

说明书摘要

一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法

本发明公开了一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法,属于无人系统控制技术领域,其特征在于,搭建固定翼无人机模型,并将该模型转化为基于位置、速度控制的二阶模型;基于鸟类趋光飞行特性,建立固定翼无人机趋光性避障模型,并结合固定翼无人机飞行约束等特性,设计相应的固定翼无人机避障策略及流程;设计安全、稳定的固定翼无人机避障控制律,实现固定翼无人机的可靠飞行。本发明对解决固定翼无人机避障控制问题具有很好的改善效果,增强了固定翼无人机飞行的安全性和鲁棒性,在无人系统控制领域具有很好的应用前景。

权 利 要 求 书

1. 一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法，其特征为：

步骤 1： 搭建固定翼无人机模型，并将固定翼无人机模型转化为基于速度、位置控制的二阶模型；

步骤 2： 根据鸟类基于趋光性避障的特性，建立固定翼无人机趋光性避障模型；

步骤 3： 基于步骤 2 中所建立的趋光性避障模型，结合固定翼无人机飞行约束，设计相应的固定翼无人机避障策略及流程；

步骤 4： 将步骤 2 中所建立的趋光性避障模型与人工势场法相结合，设计固定翼无人机控制律，保证该固定翼无人机无碰撞飞行。

2. 权利要求 1 所述的固定翼无人机模型，其特征在于：

固定翼无人机的二维简化动力学模型可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{v} = n^v \\ \dot{\psi} = n^\psi \end{cases} \quad (1)$$

其中， (x, y) 为固定翼无人机在惯性坐标系中的位置； ψ 为无人机的航向角； v 为无人机的速度； n^v 和 n^ψ 为系统控制输入；

经过模型转换，固定翼无人机基于速度、位置控制的二阶模型为：

$$\begin{cases} \dot{q} = p \\ \dot{p} = u \end{cases} \quad (2)$$

其中， $q = [x, y]^T$ 表示无人机的位置； p 为无人机的速度； u 为无人机的控制输入。

3. 权利要求 1 所述的固定翼无人机趋光性避障模型，其特征在于：

将无人机飞行过程中可能遇到的障碍物情形分为“单个障碍物”和“多个障碍物”两种进行趋光性建模：

步骤①： 在单个障碍物情形下，无人机 (U) 可飞行空域的角度大小为：

$$A(U) = 2\pi - \angle B_1'UB_2' \quad (3)$$

其中， $\angle B_1'UB_2'$ 为受障碍物影响，无人机不可飞行的空域角度；

步骤②： 在多个障碍物情形下，无人机 (U) 可飞行空域的角度大小为：

$$A(U) = \angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2' \quad (4)$$

其中， $\angle B_1UB_1'$ 和 $\angle B_2UB_2'$ 为受障碍物影响，无人机不可飞行的空域角度； $\angle B_1UB_2$ 为无人机在障碍物间的可飞行空域；

步骤③：将趋光性的大小用无人机进入可飞行区域的概率来衡量，且该概率服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布，因此候选趋光性模型可以表示为：

$$P'(U) = \frac{A(U)}{2\pi} \quad (5)$$

步骤④：为防止固定翼无人机在基于趋光性避障中受局部趋光影响而造成飞行碰撞，在式(5)所示的候选趋光性模型中引入距离因子，可以表示为：

$$\xi = e^{\delta \cdot \Delta r} \quad (6)$$

其中， e 为指数函数； δ 为距离因子的权重系数； Δr 是无人机到障碍物的距离；

步骤⑤：固定翼无人机趋光性避障模型可以最终表示为：

$$P(U) = P'(U) \cdot \xi = \frac{A(U)}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} = \begin{cases} 1 & (N=0) \\ \frac{2\pi - \angle B_1'UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N=1) \\ \frac{\angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N \geq 2) \end{cases} \quad (7)$$

其中， N 为无人机检测到的障碍物总个数。

4. 权利要求 1 所述的固定翼无人机避障控制策略及流程，其特征在于：

步骤①：建立固定翼无人机的飞行约束模型，具体可以表示为：

$$\begin{cases} 0 < v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ |w| \leq w_{\max} \\ R \geq R_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

其中， v_{\min} 和 v_{\max} 分别表示固定翼无人机的最小、最大飞行速度； w 为固定翼无人机的航向角速度； w_{\max} 为最大航向角速度； R 为转弯半径； R_{\min} 为固定翼无人机的最小转弯半径；

步骤②：根据步骤①中固定翼无人机的飞行特性，将固定翼无人机在飞行过程中遇到障碍物的情形分为情形 1、情形 2 和情形 3，并设计相应的飞行方案：

- a) 情形 1：多个障碍物间的间距大于固定翼无人机的最小转弯半径，此时无人机可以以任意入射方向通过障碍区域；
- b) 情形 2：多个障碍物间的间距小于固定翼无人机的最小转弯半径，此时要保证无人机无碰撞的通过障碍区域，其入射方向(θ)满足约束范围 $\theta \in [\theta_2, \theta_1]$ ，其中， θ_1 和 θ_2 为保证无人机无碰撞的临界入射方向；
- c) 情形 3：当存在两个相同趋光大小的可飞行空域，无人机依照航迹飞行油耗最少的原则，选择最优可飞行路径。

