

考虑保质期约束的生鲜品的协同生产与配送研究*

李嘉栋, 陈淮莉

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要:【目的】考虑到生鲜品易变质的特点,为了减少产品腐坏,降低生鲜厂商供应过程的各项成本,提出了一个随机需求下多时段、多产品的生鲜品协同生产与配送问题。【方法】引入了逻辑斯蒂方程来表示保质期和变质成本的关系,将产品新鲜度的因素加入到目标函数中,建立生鲜品协同生产与配送过程的模型,并用数值例子进行验证,最后将协同优化与单独优化得到的最小总成本做仿真对比分析。【结果】所建模型可以在满足顾客对生鲜品需求的前提下有效地减少保质期的损耗,降低变质成本,得到整个过程的最低总成本。【结论】考虑生鲜品保质期约束的模型对生鲜厂商的实际供应过程有一定的指导意义,且通过仿真对比分析证明了提出的协同优化效果更好,问题模型越复杂,协同生产与配送优化的效果越明显。

关键词: 生鲜品; 生产配送; 保质期; 协同优化; 随机需求

中图分类号: F273; O175

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)06-0136-05

生鲜品在食品行业中属于特殊的一类。生鲜品作为一种易腐食品,客户对生产日期、质量、保质期、配送到达时间等方面尤其看重。然而生鲜品的质量和价值会在生产、存储、运输、销售等环节不断衰减,极易变质,这与人们对生鲜品质量的要求不断提高相矛盾。此外,由于居民对生鲜品需求的种类各异,加之保质期较短的特点,导致了生鲜品的补货周期相对较短。因此,生鲜厂商如何有效地制定合理的生产和配送计划已经成为该行业一个必须解决的问题。

当前在学术领域,对于生鲜品的研究主要集中在定价、销售和订货策略以及生产排程方面。陈淮莉等人^[1]研究了生鲜品的多周期订货批量和即将到期商品的打折出售,确定了最优订货批量和最优折扣价。Bilgen等人^[2]提出了作业块生产的概念,考虑整车运输与零担运输,利用混合整数线性规划模型获得最小的生产和运输成本。Sel等人^[3]基于一种混合整数线性规划和约束规划的混合模型解决了生鲜品供应链上的生产配送问题。Bilgen等人^[4]用仿真的方法优化模型,使之向真实世界的生鲜品生产系统靠拢,充分考虑了保质期、加班费用、延迟费用和运输费用,并通过一个乳制品公司的实例证实了模型和方法的有效性。Entrup等人^[5]提出了生鲜品的生产排程。国内很少有将生产排程的方法应用于生鲜品行业的报道。陈淮莉等人^[6]对于易腐品的生产流程作了较为详细的分析,构建了一般易腐品的生产排程模型。

生鲜品在生产、储存、运输等物流过程的损耗高达2/3以上,尤其是在配送末端的损失更为惊人。丁涛等人^[7]重点研究了冷链物流终端配送车辆路径问题,对电商“最后一公里”问题进行了有效的解决。现有的对生鲜品的研究大多只侧重于生鲜品供应链环节的某一环,如Cinzia等人^[8]研究了随机需求下易腐品的EOQ模型。Elzakker等人^[9]对快消品行业的生产策略进行了优化。然而仅考虑一方面难以从根本上减少对生鲜品保质期的损耗。Nasiri等人^[10]研究了生产和配送两个环节,提出了一个多工厂、多分销中心的三级供应链。实际上,生鲜产品由于具有易腐、不耐储存的特点,对各个环节时间的要求非常严格,每个过程经历的时间越长,损耗就会越大,甚至会腐败失去本身的价值。现有文献很少将生鲜品的保质期和整个生产配送的过程联系在一起,且未能考虑到生产配送过程中的不确定性。本文将生鲜品的保质期约束作为一个严格的限制条件,引入变质成本加入到目标函数中,将生产和配送过程协同考虑,构建生鲜品的生产与配送模型。

