

文章编号:1007-6735(2013)05-0463-06

基于着色 Petri 网实现 A 星算法的 生产调度优化研究

任 上¹, 秦江涛²

(1. 上海理工大学 信息化办公室, 上海 200093; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 基于着色 Petri 网对 A 星算法进行建模, 研究生产调度优化问题. 利用着色 Petri 网的理论优势, 简化了大规模复杂工艺生产过程的调度模型过于复杂的问题. 直接建立 A 星算法的着色 Petri 网模型, 对于生产调度研究中的跨平台问题给出了一种解决方法. 通过着色 Petri 网仿真模拟软件 CPN Tools 构建了基于着色 Petri 网的 A 星算法实例和生产调度实例.

关键词: 着色 Petri 网; 生产调度; A 星算法
中图分类号: TP 311.1 **文献标志码:** A

A Star Algorithm for Scheduling Optimization Based on Colored Petri Nets

REN Shang¹, QIN Jiang-tao²

(1. Informatization Office, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The scheduling process and A star algorithm were modeled based on colored Petri nets. The complexity of scheduling process resulting from mass scale and complicated procedures of manufacturing system was decreased by taking the advantage of colored Petri nets theory. Moreover, the A star algorithm was modeled based on colored Petri nets directly in order to solve the problem of doing production scheduling on some different software platforms. A pretical modelling example of scheduling and A star algorithm was conducted colored Petri nets by use of the modeling and simulation software CPN Tools.

Key words: colored Petri nets; scheduling; A star algorithm

生产调度问题是多年来的研究热点, 其研究方法包括数学规划方法、启发式搜索方法^[1-2]、系统仿真方法、人工智能方法及计算智能方法等^[3]. 近年来, 鉴于 Petri 网具有严格的数学定义和直观的图

形表示, 能够很好地描述离散系统的同步、并行、共享以及冲突等系统状态, 许多学者基于 Petri 网来研究生产调度问题. 基于 Petri 网研究生产调度问题的方法主要有两种: 一是将 Petri 网作为计算工

收稿日期: 2012-08-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071097)
第一作者: 任 上(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 制造系统生产调度方法及性能分析. E-mail: shawn_ren@163.com

具,通过 Petri 网对生产过程建模,计算该 Petri 网模型的(可达)状态空间,通过启发式算法在状态空间中得到生产调度的最优路径^[4];二是将 Petri 网模型作为仿真工具,在基于 Petri 网对生产过程建模的基础上植入系统性能监视器,在仿真模拟过程中实时地对 Petri 网模型的性能指标数据进行收集,并将信息反馈给智能算法进行生产调度方案评判.一般选择遗传算法作为第二种研究方法中的智能算法^[5-7],其主要流程是将基因编码设计为生产调度问题中的调度策略、调度路径或模型的激发顺序等,将适应度函数设计为调度时间相关函数,通过一定的迭代次数得到调度问题的解.

在上述的第二种研究方法中,利用 Petri 网作为仿真模拟工具结合遗传算法研究时,对于适用的生产调度问题有局限性.这是由于其基因编码设计中一位基因片段只能对应一个加工机器,所以,该方法只适用于待加工工序只在一种机器上加工的生产系统.然而,近年来基于智能算法的研究占了多数,原因在于基于 Petri 网模型状态空间和启发式算法的研究目前主要存在两个问题.首先当生产工艺复杂化或者系统规模扩大化后,系统的状态空间呈现爆炸式膨胀,因此,很难直接求解;其次在 Petri 网建立的状态空间转化为启发式算法的输入数据的过程中,没有专门的软件平台支持,因而实现难度较大^[8-9].本文提出在着色 Petri 网理论上^[10],将生产调度系统的(可达)状态通过着色 Petri 网中的颜色集来描述,并在着色 Petri 网中构建了启发式算法的过程,不仅简化了生产调度模型,而且解决了利用启发式算法的生产调度研究中跨平台的问题.最后对一个简单的生产调度实例进行建模.

