

并行产品开发过程中的任务分配问题研究

李玉家 胡宗武 金 烨



李玉家 博士

摘要: 在阐述了任务分配问题的特殊性的基础上, 建立了并行产品开发过程中任务分配问题的数学模型, 然后运用遗传算法的思想及整合处理对数学模型进行求解, 并通过具体实例予以验证。结果表明, 运用该方法能大幅缩短项目周期, 对于复杂产品开发过程中的任务规划有积极的指导作用。

关键词: 并行工程; 任务分配; 遗传算法; 整合

中图分类号: TH 166; TP 391. 72

文献标识码: A

1 任务分配问题的特殊性

为了能够在尽可能短的时间内设计出功能复杂的产品, 开发人员在产品开发过程中必须高度协作、密切交流, 运用并行工程的思想和方法处理和解决问题。产品开发过程中的任务分配问题从本质上讲是一个资源的优化配置问题, 但是与一般意义上的资源优化配置问题相比, 产品开发过程中的任务分配问题有着自身的特殊性, 表现如下:

(1) 资源的侧重点不同 产品开发活动是一项创造性的脑力劳动, 开发过程中耗费的主要是产品开发人员的智力, 因而人力资源规划是产品开发过程中资源规划的重点。

(2) 任务执行模式的多样性 1 个任务可以由 1 个人来完成, 也可以由掌握该项技术的若干个人的任意组合来完成, 不同的参与者组合会对任务的完成周期产生重大影响。

(3) 资源能力的差异性 受教育背景和工作经验等方面因素的不同导致了每个资源实体(人员)的技能有着较大的差异。另外, 同样的任务由不同的设计者来完成, 任务周期也会因人员的技能不同而有所变化, 这就增加了求解的复杂性。

(4) 资源的间断性 很多基于资源约束的项目规划中都作了以下假设: 在整个项目进展过程中资源总量恒定。但对于设计型项目, 由于存在人员调动、轮班、休假等因素, 导致资源总量不稳定, 对人力资源进行规划时必须考虑其影响。

2 任务分配问题的数学模型

产品开发过程中的任务分配问题可以简单地

描述如下: 已知 1 个由 n 个相互关联的设计任务组成的约束网络, m 个工程师负责完成这些设计任务, m 个工程师对 n 个任务的胜任程度各不相同, 每个任务可以由胜任该项任务的任意 1 个工程师或者多个工程师的组合来完成, 该任务的完成周期也随着参与人员及数量的不同而发生相应的变化。求怎样分配任务才能使得整个项目的完成周期最短?

为了从数学的角度对该问题进行求解, 需要对问题的特征作数学上的定量化描述, 为此引进以下一些矩阵:

(1) 设计结构矩阵 $[DSM]_{n \times n}^{[1]}$ 设计结构矩阵又称为活动邻接矩阵, 它用矩阵形式来表达多个任务之间的信息流向关系。1 个由 n 个任务按照特定的约束关系组成的任务网络图可以由 1 个 $n \times n$ 阶设计结构矩阵来表示, 其中,

$$DSM_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当任务 } i \text{ 是任务 } j \text{ 的直接前序任务时} \\ 0 & \text{当任务 } i \text{ 不是任务 } j \text{ 的直接前序任务时} \end{cases}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n$$

1 个任务 i 的直接前序任务集是它的前序任务集的 1 个子集, 由前序任务集中那些与 i 有直接联系的任务组成; 同理, 1 个任务 i 的直接后序任务集是它的后序任务集的 1 个子集, 由后序任务集中那些与 i 有直接联系的任务组成。如在图 1

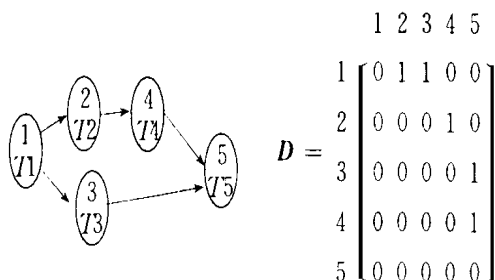


图 1 任务网络图及其设计结构矩阵

中, 任务 5(T_5) 的前序任务集合为 $\psi_1 = \{1, 2, 3,$

收稿日期: 2000—02—21

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (863—511—030—002)

