



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110262542 A

(43)申请公布日 2019.09.20

(21)申请号 201910422934.7

(22)申请日 2019.05.21

(71)申请人 西北大学

地址 710069 陕西省西安市太白北路229号

(72)发明人 姬翔 王安文 刘宝英 华庆一

陈峰 陈晓江 房鼎益

(74)专利代理机构 西安恒泰知识产权代理事务  
所 61216

代理人 黄小梧

(51) Int. Cl.

G05D 1/10(2006.01)

G01C 21/20(2006.01)

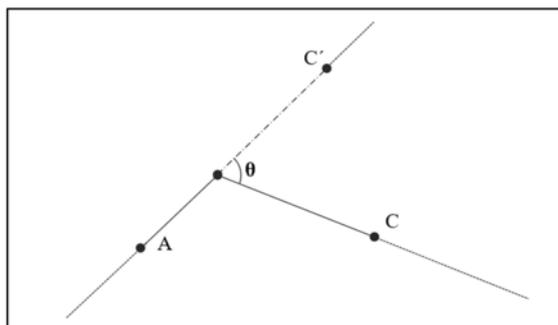
权利要求书1页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径优化方法

(57)摘要

本发明公开了一种转角与距离结合的旋翼无人机的节能路径规划方法,该方法使用折线路径的转角和距离特征来估计旋翼无人机飞过该条折线路径的能耗,改善了现有旋翼无人机节能路径规划中只使用距离估计路径能耗的不全面问题;并通过构造三维权矩阵,然后结合贪心策略规划出节能路径。增加了旋翼无人机的续航能力,改善了旋翼无人机应用中的能量受限情况。本发明提出的通过路径转角与距离同时考虑来评价无人机飞过该路径能耗的节能路径规划方法,在无人机辅助遍历任务点的应用中均可应用,起到减少飞行能耗,提高单次充电的任务完成量的效果。



1. 一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径优化方法,用于对无人机需经过的 $n+1$ 个任务点进行路径规划,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,由 $n+1$ 个任务点构成集合 $N = \{n_i | i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ ,取 $i = 0$ ;

步骤2,从集合 $N$ 中取任务点 $n_i$ 作为当前任务点,将当前任务点 $n_i$ 放入路径 $L_i$ 中,并将当前任务点 $n_i$ 从集合 $N$ 中删除,设路径 $L_i$ 的能耗 $e_i = 0$ ;

步骤3,在 $N$ 中找一个任务点 $n_j$ ,使得 $b_{ij}$ 最小,将任务点 $n_j$ 放入路径 $L_i$ 中,并将任务点 $n_j$ 从集合 $N$ 中删除, $e_i = e_i + b_{ij}$ ,其中 $b_{ij}$ 表示无人机由当前任务点 $n_i$ 飞到任务点 $n_j$ 时的距离能耗;

步骤4,将路径 $L_i$ 中的最后一个任务点作为任务点 $n_k$ ,将路径 $L_i$ 中当前任务点的前一个任务点作为任务点 $n_{k-1}$ ,在集合 $N$ 中找到一任务点 $n_r$ ,使得 $c_{k-1kr}$ 最小,其中 $c_{k-1kr}$ 表示无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞到任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和,将任务点 $n_r$ 加入到路径 $L_i$ 中并在集合 $N$ 中将任务点 $n_r$ 删除, $e_i = e_i + c_{k-1kr}$ ;

步骤5,重复步骤4,直至集合 $N$ 为空集为止;

步骤6, $e_i = e_i + c_{k-1ki}$ , $c_{k-1ki}$ 表示无人机从路径 $L_i$ 中倒数第二个任务点 $n_{k-1}$ 飞来,并在路径 $L_i$ 中最后一个任务点 $n_k$ 转弯后飞到起始任务点 $n_i$ 时的转角能耗和所对应的距离能耗之和;

步骤7, $i = i + 1$ ,如果 $i$ 小于等于 $n$ ,则转到步骤2,否则执行步骤8;

步骤8,对所得 $n+1$ 个路径集合 $\{L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n\}$ 及所对应的能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ ,将能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ 中能耗最小所对应的路径作为无人机的节能路径。

2. 如权利要求1所述的旋翼无人机节能路径优化方法,其特征在于,通过式(1)得到无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和 $c_{k-1kr}$ :

$$c_{k-1kr} = a_{k-1kr} + b_{kr} \quad (1)$$

式(1)中, $a_{k-1kr}$ 表示无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗, $b_{kr}$ 表示无人机由任务点 $n_k$ 飞到任务点 $n_r$ 时的距离能耗。

## 一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于无人机节能应用技术领域,涉及一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径规划方法。

### 背景技术

[0002] 路径规划是旋翼无人机应用中降低飞行能耗的主要手段。有效的节能路径规划方法可以增强旋翼无人机的续航能力,改善旋翼无人机的应用效果,拓展其应用空间。

[0003] 在路径规划中,选取路径的何种特征作为规划依据对规划结果有着决定性的影响。现有的使用路径规划来对旋翼无人机的飞行能耗优化的研究中往往以飞行访问节点(或路径点)之间的距离作为规划依据,以飞行总距离作为优化目标。认为飞行距离最优解就是能耗最优解。近期虽然在已有节能路径规划的基础上提出一些新方案,如在数据收集应用中通过分簇等方法减少访问节点数目来进一步降低无人机的飞行能耗;以及结合任务点的通信范围来进一步降低无人机的飞行能耗等等。但这些改进方案的实质依然是在通过结合实际应用特点来缩短飞行总距离。同样是基于飞行距离最优解就是能耗最优解。不难发现把飞行距离最优解作为能耗最优解时,隐含的前提是飞行距离越短则飞行能耗越小。由普通的物理常识不难理解,在理想环境中匀速直线飞行时,这一前提显然是成立的。

