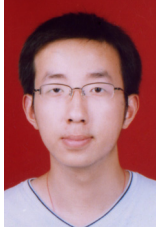


# 分布式多无人机编队飞行的阵形保持策略

李文皓, 张 珩

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



**摘 要:** 设计了一种仅采用相对位置偏差状态进行多无人机编队阵形保持的分布式保持策略。首先, 分析多无人机编队的特点及其阵形保持问题, 提出其阵形保持策略的要求, 然后设计一种采用局部阵形状态制定的阵形保持策略。该保持策略从非一致性的冗余状态中进行简洁的处理, 判断阵形的保持状态, 采取相应的保持机制。最后, 应用于几个多无人机编队飞行的例子, 仿真结果验证了该保持策略的可行性。

**关键词:** 多无人机编队飞行; 分布式; 保持策略; 非一致状态

**中图分类号:** V279

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-731X (2007) 20-4765-04

## Distributed Maintain Strategy for Multiple Unmanned Aerial Vehicle Formation Flight

LI Wen-Hao, ZHANG Heng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A distributed maintain strategy for multiple unmanned aerial vehicle formation flight was designed by using comparative position deviation. Characters of multiple-uav formation and problems for formation maintenance were analyzed, requirements for the maintain strategy were propounded and a distributed maintain strategy was designed based on partial states of the uav-formation. The strategy uses a simple method to extract formation correction from redundantly inconsistent information, speculates the requirement of formation maintenance, takes appropriate maintain method for different situation. The simulation examples validate the feasibility of the strategy.

**Key words:** multiple-uav formation flight; distributed; maintain strategy; inconsistent information

### 引 言

无人机编队通过多无人机的协作飞行将使其系统的综合效能和任务执行时的冗余性能得到大幅提升。随着任务复杂程度的提高, 编队无人机数量的增加, 对编队飞行的阵形设计、变化和保持的要求也与日俱增, 可以说无人机编队飞行的阵形控制是未来无人机编队发展的一个研究重点。

阵形保持控制包括控制器和控制策略, 前者决定执行性能, 后者则决定控制器所引用的状态和结构。由于多无人机编队飞行的阵形紧密程度高, 动态因数多, 耦合<sup>[1]</sup>程度深, 使得其不光对控制器提出了更高的要求, 而且也迫切需要一种合适的阵形保持策略。

早期的阵形保持主要采用集中式 (centralized) 方法。其要点是无人机考虑编队中所有无人机的状态并保持相对关系。这种方法虽然有较好的控制品质, 但是对于多机编队, 该方法将引起海量的数据交互以及复杂的计算处理, 对机载处理器要求较高而且易引起交互冲突。随后人们提出了分散式 (decentralized) 方法<sup>[2-3]</sup>: 无人机只要保持与编队中约定点的相对关系, 不与任何无人机进行状态交互。这虽然解决了大数据量、大处理量的问题, 但是由于无人机得不到其他

无人机的状态, 使得飞行时发生碰撞冲突的可能性大大增加, 控制效果大打折扣。为同时满足少量数据交互、良好控制品质的要求, 最新提出了分布式 (distributed) 方法<sup>[4-6]</sup>: 首先, 无人机与周围无人机进行交互, 得到周边无人机的相对关系, 然后对比阵形的期望相对关系, 得出本机与各无人机的期望修正量, 最后控制使得修正量为零。这种策略既大幅削减了交互密度又提供了冗余状态, 减小了碰撞冲突的概率, 通过利用周边无人机的状态修正与领航机的偏差, 可以削弱由领航机扰动引起的阵形扰动。

虽然分布式方法有诸多优点, 但冗余状态也带来了问题: 多机编队中的无人机周边往往存在多机, 而不同无人机因动态效应引起的相对偏移量可能不同, 这将导致各无人机期望修正量的不匹配和不一致。如何从非一致期望修正量中提取出阵形保持的修正量, 是一个必须解决的问题。本文将由分布式方法, 针对多无人机编队, 设计一种仅利用相对位置偏差进行编队阵形保持的策略。

### 1 问题描述

假设由  $N$  个无人机组成的无人机编队 (如图 1)。其第  $m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, N; m \leq N$ ) 个无人机的周围有  $Km$  ( $Km \leq N-1$ ) 个无人机, 其中第  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, Km; i \leq Km$ ) 个无人机与无人机  $m$  的相对位置偏差矢量:  $\vec{C}_i^m = (\Delta X_i^m, \Delta Y_i^m, \Delta Z_i^m)$  (其中  $\Delta X_i^m$ ,  $\Delta Y_i^m$ ,  $\Delta Z_i^m$  分别是  $\vec{C}_i^m$  在航迹坐标系下的三个分量), 而领