4}, 而任务 5 的直接前序任务集合 ψ_2 为 ψ_1 的 1 个子集, $\psi_2 = \{3, 4\}$; 同理, 任务 1(T1) 的后序任务集合 $\psi_3 = \{2, 3, 4, 5\}$; 而其直接后序任务集合为 $\psi_4 = \{2, 3\}$ 。

(2) 人员技能矩阵 $[PSM]_{m \times n}$ PSM 用来量化地描述产品开发人员对各项任务的胜任程度。为了简化问题, 可以用 $[0, 1]$ 区间内的几个离散数值来表示相对技术熟练程度。

$$PSM_{ij} \in \{0, a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, 1\}$$
$$0 < a_1 < a_2 < \dots < a_k < \dots < 1$$

若 $PSM_{ij} = a_k$, 表示工程师 i 对任务 j 的相对技术熟练程度介于 0 和 1 之间, a_k 值越大, 能力越强, 越应该在不引起资源冲突的情况下将任务 j 分配给工程师 i 来完成。在定义 PSM 值域的时候, 应根据对各人技能的把握程度适当选取离散值的个数。离散值太少, 不能很好地反映开发人员在技能上的差异, 但如果离散值太多, 又难以精确评价每个人对各项任务的具体参数值。

(3) 原始周期列阵 $[IPM]_n$ IPM 用来表示各个任务对应的任务量, IPM_i 的数值表示任务 i 分配给 $PSM_{ki} = 1$ 单个工程师 k 去完成需要的周期。

(4) 禁区数列阵 $[MFZN]_n$ MFZN 用来描述资源动态可获取性, $MFZN_i$ 的值表示在整个项目期间, 工程师 i 由于人员调动、轮班、休假等原因不能投入项目的时间片段数量。

(5) 禁区值矩阵 $[MFZV]_{m \times \max\{MFZN_i\} \times 2}$ 结合 MFZN, MFZV 用来描述各个时间禁区的边界值, $MFZV_{i,j,1}$ 表示第 i 个人第 j 个禁区的左边界值, $MFZV_{i,j,2}$ 表示第 i 个人第 j 个禁区的右边界值。

(6) 执行模式矩阵 $[EMM]_{m \times n}$ EMM 用来描述所有任务对应的模式, 是一个 0 - 1 布尔矩阵, 若 $EMM_{ij} = 1$ 表示工程师 i 被指定参与 j 项任务, 否则表示工程师 i 与任务 j 无关。如果 $n = 4$, $m = 3$, 则图 2 所示的 EMM 矩阵代表的含义为, T1 分配给 $e1$ (工程师 1)、 $e3$; T2 分配给 $e2$, $e3$; T3 分配给 $e1$, $e3$; T4 分配给 $e1$ 。

$$D = \begin{matrix} & T1 & T2 & T3 & T4 \\ \begin{matrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图 2 执行模式矩阵

(7) 实际周期列阵 $[APM]_n$ APM 表示对应于某一确定的任务分配方案的各个任务的完成周期, 它由 PSM、EMM 及 IPM 3 个矩阵的数值决

定。

$$APM_k = \frac{IPM_k}{\sum_{i=1}^n (PSM_{ik} \cdot EMM_{ik})} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

(8) 任务触发时刻矩阵 $[STM]_n$ STM_i 的值表示任务 i 的实际触发时刻。有了 APM 和 STM 就可以计算出整个项目的完成周期

$$T_{Total} = \max\{STM_i + APM_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

通过以上这些矩阵及相关描述, 可以将产品开发过程中的任务分配问题描述如下:

已知: $[DSM]_{n \times n}$, $[PSM]_{m \times n}$, $[IPM]_n$, $[MFZN]_n$, $[MFZV]_{m \times \max\{MFZN_i\} \times 2}$

求: $[EMM]_{m \times n}$ 和 $[STM]_n$

使得: $\min(T_{Total}) = \min(\max\{STM_i + APM_i\}) \quad i = 1, 2, \dots, n$

3 求解策略与算法

目前对并行任务的人力资源规划的研究还处于原则性的探索和讨论阶段, 或者是根据经验予以规划, 然后借助一些项目管理软件 (如 Microsoft 公司的 Project 98 等) 对该规划方案进行检验和评价, 根据检测结果手工调整规划方案, 再用软件去验证。这种规划方法要求规划人员具有丰富的经验, 而且在任务网络图复杂、人员技能差异明显时规划工作显得愈发复杂。

