

供应链视角下工程材料库存优化研究

段文凤¹, 罗晓龙², 陈昌禄¹, 罗爱忠¹

(1. 贵州工程应用技术学院 土木建筑工程学院, 毕节 551700; 2. 毕节市七星关区水务局, 毕节 551700)

摘要: **目的** 为了达到节约工程建设行业企业材料管理成本的目的, 以常用的 2 种工程材料钢材和水泥存储于同一仓库且由同一供应商供货的库存管理为研究对象进行研究。**方法** 分析承包商采购材料情形下, 供应商和承包商基于合作伙伴关系实现库存信息共享, 建立 2 种材料两级库存联合库存成本优化的数学模型, 并通过工程实例, 运用粒子群算法求解, 验证研究方法的有效性。**结果** 不同的材料订购策略对工程供应链上的材料库存成本影响很大, 数学模型可以给出恰当的订购策略, 满足系统成本的最低要求, 从而节约成本, 提升工程供应链的整体竞争力。**结论** 研究成果丰富了工程供应链管理理论、工程材料的库存管理理论, 并对工程建设实践中的材料采购有一定的指导意义。

关键词: 工程供应链; 粒子群算法; 库存优化

中图分类号: F253.4; TU-9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0169-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.023

Inventory Optimization of Engineering Materials under the Perspective of Supply Chain

DUAN Wen-feng¹, LUO Xiao-long², CHEN Chang-lu¹, LUO Ai-zhong¹

(1. School of Civil Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China;

2. Water Authority of Qixingguan, Bijie 551700, China)

ABSTRACT: The work aims to take the inventory management of two commonly used building steels and cement materials stored in the same warehouse and supplied by the same supplier as the research object to save the management cost of materials in engineering construction industry. By analyzing the situation where the contractor purchased materials, the supplier and the contractor shared information based on cooperation. The optimization model for the combined inventory cost of two materials and two-echelon was established and the optimal solution of the engineering example was obtained by the particle swarm algorithm to verify the effectiveness of the research method. The ordering strategies of different materials had great influence on material inventory cost in construction supply chain. Mathematical model could give appropriate ordering strategies to satisfy the lowest system cost requirement, save costs and improve the overall competitiveness of construction supply chain. The research has enriched the theory of construction supply chain management and inventory management theory of engineering materials and also has guidance significance on material purchasing in the practice of project construction.

KEY WORDS: construction supply chain; particle swarm algorithm; inventory optimization

收稿日期: 2018-09-27

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7534 号); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]309)

作者简介: 段文凤(1987—), 女, 硕士, 贵州工程应用技术学院讲师, 主要研究方向为管理科学与工程。

材料工业在材料的采集、制造和运输等过程中会耗费大量能源,引发污染,应加强管理。互联网、大数据的应用,市场竞争的加剧,都促使着企业结成联盟,向供应链模式转型发展。供应链是包含原材料采购、中间产品加工以及最终产品制造的一系列过程,并将产品供产销线上的众多参与者连接成一个网链结构^[1]。贾俊秀和袁泽^[2]通过算例表明了两级库存中,供应链成员间可以通过联合决策同时实现库存的动态控制。张德春^[3]分析了建材价格波动对房地产企业的影响,并提出了相应的建议。张鑫和高淑春^[4]基于延期支付理论研究了易腐品的库存模型。周剑桥^[5]建立了多约束条件下库存成本最优的多级库存控制模型,并采用遗传算法求解。陈琳轶和陈广学^[6]从包装在供应链中的角色出发,分析了实现包装可视化的各种方法以实现供应链管理的高效化。Koskela^[7]首先提出将制造业中的供应链理念应用于工程建设中,提出了工程供应链管理的思想。Cus-Babic等^[8]研究了工程供应链中物料管理的信息流问题。Vidalakis等^[9]分析了需求的不确定问题对工程供应链提前期与成本的影响。高宁等^[10]采用敏感性分析识别出了影响国际石化工程项目供应链总建设成本的不确定性因素,并针对风险因素提出了相应对策。Zhou W等^[11]采用遗传算法优化了基于敏捷供应链的由多级供应商和分销商构成的多种产品库存控制模型。于艳娜等^[12]研究了需求和成本同时扰动下,由单一制造商和单一零售商组成的信息产品供应链的定价策略问题。赵川等^[13]考虑了随机需求下基于反馈控制的一个四级供应链系统中的牛鞭效应抑制方法。马鹏和张晨^[14]研究了绿色供应链背景下生产2种互补品的2个制造商和一个零售商系统下的定价策略问题。薛浩和文剑^[15]介绍了火电工程总包项目中采用的基于数据一体化的材料控制与采购管理系统以控制材料成本。当前,我国企业管理领域中有关工程供应链环境下工程材料的库存管理研究还很少,文中将工程供应链理论引入建材存储的企业管理中,以期丰富工程建设中工程材料多级库存的优化研究,并为工程实践中多种材料的订购提供参考。

