

引用格式:邹明虎,张飞. 倾转三旋翼无人机倾转过程转动惯量建模[J]. 电光与控制,2019,26(3):108-111. ZOU M H, ZHANG F. Modeling of rotational inertia for tilting three-rotor UAV[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):108-111.

倾转三旋翼无人机倾转过程转动惯量建模

邹明虎¹, 张飞²

(1. 中国人民解放军65183部队, 辽宁 辽阳 111200; 2. 中国人民解放军63870部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 倾转三旋翼无人机在倾转过程中, 机体沿各方向轴转动惯量会随着发动机短舱角不断改变而发生变化。为了实现倾转三旋翼无人机倾转过渡模式下的精确控制, 需要对其倾转过程中的转动惯量变化进行数学建模研究。通过研究倾转三旋翼无人机倾转过程中重心位置变化, 运用扭摆法基本原理和实验等方法, 对其不同短舱角条件下飞行器转动惯量展开分析, 得到了倾转三旋翼飞行器转动惯量与短舱角的关系, 为倾转三旋翼飞行器倾转过程建模奠定了理论基础。

关键词: 倾转三旋翼; 倾转模式; 重心位置; 转动惯量; 短舱角

中图分类号: V249.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.022

Modeling of Rotational Inertia for Tilting Three-Rotor UAV

ZOU Ming-hu¹, ZHANG Fei²

(1. No. 65183 Unit of PLA, Liaoyang 111200, China; 2. No. 63870 Unit of PLA, Huayin 714200, China)

Abstract: In the tilting process of the three-rotor UAV, the rotational inertia of the body along each axis direction will change as the nacelle angle of the engine changes. In order to realize the precise control of the three-rotor UAV in the tilting transitional mode, it is necessary to study the changes of the rotational inertia during the tilting process and to build a suitable mathematical model. By analyzing the changes of the position of the gravity center of the three-rotor UAV in its tilting process, the basic principle and experimental method of the torsion pendulum are used to analyze the rotational inertia of the aircraft under the condition of different nacelle angles. The relationship between the rotational inertia and the nacelle angle is obtained, which has laid a theoretical foundation for the modeling of the rotary three-rotor UAV in the tilting process.

Key words: rotary three-rotor UAV; tilting pattern; center-of-gravity position; rotational inertia; nacelle angle

0 引言

短距/垂直起降固定翼飞行器拥有直升机和固定翼飞行器的共同优点, 具有短距/垂直起降、空中悬停和高速巡航飞行的能力, 具有极强的机动性, 能满足恶劣环境下飞行器的使用要求, 所以应用前景极为广阔^[1-3]。倾转三旋翼无人机作为可垂直起降固定翼无人机的一种形式, 具有稳定性高、控制难度相对较低的特点。国外对于倾转旋翼机的研究已经开展多年, 积

累了大量经验, 其中具有代表性的如美国 V-22 大型倾转旋翼机和以色列“黑豹”倾转三旋翼无人机^[4-5]。同时, 国内已将垂直起降固定翼飞行器纳入“十三五”发展预研计划重点科研项目, 而关于倾转旋翼机的研究正处于跟踪起步阶段, 需要大量的基础理论研究^[6-8]。

倾转三旋翼无人机具有直升机模式、固定翼模式和倾转模式 3 个飞行模式。由于倾转过程中, 飞行器的发动机短舱角会随着倾转过程的变化而变化。发动机短舱角变化不仅会引起飞行器气动特性、结构特性的变化, 同时也会引起飞行器的重心位置以及绕各轴的转动惯量变化。倾转过程中需要对飞行器姿态进行精确控制, 而转动惯量在飞行器姿态控制中起着关键性作用^[9]。故本文结合扭摆法理论基础以及实验条

