

无人机避障方法研究进展*

陈亚青¹, 张智豪¹, 李 哲²

(1. 中国民用航空飞行学院 飞行技术与飞行安全科研基地, 四川 广汉 618307;

2. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘 要: 社会的高度信息化使得无人机能应用于各个领域, 任务难度的增加决定了无人机朝集群化和自主化的方向发展。高效的避障技术是实现无人机高速飞行和智能化的重要保障。本文首先阐述了无人机避障的概念、过程以及分类。其次, 详细介绍了超声波、单目视觉、双目视觉、激光雷达4种单无人机避障方法以及人工势场法为主的无人机编队避障方法, 并分析了各种方法的原理和优缺点。最后, 总结了无人机避障目前存在的问题和未来的发展趋势。

关键词: 避障; 无人机避障; 无人机编队; 激光雷达避障

中图分类号: V279 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2020)012-0001-06

Research Progress on Obstacle Avoidance Methods of UAV

CHEN Ya-qing¹, ZHANG Zhi-hao¹, LI Zhe²

(1. Civil Aviation for Flight Technology and Safety Research Base, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307 China;

2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307 China)

Abstract: The highly informationized society enables unmanned aerial vehicle (UAV) to be applied in various fields. The increasing in mission difficulty determines the development direction of unmanned aerial vehicles towards clustering and independence. Efficient obstacle avoidance technology is an important guarantee for high-speed flight and intelligentization of drones. Firstly, this paper describes the concept, process and classification of UAV obstacle avoidance. Firstly, this paper describes the concept, process and classification of UAV obstacle avoidance. Secondly, the ultrasonic, monocular vision, binocular vision, lidar, four kinds of single unmanned aircraft obstacle avoidance methods and artificial potential field method based unmanned aerial vehicle formation obstacle avoidance method are introduced in detail, and the principles, advantages and disadvantages of these methods are analyzed. Finally, it summarizes the current problems and future development trends of UAV obstacle avoidance.

Key words: obstacle avoidance; UAV obstacle avoidance; UAV formation; lidar radar obstacle avoidance

1 引言

近年来, 随着电子产业的飞速发展和社会的高度信息化, 无人机在众多领域都有了广泛的应用, 由于执行任务难度的提升, 无人机的使用规模也在不断扩张, 多无人机同时执行任务^[1]的模式被广泛适用。所以, 现代无人机的目标是实现更高水平的自主和稳定飞行。换言之, 无人机的安全性和失误率的降低就显得格外重要, 而

断完善的避障系统^[2]可以极大的降低操作失误带来的损失和灾祸。因此, 避障技术成为了无人机智能化的关键。

2 无人机避障概述

无人机避障是指无人机在移动过程中, 通过传感器感知到在其规划路线上存在静态或动态障碍物时, 按照一定的算法实时更新路径, 绕过障碍物, 最后达到目标点的一种行为。根据目前的无人机避障技术原理可以将无人机避障技术分为三个阶段, 分别是感知障碍物阶段、危险区域判断阶段、路径搜索及绕过障碍物阶段。

2.1 无人机避障过程

*基金项目: 民航局民航安全能力建设资金支持研究项目(编号 TM2018-3-1/2)

收稿日期: 2019-09-04

在障碍物识别阶段首先需要精确的测量无人机与障碍物之间的距离,测量出危险范围内的距离,才能有时间在撞向障碍物前停止动作,从而避免事故和意外的发生。所以障碍物识别的准确性是实现精确避障的基础。

危险区域判断阶段根据获取的障碍物位置信息判断障碍物是否在危险区域内,如果不在危险区域内,保持初始的飞行路径继续飞行;如果在危险区域内,则需要转向或改变高度等避障操作。

在路径搜索及绕过障碍物阶段的关键点在于精确地获取障碍物的位置信息、外部轮廓信息以及障碍物的三维图像。然后根据获得的障碍物位置信息,利用机载设备中设置的智能算法来选择最优路径,实现无人机的高效避障。

2.2 无人机避障分类

按避障的对象划分有单无人机避障和无人机编队避障。单无人机避障是指单架无人机在进行任务时完成的避障操作,单无人机模式是一种较为传统的无人机运行模式,单无人机避障相对比较容易,算法也相对简单。