[0004] 然而,实际的旋翼无人机应用中,任务路径是曲折变化的导致任务飞行不是匀速直线;而实际的任务环境显然也不是理想环境。因此,正如50米往返跑要比100米直线跑更消耗体力一样,在实际的旋翼无人机飞行中,飞行距离较短时的飞行能耗也不一定小,飞行距离较长时的飞行能耗也不一定大。这使得仅以路径距离长度作为能耗估计依据进行节能路径规划的节能效果大打折扣。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中存在的不足,本发明的目的在于,提供一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径规划方法,解决现有技术规划的无人机路径节能效果不好的技术问题。

[0006] 为了解决上述技术问题,本申请采用如下技术方案予以实现:

[0007] 一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径优化方法,用于对无人机需经过的 $n+1$ 个任务点进行路径规划,包括以下步骤:

[0008] 步骤1,由 $n+1$ 个任务点构成集合 $N = \{n_i | i=0,1,2,\dots,n\}$ ,取 $i=0$ ;

[0009] 步骤2,从集合 $N$ 中取任务点 $n_i$ 作为当前任务点,将当前任务点 $n_i$ 放入路径 $L_i$ 中,并将当前任务点 $n_i$ 从集合 $N$ 中删除,设路径 $L_i$ 的能耗 $e_i=0$ ;

[0010] 步骤3,在 $N$ 中找一个任务点 $n_j$ ,使得 $b_{ij}$ 最小,将任务点 $n_j$ 放入路径 $L_i$ 中,并将任务点 $n_j$ 从集合 $N$ 中删除, $e_i = e_i + b_{ij}$ ,其中 $b_{ij}$ 表示无人机由当前任务点 $n_i$ 飞到任务点 $n_j$ 时的距离能耗;

[0011] 步骤4,将路径 $L_i$ 中的最后一个任务点作为任务点 $n_k$ ,将路径 $L_i$ 中当前任务点的前一个任务点作为任务点 $n_{k-1}$ ,在集合 $N$ 中找到一任务点 $n_r$ ,使得 $c_{k-1kr}$ 最小,其中 $c_{k-1kr}$ 表示无人

机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞到任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和,将任务点 $n_r$ 加入到路径 $L_i$ 中并在集合  $N$ 中将任务点 $n_r$ 删除, $e_i = e_i + C_{k-1kr}$ ;

[0012] 步骤5,重复步骤4,直至集合 $N$ 为空集为止;

[0013] 步骤6, $e_i = e_i + C_{k-1ki}$ , $C_{k-1ki}$ 表示无人机从路径 $L_i$ 中倒数第二个任务点 $n_{k-1}$ 飞来,并在路径 $L_i$ 中最后一个任务点 $n_k$ 转弯后飞到起始任务点 $n_i$ 时的转角能耗和所对应的距离能耗之和;

[0014] 步骤7, $i = i + 1$ ,如果 $i$ 小于等于 $n$ ,则转到步骤2,否则执行步骤8;

[0015] 步骤8,对所得 $n+1$ 个路径集合 $\{L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n\}$ 及所对应的能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ ,将能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ 中能耗最小所对应的路径作为无人机的节能路径。

[0016] 进一步地,通过式(1)得到无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和 $C_{k-1kr}$ :

[0017]  $C_{k-1kr} = a_{k-1kr} + b_{kr}$  (1)

[0018] 式(1)中, $a_{k-1kr}$ 表示无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来,在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗, $b_{kr}$ 表示无人机由任务点 $n_k$ 飞到任务点 $n_r$ 时的距离能耗。

[0019] 本发明与现有技术相比,有益的技术效果是:

[0020] 1、在对旋翼无人机飞行路径进行节能规划时,除了将现有方法中考虑的路径距离特征作为规划依据外,还同时增加了将路径的转角特征也作为节能路径规划的依据,使得在节能路径规划中对路径能耗估计更准确,从而进一步降低了所规划路径的的能耗,且增加了所规划出的节能路径的有效性,最终降低了旋翼无人机在实际飞行中的能耗,增加了旋翼无人机单次充电的续航能力。

[0021] 2、本发明用路径的转角和距离特征作为节能路径的规划依据,与节能路径规划的具体应用场景相对独立,在旋翼无人机辅助遍历任务点的应用中均可很好的使用,起到提高能效,增加续航能力的效果。

## 附图说明

[0022] 图1为实际能耗对比实验设计示意图;

[0023] 图2为无人机转角与能耗关系图;

[0024] 图3为应用场景示意图;

[0025] 图4为无人机直线飞行距离与能耗关系图;

[0026] 图5为50个任务节点时PPDAEC和PPDEC所规划的路径对比;

[0027] 图6为在不同任务节点数目下PPDAEC和PPDEC所规划路径的能耗对比图;

[0028] 图7为在不同任务节点数目下PPDAEC比PPDEC所规划路径的节能比示意图;

[0029] 图8为PPDAEC和PPDEC所规划路径的真实飞行实验结果对比。

[0030] 下面结合附图和具体实施方式对本发明的方案做进一步详细地解释和说明。

## 具体实施方式

[0031] 以下给出本发明的具体实施例,需要说明的是本发明并不局限于以下具体实施例,凡在本申请技术方案基础上做的等同变换均落入本发明的保护范围。

[0032] 实施例：

[0033] 本实施例给出一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径优化方法，用于从无人机的需经过的 $n+1$ 个任务点中进行路径规划，包括以下步骤：

