

基于本体的产品创新设计知识网络研究

王有远¹, 周声灵²

(1. 南昌航空大学 工业工程研究所, 江西 南昌 330063;
2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:为提高产品设计者产生创新方案的效率,利用设计知识驱动产品创新设计,提出一种基于本体的产品创新设计知识网络构建及分析方法。在概念设计阶段,引入用户意图设计概念,利用 F、B、S、P 四类设计知识通过不同抽象层之间多对多映射关系,构建 PFBS 模型,建立设计知识网络并对其进行分析,计算和分析知识节点的度、集聚系数和效率等,挖掘网络拓扑结构特点,评价知识节点的重要度,在此基础上建立知识网络模型。以预警机产品中的多芯线缆为例,阐述线缆设计本体知识,构建了预警机产品线缆设计知识网络,验证了该方法在解决产品设计过程中设计效率低等问题的有效性。

关键词:本体;产品创新设计;知识网络;概念设计

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)01-0195-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.01.042

Research on Knowledge Network of Product Innovation Design Based on Ontology

WANG You-yuan¹, ZHOU Sheng-ling²

(1. Institute of Industrial Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To improve the efficiency of innovative solutions from product designers, the use of design knowledge in product innovation design driven, we put forward a method of construction and analysis of product innovation design knowledge network based on ontology. In the conceptual design stage, introduction of user intention design concept, the PFBS model is built by multiple mapping relationship of different layers of abstraction for four kinds of design knowledge like F, B, S, P. The knowledge network model is established on the basis of setting up and analysis of design knowledge network, calculation and analysis of the degree, clustering coefficient and efficiency of knowledge nodes, mining of features of network topology, and evaluation of importance degree of knowledge nodes. With multi core cable in AWACS products as example, the ontology knowledge of cable design is described, and the knowledge network of cable design for early warning machine is constructed. It was verified that this method is effective in solving the low efficiency in the design of product.

Key words: ontology; product innovation design; knowledge network; conceptual design

1 概述

随着客户对产品需求的多样化和个性化,产品的种类和功能与日俱增。在产品的设计中,涉及到的设计知识越来越多,涵盖的领域极广,同时产品设计的程度不断加深,因此对于企业,加强产品创新设计至关重要。在产品创新设计过程中,每个阶段都需要大量的设计知识,概念设计阶段是产品设计最初的阶段,是最能反映产品创新设计的阶段,对产品的成本和质量有很大影响。面对客户需要的不同产品,设计人员如何在海

量的设计知识中找到自己需要的,并对相关的知识进行管理、共享和采用,提高产品创新设计的效率,已成为知识网络下概念设计的研究热点。

在产品创新设计过程中,设计的知识对产品的创新起到了关键作用,更是产品设计成功的主要依据。随着新产品的开发与设计,不同的设计知识不断积累,各知识之间的映射、调用关系也变得越来越复杂,知识节点之间形成的网络结构将对各节点产生影响。挖掘其中的知识网络已成为有效挖掘知识资源内在关系,

收稿日期:2017-01-20

修回日期:2017-05-23

网络出版时间:2017-10-19

基金项目:江西省火炬计划项目(20151BBE51064);江西省科技支撑计划项目(20141BBE53005)

作者简介:王有远(1965-),男,教授,博士,研究方向为制造业信息化、智能制造;周声灵(1991-),男,硕士研究生,研究方向为数字化设计与制造。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20171019.1624.030.html>

