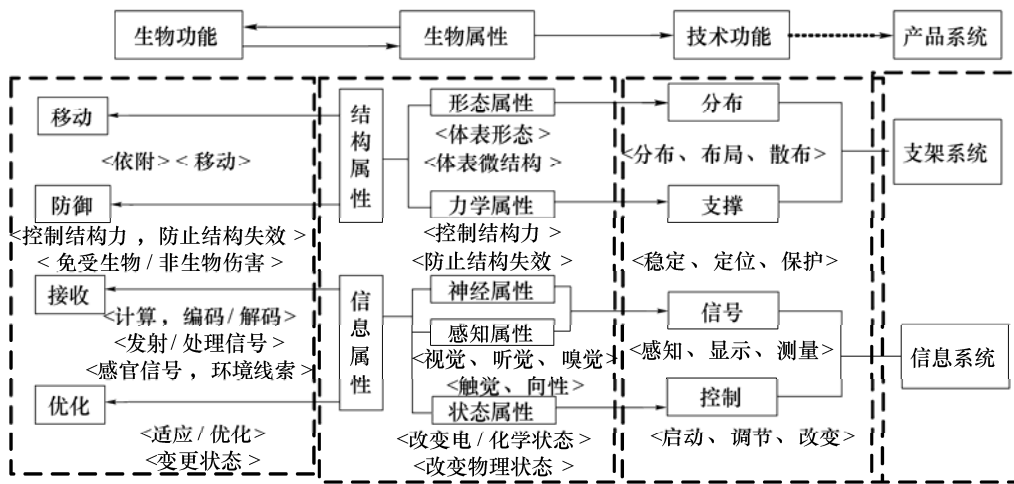


图7 基于生物属性的生物功能的技术原理图

利用通用特征方法，工程设计人员需将检索条件规范成<动作要素>+(通用属性)的形式，其中动作元素如表3所示，通用属性有三大类共35个详见文献[26]中所述，其描述形式为：学科_大类_子类，例如位置可被描述为(物理_位置_位置)。

3.3 基于特征聚类生物功能技术求解

特征聚类方法为多生物效应中的生物功能技术求解提供了科学的量化依据，利用特征聚类的原理，可分析多生物效应的功能性、属性及系统等多个方面的特征信息，从中寻找相似的技术效应或技

表 3 通用操作特征集

一级	二级	技术操作	生物操作
量变	增加	增加、提高、加强增多	增多、提高、加强
	减少	降低、减少、抑制减弱	抑制、吸收、排出
量变	保持	调节、控制、改变保持	反射、调节、应激、维持
	破坏	破坏、去除、分解	消灭、分解、代谢、吞噬
质变	建造	产生、创造	分泌、产生、分裂、增殖、合成
	转化	转化、转变	转化
方向变化	形变	弯曲、变形	弯曲、变形
测量	测量	测量、检测、收集	感受、感应、收集

术方案对多生物效应的特征元素进行转化。引入灰色聚类量化时需要建立生物功能单元的特征分析表，如表 4 所示，通过对属性、功能、效应三类层面上的特征项进行聚类，能够帮助设计人员在科学效应库中找到与生物功能相似的技术原理，并且能够对这些原理的相似度进行量化评价。

表 4 生物功能单元的特征分析表

特征序列	特征项	生物特征	技术特征	聚类参数
属性特征序列	属性名称	生物属性	技术属性	A_1
	操作关系	生物操作	技术操作	A_2
	作用对象	作用对象特征	作用对象特征	A_3
功能特征序列	流的名称	功能流	功能流	F_1
	功能关系	作用动词	作用动词	F_2
效应特征序列	效应类型	效应类别	效应类别	E_1
	环境支持	环境条件	环境条件	E_2

3.4 基于多生物效应的产品技术原理解构建

多生物效应中的功能的技术求解，仅是对若干个离散的生物功能的求解，只完成了产品系统的局部原理或结构的仿生设计，多生物效应提供的信息还可进一步利用，形成满足功能实现的系统层面构建的技术方案，即技术系统原理解，实现产品创新。由于生物与产品技术系统的相似度呈现在不同的层面上，多生物效应的技术转化也需处理不同层面上的信息，既包含功能层次中效应环节的技术转化，也包含结构层面的生物组织、器官的技术转化。这种统一于系统实现的多层次目标的同时转化也是多元仿生的一个重要特征。这个过程的实现需要利用已有多种创新设计工具与灰色聚类方法的集成，该转化原理如图 8 所示。

