

可变功能机械基于功能逻辑图和结构关系图的变更设计方法

王君宇^{1,2}, 邓益民^{1,2*}, 涂 强^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 设计变更(被动变更)是产品设计开发过程中的一项重要活动. 本文基于“功能-行为-结构”(FBS)设计模型, 在产品设计阶段进行功能和结构上的“主动变更”, 探讨适用于可变功能机械的“变更设计方法”. 根据产品的功能与结构特性及其相互关系建立功能逻辑图和结构关系图, 用以描述变更前产品功能和结构的变化以及变更传播影响; 提出变更设计的3种规范, 并基于此进行面向结构的变更操作; 将变更设计分为4个阶段, 并据此提出变更设计流程. 最后开展可变功能机械变更设计的软件系统实现方法研究, 并以电动剃须刀的变更设计为例, 验证所提出方法的有效性和可行性.

关键词: 可变功能机械; 功能结构映射模型; 变更设计; 软件原型

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0027-06

可变功能机械是指一类通过更换系统构件或改变系统构件的连接方式获取不同功能的机械产品^[1]. 由于其结构紧凑、一机多用、构件利用率高、可拓展和可升级等特点, 因此具有良好的市场价值. 可变功能机械的设计方法之一是在原有机产品功能原理的基础上, 对机械产品结构进行合理的变更, 实现其既有功能的更改, 从而为原产品引入新功能. 此类方法可称为“基于变更的设计”, 或简称“变更设计”. Huang等^[2]的研究表明, 机械产品中有将近75%的产品是在原有设计信息基础上进行变更设计, 采用原有产品的功能与结构特性进行新产品的研究设计可减少设计过程中的成本和风险, 获取更大的经济效益. 由于变更设计对产品开发的重要性, 越来越多国内外学者对此开展了相关研究. Jarratt等^[3]根据变更设计的产品对象不同, 从变更设计技术、产品本身特性和变更操作过程等方面对包括变更设计在内的工程变更研究进行了总结. Ahmad等^[4]通过目的、功能、构件和具体设计4个方面来描述产品变更设计信息, 辅助设计人员对变更影响进行评估. Eckert等^[5]分析产品结构受变更影响的特点, 归纳出4类结构——

无变更影响结构、变更合并结构、变更传递结构、变更雪崩结构. 唐敦兵等^[6]在设计结构矩阵基础上建立变更设计影响分析模型, 并通过变更影响计算方法进行变更影响程度的预测. 殷习等^[7]从产品概念设计角度出发, 分析功能间的关联性和结构体间的约束关系, 归纳典型的传播行为特性并得出变更传播树模型. 综上所述, 目前还缺少专门针对可变功能机械变更设计的研究, 因此, 进行可变功能机械变更设计方法和技术的研究是开展面向可变功能机械再设计研究的重要内容之一.

在产品的设计开发过程中, 引起变更的原因有很多. 但在实际活动中, 多数变更是为了消除产品设计中出现失误而造成的负面影响, 即所谓的“设计变更”, 如改善产品的安全性、提高产品性能、替换不可获得的构件等, 这样的变更可以理解为“被动变更”. 与一般机械产品在设计开发过程中经常遇到的此类“设计变更”不同, 本文所说的“变更设计”是在指原有产品的基础上, 为了获取新功能, 通过替换或改变构件的连接方式等合理的变更操作, 实现产品功能的创新, 因此可以称之为“主动变更”. 变更设计本质上是一种再设计, 以

收稿日期: 2017-11-29.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51375246).

