

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.05.013

小型固定翼无人机绳钩回收过程动力学分析

裴锦华^{1,2} 何成^{1,2} 王陶^{1,2} 李悦^{1,2}

(1. 南京航空航天大学无人机研究院, 南京, 210016;

2. 南京航空航天大学中小型无人机先进技术工业和信息化部重点实验室, 南京, 210016)

摘要:绳钩回收作为小型固定翼无人机的一种精确定点拦阻无损回收技术,近年来在国内外得到迅速发展。本文以某型无人机的绳钩回收系统为研究对象,对绳钩回收系统进行了参数化处理并建立了两种动力学仿真模型。一是在考虑回收架柔性基础上建立了基于 Lagrange 方程的绳钩回收系统的动力学仿真模型,二是在考虑绳索变形和系统结构细节基础上建立了基于 MSC. ADAMS 的绳钩回收系统的多体动力学仿真模型。通过上述两种仿真模型的算例分析以及与某型无人机绳钩回收试验的测试数据作对比,验证了两种动力学仿真模型在绳钩回收系统不同设计阶段的适用性和有效性。

关键词:无人机;绳钩回收系统;动力学;仿真模型

中图分类号:V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)05-0693-06

Dynamics Analysis of Rope-Hook Recovery System for Fixed-Wing UAV

PEI Jinhua^{1,2}, HE Cheng^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, LI Yue^{1,2}

(1. Research Institute of Pilotless Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, Nanjing, 210016, China; 2. Key Laboratory of Small and Medium-Sized Unmanned Aerial Vehicle Advanced Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Rope-hook recovery system, as a assigned spot and nondestructive recovery program for fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV), has developed rapidly both at home and abroad in recent years. In this paper, two kinds of dynamic model for Rope-hook recovery system are established by parameterization. First, the Lagrange equation of the Rope-hook recovery system is established based on the flexible recovery frame. Secondly, the multi-body dynamics simulation model of the recovery system based on MSC. ADAMS is established by considering the deformation of the rope and the details of the system structure. The dynamic characteristics of UAV in the recovery process are analyzed. Finally, the applicability and effectiveness of the two dynamic simulation models in the different design stages of the Rope-hook recovery system are determined by comparing the simulation results with the test results.

Key words: unmanned aerial vehicle; rope-hook recovery system; dynamics; simulation model

常用的无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV)回收方式主要有伞降回收、着陆滑跑、空中

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20160050)资助项目;国家自然科学基金(11602105)资助项目。

收稿日期:2017-07-01;**修订日期:**2017-08-15

作者简介:裴锦华,男,研究员,国际无人机系统标准化协会技术委员会委员,江苏省“333 高层次人才培养工程”中青年科学技术带头人,江苏省“六大人才高峰”创新人才团队带头人。发表学术论文 20 余篇,主编国军标 2 项,授权发明专利 4 项。获省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 4 项、三等奖 5 项,省部级型号研制个人二等功 1 次、三等功 2 次。

通信作者:裴锦华, E-mail: peijh@nuaa.edu.cn.

引用格式:裴锦华,何成,王陶,等. 小型固定翼无人机绳钩回收过程动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(5):693-698. PEI Jinhua, HE Cheng, WANG Tao, et al. Dynamic analysis of rope-hook recovery system for fixed-wing UAV[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(5):693-698.

钩挂回收、撞网回收和气囊减震等^[1-8]。然而,这些传统回收方式往往对回收场地的空间大小、地形地貌及技术保障等方面均有较高的要求或者较难实现无人机的无损回收,这也是导致无人机回收阶段故障高发的重要因素。因此,无人机回收技术已成为影响无人机系统研制发展和使用费效比的关键技术之一。