1 基于着色 Petri 网的生产调度模型

1.1 着色 Petri 网

着色 Petri 网定义为

$CPN = \{\Sigma, P, T, A, C, G, E, F, I\}$,且满足:

a. Σ 是一个非空有限集,称为颜色集(color set),颜色集的每一个元素代表一种数据类型,它决定了网络中表达式能够使用的操作和函数.

b. P 为有限库所集,库所使用圆形来描述,库所中的元素称为托肯,托肯的数据类型称为颜色.

c. T 为有限变迁集,变迁使用矩形来描述.

d. A 为有限有向弧集,且 $P \cap T = P \cap A =$

$T \cap A = \phi$.

e. C 为着色函数, $C: P \rightarrow \Sigma$,着色函数是 P 到 Σ 的映射,即库所中的每个托肯都属于颜色类型.

f. G 为变迁的守卫函数, $G: T \rightarrow \text{Exp}$,且满足 $\forall t \in T: [\text{Type}(G(t)) = \text{Bool} \wedge \text{Type}(\text{Var}(G(t))) \subseteq \Sigma]$.守卫函数 G 中的表达式是布尔型,且其中所有变量的类型都包含于颜色集 Σ 中.

g. E 为有向弧表达式, $E: A \rightarrow \text{Exp}$,且满足 $\forall a \in A: [\text{Type}(E(a)) = C(p(a))_{\text{ms}} \wedge \text{Type}(\text{Var}(E(a))) \subseteq \Sigma]$.其中, $p(a)$ 是有向弧相连的库所, $C(p(a))_{\text{ms}}$ 是这些库所的多重颜色集,且表达式中所有的变量都包含于颜色集 Σ 中.

h. F 为变迁函数, $F: P_i \rightarrow \text{Exp}$,且满足 $\forall p \in P_i: [\text{Type}(F(p)) = C(p_o)_{\text{ms}} \subseteq \Sigma]$,变迁函数就是对于输入库所托肯的操作函数,使其转化成输入库所的托肯.

i. I 为初始化函数, $I: P \rightarrow \text{Exp}$,且满足 $\forall p \in P: [\text{Type}(I(p)) = C(p)_{\text{ms}}]$.这个集合的元素属于库所 p 的多重颜色集 $C(p)_{\text{ms}}$.

1.2 基于着色 Petri 网的生产调度模型

现研究生产调度问题,该问题涉及多个工件,每个工件有各自不同的加工路径,加工路径上的操作称为该工件的工序,不同工件的不同工序可以在不同的机器上加工,每台机器一次只能加工一个工件的一道工序.在普通的 Petri 网建模中,库所存放的托肯是没有颜色的,托肯往往表示的是状态以及个数,生产调度模型所有的工件和工序及其加工操作都由相应的模块组成,模型相对比较复杂和繁琐,本文通过着色 Petri 网中颜色集的引入,使得模型简单易懂.如图1所示,Job库所存放的是所有工件的

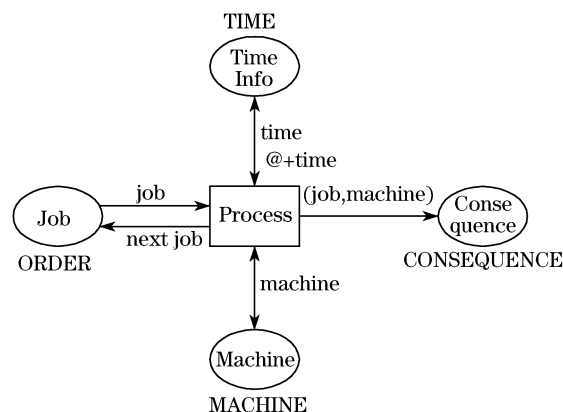


图1 基于着色 Petri 网的生产调度模型

Fig.1 Model of production scheduling based on colored Petri nets

工序,Time Info 库所存放的是不同工序在不同机器上加工的操作时间信息,Machine 库所存放的是加工机器,Consequence 库所存放的是加工顺路的记录.其中,TIME,ORDER,CONSEQUENCE,MACHINE 表示各个库所存放托肯的颜色.

