

齿轮制造企业数字化转型中的生产管理创新

刘 浩, 张 鹿, 高 峰

(山东能源装备集团中传矿用设备制造有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要 齿轮制造企业数字化转型, 正在对生产管理模式进行深刻重构。转型以数据透明、过程精准、系统协同显著提高生产效率和柔性, 但数据孤岛、管理脱节、工艺数字化不到位的问题依然制约着其发展。在此背景下, 企业需要建构数据驱动新管理哲学、创建柔性自适应生产体系、创新数据应用场景、夯实技术和人才支撑等, 旨在实现生产管理全面创新升级。

关键词 齿轮制造企业; 数字化转型; 生产管理

中图分类号:F425

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.022

0 引言

在全球制造业智能化大潮中, 齿轮制造这一至关重要的基础环节的数字化转型事关产业链竞争力。以生产管理为经营核心是转型成效的关键表现。本文论述数字化转型给齿轮生产管理所带来的有利条件, 分析目前存在的重大挑战, 并在此基础上提出系统创新策略, 旨在能对促进相关企业智能化生产和高质量发展起到理论借鉴和实践指引作用。

1 齿轮制造企业数字化转型中生产管理的优势

1.1 数据获取与透明化优势

数字化转型以数据为中心。传统齿轮生产管理、信息传递往往依赖纸质单据, 手工记录且系统分散、数据滞后、片面甚至错误。数字化转型是通过将传感器、智能仪表、机器视觉系统、RFID 广泛布设于生产现场来实现原料的入库, 毛坯锻造以及热处理、齿形加工(车、铣、滚、插、磨)、检测、装配等全工序的实时数据采集^[1]。这些数据涵盖设备状态(如主轴转速、进给量、振动、温度)、工艺参数(如切削深度、冷却液流量等)、质量指标(如尺寸公差、表面粗糙度、齿形误差)、物料流转信息、能源消耗等。由此建立起来的“数据透明化”环境让管理者可以像有“透视眼”一样对生产现场实际情况进行实时透视。例如: 借助车间级制造执行系统(MES)的看板功能, 管理团队能够实时了解每一台数控机床的工作进度、设备的整体效率(OEE)、在制品(WIP)的库存布局以及订单交付的倒计时情况^[2]。

1.2 过程控制与精准化优势

在综合、实时数据获取基础上, 数字化转型使得齿轮生产过程控制由“经验驱动”向“数据驱动”精

准化转变。在工艺控制方面, 通过对历史加工数据与质量数据进行关联分析, 可以建立关键工艺参数(如热处理温度与时间的曲线以及磨削砂轮的线速度等)与最终齿轮性能(如硬度、残余应力、疲劳寿命等)的量化模型^[3]。通过应用这些模型, 能够对生产工艺进行进一步的优化和固化, 并可以直接通过数字工艺卡将其发送到设备上, 以确保每一批次的产品工艺执行都是一致的, 从而降低人为操作的波动性。在质量控制方面, 在线检测技术和 SPC(统计过程控制)系统的结合, 使得质量控制从传统的“事后检验”转变为“事前预防和事中控制相结合”。以磨齿工序为例, 利用在线测量装置对齿形、齿向误差等数据进行实时反馈, 该系统能自动判断变化趋势和对机床参数进行微调, 从而达到加工过程中自适应补偿的目的, 使质量偏差达到萌芽状态^[4]。

1.3 系统协同与柔性化优势

数字化转型以信息技术集成为手段, 有效地打通齿轮制造企业内和企业与其上下游间信息流, 建立一个高协同生产体系。在企业内部, 通过 ERP(企业资源计划)、MES(制造执行系统)、PLM(产品生命周期管理)、SCADA(数据采集和监控系统)等系统的深度集成, 实现从订单受理、生产计划排程、物料采购及分配、车间作业实施, 直至产品入库发运等全过程信息贯通和业务协同。在顾客订单发生变化或者紧急插单情况下, 该系统能迅速模拟出物料、产能、交期等因素对生产计划的影响程度, 动态地调整生产计划以带动供应链和生产线做出同步反应。在制造和执行的过程中, 利用 AGV(自动导引车)、智能立库和 MES 的协同作用, 成功地实现物料的按需、准时和准确的自动配送, 从

作者简介: 刘浩(1980-), 男, 本科, 研究方向: 智能再制造。

而大大减少线边的库存和等待时间^[5]。这一系统协同能力使企业具有更大的生产柔性。面对市场对多品种小批量定制化要求不断提高的趋势，数字化生产线可实现程序快速切换、工装准备、工艺参数调用等功能，为混线生产提供支撑。例如：利用数字化双胞胎技术可在虚拟环境下模拟和优化新产品加工流程、验证工艺可行性、缩短试制周期以迅速应对市场变化和提高顾客满意度。

