

计算机应用

基于逻辑模拟退火法的炼油厂
原油库存调度优化田文德¹ 孙素莉²

1. 青岛科技大学化工学院(山东省青岛市 266042)

2. 青岛科技大学高分子科学与工程学院(山东省青岛市 266042)

摘要:提出了一种混合模拟退火算法,以模拟退火法作为随机搜索引擎,利用逻辑编程和线性规划来检验和处理搜索结果。这种算法既可以发挥随机搜索法的快速寻找可行解的优势,又可以充分考虑特定问题内在的逻辑和数学关系,使之可以在较短的时间内得到一较优解。实例计算结果表明,同传统的混合整数线性规划方法相比,这种算法可以快速地给出优化解,且优化值与全局最优值差别不大,可以更好地解决原油实际调度问题。

关键词:炼油厂 原油 调度 模拟退火法 混合整数规划 优化

现代商业激烈的竞争环境要求企业能够根据市场变化情况,预测未来一定时期内的企业相关原料和产品变化,并由此制定相应的生产计划。目前,时间跨度为数月的生产计划,一般要通过更为细致的周生产调度来具体实施。这种调度系统在满足生产计划规定的原料供应和产品需求的前提下,给出详细的设备和人员的时间安排,以便尽可能地降低调度周期内的生产成本。相对于成熟的生产计划技术,现有的生产调度研究还局限于经验推理^[1],其理论研究还进行得很不够,有关的优化技术距离实用化还有一定的距离^[2]。

本文研究了炼油厂原油库存的生产调度优化问题,针对现有优化算法的不足,采用了一种混合算法对其进行了改进,起到了提高计算速度,更好地为生产管理提供决策方案的作用。

1 原油库存调度优化过程简介

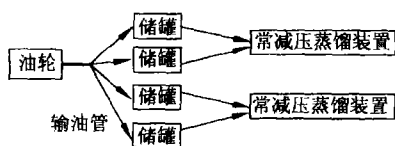


图1 原油库存示意

炼油厂原油库存管理涉及油轮、输油管、储罐和常减压蒸馏装置(CDU)^[3],如图1所示。根据旬或月生产计划,在调度周期内将有一艘或数艘油轮按期抵达码头,通过设在码头的输油管向储罐

输油。通常,出于经济考虑输油管只铺设一条,加上为了防止不同类型的原油混杂,在同一时刻将只能有一艘油轮卸油。这将导致其它已抵达的油轮不得不在海上等候。接下来,由于每一储罐只能接收规定规格的原油,加上各种实际操作条件的限制,此时的输油管只能与一个储罐相连。然后,各储罐中的原油根据生产要求进行在线混合向各 CDU 加料,满足由生产计划给定的 CDU 的原油加工量。在该过程中,出于生产安全考虑,储罐在受油时将不允许向 CDU 送料。另外,实际生产中通常还规定,一套 CDU 最多同时由两个储罐加料,而一个储罐也最多同时向两套 CDU 供料。

炼油厂原油库存调度优化的任务是:基于上述给定的工艺流程,在固定原料供给和满足产品产量与各种操作规则的前提下,合理地安排调度周期内每一时刻的油轮、储罐和 CDU 的运行情况,以使整个周期内的操作费用最低。

该优化模型的变量由连续变量和离散变量两类构成,前者包括单元设备间的物流流量和设备持液量等实数变量,后者包括油轮开始输油时刻、某一时刻某一储罐是否受油以及某一时刻某一 CDU 是否与某一储罐连接等逻辑变量。与此相对应,优化模型的约束条件可分为组分物料衡算约