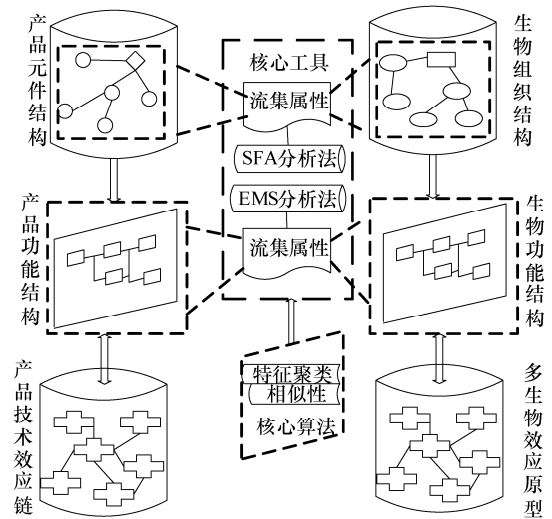


图 8 多生物效应中生物—技术转化原理图

产品技术原理解构建体现为两个层次，一是将多生物效应中的效应环节用技术效应进行替换，二是用已有技术系统或元件对生物组织或器官进行替换。按形式特点可将产品原理解构建分为三种：基于效应链重组的系统构建，基于元件系统的构建和基于产品系统完整性验证的系统构建。将上述方法进一步整合，可得到基于多生物原型的产品技术系统原理解构建一般流程，如图 9 所示。

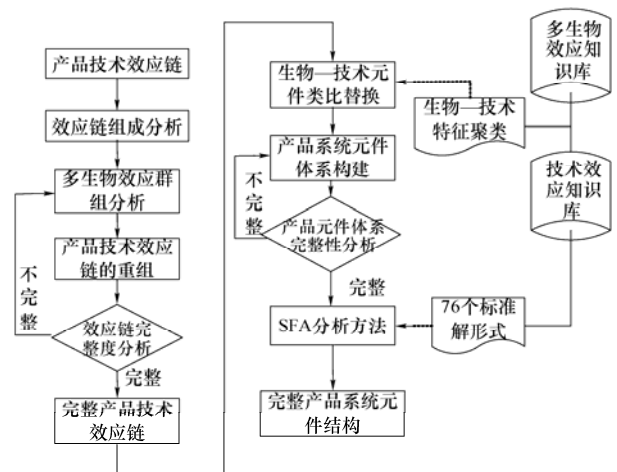


图 9 基于多生物效应产品技术系统原理解构建流程图

3.5 多生物效应技术求解模型

多生物效应为产品仿生设计提供了丰富可用的生物原型。特征聚类方法为产品设计中的多目标优化提供量化依据，结合生物—技术间的相似类比推理，完成多生物效应中各效应环节的技术实现。综上，形成多生物效应技术求解模型如图 10 所示。设计模型的具体操作实现流程按照次序可以分为四个阶段：设计任务分析、生物原型的检索与分析 and 目标产品的功能设计。生物原型的技术实现及目标产品的系统组、元件设计，产品技术方案择优与

