一种高性能两相步进电动机细分驱动器的设计

张秦岭 李艳明 郭 宏

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以高性能单片机 C8051F005 和全桥脉宽调制(PWM, Pulse Width Modulation)驱动电路 3955 为核心实现了一种结构简单的高性能、多细分、微型化两相混合式步进电动机驱动器. 该系统采用正弦波电流细分驱动和双极性、固定关断时间的恒流斩波控制方式, 可调的电流衰减模式可以进一步改善步进电动机绕组的电流波形. 驱动器最高细分数为 256, 提供细分选择、正反向控制、半流控制、使能控制, 以及过压、欠压、过流、过热等电动机驱动器的保护功能. 此外, 系统还具有在系统调试和升级能力. 从驱动器的总体设计、不同细分下电流参考信号生成和绕组电流控制等方面对该方案进行了详细的论述, 实验结果证明该步进电动机高细分驱动器方案结构简单、可靠性高、运行平稳, 具有良好的运行矩频特性.

关 键 词: 两相步进电动机; 驱动器; 运动控制

中图分类号: TM 383.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1039-04

Design of a high-performance microstepping driver for two-phase stepping motors

Zhang Qinling Li Yanming Guo Hong

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on mixed-signal ISP flash MCU C8051F005 and full-bridge pulse width modulation (PWM) integrated circuit 3955, a microstepping driver with high performance, simple structure and ultra small size was designed for two-phases hybrid stepping motors. The driver utilized advanced sinusoidal current subdivided technique and fixed off-time PWM current control. Adjustable mixed current decay mode optimized the output current further. The stepping motor system provided selectable subdividing up to 256, and offered functions including direction control, half current control, enable/disable option, etc. It also had the ability of simulation and update program on system. In addition, over voltage, under voltage, over current and over temperature protections were also included for the driver's high reliability. System design, generation of reference voltage for the phase current in different resolution and armature current control technique were detailed descried. The experiment results confirm that the microstepping driver has the characteristic of high performance, high reliability and good torque/frequency characteristic.

Key words: stepping motor; drivers; motion control

步进电动机是一种将数字式电脉冲信号转换成机械位移(角位移或线位移)的机电执行元件, 它必须与相应的驱动器配合使用, 其性能不仅取决于步进电动机本身, 而且在很大程度上取决于其驱动器的性能. 目前, 细分控制技术和电流控制技术是步进电动机驱动技术的发展趋势. 采用细分控制不仅减小了步距角, 提高了步进电动机运动控制的分辨率, 而且可以减小或消除步进电动机的低频振荡, 降低噪声, 显著改善其动态性能. 采用电流控制技术的优点是瞬态响应性能好, 相

收稿日期: 2005-11-22

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-04-0163)

作者简介: 张秦岭(1978-), 男, 陕西汉中人, 博士生, buaazhang@tom.com.

移和系统延迟小. 步进电动机驱动技术的另一个趋势是前级控制电路集成化和功率驱动模块化. 新一代小功率步进电动机驱动器的驱动级已多采用功率驱动模块,采用功率驱动模块极大地方便了步进电动机驱动器的设计,使其体积减小,可靠性提高. 特别是易于与微处理器结合,对步进电动机作细分控制[1-3]. 在控制级方面则主要有 2 种结构:一种是采用专用集成控制芯片[4];另一种是采用单片机(或者 CPLD、DSP 等)为核心构成的数字控制电路[5]. 与前者相比,采用微控制器不仅可以实现复杂的控制功能,而且具有很高的灵活性,便于系统的功能升级和容量扩充.

本文设计了一种以高性能单片机 C8051F005 和 Allegro 公司的全桥脉宽调制(PWM, Pulse Width Modulation)电动机细分驱动电路 3955 为核心的两相混合式步进电动机细分驱动器,该系统具有结构简单、运行平稳、可以在系统调试和升级,以及高性能、多细分、低功耗、微型化、模块化等优点.

1 总体设计方案

由高性能单片机 C8051F005 和 3955 构成的两相混合式步进电动机细分驱动器采用正弦波电流细分控制技术,系统框图如图 1 所示. 本系统设计的细分数有 8 种选择,由 3 个拨码开关来设置,最高可达 256 细分. 为了满足细分驱动的需要,脉冲输入 CP 和方向输入 DIR 用高速光耦进行隔离. EN 为驱动器的使能信号. 该系统还提供半流锁定功能,当超过 0.5 s 没有输入控制脉冲时,为了减少发热和系统损耗,绕组中的电流自动减半. 图 1 中的 DOW 为半流信号.

