

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.01.006

# 产品协同创新设计任务分解及资源分配

杨育<sup>1</sup>, 李云云<sup>1</sup>, 李斐<sup>1</sup>, 邢青松<sup>2</sup>, 包北方<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆交通大学管理学院, 重庆 400074)

**摘要:**针对产品协同创新设计任务分解及分配的复杂性问题, 考虑设计任务间的依赖关系及创新主体的设计能力约束, 提出了基于层次功能-结构-任务映射及协同伙伴模糊搜索匹配相结合的任务分解模型; 在研究设计资源分类属性的基础上, 为弥补设计任务优先级资源分配策略的不足, 建立了考虑资源使用阈值的设计资源分配模型, 并基于时间有色 Petri 网进行任务-资源分配仿真建模; 导入某品牌手机产品协同创新研发实例, 验证了所提模型的有效性。

**关键词:**产品协同创新; 产品设计; 任务分解; 资源分配; Petri 网

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)01-031-08

## Task decomposition and resources allocation of product collaboration innovative design

YANG Yu<sup>1</sup>, LI Yunyun<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>, XING Qingsong<sup>2</sup>, BAO Beifang<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** To deal with the complexity problems of design tasks decomposition and allocation in the process of product collaborative innovation, a task decomposition model based on mapping level function, structure and task and fuzzy search and matching collaborative partners is proposed by considering the dependencies between the design tasks and the design capacity constraints of innovative subjects. Then on the basis of studying the classification and attributes of design resource, a design resources allocation model with resource use threshold is established to compensate the lack of resource allocation by the priority strategy for design tasks, and the simulation modeling for task-resource allocation based on the time colored Petri net is carried out. Finally, a product collaborative innovation design R & D case of a certain brand phone is imported to verify the effectiveness of the proposed model.

**Key words:** product collaborative innovative; product design; task decomposition; resource allocation; Petri net

由于顾客需求日益多样, 市场环境日趋复杂多变, 新产品市场生命周期越来越短, 使得新产品的开发难度不断加大, 依靠企业自身的力量很难实现满

足市场需求的新产品开发要求。因此, 一种新的产品开发方式应运而生——产品协同创新设计, 它充分利用不同地区、不同背景的客户、供应商、科研院

收稿日期: 2013-08-01

基金项目: 国家自然科学基金基本项目(71071173); 教育部高校博士点科研基金资助项目(20090191110004); 贵州省软科学项目(黔科合体 R 字[2011]LKC2014 号)

作者简介: 杨育(1971-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事产品协同设计、网络化协同制造、产品创新、效率工程等研究, (E-mail)yuyang@cqu.edu.cn。

所的知识技能及创新设计能力,在现代化的网络环境和技术工具的支持下,以企业为中心协同完成新产品的研发设计<sup>[1-2]</sup>。然而,产品协同创新设计作为一种特殊的新产品创新方式,具有创新组织分散、创新主体多样、合作方式灵活等特点,因此,其设计任务分解及设计资源协调分配与常规的新产品设计中任务分解及资源分配方式不尽相同。任务分解及资源分配是产品协同创新过程的重要组成部分,合理地设计任务进行分解、分配,优化配置各种设计资源,使其得到充分利用,可以降低产品协同创新过程中人员、设备、信息等之间的交互复杂度,保证产品协同创新过程的顺利进行。因此,有必要对如何有效实现产品协同创新设计中任务分解及设计资源分配进行研究,以合理分解、分配设计任务,平衡分配设计资源,从而提高整个产品协同创新设计过程的设计效率,降低开发成本。

目前,在任务分解、分配及资源分配方面国内外的主要研究成果有:Lo<sup>[3]</sup>以最大化经济效益为原则,针对产品创新过程中任务-资源协调的复杂性,运用博弈论方法及 Multi-Agent 技术建立了一种支持产品协同创新模式的任务-资源动态调度模型;Chen 等<sup>[4]</sup>为解决项目动态执行过程中的资源冲突,基于主体协商建立了效用函数及补偿协商模型;Mahesh 等<sup>[5]</sup>基于分布式 Multi-Agent 制造系统各业务的依赖关系,考虑优先次序原则,建立了 Multi-Agent 制造系统的冲突协调模型;郝宪文等<sup>[6]</sup>人提出基于约简任务-资源分配图的调度模型和调度算法,利用免疫遗传算法对问题进行求解;徐进等<sup>[7]</sup>利用改进的粒子群优化算法求解任务资源动态分配项目调度数学模型;周明郡等<sup>[8]</sup>提出了基于分布式认知的协作资源模型;尹胜等<sup>[9]</sup>人针对资源优化配置过程中的多任务性、多目标性和环境多变性等特点,采用线性加权法建立了以时间、成本、质量为目标的多任务资源优化配置模型。上述研究成果为产品协同创新设计过程中任务分解、分配及资源分配的研究奠定了基础,但在进行任务分解、分配研究时,较少关注协同设计复杂环境下各设计任务之间的相互影响及协同客户、供应商和科研院所的设计能力制约,可能出现任务分解不合理以及创新主体被分配的设计任务与其能力匹配度不高等问题,从而影响设计任务完成的质量及效率;另外,在设计资源分配方面,主要是基于设计任务优先级策略进行设计资源分配,这种分配策略易造成高优先级设计任务对低优先级设计任务进行长时间的资源占用,甚至是资源掠夺,使低优先级的设计任务进入长时间的等待延迟,进而

