文章编号：1001-8360(2018)11-0001-08

铁路集装箱班列开行方案与定价综合优化研究

张小强[1,2]，　李保轶[1,2]，　吴　桐[1,2]，　陈娅娜[3]

（1. 西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　610031；
2. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都　610031；
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081）

摘　要：当前铁路集装箱班列的开行决策主要依赖决策者的主观判断，缺乏理论支撑。客户需求决定了开行方案，集装箱班列的开行方案又关系到运输时效性，而运输服务的价格和时效性又对客户需求产生影响。开行方案与定价之间互相影响，有必要对两者进行综合研究。在考虑运输网络稳定性的基础上，建立了以铁路运输企业运营收益最大为目标的混合整数规划模型。设计基于李雅普诺夫优化技术的算法，将时变网络的全局优化问题转化为一系列单一时隙优化问题，并在网络稳定性和原优化目标之间得到平衡，从理论上证明了该转化具有等价性。对于转化后的模型，运用和声搜索算法进行求解。通过算例分析验证了上述模型和算法的正确性和有效性。

关键词：铁路集装箱运输；开行方案；定价；李雅普诺夫优化；收益管理
中图分类号：U294.3　　文献标志码：A　　doi:10.3969/j.issn.1001－8360.2018.11.001

Research on Comprehensive Optimization of Railway Container Train Scheduling and Pricing

ZHANG Xiaoqiang[1,2]，　LI Baoyi[1,2]，　WU Tong[1,2]，　CHEN Yana[3]

（1. School of Transportation and Logistics，Southwest Jiaotong University，Chengdu 610031，China；
2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation，Chengdu 610031，China；
3. Transportation and Economic Research Institute，Academy of Railway Science Corporation Limited，Beijing 100081，China）

Abstract：The rail operation planning is related to the efficiency and the quality of transport services. The rail operation planning of container trains highly depends on the subjective judgement of operators，which is not optimal. For a container train operation planning，it is necessary to estimate the transport demand. The service time and rates are two important factors which directly related demands. Therefore，this paper accesses the pricing and operation planning of container trains. Based on the stability of the transportation network，a mixed integer programming model is established. The objective of the model is to maximize the incomes of railway operator. It is a global optimization problem for time-varying networks. An algorithm based on Lyapunov optimization technique is designed to transform this model into a series of single-slot optimization problems，and a trade-off between network stability and original optimization goal is obtained. Simultaneously，the equivalence of this conversion is proved theoretically. The harmony search algorithm is used to solve the transformed model. The correctness and validity of the proposed methodology are verified by a numerical study.

Key words：container trains tromsportation；operation planning；pricing；Lyapunov optimization；revenue management

在现代化货物运输方式中，铁路货运在大宗物资运输及长远距离运输方面占据优势，具有适应性强、安全程度高、运输成本低、运输能力大、环境污染程度小等特点。其中集装箱运输是铁路运输的重要组成部分，具有标准化、低成本、高效率等优势。目前集装箱运输在我国铁路货运中占比逐年上升，至2017年占比达到11％，但仍远低于发达国家40％的比例。因此，加快铁路集装箱发展是促进我国铁路货运可持续发展

收稿日期：2017-06-15；修回日期：2017-11-02
基金项目：国家社会科学基金(14BGL060)；中国铁路总公司科技研究开发计划(2017Z002-D)
作者简介：张小强(1975—)，男，江西石城人，副教授，博士。
E-mail：xqzhang@swjtu.edu.cn

的必经之路。

就目前我国铁路货运定价现状来看，基本仍然按照原铁道部铁运〔2005〕46号《铁路货物运价规则》[1]等有关规定执行，采用货物品类适用运价号等计费方法。在当前市场化的竞争环境下，实施固定运价的定价机制并不能为铁路运输企业带来较好的收益。为了推动铁路货运价格市场化，2015年国家发改委发布了《关于调整铁路货运价格进一步完善价格形成机制的通知》[2]，指出应适当调整铁路货运价格，并建立上下浮动机制。2016年中国铁路总公司拿到高铁定价权，这给予了铁路运输企业根据运输市场供求关系实行一定的折扣票价的权利。由此可见，铁路运价的改革是大势所趋，铁路货运必须建立灵活的定价机制来参与市场竞争，进而提高运营效率。

另一方面，我国铁路部门在集装箱班列开行和停靠决策方面仍然缺乏科学合理的制定机制，运营管理水平相对落后。决策制定主要依靠决策者的经验及以往的数据，带有很大的主观性，不适用于竞争市场。

