



轻型四旋翼无人机声场特性研究

曹惠茹^{1,2}, 陈 玮¹, 成海秀¹, 祝文坚¹

(1. 中山大学南方学院, 广东 广州 510970; 2. 广州工程技术职业学院信息工程系, 广东 广州 510075)

摘 要: 无人机声场特性直接反映无人机飞行过程中的稳定性和其他相关特性, 该文通过构建测试平台对轻型四旋翼无人机在不同电流、距离下的声场进行测试; 并对固定飞行高度下的无人机声场频率进行试验。试验结果表明: 无人机声压强度与声音的传播距离呈对数关系; 随着电流的增加, 声压衰减系数逐渐减小; 在无人机声场衰减模型中常数项基本保持不变, 且只和环境相关。同时无人机飞行中声场频率集中在 10 kHz 左右; 随着声场传播距离的增大, 无人机声压剧烈减少。该研究可为无人机的相关研究与发展提供理论和实践的依据。

关键词: 四旋翼; 无人机; 声场特性; 声压

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)05-0043-04

Study on acoustic field characteristics of light quadrotor unmanned aerial vehicle

CAO Huiru^{1,2}, CHEN Wei¹, CHENG Haixiu¹, ZHU Wenjian¹

(1. Nanfang College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510970, China;

2. Department of Information Engineering, Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Acoustic field data directly map stability and other performance of unmanned aerial vehicle (UAV). this paper construct the experiment of acoustic field on UAV with different distance, working current and other parameters, and the sound field frequency of UAV under fixed flight altitude is tested. The experimental results show that the logarithm mathematical model was established between the distance and the intensity of sound. As the current increases, the attenuation coefficient would decrease. In the UAV sound field attenuation model, the constant coefficient is basically unchanged, and is only related to the environment. The frequency of sound field in UAV flight is about 10 kHz. With the propagation distance of sound field increasing, the sound pressure of UAV decreases dramatically. This study can provide theoretical and practical basis for the research and development of UAV.

Keywords: quadrotor; unmanned aerial vehicle; sound field characteristic; sound pressure

0 引 言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是由动

力驱动的、无线遥控或自主飞行, 机上无人驾驶并可重复使用的飞行器^[1-4]。新世纪以来, 随着通信、

收稿日期: 2018-04-20; 收到修改稿日期: 2018-05-18

基金项目: 广州市科技计划项目 (201804010427); 广东省水利科技创新项目 (2016-18)

作者简介: 曹惠茹 (1981-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络、计算机应用与控制、计算机信息处理等方面。

电子技术的发展,物联网技术趋于成熟,多旋翼无人机飞行器也应运而生。相比固定翼无人机,多旋翼无人机体积小、质量轻、隐蔽性强,能实现低空悬停、垂直起降 (vertical take off and landing, VTOL) 等特点。因此多旋翼无人机作为一种轻便、稳定的平台在军事与民用领域得到了广泛的应用^[5-6]。

近年随着无人机的发展,采用无人声场对无人机识别、检测、跟踪等成为当前的研究热点^[7-9]。无人机声场特征与传播特性的研究也为当前迫切需要解决的基础性问题。为此,丘恺彬等^[10]基于无人机噪声的产生机理,对不同类型的无人机声场信号进行特征提取,建立分类器对无人机进行分类与识别;实验证明了利用声音感知技术来识别与监管无人机的可行性。程翠^[11]在研究无人机飞行时声音频谱特征的基础上,选取声纹能量为特征向量,利用 SVM(support vector machine) 对无人机声音和其他声音进行了分类,从而实现无人机检测。杨东海^[12]采用 FISHER 准则择优选取的特征参数结合支持向量机法对无人机的声音进行识别,并提出了将支持向量机法和高斯混合模型 (Gaussian mixture model, GMM) 法应用于四旋翼无人机的声音识别。王威^[13]等通过无人机声场,建立多特征的无人机音频“指纹库”,最后用特征匹配算法实现无人机的探测和识别。Case^[14]等采用廉价的麦克风设计一种低成本的声场测试阵列,用于定位和跟踪小型无人机。进一步, Yue^[15]等针对入侵无人机甄别问题,以无线声场传感器网络为基础构建了声场无人机入侵判别系统;同时通过无线声场传感器网络和机器学习算法来识别不受欢迎的无人机的外观和近似位置;最后仿真与实际实验验证了算法的可行性。

