

多轴步进电机速度曲线算法的时分复用策略

吴博¹ 雷兴明² 王邦继¹ 刘德兴^{1,3}

(1. 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031; 2. 海军装备部 成都 610100;

3. 四川航天烽火伺服控制技术有限公司 成都 610031)

摘要: 针对多轴步进电机控制器实现过程中,需要进行硬件逻辑的复用,导致逻辑资源占用量过多的问题,提出一种速度曲线算法的时分复用策略。首先,基于刚体绕定轴转动的运动学理论及步进电机控制原理,建立了步进电机控制脉冲周期与运动学物理量之间的映射关系;其次,结合脉冲计算公式将匀加速与匀减速两种转动模式进行合并,优化了速度曲线的计算方法;然后,采用时分复用的设计思想,在单轴非时分复用控制的基础上,充分利用控制脉冲输出的时间间隔,进行了多轴速度曲线算法的时分复用设计;最后实现了两轴步进电机时分复用控制器IP核,相较于两轴非时分复用IP核,逻辑资源使用量降低了33.68%,热功耗降低了14.04%,并搭建硬件实验平台进行了算法验证。结果表明,时分复用IP核可以实现两轴步进电机的精确控制,角位移跟随误差均在±8 step(±0.9°)以内。

关键词: 多轴步进电机;开环控制;速度曲线;时分复用;现场可编程门阵列(FPGA)

中图分类号: TM383.6; TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Time-division multiplexing strategy for speed curve algorithm of multi-axis stepper motors

Wu Bo¹ Lei Xingming² Wang Bangji¹ Liu Dexing^{1,3}

(1. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Naval Armament, Chengdu 610100, China;

3. Sichuan Aerospace Fenghuo Servo Control Technology Corporation, Chengdu 610031, China)

Abstract: To address the challenge of reusing hardware logic in the implementation of a multi-axis stepper motor controller, which leads to excessive consumption of logic resources, a time-division multiplexing strategy grounded in a speed curve algorithm has been proposed. Initially, leveraging the kinematic theory of rigid bodies rotating about a fixed axis alongside the control principles of stepper motors, a mapping relationship between the pulse period of stepper motor control and the corresponding kinematic physical quantities is established. Subsequently, the two rotational modes of uniform acceleration and uniform deceleration are integrated with the pulse calculation formula, optimizing the velocity curve calculation method. Building upon single-axis non-time-division multiplexing control, the design of the time-division multiplexing multi-axis velocity curve algorithm is executed by fully utilizing the time intervals of control pulse outputs. Ultimately, the IP core for the time-division multiplexing controller of the two-axis stepper motor is developed, achieving a 33.68% reduction in logic resource usage and 14.04% reduction in thermal power consumption compared to the two-axis non-time-division multiplexing IP core. A hardware experimental platform is constructed to validate the algorithm, with results indicating that the time-division multiplexing IP core enables precise control of the two-axis stepper motor, maintaining an angular displacement following error within ±8 steps (±0.9°).

Keywords: multi-axis stepper motor; open-loop control; velocity curves; time division multiplexing; field programmable gate array(FPGA)

0 引言

步进电机是一种将数字脉冲信号转换成相应角位移的

特种电动机,具有定位精度高、动态力矩大、调速范围宽、控制简单且无累计误差等特点^[1],能够满足快速启动及精确定位的要求,广泛应用于数控、航天、机器人以及医疗行业

中^[2-3]。在正常的工作状态下,其输出与输入具有严格对应关系,不受电压波动和负载变化的影响。

步进电机主要有闭环和开环两种基本控制方法。闭环控制具有控制精度高、抗干扰能力强以及适应性强的特点^[4-5],但对系统成本、稳定性和实现复杂度要求都比较高,也不适用于高实时性控制的场合。随着细分驱动技术的不断进步,步进电机的角度输出与控制脉冲输入的同步能力得到了显著提升。通过采用合适的加减速曲线算法进行优化,可以有效预防失步和冲击振荡等问题^[6]。鉴于开环控制实现起来相对简便,且其控制精度足以满足大多数应用场景的需求,因此它成为了步进电机的主要控制方式。目前,针对开环控制的研究主要聚焦于加减速曲线的优化及其具体实现方法上。

国内外学者提出了很多针对步进电机加减速曲线算法的优化方案,主要有 S 型、正矢型以及直线型等^[7-8]。S 型和正矢型能较好地抑制运动过程中的冲击及残余振荡,但并不适合对动态响应有快速要求的场合^[9]。直线型加减速曲线算法实现简单、响应快速,具有时间最优的特征。

现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)由于其并行执行以及数据处理位宽灵活的特点,能够进行高实时性和高精确度的步进电机速度剖面生成,同时结合知识产权(intellectual property, IP)核的思想,也可以实现多轴电机的同步控制^[10]。邱靖超等^[11]设计了基于 FPGA 的多通道步进电机控制系统。但是实现精确的步进电机速度剖面生成,需要占用大量的逻辑资源进行速度曲线计算,在 FPGA 逻辑资源有限的情况下,其多轴控制性能会受到限制。

时分复用(time division multiplexing, TDM)技术是将提供给整个信道传输信息的时间划分成若干时隙,并将这些时隙分配给每一个信号源使用,保证资源的利用率^[12-13]。在电机控制方法中引入 TDM 的思想,可在有限资源下实现精确的多轴电机控制。周兆勇等^[14]采用 TDM 的思想实现了多轴伺服控制器的可编程片上系统设计;刘亚静等^[15]在 FPGA 上使用 TDM 实现了四轴全数字舵位置伺服系统;张立等^[16]基于 FPGA 采用分时复用浮点运算 IP 核的方式实现了四轴飞轮磁轴轴承控制。但是以上研究多集中于伺服控制系统,与之不同的是,步进电机的控制需要计算每一步的脉冲控制周期,在一次完整控制周期内,需要进行多次脉冲控制周期计算。因而在多轴步进电机控制系统中,TDM 在其速度曲线算法上的应用会更加复杂,现有文献并未在此方面进行过深入探讨。