无人机编队执行任务的运行模式是随着无人机任务的加重,单架无人机难以满足任务需求而诞生的,例如执行侦察任务时由于传感器限制,单架无人机可侦察范围有限,无法有效覆盖侦察区域。且一旦无人机出现故障,便意味着任务失败。根据自然界常见的生物群体现象,对无人机进行编队来执行任务能有效地提高任务的成功率。当前无人机的编队方法主要有“长机-僚机”法、行为法、虚拟结构法和人工势能法等。相对于无人机的避障而言,无人机编队避障更复杂,不仅需要避开障碍物,还需要保障无人机群之间的安全距离,能够满足无人机在以高速度和小角度接近障碍物时,有足够的时间来进行避障操作,同时,还需要考虑队形的变换问题。

3 单架无人机避障方法

3.1 超声波避障

超声波避障^[3-5]是借助超声波传感器模块检测各方向上障碍物的距离,根据距离信息判断是否有障碍物。价格便宜、重量轻、测距方法简单、不需要依赖三维地图等都是超声波测距模块所具备的优势,但是测距的范围会相对较短,传统的超声波传感器测量误差也较大,只能测得大致的距离,要得到高精度的结果则需要在传统超声波传感器上添加多种传感器以及外围电路。

超声波避障技术一般采用时间差进行测距,发射超

声波的时候开始计时,遇到障碍物时超声波会发生反射,当接收器收到反射波的时候停止计时,从开始计时到停止计时的时间之差为超声波传播时间,根据在介质中的传播速度和传播时间的关系可以推导出障碍物的距离。超声波传感器的误差源于在不同介质中的反射、折射、衰减以及测量误差等。其中,测距时的测量偏差主要由超声波发射器的发散角所形成的。

改进的超声波避障方法可以加装传感器,现在使用较多的有图像采集传感器,包括 CCD 和 CMOS 两种,CMOS 一般用于低端的产品中,CCD 用于高端产品中。通过图像采集和处理可以得到边缘清晰的图像。无人机在飞行时,通过超声波检测飞行方向上是否有障碍物,当障碍物处于危险区域内时,会触发一个图像采集信号,可以得到无人机与障碍物的位置信息和边界情况,以无人机为中心,障碍物顶点为端点,计算出无人机与障碍物之间的位置关系,结合人工势场法即可选择最优的避障路径。

3.2 基于视觉的无人机避障方法

基于视觉的无人机避障^[6]是指利用摄像机代替人眼捕获客观事物信息,通过相关视觉图像处理算法获取事物的轮廓信息、深度信息、位置信息等,为避障提供依据。相对于其他的无人机避障技术而言,基于视觉的无人机避障技术依赖于光源信息,需要摄像机标定、图像处理、几何运算等步骤,操作比较复杂,对硬件的要求也较高。本节主要介绍单目视觉避障方法和双目视觉避障方法。

3.2.1 单目视觉避障

单目视觉避障技术^[9-10]是利用单个摄像机连续拍摄图像,通过计算前后两帧图像的特征区域或像素变化获取物体的运动信息,以及判断物体的远近程度,然后通过方向决策完成避障操作。基于单目视觉的无人机避障系统包括了两个子系统,分别是无人机避障子系统和图像处理子系统。其中,无人机避障子系统通常搭载在无人机上,该子系统还包括了数据通信模块和避障决策模块。图像处理子系统通常搭载在计算机桌面,该子系统包括了数据通信模块和图像处理模块。两个子系统可以通过无线网络进行信息交互。

单目视觉避障技术的缺陷在于单目摄像机由于缺乏光流和运动视差,获得的信息量有限,导致对前方障碍物的检测准确度相对较低,难以直接测量出障碍物的距离位置信息。而它的优势是所需的成本和计算代价较低,同时可以得到一个较为合理的结果。

图像特征提取是单目视觉技术中的重要一环,图像

特征提取算法的优劣会直接影响到避障操作的可行性。目前主要采用的方法有尺度不变特征变换(SIFT)算法和加速稳健特征(SURF)算法,表1对比了两种方法的特点和优劣势。

目前,普遍运用的方法是通过运动物体成像尺寸的变化来对物体进行避障检测。障碍物与无人机的距离越近,物体的成像就越大,在相同的时间内,如果物体尺寸变化率越大,则与障碍物的碰撞时间越短,可以凭此获得近似的深度信息,从而完成避障操作。

