

多目标约束下的联盟混合轴辐式运输网络优化

王建伟¹, 甘家华¹, 毛新华¹, 唐穆君²

(1. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安市社会科学院, 陕西 西安 710054)

摘要:以混合轴辐式运输网络为目标网络结构,对中小物流企业联盟运输网络进行优化,将联盟组建过程中不能损害成员企业利益的个体运营成本约束、协同完成物流业务的时间约束作为主要约束条件,构建了以单位运输成本、单位货物处理成本、运输车型为变量的目标约束混合轴辐式运输网络优化模型,旨在实现多重约束下的联盟网络总成本最小,最后借助模拟退火(simulated annealing, SA)算法对模型进行了求解。研究表明:该模型对网络的枢纽选址、成员企业间运输线路选择和运输量分配进行了有效的优化,使优化后联盟的运营成本与直达式网络相比降低了 6.8%,与纯轴辐式网络相比降低了 4.71%,与普通混合轴辐式网络相比增加了 1.86%,并且能够在符合成员利益情况下满足协同运输的时效性要求,具有对企业间原有运输网络改造幅度较小的特点。

关键词:交通工程;中小物流企业联盟;混合轴辐式网络;运输网络优化模型;模拟退火算法

中图分类号:U491

文献标志码:A

Optimization of hybrid hub-and-spoke transportation network of alliance under constraint of multi-objective

WANG Jian-wei¹, GAN Jia-hua¹, MAO Xin-hua¹, TANG Mu-jun²

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Xi'an Academy of Social Science, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Hybrid hub-and-spoke transportation network was established as an objective network structure to optimize the transportation network of small and medium-sized logistics enterprise alliance network. Based on the principles that alliance establishment couldn't damage the member enterprises' interests as well as time was constrained during collaborative logistics business, hybrid hub-and spoke transportation networks optimization model, taking unit transportation cost, unit cargo handling cost and car types as variables, was established to minimize the total costs of the transportation network. Finally, the model was solved by Simulated Annealing (SA) algorithm. The results show that this model can effectively optimize the network hub location choice, transportation line choice between member enterprises and transportation volume distribution. And the optimized union operation cost reduce by 6.8% and 4.71% compared with direct network and pure hub-and-spoke network respectively, while it increases by 1.86%

收稿日期:2014-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41301130);国家社会科学基金项目(09XJY004);浙江省交通运输厅科技项目(2014T01);

陕西省社会科学基金项目(08E040)

作者简介:王建伟(1965-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,E-mail:wjianwei@chd.edu.cn。

compared with the ordinary hybrid hub-and-spoke network. Besides, this model can meet the requirements of timeliness for collaborative transport can satisfy the membership benefits, and has the characteristics of small changes to the original transportation network between enterprises. 3 tabs, 1 fig, 16 refs.

Key words: traffic engineering; small and medium-sized logistics enterprise alliance; hybrid hub-and-spoke networks; transportation networks optimization model; simulated annealing algorithm

0 引言

中国物流市场主体过散、过弱,企业间缺乏协作,使现有物流运输网络由大量分散的“点-点”运输线路构成,这种运输网络结构是导致目前运输组织化程度低、总体效率不高、物流成本居高不下等问题的重要原因之一。近年来,物流市场的各类企业都在探索集约化经营之道,整合优势资源走联盟发展之路渐成大势所趋,特别是对于占物流市场90%以上的中小企业,由于不具备兼并收购的资金实力与管理能力,通过组建联盟实现优势互补、互利共赢,已成为企业快速扩张运输网络、扩大业务覆盖范围、降低物流成本的最佳途径^[1]。成员企业利用联盟伙伴运输网络的互补性和资源的共享性,可以用比自建网络更少的时间和费用实现运输网络广度和深度的拓展。因此,为适应物流网络化需要,整合联盟成员资源,对传统“点-点”式网络结构进行优化,构建经济、高效的运输网络,成为中小物流企业联盟运输网络规划要解决的首要问题。