针对多轴步进电机控制器实现过程中,需要进行大量的硬件逻辑复用,导致逻辑资源占用量过多的问题,提出一种速度剖面的 TDM 策略,充分发挥 FPGA 高速和并行处理的优势,可使多台步进电机的控制脉冲计算部分共享同一个速度剖面的有限状态机、乘法运算单元、除法运算单元以及开方运算单元,在满足控制精度的同时,达到降低逻辑

资源开销的目标。

1 步进电机速度剖面

典型的梯形速度曲线如图 1 所示,其包含 3 个阶段:匀加速阶段 $0 \sim t_1$ 、匀速阶段 $t_1 \sim t_2$ 以及匀减速阶段 $t_2 \sim t_3$ 。

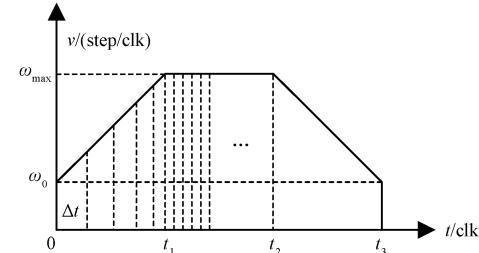


图 1 梯形速度剖面

Fig. 1 Trapezoidal velocity profile

1.1 脉冲控制周期推导

下面对 3 种转动模式下的控制脉冲周期进行理论分析推导,并对其进行离散化处理。

设控制周期为 T ,转动角度为 θ ,初始角速度为 ω_0 ,角加速度为 α ,控制脉冲周期为 Δt 。将步进电机的转轴视为刚体,由刚体绕定轴转动的运动学公式可得:

$$\theta = \omega_0 T + \frac{1}{2} \alpha T^2 \quad (1)$$

由式(1)可得角加速度 α 为:

$$\alpha = \frac{2(\theta - \omega_0 T)}{T^2} \quad (2)$$

设步进电机的总步进数为 n ,细分步距角为 q ,那么转动角度 θ 为:

$$\theta = nq \quad (3)$$

1) 匀速转动模式

匀速转动模式中,步进电机以某一固定的角速度运行,其控制脉冲输出频率恒定,即角加速度 $\alpha = 0$,将其转动过程进行离散化处理之后,所得如图 2 所示。

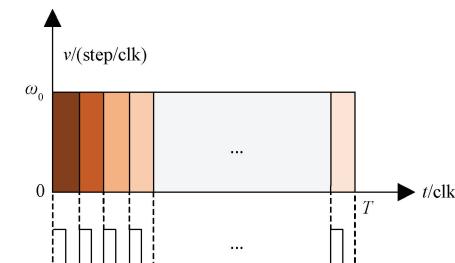


图 2 匀速转动模式与控制脉冲对应关系

Fig. 2 Correspondence between uniform rotation mode and control pulse

此时,由式(1)和式(3)可得电机角速度:

$$\omega_0 = \frac{nq}{T} \quad (4)$$

由脉冲控制周期 Δt 与角速度 ω_0 的关系 $f = \Delta t \cdot \omega_0$,可

得控制脉冲周期 Δt_i 为:

$$\Delta t_i = f \cdot \frac{T}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n = \frac{\theta_1}{q} \quad (5)$$

式中: f 为控制器的主时钟频率, θ_1 为匀速转动角度。

2) 匀加速转动模式

匀加速转动模式中, 以正向转动为例, 角加速度 $\alpha > 0$, 即 $(\theta - \omega_0 T) > 0$, 且保持恒定, 同时 α 与 ω_0 正负性相同, 将其转动过程进行离散化处理之后, 所得如图 3 所示。

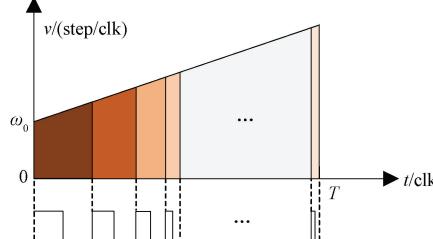


图 3 匀加速转动模式与控制脉冲对应关系

Fig. 3 Correspondence between uniform acceleration rotation mode and control pulse

从图 3 可知, 计算从 $t = 0$ 到任意时刻的转动角度, 即对当前时刻的角速度 ω_i 进行积分。

$$\theta_i = \int_0^{t_i} \omega_i dt = \int_0^{t_i} (\omega_0 + \alpha T) dt = \omega_0 t_i + \frac{1}{2} \alpha t_i^2 = iq \quad (6)$$

步进电机的第 i 个脉冲发生时刻 t_i 为:

$$t_i = \frac{-\omega_0 \pm \sqrt{\omega_0^2 + 2iaq}}{\alpha} \quad (7)$$

同理, 第 $i-1$ 个脉冲发生时刻 t_{i-1} 为:

$$t_{i-1} = \frac{-\omega_0 \pm \sqrt{\omega_0^2 + 2(i-1)\alpha q}}{\alpha} \quad (8)$$

那么第 i ($i > 1$) 个脉冲控制周期 Δt_i 为:

$$\Delta t_i = f \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (9)$$

综上, 脉冲控制周期 Δt_i 为:

$$\Delta t_i = f \cdot \left(\sqrt{P_1^2 + \frac{iqT^2}{\theta_2 - \omega_0 T}} - \sqrt{P_1^2 + \frac{(i-1)qT^2}{\theta_2 - \omega_0 T}} \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, n = \frac{\theta_2}{q} \quad (10)$$

