

优化技术在原油管输调度中的应用

李德芳¹ 宫向阳¹ 唐全红² 安 艺²

(1. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100029; 2. 石化盈科信息技术有限责任公司, 北京 100080)

摘要:以甬沪宁原油管网为例,说明调度优化系统将数学规划模型和仿真模型 2 种调度方法完美结合,首先采用数学规划模型计算出最优解或可行的满意解,然后将结果导入仿真模型进行模拟,修正数学模型近似或忽略的因素。主要描述混合整数线性规划技术以及仿真技术在原油管输调度中的应用及应用的初步效果。

关键词:原油管输;调度;混合整数线性规划;优化;模拟

中图分类号:TE06

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0012-05

Application of optimization technology in crude oil pipeline transferring schedule

LI De-fang¹, GONG Xiang-yang¹, TANG Quan-hong², An Yi²

(1. SINOPEC, Beijing 100029, China; 2. Petro-CyberWorks Information Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Using Yonghuning crude pipeline as example, the schedule optimization system which integrates the simulation based on artificial intelligence and the mathematics programming methods together successfully was introduced. Firstly, it runs the mathematics programming model to work out optimal solution or feasible satisfying solution, and secondly, transfers the solution to simulation model to simulate in order to correct approximate or ignored factors in the mathematics model. The mixed-integer linear programming technology, simulation technology application and the applied effects in crude oil pipeline transferring schedule were described.

Key words: crude oil transferring; schedule; mixed-integer linear programming; optimization; simulation

目前,国内外调度软件的调度方法大多采用以人工智能为基础的动态模拟方法,近年来数学规划方法开始用于原油调度^[1]。以人工智能为基础的动态模拟方法需要总结并提供大量的专家知识,开发和实施的工作量较大,并且需要大量的数据做支撑。这种方法的显著优势在于强大的情景模拟能力,可以快速直观地反映模拟方案的结果,但是该解只能局部优化的结果。数学规划方法开发周期短、工作量大、用户操作简便、不需要专人进行系统维护,其结果是全局最优解,但是由于这种方法将时间分成离散的时间段,并且对实际问题采用近似的数学描述,一些非线性问题可能被忽略,所以计算结果与实际存在一定偏差。

甬沪宁原油管网的调度优化项目将 2 种调度方法完美结合,优势互补。笔者在 Aspen MIMI 的工作平台上搭建了数学规划模型和仿真模型。数学模型采用混合整数线性规划技术,仿真模型的开发和实施主要基于编写大量的专家规则程序。该系统首先采用数学规划模型计算出最优解或可行的满意解,该解是基于每天的活动,然后将结果导入仿真模型进行模拟,此模型的时间周期可以精确到小时、分,用户可以微调计划模型的结果,修正计划模型近似

或忽略的因素。

本文将详细描述混合整数线性规划技术在原油管输调度^[2]中的应用。由于仿真模型涉及了大量的反应管线业务的专家规则,本文中只简单介绍几个规则。

1 原油管输调度模型

1.1 问题描述

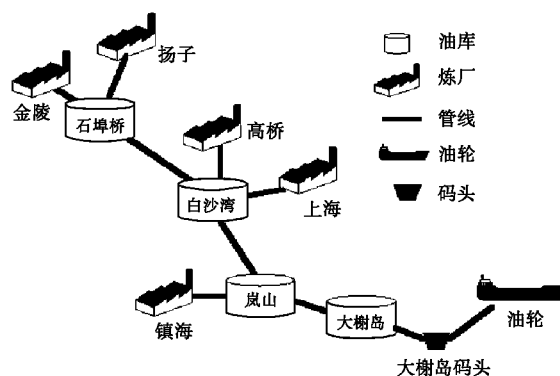


图 1 甬沪宁管网简图

油轮装载原油到达大榭岛码头,卸油至码头油库,再经管线输送到各中转油库和各炼厂。该模型范围涉及大榭岛码头油库、岚山中转油库、白沙湾中

转油库、石埠桥中转油库、油库间的管线段及镇海、上海、高桥、金陵和扬子5个炼厂。模型的时间跨度为30天,周期为日。甬沪宁管网简图见图1。

该问题为在已知各油库、较长管段期初库存、炼厂需求和原油到港信息的条件下,考虑原油供需平衡、各油库的物料平衡、油库高低硫的罐容限制、管线的输送约束、管线输油的时间延迟等约束,求解出最优的输油计划。这一日计划模型将为仿真模型提供数据,并指导仿真模型。

