文章编号:1671-4598(2026)07-0114-09 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.07.015 中图分类号:TP272 文献标识码:A

基于 FPGA 的轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统设计

陈 虹
(上海建桥学院 机电学院,上海 201306)

摘要:在高速轨道运行环境中,受轨道谱激励、负载突变等多源扰动耦合作用,轨道式移动机器人易呈现显著的偏摆力矩非线性波动,导致控制存在偏差;为此,设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)的轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统;系统以 XilinxKintex-7FPGA 为核心,构建了集多维度运动参数感知、硬件并行运算与高精度数模转换于一体的控制架构;通过将 3 次样条插值与参数搜索过程硬件化,系统能够快速遍历参数空间并嵌入机械约束,从而兼顾轨迹平滑性与实时性要求;通过构建总作用力矩与偏摆力矩的耦合修正模型,结合实时解算与比例-积分-微分(PID)控制,系统可动态输出补偿指令,从而有效解决了偏摆力矩的非线性波动问题,实现微秒级力矩补偿与实时跟随控制;实验结果表明,在偏心负载突变场景下,该系统能将偏摆力矩波动幅度抑制在 0.19~0.32 N·m 范围内,侧导轮调节臂角度跟踪曲线与理论指标一致,即使在 0.6 N·m 峰值力矩下仍能稳定跟随,且偏摆力矩峰值为 50 N·m 时,偏摆力矩抗干扰恢复时间仅为 13 s,验证了 FPGA 控制在强干扰场景下的鲁棒性。

关键词:FPGA;轨道式移动机器人;偏摆力矩;跟随控制;负载突变

Design of FPGA Based Yaw Moment Following Control System for Orbital Mobile Robots

CHEN Hong
(College of Mechanical & Electronic Engineering, Shanghai Jianqiao University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In high-speed track operation environments, due to the coupling effect of multiple sources of disturbances such as track spectral excitation and load sudden changes, a track-based mobile robot is prone to exhibit significant nonlinear fluctuation of yaw moment, resulting in control deviation. Therefore, a yaw moment following control system for track-based mobile robots based on field programmable gate array (FPGA) is designed. The system adopts Xilinx Kintex-7 FPGA as the center, and constructs a control architecture that integrates multi-dimensional motion parameter perception, hardware parallel computing, and high-precision digital-to-analog conversion. By implementing the cubic spline interpolation and parameter search process, the system can quickly traverse the parameter space and incorporate mechanical constraints, thus balancing the requirements for trajectory smoothness and real-time performance. By constructing a coupling correction model for the total torque and yaw moment, combined with real-time calculation and proportional-integral-derivative (PID) control, the system can dynamically output compensation instructions, effectively solving the nonlinear fluctuation of the yaw moment, thereby achieving microsecond-level torque compensation and real-time following control. Experimental results show that in the eccentric load sudden change scenario, the system can suppress the amplitude of yaw moment fluctuation within the range of 0.19~0.32 N·m, and the tracking curve of side guide wheel adjustment arm angle is consistent with theoretical indicators. Even with a peak torque of 0.6 N·m, it can still stably follow. With the peak yaw moment of 50 N·m, the anti-interference recovery time of the yaw moment is only 13 seconds, verifying the robustness of FPGA control in strong interference scenarios.

Keywords: FPGA; orbital mobile robot; yaw moment; follow control; load mutation

收稿日期:2025-12-01; **修回日期**:2026-02-03。

作者简介:陈 虹(1978-),女,硕士。

引用格式:陈 虹.基于 FPGA 的轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统设计[J].计算机测量与控制,2026,34(7):114-122.

0　引言

轨道式移动机器人作为沿固定轨道自主执行任务的专用机器人系统，凭借运动路径可控、负载能力强、作业精度高等优势，已广泛应用于轨道交通巡检、仓储轨道转运、工业流水线物料传输等领域。这类机器人在沿轨道运行过程中，受轨道接头间隙冲击、轨道面磨损不均、负载重心动态偏移、驱动电机输出力矩波动等因素影响，易产生围绕轨道轴线的偏摆力矩[1]。该力矩会导致机器人车体与轨道贴合度下降，出现横向偏移、振动甚至卡轨的风险，不仅严重影响机器人沿轨道的运动精度，还会加剧轨道与车轮的摩擦损耗，缩短设备使用寿命。

为解决轨道式移动机器人运行中的偏摆力矩干扰问题，确保机器人始终沿轨道稳定跟随预设路径，同时提升其运动精度与任务执行可靠性，设计并开发轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统成为关键需求。现阶段发展较为成熟控制系统中，吴石等人[2]提出了基于量子粒子群优化－长短期记忆网络（QPSO-LSTM，quantum-behaved particle swarm optimization-long short-term memory）算法的控制方法，考虑偏摆力矩在线实时反馈的优化，构建机器人动力学模型、偏摆力矩计算模型以及力矩跟随控制模型。以机器人偏摆力矩精准跟随为目标，以机器人运动速度、关节角度和能耗为不等式约束，建立基于加入异变序列的量子粒子群优化－长短期记忆网络算法的优化模型，以此控制偏摆力矩。该方法异变序列难以及时输出准确的补偿指令，从而削弱了对非线性力矩波动的抑制能力。任乔等人[3]提出了基于三维有限元模型的控制方法，构建机器人旋转部件的三维有限元模型，研究部件几何参数与电磁参数对偏摆力矩的影响规律，获取适用于机器人复杂运动工况的部件参数。依据偏摆力矩变化曲线建立部件参数模型，设计了模糊控制器，通过实时调整控制参数，实现机器人偏摆力矩的精准跟随。但该方法构建的模型对复杂环境因素考虑有限，实际中多变的环境因素易引发非线性力矩波动，导致控制出现偏差。许庚晨等人[4]提出了基于振动传递终端力检测的控制方法，通过测量机器人运动部件产生的偏摆振动与终端执行机构所受的偏摆作用力之间的传递矩阵，依据此矩阵精准计算补偿电流。利用补偿电流对机器人的驱动电机进行实时调控，抵消外部干扰引起的偏摆力矩，实现机器人在复杂环境下偏摆力矩的稳定跟随。然而此方法对测量误差极为敏感，在非线性力矩波动场景下难以保证补偿电流的准确计算，限制了波动抑制效果。黄明力等人[5]提出了数学模型和回正力矩模型的控制方法，依托轨道式移动机器人搭载的各类传感器信号，提出通过机器人转向指令角度确定期望偏摆力矩，由机器人行进过程中的横向位移加速度确定实际偏摆力矩。依据期望偏摆力矩和估算得到的实际偏摆力矩，对机器人的转向执行机构进行偏摆补偿，以此实现机器人在行进过程中偏摆力矩的精准跟随。但该方法高度依赖传感器精度，在传感器出现故障或受干扰时，无法准确感知非线性力矩波动，导致控制失效。

