

文章编号: 1006-5911(2002)07-0542-05

# 面向并行工程的任务分配与规划

杨波<sup>1</sup>, 黄克正<sup>2</sup>, 孙红卫<sup>3</sup>

(1. 济南大学机械系, 山东 济南 250022; 2. 济南大学数理系, 山东 济南 250022;

3. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**项目的成功依赖于全体参与者的协同工作,但在并行工作环境下,由于网络上的多功能小组工作风格的差异,因而在产品开发阶段经常出现任务规划的交叠和冲突现象。为解决这些问题,保证资源的合理利用及缩短开发时间,本文提出了在产品开发过程中任务分解的原则,给出了任务到团队及基于均衡-适度原则的任务到团队内各个参与人员分配的数学模型,该模型有效地支持了并行工程中的资源配置。

**关键词:**并行工程;任务分解;团队;任务分配

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

## 0 引言

在并行产品设计过程中,通过多学科产品开发人员的合作与协调,改进产品开发过程,使产品设计得到优化<sup>[1]</sup>。并行设计的实施不仅需要构建一个适应并行工作方式的计算机环境,而且还要重组产品开发过程和合理分配任务,把不同地点、不同子系统的多学科小组成员集成起来,构建一个分布式协同设计平台,并优化其结构,以达到提高效率、合理利用资源的目的。因此,产品设计过程规划中要按照一定的规则对设计任务进行合理分配。

任务分配与规划就是在众多的匹配方法中寻找一个最合理的子任务分配方案,它与 Job-shop 问题、货郎担问题以及背包问题均有某些相似的特点,都是典型的、易于描述却难以处理的 NP 完全问题<sup>[2]</sup>(指不存在多项式时间算法的问题<sup>[3]</sup>)。在分析并行工程产品开发过程特点的基础上,本文讨论了任务分解的原则,并提出了一种以节约资源为目标的设计任务分配的数学算法,为优化配置并行工程的实施中人员或功能小组提供了一种途径。

## 1 支持并行工程的产品开发过程

产品设计过程是有序的企业活动流程,为支持并行工程,设计过程的定义工具应该屏蔽底层各种复杂的细节信息,实现三方面从抽象到具体的映射:

①从抽象的用户需求到具体的产品设计任务的映射;②从单一抽象的设计任务信息到多级可执行设计子任务的映射;③从设计子任务到具体的产品开发团队及开发人员的映射。

因此,必须建立两个模型,并实现相应的两个过程:①任务的分解。建立产品设计任务及其分解模型;②任务的分配。建立设计任务到产品开发团队及设计人员的映射模型。

## 2 任务的分解

分解的目的是降低设计问题的复杂性。设计过程是一个动态变化的过程,就并行工程的角度而言,设计过程只有细化到可操作的程度,才可能并行展开工作<sup>[4]</sup>。在产品开发中,我们可以通过建立一种基于规则的约束机制来实现任务的分解。要使复杂

收稿日期: 2001-08-02; 修订日期: 2001-11-05。

作者简介: 杨波(1968-),女,吉林省长春市人,济南大学机械系讲师,硕士,主要从事并行设计、PDM、设计理论等研究。

E-mail: shw\_yb@xinhuanet.com。

的设计任务转化为许多简单、基本的设计任务, 功能是单一的设计所必须达到的最重要的特性, 机械的主要功能是无条件的、必须满足的, 而设计约束是可以相互协调让步的。因此, 任务分解的要求是:

规则 1 如果设计要求满足功能元, 那么, 根据设计要求指定功能元;

规则 2 如果功能元与设计要求相匹配, 那么, 功能元就不分解;

规则 3 设计子任务之间的交互应当最少。

由于在并行设计过程中多任务模型间不可避免的关联性, 使得每个任务求解器不仅需要完成对某种任务的求解, 同时必须和其他求解器进行协调, 使得规则 3 实现起来具有一定的难度。为建立基于规则 3 分解模式的任务分解过程, 本文采用一种结构矩阵定义任务分解的方法, 并以具有 7 个部件产品的任务分解过程说明这一方法, 如图 1、2 所示。

