

无人机大区域侦察研究

王庆江, 彭军, 倪保航, 徐学文, 单鑫, 刘勇
(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘要: 利用自身携带的侦察设备对大区域内目标进行独立的侦察是无人机在现代战场上的主要应用之一。针对无人机执行侦察任务的效能问题, 首先, 建立了 CCD 摄像机的侦察模型, 在分析了无人机完成侦察任务的能力和侦察代价后, 提出了大区域侦察路径的效能评价模型; 接着, 应用效能评价模型, 对无人机的光栅式侦察方式进行了改进及路径分析, 并通过仿真进行了验证。研究结果对无人机完成实际的侦察任务具有一定的参考作用和工程应用价值。

关键词: 无人机; 大区域侦察; CCD; 改进的光栅式

中图分类号: V279; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0039-05

Research on Large-Range Reconnaissance of UAV

WANG Qing-jiang, PENG Jun, NI Bao-hang, XU Xue-wen, SHAN Xin, LIU Yong
(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To reconnoiter targets in a large-scale area independently with onboard reconnaissance equipment was one of the most important applications for UAVs in modern battle field. Focusing on the problem of effectiveness evaluation for UAV when executing reconnaissance tasks, a model was built up for CCD camera, and the advantages and the disadvantages of UAVs in excuting reconnaissance were analyzed. Based on which a model was proposed for evaluating large-range reconnaissance route planning. Then, using this model, the searching pattern of UAV, box-spiral, was improved and the path was analyzed. The improved pattern was verified by a simulation. The effectiveness evaluation model and the improved searching pattern can be taken as a reference for UAVs in taking reconnaissance tasks, which has certain engineering values.

Key words: UAV; large-range reconnaissance; CCD; improved grating form

0 引言

随着侦察技术和无人机的广泛应用, 无人机执行侦察任务成为当前的研究热点^[1-2]。无人机执行侦察任务时一般分为两种情况^[3]: 1) 在侦察区域内分布着已知的、有限个、不连续的点目标, 无人机只需对其进行侦察即可(例如对桥梁、车站等重点目标的监控); 2) 目标在大面积侦察区域内的分布、数量、类型不详, 无人机只能对区域进行覆盖式搜索、全面侦察才能发现目标(如在指定海域内找出敌方舰艇)。本文只对第2种情况进行研究。

无人机在大区域内侦察时, 由于战术目的不同, 对侦察航路的要求也不同: 如果要求快速完成任务, 则侦察时间是较重要的战术指标; 如果要求进行细致、不留

死角的侦察, 则对侦察区域的覆盖率是一项重要战术指标, 如此等等。因此, 建立一个合理的侦察航路评价模型, 从而能根据战术不同的侦察目的在众多侦察航路方案中选出一个较优的方案, 就是本文的研究内容。

1 传感器侦察模型

无人机执行侦察或跟踪任务时, 所搭载的传感器类型较多, 如光学仪器、红外传感器、CCD(Charge Coupled Device)摄像机、多普勒或合成孔径雷达等^[1-2,4]。本文无人机所搭载的传感器为 CCD 摄像机(简称 CCD), 并假设 CCD 通过万向支架(云台)安装在无人机机头下方的半球形转塔内。

CCD 工作时的瞬时探测区域是一个很重要的参数, 它与 CCD 的视场角、俯仰角及无人机的飞行高度和飞行姿态有关, 如图 1 所示。设无人机做定高飞行, O 点是 CCD 的安装位置, OX 轴为 CCD 的光轴在无人机飞行平面上的投影。图 1a 是 CCD 对地探测的示意图, 图 1b 是此示意图在 OX 轴所在铅垂面内的投影。

在图1a中,平面 V_e 表示目标所在的平面,即水平面。一般情况下,CCD瞬时所能探测到 V_e 中的区域 V_{aim} 是一个由点 A, D, B, C 围成的椭圆,它就是CCD的瞬时探测区域,称为CCD的探测靶面,简称为靶面(文献[5-6]中称为收容面积)。在图1中, C_o 为靶面的中心,直线 OC_o 为CCD的探测距离, r_{long} (线段 CD)和 r_{short} (线段 AB)分别被称为靶面的长轴和短轴。过 O 点向目标所在的平面做垂线并与 CD 或其延长线交于点 E ,则 OE 就是无人机的飞行高度 H 。 $\angle AOB, \angle COD$ 分别为CCD的水平 and 垂直视场角,分别用 α, γ 表示(两参数一般相等)。 $\angle DOX$ 为CCD光轴与机轴所形成的俯仰角,用 β 表示。

