

中文引用格式: 韩鹏, 张冰玉. 航迹误差对无人机坠地伤人风险评估的影响[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 106-111.

英文引用格式: HAN Peng, ZHANG Bingyu. Effect of track error on safety risk assessment of UAV ground impact [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 106-111.

航迹误差对无人机坠地伤人风险评估的影响^{*}

韩鹏 讲师, 张冰玉 讲师

(中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn 1003-3033.2021.02.015

资助项目: 天津市教委科研计划项目(2019KJ128)。

【摘要】 为提高无人机(UAV)安全风险评估的精确性和置信度,在坠地安全风险评估过程中,考虑航迹误差导致的事故瞬间 UAV 位置和高度不确定性,及其对坠地撞击点和撞击速度的影响,分析 UAV 坠地的水平位置误差和高度误差分布特征,确定 UAV 失效瞬间位置和高度,建立坠地撞击点预测模型,计算其坠地撞击速度,并以 M210-RTK 型 UAV 为例,分析不同航迹误差对坠地时间、地面撞击点位置和坠地动能的影响。结果表明:航迹误差作用下,坠地撞击点分布遵循正态分布特征;随着飞行高度的增加,航迹误差对坠地位置的影响逐渐下降,高度误差对坠地动能的影响呈先增后减的趋势。

【关键词】 航迹误差; 无人机(UAV); 坠地伤人; 风险评估; 撞击动能

Effect of track error on safety risk assessment of UAV ground impact

HAN Peng, ZHANG Bingyu

(School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to improve accuracy and credibility of UAV safety risk evaluation, uncertainties of instant UAV position and altitude at the moment of accident caused by track error and its influence on impact point and speed were considered in risk assessment of ground impact. Distribution rules of horizontal position error and height error were analyzed, and location and height of UAV failure moment were determined. Then, a prediction model of impact point was established and impact velocity was calculated. Finally, with UAV of M210-RTK type selected as research object, effects of different track errors on impact time, position of impact point and impact kinetic energy were obtained. The results show that distribution of impact points, under influence of track error, still obeys normal distribution. With increase of flight altitude, track error's influence on ground impact position decreases gradually while that of altitude error on ground impact kinetic energy increases first and then decreases.

Keywords: track error; unmanned aerial vehicle (UAV); ground impact; risk assessment; impact energy

* 文章编号: 1003-3033(2021)02-0106-06; 收稿日期: 2020-11-06; 修稿日期: 2021-01-15

0 引言

近年来,随着无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在物流配送、农林植保和搜寻救援等领域的成功应用,UAV已成为先进生产力的重要载体。但是,UAV安全事故也随之不断增多,并引起各国学者和监管机构的重视^[1-2]。据中国民航局UAV云数据统计结果^[3],我国(不包括港澳台地区)UAV主要在1 000 m以下的低空空域内运行,其中运行高度在120 m以下的UAV占96.5%,1 000 m以下的UAV占比达到99.9%。由于航路航线中载人飞机的运行高度通常在3 000 m以上,在低空空域内,UAV运行安全风险已由传统载人飞机对机上人员安全的威胁转移到对地面人员安全的威胁。换言之,受UAV坠落影响,对地面撞击点附近人员安全造成威胁的坠毁伤人事故已成为我国低空空域内UAV运行的首要风险。

目前,国内外对UAV运行风险评估的相关研究主要集中在坠地致伤区域的预测和坠地动能的估算。这些研究大多通过对UAV失效航迹的建模实现坠地区域预测,主要建模方法有经验估算法和建模分析法。其中,经验估算法依据UAV的质量、尺寸及类别,参考载人飞机或UAV历史失事数据,估算UAV失效后的航迹和受影响区域。根据航空器质量和航空器尺寸、类型的差异,经验估算法又分为基于航空器质量和基于航空器尺寸和类型的2种方法。建模分析法主要依据空气动力学模型和运动学模型预测坠落航迹,并利用概率分布函数计算UAV失效后的受影响区域范围。WEIBEL等^[4]首先提出坠地致伤区域的概念,并基于UAV的动力学模型预测了失效后的航迹及坠地区域;CLOTHIER^[5-7]、FORD^[8]和HALL^[9-10]等陆续将UAV类型、操纵方式、失效形式和环境条件等作为考虑因素,不断丰富和完善UAV失效航迹预测模型^[11-14]。但是,作为失效航迹建模的输入,需要根据UAV航迹确定其初始失效位置和失效初速度,并以此为失效边界条件。上述文献虽然不断修正UAV的坠落航迹建模方法,却极少展开研究。UAV在失效坠落前初始位置对预测输出的精确性影响较大,直接关系到地面人员的风险。初始失效位置通常由UAV机载导航数据或广播式自动相关监视系统(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)数据给出,现有研究在对UAV坠地伤人风险评估中,通常忽略导航系统和航径定义等误差,导致风险评估结果的精确性和

