

机械制造自动化生产线设计与优化研究

刘 来

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要] 自动化生产线是机械制造企业实现高效生产、智能化转型的主要平台。围绕生产线的系统化设计和多维优化展开研究, 在结构设计上提出模块化总体架构以及基于可编程逻辑控制器和数据采集与监控系统的分布式控制系统方案, 在优化方面从工艺流程再造、设备配置与产线平衡、智能物料配送、信息集成与监控四个方面建立优化框架。机电一体化技术属于现代制造业主要发展方向, 它所要实现的是生产过程的自动化、智能化、高效化。在此基础上, 从设备可靠性保证、质量控制体系完善、数字化管理平台创建、智能制造升级等角度给出实施保障策略, 给机械制造自动化生产线系统性更新提供参照。

[关键词] 机械制造; 自动化生产线; 智能控制

DOI: 10.33142/ec.v9i10.20515

中图分类号: TH165

文献标识码: A

Research on Design and Optimization of Mechanical Manufacturing Automation Production Line

LIU Lai

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: Automated production lines are the main platform for mechanical manufacturing enterprises to achieve efficient production and intelligent transformation. Research is conducted on the systematic design and multidimensional optimization of production lines, proposing a modular overall architecture and a distributed control system solution based on programmable logic controllers and data acquisition and monitoring systems in structural design. In terms of optimization, an optimization framework is established from four aspects: process reengineering, equipment configuration and production line balance, intelligent material distribution, and information integration and monitoring. Mechatronics technology belongs to the main development direction of modern manufacturing industry, which aims to achieve automation, intelligence, and efficiency in the production process. On this basis, implementation guarantee strategies are proposed from the perspectives of ensuring equipment reliability, improving quality control systems, creating digital management platforms, and upgrading intelligent manufacturing, providing reference for systematic updates of mechanical manufacturing automation production lines.

Keywords: mechanical manufacturing; automatic production line; intelligent control

引言

在全球制造业竞争日趋激烈的背景下, 自动化生产线已经成为机械制造企业提高生产效率、保证产品质量、降低生产成本的重要设备。美国、日本、德国等发达国家一直重视自动化生产线的研发, 柔性制造系统以及多轴加工设备在全世界的市场占有率较高。国内制造业正处在由传统生产方式向智能化、柔性化转变的过程之中, 对于自动化生产线的设计与优化也成为行业的热门话题。目前许多企业自动化产线存在设备配置不合理、工艺流程固化、信息孤岛等状况, 从而影响到整个效率的发挥。怎样从系统角度出发, 既考虑硬件又考虑软件, 创建起高效、稳定且

可拓展的自动化生产体系, 这是急需解决的工程问题。因此, 从总体结构、控制系统、工艺流程、物流配送、信息集成等各方面入手进行系统的探究, 提出切实可行的设计和改进方案, 对促进机械制造自动化升级有现实意义。

1 机械制造自动化生产线设计与优化的理论基础

自动化生产线设计和优化要依靠多学科理论支撑, 主要依据产线平衡理论、系统集成理论和智能制造理论。产线平衡理论起源于装配线平衡问题, 核心就是把生产任务合理地分派到各个工位上, 使各个工位的作业周期尽量接近一致, 从而达到最大的资源利用率和节拍要求。自动化加工产线的平衡问题可以表述为, 在自动化加工线各个工

位之间怎样合理地分配加工任务,从而使得产线效率最高。该理论对自动化加工产线也同样适用,其目标函数一般为最小化工位数或者最小化生产节拍,属于非确定性多项式困难问题,需要使用智能优化算法来求解。机械制造自动化产线中由于加工设备并行处理能力、多主轴加工头使用、切削参数调节空间等因素,自动化加工产线平衡问题比传统装配线平衡问题更复杂,需要考虑设备选型和任务分配的耦合关系。

系统集成理论是从全生命周期的角度来考虑产线的设计和运行,把工艺规划、生产调度、物料管理、质量控制等环节都包含在统一的框架内。过程规划属于制造系统设计不可分割的部分,从自动化走向集成的过程,意味着在设计目标函数的时候也要考虑系统整合所造成的性能指标。智能制造理论给产线优化指明了数字化、网络化、智能化的发展方向,数字孪生、信息物理系统、工业互联网等技术的加入,使产线可以在虚拟空间中对自身进行仿真的验证和实时的映射,进而提高设计的精确性以及运行的自适应性。

2 机械制造自动化生产线设计分析

2.1 自动化生产线总体结构设计

自动化生产线总体结构设计属于系统工程,要依照生产对象的工艺特性、产能要求和场地状况来决定产线的布置形态以及模块组成。典型的自动化生产线是由加工设备模块、物料输送模块、检测和分拣模块、控制和信息模块这四个部分组成的。从布局上来说可以采用直线式、U形或者环形布局,U形布局由于操作人员可以兼顾多个工位、缩短物料搬运路径而被广泛应用于中小批量柔性生产的场合。模块化设计是目前总体结构设计的主要思想,把产线分隔成若干个功能各自独立、标准的模块,从而便于迅速重组和扩充。自动化码垛系统可以使用吸附式或者机械夹持式的执行机构,配合专用定位工装来完成工件的自动堆叠和转运;冲压成型系统的设计要将逻辑控制和运动控制融合在一起,从而达成冲压动作的精确协调。根据产能目标确定产出线理论节拍,从而安排各个模块的加工能力以及缓存容量,使上下游工序的流量匹配。