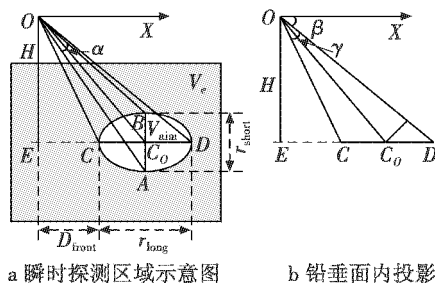


图1 CCD的瞬时探测区域

Fig. 1 Diagram of instantaneous detecting area for CCD

下面计算靶面的 r_{long} 与 r_{short} 。当无人机做定高飞行时,设CCD的俯仰角为 β ,CCD的视场角为 γ ,无人机的飞行高度为 H 。在无人机的滚转角为零的条件下,由图1b可得靶面的 r_{long} 为

$$r_{long} = ED - EC = H \times [1/\tan \beta - \tan(0.5\pi - \beta - \gamma)] \quad (1)$$

由图1a可得靶面的 r_{short} 为

$$r_{short} = AB = 2 \tan 0.5\alpha \times OC_o \quad (2)$$

由图1可得

$$OC_o = \frac{H}{\sin(\beta + 0.5\gamma)} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$r_{short} = 2 \tan 0.5\alpha \times OC_o = \frac{2H \tan 0.5\gamma}{\sin(\beta + 0.5\gamma)} \quad (4)$$

在图1中,直线 EC 也是一个很重要的参数,它表示从CCD在 V_e 中的投影点 E 到此点与靶面长轴的近点 C 之间的一段长度,由于CCD的俯仰角和视场角的限制,落在此直线所在区间的目标并不能被扫描到,因此被称作CCD的侦察盲区,用 D_{front} 来表示,其值为

$$D_{front} = EC = \frac{H}{\tan(\beta + \gamma)} \quad (5)$$

无人机无论处于侦察状态还是跟踪状态,目标都必须位于靶面内。当无人机在一定高度水平飞行,并保持 β, γ 不变时,它的靶面扫过的区域就形成了一条

带状区域,即探测带,此探测带的宽度为靶面的短轴 r_{short} 。在侦察的过程中无人机要想对侦察区域进行全侦察,则必须使探测带扫描全部的侦察区域。

2 侦察路径评价模型

无人机侦察路径的优劣主要从对目标的侦察能力和所需付出的代价两个方面评价。

2.1 系统侦察能力分析

无人机完成任务的能力 $W(W \in [0, 1])$ 实际上就是无人机在侦察区域 S_i (S_i 是一个位于水平面内的矩形平面,被侦察目标只分布于此区间)中侦察到目标的能力,它可以用发现目标概率 $P_f(P_f \in [0, 1])$ 、对目标的漏扫率 $P_m(P_m \in [0, 1])$ 这两个参数表示,即

$$W = P_f \times (1 - P_m) \quad (6)$$

无人机在执行侦察任务时发现目标的概率 P_f 是指当无人机在对 S_i 进行侦察时,在被CCD搜索过的区域内发现目标的概率。 P_f 可表示为

$$P_f = P_s \times (1 - P_p) \times (1 - P_d) \quad (7)$$

式中: $P_s(P_s \in [0, 1])$ 为目标位于CCD搜索区内并被正确识别出的概率; $P_p(P_p \in [0, 1])$ 为目标位于CCD搜索区内,但由于目标或环境的原因而没有发现目标的概率; $P_d(P_d \in [0, 1])$ 为反映侦察系统可靠性的指标。

在CCD的分辨率已定的情况下, P_s 与落入探测带内目标的大小及目标识别的方法有关。如果目标太小或目标识别的方法不合理,即便是它被CCD搜索到也不会被识别。 P_s 为一个描述目标特性及侦察系统后期目标处理能力的参数。