置信度降低。

鉴于此,笔者拟考虑航迹误差在UAV失效坠地区域预测中的作用,分析不同航迹误差对坠地时间、地面撞击点位置和坠地动能的影响,并分析其对UAV坠地伤人安全风险的影响,以期对UAV运行风险评估和风险缓解提供理论支撑。

1 UAV航迹误差分布特征

航迹误差是指在航空器航行过程中,受到各种因素的影响和干扰而产生的实际航迹与预设航径之间的误差。UAV航迹误差主要分为水平位置误差和高度误差。UAV的水平位置由全球定位系统(Global Positioning System, GPS)导航信号和惯性测量单元解算获得,飞行高度由气压传感器和超声波传感器获取,其中气压传感器数据用于悬停高度粗略控制,超声波传感器数据用于低空高度精确控制或避障。在UAV飞行中,由于存在飞行控制系统的传感器测量误差、GPS天线遮挡或丢星,以及惯性测量单元精度等,会导致UAV航迹误差的产生。

UAV航迹误差分析通过UAV飞控系统和ADS-B系统输出的航迹位置数据,对照航迹捕捉系统中校准的视觉位置数据进行分析,并统计和分析其初始位置误差和速度误差分布情况。在实验室环境中布置基于VICON光学位置传感室内UAV的三维动作捕捉系统,用于UAV航迹的捕捉与分析。该系统能够实现多目标快速捕捉,实时输出高频率运动学数据,并开展UAV航迹误差分析试验。

通过分析UAV的GPS导航数据和ADS-B数据发现,航空器航迹误差遵循均值为0的三维高斯分布特征^[15],且航迹误差在纵向、横向和垂向3个方向相互独立,如下式:

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{E} - \mathbf{M})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{E} - \mathbf{M}) \right] \quad (1)$$

式中: \mathbf{P} 为航迹误差分布概率列向量; \mathbf{E} 为航空器航迹点误差列向量; \mathbf{M} 为三维航空器航迹点误差均值列向量; Σ 为航迹误差的协方差矩阵。

2 UAV坠地伤人风险评估模型

2.1 UAV坠地撞击点预测

通过对UAV安全事故的统计分析,坠地诱因有硬件系统故障和软件系统故障2类。其中,硬件系统故障以动力系统和电气系统为主,表现为UAV旋翼

停转或电池供电故障; 软件系统故障以飞行控制系统故障为主, 表现为对 UAV 失去控制。在诸多故障形式中, 涉及 UAV 系统自身故障的坠地形式通常为失控或失去动力的自由落体运动或抛体运动, 考虑坠落过程中的空气阻力, 受力分析 UAV。建模过程中, 忽略 UAV 在下落过程所受风力的影响。将 UAV 坠落后的运动分解到垂直和水平方向, 其运动方程如下:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -D_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = G - D_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为 UAV 质量, kg; G 为 UAV 重力, N; x, y 分别为 UAV 坠落时在水平和垂直方向的位移, m; t 为 UAV 坠落时间, s; D_x, D_y 分别为水平和垂直方向的空气阻力, N。

将空气阻力用 UAV 迎风面积和空气阻力系数展开, 如下式:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{1}{2} c_D A_x \rho_a \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \frac{1}{2} c_D A_y \rho_a \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; c_D 为空气阻力系数; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; A_x, A_y 分别为侧向和垂向迎风面积, m^2 。

将式(3)积分并代入初始速度边界条件 $\begin{cases} v_{x0} = v_0 \\ v_{y0} = 0 \end{cases}$ 和 $\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$, 其中, v_{x0} 和 v_{y0} 分别为 UAV 坠地初始状态在侧向和垂向的初速度, m/s ; v_0 为初始速度值, m/s ; x_0 和 y_0 为 UAV 坠地初始状态在侧向和垂向的位置, m。可得 UAV 坠地撞击点, 如下式:

$$\begin{cases} x = \frac{2m}{c_D A_x \rho_a} \ln[(c_D A_x \rho_a v_0 t + 2m) / kg] - \frac{2m \ln(2m/kg)}{c_D A_x \rho_a} \\ y = \frac{2m}{c_D A_y \rho_a} \ln \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{c_D A_y \rho_a g}{2m}} t \right) \right] \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知: 当 UAV 运行高度已知时, 其坠落地时间如下式:

$$t|_{y=h} = \sqrt{\frac{2m}{c_D A_y \rho_a g}} \ln \left(\exp \left(\frac{c_D A_y \rho_a h}{2m} \right) \pm \sqrt{\exp \left(\frac{c_D A_y \rho_a h}{m} \right) - 1} \right) \quad (5)$$