收稿日期: 2006-08-22

修回日期: 2006-10-10

作者简介: 李文皓 (1983-), 男, 湖南岳阳人, 博士生, 研究方向为无人机编队飞行控制与仿真方面的研究; 张珩 (1961-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博导, 研究方向为编队飞行理论、飞行器控制与操作等研究。

航机 leader 与无人机  $m$  的相对位置偏差矢量： $\vec{C}_L^m = (\Delta X_L^m, \Delta Y_L^m, \Delta Z_L^m)$ 。当周边第  $j$  个无人机的 ( $j=1,2,3 \dots Km; j \neq m$ ) 相对位置偏差矢量  $\vec{C}_j^m \neq \vec{C}_i^m$  时，如何由  $\vec{C}_1^m, \vec{C}_2^m \dots \vec{C}_{Km}^m$  和  $\vec{C}_L^m$  确定无人机  $m$  的编队阵形保持修正量  $\vec{C}_m$  ?

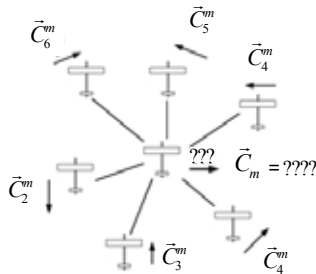


图 1 附近无人机的期望修正量不匹配示意

编队中，只有领航机 (leader) 知道绝对坐标位置并受到地面站的轨迹控制，其他无人机跟随领航机飞行并保持阵形，跟随无人机只知道领航机以及周边无人机与本机的相对位置状态。在飞行过程中，无人机可能会偏离阵形的期望位置，按发生偏移的无人机数量和发生的偏移量大小，阵形保持可以分为四种状态，每种状态有不同的保持需求。

- 1) 保持良好；该状态下不做任何调整。
- 2) 少量无人机发生偏移；该状态希望在小范围内抑制扰动，而未偏移的无人机尽量少受影响；
- 3) 大量无人机的小范围偏移；此时希望各无人机在回复至原位置时尽量平稳，不引发混乱；
- 4) 阵形散乱；该情况下要求阵形迅速恢复。

无人机运用局部的阵形状态采取相应行动，通过各无人机之间协调使得阵形得以保持。由此，阵形保持策略有如下几个要求：

- a) 基于局部阵形状态制订本无人机的行动；
- b) 利用  $\vec{C}_L^m$  和非一致的  $\vec{C}_i^m$  中提取  $\vec{C}_m$ ；
- c) 判断阵形状态并采取相应措施；
- d) 简洁处理以满足飞行时的动态性能要求。

## 2 保持策略分析

### 2.1 非一致 $\vec{C}_i^m$ 处理

在非一致的  $\vec{C}_i^m$  中，有的有利于阵形保持，而有的则会带来不利因素，如果不带选择的使用则会不利于阵形保持的  $\vec{C}_i^m$  带入其中。比如，常用的平均化处理<sup>[7]</sup>能够综合区域内所有的  $\vec{C}_i^m$ ，但是采用此方法将会使少数无人机的扰动带入到其周围的无人机(图 2)，而进一步波及到更大的范围，显然，这是不希望的。

选择恰当的  $\vec{C}_i^m$  需要一个基准对比、判断各个  $\vec{C}_i^m$  的利用价值。可以通过搜寻区域内受扰动影响最小的点作为基准点，但是该方法计算复杂，不适合机动飞行时的阵形保持，而且，基于局部的区域信息的判断并不能保证对整体状态判

断正确的一致性，所以精确寻找局部最稳定基准并不必要。一个明显的结论：编队飞行过程中不同无人机出现相同偏移矢量的概率非常小，由此可以采用最小相对位置偏差量  $\min(\vec{C}_i^m)$  作为  $\vec{C}_i^m$  价值的评判基准，由于寻找  $\min(\vec{C}_i^m)$  的计算简单，该方法比较合适。