P_p 主要是反映无人机与目标的相对位置关系,并且反映 S_i 中地貌特征的一个参数,它与无人机相对于障碍物的高度(目标可能隐藏)、无人机上CCD的视场角、目标是否在其附近施放了干扰或进行了伪装等因素有关。

P_d 是反映整个无人机侦察系统可靠性概率的值(它表明的是无人机侦察系统不可靠性概率),它指无人机及其所搭载的CCD侦察系统由于自身原因(无人机飞控系统或导航系统等本身性能原因,无人机没有严格按照规划路径飞行,环境中风、雨、雾等环境原因)所导致的“本该被CCD搜索的区域但实际没有被搜索”这个事件的概率,它实质上指的是由于无人机侦察系统本身原因导致的漏扫率。

P_m 是指在 S_i 中存在“无人机根本就没有扫描到的区域(即漏扫区,如图2所示)”的概率,它是一个反映侦察方案中侦察模式的参数。

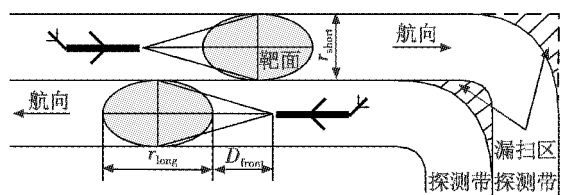


图2 无人机漏扫区示意图

Fig.2 Diagram of missing area of UAV

P_m 可以用漏扫区域 $S_s (S_s \subseteq S_r)$ 占 S_r 的比例来表示, 即

$$P_m = \frac{S_s}{S_r} \quad (8)$$

2.2 系统侦察代价分析

无人机执行侦察任务时所付出的侦察代价 $C (C \in [0, 1])$ 包括4部分: 1) 整个侦察过程的总飞行路径长度代价 D_{path} , D_{path} 包括在侦察区内飞行的路径长度及进入、离开 S_r 的路径长度; 2) 执行侦察任务所费的油料代价 O_{oil} 及时间代价 T_{time} ; 3) 防空武器(导弹、火炮)、雷达等对无人机执行侦察任务的威胁代价 T_{threat} 。因此, 可得

$$C = f(D_{path}, O_{oil}, T_{time}, T_{threat}) \quad (9)$$

显然, 无人机做匀速飞行时按某条航路飞行的耗油量 C_{oil} 可表示为

$$C_{oil} = t \times r_{oil} = \frac{D}{V} \times r_{oil} = \frac{D \times r_{oil}}{V} \quad (10)$$

式中, t, r_{oil}, D, V 分别为无人机按某条航路飞行时的飞行时间、耗油率、航路长度和飞行速度。

执行侦察任务时, 一般情况下无人机做匀速飞行, 对于变速飞行, 可以认为无人机按平均速度飞行。在某一高度的匀速飞行状态下, 无人机的耗油率与其飞行速度成正比。由式(10)可知, 无人机在某一高度做匀速飞行时, 它的耗油量、飞行时间都与它所飞过的航路长度成正比, 因此可以认为, 无人机的飞行时间和耗油量是其航路长度的函数。

对于防空武器、雷达等所构成的威胁, 无人机一般采取规避和突防两种手段。如果防空武器、雷达本身就是所要侦察的目标, 则无论威胁有多大都要进行突防侦察, 这时可以不考虑威胁代价; 反之, 从安全和保密的角度来讲, 采用规避的手段是合理的, 规避的程度可以从其路径的长短上反映出来。因此, 无论采用何种手段, 无人机面对威胁时其威胁代价可以通过在威胁区域的路程长度来表述。

设无人机执行侦察任务时规划了 k 种方案, 则无人机按第 $j (1 \leq j \leq k)$ 种方案执行任务所付出的代价 C_j 可以表示为

$$C_j = \frac{D_{path-j}}{\max(D_{path-1}, D_{path-2}, \dots, D_{path-k})} \quad (11)$$

2.3 侦察效能评估模型

无人机执行侦察任务时进行效能评估的目的是在众多备选方案中按照侦察目的找出一个最优方案, 从而使无人机在付出代价最小的情况下, 以最高的效率完成侦察任务, 它的评估模型为

$$F = K_1 \times W - K_2 \times C \quad (12)$$

式中: $F (F \in (-1, +1))$ 为无人机执行侦察任务时的效能; K_1, K_2 为大于零、小于1的常系数, 主要用于调整代价与能力之间的权重。

