

高可靠性无人机飞控自毁系统设计与实现

牛伟¹ 张樱子¹ 康长盛² 张一洲¹

(1. 中北大学极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室 太原 030051;

2. 山西中北测控科技有限公司 太原 030000)

摘要: 为解决无人机被捕获后敏感数据泄露风险的问题,本文设计并实现了一种基于过流驱动型物理损伤机制的飞控自毁系统,提出一种自主可控的自适应滑动窗口动态判决算法。该算法结合滑动窗口统计特征与一阶差分趋势判断,引入多阶段触发判据、误判容忍机制与功耗优化策略,并结合线性霍尔效应传感器的位移监测与加密指令验证的组合机制,实现对无人机未授权拆卸行为的精准识别。系统基于TL494的过流销毁模块触发40 V/20 A高能脉冲电流,对飞控核心电路实施不可逆的物理损毁。实验结果表明,本文所提方法在强电磁干扰、温度变化等复杂环境下其执行时间仍达到约18.2 ms的响应速度与2%的误触发率,与使用传统的固定阈值算法和移动平均算法的系统误毁率相比,虽然牺牲了7~12 ms响应速度,但使误毁率分别提高了31%、21.5%。相较于现有传感器异常检测与物理自毁方案,本系统具有低成本优势。为无人机及其敏感设备的数据安全防护提供了一种高效、可靠且实用的技术路径。

关键词: 无人机;飞控自毁系统;动态阈值识别;物理损毁机制;数据安全

中图分类号: TP273; TN97 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design and implementation of a high-reliability self-destruction system for UAV flight

Niu Wei¹ Zhang Yingzi¹ Kang Changsheng² Zhang Yizhou¹

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Zhongbei Measurement & Control Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: This paper presents a flight-control self-destruction system to mitigate sensitive data leakage when unmanned aerial vehicles are captured. The system employs an over-current-driven physical damage mechanism and an adaptive sliding-window dynamic decision algorithm that integrates statistical features with first-order difference trend analysis. Multi-stage triggering criteria, false-decision tolerance, and power-consumption optimization are combined with displacement monitoring via a linear Hall-effect sensor and encrypted command verification to ensure accurate detection of unauthorized disassembly. A TL494-based over-current module delivers a 40 V/20 A high-energy pulse, irreversibly damaging the flight controller's core circuits. The experimental results show that the proposed method is effective in complex environments such as strong electromagnetic interference and temperature changes. Its execution time still reaches about 18.2 ms response speed and 2% false trigger rate. Although response speed is 7 to 12 ms slower than fixed-threshold and moving-average algorithms, the false-trigger rate improves by 31% and 21.5%. Compared with existing schemes, the proposed system offers low cost, high reliability, and practical protection for UAV data security.

Keywords: drone; flight control self-destruction system; dynamic threshold recognition; physical damage mechanism; data security

0 引言

近年来,现代战争呈现出高度无人化与智能化的发展趋势。作为无人作战系统的关键组成部分,无人机

(unmanned aerial vehicle, UAV)在各类局部冲突中发挥了显著作用,逐渐成为各国军队建设的重要作战力量之一^[1]。然而在实际任务中,无人机存在被非合作方通过电磁干扰、网捕等手段捕获的风险。一旦被捕获,非合作方常借助逆

向工程或数据提取等手段破解机载信息,导致敏感数据外泄,进而严重威胁任务安全乃至国家战略利益^[2]。因此,如何在无人机面临非法捕获或恶意拆解时精准识别触发时机并实现敏感数据的彻底销毁,已成为当前亟需解决的关键技术难题。

目前,无人机关键芯片的自毁触发方式主要分为人工触发与自动触发两类^[3]。人工触发方式依赖操作人员的远程判断与响应速度,整体响应时间往往在1~3 s甚至更长,难以满足实战部署中对“亚秒级响应”能力的需求。相比之下,自动触发方式通过预设触发条件与检测机制进行自主决策,可实现毫秒级触发,更适用于高时效性任务需求^[4]。然而,现有自动触发技术普遍存在触发条件单一、抗干扰能力不足、误触发率高等问题。

针对上述问题,国内外科研人员提出了多种自毁触发机制与实现方案。例如,Andern等^[5]提出导电网格破坏检测机制,通过在芯片表面布设感测金属线网实现篡改识别,一旦网格断裂即触发数据擦除。但导电网格在运输或长期振动中易发生应力裂纹,可能导致误触发;Vidaković等^[6]采用多种物理不可克隆函数(physically unclonable function, PUF)结构及其变体对湿度、温度、电磁干扰等外界环境变化进行感应,但这类方案易受温度、湿度和电磁干扰等环境因素影响,制造成本较高,不适用于无人机高振动、强干扰的实际应用场景;Kan等^[7]提出的基于纳米反应材料的快速自毁技术尽管具备毫秒级响应与物理摧毁能力,但其触发条件相对单一,误毁率较高,且材料制备工艺复杂,难以大规模实际应用。

基于上述分析可知,现有自毁技术在触发鲁棒性、环境适应性与工程实现难度等方面仍存在诸多限制。为此,本文设计了一种融合霍尔效应传感器拆卸检测与加密指令验证的双重触发机制,构建了高可靠的无人机飞控自毁系统。系统通过检测传感器位移引起的磁场变化,输出模拟电压感知拆卸行为,并结合自适应动态阈值算法、容错校验机制与融合决策逻辑,有效提升对异常事件的识别精度与

