

控制与决策

Control and Decision

基于即时交货的离散时间模型及其在炼油过程调度优化中的应用

韩彪, 江永亨, 王凌, 黄德先

引用本文:

韩彪, 江永亨, 王凌, 等. 基于即时交货的离散时间模型及其在炼油过程调度优化中的应用[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1361–1368.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1467>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[求解区间数分布式流水线调度的混合离散果蝇优化算法](#)

A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for distributed permutation flowshop scheduling with interval data
控制与决策. 2020, 35(4): 930–936 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1274>

[离散猫群优化算法求解带交货期的FJSP问题](#)

Discrete cat swarm optimization algorithm for solving the FJSP with due date
控制与决策. 2020, 35(1): 161–168 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0631>

[基于MapReduce模型带任务分割的并行机调度优化](#)

Parallel machine scheduling with splitting jobs in MapReduce system
控制与决策. 2019, 34(7): 1514–1520 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1677>

[基于改进烟花算法的随机装配线混流调度](#)

Mixed-model sequencing of stochastic assembly line based on improved fireworks algorithm
控制与决策. 2019, 34(4): 751–758 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1291>

[以低碳为目标的集装箱拖车运输问题及其时间窗离散化算法](#)

Container drayage transportation problem with objective of low carbons and its time window discretization based solution method
控制与决策. 2016, 31(4): 717–722 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0086>

基于即时交货的离散时间模型及其在炼油过程 调度优化中的应用

韩 彪, 江永亨, 王 凌, 黄德先[†]

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 针对炼油过程调度优化的离散时间与连续时间建模方法在应用中的局限性, 提出一种基于即时交货的离散时间建模方法. 该方法总体上采用离散时间表示, 通过对成品油交货环节相关部分更加细致的描述, 使得交货活动能够在时间片段内部发生, 既可保证对实际问题的准确刻画, 又能实现对模型规模的有效控制. 以华北地区某炼油厂的改质及调合过程为例, 分别建立离散时间模型、连续时间模型以及所提出的基于即时交货的离散时间模型, 并结合对 3 个案例的求解, 从不同的角度对 3 种模型进行对比研究. 研究表明, 所提出的模型兼具原离散时间模型和连续时间模型的优势, 能够在不同的情形下保持稳定且优良的性能.

关键词: 调度优化; 离散时间模型; 连续时间模型; 基于即时交货的离散时间模型

中图分类号: TP278

文献标志码: A

Instant delivery based discrete-time model and its application in refinery process scheduling optimization

HAN Biao, JIANG Yong-heng, WANG Ling, HUANG De-xian[†]

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Discrete-time and continuous-time modeling methods for refining process scheduling have limitations in application. In view of this, this paper proposes an instant delivery based discrete-time modeling method. This method generally adopts discrete time representation. Through more detailed description of the relevant parts of the product delivery, the delivery activities can occur within the time interval, which not only ensures accurate description of actual problems, but also achieves effective control of the model scale. Taking the modification and blending process of a refinery in North China as an example, a discrete-time model, a continuous-time model, and an instant delivery based discrete-time model are established, respectively. According to the solution to the three cases, the three models are compared from different perspectives. The research results show that the model proposed in this paper has both the advantages of the original discrete-time model and continuous-time model, and can maintain stable and good performance in different situations.

Keywords: scheduling optimization; discrete-time model; continuous-time model; instant delivery based discrete-time model

0 引 言

炼油工业在我国国民经济与国防建设中占有举足轻重的地位^[1-2]. 近年来, 炼油过程的调度优化越来越受到关注和重视, 相关研究也已取得丰硕成果^[3-9]. 在过程调度优化的建模中, 依据对时间的不同处理方式, 一般可分为离散时间建模方法和连续时间建模方法^[10-12]. 离散时间建模方法是对调度时间的一种离散化近似处理, 按照一定的时间间隔 Δt , 将一个完整的调度周期 T 均匀地划分为 N 个时间片段, 在

每个时间片段内, 认为装置的操作状态恒定不变. 在传统的离散时间建模方法中, 认为装置操作状态的改变及其他某些调度活动(包括成品油的交货)只能在时间片段的端点处发生^[13]. 对于调度周期内订单要求的若干交货时刻, 模型选取的时间片段的长度 Δt 最大也只能是各交货时刻之间时间段长度的最大公因数^[8]. 这样, 即便调度周期内的订单数量 L 不大, 一旦其中某两个订单要求的交货时刻相距比较近, 势必会导致 Δt 取值很小, 从而划分的时间片段数 N 将

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2018-12-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673236, 61273039, 61873328).

责任编辑: 樊治平.

[†]通讯作者. E-mail: huangdx@tsinghua.edu.cn.

非常大,使建立的模型规模庞大,对求解十分不利.显然,传统离散时间模型的规模因订单分布情况的多样性而难以预期,这对模型的实用性而言是一个局限.

连续时间建模方法不要求时间片段均等划分,而是将各个时间片段的长度作为决策变量进行优化,使得调度周期能够以更加灵活的方式进行划分.这样,对于调度周期内的 L 个订单,不论其交货时刻的分布情况如何,只要时间片段数 $N > L$,就能通过恰当地调整各个时间片段的长度来保证各交货时刻恰好处在时间片段的端点处,这在很大程度上减小了时间片段划分个数的不确定性,使模型的规模可以预期.

