

机械产品结构对称性设计知识模型研究

杨俊成^{1,2}, 马志勇^{1,2*}, 张太霞^{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: 研究了机械产品结构对称性设计知识模型, 建立了包含结构对称、对称破缺和弱对称在内的完整机械结构对称性层次性模型, 以及结构对称性在实现机械产品功能、性能和约束中的设计知识模型, 包括单种结构对称性不同层次的设计知识模型、同种对称性程度不同对称性类型的结构对称性设计知识模型以及同种对称性类型不同对称性程度的结构对称性设计知识模型。建立的结构对称性设计知识模型能较完整地描述不同层次、不同类型及不同对称性程度的结构对称性设计知识及其之间的关联关系, 为进一步研究机械结构对称性设计知识的挖掘和应用规律的建立奠定了基础。

关键词: 机械结构对称性; 功能; 性能; 约束; 设计知识模型

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 04-0023-06

结构对称性是机械产品结构中一种常见的现象, 合理地利用结构对称性有助于更好地实现机械产品的功能、提高性能、满足约束。从大量的机械产品结构对称性设计实例中挖掘结构对称性设计知识, 建立结构对称性应用规律, 可以指导结构对称性在机械产品设计中科学、系统的应用, 建立机械结构对称性模型是挖掘结构对称性设计知识的基础。现有研究中, 对机械结构对称性的设计知识挖掘及提炼已有初步的研究。如冯培恩、马志勇等已建立了以关联规则为基础的结构对称性设计知识模板、设计知识挖掘方法, 并从实例中挖掘出了若干结构对称性设计知识, 可在一定程度上指导结构对称性的科学应用^[1-4]。但是现有的设计知识模板多集中于结构对称, 比较简单, 并不能反映出结构对称破缺及弱对称的设计知识。这些不足导致知识挖掘方法、挖掘结果及提炼的设计知识难以深入、系统地反映结构对称性在机械产品设计中的功用, 影响了结构对称性应用规律的建立。

国内外学者针对知识建模已进行了大量的研究并建立了大量的设计知识模型。例如, Kiriyaama提出了一种产品信息元模型, 用元模型来表示设

计者的设计意图^[5]。Harmer 针对通用组件产品建模技术进行了研究, 将功能需求约束转换为属性特征, 通过匹配比较建立模型^[6]。宋慧军等根据机械产品一般设计特点, 提出了多层次混合映射功能求解框架^[7]。本文借鉴这些现有的设计知识模型, 结合结构对称性在机械产品中的存在形式及作用形式建立适用于机械结构对称性的设计知识模型。

本文旨在理论分析和实例分析的基础上, 建立较为系统的结构对称性设计知识模型, 用以描述各种不同层次、不同类型的结构对称性在实现设计需求中的作用, 描述不同类型结构对称性在实现设计需求中的异同点, 描述对称性程度变化导致的结构对称性功效变化。建立的模型具多维度、多角度、静态动态结合的特点, 能全面地反映结构对称性在实现机械产品设计需求中的作用, 为深入系统的挖掘结构对称性设计知识奠定基础。

1 机械产品设计需求层次模型

机械产品的设计需求可以分为功能、性能和约束 3 种类型。结构对称性在机械产品设计中的作用主要体现在实现功能、提高性能及满足约束方面。

收稿日期: 2016-07-14.

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(51305213)。

第一作者: 杨俊成(1989—), 男, 江苏淮安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计理论。E-mail: nbuyjc@163.com

*通信作者: 马志勇(1979—), 男, 四川成都人, 博士/副教授, 主要研究方向: 机械设计理论。E-mail: mazhiyong@nbu.edu.cn

要建立机械结构对称性设计知识模型, 首先就要建立设计需求模型。

功能描述机械产品“做什么”^[8], 性能描述的是功能实现的程度, 约束描述的是机械产品在实现功能及性能时需要满足的约束性条件。机械产品功能的表达方法有很多^[9-11], 本文采用动词对法来表示功能、性能和约束, 并借鉴马志勇等^[12]建立的适用于机械结构对称性知识发现体系的功能、性能和约束体系开展研究。