收稿日期: 2018-01-23

修回日期: 2018-04-28

作者简介: 邹明虎(1966—), 男, 吉林和龙人, 硕士, 高工, 研究方向为武器系统性能检测与故障诊断。

件,对倾转三旋翼无人机倾转过程中飞行器的重心位置变化和转动惯量与发动机短舱角之间的关系展开深入研究,通过对实验数据的处理,得到其相互影响变化的关系模型。

1 倾转三旋翼无人机的重心位置变化

本文研究讨论的倾转三旋翼无人机采用正三角布局,布局结构如图1所示。在飞行器结构上,认为左右完全对称,机体的形心与重心重合。飞行器机体坐标系、旋翼分布如图2所示。规定旋翼1向 B_y 正向偏转为正,旋翼2、旋翼3直升机模式下短舱角 i_n 为 90° ,固定翼模式下为 0° 。

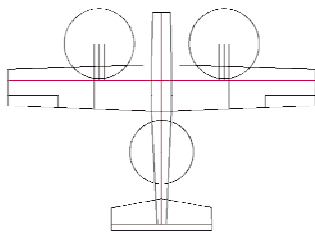


图1 倾转三旋翼无人机布局

Fig. 1 Overall layout of tilting three-rotor UAV

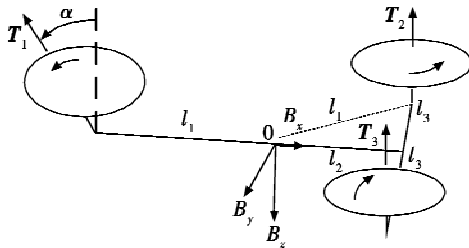


图2 倾转三旋翼无人机机体坐标系示意图

Fig. 2 Body coordinate system of tilting three-rotor UAV

倾转三旋翼无人机在过渡模式下飞行中,飞行器的重心会随着3个发动机短舱角的变化在空间内移动。直升机模式下,飞行器重心位于三角布局正中心,以此为机体坐标系原点。旋翼1的位置变化使飞行器重心在 yOz 平面内移动,认为旋翼2、旋翼3倾转过程短舱角度时刻保持一致,使飞行器重心在 xOz 平面内移动。旋翼1以及旋翼2、旋翼3引起飞行器重心变化的几何示意图图3。

在倾转三旋翼全过程飞行中,旋翼1为了平衡自身扭摆力矩, α_1 在 $0^\circ \sim 4^\circ$ 范围内发生微小倾转,为了方便计算,对其采取近似处理 $\sin \alpha_1 = 0, \cos \alpha_1 = 1$,至此忽略旋翼微小角度变化对飞行器转动惯量的影响。则旋翼2、旋翼3在倾转过程中,发动机短舱位置 X_{R_n} 和 Z_{R_n} 以及飞行器重心位置 X_B 和 Z_B 分别确定为

$$X_{R_n} = X_{RP} - x \cos \alpha_n - y \sin \alpha_n \quad (1)$$

$$Z_{R_n} = Z_{RP} - x \sin \alpha_n - y \cos \alpha_n \quad (2)$$

$$X_B = X_{BH} - \frac{m_{R2}}{m} (X_{RHn} - X_{Rn}) \quad (3)$$

$$Z_B = Z_{BH} - \frac{m_{R2}}{m} (Z_{RHn} - Z_{Rn}) \quad (4)$$

式中: $\alpha_n = \pi/2 - i_n, i_n$ 为短舱角, $n = 2$ 或 3 ,取 $\alpha_2 = \alpha_3$; X_{RP} 和 Z_{RP} 为倾转三旋翼无人机旋翼2、旋翼3倾转轴点所在的纵向和垂向位置; X_{RHn} 和 Z_{RHn} 为旋翼2、旋翼3发动机短舱在直升机模式下重心所在位置; X_{RH} 与 Z_{RH} 为倾转三旋翼无人机在直升机模式下重心所在纵向位置与垂向所在位置; m_{R2} 为旋翼2、旋翼3发动机短舱总重量; m 为飞行器总重量。

