

基于FS映射求解和DSM信息过滤的计算机辅助概念设计研究

周磊¹, 杨伟荣^{2,3}, 邓益民^{3*}

(1.华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2.浙江合众新能源汽车有限公司, 浙江 嘉兴 314511;
3.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为解决计算机辅助概念设计系统方案生成中经常出现的产品结构匹配性不能满足要求, 从而需对设计方案进行人工筛选的问题, 因此根据概念设计中功能-结构映射(Function-Structure Mapping)信息和设计结构矩阵(Design Structure Matrix)的内部结构联系, 提出一种适合计算机辅助概念设计的问题解决方法. 该方法以DSM表达和存储产品的结构匹配设计知识, 然后基于FBS(Function-Behavior-Structure)设计过程模型开展概念设计, 通过构建功能链以及提取设计中的FS映射信息获得结构链, 再利用DSM设计知识对所获得的结构链进行结构匹配性评判, 从而实现对计算机辅助概念设计方案的获取与筛选. 基于该方法搭建了计算机辅助概念设计软件平台, 并结合具体实例验证了所提出方法的有效性与软件系统的实用性.

关键词: 概念设计; 设计结构矩阵; 功能-结构映射; 设计方案

中图分类号: TB21; P39

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 05-0031-05

概念设计对产品创新和市场成败至关重要. 在计算机广泛应用的当今时代, 在概念设计过程中应用计算机辅助概念设计系统无疑会对设计人员提供极大帮助. Umeda等^[1]和Komoto等^[2]分别基于功能-行为-状态(Function-Behavior-State)建模方法开发了相应的计算机辅助概念设计系统; 雷光强等^[3]基于功能-行为-广义机构模型和本体描述语言开展机械产品的概念设计系统的研究; 梁庆华等^[4]通过将串联式机构组合方案进行筛选实现计算机辅助概念设计; Frillici等^[5]提出将TRIZ方法引入计算机辅助概念设计过程中; 其他很多学者也从多个角度尝试提出了各种计算机辅助概念设计的设想与方法^[6-7]. 但由于各类不同产品的多样性和复杂性, 即使其中部分方法存在理论上可行性, 但真正将概念设计方法应用于计算机系统开发并成功用于指导实际的设计过程仍然有相当的难度. 其中一个仍需要继续开展研究的问题是: 由计算机辅助概念设计系统所生成的设计方案往往存在结构匹配性不能满足要求的问题, 需要设计

人员运用自身经验和设计知识将不符合要求的设计方案剔除, 从而大大影响了计算机辅助设计系统的实用性和设计效率.

概念设计的首要任务是获得满足功能需求的设计方案. 在此过程中, 功能需求及其内部联系的表达以及如何获得满足功能需求的设计方案是研究计算机辅助概念设计系统中两大技术关键; 其中, 功能需求的内部联系包括子功能联系、各实体结构间联系和行为域中行为过程的内部联系等. 前者是后者的基础, 也是计算机辅助概念设计研究中最为关键的问题. 为此, 本文通过应用功能设计理论中的FBS(Function-Behavior-Structure)设计过程模型^[8], 构建产品的设计结构矩阵DSM, 以及基于FS(Function-Structure)映射获得产品的结构链, 再利用DSM表达和存储产品结构匹配知识, 并进一步用来对概念设计方案进行结构匹配性检查和筛选; 最后, 基于此方法开发了计算机辅助概念设计系统, 用于辅助设计人员获得满足功能需求的设计方案.

收稿日期: 2018-06-18.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51375246).

第一作者: 周磊(1997-), 男, 安徽舒城人, 主要研究方向: 设计理论与方法. E-mail: 1421527140@qq.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: 设计理论与方法、注塑成型与优化. E-mail: dengyimin@nbu.edu.cn

1 DSM 的构建

DSM 最早由 Steward^[9]提出, 并经由 Eppinger 等^[10]成功应用于设计知识的管理和设计方案的生成中. 这是一个以矩阵形式表达的构件关系图, 其作用主要是描述了产品各个结构间的匹配性, 以方便设计人员对零部件关联知识的管理和使用. 本文采用 DSM 的目的主要是对计算机辅助概念设计系统所产生的设计方案进行零部件间可匹配性的评判, 从而在系统生成的众多方案中筛选出有效方案, 以便于设计人员进一步开展设计工作.