1.2 MILP 模型假设条件

目前,甬沪宁一期管线为一方供油,多方需求的树状网络结构。实际管网系统较复杂,采用混合整数线性规划技术建模需做以下简化处理:

(1)系统不进行管输原油的混合比例计算,混油的比例和数量由企业根据需求给定;

(2)不考虑管线输送过程中的混油量,管线视为理想的光滑管线;

(3)按逻辑罐建模,即一个油种一个虚拟罐;

(4)油轮卸油建模为原油供应;

(5)炼厂建模为原油需求;

(6)为减少原油切换,每天只向各管段输入一种原油;

(7)忽略输送时间小于一天的管段库存和输送过程的时间延迟。

1.3 MILP 模型

1.3.1 目标函数

$$\begin{aligned} \min OBJ = & \sum_{c,t} p_{c,1} I_{DX,c,t} + p_{c,2} I_{LS,c,t} + p_{c,3} I_{BS,c,t} + \\ & p_{c,4} I_{SF,c,t} + \sum_{c,t} q_1 DI_{LS,c,t} + q_2 DI_{BS,c,t} + q_3 DI_{SF,c,t} + \\ & \sum_{c,c',t} r_{c,c',1} Z_{DX_{LS},c,c',t} + r_{c,c',2} Z_{DX_{BS},c,c',t} + \\ & r_{c,c',3} Z_{DX_{SF},c,c',t} + r_{c,c',4} Z_{LS_{BS},c,c',t} + \\ & r_{c,c',5} Z_{LS_{SF},c,c',t} + r_{c,c',6} Z_{BS_{SF},c,c',t} \end{aligned}$$

1.3.2 约束方程

(1)大榭岛物料平衡方程

$$\begin{aligned} I_{DX,c,t} = & I_{DX,c,t-1} - T_{DX_{LS},c,t} - T_{DX_{BS},c,t} - \\ & T_{DX_{SF},c,t} + S_{DX,c,t} \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

(2)岚山油库物料平衡方程

$$\begin{aligned} I_{LS,c,t} = & I_{LS,c,t-1} + T_{DX_{LS},c,t} - T_{LS_{BS},c,t} - T_{LS_{SF},c,t} \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

(3)白沙湾油库物料平衡方程

原油从岚山到白沙湾的输油时间近似为1天,白沙湾油库第一天接油近似处理为岚山-白沙湾管段的库存。

$$\begin{aligned} I_{BS,c,t} = & I_{BS,c,t-1} + IP_{LS_{BS},c,t} - T_{BS_{SF},c,t} - \\ & D_{SH,c,t} - D_{CQ,c,t} \\ & t = 1; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_c T_{DX_{BS},c,t} + T_{LS_{BS},c,t} = & IP_{LS_{BS},c,t} \\ & t = 1; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{BS,c,t} = & I_{BS,c,t-1} + T_{DX_{BS},c,t-1} + T_{LS_{BS},c,t-1} - \\ & T_{BS_{SF},c,t} - D_{SH,c,t} - D_{CQ,c,t} \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

(4)石埠桥油库物料平衡方程

原油从白沙湾到石埠桥的输油时间近似为4天,石埠桥油库前4天接油近似处理为白沙湾-石埠桥管段的库存。

$$\begin{aligned} I_{SF,c,t} = & I_{SF,c,t-1} + IP_{BS_{SF},c,t} - D_{JL,c,t} - D_{YZ,c,t} \\ & t = 1,2,3,4; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_c T_{DX_{SF},c,t} + T_{LS_{SF},c,t} + T_{BS_{SF},c,t} = & IP_{BS_{SF},c,t} \\ & t = 1,2,3,4; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{SF,c,t} = & I_{SF,c,t-1} + T_{BS_{SF},c,t-4} - D_{JL,c,t} - D_{YZ,c,t} \\ & t = 5, c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{SF,c,t} = & I_{SF,c,t-1} + T_{DX_{SF},c,t-5} + T_{LS_{SF},c,t-5} + \\ & T_{BS_{SF},c,t-4} - D_{JL,c,t} - D_{YZ,c,t} \\ & t = 6,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

(5)管段的输油约束

$$\begin{aligned} T_{l,\min} \times Y_{l,c,t} \leq & T_{l,c,t} \leq T_{l,\max} \times Y_{l,c,t} \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C; \end{aligned}$$

