



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111256703 A  
(43)申请公布日 2020.06.09

(21)申请号 202010374783.5

(22)申请日 2020.05.07

(71)申请人 江苏方天电力技术有限公司  
地址 211102 江苏省南京市江宁科学园天元中路19号

(72)发明人 黄郑 王红星 潘志新 周航  
宋煜 黄祥 张星炜 赵宏伟

(74)专利代理机构 南京钟山专利代理有限公司  
32252  
代理人 徐博

(51)Int.Cl.  
G01C 21/20(2006.01)

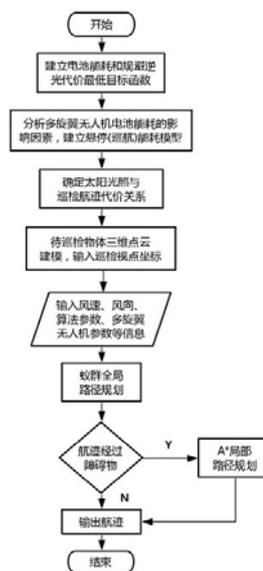
权利要求书4页 说明书11页 附图3页

(54)发明名称

一种多旋翼无人机巡检路径规划方法

(57)摘要

本发明是一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,首先,为保证巡检的安全性和低能耗性,建立电池能耗和规避逆光代价最低目标函数;分析影响多旋翼无人机巡检电池能耗的影响因素,确定悬停能耗以及巡航能耗;确定太阳光照与多旋翼无人机巡检航迹间关系;对扫描得到的待巡检物体三维点云模型进行建模,同时输入巡航过程中所有视点坐标;运用改进蚁群算法输出最优巡航路径、运用改进A\*混合算法输出相邻两视点间的最优飞行路径,最终输出最优航迹。该方法能够确定无人机巡航过程中能耗以及太阳光照对航迹规划的影响,为无人机巡检提供一条安全、低能耗、规避逆光的最优路径,提升多旋翼无人机自动巡检的安全性和可靠性。



1. 一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:通过以电池能耗和规避逆光代价最低为目标函数,通过改进蚁群算法和改进A\*混合算法完成路径规划;具体步骤如下:

步骤1,为保证巡检的安全性和低能耗性,建立电池能耗和规避逆光代价最低目标函数;

步骤2,分析影响多旋翼无人机巡检电池能耗的影响因素,确定悬停能耗以及巡航能耗;

步骤3,确定太阳光照与多旋翼无人机巡检航迹间关系;

步骤4,对扫描得到的待巡检物体三维点云模型进行建模,同时输入巡航过程中所有视点坐标;

步骤5,运用改进蚁群算法输出最优巡航路径、运用改进A\*混合算法输出相邻两视点间的最优飞行路径,最终输出最优航迹。

2. 如权利要求1所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:所述的步骤1中建立的电池能耗和规避逆光代价最低目标函数如下:

$$f = \min \left\{ C = \xi_1 \left( \sum_{i=1}^n w_i + \sum_{j=1}^{n-1} w_j \right) + \xi_2 \sum_{k=1}^{n-1} \psi_k \right\}$$

式中,  $\xi_1, \xi_2$  为控制能耗和逆光代价的参数,且  $\xi_1 + \xi_2 = 1$ , 当多旋翼无人机视觉系统较优或光照条件影响较少时,此时可令  $\xi_2 = 0$ ; 根据多旋翼无人机性能或者巡检目的不同,参数可选取不同数值;  $\psi_k$  为规避逆光代价,  $w_i$  为悬停时的能耗,  $w_j$  为航迹段之间的能耗。

3. 如权利要求2所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:所述的步骤2中悬停能耗以及巡航能耗的表达式如下:

悬停能耗表达式:

$$w_i = P_{V_w} \cdot t_1$$

式中,  $P_{V_w}$  为悬停的额定功率,由于无人机在悬停状态下的能耗只用来克服风速的影响,因此,可用悬停时风速所对应的功率作为悬停时的额定功率,  $t_1$  为在一个视点中悬停拍摄时间和调整姿态角的时间和;

巡航能耗表达式:

$$w_j = \left( P_{V_w} + P_V + P_{V_I} \right) \cdot t_2$$

式中,  $w_j$  为航迹段之间的能耗,  $P_{V_w}$  为抵抗侧风的能耗功率,  $P_V$  为无人机直飞航线

上实际航速水平对应的能耗功率,  $P_{V_I}$  为实际航速竖直方向对应的能耗功率,  $t_2$  为巡航时间。

4. 如权利要求3所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法, 其特征在于: 无人机巡航过程中将地速  $V_I$  投影到水平  $X_I O Y_I$  平面, 所述的  $X_I O Y_I$  平面为水平二维平面, 投影为  $V_I'$ ,  $V_I''$  和  $V$  可根据下列公式求得:

$$\gamma = \arcsin \frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}}$$

$$V_I' = V_I \cdot \cos \gamma$$

$$V_I'' = V_I \cdot \sin \gamma$$

$$V = V_I' - \cos(\delta - \chi) \cdot V_w$$

式中,  $V_I''$  为地速  $V_I$  在竖直方向的投影,  $\gamma$  为梯度角、 $\delta$  为风向角, 风向角由北偏东90度开始记为0度, 逆时针方向递增;  $V_w$  为二维平面干扰风速, 视点i的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ; 视点j的坐标为  $(x_j, y_j, z_j)$ ;  $V$  为克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的实际投影;

