

无人机共享空域管制间隔研究

于清媛, 潘卫军

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:国内外关于无人机在有人机共享空域运行的相应规章几乎为空白,无人机运行仍处于隔离空域。通过对无人机进行使用高度层的分类,提出无人机进入有人机共享空域的关键约束条件。根据无人机相较有人机管制操纵指令延迟的实际情况,推导管制区域内,无人机与有人机的防撞管制间隔。建立无人机与有人机碰撞风险模型,对无人机管制间隔进行风险评估。为无人机与有人机共享管制区域运行的防撞管制间隔提供了可行的推导与验证方法。

关键词:无人机;管制间隔;EVENT模型;ADS-B;风险评估

中图分类号:V271.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2018)06-0102-06

目前无人机技术的发展到已经达到了全空域飞行的能力,飞行高度可以涉及到从地面到有人机飞行高度上限的几万米高空。在无人机使用频次和空域范围不断增加和扩大的环境下,无人机系统融入民航空域管理体系已成为必然趋势。由于无人机性能参差不齐,并且无论在管理、协调以及工作量等各方面都涉及到军航部门、空管部门和地方政府机构的大量监管工作,目前无人机只能依赖于航行通告(NO-TAM)进行隔离运行。

融入管制区域共享飞行是短期未来适应无人机产业和客户需求的必经之路,出台适用于管制区域无人机运行的法规是各个国家政府的迫切需求。实施具体的空中交通管制过程中缺少适用于同有人机共享空域的无人机运行分类标准和管制间隔标准^[1],成为首当其冲的问题。仿真无人机防撞管制间隔,还需要能够和有人机安全等级同等要求的安全目标等级,通过风险评估,才能对无人机管制间隔实际应用提供量化方法,从而判断无人机在管制空域共享飞行的安全性。

1 基于空中碰撞风险的无人机分类

无人机管制空域间隔标准应符合空域的不同属性,才能为空中交通管制提供依据。飞行高度非常低的无人机在目前低空开放的情况下飞行,通常会遇到非航空器(如建筑物、树木、电线等固定障碍物)的威胁。这类飞机又分为视距飞行和超视距飞行,有着不

同的防撞要求。视距内飞行高度极低的无人机在操作员的视线范围内飞行,并且操作员负责防撞^[2]。中低空飞行的无人机在可控区域内飞行,为了减少空中碰撞的风险,必须协同无人机与有人机使用有效感知和避让系统,管制空域内飞行需要与空中交通管制部门建立不间断的双向通讯,并且需要具备即时执行空中交通管制指令的能力。在中低空空域飞行的无人机属于空中交通管制空域,由空中交通管制对各家无人机之间配备间隔,因此在空中交通管制间隔适当放大的情况下,对无人机的感知与规避要求可以放宽限制,实现一部分无人机准入共享空域。

需要强调的是,本文研究无人机能够在甚高频(VHF)双向通讯的情况下与有人机共同飞行。目前,类似于“全球鹰(RQ-4)”性能的无人机已经能够超越有人机可用的超高空巡航,需要采取的管制措施已经等同有人机,在现有无人机中所占比例很小,本文不做研究。

为了研究无人机与有人机的防撞风险,按照飞行高度对无人机分类可以提现防撞要求。参考我国空域划分方法,本文将无人机按使用高度层分类如下:

- 1) 1 000 米以下(低空开放区域),典型机型:一般农用无人机。
- 2) 1 000~4 200 米(通常的进近管制空域,各单位可灵活调整),典型机型:HW-220。
- 3) 4 200~7 800 米(通常的中低空区域管制空

收稿日期:2018-04-28

基金项目:2015年度学校科研基金学生科技活动(X2015-38)。

作者简介:于清媛(1987—),女,山东威海人,中国民用航空飞行学院,硕士研究生,研究方向:空域规划管理;潘卫军(1968—),男,四川成都人,中国民航飞行学院空管学院,院长,教授,澳大利亚RMIT大学航空管理硕士,四川大学计算机应用技术博士,研究方向:空管仿真。