实现产品创新设计的主要手段。

龙侃等^[1]通过对概念设计进行分析,提出一种知识网络模型,将产品的显性知识进行组织,使产品需求转变成产品功能,以得到产品结构的概念设计过程,同时对产品设计中的隐性知识进行挖掘,使其转化成显性知识;申妍等^[2]从本体的知识表示出发,提出基于本体的产品知识 F-B-S 表达模型,并对功能、行为、结构各领域本体进行形式化定义,使各模块之间的联系更清晰;郭乾统等^[3]给出了知识本体模型,分析了知识本体领域,研究了概念设计下的功能、行为、结构,构建多维设计知识分类体系,实现产品概念设计的创新;冯豪等^[4]对产品设计中的知识进行表示,给出面向对象的知识表示方法,并对其进行分类;刘培奇等^[5]提出扩展产生式规则,运用知识表示方法对其进行表示,采取概念图表达产生式规则的前提、结论和处理;陈继文^[6]等分析了产品设计中由新需求引起的新功能,采用分层递进的 F-B-S 本体映射,提出一种基于变型空间本体映射的 F-B-S 模型,得到变型功能元或者特殊功能元,通过在知识库中搜索相似名称的知识,实现产品创新设计;叶腾等^[7]构建知识传播理论模型,对知识传播效果在虚拟社区影响进行了分析,提出知识分享策略和创新策略在虚拟社区管理中的积极作用。

文中对概念设计阶段的产品创新设计进行了研究,提出基于本体的产品创新设计知识网络方法。引入用户意图设计概念,构建了 PFBS 模型,在此基础上计算和分析网络关键特征参数,评价知识节点的重要度,给出知识网络设计模型。

2 基于本体的产品创新设计知识网络

在产品创新设计中,概念设计阶段是最能体现设计内容,完成对产品的功能分析,以及实现功能的结构载体^[8]。产品概念设计是指用户提出产品要求到产品概念形成的这一阶段。其包含两个设计过程:将用户提出的需求转化为产品设计功能的分析;将产品设计功能转化为产品设计结构。

在设计过程中,设计者需要查询大量的设计知识,然而在产品创新设计过程中需涉及到的知识复杂多样,一般都是多个学科的知识交叉,给设计者带来了困难。同时,传统的知识获取不仅准确性不高,而且效率低。

本体的引入可以对产品的概念设计过程中的不同信息进行语义化,通过本体语言构造一致的上下文,完成基于知识的推理与描述,使产品创新设计得到支持。本体是知识表达的一种良好载体,对各知识进行形式化描述,可以很好地建立上述知识之间的联系,使设计知识之间进行数据共享。

在设计过程中,功能、行为和结构是设计领域中的基本概念,可以作为描述设计对象知识的本体^[9]。产品的设计必须满足用户的要求,因此用户意图也可以作为设计的基本概念,是产品创新设计的评价标准。

对于产品,用户关心的是设计出的产品是否符合自己的需求,满足不同用户广大的需求也是实现产品创新的核心。在产品设计上,若要赢得竞争就必须以市场为导向、以获取用户需求知识为核心。融合用户需求(P)、设计约束(C)、原理空间(W)和设计描述(D),提出一个更为全面的 PFBS 模型,如图 1 所示。

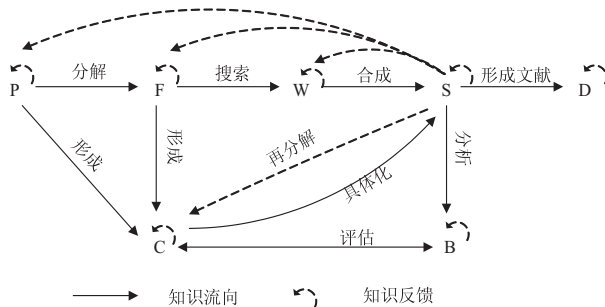


图 1 PFBS 模型

从该模型可以看出设计知识的流向和设计之间的约束关系,及应基于何种知识通过哪些设计活动获取新知识。

在产品设计中,概念设计阶段知识之间彼此映射形成的网络关系,可以将功能、行为、结构和用户需求四类知识作为网络中的知识节点,各知识之间交流形成的路径抽象为网络的边^[10]。对概念设计阶段的知识特点进行分析,探寻知识与知识的内在关联,并组建设计知识网络,挖掘知识之间表达和驱动之间的关系。概念设计知识映射关系形成的网络可以投影为同类知识单顶点网络,将同一类知识节点看成中心顶点集,分别得到功能类、行为类、结构类、用户需求类知识中心顶点集,构成一个由知识集成的知识网络结构关系。其中知识间形成的边的权重表示单个知识节点在其同类知识中心顶点集中占的比重,权重值的大小代表知识节点在知识网络中的重要性,权重值越大,设计知识越重要。因此,在知识网络中挖掘重要的知识节点,驱动知识创新,是产品创新设计的关键。