抗干扰能力。在触发条件确认后,系统利用高电流脉冲对飞控芯片逻辑核心与存储结构实现快速、不可逆物理损毁。实验结果表明,该系统在触发精准性、响应时效性与成本控制等方面实现了综合优化的同时,具备低误触发率与良好环境适应性,为无人机关键信息防护提供稳定可靠的工程化解决方案。

1 系统总体方案设计

自毁系统总体框架如图1所示,系统由控制逻辑模块、电源模块、过流销毁模块、拆卸检测模块、继电器模块、指令验证模块与无人机飞控系统目标板组成。控制逻辑模块选用STM32F407单片机,该芯片具备高速处理能力与丰富的外设接口,可实时处理来自霍尔效应传感器的模拟位移信号与实现加密指令验证功能。系统在决策触发自毁程序时,首先对霍尔传感器输出信号进行异常检测,再依据加密指令的授权状态确认是否触发,避免了因单一信号误判导致的误触发风险;指令验证模块通过平衡电压数字接口电路的电气特性(recommended standard 422, RS422)进行指令传输,采用循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)机制与帧错误检测进行完整性检验,以实现指令验证功能;拆卸检测模块选用高精度 Allegro A1369 线性霍尔效应传感器,传感器与永磁体推杆结构采用非接触式位移检测方式,通过测量传感器位移产生的输出电压变化,再经过前端信号调理电路,确保信号进入STM32主控模块后具备高信噪比与稳定性;过流销毁模块基于TL494脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制芯片搭建升压型直流-直流变换器(direct current, DC-DC),提供40 V/20 A的高电流脉冲用以摧毁目标芯片;继电器模块采用固态光耦继电器AQY212与电磁继电器HF115F相结合的互锁机制,有效避免主控芯片初始化阶段或异常状态下因电气干扰造成的误触发风险,从而提高系统的整体安全性。为了便于展示细节,将系统置于亚克力透明实验箱中,系统整体如图2所示。

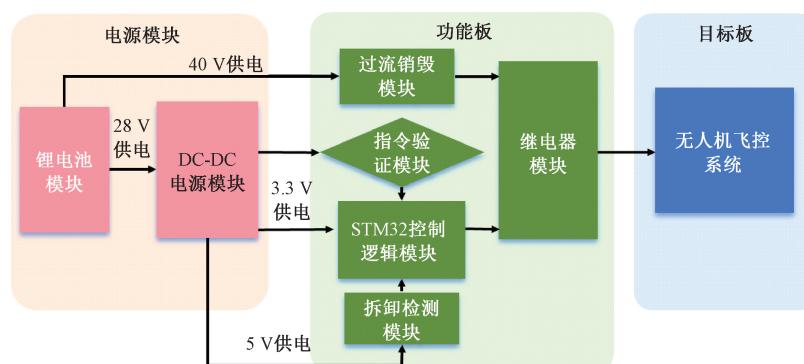


图1 自毁系统总体框图

Fig. 1 System architecture of the self-destruction mechanism

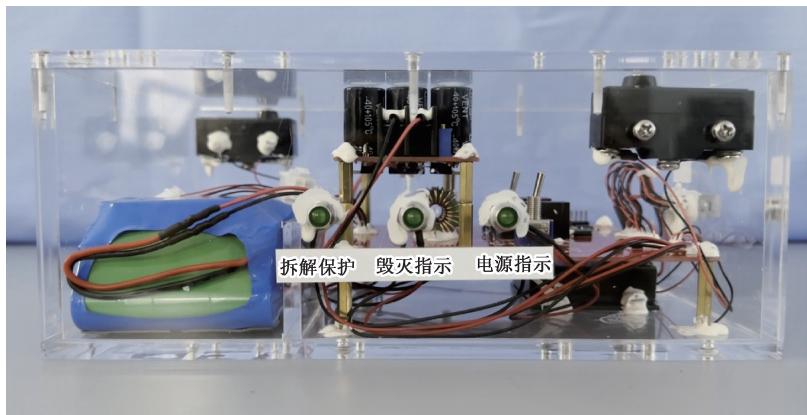


图 2 系统整体图

Fig. 2 Overall system diagram

2 硬件结构设计

2.1 电源与过流销毁模块

本系统电源模块由锂电池组与两组 DC-DC 电压转换模块组成,以满足各功能模块所需的工作电压。

采用 NKF30-24S5 降压芯片将锂电池 28 V 输入电压转换为 3.3 V 和 5 V,为 STM32 主控芯片与拆卸检测模块提供稳定可靠电压。

升压型 DC/DC 变换器的原理是通过脉宽调制电路输出不同占空比的脉冲波来控制 MOSFET 管的导通和截止,从而实现输出电压的可调和稳定^[8-9]。升压型 DC/DC 变换器的输入、输出电压关系如式(1)所示。

$$U_o = U_i / (1 - q) \quad (1)$$

式中: U_o 为输出电压, U_i 为输入电压, q 为占空比。从式(1)中得, 占空比为 0.3 时可以使将锂电池的 28 V 电压迅速升压至 40 V。采用额定功率为 800 W(40 V/20 A) 的过流模块对目标芯片施加高电流脉冲,已足以实现对目标板逻辑核心与存储结构的损毁。

