

无人机系统安全目标水平预估方法

张泽京¹, 张曙光^{2,4}, 柳旭³, 金镭¹

- (1. 中国航空综合技术研究所 适航性技术研究与管理中心, 北京 100028;
2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学 国际学院, 北京 100191;
4. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 考虑无人机系统(UAS)与有人机运行安全特性的不同,通过事件树分析识别出对地撞击是无人机系统运行的首要风险方式。基于等效安全水平的概念,建立确定无人机系统安全目标水平的对地撞击模型,将无人机撞击动能、构型参数以及飞行环境因素综合考虑到模型中,并计算了不同无人机系统在不同运行场景下的安全目标水平以及基于我国地域人口的安全目标水平,结果表明:在考虑运行环境的情况下,对无人机系统安全目标水平的定量要求可能跨越4~5个数量级。在此基础上,结合风险矩阵的概念,给出基于对地撞击情况的无人机系统运行风险评价矩阵,为无人机系统运行风险评价提供了一种可行思路。

关 键 词: 无人机系统(UAS); 等效安全水平(ELS); 对地撞击模型; 安全目标水平(TLS); 风险评价矩阵

中图分类号: V279

文献标志码: A

Estimated method of target level of safety for unmanned aircraft system

ZHANG Zejing¹, ZHANG Shuguang^{2,4}, LIU Xu³, JIN Lei¹

- (1. Airworthiness Technologies Research and Management Center, China Aviation Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China;
2. School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
3. International School, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
4. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Considering the differences of safety features between unmanned aircraft system(UAS) and manned aircraft, the ground impact was recognized as the critical risk condition by means of event tree analysis. Based on definition of equivalent level of safety, safety evaluation model for unmanned aircraft system was established by consideration of kinetic energy, configuration and flight environment factors. Target levels of safety evaluation approaches based on different UAS classes operating in different scenarios and Chinese population density were discussed. Results indicated that quantitative requirement for UAS operating in different scenarios may range between 4 or 5 orders of magnitude. On this basis, risk

收稿日期:2016-10-08

基金项目:民航安全能力建设项目(AADSA0010)

作者简介:张泽京(1992—),男,助理工程师,硕士,研究方向为系统安全性和适航。

引用格式:张泽京,张曙光,柳旭,等.无人机系统安全目标水平预估方法[J].航空动力学报,2018,33(4):1017-1024. ZHANG Zejing, ZHANG Shuguang, LIU Xu, et al. Estimated method of target level of safety for unmanned aircraft system[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 1017-1024.

evaluation matrix of UAS operation based on ground impact condition was proposed, providing an effective approach to risk evaluation matrix for operations of UAS.

Key words: unmanned aircraft system (UAS); equivalent level of safety (ELS); ground impact model; target level of safety (TLS); risk evaluation matrix

随着航空技术的发展,无人机系统以其低成本,灵活性强,操作简便的优点得到了极大的发展。但随着无人机飞行频次的大量增长,呈现出较高的事故率特征,对公共安全造成了较大的威胁,对无人机系统的适航管理提出了迫切需求。

无人机系统事故率要远高于传统有人机,但考虑到设计特征、运行方式等因素,无人机造成的风险后果可能低于有人机,直接套用有人机的适航规章要求将造成管理不公平^[1]。欧洲航空安全局(EASA)针对无人机安全性提出了等效安全水平(equivalent level of safety, ELS, 量符号记为 L_{es})的概念^[2],要求无人机系统不能对地面人员财产造成与对应的有人机相比更高的风险^[3],为无人机系统以可接受的安全水平进入空域运行提供了指导原则。

在 ELS 基础上,需要建立无人机系统研制的安全目标水平预估方法。麻省理工学院(MIT)的 Weibel 等提出了对地撞击和空中相撞两种风险情况,建立了无人机系统安全目标水平确定思路 and 模型^[4], Dalamagkidis 等针对其对地撞击模型进行了修正^[5], Clothier 等基于对地撞击情况提出一种风险评价矩阵的思路,但没有给出具体的定量描述方法^[6]。

上述研究建立了基于无人机系统对地撞击描述的初步思路,本文在此基础上,进一步探讨无人机系统安全的定量安全目标水平预估问题。

1 无人机系统安全水平分析方法

基于等效安全水平的概念,无人机系统进入空域运行的要求是其安全水平与有人机相当。因而,在考虑无人机运行的安全特征基础上,考虑借鉴相对成熟的有人机安全标准,建立系统安全水平的分析方法。