从国内外的研究来看，海运集装箱以及多式联运集装箱运输是集装箱运输收益管理最早开始应用的领域。对于海运集装箱的空箱调运问题，Zhou等[3]通过空箱调运策略与最优定价策略对运输网络中的货运流量进行平衡，其需求模型是只与价格有关的线性模型。Wang等[4]研究了客户面对多条集装箱货轮线路时如何进行选择的问题，其中的选择行为采用Logit模型描述。杨华龙等[5]同时考虑了集装箱班轮运输现货市场的定价策略与合同市场的舱位分配，并建立了现货市场分时段动态定价模型、班轮公司空箱调运的舱位分配模型以及合同市场客户重箱运输模型。Xie等[6]研究了班轮公司与铁路公司组成的多式联运系统中的空箱运输问题，对于集中式模型，推导出最优的交付策略，并展示策略如何随初始库存状态而变化。刘迪等[7]在集装箱海铁联运问题的研究中，考虑了协议销售与自由销售之间定价的差异性，以此切入建立了关于集装箱海铁联运的综合箱位分配动态定价模型。Martín等[8]分析了进口集装箱的定价问题，并以实际集装箱码头的数据进行了实验。这些研究对于制定运输开行方案以及优化定价策略都有重要的贡献，但是都没有考虑运输网络的货物积压，即运输的服务水平，本文在考虑服务水平的基础上优化铁路运营企业的利润，得出最优的开行方案和运价。

对于铁路运输动态定价和开行方案的研究，研究重点集中在铁路客运服务上。Crevier等[9]提出了一种铁路货运企业运营规划与收益管理相结合的新模式。蓝伯雄等[10]构造了一个优化旅客列车开行方案和客流分配的混合整数规划模型，且此模型能够在较短的时间内获得高质量的列车开行优化方案。邓连波等[11]构造乘客出行的弹性需求函数，将乘客乘车选择归结为具有能力约束的弹性需求用户均衡问题。张小强等[12-13]在铁路集装箱班列运输动态定价的基础之上，考虑了以公路集装箱运输为代表的竞争环境，研究铁路集装箱动态定价与开行决策模型。

大多数学者将铁路集装箱运输价格制定与开行方案决策看成两个独立版块进行研究，而这二者实则互相影响，因此本文将这二者进行综合优化，同时将运输网络的稳定性纳入考虑。为求解复杂的优化问题，本文提出一种优化算法，能够将时变网络中的优化问题转化为在单一时隙上进行贪婪求解，且从数学层面上证明了转化后问题的最优值与原问题时间平均下的最优值无限接近。不仅可通过将用于保证网络稳定性的无限时间积压约束转化为最小化李雅普诺夫函数(Lyapunov)问题使得求解方便，同时，动态调整权重值的大小也能够实现原优化目标与运输网络货物积压之间的平衡。

1 模型描述

本文考虑铁路集装箱班列运输，在单一线路上有多个停靠站点。一趟列车由始发站发车，途径若干中间站后到达终到站。在需求已知的情况下，决策者对列车开行及停靠方案，各OD之间的货运量，以及各OD之间的运输价格做出决策，从而优化使得运输部门获得最大运营收益。

模型参数及各个变量的描述，见表1。

表1 模型参数及变量描述

符号	含义
O	列车运行所获得的总收益
N	车站数量，$n\in\{1,2,\cdots,N\}$，$i,j=1,2,\cdots,N$
$p_{ij}(t)$	t时隙，站点i到j的集装箱运输价格
m	运输一个集装箱的边际成本
T	总的决策时隙数量
$b_{ij}(t)$	t时隙，站点i到j的实际货运量
$b_{\max}$	最大集装箱货运量
$F(t)$	0-1变量，若列车在t时隙发车，则$F(t)$为1；反之，$F(t)$为0
K	集装箱班列固定开行成本
$\tau_i(t)$	0-1变量，若列车在t时隙停靠在站点i，则$\tau_i(t)$为1；反之，$\tau_i(t)$为0
S_i	在站点i的停靠成本
$a_{ij}(t)$	t时隙，站点i到j的实际货运需求量
$a_{\max}$	最大集装箱运输需求量
C	列车容量
$Q_{ij}(t)$	站点i到j之间在t时隙开始时的货物积压，即上一时隙的积压
V	非负权值

2　模型假设

讨论具体优化模型之前,首先做出如下基本假设:

(1) 本文研究的集装箱运输网络不存在与外界的流量转移,即为封闭网络,未被满足的货运需求将在网络中产生积压。

(2) 列车一定在始发站发车,在终到站结束。

(3) 不包含从目的地运往出发地的情况。

(4) n 个站点最多可组成$\frac{n(n-1)}{2}$个 OD 对。

(5) 同一 OD 上货物运输价格相同,运费以箱计。

(6) 列车固定其开行成本和停靠成本。

3　模型建立

本文优化目标是在满足所有约束条件的情况下使列车运行的利润最大,建立优化问题 P1 为

$$\max O=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}\{[p_{ij}(t)-m]\cdot b_{ij}(t)-F(t)\cdot K-\tau_i(t)\cdot S_i\}$$

$$\text{s.t.}\quad i<j \tag{1}$$

$$\tau_i(t)\leqslant F(t) \tag{2}$$

$$\tau_N(t)=F(t) \tag{3}$$

$$M\tau_i(t)\geqslant b_{ij}(t) \tag{4}$$

$$M\tau_j(t)\geqslant b_{ij}(t) \tag{5}$$

$$b_{ij}(t)\leqslant C-\sum_{u=1}^{i-1}\sum_{j=i+1}^{N}b_{uj}(t) \tag{6}$$

$$a_{ij}(t)=\frac{S_{ij}\cdot \mathrm{e}^{-(\beta+\alpha\cdot p_{ij}(t))}}{1+\mathrm{e}^{-(\beta+\alpha\cdot p_{ij}(t))}} \tag{7}$$

$$b_{ij}(t)\leqslant a_{ij}(t) \tag{8}$$

$$a_{ij}(t)\leqslant a_{\max} \tag{9}$$

$$b_{ij}(t)\leqslant b_{\max} \tag{10}$$

$$\limsup_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T-1}\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}E[Q_{ij}(t)]<\varepsilon \tag{11}$$

式中:$p_{ij}(t)$、$b_{ij}(t)$、$F(t)$为模型的决策变量;S_{ij} 为 OD i 和 j 之间的最大运输需求,为常数;M 为一个很大的常数;u 是一个正整数;α、β 为已知参数;ε 为一个无穷大的正数。

式(2)表示列车开行时才有列车停靠决策。式(3)表示开行的列车一定在终点站结束行程,这两个约束共同用于表明列车的 OD 固定,不存在中间站发车或是终止的情况。式(4)和式(5)表示若 OD i 和 j 间有货运量,则列车一定在 i、j 站点均停靠。式(6)表明列车在站点 i 的装箱数不能超过当前列车剩余的容量。式(7)为用于表明 OD i 和 j 间的实际需求量与货运价格之间的关系的 Logit 价格反应函数。式(8)限制实际货运量不能超过需求量。式(9)限制实际需求量不能超过最大需求量。式(10)限制实际货运量不能超过最大货运量。式(11)用于保证运输网络的稳定性,当时隙数量 T 趋于无穷时,货物积压之和小于一个无穷大的正数 ε。

货物积压队列演变等式为

$$Q_{ij}(t+1)=Q_{ij}(t)+a_{ij}(t)-b_{ij}(t) \tag{12}$$

问题 P1 是时间周期 T 内的全局优化问题,涉及很多的变量,求解复杂度高。对于时变网络优化问题中的这种 NP 难问题,目前还没有算法可以对 NP 难问题求出准确的全局最优解。如果各变量之间存在一定的因果关系,则不能保证每一时隙所做决策的独立性,以本问题为例,当前的货运价格会影响下一时隙的货运需求,从而影响接下来的列车开行与停靠决策。因此,本文提出一种算法对问题 P1 进行转化,以便于求解。

4　求解算法

4.1　BCPO 算法

本节提出一种积压控制与价格优化 BCPO(Backlog Control and Pricing Optimization)算法以解决问题 P1,BCPO 算法将难以求解的时变网络优化问题 P1 转化为仅在单一时隙进行网络优化的问题 P2,问题 P2 的最优值与问题 P1 在时间平均下的最优值无限接近,且动态调整参数的大小可以实现在目标函数和货物积压队列之间的权衡。应用文献[14-15]提出的李雅普诺夫优化技术,本文将解决货运定价,列车开行与停靠决策,货物积压控制等一系列决策问题。

BCPO 算法在保证铁路集装箱运输网络稳定性的基础上,综合优化了货运价格和列车开行方案,他可以解决时变网络优化中每一时隙结果互相影响难以求解的问题。该算法的核心是构建二次李雅普诺夫函数和李雅普诺夫加罚漂移,通过最小化加罚漂移保证网络稳定性,同时在时间平均的目标函数和时间平均的积压队列之间达到权衡。

