

无人机电缆隧道巡检可行性调研报告

一、 概述..... 1	2. 微型无人机 10
二、 主要问题与关键技术..... 2	3. 吸顶无人机 11
1. 飞行距离 3	四、 主要调研单位..... 12
2. 起降方式 4	五、 下一步工作计划..... 14
3. 信号传输 5	1. 隧道情况调研 14
4. 控制与导航 6	2. 相关单位调研 14
5. 结构与负载 7	六、 结论..... 15
6. 外部设备接口 8	七、 致谢..... 15
三、 相关方案..... 8	
1. 球型无人机 9	

一、 概述

针对无人机电缆隧道巡检的可行性，通过实地调研、查阅资料、电话交流、邮件沟通的方式，与国内外十余家研究机构和公司进行了探讨。无人机隧道巡检，首要解决隧道内的飞行问题，然后考虑携带检测设备。目前从事相关工作的单位较少，本次调研集中在旋翼无人机隧道内飞行的可行性。根据目前掌握的现状，本报告的初步结论如下：

- 1) 市面上的无人机产品，无法执行隧道内的飞行任务；
- 2) 部分研究机构的成果，可用于隧道巡检，但可行性须实地验证；
- 3) 各方优势互补，无人机隧道巡检可作为研究方向，但短期内难以实用；
- 4) 展示了三种无人机方案，作为隧道巡检研究的参考机型。

二、 主要问题与关键技术



图 1：鸿恩寺电缆隧道内情况

电缆隧道是地下狭长的封闭空间：在 1km 之内，通常会有连接地面与地下的通风井；可飞行的空间高度大约 2m；最窄处为人肩宽，大约 60cm；隧道两侧有线缆支架；底部环境较复杂，可能有线缆交错，如图 1 所示，人需要跨越才能通过；顶部较平整，但可能有吊灯、标志牌等。

隧道特殊的构造和环境是制约了无人机飞行的主因，若不受限于隧道环境，无人机的技术指标足够。目前的调研表明：尚无相关机构有隧道内无人机飞行的经验，关键技术有待实地测试或模拟实验确认。

为了对无人机及其性能有直观的了解，现给出如图 2 所示的大疆 PHANTOM 4 无人机的部分参数作为参考，如表 1 所示。



图 2：大疆 PHANTOM 4 无人机

表 1：大疆 PHANTOM 4 的相关参数

起飞重量	1380g	最大上升速度	6m/s
飞行时间	约 20 分钟	最大下降速度	4m/s
电池容量	5350 mAh	最大水平飞行速度	20m/s
电池重量	约 462g	障碍物感知范围	0.7~15m
卫星定位模块	GPS/GLONASS	视觉系统使用环境	表面有丰富纹理,光照条件充足 (> 15 lux, 室内日光灯正常照射环境)
遥控器工作频率	2.400 - 2.483 GHz	工作环境温度	0 - 40°C
信号有效距离	可达 5000m	轴距	350mm

1. 飞行距离

假设无人机可由通风井进出，若一端进另一端出，飞行距离至少为 1km，若只采用一个通风井，通过往返方式进出，飞行距离至少为 2km。

制约无人机飞行距离的是电池的续航时间，通过飞行速度直接影响飞行距离。理想情况下：假设采用 5000mAh 左右的电池，续航约 20 分钟；为了

执行巡检任务，飞行速度按 2m/s 计；此时的飞行距离也在 2km 以上，完全能够满足飞行距离要求。然而，在隧道巡检条件下，飞行条件差，且需完成既巡检任务，这会降低无人机飞行的距离：

- 1) 隧道环境复杂，操控难度极高且需完成巡检任务，飞行速度需要降低，甚至需要不断的悬停；
- 2) 携带的巡检设备，增加了重量且本身需耗能，缩短了电池续航时间。

结论：理想情况下，无人机的电池足够支撑巡检的飞行距离；但无人机在隧道中的续航时间和飞行距离，需要实地测试和模拟实验论证。

2. 起降方式



图 3：鸿恩寺电缆隧道口情况

无人机在开放或封闭环境中起降时，需要一定的空间作为起降平台，起降平台环境通常易于观测。无人机进出电缆隧道时，需要在井口外的地面起飞，通过垂直升降的方式，穿越狭窄的井口进出，如图 3 所示。井口较窄，隧道口下方情况难以直接观测，无人机进出隧道时，需要无人机在垂直方向

