

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209309

非零速启停的低功耗步进电机控制器研究*

刘杰 王邦继 周国祥 邱嵩 刘庆想
(西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031)

摘要: 为了优化步进电机开环控制性能,对非零速启停的加减速曲线算法及其低功耗硬件逻辑实现进行了研究。针对零速启停的加减速曲线存在控制性能难以充分发挥的问题,提出了一种非零速启停的步进电机线性加减速曲线算法,将加减速过程划分为4种转动模式,可构建任意的线性速度剖面。首先理论推导了4种加减速转动模式的控制脉冲周期;其次结合流水线设计思想优化加减速曲线算法的硬件逻辑模型,在FPGA中设计了步进电机控制器IP核,并采用门控时钟等低功耗IC设计技术实现了IP核的低功耗;最后,搭建了实验平台进行验证。实验结果表明,IP核可以实现4种转动模式的非零速启停控制,实现了高实时、高精度驱动,提升了20%的控制性能,电路面积优化约30%,功耗降低53%,验证了方案的可行性与有效性。

关键词: 步进电机;开环控制;非零速启停;现场可编程门阵列;低功耗

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

The study on design of a non-zero speed start-stop and low-power stepper motor controller

Liu Jie Wang Bangji Zhou Guoxiang Qiu Song Liu Qingxiang
(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This study presents a design of a non-zero speed start-stop and low-power stepper motor controller. To achieve such design, the acceleration-deceleration curve algorithm for the realization of non-zero speed start-stop, and the hardware-logic design for the realization of low-power dissipation, have been proposed to improve the performance of the stepper motor open-loop control method. The acceleration-deceleration curve algorithm is able to divide the stepper motor rotation process to 4 different modes so that to establish any desired linear motor velocity profile, to tackle the problem of achieving the performance of non-zero speed start-stop. In this paper, the control pulse periods of the 4 different linear acceleration-deceleration process are theoretically derived; Then the hardware-logic model of the acceleration-deceleration process is optimized with the assistance of the Pipeline Design concept. The IP core of the stepper motor controller is built on a Field Programmable Gate Array (FPGA), and utilize the low-power ICs to achieve the low-power performance of the controller. Finally, an experimental platform is setup to demonstrate that, the IP core on FPGA is capable for the non-zero speed start-stop with 4 modes, and is able to drive the motor timely and precisely. The empirical results with statistical analysis show the proposed design is feasible and efficient, and successfully achieve 20% better control performance, 30% less electronic system circuit area, and 53% less power dissipation.

Keywords: stepper motor; open-loop control; non-zero speed start-stop; field programmable gate array; low power dissipation

0 引言

步进电机是一种将数字脉冲序列转换为角位移增量的执行元件,具有成本低廉、启停迅速、定位精度高等特点,广

泛应用于机器人、数控机床、自动化设备等领域^[1]。步进电机控制方法有开环和闭环两种。闭环控制具有控制精度高、效率高的特点^[2],但系统成本和实现复杂度较高。由于开环控制实现简单,控制精度能满足大多数应用需求,是步

收稿日期:2022-03-17

* 基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目资助

进电机的主要控制方式,目前研究主要集中在加减速曲线优化和控制器具体实现上^[3-4]。

随着细分驱动技术的发展,角位移输出跟踪脉冲输入的同步能力不断提高,再通过合适的加减速曲线算法的优化,可以有效避免丢步、冲击振荡等现象^[5]。国内外学者提出了很多步进电机加减速曲线算法的优化方案,主要有线形、S形、正矢形等^[6-8]。线形加减速曲线算法实现简单、响应快速,具有时间最优的特征。候俊杰等^[9]设计了一种梯形加减速算法的步进电机控制系统,解决启动速度过大导致的堵转问题,但是没有充分利用步进电机的自启停频率和矩频特性,其控制性能难以得到充分发挥。

FPGA 具有高速、并行处理和模块化等特点,可实现多轴电机的同步并行控制,提高了多轴系统的集成度,增强了系统的伺服控制性能。邱靖超等^[10]基于 FPGA 技术设计了一种步进电机控制系统,用于控制多路电机,而基于 FPGA 的多轴电机控制系统存在着严重的热功耗问题,不仅消耗更多的供电功率,通常还会导致芯片损坏或者器件寿命降低^[11-12]。

