

# 2024 年无人机安全年报

## 1. 执行摘要

2024 年，全球无人机安全领域呈现出复杂而动态的图景。无人机技术以前所未有的速度发展，市场应用持续扩张，与此同时，基础安全挑战与部分领域监管滞后的矛盾依然存在。本年度，无人机事件与违规统计数据揭示了持续存在的合规性问题；美国联邦航空管理局（FAA）、欧洲航空安全局（EASA）及中国民用航空局（CAAC）等主要监管机构纷纷推出了重要的法规更新与政策调整；全球范围内，地缘政治因素，特别是国家安全考量，日益深刻地影响着无人机安全法规的制定与执行，对无人机采购和运营政策产生了显著影响；以远程识别（Remote ID）、无人机交通管理（UTM）系统及人工智能（AI）在安全领域的应用为代表的新兴技术取得了显著进展，但也面临着集成与普及的挑战。GNSS 信号干扰、无人机滥用于非法活动等新兴风险日益凸显，对空域安全构成了新的威胁。本报告旨在全面梳理 2024 年全球无人机安全态势，分析关键数据，解读法规动向，评估新兴风险与技术进展，并展望未来发展趋势与挑战。

2024 年无人机行业的显著特征之一是技术创新与市场拓展的迅猛势头，与此形成对比的是，在某些方面，基础安全文化的建设和监管框架的完善未能完全跟上步伐。一方面，全球无人机市场规模持续扩大，应用领域从传统的航拍、巡检扩展到物流配送、应急救援等新兴场景，显示出巨大的经济潜力<sup>1</sup>。另一方面，违规飞行、安全事件的报告数量依然高企，反映出部分运营商在合规意识、操作技能方面仍有不足<sup>4</sup>。监管机构虽然在积极推进针对超视距飞行（BVLOS）等复杂运行场景的规则制定<sup>6</sup>，但在远程识别等基础安全技术的推广与执行层面仍面临挑战。这种发展的不均衡性表明，无人机安全生态系统的成熟尚需时日，未来可能出现技术先进的运营商与合规水平较低的广大用户群体之间的安全能力差距持续扩大的局面，这对监管机构的风险管理能力提出了更高要求。

另一个贯穿 2024 年无人机安全领域的重要趋势是国家安全考量对行业法规与政策的深刻影响。以美国为例，《美国安全无人机法案》（ASDA）对联邦政府机构采购和使用特定国家制造的无人机施加了严格限制<sup>7</sup>。此类法规的出台，其核心驱动力在于对数据安全和潜在间谍活动的担忧，这些因素虽然与直接的飞行安全有所区别，但却显著影响了无人机的市场准入、技术选型乃至全球供应链格局。这一趋势可能导致无人机领域出现一定程度的“技术民族主义”，不同国家或地区可能会根据自身安全标准构建相对独立的无人机技术与安全生态系统，从而对全球市场的统一性和技术标准的普适性构成挑战。

## 2. 2024 年全球无人机运营与安全概览

### 无人机市场增长与应用概述

2024 年，全球无人机市场持续展现强劲的增长势头。据行业报告分析，2024 年全球无

人机巡检与监控市场价值已达到 164 亿美元，并预计在未来数年内将以显著的年复合增长率持续攀升<sup>1</sup>。无人机的应用范围不断扩大，已渗透到基础设施巡检、建筑施工、农业、能源、公共安全、医疗物资运输以及安防监控等多个关键领域<sup>1</sup>。特别是在巡检与监控领域，无人机凭借其高效、安全、低成本的优势，正逐步替代传统的人工作业方式<sup>1</sup>。

在区域层面，各国无人机产业也呈现出积极发展态势。例如，美国联邦航空管理局（FAA）的数据显示，截至 2025 年初（反映 2024 年及以前的积累），无人机注册数量持续增长，商业和娱乐性无人机均有显著体量<sup>13</sup>。中国民用航空局（CAAC）的数据同样印证了无人机行业的蓬勃发展，2024 年无人机运营单位数量突破 2 万家，新增注册无人机超过 110 万架，全年飞行小时数同比增长 15%<sup>3</sup>。佐治亚州交通部（GDOT）的年度报告也指出，州级交通部门对无人机的应用日益广泛，尤其是在航空摄影和测绘领域已实现全面覆盖<sup>2</sup>。DRONEII 的全球无人机报告进一步指出，紧急服务和安防领域已成为无人机应用增长最快的市场之一<sup>11</sup>。

值得注意的是，2024 年无人机应用推广的主要驱动因素发生了重要转变。除了传统的成本效益考量外，“提升作业安全”和“提高运营效率”成为各行业采纳无人机技术的核心动机，尤其是在那些作业环境危险性较高的行业，如石油天然气管道巡检、高空建筑结构检查等<sup>1</sup>。全球无人机行业调研报告显示，“改善工作安全”已成为 2024 年企业部署无人机的首要原因<sup>12</sup>。例如，在建筑行业，无人机勘测通过减少人员进入危险区域的频次，直接提升了工地安全性，并能辅助进行更精细化的场地规划和安全检查<sup>14</sup>。这一趋势的转变，标志着无人机行业的价值主张从单纯的降本增效，向更深层次的安全效益和运营优化拓展，这可能进一步推动无人机在安全标准要求严苛的行业中的普及，并对相关行业的保险和风险评估模型产生影响。

## 国际安全表现高级别总结

从全球航空安全的大背景来看，2024 年传统商业航空运输领域继续保持了积极的安全态势，事故率和致命事故数量维持在较低水平<sup>15</sup>。然而，无人机领域的安全状况则更为复杂和多层面。一方面，由于无人机技术的快速迭代和应用场景的急剧扩张，其安全监管和风险管理面临着与传统航空不同的挑战。欧洲航空安全局（EASA）在其 2024 年年度安全审查报告中，首次加入了专门的无人机安全章节，这本身就反映出监管机构对无人机安全日益增长的重视及其独特性<sup>15</sup>。

尽管目前尚缺乏与传统航空业相媲美的、全球统一且细致的无人机事故统计体系，但从已有的无人机违规飞行和目击报告（尤其指未经授权的飞行活动）数据来看，其数量之庞大，足以对现有空域管理和安全监控能力构成严峻考验。例如，第三方数据公司 Dedrone 的报告显示，仅在美国，2024 年记录到的特定类型无人机违规事件（如超高速行驶、未经授权进入管制空域等）就高达数十万起<sup>4</sup>。美国联邦航空管理局也承认，每月

收到的无人机目击报告超过百起<sup>17</sup>。这些数据虽然并不都直接等同于发生了飞行事故，但每一次违规或未经授权的飞行都构成了潜在的安全风险，并给监管机构和执法部门带来了巨大的工作负荷。

此外，国际飞行安全基金会（Flight Safety Foundation）在其 2024 年安全报告中对航空业整体安全合规性有所弱化的趋势表示担忧<sup>19</sup>。尽管该报告主要聚焦于传统航空器，但其提出的关于安全文化建设和标准操作程序遵守的问题，在快速发展且用户构成极为多元化的无人机领域，同样具有警示意义。

综合来看，2024 年无人机安全领域的主要挑战，并非仅仅是预防灾难性的飞行事故（尽管这类事故的风险始终存在），更在于如何有效管理海量的无人机飞行活动，确保广大用户遵守基本飞行规则，以及防止无人机与传统航空器、关键基础设施发生冲突。这要求监管机构、行业参与者和用户群体共同努力，提升整体安全水平。

### 3. 区域无人机安全分析与法规进展

#### 3.1. 北美地区

##### 3.1.1. 美国 (联邦航空管理局 - FAA)

###### 法规更新与举措

2024 年，美国联邦航空管理局（FAA）在无人机监管领域持续发力，旨在平衡行业发展需求与空域安全保障。年内通过的《FAA 重新授权法案》（FAA Reauthorization Act of 2024）中包含了多项涉及通用航空和无人机的条款，例如为无人机操作员培训和劳动力发展提供资金支持，以及推动无人机融入国家空域系统（NAS）的举措<sup>6</sup>。

备受业界关注的超视距飞行（BVLOS）操作规则制定取得了阶段性进展。FAA 预计在 2024 年发布 BVLOS 的拟议规则通知（NPRM），为商业无人机包裹递送等复杂运营铺平道路<sup>6</sup>。佐治亚州交通部的报告也提及，FAA 计划引入 14 CFR Part 108 法规，以规范包括 BVLOS 在内的专业化无人机应用，这些应用将需要操作员具备高级技能和相关知识，如探测与避让系统<sup>2</sup>。

远程识别（Remote ID）法规的实施是 2024 年的另一重点。尽管原定于 2023 年 9 月生效的针对无人机操作员的 Remote ID 强制执行日期因部分广播模块的供应问题而推迟了六个月<sup>7</sup>，FAA 仍强调其重要性，并持续推动合规工作。Remote ID 旨在提供无人机的身份和位置信息，以便 FAA、执法部门和其他联邦机构在无人机出现不安全飞行或进入禁飞区时能够追踪到控制站<sup>7</sup>。FAA 在其《安全简报》中也对飞行于 FAA 认可的识别区（FRIA）的规则进行了说明，未配备 Remote ID 的无人机仅能在 FRIA 内飞行<sup>6</sup>。

根据 14 C.F.R. §107.9 规定，小型无人机系统（sUAS）所有者或操作员在发生特定类型的航空器事故后十天内，必须向 FAA 报告。FAA 通过 FAADroneZone 门户网站提供 sUAS Part 107 事故报告应用程序，收集初步事故信息<sup>21</sup>。

此外，国家安全考量对无人机政策的影响在 2024 年尤为突出。《美国安全无人机法案》（ASDA）被重新引入并通过，作为 2024 财年《国防授权法案》（NDAA）的一部分。该法案禁止联邦部门和机构运营或采购由特定外国实体（尤其是中国）制造或组装的无人机系统，并禁止使用联邦资金购买此类系统<sup>7</sup>。这一法案的实施，对联邦机构的无人机采购和运营策略产生了深远影响。

FAA 在 2024 年的监管活动体现了一种双重焦点：一方面，通过制定 BVLOS 规则和批准全国范围的无人机包裹递送服务<sup>6</sup>，积极推动和赋能具有重要经济价值的先进无人机运营；另一方面，则致力于巩固基础安全措施，如 Remote ID 的全面实施<sup>7</sup>，并应对由 ASDA 等法案带来的国家安全层面的挑战<sup>7</sup>。这种多管齐下的策略为无人机运营商和制造商构建了一个复杂的监管环境，要求他们不仅要遵守飞行安全规则、获取高级运营授权，还需日益关注设备的来源地限制。这可能导致合规成本增加，并可能使得不同用户群体在可获得技术方面出现分化。