2 当前齿轮制造企业数字化转型中的生产管理存在的问题

2.1 “数据孤岛”与集成困境

尽管数据价值凸显，但“数据孤岛”问题在众多齿轮制造企业中依然普遍存在，成为阻碍数字化转型深化的瓶颈。所谓“数据孤岛”，就是各部门、各系统、各设备之间的数据相互隔离，不能畅通流通并进行有效集成。其成因复杂：第一，在技术层面，企业内各类自动化设备、数控系统（如西门子、发那科、海德汉）、专业软件（如 CAD/CAM、CAPP）以及管理信息系统往往来自不同厂商，使用不同的通信协议及数据标准以及没有统一接口规范等原因，造成物理连接及数据互通难度较大。第二，在管理层面，部门壁垒造成数据所有权认知过度，将业务数据看作是部门“私有财产”，数据治理机制与跨部门共享文化缺失。例如：设计部门几何模型和公差数据、工艺部门加工参数、生产车间实际实施数据、质量部门检测报告等，往往散见于各个系统，很难对其进行关联分析来对质量问题进行溯源或者优化工艺。

2.2 管理模式与数字技术脱节

许多齿轮制造企业在推进数字化转型时存在“重技术、轻管理”的倾向，即引入了先进的数字化系统和设备，却沿用传统的、以经验为主的管理模式及组织架构，造成技术和管理上的“两张皮”。第一，从管理理念来看，一些管理者仍然习惯层层汇报和会议决策等指挥控制方式，对数据驱动和即时响应等敏捷管理方式没有足够的接受程度，决策过程没有充分利用数字化平台所提供的实时信息以及分析工具。第二，在组织架构方面，传统金字塔式和职能化的部门设置同数字化转型对扁平化、网络化、跨职能协作团队需求相矛盾。当端到端流程优化需要以数据为基础时，往往会因为部门墙存在障碍导致推进困难。第三，在业务流程中，很多工作流程并没有以数字化环境为目标而重新创建。以生产计划排程为例，目前仍然以计划员亲身体验为主，没有与 MES 实时产能、设备状态数据进行深度融合，无法达到自动化有限容量排程；

质量处理流程仍然停留在纸质单据的转移上，没有做到全电子化闭环管理。

2.3 核心工艺的数字化深度不足

齿轮制造包含诸多核心关键工艺，如热处理（渗碳、淬火、氮化）、精密磨齿、修形等，这些工艺对齿轮的最终性能（如疲劳强度、耐磨性、噪声水平等）具有决定性影响。目前，这些核心工艺普遍数字化深度不够，已成为数字化转型“深水区”“硬骨头”问题。一方面是工艺机理难以数字化建模。例如：热处理时材料组织转变和应力场分布、磨削时材料去除机理、表面完整性的形成等，均是涉及多物理场耦合作用的复杂问题。若要准确地建立数字化仿真模型是非常困难和昂贵的，而且还需大量实验数据来进行验证。很多企业仍然主要依靠工艺专家经验，采用“试错法”进行生产。另一方面是工艺过程数据采集和闭环控制不力。对热处理炉而言，通常仅能采集温度、时间等宏观参数，对炉内气氛碳势准确控制以及工件心部和表面温差这一微观状态却缺少有效监控；对于高精度磨齿机，虽然能采集到部分电机参数，但对于砂轮与工件接触区的真实状态（如磨削力、磨削温度）的在线感知能力有限。

3 齿轮制造企业数字化转型下的生产管理创新策略

3.1 构建“精益为基，数据驱动”的生产管理新哲学

齿轮制造企业生产管理创新首先是管理哲学上的改革。必须确立“精益是基础，数据是动力”的新理念，将精益思想与数字技术深度融合。精益生产以消除浪费和创造价值为核心内容，为优化流程和提升效率提供方法论框架。数字化的转型为精益管理提供了一种前所未有的透明度和精准性手段。新管理哲学强调：数据作为一种新型生产要素和基本决策依据。企业需要在整个生产管理价值链中渗透数据驱动思维，包括战略规划和日常经营。这就决定管理者应该习惯用数据看板，而不是简单地通过听取汇报的方式去了解企业的运营状况；决策应该建立在数据分析所获得的洞察之上，而不是纯经验的直觉；改进活动应在发掘数据趋势和确定根本原因的基础上进行。同时，必须坚持精益原则，避免因数字化而产生新的浪费（如过分收集无用数据，打造花哨“面子工程”等）。具体执行时，要求企业高层形成共识，并通过培训、文化建设等方式把这种新哲学内化到所有员工共同的信念与行为准则之中，指导组织由“经验文化”走向“数据文化”“不断提升文化”。