2 基于着色 Petri 网实现 A 星算法

2.1 A 星算法

A 星算法是人工智能中典型的启发式算法^[11],是状态空间求最短路径最有效的方法之一.A 星算

法中有一个评估函数 $f(x) = g(x) + h(x)$.其中, $g(x)$ 表示从起点到任意结点 x 的实际距离, $h(x)$ 表示任意结点 x 到目标结点的估算距离.A 星算法的总体思路就是从起点开始选取评估函数值最优的结点为当前的最优结点,并扩展该结点寻找下一个最优结点,直到最优节点为终点,最后从终点回溯到起点记录下最优路径,其具体流程如图 2 所示. S 为起始节点, k 为实际距离.

2.2 基于着色 Petri 网对 A 星算法建模

如图2所示,将A星算法分解为选择最优结

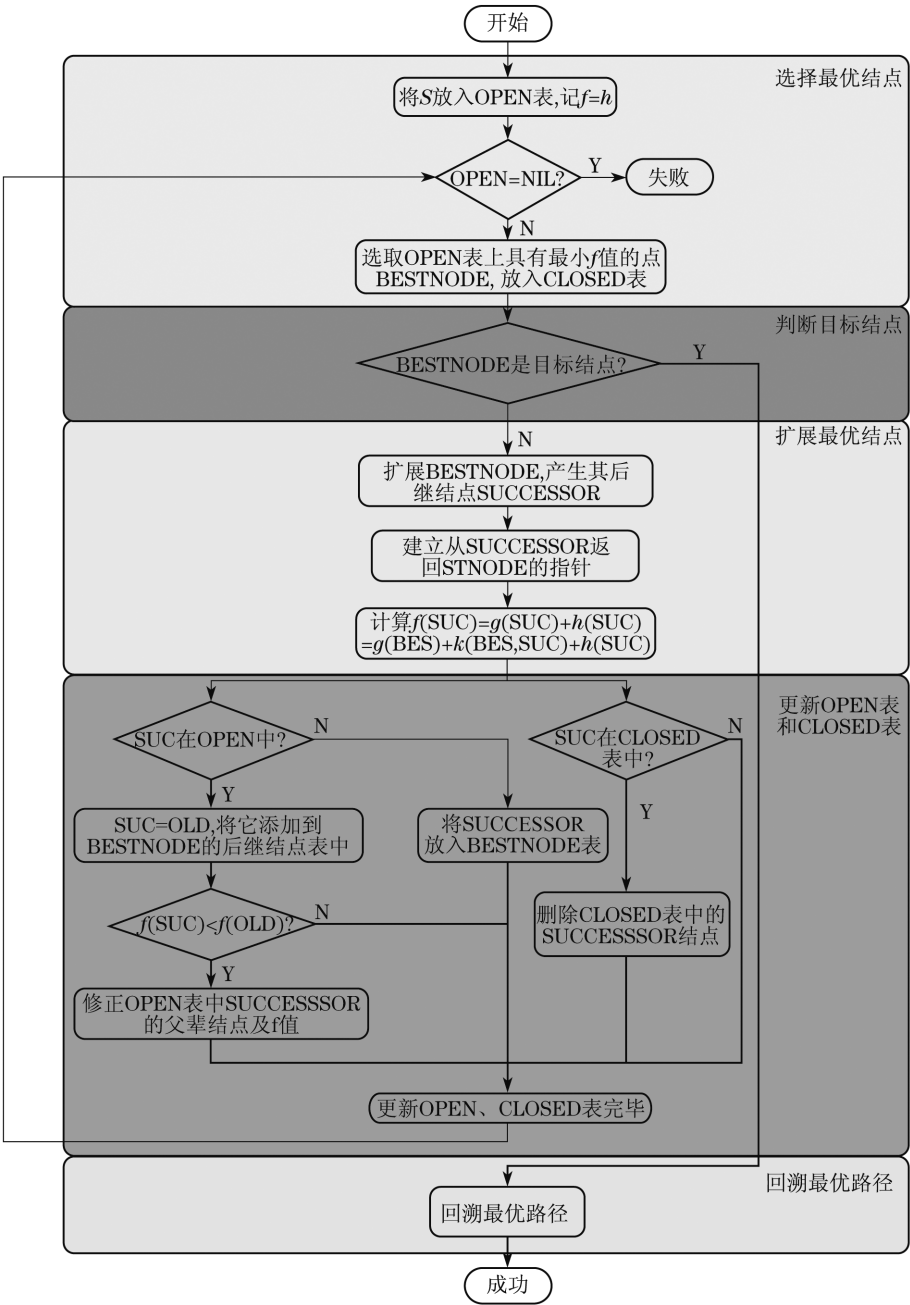


图2 A 星算法流程图
Fig.2 Flow diagram of A star algorithm

点、判断目标节点、扩展最优节点、更新 OPEN 表和 CLOSED 表、回溯最优路径 5 个算法子模块. 这 5 个算法子模块与图 3 所示的模型图中 ChooseBest, CheckTarget, Explode, CheckSets, CollectPath 这 5 个变迁相对应. 在基于着色 Petri 网的 A 星算法模型中, OpenSet 库所、ClosedSet 库所分别代表了 A 星算法中的 OPEN 表和 CLOSED 表, BestNode 库所存放当次迭代中的最优节点, NextNode 库所存放当次迭代中最优节点的后续结点, Path 库所存放搜索出的最优路径.

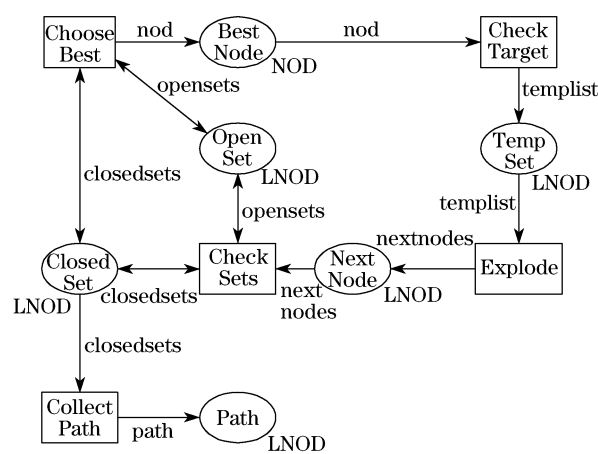