针对零速启停存在控制性能难以充分发挥的问题,提出了一种非零速启停的步进电机线性加减速曲线算法,为了降低控制器功耗,通过优化算法结构并采用门控时钟等低功耗 IC 设计技术设计实现了步进电机控制器 IP 核,能够驱动步进电机以非零速启停,在提升控制性能的同时降低 FPGA 芯片功耗。

1 线性加减速曲线算法

1.1 非零速的线性加减速曲线

某任意的线性加减速曲线如图 1 所示,步进电机由非

零速开始启动,启动速率不高于电机自启停频率,以恒定加速度加速,达到所需运行速率,匀速运行一定时间后,开始以恒定减速度减速,减速至反方向后再经过加速、匀速和减速过程,最后以非零速停止。与零速启动过程相比,非零速启动在加速过程中所需动态扭矩更小,加速至中高速状态时电机不会因为扭矩不足而产生抖振,并且充足的加速扭矩可以实现更好的控制性能和更高的转速驱动,充分发挥电机性能。

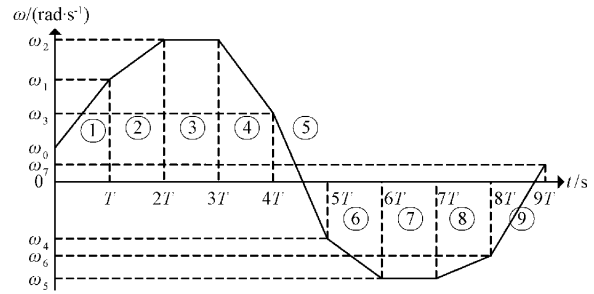


图 1 任意的线性加减速曲线

上述的整个加减速过程可分为匀速、匀加速、匀减速和匀减速过零点 4 种转动模式,如图 2 所示。其中,过程③、⑦为匀速转动,过程①、②、⑥为匀加速转动,过程④、⑧为匀减速转动,过程⑤、⑨为匀减速过零点转动。由这 4 种转动模式可以拼接构建任意的线性速度剖面,如三角形速度剖面、梯形速度剖面等,具有较强的使用灵活性。

1.2 四种转动模式的控制脉冲周期推导

步进电机通过一组离散的脉冲序列确定速度变化特性,脉冲周期的大小决定步进电机的转速。下面分析 4 种模式转动过程的控制脉冲周期。

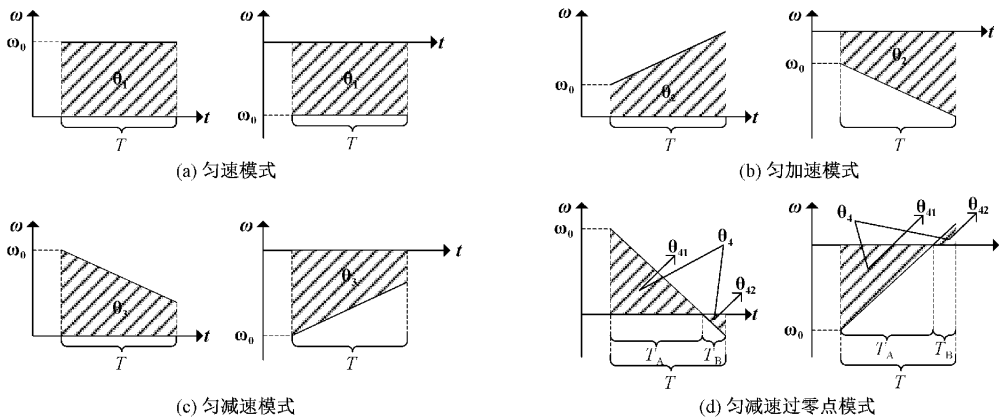


图 2 4 种转动模式

线性转动过程中,以控制周期 T 的起点为时间原点,角位移 θ 为:

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

式中: ω_0 为初始角速度, β 为角加速度, n 为步进数, η 为电

机步距角。

可得角加速度 β 为:

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

1) 匀速模式转动过程中角加速度 β 为零,即 $\theta_1 = \omega_0 T$,

步进电机以恒定的步进速率转动,其控制脉冲周期 c_i 为:

$$c_i = f \cdot \frac{T}{n}, i = 1, 2, \dots, n = \frac{\theta_1}{\eta} \quad (3)$$

式中: f 为处理器工作时钟频率, θ_1 为匀速角位移, ω_0 为初始角速度, T 为控制周期, n 为步进数, η 为电机步距角。

2) 匀加速模式中初始角速度 ω_0 与角加速度 β 符号相同, 同时 $|\theta_2| > |\omega_0 T|$, 其转动过程离散化后如图 3 所示。

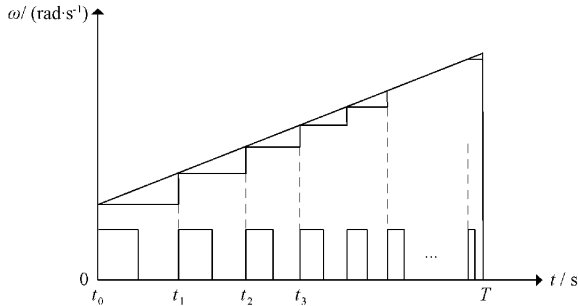


图 3 匀加速曲线

以 $t=0$ 的时刻为起点, 角位移 θ_i [13] 为:

$$\theta_i = \int_0^{t_i} (\omega_0 + \beta t) dt = \omega_0 t_i + \frac{1}{2} \beta t_i^2 = i \eta \quad (4)$$

步进电机的第 i 个脉冲发生时刻 t_i 为:

$$t_i = -\frac{\omega_0}{\beta} \pm \frac{\sqrt{\omega_0^2 + 2\beta i \eta}}{\beta} \quad (5)$$

第 i 个控制脉冲周期 c_i 为:

$$c_i = f \cdot \sqrt{\left[\frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_2 - \omega_0 T)} \right]^2 + \frac{i \eta T^2}{\theta_2 - \omega_0 T}} - f \cdot \sqrt{\left[\frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_2 - \omega_0 T)} \right]^2 + \frac{(i-1) \eta T^2}{\theta_2 - \omega_0 T}}, i = 1, 2, \dots, \frac{\theta_2}{\eta} \quad (6)$$

3) 匀减速模式中初始角速度 ω_0 与角加速度 β 符号相反, 同时 $|\omega_0 T| / 2 \leq |\theta_3| < |\omega_0 T|$ 。与匀加速模式推导过程类似, 符号相反, 第 i 个控制脉冲周期 c_i 为:

$$c_i = f \cdot \sqrt{\left[\frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_3 - \omega_0 T)} \right]^2 + \frac{(i-1) \eta T^2}{\theta_3 - \omega_0 T}} - f \cdot \sqrt{\left[\frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_3 - \omega_0 T)} \right]^2 + \frac{i \eta T^2}{\theta_3 - \omega_0 T}}, i = 1, 2, \dots, \frac{\theta_3}{\eta} \quad (7)$$

4) 匀减速过零点模式中初始角速度 ω_0 与角加速度 β 符号相反, 同时 $|\theta_4| < |\omega_0 T| / 2$ 。可以分为匀减速模式和匀加速模式两部分, 匀减速模式的控制周期 T_A 为:

$$T_A = -\frac{\omega_0 T^2}{2(\theta_4 - \omega_0 T)} \quad (8)$$

匀减速模式角位移 θ_{41} 为:

$$\theta_{41} = -\frac{(\omega_0 T)^2}{4(\theta_4 - \omega_0 T)} \quad (9)$$

匀加速模式初始角速度为零, 控制周期 $T_B = T - T_A$, 匀加速模式角位移 $\theta_{42} = \theta_4 - \theta_{41}$ 。第 i 个控制脉冲周期计算方式与匀减速模式和匀加速模式相同。

