

# 两相混合式步进电机细分驱动器研制

陈建进, 管兴勇

(深圳市世强先进科技有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘要:** 讨论了步进电机的细分驱动原理以及数字 PI 控制策略。介绍了一种基于数字信号处理器 (DSP) 的两相混合式步进电机细分驱动器的软硬件结构, 并给出了实际运行的电机相电流波形。通过采用电压补偿、电流负反馈以及数字 PI 调节, 对步进电机相电流进行“阶梯化”正弦波控制, 使步进电机相电流接近正弦波, 改善了步进电机的运行工况。

**关键词:** 步进电机; 细分驱动; DSP; PI 控制

中图分类号: TP271

文献标识码: B

文章编号: 1674-7720(2014)04-0071-03

## Development of two-phase hybrid stepping motor microstepping driver

Chen Jianjin, Guan Xingyong

(Shenzhen Sekorm Advanced Technologies Co., Ltd, Shenzhen 518001, China)

**Abstract:** Discuss the principle of stepper motor microstepping driving and digital PI control strategy. Introduce the hardware and software structure of the two-phase hybrid stepping motor microstepping driver based on DSP technology, and give the actual operation of the motor phase current waveforms. By using voltage compensation, current negative feedback and digital PI regulator, and the stepper motor phase current "ladder" of sine wave controlling, make the stepper motor phase current nearly sinusoidal, improved operating performance of stepper motor.

**Key words:** stepper motor; microstepping driver; DSP; PI controller

步进电机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构, 在工业控制中应用十分广泛。步进电机的角位移量与输入脉冲数严格成正比, 从而没有位置累积误差, 易于进行精确的位置和速度控制; 步进电机与驱动控制器可组成开环数控系统, 既简单又可靠, 可大大减少系统的成本。但是由于步进电机分辨率不高、低频振动、噪声大等问题, 使得步进电机的应用局限于一些振动、噪音以及分辨率要求不高的场合, 因而出现了许多旨在提高步进电机驱动性能的措施, 采用细分技术无疑是最常用、最简便的方法。细分技术可使得在不改变步进电机结构参数的情况下减小步距角, 这大大减弱或消除了步进电机的低频振动和噪音, 提高了步进电机的运转精度<sup>[1]</sup>。

电机专用 DSP 的出现, 为电机控制提供了强有力的工具。TMS320LF2407A 是 TI 公司推出的专为数字电机控制应用而设计的 DSP 器件, 该器件集成了 A/D 转换模块、事件管理器等电机控制系统所必需的外围器件, 其 CPU 具有 16 位定点 DSP 内核, 指令系统丰富灵活, 运算速度 40 MHz, 利用其高速运算能力可以实时完成

各种复杂控制算法。

本文主要讨论了步进电机的细分原理和数字 PI 控制策略, 同时给出了基于 DSP 的两相混合式步进电机细分驱动器的软硬件设计和相应的运行结果。

### 1 原理与设计

步进电机的细分控制是通过精确控制步进电机的相电流来实现, 即步进电机每运行一步时, 其绕组电流不是全部通入或者切除, 而是只改变相应绕组中额定电流的一部分, 则步进电动机的合成磁势也只旋转步距角的一部分, 转子的每步运行也只有步距角的一部分。细分驱动就是将步进电机相电流从零电流值到最大电流值之间分成了多个稳定的电流状态。

以两相混合式步进电机为例, 这里采用电流矢量恒幅均匀旋转细分驱动, 电机 A、B 相绕组通过的电流  $i_A$ 、 $i_B$  可描述如下:

$$\begin{cases} i_A = I \sin \phi \\ i_B = I \cos \phi \end{cases}$$

式中,  $I$  为电流幅值,  $\phi$  为电机轴预置位置的电角度。

# 技术与方法 Technique and Method

$$\phi = \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{m} \times N$$

其中,  $m$  为细分数,  $N$  为步进电机前进的步数。若  $m$  为 1, 则步进电机是以整步方式运行, 即步进电机没有细分; 若  $m$  为 2, 则步进电机是以半步方式运行, 可见半步运行方式已经包含了细分的思想在里面。步进电机细分后的电流波形是“阶梯形”正弦波, 如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

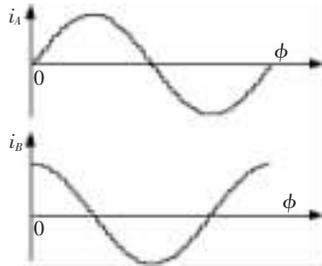


图 1 A、B 相细分后理想电流波形

## 1.1 数字 PI 控制策略

由于步进电机是一个多变量、非线性系统, 特别是当电感随位置、电流大小的变化而变化时, 电机的电磁关系十分复杂。因而给定电流与采样电流的偏差与 PWM 脉冲的导通占空比之间的关系也十分复杂, 而且还受诸如电压、负载等其他参数的影响。从工程应用观点看, 可以采用 PI 控制算法来根据输入确定输出, 这样可以确保系统具有较好的动、稳态性能。