图 3 基于 Petri 网实现 A 星算法的建模
Fig.3 Modeling of A star Algorithm in colored Petri nets

3 基于着色 Petri 网实现 A 星算法实例

每一个算法单元都是由一个变迁和若干库所组成, 而算法单元的函数功能就是由变迁中的变迁函

数体现的. 在算法单元设计之前, 首先要定义算法单元之间传递数据的数据类型, 在着色 Petri 网中就是定义库所中托肯的颜色.

3.1 生产调度问题描述与颜色集定义

生产调度问题中的单个工件的状态可以用工件、工序和加工机器这 3 个参数来描述, 其颜色定义为 $PRO = product\ JOB * NUM * MACH$, 其中, $JOB, NUM, MACH$ 是分别代表工件、工序、加工机器的枚举型颜色集. A 星算法中的结点包含生产调度系统的状态信息, 系统状态由所有工件的状态叠加而成, 假设现要加工 2 个工件, 那么, 记录系统状态和评估函数 f 值的颜色定义为 $FX = product\ PRO * PRO * INT$. 表 1 与表 2 分别为待加工的 2 个工件的工艺以及加工时间. 在 A 星算法中从起点搜索到终点后, 需要通过结点信息追溯路径, 需要每个结点都记录其父亲结点, 因此, 将 A 星算法单元间传递的颜色定义为 $NOD = record\ fath:FX * self:FX$. 定义 $LNOD = list\ NOD$ 为 NOD 类型数据的列表.

A 星算法的子算法单元包括选择最优结点单元、检查目标结点单元、扩展结点单元、更新 OPEN 表和 CLOSED 表单元以及回溯最优路径单元. 本文仅重点介绍扩展结点单元以及更新 OPEN 表和 CLOSED 表单元.