地速在  $X_I O Y_I$  平面的投影与X轴的夹角  $\chi$  的计算公式如下:

$$\chi = \arctan \frac{y_j}{x_j}$$

式中,  $\chi$ 、 $\delta$  的大小均为与X轴正方向所成的夹角;

无人机由视点i飞行至视点j的距离  $D$  为:

$$D = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

所需时间  $t_2$  为:

$$t_2 = \frac{D}{V_I}$$

根据克服二维平面干扰风后的地速 $V_I$ 在 $X_I O Y_I$ 平面的投影速度 $V$ 、实际航速垂直方向投影速度 $V_I''$ 和侧风风速 $V_W''$ 能够查表得到相关功率 $P_{V_W''}$ 、 $P_V$ 和 $P_{V_I''}$ 。

5. 如权利要求3所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:所述的步骤3中,以太阳光照和航迹之间的角度关系作为以太阳光照与航迹间关系,所述的以太阳光照和航迹之间的角度关计算方式如下:

$$\psi_k = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| * |\vec{v}_2|}$$

式中, $\psi_k$ 表示规避逆光代价,用以太阳光照与航迹之间的夹角来表示; $\vec{v}_1$ 表示光线三维向量,该数值由用户输入得到; $\vec{v}_2$ 表示相邻航迹段三维向量。

6. 如权利要求5所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:所述的步骤5中改进蚁群算法具体步骤如下:

步骤5.1,参数初始化:设置循环次数 $N_c = 0$ 、最大循环次数G、将m只蚂蚁置于n个视点上,每条路径上的初始信息素 $\tau_{ij} = 1$ ;

步骤5.2,视点选择策略:第k只蚂蚁从当前视点i选择下一个视点j的概率由路径上残留的信息素量和启发式信息即两个视点间的功耗决定,公式为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{S \in J_k(i)} \tau_{is}^\alpha \cdot \eta_{is}^\beta}, & \text{当 } j \in J_k(i) \text{ 时} \\ 0 & \text{, 其他} \end{cases}$$

式中, $J_k(i)$ 表示蚂蚁k下一步允许遍历的视点的集合; $\eta_{ij}$ 表示视点i到视点j的能耗; $\alpha$ 、 $\beta$ 为启发因子, $\alpha$ 的取值为[1,4], $\beta$ 的取值为[3,5];

步骤5.3,更新信息素:当每只蚂蚁遍历完所有视点后,根据下列公式进行信息素的更新:

$$\tau_{ij}^n = (1 - \rho) \tau_{ij}^{n-1} + \Delta \tau_{ij}$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{if } pass_{ij} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$L_k = \sum_{j=1}^{n-1} w_j$$

式中,  $L_k$  代表第  $k$  只蚂蚁巡检完所有视点消耗的能耗, 其中  $w_j$  代表第  $j$  个航迹段的能耗, 由于全局规划时, 相同视点悬停时间相同, 所以无需计算悬停时能耗,  $\tau_{ij}^n$  代表第  $n$  次迭代后, 各路径上的信息素;  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) 代表蒸发系数,  $\Delta\tau_{ij}$  代表信息素的增量;  $\Delta\tau_{ij}^k$  代表第  $k$  只蚂蚁在边  $ij$  上的增量;  $Q$  为常数。

7. 如权利要求6所述的一种多旋翼无人机巡检路径规划方法, 其特征在于: 所述的步骤5中改进A\*混合算法通过设置启发函数, 求解出在三维空间里任意两点间能耗最小的代价表现, 所述的启发函数如下:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

$$g(n) = w_s + w_{(s,i)}$$

$$h(n) = w_{(i,d)} + w_d$$

式中,  $f(n)$  为任意两个视点的能耗总和;  $g(n)$  为始点悬停的能耗和始点到当前节点  $i$  的能耗总和;  $h(n)$  为目标点悬停的能耗和当前节点直飞到目标点的能耗总和;  $w_s$  为起始悬停点的悬停功耗,  $w_d$  为终结悬停点的悬停功耗;  $w_{(s,i)}$ 、 $w_{(i,d)}$  为巡航状态的功耗。

## 一种多旋翼无人机巡检路径规划方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及无多旋翼无人机航迹规划技术领域,具体的说是一种多旋翼无人机巡检路径规划方法。

### 背景技术

[0002] 随着航空工业和科技的发展,采用多旋翼无人机来进行巡检成为近来研究的热点。多旋翼无人机不仅重量轻、体积小、成本低;而且灵活性高,便于控制;通过人工或者自动等方式可以实现高效且全方位的巡检服务。多旋翼无人机搭载各类可见光、红外、紫外或者激光设备一同执行巡检任务,将可以全面检测和掌握待检测物体的安全情况。多旋翼无人机按照一定的航路飞行,采集图像或者视频来获取待检测物体的设备状态和周围环境情况,然后由人工观察图像视频或者智能算法自动检测待检测物体存在的安全隐患和故障。通过多旋翼无人机巡检,将能够大幅降低成本和劳动强度,提高巡检过程的有效性。

