

小型无人机绳钩回收装置动力学分析

刘恒

(四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000)

摘要: 本文建立了一种适用于小型无人机的绳钩回收装置力学模型。应用多体系统动力学分析软件 MSC.Adams 对模型进行处理并控模型回收过程动力学分析, 计算出回收过程中无人机速度、位移变化规律及回收绳张力变化规律。

关键词: 无人机; 绳钩回收; 动力学分析

0 引言

无人机的回收是无人机研制中关键技术之一。绳钩回收是一种新型的无人机回收方式, 通过一根竖直布置的回收绳捕获无人机上的翼尖小钩, 实现对无人机的回收。此方式结构简单, 体积小, 入场精度要求低且回收范围大, 具有广阔研究前景。

本文建立了一种适用于小型无人机的绳钩回收装置静动力学模型, 进行无人机回收过程中的运动学仿真, 得到回收过程中无人机速度、位移变化规律及回收绳张力变化规律, 为小型无人机绳钩回收系统的设计、仿真、优化改进提供理论参考。

1 回收装置力学模型

本文采用的回收装置为折叠机构, 由多级折叠机械臂组成, 其回收装置框架(见图1)。借助建模软件对回收装置各零件进行了三维建模(见图2)。

2 回收过程动力学分析

2.1 回收过程概述

图3为无人机绳钩回收示意图。支架固定在地面上, 上下摆杆通过球铰与支架主体连接, 橡胶绳6、7将上下摆杆固定。回收绳5从绞绳器8中伸出, 绕过上下摆杆末端的滑轮2回到绞绳器中, 绞绳器将回收绳绷紧。无人机撞钩以后, 机翼前缘与回收绳接触, 回收绳收紧的趋势使回收绳迅速滑向机翼末端, 滑入翼尖小钩并被锁住。无人机绕回收绳转动, 其速度逐渐降低, 达到安全回收的目的。

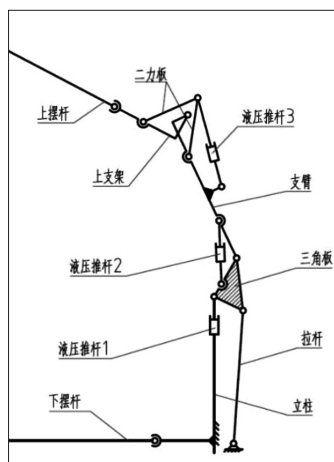


图1 回收装置框架模型

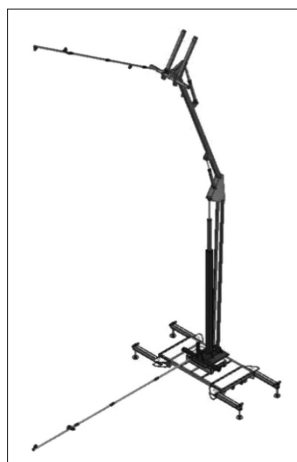


图2 回收装置三维模型

2.2 Adams 动力学模型

动力学分析中简化掉不必要的回收支架主体部分, 将无人机简化为一个球体和杆件的组合, 球体表示机舱, 杆件代表机翼。因为支架固定在大地上, 支架可以视为大地的一部分, 将摆杆通过球铰直接与大地联接即可。在 Adams 中创建分析对象的几何模型, 并添加约束, 载荷完成动力学模型的建立(见图4)。本文中设置无人机模型质量为 25kg, 机翼长 3m, 其初始速度设置为 120km/h (约 33.3m/s)。