式中: $P_1 = \frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_2 - \omega_0 T)}$, θ_2 为匀加速转动角度。

3) 匀减速转动模式

匀减速转动模式中, 角加速度 $\alpha < 0$, 即 $(\theta - \omega_0 T) < 0$, 且保持恒定, 同时 α 与 ω_0 正负性相反。其推导过程与匀加速过程同理, 脉冲控制周期 Δt_i 为:

$$\Delta t_i = f \cdot \left(\sqrt{P_2^2 + \frac{(i-1)qT^2}{\theta_3 - \omega_0 T}} - \sqrt{P_2^2 + \frac{iqT^2}{\theta_3 - \omega_0 T}} \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, n = \frac{\theta_3}{q} \quad (11)$$

式中: $P_2 = \frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_3 - \omega_0 T)}$, θ_3 为匀减速转动角度。

在匀加速与匀减速转动模式中, 通过对比式(10)与式(11)可知, 两者的差别仅为括号中做差部分的被减数与减数部分位置互换, 其他计算部分完全一致。因此, 可将两者相同的计算部分进行整合归一, 最后通过加速度 α 的正负判断是匀加速还是匀减速模式, 从而计算出相应的脉冲控制周期。原本需要两个计算模块分别计算匀加速与匀减速曲线的中间参量, 通过合并中间参数计算的方式, 可简化为一个, 节省了计算资源。优化过后的计算流程如图 4 所示。

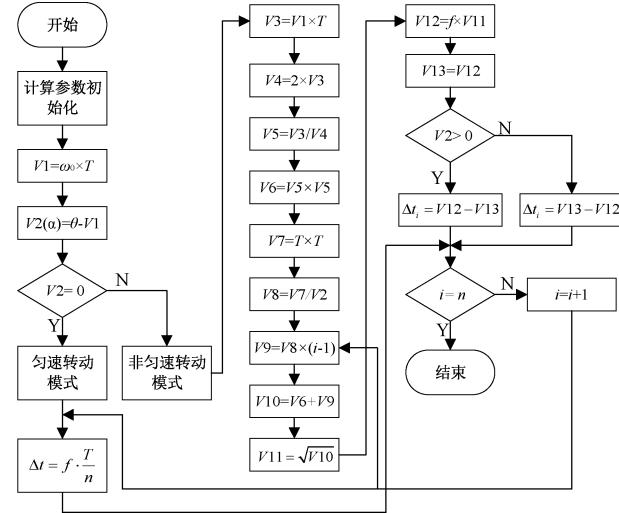


图 4 控制脉冲周期计算流程

Fig. 4 Control pulse period calculation flow

1.2 速度剖面的 TDM 策略

步进电机的驱动信号为一系列的脉冲信号, 单轴非 TDM 速度剖面控制时序如图 5 所示, 具体为: 第一个脉冲控制周期 Δt_1 被送入 PWM 模块用以产生相对应的 PWM 控制信号后, 速度剖面模块立即计算相邻下一个脉冲的控制周期 Δt_2 , 计算完成后, 等待 PWM 模块完成 Δt_1 的脉冲输出, 随后将 Δt_2 送入 PWM 模块, 进入下一轮控制。但 Δt_2 计算完成后, 距离上一个 PWM 输出完成还有很长一段时间, 在这段时间间隔内, 速度剖面计算部分一直处在保持状态^[14], 并未将 FPGA 的并行特性充分利用。

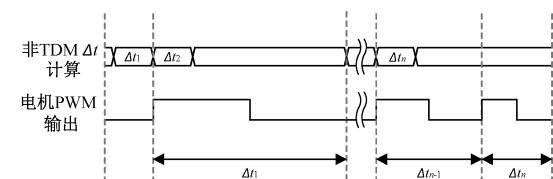


图 5 非 TDM 时序

Fig. 5 Non-TDM timing

采用多轴速度剖面 TDM 策略的基本控制方法为: 通过合理的时序规划, 使用 TDM 在不同时间段反复调用速度剖面生成单元, 计算不同轴的脉冲控制周期。设最小的

脉冲控制周期为 Δt_{\min} , 脉冲控制周期计算时间为 t_{calc} , 能实现时分复用的轴数为:

$$k = \frac{\Delta t_{\min}}{t_{\text{calc}}} \quad (12)$$

多轴控制系统时序规划如图 6 所示, 当 1# 电机的 PWM 开始输出时, 速度曲线模块依次计算当前电机的下一个脉冲控制周期, 2# 电机、3# 电机、…、 k # 电机的第一个脉冲控制周期, 往后以此循环。其中核心部分为速度剖面时序控制与电机多路复用选择, 其逻辑实现流程图如图 7 所示。其中 m 为当前进行脉冲控制周期计算的电机, k 为进行速度剖面 TDM 的总电机轴数, i 为电机的当前转动步数, n 为电机的转动步数。使用 FIFO 对各电机的脉冲控制周期进行存储, 对各 FIFO 的空满状态进行判断, 若当前 FIFO 中没有数据, 则选择当前电机, 进行脉冲控制周期计算, 若当前 FIFO 中有数据或者已满, 则切换至下一台电机, 如此循环, 直至将所有电机的脉冲控制周期计算完毕。