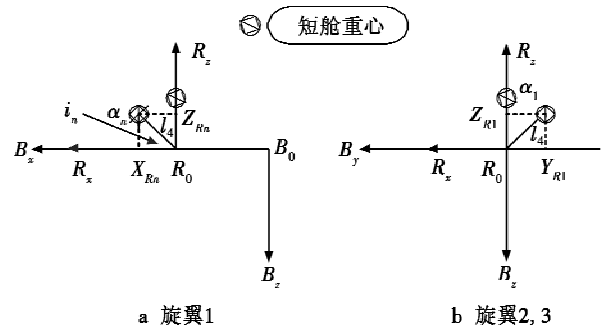


图3 倾转三旋翼无人机发动机短舱重心位置变化几何布局

Fig. 3 The change of engine gravity center position of tilting three-rotor UAV

2 转动惯量测量基本原理和测量

2.1 扭摆法基本原理

转动惯量为刚体绕轴旋转时转动的惯性的量度。常用的测量刚体转动惯量的方法为扭摆法,包括三线摆、复摆法等^[10]。在扭摆法系统理论中,不考虑空气阻力的前提下,刚体对扭摆系统扭摆周期与扭摆系统转轴转动惯量存在以下关系^[11]

$$J = \frac{K}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (5)$$

式中: J 为刚体对与扭摆系统转轴的转动惯量; T 为摆动周期; $A = K/4\pi^2, K$ 为与扭摆系统扭杆刚度有关的一个常量,在不考虑空气摩擦阻力的前提下,刚体的转动惯量与摆动周期成正比。在用扭摆法测量刚体转动惯量过程中,通常通过标定 K 值,测得刚体绕轴摆动时间,获得刚体绕该轴转动的惯量。

2.2 转动惯量测量

利用CDL-20型无人机特征参数测量系统对倾转三旋翼无人飞行器的旋翼2、旋翼3在倾转过程中的飞行器转动惯量变化进行测量分析。在对倾转三旋翼无人机不同短舱倾转角度下的转动惯量进行测量前,需要对实验测试平台 K 值进行弹性系数标定,标定结

果如图 4 所示。

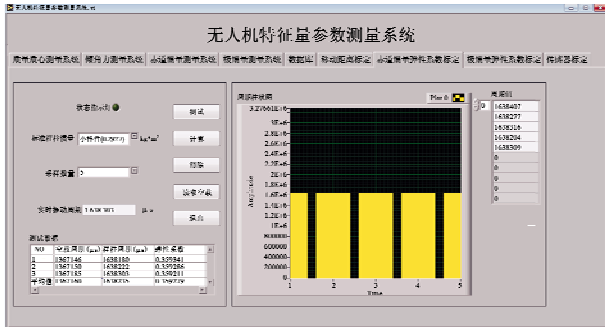


图 4 无人机特征参数测量系统弹性系数 K 标定

Fig. 4 Calibration of the elastic coefficient K in UAV characteristic parameter measurement system

经过弹性系数 K 值标定以后,采用 CDL-20 型无人机特征参数测量系统针对旋翼 2、旋翼 3 在短舱角 i_n 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的倾转三旋翼无人机进行转动惯量测量,测量过程如图 5 和图 6 所示。



图 5 倾转三旋翼无人机绕 Z 轴转动惯量测量

Fig. 5 Rotational inertia measurement of the tilting three-rotor UAV around the Z -axis