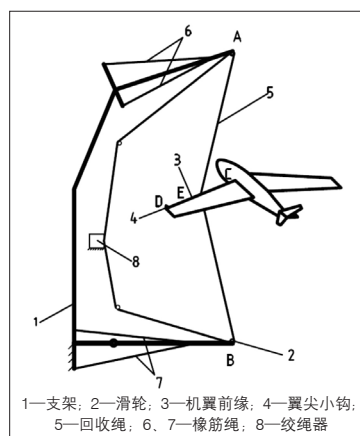


图3 绳钩回收示意图

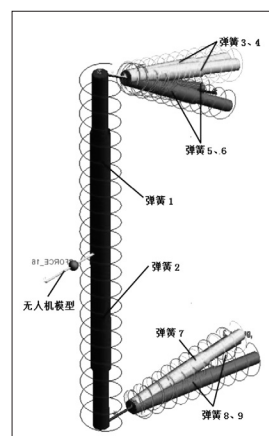


图4 回收过程动力学模型

2.3 弹簧参数设置

在 Adams 运动仿真中, 弹簧需要定义参数有刚度系数, 阻尼系数, 预紧力, 预紧力下初始长度。

过程开始之前, 回收绳和橡胶绳处于预紧力紧绷状态, 各绳拉力作用在摆杆上, 摆杆受力平衡, 所以, 各绳预紧力、摆杆重力和球铰支座反力对于摆杆是一组平衡力, 它们的合力为零, 合力矩也为零。回收绳预紧力和橡胶绳预紧力都为已知 ($F_1=F_2=500\text{N}$), 沿绳子方向。根据合力矩为零可计算出各绳预紧力之间关系。

图中 F_1 为回收绳上段作用在上摆杆末端的拉力, G 为下摆杆所受重力, F_{34} 为上摆杆上方两橡胶绳拉力 F_3 与 F_4 的合力, F_{56} 为上摆杆下方两橡胶绳拉力 F_5 与 F_6 的合力, F_{89} 为下摆杆下方两橡胶绳拉力 F_8 与 F_9 的合力。上摆杆与竖直方向夹角 57.11° , 回收绳拉力和重力沿竖直方向, 上下方橡胶绳与摆杆夹角分别为 12.33° 和 1.55° 。 L_1 为上摆杆总长度, L_{10} 为上摆杆末端到摆杆上橡胶绳固定点的距离。由合力矩为零得:

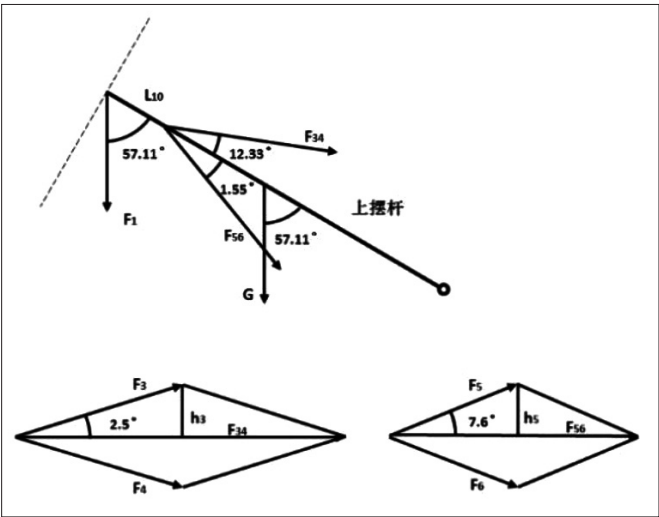


图 5 预紧后上摆杆受力示意图

$$F_1 \times L_1 \times \sin 57.11^\circ + F_{56} \times (L_1 - L_{10}) \times \sin 1.55^\circ + G_1 \times (L_1/2) \times \sin 57.11^\circ - F_{34} \times (L_1 - L_{10}) \times \sin 12.33^\circ = 0$$

F_2 为回收绳下段作用在下摆杆末端的拉力， G 为下摆杆所受重力， F_{89} 为下摆杆下方两橡胶绳拉力 F_8 与 F_9 的合力， F_7 为下摆杆上方橡胶绳拉力。下摆杆平衡位置沿水平方向，回收绳拉力竖直向上，重力竖直向下，上下方橡胶绳与摆杆夹角分别为 5.07° 和 3.65° 。 L_2 为上摆杆总长度， L_{20} 为上摆杆末端到摆杆上橡胶绳固定点的距离。

$$F_2 \times L_2 + F_7 \times (L_2 - L_{20}) \times \sin 5.07^\circ - G_2 \times (L_2/2) - F_{89} \times (L_2 - L_{20}) \times \sin 3.65^\circ = 0$$

