第18卷第7期
2015年7月

管 理 科 学 学 报
JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCES IN CHINA

Vol. 18 No. 7
Jul. 2015

随机需求环境下零担货物运输合作[①]

曾银莲[1]，李　军[1]，冯海荣[2]
(1. 西南交通大学经济管理学院，成都 610031; 2. 四川师范大学商学院，成都 610101)

摘要： 合并运输是随机需求环境下零担运输承运人广泛使用的一种运输策略. 本文研究了在合并运输策略下承运人之间的运输合作. 分别讨论了基于时间的合并运输策略和基于数量的合并运输策略下承运人运输合作的费用分配问题，建立了相应的合作博弈模型，设计了属于核心中的费用分配方案. 并进一步探讨了合并运输策略的选择. 研究结果表明时间策略下的运输合作比数量策略下的运输合作客户服务水平要高，但是时间策略下运输合作的期望总成本也要高. 合作不仅能够降低承运人的成本，提高资源的利用率，还能提高客户服务水平.

关键词： 随机需求; 零担运输; 合作博弈; 费用分配

中图分类号： F253.4　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1007-9807(2015)07-0048-11

0 引　言

随着油价的不断上涨以及人力资源成本的不断增加，承运人降低运输成本的压力越来越大. 对于零担货物运输，单个承运人可以采用合并运输策略将几个随机到达的零担运输小订单合并成一个较大甚至整车运输订单进行运输，从而提高车辆和人员的利用率，降低运输总成本. 当然，使用合并运输策略会使运输提前期延长，因此并不是每种产品或每个承运人都适合使用合并运输策略[1]. 如对于易腐性产品及为 just-in-time 生产商运输原材料的零担运输承运人，这种策略并不适合. 这种策略适合于对运输提前期要求不是很高及不具有易腐性的产品. 对于这些产品，当随着运输量的增加单位运输成本不会明显增加时，通过合并运输可以为每笔订单节约多达 50% 的运输成本[2]. 同时，通过合并运输还能减少对环境的碳排放量，降低对环境的损害[3].

虽然单个承运人使用合并运输策略可以在一定程度上降低运输成本，但是当承运人的需求本身较小时(如中小承运人)，合并运输降低成本的代价就是要在一定程度上牺牲客户服务水平. 因此，不同的零担运输承运人也可以通过合作运输来降低成本，同时保证顾客的服务水平. 例如荷兰四家专门运输建材的承运人(Brothers Transport, Vink International Transport, Kluitmans Transpor 和 Twello Verheul)进行运输合作，通过合作，这四家承运人减少了超过 10% 的车辆运输里程，并增加了 30% 的车辆负载率[4]. 国外也已出现一些专门提供合作运输平台的公司，如 Nistevo(现已被 IBM 收购)，Transplace 等，承运人通过在这些平台上实现合作来提高车辆利用率以及顾客的服务水平[5]. 文献[6]指出零担货运承运人之间的合作可以更好地实现协同效益(如充分利用车辆资源、需求的规模经济)，降低运输成本和运输提前期，提高资源的利用率，提高总体的服务水平.

注意在本文中提到了两个概念“合并运输”与“合作运输”. 合并运输是指企业将随机到达的几个零担运输订单合并成一个大订单甚至是整车运输订单的一种运输策略，其对象是运输

---

① 收稿日期: 2012-11-23; 修订日期: 2014-07-23.
基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(71090402); 国家自然科学基金资助项目(71271178; 71401118).
作者简介: 曾银莲(1986—)，湖南邵阳人，女，博士生. Email: yinlianzeng@foxmail.com

订单,可以理解为战术层面上的概念; 合作运输则是指不同企业之间进行运输合作,其对象是企业,可以理解为战略层面上的概念. 当企业单独进行运输时,合并运输策略合并的只是自己的运输订单; 当企业之间进行合作运输时,合并运输策略合并的是所有参与合作的企业的运输订单. 常见的合并运输策略有三种: 时间策略,数量策略和时间数量策略[7]. 时间策略基于时间进行运输订单合并,即预设一个时间周期,每隔一个周期进行一次合并运输; 数量策略基于数量进行运输订单合并,即当运输订单的量达到一定数量时就进行合并; 时间数量策略基于时间和数量这两个标准进行运输订单合并. 本文的研究主要基于前两种合并运输策略,即时间策略和数量策略.

目前合作运输的研究对整车合作运输关注较多,主要集中在不同运输线路的组合优化与费用分配,如 Ozener 和 Ergun[5],Ergun 等[8,9],Ozener 等[10]. 对于零担运输合作,Dai 和 Chen[11,12] 分别研究了零担运输承运人通过拍卖机制进行合作和零担运输承运人合作优化问题以及费用分配问题. Liu 等[13] 针对零担运输承运人合作提出了一种 WRSM(weighted relative savings model) 费用分配机制. 李军和蔡小强[14] 对易腐品零担运输合作的设施选择进行了研究. Hernández[15] 等研究了在参与合作的资源是动态的情况下零担运输合作的优化算法. Krajewska 等[16] 以夏普利值作为零担运输承运人合作的费用分配方案,并以实际案例分析合作所能产生的结余. 以上关于零担运输合作的研究都假设需求是确定的,没有考虑需求的随机性. Zhou[7] 利用仿真的方法分析了随机需求条件下零担运输合作的策略选择,但是没有考虑合作后的费用分配问题. Yilmaz 和 Savasaneril[17] 分析了随机需求环境下,零担运输托运人之间的合作,考虑了参与合作的托运人的订单在不同装运点进行重新分配的问题,将该问题模型化为马尔科夫决策过程,并讨论了托运人合作的费用分配方案. 与以上研究不同,本文考虑了在随机需求环境下,使用合并运输策略的承运人之间的合作,并讨论承运人对不同合并运输策略的选择.

