



ISSN 0577-6686
CODEN CHHKA2

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



CMES 中国机械工程学会主办

半月刊 | 11 / 2012
第 48 卷

ISSN 0577-6686



9 770577 668125

11 >

本刊荣获

- ★ 首届“国家期刊奖”(1999年)
- ★ 第二届“国家期刊奖”(2003年)
- ★ 第三届“国家期刊奖”(2005年)
- ★ “中国期刊方阵”双高期刊
- ★ 中国科协精品科技期刊工程项目资助期刊
- ★ 国家自然科学基金委员会资助
- ★ 第二届中国出版政府奖期刊奖

机械工程学报

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

2012年第48卷第11期 6月5日出版

Vol.48 No.11 Published on June 5, 2012

(半月刊, 1953年创刊)

(Semimonthly, started in 1953)

版权所有: ©2012 Journal of Mechanical Engineering

主管: 中国科学技术协会

主办: 中国机械工程学会

编辑出版: 《机械工程学报》编辑部

编辑部地址: 北京百万庄大街22号(100037)

主编: 宋天虎

常务副主编: 王淑芹

编辑部主任:

副主编: 郑小光

责任编辑: 岑伟

电话: (010)88379907

传真: (010)88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

印刷: 北京机工印刷厂

国内发行: 北京报刊发行局

订购处: 全国各地邮局

Responsible Department:

China Association for Science and Technology

Sponsored by:

Chinese Mechanical Engineering Society

Edited and Published by:

Editorial Office of JOURNAL OF
MECHANICAL ENGINEERING

Address:

22 Baiwanzhuang Dajie, Beijing 100037, China

Chief Editor: Song Tianhu

Executive Chief Editor: Wang Shuqin

Deputy Chief Editor: Zheng Xiaoguang

Tel: 0086-10-88379907

Fax: 0086-10-88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

Distributed Abroad by:

China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing, China)

Code: M201

《机械工程学报》董事会

董事长:

宋天虎(中国机械工程学会)

副董事长:

王文斌(机械工业信息研究院)

董事:

王田苗

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院)

王庆丰

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室)

王时龙(重庆大学机械传动国家重点实验室)

王祖温(大连海事大学)

王润孝(西北工业大学)

邓宗全(哈尔滨工业大学)

仪垂杰(青岛理工大学)

刘宏民(燕山大学)

吕明(太原理工大学)

孙汉旭(北京邮电大学自动化学院)

闫献国(太原科技大学)

严新平(武汉理工大学)

何存富(北京工业大学)

张义民(东北大学机械工程与自动化学院)

张宪民(华南理工大学机械工程学院)

李大勇(哈尔滨理工大学)

李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院)

李杨民(澳门大学)

李剑峰(山东大学)

李荣彬(香港理工大学)

李荣德(沈阳工业大学)

杨兆军(吉林大学)

邵新宇(华中科技大学机械科学与工程学院)

季林红(清华大学精密仪器与机械学系)

姚振强(上海交通大学机械与动力工程学院)

胡燕平(湖南科技大学)

赵韩(合肥工业大学)

项昌乐(北京理工大学)

徐西鹏(华侨大学)

徐金梧(北京科技大学)

袁寿其(江苏大学)

贾振元(大连理工大学机械工程学院)

郭隐彪(厦门大学)

高健(广东工业大学)

梅雪松(西安交通大学机械工程学院)

黄田(天津大学机械工程学院)

黄明辉(中南大学机电工程学院)

黄洪钟(电子科技大学机械电子工程学院)

葛世荣(中国矿业大学)

韩旭(湖南大学机械与运载工程学院)

谭援强(湘潭大学机械工程学院)

檀润华(河北工业大学)

ISSN 0577-6686

CN11-2187/TH

国内邮发代号: 2-362 国外发行代号: M201

国内定价: 35元/期, 840元/年

机械工程学报

JIXIE GONGCHENG XUEBAO

2012年第48卷第11期 6月5日出版

目次

*** 创新设计专栏 ***

- 机械功能对称的概念体系及其应用 冯培恩 曾令斌 邱清盈等 (1)
- 基于技术进化理论的破坏性创新预测与实现模型 孙建广 檀润华 江屏 (11)
- 异构模块组合耦合分析的完全关联矩阵 陈羽 滕弘飞 (21)
- 面向功能创新的功能进化、组合与失效研究 曹国忠 郭海霞 檀润华等 (29)
- 专利设计知识的创新性评估方法及其在创新设计中的应用 邱清盈 薛驰 冯培恩等 (39)
- 基于功能裁剪的专利规避设计 江屏 罗平亚 孙建广等 (46)
- 模块化产品族演进创新方法研究 侯亮 王浩伦 穆瑞等 (55)
- 基于TRIZ的可拆卸联接改进设计 刘志峰 胡迪 高洋等 (65)
- 集成TRIZ的产品生态设计方法研究 刘征 潘凯 顾新建 (72)
- TRIZ辅助功能周期确立方法 张鹏 檀润华 (78)
- 基于复杂网络与公理设计的产品平台设计方法 刘曦泽 祁国宁 纪杨建等 (86)
- 基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法 肖人彬 程贤福 陈诚等 (94)
- 基于相似性与结构敏感性分析的产品平台设计过程模型 张换高 赵文燕 江屏等 (104)

机械学

机构学及机器人

- 虚拟轴机床并联机构的自适应动态滑模运动控制 高国琴 郑海滨 (119)
- 基于蛇形魔方机构分析的模块化可重构机构理论 丁希仑 吕胜男 (126)
- 基于非瞬时支链位形设计的并联机构内部奇异消除方法 刘延斌 李志松 韩建海 (136)

机械动力学

- 高速主轴系统静止及运转状态下动力学特性对比分析 孙伟 汪博 闻邦椿 (146)
- 调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩分析计算 葛研军 聂重阳 辛强 (153)
- 二维声学数值计算的径向插值有限元法 夏百战 于德介 姚凌云 (159)
- 甚低频拖曳天线的稳态动力学研究 郑小洪 侯志强 韩维等 (166)

制造科学与技术

制造工艺与装备

- 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理 言兰 姜峰 融亦鸣 (172)
- 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制 潘日 王振忠 郭隐彪等 (183)
- 基于 Hermite 插值的复杂光学曲面车削加工路径规划 王兴盛 康敏 (191)