## 无人机统计与执法

截至 2025 年 4 月 1 日的数据（可反映 2024 年及此前的积累情况），FAA 记录的无人机注册总数已超过 100 万架，其中商业无人机注册量为 420,825 架，娱乐性无人机注册量为 383,007 架。获得认证的远程飞行员数量达到 444,960 名，已颁发的 TRUST（娱乐性无人机安全测试）证书数量超过 106 万份<sup>13</sup>。这些数字直观地反映了美国无人机活动的巨大体量。

FAA 通过其 sUAS Part 107 事故报告应用程序收集事故数据，但更广泛的违规飞行情况则部分依赖第三方数据。例如，Dedrone 公司的无人机违规数据库显示，2024 年在美国境内发生了大量无人机违规事件，其中包括：违反 FAA 400 英尺高度限制的事件 300,914 起；未经 LAANC（低空授权和通知能力）批准在管制空域飞行的事件 302,297 起；夜间违规飞行 207,314 起；以及在发电厂（4,827 起）、惩教设施（9,839 起）和临时飞行限制（TFR）区域（如大型活动场所，10,759 起）附近的入侵事件<sup>4</sup>。同时，FAA 自身每月也会收到超过 100 起的无人机目击报告<sup>17</sup>。

Dedrone 等第三方系统捕获的大量特定违规数据（如超高、未经授权进入管制空域、夜航）表明，FAA 官方的事故/事件数据库（如 ASRS 或 Part 107 事故报告）可能仅记录了不合规无人机活动的一小部分。Part 107 的事故报告主要针对造成严重人员伤亡或重大财产损失的事故<sup>21</sup>，而 ASRS 系统则是自愿报告性质<sup>27</sup>。FAA 每月收到的百余起目击报



告，与 Dedrone 报告的数十万起违规事件相比，数量级差异巨大。这种差异暗示了大量违规行为可能未向 FAA 报告，或未达到官方事故/事件报告的阈值，但它们依然构成潜在的安全风险。这揭示了一个潜在的“冰山之下”的未报告事件规模，对全面执法构成了挑战。因此，监管机构可能需要更多地依赖第三方数据和先进的探测技术，以更全面地掌握空域活动和违规情况，因为仅靠自我报告和传统的事件调查已不足以应对无人机运营的规模及其伴随的风险。

## NextGen 无人机集成计划

FAA 的下一代航空运输系统（NextGen）计划正在积极调整其战略，以适应包括无人机在内的新型空域用户的快速增长<sup>28</sup>。该计划致力于将国家空域系统（NAS）推向新一代，通过过渡到基于卫星的导航和监视、以数字通信补充语音通信、改进自动化决策等方式，提升空域的整体效能和安全性<sup>28</sup>。

针对无人机（UAS）的整合，NextGen 计划包含了一系列具体的运营改进项目。其中包括计划于 2025-2030 年间探索和成熟化的“UAS 飞行信息管理系统（FIMS）”[101203-02]，以及在 2020-2025 年间推进的“小型 UAS 咨询服务”，后者又细分为“UAS 咨询信息”[103211-01]和“sUAS 交通咨询服务”[103211-02]<sup>28</sup>。此外，在“NAS 基础设施”组合下，一项针对“额外航空器类型的防撞系统”的改进计划（2023-2030 年）也包含了专门针对 UAS [102163-31] 和 sUAS [102163-34] 的防撞技术研发，计划周期分别为 2023-2028 年<sup>28</sup>。

FAA 的系统级信息管理（SWIM）平台在无人机整合中扮演着关键角色。SWIM 旨在统一和共享整个 NAS 及航空界的航空、飞行与流量、监视以及气象等关键信息<sup>28</sup>。截至 2024 年，已有 51 个内部和外部组织通过 SWIM 网络提供超过 200 项服务的数据。随着无人机运营数据的日益重要，SWIM 将成为实现 UAS 与传统航空器安全、高效融合的关键信息枢纽。2024 年，FAA 还批准了一项新的证书颁发机构产品，用于身份和访问管理，以增强 SWIM 系统的安全性<sup>28</sup>。

FAA 的 NextGen 计划清晰地表明，其长期战略已将无人机视为国家空域系统（NAS）中一个永久且重要的组成部分，正在从最初的简单容纳转向主动管理和深度信息融合。诸如 FIMS、UAS 咨询服务和防撞系统等项目的设立，并非权宜之计，而是构建未来空域基础设施的基础模块。对 SWIM 平台的持续投入和对信息共享的强调，也预示着未来空域管理将更加依赖网络化和数据驱动的模式，以应对包括无人机在内的多样化空中交通。这意味着无人机将不再是游离于主流空域管理体系之外的存在，而是深度融入其中。这不仅需要对新技术和新程序进行大量投资，也对无人机运营商及其系统的技术成熟度和数据交互能力提出了更高的要求。

## 重要事件与安全关切

2024 年下半年，美国多地发生了一系列备受关注的“无人机目击事件”，尤其是在 11 月至 12 月期间，新泽西州及周边地区频繁报告出现大型不明无人机夜间飞行的情况，一度引发公众和媒体的广泛关注，甚至被称为“新泽西无人机目击事件”<sup>17</sup>。这些报告描述的无人机体积较大，有时伴有显著噪音，并出现在居民区和关键基础设施附近。联邦及地方机构随即展开调查。最终，官方调查结论指出，大部分目击事件可以归因于对普通航空器（包括已获授权的无人机、民用飞机）、天体（如行星、亮星）或其他常规空中物体的错误识别，部分也与公众的确认偏误和群体性焦虑有关<sup>17</sup>。白宫方面也表示，调查显示这些飞行器主要是获得 FAA 授权的科研无人机、爱好者操作的无人机以及私人无人机，并未构成国家安全威胁<sup>17</sup>。FAA 的数据也显示，2024 年每月都会收到超过 100 起无人机目击报告，而全年预计有约 280 万架商业和娱乐无人机在美国运营<sup>17</sup>。

除了大规模目击事件外，一些具体的无人机安全事件也凸显了潜在风险。无人机违规飞行对野火扑救工作的干扰在 2024 年依然存在。例如，亚利桑那州的 Ironwood 火灾中，由于无人机活动，空中灭火作业一度被迫暂停<sup>18</sup>。这类事件严重影响了灭火效率，甚至可能导致火势蔓延。

FAA 持续关注激光照射航空器的安全隐患。尤其在节假日期间，装饰性激光灯的使用增多，若不当指向天空，可能对飞行员造成短暂失明，危及飞行安全<sup>6</sup>。

第三方安全分析机构 AirSight 在其 2024 年度回顾中，也列举了多起值得警惕的无人机相关安全事件，包括：无人机坠毁导致人员受伤的事故；针对关键基础设施的潜在威胁，如纳什维尔发生的企图利用无人机袭击变电站的图谋；以及利用无人机向监狱等敏感区域走私违禁品的行为<sup>5</sup>。这些事件共同揭示了无人机技术被滥用的多样化风险。

### 3.1.2. 加拿大

（基于所提供的研究材料，未发现关于加拿大 2024 年具体的无人机安全报告或详细数据。因此，本小节暂不展开，或注明“数据暂缺”。）

## 3.2. 欧洲地区

### 3.2.1. 欧洲航空安全局 (EASA)

#### 新欧盟无人机法规 (2024 年 1 月 1 日生效)

自 2024 年 1 月 1 日起，一套全新的欧盟无人机法规正式生效，旨在为整个欧盟范围内的无人机运营建立统一、安全且可预测的框架<sup>29</sup>。这些法规由欧洲航空安全局（EASA）主导制定，其核心目标是确保欧洲在无人机应用领域保持领先地位，并为未来更广泛、更复杂的无人机用例（如城市空中交通）奠定基础<sup>30</sup>。

新法规的关键内容包括：

- **C 级分类与 CE 标志：** 新投放市场的无人机（在“开放”类别下运行）必须根据其重量、能力和安全特性进行 C0 至 C6 的等级划分，并在产品上标注相应的 CE 符合性标志<sup>29</sup>。例如，C0 和 C1 级适用于开放子类别 A1，C2 级适用于 A2 子类别，而 C2、C3、C4 级则可用于 A3 子类别。C5 和 C6 级则针对需要运营许可并可能收费的特定操作<sup>30</sup>。这一分类体系旨在让用户清晰了解其无人机的操作限制和要求。对于重量在 250 克以上的无人机，操作员需要完成在线理论考试<sup>30</sup>。
- **强制性远程识别 (Remote ID)：** 从 2024 年 1 月 1 日起，在欧盟境内运行的大部分无人机（特定豁免情况除外）必须配备远程识别功能<sup>30</sup>。Remote ID 系统能够广播无人机的识别信息、位置、高度、速度等数据，从而增强空域的透明度和可追溯性，有助于监管机构和执法部门识别和管理无人机活动，提升空域安全和安保水平。
- **运营类别划分：** 法规根据操作风险将无人机运营划分为三个主要类别：“开放”（Open）、“特定”（Specific）和“认证”（Certified）<sup>30</sup>。
  - **开放类别：** 风险较低的操作，通常无需事先授权，但需遵守严格的操作限制（如飞行高度、与人群的距离、视距内飞行等），并根据无人机的 C 级分类遵循相应的子类别（A1, A2, A3）规则<sup>29</sup>。
  - **特定类别：** 风险较高的操作（如超视距飞行 BVLOS、在人群上空飞行、运输危险品等），需要运营商进行操作风险评估（SORA），并获得国家航空管理机构（NAA）的运营授权<sup>29</sup>。
  - **认证类别：** 风险极高的操作（如载人 eVTOL、大型货运无人机），其安全标准和监管要求与传统载人航空相当，需要对无人机本身、运营商和飞行员进行全面认证。

EASA 于 2024 年实施的这套法规，代表了全球范围内针对无人机运营的最全面、最具系统性的风险管理框架之一。其核心在于通过统一标准，在数十个成员国之间创造一个协调且可预测的无人机市场环境，这不仅便利了制造商的产品准入，也为运营商的跨国作业提供了清晰指引。这一框架的成功实施，无疑将对其他地区的无人机监管政策产生示范效应。然而，其成效也取决于各成员国能否一致、有效地执行这些规则，以及运营商和制造商能否快速适应这些细致的合规要求。同时，该框架通过“特定”和“认证”类别，为更复杂的无人机运营（如 BVLOS、UAM）开辟了明确的发展路径。

