

共用模式下的空托盘调配决策方案优化研究

周康, 何世伟, 宋瑞, 黎浩东

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 共用模式下合理的空托盘调配能够提高托盘的利用率、降低运输成本、减少资源浪费. 基于托盘共用模式, 以公路和铁路运输为主要运输方式对空托盘调配决策方案进行优化研究. 对空托盘调配的运输网络的节点进行拆分, 细化节点处的作业模式. 综合考虑各种影响空托盘调运的因素, 针对实际运输特点, 以包括装运费用、库存费用和租赁费用在内的总的调配费用最小为目标构建优化模型, 同时结合客户对空托盘的时间约束构建路径运送时间优化模型. 利用 ILOG Cplex 数学优化软件对模型求解. 最后通过算例分析验证了共用模式下该模型的可行性及优越性.

关键词: 决策方案; 综合运输; 空托盘调配; 托盘共用模式; 优化模型

中图分类号: U294.3

文献标志码: A

Study of decision scheme optimization for empty pallets dispatching based on pallet pool mode

ZHOU Kang, HE Shi-wei, SONG Rui, LI Hao-dong

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. Correspondent: ZHOU Kang, E-mail: zhoukang@bjtu.edu.cn)

Abstract: The scientific dispatching of empty pallets based on the pallet pool mode can improve the utilization rate of pallets, improve transport efficiency, reduce resource consumption and save transport costs. Based on the pallet pool mode, this paper studies the scheme of empty pallet dispatching in the transport of highway and railway. To refine operation mode of nodes, it's necessary to split the nodes of empty pallet dispatching network. The paper considers various factors of influencing the empty pallet transportation, according to the actual transport characteristics, takes the minimum total dispatching cost which includes shipping cost, inventory cost and rental cost as objective to construct optimization model, and constructs transit time optimization model of path based on the time constraint of customers for empty pallets dispatching. Using the ILOG Cplex mathematical software to solve the model. Finally, the feasibility and superiority of this model is confirmed by a case.

Key words: decision scheme; multimodal transport; empty pallets dispatching; pallet pool mode; optimization model

0 引言

目前, 我国物流单元化中所使用的大多是一次性托盘, 即商品生产企业基于提高运输过程的装卸效率、降低货物破损率等原因自购托盘运输, 托盘随货物到达收货终端后就退出运输环节, 因此浪费了大量资源, 没有充分实现托盘的价值. 在托盘共用以及空托盘回收方面, 国外已经拥有相对成熟的理论和实践^[1, 2]. 近年来, 我国相关专家学者对于托盘共用模式的研究取得了一定成果, 吴清一^[3, 4]对我国建立托盘共用系统的必要性和实施的关键问题进行了分析, 并

提出托盘共用系统所带来的巨大经济效益及社会效益. 金寿松等^[5]参照银行的建设经验及经营模式, 提出“托行”式的托盘联营模式, 并推出中国托盘联营公司的构建思路以及相应的管理信息系统构架. 李晓等^[6]指出, 现阶段快速实现我国托盘联营的有效组织方式是构建托盘租赁战略联盟, 并对联盟模式下的分配问题进行了研究. 周康等^[7]提出适合企业内部使用及网络流通条件下的托盘共用模式, 及针对铁路运输环节的托盘共用模式.

共用模式能够实现托盘利用率的最大化, 减少空

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修回日期: xxxx-xx-xx.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014YJS071).

作者简介: 周康(1983—), 男, 博士生, 从事交通运输规划与管理、运输组织的研究; 何世伟(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通运输规划与管理、物流及供应链管理等研究.

托盘的闲置及回送. 托盘共用模式的最理想状态是各个托盘服务站点随货物到达的托盘恰好能够满足该服务站点周边区域托盘的需求, 且无剩余. 但是由于各地区适合托盘运输的货物分布不均衡, 以及有些货物的运输存在季节性, 势必导致随货物运输的托盘在区域范围内出现部分地区空托盘过剩而另一部分地区空托盘不足的情况. 对于空托盘过剩的地区, 有必要对部分空托盘进行经济合理地调运, 以实现托盘效益最大化. 任建伟等^[8,9]对托盘回收中存在的确定性因素进行了分析, 在此基础上构建了针对托盘回收的随机规划模型, 对模型进行确定性等价转换, 利用lingo求解. 另外, 他们又提出了用于托盘共用系统运营管理者对托盘进行科学分派与回收的两阶段随机机会约束调度模型, 并给出了相应的求解方法. 但是, 上述研究都忽略了空托盘调运过程中是重要的影响因素: 长距离调运时的运输路径 (包括运输方式) 选择以及调运的时效性.