近年来,随着新材料、机载航电及任务设备小型化和轻量化等应用技术的不断成熟,更小、更轻和航时更长的空中平台必然成为小型固定翼无人机的技术发展方向,其中,如何实现此类无人机的全地形起降(陆基、海基)和高费效比使用(快速无损回收)是亟待解决的一个重要问题。目前,国际上发展出一种适合几十千克重量级别的小型固定翼无人机使用的精确定点拦阻无损回收系统——绳钩回收系统。该回收系统利用一根垂直悬挂在吊杆上的拦阻绳捕获无人机翼尖锁钩来实现回收,结构组成简单、收放机动灵活,可在陆基地面/车载、海基舰载/岛礁等各种狭小回收空间下使用。美国“扫描鹰”(ScanEagle)无人机和“整合者”(RQ-21A)无人机的“天钩”(Skyhook)回收系统^[9]是其典型代表。

国内的南京航空航天大学、西北工业大学、中国航空工业集团公司和中国航天科技集团公司等少数高校院所已经开展了无人机绳钩回收技术的研究工作及其系统研制。卢伟等^[10]建立了基于矢量封闭环的无人机绳钩回收系统动力学模型,并通过 Matlab/Simulink 研究了无人机回收过程中系统的吸能特性,在此基础上对回收过程中拦阻力峰值载荷下的机翼强度进行了校核。孙林峰等^[11]建立了无人机绳钩回收质点动力学方程,其中假定无人机为刚体,并且忽略了回收绳的质量和弹性变形,然后通过 Matlab/Simulink 对绳钩回收系统的可行性进行了验证,计算结果显示无人机过载和回收制动力都在合理范围内。吴佳凯等^[12]建立了无人机绳钩回收系统的多目标优化模型,采用遗传算法对回收系统的关键参数进行了优化分析。

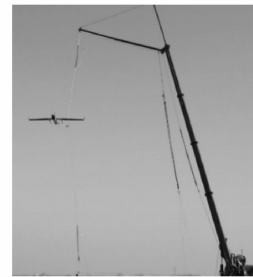
上述研究工作大多以引入假设进行数学建模和仿真分析为主,而通过系统试验测试数据来对比分析所建动力学模型的准确性以及不同模型处理方式差异性的相关研究还较少。本文以某型无人机绳钩回收系统为研究对象,在其不同设计阶段分别建立了系统的动力学近似模型和多体动力学模型,并基于两种模型对无人机绳钩回收过程的运动

状态进行了算例仿真,通过与实际绳钩回收系统的试验测试数据进行对比,验证了两种模型的阶段适用性及其有效性。

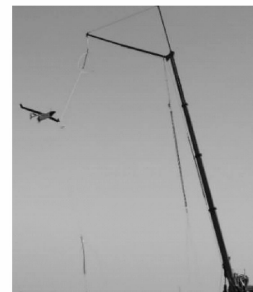
1 无人机绳钩回收过程

某型无人机绳钩回收系统由捕获装置(无人机翼尖锁钩、回收架和回收绳)、吸能缓冲装置(弹性阻尼器)和导引装置等组成。

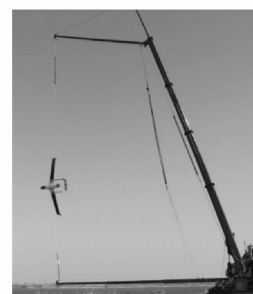
无人机绳钩回收的整个过程可分为对准撞绳、滑行锁定和回旋摆动3个阶段如图1所示。第1阶段,无人机在导引装置指引下,实现精确对准并由机翼根部前缘撞上回收绳,此阶段若未实现精确对准,无人机可复飞后再次导引撞绳;第2阶段,回收绳沿机翼根部前缘滑行到翼尖,翼尖锁钩钩住并锁定回收绳,此时无人机发动机停车;第3阶段,在回收动能作用下无人机悬挂在回收绳上作幅度逐步衰减的回旋摆动,吸能缓冲装置在此摆动过程中吸收无人机的大部分动能。当无人机摆动幅度小到一定程度,即认为无人机回收过程结束。



(a) Stage 1



(b) Stage 2



(c) Stage 3

图1 某型无人机绳钩回收过程

Fig. 1 Recovery process of UAV rope-hook

2 绳钩回收系统动力学建模

无人机绳钩回收过程是一种典型的、强非线性的瞬态动力学过程,动力学模型建立的精准程度取决于系统结构的参数特性、各组成部件结构特征以及建模中的假设简化因素等。因此,在回收系统不同设计阶段,可分别建立有效适用的动力学模型。