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

Vol.48 No.11 June 2012

CONTENTS

- Research on Mechanical Function Symmetry Architecture and Its Application
..... FENG Peien ZENG Lingbin QIU Qingying et al (1)
- Model for Roadmapping Disruptive Innovation Based on Technology Evolution Theory
..... SUN Jianguang TAN Runhua JIANG Ping (11)
- Comprehensive Dependency Matrix for Heterogeneous Modular Combination
Coupling Analysis..... CHEN Yu TENG Hongfei (21)
- Research on Function Evolution, Combination and Failure Mode for Product Function Innovation
..... CAO Guozhong GUO Haixia TAN Runhua et al (29)
- Novelty Evaluation Method of Patent Design Knowledge and Its Application in Creative Design
..... QIU Qingying XUE Chi FENG Peien et al (39)
- Method about Patent Design Around Based on Function Trimming
..... JIANG Ping LUO Pingya SUN Jianguang et al (46)
- Research on the Evolution & Innovation for Modular Product Family
..... HOU Liang WANG Haolun MU Rui et al (55)
- TRIZ Based Revised Design for Disassembly of Joint Structure
..... LIU Zhifeng HU Di GAO Yang et al (65)
- Research on Product Ecological Design Method Integrating TRIZ
..... LIU Zheng PAN Kai GU Xinjian (72)
- Method of Establish Functional Period Assisted by TRIZ
..... ZHANG Peng TAN Runhua (78)
- Product Platform Design Method Based on Complex Network and Axiomatic Design
..... LIU Xize QI Guoning JI Yangjian et al (86)
- New Approach to Product Platform Design Based on Axiomatic Design
and Design Relationship Matrix..... XIAO Renbin CHENG Xianfu CHEN Cheng et al (94)
- Product Platform Design Process Model Based on Similarity
and Structural Sensitivity Analysis.....ZHANG Huangao ZHAO Wenyan JIANG Ping et al (104)
- Adaptive Dynamic Sliding Mode Motion Control for the Parallel Mechanism of
Virtual Axis Machine Tool.....GAO Guoqin ZHENG Haibin (119)
- Reconfiguration Theory of Modular Reconfigurable Mechanism Based on
Analysis of Snake Cube.....DING Xilun LÜ Shengnan (126)
- (下转封三)

DOI : 10.3901/JME.2012.11.029

面向功能创新的功能进化、组合与失效研究*

曹国忠¹ 郭海霞² 檀润华¹ 张承业¹ 李青海¹

(1. 河北工业大学河北省制造业创新方法工程技术研究中心 天津 300130 ;

2. 河北工业大学管理学院 天津 300130)

摘要 : 功能创新是对功能结构进行优化、更新和重组的过程,是实现产品前端创新的一种有效途径。针对功能创新研究尚属于初步探索阶段的现状,研究功能创新关键使能技术(功能进化与预测技术、功能组合与配置技术、功能失效判定与消除技术),通过功能进化动力分析确定功能进化决定因素,利用专利知识挖掘抽取功能进化定律,基于功能进化定律进行产品功能进化预测,按照功能与功能关系分类进行功能组合,依据功能匹配设计进行功能结构优化,通过功能失效分析与消除过程保证功能结构的可靠性。将功能创新关键使能技术与功能设计过程融合建立功能创新过程模型,并通过 CdTe 薄膜太阳能电池沉积源创新设计案例验证所建立模型与方法的可行性。

关键词 : 功能创新 功能进化 功能组合 功能失效 过程模型

中图分类号 : TH122

Research on Function Evolution, Combination and Failure Mode for Product Function Innovation

CAO Guozhong¹ GUO Haixia² TAN Runhua¹ ZHANG Chengye¹ LI Qinghai¹

(1. Manufacturing Innovation Methods Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. School of Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract : Function innovation is the process of optimization, update, and restructuring for function structure, which is a effective way to product front innovation. Function innovation research is still belongs to the initial stage of exploration. The key technologies to function innovation is researched, which are function evolution and prediction technology, function combination and configuration technology, function failure determination and eliminate technology. The decisive factors of function evolution is confirmed by dynamic analysis, the laws of function evolution are extracted by patent knowledge mining, the product function evolution can be predicted by function evolution laws, the functions are combined by classification of function and function relationship, the function structure is optimized by function matching design, the reliability of function structure is ensured by the process of function failure analysis and eliminate. Then the function innovation process model is constructed by integrating function innovation and function design process, further, the computer-aided functional design software system is developed. Finally, the design of a deposition source machine of CdTe thin film solar cell is taken as an example to validate the effectiveness of the model.

Key words : Function innovation Function evolution Function combination Function failure Process model

0 前言

功能创新是在需求拉动和技术推动导向下对产品的功能结构进行优化、更新和重组的过程。功

能创新包括渐进型功能创新和激进型功能创新^[1],其目标是达到功能理想化^[2-3]。功能创新与功能设计既有联系又有区别。功能设计是依据用户需求设计产品的功能结构及功能载体的过程^[4]。功能创新与功能设计前端即功能结构设计阶段紧密相关,通过功能设计可以实现功能创新^[5]。但现有的功能设计研究主要面向功能载体设计^[6-8],采用直接映射^[7]或间接映射^[8]方法。而功能结构设计的研究大多局限于

* 国家自然科学基金(70972050, 51145014)和国家科技基础性专项(2010IM020100, 2011IM010200)资助项目。20110728 收到初稿, 20111203 收到修改稿

对功能结构设计过程的描述^[5, 9-10], 采用自顶向下^[1, 9]或自底向上方法^[10], 设计过程主要由设计者经验决定^[11], 主观性强。功能创新与技术创新同样存在差别, 其设计对象分别是功能系统和技术载体^[1]。

在功能创新研究方面, 陈圻^[1]提出了基于功能的蓝海战略思想, 建立了功能创新的一些策略与方法; PETROV^[2]认为功能进化受客观规律支配并归纳为 4 条功能进化定律; LI 等^[3]扩展 Petrov 的 4 条功能进化定律提出了 3 条功能组织定律和 10 条功能改进定律; LIU 等^[5]提出了基于 TRIZ 的功能组合冲突解决方法; MIZOGUCHI^[11]建立功能本体以规范说明功能组合关系; STONE 等^[12]提出了知识库驱动的功能失效设计方法(FFDM)。功能进化、功能组合、功能失效分析可以分别对产品的功能系统进行更新、重组和优化, 是实现功能创新的三个关键使能技术。现有研究虽然在功能创新关键使能技术方面取得了一定成果, 但仍属于初步探索阶段, 在功能进化趋势预测、功能配置方法、功能失效产生机理和演化规律等方面需要开展深入研究。另外, 目前尚少见系统化功能创新过程模型研究。