域,各单位可灵活调整),典型机型:MQ-9(收割者)。

4) 7 800 米以上,典型机型:RQ-4(全球鹰)。

该无人机分类的意义在于,找到无人机与管制区域有人机的共性。因为无人机无论从重量、飞行环境、航时等各个飞行要素,都跨度范围巨大,分类多种多样,使得无人机分类隔离在有人机之外。而按照使用高度层对无人机进行分类,可以根据在相应高度层飞行的民用客机的飞行速度、机载设备、人因环境等航行诸元,为无人机进入管制区域提供约束条件,同时对无人机与管制区域有人机碰撞风险的研究提供必要参数。

2 无人机防撞间隔推导

FAA 在 2013 年研究了从空中交通管制员指令

结束到雷达屏幕上能够看到无人机做出相应机动的时间——无人机机动时间——空中交通管制员指令结束到无人机完成预期机动的时间^[3-4]。此实验针对管制员与无人机操作员之间的额外语音通讯延迟统计的数据,为无人机融入有人机空域的管制间隔裕度计算提供了有效参考。

统计响应阶段可以分解为图 1 所示的几个部分：

① 无人机操作员回复管制指令时间(T1)；从管制员发出指令结束到飞行员开始回复指令之前。

② 操作员接受指令后开始操作时间(T2)；从管制员发出指令结束到飞行员开始执行机动。

③ 无人机反应延迟(T3)；从无人机操作员在控制站输入指令到无人机开始执行命令。

④ 雷达监测延迟(T4)；无人机开始机动到空管自动化系统监测到无人机机动的的时间。

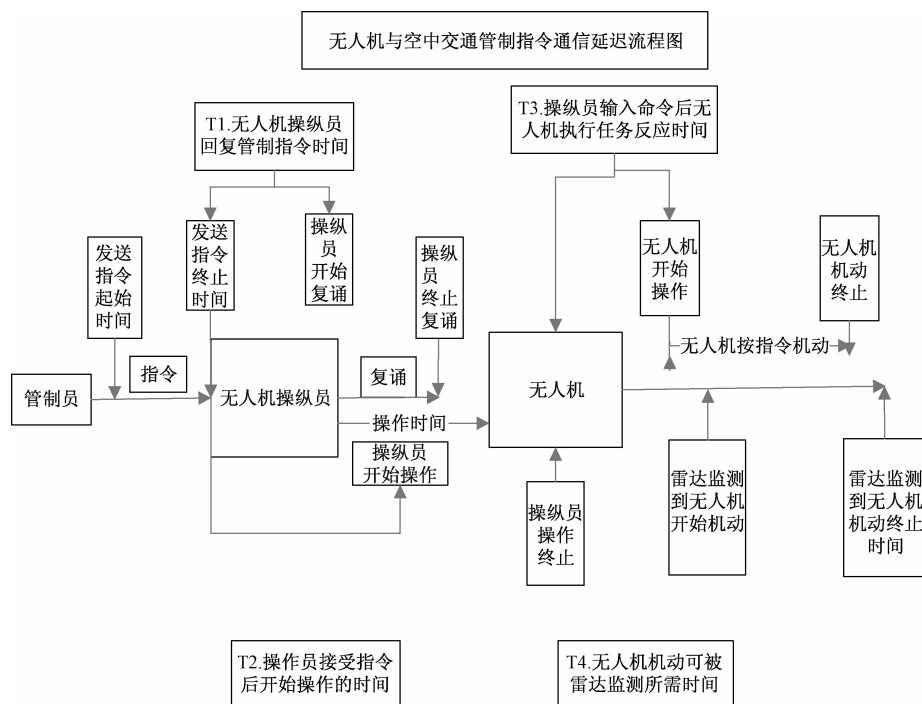


图 1 无人机与空中交通管制指令通讯指令延迟

通过统计数据验证了无人机“飞行员回复管制指令反应时间(以下简称 T1)”与无人机“飞行员接受指令后开始操作的反应时间(以下简称 T2)”。

T1: 短指令干扰下, 无人机飞行员平均延迟 2.10 s, 有人机飞行员平均延迟 0.80 s。长指令干扰下, 无人机飞行员平均延迟 5.48 s, 有人机飞行员平均延迟 1.01 s。