从数学的角度看, 并行环境下的任务分配问题是一个典型的 NP 问题, 无法用通用方法得出惟一的精确解, 需要借助各种启发式算法逐渐逼近最优解, 有 2 类方法可供参考:

(1) 面向任务选择的启发式算法 是指以 DSM 为依据, 先选定第 1 个任务予以规划, 然后从初始候选任务集 (即由所有前序任务都已经完成的待规划任务组成的集合) 中依赖某种规则选择 1 个任务予以规划, 接着从当前候选任务集中依规则选取新的规划对象, 如此反复, 直至所有的任务规划完毕。该方法有 1 个明显的缺陷, 即 1 个任务一旦被选中并予以规划, 则在后续的规划过程中就不能对其进行任何修改, 这对于单模式 (任务所需的资源固定、周期固定)、中小规模问题而言尚有一定的适应性, 但对于多模式、大规模的任务规划问题显然不能取得很好的效果。

(2) 面向方案选择的启发式算法 是指先给定 1 个或者若干个任务分配方案, 分析其目标函数值, 然后遵循某种规律进行迭代, 形成新的方案或者方案群体, 分析其目标函数值后继续迭代, 逐步向最优解靠近。目前常用的面向方案选择的启发式算法主要有 2 种, 即模拟退火算法 (simulat-



ed algorithm, SA) 和遗传算法 (genetic algorithm, GA)。SA 是从单个方案到单个方案的迭代, 是点到点的优化; 而 GA 是从一代方案到另一代方案的迭代, 是群体到群体的优化。相比之下, GA 自身独立于搜索规则, 模拟自然选择的生物学规律, 通过杂交和变异等操作, 能够更好地逼近全局最优解。

3.1 构造单个任务分配方案的编码^[2]

GA 的前提是对可行解进行编码。为了在可行解编码中明确描述解的特征和便于进行杂交和变异操作,用中间态矩阵 $[SM]_{(m+1) \times n}$ 取代传统的二进制码串对任务分配方案进行编码。矩阵中的第 1 行由阿拉伯数字 $1 \sim n$ 的任意 1 个序列构成,用来确定规划顺序;矩阵中的每 1 列元素(除各列的第 1 个元素以外)由阿拉伯数字 $1 \sim m$ 的任意 1 个序列构成,用来确定执行模式。

3.2 求解规划顺序和执行模式

对于给定执行模式的任务规划问题来说, 只要将所有的任务排列成 1 个可行的优先序列, 就可以得到 1 个确定的项目进度计划, 这个优先序列对应于次序树 (precedence tree)^[3] 中的 1 个分枝, 它由 SM 和 D_{SM} 的数值确定。

首先由 DSM 确定初始可执行任务(对应的列元素全为零)集合,然后与 SM 的第 1 行元素对比,首先出现在该行中的可执行任务被作为规划对象,然后形成新的可执行任务集合,再与 SM 中的第 1 行元素对比,选出首先出现在该行中的任务作为规划对象,如此类推。以图 3 所示的 DSM

(a) 设计结构

矩阵 DSM

(b) 编码矩阵 SM

(c) 人员技能

矩阵 PSM

Figure 1 illustrates the design structure matrix (DSM), coding matrix (SM), and personnel skill matrix (PSM) for a project. The DSM is a 5x5 matrix with columns labeled 1 to 5 and rows labeled 1 to 5. The SM is a 5x5 matrix with columns labeled 1 to 5 and rows labeled e1 to e4. The PSM is a 5x5 matrix with columns labeled T1 to T5 and rows labeled e1 to e4.

图3 规划顺序和执行模式的求解依据

(与图1中 DSM 相同) 和 SM 为例, 初始可执行任务集 $\varphi = \{T1\}$, 规划序列 $S1 = \{T1\}$; $T1$ 剔除后的可执行任务集变为 $\varphi = \{T2, T3\}$, 在 SM 的第1 行中 $T3$ 比 $T2$ 先出现, 故规划序列变为 $S1 = \{T1 \quad T3\}$; 剔除 $T1$ 、 $T3$ 后可执行任务集 $\varphi = \{T2\}$, $S1 = \{T1 \quad T3 \quad T2\}$; 剔除 $T1$ 、 $T3$ 、 $T2$ 后可执行任务集 $\varphi = \{T4\}$, $S1 = \{T1 \quad T3 \quad T2 \quad T4\}$; 剔除 $T1$ 、 $T3$ 、 $T2$ 、 $T4$ 后可执行任务集 $\varphi = \{T5\}$, $S1 = \{T1 \quad T3 \quad T2 \quad T4 \quad T5\}$ 。此时 $S1$ 即为最终的规划优先序列。

