

文章编号:1000-8055(2012)01-0233-08

无人机系统适航与安全性分析方法

丁水汀, 鲍梦瑶, 杜发荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 针对无人机系统安全性需求, 首先根据载人航空器适航审定规范及安全性评估依据, 表明由于无人机系统的特殊性造成直接应用现有安全性评估流程和评估方法具有局限性. 在此基础上提出无人机系统适航安全性评估的几点改进: ①考虑无人机系统包括无人机和综合保障设备, 扩大安全性评估边界进行无人机系统级的功能危险分析; ②考虑无人机系统“人机分离”特点, 需要对无人机系统失效状态的严重程度进行重新分级和定义; ③考虑无人机系统本身受起飞质量的影响很大, 强调必须根据无人机系统分类对地面撞击和空中碰撞两个关键事件进行安全性分析. 结果表明: 上述改进从无人机系统本身特点出发, 通过给定的目标安全水平进一步确保安全性.

关 键 词: 无人机系统; 无人机; 适航; 法规; 安全性

中图分类号: V279

文献标志码: A

Safety research on unmanned aircraft system for airworthiness

DING Shui-ting, BAO Meng-yao, DU Fa-rong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at safety requirement for unmanned aircraft system (UAS), it was initially demonstrated that current safety assessment process and methodology based on regulation and reference for manned aircraft were limited for UAS because of its unique features. In views of this principle, some improvements for UAS safety assessment were proposed: (1) take consideration of UAS including the unmanned aerial vehicle and assured equipments, and enlarge the scope of safety assessment during functional hazard analysis at system level; (2) take consideration of the feature that pilot and unmanned aircraft are physically separated, and reclassify and redefine the serious level of UAS failures. (3) consider that the quality of take-off has a huge impact on system, and the safety analysis must be conducted for two key events- ‘air collision’ and ‘ground impact’. The result indicates that the above improvements are in accordance with features of UAV and ensures safety through establishing targeted safety level.

Key words: unmanned aircraft system; unmanned aerial vehicle; airworthiness; regulation; safety

收稿日期: 2011-06-25; 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 航空发动机复杂系统安全性教育部长江学者创新团队 (IRT0905)

作者简介: 鲍梦瑶 (1985—), 女, 北京人, 博士生, 研究方向为航空器适航技术及系统安全性分析.

E-mail: bomeya@gmail.com

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)于 1944 年首次使用,近 20 年在军事上广泛应用,并逐渐成为国家空域系统(national airspace system, NAS)中的一种新型飞行器。近期的技术提高和军事运用已证明了无人机的可操作性,带来了更多的军用、民用需求^[1]。

随着无人机应用范围的扩展,运行环境的动态性、飞行任务的复杂性,使得无人机航空器系统(unmanned aircraft system, UAS)(以下简称无人机系统)事故频发,美国国防部分分析报告显示无人机系统的失效概率是 F16 的 50 倍,是一般通用航空器的 100 倍,安全性成为设计及验证的难点^[2-3]。美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)Sabatini N A 指出基于安全的设计原则是未来无人机系统规章的基础^[4]。近几年,美国联邦航空局已经认识到现行的美国联邦航空法规在制定时并没有预见性地把无人机系统要求纳入其中,在无人机上直接使用具有一定的局限性,法规的缺失已成为阻碍无人机实现全面应用的障碍,需要通过相应合理法规、流程和标准来确保无人机的安全性^[5-6]。

因此,本文首先通过回顾载人航空器安全性评估规章、符合性指导文件及无人机系统适航审定规范,分析无人机系统的特殊性造成直接应用现有安全性评估流程和方法的局限和差异性,在此基础上对无人机系统适航安全性评估提出一些改进意见并给出改进措施。

1 适航基本概念

无人机系统是“特种航空器”的一种,包括民用无人机系统和军用无人机系统,分属于民用航空器和军用航空器,其适航定义上有所区别。

民用航空器的适航是指航空器能在预期环境中安全飞行(包括起飞和着陆)的固有特性,其适航标准是最低安全标准。因此民用航空器适航审定的根本目的是对航空器的安全性进行评判和审查。

军用航空器的适航是以保证实现军事用途下的安全运行为目标,最终目标是战斗力的最大化。因此军用航空器审定的主要目的是验证航空器在规定的军事使用限制内具备满足运行安全水平。

