

面向目标跟踪的无线传感器网络动态分簇

周红波^{1,2}, 邢昌凤², 万福¹

(1. 海军指挥学院信息战研究系, 南京 211800; 2. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 在考虑节点剩余能量和节点探测信号强度的基础上, 提出了一种面向目标跟踪的无线传感器网络动态分簇方法。由于在簇首选择时考虑了节点的剩余能量, 因此可以有效地避免簇首节点能量不足导致的跟踪失败。方法既能保证各个节点均衡地担任簇首节点, 又能避免簇首切换过于频繁, 因此可以延长网络的使用寿命。计算机仿真结果表明, 在满足簇首节点能量需求和簇内节点大部分能观测到目标的情况下, 应该取尽量小的能量阈值和尽量大的距离阈值。

关键词: 无线传感器网络; 目标跟踪; 动态分簇

中图分类号: V271.4; TP393

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)01-0014-05

Dynamic Clustering of Wireless Sensor Network for Target Tracking

ZHOU Hongbo^{1,2}, XING Changfeng², WAN Fu¹

(1. Department of Information Warfare Research, Navy Command College, Nanjing 211800, China;

2. College of Electronic Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A dynamic clustering method of wireless sensor network for target tracking was proposed considering residual energy and received signal energy intensity of nodes. Because the residual energy of the nodes was considered when choosing cluster heads, the fail of tracking caused by shortage of node's energy could be avoided. The method can not only make each node play the role of cluster head evenly, but also avoid the cluster heads switching too frequently. Therefore, the life of network can be prolonged tremendously. The results of simulations show that: to satisfy the energy requirement of cluster head and guarantee that most of the nodes of cluster can sense the target, the energy threshold should be as small as possible and the distance threshold should be as big as possible.

Key words: wireless sensor network; target tracking; dynamic cluster

0 引言

近年来,无线通信、集成电路、传感器以及微机电系统等技术的发展和日益成熟,使低成本、低功率、多功能的微型传感器的大批量生产成为可能。无线传感器网络(WSN)就是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点通过无线电通信形成的一个多跳自组织网络系统^[1-2],其中一个重要应用即目标定位与跟踪^[3]。

由于WSN中节点数目通常很多,但各个节点的探

测能力却有限,因此为了对目标进行跟踪,往往是节点组织成簇,簇内各个节点相互协同,共同实现对目标的跟踪^[4]。WSN的簇组织通常可以分为静态簇和动态簇^[5]:静态簇是在布网初期组建,一旦组建完成,该类型簇的结构将固定不变;动态簇是由目标事件激发组建,可以根据目标事件的实时状态决定自身的位置和规模,由目标跟踪的特点可知,动态簇更适用于目标跟踪。针对WSN动态分簇目标跟踪问题,国内外学者也做了大量的研究,但是大多数文献^[6-8]在选择簇首节点时主要考虑的是信息收益和能量消耗,并没有考虑节点的剩余能量。节点的剩余能量在簇首的选择中也起着十分重要的作用,因为簇首节点需要执行更多的任务,往往需要更多的能量。如果簇首节点剩余能量不足,则可能导致跟踪的失败。文献[9]虽然考虑了

收稿日期:2011-12-06

修回日期:2011-12-29

基金项目:国家“八六三”计划项目(2007AA01Z309);湖北省自然科学基金(2009CDB301)

作者简介:周红波(1984—),男,山西夏县人,博士,讲师,研究方向为无线传感器网络目标定位与跟踪。

节点剩余能量,但也并没有完全避免剩余能量不足而导致跟踪失败的情况。

本文在考虑节点剩余能量和节点探测到目标信号强度的基础上,提出了一种面向目标跟踪的 WSN 动态分簇方法。由于在选择簇首时考虑了节点的剩余能量,因此可以避免簇首节点能量不足导致的跟踪失败。另外,本文方法既能保证各个节点均衡地担任簇首节点,又能避免簇首切换过于频繁,因此可以延长网络的使用寿命。最后利用计算机仿真进行了验证和分析。