[0003] 目前多旋翼无人机的应用和相关路径规划算法,主要存在以下问题:首先,对于多旋翼无人机在三维空间中面向三维物体结构的全覆盖路径规划方法研究很少;其次,现有巡检路径多以路径最短作为巡检目标,未能考虑自然风因素和光照条件对航迹规划的影响,不能有效综合针对杆塔、多旋翼无人机性能的安全约束实现最优路径规划。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是提供一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,能够确定无人机巡航过程中能耗以及太阳光照对航迹规划的影响,为无人机巡检提供一条安全、低能耗、规避逆光的最优路径;减少巡检的人力成本,提升多旋翼无人机自动巡检的安全性和可靠性。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案为:

一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:通过以电池能耗和规避逆光代价最低为目标函数,通过改进蚁群算法和改进A\*混合算法完成路径规划;具体步骤如下:

步骤1,为保证巡检的安全性和低能耗性,建立电池能耗和规避逆光代价最低目标函数;

步骤2,分析影响多旋翼无人机巡检电池能耗的影响因素,确定悬停能耗以及巡航能耗;

步骤3,确定太阳光照与多旋翼无人机巡检航迹间关系;

步骤4,对扫描得到的待巡检物体三维点云模型进行建模,同时输入巡航过程中所有视点坐标;

步骤5,运用改进蚁群算法输出最优巡航路径、运用改进A\*混合算法输出相邻两视点间的最优飞行路径,最终输出最优航迹。

[0006] 所述的步骤1中建立的电池能耗和规避逆光代价最低目标函数如下:

$$f = \min \left\{ C = \xi_1 \left( \sum_{i=1}^n w_i + \sum_{j=1}^{n-1} w_j \right) + \xi_2 \sum_{k=1}^{n-1} \psi_k \right\}$$

式中,  $\xi_1, \xi_2$  为控制能耗和逆光代价的参数, 且  $\xi_1 + \xi_2 = 1$ , 当多旋翼无人机视觉系统较优或光照条件影响较少时, 此时可令  $\xi_2 = 0$ ; 根据多旋翼无人机性能或者巡检目的不同, 参数可选取不同数值;  $\psi_k$  为规避逆光代价,  $w_i$  为悬停时的能耗,  $w_j$  为航迹段之间的能耗。

[0007] 所述的步骤2中悬停能耗以及巡航能耗的表达式如下:

悬停能耗表达式:

$$w_i = P_{V_W} \cdot t_1$$

式中,  $P_{V_W}$  为悬停的额定功率, 由于无人机在悬停状态下的能耗只用来克服风速的影响, 因此, 可用悬停时风速所对应的功率作为悬停时的额定功率,  $t_1$  为在一个视点中悬停拍摄时间和调整姿态角的时间和;

巡航能耗表达式:

$$w_j = \left( P_{V_W''} + P_V + P_{V_I''} \right) \cdot t_2$$

式中,  $w_j$  为航迹段之间的能耗,  $P_{V_W''}$  为抵抗侧风的能耗功率,  $P_V$  为无人机直飞航线上实际航速水平对应的能耗功率,  $P_{V_I''}$  为实际航速竖直方向对应的能耗功率,  $t_2$  为巡航时间。

[0008] 无人机巡航过程中将地速  $V_I$  投影到水平  $X_I O Y_I$  平面, 所述的  $X_I O Y_I$  平面为水平二维平面, 投影为  $V_I'$ ,  $V_I'$  和  $V$  可根据下列公式求得:

$$\gamma = \arcsin \frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}}$$

$$V_I' = V_I \cdot \cos \gamma$$

$$V_I'' = V_I \cdot \sin \gamma$$

$$V = V_I' - \cos(\delta - \chi) \cdot V_W$$

式中,  $V_I''$  为地速  $V_I$  在竖直方向的投影,  $\gamma$  为梯度角、 $\delta$  为风向角, 风向角由北偏东90度开始记为0度, 逆时针方向递增;  $V_W$  为二维平面干扰风速, 视点 i 的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ; 视点 j 的坐标为  $(x_j, y_j, z_j)$ ;  $V$  为克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的实际投影;

地速在  $X_I O Y_I$  平面的投影与 X 轴的夹角  $\chi$  的计算公式如下:

$$\chi = \arctan \frac{y_j}{x_j}$$

式中,  $\chi$ 、 $\delta$  的大小均为与 X 轴正方向所成的夹角;

无人机由视点 i 飞行至视点 j 的距离  $D$  为:

$$D = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

所需时间  $t_2$  为:

$$t_2 = \frac{D}{V_I}$$

根据克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的投影速度  $V$ 、实际航速竖直方向投影速度  $V_I''$  和侧风风速  $V_W''$  能够查表得到相关功率  $P_{V_W''}$ 、 $P_V$  和  $P_{V_I''}$ 。

[0009] 所述的步骤3中, 以太阳光照和航迹之间的角度关系作为太阳光照与航迹间关系, 所述的太阳光照和航迹之间的角度关计算方式如下:

$$\psi_k = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{\left| \vec{v}_1 \right| * \left| \vec{v}_2 \right|}$$

