

数字化生产线在传统制造企业实施探索与研究

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 李健彰 迟鹏

面对今天全球范围内的制造业技术革新和技术挑战，我国制定了面向未来制造业发展的智能制造和两化融合战略，力争实现我国制造业向创新型发展的目标，提出工程信息化与工业化融合，从而促进制造业的发展。在航空发动机行业来看，针对国家制造业发展计划，深度融合涉及整个航空发动机企业的数字化、网络化、智能化，使工程信息化技术与航空发动机行业的制造技术相结合，从而促进发展，实现制造过程和产业模式的变革，以信息化带动传统制造业长足发展，将数字化制造技术渗透到产品研制的设计、制造、试验和管理等全过程中，提高生产过程的可控性、减少生产线上的人工干预，高效、高质量、低成本地提供所需的产品和服务。

一、数字化生产线建设必要性分析

航空发动机是企业未来发展的支柱产品，其具有技术新、难度大、变批量、多品种、进度急等特征，同时生产涉及加工材料切削技术、新工艺、高效数控加工技术、数字化检测技术等多个学科，研制难度大、周期长，现有生产现和制造技术水平并不能适应先进制造需求的挑战。产能方面，现有生产方式和生产能力与需求存在差距。

1. 订单管理无法实施相应生产动态变化

生产线每月产品订单由工厂计划员根据公司的总体计划安排和工艺流水分工分派各条专业生产线，每条生产线也有专职的生产计划员根据工厂交付需求通过桌面模型的工具将订单计划细化到每台设备、每天的执行进度计划。

这种静态订单管理方式以人力活动为主，因而需求大量

的人工操作，虽然通过 MES 系统使订单信息创建和管理的效率有了一定提高，但是由于 MES 系统与生产线和生产设备的脱节，订单的派发和执行反馈信息仍然需要人工维护。也正是因为 MES 系统与生产线之间缺乏系统链接，难以保证两者之间信息传递的准确性和时效性，既定的订单计划不能及时的下达至执行端，也不能及时获知执行端的执行反馈。当面对临时的订单调整、计划变更时，或者是发生突发事件时，静态的订单管理模式无法及时响应并调整任务队列，无法抵御生产变化对计划的影响和冲击。

而智能生产线的产品订单（计划）管理由智能化的工程管理系统负责，可适应多项目管理的项目驱动生产模式，支撑科研生产模式下的多品种、小批量、工艺数据频繁变更的管理需求，实现生产计划、设计与现场生产的实时联动，而无需依靠专职的生产计划管理人员。还能够提供多角度、多类型的现场过程监控手段，以直观简便的方式满足对整个生产过程的监控和管理需要。

2. 固定资产投资规模大，催高生产成本

传统的离散式生产线以单一功能设备构成，机床的工艺适应能力范围小，产品工艺路线只能将划分车、钻、铣等加工过程单独设置工序，并编排固定的执行顺序。这种生产线形式虽然制造流程清晰，但是却容易形成瓶颈工序、瓶颈设备，导致普遍的工序等待和设备利用不充分，平均设备利用率不足 40%。

智能生产线将以同规格的铣、车复合加工设备构成，设备柔性更强，可消除瓶颈设备，减少工序等待，设备的平均利用率将比独立加工设备提升 100%，同时结合自动化

物流系统和先进的自动装夹技术，还可将产品加工效率提升20%~30%。产品制造周期的缩短将使设备需求数量下降。

3. 质量管理与生产线终端缺少衔接

企业执行着行业内部最为全面的、系统的、严格的质量体系管理标准，针对产品的投料、制造、试验、使用、保存、维修和报废等环节，都有专项的质量管理、控制、追溯制度和流程，并不断推进质量业务流程信息化工程。然而，实际操作中软件体系与硬件系统存在脱节，两者之间需要由人力来衔接，其一无法保证质量信息获取的时效性，其二无法保证质量数据传递的真实性和准确性，其三海量的数据信息处理和分析工作消耗大量人力，其四人工处理过程效率低、周期长，其五过程数据项目少、不具体、难追溯。

