

## 基于优化的电势理论规划三维飞行路径

刘丽峰<sup>1,2</sup>, 张树清<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(hebeiliu@163.com)

**摘要:**利用优化的电势理论进行飞行器三维航迹规划。对电势理论进行了优化,使其既能回避雷达、火力威胁,又能有效地回避地形威胁,使规划出的三维航迹具有一定的实用性。根据突防任务的需要,确定地形威胁与雷达、火力威胁的权重,并将模拟地形的高程数据与雷达、火力威胁按各自的权重叠加得到综合威胁电场;通过限定位于起始点和目标点之间的搜索范围,并对搜索条件进行改进,保证飞行路径最终能收敛于目标点;最后,用坡度限制平滑算法、曲率限制平滑算法对航迹进行法向加速度和曲率限制使其符合飞行器机动性能和可飞性要求。仿真结果表明,优化的电势理论可以进一步考虑地形威胁,而且在能够考虑目标点附近的各种威胁,提高了该方法的实用性,还能缩短航线规划的时间。

**关键词:**电势理论;综合威胁场;三维航迹规划;高程矩阵

**中图分类号:** TP202.7 **文献标志码:** A

## 3D flight path planning based on optimized potential field theory

LIU Li-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-qing<sup>1</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130012, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An improved potential field theory was used to plan three dimensional paths for airplane. The potential field theory was optimized with the aim of effectively evading not only radar threat and fire threat, but also terrain threat, which made three dimensional flight path planning have certain practicality. Simulated terrain elevation data was overlapped with radar threat and fire threat in accordance with their weights respectively to form integrated threat electric field, and the weights of terrain threat and radar threat, fire threat were determined according to the needs of given penetration task. Through locating the search area between start point and end point, it is ensured that the final flight path can be restrained on end point; at last, the above paths were smoothed by gradient smooth algorithm and curvature smoothing limitation algorithm on acceleration and curvature, so that the performance of paths can be in line with the requirements of maneuverability and flying. The simulation results show that the optimal potential field theory can further consider terrain threat and other threat (radar threat and/or fire threat) near end point, which improves the method's practicability, and deduces the planning time.

**Key words:** potential field theory; comprehensive threats field; 3D flight planning; elevation matrix

## 0 引言

随着先进防空技术的不断发展,地面防御体系的日臻完善,单纯依靠人工方式规划的航迹时代已经难以达到突防的目的。为了提高现代飞行器的生存能力和完成任务的效率,突防用飞行器需要研究低空突防航迹规划的实用方法。

如何在复杂的地形、气候、各种火力威胁的环境下找出一条生存率最高的突防路线是低空突防的基本要求。飞行器航迹规划要实现地形跟随、地形回避和威胁回避的飞行,其目的是充分利用已知的地形和威胁信息进行航迹规划。同时由于飞行器航迹规划的区域广阔,形成一个巨大的搜索空间,通常的搜索算法要获得一条最优路径需要很长的收敛时间和极大的内存空间,对于实时应用是不现实的<sup>[1]</sup>。

任务规划系统作为精确制导武器必不可少的支持工具,是提高武器系统实际作战效能的关键技术之一,备受世界各国的关注<sup>[2]</sup>。

## 1 电势理论及优化

### 1.1 电势理论

电势理论属于梯度寻优算法,选取惩罚函数的梯度方向

作为优化方向来逼近极值,算法结构简单、速度快。将整个突防区域看做一个电场,从起点到终点的场强方向为步进方向选出最优航路。将飞行器设为在电场中带正电的点电荷,雷达、火力和地形威胁设为带正电的带电体,根据同性相斥的原理,可以保证飞行器能有效地回避威胁;同时,将目标点的电荷取负无穷,根据异性相吸的原理保证航线收敛于目标点。由于该算法在搜索过程中,只用当前位置邻近诸点的信息,计算速度快,还可以处理动态威胁信息。

