

WORKtoZERO

an nsc program



无人机用于高空作业和受限
空间检查

执行摘要

检查是每个行业执行操作的重要组成部分。一些检查本质上是更具危险性的，尤其是那些需要在高处作业或进入有限空间的情况。虽然2017年检查仅占非道路工作场所事故死亡的2%，但高处作业和有限空间进入共同导致这些死亡的25.34%（NSC，2020）。

国家安全委员会“零事故”工作的目标是通过技术的利用来消除工作场所的伤亡事故。无人机，也称为无人驾驶飞行器（UAVs），可以作为减轻与检查相关的系统性和情境性风险的支持工具。无人机可以飞入高风险情况和难以到达的区域，以执行现实捕捉和进行准确测量，否则这些工作将需要员工将自己置于风险环境中（Karakhan & Alsaffar，2019）。利用无人机技术来减少或消除垂直和有限空间检查的风险，还具有通过增强数据捕获过程来提高生产力和效率的附带好处。

商用及工业无人机市场正在经历快速扩张。竞争格局多样化，包括三类核心供应商：拥有专有软件的硬件提供商、针对不同应用场景的纯软件供应商以及提供无人机服务的企业。

无人机技术在商业、工业和民用政府（CICG）领域的应用仍在兴起。尽管面临数据隐私担忧、复杂法规和技术限制（如电池寿命短限制飞行时间）等采用障碍，兴趣仍在不断增长。在未来五年内，随着无人机技术和相关法规的更加成熟，我们可以预期CICG领域的无人机将迎来第二波增长，随着市场不确定性的降低和投资的增加。作为航空航天、科学和技术中发展最快的领域之一，无人机无疑将在技术障碍被克服的过程中越来越多地颠覆传统流程。



引言及背景

致力于零缺陷工作

尽管共同努力减少严重伤害和死亡事故（SIF），但美国的工作场所死亡人数并没有出现大幅下降。在1992年至2017年之间，美国职业安全与健康管理局（OSHA）的记录伤害率从每100名工人8.9起伤害下降到每100名工人2.8起伤害，下降了67%（美国国家安全委员会，2018年）。在同样的时间段内，工作场所的死亡率（可预防的死亡）仅下降了26%，2017年发生了4,414起可预防的工作场所死亡事故（劳工统计局，2018年）。此外，根据美国劳工统计局的数据，2018年美国共记录了5,250起总工作死亡伤害，比2017年的5,147起增加了2%。在2017年至2018年之间，每10万名全职等效员工中的致命工作伤害率保持不变，为3.5起。公司为减少工作场所伤害所作的广泛努力似乎并未转化为对工作场所死亡率的有效减少。

认识到这一趋势，国家安全委员会（NSC）于2019年启动了其“零事故”计划——由McElhattan基金资助——以专注于对抗工作场所伤亡事故和严重伤害事件中衰退的下降趋势。“零事故”计划的目标是利用技术消除工作场所的伤亡。通过几十年的洞察力和数据，以及利用NSC成员和网络的专长，“零事故”计划将确定在我们有生之年有助于消除工作场所伤亡的有前景的技术创新。

数字技术作为降低工作场所SIF事件的方法

在2020年，零工计划发布了其首份白皮书，详细列出了前18个危险的工作场所情况（例如，高空作业、机械操作、受限空间进入）以及相关的情境风险（例如，坠落、被物体击中、有害气体暴露）。报告进一步确定了可能导致这些危险情境风险加剧的系统性影响因素（例如，缺乏培训、疲劳、工作设计）。接下来，NSC与Verdantix研究人员合作，识别并绘制了超过100种相关的环境健康与安全（EHS）技术，这些技术可以帮助减轻情境和系统性风险。这些风险还被以EHS专业人士认为最有效的方式进行了映射。

《零工作初始报告》确定了在调查的专业人士中引起最多兴趣和价值的几项关键技术。此外，NSC的Campbell研究所内的安全领导者已表现出对评估和评估某些技术（如虚拟现实、可穿戴设备、传感器和无人机）的兴趣。本报告是该系列报告之一，更专注于特定危害风险及其相关有希望的技术。

