

反无人机绳网捕获系统的动力学建模与仿真*

陈青全, 丰志伟, 张国斌, 王星, 张青斌
(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对无人机“黑飞”问题,提出了包含捕获平台地面发射、柔性绳网空中展开抓捕和降落伞回收的反无人机绳网捕获系统方案,建立了全过程动力学模型。并将动力学模型中的平台飞行轨迹模型和绳网展开模型与飞行试验数据进行了对比验证。结果表明,该系统动力学建模与仿真方案可行,对系统工程设计具有指导意义。

关键词:无人机;多体动力学;柔性绳网;建模;仿真

中图分类号:V412 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)02-009-07

Dynamic modeling and simulation of anti-UAV tethered-net capture system

CHEN Qingquan, FENG Zhiwei, ZHANG Guobin, WANG Xing, ZHANG Qingbin

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the ‘Black Fly’ problem of UAV (unmanned aerial vehicle), a program of the anti-UAV tethered-net capture system consisting of platform flying, flexible tethered-net arresting and parachute recycling was proposed, and a dynamic model of the whole process was conducted. The platform flight trajectory model and the tethered-net dynamic model were compared and verified with the test data. The results show that the proposed system dynamics modeling and simulation program is feasible and has guiding significance for engineering system design.

Keywords: unmanned aerial vehicle; multi-body dynamic; flexible tethered-net; modeling; simulation

无人机技术的发展使得其在生活、工作^[1-7]中发挥着愈发重要的作用,无人机具有的体积小、飞行空域低和雷达难以探测等特性^[8],使得其可能被不法分子利用从而造成各种破坏,如非法进入敏感空域、贩毒、走私等,给社会稳定带来重大安全隐患,因此反无人机技术成为近几年来世界各国关注的热点研究领域之一^[9-12]。

绳网捕获作为一种新兴的反无人机模式,其具有的高容差、低要求和低成本等特性,使其迅速得到发展。按照发射位置的不同分类,反无人机绳网捕获模式分为地面发射捕获和空中发射捕获。地面捕获为地面瞄准和发射,例如英国 OpenWorks 公司研发出的肩扛式发射器 SkyWall。空中捕获是利用装载有绳网的无人机在空中瞄准和发射,捕获目标无人机并运送至指定区域,例如美国密歇根理工大学研制的无人机捕获系统。

尽管各组织研究了各类反无人机绳网捕获武器,但从公开文献上看,对无人机的拦截过程以及

拦截之后的回收着陆过程尚无深入和全面的动力学建模,也无较为完整的全过程仿真分析。事实上,国内外对柔性绳网的应用及理论分析主要集中在空间清除太空垃圾方面。如欧空局名为 ROGER 的地球静止轨道废弃卫星绳网抓捕项目^[13-16];美国 NASA 名为 GRASP^[17-18]的绳网捕获项目等。动力学研究方面,Gärdsback 等^[19]建立了空间飞网旋转展开模型,利用商业软件进行了仿真模拟;Hobbs^[20]研究了绳索的弹性和疲劳断裂,初步分析了绳索的自接触机理;于洋等^[21-23]利用商业软件分析了空间柔性绳网的展开;张青斌等^[24-29]研制了地面试验样机,进行了绳网地面试验,并基于离散化模型,研究了空间绳网展开过程的动力学特性,进行了天地差异性分析。

相比于空间碎片捕获任务,地面反无人机绳网捕获任务最大的不同就在于绳网受到不可忽视的重力和空气作用力。在上述力的作用下,绳网

* 收稿日期:2020-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772353)

作者简介:陈青全(1990—),男,重庆忠县人,讲师,博士,E-mail:chenqingquan@nudt.edu.cn;

丰志伟(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:fengzhw@nudt.edu.cn

的网形变化与在空间环境中的相差甚远。前期的试验和仿真研究表明,重力和空气作用力可能使得绳网不能完全展开,或者提前收拢,导致反无人机抓捕任务失败。因此,有必要进行反无人机绳网捕获任务的全过程动力学分析,并以此指导实际任务。

本文在项目组前期空间绳网和降落伞的研究基础上,结合“低、慢、小”无人机的任务特征,阐述了平台发射、绳网展开以及目标捕获后降落伞回收的无人机捕获过程;建立了捕获平台的六自由度刚体动力学模型;基于离散化的策略,采用绳索有限段的半阻尼弹簧模型分析了绳网展开过程的位置和形状变化特性;采用九自由度物-伞多体动力学模型分析了绳网捕获目标后的坠落过程。然后以某网捕系统为例,进行了全过程的仿真分析,并利用部分飞行试验数据验证校核了模型,研究反无人机绳网捕获过程的特性。