2 步进电机控制器 IP 核

2.1 硬件实现

基于非零速启停的线性加减速曲线算法设计了步进电机控制器 IP 核, 图 4 中给出了 IP 核的整体结构。步进电机控制器 IP 核采用纯硬件逻辑方式设计实现, 主要包含四部分: 接口模块、曲线算法模块、脉冲生成模块和位置检测模块。

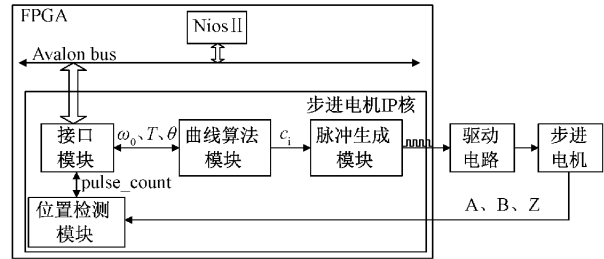


图 4 步进电机控制器 IP 核结构

1) 接口模块

用于实现 IP 核与 Nios II 软核的实时数据交互, 通过读写 IP 核内寄存器实现步进电机运动控制, 内部寄存器与接口映像如表 1 所示。

表 1 寄存器与接口映像

寄存器	偏移量	位宽	位	功能
Reg_control	0x0	2	[0] [1]	复位 电机使能
Reg_ω₀	0x1	32	[31:0]	初始角速度
Reg_T	0x2	32	[31:0]	控制周期
Reg_θ	0x3	32	[31:0]	预设角位移
Reg_QEP	0x4	32	[31:0]	转子位置反馈

2) 曲线算法模块

步进电机控制器 IP 核的核心模块, 根据接口模块参数的输入计算每个步进脉冲控制周期 c_i , 分为两个部分: 时序调度和算法模块。以有限状态机形式完成算法内部时序调度和状态转换, 减少中间计算变量并约束变量位宽; 算法模块用于乘法、除法和开方运算, 采用不恢复余数除法和非冗余开方两种递推式结构算法进行除法和开方计算, 通过增加计算周期节约逻辑资源的使用。

3) 脉冲生成模块

根据曲线算法模块计算的 c_i 值实时调节输出脉冲波形, 设计一个计数器使之减 1 计数, 输出的脉冲占空比为 50%, 当计数器数值小于 $c_i/2$ 时, PWM 输出电平为低, 反之为高。

4) 位置检测模块

通过位置传感器实时检测电机转子位置并解析位置信息。

2.2 算法的 FPGA 实现

非零速启停的线性控制算法在图 4 所示的曲线算法

模块实现。曲线算法模块整体流程如图 5 所示,结合流水线设计思想将复杂的算法流程划分为多级流水处理。

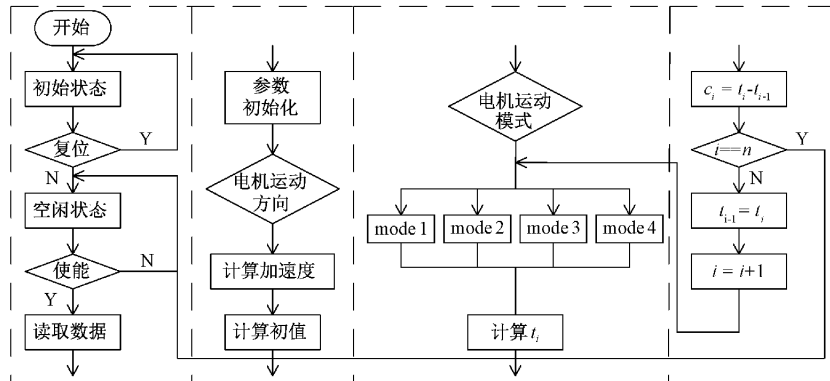


图 5 控制算法流程

Nios II 软核通过 Avalon 总线在接口模块对相应寄存器进行赋值。

完整的非零速启停电机控制算法所需的状态转换如下:第 1 阶段初始化,电机使能后读取数据,通过寄存器存储电机控制参数;第 2 阶段进行初值计算,初始化计步参数 i 与步数 n ,判断电机转动方向,根据算法时序调度计算角加速度 β 并完成初值计算;第 3 阶段进行转动模式判断,mode1 对应匀速,mode2、3 分别对应匀加、减速,mode4