然而,连续时间建模方法在实际使用中也会存在一些局限^[13-14].首先,该方法在为时间片段的划分提供更大自由度的同时引入了0-1决策变量,使得所建立的连续时间模型通常是一个复杂的混合整数非线性规划(MINLP)问题,这比用离散时间建模方法得到的非线性规划(NLP)模型往往更难求解;其次,该方法虽然使时间片段划分的个数可以预期,但在调度周期内订单数量较多的情况下,时间片段的个数也难免会很多,0-1变量的个数也会随之增加,这对模型的有效求解无疑是一个很大的挑战.

鉴于此,本文提出一种基于即时交货的离散时间建模方法,该方法总体上采用离散时间表示,将炼厂的生产环节和订单交货环节相对独立地对待,在任一时间片段内过程装置以恒定状态生产的同时,允许随时发生成品油的交货活动,即后者不必像装置操作状态的切换那样,仅在时间片段交接处才能发生.这一改进可有效地规避上述两种方法的局限.本文针对华北地区某炼厂的改质及调合过程,分别建立离散时间模型、连续时间模型以及基于即时交货的离散时间模型,并通过案例分析对3种模型加以对比.

1 问题描述

一般来说,炼厂的一次装置(主要包括常减压蒸馏装置)和二次装置(如催化裂化、加氢裂化、延迟焦化等)的操作都会保持在一个相对稳定的状态.本文假设一次、二次装置提供稳定的输出,以改质及成品油调合过程为对象研究调度优化问题,其工艺流程如图1所示.

该部分的生产原料直接来自储罐,是经过炼油厂前一阶段生产出的、具有稳定性质且供应量充足的油品(如图1中虚线).原料经改质装置生产加工后,可获得若干种用于调合成品油的组分油.其中包括3种用于调合汽油的重整汽油组分油(RF)、甲基叔丁基醚汽油组分油(MTBE)、S-Zorb脱硫精制汽油组

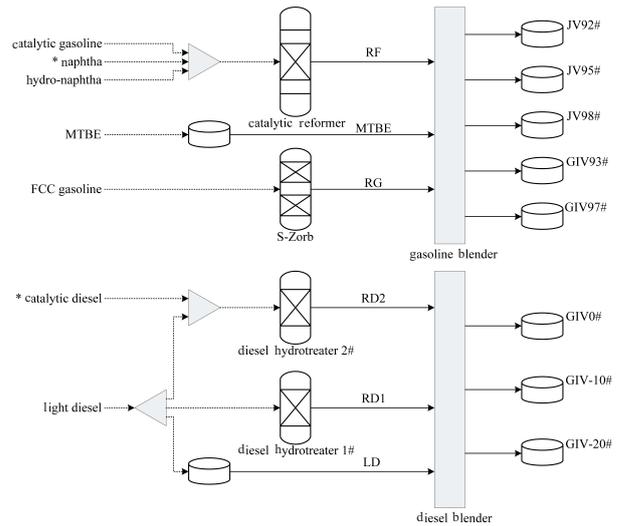


图1 改质及调合过程流程

分油(RG),以及3种用于调合柴油的轻直馏柴油组分油(LD)、精制柴油组分油1(RD1)和精制柴油组分油2(RD2).汽油调合操作和柴油调合操作分别在相应的调合装置中完成,最终生产出5种汽油(JV92#、JV95#、JV98#、GIV93#、GIV97#)和3种柴油(GIV0#、GIV-10#、GIV-20#)作为用于满足客户需求的成品油.所有装置都由输油管线互连以实现油品输送.

调度的任务是确定改质装置、调合装置、存储装置等操作,在满足成品油的市场需求和改质、调合等装置的生产约束条件下实现炼油厂利润的最大化.

2 数学模型

2.1 离散时间调度优化模型

2.1.1 物料平衡相关约束

对于改质装置 u ,在时间片段 n 内其出料流量 $QO_{u,n}^{HUPU}$ 与进料流量 $QI_{u,n}^{HUPU}$ 之间满足如下物料平衡关系:

$$QO_{u,n}^{HUPU} = QI_{u,n}^{HUPU} \cdot Yield_{u,n},$$

$$\forall u \in HUPUs, n \in Ns. \quad (1)$$

其中: $HUPUs$ 为改质装置的集合, Ns 为整个调度周期内所有 N 个时间片段的集合,装置 u 在时间片段 n 内的收率 $Yield_{u,n}$ 可将其表示为关键进料占比与两个关键性质改变量的三元线性回归模型^[13].

