

机械电子技术在工业自动化中的应用

张沛晨 刘超 张文彬

临沂城发工科建设投资发展有限公司 山东 临沂 276000

摘要: 机械电子技术融合机械、电子等多学科,在工业自动化中作用关键。本文先阐述其核心组成与原理,包括机械系统、电子控制等。接着分析在生产过程自动化、机器人技术等关键领域的应用。还探讨推动工业自动化的效率提升、成本优化等优势。最后展望智能化升级、网络化协同等发展趋势,为工业自动化发展提供参考。

关键词: 机械电子技术;工业自动化;机器人技术;智能化升级;网络化协同

引言:工业自动化是现代工业发展的重要方向,对提升生产效率、降低成本意义重大。机械电子技术作为多学科交叉融合的产物,融合了机械、电子、控制等多领域知识,凭借独特优势成为工业自动化的关键支撑。其在工业自动化各环节的深度应用,推动着工业生产模式不断革新,研究其应用及发展趋势具有重要的现实意义。

1 机械电子技术的核心组成与原理

1.1 机械系统基础

机械系统作为机械电子技术的物理载体,其设计与优化直接决定了整体性能的上限。传动机构通过齿轮、链轮或同步带等元件实现动力传递与速度变换,需兼顾传动效率与噪声控制;执行机构如机械臂末端或自动化夹具,需根据任务需求设计刚度与灵活性平衡的结构;支撑结构则通过合理布局减轻振动并提升系统稳定性^[1]。机械动力学研究运动过程中的力与运动关系,通过建立数学模型分析惯性、摩擦等非线性因素对系统动态特性的影响。运动控制原理以闭环反馈为核心,通过位置、速度或力传感器实时采集数据,结合控制算法调整驱动信号,确保执行机构按预定轨迹精准运动。

1.2 电子控制系统

传感器技术是电子控制系统的感知层,类型涵盖位移、力、温度、视觉等多个维度。位移传感器通过电感、电容或光电原理将机械量转换为电信号;力传感器利用应变片或压电效应实现力的精确测量;视觉传感器则通过图像处理算法提取目标特征。微控制器作为控制核心,集成了CPU、存储器与外设接口,通过编程实现逻辑判断与信号处理。嵌入式系统将软件算法与硬件电路深度融合,通过定时器中断、PWM输出等功能模块控制外设动作。接口设计需兼顾电气特性与通信协议,确保传感器数据可靠传输至控制单元。

1.3 驱动与执行技术

电机驱动技术主要分为步进电机、伺服电机与直流

电机三类。步进电机依靠脉冲信号实现角度分度,适合开环定位场景,其步距角通常为 0.9° 至 1.8° ,开环控制下定位精度可达 $\pm 0.05^\circ$ 至 $\pm 0.1^\circ$ 。伺服电机集成编码器形成闭环控制,响应速度快,低速运行平稳,响应时间可达1至5毫秒,低速时速度波动一般不超过 ± 0.1 转/分钟。直流电机结构简单,但需外接调速装置,调速范围可达1:10至1:100,实现灵活调速。液压系统以液体压力为动力,输出力大、过载保护强,输出力可达数吨至数十吨,过载保护在压力超过额定值10%至20%时启动,但存在泄漏与响应延迟问题。气动系统采用压缩空气,动作迅速、成本低,响应时间可缩短至0.1至0.5秒,但精度受气压波动影响,通常需将波动控制在 ± 0.01 至 ± 0.05 兆帕内。两类系统在重型装备与高速自动化场景中可互补应用。

1.4 通信与网络技术

工业现场总线通过标准化协议实现设备间实时通信。CAN总线采用差分信号传输,抗干扰能力强,广泛用于汽车电子,传输速率可达1兆比特/秒,最远传输距离10公里。Profibus支持主从与多主通信,适用于分布式控制系统,传输速率范围9.6千比特/秒至12兆比特/秒,最多可连接127个设备。EtherCAT基于以太网架构,通过帧嵌套技术实现微秒级同步,同步精度可达 ± 1 微秒以内,满足高精度控制需求。无线通信中,Wi-Fi传输速率高但易受干扰,速率可达数百兆比特/秒以上,工业环境下受干扰可能下降;蓝牙适于短距离互联,有效距离一般在10至100米,传输速率1至3兆比特/秒;Zigbee以低功耗和自组网见长,多用于环境监测等低速场景,传输速率通常为20至250千比特/秒,单个网络可容纳多达65000个节点。