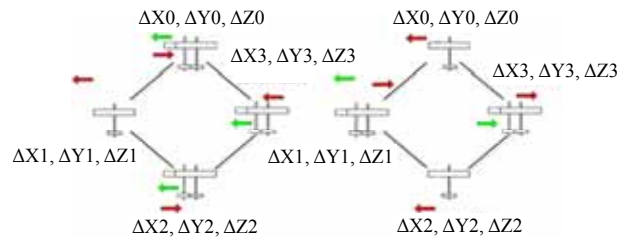


图 2 扰动由一架无人机波及到整个编队的情形

### 2.2 阵型保持状态判断

编队中的无人机由于气动影响，其动态效应互相耦合<sup>[1]</sup>。当编队距离 AR 与翼展 b 的比值大于等于三时，属于松散阵形，耦合效应弱，此时偏差在控制器的控制误差  $\epsilon$  范围内时可以视为良好保持；当  $AR/b < 3$  时，属于耦合效应强的紧密阵形编队，此时无人机的偏移会影响到其他无人机的控制，根据 Biot-savart 定理推算的同平面双机飞行(图 3)的气动诱导速度估计公式如下<sup>[8-10]</sup>：

$$q = \frac{\Gamma}{4\pi h} (1 - \cos\beta) \tag{1}$$

$$\Gamma = \frac{L}{\rho v_x b_v} = \frac{2v_\infty b C_{L1}}{\pi AR} \tag{2}$$

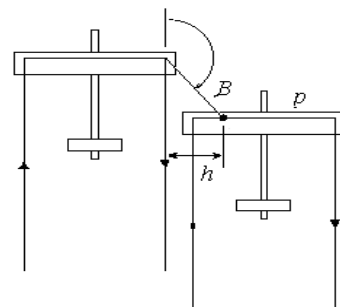


图 3 同平面双机飞行相对关系示意

可以看出诱导速度  $q$  与飞行速度  $v_\infty$  之比近似正比于翼展 b，反比于编队距离 AR 的平方。假设控制器的对该比值的容忍误差限为  $\delta$ ，考虑多架无人机的叠加影响因素，取翼展 b 的  $\delta/2$  变化为控制器可以容忍的偏移范围，当偏移量小于  $\delta*b/2$  时，可以认为阵形保持良好。综上所述，判定阵形保持良好的判据是：当  $AR/b \geq 3$  时  $\vec{C}_L^m \leq \epsilon AR, \max(\vec{C}_i^m) \leq \epsilon AR$ ；当  $AR/b < 3$  时  $\vec{C}_L^m \leq \delta*b/2, \max(\vec{C}_i^m) \leq \delta*b/2$ 。如果阵形没有良好保持，则需要进一步判断，一般认为当  $\vec{C}_i^m \leq AR/2$  时，无人机  $i$  已经脱离与无人机  $m$  的编队范围，而小于  $AR/2$  的  $\vec{C}_i^m$  视为阵形内部的相对位置偏移。

若  $AR/b \geq 3$  且  $\min(\vec{C}_i^m) \leq \epsilon AR$  或者  $AR/b < 3$  且  $\min(\vec{C}_i^m) \leq \delta*b/2$ ，说明至少有一架无人机与本机的阵形关系良好，

由于“不同无人机出现相同偏移矢量的概率非常小”, 可以认为本机和  $\bar{C}_i^m \in AR (\delta \cdot b/2)$  所对应的无人机没有发生偏移。此时阵形处于小部分无人机偏移的状态, 本机应继续保持已有阵形, 不考虑较大偏移的无人机状态。

若  $AR/b \geq 3$  且  $\bar{C}_i^m \in AR (\delta \cdot b/2)$ , 或者  $AR/b < 3$  且  $\delta \cdot b/2 \leq \min(\bar{C}_i^m) \leq AR/2$ , 并且  $\max(\bar{C}_i^m) < AR/2$ , 说明周边各无人机在编队范围内都发生了不同程度的相对偏移, 阵形处于大量无人机的小范围偏移状态, 没有基准点, 因此要考虑所有的  $\bar{C}_i^m$ , 为使阵形恢复平稳化, 大偏差量的采用比例应当较小, 小偏差量的采用比例较大。若  $\max(\bar{C}_i^m) > AR/2$ , 说明某些无人机脱离了编队, 这些无人机的状态不利于阵形保持, 则在处理时应对这些状态予以剔除。

