

波形与目标波形的相似度达到 90% 以上。该调控策略解决了传统开环控制精度低的问题，实现了冲击载荷的动态精准调控。

4 试验验证与分析

4.1 试验系统搭建

搭建液压伺服高加速冲击试验系统验证所提方法的可行性，系统由试验台主体、液压伺服系统、控制系统和测量系统组成。试验台主体采用刚性框架结构，最大承载质量 50kg，刚度 $5 \times 10^7 \text{ N/m}$ ；液压伺服系统采用电液比例阀控制，最大输出力 100kN，响应频率 0-2000Hz；控制系统采用 PLC+ 工业计算机架构，实现载荷模型参数设置、实时调控和数据采集；测量系统由压电式加速度传感器（量程 0-10000g，精度 $\pm 0.5\%$ ）、高速数据采集卡（采样频率 1MHz）和波形分析软件组成，用于采集和分析冲击响应波形。试件选取航空发动机叶片模拟件，材质为 TC4 钛合金，质量 3.2kg，尺寸为 300mm × 50mm × 5mm，根据航空标准要求，目标冲击载荷为峰值 3000g、峰值出现时间 5ms、阻尼比 0.2 的带阻尼比正弦波。试验前对系统进行校准，通过静态加载试验测量试验台刚度为 $5.2 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，通过空载振动试验确定系统固有角频率为 1250rad/s。

4.2 试验结果分析

采用所提方法进行 3 组平行试验，采集试件的加速度响应波形，与目标波形对比分析。试验结果显示，3 组试验的峰值加速度分别为 2980g、3020g、3010g，平均值 3003g，与目标值 3000g 的偏差均小于 1%，峰值出现时间分别为 4.9ms、5.1ms、5.0ms，偏差均小于 $\pm 0.1\text{ms}$ ，满足时序精度要求。在衰减特性上，3 组试验峰值后 10ms 的加速度幅值分别为 620g、590g、600g，与目标值 600g 的偏差均小于 5%，衰减曲线与目标曲线的相似度分别为 93%、92%、94%，平均相似度 93%。传统半正弦波法试验结果比较：采用相同试验系统和试件，半正弦波法的峰值偏差为 $\pm 5\%$ ，峰值出现时间偏差为 $\pm 0.5\text{ms}$ ，与实际载荷相似度仅为 78%。说明带阻尼比正弦波法载荷的精确性远高于传统方法。进一步分析试件的损伤情况，通过超声检测，带阻尼比正弦波法试验后试件的微裂纹数量与实际工况下的损伤程度一致，半正弦波法试验后微裂纹数量偏多，存在过度测试问题。这证明了带阻尼比正弦波法在冲击测试真实性上优越性。

4.3 方法局限性分析

试验过程中发现，带阻尼比正弦波法有一定的局限性：当阻尼比大于 0.3 时，载荷波形的周期性消失，与实际冲击

载荷的适配性下降；当试件质量小于 1kg 时，系统固有频率受试件质量的影响很大， ω_n 很难稳定控制，波形畸变率增大。针对这些局限性，在今后的研究中，采用自适应滤波技术来修正高阻尼比下的波形，同时通过增加试件质量补偿装置来稳定小质量试件的固有频率，可以增加方法的适用性。针对以上局限性，后续研究可以从两方面重点进行技术优化。首先，针对高阻尼比导致的周期性丧失问题，引入 LMS 算法等自适应滤波技术对驱动信号进行在线识别与实时修正，动态补偿系统的能量耗散，在强阻尼条件下重建与维持载荷波形的周期性特征。其次，为了解决由于小质量试件引起的固有频率漂移与波形畸变，可在试验装置中采用质量补偿机构来解决这方面的问题，如通过预载弹簧或附加配重结构，使系统等效质量控制在可控范围内，从而抑制 ω_n 的波动。此外，结合系统辨识与闭环控制算法，实时调整激振参数，有望在宽泛的阻尼比与试件质量条件下，均能精确复现目标冲击载荷，显著提升该方法的工程适用性与测试精度。

