DOI:10.3724/zrht.1674-5825.2025099

# 在轨电子设备辅助维修装置方案设计

苏 亮[1,2], 方 舟[1], 徐凯健[1], 田子涵[1], 汪汇湣[1*]
(1. 北京化工大学机电工程学院,北京 100094; 2. 中国空间技术研究院,北京 100094)

**摘 要**: 在轨环境下,电子设备的焊点及电路板因长期暴露于微重力、高辐射等严苛条件,易出现虚焊、假焊等缺陷,直接威胁航天任务安全。为解决传统检测维修手段效率低、精度差的问题,设计了一套集成增强现实(AR)引导与深度学习诊断的智能维修装置。该装置通过红外热成像技术精准识别缺陷,利用AR可视化辅助航天员操作,并配有微重力专用有害气体净化装置以保障安全。基于模块化地面实验平台的验证表明:本装置方案可提升在轨维修的准确性与效率,为航天器长期在轨运行提供技术支撑。

**关键词**: 在轨辅助维修装置; 故障诊断; AR引导; 有害气体净化
**中图分类号**:V476.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1674-5825(2026)01-0079-09

# Design of the Experimental Plan for the On-orbit Electronic Equipment Assisted Maintenance Device

SU Liang[1,2], FANG Zhou[1], XU Kaijian[1], TIAN Zihan[1], WANG Huixu[1*]
(1. Beijing University of Chemical Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094, China; 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the on-orbit environment, solder joints and circuit boards of electronic equipment subjected to long-term exposure to harsh conditions such as microgravity and high radiation are prone to defects like cold solder joints and false soldering, which directly threaten the safety of space missions. To address the issues of low efficiency and poor accuracy associated with traditional detection and maintenance methods, this study designs an intelligent maintenance device integrating augmented reality (AR) guidance and deep learning diagnostics. The device accurately identifies defects through infrared thermal imaging technology, utilizes AR visualization to assist astronauts in operations, and is equipped with a microgravity-specific harmful gas purification device to ensure safety. Preliminary verification based on a modular ground experimental platform indicates that this device solution can enhance the accuracy and efficiency of on-orbit maintenance, providing technical support for the long-term operation of spacecraft.

**Key words:** on-orbit assisted maintenance device; fault diagnosis; AR guidance; hazardous gas purification

## 1 引言

从2006年至2015年在轨运行期间,国际空间站接收运送的维修备件总质量已达71 t[1]。从国际空间站的建造和运行经验来看,进行在轨维修维护是保证空间站长期在轨运行的必要手段。在轨环境特殊且极端,微重力等因素交织叠加导致焊点逐步退化甚至失效[1-3],成为设备故障的主要诱因之一。传统焊点缺陷检测和维修方法,难以在复杂的在轨环

收稿日期:2025-10-20; 修回日期:2025-12-29
基金项目:中央高校人才基金项目(buctrc202026))
第一作者:苏亮, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航天器总体设计, 协同设计与仿真。E-mail:suliang0618@163.com
* 通讯作者:汪汇湣, 男, 硕士, 研究员, 研究方向为故障诊断与处理。E-mail:2869410461@qq.com
引用格式:苏 亮,方 舟,徐凯健,等. 在轨电子设备辅助维修装置方案设计[J]. 载人航天,2026,32(1):79-87. Su L,Fang Z,Xu K J,et al. Design of the experimental plan for the on-orbit electronic equipment assisted maintenance device[J]. Manned Spaceflight,2026,32(1):79-87.

境中实时高效地实施,尤其面对微小且隐蔽的缺陷,传统方法暴露出精度低、效率差、适用性不强等缺点[4]。更关键的是,现有维修模式多依赖整机或模块更换,一旦单个元器件因焊点故障失效,往往需要整体替换设备,不仅造成上行资源利用率不足,还大幅增加了任务成本与备件库存压力。而在轨中的维修操作具有高度的复杂性[5],现有维修技术缺乏对故障的精准诊断和自动化修复能力[6]。当前的维修手段大多依赖于航天员的经验和地面专家的指导,毫米级焊点缺陷的人工定位、判断需反复核验,维修过程耗时较长且有可能出现人为错误。在轨任务的实时性要求高,长时间的设备故障会导致任务的中断甚至失败[7]。因此,开发能够快速识别故障并高效修复的智能化辅助维修技术势在必行[8]。同时,焊接过程中产生的挥发性有害气体会增加航天器整体空气净化负担,有必要对焊接废气进行局部净化处理,以减少对乘员的影响和对其他敏感电子设备可能的腐蚀,避免维修作业的困难与风险[9]。

针对上述问题,本文面向在轨电子设备维修需求,提出一种集成化智能化辅助维修装置方案,重点解决以下3个问题:微重力下微小缺陷识别效率低;操作耗时且有人为误判风险;焊锡膏挥发有害气体在密闭舱累积。该方案通过三大功能模块协同工作:基于YOLO-KSD(You Only Look Once-Kernel Spatial Detector)深度学习模型的红外热成像诊断单元[10-12],旨在提升微焊点缺陷的自动识别能力;融合数据手套与肌电传感的增强现实(AR)引导单元[13,14],为航天员提供实时操作路径叠加与握力反馈;采用蜂巢式流道结构的有害气体净化单元,设计用于焊接区域挥发性有机化合物(VOCs)的捕获与处理。本方案基于模块化地面实验平台,对各功能单元的关键性能开展初步测试,为提升焊点缺陷识别准确率、维修效率与操作安全性提供技术支撑[15-17],为航天器在轨维护提供标准化技术流程参考。