3 基于本体的产品创新设计知识网络建模

知识网络可以很清晰地描述设计过程,设计者能快速准确地找到所需要的设计知识资源,有利于设计过程中的知识重用与共享^[11]。在设计过程中,各个相关的知识节点都会关联起来,设计者可以通过知识节点形成的知识网络观察整个设计知识的结构 and 应用背景,对整个设计过程中的设计知识进行全面了解,而不局限于了解单个知识点的内容、结构、使用条件等

信息。

3.1 设计知识网络的特征分析

基于本体的产品创新设计知识网络是在知识网络特性的基础上进行研究的。文中根据概念设计过程中知识网络的结构特点,对网络中知识进行了分析,定义了知识节点度,并对知识集聚系数、知识节点效率和知识间平均路径长度进行了分析,通过知识节点间加权关联系数,揭示各知识节点在知识网络中起到的作用,为知识驱动产品创新设计提供了科学依据。

(1) 知识节点的度及度分布。

在产品概念设计中,每个设计知识构成知识节点,知识节点与知识节点之间的联系构成网络中的边,每两个知识节点 V_i 构成的邻边数 k_i 称为知识节点的度。知识节点的度是指该知识节点与其相关联的知识节点之间联系的频率,反映该知识节点和其相连接的知识节点的程度。知识节点度是随机抽取到度为 k 的节点的概率,即知识节点数量为 k 与整个知识网络中的知识节点数量的比值,记为 $P(k)$:

$$P(k) = n_k / \sum_{j=1}^n n_j = n_k / M \quad (1)$$

其中, n_j 是度为 j 节点的点数, j 可以从 1 取到 n ; M 为整个网络中的节点数。显然, $P(1)$ 一直加到 $P(n)$ 的 n 项和为 1。

网络中各节点的度是不一样的,可以根据比较度的大小来判断节点的重要性,节点的度越大,说明该节点与其他节点的关联越多,也更重要。在知识网络中,网络的节点的度也服从一定的分布规律,例如 t 分布、 F 分布等。实验结果表明,很多实际网络中度的分布服从幂率分布,即 $P(k) = CNk^{-\tau}$, $CN = 1 / \sum_{k=1}^n k^{-\tau}$ 。因此,文中采用幂率分布。

(2) 知识节点的集聚系数。

知识节点的集聚系数是描述一个知识节点与其相连的节点联系的紧密程度。在知识网络中,每个知识节点都会形成一个或大或小的知识集聚,可以分别反映出以知识节点 V_i 为中心的知识集聚程度,记为 C_i :

$$C_i = 2M_i / [K_i(K_i - 1)] \quad (2)$$

其中, V_i 与 K_i 个节点直接连接,在知识网络中, K_i 个节点之间存在的最大的边数目为 $K_i(K_i - 1)/2$,但在实际的网络中存在的边数为 M_i 。

从知识节点的集聚系数可以看出,一个知识节点与其他知识节点凝聚的知识越多,集聚系数越高,说明该知识节点与其他知识节点互通得越多,在整个网络中越重要,是辅助设计者选择关键节点的重要依据。

(3) 知识节点的效率。

知识节点与知识节点之间形成的边的距离都是不

一样的,所以知识在流过的时间也不一样。知识节点的效率(I_i)是反映某一知识节点与其相连的知识节点在知识流经过的效率。节点之间的距离越短,效率就越高,能更快地到达目的地。

$$I_i = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{1}{d_{ik}} \quad (3)$$

