

基于公理化设计的可重构产品 C - F - D - P 映射过程*

程幼明 马鲁强

(安徽工程大学管理工程学院, 芜湖 241000)

摘要:以公理化设计理论为指导,运用“Z”型映射方法,在对可重构产品系统与一般产品系统设计过程中映射过程的差异分析基础上,从域的界定及其转换角度规划出可重构产品系统实现中的 C - F - D - P 映射过程,并以可重构小型农业作业机为例,运用 Acclaro DFSS 验证了其实现过程。

关键词:公理化设计 可重构产品系统 映射过程

中图分类号: TB472; S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0218-06

C - F - D - P Mapping Process of Reconfigurable Product Systems Based on Axiomatic Design

Cheng Youming Ma Luqiang

(College of Management and Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Using the axiomatic design theory and the method of Z-type mapping, difference characteristics of mapping process between design the reconfigurable product system (RPS) and common product system was analyzed. The C - F - D - P mapping process of RPS was analyzed by the defined rule of and transformed domain. Taking the reconfigurable small agricultural machinery as an example, the implementation process of RPS by Acclaro DFSS software was verified.

Key words: Axiomatic design Reconfigurable product systems Mapping process

引言

在企业产品创新过程中盲目追求创新而忽视现有资源重用与优化配置将导致重复开发,造成资源浪费、开发设计成本高和开发设计周期长而丧失市场先机。产品创新实践表明:新产品并不是完全从无到有,而是在现有产品基础上的持续改进与完善;顾客需求的多样化往往是绝大多数共性需求基础上的个性需求,这样基于现有资源重新配置的集成创新产品策略——可重构产品系统(Reconfigurable product systems, RPS)应运而生,它通过对产品自身可重构性的提升,使得占产品大部分的通用部分可以直接重用企业现有资源(约40%)或借用基础上的局部修改(约40%),只需对少量定制部分进行重新设计(约20%),从而在产品开发设计上建立起快

速响应市场需求变化的机制。要发挥 RPS 的优势,同时达到节能减排和节约资源的目的,需要科学的设计理论的支持^[1],在满足顾客个性化需求下简化产品结构、剔除冗余功能。本文以公理化设计(Axiomatic design, AD)理论为指导,在对 RPS 与一般产品系统设计中映射过程的差异分析基础上,对 RPS 设计过程域及其映射过程进行研究,设计出 RPS 的 C - F - D - P 映射过程,并以小型农业作业机重构为例进行验证,以达到提升产品系统的可重构性和资源的可重用性目的。

1 文献回顾

RPS 可重构理论的研究始于 20 世纪 90 年代。许虹等阐述了可重构机床内涵、特性及其与现有机床的主要区别^[2];周强强等设计出可重构模块化机

器人,对模块设计及模块组合的运动规则进行了研究^[3];童刚等基于对象模型及 Web 结构模式构建可重构 ERP 的方法框架^[4];程幼明等认为产品是一广义概念,RMS、可重构机器人和可重构机床等都是典型的 RPS,具有可重构性、可重用性和可扩展性,可实现在展示产品外部多样化的同时尽可能减少内部(零部件、结构)多样化,最大化利用组织资源和以较低转换成本、较短时间适应需求变化^[5]。可重构理论已广泛应用于生产资料与软件系统领域中。

AD 是设计领域的科学准则和设计者的思维方法^[6],是 RPS 实现的设计理论基础。AD 的基本思想和 C-F-D-P 映射过程可用于软件、组织机构、系统、材料、制造过程的设计^[7],程翰鹏^[8]通过 AD 的映射过程完成了对协同流量管理系统的设计;Peck^[9~10]等将 AD 应用于医疗组织设计中,以提高组织运行效率、简化病患就诊步骤;陈耀华^[11]等依据 AD 映射过程获得了 RMS 的设计方法及设计步骤,降低了设计的复杂性和实现在设计过程中以适当的顺序做出合理决策;Shin^[12]等通过 AD 映射过程实现了汽车座椅系统设计;Jang^[13]将 AD 映射过程应用于船舶设计中;Tang Dunbing^[14]、曹鹏彬^[15]等分别针对 AD 的 C-F-D-P 映射过程所面临的不足进行了改进,等等。

