公开

名 称　筒射式拦截无人机系统

Tube-Launched Upward-Looking C-UAS Interceptor

总体方案设计报告

学　　校：　　上海工程技术大学

负 责 人：　　沈佳高

联系电话：　　13321901996

赛题名称：　　新质反无人机拦截器

日　　期：　　2026 年 9 月

摘要

近年来，低空“低慢小”无人机数量呈爆发式增长，机场净空、大型赛事安保、监所周界、要地反恐、能源管线等场景面临的入侵威胁日益严峻。电磁干扰、激光毁伤与绳网捕获等传统反制手段虽各有优势，但在复杂电磁环境适应性、附带损伤控制与部署成本等方面存在固有局限，难以满足单兵即时响应的需求。为此，本报告提出一种基于筒射折叠构型的高速拦截机方案，命名为“天网”反无拦截机。

方案以“一键弹射、自动锁定、撞机即毁”为核心理念，把弹筒一体的折叠构型、朝天单光视觉感知与软化比例导引算法结合起来，对于 1～200 m 距离、0～300 km/h 多旋翼无人机目标，可在 15 s 内完成从发现到动能撞击的完整链路。需要说明的是，报告中提到的所有“撞击速度”是拦截机相对于靶机的相对速度（闭合速度）。拦截系统的主要研究内容包括六个方面。

（1）针对传统反无装备体积庞大、展开迟缓、难以单兵携行的问题，设计了筒射折叠总体构型。整机质量 1.6 kg，机臂内折后可收纳于 Ø120 mm 发射筒内；采用弹筒一体的气体弹射装置，机臂在弹出后 0.1 s 内瞬时展开，从而实现单兵“一键拦截”的快速反应能力。同时，该方案确保了纯尼龙打印折叠机臂的强度问题。

（2）针对光电吊舱搜索机构复杂、成本高昂的问题，提出了朝天单光纯视觉感知链路。PiCam3 相机以 0° 俯仰角固定于机体顶部上视、正对天穹，由机身 yaw 匀速自旋完成全空域扫描；在此基础上，让相机以 1080p 成像、YOLOv11n 以 640×640 分辨率输入，构成 4 Hz 周期 UAV 检测与 CSRT 60 Hz 追踪器补帧的双时钟解耦算法架构，并针对机载树莓派 5B 算力平台做了线程优化，具备 200 m 级单目测距与稳定跟踪能力。

（3）针对 240 km/h 极端撞击相对速度下标准比例导引增益过高、易引发弹道振荡的问题，设计了软化比例导引制导律。通过有效导航比弱化、法向加速度限幅与 CSRT 像素误差修正三项措施，在抑制弹道振荡的同时保证了末端收敛精度，并配套设计了含超时与重捕分支的六态作战状态机。

（4）面向大型赛事、机场、监所等持久防护场景，提出了集群化小体积机巢部署策略。单巢可装载 9 枚拦截机，配合指挥作战平台使用，具备待机充电、发射药筒快速更换、远程唤醒与序列弹射能力；最小独立拦截单元（单枚） BOM 成本仅 5210 元，较国际同类产品下降 95% 以上，为低成本规模化部署奠定了基础。

（5）基于 Gazebo 仿真平台对全任务链路进行了系统验证。300 次蒙特卡洛撞击仿真的命中率达 72.7%，撞击动能达 3.56 kJ，对典型四旋翼目标具备结构毁伤能力。仿真结果表明，本方案在极筒折叠构型与高强度撞击毁伤之间取得了工程上的平衡，在本擂台赛所代表的“新质反无”命题下，具备可复现、可量产、可集群部署的工程属性。对低空安防领域有推广价值。

（6）在仿真基础上完成了原型样机与算法上机。软化比例导引与六态作战状态机已部署到树莓派 5B 实机实时运行，并在户外真实气象条件下完成一次实地打靶测试。方案以单人单筒作为最小拦截单元，既可独立作战，也可在雷达与天网 C2 指挥作战平台支持下组成集群，后续按技术融合与创新、方案设计深度与成本可行性、应用前景三个方向继续深化。有关项目的所有详细内容（3D 模型动画、天网 C2 指挥作战平台、仿真过程在线运行）均可在本课题组的官方网站 wuchuangchanqianjiance.com.cn 在线访问查看。

主题词	反无人机；筒射折叠；朝天相机；YOLOv11n；软化比例导引；气动弹射；集群机巢

目次

1.概述.....1
2.主要战术技术指标.....3
2.1.典型目标.....3
2.2.飞行器主要性能指标.....3
3.飞行器总体方案设计.....6
3.1.飞行器设计思路.....6
3.2.功能组成.....8
3.3.气动外形方案.....10
3.4.部位安排.....11
3.5.制导控制方案.....12
3.6.毁伤方案.....18
3.7.关键技术创新与技术融合.....18
4.主要设备及分系统方案.....21
4.1.探测系统.....21
4.1.1.功能.....21
4.1.2.组成.....22
4.1.3.方案.....22
4.1.4.主要技术指标.....22
4.2.飞控导航系统.....23
4.2.1.功能.....23
4.2.2.组成.....23
4.2.3.方案.....23
4.2.4.主要技术指标.....23
4.3.电气系统.....23
4.3.1.功能.....23
4.3.2.组成.....24
4.3.3.方案.....24
4.3.4.主要技术指标.....24
4.4.数据链系统.....24
4.4.1.功能.....24
4.4.2.组成.....24
4.4.3.方案.....25
4.4.4.主要技术指标.....26
4.5.动力系统.....26
4.5.1.功能.....26
4.5.2.组成.....26

4.5.3.方案.....27
4.5.4.主要技术指标.....27
4.6.毁伤系统.....27
4.6.1.功能.....27
4.6.2.组成.....27
4.6.3.方案.....27
4.6.4.主要技术指标.....28
4.7.飞行器结构.....28
4.7.1.功能.....28
4.7.2.组成.....28
4.7.3.方案.....28
5.飞行器性能分析.....29
5.1.平台飞行性能.....29
5.2.飞行弹道性能.....30
5.3.探测跟踪性能.....32
5.4.制导控制性能.....33
5.5.毁伤特性.....35
5.6.样机试制、算法部署与实弹验证.....35
6.经济性分析.....37
7.结论.....42

1. 概述

近年来，低空“低慢小”无人机数量呈爆发式增长，机场净空、大型赛事安保、监所周界、要地反恐、能源管线等场景面临的入侵威胁日益严峻。电磁干扰、激光毁伤、绳网捕获等传统反制手段虽各有优势，但在复杂电磁环境适应性、附带损伤控制与部署成本等方面存在固有局限，难以满足单兵即时响应的需求。另受俄乌冲突前线单兵面对光纤 FPV 拦截困难的启发，设计了筒射一键拦截方案。本方案与三类传统反制手段的关键指标对比如表 1 所示。

表 1 关键技术指标对比

指标	本方案	传统电磁干扰	激光毁伤	绳网捕获
作用距离	1～200 m	50～500 m	200～2000 m	5m
响应时间	≤ 15 s	即时	数秒级	数十秒级
附带损伤	无（动能撞击）	电磁环境干扰	高能激光风险	无
单兵携行	1.6 kg/筒	10～30 kg	＞50 kg	5～15 kg
成本	≈ ¥5210	数万至数十万	数十万至百万	数万
拦截能力	所有类型多旋翼	无线遥控类多旋翼	所有类型多旋翼	低速多旋翼

国际上 Anduril Roadrunner、AeroVironment Switchblade 300、Fortem Technologies DroneHunter 等高速拦截装备已实现商业化，但普遍存在整机重型化（＞ 4 kg）、探测依赖雷达/光电吊舱、单机价格不低于 5 万美元等局限；国内航天彩虹、北方导航、中航工业、凤凰金翼、云雀 skylark、智鹰、闪电猎手等方面的公开成果多见于大型 X 字形/复合翼/火箭机构型，探测手段以“俯视 + 前视”双光吊舱为主流，在“单兵便携、一键部署、筒射构型”工程命题方面仍有欠缺。

本报告提出“天网”筒射反无拦截机，英文名为 Tube-Launched Upward-Looking C-UAS Interceptor 总体方案。方案以**“一键弹射、自动锁定、撞机即毁”**为核心理念，把弹筒一体高压弹射、朝天单光

视觉感知与软化比例导引结合在一起。整机质量 1.6 kg，机臂内折后可收纳于 Ø120 mm 发射筒内；弹筒一体高压弹射使出筒速度约 10 m/s，机臂在弹出后 0.1 s 内由纯机械结构（十字对拉弹簧）瞬时展开；PiCam3 相机以 0° 俯仰角固定于机体顶部上视、正对天穹，取消两轴云台与伺服机构，由机身 yaw 匀速自旋完成全空域扫描；视觉链路采用 1080p 相机成像、YOLOv11n 以 640×640 分辨率输入，实现 4 Hz 周期检测与 CSRT 追踪器 60 Hz 补帧的双时钟解耦架构，具备 200 m 级单目测距与连续稳定跟踪能力；终端以 240 km/h 全速撞击，撞击动能 3.56 kJ。

系统可以在 15 s 内走完从弹射出筒、锁定追踪到动能撞击的全任务链路，对 1～200 m 距离、0～300 km/h 的多旋翼无人机目标实施可靠拦截。单机 BOM 成本 5210 元，只有国际同类产品的零头，并支持 9 枚一巢的小体积机巢集群部署，具备待机充电、气瓶更换、远程唤醒与序列弹射能力。

本方案基于 Gazebo 半物理仿真平台对百米级全任务链路做了系统验证。300 次蒙特卡洛撞击仿真的命中率达到 72.7%，撞击动能 3.56 kJ，对典型四旋翼目标具备结构毁伤能力。极简折叠构型与高强度撞击毁伤，在这里找到了一个可落地的平衡点，整机从设计到量产、再到集群部署的路径都是通的。

本报告涉及的速度需要先做一个口径说明。文中的撞击速度一律指拦截机相对于靶机的相对速度，也就是两者之间的闭合速度；而最大速度 240 km/h 与峰值速度 340 km/h 描述的是拦截机自身的飞行能力，属于另一个口径，两者不能混用。

2.主要战术技术指标

2.1.典型目标

本方案的典型作战对象是微小型多旋翼无人机，涵盖消费级与工业级的四旋翼、六旋翼机型。这类目标含桨盘在内的对角尺寸在 0.5 m 到 1.2 m 之间，飞行高度 10～150 m，速度不超过 300 km/h。本报告在测距与制导设计中统一按 1.2 m 的最大口径取值，以覆盖尺寸最大的工业级机型。本机拦截包线为 1～200 m，其中 200 m 以外由外部雷达或远程引导链路提供粗定位交接，200 m 以内交给本机视觉制导链路完成精跟踪与撞击。部署位置可以是窗口、楼顶、草丛或移动载具，也可以单人手持部署，部署时间不超过 5 s，从出筒到撞击不超过 15 s。

2.2.飞行器主要性能指标

基于上述设计方案，整机性能指标如下。

（1）整机重量 ≤ 1.8 kg，实测 1.60 kg 且不含战斗部；

（2）折叠筒径 ≤ 120 mm，实测 110 mm，可单人携带；

（3）最大速度 ≥ 300 km/h，实测 340 km/h；

（4）撞击能量 ≥ 3 kJ，实测 3.56 kJ；

（5）拦截时间 ≤ 15 s，从弹射到撞击；

（6）探测距离 ≥ 150 m、最大可测 200 m，受 YOLO 模型像素可检下限约束；

（7）命中精度 $R<0.55$ m，蒙特卡洛 $n=300$ 测得命中率为 72.7%；

（8）探测频率 ≥ 3 Hz，YOLOv11n 为 4 Hz，CSRT 60 Hz 补帧；

（9）集群能力 > 10 节点，机巢可装 9 枚；

（10）单机成本 ≤ 6000 元，BOM 为 5210 元且不含工时。

单发拦截单元的折叠待发状态，主机与发射筒、气瓶仓的装配关

系如图 1 所示，图中发射筒做了透明处理，便于观察内部折叠布局。

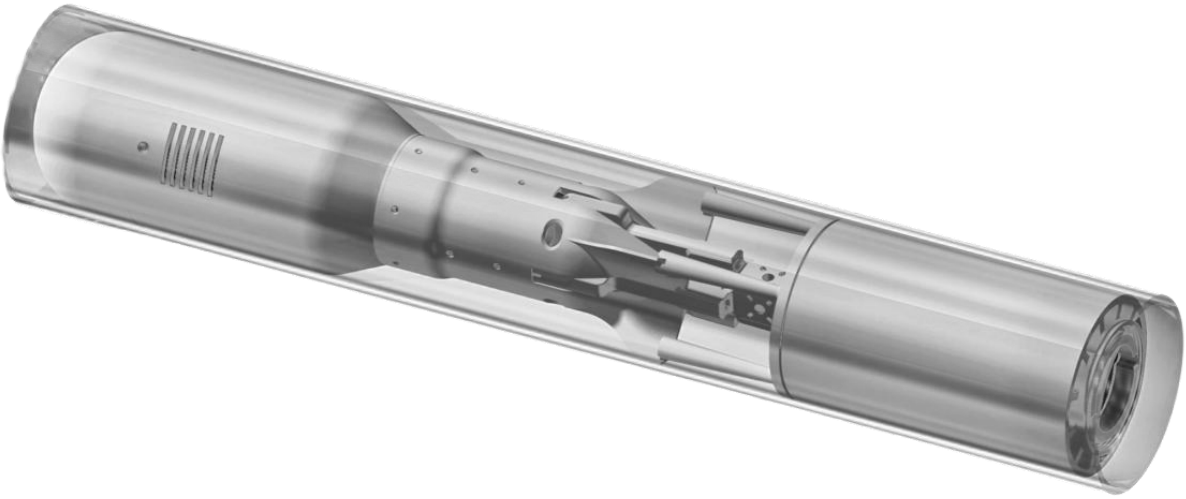


图 1 最小独立工作单元折叠待发状态与发射筒（透明处理）

在展开各分系统之前，先把整套系统放到更上一层的视角做一次定位。本方案不是一枚孤立的拦截弹，而是一套可以按任务规模分级叠加的反无体系，由最小拦截单元、搜索雷达、天网 C2 指挥平台和机巢四种单元构成。四者的职责互不重叠，组合起来的层级越高，覆盖范围和多目标能力就越强。

