

可变功能机械基于实例推理的分级实例集模型 及其概念设计方法

高 强^{1,2}, 贺华波^{1,2*}, 董雪诗^{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: 为更好地利用现有案例实现可变功能机械的概念设计, 在 FBS 理论的基础上基于 CBR 技术, 分析并总结了可变功能机械的功能和结构特点, 提出了可变功能机械的分级实例集模型; 通过分级实例集实现了可变功能机械产品基于实例推理的概念设计. 针对实例推理方法的特点, 提出了相似实例匹配度计算方法, 通过对设计要求和实例的相似度匹配获得产品概念设计的最佳实例, 提高概念设计效率. 最后以旋压机为案例, 验证提出方法的有效性.

关键词: 可变功能机械; 实例推理; 分级实例集; 概念设计

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0028-05

新产品设计的核心是功能的创新设计^[1], 产品的概念设计就是从客户要求开始, 通过诸如功能分解、原理分析与选择、构件布局等诸多设计环节, 最终获得设计方案或设计概念的过程. 在产品设计中, 概念设计作为设计的关键阶段最能激发设计中的创造性思维^[2], 在概念设计阶段可完成对功能的创新以及在原有产品的基础上对小范围结构加以改变而实现新的功能. 可变功能机械产品^[3]是指可通过更换系统构件或调整系统构件连接方式来实现系统功能变更的一类特殊机械. 具有可变功能的机械, 一般具有广泛的适应性、多功能性、再设计性等特点. 目前专门针对这类产品的设计方法研究较少. 杨鹏等^[4]提出以再设计方法开展可变功能机械产品的概念设计, 并将再设计映射为行为链的再设计, 提出了一种基于行为链的机械产品可变功能的再设计方法. 殷习等^[5]基于功能—结构的映射关系提出了可变功能的设计变更方法. 李帅军等^[6]通过引入功能主题链的概念, 提出了基于功能本体的创新组合设计策略. 这些方法虽然为可变功能的概念设计提供了一些初步方法, 但还存在诸多不足, 例如, 如何为设计过程提供设计

案例等相关设计知识的支持, 如何进一步提高设计过程效率等.

根据调查, 在产品的设计阶段, 设计的修改占据设计总工作量的 60%^[7]. 实例推理(Case-Based Reasoning, CBR)是一种基于经验和成功案例的类比或相似的推理方法, 其主旨思想是通过以往成功的实例进行推理, 经过对既有案例的必要修改获得新的设计方案, 从而减少设计工作量. 因此实例推理方法可解决概念设计中的“瓶颈”问题^[8]. 为此, 本文提出了基于实例推理方法进行可变功能产品的概念设计, 并对相关关键技术开展研究.

1 分级实例集模型

现有的实例产品中, 蕴含着包括功能、行为、结构及各参数等诸多信息. 对于蕴含在丰富实例中的巨大的信息量, 如果不能得到有效的组织和管理, 想要进行新功能的实例推理基本无法完成. 因此, 有必要在建立实例库前对各种信息参数进行归纳总结, 对实例中各特征参数进行分类存储和管理.

机械产品是一个具有复杂的功能和结构的集

收稿日期: 2017-09-14.

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

基金项目: 国家自然科学基金(51375246).

第一作者: 高强(1990—), 男, 山东济宁人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论与方法. E-mail: gaoqiang728@163.com

*通信作者: 贺华波(1976—), 男, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: 概念设计理论与方法等. E-mail: hehuabo@nbu.edu.cn

合体, 目的功能的完成往往需要有多个子功能组合在一起共同完成, 然后通过功能—行为—结构 (Function-Behavior-Structure, FBS)^[9]之间的映射关系确定各子功能的行为表达, 结构组成及装配关系. 在清楚可变功能机械实例产品目的功能基础上, 对连续功能离散化, 分析各功能的组成特点、结构特征和性能参数, 形成分级实例集. 例如, 某个机械产品的总功能为 F , 完成总功能的分功能为 F_1 和 F_2 , 则完成功能 F_1 、 F_2 两功能的整体行为和结构组成了两个分功能系统. 各系统根据完成某一行为的不同又可离散为不同的子系统, 直到离散至完成某一基础行为所具有的所有机构组成的基础系统. 根据 FBS 的映射关系, 上一级系统的功能和行为参数分别决定了下一级系统的行为和结构参数. 根据时序关系或空间关系等, 判定具有不同结构参数的系统所处层级. 图 1 为四轮拖拉机式联合收割机的分级实例模型. 这是一个可变功能机械, 可以提供包括运动功能和收割功能在内的多个可变功能. 按照 FBS 的映射关系, 第一层为总功能集, 即目的功能所组成的集合; 第二层为一级功能集; 第三层为二级结构集, 即由各分功能所映射的结构组成. 在基于实例推理的设计方法中, 主要研究对象为结构及各结构实体的参数推理, 因此在组建实例库的模型中, 对行为层进行抽象化处理, 直接体现为功能集到结构集的映射.