从上述研究现状可以看出,虽然 AD 理论的应用已引起人们重视,但应用于 RPS 中尚未涉及。RPS 的研究只停留在原理、特征的研究,主要应用于工业品,而一般意义的产品尚未涉及,产品开发过程的研究涉及较多的是全新产品开发。为此开展 RPS 的资源重用配置设计的研究,对于规范组织资源的重用与优化配置有着重要理论与现实意义。

2 公理化设计与可重构产品系统

2.1 公理化设计

公理化设计是指产品开发设计过程存在设计公理,即存在可归纳的控制设计过程的原理和法则;并依据设计过程的阶段性特点将其抽象为式(1)的不同“域”,域间的转换关系形象描述为“Z 形映射”过程(图 1);约束条件为独立公理与信息公理(两大公理),可实现使设计过程更具创新性的同时减少搜索解的过程的随意性,最小化“设计/反馈/再设计”循环迭代过程,并在可行方案中确定最佳设计。

$$F = f(x) = \{Y | CA_s, FR_s, DP_s, PV_s\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad CA_s &= [ca_1 \quad ca_2 \quad \cdots \quad ca_m]' \\ FR_s &= [fr_1 \quad fr_2 \quad \cdots \quad fr_n]' \\ DP_s &= [dp_1 \quad dp_2 \quad \cdots \quad dp_k]' \\ PV_s &= [pv_1 \quad pv_2 \quad \cdots \quad pv_g]' \end{aligned}$$

式中 F ——设计过程(C-F-D-P)

f ——过程函数

x ——过程 Y ——域

$ca_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ——第 i 顾客需求

$fr_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ——第 i 功能要求

$dp_i (i = 1, 2, \dots, k)$ ——第 i 物理结构构思

$pv_i (i = 1, 2, \dots, g)$ ——第 i 工艺参数

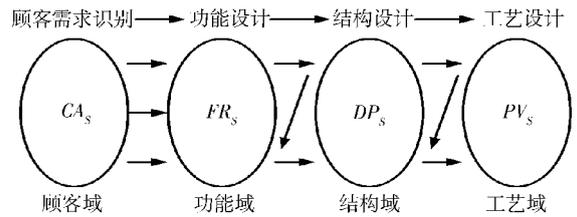


图 1 设计过程、域及域的转换过程图

Fig. 1 Design process, domain and its conversion

图中“→”反映了顾客要求依据质量特性需要通过质量功能来满足;进而借助一定的物理结构实现质量功能;并借助工艺过程实现物理结构。“↙”则表达了箭头方向的域依据实际问题存在层级分解过程现象,且分解时受到箭尾方向域的约束。

“→”与“↙”组成的“Z”形状表达出映射过程是自顶向下的逐层分解过程,且要依据实际需求重复进行,直至实现设计要求和同时满足约束条件的独立公理的功能域各组件(模块)的独立性、信息公理的最小化信息量。

2.2 RPS 与一般产品 C-F-D-P 映射过程的差异

RPS 是指一种能按市场需求变化和产品设计的规定,以重排(重新组态)、重复利用、革新组元或子系统的方式,实现较低的重构成本、较短的开发设计与生产准备时间和生产周期、较高的质量,快速调整组成单元/模块,获得新的功能或性能的可变产品系统^[5]。它由通用部分与定制部分构成,通用部分可通过重用企业现有生产资源与设计资源来实现,定制部分可对企业资源进行修改或重新开发设计来满足顾客个性要求。因此,其 C-F-D-P 映射过程应有别于一般产品映射过程(图 1),共性与个性定制组元应差异化对待,如图 2 所示。图中 SCA_s 、 CA_s 分别代表共性、个性需求; SFR_s 、 CFR_s 为共性、个性功能域; SDP_s 、 CDP_s 为个性、共性结构域,而在开发设计时应充分重用企业现有的生产资源与设计资源,故共用 PV_s 。

对于共性需求部分,由于 RPS 的硬/软件模块具有良好定义(通用)的接口,企业只需直接从企业的知识库、(子)模块数据库及 PDM 等工具中选择满足要求的(子)模块重新配置即可。