1 系统问题描述

1.1 研究对象

文中研究的建材存储系统见图1。建设项目材料管理中的主要参与者基于工程供应链的合作伙伴关系建立建筑材料联合库存管理的决策中心,以钢材和水泥的库存管理为研究对象,工程供应链管理视角下,供应商与承包商共享库存信息,共同制定材料库存计划。

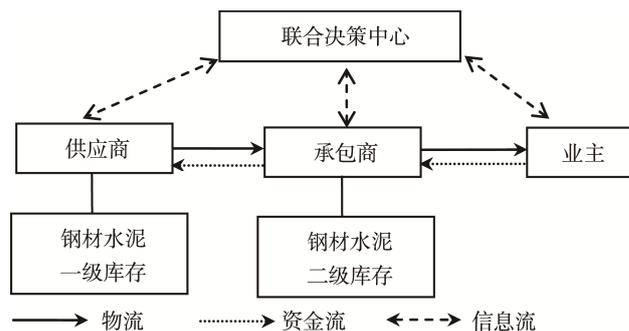


图1 2种材料两级库存模型

Fig.1 Two-level inventory model of two materials

1.2 模型假设

1) 材料的库存是一个包含材料订购、购入、存放直至使用出库的过程,因此,库存成本应包括购买费用(不含运输费)、下单过程中所产生的管理成本(包括供应商的备货成本和承包商的订货成本,这种间接的管理成本与每次的材料下单量关系不大,与订货次数有关)、存储成本(双方的库存成本由双方各自负担)、运输费用(材料的运输由工程所在地项目现场周围的物流企业负责,其运输能力不受限制,运输费由供应商支付)。

2) 材料供应商简化为一家供应商,并同时供应钢材和水泥2种材料,其仓库足够大,存储能力不受限制,施工承包商也简化为一家,并且从材料供应商处购买来的2种材料同时存储于同一个仓库中,仓库容积有约束。另外,材料供应商与施工承包商的材料存储时间也有本质的不同:施工承包商的材料管理是以项目为导向的,其材料需求不均匀、材料存储管理是一次性的、存储时间是区间性的。材料供应商生产材料是一种日常作业活动,是匀速生产的,可以假定其库存材料数量为模型中相应材料供货量的一半,它以满足图1的承包商施工项目的材料需求为前提,但又不仅仅是针对一个工程项目、一个承包商而进行生产经营。正常情况下,材料库存一直存在,其存储时间一直持续到最后一次向项目所在地发出材料的时间,即最后一次供货点减去运输时间,而运输是由施工现场附近的物流企业负责,运输时间很短,忽略不计,假定其材料的存储时间为最后一次订货的供应点。

3) 工程进度按计划进行,材料需求函数是一个与各项活动持续时间相关的分段函数。承包商的库存管理采取连续盘点策略定期检查,不需要再设立安全库存量,当其库存量低于订货提前期内材料的消耗量时发出订单,提前期就是从采购清单发出到材料验货入库的时间。

4) 供应商和承包商基于工程供应链的合作伙伴关系,风险共担,信息共享,所以,假设市场波动不大的前提下每种材料的原价均稳定不变。供应商根据

承包商的不同订货提前期而给予不同程度折扣的价格优惠,价格优惠率是一个与订货提前期有关的分段函数。

5) 基于工程供应链管理的系统思想,材料联合库存管理的决策中心追求的是供应链整体的库存成本最低,供应商确保可以及时应对承包商的库存变化,满足施工需要,不会延迟交货,承包商承诺按约付款,且施工承包商现场管理水平较高,没有停工待料情形,所以施工方不存在缺货成本。