针对功能设计中存在的上述问题, 采取定性研究与定量研究相结合的研究方法, 通过需求进化、技术进化与法律法规进化分析, 建立功能进化动力模型和目标性选择矩阵; 基于戴尔菲法和回归分析法形成功能进化预测方法; 基于流进行功能配置研究, 提出功能组合模式与组合算法; 归纳功能失效类型以及功能失效传播模式和传播路线, 形成功能失效判定与消除方法; 在此基础上建立系统化功能创新过程模型及知识原型系统。

1 功能进化与预测

1.1 功能进化动力

功能处于进化状态^[2]。功能的实现建立在与环境发生物质、能量和信号交换关系的基础上, 具有开放性、动态性等特征, 需要不断地调整、协调内部诸要素, 以完善其结构组成。功能进化是通过产品功能结构组成与组成关系的演化以提高主功能的理想化水平或产生新功能的过程。功能进化是内部和外部动力共同作用的结果。

1.1.1 功能进化内部动力

功能结构是由功能与能量、物料、信号三种流组成的网络结构^[4]。功能可分为有用功能和有害功能两类。有害功能伴随有用功能出现, 是由于有用功能的实现原理或结构存在缺陷而引起的有害物料

和能量输出。功能结构中总功能、分功能、功能元之间存在着纵向层次关系以揭示每一层的设计目的, 同一层分功能之间存在着横向关系以揭示子功能间的物理和逻辑组合的可能性。因此, 消除功能结构中的有害功能与不协调的功能组成关系是功能进化的内部动力。

1.1.2 功能进化外部动力

技术系统的进化分为三个层级: 需求进化^[13]、功能进化^[2]和技术进化^[14]。随着需求进化和系统进化, 在市场拉动和技术驱动的作用下, 功能处于进化状态。功能进化并不是与需求进化和系统进化并列的概念, 它是需求进化与系统进化相结合的产物。另外, 社会变迁是法律法规功能演进的动力, 多元利益调整的需求推动法律法规的进化。例如, 环保法律法规的实施使产品竞争不再仅仅是质量、成本、上市时间、服务的竞争, 与环境相关的属性正成为市场竞争的新焦点。因此, 需求进化、技术进化和法律法规进化是协同推进功能进化外部动力。

1.1.3 功能进化动力模型

功能进化动力模型是功能结构的依存型模型, 主要反映作用于功能结构的内部和外部影响因素与功能进化的关系, 是进行功能进化分析与预测的关键基础, 如图 1 所示。

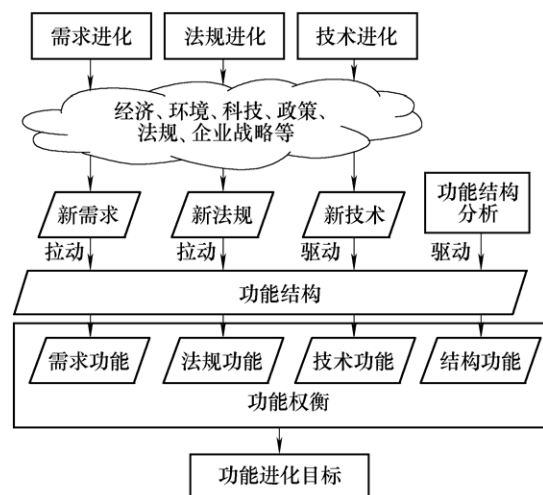


图 1 功能进化动力模型

图 1 中推动产品功能进化的因素包括外部市场、技术、法律法规等, 也包括功能结构内部存在的有害功能和不协调的组成关系。需求进化、法规进化和技术进化推动当前经济、环境、政策、法规和企业战略等的发展, 新需求、新法规和新法规不断出现。产品功能要满足新需求和新法规, 新需求和新法规的出现拉动功能进化, 在功能结构中需要具有相应的需求功能和法规功能。技术是功能实现的载体, 新技术的出现为功能进化提供了可能, 功

能结构中相应的功能称为技术功能。功能结构内部存在的有害功能和不协调的功能组成关系需要通过功能创新来消除，上述有害因素是功能进化的内在驱动力。产品功能进化受多方因素影响，功能进化目标的确定是一多目标决策问题，需要分析这些因素与功能进化的关系，同时还要对各种因素间的关系进行权衡，包括市场与技术的权衡、技术与法律法规的权衡、技术与环境的权衡、内在因素与外在因素的权衡等，以确定功能进化目标和途径。

1.2 功能进化预测

1.2.1 功能进化预测原理

图2是基于功能进化定律的功能进化预测原理。图2中纵向分为已实现功能、可预测功能及目前不可预测功能三个区，分别表示已满足的功能、可通过功能进化定律预测的功能和通过定律目前不能预测到的功能。横向表示功能进化过程。

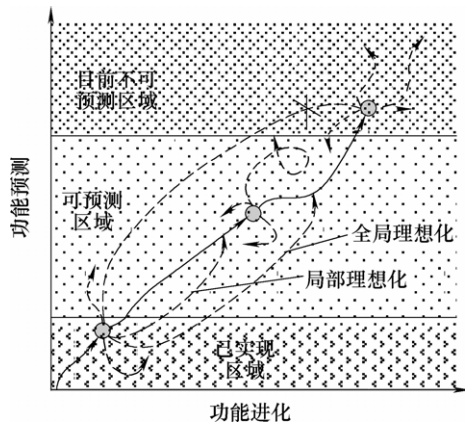


图2 功能进化预测原理

○ 临界点 ———— 实际路径 - - - - - 可能路径

(1) 功能结构是一个复杂系统，存在着偏离原稳态的涨落。功能进化是一个自组织过程，功能进化不是随意发生的，带有明显的路径依赖性，与以前的功能轨迹、技术积累以及人们的认知直接关联，使得功能在进化的一定阶段内会表现出线性的特点。

(2) 功能结构是一个开放体系，与环境系统不断进行着物质、能量和信息的交换，功能进化要受到社会、经济、科技等的影响。当社会需求、技术环境、条件有较大的变化，或者技术进化到了某一临界点，功能进化就要面临着新的选择，也就是功能进化的“临界点”。此时功能进入到非线性的混沌状态，功能进化的历程出现“突变”，结果产生了新功能，此后功能进化在新的一个层次上继续进行。

(3) 在系统外部条件变化与内部结构波动共同

作用下，功能不断向最终理想功能进化。功能进化的最终状态是功能进化理想化水平处于无穷大的状态。功能进化可以分为局部理想化和全局理想化两个目标层次。当功能沿着局部理想化目标发展时，产品内部结构矛盾决定着功能进化的路径和方向，功能进化表现为渐进的、连续的、适应性的过程；当功能沿着全局理想化目标发展时，系统外部环境条件成为产品功能进化的主导和诱因，对功能能否越过临界点发生突变起决定性作用，功能进化则表现为突变的、跃迁的、全局性的过程。

