

机械设计中的机械创新和智能化研究

高 洁

陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司 陕西 渭南 714000

摘要: 科技革命下, 机械设计作为制造业核心正深刻转型, 传统理念方法难满足现代制造业综合需求, 机械创新与智能化成发展双引擎。本文系统探讨二者内涵、关系、关键技术、应用场景及趋势。先阐述机械创新多维内涵, 再剖析智能化核心要素, 论述前沿技术如何赋能二者融合; 通过高端数控机床等典型案例展示协同成果; 最后反思当前挑战, 展望未来方向, 为机械设计理论研究与工程实践提供参考。

关键词: 机械设计; 机械创新; 智能化; 人工智能; 数字孪生; 先进制造

引言

机械贯穿人类文明史, 每一次重大革新都深刻改变社会。21世纪, 新一代信息技术催生智能制造, 机械装备的设计理念等需根本性变革。传统机械设计依赖经验等, 面对复杂需求力不从心, 将“创新”注入机械设计并赋予机械“智能”是当前关键问题。机械创新与智能化相互依存、相互促进, 前者是后者的物质基础, 后者是前者的价值倍增器, 二者构成现代机械设计发展核心驱动力。本文将围绕此命题, 梳理理论技术, 分析融合路径与应用实践。

1 机械创新的多维内涵

1.1 结构创新

结构创新是机械创新最直观的体现, 旨在通过改变或优化机械系统的构型、布局和连接方式, 以实现性能的突破。例如, 柔性机构 (Compliant Mechanism) 摒弃了传统刚性构件间的铰链连接, 利用材料本身的弹性变形来传递运动和力, 具有无摩擦、无间隙、免润滑、高精度和易于微型化等优点, 在精密仪器、微机电系统 (MEMS) 和仿生机器人等领域展现出巨大潜力。并联机构 (Parallel Mechanism) 则通过多个支链同时连接动平台和定平台, 相比传统的串联机构, 具有刚度大、承载能力强、动态响应快等优势, 被广泛应用于高速高精加工中心 (如Stewart平台) 和飞行模拟器中。

1.2 材料创新

材料是机械的“血肉”, 材料的性能直接决定了机械装备的极限能力。新型材料的应用为机械创新开辟了全新的可能性。轻量化材料如碳纤维增强复合材料 (CFRP)、高强度铝合金和镁合金, 能显著减轻装备重量, 提高能效比, 在航空航天和新能源汽车领域至关重要。智能材料 (Smart Materials) 则能对外界刺激 (如温度、电场、磁场、光、pH值等) 产生可控的响应^[1]。例

如, 形状记忆合金 (SMA) 可在加热后恢复预设形状, 用于制作微型驱动器和自展开结构; 压电材料能将机械能与电能相互转换, 既是优秀的传感器也是高效的执行器。这些材料的引入, 使得机械系统能够实现传统材料无法企及的功能。

1.3 原理创新

原理创新触及机械设计的本质, 是对能量转换、运动传递和信息处理基本规律的重新诠释与应用。仿生学 (Bionics) 是原理创新的重要源泉。通过模仿生物体的精巧结构和高效机能, 工程师们设计出了许多性能卓越的机械系统。例如, 模仿鲨鱼皮表面的微沟槽结构设计的减阻涂层, 可有效降低流体阻力; 模仿壁虎脚趾刚毛结构的干性粘附材料, 为攀爬机器人提供了新的解决方案。此外, 将不同领域的原理进行跨界融合也是一种重要的创新方式, 如将流体力学原理与机械结构结合, 创造出高效的流体传动与控制系统。

1.4 功能创新

功能创新是机械创新的最终目标, 即赋予机械装备超越传统范畴的新能力。这通常通过集成化、模块化和系统化的设计来实现。现代机械装备不再是单一功能的执行单元, 而是集成了感知、计算、通信和执行等多种功能的复杂系统。例如, 一台智能数控机床不仅能完成高精度切削, 还能实时监测刀具磨损、预测设备故障、自动优化加工参数, 并与工厂的MES (制造执行系统) 进行数据交互, 实现全流程的智能化管理。

2 机械智能化的核心要素

机械智能化是指赋予机械装备类似于人类的感知、认知、决策和行动能力, 使其能够自主地、高效地、安全地完成复杂任务。其核心要素可归纳为感知、决策、执行与交互四个层面。

2.1 感知层: 构建装备的“感官”

