

基于 Petri 网的虚拟企业建模与调度

万 军^{1,2} 赵不贻¹

(江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)¹ (常州大学城市轨道交通学院 常州 213164)²

摘 要 在分析现有虚拟企业建模及其调度方法的基础上,探讨了基于一种扩展 Petri 网模型的虚拟企业建模和调度方法,给出了 T 时延广义自控网的形式化定义和变迁规则。根据虚拟企业项目的特点,描述了基于 T 时延广义自控网的虚拟企业建模过程。基于所建立的虚拟企业项目模型,分别针对时间最短与费用最小两个调度目标,设计了 A* 算法以实现虚拟企业项目调度方案求解。实例分析验证了所提模型及调度算法的有效性。

关键词 Petri 网,虚拟企业,建模,调度

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.019

Modeling and Scheduling of Virtual Enterprises Based on Petri Nets

WAN Jun^{1,2} ZHAO Bu-hui¹

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)¹

(School of Urban Railway Transportation, Changzhou University, Changzhou 213164, China)²

Abstract Based on the analysis of existing modeling and its scheduling methods of virtual enterprise, this paper discussed the modeling and scheduling method of virtual enterprise based on an extended Petri nets class. The formal definition and transition rules of a new class of Petri nets called T-timed generalized cyber net was developed. Considering the characteristics of virtual enterprises project, the modeling process of virtual enterprise was described. Based on the established model, aiming at the scheduling target of shortest time or minimum cost, A* search algorithm was designed to solve the scheduling scheme for virtual enterprise project. The validity of the proposed model and scheduling algorithm is verified by a practical example.

Keywords Petri nets, Virtual enterprises, Modeling, Scheduling

1 引言

虚拟企业是 21 世纪企业进行生产经营和市场竞争的主要运作模式,其主要目的是为了迎合快速变化的市场机遇。如何从服务质量(如生产成本、生产时间和产品质量等)各异的候选企业中选择最适当的合作企业进行产品生产,是虚拟企业成功的关键。

目前,有许多关于虚拟企业项目建模和调度方面的研究。文献[1,2]分别针对虚拟企业生产计划的特点,以各成员企业承担的生产任务为对象,建立了生产任务计划的数学模型,且都采用遗传算法来优化虚拟企业生产计划调度,充分发挥了遗传算法良好的全局搜索能力,提高了算法的全局寻优能力。文献[3]采用多智能体技术构建虚拟企业任务调度模型。针对调度优化问题,以资源智能体承担的生产任务为研究对象,综合考虑生产任务之间的时序逻辑关系、作业时间及资源自身已确定的生产任务等影响因素,建立以生产延续时间最小为目标的优化模型,给出了粒子群优化求解算法。针对企业在生产实际中完工时间和交货期是一个模糊数的情况下的虚

拟企业伙伴选择问题,文献[4]运用模糊集的理论,以极大化最小客户满意度为优化指标,建立了考虑模糊完工时间和模糊交货期情况的虚拟企业伙伴选择模型。文献[5]建立了统一描述虚拟企业过程和资源的项目配置图,并以任务-资源分配图(task-resource assignment graph)作为调度模型,采用基于相对费效比的启发式算法迭代求解。启发式算法避免了当虚拟企业规模较大时采用遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等算法时间开销大的问题。

Petri 网是一种图形化的系统建模工具,非常适合于描述离散、异步和并发等过程。Petri 网已广泛应用于求解制造系统的调度问题^[6-10]。文献[11]采用一种随机 Petri 网为视频流系统进行建模,提出了简单的控制方法来确保系统的活性。利用 PN 来建立 FMS 系统模型,再利用优化算法根据模型信息搜索最优解,是近期发展起来的用于求解 FMS 调度问题的极具前途的解决方案^[12]。但迄今为止,借助 Petri 网实现虚拟企业建模和调度的研究较少,特别是通过一个 Petri 网模型同时实现虚拟企业项目调度的成本优化和时间优化目标。本文对自控网系统定义进行了扩展,提出了 T 时延广义自控