对应匀减速过零点,计算第 i 个步进脉冲发生时刻 t_i ;第四阶段根据相邻脉冲发生时刻差值计算控制脉冲周期 c_i ,使能 PWM,在每步进脉冲结束之前循环迭代计算下一控制脉冲周期,保证控制的实时性并发挥 FPGA 并行处理能力。完成后转至空闲状态等待下一控制周期。

控制算法时序调度如图 6 所示,在相应模块插入门控时钟实现控制器低功耗。使能接口模块时钟读取参数指令,对相应寄存器赋值后展开计算。

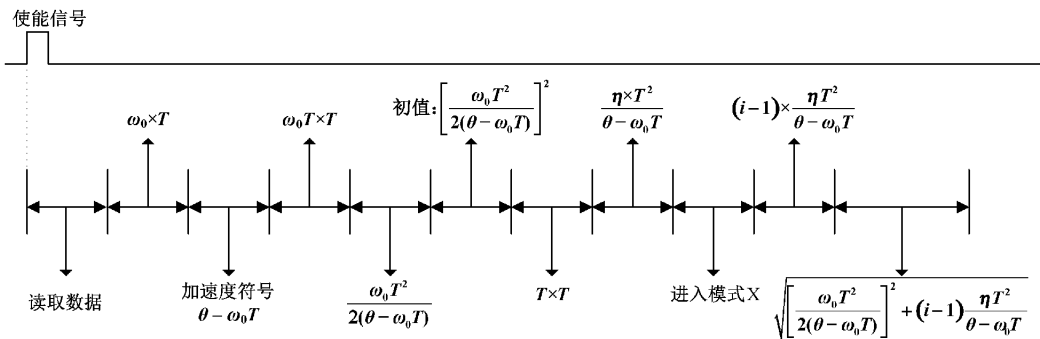


图 6 时序控制流程

2.3 综合及仿真

为验证上述方案的可行性和有效性,利用 Verilog 硬件描述语言在 EDA 开发工具(Quartus II)中设计实现了步进电机控制器,将各个模块综合并封装为自定义 IP 软核,综合后 IP 核的逻辑资源使用量如表 2 所示。以下将非零速启停步进电机控制器 IP 核称为非零速 IP 核,文献[5]中提出的由零速启停的步进电机控制器 IP 核称为零速 IP 核。

利用 Quartus II 提供的功耗分析器工具 PowerPlay Power Analyzer 对控制器 IP 核进行功耗预评估,以门级仿真的输出作为输入分析估算功耗,相同条件下评估结果如表 3 所示。

根据表 2 中资源使用量,与零速 IP 核相比,总逻辑资源使用量减少 1 005,降低了 29.71%,其中组合逻辑减少

表 2 逻辑资源使用量

逻辑资源	非零速 IP 核	零速 IP 核
Total logic elements	2 378	3 383
Total combinational functions	2 166	3 102
Total registers	1 331	1 768
Embedded Multiplier	12	16
9-bit elements		

表 3 功耗评估结果

热功耗/mW	非零速 IP 核	零速 IP 核
总热功耗	256.93	402.40
动态热功耗	89.83	234.75
静态热功耗	78.64	79.46
I/O 热功耗	88.46	88.19

936,降低了 30.17%;时序逻辑减少 437,降低了 24.72%;乘法器减少 4,降低了 25%。

根据表 3 中功耗评估结果,与零速 IP 核相比,总热功耗减少 145.47 mW,降低了 36.15%,其中动态热功耗减少 144.92 mW,降低了 61.73%,静态热功耗和 I/O 热功耗基本相同。

完成硬件模块的优化设计后,在 Modelsim 中仿真验证控制脉冲周期的计算精度,如图 7 所示。可以看出,实时计算控制脉冲周期的值与理论值误差均不超过 ±0.1%,保证了加减速控制的精确性。