1.1 无人机系统安全特征

对比有人机,无人机系统的有明显不同。在构成上无人机系统包含数据链、地面站设备;从需求上通常采用较低成本设计,系统、零部件的可靠性水平较低;从运行风险上,有人机更关注机上成员生命财产安全,而无人机系统的风险主要是针

对地面人员生命和财产的安全。

系统安全性作为通用概念,已在有人机中得到广泛应用^[7-8]。无人机系统失效的严重程度以及出现概率要求(即安全目标水平)需要重新定义,其严重程度侧重于考虑地面影响,与有人机对比如表 1 所示^[9-10]。

表 1 失效状态对人员影响严重程度对比
Table 1 Comparison of failure condition severities to crews

严重程度	载人航空器失效影响情况 ^[9]	无人机系统失效影响情况 ^[10]
无影响	不产生增加机组工作负担的安全性影响	不产生增加机组工作负担的安全性影响
轻微	机上乘员身体不适	可能轻微增加机组工作负荷
重大	机上乘员身体难受,可能受伤	可能对机组或地面人员造成伤害
危害性	少量机上乘员受到严重或致命伤害	对机组或地面人员造成严重伤害
灾难性	大量人员伤亡	对机组或地面人员造成致命伤害

无人机系统失效可能造成灾难性后果,前提是无人机飞行失控或不受控坠毁,后果是对机组或地面人员造成致命伤害。无人机系统运行将造成的风险主要来源于撞击事故,可分为对地撞击和空中相撞,除去与载人航空器撞击可能造成灾难性事故危害机上人员生命安全外,其余的撞击潜在后果针对的均是地面人员和财产。对无人机飞行失控这一事件可能造成的风险进行事件树定性分析如图 1 所示。

根据系统安全的反比思路,越严重后果的危险事件,允许的出现概率越低^[8],亦即在有人机系统安全评估中,将安全目标水平(target level of safety, TLS)用允许出现的概率进行描述,但如何确定无人机系统的 TLS,需要结合 ELS 重新定义。

在图 1 的多种无人机撞击风险构成中,对地撞击是飞行失控的最终结果,发生空中相撞后残

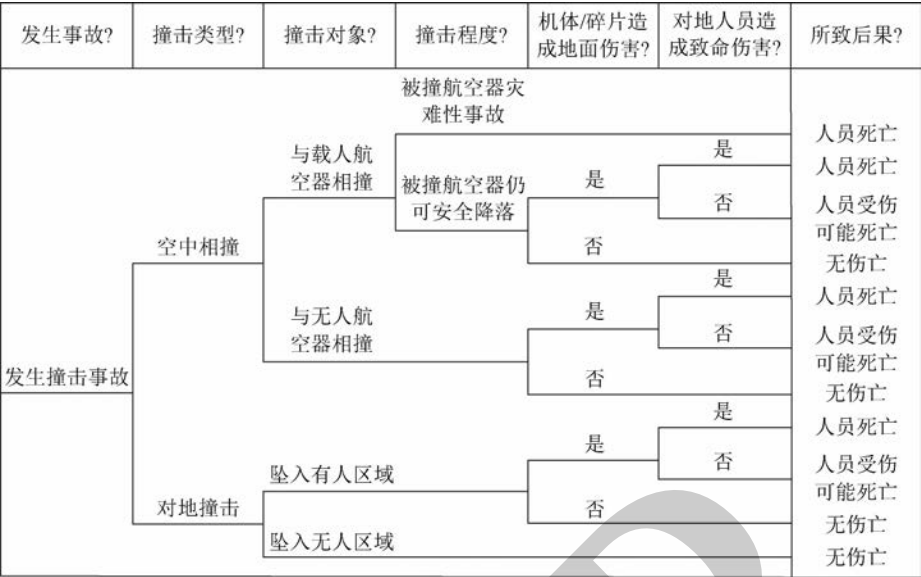


图 1 无人机系统风险事件树分析

Fig. 1 Event tree analysis of UAS risks

骸与碎片最终也会坠地,因此可以认为对地撞击是主要的风险表现。根据 1983-2006 年美国国家运输安全委员会(NTSB)公布的事故数据^[11],有人机空中相撞事故率为 $3.74 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ (这里的 h 表示飞行小时),所有类型事故率为 $8.05 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$,可见在空中相撞事件在所有事故率中占比不到百分之一。因此本文进一步以无人机对地撞击情况作为研究对象,探讨将等效安全水平转化为无人机系统安全目标水平 TLS 的定量描述方法。

