

航空发动机装配外观缺陷检测技术应用与发展

Application and Development of Appearance Defect Detection Technology in Aero Engine Assembly

■ 孙军华 秦浩 / 北京航空航天大学 韩冰 / 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 张洁 / 北京科技大学

航空发动机整机装配完成后，必须按照标准进行一系列严格的检测，以确保航空发动机高质量交付。装配外观缺陷检测是产品交付的最后一道防线，对保证航空发动机质量意义重大。

航空发动机结构复杂、零部件数量众多且型号多样，装配工作主要依靠人工使用专用工具完成，整机的装配时长通常占据生产时长的50%以上。在装配过程中，由于人眼视觉疲劳、装配工具作业范围有限等因素，人工装配易出现零部件的错装和漏装等情况，而任一关键零部件的装配缺陷均有可能造成严重的安全事故。目前，国内外针对航空发动机装配外观缺陷主要采用的人工检测方式效率低下，要求检测人员具备较高的技术水平和检测经验，且无法保存现场图像或三维点云信息，不利于追溯质量问题。随着计算机视觉和深度学习技术的不断发展，基于视觉检测技术的航空发动机装配外观缺陷检测方法逐渐得到应用。国外航空发动机企业已将视觉检测技术用于航空发动机装配外观缺陷检测，但对我国实施了严密技术封锁。国内一些研究机构正在开展的航空发动机装配缺陷视觉检测技术的研究主要有3条技术路线：基于二维图像识别的装配外观缺陷检测技术，基于三维点云分析的装配外观缺陷检测技术，以及基于图像和点云数据低层次叠加的装配外观缺陷检测技术。

基于二维图像识别的装配外观缺陷检测技术

基于二维图像识别的装配外观缺陷检测技术主要以相机拍摄的图像为数据源进行装配外观缺陷检测。

由美国GE公司和法国赛峰集团合资成立的CFM国际公司使用协作式机器人(Omer)对LEAP发动机基于图像进行最终放行前的检测。通过标准数字模型和200次拍照，对460个检测点进行确认，Omer一天可以检测6台发动机。

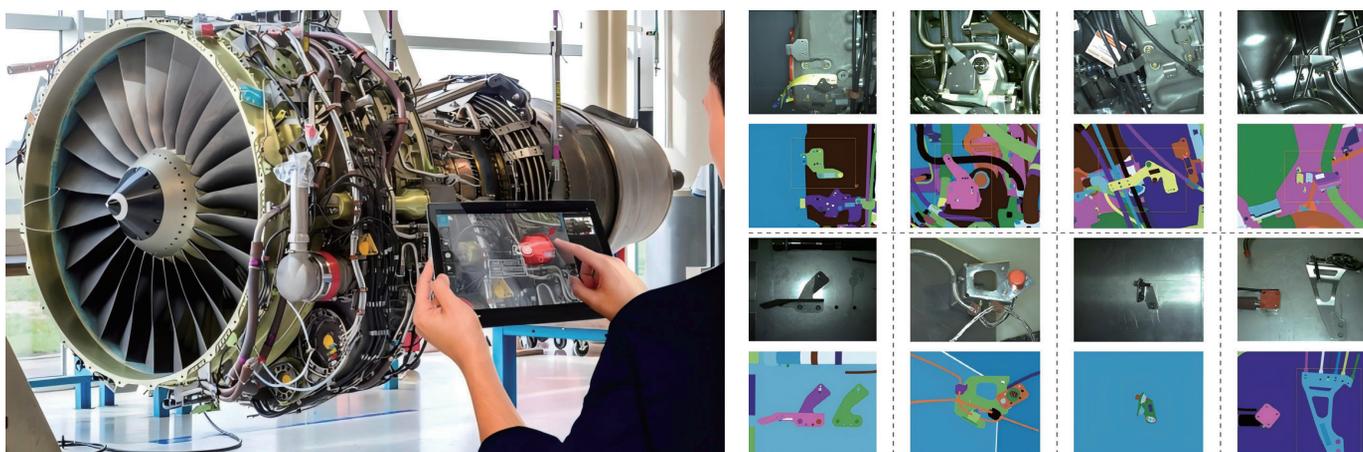
法国克莱门特阿德研究所研制了自动化装配外观缺陷检测系统，其工作流程分为两步：首先，在检查过程开始前自动选择信息视点(离线准备检查)；然后，采用上述视点获得的图像与计算机辅助设计(CAD)模型中的信息进行匹配来进行自动处理，以此来检测航空发动机机械组件上的缺陷，目的是检查所有的零件是否漏装和错装^[1]。该系统使用手持平板电脑进行操作，如图1所示。然而，这种通过图像与CAD模型进行配准的方式十分依赖于图像的精度以及CAD模型的完整程度，如果视角出现遮挡导致被测零部件图像残缺，易出现无法匹配的问题，从而降低准确率。另外，

