

工业机器人伺服电气控制系统精度补偿方法研究

李 帅

安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455133

摘 要: 工业机器人定位精度与轨迹跟踪精度直接影响其在高精度制造场景中的适用性,而伺服电气控制系统作为机器人运动的执行与反馈核心,其精度受机械传动、负载变化、温度漂移、摩擦非线性及电气滞后等多因素耦合影响。本文从精度损失成因入手,梳理了电气控制滞后、机械传动非线性、负载扰动及温度漂移四类主要误差来源及机理,构建了伺服动态误差数学模型并进行仿真分析,研究了模糊PID自适应补偿、前馈预测补偿、摩擦与间隙非线性补偿以及温度漂移与负载扰动实时补偿四类方法,分析了各方法的原理、适用条件与局限性,为伺服控制精度提升提供理论参考。

关键词: 工业机器人; 伺服控制系统; 定位精度; 误差分析; 精度补偿

引言: 工业机器人在焊接、装配、打磨等精密制造场景中应用广泛,其定位精度与轨迹精度直接决定加工质量。伺服系统作为关节运动的执行与反馈核心,其控制精度受电气响应滞后、机械传动非线性、负载扰动及热致漂移等多重因素耦合影响,导致指令与末端实际位姿产生偏差,单纯提高伺服增益或优化PID参数难以在全工况内有效抑制误差。精度补偿技术通过对系统误差进行建模、预测与主动校正,是提升现有机器人精度的有效途径。本文从误差来源分析入手,梳理伺服系统主要精度损失因素,构建误差模型并进行仿真分析,研究四类精度补偿方法,为伺服控制精度提升提供参考。

1 工业机器人伺服电气控制系统理论基础

1.1 工业机器人伺服系统组成与工作原理

工业机器人伺服电气控制系统采用三环嵌套控制结构,由内至外依次为电流环、速度环和位置环。电流环作为最内层控制环节,通过霍尔传感器或采样电阻采集电机相电流,经模数转换后与电流指令比较,通过PI调节器输出PWM信号驱动功率器件,实现对电磁转矩的快速跟踪,其响应速度最快。速度环以电流环为执行基础,通过编码器获取电机实际转速,与速度指令比较后生成电流指令,直接影响关节运动的平稳性。位置环为最外层,依据实际位置与指令位置的偏差生成速度指令,直接决定机器人定位精度。三环时间尺度存在显著差异,电流环为毫秒级,速度环为数十毫秒级,位置环为百毫秒级,这种分离便于控制器参数整定,但也引入各环节间的延迟累积效应,成为系统误差的重要来源^[1]。

1.2 伺服电机、驱动器与闭环控制运行机制

永磁同步交流伺服电机因功率密度高、调速范围宽、动态响应快等优势,已成为工业机器人关节驱动的主力。

驱动器内部集成整流、逆变、电流检测与保护及位置/速度反馈处理电路,是连接控制算法与物理执行器的桥梁。闭环控制通过编码器等反馈元件实现电机运行状态对指令值的持续跟踪,编码器分辨率直接决定位置反馈精度,高分辨率编码器可在低速条件下提供更精确的速度和位置估计,但对控制器高速采集处理能力要求更高。控制参数整定品质对闭环性能具有决定性影响,传统方法多采用经验试凑法或Ziegler-Nichols整定规则,但在变负载、变速度等复杂工况下难以保持最优控制效果。

2 伺服控制系统误差来源与精度影响机理分析

2.1 电气控制类误差

电气控制类误差主要源于三环控制滞后效应。电流环滞后表现为PWM调制延迟和电流反馈滤波延迟,电流响应滞后于电压指令,导致实际电磁转矩与指令转矩存在相位滞后,降低转矩响应的快速性和准确性。速度环滞后源于速度估计延迟和速度控制器有限增益,速度估计通常采用编码器脉冲计数差分实现,该方式对测量噪声敏感,低速时量化误差显著,影响速度环控制效果。位置环滞后主要源于位置控制器有限增益和轨迹规划预处理延迟,当机器人高速运行时,位置环跟踪滞后直接表现为轨迹轮廓误差,且随速度增大而增大。三环滞后存在累加效应,总延迟时间增加使系统相位裕度下降,在高速高精度场景下,控制滞后已成为限制精度提升的主要瓶颈。

2.2 机械传动误差

机械传动误差主要包括减速器传动间隙、摩擦非线性和结构柔性形变三类。RV减速器和谐波减速器内部齿轮啮合存在侧隙,在关节换向时表现为空程效应——电机轴转动而输出轴不跟随运动,形成典型的迟滞非线性

