

文章编号: 1001-0920(2013)05-0711-05

多无人机协同搜索随机目标决策

轩永波, 黄长强, 吴文超, 王 勇, 翁兴伟, 李望西

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对目标在空间上随机均匀分布, 在时间上动态随机产生的搜索环境, 提出一种基于质心V图划分(CVP)的无人机搜索决策方法对多架无人机进行搜索空间分配. 首先建立了CVP数学模型, 在此基础上提出了基于CVP的目标分配算法, 并证明了算法的收敛性; 最后进行了仿真实验, 仿真结果表明所提出的CVP策略能有效进行随机目标搜索, 且算法具有良好的自适应能力.

关键词: 无人机; 搜索决策; 质心V图划分; 动态环境

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Cooperative search strategies of multi-UAVs for random targets

XUAN Yong-bo, HUANG Chang-qiang, WU Wen-chao, WANG Yong, WENG Xing-wei, LI Wang-xi

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force University of Engineering, Xi'an 710038, China.

Correspondent: XUAN Yong-bo, E-mail: xuanyongbo@163.com)

Abstract: The paper present search strategies based on centroidal voronoi partitions(CVP) for uninhabited aerial vehicles(UAVs) under such dynamic environments that the targets are uniformly distributed and appear randomly over time in a bounded region. Firstly, the CVP model is presented, on the basis of that, the search space division algorithm is given and the convergence of the algorithm is proved. Then the multi-UAVs search strategy under dynamic environment is designed and the effect of UAVs turning radius to algorithm performance is also considered. Finally, the simulation results show that CVP search algorithm is effective to search dynamic targets, and the algorithm has good adaptivity.

Key words: uninhabited aerial vehicles; search strategies; centroidal voronoi partitions; dynamic environment

0 引言

目标搜索作为无人机的一种典型任务, 已广泛应用于环境监测和各项军事活动中. 静态环境下的无人机搜索根据任务性质不同可以分为两类: 一类是目标位置已知, 使无人机沿规划的航路到达目标点, 以进一步获取目标的详细信息, 该问题类似于旅行商问题. 文献[1]研究了多架无人机的路径规划问题, 基于任务优先性进行编队任务设计. 文献[2]设计了一种多Agent的任务分配算法, 将目标进行分类, 使每个Agent访问各自的目标. 文献[1-2]中的距离代价都是基于欧几里德距离计算的, 文献[3-5]则考虑了无人机转弯限制的影响, 研究杜宾运动模型下的无人机协同搜索任务规划问题, 因而其研究更具有实际意义. 另一类无人机搜索任务是在目标位置未知的情况下, 设计一种搜索策略使无人机对环境进行覆盖搜索, 以确认目标的位置信息. 文献[6]基于搜索环境不确定

信息的优先性, 设计了PPP算法来解决多架无人机协同搜索地面目标的问题. 文献[7]研究了基于分布式模型预测控制的多无人机区域搜索问题. 文献[8]提出了一种多无人机协同搜索和定位的框架, 无人机之间通过交换可能性函数, 完成实时航路规划. 文献[9-10]分别给出了基于动态规划、进化计算的多无人机协同搜索决策.

上述文献都是按照某种搜索代价函数在静态环境中进行搜索, 待搜索目标在无人机执行搜索任务前已经客观存在, 而在目标产生过程和位置分布都具有不确定性的动态环境中, 即使无人机已经对某一区域进行过搜索, 也不能排除以后该区域某段时间存在目标的可能性, 在这种情况下上述文献提出的各种搜索策略均无法直接应用. 基于此, 本文借鉴了传感器位置优化的思想, 运用质心V图划分(CVP)方法对无人机进行搜索区域分配, 提出了一种协同分布式搜索策

收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-04-23.

基金项目: 空军工程大学研究生创新基金项目(2010108).

作者简介: 轩永波(1984—), 男, 助理工程师, 博士, 从事飞行器作战决策、机载精确制导武器作战使用等研究; 黄长强(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事无人机总体技术设计、机载精确制导武器作战使用等研究.

略, 该策略满足无人机转弯限制要求, 针对空间上随机均匀分布, 时间上随机产生的目标, 可以有效完成搜索任务.