可行性分析。每个阶段任务都可由若干具体操作步骤实现。

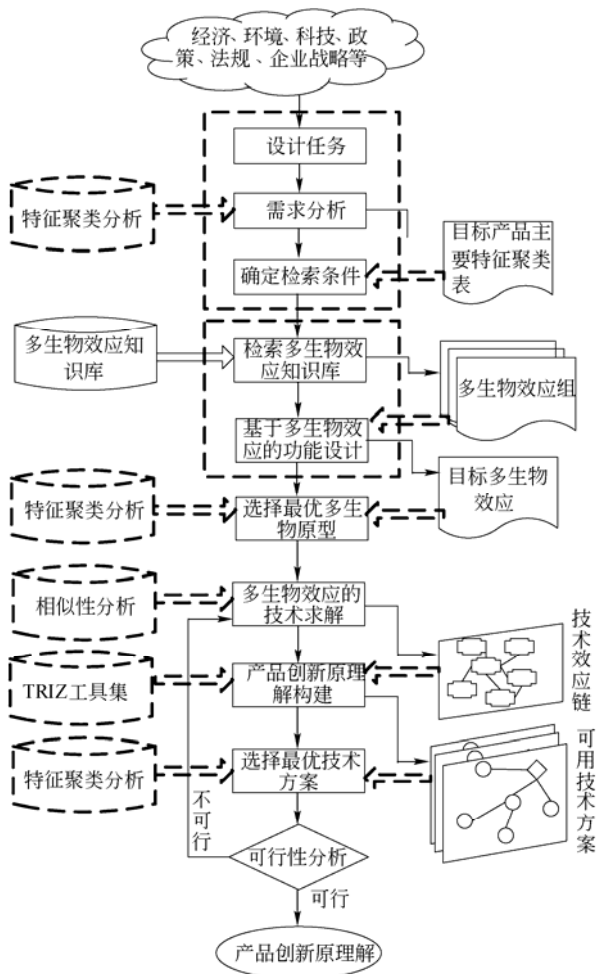


图10 多生物效应技术求解模型

求解模型包含工具方法、操作流程及过程文档三个模块。工具方法是完成设计过程的支撑方法与工具，包括特征聚类分析法、相似性分析法、多生物效应知识库及 TRIZ 工具集；操作流程模块是设计模型实现的具体流程与实施步骤；过程文档模块是设计流程生成的设计文档和分析对象的集合，包括特征聚类表、多生物效应组、技术效应链和产品功能结构与技术方案。

4 设计实例

纽扣电池因其体积小，容量大等优点，成为电子产品中电路板供电的主要电源。但在纽扣电池将密封垫圈扣入进极壳的这一生产工序中仍然缺少高效的自动化设备，依旧以人工扣圈的方法实现，劳动量大，人工成本高。因此需要设计一种自动化设备能够完成上述操作过程。

4.1 目标产品的用户需求与设计任务分析

4.1.1 确定设计任务并进行需求分析

设计一种可替代人工的纽扣电池扣圈设备，对其功能进行设计，可以得到目标产品的主要功能模型如图 11 所示。

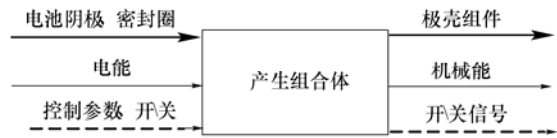


图11 扣圈设备功能模型

根据上述图 11 中的功能模型，利用上文所述的建立特征聚类列表的方法，可以得到目标产品的功能聚类列表如表 5 所示。表 5 中的各类权重因数由多个设计参与者按照个人经验及判断给出。

表5 扣圈设备的主要功能要素聚类分析表

要素类型	特征项	白化函数	小项权因子	权重因子
功能特征	移动固体	1类	0.30	0.5
	转化能量	1类	0.25	0.5
	定位固体	1类	0.20	0.5
	挤压固体	1类	0.15	0.5
	减少冲击	1类	0.10	0.5

4.1.2 确定检索条件

将由需求分析得到的特征项需要转化为通用特征重新表达，才能用于对满足设计要求的多生物效应进行检索。对应目标产品的检索信息如表 6 所示。

表6 用于通用特征法检索的关键信息列表

特征项名称	特征项类型	检索条件信息
移动固体	功能要求	<改变>+(物理_位置_位置)
转化能量	功能要求	<改变>+(物理_能量_能量)
定位固体	功能要求	<改变>+(物理_位置_位置)
挤压固体	功能要求	<增强>+(物理_力学_压强)
减少冲击	资源约束	<降低>+(物理_振动_冲击)