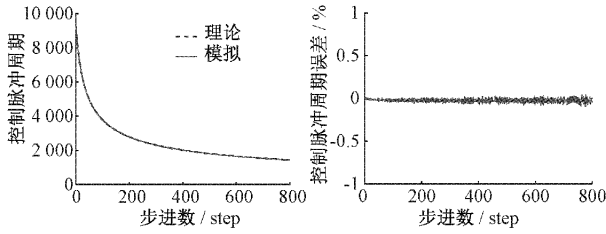


图 7 控制脉冲周期及其误差

3 实验验证

3.1 功能验证

前述的步进电机控制器 IP 核已在 Altera 公司的 DE0 FPGA 开发板上得以实现。驱动对象是额定转矩为

0.032 Nm、额定电流为 0.5 A、步距角为 1.8°、转子惯量为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、编码器线数为 1 024 和边长为 20 mm 的两相混合式步进电机。负载转动惯量约 $6.5 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,驱动电路的电压为 24 V,微步细分数为 16。实验平台如图 8 所示。

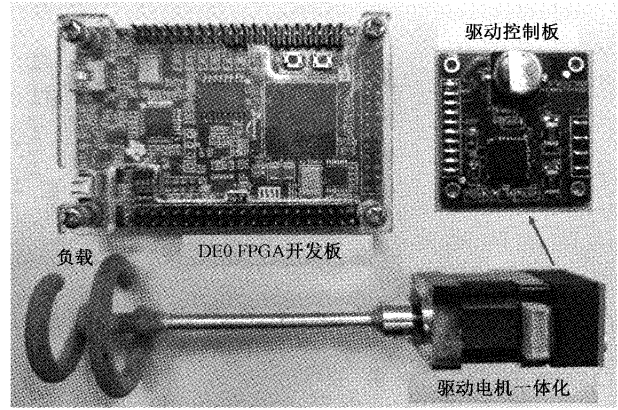


图 8 步进电机控制器 IP 核实验平台

为验证 4 种转动模式的运行效果,分别测试了 4 种转动模式下的控制性能,其速度和角位移曲线如图 9 所示。可以看出,设计的步进电机控制器 IP 核可以实现 4 种转动模式的非零速起停控制,其实际速度和角位移曲线与理论值吻合度较好,实现了高实时、高精度驱动控制。

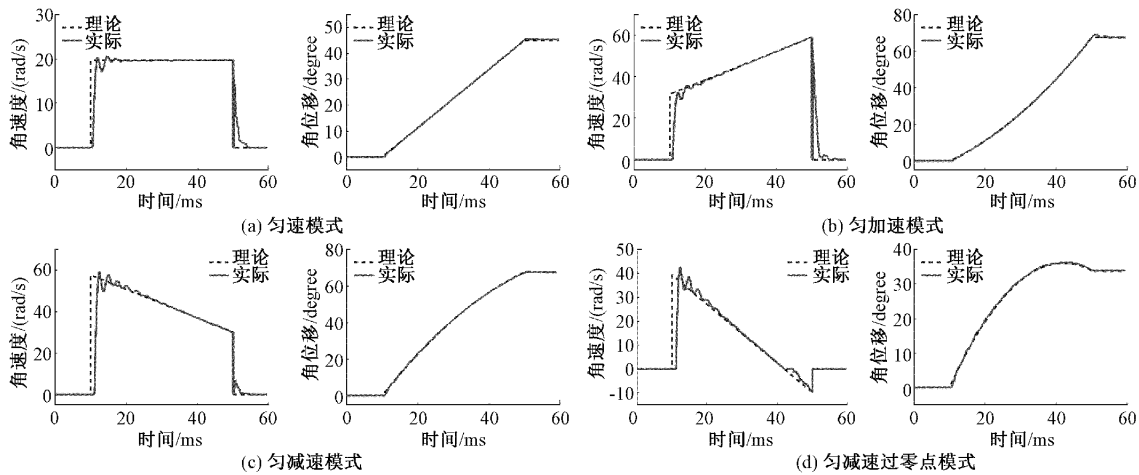


图 9 四种转动模式的速度及角位移曲线

由这 4 种转动模式可以构建任意的线性速度剖面。构建的某线性速度剖面包括非零速启动的匀加速过程、匀速过程、匀减速过零点过程、零速停止的匀减速过程 4 个过程,其转动过程中的速度和角位移曲线如图 10 所示。可以看出,步进电机严格按照规划的某线性速度剖面精确运行,但在电机非零速启动和停止瞬间由于速度突变存在一定的机械振荡现象。

