

多层隔热组件智能投影辅助裁剪 系统研制与应用

汪亮, 代森, 王国君, 孟晓亮, 张晓俊, 王啸晨

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 针对传统纯手工制作多层隔热组件难以满足小卫星批产研制对其制作效率和一致性要求高的问题, 建立一种基于视觉传感技术的多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统; 系统主要包括投影仪、相机和控制软件, 可通过深度相机、投影仪和系统标定, 实现投影仪图像坐标系与工作坐标系定位对齐, 确保多层工艺图纸 1:1 定位投影; 可用于指导多层隔热组裁剪、尼龙搭扣和聚酰亚胺销钉的安装工作; 经试验及应用验证, 系统投影比例和定位误差满足设计要求, 能够显著提高多层制作效率和一致性, 并可建立通用产品多层工艺信息库, 实现工艺知识积累和快速调用。

关键词: 批产; 多层隔热组件; 裁剪; 增强现实; 投影

Development and Application of Intelligent Projection Assisted Tailoring System for Multi-layer Insulation Blankets

WANG Liang, DAI Seng, WANG Guojun, MENG Xiaoliang, ZHANG Xiaojun, WANG Xiaochen

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: It is difficult for a traditional handmade multi-layer insulation blanket to meet the high production efficiency and consistency requirements for the batch production of small satellites, to address this issue, an intelligent projection assisted tailoring system for multi-layer insulation blankets based on vision sensing technology is presented. The system mainly consists of a projector, a camera, and control software. Through the depth calibration of the camera, projector and system, the alignment between the project image coordinate system and the workpiece coordinate system is achieved to ensure a 1:1 positioning projection of the multi-layer process drawing. The system can be used to guide the cutting of the multi-layer insulation blankets, the velcro and installation of polyimide pin. Experiment and application show that the projection ratio and positioning error of the system meet the design requirements, and can significantly improve the efficiency and consistency of multi-layer insulation blankets, and establish a general product multi-layer process information database to realize the accumulation of process knowledge and rapid call.

Keywords: batch production; multi-layer insulation blankets; tailoring; augmented reality; projection

0 引言

随着小卫星组批研制模式的变革, 小卫星总装周期越来越短, 总装质量一致性要求越来越高。小卫星总装过程仍是手工作业占主导式生产^[1], 由于不同技能人员技术水平、操作习惯以及对工艺文件理解不同等因素, 电缆绑扎固定、多层隔热组件制作安装等总装实施结果保持一致性较差, 传统总装方式逐渐难以满足小卫星组批生成模式。多层隔热组件在真空环境下具有良好的隔热和保温性能^[2], 可将卫星内部热环境与空间中剧烈变化的外部热隔离^[3], 确保星内仪器设备温度在允许范围内。多层隔热组件具有隔热效果好、重量轻和低污染等优点^[4], 是卫星在轨工作基本的被控控温方式, 因此在卫星总装过程中大量

应用。

多层隔热组件主要包括: 面膜、间隔层、反射屏以及缝合材料等。小卫星多层隔热组件可根据多层使用温度、面膜吸收率和发射率、轨道防原子氧要求以及杂光抑制等要求选择, 一般为单面镀铝聚酰亚胺膜、F46 镀银二次表面镜或者黑色含碳聚酰亚胺膜等; 间隔层一般为接触面积小、低热传导率^[5]的涤纶网; 反射屏一般为高反射率、低发射率的 6 μm 双面镀铝聚酰亚胺膜; 缝合材料可根据使用温度选择涤棉线、阻燃线或者不锈钢丝。多层隔热组件主要由多层反射屏和间隔层迭合而成, 其制作过程主要包括: 结构板粘贴尼龙搭扣、取样制作模板、坯料制作、坯料裁剪、缝尼龙搭扣、包面膜、安装接地装置、制作后检验等步骤,

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-06-04。

作者简介: 汪亮(1989-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 汪亮, 代森, 王国君, 等. 多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统研制与应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 265-270.