* 收稿日期:2016-10-27 修回日期:2017-01-16 网络出版时间:2017-05-16 11:25

资助项目:国家社会科学基金(No.15BGL084);上海市科委科研项目(No.14DZ2280200);上海市哲学社会规划课题资助(No.2014BGL018)

第一作者简介:李嘉栋,男,研究方向为物流与供应链管理,E-mail:578924247@qq.com;通信作者:陈淮莉,教授,E-mail:hlchen@shmtu.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170516.1125.040.html>

1 问题模型的计算与仿真

1.1 问题描述

近些年来,酸奶作为生鲜品的一种典型代表被广泛研究。在酸奶生产中最重要的是发酵和包装。高度的生产复杂性会产生很多不同的酸奶品种(这是由口味、营养成分、包装材料和大小等决定的)。本研究简化了酸奶生产复杂的中间过程,将包装作为酸奶生产的代表过程,只考虑酸奶最终的包装与配送,具体过程见图 1。

如今,人们对酸奶保质期的关注远超价格。研究发现,保质期不仅影响酸奶的需求而且还直接影响酸奶生产厂商的收益。然而酸奶的保质期会随着储存、运输的过程不断被消耗,给酸奶生产厂商带来变质成本,酸奶的新鲜度会对需求和价格产生影响,这里从消费者的心理推导变质成本与时间的关系见图 2。例如保质期为 14 天的酸奶,当它的保质期降到 13 天或 12 天的时候,并不影响顾客对它的需求,此时几乎不产生变质成本,变质成本曲线缓慢增长。随着时间的流逝,当接近某一个拐点的时候,变质成本迅速增加,这个拐点是顾客所期望的酸奶的最低保质期。当酸奶的剩余保质期降到 2 天或 1 天的时候,变质成本的增加又趋于平缓,这是因为消费者不愿意接受剩余保质期低于自己最低期望的产品,商家只能将酸奶打折或回收处理,本研究引入参数符号 r_j, ω_j 和 s_j 加入到变质成本的函数中, r_j, ω_j 与消费人群的消费特点以及经济发展水平等因素相关,其中 r_j 表示顾客能接受的最低的酸奶保质期,若剩余保质期低于此值,将直接计入到固定的变质成本中(即酸奶的定价 p); ω_j 表示顾客期望的保质期,即曲线的拐点; l_j 表示酸奶的最大保质期。假设新鲜度为 c_j 时,酸奶的变质成本为 $C_{\text{damage}} = f(c_j)$,变质成本的增长随时间的流逝速度 df/dc_j 与 $f(p-f)$ 成正比,于是有 $df/dc_j = kf(p-f)$ 。其中, k 为比例系数为常数,将它分离变量并积分解得 $f(c_j) = \frac{p}{1+Be^{-kc_j}}$ 。其中, $B = e^A$, A 和 B 均为常数。得到变

质成本函数 $y = \begin{cases} p, 0 \leq c_j \leq r_j \\ \frac{p}{1+Be^{-kc_j}}, r_j \leq c_j \leq \omega_j \end{cases}$ 。在本研究中取 $k=7, B=300$ 。此外,新鲜度表示为 $c_j = \frac{l_j - (t-d)}{l_j}$ 。