在 t 时隙,定义 Lyapunov 函数 $L(t)$为

$$L(t)=\frac{1}{2}Q_{ij}^2(t) \tag{13}$$

可以看出,当最小化 Lyapunov 函数 L 时,运输队列将处于低拥塞状态(货物积压 Q 趋于 0)。

定义一个时隙内的 Lyapunov 漂移 $\Delta(t)$为

$$\Delta(t)=\frac{1}{2}Q_{ij}^2(t+1)-\frac{1}{2}Q_{ij}^2(t) \tag{14}$$

从式(14)构造的 Lyapunov 漂移看出,最小化 Lyapunov 漂移也就是最小化相邻时隙的网络积压的

平方差，约束(11)将会始终满足，即运输网络始终保持稳定。因此，在下面问题讨论中，可去掉约束(11)。

$$\Delta(t)=\frac{1}{2}Q_{ij}^2(t+1)-\frac{1}{2}Q_{ij}^2(t)=$$
$$\frac{1}{2}\{[Q_{ij}(t)+a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]^2-Q_{ij}^2(t)\}=$$
$$\frac{1}{2}\{2Q_{ij}(t)\cdot$$
$$[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]+[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]^2\}\leqslant$$
$$\frac{1}{2}\{2Q_{ij}(t)\cdot$$
$$[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]+[a_{ij}(t)^2+b_{ij}(t)^2]\}\leqslant$$
$$B+Q_{ij}(t)\cdot[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)] \tag{15}$$

式中：B 为一个常数，$B=\frac{1}{2}(a_{\max}^2+b_{\max}^2)$。

Lyapunov 漂移反映了货物积压水平。当最小化 $\Delta(t)$ 时，也就是最小化 $[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]$，即做出运输决策后未被满足的货运需求。

现在定义 Lyapunov 加罚漂移 $\Delta_V(t)$ 为

$$\Delta_V(t)=L(t+1)-L(t)-V\cdot O(t)\leqslant B+\tilde{\Delta}_V \tag{16}$$

式中：V 为非负权重，可以在目标函数和运输网络货物积压之间起到一个权衡的作用，并控制当前时隙的目标函数无限接近全局最优值；$O(t)$ 为 t 时隙的收益函数；因此只需 B 为一个常数，优化 $\tilde{\Delta}_V$，其表达形式为

$$\tilde{\Delta}_V=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q_{ij}(t)\cdot[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]-$$
$$\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}V\{[p_{ij}(t)-m]\cdot b_{ij}(t)-$$
$$F(t)\cdot K-\tau_i(t)\cdot S_i\} \tag{17}$$

问题 P1 转化为 P2

$$\min O'(t)=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q_{ij}(t)\cdot[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]-$$
$$\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}V\{[p_{ij}(t)-m]\cdot b_{ij}(t)-$$
$$F(t)\cdot K-\tau_i(t)\cdot S_i\} \tag{18}$$

s.t. 式(1)～式(10)

推论 1 在对问题 P1 应用 BCPO 算法后转化得到的问题 P2 中，令

$$O^*=\max\{[p_{ij}(t)-m]\cdot b_{ij}(t)-$$
$$F(t)\cdot K-\tau_i(t)\cdot S_i\} \tag{19}$$

式中：O^* 是 P2 的最大值，表示时隙 t 时的最大收益。O^* 与原优化问题 P1 在时间平均下的最优值 $\bar{O}$ 需要满足

$$\bar{O}\geqslant O^*-\frac{B^*}{V} \tag{20}$$

式中：B^* 为一个非负实数。

推论 1 说明应用 Lyapunov 优化方法可以为原问题在时间平均下的最优值找到一个下界，控制参数 V 的大小可以使 O^* 无限接近 $\bar{O}$。此推论的正确性在算例分析也得到了验证。

证明：给定时间周期 T

$$\sum_{t=1}^{T}[\Delta(t)-VO(t)]\leqslant\sum_{t=1}^{T}[B+\tilde{\Delta}_V(t)] \tag{21}$$

对式(21)两边同时求时间平均得

$$\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}[\Delta(t)-V\cdot O(t)]\leqslant\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}[B+\tilde{\Delta}_V(t)] \tag{22}$$

假设

$$\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\tilde{\Delta}_V(t)=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)\cdot$$
$$[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]-V\cdot O^*+\varphi \tag{23}$$

式中：φ 是一个常数，若 $\varphi>0$，则说明 $\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\tilde{\Delta}_V(t)$ 比 $\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]-V\cdot O^*$ 大；若 $\varphi=0$ 则两者相等；若 $\varphi<0$ 则同理。

$$\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}[\Delta(t)-V\cdot O(t)]=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\Delta(t)-V\bar{O}\leqslant$$
$$B+\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\tilde{\Delta}_V=$$
$$B+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]-V\cdot O^*+\varphi \tag{24}$$

通过上式可得

$$\bar{O}\geqslant O^*-$$
$$\frac{B-\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\Delta(t)+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]}{V} \tag{25}$$

由式(15)可知

$$B+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]\geqslant\Delta(t)$$

设 $B^*=B-\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\Delta(t)+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}Q(t)[a_{ij}(t)-b_{ij}(t)]$ 为非负实数，所以 $\bar{O}\geqslant O^*-\frac{B^*}{V}$，证明完成。