若  $\min(\bar{C}_i^m) > AR/2$ , 说明周边无人机都脱离了编队范围, 阵形处于散乱状态, 要求阵形能够迅速重组, 重组过程中, 能与本机最快形成编队阵形的是相对位置偏差最小的无人机, 因此, 优先考虑与  $\min(\bar{C}_i^m)$  对应的无人机组成编队可以使整体形得以迅速而有序地重组。

### 3 分布式保持策略算法

1 测量本机 (编队中的无人机  $m$ ) 与领航机以及周边无人机的相对位置偏移矢量  $\bar{C}_L^m$  和  $\bar{C}_1^m, \bar{C}_2^m, \dots, \bar{C}_{K_m}^m$ , 其中  $\bar{C}_i^m = (\Delta X_i^m, \Delta Y_i^m, \Delta Z_i^m)$ ,  $\bar{C}_L^m = (\Delta X_L^m, \Delta Y_L^m, \Delta Z_L^m)$ ;

2 计算  $\min(\bar{C}_i^m)$ ,  $\max(\bar{C}_i^m)$ ;

3 若  $AR/b \geq 3$  [ $\bar{C}_L^m \in AR (\delta \cdot b/2)$ ,  $\max(\bar{C}_i^m) \in AR (\delta \cdot b/2)$ ] 为真, 或者  $AR/b < 3$  [ $\bar{C}_L^m \in \delta \cdot b/2$ ,  $\max(\bar{C}_i^m) \in \delta \cdot b/2$ ] 为真, 则编队阵形保持修正量  $\bar{C}_m = 0$ , 若均为假, 则执行第四步;

4 若  $AR/b \geq 3$  且  $\min(\bar{C}_i^m) \in AR (\delta \cdot b/2)$  为真, 或者  $AR/b < 3$  且  $\min(\bar{C}_i^m) \in \delta \cdot b/2$  为真, 则修正量  $\bar{C}_m = [\min(\Delta X_i^m), \min(\Delta Y_i^m), \min(\Delta Z_i^m)]$ , 若均为假, 则执行第五步; (注: 采用三个方向上偏移的最小量, 使得无人机尽量保持与已有阵形。)

5 若  $AR/b \geq 3$  且  $\bar{C}_i^m \in AR (\delta \cdot b/2)$  为真, 或者  $AR/b < 3$  且  $\delta \cdot b/2 \leq \min(\bar{C}_i^m) \leq AR/2$  为真, 则  $\bar{C}_m = \min(\alpha \bar{C}_1^m + \beta \bar{C}_2^m + \dots + \tau \bar{C}_j^m)$ , 其中  $(\alpha + \beta + \dots + \tau) = 1$ ,  $(\bar{C}_1^m, \bar{C}_2^m, \dots, \bar{C}_j^m) < AR/2$ , ( $j=1, 2, 3, \dots, K_m, j \leq K_m$ , 当  $\max(\bar{C}_i^m) < AR/2$  时,  $j=K_m$ ), 若均为假, 则执行第六步; (注: 含权值的融合方法同时考虑了信息的完整性和非同等性, 经过该处理, 较小相对偏移矢量将获得较大权值。阵形修正信息为极小值, 使得回复平稳。)

6 若  $\min(\bar{C}_i^m) > AR/2$  为真, 则  $\bar{C}_m = \min(\bar{C}_i^m)$ , 若为假, 则报错, 重复第一步。 (注: 此时本机搜寻周围最接近预定相对位置的无人机, 优先与其保持。从整个编队看来, 散乱的无人机将自行先两两组成小的编队然后进一步互相靠近组成大的编队。)

### 4 仿真算例与分析

本文以五架无人机组成的同水平面编队为例, 无人机质

量 6kg, 翼展  $b=2m$ , 编队距离  $AR=5m$ , 飞行速度为 10m/s, 其具体编队相对位置关系如图 4。

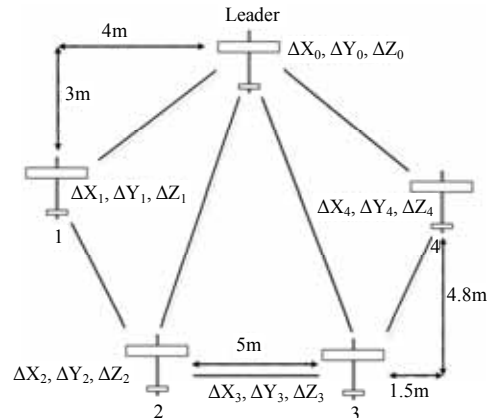


图 4 目标编队具体位置关系

由于考虑的是编队保持策略, 仿真中将无人机视为良好操纵的对象, 其模型假设为一阶惯性环节:  $G(S) = 1/(MS+1) = 1/(6S+1)$ 。设计控制器使其在幅值为 3 的阶跃信号下的调节时间为 2.5s, 超调量 5%, 控制器的控制误差限  $\varepsilon = 3\%$ , 可容忍的输入误差限  $\delta = 15\%$ 。