3.2.2 双目视觉避障

双目视觉避障^[11]是利用两个摄像头从不同角度对物体进行拍摄,基于极限约束计算视图差,再根据几何关系获取物体的三维信息。相对于单目视觉避障技术,双目视觉避障技术能够获得更精确的三维空间信息,但是在图像匹配和融合等操作上难度会大幅增大,对于硬件的要求也更高。双目避障技术依然存在局限性,难以实现全向避障,当无人机转动角度达到九十度的时候,两个视觉接收系统对于边界点的处理会出现重合的情况,运算结果也会出现偏差。

双目视觉避障技术可以通过在不同的视角下获取的感知图像,根据三角测量原理计算图像像素间的位置偏差,进而获取场景的三维信息。在障碍物检测阶段可以通过双目视觉系统构造观测场景的视差图,然后从视差图上分辨出障碍物。目前采用较多的从视差图分离出障碍物的方法有两种,第一种是通过像素点的高度判断从视差图中去除背景像素点,剩下的点即被认为是障碍物。第二种是使用区域生长算法分离视差图上相近视差区域,并判断该区域中像素值,决定是否为障碍物。其中,视差越大表示距离越近,灰度值越高的区域亮度越高,说明障碍物与无人机摄像头的相对距离越近。

双目视觉避障技术的具体操作步骤通常包括以下四步:

- (1) 判断障碍物是否可以直接越过。
- (2) 如果无法直接越过障碍物,可以通过双目摄像机

获取障碍物的相对距离、尺寸,判断危险程度。

(3) 对于危险程度较高的障碍物,利用立体视觉系统的位置不确定性和轮廓不确定性,生成危险区域。

(4) 综合考虑危险区的范围、无人机的尺寸、飞行区域的环境等因素,在障碍物附近的区域生成一定量的控制点,能够引导无人机飞越障碍物区域,成功完成避障操作。

3.3 激光雷达避障

激光雷达避障^[12-13]原理是由发射器和接收器分别发射和接受特定的光脉冲,并使用测距方法计算出距离信息,为避障控制器提供障碍物信息。激光雷达测距的优势是测距准确、测量的距离远、抗干扰能力强、弱光条件下表现好、仪器质量轻、体积小等,缺点是硬件要求较高,所需要的成本也较高,在自然光光线强度较高的情况下,光波容易受到影响。

激光雷达避障技术需要与适合的避障算法结合,才能完成无人机的避障操作,通常采用的算法有人工势场法和向量场直方图法(VFH)。人工势场法的具体步骤是将激光雷达测得的二维点云数据经滤波处理得到有效点的云数据,由于人工势场法需要解决局部最小值的问题,利用改进的启发函数并转换为飞控系统的引导指令,从而实现无人机的自主避障。

向量场直方图法(VFH)是由人工势场法演变而来的一种避障方法,在无人机及机器人避障中都有着广泛的应用。通过向量场直方图法(VFH)可以将激光雷达采集到的障碍物距离信息通过坐标变换进行量化,不同的障碍物距离,会赋予不同的障碍物强度值。无人机需要在一定的阈值范围内选择移动方向,阈值的确定跟实际飞行状态相关,阈值过小,无人机难以发现前方的障碍物,容易发生碰撞;阈值过大,部分可通过路径会被忽视,难以找到目标点。采用自适应阈值策略结合代价函数来确定阈值,能使代价函数对应的函数值最小的阈值则为最优阈值。

表1 图像特征提取算法对比

采用的算法	特点	优势
SIFT算法	独特性好,信息量丰富;对平移、旋转、尺度缩放、亮度变化、遮挡和噪声等具有良好的不变性;多量性;速度相对较快;可扩展性强,可以很方便的与其他形式的特征向量进行联合	SIFT算法特征匹配数量要多于SURF算法;SIFT算法拥有更好的稳定性,能够提取出更多稳定的特征点
SURF算法	使用积分图像完成图像卷积操作;使用Hessian矩阵检测特征值;使用基于分布的描述符	SURF算法运行时间远低于SIFT算法;SURF算法拥有更好的实时性

4 协同编队避障方法

在考虑无人机编队避障问题之前,首先要确定合适的编队和控制方法,国内外对多无人机的编队和控制方法都有过大量的研究,也提出了很多无人机编队队形变换策略和控制方法。其中,队形变换需要考虑成员不变、队形改变以及成员变化,队形重构两种情况,而编队控制方法主要包括“长机-僚机”法、基于行为法、虚拟结构法等。