电路结构如图 2 所示, 储能电感器 L_1 通过 PWM 控

制的 MOSFET 开关管 Q_1 实现周期性导通和截止进行储能与能量释放。MOSFET 的控制信号由 TL494 的第 9 脚输出,当 V_i 为高电平时, Q_1 导通, L_1 线性储能, D_2 截止;当 V_i 为低电平时, Q_1 截止, L_1 反向释放能量, D_2 导通, 将储能能量转移至输出滤波电容 $C_6 \sim C_9$ 与负载, 完成升压过程。为提升输出电压稳定性与系统的响应速度, 此模块设计了完整的负反馈闭环控制系统。TL494 内部集成两路误差放大器, 用于输出电压调节与实现过流检测与保护。输出电压经采样电阻网络 $R_{10} \sim R_{12}$ 分压, 反馈信号与由基准 5 V 参考源经 $R_4 \sim R_6$ 分压后的参考电压进行比较。同时, 输出电流经采样电阻 R_s 获取电压信号, 送入误差放大器, 与第 15 脚参考电压进行比较。一旦输出电流超过设定阈值, 系统自动调整占空比, 限制电流输出, 防止功率器件过载损毁, 确保整个过流电路的安全运行。通过在 TL494 的第 2、3 脚引入 R_1 、 R_2 与 C_5 组成的补偿网络, 可调节误差放大器增益, 改善系统的瞬态响应特性与动态稳定性。整套控制回路构成负反馈闭环系统, 确保了输出电压在不同输入和负载条件下的快速响应与稳定控制, 原理图如图 3 所示。

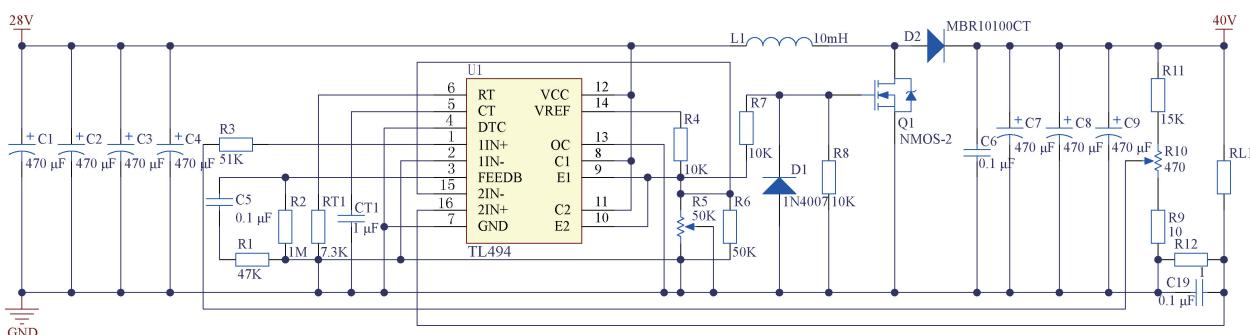


图 3 TL494 构成的 DC-DC 稳压电源原理图

Fig. 3 Circuit diagram of a DC-DC regulated power supply based on TL494

2.2 拆卸检测模块

本系统使用 Allegro 公司生产的 A1369 线性霍尔效应

传感器, 结合永磁体推杆结构形成非接触式的位移检测装置, 用于实现无人机主控外壳拆卸行为的精准识别。为保

证传感器在目标磁场范围内具有足够的电压响应,同时避免输出饱和,本设计选用 25 mV/G 的灵敏度配置,结合传感器 0.2~4.8 V 的线性输出范围,使得在最大工作磁场条件下仍能维持高信噪比与系统线性响应。实验表明,输出电压与垂直磁场强度呈良好线性关系,适用于动态位移感知^[10]。结构图如图 4 所示。

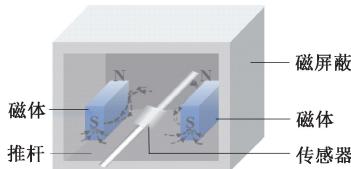


图 4 拆卸检测模块构造图

Fig. 4 Structural diagram of the disassembly detection module

两块永久性磁体同向置于传感器两侧,整体呈对称结构,传感器嵌入可移动推杆上平行于磁体滑动,推杆与系统外壳连接。结构外部由高磁导率坡莫合金(μ -metal)制成磁屏蔽物包裹,减少外部磁场对传感器的干扰从而造成系统误判。记录传感器从初始中间位置向上运动过程中所对应的电压输出。

由图 5 可知,传感器输出电压 y 随位移 x 呈单调上升、在中高段趋于缓慢、末端略有回落的非线性特性。对在 0~80 mm 单调区间的三次测量数据进行最小二乘拟合,从而建立电压-位移之间的对应关系。

$$y(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 \quad (2)$$

其中, $b_0 = 2.14$, $b_1 = 0.33$, $b_2 = -0.02$ 由最小二乘估计,基于拟合结果,推导反算表达式:

$$x(y) = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4b_2 - (b_0 - y)}}{2b_2} \quad (3)$$

在 0~70 mm 的位移区间内,经拟合位移-电压关系满足二次多项式特性,传感器输出电压随位移增加而逐渐增大,传感器在空间位置上的微小调整都会导致输出信号发生变化。系统在初始状态下,传感器位于磁场中性轴位置,此时电压输出为 2.2 V,并以此位置作为零点进行标定。

