

基于事件逻辑的炼油企业动态调度系统

李歧强, 李明, 张平

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对炼油生产动态调度问题, 开发了基于事件逻辑的调度优化系统. 在分析大量实际生产事件和调度专家处理经验的基础上定义动态事件, 生成事件逻辑. 将事件逻辑与广义析取规划相结合, 建立了基于事件逻辑的动态调度模型. 基于事件逻辑的动态调度建模方法增加了动态调度模型生成的快速性和灵活性, 在保证调度优化性的同时获得较好的调度实时性. 最后, 以某炼油厂“原油供应不足”事件为例进行仿真实验. 结果表明, 基于事件逻辑的动态调度系统是可行、有效的.

关键词: 事件逻辑; 炼油过程; 动态调度; 调度系统; 广义析取规划

中图分类号: TB 114.1

文献标识码: A

Dynamic Scheduling System Based on Event Logic for Oil Refineries

LI Qiqiang, LI Ming, ZHANG Ping

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: A dynamic scheduling system for oil refineries was developed based on event logic. Dynamic events were defined and corresponding event logics were generated by analyzing practical production event characteristics and event treatment experiences of scheduling experts. Based on event logic and generalized disjunctive programming, a dynamic scheduling model was constructed. The event logic based modeling method can raise the rapidity and flexibility to formulate dynamic scheduling models, and can give a better solution to meet real-time requirements and optimization performance. The developed dynamic scheduling system was used to address the scheduling problem of an oil refinery with an event of crude oil shortage. Numerical results show that the event logic-based dynamic scheduling system is feasible and effective.

Key words: event logic; oil refinery; dynamic scheduling;

scheduling system; generalized disjunctive programming

石油炼制行业是国民经济的支柱产业, 其动态调度可为实际生产过程带来明显的经济效益^[1-2]. 目前, 动态调度的主要方法包括数学规划方法、启发式方法和基于规则推理的人工智能方法.

数学规划方法在定义调度问题的基础上建立调度模型, 并运用一定的调度算法进行求解. 混合整数规划是目前常用的调度建模方法^[3-4]. 数学规划方法能够在理论上提供凸优化问题的最优解, 即使没达到最优解, 也可获得最优解的界, 并能对调度方案做出质量评价, 能较好地满足调度决策的优化性要求. 但由于模型规模和求解的限制, 往往不能满足调度实时性要求.

启发式方法根据一定的规则和策略来确定生产过程的下一步操作, 直观、简单和实用, 花费较少时间即可得到调度问题的可行解, 因此, 尤其适用于动态问题的求解^[5-6]. 启发式方法虽然可以在一定程度上提高调度的实时性, 但优化性能较差, 难以全局的观点进行寻优, 较难产生令决策者满意的方案.

面对启发式方法的不足, 人们借助人工智能方法寻求动态调度问题的有效解决途径. 基于领域知识的获取和推理, 借助软件技术, 设计实现辅助决策智能专家系统, 虽然能生成比单纯启发式方法更好的调度方案^[7-8], 但其优化性依然难以保证, 专家系统的开发、验证、维护和修改也具有一定的难度.

针对既有研究成果中的上述不足, 如何根据炼油过程的实时性要求以及全局优化与局部调整相结合的特点, 有效利用数学规划、启发式和人工智能方法, 在结合一定经验规则的基础上进行数学优化, 找到优化性和实时性之间令人满意的平衡点, 是解决炼油厂动态调度优化系统开发和应用困难的关键问

收稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z157)

作者简介: 李歧强(1964—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为生产调度与能量系统优化. E-mail: qqli@sdu.edu.cn

题.针对这一问题,笔者提出了一种基于事件逻辑的动态调度优化建模方法,在此基础上,开发了炼油企业动态调度系统,最后对该系统进行了检验.

1 基于事件逻辑的动态调度建模方法

在炼油厂实际生产过程中,经常会遇到各种各样的情况,如原料短缺、停电、装置故障等,使得原调度方案无法继续执行下去,需要重新建立调度模型,重新进行调度.基于事件逻辑的动态调度建模方法是一种基于动态事件的反应式重调度方法,建模过程如图 1 所示.