其中, n 为网络中的节点数目; d_{ik} 为节点 i 与 k 之间的距离。 I_i 的值越大,表示知识节点的效率越高,该知识节点到达其相连的知识节点越快,能够以最短途径到达目的地,较大程度上激励设计者产生新方案。

(4) 知识间平均路径长度。

每个知识节点的重要性可以用度来衡量,但是当知识节点上的度都是一样时,知识与知识间传递的速度也不一样。知识间平均路径长度的引入可以很好地解决度相同的问题。知识间平均路径长度(F_i)是指两知识间的平均最短距离,可以用来表示知识在知识网络中传递的效率。知识间平均路径长度越短,说明该节点对其他节点的影响越大。

$$F_i = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (4)$$

其中, N 为网络中节点的数量; d_{ij} 为知识节点 i 和 j 之间的最短距离。

(5) 知识节点间加权关联系数。

在知识网络中,知识节点之间彼此关联的大小,可以根据关联次数的多少和具体关联权重的大小来判断。将知识节点之间这种加权的关系称为知识节点间的关联系数 $R(i, j)$ 。关联系数从 F、B、S、P 不同角度判断知识节点在整个网络中的关联程度,知识节点之间关联越紧密,关联系数就越大。

$$R(i, j) = \varepsilon_{i-j} + \omega_{i-j} + \beta_{i-j} + \varphi_{i-j} \quad (5)$$

其中, ε_{i-j} 为功能关联权重; ω_{i-j} 为行为关联权重; β_{i-j} 为结构关联权重; φ_{i-j} 为用户意图关联权重。

3.2 知识节点重要度评价

从知识节点度 k_i 、集聚系数 C_i 、节点效率 I_i 、知识间平均路径长度 I_i 的物理意义可以看出,知识网络中特征参数指数越高,代表该知识节点在该网络知识里越重要,到达其他知识节点越快,即该知识更容易引起其他知识变化,更容易影响产品创新设计。

因此分析知识网络中的每个节点,找到重要节点,通过对知识重要度进行排序,使得知识变得有序,从而提高产品创新设计的效率。

在产品创新设计中,设计知识形成的知识网络,仅通过其中的某一指标去判断知识节点在该网络中的重要性是不科学的。因此采用知识节点的度、集聚系数、节点效率、知识间平均路径长度等多种知识评价指标,综合判断节点在网络中发挥的作用。知识节点重要度

评价用 X_i 表示,在知识网络中,知识节点度的评价和 4 个特征参数都呈线性关系。

$$\left\{ \begin{aligned} k_i &= \frac{k_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i} \\ C_i &= \frac{C_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i} \\ I_i &= \frac{I_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i} \\ F_i &= \frac{F_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

其中, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。根据公式可以对每个特征参数进行计算和分析,得到重要度指标的一般公式。

$$X_i = \omega_1 k_i + \omega_2 C_i + \omega_3 I_i + \omega_4 F_i \quad (7)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别是各自指标的影响系数,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ 。

3.3 基于本体的产品创新设计知识网络模型

面对海量的设计知识,设计者需要在众多的设计知识里快速准确地找到自己需要的,而且产品设计中设计知识的表示也不相同,因此需要合理的方式对产品知识模型进行描述,解决结构、行为、功能和用户意图建模等问题。因此,构建了基于本体的产品创新设计知识网络模型,分别把结构、行为、功能和用户意图设计知识作为网络中的节点,将各知识之间彼此联系映射关系抽象为网络的边^[12]。由于设计知识节点之间可以相互映射和联系,所以取网络中的边为无向边。设计的模型如图 2 所示。