$l \in \{DX_{LS}, DX_{BS}, DX_{SF}, LS_{BS}, LS_{SF}, BS_{SF}\}$

(6)油库的库容约束

高硫油罐的库容约束

$$\begin{aligned} I_{i,HS,\min} \leq & \sum_c I_{i,c,t} \leq I_{i,HS,\max} \\ i \in \{DX, LS, BS, SF\}; & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C_{HS}; \end{aligned}$$

低硫油罐的库容约束

$$\begin{aligned} I_{i,LS,\min} \leq & \sum_c I_{i,c,t} \leq I_{i,LS,\max} \\ i \in \{DX, LS, BS, SF\}; & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C_{LS} \end{aligned}$$

(7)各管段在t周期只输一种油

$$\begin{aligned} \sum_{c,t} Y_{DX_{LS},c,t} + Y_{DX_{BS},c,t} + Y_{DX_{SF},c,t} \leq & 1 \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{c,t} Y_{DX_{BS},c,t} + Y_{LS_{BS},c,t} + Y_{LS_{SF},c,t} + Y_{DX_{SF},c,t} \leq & 1 \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_c Y_{DX_{SF},c,t-1} + Y_{LS_{SF},c,t-1} + Y_{BS_{SF},c,t} \leq & 1 \\ & t = 1,2,3,\dots,30; c \in C \end{aligned}$$

(8)日库存变化方程

$$\begin{aligned} DI_{i,c,t} = & I_{i,c,t+1} - I_{i,c,t} \\ i \in \{DX, LS, BS, SF\}; & t = 1,2,3,\dots,29; c \in C_{HS} \end{aligned}$$

(9)切换方程

$$Z_{l,c,c',t} \geq Y_{l,c',t} + Y_{l,c,t-1} - 1$$

$$c, c' (c \neq c') \in C; t = 2, 3, \dots, 30;$$

$$l \in \{DX_LS, DX_BS, DX_SF, LS_BS, LS_SF, BS_SF\}$$

1.3.3 模型下标、变量及参数说明

c —油种下标;

t —时间周期;

C —油种集合;

C_{HS} —高硫油集合;

C_{LS} —低硫油集合;

$I_{i,c,t}$ — i 油库 t 周期油种 c 的库存;

$DI_{LS,c,t}$ —岚山油库 t 周期油种 c 的库存变化;

$DI_{BS,c,t}$ —白沙湾油库 t 周期油种 c 的库存变化;

$DI_{SF,c,t}$ —石埠桥油库 t 周期油种 c 的库存变化;

$IP_{LS-BS,c,t}$ —岚山-白沙湾管段 t 周期油种 c 的库存;

$IP_{BS-SF,c,t}$ —白沙湾-石埠桥管段 t 周期油种 c 的库存;

$S_{DX,c,t}$ —大树岛油库 t 周期油种 c 的来油量;

$T_{l,c,t}$ — t 周期原油 c 管段 l 的输油量;

$D_{SH,c,t}$ — t 周期上海石化对于原油 c 的需求;

$D_{GQ,c,t}$ — t 周期高桥石化对于原油 c 的需求;

$D_{JL,c,t}$ — t 周期金陵石化对于原油 c 的需求;

$D_{YZ,c,t}$ — t 周期扬子石化对于原油 c 的需求;

$Y_{l,c,t}$ —二进制变量,若 t 周期原油 c 在 l 管段中输,变量值为 1,否则为 0;

$Z_{l,c,c',t}$ —二进制变量, l 管段若 t 周期输送原油 c' ,而 $t-1$ 周期输送原油 c ,变量值为 1,否则为 0;

$p_{c,1}$ — t 周期大树岛油库油种 c 的末库存罚款;

$p_{c,2}$ — t 周期岚山油库油种 c 的末库存罚款;

$p_{c,3}$ — t 周期白沙湾油库油种 c 的末库存罚款;

$p_{c,4}$ — t 周期石埠桥油库油种 c 的末库存罚款;

$p_{c,5}$ — t 周期白沙湾虚拟油库油种 c 的末库存罚款;

q_1 —岚山油库 t 周期原油 c 的库存变化罚款;

q_2 —白沙湾油库 t 周期原油 c 的库存变化罚款;

q_3 —石埠桥油库 t 周期原油 c 的库存变化罚款;

