doi: 10.7690/bgzdh.2015.12.016

基于主从博弈的装备维修器材供应链协调订货

林　翔，瞿　勇
（海军工程大学理学院，武汉 430033）

摘要： 为了减小维修单位的库存压力，提出一种基于 Stackelberg 主从博弈的装备维修器材供应链协调订货机制。结合装备维修器材供应现状，供应商作为主方提出最小补充期策略和数量折扣，维修单位作为从方以最佳订货策略响应，以供应商成本最小化为目标建立优化模型，构建带有惩罚因子的特殊适应度函数，利用粒子群优化算法进行求解，并运用军事算例进行仿真。仿真结果表明：该机制不仅可以降低整个供应链的成本，也可以使其成员有不同程度的收益。

关键词： 供应链；Stackelberg 主从博弈；最小补充期；数量折扣；粒子群算法
中图分类号： TJ07　　**文献标志码：** A

Supply Chain Coordination Ordering in Equipment Repair Equipment Based on Stackelberg Game

Lin Xiang, Qu Yong
(*College of Science*, *Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: For reduce inventory overstocking of maintenance unit, put forwards equipment maintenance parts supply chain coordination ordering mechanism based on Stackelberg game. Combined with the supply situation of equipment maintenance parts, the suppler, which is the host, introduces the minimum replenishment periods strategy and quantity discount, the maintenance unit, as the service part, introduces the optimal order strategy. Based on suppler minimize cost as target, establishes optimal model, constructs special fitness function with punishment factor, uses particle swarm optimization (PSO) algorithm to carry out resolution, and takes military example to simulate. The simulation results show that the mechanism can not only reduce the cost of the whole supply chain, but also can make the members of different levels of income.

Keywords: supply chain; Stackelberg game; minimum replenishment periods; quantity discount; PSO algorithm

0　引言

装备维修器材供应链是指以装备保障系统(维修部分)为核心节点，依托信息系统，将装备维修器材各级供应商与各级部队(最终用户)连成一个整体的功能网链结构[1]。对于供应商而言，面对维修单位随时的订货要求，当然希望可以建立一种最小补充期[2-3]协调机制，规定订货周期以降低供应难度；但这无疑会给维修单位带来库存上的压力，因此，供应商需要提出适当的激励机制以保证装备维修器材供应链的正常运行。其中，应用数量折扣可以有效地影响供应链的库存和订货策略，对整个供应链起到协调控制的作用[4-5]。

文献[1]给出了当前装备维修器材供应链的一个基本现状以及未来的发展趋势；文献[2]研究了应用普通补充期协调供应链库存问题，并进行了数例计算；文献[3]分析了在一个分销商、多个买方单一产品供应链订货下，最小补充期协调的 Stackelberg 对策，给出了主从双方各自的成本函数和响应函数；文献[4-5]研究了一致和不同 2 种数量折扣在供应链协调中的应用；文献[6]给出了不允许缺货，备货时间很短条件下的确定性存储模型，并给出了实际算例；文献[7]研究了最小补充期协调下买方成本理性约束下的卖方成本优化模型，并应用遗传算法进行了主从博弈的仿真实验；文献[8-10]提出了一种求解双矩阵对策多重纳什均衡解的粒子群优化算法，并通过仿真示例验证了其有效性。

笔者在上述文献的基础上，结合当前装备维修器材供应实际，给出了基于 Stackelberg 主从博弈的装备维修器材供应链协调订货机制，并在此基础上建立优化模型，构建适应度函数，利用粒子群优化算法求解，运用实际算例进行了仿真计算。

1　建立模型

1.1　模型假设

由于装备维修器材的生产组织复杂，一个供应

收稿日期：2015-07-16；修回日期：2015-08-25
作者简介：林　翔(1991—)，男，福建人，在读硕士，从事军事系统建模与运筹决策研究。

商往往需要负责多个维修单位的维修器材生产供应任务。而当前各维修单位提交的器材申领订单时间又是不确定的，这给原本就担负着繁重生产任务的供应商增加了供应上的难度；因此，供应商希望能建立一种供应链协调机制来减轻供应上的负担。