[0034] 步骤1，由 $n+1$ 个任务点构成集合 $N = \{n_i | i=0, 1, 2, \dots, n\}$ ，取 $i=0$ ；

[0035] 步骤2，从集合 $N$ 中取任务点 $n_i$ 作为当前任务点，将当前任务点 $n_i$ 放入路径 $L_i$ 中，并将当前任务点 $n_i$ 从集合 $N$ 中删除，设路径 $L_i$ 的能耗 $e_i=0$ ；

[0036] 步骤3，在 $N$ 中找一个任务点 $n_j$ ，使得 $b_{ij}$ 最小，将任务点 $n_j$ 放入路径 $L_i$ 中，并将任务点 $n_j$ 从集合 $N$ 中删除， $e_i = e_i + b_{ij}$ ，其中 $b_{ij}$ 表示无人机由当前任务点 $n_i$ 飞到任务点 $n_j$ 时的距离能耗；

[0037] 步骤4，将路径 $L_i$ 中的最后一个任务点作为任务点 $n_k$ ，将路径 $L_i$ 中当前任务点的前一个任务点作为任务点 $n_{k-1}$ ，在集合 $N$ 中找到一任务点 $n_r$ ，使得 $c_{k-1kr}$ 最小，其中 $c_{k-1kr}$ 表示无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来，在任务点 $n_k$ 转弯后飞到任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和，将任务点 $n_r$ 加入到路径 $L_i$ 中并在集合 $N$ 中将任务点 $n_r$ 删除， $e_i = e_i + c_{k-1kr}$ ；

[0038] 步骤5，重复步骤4，直至集合 $N$ 为空集为止；

[0039] 步骤6， $e_i = e_i + c_{k-1ki}$ ， $c_{k-1ki}$ 表示无人机从路径 $L_i$ 中倒数第二个任务点 $n_{k-1}$ 飞来，并在路径 $L_i$ 中最后一个任务点 $n_k$ 转弯后飞到起始任务点 $n_i$ 时的转角能耗和所对应的距离能耗之和；

[0040] 步骤7， $i = i + 1$ ，如果 $i$ 小于等于 $n$ ，则转到步骤2，否则执行步骤8；

[0041] 步骤8，对所得 $n+1$ 个路径集合 $\{L_0, L_1, \dots, L_i, \dots, L_n\}$ 及所对应的能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ ，将能耗集合 $\{e_0, e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\}$ 中能耗最小所对应的路径作为无人机的节能路径。

[0042] 其中，通过式(1)得到无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来，在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗与所对应的距离能耗之和 $c_{k-1kr}$ ：

$$[0043] \quad c_{k-1kr} = a_{k-1kr} + b_{kr} \quad (1)$$

[0044] 式(1)中， $a_{k-1kr}$ 表示无人机由任务点 $n_{k-1}$ 飞来，在任务点 $n_k$ 转弯后飞向任务点 $n_r$ 时的转角能耗， $b_{kr}$ 表示无人机由任务点 $n_k$ 飞到任务点 $n_r$ 时的距离能耗。

[0045] 本实施例首先需计算 $N+1$ 个任务点中无人机所有可能路径转角构成的三维能耗矩阵 $A = \{a_{ijk} | i, j, k=1, 2, \dots, n\}$ ，需要先对旋翼无人机的转角与能耗关系进行测定。如图1，设置无人机的飞行速度 $v=4.5\text{m/s}$ （应用中的飞行速度也要与此相同），让无人机沿AB方向直线飞行，然后在B处转 $\theta$ 角度（ $\theta$ 依次选择 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 和 $180^\circ$ ），再继续沿BC方向直线飞行。为了使得在该期望速度下无人机转不同角度的能耗具有可比性，需要保证无人机在每种转角的情况下，能耗计算的开始点A和结束点C处的飞行速度为期望速度，还需要路径ABC的距离在不同转向角度下都一样长。为了满足上述两点要求，对点A和点C进行如下选择：对于 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 这7种情况，分别测得无人机从期望速度开始进行减速飞行的临界点 $A_0, A_{30}, A_{60}, A_{90}, A_{120}, A_{150}, A_{180}$ 和从B开始加速到期望速度的临界点 $C_0, C_{30}, C_{60}, C_{90}, C_{120}, C_{150}, C_{180}$ 。然后在 $\{A_0B, A_{30}B, A_{60}B, A_{90}B, A_{120}B, A_{150}B, A_{180}B\}$ 中选择最长距离，作为AB的距离；在 $\{BC_0, BC_{30}, BC_{60}, BC_{90}, BC_{120}, BC_{150}, BC_{180}\}$ 中选择最长距离，作为BC的距离。根据实验数据分析得到 $AB=4\text{m}, BC=27\text{m}$ （向上取整后得到）。

[0046] 分别对无人机沿AB方向直线飞行4m，接着在B点处转向 $\theta$ 角度（ $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ,$

90°, 120°, 150°, 180°), 然后再沿BC直线飞行27m的飞行实验重复50次, 计算每种转角情况下的平均能耗作为该转角的能耗, 然后对转角与平均能耗进行二次拟合得到如图2所示的能耗与转角关系。

[0047] 所拟合多项式的二次、一次和常数项系数依次为 $4.246e-6$ ,  $1.7738e-4$ 和 $0.18793$ , 常数项的值正好和转角为零即直线飞行31m的飞行能耗0.188瓦时非常非常接近。这也说明我们可以将转弯的总能耗近似认为是由无人机直线飞行31m的能耗和转向能耗构成。那么将总能耗减去该部分直线飞行的能耗, 就可以得到无人机在期望速度 $v=4.5m/s$ 下, 不同转向角度所消耗的能量。从图中可以看出, 转向角度越大, 能耗越大, 且转向角度与能耗的真实数据与所拟合得到的二次曲线非常接近。因此可以通过该二次表达式计算出转向任意角度的能耗, 那么去掉表达式中的常数项便得到无人机转向角度与能耗的关系模型为:

$$[0048] \quad f_v(\theta) = (4.246 \times 10^{-6}) \theta^2 + (1.7738 \times 10^{-4}) \theta \quad (2)$$