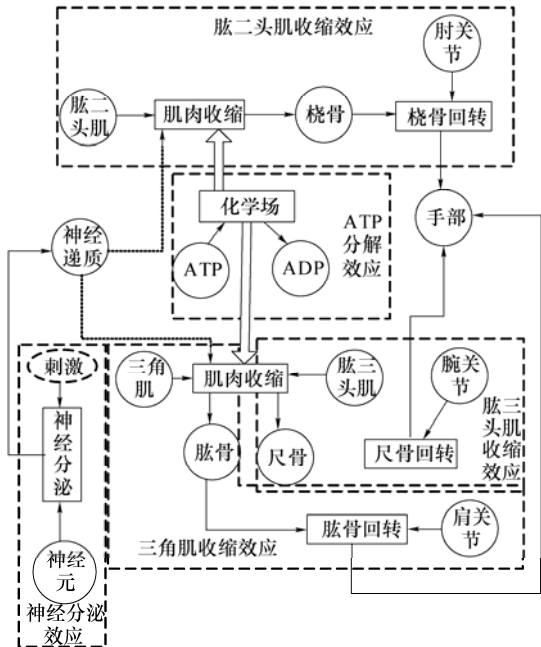
4.2 满足目标产品的最优多生物效应确定

4.2.1 多生物效应检索结果分析

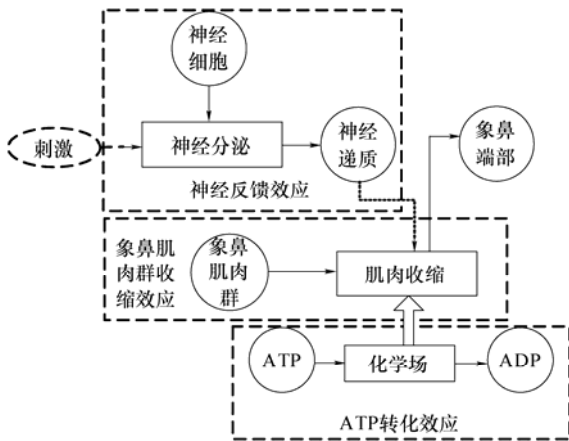
利用检索条件，检索多生物原型知识库，因检索特征项较多，未检索到与表 6 中所有检索条件匹配的多生物效应，其中满足<改变>+(物理_位置_位置)与<增强>+(物理_力学_压强)以及<改变>+(物理_能量_能量)条件的多生物效应有两个，分别是灵长目上臂构造多生物效应及象类鼻子构造多生物效应，满足<降低>+(物理_振动_冲击)条件的多生物效应有两个分别是猫足垫构造多生物效应和猫头鹰头部吸振多生物效应。利用基于符号的多生物效应建模方法利用表 1 中的符号，建立相应的多生物效应模型如图 12a~12d 所示。

4.2.2 基于多生物效应的目标产品功能设计

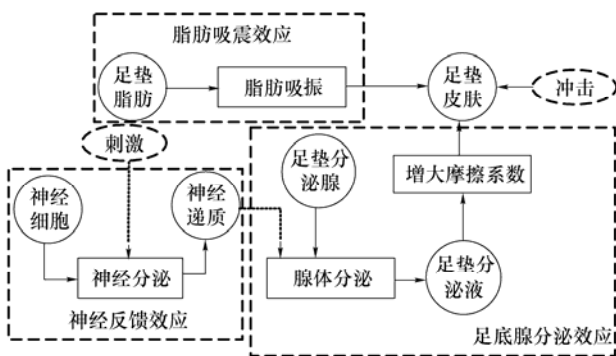
分析图 12a~12d 中的多生物效应模型,将其中完成主要功能的支撑环节中相关信息进行提取,对图 10 的功能模型进行扩展与补充形成扣圈设备的功能结构,如图 13 所示。对完善后的目标产品的功能结构中提取新的产品特征,这些特征包括对资源



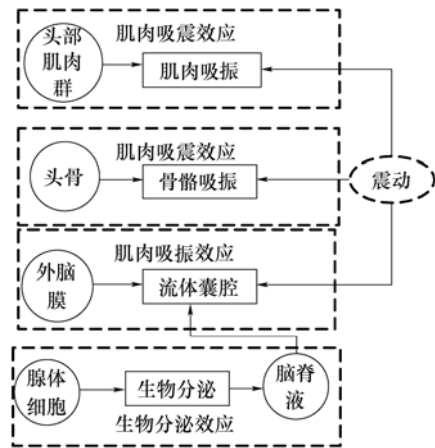
(a) 灵长目上臂构造多生物原型图



(b) 象类鼻子构造多生物原型图



(c) 猫足垫构造多生物原型图



(d) 猫头鹰头部吸振多生物原型图

图 12 多生物效应检索结果示意图

的应用特征及核心技术特征两部分。这两部分的辅助特征要素的聚类分析参数如表 7 所示。表中的相关赋值由多名设计者根据经验给出。

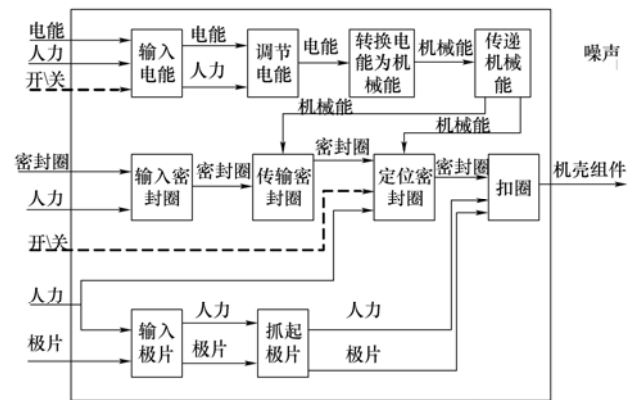


图 13 扣圈设备的功能结构图

表 7 扣圈设备的辅助要素聚类分析表

要素类型	特征项	白化函数	小项权因子	权重因子
资源特征	作用时间	2 类	0.30	0.3
	占用空间	2 类	0.20	0.3
	发出噪声	2 类	0.25	0.3
	能量消耗	2 类	0.25	0.3
核心功能	能量转化实现	1 类	0.25	0.2
技术特征	末端执行器	1 类	0.50	0.2
	系统成熟	5 类	0.25	0.2