影响创新设计任务整体完成效果。

鉴于此,笔者以产品设计任务分解和分配为切入点,引入图论原理对产品协同创新设计环境下设计任务的依赖关系进行分析研究,在此基础上,考虑到任务间的相互依赖关系和协同伙伴的创新设计能力制约,提出了基于层次功能-结构-任务匹配及协同伙伴模糊搜索相结合的任务分解及分配模型;然后分析了产品协同创新设计过程中设计资源的分类属性,针对产品协同创新设计过程中创新任务-资源分配的复杂性,进一步建立考虑资源使用阈值的资源分配模型,以弥补设计任务优先级策略的不足,解决其造成的局部最优问题,并基于时间有色 Petri 网建立产品协同创新设计资源协调分配仿真模型;最后导入实例以验证所提模型的有效性。

## 1 产品协同创新设计任务分解及分配

### 1.1 基于依赖关系的设计任务描述

在产品协同创新设计过程中,各设计任务间存在一定的约束关系。定义任务集  $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。如果  $t_i < t_j$ , 表示任务  $t_j$  受到任务  $t_i$  的优先约束限制,其中“<”是表示关系约束的一种模型符号。在一个任务集中,如果至少有两个设计任务受到优先约束的限制,则称该集合中的设计任务相关,否则称为无关。根据协调理论的描述,将这种逻辑关系定义为依赖关系<sup>[10-12]</sup>。引入图论的表述方法,将任务的依赖关系分解为 3 种典型的情况,即线性依赖、汇合依赖和分流依赖,如图 1 所示,其中圆表示任务节点,箭头表示依赖约束方向。线性依赖表示任务与任务之间呈单一的链传动形式,上一个设计任务完成后即可立即传给下一个设计任务,并开始进行任务设计;汇合依赖表示汇合点所在任务的开始受限于它的多个汇入设计任务,只有当所有汇入任务完成后才能启动汇合点的任务;分流依赖是指一个设计任务对它的多个分支任务均产生影响,每个分支任务均需等待支流点所在任务完成后才能开始设计。3 种依赖关系的任意组合可形成混合依赖约束。

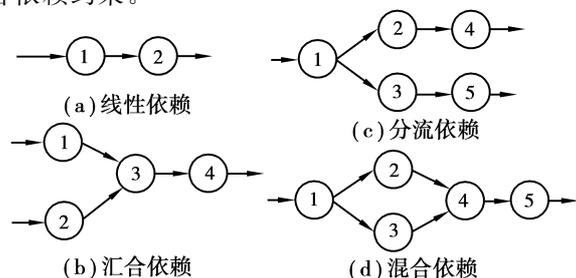


图 1 任务间的依赖约束关系

### 1.2 设计任务分解及分配模型

在产品协同创新设计过程中,需要对创新设计任务进行分解,将分解后的设计任务分配给客户、供应商和科研院所,由开发企业和合作伙伴协同完成。设计任务之间的依赖约束关系势必对产品协同创新设计任务的分配产生一定的影响,而设计任务分配是否合理直接关系到产品协同创新设计的成败。因此,为减小设计任务之间的依赖,基于层次知识匹配

方法<sup>[13]</sup>构建产品协同创新设计功能-结构-任务分解子模型,将设计任务分解为单个可执行的子任务模块,且任务模块之间相互影响相对较小。同时,考虑产品协同创新组织中协作伙伴的创新能力、创新动机及创新经验等因素的影响,将分解后的子任务合理分配给各创新设计主体,以保证各创新主体均能完成相应的设计任务。产品协同创新设计任务分解及分配模型如图 2 所示。

