

面向工业 4.0 的机械零部件智能制造技术研究

郭培育

汝岩（上海）自动化科技有限公司，上海市，200540；

摘要：随着全球制造业加速转型升级，工业 4.0 作为新一代工业革命的核心范式，正深刻重构机械零部件制造的生产模式、技术体系与价值链条。当前，我国机械零部件产业虽已形成规模优势，但传统生产模式普遍存在设计效率低下、工艺规划依赖经验、生产过程柔性不足、质量管控滞后等问题，难以满足高端装备制造对精度、可靠性与定制化的需求。在此背景下，本文以工业 4.0 核心理念为指引，结合我国机械零部件制造企业的实际需求，构建了“基础设施 - 控制系统 - 信息管理”三层架构的智能制造技术体系框架。重点围绕数字化设计与建模、智能工艺规划与优化、智能化加工设备与柔性生产线三大核心技术，深入剖析其技术原理、应用场景与实施路径，并提出融合物联网、云制造、工业机器人的信息化与自动化集成解决方案。通过该方案，可实现机械零部件从研发设计到售后服务的全生命周期智能化管理，有效提升生产效率、稳定产品质量、降低运营成本，为我国机械零部件企业向高端化、绿色化、智能化转型提供技术支撑。

关键词：工业 4.0；机械零部件；智能制造技术

DOI：10.64216/3080-1508.25.10.039

引言

当前，我国制造业正在由高速增长阶段转向高质量发展阶段，向高端化、绿色化、智能化转型升级是制造业高质量发展的必由之路。机械零部件作为机械产品的基本组成单元，其设计、加工制造水平是衡量企业装备智能化水平的重要标志。我国机械零部件制造企业数量众多，产品种类繁多，但大多处于劳动密集型产业。由于制造企业数字化、自动化水平较低，导致生产效率较低、产品质量不稳定，传统机械零部件生产模式已无法适应未来工厂的发展需求。

1 工业 4.0 的核心理念与体系架构

工业 4.0 是德国政府在《德国制造 2025》战略中提出的概念，其核心理念是智能化、网络化、绿色化、服务化。为了实现工业 4.0 的目标，德国政府提出了一系列举措，包括成立工业 4.0 专门机构、在企业和研究机构推广工业 4.0 相关技术以及实施试点示范项目等。按照这一思路，结合我国机械零部件制造企业的实际情况，构建了面向工业 4.0 的机械零部件智能制造技术体系框架，包括关键基础设施、生产过程控制系统和企业信息管理系统 3 个方面。

2 智能制造技术演变及主要特征

智能制造技术是将信息技术与制造技术深度融合，贯穿于产品研发、生产制造、经营管理和售后服务全生命周期，实现企业内部各生产环节智能化、网络化、协同化。智能制造是制造业的发展方向，也是制造业实现

数字化转型和智能化升级的关键途径。我国正处于传统制造业向先进制造业转型升级的重要历史阶段，发展智能制造对于加快产业结构调整，增强经济发展后劲，提升产业核心竞争力具有重要意义。机械零部件智能制造技术作为智能制造的重要组成部分，是实现机械零部件生产企业由传统生产模式向智能化生产模式转变的重要保障。

3 机械零部件智能制造的关键技术

3.1 数字化设计与建模技术：从“图纸驱动”到“模型驱动”

传统机械零部件设计依赖手工绘图与二维图纸，存在设计效率低、信息传递偏差大、物理样机成本高等问题。数字化设计与建模技术以 3D CAD/CAE/CAM 为核心，构建“设计 - 仿真 - 制造”一体化的数字环境，实现产品设计的精准化、高效化与低成本化。

3.1.1 核心技术组成

3D CAD 三维实体建模技术：采用参数化建模方法，构建零部件的三维实体模型，可直观反映零部件的几何形状、尺寸与装配关系。例如在齿轮设计中，通过 CAD 软件（如 SolidWorks、UG）的参数化功能，只需输入齿数、模数、压力角等关键参数，即可自动生成齿轮的三维模型，设计效率较传统方法提升 60% - 80%；

CAE 仿真分析技术：在设计阶段对零部件的性能进行虚拟仿真，提前发现设计缺陷，避免物理样机的反复试制。例如在发动机缸体设计中，通过 CAE 软件（如

ANSYS、ABAQUS) 进行强度仿真, 模拟缸体在高温、高压环境下的应力分布, 优化缸体的壁厚与结构, 使缸体重量减轻 10%, 同时满足强度要求;

CAM 自动编程技术: 将 3D 设计模型直接转换为数控机床的加工代码, 实现设计与制造的无缝衔接。例如在复杂曲面零部件(如航空发动机叶片)加工中, CAM 软件可根据叶片的三维模型, 自动生成五轴联动数控机床的加工路径, 避免人工编程的误差, 加工精度提升 20% - 30%;