可见无论是民用无人机系统还是军用无人机系统,其安全性分析都是适航研究的重点。

2 航空器适航及安全性法规依据

2.1 载人航空器适航标准

为保证航空器合法化,必须进行适航审定。美国联邦航空局规定取得适航认证必须满足两个条件:第一,必须符合其型号合格认证;第二,必须确保航空器的安全运行。

2.1.1 航空器适航型号认证标准

美国联邦条例法典第 14 章(code of federal regulations, CFR14)第 21-39 部是相关适航型号认证标准。其中主要按照:

FAR21 民用航空器产品和零部件合格审定规定

FAR23 正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定

FAR25 运输类飞机适航标准

FAR27 正常类旋翼航空器适航规定

FAR29 运输类旋翼航空器适航规定

2.1.2 航空器安全性评估方法

申请人为了表明所设计的航空器安全性满足适航要求,通常采用 1309^[8-9]作为 FAR25^[10]运输类飞机和 FAR23 正常类、实用类、特技类和通勤类飞机进行安全性适航审定的基本依据。FAR25、1309 款明确了系统和子系统的设计在不同危害程度下失效状态所允许的概率要求,并要求用分析的方法来验证每个失效状态的概率和事件严重性之间存在合理且可接受的反比关系。因此,申请人必须对某些关键系统和某些功能是否符合具体的系统要求进行安全性评估,保证一个可接受的整机安全水平^[10]。

为保证民用航空器的设计满足 FAR25、1309 款要求,国外逐步形成较为完善的理论体系和适航符合性验证常用的安全性分析方法。1996 年颁布了两部航空建议活动(aerospace recommended practice, ARP):APR 4754《高度综合或复杂飞机系统的审定考虑》^[11]和 ARP 4761《民用机载系统和设备执行安全评估过程的指南和方法》^[12]。其中 ARP 4761 要求安全评估过程首先对飞机级和系统级进行功能危险分析(functional hazard assessments, FHA),由飞机级要求形成系统级的安全要求;其次采用故障树分析(fault tree analysis, FTA)和故障模式及影响分析(failure modes and effects analyses, FMEA),进行系统级初步系统安全性分析(preliminary system safety analy-

sis,PSSA);最后采用 FTA,FMEA 和共因分析 (common cause analysis,CCA)对开发结果进行

系统安全性分析(system safety analysis,SSA). 图 1 为 ARP 4761 中系统安全性评估流程图.