5 结论

本文详细分析了带阻尼比正弦波法在高加速冲击技术中的应用，得出以下结论：带阻尼比正弦波的欠阻尼特性与高加速冲击载荷的“峰值骤升—快速衰减”特征十分吻合，其波形与实际载荷的接近程度远高于传统的半正弦波；所建立的受迫阻尼振动载荷模型在很大程度上考虑了试验台的激励特性，其模型参数的确定可以通过最小二乘法和静态试验来实现；阻尼比是影响冲击响应三段式调控策略结合闭环控制，可使冲击载荷峰值偏差小于 1%，时序偏差小于 $\pm 0.1\text{ms}$ ，波形相似度达到 93%；试验验证表明，该方法在测试精准度和真实性上均优于传统方法，可有效复现实际冲击工况。

参考文献

- [1] 李玉,刘海波,孙丹,杨泽敏,苏国征,徐梅鹏.阻尼环对箝齿封严气弹稳定性的影响[J].航空动力学报,2025,40(06):266-276.
- [2] 陈林,谭平,徐亚飞,赵啸峰,周福霖.考虑楼层刚度的新型消能伸臂结构动力特性研究[J].振动与冲击,2023,42(15):55-64.
- [3] 甄晓霞,刘桂源,董春光,张卓杰,李明阳.索网-阻尼器系统自振特性研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(07):61-71.
- [4] 张蓝方,张乐乐,谢壮宁,江毅.内部带阻尼格栅的 TLD 减振性能试验研究[J].振动工程学报,2022,35(03):674-680.
- [5] 杨兴国,魏显坤,王茂辉,石英.基于多自由度阻尼振动系统的动力吸振器的理论研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020,(01):89-92.

Research on the Development of Nuclear , Biological and Chemical Decontamination Technologies for US Military Aircraft

Ruicai Zhang Yanyan Zhu Sijing Wang Jingtang Peng

The People's Liberation Army of China 95899 Brigade, Beijing, 100085, China

Abstract

The research and application of decontamination technology for military aircraft is of great significance to ensure the smooth progress of military operations and safeguard national security. This paper systematically reviews the development history of US military aircraft decontamination technology, and reveals its equipment and technical path. It studies the US military aircraft current development status of nuclear, biological and chemical decontamination technologies and equipment, analyzes the key technologies including positive pressure thermal airflow technology, ultrasonic degradation technology and adsorption technology, and outlines the related aircraft decontamination equipment, including fixed and mobile decontamination equipment. It also predicts the three core directions of future technological development, providing reference for the relevant fields in China.

Keywords

Military aircraft, decontamination of nuclear; biological and chemical agents; decontamination equipment and technology; scientific and technological innovation; military engineering

军用飞机核生化洗消发展研究

张瑞彩 朱艳艳 王思静 彭靖棠

中国人民解放军 95899 部队，中国 · 北京 100085

摘要

军用飞机核生化洗消技术的研究与应用对保障军事行动的顺利进行与维护国家安全有至关重要的意义。本文系统梳理了美国军用飞机核生化洗消技术的发展脉络，揭示其装备与技术路径。研究了有关飞机核生化洗消的技术与装备发展现状，分析其关键洗消技术包括热气流正压技术、超声波降解技术与吸附剂吸附技术，概述了相关飞机洗消装备，涉及固定式洗消装备与机动式洗消装备，并预测未来技术发展的三大核心方向，为中国相关领域提供参考。

关键词

军用飞机；核生化洗消；洗消装备与技术；科技创新；军事工程

1 引言

化学、生物、放射和核 (CBRN) 威胁是现代战争与非传统安全领域的“隐形杀手”，而洗消装备则是空军应对此类威胁的战斗力“修复器”，能在核云下快速“重启”的空军，才是真正战略力量。全球空军洗消装备技术，从二战时期的人工化学擦拭，发展到如今融合 AI、无人化平台的智能系统，本质上是一场围绕“效率、安全、适应性”的技术革命。在核生化防护体系中，空军飞机洗消装备具有至关重要的战略地位，是应对核生化威胁、确保空军战斗力持续发挥的关键环节。

1.1 核生化武器特性与危害

核武器通过核裂变或聚变反应释放巨大能量^[1]，其爆炸效应主要包括冲击波、光辐射、早期核辐射、放射性沾染及电磁脉冲。冲击波可造成飞机机体结构物理性损毁，超压与负压变化可能引发燃油系统破裂或舱体密封失效；光辐射导致表面材料碳化或电子设备过载；早期核辐射与放射性沾染则可能损伤人员 DNA 并污染设备；电子脉冲效应则会干扰或永久损坏机载电子系统，破坏通信、导航及火控装置的功能连续性。生物武器以病毒、细菌等战剂为核心^[2]，通过空气、水体或食物传播，其隐蔽性与强传染性使感染防控极具挑战性。一些病毒、细菌可通过气溶胶形式附着于飞机表面或通风系统，对人员健康构成持续威胁，且生物战剂的潜伏期特性易导致危害的延迟性显现，加剧应急处置难度。化学武器则通过神经性毒剂（如 VX、沙林）与糜烂性毒剂（如芥子气）等有毒化学物质作用于人体神经系统或皮肤黏膜，