其工艺流程如图 1 所示。传统取样制作模板方式主要有两种方式：一是根据设计图纸尺寸，在牛皮纸上手工画出多层隔热组件的外形图、开口以及尼龙搭扣位置；二是使用透明塑料膜紧贴设备或结构板，在塑料膜上画出多层外形、开口以及尼龙搭扣位置。多层裁剪时，根据模板轮廓，对多层进行裁剪、开孔并缝制尼龙搭扣。面对小卫星组批总装特点，传统手工多层取样、制作模板难以满足制作效率高、一致性好的要求。

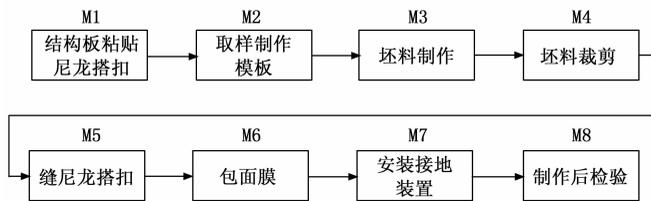


图 1 多层隔热组件制作工艺流程图

随着计算机视觉技术的飞速发展，增强现实（AR, augmented reality）技术在生产制造中为各个环节提供支持^[6]，特别是在燃气轮机、航空发动机、飞机以及航天器等复杂产品装配环节展现出巨大技术优势。苑鑫等^[7]使用虚拟现实引擎 Unity 3D 三维驱动引擎技术和 HoloLens 眼镜，实现复杂燃气轮机多人协同、人机交互装配指导。魏巍等^[8]开发一套智能辅助装配系统，实现电脑主板装配过程装配步骤自动识别、实时装配指导、装配视频查看、关键步骤自动保存图像等功能。武殿梁等^[9]通过研究 AR 和 AI（AI, artificial intelligence）相结合的装配辅助作业指导方法，实现航空发动机装配过程目标智能识别、装配引导、信息感知与记录以及操作过程正确性判断。霍志宇、张秋月、秦玉波等^[10-12]在飞行装配过程使用 AR 和混合现实技术（MR, mixed reality）以及空间增强现实技术（SAR, spatial augmented reality），提升现场重要信息感知能力，提高飞机装配效率和质量。陈华俊、王升安、赵甘霖等^[13-15]针对航天器电缆装配过程工艺可读性不强、三维模型指导不便等问题，研究使用 AR 技术指导电缆装配，显著提高电缆装配效率和质量。尹旭悦等^[16]利用机器视觉和增强现实技术，研制出一套包含航天产品装配作业指导、检验记录的训练系统，提高装配人员培训效率、缩短上岗时间。徐磊等^[17]研制一套卫星结构板智能投影辅助装配系统，通过系统标定实现相机坐标系和结构板坐标系一，实现埋件安装信息一次性投影，大幅提高装配效率和装配质量。

针对多层隔热组件手工取样、制作模板过程效率低、人与人制作差异大等问题，本文将增强现实技术应用于多层取样制作模板过程中，研究一种利用投影仪和深度相机相结合的空间增强现实技术，将多层图纸进行工艺性编辑，并将多层轮廓图 1: 1 投影至多层坯料和结构板或设备上，并显示多层制作关键工艺参数，用于指导多层坯料裁

剪和多层坯料、结构板或设备尼龙搭扣粘贴工作，直接省去取样和模板制作环节，提高多层制作效率、减轻操作人员劳动强度。

1 增强现实技术

增强现实是将计算机产生的图形、文字等虚拟信息有机地融合到使用者所看到的真实世界景象中^[18]，对人的视觉系统进行影像增强或扩张的技术，具有三维注册、虚实结合、实时交互等特点。增强现实技术随着计算机技术、移动终端设备、视觉算法的成熟，逐渐进入人们生活和工业生产中，例如 AR 导航^[19]、AR 试鞋^[20]以及 AR 辅助装配。按照实现形式不同，增强现实技术可分为透视式、视频式和投影式。透视式增强现实主要代表硬件为 HoloLens、Google Glass 眼镜，设备上摄像头能实时采集视频并计算出观察者位置和姿态，将虚拟图像与现实世界融合并显示在眼镜上，可释放操作者双手。视频式增强现实是固定位置摄像头实时采集视频并计算别观察物体位置和姿态，将虚实融合后景象现实在屏幕上。投影式增强现实是通过相机系统识别物体上标识点，实现三维重构，并将图纸、文字等虚拟信息投影到现实物体中。

