

近窥切尔诺贝利隐藏的辐射“热点”

(北京大学 赵强、孟杰 摘译自 Peter Martin, Tom Scott. *Physics World*, 2019, (9): 29)

由于切尔诺贝利仍然是地球上放射性污染最严重的地区之一，获得进入许可并不容易。研究人员花了四个月的时间获得使用无人机的安全许可，以及在工作期间需要佩戴的辐射剂量测量胶片徽章。2019年4月，英国布里斯托大学教授汤姆·斯科特(Tom Scott)和研究助理彼得·马丁(Peter Martin)等人乘着载有各种辐射探测器、无人机和防护设备的小型巴士，在向导引领下进入切尔诺贝利核电站周围的禁区。乌克兰对禁区安全的态度可以从检查站反映出来：武装警卫人员在入口认真检查许可证和身份证，在出口检查人员和车辆的放射性。

1986年4月切尔诺贝利事故发生36小时后，居民开始撤离，前后约有20万人被迁移。受事故影响，乌克兰境内形成一个约2600平方公里的禁区，里面仅有不到200名拒绝撤离或秘密返回的居民。从矗立在地平线上的新安全隔离防护层，

可以看到为了保护事故形成的废墟并防止更多的放射性泄漏到环境中所做的大量工作。禁区周围有着令人毛骨悚然的寂静。但是，这种寂静很快被个人剂量仪的警报破坏，警报阈值略高于布里斯托的正常本底放射性，即每秒1—2个计数，而在切尔诺贝利则超过了每秒50个计数。

反应堆与事故

造成1986年灾难的原因之一，是核电时代到来时基本安全常识的缺乏。当然，反应堆的设计缺陷也是原因之一。切尔诺贝利的四个反应堆是前苏联国家独有的压力管式石墨慢化沸水反应堆(RBMK)。

RBMK的石墨芯存放反应堆燃料并充当中子慢化剂。RBMK用水作为冷却剂，利用水泵注水冷却燃料棒，核反应产生的热量将水转化为蒸汽，蒸汽带动涡轮发电机发电。水泵由国家电网供电，停电时，则启动备用柴油发电机维持水

泵的运转和燃料的冷却。然而，备用柴油发电机需要约一分钟才能开始供电，这个时间差足以导致反应堆过热。

确定存在这样的问题之后，切尔诺贝利的工作人员一直尝试在这一分钟的间隙里，利用涡轮发电机为水泵供电。但是，测试表明，没有水注入产生蒸汽，涡轮迅速减速，从而无法保持足够的水流量。

正是在第四次这样的测试中事故发生了。

在关闭安全装置和进行相关操作流程之后，反应堆被关闭(意味着输出功率已降低且达到稳定)，测试于1986年4月26日星期六凌晨开始。涡轮发电机的阻止阀被关闭，蒸汽不再推动涡轮转动，相应的涡轮机驱动的水泵开始减速。但是，水流的减少、设计缺陷、人为失误和安全系统的禁用，造成反应堆底部的水沸腾，引发反应堆功率灾难性的快速增加。最后已知的反应堆输出功率约为30000 MW，是正常运行值的10倍，据称其峰值甚至可能比此高10倍。

爆炸一共发生两次，燃料、慢化剂和结构材料从反应堆中喷出，引发火灾，并且将堆芯暴露在大气中。大量放射性物质扩散到大气环境，并传播到很远的地方。两名工人在爆炸中立即丧生，超过130名消防员被送往医院治疗，其中28人死于急性辐射病，14人在随后几年中遭受辐射诱发癌症的折磨。与切尔诺贝利核事故相关的死亡人数存

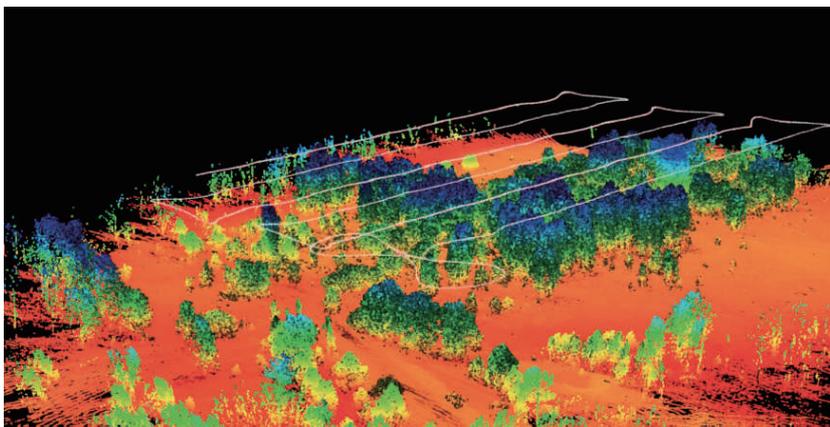


图1 俯瞰图。无人机上的3D扫描激光雷达获得的部分红色森林的数字立体模型。激光扫描可以检测毫米级的表面特征，从而获得该地的高分辨率地形图

在很大的分歧，估计为4000至60000人。

放射性后果

全球范围内都探测到切尔诺贝利核电站的放射性，但大部分放射性物质都沉积在事发地附近，尤其是反应堆西侧区域。这种高辐射导致核电站周围10平方公里林地内的松树变成红色并最终死亡，这就是著名的“红色森林”。尽管这些树木最终被推倒并掩埋，这里仍然是世界上污染最严重的地区之一。