1 问题描述

设搜索环境 $Q \subset \mathbf{R}^2$ 为非空凸集, Q 的面积为 A . 目标在 Q 上均匀分布, 目标产生过程为一个泊松过程, 目标产生速率 $\lambda > 0$. 设共有 n 架无人机对环境 Q 内的随机目标执行搜索任务, $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 表示 n 架无人机位置, $f(\|q - p_i\|)$ 为环境 Q 中服从均匀分布的随机目标位置 q 和离该点最近的无人机位置 p_i 之间的代价, 通常可以表示为时间或距离的函数, 在速度为常量的情况下, 两者等价. 目标函数建立如下:

$$H_i(p_i, Q_i) = \int_Q \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} f(\|q - p_i\|) dq. \quad (1)$$

无人机的搜索任务是以尽可能短的时间访问目标, 即使式 (1) 中的函数值最小. 为研究方便, 作以下假设:

1) 动态环境中的目标位置信息由无人机机载侦察设备 (例如光电相机, 合成孔径雷达等) 获得, 假定任意无人机均能感知其他无人机的位置信息, 并假定所有无人机在获知信息时没有延迟;

2) 每个目标对应一个搜索服务请求, 无人机到达目标上空认为已经完成搜索任务;

3) 搜索环境为凸多边形;

4) 无人机执行任务时飞行速度保持不变;

5) 每架无人机在某个给定水平面内飞行, 为了避免碰撞, 假定无人机飞行在不同高度的水平面上, 因此文中不考虑无人机之间的碰撞问题;

6) 本文研究的重点是目标搜索过程中的多无人机协同策略和优化搜索方法, 而非平台的底层飞行控制, 因此文中无人机上层任务控制与底层飞行控制可在各自问题空间内解耦考虑.

2 基于 CVP 的搜索任务决策

2.1 CVP 数学模型

与单架无人机相比, 多无人机协同搜索首先需要解决的是目标分配的问题. 由式 (1) 知, 可以从两个方面最小化函数 H : 1) 搜索区域 Q 进行空间划分; 2) 无人机在空间中的位置 P . 该问题类似于位置优化问题, 环境 Q 的最优空间划分为 Voronoi 划分. 假定第 i 架无人机负责的搜索区域为 V_i , 式 (1) 可改写为

$$H(P, V(P)) = \sum_{i=1}^n \int_{V_i(P)} f(\|q - p_i\|) dq, \quad (2)$$

$$V_i = \{q \in Q \mid \|q - p_i\| \leq \|q - p_j\|, \forall j \neq i\}. \quad (3)$$

下面给出 CVP 的相关定义. 设区域 $V \subset \mathbf{R}^N$, 质

量密度函数 ρ , 质量、质心和极惯性矩定义为

$$M_V = \int_V \rho(q) dq, \quad (4)$$

$$C_V = \frac{1}{M_V} \int_V q \rho(q) dq, \quad (5)$$

$$J_{V,p} = \int_V \|q - p\|^2 \rho(q) dq. \quad (6)$$

将 $J_{V,C_V} \in \mathbf{R}_+$ 定义为区域 V 关于质心 C_V 的极惯性矩, 则式 (6) 可改写为

$$J_{V,p} = J_{V,C_V} + M_V \|q - p\|^2. \quad (7)$$

为表述方便, 将 $H(P, V(P))$ 表示为 $H_V(P)$. 令 $f(\|q - p_i\|) = \|q - p_i\|^2$, 目标均匀分布时取 $\rho = 1$, 位置优化模型 (2) 可改写为

$$H_V(P) = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} \|q - p_i\|^2 dq. \quad (8)$$

由式 (7) 可知有下式成立:

$$H_V(P) = \sum_{i=1}^n J_{V_i, C_{V_i}} + \sum_{i=1}^n M_{V_i} \|p_i - C_{V_i}\|^2, \quad (9)$$

$$\frac{\partial H_V(P)}{\partial p_i} = 2M_{V_i}(p_i - C_{V_i}). \quad (10)$$

位置优化函数 $H_V(P)$ 的局部极小点是 Voronoi 单元的质心, 第 i 架无人机的位置 p_i 应为 V_i 中的质心, 可表示如下:

$$C_{V_i} = \arg \min_{p_i} H_V(P). \quad (11)$$

2.2 基于 CVP 的无人机搜索空间划分

基于 CVP 进行搜索环境空间划分, 根据目标出现的位置不同进行无人机-目标分配, 可以有效解决动态环境中的目标位置不确定性问题. 根据 2.1 节 Voronoi 划分的定义可知, 对第 i 架无人机而言, H_V 的偏微分的计算只依赖于无人机 i 和与之相邻的无人机的位置.