$r_{c,c',1}$ —大树岛-岚山管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$r_{c,c',2}$ —大树岛-白沙湾管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$r_{c,c',3}$ —大树岛-石埠桥管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$r_{c,c',4}$ —岚山-白沙湾管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$r_{c,c',5}$ —岚山-石埠桥管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$r_{c,c',6}$ —白沙湾-石埠桥管段原油 c 切换为 c' 的成本;

$T_{l,\min}$ —原油 c 在 l 管段的最小输油量;

$T_{l,\max}$ —原油 c 在 l 管段的的最大输油量;

$I_{i,HS,\min}$ —油库 i 高硫油的最小库存;

$I_{i,HS,\max}$ —油库 i 高硫油的最大库存;

$I_{i,LS,\min}$ —油库 i 低硫油的最小库存;

$I_{i,LS,\max}$ —油库 i 低硫油的最大库存。

1.4 仿真模型

对于管线而言,有一些因素用数学模型是很难描述的,一个比较突出的问题就是管线的顶油问题。原油在管线中运动,其下游的活动和上游活动紧密相关,后边出油情况是由前边的进油情况决定的,前边的油顶着后边油沿着管线运动。这种顶油活动以及较短管段的库存和输送时间在数学模型中只能近似处理,或者忽略不计。另外,数学模型的规模也受计算机处理能力和求解速度的制约,如果规模过大,计算时间就会过长,严重时会出现组合爆炸。为了弥补数学模型的缺陷,将仿真模型与其结合。仿真模型是以人工智能为基础的模拟方法,仿真模型构建的主要工作就是根据管线运输的实际业务流程、以及调度人员总结的多年调度经验和专家知识,编制相应的规则,模拟管线的实际运行情况,在计划面板上展示各种输油活动以及库存信息。计划面板为用户提供了一个友好的人机互动的平台。仿真模型包括仿真模拟、结果检查、结果返回和计划调整等功能。通过对计划模型结果的仿真模拟,形象化地展示计划周期内甬沪宁原油管网的运行状况。使用计划面板上强大而灵活的图形化操作功能,用户可以多角度地检查和分析管网内各油库和炼厂库存状况;并且可以在满足管网输送的工艺条件下,对管线输送计划或炼厂需求进行适当的调整,从而解决计划模型中未能考虑的某些约束条件而产生的问题。经过反复多次调整计划和仿真模拟后,找到既符合管网的工艺条件又满足炼厂需求的管输计划。仿真模型的开发和实施主要基于编写大量的专家规则程序。甬沪宁调度系统的仿真模型涉及到 30 多个规则,包括活动生成和计划面板功能两大部分。由于规则较多,只简单介绍 2 个主要规则程序流程。

1.4.1 生成进油活动规则

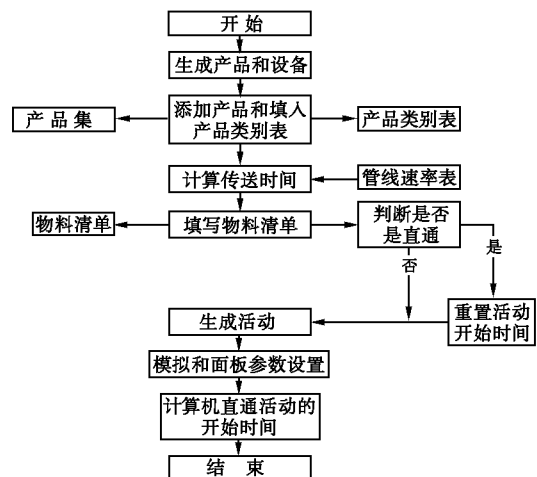


图 2 生成进油活动规则的程序流程图

1.4.2 生成出油活动规则

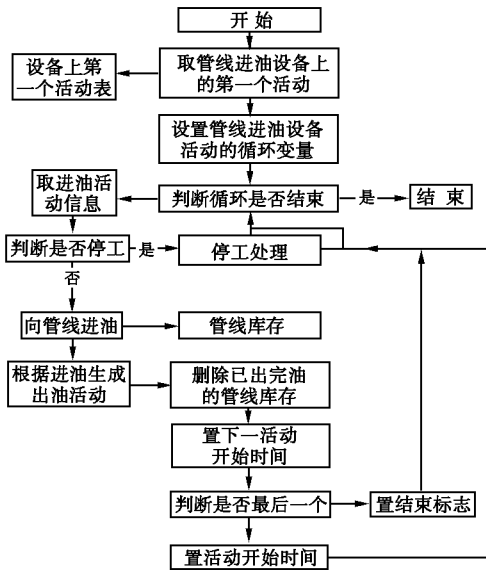


图3 生成出油活动规则的程序流程图

2 应用实例

已知调度的时间范围为31天,周期为日,最小管输量2万t/d,期初库存,原油到港信息、原油需求信息等见表1至表6。

表1 原油需求信息

炼厂	原油	时间	数量/万t
1 高桥石化	混合油(阿曼:卡宾达=1:1)	04/05/25	8.0000
2 高桥石化	杰拉索油	04/05/30	19.2000
3 高桥石化	卡宾达油	04/05/19	6.0000