## **EASA 2024 年年度安全审查 (ASR 2024) - UAS 焦点**

EASA 在其《2024 年年度安全审查》（ASR 2024）中，首次纳入了关于无人机系统（UAS）安全的专门章节，这标志着 EASA 对无人机安全问题的日益重视以及将其作为独立航空领域进行系统性风险评估的开端<sup>15</sup>。报告指出，2023 年欧洲整体传统航空运输安全表现积极，商业航空致命事故数量处于历史低位<sup>15</sup>。然而，无人机领域的安全挑战具

有其独特性。

ASR 2024 的一个重要变化是，所有特定领域（包括 UAS）的附录数据均基于欧洲中央知识库（ECR）的信息<sup>15</sup>。ECR 集中了来自欧盟各国的安全相关数据，为 EASA 提供了更全面的安全风险视角，有助于进行更精准的趋势分析和风险评估。

在 ASR 2024 中，EASA 特别提到了地缘政治因素对航空安全的持续影响，尤其是全球导航卫星系统（GNSS）信号受到干扰（包括ジャミング和欺骗）的事件增多，这不仅影响传统航空，也对高度依赖 GNSS 进行导航和定位的无人机运营构成了严重威胁，可能导致无人机失控、偏离航线或无法执行预定任务<sup>16</sup>。EASA 表示已就此采取了一系列协同的风险缓解措施<sup>16</sup>。

EASA 在其年度安全审查中设立 UAS 专门章节，并依托 ECR 进行数据分析，这表明其无人机安全监管正迈向成熟，从以往可能将无人机视为传统航空的“附属品”或“新奇事物”，转变为一个基于数据驱动、进行专项风险评估和政策制定的独立安全领域。这种结构化的方法，使得 EASA 能够更好地识别 UAS 特有的安全隐患，分析事故和事件的根本原因，并据此制定更具针对性的安全推广活动和法规更新。这不仅将提升欧洲无人机运营的安全水平，也为其他国家和地区的监管机构在数据收集、分析及安全管理方面树立了新的标杆。

## U-space 发展

2024 年，EASA 在 U-space（即欧洲的无人机交通管理 UTM 系统）的建设方面也取得了进展。EASA 发布了针对 U-space 的“简易规则”（Easy Access Rules），为 U-space 的实施提供了更清晰的指导材料<sup>31</sup>。同年，EASA 认证了 ANRA Technologies 作为首个 U-space 服务提供商，这标志着 U-space 从概念和规则制定阶段向实际部署和运营迈出了重要一步<sup>31</sup>。U-space 的逐步建立，对于保障未来大规模、高密度无人机（尤其是 BVLOS）运营的安全至关重要。

### 3.2.2. 英国 (民航局 - UK CAA)

英国民航局（UK CAA）在 2024 年继续推进其无人机安全监管体系的现代化。作为提升无人机运营安全与效率的关键举措，UK CAA 于 2024 年 4 月推出了在线 PDRA-01（预定义风险评估-01）运营授权服务<sup>32</sup>。这项服务的引入，通过实现自我声明，显著缩短了特定类型无人机运营授权的申请处理时间，平均从过去的 14 天大幅减少至 30 分钟<sup>32</sup>。

在此基础上，更全面的英国特定操作风险评估（UK SORA）系统虽计划于 2025 年 4 月 23 日正式上线，但其准备工作和理念在 2024 年已对行业产生影响<sup>32</sup>。UK SORA 旨在为无人机运营商提供一个透明、一致的在线数字化风险评估工具，使其更容易、更快捷地获



得运营批准，特别是针对更复杂的运营，如超视距飞行（BVLOS）<sup>32</sup>。UK CAA 此举旨在与全球其他 67 个已采用 SORA 进行无人机风险评估的国家保持一致，并支持英国无人机行业的快速增长<sup>32</sup>。

UK CAA 在 2024 年通过 PDRA-01 服务启动的数字化和简化流程，预示着其无人机安全管理策略正朝着更高效、可扩展的方向发展。虽然完整的 UK SORA 系统在 2025 年才全面铺开，但 2024 年的初步举措已经为基于信任的、数据驱动的授权模式奠定了基础。这对于应对日益增长的无人机运营数量和复杂性至关重要，并可能在降低合规门槛的同时，通过标准化的风险评估方法来维持甚至提升安全监管的有效性。

### 3.2.3. 海峡群岛 (民航处 - ODCA)

2024 年，海峡群岛民航处（ODCA）在无人机安全管理方面也采取了积极措施。ODCA 于年内发布了新的无人机（UAS）操作员指导材料，并在其官方网站上提供查阅<sup>33</sup>。此外，经过全面的技术评估和必要的安全案例审查，ODCA 向一家申请机构颁发了航空作业许可证，允许其在泽西岛作为“ALIAS”项目的一部分，进行专业的无人机活动试验<sup>33</sup>。ODCA 还设立了专门的电子邮件地址（drones@cidca.aero）供无人机用户咨询和联系<sup>33</sup>。这些举措表明，即使在较小的航空管辖区域，对无人机安全运营的规范化管理和支持也在不断加强。

## 3.3. 亚太地区

### 3.3.1. 中国 (中国民用航空局 - CAAC)

#### 运营统计与增长

2024 年，中国无人机行业持续高速发展，各项关键指标均呈现显著增长。据中国民用航空局（CAAC）发布的数据，截至 2024 年底，获得无人机运营合格证的单位已超过 2 万家<sup>3</sup>（另一统计口径为 19,979 家<sup>34</sup>）。年内新增实名登记无人机 110.3 万架，累计完成无人机飞行 2666 万小时，同比增长 15%<sup>3</sup>。这些数据充分显示了中国无人机市场的巨大活力和广阔的应用前景。

#### 监管重点与安全表现

面对无人机数量和飞行活动的急剧增加，CAAC 在 2024 年的监管重点之一是构建适应未来数百万架无人机运行需求的低空无人机空中交通管理新框架<sup>35</sup>。由于大量无序飞行的低空无人机可能对地面设施、公共安全及空中有人驾驶航空器构成威胁，CAAC 认识到现有民航空中交通管理体系难以适应这一挑战，因此正积极探索和开发新的管理模式<sup>35</sup>。

在安全表现方面，CAAC 报告称，2024 年中国民航安全态势总体平稳。在飞行总量较 2019 年增长 12.3% 的情况下，运输航空责任原因征候万时率较 2019 年下降 74.6%，通

用航空事故数量同比减少 3 起<sup>3</sup>。虽然这些数据主要反映传统航空领域，但也为无人机安全管理提供了一个积极的宏观背景。

为加强无人机安全监管，CAAC 在 2024 年采取了多项措施。其中包括：

- **法规建设：**持续推进《民用航空法》的修订工作，并完善相关配套法规<sup>3</sup>。值得关注的是，《民用无人驾驶航空器事件信息管理办法（征求意见稿）》的起草和意见征求工作，旨在规范无人机事件信息的报告、调查和处理流程<sup>37</sup>。
- **数据管理：**发布了《关于发布民用无人驾驶航空器飞行动态数据报送要求的公告》，明确了无人机飞行动态数据的报送标准和责任单位，并公示了报送飞行动态数据的单位及其无人机型号（动态更新）<sup>37</sup>。这对于实现对无人机飞行的有效监控和管理至关重要。
- **低空经济监管探索：**梳理低空经济监管事项，开展低空经济安全监管权责边界研究，探索推进央地联合监管体系建设<sup>36</sup>。

中国在 2024 年的无人机安全战略中，将建立健全低空无人机交通管理体系置于优先地位，这清晰地反映出监管机构认识到，随着无人机数量的爆炸式增长，运营密度和飞行活动的有序性已成为首要的风险因素。CAAC 积极推动飞行动态数据报送<sup>37</sup>和事件信息管理办法的制定<sup>37</sup>，这些都是构建任何有效 UTM 系统的核心组成部分。这种对“有序飞行”的高度关注，对于在无人机数量持续激增的背景下保障空域安全具有决定性意义，也可能使中国在开发和部署大规模 UTM 解决方案方面走在前列。

## CAAC-EASA 合作

2024 年 5 月，CAAC 与 EASA 联合举办了航空安全会议。会议议程中包含了一个专门的研讨环节，主题为“连接天空：探索中国与欧洲的无人机融合”<sup>38</sup>。该环节聚焦于无人机（UAV）及其交通管理系统（UTM）的快速发展，探讨了双方在监管政策、UTM 技术进步、无人机运营面临的挑战以及未来合作机遇等议题<sup>38</sup>。这表明中欧双方均认识到在无人机安全与管理领域加强国际交流与合作的重要性。

### 3.4. 其他地区

（基于所提供的研究材料，其他地区如南美、中东及非洲等，虽有提及无人机在特定领域（如 BVLOS、医疗配送）的增长<sup>11</sup>，但缺乏 2024 年详细的安全报告或监管动态。因此，本小节暂不展开。）

## 4. 2024 年关键无人机安全事件、违规行为及成因分析

### 已报告事件分析 (碰撞、近距离接近)

2024 年，全球范围内发生的多起无人机相关安全事件，再次凸显了无人机融入现有空域

所面临的挑战。其中，无人机与传统航空器的碰撞或近距离接近事件尤为引人关注。一份 DRONELIFE 的报告详细记录了一起发生于 2025 年初（但涉及 2024 年底或之前趋势）的事件：洛杉矶县消防局的一架 Canadair CL-415 灭火飞机在执行任务时，与一架在限飞区低空飞行的 DJI Mini 无人机相撞，导致飞机左翼前缘被刺穿，该飞机在后续的灭火任务中无法使用<sup>18</sup>。此类事件不仅对航空器本身构成威胁，更可能严重影响应急救援等关键任务的执行。

类似的近距离接近事件也时有发生。例如，据报道，一架无人机在伦敦上空一度飞至距离一架英国航空的客机仅 10 英尺（约 3 米）的范围内，构成了“明确的碰撞风险”<sup>39</sup>。此外，无人机非法闯入机场等敏感区域，也对航空运营秩序造成干扰。纽约斯图尔特国际机场曾因无人机活动而一度关闭<sup>17</sup>。

美国国家航空航天局（NASA）管理的航空安全报告系统（ASRS）作为一个自愿、保密的报告平台，也收到了大量与无人机相关的安全报告，内容涵盖空域入侵、操作冲突、近距离空中碰撞（NMAC）等<sup>27</sup>。同样，供野火救援人员使用的 SAFECOM 数据库也记录了一起多起无人机相关的空域入侵、冲突和 NMAC 事件<sup>18</sup>。这些报告共同描绘了无人机安全风险的多样性和普遍性。

