

基于产品族的核心模块演进分析与评价方法*

吴永明 侯亮 祝青园 赖荣燊 钱尧一 林森泉

(厦门大学机电工程系, 厦门 361005)

摘要: 针对产品族设计中核心模块演进问题,研究了产品族核心模块演进规律与演进过程评价,提出了一种模块演进规律分析与评价方法。该方法研究了客户需求与产品核心模块设计之间的关系,并在现有产品核心模块基础上,进一步对模块部件的标准化、继承性等指标进行了分析;在需求分析过程中,建立了一种基于贝叶斯网络的核心模块演进分析模型,利用历史数据对该模型进行了训练,将客户需求作为证据对该模型进行推理,进而得出核心模块在设计与工艺方面的改变规律;在演进规律分析基础上,对现有核心模块部件设计参数、标准部件重用度进行了分析,获得了核心模块演进过程综合评价。最后,用小型轮式装载机后车架模块的演进过程验证了该方法的可行性和正确性。

关键词: 大规模定制 核心模块 贝叶斯网络 演进评价

中图分类号: F273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0294-10

引言

为了适应动态的市场需求,需要快速、高质量、高效率、低成本配置出面向不同用户群体的个性化产品,大批量定制(MC)已被越来越多的企业所采用^[1],这种研发和生产模式正逐渐成为主流^[2]。产品族设计作为实施大批量定制生产的有效手段^[3],得到了学术界和工业界的广泛认同,基于模块化的产品族设计以灵活、高效的组织形式,实现产品多样化与生产标准化之间的平衡,被视为增强企业核心能力的重要手段^[4]。

基于模块化的产品族设计是MC有效设计方法,通过对产品核心模块添加、删除、替换一个或多个模块,衍生出不同的产品,同时模块化设计也是实现产品改进、升级、扩展等创新方法的基础,为客户提供定制化产品而减少内部多样化的有效策略。目前,有很多关于产品族模块化设计与评价研究^[5-10],这些研究在新产品开发中,产品族模块化战略能带来竞争优势,同时产品族演进评价也是产品族创新决策的基础,以上研究对基于模块化的产品族设计、产品族评价起了非常重要的推动作用,但大多数研究局限于产品族模块规划研究与评价,即根据产品实现功能对产品族进行模块划分或规划,

从整体上分析产品族模块之间的关系,而针对某个具体功能模块的演进研究较少,尤其缺少对产品族核心模块的演进研究,产品族演进评价大多停留在产品族整体上,也未能对产品族具体模块演进过程进行分析评价。

本文从微观角度,以产品族核心模块为研究对象,提出核心模块演进规律分析和评价方法,建立产品族核心模块贝叶斯网络分析模型,从概率论的角度,充分考虑市场需求的不确定性与产品模块设计方法的多样性,通过大量客户需求数据和模块设计历史数据对建立的网络模型进行训练,经网络模型推理得出产品族核心模块的演进规律,同时对产品族核心模块演进过程做出综合评价,利用模块设计方法对模块演进规律进行分析和评价。

1 传统的模块设计与综合演进设计方法

自上而下法与自下而上法是产品模块设计的两种基本方法^[11]。自上而下法是一种前置模块设计方法,即根据客户需求,主观地提前确定产品模块设计框架,确定有关参数范围;自下而上法是一种对现有产品模块进行修正的演进设计方法,并对产品模块演进创新进行评判,设计者可以充分利用现有的类似模块设计出新模块,从而节省设

收稿日期: 2013-05-09 修回日期: 2013-11-25

* 国家自然科学基金资助项目(71172055)和科技部创新方法工作专项资助项目(2011IM020400)

作者简介: 吴永明, 博士生, 主要从事数据挖掘和产品族设计研究, E-mail: wu20811055@163.com

通讯作者: 祝青园, 助理教授, 主要从事复杂机电装备系统设计与分析和机械设计创新方法研究, E-mail: zhuqy@xmu.edu.cn

计时间。

1.1 自上而下法与自下而上法

在模块设计出来之前,有意识地提前规划产品核心模块来开发产品族,主要基于各种优化算法,通过确定模块设计参数范围,适用于产品模块变量不多的情况,设计比较困难,但模块演进创新空间比较大,可以根据环境的变化进行动态的设计,PPCEM模块设计方法为典型自上而下设计法。对已经存在的一组类似模块进行功能分析和重新设计,将模块部件标准化,得到更具竞争实力的产品,优点在于模块部件设计的标准化和设计重复的最小化,设计者可以利用类似的部件设计出新的产品,大大节省设计时间,Dahmus模块设计方法为典型自下而上设计法。

以上两种设计方式都能对产品模块进行演进设计,创新出更有竞争力的产品。PPCEM方法通过改变模块中一个或多个参数,来满足不同的市场和顾客需求,设计过程难度较大,演进跨度较大,研究成果相对较少;Dahmus方法通过吸取已有模块设计精华,设计出更具有标准化的产品模块,利用各种优化方法可以对已有产品模块进行优化,利用以前类似模块部件设计出新的模块部件,但该方法只能在已经存在模块基础上进行设计,演进层次比前一种设计方法低,也没有充分考虑市场需求与环境的变化对产品模块的影响。因此,本文从模块综合设计的角度对核心模块的演进进行分析。