2 结构对称性模型

现有研究已对结构对称性在机械产品中的存在形式做了较为完善的研究, 并建立了较为完整的机械结构对称性概论体系^[1-2,4]。本文借鉴现有体系, 建立结构对称性的层次性模型(图 1)。将结构对称性表述为 $S = \{S_s, S_b, S_w\}$, 其中, 结构对称 S_s 、结构对称破缺 S_b 和结构弱对称 S_w 又可细分为多种类型对称形式, 如 $S_s = \{S_{st}, S_{sr}, S_{sm}, \dots\}$ (S_{st} 为平移对称, S_{sr} 为旋转对称, S_{sm} 为镜射对称)。而每种具体的结构对称性类型都包含 4 种对称性要素: 对称主体、对称组元、对称基准和对称操作, 如 $S_{st} = \{B_{st}, E_{st}, R_{st}, O_{st}\}$, 其中, B_{st} 为平移对称主体, E_{st} 为平移对称组元, R_{st} 为平移对称基准, O_{st} 为平移对称操作。

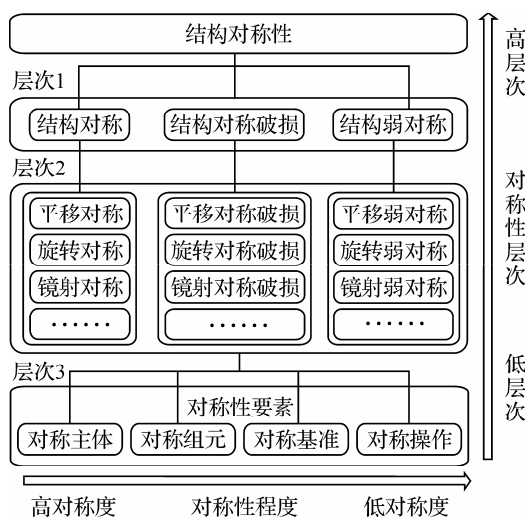


图 1 结构对称性层次模型

3 结构对称性设计知识模型

在机械产品中, 结构对称性用以实现产品功能、提高产品性能及满足设计约束。因此建立的结构对称性设计知识都应该包含以下基本内容: 某

种结构对称性(或对称性要素)在何种条件(约束)下实现了何种功能、取得了何种效果(性能)。由于结构对称性本身具有复杂的层次关系和类型关系, 因此建立的设计知识还需要表达出不同层次、不同类型及不同对称性程度结构对称性设计知识之间的关系。从整体上, 结构对称性设计知识模型可表述为 $K = \{K_l, K_t, K_d\}$, 其中, K_l 为单种结构对称性不同层次的设计知识, K_t 为同种对称性程度不同类型结构对称性的设计知识, K_d 为同种类型不同对称性程度的结构对称性设计知识。

3.1 单种结构对称性不同层次的设计知识模型

单种结构对称性的设计知识包含了某个结构对称性(或对称性要素)在何种条件(约束)下实现了何种功能、取得了何种效果(性能)。由于设计知识中的各个要素(结构对称性、功能、性能和约束)都具有层次性的体系, 低层次设计知识可向上抽象, 得到高层次设计知识。在向上抽象时, 既可抽象结构对称性, 又可将功能、性能或约束向上抽象, 当然, 抽象后的设计知识是否还具有实用性, 还需要进一步分析和验证。因此 K_l 包含了所有结构对称性层次的单种结构对称性的设计知识, 可表述为 $K_l = \{K_{l1}, K_{l2}, K_{l3}\}$, 其中, K_{l1} 、 K_{l2} 、 K_{l3} 分别为 3 个层次的单种结构对称性设计知识, K_{l3} 中的设计知识通过向上抽象可得到 K_{l2} , K_{l2} 中的设计知识通过向上抽象可得到 K_{l1} (图 2)。

