

数控机床自动化生产线的设计与优化

张伟民¹ 徐军峰² 殷俊²

1. 宁波海天智联科技有限公司 浙江 宁波 317600

2. 宁波海天精工股份有限公司 浙江 宁波 317600

摘要: 数控机床自动化生产线是高度集成化、智能化的制造系统,以数控机床为核心,整合加工工序实现全自动化生产。其具有高精度、高效率、高柔性等特点。文章详细阐述生产线的设计要点,包括需求分析、总体布局、设备选型与配置、控制系统及物流系统设计。提出了生产计划、设备维护、质量控制、能源管理等方面的优化策略,旨在提升生产线效率、稳定性和产品质量,降低生产成本,实现节能与生产效益双赢。

关键词: 数控机床; 自动化生产线; 设计; 优化

1 数控机床自动化生产线概述



图1 数控机床自动化如图所示

1.1 定义与特点

数控机床自动化生产线,是一种高度集成化、智能化的制造系统,它以数控机床为核心,通过自动化物流系统、控制系统以及相关辅助设备,将多个加工工序有机整合,实现零件从毛坯到成品的全自动化生产。其特点显著。首先是高精度,数控机床本身具备精密的加工能力,在自动化生产线中,各工序的衔接与执行都能精准把控,确保产品尺寸精度和形位公差符合严格标准。其次是高效率,自动化生产线减少了人工干预时间,各工序并行或紧密衔接运作,大大缩短了生产周期。一条汽车发动机缸体生产线,相比传统加工方式,生产效率可提升数倍。再者是高柔性,通过对数控程序的修改,生产线能够快速适应不同产品型号、规格的生产需求,实现多品种、小批量的灵活生产。

1.2 组成与工作流程

数控机床自动化生产线主要由以下几部分组成:

(1) 数控机床,作为核心加工设备,根据预先编制的数控程序,对工件进行车削、铣削、镗削、磨削等多种加工操作。常见的有数控车床、数控铣床、加工中心等。

(2) 自动化物流系统,包括工件传输装置(如传送带、桁架机器人、AGV小车等)和刀具配送装置。工件传输装置负责将毛坯、半成品和成品在各加工设备之间准确运输;刀具配送装置则及时为数控机床提供所需刀具^[1]。

(3) 控制系统,对整个生产线的运行进行集中监控与管理,协调各设备的动作顺序和运行参数,确保生产过程稳定、高效。它接收生产任务指令,调度各设备协同工作,并实时监测设备状态和生产进度。(4) 检测与监控设备,用于对加工过程中的工件尺寸、表面质量等进行在线检测,以及对设备运行状态(如温度、振动等)进行实时监控,一旦出现异常能及时报警并采取相应措施。

工作流程:毛坯由自动化物流系统的传输装置送至首台数控机床,机床按照数控程序进行第一道加工工序。加工完成后,工件经传输装置转移至下一工序的机床,同时,刀具配送装置根据加工需求为机床更换合适刀具。如此依次进行多道加工工序,直至工件加工完成。在整个过程中,检测与监控设备实时工作,将数据反馈给控制系统,若发现问题,控制系统立即调整设备运行参数或停止生产线进行故障排查。

2 数控机床自动化生产线的设计

2.1 需求分析

在设计数控机床自动化生产线之前,深入且全面的需求分析至关重要。首先是产品工艺需求。不同产品具有独特的加工工艺,例如在机械制造领域,轴类零件与箱体类零件的加工工艺截然不同。轴类零件通常涉及车削外圆、钻孔、磨削等工序,而箱体类零件则需要铣削平面、镗孔、攻丝等操作。以汽车发动机缸体为例,

其加工精度要求极高,缸筒内径的尺寸公差需控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,平面度误差不超过 0.05mm 。这就要求生产线具备相应的高精度加工能力和检测手段,以保证产品质量符合严苛标准。生产规模需求同样关键。若企业计划大规模生产某类产品,如汽车零部件制造企业,日产发动机缸体500-1000件,那么生产线需具备高产能。此时,可采用多工位并行加工、高速切削等技术,提高单位时间内的产量。相反,对于小批量、多品种的生产需求,如航空航天零部件制造,可能每月仅生产数十件不同规格产品,生产线则需具备高度柔性,能够快速切换生产不同型号的产品,这通常依赖于先进的数控编程技术和灵活的工装夹具系统。企业的投资预算也是重要考量因素。自动化生产线的建设成本包括设备采购、安装调试、厂房改造、人员培训等多方面费用。一般而言,一条中等规模的数控机床自动化生产线,设备采购成本可能在500-1000万元,安装调试及厂房改造费用约100-200万元,人员培训费用为50-100万元。企业需根据自身财务状况和预期投资回报,合理规划预算,在满足生产需求的前提下,选择性价比最优的设计方案。