在复杂机电产品装配装配过程中，通过增强现实技术产生增强装配（AA, augmented assembly）^[21]，是指利用增强现实技术实现高效率、高质量装配，主要通过真实装配环境中增加通俗易懂的虚拟装配信息，如模型、关键工艺信息、三维装配动画等，方便操作者在实际操作过程中快速便捷获取装配信息。在复杂产品装配中，增强装配技术主要应用于装配虚拟设计、装配工艺性设计、装配操作指导、装配操作训练与装配质量检验与记录等方面。在装配虚拟设计中，可提前在虚拟样机上进行装配工艺性仿真，提高设计准确性。在装配工艺性设计中，可应用增强现实技术，进行工艺性装配仿真，进行装配顺序设计。通过虚实结合，可将三维模型和关键参数信息直接显示在实际操作者视野中，提高复杂产品装配效率和质量。增强装配操作训练可利用虚拟手导师和装配信息的同步显示，高效指导学员完成装配训练。利用增强现实技术，可将实际装配结果和模型关键特征进行匹配实现差异检测，实现装配结果可视化表达^[22]，并可根据需要进行摄像和拍照记录。

2 系统实现

2.1 系统硬件组成

根据多层隔热组件制作过程中实际需求，开发出一套基于视觉传感的多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统，该系统硬件主要包括：光学投影仪、深度相机、投影仪和相机控制器、控制计算机等组成，系统结构图如图 2 所示。投影仪、深度相机、投影仪和相机控制器通过连接支架安装成为一体，并通过安装支架安装固定在墙壁上，工作台固定在投影仪下方。深度相机与光学投影仪的光学特性和

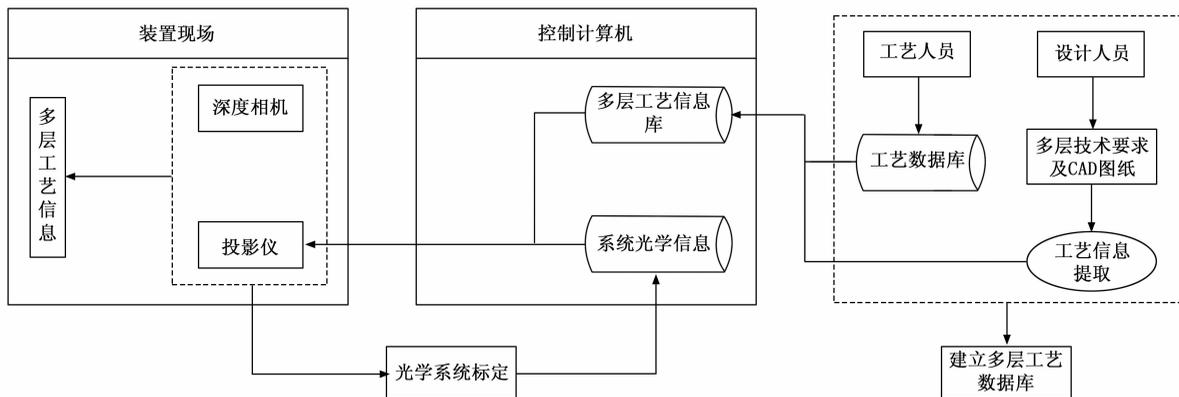


图 2 多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统结构图

空间位姿关系可在设备安装后标定,对于固定位置的工作台,仅需一次标定即可。光学投影仪可将多层轮廓信息和工艺信息投影至多层坯料上,操作人员可根据投影信息进行多层裁剪。