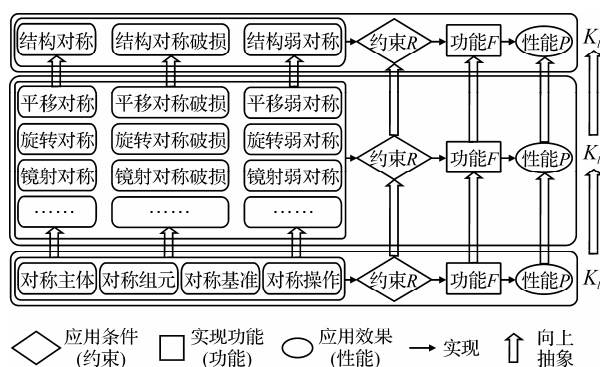


图 2 单种结构对称性不同层次的设计知识模型

3.2 同种对称性程度不同对称性类型的结构对称性设计知识模型

取得单种结构对称性设计知识后, 将同种结构对称性程度的 2 种不同类型的结构对称性设计知识进行比较。如果 2 种设计知识完全相同, 则可以向上抽象为更高层次结构对称性的设计知识; 如果 2

种设计知识不完全相同, 则可以将不同的功能或应用效果(性能)或应用条件(约束)进行抽象, 得到同种对称性程度不同类型结构对称性的设计知识。依据比较结果, 可将同种对称性程度不同类型结构对称性的设计知识表示为 $K_t = \{K_{tr}, K_{tf}, K_{tp}\}$, 其中, K_{tr} 为 2 种不同结构对称性在同种应用条件下取得的不同功能和应用效果, K_{tf} 为 2 种不同结构对称性在实现相同功能和应用效果时的不同应用条件, K_{tp} 为 2 种不同结构对称性在相同应用条件下实现同样功能时的不同应用效果(图 3)。

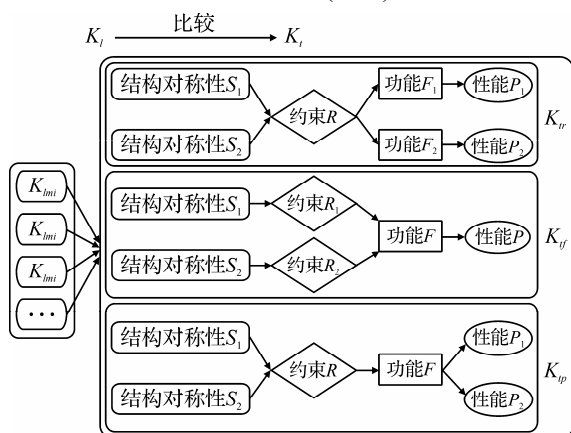


图3 同种对称性程度不同对称性类型的结构对称性设计知识模型

3.3 同种对称性类型不同对称性程度的结构对称性设计知识模型

将同种类型不同对称性程度的结构对称性(如平移对称、平移对称破缺和平移弱对称)的设计知识进行比较, 可以得到同种类型不同对称性程度的结构对称性设计知识, 即结构对称性程度的变化所带来的结构对称性功效变化规律。同种类型不同对称性程度的结构对称性设计知识可表述为 $K_d = \{K_{df}, K_{dr}, K_{dp}\}$, 其中, K_{df} 为相同应用条件下对称性程度改变带来功效的变化知识, K_{dr} 为相同功效时对称性程度改变带来应用条件的变化知识,