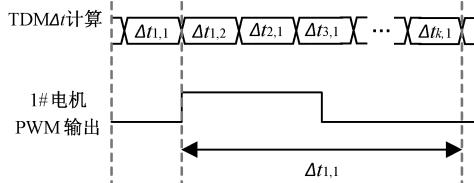


图 6 多轴步进电机速度曲线 TDM 时序

Fig. 6 Multi-axis stepper motor speed profile TDM timing

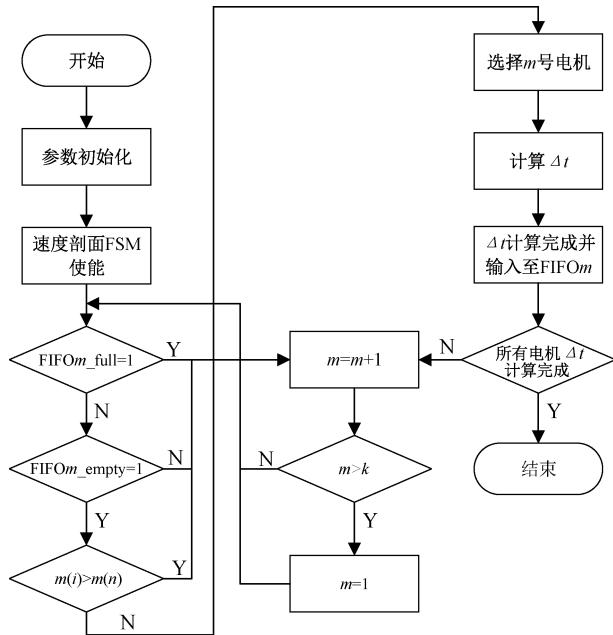


图 7 多路复用的时序控制流程

Fig. 7 Timing control flow for multiplexing

多轴速度剖面 TDM 控制系统结构如图 8 所示。外部主机或处理器通过总线接口发送控制命令和参数至电机运行寄存器。时序控制单元通过判定当前脉冲控制周期计算单元、脉冲控制周期寄存器单元以及脉冲输出单元的状态,

控制多路复用单元选择不同的电机以进行相应的脉冲控制周期计算。通过脉冲控制周期寄存器, 将各轴的脉冲控制周期输出至各 PWM 产生模块, 以驱动电机进行转动。

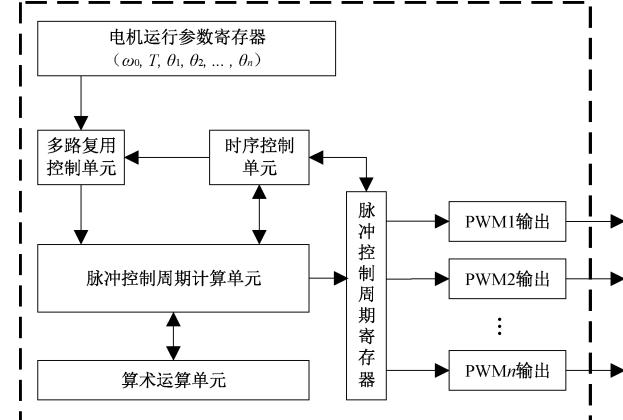


图 8 多轴速度剖面 TDM 控制结构

Fig. 8 Multi-axis velocity profile TDM control structure

多台步进电机的脉冲控制周期计算部分共享同一个速度剖面的有限状态机、乘法运算单元、除法运算单元以及开方运算单元。在输出上一个 PWM 的时隙, 对各台电机的相邻下一个脉冲控制周期进行交替计算。相较于每台电机独立配置一套完整的速度剖面计算模块, 该设计显著降低了逻辑资源的占用。

2 电机控制 IP 核

2.1 硬件实现

基于前述的步进电机线型加减速曲线算法与速度剖面 TDM 策略, 以两轴步进电机速度剖面的 TDM 为例, 对其控制器 IP 核进行设计, 其整体结构如图 9 所示。该 IP 核由 5 个功能模块构成, 分别是: EXMC 总线接口模块、异步 FIFO 模块、曲线算法模块以及 PWM 生成模块。

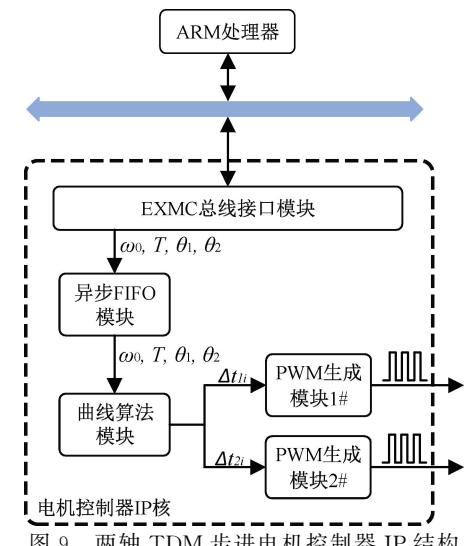


图 9 两轴 TDM 步进电机控制器 IP 结构

Fig. 9 Two axis TDM stepper motor controller IP structure

1) EXMC 总线接口模块

通过此接口,ARM 处理器能够对步进电机控制器 IP 核中的角初速度 ω_0 、控制周期 T 以及转动角度 θ 寄存器直接进行写操作,从而实现步进电机的运动控制。