笔者考虑一个简单的两级装备维修器材供应链模型，如图 1 所示。如果供应商在供应链中不考虑自身库存等产生的费用问题，只关注供应环节产生的成本和供应效率，为此向维修单位提出最小补充期策略，并通过多年供应经验知道维修单位的年需求、库存成本和订购成本，以方便为其提供适当的数量折扣。维修单位在接受供应商的最小补充期策略后，在无特殊情况(如战争、重大军事演习、紧急救灾等)需要时，只能将补充期调整为最小补充期的整数倍；因此，在供应链中需要考虑库存成本和订购成本对订货成本的影响，不考虑产品价格、运输费用等固定费用。

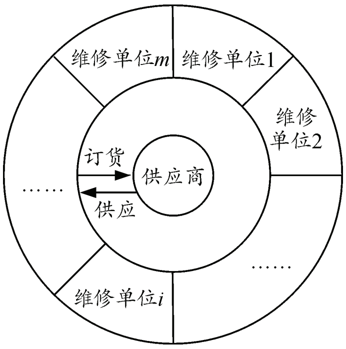

图 1　两级装备维修器材供应链结构模型

1.2　主从博弈分析

在装备维修器材供应链协调下，维修单位 i 的补充期为

$$t_i = n_i T \text{ 。} \tag{1}$$

其中：$n_i \geqslant 1$，且是整数，表示维修部队的订货策略；$T \geqslant 1$，单位为 d，且为整数，表示供应商提出的最小补充期。

考虑维修单位的库存成本和订购成本，在供应链协调下，每年维修单位 i 的订货成本为

$$C_i(n_i) = \frac{T_0 d_i}{n_i T} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_i T}{T_0} \text{ 。} \tag{2}$$

其中：$T_0 = 365$；d_i 为维修单位 i 每次向供应商下订单的订购成本；q_i 为维修单位 i 每年单位产品的存储费用；R_i 为维修单位 i 每年的固定需求量。

利用微积分求最小值的方法，对式 (2) 中 n_i 求导，可以求得最优订货策略

$$n_i^* = \frac{T_0}{T} \sqrt{\frac{2d_i}{q_i R_i}} \text{ ，} \tag{3}$$

使得维修单位 i 的订货成本最低。

考虑维修单位接受最小补充期后订货成本的增加，供应商需要对其提供适当的数量折扣，以弥补维修单位成本的增加，并提供给各维修单位在一般订货模式下产生订货成本的一个最小节余，使得维修单位感受到供应链协调订货后成本得到了降低，以激励维修单位积极参与到供应链协调中来；因此供应商提供给维修单位 i 的总数量折扣 $R_i \nu_i$ 至少应满足以下条件

$$R_i \nu_i = \frac{T_0 d_i}{n_i T} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_i T}{T_0} - (1-\varepsilon)\sqrt{2 d_i q_i R_i} \text{ 。} \tag{4}$$

其中：n_i 应取使 $C_i(n_i)$ 极小化的 $\left[n_i^*\right]$ 或 $\left[n_i^* + 1\right]$；ε 为维修单位在未接受供应链协调下订货成本节余的一个最小比率；$\sqrt{2 d_i q_i R_i}$ 是维修单位 i 在一般订货模式下[6]即 $T = 1$ 时的订货成本；ν_i 是供应商提供给维修单位 i 的单位数量折扣。

数量折扣包括一致数量折扣 ν_{1i} 和不同数量折扣 ν_{2i}。一致数量折扣就是取供应商给各维修单位数量折扣率的最大值；而不同数量折扣，各维修单位获得的数量折扣率不同，年需求量越大所获得的数量折扣越高，也就越优惠。即：

$$\nu_{1i} = \max\{\frac{1}{R_i}[\frac{T_0 d_i}{n_i T} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_i T}{T_0} - (1-\varepsilon)\sqrt{2 d_i q_i R_i}]\} \text{；} \tag{5}$$

$$\nu_{2i} = \frac{1}{R_i}[\frac{T_0 d_i}{n_i T} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_i T}{T_0} - (1-\varepsilon)\sqrt{2 d_i q_i R_i}] \text{。} \tag{6}$$