2 数学模型建立

2.1 变量符号说明

C 为 2 种材料 2 级库存的联合库存总成本; C_s 为供应商的材料库存总成本; C_c 为承包商的材料库存总成本; n 为订购次数(决策变量); Q_{ij} 为第 i 种材料第 j 次订购的经济订购量(决策变量); S_i 为 i 种材料的每次备货成本; C_i 为 i 种材料的每次订货成本; H_{si} 为供应商的 i 种材料单位持有成本; H_{ci} 为承包商的 i 种材料单位持有成本; T_{ij} 为 i 种材料 j 次供货的供应点(决策变量); l_{ic} 为 i 种材料的单位运费; l_s 为材料运距; L_{ij} 为 i 种材料 j 次订货时的订货提前期(决策变量); α_{ij} 为 i 种材料 j 次订货享有的折扣,与 L_{ij} 有关; P_i 为 i 种材料原价; r_1, r_2 分别为 2 种材料的容量; Q_d 为承包商施工前期所建仓库的最大容积。

2.2 供应商库存成本分析

材料供应商的库存成本有备货成本、运输成本及库存持有成本 3 部分费用。其中,备货成本是接到材料订单后为准备订单而花费的成本,运输成本由订货量、运输距离及单位材料单位运距的费用决定,是一个线性函数,库存持有成本与库存量、单位持有成本及存储时间相关,由前面的假设分析,可以得到其库存成本表达式为:

$$C_s = n \sum_{i=1}^2 S_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{H_{si} Q_{ij}}{2} T_{in} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n Q_{ij} l_{ic} l_s \quad (1)$$

2.3 承包商库存成本分析

承包商库存成本有订货、购买和库存持有等三方面的费用。其中,订货成本是每次订货时发生的差旅、管理、验收费等相关费用,购买成本由订购数量、单位价格、价格折扣率决定,库存持有成本与库存量、存放时间成正比,其每次购进材料的存放时间为下次的供应时间点减去这次的供应时间点,而在这段时间内材料又是近似均匀消耗的,那么每次订货后的材料消耗期即材料存储时间内,其库存量也可按其平均库存量计算。其库存成本表达式为:

$$C_c = n \sum_{i=1}^2 C_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n Q_{ij} \alpha_{ij} P_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{H_{ci} Q_{ij}}{2} (T_{ij} - T_{i(j-1)}) \quad (2)$$

2.4 联合库存成本分析

由前面分析可得,基于供应链的 2 种工程材料联合库存成本有供应商的库存成本和承包商的库存成本 2 部分组成。除了假设的承包商仓库容量有限的约束外,材料的供应点应该在项目的计划工期内,并且材料的供应量应至少等于材料的需求量,那么,基于成本最小的联合库存函数及约束条件为:

$$\min C = \min(n \sum_{i=1}^2 (S_i + C_i) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n Q_{ij} \alpha_{ij} P_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n l_{ic} Q_{ij} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{H_{si} Q_{ij}}{2} T_{in} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n \frac{H_{ci} Q_{ij}}{2} (T_{ij} - T_{i(j-1)})) \quad (3)$$

$$T_{i(j-1)} \leq T_{ij} \leq T_p$$

$$\frac{Q_{1j}}{r_1} + \frac{Q_{2j}}{r_2} \leq Q_d$$

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n Q_{ij} \geq \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^n r_{ij} (t_j - t_{j-1}) \quad (4)$$

$$i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n$$

式中: T_p 为计划工期; r_{ij} 为各项工序对 i 种材料在各个时间段的需求量。

3 粒子群算法

3.1 算法简介

1995 年,美国 Eberhart 和 Kennedy 受鸟群觅食行为的启发提出了粒子群优化算法^[16],与传统的动态规划优化方法相比,它的优越性在于能够方便快捷地求解。同遗传算法相比,它采用实数而不是二进制编码,基于粒子位置和速度的不断更新来进行迭代寻优,没有复杂的选择、交叉、变异算子,编码相对简单,易于实现,目前已经在系统控制和函数优化等众多领域得到了广泛应用。针对供应链视角下 2 种工程材料的库存优化问题,每一个订货次数 n ,都有相应的 $2n$ 个材料订购量, $2n$ 个材料订购提前期, $2n$ 个材料供应点,如此复杂的问题,很难用传统的动态规划来求解,而粒子群优化算法在多维空间函数和动态目标寻优等方面有着收敛速度快、解质量高等优点,因此特别适合工程领域中材料的库存优化问题。