1 问题定义

考虑零担运输市场上有 $N = \{1,\cdots,n\}$ 个承运人,每个承运人面对的需求都是随机需求. 对于承运人 i,设随机变量 T_j^i 表示其第 $(j-1)$ 个订单与第 j 个订单到达的时间间隔. 令 $S_0^i = 0$,且 $S_m^i = \sum_{j=1}^{m} T_j^i, m \geqslant 1$,则 $N_1^i(t) = \max\{m: S_m \leqslant t\}$ 表示在时间段 $(0,t)$ 内到达的订单数量. 另设随机变量 W_j^i 表示承运人 i 第 i 笔订单的运输量(可以理解为重量). 令 $D_0^i = 0$,且 $D_m^i = \sum_{j=1}^{m} W_j^i, m \geqslant 1$,则 $N_2^i(w) = \max\{m: D_m \leqslant w\}$ 表示总运输量达到 w 的订单数. 假设 $\{N_1^i(t), t \geqslant 0\}$ 与随机变量序列 $\{W_j^i: j \geqslant 1\}$ 相互独立,同时假设 $N_1^i(t)$ 与 $N_2^i(w)$ 都是泊松过程,其均值分别为 $E[N_1^i(t)] = \lambda_i t$,$E[N_2^i(w)] = w/\mu_i$,也即相邻订单到达的时间间隔和每笔订单的运输量分别满足均值为 $E[T_j^i] = 1/\lambda_i$ 与 $E[W_j^i] = \mu_i$ 的泊松分布. 运输订单到达的时间间隔满足泊松分布的假设在文献中很常见,如文献[2,17]; 订单运输量满足泊松分布的假设见文献[18]. 由于承运人处在同一个零担运输市场中,其面对的订单具有同质性,因此可以假设各个承运人面对的每笔订单的运输量服从相同的泊松分布,即假设对所有的 $i \in N, \mu_i = \mu$. 最后令 $M(t) = \sum_{m=1}^{N_1(t)} W_m$ 表示在时间点 t 的累积总运输量.

2 合并运输策略

基于时间的合并运输策略和基于数量的合并运输策略分别与运作管理中 EOQ 模型的周期补货策略和最佳订货点补货策略类似,关键问题就是要确定最优的运输周期 T 或者最优的运输量临界点 w 使得单位时间的库存持有成本与运输成本之和最小. 已有文献对合并运输进行了研究,Cetinkaya 和 Bookbinder[18] 利用更新理论(renewal theory) 分别对数量策略与时间策略下的合并运输进行了研究,并分别给出了在这两种策略下订

单到达率及每笔订单的需求量满足泊松分布时的最优时间周期 T 和最优运输量 w 的数学表达式. Higgnson 和 Bookbinder[2] 运用马尔科夫决策过程对合并运输策略进行了研究,说明了最优策略的存在性,但没有给出最优策略的一般表达形式. 另外还有一部分文献利用仿真的方法来近似分析合并运输的最优策略[19,20]. 下面分别分析时间策略下和数量策略下承运人进行合作运输的情况.

2.1 时间策略下合作运输的最优运输周期

承运人在一个周期内的成本包括运输成本和库存持有成本. 设 K_D 和 K_O 分别表示每个承运人每次运输的固定成本和每笔订单的处理成本, c 表示承运人每单位运输量的变动成本, h 表示单位时间单位运输量货物的库存持有成本. 由于泊松分布之和仍然是泊松分布,因此对于任意的承运人集合 $S \subseteq N$,当他们进行合作运输时,其总订单到达率满足参数为 $\sum_{i \in S} \lambda_i$ 的泊松分布. 在使用时间策略的情况下,他们共同决定服务周期 T_S 使得总期望成本最小. 根据文献[18]的研究,利用更新理论可以得出在时间策略下承运人集合 S 在一个周期内的期望总运输成本为

$$E(TC) = K_D + K_O T_S \sum_{i \in S} \lambda_i + c\mu T_S \sum_{i \in S} \lambda_i \tag{1}$$

其期望总库存持有成本为

$$E(HC) = \frac{h\mu T_S^2 \sum_{i \in S} \lambda_i}{2} \tag{2}$$

故承运人合作运输时单位时间的总期望成本为

$$c^T(S) = \frac{E(HC) + E(TC)}{T_S} = \frac{K_D}{T_S} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i + \frac{h\mu T_S \sum_{i \in S} \lambda_i}{2} \tag{3}$$

参与合作的承运人共同决定最优的 T_S^* 使得单位时间的总期望成本最小. 根据式(3)的一阶条件可求得

$$T_S^* = \sqrt{\frac{2K_D}{h\mu \sum_{i \in S} \lambda_i}} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)可得承运人 S 合作运输时单位时间的总期望成本为

$$c^T(S) = \sqrt{2K_D h\mu \sum_{i \in S} \lambda_i} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i \tag{5}$$

2.2 数量策略下合作运输的最优运输量临界点

在采用数量策略时,由于每笔订单运输量的随机性,通常实际的货物运输量要比选取的临界值 w 大,其实际的运输量为 $(w + E[Y_2(w)])$,其中 $E(Y_2(w))$ 表示实际运输量超出运输量临界点 w 部分的期望值,其值为 μ[18]. 根据文献[18]的研究,在一个运输周期内,到达订单的总运输量第一次超过运输量临界点 w 所用的平均时间为 $(w/\mu + 1)/\lambda$. 因此,当任意的承运人集合 $S \subseteq N$ 进行合作运输并采用数量策略时,利用更新理论可知其在单位时间的总期望成本(包括期望库存成本和期望运输成本)为

$$c^w(S) = \frac{K_D \sum_{i \in S} \lambda_i}{w_S/\mu + 1} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i + \frac{hw_S^2/\mu}{2(w_S/\mu + 1)} = \frac{2K_D\mu \sum_{i \in S} \lambda_i + hw_S^2}{2(w_S + \mu)} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i \tag{6}$$