2.2 自动化控制系统设计

控制系统是自动化生产线的“大脑”,它的设计好坏直接影响到产线的运行稳定和控制精度。目前主流的自动化产线控制系统采用的是分布式结构,底层用可编程逻辑控制器(PLC)作为执行单元来完成各个工位设备的逻辑控制和顺序控制,中间层用SCADA系统来完成数据采集和集中监控,上层用制造执行系统(MES)来完成生产调

度和信息管理。

在控制算法上,PID控制器由于结构简单、参数整定容易,所以在工业过程控制中被广泛应用。但是传统的PID控制理论对于复杂的工业对象来说,由于不能建立准确的数学模型,很难达到理想的效果,而模糊PID控制方案比传统的PID控制方案要好,系统合理化后先期策划的质量鲁棒性得到提高。因此,在自动化产线的伺服驱动、温度控制、位置定位等处加上模糊控制、自适应控制等智能算法,可以提高系统动态响应以及抗干扰性。除此之外,人机交互模块的设计也越来越重要,用工业触摸屏或者上位机界面来实现对产线运行状况的实时监测、工艺参数的调节以及异常报警的处理。

3 机械制造自动化生产线优化的关键措施

3.1 生产工艺流程优化

生产工艺流程决定产线的总体效率上限。传统的工艺流程一般依照历史经验来制定,存在着工序重复、加工路线曲折、工序之间等待时间过长等状况。优化的任务就是使产品质量不变的情况下,用工序合并、并行加工、路径重排等办法来缩短生产时间。具体措施有分组技术把相似加工特征的零件合并到同一个加工族里,缩减换模和调整的时间,利用价值流图分析法找出流程里的非增值部分,对瓶颈工序实施定向改善,引进柔性加工单元,达成多品种零件的混流生产,提升产线应对市场需求变动的反应速度。对机械制造生产线进行自动化智能化设计的优化研究,用智能设计来实现生产链环节的智能化处理,从而达到生产效益的显著提高。工艺流程优化要和设备参数调优一起推进,以切削参数的多目标优化为例,在保证加工质量的基础上进一步压缩单件加工时间,使流程再造和工艺参数优化形成合力,共同提高产线整体产出效率。

3.2 设备配置与产线平衡优化

设备配置优化就是以最低的设备投资和运行成本来满足产能需求,并且保证产线各个工序能力的匹配。产线平衡问题在本环节更加明显,各个工位的作业时间不一致,瓶颈工位会限制整线产出,非瓶颈工位就会出现能力浪费^[1]。解决思路分为两层,第一层是设备选型和数量安排来调节各个工位的加工能力,在瓶颈工序上增加并行设备或者使用高速加工单元;第二层是作业元素的重新分配来平衡各个工位的负荷,用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法在可行解空间中寻找最优的分配方案。经过自动化、智能技术的优化设计,生产线生产效率提高30%,质量稳定性提高25%,充分说明了自动化、智能技术对机械制造生产线优化设计有着重大的实践意义。

表 1 为自动化生产线设备配置和产线平衡优化前后性能对比

评估指标	优化前	优化后	改善幅度
生产线综合效率（OEE）	65%	82%	提升 17 个百分点
瓶颈工序设备利用率	98%	88%	降低 10 个百分点
非瓶颈工序平均利用率	56%	83%	提升 27 个百分点
生产节拍（分钟/件）	3.2	2.5	缩短 21.9%
在制品库存数量（件）	215	98	减少 54.4%

表 1 给出了设备配置和产线平衡优化前后各个主要性能指标对比结果。优化之前，瓶颈工序的利用率接近饱和，而不是瓶颈工序的利用率不到六成，能力失衡严重。优化之后各个工序的利用率趋近于平均，生产系统中物料库存明显下降，生产系统的总效率提高 17 个百分点，说明产线平衡改善是行之有效的。

3.3 智能物流与物料配送优化

物料配送的及时性、准确性影响产线连续运转速度。传统的手工配送方式存在着随意性大、反应慢、信息不透明等缺点，已经成为制约产线效率提高的瓶颈。智能物流优化的关键在于创建起自动导引车、悬挂输送链、机器人码垛等自动化物流设备同信息系统深度整合起来的配送体系^[2]。具体的措施有：根据生产节拍和工位物料消耗速率来制订精确的定时定量配送计划，采用自动导引车路径规划算法优化车辆行驶路线，削减空驶和拥堵，创建线边超市或者缓冲库存区，实行物料分批次、小批量配送，依靠条码或者二维码技术实现物料流转过程的全程追踪，保证物料信息同生产进度实时同步。智能物流系统要正常运转，还要同上层制造执行系统展开数据交流，使得配送指令可以依照生产计划的变动及时做出改变，从而加快物料供应的速度并提高其精确性。

