

DOI: 10.7652/xjtuxb201406007

多类型煤炭海运运输库存管理一体化模型

董皎皎¹, 马瑞瑞², 翟桥柱³, 卫军胡¹, 赖菲², 王虹¹, 管晓宏³, 王智微²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安热工研究院有限公司, 710032, 西安;
3. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对大型发电集团煤炭采购海运总成本较高、库存积压严重的问题,提出海运运输库存管理一体化的三层混合整数规划模型。该模型基于多配送中心至多电厂码头的物流配送网络,考虑实际海运中复杂的船舶构成及电厂码头靠泊限制,采用混合整数规划方法,以调度周期内发电集团总部煤炭采购运输成本总和最小作为第一优化目标,以船运公司航次运行总费用最小为第二优化目标,并考虑电厂码头库存成本及库存不平衡惩罚,采用分层序列优化方法对该模型进行求解。基于国内某大型发电集团及其下属 12 个电厂的实验结果表明:该模型在避免煤炭短缺及库存爆仓的同时,降低供应链系统总费用 800 万元,减少由等待泊位引起的滞期费用 195 万元,降低电厂码头平均库存量 30%;分层模型可有效降低由统一建模带来的管理难度及求解复杂度,特别适用于多电厂码头的复杂煤炭海运问题。

关键词: 海运供应链;库存管理;煤炭运输;船舶调度计划;三层混合整数规划模型

中图分类号: F274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0037-06

Integration Model of Inventory and Transportation Decisions for Multiple Coal Shipping

DONG Jiaojiao¹, MA Ruirui², ZHAI Qiaozhu³, WEI Junhu¹, LAI Fei²,
WANG Hong¹, GUAN Xiaohong³, WANG Zhiwei²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Thermal Power Research Institute Corporation Limited, Xi'an 710032, China; 3. Ministry of Education Key Lab
for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A three-level mixed integer programming model is proposed to reduce the cost of coal purchase and transportation in large-scale power generation groups, and to decrease the inventory levels of coal in group's subsidiaries. Mixed integer liner programming is used to establish the model, and the logistic distribution networks among multi-loading ports and multi-unloading ports, vessel capacities and physical constrains of subsidiaries are considered in the model. The first level object of the model is to minimize the purchase and transportation costs of power generation groups in the entire scheduling cycle. The second level object is to minimize the voyage operating expenses, and the third level object is to minimize the inventory and penalty costs of all subsidiaries. Sequential optimization method is used to solve the model. Numerical tests are performed for a power generation group with 12 subsidiaries and the results show that the cost of the overall supply chain system is saved by 800 million RMB, the demurrage cost is reduced by

收稿日期: 2013-11-30。 作者简介: 董皎皎(1989—),女,博士生;高峰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 华能集团重点科技项目(HNKJ12-H61);国家自然科学基金资助项目(61174146,61221063)。

网络出版时间: 2014-04-16 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1749.016.html>

195 million RMB, and the inventories of all subsidiaries are reduced by 30%. The three-level model has competitive performance in terms of solution efficiency against traditional consolidated models, especially for complex coal shipping problems of multiple subsidiaries.

Keywords: maritime supply chain; inventory management; coal transportation; ship routing strategy; three-phase mixed-integer programming model

大型发电集团的煤炭采购-海运问题具有供应链关系复杂及海运物流建模复杂等特点。应用供应链管理理论分析其供应链特点及企业管理方式可有效降低供应链总费用,增强企业合作关系,但国内外对海运供应链管理研究相对薄弱。大部分船舶调度仍然依靠调度人员经验完成,以至运营成本过高,因此,对煤炭采购-海运优化调度问题进行全面、系统的分析研究是十分必要的。

海洋运输研究分为 3 类:工业船运、不定航线不定期船运、班轮船运^[1]。工业船运又包括工业船运的船队规划、船队定线及调度问题^[2]。文献[3-4]建立了基本的多类型产品库存路径优化问题模型。文献[5-7]分别从煤炭、粮食采购-海运问题出发,考虑成本最小化的煤炭、粮食采购及运输计划制定。文献[8-10]分别研究了船队规划、班轮调度、不定期船运问题。文献[11-12]分别研究了中国石化的煤炭库存管理策略和炼油厂的库存管理问题。文献[13]研究了铁路直达运输条件下煤炭采购、运输问题。文献[14-15]构建了煤炭物流网络。