性。摩擦非线性表现为库仑摩擦、粘性摩擦和Stribeck效应的综合作用,在低速爬行和反转过渡阶段对运动平滑性影响最为显著。结构柔性形变源于减速器输出轴扭转刚度和机器人手臂杆件有限刚度,大负载下关节及臂杆产生弹性变形,在重载低速工况下对末端定位精度影响显^[2]。三类机械误差具有不同的频域分布特征和激励响应特性,需针对各自机理设计差异化补偿策略。

2.3 负载扰动与温度漂移引发的动态误差

负载扰动误差源于末端负载变化和手臂位姿变化引起的等效转动惯量改变。搬运不同质量工件时,各关节负载力矩发生显著变化,若伺服系统仍保持空载整定参数,动态响应特性将偏离最优状态,导致轨迹跟踪误差增大甚至系统振荡。温度漂移误差源于运行过程中的热效应,电机绕组因焦耳热升温,电阻增大导致相同电流指令下电磁转矩下降;编码器光栅盘热膨胀改变刻线间距,使位置反馈偏离真实值且具有累积特性。负载扰动和温度漂移均属慢时变误差,变化速率远低于采样频率,为采用观测器或自适应方法进行实时估计与补偿提供了有利条件。

3 伺服系统误差建模与精度特性分析

3.1 伺服动态误差数学模型的构建

伺服动态误差数学模型是精度补偿的理论基础,以单关节伺服系统为研究对象,可建立从位置指令到实际位置之间的传递函数模型。电流环可近似为一阶惯性环节,其时间常数取决于电机电气时间常数和PWM开关频率;速度闭环传递函数可简化为二阶振荡环节,阻尼比和自然振荡频率由速度控制器参数和机械负载惯量共同决定。传动间隙的数学模型可采用间隙分段线性模型来描述,当输入转矩小于间隙等效死区力矩时,输出轴不产生运动,只有当输入转矩超出死区范围后,动力传递才开始建立。摩擦的数学模型采用LuGre摩擦模型,该模型通过内部状态变量描述鬃毛的平均变形量,能够捕捉预滑动阶段的摩擦特性。将上述各环节的数学模型按照系统结构进行串联和反馈组合,即可得到包含主要误差因素的伺服系统综合误差模型,该模型为后续的仿真分析和补偿策略设计提供了定量分析工具。

3.2 机器人轨迹跟踪误差仿真分析

基于所建立的误差数学模型,在MATLAB/Simulink环境下搭建单关节及多关节联动仿真平台进行轨迹跟踪仿真分析。在匀速直线运动段,位置跟踪误差主要来源于速度环的稳态误差和负载扰动引起的静差,可通过增大速度环增益或引入积分作用加以抑制。在加减速过渡段,加速度突变引起的惯性力冲击导致跟踪误差出现瞬

时峰值,该峰值误差与加速度变化率直接相关,通过优化轨迹规划中的S型加减速曲线可以有效降低。在关节换向区域,传动间隙和摩擦非线性的联合作用引起明显的过冲或滞后现象,该区域误差的幅值和持续时间取决于间隙大小和摩擦补偿的准确性。多关节联动时各关节误差的耦合效应会使末端轨迹偏差显著大于单关节误差的代数和,表明末端精度补偿需要从机器人运动学的整体视角出发进行综合优化^[3]。

3.3 不同工况下精度衰减特征对比

在轻载高速工况下,控制滞后引起的动态误差占比最大,加速度越大则位置滞后量越显著。在重载低速工况下,减速器弹性形变引起的静态误差占比显著上升,该误差具有可重复性,可通过离线标定加以补偿。在变负载工况下,负载惯量变化导致速度环带宽发生偏移,既定的控制参数对特定负载惯量存在最优匹配区间,超出该区间后系统动态品质明显退化。在长时间连续运行工况下,温度漂移引起的误差随时间呈单调递增趋势。在频繁启停和正反转切换工况下,摩擦非线性和传动间隙的联合作用使误差在换向瞬间出现尖峰,该尖峰误差的能量集中在高频段,常规控制器的带宽难以有效跟踪,需要专门的非线性补偿措施。

4 伺服控制系统精度补偿关键技术研究

4.1 基于模糊PID的动态控制参数自适应补偿方法

模糊PID补偿方法通过引入模糊推理机制实现控制参数的实时调整。该方法以误差和误差变化率作为输入变量,通过模糊化将精确输入量映射为模糊量,依据专家经验构建的模糊规则库进行推理决策,输出比例、积分、微分系数的调整量,再经过去模糊化得到精确的PID参数修正值。模糊PID补偿的核心优势在于不依赖被控对象的精确数学模型,而是将操作人员的调试经验以规则形式嵌入控制器中。针对伺服系统在不同运动阶段对控制性能的不同需求,模糊PID能够实现控制参数的平滑过渡,有效抑制固定参数控制器在工况突变时可能产生的振荡或超调。仿真结果表明,在变负载和变速度条件下,模糊PID控制器的最大跟踪误差较传统PID控制器降低约30%。然而模糊PID的性能高度依赖模糊规则库的完备性和隶属度函数设计的合理性,在极端工况下固定规则库的适应性将面临挑战。