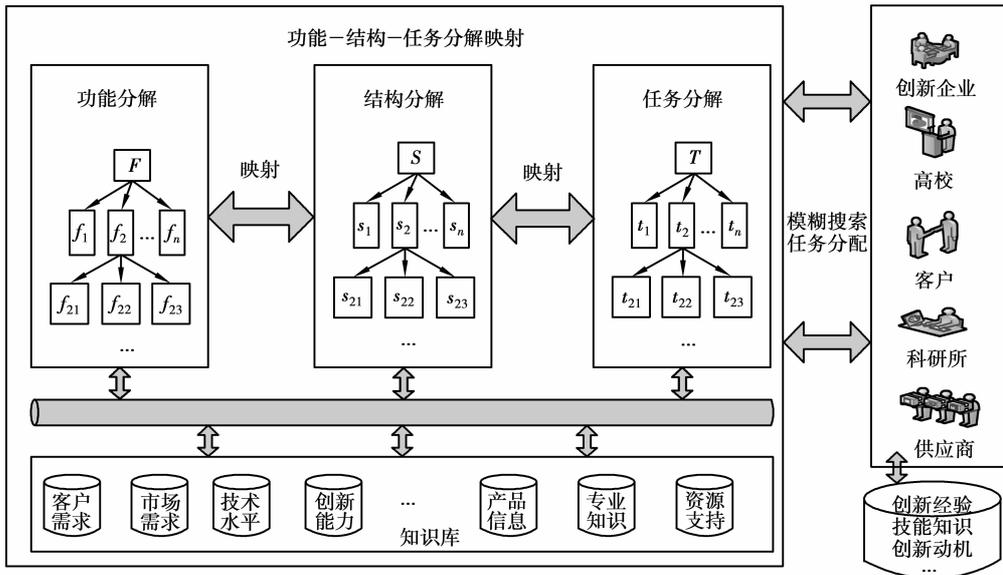


图 2 产品协同创新设计任务分解及分配模型

上述模型利用创新产品功能、结构和设计任务之间的映射关系,构建层次功能-结构-任务分解模型,将任务进行合理分解。并针对设计任务在协同产品创新组织间的分配问题,引入模糊理论,建立基于模糊搜索的设计任务分配模型,其具体步骤如下。

**Step 1** 综合考虑客户、供应商、科研院所等合作伙伴的创新设计能力、创新经验和创新动机,分别设定其设计任务完成阈值  $\sigma_i$ 。

**Step 2** 基于层次知识匹配方法对设计产品功能  $F_i$ 、结构  $S_i$  及任务  $T_i$  进行分解匹配。

**Step 3** 分析客户、制造企业、市场对创新设计产品某功能  $F_i$  的重要度要求,描述为{不重要,一般,比较重要,重要,非常重要},并对其重要程度进行赋值,记为  $I_i = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

**Step 4** 设定产品功能  $F_i$  对应的属性值为  $C_i = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,  $0 \leq \sum_{i=1}^n c_i \leq 1$ , 设计功能是否满足可

$$表示为 C_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq \sum_{i=1}^n c_i \leq 0.8, \quad \text{不满足;} \\ 1, & 0.8 < \sum_{i=1}^n c_i \leq 1, \quad \text{满足。} \end{cases}$$

**Step 5** 根据式(1)计算完成产品协同创新设计所分配的设计任务的要求能力阈值。

$$A_i = \frac{\sum_{i=1}^n I_i C_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (1)$$

若  $A_i \leq \sigma_i$ , 表示协同创新设计主体能胜任所分配的设计任务,任务分解、分配成功。当有两个或两个以上符合要求的创新设计主体时,将设计任务分配给  $A_i$  与  $\sigma_i$  最相近的设计主体;若  $A_i > \sigma_i$ , 表示所分配的设计任务超过设计主体的能力范围,被分配任务不具有可执行性,无法成功完成,转 Step 6。

**Step 6** 设定任务的分解粒度为  $\Delta_i$ , 判断任务的分解粒度是否大于创新主体的设计条件。若分解粒度  $\Delta_i$  大于创新主体设计条件,则表明可进一步分解设计任务,然后转 Step 2 重新进行创新主体-任务模糊搜索匹配;否则,从创新组织外寻找可胜任该创新任务的创新协作主体,加入到创新组织中。