[0049] 旋翼无人机辅助的应用场景中, 一次任务执行过程可以描述为: 无人机从出发点(如服务站)出发, 访问所有静止部署的任务点, 在飞行状态下完成任务, 最后又回到出发点准备下一轮任务执行(如图3所示)。而这些任务点会根据实际需要分部于任务区域范围内, 一般不会完全处于一条直线上。

[0050] 把这些任务点看作图的顶点, 任意两个任务点之间可以飞行的线路段看作图的边。则根据 $f_v(\theta)$ 可计算出转角构成的三维能耗矩阵A中的每一个值。

[0051] 其次, 本实施例计算了无人机所有可能路径段的二维距离能耗矩阵  $B = \{b_{jk} | j, k = 1, 2, \dots, n\}$ , 为了能够计算出B需要先对旋翼无人机的飞行距离与能耗关系进行测定。还是让无人机以期望飞行速度 $v=4.5m/s$ 沿直线飞行, 分别通过50次飞行实验测得其飞行1m, 2m, ..., 31m的平均能耗(如图4所示), 其飞行能耗与直线飞行距离基本成正比。于是进行线性拟合, 拟合结果为一次项系数为0.006, 常数项为 $3.01723444781610e-05$ 。这里的常数项非常接近于零, 因此将其舍去。最后得到无人机在该速度直线飞行情况下, 其直线飞行距离与能耗的关系为

$$[0052] \quad g_v(d) = 0.006d \quad (3)$$

[0053] 则根据 $g_v(d)$ 可计算出转角构成的距离能耗矩阵B中的每一个值。

[0054] 本发明根据节能路径规划问题的特点, 可将转角与距离结合的旋翼无人机节能路径规划问题转换为数学问题:

[0055] 综合前面所述, 转角与距离结合的旋翼无人机节能路径规划方法要解决的问题所描述的图就是以任务点集 $N = \{n_i | i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ 作为顶点集  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  (即N和V是相等的) 和顶点之间的直线路段所构成的集合作为边集E的图 $G = (V, E)$ 。而问题的求解就是确定过每个顶点的转角选择哪一个, 因为在图中过某个顶点所构成的角取决于与其相连的是另外哪两个顶点, 即对当前顶点来讲, 无人机是从哪个顶点飞来, 又飞去哪个顶点。我们把飞来方向的顶点叫做前驱顶点, 而把飞去方向的顶点叫做后继顶点。不难看出对于图G来讲, 其中某一顶点 $v_i$ 的前驱节点有n种选法(除不能选 $v_i$ 自己), 而它的后继节点有 $n-1$ 种选法(除不能选 $v_i$ 自己和它的前驱节点)。所以组合起来过顶点 $v_i$ 的转角就有 $n \cdot (n-1)$ 种可选。每个顶点都如此, 所以可以形成的转角的集合就有 $(n+1) \cdot n \cdot (n-1)$ 个不同的转角。我们要求的解则是在这个转角集合当中选取 $(n+1)$ 个不同的转角, 且这 $(n+1)$ 个转角的顶点互不相

同,还要满足每个转角的顶点充当且只充当一次其他顶点转角的前驱顶点一次和充当且只充当一次其他顶点转角的后继顶点一次。而最优解为这个解集中使得无人机飞行能耗最少的那一个。为了寻找最优的节能路线,设0-1矩阵

$$\begin{aligned}
 X = & \begin{pmatrix} x_{000} & \dots & x_{00n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{0n0} & \dots & x_{0nn} \end{pmatrix} \\
 & \begin{pmatrix} x_{100} & \dots & x_{10n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{1n0} & \dots & x_{1nn} \end{pmatrix} \\
 & \vdots \\
 & \begin{pmatrix} x_{n00} & \dots & x_{n0n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{nn0} & \dots & x_{nnn} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{4}$$

[0057] 用来表示过顶点的转角集合中的转角是否被选用到路线中,当 $x_{i,jk}$ 取1时表示该角即过任务节点 $n_j$ 的一个转角(其前驱顶点是 $n_i$ 后继顶点是 $n_k$ )被选为总路线的一部分,而当 $x_{i,jk}$ 取0时表示该角即过任务节点 $n_j$ 的一个转角(其前驱顶点是 $n_i$ 后继顶点是 $n_k$ )未被选为总路线的一部分。根据定义3.1和上述的符号设定,基于转角和距离的能耗最少线路规划问题可以用以下数学模型表示:

$$\begin{aligned}
 \min f(N, X) &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n x_{ijk} e_{i,j} \\
 &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n x_{ijk} (e(n_i n_j) + e(\angle n_i n_j n_k)), i \neq j \neq k
 \end{aligned} \tag{5}$$

[0059] s. t.

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1, (k = 0, 1, 2, \dots, n) \tag{6}$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n x_{ijk} = 1, (i = 0, 1, 2, \dots, n) \tag{7}$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n x_{ijk} = 1, (j = 0, 1, 2, \dots, n) \tag{8}$$

[0063]

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{k \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| \leq n, S \subset \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\} \tag{9}$$

[0064]  $x_{ijk} \in \{0, 1\}, (i, j, k=0, 1, \dots, n)$  (10)

[0065] 模型中,  $f(N, X)$  是目标函数, 其物理意义为无人机通过一条路线遍历所有任务节点的能耗。由于这里考虑路线长度和其中包含的转角对飞行能耗带来的影响, 所以其参数为影响路线形状的任务节点的位置  $N$ , 以及过顶点的转角的选择矩阵  $X$ 。这些参数正好可以确定一条过且只过一次每个任务节点的环路路线。而路线确定, 其飞行能耗也就确定了。