式中,  $\psi_k$  表示规避逆光代价, 用太阳光照与航迹之间的夹角来表示;  $\vec{v}_1$  表示光线三

维向量,该数值由用户输入得到; $\vec{v}_2$ 表示相邻航迹段三维向量。

[0010] 所述的步骤5中改进蚁群算法具体步骤如下:

步骤5.1,参数初始化:设置循环次数 $N_c = 0$ 、最大循环次数G、将m只蚂蚁置于n个视点,每条路径上的初始信息素 $\tau_{ij} = 1$ ;

步骤5.2,视点选择策略:第k只蚂蚁从当前视点i选择下一个视点j的概率由路径上残留的信息素量和启发式信息即两个视点间的功耗决定,公式为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{S \in J_k(i)} \tau_{is}^\alpha \cdot \eta_{is}^\beta}, & \text{当 } j \in J_k(i) \text{ 时} \\ 0 & \text{, 其他} \end{cases}$$

式中, $J_k(i)$ 表示蚂蚁k下一步允许遍历的视点的集合; $\eta_{ij}$ 表示视点i到视点j的能耗; $\alpha$ 、 $\beta$ 为启发因子, $\alpha$ 的取值为[1,4], $\beta$ 的取值为[3,5];

步骤5.3,更新信息素:当每只蚂蚁遍历完所有视点后,根据下列公式进行信息素的更新:

$$\tau_{ij}^n = (1 - \rho) \tau_{ij}^{n-1} + \Delta \tau_{ij}$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{if } pass_{ij} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$L_k = \sum_{j=1}^{n-1} w_j$$

式中, $L_k$ 代表第k只蚂蚁巡检完所有视点消耗的能耗,其中 $w_j$ 代表第j个航迹段的

能耗,由于全局规划时,相同视点悬停时间相同,所以无需计算悬停时能耗, $\tau_{ij}^n$ 代表第n次

迭代后,各路径上的信息素; $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ )代表蒸发系数, $\Delta\tau_{ij}$ 代表信息素的增量;

$\Delta\tau_{ij}^k$ 代表第k只蚂蚁在边ij上的增量; $Q$ 为常数。

[0011] 所述的步骤5中改进A\*混合算法通过设置启发函数,求解出在三维空间里任意两点间能耗最小的代价表现,所述的启发函数如下:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

$$g(n) = w_s + w_{(s,i)}$$

$$h(n) = w_{(i,d)} + w_d$$

式中, $f(n)$ 为任意两个视点的能耗总和; $g(n)$ 为始点悬停的能耗和始点到当前节点i的能耗总和; $h(n)$ 为目标点悬停的能耗和当前节点直飞到目标点的能耗总和;

$w_s$ 为起始悬停点的悬停功耗, $w_d$ 为终结悬停点的悬停功耗; $w_{(s,i)}$ 、 $w_{(i,d)}$ 为巡航状态的功耗。

[0012] 该种多旋翼无人机巡检路径规划方法能够产生的有益效果为:第一,该方法以电池能耗和规避逆光代价最低为目标函数,详细分析了多旋翼无人机在巡航和悬停拍摄两个不同阶段的能耗消耗以及光照角度对航迹的影响。

[0013] 第二,通过对旋翼无人机自身性能约束,保证巡检过程多旋翼无人机自身的安全性,同时不会对巡检的三维物体带来安全隐患。

[0014] 第三,通过对自然风进行矢量合成与分解,分析了自然风对多旋翼无人机的影响,进一步计算出对多旋翼无人机能耗消耗情况。

[0015] 第四,分析了光照角度对多旋翼无人机规避逆光飞行的代价,并给出光照角度对多旋翼无人机在任意航迹段飞行的代价计算公式。

[0016] 第五,该方法能够在不同风向和光照条件下,为多旋翼无人机规划一条电池能耗和规避逆光代价最低的巡检路径,大大地节约巡检的成本。

[0017] 第六,通过改进蚁群算法规划出一条,电池能耗和规避逆光代价最低的巡检路径;进一步通过改进A\*混合算法,实现相邻两个视点间的最优路径的输出,同时在三维空间面向待检测物体三维点云模型,能够完成针对待测物体的避障操作。

### 附图说明

- [0018] 图1为本发明一种多旋翼无人机巡检路径规划方法的算法流程图。
- [0019] 图2为本发明一种多旋翼无人机巡检路径规划方法中航速三角形矢量图。
- [0020] 图3为本发明一种多旋翼无人机巡检路径规划方法中无人机在风干扰下的速度矢量图。
- [0021] 图4为本发明一种多旋翼无人机巡检路径规划方法中地速、风速二维平面矢量分解图。

### 具体实施方式

- [0022] 以下结合说明书附图和具体优选的实施例对本发明作进一步描述。
- [0023] 如图1所示,一种多旋翼无人机巡检路径规划方法,其特征在于:通过以电池能耗和规避逆光代价最低为目标函数,通过改进蚁群算法和改进A\*混合算法完成路径规划;具体步骤如下:

- 步骤1,为保证巡检的安全性和低能耗性,建立电池能耗和规避逆光代价最低目标函数;
- 步骤2,分析影响多旋翼无人机巡检电池能耗的影响因素,确定悬停能耗以及巡航能耗;
- 步骤3,确定太阳光照与多旋翼无人机巡检航迹间关系;
- 步骤4,对扫描得到的待巡检物体三维点云模型进行建模,同时输入巡航过程中所有视点坐标;
- 步骤5,运用改进蚁群算法输出最优巡航路径、运用改进A\*混合算法输出相邻两视点间的最优飞行路径,最终输出最优航迹。

- [0024] 进一步的,现有的多旋翼无人机的飞行时间一般在20-40min,因此,在有限的时间范围内,既要保证能够安全的完成一次巡检,同时,应使得每次巡检的电池能耗最小;此外,多旋翼无人机巡航时,为了能更好的规避障碍物,安全地完成巡检,应尽量规避逆光产生的视觉影响,本实施例中的步骤1中,无人机在巡航过程中会经过n个视点以及n-1段巡航路径,此时建立的电池能耗和规避逆光代价最低目标函数如下:

$$f = \min \left\{ C = \xi_1 \left( \sum_{i=1}^n w_i + \sum_{j=1}^{n-1} w_j \right) + \xi_2 \sum_{k=1}^{n-1} \psi_k \right\}$$

- 式中,  $\xi_1, \xi_2$  为控制能耗和逆光代价的参数,且  $\xi_1 + \xi_2 = 1$ ,当多旋翼无人机视觉系统较优或光照条件影响较少时,此时可令  $\xi_2 = 0$ ;根据多旋翼无人机性能或者巡检目的不同,参数可选取不同数值;  $\psi_k$  为规避逆光代价,  $w_i$  为悬停时的能耗,  $w_j$  为航迹段之间的能耗。

- [0025] 进一步的,影响多旋翼无人机巡检电池能耗的影响因素包括多旋翼无人机自身性能约束和自然风的影响;

所述的多旋翼无人机自身性能约束包括但不限于悬停精度、最低/高飞行高度、航速限制、安全距离约束。关于悬停精度：不同型号的多旋翼无人机，水平和垂直精度不同；悬停精度将影响待检测物体三维点云模型的映射，如果低于多旋翼无人机的悬停精度，将使得三维模型没有意义。关于最低/高飞行高度：限制通过任务区域最低飞行高度，防止飞行高度过低而撞击地面，导致坠毁；限制最高飞行高度，防止多旋翼无人机在翻越待检测物体时，超过多旋翼无人机限制高度。该约束将在待检测物体三维点云映射中以障碍物的形式实现。关于航速限制：航速限制主要包括最大上升速度、最大下降速度、最大可承受风速、最大航行速度、最大加/减速度。不同型号的多旋翼无人机，对应着不同的性能参数。关于安全距离约束：安全距离约束考虑的是多旋翼无人机巡检系统的安全性，包括多旋翼无人机自身飞行的安全性以及对待检测物体的安全性。

[0026] 对于自然风的影响的处理，由于多旋翼无人机的电池能耗不仅受到自身航速的影响，同时还会受到风速的影响，因此将巡检过程分为两个部分，悬停拍照阶段和巡航阶段。

[0027] 在悬停状态中，多旋翼无人机在空中悬停时会处于一种稳态，当有风影响时，多旋翼无人机通过PID控制器自动调节倾斜角，以使多旋翼无人机恢复到原来的稳态；最终，调节的倾斜角度和风向是共线的，速度大小和风速相同；通过查阅多旋翼无人机性能参数可得知单个电机的悬停额定功率以及多旋翼无人机的姿态角调节时间可得知无人机在一个视点的悬停时的能耗为：

$$w_i = p_{V_w} \cdot t_1$$

式中， $p_{V_w}$  为悬停的额定功率，由于无人机在悬停状态下的能耗只用来克服风速的影响，因此，可用悬停时风速所对应的功率作为悬停时的额定功率， $t_1$  为在一个视点中悬停拍摄时间和调整姿态角的时间和；

在巡航阶段中，由于风速对多旋翼无人机偏航角的影响不大，当多旋翼无人机受到外界风影响时，其需要调整相应的俯仰角、横滚角以保证多旋翼无人机能够按照预定航线飞行；此时，每个电机就需要调整相应的功率，既要保证多旋翼无人机按照所设定的航速飞行，同时又不偏离预定航线。风对多旋翼无人机飞行的影响可用航行速度三角形来描述，如附图2所示。即地速  $V_I$  是空速  $V_\infty$  和风速  $V_w$  的矢量和。故巡航阶段的能耗包括多旋翼无人机直飞航线上的能耗以及抵抗风所消耗的能耗。多旋翼无人机在巡航阶段受到的风干扰来自于二维平面风，此时地速、风速的矢量图如附图3所示，地速的大小是在多旋翼无人机起飞前设定好的，所以可看作常量，方向为两个视点所在的直线；风速的大小和方向是在多旋翼无人机起飞前测量得到，也看作常量；