(4) 面向局部理想化的功能进化是指初始位置与下一个最近临界点之间的功能进化，其特点是充分利用内部资源，渐进、连续的进化。由于局部理想化的线性性质，在已有功能结构分析、领域专业知识应用的基础上通过详细规划，可以保证短期预测的可靠性。

(5) 面向全局理想化的功能进化是指包含下一个最近临界点的功能进化。在临界点，由于社会、经济、科技等多种因素(其中一些是未知因素)的作用，功能进化轨迹的预测具有一定的不确定性，但功能在临界点上的进化方向是可以控制的。因此，需要在临界点对可能的进化方向进行评估，选择最适宜的变体，确定相关技术，有效地控制和管理临界点，以实现预期效果。

(6) 目前不可预测功能区是由于人们的知识所限，对遥远的未来在今后某个时间段才能预测的区域。可预测功能区是应用已有的知识及功能进化定律，对近期未来将出现功能的预测，很多功能将是新功能。所有功能都向趋近于理想功能的方向进化，可预测功能区与已满足功能区相比更接近于理想功能状态。目前不可预测功能区是下一个最近临界点以外的区域，难以预测以后的临界点及进化方向。该区域内的功能进化预测主要是依据面向局部理想化和全局理想化的功能进化，结合更广泛的社会需求、市场、新技术等知识，考虑系统重大变化，确定战略目标，揭示潜在危机，并确定未来所需资源。

1.2.2 基于专利知识挖掘的产品功能进化分析

专利是创新知识的主要信息源。专利主要通过产品结构特征来反映其中蕴含的创新原理，而这些信息是功能进化分析所要求的。专利知识挖掘特指针对专利的数据挖掘，是从大量的专利里面搜索出隐藏于其中有着特殊关联性的知识发现过程。基于专利知识挖掘的产品功能进化分析过程如下。

(1) 技术主题确认。技术主题关键词库是指在技术范围内与技术主题相关的关键词集合。

(2) 数据库建立。利用关键词进行专利检索，建立专利数据库。

(3) 专利分析。引用图主要表述了随时间排列的专利相互间的引用关系，通过专利引用图分析产品的功能进化过程。

(4) 功能专利群聚分析。利用专利的技术密集点和空白点，分析得到产品的技术进化过程，进而通过技术进化可以分析得到产品的功能进化过程。

图 3^[15]和表 1 为商务手机功能进化分析过程中商务手机专利引用图和商务手机专利划群表，通过分析可以确定商务手机的技术密集点和空白点及其技术进化过程，进而可以分析得到商务手机功能进化规律如下。

(1) 对手机中控制功能与其他功能间相互作用关系的调整，使功能由没有实时控制的基本协调状态向自动化控制的完全协调状态转化——功能可靠性。

(2) 通过手机相关支持技术的发展，已有功能集成或新功能开发，使得手机有用功能得以增强而有害功能被削减或抵消——功能集成化。

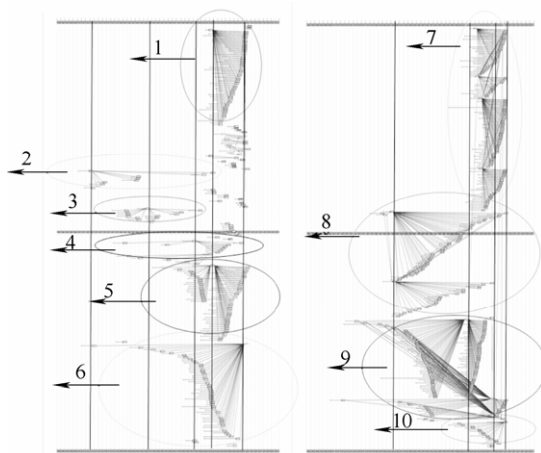


图 3 商务手机专利引用图

功能结构本身是一种耗散结构，具有开放性、动态性、有序性等特征，需要不断地调整、协调内部诸要素，以完善其结构组成，提高理想化水平。当用户需求、科学技术、可用资源等外部因素满足功能产生的条件时，通过适当的连接关系将功能要素组织起来，形成新功能。功能进化包括新功能产生和已有功能发展两个方面，并受功能组织定律和功能改进定律的支配^[3]。功能组织定律是描述功能静态结构的规则(图 4)，而功能改进定律则是关于功能动态发展的规律(图 5)。

表 1 商务手机专利划群

群号	专利年跨度	种子专利号(美国)	技术	前引用/个	后引用/个	群密度
1	2001-2011	20010022558	定位	0	62	5.640
2	1972-2001	3684832	声学数据集/终端测试仪	0	9	0.333
3	1981-1999	4594478	发射机组装电话机	7	7	0.789
4	1981-2009	5671135	可编程控制器模块	2	6	0.310
5	1990-2010	6356543	互联网控制系统	22	40	3.000
6	1973-2010	7715838	蜂窝通信系统	50	0	1.342
7	2003-2010	20030146871	无线定位技术	0	30	16.440
		20030222820		0	22	
		20040198386		0	54	
8	1981-2010	20040266457	光电技术	0	39	3.400
		4410930		3	50	
		4441143		3	44	
9	1972-2010	6249252	网关和无线定位技术	17	22	3.180
		7298327		32	12	
		7525484		34	4	
10	1999-2010	7792498	自动无线连接方法的建立	14	0	1.250



图 4 功能组织定律

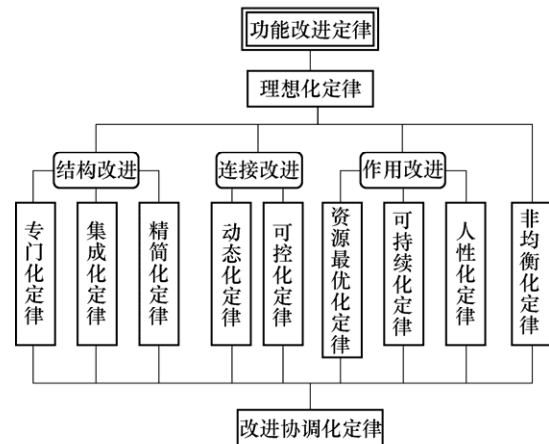


图 5 功能改进定律

1.2.3 基于功能进化定律的功能预测

功能进化定律指明了功能进化的方向和途径，

按照功能进化定律逐步接近理想功能的功能是未来功能，这些功能中未出现过的功能是新功能。功能进化定律可用于预测产品未来的功能^[6]。功能进化的局部理想化与全局理想化可分别通过功能强化、弱化、通用化、专用化和功能禁止、系统禁止、原理改变来实现。基于理想化的功能进化定律选择如表2所示。基于功能进化定律的功能预测过程如下。