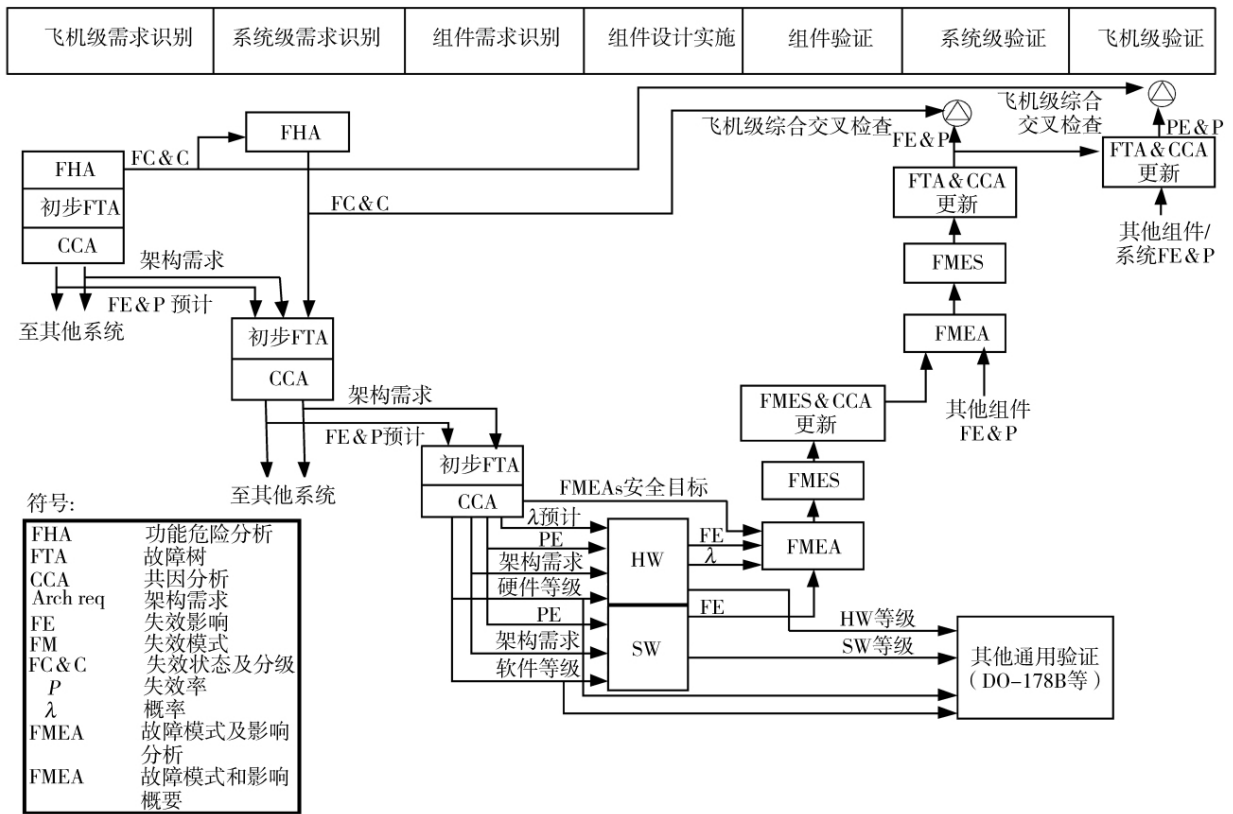


图 1 ARP 4761 系统安全性评估流程图

Fig. 1 Safety Assessment Process from ARP 4761

2.2 无人机系统适航的特殊性

与载人航空器相比,无人机系统最突出的特性有以下两点^[24-25]:

其一,无人机系统采用“人机分离”遥控方式,英国国防部标准 Def Stan00-970 部第九部《无人机系统设计与适航性要求》,在借鉴 ARP4761 的同时,将无人机系统定义为无人机和综合保障设备两大部分.综合保障设备定义为无人机及其机载系统正常工作所需的所有系统要素集合,明确综合保障设施包括指挥控制站、发射回收以及撤收系统和其他保障设备.通过这种结构确定了无人机作为“系统体系(system of systems)”的概念,即一方面,“无人机”仅是“无人机系统”的一部分;另一方面,“无人机”和“综合保障设备”作为不可分割的两部分共同组成了“无人机系统”,实现系统特性.因此,在进行无人机系统适航安全性评估时,不能孤立的分析无人机,需要进行整个无人机系统的安全性评估.值得注意的是一旦无人机失控,操作人员毫无办法.因此无人机的控制环节尤为重要,单一失效会导致无人机系统的失效.

其二,无人机系统失效影响不仅需要考虑空中载人航空器的机组人员和乘客的影响,而且需要考虑对地面人员的影响,这对整个系统的安全性提出了更高的要求.在进行无人机系统适航安全性评估时,需要对其严重程度的影响等级进行重新划分.

2.3 无人机系统适航规范

通过上述分析,可以看出载人航空器适航技术的发展和无人机系统本身的特殊性催生了无人机系统适航技术的发展.

美国军方于上世纪 80 年代首先提出军机适航性概念,经过不断完善,美国国防部(United States Department of Defense, DoD) 2002 年颁布了《军用航空器适航审查准则》(MIL-HDBK-516),2004 年和 2005 年先后颁布 A 版和 B 版,2008 年颁布 MIL-HDBK-516B(修订版 1),规定美国固定翼/旋翼、有人驾驶/无人机各类型军用航空器适航性的通用要求,形成了军用无人机系统适航审定规范.该规范以美国军用标准规范的技术要求为基础,参考了美国联邦航空条例要求,

将军机性能设计要求和适航安全要求放在同等重要的位置。

近年来,美国联邦航空局也逐步认识到民用无人机对国家空域带来的安全问题,在民用无人机系统适航审定方面,美国联邦航空局按照“无危害”的管理原则对无人机进行适航管理^[4],于2008 年颁布了《无人机系统适航审定》(FAA order 8130. 34 airworthiness certification of UASs)^[13]。

无人机系统同样要求满足 FAA 对系统安全性的要求,建立与载人航空器相当的安全水平^[13-14,23]。目前,虽然无人机系统已逐步形成自身的适航规范,但其安全性分析仍沿用载人航空器 ARP 4761 中所述流程和方法处理^[15,23]。

2.4 无人机系统应用现有安全性法规的差异性

通过上述载人航空器安全性评估规章、符合性指导文件,及无人机系统适航审定规范的回顾,发现由于无人机系统本身的特殊性造成一些关键问题的处理应该有所不同。目前,美国联邦航空局