4.2 和声搜索算法

对转化得到的单时隙铁路货运集装箱班列定价策略与开行方案问题，其目标函数非凸，仍具有相互影响的决策变量。故本文采用和声搜索算法进行求解，和声搜索优化算法是一种启发式的全局搜索智能算法，

其结构简单、收敛速度快、稳健性好，且具有较高的通用性，对连续变量和离散变量的优化问题均适用。具体求解流程见图 1。

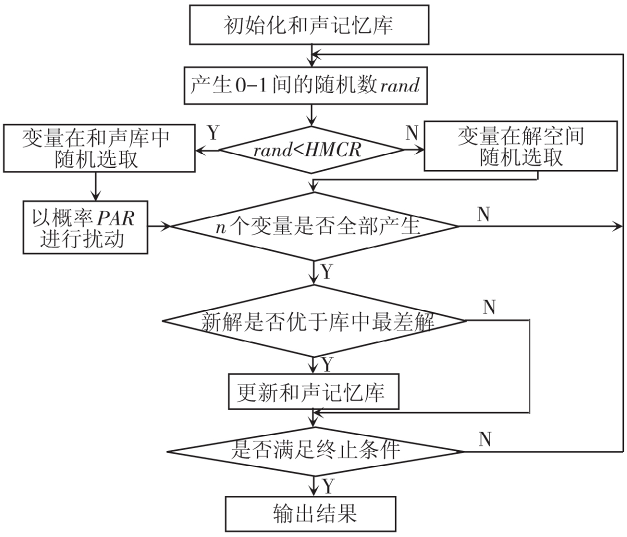

图1　和声搜索算法流程图

建立用于保存初始可行解和迭代过程中的解的和声记忆库 HM(Harmony Memory)之后，和声搜索算法中需要确定的参数值有：HMS 为声记忆库大小，指和声记忆库中解向量的个数，取值过大会使计算量过大，取值过小则无法保证样本多样性；$HMCR$ 为和声记忆库取值概率，指从现有种群(HM 和声库)中拿出一个和声的概率；PAR 为音调微调概率，是对从和声记忆库中选择的解向量进行音调微调的概率；BW 为音调微调带宽，指音调微调的幅度，一般情况下此参数对于离散优化问题不需考虑。

主要流程为先对和声记忆库进行初始化，然后随机产生新的和声，若新的和声优于和声记忆库中最差的和声，则淘汰最差的和声，并用新产生的和声取代。循环上述过程直到求出最优解或满足算法的终止条件。

算法的伪代码如下：

Begin

随机生成初始库

将 $f(x^1), f(x^2), \cdots, f(x^{HMS})$ 排序

while $Itr < MaxItr$;

随机生成 $rand1$

if $rand1 < HMCR$

在 HM 内随机选取新和声 $\{X_1^{\alpha}, X_1^{\beta}, \cdots, X_1^{\omega}\}(\alpha, \beta, \cdots, \omega \in [1, \cdots, HMS])$