### 常见无人机违规行为统计分析 (全球/侧重美国)

要全面了解 2024 年无人机的安全状况，除了分析已发生的事故外，对普遍存在的违规飞行行为进行统计也至关重要。第三方空域安全公司 Dedrone 通过其部署在美国多个城市的传感器网络，收集并发布了大量无人机违规数据。截至 2024 年底（数据更新至 2025 年 5 月，反映 2024 年全年情况），其数据库记录的主要违规类型包括<sup>4</sup>：

- **违反 FAA 400 英尺高度限制：** 300,914 起。这是指无人机在未获授权的情况下，飞行高度超过地面以上 400 英尺（约 120 米）。
- **违反 LAANC 授权规定：** 302,297 起。LAANC（低空授权和通知能力）是 FAA 为无人机在机场附近受控空域 400 英尺以下飞行提供的快速授权系统。此类违规指未经 LAANC 授权在这些区域飞行。
- **夜间违规飞行：** 207,314 起。根据 NASA 对民用晨昏蒙影的定义进行分类，指在不符合夜航规定的条件下进行飞行。
- **侵入发电厂附近空域：** 4,827 起。
- **侵入惩教设施（监狱）附近空域：** 9,839 起。
- **侵入临时飞行限制（TFR）区域（如大型活动、体育赛事场所）：** 10,759 起。

与此同时，美国联邦航空管理局（FAA）自身也确认，在 2024 年期间，平均每月收到超过 100 起由飞行员、空中交通管制员、执法部门及普通民众提交的无人机目击报告<sup>17</sup>。这些目击报告中，很多涉及无人机在机场附近、限飞区或其他不当区域的飞行。

## 主要致因探讨

综合分析 2024 年发生的无人机安全事件和大量违规数据，可以识别出以下几个主要的促成因素：

- **操作员失误/违规操作：** 这是最常见的致因之一。具体表现为：
  - **缺乏空域意识和授权：** 大量 LAANC 违规和侵入 TFR 区域的事件表明，许多操作员未能充分了解其飞行区域的空域类型和限制，或未能按规定申请飞行授权<sup>4</sup>。一篇针对 Part 107 操作下 UAS 事件的研究指出，部分摄影任务操作员为了节省时间和便利，在明知需要授权的情况下依然选择违规飞行<sup>21</sup>。
  - **违反飞行高度和距离限制：** 超高飞行是 Dedrone 数据库中记录最多的违规类型之一<sup>4</sup>。此外，在人口密集区或人群上空飞行、夜间无适当设备或豁免飞行等行为也屡见不鲜<sup>42</sup>。
  - **“侥幸心理”：** 上述研究还提到，部分操作员可能存在“侥幸心理”或“刀枪不入的态度”，认为事故不会发生在自己身上，从而选择性忽视规则<sup>41</sup>。
- **技术故障：** 虽然不如操作员失误普遍，但技术故障也是导致无人机事件的原因之一。ASRS 报告中提及的设备问题（硬件/软件/自动化故障）、链路丢失（lost link）、失控飞离（fly away）、不受控下降等均属此类<sup>27</sup>。例如，Skydio 曾针对其 X10 系列无人机发布软件更新，以解决一个罕见的电源相关问题<sup>43</sup>。
- **环境因素：** 不利的气象条件（如强风、低能见度、降水）可能超出无人机的性能限制或操作员的应对能力，从而引发事件。
- **“看见与避让”（See and Avoid）原则的局限性：** 传统航空依赖“看见与避让”原则保障飞行安全，但在无人机与有人驾驶航空器混合运行的环境下，这一原则面临严峻挑战。研究表明，无论对于有人机飞行员还是无人机操作员（或目视观察员），在空中及时发现并避让对方都非常困难，尤其是在夜间或飞行员工作负荷较高（如进近着陆）的阶段<sup>18</sup>。
- **监管与技术配套不足：**
  - **远程识别（Remote ID）推广挑战：** 尽管 Remote ID 被视为提升无人机可识别性和空域安全的关键技术，但在 2024 年的推广过程中遇到了一些障碍，如广播模块供应不足、信号范围和可靠性存疑等问题，影响了其有效性<sup>5</sup>。此外，执法部门获取 Remote ID 关联的注册信息的接口尚不完善，也制约了对违规飞行的快速响应和追溯<sup>18</sup>。

2024 年发生的相当一部分无人机事件和违规行为，其根源在于操作员缺乏对空域规则、其他航空器存在的充分情境感知，以及有意或无意的违规操作，这种情况在娱乐性飞行和部分商业摄影领域尤为突出。Dedrone 的数据清晰地显示了大量违反 LAANC 规定、飞行高度限制和 TFR 禁令的事件<sup>4</sup>，这些都直接关联到操作员对空域规则的认知和遵守程度。针对 Part 107 操作的研究也揭示，商业摄影是报告事件最多的任务类型，其中不乏



为图方便而故意违规的情况<sup>41</sup>。同时，“看见与避让”原则在无人机时代的有效性受到严重质疑<sup>18</sup>，这进一步加剧了因情境感知不足引发的风险。FAA 针对娱乐性飞行员的 TRUST 测试和基本飞行规则宣传<sup>42</sup>，也从侧面反映了对这一庞大用户群体进行持续安全教育的必要性。这些现象共同指向一个核心问题：提升飞行员培训质量、改进空域信息传递系统（如优化 LAANC 的可及性或提供实时空域警报），以及加强执法力度，对于改善无人机安全状况至关重要。特别是研究中提及的“侥幸心理”<sup>41</sup>，更揭示了无人机社群内部存在的安全文化建设挑战，需要通过教育、宣传和必要的惩戒措施加以纠正。

无人机事件和近距离碰撞事件的漏报、瞒报现象，依然是 2024 年无人机安全领域面临的一大难题。这种现象不仅掩盖了风险的真实规模，也阻碍了基于全面数据的主动性安全分析和预防措施的制定。有研究通过对比 Remote ID 数据与 ADS-B 数据发现，在特定机场附近，实际发生的无人机与航空器近距离碰撞事件数量远高于官方收到的目击报告数量，表明存在显著的漏报情况<sup>18</sup>。ASRS 等自愿报告系统<sup>27</sup>，虽然为收集安全信息提供了渠道，但其自愿性质决定了并非所有事件都会被上报。考虑到全球无人机运营的巨大体量<sup>18</sup>，与官方记录的事件数量相比，可以推断大量轻微事件或违规行为可能未进入官方统计视野。如果缺乏全面、准确的数据，监管机构和行业组织在识别新兴安全趋势、评估风险优先级以及有效分配安全资源时将面临更大困难。因此，鼓励和简化报告程序，并积极探索和整合多样化的数据来源（包括非传统的传感器网络数据），对于提升无人机安全管理水平至关重要。

表 1: 2024 年已报告无人机违规与事件摘要

区域 (主要)	违规/事件类型	数量/频率 (2024 年数据)	主要促成因素	数据来源
美国	违反 FAA 400 英尺高度限制	300,914 起	操作员失误，缺乏空域意识	4
美国	违反 LAANC 授权规定	302,297 起	未申请授权，缺乏空域规则知识	4
美国	夜间违规飞行	207,314 起	未获豁免，设备不合规	4

美国	侵入发电厂附近空域	4,827 起	故意或无意侵入限飞区	4
美国	侵入惩教设施附近空域	9,839 起	多数为非法运输企图	4
美国	侵入 TFR 区域 (大型活动等)	10,759 起	未关注 TFR 通告，冒险飞行	4
美国	FAA 每月收到无人机目击报告	>100 起/月	多为在机场附近或不当区域飞行	17
美国	无人机干扰野火扑救	多起 (如 Ironwood 火灾)	操作员违规闯入灭火作业空域	18
美国	Part 107 操作下事件报告	年均 51 起 (2021 年后)	摄影任务占比高，部分存在明知故犯	41
英国 (伦敦)	无人机与客机近距离接近	1 起 (距英航客机 10 英尺)	操作员失误，危险接近	39
全球/多地	ASRS/SAFECOM 报告	ASRS: >800 起 (累计); SAFECOM: >59 起 (野火相关)	空域入侵，操作冲突，NMAC	18

5. 无人机运营中的新兴风险与威胁

随着无人机技术的飞速发展和应用领域的不断拓宽，一些新的安全风险和威胁在 2024 年日益显现，对空域安全、公共安全乃至国家安全构成了新的挑战。

- GNSS 信号操纵 (干扰与欺骗):  
全球导航卫星系统 (GNSS, 如 GPS、GLONASS、Galileo、北斗) 是绝大多数无人机实现精确定位和导航的基础。然而，2024 年，GNSS 信号受到人为干扰 (Jamming, 即通过发射大功率噪声信号压制正常 GNSS 信号) 和欺骗 (Spoofing, 即发射虚假的 GNSS 信号诱导接收机产生错误的定位和时间信息) 的

事件在全球范围内有所增加，这已成为影响整体航空安全（包括无人机安全）的一个重要因素 16。GNSS 信号的完整性和可用性一旦受到破坏，无人机可能无法准确感知自身位置和速度，导致偏离预定航线、闯入禁飞区、无法稳定悬停，甚至失控坠毁。对于执行精密任务（如测绘、巡检、物流配送）的无人机而言，GNSS 信号的可靠性更是至关重要。EASA 已注意到这一风险，并强调其对空域可用性的负面影响 16。

- 无人机滥用于非法活动：

无人机因其隐蔽性、灵活性和可远程操控的特点，日益被犯罪分子和恶意行为者所利用，从事各类非法活动。2024 年的报告和事件分析揭示了以下几种主要的滥用形式：

- **走私违禁品：** 利用无人机向监狱、边境地区等敏感区域投送毒品、手机、武器等违禁品，已成为一种常见的犯罪手段<sup>5</sup>。
- **未经授权的监视与侦察：** 无人机被用于对个人、企业或敏感设施进行非法监视、偷拍，侵犯隐私，甚至窃取商业秘密或军事情报<sup>5</sup>。
- **袭击关键基础设施：** 2024 年发生了企图利用无人机携带爆炸物袭击变电站的图谋（如美国纳什维尔事件），这表明无人机已具备对关键基础设施构成实质性物理威胁的潜力<sup>5</sup>。此外，无人机还可能被用作数据窃取工具、机载信号干扰器或爆炸物投送平台<sup>44</sup>。

- 网络安全漏洞：

随着无人机智能化、网络化程度的提高，其面临的网络安全风险也日益突出。无人机的飞行控制系统、数据链通信系统、地面站软件等都可能成为黑客攻击的目标。一旦无人机被成功入侵，可能导致：