2.2 总体布局设计

总体布局设计决定了生产线各组成部分的空间位置关系,直接影响生产线的运行效率和物流顺畅性。在设计时,需遵循紧凑、高效、便于维护的原则。常见的布局形式有直线型、U型、环形等。直线型布局适用于工序较少、物流方向单一的生产线,设备沿直线依次排列,工件在各设备间单向传输,这种布局简洁明了,易于安装和调试。U型布局则能有效节省占地面积,且有利于物料的集中配送和回收。在U型布局中,设备呈U型排列,物料入口和出口位于同一侧,方便物流系统的衔接。如电子产品的插件生产线,采用U型布局可使物料配送路径缩短30%-40%,提高生产效率^[2]。环形布局常用于需要多工位循环加工的生产线,工件在环形轨道上循环运输,各工位依次进行加工操作。这种布局能实现连续生产,提高设备利用率。以手表零部件的精密加工生产线为例,环形布局可使设备利用率提升至80%-90%。在确定布局形式后,还需考虑设备间距、操作空间等细节。设备间距应根据工件尺寸、物流设备的运行空间以及人员操作需求来确定,一般在1.5-3米之间。同时要为操作人员预留足够的操作空间,确保其能够安全、便捷地进行设备操作和维护,操作空间面积通常不小于每台设备占地面积的30%-50%。

2.3 设备选型与配置

设备选型与配置是生产线设计的核心环节,直接关

系到生产线的加工能力、精度和可靠性。对于数控机床的选型,要依据产品的加工工艺和精度要求。若产品以铣削加工为主,且精度要求较高,可选用高精度的立式加工中心,如德国德马吉的DMU50eco,其定位精度可达 $\pm 0.005\text{mm}$,重复定位精度为 $\pm 0.003\text{mm}$,主轴转速最高可达18000rpm,能满足精密模具、航空零部件等产品的铣削加工需求。若涉及大量车削加工,可选择数控车床,如大连机床的CAK6150,其最大加工直径为500mm,最大加工长度为1000mm,适用于轴类、盘类零件的车削加工。自动化物流设备的选型需结合生产线布局和物料特点。对于直线型布局且物料重量较轻的生产线,可采用传送带作为传输装置,其传输速度一般在0.5-2m/s之间,能满足中小尺寸零件的快速运输。若物料较重或需要在复杂空间内运输,可选用AGV(自动导引车),其承载能力可达1-5吨,运行速度通常为0.2-1m/s,具有较高的灵活性和自动化程度。刀具配送设备也是关键组成部分,对于加工工序复杂、刀具更换频繁的生产线,可配置自动换刀系统(ATC),如斗笠式刀库、链式刀库等。斗笠式刀库换刀速度一般在3-5秒,链式刀库换刀速度可达1-3秒,能大大缩短刀具更换时间,提高生产效率。在设备配置数量上,需根据生产节拍进行计算。假设某产品的生产节拍为10分钟/件,某台数控机床的加工时间为3分钟/件,则该设备的配置数量至少为2台($10 \div 3 \approx 3.33$,向上取整),以确保满足生产需求。

2.4 控制系统设计

控制系统犹如生产线的“大脑”,负责协调各设备的运行,实现生产过程的自动化控制。现代数控机床自动化生产线多采用分布式控制系统(DCS)或可编程逻辑控制器(PLC)控制系统。DCS系统具有高度的可靠性和灵活性,能够实现对大规模生产线的集中监控和分散控制。它通过网络将各个控制站连接起来,每个控制站负责控制一部分设备,实现数据的实时采集、处理和传输。PLC控制系统则以其编程简单、抗干扰能力强等特点,广泛应用于中、小型自动化生产线。PLC通过编写梯形图等程序,实现对设备的逻辑控制。在一条小型五金件加工生产线上,利用PLC控制各设备的启停、物料传输顺序以及加工参数的切换,能快速响应生产需求的变化。控制系统需具备完善的人机界面(HMI),方便操作人员进行参数设置、生产任务下达以及设备状态监控。HMI界面应设计简洁直观,易于操作。同时系统应具备故障诊断功能,当设备出现故障时,能迅速定位故障点,并提供相应的故障解决方案,以减少停机时间。据统计,具备高效故障诊断功能的控制系统,可使生产