在编队成员不发生改变,队形改变的情况下,需要根据飞行环境的要求,考虑不同队形的优势进行队形变换,比如:人字形编队能降低跟随无人机的气动性能、节约油耗;跟随型编队可以增强各无人机之间的协同性和灵活性。当编队成员改变,需要进行队形重构的情况通常是执行任务的无人机出现故障或有新无人机加入编队。当某架无人机出现故障时,需要其他无人机来补位,补位的无人机应距故障机较近,同时满足邻近的无人机数量尽可能少。新无人机加入编队需要与处于边界的无人机建立通信,新编队应该是初始编队的相似队形。

采用“长机-僚机”法进行编队控制时,任意一架无人机都可以作为长机,当一架无人机被确定为长机时,其余的无人机作为僚机,这种方法的缺点是僚机对于长机没有实时的反馈。

基于行为法^[16]通常是借鉴仿生学的思想对无人机进行编队控制。采用这种方法时,群系统中的无人机都具有多种预设行为模式,这些行为可以组成一个集合。每种行为都对对应一种控制作用,并且所占的权重不同,每架无人机的整体控制行为由多个控制作用加权求和得到。无人机编队可以通过动态调整各行为的权值,从而实现期望的行为。该方法的优势在于每架无人机只需要局部信息,整体采用分布式控制,鲁棒性好;缺点是行为模型构建较为复杂,难以保证编队控制的稳定性。

虚拟结构法将无人机编队视为一个刚体的虚拟结构。该方法将每一架无人机都视作虚拟结构中的一个节点,每当编队发生变化时,无人机和虚拟结构上的点保持同步运动,这样就可以实现无人机的编队控制。该方法编队控制的精度高,鲁棒性强;但缺点是编队对于实时性与同步性要求较高,计算量大。

完成无人机的编队控制后,就可以采用适合的避障算法来实现避障操作,目前采用较多的方法是人工势场法,其他的方法还包括基于人工免疫的避障方法、基于几何方法的无人机避障算法等。

4.1 人工势场法

人工势场法^[17]是研究无人机避障中普遍使用的一种方法,它具有简单、实用、工程实践性强的特点。人工势场法是将无人机视为相互吸引或排斥的球体,根据相邻无人机的相对距离,提出了两种虚拟力,分别是编队引力 and 编队斥力。当无人机在一定的距离范围内相互靠近时,会产生编队斥力,使相邻无人机向反方向运动,从而避免碰撞。当无人机在一定距离范围内相互远离时,会产生编队引力,编队引力使相邻无人机做相向运动,避免无人机之间失去联系。

同理,可以将多无人机群视为由具备自主决策能力的个体组成的整体,假设每架无人机个体都有感知、判断、决策和动态反应能力,多个个体间通过通信拓扑进行协调可使无人机群具有协同编队避障的能力。在编队内部,各无人机可通过分布式通信拓扑实现局部的信息交互,避免碰撞并保持队形;在编队外部,利用改进的人工势场法构建虚拟势场,使目标位置和障碍物信息反映在每一点的势场值上,无人机根据势场值的变化决定飞行的方向和速度,从而使无人机群在没有预先规划飞行路径的情况下也能躲避空域障碍物并飞向目标点。

Khatib^[17]在文献中给出了经典的势能场函数:

$$U_G(p) = \frac{1}{2}k(p - p_G)^2 \quad (1)$$

$$U_O(p) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}) & (\rho \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho > \rho_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U_G(p)$ 为p点的引力场; $U_O(p)$ 为p点的斥力场; $k>0$, $\eta>0$ 分别为引力场系数和斥力场系数; ρ 为无人机到障碍物的最短距离; ρ_0 为一阈值。

无人机在势力场中受到的合力可以表示为:

$$\begin{aligned} F(p) &= F_G(p) + \sum_{i=1}^n F_{O_i}(p) \\ &= -\nabla U_G(p) + \sum_{i=1}^n (-\nabla U_{O_i}(p)) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $F_G(p)$ 是无人机在p点引力场产生的引力,为引力场的负梯度; $F_{O_i}(p)$ 是i个障碍物在p点引力场产生的斥力,该斥力为p点处斥力场的负梯度。

传统的人工势场法往往存在一个局部最小值的问题。无人机群内部达到稳定编队时,每架无人机只存在目标点所提供的引力,如果此时编队遇到障碍物,使得障碍物的斥力与目标点的引力相等,那么机群中的个体将面临局部最小值导致的静止问题。为了解决此类问题,提出了改进的人工势场法。