收稿日期:2004-06-02;修改稿收到日期:2005-01-11。

作者简介:田文德,青岛科技大学化工学院博士生。联系电话:0532-4022845 E-mail:tiandwende@scut.com

束和操作逻辑约束两类,前者表达了物料平衡关系,后者表达了单元设备间的连接关系。物料衡算约束中涉及的都是连续变量,经过适当的线性化处理可表达为线性方程组,可采用技术较为成熟的线性规划来求解,计算效率较高。操作逻辑约束表达的是离散变量间的复杂逻辑关系,现有的处理方法一般是将它们通过各种方法表达为线性方程组,然后与线性物料衡算约束方程组一起构成线性模型,通过线性规划来求解,之后对优化结果为非整数的离散变量采用分枝剪切法(Branch & Cut)进行迭代处理,这种方法被称之为混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)^[4]。该方法的好处是可以利用成熟的线性规划技术,缺点是这种人为的线性化将导致模型复杂化,使求解效率随着问题规模的扩大而快速降低。

将逻辑约束简单地表达为线性方程组,实际上是采用通用方法来处理特殊问题,它忽略了各种逻辑关系间的内在特定联系,是一种低效率的方法。较好的方式是采用特定的启发式算法来处理逻辑约束,用线性规划来处理物料衡算约束,然后通过一定的结构框架将二者统一起来构成混合算法。

2 基于逻辑模拟退火法的混合算法

对于石油工业中的许多调度问题,找到全局最优解的唯一方法是彻底搜索整个可行域。然而,如果某一问题存在着大量可行解的话,必将耗费大量的机时来完成这一搜索过程。当前被广泛应用的启发式算法,如模拟退火法(Simulated Annealing, SA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和禁忌搜索法(Tabu Search, TS),是解决这一问题的有效方法。它们不再搜索整个可行域,而是为了满足实际需要只进行部分搜索,目标是获得一些好的或者接近全局最优的解。同其它两种算法相比,SA具有原理简单、计算速度快等优点,便于实际应用。SA基于热力学原理,给出了一种局部解改善机制,允许对某些没有改善效果的解进行空间移动操作,以免陷于局部最优解^[5]。

在优化过程中,SA通过随机改变自变量值来获得问题解。但由于它在解空间移动过程中,没有对问题的约束加以考虑,故往往会给出大量的不可行解。采用惩罚函数的方法可以解决这一问

题,但往往比较复杂,并且可能会漏掉全局最优解,实际效果并不令人满意。基于这一认识,本文提出了一种混合模拟退火算法(简称混合算法)。在该算法中,模拟退火法主要负责引导整个计算过程的进行,而内嵌的逻辑编程和线性规划技术则分别负责处理逻辑约束和实数约束,该算法的计算原理如图2所示。逻辑约束编程(Logic Constraint Programming, CLP)是一种计算机编程技术^[6],其内置有各种逻辑关系函数,可以方便地进行逻辑推理。正因为如此,目前CLP已开始应用于含有特定逻辑关系的整数规划中,从而出现了各种各样的CLP与数学规划相结合的混合算法。本文所提出的算法是在这类混合算法基础上进行的一种改进,它用启发式算法来统一调配CLP和线性规划,可以及时排除不满足逻辑关系的无效解,从而加快可行解的搜索速度。

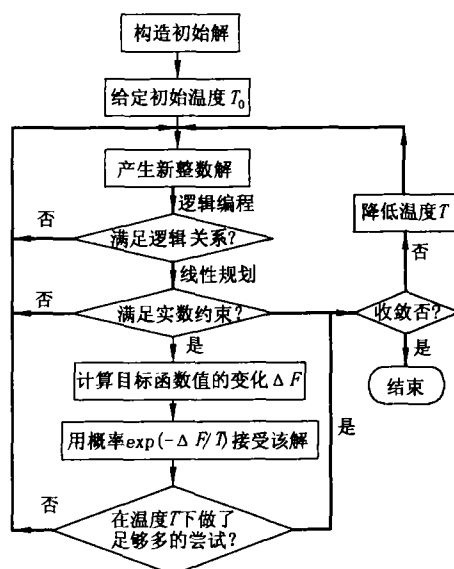


图2 混合算法框图

在应用该算法解决原油调度问题时,需注意以下两点:

(1)算法中的温度,直接决定了新整数解的被接受程度,在实际问题解决过程中代表了搜索范围的大小。起初,算法给定较大的搜索范围,对应于较高的初始温度 T_0 ,这样可以防止遗漏掉真正的优化解。随着搜索过程的进行,温度 T 将被逐渐降低,搜索范围相应地将不断缩小,直至最终以一定的精度逼近最优解。

(2)在选择新整数解时,通过两种判据来决定该解是否被接受,以避免盲目搜索带来的组合爆炸问题。一是通过线性规划来考察该整数解是否

满足物料守恒。由于线性规划的运算速度较快,所以该步操作可以快速排除无效解,进而有效地缩小搜索空间。二是通过概率 $\exp(-\Delta F/T)$ 来决定该解的被接受程度。随着温度 T 的逐渐降低,该概率将越来越小,优化解将被圈限在一个较小的范围内,从而有利于以较小的计算量解决实际过程中的较大规模问题。

3 编码过程

在混合算法的“产生新整数解”部分,为了充分考虑各种整数约束的限制,需要采用一定的方式对整数变量进行编码,并根据约束情况对编码后的自变量向量的空间移动给予一定的限制,以尽可能地保证产生可行解。对于原油调度问题,一个可行解由卸油、储油和蒸馏进料三部分构成,并以后二者为主。混合算法将仿照物理退火过程,通过搜索该解邻域来试图对其进行改进。因此,由解表达和解改进组成的编码过程,在混合算法应用过程中至关重要。

3.1 储油阶段

原油储罐受油的操作规则为:当某一油轮与输油管相连向码头输油时,应保证至少一个但最多两个储罐同时与该油管相连以便进行接收;否则不准有储罐与输油管相连。根据这一规则,本文定义了一个数组,数组的每一元素代表每一时刻与输油管相连的所有储罐的编号,如下所示。

$$\begin{bmatrix} \text{Tank}_{11} & \text{Tank}_{12} \\ \text{Tank}_{21} & \text{Tank}_{22} \\ \dots & \dots \\ \text{Tank}_{r1} & \text{Tank}_{r2} \end{bmatrix}$$

在储罐接收原油时,对于一个给定的可行解,其局部改进过程为:首先随机地选定一个时期,使输油管在该时期内与油轮相连;然后随机地改变该时期内的储罐列表。不同情况下可能进行的列表修改操作项目如表1所示。

表1 储罐受油时可能的列表操作

现有可用储罐数量	允许操作
0	添加
1	添加, 去除, 替换
2	去除, 替换

其中,添加操作代表在该时期内增加一个与输油管相连的储罐;去除操作代表在该时期内选

择一个与输油管相连的储罐,将其与输油管断开;替换操作是添加操作和去除操作的联合操作,即首先使一个储罐与输油管断开,然后再选择另外一个储罐与输油管相连。

3.2 CDU 进料阶段

该部分要求,每一原油储罐最多可同时向两套 CDU 加料。同时,每一 CDU 必须从至少一个但至多两个原油储罐中加料。由于每一 CDU 都要求具有相对稳定的加料流量,因此本部分的编码过程将基于 CDU 进行。首先,定义一个下标为时刻的编码数组,它的每一个元素代表了每一时刻可能与每一 CDU 相连的原油储罐的编号集合。其次,对该数组进行如下的更新操作:(1)随机选择一个时刻;(2)在该时刻随机地选择一套 CDU;(3)变更该与 CDU 相连的储罐列表,其可能的变更方式如表2所示。

表2 CDU 加料时可能的列表操作

现有可用储罐数量	允许操作
1	添加, 替换
2	去除, 替换

表2中的添加和替换操作机理,与表1中的操作相对应。这两种操作都涉及到往储罐列表中添加储罐的可能,因此为了不违反一个储罐最多可同时向两套 CDU 加油的规则,有必要在对列表进行调整之前首先筛选出仍可以向 CDU 加油的储罐集合。之后如果出现向列表添加储罐的操作,则直接从这一集合中进行候选。由于删除操作被限定在数量为2的列表中进行,不涉及添加储罐问题,也就无需考虑上述的预处理储罐集合。