执行模式由 PSM 及 SM 的数值决定。先从 SM 中第 1 个元素为 k 的 1 列中按元素值大小抽取工程师的升序集合, 如果这个集合中的所有人 i 都有能力参与完成该任务 (即 $PSM_{i,k} = 0$), 则就将该任务分配给该集合中的所有人, 否则转入下一个升序集合进行分析, 依次类推。如果所有升序集合都不满足上述条件, 则将任务分配给第 1 个升序集中有能力参与任务 k 的所有人, 如果第 1 个升序集中的人全部不具备参与任务 k 的能力, 则转入下一个升序集合, 依此类推, 直到将任务 k 分配出去为止。

3.3 求任务触发时刻和项目周期

根据 EMM、PSM 及 IPM, 就可以利用式(1)计算出实际任务周期矩阵 A_{PM} 。然后依次从规划序列 S_1 中取出任务 k , 以任务 k 的最晚完成的前序任务的完成时刻为起点, 搜索 1 个区间, 使它满足 该区间中任务 k 所需要的人力资源都处于空闲状态; 区间长度大于任务 k 的实际完成周期 $A_{PM}_{k_0}$ 。以该区间的起点作为任务 k 的触发时刻, 待求出所有任务的触发时刻以后, 按照式(2)求出整个项目的周期。

3.4 杂交和变异操作及个体选取规则

杂交的目的是改变任务规划序列, 杂交方式是交换 2 个个体(即 2 个 SM 矩阵)中的对应的列, 交换对象由 1 个随机数来控制; 变异的目的是改善任务的执行模式, 变异方式采用交换 1 个个体的任意 2 行(第 1 行除外), 形成 1 个新个体。将每一代中最好的个体自然遗传到下一代中去, 对于其余的个体, 则依据一定的杂交率和变异率进行杂交和变异操作。为了让目标函数值较优化的个体获得较多的机会参加杂交和变异操作, 在同一代个体群中依据赌盘选择规则^[4]选取用于杂交和变异的个体。

3.5 优化结果的整合处理

GA 可以计算出整体上优化的任务分配方案,但是得出的任务分配方案仍然有进一步优化的可能性。具体表现在 3.3 节中搜索 1 个可行区间的时候,该区间可能还具有另外 1 个特征,那就是在这段时间内还有执行模式所需人员以外的工程师处于空闲状态,而依据 PSM 这些工程师中有些是有能力参与该项任务的。在这种情况下,需要进行试探性的整合处理,即重新调整执行模式,使在该区间内,所有处于空闲状态且有能力参与该任务的人都作为该项任务的分配对象。整合策略的宗旨是最大限度地使用可用资源,但由于人员的多重角色特性,以及受任务与任务之间牵扯关

系的制约, 在每个阶段都穷尽使用资源未必就可以使整个项目周期缩短, 有时甚至会适得其反, 这时应撤消整合, 保留原有的任务分配方案。

4 计算实例

笔者在微机平台上自行开发了 1 套求解并行产品开发过程中任务分配问题的软件工具, 其核心是遗传算法及整合处理。图 4 为 1 个验证实例对应的任务网络图和 PSM 矩阵。问题的其它必需参数如下:

$$[IPM]^T = [8\ 10\ 6\ 5\ 12\ 8\ 12\ 4\ 2\ 6\ 5\ 7]$$
$$[MFZN]^T = [1\ 2\ 0\ 0]$$
$$MFZV_{1,1,1} = 10\ MFZV_{1,1,2} = 15$$
$$MFZV_{2,1,1} = 20\ MFZV_{2,1,1} = 25$$
$$MFZV_{2,2,1} = 30\ MFZV_{2,2,2} = 40$$