3 侦察路径分析

实际中, 无人机侦察区域一般分为不规则形、圆形、多边形、矩形等形状或其中几种的组合。本文对最简单的矩形区域进行分析, 其他的形状分析方法类似。

无人机侦察路径包括两个部分: 1) 在侦察区内的路径; 2) 无人机从出发点进入侦察区点、离开侦察区点到任务终点的路径, 这部分也称为侦察区外的路径。下面分别进行分析。

3.1 侦察区外路径

在出发点、进入侦察区点、离开侦察区点和任务终点这4点已确定的情况下, 无人机进入侦察区和离开侦察区的路径飞行过程中 $W = 0$, 因此要想 F 最大, 只能采用路径最短的直线或转弯较少的折线方案。

3.2 侦察区内路径

根据第2节所述可知, 无人机在执行侦察任务时, 在 W 已定的情况下, 要想使 F 最大, 应该使无人机的 V 最小, 也就是使无人机的路径长度最小。

侦察路径的形状一般分为光栅式、螺旋式、扫雷式3种^[7]。文献[3]指出, 从飞行的效率来讲, 无人机做转弯机动是不经济的, 因此 UAV 在进行区域搜索时尽量做直线飞行少做转弯飞行, 对于多边形的侦察区域, 当扫描线与多边形的某个边平行时, 侦察路径的转弯次数最少, 因此本文采用光栅式的侦察方式, 也可称为扫描方式。

由式(6), (11), (12)可知, 在无人机和 CCD 已定、侦察环境和目标特性不可控的条件下, 要想使无人机 F 最大, 只能尽量减少对目标的漏扫率 P_m (最好是对 S_r 进行没有漏扫区的全扫描) 和侦察路径长度 D_{path} 。

设无人机侦察区域 S_r 的长和宽分别为 x 和 y 。对于光栅式侦察方式, 设无人机在侦察区域中每两次转弯之间所飞过的路径长度为 L 。当无人机的飞行方向与 CCD 的侦察方向总是相同时, 要想实现对侦察区域全扫描, 参照图1可得

$$L = y + 2 \times D_{front} + r_{long} \quad (13)$$

如果 CCD 的侦察方向与无人机的飞行方向并不

总是一致,例如按图3b中所示的改进方案进行全扫描,则在侦察区域中每两次转弯之间无人机所飞过的路径长度 L 为

$$L = y \quad (14)$$

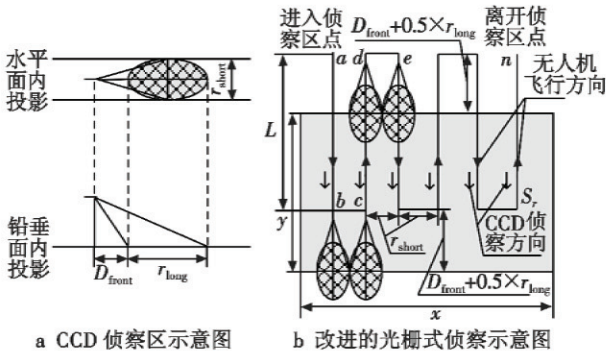


图3 无人机侦察区示意图

Fig.3 Diagram of detecting area of UAV

对比式(13)与式(14),显然改进方案飞行时无人机的飞行路径较短,因此本文采用这种改进方案。按图3b中所示的改进方案进行扫描时,无人机的飞行方向与 CCD 的侦察方向之间的关系是:以无人机进入侦察区点 a 为参照,当无人机的飞行远离此点时,无人机的飞行方向与 CCD 的侦察方向一致;反之,则两者的方向相反。

由于要对 S_r 进行全扫描且 CCD 一次扫描的结果为一条探测带,因此可知在 S_r 中相互平行的两条侦察路径间的距离为探测带宽度的整数倍,其他路径段之间的距离依此类推。