表 1 生产调度问题中的产品工艺描述

Tab.1 Product operation description in production scheduling problem

工序	工件	
	J2	J1
1	M1/M2	M1/M3
2	M2/M3	M1/M2/M3

表 2 生产调度问题中的工序时间描述

Tab.2 Operation time description in production scheduling problem

操作	O1,1,1	O1,1,2	O1,2,2	O1,2,3	O2,1,1	O2,1,3	O2,2,1	O2,2,2	O2,2,3
加工时间	3	4	3	2	4	2	3	4	4

注: $O_{i,j,k}$ 表示第 i 个工件的第 j 道工序在第 k 台机器上的操作.

3.2 扩展结点单元

扩展结点单元的功能是根据工件工艺信息, 扩展当前最优结点, 并计算它们的评估函数 f 值.

如图 4 所示, 扩展结点单元由 Explode 变迁以及 TempSet, Info, NextNode 库所组成. TempSet 库所传递的是当前的最优结点, Info 库所包含工艺和加工时间的信息, 通过 Explode 变迁的激发, 生成扩

展结点存放到 NextNode 库所.

Explode 变迁的变迁函数为 $List.\ drop\ (foldr\ insert2\ (foldr\ insert1\ templist\ info)\ info, 1)$

其功能为扩展当前的最优结点, 其具体操作是通过 insert1 函数查找所有第 1 个工件的下一步工艺, insert2 函数查找所有第 2 个工件的下一步工艺, 来查找该工件所有可能的下一步加工工艺的

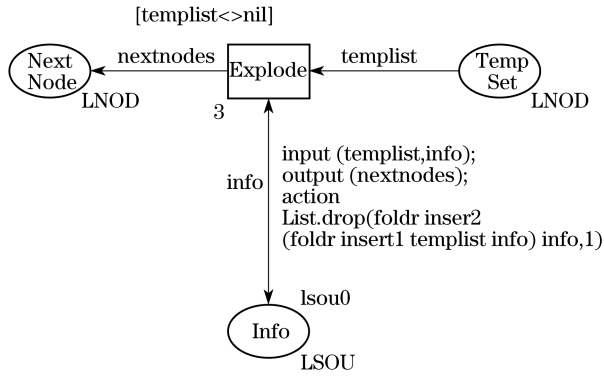


图4 扩展结点单元

Fig.4 Exploding nodes unit

过程.

评估函数 $f(x) = g(x) + h(x)$ 中的启发函数 $h(x)$ 的选择是多样的,该实例中令 $h(x) = 0$, $f(x) = g(x) = \#3 (\# \text{self} (\text{hd list})) + \#4 \text{ en}$. 如果令 $h(x)$ 为 A 星算法的深度,可以定义 $f(x) = g(x) + h(x) = \#3 (\# \text{self} (\text{hd list})) + \#4 \text{ en} - \text{NUM.ord} (\#2 (\#1 (\# \text{self} (\text{hd list})))) - \text{NUM.ord} (\#2 (\#2 (\# \text{self} (\text{hd list}))))$.

3.3 更新 OPEN 表和 CLOSED 表单元

更新 OPEN 表和 CLOSED 表单元的功能主要是将最优结点的后继节点放入 OPEN 表中,如果后继结点已经存在于表中,则比较 f 值,选取 f 值较小的结点.

如图 5 所示,CheckSets 变迁的变迁函数由 2 个子表达式组成,分别是生成 newopen 列表的表达式: $\text{foldr opencheck opensets nextnodes}$ 以及生成 newclosed 列表的表达式: $\text{foldr closedcheck closedsets nextnodes}$. 其中 opencheck 和 closedcheck 为函数名,它们的定义为

```
fun opencheck(nd:NOD,list:LNOD) =
  let val a = foldr checkloop nd list
  in
    if nd = a then ins_new list a
    else ins_new (rm nd list) a
  end
fun closedcheck(nd:NOD,list:LNOD) =
  if nd = foldr checkloop nd list then list
  else rm nd list
```

如果扩展结点已经存在于 OPEN 表,则在 OPEN 表中留下评估函数 f 值较小的结点. 如果扩展结点已经存在于 CLOSED 表,则比较 2 个结点的评估函

数 f 值. 如果扩展结点的 f 值较大,则忽略,因为已经有更优的路径到达该结点;如果扩展结点的 f 值较小,则从 CLOSED 表中删除该结点,并将其加入 OPEN 表,因为, CLOSED 表中包含该结点 D,说明该结点重新返回 OPEN 表后其 f 值仍然是最小的,因此,该结点会在下一步迭代中成为最优结点.