式中 h 为 UAV 运行高度, m。

此时间段 UAV 在水平方向运行的距离如下式:

$$x|_{t|_{y=h}} = \frac{2m}{c_D A_x \rho_a} \ln[(c_D A_x \rho_a v_0 t + 2m) / kg] - \frac{2m \ln(2m/kg)}{c_D A_x \rho_a} \quad (6)$$

当 UAV 运行高度为 h 、水平初速度为 v_0 时, 其坠地撞击点和坠地瞬间速度可据此计算。

2.2 UAV 坠地伤人量化评估

UAV 地面撞击事故的人员伤亡率与诸多因素有关, 其中以 UAV 坠地速度和坠地撞击点附近地面环境遮蔽物的保护能力(如建筑物或树木)最为关键。考虑 UAV 坠毁能量、遮蔽物保护系数和人员伤亡阈值等参数^[2], 人员伤亡率计算模型如下式:

$$F = \frac{1-k}{1-2k + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \left[\frac{\beta}{I} \right]^{\frac{3}{S}}} \quad (7)$$

式中: F 为地面人员伤亡率; S 为地面遮蔽物保护系数, 取 1; α 为当 S 取值为 6 时, 人员伤亡率为 50% 所需的冲击能量, 取 100 kJ; β 为当 S 趋向于 0 时人员伤亡的能量阈值, 取 34 J; I 为地面撞击事故发生时的 UAV 动能, J; k 为校正因子。

UAV 坠地瞬间速度根据式(4)和式(5)计算后, 如下式:

$$\begin{cases} v_x = \frac{2mv_0}{c_D A_x \rho_a v_0 t + 2m} \\ v_y = \sqrt{\frac{2mg}{c_D A_y \rho_a}} \tanh \left(\sqrt{\frac{c_D A_y \rho_a g}{2m}} t \right) \end{cases} \quad (8)$$

3 航迹误差对坠地伤人风险的影响

3.1 参数设置

选取经纬 M210-RTK 型 UAV 作为分析对象, 计算中所涉及 UAV 各项参数, 见表 1。

表 1 UAV 选型及相关参数

Tab.1 UAV models and its parameters

参数	型号	质量 / kg	设计尺寸 / m	侧向迎风面积 / m^2	垂向迎风面积 / m^2
取值	M210-RTK	6.14	长: 0.887 宽: 0.880 高: 0.408	0.234	0.035

3.2 坠地撞击点位置分布特征

为分析航迹误差对 UAV 坠地撞击点位置分布的影响, 计算 UAV 在水平精度为 ± 2 m 及高度精度为 ± 5 m 情况下的坠地撞击点位置分布特征。考虑 UAV 失效时飞行高度为 100 m, 水平初速度为 20

