

太阳能无人机空中起飞设计

雷安旭, 冯博文, 董琛, 胡锦涛

(江汉大学 物理与信息工程学院, 湖北 武汉 430056)

摘要:通常情况下,太阳能无人机从地面起飞需要消耗大量能量,必须携带质量较大的电池组,很大程度上降低了无人机的续航能力。基于此设计了无人机空中起飞系统,该系统由地面控制台、升空动力模块、传感器模块、空中定位及位置保持模块、起飞弹射系统和空中滑跑辅助系统组成。通过理论推导构建物理模型,对比了空中起飞和地面起飞的能量消耗,从而得出无人机空中起飞的方案。

关键词:太阳能无人机;空中起飞跑道;浮空器;能量消耗

中图分类号:V279 文献标志码:A 文章编号:1673-0143(2019)05-0430-06

DOI:10.16389/j.cnki.cn42-1737/n.2019.05.007

Design of Aerial Take-off of Solar Unmanned Aerial Vehicle

LEI Anxu, FENG Bowen, DONG Chen, HU Jinxin

(School of Physics and Information Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: Usually, ground take-off of solar unmanned aerial vehicle (UAV) will consume plenty of energy, so it has to carry batteries of higher mass, which greatly reduces the UAV's endurance capability. Based on this, the author designed a new aerial take-off system of UAV, the system consisted of ground console, lift-off power module, sensor module, spatial positioning and position holding module, take-off ejection system and aerial taxiing assistant system. The physical model was built through theoretical deduction, the energy consumptions of aerial take-off and ground take-off were compared by simulation calculation, thus the superior scheme of UAV aerial take-off was obtained.

Key words: solar unmanned aerial vehicle; aerial take-off runway; aerostat; energy consumption

0 引言

自20世纪80年代美国研制出世界第一架太阳能无人机——太阳挑战者以来,太阳能无人机因其能源普遍、节能环保等优势被广泛应用。在关于太阳能无人机的相关研究^[1-3]中,除了关于总体设计和控制方式方面的讨论,其续航能力颇受关注。受目前太阳能电池板发展的限制,在相同起飞重量的情况下,无人机由地面起飞需克服自身重力爬高至平流层巡航飞行,需要携带质量较大的电池组,减少了其他设备的携带量。孙蓉等^[4]对小型固定翼飞行器自主起飞控制系统进行了相关的探索;王彦广等^[5]对平流层的飞行器做了相关梳理;黄宛宁等^[6]对浮空器在应急通讯下的工作模式进行了相关研究;GHOSH等^[7]对浮空器太阳能发电平台做了相关研究,解决了浮空器能源问题;马威等^[8]对无人机海上起飞平台做了相关探索。基于以上研究成果,为减少太阳能无人机克服自身重力做功所需要的能量,笔者提出了一个新的设计方案——太阳能无人机空中起飞。该设计方案利用热气球等浮空器将起飞

收稿日期:2019-06-12

作者简介:雷安旭(1987—),男,实验师,硕士,研究方向:航空器、无人机的飞行控制和电工电子实验教学。

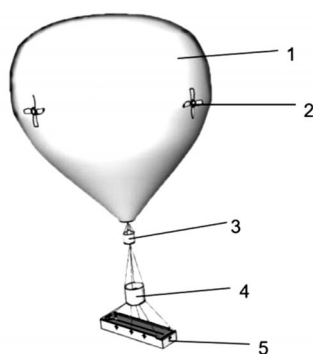
跑道携带至太阳能充足的平流层指定位置,太阳能无人机在空中跑道上起飞,由弹射装置给无人机提供起飞的初始速度。此方案能减少无人机电池携带量,使无人机携带更多的功能性设备,并有效减少太阳能无人机爬升至平流层的失事率。