个性需求部分,由于其有别于以前产品需求,也

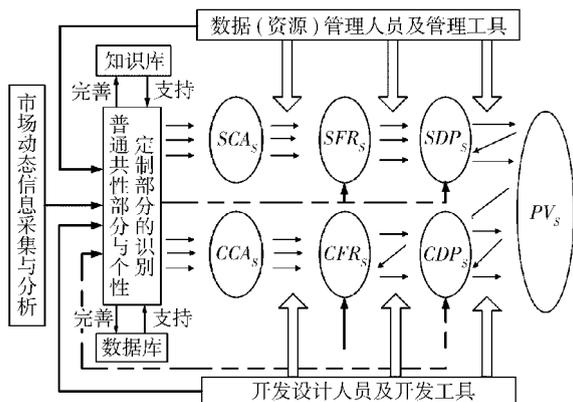


图2 可重构产品系统映射过程图

Fig. 2 Mapping process of RPS

就要在现有资源重用和重新配置基础上重新映射。一是通过企业知识库、数据库等工具识别出个性模块中的共性子模块(组元)而重用,即从企业数据库或现有设计方案中选择能满足顾客要求的模块、子模块与基本零部件、典型结构、典型工艺等即可;另一方面,对个性子模块(组元)需开发设计,并对个性子模块(组元)进行分解识别,直至无法划分出共性部分为止,并按AD的映射过程和约束条件实现转换而完成设计。企业应适时完善知识库与数据库系统,对频繁出现个性需求,应实现模块化与零部件的通用化、结构、工艺的典型化,将其变成企业的共性部分。

3 RPS的C-F-D-P映射过程实现

基于对图2的分析,RPS的C-F-D-P映射过程实现流程可描述为如图3所示,其核心在于C-F-D-P域的确立以及C-F-D-P域间的转换。

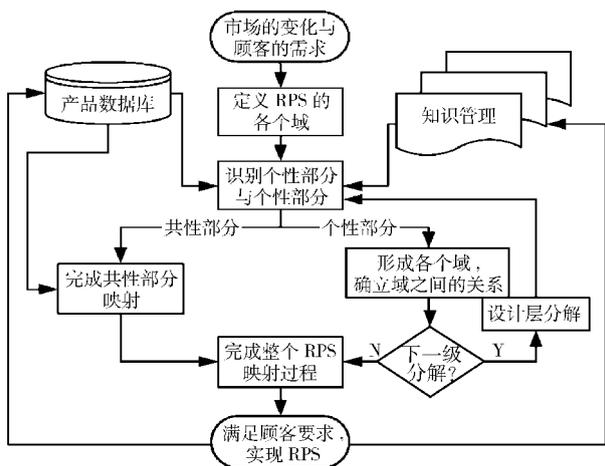


图3 映射过程实现流程图

Fig. 3 Achieve flow of mapping process

3.1 RPS的C-F-D-P域的确立

结合AD四大域的定义与RPS的内涵,RPS的C-F-D-P域确立过程如下:

3.1.1 CA_s 的确立

CA_s 是对市场动态变化的反映。基于市场信息和订单分析,获得顾客/市场变化对RPS的要求,并将其区分为共性需求与个性需求,并借助于诸如QFD等工具将需求及其变化转换为规范化的企业顾客域可识别的信息,区分顾客的 SCA_s 与 CCA_s 以确立 CA_s : $\{CA_s|SCA_s, CCA_s\}$ 的具体内容。

3.1.2 FR_s 的确立

FR_s 反映了RPS应具有满足顾客要求以及应对市场变化的功能。通过 SCA_s 与 CCA_s 确立 FR_s : $\{FR_s|SFR_s, CFR_s\}$ 的具体内容。

对于 SFR_s 的确立,企业可通过知识库、数据库等工具对照 SCA_s 的内容, SFR_s 在PDM等的指导下直接映射获得相关数据。 SFR_s 中元素 sfr_i 确立方式为

$$f(sca_i) = sfr_i \quad (2)$$

式中 f ——索引规则,是在PDM或相关数据库中寻找满足 sca_i 的产品功能的重构单元

而对于 CFR_s 的确立,由于企业产品数据中没有与 CCA_s 要求相匹配的数据,开发设计人员应在“中立求解的环境”中即没有任何关于某些已经设计过的事物或关于设计方案应当是什么样的想法^[7],寻求满足个性要求的功能,且 CFR_s 中元素 cfr_j 确立方式为

$$g(cca_i) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (3)$$

其中

$$x_j = cfr_j$$

$$a_j = \begin{cases} 1 & (I_j = \min I_j) \\ 0 & (I_j \neq \min I_j) \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1 \quad (j=1, 2, \dots, n)$$

$$I_i = -\ln P_i \quad (4)$$

式中 g ——满足 cca_i 要求的最佳产品功能转换规则
 cfr_j ——通过头脑风暴等方式获得可满足 cca_i 要求的若干产品功能,且 cfr_j 满足独立公理