1 无人机捕获过程描述

图 1 给出了绳网捕获无人机的三个大体阶段:①通过火箭或其他形式动力以一定初速度 v_0 和角度 α_0 发射总质量为 m_0 的捕获平台;②当平台飞行至目标空域时,二次发射绳网抓捕目标;③展开降落伞,完成目标无人机的捕获回收。

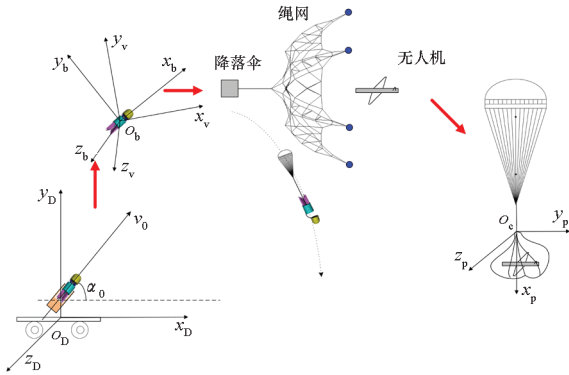


图 1 无人机捕获过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the capture process of the UAV

2 动力学建模

分别对捕获平台飞行、绳网展开捕获和降落伞回收进行动力学建模。

2.1 捕获平台飞行动力学建模

采用六自由度刚体模型建立捕获平台的轨迹动力学模型,如图 1 所示。以地面发射点为原点 o_D 建立右手直角坐标系 $o_D - x_D y_D z_D$,其中 $o_D x_D$ 轴方向为发射时刻平行于地面且指向目标无人机的

方向, $o_D y_D$ 轴垂直大地竖直向上;以捕获平台质心为原点 o_b 建立右手直角坐标系 $o_b - x_b y_b z_b$, $o_b x_b$ 轴沿捕获平台纵轴指向头部, $o_b y_b$ 轴在平台纵向对称面内垂直于 $o_b x_b$ 轴向上;以 o_b 为原点建立右手直角坐标系 $o_b - x_v y_v z_v$, $o_b x_v$ 轴为沿平台速度方向, $o_b y_v$ 轴竖直向上。

捕获平台在飞行过程中,受到重力、气动力和推力作用。不考虑有推力情况,则在不考虑地球自转的情况下,捕获平台质心的动力学方程为

$$m_0 \dot{\mathbf{v}} = m_0 \mathbf{g} + \mathbf{B}_b^D \mathbf{B}_v^b \mathbf{R}_v \quad (1)$$

式中: m_0 为初始质量, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{R}_v 为 $o_b - x_v y_v z_v$ 中的气动力向量, \mathbf{B}_b^D 为 $o_b - x_b y_b z_b$ 到 $o_D - x_D y_D z_D$ 的转移矩阵, \mathbf{B}_v^b 为 $o_b - x_v y_v z_v$ 到 $o_b - x_b y_b z_b$ 的转移矩阵。

在 $o_b - x_b y_b z_b$ 中建立其绕质心转动的动力学方程为

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (I_z - I_y) \omega_z \omega_y = M_{q,xt} \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = M_{q,yt} \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + (I_y - I_x) \omega_y \omega_x = M_{q,zt} \end{cases} \quad (2)$$

其中: ω_x 、 ω_y 和 ω_z 为捕获平台的角速度, I_x 、 I_y 和 I_z 为转动惯量, $M_{q,xt}$ 、 $M_{q,yt}$ 和 $M_{q,zt}$ 为 $o_b - x_b y_b z_b$ 中的气动力矩分量。联立式(1)和式(2)即可求解平台的运动特性。

2.2 绳网发射展开动力学建模

采用质量块牵引的方式展开绳网,装置如图 2 所示。发射时抛掉前罩,质量块以发射速度 v_{net} 和角度 β_{net} 牵引展开绳网。

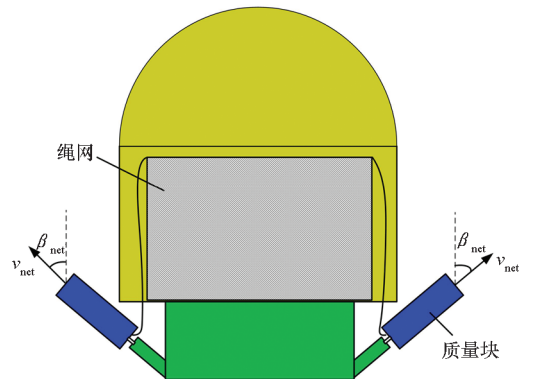


图 2 绳网发射装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the tethered-net launching device