K_{dp} 为相同条件下实现相同功能时对称性程度改变带来应用效果的变化知识(图 4、图 5 和图 6)。

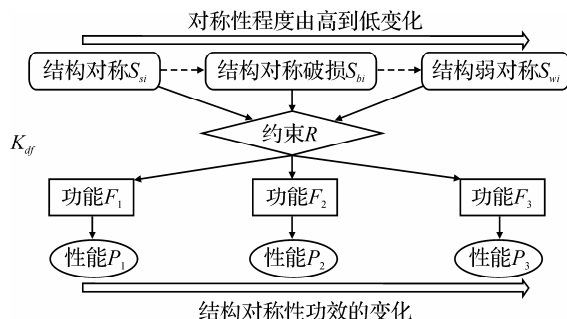


图4 相同应用条件下对称性程度改变带来的功效变化知识模型

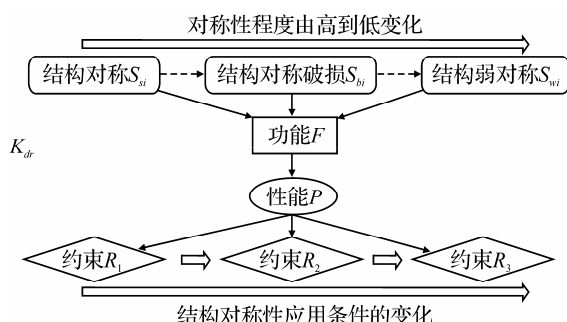


图5 相同功效时对称性程度的改变带来的应用条件变化知识模型

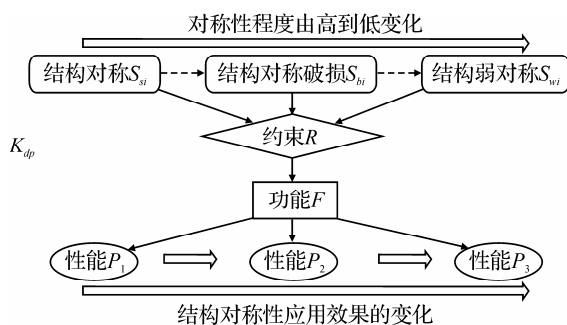


图6 相同条件下实现相同功能时对称性程度改变带来的应用效果的变化知识模型

3 种结构对称性设计知识 K_t 、 K_d 和 K_d 中, 以 K_t 为基础, K_d 和 K_d 是在 K_t 基础上通过比较总结得

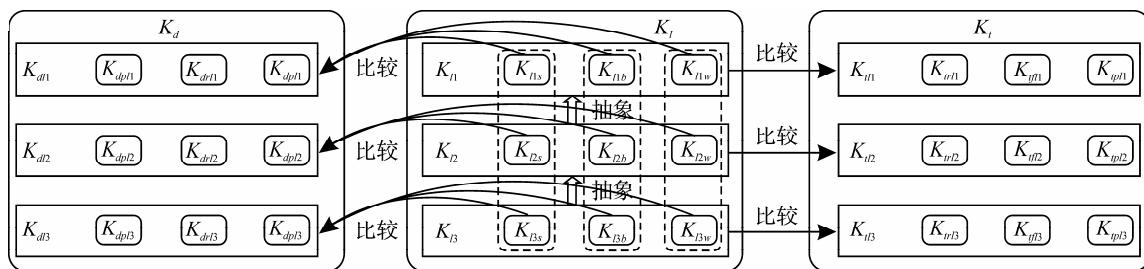


图7 3种结构对称性设计知识的关系

到, 与 K_l 一样, K_t 和 K_d 也具有层次性特征. 3 种设计知识的相互关系如图 7 所示. 本文提出的结构对称性设计知识模型包含了结构对称性与产品功能、性能和约束间比较全面的知识关系, 能在不同层次、不同粒度上描述某种结构对称性(或对称性要素)在何种条件(约束)下实现何种功能, 具有何种效果(性能), 是对结构对称性在机械系统中作用的较完整描述. 以往研究中也有机械结构对称性设计知识模型被提出, 但多数关注结构对称性和产品功能之间的知识关系上, 没有系统考虑结构对称性与性能、约束间的关系, 如文献[12]提出的“基于功能-结构映射模型(FS)的结构对称性设计知识”和“功能-结构设计原理-结构映射模型(FPS)的结构对称性设计知识”. 显然, 仅仅研究结构对称性在实现产品功能中的设计知识并不能完整描述结构对称性在机械系统中的作用, 而是必须综合考虑结构对称性与功能、性能和约束之间的复杂、多层次、多粒度的知识关系, 这也正是本文提出设计知识模型所要描述和表达的, 也是其比以往设计知识更完整、更实用的体现所在.