1 WSN 动态分簇结构

本文设计的动态分簇结构的基本思想是:根据目标的当前位置,激活目标周围的节点进行探测,其他节点处于休眠状态以节省能量。这些处于激活状态的节点组成一个簇并根据一定的规则选择一个节点为簇首节点,其他节点为簇成员节点。簇成员节点将观测信息发送给簇首节点,簇首节点利用适当的算法实现对目标的跟踪。随着目标的运动,簇也跟着变化,当簇变化时,当前簇首节点要将目标状态信息传送给下一时刻的簇首节点。下面对动态分簇结构进行详细表述。

1.1 簇初始化

WSN 一般是事件驱动的。当监视区域没有目标时,所有传感器节点处于休眠状态,各个节点之间相互独立,不组成簇。只有当目标进入监视区域时,发现目标的节点通过初始化过程动态成簇。其中,动态簇初始化过程如下所述。

当节点探测到目标后,检查自己的剩余能量 E^t ,如果剩余能量 $E^t > E_0$,则进入簇首竞争,否则不参加簇首竞争,其中, E_0 为设定的阈值,其设定必须满足一定的条件。由于每个采样时刻簇首要接受簇成员的探测信息,并利用这些探测信息进行目标状态估计,另外,当需要簇首节点切换时,当前簇首节点要将目标状态信息传送给下一时刻的簇首节点。因此, E_0 的取值必须保证簇首节点能够完成一个采样时刻的目标状态估计和将目标状态信息传送给下一时刻簇首节点所需的能量。参与簇首竞争的节点根据自己接收到的目标信号强度 y_s 设定一个等待时间 τ_s ,等待时间的长度与目标信号强度成反比。具体可以定义为

$$\tau_s = \frac{y_0}{y_s} \tau_{\max} \quad (1)$$

式中: y_0 为探测阈值,只有节点探测的信号强度大于 y_0 才认为节点发现目标; τ_{\max} 为系统允许的最长等待时间,跟监测的目标的速度相关,目标速度越快, τ_{\max} 越小。由于 $y_0/y_s < 1$,所以 τ_{\max} 为 τ_s 的上限,且 τ_s 的值与 y_s 的值成反比。

若节点在簇首竞选等待时间结束之前还没有接收到其他节点发出的簇首当选消息,那么节点发出簇首当选信息,成为簇首节点。簇首当选信息包括节点的标识、空间坐标和时间坐标等信息。

若节点在簇首竞选等待时间结束之前接收到其他节点发出的簇首当选消息,那么节点取消本地簇首竞选等待时间,退出簇首竞选,成为待选簇成员。节点存储簇首的节点标识和空间坐标信息,并根据簇首的时间坐标调整本地时钟以同步于簇首。附近处于休眠状态的节点在接收到簇首当选信息后转入激活状态,存储簇首的标识和空间坐标,并调整本地时间同步于簇首,也成为簇成员。

由于等待时间 τ_s 的值与节点探测到的信号强度 y_s 值成反比,因此,节点探测到的信号越强,其等待时间越短,则其在簇初始化过程中成为簇首节点的可能性越大。另外,假设传感器的通信半径大于探测半径的 2 倍,那么,发现目标的所有节点之间都能相互通信;假设节点间通信的时间相对等待时间很短,可以忽略不计,那么,可以保证发现目标的节点最多只有一个当选簇首。

动态簇初始化完毕后,簇成员节点探测目标信息,将信息发送给簇首节点,簇首节点利用观测信息开始对目标进行跟踪。

1.2 簇首的切换

当目标进入 WSN 监测区域后,节点根据上面的初始化过程动态成簇,开始对目标进行跟踪,随着目标的运动,簇也要有相应的变化,而簇首的切换方法直接影响动态分簇的效果。因此,簇首切换在簇的变化中起着关键的作用。对于 WSN 动态分簇跟踪结构而言,簇首的切换应该考虑以下因素:1) 各个节点应该均衡地担任簇首节点,因为如果某些节点长时间担任簇首节点,会导致相应的节点能量耗尽,从而破坏网络的连通性,甚至导致跟踪的失败;2) 簇首节点不宜切换过于频繁,因为当簇首节点切换时,当前节点要将目标的状态信息发送给下一个簇首节点,如果簇首节点切换过于频繁,将会消耗大量的能量。假设 E_{CH}^{t+1} 为预测的 $t+1$ 时刻当前簇首节点的剩余能量,即完成下一时刻估计后剩余的能量; E_s 为设定的能量阈值; x_{CH} 为当前时刻簇首节点的位置; $x_{t+1,t}$ 为目标下一时刻的预测位置; R_s 为距离阈值,可以设定簇首切换的判定条件如下:1) 如果 $E_{CH}^{t+1} < E_s$,则切换簇首节点;2) 如果 $\|x_{CH} - x_{t+1,t}\| > R_s$,则切换簇首节点。