具备良好的避障能力。

结论：目前的无人机的环境感知和避障能力重点在水平方向，垂直方向的避障能力可能需要强化，并通过实地测试验证。

3. 信号传输



图 4：2.4GHz 24dBi 网状抛物面天线

传输的信号通常包括控制信号和图像等测量信号。2.4GHz 频率通常用于传输控制信号，5.8GHz 同时用于传输图像和控制信号。在无遮挡和无干扰的开放环境中，传输距离可达 5km。人工控制必须依赖可靠的信号传输，自主导航可部分解决无信号或信号丢失的问题。图 4 所示的天线，户外传输范围可达 56km，可以考虑将经过改造的天线从井口伸入隧道。用于控制隧道内无人机的信号传输，面临诸多问题：

- 1) 信号在狭窄的隧道内传输时，中途可能存在遮挡，如图 1 所示；
- 2) 信号难以穿越地层，不借助额外设备，难以实现隧道内外信号互通；
- 3) 电缆中的高压交流电，可能存在电磁场干扰。

结论：理想情况下，信号传输距离足够覆盖巡检区域。但在隧道中，可能需要加装中继或增强天线实现信号互通，传输距离和带宽需实测确认。

4. 控制与导航



图 5：大疆 GUIDANCE 视觉传感导航系统

目前，控制无人机的飞行主要有两种方式：人工操控辅以自主导航。自主导航通常需要 GPS 信号，有时也可利用图像信息，但利用图像导航时对光照环境要求较高。如图 1 所示的隧道环境，既无法接受 GPS 信号，图像成像质量也很差。为了解决导航问题，大疆专门开发如图 5 所示的视觉导航系统 GUIDANCE，定位精度可达 **0.05m（离地 2m）**，但是使用环境需要“照明情况良好，观测对象纹理明显”。经过和大疆工程师沟通，目前相关产品无法达到隧道巡检要求。隧道内导航主要面临如下问题：

- 1) 隧道内无法接收 GPS 信号，图像成像条件较差，图像等传感器离隧道壁太近，测量精度受限；
- 2) 人工控制和自主导航需要足够的操控空间，典型的视觉感知障碍物的距

离是 0.7~15m，隧道过于狭窄；

- 3) 人工控制方式：对操控人员要求高，控制有较大的误差（1m 以上），不可避免与隧道壁发生碰撞；隧道外要实现对隧道内无人机的控制，还依赖于信号的传输能力；
- 4) 自主导航方式：避障时自主导航要解决的基本问题；无人机良好的避障能力，在开放和封闭环境中都是公认的难题；自主导航除了可用 GPS 进行路径规划外，必须通过传感器测量无人机附近环境；狭窄的隧道条件恶劣，影响了传感器的性能，同时无人机平台实时处理信号的能力也影响自主导航的性能；

结论：控制与导航是无人机隧道执飞的关键，就目前技术水平而言，难度较大，需要有针对性的深入研究，开发适用于隧道的方案。

5. 结构与负载



图 6：具备旋翼保护功能的无人机

由于隧道狭窄，环境复杂，无人机飞行中不可避免碰撞，需要具备防碰

撞的能力，比如图 6 的旋翼防碰撞装置。为了执行巡检任务需要加装设备，加大电池以确保续航时间，这些都对无人机负载有要求。

结论：针对结构和负载，有较合理的解决方案，但是隧道环境是否可行，仍需现场测试。

6. 外部设备接口

市面的无人机主要用于航拍。但巡检的无人机需要完成特定的任务，比如温湿度检测、气体检测、拍照等，需要接入外部设备。目前，无人机产品不具备接入外部装置的能力，因此需要具备自主开发能力的无人机平台，以便接入巡检工作所需的相关设备。

结论：外围电路和外设接入，有较多的解决方案，比如利用开源的飞控板。

三、 相关方案

根据参与调研单位提供的资料，给出了三种可能用于隧道环境巡检的无人机参考机型。主要遵循两条技术路线：

- 1) 人工控制方式：主要依赖于摄像头等环境采集传感器，以及可靠的信号传输和无人机的灵活的可操控性，比如微型无人机方案；
- 2) 自主导航方式：主要依赖于摄像头等环境采集传感器，以及自主导航能力，比如吸顶无人机方案。

1. 球型无人机

方案提供单位：中国空气动力研究与发展中心。

基本思路：隧道内不可避免存在碰撞，强化防碰撞装置。隧道可视为一种连接两个出口的管道，本身可帮助导航，采用碰撞的方式避障。



图 7：球形无人机样机

该无人机可采用自主导航或人工控制飞行。基本结构如上图 7 所示。球形机撞到墙后，外表面一层的软性塑料材质能让球形机弹回继续飞行。减少了飞机自身对避障技术的高度要求，适合用于各种避无可避可能会发生碰撞的场景。假设隧道已建好的情况下，可以预先测绘隧道情况。将隧道的模型和飞行路线预先加入到飞行控制系统中，可实现无人机的定位和导航。若需加强飞行的安全性和可靠性，可加入 SLAM 模块。