对于调合组分油罐 u ,其在时间片段 n 内的出料流量 $QO_{u,n}^{OCTK}$ 、进料流量 $QI_{u,n}^{OCTK}$ 与该时间片段的罐存量 $INV_{u,n}^{OCTK}$ 之间满足下式描述的物料平衡关系:

$$INV_{u,n}^{OCTK} = INV_{u,n-1}^{OCTK} + QI_{u,n}^{OCTK} \cdot \Delta t - QO_{u,n}^{OCTK} \cdot \Delta t, \forall u \in OCTKs, n \in Ns. \quad (2)$$

其中: OCTKs 为 2 个调合组分油罐的集合, Δt 为离散时间建模所选定的时间间隔(时间片段长度), $INV_{u,0}^{OCTK}$ 为第 1 个时间片段初的罐存量。

在时间片段 n 内, 任一时刻某种调合组分油 oc 用于调合各种成品油的流量之和, 等于相应时刻该种组分油输入调合装置的流量 $QI_{oc,n}^{BLD}$, 即

$$\sum_{oc \in Os} Q_{oc,o,n} = QI_{oc,n}^{BLD}, \forall oc \in OCs, n \in Ns. \quad (3)$$

任一时刻调合装置输出某种成品油 o 的流量 $QO_{o,n}^{BLD}$, 等于相应时刻所有用于调合该种成品油的调合组分油流量之和, 即

$$QO_{o,n}^{BLD} = \sum_{oc \in OCs} Q_{oc,o,n}, \forall o \in Os, n \in Ns. \quad (4)$$

其中: Os 为炼油厂生产的 8 种成品油的集合, $Q_{oc,o,n}$ 表示时间片段 n 内每一时刻调合组分油 oc 用于调合成品油 o 的流量。

与调合组分油罐类似, 存放成品油 o 的储罐满足如下物料平衡关系:

$$INV_{o,n}^{OTK} = INV_{o,n-1}^{OTK} + QI_{o,n}^{OTK} \cdot \Delta t - \sum_{l \in Ls} D_{l,o,n}, \forall o \in Os, n \in Ns. \quad (5)$$

其中: Ls 为调度周期内需要交货的所有 L 个订单的集合, $D_{l,o,n}$ 表示第 n 个时间片段的末时刻针对订单 l 所交货的成品油 o 的量, $INV_{o,n}^{OTK}$ 为第 n 个时间片段末、交货后成品油 o 的罐存量, $INV_{o,0}^{OTK}$ 为其在第 1 个时间片段初的罐存量。

用 $R_{l,o}$ 表示订单 $l \in Ls$ 中对成品油 $o \in Os$ 的需求量, $k_l \in Ns$ 表示订单 l 规定的提交时刻为第 k_l 个时间片段的末时刻。本问题中订单的交货规则如下: 要求在每一订单规定的提交时刻一次性完成成品油交货, 其他时刻均不能进行订单交货, 当订单交货量 $D_{l,o,n}$ 小于订单需求 $R_{l,o}$ 时, 会产生缺货惩罚。故有

$$D_{l,o,n} \geq 0, \forall l \in Ls, o \in Os, n \in Ns; \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^{k_l-1} D_{l,o,n} = 0, \forall l \in Ls, o \in Os; \quad (7)$$

$$\sum_{n=k_l+1}^N D_{l,o,n} = 0, \forall l \in Ls, o \in Os; \quad (8)$$

$$\sum_{n \in Ns} D_{l,o,n} \leq R_{l,o}, \forall l \in Ls, o \in Os. \quad (9)$$

除上述各约束之外, 对改质、调合等装置还应有加工能力约束, 即约束其进料流量在一定的范围之内; 对调合装置各进料组分油的使用比例也有上下限约束, 例如调合汽油成品油时, MTBE 的使用比例不能高于 10% 等; 对调合组分油罐及成品油罐还应

有罐存量的约束, 以维持其罐存量在合理范围内。

2.1.2 性质指标相关约束

对改质装置 u 而言, 其在任一时间片段内始终满足如下性质指标的变化关系:

$$PRO_{u,pi,n}^{HUPU} = PRI_{u,pi}^{HUPU} + \Delta PR_{u,pi,n},$$

$$\forall u \in HUPUs, pi \in PIs, n \in Ns. \quad (10)$$

其中: PIs 为本文所考虑的两个关键性质指标的集合, 它们对于不同的装置有不同的具体指代(对于汽油装置, 二者分别指代辛烷值和硫含量; 对于柴油装置, 二者分别指代凝点值与硫含量); $PRI_{u,pi}^{HUPU}$ 与 $PRO_{u,pi,n}^{HUPU}$ 分别表示改质装置 u 进出料的性质指标 pi 的取值, 前者的取值由上游决定, 本模型认为其恒定; $\Delta PR_{u,pi,n}$ 为改质装置对物料性质指标 pi 的改变量, 是表征装置操作状况的操纵变量, 根据实际情况, 对其也有一定的上下限约束。

在进行油品性质的调合计算时, 本文采用线性计算公式, 其中凝点的取值均是依“凝点因子法”计算得到(以保证线性的表达)^[15], 即调合得到的某种成品油 o 的性质指标 pi 的值 $PRI_{oc,pi,n}^{BLD}$, 等于参与其调合的各种组分油的性质指标值 $PRI_{oc,pi,n}^{BLD}$ 按调和比进行加权的平均值。成品油调合的目的是使成品油的性质符合国家规定的质量要求, 故有

$$\begin{aligned} PR_{o,pi}^{\min} \cdot \sum_{oc' \in OCs} Q_{oc',o,n} &\leq \\ \sum_{oc \in OCs} PRI_{oc,pi,n}^{BLD} \cdot Q_{oc,o,n} &\leq \\ PR_{o,pi}^{\max} \cdot \sum_{oc' \in OCs} Q_{oc',o,n}, & \\ \forall o \in Os, pi \in PIs, n \in Ns. & \quad (11) \end{aligned}$$