为此, 首先需要针对所设计产品的特定产品类型来构建包含结构匹配性的设计知识库. 所谓的结构匹配性, 对机械产品来说, 就是零部件之间的装配性、连接性、配合性等. 针对一类产品族, 有些零部件可以匹配(可装配、可连接、可配合等), 有些则不可以. 这些匹配性知识可以通过对本领域相关产品所相应的设计结构矩阵(DSM)加以表达和存储, 构造特定于该产品的 DSM 结构匹配知识库. 此处用红酒抽真空器作为例子来说明 DSM 的获得方法. 基于 FBS 设计过程模型, DSM 的获取可以分为 4 个阶段(图 1), 这 4 个阶段可以表达为自上而下的 4 个层次: (1)功能分解层; (2)行为过程层; (3)实体结构层; (4)DSM 层.

在 DSM 中, 存在直接接触或直接关联的 2 个零部件所对应的矩阵元素用“1”表示, 其他元素用“0”表示. 通过此形式所存储的各零部件之间的匹配关系具有表达简洁, 便于后期设计过程中对其加以使用的优点. 如图 1 所示, 红酒抽真空器的 8 个构件之间的关联信息通过 DSM 可以获得清晰的表达. 我们可以采用此方法获取相关产品的 DSM, 从而构造适用于红酒抽真空器及类似产品的 DSM 设计知识库.

2 计算机辅助概念设计过程

2.1 概念设计方案的生成与筛选

如前所述, 概念设计的目的是获得满足功能需求的设计方案. 基于 FBS 设计过程模型, 我们可以首先将所需功能加以分解, 并以功能链的形式表达出来; 接着通过 FS 映射(在此过程中可以借助产品行为信息), 得到一系列的结构链模型; 最后

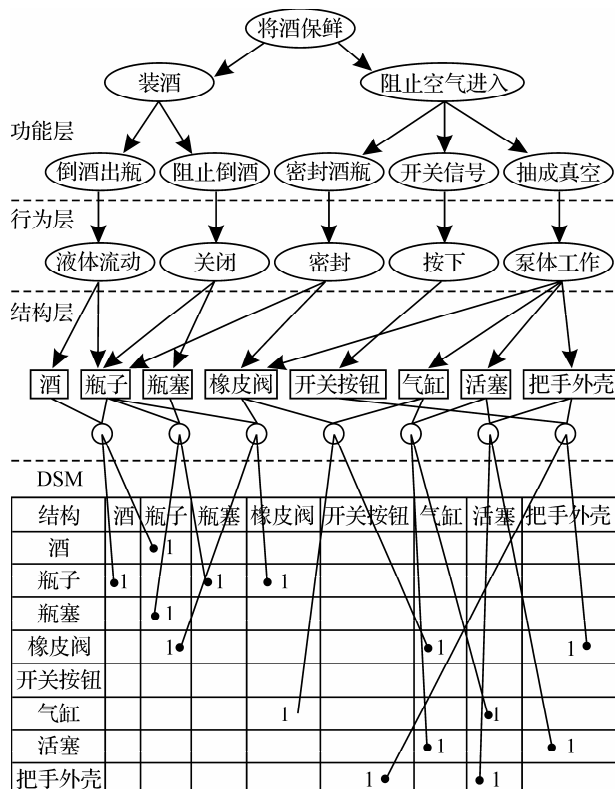


图 1 红酒抽真空器的 FBS 模型及相应的 DSM

通过以 DSM 表达的设计知识判断各结构链中零部件的匹配性, 从而筛选出有效的结构链模型, 作为设计方案进入下一步设计工作.

例如, 假设有 $F1 \rightarrow F2 \rightarrow F3 \rightarrow F4$ 功能链, 结构 $C1$ 能实现功能 $F2$ 和 $F3$, $C2$ 能实现功能 $F1$ 和 $F4$, $C3$ 能实现 $F2$, $C4$ 能实现 $F4$, 则可以将功能与结构间的 FS 映射表达如图 2 所示.

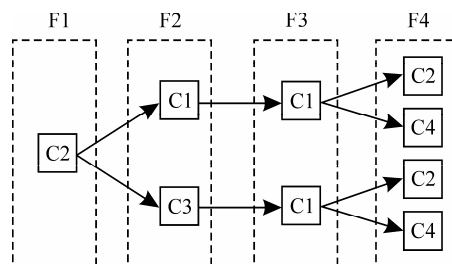


图 2 设计案例的 FS 映射关系及结构链

从图 2 可见, 该 FS 映射解包括 4 个结构链, 对应 4 个可能的设计方案: (1) $C2+C1+C1+C2$; (2) $C2+C1+C1+C4$; (3) $C2+C3+C1+C2$; (4) $C2+C3+C1+C4$.