为解决上述方法存在的问题，设计了一种基于 FPGA 的偏摆力矩跟随控制系统。系统由 FPGA 核心控制与实时运算模块、多维度运动参数感知模块和高精度数模转换输出模块构成；通过建立总作用力矩与偏摆力矩的耦合修正模型，结合实时解算与 PID 控制，实现动态补偿指令输出；将三次样条插值与参数搜索过程硬件化，采用基于 FPGA 的穷举搜索算法对调节机构摆动轨迹进行快速参数优化，在嵌入机械约束的同时兼顾轨迹平滑性与系统实时性。

1　轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统硬件设计

轨道环境中存在强电磁干扰与持续振动，常规控制架构延迟无法满足，易引发机器人横向偏移、振动甚至卡轨风险。而 FPGA 基于硬件并行特性，可同时处理多传感器数据与复杂控制算法，大幅提升运算速度，满足微秒级力矩矫正的实时性需求[6]。为此，设计的轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统由 3 大核心模块构成：FPGA 核心控制与实时运算模块作为中枢，处理感知数据、固化控制算法并完成高速并行运算，输出精准控制指令；多维度运动参数感知模块采集加速度、角速度、位置等多维度运动数据，为力矩计算提供高精度原始感知；高精度数模转换输出模块将数字控制指令转换为模拟驱动信号，衔接数字逻辑与执行机构[7]。三者协同实现偏摆力矩的精准跟随，保障机器人高速运行时的轨迹稳定性与抗干扰能力。

1.1　FPGA 核心控制与实时运算模块

偏摆力矩变化频率高且需实时响应，而常规处理器运算延迟大，易导致矫正滞后，所以设计 FPGA 模块，利用其硬件并行特性，可有效提高控制精度和响应速度。FPGA 核心控制与实时运算模块是轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统的中枢单元，负责集中处理传感器感知数据、固化核心控制算法、完成高速并行运算及输出精准控制指令，为偏摆力矩的耦合修正与实时跟随提供硬件算力支撑，保障机器人高速运行时的轨迹稳定性与抗干扰能力。该模块结构框图，如图 1 所示。

由图 1 可知，该模块以 XilinxKintex-7K7325T 型号 FPGA 芯片为核心硬件载体，集成配置芯片 SPIFlash、联合测试行动组（JTAG，joint test action group）调试接口及 200 MHz 晶振时钟模块：其中，FPGA 主芯片

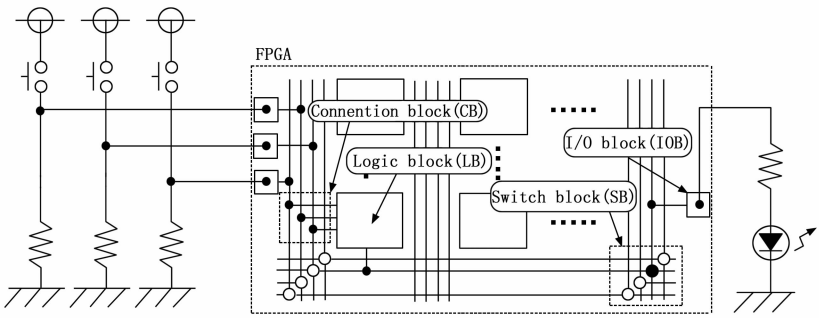

图 1 FPGA 结构原理图

采用 28 nm 工艺制程，内置 326 080 个逻辑单元与 840 个 DSPSlice，为算法硬件化提供充足资源[8]；SPIFlash 负责存储 FPGA 的配置程序与预标定参数，系统上电后可自动完成 FPGA 的程序加载；JTAG 调试接口支持在线调试与程序烧录，便于算法逻辑的迭代优化[9]；200 MHz 晶振时钟模块则为全系统运算提供稳定时序基准，确保各硬件逻辑同步工作。

在机器人高速运行场景中，偏摆力矩变化频率高且需实时响应，此时模块内置的乘法－累加器（MAC，multiply-accumulate unit）阵列乘累加运算单元依托 FPGA 的硬件并行特性，可在 3 个时钟周期内完成一次补偿力矩计算。该单元基于 FPGA 内置的 DSP48E2Slice 级联[10]构建，核心组成包括并行乘法器模块、加法树模块、累加寄存器模块与控制逻辑模块；配合 200 MHz 高时钟频率，其运算速率可达 66.7 MHz，完全满足系统微秒级力矩矫正需求，能有效避免因运算延迟导致的偏摆力矩矫正滞后，确保调节机构精准跟随力矩变化，进而抑制机器人横向偏移、振动及卡轨风险。

为实现补偿力矩的微秒级计算，充分利用了 FPGA 的硬件并行性与可编程资源。具体而言，MAC 乘法－累加器阵列由 4 个 DSP48E1 Slice 级联构建，分别用于角速度项与相应系数的乘法、角加速度项与相应系数的乘法、角加加速度项与相应系数的乘法以及最终的求和累加，该部分仅占总 DSP Slice 资源的约 0.48%。运算采用三级流水线设计：第一时钟周期读取数据与系数，第二周期并行完成三次乘法，第三周期进行累加并输出结果。整个流程仅耗时 15 ns，确保了计算的极低延迟。此外，控制算法的其余部分，包括三次样条插值、参数搜索状态机、传感器接口及 PID 控制器等逻辑，总计占用约 10 630 个逻辑单元，约占芯片逻辑资源总量的 3.26%。此资源分配方案在保障算法实时性与功能完整性的同时，为系统扩展预留了充足空间，体现了硬件设计的合理性与高效性。

1.2 多维度运动参数感知模块

机器人运动状态复杂多变，需高精度感知数据支撑力矩计算，轨道干扰易导致数据失真。因此，设计多维度感知模块，该模块是轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统的核心数据采集单元，主要负责实时捕获机器人执行单元的运动状态与调节机构的位置信息，为总作用力矩、偏摆力矩的计算及矫正逻辑提供高精度原始感知数据，保障力矩跟随控制的准确性与实时性[11]。该模块采用“3 类传感器协同采集＋抗干扰封装”设计，专门适配轨道运行场景下多参数同步监测需求，严格规避轨道摩擦振动、电机电磁辐射等干扰因素对数据采集的影响，确保感知数据的稳定性。该模块以加速度传感器 ADXL355、角速度传感器 MPU6050、位置传感器 AS5048A 为核心硬件载体，集成传感器探头、串行外设接口（SPI，serial peripheral interface）信号传输接口、抗干扰屏蔽外壳[12]。