下面介绍一种可用来求解搜索区域 Voronoi 质心和顶点的算法. 假定 V_i 共有 N_i 个顶点, 可以表示为 $\{(x_0, y_0), \dots, (x_{N_i-1}, y_{N_i-1})\}$. 定义 $(x_{N_i}, y_{N_i}) = (x_0, y_0)$, 通过计算对应的积分, 可以得到以下闭环表达式:

$$M_{V_i} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_i-1} (x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k), \quad (12)$$

$$C_{V_i, x} = \frac{1}{6M_{V_i}} \sum_{k=0}^{N_i-1} (x_k + x_{k+1})(x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k), \quad (13)$$

$$C_{V_i, y} = \frac{1}{6M_{V_i}} \sum_{k=0}^{N_i-1} (y_k + y_{k+1})(x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k). \quad (14)$$

CVP 空间划分步骤如下:

输入无人机起始位置 P , 搜索区域 Q .

1) 以 P 为中心, 构建 Voronoi 图, 输出多边形顶

点 $(x_k, y_k), k = 0, 1, \dots, N_i$;

2) 根据式(12)~(14) 计算 M_{V_i}, C_{V_i} ;

3) 更新 Q . 将步骤2) 得到的 C_{V_i} 作为无人机新的位置, 即 $P = (C_{V_1}, C_{V_2}, \dots, C_{V_n})$;

4) 重复步骤1)~3), 直到满足终止条件, 输出 P ;

5) 无人机 i 按照 CSC 或 SC 类型航路以最短距离到达与质心 p_i 距离为 r 的圆形轨道上做巡逻飞行, 飞行方向由到达圆形轨道时的飞行方向决定. 其中 C 表示弧形航迹, S 表示直线航迹.

以无人机的起始位置为中心, 构建 Voronoi 图, 将待搜索区域 Q 划分为3块搜索区域, 如图1中的虚线所示, 基于 CVP 划分的3块区域如图1中的实线所示.

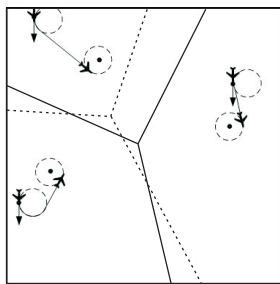


图1 基于CVP的无人机搜索空间划分

2.3 收敛性证明

将无人机位置更新视为一个连续映射 $T : Q^n \rightarrow Q^n$, 由式(5) 可得

$$T_i(P) = \left(\int_{V_i(P)} \rho(q) dq \right)^{-1} \int_{V_i(P)} q \rho(q) dq. \quad (15)$$

对于任意 $i \in \{1, 2, \dots, n\}, \|T_i(P) - C_{V_i}\| = 0 \leq \|p_i - C_{V_i}\|$. 如果不是质心, 则对于所有 $p_i \neq C_{V_i}$, 不等式严格成立. 因此, T 具有如下两个性质:

性质1 对于任意 $i \in \{1, 2, \dots, n\}, \|T_i(P) - C_{V_i(P)}\| \leq \|p_i - C_{V_i(P)}\|, T_i$ 表示第 i 个 T 变换.

性质2 如果 P 为质心, 则存在 j 满足 $\|T_j(P) - C_{V_j(P)}\| < \|P_j - C_{V_j(P)}\|$.

性质1 确保按照 T 运动的无人机不增加到各自对应质心的距离. 性质2 确保在每一代中至少有一架无人机严格趋近于 Voronoi 区域的质心. 根据上述性质, 可得到以下定理:

定理1 设 T 为连续映射: $Q^n \rightarrow Q^n, T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$, 设 $P_0 \in Q^n$ 表示无人机的最初位置, 根据1.2节得到的序列 $\{T^m(P_0) | m \in \mathbf{N}\}$ 收敛.