在柔性绳网多体动力学模型的基础之上,考虑重力和空气阻力的影响,建立低空条件下绳网展开过程的动力学模型^[26-29]。如图 3 所示,采用

离散化的建模思路,将绳网划分为若干绳段,各绳段可受拉不可受压,质量集中于两端点。

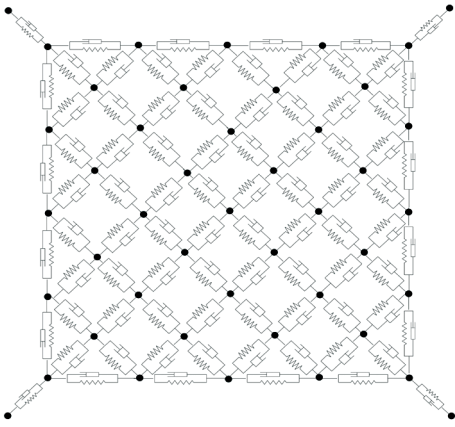


图3 绳网的“半弹簧阻尼”模型

Fig. 3 Semi-spring damper model of the tethered-net

绳段单元 s_{ij} 的内力方向沿着单元径向,大小近似为线弹性与线性阻尼之和,即

$$T_n = \begin{cases} k_n(l_n - l_n^0) + c_n \dot{l}_n & l_n > l_n^0 \\ 0 & l_n \leq l_n^0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, l_n 和 \dot{l}_n 分别为绳段 s_{ij} 的原长和对应的伸长率, k_n 为 s_{ij} 等效弹性系数, c_n 为等效阻尼系数。

绳段 s_{ij} 在地面环境所受外力如图4所示,其中 F_{ij}^D 为气动阻力和 F_{ij}^L 为气动升力。记风速为 V_w , 绳索单元质心的速度为 $V_n = 1/2(V_i + V_j)$, 则相对空气的速度 V_n^c 可以表示为

$$V_{ij}^c = \frac{1}{2}(V_i + V_j) - V_w \quad (4)$$

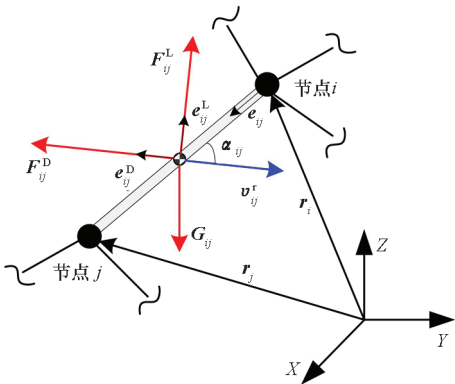


图4 绳段 s_{ij} 所受外力

Fig. 4 External force acting on the segment s_{ij}

考虑绳索的透气性,采用 Paul Williams^[28] 经验公式得到阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 分别为

$$C_D \approx 0.022 + 1.1 \sin^3 \alpha_n \quad (5)$$

$$C_L \approx 1.1 \sin^2 \alpha_n \cos \alpha_n \quad (6)$$

其中, α_n 为绳段的攻角,其余弦 $\cos \alpha_n$ 可以表示为

$$\cos \alpha_n = \frac{e_{ij} V_{ij}^c}{\|e_{ij} V_{ij}^c\|} \quad (7)$$

进一步,绳段上的气动阻力 F_{ij}^D 和气动升力 F_{ij}^L 可以表示为

$$F_{ij}^D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_D d \|V_{ij}^c\|^2 e_D \quad (8)$$

$$F_{ij}^L = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_L d \|V_{ij}^c\|^2 e_L \quad (9)$$

其中, ρ_{air} 为空气密度, d 为绳子的直径, e_D 和 e_L 分别为空气阻力和空气升力的单位方向向量。

$$e_D = -\frac{V_{ij}^c}{\|V_{ij}^c\|} \quad (10)$$

$$e_L = -\frac{e_{ij} V_{ij}^c}{\|e_{ij} V_{ij}^c\|} \frac{V_{ij}^c \times e_{ij} \times V_{ij}^c}{\|V_{ij}^c \times e_{ij} \times V_{ij}^c\|} \quad (11)$$