表2 油轮到港信息

码头	原油	时间	数量/万t
1 大榭码头	卡宾达油	04/05/20	5.0000
2 大榭码头	杰拉索油	04/05/22	21.6000
3 大榭码头	沙轻油	04/05/24	15.0000
4 大榭码头	沙超轻油	04/05/25	8.1000
5 大榭码头	卡宾达油	04/05/25	8.0000
6 大榭码头	阿曼油	04/05/10	10.0000
7 大榭码头	沙轻油	04/05/27	10.9000
8 大榭码头	卡宾达油	04/05/05	10.0000

表3 油库期初库存

油库	原油	油罐	数量/万t
1 大榭岛	沙轻油	大榭岛罐3	4.3600
2 大榭岛	沙轻油	大榭岛罐5	1.0900
3 大榭岛	中转油	大榭岛罐6	2.9600
4 大榭岛	阿曼油	大榭岛罐7	5.0400
5 大榭岛	阿曼油	大榭岛罐8	3.5700

(续表)

油库	原油	油罐	数量/万t
6 大榭岛	沙超轻油	大榭岛罐9	3.5800
7 大榭岛	中转油	大榭岛罐11	7.6000
8 岚山油库	沙超轻油	岚山油库罐1	2.2200
9 岚山油库	沙轻油	岚山油库罐1	5.1800
10 岚山油库	沙超轻油	岚山油库罐2	2.3100
11 岚山油库	沙轻油	岚山油库罐2	5.3900
12 岚山油库	沙超轻油	岚山油库罐3	2.2500
13 岚山油库	沙轻油	岚山油库罐3	5.2500
14 岚山油库	沙超轻油	岚山油库罐4	2.2500
15 岚山油库	沙轻油	岚山油库罐4	5.2500

表4 管线期初库存

管线	原油	数量/万t
1	白高线	填充物 2.7080
2	白上线	填充物 0.0360
3	白石线	填充物 13.4580
4	大岚线	沙超轻油 0.6000
5	大岚线	沙轻油 1.3100
6	石金线	填充物 0.0090
7	石扬线	填充物 0.7640
8	岚白1号线	填充物 3.1590
9	岚镇线	填充物 0.0180

表5 管线段最大输油能力

管线段	最大输油量/万t·d ⁻¹
大榭码头装卸	15.60
大岚线	4.80
大白线	4.80
大石线	4.80
岚镇线	4.80
岚石线	4.80
岚白1号线	4.80
白上线	4.80
白高线	4.80
白石线	3.00
石金线	4.80
石扬线	4.80

表6 油库的库容能力

	最小库存量	最大库存量
大榭岛高硫油	0	60
岚山油库高硫油	0	38
白沙湾库高硫油	0	34
石埠桥油库高硫油	0	15
大榭岛低硫油	0	60
岚山油库低硫油	0	0
白沙湾库低硫油	0	34
石埠桥油库低硫油	0	15

计算结果模拟见图 4。由于数学模型采用的是线性规划技术,将实际问题做简化处理,所以将其计算结果模拟后,会出现一些不合理活动,笔者通过合并、增加、删除、移动等操作可以修正这些不合理活动,这主要依靠调度人员的经验。修正后的结果见图 5。