1.2 无人机对地撞击模型及其改进

针对无人机对地撞击情况,Weibel 等率先提出了地面撞击模型^[4]

$$L_{es} = \frac{1}{F_{mtb}} A_{exp} \rho p_{pen} (1 - p_{mit}) \tag{1}$$

该模型通过撞击区域的影响面积(暴露面积) A_{exp} 、人口密度 ρ 和撞击动能影响的穿透率、缓解率等参数,建立了等效安全水平与系统可靠性指标 MTBF(量符号记为 F_{mtb})的联系方法,亦即用系统可靠性指标来表征安全目标水平。模型(式(1))中,拟用 A_{exp} 考虑无人机系统的翼展等影响,用 p_{pen} 考虑撞击动能等参数,用 p_{mit} 考虑建筑物遮蔽等影响。该模型提供了开创性思路,但并未给出具体的定量关系。

Dalamagkidis 等建立了无人机撞击动能、环境遮蔽与撞击致死概率 $P(f)$ 的定量关系^[5]

$$P(f) = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{E_{imp}} \right)^{\frac{1}{4p_s}}}} \tag{2}$$

其中 E_{imp} 为撞击动能,遮蔽参数 p_s 取值范围 $(0,1]$ 刻画了人群的暴露程度,考虑建筑,树木等对撞击的减缓作用。遮蔽参数越大,在同样撞击动能下有更低的死亡率。 α 参数定义为 $p_s = 0.5$ 时死亡率达 50% 所需的撞击能量, β 参数定义为当 p_s 降到 0 时导致死亡所需的撞击能量门限值。遮蔽参数越大,在同样撞击动能下有更低的死亡率。

本文以 ELS 为着眼点,力图建立 ELS 与 TLS 的关系。为此,吸收模型(式(1)、式(2))的思路,定义 f_{els} 为无人机系统事故致死率(表征可接受的等效安全水平 ELS), $R_{m,tl}$ 为允许的无人机系统发生坠毁的灾难性失效率目标(表征安全目标水平 TLS),建立无人机系统对地撞击安全目标预估公式

$$\begin{cases} R_{m,tl} = \frac{f_{els}}{A_{exp} \rho P(f)} \\ P(f) = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\beta}{E_{imp}} \right)^{\frac{1}{4p_s}}}} \end{cases} \tag{3}$$

式中综合考虑了无人机撞击特征参数和飞行区域环境参数的影响。

1.3 无人机对地撞击模型的参数取值

Clothier 等针对无人机运行,总结了可接受的事事故致死率率水平为 $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ ^[12],美国国家安全运输委员会(NTSB)给出了 1985 年~2004 年的 20 年间有人机造成的地面人员死亡率为 $6.4 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ ^[11]。基于等效安全水平的概

念,本文选取 $f_{\text{els}}=10^{-7} \text{ h}^{-1}$ 。

对于衡量无人机坠地影响区域大小的暴露面积 A_{exp} ,可以考虑垂直坠地和滑翔坠地两种撞击方式。本文采用较大的影响面积以进行保守估计,定义无人机正面和横截面构成的最大斜截面作为暴露面积

$$A_{\text{exp}}=W_{\text{uav}}\sqrt{L_{\text{uav}}^2+H_{\text{uav}}^2} \tag{4}$$

其中 W_{uav} 、 L_{uav} 、 H_{uav} 分别为无人机机体的翼展、机长和机高。

无人机撞击致死率参数取决于撞击动能。选取无人机最大起飞质量 m_{mtow} 为参考质量,基于无人机最大平飞速度 V_{max} ,得到撞击动能

$$E_{\text{imp}}=\frac{1}{2}m_{\text{mtow}}(1.4V_{\text{max}})^2 \tag{5}$$

其中余度因子 40% 是考虑势能等影响^[3]。

撞击动能对死亡率的影响,根据美国靶场司令委员会(RCC)的研究结果(1999 年发布的 RCC Document 323-99 和 2007 年发布的 RCC Document 321-07),用 0.0454 kg(11 lb)物体撞击人体躯干,致死率为 10% 和 90% 对应的撞击动能是 50 J 和 200 J^[13](图 2 中 RCC323 所示);而如果用 454 kg(1000 lb)的物体撞击,致死率为 10% 和 90% 对应的撞击动能则分别为 40 kJ 和 115 kJ^[14](图 2 中 RCC321 所示)。两种情况的曲线如图 2 中虚线所示。进一步,引入 Weibel 等给出的 4 型无人机撞击致死率结果^[4](图 2 中的 4 个点)。依据式(3),取 $\alpha=10^6 \text{ J}$ 、 $\beta=100 \text{ J}$,得到不同遮蔽参数 p_s 时撞击致死率随撞击动能的曲线(图 2 中的实线)。