与今天的技术相比，当时的辐射监测水平有限。为了获得辐射分布、强度和成分的大致测绘图，只能由人使用小型手持设备进行物理测量。这种方式并不能测量事故所释放的高剂量辐射。虽然测量工作中也使用了直升机，但是随着环境变化，现有的最完整和最准确的测绘图早已过时。

发送无人机

布里斯托大学研究团队和乌克兰政府都希望以更高的分辨率测绘禁区中无法访问的大面积区域，确定残余污染的位置和辐射水平。尽管不可能实现完全的去污染和人口回迁(与日本福岛地区不同)，这片土地目前正在被考虑用作太阳能农场。如此，只需要利用这片没有其他用途的土地上的现存配电网络，便能为当地和政府贡献急需的财富。

研究人员在多旋翼无人机辐射测绘的基础上，发展了介于200—500 m高空有人驾驶直升机和低于20 m的低空无人机之间的探测技术。所设计的固定翼无人机在2 m长的机身内封装了飞行控制电子设备、传感器、螺线管和高灵敏的辐射探测器组成的复杂阵列，能够飞行在45—100 m的高度，并覆盖数

十公里范围。其中的辐射探测器是仅重150 g的碘化铯闪烁体，它可以测量飞机巡航路线上捕获到的伽马射线的能量。

研究团队勘测的受污染地区之一，是位于核电站以南2 km的科帕奇(Kopachi)村的一个小型工业维修和废料场。与多旋翼无人机的全自动起飞、测量和着陆不同，固定翼飞机进行测量需要更多的保障和准备工作。由于飞机需要高速才能升空，因此必须在空旷的地方手动将飞机在满功率的情况下抛到空中。一旦安全飞行，飞机可以沿着预设的飞行路线进行长达一个小时的自主测量，然后返回并使用降落伞平缓降落。

这里的辐射水平远高于福岛核电站周围的大多数地区。虽然污染通常是均匀分布的，但是固定翼飞机上的灵敏探测器能够定位非常高放射性的区域(达每小时350 μSv)，而且部分区域在此之前并不知道。利用高空平台确定感兴趣的区域之后，研究人员发送了多旋翼无人机进行较低高度的探测。将他们的算法用于这两组结果，能够精确定出地面任何辐射“热点”的位置。在科帕奇，孤立的辐射“热点”位置与当时的事故处置有关，如车辆被遗弃、掩埋或清洗的地方，雨水和地下水在其周围沉积了高放射性微粒。

科帕奇放射性最强的地方，是一个包括三个大型金属漏斗的碗状

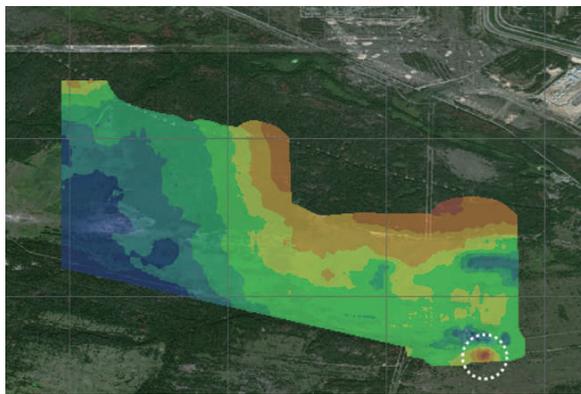


图2 高辐射和低辐射。核电站西和西南区域的辐射测绘图可以很容易地识别出红色森林，红色和橙色区域表明它仍然受到严重污染。测绘还发现了以前未知的综合设施南部的一小块辐射热点

区域。它用于分离大块的岩石和含有放射性成分的沉积物，并且将放射性物质留在原地。其他区域的放射性主要以裂变产物辐射的伽马射线为主，而这个区域则出现了乏燃料的特征光谱。在这里一小时内接受的剂量，相当于在英国全年接受的背景辐射的剂量(2.7 mSv)。

切尔诺贝利的前景

研究人员也曾经多次考察福岛，他们确信切尔诺贝利事故的规模更大。三十多年后，极强放射性区域的存在，突显乌克兰政府面临的挑战，揭示这里是地球上最困难和危险的环境之一。

乌克兰政府计划将大部分禁区改建为太阳能农场，因此迫切要知道有伤害性的放射性污染物的确切位置。此外，对于游客经常游览的区域，地方政府和向导应该提供有辐射信息的详细地图，标注不应到访的区域。尽管仍需更多的研究来改善软件算法和增强飞行性能，但是布里斯托大学的研究人员相信，他们的工作能够在未来发挥重要作用，帮助改造切尔诺贝利禁区。