1 太阳能无人机空中起飞系统总体设计

太阳能无人机空中起飞系统主要由地面控制台、升空动力模块、传感器模块、空中定位及位置保持模块、起飞弹射系统和空中滑跑辅助系统组成。空中起飞系统的整体示意图见图1。

地面控制台通过发送指令和接收回传信号控制太阳能无人机空中起飞系统工作状态;升空动力模块主要指类似热气球的浮空器,为所有设备提供升空的动力,并通过调节升力大小改变起飞系统的高度;传感器模块用于反馈当前位置信号,包括高度、经纬度、空速等;空中定位及位置保持模块作为执行器,通过螺旋桨等执行部件调整起飞系统在空中的经纬度,以上装置共同作用将空中跑道移动到指定位置。

弹射系统让无人机在短距离内获取较大初始速度;空中滑跑辅助系统保证无人机起飞时的安全,防止其侧翻,并提供合适的初始迎角,以上装置共同作用为太阳能无人机提供安全起飞条件。



1为浮空器;2为螺旋桨;3为升空动力模块的点火装置;4为安装传感器模块的吊篮;5为空中起飞跑道,其内部安装弹射系统和空中滑跑辅助系统。

图1 空中起飞系统整体示意图

Fig. 1 Overall sketch of aerial take-off system

2 太阳能无人机空中起飞跑道升空定位系统

地面控制台设置起飞系统的空中悬浮位置信息,信息包括高度及经纬度。目标位置指令信号由升空动力模块、空中定位及位置保持模块共同响应。热气球点火装置启动,浮空器爬升,传感器模块实时检测浮空器是否爬升至指定高度,若未爬升至指定高度,则会反馈高度信号给升空动力模块并继续做出修正,等爬升至指定高度后,浮空器开始水平移动,GPS传感器实时检测浮空器是否移动至指定经纬度,若未移动至指定经纬度,则会反馈经纬度信号给空中定位及位置保持模块并继续做出修正,以此来实现空中起飞跑道的指定位置悬浮。其流程图见图2。

2.1 升空动力模块

升空动力模块包括热气球和热气球加热装置。笔者提供了一种热气球吊装方案,热气球下方通过软管连接热气球加热装置。热气球加热装置由储气瓶、点火装置构成,储气瓶储藏可燃气体,气体通过点火装置点燃,可为空气加热。储气瓶内为液态甲烷,通过调整储气瓶的阀门出气量改变对空气的加热强度,达到控制升力大小的目的。气压计实时测量起飞系统的高度信息,并将高度信号反馈到气瓶的出气阀门,通过对阀门出气量的控制实现对系统整体高度的控制。

当气压计检测到整体系统的高度远离目标高度时,出气量处于较大状态,加热强度较大,热气球内的混合空气温度高,升力较大,垂直方向上的速度较大;当气压计检测到整体系统的高度接近目标高度时,出气量减小,加热强度减弱,热气球内的混合空气温度降低,升力减小,垂直方向上的速度减

小;当气压计检测到整体系统的高度达到目标高度时,出气量进一步减小,加热强度进一步减弱,热气球内的混合空气温度进一步降低,升力减小至等于重力,垂直方向上的速度为0,系统整体达到目标高度。

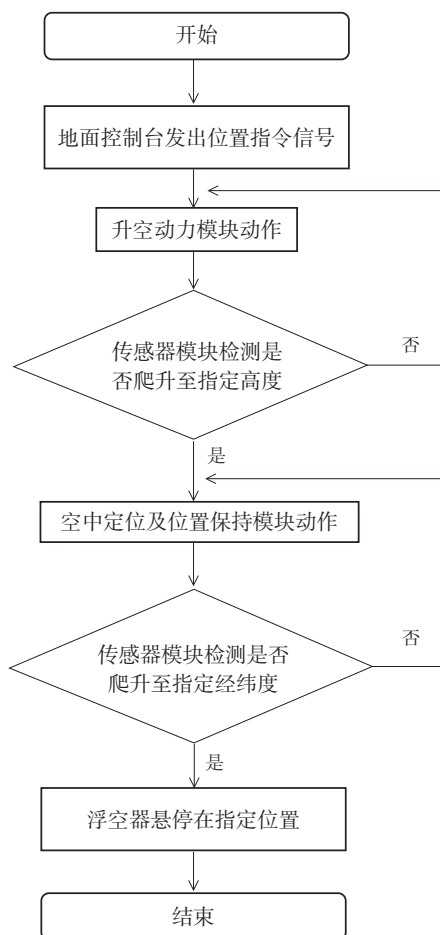


图2 升空原理示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of lift-off principle