和美国国防部也认识到现行的美国联邦航空法规在制定时没有考虑无人机系统的特殊性,直接采用上述载人航空器的安全性评估法规、指导意见进行安全性评估存在差异性^[14-18]。这些方面对无人机系统安全性分析的影响须加以考虑,归纳为:

1) 审定对象的差异性

FAR25. 1309 款的安全性标准主要针对大型载人航空器的适航审定^[10]。FAR25 和 FAA 系统安全性手册(system safety handbook,SSH)将失效后果按严重程度分为:灾难性后果、危害性后果、重大后果、轻微后果和无安全性影响^[16]。上述分类考虑失效后果对自身航空器机组人员和乘客的影响,但无人机“人机分离”,本身没有机组人员和乘客,因此主要考虑对空中其他载人航空器的机组人员和乘客的影响,及对地面人员的影响。由审定对象的差异性可以看出,现行的严重程度分级没有考虑无人机特点,不能完全适用于无人机系统,需要对无人机系统的严重程度等级进行改进,如表 1 所示^[15,26]。

表 1 无人机失效状态严重程度
Table 1 Airworthiness failure condition severities of UAVs

失效状态严重程度分级	失效状态严重评判标准 (FAA 载人航空器评估)	无人机系统标准建议 (无人机任务责任小组)
轻微	· 安全边界轻微降低 · 机组工作负荷轻微增大 · 给乘客带来不便影响	· 安全边界轻微降低(如:丧失余度)
重大	· 安全边界和功能能力显著降低 · 机组工作负荷显著增大或因某种愿意降低机组人员效率 · 给乘客带来某些不舒适	· 安全边界显著降低(如:完全丧失飞行通信能力和紧急降落在预定范围)
危害性	· 安全边界和功能能力大大降低 · 更大的工作负荷或体力疲劳以至于机组无法准确或全部执行任务 · 对乘客产生不利影响	· 无人机丧失控制在无人区坠落,紧急降落点坠毁,必要时使用紧急情况恢复程序
灾难性	· 妨碍继续安全飞行和着落的全部失效状态	· 无法控制无人机飞行并到达任何预制降落点

2) 系统复杂程度的差异性

根据上文所述,无人机系统包括空中和地面两大组成部分。空中部分包括无人机、自动驾驶仪、机载电子设备和任务设备等;地面部分包括地面控制站、地面导航站和数据链等。一架无人机在一次飞行中可能被多个控制站操纵,一个控制站可能操纵多架、多种型号的无人机。无人机的安全

运行有赖于整个系统的工作,系统中其他任何部分不适航,则整个无人机系统不适航^[13-15]。ARP 4761 中指出民用机载系统首先采用 FHA 进行飞机级(aircraft-level)然后进行系统级(system-level)的安全性评估^[12]。但是无人机系统复杂程度和定义范畴超过一般民用机载系统,因此在进行无人机系统适航安全性评估时,不能孤立地分析无

人机,需要进行整个无人机系统的安全性评估,为保证整个无人机系统适航,进而需要扩大安全性评估边界,即首先采用 FHA 进行无人机系统级(UAS-level),然后子系统级(subsystem-level)的安全性评估^[15,26]。

此外,无人机系统是系统体系,系统与子系统间的影响作用复杂,不能简单的判断子系统对系统的影响,给安全性评估提出了新的挑战,需要采用不同的系统分析方法^[15].改进的无人机系统FHA过程如图2所示.

