

doi: 10.7690/bgzdh.2018.11.018

# 基于人工势场法的无人机群航路自主规划

魏博文, 邵长旭, 王茂森

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为实现无人机编队在指定空域完成从起始点到目标点间的自主路径规划, 且机群在该过程中具有良好的协同性和执行高效性, 提出了一种无人机群航路自主规划的方法并进行仿真。分析了机群个体的规划路径点及其特点, 并通过建立的数学评价体系对以上路径进行优劣性评估。仿真及评估结果表明: 该方案是正确和有效的, 并能对传统规划方案存在的固有缺陷进行较好的修正, 更利于现实中无人机群的实现。

**关键词:** 无人机; 人工势场法; 路径规划; 编队; 避障

**中图分类号:** TP3   **文献标志码:** A

## Autonomous Route Planning of UAV Group Based on Artificial Potential Fields

Wei Bowen, Shao Changxu, Wang Maosen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the UAV group can achieve autonomous route planning in designated airspace from the starting point to the target, moreover the system complete the task with the high level of synergy and efficiency, a new method of autonomous route planning of UAV group was presented. Analyze moving track points of the group and its characteristics, and estimate all the tracks by using established mathematical estimation model. The result of simulation and estimate reveal the method is correct and effective, moreover it optimize the conventional method of route planning with inherent defects, which is beneficial to the realization of UAV group in reality.

**Keywords:** UAV; artificial potential fields; path planning; formation; obstacle avoidance

### 0 引言

无人机广泛运用于公安、武警、消防、交通、海洋执法等领域。无人机单机存在难以执行大型任务、效率低下、携带能力和抗毁性较差等缺点<sup>[1-2]</sup>。对于军事侦查、多角度勘测等需要无人机协同配合的应用场景, 无人机群表现出了很大的优势<sup>[3-5]</sup>。当前有关无人机编队路径规划方案多基于“长机-僚机”模型<sup>[6]</sup>, 或类似的“集中式”控制思想<sup>[7-8]</sup>, 该类方案能在一定程度上解决无人机群在执行飞行任务中的协同性问题, 但由于机群中各无人机均需考虑集群中其他个体的所在位置及自身所应处队形中位置的基础上进行路径规划, 不仅在自主程度上有所不足且计算量会大大增加, 故该类方案不利于无人机群个体数目的扩大。笔者对无人机编队的自主避障及路径进行了研究, 基于人工势场法, 提出了一种适用于无人机群的自主路径规划方案。该方案中机群个体路径规划不依赖于整体, 可有效降低数据计算量及机间通信压力<sup>[9-10]</sup>, 且该方案引入了路径优化机制, 可有效避免路径中的抖动, 使飞行路径更加平缓。

### 1 基于人工势场法的无人机路径规划

#### 1.1 传统人工势场法原理概述

人工势场法是传统算法中较成熟且高效的规划方法, 其基本思想是将个体从起始点到目标点的运动设计成在一个人为假想的力场中自行运动的结果<sup>[11-12]</sup>。其中, 目标点对于个体的运动呈现吸引作用, 障碍点则对无人机呈现排斥作用, 类似还可设计任意有关与个体位置及姿态的相关影响作用。将以上所有影响作用正交合成则可获得总影响值。

人工势场法存在固有缺点: 不完善的势场方程会造成势场的局部极小值, 导致无人机路径的振荡、摆动<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.2 改进的基于人工势场法的单机规划

基于以上传统人工势场法的原理及存在的缺点, 笔者针对无人机个体规划方案中, 合力场  $F_n$  由目标点对无人机的引力场 ( $F_{ar}$ )、障碍物对无人机的斥力场 ( $F_{re}$ ) 这 2 个场正交合成后归一化, 取固定步长所得, 即

收稿日期: 2018-09-22; 修回日期: 2018-10-11

作者简介: 魏博文(1996—), 男, 江苏人, 本科, 从事多飞行器协同自主控制研究。

$$F_n = l \frac{F_{ar} + F_{re}}{|F_{ar} + F_{re}|}$$

其中： $F$ 为合力场； $l$ 为所设固定步长。应注意：因为存在多个障碍物，故斥力场由所有障碍合成产生。

考虑到无人机在实验过程中均以全速飞行，故飞行时间与距离呈线性关系。因路径规划的每一点即为无人机下一时间帧应处的位置，步长大小可反映此时无人机的速度。故取固定步长后，保证了无人机在该段飞行中不会发生帧与帧之间的速度震荡与跳变。