- (1) 分析现有功能结构，确定功能进化目标。
- (2) 基于理想化的功能进化定律选择矩阵，确定可用的功能进化定律。
- (3) 依据选定的功能进化定律确定可能的临界点和可预测功能区。
- (4) 如进行功能局部理想化改进，则确定初始位置到临界点之间的区域，对功能进化趋势进行预测；如进行功能全局理想化改进，则应找出影响临界点的主要因素、表现和特征，确定可能的进化方向及预期效果。

表2 基于理想化的功能进化定律选择矩阵

功能进化定律	功能进化目标	
	局部理想化	全局理想化
功能组织定律	功能完整性定律	
功能改进定律	功能连接性定律	
	功能组织协调性定律	
功能改进定律	功能专门化	功能集成化
	功能非均衡化	资源包含最优化
	功能作用可持续化	功能改进协调化
	功能设计人性化	功能可控性
		功能动态化

1.2.4 功能进化树

由于功能进化的非均衡性，功能结构中的功能会依循不同的进化定律以不同的进化速度向不同的方向进化。因此，要清晰、完整地描述功能进化路径，必须遵循如下3条规则。

规则1 进化定律和功能的唯一性：每一次进化都是一条进化定律连续作用的结果，并且该定律只作用于系统中的一个功能。

规则2 功能进化的条件性和进化层次体系：在功能进化过程中，后续进化以前面进化创造的条件和资源为基础，功能进化按一定次序进行。

规则3 协调性检验：功能每次进化都需要检验其协调性。首先在功能构建阶段对其组织协调性进行检验，以保证初始功能的实现；然后是对功能改进过程协调性的检验。

由功能进化路径规则可知：功能进化始于初始

功能的构建，后续进化以前面功能进化创造的条件和资源为基础，可以从任一功能状态沿着一条新的改进定律进化，进化按一定次序持续进行，整个功能进化路径最终呈现为树状层次结构，称为功能进化树，如图6所示。功能进化树既指明了初始功能的进化趋势，又反映了功能进化序列。功能树中每个分支都表示功能结构中预改进功能的一种进化趋势。直接从初始功能开始进化的分支称为一级分支(树干)，是功能的主要进化方向，如F1；从树干上的某一节点开始进化的分支称为二级分支(枝干)，是功能的次级进化方向，如F1.1、F1.2。其他分支以此类推。功能进化树既指明了初始功能的进化趋势，又反映了功能进化序列。

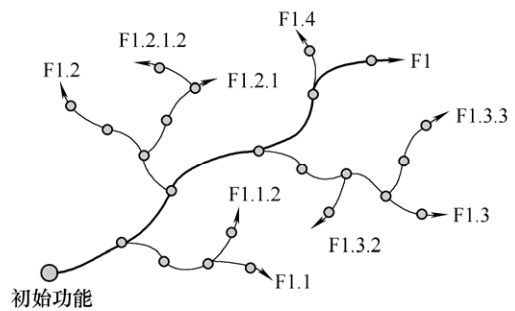


图6 功能进化树

2 功能组合与配置

产品的总功能是由一组按一定的关系组织在一起的分功能实现的，各个分功能组成的集合以及它们之间的所有关系的集合构成该产品的功能结构。功能组合是依据功能需求，将具备组合特性的功能要素按照一定的关系结合与优化的过程。

2.1 功能与功能关系分类

按照功能的重要程度可将功能结构中的功能分为主功能、基本功能、辅助功能和附加功能。主功能是对产品与对象间作用关系的抽象描述，是产品满足用户主要需求不可缺少的功能，体现出产品的用途和使用价值，是与设计和制造产品主要目的直接相关的功能。基本功能是实现主功能所必需的功能，基本功能随主功能实现原理的不同而改变。辅助功能是为了改善系统主功能实现性能的功能，辅助功能并非实现主功能所必需的。附加功能是为了适应用户多样性的需求而引入的与产品主功能实现无关的功能。功能结构中基本功能、辅助功能和附加功能间以逻辑与、或关系联接形成树型结构，称为功能树；同一层功能之间以串联、并联、环形或控制关系联接形成链型结构，称为功能链；功能

树和功能链分别描述功能间的纵向和横向关系^[17]。

2.2 功能组合设计流程

根据设计任务合理选择功能组合方案,设计者可以通过互补功能间的组合、基本功能与辅助功能的组合、目标与手段功能的组合、广义相似功能的组合等方式实现。在功能组合设计的基础上,需要通过功能匹配设计对被组合功能在数量上、数量关系上和功能的协同配合方面进行设计、权衡和确定,避免功能过剩或不足,以保证各功能的最优整合,满足使用者对功能量的需求。

功能组合设计流程如图 7 所示。在选定需要进行功能组合的(产品)系统后,先进行系统的功能分解,分析系统内部各功能之间或系统内部功能与外部系统功能之间的功能组合关系;功能组合的依据是产品市场和用户定位,所以在选择功能组合方案时必须考虑以市场和用户需求为基准,结合系统功能定位和功能组合原则的约束,合理选择功能组合方案;选择组合方案后,需要进行功能匹配设计,包括功能定量设计、功能均衡设计和功能协同设计,避免功能过剩或不足,以保证各功能间的最优整合;最后进行功能组合合理性判定,功能组合的基础是各分功能间逻辑关系明确、物理关系相容、几何关系独立,同时也是功能组合正确性、可行性的基本判断准则。进而最终得出正确合理的功能组合方案。

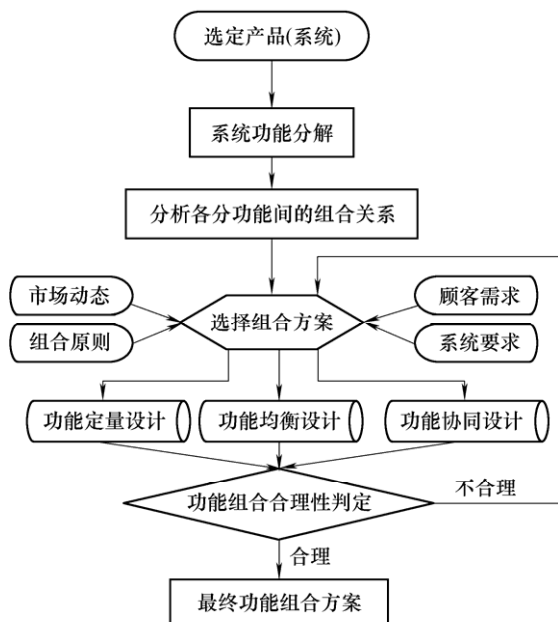


图 7 功能组合设计流程

3 功能失效判断与消除

产品丧失规定的功能称为失效。功能失效是指

在系统功能结构层面上,由于功能要素或功能结构间的流传递、效应选择、副作用、干扰等因素的影响,而使系统功能无法按既定要求和质量实现。功能失效分析就是在系统功能分析的基础上,以历史性和前瞻性的态度对所建立的功能模型进行系统分析,找出其中失效的功能结构或功能结构群,确定失效模式,判定失效机理,给出失效改进的措施。