证明 设 $H_V : Q^n \rightarrow \mathbf{R}^+$ 为 CVP 空间划分的目标函数, W 为任意空间划分, 有

$$H(P, W) = \sum_{i=1}^n J_{V_i, C_{W_i}} + \sum_{i=1}^n M_{W_i} \|p_i - C_{W_i}\|^2, \quad (16)$$

$$H(P', W) \leq H(P, W). \quad (17)$$

对于任意 $i \in \{1, 2, \dots, n\}, \|p_i' - C_{W_i}\| \leq \|p_i - C_{W_i}\|$. 特别地, $H(C_W, W) \leq H(P, W)$, 如果 $P \neq C_W$, 则不等式严格成立, 其中 C_W 表示划分 W 的质心. 对于固定点 P , Voronoi 图划分是最优的, 故有

$$H(P, V(P)) \leq H(P, W). \quad (18)$$

如果 $W \neq V(P)$, 则不等式严格成立.

根据性质1 和式(18), 有

$$H(T(P), V(P)) \leq H(P, V(P)) = H_V(P); \quad (19)$$

根据性质2 和式(18), 有

$$H_V(T(P)) = H(T(P), V(T(P))) \leq H(T(P), V(P)); \quad (20)$$

故有 $H_V(T(P)) \leq H_V(P)$. 如果 $P \neq C_V$, 则不等式严格成立, 因此 H_V 是 CVP 算法的下降函数. \square

2.4 基于CVP的多无人机动态环境协同搜索决策

生物学家利用位置优化问题研究动物如何划定势力范围, 发现动物组群行为服从以下定律: 每个动物都倾向于划分一个统治区域, 然后奔向各自的统治中心, 负责捕获其势力范围内的目标. 本文借鉴这种思想, 提出一种基于 CVP 的动态环境搜索策略, 具体描述如下:

1) 将 CVP 空间划分最终得到的 C_{V_i} 作为无人机 i 的统治中心, 每架无人机 UAV_i 关联一个产生器 $C_{V_i}, i \in I_m$, 构建 Voronoi 图.

2) UAV_i 以 C_{V_i} 为中心, 以最小转弯半径 r 为半径进行圆轨迹巡逻飞行, 飞行方向(逆时针或顺时针)与2.2节中步骤5) 得到的无人机方向保持一致.

3) 当目标出现时, 按照目标出现的先后顺序, UAV_i 访问其控制区域 $V_i(p)$ 内的所有目标; 当目标访问完毕而没有新目标出现时, 无人机返回巡逻状态; 当 UAV_i 的控制区域 $V_i(p)$ 内没有目标出现时, 该无人机保持巡逻飞行.

4) 当 UAV_i 已达到最大航时或故障不能继续执行任务时, 以 $P = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_n)$ 作为无人机初始位置, 基于 CVP 重新进行搜索空间划分, 输出环境 Q 新的质心位置 P .

5) 重复步骤1)~4), 直到满足终止条件.

求解无人机的目标函数首先需要在 \mathbf{R}^2 内建立无人机运动模型. 根据前面假设, 无人机只能以恒定速度 $v > 0$ 在平面内以最小转弯半径 $r > 0$ 飞行, 给定无人机方位坐标 $g_i = (x_i, y_i, \theta_i), g_i \in SE(2), x_i$ 和 y_i 分别为无人机的位置沿惯性直角坐标轴的投影, θ_i 为无人机与 x_i 轴的方向夹角, 无人机运动模型建立如下

所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v \cos \theta_i, \\ \dot{y}_i = v \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = w_i, \\ |w_i| \leq v/\rho. \end{cases} \quad (21)$$

3 仿真分析

实验 1 搜索环境 $Q = 10\,000 \times 10\,000 \text{ m}^2$, 无人机速度 $v = 60 \text{ ms}^{-1}$, 无人机数目 $n = 6$, 最小转弯半径 $r = 600 \text{ m}$. 设 $t = 0$ 时无人机开始执行任务, $t = 80 \text{ s}, 90 \text{ s}, 100 \text{ s}, 110 \text{ s}$ 依次生成 4 个服从随机均匀分布的目标.

无人机在环境中的初始位置随机分布, 根据无人机起始位置构建 Voronoi 图, 如图 2 所示. 在图 2 基础上, 运用前面所述的质心 Voronoi 图策略进行无人机控制区域划分, $t = 162 \text{ s}$ 时的仿真结果如图 3 所示 (其中无人机起始位置用圆圈表示, 目标用五星表示).