由于丢失三维深度信息，针对整体结构相似的细粒零部件会造成分类混淆的问题。

目前，国内的研究机构和高校在航空发动机基于二维图像识别的装配外观缺陷检测方面也做出了很多尝试。采用单目相机、多目相机或者相机阵列，拍摄发动机局部二维图像，进行缺陷分析。中国航发南方工业有限公司与湖南琴海数码股份有限公司合作，通过机器人搭载单目相机，在不同测点拍摄局部二维图像，将待测图像与标准样机图像(或CAD模型)进行配准、做差比对，从而找出缺陷区域^[2]。

以上方式针对简单的零部件检测速度较快。然而，随着缺陷检测要求的不断提高，不同的零部件缺陷问题具有差异性，传统的方法已然受限。笔者团队基于深度学习技术，设计了航空发动机零件(堵头、堵盖、保险丝、锁片、螺栓、开口销等)错装、漏装检测算法，保险丝绕向判别算法，以及锁片装配形态检测算法等。

然而，这类检测方法的缺点在于图像数据缺乏三维信息，无法完成三维重构，进而无法完成卡箍细粒型号判别、管路间隙测量等任务。



(a) 基于平板电脑的检测示意

(b) 真实零件图像(第一、第三行)和相应的CAD模型渲染(第二、第四行)

图1 图像与CAD模型结合的检测方式

基于三维点云分析的装配外观缺陷检测技术

三维光学扫描设备获取的点云拥有更丰富的几何、形状和尺度信息,可以反映被测物体的整体结构,受到工业装配缺陷检测领域的广泛关注。

德国蔡司集团是全球顶尖的三维光学扫描设备制造商,其测量软件具有通用点云分析功能,但针对发动机缺陷检测任务,仅具备外廓测量功能。笔者团队基于蔡司集团的ATOS ScanBox8160系统采集的发动机整机点云,进行部分零件装配外观缺陷检测、管路间隙测量系统开发。先后攻关杂乱背景点云中局部差异的小规模零部件分割问题,密集近距离零部件分割问题,自由弯曲管路间隙测量问题,以及复杂场景下小尺寸零件点云密度不均匀问题^[3-5],具有卡箍漏装及细粒度分类、管路间隙测量、外廓测量等缺陷检测能力。但是由于所使用视觉测量系统没有权限查看发动机具体二维图像细节,所以无法检测锁片、保险丝等的缺陷。另外,高精度的点云带来的海量数据量使得缺陷检测识别

处理速度较慢,影响发动机装配外观缺陷检测效率。图2表示两组真实点云场景中卡箍细粒度型号判别的可视化结果。其中,图2(a)为输入点云;图2(b)为卡箍点云分割结果,红色表示卡箍点云,灰色表示机体点云;图2(c)为卡箍实例检测结果,不同