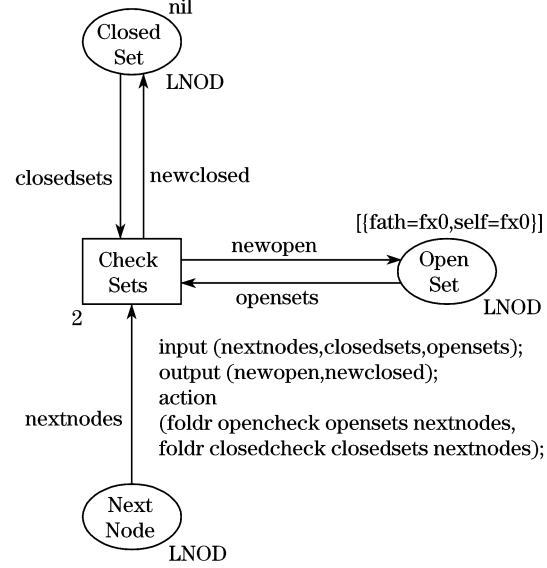


图5 更新 OPEN 表和 CLOSED 表单元

Fig.5 Updating of table OPEN and table CLOSED unit

3.4 完整的 A 星算法

将全部算法单元合并在一起可以得到 A 星算法网络. 为了避免各单元之间的运行顺序失常,给予各单元各自的优先级如图 6 所示(见下页). Petri 网中优先级的具体定义为,当多个变迁的输入弧表达式不为空且守卫函数为真时,优先级最高的变迁使能,当多个变迁的优先级同时最高时则同时使能.

如图 6 所示, A 星算法网络中 TargetState 库所、Info 库所及 OnePath 库所由蓝色标签标记. TargetState 库所及 Info 库所分别存放着生产调度系统的目标状态及工艺信息,是 A 星算法网络的外部输入, OnePath 库所则作为存放调度队列的库所,是 A 星算法网络的外部输出. 图 7(见下页)为在着色 Petri 网中生产调度模型与 A 星算法模型的组合模型,可以看出,使用着色 Petri 网构建 A 星算法网络,从全局建模的角度具有结构简单、应用方便的优势. 研究设备控制、系统应急等问题时,在不修改 A 星算法网络的前提下,只要对生产调度系统建模中 A 星算法网络的使用稍加调整,就可以实时交互系统状态信息与 A 星算法的计算信息,模拟不同的系统状况.