到稿日期:2015-08-14 返修日期:2016-03-01 本文受国家自然科学基金资助项目(61070058),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_665),江苏省产学研联合创新基金(SBY2014020188)资助。

万 军(1978-),男,博士生,讲师,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、嵌入式系统,E-mail:13815074795@139.com;赵不贻(1957-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为 Petri 网、混杂系统、异步电路等。

网,在此基础上实现了虚拟企业项目的建模。针对时间最短与费用最小两个调度目标,构造了相应的估计函数,设计了A*算法用以完成虚拟企业任务调度。

2 T时延广义自控网

定义 1^[13] 六元组 $\Sigma=(S, T; F, K, W, M_0)$ 构成广义自控网的条件是:

(1) $N=(S, T; F)$ 构成有向网,称为 Σ 的基网。

(2) $K=\{K_L, K_H\}$ 称为 N 上的容量函数。 $K_L: S \rightarrow R; K_H: S \rightarrow R$ 。 R 为实数集, K_L 和 K_H 分别称为下界容量函数和上界容量函数。 $\forall s \in S, K_L(s) < K_H(s)$, s 的容量可表示为 $[K_L(s), K_H(s)]$ 。当 $K_L(s), K_H(s)$ 为无穷时,容量的闭区间变成开区间。

(3) $W: F \rightarrow R \cup Exp(S)$ 称为 N 上的权函数;其中 $Exp(S)$ 是 S 元素的函数表达式集。

(4) $M: S \rightarrow R$ 称为 N 的标识, M_0 称为 Σ 的初始标识。

定义 2(变迁发生条件)

(1) 标识 M 下的权值定义为: $\forall (x, y) \in S \times T \cup T \times S$,

$$W_M(x, y) = \begin{cases} W(x, y), & W(x, y) \notin Exp(S) \\ e_M, & W(x, y) = e \wedge e \in Exp(S) \end{cases}$$

e_M 是指将表达式 e 中的 $s_i \in S$ 用其标识 $M(s_i)$ 代入的结果,其中 $i=1, 2, \dots, |S|$, 即表示将权函数 $W(x, y)$ 中的各库所 s_i 用 $M(s_i)$ 替代后得到的值。

(2) t 在 M 有发生权的条件是: $\forall s \in \cdot t: (M(s) - W_M(s, t)) \in [K_L(s), K_H(s)] \wedge \forall s \in t \cdot: (M(s) + W_M(t, s)) \in [K_L(s), K_H(s)]$ 。

t 在 M 有发生权记作 $M[t]$, 也称 M 授权 t 发生或 t 在 M 授权发生。

定义 3(变迁发生后) 若 $M[t]$, 则 t 在 M 可以发生, 将标识 M 改变为 M 的后继 M' , M' 的定义如下:

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - W_M(s, t), & s \in \cdot t - t \cdot \\ M(s) + W_M(t, s), & s \in t \cdot - \cdot t \\ M(s) - W_M(s, t) + W_M(t, s), & s \in \cdot t \cap t \cdot \\ M(s), & s \notin \cdot t \end{cases}$$

M' 为 M 的后继的事实, 记作 $M[t]M'$ 。

定义 4 二元组 (Σ, D_T) 构成 T 时延广义自控网的条件是:

(1) $\Sigma=(S, T; F, K, W, M_0)$ 是一个广义自控网;

(2) $D_T: T \rightarrow Q_0$, 其中 Q_0 为非负有理数集, 表示与变迁相联系的时限。

图 1 表示一个 T 时延广义自控网, 其中, $W(s_1, t) = s_1$, $W(s_2, t) = 2s_1$, $W(t, s_3) = s_1 + s_2$ 。

变迁 t 旁边标注的 d 为时延时间。当 t 有发生权时, 库所 s_1 和 s_2 中的托肯被预定, 经过时间 d 后, t 发生, s_1 和 s_2 中分别移走的托肯数为 m_1 和 $2m_1$, 库所 s_3 中增加 $m_1 + m_2$ 个托肯。