在上述相关研究基础上, 论文针对托盘共用模式下不同地区之间空托盘严重失衡的情况进行空托盘调配方案优化研究. 空托盘调配既有与货物运输和空箱调运相同之处, 也有其自己的特点. 由于托盘与集装箱等大型集装器具不同, 其制造成本较低, 制造工艺相对简单, 因此当空托盘调运费用过高或调运时间过长时, 可以考虑通过在空托盘需求地附近租赁、购买甚者制造托盘来满足需要. 因此论文充分考虑空托盘调运的费用、时间等影响因素, 以公路和铁路作为主要运输方式, 以空托盘调运费用最小为目标建立空托盘调配优化模型.

1 托盘供需点之间的调配网络

以公路与铁路作为空托盘调运的运输服务方式, 以区域内的空托盘供需点以及运输网络上的服务节点 (物流节点、货场、托盘服务节点等) 作为空托盘调配网络的节点, 以连接区域内所有节点的联弧为运输服务路径. 具体网络结构如图1所示 (图中联弧上数据为路段长度, 单位: 公里).

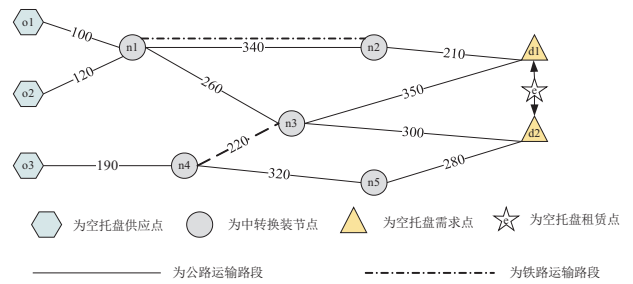


图1 空托盘供需点之间的运输网络

为了能够更直观的分析节点处的作业过程, 将节点细分为到达点和出发点, 根据节点处的作业情况分别用不同的作业联弧连接, 并且将相邻两点之间具有两种运输方式的同一路段拆分为两条路段, 具体描述如图2所示.

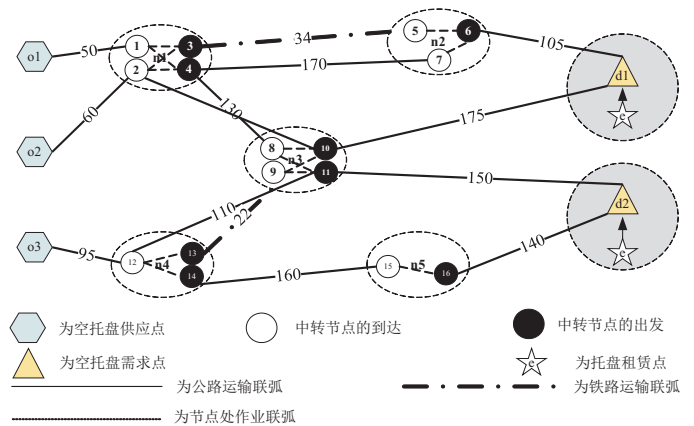


图2 有节点作业的空托盘调配网络结构图

2 共用模式下空托盘调配方案优化模型

2.1 问题描述

在托盘共用网络内, 当不同地区间的空托盘供需存在较大不平衡时, 有必要对空托盘进行调配. 假设根据空托盘需求情况, 现需要将一批空托盘从空托盘供应地 o 运达目的地 d . 运输路径由不同运输方式的路段以及运输方式之间的中转换装节点构成, 任意相连的两个节点之间有公路运输或铁路运输, 每一 o 、 d 对之间可供选择的路径有 q 条. 空托盘在衔接点处可实现不同运输方式之间的中转换装, 换装过程要花费一定的时间和费用. 整个运输过程还受线路运输能力和转载次数的约束, 客户对空托盘在路径上的运输时间有合理的区间要求, 过早会产生存储费用, 过晚产生延误费用. 通过路径优化, 选择运输过程中每条路径的节点、节点间最佳路段以及路段上运输方式组合, 以使总费用 (包括运输费用、中转换装费用、租赁费用以及库存费用) 最低, 且尽

量满足托盘需求用户的要求期限^[10]. 共用模式下的托盘要具备通用性, 规格类型较少, 目前“国标”规定以1 200mm×1 000mm及1 100mm×1 100mm两种规格为主. 空托盘远距离调配时各类型托盘调运量均较大, 可以分别对不同类空托盘供需情况单独优化.

