

民用轻小型无人机低空跌落撞击对地面人员安全性影响



郭亚周,刘小川,白春玉,王计真,王亚锋

中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要:为了研究民用轻小型无人机低空对地面人员可能产生的威胁伤害严重程度,以市场上占有率较高的 Mavic 2 无人机作为研究对象,开展了跌落撞击地面人员安全性测试,研究了无人机在不同高度跌落撞击下的响应模式,基于人体头部和颈部损伤准则分析了受撞击地面人员头颈部的力学响应,评估了地面人员受无人机碰撞伤害程度。研究结果表明,目前市场上常见的 1kg 以下的四旋翼无人机在低空高度跌落时并不会对地面人员造成不可接受的钝性碰撞伤害;由于无人机可折叠机翼的结构特征,无人机不仅会造成因机体碰撞而产生的钝性伤害,也会造成因叶片而产生的割伤/刺伤等锐性伤害;机身腹部侧面撞击姿态相比于其他姿态撞击会对地面人员造成更为严重的伤害。通过本项目的研究,可为民用轻小型无人机安全运营提供技术支撑和数据参考。

关键词:轻小型无人机;低空跌落;地面人员;安全性

中图分类号:V232

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.12.013

民用无人机作为全球新一轮工业和革命的热点,近些年得到了蓬勃发展,并且在消费娱乐、农林植保等领域内得到了广泛的应用,市场规模持续增长,市场前景广阔。其中空机质量低于 15kg、最大起飞质量低于 25kg 的轻小型无人机是民用无人机市场的主体,保有量大,用途广泛且高度融入公共场景^[1-5]。民用轻小型无人机具备飞行高度低、飞行速度快、飞行单位体积小、操作门槛相对较低等重要特点,在给各个行业带来便利的同时,轻小型无人机伤人毁物等问题也频繁发生,引发了公众的安全担忧,也引发了监管部门的高度关注,逐渐成为公共安全领域内的热点问题,也成为限制行业发展的瓶颈^[6-8]。

基于对民用轻小型无人机碰撞安全现状的担忧,近几年国内外出台了一系列无人机管控条例,美国联邦航空局 (FAA) 出台的关于小型无人机法规 (FAR-107 部)^[9],对无人机的分类、管控模式等进行了明确的要求和规定;中国民用航空局制定的《轻小型无人机运行规定》(试行)和《轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定》^[10-11]中同样有相似的规定。这些法规规范了轻小型无人机的应用场景,一定程度上从根源上避免了无人机碰撞伤害事故,维护了国家安

全、公共安全和飞行安全。然而,虽然目前轻小型无人机的运营飞行具备法规的约束和限制,但是由于轻小型无人机操作门槛低、购置/改装相对容易等特点,“黑飞”“飞手操作失误”等恶意或无意情况下无人机不可避免地对其他被撞击物所造成的伤害同样不可忽视,轻小型无人机被动碰撞伤害是轻小型无人机运营管理制度制定的出发点。

近几年,国内外相关研究机构纷纷开展了对民用轻小型无人机碰撞安全严重性评估的研究工作,研究场景主要分为空中碰撞和地面碰撞两大类。其中,空中碰撞主要为轻小型无人机与空中其他飞行器之间的碰撞,2017 年 11 月,FAA 发布了《无人机系统空中碰撞严重性评估最终报告》^[12],该报告基于经验证的数值仿真分析方法,研究了轻小型无人机对商用客机和货用飞机的碰撞安全性,并给出了轻小型无人机碰撞安全等级评估。Shelly^[13]研究了商用飞机发动机吸入无人机的安全性问题,研究结果表明,无人机的碰撞位置和碰撞姿态都会显著影响发动机叶片的损伤严重程度。Lyons 等^[14]研究了无人机撞击发动机风扇的损伤严重程度,分析了发动机吸入无人机时风扇叶片、发动机唇口和头锥的损坏。Meng 等^[15]结合试验和仿真分析方法

收稿日期: 2021-07-15; 退修日期: 2021-08-26; 录用日期: 2021-09-25

引用格式: Guo Yazhou, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Impact of low-altitude drop of civilian light and small uavs on the safety of ground personnel[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 115-121. 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 民用轻小型无人机低空跌落撞击对地面人员安全性影响[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 115-121.