5. 权利要求 1 所述的固定翼无人机控制律，其特征在于：

步骤①：搭建基于人工势场法的固定翼无人机避障模型，其中，飞行目标对无人

机的引力函数可以表示为：

$$U_{att} = \frac{1}{2} \lambda (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (9)$$

其中， \mathbf{q}_g 为飞行目标的位置； λ 为引力系数；

障碍物对无人机的斥力函数可以表示为：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0 & , d_i > d_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中， d_i 为无人机与探测到的第 i 个障碍物的间距； d_0 为障碍物对无人机的最大排斥距离； η 为斥力系数；

步骤②：将所设计的趋光性模型引入步骤①中的人工势场法避障模型中，引入后的引力函数可以表示为：

$$U'_{att} = \frac{\lambda}{2} [1 + k_a \cdot P(U)] (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (11)$$

其中， k_a 为引力函数中的趋光模型权重系数；

引入后的斥力函数可以表示为：

$$U'_{rep} = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left[1 + \frac{k_r}{P(U)} \right] \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0 & , d_i > d_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中， k_r 为斥力函数中的趋光模型权重系数；

步骤③：基于步骤②中的避障模型，设计固定翼无人机控制律，具体表示为：

$$\mathbf{u} = -c_1 \nabla U'_{att} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g) - c_2 \sum_{i=1}^N \nabla U'_{rep} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{o_i}) \quad (13)$$

其中， \mathbf{q}_{o_i} 为第 i 个障碍物的位置； c_1 和 c_2 为控制系数；

步骤④：将所设计的控制律作用于固定翼无人机，保证固定翼无人机的无碰撞飞行。

说明书

一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法

技术领域

本发明涉及一种无人机避障控制方法，尤其是一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法，属于无人系统控制技术领域。

背景技术

目前，无人机因具有低成本、强机动性等特点被广泛应用于如边境巡逻、情报侦察、电力巡检、农业植保等军事和民用领域。其中，避障问题是无人机执行任务过程中必须要解决的关键问题之一。无人机避障控制是指无人机在所设计的避障控制律作用下，能够从起始点安全飞至目标点的控制方法，其中还需要考虑到无人机的自身物理约束等问题。

在目前的无人机避障控制方法中，主要包括以下两类：1）基于航路规划算法的避障控制（具体又可划分为A*搜索算法、粒子群算法、快速扩展随机树（RRT）算法以及遗传算法），这类控制算法是通过寻找无人机从起始点到目标点之间的一条可飞行航路，指导无人机避障飞行。然而这类避障控制方法往往过于依赖于全局信息，仅适用于障碍环境已知、实时性要求较低的情况；且该类方法计算复杂度高，需要大量运算时间和存储空间，对于复杂、未知障碍环境不具有很好的避障控制效果；2）基于局部防碰撞算法的避障方法（具体又可划分为基于速度障碍法的避障控制、基于人工势场法的避障控制），这类避障控制方法通过机载传感实时探测障碍物位置，及时采取避障措施，具有较高的实时性，对于未知的障碍环境具有较好的应用效果；然而，这类控制方法又存在如局部极小、不可到达等缺陷，降低了避障控制精度。

此外，对于固定翼无人机避障控制问题，不同于旋翼无人机，固定翼无人机无法在空中悬停，且在控制过程中需要考虑如最小转弯半径等诸多飞行约束，固定翼无人机的避障控制问题研究较为复杂。因此，亟需研究一种更有效的固定翼无人机避障控制方法。

发明内容

为了克服现有技术的缺陷，本发明提出一种基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法，来保证固定翼无人机的无碰撞飞行，提高固定翼无人机飞行的安全性和可靠性，

为实现上述目的，本发明采用以下技术方案：

本发明所述的一种固定翼无人机避障控制方法：

步骤 1： 搭建固定翼无人机模型，并将固定翼无人机模型转化为基于速度、位置控制的二阶模型；

步骤 2： 根据鸟类基于趋光性避障的特性，建立固定翼无人机趋光性避障模型；

步骤 3： 基于步骤 2 中所建立的趋光性避障模型，结合固定翼无人机飞行约束，设计相应的固定翼无人机避障策略及流程；

步骤 4： 将步骤 2 中所建立的趋光性避障模型与人工势场法相结合，设计固定翼无人机控制律，保证该固定翼无人机无碰撞飞行。

本发明所述的固定翼无人机模型，其特征在于：

固定翼无人机的二维简化动力学模型可以表示为：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{v} = n^v \\ \dot{\psi} = n^\psi \end{cases} \quad (1)$$