供应商提出最小补充期策略后，所产生的成本包括订单处理成本和给所有维修单位的数量折扣。即

$$P = \frac{T_0 S_0}{T} + \sum_{i=1}^{m} (R_i \nu_i + \frac{T_0 S_i}{n_i T}) \text{ 。} \tag{7}$$

其中：S_0 是供应商每次处理订单时的准备成本；S_i 是供应商单独处理维修单位 i 的订单所造成的处理成本；$R_i \nu_i$ 是供应商给维修单位 i 的总数量折扣。

对供应商而言，相比供应链协调之前，虽然供应环节的成本提高了；但供应商面对的订单都发生在最小补充期，这样既方便了供应商对订单的集中处理，又可以大大提高供应商的供应能力。

1.3　Stackelberg 主从博弈问题

基于上述分析，可应用 Stackelberg 主从博弈。令博弈的主方是供应商，其策略是最小补充期和数量折扣；从方是维修单位，根据主方的策略来确定其订货策略。假设 U 和 V 分别是主从双方的策略集，最小补充期 T_k 和订货策略 $n_{i,k}$ 分别是主从双方的策略，$T_k \in U$，$n_{i,k} \in V$，$k = 1,2,\cdots,n$，且均为整数。由于维修单位的年需求、库存成本和订购成本等参数已知，供应商可以根据维修单位的响应函数做出最优决策。

供应商的成本函数为

$$P\left(T_k, n_{i,k}\right) = \frac{T_0 S_0}{T_k} + \sum_{1=1}^{m}\left(R_i v_i + \frac{T_0 S_i}{n_{i,k} T_k}\right)。\tag{8}$$

维修单位 i 的成本函数为

$$C_i(T_k, n_{i,k}) = \frac{T_0 d_i}{n_{i,k} T_k} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_{i,k} T_k}{T_0}。\tag{9}$$

供应商的响应函数为

$$T_k = \arg\min_{T_k \in U} P(T_k, n_{i,k})。\tag{10}$$

由式 (3) 可知，维修单位 i 的响应函数为

$$n_{i.k} = \arg\min_{n_{i,k} \in \mathrm{V}} C_i(T_k, n_{i.k}) = \left[\frac{T_0}{T_k}\sqrt{\frac{2d_i}{q_i R_i}}\right] \text{or} \left(\left[\frac{T_0}{T_k}\sqrt{\frac{2d_i}{q_i R_i}}\right] + 1\right)。\tag{11}$$

由式 (10)、式(11) 给出的策略对 $\left(T_k, n_{i.k}\right)$ 便是上述 Stackelberg 主从博弈问题的纳什均衡解[9]。

1.4　优化模型

要求出该 Stackelberg 主从博弈的纳什均衡解，必须根据上述分析确定合适的目标函数，构建合理的约束条件，笔者建立了以供应商成本最小化为目标的优化模型。即：

$$\min_{T_k, n_{i,k}} \quad P\left(T_k, n_{i,k}\right) = \frac{T_0 S_0}{T_k} + \sum_{1=1}^{m}\left(R_i v_i + \frac{T_0 S_i}{n_{i,k} T_k}\right);\tag{12}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} C_i(T_k, n_{i,k}) = \dfrac{T_0 d_i}{n_{i,k} T_k} + \\ \quad \dfrac{1}{2} q_i R_i \dfrac{n_{i,k} T_k}{T_0} \leqslant L_i \\ T_k, n_{i,k} \geqslant 1, \text{且为整数} \end{cases}。\tag{13}$$

其中 L_i 是维修单位 i 的订货成本上限。

显然，该优化模型是一个非线性规划问题，目标函数与约束条件都是非线性的，采用传统方法很难求解，笔者采用了在求解实优化问题上较遗传算法收敛效率更高，速度更快的粒子群优化算法来求解，并得出 Stackelberg 均衡解。