1.2 产品模块综合演进设计方法

在产品族设计中,为了实现产品模块的设计满足客户市场需求,同时继承原有产品类似模块的优良元素,采取用户需求与实例产品共同驱动的方式进行产品模块设计,即综合自上而下与自下而上的研究方法对产品模块进行设计。首先要有产品模块总体设计(自上而下法),在具体结构设计时,尽可能选用已有的标准件和通用件(自下而上法),以减少设计的重复性,提高模块的通用性。产品模块的规划与设计不仅涉及到原有产品,继承已有模块的优良特性,而且企业外部与内部因素存在诸多的不确定性,模块规划需要满足市场需求,综合考虑外部环境及其自身的特点进行演进是产品模块设计的必然趋势。产品族模块演进与产品模块设计方法有着极其重要的联系,同时,客户需求变化也是驱动产品族模块演进的重要原因,因此,本文从模块设计方式和客户需求两个方面综合分析产品族模块的演进规律,并对产品族核心模块的演进过程进行综合评价。

2 产品族核心模块演进分析流程

通过上节对产品族模块设计方式的分析可知,模块演进不仅涉及到客户需求的动态市场,而且需要充分考虑现有产品模块设计,产品族模块演进分析流程如图1所示。

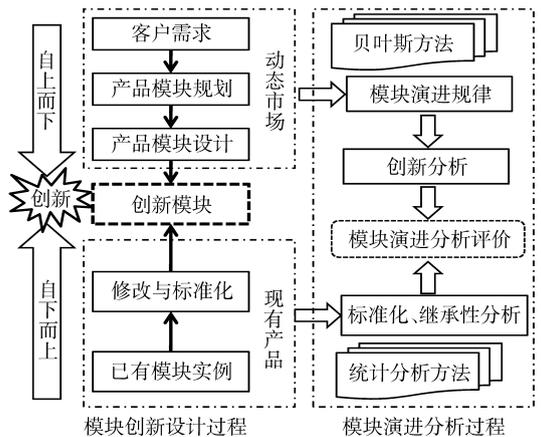


图1 模块演进分析总体框架

Fig.1 Framework for module evolution analysis

由图1可知,在客户需求变化频繁,市场多极化的情况下,产品模块演进分析应充分考虑市场客户需求的不确定性、易变性和随机性,因此,本文采取贝叶斯网络模型对用户需求、产品模块设计数据进行分析,即用企业数据库中市场需求数据与产品模块设计数据对网络进行训练,同时加入领域专家的经验知识对训练好的网络进行修正,使建立的贝叶斯网络分析模型不仅具有客观性,同时也融入了领域专家的先验知识,对核心模块的演进创新程度给出主观评价。贝叶斯网络模型能够很好地反映客户需求及动态环境的不确定性,对建立的网络模型进行推理,进而得出隐藏的市场需求与模块参数或属性变化关系,进一步得出产品模块在市场驱动下的演进规律,并从产品模块的设计方面对产品族模块的演进创新进行评价;另一方面,在已有产品族模块的基础上,采用统计分析方法对演进模块之间的通用性、模块部件标准化进行分析评价,最后,通过以上两方面的评价分析对产品族模块演进做综合评价。

产品族模块的演进分析关键在于分析隐藏在客户需求与模块设计、工艺之间的规律,在客户需求方面,客户只关心定制化的产品是否满足自身的需求,在设计方面,设计者着重在满足客户需求的同时尽量减少设计,模块的演进分析应同时针对以上两个方面,其具体分析过程如图2所示。

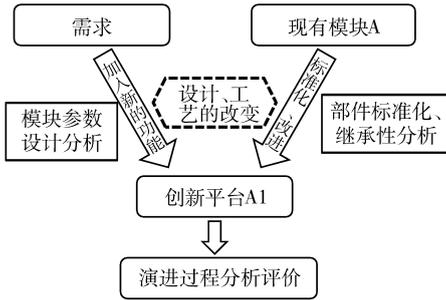


图2 产品模块演进分析过程

Fig.2 Evolution analysis process for product modules

3 产品核心模块贝叶斯网络演进模型建立

3.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络^[12]也称为信念网络,是描述数据变量之间依赖关系的一种图像模式,可以用来推理的一种模型,主要用来处理不确定性问题,为人们提供一种方便的框架结构来表示因果关系,使不确定性推理在逻辑上变得更为清晰,可以利用贝叶斯网络分析产品族中产品核心模块属性之间的相互关系,可理解性强。贝叶斯网络由代表变量的节点及连接这些节点的有向边构成,其具体描述如下:

定义:设变量集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 其中 X_i 的定义域为一个有限集 $Val(X_i)$, 以二元组 $N = \langle G, P \rangle$ 表示一个建立在变量集 X 上的贝叶斯网络, 其中 G 代表一个有向无环图, 其节点的取值为变量集 X 中的随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n , 其有向边代表节点间的因果关系, P 为 G 中节点的条件概率, 图中每个节点 X_i 都有一个条件概率表: $P(X_i | P_a(X_i), X_i \in X)$, 表达了在其父节点 $P_a(X_i)$ 发生的前提下节点 X_i 的条件概率, 则整个网络 N 的联合分布^[13]为

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (1)$$

一个简单的贝叶斯网络如图3所示。

其特点为:①可以直观地从贝叶斯网络中得出属性间的条件独立以及依赖关系,每个节点代表一个研究的属性/变量,节点间的弧代表概率的依赖关系(因果关系),利用贝叶斯网络进行推理和预测,可以使研究对象属性之间变得清晰。②贝叶斯网络用另外一种形式表示出了事件的联合概率分布,根据网络的结构以及条件概率表可以快速推断每个事件的概率。