第一作者: 王君宇(1993—), 男, 河南焦作人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: wjyyt_123@163.com

*通信作者: 邓益民(1966—), 男, 安徽舒城人, 博士/教授, 主要研究方向: 机械设计理论与方法、注塑成型与优化. E-mail: dengyimin@nbu.edu.cn

可变功能为目标的变更设计是通过对现有机械产品的再设计,使其变成可变功能机械或增添新的可变功能.变更设计这一“主动变更”式的设计方法将赋予产品创新更多的主动性和选择性,本文基于 Gero 等^[8]提出的“功能-行为-结构”(FBS)设计模型,从可变功能机械功能与结构的特征出发,研究此类产品变更设计过程中的方法和规律,并开发可变功能机械变更设计软件系统原型,为此类产品的变更设计提供技术支持.

1 可变功能机械功能与结构的变更分析和操作

在可变功能机械变更设计过程中,由于功能、结构之间存在大量的关联关系,因此,对产品设计中某个局部的变更可能会触发一系列的关联变更,导致变更传播现象^[9].一般而言,任何变更在满足产品设计需要的同时,都会在变更传播中产生一些负面影响,例如,变更传播会造成项目开支的增加和进度的拖延,影响产品质量和产品生命周期的某些阶段等^[10].为此,合理开展功能与结构的变更分析和变更操作,有利于减小变更传播造成的负面影响,也有利于可变功能机械产品的再设计.

1.1 功能逻辑图与结构关系图

机械产品的总功能一般可逐级分解为若干个相互关联的子功能,这些子功能间存在串联、并联和混联的逻辑关系,物料流、能量流和信息流将子功能连接起来,相互连接的子功能中其输入流和输出流存在着密切的联系,各子功能相互协调配合实现产品的总功能.因此,可通过子功能能否实现输入输出流的顺利连接,来判断变更设计后产品的子功能是否完整,以及能否相互协调配合,从而确定变更设计是否成功.为此,本文对变更前后产品子功能之间的逻辑关系进行分析,建立如图1所示的功能逻辑图,来描述产品进行变更设计时,为实现新的目标功能,子功能所进行的变更操作及其输入输出流的改变.例如,图中由于设计需要将功能 F_7 变更为 F_7' ,此变更造成了一系列其他功能的变更,包括 F_4 , F_5 , F_6 变更为 F_4' , F_5' , F_6' , F_8' ,以及基于变更后功能间新的连接关系.

根据“功能-结构”映射关系,产品变更设计最终应落实到结构的变更操作中,且结构的变更也将产生传播,并对与其相关的其他结构造成影

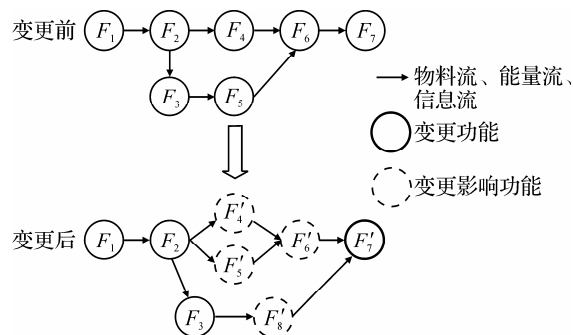


图1 基于变更设计需要的功能逻辑图

响.因此,基于上述功能逻辑图并根据“功能-结构”映射关系确定需变更和保留的结构.对于可变功能机械而言,产品的某些结构用于不同的系统功能,在变更设计中需要保留,我们称之为“共享结构”;而为了实现对产品功能的变更,需要对某些非共享结构进行变更操作,我们称之为“变更结构”.为此,本文建立与功能逻辑图相应的结构关系图,来描述产品变更设计中对结构的变更操作和影响.如图2即描述变更过程中共享结构的保留和变更结构的变化,并将各结构基于相互关系进行连接;其中,一些未被变更的非共享结构可能对这部分研究没有影响,因此可予以省略.在图2所示的案例中,共享结构包括 S_1 , S_2 和 S_3 ,而其他结构则从 S_4 - S_9 变更为 S_4' - S_{10}' .