加速度传感器采用微机电电容式敏感结构，当机器人执行单元在轨道运行中产生瞬时加速度时，内部质量块相对固定框架发生位移，导致差分电容值变化，专用信号调理电路将该变化转换为电压信号，经 16 位模数转换后输出高精度瞬时加速度数据[13]；角速度传感器集成三轴陀螺仪与辅助加速度计，基于科里奥利力原理实现角速度测量，当执行单元绕轨道轴线产生旋转运动时，内部振动结构因科里奥利力产生垂直于振动方向的位移。通过电容检测电路将位移转换为电信号，输出对应轴的瞬时角速度数据，为偏摆力矩耦合修正及轨迹平滑性验证提供高频运动参考[14]；位置传感器采用磁阻式检测原理，通过感应调节机构转轴的磁通量变化，实现无接触式位置测量，输出 14 位分辨率的实时位置数据，为零力矩基准点计算及摆动角轨迹生成提供位置参数。

SPI 信号传输接口作为模块与 FPGA 的核心数据链路，支持三路传感器数据同步传输，确保加速度、角速度、位置数据在同一时钟周期内传输至 FPGA 核心控制单元，避免多参数传输延迟导致的力矩计算偏差[15]；抗干扰屏蔽外壳采用金属合金材质，内部敷设电磁屏蔽膜，能有效隔绝轨道运行中电机驱动产生的电磁干扰、车轮与轨道摩擦引发的振动干扰，同时减少环境温度变化对传感器敏感结构的影响，保障感知数据的信噪比满足运算精度要求。

传感器选型严格匹配系统微秒级力矩补偿与±0.05 N·m 控制精度需求：加速度传感器 ADXL355 的 16 位模数转换精度，对应±2 g 量程下 0.122 mg/LSB 的分辨率，可精准捕获执行单元 0.01 m/s^2 级别的瞬时加速度变化，为总作用力矩计算提供高精度原始数据，其测量误差≤±0.5%FS，远低于系统允许的 3%力矩计算误

差阈值；角速度传感器 MPU6050 在 ±500°/s 量程下 131 LSB/（°/s）的分辨率，能实时感知 0.1 °/s 级别的偏摆角速度波动，满足偏摆力矩耦合修正对高频运动参数的感知需求，其零漂≤±1 °/h，可有效避免长期运行中的累积误差；位置传感器 AS5048A 的 14 位分辨率，对应 0.021 9°的角度分辨力，可精准定位侧导轮调节臂的摆动位置，为零力矩基准点校准与轨迹生成提供可靠位置参数，其绝对角度误差≤±0.3°，确保调节机构动作与补偿指令的精准匹配。安装方式上，加速度传感器与角速度传感器集成于机器人车体中心位置的抗振安装座，避免轨道振动导致的测量失真，且二者轴线与轨道轴线严格对齐，减少交叉轴干扰；位置传感器直接嵌套于侧导轮调节臂转轴末端，采用无接触式磁阻检测设计，消除机械安装间隙带来的位置偏移误差，确保传感器测量数据与执行机构实际状态的一致性。

1.3　高精度数模转换输出模块

由于数字控制指令需转换为模拟信号驱动执行机构，但转换误差和延迟易导致补偿偏差，而高精度数模转换输出模块是轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制系统的关键信号转换单元，能够将 FPGA 输出的数字控制指令精准转换为模拟驱动信号，为功率驱动模块提供稳定的控制输入，是衔接数字控制逻辑与执行机构动作的核心电路，直接影响补偿力矩输出的精度与稳定性[16]。该模块以 16 位高性能 DAC8552 型号数模转换器（DAC，digital-to-analog converter）为核心硬件载体，集成基准电压源、SPI 通信接口电路、输出缓冲电路及噪声抑制电路，如图 2 所示。

由图 2 可知，DAC8552 作为核心转换芯片，采用串行输入架构，内置高精度数模转换核心与输出调理电路，可将 16 位数字信号线性转换为对应模拟电压，转换非线性误差低至 ±0.001 5%，为信号转换精度提供硬件保障；基准电压源属于低噪声、低漂移高精度电压基准，输出电压稳定度达 0.1%，温度漂移仅 5 ppm/℃，能为 DAC8552 提供恒定参考电平，避免环境温度变化导致的转换误差[17]；SPI 通信接口电路采用差分信号传输设计，支持最高 50 MHz 传输速率，可实现 FPGA 与 DAC8552 的高速数据同步，确保控制信号无延迟传输；输出缓冲电路基于运算放大器构建，具备高输入阻抗与低输出阻抗特性，能有效隔离转换核心与后级功率驱动模块，避免负载变化对转换精度的影响；噪声抑制电路集成电阻-电容（RC，resistor-capacitor）低通滤波网络与电磁屏蔽结构，可滤除电源纹波与电磁干扰，降低信号噪声底至 10 μV 以下。

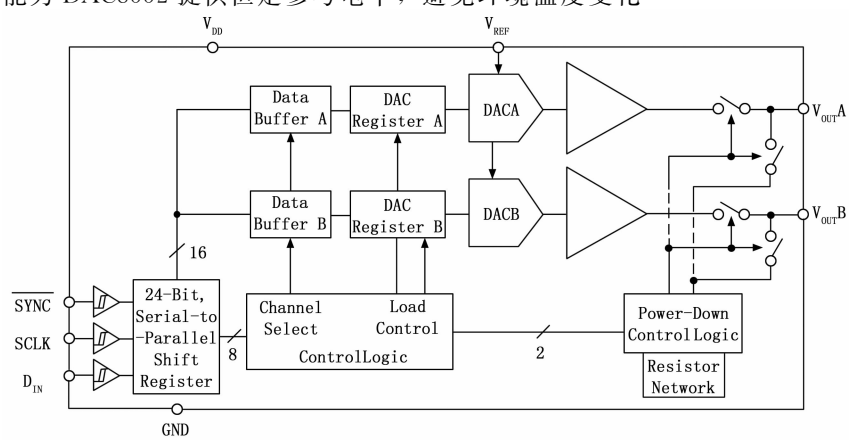

图 2　高精度数模转换输出结构原理图

在机器人高速运行场景中，补偿力矩的动态调节对模拟信号的实时性与稳定性要求严苛，此时该模块通过 SPI 通信接口电路快速接收 FPGA 输出的数字控制信号，并传输至 DAC8552 内部转换核心[18]。以 REF5040 提供的稳定基准电压为参考，转换核心将数字信号转换为对应幅值的模拟信号，经输出缓冲电路整形放大后，形成幅值稳定的模拟控制信号，再通过噪声抑制电路滤除干扰信号后传输至功率驱动模块。该模块通过控制转换延迟能精准复现数字指令中的力矩调节信息，完全满足系统微秒级力矩矫正需求，可有效避免因信号转换误差或延迟导致的补偿力矩输出偏差，确保执行机构（侧导轮调节臂驱动电机）精准响应控制指令，进而实现偏摆力矩的精准跟随。