T2:短指令干扰下,无人机飞行员平均延迟 6.72 s,有人机飞行员平均延迟 4.4 s。长指令干扰下,无人机飞行员平均延迟 10.28 s 有人机飞行员平

均延迟 4.8 s。

笔者通过语音操作延迟计算无人机侧向缓冲区域的安全余度。1 000 米以下的低空空域(报告空域和监视空域):《低空空域使用管理规定》要求监视空域和报告空域的民用航空器空速不大于 450 千米/小时(125 m/s)。“无人机飞行员执行操作与有人机飞行员操作的延迟相差不大”^[5],语音延迟差异占主导地位。在低空开放空域内,取 T_1 、 T_2 平均统计结果中的最大差值 5.48 s 作为无人机与有人机额外的保护余度。在其他高度较高的空域,还需要采用总体的

操作延迟运算。根据目视飞行安全间隔,250 km/h (含)以上的航空器,航空器之间的距离不得小于 5 000 米,这里仍考虑在监视或报告空域内无人机与有人机有相对飞行的可能。可知缓冲区至少为: $5000+5.48\text{ m}\times(125+47)\text{ m/s}=5942.56\text{ m}$ 。

1 000~4 200 米:依据大多数国内民航机场进近(终端)管制空域高度层范围划分 CCAR-93 规定进近管制空域雷达最低水平间隔标准 6 千米。无人机所有包括通话复诵和反应时间在内的机动任务完成的总时间的平均值为 71.20 s。无人机避让有人机,有人机与无人机不能有交叉飞行的趋势。可知缓冲区至少为: $6000+71.2\times 62=10414.4\text{ m}$ 。

4 200~7 800 米:依据大多数国内民航机场区域管制中低空空域高度层范围划分 CCAR-93 规定区域管制空域雷达最低水平间隔标准 10 千米。无人机避让有人机,有人机与无人机不能有交叉飞行的趋势。可知缓冲区至少为: $10000+71.2\times 62=14414.4\text{ m}$ 。

7 800 米以上:根据目前的无人机技术水平,在区域管制高空空域,除了少数 RQ-4 类型的配置与管制区域有人机相当的军用无人机能够准入有人机空域体系,其他无人机在技术和安全水平上不足以进入区域高空管制区,因此对此空域不放开无人机共享空域。

3 无人机碰撞风险安全目标等级

在建立无人机碰撞风险模型之前,必须选取满足无人机特性的适当水平的安全性。大多数国家的航空机构将“与载人航空安全”同等水平安全性,又称 ELOS 视为原则。事故发生在无人机与有人机之间时,有人机上的死亡人数是可以统计的。表 1 反映了美国国家运输安全委员会事故数据,半空中无人机与有人机或其他障碍物发生碰撞的死亡率大约是 $f=10^{-6}/h$ 。如果忽略与无人机之外的障碍物与有人机相撞后有人机上的死亡人数,则可以得到更加保守的估计 $f=10^{-7}/h$ 。

表 1 空中与其他物体/飞行器碰撞时的事故死亡率
(基于 1983—2006 年 NTSB 事故数据)

每小时发生率	航空运输	通勤航空	通用航空	合计
事故率	1.34×10^{-5}	3.48×10^{-6}	1.38×10^{-5}	8.53×10^{-6}
总死亡率	9.73×10^{-7}	3.42×10^{-6}	7.40×10^{-6}	4.99×10^{-6}
总死亡率 ^①	5.97×10^{-9}	7.53×10^{-7}	1.13×10^{-6}	7.40×10^{-7}