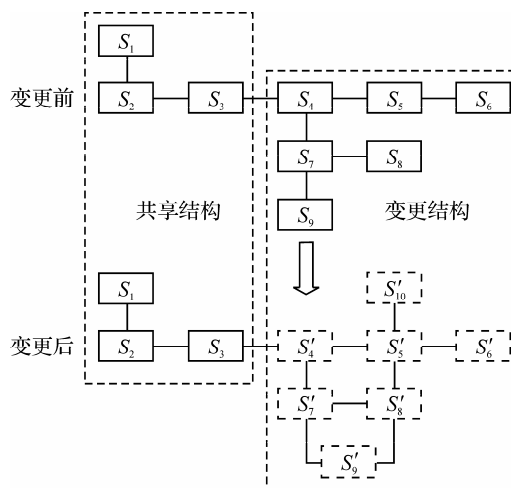


图2 基于变更设计需要的结构关系图

1.2 功能与结构的变更规范

变更设计以变更为手段,必然会改变产品子功能间的逻辑关系和结构间的连接关系,影响产品总功能的实现.因此,变更设计面临的重要任务之一是保证产品功能与结构的完整性、变更一致性

和变更数据可追踪性。

(1)功能与结构的完整性. 产品的功能与结构在实现总功能的目标下,按照一定的约束条件和相互关系组成一个整体,每个功能和结构都有其存在的必要性,若随意更改可能会破坏产品功能与结构间关系,从而导致总功能的实现受到影响.因此,必须保证变更设计后功能与结构的完整性。

(2)功能与结构的变更一致性. 根据“功能-结构”映射关系,当某个功能发生改变时,与该功能存在联系的功能及相关结构也应做出相应的调整与变更,因此应该保持功能与结构的变更一致性。

(3)变更过程的可追踪性. 对变更过程进行记录,保持变更过程的可追踪性,可以确保设计人员清楚知晓变更进程,从而为变更操作的修改和进一步完善提供便利和可执行性。

1.3 面向结构的变更操作

变更设计的最终目标是获得功能变更,而这需要通过结构变更得以实现.针对结构的变更操作主要有以下4种:(1)添加结构,即添加构件到现有结构体中,构成新的结构,满足功能变更后的功能结构映射关系;(2)删除结构,即从现有结构体中删除功能变更后与功能无关的结构;(3)替换结构,即用一个新的结构替换结构体中对应的结构,两个结构间具有可互换性;(4)升级结构,即对现有结构体中某个结构进行性能升级,用新版本代替旧版本,改变相应结构的性能属性.进行可变功能机械的变更设计时,往往需要组合使用以上4种结构变更操作,并将共享结构和变更获得的新结构在约束条件下重新组合,实现新的功能。

2 可变功能机械变更设计流程及系统实现

2.1 变更设计操作流程

基于上述分析,将可变功能机械的变更设计分为4个阶段:变更分析阶段、功能变更阶段、结构变更阶段和变更评估阶段,其流程如图3所示。

(1)变更分析阶段. 设计人员确定变更功能并根据“功能-结构”映射关系对功能结构进行分析。

(2)功能变更阶段. 判断原产品的子功能是否需要变更设计。①如果子功能需要进行变更,在功能变更的同时,记录“功能-结构”映射关系和输入输出流,为结构变更做准备,并分析功能变

更是否造成变更传播。②若产生变更传播,则判断受传播影响的子功能是否需要变更设计,重复(2)的操作;③若无变更传播,则传播结束;④如果子功能不需要进行变更操作,则该子功能下的结构为共享结构,在变更设计中予以保留。