4.2.3 利用特征聚类选择最优多生物效应

利用表 6 中目标产品的辅助特征项,对满足主要特征条件的多生物效应进行分析,从中选择最优的多生物效应作为产品设计的原型。建立多生物效应可行性分析表 8,利用资源特征项对检索所得的多生物原型进行特征聚类,以确定最优方案。各项聚类数值为多个设计参与者给出 0~1 数值的平均值。

表8 多生物原型可行性特征聚类分析表

类别	特征项	聚类参数	1-1	1-2	2-1	2-2
资源	时间消耗	A_{2-1}	0.7	0.5	—	—
	空间消耗	A_{2-2}	0.6	0.3	0.3	0.6
	能量消耗	A_{2-3}	0.6	0.5	0.2	0.7
	有害输出	A_{2-4}	—	—	0.5	0.3
	能量转化形式	A_{3-1}	0.3	0.5	0.3	0.5
核心技术	末端作用效果	A_{3-2}	0.5	0.5	0.3	0.5
	技术成熟度	A_{3-3}	0.8	0.3	0.6	0.4

利用权重因子与聚类参数进行特征值计算

$$\delta_i = (0.1 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.05 \ 0.15 \ 0.15 \ 0.35)$$

$$X = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.6 & 0.6 & - & 0.3 & 0.5 & 0.8 \\ 0.5 & 0.3 & 0.5 & - & 0.5 & 0.5 & 0.3 \\ - & 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.6 \\ - & 0.6 & 0.7 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$f_{2-i} = 1-x; \quad f_{3-1}, f_{3-2} = x; \quad f_{3-3} = \begin{cases} 2x, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1, & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

$$D = \sum(\delta_i \cdot f_i(X_i)) = |0.60 \ 0.555 \ 0.655 \ 0.55| \quad (5)$$

有计算结果： $D_{1-1} > D_{1-2}$, $D_{2-1} > D_{2-2}$, 因此选用灵长目上臂构造多生物效应与猫足垫构造多生物效应作为目标产品设计的原型系统。

4.3 多生物效应的技术求解与最优技术方案选择

4.3.1 最优多生物效应中的各生物效应的求解过程

利用图 10 中的方法对最佳生物原型中的生物功能进行技术求解，确定技术效应的特征项的算子变量值。功能特性的白化函数是正比例型，因此参数值越大，其有效性越高。相对功能特性，还需以各技术效应的技术成熟度和成本以及资源等约束条件作为设计参考。最终可以得到的技术方案如表 9 所示。