m/s。将失效瞬间 UAV 初始位置设置为坐标原点, 以 UAV 水平初速度方向为 x 轴正方向, z 轴竖直向下建立笛卡尔右手坐标系。

按照式(1)所述航迹误差分布规律随机生成 10 万个点表征 UAV 坠落初始位置, 根据式(4) 计算各初始坐标对应的坠地撞击点, 其分布情况如图 1 所示。

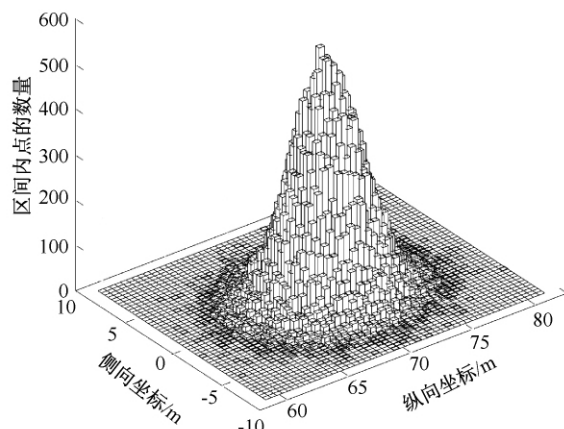


图 1 坠地撞击点分布情况

Fig.1 Distribution of impact points

以坠地撞击点纵向坐标为例, 根据统计结果, 其分布遵循均值为 70.18 m、标准差为 2.44 m 的正态分布, 坠地撞击点纵向分布特征如图 2 所示。

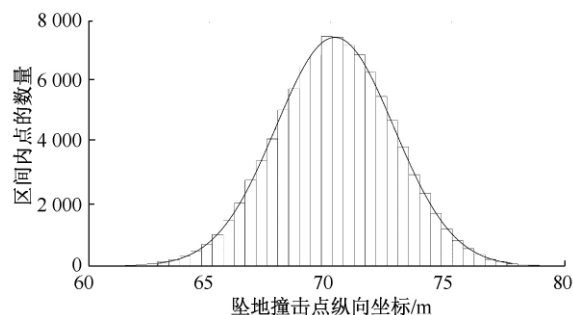


图 2 坠地撞击点纵向分布特征

Fig.2 Vertical distribution of impact points

以坠地撞击点的纵向分布和侧向分布均值为中心, 分别以纵向和侧向标准差的倍数为长短轴做椭圆, 坠地撞击点分布如图 3 所示, 其中坠地撞击点在 1 倍标准差椭圆中分布概率为 39.2%, 在 2 倍标准差椭圆中分布概率为 86.5%, 3 倍标准差椭圆中分布概率为 98.9%。

3.3 航迹误差对坠地时间的影响

由式(5)可知: UAV 坠落着地时间受其设计参数、环境参数和运行参数影响, 其中设计参数包括 UAV 质量和迎风面积, 环境参数包括阻力系数、空气密度和重力加速度, 运行参数仅包括运行高度。

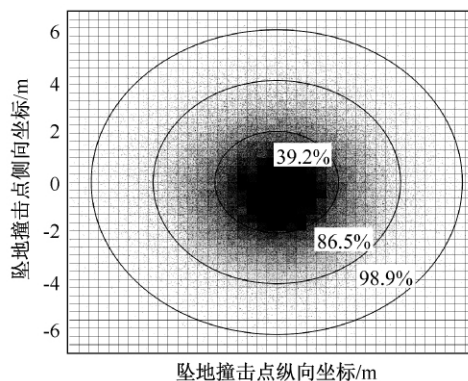


图 3 坠地撞击点分布散点

Fig.3 Scatter plot of impact points

当 UAV 选型和飞行环境确定后, 其坠落着地时间仅受坠落瞬时运行高度的作用。

高度误差对坠地时间的影响如图 4 所示。UAV 存在不同高度误差时的坠地时间, 随着飞行高度的增加, 坠地时间差异逐渐增大。定义坠地时间影响率为有无高度误差时的坠地时间差与无高度误差时坠地时间的比值, 表征高度误差对坠地时间精确性的影响程度。

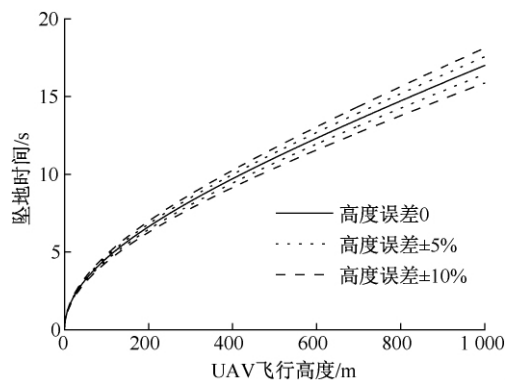


图 4 高度误差对坠地时间的影响

Fig.4 Effect of height error on falling time

高度误差对坠地时间的影响率如图 5 所示。由图 5 可知: 随着高度误差的增大和飞行高度的增加, 坠地时间影响率也逐渐变大; 当飞行高度为 1 000 m 时, 若存在 10% 的高度误差, UAV 坠地时间影响率约为 7%。

3.4 航迹误差对坠地撞击点位置的影响

由式(6)可知: UAV 坠地撞击点与失效瞬间的初速度及坠地时间有关。定义坠地位置影响率为有无误差时的坠地位置差值与无误差时坠地位置的比值, 表征误差对坠地位置的影响程度。

