

基于 FPGA 的多轴机器人运动控制算法研究

吉 强¹

JI Qiang

摘 要

针对传统多轴机器人运动控制器存在的实时性不足、算法移植性差、多轴同步精度低等问题,文章提出一种基于 FPGA 的多轴机器人运动控制方案。该方案以 FPGA 和 Nios II 软核处理器为控制核心,集成硬件化的轨迹规划算法与伺服驱动接口,通过 FPGA 的并行运算特性优化多轴同步控制逻辑。首先构建多轴机器人动力学模型,设计基于 S 曲线加减速的轨迹规划算法,解决启停阶段的冲击问题;其次采用硬件描述语言 (Verilog HDL) 实现轨迹插补、多轴同步控制及位置闭环调节等核心模块的并行化设计;最后通过 FPGA 开发板与四轴机器人实验平台的联调测试,验证系统性能。实验结果表明,该控制方案的单轴位置控制误差小于 $\pm 3 \mu\text{m}$,多轴同步误差低于 50 ns,轨迹跟踪误差不超过 0.02 mm,且系统响应延迟小于 1 μs ,相较于基于 MCU 或 DSP 的传统控制器,在实时性、同步精度及稳定性方面均有显著提升,可满足高精度多轴机器人的运动控制需求。

关键词

FPGA; 多轴机器人; 轨迹规划; 并行运算; 同步控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.043

0 引言

多轴机器人广泛应用于工业自动化、精密加工、医疗设备等领域,其运动控制精度和实时性直接影响作业质量^[1]。运动控制器作为机器人的核心部件,其性能直接决定了机器人的运动精度、响应速度及作业可靠性^[2]。传统控制方案采用单片机 (MCU) 或数字信号处理器 (DSP) 作为核心,通过串行处理实现多轴协调控制。然而,MCU 的运算能力有限,难以满足多轴复杂轨迹规划的实时性要求;DSP 虽具备较强的数字运算能力,但串行执行机制导致多轴同步控制精度不足。随着轴数增加和轨迹规划复杂度提升,串行处理的时序延迟和资源竞争问题愈发显著,难以满足高速、高精度场景需求^[3-4]。

FPGA 作为一种可编程逻辑器件,具有并行运算架构、可定制化硬件资源、低延迟响应等特性,能够将运动控制算法通过硬件逻辑电路实现,从底层提升控制性能^[5]。本文设计一种基于 FPGA 的多轴机器人运动控制系统。提出硬件化的 S 曲线加减速轨迹规划算法,通过 FPGA 并行逻辑实现轨迹点的实时计算,降低启停冲击,并构建了多轴同步控制硬件模块,采用时钟同步与相位补偿机制,提升多轴运动一致

性,提高控制精度。通过实验验证,该系统能够满足高精度多轴机器人的运动控制需求,为工业机器人的高性能控制提供新的技术方案。

1 多轴机器人运动控制理论

1.1 多轴机器人动力学模型

本设计以四轴串联机器人为研究对象,其运动学模型采用 D-H 参数法建立。设机器人各关节的连杆长度为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ,关节转角为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 (单位: rad),根据 D-H 参数表 (如表 1 所示),通过齐次变换矩阵推导末端执行器的位置坐标 (x, y, z) 和姿态角 (α, β, γ) :

$$\begin{aligned} T_i &= \text{Trans}(a_{i-1}, 0, d_i) \times \text{Rot}(z, \theta_i) \times \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \\ T &= T_1 \times T_2 \times T_3 \times T_4 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: T_i 为第 i 个连杆的齐次变换矩阵; a_{i-1} 为连杆长度; d_i 为连杆偏距; α_{i-1} 为连杆扭角。末端执行器的位置和姿态由齐次矩阵 T 的最后一列和旋转子矩阵提取。

表 1 四轴机器人 D-H 参数表

连杆 i	连杆长度 a_{i-1}/mm	连杆扭角 α_{i-1}/rad	连杆偏距 d_{i-1}/mm	关节转角 θ_{i-1}/rad
1	0	0	d_1	θ_1
2	l_2	$-\pi/2$	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3
4	l_4	$-\pi/2$	0	θ_4