根据牛顿第二定律,节点 i 的动力学方程可以表示为

$$m_i \ddot{r}_i = T_i + F_i^D + F_i^L + G_i \quad (12)$$

式中, m_i 为节点 i 的质量, r_i 为位置矢量, T_i 为内部张力, F_i^D 、 F_i^L 分别为外部气动阻力、气动升力, G_i 为重力。

$$T_i = \sum_{j \in R(i)} T_{ij} \quad (13)$$

$$F_i^D = \frac{1}{2} \sum_{j \in R(i)} F_{ij}^D \quad (14)$$

$$F_i^L = \frac{1}{2} \sum_{j \in R(i)} F_{ij}^L \quad (15)$$

$$G_i = \frac{1}{2} \sum_{k \in R(i)} G_k \quad (16)$$

其中, $R(i)$ 为与节点 i 存在连接关系的节点集合。

初始时刻绳网折叠封贮于网舱内,但是由于相关的弹射展开过程十分复杂,需另行详细论述。结合前期试验与仿真结果,为简单起见,假定绳网初始状态为原绳网的等比例缩小版,且不考虑网舱对绳网的作用。

2.3 捕获后的无人机-降落伞动力学模型

绳网抓捕目标无人机后,降落伞拉出回收。为了简化问题,忽略绳网碰撞过程和降落伞充气过程。

参考文献[29-30],本节建立如图5所示的九自由度多体动力学模型,其中 o_c 为物-伞铰接点。以 o_c 为原点建立固连的右手直角坐标系 $o_c - x_p y_p z_p$ 和 $o_c - x_l y_l z_l$, $o_c x_p$ 轴沿降落伞对称轴向下, $o_c x_l$ 轴定义为降落伞展开时刻网和无人机组合体过 o_c 竖直向下的体轴。参考文献[31-32],得到物-伞九自由度力学方程为

$$A_{\text{mass}} = \begin{bmatrix} m_l E_{3 \times 3} & -B_l^p m_l L_l & m_p L_p \\ m_l L_l & I_l & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -m_p L_p & \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_{\text{force}} = - \begin{bmatrix} (m_t + m_p)(\boldsymbol{\Omega}_p \times \mathbf{V}_o) \\ \boldsymbol{\Omega}_t \times (\mathbf{L}_t \cdot \boldsymbol{\Omega}_t) + m_t \mathbf{L}_t \times (\boldsymbol{\Omega}_t \times \mathbf{B}_p^t \mathbf{V}_o) \\ \boldsymbol{\Omega}_p \times (\mathbf{L}_p \cdot \boldsymbol{\Omega}_p) + m_p \mathbf{L}_p \times (\boldsymbol{\Omega}_p \times \mathbf{V}_o) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_t \mathbf{B}_t^p (\boldsymbol{\Omega}_t \times \boldsymbol{\Omega}_t \times \mathbf{L}_t) + m_p (\boldsymbol{\Omega}_p \times \boldsymbol{\Omega}_p \times \mathbf{L}_p) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_t^p \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_p \\ \mathbf{M}_t \\ \mathbf{M}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_t \mathbf{g} + m_p \mathbf{g} \\ \mathbf{L}_t \times m_t \mathbf{g} \\ \mathbf{L}_p \times m_p \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_o \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}}_t \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}}_p \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\text{mass}}^{-1} \mathbf{B}_{\text{force}} \quad (19)$$

其中, m_p 为降落伞的质量, I_p 为其关于铰接点 o_c 的转动惯量, m_t 为绳网-无人机的质量, I_t 为其关于铰接点 o_c 的转动惯量, \mathbf{V}_o 为系统在铰接点 o_c 处的速度, $\boldsymbol{\Omega}_p$ 和 $\boldsymbol{\Omega}_t$ 分别为降落伞及绳网-无人机组体的转动角速度, \mathbf{F}_p 和 \mathbf{M}_p 分别为降落伞所受到的气动力及气动力矩, \mathbf{F}_t 和 \mathbf{M}_t 分别为绳网-无人机组体受到的气动力及气动力矩, \mathbf{L}_p 和 \mathbf{L}_t 分别为铰接点到降落伞和绳网-无人机组体质心的矢量, \mathbf{B}_p^t 为 $o_c - x_p y_p z_p$ 到 $o_c - x_t y_t z_t$ 的转移矩阵, \mathbf{B}_t^p 为 $o_c - x_t y_t z_t$ 到 $o_c - x_p y_p z_p$ 的转移矩阵。