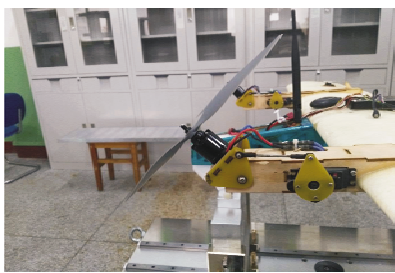


图 6 发动机短舱角为 45°

Fig. 6 The nacelle angle of the engine is 45°

CDL-20 型无人机特征参数测量系统具有操作简单、精度高的优点,测量精度能达到 $1 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 测量误差在 2% 范围内,能满足倾转三旋翼无人机不同短舱角下的转动惯量测量要求。为了使采集的实验数据具有更高的可靠性,采集数据过程中采取测量 3 次取平均值方法,并对误差明显偏大的数据采取重新测量的措施。同时,在改变发动机短舱角角度的过程中,保持螺旋桨在垂向平面内,以达到较小误差的目的。实验采集数据经过处理后如表 1 所示。

表 1 不同短舱角下机体绕各轴转动惯量

Table 1 Three-axis inertia for different nacelle angles

短舱角 $i_n / (^\circ)$	$J_{xx} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$J_{yy} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$J_{zz} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
0	1.818 232	1.801 030	0.125 024
15	1.823 151	1.791 325	0.126 086
30	1.825 024	1.785 036	0.126 991
45	1.834 468	1.778 124	0.127 829
60	1.836 733	1.775 260	0.129 088
75	1.838 421	1.772 531	0.130 537
90	1.845 124	1.762 305	0.131 368

3 实验数据分析

利用 Matlab 数据处理工具箱,对倾转三旋翼无人机不同短舱倾转角度下的沿各轴转动惯量数据进行拟合处理,结果如图 7 所示。

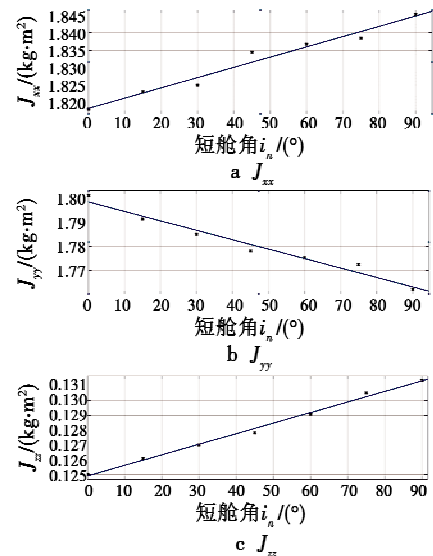


图 7 倾转三旋翼无人机转动惯量与短舱角之间的关系

Fig. 7 Relationship between rotational inertia and nacelle angle of the three-rotor UAV

通过对实验数据的处理分析,采取多重拟合方法,结合文献[12]所得出的结论,发现倾转三旋翼无人机在倾转过渡飞行过程中,随着旋翼 2、旋翼 3 的短舱角角度变化,各轴转动惯量与短舱角成一阶线性变化,飞行器沿各轴的转动惯量 J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} 可近似表示为

$$\begin{cases} J_{xx} = J_{x0} + K_{J1} i_n \\ J_{yy} = J_{y0} - K_{J2} i_n \\ J_{zz} = J_{z0} + K_{J3} i_n \end{cases} \quad (6)$$

式中: J_{x0}, J_{y0}, J_{z0} 分别为倾转三旋翼无人飞行器在发动机短舱角 i_n 为 0° 时(即固定翼模式下)飞行器沿各轴的转动惯量; K_{J1}, K_{J2}, K_{J3} 为常数;当 i_n 为 90° 时,飞行器处于直升机模式下。飞行器转动惯量关键参数见表 2。

表2 倾转三旋翼无人机转动惯量关键参数

Table 2 Key parameters of three-axis inertia $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

关键参数	J_{xx}	关键参数	J_{xx}
J_{x0}	1.8180	K_{J1}	0.00029270
J_{y0}	1.7990	K_{J2}	0.00040500
J_{z0}	0.1249	K_{J3}	0.00007167

4 结论

本文针对倾转三旋翼无人机在倾转过程中, 无人机由于发动机短舱角变化引起的飞行器重心位置以及各轴转动惯量的变化建立了适当的数学模型, 该模型可为无人机全过程飞行模式的数学建模提供理论依据, 为实现无人机全过程飞行精确控制奠定理论基础。

参考文献

- [1] 张飞, 路平, 江涛, 等. 基于模糊控制的倾转三旋翼无人机过度模式操纵策略研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(4): 1-6.
- [2] 陈琦, 江涛, 史凤鸣, 等. 倾转三旋翼无人机过度模式走廊曲线研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 24-27.
- [3] 陈琦, 江涛, 蔚建斌, 等. 倾转三旋翼无人机关键技术

与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2016(7): 34-37.