根据实际应用场景和要求,基于视觉传感的多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统的主要性能参数见表 1 所示。根据应用技术参数要求,选择的主要设备参数见表 2 所示。

表 1 系统主要性能参数

指标	参数
投影距离(m)	>5
投影范围(mm)	≥1 800×2 000
投影比例精度(mm)	<±2/1 000
投影定位精度(mm)	<±2/1 000
投影引导信息类型	几何图形、尺寸、文字等
通讯方式	TCP/IP

表 2 系统主要硬件设备性能参数

设备名称	指标	参数
投影仪	型号	NEC PA653U
	分辨率	1 920×1 200 像素
	亮度	6 500 流明
	对比度	8 000 :1
	投影面积	60~500 英寸
投影仪镜头	灯泡寿命	4 000 小时/5 000 小时 (标准模式/节能模式)
	型号	NP41ZL
	投影距离	1~12m
	投射比	1.30:1~3.02:1
深度相机	型号	Basler(acA2500-14 gm)
	像素尺寸	2.2 μm×2.2 μm
	分辨率	5 MP
	帧速率	14 fps
	分辨率	2 592×1 944 像素
深度相机镜头	型号	富士能 DV3.4×3.8SA-1
	焦距范围	3.8~13 mm
	像素	3 Mega

2.2 系统硬件组成

系统软件主要包括:工艺编辑软件、坐标系对齐软件、投影软件、系统管理软件以及控制器配置软件 5 部分组成。工艺人员利用工艺编辑软件可实现设计图纸导入与二次编辑,增加工艺信息并生成投影方案,其操作界面如图 3 所示,主要功能如下:

- 1) 具备二维 CAD 图纸导入功能,支持 *.dwg, *.dxf 等二位图纸格式;
- 2) 创建和编辑文字,符号,编辑颜色等;
- 3) 设置投影轮廓线的颜色,线宽;
- 4) 创建一个或多个装配工艺流程的投影任务;
- 5) 具备对已编写的工艺任务进行投影完整性检查;
- 6) 支持图纸的重命名以及存储,实现快速投影。

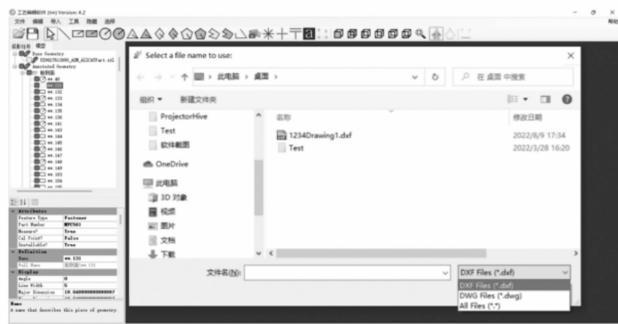


图 3 工艺编辑软件操作界面图

坐标系对齐软件主要是通过深度相机获取实物标识点空间位置并与模型标识点进行校正,从而实现投影仪坐标系与实物坐标系对齐,其操作界面如图 4 所示,主要操作步骤如下:

- 1) 设置投影仪的曝光度,并进行实物标识点特征采集;
- 2) 选取相应对齐点进行系统校准(或对齐);
- 3) 投影仪和投影物体相对固定时,系统只需校准一次,在投影其他图纸则无需校准,开机或重启后直接投影。



图 4 坐标系对齐软件操作界面图

投影软件主要是将工艺编辑软件生产投影任务传递投影仪，使其投影 1:1 图纸，其主要功能如下：

- 1) 可实现对工艺编辑软件创建的装配工艺流程投影任务 1:1 投影；
- 2) 具有工作任务进度状态显示功能，在任务栏中可通过观察任务的背景颜色了解工作任务处于“已完成”、“进行中”或“未开始”的进度状态；
- 3) 支持条码扫描器功能，使用条码扫描器扫描二维码，即可实现快速投影对应内容。