最小拦截单元是单人单筒。一名操作人员背一支发射筒，筒内装一枚拦截机，这就是一个能独立作战的完整节点。它自己就能完成探测、跟踪、制导和撞击的全过程，不需要雷达提供目标指示，也不需要指挥平台下发任务，开机就能用。这样的设计把反无装备的使用门槛压到了最低，班排一级甚至单个执勤点都配得起、用得来，对应窗口、楼顶、草丛这类零散点位的值守需求。它的边界同样清楚，探测

范围只有朝天相机能够看到的那一片天穹，超过 200 m 的目标本机看不见，这样的最小独立工作单元解决的是点位防御。

通过搜索雷达把搜索范围扩大。拦截机自身的探测距离只有 200 m，这个距离对末端制导已经够用，对提前发现目标却不够。接入 X 波段毫米波雷达之后，探测距离可以延伸到 5 km，雷达负责把远处目标的方位、距离和航迹递交给待发单元，拦截机在 150～200 m 的交接距离上接手，转入视觉精跟踪。雷达只回答目标在哪里、往哪里飞这两个问题，它不参与末端制导，也不向拦截机提供持续照射，所以即便雷达临时丢失目标，已经进入末端的拦截机也不会中断，末端闭环始终由拦截机自己闭合。此任务链路依托天网 C2 指挥平台负责集群层面的任务分配。当一个区域内部署了多个拦截单元时，平台把各单元的位置、待发弹量、状态和入侵目标的航迹汇总到一张图上，再按规则把每一个目标指派给具体单元。分配的两条核心规则是距离最近优先与已锁定去重，前者用 haversine 距离衡量单元到目标的球面距离，后者保证已经被指派出去的目标不再重复分配，避免多枚拦截机追同一个目标。末端具体怎么打仍然交给拦截机自己的制导闭环。

总之，集群组网是增强项，不是必选项。单个单元已经能独立作战，组网带来的增量是在多目标饱和来袭时，把拦截能力从一枚对一个提升到多枚对多群。对用户来说，这意味着只需要多买若干单元和扫描雷达组网就可以扩大搜索范围和拦截能力。

目前已经完成实机化的是单人单筒这一级，也就是最小拦截单元本身。雷达、机巢和指挥平台的组网链路还处在方案与软件验证阶段，其中天网 C2 平台已经跑通可交互 Demo，雷达选型已经确定，但还没有接入实装。各单元的构成与职责定位如表 2 所示。

表 2 系统单元构成与职责定位

单元	职责定位	在本体系中的角色	当前状态
最小拦截单元（单人单筒）	自带感知、决策与执行闭环，独立完成从探测到撞击的全过程	核心装备，可单独使用，也可被组网调用	已实机化
X 波段毫米波雷达	把探测范围从 200 m 延伸到 5 km，输出目标方位与航迹	选配，用于把点防御扩展为面防御	选型确定 未接入
天网 C2 指挥平台	按距离最近优先指派目标，并对已锁定目标去重	选配，用于多单元协同分配拦截任务	可交互 Demo 已跑通
机巢与组网发射单元	承载多枚拦截机，负责待机充电、气瓶更换与序列弹射	选配，用于规模化部署与并发齐射	方案仿真阶段

3. 飞行器总体方案设计

3.1. 飞行器设计思路

围绕工程命题，本方案的筒射折叠构型解决的是传统四旋翼、火箭机等构型不便携、难以在小空间集群部署、也不便从车载移动平台发射的问题；朝天单光纯视觉感知替代了复杂的光电吊舱；软化比例导引把 240 km/h 的撞击相对速度纳入了可控范围。至于毁伤手段，方案选择纯动能撞击，用最低的成本换取彻底的失效效果。对于难以直接撞毁的大型目标，机身上端还预留了 50 g 以下破片战斗部的装载空间与对应的树莓派电子点火头引爆接口，作为备用选项。

整套方案围绕五条核心理念展开，每条理念都对应一项具体的技术措施，如表 3 所示。

表 3 设计核心理念与对应方案

理念	内涵
① 弹得出、收得下	Ø120 mm 圆筒直径，二叶折叠桨与机臂内折，弹射后 0.1 s 内自动展开并锁紧
② 抬头即锁	朝天 75° PiCam3 单目测距，无需搜索云台，机身 yaw 自旋即可完成覆盖
③ 撞机即毁	240 km/h 相对速度全速撞击，3.56 kJ 动能，结构毁伤系数 K≈18
④ 装得进背包	单机 1.6 kg，可由单兵背负；集群化时多机共用 600×300×200 mm 机巢

⑤ 量产可集群	3D 打印加现成开源飞控加量产消费级算力，BOM 成本约 5210 元

整个 15 s 任务周期，按时间顺序拆成五个阶段。

弹射出筒（0～1 s）。高压气体把拦截机从静止加速到约 10 m/s，折叠机臂同步展开，螺旋桨进入预备转速。

悬停稳定（1～3 s）。飞控完成位置环收敛，随后转入搜索。

悬停自旋扫描（3～8 s）。机体稳定在 5 m 高度，以 4.5 rad/s 匀速自旋搜索，把天穹逐圈扫过。（若系统直接捕获目标则跳过此步骤）

锁定后全速上冲（8～13 s）。拦截机以 240 km/h（66.7 m/s）向目标全速上冲，在 150～200 m 的交接距离上接手目标，从悬停匀加速到极速，5 s 的时段内闭合距离约 150～170 m，正好落在交接距离区间内，末端闭合速度达到设计值 240 km/h。

撞击（13～15 s）。姿态修正与 CSRT 精对位同步完成，在近距触发撞击。全任务周期的速度剖面如图 2 所示。

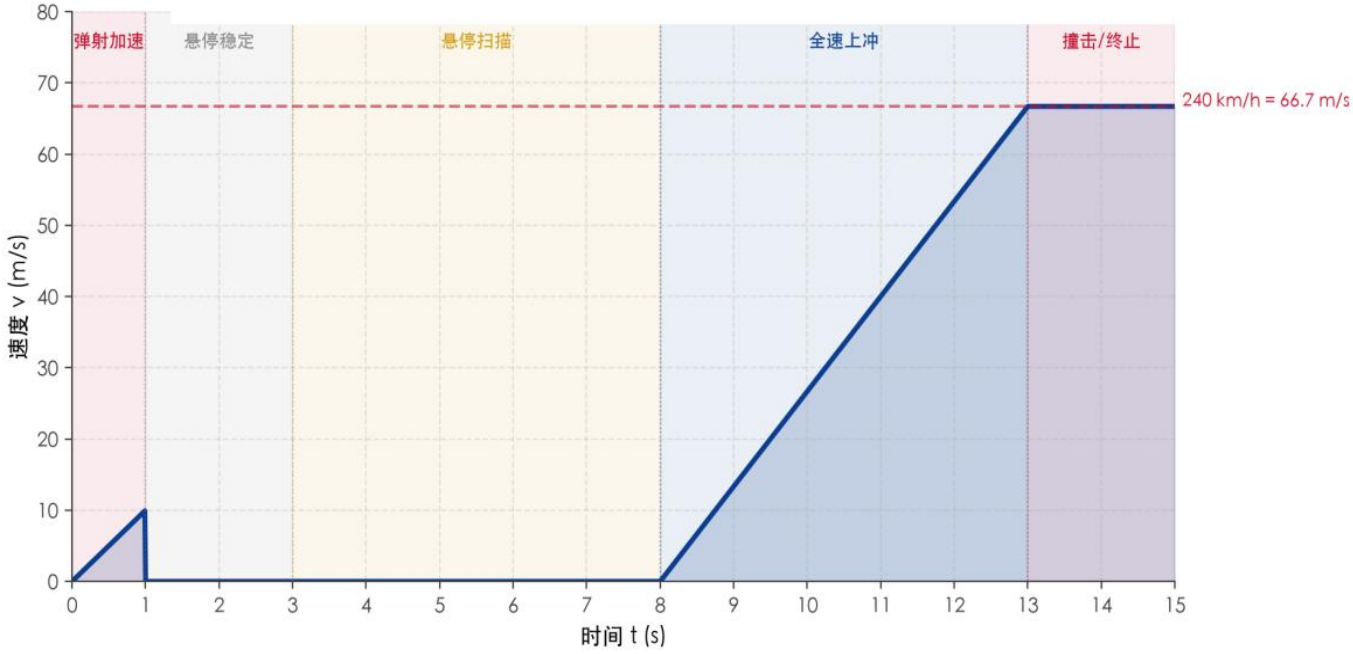
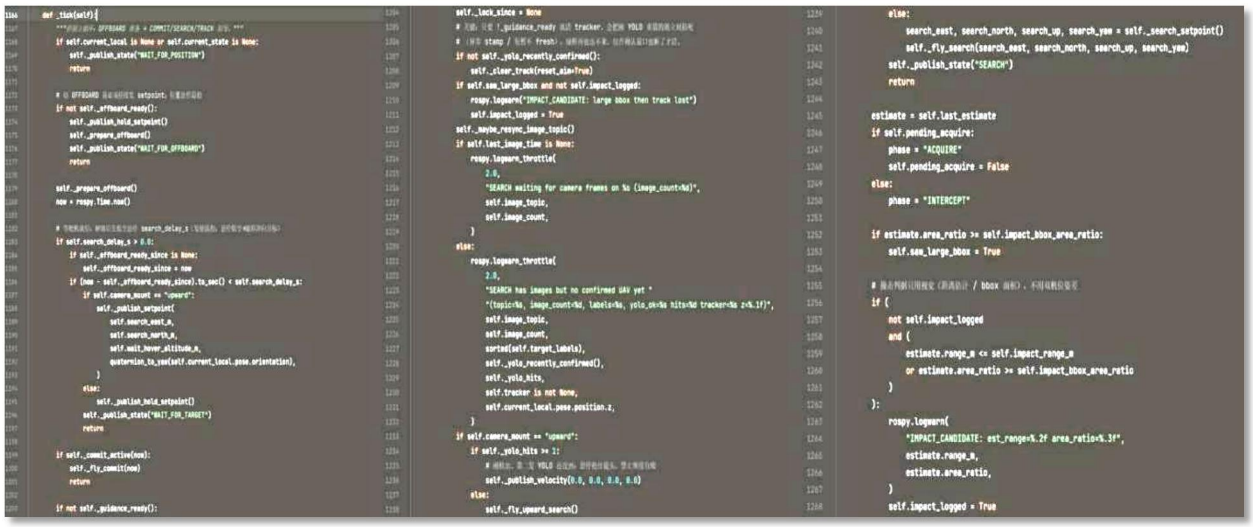


图 2 全任务周期理想速度剖面（15 s 预算分配，扫描阶段悬停）

各阶段的时间分配都留了工程裕度。扫描段一旦超过 7 s 仍未锁定，就进入继续扫描分支并上报告警；上冲段跟踪失效则进入目标重捕分支，下降高度重新搜索。这套作战时序的调度中枢在最新版程序 /xifu_dock_sim/ros1/xifu_dock_sim_ros1/scripts/vision_tracker_controller_ros1.py 的 _tick() 主循环里，位置在第 1160 行附近，主循环节选如图 3 所示。



```
def _tick(self):
    if self.current_local is None or self.current_state is None:
        self._publish_state("WAIT_FOR_POSITION")
        return

    if not self._offboard_ready():
        self._publish_hold_setpoint()
        self._prepare_offboard()
        self._publish_state("WAIT_FOR_OFFBOARD")
        return

    self._prepare_offboard()
    now = rospy.Time.now()

    if self.search_delay_s > 0.0:
        if self._offboard_ready_since is None:
            self._offboard_ready_since = now
        if (now - self._offboard_ready_since).to_sec() < self.search_delay_s:
            if self.camera_mount == "upward":
                self._publish_setpoint(
                    self.search_east_m,
                    self.search_north_m,
                    self.wait_hover_altitude_m,
                    quaternion_to_yaw(self.current_local.pose.orientation),
                )
            else:
                self._publish_hold_setpoint()
            self._publish_state("WAIT_FOR_TARGET")
            return

    if self._commit_active(now):
        self._fly_commit(now)
        return

    if not self._guidance_ready():
        self._lock_since = None
        if not self._yolo_recently_confirmed():
            self._clear_track(reset_aim=True)
        if self.saw_large_bbox and not self.impact_logged:
            rospy.logwarn("IMPACT_CANDIDATE: large bbox then track lost")
            self.impact_logged = True
        self._maybe_resync_image_topic()
        if self.last_image_time is None:
            rospy.logwarn_throttle(
                2.0,
                "SEARCH waiting for camera frames on %s (image_count=%d)",
                self.image_topic,
                self.image_count,
            )
        else:
            rospy.logwarn_throttle(
                2.0,
                "SEARCH has images but no confirmed UAV yet "
                "(topic=%s, image_count=%d, labels=%s, yolo_ok=%s hits=%d tracker=%s z=%.1f)",
                self.image_topic,
                self.image_count,
                sorted(self.target_labels),
                self._yolo_recently_confirmed(),
                self._yolo_hits,
                self.tracker is not None,
                self.current_local.pose.position.z,
            )
        if self.camera_mount == "upward":
            if self._yolo_hits >= 1:
                self._publish_velocity(0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
            else:
                self._fly_upward_search()
        else:
            self._fly_search(search_east, search_north, search_up, search_yaw)
        self._publish_state("SEARCH")
        return

    estimate = self.last_estimate
    if self.pending_acquire:
        phase = "ACQUIRE"
        self.pending_acquire = False
    else:
        phase = "INTERCEPT"

    if estimate.area_ratio >= self.impact_bbox_area_ratio:
        self.saw_large_bbox = True

    if (
        not self.impact_logged
        and (
            estimate.range_m <= self.impact_range_m
            or estimate.area_ratio >= self.impact_bbox_area_ratio
        )
    ):
        rospy.logwarn(
            "IMPACT_CANDIDATE: est_range=%.2f area_ratio=%.3f",
            estimate.range_m,
            estimate.area_ratio,
        )
        self.impact_logged = True
```

图 3 作战时序主循环（源代码节选）

3.2.功能组成

整机由六大物理子系统组成，分别是探测系统、飞控导航系统、电气系统、数据链系统、动力系统与毁伤系统；从信息处理上看，它们又归入感知、决策、执行三个逻辑层。探测系统由 PiCam3 朝天相机与 YOLOv11n/CSRT 视觉链路组成；飞控导航系统采用 AxisFlying H743Pro 与 固件 ArduCopter 4.5+；电气系统配置 6S 动力电池；数据链系统由 ELRS 2.4 GHz 遥控、5.8 GHz 图传与 4G 远程引导链路组成；动力系统由 AE2207V2 四电机、60A 4in1 电调与折叠桨组成；毁