2.1 基于 Lagrange 方程的动力学模型

在绳钩回收系统设计的初始阶段,由于缺乏各组成部分的详细结构特征,通常采用简化的近似模型进行系统的动力学分析,以期快速获得回收系统的宏观动力学特性,并将关键设计参数反馈至无人机总体进行协调匹配。因此,此阶段一般利用 Lagrange 方程对系统动力学方程进行推导,建立如图 2 所示的绳钩回收系统的动力学近似模型。

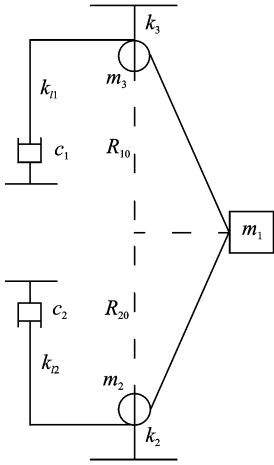


图 2 考虑回收架柔性的动力学模型

Fig. 2 Dynamics model of recovery system based on flexible recovery frame

图 2 的动力学模型中做出如下假设与说明:

(1) 假设在回收短时间内空气动力和重力基本平衡,同时绳索在完成对无人机的捕获后,发动机熄火,因此不考虑发动机推力。

(2) 假设在初始阶段绳索就完成了对无人机的捕获,并将无人机简化为质点,其质量用 m_1 表示。

(3) 引入弹簧-质点系统模拟回收系统上下吊臂的刚度和质量特性,在图中分别用 k_2, k_3 表示刚度,用 m_2, m_3 表示质量。

(4) 将橡胶阻尼系统等效为弹簧阻尼系统,上段弹簧阻尼分别为 k_{l1}, c_1 , 下段为 k_{l2}, c_2 。

以撞绳点将绳索分为上段 R_{10} 和下段 R_{20} , 根据垂绳回收系统的运动规律, R_{10} 段绳索与 R_{20} 段绳

索在任意时刻的变化量分别为

$$\Delta l_1 = \sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} - R_{10} \quad (1)$$

$$\Delta l_2 = \sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} - R_{20}$$

式中: u_{1x} 为 m_1 在水平方向的位移; u_{1y} 为 m_1 在竖直方向的位移; u_{2y} 为 m_2 在竖直方向的位移; u_{3y} 为 m_3 在竖直方向的位移。

得到

$$\begin{aligned} \Delta \dot{l}_1 &= \frac{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})(\dot{u}_{3y} - \dot{u}_{1y}) + u_{1x}\dot{u}_{1x}}{\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2}} \\ \Delta \dot{l}_2 &= \frac{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})(\dot{u}_{1y} - \dot{u}_{2y}) + u_{1x}\dot{u}_{1x}}{\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

因此有

$$V = \frac{1}{2}k_3 u_{3y}^2 + \frac{1}{2}k_2 u_{2y}^2 + \frac{1}{2}k_{l1} \Delta l_1^2 + \frac{1}{2}k_{l2} \Delta l_2^2 \quad (3)$$

$$D = \frac{c_1}{2} \frac{((\dot{u}_{3y} - \dot{u}_{1y})(u_{3y} - u_{1y} + R_{10}) + u_{1x}\dot{u}_{1x})^2}{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} + \frac{c_2}{2} \frac{((\dot{u}_{1y} - \dot{u}_{2y})(u_{1y} - u_{2y} + R_{20}) + u_{1x}\dot{u}_{1x})^2}{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{2}m_1 \dot{u}_{1x}^2 + \frac{1}{2}m_1 \dot{u}_{1y}^2 + \frac{1}{2}m_2 \dot{u}_{2y}^2 + \frac{1}{2}m_3 \dot{u}_{3y}^2 \quad (5)$$