上述相关研究已经建立了较好的整体优化模型框架,但仅考虑了单产品类型或单一卸港码头,且航运部分和卸港码头物理限制考虑相对简单,这与实际复杂的产品需求、船舶构成等有出入。此外,将采购与海运部分统一建模,求解效率较低,仅能求解小规模问题。本文基于多配送中心至多电厂码头的物流配送网络,考虑实际海运中复杂的船舶构成及电厂码头靠泊限制,建立三层混合整数规划模型,利用分层序列优化方法分别求解煤炭订购计划、航线用船计划及船舶调度计划,不仅减少了供应系统总费用,而且有效降低了由统一建模带来的管理难度及求解复杂度。

1 问题背景及特点

1.1 问题背景

本文以某发电集团为背景,该集团与多家航运公司签订期租船合同,负责海运煤炭运输。在每一调度月末,各电厂根据预测需求上报下一调度月用煤量计划,集团燃料部根据各用煤量计划制定煤炭

订购计划,并根据各电厂煤炭库存情况安排船舶调度计划,如图 1 所示。以上计划由集团总部、航运公司和电厂三方会谈制定。

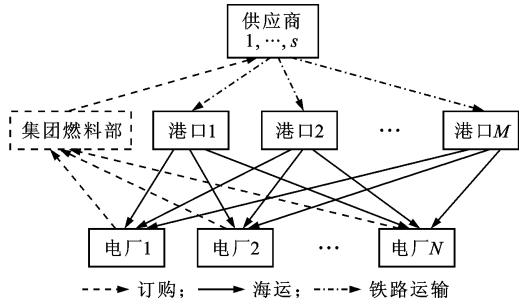


图 1 煤炭采购及海运物流系统

1.2 问题特点

分析图 1 问题并抽象其供应链系统如图 2 所示。在该供应链中,分别研究核心企业(集团总部)的订购管理及库存管理问题。根据供应链关系分析,该问题为多阶段多目标决策问题,具有煤炭耗量大、种类多、电厂分散的特点,与传统的库存路径问题相比,物流配送结构和运载工具结构更为复杂,且需要考虑更多的实际物理限制。

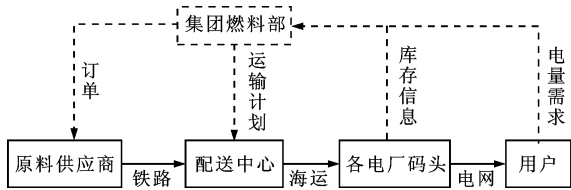


图 2 供应链中物流及信息流

1.2.1 订购管理 集团总部以月或季度为订购周期,向多家供应商采购以保障煤炭质量和煤炭价格,降低缺货风险,保障各电厂码头的煤炭供给。其成本主要包括购买成本、订购成本、物流成本及库存持有成本。

1.2.2 第三方物流 由于自建物流体系费用较高,集团总部通常与第三方物流即航运公司长期合作。与传统按照电厂码头库存需求随时租船的方式不同,本文提出新的管理模式,即在每一调度周期初,提前足够时间计划各航线用船数目,并反馈给航运公司。该管理方式使得航运公司有更大的业务自由

度,可以保障双方的长期合作关系。

1.2.3 库存管理 由于电能不能大规模经济存储,各电厂码头均存在一定安全库存以应对电量需求的意外变化。由于各电厂属于发电集团总部,且各自独立核算,因此,可以将其看作是信息完全共享的利益整体,采取供应商管理库存策略(VMI)可有效降低供应链整体费用。库存成本主要包括物流成本和库存持有成本。本文主要研究海运形式的物流配送。

2 数学模型

传统研究^[6-8,12-14]通常采用统一建模思路,但在变量规模较大时,较难在可接受时间内得到问题的可行解。经调研分析,单位采购成本远大于单位运输成本及单位库存成本,因此,本文从实际应用角度建立煤炭订购、航线用船、库存管理三层混合整数规划模型,分别求解煤炭订购计划、航线用船计划和船舶调度计划。