无人机的总场值随着无人机的位置而发生变化，无人机在总场的作用下向目标点运动。

### 1.2.1 目标引力场

目标引力场吸引无人机向目标方向运动，保证无人机可顺利到达目标点。笔者定义引力场如下：

$$F_{at} = K_a R P_a, \quad R > R_{r0};$$

$$F_{at} = K_a R_{r0} P_a, \quad R \geq R_{r0}.$$

其中： $K_a$ 为与环境及条件有关的设定系数值； $R$ 为无人机此时距目标点的距离大小。为防止无人机距目标点较远时，引力值过大影响规划，设定  $R_{r0}$  为目标点对无人机的最大影响范围，超过该距离时，目标点对无人机的引力值保持最大不再增加。 $P_a$  为单位方向矢量，方向由无人机所在位置指向目标点。由公式可见，引力大小与距离呈线性关系，距离越远引力越大。

### 1.2.2 障碍斥力场

障碍斥力场在无人机向目标点运动过程中对无人机进行排斥，使无人机避开障碍以免相撞，笔者定义斥力场如下：

$$F_{re} = K_r \sqrt{R} \left[ \frac{1}{r^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_{r0}} \right) + \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_{r0}} \right)^2 \right] P_r, \quad r < R_{r0},$$

$$Q_{re} = 0, \quad r \geq R_{r0}.$$

其中： $K_r$ 为与环境及条件有关的设定系数值； $R$ 为无人机此时距目标点的距离长短； $r$ 为无人机此时距该障碍点的距离长短； $R_{r0}$ 为无人机吸引力最大影响距离，当无人机距离某障碍物足够远时，会不再受到该障碍物的影响，故设置  $R_{r0}$  为障碍物最大影响距离，当无人机与障碍物距离大于此值时，斥力为 0； $P_r$  为单位方向矢量，方向由障碍物指向无人机所在位置。

考虑到飞行环境中会存在众多障碍物，在相邻

方向上，仅避开最近障碍物即可达到避障目的，无需考虑远处的障碍，故规定若在以无人机所在位置为圆心的  $15^\circ$  扇形范围内有若干个障碍物，则取距离无人机最近的一个计算排斥度，其余的不再计入。

## 2 无人机编队控制思想

将编队中所有无人机逐次编号，开始规划时，从编号为 1 的无人机开始，逐一进行第一时间帧时应处位置的规划。当编号为末尾的无人机完成该时间帧的规划后，重新开始从 1 号无人机的下一时间帧 ( $T=T+1$ ) 的路径规划，以此类推，直到所有无人机均到达目标位置。若其中某编号无人机已到达目标点，则跳过该无人机在本时间帧的规划。

为实现编队中所有无人机自主规划不与编队中其他无人机相撞，笔者提出一种改进方案：将障碍物坐标定义时添加 1 维时间参量  $T$ ，表示在某些特定时间帧中该障碍物存在。注意：一般由传感器探测到的障碍物，因无法确定存在时间，均定义为  $T \in (0, \infty)$ 。

当 1 号无人机完成任意时间帧  $T_x$  的路径规划后，将该点坐标 (带有时间参量  $T=T_x$ ) 加入障碍物信息中，即将该时刻该架无人机所处的位置视为其他无人机规划时应避开的障碍物。编队中其他无人机根据新的障碍信息完成规划后均要完成该步骤。注意：因带有时间参量，故该障碍仅在该时刻存在于该位置。

## 3 路径优化方案

已知无人机个体所采用的基于“人工势场法”的规划方法因势场方程选取存在不足，使大转角在某些情况下陷入最小值，导致路径点的抖动缺陷。为避免其导致的不良影响，笔者采用一种修正方案对由无人机规划出的路径进行修正。

1) 设路径起始的相邻 3 点为  $A(X_1, Y_1, Z_1)$ 、 $B(X_2, Y_2, Z_2)$ 、 $C(X_3, Y_3, Z_3)$ ， $O$  为  $A$ 、 $C$  中点。若  $\angle CBA$  角度大于某设定值，则将  $B$  点坐标替换为  $B'$  点即  $B$ 、 $O$  中点，修正示意如图 1 所示。