3.2 贝叶斯网络演进模型的建立

3.2.1 网络模型结构

(1)学习算法确定网络结构

网络结构的学习被证明是 NP 难问题,比较著

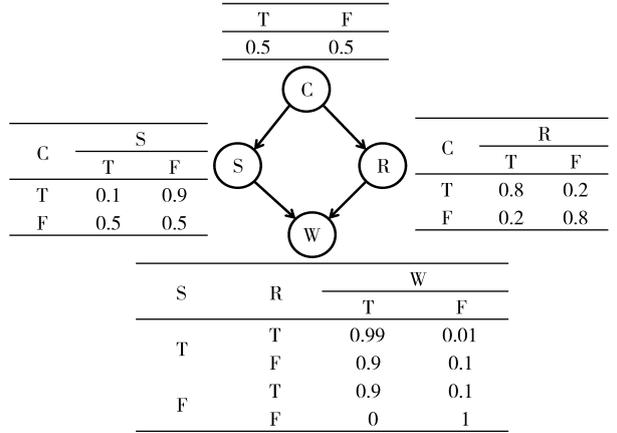


图3 一个简单的贝叶斯网络

Fig.3 A simple Bayesian network

名的结构学习算法有 TANC 算法、K2 算法、贪婪搜索 GS 算法以及爬山 HC 算法等。通常情况下,网络通过互信息衡量节点间关系依赖程度,如节点间的互信息大于给定的某个阈值 α 时,则网络中这两个节点之间就存在一条边,两个节点 X_1, X_2 的互信息^[14] $I(X_1, X_2)$ 为

$$I(X_1, X_2) = \sum_{X_1, X_2} P(X_1, X_2) \lg \frac{P(X_1)P(X_2)}{P(X_1, X_2)} \quad (2)$$

在数据完备的情况下,贝叶斯网络结构学习就是在给定的数据集中找出一个能最好解释样本数据集的有向无环图,其原理为:设训练数据集 D , 令 S^h 为网络结构的某种假设,从数据集 D 中学习出最好的结构 S , 其实质就是找到 $P(S^h | D)$ 取最大值的过程,根据贝叶斯定理有

$$P(S^h | D) = \frac{P(S^h, D)}{P(D)} = \frac{P(D | S^h)P(S^h)}{P(D)} \quad (3)$$

式中 $P(D)$ ——与网络无关的常数

$P(D | S^h)$ ——网络的边界似然

$P(S^h)$ ——网络结构先验概率,取值为常数

因此,确定网络结构的后验分布等同于为每个可能的结构计算数据的极大可能的假设。

(2)根据实际情况确定网络结构

为了保证建立的网络结构具有客观性,核心模块贝叶斯网络模型的建立需要综合考虑市场需求、设计工艺的变化。网络的确定应加入模块设计领域专家的先验知识以及对演进创新程度进行评价,其中包括节点的依赖关系及其概率的大小,使建立的网络结构层次清晰,更容易理解,同时也便于网络的推理,以及后期对分析模型的修正。

在确定贝叶斯网络分析模型结构过程中,应首先确定网络分析模型中的节点变量,利用产品核心模块的历史数据对网络结构进行训练,初步确定节

点的关系；然后，充分考虑领域专家的模块设计经验，对训练好的网络结构进行修正，确定网络的边是否存在，并加入对产品核心模块创新程度进行量化的节点（即加入该领域专家的经验知识，对演进创新程度给予评价），以便能对核心模块的演进过程做出评价，为进一步综合评价提供理论依据。本文以机械产品核心模块为研究对象，将网络结构从上至下分为 4 层：需求层（A）、设计工艺层（B）、模块指标层（C）以及创新评价层（D），网络的上一层是下一层的原因，网络模型中的虚线表示复杂的隐藏关系，建立的基于贝叶斯网络的产品核心模块分析模型如图 4 所示。

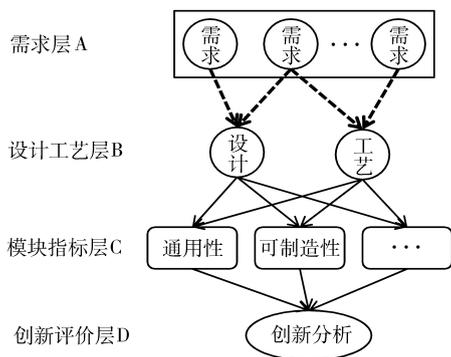


图 4 基于贝叶斯网络的产品核心模块演进分析模型

Fig. 4 Evolution analysis model based on Bayesian network for product core module

3.2.2 产品核心模块贝叶斯网络参数学习及推理

在给定的训练样本集 D 和网络拓扑结构 S^h 的情况下，利用先验知识，确定网络节点变量的概率密度。设变量集 $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，其中 n 为变量个数，对每个节点变量 x_i 其值域为 $\{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{r_i}\}$ （假设变量 x_i 是 r_i 维的）， f_i 是节点 x_i 的父节点集，令 $\theta_{ijk} = P(x_i^k | f_i^j)$ 表示在给定父节点集 f_i 为第 j 种可能取值时（假设有 R_i 种可能的取值），节点 x_i 为第 k 种取值的概率，则对整个网络各节点的概率密度即为： $P(\theta | D, S^h)$ 。为表示方便，定义参数向量

$$\theta_{ij} = (\theta_{ij1}, \theta_{ij2}, \dots, \theta_{ijr_i}) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, R_i) \quad (4)$$