2.1 煤炭订购计划模型

在调度月初,集团燃料部根据各电厂码头煤炭需求及各供应商信息,决策订购计划及各航线运量计划,以实现总支付成本最小。总支付成本主要包括采购费用、铁路物流费用及海运物流费用。

集团燃料部煤炭订购问题可表述为式(1)~式(7)所示的数学模型。

$$\min_{Q_{m,s,l}^{\text{pur}}, Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a}} \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L C_{s,l}^{\text{pur}} \sum_{m=1}^M Q_{m,s,l}^{\text{pur}} + \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M g_{m,s}^{\text{trans}} \sum_{l=1}^L Q_{m,s,l}^{\text{pur}} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{m,n}^{\text{trans}} \sum_{l=1}^L Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a} \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^S Q_{m,s,l}^{\text{pur}} - \sum_{n=1}^N Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a} = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a} = Q_{n,l}^{\text{de}} \quad (3)$$

$$Q_{m,s,l}^{\text{pur}} \leq \bar{Q}_{m,s,l}^{\text{pur}} \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L Q_{m,s,l}^{\text{pur}} / \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S Q_{m,s,l}^{\text{pur}} \leq \alpha_s \quad (5)$$

$$Q_{m,s,l}^{\text{pur}} \geq 0 \quad (6)$$

$$Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a} \geq 0 \quad (7)$$

式(1)为总支付成本最小, $C_{s,l}^{\text{pur}}$ 、 $C_{m,n}^{\text{trans}}$ 、 $g_{m,s}^{\text{trans}}$ 分别为单位煤炭采购、海运运输及铁路运输成本, $Q_{m,s,l}^{\text{pur}}$ 、 $Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a}$ 分别为煤炭订购量及煤炭运输量。式(2)为煤炭运量平衡约束,即调度周期内,港口 m 所有供应商处第 l 种煤炭的总购买量等于由该港口出发至所有码头的该类型煤炭总运输量。式(3)为系统消耗量平衡约束,即调度周期内,从所有港口运送至电厂

码头 n 的煤炭运输量满足该码头生产消耗, $Q_{n,l}^{\text{de}}$ 为煤炭需求量。式(4)限制了由各港口各供应商处各类型煤炭的购买量, $\bar{Q}_{m,s,l}^{\text{pur}}$ 表示采购量上限。式(5)考虑各供应商的政策性购买比例限制, α_s 为购买比例上限。式(6)、式(7)为决策量非负约束。

2.2 航线用船计划模型

在已知运量计划及各吨位船型可用数目的基础上,集团燃料部为各航线分配船舶运输煤炭,以实现总航次运行费用最小。

各航线用船问题可表为式(8)~式(14)所求援数学模型。

$$\min_{X_{m,n,v}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{v=1}^V h_{m,n,v} X_{m,n,v} \quad (8)$$

$$\sum_{v=1}^V Q_{m,n,v,l}^{\text{trans}} = Q_{m,n,l}^{\text{trans}_a} \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{l=1}^L Q_{m,n,v,l}^{\text{trans}} \leq X_{m,n,v} B_v^{\text{wei}} \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (2T_{m,n} + P_n^{\text{time}}) X_{m,n,v} \leq B_v^{\text{num}} T \quad (11)$$

$$X_{m,n,v} (B_v^{\text{wei}} - P_n^{\text{wei}}) \leq 0 \quad (12)$$

$$X_{m,n,v} \text{ 为整型量} \quad (13)$$

$$Q_{m,n,v,l}^{\text{trans}} \geq 0 \quad (14)$$

式(8)为总航次运行费用最小, $h_{m,n,v}$ 为单位航次运行成本, $X_{m,n,v}$ 为各航线船型 v 用船数目。式(9)为煤炭运量平衡约束, $Q_{m,n,v,l}^{\text{trans}}$ 为各航线船型 v 的煤炭装载量。式(10)为船型 v 的煤炭装载量不大于其最大载重量, B_v^{wei} 为船舶最大载重量。式(11)为 v 吨位船舶累计航行时间应不大于调度周期内最大可用时间, $T_{m,n}$ 为航线 $(m-n)$ 的航行时间, P_n^{time} 为卸港码头船舶卸载时间, B_v^{num} 为某一船型的可用数目, T 为调度时长。式(12)为调度周期内码头 n 所到船型吨位不大于该码头的最大靠泊吨位, P_n^{wei} 为卸港码头最大靠泊吨位。式(13)、式(14)为决策量约束。