综合研究了无人机撞击飞机风挡的安全性碰撞响应,研究结果表明,由于无人机硬度比动能会对撞击损伤产生更大的影响。Lu等^[15]研究了5种轻小型无人机和飞机玻璃的碰撞安全性,研究结果表明,轻小型无人机的结构、机体材料、速度、质量等均会对撞击结果造成影响。针对无人机地面碰撞安全方面,FAA于2019年发布了无人机地面严重性评估报告^[16],系统地研究和评估了无人机对地面人员的安全威胁。Choon等^[17]基于头部损伤标准和简明伤害标准初步测量评估了无人机在人群上空安全飞行的质量阈值。综上所述,目前关于轻小型无人机碰撞安全的研究多集中在与空中其他飞行器碰撞安全的研究,而针对地面人员碰撞安全的研究则相对较少,且尚处于初步阶段,这对轻小型无人机在城市人群上空的管控造成了较大的阻碍。除此之外,目前已经开展的研究中多只针对无人机单一姿态跌落撞击工况进行研究,而对无人机变姿态工况下的研究相对较少。

正是基于这种需求,本文通过试验的方式,选取一款市场上典型的轻小型无人机Mavic 2作为研究对象,开展了无人机跌落撞击地面人员头部的碰撞安全特性研究,采用高速摄像记录了试验过程中无人机的撞击响应模式,分析了不同跌落高度下无人机对地面人员的碰撞安全性,对比了无人机不同姿态跌落撞击地面人员的伤害差异性,通过多种损伤准则初步评估了低高度跌落下无人机对地面人员的撞击伤害严重性,试验和评估结果为轻小型无人机相关飞行标准和规范的制定提供了试验和技术支持。

1 试验

1.1 试验件

1.1.1 无人机试验件

本试验中的无人机试验件采用的是民用市场上占有率相对较高的大疆Mavic 2 PRO轻小型四旋翼无人机。无人机的动力源为一块可拆卸的锂电池,并且以卡扣形式固定在无人机背部,无人机整机质量为907g,Mavic 2无人机机体尺寸为:214mm×91mm×84mm(折叠态)、322mm×242mm×84mm(展开态)。无人机主要由机臂、机身、电池、电机、桨叶、内部电路等部件构成,其中主要部件材料见表1。该无人机属于轻小型无人机中质量尺寸相对较小的一类。

1.1.2 假人

本试验中采用的假人为50分位混合III型假人,由于人体尺寸基本呈现正态分布,因此50分位是指该型假人身体的尺寸能够涵盖50%整体男性人体尺寸。试验过程中,假人能够测量的物理量有头部加速度、头部角速度、颈部力和颈

部力矩。不同传感器测量的数据滤波方法见表2。

表1 无人机主要部件材料

Table 1 Material of main components of UAV

部件	材料
机臂	聚酰胺
机身、电池外壳	聚碳酸酯
电机	铝合金、钢材
桨叶	耐磨尼龙
内部电路板	玻璃纤维环氧树脂(FR4)

表2 假人测量物理量

Table 2 Dummy physical quantity

测量类型	位置	方向	滤波频率
头部角速度	头部重心	Rx Ry Rz	CFC180
头部加速度	头部重心	Ax Ay Az	CFC1000
颈部力	上颈部	Fx Fy Fz	CFC1000
颈部力矩	上颈部	Mx My Mz	CFC600

1.2 试验方法

试验主要采用自由落体跌落撞击地面假人的方法进行,跌落前无人机的跌落高度可调。如图1所示,本试验中采用提升吊钩挂载投放锁,由提升钩调整无人机跌落高度,由投放锁上的挂持器控制夹持和释放无人机,挂持器和无人机之间由粘贴在无人机重心位置处的投放绳连接,并通过调整挂持器和投放绳来调节无人机的姿态。试验过程中,由投放锁提升至一定高度,然后通过激光测距仪测量无人机是否到达指定的目标高度,并调整、对准撞击点位置,进而释放投放锁,无人机自由落体跌落撞人,测量人体在受无人机跌落撞击下的各部位响应情况。