4 实例验证

建立的结构对称性设计知识模型用以描述对称性结构在机械产品中的作用, 通过分析结构对称性设计实例, 从实例中提取设计知识, 作为知识发现的基础. 因此, 建立的结构对称性设计知识模型必须能完整描述实例中的对称性结构功用, 本节以实例来验证建立的设计知识模型, 验证模型的实用性、完整性及可分析性等.

图 8 是一系列的蜗轮蜗杆结构^[13]. 首先对每个蜗轮蜗杆机构的对称性结构、对称性要素及其实现的功能、性能和约束进行分析, 得到表 1 的单种结构对称性的层次性设计知识.

图 8(a)是基本的蜗轮蜗杆结构, 是一种完全对称的结构, 其余蜗轮蜗杆是在基本蜗轮蜗杆基础上通过一定程度的对称破缺变化得到. 基本蜗杆机构发生破缺后, 根据不同的破缺属性特征, 可获得不同的破缺效果. 对表 1 中的设计知识进行对比总结, 可以得到同种对称性程度不同类型结构对称性的设计知识和同种类型不同对称性程度的结

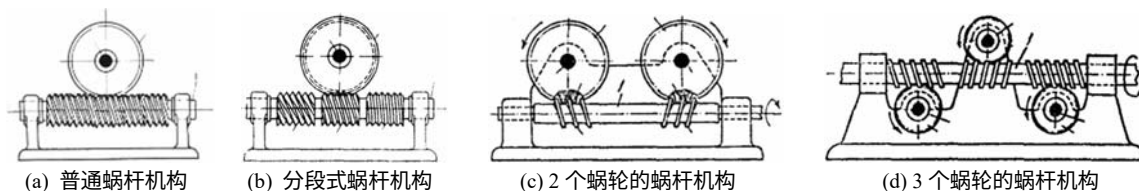


图 8 结构对称性实例^[13]

表 1 蜗轮蜗杆机构的单种结构对称性的层次性设计知识

机构名称	对称性类型	对称性要素	对称性要素结构	需求列表		
				功能 F	性能 P	约束 R
普通蜗杆机构 S_1	旋移对称			传递垂直轴线单向旋转 f_1	扩大功能作用强度 p_1 、提高功能作用稳定性 p_2	物料位置约束 r_1
		对称主体	蜗杆	输出旋转运动 f_2	提高功能作用稳定性 p_2	能量大小约束 r_2
		对称组元	轮齿	定向传递运动 f_3	提高功能作用强度 p_1	物料形状约束 r_3
		对称基准	轴线 A-A	限定物料位移 f_4	提高传动稳定性 p_3	物料位置约束 r_1
		对称操作	旋移操作 O_{sr}	传递垂直于轴线的旋转 f_1	较小设计成本 p_4	能量大小约束 r_2
分段式蜗杆机构 S_2	标度平移对称、旋移对称			调节转动速度 f_5	扩大功能作用范围 p_5	物料位置约束 r_1
		对称主体	蜗杆	输出旋转运动 f_2	提高功能作用稳定性 p_2	物料位置约束 r_1
		对称组元	轮齿	获得不同的速度比 f_6	扩大功能作用范围 p_5	物料形状约束 r_3
		对称基准	轴线 A-A	限定物料位移 f_4	提高传动稳定性 p_3	物料特性约束 r_4
		对称操作	标度平移操作 O_{sb}	标度平移操作 f_5	较小设计成本 p_4	物料位置约束 r_1