2.2 传感器模块

传感器模块主要由地面控制台、气压计、空速传感器、GPS传感器、进气温度传感器等组成,各个传感器之间协同配合,完成信号的传送和反馈。

传感器模块均安装在图1中标号4所示的吊篮位置,热气球加热装置下方通过软管连接吊篮;气压计、空速传感器、GPS传感器、进气温度传感器等安装在吊篮中。气压计检测空中起飞跑道是否升空到指定高度;GPS检测空中起飞跑道是否移动到指定经纬度;空速传感器检测系统整体的空速,并将信号反馈给升空动力模块和空中定位及位置保持模块进行修正,配合相关的作动器动作,达到指定位置。进气温度传感器检测热气球进气温度并对喷油量进行修正,以获得最佳的空燃比。

2.3 空中定位及位置保持模块

空中定位及位置保持模块主要由跑道侧面螺旋桨和热气球四面螺旋桨组成,螺旋桨对称安装,通过控制多个螺旋桨的联动旋转,实现整个空中起飞跑道系统水平移动的目标。

另一方面,由于起飞过程中需要保持起飞平台相对静止的状态,而高空中空气稀薄,阻尼较小,如果单靠空气摩擦力使系统整体悬停难度较大,此时可利用螺旋桨的联动,调整转速提供与运动方向相反的作用力,更加容易实现保持系统整体悬停状态。

3 太阳能无人机弹射系统及滑跑起飞过程

太阳能无人机空中起飞系统经过升空定位装置悬停至指定起飞位置后准备起飞。由于跑道长度

的限制,为了实现短距离起飞和确保起飞过程中的安全,笔者设计了弹射系统和滑跑辅助系统。

空中跑道平台为一个长方形平面,太阳能无人机在平面上起飞。弹射系统安装在起飞平台内部,仅在跑道平面纵向中线处露出与太阳能无人机相连接的滑块,将太阳能无人机机身与滑块单向固连,滑块在弹射系统的作用下实现短距离快速加速,带动无人机同样获得极大的加速度,达到最大速度后滑块在弹射系统的作用下减速,与无人机分离,无人机由于惯性依然处于较大速度,此时无人机自身动力装置启动,在滑跑辅助系统中的滑越装置的辅助下,获得一个合适的初始迎角,与起飞平台分离。

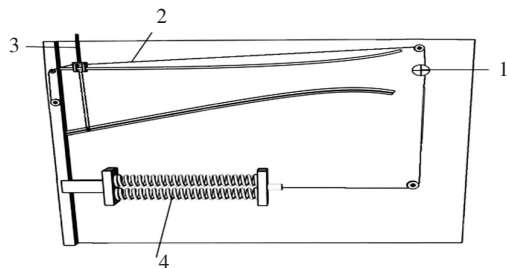
滑跑辅助系统分为两个装置,分别是与无人机翼尖小翼上的滑扣配合使用的护板,以及使无人机离开跑道时的滑越装置。护板用来防止由于使用弹射装置导致无人机加速度过大产生的侧翻,滑越装置提供给无人机一个合适的初始迎角。

3.1 太阳能无人机弹射系统设计

弹射系统^[9]安装在空中跑道平台中,除了滑块,其余所有部件都安装在安装板上。安装板垂直安装在空中跑道平台内部中线位置。机架为刚体材料,为弹射系统提供可靠的楔形轨道。第一支腿固定于机架后侧面,第二支腿固定于机架前侧面,第二支腿的顶部和末端分别设有滑轮。滑块上半部分露出空中跑道平台平面,在无人机弹射前与无人机连接在一起,滑块下半部分与上溜板连接在一起。上溜板两端设有滑轮,可在机架上表面滑动;下溜板可在机架下表面滑动。弹簧一端与第一支腿下部固定在一起,另一端与缆绳一端连接在一起;缆绳另一端与第一支腿顶部固定在一起,依次穿过滑轮。步进电机通过连接杆与限位安全销连接。当地面数据基站发送起飞指令后,步进电机转动,带动连接杆,使限位安全销脱落后,弹簧快速收缩提供的动力可以使上溜板与下溜板获得一个向前的拉力,从而使无人机快速加速达到起飞速度。当上溜板与下溜板运行到机架的最窄轨道处达到最大速度时开始减速缓冲,无人机由于惯性脱离滑块继续前进,完成起飞。本系统的弹射装置图如图3所示。