注:①不包括与飞机以外其他物体碰撞后的机上死亡事件。

TCAS 作为机载防撞与告警系统,当飞机之间小于规定的安全间隔而触发 TCAS 告警后,会提供交通警戒/决策警戒信息,TCAS 独立于 ATC 系统,无人机操纵员和飞行员服从 RA 指令时不需要听从管制指令,因此 STCA、TCAS、管制员、管制区域有人机飞行员以及无人机系统可以建立混联概率关系,在此系统中碰撞发成的概率: $P=(1-P_1P_2)(1-P_3P_4)(1-P_5)$

其中 P_1 代表 STCA 可靠性, P_2 代表管制员调配冲突的可靠性; P_3 代表 TCAS 可靠性; P_4 代表有人机飞行员避碰可靠性; P_5 代表无人机系统避碰有效性^[6]。

考虑空域、管制员与无人机操作员、有人机飞行员、无人机系统五个维度的影响后,改进 AHMEM-CR 碰撞风险模型^[7],得到无人机与管制区域有人机的碰撞风险 $CR=CR_1(1-P)k_1k_2$ 。根据参考文献,STCA 的可靠度 $P_1=1\times 10^{-7}$,TCAS 的可靠度 $P_3=93.21\%$,管制员的可靠度 $P_2=0.963$,管制空域内有人机的飞行员可靠度 $P_4=0.933$ 。定义无人机与管制区域有人机碰撞风险的环境系数为 k_1 ,当环境为理想状况时, $k_1=1$,当环境比较恶劣,出现雾霾、风切变等天气状况时, $k_1>1$ 。

根据前文基于管制间隔的无人机分类,将低空空域无人机、进近(终端)管制空域无人机、区域管制(中空/高空)无人机系统的地面碰撞概率进行分析,建立确保不同使用空域无人机系统目标安全水平所需的可靠性水平。

表 2 不同空域无人机地面撞击影响因素

无人机高度分类	影响因素	
	$A_{\text{exp}}(\text{m}^2)$	$F_{\text{shelter}}(\%)$
低空无人机	1.79	12
进近(终端)管制空域无人机	32.85	59
区域管制中低空无人机	75.43	86
区域管制高空无人机	90.25	93

分析结果如表 3 所示。

通过以上无人机地面碰撞的可靠性分析,表明:不同类型无人机起飞质量的增加导致风险程度的增加,低空空域无人机风险较低,进近(终端)空域无人机风险适中^[8]。运输航空器的基本使用寿命一般是 6 万小时左右,是由飞机制造商在完成飞机设计后在交付使用时提供的。因此,在 AHMEMCR 模型中,对于无人机系统可靠性参数的选择,遵守 ELOS 原则,选取区域管制高空空域无人机航时满足 10^6 小时

的较高要求,因此 P_5 取值 20.7%。

表 3 不同空域无人机所需可靠性水平

分类	飞行小时数				
	<1	1~10 ²	10 ² ~10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁶	>10 ⁶
低空无人机	55	59.8	11.2	0.17	0
进近(终端) 管制空域无 人机	7.9	32.0	27.1	5.8	0
区域管制中 低空无人机	7.1	24.0	58.7	7.8	0.1
区域管制高 空无人机	6.2	11.2	68.0	20.7	0.4

因此,无人机碰撞风险等级 $F = Pf = 10^{-7} (1 - P_1 P_2)(1 - P_3 P_4)(1 - P_5) = 1.03 \times 10^{-8}$ 。