3.2 工具箱简介

PSOt 为 PSO 的独立工具箱,它将算法的核心部分封装起来,应用工具箱时,首先需要设置工具箱的路径加载到 Matlab 中,其次编码目标函数并设定自变量的取值范围等,然后调用核心函数优化,并且还

可以调用 goplotpso 画图程序，了解粒子群的优化过程，检查编程结果是否正确，同时给出最优适应值随迭代次数变化的曲线图。

4 实例模拟

某建设工程项目计划工期为 16 个月，根据项目的施工进度计划和资源需求计划，确定水泥、钢材在各个时间段的需求量见表 1。供应商和施工承包商经多次采购谈判，达到以下基于订货提前期的价格折扣协议：当施工方对水泥的订货提前期为 3 个月及以上时，给予原价的七折折扣，而钢材的订货提前期在此区间时给予原价的七五折优惠；提前 2—3 月订货时，分别给予八折、八五折优惠；1—2 月时，九折、九五折优惠，不足 1 月时均无折扣。算例相关参数如下：材料原价钢材为 3800 元/t，水泥为 380 元/t，而钢材的订货成本和备货成本分别为 7000 元/次、4600 元/次，水泥的订货成本和备货成本分别为 6000 元/次、4000 元/次，运费为 3 元/(t·km)，运距为 35 km，已知供应商和承包商对水泥的单位存储费分别为每月每吨 35 元和 70 元，对钢材的单位存储费分别为每月每吨 100 元和 225 元，水泥的容重为 1.3 g/cm³，钢材的容重为 7.85 g/cm³，仓库为 2 米高的 200 m² 厂棚，求最佳订购策略。

表 1 水泥和钢材的需求状况
Tab.1 Demand for cement and steel

工期/月	水泥需求量/t	钢材需求量/t
(0,4]	130	130
(4,7]	150	146
(7,8]	160	156
(8,10]	120	117
(10,12]	70	68
(12,16]	50	49

将实例中的数据代入数学模型中，采用 Matlab 编码函数，得到优化结果及函数的变化过程，函数的变化见图 2。

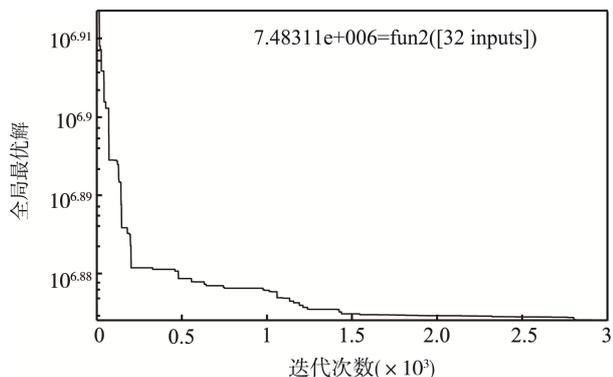


图 2 函数的变化
Fig.2 Change of function

结果如下：

$$\min C = 7\ 483\ 105$$

$$n = 8$$

$$L = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ 3 & 3 \\ 3 & 3 \\ 3 & 3 \\ 3 & 3 \\ 3 & 3 \\ 4 & 3 \\ 3 & 3 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 5 \\ 6 & 6 \\ 8 & 7 \\ 9 & 8 \\ 11 & 10 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 165 & 220 \\ 223 & 183 \\ 142 & 247 \\ 259 & 141 \\ 227 & 136 \\ 212 & 178 \\ 210 & 242 \\ 272 & 333 \end{bmatrix}$$

从联合库存成本优化的最小值来看，前文所建立的数学模型是成立的，并且从图 2 的收敛趋势曲线可以看出，粒子群算法具有较快的优化速度和全局搜索能力，适用于文中所探讨的供应链管理环境下 2 种工程材料 2 级库存的优化模型。同时，实例中订货批次取 16 时，仿真模拟的最小库存成本的一随机值为 8 277 408 元（限于篇幅，文中不再单独给出优化过程中的函数变化图及其他矩阵形式的决策变量值），说明恰当的订购策略能大大节约库存成本，从而提升工程供应链的整体竞争力。