2　FPGA 驱动的偏摆力矩耦合修正与跟随控制

2.1　轨道机器人抗扰力矩约束下偏摆力矩耦合修正

轨道式移动机器人运行时，其与轨道的接触面存在抗扰力矩。若机器人未受其他外部力矩作用，仅能依靠轨道接触面的抗扰力矩抵消偏摆力矩的影响。假设轨道接触面能提供的最大抗扰力矩为 Q_{max}^{α}，在低速运动状态下，每个执行器的加速度都很小，此时的偏摆力矩 Q_y 也很小，这就使得轨迹界面的抗干扰力矩可以消除摆动力矩对机器人的影响，所以机器人不会出现横向偏移、振动和卡轨现象；但在高速运动过程中，由于驱动机构的加速度过大，使其摆动力矩超出了导轨的最大抗干扰力矩，使机器人发生横向偏移、振动，甚至卡轨，影响其在轨道上的稳定工作，甚至导致失稳发生脱轨。因此，在高速运动状态下，需要对其进行修正，使得其处于轨道接触界面的最大抗干扰力矩范围之内，以防止其失稳。

轨道式移动机器人运行时，各执行单元的空间位置坐标可表示为 $p_s=(x_s, y_s, z_s)$，其中 s 代表执行单元个数且 $s\leqslant K$，K 为机器人执行单元总数。机器人运行过程中，围绕零力矩基准点产生的总作

用力矩可通过下式计算：

$$Q_{总}=\sum_{s=1}^{K}m_s(p_s-p_0)\cdot(\alpha_s+\alpha_g) \tag{1}$$

式中，$p_0=(x_0,y_0,0)$ 为零力矩基准点坐标；α_s 为第 s 个执行单元的瞬时加速度[19]；α_g 为重力加速度常量；m_s 为第 s 个执行单元的质量。

机器人运行过程中产生的绕轨道轴线偏摆力矩与总作用力矩存在耦合关系，总作用力矩在轨道轴线方向的分量直接影响偏摆力矩大小。结合式（1）计算得到的 $Q_{总}$，偏摆力矩可修正为：

$$Q_y=\xi\cdot Q_{总}+\sum_{s=1}^{K}m_s(x_s-x_0)\cdot v_{sy}-\sum_{s=1}^{K}m_s(y_s-y_0)\cdot\omega_s \tag{2}$$

式中，ξ 为力矩耦合系数；ω_s 为第 s 个执行单元的瞬时角速度[20]；v_{sy} 为第 s 个执行单元在 y 轴方向的加速度分量。

2.2 基于 FPGA 的穷举搜索算法的修正力矩跟随控制

轨道式移动机器人在高速运行中受到轨道谱激励、负载突变、机械传动间隙以及轮轨接触等多源扰动的耦合作用，偏摆力矩呈现非线性波动，导致控制存在偏差。而调节机构的摆动轨迹又需满足平滑性与机械约束，传统参数搜索方法存在实时性差的问题，所以进行基于 FPGA 硬件穷举法的参数优化设计，这可有效利用 FPGA 的并行计算特性，快速生成满足约束的最优摆动轨迹，提高力矩跟随控制的实时性与精度。

选取调节机构的最大摆动角速度 $\varphi_{\max}$ 和中间时刻 $t=\frac{T}{2}$，T 为摆动周期，摆动角速度 φ_a 作为核心参数。FPGA 根据偏摆力矩 Q_r，动态生成参数搜索范围：

$$\begin{cases}\varphi_{\max}\in(0,\varphi_{\lim}]\\ \varphi_a\in[-\varphi_{\max},\varphi_{\max}]\end{cases} \tag{3}$$

式中，$\varphi_{\lim}$ 为调节机构的机械角速度极限值，当 $|Q_r|$ 越大时，FPGA 会缩小 $\varphi_{\max}$ 的初始搜索步长，提升参数寻优精度。FPGA 根据上式确定参数范围，并通过 3 次样条插值模块生成摆动角轨迹：

$$\varphi_t=f(\varphi_{\max},\varphi_a,t) \tag{4}$$

为了保证调节机构的摆动角轨迹平滑无振荡，摆动角速度须满足 $\varphi_a>0$；此外，调节机构的最大摆动角 $\varphi_{\max}$ 必须处在机械结构允许的角度范围（$\gamma_{\min},\gamma_{\max}$）内，即 $\varphi_{\max}\leqslant\min(|\gamma_{\min},\gamma_{\max}|)$。其中，$\gamma_{\min},\gamma_{\max}$ 分别为调节机构的机械角度下边界值与上边界值。通过数值微分算法求解摆动角的一阶导数（角速度 $\dot{\varphi}_t$）和二阶导数（角加速度 $\ddot{\varphi}_t$），最终结合动力学模型得到补偿力矩：

$$Q_c=\lambda_1\varphi_t+\lambda_2\dot{\varphi}_t+\lambda_3\ddot{\varphi}_t \tag{5}$$

式中，λ_1、λ_2、λ_3 分别为摆动角速度、一阶导数、二阶导数的力矩系数，该式的计算由 FPGA 内部的乘法－累加器（MAC）阵列完成，确保实时性。FPGA 通过高速 AD 接口采集调节机构的摆动角速度、角加速度及三阶导数，并读取预标定的力矩系数 λ_1、λ_2、λ_3，将这些数据锁存至输入寄存器。MAC 阵列中的多个乘法器同时工作，乘法器 1 计算 $\lambda_1\varphi_t$；乘法器 2 计算 $\lambda_2\dot{\varphi}_t$；乘法器 3 计算 $\lambda_3\ddot{\varphi}_t$，每个乘法器在一个时钟周期内完成运算，输出各自的乘积结果。3 个乘积结果输入加法树，通过两级加法器在单个时钟周期内完成累加，得到补偿力矩。累加结果存入累加寄存器，经控制单元判断无溢出后，输出至后续矫正逻辑模块。整个过程通过 FPGA 的流水线设计实现单周期内完成多组乘累加运算，确保从数据采集到力矩计算的延迟控制在微秒级，满足机器人偏摆力矩实时矫正的需求。

矫正后的偏摆力矩为原始偏摆力矩与补偿力矩的耦合结果，可得：

$$Q'_y=Q_y-Q_c\cdot\mu(t) \tag{6}$$

式中，$\mu(t)$ 为 FPGA 输出的动态调节系数。由于待优化的核心参数仅为 $\varphi_{\max}$ 和 φ_a，且满足 $-\varphi_{\max}\leqslant\varphi_a\leqslant\varphi_{\max}$，为简化寻优过程、适配 FPGA 硬件并行运算特性，采用硬件化穷举法实现参数寻优。