伤系统则是整机动能体加可选配的战斗部。

逻辑层的信息流是这样走的。感知层由朝天相机完成目标探测、识别与单目测距；决策层在树莓派 5B 上运行六态作战状态机与软化 PNG 制导律，以 50 Hz 步进；执行层通过 **Mavlink Offboard** 向飞控下发速度与位置设定值，驱动动力系统完成闭合撞击。200 m 以外的中距段交给外部雷达或远程引导链路做粗定位交接，150～200 m 这一段由机载视觉制导单元与雷达、4G、GPS 导航系统融合决策，详见 4.4 节。整机组成与信息流示意如图 4 所示。

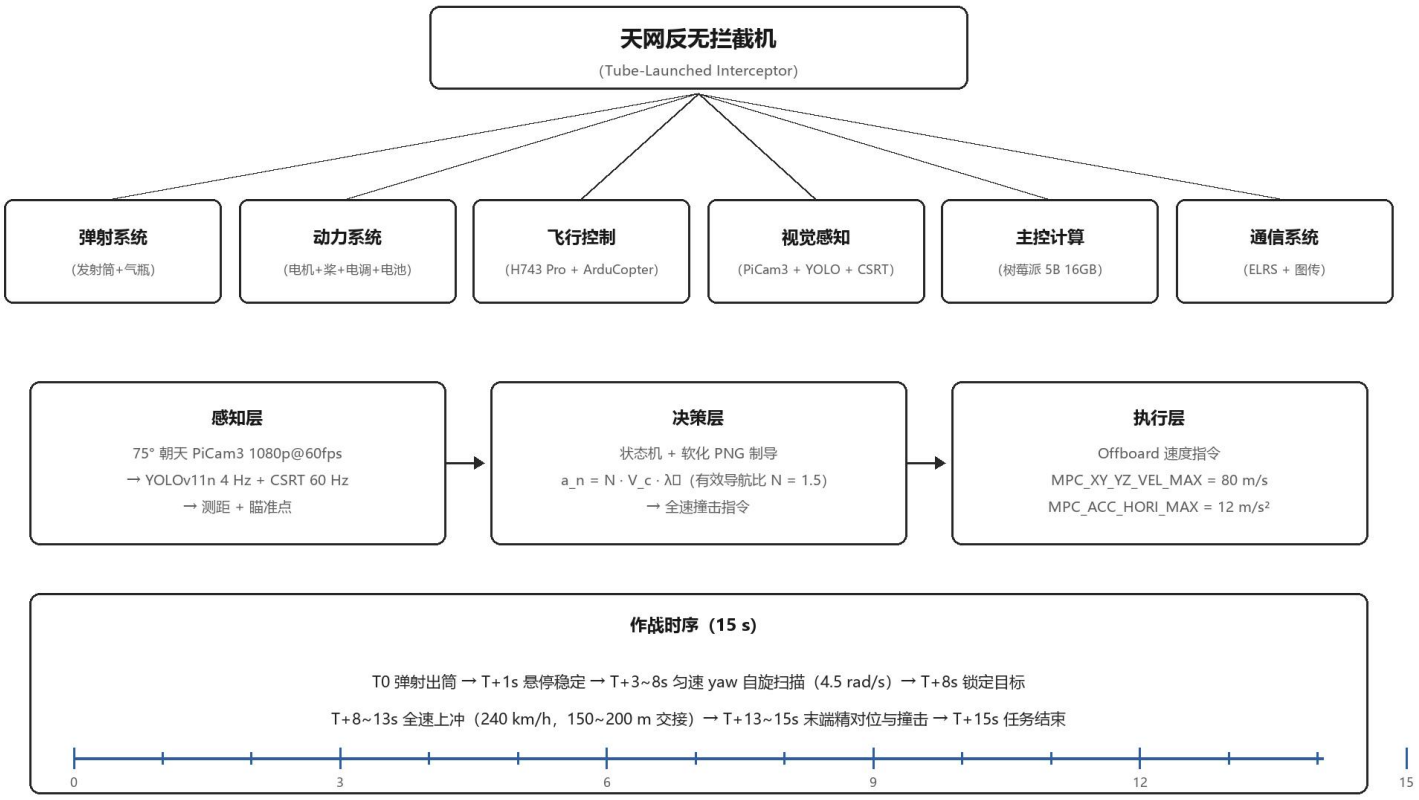


图 4 天网反无拦截机系统组成与信息流示意

3.3.气动外形方案

整机采用筒射折叠构型。折叠态为 Ø110 mm × 406 mm 圆柱，与发射筒内径匹配，既保证相对气密，也防止弹射瞬间歪斜卡死。机臂内折收纳，出筒后由内部交叉对拉弹簧瞬时收缩并锁紧，展开后为 X 字形 5 寸穿越机尺度，翼展 310 mm，配 F5135-2 二叶折叠桨。待命与弹射展开状态如图 5 所示。

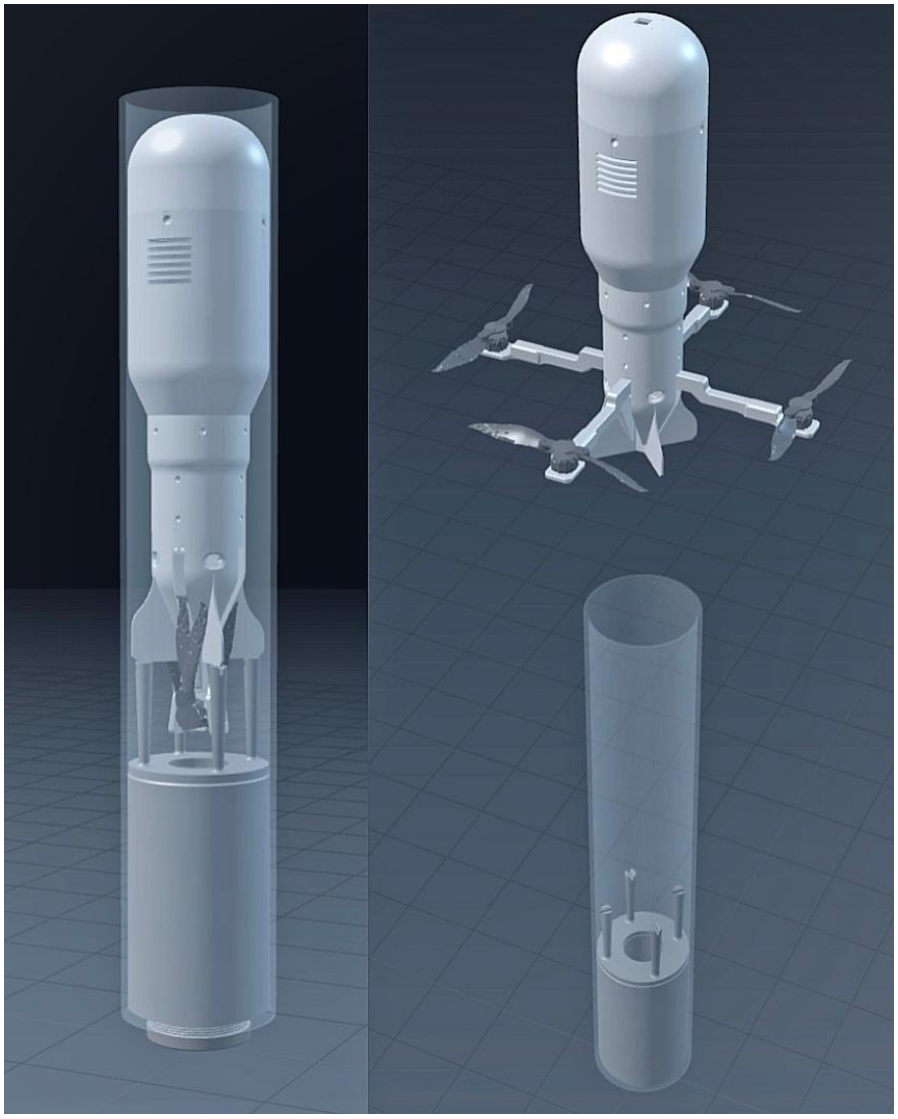


图 5 拦截机待命与弹射展开仿真环境截图

气动特性方面，类圆柱外形使出筒过程受力均匀，不产生附加姿

态扰动；展开态的 X 字形四旋翼布局在保证 240 km/h 极速的同时具备悬停能力，可以同时满足悬停扫描与全速上冲两种模态；二叶折叠桨兼顾收纳包络与推进效率，单电机峰值推力约 1100 g，整机推重比约 2.75，为极速段保留了充足的功率裕度。弹射过程遵循等温膨胀 P-V 关系，可为 1.6 kg 机体提供约 10 m/s 的出筒速度；筒体与气瓶规格见 4.7 节。

3.4.部位安排

整机部位安排自上而下依次排开。机体顶部是朝天相机与视觉模组，机身前舱布置树莓派 5B 主控与图传，中舱布置飞控、GPS 与 6S 电池，尾部布置 60A 4in1 电调与四组折叠机臂根部机构。机臂根部设有一对交叉对拉弹簧，折叠时压缩储能，弹出时瞬时释放，把机臂撑开至 90°，到位后由弹簧锁紧。这组弹簧的安装位置如图 6 所示。

弹筒一体设计方面，发射筒本身就是拦截机主体，筒身直接印有“单兵反无拦截机”标识。方案取消了外部压缩空气瓶、气泵与压力缓冲腔，改用商用礼花弹电点火气瓶作为发射动力源，开后盖、插入、接线、关盖四步即可完成更换，单兵操作时间不足 10 s。同时取消传统弹托结构，上段做成与筒壁长间隙配合的圆柱段贴壁滑行，下段布置 4 片尾鳍，鳍外缘与筒壁贴合形成基本气密。这样一来，在 Ø120 mm 口径下就避开了刚性弹托需要做高柱塞、否则容易卡滞的问题。

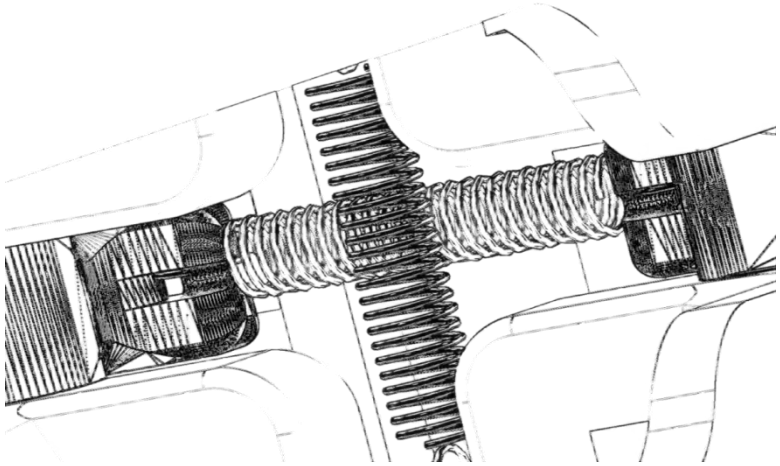


图 6 折叠机臂对拉弹簧组（内藏于机身内，弹出储能瞬时释放）

整机结构件采用黑尼龙（PA12 + CF）SLS 3D 打印工艺，单件密度 0.95 g/cm³，弯曲强度 50 MPa，按冲量 106.7 kg·m/s 与 5 ms 作用时间核算，撞击瞬间峰值载荷约 21 kN，机体平均减加速度约 1360 g；这是典型的一次性破坏工况，结构按溃缩吸能设计，不要求撞击后完整回收。全机 9 大子系统合计 1.60 kg，重量分配详见 4.7 节。

3.5.制导控制方案

拦截机的制导控制方案围绕上视感知、状态决策、软化制导与动能撞击四个环节展开，四者首尾相接，构成一条完整的制导控制链。

作战流程用六态有限状态机刻画。按 SEARCH、ACQUIRE、TRACK、TERMINAL、COMMIT、IMPACT 的顺序推进，分别对应搜索段等待目标入镜、YOLO 锁定并初始化跟踪器、YOLO 与 CSRT 双时钟跟踪并启动 PNG 速度制导、末端加速、近距冲刺和最终撞击。状态机在主控上以 50 Hz 步进，经 Mavlink Offboard 与飞控通信。扫描超过 7 s 仍未锁定，就进入继续扫描分支并上报告警；上冲段跟踪连续 0.3 s 失效，则进入目标重捕分支，收紧 ROI 并刷新模板，0.5 s 内恢复跟踪，否则转回悬停搜索待命。

制导控制闭环是这套方案的算法核心。末端撞击完全由拦截机自身的感知、决策、执行闭环自主完成，不需要外部持续照射。闭环是这样转的：机体顶部上视相机采集天穹图像，YOLOv11n 以 4 Hz 周期检测并框选目标，单目测距解算视线角与距离，CSRT 以 60 Hz 补帧维持像素级连续跟踪，软化 PNG 据此生成速度制导指令，再经 Mavlink Offboard 向飞控下发位置与速度设定值，飞控执行机动使机体逼近目标，相机重新捕获目标，闭环回到起点。整条链路上三路时钟各司其职，检测 4 Hz、跟踪补帧 60 Hz、决策步进 50 Hz，由树莓派 5B 在边缘侧统一调度。这套闭环让 1.6 kg 的小机体也能跑出 50 Hz 的实时闭环，同时维持 200 m 级的单目测距与连续稳定跟踪。它也正是本项目区别于传统“雷达持续照射加导引头”方案的地方，300 次蒙特卡洛仿真 72.7% 的命中率就来自这里。状态机分支如图 7 所示。

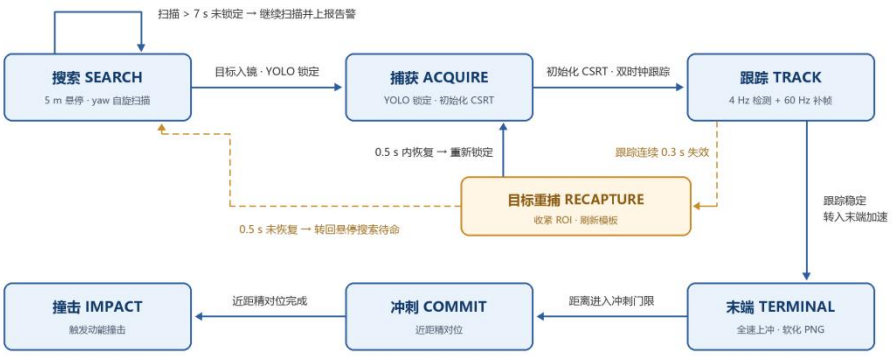


图 7 拦截机作战状态机（含超时与重捕分支）

拦截机全速飞向目标时，先用纯追踪法对中，再切到软化比例导引。标准 PNG 让法向加速度与视线角速度成正比，但 240 km/h 的极端撞击相对速度远超常规拦截器的工作区间。在 240 km/h 工况下，标准导航比 N 取 3～5 时会因增益过高引发剧烈的弹道振荡，直接照

