

一种新的启发式搜索法及其应用

周金荣 蒋慰孙

(华东化工学院自动化所, 上海, 200237)

摘要 本文提出了一种新的分步式启发式搜索法, 并应用它基于过程各类知识成功地解决了某炼油厂润滑油系统的复杂生产优化调度问题。

关键词: 启发式搜索 最优化 生产调度

1 引言

搜索技术, 特别是启发式搜索, 在人工智能的研究中, 被看成各种问题求解的主要工具。现在, 搜索方法已广泛地应用于程序设计、模式识别、专家系统等各个领域, 并逐渐渗透到过程控制、操作优化^[1-3]等方面。目前, 主要有两类基本的启发式搜索算法。一类是 Hart, Nilsson 等人的节点扩展搜索法, 如 A^* , B 算法^[4]; 另一类是国内杨永耀等在研究复杂工业过程控制的优化问题时提出的启发式路径扩展搜索法^[5]。两者各有其优缺点。然而, 对于某些实际工程优化问题, 在使某目标函数达到最优时, 要求多个约束条件都应满足, 而这些约束条件对于目标函数的作用效果是不同的甚至可能是相互矛盾的, 并且由实际情况各约束条件要求满足的程度是有差别的。应用上述两类搜索法都难以快速有效地解决此类优化问题。为此, 本文提出了一种新的智能化启发式点-路径扩展搜索法, 该方法通过对约束条件的分类, 分步循环迭代来解决复杂的优化问题。利用这一方法, 本文成功地解决了某炼油厂润滑油系统的生产优化调度问题。

2 启发式点-路径搜索法的定义

2.1 已有启发式搜索法的评价

A^* 搜索法等启发式节点搜索法采用由启发式估价函数决定的节点排序和节点扩展。对于具有相互矛盾的多约束条件的复杂决策过程其节点估价函数的构造将非常困难。1987 年杨永耀等提出的启发式路径扩展法是由初始路径开始, 通过路径估价函数 $G(p)$ 和相应的约束偏差 $E(p)$ 的计算来扩展搜索最佳路径。其关键在于由过程全部约束条件决定的指导路径扩展方向选择的知识规则集须非常合理和有效, 否则可能求解完全失败。为此, 本文设想依据过程目标函数设法将节点估价函数的构造与计算同知识规则集的建立与调用两者结合进来, 提出一种混合的启发式搜索方法, 既使估价函数的构造适于简单和有效, 又设法克服知识规则集构造不当所带来的求解失败问题, 从而快速有效地解决某些实际工程决策问题。

2.2 启发式点-路径扩展搜索法

对于含有多个相互矛盾的约束条件的实际工程优化问题, 通常我们可将这些约束条件按优先级(约束条件要求满足程度的度量)分成两类或更多类来加以处理。这种划分对于工程应用问题尤其重要。为此提出下列思想:

收稿日期: 1992-05-30

第一步:

1) 根据所有约束条件的优先级别及其构造节点估价函数的难易性将其分为两大类.

2) 以优先级别高且易于构造启发式估价函数的那类约束条件(这类条件要求必须严格满足,称之为第一类约束条件)来构造合适的含有可变参数的节点估价函数 $f(n)$;

3) 利用 2) 中所提供的估价函数来引导搜索过程得到满足第一类约束条件的整个问题的优化解及其优化路径 p (在搜索过程中利用搜索得到的信息修改 $f(n)$, 使之尽量接近于 $f^*(n)$, 这是对 A^* 算法的一大改进).

第二步:

1) 计算按第一步所得到的已知路径 p 所耗费的费用函数 $J(p)$ (反映了问题的目标函数) 和相应的第二类约束条件(这类条件优先级别相对较低, 在实际问题中应尽量满足, 但可根据具体情况适当放宽对其的要求) 得不到满足的约束偏差 $E(p)$, 采用附加罚函数的方法得到路径估价函数 $G(p)$, 即:

$$G(p) = J(p) + \beta E(p), \quad E(p) = \psi(X) | p,$$

其中 β 为罚函数加权向量, $\psi(X)$ 为约束方程, 解的最优性条件由下式给出:

$$G(p_i) = G_{\min} \cap E(p_i) = 0$$

2) 利用由问题的数学模型和专家经验规则所组成的综合知识来修改第一步中节点估价函数中可变参数的值, 以修改路径扩展方向, 重新按第一步扩展得到新的路径, 若最优性条件满足, 则结束循环, 否则反复循环, 最终得到满足各类约束条件的最优解路径.

