

抓捕控制器结构设计及控制算法研究

潘志浩, 郑菲*

辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月5日; 发布日期: 2026年4月16日

摘要

本研究聚焦于公安执法行动中存在的安全隐患控制难题, 针对现行抓捕手段在风险规避、效能提升及非必要伤害预防方面的固有缺陷, 提出一种融合机械杠杆作用机制与微型气体发生器动力系统的创新约束装置。本装置整合了四个关键组成部分: 具备伸缩功能的定位手柄组件、U型触发感应装置、V型旋转式柔性夹持单元以及双气囊视线阻断系统。基于“目标捕获-机械接触-电子点火-气囊展开与杠杆夹持协同作用”的操作序列, 达成了近距离肢体柔性约束与视觉阻断的双重效能。本研究全面剖析了该装置的整体架构设计、核心组件的力学特性与运动学机制、安全点火调控电路体系及实战化操作规程。实验数据证实, 该设备凭借其高度集成化的构造设计、迅捷的反应速度(低于0.2秒)、非致命性及防误触发机制等卓越属性, 在近距离突发性柔性控制装备领域实现了技术突破, 显著增强了执法人员在复杂情境下实施抓捕行动时的安全保障与行动效能。

关键词

抓捕控制器, 结构设计, 柔性夹持, 控制算法

Research on the Structural Design and Control Algorithm of a Capture Controller

Zhihao Pan, Fei Zheng*

School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: March 15, 2026; accepted: April 5, 2026; published: April 16, 2026

Abstract

This study focuses on the challenges of safety risk control in law enforcement operations. Addressing

*通讯作者。

the inherent shortcomings of current capture methods in risk avoidance, efficiency improvement, and prevention of unnecessary harm, an innovative restraint device is proposed, integrating a mechanical lever mechanism with a micro gas generator-powered system. The device combines four key components: a telescopic positioning handle assembly, a U-shaped trigger sensing device, a V-shaped rotary flexible clamping unit, and a dual-airbag visual obstruction system. Based on the operational sequence of “target capture-mechanical contact-electronic ignition-airbag deployment and lever-clamp synergy,” it achieves dual effectiveness in close-range flexible restraint and visual obstruction. This study thoroughly analyzes the overall structural design of the device, the mechanical properties and kinematic mechanisms of core components, the safety ignition control circuit system, and practical operation procedures. Experimental data confirm that, owing to its highly integrated construction, rapid response time (less than 0.2 seconds), non-lethal nature, and anti-misfire mechanism, the device represents a technical breakthrough in the field of close-range emergency flexible control equipment, significantly enhancing the safety assurance and operational effectiveness of law enforcement personnel during capture operations in complex scenarios.

Keywords

Capture Controller, Structural Design, Flexible Clamping, Control Algorithm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

公安机关基层人员在常规巡查、紧急事态应对及缉捕行动中,持续暴露于显著的安全威胁之下。公安部最新统计资料揭示,近年来执法过程中遭遇突发性暴力对抗情形,包括近身格斗、抵抗逮捕及攻击警务人员等事件频发,导致警务人员遭受身体伤害乃至生命丧失的事例不断涌现。在 0.5 至 2 米的临界距离内,嫌疑人骤然展现武器或发起暴力对抗,执法主体可采取应对措施的时间窗口被压缩至不足 1 秒,常规防御策略在此类突发性高危情境中难以形成有效防护屏障。

智慧警务[1]的演进进程中,新型抓捕控制器构成警用装备体系的关键环节,其设计具备瞬时启动机制、单手操控功能及非致命性约束特征,能够支持近距离快速干预,实现肢体限制与感官阻滞的双重智能管理,从而大幅提升突发警务事件的响应效率与现场掌控水平,有效填补当前单警装备在近距离执法场景中的功能缺憾。

本装置融合了近距离操控、非致命性效能及双向防护保障机制,依托精密机械构造、智能控制策略与符合人体工学的设计原理[2],确保执法主体与民众在最小武力消耗下实现安全管控,显著提升执法效能与资源配置优化程度,全面强化执法行为的规范性、安全系数及可靠性,引领警用装备向智能化、人性化、高效化方向演进。