轴辐式运输网络能够通过合并货物运输提高实载率,实现集约化、规模化运输,从而降低运输成本,其结构可以分为纯轴辐式结构和混合轴辐式结构。纯轴辐式结构要求各节点之间的所有运输必须经过枢纽场站进行中转,但实践中暴露出该结构会产生迂回线路、增加装卸次数和等待时间等缺点;混合轴辐式结构是将直达线路引入纯轴辐式网络,构成由直达运输和中转运输组成的运输系统,它继承了纯轴辐式网络实载率高的优点,同时允许货运量较大的起止节点采用直达运输,减少行驶距离和装卸费用。另外,建立混合轴辐式网络对中小物流企业联盟成员间原有“点-点”式网络的改变较小,在实践中可行。近年来学术界对混合轴辐式结构的运输系统决策问题开始逐渐关注,已经取得的研究成果主要集中在2个方面:一是按照整体最优的思路,根据具体问题构建混合轴辐式网络决策模型,主要解决枢纽选址和运输线路选择等问题;二是针对混合轴辐式网络模型算法的研究,目前主要采用遗传算法等

启发式算法进行求解。具有代表性的有:翁克瑞等研究了轴辐式运输网络的理论及应用,对不同网络结构进行了具体对比,指出纯轴辐式网络会产生“绕道运输”,而混合轴辐式网络可以避免该问题^[2];Zapfel等以奥地利一家物流企业为研究对象,针对其纯轴辐式运输网络存在的不足,设计建立了混合轴辐式网络模型,并利用启发式算法进行求解,验证了混合轴辐式网络通过允许直达运输能够平衡纯轴辐式网络分配不均衡的问题,有效降低了整体费用^[3];Barcos等设计了包含沿途停靠点的零担货物运输网络,并利用改进的蚁群算法求解验证^[4];张健等以整体运营成本最低为目标构建了公路快速货运混合轴辐式网络规划模型,采用遗传算法求解并与原纯轴辐式网络进行成本对比^[5];Liu等研究了混合轴辐式网络线路选择和运输量分配问题,利用启发式算法对模型进行求解^[6-8];汪传旭等根据混合轴辐式网络中数据参数的不准确性或模糊性特点,建立了模糊交互规划模型^[9];Jiang等主要针对轴辐式网络模型的构建和算法进行了研究^[10-13];姚志刚等则从枢纽及运输网络结构形态视角开展了研究工作^[14-15]。综上所述,现有研究主要是按照整体最优的思路设计运输网络,未考虑各节点企业运营成本在网络优化前后的变化情况;另外,对物流业务而言,时间约束是对物流服务质量重要的考核指标,但现有研究较少考虑到客户对时效性的要求。尤其对于中小物流企业联盟而言,一是联盟的组建不能损害成员企业利益,因此在网络设计中需要充分评估各成员企业的成本变化,不能使之高于结盟前运营成本,即个体成本约束;二是由于联盟中一项物流业务平均由2家以上企业共同完成,因此需要保障完成单笔业务的总体时间符合标准规范,即时间约束。为此,本文构建基于混合轴辐式的中小物流企业联盟运输网络模型,考虑联盟成员企业成本、协作完成物流任务的时间、不同车型折扣等约束条件下的枢纽选址、运输量分配和线路优化等网络优化问题,为决策者提供参考,利用模拟退火算法进行求解,并给出算例加以验证。

1 模型建立

1.1 模型假设

建立中小物流企业联盟混合轴辐式网络优化模型基于以下假设条件:

(1) 枢纽中心无容量限制,能够同时为多家企业提供货物中转服务;

(2) 每个企业货运站的货物处理能力大于其货物处理量;

(3) 允许存在多个枢纽中心,各企业货运站单重指派,每个企业只能连接某一个固定的枢纽中心,且连接情况已知;