在上述方法进行过程中, 可根据需要中止第二步过程, 得到不严格满足第二类约束条件的次优解路径, 以提高问题的求解效率和满足具体工程问题的特殊需要. 正是根据这一算法的上述特点, 我们称之为启发式点-路径扩展搜索法. 可以看出, 由于第一步可看成是 A^* 搜索法, 因此只需保证构造的节点估价函数 $f(n) \leq f^*(n)$ (由文献[4]), 就可保证这一步的可采纳性. 对于第二步, 由于这里采用了由过程数学模型知识及专家经验规则知识两方面内容来组成经验规则集, 只要构造得当, 亦可较快地求得问题的解. 因此, 这一方法的有效性是可以保证的, 这一点已由后述的具体生产优化调度问题的正确解决而得到验证.

2.3 A^* 算法、路径扩展法与点-路径扩展法三者的比较

首先, 从方法上看, 以 A^* 算法为代表的节点搜索算法其关键在于利用启发式估价函数的构造和计算进行知识的扩展和排序. 而路径扩展法则是在合理有效的经验规则集基础上的完整路径的扩展. 至于这里所提出的启发式点-路径扩展搜索法则是采用分步式求解的思想, 搜索过程既保留了节点扩展技术, 又采用了路径扩展方法, 可求得问题的满足一定主要条件的次优解以及满足全部约束条件的最优解. 此三种方法的特点可由图 1 直观地看出.

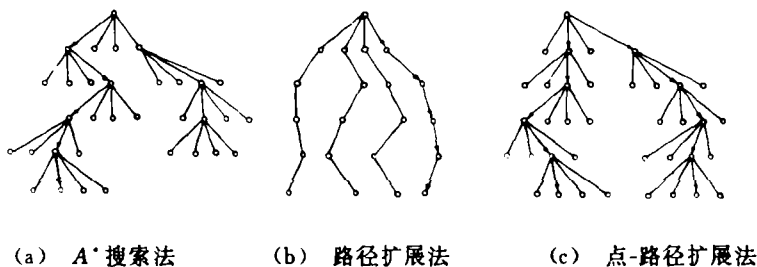


图 1 三种方法的比较(带“↓”者为最佳路径,带“ ”者为次优路径)

其次,在应用中,利用 A^* 算法的关键在于节点估价函数的定义及计算,若满足可采纳性和有效性的 $f(n)$ 的确定比较方便,则应用 A^* 算法将是非常有效的. 对于机理较复杂或不清晰,经验因素较多的工程问题,只要知识规则集构造得当,则利用启发式路径扩展法将是比较确切的. 与上述两种方法不同的是,启发式点-路径扩展方法则更适合于含有不同优先级别的约束条件的具体工程问题. 这种处理方法既使 $f(n)$ 的构造简单合理,又由于引入了模型知识与经验规则知识确定的综合知识规则集,从而使得经验规则集更加合理有效,加强了启发能力.

从上面的分析可以看出,三种不同的启发式方法各有其应用背景,应针对具体问题加以选择应用. 随着研究对象的复杂化和大规模化,本文所提出的启发式点-路径扩展法将变得越来越重要.

3 启发式点-路径扩展法在炼油厂润滑油系统生产优化调度中的应用

3.1 某炼油厂润滑系统的工艺流程

图2给出了某炼油厂润滑油系统的工艺流程. 图中“。”代表贮罐组,“□”代表生产装置. 系统的原料来源于原油七个侧线产品. 这些馏分线油品分别经酮苯脱蜡、糖醛(酚)精制、白土精制三道工序处理之后得到可调合成润滑油产品的10多种基础油品,每一装置均须按一定的品种切换图交替处理多种原料或半成品. 这显然是一个多级品种的生产过程,其中,第一与第二级工序间的物料流是交叉关联的. 且由于这两级装置的处理能力不配套,酚精制装置依一定的条件停或开工. 而第二与第三级工序间则是相互配套的.