## 2 产品协同创新设计资源分配

### 2.1 产品协同创新设计资源分类及属性分析

在产品协同创新设计过程中,从设计主体、客体、方法和环境四方面出发,将创新设计所运用到的资源分为四大类,分别是人力资源、技术资源、应用资源和评价资源<sup>[14-16]</sup>。人力资源主要是指承担设计任务的创新主体。创新主体在同一时间只能对一个设计任务进行操作,而不能同时处理多个设计任务;技术资源主要包括设计所需的文档资料、软件、数据和知识等,这些资源具有可复制性和传播性,经过复制、传播后的技术资源可以同时被多个创新主体操作使用;应用资源是指像计算机和不可复制的软件之类的资源;评价资源主要包括资金资源和时间资源,创新主体完成设计任务所占用资金、时间的多少可用于评价创新的效果。鉴于此,在产品协同创新设计过程中,主要考虑人力资源和应用资源的约束限制,而将时间资源作为评价指标,分析考虑每个创新主体完成设计任务所需的时间,确定出所需总时间最短的创新任务-资源分配方案。

### 2.2 建立考虑资源使用阈值的资源分配模型

在有限的资源条件约束下,各创新任务间不可避免的会出现资源竞争的现象,目前普遍采用优先级策略加以解决。当共享的资源出现需求冲突时,优先级高的任务首先获取资源分配权,低优先级任务只能使用高优先级任务剩余的資源,或是在资源不足的情况下进入等待状态,直到高优先级任务将资源释放,才能获取资源开始任务。在抢占式优先级策略中,高优先级任务甚至可以掠夺低优先级已经获取的资源,从而满足自己的资源需求量。上述优先级资源分配策略将可能导致低优先级任务的资源申请拖延时间过长,任务无法如期完成等情况发生。虽然可以利用动态优先级策略对优先级施行实时动态调整,但动态计算过程繁琐,不便于使用。鉴于此,笔者提出了一种考虑资源使用阈值的资源分配模型,以弥补设计任务优先级策略带来的不足。

在产品协同创新设计过程中,假定  $n$  个创新设计任务  $T_i (i=1, 2, \dots, n)$  共享  $m$  种创新设计资源  $R_j (j=1, 2, \dots, m)$ , 每种设计资源的数量为  $m_j$ , 规定第  $i$  个设计任务  $T_i$  对第  $j$  种设计资源  $R_j$  的使用阈值为  $M_{ij}$ 。当第  $t$  个创新设计任务  $T_t$  提出创新设计资源需求申请时,首先判断其资源申请量  $k_{tj}$  是否满足式(2)。

$$\begin{cases} \text{Total} & K_j \leq M_{tj} - k_{tj}, \\ \text{Total} & K_j = \sum_{i=1}^n k_{ij}, (i \neq t). \end{cases} \quad (2)$$

若满足,表明在整个创新团队中,在对第  $t$  个创新设计任务  $T_t$  限定其对第  $j$  种共享设计资源  $R_j$  的使用阈值为  $M_{tj}$  的情况下,当其预申请资源量为  $k_{tj}$  时,第  $j$  种共享设计资源  $R_j$  剩余分配量大于或等于系统已使用量,因此,系统可以满足设计任务  $T_t$  提出的要求,将共享设计资源  $R_j$  分配给设计任务  $T_t$ 。若不满足式(2),系统则拒绝或延迟满足设计任务  $T_t$  提出设计资源需求申请。

通过设定资源使用阈值的方法,可以有效解决在有限资源条件下,创新设计任务-资源分配不均衡的问题,从而不仅可以保证高优先级创新设计任务优先分配到共享设计资源,也能同时满足低优先级创新设计任务分配到适量设计资源的要求。若设定第  $i$  个创新设计任务  $T_i$  对第  $j$  种共享设计资源  $R_j$  的使用阈值为  $m_{ij}$ , 则表明系统对设计任务使用该种设计资源无权限约束。如将所用设计任务的资源使用阈值均设置为  $m_j$ , 那么系统中所有创新设计任务对共享创新设计资源的使用权限是平等的,无优先级高低区分。

## 3 基于时间有色 Petri 网的任务-资源分配建模仿真

### 3.1 时间有色 Petri 网的基本定义

德国人 Carl Adam Petri 于 1962 年首次提出 Petri 网,此后很多学者对其进行了研究。Petri 网是一种基于状态、面向图形、支持并发活动的建模语言,具有直观的图形表示及严密的数学基础<sup>[17]</sup>。利用时间有色 Petri 网进行设计任务-资源分配的建模仿真,能有效避免遗传算法、粒子群优化算法和模拟退火需构建目标函数的约束。

一个基本的 Petri 网包括库所(place)、变迁(transition)及弧(arc)三结构要素。下面给出 Petri 网的关键定义<sup>[18-20]</sup>。