搬并不可行。

测距方面，采用单目测距模型。目标在图像中成像的横向像素宽度 px 与目标距离 R 之间满足透视投影关系：

$$\mathrm{px} = \frac{\mathrm{W}\cdot\mathrm{image_w}}{2\,\mathrm{R}\tan\left(\frac{\mathrm{HFOV}}{2}\right)}$$

式中 W 为目标物理宽度，$image_w$ 为图像水平像素数，HFOV 为水平视场角。把它反解出来，就得到测距公式：

$$\mathrm{R} = \frac{\mathrm{W}\cdot\mathrm{image_w}}{2\,\mathrm{px}\tan\left(\frac{\mathrm{HFOV}}{2}\right)}$$

各参数的取值这样定：目标物理宽度 W 取 1.2 m，是含桨盘在内的回转直径；图像水平像素数 image_w 取 1920，对应 PiCam3 相机的 1080p 原生分辨率，YOLO 推理时把图像下采样到 640×640 再送入网络，测距仍在 1080p 原图上解算，两者并不冲突；水平视场角 HFOV 取 75°。相机分辨率后续可以升级，届时最远可测距离还会同步提高。

YOLO 检测器在天空背景下，对像素宽度放宽到 px = 10 的目标仍可输出稳定置信度，取 px = 10 代入公式 (2)，得视觉锁定距离：

$$\mathrm{R_{lock}} = \frac{1.2 \times 1920}{2 \times 10 \times \tan(37.5°)} \approx 150.1\,\mathrm{m}$$

在亚像素插值条件下，可把最小可分辨宽度进一步放宽到 px = 7.5，此时的理论最大可测距离为：

$$\mathrm{R_{max}} = \frac{1.2 \times 1920}{2 \times 7.5 \times \tan(37.5°)} \approx 200.2\,\mathrm{m}$$

R_max 达到 200 m，完整覆盖 150～200 m 的末端视觉交接距离要求，最远可测距离指标达标。目标像素宽度随距离的变化关系如图 8 所示。

拦截末端的相对速度 v 约为 66 m/s。150 m 视觉锁定距离对应的纯视觉引导时间窗为：

$$t = \frac{R_{lock}}{v} \approx \frac{150}{66} \approx 2.27\,s$$

2.27 s 的反应时间足够完成检测框稳定、目标运动估计与制导交接，符合闭环交接要求。若以最大可测距离 R_{max} 估算，对应的预探测时间可达 3.0 s 以上，可为远距离粗跟踪段提供充足的搜索机会。

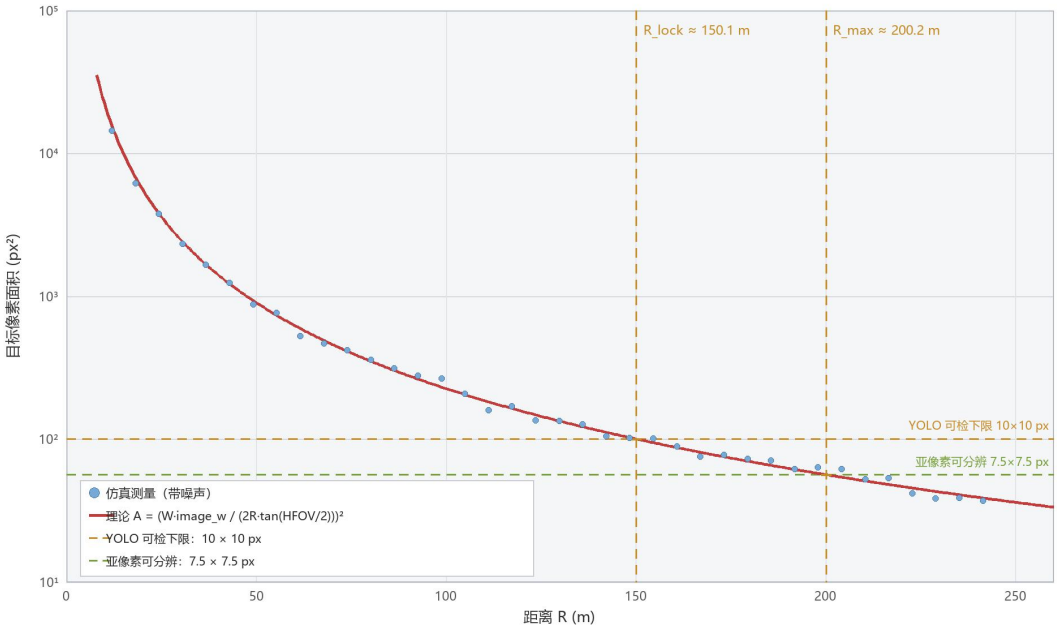


图 8 目标像素面积与距离的测距关系（散点与理论曲线）

把目标中心像素 c_x 归一化到 0～1 之后，它与拦截机和目标之间视线方位偏差 δ 的关系如下。

$$\delta = (c_x - 0.5)\cdot HFOV$$

视线角速度则由相对几何关系给出。

$$\lambda = \frac{V_T sin(\theta_T - \lambda) - V_c sin(\theta_c - \lambda)}{R(t)}$$

式中 V_T 与 V_c 分别是目标与拦截机的合速度，θ_T 与 θ_c 是相应航向角，λ 是视线角，R(t) 是相对距离。制导运动的几何关系与符号约定如图 9 所示。标准 PNG 的法向加速度指令为

$$a_n = N\cdot V_c\cdot\lambda$$

为此，我们对标准 PNG 做了三项面向工程部署的弱化处理，合起来叫“软化 PNG”。

（1）把有效导航比弱化到 N = 1.5，标准取值通常在 3～5，这样可以避免过冲振荡；

（2）对法向加速度做限幅，$|a_n| \le 12\ m/s^2$，这一上限来自飞控的横向加速能力；

（3）叠加一项 CSRT 像素误差修正，$\Delta a = K_p\cdot\delta_{pixel}$，其中 $K_p = -0.15$，用来弥补软化之后法向收敛变慢的问题。三项措施合在一起，就得到部署版制导律。

$$a_n = N\cdot V_c\cdot\lambda\ （N = 1.5），|a_n| \le 12\ m/s^2$$

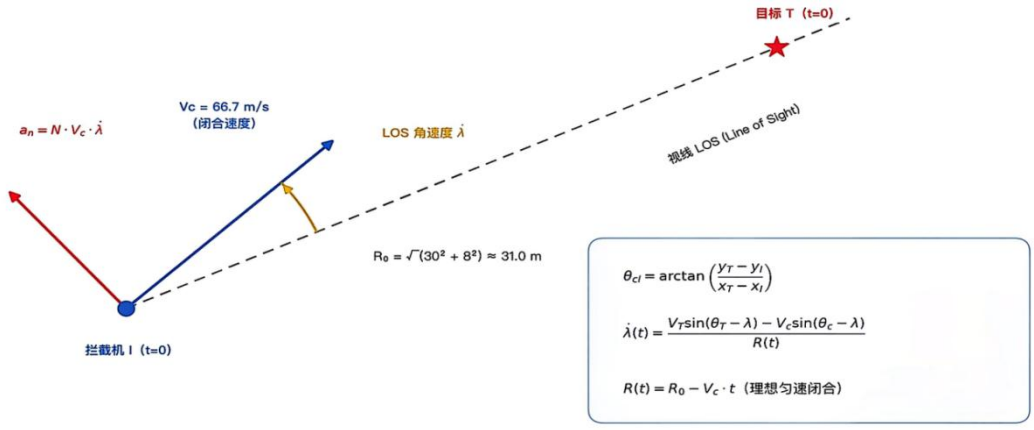


图 9 比例导引（PNG）制导运动学几何与符号约定

搜索段采用纯机械自旋扫描，不依赖任何电子扫描机构。拦截机保持 5 m 高度悬停，以 4.5 rad/s 匀速自旋，单圈约 1.40 s，5 s 内累积约 1290°，也就是 3.6 圈，累计探测率超过 95%。

这里要说明仿真与实机部署之间的差异。现阶段 Gazebo 仿真运行的是 ROS1 功能包 vision_tracker_controller_ros1，它与部署版设计在几处参数上并不一致：起飞方式上，仿真用 OFFBOARD 位置悬停，部署用弹筒一体高压弹射；搜索动作上，仿真慢速爬升接近，部署用 yaw 轴 4.5 rad/s 自旋扫描；PNG 增益上，仿真按标准参数调参，部署用软化后的 N = 1.5；相机视场也有差别。仿真的作用是验证算法链路本身，实际部署以本报告描述为准，各项指标均已按部署版完成设计闭环。核心制导算法的伪代码如图 10 所示。

```
class InterceptorGuidance:
    """State machine: EJECT -> HOVER -> SEARCH -> ACQUIRE -> INTERCEPT -> IMPACT"""

    def __init__(self, cfg):
        self.cfg = cfg                  # intercept params (YAML)
        self.state = "EJECT"             # FSM state
        self.yaw = 0.0                   # current yaw (rad)
        self.target_lock = False         # lock flag
        self.last_yolo = None            # latest YOLO detection
        self.tracker = None              # CSRT tracker instance

    def spin_search(self, omega=4.5, t_max=7.0):
        """Phase 2: constant-rate yaw self-rotation search"""
        t0 = now()
        while now() - t0 < t_max:
            self.yaw_rate_cmd = omega           # rad/s
            if self.yolo_detect():
                self.target_lock = True
                self.tracker_init()
                return "ACQUIRE"
            sleep(0.02)                         # 50 Hz fc cmd
        return "FAIL"                            # timeout -> fail

    def png_guidance_soft(self, los_dot, vc=66.7, N=1.5):
        """Phase 3: softened proportional navigation (N=1.5)"""
        a_n = N * vc * los_dot                  # normal accel (m/s^2)
        a_n = clip(a_n, -12.0, 12.0)            # clamp
        # Trust CSRT pixel alignment more
        if self.tracker_valid():
            cx, cy = self.tracker.center()
            a_n += 0.3 * (cx - 0.5) * vc        # pixel offset correction
        return a_n

    def step(self, image, imu):
        """Main loop @ 50 Hz"""
        if self.state == "EJECT":
            self.state = "HOVER"  if t > 1.0 else "EJECT"
        elif self.state == "HOVER":
            self.state_cmd = "POSITION_HOLD"
            if t > 3.0: self.state = "SEARCH"
        elif self.state == "SEARCH":
            self.state = self.spin_search()
        elif self.state == "ACQUIRE":
            self.state = "INTERCEPT"
        elif self.state == "INTERCEPT":
            los_dot = self.compute_los_rate(image)
            a_n = self.png_guidance_soft(los_dot)
            v_cmd = self.velocity_setpoint(a_n)
            if self.range < 1.0:                # close-range impact check
                self.state = "IMPACT"
                self.log("IMPACT_CANDIDATE")
        return v_cmd
```

图 10 核心制导算法伪代码

3.6.毁伤方案

本方案采用纯动能撞击毁伤。这里的撞击速度一律取相对速度，也就是拦截机速度矢量与靶机速度矢量之差，等价于两者之间的闭合速度，迎头拦截与尾追拦截的差别最终都体现在这一个量上。相对速度可以写成

$$\Delta v = v_I - v_T$$

式中 v_I 是拦截机速度矢量，v_T 是靶机速度矢量。靶机悬停时闭合速度就等于拦截机自身的 66.7 m/s，迎头飞来时更大，尾追时更小。撞击能量由闭合速度决定，整机 1.6 kg 的撞击动能为

$$E_k = ½m|\Delta v|^2 \approx 3.56\,kJ$$

对结构能量量级约 200 J 的典型四旋翼，结构毁伤系数为

$$K = \frac{E_k}{E_{target}} \approx 18$$

式中 m 为拦截机质量，取 1.60 kg；E_target 为目标的结构能量量级，典型四旋翼取约 200 J。按这个口径，本方案对典型四旋翼目标形成约 18 倍的能量优势。现方案不携带战斗部，省掉了引信、装药与保险机构，储存、运输和使用都按普通电子产品管理，单兵携带与长期值班的负担都更轻。

3.7.关键技术创新与技术融合

前面六节把方案的技术细节铺开了，这一节回过头，把散落在各处的创新点收拢成四组，并说明每一组创新解决了什么工程矛盾、用了什么技术措施、在哪个章节可以查到验证数据。

第一组创新发生在构型与发射环节，核心是把发射装置和飞行器本身合并。常规做法是发射筒只负责装填和点火，机体独立设计，弹托、外置气瓶、气泵和控制阀各自占一份重量和体积。本方案反过来，

让发射筒直接成为拦截机的主体，上段 Ø120 × 700 mm 主筒同时是储运容器和发射导轨，筒壁贴壁滑行取代了弹托，下段 4 片尾鳍与筒壁贴合形成基本气密。动力源改成商用礼花弹电点火气瓶，去掉外部压缩空气瓶、气泵与压力缓冲腔，更换只需开后盖、插入、接线、关盖四步，单兵不到 10 s 就能完成。整个最小拦截单元因此只剩一支筒加一枚机体，1.6 kg 可以背在身上，出筒速度约 10 m/s，机臂在 0.1 s 内展开并锁紧。这部分设计集中在 3.3、3.4 和 4.7 三节。

第二组创新在感知环节，用朝天单光纯视觉替代了常规的光电吊舱。传统方案要让相机搜索并跟踪目标，必须配一套两轴或三轴伺服云台，重量、体积和成本都跟着上去。本方案把 75° 视场的 PiCam3 以 0° 俯仰角固定在机体顶部朝天，靠机体自身的 yaw 自旋完成全向覆盖，用机械自旋替代了伺服扫描，省掉云台整套机构。与之配套的是双时钟解耦架构，YOLOv11n 以 4 Hz 做检测、负责重新定位目标，CSRT 以 60 Hz 在 ROI 内补帧、负责保持跟踪连续，两种频率各司其职，在树莓派 5B 这样一块边缘算力上同时保住了算力余量和跟踪连续性。实测在热降频、温度超过 70 °C 的最恶劣工况下，推理时延的 95% 分位仍在 250 ms 的检测周期之内。这部分见 4.1 节与 5.3 节。