系统管理软件可实现光学投影仪和深度相机参数配置，其主要功能如下：

- 1) 可设置投影系统中光学投影仪视场范围，可手动或远程调节投影仪的视场范围；
- 2) 可按需通过系统设置光学投影镜头的焦点，以获取清晰的投影效果；
- 3) 可按需远程控制调整相机的焦距和焦点，通过变焦及焦点的调节，使相机能够迅速精确地捕捉图像。

2.3 系统功能

根据多层隔热组件实际取样要求，多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统主要作用是在多层制作过程中，将图纸尺寸信息和工艺信息直接 1:1 投影至多层坯料上，以指导操作人员进行多层裁剪和尼龙搭扣粘贴工作，系统主要功能可分为：

- 1) 系统快速标定功能：可根据获取标定板上特征点空间位置并与图形理论值进行三维匹配，实现投影坐标系和产品坐标系对齐。
- 2) 系统管理功能：可自由设置投影系统中投影仪视场范围，可手动或远程控制自动调节投影仪的视场范围；可通过系统设置投影镜头焦点，以获取清晰的投影效果；可远程控制调整相机变焦，使相机能够迅速精确地捕捉图像。
- 3) 工艺二次编辑功能：系统可导入设计 CAD 二维图纸，工作人员可根据多层制作工艺要求，对多层设计图纸进行二次工艺编辑，使其直接应用于操作现场，如：设置多层翻边宽度、调整开孔大小、设置多层搭接宽度、设计

尼龙搭扣或销钉粘贴位置、添加多层单元数和面膜类型等。

4) 定位投影功能：根据系统标定结果，可实现将工艺编辑软件中图纸信息 1:1 定位投影至工作台上，并支持条码扫描器扫码，实现投影任务快速选择并投影。

2.4 系统标定

基于视觉传感的多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统的标定对于投影精度和定位精度至关重要，直接影响多层隔热组件裁剪的正确性。系统标定主要包括：相机标定、投影仪标定和系统标定。相机标定主要获取世界坐标系与像素坐标系之间的映射关系^[23]，其理论数学描述如下：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{内参}} \underbrace{\begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}}_{\text{外参}} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： (x_w, y_w, z_w) 为世界坐标系中一点， (u, v) 为点在像素坐标系的坐标， z_c 为比例因子， f 为相机焦距， dx 和 dy 分别表示像素在横轴和纵轴上的物理尺寸， R 、 T 为相机主点坐标，内参参与相机几何和光学特性有关、为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。

考虑到相机镜头制造误差，相机成像时会发生畸变^[24]，畸变可根据泰勒级数开展式进行校正：

$$\begin{cases} x_c = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 y + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_c = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_2 x + p_1(r^2 + 2y^2)] \end{cases} \quad (2)$$

其中： (x, y) 为畸变状态下图像坐标， (x_c, y_c) 为校正后图像坐标， k_1, k_2, k_3 为径向畸变参数， p_1, p_2 为切向畸变参数， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

相机标定可采用棋盘格标定板进行相机内参、外参以及畸变参数标定。

投影仪光路与相机光路相反，二者光学结构类似，投影仪标定采用结构光技术。投影仪发射结构光，由相机捕获并解码，通过获取不同频率光栅图像，获得投影仪标定参数，系统标定示意图如图 5 所示。

系统标定主要是将建立投影仪坐标系、相机坐标系在空间中心相互位置关系^[25]，并确定投影仪与工作台之间相互关系，保证投影比例和投影定位精度。通过在标定板上设置特征标示，并在对应理论图纸上设置特征点并通过投影仪投射至标定板上，相机获取标定板上特征点位置并与投影仪投影理论特征点位置进行特征匹配，从而完成系统标定实现投影仪图像坐标系与工件坐标系定位对齐。

按照系统标定流程，标定板上靶标点按照系统最大工作范围 1 800×2 000mm 进行设计，如图 6 所示，并设计出靶标点理论位置图纸。系统按照理论图纸进行投影，通过靶标点识别与特征匹配，实现系统定位对齐。

