

基于机电集成的机器人精度提升技术分析

武培民

(三门峡技师学院, 河南 三门峡 472000)

摘要 为了提升工业机器人在复杂环境下的作业精度, 基于机电集成思路, 构建涵盖结构优化、电气系统集成与控制算法补偿的多层次提升路径。分析护盾式煤矿智能掘进机器人应用实例, 装配平面度控制在 $0.013 \sim 0.017$ mm, 法兰同轴度最大值为 0.009 mm, 轨迹误差均值为 0.0217 mm。分析结果表明, 三维协同控制体系可有效抑制微小扰动传播, 实现高精度稳定运行。

关键词 机电集成; 机器人精度; 结构优化

中图分类号: TP24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.002

0 引言

机器人作为现代工业自动化与智能制造的核心装备, 其运行精度直接决定了生产过程的效率与产品质量。在高柔性、高复杂度作业场景中, 系统微小误差的积累常导致性能退化, 影响整体作业可靠性。如何突破传统单系统局限, 实现结构、电气与控制系统的深度融合, 成为提升机器人精度性能的关键。在此背景下, 基于机电集成的机器人精度提升技术应运而生, 为解决多源误差耦合、系统动态响应不足等瓶颈问题提供了技术路径。

1 机器人精度影响因素分析

1.1 机械系统精度影响因素

机械系统在机器人精度中占据了核心地位, 其影响因素包括结构刚度、传动误差、装配精度以及材料特性等。机器人在执行任务时, 其机械结构的刚性决定了系统对外力的抵抗能力, 刚性不足则容易产生变形, 从而影响运动精度^[1]。同时, 传动系统中的齿轮啮合误差、轴承摩擦等都会导致运动误差的积累, 最终影响末端执行器的位置精度。此外, 机械装配过程中的微小误差也会通过传动链条逐级放大, 导致机器人整体精度的下降。材料的选择与热膨胀特性也会对精度产生影响, 材料的稳定性与耐磨性直接关系到机器人的长期工作精度。

1.2 电气系统精度影响因素

电气系统对机器人的精度控制起着关键作用, 其影响因素主要集中在驱动控制精度、传感器反馈精度以及信号处理稳定性三个方面。驱动模块中的伺服控制器若存在响应延迟、分辨率不足或电流环调节不稳定, 将直接导致电机输出微小偏差, 进而影响运动轨

迹的精确性。传感器作为反馈环节的核心, 其精度等级与抗干扰能力决定了姿态与位置的实时检测准确性, 若编码器或角度传感器存在非线性误差或零漂, 将对闭环控制系统造成累积性影响。此外, 电气系统中的电磁干扰、接地不良或通信延迟也可能引发指令信号的波动, 降低整体响应的一致性^[2]。

1.3 控制系统精度影响因素

控制系统作为机器人精度调控的中枢, 其性能直接决定着运动命令的执行偏差和轨迹重构能力。影响因素主要包括控制算法的解析能力、实时性调度机制及控制模型的误差补偿策略。若系统采用简化模型忽略动态耦合关系, 可能导致非线性扰动在执行端放大, 降低轨迹跟踪精度; 实时性调度中断或系统响应滞后将引起控制信号延迟, 使执行误差积累; 此外, 若反馈控制中未引入自适应或前馈补偿机制, 无法有效对抗负载变化与动态摩擦干扰, 精度将呈现不稳定波动^[3]。由此可见, 控制系统精度受多维因素耦合制约, 其稳定性与响应特性对整体精度具有决定性影响。

2 基于机电集成的机器人精度提升关键技术

2.1 机械结构精度优化技术

在机器人机械结构的精度优化过程中, 刚度提升与结构轻量化需协同推进, 避免因结构复杂性增加而引入耦合误差^[4]。采用有限元静力与模态分析表明, 臂部截面由矩形 (40×60 mm) 改为蜂窝状薄壁结构后, 在不增加质量的情况下, 一阶固有频率由 138 Hz 升至 213 Hz, 静态挠度降低约 40% 。精密关节中, 轴承座与壳体的同轴度必须优于 0.005 mm, 方能保证径向跳动低于 $5 \mu\text{m}$, 避免微振动累积误差; 若采用不锈钢衬套与碳纤维复合支撑组合, 单位质量刚度系数可提升 18%

以上,有助于抑制动态响应误差。此类结构需依托五轴数控加工,轮廓度控制优于 0.01 mm,形位误差累积不超过 0.02 mm,才能满足高精度装配。

在连接精度方面,减速器与法兰界面采用 H7/h6 配合以控制间隙在 4~9 μm,装配需在 20 ± 0.5 °C 恒温条件下完成,并辅以 0.003 mm 间隙定位销与手工刮研确保接触斑点 ≥ 75%。臂架材料选用拉伸强度 980 MPa、弹性模量 220 GPa 的 6061-T6 航空铝合金,兼顾刚性与减重,全部零件加工后统一进行时效热处理与硬质阳极氧化处理,以增强稳定性与耐磨性。最终经激光干涉仪校核表明,结构误差占末端位姿误差比重高达 38.7%,因此机械结构精度优化构成整机精度提升的关键环节。