$rand2 = rand1$

if $rand2 < PAR$

$X_1^{\alpha'} = X_1^{\alpha} + BW$

$X_2^{\beta'} = X_2^{\beta} + BW$

$\vdots$

$X_N^{\omega'} = X_N^{\omega} + BW$

$f(x_n^r)' = f(X_1^{\alpha'}, X_2^{\beta'}, \cdots, X_N^{\omega'})$

else

$X_1^{\alpha'} = X_1^{\alpha}$

$X_1^{\beta'} = X_1^{\beta}$

$\vdots$

$X_1^{\omega'} = X_1^{\omega}$

$f(x_n^r)' = f(X_1^{\alpha'}, X_2^{\beta'}, \cdots X_N^{\omega'})$

end

else

在变量取值范围内再随机生成新和声 $\{X'_1, X'_2, \cdots, X'_n\}$

$f(x_n^{HMS})' = \{f(X'_1), f(X'_2), \cdots, f(X'_n)\}$

end

if $f(x_n^{HMS})' > f_{\text{worst}}$

$f_{\text{best}} = f_{\text{best}}$

$f_{\text{worst}} = f_{\text{worst}}$

else if $f(x_n^{HMS})' < f_{\text{worst}}$

$f_{\text{best}} = f(x_n^{HMS})'$

$f_{\text{worst}} = f_{\text{worst}-1}$

else

$f_{\text{best}} = f_{\text{best}}$

$f_{\text{worst}} = f'_{\text{worst}}$

把 $f(x_n^{HMS})'$ 加入库中，并按大小排列更新，库容量不变

end

end

end

5　算例分析

考虑从广州站开往成都站的铁路集装箱货运班列运输，运输线路示意见图 2。

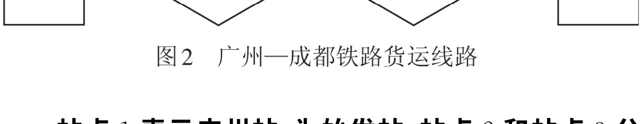

图2　广州—成都铁路货运线路

站点 1 表示广州站，为始发站；站点 2 和站点 3 分别表示株洲站和重庆站，均为中间站；站点 4 表示重庆站，为终到站。参数的设置见表 2。

表2 主要参数设置表

参数	数值	参数	数值	参数	数值
N	4	$Q_{ij}(t)$	50	V	1
C/箱	90	K/元	150 603	S_i/元	50 986
m/元	1 109	HMS	10	$HMCR$	0.9
$PAR_{\min}$	0.4	$PAR_{\max}$	0.9	$BW_{\min}$	0.000 1
$T_{\max}$	100 000				

注：$T_{\max}$为创作次数，通常作为算法的终止条件，指最大迭代次数。

根据铁路货运的实际情况，对各OD集装箱运输的运价范围进行限定，见表3。

表3 各OD集装箱运价范围

OD	价格/元	OD	价格/元
1—2	1 000～4 000	2—3	3 000～7 000
1—3	2 000～5 000	2—4	5 000～9 000
1—4	1 000～3 000	3—4	3 000～7 000

由此根据前文的模型与算法优化求得目标函数值为$8.894\ 9\times10^4$，运输企业所得利润为$8.888\ 8\times10^4$元。此时集装箱货运班列从广州站开行，并在株洲站和重庆站停靠，得到的定价策略与运量决策见表4。

表4 各OD最优价格与货运量

OD	价格/元	运量/箱	OD	价格/元	运量/箱
1—2	2 396	15	2—3	4 531	22
1—3	3 148	12	2—4	6 243	34
1—4	2 554	10	3—4	4 449	10

依据广州铁路（集团）公司的实际数据，得到广州—成都线路上集装箱运输班列的现有运价见表5。把各OD的现有运价代入优化模型中，可得到应用当前运价时铁路部门的运营收益，将其与应用优化后的最优价格时铁路部门所获收益值进行对比，可验证动态定价的优越性。

表5 各OD现行运价

OD	价格/元	OD	价格/元	OD	价格/元
1—2	2 386	1—4	1 937	2—4	7 443
1—3	3 703	2—3	5 566	3—4	5 580

在现行的固定运价策略下，优化得到目标函数值为$-3.403\ 7\times10^3$，铁路部门获得的利润为-3.235×10^3元。可以发现这种情况下铁路部门出现亏损，所获收益远低于应用表4中最优化运价时带来的收益。

同时，本文所设计的算法是完全分布式的，只需要知道当前状态下各OD的市场潜在货运需求以及上一时隙的货物积压就可以做出贪婪决策。为了进一步分析动态定价和固定运价的优劣性，对这两种定价策略下的目标函数值、利润值和货物积压值进行对比分析，分析结果见图3～图5。

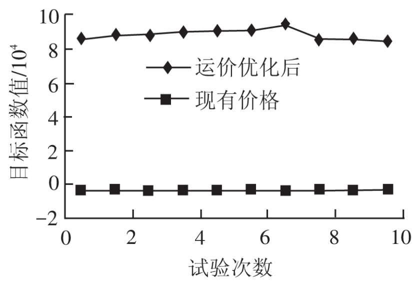

图3 目标函数值对比图

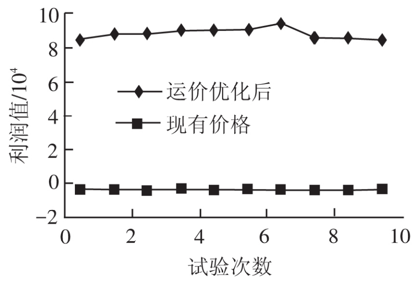

图4 利润值对比图

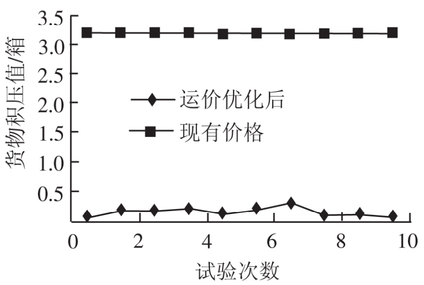

图5 货物积压对比图

可以发现，广州铁路集团在采用优化运价后，获得的运输收益远高于采用现有运输价格获得的运输收益。同时，采用优化后的开行停靠决策也可以保证运输网络的稳定性，使得货物积压大幅度减少，几乎接近于0。