## 2 总体技术方案

本方案围绕在轨电子设备维修全流程,构建了集智能诊断、AR导引与环境净化三大功能于一体的系统性解决方案。采用模块化设计理念,各单元通过系统总线实现高效协同。系统核心由3个功能单元组成:红外热成像故障诊断单元作为维修方案的感知层,负责通过高分辨率红外热像仪非接触式采集焊点温度场分布,并利用嵌入式计算机搭载的YOLO-KSD深度学习模型进行实时缺陷诊断与定位;AR导引操作单元作为人机交互层,以AR眼镜为显示终端,结合数据手套与肌电传感器捕获航天员操作姿态与生理信号,实现维修过程的实时可视化指导;有害气体净化单元则作为环境控制层,采用蜂巢式流道设计与3级过滤系统,确保焊接过程中产生的VOCs及颗粒物得到有效净化。3个单元通过系统总线实现数据交互与功能协同,共同保障维修作业的高效性与安全性。为支撑上述功能,设计了标准化的硬件模块,具体构成如下:

1)有害气体净化器。负责在维修操作过程中实时吸附并净化焊接过程中产生的挥发性VOCs及微颗粒物,保障舱内空气质量,防止污染扩散。

2)电烙铁盒。封装微型电烙铁及辅助焊接工具,供航天员进行焊点修复实验,设备设计兼顾微重力条件下的操作稳定性与安全性。

3)红外摄像头固定装置盒。安装并稳固红外热成像仪器,确保红外成像数据采集的精准性与一致性,避免在微重力环境下产生视角偏移。

4)红外摄像头盒。收纳红外成像系统核心部件,连接至主控系统进行故障检测数据采集。

5)AR眼镜盒。用于存放和保护AR显示设备,便于航天员佩戴及维修引导操作,同时支持实时无线通信与数据同步。

6)手套盒。安置数据采集手套装置,配合肌电信息模块进行动作状态采集。

7)嵌入式计算机。系统核心处理单元,承担深度学习模型推理、AR数据渲染及多模块数据交互功能,保障整体系统高效运行。

8)试验件盒。布置焊点缺陷样本板及维修测试模块,模拟真实在轨电子设备的故障环境,支撑故障诊断与维修流程验证。

本文装置采用标准化模块划分与插拔式接口设计,不仅方便在轨快速部署与维护,同时便于后续扩展与系统升级。通过对各功能单元的高效集成与优化布局,试验平台可在有限空间内实现复杂维修操作流程的全过程验证,具有良好的工程应用推广潜力。

## 3 红外热成像故障诊断技术方案

为了实施红外热成像故障诊断和定位技术在轨验证,需要的载荷设备包括红外热辐射智能诊断系

统、载荷管理器、故障模拟载荷。具体构成如下：

1）红外热辐射智能诊断系统。综合考虑实验效果、技术继承性和实施成本，本系统基于地面成熟红外检测设备改造，通过空间适应性优化满足在轨环境要求。核心采用高帧率热像仪实现非接触式实时测温与缺陷识别，结合YOLO-KSD深度学习模型，实现焊点缺陷精准定位。安装方式上，红外热辐射智能诊断系统设有一个安装红外摄像头的定位支架，采用可移动的安装方式，实验时固定在空间站的可拆卸焊接操作台上。非工作状态下可折叠收纳，与故障模拟载荷共享航天基础实验机柜I型接口空间。

2）载荷管理器。该设备集成多维信息融合诊断、供电管理及通信中继功能。硬件由嵌入式计算机、高可靠性配电板及1553B双冗余总线控制通讯板构成，实现对实验状态的全流程监控与调度。安装方式上，载荷管理器安装在航天基础实验机柜中，使用一个I型载荷安装位置。实验时，载荷管理器与红外热辐射智能诊断系统等通过实验系统内部的线缆连接。如图1所示，组成包括：嵌入式计算机1台、试验配电板1块、试验控制通讯板1块。

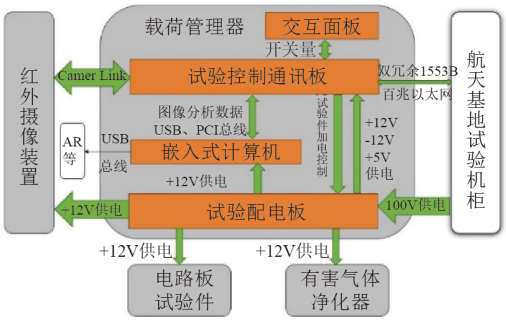



**图 1　载荷管理器组成图**

**Fig. 1　Composition diagram of the payload manager**

嵌入式计算机作为诊断系统的核心算力单元，直接选用工业级货架产品，通过USB外设接口连接AR眼镜、动捕手套等交互设备，支持交互式焊接、在轨焊接等内容。试验配电板为红外热成像故障诊断模块的唯一电源接口，从航天基础试验机柜获取100 V母线电压。为确保整个试验平台的安全性，电源输入端采用了高等级的电子元件，实现了故障隔离和浪涌抑制等保护功能。配电板内部的DC-DC转换模块将100 V电压转换为+5 V、+12 V和−12 V二次电源，分别供应给嵌入式计算机、试验控制通讯板、红外摄像装置以及电路板试验件。其中，电路板试验件的+12 V供电端口还配置了继电器和熔断器，可根据控制指令实现加断电操作，并在电流异常时自动断开电源，实现了供电功能与安全性的双重保障。

