

文章编号:1674-8190(2020)05-724-06

基于火箭橇的无人机碰撞民用飞机试验技术研究

郑奎涛, 龚明生, 蒋大鹏, 刘俊

(航宇救生装备有限公司 试验部, 襄阳 441003)

摘要: 无人机碰撞民用飞机关键部位损伤程度的研究是民航领域关注的新型热点问题。本文首次提出采用火箭橇试验评估无人机碰撞民用飞机的安全性。通过对碰撞速度、碰撞位置、无人机姿态、参数测量等进行研究,设计碰撞技术方案,论述火箭橇的设计、弹道控制设计、强度校核和测试方案,并进行试验验证和仿真计算。结果表明:本文设计的火箭橇碰撞试验方案是可行的,实现了单一弹道上的连续多点碰撞及多视角、全覆盖、高稳定的全过程记录;可为后续开展同类碰撞试验提供必要的技术参考,所开展的多发次碰撞试验也为无人机碰撞民用飞机的安全性评估提供了有效的试验数据。

关键词: 无人机;碰撞;民用飞机;火箭橇

中图分类号: V216.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Test Technology of Civil Aircraft Impacted by UAV Based on Rocket Sled

ZHENG Kuitao, GONG Mingsheng, JIANG Dapeng, LIU Jun

(Testing Department, Aerospace Life-support Industries, Ltd., Xiangyang 441003, China)

Abstract: The research on the damage degree of the key parts of civil aircraft impacted by UAV is a new hot issue in the field of civil aviation. It is the first time that rocket sled test is proposed to evaluate the safety of UAV colliding with civil aircraft. Through the research on collision speed, collision position, UAV attitude and parameter measurement, the technical scheme of collision is designed, and the design of rocket sled, trajectory control design, strength check and test scheme are discussed, and the test verification and simulation calculation are carried out. The results show that: the rocket sled collision test scheme designed in this paper is feasible, which can realize continuous multi-point collision on a single trajectory and record the whole process of multi angle, full coverage and high stability. It can provide the necessary technical reference for the subsequent similar collision tests, and the multiple impact tests also provide effective test data for the safety evaluation of UAV collision with civil aircraft.

Key words: UAV; collision; civil aircraft; rocket sled

收稿日期:2019-11-06; 修回日期:2020-01-20

通信作者:郑奎涛,599219694@qq.com

引用格式:郑奎涛, 龚明生, 蒋大鹏, 等. 基于火箭橇的无人机碰撞民用飞机试验技术研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 724-729.

ZHENG Kuitao, GONG Mingsheng, JIANG Dapeng, et al. Research on the test technology of civil aircraft impacted by UAV based on rocket sled[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 724-729. (in Chinese)

0 引言

近年来,随着消费级无人机的普及和其数量剧增,无人机“黑飞”现象频发,严重危及航空安全和正常航班的运行^[1],无人机碰撞民用飞机造成破坏损伤程度的研究成为民航领域关注的新型热点问题。

目前,国内针对无人机碰撞民用飞机的安全性研究主要有:吴志坚^[2]利用有限元分析,对碰撞客机关键部位的损伤情况作出分析;王永虎等^[3]通过 ABAQUS 软件,对比分析了无人机撞击机翼与鸟撞机翼,得出无人机撞击飞机比鸟体撞击飞机更具破坏性的结论;于清媛^[4]和高扬等^[5]通过改进 Event 碰撞模型,得出不同情况下的碰撞风险;邓力^[6]研究了不同类型无人机与民航客机的碰撞概率。

国外,针对无人机撞击民用飞机的问题,FAA 无人机安全研究联盟认为,无人机的刚性结构及质量集中的部分,例如电池、摄像头、电机等对飞机结构的损坏比柔性的鸟要严重^[7],但研究时可以借鉴比较成熟的鸟撞案例^[8];J. Lai 等^[9]参考飞鸟撞击位置,采用有限元分析法对无人机撞击客机进行了数值模拟;K. Schroeder 等^[10]将无人机等同于相同质量的鸟体来分析碰撞的损伤,但这一思路的合理性仍需进一步验证;文献^[11]介绍了一个模仿无人机物理特性的弹体,通过压缩空气以一定的速度射出,但未考虑无人机的锂电池,锂电池如果在发动机的燃烧室中,则很容易燃烧,将造成非常严重的后果。

综上,国内外已在无人机与民用飞机碰撞的安全性分析方面进行了诸多研究,但主要是在鸟撞研究的基础上进行的数值模拟和试验,虽然得到了一些有价值的物理现象和规律,但有些结论只能从表面上进行猜测和推测,一直缺乏全面、系统性的碰撞试验验证。