由于 CCD 的偏航角为 0° 或 180° ,参照图3a可知,无人机的位置必在探测带的中心线上,因此可知侦察路径的起始直线路径段与 S_r 相应边的距离为 $0.5 \times r_{short}$,即路径段 ab 与 S_r 左边界的距离为 $0.5 \times r_{short}$ 。由于要对 S_r 进行全扫描并假设无人机从 S_r 左上角的 a 点进入,因此进入点 a 与 S_r 的上边界的最小距离为 $D_{front} + 0.5 \times r_{long}$ 。无人机离开 S_r 的点 n 的位置确定与点 a 类似。

显然,点 b, c 间的距离为侦察带的宽度 r_{short} 。对于转弯点 c ,为了使无人机的飞行路径最短并满足无人机自身的约束,按文献[8]所述的最小转弯半径 R_{min} 进行 90° 转弯即可。

设 N 为侦察路径中与路径段 ab 平行的直线路径段数量,则可得

$$N = \text{int}(x/r_{short}) \quad (15)$$

在 S_r 中一个完整的侦察周期路径(例如路径 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$) 的路径长度为

$$d = 2 \times (y + \pi \times R_{min} + r_{short} - 4 \times R_{min}) \quad (16)$$

因此,在 S_r 中的总路径长度为

$$D_l = \text{int}(0.5 \times N) \times d \quad (17)$$

由于通常情况下若干个侦察周期并不能完全覆盖 S_r ,因此实际的侦察路径为若干个侦察周期路径与部分侦察周期路径之和,式(17)中也要加上此部分。考虑到从任务起点(机场)到进入侦察区点的路径 D_E 及离开侦察区点到任务终点(机场)的路径长度 D_L ,可得完成侦察任务时无人机飞行的总路径长度 D 为

$$D = D_l + D_E + D_L \quad (18)$$

4 仿真实例

4.1 仿真条件

在仿真时,无人机的起飞机场及完成任务的降落机场为同一机场,并设为坐标系原点侦察区域为矩形,以平行于矩形长边的方向为 X 轴。

无人机按本文所述的改进的光栅式侦察航路对侦察区域侦察时,仿真条件如下所述。

1) 侦察区域。侦察区域为矩形,其4个顶点坐标(单位为 m)分别为:左上顶点(20000,60000)、左下顶点(20000,20000)、右上顶点(80000,60000)、右下顶点(80000,20000)。

2) 初始和最终位置。起飞机场和降落机场位置为(0,0)。无人机从起飞机场出发后直接飞向侦察区域,完成任务后直接返回降落机场。

3) 无人机参数。无人机巡航高度为 1000 m,速度 $V = 180 \text{ m/s}$;侦察时高度 $H = 3000 \text{ m}$,速度 $V = 100 \text{ m/s}$, $R_F = R_{min} = 800 \text{ m}$ 。

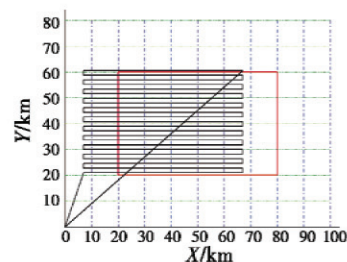
4) CCD 参数。CCD 的俯仰角 $\beta = 10^\circ$,视场角 $\alpha = \gamma = 9^\circ$,通过安装平台,CCD 镜头在偏航方向转动的范围为 $\pm 180^\circ$ 。

5) 侦察方案。仿真中采用改进的光栅式方案,并分别采用横向和纵向两种方案。

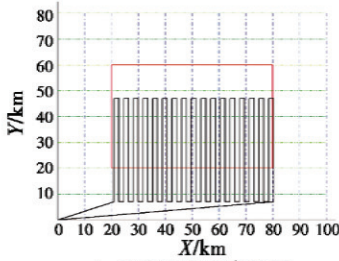
6) 无人机完成任务的能力 W 。由2.1节分析可知, W 与无人机侦察系统性能、侦察区域环境、侦察路径方案有关,为了重点研究侦察路径,在仿真中设 $W = 1$ 。

4.2 仿真结果

根据3节所述的规划航路、4.1节仿真条件及相关算式,使用改进的光栅式侦察方案得到了飞行的仿真结果,如图4所示。



a 横向方案仿真结果



b 纵向方案仿真结果

图4 仿真结果图

Fig. 4 Diagram of simulation results

无人机执行侦察任务时的 r_{short} , r_{long} , D_{front} , N , D 如表1所示。

表1 仿真结果

Table 1 Simulation results

	$r_{\text{short}}/\text{m}$	r_{long}/m	$D_{\text{front}}/\text{m}$	转弯数 N	D/m
横向	1 800.0	8 300.0	8 700.0	23	1 515.978 3
纵向	1 800.0	8 300.0	8 700.0	34	1 471.394 0