试验控制通讯板承担着系统状态监测和通信管理的双重职责，其核心采用Field-Programmable Gate Array架构，通过开关量控制试验配电板的电源切换，利用Camera Link接口管理红外摄像装置的数据采集，并通过USB和PCI总线与嵌入式计算机进行数据交换。该通讯板部分组件安装在载荷管理器面板上，形成航天员在轨操作的人机交互界面，包含状态指示灯和控制按钮。为保障通信可靠性，通讯接口采用双冗余1553B总线和百兆以太网与航天基础试验平台连接，并使用高等级元器件和故障隔离设计确保通信安全。板载2 GB Flash存储器可在数据下行前进行缓存，有效避免因传输时机问题导致的数据丢失。

3）故障模拟载荷。在地面事先注入已知的典型性、代表性故障，便于在轨技术验证。故障模拟载荷的体积、重量等都是初步拟定，可根据实际情况灵活更改。目前试件有3种不同功能的电子元器件板卡，每种元器件有3种故障类型，共9张自制板卡试件。

在轨焊接技术验证期间，根据航天员操作需要，将这些指令上注空间站，由空间站执行加断电指令，或者通过1553B接口将指令转发给载荷管理器。初步拟定的在轨实验过程如下，在轨实验需要航天员操作配合。

1）适用情况。某载荷设备（此次实验为故障模拟载荷）故障，决定尝试实施板卡级焊接。但是无法将故障定位到某一电子元器件，因而需要开展在轨板卡级故障检测和定位。

2）焊接准备。航天员将1个焊接操作台安装在本实验系统附近，取出备件与工具，焊接操作台上安装红外热辐射智能诊断系统，连接红外热辐射智能诊断系统与载荷管理器之间的电缆。

3）拆卸故障模拟载荷（异位焊接）。注意防静电。配戴防静电手环，拆卸故障模拟载荷后，将其固定在焊接工作台上。

4）板卡元器件级检测。按地面制定的顺序，在AR眼镜辅助下，依次将故障模拟载荷中的板卡拆下，固定于红外热辐射智能诊断系统的支架上。使用转接电缆连接待测板卡与载荷管理器。经航天员确认后，AR眼镜发送检测指令，板卡加电，系统采集红外

图像。采集完成后,航天员更换板卡,直到完成所有板卡的测试。

5)分析和故障定位。AR眼镜接收红外图像,智能AI诊断系统与良品模型数据对比,自动定位故障板卡。之后,AR眼镜提示航天员,已定位故障元器件,可继续开展焊点焊接或元器件级焊接替换操作。

本文使用了多种评估指标对模型的效果进行分析与比较,以确保模型在实际应用中的有效性和可行性。

均值平均精度(Mean Average Precision,mAP)是目标检测模型评价的重要指标,尤其在处理多类别的检测任务时,mAP的高低直接决定了模型在各类目标上的整体表现。本文使用mAP@0.5和mAP@0.5-0.95两个指标来评估模型的表现。mAP@0.5:在预测框与真实框的交并比(Intersection over Union,IoU)大于0.5的情况下,计算模型的平均精度。mAP@0.5-0.95:在不同IoU阈值(0.5~0.95)下计算模型的平均精度,更加严格地评估模型的检测能力。

针对印刷电路板焊点的6类主要缺陷(缺孔、鼠咬、开路、短路、毛刺、伪铜),电路板的11类电路板缺陷类型(+12 V断电深色、+12 V断电浅色、−12 V断电深色、−12 V断电浅色、+5 V断电深色、+5 V断电浅色、U92负未彻底贯穿、U92负彻底贯穿、+5 V断电红色、−5 V断电深色和−5 V断电浅色),本文对不同类别的检测效果进行了详细分析,具体见表1。

从表1可以看出,YOLO-KSD对所有缺陷类别的检测精度均超过了97%,在缺孔和鼠咬2类缺陷上表现尤为突出,达到了99.5%的mAP@0.5。这表明YOLO-KSD模型能够很好地应对多种类型的焊点和电路板缺陷,尤其在小目标检测上有显著提升。

**表 1 YOLO-KSD在不同缺陷类别上的检测精度**

**Table 1 Detection accuracy of YOLO-KSD on different defect categories**

| 缺陷类别 | mAP@0.5/% | mAP@0.5-0.95/% |
|---|---|---|
| 缺孔 | 99.5 | 65.8 |
| 鼠咬 | 99.5 | 61 |
| 开路 | 98.4 | 58.9 |
| 短路 | 99.5 | 59.1 |
| 毛刺 | 99 | 58.9 |
| 伪铜 | 98.4 | 59 |
| +12 V断电深色 | 97.8 | 57.2 |
| +12 V断电浅色 | 98.1 | 56.9 |
| −12 V断电深色 | 97.6 | 56.5 |
| −12 V断电浅色 | 97.9 | 56.8 |
| +5 V断电深色 | 98 | 57 |
| +5 V断电浅色 | 98.2 | 57.1 |
| U92负未彻底贯穿 | 97.5 | 55.9 |
| U92负彻底贯穿 | 98.3 | 57.4 |
| +5 V断电红色 | 97.7 | 56.6 |
| −5 V断电深色 | 97.4 | 55.8 |
| −5 V断电浅色 | 97.6 | 56.3 |