此算法也有以下不足:1)在航线规划的过程中仅考虑了雷达、火力威胁,没有记入对飞行安全具有重大影响的地形威胁;2)由于该方法把目标点设为负无穷大,使得在目标点附近不可能考虑任何威胁信息,而实际上目标点附近往往有最多的防御系统,减少了该方法的实用性;3)此算法容易陷入局部最优;4)未涉及飞行器的机动性能<sup>[2]</sup>。

### 1.2 电势理论的优化

本文在文献[1]的基础上,对电势理论进行了优化:1)加入地形威胁。通过模拟山峰函数获得地形分布矩阵,与已有的雷达、火力威胁电场按任务需要设定的权重值叠加生成综合威胁电场。2)缩小搜索范围。在搜索过程中,限制了搜索

收稿日期:2010-07-08;修回日期:2010-08-20。

作者简介:刘丽峰(1976-),女,河北武安人,博士研究生,主要研究方向:地图学与地理信息系统;张树清(1963-),男,吉林长春人,研究员,博士,主要研究方向:地图学与地理信息系统。

范围为自起始点到目标点之间的区域,并且在搜索函数中加入了到目标点距离的限制,可以加快优化的速度。3)未将目标点电荷设为负无穷大。不将目标点设为负无穷大的电荷,这使得在目标点位置回避雷达、火力和地形威胁成为可能。4)加入飞行器的机动性能限制。在航迹优化过程中,综合考虑了飞行器的机动性能,给出较实用的航迹规划方法。5)避免陷入局部最优解。在惩罚函数中加入了到目标点距离的惩罚,这样有效地避免了程序陷入局部最优解。

## 2 综合威胁场的建立

低空突防是在复杂的环境中搜索出一条能够满足飞行器机动性能的三维飞行航线,按此航线飞行能够有效地利用地形掩护避开各种威胁。

### 2.1 雷达、火力威胁

雷达是军事上的主要探测设备,其探测特性随周围环境影响较大。考虑各种因素,精确描述雷达的探测特性非常复杂,一般用雷达的观测空域来考查其战术性能指标<sup>[4]</sup>。

弹炮结合防空武器系统已经成为现代防空的主要拦截武器之一<sup>[5]</sup>。密集的防空火炮一般部署在重要目标附近,具有固定阵地,它对低空突防的飞行器的拦截往往很有效。

利用电场理论得到威胁场如下:

$$T(x, y) = \left\{ \sum_{i=1}^M \frac{K_i}{\sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}} \right\} \quad (1)$$

其中:  $T(x, y)$  为威胁场的场强;  $x_m, y_m$  是第  $i$  个威胁中心的坐标;  $K_i (i \in [1, M])$ , 代表第  $i$  威胁的能量。式(1)将威胁的作用效果模拟为电荷产生的电场<sup>[1]</sup>。

### 2.2 地形威胁

在低空突防中,由于飞行高度低,地形又很复杂,才能利用地形因素来实现隐蔽的目的,避免被敌方发现,但同时也增加了撞地的危险。所以在低空突防中引进地形影响因素是很重要的,本文通过模拟山峰函数获得待规划区域的高程数据矩阵:

$$H(x, y) = \left\{ \sum_{i=1}^M H_i \exp \left[ - \left( \frac{x-x_{0i}}{x_{si}} \right)^2 - \left( \frac{y-y_{0i}}{y_{si}} \right)^2 \right] \right\} + H_0 \quad (2)$$

其中:  $H_i$  是以  $H_0$  为基准地形高度的第  $i$  个山峰的高度,在这次模拟中取  $H_0$  为 0;  $x_{0i}, y_{0i}$  是第  $i$  个山峰的坐标;  $x_{si}, y_{si}$  分别是与第  $i$  个山峰沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的坡度有关的量。