3.2 太阳能无人机空中滑跑辅助系统

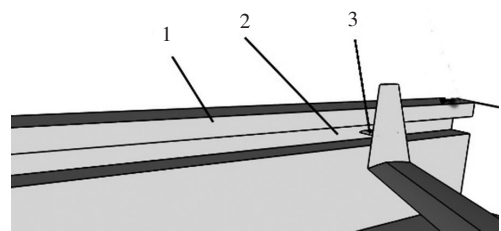
空中跑道平台为一个长方形平面,跑道外侧长边设有高于跑道平面的护板,护板内侧设有滑槽,飞行器翼间小翼外侧设有滑扣,滑扣可在滑槽内滑动,通过滑槽与滑扣配合,使飞行器在起飞时避免因初始加速度过大而导致侧翻,确保起飞过程的安全。跑道平台短边一端为飞行器放置点,另一端为飞行器起飞后与起飞平台的脱离点。飞行器起飞脱离跑道平台处(脱离点处)设置滑越装置,滑越装置可以修正飞行器初始迎角(见图4)。



1为限位安全销;2为缆绳;3为滑块并与机体连接;4为拉伸状态的高压弹簧。

图3 弹射装置图

Fig. 3 Ejection device



1为护板;2为滑槽;3为无人机翼尖小翼外侧的滑扣。

图4 护板示意图

Fig. 4 Guard plate

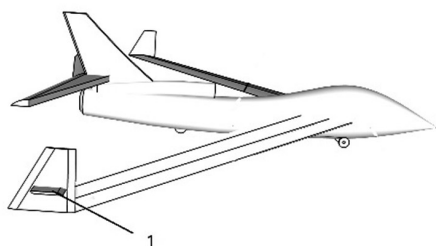
图5为翼尖小翼滑扣示意图,滑扣与护板上的滑槽配合作用,防止无人机在起飞过程中侧翻。

图6为滑越装置示意图,安装在无人机与跑道起飞脱离处,由于无人机起飞距离较短,初始速度相对巡航速度较小,若无人机采用自身的升降舵来改变姿态,效率较低,所以设计滑越装置,通过调整滑越装置的角度间接调整无人机脱离跑道时的初始迎角,使无人机更加安全地起飞。

3.3 无人机滑跑起飞过程分析

地面控制台发送起飞信号,空中跑道接收信号并执行,步进电机工作,连杆产生位移,安全销释放,多根拉伸状态的高压弹簧收缩,缆绳带动滑块向前高速位移,滑块带动无人机向前高速位移,两侧卡扣和滑槽配合工作,使无人机在加速过程中保持平稳,不会侧翻,高压弹簧收缩完毕,滑块减速,与

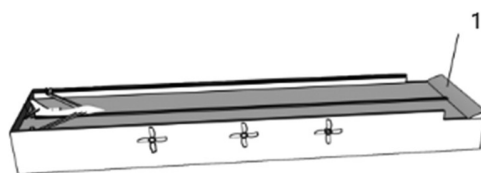
无人机机体脱离,无人机获得初速度并继续向前移动,此时无人机自身动力装置启动进一步进行加速,无人机经过滑跃平台后脱离起飞跑道,间接获得合适的初始迎角,完成空中起飞全过程。



1为无人机翼尖小翼外侧安装的滑扣。

图5 翼尖小翼滑扣示意图

Fig. 5 Sketch diagram of winglet slip-buckle at wingtip



1为滑越装置。

图6 滑越装置示意图

Fig. 6 Skidding device

4 空中起飞收益分析

4.1 地面起飞与空中起飞能量消耗对比

经推导,得出无人机从地面到达平流层巡航速度所消耗的能量为

$$W_{\text{total}} = W_1 + W_2 = \ln t \frac{2m^2 g}{\rho C_L S} + ft \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_L S}} + mgH + f_1 \sqrt{H^2 + x_1^2} + \frac{1}{2} m(V_H^2 - V_f^2),$$