3.1 功能失效类型与传播模式

流是功能的作用对象,功能的作用过程称为操作。根据对流和操作的描述,功能可认为是通过对输入流的操作将输出流转化为期望流的过程。功能失效类型分为流失效和操作失效两类。

3.1.1 流失效

将流的类型、流速及流的其他属性所规定的范围定义为流阈。也就是说,当流的类型、流速及其他属性的值超出所规定的范围,就产生了失效。流失效有以下几种情形:流的类型超出流阈;流速过大或过小;流速等于零;其他属性超出流阈。

3.1.2 操作失效

当功能的输入流没有按功能操作的要求转化为输出流,或是使转化的输出流产生了流失效,即产生了操作失效。

功能失效的传播模式分为流失效传播和操作失效传播。

(1) 流失效传播。流失效的传播分为两种情形:第一种情形为第一个功能的流失效使得无法得到正确的输出流,而当该流作为第二个功能的使能流或供给流时,则会引起第二个功能的操作失效,第二个功能的操作失效又引起第二个功能的流失效。即此种方式为流失效通过操作失效并引起相邻功能的流失效而向下一个功能传播;第二种情形为第一个功能的流失效引起该功能的输出流失效,而该输出流作为第二个功能的输入流又引起第二个功能的输出流失效,由此方式依次传播。

(2) 操作失效传播。操作失效的传播方式也有两种情形:第一种情形:第一个功能的操作失效使得该功能的输出流失效,同时该输出流作为相邻功能的使能流时,导致第二个功能的操作失效,由此操作失效通过产生流失效而使失效传播;第二种情形:第一个功能的操作失效使得该功能的输出流失效,同时该输出流作为相邻功能的供给流时,则引起第二个功能的输出流失效。而当该输出流作为下一个功能的输入时,则会引起下一个功能的失效。

3.2 功能失效分析与消除过程

功能失效分析与消除的目的就是要发现功能

结构建立中所存在的潜在失效，判断失效模式并对失效的功能结构进行改进。功能失效分析与消除包括以下步骤：建立系统功能结构模型、划分功能结构、圈定功能失效重点区域、分析失效模式并按风险度排序、提出改进和改进评价6个阶段，如图8所示。

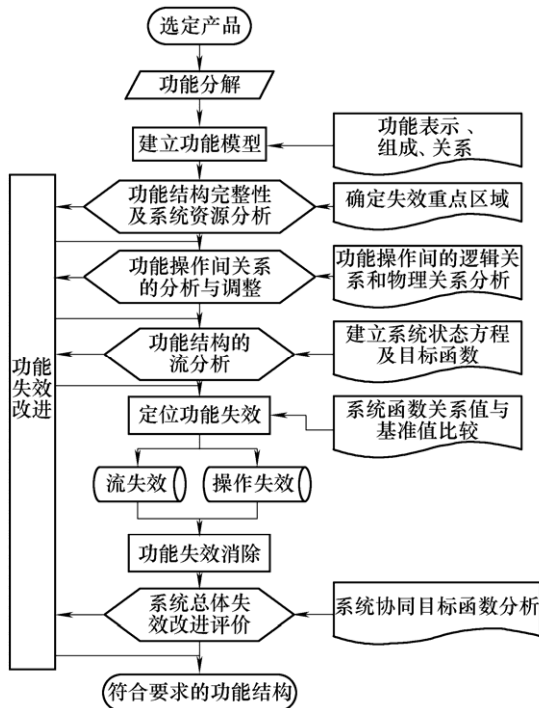


图8 功能失效分析与消除过程模型

(1) 建立系统功能结构模型。进行功能失效分析之前，需要对系统进行功能分解，分解到最基本的功能元，采用功能基方法“元功能+流”的表示形式并考虑功能之间的组成、时序和因果关系，建立系统的功能模型。

(2) 功能结构完整性及系统资源分析。对已建立的系统功能模型分析子系统功能结构所对应物质—场模型的完整性和合理性、系统内外部资源作用进行分析，并圈定系统功能失效的重点区域，并进行简单的完善和修改。

(3) 功能操作间关系的分析与调整。分析功能结构中功能操作间的逻辑关系和物理关系是否符合设计任务要求，如不符合则进行调整或选用更高级的效应原理。

(4) 功能结构的流分析。采用键合图建模来描述流的流向和转换，应用分段轨迹法描述输入输出流的动态变化。建立系统状态方程以及单个子系统的局部最优目标函数。以单个子系统的局部最优为基准，与各子系统所建立的函数关系值进行比照，从而定位功能失效的部位所在。

(5) 提出改进。对所确定的失效，应区分流属

性匹配失效和操作匹配失效这两种方式。对于流属性匹配失效的消除可采用调整流的属性或改变上一级操作而达到调整流的属性的方式消除；对与操作匹配失效的消除可选用更高级的效应或增加系统的柔性等方式消除。

(6) 系统总体失效改进评价。通过建立系统状态方程，根据对系统协同目标函数的分析，对上述失效分析改进进行总体分析。如不符合，继续上述过程。

4 功能创新过程模型

功能设计是产品设计的重要阶段^[1]。在该阶段，设计人员根据用户需求确定产品的总功能，并将总功能分解为分功能及功能元，功能与能量、物料、信号三种流组成的网络结构即为待设计产品的功能结构；确定每个功能元的原理解，并将所有功能元的原理解合成得到待设计产品的原理解^[4]。将功能创新关键使能技术(功能进化与预测、功能组合与配置、功能失效判定与消除)与基于扩展效应模型的功能设计过程^[18]融合，建立系统化功能创新过程模型，如图9所示。

