

软硬件协同设计的步进电机细分技术的研究

韩 昌, 陈 鑫, 周 浩, 高 俊

(武汉商学院 机器人视觉感知与应用科研创新团队, 武汉 430056)

摘要: 为了满足两相混合式步进电机的运行特性, 设计了驱动控制系统的硬件和软件控制系统; 驱动控制系统主要分为控制部分、驱动器部分、系统供电电源模块等; 以单片机 STC89C51 为微处理器控制核心, 实现对步进电机的运转方向和速度快慢的执行控制; 驱动硬件电路核心部分采用高精度细分驱动芯片 THB6128 实现对步进电机的精细驱动, 测试结果较理想; 实际应用的结果表明, 该系统稳定可靠, 应用简单可行。

关键词: 微型计算机控制; 步进电机细分; 高精度细分驱动器

Research into Subdivided Technology of Stepping Motor Based on Hardware—Software Co—design

Han Chang, Chen Xin, Zhou Hao, Gao Jun

(Department of Mechatronic Engineering, Wuhan Business University, Wuhan 430056, China)

Abstract: To meet the operator characteristic of the two-phase hybrid stepping motor, the software and hardware of the driving control system was designed. The driving control system is consists of the control part, driving part and the power supply system etc. It utilized the STC89C51 as the core to control the reverse moves and speed of the motor. High resolution driver THB6128 was adopted in driving part. Experimental results show that the system is feasible.

Keywords: MCU; hybrid stepping motor; subdivision driver

0 引言

随着工业自动化程度的提高, 步进电机在现代生产生活中的应用也越来越广泛。比如在工业机器人应用领域和医疗自动化领域中的应用极其广泛, 在医疗设备领域的应用也随处都可以见到步进电机的应用^[1]。在多种步进电机中, 混合式步进电机集反应式和永磁式步进电机的优点于一身, 应用更加普遍^[2]。但是步进电机在应用中存在一些制约其深入发展和性能提高的瓶颈性因素, 比如在实际应用中会现出诸如低速平稳性和高速快速响应能力较差, 并且存在效率低和能耗大等弊端^[3-5]。步进电机驱动控制技术是步进电机运动性能的关键, 当前在现有的控制技术中存在步进电机的分辨率较低, 低频振荡, 运行噪声大, 脱步或位置偏移等方面的问题。这些问题限制了步进电机的运行精度和在高系统稳定性要求的工程技术的领域的应用。针对这些在实际应用中遇到的问题, 可以采用软硬件技术协同设计的方法提高步进电机细分驱动的精度, 改进步进电机的运行驱动方式, 以到提高其稳定性和节能增效的目的。本文探索了基于单片机控制的步进电机细分技术, 通过实验进一步提高了步进电机运行的稳定性和精度。

1 步进电机细分技术的方案设计

众所周知, 步进电机是在开环控制系统中实现电脉冲信号转换成角度位移信号的主要元素。非过载的步进电机的速度和位置完全取决于脉冲信号的频率和脉冲个数, 而不受负载变化的影响。因此, 在步进电机的控制应用领域, 每给定电机一个脉冲信号, 电机将转一个步角, 工程系统最重要的控制参数是步角的控制精度, 即通过控制步进电机的步长来提高步角的精度。步进电机细分技术是在 20 世纪 80 年代发展起来的驱动控制技术, 该技术的出现极大提高了步进电机的精度和控制系统的性能。最近几年来, 随着微处理器和半导体技术的发展, 细分技术有了更加宽广的应用范围, 特别是在数字控制领域。脉冲宽度调制技术在步进电机驱动电路中值最为典型的驱动电路之一。也是人们研究最多, 应用最广的电路。该类型电路也被人们广泛称之为变频驱动方法, 即通过改变输出脉冲的频率和个数改变步进电机的速度和位置。

1.1 基于 PWM 波的细分驱动技术

如今, 变频驱动方法由于其控制方法简单, 节约能源等方面的优势被广泛应用在步进电机的速度控制方面。已经广泛应用到电机驱动领域里的 PWM 技术 (脉宽调制) 其实质是把谐波的能量搬移到更高频谱的范围之内, 从而提高系统的稳定性和减少系统能耗, 达到节能目的。其基本思路是: 细分驱动电流的变化受控于 PWM 脉冲的脉宽变化, 只要给驱动功率管的基极上施加一定脉宽和频率的脉冲序列, 就可在相应电机绕组上得到相应的阶梯变化的

