

文章编号: 1672-8785(2021)05-0018-10

基于连续变焦的多电机协同 控制架构设计

刘纪洲 许 静 张 倩

(中电科光电科技有限公司, 北京 101300)

摘 要: 超长焦距连续变焦系统的多电机协同控制方案是保证成像质量及效果的一个重要设计环节。分析了某型连续变焦热像仪的控制指标和需求指标, 然后以指标数据作为理论依据详细讨论了多种控制方案的优缺点, 并根据结果设计了一种基于 SOPC 片上系统的多电机协同控制方案。详细阐述了该方案在连续变焦系统中的具体设计及软件实现方法。该设计能够在单一 FPGA 上实现多组元协同控制, 其时间和位置精度分别达到 $0.01 \mu\text{s}$ 级和 0.01 mm 级, 有效保证了超长焦距连续变焦系统的控制需求。

关键词: 连续变焦; SOPC 多电机协同控制

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.05.004

Design of Multi-Motor Cooperative Control Architecture Based on Continuous Zoom

LIU Ji-zhou, XU Jing, ZHANG Qian

(CETC Electro-Optics Technology Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: The multi-motor cooperative control scheme of ultra-long focal length continuous zoom system is an important design link to ensure the imaging quality and effect. In this paper, the control and demand indexes of a continuous zoom thermal imager are analyzed, and the advantages and disadvantages of various control schemes are discussed in detail based on the index data. In addition, according to the results, a multi-motor cooperative control scheme based on SOPC system-on-chip is designed. The specific design and software implementation method of the scheme in continuous zoom system are described in detail. The design can realize multi-component cooperative control on a single FPGA. The time and position accuracy can reach $0.01 \mu\text{s}$ level and 0.01 mm level respectively, which effectively ensure the control requirements of the ultra-long focal length continuous zoom system.

Key words: continuous zoom; SOPC multi-motor cooperative control

收稿日期: 2020-10-27

作者简介: 刘纪洲(1985-), 男, 河北人, 高级工程师, 主要从事热像仪系统设计研究。

E-mail: liujizhou307@126.com

0 引言

由于在视场转换中像面位置稳定, 且便于快速、准确地追踪和测量目标, 连续变焦系统近年来广泛应用于制导、监控、红外前视以及目标探测与跟踪等领域。随着探测需求的增加, 该系统逐渐向长焦距、大口径等方向发展。与一般的连续变焦系统相比, 超长焦距系统的运动组元较多, 光学口径较大, 且运动距离较长。这些特性不仅增加了光学设计的复杂性, 而且还增加了电机运动控制的难度(如控制变量增加、积累误差易于产生等)。本文针对超长焦距的控制问题进行了多运动组元电机协同控制的需求分析, 并考虑了多种控制方案的优缺点, 最终设计了一种基于 SOPC 片上系统的多电机协同控制方案, 并对其进行了实现和验证。

1 连续变焦多电机协同控制需求分析

某两组元连续变焦光学镜组的运动曲线如图 1 所示。在该系统中, 两个组元的移动距离分别为 197.04 mm 和 62.5 mm。光学曲线数据一般由 200~500 个数组构成。移动过程中的其他曲线数据由相邻点的线性差值构成。电机运行过程可以细分为分段线性运动。一般连续变焦系统的全行程变倍时间需求约为 10~20 s, 因此两组元的运动控制时间同步周期须在 20~100 ms 之间。

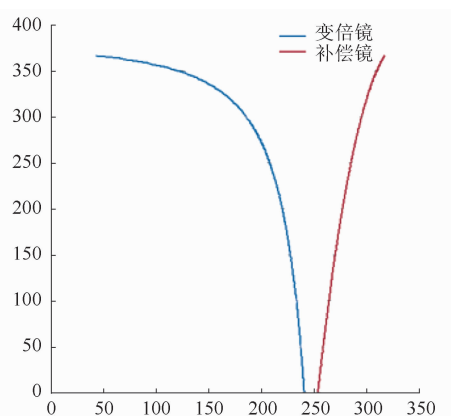


图 1 某两组元连续变焦光学镜组的运动曲线

根据光学对位置敏感度的仿真结果, 两组元光学独立镜片的位置控制精度应达到 0.02

~0.03 mm, 以保证成像质量。对比步进电机和直流电机控制系统可知, 步进电机能够更好地按预定速度和位置运行, 且位置控制精度更高。因此, 系统选用两个步进电机分别控制两组元光学镜组。

根据上述分析选定了步进电机控制系统的相关机械参数(省略力学参数), 具体如下: 步进角和步距分别为 1.8° 和 0.0254 mm; 编码器为 400 线 AB 相; 控制参数为双极性和 32 细分。

1.1 步进电机控制需求

由于本方案选择步进电机, 对其控制要素进行了需求分析。步进电机控制采用 TH-B6128 专用驱动芯片。该芯片自动完成细分驱动, 而控制器仅需提供步进脉冲和旋转方向信号。另外还可配置驱动电流、电机使能控制等辅助控制能力。在驱动芯片控制步进电机运动的过程中, 步进脉冲应满足电机运动的力学特征(即需要限制最大响应频率、加减速的加速度以及突变频率等), 防止电机在运行过程中产生丢步、滑步和堵转等现象。