1. 江苏安全技术职业学院 江苏徐州 221011

[基金项目] 江苏安全技术职业学院安全应急装备研究开发中心专项研究课题资助 (YJZBPKT007); 江苏高校“青蓝工程”资助项目

动力学模型采用拉格朗日方程建立，机器人的动能 K 和势能 P 分别为：

$$K = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_{zi} \dot{\theta}_i^2 \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^4 m_i g z_i$$

式中： m_i 为第 i 个连杆的质量； v_i 为连杆质心的线速度； I_{zi} 为连杆绕 z 轴的转动惯量； g 为重力加速度； z_i 为连杆质心的 z 坐标。根据拉格朗日方程 $L=K-P$ ，推导关节驱动力矩 τ ：

$$\tau = \mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + \mathbf{G}(\theta) \quad (3)$$

式中： $\mathbf{M}(\theta)$ 为惯性矩阵； $\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})$ 为科里奥利力和离心力矩阵； $\mathbf{G}(\theta)$ 为重力矩阵。该模型为后续轨迹规划和控制算法设计提供理论基础。

1.2 S 曲线加减速轨迹规划算法

为避免机器人启停阶段的速度突变导致的冲击振动，采用 S 曲线加减速算法进行轨迹规划，S 曲线加减速的速度曲线平滑，从而能够减少对控制过程中的冲击，并使插补过程具有柔性^[6]。S 曲线加减速的速度曲线分为 7 个阶段：加速阶段、匀加速阶段、减加速阶段、匀速阶段、加减速阶段、匀减速阶段、减减速阶段，因此又被称为 7 段式曲线。

设轨迹的起始速度为 v_0 ，目标速度为 $v_{\max}$ ，加速度最大值为 $a_{\max}$ ，加加速度最大值为 $j_{\max}$ ，则各阶段的运动用公式表示为：

(1) 加加速阶段 ($0 \leq t \leq t_1$)：

$$j(t) = j_{\max}, \quad a(t) = j_{\max} t, \quad (4)$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{2} j_{\max} t^2, \quad s(t) = v_0 t + \frac{1}{6} j_{\max} t^3$$

(2) 匀加速阶段 ($t_1 \leq t \leq t_1+t_2$)：

$$j(t) = 0, \quad a(t) = a_{\max}, \quad (5)$$

$$v(t) = v_0 + a_{\max}(t - t_1) + \frac{1}{2} j_{\max} t_1^2,$$

$$s(t) = v_0 t + \frac{1}{2} a_{\max}(t - t_1)^2 + \frac{1}{6} j_{\max} t_1^3(t - t_1)$$

(3) 减加速阶段 ($t_1+t_2 \leq t \leq t_1+t_2+t_3$)：

$$j(t) = -j_{\max}, \quad a(t) = a_{\max} - j_{\max}(t - t_1 - t_2), \quad (6)$$

$$v(t) = v_{\max},$$

$$s(t) = s(t_1+t_2) + v_{\max}(t - t_1 - t_2) - \frac{1}{6} j_{\max}(t - t_1 - t_2)^3$$

后续匀速、减速阶段的运动方程可通过对称关系推导。通过该算法实现速度、加速度的平滑过渡，降低机器人运动冲击，提升轨迹跟踪精度。

1.3 主从轴同步控制

多轴同步控制的核心是保证各关节按照预设轨迹同步运

动，避免因运动延迟导致的末端执行器位置偏差。本文采用“主从轴同步”策略，以其中一个关节为主动轴，其余关节为从动轴，通过时钟同步和相位补偿实现多轴协调控制。

设主动轴的位置指令为 $q_m(t)$ ，从动轴的位置指令为 $q_s(t)$ ，则从动轴的同步补偿量 $\Delta q_s(t)$ 为：

$$\Delta q_s(t) = K_p(q_m(t) - q_s(t)) + K_d(\dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t)) \quad (7)$$