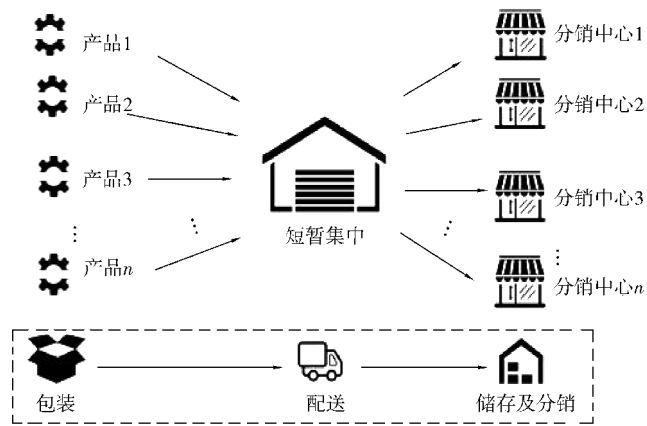


图 1 酸奶生产问题的研究范围

Fig. 1 The research scope of yogurt production

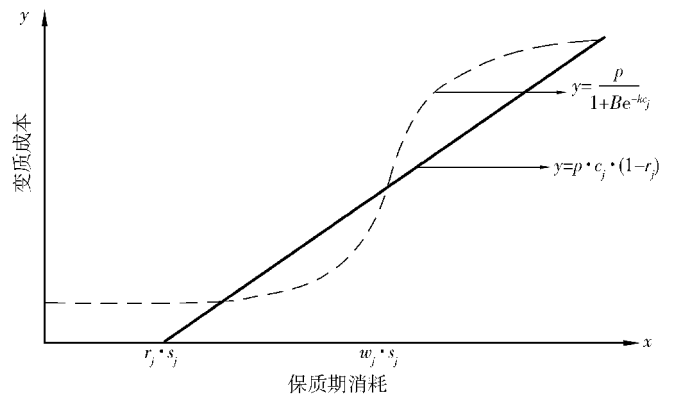


图 2 酸奶的变质成本函数

Fig. 2 Deterioration cost function of yogurt

基于如上陈述,研究的是单生产商、多分销中心、多产品、多时段的酸奶供应商生产配送问题。假设工厂只有一条生产线,但是会根据最终包装的不同而产生几个不同品种的酸奶,对于包含几种不同批次的酸奶生产,采用“后进先出”的原则,即高保质期的酸奶享有生产的优先权,高衰减率的酸奶放在后面生产,生产完成后立即装车,以求将变质的成本降到最低。各类酸奶生产完毕经过短暂的集中后转运到该酸奶供应商的分销中心,由于功能限制,假设一个分销中心只储存一种类型的酸奶。各个时段允许缺货,此时产生缺货费用;供应商有生产能力限制,生产酸奶会产生生产成本;分销中心有库存约束,同时会产生库存成本;车辆运能有限,车辆运输的过程中会产生运输成本;同时在整个过程中酸奶的变质会产生变质成本。目标函数是使整个酸奶供应商系统内的总成本最低。

1.2 问题模型

目标函数:

$$\begin{aligned} \min & \sum_d \sum_j C_j \cdot P_{j,d} + \sum_d \sum_j i_j \cdot \max\{h_{j,t}, 0\} + \sum_d \sum_j l_j \cdot |\min\{h_{j,t-1} + R_{j,t} - D_{j,t}, 0\}| + \\ & \sum_d \sum_j t_j \cdot r_{j,t} + \sum_t \sum_d \sum_j y \cdot \max\{h_{j,t-1} + R_{j,t} - D_{j,t}, 0\} \\ & R_{j,d} \geq N_j, \tag{1} \\ & R_{j,d} \leq M_j, \tag{2} \\ & \sum_j a_j \cdot R_{j,d} \leq A, \tag{3} \\ & h_{j,1} = o_j + q_{j,1} - M_{j,1,1}, \tag{4} \\ & h_{j,d} = h_{j,d-1} + R_{j,d} - M_{j,d,t} (d=t), \tag{5} \\ & R_{j,d} = q_{j,t} (d=t), \tag{6} \\ & R_{j,d} \geq \sum_t M_{j,d,t}, \tag{7} \\ & h_{j,d} \leq H_j, \tag{8} \\ & q_{j,t} / r_{j,t} \leq C. \tag{9} \end{aligned}$$