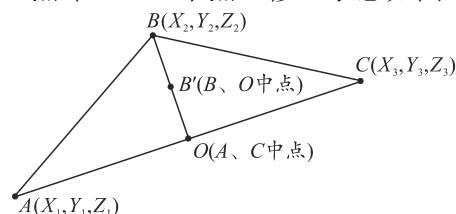


图 1 路径修正方案

设定值可由调试情况调整；若不大于该设定值，

则该 3 点均保持不变。

2) 向下滑动一点,取下面 3 点  $B$  (或  $B'$ )、 $C$ 、 $D$  重复 1)进行修正。

3) 始终向下滑动一点重复以上 1)、2) 直至完成本条路径所有点的修正。

4) 再次重复 1)–3), 进行该线的再次修正, 直至该线任意一点均不再需要修正, 则完成该线的全部修正工作。

需要注意的是: 该修正会使路径在修正点处的步长有所下降, 即飞行速度的下降。但下降程度仅取决于该段转角大小, 相邻路径点转角越大, 步长被修正值越小, 故速度的上升与下降均为平缓变化, 不会产生突变, 即不会对飞行稳定性造成影响, 同时还可避免在飞行路径转弯过大处因飞行速度过大而造成危险与飞行误差。

### 4 评价体系

为了便于直观地评价某一条路径的优劣, 笔者采用了一种评价度函数通过路径的几项参数对该路径进行评分。其规则为:

1) 获取一条路径的所有离散点, 通过公式计算对其量化评分, 分数越低者特性越好。其评价指标

包括: “总长度” “危险度” “平缓度”。

总长度: 相邻两点连接, 求和得总长度  $Y_1$ 。

危险度: 取该路径的第一点, 计算其到所有  $n$  个静态障碍物的距离, 记为  $d_1 - d_n$ 。取其倒数并求和记为  $D_1$ 。将所有  $m$  个路径点均做此计算, 得到  $D_1 - D_m$  并将其求和, 获得危险度数值  $Y_2$ 。

平缓度: 取路径点的起始 3 点  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ , 计算该 3 点两线夹角记为  $\varnothing$ , 计算  $\frac{1}{\varnothing} - \frac{1}{\pi}$  得  $S_1$ , 向下滑动一点, 同样方法计算得  $S_2$ , 依次向下滑动, 直至完成全部  $m$  个点的计算得到  $S_1 - S_{m-2}$ , 对其求和得平缓度数值  $Y_3$ 。

2) 将  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  三者归一化, 并设置系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ , 则优劣度评分  $SC$  为  $SC = K_1S_1 + K_2S_2 + K_3S_3$ 。

3) 将机群所有  $N_u$  架无人机的路径评分  $SC_1 - SC_{N_u}$  求和得到本机群的优劣的评分  $S_a$ 。

### 5 仿真与分析

为证明该方案的可行性, 采用 Matlab 2015 对其进行仿真。流程如图 2 所示。

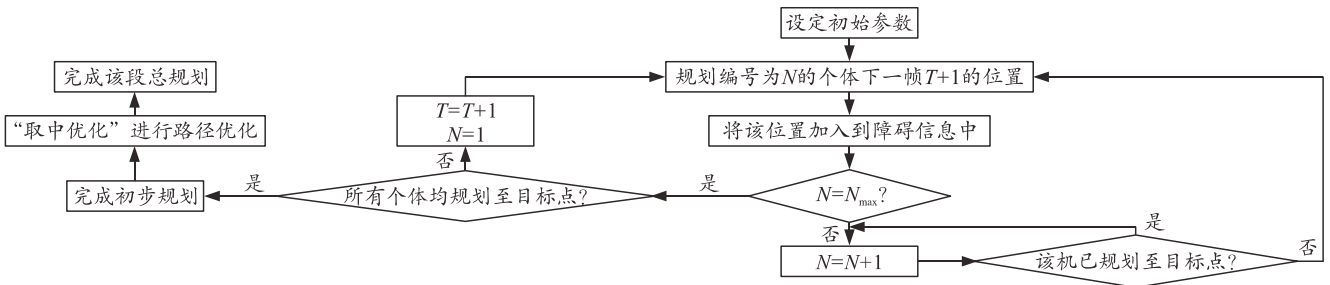


图 2 仿真流程

初始设定值如下:

设有机群有无人机 9 架, 即  $N_u=9$ , 排为  $3 \times 3$  的矩形阵。为便于描述, 将无人机编号, 左下角为 1 号, 右上角为 9 号, 以此类推。1 号无人机起始点为坐标原点(0,0)、目标点坐标为(15,15); 设置 9 个障碍点, 坐标分别为: (4,3)、(4,4)、(4,5)、(5,3.5)、(5,4.5)、(5,5.5)、(5.5,4)、(5.5,5)、(6,4)、(6,5)、(6,6)。

以上障碍点视为在规划过程中始终存在, 故时间参量均为  $T \in (0, \infty)$ 。

优化前路径规划如图 3 所示, 空心方块为无人机群路径起始位置, 空心圆为障碍物所在位置, 当 4 号无人机处于  $T=195$  的时间, 其当前所处坐标点位置为(4.761 5, 4.111 5), 该点右上相邻  $15^\circ$ 内存在

障碍物 A、B, 根据以上原则, 仅取较近的障碍物 A 计算排斥度。

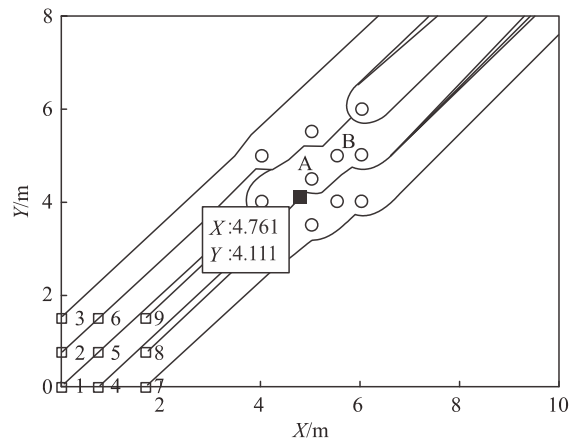


图 3 障碍物选择

该无人机在确定的运动方向上运动一个时间帧的固定步长，得到下一时刻的位置坐标，并将该位置坐标加入下一待规划无人机的障碍点集合；将上述 4 号无人机处于  $T=195$  时间所有吸引度和排斥度矢量进行正交，并在该合矢量方向上运动一个时间帧的固定步长，得到下一时间  $T=196$  的位置坐标

(4.783 9, 4.131 5)如表 1 所示。

表 1 4 号无人机路径点坐标(部分)

时间帧	195	196
坐标	(4.76, 4.11)	(4.78, 4.13)

如表 2 所示，将该位置坐标加入下一待规划 5 号无人机的障碍点集合中。

表 2 5 号无人机障碍点坐标

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
坐标	(4,3)	(4,4)	(4,5)	(5,3.5)	(5,4.5)	(5,5.5)	(5.5,4)	(5.5,5)	(6,4)	(6,5)	(6,6)	(3.73,4.23)	(4.17,4.72)	(4.02,5.70)	(4.76,4.11)

表 2 中：序号为 15 的坐标即为 4 号无人机规划后所加入的障碍点信息；序号 1~11 为固定障碍物坐标信息，序号 12~14 为 1~3 号无人机规划后所加入的障碍点信息。

人工势场仿真结果如图 4—6 所示，可见斥力与引力的影响情况满足方程所要求效果。合成场如图 6 所示，可见在障碍物附近两场叠加会造成出现一定的极小值，造成仿真路径规划在障碍物附近的较大震荡。