火箭橇试验是介于实验室与全尺寸飞行试验之间的一种非常有效的地面试验,其采用不同的火箭发动机组合作为推进动力,主要模拟飞行时的动态环境,以解决飞机、导弹、宇航飞行器等在研制中有关高速度和高加速度的技术问题^[12],能够为无人机碰撞民用飞机的安全评估提供一种全新的试验方法。

本文基于火箭橇试验平台对无人机碰撞民用飞机的破坏损伤开展试验技术研究,针对无人机与民用飞机碰撞工况的复杂性、随机性及火箭橇试验

高昂的成本和苛刻的试验要求,为了系统、逼真地模拟无人机与民用飞机碰撞的工况,通过对碰撞速度、碰撞位置、无人机碰撞姿态、参数测量等进行研究,设计出适用于火箭橇试验的无人机与民用飞机碰撞技术方案;对设计的火箭橇进行结构有限元刚度、强度分析和弹道仿真计算,并完成 10 个工况的火箭橇试验,对试验结果进行评价分析。

1 试验技术状态

根据某型飞机和大疆系列无人机的真实性能数据,参考鸟撞试验方法,确定技术状态如下。

1.1 试验件

采用某型民用飞机机头及平尾段,真实模拟和分析碰撞的危害性。

选用大疆系列无人机。参考鸟撞适航规章^[13]和民航局对无人机的注册管理规定,选用 0.30、0.73、1.30、3.50 kg 四个质量型号的无人机进行碰撞试验。

1.2 碰撞速度

FAA Part 107 规定无人机的飞行高度不得高于 400 ft(120 m)^[14],大疆公司的无人机限飞高度为 500 m。按某型民用飞机运营的速度包线,120 m 高度对应的速度为 96 m/s,500 m 高度对应的速度为 122 m/s,考虑到 10 000 ft 以下运行速度 250 kn(1 kn=1.852 km/h)的限制,选择这 3 个工况下的速度为试验速度。无人机最大水平飞行速度统一为 20 m/s,碰撞速度如表 1 所示。

表 1 碰撞速度
Table 1 Collision speed

民用飞机 飞行高度	民用飞机飞行 速度/(m·s ⁻¹)	无人机电 速/(m·s ⁻¹)	碰撞速度/ (m·s ⁻¹)
120 m	96	20	116
500 m	122	20	142
10 000 ft	131	20	151

1.3 碰撞位置

通过动态仿真分析,确定风挡的中间点和边角点、机头承力梁和平尾中点为薄弱部位,作为碰撞位置。

1.4 无人机姿态

无人机姿态有悬停和悬挂,为了保证碰撞位置的精确控制,采用悬挂的方式。

无人机悬挂时,既要保证其能稳定地挂在预定碰撞点,又要保证在碰撞瞬间其不与机体结构干涉、连接绳完全断裂而不发生牵连作用。

为了保证无人机平稳地挂在预定碰撞点,通过实验室模拟吹袭试验,得到悬挂方式,如图 1 所示。



图 1 实验室悬挂试验

Fig. 1 Laboratory suspension test

通过动静结合及试验前在位调节保证碰撞位置的准确性。

2 技术方案

利用火箭橇平台搭载民用飞机机头及平尾,以固体火箭发动机为动力,推动火箭橇沿高精度滑轨高速运动,模拟民用飞机飞行过程。在预定碰撞点位置布置无人机悬挂架,将无人机预先用多根凯夫拉绳悬挂固定并调整至试验姿态。火箭橇运行到预定速度(碰撞点速度)时与悬挂在轨道上方的无人机发生碰撞,模拟无人机碰撞民用飞机的全过程。

通过橇载高速视频系统、地面高速视频系统拍摄整个碰撞过程,并利用橇载电遥测测试设备采集撞击过程的结构应变数据,试验后通过数据分析评价无人机碰撞民用飞机后的危害性。试验总体布局如图 2 所示。