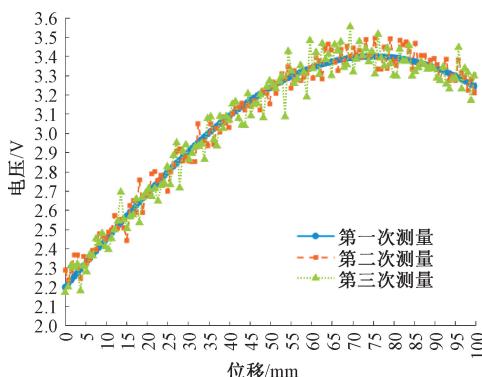


图 5 位移-电压输出曲线图

Fig. 5 Displacement-voltage output waveform diagram

2.3 继电器模块

本系统继电器模块采用固态光耦继电器 AQY212 与电磁继电器 HF115F 组成双级闭合的互锁引爆机制。AQY212 为 MOSFET 输出型固态继电器,用于实现输入输出之间的电气隔离,从而抑制来自主控模块的电磁干扰与噪声信号。HF115F 电磁继电器提供的负载切换能力,能够可靠地实现过流销毁电路的通断控制。首先由 AQY212 快速响应主控模块的自毁指令,迅速提供隔离驱动信号,并通过 HF115F 继电器完成最终的电源回路闭合。采用两级继电器的硬件电路结构有效地防止系统在上电初始化或异常信号波动时误触发的风险,从而极大提高系统运行的安全性与可靠性。继电器控制电路如图 6 所示。

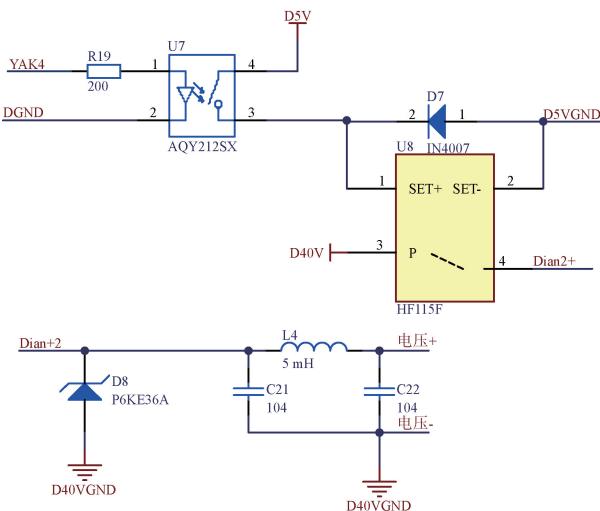


图 6 继电器控制模块

Fig. 6 Schematic diagram of relay control module

3 软件设计

3.1 指令验证模块

指令验证模块采用 STM32F407 主控芯片与隔离型收发器 ADM2582E 构成高抗干扰能力的传输通道,其中 ADM2582E 具备 2.5 kVrms 高压隔离与±15 kV 静电放电(electrostatic discharge, ESD)保护能力,有效防止来自外部环境的电磁干扰与静电冲击,继而确保数据传输的稳定性与完整性。

拆解保护指令采用自定义安全通信协议设计,指令帧结构包含起始标识、命令字段、密钥字段和校验字段^[11]。安全密钥预置于主控芯片的 EEPROM,外部授权设备需通过密钥验证后方可与系统建立通信连接进行数据收发。当系统检测到拆卸事件或数据访问行为时,STM32 主控芯片首先读取内部标志位 DESTROY_FLAG 状态,并进入指令接收与验证流程。系统使用中断方式接收 RS-422 接口传入的指令帧后,首先确认起始标识位是否匹配预设帧格式,其次解析命令字段并对比合法操作集,随后提取

密钥字段与 EEPROM 中预置密钥进行比对。最后, 系统通过 CRC-16 冗余循环校验算法对整个指令帧进行完整性校验, 以确保指令帧在传输过程中未发生数据篡改、误码或损坏, 指令帧结构如图 7 所示。

一旦指令合法性与密钥验证全部通过, STM32 主控芯片根据命令字段内容执行对应操作逻辑, 若命令为“拆解保护密匙”, 则将 DESTROY_FLAG 置为“1”, 授权系统可进行自毁; 若命令为“清除拆解保护密匙”, 则将 DESTROY_FLAG 置为“0”, 系统进入休眠模式, 拆卸时不进行自毁; 若三次指令验证失败, 则立即启动自毁。通过指令验证机制, 确保在复杂电磁环境下稳定接收并准确解析控制指令, 增加系统灵活性。指令数据帧如图 7 所示。

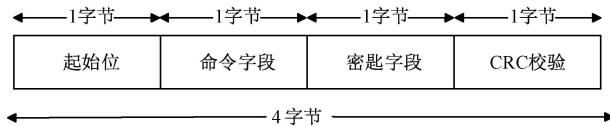


图 7 指令数据帧格式

Fig. 7 Format of the command data frame

3.2 算法设计

为提高系统对突发干扰和电压基线漂移等复杂场景的泛化能力, 本系统采用滑动窗口机制计算实时动态阈值, 通过连续采样电压信号结合一阶差分进行自毁融合决策。

系统 ADC 采样频率设定为 800 kHz, 设定滑动窗口长度 $l=512$, 窗口采样时长约为 0.64 ms。每轮 512 个采样点完成后, 先用中值滤波处理输入数据, 避免个别尖峰影响整体阈值统计, 再计算含有 512 个采样点窗口的电压信号均值 $\mu(t)$ 与标准差 $\sigma(t)$, 以构建动态阈值^[12]。为了降低系统功耗, 使用定时器触发实现 10 ms 轮询采样。