续表

机构名称	对称性类型	对称性要素	对称性要素结构	需求列表		
				功能 F	性能 P	约束 R
有 2 个蜗轮的蜗杆机构 S_3	镜射对称、 旋移对称	对称主体	蜗杆	输出 2 个反向旋转运动 f_7	提高功能作用稳定性 p_2	物料位置约束 r_1
		对称组元	轮齿	输出旋转运动 f_2	连续传递运动 p_6	物料位置约束 r_1
		对称基准	轴线 A-A	定向传递运动 f_3	提高传动稳定性 p_3	物料位置约束 r_1
		对称操作	旋移操作 O_{sr}	限制运动形式 f_8	提高传动稳定性 p_3	物料位置约束 r_1
有 3 个蜗轮的蜗杆机构 S_4	旋移对称、 滑移对称	对称主体	蜗杆	输出反向旋转的运动 f_7	减小设计成本 p_4	物料位置约束 r_1
		对称组元	轮齿	传递垂直轴线单向旋转运动 f_1	扩大功能作用稳定性 p_2 、运动形式约束 r_5	
		对称基准	轴线 A-A		连续实现功能 p_7	
		对称操作	旋移操作 O_{sr}	输出旋转运动 f_2	连续传递运动 p_6	运动形式约束 r_5
				变向传递运动 f_9	连续实现功能 p_8	物料位置约束 r_1
				限制运动形式 f_8	扩大功能作用范围 p_5	物料位置约束 r_1
				传递垂直轴线单向旋转运动 f_1	减小设计成本 p_4	运动形式约束 r_5

构对称性设计知识。

不同的破缺方式可得出不同的破缺结构,图9列示了不同的蜗轮蜗杆机构在不同层次实现的功能、性能和约束,随着破缺程度及破缺方式的变化,结构实现的功能、性能和约束也不完全相同,但也有重叠的部分,且部分破缺结构能够实现原理解的功能、性能及约束。如普通蜗杆蜗轮机构组元分布程度发生破缺后形成有3个蜗轮的蜗轮机构,在属性的很多方面都发生了变化,但是无论是破缺前结构还是破缺后结构都属于旋转机构,都具有传递垂直轴线单向旋转的功能。具体来看,普通蜗杆蜗轮机构的对称主体有传递周向旋转运动的功能,受物料位置约束,对称基准能够提高传动稳定性,而在3个蜗轮机构中,其对称主体同样能实现传递周向旋转运动的功能,但对称主体受运动形

式约束,其对称组元和对称基准受到物料位置约束,而对称组元能够用于提高传动稳定性。

文中提出的结构对称性设计知识模型包含了结构对称性的横向(单种对称性、不同种类对称性)设计知识、纵向(不同层次的同种对称性)设计知识以及不同对称性程度变化导致功效演变的设计知识,能对结构对称性在机械系统中的各种应用进行比较完整的涵盖。基于此模型建立的设计知识可指导结构对称性在机械系统中的合理应用,更好满足设计需求,提高产品的技术性、经济性和社会性。

5 结论

在机械产品中,对称性结构是一种常见结构。机械结构对称性有多种多样的存在形式,其对称性类型和对称性形式丰富多样,并对机械产品功能、性能和约束的实现起着重要的作用。系统地建立机械结构对称性设计知识和应用规律可以指导结构对称性在机械产品设计中的应用,有助于更好实现设计需求。要建立机械结构对称性设计知识,首先要建立机械结构对称性设计知识模型,用以描述结构对称性的功用。本文针对机械结构对称性的结构特征及其在机械产品设计需求实现中的作用方式,建立了较为完整的机械结构对称性设计知识模型,包括单种结构对称性不同层次的设计知识模型、同种对称性程度不同类型结构对称性的设计知识模型及同种类型不同对称性程度的