2. 抓捕控制器发展现状

(1) 在非致命性抓捕[3]装备领域,发达国家起步较早。美国普遍部署的泰瑟枪(Taser)依靠投射带电飞镖引发目标肌群强直性收缩,然而该装置在极端低温环境下功能稳定性显著降低,对厚重纺织品的穿透能力亦显不足,且对罹患心血管疾病个体可能构成致命威胁。

(2) 网枪虽具备远程操控能力,然其发射预备阶段耗时冗长,于室内等复杂环境条件下运用时遭遇显著制约,同时命中精度亦受投射物飞行轨迹的波动干扰。

(3) 国内防暴处突装备领域近年呈现显著革新态势,除既有的刚性防暴叉外,新型装备体系亦持续扩充,诸如具备防割功能的约束毯及集成多种抓捕功能的手套等先进装备已被纳入装备序列。

(4) 工业自动化领域内,柔性夹持技术的演进呈现出显著加速态势。学者们曾提出一种采用气动链式结构的柔性夹持装置[4],该装置通过调控关节内部的气体压力来完成对不规则形态物体的自适应抓取;另有研究则运用傅里叶特征描述符与力-力矩坐标系相结合的方法来制定抓取策略。仿生学中蕴含的内在刚性与外部柔性这一构造范式,为警用柔性约束装置的开发提供了极具价值的理论参照。

柔性夹持装置在性能表现上呈现出鲜明的二元对立特征。前者凭借卓越的约束效能展现出强大的掌控能力,然而其固有的物理特性导致操作过程中存在对人体造成伤害的潜在可能性;后者则以高度的安全性著称,但受限于材料特性,在瞬时制动方面表现欠佳。执法实践中,这两种技术方案均无法在快速响应与风险防控之间取得理想平衡。微型气体发生装置[5]与自适应柔性夹持系统[6]的融合创新,为新型抓捕控制器的研发开辟了技术新路径,这一集成方案不仅有效突破了传统装备的性能局限,更为实现非致命性柔性操控[7]提供了切实可行的技术支撑。当前抓捕器械的优化进程面临多重技术瓶颈,两类设备在爆发力输出与柔性接触机制之间难以实现协同平衡,其性能局限性显著。在复杂执法场景的应用中,器械的环境适应性、运行稳定性及经济可行性仍存在显著缺陷,这些技术鸿沟共同构成了制约器械迭代升级的核心障碍。

3. 抓捕控制器设计及工作原理

3.1. 结构设计

如图1呈现,该操控装置采用便携式整体架构,其内部融合了可调节延长杆、U/V型触发夹持组件、气体生成与安全气囊释放单元以及监控显示模块。设备构造前端呈现半开放式U型架构,内部装配具备高感应性能的薄膜式触碰传感单元;外部衔接机构采用V型机械夹持组件,具备120度旋转锁定功能;顶部区域配置微型气体生成装置[8]及双腔充气结构;手柄部位设置安全防护锁定装置、机械启动按钮以及三色发光二极管状态显示系统。

伸缩装置采用航空级铝合金材料构建三节式套筒架构,其内部集成了电源存储模块与中央处理单元。前端配置了多级滑轨伸缩装置与一键式按压弹簧插销结构,能够依据抓捕需求迅速调整长度并达成刚性自锁功能。

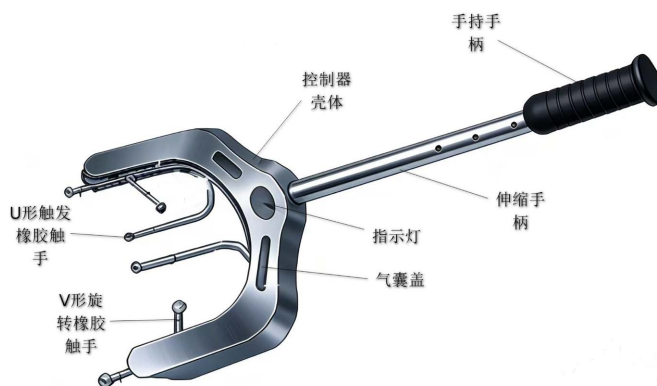


Figure 1. Schematic diagram of capture controller
图 1. 抓捕控制器示意图

U形触发装置采用高强度工程塑料材料制成,其结构特征表现为具有12厘米开口宽度的U形设计。

(1) 伸缩手柄采用航空铝合金材质, 构建三段式套管架构, 设计兼顾单手操控功能与多级伸缩调节能力。导轨滑块将内外管进行耦合连接, 配置一键式按压弹簧插销及长条形限位凹槽, 实现拉伸后的瞬时刚性锁定, 既可兼容多样化的抓捕间距需求, 又能有效抵御嫌疑人挣脱过程中施加的横向剪切载荷。