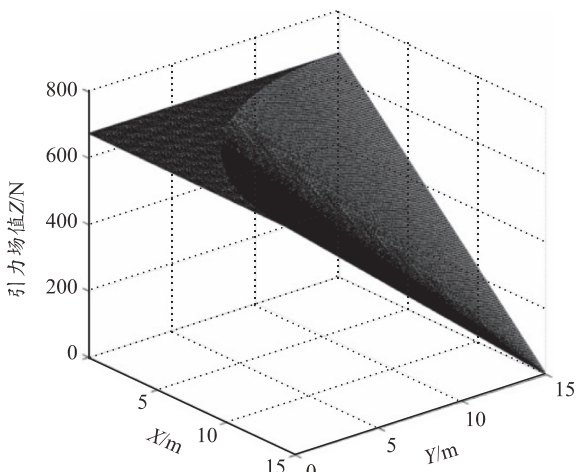


图 4 引力场仿真

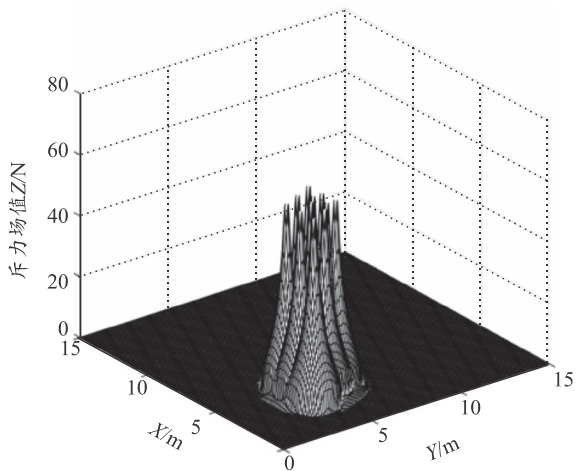


图 5 斥力场仿真

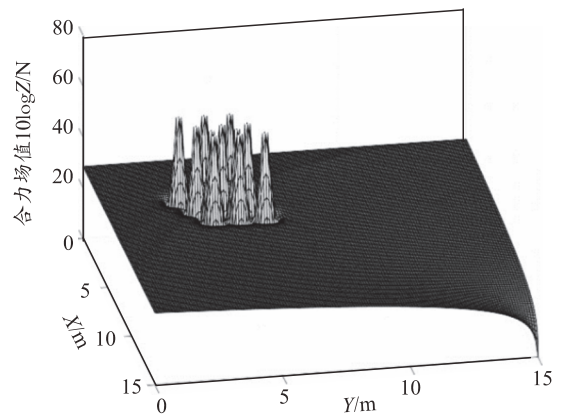


图 6 合力场仿真

优化前路径规划仿真图如图 7 所示，可观察到在障碍附近处有较大转角且有抖动。其各路径评分如表 3 所示，可见 1、4 号无人机因上述不稳定导致评价价值较明显高出其他无人机。

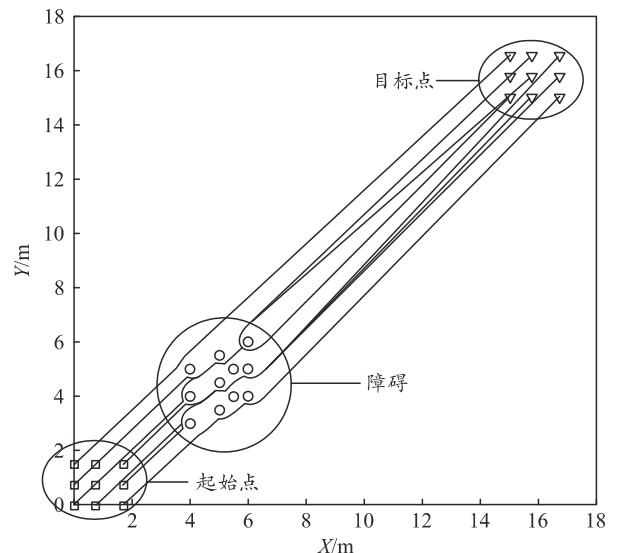


图 7 优化前路径规划仿真

表 3 路径优化前评分

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总分
评分	303.3	12.6	1.8	109.8	32.8	10.5	3.4	12.6	11.7	498.5

故采用以上方案进行路径优化。优化后仿真如



图 8 所示，可以观察到优化后的规划路径在平缓程度上大大提高，不再有大转角与震荡。其各路径评分如表 4 所示，可见相较于优化前的各路径，评分大大降低，即在 3 个指标上得到了较大提升。