3.4 信息集成与智能监控优化

信息集成就是打通产线各个环节的数据壁垒。传统产线中设备层、控制层和管理层之间存在信息不畅的现象，造成决策跟不上现场的变化。优化目标就是利用工业以太网、OPCUA 等通信协议创建起统一的数据采集和交换平台，把设备的状态、工艺参数、质量数据、生产进度等信息实时汇集起来并加以融合。在此基础上，智能监控系统对运行数据进行实时分析，从而达到设备健康状况评价、异常预警以及故障诊断的目的。面向数字孪生车间的自动化产线研究，提出了一种适合于自动化产线的数字孪生体系结构，既满足了自动化产线基本功能的要求，又考虑到了智能化管理、运营等各方面的需求，实现了虚拟产线的调试和虚实产线的实时映射。数字孪生技术加入之后，产线优化就不再是试错法，而是在虚拟环境里检验并修改方案，进而削减了优化的成本与风险。

4 机械制造自动化生产线优化实施保障

4.1 自动化设备维护与可靠性保障

设备可靠性是自动化生产线正常运转的前提。高故障率不但会造成非计划停机，还会造成质量问题 and 安全隐患^[3]。维护保障策略应该从预防性和预测性的维护两个方面来开展。预防性维护根据设备运行时间或者加工数量来制定定期检修计划，包含机械部件润滑、电气线路检查、传感器校准等。预测性维护依靠振动监测、温度检测、电流分析等手段，对电主轴温度展开测试，把工业电主轴应用到自动化生产线中，实验结果显示，装有工业电主轴的自动化生产线生产效率得到明显提升，产品合格率也有所提高。通过对设备状态数据趋势的预测，提前判断出故障发生的时间段，在故障出现之前开展维修工作，使非计划停机造成的损失降到最低。

4.2 生产质量控制体系完善

自动化生产线高速运转的时候，对质量把控有了更高的要求。传统的事后抽检模式已经不能满足全面质量控制的要求，需要向过程控制、在线检测的方向发展。完善质量控制体系的措施有：在关键工序上设置在线检测设备（机器视觉系统、激光测量仪），对产品的尺寸、外观、性能等指标进行实时测量和自动判定；建立统计过程控制（SPC）系统，对关键质量特性进行过程能力分析和异常预警；将质量数据同设备运行参数联系起来加以分析，找到质量偏差的根本原因，达成由检出不不良转向预防不良的目的。

4.3 数字化管理平台建设

数字化管理平台属于产线优化落地的信息化载体，主要包含生产计划排程、设备管理、质量追溯、绩效分析等各方面内容。平台创建要遵照统一数据标准，分阶段推进，不断更新的准则。生产计划上平台应该具有根据实时产能、订单优先级来动态排程的能力，在发生设备故障或者紧急插单的时候可以马上产生调整方案。从绩效管理角度来说，平台可以利用设备综合效率（OEE）、生产计划完成率、不良率等指标来对各个环节的运行绩效做出量化的评价，从而给持续改进赋予数据支持。平台还要留出和供应商管理系统、客户关系管理系统等外部系统接口，为产业链协同打下基础。

4.4 持续改进与智能制造升级

自动化生产线的改良不是一项独立的工程，它是一种不断更新完善、循环往复的工程。企业应当创建常态化的改善机制，定时执行产线效能评定，找出新的改善领域。改进信息来源有设备运行日志分析得出的时间损失，质量

数据反馈出现的工艺偏差,操作人员提出的意见,行业对标发现的差距等。就中长期来看,智能制造的升级是必然的。智能制造生产线及其控制策略的设计要分析机械加工智能制造生产线的控制需求,设计总体控制架构、加工设备控制策略、物料搬运和仓储控制策略、组件装配区控制策略。企业要制订分阶段升级路线图,由单机自动化向整线智能化迈进,由数据采集到数据分析和智能决策飞跃,最后达成自主感知、自主优化、自主决策的智能制造目的。

5 结语

机械制造自动化生产线设计与优化属于一项系统工程,要从结构设计、控制配置、流程再造、物流优化、信息集成等多方面同步开展。经过研究发现,按照产线平衡理论来配置设备可以有效地消除工序瓶颈,而采用数字孪生、智能监控等信息技术来对产线运行进行优化,也给产

线运行带来了新的方法。落实实施保障措施才能把优化方案由理论变为现实的效益。随着人工智能、5G、数字孪生等前沿技术的不断渗透,自动化生产线会向着自感知、自决策、自执行的方向不断前进,机械制造企业智能化转型也会因此得到更加有力的技术支持。

[参考文献]

- [1]扈晓刚.自动化智能技术在机械制造生产线中的优化设计研究[J].中国设备工程,2024(17):43-45.
- [2]唐龙.机械加工智能制造生产线的控制策略设计与实践探索[J].现代制造技术与装备,2024,60(8):213-215.
- [3]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(6):225-227.

作者简介:刘来(1989—),男,汉族,河北邢台人,中级工程师,2012年6月毕业于邢台职业技术学院,大专,现主要从事锂电设备的设计与研发工作。