如图 1 所示,高性能单片机 C8051F005 产生两相绕组正弦波细分所需的电流参考电压 VRA 和 VRB,以及控制绕组电流方向的相极性逻辑信号 PHA 和 PHB,分别输入到驱动级的 3955,3955

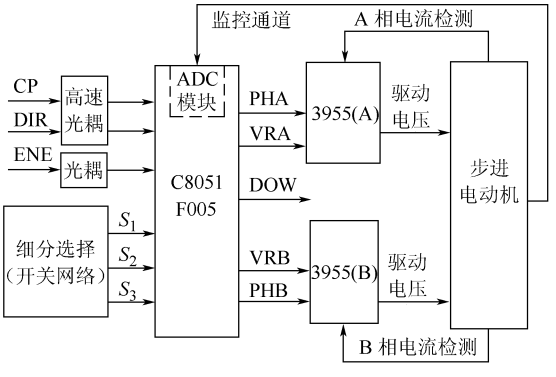


图 1 基于高性能单片机的步进电动机细分驱动系统

的输出为直接驱动步进电动机两相绕组的电压. 由于无需外加 DAC,减小了驱动器的体积,简化了电路的硬件结构.

3955 是用来在细分模式下驱动双极性步进电动机相绕组的,输入电压最大为 50 V,输出电流为±1.5 A,内部包含全桥功率驱动、电流控制以及保护电路,采用双极性、固定关断时间的斩波电流驱动方式.

2 系统设计中的几个关键点

2.1 不同细分下电流参考信号的形成

步进电动机在高细分时,需要在电动机内产生接近圆形的均匀旋转磁场,即各相绕组电流的合成磁势应在空间作幅值恒定的旋转. 因此,绕组电流的参考信号应采用正弦波. 对两相混合式步进电动机来说,两相绕组在空间位置上相差 90°,故其电流的参考信号也应是幅值相等,相位互差 90° 的正弦波. 这两路参考信号由单片机 C8051F005 产生. C8051F005 是集成在一块芯片上的混合信号系统级单片机,它具有与 8051 兼容的高速 51 内核,运行速度可达 25 MIPS,70% 的指令执行时间为 1 个或 2 个系统时间. 除了具有标准 8051 的数字外设部件之外,C8051F005 单片机中提供了丰富的模拟和数字资源,通过数字交叉开关的配置,可将这些片内资源分配到 I/O 端口. 片内还有 VDD 监视器、看门狗电路(WDT, Watch Dog Timer)和时钟振荡器,是真正的片上系统(SoC, System on Chip). 另外,利用片内 JTAG 调试和边界扫描功能,无需仿真器即可方便地实现在系统调试和升级、修改程序,简化了系统开发过程,系统维护也更加方便.

根据细分要求,将绕组电流按正弦方式分成若干个台阶,即在 0 到相电流的最大值之间划分多个稳定的中间电流状态,将对应的数字量存放到 C8051F005 的 FLASH 存储器中. 对两相步进电动机,FLASH 存储器中存储的表是一个完整周期的正弦电流参考信号和余弦电流参考信号,这个表是以最大细分数建立的. 对于不同的细分数,可以等间隔地查表,从完整的表中跳读出相应细分所需的数字量. 如果需要改变电流的方向,则只需反向读取正弦表和余弦表即可. 通过软件编程,按照电动机旋转方向信号 DIR 和输入控制脉冲 CP 查表读出相应的值,写入 DAC 控制寄存器 DAC0 和 DAC1,利用 C8051F005 片内集成的两路 12 位电压输出型 DAC 可以无需外部 DAC 直接获得两路模拟参考信号 VRA 和 VRB.

另外,单片机还要提供给 3955 控制绕组电流方向的相极性信号 PHA 和 PHB,为了编程方便,将电流参考信号的数字量与相极性信号统一编码,占用 2 个字节,高 12 位为电流参考信号,低 4 位为相极性信号.

2.2　绕组电流的控制

为满足高细分的要求,3955 片内 3 位非线性电流选择端口直接接高电平(100% 电流),即将满额参考电压送到内部比较器与采样电阻上的电压进行比较,从而控制 H 桥的输出电流的大小.

