

采用病毒粒子群优化算法的飞行器航迹规划

吴天爱¹, 吴云玉², 别晓峰¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 山东航空股份有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对飞行器航迹规划问题,对基本粒子群算法进行了改进,提出一种基于病毒粒子群优化算法的飞行器航迹规划方法。该方法结合生物病毒进化系统理论,在基本粒子群算法中引入病毒种群,通过执行反向代换和转导算子两种操作,利用病毒的水平感染和垂直传播能力来维持主群体粒子种群和病毒种群之间的信息交换,保证了航迹规划中粒子个体的多样性,提高了算法的局部搜索能力,解决了基本粒子群优化算法容易使粒子陷入局部最优、收敛速度慢的问题。仿真实验结果表明,在相同的约束条件下,所提出的方法能够更快更有效地生成满足要求的航迹。

关键词: 飞行器; 航迹规划; 病毒粒子群算法; 病毒感染

中图分类号: V271.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0102-04

Aircraft Path Planning Based on Virus-Evolutionary Particle Swarm Optimization Algorithm

WU Tian-ai¹, WU Yun-yu², BIE Xiao-feng¹

(1. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Shandong Airline Co. Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at the path planning problem of aerial vehicles with unexpected threats, a virus-evolutionary particle swarm optimization algorithm (VEPSO) is proposed based on basic particle swarm algorithm. Combined with the theory of the biological virus-evolutionary system, a biological virus mechanism is introduced in the basic particle swarm, and two kinds of infection-based operation, reverse substitution and incorporation operation, are executed. The horizontal infection and vertical propagation of virus are used to maintain the individual diversity of the particles in path planning, thus the local search capability of the algorithm is enhanced, and the problems of local optimum and the slow convergence speed are solved. Simulation results show that the VEPSO algorithm is faster and more effective under the same path constraints.

Key words: aerial vehicle; path planning; virus-evolutionary particle swarm optimization algorithm; virus infection

0 引言

飞行器航迹规划是指在综合考虑飞行器自身性能以及战场环境等约束的条件下,寻找一条从起始点到目标点的最优或可行的飞行航迹^[1-2]。航迹规划是提高飞行器生存概率和作战效能,对敌方实施远程精确打击的一种有效手段^[3]。目前比较常见的研究方法主要有:动态规划法、最速下降法、启发式搜索法、概略图法、A*算法、人工势场法,以及以遗传算法、粒子群算法、蚁群算法为代表的智能优化算法等^[4-7]。这些方

法各有优缺点。尤其对于计算智能方法而言,具有搜索速度快、精度高的优点,但早熟收敛是影响算法性能和寻优效果的主要问题之一。例如,基本粒子群算法^[8](Particle Swarm Optimization, PSO)是一种模拟鸟群寻食仿生的智能进化算法,原理简单、调整参数少,易于实现,非常适合于对飞行器航迹规划这种实时性要求较高的复杂问题进行求解,但算法存在易陷入局部最优、出现早熟收敛现象。许多学者对 PSO 算法进行了改进,例如:文献[9]提出了一种带有混沌变异算子的量子粒子群优化算法;文献[10]提出了一种自适应的粒子群优化算法;文献[11]提出了一种用改进变异粒子群算法实现突发威胁下的无人机航迹规划算法等。这些算法大多着眼于 PSO 的参数选择或某个参

数的动态修改策略,难以克服标准 PSO 算法易陷入局部极值的弱点。受生物病毒系统启发,对基本粒子群算法进行改进,本文提出了一种基于病毒粒子群优化算法的飞行器航迹规划方法,解决了粒子群算法在寻优过程中易陷入局部最优的问题,提高了算法的收敛效率,并通过仿真试验对所提方法进行了分析验证。

1 问题描述

飞行器航迹规划问题一般可描述为:设定敌方威胁、地形、障碍以及飞行器自身性能等约束条件,求解一条从起始点到达目标点的可行航迹,并且在某种性能指标函数的度量下是最优的,即付出的代价最小。航迹规划建模流程如图 1 所示,输出结果为一条从起点到终点的可飞最短路径。