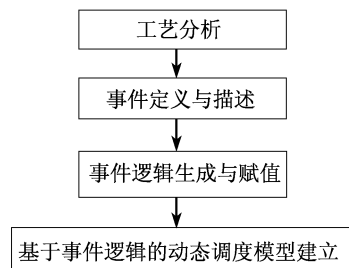


图 1 基于事件逻辑的调度建模方法

Fig.1 Event logic based scheduling modeling method

1.1 工艺分析

(1) 分析炼油生产中引起动态调度的大量生产事件,获得这些事件的一般特性,作为事件定义的基础.

(2) 分析炼油生产流程,获得生产装置的工艺连接、生产装置的运行参数(加工能力、收率、能源消耗率和生产成本等)和物料的生产信息(消耗量、产出量、库存量和存储费用等),作为调度建模的基础.

1.2 事件定义与描述

提取动态事件的一般特性,定义动态事件,并以此为基础描述各种具体事件的进行.

1.2.1 事件定义

事件定义为包含状态、属性、行为和需求的四元组集合形式.其中,状态表示事件是否发生;属性包括事件发生时间、对象、影响时间范围和影响装置范围,分别表示事件在何时发生,发生在哪个装置、影响何种物料,从事件发生到消除所需要的时间,响应事件所需调整生产运行的生产装置;行为表示调度人员为处理事件而采取的调整措施;需求表示在事件影响时间内对事件相关物料的购买量、销售量和库存量的要求.

1.2.2 事件描述

事件描述是调度专家在获取全厂生产状况的基

础上,根据事件定义和调度经验规则,对具体事件处理的定量描述:

- 确定事件的影响时间和影响范围;
- 划分调度时段;
- 给出事件处理措施;
- 给出事件处理目标.

1.3 事件逻辑的表达与动态调度模型的生成

首先由事件定义生成相应的事件逻辑,进而将事件逻辑与一般调度模型结合建立基于事件逻辑的动态调度模型,再根据事件描述对事件逻辑赋值,最后通过动态事件的触发对基于事件逻辑的动态调度模型进行简化,形成响应该事件的调度优化模型,实现动态调度.

2 基于事件逻辑的动态调度模型

2.1 炼油生产流程的简化

通过对炼油厂生产流程的合理简化,得到了一个较为实用的生产流程模型,包括生产装置、罐区、虚拟罐区、混合分流器和管线.

生产装置即炼油厂的油品炼制装置,如常减压、催化裂化、焦化等装置.

罐区是存储某一种或几种物料的储罐的集合.

虚拟罐区是为了方便处理不可存储物料而引入的一种虚拟装置,在实际的炼油企业中并不存在,如氢气罐区和瓦斯罐区.

混合分流器是物料的混合和分流装置.

管线是装置间物料的流通渠道.

2.2 基于事件逻辑的动态调度模型

为体现动态事件的特点和调度专家的经验规则,采用广义析取规划^[9]建立基于事件逻辑的动态调度模型.

2.2.1 事件逻辑的生成

由事件的状态生成事件触发逻辑 E_s ,表示事件集合 S 中第 s 个事件是否触发,通过 E_s 对其他事件逻辑赋值;由事件的影响时间范围确定动态调度时段;由事件的影响装置范围生成事件范围逻辑 ETI_{it} ,表示动态事件的影响范围,下标 i 和 t 分别代表第 i 套生产装置和第 t 段调度周期;由事件的行为生成装置的生产调整逻辑 EC_{it} 和物料平衡调整逻辑 ES_{jt} ,它们分别表示对生产装置、库存或工艺连接等的调整,其中下标 j 代表第 j 种生产物料.