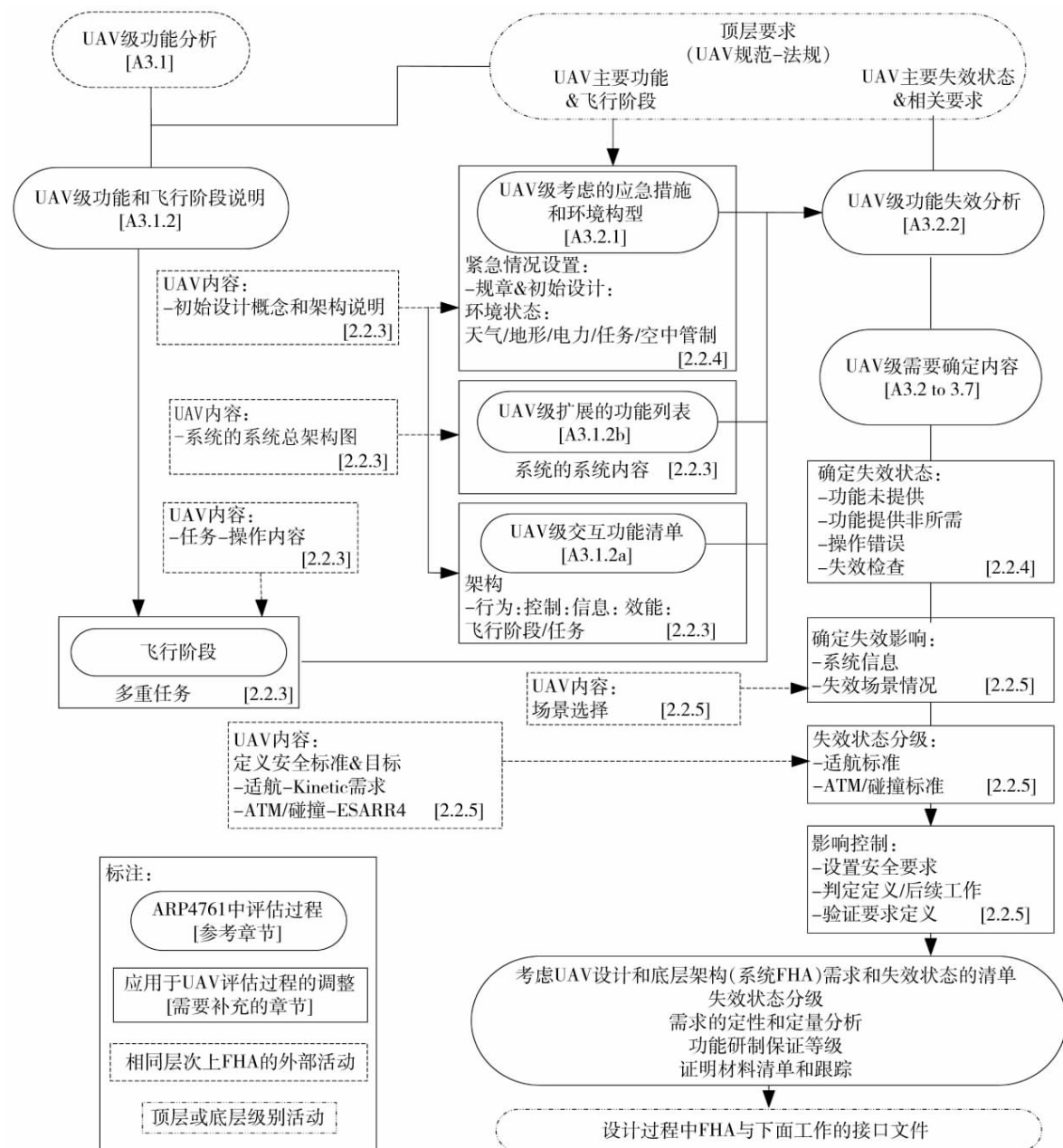


图 2 参照 ARP4761 改进的无人机系统 FHA 过程

Fig. 2 Improved UAV system FHA process refer to ARP 4761

3) 分析方法的差异性

在无人机系统安全性分析中,最主要的风险因素是无人机的起飞质量,无人机的起飞质量对无人机系统失效程度的影响很大,因此在进行无人机系统适航审定时,首先按照无人机的起飞质

量对其分类^[7]。目前,无人机分为 5 类:微型无人机、小型无人机、战术型无人机、中空无人机和高空无人机。由于无人机系统分类、用途、使用范围和应用环境的差异性,导致失效不一定会导致危险或灾难性影响。美国国防部和 FAA 系统安全

指南规定了无人机系统主要的两个关键失效：地面撞击和空中碰撞，明确指出应考虑无人机地面撞击时对地面人员和公共设施的影响，及空中飞行时与其他载人航空器碰撞对其机组人员和乘客的影响，进行安全性评估^[16-17]。其中地面撞击为危害性后果，空中碰撞为灾难性后果^[7,15,17]。

3 无人机系统关键失效的安全性分析

无人机系统要求建立与载人航空器相当的目标安全水平(target level of safety, TLOS)^[19]，针对上述差异和局限性，现有法规对无人机系统目标安全水平尚不明确。因此，在现有规章的基础上主要对无人机系统地面撞击和空中碰撞两个关键失效进行安全性分析，给出合适的期望安全水平(except level of safety, ELOS)以满足系统目标安全水平。