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} h(x_1, y_1) & \cdots & h(x_1, y_n) \\ \vdots & & \vdots \\ h(x_n, y_1) & \cdots & h(x_n, y_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:  $H$  为高程矩阵;  $h(x_i, y_i)$  为对应于  $(x_i, y_i)$  点的高程值。

### 2.3 综合威胁场

把高程数据矩阵按设定的权重叠加到雷达、火力电场上产生了综合威胁电场:

$$T(x_i, y_i) = (1 - \lambda) \left\{ \sum_{i=1}^M \frac{K_i}{\sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2}} \right\} + \lambda H(x_i, y_i) \quad (4)$$

其中:  $H(x_i, y_i)$  为离散的高程值;  $\lambda$  为地形高程的权重(其大小由火力、雷达威胁与地形威胁的大小以及重要程度来确定),  $(1 - \lambda)$  是火力、雷达威胁的权重。

### 2.4 优化搜索范围及惩罚函数<sup>[1]</sup>

在规划过程中,限制航迹规划的范围。椭圆作为规划范围,以连接初始点和目标点的线段为长轴,以过该线段中点并垂直于线段的直线为短轴,其中短轴的长度可根据任务的性质进行动态的调整。

因起始点到目标点连线的路径最短,限定搜索范围在这

条直线的附近,这样既可以保证飞行器能飞到目标点,又可以保证航线最短,故采用的惩罚函数如下:

$$J = \sum [w_d D(x_i, y_i) + w_t T(x_i, y_i)] \quad (5)$$

其中  $w_d + w_t = 1$ 。

$$D(x_i, y_i) = d(x_i, y_i) + \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} \quad (6)$$

其中:  $d(x_i, y_i)$  表示点  $(x_i, y_i)$  离开参考航线的距离;  $w_d$  是  $d(x_i, y_i)$  与点  $(x_i, y_i)$  到目标点距离,即  $D(x_i, y_i)$  之和的权重,  $w_t$  是综合威胁(包括雷达、火力威胁及地形威胁)的权重;  $(x_e, y_e)$  表示终点的坐标;  $T(x_i, y_i)$  是点  $(x_i, y_i)$  处综合威胁场强的大小。

### 2.5 航迹重规划

从图1~2中的水平航迹图可以看出规划的航迹虽然已经成功回避了威胁,但还要从实用的角度对航迹的高程进行最大航迹爬升角和最大法向过载的限制。“最大航迹爬升角”对应着地形高程曲线中每一点的坡度(地形斜率);“最大法向过载”对应于地形每一点的曲率。在对航线的高程进行平滑处理时,需分别对各点地形坡度和地形曲率进行限制,如检测到有不满足坡度或曲率要求的点时,就对该点进行最小幅度的抬升,再采用整体迭代法对整个地形高程完成调整。

为了同时满足飞行器的最大法向加速度、最大航迹爬升角及最小离地安全间隙的限制,可以对改进电势法产生的垂直航线进行平滑。将坡度限制法和曲率限制法结合起来运用,同时对水平规划产生的垂直平面中的地形高程进行平滑处理,处理步骤如下:1)根据飞行器最大航迹爬升角的限制,采用坡度限制平滑算法进行坡度限制;2)根据飞行器最大法向过载的限制,采用曲率限制平滑算法进行曲率限制;3)判断垂直航迹是否满足要求,若满足则结束迭代,否则返回1)。