**定义 1** 一个时间有色 Petri 网是一个多元组,  $TCPN=(\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I, R, r_0)$ , 其中:

- 1)  $\Sigma$  是非空时间类或非时间类的有限集合,即时间或非时间的颜色集合;
- 2)  $P$  是库所(place)的有限集合;
- 3)  $T$  是时间或非时间变迁(transition)的有限集;
- 4)  $A$  是弧(arc)的有限集合,其中  $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \phi$ ;
- 5)  $N$  是节点函数(node function),是定义  $A$  到  $(P \times T) \cup (T \times P)$  的函数;
- 6)  $C$  是颜色函数(color function),是定义  $P$  到

$\Sigma$  的函数;

7)  $G$  是守卫函数(guard function),是定义在  $T$  上的表达式,即

$$\forall t \in T: [\text{Type}(G(t)) = B \wedge \text{Type}(\text{Var}(G(t))) \subseteq \Sigma],$$

$$B = \{\text{true}, \text{false}\};$$

8)  $E$  是弧表达函数(arc expression function),是定义在  $A$  上时间或非时间表达函数,即

$$\forall a \in A: [\text{Type}(E(a)) = C(P(a)) \wedge \text{Type}(\text{Var}(E(a))) \subseteq \Sigma],$$

其中  $P(a)$  是  $N(a)$  的库所;

9)  $I$  是初始化函数(initialization function),是定义在  $P$  上的时间或非时间函数,即

$$\forall p \in P: [\text{Type}(I(p)) = C(P)];$$

10)  $R$  是时间值集合,即时间标识,是非负值集合;

11)  $r_0$  是时间值集合  $R$  的元素,即开始时间。

### 3.2 基于时间有色 Petri 网的任务-资源分配仿真建模

在给出时间有色 Petri 网定义基础上,建立基于时间有色 Petri 网的产品协同创新设计任务-资源分配仿真模型,其基本原理如图 3 所示。

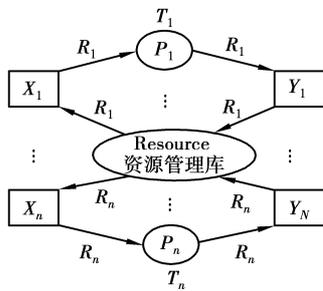


图 3 基于时间有色 Petri 网的任务-资源分配建模原理

在仿真模型中,变迁  $X_i$  表示为设计任务  $T_i$  分配资源,变迁  $Y_i$  表示为设计任务  $T_i$  归还资源。为实现统一管理及分配,建立一个资源管理库 Resource,将系统所有可分配的创新设计资源全部存放于该资源管理库中。客户协同产品开发过程中的创新设计资源描述为

$$\text{color Res} = (\text{ID}, \text{Name}, \text{State}, \text{Capacity}, \text{Feature}),$$

式中:ID 表示创新设计资源的编号,该编号具有唯一性;Name 表示创新设计资源的名称;State 表示创新设计资源的状态是否为可用,资源具有 free(空闲)及 busy(忙碌)两种状态;Capacity 表示创新设计资源的能力,即使用该设计资源可达到实现的功能。Feature 表示创新设计资源的使用特征,即设计资源是否具有共享性、可复制性、可传播性等性能。为简化描述模型,将设计资源描述组合简化为

$$R_i = k_{i1}R_1 + k_{i2}R_2 + \dots + k_{im}R_m (i=1, 2, \dots, n).$$

**Step 1** 设计任务  $T_i$  向系统提出资源需求申请。

**Step 2** 系统检查资源管理库 Resource 中待分配的资源是否能满足需求申请,即利用考虑资源使用阈值的任务-资源分配模型判断所申请资源的状态是否为可分配。若可分配,转 Step 3;若超过其资源使用阈值,不可分配,则进入申请等待状态。

**Step 3** 将资源组合  $R_i = k_{i1}R_1 + k_{i2}R_2 + \dots + k_{im}R_m (i=1, 2, \dots, n)$  分配给设计任务  $T_i$ 。即变迁  $X_i$  使能,资源管理库 Resource 中的资源托肯相应地减少,表示设计任务  $T_i$  的库所  $P_1$  中的资源托肯相应地增加。

**Step 4** 设计任务  $T_i$  将资源使用完毕,提出资源归还申请,变迁  $Y_i$  使能,资源管理库 Resource 中的资源托肯相应地增加,库所  $P_1$  中的资源托肯相应地减少。

上述模型,考虑了任务对资源的使用阈值,将设计资源合理分配给各设计任务,保证各设计任务都能被分配到适量的资源,而不至于出现低优先级任务的设计资源完全被高优先级任务掠夺的现象。同时,将设计任务的完成时间进行规定,相当于将时间资源分配给不同的设计任务。为完成不同的设计任务,需要不同的资源组合,通过调整资源组合,实现产品创新设计任务-资源的最优匹配。