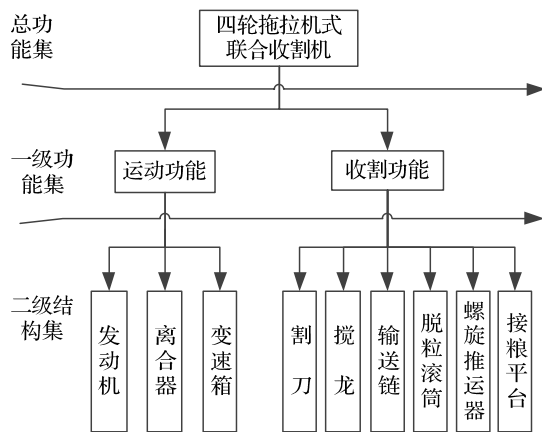


图1 四轮拖拉机式联合收割机分级实例模型

以 FBS 模型为基础, 提出分级实例方案形成的流程图, 如图 2 所示. 从图 2 可知, 在功能层面上将总功能离散化, 形成各子功能. 横向箭头表示在功能集中各分功能系统的时序关系, 虚线框表

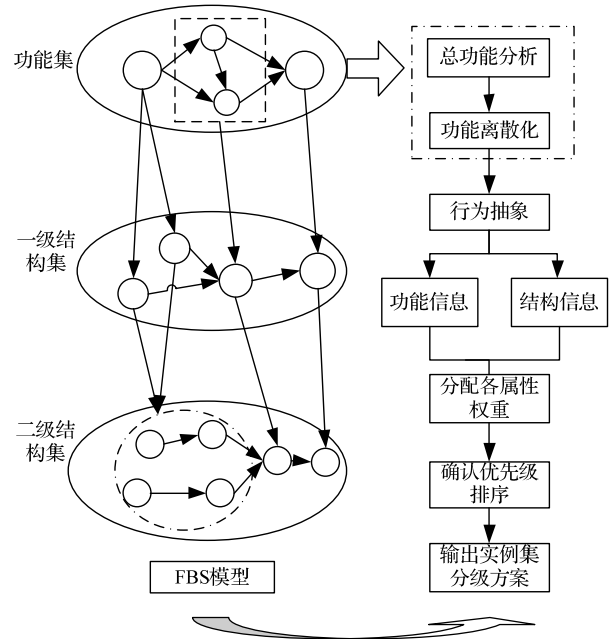


图2 分级实例集输出流程

示此功能分系统可继续离散获得更低层级的功能系统集合. 在行为层进行抽象处理, 通过功能层的映射直接获得功能参数信息和结构参数信息. 竖向箭头表示功能集向结构集的映射关系. 同理, 结构集中虚线框表示此结构可继续离散获得更低层级的结构系统. 分别对离散得到的功能和结构进行权重分配. 在实例集方案输出过程中, 对于权重的赋值, 本文采用了主观赋权法. 主观赋权法是研究较早、较为成熟的方法, 在典型可变功能机械产品实例库组建过程中, 主观赋权法的优点是可以根据典型的实例和专家长时间积累的设计经验及其自身的知识合理地确定各属性权重的排序.

离散后各系统进行优先级排序. U 为各层级离散系统的各属性的权重集:

$$U = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1i} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2i} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{ni} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

C_{ni} 为本层级第 n 个离散系统的第 i 个属性的权重值. 若此系统不存在第 i 个属性, 则此处数值设置为 0. 将 n 个离散系统进行优先级排序, 根据权重矩阵 U 各行元素之和, 从大到小进行排列, 再以排序第一位的目标作为基准, 与其他目标进行比较, 得到以优先级排序的离散系统矩阵 ω :

$$\omega = (\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \cdots \ \omega_n), \quad (2)$$

ω_n 表示与排序第一位的目标作为基准进行比较得到的比较值. 设计者给出权重指标 $\delta (0 < \delta \leq 1)$, 若 $\omega_n < \delta$, 则不列入分级实例集. 此处 ω 既为分级实例集的组成提供了定量分析的依据, 又为整体实例相似度的匹配提供了系数参考.