3.2 控制性能验证

为验证非零速启停的加减速曲线性能优化效果,在相

同条件下分别测试了零速启停、非零速启停加减速曲线的控制性能。给定控制周期为 100 ms,其中加速、匀速和减速时间分别为 40 ms、20 ms 和 40 ms;非零速启动的角速度为 $7.5\pi \text{ (rad/s)}$,给定的零速启停和非零速启停的速度曲线分别如图 11、12 中(a)所示。在此过程中,零速启停和非零速启停加减速过程的最大角位移及其误差分别如图 11、12 中(b)、(c)所示。

由图 11 和 12 可以看出,零速启停的最大无失步角位移为 540° ,非零速启停的最大无失步角位移为 648° ,相

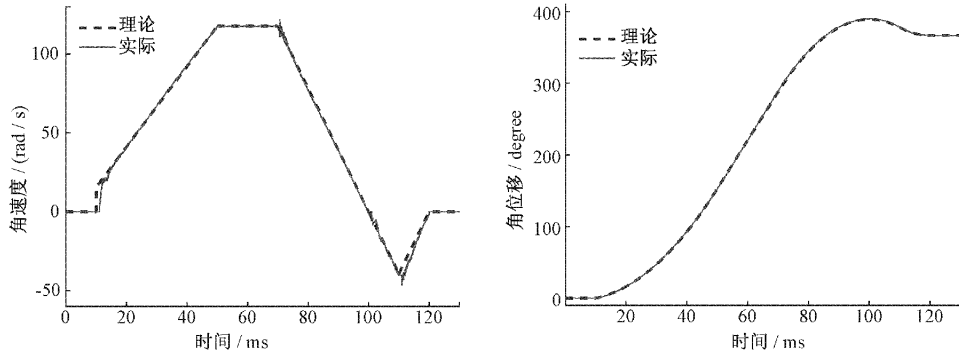


图10 某任意线性速度剖面的速度及角位移曲线

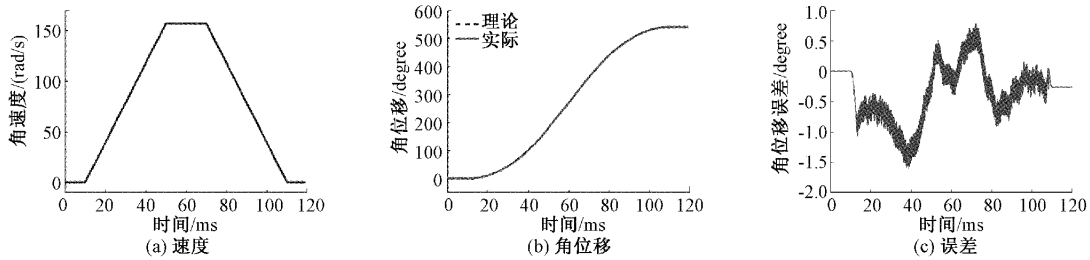


图11 零速启停转动的速度、角位移及误差曲线

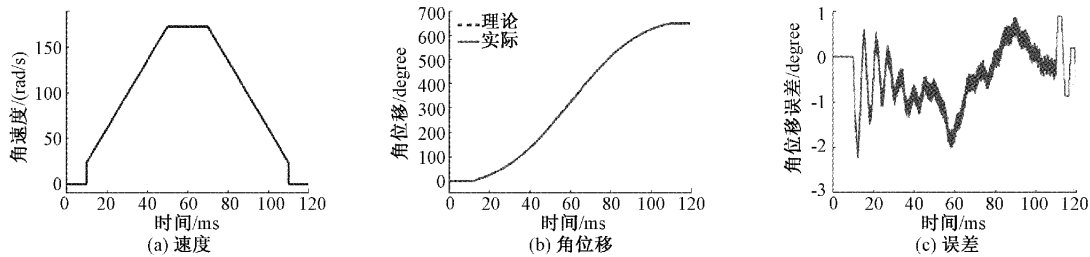


图12 非零速启停转动的速度、角位移及误差曲线

较零速启停增加了 108° ,提升了20%的控制性能,运行稳定后位置误差均在 $\pm 0.5^{\circ}$ 以内。

3.3 功耗验证

为验证设计的低功耗步进电机控制器IP核的功耗优化效果,在FPGA中分别例化6路零速启停控制器IP核和非零速启停控制器IP核,在自由开放环境下,各自FPGA芯片表面温度变化情况如图13所示。可以看出,约30 min后FPGA芯片均达到热平衡,零速IP核温升约