将无人机巡航过程中将地速  $V_I$  投影到水平  $X_I O Y_I$  平面，所述的  $X_I O Y_I$  平面为水平二维平面，投影为  $V_I'$ ， $V_I'$  和  $V$  可根据下列公式求得：

$$\gamma = \arcsin \frac{|z_j - z_i|}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}}$$

$$V_I' = V_I \cdot \cos \gamma$$

$$V_I'' = V_I \cdot \sin \gamma$$

$$V = V_I' - \cos(\delta - \chi) \cdot V_W$$

式中,  $V_I''$  为地速  $V_I$  在竖直方向的投影,  $\gamma$  为梯度角、 $\delta$  为风向角, 风向角由北偏东 90 度开始记为 0 度, 逆时针方向递增;  $V_W$  为二维平面干扰风速, 视点 i 的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ; 视点 j 的坐标为  $(x_j, y_j, z_j)$ ;  $V$  为克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的实际投影;

地速在  $X_I O Y_I$  平面的投影与 X 轴的夹角  $\chi$  的计算公式如下:

$$\chi = \arctan \frac{y_j}{x_j}$$

式中,  $\chi$ 、 $\delta$  的大小均为与 X 轴正方向所成的夹角;

无人机由视点 i 飞行至视点 j 的距离  $D$  为:

$$D = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

所需时间  $t_2$  为:

$$t_2 = \frac{D}{V_I}$$

根据克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的投影速度  $V$ 、实际航速竖直方向投影速度  $V_I''$  和侧风风速  $V_W''$  能够查表得到相关功率  $P_{V_W''}$ 、 $P_V$  和  $P_{V_I''}$ 。

[0028] 最终得到巡航能耗表达式:

$$w_j = \left( P_{V_W''} + P_V + P_{V_I''} \right) \cdot t_2$$

式中, 式中,  $w_j$  为航迹段之间的能耗,  $P_{V_W''}$  为抵抗侧风的能耗功率,  $P_V$  为无人机直飞航线上实际航速水平对应的能耗功率,  $P_{V_I''}$  为实际航速垂直方向对应的能耗功率,  $t_2$  为巡航时间。

[0029] 本实施例中, 测风风速  $V_W''$  为风速  $V_W$  在垂直航向方向的分量,  $V_W'$  为风速  $V_W$  在航向方向的分量, 所述的克服二维平面干扰风后的地速  $V_I$  在  $X_I O Y_I$  平面的投影速度  $V$  即地速  $V_I$  克服  $V_W'$  后的实际航行速度。

[0030] 进一步的, 步骤3中, 以太阳光照和航迹之间的角度关系作为太阳光照与航迹间关系, 所述的太阳光照和航迹之间的角度关计算方式如下:

$$\psi_k = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{\left| \vec{v}_1 \right| * \left| \vec{v}_2 \right|}$$

式中,  $\psi_k$  表示规避逆光代价, 用太阳光照与航迹之间的夹角来表示;  $\vec{v}_1$  表示光线三维向量, 该数值由用户输入得到;  $\vec{v}_2$  表示相邻航迹段三维向量。

[0031] 进一步的, 步骤4中, 构建混合路径规划算法模型之前, 需要对巡检的待检测物体、多旋翼无人机的搜索空间建模。针对现有的待检测物体, 通过栅格法对其进行三维抽象, 映射成计算机能够处理的三维数组, 映射精度既要考虑多旋翼无人机导航误差, 还要考虑多旋翼无人机悬停精度, 本实施例中取二者最大值, 同时待巡检物体映射为障碍物。

[0032] 进一步的, 步骤5中, 根据构建好的三维模型, 运行改进蚁群算法输出最优巡航路径, 即视点的巡视顺序。具体步骤如下:

步骤5.1, 参数初始化: 设置循环次数  $N_c = 0$ 、最大循环次数G、将m只蚂蚁置于n个视点上, 每条路径上的初始信息素  $\tau_{ij} = 1$ ;

步骤5.2, 视点选择策略: 第k只蚂蚁从当前视点i选择下一个视点j的概率由路径上残留的信息素量和启发式信息即两个视点间的功耗决定, 公式为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{S \in J_k(i)} \tau_{is}^\alpha \cdot \eta_{is}^\beta}, & \text{当 } j \in J_k(i) \text{ 时} \\ 0 & \text{, 其他} \end{cases}$$

式中,  $J_k(i)$  表示蚂蚁k下一步允许遍历的视点的集合;  $\eta_{ij}$  表示视点i到视点j的能耗;  $\alpha$ 、 $\beta$  为启发因子,  $\alpha$  的取值为[1,4],  $\beta$  的取值为[3,5];

步骤5.3,更新信息素:当每只蚂蚁遍历完所有视点后,根据下列公式进行信息素的更新:

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^n &= (1 - \rho) \tau_{ij}^{n-1} + \Delta \tau_{ij} \\ \Delta \tau_{ij} &= \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \\ \Delta \tau_{ij}^k &= \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{if } pass_{ij} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ L_k &= \sum_{j=1}^{n-1} w_j \end{aligned}$$

式中,  $L_k$  代表第k只蚂蚁巡检完所有视点消耗的能耗,其中  $w_j$  代表第j个航迹段的能耗,由于全局规划时,相同视点悬停时间相同,所以无需计算悬停时能耗,  $\tau_{ij}^n$  代表第n次迭代后,各路径上的信息素;  $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) 代表蒸发系数,  $\Delta \tau_{ij}$  代表信息素的增量;  $\Delta \tau_{ij}^k$  代表第k只蚂蚁在边ij上的增量;  $Q$  为常数。