特别是，本报告将探讨无人机在垂直和有限空间检查中的应用。它将研究无人机在商业、工业和民用政府部门的各种应用案例。此外，它还将调查这项技术的既定和提出的好处，以及与其采用相关的局限性和风险。最后，本报告将阐明与无人机相关的供应商格局，以提供有关市场和供应的教育。

检查的危害

审核通常是大多数运营的关键部分，无论行业类别。虽然审核对于确保资产得到适当维护和保持健康至关重要，但这些活动往往要求审核团队使自己陷入危险情况、不断变化的环境条件和发展中的风险环境之中。

在《零事故安全技术2020白皮书》中，NSC发现与检查中严重伤害和死亡（SIF）最相关的情境风险是受限空间风险和跌落到较低水平。2017年，高空作业和受限空间进入分别占非道路工作场所死亡人数的大约22.59%和2.75%（NSC，2020）。与检查中严重伤害和死亡最相关的系统性风险是缺乏培训、不恰当的坠落防护和缺乏工作场所意识（NSC，2020）。

随着技术的进步，企业正在探索新的数据收集方法，以避免将检查队伍置于危险环境中，例如在锅炉和压力容器内工作或在塔楼和蜂窝基站上攀爬。无人机，也称为无人驾驶飞行器（UAVs），可以作为辅助工具，在减轻与检查相关的系统性和情境性风险的同时，提高生产效率和降低维护成本。

研究方法

本论文的方法论包括两个步骤：

- 1) 确定用于无人机垂直和有限空间检查的案例研究、临床试验和用例
- 2) 开发与该技术相关联的相关供应商市场格局候选名单

本文数据来源于与该技术相关的几份学术和工业期刊的文献综述（见参考文献）。此外，Verdantix研究人员还利用了先前发表的报告和访谈中的案例研究和访谈数据（Verdantix，2020）。供应商短名单是通过搜索Verdantix市场数据库和外部研究编制的。供应商的选择基于公司的规模和成熟度、与风险领域的相关性、可证明的使用案例以及对美国市场的适用性。

无人机市场概述

技术介绍

无人机，也称为无人驾驶飞行器（UAVs），在军事和防御目的上已被使用了几十年。在过去的十年里，消费级无人机市场经历了快速增长，这极大地降低了技术的价格点。这为商业、工业和民用政府（CICG）用途案例开辟了一系列新机会。2017年，美国在CICG无人机上的支出达到了4.55亿美元，但市场仍处于起步阶段（Verdantix，2018）。

无人机被定义为“多旋翼和固定翼无人机，设计用于搭载信息收集技术载荷，并配备导航与控制系统，允许在视距内及超出视距的远程、半自主及自主飞行”（Verdantix，2020）。

无人机正在成为人类历史上最具颠覆性的技术之一（Watkins等，2020）。过去四年中，使用无人机收集数据的技术得到了显著改进，这反过来又增强了在CICG中运用无人机所带来的价值主张。无人机可以配备3D摄像头、热成像摄像头、人工智能、光探测与测距（LiDAR）以及具有高级传感器的4K摄像头。这使得它们作为“天空之眼”具有极大的效能。广泛的各种传感器和转换器——包括电子重力、热、机械、电磁和化学——可以感应从气体泄漏到大气压力的多种测量值，允许执行广泛的调查任务，其中许多任务已在商业上实施（Watkins等，2020）。

多旋翼飞行器由于其悬停能力、操作相对简单和出色的机动性，在无人机市场中占据主导地位。多旋翼无人机非常适合空中摄影和检查，因为它们使用自动稳定性系统，可以控制位置和构图（Watkins等，2020年）。多旋翼飞行器的续航能力和速度有限，当前的电池技术使得载重较轻时，飞行时间上限为30分钟（Verdantix，2020年）。

相比之下，固定翼无人机模仿了普通飞机的翼结构以实现升力，并且由于它们仅使用能量向前推进而不是保持空中飞行，因此效率更高（Watkins等人，2020）。因此，固定翼无人机能够飞行更长的距离，但它们无法在单一位置悬停（Verdantix，2018）。这些特性使得固定翼飞行器在长途测绘和勘测方面非常有效，但同时也使它们不适合空中摄影、垂直和受限空间的检查。