参与合作的承运人共同决定最优的运输量临界点 w_S^* 使得单位时间的期望总成本最小. 根据式(6)的一阶条件可求得

$$w_S^* = \mu \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2K_D \sum_{i \in S} \lambda_i}{h\mu}} \right] \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)可得承运人单位时间的总期望成本为

$$c^w(S) = \sqrt{h\mu(h\mu + 2K_D \sum_{i \in S} \lambda_i)} - h\mu + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i \tag{8}$$

3 时间策略下的合作运输博弈

在这节主要回答两个问题: 1) 在时间策略下,零担运输承运人是否应该合作,即合作能否带来好处? 2) 如果合作是有益的,合作后产生的总费用应该如何分配才能保证联盟的稳定性? 要回答这两个问题,应用合作博弈理论,将时间策略下的零担运输承运人的合作问题构造成时间策略下

的合作运输博弈. 首先介绍合作博弈的一些基本概念.

一个合作博弈可以定义为一个二元组 (N, c)，其中 $N = \{1, \ldots, n\}$ 表示 n 个承运人的集合，称为全联盟. 函数 $c: 2^N \to R$ 为分派给任意非空联盟 $S \subseteq N$ 的特征函数，且 $c(\emptyset) = 0$. 如果对于博弈 (N, c)，对任意的 $S, R \subseteq N, S \cap R = \emptyset$，有

$$c(S) + c(R) \geqslant c(S \cup R)$$

则博弈 (N, c) 满足次加性(subadditive). 博弈满足次加性时表示合作是有益的，可以带来成本的节约. 博弈 (N, c) 的核心定义如下

$$Core(c) = \left\{p \in R^N \mid \sum_{i \in N} p_i = c(N),\ \sum_{i \in S} p_i \leqslant c(S), \forall S \subseteq N\right\}$$

核心是所有满足预算平衡性和稳定性的费用分配方案的集合，它是合作博弈中最重要的解概念. 当核心非空时，博弈满足平衡性; 在核心中的费用分配方案下，没有参与者愿意脱离大联盟单干或者组成小联盟，也即大联盟是稳定的[21]. 博弈 (N, c) 是凹博弈(concave)，如果其满足对任意的 $S \subseteq R \subseteq N \backslash \{l\}$

$$c(S \cup \{l\}) - c(S) \geqslant c(R \cup \{l\}) - c(R)$$

凹博弈具有一些很好的性质，如核心非空，边际向量是核心的极点，核心是边际向量的凸组合，夏普利值是核心的极点的重心; 稳定集、讨价还价集与核心重合，内核与核仁重合[21,22].

定义1 时间策略下合作运输博弈可以定义为二元组 (N, c^T)，其中 $N = \{1, \ldots, n\}$ 表示承运人的集合，特征函数 c^T 定义为 $c(\emptyset) = 0$，对任意的非空集合 $S \subseteq N$

$$c^T(S) = \sqrt{2K_D h\mu \sum_{i \in S} \lambda_i} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i \tag{9}$$

即特征函数是联盟在时间策略下实施合作运输时所能产生的最小总期望费用.

命题1 时间策略下合作运输博弈 (N, c^T) 满足次加性，即对任意的 $S, R \subseteq N$，$S \cap R = \emptyset$，有 $c^T(S) + c^T(R) \geqslant c^T(S \cup R)$.

证明 由式(9)知，

$$c^T(S) = \sqrt{2K_D h\mu \sum_{i \in S} \lambda_i} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S} \lambda_i$$

$$c^T(R) = \sqrt{2K_D h\mu \sum_{i \in R} \lambda_i} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in R} \lambda_i$$

$$c^T(S \cup R) = \sqrt{2K_D h\mu \sum_{i \in S \cup R} \lambda_i} + (K_O + c\mu) \sum_{i \in S \cup R} \lambda_i$$

从而有

$$c^T(S) + c^T(R) - c^T(S \cup R) = \sqrt{2K_D h\mu} \times \left[\sqrt{\sum_{i \in S} \lambda_i} + \sqrt{\sum_{i \in R} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in S \cup R} \lambda_i}\right]$$

因为函数 $\sqrt{x}, x \geqslant 0$ 是凹函数，由凹函数的性质可得

$$\left[\sqrt{\sum_{i \in S} \lambda_i} + \sqrt{\sum_{i \in R} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in S \cup R} \lambda_i}\right] \geqslant 0$$

从而可得 $c^T(S) + c^T(R) - c^T(S \cup R) \geqslant 0$. 证毕.

(N, c^T) 具有次加性意味着“整体小于部分之和”，即合作是有益的，合作可以带来成本的节约. 由 (N, c^T) 的次可加性可知对大联盟的任意划分 $\{S_1, S_2, \cdots, S_k\}$，有 $\sum_{i=1}^{k} c^T(S_i) \geqslant c^T(N)$. 特别地 $\sum_{i=1}^{n} c^T(\{i\}) \geqslant c^T(N)$，也即合作运输时联盟的总期望费用少于各承运人独立运输时的期望费用之和，各承运人之间应该合作.

命题2 时间策略下合作运输博弈 (N, c^T) 是凹博弈，即对任意的 $S \subseteq R \subseteq N \backslash \{l\}$，有 $c^T(S \cup \{l\}) - c^T(S) \geqslant c^T(R \cup \{l\}) - c^T(R)$.