其中， (x, y) 为固定翼无人机在惯性坐标系中的位置； ψ 为无人机的航向角； v 为无人机的速度； n^v 和 n^ψ 为系统控制输入；

经过模型转换，固定翼无人机基于速度、位置控制的二阶模型为：

$$\begin{cases} \dot{q} = p \\ \dot{p} = u \end{cases} \quad (2)$$

其中， $q = [x, y]^T$ 表示无人机的位置； p 为无人机的速度； u 为无人机的控制输入。

本发明所述的固定翼无人机趋光性避障模型，其特征在于：

将无人机飞行过程中可能遇到的障碍物情形分为“单个障碍物”和“多个障碍物”两种进行趋光性建模：

步骤①：在单个障碍物情形下，无人机(U)可飞行空域的角度大小为：

$$A(U) = 2\pi - \angle B_1'UB_2' \quad (3)$$

其中， $\angle B_1'UB_2'$ 为受障碍物影响，无人机不可飞行的空域角度；

步骤②：在多个障碍物情形下，无人机(U)可飞行空域的角度大小为：

$$A(U) = \angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2' \quad (4)$$

其中， $\angle B_1UB_1'$ 和 $\angle B_2UB_2'$ 为受障碍物影响，无人机不可飞行的空域角度； $\angle B_1UB_2$ 为无人机在障碍物间的可飞行空域；

步骤③：将趋光性的大小用无人机进入可飞行区域的概率来衡量，且该概率服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布，因此候选趋光性模型可以表示为：

$$P'(U) = \frac{A(U)}{2\pi} \quad (5)$$

步骤④：为防止固定翼无人机在基于趋光性避障中受局部趋光影响而造成飞行碰撞，在式(5)所示的候选趋光性模型中引入距离因子，可以表示为：

$$\xi = e^{\delta \cdot \Delta r} \quad (6)$$

其中， e 为指数函数； δ 为距离因子的权重系数； Δr 是无人机到障碍物的距离；
步骤⑤：固定翼无人机趋光性避障模型可以最终表示为：

$$P(U) = P'(U) \cdot \xi = \frac{A(U)}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} = \begin{cases} 1 & (N=0) \\ \frac{2\pi - \angle B_1'UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N=1) \\ \frac{\angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N \geq 2) \end{cases} \quad (7)$$

其中， N 为无人机检测到的障碍物总个数。

本发明所述的固定翼无人机避障控制策略及流程，其特征在于：

步骤①：建立固定翼无人机的飞行约束模型，具体可以表示为：

$$\begin{cases} 0 < v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ |w| \leq w_{\max} \\ R \geq R_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

其中， v_{\min} 和 v_{\max} 分别表示固定翼无人机的最小、最大飞行速度； w 为固定翼无人机的航向角速度； w_{\max} 为最大航向角速度； R 为转弯半径； R_{\min} 为固定翼无人机的最小转弯半径；

步骤②：根据步骤①中固定翼无人机的飞行特性，将固定翼无人机在飞行过程中遇到障碍物的情形分为情形1、情形2和情形3，并设计相应的飞行方案：

- a) 情形1：多个障碍物间的间距大于固定翼无人机的最小转弯半径，此时无人机可以以任意入射方向通过障碍区域；
- b) 情形2：多个障碍物间的间距小于固定翼无人机的最小转弯半径，此时要保证无人机无碰撞的通过障碍区域，其入射方向(θ)满足约束范围 $\theta \in [\theta_2, \theta_1]$ ，其中， θ_1 和 θ_2 为保证无人机无碰撞的临界入射方向；
- c) 情形3：当存在两个相同趋光大小的可飞行空域，无人机依照航迹飞行油耗最少的原则，选择最优可飞行路径。

本发明所述的固定翼无人机控制律，其特征在于：

步骤①：搭建基于人工势场法的固定翼无人机避障模型，其中，飞行目标对无人机的引力函数可以表示为：

$$U_{att} = \frac{1}{2} \lambda (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (9)$$

其中， \mathbf{q}_g 为飞行目标的位置； λ 为引力系数；

障碍物对无人机的斥力函数可以表示为：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0 & , d_i > d_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中， d_i 为无人机与探测到的第 i 个障碍物的间距； d_0 为障碍物对无人机的最大排斥距离； η 为斥力系数；

步骤②：将所设计的趋光性模型引入步骤①中的人工势场法避障模型中，引入后的引力函数可以表示为：

$$U'_{att} = \frac{\lambda}{2} [1 + k_a \cdot P(U)] (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (11)$$

其中， k_a 为引力函数中的趋光模型权重系数；

引入后的斥力函数可以表示为：

$$U'_{rep} = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left[1 + \frac{k_r}{P(U)} \right] \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0 & , d_i > d_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中， k_r 为斥力函数中的趋光模型权重系数；

步骤③：基于步骤②中的避障模型，设计固定翼无人机控制律，具体表示为：

$$\mathbf{u} = -c_1 \nabla U'_{att} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g) - c_2 \sum_{i=1}^N \nabla U'_{rep} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{o_i}) \quad (13)$$