自适应阈值启发式方法 (adaptive threshold heuristic method, ATHM) 通过滑动窗口和统计特征动态调整判定门限, 阈值设定式(4)~(6)如下:

$$\mu(t) = \frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} x_{t-i}, l = 512 \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} (x_{t-i} - \mu(t))^2} \quad (5)$$

$$T(t) = \mu(t) + k \cdot \sigma(t) \quad (6)$$

$\mu(t)$ 为当前时间 t 处滑动窗口内的均值, $\sigma(t)$ 为当前滑动窗口的标准差, x_t 为实时电压值, k 为置信因子且 k 取 3。根据正态分布法则, 当 $k=3$ 时, 对应触发罕见事件概率约为 0.13%, 即 99.87% 的正常波动将落在容忍范围内。因此, 该策略具备较强的抗误触发能力。

为增强对局部趋势的敏感性, 结合差分趋势分析模型 (differential trend analysis module, DTAM):

$$\Delta x_t = x_t - x_{t-1} \quad (7)$$

通过使用移动均值差分趋势, 系统可以区分电压缓慢漂移与瞬态突变, 从而提高识别准确率。设定突变条件

如下:

$$|\Delta x_t| > \delta \cdot \sigma(t) \quad (8)$$

式(8)中, δ 为灵敏度系数, 根据基于统计分布的异常检测 Z-score 法, 设 δ 取 2。

当式(7)成立时, 系统以原采样频率逐点采样瞬时电压信号进行判断, 此时将定时器设置为 0.64 ms。在该阶段, 若采样值 x_t 大于当前动态阈值 $T(t)$, 视为一次有效采样; 若采样值 x_t 小于当前动态阈值 $T(t)$, 则视为一次无效采样。当连续出现无效采样次数超过 8 次时, 系统自动清零所有计数并重新返回开始; 若有效采样累计次数达到总目标 14 576 次的 80% (11 660 次) 后, 系统进入预触发检测阶段, 此后对信号进行更严苛的检测: 将有效计数器值设置为 50 次, 且电压信号变化满足 $\Delta x_t >> \Delta x_1$ 的剧烈趋势, 则确认非法拆卸行为成立, 系统启动自毁程序。算法逻辑如图 8 所示。

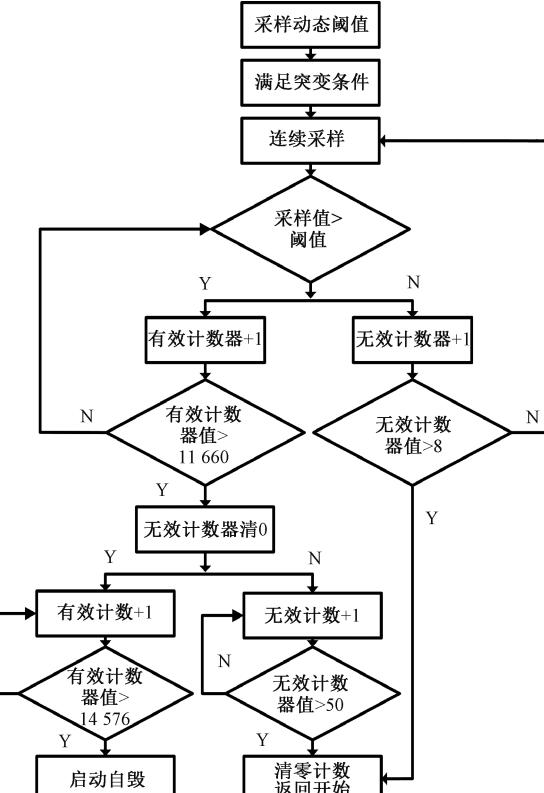


图 8 算法流程图

Fig. 8 Flowchart of the algorithm

4 测试结果

实验测试平台包括上位机^[13]、信号发生器、亥姆霍兹线圈干扰发射器、高低温实验箱、万用表和数字示波器等。测试平台与上位机界面如图 9、10 所示。

4.1 销毁模块输出能力测试

为验证系统在执行自毁命令时是否能够提供设计要求的 40 V/20 A 的脉冲输出, 使用万用表对飞控芯片前端

供电电压进行测量。经测量,当系统启动自毁程序后,目标板供电电压达到 40.122 V,如图 11 所示,满足设计要求。



图 9 测试平台

Fig. 9 Testing platform

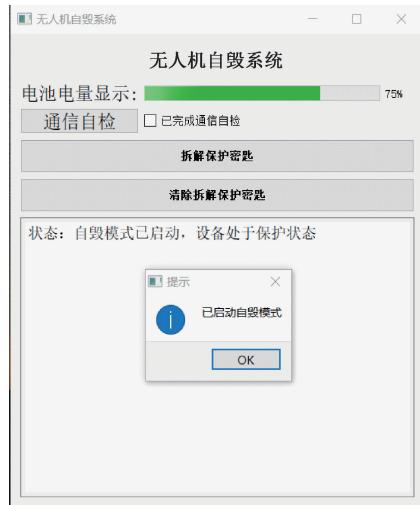


图 10 上位机控制界面

Fig. 10 Host computer control interface

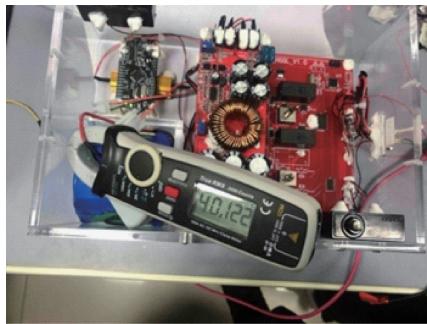


图 11 输出电压测试

Fig. 11 Output voltage test

4.2 物理毁伤实验

根据“IEC 61000-4-2 静电放电抗扰度标准与 IEC 61000-4-5 浪涌抗扰度标准”,微控制器内部的 ESD 防护电路通常仅能承受 nJ-μJ 级的瞬态能量冲击。按脉冲能量定义:

$$E = \int v(t)i(t)dt \quad (9)$$

$v(t)$ 为芯片端口两端的瞬时电压。 $i(t)$ 为冲击电流随时间的瞬时值。以此计算器件端能量,并以示波器同步采样 $v(t)$ 和 $i(t)$ 做数值积分获取实测能量;假设电压与电流恒定,以 40 V/20 A 的扁平脉冲 50 μs 脉宽进行估算对应能量为 40 mJ,较标准防护极限高出 3~6 个数量级。因此,在面临高性能、多引脚、大规模集成度的飞控主控芯片甚至更高级的片上系统(system on chip, SOC)时,必然会导致主控芯片造成不可逆的物理损伤。

本次测试首先选用 STM32F103 作为飞控芯片低端替代进行初步验证;进一步选用 STM32H7 作为测试目标,该系列 MCU 已在如 Pixhawk 6X/6C/6U, Holybro Durandal 等型号的无人机飞控主控板中普遍使用。现分别对 STM32F103 与 STM32H7 将进行毁伤效果验证,观察目标板的状态变化与数据读取恢复实验。经过 20 次重复性测试实验,均观察到目标芯片产生明显白烟,表面明显烧蚀,部分引脚熔断,板面烧焦痕迹明显,且数据不可恢复。实验表明:自毁系统对无人机飞控系统实现了不可逆的物理摧毁。毁伤结果如图 12 所示。

明显毁坏痕迹

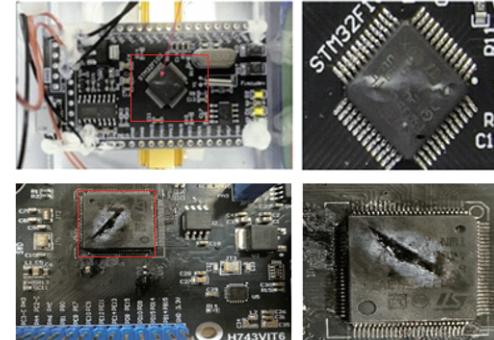


图 12 毁伤性能测试

Fig. 12 Damage effectiveness test

4.3 抗干扰性能对比测试

干扰测试包括算法鲁棒性测试与多源复合干扰实验。为验证所提出系统的鲁棒性,实验中引入了小型 UAV 仿真模型产生的干扰信号作为输入,包括多个瞬态冲击干扰与持续高频振荡干扰,对 UAV 实际运行过程中的轻度悬停振动、起飞冲击、急转或失控晃动等^[14] 动作进行仿真。

为了进一步验证本自毁系统在实际复杂环境下的可靠性,将本系统放入高低温实验箱设置不同温湿度并通过亥姆霍兹线圈干扰发射器设置不同强度的磁信号干扰进行复合干扰实验。通过数字示波器对自毁触发逻辑信号与目标芯片电源引脚的电压进行实时采样与记录,测量自毁流程中生成逻辑控制信号到施加高电流脉冲所需的时间,即为自毁响应执行时间。系统整体响应延迟主要包括

霍尔传感器感知、主控模块进行 AD 采样与算法判断处理以及继电器物理动作等环节,在测试中通过统计固定阈值、移动平均算法的误毁率,验证此算法是否具有更好的鲁棒性。

测试步骤如下:

1) 分别向主控单元 STM32 烧录固定阈值算法、移动

平均算法与本文提出的自适应阈值短期异常容错算法的完整自毁判定程序;

2) 使用 MATLAB 创建干扰波形,将仿真模拟电压导入 AFG31000 波形信号发生器,将 AFG31000 的 CH1 连接至传感器输入接口重复注入干扰 100 次,如图 13 所示;

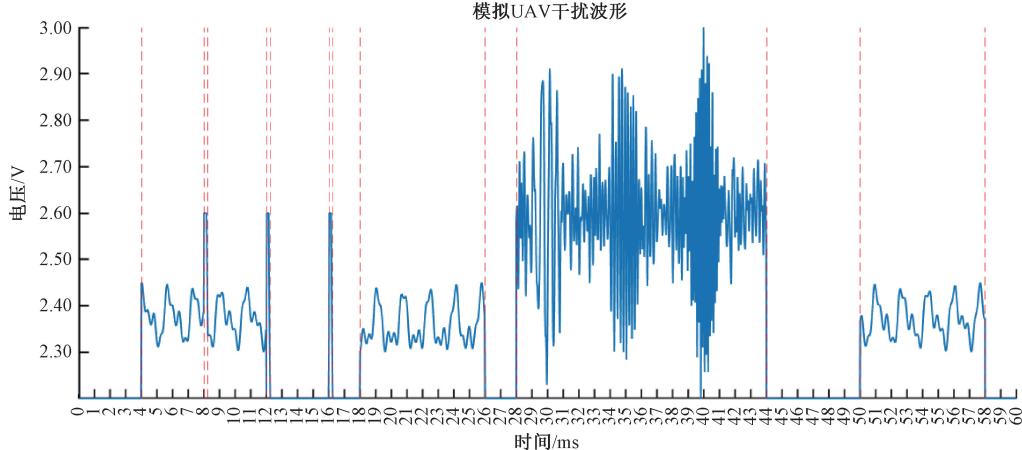


图 13 模拟 UAV 复合干扰波形

Fig. 13 Simulated composite interference waveform for UAV testing

3) 使用高低温实验箱温度设置 -30°C 、 -10°C 、 0°C 、 10°C 、 20°C 、 30°C , 使用亥姆霍兹线圈设置 10、20、30 mT 三种电磁强度,通过示波器监测 STM32 自毁触发控制引脚是否输出高电平信号,并记录不同算法在极端环境中的自毁次数;