1.3 假人各部位损伤准则

本试验的目的是为了评估无人机跌落撞人后人体的各部位损伤情况,因此需要通过统一的人体损伤评估准则来系统评估人体不同的部位的损伤大小,且不同部位的损伤准则也各不相同。由于本试验中无人机的主要形式为跌落撞人,因此此处相比于人体的胸部、腿部,本试验相对更为关注人体的头部和颈部损伤。

1.3.1 头部损伤准则

头部损伤准则(HIC)^[18]如式(1)所示,该准则是目前世界范围内获得公认的最为常用的头部损伤评价准则,已经应用在欧洲、美国和中国等多个国家的汽车碰撞安全法规和NCAP新车的评价体系中的正撞、侧撞工况等。

$$HIC = \left[(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right]_{\max} \quad (1)$$

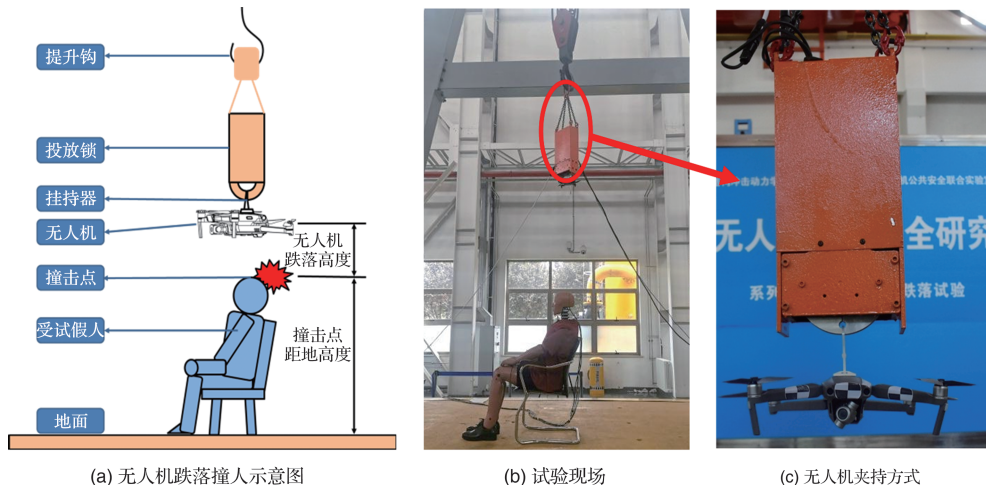


图1 无人机跌落撞击假人试验

Fig.1 UAVs falling and hitting dummy test

式中: t_1 为积分时间间隔的起始时刻; t_2 为积分时间间隔的结束时刻; $a(t)$ 为碰撞过程中头部质心的合成加速度(单位为 g)。其中, 由于碰撞事故的持续时间通常小于 15ms, 因此取时间间隔为 15ms 的值作为 HIC 取值。

1.3.2 头部 3ms 累积加速度准则

头部 3ms 累积加速度准则是指碰撞过程的头部加速度曲线超过某一限值的累积时间不超过 3ms。该准则强调了超过某一加速度限值的作用时间不能太长。目前, 该准则配合 HIC 在多个法规和 NCAP 的正撞、侧撞等工况中采用, 目前的限值多数是 72~80g。

1.3.3 颈部 N_{ij}

N_{ij} 最早在美国国家公路交通安全局(NHTSA)的关于儿童保护的报告中提出, 该准则是针对碰撞事故中 AIS2+ 以上的颈部损伤。 N_{ij} 准则基于试验研究提出的颈部轴向压

缩载荷与弯矩载荷的耐受极限, 结合颈部作用力与力矩进行评判的。 N_{ij} 准则的计算公式如下:

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (2)$$

式中: F_z 为颈部轴向力; M_y 为俯仰力矩; F_{int} 为颈部轴向力临界值; M_{int} 为俯仰力矩临界值。对于混 III 假人来说, 提出的颈部轴向力和弯矩临界值分别为 F_{int} (拉伸)= F_{int} (压缩)=4500N, M_{int} (弯曲)=310N·m, M_{int} (伸展)=125N·m, N_{ij} 的临界值为 1。