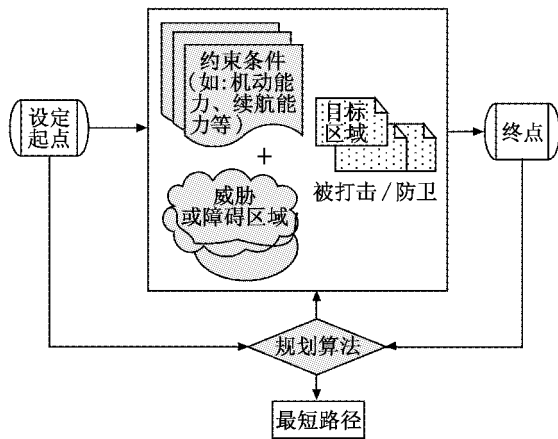


图 1 航迹规划建模流程图
Fig.1 Path plan modeling process

2 基本粒子群算法

基本粒子群算法是由 Eberhan 博士和 Kennedy 博士在 1995 年提出的模拟鸟类觅食行为的一种群体智能优化搜索算法^[8]。其基本思想是将问题解空间中的一个可行解看作是一个搜索粒子,并将其延伸到 N 维空间,每个粒子追随当前的最优粒子在解空间中搜索,即通过迭代找到最优解。算法主要通过跟踪两个位置来决定自己下一步的飞行,一个是粒子本身所找到的最优解 P_{best} ,即个体最好位置;另一个是整个群体中所有粒子当前找到的最优解 G_{best} ,即全局最好位置,最终群体成员逐渐移入问题空间的更好区域。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值,每个粒子还有一个决定它们飞行方向和距离的速度。

PSO 算法在运行过程中,随机产生一个初始种群并赋予每个粒子一个随机速度,在每一代对第 i 个粒子在第 j 维 ($1 \leq j \leq D$) 根据式(1)~式(3)来更新每个粒子的速度和位置。

$$v_{ij}(k+1) = w(k)v_{ij}(k) + c_1r_1(p_{ij}(k) - x_{ij}(k)) + c_2r_2(g_j(k) - x_{ij}(k)) \quad (1)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \quad (2)$$

$$w(k) = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{i_{max}}k \quad (3)$$

式中: $j=1,2,\dots,D$; c_1, c_2 为常数,称为学习因子; r_1 和 r_2 是 $[0,1]$ 上的随机数; $w(k)$ 为惯性权重, k 表示第 k 代粒子; i_{max} 为最大进化代数; w_{min} 和 w_{max} 为 $w(k)$ 的取值范围。

3 病毒粒子群优化算法

粒子群优化算法设计的核心思想是寻优过程靠粒子间的相互作用和相互影响来完成,但是粒子自身不具备变异能力,当粒子陷入局部极值时,只有借助于其他粒子来逃逸局部极值点。当所有粒子均受到同样的局部极值限制时,粒子群优化算法的寻优速度就会变慢,并且到了搜索后半阶段,由于全部粒子均趋向于局部最优,所有粒子聚集在全局最艰险位置的周围,可能会出现所有粒子的 G_{best} 、每个粒子的 P_{best} 和每个粒子的当前位置趋向同一点现象,整个粒子群慢慢丧失其多样性,不利于产生新的优质粒子,易于陷入局部极值,出现“早熟”收敛的现象。

本文受生物病毒进化系统理论启发,利用病毒的水平感染和垂直传播功能机制,在基本粒子群算法产生的粒子群主群体基础上引入病毒群体,提出基于病毒粒子群优化算法。算法的核心思想是,利用基本粒子群算法进行求解空间的全局搜索,在病毒群体中通过执行反向代换和转导操作使两种病毒感染操作,在同代个体之间横向感染进化基因,在跨代个体之间垂直传递进化基因,进行求解空间的局部搜索。联合基本粒子群优化算法的全局进化和病毒进化机制,保证航迹规划中粒子求解个体的多样性,避免算法过早陷入局部最优。