式中： K_p 为比例系数； K_d 为微分系数。

通过实时计算主动轴与从动轴的位置差和速度差，动态调整从动轴的位置指令，实现多轴同步运动。

2 基于 FPGA 的多轴运动控制系统设计

2.1 系统总体架构

系统采用“FPGA 核心控制 + 外设接口”的分层架构，系统硬件架构图如图 1 所示。FPGA 作为核心芯片，是整个系统的核心处理单元，主要执行运动控制算法的计算和轨迹规划工作。传感器模块主要实时采集机器人的运动状态信息，如位置、速度等。电机驱动模块主要接收 FPGA 核心模块发送的控制信号，根据这些信号驱动电机运转，实现机器人的运动。通信模块主要负责在 FPGA 核心模块与上位机之间传输数据，实现两者之间的信息交互。

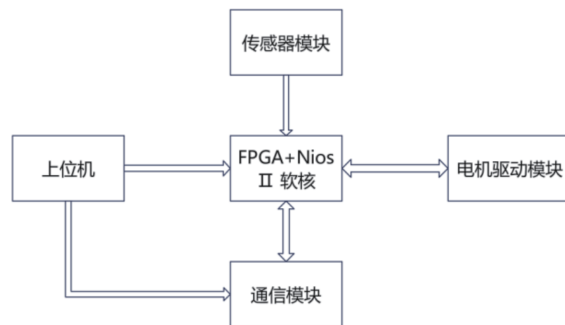


图 1 系统硬件架构图

系统采用“FPGA+Nios II 软核”的异构架构，FPGA 核心模块根据上位机发送的运动控制指令和传感器反馈的实时数据，进行运动控制算法的计算和轨迹规划，生成电机的控制信号，并将这些信号发送给电机驱动模块。集成 Nios II 软核处理器，负责上位机指令解析、轨迹参数配置、算法参数优化等串行任务，通过 Avalon 总线与硬件层模块通信。电机驱动模块根据接收到的控制信号，驱动电机运转，同时将电机的运行状态（如电流、温度等）反馈给 FPGA 核心模块。传感器模块实时采集机器人的运动状态信息，并将这些信息发送给 FPGA 核心模块，供其进行运动控制决策。通信模块负责在 FPGA 核心模块与上位机之间传输数据，实现两者之间的信息交互。在多轴机器人执行搬运任务时，上位机通过通信模块将搬运目标的位置信息发送给 FPGA 核心模块，FPGA 核心模块根据这些信息进行轨迹规划和运动控制计算，

生成电机控制信号发送给电机驱动模块,同时接收传感器模块反馈的机器人运动状态信息,对运动控制进行实时调整,确保机器人能够准确地搬运物体。该架构充分利用 FPGA 的并行运算优势,将核心控制算法硬件化,同时通过软核处理器实现灵活的参数配置和指令交互,兼顾了系统的实时性和灵活性。

2.2 核心硬件模块设计

2.2.1 轨迹插补模块

轨迹插补模块是运动控制的核心,负责将 S 曲线加减速规划后的离散轨迹点插值为连续的位置指令。本文采用硬件化的线性插补和圆弧插补算法,通过并行逻辑实现插补点的实时计算。

线性插补模块的输入为起点坐标 (x_0, y_0, z_0) 、终点坐标 (x_e, y_e, z_e) 和插补周期 T_s ,输出为每个插补周期的位置指令 (x_k, y_k, z_k) 。插补计算过程为:

$$\begin{aligned}\Delta L &= \sqrt{(x_e - x_0)^2 + (y_e - y_0)^2 + (z_e - z_0)^2} \\ n &= \frac{\Delta L}{v_{\max} T_s} \\ x_k &= x_0 + \frac{x_e - x_0}{n} k \\ y_k &= y_0 + \frac{y_e - y_0}{n} k \quad (k = 0, 1, \dots, n) \\ z_k &= z_0 + \frac{z_e - z_0}{n} k\end{aligned}\quad (8)$$

圆弧插补模块采用圆心坐标法,通过角度增量计算插补点位置,支持顺时针和逆时针圆弧运动。该模块通过 FPGA 的并行逻辑实现,插补周期可低至 1 μ s,满足高精度轨迹控制需求。

2.2.2 位置闭环控制模块

位置闭环控制模块采用硬件化 PID 控制器,实现位置误差的实时修正。PID 控制器的离散化方程为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0}^k e(i) T_s + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (9)$$