为了从这些备选方案筛选出满足结构匹配要求(对于机械产品而言, 可以包括装配匹配、连接匹配、配合匹配等多种情况)的方案, 我们可以利用上

文所述的 DSM 设计知识. 例如假定本案例所对应的领域知识可以表达为如图 3 所示的 DSM.

		结构部件			
		C1	C2	C3	C4
结构部件	C1	1	1	1	0
	C2	1	0	0	1
	C3	1	0	1	1
	C4	0	1	1	0

图3 以 DSM 表达的结构匹配性设计知识

按照图 3 设计知识的要求, 图 2 中有 2 条结构链不合要求, 结果如图 4 所示.

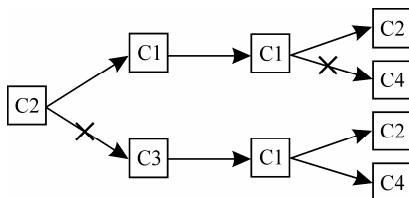


图4 利用 DSM 设计知识筛选结构链

上述案例展现了如下的概念设计方案生成及筛选过程:

(1)构建功能链. 为满足设计需求, 首先分解总功能, 获得具有先后次序和作用关系的功能链.

(2)求解 FS 映射, 获得结构链. 利用 FBS 设计过程模型和设计方法, 获得产品的行为信息和结构信息, 然后提取其中的功能与结构之间的映射关系, 获得相应的结构链.

(3)应用 DSM 设计知识过滤无效结构链. 调用 DSM 结构匹配设计知识库对上述结构链进行评判, 过滤掉不满足匹配性要求的结构链.

(4)输出概念设计方案. 将上个步骤所保留下来的结构链相应的 DSM 保存入 DSM 结构匹配设计知识库中备用; 将相应的 FS 映射设计信息作为概念设计方案输出, 为进一步的设计工作提供数

据输入.

2.2 计算机辅助概念设计系统

根据上述概念设计方法, 利用 Visual Basic 6.0 编程语言开发了一个计算机辅助概念设计软件平台. 软件系统界面主要包含描述功能需求信息及生成概念设计方案及其相关参数两大部分. 图 5 展示了其中用于功能链建模及 FS 映射求解的用户界面, 其中上半部分用于用户输入所设计产品的功能链, 下半部分用于显示经过 FS 映射后所获得的结构链(即设计参数部分). 系统的支撑数据库包括本文所研究的 DSM 结构匹配数据库, 以及 FBS 设计过程模型所涉及的其他设计知识数据库.

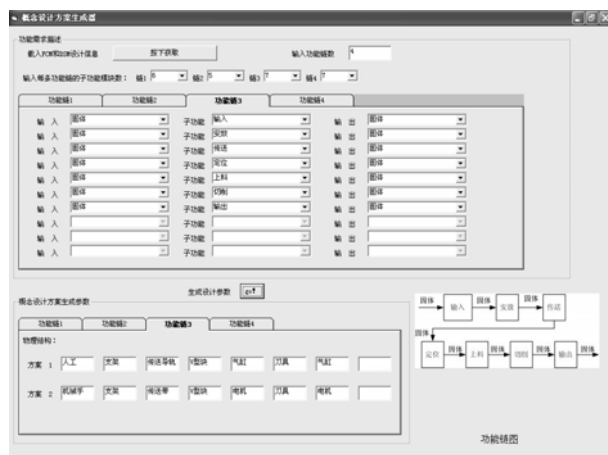


图5 计算机辅助概念设计系统用户界面

3 实例研究

假设某轴承公司为提高生产效率欲设计一个加工轴承外圈所需的自动上料机构. 考虑该产品“自动上料”的设计需求, 依据功能分析法进行功能分解, 建立自动上料机构的功能链模型(图 6).

如图 7 所示, 为能更为清晰地表达各子功能间的联系, 将上述自动上料机构功能链模型分解为以下 4 条单一、没有分支的功能链.