国际民航组织规定的碰撞风险所对应的安全目标等级是 1.5×10^{-8} 次事故/飞行小时,侧向、纵向和垂直方向所对应的安全目标等级分别是 5×10^{-9} 次事故/飞行小时。比较得出,规定无人机碰撞风险等级 1.03×10^{-8} 是合理的保守估计,因此无人机与有人机碰撞的侧向、纵向和垂直方向所对应的安全目标等级分别是 3.4×10^{-9} 次事故/飞行小时。

4 无人机碰撞风险评估

据我国国内实际运行情况和无人机自身性能特征,机载防撞、通讯设备等必须接受有关监管部门的审核,配备甚高频通讯设备、高精度高度表、二次雷达应答机和广播自动相关监视设备(ADS-B)、GPS、标准的飞机防撞灯等,无人机操作员、控制站和空中交通管制部门之间彼此都保持双向无线电通讯。对于进入有人机空域的无人机,必须具备二次监视雷达、机载应答机或高度编码转发器、ADS-B 设备^[9]。中型以上无人机要求有自动处置能力。因此,在研究了无人机碰撞风险建模的影响因素之后,参考 E-VENT 模型进行无人机纵向碰撞风险评估^[10]。

$$P_x = 2 \times E(O) \times L(S) \times P_y(O) \times P_z(O) \times (1 + \frac{2v_x \lambda_x}{2v_x \lambda_y}) \times (1 + \frac{2v_z \lambda_z}{2v_x \lambda_z}) \quad (1)$$

式中: P_x 代表纵向碰撞风险概率; $P_y(O)$ 代表两机侧向碰撞的概率; $P_z(O)$ 代表两机垂直碰撞的概率; $E(O)$ 代表两机纵向接近率; $L(S)$ 代表在最小安全间隔 S 下飞机穿越纵向间隔层的概率; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别代表 A 机的机长、翼展、机高; v_x 、 v_y 、 v_z 分别代表两机在纵向、侧向、垂直方向的相对速度。

全球卫星导航系统(GNSS)为 ADS-B 系统提供位置信息,因此航空器根据记载 GPS 定位,而 GPS

的定位误差服从混合正态分布^[10]:

$$f(x) = (1 - \theta)N(x|a_1) + \theta N(x|a_2), 0 < \theta < 1 \quad (2)$$

式中: θ 为对碰撞风险影响很大的误差出现的比例,因此忽略其影响,将变量取 0。

飞机在 RNP-n 程序下飞行时,满足置信区间:

$$\int_{-n}^{+n} \frac{1}{2a_1} \times \exp\left(-\left|\frac{x}{a_1}\right|\right) dx = 95\% \quad (3)$$

在中低空管制范围内,区域管制和进近管制主要遵循 RNP-1 的方式飞行。确定 n 的取值为 1,可求解出 a_1 。

因此,只需带入前文推导的无人机管制间隔,就可检验出,基于 ADS-B 导航性能误差的纵向碰撞风险概率。

利用卷积积分计算基于导航误差导致的纵向穿越碰撞率:

$$P_x(S_x) = 2\lambda_x \int_{-\infty}^{+\infty} [f_x(x)f_x(S_x - x)] dx \quad (4)$$

由于监视性能误差导致的纵向碰撞概率服从指数分布^[11]:

$$g_x(x) = \frac{1}{2b_1} \times \exp\left(-\left|\frac{x}{b_1}\right|\right) \quad (5)$$

ADS-B 自身系统的反应时间并不时产生纵向偏航的主要原因,在无人机操纵员和飞机分离的特定环境下,根据前文推导,无人机反应操作延迟时间,是影响监视性能的主要因素。

监视性能参数 $m = (\text{系统更新时间} + \text{有人机反应时间} + \text{无人机操作延迟时间}) \times v_x$ 。ADS-B 设备反应时间为 1 s,根据前文推导,长指令干扰下,无人机飞行员平均延迟 10.28 s,ADS-B 系统刷新时间 1 s。 v_x 表示无人机与有人机在纵向的相对速度,带入 v_x 值,可求得 m 值^[12],由此可以确定 b_1 。

$$\begin{aligned} P_{S_x}(S_x) &= P_{N_x}(S_x) \times P_{S_x}(S_x) \\ &= 2\lambda_x \int_{-\infty}^{+\infty} [f_x(x)f_x(S_x - x)] dx \times \\ &2\lambda_x \int_{-\infty}^{+\infty} [g_x(x)g_x(S_x - x)] dx \end{aligned} \quad (6)$$