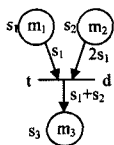


图 1 T时延广义自控网

3 基于 T时延广义自控网的虚拟企业建模

一个企业确定生产项目后,由于依靠自身的资源能力不能独立完成整个项目,因此将此项目分解为若干个具有时序关系的任务,以招标的方式选择合适的合作企业组成虚拟企业,共同完成此项目。对于每一个任务,有多个候选企业,在给定的时间内,只可选择一个候选企业负责完成。每一个任务可有多个紧前任务,但最多只有一个紧后任务。一个任务完成后,任务的承担企业需将产品运输到紧后任务承担企业。

3.1 虚拟企业任务建模

虚拟企业项目中的任务具体实施包括零部件的加工和零部件的运输两个阶段。

考察虚拟企业项目中的某个任务 i , 其紧后任务为任务 j 。假设 i 和 j 为任务编号, i 有 m 个候选企业 $V_{ir} (r=1, 2, \dots, m)$, j 有 n 个候选企业 $V_{js} (s=1, 2, \dots, n)$ 。 i 的候选企业生产的相关数据符号如表 1 所列。

表 1 候选企业生产数据表

候选企业	加工零部件数	加工费用	运输费用	加工时间	运输时间
V_{ir}	N_i	F_{ir}	G_{irjs}	c_{ir}	d_{irjs}

表中各数据含义如下。

N_i : 加工零部件的数量;

F_{ir} : V_{ir} 完成任务需要的加工费用函数;

G_{irjs} : 将 V_{ir} 完成的零部件送到 V_{js} 所需的运输费用函数;

c_{ir} : V_{ir} 完成任务需要的加工时间;

d_{irjs} : 将 V_{ir} 完成的零部件送到 V_{js} 所需的运输时间。

其中, F_{ir} 和 G_{irjs} 均是加工零部件数量的线性或非线性函数, 具体由企业实际情况来确定。

首先考察任务中仅有一个候选企业的情形, 建立对应任务 i 的 T 时延广义自控网模型 M 的过程如下。

1) 创建 M 的库所集 $S = \{P_{i1}, P_{i21}, P_{i3}, E_i\}$ 。库所 P_{i1} 表示任务处于等待加工状态, 库所 P_{i21} 表示任务处于等待运输状态, 库所 P_{i3} 表示任务处于完成状态, P_{i1} 和 P_{i21} 的托肯值分别代表需加工和运输的零部件数量, 库所 E_i 表示任务加工或运输完成后产生的累计费用。为便于表述, P_{i1}, P_{i21}, P_{i3} 和 E_i 分别称为等待加工库所、等待运输库所、完成库所和费用库所。

2) 创建 M 的变迁集 $T = \{T_{i1}, T_{i11}, \dots, T_{in}\}$ 。 T_{i1} 表示零部件加工操作, T_{i11}, \dots, T_{in} 分别表示零部件运输过程, 其中 n 为紧后任务候选企业的数量。

3) 根据 S 与 T 的关系, 创建 M 的有向弧集: $F = F1 \cup F2$ 。其中, $F1 = \{(P_{i1}, T_{i1}), (T_{i1}, P_{i21}), (P_{i21}, T_{i11}), \dots, (P_{i21}, T_{in}), (T_{i11}, P_{i3}), \dots, (T_{in}, P_{i3})\}$ 代表了任务模型的业务流; $F2 = \{(T_{i1}, E_i), (T_{i11}, E_i), \dots, (T_{in}, E_i)\}$ 代表了任务模型的费用流。

有向弧上的权值函数根据候选企业 V_{ir} 生产的数据确定。

仅含一个候选企业的虚拟企业项目任务模型 M 如图 2(a) 所示。针对多个候选企业的情形, 建模时需增加代表候选企业处于等待运输状态的库所、代表零部件加工操作的变迁以及零部件运输过程的变迁, 同时增加变迁与相应库所的弧。图 2(b) 示出了包含 2 个候选企业的虚拟企业项目任务模型, 其中虚线框中内容包含了模型在图 2(a) 基础上的扩展部分。