其中: $j \in J$, DC 表示产品、分销中心集合; $d \in PD$ 表示生产日期集合; $t \in DD$ 表示需求日期集合; N_j 表示产品 j 的最小生产批量; M_j 表示产品 j 的最大生产批量; $D_{j,t}$ 表示第 t 天分销中心对产品 j 的需求; C_j 表示产品 j 的生产成本; a_j 表示生产单位产品 j 所耗费的生产能力; A 表示工厂每天的最大生产能力; H_j 表示分销中心 j 的最大库存能力; i_j 表示产品 j 的单位库存成本; s_j 表示生产产品 j 的最大保质期; p_j 表示产品 j 的定价; C 表示一辆车的最大运输批量; f 表示一辆车出动的固定行驶费用; t_j 表示产品 j 的单车运输成本; l_j 表示产品 j 的单位缺货成本; $R_{j,d}$ 表示工厂在第 d 天生产 j 的量; $M_{j,d,t}$ 表示在第 d 天生产满足第 t 天产品 j 的量; $h_{j,t}$ 表示在第 t 天结束时产品 j 的库存量; $q_{j,t}$ 表示产品 j 在第 t 天运到分销中心的量; $r_{j,t}$ 表示在第 t 天产品 j 被车辆运输的次数。

目标函数是使整个系统内的生产成本、库存成本、缺货成本、运输成本以及变质成本最小。其中需要特别说明的是,若剩余库存量为负,则缺货量为剩余库存量的绝对值,此时产生缺货成本;若为 0,则不产生缺货成本;若为正,则此时产生变质成本和库存成本。约束(1)和(2)表示为了获得生产经济规模效益,一个批量的产品生产必须要大于规定的最小产量,并且不能超过规定的最大产量,通过给产量定义严格的上下界可以大幅地提高计算和优化搜索的效率。约束(3)是生产能力约束,表示的是一天中生产所有产品的消耗的资源不能超过工厂的最大生产能力。约束(4),(5)是分销中心的库存约束,这里需要注意的是,库存结算时考虑的生产日和需求日应为同一天。约束(6)是生产运输平衡约束,即工厂不留有库存,当天生产出来的产品全部运往分销中心。约束(7)表示了生产与供给的关系,即只有在需求日之前生产的产品才能够用来满足该日的需求。约束(8)是分销中心的库存约束,产品 j 的库存不能超过分销中心的最大容量。约束(9)是对配送车辆运能进行约束,即每次运输的产品不能超过车辆的最大载能。

1.3 算例分析

安排 4 种类型的酸奶一周(7 天)的计划,假设它们的需求如下:第 1,2 种酸奶: $D_{1,2} \sim N(500, 200)$; 第 3,4 种酸奶: $D_{3,4} \sim N(700, 300)$; 且它们的部分参数如表 2 所示。此外, o_j 表示计划周期开始前产品 j 的初始库存量,这里设置为 0,工厂每日的最大生产能力为 2 500,安全库存为 50,每个仓库的最大容量为 1 000,车辆最大运输批量为 300,固定出车费用为 20。结果如表 1~7 所示。

表 1 各项参数数值
Tab. 1 Parameter value

	$\max p$	$\min p$	p	i	C	t	l	sl
产品 1	680	100	1.52	0.08	0.36	0.10	0.20	10
产品 2	680	100	1.40	0.06	0.40	0.08	0.15	5
产品 3	800	100	1.12	0.10	0.25	0.12	0.18	5
产品 4	800	100	1.34	0.08	0.28	0.09	0.16	7

表 2 各产品每日产量
Tab. 2 Daily output of each product

产品	第1天	第2天	第3天	第4天	第5天	第6天	第7天
1	543	541	461	523	680	204	483
2	554	366	465	680	577	448	135
3	568	793	800	497	482	642	687
4	409	800	774	800	761	610	800

表 3 产品 1 生产需求协调

Tab. 3 Matching production and demand of product 1

PMD	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
第 1 天	493	50					
第 2 天		461	80				
第 3 天			461				
第 4 天				523			
第 5 天					680		
第 6 天						204	
第 7 天							483