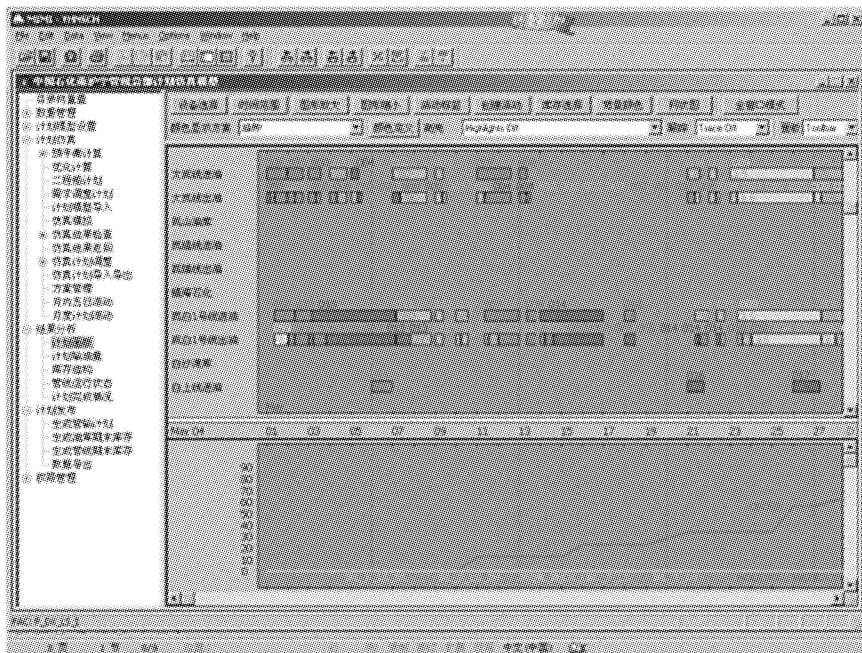


图 4 数学模型计算结果模拟

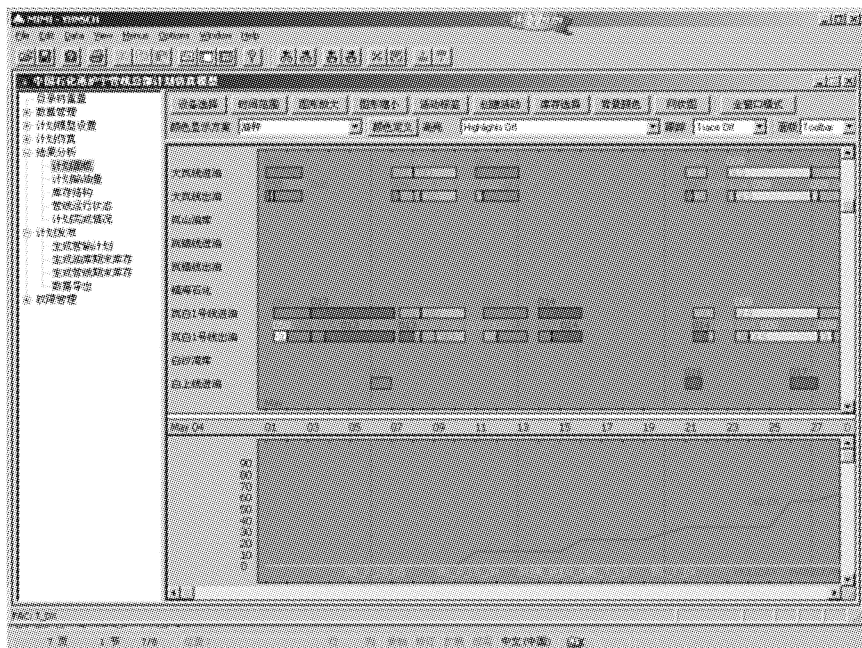


图 5 调整后的结果

3 应用效果分析

通过例题,可知用户首先运行数学模型得出结果,该结果考虑到诸多复杂的约束,为全局最优解,但是目前混合整数线性规划模型只能做到日调度,并且数学模型存在一些近似处理,所以其结果只能

近似反映实际情况。将数学模型仿真模拟后,有时会出现一些油库负库存问题,或者用户需求不能完全满足的情况。此时用户可以在计划面板上进行相应的调整,直到得到满意方案。通过 2 个模型几个月来的上线运行,其结果能够反映甬沪宁管网的实际业务流程,解决该管网的原油管输调度问题,为用户提供决策支持,并且大大减少了调度员编制月计划、调度作业计划的时间和工作量,得到了用户的认可。由此可见,以人工智能为基础的动态模拟方法和数学规划方法相结合,可以修正数学模型结果,时间精确到小时、分、秒,更真实地反映实际情况,及时得到准确合理的方案,充分发挥仿真模拟快速、直观的特点。2 种方法结合应用,可以优势互补,更好地解决原油管输调度问题。

参考文献

[1] Lee H, Pinto J M, Grossmann I E, et al. [J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35: 1630 - 1641.
 [2] Shah N. [J]. Computers Chem Eng, 1996, 20(S): 1227 - 1232.

