

机器视觉在航空发动机装配过程中的应用研究

Research on the Application of Machine Vision in Aero Engine Assembly Process

■ 王明军 / 中国人民解放军93170部队

杨军 李成山 何嘉辉 吕佳伟 / 中国航发动力股份有限公司

目前,我国航空发动机装配主要以人工作业为主,受人为因素影响,装配质量和装配效率一直无法得到有效提升。随着图像处理技术的成熟,机器视觉在工业生产领域得到广泛应用,研究机器视觉在航空发动机装配过程中的应用,或将成为一个新的突破口。

机器视觉是基于使用智能相机和图像捕获技术自动进行检查的一项综合技术,最终实现利用机器来代替人眼进行测量跟判断,从而实现智能化^[1]。机器视觉技术凭借其检测精度高、执行速度快、环境适应性强且能够与各类生产控制系统实现有效集成等优势,已经在制造业被广泛开展应用。然而,在我国航空发动机装配领域,传统的以人工为主的装配和检验模式仍占据主导地位,与自动化的工业生产模式相比,人工作业成本高、效率低、质量不稳定等劣势愈加明显。因此,探索机器视觉技术在航空发动机装配过程中的应用,对改善航空发动机装配作业环境,提升航空发动机装配效率和装配质量具有重要意义。本文以应用机器视觉技术的涡轮转子装配为例,介绍了基于机器视觉技术的航空发动机装配检测一体化作业模式。

机器视觉的工作原理

典型的工业机器视觉系统一般包括光源、光学成像系统、图像捕捉系统、图像采集与数字化转换模块、智能图像处理与决策模块,以及机械控

制执行机构等。

机器视觉系统工作过程中,在确定目标物体后,首先调整合适的光源以便目标物体易于识别,光学成像系统将被测目标转换为图像信号,然后通过模板转换器生成数字信号传送给专用的图像处理系统,并根据像素分布、亮度和颜色等信息,将其转换成数字化信息。图像系统对这些信息进行各种运算来抽取目标的特征,如面积、数量、位置和长度等,再根据预设的允许度和其他条件输出结果,包括尺寸、角度、个数、合格/不合格、有/无等,实现自动识别功能,或根据判别的结果来控制现场的设备动作。

基于机器视觉的装配生产线设计

涡轮转子装配生产线主要承担航空发动机高、低压涡轮转子部件的分解和装配工作,生产线设有4个装配工位,能够同时满足2台份发动机的分解或装配工作。鉴于发动机“两装两试”的验收标准和涡轮转子部件高精密性的装配要求,涡轮转子部件的单台作业周期和作业难度都要高于其他部件。因此,在涡轮转

子单元开展机器视觉技术应用,不仅能够突破生产线产能瓶颈,更是对发动机装配质量的深度保障。

流程分析及改善方案

在进行装配生产线设计之前,首先要对装配作业流程进行分析并加以改善,以确保生产线内物流、加工流、信息流的畅通以及生产作业高效、无等待。本文介绍的涡轮转子装配作业流程通过价值流程分析(见图1),主要存在以下问题:一是齐套性人工核对易出错,发动机装配前,由现场工人对零件箱内的零件逐一进行数量核对,确保零件齐套,具备装配条件,但人工清点容易出错,尤其是小零件,体积小、数量多,清点困难;二是叶片称重、分选耗时长,发动机涡轮转子共包含叶片400多件,装配前需要对叶片进行批次识别、称重、编码,所有叶片称重完成后,再按照静平衡算法进行叶片排序,该项工作操作简单、重复性强,但由于叶片数量较多,往往需要占用近三分之一的装配周期;三是检测手段落后,质量风险高,装配过程中着色面积、零件锁紧等检测点均为人工目视检测,只能定性给出判定结论,无法准确测量。