表 4 产品 2 生产需求协调

Tab. 4 Matching production and demand of product 2

PMD	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
第 1 天	504	50					
第 2 天		366					
第 3 天			465				
第 4 天				680			
第 5 天					577		
第 6 天						448	
第 7 天							135

表 5 产品 3 生产需求协调

Tab. 5 Matching production and demand of product 3

PMD	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
第 1 天	518		50				
第 2 天		751	42				
第 3 天			800				
第 4 天				497			
第 5 天					482		
第 6 天						642	
第 7 天							687

表 6 产品 4 生产需求协调

Tab. 6 Matching production and demand of product 4

PMD	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
第 1 天	359	50					
第 2 天		800					
第 3 天			774				
第 4 天				800			
第 5 天					761		
第 6 天						453	157
第 7 天							800

从表 7 中可以看出,通过优化求解,得出的最低总成本为 9 826.04。缺货成本仅仅占总成本的 2%左右,因此解得的生产计划能满足大部分需求;且变质成本也只占到了总成本的 3.5%左右,说明该模型求解过程中充分考虑了酸奶的保质期约束,若忽略了保质期约束,生鲜厂商的生产将处于随机的状态,必会产生很大的变质成本。结合表 3~7 产品的生产需求协调可以发现,虽然产品 2 和产品 3 的保质期相比其他两种产品比较短,但它的变质成本却远低于另两种产品。这里看起来似乎显得矛盾,但其实是考虑到它们保质期较短,易发生保质期的损耗,对鲜度的要求非常严格,因此在生鲜厂商的实际生产过程中,工厂会充分利用产能,将产品尽可能安排在临近需求日时生产,这样可以大幅度减少新鲜度的损耗,降低变质成本。

1.4 仿真对比分析

在相同模型数据的框架下,根据不同的优化方法分别进行两组数值仿真:第一组先求解生产批量问题,该方案会在优先满足需求的前提下,求得局部最优解,即获得最小的生产成本,然后根据生产计划解得相应的最小配送成本;二是采用本研究提出的协同优化策略,在满足顾客需求的同时尽可能降低保质期的损耗,获得整个生产配送问题的满意解甚至最优解。最后将协同优化和对照组的总成本进行比较,发现协同优化能有效降低成本。本研究在原有模型的基础上增加了产品种类/分销中心数量和车辆最大运输批量,得到的结果如表 8 所示。

表 7 产品各项成本

Tab. 7 Various cost of each product

产品	生产成本	运输成本	缺货成本	库存成本	变质成本	总计	平均
1	1 236.60	623.00	25.40	285.20	127.40	2 272.20	0.67
2	1 290.00	538.00	7.50	196.50	33.18	2 057.68	0.64
3	1 117.30	896.28	158.22	461.10	25.31	2 499.99	0.59
4	1 387.10	845.86	2.88	408.88	160.33	2 802.17	0.57
总计	5 031.00	2 903.14	194.00	1 351.68	346.22	9 826.04	

表 8 两种不同优化方案对比

Tab. 8 Comparison of two different optimization schemes

产品种类	分销中心数量	车辆最大运输批量	对照组总成本	协同优化总成本	优化比率/%
4	4	300	10 365	9 826	5.52
4	4	400	10 103	9 566	5.61
6	6	300	16 224	15 248	6.40
6	6	400	15 627	14 628	6.83

从表 8 可以看出,协同生产配送优化对总成本的减少有明显的改善,并且在其他条件和参数不变的情况下,改进比率会随着分销中心的数量/产品种类变多、车辆的运能的增大而提高。这就说明供应链网络越复杂,协同优化的效果越突出。同时,大运能的车辆有着很好的柔性,能给决策者提供更多可供选择的配送方案。

