

基于流程重构的涡轮转子数字化装配生产线建设实践

Construction of Digital Assembly Line for Turbine Rotor Based on Process Reconfiguration

■ 马红涛 张红亮 许涛 马永斌 李成山 杨军 / 中国航发西航

针对涡轮转子装配单元制约生产交付能力的痛点，综合运用自动化技术、视觉检测技术和信息技术，建立齐套性检查、叶片自动称重排序和涡轮转子装配等装检一体化工位，实现航空发动机装检一体化作业模式运行，可提升生产效率并增强质量过程的可追溯性。

基于流程重构的涡轮转子数字化装配生产线建设实践是以最终实现准时化生产、消除过程浪费为目标，以中国航发运营管理体系（AEOS）建设为指引，以数字化、精益管理方法论和“一次把事情做对”的质量理念为核心，通过对大修发动机“两装两试”流程进行价值流分析、梳理，围绕制约物流和信息流的涡轮转子装配及检验工序进行系统研究，开展数字化装配单元建设，形成装配与检验同步一体化的装配模式，达到装配质量“事前控制”替代“事后补救”的效果，实现数字化生产组织方式转型，从而大幅提高发动机生产效率和产品质量。

顶层方案设计

基于流程重构的涡轮转子数字化装配生产线建设方案分为三个步骤实施：开展全流程价值分析，查找出问题；以问题为导向，开展改善点分析；根据改善分析，系统策划建设与推进。

通过对大修中心生产能力评估，发现发动机涡轮转子装配单元为制约生产交付短板。为解决产能不足的问题，对涡轮转子装配过程进行价

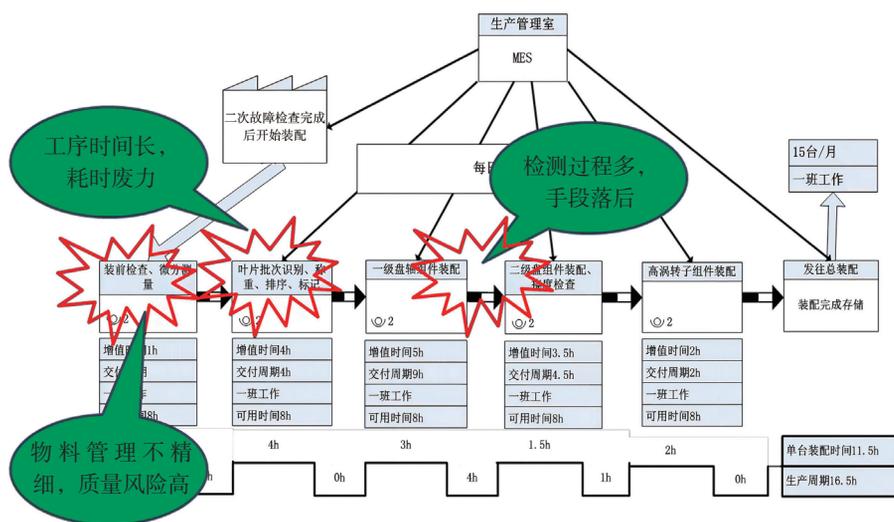


图1 高压涡轮转子现状价值流程图

值流分析，查找生产过程中的堵点、瓶颈点和质量波动点，如图1所示。经过对比发现，由于高压涡轮转子与低压涡轮转子结构原理类似，在叶片排序、零件管理、装配检测过程中基本存在同样的问题。经过绘制涡轮转子价值流程图，分析发现了一些问题及改善点，详见表1。

基础优化改善 重构工艺流程

梳理工艺流程，对与装配过程

有明显分离界面的工序进行调整，将微分测量、叶片称重排序提前进行。将工艺流程划分为三大块：一是装前检测，包括接受零件检测齐套性、清洗、外观目视检查、微分测量、叶片称重排序；二是装配过程，包括盘轴组装、装配叶片固定板和压装盘等；三是检测过程，包括高度检测和同心跳动检测。