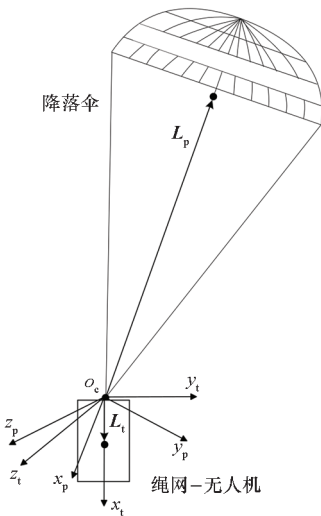


图 5 物-伞多体系统示意

Fig. 5 Parachute-payload multi-body system

3 仿真与试验分析

对平台飞行、绳网捕获和降落伞回收全过程进行数值仿真分析,并基于试验数据,分别对平台飞行和绳网展开模型进行验证。

3.1 试验及仿真工况

结合网捕系统试验,令质量为 5 kg 的无人机以 40 km/h 的速度平行于发射坐标系 $o_p x_D$ 轴飞行,主要参数见表 1。

表 1 主要系统参数

Tab. 1 Main system parameters

参数	取值
捕获平台质量 m_0/kg	15
捕获平台发射速度 $v_0/(\text{m/s})$	100
捕获平台发射角度 $\alpha_0/(\text{°})$	73
绳网质量 m_{net}/kg	0.2
单个质量块质量 $m_{\text{bullet}}/\text{kg}$	0.05
绳网发射速度 $v_{\text{net}}/(\text{m/s})$	70
绳网发射角度 $\beta_{\text{net}}/(\text{°})$	40
绳网边长/m	5.2
绳网角牵引绳长/m	0.5
降落伞质量 m_p/kg	2
无人机飞行高度/m	435

3.2 结果与分析

图 6 为捕获平台的飞行仿真结果与试验数据对比图。图中曲线吻合较好,最大的高度偏差约为 17.2 m,对应偏差百分比约为 4.6%,满足工程任务要求,验证了捕获平台仿真模型的有效性。

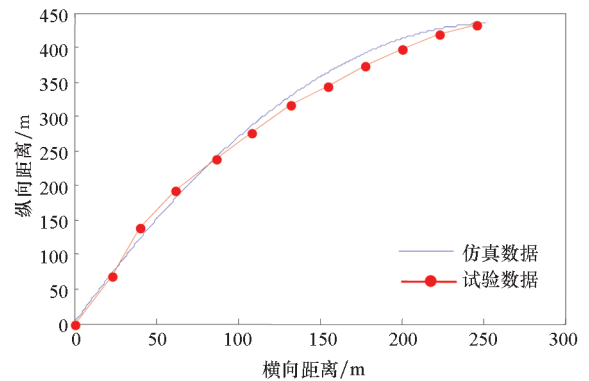


图 6 捕获平台飞行轨道试验与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of test and simulation results of the flight path of the platform

图 7 为绳网发射展开过程中网口直径的仿真结果与高速图像试验测量数据对比图。图 8 为仿真得到的部分时刻绳网形状变化图。从图 7 中可以看出,试验与仿真的网口直径随时间的变化较为符合。且从图 8 中可以看出,仿真中绳网先呈

束状牵引随后网面迅速展开,通过定性地对比试验图像,吻合度较好,这验证了绳网展开动力学模型的有效性。

忽略降落伞与绳网-无人机组体的碰撞和碰撞之后的平衡过程,由动量定理计算得到状态

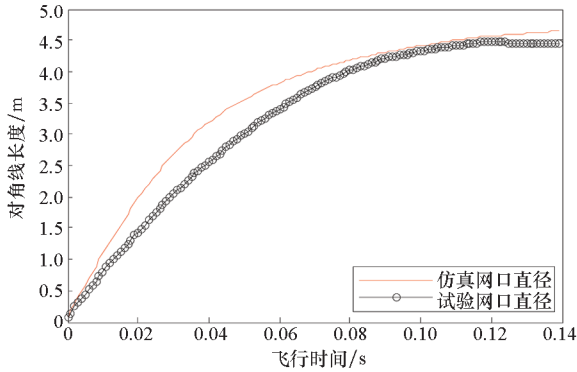
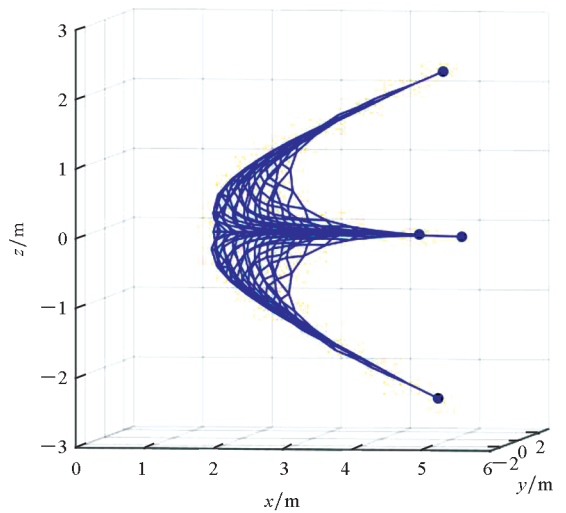