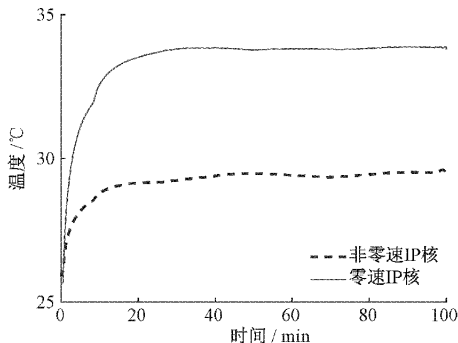


图13 温升对比

8.1°C ,非零速IP核温升约 3.8°C ,相较零速IP核温升减少 4.3°C ,热功耗降低约53.09%。

4 结论

提出了一种非零速启停的步进电机线性加减速控制方案,并对曲线算法的低功耗硬件逻辑实现进行了设计,主要成果包括:提出一种非零速启停的步进电机线性加减速曲线算法,将加减速过程划分为四种转动模式,可构建任意的线性速度剖面;结合流水线设计思想优化曲线算法的硬件逻辑模型,设计了步进电机控制器IP核,并采用门控时钟等低功耗IC设计技术实现了IP核的低功耗;实现了4种转动模式的非零速启停控制,优化了控制性能,降低了控制器逻辑资源及功耗,证实了方案的可行性与有效性。

参考文献

- [1] 蔡娜,秦刚,张和铭,等. 步进电机速度控制技术[J]. 电子测量技术,2021,44(15):84-88.
- [2] 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.
- [3] 王邦继,刘庆想,周磊,等. 步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J]. 电机与控制学报,2018,22(1):37-42.
- [4] PILLANS J. Reducing position errors by vibration optimization of stepper motor drive waveforms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(6): 5176-5183.
- [5] 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.
- [6] 刘素贞,王晨光,张闯,等. 电磁超声扫描装置及其控制系统的设计[J]. 电工技术学报,2015,30(10):20-25.
- [7] 王磊,徐明刚,马小林,等. 水质总磷监测蠕动泵步进电机精准控制策略[J]. 微电机,2014,47(7):72-75.
- [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,(1):20-25.
- [9] 侯俊杰,赵宇,李孟委. 基于 Zynq 的步进电机控制系统[J]. 国外电子测量技术,2021,40(3):108-112.
- [10] 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.
- [11] FENG X, ZHUO Q, LIU X, 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.
- [12] SAMIR N, HUSSEIN A S, KHALED M, et al. ASIC and FPGA comparative study for IoT lightweight hardware security algorithms [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2019, 28 (12), DOI: 10.1142/S0218126619300095.
- [13] SIRIPALA P J, SEKERCIOGLU Y A. A generalised solution for generating stepper motor speed profiles in real time[J]. Mechatronics, 2013, 23(5): 541-547.
- [14] 李鹏,鲁华,郑文鹏,等. 基于模型变换的混合式步进电机静态特性仿真分析方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4737-4745.
- [15] JABEEN S, SRINIVASAN S K, SHUJA S, et al. A formalverification methodology for FPGA-based stepper motor control[J]. IEEE Embedded Systems Letters,2015,7(3):85-88.
- [16] 马壮,方一鸣,赵晓东,等. 基于参数优化的连铸结晶器振动位移系统复合控制研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):288-297.
- [17] 李云梦,关丽敏,王会峰,等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):66-73.

作者简介

刘杰,硕士研究生,主要研究方向为电机驱动与控制技术。

E-mail:liujie_199603@163.com