2.2.2 事件逻辑的赋值

基于事件定义,根据事件状态对事件逻辑进行赋

值,如式(1)所示,其中, \mathcal{T} 为调度周期集合; I 为生产装置集合; I^1 为事件影响装置集合; I^c 为工艺调整装置集合; \mathcal{J} 为生产物料集合; \mathcal{J}^1 为事件影响物料集合.

$$\left[\begin{array}{l} E_s \\ ETI_{it} = \text{True} \\ \forall i \in I^1, t \in \mathcal{T} \\ ETI_{it} = \text{False} \\ \forall i \in I/I^1, t \in \mathcal{T} \\ EC_{it} = \text{True} \\ \forall i \in I^c, t \in \mathcal{T} \\ EC_{it} = \text{False} \\ \forall i \in I/I^c, t \in \mathcal{T} \\ ES_{jt} = \text{True} \\ \forall j \in \mathcal{J}^1, t \in \mathcal{T} \\ ES_{jt} = \text{False} \\ \forall j \in \mathcal{J}/\mathcal{J}^1, t \in \mathcal{T} \end{array} \right], \quad \forall s \in S \quad (1)$$

从式(1)可以看出,通过这些逻辑赋值,主要改变模型中的变量集合.

2.2.3 基于事件逻辑的动态调度模型

基于文献[10]的一般动态调度模型,采用分层嵌套的析取表达建立基于事件逻辑的动态调度模型,模型目标为产品产值最大化,如式(2)所示,其中 \mathcal{QJ} 为产品集合, $\mathcal{OT}(j)$ 为产出物料 j 的装置集合, μ_{jt} 为调度周期 t 产品 j 的单位价格,变量 XO_{jit} 表示调度周期 t 装置 i 产出物料 j 的量.析取式(3),(4)将事件逻辑 ETI_{it} 和 EC_{it} 与装置模型约束(包括加工能力约束、物料产出约束和输入输出物料平衡约束)相结合表达事件影响范围和装置的生产调整对调度的影响,其中 $\mathcal{EK}(i)$ 为装置 i 消耗物料的集合, $\mathcal{EO}(i)$ 为装置 i 产出物料的集合, c_i^u 和 c_i^l 分别为装置 i 最大和最小加工能力, β_{ji} 为装置 i 物料 j 的收率, Y_{it} 为表示调度周期 t 装置 i 启停的0/1变量,变量 XC_{it} 表示调度周期 t 装置 i 的加工量,变量 XC_{jit} 表示调度周期 t 装置 i 消耗物料 j 的量.析取式(3)表示事件影响范围内调整的装置和相应物料模型约束,并对变量 Y_{it} , XC_{it} 和 β_{ji} 进行限制,参数 ct_i^u , ct_i^l 和 o_i^u , o_i^l 分别表达了调度人员对生产装置加工量和物料收率的调整要求.析取式(4)表示事件影响范围内无需调整的装置和相应物料模型约束.析取式(5),(6)将事件逻辑 ES_{jt} 与物料平衡约束相结合,分别表示事件影响范围内受事件影响物料和不受事件影响物料的物料平衡,其中 $\mathcal{AN}(j)$ 为消耗物料 j 的装置集合,变量 I_{jt} 表示调度周期 t 物料 j 的库存量,变量 P_{jt} 表示调度周期 t 物料 j 的购入

量,变量 S_{jt} 表示调度周期 t 物料 j 的销售量.析取式(3),(5)中集合 $\mathcal{EK}(i)$, $\mathcal{EO}(i)$, $\mathcal{OT}(j)$, $\mathcal{AN}(j)$ 是生产装置和物料存储调整后表达物料消耗和生产关系的集合,反映了新的工艺连接.式(7)为调度时域内市场供需能力和库存能力约束,不受事件逻辑影响,其中 \mathcal{RJ} 为原料集合, sc_j^u 和 sc_j^l 分别为物料 j 库存量的上限和下限, rb_{jt}^u 和 rb_{jt}^l 分别为调度周期 t 物料 j 购入量的上限和下限, ps_{jt}^u 和 ps_{jt}^l 分别为调度周期 t 物料 j 销售量的上限和下限.