【作者简介】张瑞彩（1995-），女，中国山西朔州人，硕士，工程师，从事化学研究。

极低剂量即可引发中毒甚至死亡。这些毒剂多为液体形态，易挥发或附着于飞机材料表面，导致设备腐蚀与长期环境残留。

1.2 研究背景与意义

在当代军事冲突中，核生化威胁已成为影响作战行动安全与成效的关键因素。核武器、生物武器、化学武器的潜在使用不仅对人员构成致命威胁，还可能对军事装备尤其是军用飞机造成严重损害。美国作为全球军事力量的重要一级，在飞机核生化洗消装备与技术领域具备成熟的经验。首先是装备体系完备，拥有多种固定式洗消站、机动洗消单元，可快速洗消各类军民用飞机；其次是技术先进，广泛应用高效、低腐蚀性洗消剂，集成了高压冲洗、蒸汽、吸附等先进技术，并注重环保与人员安全；第三是重视研发机器人、无人辅助洗消及实时监测技术，走向自动化与智能化，减少人员暴露危险；第四是聚焦应对新型威胁，增强装备适应性与部署能力，趋向于建设更快速、更智能、更安全的应对未来复杂化生放核威胁能力。

本文系统研究梳理了航孔装备的核生化洗消技术发展脉络，分析研究了当前飞机洗消技术与装备，并预测了未来趋势。通过深入分析其装备技术演进与特点，为中国相关领域建设提供理论参考与实践借鉴，助力提升核生化威胁应对能力。

2 美国航空设备核生化洗消技术发展历程

航空设备洗消装备的发展与核生化武器的迭代、战场需求的升级紧密相关，主要分为三个阶段：早期萌芽阶段、机械化阶段、现代化发展阶段。其发展脉络主要表现为，从“被动应对”到“主动防护”的代际跃迁。

2.1 早期萌芽阶段

早期萌芽阶段（20世纪初-1950年代）：人工为主，功能单一。一战期间，化学武器（如氯气、芥子气）的大规模使用，催生了最早的洗消需求。但受限于技术，早期空军洗消以“人工+简单工具”为主。士兵穿戴简易防护装备，用刷子、抹布蘸取石灰水、次氯酸钠等化学溶剂，手动擦拭飞机表面污染物。此时装备无标准化设计，洗消效率低（单架战机需数小时），且对人员防护不足，易造成二次伤害。

2.2 机械化阶段

机械化阶段（1960年代-2000年代）：车载化、系统化，覆盖核生化全场景。冷战时期核威慑与生化武器扩散，推动洗消装备向“机械化、集成化”转型。典型代表是美国M12A1洗消系统（1980年代列装）。这类装备以军用卡车为平台，集成高压水泵、加热装置、储液罐（可装载化学洗消剂或热水），支持“喷洒-冲洗-中和”一体化作业，单架战机洗消时间缩短至30分钟内。同时，洗消剂从单一化学溶剂升级为“复合配方”（如DS2洗消剂，可同时应对核辐射尘埃、生物战剂和化学毒剂）。

2.3 智能化阶段

智能化阶段（2010年代至今）：无人化、精准化，融入战场信息链。进入21世纪，非对称战争与反恐作战成为主流，空军任务场景从传统战场延伸至城市、丛林等复杂环境，洗消需求进一步细化：既要快速响应（如无人机蜂群作战后需即时洗消），又要避免人员暴露（如高辐射区域）。技术突破集中在三方面：一是发展无人化平台。如美国“洗消机器人”可自主识别污染区域，通过多自由度机械臂喷洒洗消。二是聚焦精准检测-洗消联动。洗消装备集成光谱仪、生物传感器，实时分析污染物类型，自动匹配洗消剂配方，如遇VX毒剂使用酶解洗消剂，遇放射性尘埃使用纳米吸附材料。三是进行轻量化与模块化设计。便携式洗消背包可拆解为喷雾器、中和剂包等模块。