式中: V 为系统势能; D 为耗散函数; T 为系统动能。

根据 Lagrange 方程得到系统的动力学微分方程为

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_{1x} + k_{l1} \frac{u_{1x}(\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} - R_{10})}{\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2}} + \\ k_{l2} \frac{u_{1x}(\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} - R_{20})}{\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2}} + \\ c_1 u_{1x} \frac{((\dot{u}_{3y} - \dot{u}_{1y})(u_{3y} - u_{1y} + R_{10}) + u_{1x}\dot{u}_{1x})}{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} + \\ c_2 u_{1x} \frac{((\dot{u}_{1y} - \dot{u}_{2y})(u_{1y} - u_{2y} + R_{20}) + u_{1x}\dot{u}_{1x})}{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_{1y} + k_{l1} \frac{(u_{1y} - u_{3y} - R_{10})(\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} - R_{10})}{\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2}} + \\ k_{l2} \frac{(\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} - R_{20})(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})}{\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2}} - \\ c_1 (u_{3y} - u_{1y} + R_{10}) \frac{[(\dot{u}_{3y} - \dot{u}_{1y})(u_{3y} - u_{1y} + R_{10}) + u_{1x}\dot{u}_{1x}]}{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} + \\ c_2 (u_{1y} - u_{2y} + R_{20}) \frac{((\dot{u}_{1y} - \dot{u}_{2y})(u_{1y} - u_{2y} + R_{20}) + u_{1x}\dot{u}_{1x})}{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$m_2 \ddot{u}_{2y} + k_2 u_{2y} - k_{l2} \left(\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} - \right.$$

$$R_{20}) \frac{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})}{\sqrt{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2}} - c_2 \frac{(\dot{u}_{1y} - \dot{u}_{2y})(u_{1y} - u_{2y} + R_{20}) + u_{1x}\dot{u}_{1x}}{(u_{1y} - u_{2y} + R_{20})^2 + u_{1x}^2} = 0 \quad (8)$$

$$m_3 \ddot{u}_{3y} + k_3 u_{3y} + k_{l1} \left(\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} - R_{10} \right) \frac{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})}{\sqrt{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2}} + c_1 \frac{(\dot{u}_{3y} - \dot{u}_{1y})(u_{3y} - u_{1y} + R_{10}) + u_{1x}\dot{u}_{1x}}{(u_{3y} - u_{1y} + R_{10})^2 + u_{1x}^2} = 0 \quad (9)$$

在建立了上述无人机绳钩回收过程动力学分析模型后,即可基于 Matlab 平台并采用中心差分法进行响应求解。

2.2 基于 MSC. ADAMS 的多体动力学模型

采用近似模型虽然可以快速获得回收过程中无人机的动力学参数,但是毕竟引入了诸多假设,忽略了绳索与滑轮之间的摩擦作用、机体与绳索的碰撞效应,因此在确定回收系统设计的基本参数后,需要建立更为精细的动力学模型,对整个回收过程进行分析,以检验回收系统结构设计的合理性。

MSC. ADAMS 是一款应用较为广泛的虚拟样机分析应用软件,用户可以运用该软件建立机械系统的虚拟样机模型,并对其进行相关的运动学和动力学分析。本文以 MSC. ADAMS 软件为平台建立了如图 3 所示的绳钩回收系统多体动力学模型。

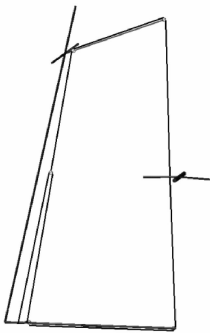


图 3 绳钩回收系统多体动力学模型

Fig. 3 Multi-body dynamics model of rope-hook recovery system

多体动力学模型中主要包含回收架模型、无人机模型和回收绳模型。其中,回收架模型采用刚性杆进行建模,固定于地面;无人机模型按多刚体进行处理,确保模型的质心、质量和惯量等基本参数与实际机体一致;回收绳模型采用 MSC. ADAMS 软件中的 Cable 模块进行建立,采用该种方式不仅可以实现对绳索类动力学问题的精确模拟,而且可