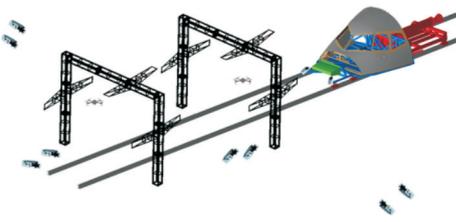


图 2 火箭橇试验总体布局

Fig. 2 Overall layout of rocket sled test

2.1 火箭橇结构设计

考虑机头总体尺寸和结构传力特点、运行平稳性、制动需求和研制成本等因素,确定火箭橇采用双轨、分节、桁架式结构形式。为了保持所有发次试验弹道的一致性和碰撞可实施性,民用飞机机头安装在试验橇体上方,将平尾始终安装在机头前下方位置的橇体上,并在平尾与机头之间用搭接板进行整流,以取得良好的整体气动外形,最终得到一体化的机头—平尾结构外形,如图 3 所示。



图 3 火箭橇结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of rocket sled

2.2 试验弹道设计

无人机和民用飞机碰撞速度的精确度直接影响到对试验结果的评价,由于火箭橇速度受轨道精度、发动机技术状态、环境温度、轨道润滑状态等多因素影响,每发试验实际弹道结果存在不可避免的误差。本文无人机碰撞试验基于同一弹道设计,碰撞速度精度依赖于碰撞点的弹道位置布局,因此对弹道的准确估计是控制碰撞速度精度的前提。试验过程中采取如下措施:

- ① 试验前调整试验段轨道精度;
- ② 规范轨道润滑作业程序,确保各发次试验轨道润滑状态保持一致;
- ③ 在所有 5 发试验中选用同型、同批次固体火箭发动机。

弹道计算的速度和加速度—时间曲线如图 4 所示,可以看出:火箭橇运行过程中满足试验碰撞速度的点有两处,分别处于火箭橇运行加速段和减速段,可实现一次试验中完成两次碰撞,减少试验发次,节约试验成本。

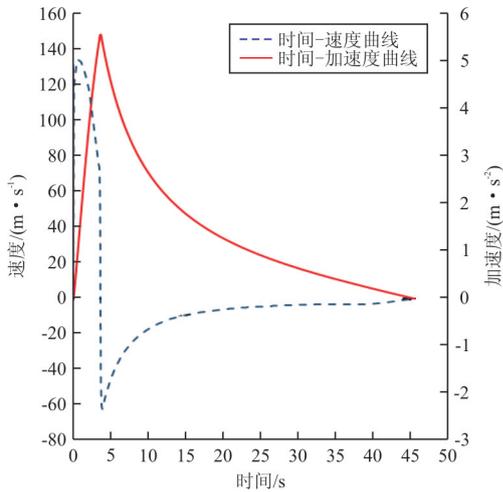


图 4 速度和加速度—时间曲线图

Fig. 4 Graph of velocity and acceleration versus time

2.3 强度校核

在结构设计和弹道性能计算的基础上,对火箭橇进行强度计算,以保证整个试验过程中火箭橇的安全,结果表明:在各个危险状态,火箭橇的强度、刚度均能满足试验要求。火箭橇有限元计算模型如图 5 所示。

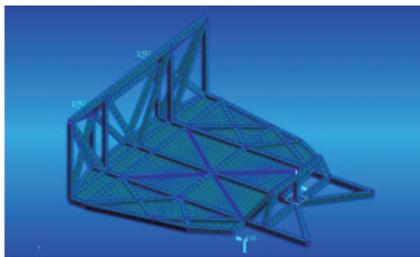


图 5 火箭橇有限元计算模型

Fig. 5 Finite element calculation model of rocket sled

2.4 测试方案

火箭橇速度采用电测测量。滑轨副轨东侧每 10 m 安装一块永磁铁,火箭橇底部前后分别安装两台霍尔传感器,火箭橇运动过程中,霍尔传感器进入磁场会产生脉冲变化,采集器通过捕捉脉冲变化来判断永磁铁的位置^[15]。

在民用飞机舱内固定 HBM 应变测试系统和 NI 应变测试系统,在碰撞点对应的内侧贴一定数量的应变片,记录碰撞时的数据。典型的应变片布局如图 6 所示。



图 6 应变片布局

Fig. 6 Strain gauge layout

为了能够多角度地观测无人机的碰撞过程,光测采用多方位、多点交汇布局,如图 7 所示。

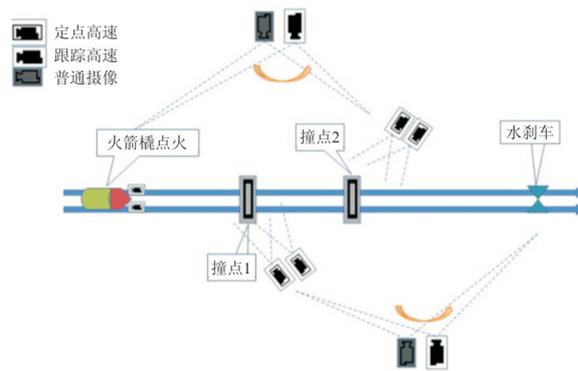


图 7 光测布局

Fig. 7 Photometric layout

3 结果分析

共进行 5 发次 10 个工况的火箭橇试验,各工况试验技术状态及实际碰撞速度如表 2 所示。

表 2 各工况试验技术状态及实际碰撞速度

Table 2 Test technical status and actual collision velocity under each working condition