开展工艺改进

针对人工叶片称重、标记重量、排序、识别批次效率低的问题，可

表1 涡轮转子装配流程问题及改善点分析

问题	改进点	现状	改进方式	预期效果
工序时间长, 耗时费力	叶片称重、排序效率低, 每级叶片平均占用2h (每个转子各2级叶片, 79 ~ 109件不等)	人工逐一识别叶片批次并称重, 在叶背标记叶片重量, 然后排序并在叶背标记叶片顺序号	通过自动化设备完成叶片批次识别、称重、排序	预计每级平均30min内完成
物料管理不精细, 质量风险高	物料实物齐套性检查耗时较长, 且存在错配、漏配的风险	配套工段人工进行零件实物的清点, 并按周转箱行迹模板进行装箱	通过视觉检测设备完成周转箱内零件齐套性和准确性检查	单台发动机齐套检查效率提升30%, 错配、漏配问题减少25%以上
检测过程多, 手段落后	零件微分测量在装配过程中进行, 占用了较多操作时间	物料配送到工位后, 在装配前进行微分测量, 不合格提交更换	将微分测量工序前置到配送前, 并对尺寸进行选配	减少测量等待时间约30min
	装配定性特性通过人工目视检测方法落后, 效率低	装配过程有一些人工目视检查的特性, 诸如着色面积, 锁片、杯形垫圈等, 需要人工判定, 大多数情况下需要二检、三检防错	通过智能设备对操作过程进行拍照比对, 将装配过程与检测过程并行	提高工作效率, 提高装配质量, 探索定性特性的新式检测方法

借助自动化技术改进。每个叶片须自动完成称重、标记重量、识别批次, 要完成这些自动化作业需要一个机器人夹持叶片自动放到电子称上称重, 再到喷码机上标记重量、最后到视觉检测系统上识别批次。

针对零件齐套性检查耗时较长, 且存在漏配现象的问题。可通过视觉检测系统改进。通过视觉检测相机对零件周转箱进行拍照, 然后与后台标准数据库进行比对, 查找出缺失的零件, 并在操作系统界面进行显示。检查出的缺件信息反馈至生产执行系统 (MES), 并进行仓储库存零件数量的比对, 提醒集配人员及时进行缺件补充。

针对目视检测效率低、方法落

后的问题, 重新梳理检验特性和检验方式, 发现除零件外观检验由于包含太广无法针对性改进外, 其余目视检验特性的检验方式均可采取相应措施提高检验准确率、提高效率。如零件尺寸可采用数字化测具将测量结果上传, 避免手抄失误; 着色面积等其他目视检查项均可通过视觉检测完成, 视觉检测判断标准统一, 质量稳定。

重构生产布局

根据重构后的装配流程, 对生产布局进行重置, 至少包含以下工位: 一是装前检测区, 设置齐套检测工位、装前检测工位、叶片称重排序工位; 二是装检一体化区, 设置高压涡装检一体化工位、低压涡

装检一体化工位; 三是检测区, 设置高度检测工位、同心度检测工位。

根据装配流程所需工位, 再结合涡轮转子装配原有的零件缓存区、设备、工装架等及分解所需的原高涡转子分解工位、低涡转子分解工位, 涡轮转子装配总体布局如图2所示。零件进入涡轮转子单元后首先进行齐套检测, 齐套检测完成后进入装前检测台, 进行清洗、外观目视检查、微分测量, 装前检测完成后叶片进入叶片分选设备进行称重排序, 其余零件进入装检一体化工位进行装配, 不具备装配条件的零件放置在存储区。装配完成后在高度平台和同心度平台进行检测。

数字化推进

生产管控系统数字化

通过以上工艺改善和布局改进, 各工位工艺内容明确, 流程合理, 生产衔接有序, 部分工位通过自动化技术和视觉检测技术提高了工作效率, 改进了检验模式, 但是缺少一个能促使各工位连贯运行的系统来集成自动化作业和视觉检测作业, 所以必须进行数字化转型, 建设一个面向生产现场、面向操作者的生产管控系统。

生产管控系统主要具备以下功能。

一是数据采集与处理。生产管控系统自动采集装配检测过程中的叶片编码、叶片重量、视觉图像、装配检测数据、设备状态, 以及生产异常信息等。另外, 生产管控系统能够满足现场使用的各种量具的通信需求。系统可以将数据进行输出和存储。

