

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.011

# TMS320F28379D 在双电机同步控制中的应用

殷健翔, 马钧华

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**在双电机同步控制中,需要传递电机的关键控制参数来保持其同步运行,利用普通的通信总线进行信息传递会有延时,影响同步精度。为了实现双电机高精度同步控制,课题组提出基于双内核的 TMS320F28379D 芯片来实现双电机同步控制的方法。首先,设计了双内核 CPU 的 IPC 通信,避免信息交换的延时;然后,利用芯片的 SDFM 模块完成电流检测,简化了电流检测电路;最后,针对电机运行的不同场景,提出了不同的控制策略。通过实验证明该方法可以实现 2 台伺服电机的同步控制,并可预见的是利用该芯片可实现多至 4 台电机的同步运行。

**关键词:**永磁同步电机;双电机;磁场定向控制;同步控制;IPC

中图分类号:TM351;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)04-0056-07

## Application of TMS320F28379D in Synchronous Control of Dual Motors

YIN Jianxiang, MA Junhua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In dual motor synchronous system, it is necessary to transfer the key control parameters to keep its synchronous operation. However, using the common communication bus to transmit information will cause transmission delay, which will affect the synchronization precision. In order to realize the high precision synchronous control of dual motors, a method to realize the synchronous control of dual motors based on TMS320F28379D chip with dual CPUs was presented. Firstly, the IPC communication of dual CPUs was designed to avoid the delay of information exchange. Then, the current detection circuit was simplified by using SDFM module of the chip. Finally, different control strategies were proposed for different scenarios of motor operation. Experiments show that this method can realize synchronous control of two servo motors. And it is foreseeable that the chip can be used to achieve up to 4 motor synchronous operation.

**Keywords:** PMSM (Permanent Magnetic Synchronous Machine); dual-motor; FOC (Field-Oriented Control); synchronous control; IPC (Inter-Processor Communication)

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因为其结构简单、运行效率高、运行可靠性好等优点,被广泛应用在高性能伺服控制场合。在某些多台电机协同运行的工作场景,如轴报业印刷等机械中,对多电机同步控制精度有很高要求。为了实现更高水平的工业控制,对于高精度的电机同步控制的研究非常具有意义。

目前对于多电机同步控制的研究主要集中于系统结构、同步策略和同步环控制器的实现上。现有研究的控制方法主要有并行控制、主从控制、交叉耦合控制<sup>[1-3]</sup>等。为了实现多电机同步控制,目前多使用工业

现场总线来确保电机之间通信的可靠性。文献[4]~[6]提出基于 EtherCAT 和 CAN 协议实现了多电机控制,优点是参与同步的电机数量没有限制,可以有数十台,但 Sercos 或 EtherCAT 等同步通信总线造价较为昂贵,且实现同步方式比较复杂。课题组研究利用高性能的单一芯片 DSP 实现 2~4 台电机同步。

TI 公司的 C2000 系列 TMS320F28379D 芯片具有 2 块相对独立的 CPU 内核,可分别控制一套伺服控制系统。此外,在 2 块 CPU 之间具有共享内存区域,可通过共享内存的进程间通信方式(IPC)交换电机运行控制信息,实现双电机的高精度同步伺服控制<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2021-01-07;修回日期:2021-04-05

第一作者简介:殷健翔(1996),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为多电机同步控制。E-mail:616947132@qq.com

# 1 双电机控制原理

## 1.1 PMSM 矢量控制数学模型

为了简化分析,选择数学和物理模型清晰的表贴式永磁同步电机(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)作为分析对象。PMSM 是非线性、多变量、强耦合的系统,若想实现高效控制,需要将其三相电流进行解耦。首先将三相交流变量变换成两相相互垂直的变量,其次让该两相坐标系随转子同步旋转,使定子交链的磁链不随转子旋转角度而变化。该模型基于恒幅值变换理论,利用 CLARKE 和 PARK 变换将 PMSM 三相交流电变换至  $d-q$  轴进行分析。略去推导过程,给出在  $d-q$  轴下的 PMSM 的数学模型:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & -\omega \\ -\omega & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $d-q$  为转子同步坐标系; $u_d, u_q$  为变换后  $d-q$  轴定子相电压; $i_d, i_q$  为变换后  $d-q$  轴定子相电流; $\omega$  为电机转速; $\Psi_d, \Psi_q$  为变换后定子  $d-q$  轴总磁链。