结果表明,当遮蔽参数 p_s 为 0.5 时,与 Weibel 等给出的离散点较为一致。另外,当遮蔽参数选取较小值时,结果与文献[13-14]中的曲线趋

势接近,表明了较小遮蔽作用时直接撞击情况与 RCC 结果较符合。

综上所述,根据无人机系统特性和运行条件可对相应的模型参数进行计算,从而得到无人机系统安全目标水平的预估方法。

2 安全目标水平预估方法应用

在建立了以事故致死率为等效安全水平衡量准则、将可接受的事故致死率目标转化为无人机系统灾难性失效率定量指标方法的基础上,本节将针对典型无人机型号,结合具体的撞击事故场景和我国当地运行条件进行具体分析。

2.1 基于运行场景的无人机安全目标水平

基于对地面人员和财产影响的考虑,无人机系统的运行风险相比于载人航空器将更依赖于运行条件。本节进行运行场景划分,选取 8 种典型无人机系统对撞击动能、致死率进行计算,定义 3 种运行场景,通过撞击公式导出无人机系统发生失控坠毁的灾难性失效率目标值,探讨在不同运行场景下安全目标水平的计算方法和结果。

1) 运行场景 1:低风险运行

该场景针对海洋监测、地质探测、空中喷洒等特定任务用途的运行情况。在此类场景中,无人机运行在较为空旷的无人区或人口极稀区域,选取人口密度 $\rho=1 \text{ km}^{-2}$;考虑区域内缺少遮蔽,选取遮蔽参数 $p_s=0.2$;

2) 运行场景 2:一般风险运行

该场景针对快递货运、科学研究等任务用途的运行情况。在此类场景中,无人机运行在一般城镇地区的空域内,选取人口密度 $\rho=100 \text{ km}^{-2}$;考虑区域内具有建筑物和树木对无人机可能的失控飞行进行缓冲的遮蔽作用,选取遮蔽参数 $p_s=0.5$ 。

3) 运行场景 3:高风险运行

该场景针对大型赛事活动航拍直播等特殊任务用途的运行情况。在此类场景中,无人机运行在人口密集区域,选取人口密度 $\rho=10\,000 \text{ km}^{-2}$;考虑区域内具有建筑物等具有遮蔽作用,但由于区域人口密集导致的遮蔽作用弱化,设定遮蔽参数 $p_s=0.3$ 。

针对以上场景的参数设置进行计算,选取的无人机系统参数和计算结果如表 2 所示。

在不同的运行场景中,无人机系统运行应满足的最低安全水平区间结果如图 3 所示。

在考虑运行环境的情况下,对无人机系统安

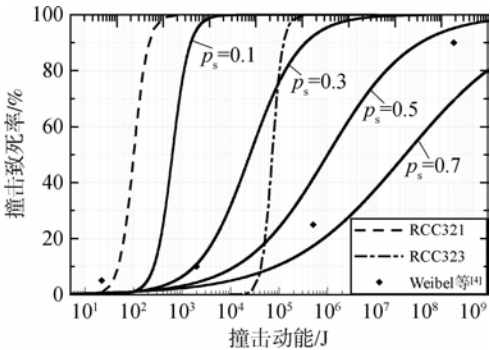


图 2 致死率与无人机(UVA)撞击动能关系曲线
Fig. 2 Relationship curve of fatality rate and UVA impact kinetic energy

表 2 典型无人机基本参数和不同风险场景运行灾难性失效率目标计算结果

Table 2 Basic parameters of typical UAV and results of operating mishap failure rate target of different risk scenarios