公式中，上下摆杆总长度 $L_1=7689\text{mm}$ ， $L_2=7717\text{mm}$ 。橡胶绳固定点距离摆杆顶端距离 $L_{10}=L_{20}=1600\text{mm}$ 。上下摆杆重力：

$$G_1 = G_2 = 56\text{kg} \times 9.8\text{N/kg} = 548.8\text{N}$$

F_1, F_2 为回收绳预紧力。 $F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9$ 为各橡胶绳预紧力， F_{34} 为 F_3 与 F_4 的合力， F_{56} 为 F_5 与 F_6 的合力， F_{89} 为 F_8 与 F_9 的合力。且应有：

$$F_3=F_4, F_5=F_6, F_8=F_9$$

所以：

$$F_{34}=2F_3 \cos 2.5^\circ \quad F_{56}=2F_5 \cos 7.6^\circ \quad F_{89}=2F_8 \cos 7.67^\circ$$

联立上式得：

$$2.6036F_3 - 0.3259F_5 = 5001.66\text{N}$$

$$0.7725F_8 - 0.5407F_7 = 1740.96\text{N}$$

取 $F_3=F_5=2195.9\text{N}$ ，取 $F_7=2000\text{N}$ ，则 $F_8=3653.5\text{N}$
各弹簧的所有参数（见下表）：

在受拉情况下，柔性绳索的特性与弹簧很相似，伸长量与拉力成正比，拉力与伸长量的比值为刚度系数，而受压情况下，弹簧力始终为零，弹簧可以被无限压缩，弹力不会为负。故在仿真软件中 Adams 中需要修改弹簧的刚度系数，使其符合弹性绳索特性，拟合后的刚度系数曲线（见图 8）。

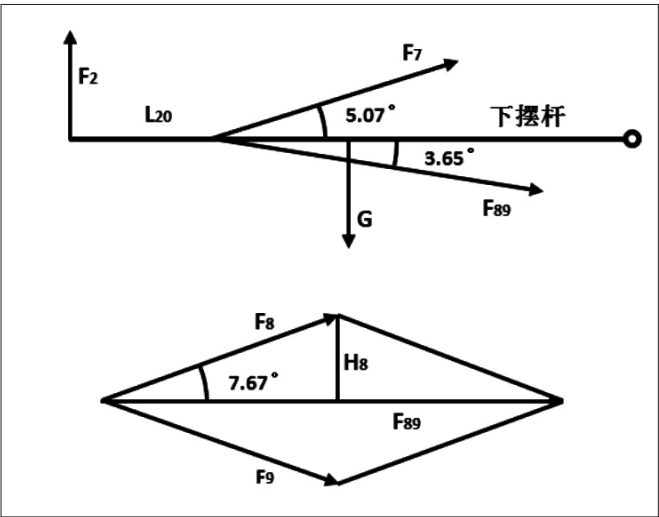


图 6 预紧后下摆杆受力示意图

表 弹簧参数

	受拉刚度系数 k (N/m)	阻尼系数 C (Ns/m)	预紧力 F (N)	预紧力下初始 长度 L (m)	直径 D (m)
弹簧 1 (回收绳上段)	7900.5	50	500	8.197	0.01
弹簧 2 (回收绳下段)	13923.9	100	500	8.197	0.01
弹簧 3、4	13396.0	100	2195.9	6.270	0.005
弹簧 5、6	13864.8	100	2195.9	6.058	0.005
弹簧 7	13670.7	100	2000	6.144	0.005
弹簧 8、9	13486.3	100	3653.5	6.228	0.005