确定参数状态空间，通过 FPGA 内部的循环嵌套逻辑模块划定 $\varphi_{\max}$ 和 φ_a 的搜索范围；嵌入约束条件判断逻辑，确保搜索到的参数满足机械结构限制与轨迹平滑要求；遍历状态空间内所有参数组合，通过硬件流水线运算快速筛选最优解。具体操作流程由基于 FPGA 的穷举搜索算法的逻辑实现，步骤如下。

步骤一：计算出机器人在前半运行周期内 n 个采样时刻的偏摆力矩 $Q_y=[Q_{y1},Q_{y2},\cdots,Q_{yn}]$；令最大摆动角速度 $\varphi_{\max}=\varphi_{\lim}$，中间时刻摆动角速度 $\varphi_a=-\varphi_{\max}$；初始化矫正后的偏摆力矩最大值 $Q'_{y-\max}=\max|Q_y|$；设定参数最优初始值 $\varphi_{\max_opt}=0$、$\varphi_{a_opt}=0$；选取合适的角速度增量 $\Delta\varphi>0$。

步骤二：将当前参数 $\varphi_{\max}$ 和 φ_a 代入式（4），通过 FPGA 内部的三次样条插值模块生成调节机构的摆动角轨迹 φ'_t；调用角速度判断逻辑，验证摆动角速度是否满足单调递增条件 $\varphi'_t>0$，若满足则进入步骤三，否则跳转至步骤四。

步骤三：由式（5）计算出 n 个采样时刻的补偿力矩 $Q_c=[Q_{c1},Q_{c2},\cdots,Q_{cn}]$，结合式（6）得到各时刻矫正后的偏摆力矩；判断所有 Q'_y 元素是否满足约束条件 $Q'_y\leqslant|Q^{\mu}_{\max}|$，若不满足则跳转至步骤四；若满足则计算当前参数组合下矫正后的偏摆力矩最大值 $\max|Q'_y|$，并与 $Q'_{y-\max}$ 进行比较：若 $Q'_{y-\max}>\max|Q'_y|$，则更新 $Q'_{y-\max}=\max|Q'_y|$、$\varphi_{\max_opt}=\varphi_{\max}$、$\varphi_{a_opt}=\varphi_a$，否则跳转至步骤四。

步骤四：调整中间时刻摆动角速度 $\varphi'_a=\varphi_a+\Delta\varphi$，通过 FPGA 内部的比较器逻辑判断是否满足 $-\varphi_{max}\leqslant\varphi'_a\leqslant\varphi_{max}$，若满足则返回步骤二，否则跳转至步骤五。

步骤五：调整最大摆动角速度 $\varphi'_{max}=\varphi_{max}-\Delta\varphi$，若 $\varphi'_{max}>0$，则令 $\varphi'_a=-\varphi'_{max}$ 并返回步骤二；反之则搜索结束。此时，φ_{max_opt} 和 φ_{a_opt} 即为摆动角速度参数的近似最优解。

将步骤五得到的最优参数 φ_{max_opt} 和 φ_{a_opt} 代入式(4)，生成最优摆动角轨迹；再通过式(5)计算稳定的补偿力矩 Q_{c_opt}，结合式(6)使矫正后的偏摆力矩 Q'_y 稳定在 $|Q''_{max}|$ 范围内。FPGA 最终输出驱动控制信号，通过 DA 转换后驱动调节机构动作，实现偏摆力矩的精准跟随：

$$u_{ctrl}=k_pQ'_y+k_i\int Q'_y\mathrm{d}t+k_dQ'_y \tag{7}$$

式中，k_p、k_i、k_d 为 PID 控制参数，整个控制过程由 FPGA 硬件逻辑并行执行，计算延迟控制在微秒级，确保轨道式移动机器人沿轨道稳定运行，有效抑制横向偏移、振动及卡轨风险。

3　实验

3.1　负载突变场景

某智能制造工厂仓储区，型号为 AGV-R3 的轨道式移动机器人沿 40 m 钢制仓储轨道，转运 18 kg 均匀码放在长 60 cm×宽 40 cm 的塑料零件箱，从 3 号原料货架前往 8 号生产工位，运行速度 3 m/s。

机器人启动 8 s 后，行驶至轨道 24 m 处，距工位 16 m，工厂 KR6R900 自动化机械臂向其货台右侧补充 20 kg 含金属连接件的纸箱，长 50 cm×宽 30 cm，重量集中于右侧 1/2 区域，因吸盘偏移，纸箱仅右侧 2/3 落于预设承重区，左侧 1/3 悬于货台边缘，负载分布严重不均。

实验在一条长 40 米的标准工业钢制轨道上进行，材质为 Q235A，表面经防锈与硬化处理，平整度误差≤1.5 mm/m。轨道表面存在因长期使用产生的轻微均匀磨损，但无突变凹陷或接缝错台，可模拟稳态运行与受扰动的典型工况。实验中施加的偏心负载为一只内部封装有金属配重块的定制纸箱，外形尺寸为长 50 cm×宽 30 cm×高 40 cm。配重块总质量 18 kg，被固定于纸箱内部右侧三分之二区域，导致负载整体重心水平偏离几何中心达 12 cm，垂直方向位于箱体高度中心。该设计模拟了工业场景中因摆放不稳或物料密度不均导致的典型重心突变情况。

负载添加瞬间 0.1 s 内，货台重心向右侧偏移 12 cm，绕轨道轴线产生的偏摆力矩 1.2 N·m 瞬间超过轨道接触面最大抗扰力矩 0.6 N·m。0.3 s 时，机器人左侧车轮与轨道侧缘出现持续摩擦异响，横向位置误差达 7 mm，超出正常运行允许的 3 mm 范围；0.6 s 时，MPU6050 检测到机器人绕轨道轴线的振动频率升至 8 Hz，AS5048A 显示侧导轮调节臂因指令残缺仅微调 3°，无法有效抵消偏摆力矩；0.9 s 时，左侧车轮与轨道侧缘接触压力骤增，机器人行驶速度从 3 m/s 降至 1.5 m/s，出现明显卡轨趋势，货台塑料零件箱因振动倾斜，部分零件滑落，完全中断物料转运任务，直至 1 s后现场维护人员紧急停机，故障才得以控制。

3.2　实验装置

MPU6050 是一款集成三轴加速度计与三轴陀螺仪的运动传感器，通过检测机器人在运行过程中的加速度变化和绕轨道轴线的角速度变化，获取其姿态信息。实验平台核心由 AGV-R3 机器人本体、基于 Xilinx Kintex-7 FPGA 的嵌入式控制箱、传感单元及上位机监控软件构成。MPU6050 惯性测量单元固定于机器人车体质心处的刚性安装板上，其 X、Y、Z 三轴分别与机器人的前进方向、横向和垂向严格对齐，以直接测量绕轨道轴线的偏摆角速度；AS5048A 磁编码器通过非接触式联轴器与侧导轮调节臂的驱动电机转轴同轴连接，实时测量摆动角度；ADXL355 加速度计同样安装于车体质心附近，用于辅助验证动态特性。FPGA 控制板置于机器人载物台下的屏蔽控制箱内，通过定制线缆与各传感器及执行机构驱动器连接，以减少信号衰减与电磁干扰。该装置核心参数，如表 1 所示。