## 4 案例分析

为验证模型的有效性,以某品牌手机研发项目为例,对其产品协同创新设计任务-资源分配进行建模分析。整个手机创新设计研发小组共分为 7 个设计团队,其中,包括经过筛选的创新客户、企业专业技术人员、科研院所成员、咨询公司及供应商。设计所需的资源简括为计算机、专业软件、技术资料、测试设备、生产设备、设计图纸、铅笔七大类资源,在案例中用  $R_i (i=1, 2, \dots, 7)$  表示。该手机研发项目设计任务分解如表 1 所示。

经过分解,手机创新设计任务可以细分为 12 个子设计任务,被分解后各子设计任务的活动依赖关系如图 4 所示。设计任务 3 与设计任务 4 并行进行,均由设计团队 3 负责。设计任务 5、设计任务 6、设计任务 7、设计任务 8 及设计任务 9 均由设计团队 4 负责,设计任务 6、设计任务 7、设计任务 8 及设计任务 9 可并行设计。

基于时间有色 Petri 网建立设计任务-资源的分配仿真模型,如图 5 所示。在该模型中,设计资源首先被储存于资源管理器 resources store 库所中,设

设计任务根据需求,提出资源调用申请,使用完成后释放资源,使资源返回资源管理器 resources store。  
 设定设计任务 task 6 对设计资源  $R_1$  的使用阈值为  $M_{61}=4$ ,当设计任务 task 6 需要调用设计资源  $R_1$  时,

需首先判断是否满足式(2),即

$$\begin{cases} \text{Total } K_1 \leq M_{61} - k_{61}, \\ \text{Total } K_1 = k_{71} + k_{81} + k_{91}. \end{cases}$$

表 1 某品牌手机研发项目设计任务分解表

任务编号	任务名称	设计时间/d	设计资源	创新主体
task 1	可行性分析	28	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 1
task 2	概念设计	28	$R_1 + R_2 + R_3 + R_6 + R_7$	设计团队 2
task 3	外型设计	21	$R_1 + R_2 + R_3 + R_6 + R_7$	设计团队 3
task 4	结构工艺可行性分析	14	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 3
task 5	结构设计	21	$R_1 + R_2 + R_3 + R_6 + R_7$	设计团队 4
task 6	模具工艺分析	7	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 4
task 7	制造工艺分析	7	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 4
task 8	装配工艺分析	7	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 4
task 9	强度分析	7	$R_1 + R_2 + R_3$	设计团队 4
task 10	手板制作	14	$R_1 + R_2 + R_3 + R_5$	设计团队 5
task 11	性能测试	21	$R_1 + R_2 + R_3 + R_4$	设计团队 6
task 12	手机试制	28	$R_1 + R_2 + R_3 + R_5$	设计团队 7