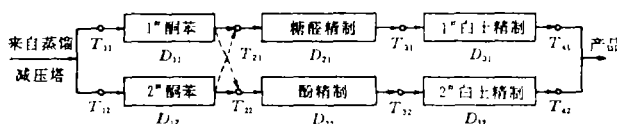


图2 工艺流程图

3.2 问题的提出及解决

由于每一装置均须处理多种性能相异的原料,每一装置的品种切换则是由前后贮罐的贮量及产品的计划量来决定的,所以每一装置的处理品种顺序的确定则是非常重要的. 由实际工厂情况,每一装置发生切换所引起的过渡过程中生产的产品一般均不能作为合格产品,这就造成了经济损失,而这一损失是影响工厂经济效益的最主要的原因. 显然单位时间内完成计划量的各装置的切换次数越少,则经济效益越高. 为此要求相邻切换品种性能尽量相近,且系统的总切换次数越少. 考虑到相邻切换品种的确定总是由各装置特定的切换规则加以限制,故在此选择单位时间内完成计划量的各装置的总切换次数最少为目标函数:

$$J = \min \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} e_{ij}$$

其中, e_{ij} 为各装置的切换次数, α_{ij} 为权系数.

在使上述目标函数达最优时,工厂要求单位时间内产品的总计划量必须满足;各产品的分计划量亦应满足;尽量多生产效益高的品种;出口油满足计划即可;...等多个约束条件. 通过分析,仅完成总计划量的所需总切换次数显然少于使各分计划量都完成所需的切换次数,如果再结合其他条件,情况将更加复杂. 工厂实际规定完成总计划量、超产效益高的约束的优先级别

高于完成各分计划量等约束的优先级别,且前两种约束条件容易构造出简单的估价函数.为此,对于这一调度问题,选择将满足总计划量及尽量多生产效益高的产品等约束条件作为第一类约束条件,而其他约束则均作为第二类约束条件.

以装置 2[#] 酮苯为例,它处理五种原料 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 . 其切换规则图见图 3. 这里节点估价函数 $f(n) = g(n) + h(n)$. $g(n)$ 为从初始节点到当前节点 2[#] 酮苯已发生的切换次数. $h(n)$ 则是对未来还需切换次数的估计.

$$h(n) = \alpha(i) + G_m - Q_m / \beta_i \times F$$

这里 α 取值 1, 2, ..., 反映品种的经济效益高低, α 越大, 该油品效益越低, G_m 与 Q_m 则为总计划量与当前总生产量, β_i 则由第二步启发式路径扩展法中偏差量决定的可变参数, 初始值 β_i 为 1, F 为当前品种的处理量.

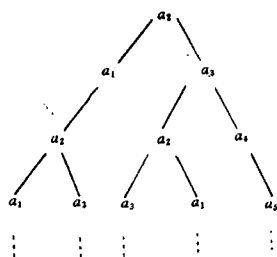


图3 切换规则

其他装置均同样构造出 $f(n)$. 通过设定一组数组变量以及一些单位变量, 并结合装置实际情况给出各变量间的关系, 可得到这一系统的数学模型知识^[6]. 同样通过深入现场, 作者了解并总结了这一系统的若干经验规则, 如: 难以合格的品种优先安排生产; 优先安排各品种的第一次生产; 两次切换间需间隔 8h; ... 等, 由此构成了具有丰富知识的经验规则集. 在充分考虑了各装置的每一次切换均对其

其他装置的生产情况(包括当前处理品种的持续时间及下一最佳品种的选择)发生影响的情况下, 本文运用前面给出的启发式点-路径搜索法解决了这一系统的生产优化调度问题. 由这一思想所开发出来的生产优化调度软件已在现场实际试用, 其有效性得到了验证.

3.3 实际调度结果分析

随意选取某炼油厂润滑油系统的某组现场数据, 考虑生产安排时间为 10d, 计划总量为 7 200t, 各产品分计划量见表 1. 以 1—7 分别代表按某性能要求指标排定的七种油品, 即: 常三油、减二(变)油、减二(普)油、减二(外)油、减三油、减四油和减五油. 各装置初始处理品种为 1[#] 酮苯: 减四油; 2[#] 酮苯: 减二(外); 糖醛精制(1[#] 白土): 减二(外); 酚精制(2[#] 白土): 减五油. 由此可得计算机优化调度结果见图 4.