UAV 失效瞬间水平初速度为 20 m/s 时, 速度误差对坠地位置的影响率如图 6 所示。由图 6 可

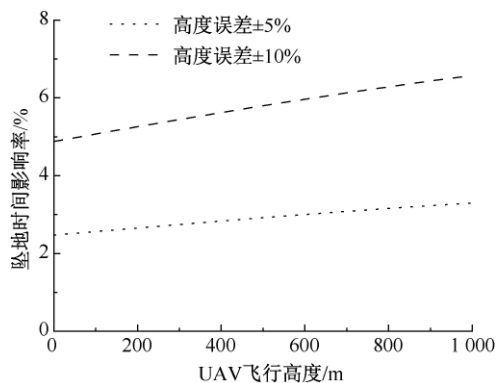


图5 高度误差对坠地时间的影响率

Fig.5 Effect of height error on impact rate of falling time
知: 随着飞行高度的增加,速度误差对坠地位置的影响率逐渐下降,当速度误差达到10%时,坠地位置影响率从10%逐渐下降至7%。

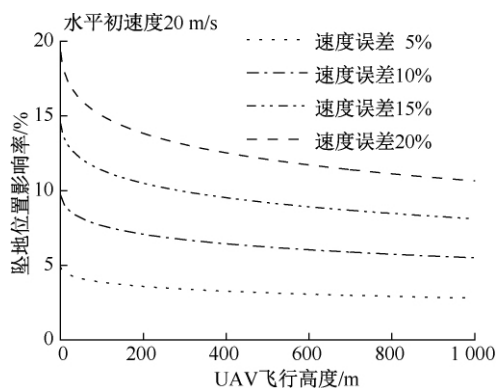


图6 速度误差对坠地位置的影响率

Fig.6 Effect of velocity error on impact rate of impact points

高度误差对坠地位置的影响率如图7所示。由图7可知: 高度误差对坠地位置影响率同速度误差的趋势一致,当高度误差为10%时,UAV飞行高度上升至1000 m后,坠地位置影响率从5%下降至4%。

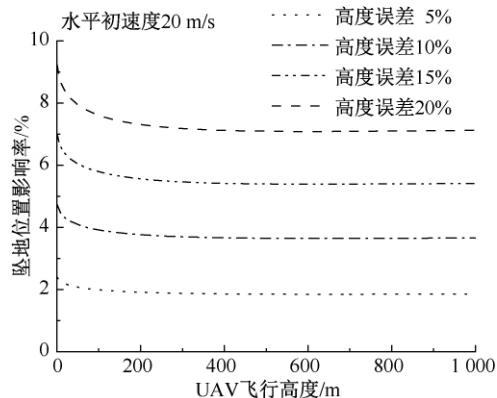


图7 高度误差对坠地位置的影响率

Fig.7 Effect of height error on impact rate of impact points

3.5 航迹误差对坠地动能的影响

由式(7)和式(8)可知: UAV坠地伤人严重程度与坠地动能有关,而坠地动能受坠地瞬间初速度和坠地时间影响。定义坠地动能影响率为有无误差时的坠地动能差值与无误差时坠地动能的比值,表征误差对坠地动能的影响程度。

UAV水平初速度为20 m/s时,速度误差对坠地动能的影响率如图8所示。由图8可知: 当飞行高度低于100 m时,速度误差对坠地动能影响率非常大,随着飞行高度的增加,速度误差对坠地动能的影响程度从30%降低到10%以内;当飞行高度大于200 m后,速度误差对坠地动能的影响率在2%以下。

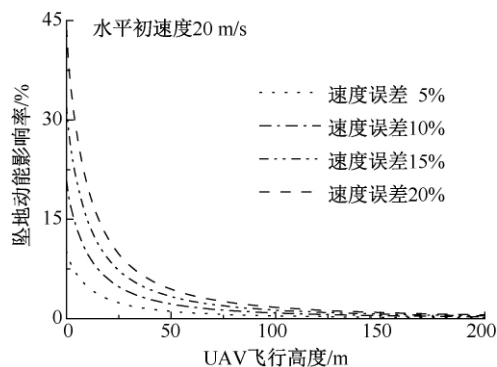


图8 速度误差对坠地动能的影响率

Fig.8 Effect of velocity error on impact rate of ground kinetic energy

UAV水平初速度为20 m/s时,高度误差对坠地动能的影响率如图9所示。由图9可知: 随着飞行高度的增加,高度误差对坠地动能的影响率呈先增后减的趋势,其拐点出现在100 m附近,当高度误差达到20%时,坠地动能影响率的极值约为17%;随着高度误差的增大,坠地动能影响率也逐渐增大,当飞行高度为100 m时,若高度误差从5%增大到