证明 由式(9)可知

$$c^T(S \cup \{l\}) - c^T(S) = \sqrt{2K_D h\mu} \times \left[\sqrt{\sum_{i \in S \cup \{l\}} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in S} \lambda_i}\right] + (K_O + c\mu)\lambda_l$$

$$c^T(R \cup \{l\}) - c^T(R) = \sqrt{2K_D h\mu} \times \left[\sqrt{\sum_{i \in R \cup \{l\}} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in R} \lambda_i}\right] + (K_O + c\mu)\lambda_l$$

因此

$$\left[c^T(S \cup \{l\}) - c^T(S)\right] - \left[c^T(R \cup \{l\}) - c^T(R)\right] = \sqrt{2K_D h\mu}\left[\left(\sqrt{\sum_{i \in S \cup \{l\}} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in S} \lambda_i}\right) - \left(\sqrt{\sum_{i \in R \cup \{l\}} \lambda_i} - \sqrt{\sum_{i \in R} \lambda_i}\right)\right]$$

令函数 $f(x) = \sqrt{x + \lambda_l} - \sqrt{x}, x, \lambda_l \geqslant 0$，其一阶倒数 $f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x + \lambda_l}} - \frac{1}{2\sqrt{x}} < 0$，故 $f(x)$ 为在 $(0, +\infty)$ 的减函数. 由于对任意的 $S \subseteq R \subseteq N$，$\sum_{i \in S} \lambda_i \leqslant \sum_{i \in R} \lambda_i$，所以有

$$\left[\left(\sqrt{\sum_{i\in S\cup\{l\}}\lambda_i}-\sqrt{\sum_{i\in S}\lambda_i}\right)-\left(\sqrt{\sum_{i\in R\cup\{l\}}\lambda_i}-\sqrt{\sum_{i\in R}\lambda_i}\right)\right]\geqslant 0$$

因此

$$[c^T(S\cup\{l\})-c^T(S)]-[c^T(R\cup\{l\})-c^T(R)]\geqslant 0.$$

证毕.

时间策略下的合作运输博弈 (N,c^T) 的凹性意味着承运人对某个联盟的边际费用随着联盟规模的增大而减小，即任意一个承运人或联盟加入另一不相连联盟的动机随着联盟成员的增多而增大，对单个参与者具有滚雪球效应(snowballing effect)，对一个联盟具有从众效应(bandwagon effect) [22]. 另外，由命题 2 还可以得到如下推论.

推论 1 时间策略下的合作运输博弈 (N,c^T) 满足平衡性，其核心非空.

核心非空说明存在使得大联盟稳定的费用分配方案. 由于时间策略下的合作运输博弈 (N,c^T) 是凹博弈，因此其夏普利值、内核和核仁等经典的费用分配解都在核心中 [22]. 尽管如此，当联盟的参与人增加时，这些解的计算复杂度成指数增加. 因此，提出一个即在核心中又便于计算的比例分配解. 该分配方案按照承运人订单到达率的比例分配总成本.

命题 3 令 $\beta_i=\lambda_i c^T(N)/\sum_{j\in N}\lambda_j, i\in N$，则 $\beta=(\beta_1,\cdots,\beta_n)\in Core(c^T)$，即该分配方案属于时间策略下的合作运输博弈 (N,c^T) 的核心.

证明 首先很显然 $\sum_{i\in N}\beta_i=c^T(N)$，其满足预算平衡性. 另外，对于任意的 $S\subseteq N$

$$\sum_{i\in S}\beta_i=\sum_{i\in S}\lambda_i\Big(\sqrt{2K_D h\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}+(K_O+c\mu)\sum_{i\in N}\lambda_i\Big)/\sum_{i\in N}\lambda_i$$
$$=\sum_{i\in S}\lambda_i\sqrt{2K_D h\mu/\sum_{i\in N}\lambda_i}+(K_O+c\mu)\sum_{i\in S}\lambda_i\leqslant$$
$$\sqrt{2K_D h\mu\sum_{i\in S}\lambda_i}+(K_O+c\mu)\sum_{i\in S}\lambda_i=c^T(S)$$

故 β 又满足稳定性. 证毕.

由于 β 在时间策略下的合作运输博弈的核心中，因此在该分配方案下，大联盟是稳定的，没有承运人愿意脱离大联盟单干或者组成小联盟. 而且该分配方案按照各承运人订单到达率的比例进行成本分配，订单到达率越大的承运人，其分配的成本也越大，这样不仅直观、易于理解，又反映了公平性，因此在实际应用中具有可行性.

4 数量策略下的合作运输博弈

考虑数量策略下零担运输承运人之间的运输合作. 与上一节类似，通过构建数量策略下的合作运输博弈来分析承运人是否应该合作以及合作后的费用如何分配的问题.

定义 2 数量策略下合作运输博弈可以定义为二元组 (N,c^w)，其中 $N=\{1,\cdots,n\}$ 表示承运人的集合，特征函数 c^w 定义为 $c(\varnothing)=0$，对任意的非空集合 $S\subseteq N$

$$c^w(S)=\sqrt{h\mu\big(h\mu+2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i\big)}-h\mu+(K_O+c\mu)\sum_{i\in S}\lambda_i \quad (10)$$

即特征函数是联盟在数量策略下实施合作运输时所能产生的最小总期望费用.

命题 4 数量策略下合作运输博弈 (N,c^w) 满足次加性，即对任意的 $S,R\subseteq N, S\cap R=\varnothing$，$c^w(S)+c^w(R)\geqslant c^w(S\cup R)$.

证明 由式(10)知 $c^w(S)=\sqrt{h\mu\big(h\mu+2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i\big)}-h\mu+(K_O+c\mu)\sum_{i\in S}\lambda_i$

$$c^w(R)=\sqrt{h\mu\big(h\mu+2K_D\sum_{i\in R}\lambda_i\big)}-h\mu+(K_O+c\mu)\sum_{i\in R}\lambda_i$$

$$c^w(S\cup R)=\sqrt{h\mu\big(h\mu+2K_D\sum_{i\in S\cup R}\lambda_i\big)}-h\mu+(K_O+c\mu)\sum_{i\in S\cup R}\lambda_i$$

从而有

$$\frac{c^w(S)+c^w(R)-c^w(S\cup R)}{\sqrt{h\mu}}=$$
$$\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}+\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in R}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}-\Big(\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in S\cup R}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}\Big)$$

令函数 $f(x)=\sqrt{h\mu+2K_D x}-\sqrt{h\mu}$，显然其为在 $[0,+\infty)$ 上的凹函数，且 $f(0)=0$，因此有

$$\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}+\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in R}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}\geqslant\Big(\sqrt{h\mu+2K_D\sum_{i\in S\cup R}\lambda_i}-\sqrt{h\mu}\Big)$$

即 $c^w(S)+c^w(R)\geqslant c^w(S\cup R)$. 证毕.