表 1　MPU6050 传感器核心参数表

参数名称	典型参数
加速度量程	±2 g、±4 g、±8 g、±16 g 可选
角速度量程	±500°/s、±1 000°/s、±2 000°/s 可选
加速度分辨率	约 16 384 LSB/g(±2 g 量程下)
角速度分辨率	约 131 LSB/(°/s)(±250 °/s 量程下)
输出数据速率	最高可达 1 kHz
供电电压	2.5～3.3 V
通信接口	I2C、SPI

结合机器人的结构参数，可进一步计算出偏摆力矩，从而实现对轨道式移动机器人运行状态，尤其是负载不均导致的偏摆异常的实时监测。

3.3　实验指标

为了验证基于 FPGA 的轨道式移动机器人偏摆力矩跟随控制的精准性，需结合控制系统核心目标，通过对校正后偏摆力矩波动幅度、调节臂角度跟踪精度、负载突变场景偏摆力矩抗干扰恢复时间等指标的验证，全面评估系统在力矩校正精度、运动稳定性及执行任务可靠性方面的表现。

机器人绕轨道轴线的偏摆力矩波动幅度，如图 3 所示。

由图 3 可知，校正后的偏摆力矩应小于 0.4 N·m，

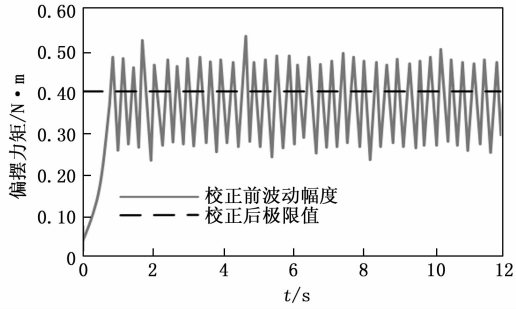

图 3 机器人绕轨道轴线的偏摆力矩波动幅度

校正前偏摆力矩波动特征：0～1 s 力矩从接近 0 快速上升至 0.4 N·m，反映负载突变后力矩的瞬时增长。1～12 s 力矩进入高频波动阶段，波动范围是 0.23～0.53 N·m，说明未校正时力矩波动剧烈，易引发卡轨、振动等故障。

侧导轮调节臂角度跟踪曲线，如图 4 所示。

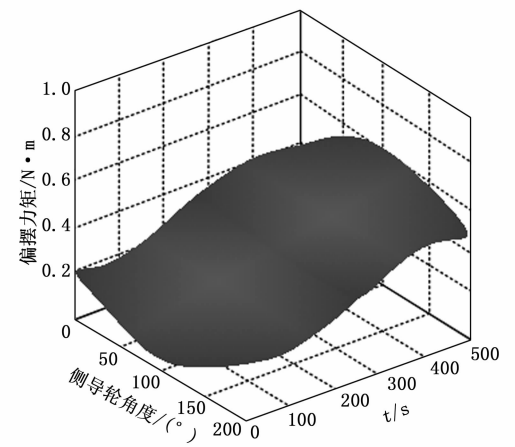

图 4 侧导轮调节臂角度跟踪曲线

由图 4 可知，从曲面形态可观察到偏摆力矩与侧导轮角度、时间的动态耦合关系：高力矩区间：在时间 200～300 s、侧导轮角度 150～200°时，偏摆力矩达到 0.6 N·m 的峰值。这说明该阶段侧导轮调节负载最大，需关注驱动装置的功率储备、结构件的抗扭强度；低力矩区间：在时间 0～100 s、侧导轮角度 50～100°时，偏摆力矩处于 0.05 N·m 的较低水平。

在添加 5 kg、20 kg、50 kg 偏心负载场景下，将偏摆力矩抗干扰恢复时间作为验证指标，验证系统鲁棒性。

3.4 控制效果与分析

对比分析基于 QPSO-LSTM 算法的控制方法[2]、基于三维有限元模型的控制方法[3]、基于振动传递终端力检测的控制方法[4]、数学模型和回正力矩模型的控制方法[5]、基于 FPGA 的控制方法校正后偏摆力矩波动幅度，如图 5 所示。

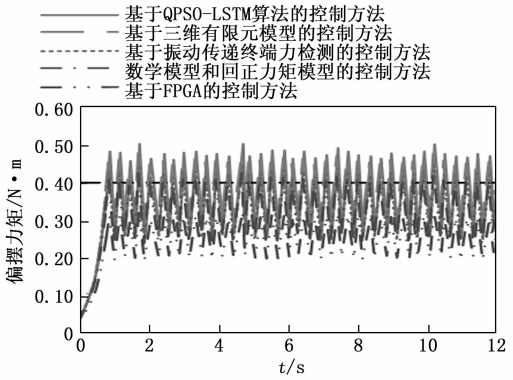

图 5 不同方法校正后偏摆力矩波动幅度

由图 5 可知，基于 QPSO-LSTM 算法的控制方法、基于三维有限元模型的控制方法、基于振动传递终端力检测的控制方法、数学模型和回正力矩模型的控制方法，力矩进入高频波动阶段的波动范围分别是 0.25～0.51 N·m、0.28～0.48 N·m、0.24～0.43 N·m、0.24～0.42 N·m，上述方法均超过校正后极限值；而基于 FPGA 的控制方法力矩进入高频波动阶段的波动范围是 0.19～0.32 N·m，未超过校正后极限值，则说明控制策略有效抑制了力矩波动，保障了机器人运行稳定性。