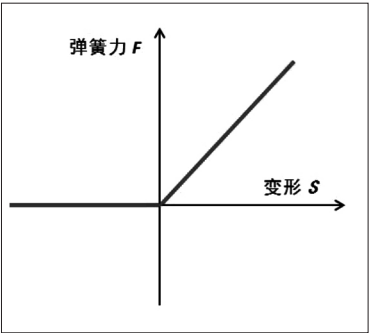


图 7 刚度系数分段函数

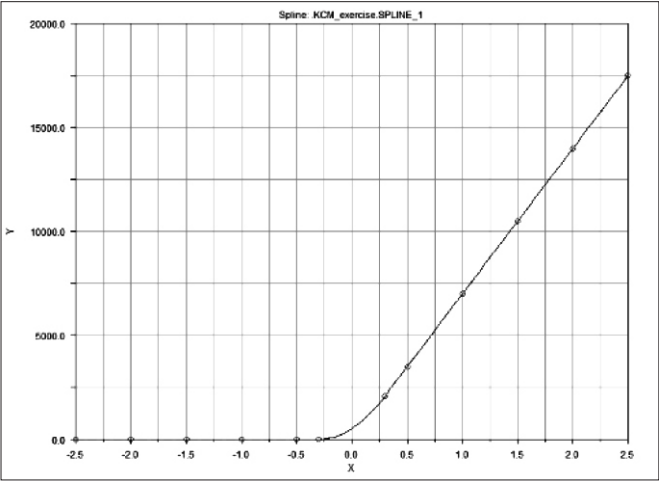


图 8 刚度系数拟合曲线

2.4 空气阻力的设置

回收过程中,无人机除受到回收绳拉力和重力的作用外,还要受到空气的阻力,空气阻力方向始终与飞行速度方向相反,空气阻力大小与速度,无人机外形有关。本分析中考虑无风情况下无人机收到的空气阻力。空气阻力的数值和与气流相对速度的动压力成正比。即:

C_D 为空气阻力系数,与无人机外部形状有关,取 C_D 值为 0.08。 A 为飞机迎风面积,即无人机行驶方向的投影面积,取 0.8m^2 。 ρ 为空气密度,一般取 $\rho=1.2258\text{Ns}^2\text{m}^{-4}$ 。 u_r 为相对速度,无风情况下即无人机的飞行速度。

$$F_A \approx 0.039 = u_r^2 (\text{N})$$

2.5 动力学仿真结果

2.5.1 无人机速度响应

图 9 为回收过程前 20s 无人机的速度变化曲线。从图中可以看出整个过程中无人机速度震荡衰减,并且衰减幅度逐渐减小。15s 以后,无人机速度衰减已很小,速度基本保持稳定,最大速度降到 2.5m/s 以下,可视为回收过程完成。

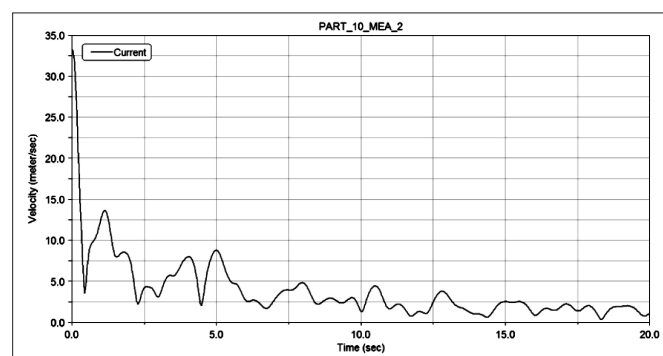


图 9 无人机速度变化曲线

2.5.2 回收绳载荷响应

图 10 为回收绳上段载荷变化曲线。数值为负表示受拉,正表示受压。可以看出,上段回收绳初始预紧力 500N ,回收过程开始后拉力先急剧增大, 0.3s 达到峰值,峰值拉力 2524.9N 。之后震荡衰减,并且衰减幅逐渐减小,最终稳定震荡在 1000N 附近。