数量策略下合作运输博弈满足次加性说明在数量策略下，零担运输承运人之间进行合作也是有利的，可以带来成本的节约.

命题 5　数量策略下合作运输博弈 (N,c^w) 是凹博弈.

证明　证明过程与命题 2 类似,这里不再赘述.　　证毕.

同样,对于数量策略下合作运输博弈 (N,c^w) ,由于其是凹博弈,其核心非空. 有如下推论.

推论 2　数量策略下的合作运输博弈 (N,c^w) 满足平衡性,且其核心非空.

数量策略下的合作运输博弈的核心非空说明存在使得大联盟稳定的费用分配方案. 从上节的讨论可知按照订单平均到达率的比例来进行费用分配的方案 β 属于时间策略下的合作运输博弈的核心中. 但与时间策略下的合作运输博弈不同,按照订单平均到达率的比例来进行费用分配的方案不在数量策略下的合作运输博弈的核心中,如命题 6 所述.

命题 6　比例分配方案 $\beta_i = \lambda_i c^w(N) / \sum_{j\in N}\lambda_j$, $i \in N$ 不属于数量策略下的合作运输博弈 (N,c^w) 的核心中.

证明　很明显,该费用分配方案满足预算平衡性,但是该费用分配方案不满足稳定性,即对于某些 $S\subseteq N$, $\sum_{i\in S}\beta_i > c(S)$. 为了证明表述的方便,令 $\lambda_N = \sum_{i\in N}\lambda_i$, $\lambda_S = \sum_{i\in S}\lambda_i$.

首先

$$\sum_{i\in S}\beta_i - c(S) = \frac{\lambda_S}{\lambda_N}\left(\sqrt{h\mu + 2K_D\lambda_N} - \sqrt{h\mu}\right) - \left(\sqrt{h\mu + 2K_D\lambda_S} - \sqrt{h\mu}\right)$$

将 λ_S 看作自变量,令 $f(\lambda_S) = \sum_{i\in S}\beta_i - c(S)$. 将 $f(\lambda_S)$ 对 λ_S 求导可得

$$f'(\lambda_S) = \frac{1}{\lambda_N}\left(\sqrt{h\mu + 2K_D\lambda_N} - \sqrt{h\mu}\right) - \frac{K_D}{\sqrt{h\mu + 2K_D\lambda_S}}$$

很明显,当 $0 \leqslant \lambda_S \leqslant \lambda_N$ 时, $f'(\lambda_S)$ 可能等于零、大于零或者小于零,即 $f(\lambda_S)$ 在区间 $[0,\lambda_N]$ 内即可能增也可能减. 又因为 $f(0) = f(\lambda_N) = 0$,因此当 $\lambda_S \in [0,\lambda_N]$, $f(\lambda_S) > 0$ 时, $f(\lambda_S)$ 在区间 $[0,\lambda_N]$ 的取值大于零,即对于 $S\subseteq N$, $\sum_{i\in S}\beta_i > c(S)$. 因此,比例分配方案不属于数量策略下的合作运输博弈 (N,c^w) 的核心中.　　证毕.

为什么比例分配方案属于时间策略下的合作运输博弈的核心中而不属于数量策略下的合作运输博弈的核心中呢? 这是由于数量策略下的合作运输博弈的特征函数的结构与时间策略下的合作运输博弈的特征函数结构不同,通过比较式(5)和式(10)可以发现,数量策略下的合作运输博弈的特征函数较时间策略下的合作运输博弈的特征函数中多了固定的成本项 $h\mu$. 正是因为这个固定成本项导致比例分配方案不在数量策略下的合作运输博弈的核心中. 针对数量策略下合作运输博弈特征函数的特点,考虑另外一种比例分配方案,其结构如下

$$\begin{aligned}\gamma_j &= \left[\frac{h\mu/n + 2K_D\lambda_i}{h\mu + 2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}\sqrt{h\mu + 2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i} - \frac{1}{n}\sqrt{h\mu}\right]\sqrt{h\mu} + (K_O + c\mu)\lambda_i \\ &= \left[\frac{h\mu/n + 2K_D\lambda_i}{\sqrt{h\mu + 2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}} - \frac{1}{n}\sqrt{h\mu}\right]\sqrt{h\mu} + (K_O + c\mu)\lambda_i \end{aligned} \tag{11}$$

该分配方案的思想是,对于订单处理成本和变动运输成本按照承运人订单到达率的比例进行分配,因为这些成本本身是订单到达率的比例函数; 对于库存持有成本与固定运输成本 $\left[\sqrt{h\mu(h\mu + 2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i)} - h\mu\right]$,首先对 $-h\mu$ 部分在各承运人之间进行均分,然后对 $\sqrt{h\mu(h\mu+2K_D\sum_{i\in S}\lambda_i)}$ 部分按照比例 $\frac{h\mu/n+2K_D\lambda_i}{h\mu+2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}$ 进行分配,该比例由对 $h\mu$ 进行均分及对成本 $2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i$ 按照订单到达率进行比例分配得到. 所以,

该分配方案事实上也是一种比例分配方法. 但是该费用分配方案的缺点是不满足“zero cost”的性质，即当 $\lambda_i = 0$ 时，$\gamma_i \neq 0$，也就是说当某个参与者的订单量为零时，其相应也需承担一定的费用，因此该比例分配方案也不在核心中.