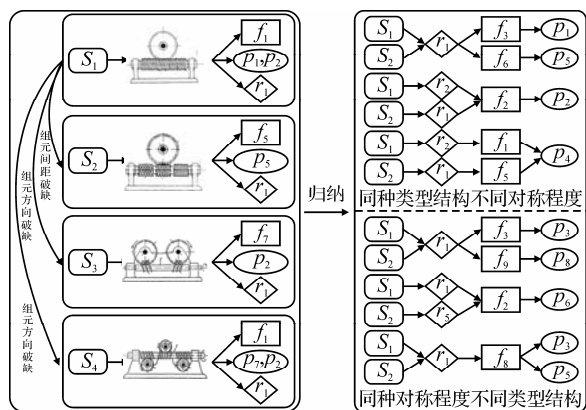


图9 不同类型、不同对称性程度的蜗轮蜗杆机构结构对称性设计知识

结构对称性设计知识模型。该模型可以描述不同层次的对称性,对称性要素的功用,不同类型的对称性功用的异同,不同对称性程度的对称性功用的异同,为全面深入挖掘结构对称性设计知识,建立结构对称性设计知识库,总结结构对称性应用规律奠定基础。

参考文献:

- [1] 冯培恩,马志勇,邱清盈.从自然科学到工程科学的对称性本体论研究[J].自然科学进展,2008,18(12):1441-1450.
- [2] 马志勇,邱清盈,冯培恩.机械对称性的概念体系及其应用方法[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(12):2354-2359.
- [3] 马志勇.机械对称的概念、作用及其应用知识获取的研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [4] 刘帆,马志勇,张太霞.机械结构静态对称概念体系及功能分析研究[J].机械设计与研究,2015(5):141-147.
- [5] 伊国栋.产品信息符号建模理论、方法及其应用研究[D].杭州:浙江大学,2003.
- [6] HARMER Q J, WEAVER P M, WALLACE K M. Design-led component selection[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(5):391-405.
- [7] 宋慧军,林志航.机械产品概念设计多层次混合映射功能求解框架[J].机械工程学报,2003,39(5):82-87.
- [8] 何斌.有助于产品创新的概念设计理论与方法的研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [9] PAHL G, BEITZ W, FELDHUSEN J, et al. Engineering Design[M]. 3rd ed. London: Springer, 2007:31-44.
- [10] UMEDA Y, MASAKI I, TOMIYAMA T. Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis & Manufacturing, 1996, 10(4):275-288.
- [11] FENG P E, XU G R, ZHANG M J. Feature modeling based on design catalogues for principle conceptual design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis & Manufacturing, 1996, 10(4):347-354.
- [12] MA Z Y, ZHANG T X, LIU F, et al. Knowledge discovery in design instances of mechanical structure symmetry[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(11):1-19.
- [13] 李宗良,林永立.现代机构百科(下册)[M].北京:世界图书出版公司,1990:154-156.
- [14] 刘伟平.机械结构对称破缺的概念、作用及其应用[D].杭州:浙江大学,2012.

Design knowledge model for mechanical product structure symmetry

YANG Jun-cheng^{1,2}, MA Zhi-yong^{1,2*}, ZHANG Tai-xia^{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: In this article the design knowledge model of mechanical product structure symmetry is studied. A comprehensive hierarchical model of mechanical structure symmetry is established, which includes strict structure symmetry, structure symmetry broken and weak structure symmetry. The design knowledge model of structure symmetry in realizing mechanical product function, performance and restriction is also built, including the hierarchical design knowledge model for a single symmetry type, the design knowledge model for structure symmetries which have same symmetry degree but different symmetry types, and the design knowledge model for structure symmetries which have same symmetry type but different symmetry degrees. The proposed design knowledge model can describe the design knowledge and their relationships of all structure symmetries from the views at different levels, different symmetry types and different symmetry degrees. The research result lays the theoretical foundation for the further research on design knowledge discovery and application rules of mechanical structure symmetry.

Key words: mechanical structure symmetry; function; performance; restriction; design knowledge model

(责任编辑 章践立)