$E(O)$ 数值基于大量的统计计算,根据北大西洋规划小组统计的交通密度和航路结构的观测数据^[13], $E(O) = 0.01$ 。 $P_y(O)$ 代表两架飞机侧向间距为 0 的概率,受导航性能 RNP 的值 n 决定,实际运用中^[14], $P_y(O) \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (p_i p_j 3\lambda_y / (2n))$,根据此式计算出,RNP 值 $n = 1$ 时所对应的 $P_y(O)$ 的值为 0.054。 $P_z(O)$ 垂直方向上重叠的概率,根据参考文献^[15],飞行在同高度层上,本文选取 0.37 作为两架飞机之间

的垂直重叠率。

在中低空飞行的无人机相较于有人机,无论从速度、尺寸,都低于有人机的性能指标,对于无人机与有人机的碰撞风险概率的研究,碰撞盒的尺寸应该选取无人机与有人机的平均翼展、机身长度、机身高度。根据前文无人机准入有人机中低空空域条件,无人机的速度与有人机速度的差值,应该为常见有人机机型的速度与无人机准入速度上限的差值。

因为以空域内小型有人机(通航飞机、训练飞机等)的飞行间隔作为最低限制需求,以 A、B 类飞机为依据,限制无人机在 1 000 米以下低空开放空域内指示空速小于 169 km/h(47m/s),选取符合次速度标准的通航小型飞机作为样本,求出无人机的纵向相对速度^[16-17]。

本文选取济南区域进行中低空有人机飞行速度统计。由于空中风向导致管制空域民航飞机的顺风速度和逆风速度差,因此同时统计东西方向和南北方向的飞机速度,求平均值,即可得出静风速度。

因此,1 000 米以下低空开放区域选取民航客机平均速度 360 km/h 作为净空速度。根据管制区域民航客机的着陆入口速度,验证了规定无人机速度上限为 224 km/h 的可行性。1 000~4 200 米进近管制空域内民航客机的净空速度 610 km/h。4 200~7 800 米区域管制中低空空域有人机的净空速度为 720 km/h。

1 000 米以下空域内,限制无人机指示空速小于 169 km/h,因此 $v_{x1}=191$ km/h,因监视性能误差导

致的纵向偏航服从指数分布:

$$g_x(x) = \frac{1}{0.40} \times \exp\left(-\left|\frac{x}{0.20}\right|\right) \quad (7)$$

1 000~4 200 米空域内,限制无人机指示空速小于 224 km/h, $v_{x2}=386$ km/h, $g_x'(x) = \frac{1}{0.80} \times$

$$\exp\left(-\left|\frac{x}{0.40}\right|\right) \quad (8)$$

4 200~7 800 米空域内,限制无人机指示空速小于 224 km/h。 $v_{x3}=496$ km/h,

$$g_x''(x) = \frac{1}{0.55} \times \exp\left(-\left|\frac{x}{1.10}\right|\right) \quad (9)$$

由于无人机在侧向、垂直方向的速度统计归纳需要大量的经验数据,且统计过程过于冗杂,因此参考性能类似的通用航空飞机^[18],取侧向相对速 $V_y=9$ km/h,垂直相对速度 $V_z=2.7$ km/h。

选取济南区域最常见的 B738 机型的机长、翼展、机高为有人机碰撞盒尺寸: $\lambda_{x'}=39.5$ m, $\lambda_{y'}=28.5$ m, $\lambda_{z'}=12.5$ m。