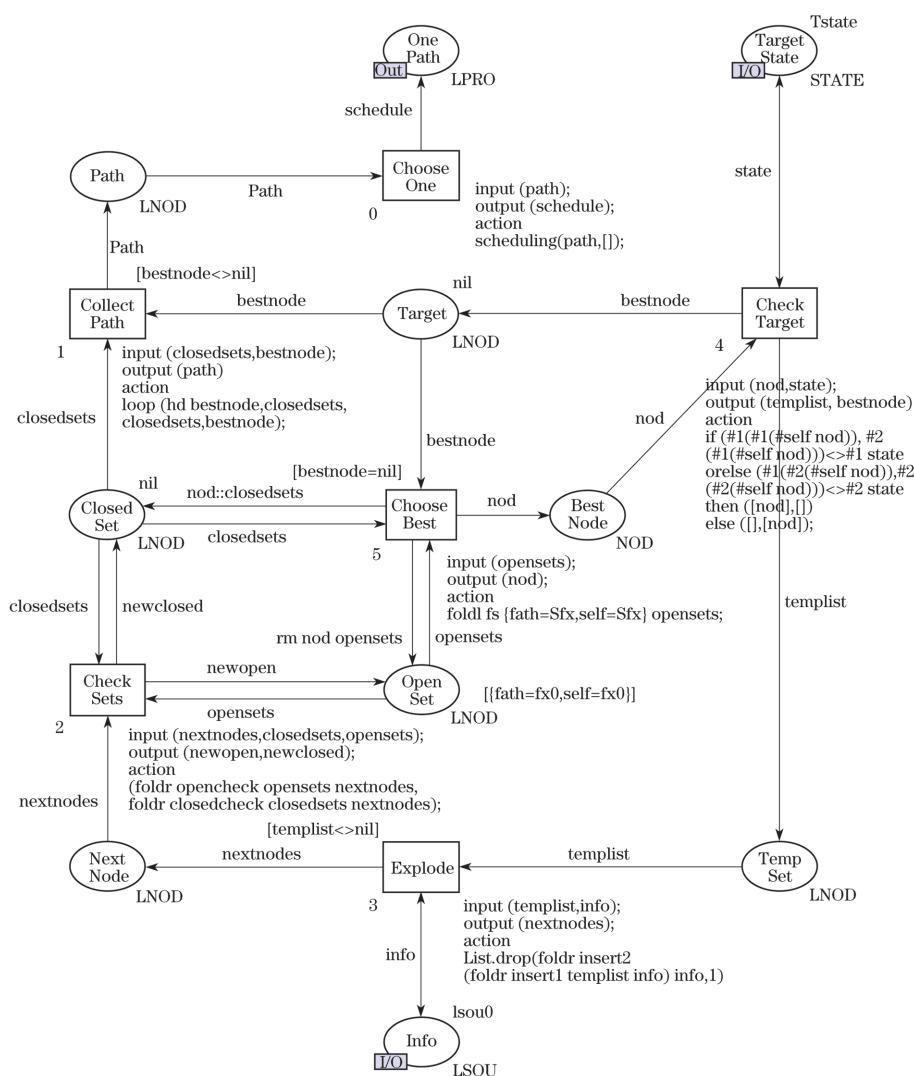


图 6 A 星算法在着色 Petri 网中的建模实例

Fig.6 Modeling example of A star Algorithm in colored Petri nets

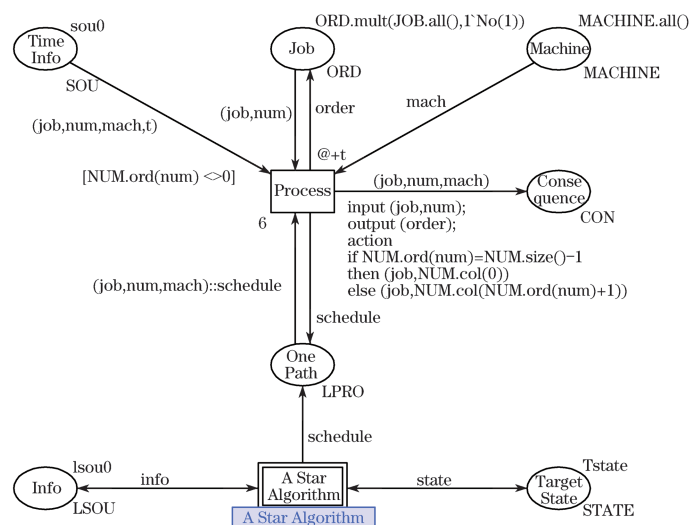


图 7 生产调度与 A 星算法在着色 Petri 网中的建模

Fig.7 Modeling of production scheduling with A star algorithm in colored Petri nets

(下转第 474 页)

4 结 论

针对当前电力市场研究领域,同时考虑多个目标情况下的不同时段负荷分配问题,提出对各个目标设置不同权重,运用最大满意度的思想来求解多目标经济优化问题.在此基础上,针对当前电力系统调度问题求解较难等提出了粒子群-人工鱼群算法.根据计算结果的比较,发现人工鱼群-粒子群算法在计算时间上有明显优势.多次试验的结果证明了该算法具有良好的收敛性和稳定性.