2.3 库存管理模型

在已知运量计划、航线用船计划及单位时段各电厂码头煤炭消耗量的基础上,集团燃料部制定船舶调度计划,以实现所有电厂码头的库存持有费用及惩罚费用最小。

各电厂码头库存管理问题可表述为式(15)~式(27)所示的数学模型。

$$\min_{q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}}} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (C_n^{\text{inv}} \sum_{l=1}^L q_{t,n,l}^{\text{inv}} + C_n^{\text{pen}+} \sum_{l=1}^L q_{t,n,l}^{\text{inv}+} + C_n^{\text{pen}-} \sum_{l=1}^L q_{t,n,l}^{\text{inv}-}) \quad (15)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}} = Q_{m,n,l}^{\text{trans,a}} \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{t,m,n,v} \leq X_{m,n,v} \quad (17)$$

$$q_{t,n,l}^{\text{inv}} = q_{t-1,n,l}^{\text{inv}} + \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}} - d_{t,n,l} \quad (18)$$

$$q_{0,n,l}^{\text{inv}} = Q_{n,l}^{\text{inv}0} \quad (19)$$

$$q_{t,n,l}^{\text{inv}} - q_{t,n,l}^{\text{inv-}} = \bar{Q}_{n,l}^{\text{inv}} \quad (20)$$

$$q_{t,n,l}^{\text{inv}} + q_{t,n,l}^{\text{inv+}} = \underline{Q}_{n,l}^{\text{inv}} \quad (21)$$

$$\sum_{\Delta t=0}^{P_n^{\text{time}}-1} \sum_{v=1}^V \sum_{m=1}^M x_{t-\Delta t,m,n,v} \leq P_n^{\text{num}} \quad (22)$$

$$0 \leq \sum_{l=1}^L q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}} \leq x_{t,m,n,v} B_v^{\text{weight}} \quad (23)$$

$$x_{t,m,n,v} \text{ 为整型量} \quad (24)$$

$$q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}} \geq 0 \quad (25)$$

$$q_{t,n,l}^{\text{inv+}} \geq 0 \quad (26)$$

$$q_{t,n,l}^{\text{inv-}} \geq 0 \quad (27)$$

式(15)为调度周期内库存持有费用及各惩罚费用最小, C_n^{inv} 、 $C_n^{\text{pen+}}$ 、 $C_n^{\text{pen-}}$ 分别为单位库存持有成本及单位惩罚费用, $q_{t,n,l}^{\text{inv}}$ 、 $q_{t,n,l}^{\text{inv+}}$ 、 $q_{t,n,l}^{\text{inv-}}$ 分别为 t 时段末码头库存量及库存惩罚量。式(16)为煤炭运量平衡约束, $q_{t,m,n,v,l}^{\text{trans}}$ 为 t 时段末, 由港口 m 运达电厂码头 n 的 v 型船舶的第 l 种煤炭装载量。式(17)为航线用船约束, $x_{t,m,n,v}$ 为 t 时段末的船舶调度计划变量, 表示 t 时段末有 x 条 v 型船舶从港口 m 运达电厂码头 n 。式(18)~式(21)为 t 时段末, 码头 n 的库存状态转移方程及库存惩罚量约束, $d_{t,n,l}$ 为电厂码头煤炭消耗量。式(22)为 t 时段末, 码头 n 拟靠泊的船舶数目不大于其泊位数目, P_n^{num} 为卸港码头泊位数目。式(23)为船型 v 的煤炭装载量不大于其最大载重量。式(24)~式(27)为决策量约束。