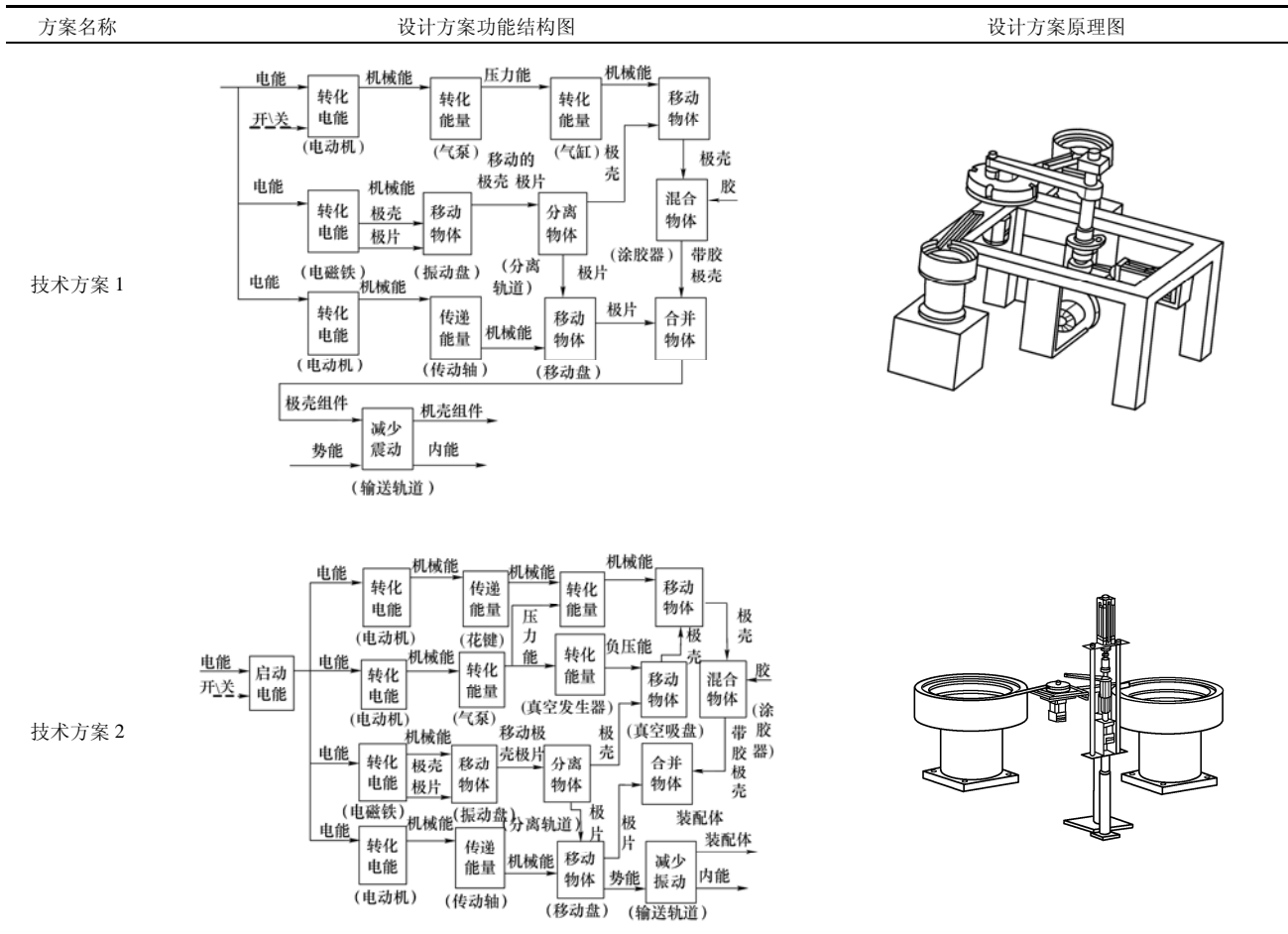
表9 基于特征聚类生物原型技术求解方案列表

特征项	生物效应	方案1	方案2	方案3
接收信号	光电元件	光电元件	压电元件	霍尔元件
传递信号	神经分泌效应	电子功放元件	电子功放元件	电子功放元件
改变长度	肌肉收缩效应	凸轮机构	气缸	花键
改变方向	关节效应	回转机构	连杆机构	摆动气缸
转化能量	ATP 转化效应	电动机	电动机	电动机、电磁铁
减少振动	脂肪吸振效应	弹性体吸振	泡沫体吸振	海绵体吸振

4.3.2 多生物效应技术实现的原理方案

将表 9 中的相关信息进行组合，可以形成满足设计需求的技术方案。表 10 给出了三种技术方案各自的功能结构与原理示意图。

表10 三种技术方案的简图列表



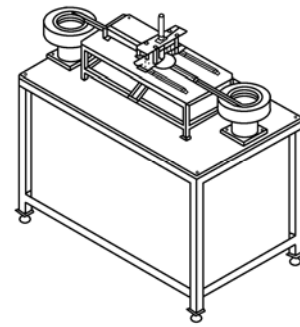
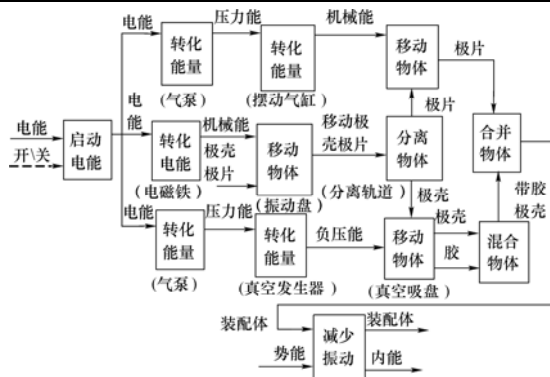
(续)

方案名称

设计方案功能结构图

设计方案原理图

技术方案3



4.3.3 技术原理方案的评价与最优方案的选择

利用聚类分析，评价三个可行技术方案的综合性能指标，建立与表5、7中所有特征项对应的技术方案综合评价分析表如表11。各项聚类数值为多位行业专家给出0~1数值的平均值。

表11 技术方案综合评价特征聚类分析表

要素类型	特征项名称	方案1	方案2	方案3
功能特征	移动固体	0.3	0.6	0.7
	定位固体	0.3	0.5	0.5
	挤压固体	—	—	—
	减少冲击	0.5	0.5	0.5
资源特征	作用时间	0.8	0.5	0.4
	占用空间	0.8	0.4	0.6
	发出噪声	0.8	0.5	0.6
	能量消耗	0.6	0.4	0.5
	能量转化实现	0.7	0.5	0.4
核心技术特征	末端执行器	0.3	0.5	0.6
	技术成熟	0.3	0.5	0.7