另一方面，在质量控制活动中，人仍然占据主导地位。现有设备的线测量系统和加工控制系统之间没有闭环的数据传输功能，数控系统仅能辅助实现切削动作和轨迹的自动化，但工件的几何尺寸精度还是需要通过操作者手动调整机床参数来保证，产品的尺寸一致性和质量稳定性完全取决于操作者的技能水平高低和主观因素的稳定程度。虽然通过完善管理制度、强化管理力度、加强岗位培训等质量举措，制造质量在逐年提升，但其年均不合格率仍有0.67%。

而智能化集成式生产线的质量管理是基于网络技术和传感器技术对生产过程实测质量信息进行实时监控、采集、分析和发布，利用相关计算、报告、查询、分析和挖掘工具生成各类质量关键性能指标，诊断出问题的根源并提供相应的解决方案。还可实现对产品整个加工过程的追溯，包括工艺路线、加工设备、加工时间、工装工具、操作人员的追溯。同时，生产线的控制系统能够自动采集机床在线检测系统、三坐标测量机和数字化测具的检测数据，并根据产品设计模型，自动调整切削策略和参数设置，从而保证加工过程的质量安全性和稳定性，产品不合格率将有望降30%。

4. 低生产效率严重制约生产能力的提升

低设备利用率和低效率的工艺路线是导致离散式生产线的低生产效率的主要因素。离散式生产线中机加设备的非切削活动造成设备停机频繁，如开工前毛坯的装夹和找正、加工过程中的跟踪测量和加工参数调整、完工后提检程序和在线测量活动等都需要设备停机，设备停机时间往往超过了运转时间，总体平均设备利用率不足40%。现有单一功能的设备类型限制工艺路线的设计，典型的工艺路线形式多为：粗

车→粗铣→半精车→半精铣→精车→精铣→钻、镗孔，其中每种工艺过程还要分成前、后两端两个工序进行，半成品始终处于重复装夹、重复找正、重复单一工艺的往复操作中，进一步增加了设备停机的时间；线性的工艺路线降低了排产难度，却使精加工环节出现工序停滞和瓶颈设备，在生产过程中发生工件因等待精加工机床而出现工序停滞的比率占到全部生产任务的60%~70%，工件在工序间的平均等待时间超过8小时；同时，现有的物流体系又是完全基于人工和辅助车辆，物料配送及时率不足50%，过多的工序环节使情况更加恶化。低生产效率将拖长产品的制造周期，拉低生产线产能。

智能生产线设有专门的上下料站，可在机床外部完成工件装夹、找正，通过工作托盘传输系统与各个加工单元进行快速工件交换，而不需要设备停机；智能生产线中机加设备还将配备雷尼绍高速扫描头，使加工前找正和过程检测、工序检测都能够在线自动完成，更可以利用检测数据自动修正、补偿加工参数，将非切削活动停机时间减少90%。智能生产线将以同种规格铣、车复合加工中心作为基础加工设备，加工柔性强，可以将车、铣、钻、扩、镗、铰加工合并进行，令产品工艺路线缩短75%，同时无差别的设备规格也消除了瓶颈设备。高效的自动化物流系统也将完全代替人工完成产品的工序间物流运输，配送及时率可达99%，在生产线智能化生产管理系统的控制下可应对多品种、小批量的复杂物流运输任务。与同规模的离散型生产线相比，智能生产线的生产效率和生产能力能够提升二倍。

因而，在航空发动机领域大力开展智能制造技术研究，在传统制造技术基础上发展先进制造技术，打造支撑现代制造业的骨架和核心，将成为提高设计、制造和管理水平，保障重点型号的研制，促进航空工业跨越式发展的必然选择。以信息化带动传统制造业长足发展，以网络化突破空间地域对企业生产经营范围和方式的约束，实现企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，将数字化制造技术渗透到产品研制的设计、制造、试验和管理的全过程中，提高生产过程的可控性、减少生产线上人工的干预，高效、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。

二、建设目标

建成一条航空发动机示范智能生产线，满足批产需求。相对于现有的生产线模式，智能生产线将综合采用数字化、

自动化和智能化等控制技术，重点解决加工自动化生产线建设中的关键工艺技术和瓶颈问题，生产效率将提升 2 倍，机床平均利用率将提高 1 倍，不合格品率同比降低 30%，制造成熟度可达到 10 级，人员配备数量将下降 50%。