以有效提高绳索模型的建模效率。定义无人机机翼与绳索之间的接触关系,用于模拟机翼撞绳滑入翼尖的过程。如图 4 所示为利用 MSC. ADAMS 仿真得到的无人机绳钩系统回收过程的示意图。

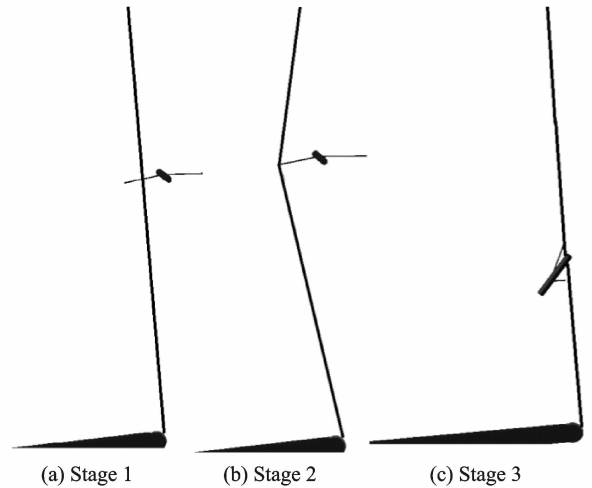


图 4 无人机绳钩系统回收过程 MSC. ADAMS 仿真结果
Fig. 4 Simulation results of recovery process of UAV based on MSC. ADAMS

2.3 数值算例

本文分别采用上述近似模型与多体动力学模型对某型无人机绳钩回收过程进行 3 s 的仿真分析,其中无人机回收速度为 25 m/s、回收质量为 20 kg,回收架高度为 15 m,假设无人机在垂绳中点处进行撞绳。对于近似模型,上段弹簧刚度 $k_{11} = 367$ N/m, $c_1 = 30$ Nm/s,下段弹簧刚度 $k_{12} = 128$ N/m, $c_1 = 10$ Nm/s,上下吊臂 k_2 和 k_3 在本算例中均取为 500 N/m(实际刚度可根据悬臂梁采用解析或有限元方法进行等效计算获得)。多刚体动力学模型的相关参数与近似模型保持一致。

回收过程中,通过弹性阻尼器、上下吊臂弹性变形共同吸收能量,阻尼器在 3 s 内持续耗散无人机动能,使系统在短时间内趋于稳定完成回收。图 5 为无人机速度响应曲线,可以看出:整个过程中无人机速度振荡衰减且衰减幅度逐渐变小。图 6 为无人机加速度响应曲线,可以看出:无人机的加速度先急剧增大,0.51 s 达到峰值后振荡衰减直至趋于零。另外,从图 5,6 中可以看出,两种仿真方法得到的速度与加速度曲线在 1 s 内基本吻合,然而,随着仿真的进一步进行,两者的差异逐渐增大,这主要是由于近似模型引入了大量假设,一些撞绳过程的细节未能在建模过程中体现出来。

3 绳钩回收系统试验

试验过程采用全尺寸样机进行。如图 7 所示,

试验过程中在回收绳下端串联一组拉力传感器,将安装好滑轮、橡胶阻尼器和力传感器的绳钩回收装置展开,进行回收质量 25 kg 和回收速度 25 m/s 的无人机撞绳回收试验。

无人机在进入预定回收路径后,通过测速系统和飞控系统对撞绳速度、高度和姿态进行实时调整,确保在撞绳时满足设定的工况要求。针对无人机回收过程,采用高速摄像装置记录撞绳回收全程运动,同时采集安装在绳钩回收装置上的拉力传感器数据并进行处理,获得撞绳回收阶段回收绳的载荷水平。