2　求 Stackelberg 均衡解的粒子群优化算法

2.1　算法设计

为了方便处理问题，在应用粒子群优化算法计算 Stackelberg 主从博弈问题的近似解时，可以利用约束条件式 (13)，限定粒子群搜索空间并建立如下惩罚函数

$$h(T_k, n_{i,k}) = 1 + \lambda \sum_{i=1}^{m} \delta\left(\frac{T_0 d_i}{n_{i,k} T_k} + \frac{1}{2} q_i R_i \frac{n_{i,k} T_k}{T_0} - L_i\right)。\tag{14}$$

其中：$\delta(x)$ 是单位阶跃函数，即 $\delta(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \leqslant 0 \end{cases}$；$\lambda$ 是用来调节惩罚严厉性的参数，这里为了保证满足上述优化模型的目标函数式 (12)，$\lambda \geqslant 1$ 且为整数即可。该惩罚函数不依赖于问题。

有了该惩罚函数再结合目标函数，通过乘法形式的评估模式，就可以定义粒子群优化算法中粒子的适应度函数，即

$$f(T_k, n_{i,k}) = h(T_k, n_{i,k})\left[\frac{T_0 S_0}{T_k} + \sum_{i=1}^{m}\left(R_i v_i + \frac{T_0 S_i}{n_{i,k} T_k}\right)\right]。\tag{15}$$

显然，适应度函数取得最小值的策略，也就是优化模型中满足约束条件的目标函数的解，即 Stackelberg 主从博弈的均衡解。

2.2　PSO 算法步骤

对于上述 Stackelberg 主从博弈问题，PSO 算法中每个粒子表示主从双方的策略对 $\left(T_k, n_{i.k}\right)$，下面给出求该 Stackelberg 均衡解的 PSO 算法的基本步骤：

1) 给出粒子群规模 N，最大迭代次数 $k_{\max}$，最大惯性权重 $\omega_{\max}$，最小惯性权重 $\omega_{\min}$。根据粒子的取值范围和速度的取值区间，随机初始化粒子群位置及其速度，每个粒子的位置向量代表最小补充期 T_k。

2) 对每个粒子即供应商的最小补充期策略 T_k，维修单位根据式 (11) 给出最优策略即其订货策略 $n_{i,k}$ 作为响应，接着卖方根据式 (5) 或式 (6) 确定最优价格折扣 v_i，然后根据式 (15) 计算粒子的适应度函数值。根据粒子的适应度值，找到粒子的个体极值和全局极值。

3) 更新粒子速度与位置，并依次对每个粒子的

位置向量作取整等数据处理，使得每个粒子的位置保持在可行的策略组合空间内。

4) 按照 2)计算粒子的适应度值，更新粒子的个体极值和全局极值，如果全局极值达到足够好或者已经进行到设定的最大迭代次数 $k_{\max}$ 时则停止，输出最优的粒子即为近似均衡解。否则转到 3)。

3　军事算例仿真

由于联轴节是舰船上经常需要维修和更换的器材，各单位对该零件的报损率都很高，需要很大的库存量和供应量；因此，笔者选择联轴节的维修供应来说明供应链协调过程并进行仿真设计。假设某联轴节生产厂家对 10 个舰船修理仓库提供联轴节保障，其中，该生产厂家是供应链 Stackelberg 主从博弈问题的主方，其保障的 10 个修理仓库是从方。各修理仓库的参数设置见表 1，买方初始库存成本的最小节余比率为 $\varepsilon = 0.1$，设置 3 组不同的生产厂家供应参数，见表 2。

应用文中粒子群优化算法计算该问题的近似解时，参数取为 $\lambda = 2$；因此，当该零部件的成本降低时，适应度也随之降低。粒子群粒子位置向量即卖方的策略 T_k 取为 $1 \leqslant T_k \leqslant 60$，且为整数，粒子群粒子速度区间为[−30,30]。

表 1　各修理仓库的参数设置　　元

修理仓库 i	年需求 R_i	订货成本 d_i	持有成本 q_i/%	成本约束 L_i
1	1 000 000	100	0.2	6 450
2	2 000 000	1 000	0.1	21 000
3	3 000 000	100	0.3	14 500
4	4 000 000	5 000	0.2	90 000
5	5 000 000	100	0.3	18 500
6	6 000 000	2 000	0.1	50 000
7	7 000 000	1 000	0.3	66 500
8	8 000 000	500	0.1	30 000
9	9 000 000	200	0.2	27 500
10	10 000 000	1 000	0.1	47 000