工况	无人机		碰撞部位	碰撞速度/(m·s ⁻¹)	
	型号	姿态		设计	实测
1	Spark	水平	左侧风挡中间点	142	135.7
2	Spark	水平	右侧风挡左上角	142	152.7
3	Ph 4 Pro	水平	右侧风挡左上角	151	158.6
4	Ph 4 A	水平	风挡中间点	151	153.4
5	Mavic	后仰 45°	风挡中间点	151	152.8
6	Ph 4 Pro	后仰 45°	风挡中间点	151	131.5
7	Ph 4 Pro+电池	水平	风挡中间点	151	150.7
8	Inspire 1	水平	风挡中间点	116	154.8
9	Ph 4 Pro	水平	机头左侧	151	118.5
10	Inspire1	水平	尾翼	151	152.1

为了进一步验证试验碰撞结果的准确性,对各试验工况进行数值仿真。碰撞分析采用 PAM-CRASH 求解器进行计算分析,有限元网格在 Hypermesh 中处理,机头试验件、尾翼和 Phontom 型无人机的有限元模型如图 8~图 9 所示。

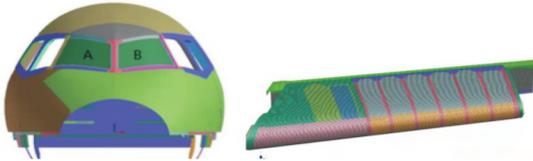


图 8 机头、尾翼有限元模型

Fig. 8 Finite element model of nose and tail

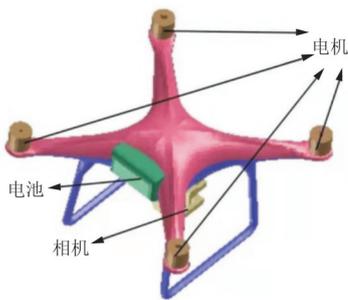
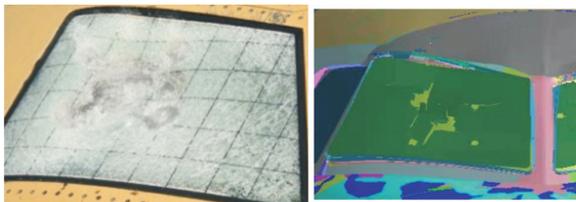


图 9 Phontom 型无人机有限元模型

Fig. 9 Finite element model of Phontom UAV

机头和尾翼的隔板固支,无人机以预定速度碰撞。工况 7 和工况 10 的试验结果和仿真结果分别如图 10~图 11 所示。

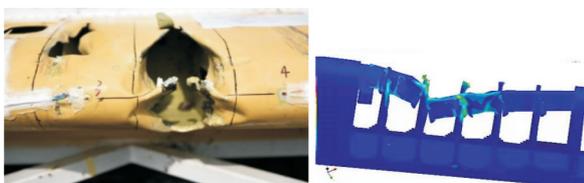


(a) 试验结果

(b) 仿真结果

图 10 工况 7 的试验结果和仿真结果

Fig. 10 Test results and simulation results of working condition 7



(a) 试验结果

(b) 仿真结果

图 11 工况 10 的试验结果和仿真结果

Fig. 11 Test results and simulation results of working condition 10

工况 7 的仿真计算结果显示:第一、第三、第五层风挡出现严重破损,其他两层胶膜出现轻微破损,与试验结果一致;工况 10 的仿真计算结果显示:蒙皮出现局部破损,斜板断裂,前梁未击穿,与试验结果一致。试验结果和仿真计算结果基本一致,表明无人机碰撞民用飞机的试验方案和数据是可信的。无人机的姿态、重量和相对速度是影响民用飞机飞行安全的主要因素,试验取得圆满成功。