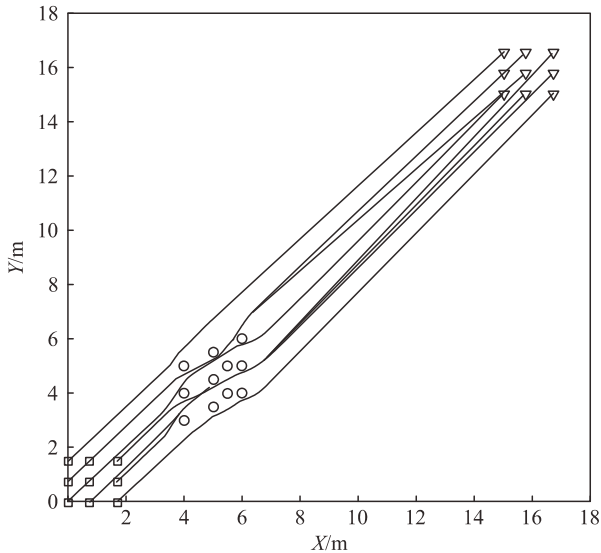


图 8 优化后路径规划

表 4 路径优化后评分

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	总分
评分	2.9	2.6	1.8	2.8	2.7	2.6	2.4	2.9	2.8	23.5

将以上思想拓展到 3 维坐标系中，修改仿真程序得到如图 9 所示 3 维路径规划仿真结果。从图中可见：在模拟现实的 3 维条件下，且障碍物数量、密度都大大提升的情况下，无人机仍可顺利避开障碍到达目标点。

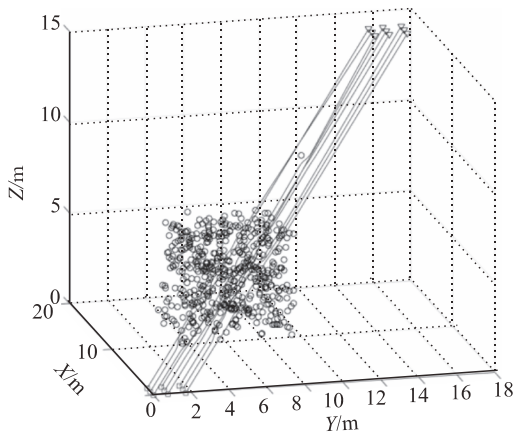


图 9 3 维路径规划仿真

## 6 结论

笔者提出一种基于“人工势场法”的无人机编

队自主路径规划方法，引入时间变量，将无人机视作动态障碍便于处理，且引入了路径优化方案对路径存在的大转角及震荡进行优化，能够保证无人机编队顺利躲避障碍到达目标点。仿真实验从 2 维及 3 维角度对其进行验证，证明了其可行性与优势。

## 参考文献：

- [1] PROUD W, PACTHER M D, AZZO J. Close formation flight control[R]. AIAA Guidance Navigation and Control Conference AIAA-99-4207, 1999: 1231-1246.
- [2] 朱战霞, 袁建平. 无人机编队飞行问题初探[J]. 飞行力学, 2003, 21(2): 5-7, 12.
- [3] 杨帅, 程红, 李婷, 等. 无人机侦察图像目标定位在军事上的应用研究[J]. 红外技术, 2016, 38(6): 467-471.
- [4] KARIMODDINI A, LIN H, CHEN B M. Hybrid three-dimensional formation control for unmanned helicopters[J]. Automatica, 2013, 49(2): 424-433.
- [5] 李文皓, 张珩. 无人机编队飞行技术的研究现状与展望[J]. 飞行力学, 2007, 25(1): 9-11, 18.
- [6] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升, 等. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(4): 505-509.
- [7] 刘楚豪. 基于集中式控制的多个无人飞行器编队[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(z1): 481-485.
- [8] 零度智控(北京)智能科技有限公司. 无人机编队路径自动规划方法及装置: 中国, 201610591505. 9 [P]. 2016-11-16.
- [9] 袁杰波, 杨峰, 张共愿, 等. 无人机编队飞行导航方法及其仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 64-67.
- [10] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升, 等. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(4): 505-509.
- [11] AHMAD A M. Decentralized self-organizing potential field-based control for individually motivated mobile agents in a cluttered environment: a vector-harmonic potential field approach[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2007, 37(3): 372-390.
- [12] 彭建亮, 孙秀霞, 蔡满意, 等. 基于人工势场的防空威胁建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 338-341, 409.
- [13] 张殿富, 刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(6): 88-95.
- [14] SATO K. Deadlock-free motion planning using the Laplace potential field[J]. Advanced Robotics, 1993, 7(5): 449-461.