离散增量式的 PI 控制器规律为<sup>[3]</sup>:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k)$$

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k)$$

式中,  $u(k-1)$  为上一次的控制量,  $k_i = \frac{k_p T}{T_i}$ 。

这里,  $u(k)$  为输出信号,  $e(k)$  为输入偏差信号,  $k_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间常数,  $T$  为采样周期。

由于运行时给定值有较大的变化以及负载变化等都会导致控制器变量及输出信号的饱和与溢出, 因此控制器必须加以限幅, 即:

令  $u_{out} = u(k)$ ,

若  $u(k) > U_{max}$ , 则  $u_{out} = U_{max}$ ;

若  $u(k) < U_{min}$ , 则  $u_{out} = U_{min}$ 。

同时积分必须加以矫正, 即:

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + \frac{k_i}{k_p} [u_{out} - u(k)]$$

## 1.2 细分驱动器软硬件实现

基于 DSP 的两相混合式步进电机细分驱动的控制结构原理如图 2 所示。步进电机的电流细分控制由 DSP 软件来完成, 主要采用数字 PI 调节, 同时对输入电压进行补偿。对电压的补偿, 可使得细分驱动器在宽电压范围内均能正常工作。现分别介绍其硬件电路组成以及软件结构。

## 1.3 硬件电路

本细分驱动器硬件主要由 DSP、功率场效应管 H 桥逆变器、功率场效应管的驱动电路以及电机相电流检测

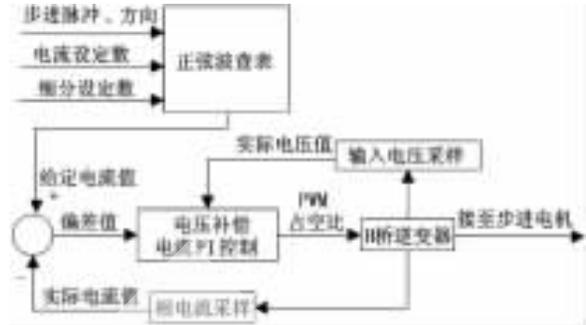


图 2 细分驱动器控制框图

电路等构成。

驱动主回路如图 3 所示, 每相采用 H 桥驱动, 由两相组成, 每相使用 4 个功率场效应管。以 A 相为例, 当需通以正向电流时, 则开通 Q1、Q3, 当要通以反向电流时, 则开通 Q2、Q4。电阻  $R_1$  是采样电阻, 用来检测电机相电流的大小。同时对主回路设有过流、过压的硬件保护, 保证了系统的安全运行。

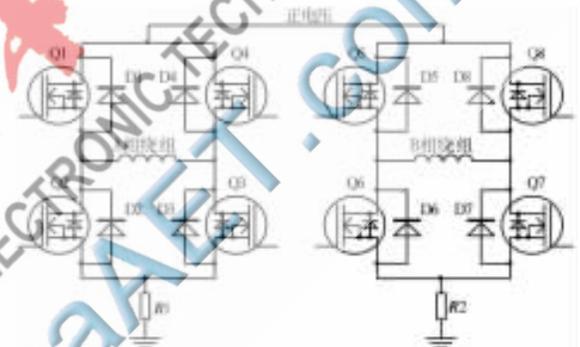


图 3 主回路

采用 TMS320LF2407A 作为控制核心实现了 DSP 的单片解决方案, 图 4 表示了 DSP 的主要实现方式。TMS320LF2407A 片内带有高性能的 10 位 A/D 转换模块, 包含内部采样保持电路, 将检测到的相电流信号、输