其中磁链表达式表示为:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \Psi_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Psi_f$  为永磁体磁链; $L_d, L_q$  为定子绕组自感。

求得电机电磁转矩为:

$$T_e = \frac{3}{2} N_p [ \Psi_f i_q - (L_d - L_q) i_d i_q ] = \frac{3}{2} N_p \Psi_f i_q \quad (3)$$

式中  $N_p$  为电机极对数。

SPMSM 的交直轴的电感相同,则转矩简化为式(3)。可以看出电机转矩值和定子电流  $i_q$  成正比。在电机控制过程中,为获得最大转矩,采取  $i_d = 0$  进行控制,再通过 SVPWM 变换得到逆变器的占空比,实现永磁同步电机的高性能控制。

磁场定向控制(Field-Oriented Control, FOC)具有精准高效的控制效果,因此在 PMSM 的高性能控制中被广泛利用<sup>[8]</sup>。课题组采用该控制方法,控制框图如图 1 所示。

图 1 中,为了控制永磁同步电机,共有 3 个闭环控制过程:最外层为位置环,中间为速度环,最内层为电流环。本实验中电机实际位置由光电编码器测得,电机实际转速由测速模块根据光电编码器数值计算得到。电流作为控制环的最内环,频率最高,速度环和位置环作为外环,控制频率较电流环低。在本实验实际控制中,电流环的控制频率为 10 kHz,速度环和位置环的控制频率为 1 kHz。

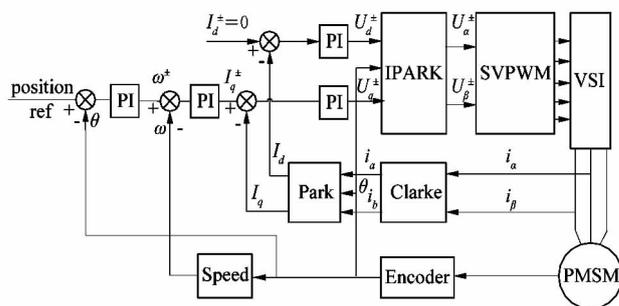


图 1 磁场定向控制框图

Figure 1 Block diagram of FOC control

## 1.2 TMS320F28379D 芯片

德州仪器的 DSP 芯片计算能力强大,外设丰富,被广泛应用于电机伺服控制当中<sup>[9]</sup>。TMS320F28379D 双核芯片时钟频率高达 200 MHz,有浮点运算单元(FPU)和辅助计算单元(CLA),每块 CPU 主存储空间大小相同。此外,芯片设计了特定的共享内存区域,可用于 2 块 CPU 之间进行信息交换,即 IPC(Inter-Processor Communication)通信。

在芯片内有 2 块内存区域可完成 IPC 通信:其中一块内存区域称为 MSG RAM(Message RAM),由 2 个 2 KiB 的空间构成,每块 CPU 对其中一个 RAM 空间具有读/写权限,对于另一个 RAM 空间仅有只读权限;另一块内存区域是由 16 个大小为 8 KiB 的内存块构成的 Global Shared RAM 区域,在程序中可设定每段内存块由哪个 CPU 进行控制,该 CPU 对该区域有读写权限,另一块 CPU 对于该区域仅有只读权限<sup>[10]</sup>。这 2 块内存区域的读写规则可以保证在信息交换过程中,数据不会被意外更改。利用 Global Shared RAM 区域完成 IPC 通信可交换更多信息且更为灵活,因此课题组采样该内存区域完成 IPC 通信。芯片 IPC 模型如图 2 所示。

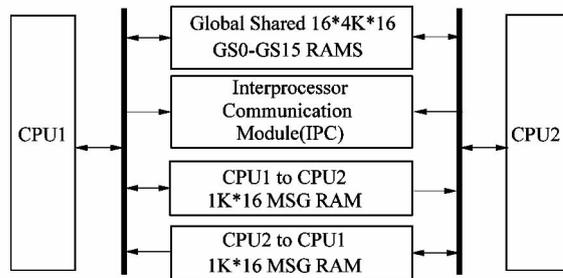


图 2 芯片内部通信模型

Figure 2 Model of IPC

从图 1 可以看出,在永磁同步电机控制过程中,若能确保控制芯片同步进行控制算法运算,包括:相同的

算法、严格同步的位置和/或速度指令、严格同步的控制中断时刻,即可有效控制电机同步运行。如果能提供如位置角  $\theta$ 、速度  $\omega$ 、电流等实时信息,还可以协调双同步电机的负载分配、同步精度监测和同步跟随等多种同步运行控制策略。IPC 模块是共享内存的交流方式,采取 IPC 通信进行双电机伺服控制的信息交互,可有效避免在芯片外进行通信交流的延时。