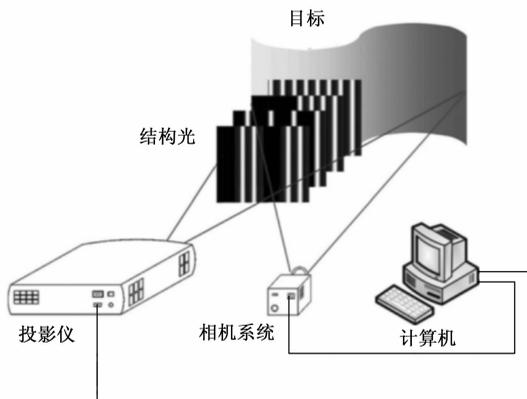


图 5 系统标定示意图

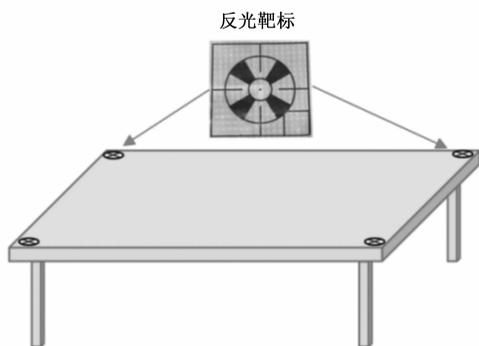


图 6 标定板靶标点设置示意图

3 系统试验结果及分析

在综合考虑实际应用场景及操作场地限制, 将多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统硬件设备安装至工作间墙壁上, 工作台设置在系统斜下方固定位置, 设备安装示意图及实物图如图 7 所示。由于投影仪与深度相机、工作台位置固定, 因此系统标定一次即可, 后续投影操作将会按照该投影方案进行定位 1:1 投影, 无需重复标定。

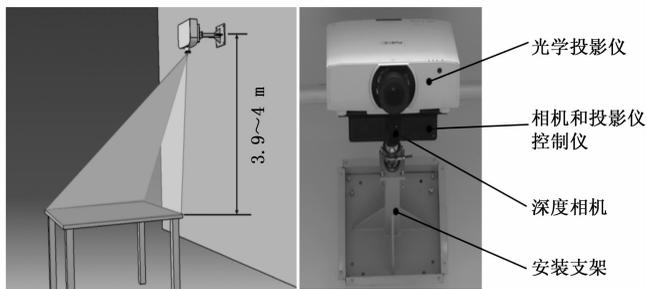


图 7 系统安装示意图及实物图

系统安装调试完成后, 进行系统调试与测试工作, 经验证, 系统快速标定、系统管理、工艺二次编辑、定位投影等功能均能满足设计要求。为验证系统投影精度, 进行投影比例及定位误差测试。采用 2 000 mm×1 800 mm

矩形图形进行测试, 通过多次测量投影矩形长边和短边长度, 计算得出平均比例误差; 通过多次测量投影矩形 4 个顶点与标定板上靶标点之间的位置差, 获得系统投影定位平均误差, 具体试验结果见表 3。

表 3 系统投影比例及定位误差

	理论长度	实测长度	误差	
投影精度	2 000 mm	1 998.5 mm	1.5 mm	
	1 800 mm	1 798.8 mm	1.2 mm	
定位精度	1 点	2 点	3 点	4 点
	0.6 mm	0.7 mm	0.5 mm	0.9 mm

试验结果表明, 多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统投影范围满足设计要求, 投影比例精度及定位精度满足设计要求 ($\leq \pm 2 \text{ mm}/1\,000 \text{ mm}$), 系统可投入实际生产应用中。