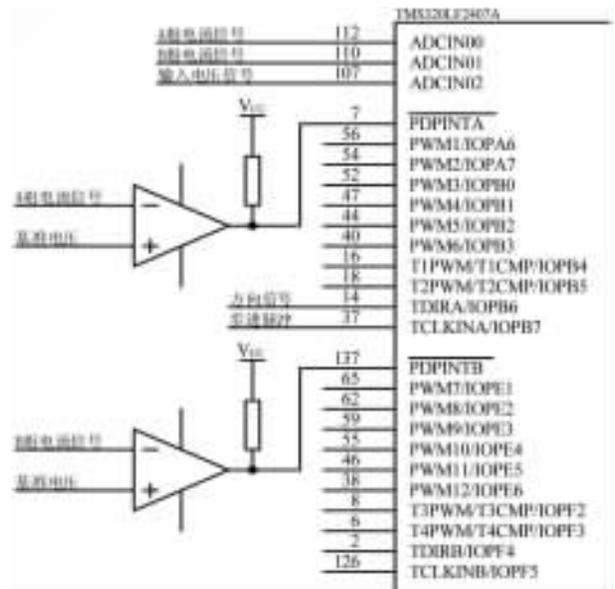


图 4 驱动器 DSP 实现方式

## 技术与方法 Technique and Method

入电压信号进行滤波处理,然后接入 DSP 的 A/D 转换通道。TMS320LF2407A 有两个事件管理器模块,每个事件管理器模块提供带有可编程死区的 PWM 通道,每个通道都有单独的比较寄存器,通过对其写入就可以改变 PWM 的占空比,从而控制输出 PWM 脉冲的宽度,PWM 信号经功率场效应管构成的 H 桥逆变器驱动步进电机。事件管理器模块 A 的 PWM1、PWM3、PWM5、T1PWM 控制 A 相电机绕组,事件管理器模块 B 的 PWM7、PWM9、PWM11、T3PWM 控制 B 相电机绕组。TCLKINA、TDIRA 管脚分别接步进脉冲信号、方向信号。/PDPINTA、/PDPINTB 为低电平时可分别禁止事件管理器模块 A、事件管理器模块 B 的 PWM 信号,由图 4 所示方式实现了主回路过流的硬件保护,基准电压值代表了过流保护的门限电流值大小。脱机信号、细分数设定、电流值设定等外部信号均接至 DSP 的 I/O 管脚。

### 1.4 软件结构

DSP 软件采用 C 语言编程,主要由主程序和中断程序构成,如图 5 所示。



图 5 主程序流程图和中断子程序流程图

主程序主要完成如下功能: DSP 系统资源的初始化; 电流值设定扫描以及电流设定值为幅值的正弦波表的建立; 细分数设定和脱机信号的扫描; 负责中断程序调用等。在 DSP 系统资源初始化里, 定时器 T1、T3 用于产生 PWM 周期, 分别作用于 A、B 相的 H 桥电路, 同时当 T1 下溢时启动 DSP 的 A/D 转换。定时器 T2 用于计外部的脉冲信号数, 即步进电机前进的步数。A/D 中断的设置使每次 A/D 转换结束时产生中断。正弦波电流表的建立, 使得在 A/D 中断程序中每次调用电流给定值时节省了计算所需的时间。

A/D 中断程序主要是计算要达到给定电流值时 PWM 实际的占空比。在 A/D 中断程序中, 首先读取相电

流、输入电压的大小, 同时也读取 T2 计数器的值, 该值表示了步进电机需前进的步数, 然后根据所采样的电流、电压值对电流进行数字 PI 控制、电压补偿, 计算出下一个载波周期的占空比, 并将计算结果写入寄存器, 当下一个周期脉冲到达时, 系统将自动地使用寄存器的结果来控制脉宽调制器, 这样不断重复, 实现了对步进电机的实时控制。

### 2 实验

上述细分驱动控制技术已成功用于两相混合式步进电机的细分驱动, 负载电流在 3 A~6 A 可调, 供电电压在 12 V~75 V 范围内均可正常工作, 细分数高达 256, 并提供细分在线切换功能。图 6 是步进电机 64 细分运行时的绕组电流波形。

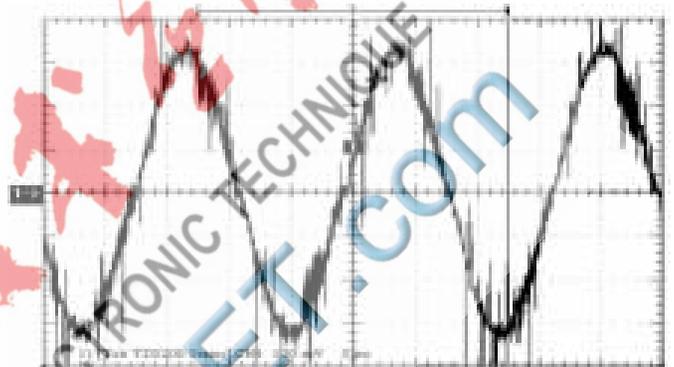


图 6 步进电机相电流波形

采用 DSP 控制能实现步进电机步矩角细分, 并且硬件电路具有通用性, 能够满足不同细分的要求。PI 调节器能够方便地对电机相电流进行控制, 受系统参数影响较小, 有较好的快速响应。通过在 H 桥臂中串接采样电阻, 并结合软件的方法来实现, 可实现低成本的电机相电流检测。采用 TI 公司的 TMS320LF2407A 为控制核心, 所组成的步进电机驱动器只需很少的外部器件, 其性能高、成本较低, 有很好的应用价值。

### 参考文献

- [1] 刘宝廷. 步进电机及其驱动控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1997.
- [2] 张文超, 雷瑛, 吴勤勤. 步进电机 PWM 恒转矩细分驱动技术研究[J]. 机械制造, 2003, 41(6): 1-2.
- [3] 张东亮, 常宏敏, 田新诚, 等. 无刷直流伺服电机的 DSP 全数字控制系统研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2002, 32(5): 3.

(收稿日期: 2013-10-22)

### 作者简介:

陈建进, 男, 1977 年生, 本科, 中级工程师, 主要研究方向: 工业控制技术。

管兴勇, 男, 1978 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 工业控制技术。