3 航空设备的核生化洗消技术与装备体系

3.1 关键洗消技术

航空设备核生化洗消技术是保障航空装备快速恢复作战能力的核心支撑，在物理洗消技术领域，目前以热气流正压技术、超声波降解技术与吸附剂吸附技术为主要代表。

热气流正压技术是将空气、稀有气体或低反应性蒸汽以正压形式高速喷向受染对象，实现沾染表面污染物的去除。被去除的污染物通过过滤单元进行富集。通过不同高温（温度>75°C）和高温（湿度>70%）环境条件组合以实现典型飞机材料表面化学毒剂降解和病原体有效灭活。根据从军用飞机上清除化学污染物和模拟剂的研究显示，在3.0 h、4.0 h 和 20.0 h 内分别能够去除 99% 的芥子气、浓芥子气和 VX^[3-4]。

超声波清洗技术能够产生高频振动，使污染物从设备表面分离，目前已用于医疗器械、电子产品、光学设备、印刷电路板和金属上的污垢、油脂和锈迹的清洁处理。美国Master Sonics 制造了一系列超声波清洗机，可用于清洗飞机上的单元件（刹车部件、发电机组件、执行器、梭阀、过滤器、车轮和发动机叶片等）。

吸附剂吸附技术主要是通过物理或化学吸附材料捕获、固定并降解有毒有害物质（如化学战剂、生物毒素、放射性污染物等）的应急处置方法。其核心是借助高比表面积材料的强吸附能力，实现对污染物的高效清除。纳米粒子为典型代表，纳米粒子（1-100nm）的尺寸效应赋予其极大的比表面积，能提供大量吸附位点，通过物理吸附（范德华力）和化学键合（表面羟基、官能团）高效捕获污染物，使其成为洗消、降解、过滤等消毒应用的理想材料。为了提升吸附技术洗消效果，纳米粒子必须能够与污染物实现固-固或固-液接触，并在处理后从受影响表面移除。纳米粒子已用于敏感设备的除污，例如美国 NanoMaterials 公司研发的 FAST-ACT。溶胶-凝胶合成的 Al₂O₃ 纳米颗粒，无论是带有还是不带反应性浸渍剂，都已研究证实了其连续物理吸附和原位

中和芥子气的能力。

在化学洗消领域，美国广泛应用表面活性剂技术，通过其独特的浸润、乳化、分散及增溶等特性，高效清除污染物，同时兼顾飞机机体安全性与环境兼容性。美国国防部联合科学技术办公室和化学与生物防御联合项目执行办公室，研发了一种用于去除表面化学和生物战剂的表面活性剂技术，专门用于乳化和去除军用涂漆表面的化学战剂。使用过程中将表面活性剂溶液喷洒在飞机上形成稳定的乳化液，去除沾染在飞机上的化学战剂，然后通过传统方法进行消毒处理。该表面活性剂不含挥发性有机化合物，并符合多项飞机使用规格要求。

针对生物战剂（如炭疽孢子）污染后的战机表面处理，美国研究采用细菌孢子萌发灭火新技术，通过精准激活孢子休眠-萌发转换机制，诱导休眠孢子主动萌发为营养细胞，推动军用洗消从“化学中和”向“生物智能”跃迁。美国研发团队使用一架废弃的 C-130 飞机和炭疽杆菌模拟芽孢，测试了细菌孢子萌发灭活技术：该团队在 C-130 的内表面上每平方米均匀喷洒了超过 1 亿个细菌孢子，孢子干燥后，使用背负式静电喷雾器在表面均匀地喷洒无腐蚀性萌发溶液，以最大限度地降低人员风险并保持与飞机材料的兼容性。由于萌发需要湿润的表面，团队继续每隔 2 小时定期向飞机内表面喷洒萌发溶液，以保持表面湿润。研究人员发现，孢子萌