4 结 论

(1) 本文针对无人机碰撞民用飞机的安全性研究问题,设计了火箭橇碰撞试验方案,解决了某型机身一尾翼一体化的火箭橇设计及制造、基于弹道布局的无人机运行状态模拟等问题,实现了单一弹道上的连续多点碰撞;并通过动静结合及试前在位调节保证了碰撞位置模拟的精确性;制定了多方位、多点交汇的测试布局,实现了多视角、全覆盖、高稳定的全过程记录。

(2) 试验结果与仿真结果基本一致,验证了试验方案的可行性和仿真结果的可信性,试验达到了预期目的。

(3) 采用火箭橇试验来评估无人机碰撞民用飞机的安全性,该碰撞技术为后续开展同类型火箭橇试验提供了重要的技术参考,试验结果为无人机碰撞民用飞机的安全性评估提供了重要的试验数据。

参考文献

- [1] 闫少琨. 无人机运行安全风险评价[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
YAN Shaokun. Evaluating the risk of unmanned aircraft operation[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)
- [2] 吴志坚. 无人机撞击民机动态响应及破坏损伤数值研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
WU Zhijian. Numerical study on dynamic response and damage of the UAV impact civil aircraft[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018. (in Chinese)
- [3] 王永虎, 吴志坚, 杨敏. 无人机飞鸟撞击机翼损伤程度预测仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(9): 48-51.
WANG Yonghu, WU Zhijian, YANG Min. The damage prediction and simulation for the UAV and bird strike impact on wing[J]. Computer Simulation, 2018, 35(9): 48-51. (in Chinese)

- [4] 于清媛. 管制区域无人机仿碰撞技术研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018.
YU Qingyuan. Unmanned aerial vehicle anti-collision technology research in control airspace[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018. (in Chinese)
- [5] 高扬, 刘单单. 低空开放后终端区航空器碰撞风险模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 141-145.
GAO Yang, LIU Dandan. Research on model for aircrafts collision risk in terminal area after low altitude open[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 141-145. (in Chinese)
- [6] 邓力. 无人机与民航客机碰撞概率研究[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1): 122-128.
DENG Li. Research of collision probability of unmanned aerial vehicles and civil airplane[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(1): 122-128. (in Chinese)
- [7] 郁振山. FAA: 飞机与无人机相撞比鸟击更危险[J]. 现代职业安全, 2018, 1(1): 57.
YU Zhenshan. FAA: collision between aircraft and UAV is more dangerous than bird strike[J]. Modern Occupational Safety, 2018, 1(1): 57. (in Chinese)
- [8] FAA. Pilot reports of close calls with drones soar in 2015 [EB/OL]. (2015-08-13) [2019-11-06]. <https://www.faa.gov/news/updates/?newsId=83445>.
- [9] LAI J, MEJIAS L, FORD J. Airborne vision-based collision-detection system[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28: 137-157.
- [10] SCHROEDER K, SONG Yangkun, HORTON B. Investigation of UAS ingestion into high-bypass engines, Part 2: parametric drone study [C] // 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. USA: AIAA, 2017: 135-142.
- [11] 佚名. 英国模拟无人机撞飞机实验: 后果很严重[EB/OL]. (2016-12-23) [2019-11-06]. <https://www.ithome.com/html/it/283011.htm>.
Anon. British simulated UAV crash test: very serious consequences[EB/OL]. (2016-12-23) [2019-11-06]. <https://www.ithome.com/html/it/283011.htm>. (in Chinese)
- [12] 杨兴邦. XB高精度火箭橇试验滑轨[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 98-104.
YANG Xingbang. XB high accuracy rocket sled test track [J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 98-104. (in Chinese)
- [13] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [14] 刘阿平. 美国无人机管理新规则下周正式启用[EB/OL]. (2016-08-17) [2019-11-06]. <http://www.yuchen360.com/news/9715-0-0.html>.
LIU Aping. The new rules for UAV management in the United States will be officially launched next week[EB/OL]. (2016-08-17) [2019-11-06]. <http://www.yuchen360.com/news/9715-0-0.html>. (in Chinese)
- [15] 唐瑞, 姚冉中. 火箭橇弹道测试技术研究[J]. 电子测试, 2018(17): 17-18.
TANG Rui, YAO Ranzhong. Research on ballistic test technology of rocket sled[J]. Electronic Test, 2018(17): 17-18. (in Chinese)

作者简介:

郑奎涛(1987—),男,硕士,工程师。主要研究方向:火箭橇试验技术。

龚明生(1964—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器综合试验技术。

蒋大鹏(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:火箭橇试验技术。

刘俊(1984—),女,博士,工程师。主要研究方向:火箭橇结构设计。

(编辑:马文静)