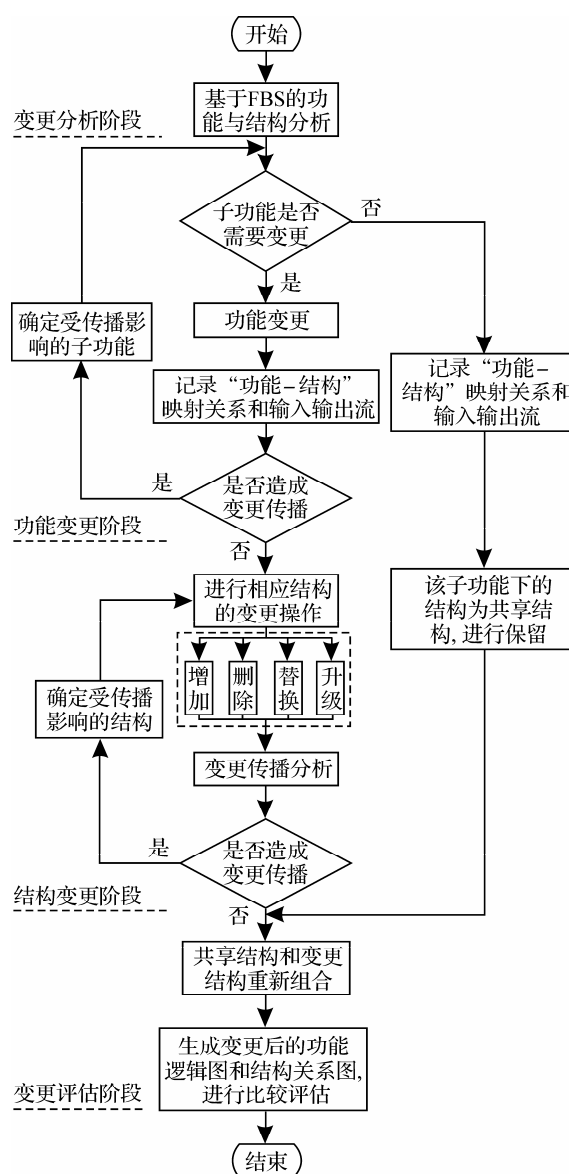


图3 变更设计流程图

(3)结构变更阶段. 根据“功能-结构”的映射关系,对变更功能所映射的各结构进行增加、删除、替换、升级的变更操作,同时判断结构变更是否造成变更传播。①若造成变更传播,则确定受传播影响结构并进行变更,重复步骤(3)的操作;②若无变更传播影响,则结构变更结束。

(4)变更评估阶段. 对变更设计后所获得设计

结果进行评估,由设计人员判断是否需要重复上述的3个步骤,以获得符合设计要求的设计结果。

2.2 变更设计系统实现

2.2.1 系统简介

为进一步说明上文所提出的变更设计方法,方便设计人员进行可变功能机械的设计,笔者开发了一个可变功能机械变更设计系统的软件原型。其主要功能包括:对产品功能和结构等设计信息进行管理和检索;对产品进行变更操作;描述产品功能逻辑和结构关系。系统包括3个主要功能模块:设计信息管理模块、变更设计操作模块和变更设计分析模块,主要功能如图4所示。系统采用 Visual Basic .Net 语言进行开发,开发平台是基于 .Net 4.5 框架的 Microsoft Visual Studio 2013,数据库管理采用 Microsoft SQL Server 2014。本系统不仅可以对知识库中功能和结构信息进行查询、编辑和保存,还可以对原产品的设计方案、变更操作过程中的设计信息以及变更完成后的最终设计方案进行保存,方便设计人员进行变更设计。