2) 异步 FIFO 模块

对角初速度 ω_0 、控制周期 T 和转动角度 θ 的数据进行缓冲,使其能从 ARM 时钟域准确同步至 FPGA 时钟域,保证数据的准确性。

3) 曲线算法模块

根据异步 FIFO 输出的速度曲线控制参数,利用 PWM 输出时隙,交替计算出两台步进电机各自的单脉冲控制周期。使用有限状态机对算法内部时序调度和状态转换进行

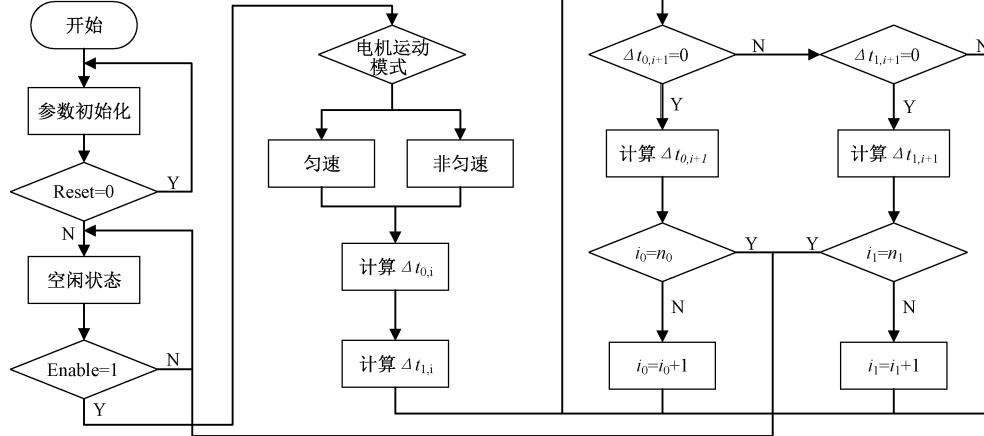


图 10 TDM 速度剖面算法流程图

Fig. 10 Flowchart of the TDM velocity profile algorithm

完整的步进电机速度剖面 TDM 控制算法执行流程如下:第 1 部分控制参数初始化,对电机步数控制参数 i 、步进数 n 以及其他中间量进行初始化设置,同时读取电机控制所需的数据,包括初始角速度 ω_0 、控制周期 T 以及转动角度 θ ;第 2 部分根据控制算法,计算角加速度 α ,判断出电机运动模式,根据相应的运动模式先后计算出第 1 台与第 2 台电机的第 1 个脉冲控制周期;第 3 部分在 PWM 模块输出控制脉冲的同时,首先判断第 1 台电机的下一个控制脉冲周期 $\Delta t_{0,i+1}$ 是否计算完成,如果没有,则进行计算,若计算完成,继续判断第 2 台电机的下一个控制脉冲周期 $\Delta t_{1,i+1}$ 是否计算完成,如果没有,则进行计算,若计算完成,则等待当前控制脉冲输出完成,所有控制脉冲输出完成后,转到空闲状态,等待下一次控制。

2.3 综合与仿真

为验证前述方案的可行性和有效性,在 EDA 开发工具(Elinx)中利用 Verilog 硬件描述语言设计实现了两轴 TDM 步进电机控制器,再将各个模块综合并封装为自定义 IP 核,同时,实现文献[6]中提出的步进电机控制器 IP 核并构建两轴控制工程,综合后,二者进行逻辑资源使用量对比如表 1 所示。

控制,采用格雷码进行状态机编码,确保状态跳转的高效、准确。

4) PWM 生成模块

根据曲线算法模块输出的脉冲控制周期值 (Δt_i) 进行 PWM 脉冲输出,占空比设置为 50%。设计一个 $\Delta t_i/2$ 的比较器和初始值为 Δt_i 的递减计数器,当计数器值大于 $\Delta t_i/2$ 时,PWM 输出值为高电平,反之则为低电平。

2.2 算法实现

构建速度剖面的 TDM 算法整体流程如图 10 所示,再结合流水线的设计思想将复杂的控制算法流程分解成多个部分,每个部分完成一个特定的任务。

表 1 逻辑资源占用量对比

Table 1 Comparison of logical resource usage

逻辑资源	两轴非 TDM IP 核	两轴 TDM IP 核
LUT	6 262	4 153
FF	2 999	2 139
DSP	6	5
CLBs	826	525

根据表 1 中逻辑资源占用量对比可知,使用 TDM 策略构建的步进电机控制 IP 核相比非 TDM IP 核 LUT 资源占用量减少了 33.68%,触发器资源占用量减少了 28.68%,乘法器资源占用量减少了 12.67%,CLBs 资源占用量减少了 36.44%。

基于 Quartus II 集成化 EDA 工具链,本研究采用 Power Analyzer 功耗分析平台分别对两轴 TDM 与非 TDM 步进电机控制器 IP 核进行功耗评估,其结果如表 2 所示。

根据表 2 中功耗对比可知,与非 TDM IP 核相比,TDM IP 核的总热功率耗散降低了 14.04%,动态热功率耗散降低了 32.84%,静态热功率耗散与 I/O 热功率耗散

表 2 功耗对比

Table 2 Power consumption comparison mW

功耗	两轴非 TDM IP 核	两轴 TDM IP 核
总热功率耗散	596.78	512.99
动态热功率耗散	259.39	174.21
静态热功率耗散	160.14	161.32
I/O 热功率耗散	177.25	177.46