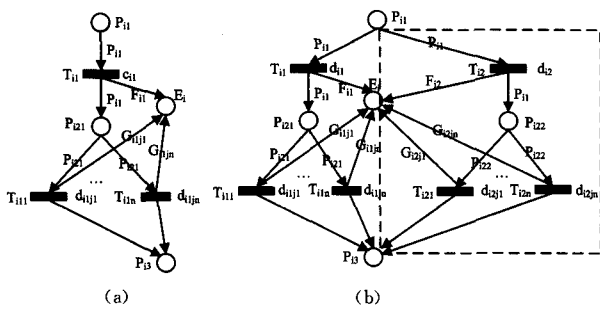


图2 虚拟企业项目任务模型

3.2 虚拟企业项目模型

依据虚拟企业项目中任务之间的时序关系,若某任务的紧前任务完成,则该任务即可无延时地启动。因此为虚拟企业项目中各任务建模后,即可建立虚拟企业项目模型。具体方法为针对每个任务*i*,执行以下两个步骤:

1) 创建一瞬时变迁 T_{i0} , 并建立 T_{i0} 到任务 i 模型中的等待加工库所 P_{i1} 的有向弧 (T_{i0}, P_{i1}) , 且 $W(T_{i0}, P_{i1}) = Ni$ 。变迁 T_{i0} 代表了任务的初始化。

2) 建立从任务 i 的紧前任务模型中的完成库所到 T_{i0} 的有向弧。若 i 无紧前任务, 则创建一托肯数为 1 的库所 S_i , 用于虚拟一个已经完成的紧前任务, 且建立 S_i 到 T_{i0} 的有向弧。

4 虚拟企业任务调度

虚拟企业任务调度就是将项目模型中的每个生产任务映射到任务的某个具体候选企业去完成。该调度的执行满足一定的目标, 即总的加工处理时间最短或加工费用最小。将虚拟企业项目用 T 时延广义自控网建模后, 任务的生产费用和时间关系已被清楚地表达出来, 因此由该模型产生的调度将是可行性调度。

虚拟企业的任务调度问题等价于如下的搜索优化问题: 从初始标识到目标标识的所有可能的变迁发生序列中, 找到一条代价值最小的最优路径。结合虚拟企业项目模型的特点, 构造 A* 来求解系统的最优解, 具体调度算法步骤如下:

Step1 将初始标识 m_0 放在 OPEN 表中, 找出 m_0 下所有使能的变迁。

Step2 若 OPEN 为空, 则返回错误, 结束。

Step3 从 OPEN 中移去第一个标识 m 且放入 CLOSE 表中。

Step4 若 m 是目标标识 m_g , 则构建从 m_0 到 m_g 的最优路径, 结束。

Step5 对于标识 m 下每一个使能的变迁, 产生 m 的后续标识 m' , 并设置 m' 到 m 的指针。计算 $f(m') = g(m') +$

$h(m')$, 找出 m' 下所有使能的变迁。

Step6 对于 m 的每一后继标识 m' :

1) 若 OPEN 中不存在标识 m'' , 使得在 m' 和 m'' 下的所有使能变迁相同, 则将 m' 按 f 的递增顺序插入 OPEN 中。

2) 否则, 比较 $f(m')$ 和 $f(m'')$, 若 $f(m') < f(m'')$, 则删除 OPEN 中的 m'' , 将 m' 按 f 的递增顺序插入 OPEN 中。

Step7 跳转至 Step2。

以上算法步骤中, 定义函数 $f(m)$ 为从 m_0 经过标识 m 到 m_g 的最优路径的代价估计值, $g(m)$ 是从 m_0 到 m 的最低成本, $h(m)$ 为从 m 到 m_g 的最优路径的代价估计值。 $g(m)$ 和 $h(m)$ 根据调度目标评价标准来确定。