2 结果分析

2.1 无人机跌落撞击响应

图2为典型工况(5m跌落)下无人机跌落撞击地面人员的碰撞响应过程, 其他高度下的撞击响应与该工况具有较高的一致性和相似性。从图2中可以看出, 由于 Mavic 2

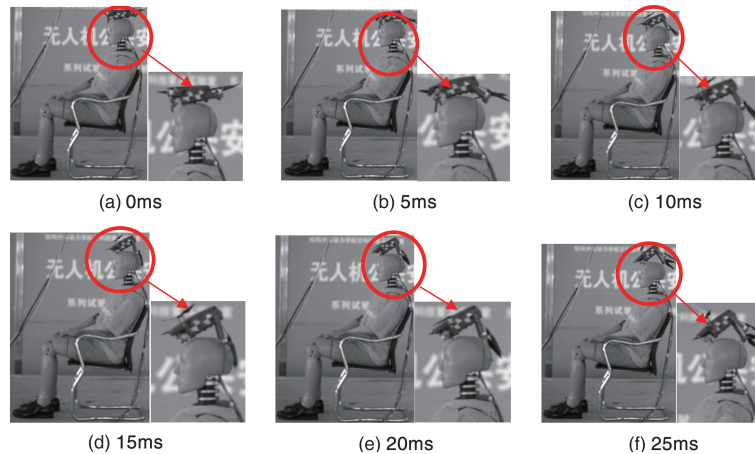


图2 无人机典型工况下的撞击响应

Fig.2 Impact responses of UAVs under typical working conditions

无人机具有较大的翼展,从而使得跌落过程中机臂承受了较大的弯矩,Mavic 2 无人机前后机臂的结构布局形式各不相同,其中前机臂为前后折叠式,后侧机臂为旋转折叠式,因此后侧机臂在撞击时由弯矩作用迅速产生机臂折叠响应,前机臂则并未折叠。在整个撞击过程中无人机机臂看似发生了折断,实际上是由于机臂自身旋转部件产生了相对运动,无人机结构并未由于跌落撞人而产生损坏,无人机在跌落试验后仍然能够正常启动和使用。

从图2中无人机各个部分的变形响应中可以看出,无人机在跌落撞击过程中不仅存在无人机自身的变形,同时还存在机臂折叠等机体部件的活动变形影响。因此,从无人机的响应可以看出无人机对人体可能造成的伤害中除了由于自身机体结构撞击而产生的钝性伤害之外,无人机旋翼翼片伴随着机臂运动同样有可能对人体薄弱部位造成割伤刺伤等不可忽视的锐性伤害。

2.2 无人机跌落高度

图3为无人机在不同高度下跌落撞击假人各部位损伤准则与耐限值的比值情况。本文中采用的头部损伤准则 HIC_{15} 的耐限值为 700,头部 3ms 加速度准则的耐限值为 80g,颈部 N_{ij} 准则的耐限值为 1,颈部轴向力耐限值为 4000N,颈部力矩耐限值为 57N·m。

由图3中可以看出,当Mavic 2 PRO无人机在9m以下高度跌落撞击时,头部和颈部所有指标均未超过耐限值红线,因此无人机在这种程度的低高度运行时相对安全,从损伤准则指标上来看并不会由于机体自身质量撞击而对地面人员造成不可接受的钝性碰撞伤害。

同时可以明显地看出,相比于头部损伤准则各项指标,颈部各项的损伤准则指标与耐限值的比值更大,以9m工况下无人机跌落撞击地面人员的结果分析为例,该工况下颈部力的与耐限值的比值为73.2%,颈部 N_{ij} 与耐限值的比值为64%;而头部 HIC_{15} 与耐限值的比值则为14.5%,连续3ms加速度为28.5%,非连续3ms加速度为45.1%,其他工况也