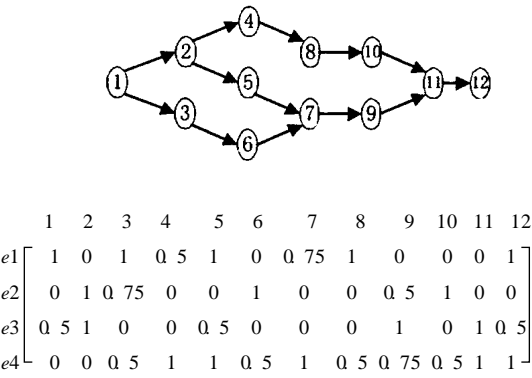


图 4 实例对应的任务网络图和 PSM 矩阵

在计算过程中, 选取杂交率为 0.8, 变异率为 0.2, 每代个体数为 100, 总代数 150。通过计算发现, 当迭代进行到第 70 代时, 最优个体对应的项目周期由最初的 55.4 下降到 42.2, 此后最优值不再发生变化; 每代个体群的平均周期也由最初的 82.2 下降到 65.4, 此后在小范围内上下波动, 不再出现大幅度变化, 这说明对于这一问题的遗传种群在 70~80 代以后基本达到动态平衡状态, 继续迭代对于产生更优个体收效甚微。

最优分配方案对应的各任务的触发时刻、实际完成周期, 以及任务分配对象见表 1。图 5 为最优分配方案对应的 Gantt 图, 矩形右侧的数值为各个任务的完成时刻。

大量实验表明, 对于并行任务的分配问题来说, 杂交率取 0.8~0.9, 变异率取 0.1~0.2 能够较快地收敛。另外, 每一代个体的数量取 100 左右比较适当, 取得太小不能合理反映遗传算法从种群到种群优化的特点, 取得太大则会浪费大量的机时。一般说来, 对于中等规模 (任务数量小于

表 1 最优任务分配方案

任务序号	触发时刻	实际完成周期	任务分配对象
1	0	5.3	e1 e3
2	5.3	5	e2 e3
3	5.3	4	e1 e4
4	10.3	5	e4
5	15	8	e1 e3
6	10.3	8	e2
7	29	6.8	e1 e4
8	15.3	8	e4
9	35.8	1.1	e3 e4
10	25	4	e2 e4
11	37	2.5	e3 e4
12	39.5	2.7	e1 e3 e4

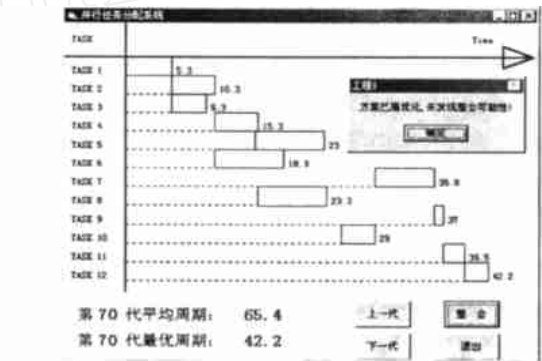


图 5 最优分配方案对应的 Gantt 图

50, 设计者人数小于 10) 的问题, 迭代的优化解可以在 100 代以内达到。

参考文献:

[1]

Donald V Steward The Design Structure System. A Method for Managing the Design of Complex System. IEEE Transactions on Engineering Management, 1981, 28(3): 71~ 74

[2]

Lam F S C, L N B C. Scheduling to Minimize Product Design Time Using a Genetic Algorithm. Int J. Prod Pes , 1999, 37(6): 1369~ 1386

[3]

Roman Slowinski, Jan Weglarz Advances in Project Scheduling Amsterdam: Elsevier, 1989: 11~ 13

[4]

刘勇, 康立山, 陈毓屏 非数值并行算法——遗传算法, 北京: 科学出版社, 1998: 7~ 8

(编辑 卢湘帆)

作者简介: 李玉家, 男, 1973 年生。美国 EDS (PLM Solution) 公司上海分公司技术专员、博士。研究方向为计算机集成制造。发表论文 10 篇。胡宗武, 男, 1934 年生。上海交通大学 (上海市 200030) 工业工程系主任、教授、博士研究生导师。金 烨, 男, 1945 年生。上海交通大学机械工程学院计算机集成制造研究所副所长、教授、博士研究生导师。

program (GRASP) maintenance time maintenance man- hour simulation

Research on Task Distribution in Concurrent Product Development LI Yujia (EDS PLM Solution, Shanghai, China) HU Zongwu JN Ye p 580-583

Abstract Time- to- market is very important for today's enterprises to be competitive. Properly scheduling the human resource can reduce time- to- market greatly in development of complex products. Based on the description of basic characteristics, the mathematic model of task distribution problems is established. Then the Genetic Algorithm and Hamonizing Strategy are used to pursue the solution. Finally, an detailed example is given to support the method. Computation Results prove that using this method the project duration can be greatly reduced and it is very helpful in scheduling concurrent tasks.