3955 内部提供了可选的电流衰减模式:慢衰减方式、快衰减方式以及混合衰减方式. 慢衰减方式下,电流波动比较小,平均值与所给参考值更加接近,从而提高了步进电动机的运行性能,还可以降低开关损耗和磁滞损耗,减少电动机和驱动电路的发热. 但是在负载电流下降很快,负载电流很小以及反电势足够大时,慢衰减模式并不能保证很好的电流调节. 采用快衰减模式,电流衰减很快,产生的电流纹波也大,导致电流的准确性下降,同时电动机和驱动电路发热增加. 混合衰减模式允许用户根据需要,选择快衰减模式和慢衰减模式在整个衰减过程中的时间比例. 当负载电流减小时,利用混合衰减模式,可以防止由步进电动机反电势引起的电流波形畸变,从而得到比较平滑的电流波形和较低的损耗. 衰减模式所占比例对输出的电流波形有较大的影响,由 V_{PFD} 或 2 个外部电阻(见图 2)决定,快衰减模式所占比例由(1)式决定:

$$V_{PFD} = 100\ln[0.6(R_1 + R_2)/R_2] \qquad (1)$$

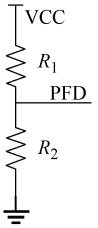


图 2　电流衰减模式

当电流上升时,应使用慢衰减方式;而电流下降时,则应使用混合衰减模式. 当输入脉冲频率较低时,慢衰减方式所占比例应大一些,随着输入脉冲频率的提高,慢衰减方式所占的比例应逐渐减少,以获得不同输入脉冲频率下最好的输出电流波形. 本方案中由 2 个电阻分压来固定设定 V_{PFD} 的电平,使电路处于混合衰减模式.

2.3　半流锁定的实现方式

半流锁定功能有 2 种实现方式,即硬件方式和软件方式. 硬件方式采用开关管控制电阻并联参考电压输出端,软件方式采用程序控制 3955 输出电流为原来的 50%. 经过实验验证,此 2 种方式皆具有高可靠性和良好的结果实现.

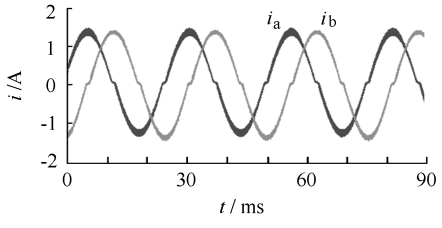
2.4　系统电源构成与监控

单片机 C8051F005 工作所需的数字电压和模拟电压均为 3.3 V,这 2 个电源来自同一个输入电源,在两者之间加入一个 2 Ω 的绕线电阻作简单的滤波器. 而整个系统的逻辑电压为 5 V,因此采用 LM1117 或者 LM3940 将输入的 5 V 调整为 3.3 V. 相应地由单片机提供给驱动电路的控制逻辑信号输出 I/O 口应外接上拉电阻,以保证其对后级功率驱动电路的驱动能力. 此外,利用单片机 C8051F005 所具有的多路 AD 采样通道,对功率桥电压、电源电压等参数进行实时监控和处理,可以方便地实现过压/欠压、过流、过热等保护功能,扩展了系统功能,提高了系统可靠性.

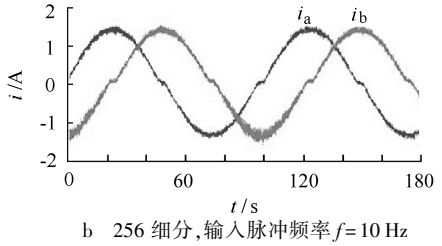
3　实验结果

本文研制的这种驱动器最高工作电压为 50 V,工作电流峰值为 1.5A,设计方案符合目前国内外步进电动机驱动技术的发展趋势,在步距角的精度和减小电动机低频振荡等方面接近于国外的同类驱动器.

以 17HS0401 两相混合式步进电动机为控制对象,对该驱动器进行了实验,取得了理想的实验结果. 经过长时间运行,该系统在较宽输入频率范围内运行良好,有效抑制了电动机的转矩脉动,驱动器发热小. 在 128 细分数下,测试运行频率范围为 10 ~ 47.2 kHz(对应电动机转速是 0.023 ~ 110.625 r/min),空载最大起动频率为 13.5 kHz. 图 3 ~ 图 6 给出了工作电压 24 V、电流峰值 1.3 A 时,步进电动



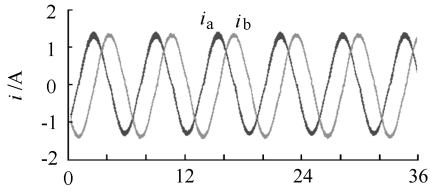
a　256 细分,输入脉冲频率 f=40.4 kHz



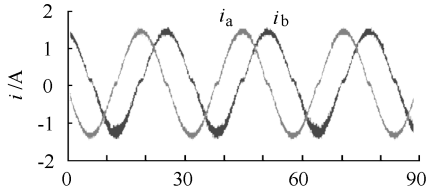
b　256 细分,输入脉冲频率 f=10 Hz

图 3　256 细分下步进电动机两相绕组中的电流波形

机在不同细分和输入脉冲频率下的电流波形(i_a,i_b 分别表示 A 相、B 相电流);图 7 和图 8 则分别给出了 128 细分和 32 细分下测得的运行矩频特性.