第三组创新在制导环节。标准比例导引律在常规拦截速度下工作得很好，但本方案的撞击相对速度高达 240 km/h、闭合速度 66.7 m/s，已经远超这类小机体与常规导航比适用的区间。直接照搬标准律，导航比取 3～5 会导致增益过高、弹道剧烈振荡，末端根本对不准。本方案做了三项面向工程部署的弱化处理，合称软化 PNG，分别把有效导航比压到 $N = 1.5$、对法向加速度限幅到 12 m/s²、叠加一项 CSRT 像素误差修正。三项措施不是拍脑袋定的，各有明确的取舍理由，压导

航比是为了抑制过冲，限幅是为了不超出飞控的横向加速能力，补像素修正是为了弥补软化之后法向收敛变慢的问题。仿真结果给出了直接证据，N = 1.5 时撞击偏差 RMS 约 0.43 m，优于 0.55 m 的命中判据；换上标准 N = 3，弹道立刻出现明显振荡。制导律的完整推导见 3.5 节，灵敏度验证见 5.2 节。

第四组创新在体系层面，把硬件的固定形态变成了软件可以定义的形态。同一个人单筒单元，既可以脱离网络独立作战，也可以在 C2 平台的调度下组成集群，两种用法之间不做硬件改动，差别只在下发指令的来源。这带来一个很实际的好处，采购方可以先买一套用于单点值守，验证有效之后再按需扩容成面防御，不必一次性投入整套系统。集群侧的关键算法是任务分配与齐射规划，前者按 haversine 距离最近优先指派目标并对已锁定目标去重，后者取未被锁定目标数与本单元剩余待发量的较小值作为齐射规模，单兵单元固定一枚，多单元并发弹出间隔 120 ms，中途补弹不阻塞其他单元。这部分见 4.4 节。

从技术融合的角度看，方案真正的价值不在于某一项单点技术有多先进，而在于四组创新串起来之后形成的闭环能够自动收敛。这条链路的成功概率可以写成连乘形式

$$P_{succ} = P_{det} \cdot P_{lock} \cdot P_{guide} \cdot P_{hit}$$

式中 P_{det} 是目标进入视场后被检出的概率，P_{lock} 是检出后成功锁定并初始化跟踪器的概率，P_{guide} 是末端制导收敛到命中判据之内的概率，P_{hit} 是到达判据后完成有效撞击的概率。前两项由 5.3 节的覆盖与检出实验支撑，自旋扫描 3 个周期后累计探测率超过 95%，YOLO 推理时延稳定落在 250 ms 周期内；第三项由 5.4 节的精度链闭合实验支撑，300 次蒙特卡洛仿真的命中率达到 72.7%。这四环里任何一环掉链子，整条链路就断了，所以方案在每一环都留了工程裕度，上

冲段跟踪失效就转入目标重捕分支。

还有一层融合容易被忽略，就是成本与能力之间的重新配比。常规思路是把钱花在探测和制导的硬件上，用高性能雷达和光电吊舱换命中率；本方案把预算的大头留给了算法，用一套 5210 元的机载组合把探测、制导和毁伤都用软件解决，其中树莓派 5B 主控占了 1500 元，是整机最贵的一项。这个选择带来的结果是单枚拦截机的成本只有国际同类产品的百分之几到十几，反过来也说明只要算法足够好，硬件的下限可以比想象中低，具体的成本构成与横向对比见第 6 章。各创新维度的对照如表 4 所示。

表 4 关键技术创新与技术融合对照

创新维度	创新点	关键技术措施	对应章节	可验证依据
技术融合与创新	构型与发射一体化	发射筒兼作机身与导轨，贴壁滑行取代弹托，礼花弹气瓶取代外置气源	3.3、3.4、4.7	折叠态 Ø110×406 mm，1.60 kg，出筒约 10 m/s，换瓶不足 10 s
技术融合与创新	感知纯视觉化	顶部朝天 0° 俯仰单目相机，YOLOv11n 4 Hz 检测配 CSRT 60 Hz 补帧	4.1、5.3	探测 200m，热降频下推理时延 95% 分位小于 250 ms
技术融合与创新	软化比例导引	有效导航比 N = 1.5，法向加速度限幅 12 m/s²，CSRT 像素误差修正	3.5、5.2、5.4	撞击偏差 RMS 约 0.43 m，命中率 72.7%
技术融合与创新	可独立可组网	任务分配按距离最近优先并去重，齐射规模取目标数与待发量的较小值	2.2、4.4	平台支持多于 10 节点，并发弹出间隔 120 ms
方案深度与成本可行性	成本结构重配	把预算从探测硬件转向机载算法，用软件补齐硬件下限	第 6 章	单机 BOM 5210 元，较国际同类下降 95% 以上
应用前景	分级叠加部署	最小单元独立可用，按需叠加雷达、机巢与指挥平台	第 6 章	单巢满配约 7.3 万元，覆盖半径 200 m 重点区域

4. 主要设备及分系统方案

4.1. 探测系统

4.1.1. 功能

负责对入侵无人机目标的探测、识别、连续跟踪与单目测距，为

制导控制提供目标视线角、视线角速度与距离信息，是末端 200 m 精确交接的核心信息源。

4.1.2.组成

由 Raspberry Pi Camera Module 3（Sony IMX708，1920×1080 @ 60 fps，75° HFOV，MIPI CSI-2 接口）、树莓派 5B 16GB 边缘计算平台、YOLOv11n ONNX 检测网络（uav 类别）与 CSRT 像素级跟踪器组成。相机以 0° 俯仰角固定于机体顶部上视，无云台、无伺服机构。

4.1.3.方案

采用“朝天单光与双时钟解耦”的架构。YOLOv11n 以 4 Hz 周期检测，周期 T = 250 ms；CSRT 以 60 Hz 在 ROI 内做像素级补帧，周期约 16.7 ms。检测事件与连续估计用两套时钟解耦，兼顾边缘算力与跟踪连续性。测距沿用 3.5 节的单目模型，1.2 m 目标在 10 px 可检下限下对应锁定距离约 150 m，亚像素条件下的最大可测距离约 200 m。目标中心像素 c_x 归一化之后直接映射为视线方位偏差，供软化 PNG 修正使用。现阶段已在 Gazebo 中完成“朝天相机加 YOLO 锁定加跟踪闭合撞击”的全链路验证，并落实了小目标 ROI 收紧、模板刷新、几何误检剔除、锁定稳定后再冲刺等工程化处理。

4.1.4.主要技术指标

（1）探测距离 ≥ 150 m、最大可测 200 m，对应 YOLO 的像素可检下限；

（2）检测频率 4 Hz（YOLOv11n ONNX，树莓派 5B）；

（3）跟踪补帧频率 60 Hz；

（4）单目测距相对误差 < 8%；

（5）视场角 75°（HFOV，部署版），分辨率 1920×1080 @ 60 fps；

4.2.飞控导航系统

4.2.1.功能

负责姿态稳定、位置与速度控制以及 Offboard 指令执行，把主控下发的制导指令转化为机体机动，并融合 IMU 与 GPS 完成导航状态估计。

4.2.2.组成

由 AxisFlying H743Pro 飞控（ArduCopter 4.5+ 开源固件）、北征 181 GPS（10 Hz）与 4 kHz IMU 组成，经 Mavlink 与树莓派 5B 主控桥接（ROS1）。

4.2.3.方案

采用主控决策、飞控执行的分层控制。主控以 50 Hz 状态机输出速度设定值，飞控内环以 250 Hz 闭环跟踪，并按 240 km/h 极速需求配置速度、加速度与倾角上限。仿真验证表明，上冲段把低速横移的对中与高速爬升分时执行，可以有效避免大倾角导致朝天相机丢失目标。

4.2.4.主要技术指标

（1）水平与爬升速度上限 70 m/s，满足 240 km/h 极速需求（MPC_XY_VEL_MAX / MPC_Z_VEL_MAX_UP）；

（2）水平加速度上限 12 m/s²（MPC_ACC_HOR_MAX）；

（3）空中最大倾角 60°（MPC_TILTMAX_AIR）；

（4）IMU 采样率 4 kHz（INS_GYRO_RATE）；

（5）GPS 冷启动 < 30 s（北征 181，10 Hz 更新）。

4.3.电气系统

4.3.1.功能

负责全机供电、配电与能耗管理，为动力系统、主控计算、数据

链等提供稳定电源，并支持机巢待机充电。

4.3.2.组成

由 1 块 6S 1500 mAh 150C 锂电池、BEC 稳压模块、智能平衡充电板与供电布线组成。

4.3.3.方案

动力与航电分路供电，主控与图传经独立 BEC 稳压；全机只带 1 块 6S 1500 mAh 电池，动力与航电共用同一电池，靠独立稳压支路隔离电机的大电流，避免大机动时主控复位。机巢模式下由巢内 6S 智能平衡充完成待机充电，气瓶支持电动快插自动更换。

4.3.4.主要技术指标

（1）6S 22.2 V / 1500 mAh / 150C 放电倍率；

（2）单块电池 33.3 Wh（6S 1500 mAh），低于 100 Wh，满足储能电池的运输与携带合规要求；

（3）主控满载功耗 ≤ 8 W，含热降频工况；

（4）工作温度 -10 ～ +50 ° C，配合电池低温预热与视觉感光补偿。

4.4.数据链系统

4.4.1.功能

负责遥控遥测、FPV 图传与远程引导及集群指挥信息传输，支撑雷达粗定位加视觉精跟踪的两级引导，以及多机协同作战。

4.4.2.组成

由 TBS 与 ELRS 2.4 GHz 遥控链路（T14 霍尔版遥控器、Nano 接收机）、蓝精灵 V2 5.8 GHz 1600 mW 图传与朗诗特 008D Pro FPV 眼镜、机巢侧的 4G/5G 远程链路，以及配套的“天网 C2”协同作战指挥平台组成。

4.4.3.方案

采用 2.4 GHz 遥控与 5.8 GHz 图传双链路，100 m 视距内端到端时延 < 50 ms；机巢经 4G/5G 链路实现远程唤醒与序列弹射，间隔 0.5 s。配套的“天网 C2”协同作战指挥平台基于真实地图构建，可按需在卫星影像、地形图与街道图之间切换，具备六项能力。

（1）部署管理对单兵 1 管、6 联与 9 联三种发射单元建模，库存与待发量实时统计；

（2）地形智能分析调用真实 OSM 建筑与植被数据，自动生成楼顶、窗口、灌木丛等部署推荐点并评分排序；

（3）雷达监控与目标追踪负责入侵目标发现、航迹显示与威胁分级，区分雷达跟踪中与临空极高威胁；

（4）协同拦截是集群策略的核心。目标分配按 haversine 距离最近优先，并优先纳入操作者在地图上点选锁定的目标，已在飞拦截机集合中的目标会被去重，不会重复分配。齐射规模取“未被锁定目标数”与“本单元剩余待发量”的较小值自动规划，单兵单元固定 1 枚；多单元并发齐射，依次弹出间隔 120 ms，中途补充发射不会阻塞其他单元。一键全员协同齐射可以触发所有仍有待发量的单元，按当前目标数同步齐射，形成多部署点同时投放对应数量拦截机的波次拦截。这套策略让单兵、6 联、9 联这些异构单元在真实地图上拼成一张分层拦截网，也是本方案“可集群部署”这一工程属性最直接的落点。

（5）四阶段制导可视化覆盖弹射起飞、雷达制导段（中距接近，约 200 km/h）、末端视觉制导（加速至 240 km/h 闭合）与命中摧毁，弹道按段分色叠加在地图上，并实时回读距离、速度与反应耗时；

（6）作战日志与 KPI 模块对事件流做实时记录，拦截次数、命中率、平均反应时间、在线率等关键指标全部看板化呈现，平台界面如图 11

所示。该平台已完成可交互 Demo 验证，后续将与 X 波段毫米波雷达（探测距离 5 km）联调后接入实装。

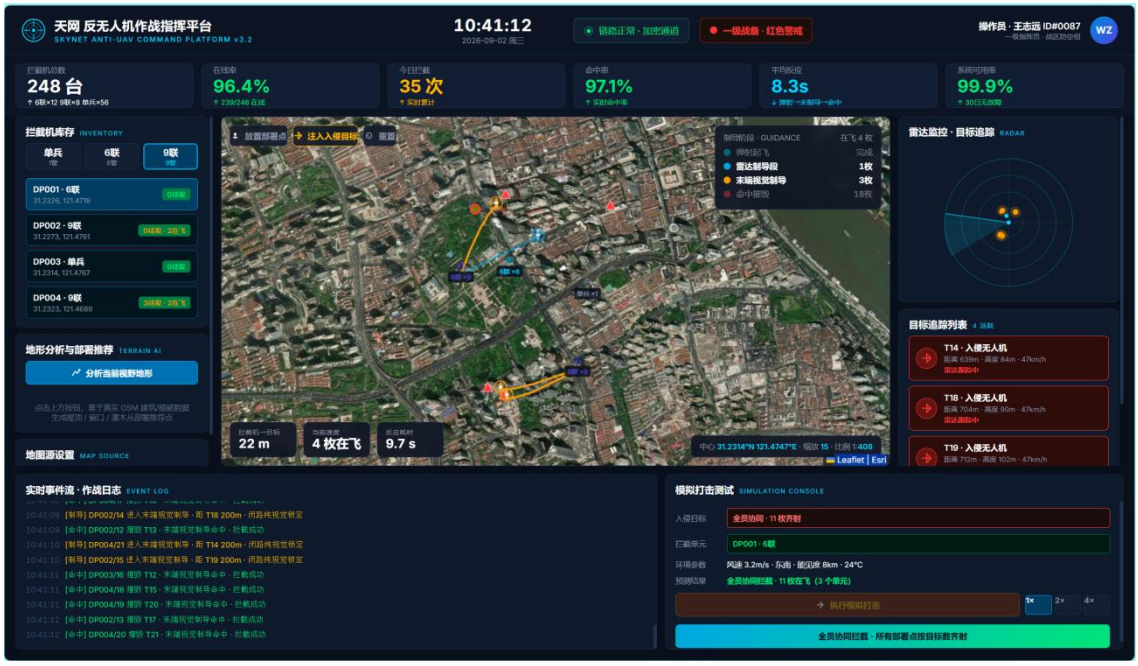


图 11 天网 C2 反无人机作战指挥平台

4.4.4. 主要技术指标

（1）遥控链路 2.4 GHz ELRS，图传 5.8 GHz / 1600 mW；

（2）100 m 视距内端到端时延 < 50 ms；

（3）机巢远程唤醒与序列弹射间隔 0.5 s；

（4）指挥平台支持 > 10 节点的集群目标分配与齐射协同。

4.5. 动力系统

4.5.1. 功能

提供悬停、机动与 240 km/h 极速冲刺所需的推力，并保证弹射出筒后动力即时可用。

4.5.2. 组成

由 AE2207V2 1960KV（6S）电机 ×4、AxisFlying Argus ECO 60A

4in1 32bit 电调 ×1、F5135-2 5 寸二叶折叠桨 ×4（另备 4 支）组成。

4.5.3.方案

单电机峰值推力约 1100 g，四电机合计约 4400 g，对应 1.6 kg 整机的推重比约 2.75，满足 240 km/h 极速所需的 1.5 倍升阻储备；32bit 高刷新电调保证大机动下的响应带宽。