2 机械电子技术在工业自动化中的关键应用领域

2.1 生产过程自动化

自动化生产线设计以模块化理念为核心,通过标准化功能单元的快速组合实现不同产品的柔性生产。可重构生产系统借助机械电子技术的集成优势,能够根据订

单需求动态调整工艺流程,缩短换型时间并提升设备利用率^[2]。工艺参数实时监测依托高精度传感器网络,对温度、压力、流量等关键指标进行毫秒级数据采集。动态调整机制通过闭环控制算法分析偏差值,自动修正执行机构输出参数,确保生产过程始终处于最优状态。例如在化工反应釜控制中,温度波动超过阈值时,系统会同步调节加热功率与冷却水流速,维持反应条件稳定。

2.2 机器人技术

工业机器人按结构特性分为关节型、SCARA与Delta三大类。关节型机器人凭借六轴旋转自由度,擅长复杂空间轨迹作业,关节型机器人的工作半径一般可达1-3m,重复定位精度可达到 $\pm 0.05\text{--}\pm 0.1\text{mm}$;SCARA机器人水平方向高刚度特性使其成为电子装配领域的首选,SCARA机器人的水平重复定位精度可达到 $\pm 0.02\text{--}\pm 0.05\text{mm}$,在电子装配中能够满足高精度要求;Delta机器人并联结构实现高速拾放动作,广泛应用于食品包装场景,Delta机器人的拾放速度可达每分钟100-300次,大大提高了包装效率。机器人运动学研究末端执行器位姿与关节变量间的映射关系,通过正向运动学计算空间坐标,逆向运动学求解关节角度。路径规划算法结合A星寻优与动态避障策略,在三维空间中生成时间最优的无碰撞轨迹,同时考虑加速度连续性以减少机械振动。

2.3 智能检测与质量监控

在线检测系统集成多光谱视觉传感器与涡流检测模块,实现产品表面缺陷与内部结构的同步扫描。视觉检测通过卷积神经网络提取图像特征,能够识别微米级划痕与色差偏差;无损检测技术利用电磁感应原理检测金属材料裂纹,检测速度可达每分钟数百件。数据驱动的质量预测模型基于历史生产数据训练机器学习算法,通过特征工程提取温度波动、设备振动等关联参数,构建缺陷发生概率预测矩阵。该模型可提前12小时预警潜在质量问题,指导生产参数优化。

2.4 物流与仓储自动化

自动化导引车采用激光导航或视觉定位技术,在复杂仓库环境中实现厘米级定位精度。智能仓储系统通过物联网标签实时追踪库存状态,结合需求预测算法动态调整货位分配。物料搬运环节中,机械臂与输送带通过时间同步控制实现无缝交接,机械臂末端执行器配备力传感器,可根据物料形变自动调整抓取力度。分拣系统利用RFID识别技术快速分流不同目的地货物,配合高速滑块式分拣机,单小时处理量突破两万件。

3 机械电子技术推动工业自动化的核心优势

3.1 效率提升

机械电子技术通过高速运动控制与精密定位能力,将传统人工操作的间歇性作业转化为连续自动化流程。高速执行机构在机械传动与电子驱动协同作用下,完成每分钟数百次的拾放动作,操作速度相较于人工操作实现显著提升。人工操作每小时可能完成数十次拾放动作,而自动化设备可达数百次甚至上千次^[3]。高精度传感器网络实时采集生产数据,通过闭环反馈机制将位置误差控制在微米级,显著减少因定位偏差导致的重复修正时间。并行处理能力依托分布式控制架构实现,多台设备通过工业总线共享任务指令,在统一时钟同步下完成协同作业。例如在汽车焊接生产线中,六台机器人可同时对身体不同部位进行焊接,工序衔接时间缩短至毫秒级,整体生产节拍得到明显优化。生产节拍可从原来的每分钟1-2辆提升至每分钟3-5辆。

3.2 成本优化

自动化系统通过精准控制减少原材料浪费,视觉检测模块在装配环节识别错装零件,避免批量性返工损失。能源管理系统实时监测设备功率输出,根据负载变化动态调节供电频率,配合能量回收装置将制动能量转化为电能再利用,综合能耗得以有效降低。故障预测算法通过分析振动、温度等参数变化趋势,提前识别设备劣化征兆,大幅减少计划外停机时间。预防性维护模式延长关键部件使用寿命,以伺服电机轴承为例,其更换周期可从两年延长至五年,备件库存成本随之下降。