仿真情况一: 领航机做 S 型机动飞行, 对 3 号无人机 (uav3) 引入随机干扰量, 分别采用平均值法和本文设计的动态跟随法进行保持, 并在该情况下进行仿真对比 (图 5)。

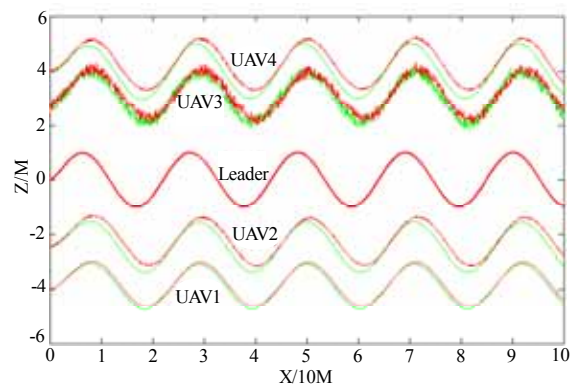


图 5 uav3 随机干扰情况下动态跟随法与平均法的效果比较

图中红色为各无人机在取平均值情况下的运动曲线, 而绿色为以本文设计的保持策略情况下的运动曲线。可以发现, 采用取平均值法的飞行曲线中, 各无人机都或多或少的带入了 uav3 的干扰量, 从而引起了不同程度的偏移, 而本文提出的动态跟随的保持策略则有效的克服了这一点。

仿真情况二: 领航机偏航飞行, 其他的无人机由初始的散乱队形回到期望的编队位置。通过分别采用平均值保持策略和动态跟随保持策略进行仿真对比 (如图 6)。图中实线为各无人机在取平均值情况下的运动曲线, 而虚线为以本文设计的保持策略情况下的运动曲线。可以看出, 动态跟随保持策略有效的减小了重组时的混乱程度, 首先组成小编队然后组成集群编队的方法使得重组的调节的时间较少而且更加安全可靠。



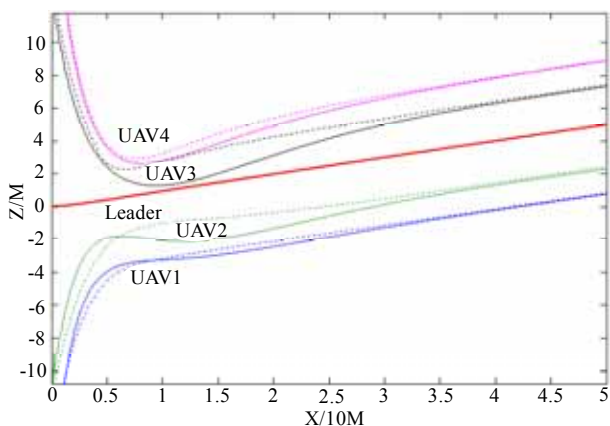


图 6 散乱阵形重组情况下平均法与动态跟随法的效果比较

### 5 结论

同等控制条件下,采取合适的保持策略将获得较好的控制效果,本文结合分析多无人机编队飞行在不同情况下的编队阵形保持需求,设计了一种简洁处理的分布式阵形保持策略。该保持策略从非一致冗余状态中提取阵形保持修正量,针对不同的阵形保持状态做出相应的保持算法。仿真结果表明该保持策略在同等控制条件下取得了优化编队飞行的阵形保持效果,是一种适合于多无人机编队飞行的保持策略。

### 参考文献:

[1] D F Chichka1, J D Wolfe, J L Speyer. Aero-Dynamically Coupled Formation Flight of Aircraft [C]// Portugal, 10th Mediterranean

(上接第 4742 页)

法相当有效,计算量显著降低,往往只需经过几次迭代就可以获得很好的可行解。

在定价和批量联合决策领域,还有大量的工作值得我们去研究。例如,可以应用博弈论研究制造商和分销商的相互协调的定价和批量联合决策问题。也可以应用博弈论研究产品可以相互替代的两个制造商在相互协调的策略下,定价和批量的联合决策问题,也可以考虑其它市场因素,如折扣、广告费用等。