图7 网口直径的试验与仿真结果对比图

Fig. 7 Comparison of the test and the of the diagonal length simulation results



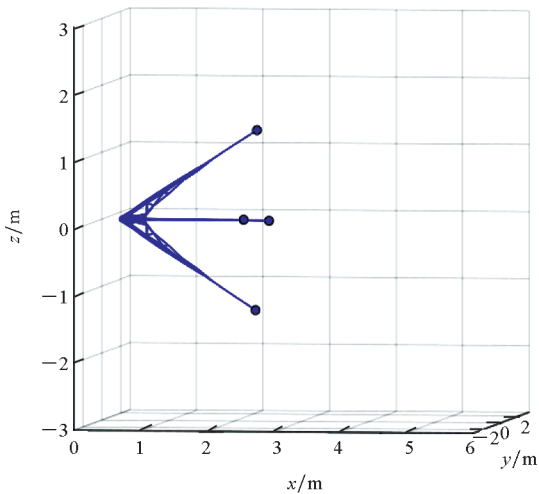
(c) 0.14 s

图8 特定时刻的网形图

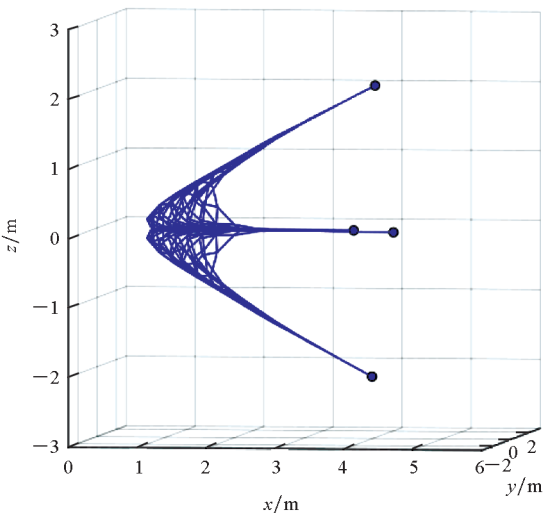
Fig. 8 Shapes of the tethered-net at several moments

平衡之后的系统速度约为 0.9 m/s,俯仰角约为 83.3°。由于试验测量条件限制,未能收集得到系统下落过程数据。

图9为无人机捕获全过程高度随相对飞行时间的变化图。第一阶段,捕获平台以 $v_0 = 100$ m/s 和 $\alpha_0 = 73^\circ$ 的初始条件从地面发射,经过 9.0 s 飞行后升高到约 435.1 m,此时捕获平台的俯仰角约为 6.5° ,速度约为 27.3 m/s;第二阶段,绳网质量块以 $v_{net} = 70$ m/s 和 $\beta_{net} = 40^\circ$ 初始条件发射,在绳网展开过程中,向前飞行了约 4.8 m,向上飞行了约 0.5 m;第三阶段,降落伞-绳网-无人机组体的下落时间约为 69.4 s,着陆速度约为 7.2 m/s^[33]。