因此，由于简单易行的比例分配方案不在数量策略下的合作运输博弈的核心中，考虑其它核心中的分配方案. 由命题 5 可知由于数量策略下的合作运输博弈是凹博弈，因此诸如 Shapley 值和核仁这样的解概念都在其核心中. 同时，Shapley 值是唯一同时满足虚拟参与者(dummy)、对称性(symmetry)和可加性(additivity)的分配方案[21]，其也是唯一同时满足匿名性(anonymous)和强单调性(strongly monotonic)的分配方案[23]. 虽然核仁也在核心中，但是它并不同时具备 Shapley值的这些性质[24]. 因此，在本节将利用 Shapley 值来对数量策略下的合作运输的费用进行分配. Shapley 值的定义如下

$$Sh_i = \sum_{S \subseteq N \backslash i} \frac{s!(n-s-1)!}{n!}(c^w(S \cup i) - c^w(S))$$

其中 $(c^w(S \cup i) - c(S))$ 表示参与者 i 加入联盟 S 所带来的边际成本. Shapley 值分配方案的思想是参与者所承担的费用是其加入所有可能联盟的边际成本的加权平均，体现了公平性. 一般情况下，Shapley 值可能不在核心中，但是当博弈是凹博弈时，其一定在核心中，而且是核心的重心(barycenter of the core).

5 合并运输策略的选择

在此节中主要分析零担运输承运人合作时合并运输策略的选择. 首先对所用符号进行一些说明. 对于联盟 N，w_N^* 表示数量策略下的最优运输量临界点，$w_N^* + E[Y_2(w_N^*)]$ 表示数量策略下的期望实际运输量，$E[S_{N_2(w_N^*)+1}]$ 表示数量策略下的平均运输周期; T_N^* 表示时间策略下的最优运输周期，$E[M(T_N^*)]$ 表示时间策略下的期望运输量. 与文献[18]中定理 2 和定理 3 的结论类似，可以得到如下命题.

命题 7[18] 对于联盟 N，$w_N^* < E[M(T_N^*)] < w_N^* + E[Y_2(w_N^*)]$，即时间策略下的期望运输量大于数量策略下的最优运输量临界点，小于数量策略下的期望实际运输量; $E[S_{N_2(w_N^*)+1}] = [w/\mu + 1]/\lambda > T_N^*$，即时间策略下最优运输周期比数量策略下的平均期望运输周期短.

证明 由式(4)可知 $T_N^* = \sqrt{\dfrac{2K_D}{h\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}}$，故在一个周期内的累积期望运输量为

$$E[M(T_N^*)] = \mu\sum_{i\in N}\lambda_i T_N^* = \sqrt{\frac{2K_D\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}{h}}$$

又由式(7)知

$$w_N^* = \mu\left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}{h\mu}}\right]$$

又

$$\sqrt{\mu^2 + \frac{2K_D\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}{h}} < \mu + \sqrt{\frac{2K_D\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}{h}}$$

可知 $w_N^* < E[M(T_N^*)]$. 又 $E[Y_2(w)] = \mu$

$$w_N^* + E[Y_2(w_N^*)] = \sqrt{\mu^2 + \frac{2K_D\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}{h}} > \sqrt{\frac{2K_D\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}{h}} = E[M(T_N^*)]$$

在最优数量策略下，平均运输周期(也就是货物总量第一次超过临界点 w_N^* 的时间)为

$$E[S_{N_2(w_N^*)+1}] = \frac{(w_N^*/\mu + 1)}{\sum_{i\in N}\lambda_i} = \sqrt{\frac{1}{(\sum_{i\in N}\lambda_i)^2} + \frac{2K_D\mu}{h\sum_{i\in N}\lambda_i}}$$

又

$$\sqrt{\frac{1}{(\sum_{i\in N}\lambda_i)^2} + \frac{2K_D\mu}{h\sum_{i\in N}\lambda_i}} > \sqrt{\frac{2K_D}{h\mu\sum_{i\in N}\lambda_i}} = T_N^*$$

故 $E[S_{N_2(w_N^*)+1}] > T_N^*$. 证毕.

平均运输周期 T 可以理解为客户服务水平，

即每笔订单的等待时间不超过时间 T. 根据命题7，可以得到如下推论.

推论3　时间策略下的客户服务水平比数量策略下的客户服务水平高.

证明　由命题7知 $E\left[S_{N_2(w_N^*)+1}\right] > T_N^*$，即在数量策略下的平均运输周期要大于时间策略下的平均运输周期，因此该推论成立.　　证毕.

尽管时间策略下的客户服务水平比数量策略下的客户服务水平高，但是由下面的命题可知数量策略下的最优总期望成本要低于时间策略下的最优总期望成本.

命题8　数量策略下的最优总期望成本优于时间策略下的最优总期望成本.

证明　对于联盟 N 来说

$$c^w(N) - c^T(N) =$$

$$\sqrt{h\mu}\left(\sqrt{h\mu + 2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i} - \sqrt{h\mu} - \sqrt{2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}\right) =$$

$$\sqrt{h\mu}\left(\sqrt{h\mu + 2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i} - \left[\sqrt{h\mu} + \sqrt{2K_D\sum_{i\in N}\lambda_i}\right]\right) \leqslant 0.$$

其中最后一个不等式是由 $\sqrt{x}$ 的凹函数性质得到的. 因此可以得到数量策略下的最优总期望成本要优于时间策略下的最优总期望成本.　　证毕.

从推论3和命题8可以看出，时间策略与数量策略之间没有一个策略绝对优于另外一个策略. 时间策略在服务水平上要优于数量策略，但是数量策略在总期望成本上面要优于时间策略. 因此，在实际生活中，对于这两种策略的选择要依实际情况而定. 当参与合作的承运人对服务水平要求比较高时，可以选择时间策略进行合作运输；当参与合作运输的承运人对成本更加敏感时，可以选择数量策略进行合作运输.