如果调度目标为总费用最小, 则:

$$g(m) = \sum_{i=1}^n m(E_i) \quad (1)$$

$$h(m) = \min\{\sum_{i=1}^n (m'(E_i) - m(E_i)), m[t_j]m'\} \quad (2)$$

$g(m)$ 为标识 m 下所有费用库所的托肯数之和。 $h(m)$ 表示标识 m 下每一使能变迁发生后, 费用库所增加的托肯数的最小值。

如果调度目标为项目完成时间最短, 则:

$$g(m) = \sum d(t), t \in S, m_0[S]m \quad (3)$$

$$h(m) = \min\{d(t_j), m[t_j]\} \quad (4)$$

$g(m)$ 代表从 m_0 到 m 的激发序列中每一变迁关联时间的累加, $h(m)$ 为在 m 下所有使能变迁关联时间中的最小值。

易分析得出, 式(2)中的 $h(m)$ 是 m 到 m_g 实际所需费用的一个下界, 式(4)所定义的 $h(m)$ 是 m 到 m_g 激发序列中所有变迁关联时间之和的一个下界。由式(2)或式(4)定义的评价函数满足 A* 算法的要求, 从而能够找到相应调度目标下的最优解。

5 实例分析

现以某大型设备的生产为例。由于盟主企业无法单独完成其生产, 将其生产过程分解为 6 个生产任务。其中任务 1 由盟主企业自身完成, 任务 2—任务 6 分别有 2 个候选企业, 且任务 6 为最后一个加工任务, 任务完成后需将最终产品运输至盟主企业。假设候选企业的加工费用和运输费用为加工零部件数量的比例函数, 加工时间和运输时间根据加工零部件数量事先确定。任务之间的时序关系和候选企业的具体生产数据如表 2 所列。

依据虚拟企业项目模型的建立方法, 使用文献[14]中设计的自控网系统建模工具 CyberNetTool 创建的实例项目模型如图 3 所示。图中的库所 S1, S2 和 S3 用来虚拟任务 1, 2 和 3 的紧前任务。

表2 任务时序和候选企业的生产数据

任务	紧前任务	候选企业	加工数量	单件加工费用	单件运输费用	加工时间	运输时间
1	/	V_{11}	50	$f_{11}=1.3$	$g_{1151}=0.4, g_{1152}=0.5$	$c_{11}=1$	$d_{1151}=5, d_{1152}=4$
2	/	V_{21}	100	$f_{21}=1.1$	$g_{2141}=0.5, g_{2142}=0.1$	$c_{21}=5$	$d_{2141}=2, d_{2142}=3$
	/	V_{22}	100	$f_{22}=1.2$	$g_{2241}=0.2, g_{2242}=0.2$	$c_{22}=6$	$d_{2241}=3, d_{2242}=2$
3	/	V_{31}	60	$f_{31}=1.0$	$g_{3141}=0.3, g_{3142}=0.3$	$c_{31}=3$	$d_{3141}=5, d_{3142}=4$
	/	V_{32}	60	$f_{32}=0.9$	$g_{3241}=0.2, g_{3242}=0.2$	$c_{32}=4$	$d_{3241}=2, d_{3242}=6$
4	2,3	V_{41}	80	$f_{41}=1.4$	$g_{4151}=0.5, g_{4152}=0.4$	$c_{41}=5$	$d_{4151}=1, d_{4152}=2$
	2,3	V_{42}	80	$f_{42}=1.5$	$g_{4251}=0.5, g_{4252}=0.8$	$c_{42}=6$	$d_{4251}=2, d_{4252}=3$
5	1,4	V_{51}	70	$f_{51}=0.8$	$g_{5161}=0.4, g_{5162}=0.5$	$c_{51}=4$	$d_{5161}=2, d_{5162}=2$
	1,4	V_{52}	70	$f_{52}=0.9$	$g_{5261}=0.4, g_{5262}=0.5$	$c_{52}=3$	$d_{5261}=3, d_{5262}=1$
6	5	V_{61}	35	$f_{61}=1.1$	$g_{61}=0.8$	$c_{61}=2$	$d_{61}=4$
	5	V_{62}	35	$f_{62}=1.3$	$g_{62}=0.9$	$c_{62}=3$	$d_{62}=5$