编号	主要用途	$m_{\text{mtow}}/\text{kg}$	$A_{\text{exp}}/\text{m}^2$	E_{imp}/kJ	$R_{\text{m, tls}}/10^{-8} \text{ h}^{-1}$		
					低风险场景	一般风险场景	高风险场景
1	娱乐航拍	3.4	0.2	1.61	205 000 000	13 000 000	54 300
2	科研试验	12	3.01	17.79	3 830 000	282 000	775
3	遥感测绘	14	4.68	20.75	2 410 000	170 000	464
4	遥感测绘	28	6.9	47.64	1 510 000	80 900	230
5	农林植保	120	11.52	47.04	908 000	48 700	138
6	侦察巡检	757	47.93	1 483.78	209 000	3 800	21.6
7	高空探测	1 020	129.94	3 209.83	77 000	1 200	7.83
8	高空探测	11 610	474.36	370 919	21 100	222	2.11

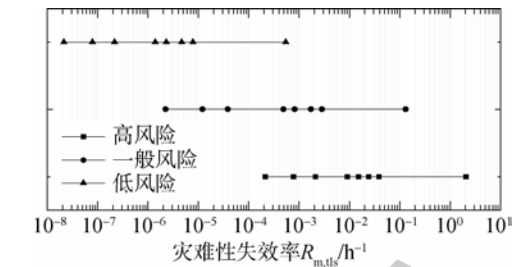


图 3 基于运行场景的无人机系统运行安全目标水平

Fig. 3 Target level of safety for UAS based on different operation scenarios

全目标水平的约束可能跨越 4~5 个数量级。基于运行场景的考虑,针对特定用途的无人机,合理约束其安全目标水平可避免不必要的研制成本浪费,同时在当前政策环境下,可为无人机运行提供一种特许飞行的批准方式。

以捕食者无人机 MQ-1 系统为例,在不同场景中,TLS 相差 4 个数量级(图 4)。对比美国国防部公开的捕食者运行事故率数据^[15],在 10^{-7} h^{-1} 事故致死率目标限制下,捕食者无人机系统在当前技术水平下仅达到低风险运行的期望安全水平。目前捕食者无人机及其改型已获得美国联邦航空局(FAA)试验类适航证,证明 FAA 仅认可其在低风险环境下运行,与本文预期结果一致。

2.2 基于我国地域人口的安全目标水平

无人机系统的风险评估更加依赖运行环境,最重要的参数之一就是人口密度,对地面人员的保护是无人机系统安全管理的最基本原则。本节以我国人口密度情况为例,选取典型无人机作为分析对象,探讨安全目标水平确定方法的应用。

利用前文所述的对地撞击安全目标水平公

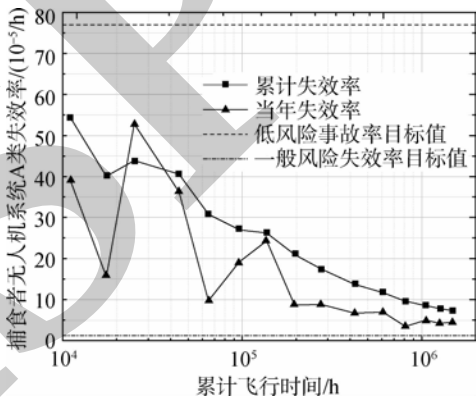


图 4 MQ-1 实际失效率与目标值对比

Fig. 4 MQ-1 actual failure rate compared with the targets

式,选取一般风险场景的遮蔽参数 $p_s=0.5$,分别对暴露面积 A_{exp} 、撞击能量 E_{imp} 和撞击死亡率 $P(f)$ 评估参数进行计算,结果如表 3 所示,参考国家统计局给出的我国人口密度数据^[16],可以绘制出基于我国地域人口密度的无人机系统事故率目标的分布情况。

表 3 选取的典型无人机撞击特征参数

Table 3 Impact feature parameters of selected typical UAV

序号	布局形式	$A_{\text{exp}}/\text{m}^2$	E_{imp}/kJ	$P(f)$
1	四旋翼	0.2	1.61	0.0386
2	翼身融合	3.01	17.79	0.1179
3	固定翼	7.8	52.37	0.1862
4	直升机	11.52	47.04	0.1782
5	固定翼	129.94	3 209.83	0.6418
6	固定翼	474.36	370 919.79	0.9506

图 5 给出以上 6 种典型无人机灾难性失效率目标 $R_{m,tlis}$ 分布图,表征了通过安全目标水平确定方法导出的可接受的最低安全水平。以无人机失控坠毁事故率 $R_{m,tlis}$ 作为 TLS 的衡量指标,颜色越深代表预期事故率越低,要求无人机具备更高的安全性,保证无人机系统的实际灾难性失效率低于预期值。