I_i ——相应 cfr_j 的信息量,其计算原理满足信息公理要求,如图4所示(面积 A_{cr} 即概率 P_i)

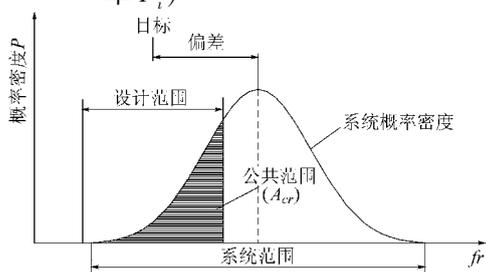


图4 信息量计算原理图

Fig. 4 Calculating schematic of information content

当需多个 fr_i 满足 ca_j 时, I_s 为

$$I_s = -\ln P_s \quad (5)$$

其中

$$P_s = \prod_{i=1}^m P_i$$

式中 P_s ——所有 m 个 fr_i 都能满足无耦合设计情况下的联合概率密度

3.1.3 DP_s 的确立

DP_s 为达到 FR_s 的内容产品所应具备的物理结构。依据 SFR_s 与 CFR_s , 确立 $DP_s: \{DP_s | SDP_s, CDP_s\}$ 的具体内容。

SDP_s 的确立, 也可通过 PDM 等工具直接确定满足 SFR_s 的结构模块, 进而形成 SDP_s , 参照式(2)确立其元素 sdp_i 。

CDP_s 的元素 cdp_i 确立的逻辑关系与数学表达可参照式(3)进行。

$FR_s = [fr_1 \quad fr_2 \quad \dots \quad fr_n]'$ 与 $DP_s = [dp_1 \quad dp_2 \quad \dots \quad dp_k]'$ 确定后, 令 $t = k - n$, FR_s 与 DP_s 间存在 3 种关系: $t > 0$, 冗余设计, 应判断是否有违反独立公理并用解耦器解耦; $t < 0$, 耦合设计, 应判断所有 FR_s 都已满足并进行解耦; 只有当 $t = 0$ 时才被视为是合理的, 即理想设计。

3.1.4 PV_s 的确立

PV_s 确定了 DP_s 中所有工艺参数, 直接影响着企业现有生产资源与设计资源的重用程度。 PV_s 中元素 pv_i 确立方式可参照式(2)、(3)加以确定。

其中, SDP_s 可直接通过 PDM 等工具获得相应的 pv_i , 而对于 CDP_s 需要新确定新研发模块及其他新零部件等的工艺参数来确定相应的 pv_i 时, 应对需新开发的模块单元也充分考虑重用企业现有的子模块(组件)、标准零部件, 保证新研发的模块质量及接口的通用性, 以最低的成本, 最快的速度提升产品可重构能力。

当多个 pv_i 满足 DP_s 要求时, 可通过式(4)、(5)进行筛选。当企业现有资源无法满足 cdp_i 要求时, 可考虑对其进行外包或者以最小约束集形式反馈给 CDP_s , 从而调整 CDP_s , 进而获得最终理想设计。

3.2 RPS 的 C-F-D-P 之域间转换

域之间的映射过程 $W_i \rightarrow H_i$ 用数学方法可描述为设计目标(W_i)和设计解(H_i)的特征向量。两个向量在第 i 层级的映射为 $W_i \xrightarrow{A_i} H_i$, A_i 为映射规则, 可用设计矩阵表示, 是映射实现的依据与产品设计的表征。同时域之间的映射存在着逆向映射 $W_{i+1} \xleftarrow{C_r} H_i$, 表示对邻域的下一级分解与映射的约束, C_r 为最小约束集。因此, 在考虑 C_r 的前提下, 域

之间的关系可用向量通式表示为

$$W_i = A_i H_i \quad (6)$$

域间的映射关系用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} CA_i \\ FR_i \\ DP_i \\ PV_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FR_i \\ DP_i \\ PV_i \\ PV_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 CA_i, FR_i, DP_i, PV_i ——第 i 层次对应的域
 α, β, γ ——相应的设计矩阵
 I ——单位阵