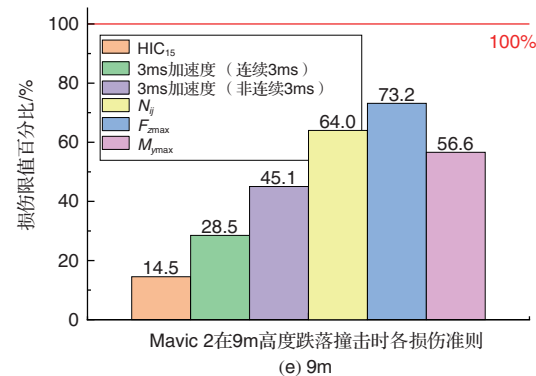
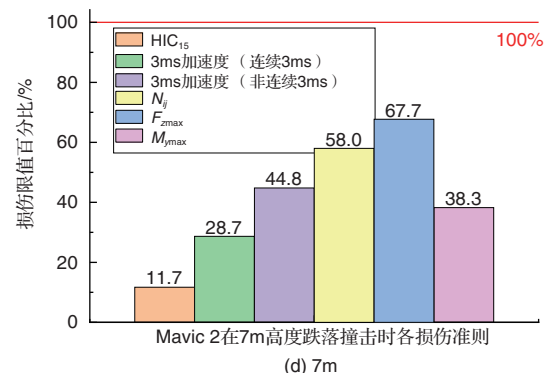
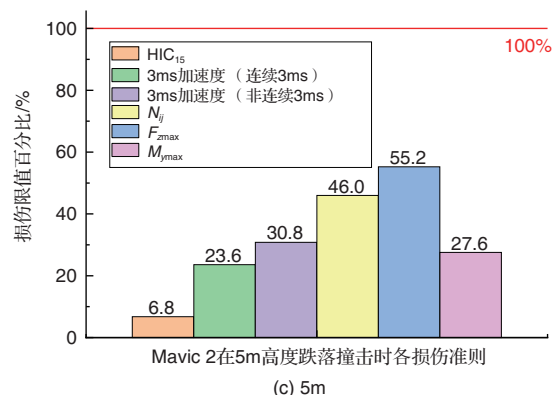
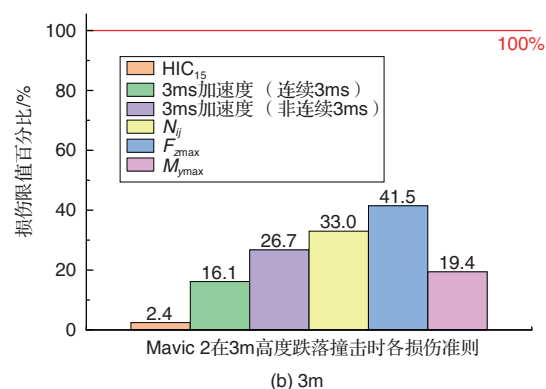
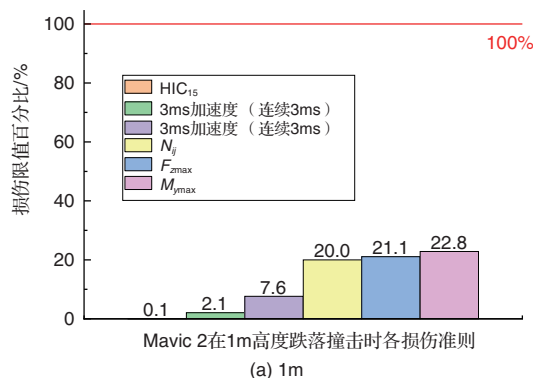