[0066] 式5给出了目标函数  $f$  的具体表达, 当  $x_{ijk}$  表示过任务节点  $n_j$  的某个转角 (其前驱顶点是  $n_i$  后继顶点是  $n_k$ ) 是否被选为总路线的一部分,  $e_{i,j}$  表示无人机从节点  $n_i$  飞到节点  $n_j$  所需的能量, 可以通过函数  $e(n_i n_j)$  和  $e(\angle n_i n_j n_k)$  求得。

[0067] 式6表示每个任务节点作为后继任务节点要出现一次, 且只能出现一次。

[0068] 式7表示每个任务节点作为前驱任务节点要出现一次, 且只能出现一次。

[0069] 式8表示每个任务节点作为被选的转角顶点要出现一次, 且只能出现一次。

[0070] 式9是约束图  $G = (V, E)$  中只能有一条包含  $V$  中所有顶点的环路, 不出现多个环的情况。其中,  $S$  是顶点集  $V$  的任意子集, 而  $|S|$  是集合  $S$  中的顶点个数,  $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{k \in S} x_{ijk}$  是环中边的条数。由式3.9、3.10和式3.11知每个顶点的度是小于等于2的。而只有环中的每个顶点的度都等于2, 其边的条数和顶点个数相等。因此只有  $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{k \in S} x_{ijk} = |S|$  时, 图中才存在环。而式3.12限制  $V$  的任意真子集构成的图中边的个数都少于顶点的个数, 就使得  $V$  的任意真子集  $S$  构成的图都不是环。而过每个顶点的转角中当前顶点与该角中的前驱顶点连接的边正好是过其前驱顶点的转角中由该前驱顶点和它的后继顶点 (其实就是当前顶点) 连接所构成的边。过每个顶点的转角中当前顶点与该角中的后继顶点连接的边正好是过其后继顶点的转角中由该后继顶点和它的前驱顶点 (其实就是当前顶点) 连接所构成的边。这样就在问题对应的图中形成了唯一的包含所有节点的唯一环路。

[0071] 式10给定了选择矩阵  $X$  的元素  $x_{ijk}$  的取值为0或1, 表示对应转角是否被选中。

[0072] 上面建模的转角和距离集合的旋翼无人机节能路径规划问题是一个NP 完全问题。

[0073] 证明: 对于一个问题, 如果能证明, ①该问题是NP难问题; ②可以将已知的一些NP完全问题规约到该问题。那么由NP完全问题定义和证明方法可知这个问题就是NP完全问题。

[0074] 由于转角和距离集合的旋翼无人机节能路径规划问题是一个非凸的优化问题。而非凸优化问题是NP难问题。所以转角和距离集合的旋翼无人机节能路径规划问题是NP难问题。

[0075] 又因为在基于转角和距离的无人机能耗最少线路规划问题中, 如果把节点处转角带来的能耗忽略的话, 那么基于转角和距离的无人机能耗最少线路规划问题就退化为经典旅行商问题, 即经典旅行商问题可以被规约为基于转角和距离的无人机能耗最少线路规划问题的这种特例情况。

[0076] 而经典的旅行商问题是NP完全问题。所以基于转角和距离的无人机能耗最少线路规划问题也是NP完全问题。

[0077] 实验验证:

[0078] 将本发明中的方法“一种转角与距离结合的旋翼无人机节能路径规划方法”简记为PPDAEC; 而把现有单独使用距离作为路径规划依据结合贪心策略的方法简记为PPDEC。然

后,仿真了一个9万平方米的正方形任务区域,在该区域中的指定位置(0,0)部署1个服务站,随机部署n个任务节点,设置的无人机期望飞行速度为经验节能飞行速度 $v=4.5\text{m/s}$ 。

[0079] 仿真1,对本发明方法规划的节能路径特征进行展示。

[0080] 首先为了能够直观的看到本发明中的PPDAEC方法和PPDEC方法的区别,对 $n=50$ 时用PPDAEC方法和PPDEC方法分别做路径规划进行仿真。如5所示,可以看出,PPDAEC方法得到的路径(图5(b))较平滑,更适于飞行;而PPDEC方法得到的路径(图5(a))有较多较大的转角。

[0081] 仿真2,对本发明方法规划路径的节能效果进行验证。

[0082] 仿真中,在 $n=30,35,40,\dots,70$ 这9种不同任务节点数目的情况,分别对每种任务点数下的100种不同分布使用本发明的PPDAEC方法和PPDEC方法对任务点访问路径进行规划,并对所规划路径的能耗进行比较,其每种任务点数目下100中不同分布的能耗均值和标准差如图6所示。从图中可以看出,无论哪种方法规划的路径,访问的任务节点越多,无人机能耗越高。但是从整体上来看,不管访问的任务节点多还是少,使用本发明的PPDAEC方法规划的路径比传统的PPDEC方法规划的路径都要更节能。

[0083] 同时对不同任务点数目的情况下的节能比也做了相应对比(这里的节能比 $=1-\text{PPDAEC能耗}/\text{PPDEC能耗}$ ),如图7所示。

[0084] 图7中9种情况下的平均节能比3.79%,标准差为0.25%。同时也可以看出,在相同大小的区域内,任务点数目对节能比的影响不大。节能比是一个较为稳定的值。

