航空零件精益数字化机加生产线建设实践

唐辉　苏红芬
中国航空综合技术研究所　北京　100028

摘　要　以A车间某系列航空机加零件为研究对象，融合精益思想和数字化技术，提出了策划准备—诊断分析—产线设计—实施运行—持续改善的精益数字化机加生产线实施路径。通过产品家族划分、工艺优化、生产线平衡、布局和物流优化、产线数字化管控设计等方法，建立了连续流动、生产透明的精益数字化机加生产线，消除了生产过程中的浪费，缩短了加工周期，提高了合格率，降低了在制品库存。

关键词　精益思想；数字化；精益数字化；机加生产线

Construction Practice of a Lean Digital Machining Production Line for Aviation Parts

Tang Hui, Su Hong-fen
China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

Abstract　Focusing on a series of aviation machined parts from Workshop A, this study integrates lean thinking and digital technology to propose a lean digital machining production line implementation path consisting of planning and preparation, diagnosis and analysis, production line design, implementation and operation, and continuous improvement. Through methods such as product family classification, process optimization, production line balancing, layout and logistics optimization, and digital production line control design, a lean digital machining production line with continuous flow and transparent production was established. This approach eliminated waste in the production process, shortened processing cycles, improved qualification rates, and reduced work-in-progress inventory.

Key words　Lean Thinking; Digitalization; Lean Digital; Machining Production Line

当前，随着5G、大数据、物联网、工业机器人、高档数控机床等为代表的先进信息技术与制造技术深度融合应用，生产线的加工设备和信息技术不断更新换代，使生产线效率和质量得到很大提高，生产成本大幅降低[1]。但同时也应当看到，有些企业在智能制造和生产线建设方面投入巨大，实际效果不佳，生产线设备利用率不高，生产成本不降反而上升，其中有设计不合理的原因，也有实施管理的原因，更重要的是没有夯实精益的基础，过分强调先进技术的应用，这些正是精益的用武之地[2]。面对传统产线智能化升级需求，需要精益化与数字化的双重支撑，即精益数字化，在夯实精益管理的基础上，通过技术赋能，提升产线精益数字化水平，促进企业高质量发展[3]。

本文以A车间某系列航空零件为研究对象，基于现状，融合精益思想和数字化技术，提出了精益数字化机加生产线实施路径，打造精益管理与数字技术融合的精益数字化产线，实现了生产周期缩短、一次交检合格率提升、在制品数量降低以及生产模式的转变，这对其他制造企业构建精益数字化机加生产线将有现实的指导意义[4]。

1　实施路径

1.1 指导原则

在没有进行精益化改造的前提下，直接引入昂贵的自动化装备或者信息化系统，相当于把包含大量浪费的问题流程和工艺以软件和机器固化下来，不仅不能消除浪费，反而会产生更大的浪费。因此，本文提出以“精益为核，技术赋能”的指导原则，即精益数字化，运用精益方法对产线工艺、布局和物流等基于产线进行精益化改造，并借助自动化设备、信息化系统等技术手段打造精益与数字化融合产线，进一步提升生产效率和质量。

1.2 建设步骤

1.策划准备。首先建立由甲乙双方相关部门和人员组成的联合团队，指定双方项目经理，明确团队成员职责；制订项目行动计划，确定建设对象、目标以及里程碑节点；组织开展项目启动会，拉齐团队各成员目标、行为标准和工作方法，凝聚共识；定期开展项目例会，跟踪管控项目进展，协调各方资源，处理问题，同时做好需求变更管理。

2.诊断分析。产线诊断分析的关键点在于调研内容设计，

应全面而准确，为后续方案的设计以及建设目标设定提供坚实的基础，调研内容应包括但不限于产线基本信息、绩效信息、布局和物流信息、生产控制信息、生产保障信息、计划与管控信息、先进技术应用情况，如图1所示。