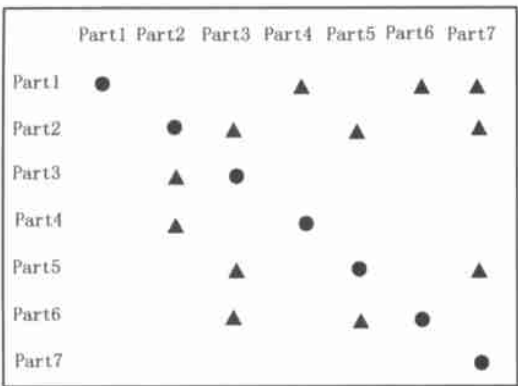


图1 产品结构矩阵

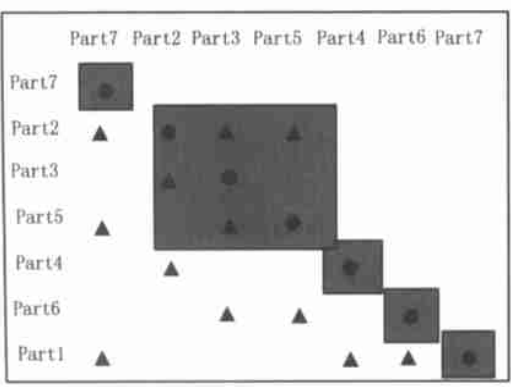


图2 对角线形式的结构矩阵

图 1 中▲表示列部件对行部件的完成具有依赖关系, 如 Part1 的设计依赖于 Part4、6、7 的输出结果; 经调整后, 该结构矩阵变成了分块三角矩阵如图 2 所示。此时, 在所划分的块内存在着频繁的通讯, 而块之间仅存在偶尔的信息交换, 将这一产品的开发过程, 按照分块三角矩阵的结构分解为 5 个子任

务: { Part7 }、{ Part2、3、5 }、{ Part4 }、{ Part6 }、{ Part1 }, 这一分解模式支持了规则 3 对任务分解的要求, 有效地减少了任务间的耦合。

3 任务的分配

并行设计的本质, 就是充分利用网络上的资源和参与设计各成员的领域知识进行协同作业。将一个复杂的任务分解成若干粒度较小的子任务, 并将各个子任务分配在适宜的网络节点上, 由适当的成员求解, 这是实现成员间协同作业的前提条件, 在上述三项原则对任务分解的基础上, 本文提出了如下任务分配方法。

3.1 任务到产品开发团队的分配

由于完成并行设计任务的各个团队能力不尽相同, 因此需按一定的策略将任务分配到有能力的团队。在并行设计环境下, 由于各个开发团队分布于不同的地理位置, 为提高设计效率, 在从任务到团队的分配中, 应尽可能减少设计团队之间的协调, 减少各个团队之间的交互, 因此, 我们提出了一个以开发团队数量最少为目标的分配算法。

设现有  $m$  个开发团队, 我们用  $x_j$  表示第  $j$  个团队的状态:  $x_j = \begin{cases} 1 & \text{该团队被选中} \\ 0 & \text{该团队未被选中} \end{cases}$

另假设该项目被分解为  $n$  部分子任务, 可以定义任务-团队能力 ( $T-A$ ) 矩阵:

$A_{m \times n} = (a_{ij})_{n \times m}$   
 $a_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{第 } j \text{ 个团队可以完成第 } i \text{ 个子任务} \\ 0 & \text{第 } j \text{ 个团队不能完成第 } i \text{ 个子任务} \end{cases} \quad (1)$

得到优化模型: 
$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^m x_j \\ (-A)x \geq (-b) \\ x_j = 0 \text{ or } 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

其中  $b = (-1 \dots -1 \dots -1);$

其等价优化问题为: 
$$\begin{cases} \max \sum_{j=1}^m (-x_j) \\ Ax \leq b \\ x_j = 0 \text{ or } 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

这是一个典型的 0-1 整数规划问题。解此类问题若用完全穷举法将是 NP 困难的, 需计算  $m^n$  次。我们采用一种分枝定界法进行求解, 利用不可行度确定较佳的分枝, 确定问题(2)的下界, “杀死”一些其他分枝, 从而减少计算量, 其算法如下<sup>[5]</sup>:

步骤 1 若当前活跃集(未被杀死的分枝节点

集合)  $activeset = \emptyset$  则已得到当前最优解, 结束; 否则, 转步骤 2;

步骤 2 计算  $activeset$  中每一节点的不可行度  $I$ , 选择  $I$  最小者作为一分枝点  $k$ , 将  $k$  从  $activeset$  中去掉;