2.1.3 目标函数

本调度优化问题的目标是实现炼厂利润最大化, 故目标函数为

$$f = f_{income}^{DLVR} - (f_{material}^{HUPU} + f_{material}^{OCTK}) - f_{operation}^{HUPU} - (f_{storage}^{OCTK} + f_{storage}^{OTK}) - f_{punishment}^{DLVR}, \quad (12)$$

其中: f_{income}^{DLVR} 为成品油销售收入, $(f_{material}^{HUPU} + f_{material}^{OCTK})$ 为改质装置及调合组分油罐的原料成本, 分别根据成品油和原料的价格进行核算; $f_{operation}^{HUPU}$ 表示改质装置的操作成本, 采用文献[13]中的线性回归模型; $(f_{storage}^{OCTK} + f_{storage}^{OTK})$ 表示调合组分油罐及成品油罐的库存成本, 其与罐存量及库存时间成正比; $f_{punishment}^{DLVR}$ 表示未能按时满足订单需求所产生的缺货惩罚, 与缺货量成正比。

2.2 连续时间调度优化模型

2.2.1 连续时间模型的时间表示

以 Δt_n 表示第 n 个时间片段的长度, 则所有 N 个时间片段的长度之和等于整个调度周期 T , 即

$$\sum_{n \in N_s} \Delta t_n = T. \quad (13)$$

由于过短的时间片段在实际操作中可能会引起装置操作模式的频繁变动, 应要求任一时间片段的长度不能小于固定值 Δt_{\min} , 即

$$\Delta t_n \geq \Delta t_{\min}, \forall n \in N_s. \quad (14)$$

第 n 个时间片段的末时刻记为 t_n , 其与时间片段长度 Δt_n 之间满足如下关系:

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t_n, \forall n \in N_s, \quad (15)$$

其中默认调度周期的起始时刻 $t_0 = 0$.

2.2.2 连续时间模型生产环节相关约束

在连续时间模型中, 改质装置与调合装置的物料平衡及性质指标变化关系均与离散时间模型中相同, 即式(1)、(3)、(4)、(11)依然适用. 由于连续时间模型允许调度周期不均等地划分, 其各个时间片段的长度为待优化的变量, 从而与时间相关的模型式在表达上与离散时间模型有所不同, 因此, 对于调合组分油罐与成品油罐的物料平衡约束式(2)和(5), 在这里应将其中的固定参数 Δt 替换为决策变量 Δt_n , 相应地, 目标函数中库存成本的核算式也应随之改变.

2.2.3 连续时间模型交货环节相关约束

在连续时间模型中, 本文用 $kt_l \in [0, T]$ 来表示订单 l 规定的具体交货时刻, 同时引入 0-1 决策变量 $yd_{l,n}$ 来表征 kt_l 是否处在第 n 个时间片段的末时刻 (即时刻 t_n), 若是则取 1, 否则取 0. 于是, 离散时间模型中用来表示订单交货量的决策变量 $D_{l,o,n}$ 便可缩减一维写成 $D_{l,o}$, 其与 $yd_{l,n}$ 联合在一起的乘积 $D_{l,o} \cdot yd_{l,n}$ 可以表达第 n 个时间片段的末时刻针对订单 l 所交货的成品油 o 的量. 这样, 订单交货环节的相关模型式与离散时间模型也有所不同:

1) 离散时间模型中的式(6)表示订单交货量取值的非负性, 这里应为

$$D_{l,o} \geq 0, \forall l \in L_s, o \in O_s. \quad (16)$$

2) 离散时间模型中的式(7)和(8)是对订单交货规则的刻画, 即每一订单只能在规定的时刻一次性完成交货, 其他时间不能进行交货, 且订单交货的时刻须为某一时间片段的末时刻, 这在本模型中应写为以下形式:

$$\sum_{n \in N_s} yd_{l,n} = 1, \forall l \in L_s; \quad (17)$$

$$t_n \cdot yd_{l,n} = kt_l \cdot yd_{l,n}, \forall l \in L_s, n \in N_s. \quad (18)$$

3) 离散时间模型中的式(9)表示订单的交货量不大于需求量, 这里应为

$$D_{l,o} \leq R_{l,o}, \forall l \in L_s, o \in O_s. \quad (19)$$

除此之外, 与交货环节相关的、凡含有变量 $D_{l,o,n}$ 的模型式, 应将其中的变量 $D_{l,o,n}$ 替换为 $D_{l,o} \cdot yd_{l,n}$.

2.3 基于即时交货的离散时间调度优化模型

本文提出基于即时交货的离散时间模型, 其在总体的时间划分方式上采用等间隔划分, 对各生产环节的描述也与原离散时间模型相同. 在对订单交货环节的描述上, 承认时间的连续性, 用 $kt_l \in [0, T]$ 来表示订单 l 规定的具体交货时刻, 并允许其处在时间片段的端点处或内部. 即在本模型中, 生产相关的环节以均等划分的时间片段为操作状态切换节奏, 而成品油的交货则依据订单实际要求的时刻随时进行, 并不要求二者节奏一致. 这样, 调度周期的划分便有了很大自由度, 不再依赖订单交货时刻的分布情况. 对本模型而言, 成品油罐存量的减少便不再仅发生在时间片段的端点处, 因此需要对其进一步刻画, 以表达其在调度周期任一连续时刻的状态, 相应的库存成本等也应重新核算. 为了建模方便, 需要对订单的排序以及交货时刻的表达做如下预处理:

1) 将订单按其交货时间先后排序, 即使排序后 $\{kt_l, \forall l\}$ 中的各元素为升序排列, $\{R_{l,o}, \forall l, o\}$ 中的各行为相应订单的需求量.