2.4 模型求解

式(1)~式(27)为混合整数规划模型, 求解流程如图 3 所示。由于该实际问题中各层成本间存在数量级上的显著差异, 如表 1 所示, 迭代算法对总成本改变并不明显, 且会增加问题的求解时间。因此, 本文采用顺序求解算法, 自上而下求解三层混合整数规划模型。

表 1 各层成本优化结果

模型	各层成本	各层成本占总
	最优解/元	成本的比例/%
煤炭订购计划模型	6.33×10^8	92.03
航线用船计划模型	4.95×10^7	7.20
库存管理模型	5.31×10^6	0.77

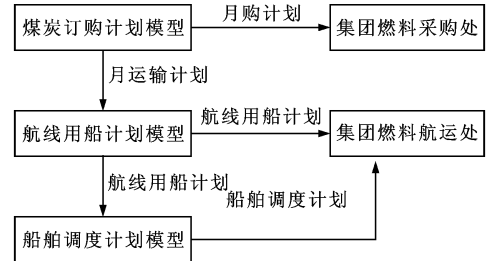


图 3 三层模型求解流程

3 算例分析

以某集团下属电厂为例。为降低算例规模, 分别对煤炭、港口、船舶分类, 其中煤种为 14 类, 港口为 2 类, 船舶为 11 类。式(1)~式(27)为混合整数规划模型, 利用 lingo 11.0 软件求解。由于各计划表数据量较大, 因此选择其中某一电厂分析计算结果。

3.1 订购情况分析

由式(1)~式(8)制定采购计划, 如表 2 所示。可以看出: ①考虑供应商最大购买量, 各供应商购买量不大于最大供应能力, 可有效降低缺货风险; ②经验证明所有供应商的煤炭购买量可以满足各电厂需求。

表 2 订购计划表

港口	供应商	煤种	购买量/ 10^7 kg
m_1	s_1	l_1	6.8
m_2	s_2	l_2	5.5

定义到厂煤炭单价为采购单价与运输单价的总和。在不考虑管理意志约束时, 计算各港口各供应商到厂煤炭单价, 可有效指导订购计划的制定。

3.2 航线用船情况分析

由式(9)~式(16)可得航线用船方案, 如表 3 所示。调度周期内船舶使用数目为 3, 船舶载重量利用率为 94.6%。可以看出: ①通过该方式制定的航次计划可以在调度周期内完成计划运量且满足各船型可用数目限制; ②与表 4 历史计划相比, 船舶利用率差异不大, 但减少了船舶使用数目, 降低了总航次运行费用; ③考虑泊位约束, 船运计划更加贴近实际。因此, 计算结果满足船舶适载原则, 即用合适的船型运输合适的货物。

表 3 航线用船计划表

航线	船型			
	船型 1	船型 2	船型 3	船型 4
m_1-n_1	0	2	0	0
m_2-n_1	0	0	1	0

表 4 历史航线用船计划表

航线	船型			
	船型 1	船型 2	船型 3	船型 4
m_1-n_1	0	2	0	0
m_2-n_1	1	1	0	0

3.3 电厂码头情况分析

由式(17)~式(26)可得航运计划表,如表 5 所示,其历史数据如表 6 所示。根据各航线的航行时间、卸港时间可画出任务时间图,如图 4 所示。其中,横轴表示调度时段;纵轴表示各任务;灰色部分表示由各港口至电厂码头 n_1 的各航行任务;黑色部分表示电厂码头 n_1 的各卸港任务。

各电厂库存变化情况如图 5 所示,可以看出:①该调度方案可使电厂码头 n_1 在满足生产的前提下降低煤炭库存量;②电厂码头 n_1 的泊位数目为 1,因此第 2 次运输任务与第 3 次运输任务错开卸港时间,可保障第 3 次到达电厂码头的船舶在无需等待的情况下安全卸港;③对比表 6 所示历史航运计划可以看出,由于人工方式较难考虑各时段的煤炭库存平衡,可能造成煤炭库存量较高。

表 5 船舶调度计划表

船型	航次	港口	码头	卸载时间/d	煤炭运量/ 10^7 kg
v_2	1	m_1	n_1	22	3.3
v_2	2	m_1	n_1	27	3.5
v_3	1	m_2	n_1	30	5.5