收稿日期:2018-10-04; 修回日期:2018-12-04。

基金项目:湖北省教育厅教育厅科学研究项目资助 (B2018264); 武汉商学院博士基金资助 (2017KB009)。

作者简介:韩 昌 (1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事模式识别和信号处理方向的研究。

电流波形^[6-7]。

许多基于 PWM 的思想的变频驱动设计方法产生了高质量的输出结果，这些方法通过简单的增加变频驱动的开关频率会使其性能进一步的优化。但这样会由于增加变换器开关频率的增加会使系统功耗的增加，因此也会产生严重的共模电压。在相关的文献报道里，基于 PWM 变频驱动的产生共模电压会转换成电机的轴向电压，该电压可能产生轴向电流进一步毁坏电机和引起严重的电磁干扰问题^[8-14]。因此，进一步研究基于脉宽调制 (PWM) 技术的步进电机细分驱动技术是十分有必要的。

1.2 步进电机细分系统设计方案

根据实际应用的需要，本系统结构由如下几个部分组成。具体包括单片机微处理器单元、步进电机细分驱动硬件电路、系统供电电源、外部交互键控单元等组成。驱动控制器的微处理器核心采用常用的 STC89C51 微型单片机。这里的 STC89C51 单片机微型控制器是系统的控制中心，人机交互部分通过 CPU 接收按键得到外部发送的指令，包含 PWM 控制的频率、步进电机运行的方向以及速度等方面的信息。同时，微处理器经过对信号指令解析之后对硬件电路和步进电机发出执行命令。系统设计方案如图 1 所示。

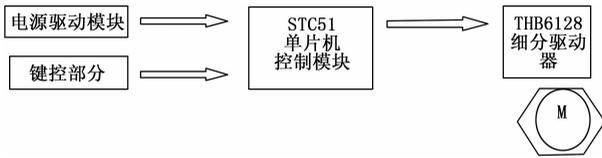


图 1 整体硬件结构

2 基于 THB6128 的硬件电路的设计

2.1 单片机控制单元

本文所使用的微处理器核心式 STC 系列单片机 STC89C51。该处理器内含有可编程 Flash 程序存储器、存储器 ROM 和 RAM、全双工异步通信模块 UART、SPI 以及 8 位模数转换器 A/D 等模块。有 ISP (In-System Programming)，无需专用编程器^[15]。该单片机已完全能满足电机的驱动控制。单片机的两个端口分别接细分驱动器 THB6128 的 PWM 控制端 CLK 和方向控制端 CW，另有 5 个端口分别接独立按键控制调节单片机 PWM 输出占空比，以调节步进电机的速度。

为了提高系统的抗干扰能力，本文采用隔离电路的策略来增加系统的抗干扰能力。光耦元器件 TLP-521 是基于光敏器件的开关特性，可以实现高速开关量传递的器件。因此本文利用该光电隔离器将输入的外部脉冲信号与 IO 口隔离开，使得外部开关量的和 IO 口的传递变化不影响单片机控制系统的性能，从而提高系统的可靠性。电路接口电路设计如图 2 所示。这里的 R7、R8 为上拉电阻，为达到限流的作用，这里电流大小为 10 mA 左右。

2.2 基于芯片 THB6128 的细分驱动电路的设计

THB6128 是日本三洋公司生产的一款二相步进电机驱

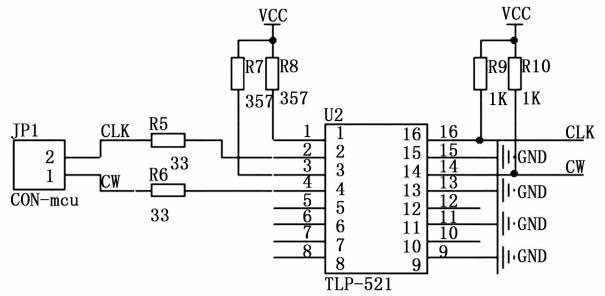


图 2 光电隔离电路

动专用芯片^[16]。该芯片采用了 MOSFET 的双全桥驱动方法，具有大电流的耐受能力，其最大直流耐压达到 40 V，峰值电流为 2.2 A。虽然内部耐流和耐压的数值较大，但是该芯片内部具有较强的温度和过流保护电路，安全性能较高。以 $(\frac{1}{2})^n$ 为基数对电机步长进行细分， n 为细分数，可以选定 0、1、2、3、4、5、6、7 等 8 个等级。同时快衰、慢衰和混合式 3 种可选的衰减模式使芯片的使用非常方便。