构建所有自动上料机构的功能链后, 在概念

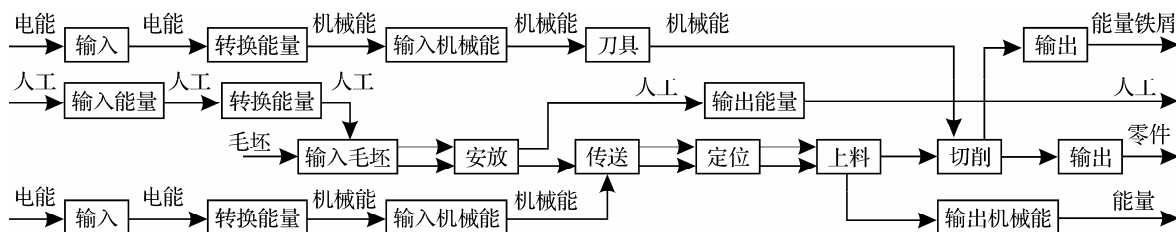


图6 一种用于轴承外圈加工的自动上料机构功能链模型

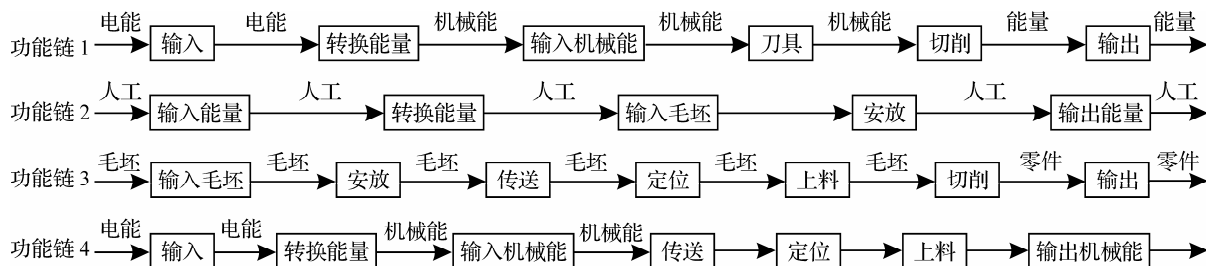


图7 自动上料机构分解功能链模型

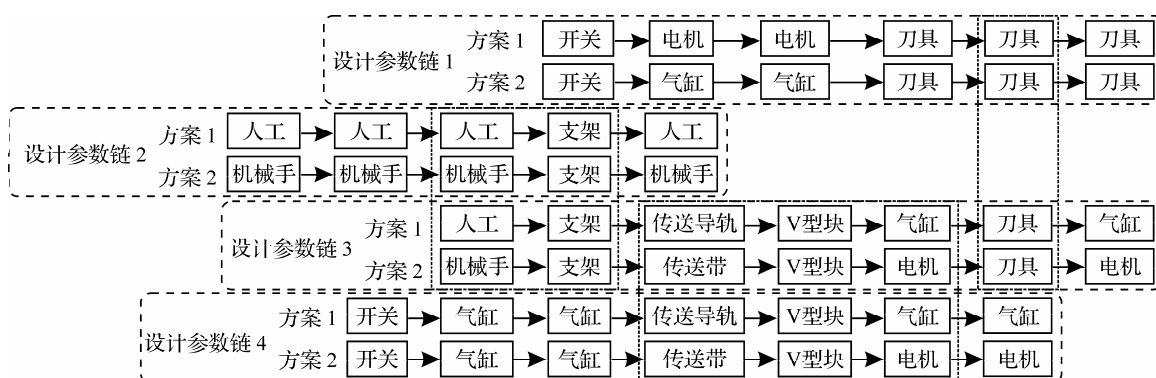


图8 自动上料机构相应功能链的设计参数链

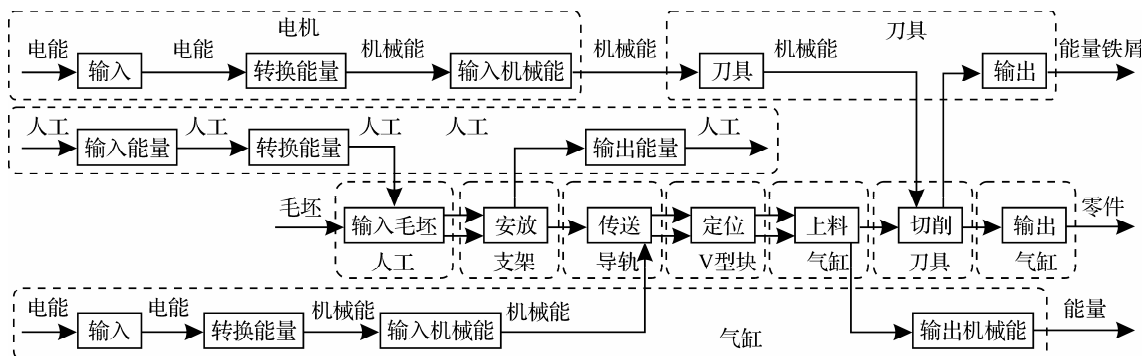


图9 自动上料机构概念设计最终方案

设计方案生成系统的操作界面输入各条功能链的信息。其中功能链3的相关信息在图5中已经展现。功能需求描述完成后,设计人员可以通过“生成设计参数 go!”按钮获得2个相对应结构链方案,再通过结构匹配检查选择合格方案作为后续设计的初始方案。系统可根据已输入的所有功能链信息自动对应4条功能链得到4组设计参数(图8)。图8中可看到多个重复的设计参数(其中,设计链1所描述的信息是对应车床的加工功能,设计参数链已确定),对参数链2、3、4中重复的各个设计参数进行整合、化简、重构,从而使得设计链更为优化(图9)。

本概念设计方案中,能量转换设备采用气缸

替代电机,以避免不必要机械振动产生的干扰,从而使得待加工零件更容易定位。同时,为避免繁杂机械结构而导致的成本增加情况,在结构设计过程中尽量避免给自动上料机构加装不必要的元器件,同时力求同种或类似的元器件能实现多种相同的功能,达到一机多用的效果。

4 结论

首先基于 FBS 设计过程模型知识生成 DSM,以 DSM 表达产品结构匹配知识;然后利用 FS 映射求解获得初步的概念设计方案,再通过查询 DSM 结构匹配知识库相关信息判断所获得的概念设计方案是否满足结构匹配性要求,并将方案的无效

解去除;最后开发了一个软件平台原型系统,并通过实例演示该系统的使用方法。文章所提出的方法充分利用了DSM所表达的产品结构匹配信息,对于计算机辅助概念设计系统中如何表达和存储此类设计知识,并将其用于辅助概念设计方案的筛选,提供了一个可资参考的问题解决方法和实施范例。

参考文献:

- [1] Umeda Y, Kondoh S, Shimomura Y, et al. Development of design methodology for upgradable products based on function-behavior-state modeling[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2005, 19(3):161-182.
- [2] Komoto H, Tomiyama T. A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(10):931-946.
- [3] 雷光强, 刘康. 基于本体的机械产品概念设计系统的研究[J]. 机械管理开发, 2010, 25(2):13-14.
- [4] 梁庆华, 郭为忠, 邹慧君, 等. 基于运动行为贴近度和属性传播的机构串联方法的研究[J]. 中国机械工程, 2001, 12(6):700-704.
- [5] Frillici F S, Fiorineschi L, Cascini G. Linking TRIZ to conceptual design engineering approaches[J]. Procedia Engineering, 2015, 131:1031-1040.
- [6] Vuletic T, Duffy A, Hay L, et al. The challenges in computer supported conceptual engineering design[J]. Computers in Industry, 2018, 95:22-37.
- [7] Charalampidis D. A modified k-means algorithm for circular invariant clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(12): 1856-1865.
- [8] Gero J S, Kannengiesser U. The situated function-behavior-structure framework[J]. Design Studies, 2004, 25(4):373-391.