2) 将各订单的交货时刻 kt_l 用 0-1 参量 $yd_{l,n}$ 与实参量 Δkt_l 联合表达, 其中 $yd_{l,n}$ 表示订单 l 规定的交货时刻是否处于事先均等划分的第 n 个时间片段内 (若是则取 1, 否则为 0), $\Delta kt_l \in [0, \Delta t]$ 表示该交货时刻距离其所在时间片段的初时刻 (也即前一时间片段末时刻) 的时长, 即有

$$kt_l = (n - 1) \cdot \Delta t + \Delta kt_l, \forall yd_{l,n} = 1. \quad (20)$$

如图 2 所示的例子, 其中 $yd_{1,2} = yd_{2,2} = yd_{3,3} = 1$.

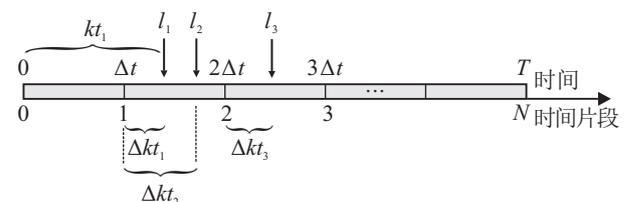


图 2 基于即时交货的离散时间建模方法示意

在原离散时间模型中, 以 $D_{l,o,n}$ 来表示订单交货

量这一决策变量,借鉴连续时间建模中的方法,本模型中也将其缩减一维写成 $D_{l,o}$, 并以与 $yd_{l,n}$ 联合在一起的乘积 $D_{l,o} \cdot yd_{l,n}$ 来表达在第 n 个时间片段内某一连续时刻针对订单 l 所交货的成品油 o 的量。

由于上述描述方式的变化,需要对成品油罐与交货环节的物料平衡相关约束以及成品油罐的库存成本核算式进行相应改动,具体如下。

2.3.1 成品油罐的物料平衡关系

根据上述约定,对成品油罐的物料平衡关系需做如下更改和补充:

1) 原离散时间模型中成品油储罐在每个时间片段末时刻、交货后的罐存量的平衡关系应改为

$$INV_{o,n}^{OTK} = INV_{o,n-1}^{OTK} + QI_{o,n}^{OTK} \cdot \Delta t - \sum_{l \in L_s} D_{l,o} \cdot yd_{l,n}, \forall o \in O_s, n \in N_s, \quad (21)$$

其中的 $INV_{o,n}^{OTK}$ 在本模型中仍表示第 n 个时间片段末、交货后成品油 o 的罐存量。

2) 原离散时间模型中对成品油罐罐存量的限制,使罐存量的最大值不高于上限、最小值不低于下限,现改为

$$INV_o^{OTK, \min} \leq INV_{o,n}^{OTK} \leq INV_o^{OTK, \max}, \quad \forall o \in O_s, n \in N_s. \quad (22)$$

即此处仅约束了每一时间片段末时刻、交货后的罐存量,这对原离散时间模型而言是不够的(因为这样仅约束了罐存量的各极小值,参考图3(a)),对本模型而言更是不够。因为在本模型中,罐存量的最大值与最小值均有可能出现在时间片段内的某些时刻(如图3(c)),而时间片段端点处的罐存量可能仅仅是一个中间值,因此需要补充一些更加细致的约束。

3) 如果订单 l 在第 n 个时间片段内的某时刻进行交货,则定义变量 $INV_{o,n,l}^{OTK, \text{delivery}}$ 来表示相应时刻、交货后成品油 o 的罐存量,于是参考图3(c)可补充如下模型式:

$$INV_{o,n,l}^{OTK, \text{delivery}} = INV_{o,n-1}^{OTK} + QI_{o,n}^{OTK} \cdot \Delta kt_l - \sum_{l' \in L_s} D_{l',o} \cdot yd_{l',n}, \quad \forall o \in O_s, yd_{l,n} = 1. \quad (23)$$

4) 一般情况下,成品油罐罐存量的最小值一定出现在某次交货后的时刻,最大值一定出现在某次交货前的时刻,因此,需要针对变量 $INV_{o,n,l}^{OTK, \text{delivery}}$ 补充如下约束:

$$INV_o^{OTK, \min} + D_{l,o} \leq$$

$$INV_{o,n,l}^{OTK, \text{delivery}} + D_{l,o} \leq INV_o^{OTK, \max}, \quad \forall o \in O_s, yd_{l,n} = 1. \quad (24)$$