由人工鱼群-粒子群算法构成的混合智能算法能够大大提高计算效率,对于解决目前在求解最优潮流问题时常常遇到的诸如计算量大、计算速度慢、无法在较短的时间内完成优化计算等问题有很大帮助,故在计算电力系统调度问题中能够得到广泛应用.在实际应用中,可以根据当时当地的情况,动态地调整各个目标对应的权系数,继而动态地分配各机组的出力,已达到利用资源和设备的最佳组合来获得系统最大利润的目的.

参考文献:

- [1] 吴杰康,唐力.含不确定性负荷的水火电力系统随机优化调度[J].中国电机工程学报,2012,32(28):36-42.
- [2] 张志刚,马光文.基于NSGA-II算法的多目标水电站群优化调度模型研究[J].水力发电学报,2010,29(1):213-218.

- [3] 田廓.基于混沌例子优化-情景约简算法的混合电力系统机组组合模型及其求解[J].电网技术,2013,37(4):1020-1024.
- [4] 温丽丽,刘俊勇.混合系统中长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟[J].电力系统保护与控制,2008,36(24):24-29.
- [5] 郝玉国,张靖,于尔铿,等.最优潮流实用化研究[J].中国电机工程学报,1996,16(6):388-391.
- [6] Garnier S, Gautrais J, Theraulaz G. The biological principles of swarm intelligence [J]. Swarm Intelligence,2007,30(1):3-31.
- [7] 马慧民,叶春明,张爽.二进制改进粒子群算法在背包问题中的应用[J].上海理工大学学报,2006,28(1):31-34.
- [8] 马慧民,吴勇,叶春明.车辆路径问题的并行粒子群算法研究[J].上海理工大学学报,2007,29(5):435-439.
- [9] 王万良,唐宇.微粒群算法的研究现状与展望[J].浙江工业大学学报,2007,35(2):136-141.
- [10] Banks A, Vincent J, Anyakoha C. A review of particle swarm optimization, Part I: background and development [J]. Natural Computing,2007,45(6):467-484.
- [11] 李晓磊,邵之江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J].系统工程理论与实践,2002,22(11):32-38.
- [12] 毛弋,刘文春,张鹏飞.利用模糊算法对电力市场下纯火电系统多目标综合经济负荷进行分配[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(6):22-29.

(编辑:丁红艺)

(上接第468页)

4 结束语

利用着色Petri网中颜色集的优势简化了生产调度模型,利用CPN Tools建模仿真软件对生产调度过程以及A星算法实例建模,使得基于A星算法的生产调度研究能够在统一的着色Petri网平台上进行,克服了跨平台研究的不便.

参考文献:

- [1] 刘长平,叶春明.求解置换流水车间调度问题的布谷鸟算法[J].上海理工大学学报,2013,35(1):17-20.
- [2] 傅家旗,叶春明,赵伟民.混合量子算法在生产调度中的应用[J].上海理工大学学报,2009,31(6):557-561.
- [3] 马正元,王伟玲,王玉生.生产调度问题的系统研究[J].成组技术与生产现代化,2005,22(1):10-14.
- [4] 徐俊刚,戴国忠,王宏安.生产调度理论和方法研究综

- 述[J].计算机研究与发展,2004,41(2):257-267.
- [5] 王国新,宁汝新,王爱民.基于仿真的生产调度优化技术研究[J].计算机集成制造系统,2007,13(7):1419-1427.
- [6] 郝东,蒋昌俊,林琳.基于Petri网与GA算法的FMS调度优化[J].计算机学报,2005,28(2):201-208.
- [7] 周卫东,杨加敏,贾磊,等.一种Petri网结合遗传算法的优化方法及应用[J].山东大学学报(工学版),2005,35(4):59-63.
- [8] 薛雷,郝跃.基于Petri网的启发式生产调度[J].自动化学报,2002,28(5):827-831.
- [9] 江志斌.Petri网及其在制造系统建模与控制中的应用[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [10] Jensen K. Colored Petri nets: a high-level language for system design and analysis [J]. Computer Science, 1991(483):342-416.
- [11] 蔡自兴.人工智能及其应用 [M].北京:清华大学出版社,2007.

(编辑:石 瑛)