发过程可将生物孢子和病毒污染减少 99.9% 以上。孢子萌发灭活技术不仅减少了飞机净化所需的时间和温度还减轻后勤负担以及对飞机部件的影响^[5]。

3.2 关键洗消装备

美国在航空设备核生化洗消装备与技术领域处于全球领先地位，拥有多种固定式洗消装备、机动式飞机洗消装备，具备成熟且先进的应对能力。

3.2.1 固定式飞机洗消装备

1. 改性过氧化氢飞机洗消掩体系统

在大规模核生化沾染环境中，洗消掩体具有显著的部署优势。洗消掩体搭建迅速，能快速形成较大的洗消空间；洗消性能强，可对大量受染战机进行高效洗消。洗消掩体可同时对飞机进行外部和内部洗消作业。掩体帐篷内的温度可加热至 77°C ~82°C，具备化学洗消与生物洗消能力。飞机受染后，置于洗消掩体内部，用改性过氧化氢蒸汽进行洗消（见图 1）。通过在掩体内部可施加负压，可防止生物、化学毒剂飘逸到掩体外部。在美国埃奇伍德化学和生物司令部的支持下，采用过氧化氢(VHP)蒸气和改性过氧化氢(mVHP)蒸气对 C-141 航空飞机内部进行了消毒试验，并验证了对多种化学毒剂、生物战剂消毒效果。过氧化氢蒸气消毒具有速度快、对电子设备没有损害、降解产物为水和氧气无二次污染的优点^[3]。

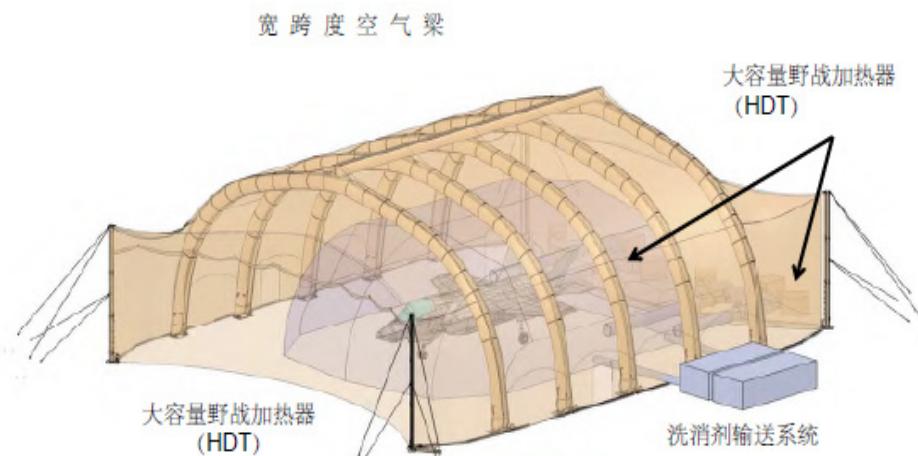


图 1 改性过氧化氢飞机洗消掩体系统模型图

2. 联合生物战剂飞机洗消系统

联合生物战剂飞机洗消系统利用生物热净化工艺，对飞机内部和外部进行生物消杀，以保障飞机重新投入战斗。该系统包括洗消剂输送系统、掩体系统、环境控制与监测系统和辅助组件。通过调节掩体内温度和湿度辅助洗消剂消除飞机内外部生物战剂，掩体内温度需低于飞机设备的安全极限温度，防止飞机系统受损。改进的联合生物战剂洗消系统可在不到 4.0 h 内将传染性包膜 RNA 病毒（如新型冠状病毒）的存活率降低 99.99% 以上^[6]。

3.2.2 机动式飞机洗消装备

机动式洗消系统能够快速洗消飞机上沾染的化学和生物战剂，还可用于船只、车辆等的洗消作业，包含大型及小型配置，具备快速、机动的飞机洗消能力，可实现“尽早执行”洗消作业，防止毒剂渗透至材料表面。在作战、撤离和后勤保障阶段，可根据不同需求灵活配置不同型号的机动式洗消系。该系统在保障战术灵活性的同时，可最大限度减轻后勤负担。美国 CBRN 特种作战部队联合项目组计划 2029 年在美国特种作战司令部全面部署该系列洗消系统。

1. 联合军种大型移动式洗消系统 (JSTD-SLS)

联合军种大型移动式洗消系统 (JSTD-SLS) 为航空装备处于研发和试用阶段的产品，可对大型装备实施洗消，包括飞机、设施、地面、海港和机场。该系统可将沾染的化学战剂浓度降低到探测器探测水平以下；可在移动过程中对受染对象进行洗消；能够使用环保型洗消剂和热肥皂水，对环境无污染。

2. 联合军种小型移动式洗消系统 (JSTD-ss)

联合军种小型移动式洗消系统 (JSTD-ss) 可安装于高机动性多用途轮式车辆或大型车辆上，具备良好的平台兼容性。每小时可洗消一架 FA-18E/CH-53 飞机或八台中型车辆，能快速完成洗消任务。该系统操作便捷、简单，3 名操作人员在 30 min 内即可完成系统安装、调试和运行。