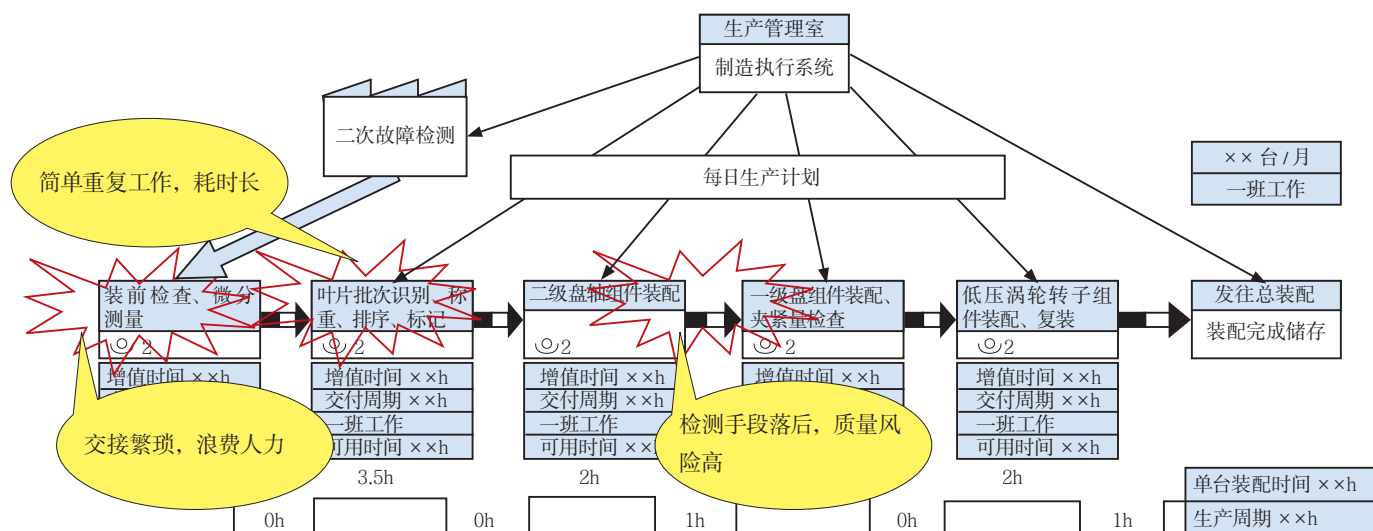


图1 发动机低压涡轮转子价值流程

通过对上述问题的原因分析不难发现，3项问题均暴露了人工作业效率低、隐患高的弊端。结合机器视觉技术的工业应用，分别从零件齐套检查、叶片自动分选和装配检测一体化3个方向对现有生产线进行改善。在零件齐套检查方面，根据周转箱内零件的定制摆放，制作零件齐套标准图样，形成对比图库，然后通过机器视觉技术完成周转箱拍照、识别和图像对比，输出齐套检测结果；在叶片称重、分选方面，由于该过程操作简单且重复性高，采用机器视觉技术加协作机器人的方式，实现叶片的称重、编码、排序等过程的一体化作业，同时集成生产管控系统，对识别的叶片批次进行核对，防止系统误判；在装配检测方面，结合无感检测的理念，利用工业摄像机对装配过程进行跟踪、拍照，通过图像识别和图像对比，量化检测结果并与预先设定的约束条件进行对比，输出判定结论。

工位布局改善方案

涡轮转子装配生产线结合部件装配周期短、流速高的生产特点进

行设计，综合考虑物流、站位、工艺、质量等因素，从工艺设计、产品流向、生产管控、质量评价等方面进行优化改善。通过机器视觉、机器人协作、自动称重等技术的应用，突破制约涡轮转子装配的瓶颈，并在部分关键环节实现全自动化，形成信息化、智能化的涡轮转子装配生产线。按照工艺阶段，可将涡轮转子装配生产线划分为齐套检测工位、叶片分选工位、高压涡轮装配检测工位和低压涡轮装配检测工位。