利用表5、7中的特征项的相关聚类参数， $\delta_i = \Omega_i \omega_i$ 计算特征技术权重变量如下

$$\delta_i = \langle 0.25, 0.125, 0.075, 0.05, 0.09, 0.06, 0.075, 0.075, 0.05, 0.1, 0.05 \rangle$$

$$X = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.3 & - & 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.6 & 0.7 & 0.3 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 & - & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.7 & 0.5 & - & 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{bmatrix}$$

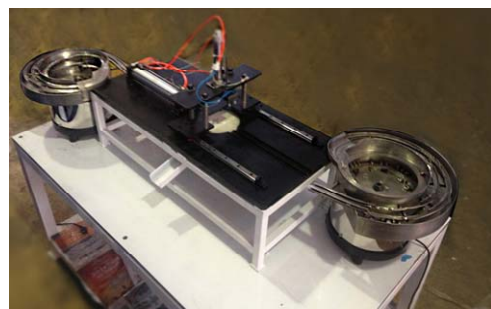
$$f_{1-i}, f_{3-1}, f_{3-2} = x \quad f_{2-i} = 1-x \quad f_{3-3} = \begin{cases} 2x, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1, & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$D = \sum(\delta_i \cdot f_i(X_i)) = |0.3075 \quad 0.526 \quad 0.538| \quad \text{有 } D_3 > D_2 > D_1$$

据分析计算，方案3的综合权重最高，为验证结果，如利用传统方法对方案2、3中的技术特征进行比较，也能得出方案3采用的执行元件统一于气动元件，在技术复杂程度方面优于方案2，与利用聚类分析方法得到的结论一致。因此将方案3作为最终技术方案，经详细设计与调试得到样机，其图样如图14所示。



(a) 试制样机正视图



(b) 试制样机俯视图

图14 创新设计试制样机图

5 结论

(1) 提出的多生物效应概念，利用生物知识对复杂的多目标仿生问题提出了面向功能系统实现的生物知识的解决方案，为工程设计人员进行创新设计尤其是多目标优化的仿生设计建立了远域类比源。

(2) 主要研究了多生物效应技术实现中的关键技术。利用特征聚类原理和类比原理进行目标产品与多生物效应之间的转化，提出了描述多生物效应信息的建模方法，建立了基于类比的生物功能技术求解模型，实现了生物知识与工程技术转化；多生物效应的产品创新原理解构建模型并集合其他方

法、工具形成了多生物效应驱动的多元仿生设计模型。系统化多元转化、优化的仿生方式能够使工程设计人员从自然生物中获取新技术或新原理,并有助于形成产品创新。

(3)虽然在利用生物知识进行仿生创新设计方面进行了一些有益探索,但仍有很多问题有待进一步研究解决,如检索算法、生物效应抽取与效应知识库扩建。另外,整个流程从人工向计算机自动化的转变等都是亟待深入研究的课题。