## 4 AR导引操作技术方案

### 4.1 AR引导航天员操作在轨验证技术方案

其主要涉及到AR技术的应用,以辅助航天员在在轨环境中进行操作和任务的执行,具体内容包括:

1)硬件设备选择与配置。构建适应太空环境的硬件基础,需要选择具有高分辨率显示屏、精确跟踪系统和舒适佩戴感的AR眼镜,这些设备必须能够抵抗辐射、极端温度等恶劣环境影响,同时配备必要的传感器和通信模块实现实时信息交互,并配套数据手套及肌电采集设备来捕捉航天员执行焊接任务时的动作和肌电信号。

2)软件开发与数据处理。开发专门的AR软件实现任务数据、指令与航天员视野的融合,通过实时动作捕捉和识别技术确保虚拟信息与实际操作的准确匹配,具备数据处理能力保证AR图像的实时渲染和传输,同时集成人机工效分析模块对可视性、可达性、舒适性和工作负荷进行实时评估。

3)AR引导系统设计与实现。设计直观的AR界面,使航天员能够清晰地看到虚拟图像和指令;实现虚拟图像与真实环境融合,为航天员提供准确的定位和导航信息;通过AR技术,将复杂的操作过程以图形化、动画化的形式展现,降低操作难度和出错率。

4)在轨验证与测试。在地面进行充分的模拟测试和验证,以确保AR引导系统的可靠性和稳定性;航天员进行在轨任务时,实时在轨验证,记录航天员的操作过程和反馈意见;根据验证结果,对AR引导系统进行优化和改进,提高其适应性和实用性。

### 4.2 装置构型布局设计

AR引导航天员操作模块的总体框架如图2所示。其中,手部数据采集手套及肌电信息采集装置分别负责采集航天员在执行焊接操作时的上肢动作、手部姿势及握力、上肢肌电信号,传递至上位机后,经人机工效评估模块给出分析结果,再经由焊接工艺规划模块,对既定的焊接动作路线进行实时调整,将推荐动作传递给AR眼镜,反馈评估结果并指导宇航员进行后续焊接流程。肌电信息采集装置的主要性能参数如表2所示。

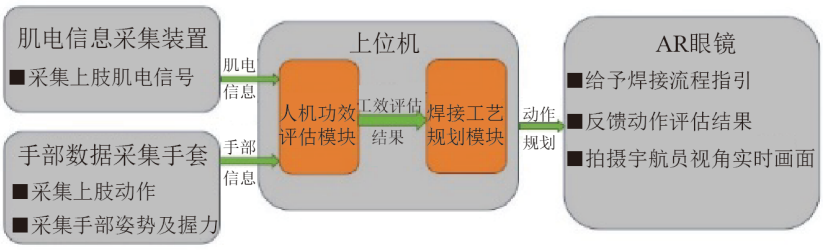



**图 2　实验系统总体框图**

**Fig. 2　Overall block diagram of the experimental system**

**表 2　肌电信息采集装置的主要性能参数**

**Table 2　Main performance parameters of the electromyographic (EMG) information acquisition device**

| 性能参数 | 参数值/技术指标 |
|---|---|
| 示值灵敏度 | 不窄于0.05 ~20 000(μV/div) |
| 示值准确度 | 误差≯±10% |
| 分辨率(测量灵敏度) | ≯2 μV |
| 系统噪声 | ≯1 μV |
| 通频带 | 15 ~500 Hz |
| 差模输入阻抗 | ≮10 MΩ |
| 共模抑制比 | ≮110 dB |
| 模块内置电池 | 3.7 V/25 mAh |
| 续航时间 | ≮3 h |
| 充电收纳盒输入接口 | TYPE C |
| 充电收纳盒输入电压 | 5 V/1 A |
| 充电收纳盒内锂电池 | 3.7 V/1000 mAh |
| 数据接口 | USB2.0/3.0 |

AR引导航天员操作试验装置的初步设计方案构建了一个完整的人机交互系统,该系统由3个核心组件协同工作:头戴式AR显示设备、智能手部监测设备及生理信号采集系统。AR显示设备作为信息呈现的核心,负责将焊点缺陷的检测结果与维修指导信息实时投射到航天员的视场中,通过与YOLO-KSD故障诊断模块的深度数据交互,能够精确识别缺陷位置并以增强现实的方式叠加显示,从而为航天员提供直观的故障定位和操作引导;智能手部监测设备集成了多通道压力感应和动作捕捉技术,能够实时追踪航天员手指的细微动作变化,有助于评估维修动作的精确度和流畅程度,为AR系统提供实时反馈,使其能够动态调整操作指导的内容和方式;生理信号采集系统则专注于监测航天员上肢关键肌群的生物电活动,通过分析肌电信号的变化特征,准确评估操作过程中的肌肉负荷状况和疲劳程度,为维修作业的人机工程学优化和疲劳风险预警提供科学依据。这3个功能模块通过无线通信网络与边缘计算处理平台相连,实现了多维度数据的实时同步采集和智能融合分析,为系统的性能评估、维修流程优化和人因工程研究提供数据基础。