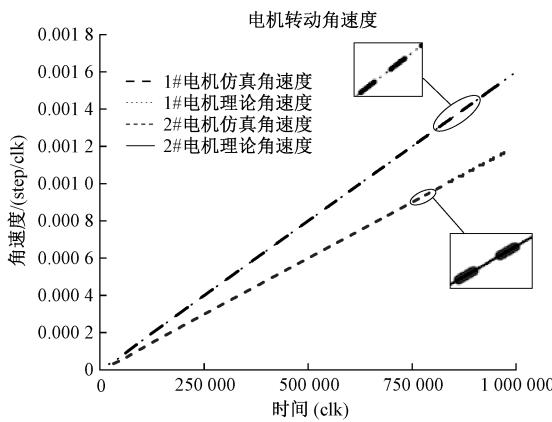
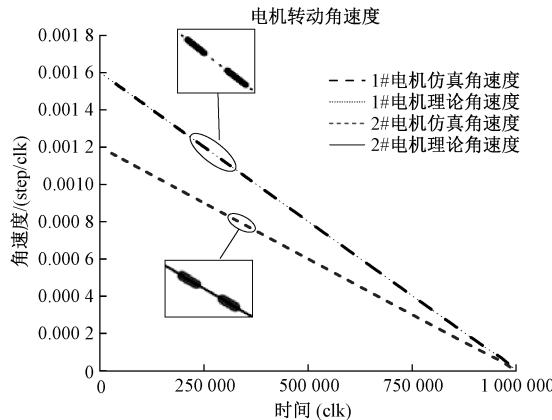
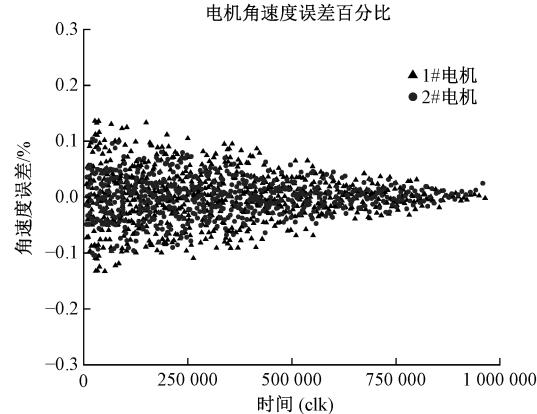
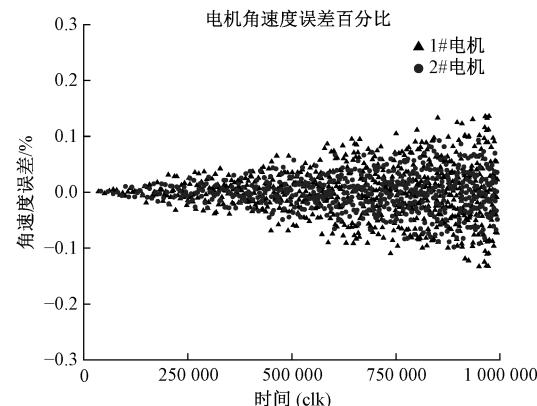
基本一致。

构建完成控制 IP 核后,联合 Modelsim 进行速度剖面的控制脉冲周期计算精度验证。设置 FPGA 主频为 50 MHz,匀加速、匀减速和匀速的控制周期均为 20 ms,仿真结果如图 11 所示。其中图 11(a)、(b)、(c) 分别为匀加速、匀减速以及匀速 3 种运动模式下的转动角速度以及仿真数据与理论数据的跟随误差百分比,图中度量单位 1 step=0.1125°,1 clk=20 ns。从图上可以看出,匀加速模式下,角速度误差呈现逐渐增大的趋势,这主要是因为角

速度与脉冲控制周期成反比关系,随着角速度增加,脉冲控制周期值逐渐减小,误差值的占比就会逐渐增加,匀减速模式下,角速度误差变化的趋势同理。但是 3 种运动模式下,当前算法计算的脉冲控制周期数据与理论值误差小于 $\pm 0.2\%$,保证了步进电机实时控制的精度。从图 12 可以看到,TDM IP 核输出两轴控制脉冲的前后时间差为 4.260 ns,电机控制的时间同步性也得到了保证。

3 实验验证

上述的 TDM 步进电机控制器 IP 核已在 EQ6HL130 FPGA 开发板上得以实现,FPGA 控制主频为 50 MHz。驱动对象是保持转矩为 0.3 kgf·cm min、额定电压 4.4 V、额定电流为 0.5 A、步距角为 1.8°、转子惯量为 1.6×10^{-7} kg·m²、编码器数据为 10 位和边长为 20 mm 的两相混合式步进电机。负载的转动惯量约 6.7×10^{-7} kg·m²,微步细分数为 16,驱动电路的电压为 24 V。实验平台如图 13 所示。