球形无人机采用单旋翼，与多旋翼的主要区别在于：（1）单旋翼效率高，飞行时间长；多旋翼稳定，但效率不高。（2）单旋翼可把旋翼包裹起来，且碰撞后不会失重；多旋翼通过外壳把旋翼包裹起来，同样载重下比单旋翼更

扁平，包裹圈也所需更大，容易发生重心偏移。

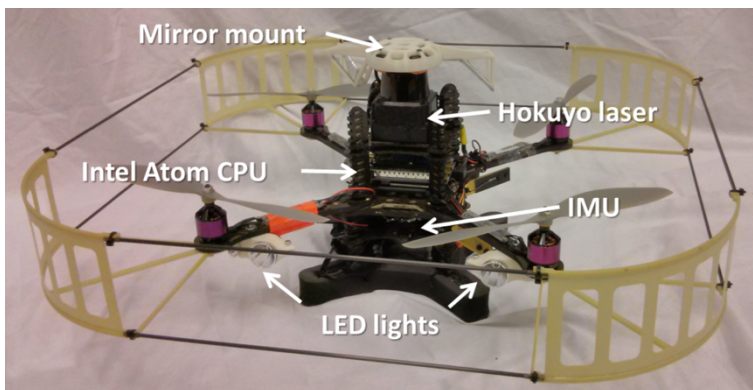


图 8：带旋翼护罩的无人机

该结构的无人机可视为美国宾夕法尼亚大学（Vijay Kumar 教授团队）和清华大学（“长江学者”戴琼海教授团队）带旋翼护罩的无人机结构的强化版，如图 8 所示。但本方案中采用了单旋翼结构。

主要问题：

- 1) 球形外壳，加工制作较复杂，且增加了重量和碰撞的几率，引入了较大的不受控因素；
- 2) 单旋翼飞行器的开发难点的难点在于容易发生自旋（因为单旋翼旋转对机架产生的反作用力无法自动抵消，必须通过扰流板控制气流来控制自旋）；
- 3) 尚未在实际线缆隧道中飞行验证，该方案优于图 8 方案存疑。

2. 微型无人机

方案提供单位：重庆大学（“千人计划”宋永端教授团队）

基本思路：为解决狭窄隧道空间的操控问题，开发微型多旋翼无人机（巴掌大小），实现隧道内灵活的操控。

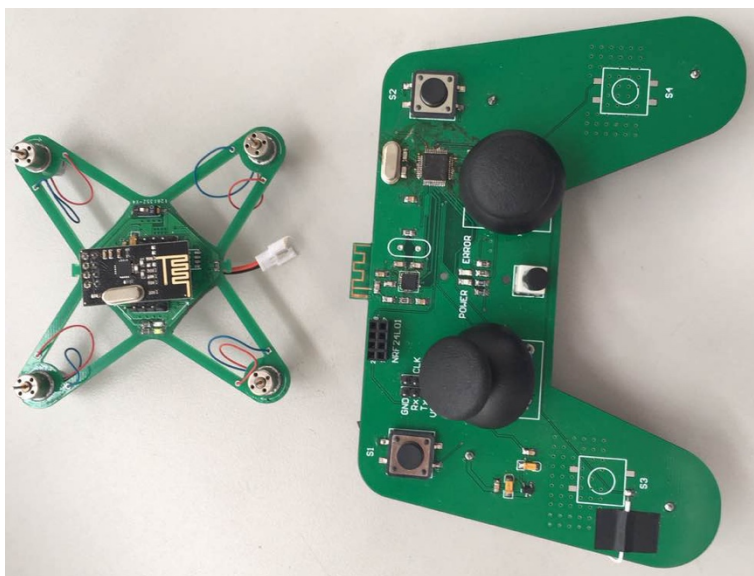


图 9：微型无人机样机

该无人机主要依赖于人工控制飞行。基本结构如上图 9 所示。上图左为微型四旋翼无人机结构，上图右是为了灵活操控而设计的控制器。小巧的机身，使得即使在狭窄的隧道空间中，也有较大的操控空间。成本较低，针对危机情况的巡检，可不考虑返航。