按照文中提出的粒子群优化算法，取粒子群规模为 $N = 4$，最大迭代次数为 $k_{\max} = 50$，参数设定为 $\omega_{\max} = 0.9$，$\omega_{\min} = 0.4$。仿真计算实现采用的操作系统为 Windows XP，机器硬件 CPU 为 Pentium Dual-Core 3.0 GHz，2 GB 内存，用 Matlab7.1 编程计算，3 组的计算时间均不超出 1 s。结果如表 2 所示，其中系统总成本(STC)是生产厂家的总相关成本与数量折扣下各修理仓库的订货成本之和。

表 2　一致数量折扣下的仿真结果　　元

组	S_0	S_i	一般订货模式				供应链协调订货模式						
			$t_{1,i}$	$C_{1,i}$	P_1	STC	T	n_i	$\boldsymbol{V}_i$/%	$C_{2,i}$	实际成本 $C_{2,i}-R_i\boldsymbol{V}_i$	P_2	STC
		200	12	6 329				2		6 329	4 084		
		300	37	20 002				6		20 002	15 511		
		100	5	13 464				1		13 481	6 745		
		200	41	89 444				7		89 480	80 499		
1	100	100	4	17 344	101 703	462 047	6	1	0.224 5	18 412	7 185	187 687	426 081
		300	30	48 991				5		48 991	35 519		
		200	11	64 991				2		64 937	49 220		
		500	13	28 285				2		28 359	10 396		
		100	5	26 929				1		26 961	6 753		
		200	16	44 730				3		44 935	22 482		
		200	12	6 329				2		6 329	4 084		
		300	37	20 002				6		20 002	15 511		
		100	5	13 464				1		13 481	6 745		
		200	41	89 444				7		89 480	80 499		
2	300	100	4	17 344	178 237	538 581	6	1	0.224 5	18 412	7 185	199 854	438 248
		300	30	48 991				5		48 991	35 519		
		200	11	64 991				2		64 937	49 220		
		500	13	28 285				2		28 359	10 396		
		100	5	26 929				1		26 961	6 753		
		200	16	44 730				3		44 935	22 482		
		200	12	6 329				2		6 329	4 084		
		300	37	20 002				6		20 002	15 511		
		100	5	13 464				1		13 481	6 745		
		200	41	89 444				7		89 480	80 499		
3	500	100	4	17 344	254 772	615 116	6	1	0.224 5	18 412	7 185	212 020	450 414
		300	30	48 991				5		48 991	35 519		
		200	11	64 991				2		64 937	49 220		
		500	13	28 285				2		28 359	10 396		
		100	5	26 929				1		26 961	6 753		
		200	16	44 730				3		44 935	22 482		

表 2 列出了 3 组参数设置一致数量折扣下的仿真结果，3 组的 Stackelberg 主从博弈均衡解均为(6,(2,6,1,7,1,5,2,2,1,3))。图 2～图 4 中的曲线都表明了联轴节生产厂家广义成本的下降渐进稳定。

从各表及图中可以得出以下结论：

1) 对比分析表 2 中的仿真结果可以得出：当生产厂家的准备成本越高时，随着最小补充期策略的实施，整个供应链的系统总成本减少得越明显，在该生产厂家提出一致价格折扣下，各修理仓库的成本显著降低。

2) 当生产厂家准备成本处于较低值时，各修理仓库的实际成本均有一定降低；但生产厂家成本并未降低，且系统总成本变化也不明显。当准备成本处于较高值时，无论是修理仓库、生产厂家还是系统总成本均有明显程度降低；因此，当生产厂家准备成本高于某临界值时，可以得到 Stackelberg 的均