对比分析不同方法的调节臂角度跟踪结果，如图 6 所示。

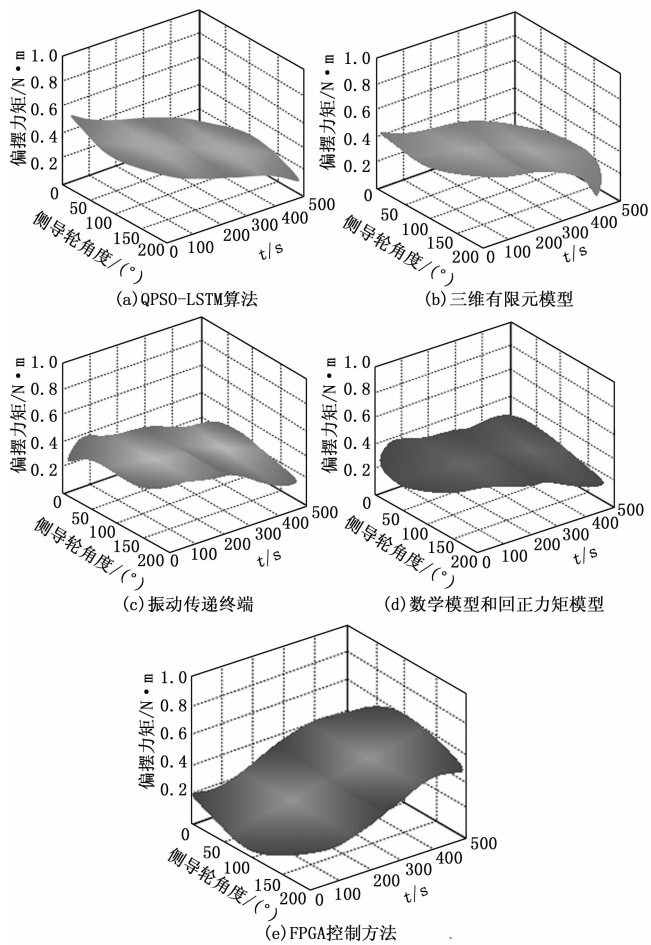

图 6 不同方法调节臂角度跟踪结果

由图 6 可知，基于 QPSO-LSTM 算法的控制方法、基于三维有限元模型的控制方法、基于振动传递终端力检测的控制方法、数学模型和回正力矩模型的控制方法“侧导轮角度－力矩－时间”曲面与指标完全不一致，核心原因是模型类型、研究场景、关注的物理维度存在本质差异，导致曲面形态和峰值区域无直接关联；基于 FPGA 的控制方法跟踪的曲面与指标完全一致，偏摆力矩达到 0. 6 N·m 的峰值，直观量化了侧导轮调节臂的力学响应特性，为其结构优化、驱动系统选型提供了关键依据。

对比分析不同方法偏摆力矩抗干扰恢复时间，如图 7 所示。

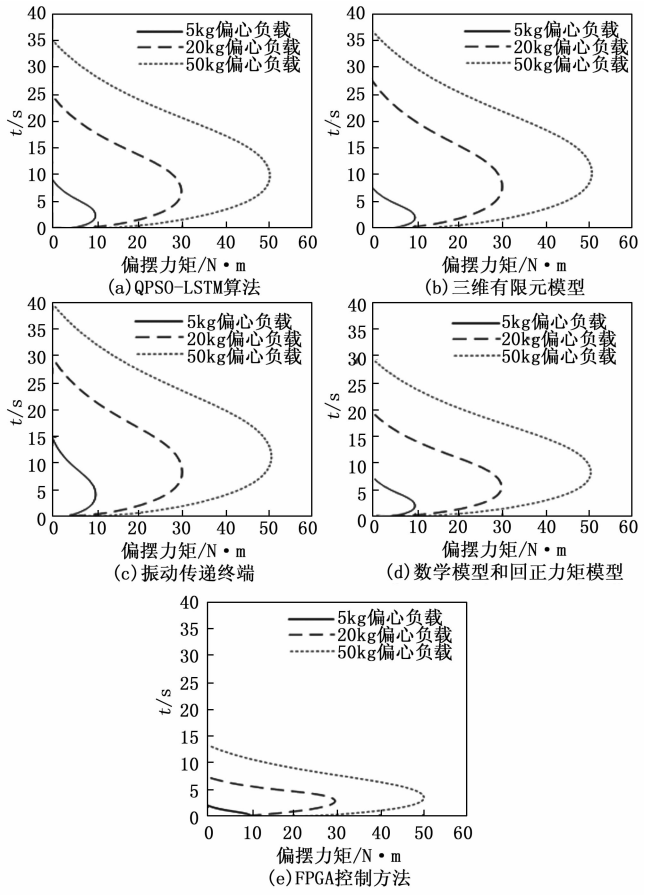

图 7　不同方法偏摆力矩抗干扰恢复时间

由图 7 可知，基于 QPSO-LSTM 算法的控制方法 LSTM 需大量数据训练，QPSO 需迭代优化参数，导致计算延迟大，5、20、50 kg 偏心负载场景下的恢复时间分别为 9、25、35 s；基于三维有限元模型的控制方法每次干扰下的力矩分析都要执行大规模矩阵运算，实时性差，5、20、50 kg 偏心负载场景下的恢复时间分别为 7、27、37 s；基于振动传递终端力检测的控制方法信号传递链长，延迟大，5、20、50 kg 偏心负载场景下的恢复时间分别为 15、30、40 s；数学模型和回正力矩模型的控制方法当干扰发生时，理论模型的预测值与实际力矩偏差大，需反复迭代修正，导致恢复时间变长，5、20、50 kg 偏心负载场景下的恢复时间分别为 8、20、30 s；FPGA 控制方法当偏心负载为 5 kg 时，偏摆力矩峰值约为 10 N·m，恢复至稳定范围的时间小于 5 s，说明小负载干扰下，FPGA 控制的偏摆力矩恢复极快，系统几乎无明显延迟；当偏心负载为 20 kg 时，偏摆力矩峰值约为 30 N·m，恢复至稳定范围的时间为 7 s，表明中负载干扰下，力矩峰值提升至 3 倍，但恢复时间仅小幅增加，体现控制策略的稳定性；当偏心负载为 50 kg 时，偏摆力矩峰值为 50 N·m，恢复至稳定范围的时间为 13 s，意味着大负载干扰下，力矩峰值达 5 倍，恢复时间虽有所延长，但仍能在 13 s 内完成稳定，验证了 FPGA 控制在强干扰场景下的鲁棒性。

4　结束语

针对现有控制方法存在的模型依赖性强、抗干扰能力不足等局限，本研究设计并实现了一种基于 FPGA 的偏摆力矩跟随控制系统。系统以 XilinxKintex-7FPGA 为处理核心，集成多维度运动参数感知、硬件并行运算及高精度数模转换模块，形成了高效的控制架构。在此基础上，通过建立偏摆力矩耦合修正模型，并结合硬件化穷举法对调节机构摆动轨迹进行参数优化，系统实现了微秒级的实时力矩补偿与跟随。实验验证显示，在负载突变工况下，系统将偏摆力矩波动幅度严格控制在 0.19～0.32 N·m 之间，侧导轮调节臂角度跟踪曲线与理论模型吻合良好，偏摆力矩峰值为 50 N·m 时偏摆力矩抗干扰恢复时间仅为 13 s，彰显了其在提升力矩控制精度与任务可靠性方面的显著优势，从而为轨道机器人的高性能控制提供了坚实的硬件基础。

但本研究仍存在一定局限，当前系统未充分考虑轨道不平顺、极端温湿度等复杂环境因素的耦合影响，且硬件化穷举法在多参数协同优化场景下可能存在局部最优解问题，面对更高精度的控制需求时仍有提升空间，未来可进一步引入多源信息融合算法增强环境适应性，结合智能优化算法改进参数寻优策略，探索 FPGA 与边缘计算的协同架构以拓展系统功能，同时开展长期耐久性测试与多场景适配验证，持续提升系统的鲁棒性、泛化能力与工程实用价值。

参考文献：

[1] 辛亚先，李贻斌，柴　汇，等. 基于全身力矩控制的双腿轮机器人跳跃方法研究 [J]. 自动化学报，2023，49(8)：1635－1644.