接下来，我们分析控制参数V对收益值的影响，给定$V=[1,10,50,100,1\ 000,10\ 000,100\ 000,1\ 000\ 000]$，观察当控制参数$V$变化时，转化后的问题P2的最优收益值$O^*$的变化变化情况。分析的结果验证了3节推论1的正确性。从图5可以看出，收益值O^*随V的增加而增加，当V值达到10 000以后，利润值接近于最优值。

在决策时隙的上一时隙，运输网络中前一时隙的货物积压量Q'会对决策时隙的运输情况产生影响，调整Q'的值，分析得到以下结果：

从图7可以看出，当前时隙的货物积压Q在各种货物积压Q'的水平下总能稳定在较小的水平（小于

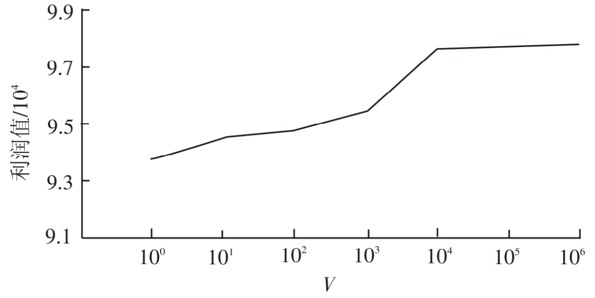

图6　利润值随V的变化情况

1)，运输网络具有较强的稳定性。由此说明了本文所建立的模型与设计的算法对优化运输网络中的货物积压和提高服务水平具有优越性。

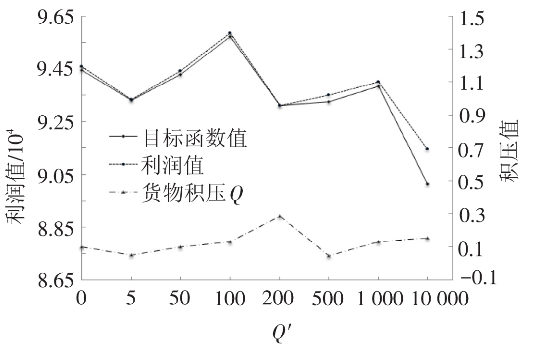

图7　运输情况随Q'的变化

当Q'的值小于 10 000 时，当前货物积压

$$Q=\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=2}^{N}(a_{ij}(t)-b_{ij}(t))$$

始终小于 1，铁路部门收益一直维持在 93 000 元以上。虽然当Q'值超过 10 000 时，收益会出现较大幅度的下滑，但是在小规模的单线运输网络中，这种情况发生的可能性很低，本文的模型和算法仍具有代表性。

各 OD 的实际货运需求量发生变化时，相应的开行停靠决策和运价策略也会发生变化。为尽量避免算法产生结果的随机性带来的影响，我们在相同条件下进行了 20 次实验，每次实验中对顾客在各 OD 的需求进行调整，并取其中使收益达到最优的开行停靠，方案和定价策略，以分析得出影响决策变化的临界需求量。具体有以下 4 种情形：

Case1　当与站点 2 停靠方案和定价策略相关的三个运输区间(1—2、2—3、2—4)的货运潜在需求量均不超过 4 箱时，最优停靠方案是在站点 2 不停靠，在站点 3 停靠。运输决策为

表 6　Case1 中各 OD 最优价格和实际货运量表

OD	价格/元	运量/箱	OD	价格/元	运量/箱
1—2	2 299	0	2—3	1 999	0
1—3	2 303	26	2—4	2 499	0
1—4	2 569	38	3—4	1 556	17

Case2　当与站点 3 停靠方案和定价策略相关的三个运输区间(1—3、2—3、3—4)的货运潜在需求量均不超过 4 箱时，最优停靠方案是在站点 3 不停靠，在站点 2 停靠。运输决策见表 7。

表 7　Case2 中各 OD 最优价格和实际货运量表

OD	价格/元	运量/箱	OD	价格/元	运量/箱
1—2	1 824	17	2—3	1 721	0
1—3	2 769	0	2—4	1 995	34
1—4	2 568	38	3—4	1 430	0

Case3　当所有运输区间的潜在货运需求量均不超过 3 箱时，集装箱班列停开。

Case4　在现有参数条件以及需求量不变的情况下多次进行实验，尝试不同的列车开行成本和停靠成本对列车的开行停靠决策的影响，结果表明当列车开行成本增加到 460 000 元时，集装箱班列停开；当停靠成本增加到 25 000 元时，列车在所有站点均不停靠。