实验硬件平台如图 3 所示。其中(a)图中,①为 TMS320F28779D 的 LaunchPAD,②和③为 2 块功率驱动板,各自驱动一台伺服功放,通过排线连接 DSP 控制板,④为 SDFM 电流检测板。图(b)为实验所用的 2 台 PMSM。

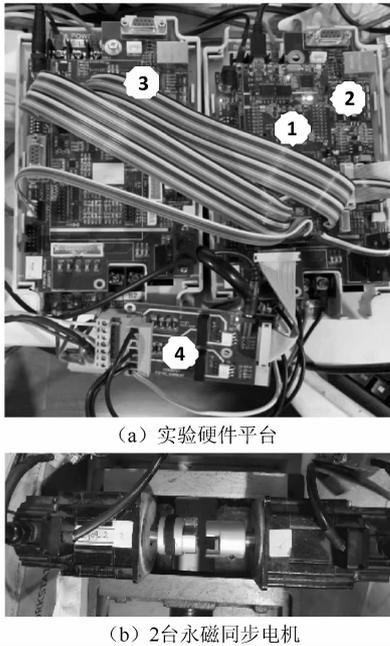


图 3 实物连接图  
Figure 3 Physical connection diagram

## 2 电流检测

在磁场定向控制中,精确的电流测量是提高系统控制精度、稳定性和响应速度的重要手段。传统的电流检测利用 ADC 实现,但需要进行电流隔离后再经复杂的外围电路将信号调理成 0 ~ 3.3 V 才可接入芯片的 ADC 模块。

Sigma-Delta ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) 是一种基于过采样和噪声整形并进行过滤的高精度模数转换器,因其具有较高的转换精度、外围器件少和低功率等特点而被广泛使用<sup>[11]</sup>。 $\Sigma$ - $\Delta$  信号控制原理如下:采样电阻将电机线电流转化为限幅  $\pm 200$  mV 的信号,再通过调制器过采样将输入转化成高速的 1 位数字流,同时完成光耦隔离接入 DSP,最后利用滤波器和解调器得到最终数字

量输出结果<sup>[12]</sup>。

TMS320F379D 芯片拥有 SDFM (Sigma Delta Filter Module) 模块,内置了滤波器和解调器。该模块能够接收  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器输出的一位数字流,进行数字滤波后即可得到真实信号。Sigma-Delta ADC 的检测原理如图 4 所示。

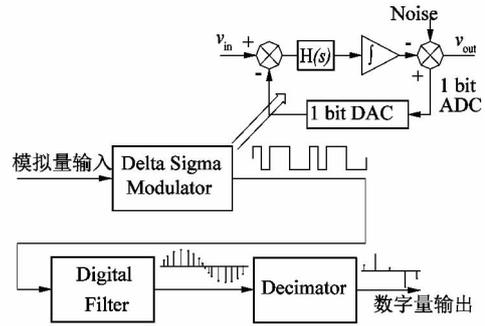


图 4 Sigma-Delta ADC 检测原理图  
Figure 4 Sigma-Delta ADC detection schematic

HPCL-7860 是 Agilent 公司设计制造的  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器,输出 10 MHz 的 1 位数字流。光耦输入电压为  $\pm 200$  mV,检测电流配合采样电阻可达到输入范围。在完成光耦隔离和数字流生成之后,无需额外的信号标定,可直接接入到 DSP 的 SDFM 模块。检测框图如图 5 所示。实验中使用电流检测板如图 3(a)中④所示。