$$\max Z = \sum_{i \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{OT}(j)} \sum_{j \in \mathcal{QJ}} \mu_{jt} XO_{jit} \quad (2)$$

$$\bigvee_{\substack{i \in I^c \\ t \in \mathcal{T}}} \left[\begin{array}{l} ETI_{it} \\ EC_{it} \\ ct_i^u Y_{it} \leq XC_{it} \leq ct_i^l Y_{it} \\ XO_{jit} = \beta_{ji} XC_{it}, j \in \mathcal{EK}(i) \\ XC_{it} = \sum_{j \in \mathcal{EK}(i)} XC_{jit} = \sum_{j \in \mathcal{EO}(i)} XO_{jit} \\ o_i^l \leq \beta_{ji} \leq o_i^u, j \in \mathcal{EO}(i) \\ Y_{it} = 1 \text{ or } 0 \end{array} \right] \quad (3)$$

$$\bigvee_{\substack{i \in I^1/I^c \\ t \in \mathcal{T}}} \left[\begin{array}{l} ETI_{it} \\ \neg EC_{it} \\ c_i^u Y_{it} \leq XC_{it} \leq c_i^l Y_{it} \\ XO_{jit} = \beta_{ji} XC_{it}, j \in \mathcal{EO}(i) \\ XC_{it} = \sum_{j \in \mathcal{EK}(i)} XC_{jit} = \sum_{j \in \mathcal{EO}(i)} XO_{jit} \end{array} \right] \quad (4)$$

$$\bigvee_{\substack{j \in \mathcal{J}^1 \\ t \in \mathcal{T}}} \left[\begin{array}{l} ES_{jt} \\ I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{i \in \mathcal{OT}(j)} XO_{jit} + P_{jt} - \sum_{i \in \mathcal{AN}(j)} XC_{jit} - S_{jt} \end{array} \right] \quad (5)$$

$$\bigvee_{\substack{j \in \mathcal{J}/\mathcal{J}^1 \\ t \in \mathcal{T}}} \left[\begin{array}{l} \neg ES_{jt} \\ I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{i \in \mathcal{OT}(j)} XO_{jit} + P_{jt} - \sum_{i \in \mathcal{AN}(j)} XC_{jit} - S_{jt} \end{array} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} rb_{jt}^l &\leq P_{jt} \leq rb_{jt}^u, \quad \forall j \in \mathcal{RJ}, t \in \mathcal{T} \\ ps_{jt}^l &\leq S_{jt} \leq ps_{jt}^u, \quad \forall j \in \mathcal{DJ}, t \in \mathcal{T} \\ sc_j^l &\leq I_{jt} \leq sc_j^u, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2.4 基于事件逻辑的动态调度模型的简化

基于事件逻辑的动态调度方法对模型的化简主要包括三个方面.一是对于调度问题规模的简化,即通过事件定义和描述,结合专家经验确定事件影响范围,对事件影响范围内的生产流程进行重调度.这主要通过事件逻辑赋值来确定模型集合,从而达到化简的目的.二

是对模型变量的简化. 为尽量减少动态事件对生产系统的冲击, 事件影响范围外的生产可以按原调度方案进行, 相关变量的值就此确定, 同时通过事件逻辑也可以确定一些 0/1 变量 Y_{it} 的取值, 从而减少了模型的变量数目. 三是对模型约束的简化. 这点主要通过析取式的逻辑分支对约束条件的取舍达到.

简化后的动态调度模型具有相对较小的规模,花费较少的求解时间即可获得调度问题的最优解或满意解,能够在保证一定优化性能的前提下提高动态调度的实时性.

3 仿真实例

根据基于事件逻辑的动态调度建模方法,开发了“炼油企业动态调度优化系统”,以Lindo API 5.00(序列号:CLPC5-501322)作为优化求解器.以中国北方某炼油厂“原油供应不足”事件为例,应用该系统进行调度排产.该炼油厂生产规模较大,仅给出其部分生产流程如图2所示.图3~图6给出了针对该事件的动态调度优化结果.