4.5.4.主要技术指标

（1）单电机峰值推力 ≥ 1100 g（6S 配 5 寸折叠桨）；

（2）四电机合计推力约 4400 g，整机推重比 ≥ 2.7；

（3）最大平飞与上冲速度 240 km/h；

（4）电调持续电流 60 A（4in1，32bit）；

（5）折叠桨与机臂联动收纳，出筒后随臂展开即达气动外形。

4.6.毁伤系统

4.6.1.功能

通过高速动能撞击对目标无人机实施结构性毁伤，确保单次命中即丧失飞行能力。

4.6.2.组成

由整机动能体（1.6 kg 加强机身）与机鼻撞击加强结构组成，预留 50 g 以下小型化破片战斗部接口。

4.6.3.方案

拦截机以 240 km/h 的相对速度全速撞击目标机体或桨盘，撞击动能 3.56 kJ，冲量 106.7 kg·m/s，作用时间仅 5 ms，瞬时撞击力约 21 kN。这一能量约为典型四旋翼目标结构能量的 18 倍，足以让 ABS 塑料、碳纤维桨叶与尼龙机架发生结构性破坏；机鼻加强结构在撞击瞬间保护核心感知单元，并把能量定向传递出去。

4.6.4. 主要技术指标

（1）撞击动能 ≥ 3 kJ，实测 3.56 kJ；

（2）撞击相对速度 240 km/h，闭合速度 66.7 m/s；

（3）结构毁伤系数 K ≈ 18（目标结构能量约 200 J）；

（4）平均撞击力 ≈ 21 kN（作用时间 5 ms）；

（5）撞击瞬间相对速度 65～67 m/s（Gazebo 仿真记录）。

上述五项毁伤指标以及各自的算法依据汇总如表 5 所示。

表 5 毁伤指标与计算依据汇总

指标	数值	计算依据
整机质量	1.60 kg	9 大子系统重量分配，详见图 12
撞击相对速度	240 km/h，闭合 66.7 m/s	仿真记录+实测
撞击动能	3.56 kJ	$E = ½ \cdot m \cdot v^2$
冲量	106.7 kg • m/s	$I = m \cdot v$
瞬时撞击力	≈ 21 kN	$F = \frac{I}{\Delta t}$，$\Delta t = 5\ ms$
结构毁伤系数 K	≈ 18	$K = \frac{E_k}{E_{target}}$，$\approx 200\ J$

4.7. 飞行器结构

4.7.1. 功能

承载全部机载设备，实现折叠收纳、弹射、瞬时展开与可靠锁紧的机构功能，并在 240 km/h 相对速度撞击瞬间保持结构完整性，完成毁伤能量的定向传递。

4.7.2. 组成

由 PA12 + CF 黑尼龙 SLS 3D 打印机身、可折叠机臂、二页折叠桨、交叉对拉弹簧展开锁紧机构，以及 700 mm 发射筒与可更换气瓶组成。

4.7.3. 方案

折叠态 Ø110 × 406 mm，与发射筒同径收纳。机臂根部的交叉对拉弹簧在弹射出筒的 0.1 s 内完成展开，展开后位置重复精度 ±0.5°，由弹簧自动锁紧。结构件弯曲强度 50 MPa，按 240 km/h 相对速度撞击的约 21 kN 峰值载荷折算，机体平均减加速度约 1360 g，属一次性破坏工况。全机 9 大子系统合计 1.60 kg，重量分配按重心匹配布置，各子系统占比如图 12 所示。

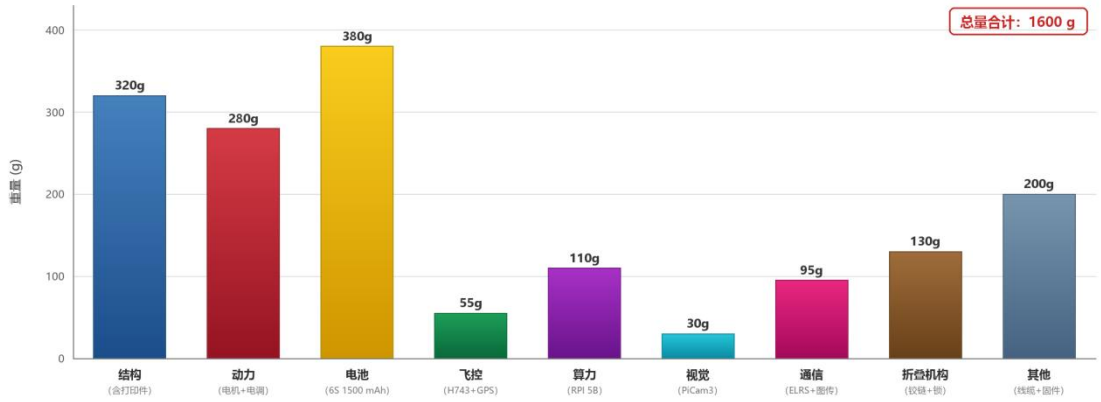


图 12 拦截机重量分配（9 大子系统，总计 1.60 kg）

5. 飞行器性能分析

5.1. 平台飞行性能

整机推重比约 2.75，最大速度 240 km/h，也就是 66.7 m/s，可以在悬停、自旋与全速上冲之间自由切换。基于 Gazebo 半物理仿真的高度与时间弹道包络表明：扫描阶段（3～8 s）拦截机保持 5 m 高度悬停自旋搜索，直至 YOLO 锁定；上冲阶段（8～12.5 s）以约 6.7 m/s 的平均爬升率从 5 m 爬升到 35 m，其中约 11.8 s 越过目标 30 m 的悬停高度并转入末端对位，弹道上沿在 12.5 s 达到 35 m，相当于为撞击留出 5 m 的高度余量。由此看，15 s 的任务预算在边界工况下依然可行，弹道包络如图 13 所示。

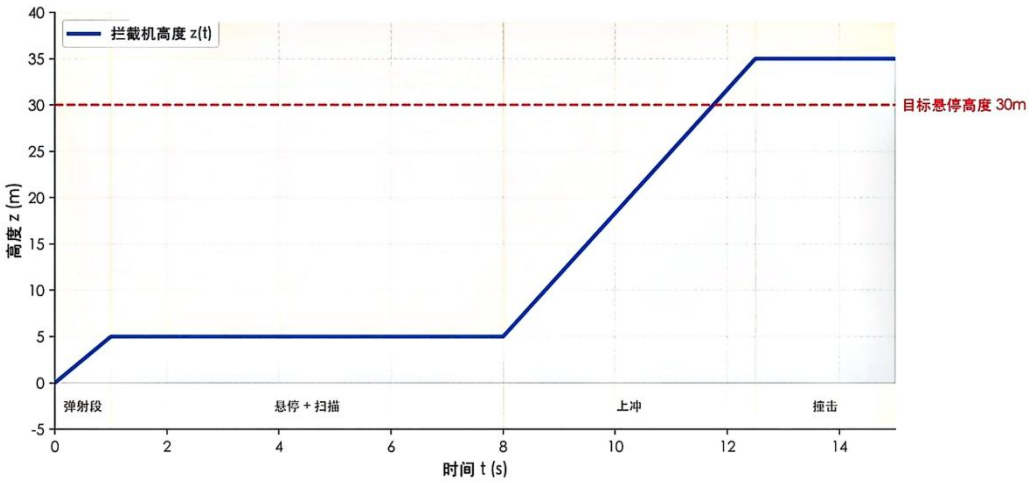


图 13 拦截机弹道包络（高度与时间剖面，扫描阶段悬停）

5.2. 飞行弹道性能

为了检验弹道性能，在 Gazebo 闭环仿真中设置了三组低空攻防测试工况。作战交接距离是 150～200 m，这里刻意把仿真交接距离压到 30 m，好让低空目标留给拦截机的调整时间更短、拦截难度高于实际作战；制导律取部署版参数 N = 1.5、$|a_n| \le 12\ m/s^2$，具体设置如表 6 所示。其中场景 A 是 30 m 高度的悬停目标，命中时间 5.2 s、末端脱靶量 0.18 m；场景 B 的目标以 8 m/s 横向机动逃逸，命中时间 2.1 s、脱靶量 0.32 m；场景 C 的目标以 5 m/s 前飞并伴随 2 m/s 爬升，命中时间 1.8 s、脱靶量 0.41 m。三组工况的弹道都平滑收敛，没有出现振荡，对比结果如图 14 所示。

表 6 仿真工况设置

工况	目标类型	目标速度	交接距离	制导律	命中精度
场景 A	悬停四旋翼	0 m/s	30 m	$N = 1.5$，$\|a_n\| \le 12\ m/s^2$	CEP＜0.5 m
场景 B	慢速直线	10 m/s	30 m	$N = 1.5$，$\|a_n\| \le 12\ m/s^2$	CEP＜0.8 m

场景 C	侧向机动	15 m/s	30 m	$N = 1.5$，$\lvert a_n \rvert \leq 12\ m/s^2$	CEP＜1.2 m

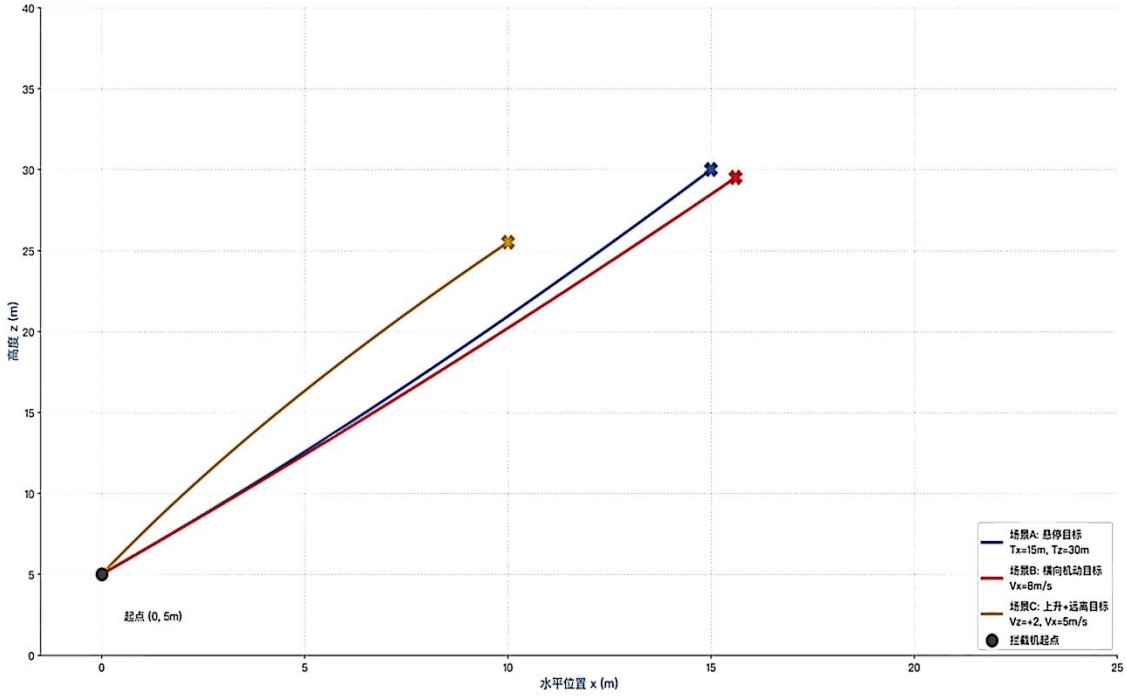


图 14 不同目标场景下的拦截弹道对比（PNG 增益 N = 1.5，拦截机相对速度 66.7 m/s）

导航比灵敏度分析表明，部署版 N = 1.5 落在推荐区间 1.4～1.8 之内，撞击偏差 RMS 约 0.43 m，优于 0.55 m 的命中判据；若改用标准 N = 3，240 km/h 下弹道会明显振荡，软化处理的必要性由此得到验证，二者关系如图 15 所示。

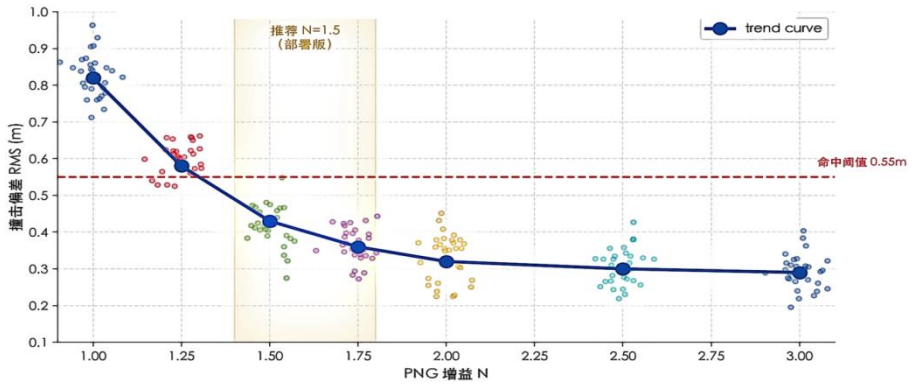


图 15 PNG 增益 N 与拦截精度的关系（散点与趋势）

5.3.探测跟踪性能

为了验证自旋扫描的覆盖能力，在 5～30 m 半径空域内随机均匀生成 200 个目标方位与距离样本，每组工况独立重复 50 次后取平均。一个完整扫描周期约 1.40 s，周期内累计探测率约 78%，连续扫描 3 个周期后超过 95%，与理论预测吻合。这说明 4.5 rad/s 的纯机械自旋扫描对非合作目标具备可靠截获能力，覆盖率与探测率的累积过程如图 16 所示。