THB6128 芯片具有芯片内部集成度高，外围电路极其简单，可靠性极高。电子工程师在使用该芯片时，只需要需要设定斩波频率，衰减模式，复位信号即可。为了达到稳定驱动的目的，芯片对电机采用电流驱动的方式进行细分控制。

THB6128 的斩波频率通过 OSC1 口设定，斩波电路输出信号的频率直接影响电机噪声的大小。在实际应用中，考虑电机产生的热量和本身噪声大小的的影响，一般会选择合适的电路输出斩波频率。在噪声方面，信号输出频率与电机噪声成反比。相反的，电机产生的热量却与斩波电路的输出频率成正比。结合不同的应用电路，经验上电路输出频率域其对应的电容通常选择在 100~470pF 之间。经过实验测试，该系统电路选择 220 pF 效果较好。斩波频率由 OSC1 端端子连接的电容，依据下面的公式设定。

$$F_{CP} = \frac{1}{C_0 S_{C_i} / 10 \times 10^{-6}} \text{Hz} \quad (1)$$

$C_0 S_{C_i}$ 为 220 pF 时， $F_{CP} = 220 \text{ kHz}$ 。在 THB6128 的 3 种衰减模式中。在混合式衰减模式中，通常慢衰减和快衰减通常由 4:1 的比例关系组成。在实际应用过程中，为了避免出现震动、高噪音以及定位不准确问题，通常根据电机的速度不同，选择不同的衰减。即高速时选择快衰减，低速时选择慢衰减。通过控制 THB6128 芯片上的 H 桥开关管的控制模式，使电机进入不同的衰减模式。这里的混合衰减是指电机先工作在快速衰减模式，然后再进入慢速衰减的工作模式。系统可以通过控制 FDT 端口的输入电压来达到实现衰减模式的目的。首先端口电压 V_{FDT} 小于 0.8 V 时，芯片进入快衰减模式，而 V_{FDT} 的值在 1.1 V 和 3.1 V 时则进入混合衰减模式，在端口电压大于 3.5 V 是进入慢衰减模式。

本设计中，输入电压 V_{FDT} 设定为 2.5 V，即选择混合

衰减模式。复位信号通过 RESET 管脚设定, THB6128 采用的是低电平复位。为了保证系统的稳定性, 本设计采用上电复位方式。V_{REF} 为电机电流设定端口, 调整此端电压即可设定驱动电流值的大小。

芯片的细分数可以通过 M1、M2、M3 三个端口进行的三选一译码选择得到。即 M1M2M3 的二进制数值从 000 变化到 111, 其细分数也从 1 变化到 1/128。

本系统采用的是 THB6128 的八细分模式, 将 M1、M2 通过上拉电阻接 5 V 电源, M3 接地, 即选择八细分。电机得到脉冲运转的过程中会产生热量, 温度过高将会影响实际应用, 通过半流锁定可以降低发热。即在没有脉冲输入的时候, 电流自动降为原来的一半, 通过这种方法来降低电机和驱动器的发热, 达到使系统节能稳定的作用。芯片 THB6128 的 OSC2 管脚可以用来实现控制保持通电电流切换时间的功能。保持电流时间 (T_{down}) 的大小由 OSC2 端子的电容充放电时间决定, 具体计算公式如下:

$$T_{down} = C_{OSC2} \times 0.4 \times 10^9 (s) \quad (2)$$

在本电路系统里, 设定保持电流通电的时间常数为 T_{down} = 0.6 s, 根据式 (2) 可知 C_{OSC2} 容量值设定为 1500pF。

为了芯片使用的安全, THB6128 芯片内部进行了保护电路设置, 即首先使电路工作在待机模式, 对电路进行检测, 当检测出电路处于短路状态时, 芯片进入关断输出状态。等待延时之后, 对电路再次进行检测, 如果发现仍然有短路的情况, 则输出进入固定待机模式。以达到防止对电源对地短路导致芯片损坏。