将用户意图设计知识引入到知识网络模型中,通过 P-F 循环映射可以得到功能,使得用户对产品的意

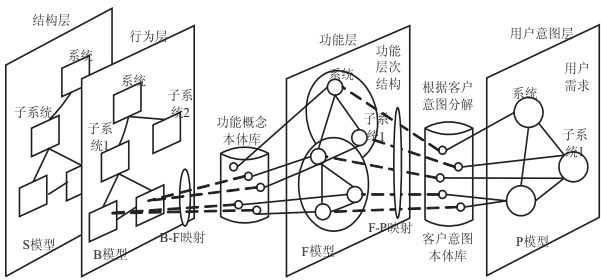


图 2 基于本体的产品创新设计知识网络模型

图语义化成功能模型。如果经过功能模块验证不符合要求,将重新进行 P-F 映射,直到得到符合要求的功能时,才进行下一步 F-B 映射。

功能与行为之间通过功能概念本体和映射原语连接^[13]。基于本体的产品创新设计知识驱动成功解决了用户意图与功能、功能与行为、行为与结构之间的多对多映射关系。在产品创新设计中,根据用户提出的需求,通过将用户意图知识语义化,与功能、行为、结构知识构成由知识节点形成的网络^[14]。通过对网络设计知识进行分析,挖掘驱动产品创新设计的知识,完善知识节点重要度,发现设计中的重要知识,最终得到求解产品创新的最优设计方案。

4 应用实例

为验证基于本体的产品创新设计知识网络的有效性,以预警机产品中的多芯线缆为例,借助本体开发软件工具 protégé 对其进行本体知识构建。在本例中,包含线缆知识、多芯线缆、知识类别、物理属性、分布电容等类目。

线缆是预警机中用于控制安装、设备连接及电力输送的重要部件,是电气设备和电器元器件中电线、光缆的总称。对电缆设计中知识本体的构建如图 3 所示。

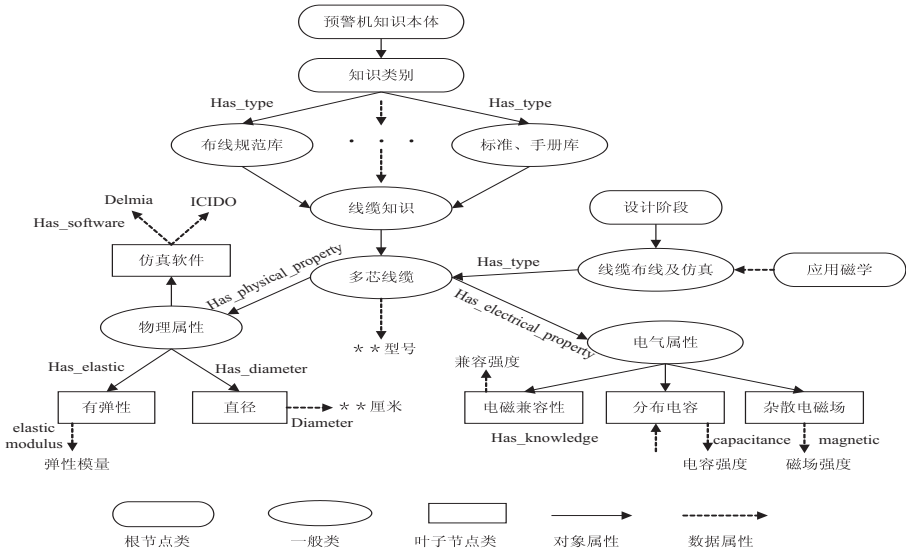


图 3 预警机中电缆设计知识本体构建

预警机产品中的多芯线缆的设计知识会随着企业的发展不断增多,使得知识与知识之间的关联增加,构成的知识网络也将变得越来越复杂。同时,对于新增的设计知识较容易从成熟的知识基础上得到,也更容易和