(a) 匀减速转动模式
(a) Uniform deceleration(b) 匀减速转动模式
(b) Uniform deceleration

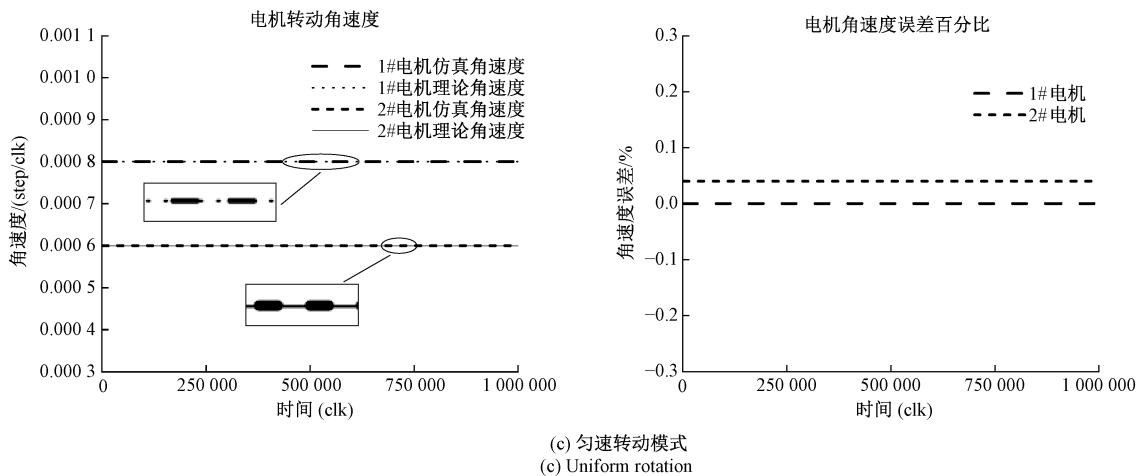


图 11 电机角速度及其误差

Fig. 11 Motor angular speed and its error

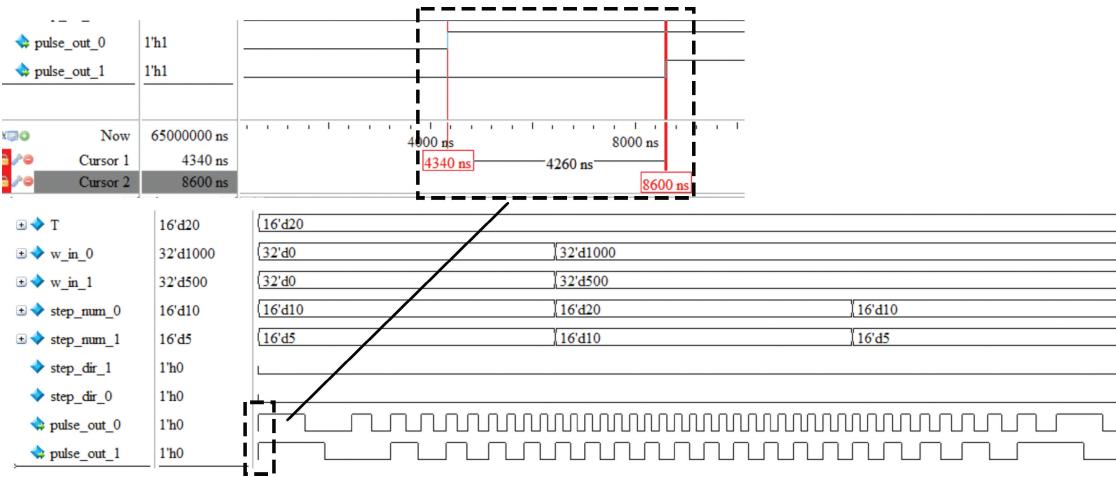


图 12 控制脉冲输出仿真结果

Fig. 12 Control pulse output simulation results

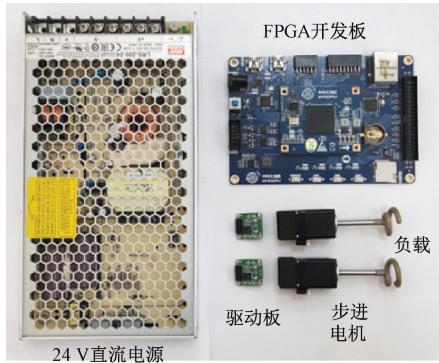


图 13 步进电机 TDM IP 核硬件实验平台

Fig. 13 Hardware experiment platform for stepper motor TDM IP core

为验证步进电机 TDM IP 核的线性速度曲线控制效果,在上述硬件平台进行实验。设置为梯形速度剖面,两台电机的控制周期均为 50 ms,其中匀加速时间为 20 ms,匀速时间为 10 ms,匀减速时间为 20 ms,角初速度均为 0,角位移分别为 2 400 和 1 800 step。二者角速度与角位移曲线分别如图 14(a)、(b)和图 15(a)、(b)所示。转动过程中,角位移的跟随误差如图 14(c)和图 15(c)所示。

从图 14 和图 15 可以看出,步进电机 TDM IP 核根据设定参数,同时控制两轴电机进行相应转动,其实际运行角速度与规划的速度剖面一致性较好,整个控制过程中,实际角位移与理论角位移的跟随误差均在 ± 8 step ($\pm 0.9^\circ$) 以内,满足实际控制要求。