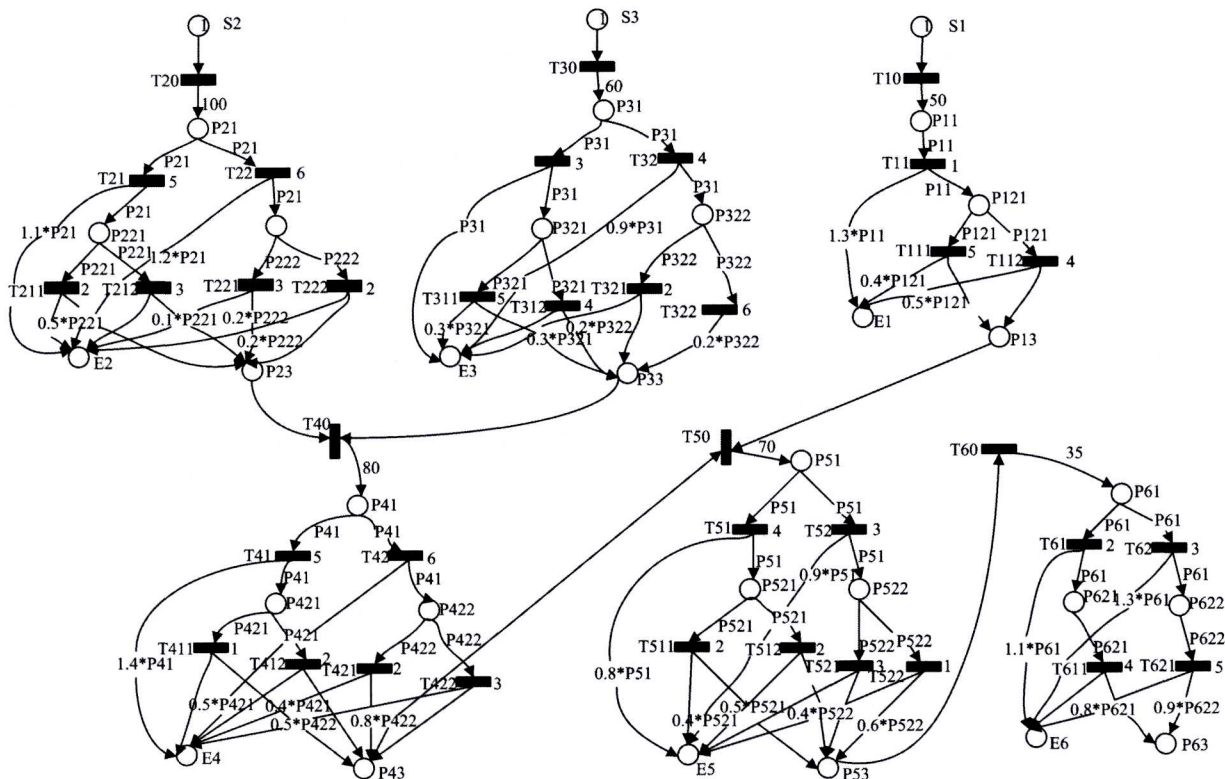


图3 实例项目的T时延广义自控网模型

对此模型进行可达标识树分析,可得在初始标识 M_0 下的可达标识结点共有 1428 个(见图 4)。针对费用最小目标,利用式(2)进行调度优化,得到调度的变迁序列为{T30, T32, T321, T20, T21, T212, T40, T41, T412, T10, T11, T111, T50, T51, T511, T60, T61, T611},选择的候选企业为{V11, V21, V32, V41, V51, V61},项目所需最小费用为 565,需搜索的标识结点数为 96。在项目完成时间最短的调度目标下,利用式(4)进行调度优化,需搜索的标识结点数为 88,调度的变迁序列为{T30, T32, T32, T321, T20, T21, T211, T40, T41, T411, T10, T11, T112, T50, T52, T522, T60, T61, T611},从而选择的候选企业为{V11, V21, V31, V41, V52, V61},项目最小完成时间为 34。

调度目标下需搜索的标识结点数为 329 和 281。

从结果可知,基于 T 时延广义自控网模型设计的调度算法有效地得到了虚拟企业项目任务调度的最优解。

结束语 本文通过将 Petri 网中的 P/T 系统和自控网系统定义进行扩展与结合,提出了一种 T 时延广义自控网模型,进而实现了虚拟企业项目的建模,所建立的虚拟企业项目模型统一集成了时间流和费用流。针对虚拟企业生产调度的时间与费用两个目标,构造了相应的启发式函数,给出了基于 T 时延广义自控网模型的虚拟企业任务调度算法,通过实例验证了模型及调度算法的有效性。进一步的工作为基于所建立的虚拟企业项目模型,当候选企业生产能力发生变化时,可自动实现模型的重构。