(4) 无论直达运输或中转运输,所用的运输车辆均在已知的 k 种车型中选择;

(5) 货物的运输时间限制已知,且企业与枢纽中心的距离矩阵已知;

(6) 各企业间的货运量矩阵已知。

1.2 模型参数说明

在给定的联盟运输网络中,设 M 为除枢纽中心外所有联盟成员企业的集合; x_{ij} 为从 i 企业运输到 j 企业的总货运量; x_{ij}^h 为 i 企业通过枢纽中心 h 中转后运输到 j 企业的货运量; x_{ih} 为从 i 企业到枢纽中心 h 的货运量; x_{hj} 为从枢纽中心 h 到 j 企业的货运量; X_i 为 i 企业能够处理的最大货物量; X_h 为枢纽中心 h 能够处理的最大货物量; c^S 为各企业站点单位货物处理成本; c^h 为枢纽中心 h 单位货物处理成本; c_{ij}^k 为从 i 企业到枢纽中心 h ,车型为 k 时的单位运输费用; c_{hj}^k 为从枢纽中心 h 到 j 企业,车型为 k 时的单位运输费用; c_{ij}^k 为从 i 企业到 j 企业,车型为 k 时的单位运输费用; C_i 为 i 企业在加入联盟前的总运营成本; l_{ih} 为从 i 企业到枢纽中心 h 的距离; l_{hj} 为从枢纽中心 h 到 j 企业的距离; l_{ij} 为从 i 企业到 j 企业的距离; T_{ih} 为货物从 i 企业运输到枢纽中心 h 所需时间; T_h 为枢纽中心 h 单位货物处理时间; T_{hj} 为货物从枢纽中心 h 运输到 j 企业所需时间; T_{ij} 为货物从 i 企业运输到 j 企业所需时间; T_j 为货物到达 j 企业的时间; v_k 为车型 k 的平均车速。

1.3 模型建立

在时间约束下,以联盟运输网络优化后各成员企业的运营成本不高于优化前,使联盟网络的运营总成本最小为原则,建立如下数学模型

目标函数

$$\min(Z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^h (c^S + c^h) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (x_{ij} - x_{ij}^h) c^S +$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N x_{ij}^h (x_{ih}^k l_{ih} + c_{ij}^k l_{hj}) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (x_{ij} - x_{ij}^h) c_{ij}^k l_{ij} \quad (1)$$

约束条件

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = x_{ih} + \sum_{j=1}^M (x_{ij} - x_{ij}^h), i \in M \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = x_{hj} + \sum_{i=1}^M (x_{ij} - x_{ij}^h), j \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq X_i, \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M x_{ij}^h \leq X_h, i \in M \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ij}^h (c^S + c^h) + \sum_{j=1}^M (x_{ij} - x_{ij}^h) c^S + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N x_{ij}^h (c_{ih}^k l_{ih} + c_{hj}^k l_{hj}) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (x_{ij} - x_{ij}^h) c_{ij}^k l_{ij} \leq C_i, i \in M \quad (5)$$