[0033] 根据已有的全局航迹,判断相邻视点是否经过障碍物,若经过,运用改进A\*算法进行局部路径规划,保证无人机在相邻两视点之间飞行时,能够避开障碍物,保证巡视飞行安全。

[0034] 所述的改进A\*算法通过设置启发函数,求解出在三维空间里任意两点间能耗最小的代价表现,所述的启发函数如下:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

$$g(n) = w_s + w_{(s,i)}$$

$$h(n) = w_{(i,d)} + w_d$$

式中,  $f(n)$  为任意两个视点的能耗总和;  $g(n)$  为始点悬停的能耗和始点到当前节点  $i$  的能耗总和;  $h(n)$  为目标点悬停的能耗和当前节点直飞到目标点的能耗总和;  $w_s$  为起始悬停点的悬停功耗,  $w_d$  为终结悬停点的悬停功耗;  $w_{(s,i)}$ 、 $w_{(i,d)}$  为巡航状态的功耗。

[0035] 最后将规划的坐标转换成GPS坐标并传给多旋翼无人机,完成无人机最终巡视路线规划的确认。

[0036] 该种多旋翼无人机巡检路径规划方法,该方法能够在满足待检测物体、多旋翼无人机性能及外部环境安全约束的条件下,考虑太阳光照因素对航迹的影响,为多旋翼无人机巡检提供一条安全、低能耗、规避逆光的最优路径。

[0037] 以上仅是本发明的优选实施方式,本发明的保护范围并不局限于上述实施例,凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理前提下的若干改进和润饰,应视为本发明的保护范围。