5 结语

文中分析了供应链管理环境下下游承包商和上游供应商的库存管理，建立了基于成本最小化的 2 种建材两级库存的优化模型，并验证了模型有效性，丰富了工程材料库存管理的理论研究，并对供应链下的联合库存管理具有一定的指导意义。在以后的研究中，可以分析材料之间的相关性，探讨多种材料的多级库存管理。

参考文献:

- [1] 马士华. 供应链管理(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
MA Shi-hua. Supply Chain Management[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [2] 贾俊秀, 袁泽. 两级库存控制下的供应链动态定价和订购策略[J]. 系统工程学报, 2014, 29(3): 403—413.
JIA Jun-xiu, YUAN Ze. Supply Chain Dynamic Pricing and Ordering Strategies Under Two-echelon Inventory Control[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 403—413.
- [3] 张德春. 建材存储商品价格波动对房地产企业的影响分析[J]. 商业经济研究, 2017(17): 109—111.
ZHANG De-chun. Analysis of the Impact of Building Material Commodity Price Fluctuations on Real Estate Enterprises[J]. Commercial Economy Research, 2017(17): 109—111.
- [4] 张鑫, 高淑春. 基于延期支付的易腐产品库存模型[J]. 统计与决策, 2017(22): 175—178.
ZHANG Xin, GAO Shu-chun. Inventory Model for Perishable Products Based on Deferred Payment[J]. Statistics & Decision, 2017(22): 175—178.
- [5] 周剑桥. 多约束单目标供应链多级库存控制模型及求解[J]. 控制工程, 2017, 24(3): 511—517.
ZHOU Jian-qiao. The Model and Its Solution of Multi-echelon Inventory Control in Supply Chain with Multi Constraints and Single Objective[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(3): 511—517.
- [6] 陈琳轶, 陈广学. 基于供应链视角的包装可视化研究[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 16—21.
CHEN Lin-yi, CHEN Guang-xue. Packaging Visualization Based on Supply Chain[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 16—21.
- [7] KOSKELA L. Application of the New Production Philosophy to Construction[R]. CIFE Technical Report No72, Stanford University, 1992.
- [8] CUS-BABIC N, REBOLJ D, NEKREP-PERC M, et al. Supply-chain Transparency Within Industrialized Construction Projects[J]. Computers in Industry, 2014, 65(2): 345—353.
- [9] VIDALAKIS C, TOOKEY J E, SOMMERVILLE J. Demand Uncertainty in Construction Supply Chains: a Discrete Event Simulation Study[J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(8): 1194—1204.
- [10] 高宁, 高秋菊, 孙巍, 等. 国际石化工程项目供应链总建设成本的敏感性分析[J]. 化工进展, 2015, 34(4): 965—969.
GAO Ning, GAO Qiu-ju, SUN Wei, et al. Sensitivity Analysis of Total Construction Cost of Supply Chain in International Petrochemical Engineering project[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4): 965—969.
- [11] ZHOU W, CHEN L, GE H. A Multi-product Multi-level Inventory Control Model Based on Agile Supply Chain[J]. Advances in Information Science & Service Sciences, 2014, 6(3): 1—10.
- [12] 于艳娜, 姚锋敏, 滕春贤. 需求与成本同时扰动下的信息产品供应链定价决策[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 516—523.
YU Yan-na, YAO Feng-min, TENG Chun-xian. Pricing Decision for Information Product Supply Chain Under Demand and Cost Disruption[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(2): 516—523.
- [13] 赵川, 揭海华, 王珏, 等. 基于反馈控制的牛鞭效应自补偿对多级库存系统的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(7): 1750—1758.
ZHAO Chuan, JIE Hai-hua, WANG Jue, et al. The Impacts of Self-compensation of Bullwhip Effect Based on Feedback Control Theory on a Multi-echelon Inventory in Supply Chain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38(7): 1750—1758.
- [14] 马鹏, 张晨. 绿色供应链背景下互补品定价策略研究[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1861—1870.
MA Peng, ZHANG Chen. Research on Pricing Strategy of Complementary Products Under the Background of Green Supply Chain[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1861—1870.
- [15] 薛浩, 文剑. 基于数据一体化的工程材料控制与采购管理系统[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 563—566.
XUE Hao, WEN Jian. Engineering Material Control and Procurement Management System Based on Data Integration[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(S1): 563—566.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, IV Piscataway, NJ IEEE Service Center, 1995: 1942—1948.