根据常用固定翼无人机参数,由于军用无人机的灵敏度、飞行高度、智能化均领先于其他民用无人机的技术水平,不考虑 RQ-4 性能参数,求出其他常见固定翼无人机参数的加权平均值,选取无人机碰撞盒尺寸:

$$\lambda_x''=2.9 \text{ m}, \lambda_y''=4.7 \text{ m}, \lambda_z''=0.7 \text{ m}$$

因此碰撞盒尺寸为无人机与有人机参数的平均值:

$$\lambda_x=21.2 \text{ m}, \lambda_y=16.6 \text{ m}, \lambda_z=6.6 \text{ m}$$

表 4 无人机与管制区域有人机纵向碰撞参数取值

参数名	$E(0)$	$P_y(0)$	$P_z(0)$	v_{x1}	v_{x2}	v_{x3}	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}
参数值	0.01	0.054	0.37	191	386	496	5.942 6	1.041 4	1.441 4
参数名	λ_x	λ_y	λ_z	V_y	V_z				
参数值	0.021 2	0.016 6	0.006 6	9	2.7				

将无人机与有人机的纵向碰撞风险根据前文推导无人机与有人机碰撞安全目标等级是 3.4×10^{-9} 次事故/飞行小时与风险评估:

在 1 000 米以下低空开放空域内,当无人机与有人机纵向管制间隔保持 5.942 56 km 时,碰撞风险评估为 $5.3 \times 10^{-9} > 3.4 \times 10^{-9}$ 。

1 000~4 200 米进近管制空域内,无人机与有人机纵向管制间隔保持 1.041 4 km 时,碰撞风险评估为 10.414 km,碰撞风险评估为 $3.53 \times 10^{-12} < 3.4 \times 10^{-9}$ 。

4 200~7 800 米区域管制中低空空域内,无人机与有人机纵向管制间隔保持 1.441 4 km 时,碰撞风险评估为 $2.18 \times 10^{-12} < 3.4 \times 10^{-9}$ 。

同理,同样建立改进的托圆柱体碰撞风险模型。

以飞机 A 为中心,设机长 λ_x =长半轴,翼展 $\lambda_y=\frac{1}{2}$ 机高,机高 λ_z =短半轴,建立椭圆柱体碰撞盒。可以计算出无人机与有人机侧向碰撞风险:

在 1 000 米以下低空开放空域内,当无人机与有人机侧向管制间隔保持 5.942 6 km 时,碰撞风险评估为 $1.95 \times 10^{-5} > 3.4 \times 10^{-9}$ 。

1 000~4 200 米进近管制空域内,无人机与有人机侧向管制间隔保持 1.041 4 km 时,碰撞风险评估为 $1.01 \times 10^{-9} < 3.4 \times 10^{-9}$ 。

4 200~7 800 米区域管制中低空空域内,无人机

与有人机侧向管制间隔保持 1.441 4 km 时,碰撞风险评估为 $9.43 \times 10^{-12} < 3.4 \times 10^{-9}$ 。

因此,本文推导的无人机与有人机在管制空域内所需执行的防碰撞间隔,在 7 800 米以下的空域内,纵向与侧向风险评估都小于目标安全等级。但在 1 000 米以下低空开放空域内,推导出的无人机与有人机纵向、侧向间隔均超过目标安全等级。从而得出,在 1 000~7 800 米的空域内无人机与有人机的管制间隔是可行的,而在 1 000 米以下低空开放空域内,无人机与有人机还不能依据现有的指令延迟、机载设备、准入空域约束条件、人机环境等指标,安全地共享空域。

通过将前文推导出的无人机与有人机防碰撞管制间隔以及目标安全等级,选取济南管制区域为具体的运行环境,统计济南管制区域的运输机的机型数据,计算出在满足约束条件下的改进的 EVENT 模型的纵向和侧向碰撞风险。碰撞风险值与目标安全等级的可比性,验证了无人机与有人机防碰撞管制间隔的可操作性,也反映了无人机与有人机碰撞风险评估的可行性。