当 A_i 为对角阵(或上/下三角阵)时则设计为非(或准)耦合设计, 设计可接受; 否则为耦合设计, 需解耦, 使其转换为可接受设计形式。

A_i 中元素的确立通常可通过定量与定性两种方法来实现。定量方法一般是将域中元素用数学模型表达, 通过求偏导的方式求解。而定性的方法则是设计人员需从偏导的定义出发, 判断出域之间的映射是否符合设计要求, 找出所存在的设计问题, 即产生耦合的地方。

3.2.1 CA_s 与 FR_s 之间的转换

$CA_i \xrightarrow{\alpha} FR_i$ 包含 $SCA_i \xrightarrow{\alpha_s} SFR_i$ 与 $CCA_i \xrightarrow{\alpha_c} CFR_i$ 两部分。由于 CA_s 与 FR_s 之间并不要求满足理想设计要求, 所以 α 往往并非 n 阶矩阵, α 所要表达的是为满足顾客某种要求, 产品应具备某种或某些功能, 反映出要求与功能之间一对一或一对多的关系, 不存在必须为非(准)耦合设计的设计要求, 故也可称 α 为关系矩阵。 α (包括 α_s 与 α_c) 中各个元素 α_{ij} 和 CA_s 与 FR_s 的转换可描述为

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial CA_i}{\partial FR_j} \quad (8)$$

$$CA_i = \alpha FR_i \quad (9)$$

3.2.2 FR_s 与 DP_s 之间的转换

$FR_i \xrightarrow{\beta} DP_i$ 同样具有 $SFR_i \xrightarrow{\beta_s} SDP_i$ 与 $CFR_i \xrightarrow{\beta_c} CDP_i$ 两部分。在 C_r 下 $CFR_i \xrightarrow{\text{分解}} CFR_{i+1}$ 之后, 应再次识别出 $\{CFR_{i+1} | SFR_{i+1}, CFR_{i+1}\}$ 中的 SFR_{i+1} , 并将其送至 SFR_s 中, 直至 CFR_i 无需分解。在 β (包括 β_s 与 β_c) 中 β_{ij} 以及 FR_s 与 DP_s 之间的转换所涉及的逻辑关系与数学表达可分别参照式(8)、(9)来确定。

3.2.3 DP_s 与 PV_s 之间的转换

$DP_i \xrightarrow{\gamma} PV_i$ 往往被设计者隐含的使用, 主要体现在运用信息公理的过程当中。 γ 中各个元素 γ_{ij} 及 DP_s 与 PV_s 之间的转换同理可分别参照式(8)、(9)

来确定,其中 $DP_s: \{DP_s | SDP_s, CDP_s\}$ 。

同一层级的 C - F - D - P 转换是同时进行的。对于 RPS 来说,一层设计层往往是不够的,通常需要再一次的分解,在约束条件下进行分解之后应再次判断识别哪些是共性部分,哪些是个性部分。共性部分可直接根据 PDM 等企业工具实现,个性部分则需要重新确立各个域及域之间的关系,且分解步骤应循环进行,直至各域中元素无法再分解为止。

4 算例

4.1 可重构小型农业作业机域的识别与转换

通过对市场动态信息的分析确定可重构小型农业作业机的顾客域 $\{CA_s | CA_1$ —价格低、质量好, CA_2 —动力稳定强劲, CA_3 —易操作, CA_4 —多功能 $\}$ 。依据企业数据库可识别得 $SCA_s: \{SCA_s | CA_1, CA_2, CA_3\}$ 与 $CCA_s: \{CCA_s | CA_4\}$ 。

由式(2)、(3)分别可确定 $SFR_s: \{SFR_s | SFR_1$ —动力功能, SFR_2 —操作控制功能, SFR_3 —行走功能 $\}$ 与 $CFR_s: \{CFR_s | CFR_1$ —多作业功能, CFR_2 —多挡位传动功能 $\}$; 由式(8)、(9)可确立 CA_s 与 FR_s 间转换的映射关系

$$\begin{bmatrix} CA_1 \\ CA_2 \\ CA_3 \\ CA_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X & X \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{bmatrix}$$

其中, $FR_1 = SFR_1, FR_2 = SFR_2, FR_3 = SFR_3, FR_4 = CFR_1, FR_5 = CFR_2$ 。

由 3.1.3 节确立 DP_s , 3.2.2 节确定 $FR_i \xrightarrow{\beta} DP_i$, 3.1.4 节确立 PV_s , 3.2.3 节确定 $DP_i \xrightarrow{\gamma} PV_i$, 映射关系为