线的平均故障修复时间缩短30%-50%。

2.5 物流系统设计

物流系统是生产线的“动脉”，负责物料的高效运输和配送，直接影响生产线的整体效率。物料传输路径设计要尽可能简洁、流畅，避免迂回和交叉。在直线型布局的生产线中，物料传输路径应沿直线方向，减少转弯次数。对于复杂布局的生产线，可通过模拟软件对物流路径进行优化。传输设备的速度和承载能力需与生产线的生产节拍和物料重量相匹配。如前文所述，传送带的传输速度和AGV的运行速度应根据实际生产需求合理设置。对于承载能力，若运输的物料最大重量为50kg，则传输设备的承载能力应至少为60-75kg，以确保安全可靠运输。物料存储系统也是物流系统的重要组成部分^[3]。在生产线上，通常设置原材料库、半成品库和成品库。原材料库用于存放毛坯件，其存储容量应根据企业的采购周期和生产用量来确定。通过在物料上粘贴条形码或安装RFID标签，利用扫码设备或RFID读写器，可实时获取物料的位置、状态等信息，并将其传输至控制系统，便于操作人员掌握物料流动情况，及时调整生产计划。

3 数控机床自动化生产线的优化策略

3.1 生产计划优化

生产计划的合理编排是提升数控机床自动化生产线效率的关键。企业应借助先进的生产管理软件，如制造执行系统（MES），依据订单需求、设备产能以及物料库存状况，制定精准的生产计划。通过对生产任务优先级的科学排序，可避免设备闲置与过度生产。例如，在多品种小批量生产场景中，MES系统能够依据产品的交货期紧迫性，合理分配生产资源，优先安排交付时间临近订单的生产，确保按时交付率提升至95%以上。优化生产批量，运用经济批量模型等方法，平衡设备调整成本与库存成本，降低单位产品的生产成本。

3.2 设备维护优化

定期且有效的设备维护是保障生产线稳定运行的基础。一方面，建立基于状态监测的预防性维护机制，在数控机床关键部位安装传感器，实时采集设备的振动、温度、电流等数据^[4]。运用数据分析技术，提前预判设备潜在故障风险，例如通过监测主轴振动数据的异常波动，可在故障发生前一周进行维护，避免因突发故障导致的生产中断，将设备平均故障间隔时间（MTBF）延长20%。另一方面，优化维护计划，依据设备运行状况与历史维护记录，合理安排维护周期，减少不必要的停机维

护时间。储备常用备件，确保在设备出现故障时能够快速更换，缩短维修时间，提高设备利用率。

3.3 质量控制优化

质量控制贯穿于生产线的全过程。引入先进的检测技术，如在线测量仪、视觉检测系统等，对加工过程中的产品尺寸、表面质量等进行实时监测。以汽车零部件加工为例，在线测量仪可在零件加工完成后立即进行尺寸测量，一旦发现尺寸偏差超出允许范围，系统自动调整加工参数，将产品废品率降低至2%以内。建立质量追溯体系，通过在产品上标记唯一识别码，关联生产过程中的原材料批次、加工设备、操作人员以及加工参数等信息，便于在出现质量问题时快速定位根源，采取针对性改进措施，提升产品质量稳定性。

3.4 能源管理优化

在倡导绿色制造的当下，能源管理优化至关重要。对生产线设备进行能耗监测，安装能源计量仪表，统计不同设备的能耗数据。分析设备能耗特性，对于高能耗设备，如大功率数控机床，采用智能节能控制技术，在设备空闲时自动降低功率，减少能源浪费。据统计，采用此类技术可使设备能耗降低15%-20%。优化生产线运行模式，通过合理安排设备启停时间，避免设备长时间空转，进一步提升能源利用效率，实现节能与生产效益的双赢。

结束语

数控机床自动化生产线的设计与优化是制造业提升竞争力的关键。通过科学合理的设计，结合有效的优化策略，企业可充分发挥生产线的优势，提高生产效率、保障产品质量、降低运营成本。未来，随着技术的不断进步，数控机床自动化生产线将朝着更智能化、柔性化、绿色化的方向发展，为制造业的转型升级提供强大动力，推动制造业迈向更高水平。

参考文献

- [1]张铭.基于机械设计与制造的自动化生产线优化与改进[J].家电维修,2024,(09):55-58.
- [2]陈永新.基于机电一体化的自动化生产线设计与优化[J].数字技术与应用,2024,42(06):225-227.
- [3]胡庆杰.轨枕预制设备的自动化生产线设计与优化[J].信息系统工程,2024,(02):65-68.
- [4]王志宇.自动化生产线的设计改进与维护[J].中国设备工程,2021(21):184-185.