式中: $e(k) = q_d(k) - q(k)$ 为位置误差; $q_d(k)$ 为插补模块输出的位置指令; $q(k)$ 为编码器采集的实际位置反馈; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。

为避免积分饱和问题,采用积分限幅策略,将积分项的输出限制在 $[-u_{i\max}, u_{i\max}]$ 范围内。该模块通过 FPGA 硬件逻辑实现,运算延迟小于 10 ns,能够快速响应位置误差变化,提升控制精度。

2.2.3 多轴同步控制模块

多轴同步控制模块采用时钟同步和相位补偿机制,实现各关节的同步运动。模块内部集成时钟发生器,为各轴控制模块提供统一的采样时钟 (100 MHz),保证采样时刻的一

致性;同时设置相位补偿寄存器,根据各轴的位置反馈信号,动态调整从动轴的插补起始相位,补偿运动延迟。同步控制模块首先接收轨迹插补模块输出的各轴位置指令,随后采集各轴编码器反馈的实际位置,进而计算主动轴与从动轴的位置差和相位差,再通过相位补偿算法对从动轴的位置指令进行调整,最后将修正后的位置指令发送至位置闭环控制模块。

2.2.4 伺服驱动接口模块

伺服驱动接口模块负责 FPGA 与伺服驱动器的信号交互,包括脉冲/方向信号输出和编码器信号采集。脉冲/方向信号采用差分信号输出,通过硬件逻辑实现脉冲频率和占空比的精确控制,脉冲频率范围为 1 Hz~1 MHz,支持位置模式和速度模式控制;编码器信号采集模块采用正交解码逻辑,支持增量式编码器 (A/B/Z 相) 信号解码,解码精度为 16 位,采样频率为 100 MHz,能够实时采集各关节的实际位置和速度信息。

3 实验验证与结果分析

3.1 实验平台搭建

实验采用 Altera Cyclone V 5CSEMA5F31C6N 型号 FPGA 开发板,其工作主频为 100 MHz;四轴机器人本体各关节最大转速为 30 r/min;伺服驱动器选用松下 MSD043A1XX 型号,支持脉冲/方向控制模式;配备增量式编码器,分辨率为 1 024 脉冲/转;上位机采用 PC 机,其上运行 LabVIEW 控制软件;位置精度检测则借助 Renishaw XL-80 型激光干涉仪完成。

通过 FPGA 开发板输出控制信号驱动伺服驱动器,带动机器人各关节运动,编码器采集实际位置信号反馈至 FPGA,形成闭环控制;上位机通过以太网与 FPGA 通信,实现指令下发和数据采集;激光干涉仪用于测量末端执行器的轨迹跟踪误差。

3.2 实验结果

3.2.1 单轴位置控制精度实验

单轴位置控制精度实验主要验证单轴位置控制的静态精度和动态响应性能。设置单轴运动指令为:从 0° 转动至 90°,速度 $v = 10$ r/min,加速度 $a = 5$ r/min²,加加速度 $j = 2$ r/min³,采样周期 $T_s = 100$ μ s。通过编码器采集实际位置,计算位置误差,实验结果如表 2 所示。

表 2 单轴位置控制误差实验结果

指令位置 / (°)	实际位置 / (°)	位置误差 / (°)	对应线误差 / μ m
0	0.000 1	+0.000 1	+2.0
30	29.999 8	-0.000 2	-2.2
60	60.000 2	+0.000 2	+1.0
90	89.999 8	-0.000 2	-1.0

实验结果表明，单轴位置控制误差的最大值为 $\pm 0.0002^\circ$ ，对应线误差 $\pm 2.1\text{ }\mu\text{m}$ ，小于 $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ 的设计要求，静态位置精度较高。动态响应测试中，单轴从 0° 启动至稳定速度的时间为 0.3 s ，停止阶段的缓冲时间为 0.2 s ，无明显超调，动态响应性能良好。

3.2.2 多轴同步控制精度实验

多轴同步控制精度实验用于验证多轴同步运动的一致性。设置四轴机器人按照预设轨迹运动，主动轴为关节1，从动轴为关节2、3、4，通过FPGA的多轴同步控制模块实现协调运动。采用示波器测量各轴脉冲信号的相位差，同步误差定义为从动轴与主动轴脉冲信号的时间差，实验结果如表3所示。