$$\max[(T_{ih} + T_h + T_{hj}), T_{ij}] \leq T_j, i \in M, j \in M \quad (6)$$

$$0 \leq x_{ih} \leq x_{ij}, 0 \leq x_{hj} \leq x_{ij},$$

$$0 \leq x_{ij}^h \leq x_{ij}, i \in M, j \in M \quad (7)$$

在上述模型中,式(1)为目标函数,即中小物流企业联盟运输网络运营总成本最小,其中第 1、2 项为通过中转运输和直达运输在货运站和枢纽站所产生的货物处理成本,第 3、4 项为中转运输和直达运输的在途运输成本;式(2)为每个企业所发出的货物总量,是从该企业货运站点发出的直达货物量与经过枢纽站中转的货物量两部分之和;式(3)为每个企业接收的货物总量,是通过直达运输到达该企业货运站点的货物量与经过枢纽站中转驶往该企业站点的货物量两部分之和;式(4)表示企业货运站点和枢纽站处理的货物总量不超过其各自最大处理能力;式(5)是保障联盟中各成员企业利益,即各企业结成联盟后的运营成本不能超过结盟前成本 C_i ;式(6)为时间约束,保障一项物流业务由多家企业协同完成的总时间必须处于规定时限内,其中 T_{ih} 、 T_{hj} 、 T_{ij} 可分别通过 l_{ih}/v_k 、 l_{hj}/v_k 、 l_{ij}/v_k 计算;式(7)为容量约束及非负约束条件。

2 模型求解

采用模拟退火(simulated annealing, SA)算法对式(1)~式(7)进行求解。模拟退火算法是一种适合于解决大规模组合优化问题的通用而有效的近似算法,具有描述简单、使用灵活、运用广泛、运行效率高和较少受到初始条件约束等优点,并且可收敛至全局最优解,对中小物流企业联盟具有的成员企业多、约束条件多等造成的数据规模大、运算复杂的情

况较为适合^[16]。通过该算法并利用 Matlab 软件编程,求解中小物流企业联盟混合轴辐式运输网络优化模型。模型求解的算法步骤如下。

第 1 步:初始化。令初始温度为 T_0 ,随机生成一个初始解 $x_{ij(0)}^h$,并计算得到相应的目标函数值 $Z_0=Z(x_{ij(0)}^h)$ 。设定迭代次数 $k=0$,常数 C ,步长初始值 ξ_k ,终止温度 T_f 。

第 2 步:产生新状态。根据当前解 $x_{ij(k)}^h$ 按照式(1)进行扰动,产生一个新解 $x_{ij(k)}^{h'}$,计算相应的目标函数值 $Z(x_{ij(k)}^{h'})$,并令 $\Delta Z=Z(x_{ij(k)}^{h'})-Z(x_{ij(k)}^h)$ 。

$$x_{ij(k)}^{h'}=x_{ij(k)}^h+\xi_k\eta$$

(8)

式中: η 为随机变量。

第 3 步:Metropolis 准则校验。若 $\Delta Z<0$,则新解 $x_{ij(k)}^{h'}$ 被接受,作为新的当前解;若 $\Delta Z>0$,则新解 $x_{ij(k)}^{h'}$ 按照概率 $e^{-\Delta Z/T_k}$ 被接受, T_k 为当前温度,并返回第 2 步。

第 4 步:算法终止检验。若当前温度 $T_k<T_f$,则令 $X_{ij}^h=x_{ij(k)}^{h'}$,即为模型的最优解;否则令 $\xi_{k+1}=\sqrt{\frac{c}{0.25k}}\xi_k$,并按照温度衰减函数 $T_{k+1}=\alpha T_k,\alpha\in(0.5,0.99)$,进行降温,转至第 2 步。

3 案例分析

3.1 数据准备

以浙江某中小物流企业联盟为例,采用本文构建的混合轴辐式网络优化模型对其运输网络进行仿真模拟。该联盟由 10 家中小型物流企业组建而成,由于原先运输组织方式落后,过度价格竞争,造成企业物流服务水平低、运营成本高、市场秩序混乱等问题,现通过组建联盟,对其原直达式运输网络进行优化,提升企业的服务质量和核心竞争力。根据调查,该联盟各成员企业之间的货物运输量如表 1 所示。