3.1 无人机地面撞击的安全性分析

3.1.1 地面撞击的安全性分析模型

通常情况下，采用事件树分析(event tree analysis)方法建立无人机系统地面撞击的安全性分析模型，以确定整个系统的安全性是否符合给定的目标安全水平^[7,20]。该方法首先针对无人机地面撞击这一初因事件进行建模，在给定初因事件的情况下，分析该初因事件可能导致的各种事件序列的后果，事件树中每一个分支代表不同的事故序列。“是”和“否”代表对应的初因事件和环节事件发生或不发生。如图 3 所示。值得注意的是：事件树模型使用时基于确定的初因和环节事件，因此对于不确定性问题、地域人口密度差异等问题需要进一步建立复杂模型。

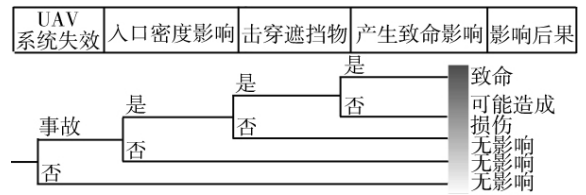


图 3 地面撞击事件树模型
Fig. 3 Ground impact event tree

基于事件树模型的无人机地面撞击安全性分析步骤：

- 1) 判断无人机系统是否失效；
- 2) 判断无人机地面撞击处的地理位置、人口密度；

3) 判断无人机地面撞击处是否有防护措施或遮挡物、碎片是否击中人群；

4) 通过各事件序列的概率组合求得系统失效时死亡率，作为期望安全水平。

3.1.2 理论分析

地面撞击失效后果的严重程度与系统可靠性指标有关。平均故障间隔时间(mean time between failures, MTBF) t_{mtbf} 是衡量系统可靠性的重要指标之一。采用这种方法 ELOS 等价于 TLOS。地面撞击的期望安全水平计算公式为

$$P_{elos} = \frac{1}{t_{mtbf}} A_{exp} \rho P_{pen} (1 - P_{mit}) \tag{1}$$

式中 MTBF 是平均故障间隔时间(h)； A_{exp} 是无人机地面撞击导致致命性伤害的平均面积(m^2)； ρ 是地面撞击处平均人口密度(人/ m^2)； P_{pen} 是假设地面撞击处有防护措施和遮挡物，碎片穿过遮挡物的击穿概率； P_{mit} 是减缓因子，一般情况 $P_{mit} = 0$ 。公式(1)化简为

$$P_{elos} = \frac{1}{t_{mtbf}} A_{exp} \rho P_{pen} \tag{2}$$

为简化分析，模型基于完全确定假设，没有考虑参数的变化和不确定性，方程(2)：①不考虑人口密度 ρ 的变化；②不考虑地面遮挡物变化导致的 P_{pen} 变化。因此，将 MTBF 作为确保目标安全水平的可控因素，确保地面撞击 $P_{elos} = 10^{-7}$ 。

$$t_{mtbf} = \frac{1}{P_{elos}} A_{exp} \rho P_{pen} \tag{3}$$

3.1.3 分析结果

采用方程(3)，对微型无人机、小型无人机、战术型无人机、中空无人机和高空无人机系统的地面撞击失效进行分析，给出确保不同种类无人机系统目标安全水平所需的可靠性水平，各模型参数如表 2 所示，分析结果如表 3 所示。

表 2 不种类型无人机地面撞击影响

Table 2 Ground impact of different classes of UAVs

分类	影响因素	
	A_{exp}/m^2	$P_{pen}/\%$
微型无人机	0.24	5
小型无人机	1.30	10
战术型无人机	2.788	25
中空无人机	33.44	60
高空无人机	83.61	90

表 3 不种类型无人机安全性所需的可靠性水平 (%)
Table 3 Reliability required for different classes
of UAVs safety (%)

分类	飞行时间/h				
	<1	1~10 ²	10 ² ~10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁶	>10 ⁶
微型无人机	95.7	4.3	0	0	0
小型无人机	38.0	57.5	4.5	0	0
战术型无人机	17.1	62.8	19.7	0.4	0
中空无人机	6.3	25.0	62.3	6.3	0
高空无人机	6.3	10.8	62.8	19.7	0.4

表 2 和表 3 分析结果表明：

- 1) 人口密度的增加导致风险程度的增加；
- 2) 不同类型无人机起飞质量的增加导致风险程度的增加. 微型无人机和小型无人机风险较低; 战术型无人机和中空无人机风险适中; 高空长航时无人机风险适中较高, 需要满足 FAA 规定的商用飞机的每百万小时的可靠性要求.