齐套检测工位是零件进入装配生产线的第一个工位，主要负责完成周转箱内零件的清点，并通过数据对比，给出检测结果。齐套检测工位由料箱上下料机构、齐套视觉识别系统、检测运动机构等设备组成。料箱上下料机构用于带动零件周转箱进行运动，控制周转箱的行进节奏；齐套视觉识别系统负责对周转箱内零件进行拍照、识别，输出检测结果；检测运动机构为三轴运动机构，用于带动齐套视觉识别系统进行运动，适应不同种料箱的齐套检测视野要求。

当零件周转箱被摆放至上下料机构后，通过扫描枪识别周转箱的二维码，开始零件的齐套检查工作。系统通过识别二维码信息，确定周转箱的类型、尺寸和方位，并调用相应的运行程序，带动上下料机构和检测运动机构按程序运动，视觉识别系统在到达指定位置后，启动光源和摄像机进行拍照，然后通过图像处理，完成周转箱内零件种类和数量的清点，最后齐套检测系统将清点结果与生产管控系统中该周转箱的配送信息进行对比，输出零件的齐套检测结果，同时通过下料机构将周转箱存放至缓存区，完成整个齐套检测过程。

叶片分选工位为全自动化设计工位，负责完成叶片的批次识别、称重、排序等分选全过程。叶片分选系统由叶片分选箱、人机协作机器人、高精度称重仪器、油墨喷码机、叶片编码视觉识别系统等设备组成。叶片分选工位与齐套检测工位通过传送带进行连接，当齐套检测工位识别到周转箱类型为叶片分选箱时，会通过下料机构和传送带将叶片分选箱直接推送至叶片分选工位的上

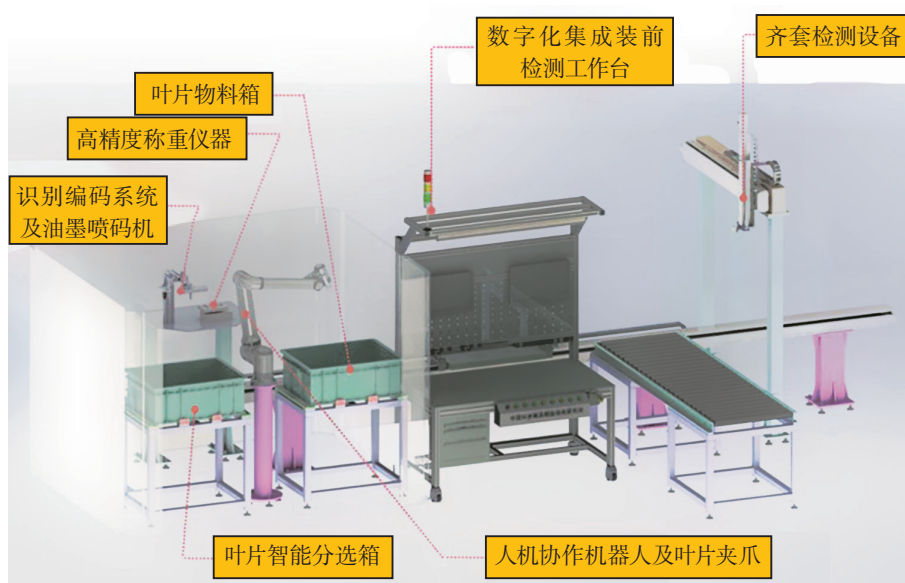


图2 齐套检测和叶片分选工位整体结构

料区，实现两工位的联动生产，同时叶片分选工位也支持人工上料，独立运行，如图2所示。

叶片分选工位同样是通过扫描周转箱上的二维码启动作业流程。当系统判定周转箱限位正确且光栅路径无阻挡时，启动作业程序通过人机协作机器人夹取叶片并带动叶片在整个分选过程中进行移动。叶片首先经过工业相机，通过编码识别系统，读取叶片的批次信息，然后经过高精度仪器完成叶片质量的测量，每个叶片的质量数据均与编码绑定，自动存储在数据库中。控制系统将叶片质量信号传递给油墨喷码机，并在叶片运行至指定位置后，控制油墨喷码机在叶片特定位置标记质量，之后由人机协作机器人将叶片放回叶片物料箱。所有叶片质量的测量完成后，通过转子平衡算法，完成叶片的排序，并调用协作机器人对叶片进行重新排布和序号标记。