在样本数据比较完备，参数 θ_{ij} 相互独立，每一个参数向量 θ_{ij} 有先验 Dirichlet 分布 $\text{Dir}(\theta_{ij} | \alpha_{ij1}, \alpha_{ij2}, \dots, \alpha_{ijr_i})$ 的假设情况下，则后验概率分布为^[15]

$$P(\theta_{ij} | D, S^h) = \text{Dir}(\theta_{ij} | \alpha_{ij1} + N_{ij1}, \alpha_{ij2} + N_{ij2}, \dots, \alpha_{ijr_i} + N_{ijr_i}) \quad (5)$$

式中， N_{ijk} 为第 i 个节点为第 k 种取值且父节点集为第 j 种取值时，数据集 D 中的样本数采用贝叶斯学习算法对网络分析模型进行参数学习时，关于网络分析模型的推理，常见的有联合树推理、全局联合树

推理、信念传播推理以及变量消元推理算法等，本文利用联合树推理算法对网络模型进行推理。

4 产品核心模块部件通用化与标准化分析

通过产品核心模块贝叶斯网络建模推理，对核心模块的演进设计满足了模块定制化需求，另一方面，提高核心模块部件标准化和继承性又有利于降低生产成本，提高规模经济效益。设核心模块中有 m 个部件，每个部件设计参数为 n 个；模块间相同的部件（共享部件）数为 C ；则构成的核心模块部件设计参数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 p_{mn} ——模块中部件 m 第 n 个设计参数

m 个部件两两比较并计算其相似性度，部件 i, j 的相似性 r_{ij} 为

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{k=1}^n (p_{ik} - p_{jk})^2}{S_k^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中

$$S_k^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_{ik} - \bar{p}_k)^2$$

$$\bar{p}_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{ik} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

得到对称矩阵

$$A'_{m \times m} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)矩阵进行 0-1 归一化处理得

$$A''_{m \times m} = \begin{bmatrix} r'_{11} & \dots & r'_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r'_{m1} & \dots & r'_{mm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则产品模块评价指数 S 可由标准化和继承性两部分组成，标准化主要针对模块部件设计参数，使设计达到标准和统一；继承性主要使模块演进前后相同部件得到最大程度的共享，减少重复设计，其计算方式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m r'_{ij}}{2m^2} + \frac{C}{2m} \quad (10)$$

式中 r'_{ij} ——归一化矩阵 $A''_{m \times m}$ 元素值

S ($S \in 0, 1$) 越大说明核心模块的标准化与继承性的程度越高，反之的越低。通过控制产品核心模块设计参数和共享零部件，在产品核心模块满足性能

需求的基础上使 S 越大。

5 应用实例

为了实现小型轮式装载机大批量生产,企业大多采取基于模块化的产品族设计,对于轮式装载机产品族,其结构复杂,组成零部件众多,而后车架是装载机产品族行走系统中的核心模块,同时也是实现装载机产品族派生和变型的基础,因此,本文以某企业生产的小型轮式装载机后车架模块(核心模块)为例,对提出的核心模块演进进行实例分析,验证面向产品族设计的后车架模块设计演进规律。

装载机的后车架是整机的主要承载骨架。随着装载机的大型化,装载强度提高,后车架容易断裂或变形,在保证后车架功能不变的情况下,其设计需要综合考虑成本、结构通用性,工艺等方面来满足质量要求,某型号装载机后车架示意图如图5所示。

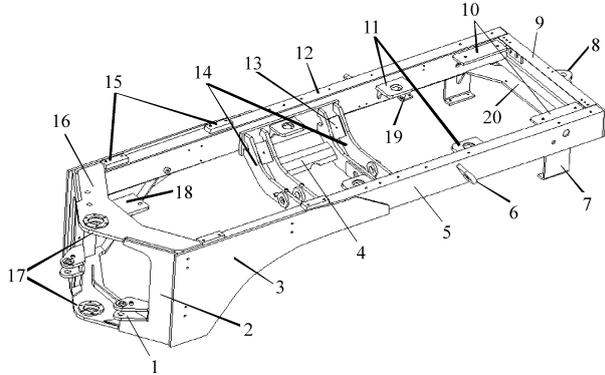


图5 装载机后车架示意图

Fig. 5 Rear frame sketch of a loader

1. 转向油缸支座 2. 前封板 3. 加强侧板 4. 付车架加强板
5. 左侧主梁 6. 吊耳 7. 弯板 8. 牵引座 9. 尾架 10. 水箱支架
11. 发动机支座 12. 右侧主梁 13. 箱板 14. 付车架
15. 垫板 16. 贴板 17. 后铰接座 18. 变速箱支架 19. 支架
20. 筋板

5.1 后车架模块演进过程

在装载机系统中,后车架模块不是一个单独的系统模块,而与其他系统存在紧密联系,后车架模块的演进分析应同时考虑其他系统模块,客户需求的变化可能不会直接影响后车架模块的设计,但通过其他系统会间接影响后车架模块的设计。后车架模块设计与客户需求以及其他系统模块之间隐藏着极其复杂的关系如图6所示。