结合本系统设计, 提出了以下几项步进电机控制指标: 最大响应频率为 2200 步/s(70400 微步/s); 最大加速度为 22000 步/s²(704000 微步/s²), 实际控制时根据负载和推力随速度变化; 突变频率为 100 步/s。

1.2 热像仪的步进电机协同控制功能需求

通过分析热像仪使用、调试和标定过程的需要, 对步进电机的协同控制功能提出了以下需求:

(1) 连续变倍过程: 多组独立步进电机按预定曲线同步工作。在运动过程中保证多组元的绝对位置和相对位置精度, 并可根据需要调节运动速度。

(2) 视场定位过程: 多组元以最大响应频率移动到指定位置。在运动过程中不考虑多组元的相对位置, 并可对环境需要限制最大响应频率和加速度。

(3) 连续变倍曲线模式切换: 可根据用户

需要调节连续变倍曲线特征(如焦距的线性、等比变化等)。

(4)温度补偿及曲线修正:根据环境、物距及其他应用条件的变化对多组元曲线进行线性或非线形修正,以保证连续变倍过程中成像清晰。

(5)电机的上电复位及零位标定:上电后或标定过程中通过位置传感器来复位电机位置,并建立位置坐标系。

(6)故障检测及异常处理:检测电机运行故障,并上报异常状态的错误信息;根据编码器信号对运行过程中可能出现的丢步、滑步现象进行检测并驱动电机加以补偿。

1.3 多电机协同控制软件架构需求

电机控制软件架构可分为一体化集成控制型和模块化分立控制型。其中,一体化集成控制型将功能与电机控制需求紧密结合,并按预定位置和速度运行。其特点是程序执行效率高、硬件需求低。但它具有对控制需求的适应能力有限、不便于实现复杂功能以及在不同光机结构间的移植能力较弱等缺点,因此无法满足超长焦热像仪光机控制的需要。而模块化分立控制型则将功能控制需求与电机控制需求分开实现,并通过两者之间的接口来实现系统控制。其特点是适应能力强、便于实现复杂系统和移植程序,因此可满足超长焦热像仪的应用需要。但它对硬件计算能力的要求较高,导致电机控制器实现的复杂程度远高于一体化集成控制型。

在模块化控制中,功能控制与电机控制之间的接口可分为增量型和绝对型。在步进电机控制系统中,增量型代表速度接口,其特点是电机控制相对简单,适合运动姿态控制。但它容易引起位置积累误差,不利于位置闭环控制。绝对型代表位置接口,其特点是位置控制准确,有利于位置闭环,而不利于运动姿态控制。在热像仪光机系统中,绝对位置是机电控制系统最需要保证的要素。因此,本文选择位置接口作为模块化控制的中间变量。模块化分立控制型软件架构如图2所示。

2 多电机协同控制软硬件实现方案的选择与设计

根据多电机协同控制软件架构的需求对各模块的实现方案进行了分析和选择。

2.1 节拍同步模块

根据前面的分析,节拍同步周期应为20~100 ms。在位置信息流完全相同的情况下,通过调节节拍周期即可改变电机的运行速度;细化位置信息流并减小节拍周期,有利于提高多电机协同运行的匹配精度。由于信号周期在毫秒级以上,利用嵌入式C语言或硬件描述语言均能有效生成该信号并提供足够高的精度,因此在实现上没有特别指向性。

2.2 功能控制模块

根据1.2和1.3节中的分析,由于需要对位置曲线进行复杂的多变量线性或非线形计算,功能控制模块需存储大量位置数据并进行

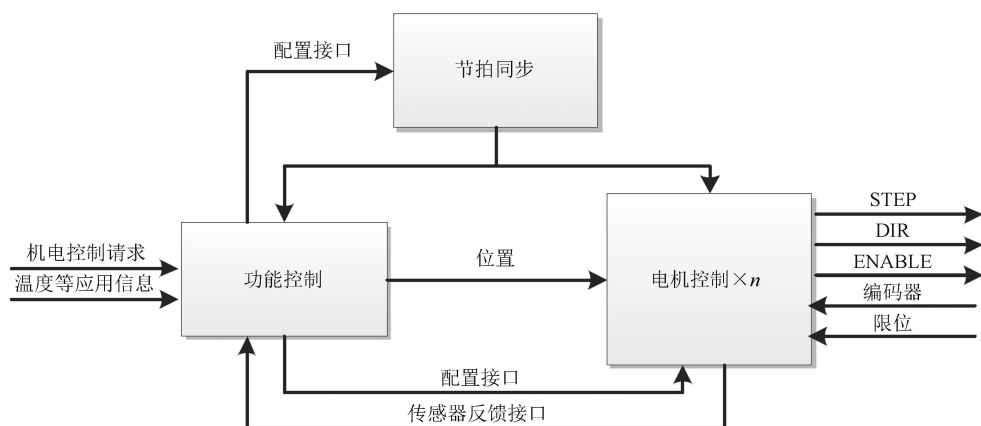


图2 模块化分立控制型软件架构

通讯和外部信息收集, 因此它需要具有灵活的复杂算法实现能力。但由于数据更新速率较低(与节拍周期相同), 利用嵌入式 C 语言可较便捷地实现该模块。通常的 ARM、DSP 及其他 MCU、嵌入式软核处理器均能实现算法并保证实时性。