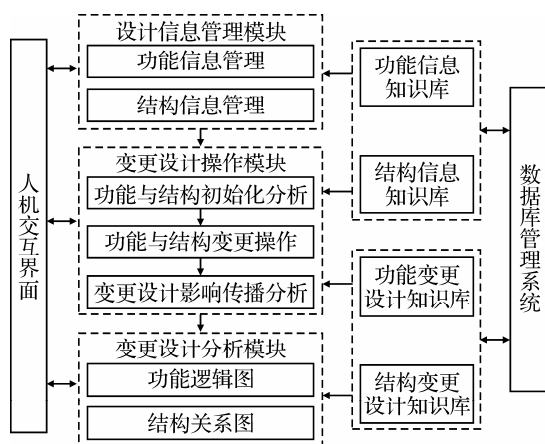


图4 变更设计系统体系结构

2.2.2 系统运行界面

变更设计系统的主界面如图5所示,界面左侧为系统功能选择区域,右侧为系统功能操作区域,通过依次选择左侧的系统功能,可以在右侧打开相应的操作窗口。如图5右侧的操作区域中所显示的是功能信息管理界面,设计人员在功能和结构信息知识库的辅助下,实现对产品信息的编辑、添加、删除和保存功能。其中,在功能信息管理界面中,输入“功能识别码”可检索功能信息,并通过“功能名称”“实现结构”“输入”“输出”和“备

注”五方面进行描述,用户可以对已有功能信息进行编辑或添加新的功能信息到知识库中;在结构信息管理界面中,结构信息主要由“结构识别码”“结构名称”“连接标识”“连接结构名称”和“备注”五方面来描述,供设计人员进行编辑操作。

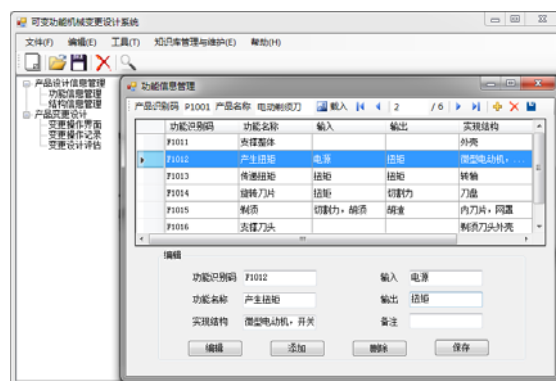


图5 可变功能机械变更设计系统主界面

变更设计操作模块是变更设计过程中最关键和最重要的部分,利用变更操作界面对产品变更设计过程进行模拟,可以帮助设计人员寻找合适的变更设计方案。变更操作界面由“产品信息栏”“功能逻辑图”和“结构关系图”三部分组成。为了更好地描述“功能-结构”映射关系,当用户选中功能逻辑图中某个功能如“产生扭矩”时,结构关系图中执行该功能的结构即“开关”“充电电池”“微型电动机”将以绿色文字显示。若进行变更设计操作,可在相应的功能和结构图标上单击右键,有“变更”“添加”“删除”等选项供用户选择,变更后的功能和结构由蓝色文字显示,受到变更传播影响的功能和结构由红色文字显示。以“电动剃须刀”向“电动理发器”的变更设计为例(详见下节的案例分析),变更操作界面如图6所示。

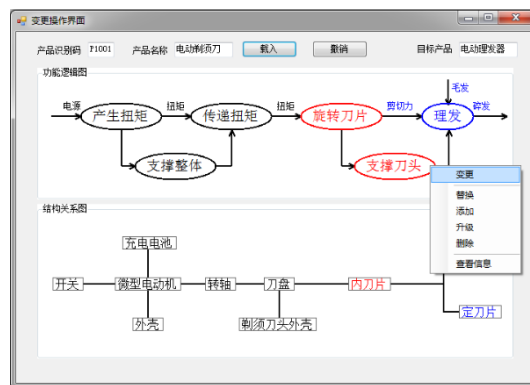


图6 变更操作界面

3 案例分析

具有可变功能的电动剃须刀可通过更换不同的刀头部件实现剃须、理发等多种不同的功能,因此深受市场欢迎,采用所开发的可变功能机械变更设计系统,通过对子功能及其结构的变更操作,实现从剃须功能到理发功能的可变功能设计。