无人机市场包括CICG在四个广泛类别中的12个关键应用场景：检查、监控、勘测和制图以及应急响应。

检查	监控	测绘学	应急响应
<ul style="list-style-type: none"> • 垂直基础设施检查 • 横向基础设施检查 • 有限空间检查 • 内部建筑检查 • 农作物、牲畜及林业检查 	<ul style="list-style-type: none"> • 临界基础设施监控 • 环境监测 • 海上安全和保障 • 网站安全监控 	<ul style="list-style-type: none"> • 环境测绘，影响评估及监控 • 现场和体积测量 	<ul style="list-style-type: none"> • 事故调查与应急响应

最广泛的类别是基础设施、有限空间、建筑和自然资源的检查，包括作物、牲畜和林业。在美国市场，垂直基础设施检查占无人机收入的最高份额，2017年总计达到9500万美元（Verdantix，2018）。这些检查用例具有跨行业应用，包括寻找风力发电机塔的裂缝和观察高层建筑的结构，如桥梁、石油钻井平台、铁路和电力线路。第二类包括监测海洋和环境问题、关键基础设施和安全设施。第三类包括建设工地、地表和商品体积的测量和制图。最后一类包括涉及救援人员的紧急和事故响应。

供应商格局

商业和工业无人机市场正在经历快速增长。竞争格局多样，包括以下三大核心供应商类别：拥有专有软件的硬件提供商、针对不同使用场景的纯软件供应商以及提供无人机服务的企业。

硬件供应商向客户提供不同类型的无人机以及载荷，例如相机和传感器。尽管目前硬件在收入中占据了多数份额，但它正在迅速变得商品化。为了在日益竞争激烈的市场中脱颖而出，大多数硬件供应商，如大疆和飞宇，现在也提供专有和第三方软件，用于制图、摄影测量、飞行导航、规划和数据分析。

纯玩软件供应商在无人机市场中，通过提供帮助无人机规划、收集、分析、检测、决策和独立行动的软件，正在加强无人机在CICG环境下应用的价值主张。例如MEASURE等公司，将高级分析和机器学习能力嵌入到软件中，使企业能够将大量原始数据转化为可操作的见解。

无人机服务提供商是咨询领域的一个新类别。这些提供商通过提供最适合的搭载有效载荷的无人机硬件、培训有素的飞行员驾驶无人机并收集数据，以及分析和解译数据的软件，提供端到端的项目服务。能够提供无人机计划所需的软硬件和服务，例如咨询巨头Golder和AECOM，帮助公司利用这项技术的好处，而不需要开发昂贵的内部能力。提供无人机产品服务的企业还包括塔塔咨询服务公司 (Tata Consultancy Services)、Jacobs、ERM和Ramboll。较小的咨询公司，如Plowman Craven和CyberHawk，也为客户提供无人机服务。以下供应商提供与无人机相关的技术或软件。特别引人注目的是供应商公司规模的不同，员工数量从61人到6000人不等。预计随着更多雇主审查和实施在职场中使用无人机，无人机技术和软件供应商的数量将会增加。

示例供应商

供应商	员工
大疆创新科技有限公司 (DJI)	6,000
FLIR	4,007
AeroVironment	779
PrecisionHawk	171
DroneDeploy	156
德尔艾尔	143
3D Robotics (3DR)	118
MicroDrones	107
度量	61

颜色代码
无人机技术提供商
无人机软件供应商

利用无人机进行垂直和封闭空间检查的益处

无人机不仅能够最小化与危险工作条件相关的安全风险，而且在某些情况下，可以完全消除这些风险（NAEM，2019）。无人机可以飞入高风险环境和难以到达的区域，进行现实捕捉和进行精确测量，否则这些工作将需要员工暴露在危险环境中（Karakhan & Alsaffar，2019）。例如，威瑞森电信与无人机服务提供商MEASURE合作，在哈维飓风之后进行蜂窝塔检查，以评估基础设施损害。手动电信塔检查通常需要每个桅杆花费整整一天时间，绳索技术人员需要亲自爬上这些40英尺高的塔。通过使用无人机进行高空检查工作，威瑞森电信能够消除检查人员面临的风险，同时节省与数据收集相关的时耗和成本（Verdantix，2020）。