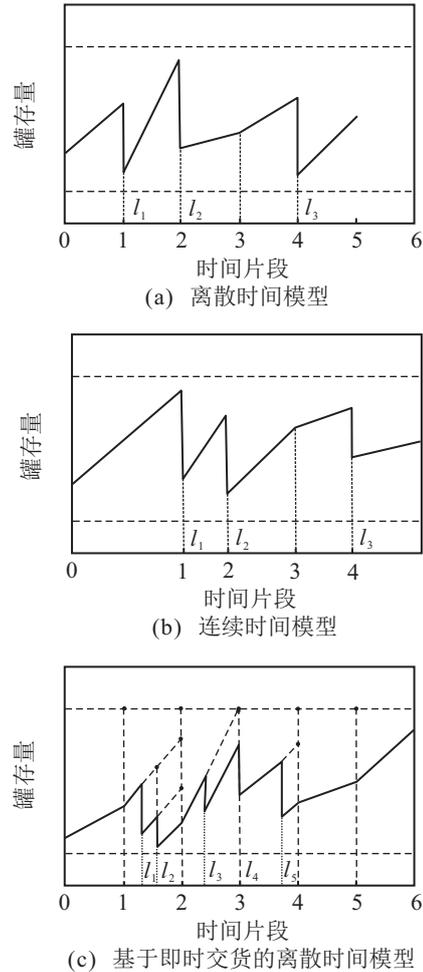


图3 3种建模方法中成品油罐罐存量的变化规律示意

2.3.2 交货环节的相关约束

由于前述对交货环节描述方式的变化,原离散时间模型中的式(6)显然应改为

$$D_{l,o} \geq 0, \forall l \in L_s, o \in O_s. \quad (25)$$

式(7)和(8)是对交货规则的描述,在本模型中不再需要,而式(9)应改为

$$D_{l,o} \leq R_{l,o}, \forall l \in L_s, o \in O_s. \quad (26)$$

2.3.3 成品油罐的库存成本核算

允许交货时刻处在时间片段的端点或内部,使得成品油罐罐存量的变化规律(图3(c))与原离散时间模型(图3(a))及连续时间模型(图3(b))不同,从而库存成本的表达也发生了改变。本模型中成品油罐的库存成本应为

$$f_{\text{storage}}^{OTK} = \sum_{n \in N_s} \sum_{o \in O_s} \alpha \cdot \left[\left(INV_{o,n-1}^{OTK} + INV_{o,n}^{OTK} + \sum_{l \in L_s} D_{l,o} \cdot yd_{l,n} \right) \cdot \Delta t / 2 - \right]$$

$$\sum_{l \in L_s} D_{l,o} \cdot y_{d_{l,n}} \cdot (\Delta t - \Delta kt_l) \quad (27)$$

3 案例研究

这里通过3个案例对上述3种模型的性能进行比较研究. 3个案例均是在 Intel Xeon CPU E5-2609 v2@2.5 GHz 2.5 GHz, 32 GB 的计算机上、Windows 系统下的 GAMS 软件中进行求解, 求解器均采用

DICOPT^[16], 停止规则采用其默认停止规则(即 NLP 解恶化时停止).

3.1 案例1

考虑调度周期 $T = 72$ h 的一个调度案例, 调度周期内共有两个订单, 订单要求的交货时刻和各种成品油的需求量如表1所示.

表1 案例1的订单信息

订单	交货时刻	汽油/t					柴油/t		
		JV92#	JV95#	JV98#	GIV93#	GIV97#	GIV0#	GIV-10#	GIV-20#
l_1	36 h 末	800	700	600	550	400	100	300	100
l_2	66 h 末	100	200	300	0	400	800	950	700

对于本案例, 采用原离散时间模型至少需要将调度周期等分为12个时间片段, 以保证两个交货时刻恰在时间片段的端点处; 而采用连续时间模型与本文所提的基于即时交货的离散时间模型, 则在时间片段的划分上均有更大的自由度. 本案例中, 为了在完全相同的条件下研究各个模型的求解效果, 选定3种模型的时间片段总数均为 $N = 12$, 并在连续时间模型中令最小时间片段长度 $\Delta t_{\min} = 6$ h (从而该模型也必将把调度周期均等划分), 以使3种模型描述的是完全等价的问题.

3个模型的统计信息及求解情况如表2所示. 可以看到: 针对完全相同的一个调度优化问题, 本文所提出的模型无论是变量个数还是约束个数, 均少于原离散时间模型和连续时间模型, 求解时间也占优势; 3种模型均得到局部最优解, 本文所提出模型的目标值比原离散时间模型高约1%, 与连续时间模型相近, 仅相差0.0018%; 连续时间模型虽然在本案例中所得目标值最高, 但由于其引入了24个0-1离散变量, 成为MINLP问题, 增大了求解的困难.

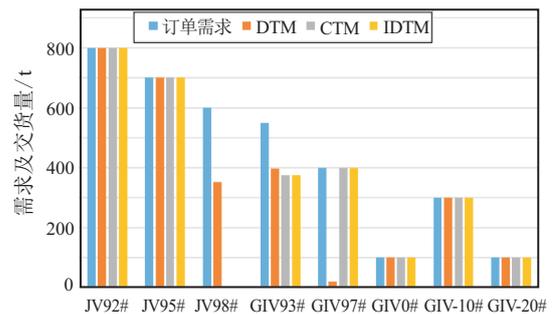
表2 案例1各模型统计信息及求解结果

	DTM	CTM	IDTM
时间片段数	12	12	12
变量数	2 178	2 051	2 018
离散变量数	0	24	0
约束数	3 776	3 619	3 616
求解时间/s	4.743	5.257	3.620
目标值/ 10^7 元	5.580	5.642	5.641

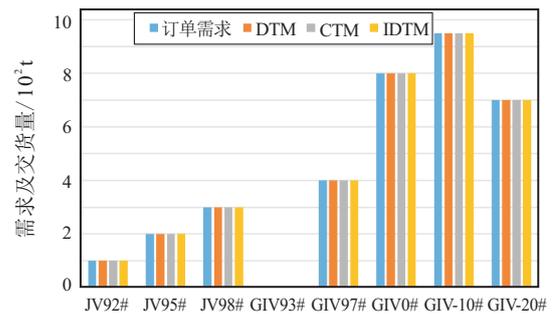
注: 表中DTM、CTM、IDTM分别指代原离散时间模型、连续时间模型以及本文提出的基于即时交货的离散时间模型, 下文同.