4) 通过人为触发自毁,观察系统自毁响应执行时间,测试结果如图 14、15、16 所示。

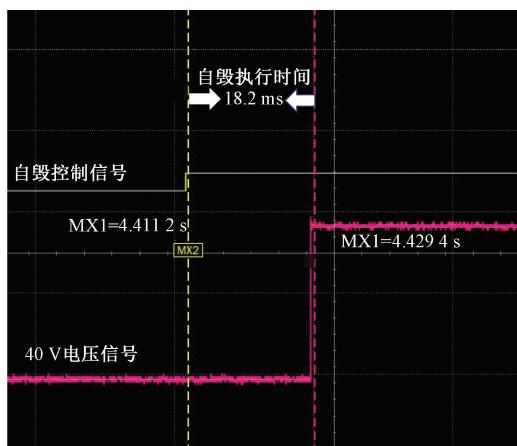


图 14 自适应阈值自毁执行时间测试

Fig. 14 Execution time test of the self-destruction system under the adaptive-threshold algorithm

复合环境测试如图 17 所示。根据记录结果,对 3 种算法在不同电磁干扰强度和温度条件下的抗干扰性能进行评估表明:随着电磁干扰强度从 10 mT 增加至 30 mT,温

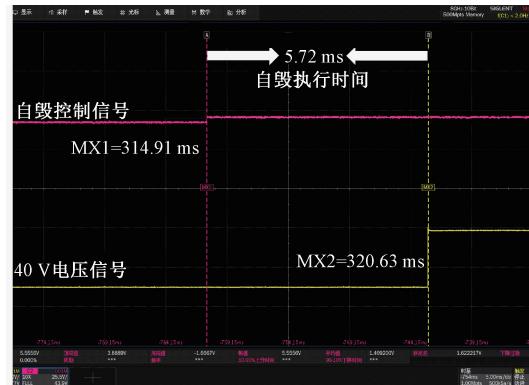


图 15 固定阈值自毁执行时间测试

Fig. 15 Execution time test of the self-destruction system under the fixed-threshold algorithm

度在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间变化,3 种算法在误毁次数上的表现存在显著差异。在固定阈值算法中,误毁次数较高,特别是在强电磁干扰和极端温度条件下(-30°C 与 30°C),误毁次数分别达到了 61 次和 60 次,这表明该算法在极端温度条件下的稳定性较差。相较之下,移动平均算法的误毁次数略低,但仍存在一定的误毁风险,在相同的环境条件下,其误毁次数分别为 40 次和 41 次。相比之下,自适应阈值算法在所有测试条件下展现出卓越的抗干扰性能,尤其是在 -30°C 和 30°C 的极端温度条件下,误毁次数始终维持在 0~3 次。这表明,自适应阈值算法具有较强的自适应性和稳定性,能够有效应对不同电磁干扰强度和温度变化所带

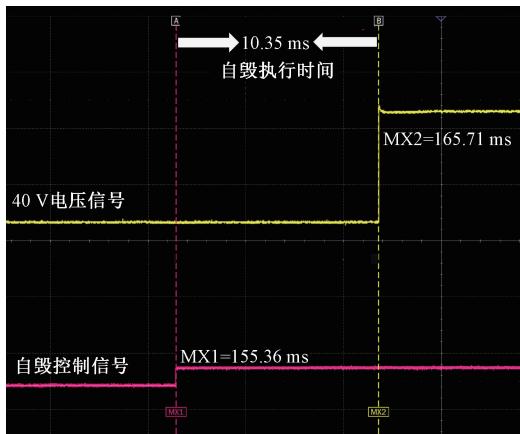


图 16 移动平均算法自毁执行时间测试

Fig. 16 Execution time test of the self-destruction system under the moving-average algorithm



图 17 电磁干扰、温湿度复合环境测试

Fig. 17 Test under combined electromagnetic interference and temperature-humidity conditions

来的影响。

总体来看,自适应阈值算法在所有测试环境中均表现出优于其他两种算法的性能,尤其适用于需要高稳定性和抗干扰能力的应用场景。综合以上测试结果可知,本系统在多源干扰共同作用下的100次测试中,平均触发响应时间保持在约18.2 ms,系统误毁率为约2%。虽然相比固定阈值算法与移动平均算法,在响应速度上分别增加了约12.48 ms与7.85 ms,但其误毁率相较于固定阈值与移动平均算法分别降低了31%与21.5%。实验表明,本文提出的自适应阈值短期异常容错算法以极小响应延迟为代价,大幅降低了无人机在运行过程中导致的系统自毁误判,为实现高可靠性的无人机飞控自毁系统提供了一种实用性较高的工程化解决方案。

4.4 方案对比

本系统与现有的典型物理防护及自毁方案进行成本对比分析,结果如表1所示,本系统在硬件构成方面的投入显著低于现有方案,其整体成本控制在其他方案的7%以内。本研究所提出的方案在保证安全性与可靠性的前提下,充分兼顾了经济性与可维护性,从而展现出更优的工程可行性和应用推广价值。