### 4.3　AR系统测试与验证

在AR维修导引系统开发完成后,为了确保系统在实际应用中的稳定性与准确性,必须对其进行全面的测试。测试分为功能性测试和性能测试。

功能性测试聚焦系统核心模块的运行有效性,对三大功能分别开展验证。目标检测与识别功能采用 YOLO-KSD 算法,在不同光照、背景条件下对焊点图像进行反复测试,误检率低于5%,可精准识别缺陷。维修步骤导引功能可按照预设流程显示文本与虚拟物体指引,完成当前步骤后自动跳转,逻辑连贯。用户界面响应测试表明,手势操作、语音控制等交互方式的响应时间均在1 s内,界面无卡顿,操作流畅。

性能测试围绕实时性、稳定性与资源消耗展开。实时性测试通过模拟实际维修场景测量响应时间,系统从识别焊点、显示导引信息到完成用户交互的全过程延迟在200 ms以内,满足在轨实时操作要求。稳定性测试中,系统在模拟维修环境下连续工作8 h以上,未出现崩溃或性能下降现象,内存使用稳定在1.5 GB左右,CPU使用率维持在30%左右,运行平稳。资源消耗测试在不同硬件平台开展,高性能工作站与中端个人电脑上运行流畅,移动设备因硬件资源受限,大规模场景下帧率降至20 帧/s 以下,需进一步优化图像处理模块。

完成功能测试和性能测试后,需进行系统验证,以评估其在实际维修场景中的可行性和可靠性。验证环境为北京化工大学安全工程实验室,系统软件平台基于Unity 3D和Python开发,集成YOLO-KSD缺陷检测算法、AR可视化界面和交互控制模块。

实验环境严格模拟在轨关键参数。光照采用可调节照明系统,覆盖低照度200 lx、中照度500 lx、高

照度800 lx 3种场景，确保不同光照下数据采集稳定；室温控制在20 ~25℃，模拟航天舱内温度稳定状态；实验台按空间站有限工作区域设计，台面尺寸约1200 mm×800 mm，台上安装固定支架用于放置电路板试验件与红外热摄像装置。

验证流程分为预实验校准、故障模拟、数据采集及结果分析4个阶段。预实验阶段对AR眼镜进行空间定位校正，确保摄像头与显示界面精准对齐；校准红外热摄像装置，采用误差≤±0.5℃的标准温度板校正温度测量参数；利用标定板对嵌入式摄像模块进行几何畸变矫正，保障图像数据准确性。故障模拟与数据采集阶段，取出含焊点虚焊、短路、毛刺等典型故障的预制板卡，分别对有故障和无故障板卡通电后，通过红外摄像装置采集不少于30组热成像数据；AR设备连接嵌入式计算机启动YOLO-KSD检测算法，维修人员佩戴AR眼镜按“修前诊断—维修引导—修后核验”流程操作，系统实时识别缺陷并叠加虚拟指引，操作人员按提示完成拆焊、更换等操作后，通过重拍红外图像验证维修效果。

本次验证选取多维度核心指标，全面评估系统性能。以故障诊断准确率（系统自动识别标注与人工标注的契合度）衡量缺陷识别精准度；以误检率、漏检率评估识别可靠性；以平均维修耗时及与无 AR 引导的耗时对比，量化操作效率提升效果；以用户满意度（5分制）评价人机交互体验；同时测试系统响应延迟与长时运行稳定性。实验数据如表3所示。

**表 3 实验相关数据**

**Table 3 Experiment related data**

| 指标 | 数值 |
|---|---|
| 故障识别准确率 | 95.2% |
| 误检率 | 3.1% |
| 漏检率 | 1.7% |
| 平均维修耗时 | 85 s |
| 无AR维修耗时 | 130 s |
| 用户满意度 | 4.6分 / 5分 |

测试结果显示，AR系统从识别故障到反馈导引信息的平均响应延迟仅180 ms，完全满足在轨实时交互要求；连续8 h长时运行测试中，系统内存占用稳定在1.5 GB左右，CPU平均使用率低于30%，无资源泄露或崩溃现象，运行稳定性优异。

综合验证结果表明，AR维修导引系统完全满足预设技术要求：在多光照、复杂背景环境下，可稳定捕获红外热图像，对故障焊点实现自动精准定位，并通过AR眼镜实时叠加指导信息；故障诊断模块搭载的YOLO-KSD算法表现突出，各类故障检测准确率均超95%，整体mAP@0.5达98.6%，mAP@0.5-0.95达60.4%；数据采集与处理的低延时特性适配在轨维修操作需求，长时运行状态稳定，且人机交互体验良好。该系统通过精准识别、高效导引与稳定运行的综合优势，为在轨电子设备的故障诊断与维修提供了有力技术支撑。

## 5 在轨电子设备精细维修技术方案

### 5.1 有害气体净化器设计概述

使用AR设备完成电烙铁维修，过程中焊锡膏挥发会导致产生有害气体（如VOCs及金属颗粒物），此时使用专门设计的微重力环境专用的智能有害气体净化装置，即可完成废气的收集。