参 考 文 献

- [1] BENYUS J M. Biomimicry: Innovation inspired by nature[M]. New York: Harper Collins Publishers Inc, 2002.
- [2] SHU L, UEDA K, CHEONG H. Biologically inspired design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60: 673-693.
- [3] 岑海堂, 陈五一. 小型翼结构仿生设计与试验分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 286-290.
CEN Haitang, CHEN Wuyi. Structural bionics design and experimental analysis for small wing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 286-290.
- [4] ARTHUR B. The structure of invention[J]. Research Policy, 2007, 36: 274-287.
- [5] 高飞, 肖刚, 潘双夏, 等. 产品功能模块划分方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 29-35.
GAO Fei, XIAO Gang, PAN Shuangxia, et al. Method of product function module partition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 29-35.
- [6] 张德远, 蔡军, 李翔, 等. 仿生制造的生物成形方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 88-92.
ZHANG Deyuan, CAI Jun, LI Xiang, et al. Bioforming methods of bionic manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 88-92.
- [7] Biomimicrytaxonomy[EB/OL]. [2015-01-02]. <http://asknature.org/aof/browse>.
- [8] VINCENT J, BOGATYREVA O, PAHL A, et al. Putting biology in triz: Biological effect database[J]. Creativity and innovation management, 2005, 14(1): 66-72.
- [9] HELMS M, VATTAM S, GOEL A. Biologically inspired design: Process and products[J]. Design Studies, 2009, 30(5): 606-622.
- [10] CHIU I, SHU L. Bridging cross-domain terminology for biomimetic design[C] // Design Engineering Technical Conf. September 24-28, 2005, Long Beach, CA: Proc. ASME Int., 2005: 673-693.
- [11] 任露泉, 梁云虹. 生物耦合及其分类学与特征规律研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(1): 5-13.
REN Luquan, LIANG Yunhong. Biological couplings: Classification and characteristic rules[J]. Sci. China, Tech. Sci., 2010, 40(1): 5-13.
- [12] 任露泉, 梁云虹. 生物耦合功能特性及其实现模式[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(3): 223-230.
REN Luquan, LIANG Yunhong. Biological couplings: Function characteristics and implementation mode[J]. Sci. China, Tech Sci., 2010, 40(3): 223-230.
- [13] 任露泉, 梁云虹. 生物耦合生成机制[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(5): 1348-1357.
REN Luquan, LIANG Yunhong. Generation mechanism of biological coupling[J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(5): 1348-1357.
- [14] 张曙. 技术创新——企业发展的原动力[J]. 机械工程学报, 2000, 36(1): 2-6, 23.
ZHANG Shu. Innovation is original power for enterprise development[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(1): 2-6, 23.
- [15] 杨晓西, 罗礼卿. 21世纪技术创新的模式探讨[J]. 华南理工大学学报, 2002, 30(11): 36-40.
YANG Xiaoxi, LUO Liqing. Inquiry into the technical innovation patterns in the 21st century[J]. Journal of South China University of Technology, 2002, 30(11): 36-40.
- [16] 陈月梅, 徐康宁. 技术特性与企业技术创新模式选择[J]. 技术经济与管理研究, 2014(3): 19-23.
CHEN Yuemei, XU Kangning. Influence of different characteristics of technology to innovation Patterns of enterprise [J]. Technoeconomics & Management Research, 2014(3): 19-23.
- [17] ASOK G, BHATTA S. Design patterns: A unit of analogies transfer in creative design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2004, 18(2): 85-94.
- [18] 赵华, 曹国忠. 基于生物效应的概念设计过程研究[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(3): 105-110.
ZHAO Hua, CAO Guozhong. Research on conceptual design based on biological effects[J]. Machine Design & Research, 2011, 27(3): 105-110.
- [19] ALTSHULLER G. The innovation algorithm triz: Systematic innovation and technical creativity [M]. Worcester: Technical Innovation Center Inc, 1999.
- [20] 熊和金, 陈绵云, 瞿坦. 灰色聚类的几个问题[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(5): 7-10.

- XIONG Hejin, CHEN Jinyun, QU Tan. Some questions on grey clustering[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1999, 21(5): 7-10.
- [21] 邱学军. 灰色聚类关联分析法及其应用[J]. *系统工程理论与实践*, 1995, 15(1): 15-21.
- QIU Xuejun. The grey cluster relation analysis method and its applications[J]. *Systems Engineering -Theory & Practice*, 1995, 15(1): 15-21.
- [22] 刘旺盛, 杨帆, 李茂青, 等. 需求可拆分车辆路径问题的聚类求解算法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(4): 535-541.
- LIU Wangsheng, YANG Fan, LI Maoqing, et al. Clustering algorithm for split delivery vehicle routing problem[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(4): 535-541.
- [23] 贺玲, 吴玲达, 蔡益朝. 数据挖掘中的聚类算法综述[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(1): 10-13.
- HE Ling, WU Lingda, CAI Yichao. Survey of clustering algorithms in data mining[J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(1): 10-13.
- [24] 肖新平. 灰色聚类分析法的改进及其应用[J]. *系统工程*, 1996, 14(2): 71-74, 77.
- XIAO Xinping. An improved method of grey cluster and its applications[J]. *Systems Engineering*, 1996, 14(2): 71-74, 77.
- [25] 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 Guozhong, TAN Runhua, SUN Jianguang. Process and realization of functional design based on extended-effect model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 157-167.
- [26] 刘伟. 多生物效应驱动的产品创新原理解构建研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- LIU Wei. Research on products innovation principle solution driven by multi biological effects[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.

作者简介: 刘伟, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为产品创新设计理论及应用。

E-mail: lwofhebut@126.com

曹国忠(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授。主要研究为产品创新设计理论及应用。

E-mail: caoguozechong@hebut.edu.cn

檀润华, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品创新设计理论及应用。

E-mail: rhtan@hebut.edu.cn

于菲, 女, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为产品创新设计理论及应用。

E-mail: yufeijixie3ban@hebut.edu.cn