颜色点云表示不同的卡箍实例,红色框表示噪声实例;图2(d)为5种不同型号卡箍细粒度型号判别结果;图2(e)为真值中细粒度型号判别结果。

南京航空航天大学汪俊等提出了一种基于原始点云的航空发动机管路间隙检测方法。首先,利用迭

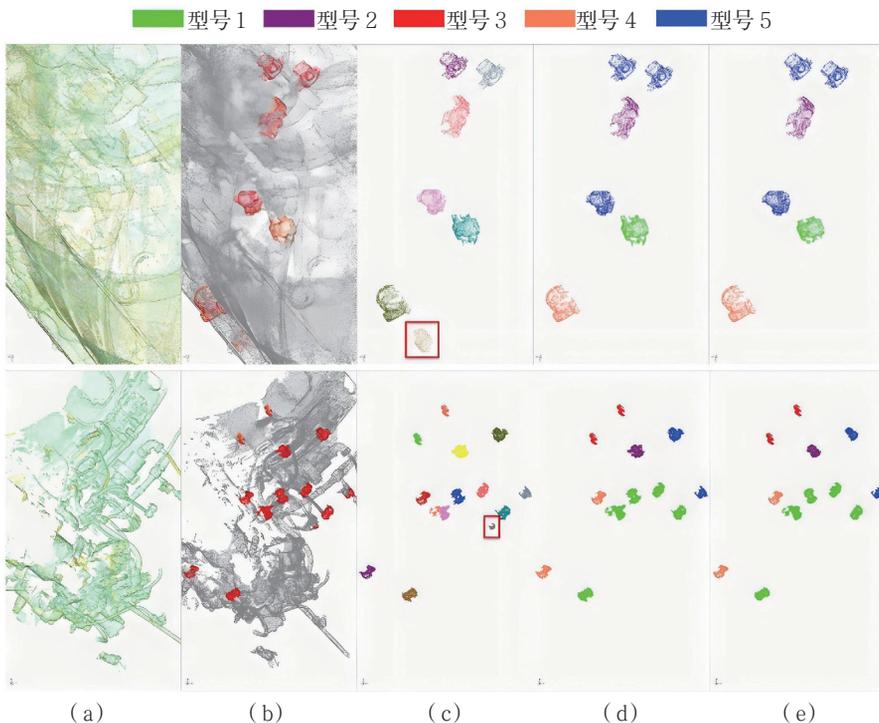


图2 两组真实点云场景中卡箍细粒度型号判别的可视化结果

代随机点来获取管路中心点集;然后,基于密度敏感的曲线拟合算法提取管路的中心曲线;最后,基于中心曲线距离建立管路间隙模型^[6]。

然而,基于点云模态的方法也存在以下挑战。首先,点云数据的质量受到三维扫描设备分辨率、拍摄视角、物体间的相互遮挡、表面强反光以及噪声等因素的影响,原始点云数据往往是残缺、稀疏的;其次,航空发动机尺寸较大,而待检零件尺寸较小,三维扫描面临高分辨率与高效率的平衡、大尺寸拼接等问题;最后,由于点云的无序性和稀疏性特点,使得点云的深度学习网络面临许多困难。

基于图像和点云数据低层次叠加的装配外观缺陷检测技术

在大范围复杂场景的三维目标检测

与缺陷识别任务中,单模态数据往往无法完成全部零件的缺陷检测任务,这促使研究者将图像与点云数据低层次叠加完成航空发动机装配外观缺陷检测。

法国博瑞尔3D公司开发出一款发动机检测系统对发动机复杂装配过程进行检测^[7]。工业机器人搭载智能控制头,智能控制头包含4个相机、工业照明和用于3D分析的投影仪。基于二维图像检查螺栓、垫圈、螺母的错装、漏装,保险丝锁紧方向和保险丝是否松动等;基于三维点云分析元素间距如电缆间距或管路间距等。法国克莱门特阿德研究所打造了一种点云、图像与CAD结合的视觉装配外观缺陷检测仪器来进行发动机表面管道和电缆间隙的检测^[8]。基于视觉的传感器系统主要由2个RGB相机和1个3D扫描仪组成,该系统中的1个RGB相机用于定位,

3D扫描仪用于扫描点云数据,可将发动机CAD三维模型与对应点云数据进行全局配准,然后将配准结果投射到对应二维图像上,给出缺陷检测结果,该视觉装配外观缺陷检测仪器及分析结果如图3所示。然而,不同模态的数据匹配往往会消耗大量时间,效率较低。