- **未授权控制：** 攻击者可能夺取无人机的控制权，使其偏离航线、执行恶意任务或直接坠毁<sup>45</sup>。
- **数据泄露：** 无人机在执行任务过程中采集的敏感数据（如高清图像、测绘数据、飞行日志）可能被窃取或篡改<sup>45</sup>。
- **拒绝服务攻击：** 干扰无人机与地面站之间的通信，使其无法正常工作。对外国制造无人机（尤其是中国品牌）的数据安全担忧，是 2024 年多国（特别是美国）出台限制性采购政策（如 ASDA）的重要原因之一<sup>7</sup>。报告强调，建立加密通信渠道和部署反黑客技术对于保障无人机运营安全至关重要<sup>45</sup>。

- 复杂人机界面与日益增长的空中交通密度：

EASA 的报告指出，复杂的人机界面（HMI）是航空领域持续面临的挑战之一 15。对于无人机操作而言，地面站软件的易用性、信息呈现的清晰度以及自动化功能的可靠性，都直接影响操作员的决策效率和应对突发情况的能力。随着无人机飞行数量的急剧增加，空域日益拥挤，尤其是在低空区域，无人机之间的碰撞风险以及与传统航空器的冲突风险也随之增大，对空域管理和交通流量控制提出了更高要求 18。

- 全球安全合规性与标准化的差距：

国际飞行安全基金会（Flight Safety Foundation）对航空业整体安全合规性弱化的趋势表示担忧<sup>19</sup>，这一问题在无人机领域可能更为突出。由于无人机操作员背景多样（从专业人士到业余爱好者），其安全意识、技能水平和合规意愿参差不齐。各国、各地区的无人机法规虽在逐步完善，但在具体执行层面和标准统一性方面仍存在差距，这给跨国运营和全球供应链管理带来挑战。

2024 年，一个显著且令人担忧的趋势是，消费级和准专业级无人机技术被用于复杂的非法活动，其复杂程度和潜在危害性正在迅速演变，有时甚至超出了传统安防措施的应对能力。例如，纳什维尔发生的企图利用无人机携带 C4 炸药袭击变电站的事件<sup>5</sup>，以及关于无人机可能被用于投送爆炸物的普遍担忧<sup>44</sup>，都表明无人机的威胁已从简单的空域违规升级到蓄意的犯罪或恶意攻击。这些无人机易于获取且能力不断增强，使其成为实施此类行为的“理想”工具。传统的物理安防措施（如围栏、保安）在应对来自空中的、灵活机动的无人机威胁时，显得力不从心。这一趋势迫使反无人机系统（C-UAS）技术和策略加速发展，不仅在军事领域，在民用关键基础设施保护和执法领域的需求也日益迫切。这也再次凸显了无人机技术固有的军民两用性所带来的持续性安全挑战。

无人机系统的网络安全，包括数据链路和控制系统的的核心安全，在 2024 年已成为一个首要关切点。这既源于对国家安全的深层忧虑（如《美国安全无人机法案》主要基于对外国制造无人机数据安全的担忧<sup>7</sup>），也源于对黑客攻击可能导致运营中断甚至灾难性后果的现实恐惧<sup>45</sup>。随着无人机日益依赖网络连接（用于 UTM 服务、数据传输、远程控制等），其受攻击面也随之扩大。因此，无人机制造商和运营商必须将强大的网络安全措施置于优先地位。监管机构也可能需要为无人机系统（包括其软件和通信协议）制定专门的网络安全标准。对于在敏感行业（如能源、交通、公共安全）使用无人机的机构而言，对其无人机机队进行彻底的网络安全风险评估，并采取相应的防护措施，已成为不可或缺的环节。

## 6. 无人机安全技术与缓解策略进展

2024 年，为应对日益复杂的无人机安全挑战，全球在无人机安全技术研发与应用方面持续投入，并在多个关键领域取得了进展。这些技术和策略旨在提升无人机的可识别性、可管理性，降低碰撞风险，并防范恶意使用。

- 远程识别 (Remote ID)：

远程识别技术被广泛认为是无人机安全监管的基石。它要求无人机在飞行过程中广播自身身份信息（如序列号）、位置、高度、速度以及操控者的位置等数据，从而使监管机构、执法部门乃至公众能够识别空中的无人机。

- **全球实施状况：** 美国 FAA 的 Remote ID 法规于 2023 年 9 月对无人机制造商生效，对操作员的强制执行日期虽有所推迟，但仍在积极推进<sup>7</sup>。EASA 的欧盟无



人机新规也于 2024 年 1 月 1 日强制要求大部分无人机具备 Remote ID 功能<sup>30</sup>。

- **目标与作用：** Remote ID 的主要目标是提升空域安全与安保水平，通过提供无人机的实时身份和位置信息，帮助识别和追踪潜在的违规或恶意飞行活动<sup>7</sup>。
- **面临的挑战：** 尽管 Remote ID 的理念得到广泛认可，但在 2024 年的实际推广和应用中仍面临一些挑战。包括：部分地区 Remote ID 广播模块的供应不足或价格较高<sup>18</sup>；广播信号的有效距离和在复杂环境（如城市峡谷）下的可靠性仍有待检验<sup>5</sup>；以及执法部门有效获取和利用 Remote ID 数据（如关联到注册用户）的接口和流程尚不完善，影响了对违规行为的快速响应和追溯<sup>18</sup>。

- **无人机系统交通管理 (UTM) / U-space:**

UTM（在美国称谓）或 U-space（在欧洲称谓）是一套旨在安全、高效地管理低空无人机交通的数字化、自动化服务和基础设施体系。

- **进展与应用：** 2024 年，FAA 授权 Zipline 和 Wing 两家公司利用 UTM 技术在美国境内开展大规模无人机包裹递送服务，这是 UTM 商业化应用的重要里程碑<sup>6</sup>。EASA 在 U-space 建设方面也取得了进展，包括发布了相关的“简易规则”并认证了首个 U-space 服务提供商 ANRA Technologies<sup>31</sup>。中国民用航空局（CAAC）也将低空无人机交通管理体系的建设作为 2024 年的工作重点之一，以应对日益增长的无人机飞行活动<sup>35</sup>。
- **核心功能：** UTM/U-space 通过提供空域授权、飞行计划管理、动态地理围栏、交通态势感知、冲突告警与解脱等服务，确保无人机之间以及无人机与传统航空器之间的安全间隔，尤其对于超视距（BVLOS）飞行至关重要<sup>6</sup>。

- **探测与避让 (DAA) 及防撞系统:**

DAA 技术使无人机能够感知并避开其他航空器或障碍物，是实现更高级别自主飞行和 BVLOS 运营的关键。

- **研发与规划：** FAA 的 NextGen 计划中包含了针对 UAS 和 sUAS 的防撞技术研发项目<sup>28</sup>。佐治亚州交通部的报告也指出，未来的 Part 108 法规可能会要求执行特定复杂任务（如 BVLOS）的无人机配备 DAA 等先进技术<sup>2</sup>。

- **反无人机系统 (C-UAS):**

针对无人机被滥用于非法活动（如恐怖袭击、走私、非法监视）的风险，C-UAS 技术市场在 2024 年持续增长<sup>44</sup>。

- **技术类型：** C-UAS 技术通常包括探测、跟踪、识别和处置四个环节。探测技术主要有雷达、光电/红外传感器、射频（RF）探测等<sup>44</sup>。处置技术则包括信号干扰、GPS 欺骗、物理捕获（如网枪）甚至激光/微波摧毁等，但后者因潜在的附带损害和法律限制，应用受到严格控制<sup>20</sup>。
- **应用与挑战：** AirSight 等公司提供多层 C-UAS 探测解决方案<sup>5</sup>。FAA 的航空 rulemaking 委员会（ARC）也就 UAS 探测与缓解系统提交了最终报告，为相关政策制定提供参考<sup>7</sup>。然而，C-UAS 的部署和使用，尤其是在民用环境中，面临

着法律授权、电磁兼容性、成本效益以及避免对合法无人机运营造成干扰等多重挑战<sup>20</sup>。

- **人工智能 (AI) 在无人机安全中的作用：**

AI 技术在提升无人机运营安全和效率方面的潜力在 2024 年得到进一步发掘。

- **应用场景：** AI 被用于增强无人机的自主飞行能力（如自主导航、智能避障）、目标识别与跟踪（如在搜救、安防监控中）、数据分析与决策支持（如在灾害评估、基础设施巡检中自动识别缺陷）<sup>1</sup>。在 C-UAS 领域，AI 算法也被用于提高对无人机目标的探测准确率，减少误报，并辅助进行行为意图分析<sup>44</sup>。
- **伦理与安全考量：** AI 在无人机（尤其是在安防和执法领域）的应用也引发了关于数据隐私、算法偏见、自主决策伦理以及网络安全（如 AI 系统本身可能被攻击）的讨论<sup>45</sup>。

- **地理围栏 (Geofencing) 技术：**

地理围栏是一种基于地理位置的虚拟屏障，用于限制无人机进入敏感区域（如机场、核电站、监狱等）。

- **策略演变：** 2024 年一个值得注意的动态是，全球最大的消费级无人机制造商 DJI 调整了其“Fly Safe”地理围栏系统的策略，从以往的强制性禁飞（硬限制）转变为向操作员发出警告，但允许操作员在确认风险后选择继续飞行<sup>18</sup>。这一改变将更多责任赋予飞行员，但也可能在飞行员安全意识不足或故意违规的情况下增加空域入侵风险。

- **安全管理体系 (SMS) 的重要性与采纳：**

SMS 是一套系统化的方法，用于主动识别危险源、评估和控制风险，并持续改进安全绩效。

- **推广与强调：** EASA 和美国国家公务航空协会 (NBAA) 等机构在 2024 年继续强调 SMS 在提升航空安全（包括无人机运营安全）中的核心作用<sup>15</sup>。推广 SMS 有助于在无人机运营商（无论规模大小）中建立积极的安全文化。

尽管 2024 年在各项安全技术（如 Remote ID、UTM 组件、AI 驱动的分析工具）方面取得了显著进展，但将这些独立的技术有效地整合为一个连贯、普适的安全网络，仍然是一个巨大的障碍。这一挑战因系统可靠性、数据共享标准、操作员接受程度和技能水平等问题而变得更加复杂。例如，Remote ID 虽已在主要地区强制实施<sup>7</sup>，但在推广过程中却面临设备可用性和性能方面的困扰<sup>5</sup>。UTM 概念虽在商业上有所突破<sup>6</sup>，但实现广泛部署、具备互操作性的 U-space/UTM 系统仍处于发展阶段。AI 技术展现出巨大潜力<sup>1</sup>，但其在实时、安全关键型功能中的应用极为复杂，需要大量的验证和信任建设。因此，未来的重点很可能从开发单一技术解决方案转向确保这些技术之间的互操作性、可靠性，并将它们无缝集成到更广泛的航空生态系统中。这需要国际社会在标准化、数据交换协议以及建立用户和监管机构之间的信任方面付出巨大努力。