参考文献

- [1] 金镭. 国内民用无人机适航管理思考[J]. 适航性技术和安全性研究, 2016(5): 33—36.
- [2] HOFFMANN T. Eye in the sky: assuring the safe operation of unmanned aircraft systems[R]. Washington: FAA Safety Briefing niques-development of procedural strategies for the practical provision of SAR services, 2013.
- [3] KIM-PHUONG L VU, DAN CHIAPPE, GREGORY MORALES, THOMAS Z. Impact of UAS pilot communication and execution latencies on air traffic controllers' acceptance of UAS operations[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2014(22): 49—80.
- [4] RERN L, SHIVELY R J. A comparison of varying levels of automation on the supervisory control of multiple UASs[R]. Washington: In Proceedings of AUUSI's Unmanned Systems North America, 2009.
- [5] DILLINGHAM G L. Unmanned aircraft systems: continues coordination, operational data, and performance standards needed to guide research and development(Report no. GAO

- 13—346T)[R]. Washington: Government Accountability Office, 2013.
- [6] COLE JK, YOUNG LW, JORDAN-CULLER T. Hazards of falling debris to people, aircraft, and watercraft[R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 1997.
- [7] 丁水汀, 鲍梦瑶, 杜发荣. 无人机系统适航与安全性分析方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 233—240.
- [8] DALAMAGKIDISK, VALAVANISK, PIEGL. Current status and future perspectives for unmanned aircraft system operations in the US[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2008, 52(2): 313—329.
- [9] ZHANG ZHAO-NING, ZHOU PENG, LIU JIAN-BIN. Assessment model of collision risk based on stochastic differential equation for free flight[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2012, 30(3): 1—5.
- [10] RAN Y, GAZI T, DAVID J. The effect of GPS-based surveillance on aircraft separation standards[J]. IEEE, 1996(4): 360—367.
- [11] R G BROWN, P MCBURNEY. Self-contained GPS integrity check using maximum solution separation[J]. Navigation, 1988, 35(1): 41—53.
- [12] 王振宇. 平行航路飞行碰撞风险模型的分析研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
- [13] NAGAOKA S, AMAI O, TAKASHI M. A safety assessment trial of an oceanic air route system in the North Pacific[C]//9th world congress of the International Association of Institutes of Navigation, Amsterdam, 1997.
- [14] B. LUITPOLD. Flight path planning for unmanned aerial vehicles with landmark-based visual navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62: 142—150.
- [15] N TAT-BAO-THIEN, L THE-LU, Y JUN-JUH. Adaptive tracking control for an uncertain chaotic permanent magnet synchronous motor based on fuzzy neural networks[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(3): 580—590.
- [14] 蔡明, 张兆宁, 王莉莉. 自由飞行环境下碰撞风险研究[J]. 航空计算技术, 2014, 41(1): 51—56.
- [16] 王红勇, 王晨, 赵巍. 基于 ADS-B 统计数据的航路安全间隔研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 103—108.
- [17] D ELLOYD. Application of monte carlo methods to estimation of collision risks associated with ATC separation standards[J]. AD-773313 June 1973, 11: 165—168. Unmanned Aerial Vehicle Sharing Space Research in Control Airspace

Research on Unmanned Aerial Vehicle Sharing Space in Controlling Airspace

YU Qing-yuan, PAN Wei-jun

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: The potential of great Unmanned Aerial Vehicle (UAV) application in military, civil and public fields has been proved again and again. The key impediment to its development is the operations of UAV in air traffic management (ATM) control airspace. The most effective way to solve this problem is the research of UAV integration into ATM control airspace with ATM separation to realize shared airspace among conventional aircrafts.

Key words: unmanned aerial vehicle; ATM separation; EVENT Model; ADS-B; risk evaluation