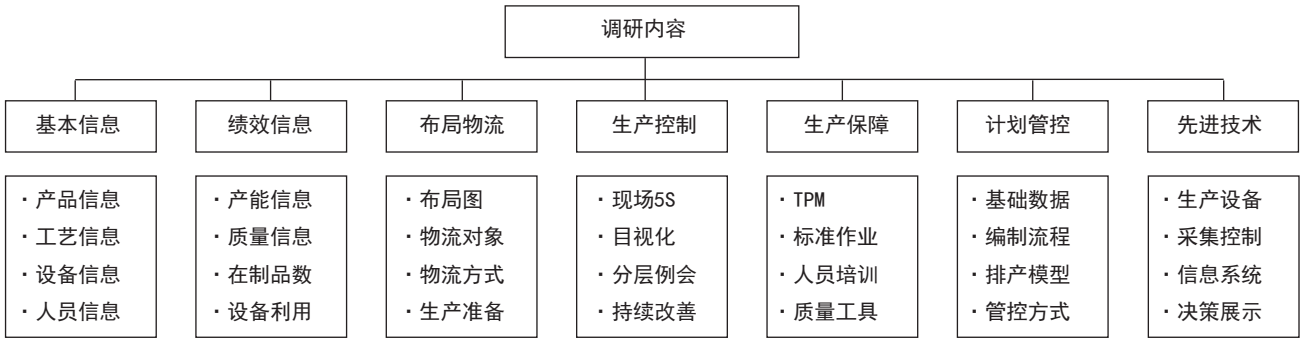

图1 调研内容

3.规划设计。

（1）划分产品家族。通过产品工艺（PR）分析，确定进线生产的零件种类，确定典型工艺路线和典型产品，基于此开展后续的工艺优化、生产线平衡等设计工作[5]。

（2）工艺优化与生产线平衡。对典型产品及其工艺开展作业工时测定，测量每道工序作业时间，计算客户需求节拍，并绘制百分负载表，计算生产线平衡率，识别瓶颈，按照ECRS工艺优化原则开展作业工序优化，减少浪费，提高生产线平衡率，使产品快速流动，缩短生产周期，提高生产效率。

（3）工位设计。根据产品的工艺流程，结合工艺优化方案以及工位划分的情况，明确各工位加工的零件号、加工内容及技术要求，同时结合各工位质量提升、效率提升、安全保障、自动化改造、设备互联等需求，依据工位设计原则，开展工位详细设计，明确工位的功能及组成，进行设计和选型，形成工位详细设计方案。

（4）布局设计。全面识别布局约束因素，综合应用封闭性原则、最小物流原则等布局原则，结合直线型布局等方式，制订多种布局方案，并从兼容性、物流路径等多维度开展综合评价，选出最优布局方案，可结合仿真软件进行仿真验证和优化。

（5）物流设计。依据进线零件种类及其工艺规程，全面梳理产线所需物料、工装等资源清单；针对每种对象开展物流需求分析，主要包括转运节拍、转运批量、转运方式、转运容器、物流追溯等；结合最小物流原则、流畅性原则等物流设计原则，并依据每种对象的需求以及布局设计，开展详细物流设计，明确转运方式、转运批量、转运路线、转运容器等；依据转运流程及规则，设计物流调度软硬件系统，最终形成物流设计方案，可结合仿真软件进行仿真验证和优化。

（6）标准作业设计。依据优化后的工艺流程及其加工时间，结合工位、布局和物流设计方案，设计人机结合机加生产线的标准作业指导书、标准作业图以及标准作业组合表，对生产线操作人员与机器协作生产加工零件的动作、顺序和时间进行规范化和标准化处理，提升效率、改善质量，同时也可基于标准持续进行改善和优化。

（7）作业计划设计。依据优化后确定的加工设备、工艺流程、加工时间、换型时间等基础数据，结合产能、周期、批量、节拍、排产顺序、关键设备等约束条件，同时充分考虑紧急插单、生产异常等突发情况，制订满足要求的排产规则和模型，形成产线排产方案。

（8）数字化管控系统设计。根据业务痛点和难点梳理产线数字化管控系统需要具备的功能模块，形成功能需求清单；确定产数字化管控系统的总体架构和各功能模块，形成系统总体架构图，详细设计各功能模块，输出各功能模块界面；依据功能架构、业务流程，开展系统集成设计，明确与产线加工等设备、车间级MES等系统集成方式；确定产线重点管控对象以及展示形式，详细设计产线运营驾驶舱，实现产线数字化管理。

（9）产线控制方案设计。产线控制方案主要是精益方法工具的应用，主要包括可视化、分层例会、管理者标准作业以及现场问题快速响应，可借助安灯系统等数字化技术，进一步提高产线控制效能，维持生产线产品稳定快速流动，出现异常问题亦能快速处置并恢复。

4.实施运行。成立由多部门组成的联合搬迁团队，编制详细搬迁方案和计划，明确各方职责和任务，推动搬迁工作按计划实施；提前做好水、电、气、网等基础设施建设，提前规划关键设备调试验证方案，全过程记录单机验证和系统联调过程；按产线规划方案进行试生产，记录生产过程中存在的问题以及解决方案。

5.持续改善。对生产线进行持续改善，不断提高生产线精益数字化的水平，总结提炼建设知识、经验、标准，快速进行推广和复制，助力企业实现整体的改善和转型，促进企业高质量发展。