表 1 联盟运输网络货流 OD 分布

Tab. 1 OD distribution of freight transport network t/d

成员企业	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2.1	28.9	18.3	2.5	15.8	5.8	1.2	2.4	17.7
2	2.5	0	31.2	21.8	9.6	8.9	2.3	3.5	9.5	20.4
3	3.6	19.8	0	12.5	12.5	6.4	15.9	9.4	18.2	5.9
4	2.8	11.5	15.2	0	27.2	11.8	21.5	15.8	25.6	11.8
5	6.4	1.8	2.8	5.1	0	2.7	17.9	2.5	1.5	19.4
6	12.8	6.8	1.6	2.5	2.5	0	8.6	3.9	3.7	1.5
7	8.9	9.4	2.7	2.7	9.7	2.9	0	21.5	18.2	2.9
8	21.3	8.4	16.8	3.8	15.8	3.8	12.6	0	28.1	3.4
9	15.3	10.5	25.7	9.4	19.4	12.8	17.1	1.8	0	17.3
10	22.8	15.9	29.4	10.5	11.5	24.2	5.1	9.7	11.4	0

联盟运输网络中各成员企业之间的距离如表 2 所示。

表 2 联盟运输网络中成员企业间距离

Tab. 2 Distance among nodes in network km

成员企业	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	153	138	204	98	118	187	196	127	186
2	153	0	241	214	324	386	284	92	162	127
3	138	241	0	264	296	349	192	217	138	267
4	204	214	264	0	154	167	115	85	279	361
5	98	324	296	154	0	162	138	149	190	216
6	118	386	349	167	162	0	354	173	192	269
7	187	284	192	115	138	354	0	269	238	196
8	196	92	217	85	149	173	269	0	163	261
9	127	162	138	279	190	192	238	163	0	368
10	186	127	267	361	216	269	196	261	368	0

根据调查,该企业联盟在实际运输中可使用的车辆主要为 3 t、8 t 及 15 t 这 3 种车型。由调查所得的不同吨位车型运输费用情况,可以得到单位运输费用函数 $F(x)$,其中 x 为货运量

$$F(x)=\begin{cases}0.5 & 0\leq x\leq 3 \\ 0.45 & 3<x\leq 8 \\ 0.4 & 8<x\leq 5\end{cases}$$

(9)

3.2 计算结果

按照模拟退火算法,设置各参数为:初始温度 $T_0=100$,终止温度 $T_f=0.01$,常数 $C=3$,步长初始值 $\xi_k=0.3$ 。通过 Matlab 编程计算得到的结果如图 1 所示。

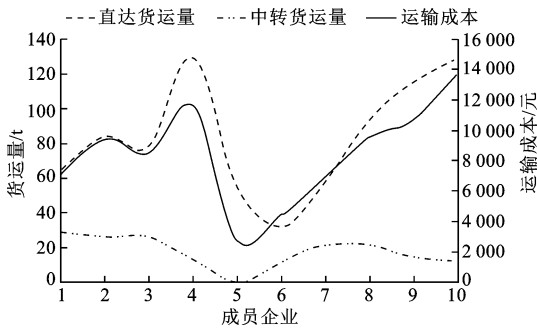


图 1 计算结果

Fig. 1 Calculation results

3.3 结果分析

根据模型计算结果,该中小物流企业联盟的枢纽中心位于成员企业 5(节点 5)处时,联盟网络的运输总费用为 84 510 元,货物平均中转率为 17%,实现了运输总成本最低。主要原因是由于成员企业 5 在物流联盟网络中的位置较优,与其他各成员企业之间的平均距离最短,为 92 km,而该企业运往其他所有企业的货物均是直达运输,不需通过中转。

为了更清晰地反映该网络结构的成本变化情况,将本文计算结果分别与纯直达式网络、纯轴辐式网络、混合轴辐式网络的总成本计算结果进行对比,结果如表 3 所示。与纯直达式运输相比,货物运输总费用平均节约 6.8%,其中节点 6 的运输总费用节约最大,为 13.12%,节点 10 的运输总费用节约最小,为 3.95%;与纯轴辐式运输相比,货物运输总费用平均节约 4.71%,其中节点 6 的运输总费用节约最大,为 9.14%,节点 10 的运输总费用节约最小,为 2.51%;与混合轴辐式网络相比,由于时间窗和成本双重约束,货物运输总费用平均增加 1.86%。其中,节点 6 的运输总费用增加最大,为 5.46%;节点 3 的运输总费用增加最小,为 0.79%。