后车架承载后车的整体质量,其关联系统的主要部件与关联描述如表1所示。

由表1可知,后车架模块与其他系统存在紧密联系,关联有强有弱,客户需求的变化通过作用于相关系统,直接或间接地影响后车架模块设计的变化,

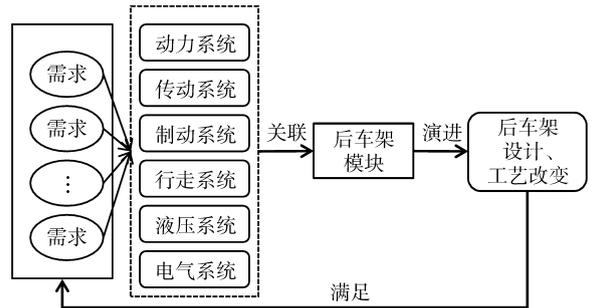


Fig. 6 Relationship with other systems for rear frame module

表1 后车架主要部件与关联描述

Tab. 1 Associated description for rear frame component

关联系统	主要关联部件	关联描述	关联类型
动力系统	内燃机	直接连接	强
传动系统	变矩器、变速箱、传动轴、驱动桥	直接连接与间接连接	强
制动系统	制动器	间接连接	弱
行走系统	车轮/履带	间接连接	中
液压系统	转向油缸、液压马达、液压泵、液压油箱	直接连接	强
电气系统	发电机、蓄电池	直接连接	中

这种通过其他系统隐藏在客户需求与后车架演进之间的关系极其复杂,例如客户需要掘取力大的装载机,间接关系中:掘取力增大要求内燃机型号改变,内燃机型号不同最终导致内燃机固定在后车架模块上的接口发生变化;直接关系中,掘取力增加,要求后车架强度提高,否则在高强度的工况下后车架会发生断裂或变形。因此,为更好地反映这种隐藏在客户需求与后车架模块演进之间的关系,通过大量客户需求与后车架模块设计历史数据,建立贝叶斯网络模型对隐藏在需求与核心模块演进设计之间的复杂关系进行分析。

5.1.1 后车架模块贝叶斯网络分析模型的建立

为了满足不同用户需求,结合后车架的具体设计过程,按3.2节方法将后车架贝叶斯网络模型分为4层:需求层、设计工艺层、模块指标层以及创新评价层,每一层又包含多种属性,为了便于网络模型的推理,网络模型节点属性均为离散节点(取值1,2),具体指标与取值定义如表2所示。

由表2可知,装载机需求的变化是后车架设计与工艺变化的根本原因,设计与工艺会直接影响通用性与经济性,最终影响车架核心模块的创新程度,因此建立的后车架模块贝叶斯网络演进分析模型如图7所示。

建立的网络模型分为需求层、设计工艺层、模块指标层以及创新评价层。用大量客户需求与设计数

表 2 后车架模块关联指标
Tab.2 Related indicators for rear frame module

网络层次	属性	取值(二值法)
需求层	A1 工矿要求(矿洞、颠簸路面等)	简单:1;特殊:2
	A2 掘取力	小:1;大:2
	A3 转弯半径	小:2;大:1(取值相反)
	A4 卸载高度与距离	低:1;高:2
	A5 作业快慢(前进与后退速度)	慢:1;快:2
设计工艺层	B1 尺寸变化(长、宽、高、重心设计等)	小:1;大:2
	B2 样式(板式、箱式等)	板式:1;箱式:2
	B3 设计加强(加强板、材料厚度等)	加强度低:1;加强度高:2
	B4 工艺加强(焊接顺序、新材料、新技术、钢材)	加强度低:1;加强度高:2
模块指标层	C1 通用性(相同零件使用数量、相同属性、工艺等)	低:1;高:2
	C2 经济性(成本等)	低:1;高:2
创新评价层	D 平台综合创新指数	低:1;高:2

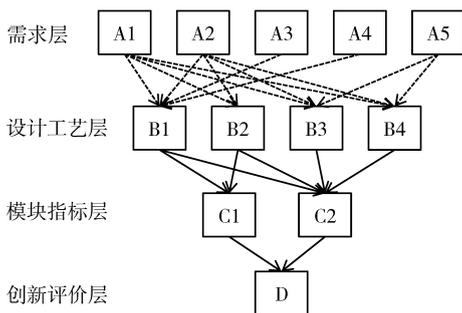


图 7 后车架模块贝叶斯网络演进分析模型
Fig.7 Analysis model based on Bayesian network for rear frame modules

据对网络模型进行训练,得出网络节点条件概率分布,部分条件概率分布可由领域专家根据经验进行修正。经过企业调研,收集得到后车架模块原始数据如表 3 所示。

对表 3 数据进行数值化(比如工况要求用 1 表示地面,用 2 表示井下)、归一化和离散化处理为二值后得到的数据如表 4 所示。

通过以上数据对后车架模块网络模型第一部分进行训练,并结合领域专家的经验知识,确定网络模型第二部分条件概率如表 5 所示。

表 3 后车架模块设计原始数据

Tab.3 Raw data in rear frame designs

型号	工矿要求	掘取力	转弯半径	高度与距离	作业快慢	尺寸变化	样式	设计加强	工艺加强	通用性	经济性
I	地面	48	4.55	3.152	14.8	0.340	板式	无	无	2	8.025
II	地面	48.67	4.6	3.246	15	1.299	箱式	有	有	2	8.139
III	地面	60	4.7	3.48	23	1.022	箱式	有	有	2	8.185
IV	井下	50	4.6	2.625	18.6	1.132	板式	无	有	1	8.237
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

表 4 离散化的后车架数据

Tab.4 Data discretization of rear frames

型号	工矿要求	掘取力	转弯半径	高度与距离	作业快慢	尺寸变化	样式	设计加强	工艺加强	通用性	经济性
I	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2
II	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2
III	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2
IV	2	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

在没有加入任何证据的情况下对后车架模块贝叶斯网络模型进行推理,得到网络节点边缘分布如表 6 所示。

由表 6 节点边缘分布 $P(X)$ 可知(X 代表相应的网络节点取值),除 A1、C1 节点外,其余节点 $P(X=1)$ 都小于 $P(X=2)$,说明用户需求在不断