## 3 仿真分析

在  $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$  的空域内,飞行器欲从点(5, 55)处飞到(30, 12)(单位 km),根据已知的雷达、火力威胁建立威胁电场如图1(a)、(b)是权重  $w_d$  为 0.9 和  $w_t$  为 0.1 时航迹规划的结果,从水平航迹图可以看出航线成功地回避了威胁,通过最大航迹爬升角和最大法向过载的限制实现了航线的优化,从而使三维航线(见图1(c))具有可飞性和可操作性;图1(d)、(e)是  $w_d$  为 0.9 和  $w_t$  为 0.1 时航迹规划的结果,此次模拟注重了雷达、火力威胁的影响,从图中看出,算法选择了远离危险地较长的路线。图2是加入了地形信息的威胁分布图,图2(b)、(c)是权重  $w_d$  为 0.1 和  $w_t$  为 0.9 时规划的航迹,从图中可以看到规划的航迹成功地避开了威胁,并且在目标点附近设置了地形威胁,可以看到用优化的电势理论不必把目标点设为负无穷大,从而能够成功地反映目标点附近的地形威胁信息的影响。图2(d)、(e)是  $w_d$  为 0.9 和  $w_t$  为 0.1 的航迹规划结果,可以看出航线选择较短的路径并避开了威胁。由以上仿真结果可以看出该算法在航迹规划过程中是可行的,且符合飞行器的机动性能的限制,拓宽了电势理论的适用范围。

## 4 结语

通过上述模拟结果,可以看到使用优化的电势理论建立的威胁场,不仅可以比较全面地反映任务区内雷达、火力威胁的分布及其作用,而且可以反映地形的威胁,使该理论具有了一定的实用价值,并且使目标点电荷大小选择在合理的范围内,这样在目标点附近能够回避不同种类的威胁(地形威胁、雷达威胁和火力威胁),这也符合低空突防的实际情况,另外,减少了搜索范围,从而能缩短搜索时间,提高了工程化的程度。

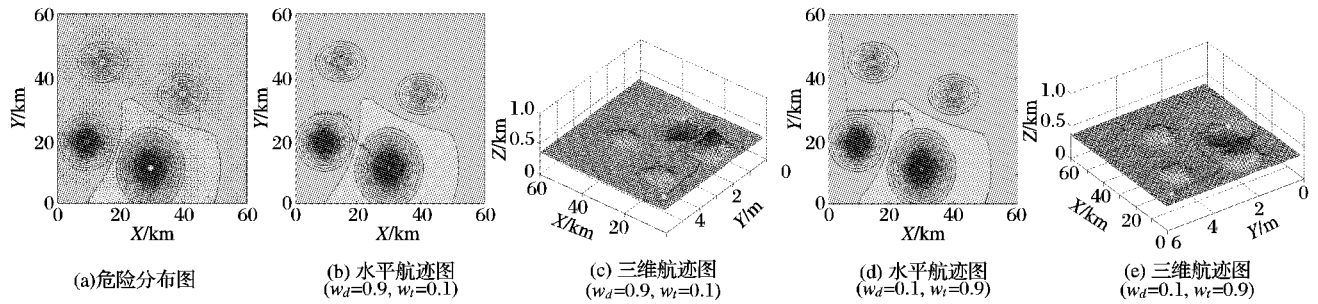


图1 没有地形信息的航迹模拟

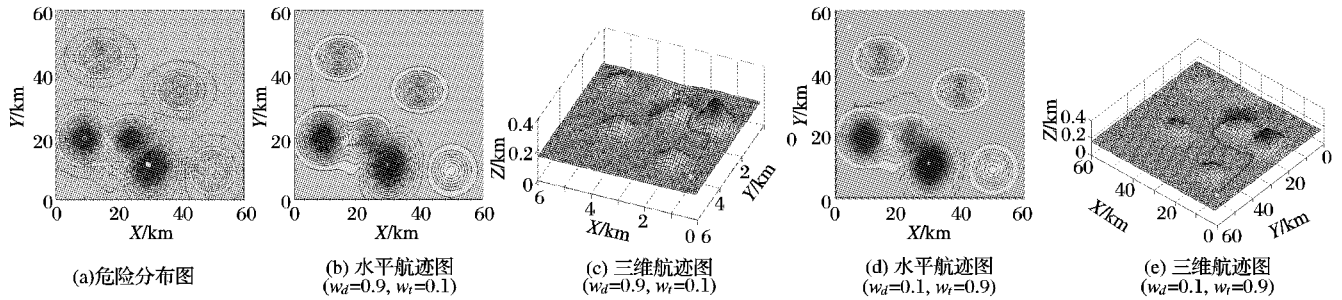


图2 综合地形信息的航迹模拟

## 参考文献:

- [1] 李春华, 郑昌文, 周成平, 等. 一种三维航迹快速搜索方法[J]. 宇航学报, 2002, 23(3): 13-17.
- [2] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [3] 范洪达, 马向玲, 叶文. 飞机低空突防航路规划技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