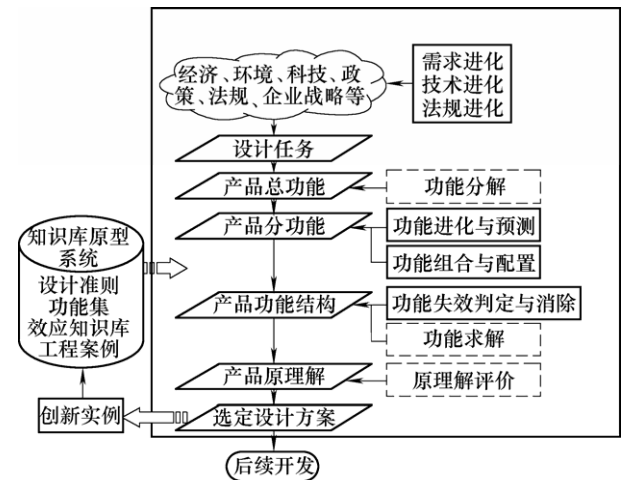


图9 功能创新过程模型

系统化功能创新过程模型的应用过程包括：产品需求获取、功能结构的建立与优化、功能求解、原理解评价及方案选定等过程。其中最为关键的是引入了功能进化和功能组合对原有产品功能结构的优化，而后应用功能失效性分析与消除对功能结构进行改进。因此，该模型与传统功能设计过程从整体流程上基本相同，但在功能结构建立过程中引入功能创新关键使能技术，有利于产生出满足多方位需求的设计方案。在此基础上，开发出计算机辅助功能设计软件系统^[19]，图10是软件的功能进化模块。



图 10 功能进化模块

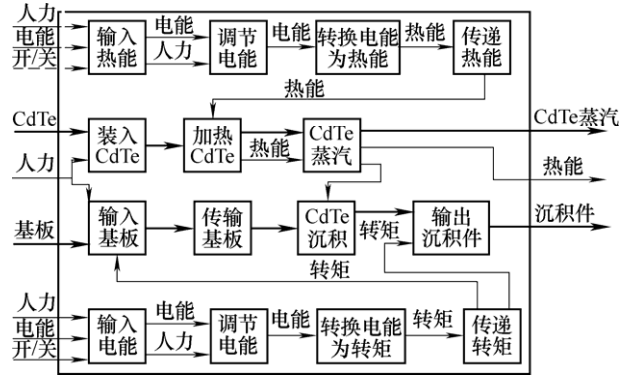


图 12 沉积源的功能结构

5 应用实例

薄膜太阳能电池已成为光伏市场发展的新趋势和新热点。CdTe 薄膜太阳能电池因其材料的高效、稳定、廉价,已经成为美国、德国、日本、意大利等研究开发的主要对象,已有公司批量投产。目前我国 CdTe 薄膜太阳能电池处于实验室基础研究阶段,尚未实现大规模的产业化,核心设备主要依赖进口。CdTe 薄膜太阳能电池连续上料沉积源作为沉积部分的重要一环,其基本要求是将 CdTe 材料加热成气态并使其沉积在玻璃基板上。现有沉积过程的物料输送过程完全靠人力和经验,不能有效地满足连续性生产的需要;而蒸发过程很难保证沉积薄膜的均匀性。上述问题亟待通过沉积系统创新设计加以解决。

5.1 需求分析

CdTe 薄膜太阳能电池连续上料沉积过程包括将 CdTe 材料引入沉积设备,之后将 CdTe 加热成气态,最后将气态的 CdTe 均匀输出至玻璃基板完成沉积。对其的要求是上料方便、自动化程度高、沉积过程简单易控、沉积材料输出平稳均匀、运行可靠、使用寿命长、加热充分、无泄漏、气流输出易控、产品模块化程度高、尽量使用可再生的原材料、能源利用率高、便于拆卸回收、减少材料消耗、使用清洁能源和符合相关法律法规要求。

5.2 功能分解

根据对客户需求的分析和技术需求的确定,确定沉积源的总功能及输入、输出流,并通过功能分解建立沉积源的功能结构,分别如图 11、12 所示。

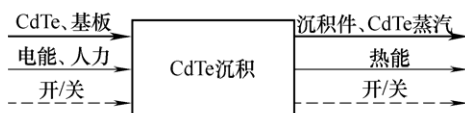


图 11 连续上料沉积源的总功能

5.3 功能结构分析与改进

(1) 依据功能进化的目标性选择对应表,系统达到全局理想化所对应的功能进化定律包括:集成化、可控化、资源包含最优和功能作用可持续化定律等。

(2) 对进化后的功能进行适当的组合,将真空吸入与输入 CdTe 分功能组合;为了使 CdTe 均匀平稳地沉积在基板上,将 CdTe 沉积与气体导向功能组合,保证了蒸汽气流的稳定性,表现为基本功能与辅助功能的组合。

(3) 对组合后的功能结构进行失效性分析,可以发现系统的能耗指标及控制复杂性上未能满足系统协同目标,这就需要系统在协调性上进行改进,保证整个沉积系统的高效益、高和谐性。图 13 为改进后的连续上料沉积源的功能结构。

5.4 功能求解

应用计算机辅助功能设计软件系统中效应实例模块进行功能求解,浏览功能树视图确定实现功能结构中各功能的效应,如图 14 所示。将各功能实现子结构按照功能结构及结构组合规则进行连接,形成连续上料沉积源原理结构^[20],如图 15 所示。

5.5 方案评价

经过综合评估,图 15 中连续上料沉积源原理结构利用系统的真空环境,实现了上料的自动化,提高了系统的精度,符合可持续设计准则;同时也免除了人体与 CdTe 材料的接触,保证了人的安全。

6 结论

(1) 将功能创新关键使能技术与基于扩展效应模型的功能设计过程融合,建立系统化功能创新过程模型,并开发出计算机辅助功能设计系统,为产品功能创新设计提供了一种新方法和支持工具。