图4将本案例中两个订单对各成品油的需求量与3个模型求解得到的交货量进行了对比. 从图4中可以看到, 对于“供不应求”的3种油品JV98#、GIV93#和GIV97#, 不同模型给出了不同的交货方案,

其中连续时间模型与本文所提出模型给出的交货方案完全相同, 显然该方案比原离散时间模型所给出的方案更优, 这不仅验证了本文提出的改进模型的有效性, 更说明其能在不引入0-1变量的前提下达到连续时间模型的优化效果, 其兼具了其他两种模型的优势.



(a) 订单 l_1 的需求与各模型交货情况



(b) 订单 l_2 的需求与各模型交货情况

图4 案例1订单需求与各模型交货情况对比

3.2 案例2

本案例的调度周期、订单数与各成品油的订单需求与案例1完全相同, 只是订单 l_1 的交货时刻变为第38 h末, 订单 l_2 的交货时刻变为第69 h末. 在本案例中, 如果采用原离散时间建模方法, 则至少需将调度周期等分为72个时间片段; 而采用连续时间和基于即时交货的离散时间建模方法, 划分的时间片段数可进行适当选取, 这里仍选取 $N = 12$, 得到了3个模

型的统计信息和求解结果.

从求解情况来看, 仅是订单的交货时间稍作变化, 导致原离散时间模型划分出更多的时间片段(72), 以更多的变量数(12 978)和约束数(22 376)来描述案例, 庞大的规模使其求解时间(219.619 s)大大增加, 优化目标(9.898×10^7)值也差强人意. 而连续时间模型

和本文所提出的模型却仍能在划分较少的时间片段(均为12)的前提下, 以更少的变量数(2051、2018)、约束数(3 619、3 616)和更快的求解时间(3.931 s、3.759 s), 给出更好的优化目标值(10.038×10^7 、 9.921×10^7). 3个模型对调度周期的划分情况示于图5.

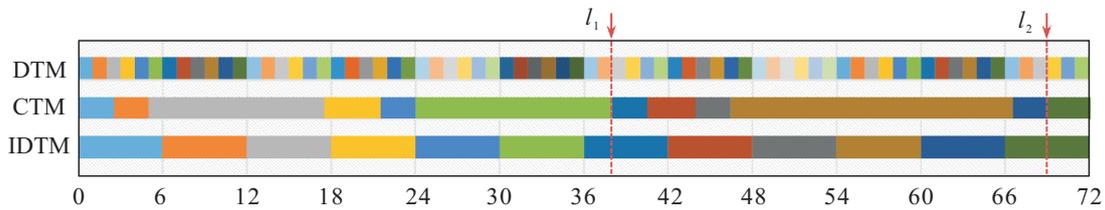


图5 3种模型对调度周期的划分情况(案例2)

3.3 案例3

本案例考查调度周期内订单数量较多的情况. 案例的调度周期仍为72h, 在调度周期内共有18

个订单, 其交货时刻的分布情况如图6所示, 各订单对不同成品油的需求各不相同.

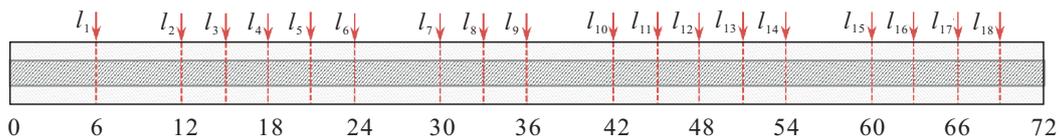


图6 案例3各订单交货时刻分布情况

易知, 对于本案例的情况, 原离散时间模型至少需要划分24个时间片段, 连续时间模型至少需要划分19个时间片段, 而基于即时交货的离散时间模型的时间片段划分则依然自由. 这里, 对每一种模型分别采用两种不同的时间片段划分方式进行求解. 得到的模型统计信息及求解结果表明, 对原离散时间模型而言, 当划分的时间片段数增加一倍时, 模型的变量数和约束数也成倍增加, 求解的时间花费大幅增加, 求解得到的目标值却有所减小. 对连续时间模型而言, 如果取其时间片段数为最小值19, 则模型的变量数和约束数均小于离散时间模型, 求解用时也较少, 但求解结果却不如离散时间模型; 如果将其划分为24个时间片段, 则尽管优化目标值有所提升, 却仍不及离散时间模型, 且求解时间已与离散时间模型相当, 更多0-1决策变量的引入也使得求解情况对变量初始取值更加依赖. 这说明, 对于类似本案例的调度周期内订单数量较多的情况, 连续时间模型的优势已不再明显, 这与文献[13]中得到的结论相吻合. 然而对于这种情况, 本文所提出的基于即时交货的离散时间模型不但仍能保持性能稳定, 而且由于对问题描述的灵活性, 其优势也愈加突出. 当划分12个时间片段时, 该模型已能以最少的变量和约束数以及最短的求

解时间得到最高的优化目标值, 当适当调整划分的时间片段数时, 该模型还能以更加简化的模型给出更好的优化结果.