下面用数值算例说明本文的结果. 假设市场上有三个零担运输承运人. 每趟运输的固定成本 $K_D = 400$ 元每笔订单的处理成本为 $K_O = 80$ 元，运输的变动成本为 $c = 100$ 元/t，库存成本为 $h = 10$ 元/(t·h)，每笔订单的平均重量为 $\mu = 7$ t. 订单平均到达率为 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0.25, 0.30, 0.50)$，在该需求参数下承运人单独运输与合作运输的各结果如表1和表2所示.

表1　承运人单独运输时的结果

Table 1 Outcomes when carriers work independently

承运人 i	数量策略			时间策略		
	1	2	3	1	2	3
$c(\{i\})$	262.48	311.31	501.38	313.32	363.61	557.33
w^*	6.75	7.73	11.14	11.83	12.96	16.73
$w^* + \mu$	13.75	14.73	18.14	18.83	19.96	23.73
T^*	47.50	43.22	33.53	6.76	6.17	4.78

表2　承运人合作运输时的结果(1)

Table 2 Outcomes when carriers collaborate (1)

	w_N^*	$w_N^* + \mu$	T_N^*	$c(N)$	$\sum_{i\in N} c(\{i\}) - c(N)$	Sh/β
数量策略	18.24	25.24	23.11	1 001.39	73.78	(240.11, 287.21, 474.06)
时间策略	24.25	—	3.30	1 061.49	172.78	(252.74, 303.28, 505.47)

通过比较表1与表2可以发现：

(1) 不论是在数量策略下还是在时间策略下，合作都是有利的，都可以给每个承运人带来成本的节约. 但是在数量策略下的最优期望总成本比在时间策略下的最优期望总成本小，这也验证了命题8.

(2) 同时发现，不论是在时间策略下还是数量策略下，通过合作不仅可以带来成本的节约，还可以提高客户服务水平. 如当承运人1单独运输且使用数量策略时，他的运输周期为47.50 h(将近两天)，而当他与其他参与者合作时并使用数量策略时，此时联盟的最优运输周期为23.11 h

(不到一天的时间),相当于每天都可以发一次车,大大提高了客户的服务水平.

(3) 另外,运输量临界点 w 可以理解成承运人选择的车型,即车辆容量. 合作后联盟选择的运输量临界点 w 比承运人单独运输时选择的 w 大,表示合作后联盟可以共同拥有容量更大的车辆,更能实现规模经济效应. 如对于承运人 1 来说,单独运输时其最优选择是容量为 20 t 以下的车辆,但是合作后他们的最优选择是容量为 25 t 以上的车辆. 容量更大的车辆更能实现规模经济效应. 因此合作可以促使资源更好地利用.

下面考虑订单平均达到率为 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0.15, 0.18, 0.22)$ 的情况,在该需求参数下,计算的结果如表 3.

表 3 承运人合作运输时的结果(2)

Table 3 Outcomes when carriers collaborate (2)

	w_N^*	$w_N^* + \mu$	T_N^*	$c(N)$	$\sum_{i \in N} c(\{i\}) - c(N)$	Sh/β
数量策略	11.89	18.89	31.96	547.94	40.00	(149.91,179.42,218.62)
时间策略	17.55	—	4.56	604.50	127.55	(164.86,197.84,241.80)

通过比较表 3 与表 2 发现,不论是在数量策略下还是在时间策略下,承运人分配的费用随着其订单的平均到达率的增加而增加. 同时还发现订单的平均到达率越大,运输周期越短,最优的车辆容量越大. 因此随着参与合作的承运人的增加,订单的总平均到达率增大,越能体现合作的优势. 因此零担运输承运人应该积极寻求合作的契机,提高资源利用率,降低成本,提高客户服务水平,从而提高竞争力.

6 结束语

合作运输的一个核心问题就是产生的总费用应该如何在参与者之间进行公平地分配. 本文考虑合并运输策略下零担运输承运人之间的运输合作. 利用合作博弈理论将零担运输承运人在时间合并运输策略下和数量合并运输策略下合作运输的费用分配问题分别构造成时间策略下与数量策略下的合作运输博弈. 首先证明了相应的博弈满足次加性,说明合作是有益的,然后证明了相应的博弈满足凹性,表明博弈的核心非空,并设计了属于相应核心中的分配方案. 此外,本文通过比较两种合并运输策略得出了一些很有意义的结论,如时间策略下的客户服务水平比数量策略下的客户服务水平高,数量策略下的最优总期望成本要低于时间策略下的最优总期望成本. 本文的研究结论对实际生活中零担运输承运人的合作提供了合并运输策略选择和费用分配方案的指导,例如:

(1) 合作可以带来成本的节约,零担运输承运人应该积极寻求合作的机会来降低成本. 如果当参与合作的承运人对服务水平要求比较高时,可以选择时间策略进行合作运输. 合作后承运人可按照各自期望需求量的比例对总费用进行分配,该分配方案可操作性强,且能够保证对于所有承运人其所分配的费用比其单独运输或组成小联盟进行运输的费用小.

(2) 如果参与合作运输的承运人对成本更加敏感时,可以选择数量策略进行合作运输. 承运人选择数量策略进行合并运输时的总成本要低. 且在数量策略合作运输下,参与合作的承运人可参照夏普利值分配法对总费用进行分配,该分配方案能保证大联盟的稳定性. 但是由于数量策略下的运输周期比时间策略下的运输周期长,因此在实际操作中,承运人还应考虑数量策略下的运输周期的合理性,在成本最优与服务质量之间要进行权衡.