3.1 航迹规划空间下粒子群主群体编码及适应度函数设计

3.1.1 粒子群主群体编码

主群体粒子编码参照文献[12]所述的二维平面粒子编码方式,如图 2 所示。

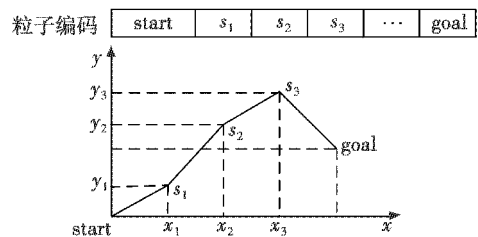


图 2 粒子编码示意图

Fig.2 Schematic map of particle coding
编码方式表示每个粒子由一系列的坐标点 $(x_{ij},$

y_{ij}) 构成, 每个粒子代表航迹规划空间中的一条路径, 每个粒子的起点和终点保持不变, (x_{start}, y_{start}) 为规划起点的坐标, (x_{goal}, y_{goal}) 为规划终点的坐标。每个粒子初始位置的确定详见文献[12]。

3.1.2 粒子群主群体适应度函数设计

1) 粒子群主群体适应度函数构造。

进行飞行器航迹规划的目标, 就是在满足飞行器物理性能约束和具体飞行任务约束的前提下, 生成超低空地形跟踪、地形回避、威胁回避的飞行轨迹, 以提高飞行器生存概率。建立的代价函数^[13]为

$$C = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} (w_1 l_i + w_2 h_i + w_3 f_i) \quad (4)$$

代价函数 C 主要考虑飞行器的航程代价和威胁代价, 代价值越小说明规划算法越稳定高效。其中: l_i 为第 i 段路径距离约束, 其作用是缩短飞行距离, 减少油耗和飞行时间; h_i 为第 i 段航迹段的平均高度, 确保飞行器的安全飞行; f_i 为第 i 段航迹段的威胁指数, 其作用是使航迹选择威胁最小的区域; w_1, w_2, w_3 分别为航迹段长度、平均飞行高度、威胁指数所对应的权重系数; n 为粒子编码方式中的等分数。

2) 航迹约束。

一般地, 航迹规划中生成的航迹应当满足最小航迹段长度约束、最大转弯角约束、最大爬升/俯冲角、航迹距离约束和飞行高度限制。在满足这些约束的条件下, 求解式(4)的最小值, 即完成航迹规划问题。

3.2 病毒群体编码及初始生成操作

病毒个体粒子编码: 病毒个体粒子产生于粒子群主群体粒子中, 从主群体粒子中采集并向主群体传播其寻优过程中更有利的模式块。采用的编码方式为变长实值方式。利用数据结构链表表示带病毒的种群, 其中头节点包含 3 个参数, 分别是反向代换概率 P_{copy} , 转导概率 P_{cut} , 病毒活力 V_{life} , 用于控制病毒的感染行为。反向代换概率 P_{copy} 负责随机挑选一个病毒个体来替换主群体粒子, 转导概率 P_{cut} 负责控制病毒种群自身的进化。病毒活力 V_{life} 决定病毒个体的生存能力。链表中后继节点包含指针域和指示规划空间中某一特定位置的坐标字段 (x_i, y_i) , 所有后继节点依次连接构成的坐标序列轨迹表达了病毒群体所携带的进化信息。

病毒种群初始化的目的是建立病毒种子库, 算法中设定病毒种群由长度不等 (节点数一般为 2 ~ 5 个) 的病毒个体组成。初始化步骤如下所述。

1) 设定病毒的头节点并赋初值。

2) 随机选取粒子群主群体中的一个粒子, 判定该粒子上是否包含可行的航迹段, 如果包含, 将其定位为第一个可行引导段的位置, 然后利用该引导段上引导

点的坐标值为病毒节点赋值, 并将其链接到头节点后面, 重复此过程直到没有可行的航迹段或者病毒种群的长度达到 5; 如果不包含可行的航迹段, 定位主群体粒子中适应度函数值最小的航迹段, 将该段构成长度为 2 的病毒个体。