图3 无人机在不同高度撞击下的损伤准则

Fig.3 UAVs damage criteria at different altitudes

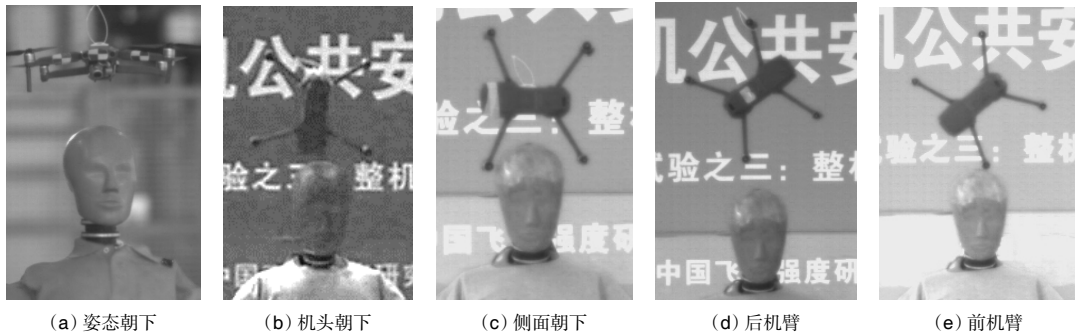


图4 无人机不同跌落姿态

Fig.4 Different drop attitudes of UAVs

有相同的数据规律。从数据中可以明显看出,轻小型无人机在跌落撞击地面人员时,颈部受到的伤害相比于头部受到的伤害更严重,最有可能率先突破耐限值。

2.3 无人机跌落姿态

如图4所示,由于无人机在实际跌落过程中并不是保持单一姿态跌落的,其故障模式具有多种,其中包括单电机失效、同侧双电机失效和对侧双电机失效等。正因为故障模式的多样性,无人机空中翻转时姿态的不确定性,使得无人机不同跌落姿态撞击地面人员安全性的研究显得更为必要。因此,为了研究不同无人机姿态对跌落撞击地面人员伤害严重程度的差异性,选取了5种比较典型的无人机跌落姿态,采用控制试验单变量的方式,分别开展了在5m跌落高度下无人机飞行姿态跌落撞击、机头朝下撞击、机腹侧面朝下撞击、后机臂撞击、前机臂撞击等多姿态撞击地面人员头部试验。图5为无人机不同跌落姿态撞击时的头部加速度对比图。从响应峰值上看,5种姿态中机腹侧面撞击所造成的头部加速度最大,飞行姿态撞击的头部加速度次之,随后依次为机头撞击、前机臂撞击、后机臂撞击。

从响应速度上看,从图5中可以明显看出不同姿态撞击时的脉冲峰值响应快慢不同,其中前后机臂撞击所产生的峰值脉冲较早,而飞行姿态与机头撞击所产生的峰值脉冲时间则相对较晚,机腹侧面撞击的峰值脉冲时间则最晚,这是由于无人机不同姿态撞击过程中行程的差异性造成了撞击响应时间的偏差,机腹侧面撞击时无人机跌落高度的行程最长,机头和飞行姿态撞击的行程次之,而前后机臂撞击的行程则最短,这就导致了不同姿态撞击下的响应峰值时间不同;从响应模式上看,飞行姿态撞击、机腹侧面撞击和机头撞击都呈现较为明显的单峰响应模式,而前后机臂撞击则呈现出双峰,且第二个峰值与第一个峰值相距较远,这是由于前后机臂在刚与地面人员发生撞击时,机臂不足

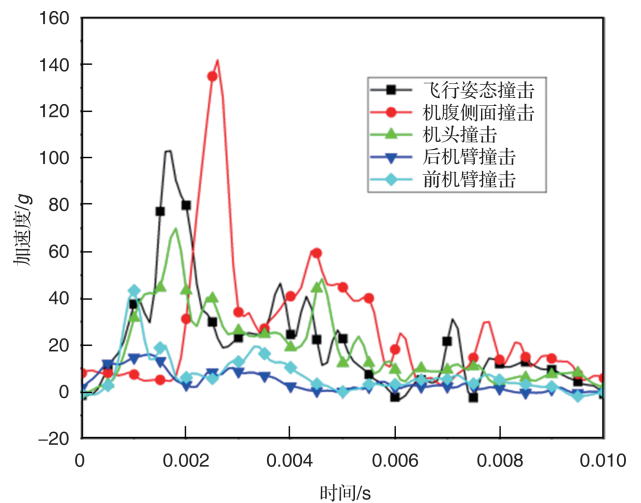


图5 不同跌落姿态下头部加速度

Fig.5 Head acceleration at different drop attitudes

以承受跌落能量,于是迅速发生了折断或者折叠,从而导致无人机仍然有一部分能量并未消耗掉,使得无人机机身二次撞击地面人员,从而产生第二个峰值。

如图6所示,为无人机不同跌落姿态时的颈部撞击力对比图。从图中可以看出无人机不同跌落姿态撞击下的颈部力规律与不同跌落姿态撞击下的头部加速度规律基本相同,其中机腹侧面撞击的撞击力最大,最大颈部力峰值为2684.32N,前机臂撞击力最小,最小峰值为557.44N。同时从图7中也可以明显看出当轻小型无人机跌落撞击地面人员时,颈部伤害准则 N_{ij} 值与耐限值的比明显要比头部 HIC_{15} 以及3ms加速度的大,从中再次印证了当无人机低空跌落撞击地面人员时,相比于头部,人员颈部将会受到更为严重的伤害。通过对 N_{ij} 值的观察可以看出,规律与头部加速度和颈部力相同,因此当无人机以不同姿态撞击地面人员时,机腹侧面撞击姿态对地面人员的伤害最为严重。