2.3 电机控制模块

从算法上来看, 根据前面描述的电机参数、控制指标及模块化接口需求, 该模块需要根据总行程、曲线数组和电机步距来计算节拍内的驱动微步数以及电机每一微步的速度期望值, 并在最大响应频率、最大加速度以及突变频率的限制下, 确定最终的电机控制步速并生成步进电机驱动脉冲和方向信号。

第 $k+1$ 步的期望速度为

$$v_{k+1} = \frac{T - \sum_{i=0}^k \left(\frac{1}{v_0} + \frac{1}{v_1} + \dots + \frac{1}{v_k} \right)}{n - k} \quad (1)$$

式中, T 表示节拍时间, n 表示节拍内的微步总数, v_k 表示第 k 步的速度。

步进电机加速度与速度的关系为

$$v_{a(k+1)} = v_k \pm a \frac{1}{v_k} \quad (2)$$

式中, a 为电机的理论加速度。

第 $k+1$ 步的最终速度为

$$v_{final(k+1)} = \begin{cases} \min(v_{\max}, \min(v_{k+1}, v_{a(k+1)})), & a \geq 0 \\ \min(v_{\max}, \max(v_{k+1}, v_{a(k+1)})), & a < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_{\max} 为电机的最大响应频率。

从式(1)~式(3)中可以看出, 该计算逻辑明确, 不存在复杂跳转。利用嵌入式 C 语言或硬件描述语言均可实现算法, 但前者相对容易。

从脉冲周期准确性上来看, 根据电机需要的最大响应频率可得脉冲周期为 $14.2045 \mu\text{s}$; 根据式(2)可得下一个减速脉冲周期为 $14.2065 \mu\text{s}$, 两者相差 $0.002 \mu\text{s}$ 。考虑到电机 32 细分控制可以提升速度的稳定性和容错性, 脉宽精度也应至少达到 $0.02 \mu\text{s}$ 级, 即脉冲宽度分辨率和准确性达到 50 MHz 水平。根据实现平台的特征, 硬件描述语言可以完全保证脉冲周

期的准确性。而嵌入式 C 语言的实现则要求具备可预加载的定时器硬件, 否则通过定时器中断或轮询来重新配置定时器数据时就无法保证脉宽的控制精度和稳定性。因此, 普通的 MCU 不能保证生成脉冲周期的准确性要求。

从计算实时性上来看, 如果采用嵌入式 C 语言结构, 那么单步进电机的最大脉冲频率为 70.4 kHz, 相应 AB 相位四倍编码脉冲频率为 17.6 kHz, 总脉冲触发量为 88 kHz。考虑三元步进电机控制系统及其他必要的通讯、传感器采样、应用服务程序计算等需求, 总脉冲触发量达到 300 kHz 量级。此外, 系统时钟需要达到 150~600 MHz 才能满足单次中断触发 500~2000 时钟的计算处理周期的实时性需求。如果采用硬件描述语言, 那么由于各模块独立并行执行、相互不影响, 仅需计算最高工作频率和最复杂单电机的实时性需求。如果采用前述的 50 MHz 工作主频, 那么步进电机脉冲最短周期为 $50 \text{ MHz} / 70.4 \text{ kHz} = 710$ 时钟。在该时钟周期内, 能够满足式(1)~式(3)的计算需求。因此, 基于 FPGA 的硬件描述语言在实时性方面表现最好, 基于嵌入式的 C 语言对硬件主频有较高要求, 同时存在一定的软件实时性风险。

综上所述, 为保证电机控制算法的灵活性以及控制波形的准确性和精度, 本文采用基于 SOPC 的系统来实现方案。其中, 功能控制模块由软核 CPU 实现; 节拍发生器和电机控制模块由硬件描述语言实现并被封装成自定义 IP, 且由软核 CPU 通过 Avalon 总线调用。软件实现框图和硬件结构图分别如图 3 和图 4 所示。

3 基于 SOPC 的多电机协同控制架构的方案实现

采用标准的可配置周期计数器来实现 SOPC 基架构中的节拍发生器。该实现过程简单, 本文不再描述。功能控制模块负责电机初

始化、零位定标、光机运动曲线位置坐标的生成、环境和误差补偿、故障检测等。这些功能与光机电结构形式紧密相关，需要根据具体应用的变化不断调整。本文也不详述其实现过程。作为 SOPC 多电机协同控制架构中的软核 CPU 自定义 IP，电机控制模块的功能与接口设计直接影响实现方法和难易程度。算法实现的准确性直接影响电机控制的性能，是该架构中的重点。本文将详细论述电机控制自定义 IP 的实现方法。

3.1 总体结构设计

电机控制自定义 IP 可根据电机数量配置多个实例。它们在 CPU 的控制和节拍器的同步下各自并行工作，其具体结构如图 5 所示。其中，总线接口负责自定义 IP 与嵌入式软核处理器之间的通讯，并完成自定义 IP 的功能控制、数据配置和反馈。另外还加入中断控制辅助嵌入式软核处理器来快速响应状态反馈。传感器反馈模块用于完成限位开关和接收编码器反馈数据，从而实现编码器编码及自动边沿