表1中, r_{short} , r_{long} , D_{front} 三项的结果都是在适当缩小的基础上取整数值所得的近似结果。

对于图4和表1的仿真结果有如下说明。

1) 由于本文重点研究无人机侦察路径,因此重点考虑所规划路径的代价(路径的长短),而不是系统侦察能力。

2) 在图4中可见仿真结果为一些线段,而实际上规划的路径应该通过圆弧过渡,这主要是为了突出侦察路径的规划。

3) 通过观察图4和表1中的 N 可知,横向方案比纵向方案的转弯数量少,这主要是因为侦察区域为长度大于宽度的矩形,横向方案的飞行方向与侦察区域的长边平行。转弯数量越多对无人机飞控系统和制导系统的要求越高,因此在本仿真中横向方案比纵向方案优。

4) 通过观察图4和表1中的 D 可知,横向方案比纵向方案的路径略长,这主要是横向方案在最后多飞了一段背离机场的侦察路径(通过计算可知横向方案比纵向方案的 D_l , D_l 大,而两者的 D_e 相同),因此在本仿真中横向方案比纵向方案优。

总之,使用改进的光栅式侦察方案时采用横向方案还是纵向方案与侦察区域有很大关系。选择方案时,在路径长度相差不大的情况下以转弯较少的方案为优。

通过仿真结果可以看出,本文给出的无人机侦察路径规划方案是合理、可行的。

5 结束语

以无人机执行侦察任务为背景,本文提出了一种无人机侦察路径效能评价的模型并对光栅式侦察方式

的路径代价进行了分析。从分析及其后的仿真结果可知,侦察路径方向平行于侦察区域的长边时,无人机转弯的次数少;采用横向方案或纵向方案与侦察区域的形状有很大关系。

参考文献

- [1] 吴永亮. 美国海军新型情报、监视与侦察飞机发展综述[J]. 飞航导弹, 2012(5): 67-73. (WU Y L. Review of US navy's new plane for intelligence surveillance and reconnaissance[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(5): 67-73.)
- [2] 林岳峥, 祝利, 王海. 全球鹰无人侦察机的技术特点与应用趋势[J]. 飞航导弹, 2011(9): 21-24. (LIN Y Z, ZHU L, WANG H. The technical features and development trends of Global Hawk UAV[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(9): 21-24.)
- [3] 彭辉, 沈林成, 霍霄华. 多UAV协同区域覆盖搜索研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(6): 2472-2476. (PENG H, SHEN L C, HUO X H. Research on multiple UAV cooperative area coverage searching[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(6): 2472-2476.)
- [4] 赵培聪. 国外情报、监视与侦察系统发展概况[J]. 现代雷达, 2012, 34(12): 8-11. (ZHAO P C. Development of intelligence surveillance and reconnaissance for foreign countries[J]. Modern Radar, 2012, 34(12): 8-11.)
- [5] 谭安胜, 贺凯. 舰载无人机光电载荷对岸射击观测与决策分析[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(2): 33-40. (TAN A S, HE K. Decision-making analysis on observation for shooting shore target by optical payload of ship-board UAV[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(2): 33-40.)
- [6] 谭安胜. 舰载无人机光电载荷对海上目标搜索决策分析[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(8): 21-27. (TAN A S. Decision analysis of searching for offshore target for O-E payload loaded in ship-board UAV[J]. Command Control & Simulation, 2010, 32(8): 21-27.)
- [7] 沈延航, 周洲. 攻击型无人机巡弋搜索航路优化设计与仿真[J]. 电光与控制, 2005, 12(10): 7-9. (SHEN Y H, ZHOU Z. Loitering search pattern optimization and simulation of UCAV[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(10): 7-9.)
- [8] 王庆江, 高晓光, 符小卫. 无威胁情况下任意两点间的无人机路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2157-2162. (WANG Q J, GAO X G, FU X W. Path planning of UAV between two random points without threats[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2157-2162.)