(2) CdTe 薄膜太阳能电池连续上料沉积源设计实例表明,该方法能够有效地支持功能创新全过程,有利于产品多层次创新设计。

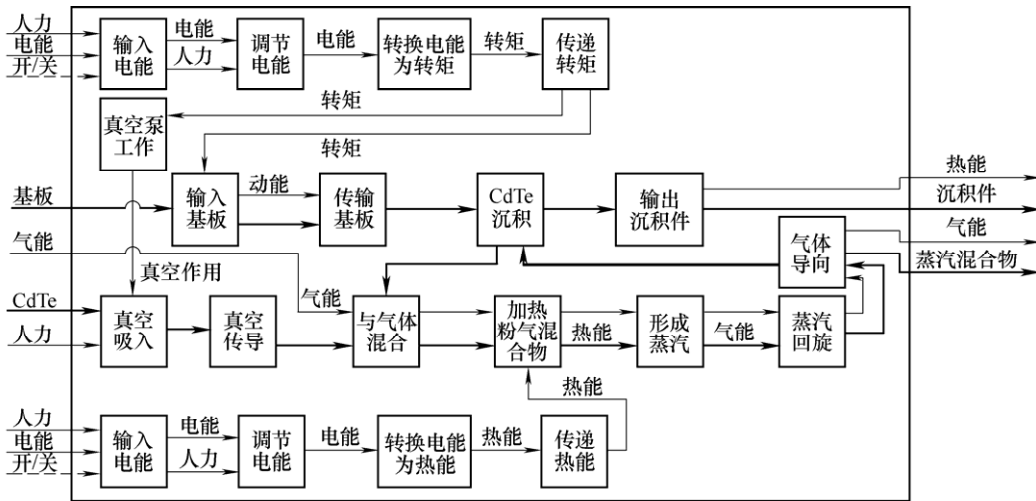


图 13 改进后的连续上料沉积源功能结构

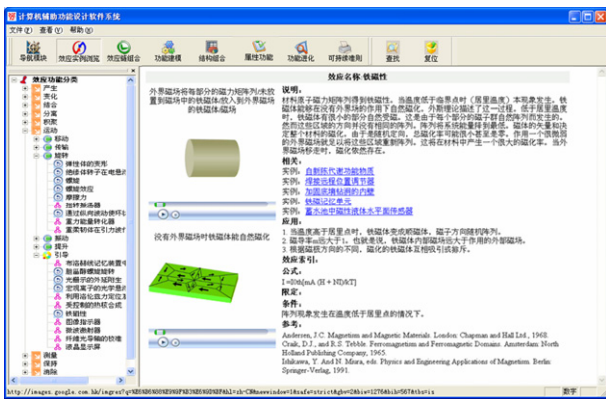


图 14 基于扩展效应的功能求解

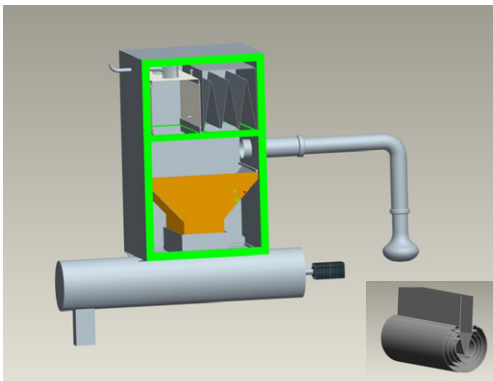


图 15 连续上料沉积源原理结构图

(3) 产品功能进化分析需要大量专利数据的支持和检验，在分析方法、知识表示等方面尚需要投入更多的精力去研究。另外，计算机辅助可持续性功能创新软件系统在大规模空间下搜索效率的提高以及推理机制的完善，都是值得深入研究的重要课题。

参 考 文 献

[1] 陈圻. 产品功能创新战略理论框架[J]. 科学学与科学技术管理, 2007, 28(12): 73-79.
CHEN Qi. A Theoretical framework for strategy of

innovations in product functionality[J]. Science of Science and Management of S.& T., 2007, 28(12): 73-79.
[2] PETROV V. The Law of system evolution[EB/OL]TRIZ Journal[2002-03]. <http://www.triz-journal.com/archives/2002/03/b/index.htm>.
[3] LI Qinghai, CAO Guozhong, GUO Haixia, et al. Research on innovation process model based on function evolution[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 20-23: 1336-1341.
[4] PAHL G, BEITZ W. Engineering design – A systematic approach[M]. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2000.
[5] LIU Fang, YANG Yu, ZHANG Peng, et al. Function-oriented product integrated innovation[C]// 2008 IEEM, Singapore, December 8-11, 2008: 800-804.
[6] NAGEL R, STONE R, HUTCHESON R, MCADAMS D, et al. Function design framework (FDF): Integrated process and function modeling for complex system design[C]// 2008 ASME IDETC/DTM, Brooklyn, NY, August 3-6, 2008: 51-60.
[7] GUI J K, MANTYLA M. Functional understanding of assembly modeling[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(6): 435-451.
[8] GERO J S, KANNENGIESSER U. The situated function-behaviour-structure framework[J]. Artificial Intelligence in Design, 2002: 89-104.
[9] SUH N P. Axiomatic design: Advances and applications [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
[10] OTTO K, WOOD K. Product design: Techniques in reverse engineering and new product development[R]. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
[11] MIZOGUCHI R. Functional ontology of artifacts[C]// First Interdisciplinary Ontology Meeting, Tokyo, Japan, Feb. 26-27, 2008.
[12] STONE R, TUMER I, STOCK M. Linking product

- functionality to historic failures to improve failure analysis in design[J]. *Research in Engineering Design*, 2005, 16(2): 96-108.
- [13] PETROV V. Laws of development of needs[EB/OL]. *TRIZ Journal*[2006-03]. <http://www.triz-journal.com/archives/2006/03/02.pdf>.
- [14] FEY V, RIVIN E. Innovation on demand: New product development using TRIZ[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [15] 智慧芽信息科技有限公司. 商务手机专利引用分析[EB/OL]. [2011-04-15]. <http://www.zhihuiya.com/>. Snaptech. Pte.Ltd., Patent reference analysis of business cell phone [EB/OL]. [2011-04-15]. <http://www.zhihuiya.com/>.
- [16] CAO Guozhong, GUO Haixia, ZHANG Chengye, et al, Function evolution and forecasting for product innovation[C]// 2010 ICMIT International Conference on Management of Innovation and Technology, 2-5 June, 2010, Singapore. 2010: 40-44.
- [17] SHI B, MEERKAMM H, SCHWEIGER W. A multiple-view integration approach to innovative product design[C]// International Conference on Mechanical-Electronic Engineering and Computer Application, Hong Kong. 2002: 1-7.
- [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 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.
- [19] 曹国忠, 郭海霞, 檀润华, 等. 计算机辅助创新设计软件系统 V2.0: 中国 ZL2011SR026022[P]. 2011-01-12. CAO Guozhong, GUO Haixia, TAN Runhua, et al. Computer aided innovation design software V2.0: China ZL2011SR026022[P]. 2011-01-12.
- [20] 曹国忠, 檀润华, 张承业, 等. 一种输运沉积连续上料设备: 中国, ZL 201010220443.3[P]. 2010-07-08. CAO Guozhong, TAN Runhua, ZHANG Chengye, et al. An equipment for transport sedimentary continuous feeding: China ZL201010220443.3[P]. 2010-07-08.

作者简介: 曹国忠(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品创新设计理论及应用。

E-mail: caoguozechong@hebut.edu.cn

郭海霞, 女, 1973 年出生, 博士研究生。主要研究方向为技术创新风险管理和产品创新设计。

E-mail: libghx@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

张承业, 男, 1985 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: jlau0431@163.com

李青海, 男, 1965 年出生, 博士。主要研究方向为产品创新设计理论及应用。

E-mail: ge01@realforce.com.cn