其中， \mathbf{q}_{o_i} 为第 i 个障碍物的位置； c_1 和 c_2 为控制系数；

步骤④：将所设计的控制律作用于固定翼无人机，保证固定翼无人机的无碰撞飞行。

本发明与现有技术相比，其显著优点：

- (1) 本发明基于鸟类趋光避障特性，在充分考虑固定翼无人机飞行约束下，设计了一种新型固定翼无人机避障控制方法，有效解决了固定翼无人机在飞行过程中的避碰问题，为固定翼无人机安全飞行、完成飞行任务提供了重要保障；
- (2) 本发明所公开的固定翼无人机避障控制算法，对于处理复杂的、未知的、突发的避障问题具有较高的适应性和有效性，且计算简单、实时性高，该方法也可移植并应用于编队避障控制问题中，具有较好的工程应用前景。

附图说明

图 1 是本发明提供的固定翼无人机避障控制方法总体流程示意图。

图 2 是本发明提供的单个障碍物下无人机趋光飞行示意图。

图 3 是本发明提供的多个障碍物下无人机趋光飞行示意图。

图 4 是本发明提供的无人机局部趋光飞行示意图。

图 5 是本发明提供的无人机避障飞行情形 1 的示意图。

图 6 是本发明提供的无人机避障飞行情形 2 的示意图。

图 7 是本发明提供的无人机避障飞行情形 3 的示意图。

图 8 是本发明提供的固定翼无人机避障控制方法及流程示意图。

图 9 是本发明提供的无人机避障控制实施例的仿真图。

图 10 是本发明提供的无人机避障控制实施例的仿真图。

具体实施方式

现结合实施例对本发明做进一步描述：

实施例 1

参见图 1，本发明具体包括步骤如下：

步骤 1： 搭建固定翼无人机模型，并将固定翼无人机模型转化为基于速度、位置控制的二阶模型；

步骤 2： 根据鸟类基于趋光性避障的特性，建立固定翼无人机趋光性避障模型；

步骤 3： 基于步骤 2 中所建立的趋光性避障模型，结合固定翼无人机飞行约束，设计相应的固定翼无人机避障策略及流程；

步骤 4： 将步骤 2 中所建立的趋光性避障模型与人工势场法相结合，设计固定翼无人机控制律，保证该固定翼无人机无碰撞飞行。

实施例 2

本发明中，固定翼无人机模型，其特征在于：

固定翼无人机的二维简化动力学模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{v} = n^v \\ \dot{\psi} = n^\psi \end{cases} \quad (1)$$

其中， (x, y) 为固定翼无人机在惯性坐标系中的位置坐标； ψ 为无人机的航向角； v 为无人机的线速度； n^v 和 n^ψ 为系统控制输入。

经过模型转换，固定翼无人机基于速度、位置控制的二阶模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{p} \\ \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{u} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{q}=[x,y]^T$ 表示无人机的位置； \mathbf{p} 为无人机的速度； \mathbf{u} 为无人机的控制输入。上述过程由下面推导转换得到：

由于式(1)所给模型为非线性模型，为了便于求解和分析，需要对式(1)进行反馈线性化处理。

首先利用坐标转化，令 $\mathbf{q}=[x,y]^T$ ，并对其求一阶导数为：

$$\mathbf{p} = \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \psi \\ v \sin \psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(3)求一阶导数得到：

$$\dot{\mathbf{p}} = \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\dot{x}} \\ \dot{\dot{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v} \cos \psi - v \dot{\psi} \sin \psi \\ \dot{v} \sin \psi + v \dot{\psi} \cos \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -v \sin \psi \\ \sin \psi & v \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{n}^v \\ \dot{n}^\psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

取

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -v \sin \psi \\ \sin \psi & v \cos \psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n^v & n^\psi \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u^v & u^\psi \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

且定义

$$\mathbf{u} = \mathbf{H} \mathbf{n} \quad (8)$$

至此，新的控制输入 \mathbf{u} 与系统原控制输入 \mathbf{n} 的关系建立如下：

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{H}_i^{-1} \mathbf{u}_i \quad (9)$$

则式(1)所表示的固定翼无人机系统可以转化为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{p} \\ \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{u} \end{cases} \quad (10)$$

实施例 3

本发明中，固定翼无人机趋光性避障模型，其特征在于：

将无人机飞行过程中可能遇到的障碍物情形分为“单个障碍物”和“多个障碍物”两种进行趋光性建模：

步骤①：参见图 2， l'_1 和 l'_2 是无人机与障碍物的切线，切点分别为 B'_1 和 B'_2 ；则在单个障碍物情形下，无人机(U)可飞行空域的角度大小为：

$$A(U) = 2\pi - \angle B'_1 U B'_2 \quad (11)$$

其中, $\angle B_1'UB_2'$ 为受障碍物影响, 无人机不可飞行的空域角度。

步骤②: 参见图 3, l_1, l_2, l_3 和 l_4 是无人机与两个相邻障碍物的四条切线, 切点分别为 B_1, B_1', B_2' 和 B_2 ; B 点是无人机速度方向延长线与两个障碍物连接线的交点; Δr 为线段 UB 的长度; 则在多个障碍物情形下, 无人机 (U) 可飞行空域的角度大小为:

$$A(U) = \angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2' \quad (12)$$