数字样机与虚拟装配技术: 构建产品的数字样机, 模拟零部件的装配过程, 检测装配干涉问题。例如在汽车变速箱装配中, 通过虚拟装配技术, 可提前发现轴承与齿轮的装配干涉问题, 避免实际装配中的返工, 装配效率提升 30%, 零件报废率降低 50%。

3.1.2 典型应用案例: 发动机缸体缸盖数字化设计

某汽车发动机制造企业采用数字化设计与建模技术, 对发动机缸体缸盖进行设计优化, 具体实施流程如下:

三维建模: 使用 UG 软件构建缸体缸盖的三维实体模型, 定义缸体的水套、油道、螺栓孔等关键结构的参数化约束;

性能仿真: 通过 ANSYS 软件进行热仿真与强度仿真, 分析缸体在工作温度(80 - 120℃)下的热变形, 以及在爆发压力(15 - 20MPa)下的应力分布, 发现缸体水套区域应力集中问题;

设计优化: 基于仿真结果, 调整水套的形状与壁厚, 增加加强筋, 使应力集中区域的应力降低 25%, 同时保持水套的散热性能;

虚拟装配: 在数字环境中模拟缸体与缸盖、活塞、曲轴的装配过程, 检测出缸盖螺栓与水套的干涉问题, 调整螺栓孔位置, 避免实际装配误差;

CAM 编程: 通过 UG CAM 模块, 根据优化后的缸体三维模型, 自动生成数控加工中心的加工代码, 实现缸体平面、孔系的自动化加工。

通过该技术, 企业将发动机缸体的设计周期从 30 天缩短至 12 天, 物理样机试制次数从 3 次减少至 1 次, 设计成本降低 40%, 缸体的重量减轻 8%, 满足汽车轻量化需求。

3.2 智能工艺规划与优化: 从“经验依赖”到“数据驱动”

工艺规划是连接产品设计与生产制造的关键环节, 传统工艺规划依赖工艺人员的经验, 存在参数设置不合理、工艺路线冗长、材料利用率低等问题。智能工艺规

划与优化技术基于数字孪生、知识图谱、人工智能算法, 实现工艺规划的自动化、智能化与全局优化。

3.2.1 核心技术类型

基于数字孪生的智能工艺规划: 构建生产场景的数字孪生模型, 模拟不同工艺方案的加工过程, 选择最优方案。例如在轴类零件加工中, 通过数字孪生系统模拟不同切削速度、进给量下的加工时间、能耗与质量, 选择“效率 - 能耗 - 质量”平衡的最优工艺参数, 使加工能耗降低 15%, 加工效率提升 20%;

基于知识图谱的智能工艺规划: 将工艺知识(如加工方法、刀具选择、参数范围)构建成知识图谱, 实现工艺知识的结构化存储与复用。例如某齿轮制造企业, 通过知识图谱整合了 5000+ 条工艺知识, 当接到新型号齿轮订单时, 系统可自动匹配相似产品的工艺方案, 再结合当前生产设备状态进行调整, 工艺规划时间从 8 小时缩短至 1 小时;

基于规则的智能工艺优化: 制定工艺优化规则(如最小化加工时间、最大化材料利用率), 结合遗传算法、粒子群算法等智能算法, 实现工艺路线与参数的全局优化。例如在多工序零部件加工中, 通过遗传算法优化加工顺序与设备分配, 使生产周期缩短 25%, 设备利用率提升 30%;

面向全生命周期的协同工艺规划: 整合设计、制造、维护等环节的需求, 制定全生命周期最优的工艺方案。例如在风电轴承加工中, 工艺规划不仅考虑当前的加工精度与效率, 还结合轴承的运行工况(如风速、载荷), 优化轴承的表面热处理工艺, 使轴承的使用寿命延长 5 年。

3.2.2 关键技术优势

智能工艺规划与优化技术相比传统方法, 具有以下优势:

效率更高: 自动化生成工艺方案, 减少人工干预, 工艺规划时间缩短 60% - 80%;

质量更稳: 基于数据与算法优化工艺参数, 避免经验偏差, 产品合格率提升 5% - 10%;

成本更低: 优化工艺路线与参数, 材料利用率提升 10% - 15%, 能耗降低 15% - 20%;

柔性更强: 快速响应产品设计变更与订单需求, 工艺方案调整时间缩短 70% 以上。

3.3 智能化加工设备与柔性生产线: 从“刚性生产”到“柔性智造”