有强有力的商业理由使用无人机代替人员在潜在危险的封闭空间，如油罐、管道和发电设施中的反应器等（NAEM，2019年）。拥有1420亿美元收入的能源公司Chevron开展了一项使用Flyability无人机进行垂直压力容器检查的试点项目。由于基于无人机的替代方案成功，Chevron已经承诺在2020年消除在受限空间检查中使用工人的做法（Verdantix，2018年）。

在需要物理干预的情况下，无人机可以通过改进危险识别和识别来降低垂直和封闭空间检查的风险概貌。无人机可以被调动来评估受检区域的环境和结构状况，在派遣检查人员之前，从而使管理层加强安全规划、意识和沟通（Karakhan & Alsaffar，2019）。

利用无人机技术降低或消除垂直和有限空间检查的风险，具有提高生产力和效率的附带好处（Verdantix，2020）。例如，Cyberhawk Innovations使用无人机检查马士基石油公司的海上货油罐，这通常需要四名工人使用绳索在三天到四天的时间内完成。通过使用无人机，整体检查时间减少了五分之一，每个货油罐节省了7000美元的成本（Verdantix，2018）。此外，全球电信公司AT&T，年收入1810亿美元，自2015年以来一直在使用无人机检查其美国65,000个蜂窝塔的状况。使用无人机作为替代塔顶攀爬者，允许AT&T员工在更安全的情况下完成更多工作，减少了潜在安全事故的机会。这也使得数据采集更快、更准确（Verdantix，2020）。

风险与考虑因素在使用无人机进行垂直和受限空间检查中

风险

有三个主要类型的与无人机硬件相关的风险事件：失败的/坠落的无人机硬件造成的地面撞击、无人机与民用有人驾驶飞机之间的空中碰撞以及与无人机螺旋桨接触造成的伤害（张等，2018年）。这些风险在垂直检查中比在受限空间检查中更为适用。地面撞击的风险在稀疏、较少遮蔽的地区尤其高。具有更多基础设施和树木覆盖率的位置可以降低因无人机坠落而导致的地面致命撞击的概率（张等，2018年）。对于空中碰撞，大多数致命风险集中在拥有主要机场、繁忙的民用航线和高密度航道的城市地区（张等，2018年）。最后，就像任何工业设备或技术一样，不当使用和不合格的运营商会大大增加SIF事件的可能性。根据无人机的大小和电机，如果处理不当，螺旋桨可能会造成严重伤害（约翰逊等，2019年）。虽然许多供应商正在使用螺旋桨护罩来减轻这种风险，但建议公司与拥有适当保险并具有先前无人机项目可审计记录的授权供应商合作。

采纳的障碍

关键挑战影响了中国商业无人机市场（CICG）的增长是围绕无人机使用的含糊、限制性的法规以及法规的持续演变。在美国，各州的无人机法规存在差异。美国联邦航空管理局（FAA）的若干规定治理了全国范围内的无人机使用，例如要求无人机具有持续的目视距离、飞行员许可证以及禁止在非直接参与操作的个体上空飞行（Gonzalez，2018）。FAA根据目的、地理位置和操作时间的因素，指定了批准的无人机使用（NAEM，2019）。无人机操作员可以申请放宽FAA第107部分的规定，进行超视距（BVLOS）飞行或允许单一操作员同时驾驶多个无人机（Verdantix，2020）。

数据隐私问题是面临不断发展的无人机市场所面临的障碍之一。无人机在执行监控程序时可能会无意中记录非雇员的信息，这导致了责任问题的担忧（EHS Today，2019）。此外，如噪音和视觉污染等社会影响也可能阻碍无人机的发展。

最后，无人机技术可能因成本过高而受限，大多数企业正在探索无人机项目的可行性，面临内部是自行研发还是购买设备的辩论。对于拥有多个无人机重复使用案例的大型跨国公司，可能会选择内部开发这些能力，但对于许多企业来说，这并不具有财务可行性。随着无人机服务提供商在供应商领域的日益增多，这项技术变得更加易于获取和负担得起，因为企业可以在需要时签订这些能力。