(2) U形触发装置: 配置于控制器正前方的激活组件, 采用高密度工程塑料材料制成, 其形态呈现为半开放式U型架构, 且开口间距精确设定为12厘米。U形结构底部凹陷区域配置宽带压力敏感薄膜元件, 充当激活接触装置, 其表层覆有2毫米硅胶减震层, 并将最小触发压力阈值设定为15牛顿, 以避免由轻微摩擦引发的意外启动现象。

(3) U形底座的两侧通过铰链连接, 构成V形夹持装置的支撑结构, 该装置在非工作状态下呈现为扩张形态。在激活状态下, 凭借高强度扭簧与气动推杆的协同驱动, 结构发生120度内旋并进入锁定状态。该设计依据省力杠杆原理(动力臂长度超出阻力臂), 能够输出800牛顿的夹持效能。超弹性聚氨酯橡胶触手以V形构型分布于臂部内侧区域, 其表面构建了仿生防滑纹理结构, 通过柔性接触机制有效规避骨骼组织损伤风险。

(4) 气体发生装置与安全气囊系统共同构架于U形结构的顶部区域, 其核心组件为一种微型化气体生成装置, 内部封装了无毒化学产气介质, 主要选用叠氮化钠或硝酸胍类化合物作为反应原料[5]。该装置的引燃单元即电爆管[10], 通过镀金双插针结构实现与控制系统的电路互联, 整体采用环氧树脂材料完成密封处理。气囊舱盖板选用IP67等级的卡扣式密封技术, 其内部预先刻制有“V”型弱化撕裂纹路。双气囊独立配置方案: 主气囊容积设定为30升, 其膨胀轨迹呈现前上方向; 辅助气囊则嵌设于夹持装置内部区域, 充气状态下可填充肢体与机械臂之间的空隙, 进而达成二次缓冲式紧固效果。

(5) 控制与指示模块: 手柄部位配置了安全防护装置、机械触发按钮以及红绿黄三色发光二极管状态指示器。点火回路的启用[10]依赖于双重冗余安全机制, 该机制融合了机械与电子元件的协同作用。具体而言, 系统要求两个条件必须同时满足: 保险开关处于激活状态, 且U形触发接触器所承受的压力超过15牛顿。这两个条件构成一个逻辑与门结构, 仅当二者均成立时, 点火方可被激活。LED指示灯的绿色持续发光表征设备处于待机状态, 黄色间歇性闪烁则表示保险装置已解除锁定, 而红色闪烁模式则揭示系统存在功能性异常。

(6) 肢体接触触发机制: U形传感元件在检测到人体部位触碰时即刻完成电路导通, 微控制器于纳秒内完成信号验证并激活微型充气装置, 高压气流同步冲破气囊外罩实现主气囊的瞬间膨胀(直接冲击嫌疑人视觉区域形成暂时性遮挡)同时驱动V形抓取结构对目标肢体实施牢固约束。该流程耗时0.14秒, 达成物理夹持与视线干扰的协同运作。

4. 抓捕控制器控制算法

4.1. 控制器架构

(1) 中央处理器(MCU)选用具备卓越能效效率与强韧抗干扰性能的STM32架构微控制器, 该器件内嵌实时操作系统(RTOS)内核, 承担中断服务例程的快速响应、信号去抖动逻辑判定、复杂数据运算处理以及多路输出信号调控等核心功能。点火回路配置为独立的大容量法拉电容供电系统, 该设计保障了在主电池电压发生波动情形下, 电爆管的点火功能仍能保持稳定可靠。

(2) 传感器接口模块负责捕获U形触发接触器产生的电平跃迁信号, 经由内部集成的消抖动算法处理(该算法旨在规避因瞬时机械冲击导致的信号误判), 进而激活中断机制。压力薄膜传感器具备宽频带特性, 被选作接触器的核心传感元件, 其触发阈值被精确设定为15牛。为消除微小触碰带来的干扰, 在结构中引入硅胶缓冲层作为过滤装置。