其中, $\angle B_1UB_1'$ 和 $\angle B_2UB_2'$ 为受障碍物影响, 无人机不可飞行的空域角度。

步骤③: 将趋光性的大小用无人机进入可飞行区域的概率来衡量, 且这一概率服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布, 因此候选趋光性模型可以表示为:

$$P'(U) = \frac{A(U)}{2\pi} \quad (13)$$

步骤④: 为防止固定翼无人机在基于趋光性避障中受局部趋光影响而造成飞行碰撞 (参见图 4, 根据候选趋光性模型的定义, 存在 $\angle p_1Up_2 > \angle p_3Up_4$, 则无人机会误飞至 p 点), 在式 (5) 所示的候选趋光性模型中引入距离因子, 距离因子可以表示为:

$$\xi = e^{\delta \cdot \Delta r} \quad (14)$$

其中, e 为指数函数; δ 为距离因子的权重系数; Δr 是无人机到检测到的障碍物距离, 具体可以表示为:

$$\Delta r = \begin{cases} \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2}, & N = 1 \\ \sqrt{(x_B - x)^2 + (y_B - y)^2}, & N \geq 2 \end{cases} \quad (15)$$

其中, (x_o, y_o) 为单个障碍物下障碍物的位置; (x_B, y_B) 为多个障碍物下 B 点的位置;

步骤⑤: 固定翼无人机趋光性避障模型可以最终表示为:

$$P(U) = P'(U) \cdot \xi = \frac{A(U)}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} = \begin{cases} 1 & (N = 0) \\ \frac{2\pi - \angle B_1'UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N = 1) \\ \frac{\angle B_1UB_2 + \pi - \angle B_1UB_1' - \angle B_2UB_2'}{2\pi} \cdot e^{\delta \cdot \Delta r} & (N \geq 2) \end{cases} \quad (16)$$

实施例 4

本发明中, 固定翼无人机避障控制策略及流程, 其特征在于:

步骤①: 建立固定翼无人机的飞行约束模型, 具体可以表示为:

$$\begin{cases} 0 < v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ |w| \leq w_{\max} \\ R \geq R_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

其中, v_{\min} 和 v_{\max} 分别表示固定翼无人机的最小、最大飞行速度; w 为固定翼无人机的航向角速度; w_{\max} 为最大航向角速度; R 为转弯半径; R_{\min} 为固定翼无人机的最

小转弯半径；

步骤②：根据步骤①中固定翼无人机的飞行特性，将固定翼无人机在飞行过程中遇到障碍物的情形分为情形 1(参见图 5)、情形 2(参见图 6)和情形 3(参见图 7)，并设计相应的飞行方案：

- a) 情形 1：多个障碍物间的间距大于固定翼无人机的最小转弯半径(参见图 5，此时满足 $2R_{\min} < d'$)，此时无人机可以以任意入射方向通过障碍区域；
- b) 情形 2：多个障碍物间的间距小于固定翼无人机的最小转弯半径，此时要保证无人机无碰撞的通过障碍区域，其入射方向(θ)满足约束范围 $\theta \in [\theta_2, \theta_1]$ ，其中， θ_1 和 θ_2 为保证无人机无碰撞的临界入射方向(参见图 6， θ_1 和 θ_2 为线段 UB 与无人机临界入射速度方向的夹角，其中 $\odot O_1$ 和 $\odot O_2$ 分别与障碍物 1、障碍物 2 相切)；
- c) 情形 3：当存在两个相同趋光大小的可飞行空域，无人机依照航迹飞行油耗最少的原则，选择最优可飞行路径(参见图 7， T_1, T_2, T_3 和 T_4 为无人机与障碍物的切线，此时存在 $\angle T_1UT_2 = \angle T_3UT_4$)；

具体的固定翼无人机避障控制策略及流程参见图 8 所示。

实施例 5

本发明中，固定翼无人机的控制律，其特征在于：

步骤①：搭建基于人工势场法的固定翼无人机避障模型，其中，飞行目标对无人机的引力函数可以表示为：

$$U_{att} = \frac{1}{2} \lambda (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (18)$$

其中， \mathbf{q}_g 为飞行目标的位置； λ 为引力系数；

障碍物对无人机的斥力函数可以表示为：

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0 & , d_i > d_0 \end{cases} \quad (19)$$

其中， d_i 为无人机与探测到的第 i 个障碍物的间距； d_0 为障碍物对无人机的最大排斥距离； η 为斥力系数；

步骤②：将所设计的趋光性模型引入步骤①中的人工势场法避障模型中，引入后的引力函数可以表示为：

$$U'_{att} = \frac{\lambda}{2} [1 + k_a \cdot P(U)] (\mathbf{q} - \mathbf{q}_g)^2 \quad (20)$$