从分析结果可以得到以下要点:

1) 无人机大小对 TLS 影响显著。对于同样的空域运行条件,以 1 号代表的轻小型四旋翼无人机灾难性失效率不超过 0.1 h^{-1} 就可以满足安

全飞行的概率要求,但对于 6 号代表的高空长航时大型无人机而言,可能要求灾难性失效率须在 10^{-6} h^{-1} 以下。考虑无人机系统型谱广泛的特点,不同型号的无人机系统失效率目标约束可能跨越 4~5 个数量级,为达到相应的安全目标水平,在无人机研制和运行中应采取的安全性理念和管理方式也应有所区别;

2) 人口密度对 TLS 影响显著。依赖于无人机飞行区域人口密度变化,对同一型号无人机系统的事故率目标要求也可能跨越 2~3 个数量级,尤其是在人口稠密的主要城市上空,对无人机系

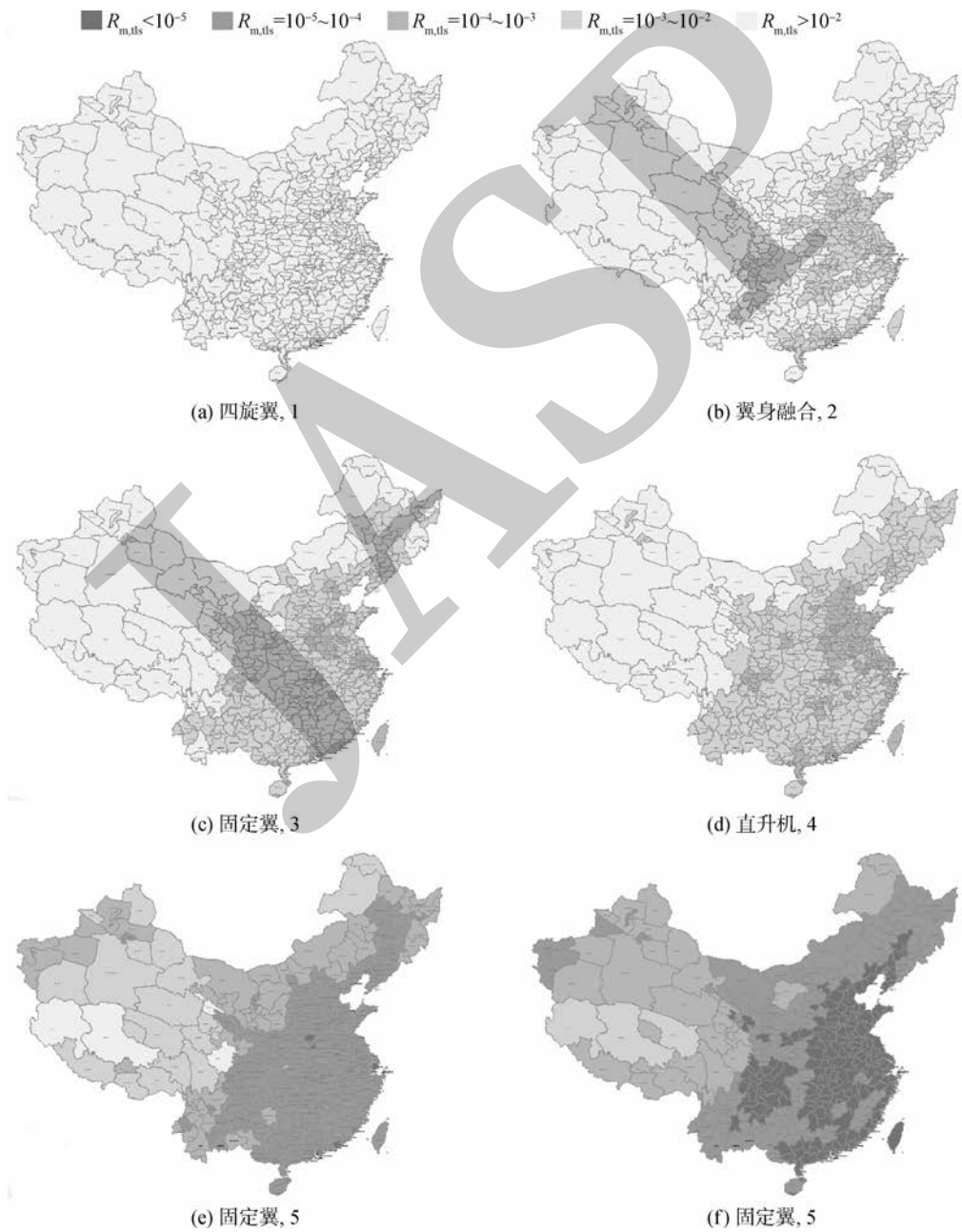


图 5 基于我国人口密度的 $R_{m,tlis}$ 分布(单位: h^{-1})