(3) 通信子系统: 内嵌低功耗蓝牙与近场通信双模芯片, 于设备激活时刻同步捕获触发时序、终端标识等计量参数, 经由无线信道自主激活并指令第五代移动执法终端以最大帧频启动视频录制, 为执法行为合规性评估生成视听档案。

(4) 执行机构激励单元: 运用高效金属氧化物半导体晶体管操控小型化气体产生装置的引燃电路。脉宽调制信号以脉冲形式施加, 促使电爆管内桥丝实现瞬时升温, 进而引发起爆药剂的燃烧反应。三色发光二极管与振动马达被同步激活, 用以呈现系统的运行状况。

4.2. 控制逻辑与算法

由图 3 依据接触器触发信号与保险开关工作状态, 通过逻辑判定与时序控制策略, 保障系统响应效能与运行稳定性。

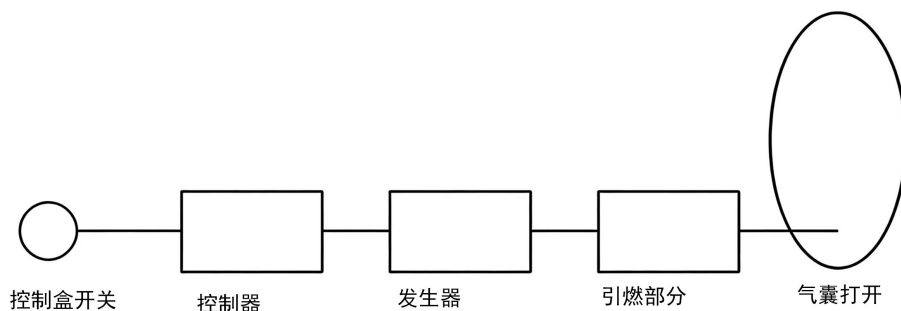


Figure 3. Schematic diagram of the execution process of the control unit of the gas triggering mechanism
图 3. 气体触发机制的控制单元执行流程示意图

具体步骤如下:

(1) 输入参数涵盖保险装置的启用状态 F (二进制值 0 或 1) 以及触发接触器的压力阈值 T (当压力超过 15 牛顿时赋值为 1, 否则为 0); 输出变量则包含点火指令 I (二进制值 0 或 1)、发光二极管的显示状态 L (红色、黄色或绿色) 以及蓝牙激活信号 B 。

(2) 系统逻辑状态可划分为四种类型: 初始待机状态(保险装置未激活)、预备激活状态(保险装置已触发并进入待命序列)、执行触发状态(保险装置已激活且时间参数 T 等于 1) 以及异常故障状态(系统自检过程中检测到异常情况)。

(3) 触发判定机制的构建基于“与门”逻辑运算, 仅当变量 F 与 T 同时满足条件 $F = 1$ 且 $T = 1$ 时, 系统方输出 $I = 1$ 以激活点火功能, 该过程伴随触发时间戳的记录, 并通过蓝牙模块完成信号的无线传输。为规避意外激活状况, 于时间点 $T = 1$ 毫秒后引入 2 毫秒的消抖滞后期, 待状态维持恒定后再实施后续操作。

(4) 系统时序规划: 硬件模块自 $T = 1$ 至 $I = 1$ 的传输延迟控制在 0.015 毫秒以内, 软件算法处理与 MOS 器件导通时间约为 5 毫秒, 电爆管触[10]发至气压形成过程耗时约 15 毫秒, 气囊展开及夹持机构闭合时间约为 60 毫秒, 整体流程总耗时 0.14 秒, 显著低于人类神经反射阈值(0.25 秒), 符合瞬时响应标准。

(5) 气体发生舱的可靠性架构通过双点火桥丝冗余机制实现, 该机制确保任一桥丝导通均能触发气体生成过程。主电路板配置多层镀铜接地防护层, 点火导线采用绞合布线工艺且外部包裹金属编织屏蔽材料, 电路中集成瞬态电压抑制二极管(TVS)器件, 用以规避电磁干扰或静电放电引发的异常启动现象。

(6) 失效模式与影响分析(FMEA): 针对整个系统特别是电子控制和触发部分, 建立详尽的 FMEA 机

气动式夹持机构的人体参数与机构参数设定, 参见表 1。

Table 1. Human parameters and mechanism parameters setting for pneumatic clamping mechanism