- [4] 李清, 沈春林. 使用电势理论规划威胁回避路径[J]. 航空与航天, 1998(3): 17-20.
- [5] 李执力, 王静滨, 吴三宝. 弹炮结合防空武器系统作战仿真模型研究[J]. 飞航导弹, 2005(10): 37-42.
- [6] 梁鹤. 低可观测飞行器航迹规划方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

(上接第567页)

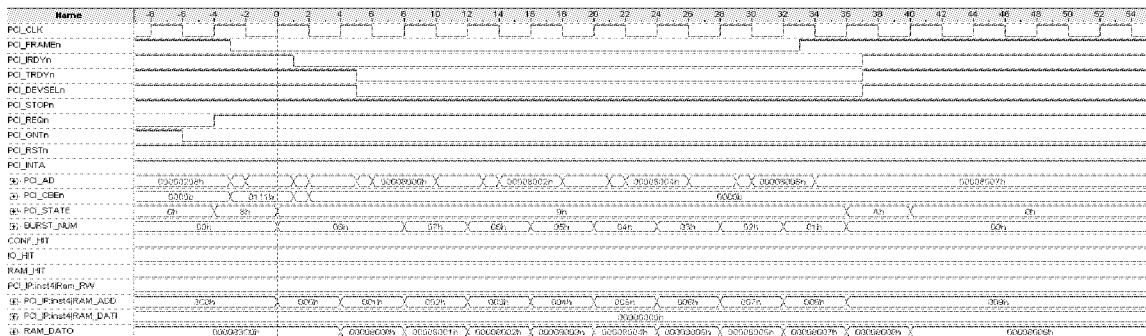


图6 主模式通过突发发送模式读存储器

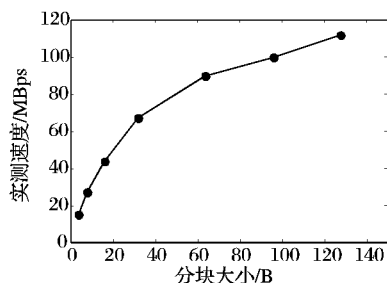


图7 不同分块大小时突发读传输速度

## 参考文献:

- [1] 李贵山, 戚德虎. PCI 局部总线开发者指南[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997.
- [2] 侯伯亨, 刘凯, 顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [3] SHANLEY T. PCI System Architecture[M]. 4th ed. 北京: 电子工业出版社, 2000.

- [4] PCI Special Interest Group. PCI Local Bus Specification Revision 2.2[S]. PCI Special Interest Group, 1998.
- [5] 任清荣, 陈吉红, 唐小琦, 等. 基于以太网的数控系统设计与实现[J]. 机械设计与制造, 2009(9): 44-49.
- [6] 白玉成, 唐小琦, 陈吉红, 等. 数控系统以太网接口技术的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(2): 148-149.
- [7] PC/104 Embedded Consortium. PCI-104 Specification, Version 1.0[S]. 2003.
- [8] Altera Corporation. Cyclone II Device Handbook, Volume 1[R]. Altera Corporation, 2005.
- [9] CORBET J, RUBINI A, KROAH-HARTMAN G. Linux 设备驱动程序[M]. 3版. 魏永明, 耿岳, 钟书毅, 译. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [10] 赵艳华. 基于 Quartus II 的 FPGA/CPLD 设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.