地理围栏策略的演变，特别是像 DJI 那样从强制性“硬围栏”转向咨询性警告<sup>18</sup>，标志着安全责任在一定程度上向飞行员的转移。这种转变如果不能与强有力的飞行员教育、易于获取的空域信息以及对违规行为的有效威慑相结合，则可能增加空域入侵的风险，尤其考虑到当前已存在大量违规飞行的记录<sup>4</sup>。这一变化可能由多种因素驱动，例如用户对操作灵活性的需求，或是维护一个完美、实时更新的全球地理围栏数据库的固有难度。无论如何，这一趋势都凸显了飞行员能力、持续培训以及获取准确、易懂的空域数据的重要性。同时，这也可能意味着需要采取更引人注目的执法行动，以阻止故意的违规行为。

表 2: 新兴无人机安全技术与缓解策略比较

技术/策略	简要描述	2024 年主要进展/状态	主要安全效益	2024 年主要挑战/局限性
远程识别 (Remote ID)	无人机广播身份和位置信息	FAA/EASA 强制实施启动 <sup>7</sup>	提升可识别性，辅助追踪违规飞行	模块供应、信号可靠性、执法接口 <sup>5</sup>
UTM/U-space	低空无人机交通管理系统	商业包裹递送应用获批 (FAA) <sup>6</sup> ；首个 U-space 服务商获 EASA 认证 <sup>31</sup>	安全间隔，BVLOS 支持，空域有序化	大规模部署、互操作性、成本
探测与避让 (DAA)	无人机感知并避开障碍物/其他航空器	FAA NextGen 持续研发 <sup>28</sup> ；被视为高级操作必备技术 <sup>2</sup>	预防空中碰撞，支持自主飞行	技术成熟度、成本、小型目标探测
反无人机系统 (C-UAS)	探测、跟踪、识别和处置恶意无人机	市场需求增长，技术多样化 (雷达、RF、光电) <sup>44</sup> ；FAA ARC 报告发布 <sup>7</sup>	防范非法入侵、恐怖袭击、走私	法律授权、附带影响、成本、误判
人工智能 (AI) 在	AI 用于自主飞	在巡检、搜救、	提升效率，辅助	算法可靠性、数

安全中的应用	行、目标识别、数据分析、风险预测	C-UAS 探测中应用增多 <sup>1</sup>	决策，增强自主性	据偏见、网络安全、伦理
地理围栏 (Geofencing)	虚拟屏障限制进入敏感区域	主要制造商策略从强制转向警告 <sup>18</sup>	警示操作员，减少误闯	依赖操作员自觉性，数据库更新
安全管理体系 (SMS)	主动识别危险源、评估和控制风险的系统方法	EASA/NBAA 等持续推广 <sup>15</sup>	建立安全文化，系统性风险管理	小型运营商采纳意愿和能力

7. 特定无人机运营的安全考量

随着无人机技术的成熟和应用场景的深化，不同类型的无人机运营模式在 2024 年都面临着各自独特的安全挑战和监管要求。

- 超视距 (BVLOS) 运营：

BVLOS 运营被广泛视为释放无人机全部潜力的“圣杯”，能够大幅扩展无人机的作业范围和效率，尤其在物流配送、大范围巡检、应急响应等领域具有不可估量的价值<sup>8</sup>。

  - 监管进展： 2024 年，FAA 在 BVLOS 规则制定方面取得了进展，其 BVLOS NPRM（拟议规则通知）备受业界期待，预计将为 BVLOS 运营提供更清晰的路径<sup>6</sup>。FAA 也计划通过 Part 108 法规来规范包括 BVLOS 在内的专业化无人机应用，这些应用将要求操作员具备高级技能和采用先进技术，如探测与避让系统<sup>2</sup>。
  - 行业挑战： 尽管前景广阔，但 BVLOS 运营的推广仍面临监管审批流程复杂、耗时过长等障碍，这在全球范围内都是一个挑战<sup>11</sup>。
  - 技术依赖： 安全的 BVLOS 运营高度依赖于可靠的 UTM/U-space 服务进行交通管理和冲突解脱<sup>6</sup>，以及有效的 DAA 技术来确保无人机能够自主感知和避开其他航空器或障碍物。
  - 公共安全应用： 在公共安全领域，BVLOS 能力对于扩大搜索范围、在危险区域进行持续监控以及为远程指挥中心提供实时态势感知至关重要<sup>53</sup>。FAA 也为公共安全机构获得 BVLOS 运营豁免提供了特定途径<sup>53</sup>。
- 商业无人机配送：

2024 年是商业无人机配送发展的重要一年。FAA 批准了 Zipline 和 Wing 两家公司在美国境内利用 UTM 技术进行全国范围的无人机包裹递送，这标志着无人机物流从试点运营向规模化商业应用迈出了关键一步<sup>6</sup>。Zipline 公司凭借其在全球（包括美



国境内 Part 107 及豁免运营) 积累的丰富运营经验, 还向 FAA 提交了多项豁免申请, 旨在优化运营流程、提升运载能力并与国际标准协调, 例如请求豁免部分有关起降场区域预防措施和防撞灯的要求, 以及简化月度运营数据报告等<sup>54</sup>。这些实践和探索为未来无人机物流的安全标准和运营规范积累了宝贵经验。

- 公共安全无人机运营:

无人机在公共安全领域的应用持续深化, 为执法、消防、搜救等部门提供了前所未有的空中支援能力, 有效提升了现场态势感知、警员安全保障和应急响应效率<sup>50</sup>。

- **FAA 支持措施:** FAA 在 2024 年致力于简化公共安全机构的无人机运营豁免审批流程, 并探索为应急响应行动量身定制空域管理方案<sup>57</sup>。FAA 的系统运营支持中心 (SOSC) 在 2024 年颁发了超过 4000 份特殊政府利益 (SGI) 豁免, 以支持紧急情况下的无人机运营<sup>57</sup>。
- **运营特点与挑战:** Skydio 公司对其“无人机作为第一响应者” (DFR) 项目的数据分析显示, 有高达 58% 的 DFR 飞行任务是在夜间执行的, 这对无人机的夜视能力、自主避障能力和电池续航提出了很高要求<sup>55</sup>。此外, 公共安全任务的紧迫性有时可能导致操作员在情急之下违反常规飞行规则<sup>41</sup>。
- **采购限制影响:** 《美国安全无人机法案》 (ASDA) 对联邦资金采购特定国家制造无人机的限制, 也对部分公共安全机构的无人机选型和机队更新计划造成了影响<sup>9</sup>。

- 娱乐性无人机运营:

娱乐性无人机用户群体庞大, 据 FAA 估计, 仅美国就有约 183 万架娱乐性无人机<sup>18</sup>。FAA 为娱乐性飞行员制定了一系列基本规则, 包括必须通过 TRUST 测试、注册重量超过 0.55 磅 (约 249 克) 的无人机、飞行高度不得超过 400 英尺、保持视距内飞行、遵守社区组织 (CBO) 的指导方针以及为需要注册的无人机配备 Remote ID 等<sup>42</sup>。然而, 由于用户数量众多且安全意识水平不一, 娱乐性无人机的违规飞行 (如超高、闯入禁区) 仍是无人机安全管理的一大挑战。

2024 年, BVLOS 运营的推进, 特别是在商业配送和公共安全领域的应用探索, 清晰地揭示了其成功与否高度依赖于三个关键支柱的成熟: 强大且可靠的 UTM 系统、精准有效的 DAA 技术, 以及清晰、可扩展且具有操作性的监管路径。这些要素在 2024 年都仍处于积极发展和完善阶段。UTM 系统虽然在特定场景下 (如 Zipline 和 Wing 的配送服务) 得到应用<sup>6</sup>, 但要实现广域覆盖、多系统互操作的 UTM/U-space 网络尚需时日。DAA 技术作为 BVLOS 飞行的核心安全保障之一, 其性能标准和认证路径仍在探索中<sup>2</sup>。FAA 等监管机构虽然在积极制定 BVLOS 规则<sup>6</sup>, 但这些规则在 2024 年尚未最终定型并全面实施。早期的 BVLOS 批准往往依赖于运营商提交的特定安全案例分析和采用的特定技术组合。这意味着, BVLOS 运营的规模化和常态化, 将取决于这些使能技术 (UTM、DAA) 的进一步成熟、标准化以及相关性能化法规的最终出台。在这些领域中的任何一个

环节出现延迟或不足，都可能减缓 BVLOS 运营的广泛普及进程。

公共安全无人机运营在 2024 年展现出巨大的应用价值，但同时也面临着一个独特的困境，即行动的急迫性、技术的快速演进（如夜航能力、AI 辅助功能）与日益收紧的采购政策（如 ASDA）之间的矛盾，这给相关机构的决策带来了复杂性。公共安全任务往往具有高度的时间敏感性<sup>41</sup>，有时甚至可能迫使操作员在紧急情况下采取一些与常规飞行规则不完全相符的行动<sup>41</sup>。为了有效执行任务，这些机构迫切需要具备先进功能的无人机，如高效的夜间飞行能力<sup>55</sup>和智能化的数据分析工具<sup>50</sup>。然而，ASDA 等法案对使用联邦资金采购特定国家（主要是中国）制造的无人机施加了限制<sup>9</sup>，这可能导致机构在技术选型上受到制约，或者增加采购成本。因此，公共安全机构亟需清晰的政策指导、简化的豁免流程（FAA 已在此方面做出努力<sup>57</sup>），以及能够获得可靠、合规且技术先进的无人机装备的畅通渠道。如何在满足迫切行动需求与遵守采购限制之间取得平衡，是对这些机构智慧的考验。