根据以上分析结果, 输出可变功能机械产品典型实例的离散特征实例集分级方案.

2 基于实例推理的概念设计过程

2.1 概念设计过程

可变功能机械产品的概念设计是以典型产品的功能再设计为核心目标, 通过寻求合适的现有设计方案并经适应性修改、完善和组合, 从而获得可实现多个可变功能的新产品的过程. 设计人员的正常思维方式是从全局到局部, 对功能和结构不断细化求精的过程, 即 Top-Down 的设计方式^[10]. 可变功能机械基于实例推理的核心是依据现有的典型案例的机构特征的相似性来类比推导出新功能的过程, 其原理是通过直接利用现有的典型案例的设计经验和结果, 利用类比推理的匹配方法, 选择与新功能相近的设计实例或设计实例的典型结构, 达到实现新功能的目的.

对于可变功能机械概念设计方法的研究, 前人多数是在原有典型可变功能机械的基础上对行为变更或对结构进行重新组合和更换来完成原有机械本体对新功能的实现. 本文提出的概念设计过程模型首先是以新功能为目标, 通过对典型可变功能机械特征实例库的检索, 完成对机械主体部分和执行部分的设计.

2.2 实施方法

基于实例推理的可变功能机械概念设计过程分 3 个环节, 如图 3 所示.

第一部分: 特征离散环节. 当新功能产品的信息确认后, 首先进行新功能的离散, 确定总功能下子功能的信息 $F = (F_1, F_2, F_3, \cdots, F_n)$, 初步确认结构特征 $S = (S_1, S_2, S_3, \cdots, S_n)$. 结构特征的初步确认可以有目标地进行实例的推理, 提高设计效率.

第二部分: 实例推理环节. 此部分是整个设计过程的核心部分, 完成了新功能产品设计方案从抽象到具体. 又可分为如下 3 步:

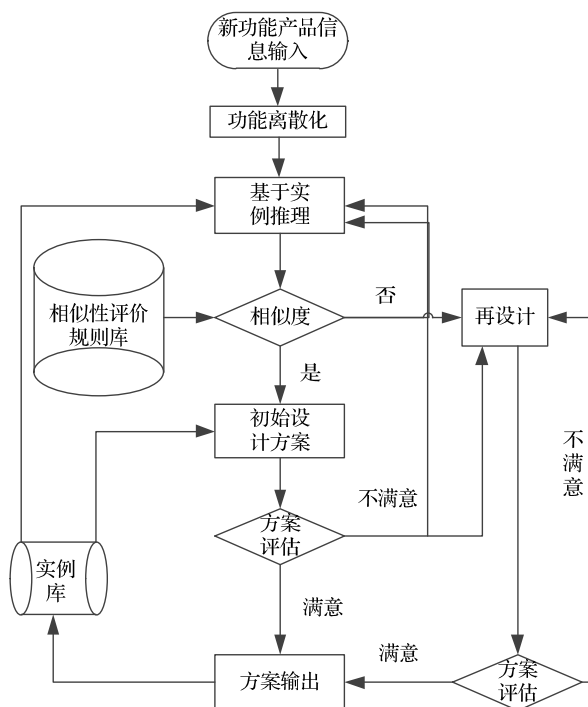


图 3 基于实例推理的概念设计过程

第一步, 针对第一环节离散得到的功能和结构信息, 通过检索实例库, 获得实例特征集 $A = (a_{f1}, a_{f2}, a_{f3}, \cdots, a_{fn}; a_{s1}, a_{s2}, a_{s3}, \cdots, a_{sn})$ (f 表示功能, s 表示结构), 包括功能信息和结构信息等.

第二步, 进行相似度分析, 包括:

(1) 获取每一个实例的特征集.