表 3 不同网络形式的总成本比较

Tab. 3 Cost comparison among different types of transportation network 元				
成员企业	纯直达式网络	纯轴辐式网络	混合轴辐式网络	带个体成本约束和时间约束的混合轴辐式网络
1	7 702	7 591	7 011	7 092
2	10 014	9 878	9 316	9 411
3	9 262	9 124	8 404	8 471
4	12 354	12 036	11 396	11 548
5	3 072	2 861	2 571	2 692
6	4 976	4 758	4 087	4 323
7	7 281	7 063	6 632	6 844
8	10 002	9 824	9 328	9 491
9	11 514	11 267	10 489	10 708
10	14 503	14 288	13 702	13 930
总计	90 680	88 690	82 936	84 510

4 结 语

(1)中小物流企业通过建立联盟,并对整体运输网络进行一体化优化,尤其形成具有混合轴辐式的运输网络结构,开展企业间协同运作,能够有效提高运输组织化程度,提高运输效率和服务质量,降低物流成本。

(2)针对中小物流企业联盟组建中不能损害各成员企业利益的个体运营成本约束,协同完成物流业务的时间约束等特点,综合考虑单位运输成本、单位货物处理成本、运输车型等因素,构建了基于混合轴辐式结构的中小物流企业联盟运输网络优化模型。模型显示在多重约束情况下,对网络的枢纽选址、成员企业间运输线路选择和运输量分配进行优化,能够实现联盟运输网络成本最优,在此基础上采用模拟退火算法对模型进行求解。

(3)案例应用分析表明,本文构建的联盟混合轴辐式运输网络不仅能够保障成员企业的利益不受损害,满足协同运输的时效性要求,而且能大大降低运输成本,使优化后的运输网络与原有的直达式网络相比,运营成本降低约 6.8%,与纯轴辐式网络相比,运营成本降低约 4.71%,且该模型对企业间原有运输网络的改造幅度更小,比其他网络的效果更为显著,具有重要的应用价值。

(4)中小物流企业联盟运输网络具有节点多、层次性强、结构复杂、网络进化快等复杂网络的特点,本文所提出的基于混合轴辐式网络优化模型只是其中 1 种运输网络优化方法,实际中更多的联盟运输网络情况更为复杂,涵盖了直达型、通道型(多点相串)、HS 型、环路型、混合型等多种形式。因此,在复杂网络形态下进行综合优化是今后进一步研究的方向。

参考文献:

References:

[1] 交通运输部道路运输司. 货运与物流企业转型发展典型案例[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
The Ministry of Transport's Road Transport Division. Typical cases study on freight and logistics enterprise transformation[M]. Beijing:China Communications Press,2013. (in Chinese)

[2] 翁克瑞,杨 超. 顺应潮流的轴-辐式物流网络[J]. 物流技术,2006(7):14-16.
WENG Ke-rui,YANG Chao. On hub-and-spoke logistics networks[J]. Logistics Technology,2006(7):14-16. (in Chinese)

[3] Zäpfel G,Wasner M. Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics providers[J]. International Journal of Production Economics,2002,78(2):207-220.

[4] Barcos L,Rodriguez V M,Álvarez M J,et al. Routing design for less-than-truckload motor carriers using ant colony techniques[J]. General Information,2010,46(3):367-383.