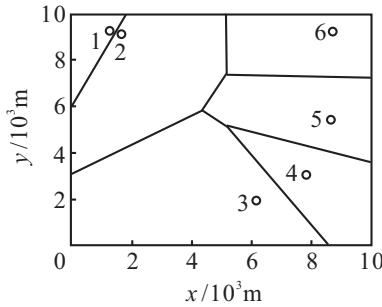


图 2 $t = 0 \text{ s}$ 时的搜索环境 Voronoi 划分

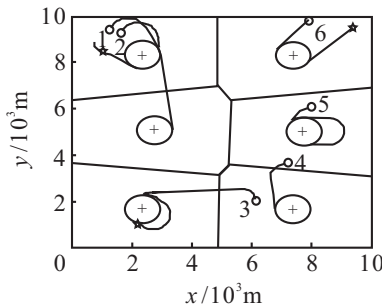


图 3 $t = 162 \text{ s}$ 时的 UAV 搜索航迹

从图 3 可以看出, 6 架无人机从起始位置到达各自的 Voronoi 图质心后, 沿各自质心以最小转弯半径进行巡逻飞行. 当突发目标出现后, 目标所处区域的对应无人机飞向该目标, 图 4 中对应的无人机编号依次为 1, 3, 5 和 6. 当无人机完成目标搜索后返回, 继续绕质心巡逻飞行, 等待下一个出现的目标.

假定 $t = 162 \text{ s}$ 时, 无人机 6 故障无法继续执行任务, 此时需要重新进行无人机控制区域划分, 仿真中重新基于 CVP 进行空间划分, 在 $t = 300 \text{ s}$ 时的仿真结果如图 4 所示.

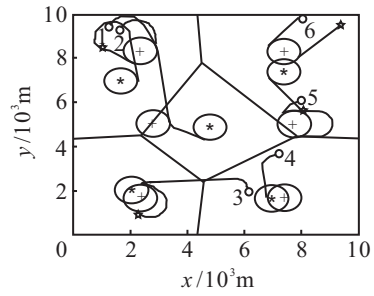


图 4 $t = 300 \text{ s}$ 时的 UAV 搜索航迹

从图 4 中可以看出, 无人机重新进行了区域划分, 原先的 6 个控制区域变为 5 个, 无人机 1~无人机 5 在到达各自的区域质心后转为圆周巡逻飞行模式, 继续等待搜索出现的目标.

实验 2 搜索环境 $Q = 10\,000 \times 10\,000 \text{ m}^2$, 无人机速度 $v = 60 \text{ ms}^{-1}$, 设 $t = 0$ 时无人机开始执行任务, $t = 100 \text{ s}$ 开始每隔 10 s 生成 1 个服从随机均匀分布的目标. 分别运用标准覆盖搜索和基于 CVP 的搜索策略计算不同条件下 (无人机数目 $n = 2, 4, 6, 8, 10$, 转弯半径分别为 $500 \text{ m}, 600 \text{ m}$) 的目标等待时间, 仿真结果见图 5.

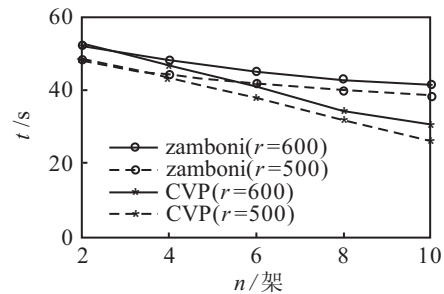


图 5 $t = 1000 \text{ s}$ 不同条件下的目标等待时间

如图 5 所示, 在无人机由 2 架增加到 10 架之后, 标准覆盖搜索方法和基于 CVP 的搜索策略得到的目标等待时间都呈下降趋势. 当无人机 $n < 6$ 时, 标准覆盖搜索方法和基于 CVP 的搜索策略得到的目标等待时间相差不多, 但随着无人机数的增多, 当无人机数 $n > 10$ 时, 本文提出的基于 CVP 的搜索策略得到的目标等待时间优势明显. 这说明在传感器探测范围足够大时 (相对于搜索环境而言, 即无人机编队的探测范围能够覆盖整个环境), 基于 CVP 的搜索策略具有更好的性能. 此外, 随着无人机转弯半径的减小, 目标等待时间呈下降趋势, 这与定理 2 和定理 3 相一致, 这是由于随着转弯半径的减少, 无人机能够在更小的转弯代价下更快地针对目标出现作出反应.