表3 多轴同步误差实验结果

运动速度 ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	关节2同 步误差/ns	关节3同 步误差/ns	关节4同 步误差/ns	最大同步 误差/ns
5	12	15	10	15
10	23	28	21	28
20	35	42	38	42
30	41	48	45	48

实验结果表明，随着运动速度的提高，多轴同步误差略有增大，但最大同步误差不超过 50 ns ，满足多轴同步控制精度要求。这得益于FPGA的并行运算架构和相位补偿机制，能够有效降低各轴的运动延迟差异。

3.2.3 系统实时性测试

系统实时性测试主要用于验证测试系统的响应延迟性能。通过上位机发送急停指令，记录指令发送时刻与机器人实际停止时刻的时间差，重复测试10次，实验结果如表4所示。

表4 系统响应延迟测试结果

测试次数	响应延迟/ μs	测试次数	响应延迟/ μs
1	0.82	6	0.78
2	0.79	7	0.81
3	0.85	8	0.77
4	0.76	9	0.83
5	0.80	10	0.79
平均值	0.80	最大值	0.85

实验结果表明，系统的平均响应延迟为 $0.8\text{ }\mu\text{s}$ ，最大响应延迟为 $0.85\text{ }\mu\text{s}$ ，小于 $1\text{ }\mu\text{s}$ 的设计要求，实时性能优异。这得益于FPGA的硬件化控制逻辑，避免了软件执行带来的调度延迟，能够快速响应外部指令。

3.3 对比实验分析

为进一步验证系统性能，与基于DSP（TI TMS320F28335）

的传统控制器进行对比实验，对比指标包括位置控制误差、多轴同步误差、轨迹跟踪误差和响应延迟，结果如表5所示。

表5 与传统DSP控制器的性能对比

性能指标	单轴位置控 制误差	多轴同步 误差	轨迹跟踪 误差	系统响应 延迟
FPGA 控制器	$\pm 2.1\text{ }\mu\text{m}$	48 ns	0.018 mm	$0.80\text{ }\mu\text{s}$
传统 DSP 控制器	$\pm 5.3\text{ }\mu\text{m}$	125 ns	0.045 mm	$3.2\text{ }\mu\text{s}$
性能提升比例	50.4%	61.6%	60.0%	73.0%

对比结果表明，本文设计的基于FPGA的多轴机器人运动控制器在各项性能指标上均优于传统DSP控制器，位置控制精度、多轴同步精度和轨迹跟踪精度提升约50%，系统响应延迟降低73%，充分体现了FPGA并行运算架构在运动控制领域的优势。

4 结论

本文提出一种基于FPGA的多轴机器人运动控制方案，通过硬件化轨迹规划、多轴同步控制和位置闭环调节模块，实现了高精度、高实时性的多轴运动控制。实验结果表明，该系统的单轴位置控制误差小于 $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ ，多轴同步误差低于 50 ns ，轨迹跟踪误差不超过 0.02 mm ，系统响应延迟小于 $1\text{ }\mu\text{s}$ ，相较于传统控制器性能显著提升，能够满足工业机器人的高精度控制需求。

参考文献：

[1] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-13.

[2] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真(第5版)[M].北京:电子工业出版社,2021.

[3] 李淑女,基于PLC的仿生机器人助力控制系统设计[J].智能计算机与应用,2019,9(2):189-192.

[4] 张欢,王雅欣,王爽,等,基于FPGA的工业机器人技术发展历史与现状[J].单片机与嵌入式系统应用,2023,23(10):31-35.

[5] 孟庆仙.基于FPGA的机器人运动平衡控制器系统[J].新技术新工艺,2020(12):35-37.

[6] 郝景材,周镇江.基于S型加减速曲线的多目标位移同步轨迹算法研究[J].装备制造技术,2025(2):13-16.

【作者简介】

吉强(1985—)，男，山东临沂人，硕士研究生，副教授，研究方向：机器人控制。

(收稿日期：2025-11-15 修回日期：2026-03-12)