表 6 历史船舶调度计划表

船型	船次	港口	码头	卸载时间/d	煤炭运量/ 10^7 kg
v_2	1	m_1	n_1	1	3.3
v_2	2	m_1	n_1	17	3.5
v_1	1	m_2	n_1	25	2.0
v_2	3	m_2	n_1	30	3.5

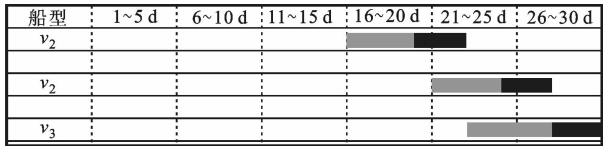


图 4 电厂码头 n_1 任务时间图

上述问题的难度随电厂码头数目、船舶类型、煤炭类型的增加而增加。当问题规模较大时,凭借人工经验制定各调度计划很难同时满足供应链中各方需求,而本文提出的三层混合整数规划模型仍可得到该问题的满意结果。

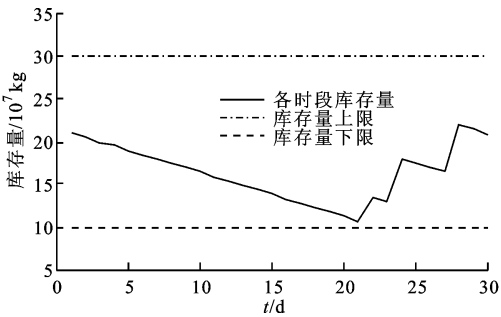


图 5 电厂码头 n_1 库存量变化

4 结 论

本文以某集团为例,研究集团总部通过海运方式向其子公司运送煤炭的供应链管理问题。通过分析供应链管理模式,提出集团总部与第三方物流公司合作新的管理方式;结合海运物流的基本特点,将供应链管理问题推广至海运领域;提出三层模型,有效降低了由统一建模带来的管理难度及求解复杂度;考虑电厂码头泊位数目,使得船舶调度计划的制定更加贴近实际。

下一步工作主要是设计启发式算法,以求解卸港码头较多的大规模海运优化调度问题。在问题规模较大时,本文所提出的模型及算法求解时间相对较长,因此如何设计启发式算法以降低问题求解时间,提高模型求解效率是下一步研究的主要方向。

参考文献:

[1] CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K, RONEN D. Ship routing and scheduling: status and perspectives [J]. Transport Science, 2004, 38(1): 1-18.

[2] HOFF A, ANDERSSON H, CHRISTIANSEN M, et al. Industrial aspects and literature survey: fleet composition and routing [J]. Computers and Operations Research, 2010, 37(12): 2041-2061.

[3] CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K, NYGREEN B, et al. Ship routing and scheduling in the new millennium [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 228(3): 467-483.

[4] CHRISTIANSEN M, FAGERHOLT K, FLATBERG T, et al. Maritime inventory routing with multiple products: a case study from the cement industry [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 208(1): 86-94.

[5] SHIH L H. Planning of fuel coal imports using a mixed integer programming method [J]. International Journal of Production Economics, 1997, 51(3): 243-249.