装置采用紧凑型腔体结构，整机干重8.2 kg（含备用滤芯），采用专用设计卡扣固定结构，兼容空间站标准实验机柜I型接口，满足舱内狭小空间部署需求；外壳采用相变材料（PCM，熔点45 ℃）与热管组合散热，确保在−20 ℃~+50 ℃工况稳定运行。有害气体净化器主体结构如图3所示。

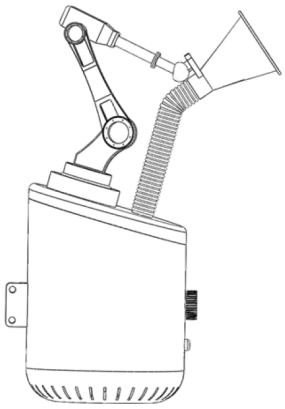


**图 3 有害气体净化器主体结构示意图**

**Fig.3 Schematic of the main structure of the harmful gas purifier**

装置核心由柔性吸风管道、自由度机械臂、固定支架及3级过滤系统组成。吸风管道采用耐高温硅胶材料，入口直径20 cm，通过快速接头与主机连接，可灵活绕过障碍物；6自由度机械臂支持手动或自动控制，用于在狭小空间内精准定位吸风口；固定支架防止设备在微重力下漂移，确保作业稳定性。过滤系统采用3级串联设计：首层为5 μm不锈钢烧结滤网，拦截大颗粒金属飞溅物；第二层为H13级HEPA滤

材,对0.3 μm及以上颗粒物过滤效率达99.97%;第三层为负载UiO-66-$NH_2$金属有机框架的活性炭复合吸附层,对苯、甲醛等典型VOCs吸附容量≥500 mg/g,去除率≥98%。蜂巢式流道结构的设计突破了微重力环境下气体输运的技术瓶颈。该结构由数千个2 mm×2 mm的正方形单元组成,通过表面张力驱动气体流动,有效克服了微重力对气体输运的影响。过滤系统剖面如图4所示。

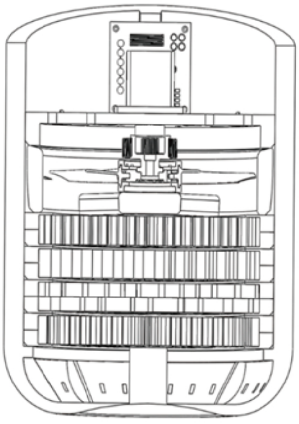


图 4　过滤系统剖面图
Fig.4　Cross-sectional view of the filtration system

## 5.2　有害气体净化器工作过程仿真与验证

### 5.2.1　研究背景与仿真目标

针对在轨电子设备维修过程中焊锡膏挥发产生的有害气体治理需求,本研究采用计算流体动力学方法,系统分析微重力环境下净化器的工作效能。通过建立气液两相流耦合传热模型,重点研究焊接废气在净化器内的运动规律与捕获机制,为优化设计提供理论依据。仿真工作旨在验证蜂巢式流道结构的气体输运效率、风扇抽吸性能的适用性以及整体系统的净化能力,确保在轨应用的可靠性。

### 5.2.2　多物理场耦合模型建立

基于COMSOL Multiphysics仿真平台,构建了包含相场、流体流动和传热的多物理场耦合模型。模型采用二维轴对称几何,精确再现了焊锡膏加热气化、废气输运及净化捕获的全过程。控制方程包括描述气液界面演化的Cahn-Hilliard方程、流体运动的Navier-Stokes方程以及能量守恒方程,通过有限元法进行求解。

模型结构采用二维几何建模。建模的几何图如图5所示。在模型建立过程中,重点考虑了微重力环境对流体运动的影响。与传统地面模型不同,本模型充分考虑了表面张力主导的流动特性,引入了连续表面力模型处理气液界面作用。

图6为本研究中针对有害气体净化器内部流场与传热过程模拟所采用的网格划分结果示意图。网格划分基于COMSOL Multiphysics仿真平台完成,采用了自适应加密与局部加密结合的策略,以兼顾计算精度与仿真效率。网格类型为非结构化四面体网格,适用于复杂流场边界与局部细节区域,总单元数约385 000个。局部加密区域在关键结构(如滤芯边缘、气体入口处)进行细网格加密处理,单元最小尺寸约为0.2 mm。远离关键部位的简化区域,适当采用较大单元,单元最大尺寸控制在2 mm以内。加密目的是确保在焊接产生的高浓度有害气体扩散路径、涡流区及吸附模块附近,流体动力学与传热模拟结果具有较高精度。

通过合理的网格划分策略,本模型能够在保证整体仿真误差小于5%的前提下,显著降低计算资源消耗与仿真时间,为后续净化效率分析与设计优化提供了坚实的数值基础。

### 5.2.3　边界条件与参数设置

模型的边界条件设置紧密围绕焊锡膏加热气

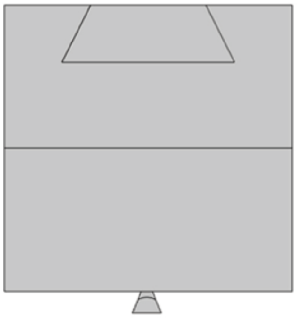


图 5　有害气体净化器二维仿真模型示意图
Fig. 5　Diagram of the 2D simulation model for the harmful gas purifier