其中, E_s, R_s 的设定应该满足一定的条件,而且其设定值的不同也直接影响动态分簇结构的性能。首先,进

行簇首切换时,当前簇首节点要将目标状态能量信息传送给下一时刻簇首节点,所以簇首节点在完成下一时刻的状态估计后,剩余的能量 E_{CH}^{t+1} 必须要能够保证簇首节点将目标的状态信息传送给下一时刻簇首节点,否则由于能量不足,当前簇首节点无法将目标状态信息传送给下一时刻簇首节点,将导致跟踪的失败。其中, E_s 取值越大,则各节点越能够均衡地担任簇首节点,但簇首切换的频率越快。另外, E_s 与簇首选择时的阈值 E_0 也有关系, E_0 必须大于或等于 E_s 与一次采样周期簇首节点消耗能量之和,否则会导致新选的簇首节点直接满足簇首切换条件。对于 R_s 的取值,由于要保证簇内大部分成员能够探测到目标,因此簇首节点与目标的距离不能大于节点的探测半径,否则,由于簇内成员大部分探测不到目标,不仅浪费资源,而且可能导致跟踪失败。所以, R_s 的取值必须小于节点探测半径 R ,同时, R_s 的取值越小,簇首的切换频率越快。

1.3 簇首选择

当达到簇首切换条件后,当前簇首节点解散当前簇,并选择下一时刻的簇首节点,同样,在簇首节点的选择中主要考虑节点探测到的目标信号强度和节点的剩余能量。由于节点探测到的目标信号强度和节点与目标的距离成反比,因此可以选择离目标预测位置最近的节点为下一时刻的簇首节点,如果最近节点的剩余能量不满足 $E' > E_0$,则选择次最近节点为簇首节点,以此类推。

1.4 簇成员的选择

在选择好簇首节点后,簇首节点根据一定规则选择簇成员节点。选择簇成员节点常用的规则有如下几点。

1) 邻节点规则。

邻节点规则是最简单的规则,簇首选择自己的所有邻居节点(距离小于通信距离)为簇成员进行观测。

2) 最近邻规则。

当节点的密度比较大,簇首节点的邻居节点可能比较多,如果选择所有的邻居节点进行过程,可能信息量仍然过大,此时可以选择离目标预测位置最近的 S 个节点为簇成员节点。这种方法选择距离目标预测位置较近的节点,在一般的情况下有利于提高目标跟踪的精度。因为对于一般的传感器模型来说,传感器节点离目标的距离越近,其观测信号的信噪比越高,对目标状态的更新作用越大。但是对于一些特定的情况则无效,例如视频传感器,由于视频传感器的观测范围为一定的角度,虽然传感器距离目标位置较近,但是由于视角原因,其观测效果可能不好。

3) 基于指标函数的规则。

基于指标函数的规则是一种可以广泛应用于所有

场合的规则,它根据性能指标的要求可以选择不同的指标函数,从而根据指标函数动态化地选择最佳的传感器节点,以达到最优化性能的目的。一般对于 WSN 性能而言,其性能指标函数应包括信息收益与能量消耗两个部分:其中信息收益体现了无线传感器网络感知能力;而能量消耗则代表在实现功能的过程中需要消耗的能量。文献[7]设计了如下形式的指标函数

$$f(\varphi_{\text{Utility}}, \varphi_{\text{Cost}}) = \varphi_{\text{Utility}} / \varphi_{\text{Cost}} \quad (2)$$

式中: φ_{Utility} 表示信息收益函数,反映节点所包含信息量的大小; φ_{Cost} 表示损失函数,反映网络的能耗。这种除式形式的指标函数有效地表明节点的能效比,即单位能耗下的信息收益。