## 8. 无人机安全监管与政策环境的演变

2024 年，全球无人机安全监管与政策环境持续演变，受到主要立法行动、国际合作努力以及数据隐私与安全考量等多重因素的驱动。

- **主要立法法案的影响：**

- **《FAA 重新授权法案》(FAA Reauthorization Act of 2024)：** 该法案在美国的通过，为通用航空和无人机领域带来了新的资金支持和发展方向。法案内容涵盖了对无人机操作员培训和劳动力发展的投资，以及推动无人机更安全、更高效地融入国家空域系统的相关条款<sup>6</sup>。
- **《美国安全无人机法案》(American Security Drone Act - ASDA)：** 作为 2024 财年《国防授权法案》(NDAA)的一部分，ASDA 在美国正式生效。该法案的核心内容是禁止联邦政府部门和机构采购或使用由“受关注外国实体”（主要是指中国公司）制造或组装的无人机系统及其相关组件，除非满足特定的豁免条件（如用于科研、反恐、情报等特定目的，且能确保数据安全）<sup>7</sup>。法案还规定了对现有相关无人机库存的管理要求，并要求制定政府范围内的无人机采购政策，特别强调信息安全。ASDA 的实施对美国联邦机构的无人机采购策略产生了直接且深远的影响，也间接影响了全球无人机市场的竞争格局。
- **《反中共无人机法案》(Countering CCP Drones Act)：** 美国众议院于 2024 年 9 月通过了该法案的独立版本（此前也已作为 2025 财年 NDAA 的一部分在众议院通过）。该法案旨在将特定中国无人机制造商（如 DJI）的产品列入联邦通信委员会（FCC）的“涵盖清单”（Covered List），从而禁止其新的无人机产品在美国使用通信基础设施获得授权<sup>26</sup>。这一法案若最终成为法律，将对相关制造商在美国市场的运营造成重大打击。

- 国际协调与机构间合作：

面对无人机技术的全球化特性，国际间的监管协调与合作显得尤为重要。

- **CAAC-EASA 合作：**2024 年，中国民用航空局（CAAC）与欧洲航空安全局（EASA）联合举办了航空安全会议，其中专门就无人机在中国的融合、UTM 发展、监管政策以及未来合作机遇等议题进行了深入探讨<sup>38</sup>。这表明中欧双方在无人机安全与管理领域加强对话与协作的意愿。
- **EASA 的欧盟统一法规：**EASA 于 2024 年 1 月 1 日正式实施的欧盟无人机新规，旨在欧盟成员国之间建立一套统一的无人机运营标准和安全要求，促进区域内无人机市场的健康发展和监管的协调一致<sup>29</sup>。
- **ICAO 的全球标准角色：**国际民用航空组织（ICAO）继续在全球航空标准制定（包括无人机相关标准）方面发挥指导作用。例如，海峡群岛民航处（ODCA）在制定其无人机政策时，也强调了遵守 ICAO 要求和标准的重要性<sup>33</sup>。

- 数据隐私与安全影响：

随着无人机采集和传输的数据量日益庞大，数据隐私保护和信息安全问题在 2024 年受到前所未有的关注。

- **隐私担忧：**自主飞行的无人机配备高清摄像头和其他传感器，有能力在用户不知情的情况下捕捉个人图像和敏感数据，引发了公众对隐私泄露的担忧<sup>45</sup>。
- **安全风险：**无人机系统（包括其数据链和控制系统）可能遭受黑客攻击，导致数据泄露、未经授权控制甚至被用于非法监视<sup>45</sup>。
- **国家安全层面的数据顾虑：**对外国制造无人机（尤其是中国品牌）可能将数据回传至其母国服务器或被外国政府获取的担忧，是 ASDA 等限制性政策出台的主要驱动因素之一<sup>7</sup>。
- **监管需求：**报告和分析普遍呼吁加强无人机数据的加密保护，制定明确的监视活动指导方针，并建立健全数据治理框架，以平衡无人机数据应用的益处与个人隐私及国家安全的需求<sup>45</sup>。

2024 年，国家安全考量，特别是在美国针对中国制造无人机所引发的担忧，已成为驱动无人机政策制定的主导因素之一。这种趋势在一定程度上可能超越或复杂化了纯粹以飞行安全为核心的监管努力，并对全球无人机市场动态产生了深远影响。《美国安全无人机法案》(ASDA)<sup>7</sup> 和《反中共无人机法案》<sup>26</sup> 的出台，其首要动机是国家安全，而非传统的飞行事故预防。这些法案旨在限制特定外国无人机制造商的市场准入和联邦机构的使用，其核心关切点在于数据安全、供应链安全以及潜在的间谍风险。虽然在法案文本中也提及了“对国家安全或安全构成不可接受的风险”<sup>25</sup>，但其政策重心明显偏向国家安全层面。这种以国家安全为主导的政策制定，可能导致市场出现分化，即部分用户因政策限制而无法使用技术成熟、性价比高且广泛应用的无人机产品，这反过来又可能影响这些用户采纳新技术的速度或增加其运营成本。长此以往，这种趋势可能催生出基于不同地缘政治阵营的、

相对独立的无人机技术生态系统，从而阻碍全球无人机技术标准的统一化进程，并在技术获取和成本效益方面造成区域性差异。这也迫使非美国无人机制造商不得不投入大量资源，以应对美国复杂的安全评估程序。

无人机作为强大的数据采集平台，其运营过程中产生并处理着海量的多样化数据，包括高清影像、地理空间信息、传感器读数、飞行参数等<sup>1</sup>。这种前所未有的数据采集能力在 2024 年引发了日益严峻的隐私保护和数据治理挑战，而现有的法律法规框架在应对这些挑战方面仍显得滞后和不足。公众对于无人机可能被用于未经授权的监视、侵犯个人隐私的担忧持续存在<sup>45</sup>。尽管一些法规（如 ASDA）已开始关注无人机的数据传输和存储安全问题<sup>22</sup>，但专门针对无人机采集数据的全面隐私保护规则仍在制定和完善之中。行业报告和专家分析普遍呼吁，应加强对无人机数据的加密保护，为无人机监视活动制定清晰、严格的指导方针，并建立健全的数据治理机制<sup>45</sup>。如果缺乏明确且统一的无人机数据隐私法规，不仅可能侵蚀公众对无人机技术的信任，也会给无人机运营商带来法律上的不确定性。因此，如何在充分发挥无人机数据价值的同时，有效保护个人隐私权和维护数据安全，已成为无人机行业健康发展所必须解决的关键问题。

## 9. 2025 年及未来无人机安全展望与建议

展望 2025 年及更远的未来，无人机技术及其应用预计将继续保持高速增长态势，特别是在超视距（BVLOS）飞行和自主化运营方面将取得更大突破。然而，随之而来的是空域集成的复杂性日益增加，无人机滥用和网络安全等新兴威胁持续演变，全球范围内监管政策的协调与国家利益之间的平衡仍具挑战性。此外，行业对具备专业技能的无人机飞行员、维护人员和数据分析师的需求也将持续扩大<sup>1</sup>。

为应对这些趋势和挑战，提升未来无人机运营的整体安全水平，本报告提出以下战略性建议：

- **对监管机构的建议：**
  - **加速制定并实施先进运营法规：** 应加快针对 BVLOS、自主飞行等先进无人机运营的性能化法规的制定和落地，提供清晰、可操作的合规路径，鼓励技术创新和应用拓展。
  - **强化现有规则的执行力度：** 综合运用技术手段（如 Remote ID 数据分析、空域监控系统）和增加一线监管资源，提升对违规飞行的发现和处置能力，形成有效震慑。
  - **投资并强制推行稳健的数据收集与共享机制：** 建立统一、高效的无人机安全数据（包括事故、事件、违规信息）收集、分析和共享平台，为基于风险的安全决策提供数据支撑。
  - **促进国际合作与标准协调：** 在透明处理合理安全关切的前提下，积极参与并推动



全球无人机安全标准的协调统一，减少跨国运营的法规壁垒。

- **制定明确的 UAS 网络安全标准：** 针对无人机系统（包括飞行平台、地面控制站、数据链）的网络安全，制定并推行强制性或推荐性标准，提升行业整体网络防护能力。
- **对行业相关方（制造商、服务提供商）的建议：**
  - **践行“安全内建”与“安保内建”理念：** 在无人机产品的设计、研发、制造全生命周期中，将飞行安全和网络安全置于核心地位，采用冗余设计、故障安全机制和强大的加密措施。
  - **投入研发用户友好的人机界面 (HMI) 和高质量的培训课程：** 简化操作复杂度，提供清晰、直观的飞行信息显示，开发针对不同运营场景和技能水平的专业培训项目。
  - **积极实施安全管理体系 (SMS) 并培育强大的安全文化：** 无论企业规模大小，都应建立并有效运行 SMS，鼓励全员参与安全管理，营造“主动报告、持续改进”的安全氛围。
  - **合作开发并采纳可互操作的安全技术：** 积极参与 UTM/U-space、DAA 等关键安全技术的研发、测试和标准化工作，确保不同系统间的兼容性和协同效应。
- **对操作员的建议：**
  - **致力于持续学习并严格遵守所有适用法规：** 主动了解并掌握最新的飞行规则、空域限制和操作流程，确保每一次飞行都合法合规。
  - **积极采纳 SMS 原则，无论运营规模大小：** 将风险评估、飞行前检查、应急预案等 SMS 核心要素融入日常操作习惯。
  - **主动管理风险并及时报告安全隐患/事件：** 对潜在风险保持警惕，发生安全相关事件或发现安全隐患时，按照规定向有关部门报告。
  - **保持对新技术和最佳实践的关注：** 持续学习新的无人机技术、安全操作方法和行业最佳实践，不断提升自身专业素养。

未来无人机安全的提升，高度依赖于一个由三方面共同构成的稳固支撑体系：即强大且能适应技术发展的监管框架、技术先进且高度可靠的安全系统，以及在整个无人机社群中根深蒂固的安全文化。监管机构需要制定既能保障安全又能促进创新的规则，例如针对 BVLOS 运营的法规<sup>6</sup>和如 EASA 新规那样的全面框架<sup>30</sup>。技术是管理复杂运营和缓解风险的关键，UTM、AI 和 DAA 等技术的发展至关重要<sup>1</sup>。然而，人的因素和操作员的合规性始终是关键环节，这需要通过教育、培训和文化建设来强化<sup>15</sup>。这三个方面中的任何一个出现短板，都可能削弱整体安全水平。因此，必须采取一种整体战略，加强监管机构、行业 and 操作员之间的紧密合作与协同。孤立的努力将不足以应对一个持续扩张和快速演变的无人机生态系统所带来的复杂风险。

解决无人机飞行员技能和知识水平参差不齐的问题，对于提升整体安全记录至关重要，尤

其考虑到无人机操作员群体的日益多样化（涵盖娱乐、商业、公共安全等多个领域）。

《FAA 重新授权法案》中已包含对劳动力培训的投资条款<sup>6</sup>，佐治亚州交通部等地方机构也在提供远程飞行员认证培训<sup>2</sup>。大量的违规事件源于操作员对基本规则缺乏了解或未能遵守<sup>4</sup>。而 BVLOS 等高级运营，则对飞行员的技能水平提出了更高要求<sup>2</sup>。因此，建立标准化、易于获取且针对不同运营角色的培训和认证体系势在必行。同时，还需要通过持续的教育和宣传活动，确保安全信息能够有效触达所有类型的无人机操作员，从而弥合技能鸿沟，夯实无人机安全运行的人力基础。