表1 各产品分计划量

N46 机械油	1 400t	30QC 汽油机油	400t	40CC 柴油机油	200t
N68 机械油	1 200t	40QC 汽油机油	300t	100SN 出口油	1 000t
N100 机械油	800t	30CC 柴油机油	300t	250SN 出口油	1 600t

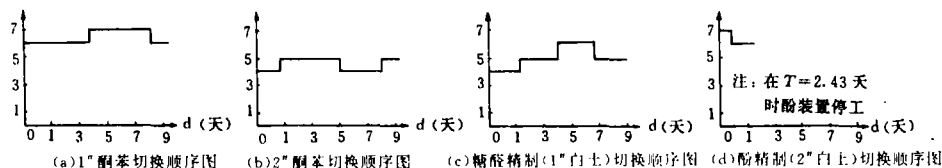


图4 计算机优化调度结果

由于各出厂产品是由前述七种油品经加工处理所得 11 种油品按比例调合得到, 因此, 可

将表 1 中计划量换算成这 11 种油品的各自计划量,其完成情况由表 2 给出。

对于同一组数据,由调度员人工安排所得各装置品种切换顺序图见图 5。

表 2 完成情况

品种	计划量(t)	生产量(t)	品种	计划量(t)	生产量(t)
二外	1 000	1 253.523	四普	2 180	2 378.998
三普	2 020	2 047.738	五普	400	439.912
三外	1 600	1 809.000	其它	0	0
总计划量: 7 200t			总生产量: 7 929.171t		

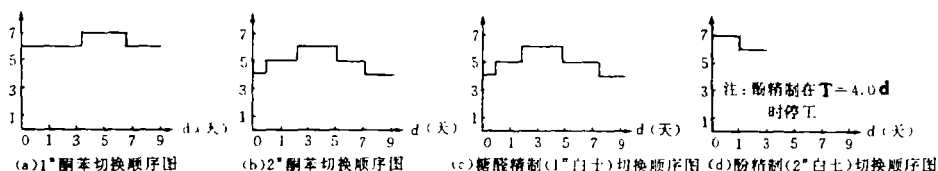


图 5 人工安排的结果

显然,由计算机调度结果可知,10d 内总生产量将达 7 929t,超额完成了总计划量,且各分计划量也得到了满足,各装置的切换次数为 $e_{11}=2, e_{12}=3, e_{21}=e_{31}=3, e_{22}=e_{32}=1$,总切换次数为 $e=13$ 。此时,人工调度的切换次数为 $e_{11}=2, e_{12}=4, e_{21}=e_{31}=4, e_{22}=e_{32}=1$,总切换次数为 $e=16$ 次,总生产量为 7 260t。可见,文中所提出的启发式点-路径搜索法是非常有效的。

参 考 文 献

- 1 Graham R L, *et al.* Optimization and Application in Deterministic Sequencing and Scheduling—a Survey. *Anu Discrete Math*, 1979; 5(2): 287—326
- 2 Valenzuela C A, *et al.* a Production Scheduling Heuristic for a Chemical Process. *Modelling and Simulation*, 1983; 14: 557—562
- 3 夏国世. 工业过程操作优化控制与生产优化调度策略的研究. 华东化工学院博士论文, 1987
- 4 陆汝玲. 人工智能. 北京: 科学出版社, 1989
- 5 杨永耀. 工业过程递阶智能控制及其应用. 浙江大学博士论文, 1987
- 6 周金荣, 蒋慰孙. 多级关联离散型系统的生产优化调度. *控制与决策*, 1992; 7(2): 88—93

A NEW HEURISTIC SEARCH METHOD AND ITS APPLICATION

ZHOU Jinrong JIANG Weisun

(Inst of Autocontrol, East China Univ of Chemical Technology, Shanghai)

Abstract

This paper proposes a new heuristic node-path search method. This approach has effectively been applied to solve a practical optimization production scheduling problem.

Key words: heuristic search optimization production scheduling

(周金荣,男,27岁,读博士学位.感兴趣的研究领域为复杂工业过程的优化控制和调度,工业过程的实用专家系统的开发以及神经网络在工业过程中的应用研究等。)