THB6128 对电机的控制, 系统只需要通过单片机模拟脉冲, 向 CLK 脉冲输入端输入脉冲实现对电机的速度和电机的启停等的控制。

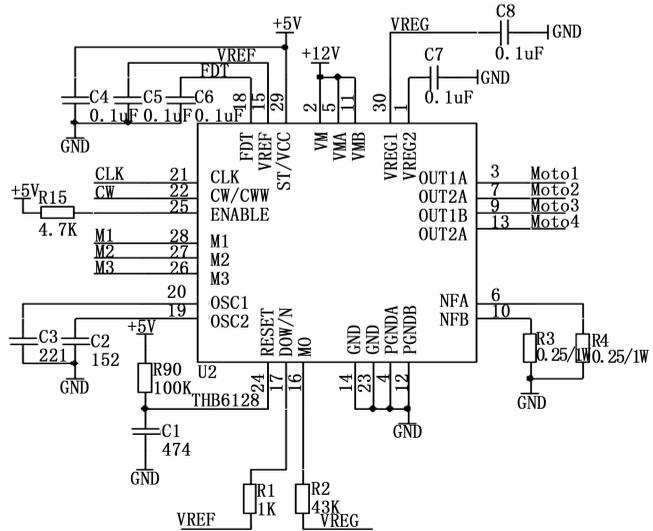


图 3 THB6128 驱动器电路

THB6128 驱动器电路如图 3 所示。引脚 M1、M2 和 M3 采用编码的形式选择步进电机的细分基准, 本系统中步进电机最大细分数为 1/128。端口 CW 电机转动方向控制端。改变 CLK 时钟频率输入端时钟频率可以有效控制步进

电机转动速度。DOWN 为通电锁定时输出端, 锁定进入待机模式时, 电机电流会被锁定在 0.35 A, 降低电流, 可防止驱动器过热。

FDT 为衰减模式选择电压输入端, 根据驱动芯片的设置的特点, FDT 上分的电压不同即表示不同的衰减模式不同。同时电机的速度不同, 选择的衰减模式不同, 高速时选择快衰减, 低速时选择慢衰减。通过 FDT 口输入电压控制, 在实际应用中, FDT 端口电压通过电阻分压原理得到。本设计中, FDT 输入电压设定在 2.5 V, 即选择混合衰减模式。V_{REF} 为电机电流设定端, 调整此端电压即可设定驱动电流值。驱动电流:

$$I_o = V_{REF} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{R_s} \quad (3)$$

R_s 为 NFA (B) 外接检测电阻。本设计中, V_{REF} 取 1.0 V、R_s 电阻为 0.25 Ω, 设定电流为 I_o = 0.85 A。

3 驱动程序设计

在硬件电路的基础上, 基于系统控制方法故得到如下程序流程图, 如图 4 所示。主程序是一个顺序执行的无限循环任务。主程序开始时, 先对硬件进行初始化以及软件系统参数进行初始化设置。比如开机自检以及电机初始化位置设置。电机的软件驱动部分包含了电机额定负载的设置, 即对于步进电机的最大负载设定极限输出。

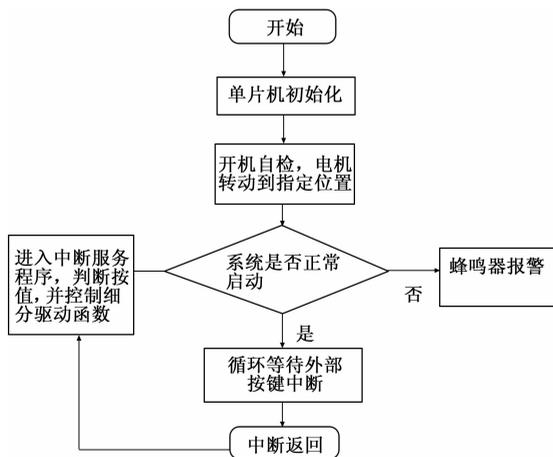


图 4 主程序流程图

如果系统正常则进入是一个喂狗死循环, 等待外部中断信号指令的到来, 否则启动系统报警程序。当中断服务信号来临时, 程序则跳转进入中断服务程序, 即对应的步进电机细分驱动程序。在这里, 系统遵循步进电机的位置转矩与脉冲频率的数量严格成正比。在步进电机控制过程中, 软件控制脉冲的个数、频率以及绕组上电的顺序就可以实现对电机位置、速度以及方向的控制。本软件系统通过控制两相混合式步进电机来验证细分控制技术的效果。两相混合式步进电机是更加常见的步进电机, 它具有很高的步进频率和快速响应的特点。所采用的两相四线混合式步进电机, 基本步角度为 1.8°。由于步进电机的驱动要求的需要, 电机不能和 IO 口直接相连。因此单片机需要直接