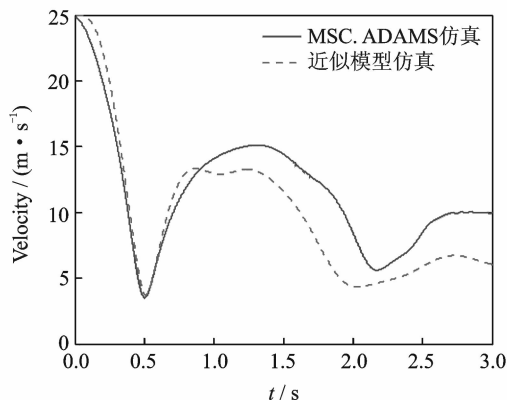


图 5 无人机回收速度幅值时域曲线

Fig. 5 Velocity of UAV in recovery process

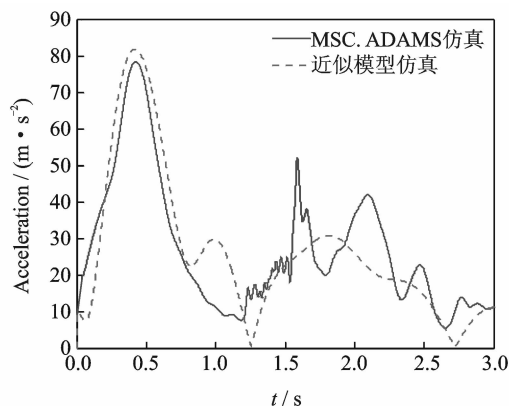


图 6 无人机回收加速度幅值时域曲线

Fig. 6 Acceleration of UAV in recovery process

作为对比,同时针对安装拉力传感器的回收绳部位,采用上述两种仿真模型分别进行试验工况条件下的仿真分析,图 8 给出了回收绳该部位的拉力-时间仿真结果与测试结果的对比情况。

从图 8 中看出:(1)对于近似模型而言,仿真曲线更为平滑,这是因为仿真模型进行了大量刚性简化近似处理,实际系统中柔性特征的影响会引入较多的高频响应到结果中,这造成了仿真与实测结果的差异;尽管如此,仿真的拉力峰值与试验测试拉

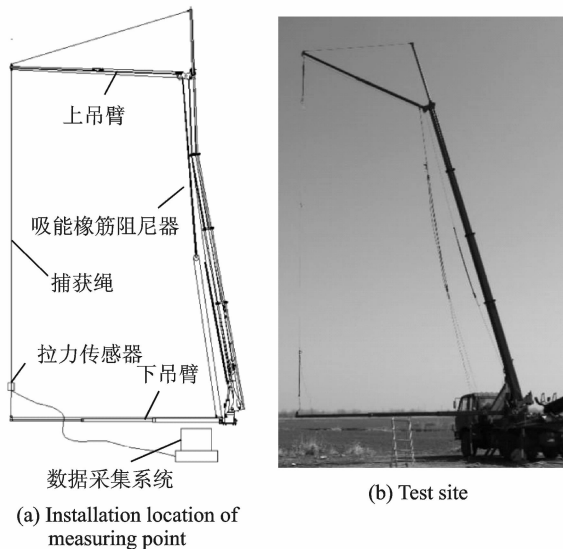


图 7 绳钩回收系统回收试验

Fig. 7 Recovery test of rope-hook recovery system

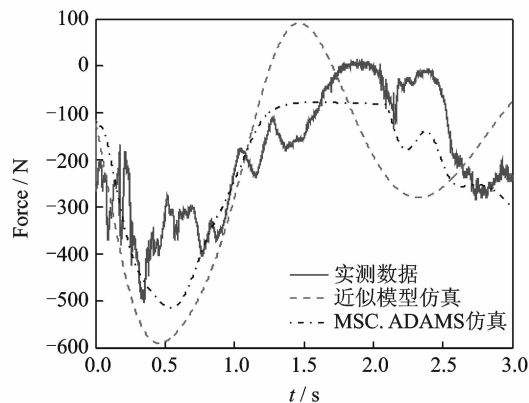


图 8 回收绳下端测点的拉力时域曲线对比

Fig. 8 Force of measuring point at bottom of recovering rope

力峰值基本接近,波形也是趋于相同,这表明模型仿真结果依然是近似可用的。另外,通过近似模型计算得到的载荷变化趋势虽然与实测结果基本一致,但其误差相对较大。(2)对于 MSC. ADAMS 仿真模型而言,其计算结果与实测结果吻合程度更高,这是由于通过 MSC. ADAMS 所建立的虚拟样机模型可以考虑更为全面的系统结构特性。