其中， k_a 为引力函数中的趋光模型权重系数；

引入后的斥力函数可以表示为：

$$U'_{rep} = \begin{cases} \frac{\eta}{2} \left[1 + \frac{k_r}{P(U)} \right] \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & d_i \leq d_0 \\ 0, & d_i > d_0 \end{cases} \quad (21)$$

其中, k_r 为斥力函数中的趋光模型权重系数;

步骤③: 基于步骤②中的避障模型, 设计固定翼无人机控制律, 具体表示为:

$$\mathbf{u} = -c_1 \nabla U'_{att}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_g) - c_2 \sum_{i=1}^N \nabla U'_{rep}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_{o_i}) \quad (22)$$

其中, \mathbf{q}_{o_i} 为第 i 个障碍物的位置; c_1 和 c_2 为控制系数;

步骤④: 将所设计的控制律作用于固定翼无人机, 保证固定翼无人机的无碰撞飞行。

实施例 6

本发明提出的基于仿鸟类趋光性的固定翼无人机避障控制方法, 在 MATLAB 环境下进行了验证, 具体实施例通过设置障碍环境, 无人机飞向目标点, 无人机在所设计的控制律作用下, 安全、无碰撞的到达目标点, 以此来验证所设计算法的有效性;

其中, 无人机的初始位置为 $(-1, -3)$; 目标点位置为 $(15, 15)$; 最大飞行速度为 $v_{\max} = 0.4 \text{ km/s}$; 最小飞行速度为 $v_{\min} = 0.1 \text{ km/s}$; 最小转弯半径为 $R_{\min} = 0.45 \text{ km}$; 距离因子为 $\delta = 0.45$; 趋光模型权重系数 $k_r = 0.5$, $k_a = 0.3$;