2.2 电气系统集成优化方法

在电气系统的集成优化过程中,伺服电机与驱动器之间的匹配关系需精细配置,以确保位置控制与转矩输出的闭环性能。针对关节驱动模块,常采用额定转矩 3.5 Nm、峰值扭矩 12 Nm、分辨率达 20bit/360° 的多圈绝对值编码器电机,其反馈信号频率需在 2 kHz 以上,才能满足高频动态响应的伺服控制要求。驱动器需具备 12 位电流环、16 位速度环与 24 位位置环的分辨控制能力,电压波动适应范围应控制在 ±10% 以内,方可避免电源扰动对末端执行精度的传导。此外,驱动器与电机间的通信需采用 CANopen 或 EtherCAT 总线,带宽要求不低于 100 Mbps,帧间时延控制在 500 μs 以内,并通过分布式时钟同步技术进行伺服节拍统一,确保多轴联动的时序一致性。

电气线缆布线方式及电磁兼容设计亦对系统精度具有重要影响。在多轴机器人中,控制信号线与动力线采用独立屏蔽管线槽布置,信号电缆使用屏蔽层厚度不低于 0.6 mm、铜网编织密度达 85% 以上的双层铝箔+编织复合屏蔽结构,接地电阻控制在 0.1 Ω 以内,确保抗共模干扰能力满足 30 V/m 以上的电磁强度环境。在电缆线径选型方面,5 A 工作电流的动力线需使用截面积 1.0 mm² 以上的多股铜导线,其绝缘耐压需符合 UL1015 标准,耐压指标不低于 600 V,工作温度范围在 -20 °C 至 105 °C 之间。接口连接中,采用 MIL-DTL-38999 III 型抗振接插件,并辅以 IP67 防护等级接头,提升接触可靠性与环境适应能力。此外,整个布线需按照 IEC 60204-1 标准执行,对电气柜与负载设备之间的信号链路进行长度匹配与阻抗控制,以抑制回波效应和传输延迟^[5]。

2.3 控制算法精度补偿技术

在机器人运动控制系统中,为降低结构耦合、非线性扰动及传动滞后所引起的位置偏差,常采用前馈

补偿与模型驱动控制相结合的方式进行精度补偿。控制算法基于逆动力学建模,对机械系统中的质量分布、惯性耦合、重力分量及摩擦项进行统一表达,其动力学控制方程为:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C'(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q})$$

其中, $M(q)$ 为质量矩阵,需通过激光跟踪系统和刚体姿态辨识算法进行精确辨识,误差约束在 ±3%。 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 和 $G(q)$ 采用数据拟合与 LMS 方法进行离线建模,建模采样周期设置为 0.5 ms,单维偏差需小于 0.1 Nm。摩擦建模 $F(\dot{q})$ 基于 LuGre 模型,参数取值范围依据负载条件动态调整。整个前馈补偿系统运行周期需严格保持在 1 ms 以内,并通过中断优先级机制确保响应一致性。高频段动态干扰采用滑模扰动观测器,估算延迟控制在 250 μs,干扰幅值估计精度优于 ±0.05 Nm,有效缓解载荷变化对轨迹控制的影响。

为增强反馈系统对误差的实时调节能力,还需构建复合式控制器,复合式控制器融合比例-微分调节与模型预测机制以实现自适应反馈,系统采样频率设为 2 kHz,控制环步长 20 ms,预测窗口 200 ms,目标函数采用二次代价形式,权重 $\lambda=10$ 、 $\gamma=0.1$ 。反馈通道配置低通滤波器,截止频率 300 Hz,采样误差滤除率达 97% 以上,编码器输出角度抖动抑制至 ±0.02° 以内。运动控制器经 SPI 与 FPGA 连接,流水线并行处理速度反馈、状态估计与预测输出,单周期延迟小于 15 μs。为抑制关节间耦合误差,算法集成多轴交叉修正模块,基于运行状态动态重构增益矩阵,保持轴间位置差异 ≤ 0.03 mm,从而在复杂任务中维持高频闭环调节与干扰抑制能力。

3 基于机电集成的机器人精度提升技术应用分析

3.1 工程概况

本工程聚焦护盾式煤矿智能掘进机器人系统,集成截割、支护、钻锚、装载、运输等多项功能,提升煤矿掘进自动化与效率。系统包括全宽横轴截割机器人(切割宽度 4.5 m,切割高度 3.2 m,功率 200 kW),临时支护机器人(支护跨度 1.5 m,高度 2.0 m 至 3.5 m,速度 0.8 m/min),钻锚机器人(钻孔直径 42 mm,深度 2.5 m,速度 1.2 m/min),超前探测系统(深度 30 m,分辨率 0.1 m)等,确保作业高效、安全。

3.2 机器人精度提升技术的具体应用

在护盾式煤矿智能掘进机器人系统的精度提升过程中,工程实施单位采用“结构预补偿+多源数据融合+运动误差动态校正”三位一体方案实现全过程精度控制。针对结构精度控制,所有高精连接部件由五轴联动加工中心一次性完成,轮廓度控制优于 0.015 mm,