4 结 论

(1)本文介绍了一种适用于小型固定翼无人机的绳钩回收系统工作原理,并在此基础上分别建立了考虑回收架柔性的基于 Lagrange 方程的动力学近似模型以及基于 MSC. ADAMS 虚拟样机平台的多体动力学模型。通过仿真计算可以看出,两种建模方法的计算结果基本吻合,但由于近似模型引

入了大量假设,随着仿真时间的推进,两种模型的计算结果差异也越来越显著。

(2)通过无人机绳钩回收试验实测数据,对两种仿真模型的计算结果进行了对比验证。通过对比可以看出,考虑了更多系统结构参数特性的基于MSC. ADAMS虚拟样机平台的多体动力学模型的计算结果与实测结果吻合程度更高。

(3)上述两种仿真模型在回收系统设计过程中具有不同的阶段适用性,一般采用近似模型作为结构初始设计参数拟定手段,然后根据初始拟定参数通过MSC. ADAMS建立系统的虚拟样机模型,对系统参数进行进一步的优化设计,从而为绳钩回收系统的设计提供有效的仿真验证方法和手段。

参考文献:

- [1] MARIANO I L. Autonomous landing system for a UAV[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2004.
- [2] 祝小平. 无人机设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
ZHU Xiaoping. Design manual of UAV[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [3] 裴锦华. 无人机撞网回收的技术发展[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(S1):6-11.
PEI Jinhua. Technology Development of UAV Net Recovery System[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009,41(S1):6-11.
- [4] SHAO Zhijian, HE Cheng, PEI Jinhua. Multi-objective optimization of design of a vented cylindrical air-bag cushioning system for unmanned aerial vehicles [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016,33(2):211-217.
- [5] 洪达,周磊,郑震山. 国外小型舰载固定翼无人机装备回收技术发展研究[J]. 飞航导弹,2014(4):50-54.
HONG Da, ZHOU Lei, ZHANG Zhenshan. Research of the development of foreign small-sized ship-borne fixed-wing UAV recovery technology [J]. Winged Missiles Journal, 2014(4):50-54.
- [6] 李悦,裴锦华. 无人机拦阻网回收动力学建模与仿真[J]. 航天返回与遥感,2012,33(1):1-7.
LI Yue, PEI Jinhua. Dynamic modeling and simulation of arresting net recovery system for UAV[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(1):1-7.
- [7] SATI S C, KANASKAR A S, KAJALE S R, et al. Modeling, simulation and analysis of aircraft arresting system using bond graph approach[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2011, 19(3):936-958.
- [8] 郭亮,张红英,童明波. 无人机伞回收动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(1):14-19.
GUO Liang, ZHANG Hongying, TONG Mingbo. Dynamics analysis on parachute recovery of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(1):14-19.
- [9] DENNIS B D. Methods and apparatuses for capturing and recovering unmanned aircraft, including a cleat for capturing aircraft on a line[P]. United States: US7059564, 2006-06-13.
- [10] 卢伟,马晓平,周明,等. 无人机绳钩回收系统的动力学特性仿真分析[J]. 航空学报,2015,36(10):3295-3304.
LU Wei, MA Xiaoping, ZHOU Ming, et al. Simulation analysis of dynamic characteristic of UAV rope-hook recovery system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10):3295-3304.
- [11] 孙林峰,马晓平,吴佳凯. 无人机绳钩回收仿真研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(7):1572-1575.
SUN Linfeng, MA Xiaoping, WU Jiakai. Simulation research of rope-hook recovery for unmanned aerial vehicle [J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(7):1572-1575.
- [12] 吴佳凯,马晓平,孙林峰. 无人机绳钩回收系统参数设计[J]. 航空计算技术,2012,42(3):92-94.
WU Jiakai, MA Xiaoping, SUN Linfeng. Design of parameters for UAV's rope-hook recovery system [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(3):92-94.