(2) 分别对新功能产品功能信息 F_i 和结构信息 S_i 进行相似实例对应特征的比较和匹配. 获得相似值:

$$P_{fi} = \frac{\min(a_{fi}, F_i)}{\max(a_{fi}, F_i)}, 0 \leq P_{fi} \leq 1,$$

$$P_{si} = \frac{\min(a_{si}, S_i)}{\max(a_{si}, S_i)}, 0 \leq P_{si} \leq 1.$$

(3) 获取实例特征的相似度:

$$P_i = \alpha P_{fi} + (1 - \alpha) P_{si}, 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (5)$$

对于不同产品, 设计者根据经验判断功能信息和结构信息的偏重, 确定 α 值.

(4) 获得整体实例相似度:

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i, \quad (6)$$

比较相似实例的相似度, 提取相似度最大的实例作为设计要求的相似实例. 低于相似度要求的特征可以进行基于实例的再推理, 对于不能在实例

库中得到相似实例的特征,可以进行传统的基于规则或其他策略的再设计,以此获得匹配特征。

对于特殊案例,如某一结构相似度较高,而其余结构较低时,较高相似度的结构推荐使用。对相似度较低的结构建议进行其他理论的再设计。

第三步,经过多次实例推理和再设计形成完整的实例特征组合,根据相似评价规则的分析初步达到设计要求则输出初始设计方案。

第三部分:方案评估环节。对经过实例推理形成的初始设计方案进行实用性、经济性的评估。主要以新产品功能为依据,评价产品的功能实现的行为过程、约束条件、结构合理性以及制造成本等,满足要求则输出最终设计方案。

通过上述方法,在可变功能的概念设计阶段,设计者可根据可变功能机械的现有量化指标或关键参数,快速准确地找到最佳相似实例。因此,基于实例推理的实例集分级方法可在概念设计阶段提高设计工作效率和实例匹配的准确性。

3 应用实例

旋压机是根据金属旋压成型技术,通过旋转使材料受力并使其由点到线由线到面扩展,同时在某个方向上给予一定压力使金属材料沿这一方向变形和流动而成某一形状的机械设备。通过更换执行系统的不同构件,可获得旋压成型、翻边成型、筒体压筋及管径口扩口等功能。这是一种可通过改变执行系统中部分构件达到改变功能的机械。

以QXK63-10旋压机为例,要求最小坯料直径为400 mm,最大旋压长度为1 200 mm,主轴转速为68~600 r·min⁻¹。根据旋压成型技术的特点,分析旋压机的组成应由床身基体、控制伺服系统、执行加工系统以及各种辅助功能组成。床身基体即为旋压机床身的基本件;控制伺服系统应包含交流伺服电机,数控控制机构及软件结构等;执行加工系统包括了传动装置、进给装置和加工用具等;而排屑、照明、检测等则为辅助系统部分。

由以上离散得到的旋压机功能和结构信息,基于实例推理的方法,匹配现有实例库中实例,获得相似实例集,如图4所示。数控车床的数控车削功能为总功能,总功能离散获得3个分功能系统,即数控系统、驱动系统和辅助系统,3个系统组成了功能集。继续离散获得一级结构集,此处应注意,辅助系统功能下结构集按照时序和逻辑关系,应与另外两功能下的二级结构集处于同一层级。