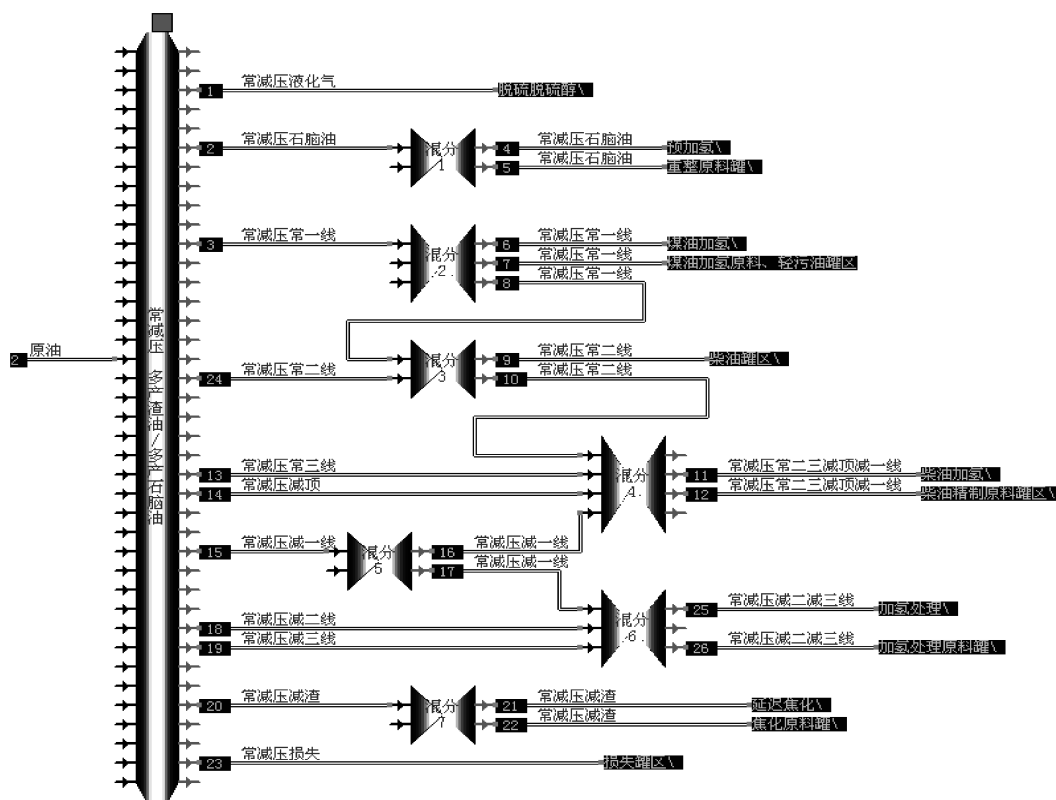


图 2 某炼油厂生产流程图(局部)

Fig.2 Partial flow sheet of a refinery

装置名称	加工量/t	原料名称	原料消耗量/t	产品名称	产品产量/t
常减压	666.67	原油	666.67	常减压顶气	6.67
				常减压液化气	6.67
				常减压石脑油	13.33
				常减压常一线	13.33
				常减压常二线	24.47
				常减压常三线	35.53
				常减压减顶	100
				常减压减一线	133.33
				常减压减二线	133.33
				常减压减三线	133.33
				常减压减渣	66.67
				常减压损失	0
催化裂化	1499.99	催化进料	1499.99	催化干气	30.6
				催化液化气	341.4
				催化汽油	588.75
				催化柴油	461.1
				催化油浆	76.05
				催化损失	2.1