2 案例分析

以A车间某系列钛合金盘零件精益数字化机加生产线建设为例，梳理现状，制订改善措施，取得建设成效。

2.1 现状问题

通过由甲方工艺、质量、信息化等人员以及乙方项目经理、总体规划、机械设计等人员组成的联合团队，按照事先梳理的调研清单及内容，全面系统地开展现状调研，主要问题如图2所示。

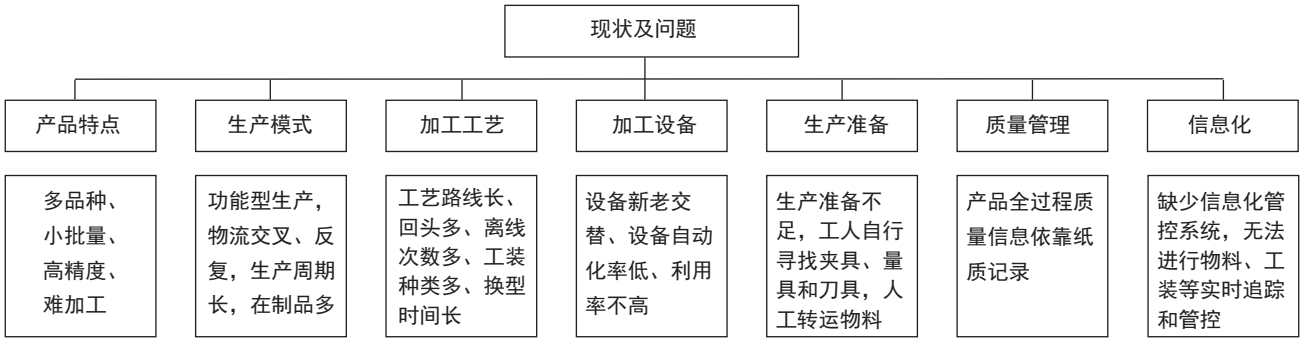

图2 现状及问题

2.2 改善措施

首先，通过工艺优化、布局优化等措施，减少离线与工艺回头、缩短物流距离，提升生产线平衡率；其次，对零件、工装和刀具赋码，实现物料追溯定位管理，同时将产线所需要的工装和刀具提前放置在产线内，由专门的生产准备人员按照系统提示准备工位上需要的工装和刀具，在预调台上完成零件和工装机外预调工作，由AGV自动转运至工位旁，缩短生产准备时间，提升设备利用率；再次，对产线内的数控车床、数控铣床等加工设备进行自动化改造，增加机内在线测量装置、机内自动对刀装置以及零点快换系统，进一步提升单机设备自动化程度，只需人工进行上下料，自动进行零件加工、自动对刀、零件尺寸自动测量，并自动生成质量报表；最后，通过产线数字化管控系统对采集的数据进行综合管理和分析，辅助决策，实现从计划到产出全流程可视化呈现和管控。

2.3 建设成果

该生产线经过近一年的实施运行及优化，已成为连续流动、生产透明的精益数字化机加生产线，生产模式发生根本性转变，管理方式实现升级与创新，达到了工艺精益化、布局合理化、物流精准化、生产透明化、管理数字化的目的，生产周期缩短30%，在制品降低20%，一次交检合格率提升25%。该企业多条机加生产线均按照本文提出的实施路径实现了转型，全面提升了企业交付水平。

3 结束语

本文通过某多品种小批量制造企业A车间某系钛合金盘零件精益数字化机加生产线建设实践，探索总结出了一条可行、有效的精益数字化产线建设路径。通过精益工具和先进自动化及数字化技术的有效融合，提高了产能及零件加工质量，缩短了生产周期，降低了在制品数量，实现了生产模式和管理方式的重塑，为未来进一步实现智能化升级打下了良好的基础。同时，该建设路径、相关方法、经验教训也能为具有相同特征的企业提供借鉴及改进思路，推动其深入进行精益思想与先进技术的融合，构建精益数字化产线，全面提升SQCDP绩效水平，促进企业高质量发展。

参考文献

[1]李亚韫.基于工业机器人的CNC上下料加工组合生产线设计[J].机械工程与自动化,2025,54(2):156-158.

[2]岳志春,李玉茜.智能制造背景下精益生产管理模式变革[J].合作经济与科技,2023(18):126-127.

[3]刘艳,闫西平.数字化精益在星环灯自动化产线中的应用研究[J].中国照明电器,2025(1):86-89.

[4]吴兴明,王光书,赵洋,等.“精益加工单元”在传统航空制造企业生产组织转型中的创新与实践应用研究[J].价值工程,2024,43(1):52-54.

[5]刘海波,古毅.精益思想在生产单元建设中的应用[J].哈尔滨轴承,2023,44(1):49-50,55.

（本文编辑 曹 阳）