[5] 张 健,吴耀华,刘 沛,等. 公路快速货运复合轴辐式网络规划分析[J]. 山东大学学报:工学版,2008,38(5):6-13.
ZHANG Jian,WU Yao-hua,LIU Pei,et al. Hybrid hub-and-spoke network planning of road express freight[J]. Journal of Shandong University:Engineering Science,2008,38(5):6-13. (in Chinese)

[6] Liu J Y,Li C L,Chan C Y. Mixed truck delivery sys-

- tems with both hub-and-spoke and direct shipment [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2003, 39(4): 325-339.
- [7] Melkote S, Daskin M S. An integrated model of facility location and transportation network design [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001, 35(6): 515-538.
- [8] 黄纯辉, 张庆年, 徐亚. 基于混合轴辐式的运输网络决策模型 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 37(5): 974-987.
- HUANG Chun-hui, ZHANG Qing-nian, XU Ya. Study on the evolution mechanism and optimization of regional logistics network structure [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 37(5): 974-987. (in Chinese)
- [9] 汪传旭, 蒋良奎. 基于混合轴-辐结构的区域运输网络优化模糊交互规划模型 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23(2): 84-91.
- WANG Chuan-xu, JIANG Liang-kui. Interactive fuzzy programming model for optimization of extended hub-and-spoke regional transportation networks [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(2): 84-91. (in Chinese)
- [10] Jiang M, Luo Y P, Yan S Y. Stochastic convergence analysis and parameter selection of the standard particle swarm optimization algorithm [J]. *Information Processing Letters*, 2007, 102(1): 8-16.
- [11] Nagy G, Salhi S. Location-routing Issues, models and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 649-672.
- [12] 方晓平, 何开先, 陈维亚, 等. 无容量限制的混合轴辐式零担运营网络优化 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(1): 126-130.
- FANG Xiao-ping, HE Kai-xian, CHEN Wei-ya, et al. Routing optimization of uncapacitated mixed hub-and-spoke network for less-than-truckload transportation [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(1): 126-130. (in Chinese)
- [13] Li J, Lu W H. Full truckload vehicle routing problem with profits [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(2): 146-152.
- [14] 姚志刚, 武颖丽, 周伟, 等. 公路运输站场空间结构演化分析 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2007, 27(2): 81-84.
- YAO Zhi-gang, WU Ying-li, ZHOU Wei, et al. Spatial structure evolvement of highway transportation terminal [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2007, 27(2): 81-84. (in Chinese)
- [15] 杨光华. 区域物流网络结构的演化机理与优化研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- YANG Guang-hua. Study on the evolution mechanism and optimization of regional logistics network structure [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [16] 李金忠, 夏洁武, 曾小芸, 等. 多目标模拟退火算法及其应用研究进展 [J]. *计算机工程与科学*, 2008, 35(8): 77-88.
- LI Jin-zhong, XIA Jie-wu, ZENG Xiao-hui, et al. Survey of multi-objective simulated annealing algorithm and its applications [J]. *Computer Engineering & Science*, 2008, 35(8): 77-88. (in Chinese)
- (上接第 102 页)
- sion by vibration method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(11): 2988-2991. (in Chinese)
- [9] 柴生波, 马石城. 考虑抗弯刚度的频率法测索力实用公式 [J]. *中外公路*, 2011, 31(5): 99-103.
- CHAI Sheng-bo, MA Shi-cheng. Practical formulas for measurement of cable-force by frequency method of considering bending stiffness [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2011, 31(5): 99-103. (in Chinese)
- [10] 李胜生, 张雷, 林立, 等. 考虑刚度及铰支边界条件的短索索力求解方法 [J]. *上海理工大学学报*, 2010, 32(6): 519-524.
- LI Sheng-sheng, ZHANG Lei, LIN Li, et al. Solving method for short cable tension in consideration of cable stiffness and simply supported boundary condition [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2010, 32(6): 519-524. (in Chinese)
- [11] 刘光众, 周岱, 马骏, 等. 剪切来流作用下的拉索流致振动分析 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2013, 30(2): 65-69.
- LIU Guang-zhong, ZHOU Dai, MA Jun, et al. Analysis of flow-induced vibration of cable in shear flow [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2013, 30(2): 65-69. (in Chinese)
- [12] 宋一凡. 公路桥梁动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- SONG Yi-fan. Highway bridge dynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2000. (in Chinese)