根据上文所提出的变更设计操作流程,通过分析可得电动剃须刀共具有“支撑整体”“产生扭矩”“传递扭矩”“旋转刀片”“剃须”“支撑刀头”6个子功能。本次变更设计的目标是使该产品具有电动理发的功能,因此需从其执行“剃须”功能开始变更设计,系统操作界面如图7所示。首先根据电动理发器的设计要求将功能逻辑图中的“剃须”功能变更为“理发”功能(图7(a,b))。由于变更传播影响,对“剃须”功能的变更(变更成“理发”)将产生传播并影响“旋转刀片”和“支撑刀头”功能,同时结构关系图中执行“剃须”功能的“内刀片”和“网罩”也受到影响,需进行更改操作(图7(b))。然后,对结构进行变更操作,使新的结构能执行变更后的“理发”功能。在结构关系图中删除无用的结构即“内刀片”和“网罩”,并添加新的结构即“动刀片”“定刀片”和“刀片张力弹簧”(图7(c))。此时变更设计的第一步即“剃须→理发”已经实现,随后根据界面中由红色文字所显示的受变更传播影响的功能和结构依次进行变更操作。

图8呈现了该案例变更设计的原理示意图,变更操作根据图中流程在系统中依次进行。当系统通过数据库中的信息,已检索不到功能和结构的变更操作所产生的变更传播时,即新的子功能可以实现目标产品功能,变更结构和共享结构的形状、尺寸等信息可以匹配,并能执行目标功能,则产品的变更设计得以成功,新产品(电动理发器)的功能逻辑图和结构关系图如图7(d)所示。

4 结论

针对现有研究中缺少面向可变功能机械的变更设计方法和软件实现技术的现状,本文提出可变功能机械基于变更的设计方法,建立产品变更前后的功能逻辑图和结构关系图,以描述变更设计过程中功能与结构的变化及变更传播情况。并提