安装面平面度控制在 0.02 mm 以内，所有法兰接触面经 75% 以上刮研斑点验收。结构总装工艺引入激光跟踪仪实时位姿监测系统，全系统节点定位误差实时反馈至安装控制系统，保障装配累积误差控制在 0.05 mm 以下。关键传动部位采用齿侧间隙调节机构，调节步距为 2 μm ，现场通过干涉仪校准啮合误差分布，确保系统齿合稳定性。

在运动控制环节，引入高频反馈数据采集系统，编码器采样频率为 5 kHz，反馈通道支持 $\pm 10\text{ V}$ 模拟量与 RS-422 高速差分信号双通道冗余输入。位姿估算基于多传感器数据融合算法，融合 IMU、激光测距仪和光学标靶三类传感器数据，其中 IMU 零偏修正周期为 1.2 s，激光测距重复性精度优于 $\pm 0.3\text{ mm}$ 。控制器采用双核 DSP 并行控制平台，指令周期为 0.5 ms，控制带宽达 1.6 kHz，并通过自适应扰动观测器对作业过程中因煤岩非均质性导致的负载扰动进行实时补偿，实现持续运行过程中的精度动态校正。在整个系统调试过程中，每日采

集误差补偿数据不低于 3 GB，作为后续控制模型修正的基础。

3.3 工程实施效果与技术评估

为全面量化护盾式智能掘进机器人系统在精度提升方案落地后的运行表现，工程项目组构建了涵盖装配精度、运行稳定性与控制响应的分级评估体系，并采用三阶段监测策略：出厂试验、入井调试与连续作业周期。装配阶段对 124 个节点进行监控，每小时测量 3 次，利用激光跟踪仪与三坐标测量机交叉验证初始误差。运行阶段在 120 小时连续作业中采集结构位移、姿态偏差与电机温升，采样周期 0.2 s。控制响应则通过高频编码器反馈评估轨迹重复性与负载干扰抑制比，并以期望路径拟合残差作为关键指标。相关量化数据见表 1 与表 2。

从表 1 中的数据可知，装配平面度控制在 0.013 ~ 0.017 mm 之间，远优于 0.02 mm 的设计限值，标准偏差仅为 0.0018 mm，表明装配过程一致性高；法兰同

表 1 系统精度误差控制指标统计表

指标项	设计值	实测值区间	标准偏差	单项最大误差
装配平面度	$\leq 0.02\text{ mm}$	0.013 ~ 0.017 mm	0.0018 mm	0.019 mm
法兰同轴度	$\leq 0.01\text{ mm}$	0.005 ~ 0.009 mm	0.0012 mm	0.009 mm
滚动轴径向跳动	$\leq 0.006\text{ mm}$	0.004 ~ 0.005 mm	0.0006 mm	0.005 mm

表 2 多轴控制稳定性评估数据表

项目	关节 1	关节 2	关节 3	均值	最大瞬时偏差
指令轨迹与实际偏差均值	0.022 mm	0.019 mm	0.024 mm	0.0217 mm	0.036 mm
负载扰动下偏差增长率	6.30%	5.70%	6.90%	6.30%	7.50%
编码器稳定性残差	0.003°	0.002°	0.003°	0.0027°	0.004°

轴度最大值 0.009 mm，具备良好的轴系稳定性；滚动轴径向跳动控制在 0.005 mm 以内，说明旋转部件运行平稳，为后续动态精度提供基础保障。

由表 2 可知，三轴间平均轨迹误差为 0.0217 mm，最大瞬时偏差控制在 0.036 mm，均处于微误差级别；在负载扰动下，偏差增长率维持在 6.3% 以内，编码器残差波动在 $\pm 0.003^\circ$ 范围，说明控制系统在复杂工况下依然具备良好的跟踪能力与高频动态响应性能，有效抑制扰动传导效应。

4 结束语

基于机电集成的机器人精度提升技术通过结构优化、电气系统集成与控制算法补偿的协同实施，有效降低了各环节误差源对末端精度的影响。针对复杂工况的实际应用验证显示，系统具备高稳定性、高响应性与微误差控制能力。未来需进一步拓展多任务工况

下的自适应调节机制与模块化重构技术，以增强其在复杂作业环境下的广适性与持续精度保持能力。

参考文献:

- [1] 苗立晓. 提升工业机器人精度的关键路径: 基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术 [J]. 机器人产业, 2025(02): 57-64.
- [2] 赵艺兵, 温秀兰, 乔贵方, 等. 基于几何参数标定的串联机器人精度提升 [J]. 计量学报, 2020, 41(12): 1461-1467.
- [3] 乔贵方, 高春晖, 蒋欣怡, 等. 数据驱动的 6R 型串联工业机器人精度性能提升 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(08): 66-69, 74.
- [4] 徐逸凡. 多传感器融合技术在工业机器人定位精度提升中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(06): 36-38.
- [5] 王梦迪, 李娜. 基于工业机器人实验平台的焊接轨迹设计 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(08): 133-135.