2.2 模型假设

在建模之前, 需要做以下假设:

1) 空托盘从供应点到需求点的单位运输成本、供应点的单位库存成本、路段上空托盘的最大运输能力均与托盘类型无关;

2) 运输过程中相邻两节点间只能选择一种运输方式和一条运输路段;

3) 需求点的空托盘需求量都能被满足, 当供应点处托盘不能满足需求点的需求时, 需求点通过租赁共用系统外的托盘来满足需求 (所有费用转化为租赁费);

4) 每条路径的起点为空托盘的供应点, 终点为需求点, 且每条路径有且只有一个供应点, 一个需求点;

5) 空托盘在不同运输方式之间的换装只能发生在节点处, 且在各节点最多进行一次换装作业, 换装时不产生库存;

6) 运输成本与运距成正比.

2.3 参数设定

用有向图 $G = (N, A)$ 表示空托盘调配网络. 定义 P 为所有能向空托盘需求点 d 提供空托盘的运输路径集合, p 为路径集合内的一条路径, 满足 $p \in P$; N 为路径上的节点集合, 节点 $i \in N$; A 为节点联弧集合, $A = A_S \cup A_T$, 其中, A_S 为节点间运输路段联弧集合, A_T 为节点处作业联弧集合, $a \in A$; o 、 d 分别表示托盘供应点、需求点 (o 为路径上的第一个节点, d 为路径上的最后一个节点), O 、 D 分别为供应点、需求点集合, $o \in O$ 、 $d \in D$, 且 $O \subset N$ 、 $D \subset N$; K 为运输方式集合, $k \in K$; s_o 为供应点 o 所能提供的空托盘数量; d_d 为需求点 d 需求的空托盘数量; c_a 为联弧 a 上的单位空托盘运输费用或作业费用; v^k 为不同运输方式的平均运输速度; $\gamma_{od}^p \in \{0, 1\}$, 如果 o 、 d 间调运空托盘选择的第 p 条路径, 则 $\gamma_{od}^p = 1$, 否则, $\gamma_{od}^p = 0$; $\delta_{od}^{pa} \in \{0, 1\}$, 如果 o 、 d 间调运空托盘选择的第 p 条路径中包含路段联弧 a , 则 $\delta_{od}^{pa} = 1$, 反之, $\delta_{od}^{pa} = 0$; $[e, l]$ 为需求点 d 所期望的运送时间范围, e 为最早到达所用时长, l 为最晚到达所用时长; x_{od}^p 为 p 路径上托盘由供应点 o 到需求点 d 的托盘量 (即路径上的货流量); r 为空托盘需求点向共用系统外租赁空托盘的单位租金;

h_d 为空托盘需求点向系统外租赁空托盘的数量; c_o 为供应点 o 的单位库存成本, q_o 为剩余库存量; w_a 为联弧 a 上的流量; m_a 为联弧 a 上的最大空托盘输送能力; t_a^p 为路径上联弧的作业时间 (包括路段上的运输时间以及节点处的作业时间); t_{od}^p 为 p 路径上托盘由供应点 o 到需求点 d 的实际到达所用时间^[11].

2.4 优化模型及约束条件

$$\min \tau = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} \gamma_{od}^p \delta_{od}^{pa} x_{od}^p c_a + \sum_{o \in O} c_o q_o + \sum_{d \in D} r h_d \quad (1)$$

$$\min t = \max(t_{od}^p - l, 0) + \max(e - t_{od}^p, 0) \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} x_{od}^p \leq d_d, \forall d \in D \quad (3)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \gamma_{od}^p x_{od}^p + h_d = d_d, \forall d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P} x_{od}^p \leq s_o, \forall o \in O \quad (5)$$

$$w_a = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \delta_{od}^{pa} x_{od}^p, \forall a \in A \quad (6)$$

$$w_a \leq m_a, \forall a \in A \quad (7)$$

$$q_o = s_o - \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \gamma_{od}^p x_{od}^p, \forall o \in O \quad (8)$$

$$t_{od}^p = \sum_{a \in A} \delta_{od}^{pa} t_a^p, \forall o \in O, d \in D, p \in P \quad (9)$$