智能生产线建成后，一是将全面应用 MBD 技术，工艺设计、仿真和发布产品工艺路线将比传统工艺路线缩短 75%，并更加柔性化和高效化；二是现智能化生产管控，能够实时分析生产计划和生产进度的匹配情况和动态排产，对生产过程信息进行全面精准的追踪，物料输送及时率可达 99%；三是产品加工过程实现全程自动化，能够实现工件的自动定位、装夹、找正、切削和检测，整体提高机匣生产工艺技术水平，保障机匣生产的质量和稳定性，大幅提升机匣生产能力。

项目的实施为企业培养一支掌握智能生产线建设关键技术的团队，为未来产业化智能制造奠定基础。智能生产线将彻底改变人员结构，传统的生产计划员、生产调度员、机床操作工、辅助周转工、工装管理员、工序检验员等岗位将消失，同时将出现上下料操作工、专职刀具装卸工等全新的岗位设定，而对于工程技术人员和设备维护保养人员的需求数量和专业技能水平的要求将大幅提高。

三、建设内容

1. 软件部分建设

研发适合的智能生产线综合管控系统，并作为生产线运行的指挥中枢，将具备生产计划管理、生产现场管理、在制品管理、生产资源管理和质量管理等功能；同时集成、部署以下功能性软件：（1）机匣自适应加工软件。（2）工件及刀具自动识别软件。（3）自适应随形表面处理软件。（4）刀具磨损及切削状态监控软件。（5）数字化测量与分析评价软件。

2. 硬件部分建设

生产线硬件主要包括加工设备、辅助设备、测量设备、中央刀库、智能夹具等，是生产线制造产品所必需的加工终端，是实现产品不同工艺要求的执行端。针对以上硬件建设需求，集成建设以下配套系统：（1）生产线过程控制单元。（2）自动化装卸单元。（3）机器人传送与控制单元。（4）机匣盘鼓零件自适应加工单元。（5）质量检测单元。（6）自适应随形抛光单元。（7）生产线物料库单元。

3. 集成系统

通过生产线集成系统实现加工设备、辅助设备、测量设备、中央刀库等设备之间的物理连接，构建可支撑整条生产运转的生产资料物流系统。针对以上能力需求，集成部署以下配套系统：（1）生产线检测与控制系统。（2）机器人传送与控制系统。（3）智能物料库管理系统。（4）智能感应装卸系统。

四、实施方案

1. 复合型加工系统组建方案

投产智能生产线加工的零件的车削加工与钻、铣加工的工时比例约为 1:2，选用相同规格高性能复合加工中心作为核心生产设备不仅可以减少设备需求数量，更重要的是采用同等规格机床组线，设备之间只有相对位置的差异，而没有性能差异，这样可使生产线制造柔性最大化。

加工中心将采用高精度的托盘交换和定位装置，确保托盘在不同加工设备之间都能精准执行系统设定的定位动作和位置坐标。同时在这些设备上全部加装在线测量系统和机内对刀装置，实时监控对工件和刀具几何参数的变化，为质量信息采集和加工精度控制提供重要的内部数据。

2. 辅助加工设备的集成方案

去毛刺机器人和自动清洗（烘干）机将集成到生产线中，通过协调设备供应商，使其采用与加工设备相同的托盘接口，可实现零件在去毛刺、洗涤等工位的自动上下料，进一步提高零件生产过程的自动化程度。

按照国家环保要求，对于易产生粉尘的去毛刺机器人将采用全封闭外罩，并配备除尘过滤装置，减少对其他精密设备、周边环境和人员健康的损害。

3. 测量系统的集成方案

生产线将承担部分铸件和焊接件毛坯的生产，这两种毛坯存在几何尺寸偏差大、型面变化不规律的特点，超出机加设备的在线测量装置的容差范围，需要使用激光扫描测量系统。激光扫描测量机采用无接触光学测量技术，对于外形尺寸变异范围较大的零件测量，更高效、更安全，同时采用机械关节臂作为运动驱动系统，使测量范围更大，测量方式更为灵活。该设备还可通过增加工作台和托盘接收器与托盘系统连接，进而集成到生产线上。而毛坯的测量数据直接传送给中央控制系统，后台程序将根据测量数据自动调整加工程