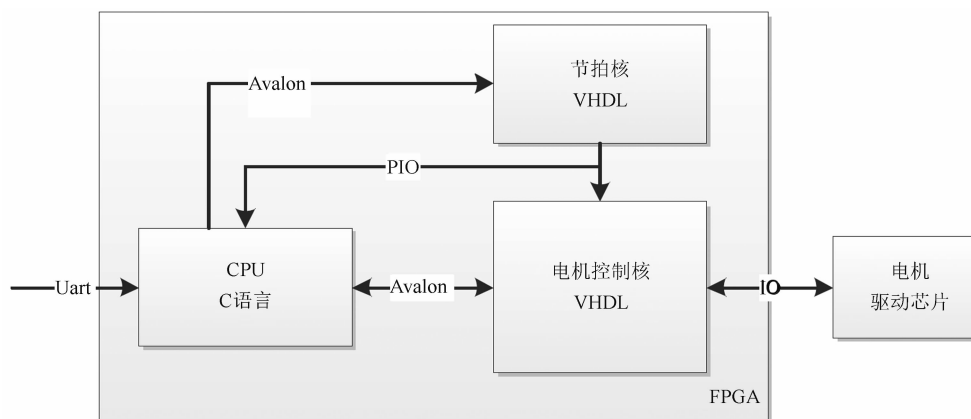


图 3 基于 SOPC 的系统软件实现框图

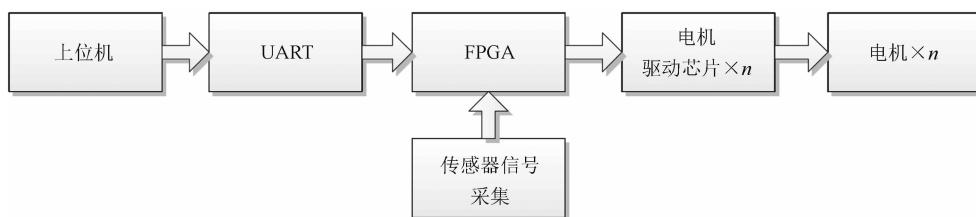


图 4 基于 SOPC 的多电机协同控制架构的硬件结构

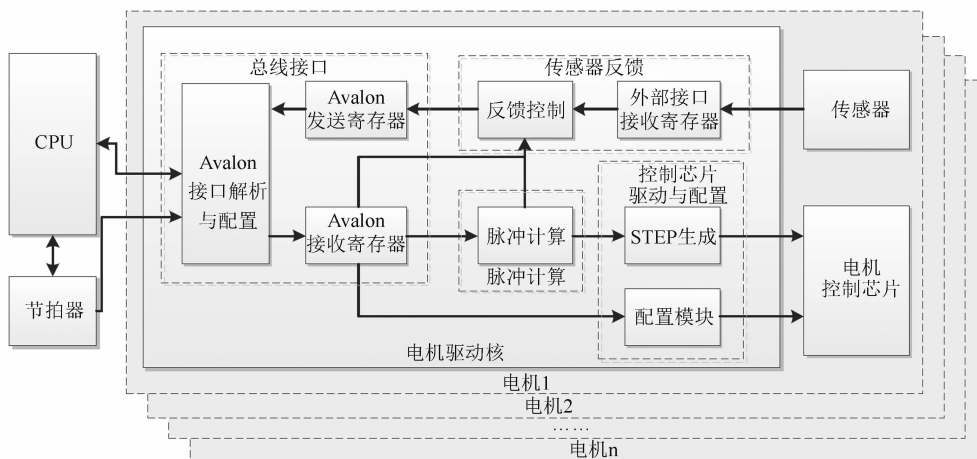


图 5 电机驱动核架构

捕获。脉冲计算模块用于计算步进电机位置闭环控制的脉冲数量、宽度及方向。电机控制芯片驱动配置接口负责根据计算结果生成 STEP、DIR 以及电机控制必需的其他配置信号, 并负责对步进电机的当前实际位置进行计数。

在模块协同运行过程中, 可将整个过程看成在规定时间内进行受最大速度、最大加速度、最大突变速度限制的位置闭环控制, 即在下一节拍到来时刻, 脉冲计算模块在限制条件下尽可能将电机驱动到指定位置。在运行过程中, 脉冲计算模块能否在给定时间点将电机驱动到预定位置, 取决于功能模块发送的节拍位置数据流是否满足电机运动的力学特征。与预定位置之间的位置差将累计到下个节拍继续执行, 直到位置闭环完成为止。该模块实时监控电机的运行状态, 对超出物理极限的运动请求反馈超速或节拍点位置控制偏差过大的警告, 便于功能模块及时发现控制曲线的不合理位置并作出相应调整。