式(1)为目标函数, 计算空托盘最小调配费用, 第一项为调运的运输及中转换装费用, 第二项为空托盘供应点的剩余空托盘的库存费用, 第三项为需求点 d 租赁费用; 式(2)表示路径总的运输时间尽量满足空托盘需求客户的要求; 式(3)、(4)为需求约束, $\sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \gamma_{od}^p x_{od}^p + h_d$ 表示最终运送到需求点 d 的空托盘数量与 d 点的空托盘租赁数量之和, 它应该与需求点 d 对空托盘的需求量 d_d 相等; 式(5)为供给约束, 每一个空托盘供给点向所有需求点提供的空托盘量不大于库存量; 式(6)为路径上联弧的流量约束, 用于计算联弧 a 上所有通过其上的路径的流量之和; 式(7)为能力约束, 联弧 a 上的空托盘调运量应该小于路段上的最大输送能力 m_a ; 式(8)为库存约束, q_o 为供应点 o 总的剩余托盘数量, 等于该供应点所能提供的托盘量减去实际调运的空托盘数量; 式(9)用于计算各 o 间空托盘调运的可选路径上的运送时间. 其中, x_{od}^p 为决策变量.

3 模型求解

3.1 模型处理

上述优化模型描述的是多目标、多约束的最短路问题. 因此, 很难直接通过单纯的数学优化软件求得精确值. 分析模型特征能够发现, 两个模型均为求解最小值, 可以采用惩罚函数对目标函数(2)进行处理, 使上述双目标优化模型变为单目标模型, 然后利用优化软件或智能算法求解.

构建惩罚函数:

$$f(t_{od}^p) = \begin{cases} M_1(a - t_{od}^p) & t_{od}^p < e \\ 0 & e \leq t_{od}^p \leq l \\ M_2(t_{od}^p - b) & t_{od}^p > l \end{cases} \quad (10)$$

其中, M_1 为空托盘提前到达的惩罚系数, M_2 为空托盘晚于客户期望时间到达的惩罚系数.

因此, 目标函数(1)和(2)可以合并为:

$$\min \tau = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} \delta_{od}^{pa} x_{od}^p c_a + \sum_{p \in P} f(t_{od}^p) x_{od}^p + \sum_{o \in O} w_o q_o + \sum_{d \in D} r h_d \quad (11)$$

3.2 求解方法

对共用模式下的空托盘进行调配优化时, 需要先确定供应点与需求点之间的可行路径, 当供需点之间的路径规模较大时, 可以以网络中两点间 k 短路作为可选路径集, 具体获取方法参见文献[12]. 确定所有可行路径后, 对路径进行标号, 然后根据路径确定网络上的所有弧段, 并对其标号. 对具有路径及弧段标号的路网进行参数标定, 根据目标函数及约束条件, 采用优化软件 ILOG Cplex 进行求解. ILOG Cplex 中包含一系列可配置的算法程序: 单一优化程序、界限优化程序以及混合整数优化程序. 可根据待解决问题的特点选择相应的优化程序. 其中混合整数优化程序能够为大部分混合整数规划问题提供快捷、高效的解决方案. 在 Cplex 代码的集合表示中, 路径和联弧之间、路径与货流之间以及路径上弧段与时间之间采用关系矩阵的方式表示. 具体应用可参考雒兴刚的优化软件与应用[13].

4 算例分析

假设托盘共用系统内有三处空托盘富余点, 令其为空托盘供应点 o_1 、 o_2 、 o_3 . 两处空托盘需求点 d_1 、 d_2 , 其托盘租赁费用分别为 0.35 元/片/天和 0.32 元/片/天, 根据托盘平均租赁周期为 20 天记, 则租赁费用分别为 7 元/片和 6.4 元/片. 各 o 、 d 点之间的路段连接情况如图 2 所示, 为便于求解计算, 将调运及库存的空托盘的量转换为吨, 按每片空托盘重 20 公斤

计, 路段上的数值为单位运输费用 (元/吨). 节点处的中转换装时间: 铁路-公路 4 小时, 公路-铁路 5 小时, 中转换装费用: 铁路-公路 20 元/吨, 公路-铁路 22 元/吨, 根据空托盘量确定所需装卸人员以及机械 (即换装的空托盘量不影响换装时间, 仅与换装的装卸费用相关), 空托盘供应点及需求点均按换装费率计算装卸费用. 另外, 惩罚系数 M_1 取值为每片空托盘的单位库存费用, 惩罚系数 M_2 取值为单位托盘的租赁费用换算为每小时的单位空托盘租赁费用. 各 o 、 d 对间的可行运输路径如表 1 所示. 运输费用、库存费用等相关参数如表 2、3 所示. 空托盘供需情况如表 4 所示. 各空托盘需求点对不同供应点的空托盘调运时间约束如表 5 所示. 篇幅所限, 不再一一给出输送能力等参数.