- [9] Steward D V. The design structure system: A method for managing the design of complex systems[J]. IEEE Transaction on Engineering Management, 1981, 28(3): 71-74.
- [10] Pimmler T U, Eppinger S D. Integration analysis of product decompositions[J]. ASME Conference on Design Theory & Methodology, USA: Minneapolis, 1994, 68(1): 343-351.

Research on computer-aided conceptual design based on function-structure mapping and design solution screening with design structure matrix

ZHOU Lei¹, YANG Wei-rong^{2,3}, DENG Yi-min^{3*}

(1.School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2.Zhejiang Hozon New Energy Automobile Co., Ltd., Jiaxing 314511, China;

3.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The design solutions generated from the computer-aided conceptual design system often contain mismatching structural information and require manual screening. To address this problem, this paper proposes a method suitable for computer-aided conceptual design by exploiting the association information between structures of function-structure (FS) mapping and those of design structure matrix (DSM). It employs DSM to represent and store product structural matching design knowledge. By applying FBS (Function-Behavior-Structure) design process model for conceptual design, it suggests construction of functional chains and structural chains by extracting FS mapping information as initial design solutions. Subsequently, the structural matching information from the DSM-based design knowledge library stored *a priori* is utilized to screen the design solutions. As such, it implements both generation and screening of design solutions for computer-aided conceptual design systems. In the end, a prototype computer-aided conceptual design software platform was developed, and a design case study was presented to demonstrate the feasibility of the proposed method and the applicability of the software system.

Key words: conceptual design; design structure matrix; function-structure mapping; design solution

(责任编辑 章践立)