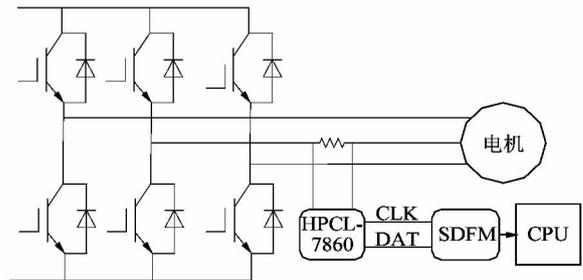


图 5 电流检测流程框图

Figure 5 Block diagram of current detection

分别使用 ADC 和 SDFM 检测电流完成电机 FOC 控制。在电机带载、转速稳定为 360 r/min 时利用 DSP 开发工具 CCS (Code Composer Studio) 记录下电机电流数值,并将其存储在 DLOG 1 数组中,导出数据至绘图软件。绘制电流波形如图 6 所示。其中所测电流为标么值,本文电流额定值为 3 A。

从图 6 可看出,利用 ADC 和 SDFM 检测电流波形基本重合,其电流平稳,表明电流检测准确,有效地控制了电机。故可利用电流检测电路及 SDFM 模块更为简便地进行电机电流检测。

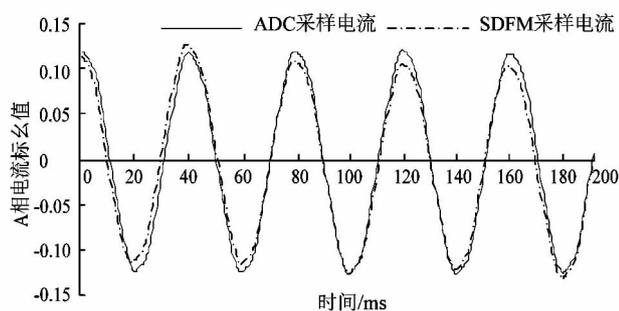


图 6 电流检测

Figure 6 Current detection

### 3 双电机控制

在本研究实验中,CPU 1 控制电机为电机 1,CPU 2 控制电机为电机 2,双电机运行中采取 IPC 进行信息交流。2 台永磁同步电机均为 4 对极,故电角度为机械角度 4 倍。CCS 同时运行双 CPU 程序,于相同时间分别记录双电机运行参数,并将其存入 2 个数组 DLOG 1 和 DLOG 2 中。

#### 3.1 软连接

在双电机同步控制中,最为常见的场景是 2 台永磁同步电机之间没有物理连接的同步运行,称之为软连接,如无轴印刷机的滚筒驱动。

实验控制框图如图 7 所示,为了实现 2 台 PMSM 同步控制,选取 CPU 1 接收给定的位置角信息,并通过 IPC 传递同步信号和位置信息,双电机可同时进行 FOC 控制。其中 RunMotor 为电机同步运行信号:将其置 1,则 2 块 CPU 同步进行运算,电机开始转动;将其置 0,则 2 台电机停转。

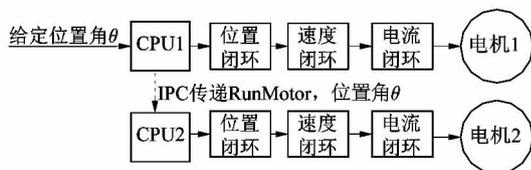


图 7 软连接电机框图

Figure 7 Block diagram of soft connected motor

在无轴印刷机中,双电机同步控制的主要目的是高精度的位置同步,可采用速度给定的方式,在各自 CPU 中计算出位置作为给定信号。这种方式的速度信号可以作为位置调节器的前馈给定,速度值是一个无需频繁变化的值。这种方式要求 2 个控制器的主中断严格同步,确保计算的位置给定值时刻同步。

为了验证 2 台电机的同步效果,在 CPU 1 中给定信息为幅值  $80 * \pi$ ,周期为 10 s 的正弦波。在 20 s 后,将电机给定位置信息修改为幅值不变,周期减小为

5 s 的正弦波。实验记录了 2 台电机启动后 30 s 内的位置信息,位置曲线记录如图 8 所示。

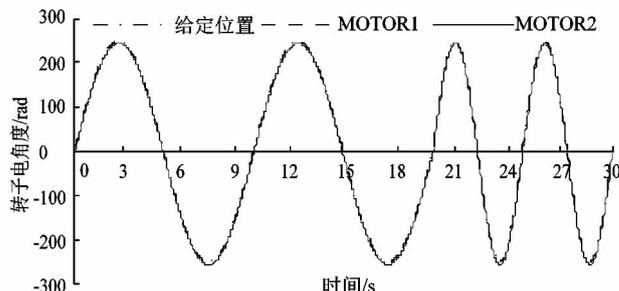


图 8 双电机位置检测

Figure 8 Position detection of dual motors

从图 8 看出 2 台电机可同时启动,在给定位置信息发生改变时,电机 2 可准确跟随给定位置变化。为了分析 2 台电机同步精度,做出 2 台电机位置误差曲线如图 9 所示。