3.2 无人机空中碰撞的安全性分析

3.2.1 空中碰撞的安全性分析模型

首先在不考虑任何避撞措施的情况下, 根据飞行特点建立飞行高度在海拔 0~15 240 m 的无人机与某一航空器碰撞模型^[21], 通过估计无人机一定时间内碰撞概率进行安全性分析, 模型如图 4 所示. 较大型无人机通常具有避撞措施, 不采用该模型进行分析.

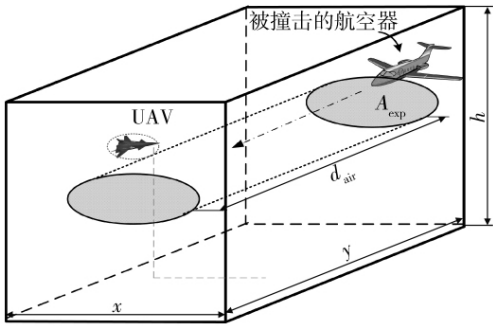


图 4 空中碰撞分析模型
Fig. 4 Midair collision model

3.2.2 理论分析

空中碰撞的期望安全水平计算公式为

$$P_{\text{elos}} = \frac{A_{\text{exp}} d_{\text{air}}}{V_{\text{air}} t} P_{\text{fat|coll}} \tag{4}$$

式中 d_{air} 是某架航空器在空中受到碰撞的飞行距离(m); A_{exp} 是某架航空器与无人机空中碰撞时

的损伤面积(m^2); t 是样本采样飞行时间 (h); $P_{\text{fat|coll}}$ 是碰撞导致致命性后果发生的条件概率; V_{air} 是空域体积(m^3).

3.2.3 分析结果

根据美国交通管理系统 (FAA enhanced traffic management system, ETMS)采用方程(4)对空中碰撞失效进行分析^[14], 不同空域分级下的期望安全水平如图 5 和图 6 所示.

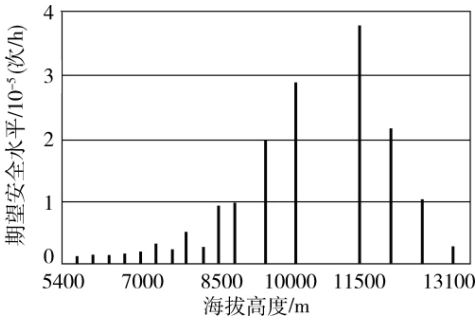


图 5 A 类空域无人机期望安全水平
Fig. 5 UAV except level of safety in class a airspace

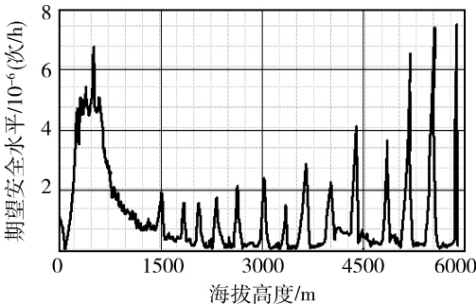


图 6 B-E 类空域无人机期望安全水平
Fig. 6 UAV except level of safety in class B-E airspace

分析结果趋势表明：

- 1) 无人机系统空中碰撞随海拔高度变化导致 ELOS 变化, 且危险程度不同, 部分空域内无人机系统安全性满足 FAA 规定的 10^{-9} 的要求;
- 2) 无人机系统空中碰撞主要集中在航线密集的地方, 航线范围内同一高度的 ELOS 会有变化;
- 3) 模型适用于固定航线, 没有考虑偏离预定航线时发生空中碰撞事件失效概率的变化.

4 结 论

通过上述分析与比较, 可以得出以下结论：

- 1) 现有载人航空器安全性评估规章、符合性指导文件, 不能完全适用于无人机系统, 需要考虑

无人机系统的特殊性对现有 ARP4761 要求的 FHA 进行改进,扩大安全评估边界,依据不同类型的无人机系统和改进的失效状态影响程度分级对其关键失效进行安全性分析。

2) 采用模型可以对无人机系统的地面撞击和空中碰撞失效进行安全性分析,分析结果表明可以通过无人机系统给定的目标安全水平,限制安全性影响因素,确保安全性。但是,由于现有模型局限性,无法解决参数不确定性和时变问题,对某一特定型号或类型无人机系统进行安全性分析时需要进一步细化模型,且实际数据进行对比验证。