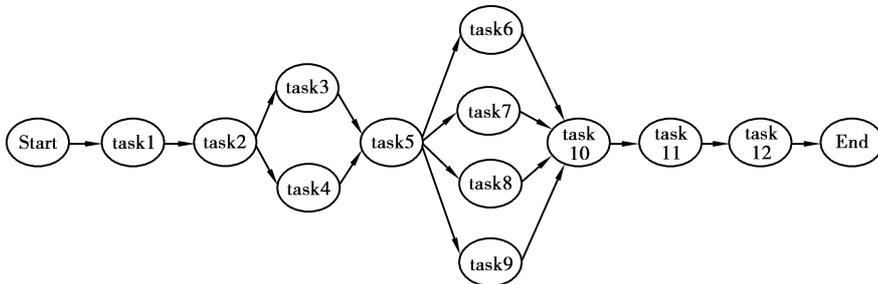


图 4 手机创新设计任务活动依赖关系

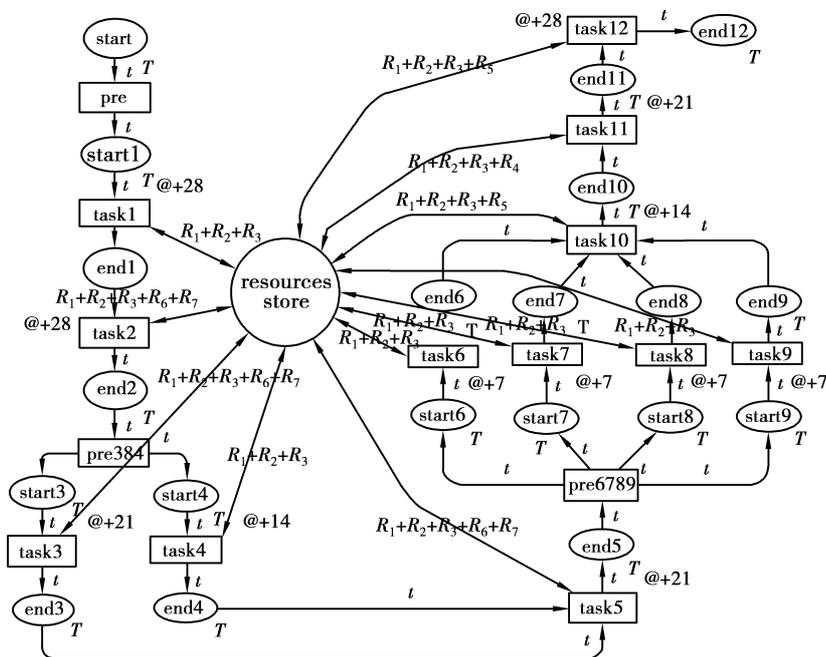


图 5 设计任务-资源分配 Petri 网模型

若满足,则资源管理器 resources store 将设计资源  $R_1$  分配给设计任务 task 6,否则,进入等待状态。表达式“@+”表示变迁的执行时间,即设计任务的设计时间,据此以整体创新设计任务完成时间最短为目标,通过仿真确定整个研发设计的完成时间为 168 d。

## 5 结 语

笔者主要研究产品协同创新设计任务分解、分配及资源分配问题。基于层次知识匹配及模糊搜索建立了设计任务分解及分配模型,模型考虑了设计任务间的相互依赖关系及设计主体的创新设计能力制约,使产品协同创新设计过程中复杂设计任务的分解、分配更具可操作性;建立了考虑资源使用阈值的资源分配模型,从全局度量设计资源的分配合理性,以弥补利用任务优先级策略分配资源造成局部设计任务被延误的不足,并基于时间有色 Petri 网建立任务-资源分配仿真模型;最后导入实际案例验证了本文所建模型的有效性。因此对科学管理产品协同创新设计任务分解及资源分配具有应用参考价值。

产品协同创新是一个复杂的系统工程,发掘创新过程中影响任务分解及资源分配效率的关键因素,并深入分析其相互之间关系,以提高产品协同创新任务分解及资源分配效率是下一步的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 杨育,郭波,尹胜,等. 客户协同创新的内涵与概念框架及其应用研究[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(5): 944-950.  
YANG Yu, GUO Bo, YIN Sheng, et al. Connotation, theory framework and application of customer collaborative innovation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008,14(5):944-950.
- [2] 张峰,杨育,贾建国,等. 企业协同生产网络的拓扑特性分析[J]. 重庆大学学报,2012,35(6):21-27.  
ZHANG Feng, YANG Yu, JIA Jianguo, et al. Topological characteristics of industry collaborative production networks [J]. Journal of Chongqing University, 2012,35(6):21-27.
- [3] Lo C. Multi-agent conflict coordination using game bargain [J]. Information Technology Journal, 2008, 7(2):234-244.
- [4] Chen Y M, Wang S C. An evolutionary compensatory negotiation model for distributed dynamic scheduling [J]. Applied Soft Computing,2008, 8(2):1093-1104.
- [5] Mahesh M, Ong S K, Nee A Y C. Communication and coordination in multi-agent manufacturing systems [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2006, 1(1):59-82.
- [6] 郝宪文,代钰,张斌,等. 基于约简任务资源分配图的网格依赖任务静态调度[J]. 东北大学学报:自然科学版,2008,29(7):948-951.  
HAO Xianwen, DAI Yu, ZHANG Bin, et al. Static grid dependent tasks scheduling based on reduced task-resource assignment graph [J]. Journal of Northeastern University:Natural Science, 2008,29(7):948-951.
- [7] 徐进,费少梅,张树有,等. 自适应粒子群求解资源动态分配项目调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(8):1790-1797.  
XU Jin, FEI Shaomei, ZHANG Shuyou, et al. Adaptive particle swarm optimization for the project scheduling problem with dynamic allocation of resource [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(8): 1790-1797.
- [8] 周明骏,敖翔,邓昌智,等. 面向协作交互任务的资源模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(10): 1321-1327.  
ZHOU Mingjun, AO Xiang, DENG Changzhi, et al. Resource model for collaborative interaction tasks [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007,19(10):1321-1327.
- [9] 尹胜,尹超,刘飞,等. 多任务外协加工资源优化配置模型及遗传算法求解[J]. 重庆大学学报,2010,33(3): 49-55.  
YIN Sheng, YIN Chao, LIU Fei, et al. Optimal allocation model and its genetic algorithms of outsourcing production resources in multi-task [J]. Journal of Chongqing University, 2010,33(3):49-55.
- [10] Halle B V. Business rules applied: building better systems using the business rules approach [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [11] Malone T W, Crowston K, Herman G A. Organizing business knowledge: the MIT process handbook [M]. Cambridge: MIT Press, 2003.
- [12] Date C J. What not how: the business rule approach to application development [M]. Boston: Addison-Wesley Professional,2000.
- [13] 王小磊,杨育,杨洁,等. 协同产品创新设计中基于层次知识匹配的冲突消解研究[J]. 中国机械工程,2010, 21(20):2488-2495.  
WANG Xiaolei, YANG Yu, YANG Jie, et al. Conflict resolution based on hierarchical knowledge matching in collaborative product creative design [J]. China Mechanical Engineering, 2010,21(20):2488-2495.
- [14] Joglekar N R, Ford D N. Product development resource allocation with foresight [J]. European