改进的人工势场法为了解决局部最小值的问题,可

以采取一致性控制方案,在无人机编队中采取分布式信息交互策略由于编队中会存在由于同一障碍物作用导致受力不平衡的无人机,在分布式通信拓扑的作用下,将在编队内部产生作用力使静止的无人机将在编队力的作用下前进。该类方法还具有较强的稳定性和灵活性,通过同相邻无人机的信息交互,适时地改变自身运动状态以适应动态环境。

还有一种思路是采用三维空间复合势场方法来避免出现局部最小值的问题。无人机编队由一架长机来引导,在三维空间内,单架无人机追踪虚拟长机,其运动轨迹是避障的关键,将障碍物看作椭圆柱体,人工势场以最小体积包住障碍物。无人机编队的避障主要取决于人工势场中的斥力。复合人工势场由两个相互垂直的面的两种人工势场复合而成,因此,无人机编队的避障轨迹也是由两种旋转矢量场叠加而成的结果,这使得无人机在进入避障区域时,能有效地避开局部最小值位置。

4.2 其他避障方法

基于人工免疫的避障方法^[21]最初用于机器人的避障,改进后用于无人机的避障。该避障方法将无人机定义为B细胞,需要配备的距离传感器数量与不同方位环境信息对路径规划的影响程度有关。结合传感器检测到的信息对无人机的飞行方向定义了抗体。根据障碍物的目标对无人机路径规划的影响,来设计面向障碍物和目标的抗原。主要的避障过程是无人机利用传感器检测四周的抗原信息,包括障碍物和目标信息,并形成抗原编码;根据抗原编码和抗体编码,在免疫网络动力学模型基础上进行最优抗体选择,即对飞行状态进行选择,从而实现无人机的自主避障操作。

另一种方法是两个或两个以上的无人机在一个共同的航空领域的避障方法,无人机的轨迹由ADS-B系统获得的两个或三个轨迹点取近似得到,在确定轨迹交点的过程中,计算了可能发生无人机碰撞的临界速度范围的两个截断值。由于临界速度的交点和截止值的计算表达式以解析形式表示,即使机载计算机系统的计算能力有限,计算时间也远小于ADS-B接收数据的时间。因此,在接收新数据的每一个周期,都可以更新计算,轨迹近似为用直线来界定。这种方法通过开发紧凑的避碰算法,即使是对于数量可观的无人机(超过几十架)也适用。

5 总结与展望

5.1 目前存在的问题

虽然无人机避障技术日渐成熟,但目前采用的无人机避障方法都存在着一些缺陷,主要体现在以下几个方面:

(1) 单目视觉避障方法由单摄像头获取的图像信息有限,而采用激光雷达避障技术容易受到强光的影响,这两种避障技术在没有其他数据信息和仪器的辅助下,避障的实际效果可能较差。

(2) 基于双目视觉的避障方法可以通过获取三维信息图来获取障碍物的信息,但在飞行过程中存在连续的障碍物且障碍物之间的距离较近时,无人机难以获取所有障碍物的信息,飞行过程中仍然存在碰撞风险。

(3) 由于多无人机的避障过程需要考虑编队控制的因素,导致其避障难度远远大于单无人机的避障,现阶段采用的算法很少考虑无人机群在避障过程中保持编队的可能性以及队形变换的问题。需要考虑如何协调单架无人机的独立性和无人机编队的一致性。

(4) 现有的无人机编队避障算法为了方便求解,都比较理想化,缺少对环境变化和特殊情况下无人机编队控制的考虑,所以如何将现实中复杂的影响因素通过建模实现也是需要解决的问题。

5.2 未来发展趋势

(1) 基于视觉的避障技术仍然会是研究的热点,在现有的单目和双目视觉技术的基础上,通过对现有仪器进行改进或是结合其他探测仪器,使无人机能够在复杂的背景或是动态光照条件下获取障碍物信息。

(2) 当飞行过程中遇到连续或密集障碍物出现时,不仅要获取障碍物的边缘信息,还要获取障碍物的深度图像信息,为无人机的连续避障提供充足的反应时间。

(3) 随着无人机任务量的增大,多无人机共同执行任务将会成为一种常态,更多的研究会转向无人机编队避障。在编队避障过程中每架无人机能够生成独立的避障路径,相互之间能够实现队形的变换和信息交互,提高人机交互能力,将碰撞风险尽可能地降低。

(4) 采用单一的无人机避障算法都存在着一定的局限性,可以将不同的算法进行结合,或是对机器人的避障算法进行改进,从而得到更好的优化效果。

(5) 利用无人机捕获的信息结合其他科技手段构建出飞行场地的3D场景,并在飞行过程中实现信息的同步,这样可以实现对无人机飞行的全程监控,并提高飞行的安全性和避障的准确性。