提高,设计工艺不断改进,后车架模块设计都具有明显创新性,而 A1、C1 节点 $P(X=1)$ 大于 $P(X=2)$,说明用于井下的装载机后车架模块设计较少,经济性方面还有待改善,符合客观实际,同时也验证了建立的后车架模块贝叶斯网络模型的正确性。

5.1.2 后车架模块部件的标准化与通用化

通过需求分析,对建立的后车架贝叶斯网络模型的推理,可以确定后车架模块部件设计参数或属性的演进规律(即变化概率的大小)。结合现有后车架模块部件,按第4节方法对后车架模块进行标准化与通用化分析。在标准化方面,在满足设计参数或属性的范围内,尽量与已有车架模块参数靠近,以保持一定的标准性;通用性方面,主要考虑后车架模块部件(比如各种支座)的重复利用,提高其通用性,减少设计成本。

表5 领域专家确定的条件概率

Tab.5 Conditional probability from experts in this field

条件节点		节点	条件概率
C1	C2	D	$P(D C1C2)$
1	1	1	1
2	1	1	0.5
1	2	1	0.3
2	2	1	0.01
1	1	2	0
2	1	2	0.5
1	2	2	0.7
2	2	2	0.99

表6 网络模型节点边缘分布

Tab.6 Marginal distribution of network model nodes

网络节点	离散概率 P	
	$X=1$	$X=2$
A1	0.75	0.25
A2	0.4	0.6
A3	0.5	0.5
A4	0.25	0.75
A5	0.45	0.55
B1	0.472 3	0.527 7
B2	0.429 4	0.570 6
B3	0.46	0.54
B4	0.44	0.56
C1	0.507	0.493
C2	0.442 1	0.557 9
D	0.418 4	0.581 6

表8 设计工艺层的变化较大节点概率

Tab.8 Node probability larger changes in design process layer

演进过程	需求变化(证据)	设计工艺层变化较大节点			联合概率
		节点	$P(X=1)$	$P(X=2)$	
915→916B	A2 = 2; A4 = 2; A5 = 2	B1	0.438 5	0.561 5	0.123 0
		B2	0.382 4	0.617 6	0.235 2
		B3	0.378 8	0.621 2	0.242 4
916B→918	A2 = 2; A5 = 2; C1 = 2; C2 = 2	B1	0.660 3	0.339 7	0.320 6
		B3	0.344 1	0.655 9	0.311 8
		B4	0.344 1	0.655 9	0.311 8
916B→918Te	A1 = 2; A3 = 2; A4 = 1; A5 = 2; C2 = 2	B2	0.167 1	0.832 9	0.665 8
		B3	0.160 5	0.839 5	0.679
		B4	0.160 5	0.839 5	0.679

5.2 后车架模块的演进规律验证

选取某企业设计生产的4款后车架为915、916B、918以及918Te模块的演进过程对本文提出的综合演进分析方法进行验证,其演进过程如图8所示。

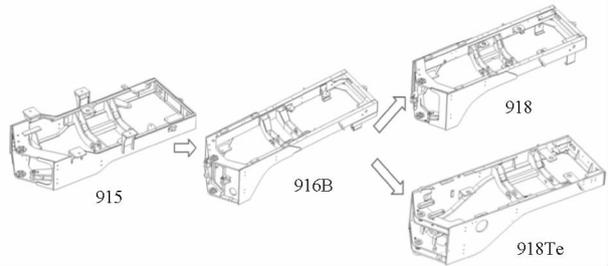


图8 4款后车架模块的演进过程

Fig.8 Evolution process of four rear frames

由后车架演进过程可知,演进的根本原因可以归结为客户需求变化和科技进步,进而引起设计和工艺的变化,经需求调研分析,4款车架演进的需求变化如表7所示。

表7 后车架演进需求变化

Tab.7 Demand changes in rear frame evolution

演进过程	需求变化(证据)
915→916B	A2 = 2; A4 = 2; A5 = 2
916B→918	A2 = 2; A5 = 2; C1 = 2; C2 = 2
916B→918Te	A1 = 2; A3 = 2; A4 = 1; A5 = 2; C2 = 2

由表7可知,915演变到916B是因为需求 A2 = 2, A4 = 2, A5 = 2 的变化(即需求:掘取力增大,卸载高度与距离增加,作业速度提高),将表7后车架模块演进过程需求变化的数据作为后车架模块贝叶斯网络模型推理的证据,用联合树推理算法进行推理,设计工艺层变化较大的节点如表8所示。

由表8的推理结果可以看出,915在 A2、A4、A6 的需求驱动下(证据),经后车架贝叶斯网络模型推理,设计工艺层 B1、B2、B3 改变的较大($|P(X=2) - P(X=1)| > 0.1$),其余节点改变的概率都小于

表 9 联合概率 (915→916B)

Tab.9 Joint probability in 915 to 916B

节点			联合概率
B1	B2	B3	$P(B1, B2, B3)$
1	1	1	0.093 8
2	1	1	0.093 8
1	2	1	0.094 7
2	2	1	0.096 5
1	1	2	0.095 6
2	1	2	0.099 2
1	2	2	0.154 4
2	2	2	0.272 1

表 10 联合概率 (916B→918)

Tab.10 Joint probability in 916B to 918

节点			联合概率
B1	B3	B4	$P(B1, B3, B4)$
1	1	1	0.136 4
2	1	1	0.034 1
1	2	1	0.138 1
2	2	1	0.035 5
1	1	2	0.138 1
2	1	2	0.035 5
1	2	2	0.247 7
2	2	2	0.234 6