3) 分析借鉴国外标准和相关研究可以为我国无人机系统适航提供合理和重要依据。

参考文献:

- [1] Anand S. Domestic use of unmanned aircraft systems; an evaluation of policy constraints and the role of industry consensus standards [R]. Washington, US: J. Eng. Public Policy, Report No. 11, 2007.
- [2] Williams K W. A summary of unmanned aircraft accident/incident data; human factors implications [R]. Washington, US: Federal Aviation Authority, DOT/FAA/AM-04/24, 2004.
- [3] DeGarmo MT. Issues concerning integration of unmanned aerial vehicles in civil airspace [R]. Virginia, US: Mitre Corporation, Report 04W0000323, 2004.
- [4] Sabatini N. Assuring the safe integration of UAS [M]. US: Unmanned Aircraft Systems, the Global Perspective, 2007.
- [5] Federal Aviation Administration. Flight plan 2005-2009. [EB/OL]. [2011-06-23]. <http://www.faa.gov/AboutFAA/Plans.cfm>.
- [6] Joint Planning and Development Office. Next generation air transportation system; integrated plan [M]. Chicago, US: Federal Aviation Authority, 2004.
- [7] Weibel R E. Safety considerations for different classes of UAV operation in the NAS [C] // Proceedings of AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference. Chicago, US: Workshop and Exhibit, 2004: 341-351.
- [8] Federal Aviation Administration. Advisory circular: transport category airplanes, federal aviation regulations-AC 25.1309-1A system design and analysis [S]. US: Federal Aviation Administration, 1988: 1-29.
- [9] Federal Aviation Administration. Advisory circular: normal, utility, aerobatic and commuter category aeroplanes-equipment, systems, and installations in part 23 airplanes, AC 23.1309-1C [S]. US: Federal Aviation Administration, 1992: 1-17.
- [10] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards; transport category airplane Part 25 [S]. US: Federal Aviation Administration, 2007.
- [11] ARP 4754, Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems [S]. US: SAE, 1996: 1-105.
- [12] ARP 4761, Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment [S]. US: SAE, 1996: 1-331.
- [13] Federal Aviation Administration. Order 8130.34 airworthiness certification of unmanned aircraft systems [R]. US: FAA, No. 8130.34A, 2008.
- [14] Dalamagkidis K, Valavanis K P, Piegl L A. On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the National airspace system [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44 (7-8): 503-519.
- [15] Andrew R Evans. Safety assessment and certification for UAS [C] // Proceedings of 22rd Bristol UAV System Conference. Bristol, UK: Bristol University, 2007.
- [16] Federal Aviation Administration. FAA system safety handbook: practices and guidelines for conducting system safety engineering and management [M]. US: Federal Aviation Administration, 2000.
- [17] Department of Defense. Unmanned systems safety guide for DoD acquisition [S]. US: United States Department of Defense, 2007.
- [18] Phillips B. Design and development of a distributed avionics system for use in unmanned aerial vehicles [D]. Australia: Monash University, 2004.
- [19] Haddon D R, Whittaker C J. Aircraft airworthiness certification standards for civil UAVs [J]. The Aeronautical Journal, 2003, 107(8): 79-86.
- [20] Clothier R A, Walker R A. Determination and evaluation of UAV safety objectives [C] // Proceedings of 21st International Unmanned Air Vehicle Systems Conference. UK: QUT prints, 2006: 18. 1-18. 16.
- [21] Endoh S. Aircraft collision models [D]. England: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [22] Weibel R E, Hansman R J. Safety considerations for operation of different classes of unmanned aerial vehicle in the national airspace system [R]. US: MIT International Center for Air Transportation, Report No. ICAT-2005-1, 2005.
- [23] Marsters G F, Sinclair M. Suggested flight approval process for unmanned air vehicles (UAVS) [R]. Ottawa: AeroVations Associates, No. 1, 2003.
- [24] Markutus, Unmanned aerial systems (UAS) or unmanned aerial vehicles (UAV) [R]. Melbourne: ISASI Unmanned Aircraft Systems Working Group, No. M03763, 2011.
- [25] Military Aviation Authority. Design and airworthiness requirements for service aircraft part 9 UAV system [R]. UK: Ministry of Defence, DEF STAN 00-970, 2011.
- [26] Kelly J Hayhurst, Jeffrey M Maddalon, Paul S Miner, et al. Preliminary considerations for classifying hazards of unmanned aircraft systems [R]. NASA/TM-2007-214539, 2007.