衡解，并使整个系统达到最优。而此时，生产厂家将更加主动地实施供应链协调。

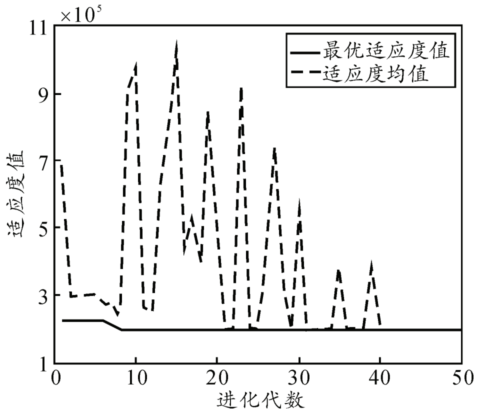

图 2　一致数量折扣下第 1 组仿真结果

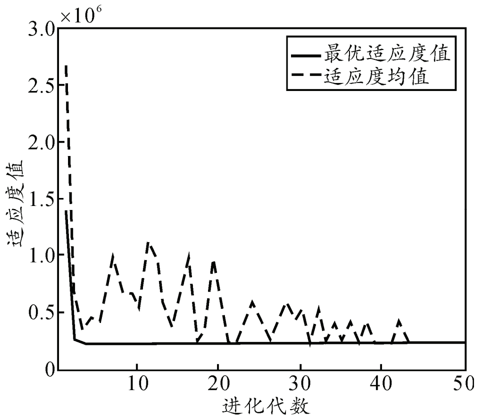

图 3　一致数量折扣下第 2 组仿真结果

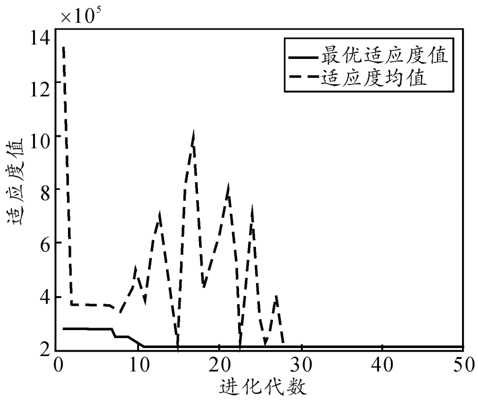

图 4　一致数量折扣下第 3 组仿真结果

3) 通过制定最小补充期策略和提供数量折扣，生产厂家可以实现对供应链渠道的协调和控制。

4　结束语

笔者针对特定装备维修器材供应，运用 Stackelberg 主从博弈理论，建立以供应商成本最小化为目标的优化模型，利用其约束条件构建了带有惩罚因子的特殊适应度函数，避免了可能产生假象的最优解。笔者利用粒子群优化算法对军事算例进行仿真计算，得出均衡解，说明通过供应链订货中最小补充期协调机制的实施，不仅能降低整个供应链的成本，而且能使其成员获得不同程度的收益。

参考文献：

[1] 何海宁, 舒正平. 供应链环境下的装备维修器材保障[J]. 物流科技, 2006, 136(29): 66–69.

[2] Viswanathan S, Piplani R. Coordianating supply chanin inwentory through common replenishment epochs[J]. European J of Operational Research, 2001, 129(2): 277–286.

[3] Chang L F, Huang X Y, Sun K D. The study of Stackelberg game in two-echelon supply chain[C]//Proceedings of International Conference on Regional Logistics and Supply Chain Management. Shenyang: Baishan Press, 2002: 80–89.

[4] Weng Z K. Channel coordination and quality distribution[J]. Management Science, 1995, 41(9): 1509–1522.

[5] Weng Z K. Modeling quantity discounts under general price-sensitive demand function: Optimal policies and relationships[J]. European J of operational Research, 1995, 86(2): 300–314.

[6] 甘英爱, 田丰, 李维铮, 等. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 348–351.

[7] 管曙荣, 常良峰. 物流管理中的主从对策问题[J]. 东北大学学报, 2003, 24(9): 866–869.

[8] 张荣沂. 一种新的集群优化方法—粒子群优化算法[J]. 黑龙江工程学院学报, 2004, 18(4): 34–37.

[9] 瞿勇, 张建军. 多重纳什均衡解的粒子群优化算法[J]. 运筹与管理, 2010, 19(2): 52–55.

[10] 马向阳, 陈琦. 以粒子群算法求解买卖双方存货主从对策[J]. 中国管理科学, 2010, 18: 142–145.