[0085] 真实飞行实验1,对本发明方法规划的节能路径的实际效果进行对比展示。

[0086] 为了说明本发明方法的有效性和可行性,进行了真实的飞行实验。实验中设定了24个目标点,然后分别使用PPDAEC方法和PPDEC方法进行了路径规划,对规划路径进行实际飞行并记录相关飞行数据并离线进行了数据的处理和比较。实验结果如图8所示,图中(a)为PPDAEC方法规划的路径,(b)为PPDEC方法规划的路径。图8中的数字标记表示了目标点的访问顺序,因为找到的路径是环路,所以其中标记为25的终止点也就是出发点1。黄线是规划的理想路径,蓝线表示实际飞行的路径。由于风力的影响,蓝线路径并未与黄线路径完全重合。在图中我们不难发现,本发明方法规划的路径轨迹相对平滑,少有尖锐转角。这样的路径可以使得无人机在飞行过程中尽可能保持一个相对匀速的运动状态,减少能量消耗。实际的飞行结果表明PPDAEC方法规划的路径比PPDEC方法规划的路径可以节约4.1%的能量。

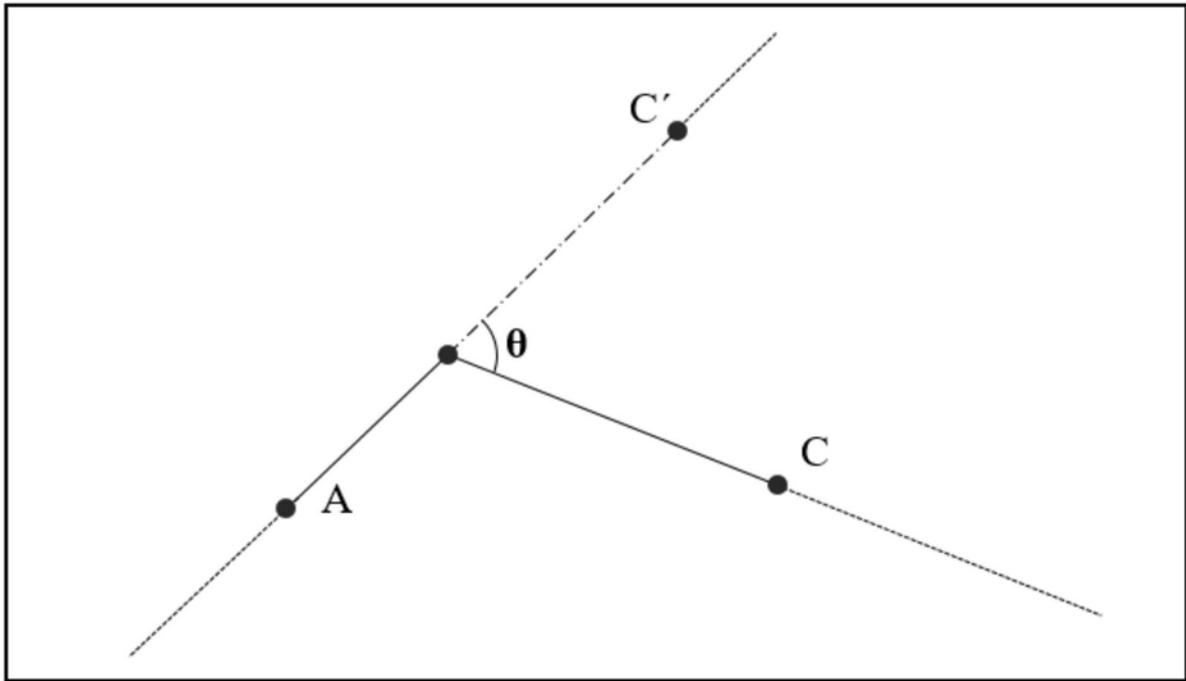


图1

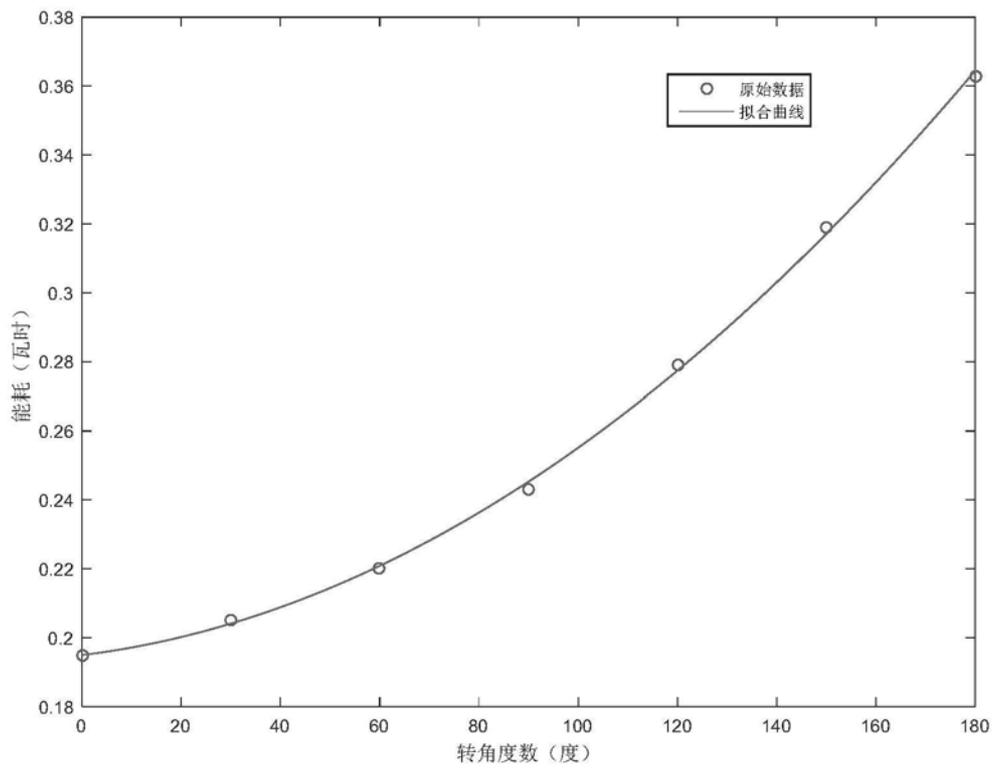


图2