随着无人机数量的增加,其检测与探测成为当前的研究热点,采用无人机声压是实现该目的的重要手段。无人声场研究是推进相关研究进步的重要基础,然而无人机声场基础实验与测试层面的研究甚少。因此,针对当前研究的现状,本文基于四旋翼无人机平台,研究了无人机的声场特性,为基于无人机声场特性的研究提供参考,为今后无人机的广泛应用及发展提供理论和实践依据。

1 试验设备与试验过程

1.1 无人机试验平台

无人机试验平台是由 Pixhawk 飞行控制器、电子调速器、无刷电机、螺旋桨、3DR 无线数传模块、

外置电子罗盘、6S 锂电池、控制接收机和碳纤维机架等元件组成,控制端有无线遥控器和电脑端地面站,如图 1 所示。



图 1 无人机试验平台

1) Pixhawk 飞行控制器: 采用 Pixhawk 飞行控制器 2.4.8 型号,是整个无人机平台的控制中心,由 CortexM4 主处理器及陀螺仪、电子罗盘、气压高度计、加速度计、应急处理器组成。主要功能是采集无人机平台相关参数(GPS 信息、无人机工作状态等信息),并根据无线数传模块与接收机接收来自地面站或遥控器的指令,进而通过电子调速器控制电机运转,达到所需工作状态。

2) 无刷电机: 采用 JFRC 飓风 u3508 无刷电机,接收来自电子调速器的控制信号,并执行相关工作状态。该电机有着功耗小,防水性能好,工作温度范围广($-30 \sim 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$),不易生锈,快速启动、启动后能够自由调速等优点。

3) 无线遥控器: 天地飞品牌 7 代遥控器 (WFT07S)。采用 7 通道 2.4 GHz 通信频段,通信距离远,能实现较远距离操控无人机飞行。采用总线数据传输,灵敏度高,支持 4.8~6 V 电池,低压设计,高端扩频和跳频技术使其具有较强的抗干扰能力^[10]。

4) 螺旋桨: 采用 1245 MR 尼龙螺旋桨正反两对,直径 12 inch (1 inch \approx 2.54 cm),螺距 4.5 mm,中心孔正面孔径 6 mm,中心孔反面孔径 9 mm,中心座厚度 6 mm。

在准备完成上述所示的试验设备后,建立无人机声场测试硬件框架,如图 2 所示。该框架主要包括主处理器,用于控制整个无人机,诸如飞行高度、参数感知等,并通过 SPI、I²C 等接口连接陀螺仪、电子罗盘、电流计、加速度计等无人机飞行过程中的

传感器参数。同时, 以 32 位 STM32F100 为测试协处理器, 通过通信接口连接电流计等获取无人机测试过程中的最大、最小和平均工作电流。

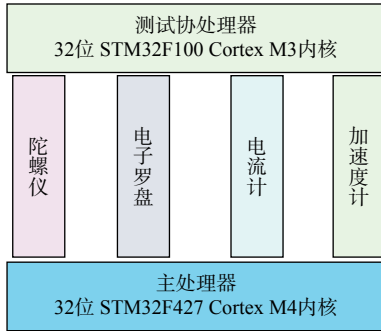


图 2 无人机试验硬件框图

本文使用的仪器有数字噪音计、风速测量仪、秒表等试验仪器。其他试验仪器包括支架、卷尺、刻度明确的风场板。其中希玛 AR854 数据声场计采用电容传感器, 测量范围为 30~130 dB, 测量精确度 ± 1.5 dB, 频率响应 20 Hz~8 kHz。该声场计具有反应迅速、精确度高等优点。

1.2 试验步骤

为了减小外界噪音对试验造成的误差, 采取安静微风的室外作为试验环境, 环境音量平均值为 39 dB, 取无人机工作电流 5~11 A。具体实验流程如图 3 所示。