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ X & X & 0 & X & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ X & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PV_1 \\ PV_2 \\ PV_3 \\ PV_4 \\ PV_5 \end{bmatrix}$$

其中, $DP_1 \sim DP_5$ 分别代表动力模块、操作模块、行走模块、作业工作模块、变速箱模块; $PV_1 \sim PV_5$ 分别代

表对应模块参数。

在 $FR_i \xrightarrow{\beta} DP_i$ 中以变速箱箱体模块为例,来说明信息公理的选择过程。假设在各项功能理想的设计范围定义为 1 的前提下,开发设计人员根据具体情况要求变速箱箱体工作可靠性、生产成本、产品体积及产品质量的许可设计范围分别为 0.7 ~ 1.3、0.8 ~ 1.2、0.95 ~ 1.05 以及 0.9 ~ 1.1^[16]。现有 4 款变速箱箱体模块,相关参数如表 1 所示。

表 1 4 款箱体相关设计参数

Tab.1 Design parameters of four box

箱体模块	工作可靠	成本低	体积小	质量小
A	0.640 ~ 1.360	0.475 ~ 1.525	0.950 ~ 1.050	0.900 ~ 1.100
B	0.640 ~ 1.360	0.775 ~ 1.225	0.945 ~ 1.055	0.900 ~ 1.100
C	0.650 ~ 1.350	0.50 ~ 1.500	0.950 ~ 1.050	0.805 ~ 1.195
D	0.650 ~ 1.350	0.80 ~ 1.200	0.945 ~ 1.055	0.805 ~ 1.195

注:依据文献[16]相关数据处理整合。

通过图 4 可得 A、B、C、D 的工作可靠的设计范围与概率密度(图 5),并获得满足功能要求的概率 P_i (表 2)。

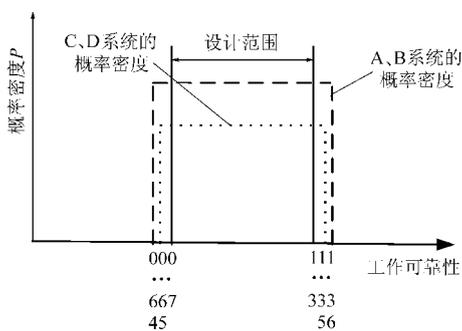


图 5 设计范围与概率密度

Fig.5 Design range and probability density

再由式(4)可得 A、B、C、D 相关参数的概率(表 2)与信息量(表 3)。根据信息量最小即为最优设计原则,应选择 B 模块。

表 2 箱体模块相关参数概率

Tab.2 Parameters probability of box module

箱体模块	可靠性 O_1	成本 O_2	体积 O_3	质量 O_4
A	0.833	0.381	1	1
B	0.833	0.889	0.909	1
C	0.857	0.400	1	0.513
D	0.857	1	0.909	0.513

表 3 4 款箱体相关参数

Tab.3 Information content of four box parameters

箱体模块	可靠性 I_1	成本 I_2	体积 I_3	质量 I_4	$\sum I_i$
A	0.079	0.419	0	0	0.498
B	0.079	0.051	0.041	0	0.171
C	0.067	0.397	0	0.290	0.754
D	0.067	0	0.041	0.290	0.398

4.2 基于 Acclaro DFSS 的 C-F-D-P 映射过程的仿真

Acclaro DFSS 是应用于公理化设计映射过程的仿真软件,依据上述的数据处理过程及逐层分解,最终获得整个可重构小型农业作业机 $FR_i \xrightarrow{\beta} DP_i$ 的映射过程的关系如图 6 所示。

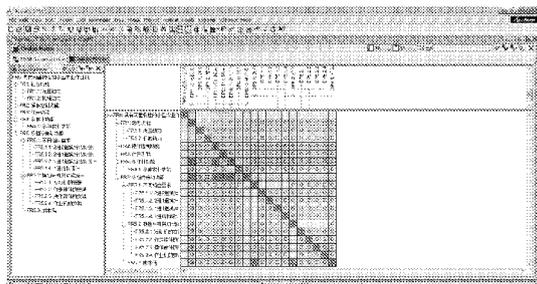


图 6 最终映射过程图

Fig. 6 Final mapping process

5 结束语

RPS 是一种全新的产品模式,通过对 RPS 的 C-F-D-P 映射过程的剖析,能较容易识别出满足需求的产品组成的共(个)性部分,减少企业斜升时间,指导企业科学、快速、准确的完成 RPS 开发设计工作,从而获得竞争优势。从算例可以看出,可重构小型农业作业机的某一功能升级或出现新的需求时,只需更换某一组元而无需重新设计或完全重新购置一个产品;同样当某个功能模块出现问题时也只需对相应的模块进行维修或替换而无需整套送修,减少了重置成本和方便了维修。这就提升了产品系统的可重构性和资源的可重用性,避免了不必要的企业成本耗费与顾客经济支出。