实际上,上面列出的解表达和解改进的三个阶段构成了原油调度问题的序列决策过程。为了获得全局最优解,这三个阶段应按照同样的概率进行随机选定。当选取的阶段为向 CDU 加料阶段(最后一个决策阶段)时,直接对其解进行改进即可。但当选取的阶段为其余两个阶段之一时,由于对它们及其后续的阶段有直接的影响,故此时需将原问题中未确定的部分提交至 MILP,从而得到全面解或认定该阶段的解不可行。

4 实例

为便于比较说明,本文对混合算法和 MILP 采用了同样的框架,由 ECLiPSe5.6 编程环境实现混

合算法主体框架,而线性规划和混合整数线性规划算法则由其内嵌的 Xpress-MP 13 算法器完成。为了考察各参数对混合算法的影响以及验证混合算法的有效性,本文选定了三个不同规模的原油调度问题进行了测试,其细节如表 3 所示。随着调度周期、油轮、储罐和 CDU 数目的增加,这三个实例的规模逐渐增加。因此,对其中最为简单的实例 1 进行参数测试,将选定的算法参数用于其它两个实例就比较可靠。

表 3 实例细节

序号	周期数	油轮数量	储罐数量	CDU 数量
1	10	1	8	3
2	20	2	8	3
3	42	3	8	3

作为一种启发式算法,模拟退火法有很多可调参数,它们对算法的计算性能具有重要影响。因此,本文首先以实例 1 为对象对影响模拟退火法的主要参数进行了测试,包括温度变化率(图 3)、在每一温度下的迭代次数(图 4)和初始温度(图 5)。所有这些测试都显示,随着这些参数数值的增加,算法的运算时间不断增加,但它们对目标函数值的影响则不那么明显。一般来说,在这些参数大到一定程度后,对目标函数值的影响就很小了,甚至对其成反比关系(图 5)。因此,针对模拟退火法选定合适的参数非常重要,这也是存在于启发式算法中的一个普遍问题。

在给定了合适的计算参数以后,针对表 3 中的三个不同规模的原油库存调度实例对混合算法进行了测试,结果见表 4。可以看出,随着问题规模的增大,MILP 的计算时间大幅增加,对于实例 3 甚至不能在合理的时间内得到优化解。与之相比,本文给出的混合算法的计算速度有了大幅度的提高,而其得出的局部最优值却与 MILP 给出的全局最优值很接近,这正是得益于模拟退火法和线性规划法的有机结合。由此可见,混合算法能够快速给出一个较好方案,可以满足实际生产过程的需要。

从表 4 还可以看出,尽管模拟退火法的主要优势是能够跳出局部最优,但其得到的最优解往往仍然是局部最优解,这主要来源于它的解改进过程。模拟退火法的每一步移动只是对现有解的随机改进,并不能阻止已尝试过的改进路径的重复出现。禁忌搜索法创建了专门的机制,能够防