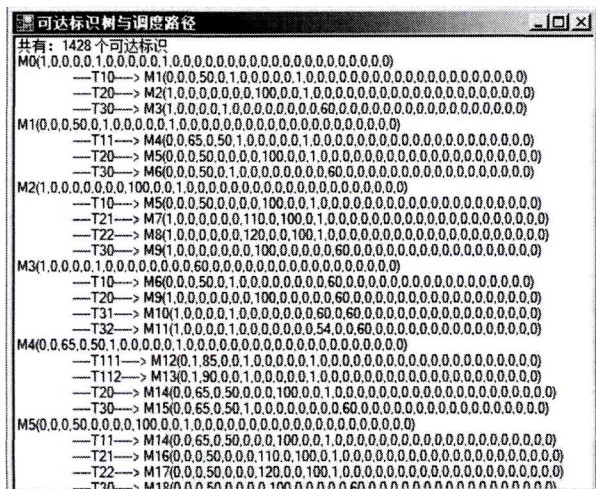


图4 可达标识树

若设定式(2)和式(4)中 $h(m) = 0$,则所用调度算法退化为广度优先搜索算法,此时在实现费用最小和时间最短两个

参考文献

- [1] Gao Yang, Jiang Zi-bin. Using HGA to solve production planning in VE [J]. Control and Decision, 2007, 22(8): 931-934, 938 (in Chinese)
高阳,江资斌.用混合遗传算法求解虚拟企业生产计划[J].控制与决策,2007,22(8):931-934,938
- [2] Long Jun, Yuan Xin-pan, Cheng Tian-chan. A Scheduling Algorithm for Virtual Enterprise Based on Time and Cost Dual Optimization [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(12): 1812-1818(in Chinese)
龙军,袁鑫攀,程天婵.基于时间与费用双优化的虚拟企业调度算法[J].上海交通大学学报,2011,45(12):1812-1818
- [3] Zhao Qiang, Xiao Ren-bin. The multi-agent-based model for task scheduling in virtual enterprise and its optimization [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(4): 459-462(in Chinese)
赵强,肖人彬.基于多Agent的虚拟企业任务调度模型及优化[J].控制理论与应用,2009,26(4):459-462

- [4] Huang Bin, Gao Cheng-hui, Chen Liang. Partner selection with fuzzy completion time and fuzzy due date in a virtual enterprise [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(6): 1085-1091(in Chinese)
黄彬, 高诚辉, 陈亮. 模糊完工时间和模糊交货期下的虚拟企业伙伴选择[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(6): 1085-1091
- [5] Long Hao, Wang Hao. Task-resource assignment graph based heuristic for partner selection in virtual enterprises [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(12): 3564-3567(in Chinese)
龙浩, 汪浩. 基于任务-资源分配图的虚拟企业伙伴优选算法[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(12): 3564-3567
- [6] Huang Bin, Gao Cheng-hui, Chen Liang. Research on Virtual Enterprises Task Scheduling Based on Timed Place Petri Net [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2011, 32(1): 148-153(in Chinese)
黄彬, 高诚辉, 陈亮. 基于时延库所 Petri 网的动态联盟任务调度研究[J]. *工程图学学报*, 2011, 32(1): 148-153
- [7] Ghoul R H, Benjelloul A, Kechida S. A Scheduling Algorithm Based on Petri Nets and Simulated Annealing [J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2007, 4(5): 269-273
- [8] Ghoul R H, Sihem, Kechida S, Tebbikh H. Scheduling of complex manufacturing systems with Petri nets and genetic algorithms; a case on plastic injection moulds[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9-12): 2773-2786
- [9] Chinnusamy T R, Karthikeyan T, Krishnan M. Flexible Manufacturing System Scheduling Using Hybrid Petri Nets with Dispatching Rules [J]. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 2014, 14(6): 62-71
- [10] Su Guo-jun, Wang Jin, Tian Li-guo. The FMS optimal scheduling based on Petri net model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2014, 34(10): 2716-2721(in Chinese)
苏国军, 汪晋, 田立国. 基于 Petri 网模型的柔性制造系统优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(10): 2716-2721
- [11] Hu He-suan, Zhou Meng-chu, Li Zhi-wu. Liveness enforcing supervision of video streaming systems using nonsequential Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2009, 11(8): 1457-1465
- [12] Shao Zhi-fang, Liu Zhong-ying. Summarize on Petri Net and optimal algorithm integrated for scheduling of FMS[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(8): 197-201(in Chinese)
邵志芳, 刘仲英. Petri 网与优化算法结合求解 FMS 调度研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(8): 197-201
- [13] Wan Jun, Zhao Bu-hui. Petri nets decoupling control for linear-time-invariant systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(9): 1213-1220(in Chinese)
万军, 赵不贿. 线性定常系统的 Petri 网解耦控制[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(9): 1213-1220
- [14] Wan Jun, Zhao Bu-hui, Lu Ji-yuan. Research and Development of Cyber Net System Modeling Tool[J]. *Computer Science*, 2014, 41(7): 97-101(in Chinese)
万军, 赵不贿, 陆继远. 自控网系统建模工具的研究与开发[J]. *计算机科学*, 2014, 41(7): 97-101