序，优化加工方案。

三坐标测量机是检验产品几何精度的必需设备，但其工作环境要求较高，特别是对温度梯度（空间、时间的）变化异常敏感，因而不适宜与生产线进行硬件连接，而应采用相对独立的、封闭工作区域，但可通过采用与生产线相同的托盘接口和传感器，以及在线数据采集系统，与生产线中央控制系统建立数据连接，使生产线中央控制系统可识别三坐标测量机的检测对象，并获取检测数据。

4. 智能工装应用方案

针对每种产品的几何特征和工艺流程分别设计专用的智能夹具，采用零点定位技术实现工件在工作托盘上的准确定位，精准执行控制系统制定的定位要求；而自动液压夹具技术可准确控制零件的夹紧状态，实现快速装夹，满足生产线运行的高效率需求。

5. 中央刀库设置方案

根据产品生产需求设置能容纳各类刀具中央刀库，通过搬运机器人进行内部刀具运输和管理，采用独立运输结构与每台机加设备的刀库连接，可根据实时的生产进度信息，有序、准确地进行刀具配送、补充和更换，而通过内部的位置传感器采集刀位数据，可以动态同步库存信息，结合刀具寿命管理系统和条件设定，针对中央控制系统发布刀具需求信息判断库存条件，采用可视化媒体装置发布实时的库存预警。

6. 生产线集成系统方案

智能生产线的集成将以物流路径为基础，通过运输轨道将加工设备、辅助设备、立体托盘库、装卸站等集成为一个整体，以工件托盘作为物流对象，通过制定统一的托盘接口，采用轨道运输车的形式执行托盘在不同设备之间的移动。

运输车、托盘库和托盘都将安装位置传感芯片，向中央控制器上报实时位置信息，使中央控制系统可以通过掌握托盘的动态位置信息实时跟踪在制品的加工进度和托盘的空闲情况。

7. 智能生产线中央控制系统建设方案

实现生产线管控信息化。该生产线加工设备借助现场的工业以太网线路按 TCP/IP 协议直接连入网络化 DNC 系统服务器。上传下达各类运行指令、运控参数、NC 程序、反馈数据、故障信息等信息；通过 RFID/ 条码的形式获取物料、设备、人员、辅助设施（包括各种专用工具、安装 / 拆卸交换站、数控辅助转台、刀具库等）的实时位置和状态信息；

储存每个工件开始 / 结束时间，加工工时、程序版本、所用工具；设备出错时，提出警报，形成带有错误信息、发生时间、报警代码的报告；生产线出错时，保证设备可以单独运行。

设备状态可视化。实现过程中的生产信息随时跟踪查看，并在现场设置电子看板等可视化终端，以三维图形化方式显示当前各类生产信息。

排产调度智能化。为了将生产计划付诸实施，对设备工装进行智能化改造，系统协调和同步包括托盘和夹具的所有资源的移动，实现对多品种的支持，提高生产线整体利用率和生产率。

8. 生产线总体布局

生产线总体布局如图所示。

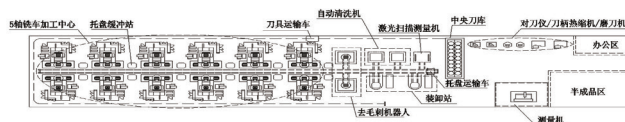


图 生产线总体布局

五、预期效益及推广前景

生产线建设指导可以极大节省经济成本效益。建立数字化生产线的总体框架结构，确定核心功能和制造能力，明晰关键技术环节，为顺利实施数字化生产线建立方案减少项目的投资和周期，有效规避项目实施过程中存在的成本、进度、质量及适应性风险。通过仿真验证，可直接避免生产线建设失败或者未能达到理想预期的投资失败。

行业推广与应用效益。智能生产线建设是一项跨学科、跨专业的系统工程，横跨机械、电子、控制等所有的机械加工专业领域，目的是在国家智能制造战略中主动作为，促进企业信息技术和制造技术的深度融合，提高企业核心竞争力。该示范项目是智能制造首次在国内航空制造业探索和应用，将为行业内智能制造研究工作积累大量的宝贵经验，同时为其他航空发动机产品专业化智能生产线建设和企业转型升级奠定坚实的基础。IM