- [4] NOTARSTEFANO G, HAUSER J. Modeling and dynamic exploration of a tilt-rotor VTOL aircraft[C]//The 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Bologna, 2010: 119-124.
- [5] BOLKCOM C. V-22 osprey tilt-rotor aircraft[R]. Washington: CRS Report for Congress, 2004.
- [6] 陈坤, 史志伟, 孙加亮. 倾转三旋翼飞行器地面效应风洞试验[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2884-2891.
- [7] 唐亮, 徐庆九. 海军倾转旋翼无人机技术和发展优势综述[J]. 科技资讯, 2012(28): 73-76.
- [8] 薛立鹏. 倾转旋翼气动/动力学多学科优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [9] 王超. 大尺寸飞行器质量特性测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 徐小方, 张华. 飞行器转动惯量测量方法研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(6): 1653-1660.
- [11] 唐文彦, 李慧鹏, 张富春. 扭摆法测量飞行体转动惯量[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(2): 69-72.
- [12] 曹芸芸. 倾转旋翼飞行器飞行动力学数学建模方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

(上接第34页)

参考文献

- [1] WANG Y C, MIAO X D. Intuitionistic fuzzy perceiving methods for situation and threat assessment[C]//International Conference on Fuzzy Systems & Knowledge Discovery, IEEE, 2012: 578-582.
- [2] XU Y, WANG Y, MIU X, et al. Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(6): 891-897.
- [3] WANG Y, SUN Y, LI J Y, et al. Air defense threat assessment based on dynamic Bayesian network[C]//IEEE International Conference on Systems and Informatics, Yan-tai, 2012: 721-724.
- [4] 刘跃峰, 陈哨东, 赵振宁, 等. 基于 FBNs 的有人机/UCAV 编队对地攻击威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1635-1639.
- [5] 王宝成, 栗飞, 陈正. 基于模糊 TOPSIS 法的空袭目标威胁评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(3): 323-326.
- [6] 王晓帆, 王宝树. 基于直觉模糊与计划识别的威胁评估方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 175-177.
- [7] 王改革. 基于智能算法的目标威胁估计[D]. 长春: 中国

科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.

- [8] BODYANSKIY Y, DOLOTOV A, VYNOKUROVA O, et al. Evolving spiking wavelet-neuro-fuzzy self-learning system[J]. Applied Soft Computing, 2014, 14(6): 252-258.
- [9] HOU M Z, HAN X L. The multidimensional function approximation based on constructive wavelet RBF neural network[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2173-2177.
- [10] JAMIL M, KALAM A, ANSARI A Q, et al. Generalized neural network and wavelet transform based approach for fault location estimation of a transmission line[J]. Applied Soft Computing, 2014, 14(6): 322-332.
- [11] BAYRAM D, SEKER S. Wavelet based neuro-detector for low frequencies of vibration signals in electric motors[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5): 2683-2691.
- [12] 陆崇, 李启明, 周志鹏. 基于模糊贝叶斯网络的地铁运营安全风险预测[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(5): 1110-1114.
- [13] 陈夏冰, 刘国栋. 基于模糊神经网络 Sarsa 学习的多机器人任务分配[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(12): 203-205, 222.
- [14] ZHANG P, WANG H. Fuzzy wavelet neural networks for city electric energy consumption forecasting[J]. Energy Procedia, 2012, 17(Part B): 1332-1338.