另外,本文在讨论随机需求环境下的合并运输策略时借鉴了文献[18]的处理方式,利用期望订单到达率和每个订单的期望大小来描述问题,并利用更新理论分别得到了时间策略下和数量策略下的总期望成本的表达式,从而求得时间策略下的最优运输周期和数量策略下的最优运输量临界点. 利用期望订单到达率和每个订单的期望大小来描述问题的好处是能够得到最优策略和总期望成本的具体表达式,从而为分析费用分配问题

提供基础. 然而使用期望值来描述问题会使得问题的随机性在一定程度上有所减弱,在未来的研究中可利用马氏过程对随机需求环境下的合作运输进行进一步描述,并讨论相应的费用分配问题. 同时,本文考虑的是承运人企业之间的横向合作,在现实生活中纵向合作的情况也较多[25,26],在未来的研究中可以进一步考虑同时存在横向合作与纵向合作的情况.

参 考 文 献:

[1] Bookbinder J H, Higginson J K. Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage [J]. Transportation Research Part E, 2002, 38: 305 – 318.

[2] Higginson J K, Bookbinder J H. Markovian decision processes in shipment consolidation [J]. Transportation Science, 1995, 29(3): 242 – 255.

[3] Ulku M A. Dare to care: Shipment consolidation reduce not only costs, but also environmental damage [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 139: 438 – 446.

[4] Sheffi Y. Logistics-Intensive Clusters: Global Competitiveness and Regional Growth [M] //Bookbinder J H, Handbook of Global Logistics: Transportation in International Supply Chains. New York: Springer, 2013, 181: 491.

[5] Ozener O, Ergun O. Allocating costs in a collaborative transportation procurement network [J]. Transportation Science, 2008, 42: 146 – 165.

[6] Esper T L, Williams L R. The value of collaborative transportation management (CTM): Its relationship to CPFR and information technology [J]. Transportation Journal, 2003, 42(4): 55 – 65.

[7] Zhou G, Hui Y V, Liang L. Strategic alliance in freight consolidation [J]. Transportation Research Part E, 2011, 47: 18 – 29.

[8] Ergun O, Kuyuzu G, Savelsbergh M. Reducing truckload transportation costs through collaboration [J]. Transportation Science, 2007, 41: 206 – 221.

[9] Ergun O, Kuyuzu G, Savelsbergh M. Shipper collaboration [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34: 1551 – 1560.

[10] Ozener O O, Ergun O, Savelsbergh M. Lane-Exchange mechanisms for truckload carrier collaboration [J]. Transportation Science, 2011, 45(1): 1 – 17.

[11] Dai B, Chen H. A multi-agent and auction-based framework and approach for carrier collaboration [J]. Logistics Research, 2011, 3: 101 – 120.

[12] Dai B, Chen H. Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service [J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62: 633 – 643.

[13] Liu P, Wu Y, Xu N. Allocating collaborative profit in less-than-truckload carrier alliance [J]. Journal of Service Science & Management, 2010, 3: 143 – 149.

[14] 李　军, 蔡小强. 易腐性产品运输设施选择博弈 [J]. 管理科学学报, 2009, 12(1): 28 – 37.
Li Jun, Cai Xiaoqiang. Transportation facility choice game of perishable products [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(1): 28 – 37. (in Chinese)

[15] Hernández S, Peeta S, Kalafatas G. A less-than-truckload carrier collaboration planning problem under dynamic capacities [J]. Transportation Research Part E, 2011, 47: 933 – 946.

[16] Krajewska M A, Kopfer H, Laporte G, et al. Horizontal cooperation among freight carriers: Request allocation and profit sharing [J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59: 1483 – 1491.

[17] Yilmaz O, Savasaneril S. Collaboration among small shippers in a transportation market [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 218: 408 – 415.

[18] Cetinkaya S, Bookbinder J H. Stochastic models for the dispatch of consolidated shipments [J]. Transportation Research Part B, 2003, 37: 747 – 768.

[19] Closs D J, Cook R L. Multi-stage transportation consolidation analysis using dynamic simulation [J]. International Journal of Physical Distribution and Materials Management, 1987, 17(3): 28 – 45.

[20] Higginson J K, Bookbinder J H. Policy recommendations for a shipment consolidation program [J]. Journal of Business Logistics, 1994, 15(1): 87 – 112.
[21] Curiel I. Cooperative Games Theory and Applications [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.
[22] Driessen T. Cooperative Games, Solutions and Applications [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.
[23] Young H P. Monotonic solutions of cooperative games [J]. International Journal of Game Theory, 1985, 14: 65 – 72.
[24] Hougaard J L. An Introduction to Allocation Rules [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
[25] 周 欣，霍佳震. 供应物流利益分配机制研究 [J]. 管理科学学报，2011，14(10): 77 – 84.
Zhou Xin, Huo Jiazhen. Allocation mechanism in inbound logistics based on multi-principal and multi-agent model [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(10): 77 – 84. (in Chinese)
[26] 赵海霞，艾兴政，唐小我. 链与链基于规模不经济的纵向联盟和利益分享 [J]. 管理科学学报，2014，17(3): 48 – 56.
Zhao Haixia, Ai Xingzheng, Tang Xiaowo. Vertical alliance and profit sharing contract based on diseconomies of scale under chain-to-chain competition [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(3): 48 – 56. (in Chinese)

Collaboration in less-than-truckload transportation with stochastic demand

ZENG Yin-lian[1], *LI Jun*[1], *FENG Hai-rong*[2]
1. School of Economics & Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Business School, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

Abstract: Shipment consolidation is widely applied by less-than-truckload carriers in stochastic demand environment. This paper studies collaboration among less-than-truckload carriers with stochastic demand under shipment consolidation policies, including time policy and quantity policy. Cost allocation problem of collaboration among less-than-truckload carriers is discussed under time policy and quantity policy, respectively. Cooperative game theory is applied to deriving cost allocations in the core. Furthermore, the choice of different shipment consolidation policies is discussed. The results show that customer service level is higher under time policy than that under quantity policy, while the total expected cost is less under quantity policy than that under time policy. It is also shown that collaboration among carriers not only reduces the cost of each carrier, but also enhances customer service level.

Key words: stochastic demand; less-than-truckload transportation; cooperative game; cost allocation