- Journal of Operational Research, 2005, 160(1): 72-87.
- [15] 王要武, 成飞飞. 基于模糊时间工作流网的建筑产品设计过程资源管理与仿真[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 189-196.
- WANG Yaowu, CHENG Feifei. Resource management and simulation for building product design based on fuzzy time workflow net [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 189-196.
- [16] 唐加福, 刘士新, 陈以增, 等. 产品优化设计的资源分配模型[J]. 系统工程学报, 2003, 18(3): 284-288.
- TANG Jiafu, LIU Shixin, CHEN Yizeng, et al. Resource allocation in product optimization design [J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(3): 284-288.
- [17] 田锋, 李人厚, 张金成. 模糊定时高级 Petri 网的协同设计活动建模和分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(3): 267-274.
- TIAN Feng, LI Renhou, ZHANG Jincheng. Modeling and analysis of collaborative design activities using fuzzy-timing high-level petri nets [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(3): 267-274.
- [18] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [19] Jensen K. Colored petri nets: basic concepts, analysis methods, and practical use[M]. 2nd ed. New York: Springer, 1996.
- [20] Jensen K. An introduction to the theoretical aspects of colored petri nets [J]. Lecture Notes in Computer Science, 1994, 803: 230-272.

(编辑 张 革)

## (上接第 30 页)

- [7] Yesilyurt I, Gu F S, Ball A D. Gear tooth stiffness reduction measurement using modal analysis and its use in wear fault severity assessment of spur gears [J]. NDT&E International 2003, 36 (5): 357-372.
- [8] 林腾蛟, 杨妍妮, 李润方, 等. 弧齿锥齿轮传动内部动态激励数值仿真[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(6): 609-613.
- LIN Tengjiao, YANG Yanni, LI Runfang, et al. Numerical simulation of the internal dynamic excitation of a spiral bevel gear transmission [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(6): 609-613.
- [9] 杨振, 王三民, 范叶森, 等. 面齿轮传动系统参数激励振动特性分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 26-35.
- YANG Zhen, WANG Sanmin, FAN Yesen, et al. Vibration characteristics of face-gear transmission system with parametric excitation [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 26-35.
- [10] 林腾蛟, 冉雄涛. 正交面齿轮传动非线性振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 25-31.
- LIN Tengjiao, RAN Xiongtao. Nonlinear vibration characteristic analysis of a face-gear drive [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 25-31.
- [11] Buckingham E. Analytical mechanics of gears [M]. New York: Dover Publications, 1949.
- [12] Band R V, Peterson R E. Load and stress cycle in gear teeth [J]. Mechanical Engineering, 1929, 51 (9): 653-662.
- [13] Weber C. The deformation of loaded gears and the effect on their load carrying capacity [R]. UK: Department of Scientific and Industrial Research, 1951.
- [14] Attia A Y. Deflection of spur gear teeth cut in thin rims [J]. Journal of Engineering for Industry, 1964, 86(4): 333-341.
- [15] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [16] 李政民卿, 朱如鹏. 面齿轮传动的承载接触分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 219-223.
- LI Zhengminqing, ZHU Rupeng. Load tooth contact analysis on face gear driver [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(2): 219-223.
- [17] 吴俊飞, 郭建章. 变厚齿轮轮齿啮合综合刚度确定方法研究[J]. 青岛化工学院学报: 自然科学版, 2002, 23(1): 74-76.
- WU Junfei, GUO Jianzhang. Study of the method for determining the meshing synthesis rigidity of beveloid gear tooth [J]. Journal of Qingdao Institute of Chemical Technology: Natural Science, 2002, 23(1): 74-76.
- [18] 李润方, 王建军. 齿轮系统动力学: 振动、冲击、噪声 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.

(编辑 张 革)