3) 以起始点 - 终点向量 ν 为基点, 对链表中所有节点按 ν 有序进行排序, 得到一个病毒个体。

4) 重复上述步骤 1) ~ 3), 直至生成整个病毒种群。

3.3 病毒感染操作

病毒感染操作的目的是利用病毒群体的粒子位信息替换粒子群主群体中相应的粒子位信息, 从而产生新的粒子群主群体个体。病毒群体集合中的每个病毒个体以概率 P_{infect} 感染进化种群中被选出的主群体个体, 然后评价病毒更新前后的效果, 评价结果的优劣决定了病毒的感染活性, 失去感染活性的个体随后将经过转导过程, 从主群体个体获得新的基因片段, 使病毒重新具有感染活性。整个感染过程利用反向代换和转导算子实现。

3.3.1 反向代换算子

反向代换算子用于将病毒个体携带的节点坐标代替主群体个体中的一部分节点坐标。代换过程主要分为 3 步: 1) 选择部分主群体供病毒种群代换; 2) 生成病毒种群反向代换航迹; 3) 评价病毒反向代换结果。具体操作流程如图 3 所示。

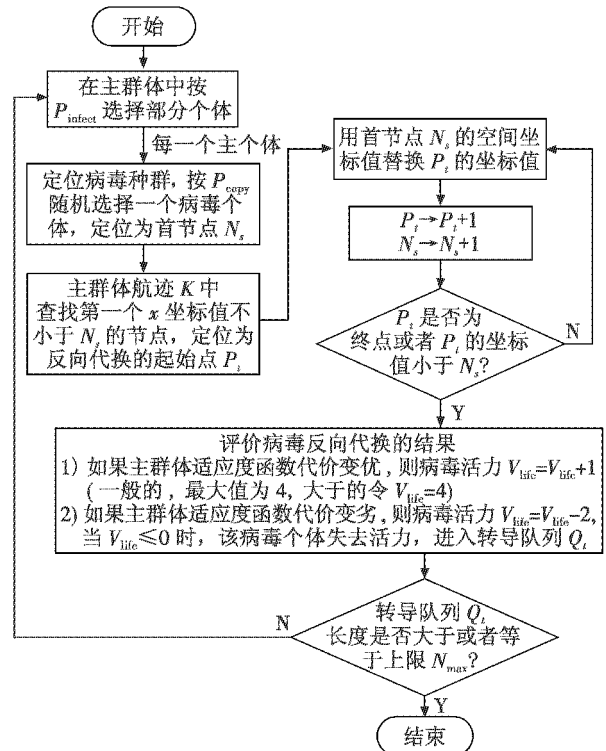


图 3 反向代换过程

Fig. 3 Reversed substitution process

3.3.2 转导算子

转导算子用于病毒种群实现自身的进化。核心思想是病毒从较优的主群体中剪切部分个体基因作为新的个体携带基因。具体操作流程如图 4 所示。

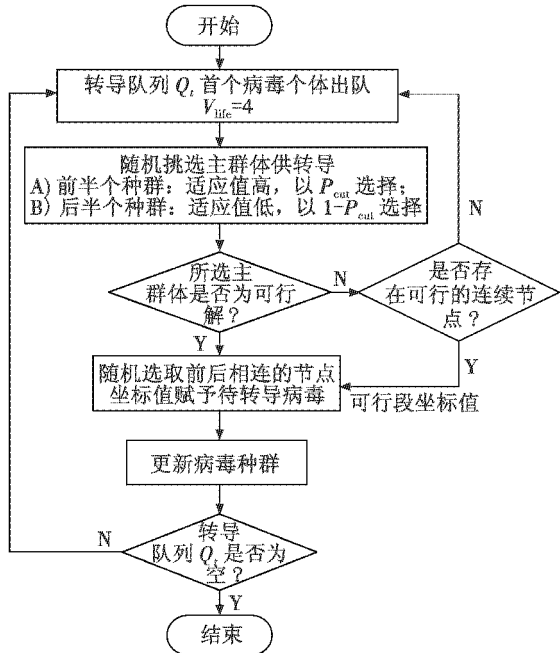


图 4 转导过程

Fig. 4 Incorporation process

3.4 基于病毒粒子群优化算法的航迹规划算法步骤

1) 定义航迹规划的搜索空间为粒子空间,并随机初始化粒子群,产生粒子个数为 N ,其位置分别是 X_1, X_2, \dots, X_N ,设定变量维的最大速度 v_{max} 、最大最小惯性权重为 w_{max} 和 w_{min} 、加速度系数 c_1 和 c_2 、最大迭代次数 i_{max} 等;