Fig. 5 Distribution of $R_{m,tlis}$ based on Chinese population density (unit: h^{-1})

统安全性要求显著提高,这符合公众对无人飞行器安全性的基本认知,尽量避免无人机系统在人口稠密区域上空运行可以作为一种保障公众安全的飞行和监管策略。

3) 结合撞击动能和运行环境能较好地刻画无人机运行风险。比较 3 号和 4 号的分析结果,虽然后者在最大起飞质量上是前者的 3 倍,但基于特殊用途的植保无人机的最大飞行速度较低,使得两者呈现的撞击动能特性相近,故导出的事故率目标要求相近,进而考虑无人机系统的运行环境特征,能得到较好的运行风险描述方法。

2.3 基于安全水平的风险评价矩阵

通过上述分析,在考虑无人机系统安全目标水平时,运行环境将作为重要的考量指标。结合文献[17]提出的利用风险矩阵建立无人机系统适航审定框架的思路,本文考虑通过无人机系统类型和无人机运行环境两个维度,组合构成不同的无人机系统运行风险情况,为其赋予相应的风险等级。

基于文中第 2.1 节、第 2.2 节的数值结果,无人机撞击动能作为最大起飞质量和最大飞行速度的组合参数,能够较好地刻画无人机特征以及坠地时的影响程度,可以作为风险矩阵中列的指标;飞行区域人口密度作为刻画运行环境的参数,能够在广义上描述无人机坠地可能造成人员伤亡的可能性大小,可以作为风险矩阵中行的指标;对于风险方案评价,借鉴 MIL-STD-882D 中规定的风险分级方案,较低的、中等的、严重的和较高的^[18]。

根据前文的研究,在考虑无人机系统撞击情况时,撞击动能将直接由撞击致死率反映,以一般撞击情况($p_s=0.5$)为例,选择致死率分别为 10%、20%、40%、60% 为分类节点,导出对应的撞击动能,从而将无人机本体分为 5 个类别,选取目前典型在役或已经批产的无人机系统性能参数,分布如图 6 所示。

同样,按照无人机系统运行的典型场景,选择区域人口密度分别为 1 km^{-2} (单位为每平方千米,下同)、100、1 000、10 000 km^{-2} 为分类节点,将无人机运行区域分为 5 个类别。由此可以得到基于无人机系统运行安全水平的风险评价矩阵,如图 7 所示。

在该风险评价矩阵中,飞行区域人口密度的递增,可以对应运行场景的变化,如无人区、乡村城镇、一般城市、大型城市以及人口聚集区或大型活动场地;撞击动能的递增可以对应无人机型号

的变化,如轻小型旋翼无人机、最大起飞质量在几十千克的近程无人机、大型中空高空长航时无人机系统;综合考虑两者后,分别定义:1 为较低风险,2 为中等风险,3 为严重风险,4 为较高风险,从而提供一种对无人机系统进行风险评价的方法,并可以结合到具体的民用无人机监管方式中,对较低风险无人机运行采取开放式的管理,对中等风险的无人机运行情况采取特许经营式的管理,对严重和较高风险的无人机运行采取类似于有人机 23、25 部规章的审定类监管。

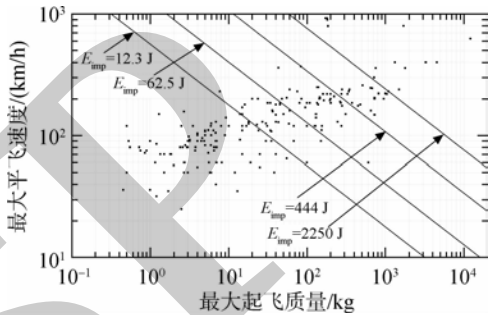


图 6 典型无人机按撞击动能分类情况
Fig. 6 Typical UAV classification based on kinetic energy

		撞击功能/kJ				
		12.3	62.5	444	2250	
飞行区域人口密度/ km ⁻²	1	1	1	1	2	2
	100	1	1	2	2	3
	1000	1	2	2	3	4
	10000	2	2	3	4	4
	100000	2	3	3	4	4