表 1 与其他现有自毁方案成本对比

Table 1 Comparison of costs with current self-destruction approaches

现有自毁技术	触发方式	自毁方式	成本/RMB
文献[5]	导电金属网格检测	擦除/毁伤	> 1 000
文献[6]	温度/湿度/电磁波变化感应	PUF 锁存状态清除	> 1 500
文献[7]	纳米反应材料触发	热能炸毁电路	> 2 000
文献[15]	加速度/角速度异常	数据擦除机制	800~1 500
本系统	霍尔传感器、动态阈值异常容错算法	40 V/20 A 脉冲	300~400

5 结论

针对无人机应用中“敏感数据防护”与“误触发抑制”之间的双重技术挑战,本文提出了一种融合多源检测与鲁棒触发机制的高可靠自毁系统。系统基于霍尔效应传感器位移监测与加密指令验证的双重判据设计,通过嵌入自适应动态阈值算法与差分趋势分析模型,实现了对非法拆解行为的精准识别。在响应执行层,采用TL494升压控制与互锁继电器结构,生成高电流脉冲对飞控芯片进行不可逆物理损毁。硬件成本控制在现有方案的7%以内,系统误毁率降低至约2%。实验证表明,该系统在复杂电磁干扰、温湿度变化、动态振动环境下仍具备稳定触发能力,具有较低的误触发率和良好的环境适应性,整体成本控制合理,具备良好的工程实用性和推广价值。未来工作将聚焦于系统功耗优化、远程协同控制机制及面向多平台适配的模块化设计,以进一步增强其在多种任务场景下的安全防护能力。

参考文献

- [1] 项昌乐,徐彬,唐寿星,等.特种无人机创新应用与关键技术发展研究[J].中国工程科学,2025,27(2):62-72.
XIANG CH L, XU B, TANG SH X, et al. Research on innovative applications and key technology development of special UAVs[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 62-72.
- [2] 陆正之,黄希宸,彭勃.军事智能数据安全问题:对抗攻击威胁[J].网络安全与数据治理,2024,43(11):23-28.
LU ZH ZH, HUANG X CH, PENG B. Security challenges of military intelligence data: Against adversarial attacks [J]. Cybersecurity and Data Governance, 2024, 43(11): 23-28.
- [3] 李建臣,许家国.存储载体销毁触发方式分析与应用[J].网络安全和信息化,2022(5):130-133.
LI J CH, XU J G. Analysis and application of storage media destruction triggering methods [J]. Cybersecurity and Informatization, 2022(5): 130-133.

[4] BRAY N, BOEDING M, HEMPEL M, et al. A latency composition analysis for telerobotic performance insights across various network scenarios [J]. Future Internet, 2024, 16(12): 457.

[5] ANDERN R, BOND M, CLULOW J, et al., Cryptographic processors-a survey[C]. IEEE, 2006, 94(2): 357-369.

[6] VIDAKOVIĆ M, VINKO D. Hardware-based methods for electronic device protection against invasive and non-invasive attacks [J]. Electronics, 2023, 12(21): 4507.

[7] KAN W X, REN J, FENG H ZH, et al. Research on energetic micro-self-destruction devices with fast responses[J]. Micromachines, 2023, 14(5): 961.

[8] 鞠宏伟. TL494 芯片在 24V 直流电源模块上应用的探讨[J]. 电子世界, 2021, (17): 188-189.

JU H W. Application of TL494 chip in 24V DC power modules[J]. Electronics World, 2021, (17): 188-189.

[9] 成哲, 刘祖韬, 吴琼. 基于无磁芯微型变压器的高效率隔离 DC-DC 设计[J]. 电子测量技术, 2025, 48(4): 8-15.

CHENG ZH, LIU Z T, WU Q. High-efficiency isolated DC-DC design based on coreless micro-transformer[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(4): 8-15.

[10] 姬宪法, 李传江. 基于 STM32 的智能线性位移传感器信号处理系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 109-112.

JI X F, LI CH J. Design of intelligent linear displacement sensor signal processing system based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11): 109-112.

[11] 党瑞阳, 吴柯锐, 张会新, 等. 基于 FPGA 的智能在线升级存储系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(18): 100-107.

DANG R Y, WU K R, ZHANG H X, et al. Design of intelligent online upgrade storage system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(18): 100-107.

[12] LIU B, GAO F, LI Y. Cost-sensitive YOLOv5 for detecting surface defects of industrial products [J]. Sensors, 2023, 23(5): 2610.

[13] 杨小兵. 基于 Qt 框架的多线程编程设计与实现[J]. 自动化应用, 2025, 66(12): 219-225.

YANG X B. Multithreaded programming design and implementation based on Qt framework [J]. Automation Application, 2025, 66(12): 219-225.

[14] 李晓琳, 朱攀, 谢帅. 基于模型的无人机机载测试系统优化设计[J]. 中国测试, 2022, 48(S2): 143-149.

LI X L, ZHU P, XIE SH. Optimization design of UAV airborne test system based on modeling [J]. China Test, 2022, 48(S2): 143-149.

[15] SREEKAR K S, SATHYA P S, SAI H M, et al. Tamper detection device[J]. International Journal of Creative Research Thoughts, 2023, 11 (5): a231-a238.

作者简介

牛伟, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表技术。

E-mail: niuwei990120@163.com

张樱子(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为先进测试技术与系统集成。

E-mail: zhangyingzi@nuc.edu.cn