装配检测一体化工位包括高压涡轮装配检测工位和低压涡轮装配配

测工位。主要负责按照工艺指导要求，对装配过程中各项检测点进行拍照记录，并通过图像分析，实时检测装配过程中的错装、漏装和作业结果。装配检测一体化工位由工作台、协作机械手、视觉检测单元、联动装配平台等设备组成，检测过程由协作机器人携带视觉系统停泊指定检测姿态，记录监视装配过程。装配检测一体化工位整体结构如图3所示。

系统集成应用

涡轮转子装配生产线通过开发

的装配单元管控系统进行运行管控和数据管理。对外提供数据库、Web Service和HTTP等多种数据接口方式，与制造执行系统（MES）、数字化检测系统（DMS）等进行信息交互，实现跨平台通信。管控系统从MES接收生产计划、生产准备、可视化工艺指导等相关信息，将物料的齐套检测结果、视觉检测结果等信息反馈至MES，并将零件装配检测过程中的零件号、安装位置以及检测数据等相关信息实时发送给DMS。数据交互采用自动传输的方式，同时也支持人工干预。此外，当管控系统与其他系统之间发生通信故障时，可以在管控系统界面上手动添加生产任务，保证生产线正常运行，再次接入时，自动触发数据交互。

关键技术研究

齐套检测技术

零件齐套检测技术首先根据零件形状、尺寸进行分类，然后针对不同的类别采用不同的图像识别和处理技术进行检测，提升物料识别的准确性。零件主要分为盘类、轴类、叶片类和小零件类。盘类由于工件外观状态差异和灰度差异大，通过

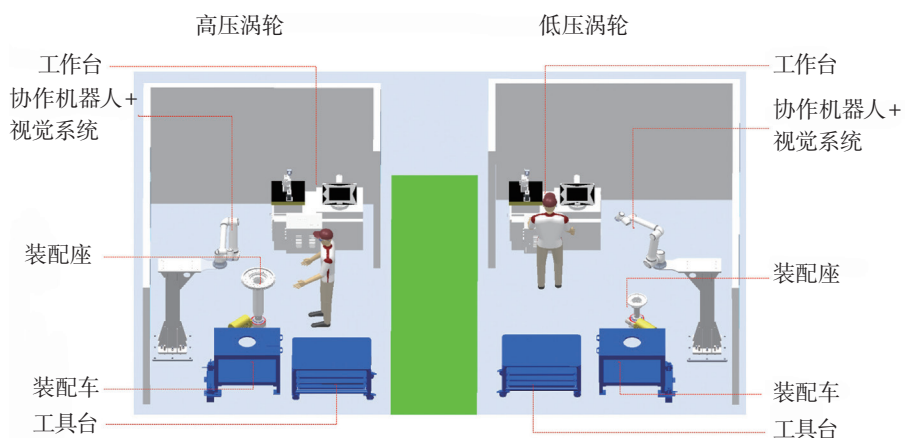


图3 装配检测一体化工位整体结构

灰度阈值技术，根据工件外观设定不同的阈值即可；轴类因工件尺寸较长，在灰度阈值的基础上增加了连通域筛选技术，保证识别的准确性；叶片类根据零件数量和周转箱形态的不同，直接采用分区采样、灰度图和模板匹配完成识别。以上3种零件识别难度较低，而小零件类受零件种类、数量、摆放等因素影响，识别难度较大，为此针对小零件类，采用了自适应动态阈值分割技术，保证识别的准确性，具体过程如图4所示。