### 参考文献:

[1] W I Zangwill. A deterministic multi-period production scheduling model with backlogging [J]. Management Science (S1526-5501), 1966, 13(1): 105-119.  
[2] M Florian, M Klein. Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints [J]. Management Science (S1526-5501), 1971, 18(1): 12-20.  
[3] Mohan Gopalakrishnan, Ke Ding, Jean-Marie Bourjolly, et al. A Tabu-Search Heuristic for the Capacitated Lot-Sizing Problem with Set-up Carryover [J]. Management Science (S1526-5501), 2001, 47(6): 851-863.  
[4] Ou Tang. Simulated annealing in lot sizing problems [J]. Int. J. Production Economics (S0925-5273), 2004, 88(2): 173-181.  
[5] Jiinxing Xie, Jiefang Dong. Heuristic genetic algorithms for general

Conference on Control and Automation. Lisbon, 2002.  
[2] Dušan M Stipanovi, Gökhan nalhan, Rodney Teo, et al. Decentralized Overlapping Control of a Formation of Unmanned Aerial Vehicles [J]. Decision and Control (S0191-2216), 2002, 3: 2829-2835.  
[3] John S Baras, Xiaobo Tan, Pedram Hovareshti. Decentralized Control of Autonomous Vehicles [J] Decision and Control (S0191-2216), 2003, 2: 1532-1537.  
[4] AJadbaaie, J Lin, A S Morse. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2003, 48(6): 988-1001.  
[5] Reza Olfati-Saber, Richard M Murray. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions [C]// The 15<sup>th</sup> IFAC World Congress Barcelona Spain. Spain: 2002.  
[6] Reza Olfati-Saber, Richard M Murray. Distributed structural stabilization and tracking for formations of dynamic multi-agents [C]// The IEEE Conference of Decision Control, Las Vegas, NV. USA, 2002.  
[7] T Vicsek, A Czirok, E Ben Jacob, et al. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles [J]. Physical Review Letters (S0556-2813), 1995, 82(6): 209-212.  
[8] 柳永, 吴密翠. 密集编队气动耦合效应分析 [J]. 飞行力学, 2001, 19(2): 12-16.  
[9] 鲁艺, 周德云. 无人机初始路径规划空间建模方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 491-493. (LU Yi, ZHOU De-yun. Study on Initial Path Planning Layout Model for UAV [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 491-493.)  
[10] 孙汉昌, 朱华勇. 基于概率地图方法的无人机路径规划研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3050-3054. (SUN Han-chang, ZHU Hua-yong. Study on Path Planning for UAV Based on Probabilistic Roadmap Method [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3050-3054.)

capacitated lot-sizing problems [J]. Computers and Mathematics with Applications (S0898-1221), 2002, 44(1): 263-276.  
[6] 张力波, 韩玉启, 陈杰, 等. 生产能力扩大的系统动态性研究 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1327-1330. (Zhang Li-bo, Han Yu-qi, Chen Jie, et al. System dynamics in plant capacity enlargement [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1327-1330.)  
[7] 田俊峰, 杨梅. 随机需求条件下生产-库存系统优化与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2522-2524. (Tian Jun-feng, Yang Mei. Optimization and simulation of production- inventory system with stochastic demand [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2522-2524.)  
[8] Stephen M Gilbert. Coordination of pricing and multiple-period production across multiple constant priced goods [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 1999, 114(2): 330-337.  
[9] Stephen M Gilbert. Coordination of pricing and multiple-period production across multiple constant priced goods [J]. Management Science (S1526-5501), 2000, 46(12): 1602-1616.  
[10] K K Haugen, A Olstad, B I Pettersen. The profit maximizing capacitated lot-size (PCLSP) problem [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2007, 176(1): 165-176.  
[11] W I Zangwill. A backlogging model and multi-echelon model of a dynamic economic lot size production system-a network approach [J]. Management Science (S1526-5501), 1969, 15(9): 506-527.  
[12] Nafee Rizk, Alain Martel, Amar Ramudhin. A Lagrangean relaxation algorithm for multi-item lot-sizing problems with joint piecewise linear resource costs [J]. Int. J. Production Economics (S0925-5273), 2006, 102(2): 344-357.