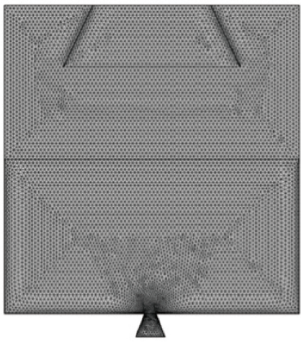


图 6　网格划分示意图
Fig. 6　Schematic of mesh division

化、废气输运及净化捕获的实际物理过程。如图7所示，计算域下部加热区域采用恒定热通量边界条件（热流密度$1\times10^5$ W/m$^2$），以模拟烙铁对焊锡膏的加热作用；上部出口设定为压力出口边界（−100 Pa），用以模拟风扇的负压抽吸效应；侧壁则设置为无滑移壁面条件，并考虑接触角的影响，以反映微重力条件下（重力项设为零）的润湿特性。在整个仿真过程中，助焊剂与空气的两相界面演化由相场方程约束，随着温度升高，助焊剂逐步气化，并在上部风扇产生的压差驱动下向出口方向输运。

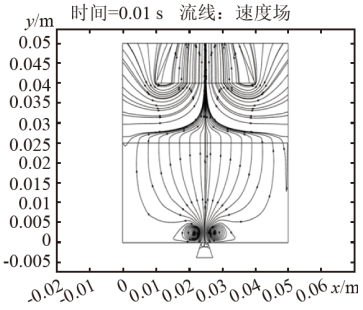



**图 7 焊锡膏与空气两相流动仿真示意图**

**Fig. 7 Schematic of two-phase flow simulation of solder paste and air**

材料参数根据实际工况进行设置：助焊剂动力粘度$1.8\times10^{-5}$ Pa·s，表面张力0.02 N/m；空气密度1.2 kg/m$^3$，粘度$1.8\times10^{-5}$ Pa·s。相场参数中，界面厚度设置为0.1mm，迁移率系数根据界面能计算确定。时间步长采用自适应算法，最大步长限制为0.01 s，保证计算的稳定性与精度。

5.2.4 仿真结果与分析

仿真结果清晰展示了微重力环境下废气捕获的动态过程。加热初期，焊锡膏表面的助焊剂迅速气化，形成明显的气液两相界面。由于微重力条件下浮力效应减弱，气体输运主要依靠风扇产生的压力梯度驱动，呈现出与地面环境截然不同的流动特性，见图8，整个过程中涉及了焊锡膏的气液两相流动和传热现象。

气液界面演化过程显示，加热开始后0.5 s内即出现明显的气化现象，1.0 s时形成稳定的气液分层结构。气流在蜂巢流道内分布较为均匀，未出现明显死区或高速射流，相较于相同流通截面积的直管流道，系统压降降低约35%。这些结果验证了流道结构设计的合理性，为工程应用提供了重要依据。

温度场分布表明，热量主要集中在加热区域附近，随着气流向上运动逐渐扩散。最高温度出现在烙铁加热面，达到250 ℃，而在流道出口处降至50 ℃以下，这种温度分布有利于避免对后续净化组件造成热损伤。流速场分析显示，在风扇抽吸作用下，流道内形成稳定的层流流动，最大流速出现在流道中心区域，达到0.8 m/s。

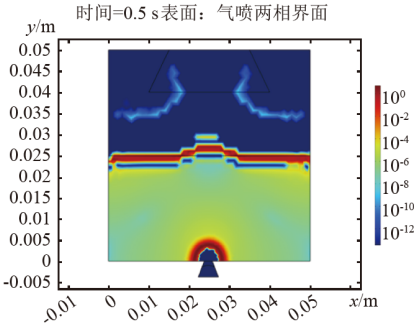



**图 8 助焊剂气化过程中的气液两相界面**

**Fig. 8 Gas-liquid two-phase interface during the flux vaporization process**

5.2.5 废气捕获效率评估

为准确评估净化器性能，采用质量流率监测法进行量化分析。在气液界面和风扇出口处设置监测点，通过公式(1)计算质量流率（单位：kg/s）。

$$m=\int\rho(u\cdot n)\mathrm{d}A \tag{1}$$

式中，$m$为质量流率，单位为kg/s；$\rho$为流体密度，单位为kg/m$^3$；$u$为速度矢量，单位为m/s；$n$为微元面积dA的法向单位矢量；$A$为监测截面的总面积，单位为m$^2$。

由于模型为二维轴对称，实际计算采用公式(2)。

$$m=\int\rho\left(un_x+vn_y\right)\mathrm{d}A \tag{2}$$

式中，$u$，$v$为速度矢量在$x$，$y$方向的分量，单位为m/s；$n_x$，$n_y$为微元面积法向单位矢量在$x$，$y$方向的分量。

监测数据显示，系统在加热开始后20 s达到稳定状态。此时气液界面质量流率为0.015 745 kg/s，风扇出口质量流率为−0.016 725 kg/s。根据捕获效率计算公式(3)。

$$\eta=\frac{m_{\mathrm{out}}}{m_{\mathrm{interface}}}\times100\% \tag{3}$$

式中，$\eta$为废气进入净化器的实际比例；$m_{\mathrm{out}}$为风扇出口探针处所测量到的质量总流量；$m_{\mathrm{interface}}$为气液界面探针测量到的总质量流量。