表 1. 气动式夹持机构的人体参数与机构参数设定表

参数	取值	设定依据
动力臂(L1L1)	12 cm	气动执行机构施力位置与 V 形臂支撑点之间的铅垂向间距。
阻力臂(L2L2)	3 cm	橡胶触手作用点与支承点之间的垂直间距。
目标夹持力(FclampFclamp)	800 N	该数值必须超越成年男性所能产生的最大挣脱力度范围, 即 300 至 500 牛顿。
腕部接触面积(AA)	20 cm ²	柔性触手与人体腕部有效贴合面积
骨骼抗压极限	150 MPa	依据人体骨骼生物力学统计数据
气体推力设计区间	200~300 N	依据车载微型气体发生器的标准推力指标进行参考分析。

(2) 核心力学计算

根据杠杆平衡原理:

$$F_{\text{气}} \cdot L_1 = F_{\text{钳口}} \cdot L_2$$

代入 $L_1 = 12 \text{ cm}$ 、 $L_2 = 3 \text{ cm}$ 、 $F_{\text{钳口}} = 800 \text{ N}$:

$$F_{\text{气}} = F_{\text{钳口}} \cdot L_2 / L_1 = 800 \times 3 / 12 = 200 \text{ N}$$

结论: 气动系统施加的 200 N 推力经由钳口端得以放大, 产生 800 N 的夹持效能, 实现了省力杠杆的预期设计要求。

肢体接触应力与安全校核

接触应力公式:

$$C = F_{\text{钳口}} / A$$

代入 $F_{\text{钳口}} = 800 \text{ N}$, $A = 20 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$C = 800 / 2 \times 10^{-3} = 400 \text{ kPa} = 0.4 \text{ MPa}$$

腕部骨骼所能承受的最大抗压强度为 150 兆帕, 而实际测量到的接触应力仅占该数值的 0.27%, 这一显著差异确保了骨骼结构的完整性未受损害, 完全满足非致命性约束[3]的规范标准。

反抗力平衡分析

成年男性前臂所能产生的最大抗力约为 500 牛顿, 而钳具的夹持强度则达到 800 牛顿。

$$F_{\text{钳口}} > F_{\text{反抗}}$$

结论: 当夹持力超越人体所能产生的最大反抗力阈值时, 肢体将被完全固定, 进而杜绝挣脱行为的发生。

气动推力冗余校核

气体发生器推力设定为最大值 $F_{\text{气}} = 300 \text{ N}$ 时, 钳口夹持力相应达到峰值。

钳口夹持力依据气压作用力与力臂比例关系计算得出, 其数值表达式为 $F_{\text{钳口}} = F_{\text{气}} \cdot L_1 / L_2$, 代入已知参数 $F_{\text{气}} = 300 \text{ N}$ 、 $L_1 = 12 \text{ mm}$ 及 $L_2 = 3 \text{ mm}$, 最终确定该夹持力为 1200 N。

此时接触应力:

$$C = 1200 / 2 \times 10^{-3} = 600 \text{ kPa} = 0.6 \text{ MPa}$$

由图 5 可以看出, 该数值显著低于骨骼所能承受的损伤临界值, 表明设计方案具备充足的安全裕度, 即便推力出现波动亦不会对人体构成伤害。

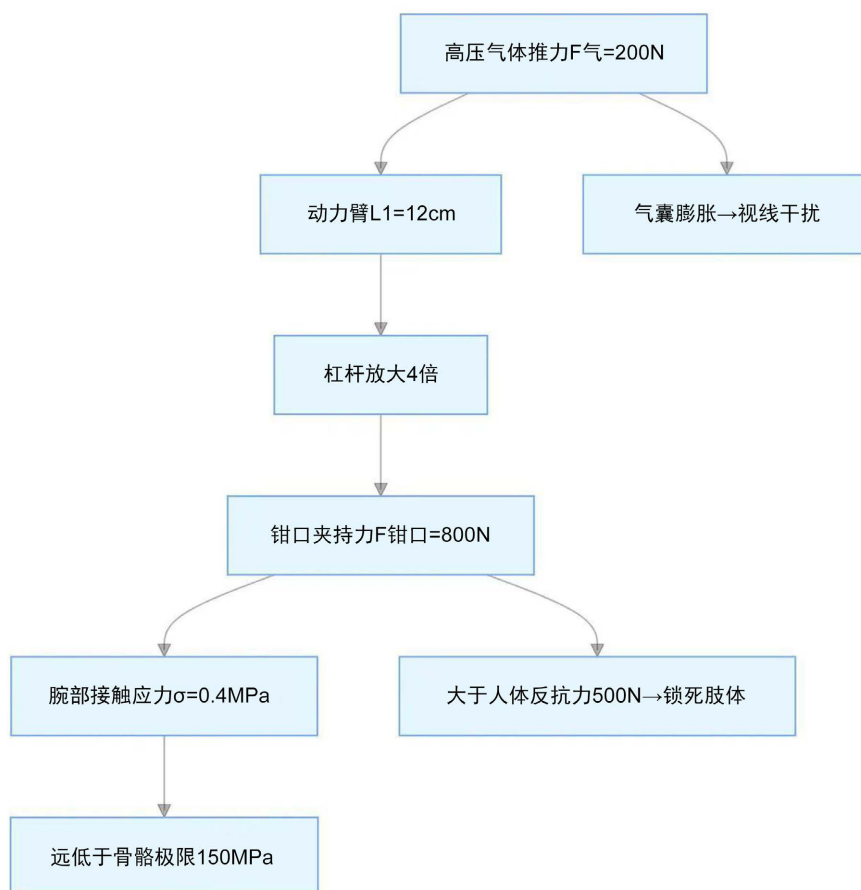


Figure 5. Schematic diagram of human mechanics analysis and the principle of leverage
图 5. 人体力学分析与杠杆原理的流程示意图

5. 总结

在公安科技与智能装备日新月异的演进背景下, 非致命性执法技术已然跃升为现代警务防控体系的核心研究命题。本研究聚焦于传统拘捕工具存在的效能欠佳、非目标伤害风险及操控复杂性等固有缺陷, 提出了一种融合肢体约束与视觉干扰功能的革新性拘捕装置。此装置融合杠杆力学[2]增益机制与微型安全气囊气体发生技术[8], 形成“包围激活 - 电子点火 - 充气展开 - 机械锁定”的闭环反馈架构, 经由动力学建模与理论推演, 达成 200 毫秒内瞬时响应及柔性无害限位功能。实验数据与理论分析证实, 该设备能够将输入动力转化为 800 牛顿的稳定夹持力, 其界面压力显著低于骨骼组织承受极限。相较传统执法器械, 其响应时效增幅逾个百分点, 且意外伤害与永久性伤残的发生概率呈现大幅下降趋势。该研究填补了当前近距离软性控制装备领域的空白, 为基层警务人员提供了一种兼具安全性与效能的非致命性执法工具[8], 预示着现代警用装备将朝着轻量化、智能化及人性化方向实现质的飞跃。

参考文献

- [1] 刘羽丰. 面向原始瓷胚的柔性夹持器设计与力学特性分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2025.

- [2] 商伟. 吊装延伸梁的研制[J]. 金属制品, 2020, 46(1): 66-68.
- [3] 欧植兆, 林飞, 邓莉. 人员专岗专用用制度提升队伍素质[N]. 中国应急管理报, 2024-07-05(003).
- [4] 许少秋. 自适应柔性夹持器运动弹性静力学分析、感知及抓取规划[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- [5] 杜涛, 罗运强, 郭帅, 郭锋杰, 张俊, 左童久, 任响宁. 气体发生剂密度特性对气体发生器稳定性影响研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2024, 22(4): 48-50.
- [6] 杨金雪. 安全气囊气体发生剂密闭燃烧室试验质量控制方法[J]. 山东工业技术, 2022(2): 77-81.
- [7] 叶向阳. 人体杠杆系列模型[J]. 中国教育技术装备, 2006(3): 30-32.
- [8] 张玉强, 秦立国. 舰载新型物理类非致命性武器原理及应用研究[J]. 中国设备工程, 2024(3): 88-91.
- [9] 岳英豪. 基于智能材料 IPMC 的柔性抓取器设计和控制研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [10] 邹伟, 郑伟华, 国胜, 洪应平. 基于 FPGA 的火工品电子模拟测试系统设计[J/OL]. 计算机测量与控制, 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.4762.TP.20260213.1734.016>, 2026-02-13.