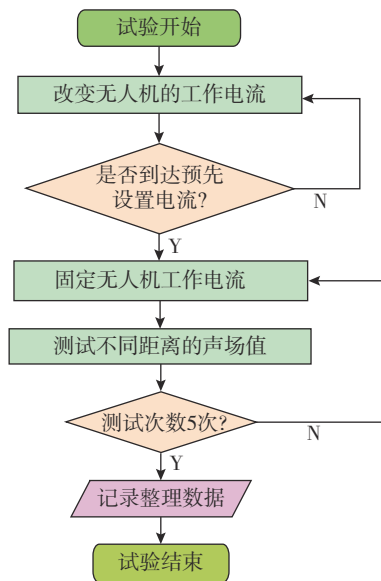


图 3 无人机声场实验流程图

Step 1: 运用无人机遥控器的油门摇杆, 通过改变油门大小从而达到改变无人机的工作电流。

Step 2: 增大油门, 使无人机机桨开始转动, 并

快速(1~2 s)让工作电流达到固定电流值, 之后保持不变。

Step 3: 测试不同工作电流下无人机附近 10 m 内声场, 以无人机为中心, 半径为 10 m 范围内取 3 个不同方向, 每个方向测量一次工作电流, 记录试验数据, 整个试验重复 5 遍。

Step 4: 整理试验数据, 去除试验过程中错误操作导致误差较大的数据, 同一工作电流取 3 次测量数据的平均值, 统计并记录最终数据。

Step 5: 分析数据, 得出试验结论。

2 试验结果分析

2.1 无人机声场频率分析

为了得到无人机平台在飞行过程中, 声场频率的分布特性, 在无人机悬停 3 m 高度下, 对无人机声场进行了测试, 采集无人机 3 s 的音频。通过 Matlab 分析其音频特性, 如图 4 所示。无人机完成起飞进入悬停模式后, 无人机的声场频率分布在 0~15 kHz 区间, 其中主要集中在 10 kHz 左右。同时, 无人机音频集中在 80 dB。

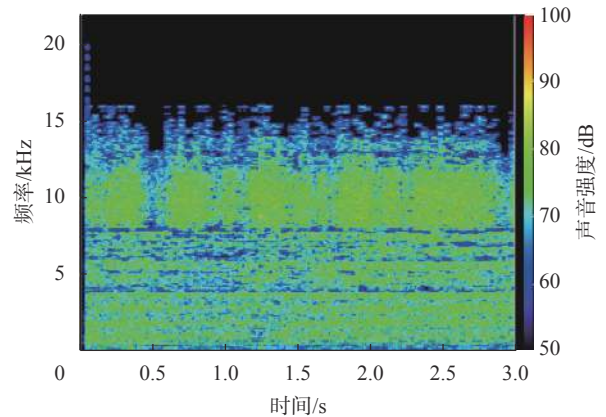


图 4 无人机频率分布图

2.2 无人机声音强度衰减分析

为了得到无人机声音强度与无人机工作电流、距离 3 者之间的内在规律, 在同一工作电流下重复试验 3 次, 分别以无人机为中心构建直角坐标系, 方向分别为 X 轴正半轴、Y 轴正半轴, 最大测量距离为 10 m, 得出数据取其平均值。

为了研究无人机工作电流与声压之间的关系, 取传播距离为 0.5, 2, 10 m, 得到工作电流与声压之间的关系图曲线。如图 5 所示, 随着无人机工作电流的增加, 相同距离下无人机的声压随之增大。对图中的曲线进行拟合, 得到工作电流与声压的拟合

公式 (1)

$$y = 0.9846I + 56.758 \quad (r^2 = 0.7684) \quad (1)$$

式中 I 为无人机工作电流。

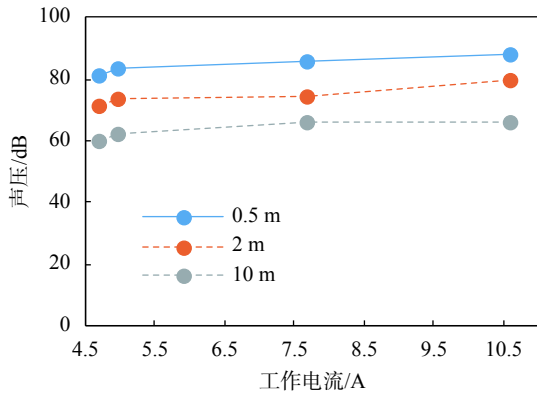


图5 工作电流与声压的关系图

以工作电流为变量,重复以上试验5次,通过Matlab分析,得到图6所示的不同电流下声压与距离的关系图。可知同一工作电流时,当距离增加,声压随之减少。其中距离无人机约小于3 m时,曲线斜率大,声压随距离变化大;距离大于3 m后,曲线斜率小,声压随距离增加缓慢稳定减小。同时,随着工作电流的增加,声压增大;不同工作电流的最近距离与最远距离的声压下降幅度相近,约为21 dB。