(上接第 70 页)

- [12] Boukreda D, Maamri R, Aknine S. Modeling and Analysis of Reliable Contract Net Protocol Using Timed Colored Petri Nets [C]//2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT). IEEE, 2013, 2: 17-24
- [13] Sun Tao, Ye Xin-ming, Liu Jing, et al. CPN based protocol testing sequence generating method[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 13(2): 165-170(in Chinese)
孙涛, 叶新铭, 刘靖, 等. 一种基于 CPN 的协议测试序列生成方法[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 13(2): 165-170
- [14] Billington J, Yuan C. On modelling and analysing the dynamic MANET on-demand (DYMO) routing protocol [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [15] Fernandes J M, Tjell S, Jorgensen J B. Requirements Engineering for Reactive Systems with Coloured Petri Nets; the Gas Pump Controller Example[C]//Proc. of the 8th Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools(CPN Workshop 2007). 2007: 207-222
- [16] Billington J, Gupta A K. Effectiveness of coloured Petri nets for modelling and analysing the contract net protocol[M]//Eighth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools. 2007
- [17] Yue Jing-yuan. Property Based CPN Modelling and Testing of Micro-Kernel System Call[D]. Inner Mongolia University, 2012(in Chinese)
岳婧媛. 基于属性的微内核系统调用 CPN 建模和测试[D]. 内蒙古大学, 2012
- [18] Sun Tao. Research on Testing Method for Parallel Software Based on Colored Petri Nets[D]. Inner Mongolia University, 2012(in Chinese)
孙涛. 基于 CP-nets 模型的并行软件测试方法的研究[D]. 内蒙古大学, 2012
- [19] He Nan. OpenFlow Modeling and Interaction Properties Testing Based on CPN[D]. Inner Mongolia University, 2013(in Chinese)
贺楠. 基于 CPN 的 OpenFlow 建模及交互属性测试[D]. 内蒙古大学, 2013
- [20] Zhao Hui-juan, Sun Wen-hui. Research and Application of Symbolic Execution Based Unit Testing[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(6): 182-185(in Chinese)
赵慧娟, 孙文辉. 基于符号执行的单元测试研究与应用[J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(6): 182-185
- [21] Samanta B, Sarkar B. Application of Petri nets for systems modeling and analysis[J]. *Opsearch*, 2012, 49(4): 334-347
- [22] Dong Lu-lu. Research on the Extension Property Modelling of OpenFlow Protocol and ITS Test Cases Generation[D]. Inner Mongolia University, 2014(in Chinese)
董路路. OpenFlow 协议可扩展性建模方法研究及测试例生成[D]. 内蒙古大学, 2014