3.2 打造“一体化、柔性化、自适应”的生产运营新体系

为了支持新的管理哲学，必须在组织和流程层面构建一个“一体化、柔性化、自适应”的新生产运营体系。一体化是指横向打通研发、工艺、生产、质量、供应链等环节，纵向贯通设备层、控制层、车间层、企业层，构建基于统一数据平台（如工业互联网平台）的业务协同体系。通过建立统一数据标准和接口规范促进PLM、ERP、MES、SCADA深度融合，使产品全生命周期内数据无缝流转和共享。柔性化就是要构造能对市场变化作出迅速反应的动态生产能力。为实现这一目标，需要推动模块化和可重构的生产线设计，采用柔性制造单元（FMC）和机器人等先进的自动化技术，并构建一个能够支持动态排产和混线生产的高级计划与调度系统。同时引入以订单为导向的快速工艺设计和工装快速制备管理模式。所谓自适应，就是使生产系统具有自我感知、自我分析、自我决策、优化等功能。通过部署更广泛的边缘感知设备，结合人工智能和机器学习算法，使系统能够实时感知生产扰动（如物料延迟、设备性能衰减、质量波动等），并且自动或者协助决策者做出调整，如动态重排工序、调整工艺参数、触发维护工单以达到生产过程动态优化和自愈的目的。

3.3 实践基于数据的生产管理新场景

在全新的管理哲学和运营体系中，要注重对特定数据应用场景进行创新与深化，使数据价值真正得以实现。需着重探究如下情景：第一，基于数字孪生进行全流程仿真和优化。构建覆盖设备、生产线甚至全厂的高保真数字孪生模型进行新产品工艺验证、生产布局仿真、物流路径优化和“假设分析”等，对虚拟世界的生产方案进行预演与优化，减少物理试错的代价，加快了创新的速度。第二，智能预测和决策支持。利用历史与实时数据，构建预测模型，应用于需求预测、设备预测性维护、关键零部件（如刀具）寿命预测、产品质量（如热处理变形）预测等。例如：对机床主轴振动频谱进行分析来预测剩余寿命、对来料参数及以往工序数据进行分析来预测最后齿轮精度等级等，从而达到前瞻性管理。第三，多无人机协同，智慧化操作。借助AR（增强现实）技术，给装配、维修工人以直观操作指导；实时生产任务、质量预警、处置建议由移动终端推送给班组长；采用AI视觉实现外观缺陷的在线检测并协助人工质检。第四，供应链的协同和透明化。通过区块链或者物联网平台将订单状态、库存水平、质量数据等信息分享给关键供应商和客户，从而对供应链进行可视化和协同计划，以增强整个供应链韧性和响应速度。

3.4 夯实“技术+人才”的双重支撑

实现生产管理创新归根到底要靠扎实的科技和人才基础。从技术支撑上看，企业需建立前瞻性和务实性技术架构蓝图。其核心在于构建或导入强大、开放、兼容的工业互联网平台，使之成为数据中枢、赋能平台。平台要有较强的数据集成、存储、计算、分析、应用开发能力。同时，需要持续投资于关键使能技术：如用于复杂工况感知的先进传感器技术、用于设备互联的工业网络技术（如5G、TSN）、边缘实时处理用边缘计算技术，深度分析用人工智能算法等。从人才支撑的角度来看，数字化转型对于人才的结构有了新的需求。企业急需三类人才：一是兼具齿轮制造工艺和信息技术的复合技术人才，能够在业务和技术之间承担桥梁作用，承担数字化解决方案设计和落地工作；二是善于数据分析与建模，能在大量数据中挖掘价值的数据科学人才；三是拥有数字化思维与变革领导力的管理人才。企业应当结合“外部引进+内部培养”的策略，构建多层次的人才培养体系，并与高等教育机构和职业学院合作，共同定制课程，并且对内建立数字化技能培训、岗位轮换、激励机制，形成学习和创新组织氛围。

4 结束语

齿轮制造企业生产管理创新是企业数字化转型能否顺利落地的关键问题。未来，企业要超越简单的技术引入，走向基于数据和精益管理哲学的体系重塑。通过不断推进管理理念、运营模式、场景应用协同创新，筑牢人才和技术根基，才能真正释放数字化潜能，打造面向未来的高效、柔性、智能的新型生产体系。

参考文献：

- [1] 林锐怡, 殷超超, 师陆冰, 等. 齿轮制造中的残余应力及其对疲劳性能的影响 [J]. 机械强度, 2024, 46(05):1216-1227.
- [2] 任宁, 周峰. 超大模数爬升齿轮制造技术研究 [J]. 机械传动, 2022, 46(10):125-129.
- [3] 吕晓峰. 高速, 高质, 高效的精密齿轮制造之路: 访平湖市一鑫齿轮有限公司总经理金佳先生 [J]. 数控机床市场, 2024(06):52-54.
- [4] 王雪原, 高宇琳. 我国隐形冠军制造企业技术阶梯优势提升机理 [J]. 科学学研究, 2023, 41(09):1581-1593.
- [5] 邓昂乐. 某齿轮企业绿色智能工厂建设的创新与实践应用 [J]. 智能制造, 2024(02):50-53.