3.2 交互时序设计

交互时序设计是避免硬件描述语言出现数据读写冲突、产生竞争冒险现象以及出现计算异常的有效手段。它可分为节拍信号交互和

SETP 脉冲计算交互两个等级设计。

在节拍信号交互时序设计中, CPU 可在任意时刻读取和写入各状态寄存器数据。但针对电机协同运行数据(如下一节拍运动位置、电机运行参数等), 寄存器均要求 CPU 在节拍信号(占空比 50%)下降沿后依次写入。自定义 IP 在节拍信号上升沿统一锁存并更新至脉冲计算模块, 以免部分数据更新造成电机错误动作。对当前运动位置、编码器等状态寄存器的复位或置位操作应尽可能在电机停止状态下执行, 以免寄存器读写冲突造成运行状态不受控。该时序交互主要由 CPU 控制参数计算时间来保证。

SETP 脉冲计算交互时序负责脉冲计算、生成以及位置更新等各个环节的使能, 从而保证数据读写不冲突和数据执行有效。主要状态信号时序如图 6 所示。其中, STEP 为脉冲信号, DIR 为脉冲方向信号, STOP 为电机停止信号, CAL_EN 为计算使能信号。

SETP 脉冲交互控制可分为图 7 所示的几个时间段。其中, t_1 约为 2 个 CLK, 在这段时间内更新当前步的周期时钟计数。根据当前位置信息判断电机驱动状态。位置差为 0 时将停

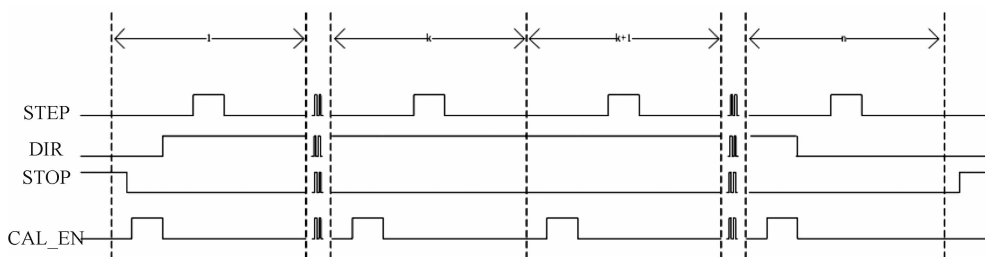


图 6 状态信号时序图

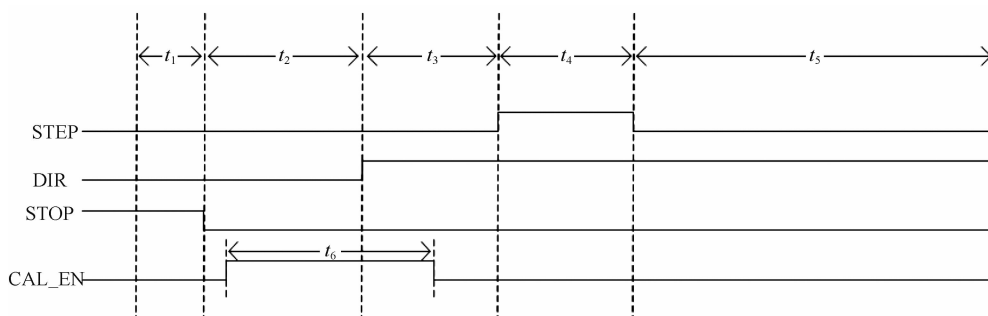


图 7 单步拆解时序图

止信号置“1”，否则将其置“0”。 t_2 为电机相关硬件的初始化时间，即上电信号跳变点与方向信号跳变点的时间间隔。 t_3 为电机方向信号跳变点与脉冲信号跳变点的时间间隔，由电机驱动芯片参数决定。 t_4 为脉冲信号高电平时间，由电机驱动芯片参数决定，在STEP下降沿更新电机位置。 t_5 为根据计算结果变长的时间。 t_6 为脉冲计算时间，与 $t_2 \sim t_5$ 并行发生。因此，驱动核在理论上能达到的最短脉冲周期为

$$t_{\min} = \max(\sum(t_1 + t_2 + t_3 + t_4), t_6) \quad (4)$$

通过对比电机参数可知， t_{\min} 值远小于电机最大响应频率的周期。

3.3 脉冲计算模块设计

脉冲计算模块的设计需求是，在下一节拍到来时刻，该模块在限制条件下尽可能将电机驱动到指定位置。它具有明显的多电机协同运动特征，其脉冲计算步骤如下：

(1)根据式(5)计算该脉冲的期望周期计数。

$$\begin{aligned} c_{v(k+1)} &= \frac{c_{t(k+1)}}{n-k} = \frac{c_t - \sum_{i=0}^k (c_{v(0)} + c_{v(1)} + \dots + c_{v(k)})}{n-k} \\ &= \frac{c_{t(k)} - c_{v(k)}}{n-k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $c_{v(k+1)}$ 表示第 $k+1$ 步的期望速度的周期时钟计数， n 为单位节拍内的位移量， c_t 为节拍周期的时钟计数， $c_{t(k)}$ 为第 k 步时剩余节拍周期的时钟计数。