## 引用的著作

1. Drone Inspection and Monitoring Global Market Report 2024-2030 - GlobeNewswire, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/04/08/3057401/28124/en/Drone-Inspection-and-Monitoring-Global-Market-Report-2024-2030-Growing-Focus-on-Oil-and-Gas-Pipeline-Monitoring-AI-for-Automated-Defect-Detection-Drives-Adoption-in-Manufacturing.html>
2. Uncrewed Aircraft Systems (UAS) FY 2024 Annual Report - GDOT, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://www.dot.ga.gov/InvestSmart/Aviation/Documents/UAS\\_2024\\_AnnualReport.pdf](https://www.dot.ga.gov/InvestSmart/Aviation/Documents/UAS_2024_AnnualReport.pdf)
3. 民航局：2024 年无人机运营单位总数超过 2 万家 - 航空产业网, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.chinaerospace.com/article/59991>
4. Drone Violations Database - Dedrone, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.dedrone.com/drone-violations-database>
5. 2024 in Review: Escalating Drone Threats and the Need for ..., 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.airsight.com/blog/2024-review-drone-threats>
6. FAA Safety Briefing - November December 2024, 访问时间为 五月 26, 2025, <http://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/NovDec2024.pdf>
7. What's Happening with FAA Commercial Drone Regulation - Winter 2024, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.commercialuavnews.com/regulations/what-s-happening-with-faa-commercial-drone-regulation-winter-2024>
8. Progress in BVLOS Rulemaking: A Turning Point for U.S. Commercial Drone Operations, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronelife.com/2025/05/15/progress-in-bvlos-rulemaking-a-turning-point-for-u-s-commercial-drone-operations/>
9. New drone laws take effect: What public safety agencies need to know - Axon.com, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.axon.com/resources/new-drone-laws-take-effect>
10. All Info - S.473 - 118th Congress (2023-2024): American Security Drone Act of 2023, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.congress.gov/bill/118th->

[congress/senate-bill/473/all-info](https://www.congress.gov/bills/118/473/all-info)

11. Global Drone Review 2024: Drone adoption “through the roof” worldwide - Zag Daily, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://zagdaily.com/zag-air/global-drone-review-2024-drone-adoption-through-the-roof-worldwide/>
12. Recap of the Global State of Drones 2024 Report - InnovateEnergy, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://innovateenergynow.com/resources/recap-of-the-global-state-of-drones-2024-report>
13. Unmanned Aircraft Systems (UAS) | Federal Aviation Administration, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.faa.gov/uas>
14. Why Drone Survey's Are Changing Construction Sites in 2024 [Expert Guide] - Atom Aviation, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.atomaviation.com/why-drone-surveys-are-changing-construction-sites-in-2024-expert-guide/>
15. EASA Safety Review 2024: Trends in European Aviation Safety - ASQS, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://asqs.net/blog/easa-safety-review-2024/>
16. vast.aero, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://vast.aero/wp-content/uploads/2024/08/EASA ASR 2024 For Publication.pdf](https://vast.aero/wp-content/uploads/2024/08/EASA_ASR_2024_For_Publication.pdf)
17. 2024 United States drone sightings - Wikipedia, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/2024\\_United\\_States\\_drone\\_sightings](https://en.wikipedia.org/wiki/2024_United_States_drone_sightings)
18. Drone Incidents Involving Aircraft Should Be Industry Wakeup Call - DRONELIFE, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronelife.com/2025/02/11/drone-incidents-involving-aircraft-should-be-industry-wakeup-call/>
19. Foundation Annual Safety Report Warns of Rising Risks from Gaps ..., 访问时间为 五月 26, 2025, <https://flightsafety.org/foundation-annual-safety-report-warns-of-rising-risks-from-gaps-in-safety-compliance/>
20. FAA Acting Administrator Chris Rocheleau Discusses Regulatory Priorities at AUVSI XPONENTIAL 2025 - Drone Life, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronelife.com/2025/05/21/faa-bvlos-and-counter-uas-update-at-xponential-2025/>
21. Appendix D - Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Part 107 Accident Reporting Application - Department of Transportation, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-09/Privacy%20FAA%20-%20Appendix%20D%20-Small%20Unmanned%20Aircraft%20System%20%28sUAS%29%20Part%20107%20Accident%20Reporting%20Application%20-%20PIA%20-%202023.pdf>
22. Text - S.473 - 118th Congress (2023-2024): American Security Drone Act of 2023, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/473/text>
23. What does the American Drone Security Act (ADSA) mean to You? - DRONERESPONDERS, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.droneresponders.org/post/what-does-the-american-drone-security-act-adsa-mean-to-you>
24. Former DOI Director on the Impact of the American Drone Security Act: From the

- Floor of the National Public Safety UAS Conference, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronelife.com/2024/03/12/former-doi-director-on-the-impact-of-the-american-drone-security-act/>
25. DJI Challenges US Security Agencies In NDAA Deadline Push - DroneXL, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronexl.co/2025/04/03/dji-us-security-agencies-drone-ndaa-deadline/>
  26. The DJI Ban: Your Guide to What's Happening with the Ban - UAV Coach, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://uavcoach.com/dji-ban/>
  27. UAS Safety Reporting - NASA ASRS, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://asrs.arc.nasa.gov/uassafety.html>
  28. www.faa.gov, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.faa.gov/nextgen/NextGen-Annual-Report-2024.pdf>
  29. Drones (UAS) | EASA - European Union, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/faqs/drones-uas>
  30. What you need to know about the 2024 EU Drone Regulations | Stay ..., 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.globhe.com/newsroom/2024-eu-drone-regulations>
  31. Drones & Air Mobility - EASA - European Union, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.easa.europa.eu/el/domains/civil-drones>
  32. UK Civil Aviation Authority Launches UK SORA: A Digital Risk ..., 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.caa.co.uk/newsroom/news/uk-civil-aviation-authority-launches-uk-sora-a-digital-risk-assessment-system-for-unmanned-aircraft-systems/>
  33. Director Of Civil Aviation Annual Report 2024 - States Assembly, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://statesassembly.je/publications/assembly-reports/2025/r-7-2025>
  34. www.caac.gov.cn, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202505/P020250515367555717699.pdf>
  35. 低空无人机交通管理概览与建议综述 - 航空学报, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/10.7527/S1000-6893.2019.23238>
  36. 2024 年民航局法治政府建设工作情况, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202503/t20250319\\_226988.html](https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202503/t20250319_226988.html)
  37. 民用无人驾驶航空器综合管理平台 (UOM) (caac.gov.cn) - 中国民用航空局, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://uom.caac.gov.cn/>
  38. www.easa.europa.eu, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/2024\\_caac\\_easa\\_asc\\_agenda\\_rv.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/2024_caac_easa_asc_agenda_rv.pdf)
  39. Tracking the Threat: Key Takeaways from Recent Drone Incidents - D-Fend Solutions, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://d-fendsolutions.com/blog/key-takeaways-from-recent-drone-incidents/>
  40. Studying the Rates of UAS Sightings Near Airports by Month, November 2019 to



December 2024, 访问时间为 五月 26, 2025,  
[https://repository.fit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1027&context=aero\\_studengt](https://repository.fit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1027&context=aero_studengt)

41. An Examination of UAS Incidents: Characteristics and Safety Considerations - MDPI, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/2/112>
42. What Are The Rules To Fly Your Drone In 2024? - DroneXL, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronexl.co/2024/01/30/rules-to-fly-your-drone-2024/>
43. Skydio X10 Safety Update Drops Amid Supply Chain Chaos - DroneXL, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronexl.co/2025/02/25/skydio-x10-safety-update-battery/>
44. Global Drone Detection Market Size, Share, Trends, and Forecast 2025–2031, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=757>
45. The Impact of Autonomous Drones on Privacy and Security - USRESIST NEWS, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.usresistnews.org/2025/01/28/the-impact-of-autonomous-drones-on-privacy-and-security/>
46. Drone Detection Market Size & Share | Industry Report, 2030 - Grand View Research, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/drone-detection-market-report>
47. The Future of the Anti-Drone Market Innovations, Trends, and Global Impact, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.marketsandmarkets.com/blog/se/future-of-anti-drone-market-trends-challenges-opportunities>
48. UAS Detection and Mitigation Systems Aviation Rulemaking Committee Final Report - FAA, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/rulemaking/committees/documents/index.cfm/document/information/documentID/6104](https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/committees/documents/index.cfm/document/information/documentID/6104)
49. The Impact of AI Drones and Nanotechnology on Global Security in 2025: Emerging Threats Across the UK, Europe, Asia, and the Middle East - IoT Magazine, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://iotworldmagazine.com/2025/04/17/2787/%E2%80%8Bthe-impact-of-ai-drones-and-nanotechnology-on-global-security-in-2025-emerging-threats-across-the-uk-europe-asia-and-the-middle-east>
50. AI Impact Analysis on Public Safety Drone Industry - MarketsandMarkets, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/ai-impact-analysis-on-public-safety-drone-industry.asp>
51. 2024 NBAA Top Safety Focus Areas, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://nbaa.org/aircraft-operations/safety/2024-nbaa-top-safety-focus-areas/>
52. EASA Annual Safety Review 2024 Explained - YouTube, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=tp3k6txCpi0>
53. Beyond Visual Line of Sight: The Next Step for Drones in Public Safety - DroneSense Blog, 访问时间为 五月 26, 2025,

- <https://blog.dronesense.com/bvlos-in-emergency-response>
54. 2024\_Comments re Zipline - Regulations.gov, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://downloads.regulations.gov/FAA-2020-0499-0045/attachment\\_1.pdf](https://downloads.regulations.gov/FAA-2020-0499-0045/attachment_1.pdf)
55. The modern DFR deployment: insights from nearly 2000 DFR flights - Skydio, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://www.skydio.com/blog/insights-from-nearly-2-000-dfr-flights>
56. 2024 U.S. Public Safety Trends Report, 访问时间为 五月 26, 2025, [https://8355279.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/8355279/trendsreport2024\(1\).pdf](https://8355279.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/8355279/trendsreport2024(1).pdf)
57. FAA Chief Operating Officer ATC Highlights Public Safety Drone Advancements at National Public Safety UAS Conference - Drone Life, 访问时间为 五月 26, 2025, <https://dronelife.com/2025/03/11/faa-chief-operating-officer-atc-highlights-public-safety-drone-advancements-at-national-public-safety-uas-conference/>