0.1, 值越小说明二者都保持在 0.5 的概率, 即不需要改变), 即需要改变外形尺寸, 主框架应改为箱型, 设计强度上应该进一步加强; 表 9 反映了 B1、B2、B3 组合状态改变的概率, 比如 B1 = 1, B2 = 2, B3 = 1 表明 B1 保持不变, B2 变化较大, B3 保持不变的概率为 0.094 7, 说明这种组合改变的概率较小, 即 $P(B1 = 1, B2 = 2, B3 = 1)$ 值为 0.094 7; 而 B1、

表 11 联合概率 (916B→918Te)

Tab.11 Joint probability in 916B to 918Te

节点			联合概率
B2	B3	B4	$P(B2, B3, B4)$
1	1	1	0.038 4
2	1	1	0.038 5
1	2	1	0.038 6
2	2	1	0.045 1
1	1	2	0.038 6
2	1	2	0.045 1
1	2	2	0.051 5
2	2	2	0.704 3

B2、B3 同时变化的概率最大, 即 $P(B1 = 2, B2 = 2, B3 = 2)$ 值为 0.272 1, 说明需要对 915 后车架模块在设计工艺层 B1、B2、B3 上做相应的改变, 而在 915 到 916B 后车架模块演进的实际过程中, 设计工艺层 B1、B2、B3 的改变最大, 推理结果与实际的演进过程相吻合, 915 后车架最终演变为 916B 后车架, 在不同需求的驱动下, 对设计工艺层做相应的改进设计, 另外 2 种演进过程: 916B 到 918, 916B 到 918Te 的演进也符合模型的推理结果, 以上数据的解释与 915 演变到 916B 的过程类似, 此处不再赘述。因此, 上述推理过程验证了建立的核心模块贝叶斯网络分析模型的可行性和有效性, 具体演进过程如表 12 所示。

在推理模型中, 设计者可以利用不同客户需求作为证据对网络模型进行推理, 推理结果能给出设计工艺层的合理改变(概率), 在设计中为设计者提供理论参考。在分析了核心模块演进规律的基础上, 对其演进过程进行综合评价: 即对演进过程的创

表 12 后车架模块演进设计过程

Tab.12 Evolution design process of rear frames

演变过程	需求变化	设计工艺变化	演进设计过程
915→916B	A2 = 2;	B1 = 2;	1 重心由高变低(主梁上支座改为垫板)
	A4 = 2;	B2 = 2;	2 尺寸(长、宽、高)由小变大
	A5 = 2	B3 = 2	3 样式(车架主梁)由板式变为箱式
916B→918			4 加强板(主梁)由无变有
			5 钢板厚度由薄变厚
	A2 = 2;	B1 = 2;	1 通用性提高
	A5 = 2;	B3 = 2;	2 尺寸(长、宽、高)有微小变化
	C1 = 2;	B4 = 2	3 工艺加强(焊接保护, 新材料应用)
916B→918Te	C2 = 2		4 经济性提高(材料利用率提高, 成本降低)
			5 作业速度提高
	A1 = 2;	B2 = 2;	1 钢材变薄
	A3 = 2;	B3 = 1;	2 尺寸(长、宽、高)变小
	A4 = 1;	B4 = 2	3 转弯半径变小
	A5 = 2;		4 重心降低
C2 = 2		5 工艺加强(焊接保护, 新材料应用)	
			6 经济性提高(材料利用率提高, 成本降低)

新程度(模型推理中的 $P(D)$)、标准化以及继承性程度(式(10))进行总体评价。其演进过程的创新程度可以由模型推理得出,其标准化以及继承性程度可以对后车架模块部件的统计分析,对以上3个演进过程的创新程度进行推理,同时对标准化与继承性指数 X 进行计算,结果如表13所示。

表13 后车架模块演进过程综合评价

Tab.13 Evolution evaluation for rear frames

指标	915→916B	916B→918	916B→918Te
标准化与继承性指数	0.542	0.763	0.664
创新指数	0.73	0.98	0.84

由表13可知,916B到918的演进过程中,模块标准化与继承性程度最高,即 $S = 0.763$,同时创新指数也较大,即 $P(D=2) = 0.98$,符合918是目前小型轮式装载机市场主流的客观实际,同时进一步证明了评价模型的客观性和正确性;916B到918Te演进中,标准化和继承性指标较高,创新指数稍显不足;915到916B的演进指标最低,尤其是标准化和继承性指标有很大的改善空间。以上两项指标是核心模块演进创新的综合评价指标,创新指数越高,该演进过程创新程度就越大,标准化与继承性指数越

高,零部件的标准化和重复性利用程度就越大。综上所述,在产品核心模块的演进过程中,为达到产品核心模块综合绩效最大化,设计者应同时考虑两项指标。

6 结论

(1)分析了产品族模块设计通用方法,以产品族核心模块演进为研究对象,建立了基于贝叶斯网络的产品族核心模块演进分析模型,从概率论的角度分析客户需求不确定性和核心模块设计多样性,利用客户需求与模块设计历史数据对演进模型进行了训练,加入不同客户需求证据对核心模块演进模型进行了推理,获得了产品核心模块演进规律。

(2)核心模块设计在不同客户需求驱动下不断更新,在核心模块演进过程中,重点考虑核心模块创新指数、标准化与继承性指数,建立的综合评价模型对核心模块的演进过程进行了评价,给出了演进设计中的优点与不足。