表 1 各供需点之间的运输路径

空托盘供需点	运输路径
$o_1 - d_1$	o1-1-3-5-6-d1, o1-1-4-7-6-d1, o1-1-4-8-10-d1
$o_1 - d_2$	o1-1-4-8-11-d2, o1-1-4-8-11-12-14-15-16-d2
$o_2 - d_1$	o2-2-3-5-6-d1, o2-2-4-7-6-d1, o2-2-4-8-10-d1
$o_2 - d_2$	o2-2-4-8-11-d2, o2-2-4-8-11-12-14-15-16-d2
$o_3 - d_1$	o3-12-13-9-10-d1, o3-12-15-9-10-2-3-5-6-d1, o3-12-13-9-10-2-4-7-6-d1
$o_3 - d_2$	o3-12-13-9-11-d2, o3-12-14-15-16-d2

表 2 不同运输方式的平均运输速度以及运输费率

运输方式	平均运输速度 (公里/小时)	运输费率 (元/吨·公里)
公路	80	5
铁路	60	1

表 3 库存费用

空托盘供应点	单位库存费用 (元/吨)
o_1	2
o_2	1
o_3	1.5

表 4 空托盘的供需情况

供应点	供应量 (片)	需求点	需求量 (片)
o_1	5700	d_1	11970
o_2	11500		
o_3	8500	d_2	6850

表 5 客户期望的运送时间

空托盘供需点	期望运送时长 (小时)
$o_1 - d_1$	[8,12]
$o_1 - d_2$	[7,16]
$o_2 - d_1$	[10,13]
$o_2 - d_2$	[25,30]
$o_3 - d_1$	[9,11]
$o_3 - d_2$	[10,12]

4.1 算例求解

利用ILOG Cplex优化软件进行求解计算,在不考虑空托盘需求点对调运时间约束的前提下得到如表6所示结果.考虑时间影响因素后,利用目标函数(11)及其约束条件求解,得到如表7所示的优化结果.

表6 空托盘调配优化方案1

空托盘需求点	最优运输路径	运送量	租赁量	总调配费用
d_1	o1-1-3-5-6-d1	7210	4760	117834.4
	o1-1-4-7-6-d1			
	o2-2-4-7-6-d1			
d_2	o3-12-13-9-10-d1	4500	2350	
	o3-12-13-9-11-d2			

表7 空托盘调配优化方案2

空托盘需求点	最优运输路径	运送量	租赁量	总调配费用
d_1	o1-1-3-5-6-d1	7210	4760	125559.7
	o1-1-4-7-6-d1			
	o2-2-3-5-6-d1			
d_2	无调运	0	6850	

4.2 结果分析

从计算结果中可以看到,在租赁费用固定的前提下,空托盘调配费用与运送量和运输路径、时间约束等因素有关.不考虑空托盘需求点的时间约束,计算结果如表6所示,总的运送量为11710片,总调配费用为117834.4元,比全部采用租赁节省9795.6元;考虑需求点的时间约束条件后,由于部分调运路径产生时间惩罚费用,导致总调配费用增加.部分o、d间的调运路径由于运输时间与需求点要求时间差异较大造成总调配费用过高,而发生改变(如路径: o2-2-4-7-6-d1改为o2-2-3-5-6-d1).另外,由于时间惩罚费用过高使得部分需求点通过租赁代替调运;运输距离与调配费用的关系在论文中体现在单位运输费用(路段距离与每公里每吨货物运费的乘积)与总调配费用的关系上,短距离调运时,公路运输由于时效性高,在空托盘需求紧迫时,其总的调配费用要小于铁路运输.当长距离运送时,由于公路运输的运输费用高于铁路运输,且其时效性不是很明显,因此铁路运输在调配费用上具有优势(如路径: o3-12-13-9-10-d1);在其它条件不变的前提下,随着空托盘的租赁费的降低,需求点所需的空托盘量逐渐由调运转为租赁.因此,在共用模式下,根据实际运输情况采用合理的运输组织方式能够大大降低调配成本,从而可以节约大量资源和费用,提高托盘的利用率.