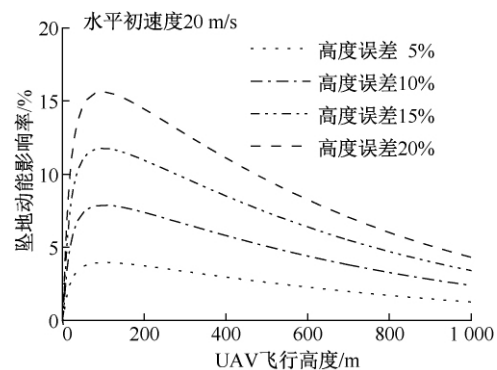


图9 高度误差对坠地动能的影响率

Fig.9 Effect of height error on impact rate of ground kinetic energy

20%, UAV 坠地动能影响率从 3% 增大到 16%。

4 结 论

1) 在 UAV 位置 and 高度误差共同作用下, 坠地撞击点分布遵循正态分布特征。

2) 随着高度误差的增大和飞行高度的增加,

UAV 坠地时间误差和坠地时间影响率也逐渐变大。

3) 随着飞行高度的增加, 速度误差和高度误差对坠地位置的影响率逐渐下降。

4) 随着飞行高度的增加, 高度误差对坠地动能的影响率呈先增后减的趋势, 其拐点出现在 100 m 附近。

参 考 文 献

- [1] 王红勇, 温瑞英. 基于复杂网络的空中交通态势风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 172-178.
WANG Hongyong, WEN Ruiying. Research on assessment of risk in air traffic situation based on complex network[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 172-178.
- [2] 韩鹏, 赵鹏飞. 基于飞行环境建模的 UAV 地面撞击风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 142-147.
HAN Peng, ZHAO Yifei. Study on ground impact risk of UAV based on flight environment[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 142-147.
- [3] 全权, 李刚, 柏艺琴, 等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 6-34.
QUAN Quan, LI Gang, BAI Yiqin, et al. Low altitude UAV traffic management: an introductory overview and proposal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 6-34.
- [4] WEIBEL R E, HANSMAN R J. Safety considerations for operation of unmanned aerial vehicles in the national airspace system[R]. MIT International Center for Air Transportation, 2005.
- [5] CLOTHIER R A. Decision support for the safe design and operation of unmanned aircraft systems[R]. Queensland University of Technology, 2012.
- [6] WU P P, CLOTHIER R A. The development of ground impact models for the analysis of the risks associated with unmanned aircraft operations over inhabited areas[C]. 11th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM11) and the Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL 2012), 2012: 1-15.
- [7] CLOTHIER R A, PALMER J L, WALKER R A, et al. Definition of an airworthiness certification framework for civil unmanned aircraft systems[J]. Safety Science, 2011, 49(6): 871-885.
- [8] FORD A T, MCENTEE K J. Assessment of the risk to ground population due to an unmanned aircraft in-flight failure[C]. 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, 2010: 1-12.
- [9] BURKE D A, HALL C, COOK S P. System-level airworthiness tool[J]. Aircraft, 2011, 48(3): 777-785.
- [10] HALL C. Application of the system level airworthiness tool to the development of small electric powered UAS[C]. 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2012: 5 600-5 608.
- [11] KING D W, BERTAPPELLE A, MOSES C. UAV failure rate criteria for equivalent level of safety[R]. International Helicopter Safety Symposium, 2005.
- [12] LUM C W, WAGGONER B. A risk-based paradigm and model for unmanned aerial systems in the national airspace[C]. Proc. AIAA Infotech Aerospace 2011 Conference, 2011: 1-31.
- [13] AVANZINI G, MARTINEZ, DAVID S. Risk assessment in mission planning of uninhabited aerial vehicles[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2019: 1-20.
- [14] ANDERS L, SCHIOLER H. Ground impact probability distribution for small unmanned aircraft in ballistic descent[C]. Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2020, 9: 1-16.
- [15] 赵鹏飞, 徐永祥, 王红勇. 基于航迹误差的空中交通冲突风险计算方法研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 16-19.
ZHAO Yifei, XU Yongxiang, WANG Hongyong. On the air traffic conflict risk calculation method based on the track deviation study[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 16-19.

作者简介: 韩鹏 (1991—), 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 主要从事空中交通管理、无人机安全风险评估方面的工作。E-mail: p_han@cauc.edu.cn。