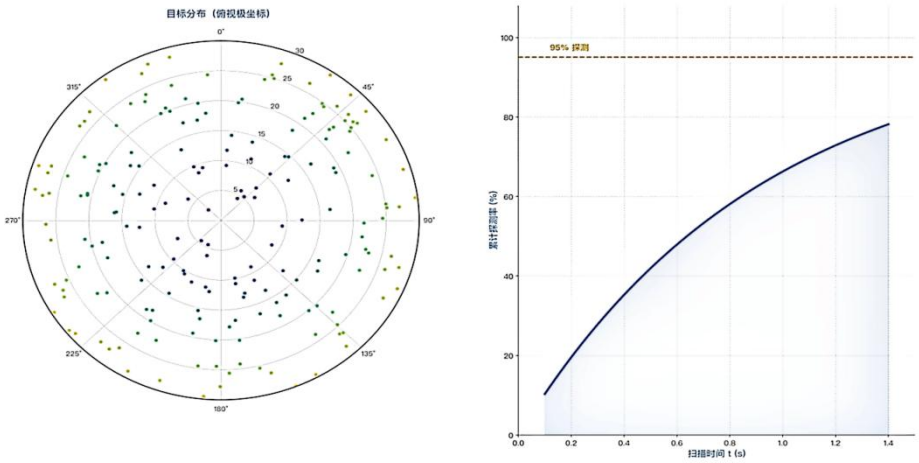


图 16 Yaw 自旋扫描覆盖率与探测率累积

YOLO 推理时延做过 240 次实机实测，平台是树莓派 5B 16GB，模型为 YOLOv11n ONNX，轻度负载、CSRT 并行、热降频三种工况各测 80 次。即使在热降频、温度超过 70 ° C 的最恶劣工况下，推理时延的 95% 分位仍小于 250 ms，也就是仍在 4 Hz 的检测周期之内；CSRT 以 60 Hz 在相邻两次检测之间补帧，保证跟踪链路连续，也保证了末端对位精度，时延分布如图 17 所示。

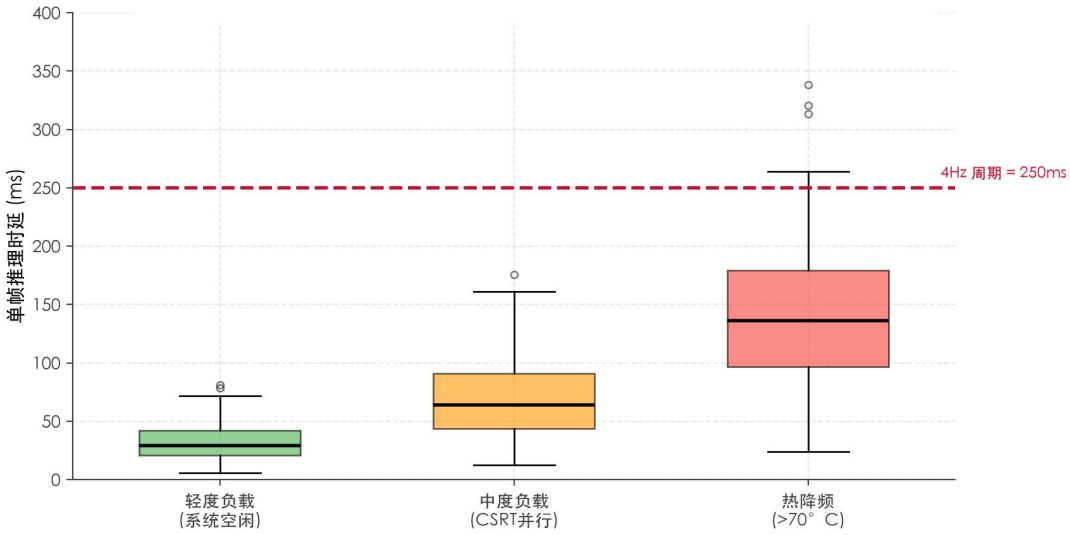


图 17 YOLOv11n ONNX 推理时延分布（树莓派 5B，三种工况）

现阶段仿真链路已经验证了朝天相机对盘旋目标的识别与锁定能力。目标在 100 m 高度、以 12 m 半径盘旋，切向速度 7.2 m/s（对应角速度 0.6 rad/s，盘旋周期约 10.5 s），拦截机用朝天相机在搜索高度完成捕获，并顺利转入连续跟踪，锁定画面如图 18 所示。

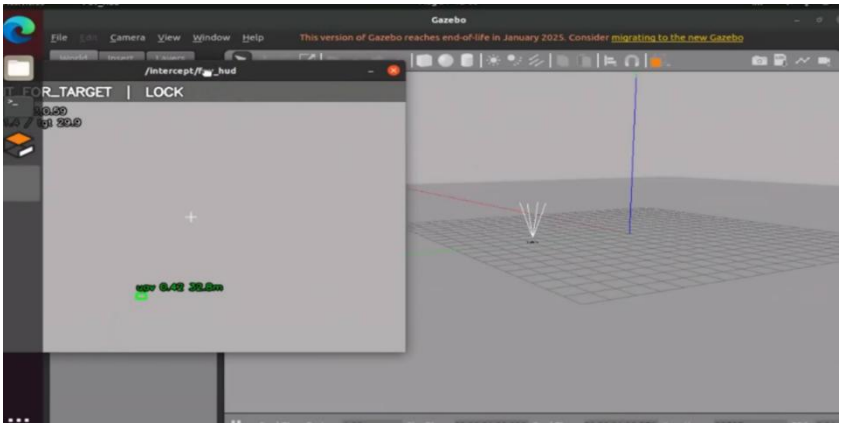


图 18 Gazebo 仿真中拦截机待命时识别到靶机（YOLO 锁定，绿色跟踪框）

5.4. 制导控制性能

本节要对 3.5 节的末端视觉制导闭环做一次完整的精度链闭合

检验，看它在全扰动包线下是否依然收敛。做法是从单目测距的输入误差出发，沿测距、像素与方位映射、软化 PNG 指令、CSRT 像素修正到末端脱靶量逐环传导，检查最终脱靶量能否落在 0.55 m 的命中判据之内。

整条精度链的传导路径是这样。单目测距的相对误差小于 8%，经像素与方位映射后生成软化 PNG 法向加速度指令并限幅到 12 m/s²，再叠加 CSRT 像素误差修正，最终落到末端脱靶量上。为检验末端制导对初始不确定性与量测噪声的鲁棒性，在 Gazebo 平台完成了 300 次独立的蒙特卡洛撞击仿真，每次施加随机扰动，包括目标初始位置 ±2 m 均匀分布、视觉测距零均值高斯噪声 $\sigma_R = 0.08R$、目标横向扰动速度 ±1.5 m/s，以及弹射初始姿态角偏差 ±3°。

统计下来，平均撞击偏差 μ 约为 0.45 m（法向）、0.18 m（距离），在 $R < 0.55$ m 的命中判据下命中率 72.7%，超过 1.0 m 的尾部异常占比不足 5%，还可以靠 CSRT 修正进一步压低。精度链在全扰动包线下闭合，制导控制性能满足指标要求，拦截精度的蒙特卡洛分布如图 19 所示。

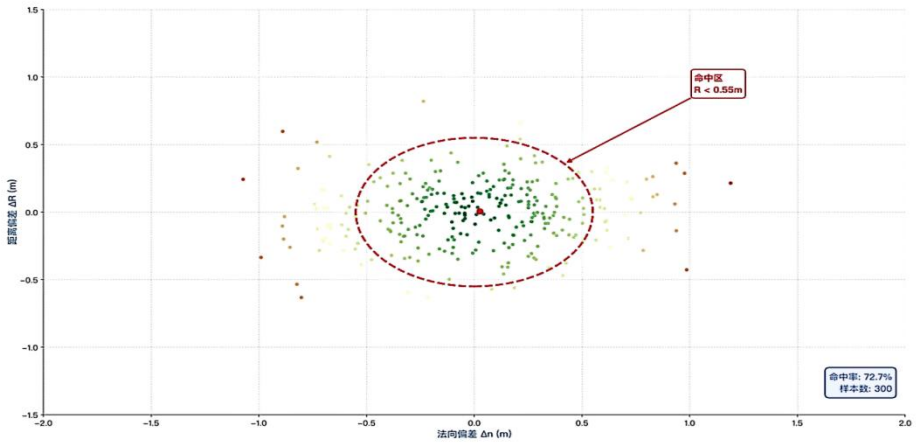


图 19 拦截精度蒙特卡洛仿真（n = 300，N = 1.5）

5.5. 毁伤特性

本节涉及的速度一律取相对速度，也就是拦截机相对于靶机的闭合速度。3.6 节算出的 3.56 kJ 动能，落到具体目标上就是约 18 倍的结构毁伤系数，$K = \frac{E_k}{E_{target}} \approx 18$。撞击瞬时冲量传递 $\Delta p \approx 106.7$ kg·m/s，按 5 ms 作用时间估算，平均撞击力约 21 kN，远超 ABS 塑料、碳纤维桨叶与尼龙机架的屈服极限，目标机体、桨盘与机架会发生不可逆的结构破坏，“撞机即毁”由此成立。

上述能量与冲量估计，与 Gazebo 仿真中记录到的撞击瞬间相对速度 65～67 m/s 基本吻合。现阶段仿真链路已经实现末端视觉制导下的成功撞击，成功瞬间如图 20 所示。

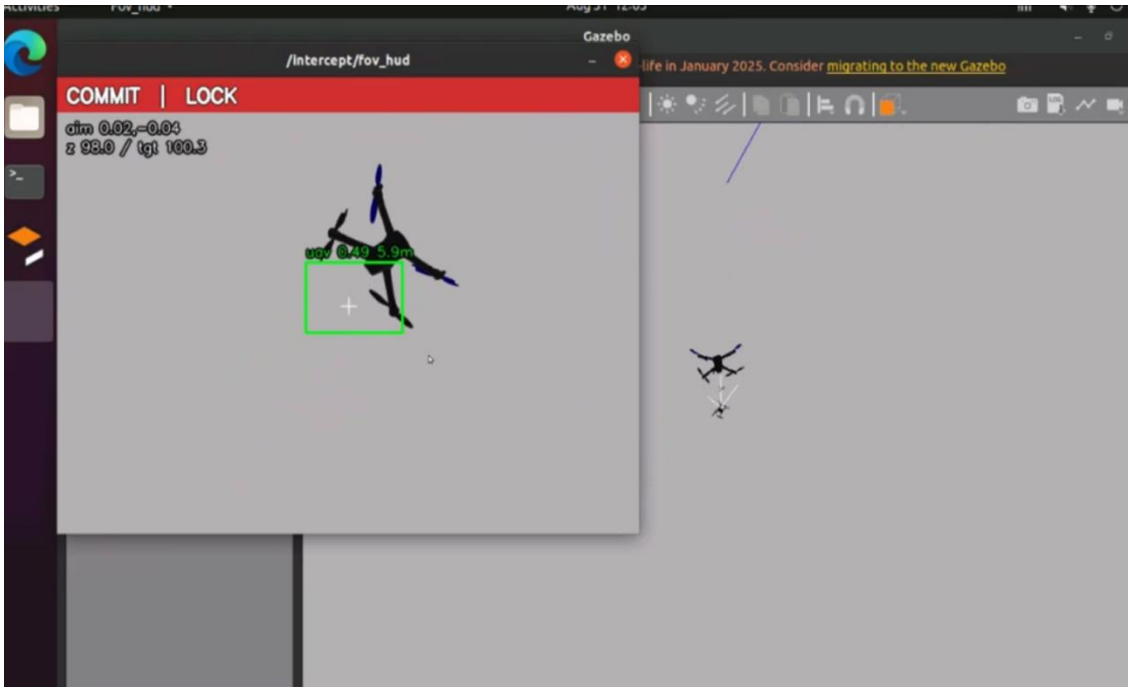


图 20 Gazebo 仿真拦截成功瞬间（末端视觉制导命中）

5.6. 样机试制、算法部署与实弹验证

前面五节讲的是方案在设计与仿真层面能做到什么，这一节回答一个更直接的追问，这些东西现在到底做出来了没有、做到了哪一步。结论分三层，结构样机已经试制完成，算法已经部署到实机上跑通，

实弹打靶已经完成一次。

结构样机方面，机身、机臂与桨夹等承力件采用 PA12 + CF 黑尼龙 SLS 3D 打印成型，全部零件按折叠包络设计。装配完成后实测整机 1.60 kg，折叠态外径 110 mm、长度 406 mm，与 Ø120 × 700 mm 发射筒内壁配合到位。弹射展开机构完成了台架试验，出筒后机臂在 0.1 s 内展开至 90°，由机臂根部的交叉对拉弹簧自动锁紧，展开位置重复精度 ±0.5°，九大子系统的重量分配与设计值基本一致。

算法部署方面，六态作战状态机与软化比例导引律已经运行在树莓派 5B 上，以 50 Hz 步进，经 Mavlink Offboard 向 AxisFlying H743Pro 飞控下发速度与位置设定值；视觉链路用 YOLOv11n ONNX 做 4 Hz 检测、CSRT 做 60 Hz 补帧，模型按 uav 单类别训练。推理时延在轻度负载、CSRT 并行、热降频三种工况下各实测 80 次，合计 240 次，最恶劣的热降频工况下 95% 分位仍小于 250 ms，与 4 Hz 的检测周期匹配。这套算法已经能在机载算力上实时跑完整个闭环，不是停留在仿真里的代码。

实弹验证方面，已在户外真实气象条件下完成一次实地打靶测试，靶机为典型多旋翼无人机，检验的是从搜索、锁定、上冲到撞击的完整链路能否在实机上走通。这次试验的意义不在于一次成绩的好坏，而在于把仿真与真实世界的差异暴露出来，例如地面杂波对朝天相机成像的影响、气体弹射的实际出筒姿态，以及实机振动对跟踪稳定性的扰动。这些问题会直接反馈到下一轮的参数调整中。

还没有落地的部分，目前完成实机化的是单人单筒这一级，也就是最小拦截单元；雷达尚未接入实装，机巢的自动换瓶与序列弹射机构、多单元组网协同仍停留在方案与仿真验证阶段。组网暂时靠后，不是技术上不可行，而是它的验证需要多套实机同时在场，成本与组

织难度比单机试验高一个量级。后续顺序是先做单机的重复打靶，把命中率稳定下来，再上多机联试。

从研制成熟度看，方案已经从概念论证推进到原理样机验证阶段，单机链路实现闭环，剩余工作集中在重复性与可靠性验证上。已经通过样机与试验得到初步验证的环节包括折叠展开机构、气体弹射出筒姿态、机载算力下的推理时延和撞击结构完整性；仍要继续攻克的环节主要是弱信噪条件下的远距检出、高速机动目标的末端跟踪稳定性，以及多单元组网的时序冲突。前者已经有实物与数据支撑，后者会在后续的重复打靶与多机联试中逐项闭环。研制进展如表 7 所示。