(a) 0.03 s



(b) 0.08 s

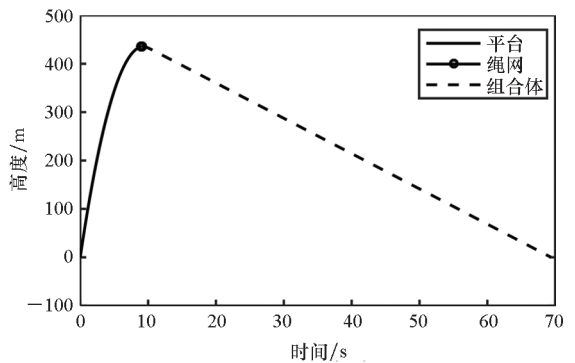


图9 系统运动过程飞行高度随时间的变化

Fig. 9 Flight altitude variation with time during system motion process

4 结论

本文针对无人机“黑飞”问题,基于项目组空

间绳网和降落伞研究基础,结合无人机“低、慢、小”等特点:提出了一种基于无人机绳网抓捕和降落伞回收的总体方案;建立了捕获平台的六自由度刚体动力学模型、绳网有限段的半阻尼弹簧模型和九自由度的降落伞-绳网-无人机动力学模型;进行全过程仿真,并通过部分系统试验,对模型进行了验证。仿真结果表明,绳网无人机捕获系统方案可行,动力学模型有效。为绳网无人机捕获系统的设计提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 陆镇武. 浅谈无人机在土地勘测中的应用[J]. 城市地理, 2016(12): 115.
LU Z W. Discussion on the application of unmanned aerial vehicle in the field of land survey [J]. City Geography, 2016(12): 115. (in Chinese)
- [2] 肖璟. 无人机遥感技术在测绘中的应用[J]. 江西测绘, 2016(4): 34-35.
XIAO J. Application of UAV remote sensing technology in surveying and mapping [J]. Jiangxi Cehui, 2016(4): 34-35. (in Chinese)
- [3] 张博, 张柏, 洪梅, 等. 湖泊水质遥感研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 301-310.
ZHANG B, ZHANG B, HONG M, et al. Advance in remote sensing of lake water quality [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 301-310. (in Chinese)
- [4] 陈鉴知. 矿区高分辨率空间数据的获取及在土地复垦管理中的应用[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2017.
CHEN J Z. Acquisition of high-resolution spatial data in mining area and its application in land reclamation management [D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2017. (in Chinese)
- [5] 戴林太, 曾芳. 无人机航测技术在矿山测绘中的应用研究[J]. 建材与装饰, 2018(43): 234-235.
DAI L T, ZENG F. Research on application of UAV aerial survey technology in mine surveying and mapping [J]. Construction Materials & Decoration, 2018(43): 234-235. (in Chinese)
- [6] 李金香, 李亚芳, 李帅, 等. 无人机遥感技术在新疆皮山地震灾情获取中的应用[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(3): 690-699.
LI J X, LI Y F, LI S, et al. Application of remote sensing technology of UAV in the acquisition of earthquake disaster in Pishan, Xinjiang [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(3): 690-699. (in Chinese)
- [7] 李强, 张景发, 罗毅, 等. 2017年“8.8”九寨沟地震滑坡自动识别与空间分布特征[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 785-795.
LI Q, ZHANG J F, LUO Y, et al. Recognition of earthquake-induced landslide and spatial distribution patterns triggered by the Jiuzhaigou earthquake in August 8, 2017 [J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(4): 785-795. (in Chinese)
- [8] 张静, 张科, 王靖宇, 等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1-8, 34.
ZHANG J, ZHANG K, WANG J Y, et al. A survey on anti-UAV technology and its future trend [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 1-8, 34. (in Chinese)
- [9] 杨勇, 王诚, 吴洋. 反无人机策略及武器装备现状与发展动向[J]. 飞航导弹, 2013(8): 27-31.
YANG Y, WANG C, WU Y. Anti-UAV strategy and current situation and development trend of weapon and equipment [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013(8): 27-31. (in Chinese)
- [10] 刘丽, 魏雁飞, 张宇涵. 美军反无人机技术装备发展解析[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 60-64.
LIU L, WEI Y F, ZHANG Y H. The development of anti-UAV technical equipment of the U. S. armed forces [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2017, 33(1): 60-64. (in Chinese)
- [11] 罗斌, 黄宇超, 周昊. 国外反无人机系统发展现状综述[J]. 飞航导弹, 2017(9): 24-28.
LUO B, HUANG Y C, ZHOU H. Overview of the development status of foreign anti-UAV system [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(9): 24-28. (in Chinese)
- [12] 潘兴宏, 秦志强. 反无人机系统浅析[J]. 科学中国人, 2016(5): 29.
PAN X H, QIN Z Q. Analysis of anti-UAV system [J]. Scientific Chinese, 2016(5): 29. (in Chinese)
- [13] European Space Agency. ROGER phase A: executive summary [R]. Bremen: ESA, 2003.
- [14] KASSEBOM M, KOEBEL D, TOBEHN C, et al. ROGER-an advanced solution for a geostationary service satellite [C]//Proceedings of 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003.
- [15] BISCHOF B, KERSTEIN L, STARKE J, et al. ROGER-robotic geostationary orbit restorer [C]//Proceedings of 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003.
- [16] DYREK M, DERDA Z, GOLEBIEWSKI W. Stereographic system for reconstruction of net flight trajectory [R]. Bremen: ESA, 2015.
- [17] SORENSEN K. Conceptual design and analysis of an MXER tether boost station [C]//Proceedings of 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2001.
- [18] PEARSON J, LEVIN E, OLDSOON J, et al. EDDE, electrodynamic debris eliminator: new frontiers in space traffic management [C]//Proceedings of 4th IAASS Conference, 2010.
- [19] GÄRDSBACK M, TIBERT G. Optimal deployment control of spinning space webs and membranes [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(5): 1519-1530.
- [20] HOBBS S. Disposal orbits for GEO spacecraft: a method for evaluating the orbit height distributions resulting from implementing IADC guidelines [J]. Advances in Space Research, 2010, 45: 1042-1049.
- [21] 于洋, 宝音贺西, 李俊峰. 空间飞网抛射展开动力学建模与仿真[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1289-1296.
YU Y, BAOYIN H X, LI J F. Modeling and simulation of projecting deployment dynamics of space webs [J]. Journal of