传统机械零部件生产采用刚性生产线, 设备固定、工艺单一, 难以适应多品种、小批量的市场需求。智能

化加工设备与柔性生产线以数控技术、工业机器人、智能传感为核心,实现生产过程的柔性化、自动化与智能化。

3.3.1 智能化加工设备:高精度、高可靠、自决策

智能化加工设备是柔性生产线的核心单元,主要包括数控加工中心、智能车床、智能磨床、激光加工设备等,其核心特征如下:

高精度加工能力:采用高精度导轨、主轴与伺服系统,实现微米级甚至纳米级的加工精度。例如某型号五轴联动数控加工中心,定位精度可达 $\pm 0.003\text{mm}$,重复定位精度可达 $\pm 0.0015\text{mm}$,可加工航空发动机叶片等复杂精密零部件;

自主感知与诊断能力:配备振动、温度、力等传感器,实时监测设备运行状态,自动诊断故障。例如智能车床通过振动传感器监测主轴振动,当振动值超过阈值时,自动停机并报警,同时分析故障原因(如刀具磨损、轴承失效),推送维修建议,设备故障率降低 30%–40%;

自适应加工能力:根据加工零件的材质、精度要求,自动调整加工参数。例如智能磨床在加工不同硬度的轴承滚子时,可通过力传感器检测磨削力,自动调整磨削速度与进给量,保证滚子的圆度精度稳定在 $0.5\mu\text{m}$ 以内;

数据交互能力:具备工业以太网接口,可与 MES、数字孪生系统实时交互数据,实现远程监控与调度。例如通过 MES 系统,可远程查看数控加工中心的加工进度、设备状态,远程下发加工任务,实现无人化生产。

4 信息化与自动化集成解决方案

4.1 物联网(IoT)在机械零部件制造中的应用

物联网是通过互联网实现数据信息的互联互通,从而实现智能化的设备管理和智能控制的一种全新信息网络。物联网通过传感器和无线通信技术将物理世界和数字世界连接起来,实现对物理世界的感知、分析、预测和控制,从而让机械零部件制造更加智能。在机械零部件制造过程中,利用物联网技术可以实现对设备、原材料、能源等生产要素的实时监测、数据采集、智能决策,通过物联网可以对生产过程进行实时监控,实现生产过程的远程控制。

4.2 云制造与大数据分析

云制造是指基于互联网技术和云计算技术的制造服务新模式,它能够使资源的配置和服务更加灵活,提高制造业的资源利用率,实现个性化、定制化、网络化

生产。在机械零部件制造中,云制造可以通过物联网技术实现零部件的远程监测、远程控制和故障诊断。云制造还可以提高机械零部件加工的自动化水平,采用云制造系统能有效地降低生产成本,减少劳动力。基于云制造的机械零部件智能制造系统包含云服务平台、云终端设备以及云数据库等三部分,通过这些设备和数据库能够采集各种信息数据,实现对加工过程的监控、加工设备状态的监控以及加工质量的监测。

4.3 机器人与协作自动化

(1) 自主开发、设计和制造用于协作工业的机器人和机器人系统;(2) 通过无线通讯技术,实现机器人与人、机器的交互;(3) 在人机协作过程中,使操作者的控制能力、感知能力、智能水平、空间移动能力得到大幅提高;(4) 通过人机协作,实现人与机器的完美结合;(5) 通过人机协作,提高了人与机器之间的交互能力。此外,机器人还可与物联网和云计算融合,为更多企业提供机器人应用服务,满足用户需求。

5 结语

本文通过梳理工业 4.0 的核心理念、主要特征和关键技术,构建了机械零部件智能制造技术体系框架,提出了面向工业 4.0 的机械零部件智能制造技术实现路径,并提出了机械零部件智能制造信息化与自动化集成解决方案。该方案是针对机械零部件制造企业信息化与自动化集成问题,围绕数字化设计、智能工艺规划与优化、智能化加工设备与柔性生产线以及物联网在机械零部件制造中的应用等方面展开的一系列研究工作。该方案为机械零部件企业提供了一套完整的信息化与自动化集成解决方案,有助于提升企业装备智能化水平,推动我国制造业向高端化、绿色化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 金美花. 智能制造在汽车零部件机械加工技术中的应用[J]. 汽车知识, 2025, 25(09): 146–148.
- [2] 刘艳华, 钱娜. 计算机辅助设计的船舶智能制造[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(18): 7–9.
- [3] 冯邦军. 机械制图[M]. 化学工业出版社: 202109: 234.
- [4] 张海. 智能制造技术在机加工领域中的应用分析[J]. 冶金与材料, 2021, 41(03): 92–93.
- [5] 陈孟元. 智能制造产线建模与仿真[M]. 机械工业出版社: 202012: 126.