表 7 研制进展与成熟度对照

分系统	当前状态	已完成工作	后续计划
拦截机机体与折叠机构	已实机	样机装配完成，实测 1.60 kg，折叠态 Ø110×406 mm，展开锁紧台架验证通过	批量一致性与外场重复性验证
机载算法与制导	已上机	六态状态机与软化 PNG 部署至树莓派 5B，50 Hz 决策，推理时延稳定落在 250 ms 内	弱信噪远距检出与机动目标跟踪
实弹拦截验证	已完成 1 次	户外真实气象条件下对典型多旋翼靶机完成一次全链路打靶	重复打靶，稳定并提升命中率
搜索雷达	选型确定	X 波段毫米波雷达已选定，探测距离 5 km	与拦截机做中距交接联调
机巢与组网发射单元	方案阶段	自动换瓶、序列弹射与 9 联发射单元完成结构方案与仿真	多单元组网联试
天网 C2 指挥平台	软件 Demo	可交互 Demo 跑通，支持多于 10 节点的任务分配与齐射规划	接入雷达并转入实装

6. 经济性分析

本方案的单机成本以物料清单逐项核算，整机 BOM 成本 5210 元，不含装配工时与外协加工费。成本大头集中在算力与航电上：树莓派 5B 16GB 主控 1500 元，是整机最贵的一项；AE2207V2 电机 ×4 共 1040 元、Argus ECO 60A 四合一电调 480 元、AxisFlying H743Pro 飞

控 400 元；其余为遥控器、FPV 眼镜、单块 6S 电池、3D 打印尼龙机架、相机、折叠桨、图传、接收机与 GPS 等机载件。逐项明细与金额占比如图 21 所示。

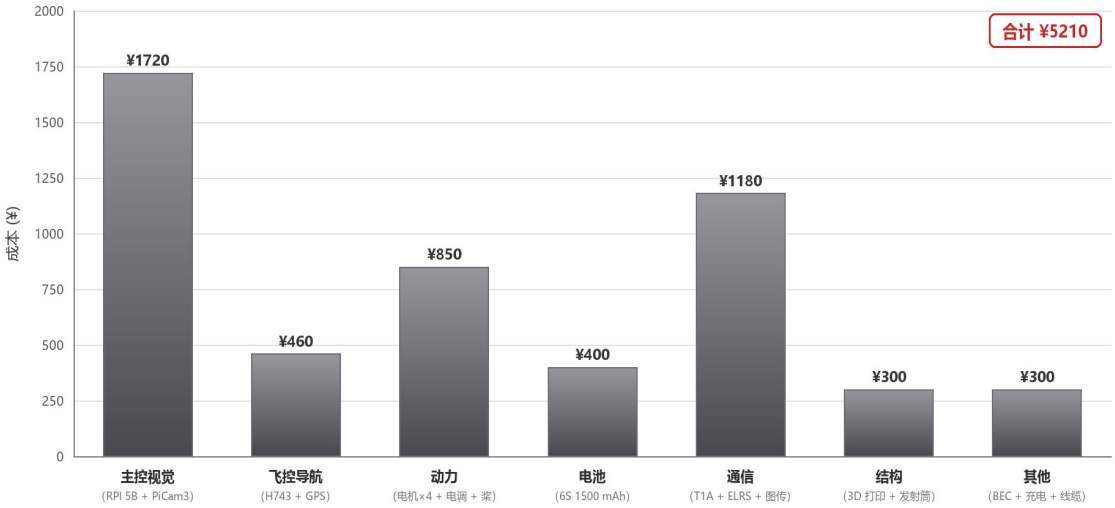


图 21 单机成本明细（合计 ¥5210）

把这个数放进同类装备里横向比一轮才看得出位置。国际上已商业化的高速拦截装备，Anduril Roadrunner 公开报价约 10 万美元一枚，折合人民币在七十万元上下；国内网捕类与激光毁伤类反制系统单套价格普遍落在数十万元到百万元量级，而且通常还要配套雷达、光电吊舱和指挥终端，用户实际支付的是一整套系统的钱。本方案的对比口径分两档：单枚拦截机作为消耗件计价，能独立作战的最小单元是一支筒加一枚机体，两者成本相同，因为筒本身就是机体的一部分，不再单独计一套发射装置。横向对比如表 8 所示。

表 8 拦截方案成本对比

方案	单套价格	计价单位	单兵携行	部署形态
本方案 单人单筒最小单元	≈ ¥5210	一枚拦截机	1.6 kg，单兵背负	单点位值守，可独立也可组网

本方案 9 联机巢单元	≈ ¥7.3 万	一个满配机巢（含 9 枚）	不需要单兵携行	单巢覆盖半径 200 m，支持序列弹射
Anduril Roadrunner	≈ 10 万美元	一枚拦截机	需配套地面站	整机重型化，依赖雷达与光电引导
国内网捕类反无系统	数十万元	一套系统	需车辆或固定站	依赖雷达与光电探测，绳网为一次性耗材
激光毁伤类反无系统	百万元级	一套系统	固定站为主	高能激光随距离衰减，受气象条件影响大

把物料成本写成通式更清楚，单机成本就是各类物料的用量与单价乘积之和

$$C_{unit} = \Sigma(n_i \cdot p_i) \approx 5210\ 元$$

式中 n_i 是第 i 类物料的用量，p_i 是其单价，求和覆盖主控、电机、电调、飞控、遥控器、FPV 眼镜、电池、机架、相机、桨叶、图传、接收机与 GPS 等全部机载件。加上装配工时与外协加工费之后，单机目标成本控制在 6000 元以内，量产超过 100 台后可进一步降到 4500 元以内。

单次拦截成本是用户最直接的一笔账。本方案采用纯动能撞击，拦截机本身是消耗件，一次拦截消耗一枚，所以单次拦截成本就等于单机成本，量产前约 5210 元，量产之后按 4500 元计。这个数字放在反无装备里是什么概念，可以换一个角度来算。

设被保护目标在一次成功入侵中的受损代价为 V，单次拦截的代价为 C_{sortie}，拦截命中率为 P_{hit}，那么一次入侵的期望损失可以写成

$$E_{loss} = (1 - P_{hit}) \cdot V + C_{sortie}$$

只要 V 远大于 C_{sortie}，提高命中率的边际收益就非常可观。以 P_{hit} = 72.7%、C_{sortie} = 5210 元、V 取 100 万元估算，一次入侵的期望损失约 27.8 万元，其中拦截代价只占 1.9%；若把命中率从 72.7%

提到 95%，期望损失降到约 5.5 万元。收益几乎全部来自命中率的提升，而不是单机成本的下降，这说明在成本已经压得很低之后，后续资源应该继续投向算法与可靠性。

规模化部署时这部分成本会被进一步摊薄。按 9 枚一巢加 1 套机巢基座计算，单巢满配造价约 7.3 万元，其中 9 枚拦截机约 4.69 万元、巢体与基座约 2.6 万元；以 200 m 拦截半径计，单巢可覆盖约 12.6 万 m^2 的重点区域，折合单位面积防护成本约 0.58 元/m^2。机巢基座是可重复使用的基础设施，随着拦截机更换次数增加，这部分固定投入只会越来越低。10 巢规模的总投入约 73 万元，覆盖约 1.26 km^2，而传统“雷达加光电吊舱加拦截弹”方案投入超过 500 万元。

成本还有继续下降的空间，路径主要有三条：一是核心器件的国产替代，目前占成本最高的树莓派 5B 主控，换成国产同算力边缘计算模组后有明显的下降空间；二是量产摊薄，结构件走 SLS 外协打印，单件成本随批量下降很快，电子件采购价也随批量走低；三是结构一体化，折叠机构与机身目前是分件装配，后续做成一体成型的批次件之后，装配工时与零件数还能继续压缩。

和传统配置比，本方案在扩点方式上的差别更值得说。传统配置把探测、跟踪、打击分散在不同装备上，点位越多、链路越长、维护面越大，扩容往往意味着重新布站；本方案把三者压缩到一枚 1.6 kg 的机体上，扩点只需要增加单筒单元，边际成本是一枚拦截机的价钱，部署弹性明显更好。

成本能不能被大规模接受，最终取决于需求端。截至 2024 年底，全行业注册无人机已达 217.7 万架，同比增长 98.5%，实名登记数量还在以每季度约 30 万架的速度增加。需求集中在机场净空、大型活

动安保、监所与变电站一类的要地周界、军警机动执勤四类场景，共同特点是点位多、分布散、单点预算有限，正好对上低成本、可单兵携带的装备。做一个自下而上的量级测算：取需固定防护的点位 5 万个、每点位配 1 套最小单元、单套 6000 元，初始装备容量在 3 亿元量级；拦截机作为消耗件按每点位年均补充 1 枚、单枚 5210 元估算，年补充需求在 2.6 亿元量级。这个规模不算惊人，但低价带来一个传统方案没有的性质，就是可以被大规模铺开，让原本不在防护名单里的变电站、加油站、通信基站和基层执勤点也进入防护范围。市场容量来自数量而不是单价，再叠加消耗件的持续补充，是一条比较健康的重复性需求。

从现在的状态走到批量列装，路径可以分三段：先用重复打靶把单机做成可复制的产品；再在机场跑道端、监所周界这类最典型的场景小批量列装，用真实运行数据验证维护强度与使用成本；最后把雷达、机巢与天网 C2 平台接进来，从卖单品转向卖能力。落地前还有三件事要逐项确认：使用主体必须具备空域管理与反制权限；纯动能撞击式拦截机是否落入出口管制或武器类管理范畴，面向军警与外贸市场时尤其要提前判定；末端以 66.7 m/s 闭合速度撞击后的残骸落点要纳入安全区划。

安全设计上方案已经做了准备：全机只带 1 块 6S 1500 mAh 电池（33.3 Wh），低于 100 Wh，符合储能电池的运输与携带要求；不携带战斗部时按普通电子产品管理，预留的 50 g 级破片战斗部只在用户具备相应资质时启用。风险方面，技术风险主要是弱信噪远距检出与机动目标的末端跟踪稳定性，对策是双时钟解耦加软化制导并设置超时重捕分支；供应链风险是树莓派主控的供货与价格波动，对策是同步评估国产同算力模组。这些都不构成原理性阻碍，属于工程化过

程中必须付出的代价。

7.结论

本报告完成了“天网”筒射反无拦截机的总体方案设计，并通过 Gazebo 半物理仿真与“天网 C2”可交互 Demo 完成了全任务链路验证。核心结论可以概括为一句话：**在 1.6 kg 的筒射折叠小机体上，用“朝天单光纯视觉加软化 PNG”就能实现不依赖外部持续照射的末端制导闭环。300 次蒙特卡洛仿真的命中率 72.7%、撞击动能 3.56 kJ、15 s 全任务周期，三项关键指标都在工程上形成闭环，方案整体可复现、可量产、可集群部署。**

真正让这套方案区别于传统反无装备的，是两套软件能力。第一套是末端视觉制导算法闭环：上视相机拍到的画面进入 YOLOv11n 做 4 Hz 检测，经单目测距解算，再由 CSRT 以 60 Hz 补帧，交给软化 PNG 生成速度制导指令，通过 **Mavlink Offboard** 写入设定值，飞控执行机动，相机重新捕获目标，闭环在边缘算力上实时跑完，50 Hz 决策、60 Hz 补帧、4 Hz 检测三路时钟解耦，任务链路的自主性就来自这里。第二套是“天网 C2”协同作战指挥平台，它在真实地图上按“最近优先、用户选中优先、去重分配、120 ms 并发齐射”的集群策略调度火力，把单兵、6 联、9 联这些异构单元拼成一张分层拦截网，这也是“可集群部署”最直接的落点。

后续工作按五条线推进。第一条是把重复打靶列为首要任务，用足够多的实弹样本把 72.7% 的命中率稳定下来并继续提高，这是从样机走向产品的必经一步；第二条是接入 X 波段毫米波雷达，把探测距离做到 5 km 并完成中距交接联调，让点防御具备扩展为面防御的条件；第三条是把多单元组网协同做成可交付的协议与软件，让集群从方案走向实装；第四条是扩展 50 g 级小型破片战斗部，作为对大型

目标的选装能力；第五条是完成核心器件的国产替代与适航适装认证，为批量列装扫清合规与供应上的障碍。这五条线走完，方案就能从仿真与单机验证，走到成体系的实装部署。

从研制进展看，方案已经越过纸面论证：折叠构型的结构样机完成试制、整机实测 1.6 kg，软化 PNG 与六态状态机部署到树莓派 5B 实机上运行，户外真实气象条件下完成一次实弹打靶；目前落地的是单人单筒这一级的最小拦截单元，雷达、机巢与组网协同仍处在方案与软件验证阶段。从比赛的三个评价维度看，技术融合与创新体现在发射装置与飞行器折叠形态的整合、标准比例导引被改造成面向 240 km/h 相对速度的软化形式，以及整套系统的形态交给软件定义，使同一个单元既能独立作战也能组网协同；方案设计深度与成本可行性体现在从单目测距、视线角速度、导引律到闭环成功率的每一步都有公式支撑与仿真验证，单机成本 5210 元只有国际同类产品的零头，扩点的边际成本是一枚拦截机的价钱；应用前景体现在低空经济规模已达万亿量级、注册无人机超过 217 万架，而本方案的低成本与单兵化特征补充了当下的真实需求。**有关项目的 3D 模型动画、天网 C2 指挥作战平台、仿真过程在线运行均可在本课题组的官方网站 wuchuangchanqianjiance.com.cn 在线访问查看。**

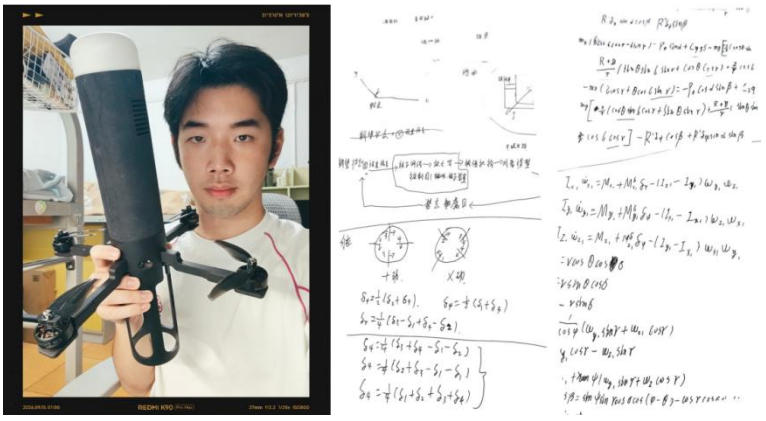


图 22 项目负责人与初代旧版本样机合影、制导算法的部分运动学建模前置准备手稿