图 3 生产装置生产调度方案

Fig.3 Production scheme of processing units

罐区名称	装置编号	周期末库存/t	库存变化量/t
原油罐区	57	30000	-10000
苯罐区	58	40717.35	717.35
MTBE罐区	59	46605.97	6605.97
甲醇罐区	60	17500.11	-22499.89
煤油罐区	61	62456.14	22456.14
芳烃罐区	62	45254	5254
柴油精制原料罐区	63	36239.03	-3760.97
重汽油罐区	64	18641.86	-21358.14
焦化原料罐区	65	40999	999
催化原料罐区	66	35871.27	-4128.73
加氢处理原料罐区	67	28504.09	-11495.91
煤油加氢原料、轻汽油罐区	68	17501.11	-22498.89
重整原料罐区	72	18051.36	-21948.64
气分原料罐区	73	18181.19	-21818.81
聚丙稀原料罐区	74	24891.33	-15108.67

图4 罐区存储调度方案

Fig.4 Storage scheme of tank fields

图 5 是常减压装置的加工量调度方案,从图中可以看出,其加工量稳定在上限和下限之间的一个

比较合理的水平上,符合生产实际要求.

图 6 是原油罐区的存储调度方案,从图中可以看出,在调度末期,其库存量正好位于下限上,说明原油的库存正是制约目标值的关键要素之一.

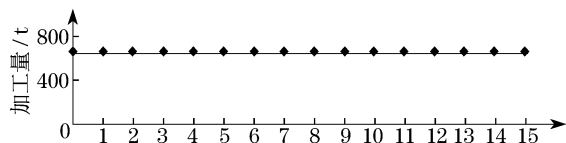


图 5 常减压装置加工量调度方案

Fig.5 Throughput scheme of crude oil distillation unit

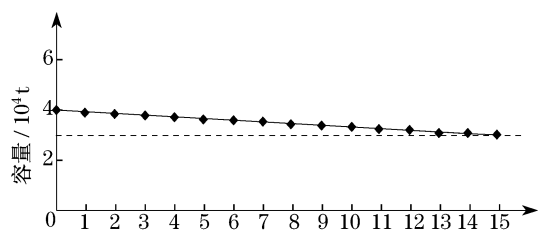


图 6 原油罐区存储调度方案

Fig.6 Storage scheme of crude oil tank field

由于炼油厂的生产装置很多,对其他装置的分析不再一一列出.

4 结语

基于事件逻辑的炼油企业动态调度系统,定义和描述了炼油过程中的突发事件,建立了基于事件逻辑的动态调度模型,能够迅速响应突发生产事件,及时地对生产做出安排调整,在保证调度实时性的同时获得较好的调度优化性,减少资源和能源的浪费,降低生产费用,提高生产效益.

参考文献:

- [1] Wu N Q, Bai L P. Scheduling optimization in petroleum refining industry: a survey [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(1): 90.
- [2] Pinto J M, Joly M, Moro L F L. Planning and scheduling models for refinery operations [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 2259.
- [3] Coxhead R E. Integrated planning and scheduling systems for the refining industry [M] // Optimization in Industry 2: Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice. New York: John Wiley & Sons, 1994: 185 - 199.
- [4] ZHAO Xiaoqiang, RONG Gang. Blending scheduling under uncertainty based on particles warm optimization [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13(4): 535.
- [5] Janicke W. On the solution of scheduling problems for multi-purpose batch chemical plants [J]. Computers and Chemical Engineering, 1984, 8(6): 339.
- [6] 衣杨, 汪定伟. 并行多机成组工作总流水时间调度问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(7): 7.
YI Yang, WANG Dingwei. Scheduling grouped jobs on parallel machines with setups [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(7): 7.
- [7] Grady P O, Lee K H. An intelligent cell control system for automated manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 1988, 26(5): 845.
- [8] Li H, Li Z, Li L X, et al. A production rescheduling expert simulation system [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 124(2): 283.
- [9] Raman R, Grossmann I E. Modeling and computational techniques for logic based integer programming [J]. Computers and Chemical Engineering, 1994, 18(7): 563.
- [10] Guo Q Q, Li Q Q, Ding R, et al. Dynamic scheduling of oil refinery based on model-optimization and process-configuration [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Ji'nan: Shangdong University Press, 2007: 1177 - 1181.