步骤 3 生成  $k$  的各分枝, 并将其各个分支节点加入当前  $activeset$ , 转步骤 1。

其具体步骤如下: 为使问题的求解更具有一般意义, 我们假设在此之前已有一部分团队的状态已确定, 用  $W_k$  表示  $x_j$  已被指定为 0 或 1 的变量的下标集, 因此问题转化为:

$$\begin{cases} \max_{j \in F_K} \sum C_j x_j + \sum_{j \in S_K} C_j \\ \sum_{j \in F_K} a_{ij} x_j \leq b_i - \sum_{j \in S_K} a_{ij} = T_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ x_j = 0 \text{ or } 1 \quad j \in F_K \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $S_K = \{j | j \in W_K, \text{ s. t. } x_j = 1\}$   $F_K = \{j | j \notin W_K\}$ , 并且  $C_j = -1, j = 1, 2, \dots, m$

令  $Q_K = \{i | T_i < 0\}$ 。

(1) 若  $Q_K = \emptyset$  则此时式(3)的最优解为  $x_j = 0, j \in F_K$ , 即现已参与团队已能够完成任务, 无需再增加新的团队。

(2) 若  $Q_K \neq \emptyset$  令

$$R_K = \{j | j \in F_K, \text{ 且对于某个 } i \in Q_K \text{ 有 } a_{ij} < 0\} \quad (4)$$

$$\text{取 } I_K(j) = \max_{i \in Q_K} \{0, -T_i + a_{ij}\} \quad j \in R_K \quad (5)$$

我们称其为不可行度, 选择

$$I_K(p) = \min_{j \in R_K} I_K(j) \quad (6)$$

则取  $x_p$  进行划分, 并向  $x_p = 1$  分枝, 即选出一个参与团队  $x_p$ , 以此类推, 即可选出其他参与团队, 最后将此方案与其他分枝比较, 求出最佳方案。

### 3.2 任务到团队内 Agent 成员的分配

设计过程是由在不同设计阶段、不同专业人员动态组织完成一定任务而实现的, 由于影响设计任务分配的诸多因素均为动态的非量化的概念, 这些影响因素都带有不同程度的模糊性。为从理论上实现设计子任务分配的合理化, 本文采用一种模糊系数的确定方法, 把影响分配的每一因素, 按其性质和程度细分为若干等级, 确定每一因素的等级系数, 然后采用均衡-适度<sup>[6]</sup>的分配原则, 实现从子任务到团队内成员的分配。

(1) 建立因素集 因素集为影响优化的各个因素所组成的普通集合, 因素集可以表示为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots\}$$

假设共有  $n$  项设计任务,  $m$  个欲参与的设计人员, 我们定义以下几个因素:

定义 1 设计技能矩阵  $T = (t_{ij})_{m \times n}$ , 其中  $t_{ij}$  表示第  $i$  个成员所具有的对第  $j$  项任务的技能系数;

定义 2 设计人员现有设计任务状况系数  $r_i, i = 1, 2, \dots, m$ ;

定义 3 任务紧急程度系数  $e_j, j = 1, 2, \dots, n$ 。

(2) 建立因素等级集 由于集合中各因素具有不同程度的模糊性, 每一因素可按其对结果的影响程度细分为若干等级, 组成因素的等级集, 式中  $u_{ij}$  为第  $i$  个因素的第  $j$  个等级系数:

$$u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}\}$$

针对上述因素集中定义的三个影响因素, 我们定义了模糊系数(如表 1)。

表 1 因素等级的模糊系数

因素	评 语					
	iv 级	iii 级	ii 级	i 级	0 级	v 级
$t$	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0
$r$	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
$e$	1.0	0.8	0.5	0.4	0.3	0.1

对三个因素的等级作如下规定:

$\ell_1$ 设计技能。采用历史事件匹配方法, 即每个参与人员保存自己过去所参与的设计任务, 若他参与过类似任务, 则具有相对高一些的等级, 并且参与相似任务的次数愈多, 他对此任务的经验越丰富, 等级也越高;

$\ell_2$ 设计任务状况。设计者现有设计任务越多, 其现有设计任务状况等级越高;