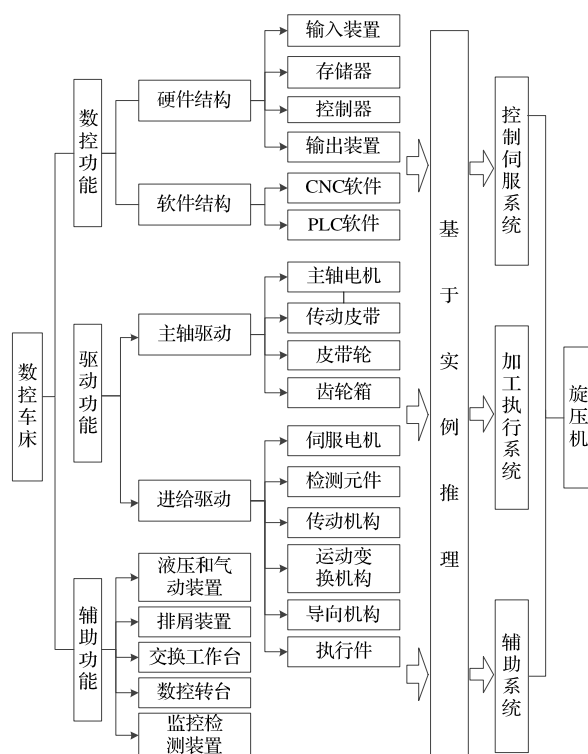


图4 数控机床—旋压机分级实例集

检索实例库,获得CKA6136x750(980TDC广数)和CKA6150x750(FANUCOI-TD)相似实例。表1为两相似实例的属性值,以此可进行相似度分析,计算相似值。首先,对CKA6136x750(980TDC广数)进行分析,可得 $P_{f1}=0.59$, $P_{s1}=0.71$,根据经验设定 $\alpha=0.6$,可得 $P_{i1}=\alpha P_{f1}+(1-\alpha)P_{s1}=0.638$ 。同理,可计算CKA6150x750(FANUCOI-TD)的相似值为 $P_{f2}=0.80$, $P_{s2}=0.71$, $P_{i2}=\alpha P_{f2}+(1-\alpha)P_{s2}=0.764$ 。

由 $P_{i1}<P_{i2}$ 知,可选择CKA6150x750(FANUCOI-

表1 数控机床实例属性

相似实例	床身上工件最大 回转直径/mm	刀架上工件最 大回转直径/mm	最大工件 长度/mm	坐标行程 x/mm	坐标行程 y/mm	主轴转速/ (r·min ⁻¹)
CKA6136x750(980TDC 广数)	360	180	750	230	230	200~3 500
CKA6150x750(FANUCOI-TD)	500	280	750	220	850	200~2 400

TD)作为所选实例集. 另外, 由实例属性和设计要求可知, 最大旋压长度和原有参数相似度较低, 因此应进行基于规则或其他策略的再设计, 最终获得具有旋压功能的机械整体.

4 结论

在机械产品的概念设计中, 通过 FBS 理论和 CBR 技术的结合, 不仅可以提高机械设计的效率, 还可以解决产品开发过程中的“瓶颈”问题. 分级实例集可使得实例库中实例特征的分配更加细化, 减少了设计者在检索相似实例阶段的时间. 本文在提出分级实例集的基础上, 建立了可变功能机械基于实例推理的概念设计最佳实例匹配方法, 为可变功能机械基于实例推理的概念设计提供了理论依据. 未来可以进一步研究实例知识库的结构及其实现方法, 从而为可变功能机械的设计开发提供更好的技术支持.

参考文献:

- [1] David W R. Towards computer-aided configuration design for the life cycle[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1996(7):145-160.
- [2] Deng Y M, Zhu Y W. Function to structure/material mappings for conceptual design synthesis and their supportive strategies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(11): 1063-1072.
- [3] 余远文, 邓益民. 基于赋权有向图的可变功能机械关键行为状态的识别[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(7): 1023-1026.
- [4] 杨鹏, 邓益民, 殷习, 等. 基于行为链的机械产品可变功能再设计方法及应用[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(6):1-4.
- [5] 殷习, 邓益民, 杨鹏, 等. 可变功能机械基于功能—结构模型的设计变更[J]. 工程设计学报, 2015, 22(2):123-128.
- [6] 李帅军, 贺华波, 邓益民, 等. 基于功能主题链和功能本体的创新组合设计初探[J]. 工程设计学报, 2016, 23(2):124-129.
- [7] Bardasz T, Zeid I. Cognitive model of memory for mechanical-design problems[J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(6):327-342.
- [8] Aamodt A, Plaza E. Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches [J]. AI Communications, 1994, 7(1):39-59.
- [9] Qian L, Gero J. Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design[J]. Artificial Intelligent for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 1996(10):289-312.
- [10] 史琦, 杜江, 李原, 等. 基于实例推理的产品概念设计模型研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2):203-207.

CBR-based hierarchical case-set model and its redesign method for adaptable-function mechanical products

GAO Qiang^{1,2}, HE Hua-bo^{1,2*}, DONG Xue-shi^{1,2}

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

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

Abstract: To speed up the redesign process of adaptable-function mechanical products, in this paper the functional and structural characteristics of adaptable-functional machine is investigated based FBS theory and CBR technology. The proposed model of hierarchical case set is built for adaptable-functional machine design, upon which the conceptual design model using case reasoning is put forward. In addition, a similarity-matching calculating method is presented based on the characteristics of CBR, with which the product redesign optimal case can be obtained by similarity-matching of design requirements with design cases. Finally, a spinning machine is taken as an example to demonstrate the effectiveness of the proposed methodology.

Key words: adaptable-function mechanical product; case-based reasoning; hierarchical case-set; conceptual design

(责任编辑 史小丽)