4 系统应用

4.1 多层隔热组件裁剪

多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统可将多层设计 CAD 图纸导入工艺编辑软件进行工艺性编辑或直接使用 Auto CAD 软件直接编辑后导入, 增加结构板多层包边宽度, 根据开孔位置及开孔作用 (精测孔、尼龙底座安装孔、隔热垫开孔、电缆支架安装孔等), 进行多层开孔形状尺寸工艺编辑, 改变开孔形状、尺寸或类型 (冲孔或划十字等), 并将可将编辑后图纸存储, 便于后续投影软件快速调用, 其投影实际效果如图 8 所示。操作人员可根据多层投影尺寸及工艺信息, 直接在多层坯料上直接裁剪。

对于组批生产卫星, 由于其技术状态固定, 多层技术状态也一直, 多层制作可进行批量化生产。可将相关图纸编辑保存, 批量化制作时可直接选用相关图纸, 直接进行投影指导操作人员裁剪, 便于控制组批总装过程多层制作的一致性。

4.2 尼龙搭扣及聚酰亚胺销钉安装

传统尼龙搭扣或聚酰亚胺销钉的安装位置取样方式为: 首先在结构板上粘贴尼龙搭扣或销钉, 在使用多层模板与结构板实物比对, 画出尼龙搭扣或销钉位置, 最后在多层上根据模板上标记进行粘贴。多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统中, 可在多层图纸上, 按照工艺规范要求画出尼龙搭扣或销钉安装位置, 在多层制作时, 按照尼龙搭扣或销钉投影位置直接进行尼龙搭扣缝制或开孔; 并将结构板放置在工作台, 按照相同位置进行尼龙搭扣或销钉粘贴, 确保粘贴位置的一致性。特别是对于销钉安装方式, 由于其定位精度要求高, 可提高销钉安装、多层开孔的准确性, 减少多层修改返工时间。

4.3 通用产品多层工艺信息库

随着小卫星组批生产模式变革, 越来越多卫星平台 (控制分系统、供电分系统、测控分系统) 产品直接选用

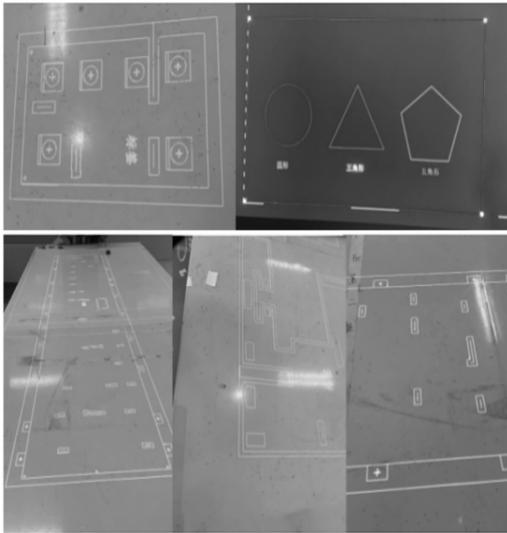


图 8 系统应用效果图

货架定型设备,其产品热控多层包覆要求基本一致。因此,对于通用货架设备,可在多层制作过程进行知识积累,根据设备类型及型号建立通用设备多层工艺信息库,并在后续多层制作时,根据设备类型和型号,直接调用图纸,进行多层裁剪制作。

对组批生产卫星,可建立型号多层信息库,对星上所有设备及结构板多层进行分类存储,并按照多层图纸信息进行批量生产,实现辅线工作产品化,既提高型号总装效率,也可批产型号质量一致性。

5 结束语

随着小卫星星座数百颗甚至上万颗需求,多层隔热组件制作工作量激增,传统手工多层隔热组件制作模式越来越难以满足组批总装需求。增强现实辅助装配技术近年来越来越多应用于卫星总装过程,本文研究一种基于投影仪-深度相机系统的多层隔热组件智能投影辅助裁剪系统,该系统可直接对多层设计 CAD 图纸进行二次工艺性编辑并将信息传递至投影控制软件进行多层任务投影,直接指导现场操作人员进行多层裁剪和尼龙搭扣安装,直接省去取样制作模板环节,优化多层制作流程,提高多层组批制作的效率和一致性,并通过建立通用设备多层图库,进行工艺知识积累,实现工艺图纸快速复用。