已构建好的设计知识进行关联和联系,反映了知识网络中的增长特性和择优特性。预警机产品线缆设计知识网络如图4所示。

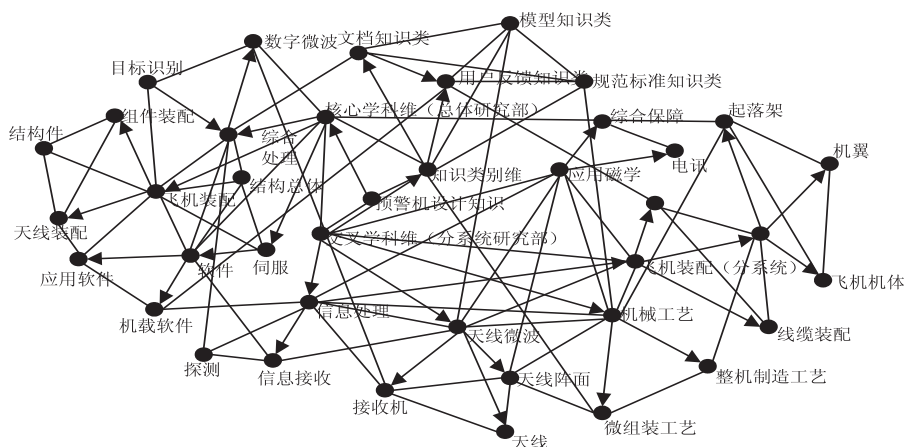


图4 预警机产品线缆设计知识网络

采用 Pajek 生成具有 40 个知识节点以及 102 条边的知识网络,如图4所示。随着设计知识节点的增多,节点与节点之间的关系变得复杂,网络也将变得复杂。挖掘网络知识节点的重要度,为设计者提供可靠有序的设计知识,激励处于知识网络中相对重要的知识节点,利用节点与节点之间的关联关系,以点带面驱动整个知识网络,实现产品创新设计,提高企业的竞争力。

5 结束语

针对产品创新设计过程中的概念设计进行研究,提出基于本体的产品创新设计知识网络方法。引入用户意图设计概念,构建了设计知识网络模型,利用 F、B、S、P 四类设计知识通过不同抽象层之间多对多映射关系,为设计知识的计算和分析网络关键特征参数提供了一个网络结构基础。通过实例表明,该方法有效解决了产品设计过程中设计效率低的问题。

参考文献:

- [1] 龙侃,纪杨建.面向产品概念设计的知识网络模型[J].机械工程师,2010(12):27-29.
- [2] 申妍,魏小鹏,王建维.基于本体的产品知识表示方法研究[J].计算机系统应用,2009,18(7):84-87.
- [3] 郭乾统,田凌.面向机械产品概念设计的知识库设计研究[J].图学学报,2015,36(5):712-723.
- [4] 冯豪,何玉林,麻芳兰,等.面向对象知识表示方法在摩托车设计中的应用[J].重庆大学学报:自然科学版,2005,28(1):1-4.
- [5] 刘培奇,李增智,赵银亮.扩展产生式规则知识表示方法

- [J].西安交通大学学报,2004,38(6):587-590.
- [6] 陈继文,杨红娟,张进生,等.基于变型空间 FBS 本体映射的产品创新设计方法[J].计算机集成制造系统,2013,19(11):2671-2679.
- [7] 叶腾,韩丽川,邢春晓,等.基于复杂网络的虚拟社区创新知识传播机制研究[J].现代图书情报技术,2016,32:70-77.
- [8] 王玉新.复杂机械系统快速创新设计[M].北京:科学出版社,2006.
- [9] 王有远,王发麟,廖杰.基于本体的协同设计产品信息模型研究[J].制造业自动化,2014,36(5):105-108.
- [10] WANG J. A knowledge network constructed by integrating classification,thesaurus,and metadata in digital library[J]. Bulletin of the American Society for Information Science & Technology,2003,29(2):24-28.
- [11] 杨琨,李彦,熊艳,等.基于复杂网络的知识驱动产品创新设计[J].计算机集成制造系统,2015,21(9):2257-2269.
- [12] KLENK N L,HICKEY G M. Improving the social robustness of research networks for sustainable natural resource management:results of a Delphi study in Canada[J]. Science & Public Policy,2012,39:357-372.
- [13] CATS O,JENELIUS E. Planning for the unexpected:the value of reserve capacity for public transport network robustness[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice,2015,81:47-61.
- [14] ZHANG H,WU W,ZHAO L. A study of knowledge super-networks and network robustness in different business incubators[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications,2016,447:545-560.