- 2) 初始化病毒粒子群;
- 3) 利用式(4)对每一个粒子的位置优劣进行评价;
- 4) 更新粒子个体及全局的最好位置;
- 5) 按照速度更新公式更新粒子操作;
- 6) 按照位置更新公式更新粒子位置;
- 7) 利用反向代换算子和转导操作算子实施病毒感染过程;

8) 在最大迭代次数 i_{max} 内重复步骤 2) ~ 8), 输出一条最优航迹,算法结束。

4 仿真实验

在 Matlab 环境下通过固定粒子群规模、粒子维数及最大迭代次数,用基本粒子群算法和基于病毒粒子群的优化算法分别在 PC 机上进行了仿真实验,仿真环境中把威胁区域用 5 座模拟山峰表示,航迹搜索空间设置为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的区域。算法实验中所用相关参数值为:群体规模 $N = 30$,最大进化代数 $i_{max} =$

$500, w_{max}$ 取 $0.9, w_{min}$ 取 0.1 ,加速常数 c_1, c_2 取为 2 ,代价函数中权系数取为 $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ 。分别使用标准粒子群算法和威胁启发粒子群算法进行相同参数设置下的无人机航迹规划,如图 5 所示,实线路径表示病毒粒子群优化算法的结果,虚线路径表示标准粒子群算法的输出结果。从仿真结果可知,在相同的环境条件下,采用病毒粒子群优化算法比标准粒子群算法能找到更平滑的飞行路径。同时,分别对相同约束条件下两种算法的时间复杂度进行了对比,提出的病毒粒子群优化算法相比基本粒子群算法提高了 66.2% 。图 6 所示的适应度值变化曲线表明病毒粒子群优化算法获得的适应度值找到可行解需要的迭代次数更少,并能够更快更好地找到通过目标位置的最优路径,收敛速度和收敛精度都优于标准粒子群算法。这表明引入病毒感染机制能够增强主群体粒子的多样性,避免标准粒子群算法过早陷入局部最优,有效提高了航迹规划算法的稳定性。

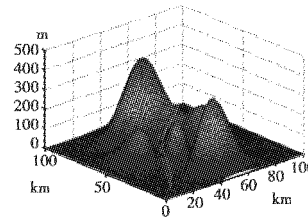


图 5 三维航迹规划图
Fig. 5 Three-dimensional route planning

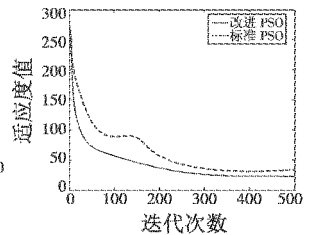


图 6 适应度值变化曲线
Fig. 6 Fitness curves comparison of two methods

5 结论

利用病毒感染机制,对基本粒子群算法进行了改进,提出了基于病毒粒子群优化算法的飞行器航迹规划算法,并给出了仿真实验结果。仿真结果表明,利用病毒所具有的水平感染和垂传播两大特性,有效避免了粒子群算法过早陷入局部最优的问题,改善了粒子群算法的全局搜索能力,提高了飞行器航迹规划的效率。

参考文献

[1] 闵昌万,袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学,1998,16(4):14-19.
MIN C W, YUAN J P. Introduction of military aircraft route planning[J]. Flight Dynamics, 1998, 16(4):14-19.

[2] 严平,丁明跃,周成平,等. 飞行器多任务在线实时航迹规划[J]. 航空学报,2004,25(5):1-4.
YAN P, DING M Y, ZHOU C P, et al. On-line real-time multiple-mission route for air vehicle[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2004, 25(5):1-4.