图 2 联合军种小型移动式洗消系统实物图

3.3 装备研发与更新

科学技术的进步正在改变 CBRN 威胁格局，美国提出先进的洗消计划项目，涉及飞机等大型敏感装备洗消项目包括联合军种敏感设备洗消系统 (JSSED) 和吸附剂洗消系统 (SDS) 等。

联合军种敏感设备洗消系统 (JSSED) 专为敏感设备的洗消而设计。其设计逻辑基于超声波降解和循环溶剂清洗技术。超声波降解能够产生高频振动，使污染物从设备表面分离；循环溶剂清洗则通过不断循环的溶剂，将分离后的污染物带走。这种洗消方式能够在不损坏设备的前提下，对电子设备、飞机内部等敏感部位进行彻底洗消。

吸附剂洗消系统 (SDS) 则具有快速擦除功能。它利用特殊的吸附剂，能够迅速吸附和清除设备表面的污染物。SDS 系统操作简单，可在短时间内完成对敏感设备的初步洗消，为后续的深度洗消提供基础。在处理一些紧急情况时，SDS 系统能够快速响应，有效减少污染物对设备的损害。

美国新型自主洗消设备研发方面取得了显著进展，其中机器人自主洗消系统备受关注。该系统具备热点识别功

能，能够通过摄像头等设备精准定位污染热点区域，然后利用清洁泥浆进行冲洗，有效清除污染物。美国研发团队对机器人自主洗消系统进行了实际测试，结果表明该系统能够快速准确地完成洗消任务，大大提高了洗消效率，同时降低了士兵的暴露风险，实现了技术上的重大突破。

4 航空装备飞机核生化洗消技术的未来发展研判

未来，美国航空装备核生化技术的创新发展将聚焦于提升技术效能、适应复杂战场环境以及增强智能化水平三大核心方向。

在飞机清洁和洗消领域，目前采用较多的是肥皂水、表面活性剂类去除污渍的洗消剂^[7-8]，由于传统的洗消剂存在腐蚀性、环境污染等缺陷和不足，在新型洗消剂技术发展方面，低腐蚀性、高效性的平衡将成为关键技术突破点。例如，生物酶制剂降解技术（磷酸三酯酶 -PTE^[9-10] 等）的应用。原则上，酶处理可能对敏感设备材料的腐蚀性比传统化学洗消剂更为“温和”，且能高效降解有机磷化合物，包括化学战剂 (GB、GD、VX)，基于酶制剂生化飞机洗消应用处于早期阶段，设计开发成本低、活性高且可降解多类生化战剂的酶制剂飞机洗消系统仍具有挑战性。

在无人检测方面，传统方法无法跟上快速变化的技术格局和动态演变的威胁。为应对复杂战场环境，现在正在探索新一代可部署的化学、生物、放射和核 (CBRN) 微传感器，这些微型传感器具备五个模块化组件，可实现部署、战场感知与通信功能，外形小到可以用手抛掷或从无人机上投掷，同时可搭载于飞机上，以实时检测预警可能出现的核生化威胁。这些微传感器的开发，代表着美国向低成本、低功耗、一次性使用的检测系统战略转变，同时能够增强遥感能力并减轻前线部队负担。在大面积区域快速部署微型传感器，并根据任务切换不同的传感器，实现化学毒剂探测分析、辐射地图绘制与生物威胁监测，同时可与其他战场系统通信互联，从而构建更广泛的传感器网络，为指挥官提供实时态势感知。

在机器人自主洗消方面，智能洗消机器人将搭载多光谱成像等先进检测技术，能够自主规划洗消路径并动态调整作业参数，显著降低人员暴露风险。未来，将可能引入机器学习与 5G 通信，实现实时分析污染物类型并自动匹配洗消剂配方，同时形成多台机器人协同作业网络，通过分布式决策机制提升整体作业效能。

未来战争是体系化对抗，技术整合与系统化建设是未来发展的核心方向，洗消体系将构建“感知 - 决策 - 执行 - 评估”的一体化闭环架构，当战场监测到核生化袭击时，洗消装备自动规划最优洗消路线（避开高污染区），与指挥系统共享数据，实时上传洗消进度、污染物类型等信息，人工智能平台将深度介入洗消任务决策环节，通过历史案例分析