感知是智能化的前提。通过在机械装备上集成各种先进传感器（如视觉传感器、力/力矩传感器、惯性测量单元IMU、激光雷达、声发射传感器、温度传感器等），可以实时、全面地采集装备自身状态（如振动、温度、应力、位姿）和外部环境信息（如工件特征、障碍物位置、光照条件）。物联网（IoT）技术则将这些分散的传感器节点连接起来，形成一个覆盖整个装备乃至生产线的感知网络，为上层决策提供海量、多源、异构的数据基础。

2.2 决策层：赋予装备的“大脑”

决策层是智能化的核心，负责对感知层获取的数据进行处理、分析和理解，并据此做出最优或次优的行动策略。人工智能技术，特别是机器学习（ML）和深度学习（DL），在此扮演着关键角色^[2]。例如，利用卷积神经网络（CNN）可以对视觉传感器采集的图像进行高精度的目标识别与缺陷检测；利用循环神经网络（RNN）或长短期记忆网络（LSTM）可以对时序数据（如振动信号）进行分析，实现设备的故障预测与健康管（PHM）。强化学习（RL）则使装备能够在与环境的交互中不断试错和学习，自主优化其控制策略，以适应动态变化的任务需求。

2.3 执行层：强化装备的“肢体”

执行层是智能化的物理体现，负责将决策层的指令转化为具体的机械动作。这不仅要求执行器（如电机、液压/气动缸、压电陶瓷驱动器等）具有高精度、高响应速度和高可靠性，还要求其具备一定的柔顺性和适应性。例如，在人机协作机器人（Cobot）中，力控技术使得机器人能够感知到与人或环境的接触力，并据此调整其运动轨迹，确保操作的安全性。此外，执行层还需要与感知层和决策层形成紧密的闭环反馈，实现“感知-决策-执行-再感知”的动态迭代优化。

2.4 交互层：建立人机协同的“桥梁”

智能化并非意味着完全取代人类，而是实现更高效、更安全的人机协同。交互层旨在建立自然、直观、高效的人机沟通渠道。除了传统的按钮、触摸屏等人机界面（HMI），新兴的交互技术如增强现实（AR）、虚拟现实（VR）、语音识别和手势识别等，正在被引入到机械装备的操作与维护中。例如，维修工程师可以通过AR眼镜，直观地看到设备内部的三维模型、实时运行数据和维修指引，极大地提高了维护效率和准确性。

3 机械创新与智能化的融合路径

3.1 人工智能（AI）驱动的设计范式变革

AI正在从根本上改变机械设计的范式。传统的“设

计-仿真-制造-测试”迭代周期长、成本高。AI赋能的生成式设计（Generative Design）则颠覆了这一流程。设计师只需输入设计目标（如轻量化、高强度）、约束条件（如载荷、空间限制）和制造工艺，AI算法（如拓扑优化、参数化建模结合深度学习）便能自动生成成百上千个满足要求的创新设计方案，供设计师筛选。这不仅极大地激发了设计灵感，还能探索出人类工程师难以想象的、性能更优的复杂结构。

3.2 数字孪生（Digital Twin）构建虚实融合的闭环

数字孪生是物理实体在虚拟空间中的高保真、动态映射。在机械设计阶段，数字孪生模型可以用于进行全生命周期的虚拟验证与优化，包括结构强度分析、运动学/动力学仿真、热力学分析、控制算法验证等，从而在物理样机制造前就发现并解决潜在问题，缩短研发周期^[3]。在装备服役阶段，数字孪生通过与物理实体的实时数据同步，可以实现状态监控、故障诊断、预测性维护和远程运维。更重要的是，物理世界中积累的运行数据可以反馈回数字孪生模型，用于持续优化和迭代，形成一个“设计-制造-运行-反馈-再设计”的闭环，驱动机械创新的持续演进。

3.3 增材制造（Additive Manufacturing）解锁创新结构的制造瓶颈

许多通过AI或仿生学设计出的创新结构（如复杂的内部流道、仿生点阵结构、拓扑优化后的有机形态）往往无法通过传统的减材制造（如车、铣、刨、磨）或等材制造（如铸造、锻造）工艺实现。增材制造（3D打印）技术通过逐层堆积材料的方式，几乎可以制造出任何几何形状的零件，完美地解决了这一制造瓶颈。这使得设计师可以“为功能而设计”，而不必过多考虑制造工艺的限制，从而释放了巨大的创新潜力。同时，增材制造还能实现多材料、梯度材料的一体化成形，为智能材料的集成应用提供了可能。

3.4 先进传感与物联网（IoT）构筑智能感知底座

没有感知，就没有智能。高精度、微型化、低功耗、低成本的先进传感器是构建智能机械的“神经末梢”。MEMS技术的发展使得惯性传感器、压力传感器等可以被大规模集成到微小的芯片上。光纤光栅传感器（FBG）则因其抗电磁干扰、分布式测量等优点，在大型结构健康监测中大放异彩^[4]。IoT技术则将这些传感器连接成网，实现了数据的互联互通，为大数据分析和AI决策提供了坚实的数据基础。