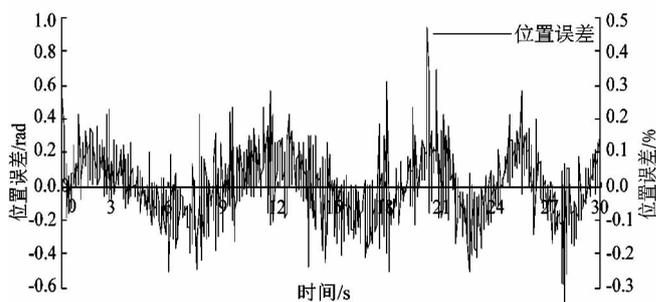


图 9 双电机位置误差

Figure 9 Position difference between dual motors

从图 9 可看出,虽然在电机启动和给定位置信息发生变化时 2 台电机位置误差略大,但 2 台电机总体位置误差很小,约为 0.16%,实现了高精度的同步。

从本实验可知在双电机没有物理连接的情况下,通过 IPC 进行双电机通信,能够保证运行的精准同步。而单机受负载扰动引起的误差,是依靠单机伺服控制控制算法来改善。

#### 3.2 硬连接

若双电机运行过程中保持机械轴的相互连接,此时电机的连接状态为硬连接。这个用法在扩展驱动功率的场合多见,可以优化传动链,但是需要解决双电机负载分配的平衡问题。如果各自独立进行位置闭环或者速度闭环时,较小的误差将导致双电机负载分配的失衡。此时需要按主从控制方式来控制。

主从控制方式:主电机进行完整的伺服控制环节,即位置环-速度环-转矩环;从电机由于物理轴连接可以和主电机保持同样的位置信息和转速信息,只要保

持从电机的电流指令和主电机一致,即可保证二者运行的负荷分配相同。设定电机1为主电机,电机2为从电机,控制流程如图10所示。

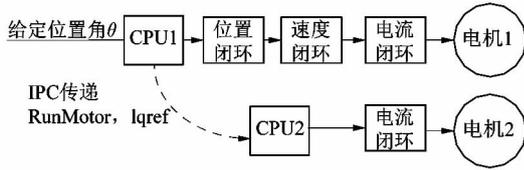


图10 硬连接电机框图

Figure 10 Block diagram of hardwired motor

在实际控制过程中,为了精确控制从电机和主电机的电流保持一致,还可以提高电流的采样和控制频率。本实验中还分别测试了10 kHz和30 kHz的电流采样和控制效果。30 kHz的控制效果优于10 kHz。

电机转速稳定在600 r/min时,在相同时刻检测双电机电流波形如图11所示。当2台电机对拖时,为了保持电机旋转方向相同,从电机的A、B相反接,故图中在同一时间2台电机A相电流有固定相位差。

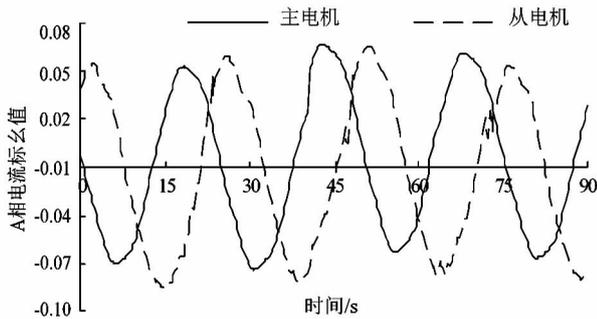


图11 双电机电流检测

Figure 11 Current detection of dual motors

电机从启动到转速600 r/min的速度曲线如图12所示。从图中可看出电机转速上升迅速,并未出现电流不匹配导致的电机失步现象。

从图11和图12中可看出,双电机同步控制过程中,电机电流基本保持为幅值、频率相同的正弦波,该控制方法有效地同步分配了处于硬连接的2台电机的负载。

### 3.3 柔性连接

当双电机处于硬连接的调试状态,如从电机与主电机断开物理连接时,此时双电机的连接状态称为柔性连接。因为此时从电机仅进行电流闭环控制且没有负载转矩平衡,由式(4)可知,很小的转矩会一直加速电机,电机有出现飞车的可能,甚至可能造成机械的损坏。