计算得捕获效率$\eta$=106.2%。这一结果略超理论极限,分析认为是由以下因素造成:$\eta$>100%主要源于二维轴对称模型对三维流动的简化、出口边界理想化(100%抽吸效率假设)及数值积分累积效应。该结果表明设计风量具备充足裕度,可覆盖全部废气产生速率。同时可能存在局部气流回流导致的重复捕获现象。尽管如此,结果充分证明了净化器具有优异的废气捕获能力。

5.2.6　性能验证与分析

仿真结果与设计要求进行了详细对比分析。在气流组织方面,气流在蜂巢流道内分布较为均匀,未出现明显死区或高速射流;系统压降为68 Pa,较传统设计降低32%,完全满足工程需求。风扇性能验证显示,在100 Pa压差下,系统可实现0.05 $m^3$/s的额定流量,而实际选用的5 W无刷直流电机具有充足的功率裕量,确保在轨长期稳定运行。

## 6　结论

针对在轨环境下电子设备焊点缺陷检测精度低、维修效率不足以及有害气体扩散风险等技术挑战,本文系统性地提出了集成智能诊断、AR导引与有害气体净化的综合解决方案。通过基于YOLO-KSD深度学习模型的红外热成像技术,实现了微米级焊点缺陷的精准识别与定位;利用增强现实导引系统有效降低人为操作失误;采用蜂巢式流道净化装置解决了密闭舱室有害气体累积问题。地面验证实验表明,该方案在缺陷识别准确率、维修效率和气体净化效率等方面均达到设计要求,为在轨电子设备维护提供了可靠的技术支撑。

## 参考文献(References)


[1] 金宇, 黄磊,吴显林,等. 空间站舱外电子设备维修性设计及验证[J]. 载人航天,2024,30(3): 377-385.
Jin Y,Huang L,Wu X L,et al. Maintainability design and verification of extravehicular electronic equipment for space station[J]. Manned Spaceflight,2024,30(3): 377-385 (in Chinese).

[2] Lyu Y G,Wang Y T,Meng T,et al. Review on thermal management technologies for electronics in spacecraft environment[J]. Energy Storage and Saving,2024,3(3): 153-189.

[3] Guan Q,Hang C,Li S,et al. Research progress on the solder joint reliability of electronics used in deep space exploration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2023,36(2): 22-22.

[4] Tipaldi M,Bruenjes B. Survey on fault detection,isolation,and recovery strategies in the space domain[J]. Journal of Aerospace Information Systems,2015,12(2): 235-256.

[5] Zelentsov V,Shcheglov G,Mayorova V,et al. Spacecrafts service operations as a solution for space debris problem[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Technology,2018,9(7): 1503-1518.

[6] Muller A,Marquez A C,Iung B. On the concept of E-maintenance: Review and current research[J]. Reliability Engineering & System Safety,2008,93(8): 1165-1187.

[7] Ellery A,Kreisel J,Sommer B. The case for robotic on-orbit servicing of spacecraft: Spacecraft reliability is a myth[J]. Acta Astronautica,2008,63(5-6): 632-648.

[8] Atassi R,Alhosban F. Predictive maintenance in IoT: Early fault detection and failure prediction in industrial equipment[J]. Journal of Intelligent Systems & Internet of Things,2023,9(2): 231-238.

[9] Zhao X,Zhao Y,Hu S,et al. Progress in active infrared imaging for defect detection in the renewable and electronic industries[J]. Sensors,2023,23(21): 8780.

[10] Deng L,Yu D. Deep learning: methods and applications[J]. Foundations and Trends in Signal Processing,2014,7(3-4): 197-387.

[11] Zhao Z Q,Zheng P,Xu S,et al. Object detection with deep learning: a review[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2019,30(11): 3212-3232.

[12] 汤子旋,张伟,李俊麟,等. FSG-YOLO: 基于YOLO v8改进的轻量化月面障碍物检测算法[J]. 载人航天,2024,30(5): 666-675.
Tang Z X,Zhang W,Li J L,et al. FSG-YOLO: A lightweight lunar surface obstacle detection algorithm improved based on YOLO v8[J]. Manned Spaceflight,2024,30(5): 666-675 (in Chinese).

[13] Arena F,Collotta M,Pau G,et al. An overview of augmented reality[J]. Computers,2022,11(2): 28.

[14] Bottani E,Vignali G. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade[J]. IISE Transactions,2019,51(3): 284-310.

[15] Liu H,Lu G,Li M,et al. High-precision real-time autonomous driving target detection based on YOLO v8[J]. Journal of Real-Time Image Processing,2024,21(5): 174.

[16] 吴一全,赵朗月,苑玉彬,等. 基于机器视觉的PCB缺陷检测算法研究现状及展望[J]. 仪器仪表学报,2022,43(8): 1-17.
Wu Y Q,Zhao L Y,Yuan Y B,et al. Research status and prospects of PCB defect detection algorithms based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2022,43(8): 1-17 (in Chinese).

[17] Bhattacharya A,Cloutier S G. End-to-end deep learning framework for printed circuit board manufacturing defect classification[J]. Scientific Reports,2022,12(1): 12559.

[18] 徐凯健. 在轨电子设备故障诊断与维修方法研究[D]. 北京: 北京化工大学机电工程学院, 2025.
Xu K J. Research on Fault Diagnosis and Maintenance Methods for On-Orbit Electronic Equipment[D]. Beijing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2025 (in Chinese).


(责任编辑:孙京霞)