同时,国内一些研究机构 and 高校开展了基于图像和点云双模态低层次叠加的增量式航空发动机外观缺陷检测技术,针对不同零件,采取不同的检测路线,可以完成全部装配零件检测。笔者团队研制的设备基于二维图像和三维点云双模态的低层次叠加,完成了小零件检测和管路间隙测量任务。

图像模态数据结构规则和纹理信息丰富,在航空发动机细小零件的缺陷检测中起到了重要作用,但其缺乏深度信息使得检测维度有限。

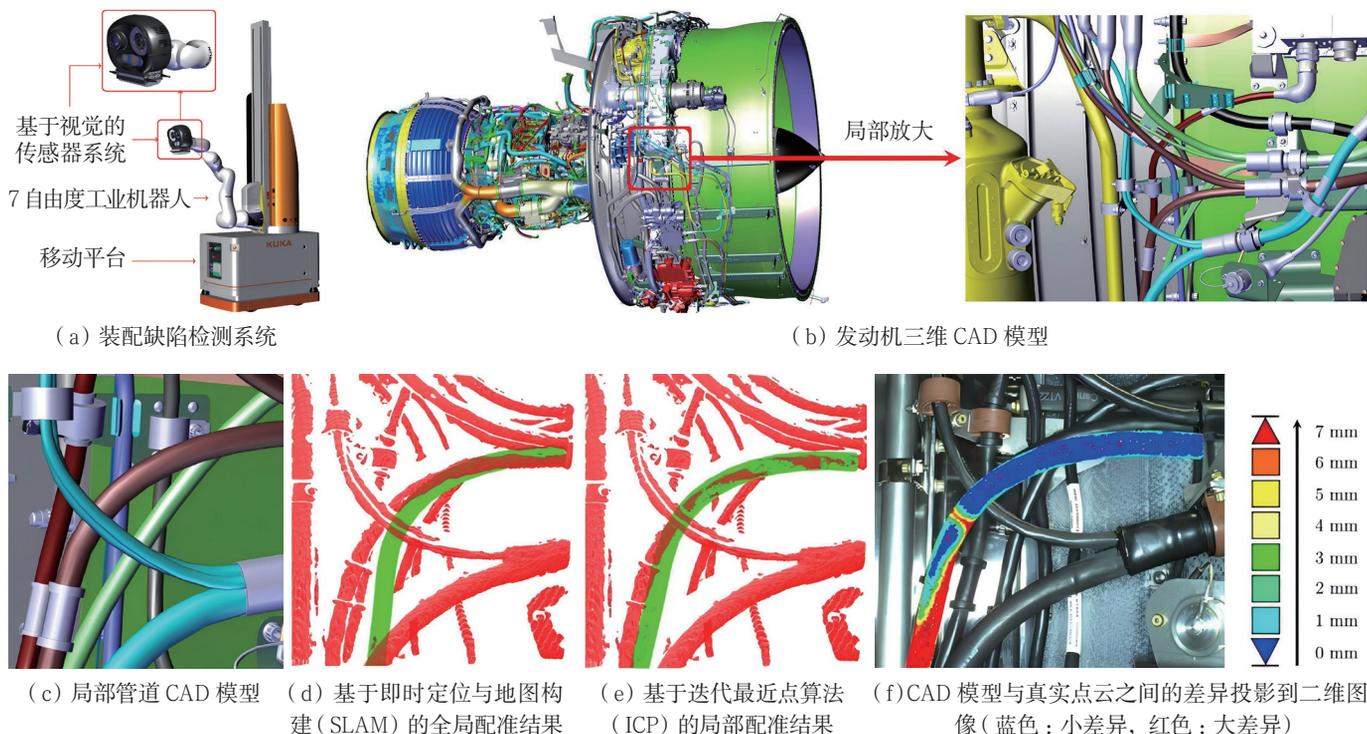


图3 克莱门特阿德研究所研制的视觉装配外观缺陷检测系统及分析结果

点云模态直接反应空间点相对位置,对于管路间隙、卡箍细粒型号判别的检测具有优势,但数据具有非结构性、无序性、局部残缺性的特点,无法完成锁片、保险丝等细小零件的检测。由于两种技术路线各有优缺点,基于图像和点云数据低层次叠加的装配外观缺陷检测技术所能胜任的外观缺陷检测类型和检测精度均受限。