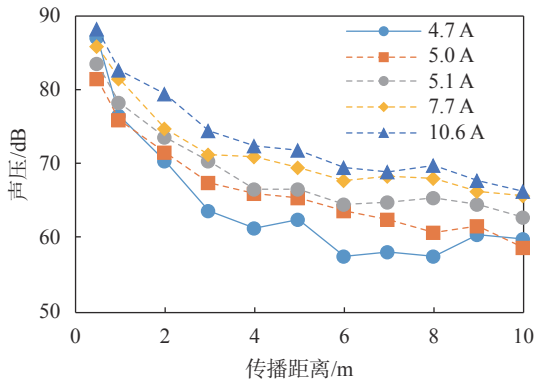


图6 声压与传播距离的关系图

对于多旋翼无人机,可以将其视为线声源,于是声压级可以表示为

$$Y = \begin{cases} L_{\omega}(r_0) - 10\lg r - k & r \leq l/3 \\ L_{\omega}(r_0) - 20\lg \frac{3r}{l} - 10\lg \frac{l}{3r_0} & r > l/3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L_{\omega}(r_0)$ —— r_0 处的声压;

l ——线声源长度;

r ——传播距离;

k ——修正系数;

r_0 ——单位距离。

明显,对于四旋翼无人机声场测试中满足 $r > l/3$,取 $r_0=1$ m 时声压随传播的距离可以表示为公式 (3):

$$Y = L_{\omega} - 20\lg \frac{3r}{l} - 10\lg \frac{l}{3} \quad (3)$$

当无人机选定,测试环境相对不变时,声场中的线声源强度 l 取值固定不变,于是有:

$$\alpha = L_{\omega} + 10\lg \frac{l}{3} \quad (4)$$

$$\beta = 20 \quad (5)$$

将公式 (4) 与 (5) 带入公式 (3) 可以转换为

$$Y = \alpha - \beta \lg r \quad (6)$$

为了便于计算,将公式 (6) 简化,并得到无人机声音强度随距离变化:

$$y = -A \ln x + B \quad (7)$$

式中: y ——声压, dB;

x ——距离, m;

A ——无人机声场衰减系数;

B ——常数项。

通过公式 (7) 对无人机不同工作电流条件下,声压随距离变化曲线进行拟合,可以得到不同电流时的相关系数取值,如表1所示。

表1 声场试验相关因素及取值

工作电流/A	A	B	r^2
10.6	6.029	83.006	0.9863
7.7	6.573	82.421	0.9766
5.1	6.769	83.01	0.9739
5.0	7.154	82.04	0.9812
4.7	9.372	84.02	0.9188

由表1可知,不同电流的拟合系数均大于0.9,进而说明无人机声场随距离呈现明显的对数关系。同时随着电流的增加,衰减系数 A 逐渐减小,说明 A 与无人机工作电流密切相关。而常数项 B 处于82.04与84.02之间无明显的变化,说明在无人机声场衰减模型中常数项只和环境相关。

3 结束语

本文通过构建无人机声场实验平台,对四旋翼无人机声场进行试验,通过数据分析建立相关数学模型。试验结果表明:无人机的声场频率分布在

(下转第53页)