[2] 吴　石，车翠茹，管诣博. 双轮毂电机驱动力矩在线分配控制方法研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报，2024，29

(1)：13－24.
[3] 任 乔，张济民，张 鹏. 电磁旋转涡流制动特性分析和力矩模糊控制方法研究 [J]. 机械工程学报，2023，59 (6)：255－263.
[4] 许庚晨，冯洪伟，张激扬，等. 基于振动传递终端力检测的磁悬浮控制力矩陀螺微振动控制方法 [J]. 空间控制技术与应用，2025，51 (2)：96－104.
[5] 黄明力，李殿起. 电动助力转向系统回正力矩补偿控制 [J]. 机械设计，2023，40 (S1)：30－34.
[6] 张新荣，谭宇航，贾一帆，等. 四轮独立驱动电动汽车路径跟踪鲁棒控制 [J]. 汽车工程，2023，45 (2)：253－262.
[7] 张恩静，卢书君，王 顺，等. 基于硬件在环的有限转角力矩电机控制系统仿真平台开发 [J]. 微特电机，2024，52 (3)：65－69.
[8] 杨郅贤，张军辉，纵怀志，等. 基于自抗扰控制方法的双叶片式摆动缸转矩控制 [J]. 液压与气动，2023，47 (12)：147－153.
[9] 高俊峰，鲍洋洋，李 伟，等. 一种预先降低平板闸阀启闭力矩的新方法 [J]. 流体机械，2023，51 (6)：90－97.
[10] 毛 帅，刁晓飞，王 晓，等. 具有非惯量负载转矩补偿功能的伺服永磁同步电机控制方法 [J]. 电机与控制应用，2023，50 (9)：20－27.
[11] 庞牧野，詹 起，唐必伟，等. 直立抗扰下踝关节外骨骼人机协作控制优化 [J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2023，51 (2)：95－101.
[12] 石照耀，张 攀，林家春. EMA 摩擦前馈补偿的模糊自抗扰控制方法研究 [J]. 电机与控制学报，2023，27 (12)：171－181.
[13] 张 冬，王世鹏，施明健，等. 一种空中自主加油扰动建模与自适应控制方法 [J]. 宇航学报，2024，45 (3)：433－442.
[14] 从永正，程盈盈，胡 正. 基于三阶超螺旋滑模观测器算法的机器人力矩估计方法 [J]. 控制理论与应用，2023，40 (7)：1208－1215.
[15] 张建华，刘延超，黄志平，等. 基于关节双位置反馈的柔性协作机械臂零力控制 [J]. 计算机集成制造系统，2024，30 (5)：1798－1809.
[16] 杜玉红，刘栋财，董广宇. 基于广义坐标形式动力学的 6-RUS 并联机器人零力控制 [J]. 机器人，2023，45 (3)：333－344.
[17] 彭英楠，王修森，王业勤，等. 基于 FxLMS 算法的双馈直线电机交流电磁力矩自适应补偿控制 [J]. 电机与控制应用，2025，52 (1)：1－11.
[18] 张雨薇，李 冰，祁克玉. 有限时间收敛的引信滚转角控制方法 [J]. 探测与控制学报，2023，45 (1)：56－60.
[19] 周俊杰，王丽男，陈星星，等. 考虑扰动补偿的双电机系统协同控制方法研究 [J]. 微特电机，2025，53 (4)：54－60.
[20] 杨辰宇，刘 凯，胡铭觐，等. 基于 FPGA 的永磁同步电机零计算延迟扩张控制集模型预测电流控制 [J]. 中国电机工程学报，2024，44 (s1)：264－273.

(上接第 113 页)

[7] KRINITSKY M，AVERBUKH M. Control and managing of individual solar water heating systems in an apartment complex [J]. Electronics，2024，13 (12)：2305－2305.
[8] YANG R，WANG Y，YI F，Design of voice temperature control faucet based on STM32MCU [J]. Journal. of. Physics：Conference，Series，2021，1906 (1)：132－139.
[9] 周为贯，武唐翰，凌子夜，等. 热泵热水系统中相变蓄热器研究 [J]. 制冷与空调，2025，25 (2)：86－91.
[10] 梁伟雄. 学生公寓智能热水系统设计和实现 [J]. 黄河科技学院学报，2021，23 (2)：54－59.
[11] 王建强，张春茜. 基于 Arduino 单片机的太阳能热水器控制系统设计 [J]. 河北水利电力学院学报，2018，(1)：52－56.
[12] 尹青山，张晓光，张德玮. 单片机在公共建筑集中供应热水系统中水温度控制的应用 [J]. 电气应用，2016，35 (15)：91－93.
[13] 杨 鹏，李成林，聂 超，等. 针对便捷的家用节能热水系统的研究 [J]. 内江科技，2016，37 (1)：90－91.
[14] 刘 新. 基于单片机的智能热水器自动控制系统故障诊断研究 [J]. 家电维修，2025，(1)：16－18.
[15] 刘栩源，翟 娟，王 典，等. 基于家用热水器的冷水回收利用与出水温度控制装置 [J]. 现代信息科技，2023，7 (12)：174－177.
[16] 王二宝，李梦琪，黄忠南，等. 基于单片机的太阳能热水器水位水温控制器设计 [J]. 内江科技，2023，44 (1)：52－53.
[17] 董 涛，刘进英. 一种太阳能热水器防冻装置的设计与实现 [J]. 电子技术与软件工程，2022， (20)：113－116.
[18] 崔阔麟，田 静，张 宁，等. 基于单片机的热水器控制系统设计 [J]. 电子质量，2022，(7)：89－95.
[19] 郑诗程，李星月，郎佳红. 基于 STC15 的承压式太阳能热水器智能控制系统 [J]. 物联网技术，2023，13 (3)：88－91.
[20] 李元勇，刘玉振. 基于 STM32 的太阳能热水器智能漏水报警系统设计 [J]. 装备制造技术，2021， (7)：142－144.
[21] 刘 忠，陈 彦，贾永磊，等. 家用光伏智能热水器控制系统的设计 [J]. 光源与照明，2022，(9)：57－59.