4 典型应用场景分析

4.1 高端数控机床

现代高端数控机床是机械创新与智能化融合的典范。在创新方面,采用高刚性、高阻尼的矿物铸件床身,结合直线电机驱动和光栅尺全闭环反馈,实现了纳米级的定位精度。在智能化方面,通过集成振动、声发射、电流等多传感器,结合AI算法,可实时监测刀具磨损状态,预测剩余寿命,并自动补偿加工误差。数字孪生技术则用于虚拟调试和工艺优化,大幅缩短了新产品的上市时间。

4.2 智能机器人

无论是工业机器人还是服务机器人,其发展都深刻体现了这一融合趋势。结构上,轻量化碳纤维臂、柔性关节的设计提升了机器人的动态性能和安全性。材料上,电子皮肤(E-skin)的应用赋予了机器人精细的触觉感知能力。智能化方面,基于深度学习的视觉系统使其能精准识别和抓取无序堆放的工件;强化学习算法让机器人能自主学习复杂的操作技能;而数字孪生则用于机器人的虚拟训练和远程监控。

4.3 新能源汽车

新能源汽车的动力总成(电机、电控、电池)本身就是机械、电气、材料和控制多学科创新的结晶。在智能化方面,整车就是一个移动的智能终端。遍布车身的传感器(摄像头、雷达、超声波)构成了高级驾驶辅助系统(ADAS)乃至自动驾驶的感知基础。车载AI芯片作为“大脑”,实时处理海量数据,做出驾驶决策。数字孪生技术被用于电池管理系统的优化,通过建立电池的数字孪生模型,可以精确预测其健康状态(SOH)和剩余电量(SOC),延长电池寿命。

4.4 航空航天装备

在极端苛刻的环境下,航空航天装备对创新和智能化的要求达到了极致。创新方面,大量采用钛合金、高温合金和复合材料,并通过增材制造技术制造出轻质高强、内部结构复杂的发动机叶片和燃料喷嘴。智能化方面,飞机健康管理系统(AHM)通过遍布机身的传感器网络,实时监控结构应力、发动机性能等关键参数,利用AI进行故障预警和寿命预测,实现了从“定时维修”到“视情维修”的转变,极大提高了飞行安全性和经济性。

5 面临的挑战

一是多学科深度交叉的壁垒:机械创新与智能化涉及机械、材料、控制、计算机、人工智能等多个学科,如何打破学科壁垒,培养具备跨领域能力的复合型人才,是首要挑战。二是数据安全与隐私保护:智能化装备产生和传输大量敏感数据,如何确保数据在采集、传输、存储和使用过程中的安全,防止被恶意攻击或滥用,是亟待解决的问题。三是AI模型的可解释性与可靠性:当前许多AI模型(尤其是深度学习)是“黑箱”模型,其决策过程缺乏透明度。在安全攸关的领域(如航空、医疗),如何确保AI决策的可靠性和可解释性,是推广应用的关键障碍。四是标准与规范的缺失:智能机械装备的设计、制造、测试和认证尚缺乏统一的国际标准和规范,制约了产业的规模化发展。

6 结论

机械创新与智能化是驱动现代机械设计发展的双轮。机械创新为智能化提供了坚实的物理载体和功能基础,而智能化则为机械创新注入了灵魂,使其具备了感知、思考和行动的能力,从而实现了从“机械”到“智能体”的质的飞跃。二者的深度融合,正在重塑机械设计的范式,催生出一系列性能卓越、功能强大、应用广泛的新型智能装备。面对未来的机遇与挑战,我们必须坚持多学科交叉融合,加强基础理论研究,突破关键核心技术,完善标准规范体系,并高度重视数据安全性与伦理问题。唯有如此,才能牢牢把握住新一轮科技革命和产业变革的历史机遇,推动我国机械工程学科和装备制造业迈向全球价值链的中高端,为建设制造强国和科技强国奠定坚实的基础。

参考文献

- [1]张久斤.人工智能算法驱动下的机械创新设计策略探讨[J].网印工业,2025,(06):38-40.
- [2]徐浩峰.智能制造技术在机械设计中的创新应用[J].数字通信世界,2025,(08):118-120.
- [3]张锦旭.基于智能制造的机械加工工艺装备创新设计[J].现代制造技术与装备,2025,61(03):87-89.
- [4]孙后法.人工智能技术在机械设计制造自动化中的创新应用[J].新型工业化,2021,11(08):79-80.