叶片编码识别的难点在于叶片分为4级，且制造商不同，叶片编码的标记位置、字体、标记方式等均不相同。同时，叶片使用年限较长，编码磨损也给批次识别带来了一定困难。为此，采用多模板匹配和深度学习技术，保证编码识别的准确性。多模板匹配是通过建立多模板库，在多幅图像中搜寻目标，已知该图中有要找的目标，且该目标同模板有相同的尺寸、方向和图像，通过一定的算法可以在图中找到目标，确定其坐标位置；深度学习技术则是结合相关性和置信度，通过不断提升样本量，并修正错误识别案例，强化系统的置信度水平。此外，叶片编码识别还应用了极大值抑制、聚类处理、编码规则选取、字符规格防错等技术，进一步提升叶片编码识别的准确性，多重识别技术相

结合，确保误识率最低，识别率最优。

智能排序技术

智能排序技术是为实现叶片称重、排序一体化而开发的基于平衡理论的叶片排序技术。当生产样本数据量足够多时，管控系统可采用基于人工智能（AI）的多目标优化算法对叶片进行排序，将叶片配重值和向心力平衡作为两个优化目标，自动搜索使叶片配重值和向心力平衡达到帕累托最优的叶片排序方案。算法主要思路是将人工免疫算法与多Agent系统相结合，建立新型人工免疫多Agent模型，实现叶片排序最优方案搜索。同时，根据动平衡检测结果，对算法中的参数作自适应调整，以动平衡结果为反馈，迭代优化算法模型。

装配检测一体化技术

装配检测一体化技术主要应用于着色面积、零件装配位置、零件锁紧等装配点检测。实现了装配过程和检测过程同步进行，同时将人工无法准确判断的定性检测内容，通过机器视觉技术进行图像处理，量化检测结果。以着色检测为例，不仅要检测着色剂的有无，还要判断其面积、均匀性、连续性是否符合标准。首先对原始图像进行均衡化处理，然后通过阈值分割，凸显图层区域，通过颜色判断目标区域有无图层，最后通过差分计算，形成图层的实际覆盖率、连续性，并

与设定的目标值进行比对，输出判断结果。

防错技术

防错技术主要应用于叶片编码识别、实测值采集过程。在叶片编码识别过程中，为避免视觉检测可能出现的错误，当叶片批次识别完成后，管控系统会将识别的叶片编码与MES原始记录进行匹配，匹配异常时触发警报，人工干预避免误识。在实测值采集过程中，系统则是根据预先设置的标准值或标准图样，对实测值采集结果进行判定，当不符合预先设定时，采用色标的形式进行预警，避免不合格信息流转。

结束语

结合视觉检测技术、深度学习技术以及防错技术，设计的自动化涡轮转子装配生产线，解决了涡轮转子装配作业生产效率低、质量风险高等问题，有效地改善了现场的作业环境，是机器视觉技术在航空发动机装配领域的一次成功应用。机器视觉技术作为一种新型的检测技术，不仅可以实现无接触测量，同时还可以进行长时间的工作。随着光学成像技术和图像处理技术的进一步发展，机器视觉技术的检测结果也必然更加准确、稳定，具有广阔的应用前景。

航空动力

（王明军，中国人民解放军93170部队，助理工程师，主要从事航空发动机装配维修过程质量管理）

参考文献

- [1] 张云. 基于机器视觉的零件图像采集及识别的研究[J]. 电子工程, 2006, 32(10): 29.

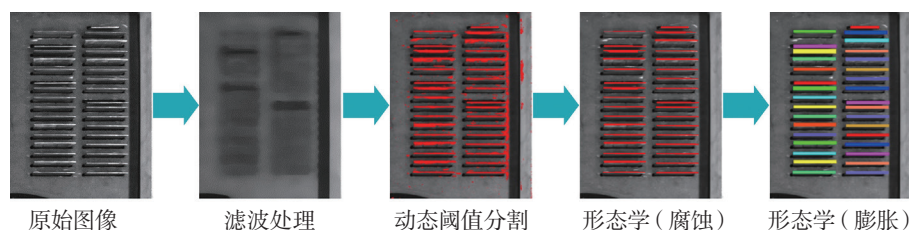


图4 小零件齐套检测流程