控制驱动器 THB6128 来实现细分技术的控制。

对于电机的控制采用按键形式的人机对话的方式来实现,即 4 个键盘按键设定电机的初始位置和以及细分的形式。同时,单片机接收到外部人机接口命令后首先把与该指令对应的译码信息通过 I/O 口发送给驱动器上,响应当前的指令要求。

本文中中断服务程序采用模块化思想设计,即根据具体的按键数进入对应的步进电机细分驱动程序。处理器上电后首先进入软件服务主程序,每当有速度控制按键信号输入时,就会产生中断,在中断服务子程序中判断是否有速度反馈信号,如果没有速度反馈信号,就直接执行细分驱动程序,稳步运行,如果有,就按照输入的控制命令改变 PWM 输出的占空比从而改变电机运行的速度,再调用细分驱动程序。

在细分驱动程序里,为了得到系统的循环磁场,使得步长进行均匀变化,假设每相绕组电流的参考正弦波阶梯信号是理想的。在每相电流信号的中间态具有 7 个稳态,但是经过细分之后,每相电流以 1/4 的步长进行上升或者下降。通过转向角实现原始步长,其具体长度由步进电机细分的精度决定。该细分算法可以实现步进电机的平滑运行,最重要的是该算法大大消除了由于细分不均匀而引起的电机震动问题。

4 实验结果

细分之前,输入电机的脉冲为干扰很大的方波,如图 5 所示。该信号电压为 12 V,电流为不超过 1.2 A。脉冲宽度调制的最大优势是通过调节脉冲的宽度来调节电流的大小,实际上是通过改变电流变化的速度来控制电机步进角度的精度。即步进电机的驱动细分实际上就是电流信号的变化速度的细分。通观察细分之前的采样信号进行分析对比,很明显,该信号使步进电机的转动角度很大,很容易引起电机的运动偏转,造成控制系统更大的误差。并且没经过细分的电机运行起来颤动非常厉害,难以满足诸如医疗设备等精度及平稳性要求较高的应用领域。这种误差还对电机的寿命产生不利的影响。本控制系统中采用恒幅电流矢量角度旋转法就是利用电流相位放大的原理进行的。



图 5 不细分输出的进入线圈的脉冲波形图

恒幅电流矢量角度法的控制电路简单,容易实现。然而,这种方法在实际应用中的最大的挑战是输出转矩会随



图 6 经过细分后进入线圈的脉冲波形图

着电流合成的矢量幅度方向发生变化,这就会引起控制系统的不稳定。这种控制误差容易导致细分角度的不均匀,这种不均匀容易引起步进电机的震动,从而影响控制系统位置的精度。本系统中,为了克服上述的问题,采用了控制相位电流变化的方法,使每一相绕组合成的矢量电流变化跟随整个系统电流合成幅度的变化而变化,并且使二者变化一致。比如角度幅度旋转变化法,这是一种恒定幅度电流旋转变换的方法。

图 6 给出了经过本细分控制系统后绕组后进行的二分之一细分的脉冲波形。如图所示,很明显细分之后,经过驱动器进入电机时的波形有明显变化,脉冲呈现阶梯状分布,即该种模式实现对基本步角的二分之一细分,在此基础之上的进一步细分控制会更加有保证,提高了步进电机的精度。同时大范围的电机干扰信号的影响也大大减少。细分驱动系统电路实物如图 7 所示。测试结果表明,经过细分之后的电机运行非常平稳,电机的噪音也有所改善,明显的电机噪声比之前大幅减小。精度提高,系统各个性能都能达到预期效果。

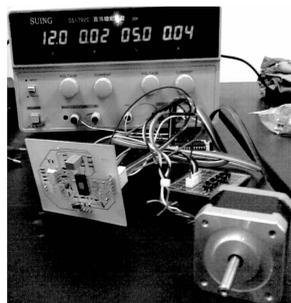


图 7 系统测试电路

5 结论

本文以两相混合式步进电机细分技术为研究对象,研究了两相混合式步进电机细分驱动控制系统的整体系统结构方案。设计了基于单片机技术的步进电机细分技术软硬件系统控制方案。采用细分驱动芯片 THB6128 驱动器的硬件电路核心,使用 PWM 控制技术可以实现步进电机的稳定可靠和达到节能环保的目的。实验结果表明,本文采用的 PWM 细分驱动技术和硬件驱动芯片相结合的方法不但实用有效,而且具有电路简单,成本低廉的特点。

(下转第 175 页)