技术局限性

尽管过去五年中无人机技术有了显著提高，但一个关键问题仍然困扰着整个行业，那就是电池寿命短。无人机飞行时间受到其电池大小与其重量和载重的相对关系的限制。多旋翼飞行器的平均飞行时间为七分钟，最高可达30分钟。这限制了进行长时间航测以评估广阔工业场所的能力，例如（Verdantix，2020年）。

无人机依赖于视距无线电波，也可能受到地形和其他障碍物的影响，如高楼大厦，也可能受到其他无线电传输来源的干扰（Watkins等，2020年）。此外，大多数无人机不具备防风雨能力，环境条件可能会显著限制无人机使用。降雨、雾、雾霾和污染限制了传感器的数据质量和通信及导航系统的有效性（Watkins等，2020年）。

结论与未来方向

NSC的Work to Zero (零工计划) 的目标是通过使用技术消灭工作场所的伤亡事故。NSC进行的工作到零的初始研究揭示了影响工作场所SIF事件的情境和系统性风险。通过专家访谈，NSC确定了可用于防范这些高风险活动的有潜力的技术。在这些技术中，无人家飞机引起了调查受访者和NSC会员的兴趣。

检查是每个行业操作中的关键组成部分。一些检查本身就具有更高的危险性，尤其是那些需要在高处作业或进入有限空间的检查。尽管在2017年，检查只占非道路工作场所伤亡的2%，但高处作业和进入有限空间的总贡献率为25.34% (NSC，2020)。多旋翼无人机可以被用来限制或消除检查团队进入这些场合的需求，使得员工可以在安全的情况下解读和分析这些信息。

商业案例表明，在危险检查中使用无人机是稳健的，因为它不仅有助于降低风险策略，还实现了生产率和效率的提升。然而，无人机技术和其在CICG中的应用仍在不断发展，寻求开发无人机项目的公司应意识到目前市场上存在的数据隐私问题、复杂的监管环境和技术限制。

在未来五年内，随着围绕无人机的技术和法规变得更加稳定和成熟，我们预计随着市场的不确定性降低和投资增多，CICG的无人机将会迎来第二波增长。在未来十年，随着人工智能和机器学习的推进，无人机价值主张也将得到加强，为完全自主的无人机铺路。

作为航空航天领域发展最快的方面之一，科学和技术，在技术和管理障碍逐步克服的背景下，无人机无疑将越来越多地颠覆传统流程。

Gonzalez, G. (2018). 能源公司利用新技术评估风险。商业保险，第52卷，第2期。

Informa. (2019). 解锁安全技术价值。EHS Today图书馆。

卡拉罕，A.，阿尔萨法尔，O. (2019)。技术在安全管理中的作用。《专业安全》。64 (1)，43-45。

国家环境保护、健康与安全以及可持续发展管理协会。(2019)。
EHS&S技术转型。NAEM.

国家安全委员会。(2020年)。《2020年安全技术：描绘技术解决方案以降低工作场所严重伤害和死亡事故》工作至零。

Verdantix. (2020). 买手指南：无人机解决方案提供商。从 <https://research.verdantix.com/report/operational-excellence/buyer-s-guide-drone-solution-providers> 获取

Verdantix. (2018). 智能创新者：无人机服务提供商。从 <https://research.verdantix.com/report/operational-excellence/buyer-s-guide-drone-solution-providers> 获取

Verdantix. (2018). 无人机市场规模及预测 2017-2037 (美国)。从 [https://research.verdantix.com/report/operational-excellence/drones-market-size-and-forecast-2017-2037-\(united-states\)](https://research.verdantix.com/report/operational-excellence/drones-market-size-and-forecast-2017-2037-(united-states)) 获取。

Watkins, S., Burry, J., Mohamed, A., Marino, M., Prudden, S., Fisher, A., Kloet, N., Jakobi, T., Clothier, R. (2019).

关于城市环境中无人机使用的十个问题 建筑与环境，167 (106458)，1-10。

张, X., 刘, Y., 张, Y., 郭然, X., 德拉哈伊, D. & 汤佳, L. (2018). 无人机在国家空域系统运行中的安全评估与风险评估。《高级运输杂志》。2018(4731585), 1-11.