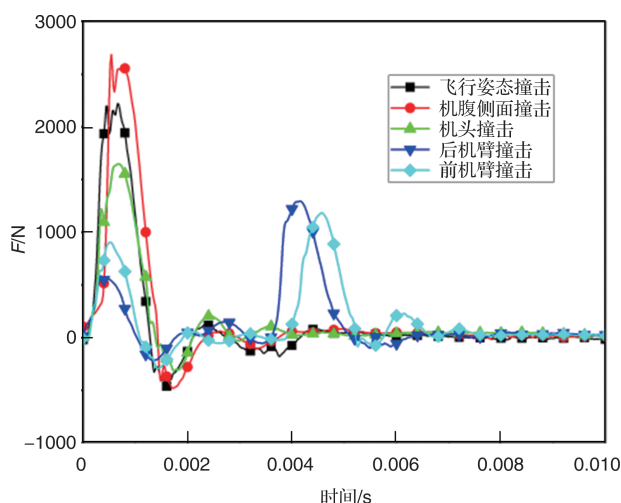


图6 不同跌落姿态颈部撞击力

Fig.6 Neck impact force at different drop attitudes

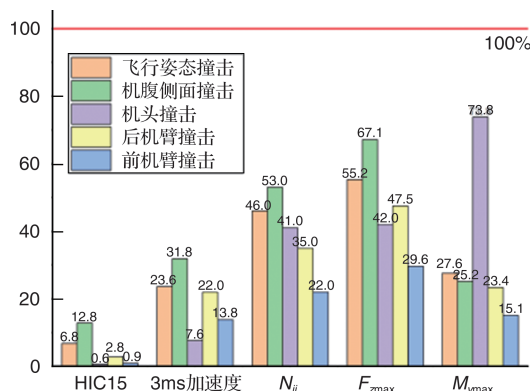


图7 不同跌落姿态损伤准则对比

Fig.7 Comparison between damage criteria for different drop attitudes

3 结论

本文基于无人机自由跌落的试验方法,开展了Mavic 2 PRO无人机跌落撞击地面人员碰撞安全性试验,考查了无人机跌落过程中的变形响应模式,评估了不同跌落高度对无人机撞击地面人员安全性的影响规律,对比分析了不同跌落姿态对地面人员的碰撞伤害差异性,得出结论如下:

(1) 1kg左右轻小型无人机在9m以下的低高度跌落时并不会对地面人员造成不可接受的钝性伤害,而应该重点关注因旋翼叶片旋转可能造成的锐性伤害影响。

(2) 轻小型无人机在跌落撞击地面人员时,相比于头部受到的伤害,人员颈部将会受到相对更为严重的伤害,最有可能率先突破耐限值。

(3) 不同姿态下无人机对地面人员的碰撞损伤严重性各不相同,无人机的撞击伤害与无人机撞击地面人员瞬间

的姿态具有较强敏感性,无人机机腹侧面撞击姿态对地面人员的损伤最为严重。

AST

参考文献

- [1] Jenkins D, Vasigh B. The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the United States[R]. Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI), 2013.
- [2] Ruchti J, Senkbeil R, Carroll J, et al. Unmanned aerial system collision avoidance using artificial potential fields[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2014, 11 (3): 140-144.
- [3] 吴兆香,欧阳权,王志胜,等.基于人工智能的无人机区域侦察方法研究现状与发展[J].航空科学技术,2020,31(10):57-68.
Wu Zhaoxiang, Ouyang Quan, Wang Zhisheng, et al. Status and development of regional reconnaissance methods of UAV based on artificial intelligence[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(10):57-68. (in Chinese)
- [4] 杨春宁,杜黎明,李春.未知区域无人机协同搜索方法及效率分析[J].航空科学技术,2019,30(10):56-63.
Yang Chuning, Du Liming, Li Chun. Methods and efficiency comparison of UAV swarms collaborative search in unknown area[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(10):56-63. (in Chinese)
- [5] 蒋浩,高鑫.人因工程在无人机中的应用及展望[J].航空科学技术,2019,30(5):9-13.
Jiang Hao, Gao Xin. Application and prospect of human factor engineering in unmanned aerial vehicle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(5):9-13. (in Chinese)
- [6] Eamon T, Campolettano W, Megan L, et al. Ranges of injury risk associated with impact from unmanned aircraft systems[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2017, 45(12): 2733-2741.
- [7] 王永东,安玉新.中国民用无人机发展潜力与制约因素分析[J].中小企业管理与科技, 2020(10):116-117.
Wang Yongdong, An Yuxin. Analysis of the development potential and constraining factors of civil UAV in China[J]. Management & Technology of SME, 2020(10): 116-117. (in Chinese)
- [8] Malik A, Linke F. Evaluation of equivalent level of safety for civil and commercial applications of remotely piloted aircraft systems[C]//5th International Air Transport and

- Operations Symposium (ATOS), 2015.
- [9] FAA. Part 107 Small unmanned aircraft regulations[S]. USA: FAA, 2016.
- [10] 中国民用航空局. 轻小无人机运行规定(试行)[S]. 中国民用航空局, 2015.
- Civil Aviation Administration of China. Operation Regulations for Light and Small UAVs (Trial) [Z]. Civil Aviation Administration of China, 2015.(in Chinese)
- [11] 中国民用航空局. 轻小型民用无人机飞行动态数据管理规定[S]. 中国民用航空局, 2019.
- Civil Aviation Administration of China. Regulations on the management of flight dynamic data of light and small civil UAVs [S]. Civil Aviation Administration of China, 2019.(in Chinese)
- [12] ASSURE. FAA UAS COE Task A3 UAS airborne collision hazard severity evaluation[R]. FAA, 2017.
- [13] Shelly A V. A model of human harm from a falling unmanned aircraft: implications for UAS regulation a model of human harm from a falling unmanned aircraft: implications[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2016, 3(3):1-42.
- [14] Lyons T, D'Souza K. Parametric study of a unmanned aerial vehicle ingestion into a business jet size fan assembly model [J]. Journal of Engineering study for Gas Turbines and Power, 2019, 141(7): 1456-1466.
- [15] Lu X H, Liu X C, Li Y L, et al. Simulation of airborne collisions between drones and an aircraft windshield[J]. Aerospace Science and Technology, 2020 (1):1-15.
- [16] ASSURE. FAA UAS center of excellence task A4: UAS ground collision severity evaluation[R]. FAA, 2016.
- [17] Choon H K, Low H H, Lei L, et al. Weight threshold estimation of falling UAVs based on impact energy[J]. Transportation Research Part C, 2018, 93:228-255.
- [18] Versace J. A Review of the severity index[R]. SAE Technical Paper, 1971.

Impact of Low-Altitude Drop of Civilian Light and Small UAVs on the Safety of Ground Personnel

Guo Yazhou, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, Wang Jizhen, Wang Yafeng

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: In order to study the severity of the threat and damage that civilian light and small drones may cause to ground personnel at low altitudes, the Mavic 2 UAV which has a high market share is used as the research object. The safety test of personnel falling and hitting the ground has been carried out, and the response mode of the UAV under different height drops and impact is studied. Based on the human head and neck injury criteria, the mechanical response of the head and neck of the ground personnel was analyzed, and the degree of injury of the ground personnel by the UAV collision was evaluated. The results show that the common quadrotor UAVs below 1kg on the market will not cause unacceptable blunt collision damage to ground personnel when falling at a low altitude. Due to the structural characteristics of the UAV's foldable wings, the UAV will not only cause blunt injuries due to body collisions, but also sharp injuries such as cuts/stabs due to blades. The side impact posture on the abdomen of the fuselage will cause more serious damage to the ground personnel than other posture. The research of this project can provide technical support and data reference for the safe operation of civilian light and small drones.

Key Words: light and small UAV; low-altitude drop; ground personnel; safety