- [6] YUCEKAYA A. Multi-objective fuel supply for coal-fired power plants under emission, transport and operational constraints [J]. *Energy Sources: Part B Economics, Planning, and Policy*, 2013, 8(2): 179-189.
- [7] BILGEN B, OZKARAHAN I. A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping [J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 107(2): 555-571.
- [8] 杨秋平, 谢新连, 赵家保. 船队规划研究现状与动态 [J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(4): 85-90.
YANG Qiuping, XIE Xinlian, ZHAO Jiabao. Research status and prospect of fleet planning [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(4): 85-90.
- [9] 杨洋. 基于班轮公司合作的海运空箱调运优化模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(1): 120-124.
YANG Yang. Integer programming allocation model of empty container by sea transportation for liner operators' cooperation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(1): 120-124.
- [10] 唐磊, 谢新连, 王成武. 基于集合划分的航速可变不定期船舶调度模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(6): 909-915.
TANG Lei, XIE Xinlian, WANG Chengwu. Model of tramp ship scheduling with variable speed based on set partition approach [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(6): 909-915.
- [11] ZHAO Qihong, CHEN Shuang, STEPHEN C H, et al. Integration of inventory and transport decisions in a logistics system [J]. *Transport Research Part E-Logistics and Transport Review*, 2010, 46(6): 913-925.
- [12] 曹萃文, 顾幸生. 炼油厂综合库存管理优化问题研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(2): 246-251.
CAO Cuiwen, GU Xingsheng. Optimal control for refinery synthesis inventory management [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(2): 246-251.
- [13] 曹学明, 林柏梁, 严贺祥. 铁路直达运输条件下煤炭运输与库存一体化模型 [J]. *北京交通大学学报*, 2006, 30(6): 27-31.
CAO Xueming, LIN Boliang, YAN Hexiang. An integrated coal transportation and inventory model under condition of rail direct transportation [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2006, 30(6): 27-31.
- [14] 赵刚. 上海电煤长江运输系统规划 [J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(1): 140-143.
ZHAO Gang. Plan on shanghai power coal transportation system on yangtze river [J]. *System Engineering-theory and Practice*, 2005, 25(1): 140-143.
- [15] 汪文生, 曾志猛, 王娟. 多级煤炭物流网络优化选择模型 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(6): 1060-1064.
WANG Wensheng, ZENG Zhimeng, WANG Juan. Construction and application of multi-level coal logistics network optimization model [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(6): 1060-1064.

[本刊相关文献链接]

- 汝海, 高峰, 徐寅峰, 等. 单水库汛期分段线性调度的在线策略与分析. 2014, 48(2): 99-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201402017]
- 徐小艳, 管晓宏, 李黎. 建筑空调系统最优停机时间预测与控制. 2013, 47(10): 31-36. [doi: 10.7652/xjtuxb201310006]
- 张彪, 曹其新, 王雯珊. 使用三维栅格地图的移动机器人路径规划. 2013, 47(10): 57-61. [doi: 10.7652/xjtuxb201310010]
- 刘连理, 李庆, 顾运, 等. 电力定价策略的多目标优化模型及其应用. 2013, 47(10): 115-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201310020]
- 王兆杰, 高峰, 翟桥柱, 等. 高耗能企业关口平衡问题的双目标规划模型. 2013, 47(8): 26-32. [doi: 10.7652/xjtuxb201308005]
- 吴雄, 王秀丽, 崔强. 考虑需求侧管理的微网经济优化. 2013, 47(6): 90-96. [doi: 10.7652/xjtuxb201306016]
- 陈旭, 王伊卿, 孙琨, 等. 高速列车车厢夹层板断面结构的多目标优化. 2013, 47(1): 62-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201301013]
- 李健, 黄庆佳, 刘一阳, 等. 云计算环境下基于粒子群优化的大规模图处理任务调度算法. 2012, 46(12): 116-122. [doi: 10.7652/xjtuxb201212020]
- 代亮, 许宏科, 陈婷. 无线传感器网络可分负载调度算法. 2012, 46(6): 23-28. [doi: 10.7652/xjtuxb201206005]
- 徐健, 景明利, 齐春, 等. 采用遗传算法的分层贪婪字典训练算法. 2012, 46(4): 18-23. [doi: 10.7652/xjtuxb201204004]
- 薛峰, 周亚东, 高峰, 等. 一种突发性热点话题在线发现与跟踪方法. 2011, 45(12): 64-69. [doi: 10.7652/xjtuxb201112012]
- 李黎, 管晓宏, 赵千川, 等. 网络生存适应性的多目标评估. 2010, 44(10): 1-7. [doi: 10.7652/xjtuxb201010001]
- 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计. 2010, 44(1): 31-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201001008]
- 颜秉珩, 钱德沛. 一种支持负载均衡的存储调度算法. 2009, 43(10): 61-65. [doi: 10.7652/xjtuxb200910013]
- 康雨, 闫相国, 郑崇勋, 等. 任意可分负载的多轮调度算法. 2009, 43(8): 125-129. [doi: 10.7652/xjtuxb200908025]

(编辑 武红江)