仿真结果参见图 9、图 10 所示: 固定翼无人机能够在飞行过程中有效躲避障碍物, 实现安全、可靠的稳定飞行。

说明书附图

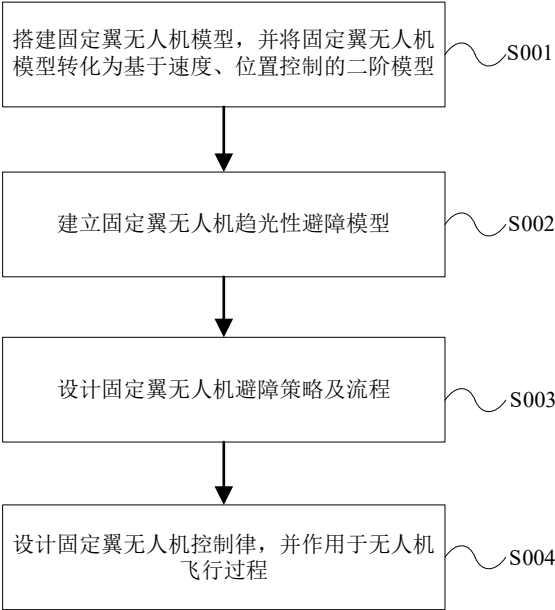


图 1

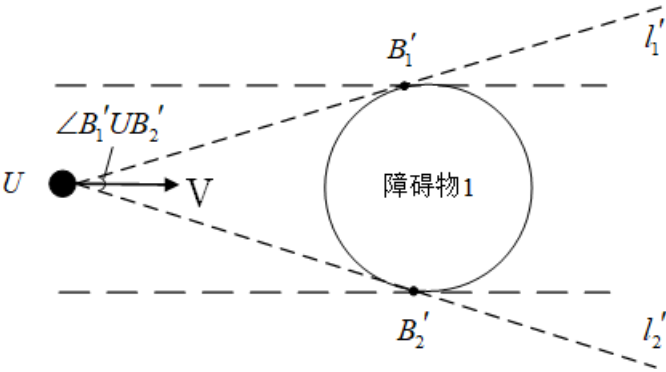


图 2

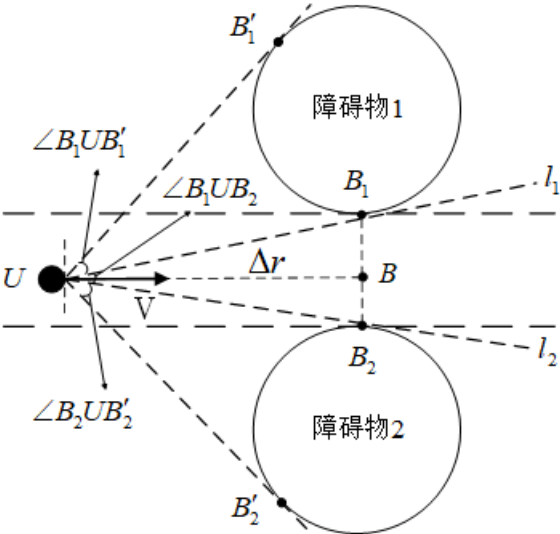


图 3

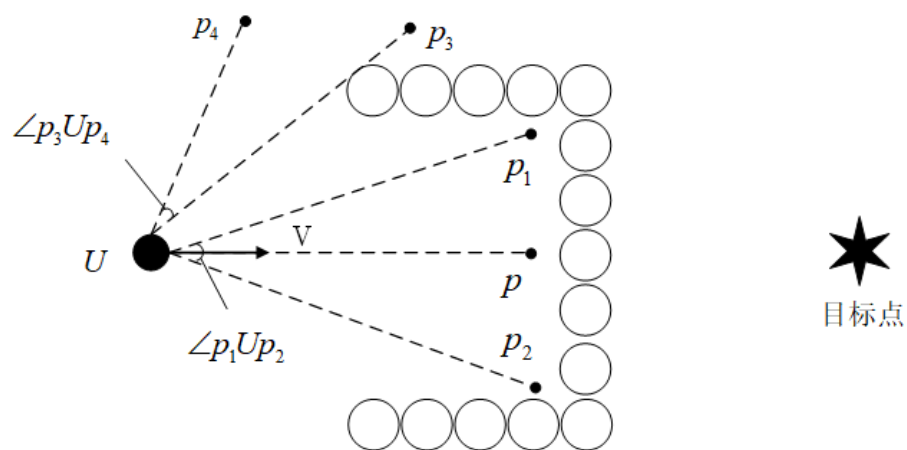


图 4