主要问题：

- 1) 负载有限，续航能力有限，能实现的巡检功能和飞行距离受限；
- 2) 不能确认是否能采集足够的信息实现隧道内的操控；
- 3) 尚未在实际线缆隧道中飞行验证。

3. 吸顶无人机

方案提供单位：重庆大学（“千人计划”宋永端教授团队）

基本思想：该无人机主要依赖于自主导航飞行。借鉴家用扫地机器人通过屋顶导航，以及隧道轨道巡检机器人通过在隧道顶部加装导轨的方案。由于隧道顶的障碍相对较少，在不需而外加装导轨等引导装置的情况下，利用接触或非接触式传感器，沿着顶壁趋势自主飞行。

主要问题：

- 1) 虽解决了垂直空间的导航问题，但是在水平（主要是左右方向）方向上的运动控制解决思路不明确；
- 2) 尚处于方案论证阶段，无原型机，实际线缆隧道飞行能力无法验证。

四、 主要调研单位

本次可行性调研，主要通过如下单位沟通交流完成：

- 1) 重庆大学（“千人计划”宋永端教授团队）
- 2) 清华大学（“长江学者”戴琼海教授团队）
- 3) 加拿大安大略理工大学（ACE Centre for UAV Research）
- 4) 美国宾夕法尼亚大学（Vijay Kumar 教授团队）
- 5) 中国空气动力研究与发展中心
- 6) 武汉南瑞有限责任公司
- 7) 重庆华夏九鼎军民融合科学技术研究院
- 8) 成都西可科技有限公司
- 9) 成都翼比特自动化设备有限公司
- 10) 昊翔电能运动科技（昆山）有限公司（Yuneec）
- 11) 深圳一电科技有限公司

- 12) 深圳智航无人机有限公司
- 13) 深圳市科比特航空科技有限公司
- 14) 深圳市大疆创新科技有限公司

根据公司反馈可知，市面没用能直接用于隧道巡检的无人机产品。研究机构有从事相关方向研究，但也并非线缆隧道环境；无人机隧道巡线具备一定可行性，但在没有实地考察和测试的前提下，必须谨慎对待。

目前，在国内外开展相关研究的机构中，已与其中三家单位进行了交流：

- 1) 美国宾夕法尼亚大学（Vijay Kumar 教授团队）
- 2) 中国空气动力研究与发展中心
- 3) 清华大学（戴琼海教授团队）

另外两家有相关研究经验的机构，尚未取得联系：

- 1) Davide Scaramuzza 团队利用无人机检测 CERN 大型强子对撞机的内部。大型强子对撞机包含了一个圆周为 27km 的圆形隧道，位于地下 50 至 150 米之间，隧道本身直径 3m。
- 2) Roland Siegwart 团队的封闭仓库的无人机导航工作。



图 10：Davide Scaramuzza 团队的丛林无人机与微型无人机



图 11: Roland Siegwart 团队的相关无人机

五、 下一步工作计划

1. 隧道情况调研

为了搞清无人机实际的飞行环境，需要实地考察测量隧道如下方面：规格尺寸、地面情况、光照环境、通信条件和电磁环境等方面。

2. 相关单位调研

目前隧道无人机尚无成品，相关单位未提供确切的技术指标，其性能参数建议通过实地考察测量确认。

针对潜在合作机构，实地考察其技术探索的实践能力及工程样机设计制造能力，测试其已有无人机在模拟飞行环境及实际隧道中的飞行能力与参数指标。

六、 结论

根据目前掌握的资料，针对电缆隧道内飞行的无人机，市面上既没有现成的产品，也没有相关机构在进行研究，有部分机构从事相近环境中的无人机研究。本报告的初步结论如下：

- 1) 市面上的无人机产品，无法执行隧道内的飞行任务；
- 2) 部分研究机构的成果，可用于隧道巡检，但可行性须实地验证；
- 3) 各方优势互补，无人机隧道巡检可作为研究方向，但短期内难以实用；
- 4) 展示了三种无人机方案，作为隧道巡检研究的参考机型。

若开展电缆隧道内无人机研究，可考虑与研究机构谨慎合作，开展探索性研究，推荐潜在的合作机构如下：

- 1) 重庆大学（“千人计划”宋永端教授团队）；
- 2) 中国空气动力研究与发展中心；
- 3) 美国宾夕法尼亚大学（Vijay Kumar 教授团队）；
- 4) 清华大学（“长江学者”戴琼海教授团队）。

七、 致谢

特别感谢重庆大学“智慧工程研究院”参与此次调研的同学！