3.3 灵活性增强

模块化设计理念贯穿机械结构与控制系统,标准功能单元通过快速连接接口实现不同配置组合。电子控制程序支持远程更新,工艺参数修改无需停机调试,换型时间从小时级压缩至分钟级。换型时间可从原来的2-3小时缩短至10-30分钟。生产调度系统根据订单优先级动态调整任务队列,小批量订单插入生产时,系统自动重新规划物流路径,确保多品种混线生产效率稳定。柔性夹具通过气动或电磁驱动适应不同尺寸工件,在3C产品制造中实现手机、平板、笔记本外壳的共线加工。可适应的工件尺寸范围可从几厘米到几十厘米。

3.4 可靠性保障

自诊断功能集成于微控制器核心,开机时自动检测传感器信号完整性、执行机构驱动能力等多项指标,生成健康状态报告。预警系统通过机器学习模型分析历史故障数据,识别振动频谱异常、温度突变等早期失效特征,提前发出维护提醒。可提前1-3天发出维护提醒。冗余设计采用双通道控制架构,主控制器故障时备用系统无缝切换,关键执行机构配置双电机驱动,单台故障仍

能保持较高负载能力,确保生产线连续运行。

4 机械电子技术在工业自动化中的发展趋势

4.1 智能化升级

人工智能算法正深度渗透机械电子系统,赋予设备环境感知与自主决策能力。自适应控制模块通过持续学习工艺参数变化规律,动态调整控制策略以应对原料波动等干扰因素,实现生产过程智能优化^[4]。自主决策系统集成多源异构数据,在质量检测、设备维护等场景中模拟人类经验判断,例如当传感器检测到异常振动时,系统自动分析历史故障模式并推荐最佳处理方案。边缘计算将数据处理能力下沉至设备端,减少云端通信延迟,满足实时控制需求;云计算则提供海量数据存储与模型训练资源,二者协同构建起分布式智能架构,推动自动化系统向认知智能阶段演进。

4.2 网络化与协同化

工业物联网通过标准化通信协议打破设备信息孤岛,传感器、执行器与控制系统形成互联互通网络。设备间数据流动催生新型协同模式,数控机床与物流机器人共享任务进度信息,自动调整加工节奏与物料配送路径,实现生产流程无缝衔接。数字孪生技术构建物理系统的虚拟映射,在虚拟空间中模拟工艺变更效果,通过仿真验证优化方案后再应用于实际生产,显著降低试错成本。虚拟调试功能允许工程师在设备安装前完成控制程序验证,缩短项目交付周期。

4.3 绿色化与可持续性

节能设计贯穿机械电子系统全生命周期,轻量化结构减少材料消耗,低功耗驱动技术降低运行能耗。能量回收装置将制动、减速等环节产生的动能转化为电能再利用,形成能源闭环。低碳制造技术聚焦加工工艺革新,干式切削替代传统切削液使用,减少有害物质排

放。资源循环利用体系推动废旧设备拆解再生,贵金属回收率与塑料再利用率持续提升。环保材料应用范围扩大,生物基复合材料逐步替代金属部件,在保证性能前提下降低碳足迹。

4.4 人机协作深化

协作机器人通过力反馈与视觉引导技术实现安全交互,柔性关节设计确保接触瞬间自动减速,避免对操作人员造成伤害。安全空间监测系统实时扫描周围环境,当人体进入危险区域时立即暂停设备运行。增强现实技术将操作手册转化为三维可视化指引,维修人员佩戴智能眼镜即可查看设备内部结构与拆装步骤,复杂故障处理效率大幅提升。远程协作模式支持专家通过AR设备标注现场问题点,指导一线工人完成高精度操作,突破地域限制实现技能共享。

结束语

机械电子技术在工业自动化中占据核心地位,从核心组成原理到关键应用领域,均展现出强大功能与显著优势。在效率提升、成本优化、灵活性增强、可靠性保障等方面成效斐然。随着智能化、网络化、绿色化及人机协作等趋势的发展,机械电子技术将持续创新,为工业自动化注入新活力,助力制造业实现更高质量的发展。

参考文献

- [1]董棋玮.智能制造中机械与电子融合的关键技术[J].张江科技评论,2024(12):69-71.
- [2]王迺峰.机械传感技术在工业自动化中的应用与创新[J].中国设备工程,2024(23):224-226.
- [3]刘铃.论机器视觉检测技术在工业自动化领域的应用[J].价值工程,2024,43(36):128-130.
- [4]刘昕锐,周桐.自动化技术在机械设计制造领域的应用研究[J].模具制造,2023,23(6):184-186.