- Astronautics, 2010, 31(5): 1289 – 1296. (in Chinese)
- [22] 李京阳, 于洋, 宝音贺西, 等. 空间飞网两种动力学模型
的比较研究[J]. 力学学报, 2011, 43(3): 542 – 550.
LI J Y, YU Y, BAOYIN H X, et al. Simulation and
comparison of different dynamical models of space webs[J].
Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011,
43(3): 542 – 550. (in Chinese)
- [23] YU Y, BAOYIN H X, LI J F. Dynamic modelling and
analysis of space webs [J]. Science China Physics,
Mechanics & Astronomy, 2011, 54(4): 783 – 791.
- [24] ZHANG G B, ZHANG Q B, FENG Z W, et al. Dynamic
modeling and simulation of a novel mechanism for adhesive
capture of space debris [J]. Advances in Space Research,
2021, 68(9): 3859 – 3874.
- [25] 张青斌, 孙国鹏, 丰志伟, 等. 柔性绳网动力学建模与天地
差异性分析[J]. 宇航学报, 2014, 35(8): 871 – 877.
ZHANG Q B, SUN G P, FENG Z W, et al. Dynamics
modeling and differentia analysis between space and ground
for flexible cable net [J]. Journal of Astronautics, 2014,
35(8): 871 – 877. (in Chinese)
- [26] 陈青全, 张青斌, 唐乾刚, 等. 基于定力撕裂带的绳网网
型控制研究[J]. 宇航学报, 2018, 39(12): 1332 – 1339.
CHEN Q Q, ZHANG Q B, TANG Q G, et al. Research on
space net control based on fixed-force tear rope[J]. Journal of
Astronautics, 2018, 39(12): 1332 – 1339. (in Chinese)
- [27] CHEN Q Q, ZHANG Q B, GAO Q Y, et al. Design and
optimisation of a space net capture system based on a multi
objective evolutionary algorithm [J]. Acta Astronautica,
2020, 167: 286 – 295.
- [28] CHEN Q Q, LI G H, ZHANG Q B, et al. Optimal design of
passive control of space tethered-net capture system [J].
IEEE Access, 2019, 7: 131383 – 131394.
- [29] ZHANG G B, ZHANG Q B, FENG Z W, et al. A simplified
model for fast analysis of the deployment dynamics of tethered-
net in space [J]. Advances in Space Research, 2021,
68(4): 1960 – 1974.
- [30] WILLIAMS P. Optimal wind power extraction with a tethered
kite[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and
Control Conference and Exhibit, 2006.
- [31] 唐乾刚, 张青斌, 张晓今, 等. 伞 – 弹系统九自由度动力
学模型[J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 449 – 452.
TANG Q G, ZHANG Q B, ZHANG X J, et al. Nine-degree-
of-freedom model of bomb-parachute system [J]. Acta
Armamentarii, 2007, 28(4): 449 – 452. (in Chinese)
- [32] 张青斌, 丰志伟, 马洋, 等. 火星 EDL 过程动力学建模与
仿真[J]. 宇航学报, 2017, 38(5): 443 – 450.
ZHANG Q B, FENG Z W, MA Y, et al. Modeling and
simulation of Mars EDL process[J]. Journal of Astronautics,
2017, 38(5): 443 – 450. (in Chinese)
- [33] 陈青全. 柔性绳网动力学与应用[D]. 长沙: 国防科技大
学, 2019.
CHEN Q Q. Dynamics and application of flexible tethered-net
system [D]. Changsha: National University of Defense
Technology, 2019. (in Chinese)