- 112: 113-21.
- [4] 周伟, 马力辉, 张洪波, 等. 风电叶片复合材料弯曲损伤破坏声发射监测 [J]. 无损检测, 2011, 33(11): 33-37.
- [5] 张鹏林, 李梅, 王汝姣, 等. 风电叶片复合材料在三点弯曲过程中的声发射研究 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4): 21-26.
- [6] 周伟, 田晓, 张亭, 等. 风电叶片玻璃钢复合材料声发射衰减与源定位 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2012, 32(1): 100-104.
- [7] PEARSON M, EATON M, FEATHERSTON, et al. Improved acoustic emission source location during fatigue and impact events in metallic and composite structures[J]. Structural Health Monitoring: An International Journal, 2016, 16(4): 382-399.
- [8] 刘增华, 董拓灿, 彭秋玲, 等. 碳纤维复合材料板的声发射源定位 [J]. 无损检测, 2016, 38(10): 48-52.
- [9] 张志强, 张国胜, 刘艳芳, 等. 断铅试验声发射信号处理与损伤源定位研究 [J]. 中国测试, 2015, 41(8): 17-21.
- [10] MAHDIAN A, YOUSEFI J, NAZMDAR M, et al. Damage evaluation of laminated composites under low-velocity impact tests using acoustic emission method [J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(4)8: 479-496.
- [11] 龙宪海, 王汉功, 阳能军. 碳/环氧复合材料三点弯曲过程声发射特性研究 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 43-45.
- [12] LIU PF, YANG J, WANG B, et al. A study on the intralaminar damage and interlaminar delamination of carbon fiber composite laminates under three-point bending using acoustic emission[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2014, 15(1): 101-21.
- [13] 郝文峰, 陈新文, 邓立伟, 等. 数字图像相关方法测量芳纶纤维复合材料 I 型裂纹应力强度因子 [J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 90-95.
- [14] MURTHY H, VENKATACHALAM S. Characterization of fatigue induced damage evolution in CFRPs using DIC[J]. Failure and Damage Evolution, 2016, 9(8): 75-82.
- [15] 余海燕, 周辰晓. 基于 DIC 法的 CFRP 粘接参数及失效分析 [J]. 机械设计与研究, 2016, 32(6): 130-134.
- [16] ZHOU W, LÜ Z H, LI Z Y, et al. Acoustic emission response and micro-deformation behavior for compressive buckling failure of multi-delaminated composites[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2016, 51(6): 397-407.

(编辑:刘杨)



(上接第 46 页)

0~15 kHz 区间, 其中主要集中在 10 kHz 左右。随着工作电流增大, 无人机声场增强, 两者呈明显线性关系。同时声压与距离呈对数关系, 距离越远, 声压越小。随着电流的增加, 衰减系数 A 逐渐减小; 在无人机声场衰减模型中常数项 B 基本保持不变, 且只和环境相关。实验结果可为今后该平台的应用提供相关支持。

参考文献

- [1] 张欣. 多旋翼无人机的姿态与导航信息融合算法研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [2] 李增彦, 李小民, 刘新海. 便携式无人机地面控制站设计与实现 [J]. 中国测试, 2014, 40(1): 119-122.
- [3] 胡春明, 郝蒙蒙. 无人机活塞式发动机进排气系统优化 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 1009-1016.
- [4] 李杰, 齐晓慧, 韩帅涛, 等. 小型四旋翼无人机飞行控制系统设计与实现 [J]. 中国测试, 2014, 40(2): 90-93.
- [5] NONAMI K, KENDOUL F, SUZUKI S. Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles[J]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010: 959-963.
- [6] 聂博文, 马宏绪, 王剑. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术 [J]. 光电与控制, 2007, 14(6): 113-117.
- [7] 蒋兆军, 成孝刚, 彭雅琴, 等. 基于深度学习的无人机识别算法研究 [J]. 电子技术应用, 2017, 43(7): 84-87.
- [8] MANYAM S G, RATHINAM S, DARBHA S, et al. GPS denied UAV routing with communication constraints[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 84(4): 691-703.
- [9] CAO Y. UAV circumnavigating an unknown target under a GPS-denied environment with range-only measurements[J]. Automatica, 2014, 55(C): 150-158.
- [10] 丘恺彬, 李建良. 无人机识别的音频特征提取方法 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(2): 188-192.
- [11] 程翠. 基于声纹多谐波分析的无人机检测与定位研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [12] 杨东海. 基于声音识别的四旋翼无人机探测技术研究与应用 [D]. 长沙: 湘潭大学, 2017.
- [13] 王威, 安腾飞, 欧建平. 无人机被动音频探测和识别技术研究 [J]. 声学技术, 2018, 37(1): 89-93.
- [14] CASE E E, ZELNIO A M, RIGLING B D. Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking[C]. IEEE National Aerospace and Electronics Conference. IEEE, 2008: 110-113.
- [15] YUE X, LIU Y, WANG J, et al. Software defined radio and wireless acoustic networking for amateur drone surveillance[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 90-97.

(编辑:徐柳)