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega. \quad (4)$$

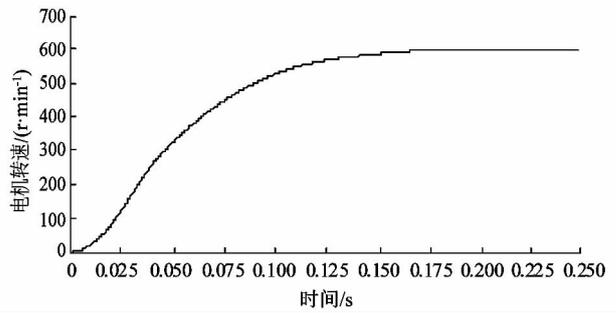


图12 速度检测

Figure 12 Speed detection

式中: $T_L$ 为负载转矩, $J$ 为电机转动惯量, $B$ 为电机的磁滞摩擦因数。

为了避免发生此情况,提出以下控制方式:保留电流闭环,同时加上转速修正。实际控制如图13所示。

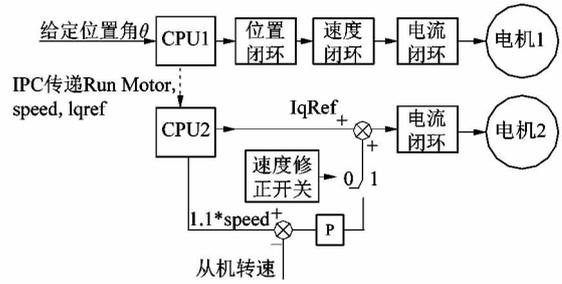


图13 柔性连接电机框图

Figure 13 Block diagram of flexible connection motor

当从电机转速不超过主电机转速10%,速度修正开关置为0,对从电机直接进行电流闭环控制;当从电机转速超过主电机转速10%,此时速度修正开关置为1,速度修正经放大后输出负值,叠加 $i_q$ ,即减小电流闭环参考值。当从电机 $q$ 轴电流减小时,电磁转矩减小,由式(4)可知,电机速度也将减小。为避免从电机反转,电流闭环参考值最小为0。

为了模拟实际应用环境,进行如下实验:

- 1) 双电机处于软连接,转速稳定在360 r/min;
- 2) 对主电机施加过大转矩使其堵转,从电机转速也降为0,同时将电机连接方式修改为柔性连接;
- 3) 撤去负载,查看此时双电机运行状况。

分别记录下2台电机的转速曲线,如图14(a)和(b)所示。

图14(a)记录了在不含速度修正环节时的双电机速度。从图中可知主电机可迅速恢复稳定运行,但从电机出现失控现象,转速远高于主电机。当从电机反电势与母线电压平衡之后转速开始稳定。

图14(b)为加入速度修正环节后的双电机速度。

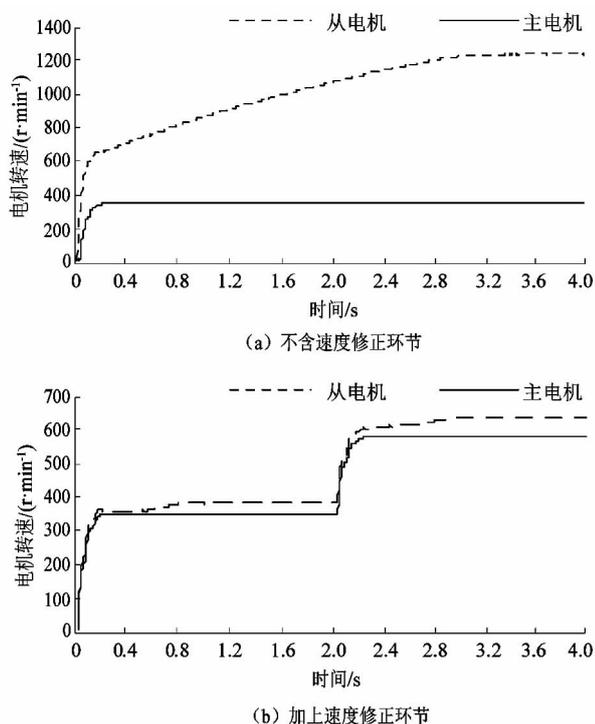


图 14 双电机速度检测

Figure 14 Speed detection of dual motors

从图中可知从电机速度始终跟随主电机变化,最后基本稳定在主电机速度 1.1 倍。为了更好地验证控制效果,在 2 s 时刻,更改主电机转速为 600 r/min,此时从电机仍然有良好的控制效果。