期望周期计数可以理解为该节拍的平均速度。由于实际速度受多变量限制，且节拍平均速度也实时改变，因此需要每微步计算一次。在计算过程中，将计算变量设置为有符号数(符号位代表运动方向)，以便进行自适应驱动计算。

(2)根据期望周期计数与当前周期计数的差值、电机位置等信息判定加减速状态及方向，并根据式(6)计算该状态下电机参数限制的速度。

$$c_{v(k+1)} = \frac{c_{v(k)} \times f^2}{f^2 \pm a \times c_{v(k)}^2} \quad (6)$$

式中， f 为电机驱动IP核的工作频率， a 为电机驱动加速度。状态对应关系在此不作描述。

(3)根据式(3)确定最终执行周期数，得到符合电机力学特征且尽可能向CPU期望速度逼近的脉冲周期计数。

脉冲计算方法及电机运动控制框图如图8所示。可以看出，控制IP可根据位置差和当前电机运行状态自动执行脉冲计算，并通过计算自动完成起步、加速、减速、停止或反向驱动过程。

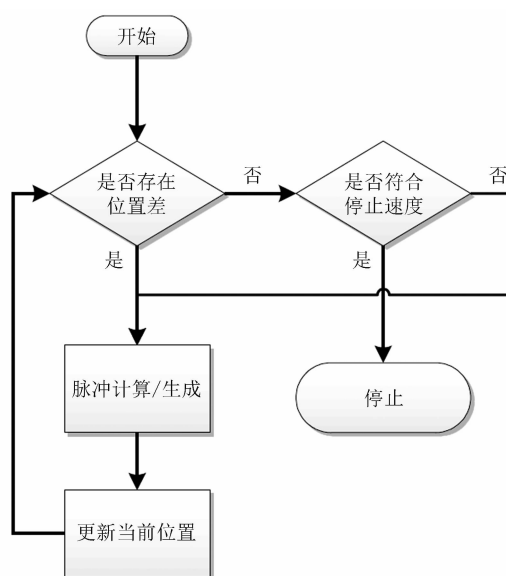


图8 脉冲计算方法及电机运动控制框图

由于协同控制脉冲计算模块的算法原理是速度及其变化受限的位置环在每个节拍点不控速，因此只能通过功能控制模块发送的节拍数据流提前降低电机的运行速度，最终使其停止运行。否则在高速运行过程中突然停止位置更新，位置环将会产生较大的位置振荡和放慢收敛速度，甚至有出现等幅振荡的可能。该问题在多电机协同控制的停止运行阶段(如连续变焦过程中断停止、焦距置位)出现。

图9所示为不限制速度时对电机置位2000微步的实际波形。信号依次为节拍同步信号、STEP脉冲和DIR方向。驱动脉冲在到达2000步位置时判断位置到达，由于速度不满足停止条件而返回脉冲计算模块中自动进行减速。减