4 结论

炼油过程的离散时间调度优化模型对实际问题的描述能力有限, 使其规模因订单情况的多样性而难以预期; 连续时间模型对实际问题的描述更加灵活和准确, 其规模也可以预期, 但由于0-1决策变量的引入而成为MINLP问题, 求解难度较大, 在订单数量较多的情况下更不具优势. 鉴于此, 本文提出了一种基于即时交货的离散时间建模方法. 该方法总体上采用离散时间表示, 通过对交货环节相关的部分更加细致的描述, 使得交货活动能够在时间片段内部发生, 既保证了对实际问题的准确刻画, 又实现了对模型规模的有效控制. 针对华北地区某炼厂的改质及调合过程, 分别建立了离散时间模型、连续时间模型以及本文提出的改进模型, 并通过3个案例进行对比研究. 研究表明, 本文所提出的基于即时交货的离散时间模型兼具了原离散时间模型和连续时间模型的优势, 能够在不同的情形下, 尤其是调度周期内订单分布复杂的情况下, 保持稳定且优良的性能.

参考文献(References)

- [1] 林世雄. 石油炼制工程[M]. 第3版. 北京: 石油工业出版社, 2000: 1-4.
(Lin S X. Petroleum refining engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 1-4.)
- [2] 金云, 费华伟. 中国炼油工业现状与发展趋势[J]. 国际石油经济, 2017, 25(5): 61-66.
(Jin Y, Fei H W. Status quo and outlook of China's oil refining industry[J]. International Petroleum Economics, 2017, 25(5): 61-66.)
- [3] Pinto J M, Joly M, Moro L F L. Planning and scheduling models for refinery operations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 24(9/10): 2259-2276.
- [4] Jia Z, Ierapetritou M. Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(6/7): 1001-1019.
- [5] Luo C, Rong G. Hierarchical approach for short-term scheduling in refineries[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(11): 3656-3668.
- [6] Mouret S, Grossmann I E, Pectiaux P. A new Lagrangian decomposition approach applied to the integration of refinery planning and crude-oil scheduling[J]. Computers & Chemical engineering, 2011, 35(12): 2750-2766.
- [7] 高小永. 基于优化控制的炼油过程调度优化方法研究[D]. 北京: 清华大学自动化系, 2014.
(Gao X Y. Studies on refinery scheduling optimization methods based on optimal process control[D]. Beijing: Department of Automation, Tsinghua University, 2014.)
- [8] Shi L, Jiang Y, Wang L, et al. Refinery production scheduling involving operational transitions of mode switching under predictive control system[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(19): 8155-8170.
- [9] 张璐. 炼油厂全流程生产调度的模型重构和两层算法研究[D]. 北京: 清华大学自动化系, 2016.
(Zhang L. Research on the reformulation and two-level algorithm for overall refinery production scheduling[D]. Beijing: Department of Automation, Tsinghua University, 2016.)
- [10] Floudas C A, Lin X. Mixed integer linear programming in process scheduling: Modeling, algorithms, and applications[J]. Annals of Operations Research, 2005, 139(1): 131-162.
- [11] Stefansson H, Sigmarsdottir S, Jensson P, et al. Discrete and continuous time representations and mathematical models for large production scheduling problems: A case study from the pharmaceutical industry[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 215(2): 383-392.
- [12] Floudas C A, Lin X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(11): 2109-2129.
- [13] 汝楠. 考虑变化进料和操作条件的炼油生产过程调度优化[D]. 北京: 清华大学自动化系, 2017.
(Ru N. Research on refinery operation scheduling considering both varying feedstocks and operating conditions[D]. Beijing: Department of Automation, Tsinghua University, 2017.)
- [14] 施磊. 考虑装置模式切换过程的炼油厂全厂调度建模和分解算法[D]. 北京: 清华大学自动化系, 2015.
(Shi L. Studies on refinery scheduling modeling and decomposition methods considering mode switching of units[D]. Beijing: Department of Automation, Tsinghua University, 2015.)
- [15] 侯祥麟. 中国炼油技术[M]. 第2版. 北京: 中国石化出版社, 1991: 558-584.
(Hou X L. China refining technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Petrochemical Press, 1991: 558-584.)
- [16] Grossmann I E, Viswanathan J, Vecchiotti A, et al. GAMS/DICOPT: A discrete continuous optimization package[J]. GAMS Corporation Inc, 2002, 37: 55.

作者简介

韩彪(1994—), 男, 博士生, 从事计划与调度优化的研究, E-mail: hanb16@mails.tsinghua.edu.cn;

江永亨(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂过程建模、调度与优化、计算机集成控制、供应链管理、智能驾驶等研究, E-mail: jiangyh@tsinghua.edu.cn;

王凌(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化与生产调度等研究, E-mail: wangling@tsinghua.edu.cn;

黄德先(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事流程工业过程建模理论与技术、生产过程先进控制理论与技术、流程工业综合自动化等研究, E-mail: huangdx@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)