6 结束语

随着无人机避障技术研究的深入与进步,如何获取障碍物的深度图像,优化算法,提高无人机编队地协调性、一致性并快速高效地绕过障碍物,是无人机避障亟需解决的问题。本文介绍了无人机避障的基本概念,避障过程与分类,并列举了单无人机和无人机编队地避障方法。重点分析了各种避障方法的原理,优缺点和使用条件。最后,总结分析了现阶段避障方法存在的问题和发展前景。高效、便捷的无人机避障方法能提高无人机的工作效率和任务成功率,具有重要的现实意义和战略意义。

参考文献:

- [1] 齐小刚,李博,范英盛,等.多约束下多无人机的任务规划研究综述[J/OL].智能系统学报,1-14[2019-07-15].
- [2] 胡海兵,汪国庆,赖重远,等.四旋翼无人机自主避障系统的设计与实现[J].现代电子技术,2018,41(22):133-137.
- [3] 任耀庭.基于超声波测距与图像信息相融合的旋翼无人机避障算法研究[D].西安:电子科技大学,2016.
- [4] 王亭岭,芦杜洋,马跃涛.PIXHAWK 开源飞控的多旋翼无人机避障技术研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2017,17(10):30-32.
- [5] 程子龙,李鹏展,刘佳.基于超声波传感器的无人机避障技术研究[J].科技视界,2018(29):89-75.
- [6] 王新东.基于机器视觉的无人机避障技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.
- [7] ABRAHAM BACHRACH,RUIJIE HE,NICHOLAS ROY,et al.Autonomous Flight in Unknown Indoor Environments[J].International Journal of Micro Air Vehicles,2009,1(4):217-228.
- [8] ZARANDY A,NAGY Z,VANEK B,et al.A five-camera vision system for UAV visual attitude calculation and collision warning[C].//International Conference on Computer Vision Systems.Springer,Berlin,Heidelberg,2013:11-20.
- [9] 符宇.基于单目视觉无人机避障系统的算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2016.
- [10] 张午阳,章伟,宋芳,等.基于深度学习的四旋翼无人机单目视觉避障方法[J].计算机应用,2019,39(4):1001-1005.
- [11] 王湜,潘峥嵘,朱翔.基于双目视觉的无人机避障之研究[J].自动化与仪表,2018,33(4):34-38.
- [12] 章志诚,杜昌平.基于激光雷达的多旋翼飞行器实时避障系统[J].计算机测量与控制,2016,24(9):117-121.
- [13] 王海群,王水满,张怡.基于激光雷达信息的无人机避障控制研究[J/OL].激光杂志:1-5[2019-07-15].
- [14] 韩亮,任章,董希旺,等.多无人机协同控制方法及应用研究[J].导航定位与授时,2018,5(4):1-7.
- [15] 段海滨,张岱峰,范彦铭,等.从狼群智能到无人机集群协同决策[J].中国科学:信息科学,2019,49(1):112-118.
- [16] 成浩浩,齐晓慧,杨森,等.一种基于一致性的四旋翼无人机编队避障方法[J].飞行力学,2019,37(2):51-55.
- [17] 林倩玉.多无人机协同编队控制算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [18] KHATIB O.Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[M].//Autonomous Robot Vehicles.Springer,New York,NY,1986:396-404.
- [19] 张佳龙,闫建国,张普,等.基于改进人工势场的无人机编队避障控制研究[J].西安交通大学学报,2018,52(11):112-119.
- [20] 刘艳,阳周明,冯运铎,等.基于改进人工势能的无人机编队与避障[J].火力与指挥控制,2018,43(12):116-120,125.
- [21] 干阳琳.四旋翼无人机编队自动飞行的避障算法研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [22] V D BERDONOSOV,A A ZIVOTOVA.Speed Approach for UAV Collision Avoidance[J].Journal of Physics Conference Series,2018,1015(5):052002.
- [23] J A,ZHAO S,MIHAYLOVA L S.A Comparative Study of Velocity Obstacle Approaches for Multi-Agent Systems[C].//2018 UKACC 12th International Conference on Control(CONTROL).IEEE.2018:289-294.

作者简介:陈亚青(1970-),男,教授,研究方向:空中交通管理。

通信作者:张智豪(1970-),男,硕士研究生,研究方向:通信导航监视。