未来展望

近年来,航空发动机装配外观缺陷检测仪器经历了较大的发展,采用了一系列先进的仪器和方法,以提高检测的准确性、快速性和可靠性。未来,航空发动机装配外观缺陷检测将朝着以下4个方向发展。

第一,航空发动机装配外观缺陷检测方式将从接触式测量向着非接触式测量发展。非接触式测量摆脱人工接触式检测效率低的问题,同时利用高精度、高分辨率的传感器使得检测结果更加准确。

第二,航空发动机装配外观缺陷检测手段将从单模态/双模态低层次叠加向着双模态高层次融合的方向发展。将图像模态与点云模态进行双模态高层次融合能够取长补短,实现双模态特征表示的互补和增强。

第三,航空发动机装配外观缺陷检测内容将从单目标向着多目标发展。未来以深度学习算法为支撑,通过对大量检测零部件数据的学习和建立模型,自动识别全部零部件缺陷,并进行分类和分析,最终给出检测报告,已成为新的研究热点。通过不断学习和优化,系统能够更好地适应不同发动机型号和工作环

境,提高了系统的适用性和通用性。

第四,航空发动机装配外观缺陷检测形式将从多环节向着一体化发展。以脉动线搭配航空发动机装配外观缺陷检测系统,可以减少中间人工环节,实现一体化流水作业,加快检测效率。对发动机进行全面装配外观缺陷检测,确保每个装配环节都得到有效监控,实现自动化全流程装配检测,打造发动机生产智慧工厂。

结束语

航空发动机装配外观缺陷检测系统的研制,是航空发动机制造技术发展的必然趋势,也是缩短国内外技术差距、建立完善的航空发动机产业体系的重要举措。通过研制先进的装配外观缺陷检测系统,可以有效提升我国航空发动机的制造水平,确保产品质量的稳定性和可靠性。航空发动机双模态高层次融合装配外观缺陷检测技术的应用,对提高我国航空航天生产力具有重要意义。这项技术的推广,不仅能够显著提升脉动生产线作业的效率,还能够高端装备制造领域发挥重要作用。

航空动力

(孙军华,北京航空航天大学,教授,主要从事视觉测量、图像处理与分析、三维点云分析技术研究)

参考文献

[1] BEN A H, JOVANCEVIC I, ORTEU J J, et al. Automatic inspection of aeronautical mechanical assemblies by matching the 3D CAD model and real 2D images[J]. Journal of Imaging, 2019, 5(10): 81.

[2] 王超,肖拾花,满月娥,等. 机器视

觉在航空发动机外观缺陷检测中的应用[J]. 航空计算技术, 2021, 51(3): 82-85.

[3] ZHANG J, SUN Z M, SUN J H. 3-DFineRec: Fine-grained recognition for small-scale objects in 3-D point cloud scenes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 1-11.

[4] ZHANG J, ZHOU Z T, SUN J H. Center-aware instance segmentation for close objects in industrial 3-D point cloud scenes[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2812-2821.

[5] ZHANG J, ZHOU Z T, SUN J H. 3D segmentation and global clearance analysis for free-bent pipelines in point cloud scenarios[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72):1-12.

[6] DING C, LIU Y P, Cao T, et al. Aero-engine pipe gap automatic detection based on 3D scanning point clouds[J]. Measurement, 2024(224): 113732.

[7] Conformity inspection of complex assemblies 100% automatic solution to certify quality[EB/OL]. <http://www.tpsh.fr/cat/products-industrial-solutions/?lang=en>.

[8] BEN A H, ORTEU J J, JOVANCEVIC I, et al. Three-dimensional point cloud analysis for automatic inspection of complex aeronautical mechanical assemblies[J]. Journal of Electronic Imaging, 2020, 29(4): 041012(1-22).