(3)应用某企业小型轮式装载机后车架模块演进实例描述了该方法的分析过程,验证了核心模块演进分析与评价模型的正确性。

参 考 文 献

- 1 Flavio S F, Giovani J C, Borenstein D. The mass customization decade: an updated review of the literature[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 138(1): 14 - 25.
- 2 Vinodh S, Sundararai G, Devadasan S R. Amalgamation of mass customisation and agile manufacturing concepts: the theory and implementation study in an electronics switches manufacturing company[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(7): 2141 - 2164.
- 3 武守飞,潘晓弘.面向大批量定制的设计重用策略与应用[J].农业机械学报, 2009, 40(1): 189 - 193.
Wu Shoufei, Pan Xiaohong. Design reuse strategy for mass customization and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 189 - 193. (in Chinese)
- 4 Zhen L, Jiang Z, Song H. Distributed knowledge sharing for collaborative product development[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(10): 2959 - 2976.
- 5 陈兴玉.面向产品族的模块化产品设计理论与方法研究[D].合肥:合肥工业大学, 2009.
Chen Xingyu. Research on design theory and method of modular product for product family[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)
- 6 侯亮,王浩伦,穆瑞,等.模块化产品族演进创新方法研究[J].机械工程学报, 2012, 48(11): 55 - 64.
Hou Liang, Wang Haolun, Mu Rui, et al. Research on the evolution & innovation for modular product family[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 55 - 64. (in Chinese)
- 7 王日君,张进生,张明勤,等.产品模块化设计中接口信息模型研究[J].农业机械学报, 2012, 43(9): 226 - 229.
Wang Rijun, Zhang Jinsheng, Zhang Mingqin, et al. Interface information model of modular design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 226 - 229. (in Chinese)
- 8 李宪华,郭永存,张军,等.模块化六自由度机械臂逆运动学解算与验证[J].农业机械学报, 2013, 44(4): 246 - 251.
Li Xianhua, Guo Yongcun, Zhang Jun, et al. Inverse kinematics solution and verification of modular 6-DOF manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 246 - 251. (in Chinese)
- 9 Thevenot H J, Simpson T W. A comprehensive metric for evaluating component commonality in a product family[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 18(6): 577 - 598.
- 10 Alizon F, Shooter S B, Simpson T W. Assessing and improving commonality and diversity within a product family[J]. Research in Engineering Design, 2009, 20(4): 241 - 253.
- 11 Wang R Y, Storey V C, Firth C P. A framework for analysis of data quality research[J]. IEEE Transactions on Knowledge and

- Data Engineering, 1995, 7(4): 623 - 640.
- 12 David H. Bayesian networks for data mining [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1997, 1(1): 79 - 119.
- 13 徐欣, 李德玉. 贝叶斯网络中因果链搜索算法及其应用研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(4): 154 - 156.
Xu Xin, Li Deyu. Research on algorithm for detecting cause-and-effect chains in Bayesian network and its applications [J]. Computer Science, 2008, 35(4): 154 - 156. (in Chinese)
- 14 王越, 谭暑秋, 刘亚辉. 基于互信息的贝叶斯网络结构学习算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(7): 62 - 64.
Wang Yue, Tan Shuqiu, Liu Yahui. Bayesian network structural learning algorithm based on mutual information [J]. Computer Engineering, 2011, 37(7): 62 - 64. (in Chinese)
- 15 李晓毅, 徐兆棣, 孙笑微. 贝叶斯网络的参数学习研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(1): 125 - 128.
Li Xiaoyi, Xu Zhaodai, Sun Xiaowei. Study on parameter learning of Bayesian network [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(1): 125 - 128. (in Chinese)

Analysis and Evaluation for Core Module Based on Product Family

Wu Yongming Hou Liang Zhu Qingyuan Lai Rongshen Qian Yaoyi Lin Senquan
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Aiming at the evolution problem of core module in product family design, the module evolution law and process evaluation were analyzed. A method for law analysis and evaluation in the module evolution was proposed. The relationship between customer demand and module design was also studied. The core module standardization and universal indicators based on existing products were analyzed. An analytical model for core module evolution was established in the process of needs analysis, and the model was trained by the history data. The changing law of design and craft was obtained by demand evidence reasoning in core module. Based on the evolution law analysis, the design parameter and reuse degree were also analyzed for core parts. Comprehensive evaluation value for core module evolution was gained. Finally, the effectiveness and feasibility of the method was tested by core module design of small wheel loaders.

Key words: Mass customization Core module Bayesian networks Evolution evaluation

(上接第 263 页)

Extraction of Seedlings Information Based on Improved Edge Segmentation Algorithm

Li Weitao^{1,2} Peng Daoli¹ Wu Jian²

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. College of Geography Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Optimization of feature space and improvement of the segmentation algorithm are the keys of accurately obtaining seedling information using object-oriented technology. An improved edge segmentation algorithm was used to segment image based on dealing with the noise of multispectral images. The algorithm developed the simulated balloon expansion method, and could control the direction of the force field, so that the curves were made to split and collapse inwards. And the feature space made up of texture, shape, spectral features was built to accomplish seedling information extraction. The results showed that the total accuracy of seedling information extraction was 86% by the method of this paper, 12% higher than that of traditional methods, and the KAPPA coefficient was 0.814 5, 0.115 9 higher than that of traditional methods. The method of this paper could accomplish seedling information extraction quickly and accurately, and provide a reference for the accurately monitoring and decision making to management departmen. It has important meaning to forecast and evaluation for the future afforestation situation.

Key words: Seedling Improved edge segmentation algorithm Multispectral Image segmentation