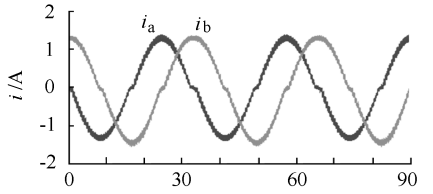


a 64 细分,输入脉冲频率 f=40.4 kHz

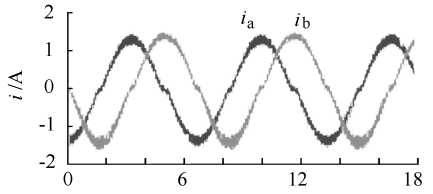


b 64 细分,输入脉冲频率 f=10 Hz

图 4 64 细分下步进电动机两相绕组中的电流波形

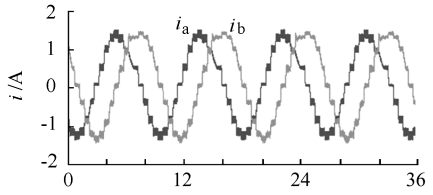


a 16 细分,输入脉冲频率 f=2 kHz

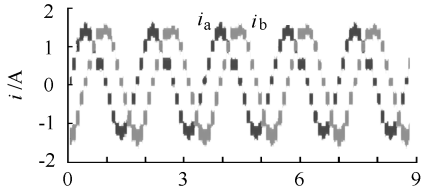


b 16 细分,输入脉冲频率 f=10 Hz

图 5 16 细分下步进电动机两相绕组中的电流波形



a 4 细分,输入脉冲频率 f=2 kHz



b 4 细分,输入脉冲频率 f=10 Hz

图 6 4 细分下步进电动机两相绕组中的电流波形

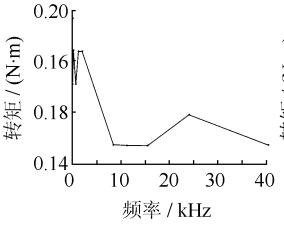


图 7 128 细分下的步进电动机和运行矩频特性

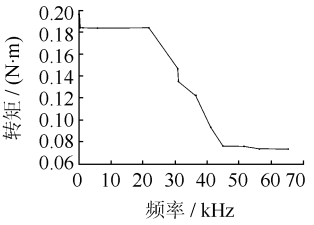


图 8 32 细分下的步进电动机和运行矩频特性

4 结 论

本文提出了由单片机 C8051F005 和全桥 PWM 驱动电路 3955 实现的结构简单、高性能、多细分、微型化两相混合式步进电动机驱动器,实验证明简单、可靠. 而由 3955 提供的可选电流衰减模式,使得在不同应用场合下获得最优的电流波形成为可能. 在应用中应注意以下 4 个问题:①在功率芯片的电源和地之间添加去耦电容;②由于驱动器功率体积比较大,为了防止芯片过热,应采取安装散热片、印制电路板接地管脚覆铜等散热措施;③虽然驱动芯片内部包含有 H 桥续流二极管,但是仍在 H 桥的输出端外加续流用的肖特基二极管,以增加电流反向续流能力,改善桥路输出性能;④为弥补高频运行时电动机输出转矩的下降,需要在高频运行时补偿电动机绕组电流值,其方法是根据频率值及细分数确定补偿数据表,补偿输出参考电压,实现对电动机绕组电流的补偿.

参考文献(References)

[1] 刘宝廷,程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997
Liu Baoting, Cheng Shukang. Stepping motors and driving systems[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1997 (in Chinese)

[2] Gao Hanying, Cheng Shukang, Sun Li, et al. Maximum torque/current control of 2-phase hybrid stepping motor[J]. Electric Machines and Drives Conference, 2003, 3(1-4): 1781-1786

[3] Rahman M F, Grantham C. Design approaches for microstepping step motor controllers[C]//IEE Conf Publ. London: IEE, 1990 (324): 253-257

[4] 周雅莉. 基于专用控制芯片的步进电动机控制器[J]. 微电动机,2000,33(3):21-23
Zhou Yali. The controller of stepper motor based on special integrated circuit[J]. Mcromotors. servo Technique, 2000, 33(3): 21-23 (in Chinese)

[5] 郭宏,胡曼丽. 两相混合式步进电机细分驱动技术的研究[J]. 电工技术杂志,2003(10):74-75
Guo Hong, Hu Manli. Study of subdivision driving technology in twuo hybrid stepping motor system[J]. Electrotechnical Journal, 2003(10): 74-75 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)