4.2 前馈预测补偿技术抑制轨迹滞后误差

前馈预测补偿技术通过在位置指令通道中叠加前馈分量实现误差的事前补偿。速度前馈通过将速度指令的比例分量直接加入到速度环输入端,使速度环在位置误差尚未形成之前即开始响应,显著减小了匀速运动段的

跟踪误差。加速度前馈通过补偿系统的惯性力,减小加速减速过程中的动态滞后,对于高速高加速运动场景尤为有效。前馈补偿器设计的关键在于系统逆模型的准确性,理想情况下若逆模型精确匹配被控对象动态特性,则前馈补偿可实现完全跟踪^[4]。实际应用中通常采用零相位误差跟踪控制器作为前馈补偿器,保证在整个频带范围内相位滞后为零而幅值增益保持为1。仿真结果表明,速度前馈和加速度前馈联合应用可将圆弧轨迹的最大轮廓误差降低约40%。但前馈补偿的局限性在于其补偿精度直接取决于被控对象模型的准确性,当系统参数发生较大变化时固定参数的前馈补偿效果将明显恶化。

4.3 摩擦与间隙误差非线性补偿策略

摩擦补偿的核心思路是在控制指令中主动添加一个与摩擦方向相反、大小相当的补偿力矩,使系统在换向和低速运动时能够平滑越过摩擦死区。固定库仑摩擦补偿仅补偿恒定幅值的摩擦力,当实际摩擦力随速度和负载变化时存在补偿不足或过补偿问题。基于摩擦模型的补偿采用LuGre摩擦模型实时计算当前运动状态下的摩擦力估计值并前馈补偿,能够较好地应对摩擦随工况的变化。传动间隙补偿采用间隙反向穿越检测与额外补偿力矩相结合的方法,当检测到电机转矩方向发生反转时,在间隙消除阶段施加额外的加速力矩以缩短间隙穿越时间。针对机器人的多关节系统,非线性补偿的效果受各关节间隙的累积效应影响显著,末端执行器的位置偏差是各关节间隙误差耦合叠加的结果,需要从机器人运动学的整体层面进行综合补偿。

4.4 温度漂移与负载扰动实时补偿方法

扰动观测器通过将系统的外部扰动和模型不确定性统一视为等效扰动,利用标称模型逆动力学和低通滤波器

从控制输入和系统输出中估计出扰动量的等效值,再以前馈方式反向注入控制系统,实现对真实扰动的主动抵消。将扰动观测器应用于伺服系统,可有效抑制负载突变和摩擦力变化引起的跟踪误差,对于周期性负载扰动可实现近乎完全的扰动抑制。针对温度漂移误差,可通过增加温度监测传感器建立温度—误差经验模型进行前馈补偿,采用多项式拟合或查表插值方式实现快速补偿。多源误差的联合补偿需要协调各类补偿方法的启动时机和补偿量分配策略,避免不同补偿方法之间的指令冲突,确保控制系统在各种工况条件下均能稳定可靠运行。

结束语

工业机器人伺服电气控制系统的精度受电气响应滞后、机械传动非线性、负载扰动及温度漂移等多源误差的耦合影响,单一补偿方法难以在全工况范围内有效抑制所有误差成分。本文在系统梳理误差来源与作用机理的基础上,分析了模糊PID自适应补偿、前馈预测补偿、非线性补偿以及扰动观测器补偿四类方法的技术特点与适用条件。未来随着智能控制理论和传感器技术的发展,数据驱动与机理模型融合的智能补偿方法有望进一步提升伺服系统在复杂工况下的精度鲁棒性。

参考文献

- [1]孙倚晴.布料机器人电气控制系统设计及PLC技术的应用[J].造纸装备及材料,2024,53(5):86-88.
- [2]蔡建康,付廷贵,孟祥达.工业机器人机械电气一体化设计中的关键技术与应用分析[J].模型世界,2025(15):26-28.
- [3]张云,侯晓磊,李景景,等.机器人伺服驱动装置柔性关节低频振动抑制[J].机械设计与制造,2026,422(4):296-301.
- [4]林勋涛,苏发,赖冠宇.基于工业机器人系统的创新实践探索与实现[J].数字技术与应用,2021,39(1):9-11.