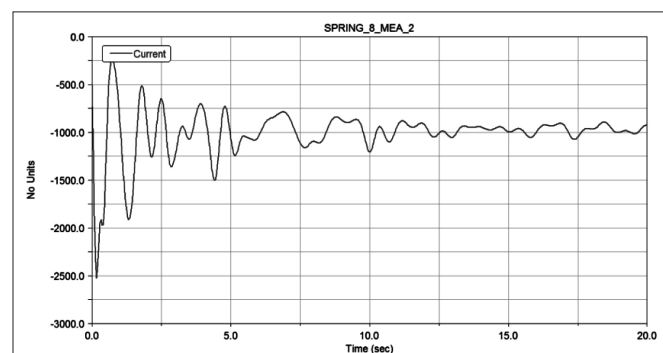


图 10 回收绳上段拉力变化曲线

图 11 为回收绳下段载荷变化曲线。可以看出,下段回收绳初始预紧力 500N ,下段回收绳拉力变化规律与上段非

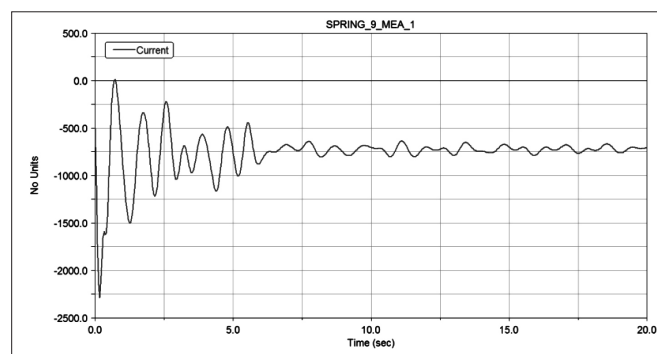


图 11 回收绳下段拉力变化曲线

常相似,峰值拉力 2289.1N 。由于上段回收绳要承受无人机重力的作用,下端回收绳震荡稳定后的拉力小于上段,大约在 750N 附近。

2.5.3 回收距离

回收距离是指整个回收过程中,无人机在初始速度方向上的最大位移。图 12 为无人机位移在初始速度方向上的分量的变化规律。无人机初始位置可以看出位移值在零附近波动,波动最大范围为 -3.05m 到 $+8.62\text{m}$ 并且波动幅度逐渐减小。回收距离为 8.62m 。

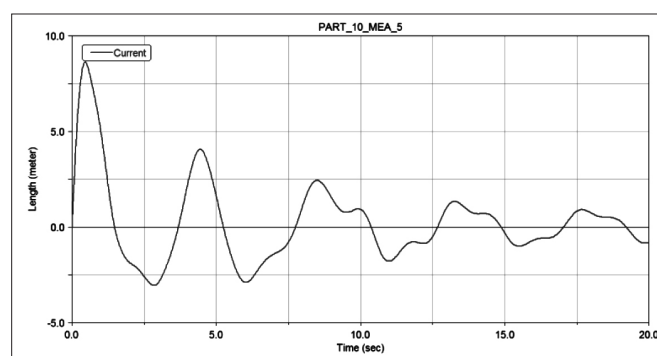


图 12 无人机回收距离

3 结语

本文建立了小型无人机绳钩回收装置有限元模型,通过 MSC.Adams 对回收过程进行动力学分析。回收绳和橡胶绳用弹簧来模拟,并通过定义刚度系数函数来使弹簧特性与绳索吻合,得到回收过程中,无人机速度和回收绳拉力变化规律。分析结果显示,回收过程中无人机速度周期性震荡并逐渐衰减,15s 内无人机速度已降到 2.5m/s 以下,回收距离 8.62m ,基本满足回收要求。为小型无人机绳钩回收系统的设计、仿真、优化改进提供理论参考。

参考文献:

- [1] 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(005):693-698.
- [2] 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(010):3295-3304.