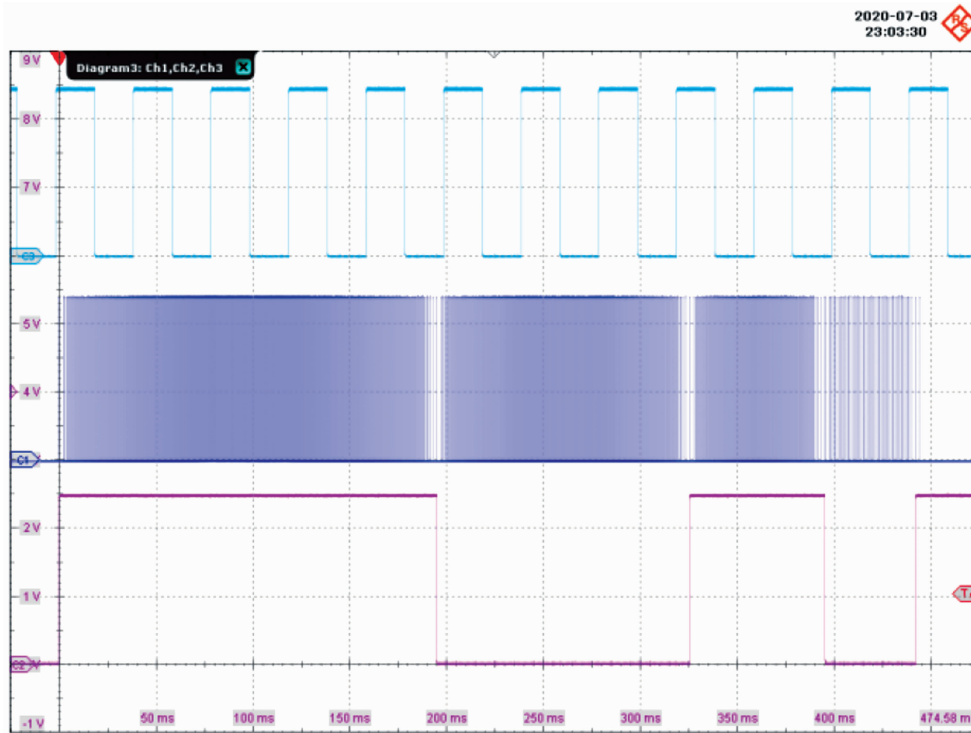


图 9 电机多次振荡波形图

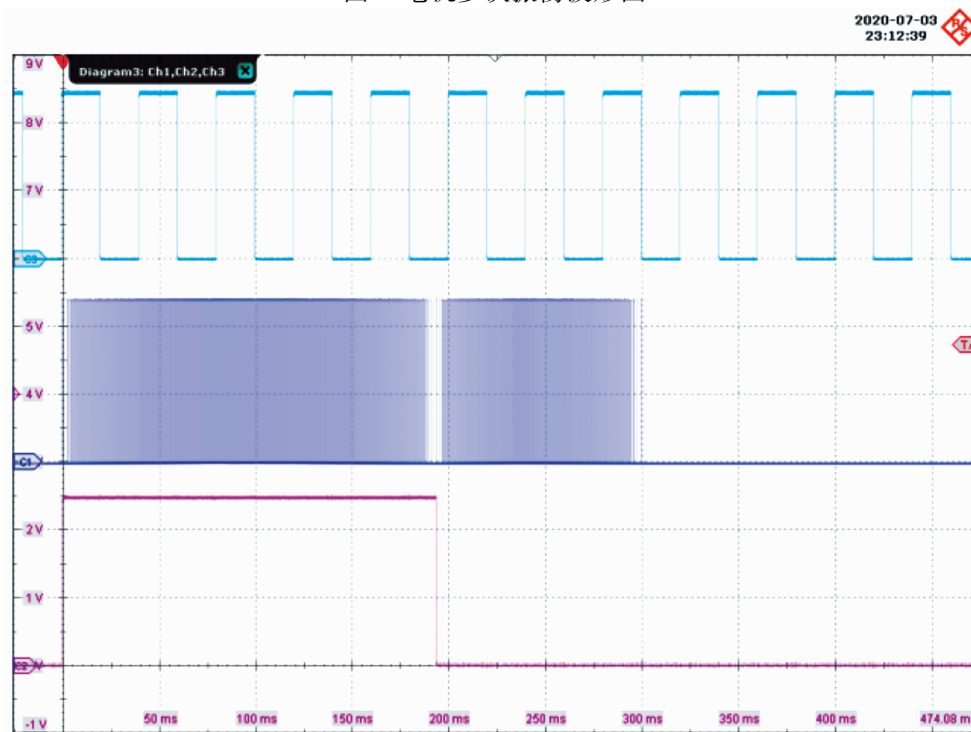


图 10 电机单次振荡停车的实际波形图

速后自动转向返回目标位置, 在返程时根据计算加速到达第二次位置点。由于依旧不符合停止条件, 多次重复该循环减速过程, 直至在位置点满足停止速度为止。

为解决电机稳定停止问题, 需要在它将要抵达最终目标时提前降速。本文引入停车控制信号标识, 表明功能控制模块需要电机抵达本节拍发送位置时的运行速度降为 0, 而不再需