(下转第 109 页)

- WANG Y J. Studies of jamming against the radar based on linear frequency modulation signals and the digital jamming synthesis[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [4] 杨绍全, 张正明. 对线性调频脉压雷达的干扰[J]. 西安电子科技大学学报, 1991(3): 24-30.
YANG S Q, ZHANG Z M. Jamming of LFM pulse compression radar [J]. Journal of Xidian University, 1991(3): 24-30.
- [5] 刘忠. 基于 DRFM 的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
LIU Z. Jamming technique for countering LFM pulse compression radar based on digital radio frequency memory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [6] 吕波, 冯起, 袁乃昌. 对 LFM 脉冲压缩雷达的移频压制干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 9-12.
LÜ B, FENG Q, YUAN N C. A study on frequency-shifting blanket jamming to LFM pulse-compression radar [J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 9-12.
- [7] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对合成孔径雷达的脉间分段移频干扰[J]. 航天电子对抗, 2010(1): 53-57.
WU X F, WANG X S, LU H Z. Interpulse subsection-shift-frequency jamming to SAR [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010(1): 53-57.
- [8] 束礼宝, 宋克柱, 王砚芳. 伪随机数发生器的 FPGA 实现与研究[J]. 电路与系统学报, 2003(6): 121-124.
SHU L B, SONG K Z, WANG Y F. The implementation and research on pseudo random number generators with FPGA [J]. Journal of Circuits and System, 2003(6): 121-124.
- [9] 王会华, 李宝平. m 序列发生器的设计与实现[J]. 北京电子科技学院学报, 2007, 15(2): 58-61.
WANG H H, LI B P. Design and realize of m sequence generator [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2007, 15(2): 58-61.
-
- (上接第 101 页)
- 外与激光工程, 2004, 33(2): 164-168.
ZHANG C, ZHANG T X. Research on detection and recognition method of moving targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 164-168.
-
- (上接第 105 页)
- [3] 高晖, 陈欣, 夏云程. 无人机航迹规划综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 35-38.
GAO H, CHEN X, XIA Y C. Introduction of route planning for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(2): 35-38.
- [4] SURESH M, GHOSE D. Role of information and communication in redefining unmanned aerial vehicle autonomous control levels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224(2): 171-197.
- [5] ARMANDO A N, MACHARET D G, CAMPOS M F M. On the generation of trajectories for multiple UAVs in environments with obstacles [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2010, 57(1-4): 123-141.
- [6] SVEN K, MAXIM L. Real time adaptive A* [C] // Proceeding of the International Conference on Autonomous Agents, Hakodate, Japan, ACM, 2006: 281-288.
- [7] 李璠, 郝应光. 基于改进混沌遗传算法的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2012, 19(8): 15-19.
LI F, HAO Y G. Path planning of UAVs based on improved chaotic genetic algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(8): 15-19.
- [8] 熊辉, 沈振康, 魏急波, 等. 低信噪比运动红外点目标的检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 26-29.
XIONG H, SHEN Z K, WEI J B, et al. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 26-29.
-
- [8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the IEEE International conf on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE, 1995: 1942-1948.
- [9] COELHO L D S. A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37(5): 1409-1418.
- [10] JIN Y S, KNOWLES J, LU H M, et al. The landscape adaptive particle swarm optimizer [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 295-304.
- [11] 刘月, 魏瑞轩, 刘敏, 等. 用改进变异粒子群算法实现突发威胁下的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2010, 17(1): 22-25.
LIU Y, WEI R X, LIU M, et al. Path planning of UAVs based on improved variant PSO algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(1): 22-25.
- [12] 于会, 于鑫, 李伟化. 基于粒子群优化算法的航迹规划与重规划[J]. 计算机工程, 2009, 35(15): 206-207.
YU H, YU X, LI W H. Route planning and re-planning based on PSO algorithm [J]. Computer Engineering, 2009, 35(15): 206-207.
- [13] 郑昌文. 飞行器航迹规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
ZHENG C W. Research on air vehicle path planning algorithms [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.