2 结语

以酸奶为例研究了生鲜品的协同生产与配送。通过数值算例证明研究所建立的模型是合理有效的,可以在满足顾客需求的同时有效地减少生鲜品生产运输过程中保质期的损耗,降低生鲜厂商的各类成本。但这一模型未涉及生鲜品复杂的生产准备和切换过程。此外,多种不同运输模式下的问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈淮莉,韩伟.基于保质期约束的生鲜品订货批量以及定价决策研究[J].工业工程与管理,2013,18(3):19-24.
CHEN H L, HAN W. Price and order quantities decision of fresh product based on the constraints of the shelf life[J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(3): 19-24.
- [2] BILGEN B, GÜNTHER H O. Integrated production and distribution planning in the fast moving consumer goods industry: a block planning application [J]. OR Spectrum, 2010, 32(4): 927-955.
- [3] SEL C, BILGEN B, BLOENHOF R J M, et al. Multi-bucket optimization for integrated planning and scheduling in the perishable dairy supply chain[J]. Computers and Chemical Engineering, 2015, 77: 59-73.
- [4] BILGEN B, ÇELEBI Y. Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modeling[J]. Annals of Operations Research, 2013, 211(1): 55-82.
- [5] ENTRUP M L. Advanced planning in fresh food industries integrating shelf life into production planning[M]. Berlin: Contributions to Management Science, 2005.
- [6] 陈淮莉,方亮.基于保质期约束的易腐食品生产排程研究[J].广西大学学报(自然科学版),2013,38(3):729-737.
CHEN H L, FANG L. Research on shelf life-constrained production scheduling for perishable foods [J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Editor), 2013, 38(3): 729-737.
- [7] 丁涛,向升斌,李表奎,等.基于改进粒子群算法的生鲜电商冷链终端配送车辆路径问题研究[J].技术与方法,2016,35(2):68-72.
DING T, XIANG S B, LI B K. Study on VRP in end-point cold chain distribution of fresh product e-businesses based on improved Particle Swarm algorithm[J]. Logistics Technology, 2016, 35(2): 68-72.
- [8] CINZIA M. An EOQ model for perishable products with fixed shelf life under stochastic demand conditions[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 255(2): 388-396.
- [9] ELZAKKER M A H, ZONDERVAN E, RAIAR N B. Optimizing the tactical planning in the fast moving consumer goods industry considering shelf-life restrictions[J]. Computers and Chemical Engineering, 2014, 66: 98-109.
- [10] NASIRI G R, ZOLFAGHARI R, DAVOUDPOUR H. An integrated supply chain production-distribution planning with stochastic demands[J]. Computer & Industrial Engineering, 2014, 77(C): 35-45.
- [11] REZA N G, ROHOLLAH Z, HAMID D. An integrated supply chain production-distribution planning with stochastic demands[J]. Computer & Industrial Engineering, 2014, 77: 35-45.

Research on Integrated Production and Distribution Planning in Fresh Foods Based on Shelf Life

LI Jiadong, CHEN Huaili

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Purposes] Considering the perishability of fresh foods, a problem is put forward with multi-period, multi-product under stochastic demand for integrated production and distribution planning in order to reduce deterioration and the cost of all kinds of fresh manufacturers supply process. [Methods] It introduces the logistic equation to express the relationship between the shelf life and deterioration cost. Factor of product freshness is added to the objective function. On this basis, the model of the fresh foods collaborative production and distribution process is established and then verified by numerical examples. Finally, the optimized minimum total cost of collaborative optimization and independent optimization by simulation are compared. [Findings] The results show that the model can effectively reduce the loss of shelf life and the deterioration cost, finally reduce the total cost of the whole process. [Conclusions] The model considering the shelf life of fresh foods has a certain guiding significance for the actual supply process of fresh manufacturers. The simulation results show that the proposed collaborative optimization is superior to the independent optimization, and the more complex the problem model, the better the effect of collaborative production and distribution optimization.

Keywords: fresh food; production and distribution; shelf life; collaborative optimization; stochastic demand

(责任编辑 游中胜)