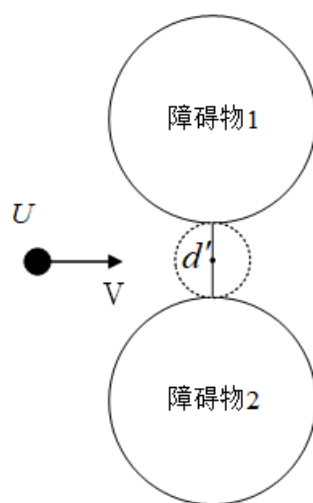


图 5

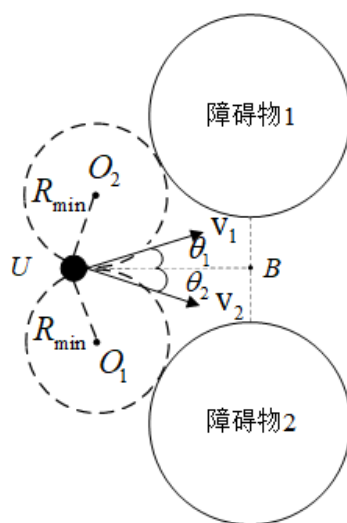


图 6

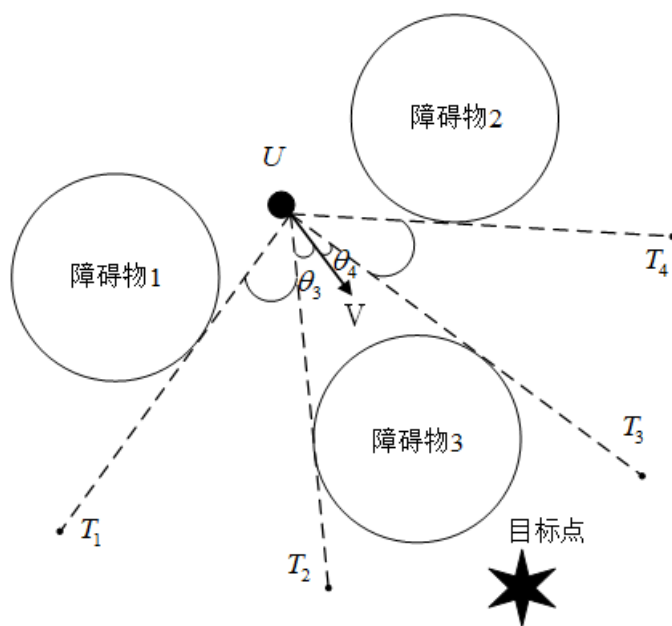


图 7

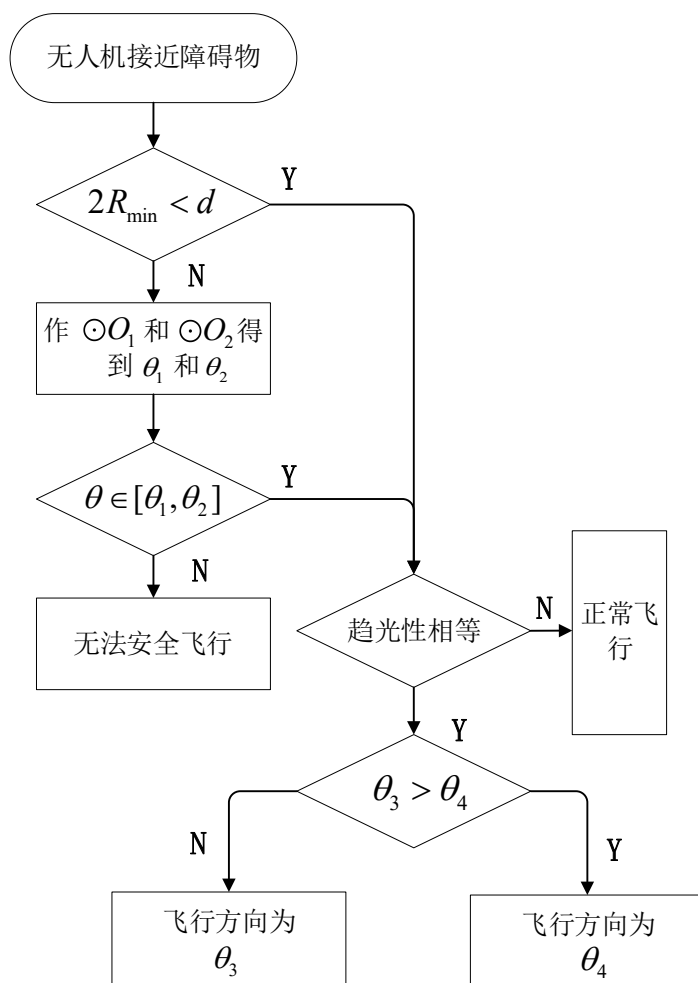


图 8

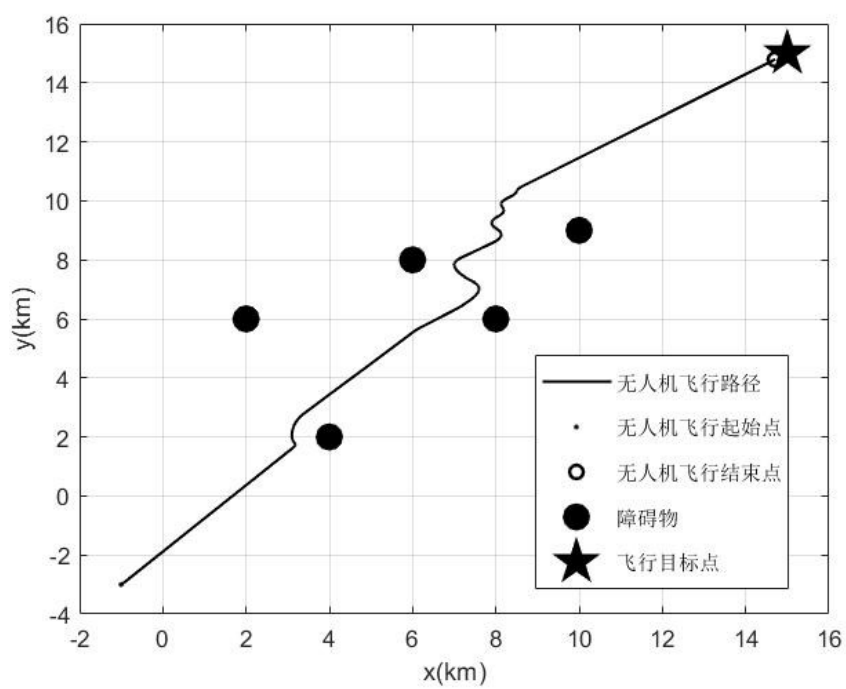


图 9

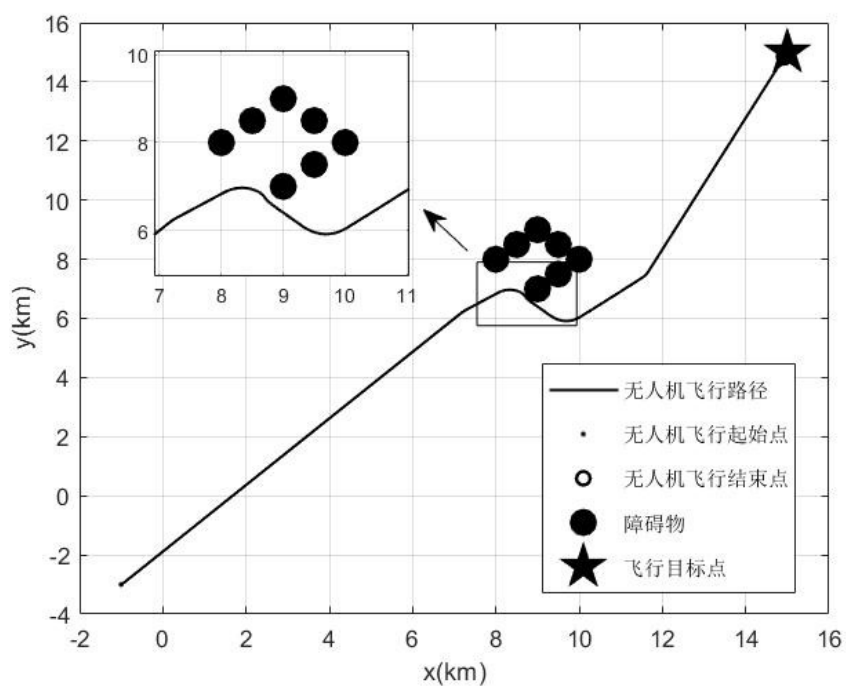


图 10

摘要附图