止近期出现的改进过程重复出现,但应用起来比较复杂。因此,与模拟退火法较快的计算速度相比,这些局部解并不构成混合算法的主要缺点。

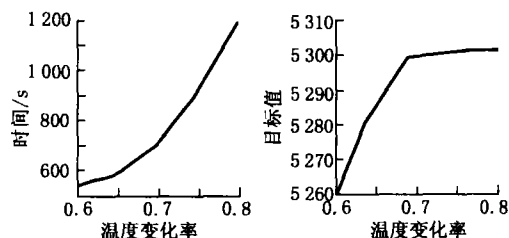


图 3 温度变化速率对混合算法的影响

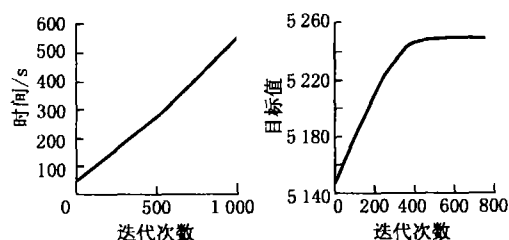


图 4 迭代次数对混合算法的影响

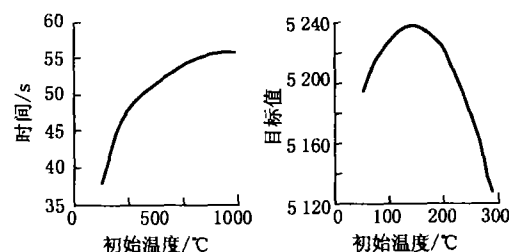


图 5 初始温度对混合算法的影响

表 4 计算结果对比

实例序号	混合算法		混合整数规划	
	时间/s	利润	时间/s	利润
1	69.77	5 234.53	597.97	5 932.05
2	683.88	9 825.06	59 510.31	10 771.23
3	1 907.83	16 065.19	*	*

* 两天内未得到结果。

5 结 论

原油库存调度为混合整数规划问题,其难点在于整数的组合爆炸过程。现有的 MILP 算法在处理这类问题是效率不高,距离实用性还较远。作为启发式算法之一的模拟退火法,在优化这类问题时则可以快速给出一个合理解,但对其中的实数规划部分却无能为力。为此,本文将模拟退火法与逻辑编程和线性规划法互补地结合起来,构成了混合模拟退火算法。通过对三个不同规模的实例测试表明,在优化结果变化不大的情况下,

该混合算法的计算速度较传统的 MILP 有了大幅度的提高,可以满足实际生产的需要。

参考文献

- 1 龙伟灿,许明春.炼油厂原油罐调度系统的研究开发.石油炼制与化工, 2000, 31(11): 38~41
- 2 M Joly, I F I Moro, J M Pinto. Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2002, 19(02): 207~228
- 3 Heeman Lee, Jose M Pinto, Ignacio E Grossmann, et al. Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. Ind Eng Chem Res, 1996, 35: 1630~1641
- 4 Josef Kalrath. Planning and scheduling in the process industry. OR Spectrum, 2002, 24: 219~250
- 5 Michael W Carter, Camille C Price. Operations research: a practical introduction. Boca Raton: CRC Press, 2001
- 6 Vipul Jain, Ignacio E Grossmann. Algorithms for hybrid MILP/CP models for a class of optimization problems. INFORMS Journal on Computing, 2001, 13(4): 258~276

(编辑 苏德中)

OPTIMIZATION OF CRUDE INVENTORY SCHEDULING IN REFINERY BASED ON LOGICAL SIMULATED ANNEALING METHOD

Tian Wende¹, Sun Suli²

1. College of Chemical Technology, Qingdao University of Science & Technology (Qingdao, Shandong 266042)
2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Qingdao University of Science & Technology (Qingdao, Shandong 266042)

Abstract A calculation method of mixed simulation annealing algorithm has been proposed. It takes simulated annealing for random searching and the search result is inspected by logical programming and linear programming. With mixed simulation annealing method, not only the advantage of random fast searching for a feasible solution can be brought into full play, but also the internal logical and mathematical relations of special subject can be considered to obtain an optimal solution within a short time. Practical calculation result shows that compared with the mixed integral linear programming, the method is characterized by the fast and optimal solution and its optimal value quite agrees with the total optimal value. So it is more applicable to deal with the problems in practical crude scheduling.

Keywords refinery, crude, scheduling, simulation annealing, mixing integral programming, optimization

书 讯

《催化裂化协作组第十届年会报告论文选集》出版

经过紧张的编辑加工,《催化裂化协作组第十届年会报告论文选集》已于2005年元月正式出版。本届年会论文选集共择选了128篇有代表性的文章,分为“会议报告与综述”、“生产工艺”、“催化剂与助剂”、“机械与设备”、“研究与开发”、“计算机应用与自动控制”六个部分,共608页,约100万字,基本涵盖了国内近年来在催化裂化生

产和技术等方面的发展和动向,值得一阅。

该选集除向协作组成员免费发放一定数量外,还可满足国内少量其他读者使用的要求。

联系人:吴虹

联系电话:0379-4887019,4887693