无人机空中起飞到达平流层巡航速度所消耗的能量为

$$W'_{\text{total}} = mgh + f_1 \sqrt{h^2 + x_2^2} + \frac{1}{2} m(V_H^2 - V_0^2),$$

其中 m 表示无人机总质量; ρ 表示空气密度; C_L 表示升力系数; S 表示机翼参考面积; f 表示飞机所受的摩擦阻力; f_1 表示飞机所受的空气阻力; x_1 表示无人机地面起飞上升到指定高度时的水平位移; x_2 表示无人机空中起飞上升到指定高度时的水平位移; V_0 表示弹射装置给无人机的初始速度; h 表示飞机加速时上升的同一高度; W_1 表示飞机起飞阶段消耗的能量; W_2 表示飞机升空阶段消耗的能量。

假设无人机的质量为 15 kg,阻力为 $(0.15 mg)$ N,空气密度为 1.29 g/L,飞机所受的空气阻力是 $(0.1 mg)$ N,飞机起飞的速度为 50 km/h,巡航速度为 120 km/h,升力系数为 0.15,重力加速度为 9.8 m/s^2 ,机翼参考面积为 8 m^2 ,弹射装置给无人机的初速度为 50 km/h,高度 18 km,锂电池的能量密度为 $150 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$,平流层的飞机上升到的同一高度的距离 8 km [10]。

代入数据计算可得,从地面起飞 $W_{\text{total}} = W_1 + W_2 \approx 2.94 \times 10^6 \text{ J}$;从空中跑道起飞 $W'_{\text{total}} \approx 1.29 \times 10^6 \text{ J}$ 。根据以上的能量消耗可以看出无人机从空中跑道起飞所消耗的能量比从地面起飞所消耗的能量少,故采用无人机空中跑道的起飞方法更节能。根据两者的能量消耗差可以得出,从空中跑道起飞的无人机可以多载重 3.05 kg,在与地面起飞完成相同飞行任务时,空中起飞模式可以提高 20.3% 的载重量。

4.2 模拟仿真测试

通过 MATLAB 建模仿真,得出地面起飞与空中起飞能量消耗仿真图如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知,起飞阶段,无人机从地面起飞需要消耗较多能量到达指定速度才能正常起飞,而从空中跑道起飞达到起飞速度所消耗的能量为 0,更加节约能源。图 8 是在空中爬升过程中的能量消耗示意图。无人机空中起飞,在 $0 \sim 10\,000 \text{ m}$ 时从空中起飞的无人机没有能量消耗,在 $10\,000 \text{ m}$ 以上从地面起飞的无人机有较大的能量消耗;由于无人机在升空阶段中的克服重力做功的数量级比摩擦力做功的数量级大,所以摩擦力做功在较大的高度间隔下整体上对曲线的斜率没太大影响,故能量消耗与高度成正相关。

在到达指定高度前,从地面起飞的无人机需要一直克服重力和摩擦力向上爬升,而在平流层的空中跑道的无人机可以不受天气影响直接进入平流层进行巡航,不仅可以节约大量能量,更可以达到长时间巡航的目的。