图 7 基于安全水平的风险评价矩阵
Fig. 7 Risk evaluation matrix based on safety level

3 结 论

本文主要对无人机系统安全目标水平预估方法进行了研究,得出以下结论:

1) 无人机系统运行安全的考虑,来源于与有人机具有等效安全水平的原则。针对无人机运行中最主要的对地撞击风险,本文发展了安全目标水平预估模型,模型参数综合考量了无人机构型、性能与运行环境,将等效安全水平 ELS 的概念转

化为以无人机系统灾难性失效率表征的安全目标水平 TLS,从而作为系统安全性评估的输入指导无人机系统设计。

2) 考量不同的运行风险场景,进一步结合我国地域人口的分布情况,对于不同类型的无人机系统,应达到的安全目标水平相差跨度大;对于同型号无人机系统在不同区域运行的安全水平要求可能在 3~4 个数量级间变化,在技术水平一定的情况下,可以考虑对无人机限定飞行区域的特许运行方式以满足无人机运行的安全需求。

3) 基于分析示例,选取无人机撞击动能和运行区域人口密度作为无人机系统运行安全考量的两个基本维度,建立风险评价矩阵,将无人机系统运行风险分为 4 类,为无人机的分级管理提供了一种可行的划分思路。

参考文献:

[1] CLOTHIER R A, PALMER J L, WALKER R A. Definition of an airworthiness certification framework for civil unmanned aircraft systems[J]. Safety Science, 2011, 49 (2): 871-885.

[2] European Aviation Safety Agency. Policy for unmanned aerial vehicle (UAV) certification[R]. European Aviation Safety Agency, A-NPA No. 16-2005, 2005.

[3] European Aviation Safety Agency. Policy statement airworthiness certification of unmanned aircraft systems[R]. European Aviation Safety Agency, E-Y01301, 2009.

[4] WEIBEL R E. Safety considerations for operation of different classes of UAVs in the NAS[R]. Chicago, US: AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, 2004.

[5] DALAMAGKIDIS K, VALAVANIS K P, PIEGL L A. Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts [R]. Ajaccio, France: the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2008.

[6] CLOTHIER R, WALKER R. Determination and evaluation of UAV safety objectives[C] // Proceedings of the 21st International Unmanned Air Vehicle Systems (UAVS) Conference, Bristol, United Kingdom; Curran Associ-

ates, 2006: 1-16.

[7] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards; transport category airplanes; CFR 14[S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2007: 129-130.

[8] Federal Aviation Administrator. System safety handbook: practice and guidelines for conducting system safety engineering and management[M]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2000.

[9] DE FLORIO F. 适航性: 航空器合格审定引论[M]. 张曙光, 柯鹏, 潘强, 等, 译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

[10] NATO Standardization Agency. Unmanned aerial vehicles systems airworthiness requirements (USAR): STANAG 4671[S]. Brussels, Belgium; North Atlantic Treaty Organization Standardization Agency, 2009: 198-202.

[11] 李春锦, 文泾. 无人机系统的运行管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

[12] CLOTHIER R, WALKER R, FULTON N. A casualty risk analysis for unmanned aerial system (UAS) operations over inhabited areas[R]. Queensland, Australia; the 2nd Australasian Unmanned Air Vehicles Conference, 2007.

[13] Range Safety Group. Range safety criteria for unmanned air vehicles-rationale and methodology supplement[R]. Range Commanders Council, Document 323-99, 1999.

[14] Range Safety Group. Common risk criteria standards for national test ranges[R]. Range Commanders Council, Document 321-07, 2007.

[15] United States Air Force Safety Center. MQ-1 predator aircraft accident statistics and accident investigation report [EB/OL]. [2013-08-21]. <http://afsc.af.mil>.

[16] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

[17] CLOTHIER R, PALMER J, WALKER R. Definition of airworthiness categories for civil unmanned aircraft systems (UAS)[C] // Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, France; International Council of the Aeronautical Sciences, 2010: 1-12.

[18] United States of America Department of Defense. Standard practice for system safety: MIL-STD-882D[S]. Washington DC: Department of Defense, 2000: 18-20.

(编辑: 王碧珺)