4 结论

在动态环境中, 难以找到一种随机目标的最优搜索策略, 本文提出了一种基于 CVP 的多无人机协同搜索策略, 得到如下结论: 1) 提出的 CVP 策略可以有

效进行随机目标的搜索,得到的目标等待时间为最优策略的常数倍;2)提出的CVP策略在无人机故障时可以重新进行搜索空间划分,算法具有良好的自适应性;3)与标准覆盖搜索策略相比,本文提出的算法在无人机数目增多的情况下具有明显优势,目标平均等待时间随无人机数目增加和无人机转弯半径减小而减少。

参考文献(References)

- [1] Shetty V K, Sudit M, Nagi R. Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(3):1813-1828.
- [2] Smith S L, Bullo F. Target assignment for robotic networks: Asymptotic performance under limited communication[C]. *Proc of the 2007 American Control Conf.* New York, 2007: 1155-1160.
- [3] Itani S, Frazzoli E, Dahleh M A. Travelling salesperson problem for dynamic systems[C]. *Proc of the 17th Int Federation of Automatic Control Conf.* Seoul, 2008: 13318-13323.
- [4] Lee J W, Walker B, Cohen K. Path planning of unmanned aerial vehicles in a dynamic environment[C]. *Infotech & Aerospace Conf.* Louis, 2011: 1654-1659.
- [5] Ma X, Castanon D A. Receding horizon planning for dubins traveling salesman problems[C]. *Proc of the 45th IEEE Conf on Decision and Control.* San Diego, 2006, 11: 5453-5458.
- [6] Zhang C L, Ordóñez R. Multi-vehicle cooperative search with uncertain prior information[C]. *AIAA Guidance Navigation and Control Conf and Exhibit.* Rhode Island, 2004: 5421-5426.
- [7] Trodden P, Richards A. Multi-vehicle cooperative search using distributed model predictive control[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf and Exhibit.* Hawaii, 2008: 7132-7138.
- [8] Tisdale J, Kim Z, et al. An autonomous system for cooperative search and localization using unmanned vehicles[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf and Exhibit.* South Carolina, 2009: 2008-7239.
- [9] Christmann H C, Johnson E N. Modeling urban environments for communication aware UAV swarm path planning[C]. *Modeling and Simulation Technologies Conf.* Toronto, 2010: 8361-8367.
- [10] Altshuler Y, Yanovski V, Wagner I. Swarm ant robotics for a dynamic cleaning problem-upper bounds[C]. *Proc of the 4th Int Autonomous Robots and Agents Conf.* Wellington, 2009: 227-232.
- [11] Savla K, Frazzoli E, Bullo F. Traveling salesperson problems for the dubin vehicle[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2008, 53(6): 1378-1391.
- [5] Fallah-Jamshidi S, Karimi N, Zandiyeh M. A hybrid multi-objective genetic algorithm for planning order release date in two-level assembly system with random lead times[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(11): 13549-13554.
- [6] Moreira M R, Alves R. Input-output control order release mechanism in a job-shop: How workload control improves manufacturing operations[J]. *Int J of Computational Science and Engineering*, 2012, 7(3): 214-223.
- [7] Germs R, Riezebos J. Workload balancing capability of pull systems in MTO production[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 48(8): 2345-60.
- [8] 严浩云, 李宏余. 基于面向负荷的生产控制的交货期设置方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(6): 1200-1205.
(Yan H Y, Li H Y. Due date assignment method based on load-oriented manufacturing control technique[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(6): 1200-1205.)
- [9] Thürrer M, Silva C, Stevenson M. Workload control release mechanisms: from practice back to theory[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 48(12): 3593-3617.
- [10] Fernandes N O, Carmo-Silva S. Order release in a workload controlled flow shop with sequence-dependent setup times[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 49(8): 2443-2454.
- [11] 张涛, 王梦光, 唐立新, 等. 基于MTO管理系统的钢厂合同计划方法[J]. *控制与决策*, 2000, 15(6): 649-653.
(Zhang T, Wang M G, Tang L X, et al. The method for the order planning of the steel plant based on the MTO management system[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(6): 649-653.)

(上接第700页)