由于在 WSN 中,相对于感知和计算,通信消耗了绝大多数的能量,因此文献[6]将损失函数设为

$$\varphi_{\text{Cost}} = \exp(\text{hop}(\text{leader}, \text{node})) \quad (3)$$

式中, $\text{hop}(\text{leader}, \text{node})$ 为簇首到簇内成员的通讯跳数。

常用的信息收益函数有最近邻(NN)、马氏距离(MD)、信息熵(Entropy)、互信息(MI)和相对熵等,具体计算方法见文献[10]。文献[10]在动态协同自组织算法下对不同的信息收益函数进行了分析与仿真,得出以下结果:

1) 基于 NN 与 MD 的信息收益函数计算简单,但性能不如另外 3 种基于信息熵思想的信息收益函数;

2) 基于信息熵思想的 3 种信息收益函数计算复杂,但性能表现良好,其中 MI 与 KL 可以获得较优的性能,并可以降低能耗;

3) 前 2 种信息收益函数效率总体低于后 3 种基于信息熵思想的信息收益函数,但是其对于节点密度和参数变化等方面的鲁棒性要高于另外 3 种。

由于本文的传感器模型为基于信号强度的模型^[11],而且认为目标的信号传播过程为各向同性,另外,在实际过程中可以根据节点的密度调整传感器节点的通信距离,从而保证簇首节点的邻居节点不是太多,因此,在簇成员的选择过程中,本文采用最简单的方法,即簇成员节点选择为簇首节点的邻居节点。

1.5 动态分簇结构组织过程

整个分布式动态分簇结构的组织过程如下所述,其流程如图 1 所示。

1) 初始化。当目标进入 WSN 监测区域后,发现目标的节点根据初始化过程动态组织成簇,开始对目标进行跟踪。

2) 簇成员节点将观测数据发送给簇首节点。簇首节点根据所有观测对目标状态进行估计,并将估计结果传送给汇聚节点。

3) 簇首节点对目标状态进行预测,并根据自身剩

余能量和目标的狀態預測判斷是否需要進行簇首節點切換。若不切換，則繼續接受簇成員的觀測信息；若需要切換，則當前簇首節點解散當前簇，根據簇首選擇規則選擇下一時刻的簇首節點，並將目標狀態信息傳送到下一時刻的簇首節點。