5 结 论

以共用模式下的空托盘调配优化方案为研究目标,通过分析与之相关的影响因素,构建以运输费用(包括中转换装费用)、库存费用、租赁费用最小为目标的优化模型,同时考虑空托盘需求客户对空托盘的时效性要求.通过构建惩罚函数将带有时间影响因素的双目标模型转化为单目标模型,在此基础上给出了针对模型特征的求解方法.利用ILOG Cplex优化软件对模型求解,通过算例对简单网络上的空托盘调配进行分析,达到了优化目的,对于大规模的复杂网络而言,需要通过k短路算法等优化方法对路径进行优化后再进行求解,由于篇幅所限,该部分内容将在今后做进一步研究.

论文虽然针对共用模式下的空托盘调配方案进行优化研究,但是该模型同样适用于其他相似的物流单元化集装器具和设施、设备的调配.

参考文献(References)

- [1] Murray J. Pallet pool is key to Swedish cargo handling efficiency [J]. The Journal of ICHCA, 1967, 3(3): 27-29.
- [2] Ray C D, Michael J H, Scholnick. Supply chain system costs of alternative grocery industry pallet systems [J]. Forest Products Journal, 2006, 56(10): 52-57.
- [3] 吴清一. 论中国托盘共用系统的建立[J]. 物流技术与应用, 2003, 8(12): 1-4.
(Wu Q Y. Discussion on set up of China pallet pool system [J] Logistics & Material Handling, 2003, 8(12): 1-4.)
- [4] 吴清一. 再论我国托盘共用系统的建立[J]. 物流技术与应用, 2004, 9(1): 14-19.
(Wu Q Y. Double-discussion on set up of China pallet pool system [J]. Logistics & Material Handling, 2004, 9(1): 14-19.)
- [5] 金寿松, 熊秋香, 蒋美仙, 等. 中国托盘联营公司及其建设策略的研究[J]. 工业工程, 2008, 11(4): 19-22.
(Jin S S, Xiong Q X, Jiang M X, et al. Study on Chinese pallet pool Co. Ltd and its construction stratagem [J]. Industrial Engineering Journal, 2008, 11(4): 19-22.)
- [6] 李晓, 金寿松, 冯定忠. 基于合作博弈托盘租赁联盟收益分配的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(1): 84-87.
(Li X, Jin S S, Feng D Z. Research on The benefit distribution of pallet rental alliance based on game theory [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2012, 40(1): 84-87.)
- [7] 周康, 何世伟, 游玲君. 基于铁路运输的托盘共用模式研究[J]. 铁道运输与经济, 2013, 35(10): 83-87.
(Zhou K, He S W, You L J. Study on palletized share mode

- based on railway transportation [J]. *Railway Transport and Economy*, 2013, 35(10): 83-87.)
- [8] 任建伟, 章雪岩. 基于改进托盘共用系统的托盘回收模型[J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(3): 482-485.
(Ren J W, Zhang X Y, Pallet recovery model based on modified pallet pool system [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(3): 482-485.)
- [9] 任建伟, 章雪岩. 托盘共用系统托盘回收随机规划模型研究[J]. *控制与决策*, 2010, 25(8): 1211-1214.
(Ren J W, Zhang X Y, Pallet recovery stochastic programming model of pallet pool system [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(8): 1211-1214.)
- [10] 康凯, 牛海姣, 朱越杰等. 多式联运中运输方式与运输路径集成优化模型研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(5): 1672-1675.
(Kang K, Niu H J, Zhu Y J, et al. Research of improved integrated optimization model for mode and route in multimodal transportation [J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(5): 1672-1675.)
- [11] 周康, 何世伟, 宋瑞等. 共用模式下的铁路空托盘调运优化模型[J]. *北京交通大学学报*, 2014, 38(3): 22-26.
(Zhou K, He S W, Song R, et al. Optimization model of railway empty pallet dispatching based on the mode of pallet pool [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2014, 38(3): 22-26.)
- [12] 王保华, 何世伟, 宋瑞等. 综合运输体系下快捷货运网络流量分配优化模型及算法[J]. *铁道学报*, 2009, 31(2): 12-16.
(Wang B H, He S W, Song R, et al. Multi-modal express shipment network routing optimization model and algorithm [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2009, 31(2): 12-16.)
- [13] 雒兴刚. 优化软件与应用[EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/f3954605b52acfc789ebc95d.html>.
(Luo X G. Optimization software and application [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/f3954605b52acfc789ebc95d.html>.)