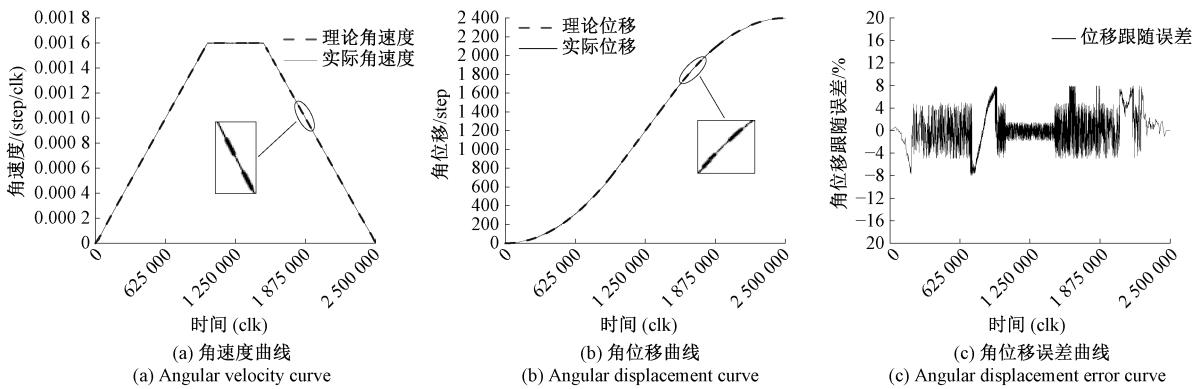


图 14 1# 电机转动角速度、位移及误差曲线

Fig. 14 1# Motor rotation angular velocity, displacement and error curve

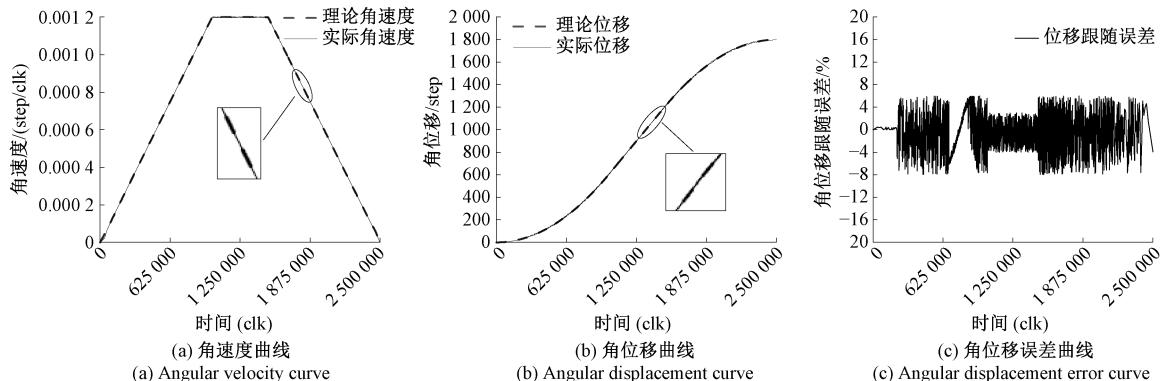


图 15 2# 电机转动角速度、位移及误差曲线

Fig. 15 2# Motor rotation angular velocity, displacement and error curve

4 结 论

本文基于步进电机线型加减速曲线提出了一种速度剖面的 TDM 设计方法,并对其进行了硬件逻辑实现。主要包括:提出一种多轴步进电机速度剖面的 TDM 策略,利用 PWM 输出时隙,计算两台电机的脉冲控制周期,相比于非 TDM IP 核,节省了 36.44% 的逻辑资源,降低了 14.04% 的热功耗,结合流水线的设计思想对曲线算法的硬件逻辑进行优化,提高执行效率,设计了两轴步进电机 TDM 控制器 IP 核;通过实验对该 IP 核的控制性能进行了验证,结果表明,实际与理论控制的跟随误差均在 ± 8 step ($\pm 0.9^\circ$) 以内。

依据本文的思路,其他步进电机加减速曲线亦可采用 TDM 的设计思想以节约逻辑资源,在资源有限的情况下,实现更多轴数的电机控制。同时,在保证 PWM 输出时间以及控制精度足够的情况下,TDM 轴数越多,其节省逻辑资源的效果越明显。

参考文献

[1] 刘杰,王邦继,周国祥,等. 非零速启停的低功耗步进电机控制器研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(18): 64-70.

LIU J, WANG B J, ZHOU G X, et al. The study on design of a non-zero speed start-stop and low-power stepper motor controller[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(18): 64-70.

[2] 高志远. 基于时变边界层滑模算法的两相混合式步进电机控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

GAO ZH Y. Research on two-phase hybrid stepper motor control based on sliding mode algorithm of time-varying boundary layer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[3] 施雨,武志涛,苏晓英,等. 基于主动式阻尼的混合式步进电机转速振荡抑制控制 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2459-2469.

SHI Y, WU ZH T, SU X Y, et al. Based on active damping hybrid stepper motor speed oscillation suppression control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2459-2469.

[4] 王春雷,曹东兴. 两相混合式步进电机全速范围无位置传感器速度控制 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(3): 41-48.

WANG CH L, CAO D X. Wide-speed-range

- sensorless speed control of two-phase hybrid stepper motors [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(3): 41-48.
- [5] LE K M, VAN HOANG H, JEON J W. An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(9): 7244-7255.
- [6] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. 步进电机速度曲线的设计与 FPGA 实现[J]. 微电机, 2012, 45(8): 67-71.
- WANG B J, LIU Q X, ZHOU L, et al. Design of stepper motor velocity profile and realization on FPGA[J]. *Micromotors*, 2012, 45(8): 67-71.
- [7] 陈祖霖, 黄峰, 吴靖, 等. 步进电机 S 曲线调速控制研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 640-645.
- CHEN Z L, HUANG F, WU J, et al. Research on s-curve speed control of stepper motor[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 640-645.
- [8] 周黎, 杨世洪, 高晓东. 步进电机控制系统建模及运行曲线仿真[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 20-25.
- ZHOU L, YANG SH H, GAO X D. Modeling of stepper motor control system and running curve simulation[J]. *Electric Machines and Control*, 2011, 15(1): 20-25.
- [9] 蔡娜, 秦刚, 张和铭, 等. 步进电机速度控制技术研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 84-88.
- CAI N, QIN G, ZHANG H M, et al. Research on speed control technology of stepper motor [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(15): 84-88.
- [10] FENG X L, ZHUO Q Q, LIU X B, et al. Development of multi-motor synchronous control system based on network-on-chip[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 234(9): 1000-1010.
- [11] 邱靖超, 刘新妹, 殷俊龄, 等. 一种基于 FPGA 的多通道步进电机控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4): 72-77.
- QIU J CH, LIU X M, YIN J L, et al. Design of a multi channel stepper motor control system based on FPGA [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(4): 72-77.
- [12] 宋宝, 徐健, 刁思勉, 等. 基于分时复用策略的 EtherCAT 从站 IP 核设计及实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 26-28, 32.
- SONG B, XU J, DIAO S M, et al. Design and implementation of the EtherCAT slave ip core based on time division multiplexing strategy[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2016(4): 26-28, 32.
- [13] 沈东阳. 连续波时分复用关键技术及其 FPGA 设计[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- SHEN D Y. Key techniques and FPGA design of continuous wave time division multiplexing[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [14] 周兆勇, 王琳, 漆亚梅, 等. 多轴伺服控制器的片上系统设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 553-558.
- ZHOU ZH Y, WANG L, QI Y M, et al. System on chip design of multi-axis servo controller[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(4): 553-558.
- [15] 刘亚静, 王治国, 王鹏飞, 等. 基于 FPGA 的四轴舵系统的设计与实现[J]. 微特电机, 2010, 38(11): 12-15.
- LIU Y J, WANG ZH G, WANG P F, et al. Design and implementation of an FPGA-based four-axis actuator servo system[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2010, 38(11): 12-15.
- [16] 张立, 刘昆. 基于 FPGA 的飞轮磁轴承一体化控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 84-90.
- ZHANG L, LIU K. Integrated control system design of magnetic bearings for flywheel based on FPGA[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(4): 84-90.

作者简介

吴博, 硕士研究生, 主要研究方向为电机与电器。

E-mail: wubo157@126.com

王邦继(通信作者), 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为高功率相控阵天线、电机驱动与控制。

E-mail: bangjiw@163.com