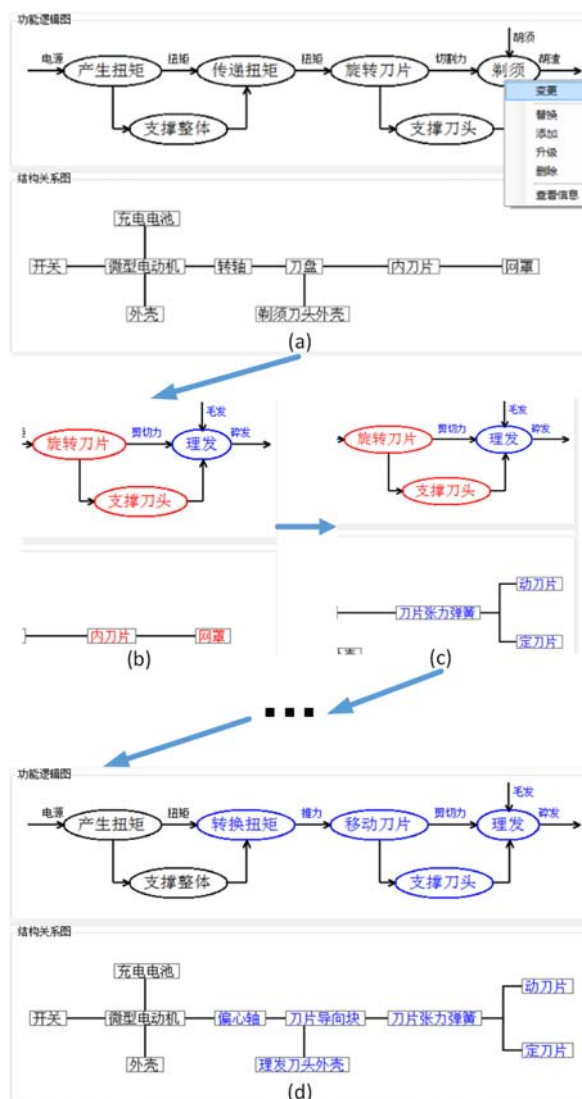


图7 实现电动剃须功能到电动理发功能的变更设计操作

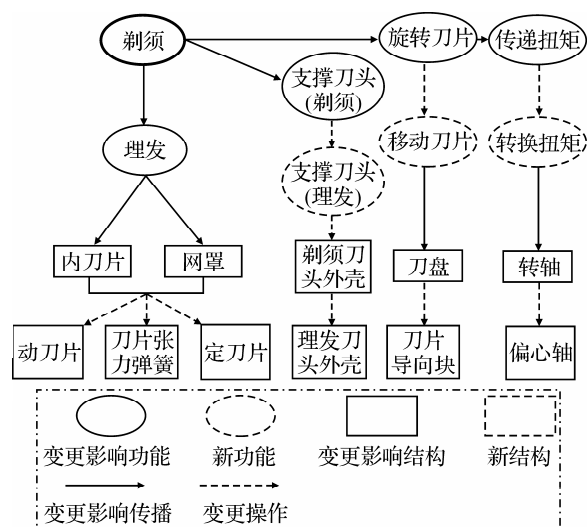


图8 实现电动剃须到电动理发的变更操作原理示意图

出变更设计规范,通过功能和结构的同步变更操作进行变更设计,实现产品目标功能。最后开发出可变功能机械变更设计系统原型,为设计人员开展此类产品的变更设计提供一个辅助设计平台。该方法为基于现有产品开展可变功能再设计提供了一种可行的方法和辅助工具,对设计开发可变功能机械产品具有一定的理论和实践指导意义。

参考文献:

- [1] Yu Y W, Deng Y M, Lu W F, et al. Analysis of mechanical systems with adaptable functions for the evaluation of functional coupling and component importance[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(5/8):1449-1458.
- [2] Huang G Q, Mak K L. Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries[J]. *International Journal of Operations and Production Management*, 1999, 19(1):21-37.
- [3] Jarratt T A W, Eckert C M, Caldwell N H M, et al. Engineering change: an overview and perspective on the literature[J]. *Research in Engineering Design*, 2011, 22(2): 103-124.
- [4] Ahmad N, Wynn D C, Clarkson P J. Change impact on a product and its redesign process: a tool for knowledge capture and reuse[J]. *Research in Engineering Design*, 2013, 24(4):219-244.
- [5] Eckert C M, Clarkson P J, Zanker W. Change and customization in complex engineering domains[J]. *Research in Engineering Design*, 2004, 15(1):1-21.
- [6] 唐敦兵, 徐荣华, 唐吉成, 等. 基于设计结构矩阵的工程变更影响分析[J]. *机械工程学报*, 2010(1):154-161.
- [7] 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.
- [8] Gero J S, Kannenglesser U. The situated function-behavior-structure framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [9] 付赟. 基于 DSM 的软件需求变更传播风险分析[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(29):22-28.
- [10] Fricke E, Gebhard B, Negele H, et al. Coping with changes: Causes, findings, and strategies[J]. *Systems Engineering*, 2000, 3(4):169-179.

A change-based design method for adaptable-function mechanical product design based on both functional logic and structure relation diagram

WANG Jun-yu^{1,2}, DENG Yi-min^{1,2*}, TU Qiang^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: Design change (passive change) is an important activity in the process of product development. In this paper the authors explore a proactive approach by applying changes intentionally (active change) to the relevant function and structure of an existing product, in which the Function-Behavior-Structure (FBS) model is exploited. This method can be referred to as a change-based design synthesis method, which is engineered specifically for the adaptable-function mechanical product. A functional logic diagram and a structure relation diagram are established to represent the changes and the change propagation effect in the function and structure of the product before and after the change-based design process. Three change-based design norms are proposed to guide the change operations on product structure. Four fundamental stages of the design process are summarized to implement the change-based design strategy. Finally, a software prototype is presented, which can be used to assist the designer in the development of adaptable-function mechanical products. An electric shaver is taken as an example to validate the effectiveness and feasibility of the proposed method and the applicability of the proposed approach.

Key words: adaptable-function mechanical product; function-structure mapping model; change-based design; software prototype

(责任编辑 章踐立)