4) 下一時刻簇首節點接收到上一時刻簇首節點的消息後，激活所有鄰居節點組成簇，繼續對目標進行跟蹤。

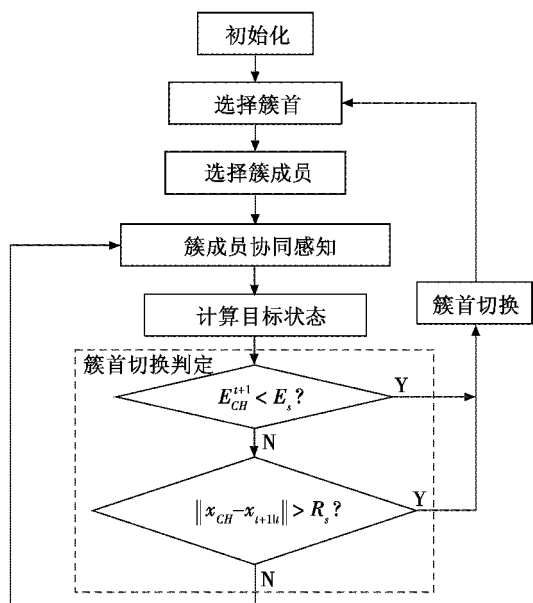


图 1 WSN 动态分簇结构组织过程

Fig.1 The process of WSN dynamic clustering

2 计算机仿真

通过计算机仿真分析 WSN 分布式动态分簇结构中阈值的選擇對分簇性能的影響。仿真中主要分析了簇首節點選擇失敗的概率和簇首切換的次數。

仿真場景設置如下：200 個傳感器節點以均勻概率密度隨機分布在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的監測區域；開始時刻所有節點的能量在 $[0, 1]$ 間均勻分布；節點探測半徑 $R = 15\text{ m}$ ；節點通信半徑 $C = 30\text{ m}$ ；簇首每個採樣周期消耗的电量为 0.1，簇首節點切換時傳送目標狀態信息消耗的电量为 0.1。簇首切換能量閾值 E_s 和簇首選擇閾值 E_0 滿足 $E_0 = E_s + 0.1$ 。首先研究了簇首選擇過程中能量閾值 E_0 對簇首選擇失敗概率的影響。簇首選擇失敗是指在簇首選擇過程中，所有備選簇首節點（簇初始化時為所有發現目標的節點，簇首切換時為距離目標下一時刻預測位置小於節點探測距離的所有節點）能量都不符合簇首選擇的條件，無法完成簇首的選擇。

在仿真中，進行了 1000 次簇首選擇，每次目標位置在 WSN 監測區域隨機產生，得到簇首選擇失敗概率 P_f 與能量閾值 E_0 關係仿真結果如圖 2 所示。

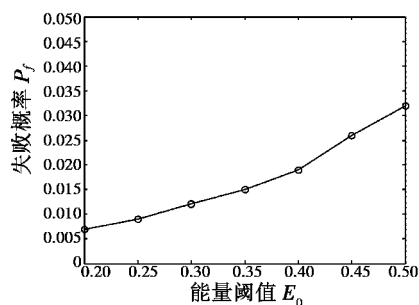


图 2 簇首選擇失敗概率 P_f 與能量閾值 E_0 關係

Fig.2 The failure probability P_f of cluster head choice vs energy threshold E_0

由於簇首切換時需要將當前目標狀態信息傳送到下一時刻的簇首節點，將消耗更多的能量，因此為便於仿真，在此用簇首切換次數來代替對實際能量消耗的研究。主要研究了簇首切換判定參數對簇首切換次數的影響。在仿真中，假設一初始位置為 $[20\text{ m}, 180\text{ m}]$ ，速度為 $[3\text{ m/s}, -3\text{ m/s}]$ 的勻速運動目標運動了 50 s。在 $R_s = 10$ 的情況下，切換次數與 E_s 關係如圖 3 所示；在 $E_s = 0.2$ 的情況下，切換次數與 R_s 關係如圖 4 所示。

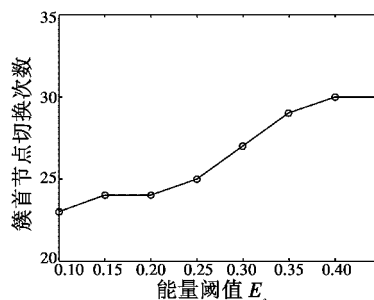


图 3 簇首節點切換次數與能量閾值 E_s 的關係

Fig.3 The switching times of cluster head vs energy threshold E_s

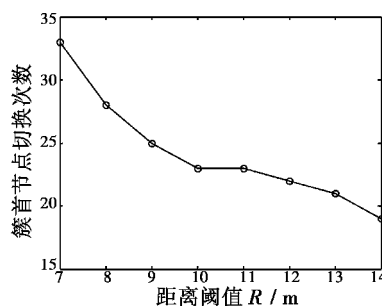


图 4 簇首節點切換次數與距離閾值 R_s 的關係

Fig.4 The switching times of cluster head vs distance threshold R_s

從上述仿真結果可以看出，簇首節點選擇閾值 E_0 越大，簇首節點的失敗概率越大，因此，在滿足簇首節點能量需求的情況下，簇首節點閾值越小越好。簇首切換能量閾值 E_s 越小，距離閾值 R_s 越大，節點的切換頻率越低。因此，在保證節點能量和簇內節點大部分

能观测到目标的情况下,应该取尽量小的簇首能量阈值和尽量大的距离阈值。

3 结论

本文在考虑节点剩余能量和节点探测到目标信号强度的基础上,提出了一种面向目标跟踪的 WSN 动态分簇方法。由于在簇首选择时考虑了节点的剩余能量,因此可以有效地避免簇首节点能量不足导致的跟踪失败。另外,本文方法既能保证各个节点均衡地担任簇首节点,又能避免簇首切换过于频繁,因此可以减少能耗,延长网络的使用寿命。通过计算机仿真表明,在满足簇首节点能量和簇内节点大部分能观测到目标的情况下,应该取尽量小的簇首能量阈值和尽量大的距离阈值。本文只是对分簇方法进行了初步的分析,下一步将结合目标跟踪算法对 WSN 的分布式目标跟踪做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] CHONG C Y, KUMAR S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges[J]. Proc. of the IEEE, 2003, 91(8):1247-1256.
- [2] CULLAR D, ESTRIN D, STRVASTAVA M. Overview of sensor network[J]. Computer, 2004, 37(8):41-49.