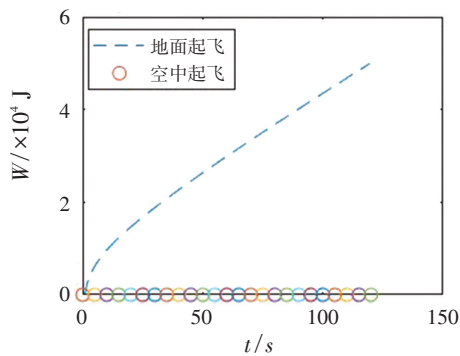


图7 无人机起飞阶段能量消耗仿真图

Fig. 7 Simulation chart of energy consumption of UAV in take-off stage

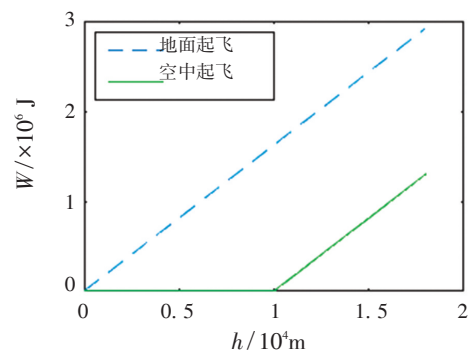


图8 无人机升空阶段能量消耗仿真图

Fig. 8 Simulation chart of energy consumption of UAV in lift-off stage

5 结语

本研究以减小无人机克服自身重力做功所需能量为出发点,提出了太阳能无人机空中起飞跑道的设计方案,让无人机直接从太阳能充足的平流层起飞,不仅避免了克服自身重力所做的功,还能减少电池携带量,以便安装更多的太阳能电池板增加续航能力,或者携带更多种类的其他航空设备,为太阳能无人机空中起飞的后续研究建立了基础。

虽然针对太阳能无人机个体而言,确实是节省了能源,但是由于空中起飞模式需携带更多的设备到高空中,就整体而言,其能耗比单独的无人机从地面起飞要高一些;另一方面,就便携性而言,比起地面起飞的无人机,空中起飞的固定翼无人机需要的起飞准备更为复杂,需同时控制起飞平台和固定翼无人机两个主体,起飞难度更大。太阳能无人机作为作业主体,增加其载重量及续航的需求要大于节约整体能源的需求,而且对于本文阐述的空中起飞的太阳能无人机,其特点是具备超长续航能力的同时可以以较低的载重完成起飞。所以付出更高的总能量消耗和不够便携的起飞条件,换来了太阳能无人机在续航和功能性上的长足进步。

亚马逊公司BERG等研发的用于运送货物的空中履行中心(airborne fulfillment center)利用无人机空中起飞运送包裹^[11],与本文区别在于其起飞的飞行器为旋翼机,且从平台起飞后仍飞回平台。目前,笔者制作了较为简易的旋翼机空中起飞平台模型,验证了空中起飞思路的可行性,并且在按照本文的设计思路制作发射装置。之后会在地面利用发射装置尝试起飞无人机,并最终将其携带至空中并完成起飞。

参考文献(References)

- [1] 陈祥,吴玉兴,郭瑞,等. 太阳能航拍无人机[J]. 河北农机, 2018(9):18-19.
- [2] 刘博. 太阳能无人机总体设计研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2018.
- [3] 徐朋. 无人机太阳能续航系统的设计与实现[J]. 工程科技研究, 2017(6):90-91.
- [4] 孙蓉,刘洪丹,权申明,等. 小型固定翼无人机自主起飞控制系统[J]. 实验室研究与探索, 2018,37(10):89-93,97.
- [5] 王彦广,王伟志,黄灿林. 平流层飞行器技术的最新发展[J]. 航天返回与遥感, 2019,40(2):1-13.
- [6] 黄宛宁,张晓军,祝榕辰,等. 浮空器在应急通信中的应用[J]. 科技导报, 2018,36(6):55-64.
- [7] GHOSH K, GUHA A, DUTTAGUPTA S P. Power generation on a solar photovoltaic array integrated with lighter-than-air platform at low altitudes[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 154:286-298.
- [8] 马威,过海峰,姜宁. 海军通用无人机及其起降方式分析[J]. 飞航导弹, 2006(12):37-40,49.
- [9] 黄国勤,罗莎祁,于今. 小型无人机气动肌腱式弹射系统动态仿真与优化[J]. 中国机械工程, 2019,30(4):74-80.
- [10] 智飞. 罗马尼亚研制平流层电动无人机系列[EB/OL].(2017-02-19)[2019-05-28]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201702/19/22986.html>.
- [11] Amazon Technologies, Inc. Airborne fulfillment center utilizing unmanned aerial vehicles for item delivery: US9305280B1 [P]. 2016-04-05.