6　结束语

本文在考虑运输网络货物积压的基础上，建立了铁路集装箱班列开行方案和运价决策的综合优化模型，此模型高度复杂，是时变网络中的全局优化问题，本文提出了基于 Lyapunov 优化的 BCPO 算法将其转化为多个单一时隙的确定性优化问题，并从理论上证明了该转后问题等价于原问题。对于转化后的问题，运用和声搜索算法进行求解，通过算例分析，表明铁路运输企业在采用本文所得出的最优运价时所得到的总收益比采用现有运价时高。在运输路段上的需求产生变化时，根据实际需求信息优化出最优的开行方案与价格策略。

对于多周期时变网络中的复杂优化问题，本文设计的 BCPO 算法能够进行优化。此算法仅需当前网络的需求信息即可做出相应的贪婪决策。

铁路运输部门可以灵活调整 V 值实现利润与客户等待运输时间之间的矛盾问题，V 值的选取是企业战略决策的体现。当运输企业更重视运营收益时，可以适当调高 V 值；当运输企业更重视网络稳定性时，可以适当减小 V 值再求得最优定价策略和开行方案，V 值越小表示企业越重视运输服务水平。

参考文献：

[1] 中华人民共和国铁道部. 铁运〔2005〕46 号 铁路货物运价规则[S].北京：中国铁道出版社，2005.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 发改价格〔2015〕183 号 关于调整铁路货运价格进一步完善价格形成机制

的通知[EB/OL].(2015-01-29)[2017-04-05]. http://www. ndrc. gov. cn/fzgggz/jggl/zcfg/201501/t20150130_662882.html

[3] ZHOU W H, LEE C Y. Pricing and Competition in a Transportation Market with Empty Equipment Repositioning[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009,43(6):677-691.

[4] WANG S, WANG H, MENG Q. Itinerary Provision and Pricing in Container Liner Shipping Revenue Management [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015,77:135-146.

[5] **杨华龙,刘迪,王霞,等. 集装箱班轮运输两阶段舱位分配与动态定价模型**[J]. **系统工程理论与实践**,2012,32(12):2684-2691.
YANG Hualong, LIU Di, WANG Xia, et al. Slot Allocation and Dynamic Pricing Models by Two Stages for Container Liner Shipping[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012,32(12):2684-2691.

[6] XIE Y, LIANG X, MA L, et al. Empty Container Management and Coordination in Intermodal Transport[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(1): 223-232.

[7] **刘迪,杨华龙,张燕. 多节点集装箱海铁联运动态定价决策**[J]. **系统工程理论与实践**,2014,34(1):104-114.
LIU Di, YANG Hualong, ZHANG Yan. Dynamic Pricing Decision-making of Multi-node Container Sea-rail Intermodal Transport [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014,34(1):104-114.

[8] MARTíN E, SALVADOR J, SAURí S. Storage Pricing Strategies for Import Container Terminals under Stochastic Conditions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014,68:118-137.

[9] CREVIER B, CORDEAU J F, SAVARD G. Integrated Operations Planning and Revenue Management for Rail Freight Transportation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012,46(1):100-119.

[10] **蓝伯雄,吴李知. 高速铁路客运网络列车开行方案优化模型**[J]. **中国管理科学**, 2010,18(6):51-58.
LAN Boxiong, WU Lizhi. Optimization Model for Line Planning in Rail Passenger Transport Network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010,18(6):51-58.

[11] **邓连波,曾强,高伟,等. 基于弹性需求的城市轨道交通列车开行方案研究**[J]. **铁道学报**,2012,34(12):16-25.
DENG Lianbo, ZENG Qiang, GAO Wei, et al. Research on Train Plan of Urban Rail Transit with Elastic Demand[J]. Journal of the China Railway Society, 2012,34(12):16-25.

[12] **张小强,刘丹,王斌. 多运输方式竞争下的铁路快捷货运定价方法**[J]. **交通运输系统工程与信息**,2016,16(5):27-32.
ZHANG Xiaoqiang, LIU Dan, WANG Bin. The Pricing Method of Railway Express Freight in Multi Transportation Modes Environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(5):27-32.

[13] **张小强,刘丹,陈兵,等. 竞争环境下铁路集装箱班列动态定价与开行决策研究**[J]. **铁道学报**,2017,39(2):17-23.
ZHANG Xiaoqiang, LIU Dan, CHEN Bing, et al. Dynamic Pricing and Operation Planning of Container Train in Competitive Environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2017,39(2):17-23.

[14] NEELY M. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems[J]. Synthesis Lectures on Communication Networks, 2010, 3(1):1-211.

[15] HUANG L, NEELY M. Utility Optimal Scheduling in Processing Networks[J]. Performance Evaluation, 2011, 68(11):1002-1021.

(责任编辑 张 航)