当主电机运行速度为 360 r/min,且 2 台电机转速稳定时,记录 2 台电机电流数值。为了更好地对比分析,将从电机电流和主电机电流于同一起点绘图如图 15。由图可知从电机电流频率约为主电机电流频率的 1.1 倍。这个 10% 的门限值,可以根据实际需求做出调整。

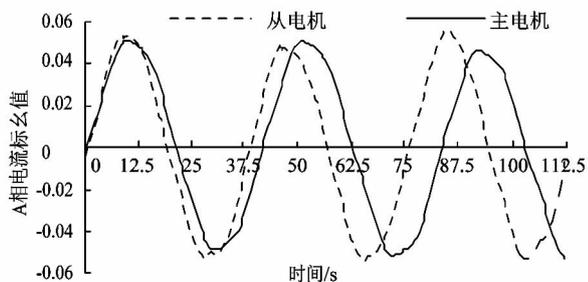


图 15 双电机电流检测

Figure 15 Current detection of dual motors

综上实验分析可知,柔性控制方式可有效防止硬连接电机调试状态或断轴故障时从电机的转速失控,可作为硬链接的替代控制方案。

## 4 实验结论

课题组针对双永磁伺服电机控制系统的精准同步控制进行了研究。利用双核 CPU 芯片 TMS320F28379D 进行双电机同步控制,采用 IPC 通信使双 CPU 同步开始运算,实时交换电机运行关键信息,避免同步控制中的通信延时。并利用了 SDFM 模块搭配 HCPL-7860 光耦完成  $\Sigma$ - $\Delta$  电流检测,可避免电磁干扰并且使电流检测电路更加简洁。此外,针对双电机不同的应用场景,提出相应的控制策略。

实验结果表明:电流检测可以达到预期效果,电机同步控制策略实现了双电机在不同场景下的同步伺服控制,精准控制双电机的位置、速度、电流。

## 5 4 电机同步伺服的展望

TMS320F28379D 芯片一共有 24 路 PWM、4 组 ADC 模块,每组 ADC 有 16 个单端通道、2 组 SDFM(每组可检测 4 路信号)、3 组 QEP 模块以及 6 组 CAP 模块。伺服电机控制一般需要 6 路 PWM 波驱动、4 路 ADC 或者 SDFM 用作信号检测、1 组 QEP 或者 CAP 用作位置检测。在本实验中,实测的 2 块 CPU 的计算负荷都很低,因此可以预见,一片 TMS320F28379D 的外设资源和 CPU 的算力,可以实现多至 4 台电机的高精度同步运行。

### 参考文献:

- [1] LORENZ R D, SCHMIDT P B. Synchronized motion control for process automation [C]//Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. San Diego: IEEE, CA, 1989: 1693-1698. doi: 10.1109/IAS.1989.96869.
- [2] 高德超. 多电机系统协同控制研究[D]. 济南: 济南大学, 2015: 1-25.
- [3] MASTELLONE S, LEE D, SPONG M W. Master-slave synchronization with switching communication through passive model-based control design [C]//2006 American Control Conference. Minneapolis, MN: IEEE, 2006: 6. doi: 10.1109/ACC.2006.1657211.
- [4] 崔海彬. 基于 EtherCAT 总线的多轴伺服控制系统的研究与实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 54-61.
- [5] 李静岚. 基于 CAN 总线伺服系统的多电机同步控制算法的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2003: 5-66.
- [6] 董汉卿. 基于 EtherCAT 通信的双伺服电机同步驱动系统研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017: 21-60.
- [7] Texas Instrument. TMS320F2837xD [EB/OL]. (2020-05-08) [2021-01-05]. <https://www.ti.com/cn/cn/lit/ds/symlink/tms320f28379d.pdf>.
- [8] 欧阳磊. 基于 FOC 的交流电机控制系统的研究与开发 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 1-4.
- [9] 赵阳. 基于 DSP 的永磁同步电机伺服控制系统设计与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2005: 47-54.

(下转第 67 页)