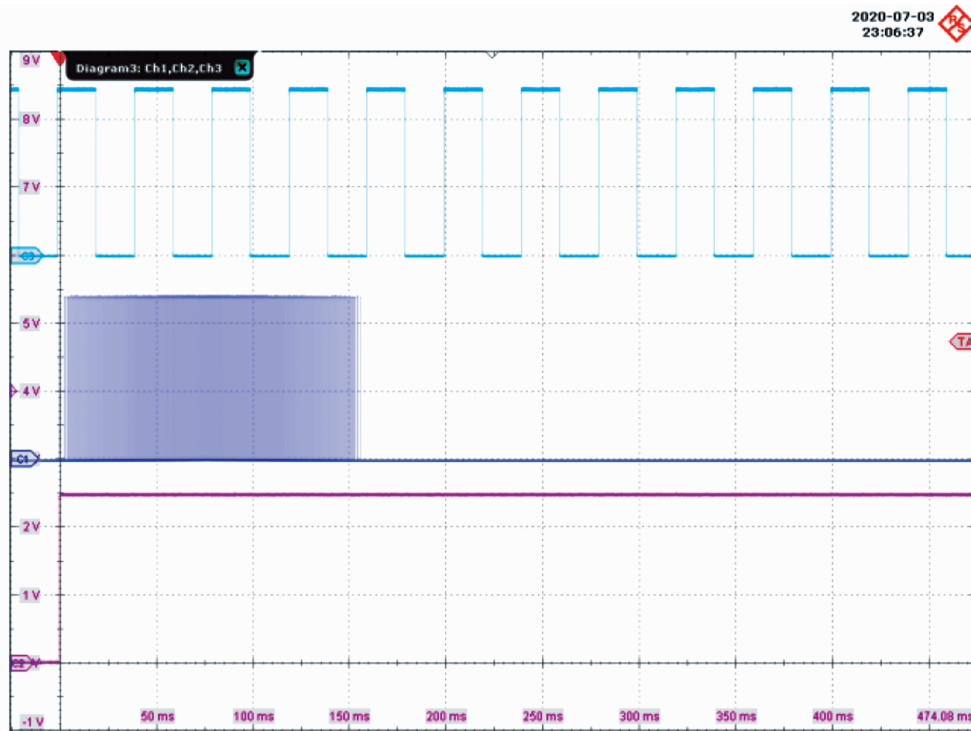


图 11 电机无振荡停车的实际波形图

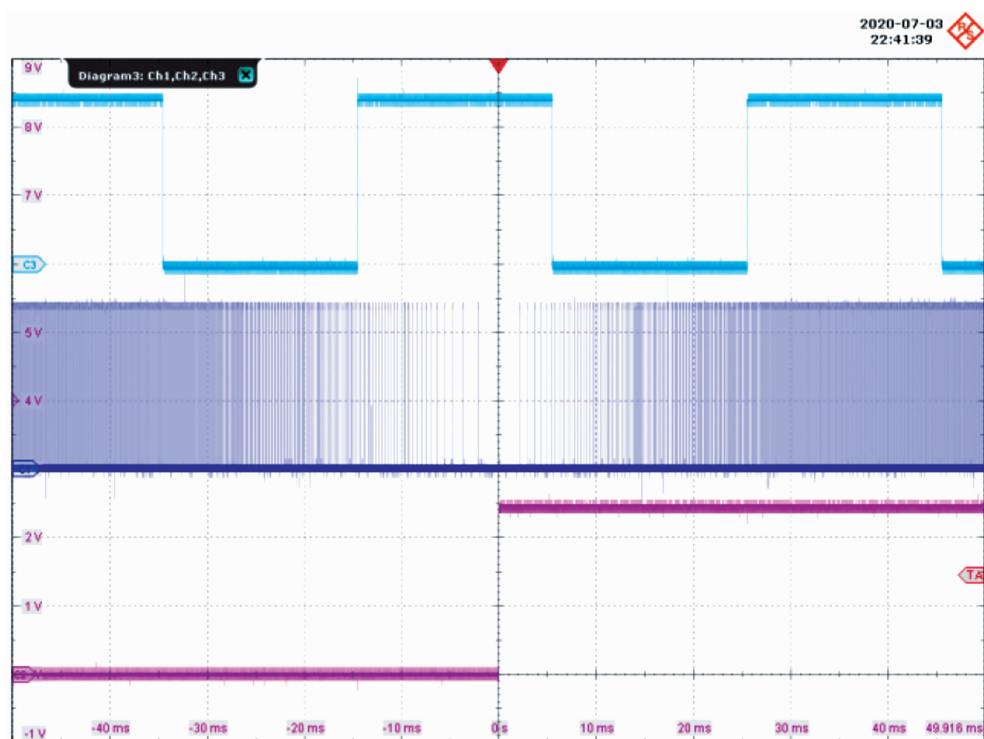


图 12 电机自动反向波形图

要它按节拍时间的要求来运动。在实现过程中，由于实时计算停止减速曲线的难度较大，因此结合现有电机运动过程框架，采用分段标记减速目标值的方法来实现自动降速，具体如

下：在距离停止目标点 A_n 微步时，控制电机最大响应频率为 S_n 。在减速停车过程中，脉冲周期仲裁算法控制步进电机减速向 S_n 靠近。通过多组 A_n/S_n 的控制，最终使电机平稳停

车。在实际控制中,不再进行式(5)的计算,而是通过位置关系对期望速度直接赋值,且后续计算不变。

引入停车控制信号后,当剩余周期数可在最大减速度的控制下停车时,控制脉冲可以无振荡停车。当剩余周期不能满足最大减速度停车需求时,可以保证在单次振荡后停车。这样提高了停车的稳定性,并减少了电机置位稳定所用的时间。图 10 和图 11 分别为周期不够时单次振荡停车和无振荡停车的实际波形图(信号顺序见图 9)。

3.4 设计结果验证

通过 CPU 向自定义 IP 发送各种测试应力。如图 12 所示,电机驱动核可在单节拍内自主完成加速、减速、减速反向等运动。结果表明,成像清晰稳定。

4 总结

根据指标计算结果及控制模型的特点,本文根据模块化分立控制的功能特性将电机协同控制分为节拍同步、功能控制和电机控制三个模块,分别保证了时间同步、算法实现和电机驱动控制等功能。根据多次试验验证的结果,

该设计能够实现 $0.01 \mu\text{s}$ 级时间精度和 0.01 mm 级位置精度的多电机协同控制。本文将位置信息作为控制传递接口。针对多种算法控制变化,只需将其演算成位置信号即可驱动控制,从而充分保证了控制算法的多样性。此外,驱动控制采用自定义 IP 核来实现,可操作性更好、控制电机类型多样,可扩展接口便于后续更新与维护。本文提出的控制架构以连续变焦为起点,可将其扩展至更多电机控制领域,因此对电机控制研究具有重要意义。

参考文献

- [1] 王啸腾. 制冷型红外双波段连续变焦光学系统设计 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [2] 白翔. 新型高精度变焦系统设计 [J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(2): 21-24.
- [3] 李红燕, 魏世民, 廖启征, 等. 基于 STM32 的多电机协同控制系统设计 [J]. 机电产品开发生与创新, 2012, 25(5): 120-122.
- [4] 赵小强. 基于 FPGA 的步进电机定位控制系统的设计 [J]. 现代电子技术, 2007, 14(10): 55-57.