$\ell_3$ 任务紧急程度。任务越紧急, 等级越高。

(3) 建模步骤 建立  $t-r-e$  平衡矩阵, 该矩阵描述了设计人员设计技能与现有设计任务状况及任务紧急程度的平衡:

$$B = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} t_{11}(1-r_1)e_1 & t_{12}(1-r_1)e_2 & \dots & t_{1n}(1-r_1)e_n \\ t_{21}(1-r_2)e_1 & t_{22}(1-r_2)e_2 & \dots & t_{2n}(1-r_2)e_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{m1}(1-r_m)e_1 & t_{m2}(1-r_m)e_2 & \dots & t_{mn}(1-r_m)e_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $n$  ——该团队需完成的子任务数;

$m$  ——该团队现有人数。

由此可建立该优化问题的数学模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m b_{ij} x_{ij}) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m x_{ij} = q_j \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1 \\ x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $q_j$  ——完成第  $j$  项子任务所需的某一类型的设计人员数;

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 人参与第 } j \text{ 项子任务的工作} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 人不参与第 } j \text{ 项子任务的工作} \end{cases}$$

这仍是一个 0-1 整数规划问题, 可通过将式 (3) 中系数  $C_j$  设定为一般整数, 然后仍可采用上述分枝界定法进行求解。

### 3.3 实例

(1) 设某一任务可分解为四项团队任务  $\text{Task} = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ , 共有 5 个分布在异地的团队有兴趣参与此项工作。

(2) 首先进行设计任务到团队的分配, 按式 (1), 其  $T-A$  矩阵如下:

$$A_{4 \times 5} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

由式 (2) 得其优化数学模型:

$$\begin{cases} \max (-x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5) \\ -x_1 - x_2 - x_3 - x_5 \leq -1 \\ -x_2 - x_4 \leq -1 \\ -x_1 - x_5 \leq -1 \\ -x_3 - x_5 \leq -1 \end{cases} \quad (9)$$

因  $Q_K \neq \emptyset$  第一步: 由式 (4) 得  $R_0 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , 按式 (5) 计算不可行度得  $I_0(1) = 2, I_0(2) = 2, I_0(3) = 2, I_0(4) = 3, I_0(5) = 1$ , 因  $I_0(5)$  为其最小值, 令  $x_5 = 1$ , 即取  $x_5$  为参与团队, 按式 (2) 继续向下分枝, 得:

$$\begin{cases} \max (-x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - 1) \\ -x_1 - x_2 - x_3 \leq 0 \\ -x_2 - x_4 \leq -1 \\ -x_1 \leq 0 \\ -x_3 \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

则有  $R_0 = \{2, 4\}, I_1(2) = 0, I_1(4) = 0$ , 说明  $x_2, x_4$  可以任选其一向下分枝。以此类推, 其分枝图如图 3 所示。

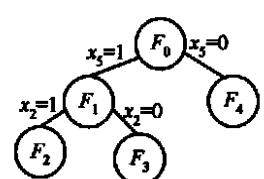


图3 任务分枝图

$F_4$ : 若  $x_5 = 0$ , 由式 (9) 易知  $x_1 = 1, x_3 = 1, x_2$  与  $x_4$  之一如必为 1, 则此分枝不可能有最优解;  $F_3$ : 若  $x_5 = 1, x_2 = 0$  由式 (10)  $x_4 = 1$ , 得出另一最优解。

因此, 可选  $x_5, x_2$  或  $x_5, x_4$  作为开发团队。

(3) 任务-团队成员分配, 若选  $x_5, x_4$  组合作为项目开发团队, 需由  $x_5$  完成  $R_1, R_2, R_4$  三项子任务, 下面我们讨论将该三项任务向  $x_5$  内成员  $Man = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$  分配。设各子任务所需人员数分别为 1, 2, 1, 各成员现有设计任务状况系数为  $r_i = 0.4, 0.2, 0.2, 0.0, 0.2$ , 三项任务的紧急程度系数为  $e_j = 0.2, 0.3, 0.5$ , 五种成员对三项任务的设计技能系数矩阵为:

$$E_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.3 \\ 0.3 & 0.5 & 0.3 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.3 & 0.1 & 0.5 \\ 0.7 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix}$$

由式 (7) 得平衡矩阵:

$$B_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.126 & 0.09 \\ 0.048 & 0.12 & 0.12 \\ 0.016 & 0.072 & 0.2 \\ 0.06 & 0.03 & 0.25 \\ 0.112 & 0.072 & 0.12 \end{bmatrix}$$