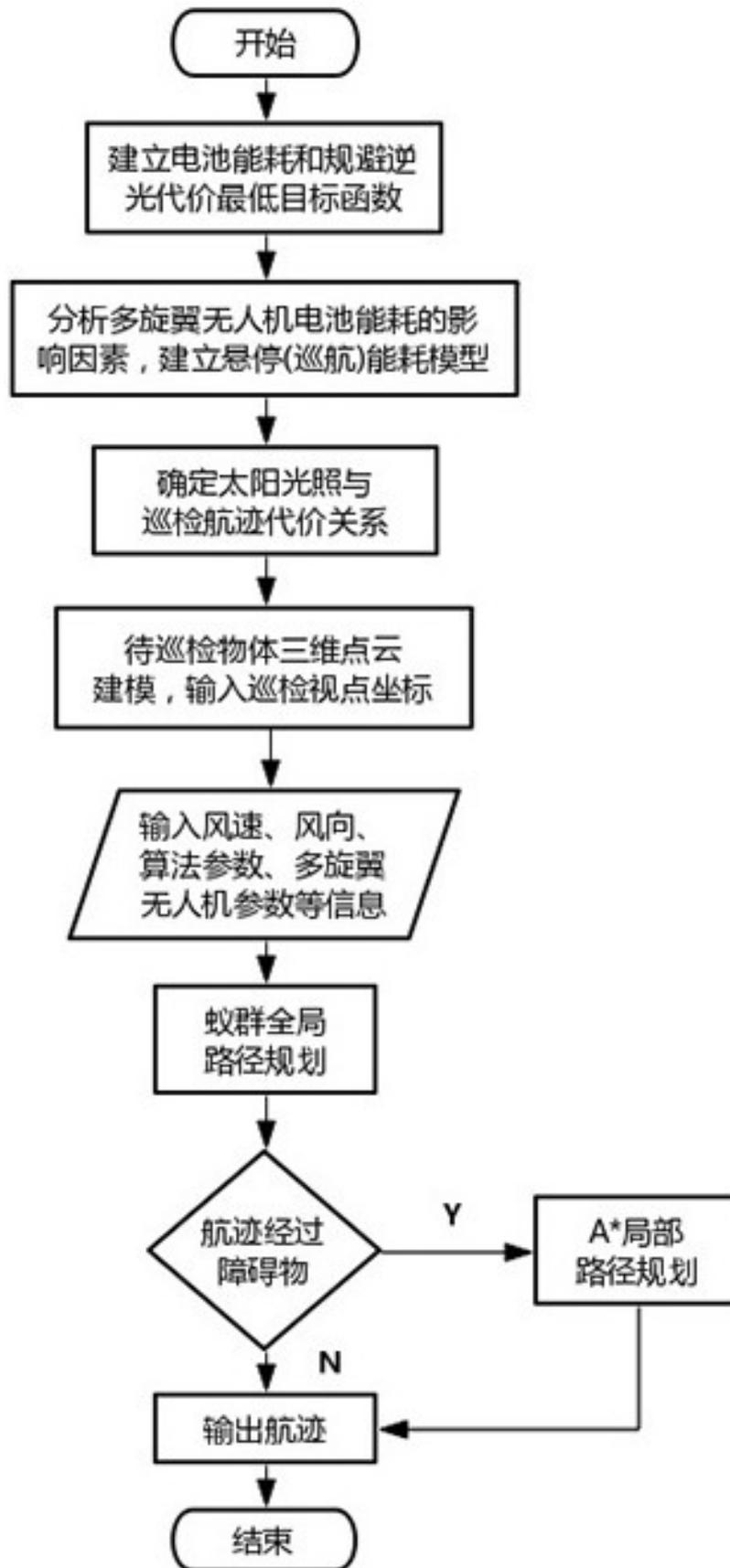


图1

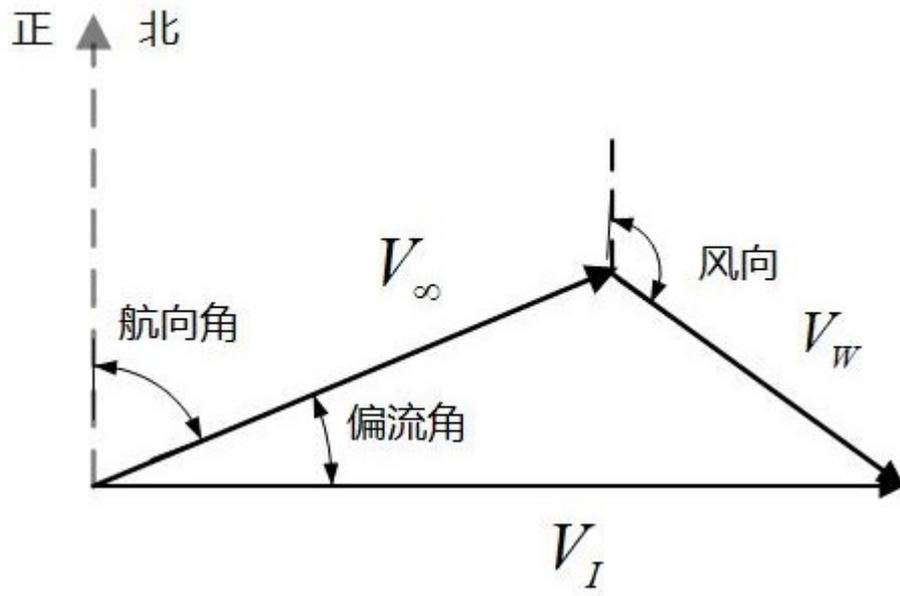


图2

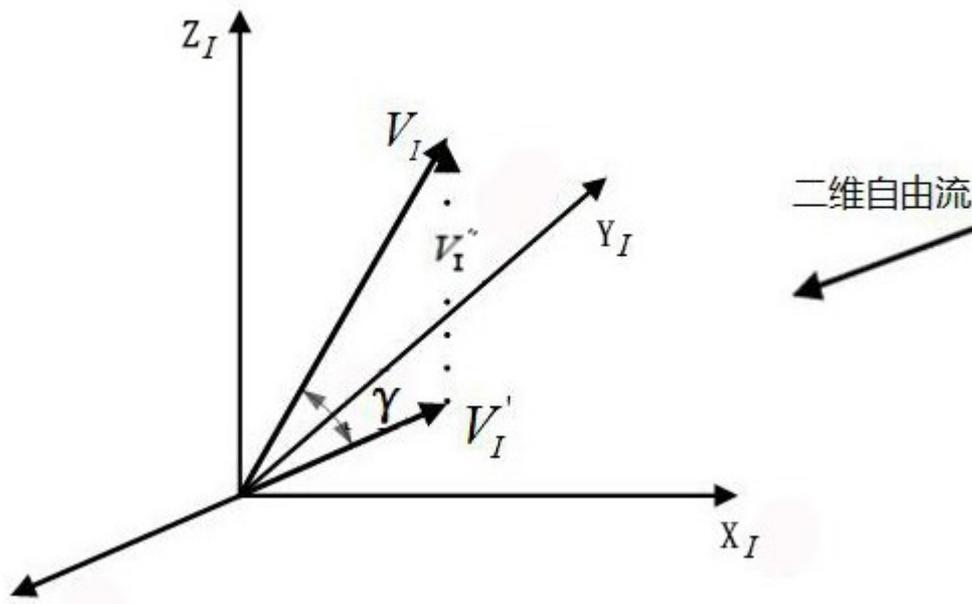


图3

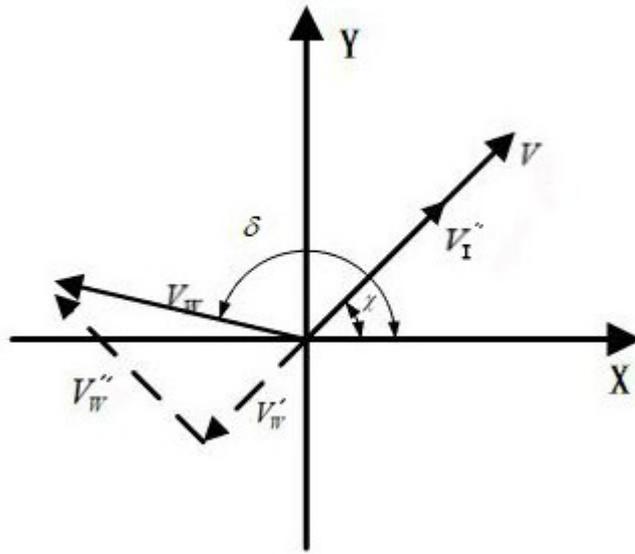


图4