Key words: concurrent engineering task distribution genetic algorithm hamonizing

Research on Web- based Component and Supplier Management System FENG Shenghua (Tsinghua University, Beijing, China) LI Jianming XU Longwen ZHEN Lip p 584-588

Abstract The CSM (Component and Supplier Management) is a new technology aimed at declining cost in design and accelerating the product to market, after the developing of PDM, ERP/MRP technology. The component and supplier management technology under the environment of Agile Enterprise is an important enable technology on agile manufacturing. A CSM solution under the environment of Agile Enterprise is proposed based on the basic conception of component and supplier management. At the end, a realization of a web- based CSM prototype system is described.

Key words: component and supplier management object oriented agile manufacture supply chain management

The Research of Flexible Final- Assembly Scheduling Methods in a JIT Production System NI Weiying (Beijing University Of Aeronautics And Astronautics, Beijing, China) YANG Guangxun p 589-591

Abstract This paper analyses three flexible final-assembly scheduling methods in a JIT production system for supplying material just- in- time, lowing work- in- process inventory, reducing setup time. The sequencing algorithm for minimizing the maximum time of late jobs is proved, and the heuristic algorithms for keeping the rate of the use of the component and parts and minimizing the total setup time are discussed.

Key words: JIT final- assembly schedule mixed- model assembly line sequencing

Miniaturized Manufacturing Machine and Micro Manufacturing System SUN Yazhou (Harbin Institute of Technology, Harbin, China) LIANG Yingchun CHENG Kai p 592-596

Abstract The background and scientific significance of micro machine tools and micro- factory are introduced in this paper, and an overview of the research and devel-

opment of micro- factory (or micro- manufacturing system) is given. Then the key problems of miniaturized manufacturing machine and system are discussed, several suggestions and research directions for developing micro manufacturing system are proposed as well.

Key words: micro machine tool micro- manufacturing system micro- factory miniaturization technology environment

The Research of Hydraulic Impact Machine with Stepless Control for Working Parameters YANG Xiangbi (Zhongnan University, Changsha, China) LIU Zhong YANG Guoping p 597-600

Abstract This paper analyses the working parameter adjustment principles of abroad and at home hydraulic impact machine, and shows their defects. A working parameter adjustment principle with variation distance shifted steplessly is first suggested in this paper, a hydraulic impactor controlled by single- chip computer is designed on the basis of this study. The design principle, structural feature and technical properties are also described in this paper.

Key words: stepless control variation distance hydraulic impact machine control system

The Analysis of the Machining Mechanism and Force Suffered of Swirling Airflow Finishing JIA Yuemei (Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China) MA Xiangyang WANG Mingzheng YANG Shengqiang p 600-602

Abstract The theory of the swirling airflow processes is studied first, the motion and the force of the abrasive grains in the air field are analyzed, then the formula of the ortho- force of the abrasive grains to the inner surface of the workpiece are derived. The influences of several parameters on the ortho- force are studied as well.

Key words: swirling airflow finishing swirling airflow field force analysis ortho- force

Survey of Enterprise Models, Enterprise Modeling and Their Related Researches LI Lin (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China) WANG Huaibo ZHANG Shensheng p 603-605

Abstract This survey focuses on the enterprise modeling, enterprise model and their related research areas. It reviews the main research trends and analyzes various concepts in this discipline. At the end of the paper, it reviews the modeling methods which can be applied to describe various enterprise models and modeling methodologies.

Key words: enterprise model enterprise modeling enterprise integration enterprise engineering model formalism method

Study on Direct Slicing in the Field of Rapid Prototyping CHEN Xubing (Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China) YE Xianfang HUANG Shuhuai p 605-607

Abstract The advantages and disadvantages of direct slicing files and STL files are compared, and many direct slicing file formats such as CL I, SLC, are introduced in

· XL I ·