参考文献:

- [1] 陈畅宇,贺文兴,易旺民,等. 航天器总装技术状态的数字化管理方法 [J]. 航空学报, 2018, 39 (z1): 139-147.
- [2] 潘尚洁,王哲,傅浩,等. 卫星多层隔热组件批生产管理系統设计与实现 [J]. 航天工业管理, 2017, 7: 12-16.
- [3] 戎建臣,杨佳鑫,刘洋,等. 器上多层隔热组件标识块安装工艺方法研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2020, 9: 155-156.
- [4] 雷营生,徐红艳,董德平,等. 固定工艺对多层隔热组件隔热

- 性能的影响 [J]. 低温工程, 2018, 4: 57-62.
- [5] 孙慧,徐抒岩,孙守红,等. 多层隔热组件的制作工艺 [J]. 宇航材料工艺, 2011, 3: 81-83.
- [6] 魏祺,郭宇,汤鹏洲,等. 增强现实在复杂产品装配领域的关键技术研究与应用综述 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (3): 649-662.
- [7] 苑鑫,王海坤,赵旷世,等. 基于增强现实技术的燃气轮机装配指导系统研究与实现 [J]. 热能动力工程, 2022, 37: 48-53.
- [8] 魏巍,冯蓬勃,陈峥廷. 基于增强现实的智能辅助装配系统设计研究 [J]. 工业设计, 2023, 1: 152-154.
- [9] 武殿梁,周烁,许汉中. 增强现实智能装配辅助技术研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (13): 26-32.
- [10] 霍志宇. 高精度增强现实辅助装配空间定位技术研究与应用 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (18): 105-110.
- [11] 张秋月,安鲁陵. 虚拟现实和增强现实技术在飞机装配中的应用 [J]. 航空制造技术, 2017, 11 (18): 40-45.
- [12] 秦玉波,穆欣伟,邹方. 基于空间增强现实的辅助装配系统研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (12): 56-62.
- [13] 陈华俊,陈畅宇,孙刚,等. 增强现实在航天器电缆装配中的应用技术研究 [J]. 科技与创新, 2019, 8: 40-44.
- [14] 王升安,杨海龙,王凤彬,等. AR 技术在卫星线缆设计和装配中的应用综述 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 1-3.
- [15] 赵甘霖,余畅,张建富,等. 基于 AR 虚实图像注意力机制的电缆装配质量检测方法 [J]. 物联网学报, 2021, 5 (3): 27-38.
- [16] 尹旭悦,范秀敏,王磊,等. 航天产品装配作业增强现实引导训练系统及应用 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (1): 48-53.
- [17] 徐磊,刘金山,孙宏宇,等. 卫星结构板智能投影辅助装配系统研制与应用 [J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48 (5): 116-124.
- [18] 刘然,范秀敏,尹旭悦,等. AR 辅助装配中基体及零件位姿组合估计方法 [J]. 机械设计与研究, 2018, 34 (6): 119-125.
- [19] 蒋佳苹,周莹,耿霏. AR 导航在室内场景应用方案探讨 [J]. 邮电设计技术, 2022 (10): 76-82.
- [20] 夏杰,尤志翔,李凯,等. 基于 AR 技术的实时互动体验电商系统 [J]. 电视技术, 2018, 42 (2): 76-82.
- [21] 魏巍,冯蓬勃,陈峥廷,等. 增强现实辅助装配技术综述 [J]. 包装工程, 2021, 42 (14): 108-118.
- [22] 崔海华,王嘉瑞,赵喜东,等. 基于视觉传感的投影标示技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (7): 22-32.
- [23] 邓继周. 基于增强现实的信息投影辅助装配平台关键技术研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [24] 王浩猛,坎标,芮明,等. 先基于双目视觉的板材平面测量研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (9): 42-47.
- [25] 陈祥辉. 大部件人工装配作业现场信息投影技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.