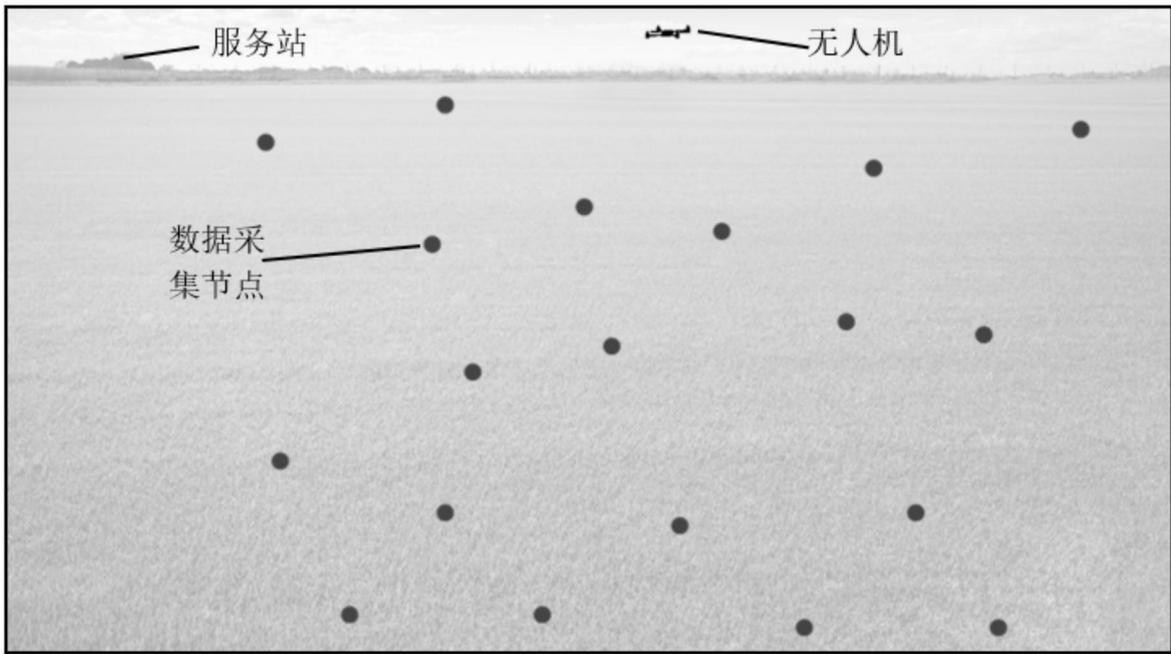


图3

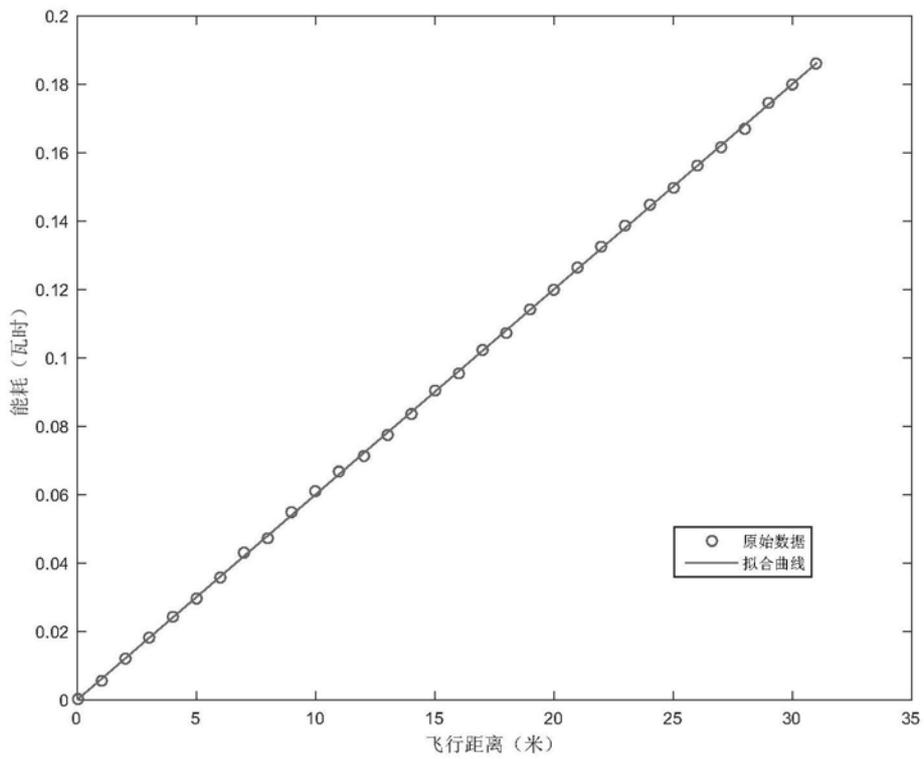


图4





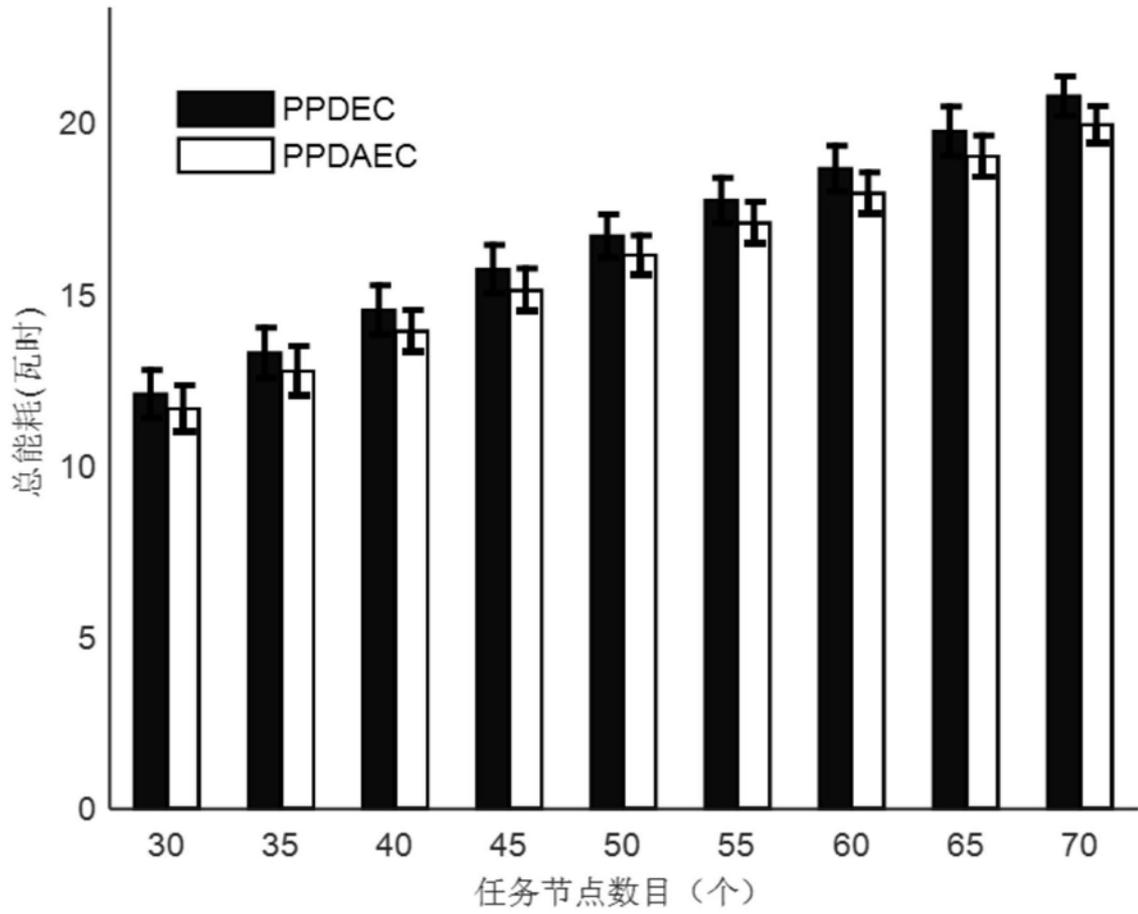


图6

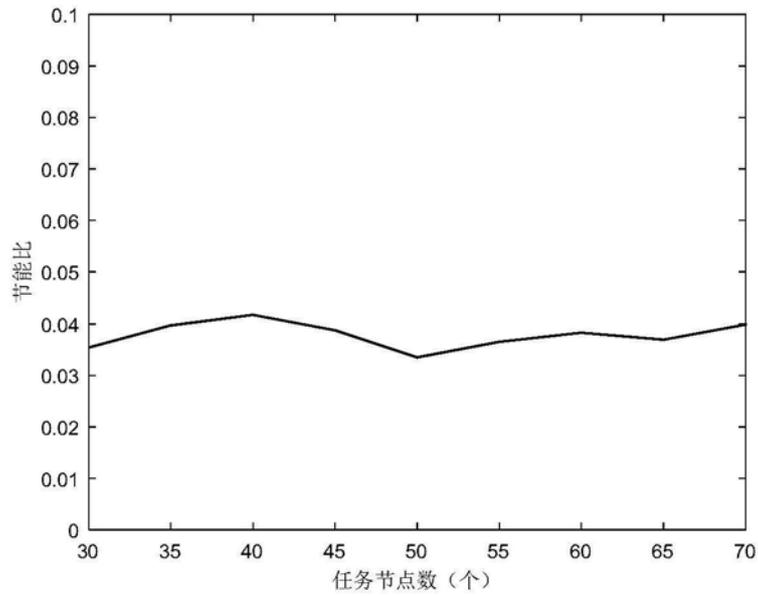
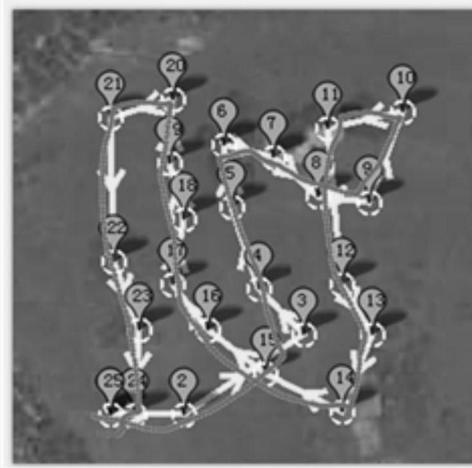
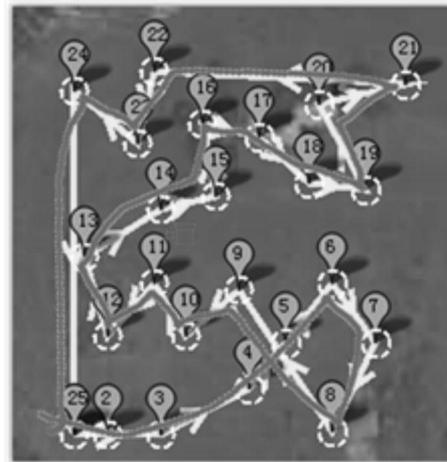


图7



(a)



(b)

图8