二是齐套检测。生产管控系统

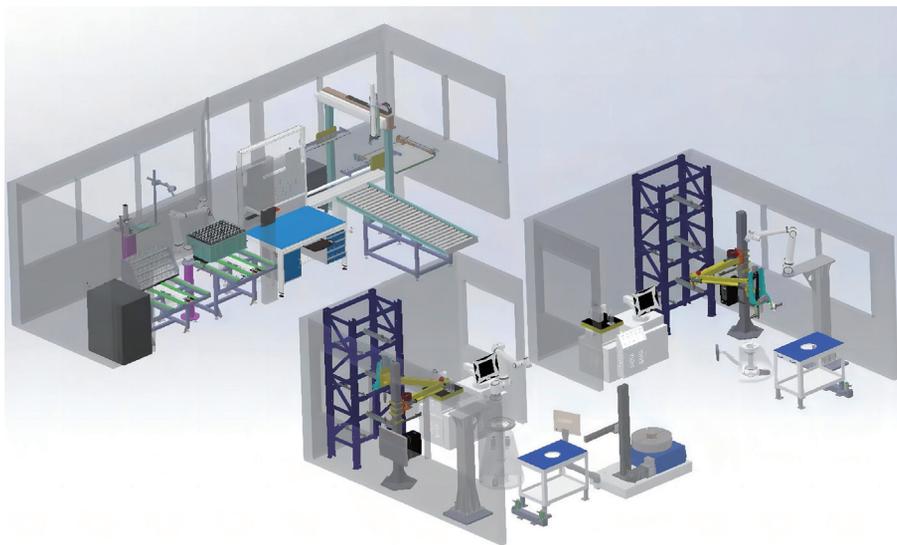


图2 数字化涡轮转子装配线

启动视觉系统检测零件周转箱，视觉相机拍照后与后台标准数据库进行比对，查找出缺失的零件，并在操作系统界面进行显示。检查出的缺件信息反馈至MES，并进行仓储库存零件数量的比对，提醒集配人员及时进行缺件补充。

三是叶片自动称重、标记重量、排序、识别批次。生产管控系统通知机器人从料箱中依次抓取每个位置上的叶片进行批次识别、称重、喷码操作。

建设高效数字化装配生产线

一是建成装前检测专机。对装前检测区的齐套检测设备、装前检测台、叶片分选设备进行集成，建设统一的上料机构，操作者在上料位置将周转箱放入托架，再由传送带将周转箱输送的齐套检测设备，齐套检测完成后将叶片周转箱输送至叶片分选设备，其余周转箱输送至缓存架，以供清洗检查、微分测量。

二是建成装检一体化工位。高/低压涡轮装检一体化工位为人机交互

工位，主要完成涡轮盘和叶片的装配、盘和轴的装配，锥形螺栓着色检查，套筒着色检查，锁片、锁板的锁紧等工作。装配过程主要由人工操作，尺寸测量由数字化测具保证，目视检查内容由6轴机械臂带动两个视觉相机拍照后，与标准库进行比对判断。在叶片装配时，按照叶片称重排序后的智能料箱亮灯提示依次拿取装配，避免错、漏装。操作过程中由可视化工艺引导，完成视觉检测后在系统界面进行显示，程序设置自动提醒，提示操作者完成下一步动作。装配关键部位拍照留存，替代以往的外观目视检查，并归入质量档案，便于后续进行质量追溯。

三是运行按灯系统。工人在进行生产作业时，如果某个工序因为设备故障、技术质量问题或其他原因导致无法正常进行，可及时通过生产管控系统第一时间将异常情况传递给相关人员，进行问题快反处理。

四是打造工装、工具形迹化管理。为了保护工装和便于清点数量，

制作带有凹槽的模板存放工装，每日收工时，可以一目了然地清点工装数量。单个部件分解和装配所需要的工具全部放在可移动工具车上，用泡沫材料制作凹槽用于放置工具。每日开工前，从材料工具室领用工具车，可以一目了然地检查工具是否齐全。工具车上的工具摆放按照工位进行划分，将同一工位分解或装配所需的工具放在一起，这样可以减少在工作过程中寻找工具的时间。

五是执行辅材配送。新的辅材配送制度根据每台次各部件装配时需要使用的辅材数量定量配送。每台次装配前材料工具室为每个部件准备一个装有定量辅材的辅材箱。在装配小组从故障检查工段接收周转箱时连同辅材箱一同接回。在进行装配时，辅材箱与工具车一起移动到装配工位。使用时随手取用辅材，能够节省作业时间。材料工具室负责配送辅助材料，装配小组不用再去材料工具室单独领取辅材。

结束语

通过涡轮转子数字化装配生产线建设，涡轮转子生产能力得到大幅提升，整体装配周期缩短34.9%，叶片排序周期缩短达41.7%。同时，涡轮转子的装配质量也得以提升，错漏装次数由上年度的9次降低至4次。更重要的是，从重构工艺流程、生产布局到创新性的进行数字化生产线建设过程中，管理水平得到了全方位的提升，数字化转型的基础得到了进一步夯实。

航空动力

(马红涛，中国航发西航大修中心主任，主要从事发动机装配修理及生产现场运营管理工作)