再由式 (8) 的数学模型进行优化, 经过计算得结果:  $R_1$  分配给  $M_5, R_2$  分配给  $M_1$  和  $M_2, R_3$  分配给  $M_4$ 。

## 4 结论

传统的产品设计进程在一定程度上具有经验性和随意性, 难以实现对设计资源的合理安排和使用, 容易造成时间、人力、物力及财力上的浪费。现代产品设计是一个多学科领域专家群体协同工作的方式, 因此, 必须建立具有灵活性和适应性的新型组织结构, 而人作为设计过程的直接参与者, 是一种复杂的自约束体, 有着各种原因和手段来影响过程。本文在分析并行工程设计过程特点的基础上, 提出了任务分解的原则及任务分配的数学模型, 实现了从任务集合到人员集合的映射, 从而达到在规定的时间内, 将合适的任务分配给合适的人的目的。这一产品开发过程的规划和调度是对并行工程实施的有效驱动。

(下转第 560 页)

- [刘连臣, 等. CIMSNET—基于 Internet 的现代集成制造支撑平台[J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2001, 7(5): 6–9.]
- [3] 李元左, 邱涤删. 网络图广义连通性的基本性质与常见连通结构[J]. 系统工程学报, 2000, 15(1): 1–6.
- [4] 林 闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000.
- [6] 张曙红, 绵 云, 宋业新, 等. 网络可靠性的模糊随机分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(10): 83–84.
- [7] 刘曲明, 顾 桔. 网络性能分析评价方法及其计算机仿真方法讨论[J]. 计算机仿真学报, 2000, 17(1): 53–55.
- [8] 逯昭义, 王思明. 计算机通信网络信息理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [9] WANG Nianbin, et al. The research and design of a knowledge integrating system in CIMS[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(5): 29–33 (in Chinese). [王念滨, 等. 一种 CIMS 知识集成系统的研究与设计[J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2000, 6(5): 29–33.]

## Research on Fuzzy Random Analysis and Simulation of Connectivity of CIMS Network

XU Guo-hua, LIU Hua-liang, WANG Dong, ZHAO Peng-wei

(School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the graph theory, the randomness and fuzziness of the service-oriented and efficiency-oriented indices of CIMS network are pictured, and the fuzzy random analysis of CIMS network is presented. Monte Carlo method is applied to produce the fuzzy correlation matrix charactering the connectivity of network, and the transitive closure of the fuzzy correlation matrix has been used to analyze the connectivity of network, which provides a new idea to improve CIMS performance.

**Key words:** CIMS network; connectivity; service-oriented index; efficiency-oriented index; transitive closure; stochastic simulation

Received 27 Jul. 2001; Accepted 24 Dec. 2001.

(上接第 545 页)

### 参考文献:

- [1] 熊光楞, 张和明, 等. 并行工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] FOGEL D B. Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems[J]. Cybernetics and Systems, 1993, (24): 24–36.
- [3] HOCHBAUM D. Approximation algorithms for NP-hard problems[M]. Berkeley, CA: PWS Publishing Company, 1997.
- [4] 马 恒, 万 立, 向 文. 基于产品结构的工作流程管理[J]. 机械设计与研究, 2000, (1): 19–21.
- [5] 谢金星, 邢文训. 网络优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 袁清河, 赵汝嘉. 并行工程环境下设计任务调度原理与实现方法的研究[J]. 计算机学报, 2000, 23(4): 440–443.

## Assignment and Planning of Task Supporting Concurrent Engineering

YANG Bo<sup>1</sup>, HUANG Ke-zheng<sup>2</sup>, SUN Hong-wei<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jinan Univ., Jinan 250022, China;

2. College of Science, Jinan Univ., Jinan 250022, China;

3. College of Mechanical Engineering, Shandong Univ. Jinan 250061, China)

**Abstract:** The success of a project depend on the collaborative work of all participators. But in the concurrent engineering, the overlay and conflict of tasks are popular because of the difference of work styles between polyfunctional teams on the network. To solve these problems and enable the high efficiency of product development and resources utilization, the principle on task decomposition, and the mathematic model of assignment from tasks to teams, as well as from sub-tasks to members of teams based on the principle of Equilibrium-Moderation method are proposed. An algorithm is employed to solve the problem. The model is suitable for the configuration of resources in concurrent engineering.

**Key words:** concurrent engineering; task decomposition; teams; task assignment

Received 02 Aug. 2001; Accepted 05 Nov. 2001.