- [3] LI D, WONG K D, HU Y H, et al. Detection, classification, and tracking of targets[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2):17-29.
- [4] CHEN Weipeng, HOU J C, SHA L. Dynamic clustering for acoustic target tracking in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3):258-271.
- [5] 邓克波. 基于无线传感器网络的能量有效的目标探测、定位与跟踪技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [6] LIU J, REICH J, ZHAO F. Collaborative in-network processing for target tracking[J]. Journal on Applied Signal Processing (EURASIP), 2003, 23(4):378-391.
- [7] 王睿, 梁彦, 潘泉, 等. 无线传感器网络信息感知中的自组织算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(5):829-833.
- [8] 周红波, 邢昌凤, 耿伯英, 等. 基于粒子滤波的无线传感器网络分布式目标跟踪研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2):274-278.
- [9] 邓克波, 刘中. 基于无线传感器网络动态簇的目标跟踪[J]. 兵工学报, 2008, 29(10):1197-1202.
- [10] 王睿. 面向目标感知的无线传感器网络自组织技术[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [11] SHENG X H, HU Y H. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(1):44-53.

(上接第 8 页)

综合观察,采用 IQGA-VD 方法进行航迹规划的效果要优于 GA-VD 方法,其主要原因是 IQGA-VD 算法采用了量子编码,并且采用了多种进化策略,使得算法在全局最优性和规划时间上都具有一定的优势。

5 小结

以飞行器航迹规划为应用背景,首先基于 V 图构建航迹规划空间,采用当前在优化领域广泛使用的量子遗传算法进行规划,并针对传统遗传算法的不足,引进了量子门旋转角动态调整机制,借鉴遗传算法的交叉和变异思想,引入了量子交叉和量子变异策略,通过综合比较和仿真说明了文中改进的量子遗传算法取得了更好的实验效果,对飞行器航迹规划的进一步发展具有一定的促进作用。

参 考 文 献

- [1] 郑昌文, 严平, 丁明跃, 等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(6):1141-1146.
- [2] 王维平, 刘娟. 无人飞行器航迹规划方法综述[J]. 飞行力学, 2010, 28(2):6-10.
- [3] 刘振, 史建国, 高晓光. Voronoi 图在航迹规划中的应用

- [J]. 航空学报, 2008, 29(B05):15-19.
- [4] 彭建亮, 戴通伟, 孙秀霞, 等. 基于 Voronoi 图和遗传算法的航迹规划[J]. 电光与控制, 2009, 16(3):9-12.
- [5] 何艳萍, 张安, 刘海燕. 基于 Voronoi 图与蚁群算法的 UCAV 航路规划[J]. 电光与控制, 2009, 16(11):22-25.
- [6] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum inspired genetic algorithms[C]//Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996:61-66.
- [7] 王凌. 量子进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(12):1321-1326.
- [8] XIONG Y, CHEN H H, MIAO F Y, et al. A quantum genetic algorithm to solve combinatorial optimization problem[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11):1855-1858.
- [9] 钱洁, 郑建国, 张超群, 等. 量子进化算法研究现状综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(3):321-326.
- [10] 刘森琪, 段海滨, 余亚翔. 基于 Voronoi 图和蚁群优化算法的无人作战飞机航路规划[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21):5935-5939.
- [11] 邢焕来, 潘炜, 邹喜华. 一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法[J]. 电子学报, 2007, 35(10):1999-2002.
- [12] 孙阳光, 丁明跃, 周成平, 等. 基于量子遗传算法的无人飞行器航迹规划[J]. 宇航学报, 2011, 31(3):648-654.