参 考 文 献

- 1 林海,崔晓璇. 国内产品功能集成创新原理研究综述[J]. 价值工程,2008(2):40~42.
- 2 许虹,唐任仲,程耀东. 新一代机床—可重构机床[J]. 组合机床与自动化加工技术,2002(2):1~4.
- 3 周强强,关胜晓. 可重构模块化机器人研究[J]. 计算机系统与应用,2008(9):28~32.
- 4 童刚,魏志强,李光泉,等. 一种可重构的 ERP 系统构建方法研究[J]. 计算机工程,2003,29(7):25~26,72.
Tong Gang, Wei Zhiqiang, Li Guangquan, et al. Research of a construction method of reconstructible ERP system[J]. Computer Engineering,2003,29(7):25~26,72. (in Chinese)
- 5 Cheng Youming, Ma Luqiang. Reconfigurable production systems; a new strategy on product[C]//2011 3rd World Congress in Applied Computing, Computer Science, and Computer Engineering, 2011.
- 6 朱龙英,朱如鹏,刘正坝. 公理化设计理论研究及其应用进展[J]. 机械设计与研究,2004,20(4):43~46.
Zhu Longying, Zhu Rupeng, Liu Zhengxun. Development in research and application of axiomatic design theory[J]. Machine Design and Research,2004,20(4):43~46. (in Chinese)
- 7 Nam Pyo Suh. 公理设计——发展与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- 8 程翰鹏. 基于公理化设计的协同流量管理系统设计[D]. 天津:中国民航大学,2009.
Cheng Hanpeng. The design for collaboration air traffic flow management system based on axiomatic design[D]. Tianjing: Civil Aviation University of China, 2009. (in Chinese)
- 9 Peck J, Nightingale D, Kim S G. Axiomatic approach for efficient healthcare system design and optimization[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2010,59(1):469~472.
- 10 Peck J, Kim S G. Improving patient flow through axiomatic design of hospital emergency departments[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2010,2(4):255~260.
- 11 陈耀华,樊树海,丁燕艳,等. 基于公理设计的可重构制造系统设计[J]. 工业工程与管理,2009,14(5):79~83,90.
Chen Yaohua, Fan Shuhai, Ding Yanyan, et al. Design of reconfigurable manufacturing systems based on axiomatic design[J]. Industrial Engineering and Management,2009,14(5):79~83,90. (in Chinese)
- 12 Shin M K, Kim Y I, Kang B S, et al. Design of an automobile seat with regulations using axiomatic design[J]. Proc. IMechE., Part D: Journal of Automobile Engineering, 2006,220(4):269~279.
- 13 Jang Beomseon, Yang Youngsoon, Song Yusuk, et al. Axiomatic design approach for marine design problems[J]. Marine Structures,2002,15(1):35~56.
- 14 Tang Dunbing, Zhang Guangjun, Dai Sheng. Design as integration of axiomatic design and design structure matrix[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing,2009,25(3):610~619.
- 15 曹鹏彬,肖人彬,库琼. 公理设计过程中耦合设计问题的结构化分析方法[J]. 机械工程学报,2006,42(3):46~55.
Cao Pengbin, Xiao Renbin, Ku Qiong. Structural analytical approach to coupled design in design with axiomatic design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3):46~55. (in Chinese)
- 16 张立彬. 微小型农业机械产品可重构模块化——设计方法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- 17 肖人彬,蔡池兰,刘勇. 公理设计的研究现状与问题分析[J]. 机械工程学报,2008,44(12):1~11.
Xiao Renbin, Cai Chilan, Liu Yong. Current research situation and problem analysis of axiomatic design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,44(12):1~11. (in Chinese)
- 18 Selcuk Cebi, Cengiz Kahraman. Indicator design for passenger car using fuzzy axiomatic design principles[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(9):6470~6481.