

基于单片机的步进电机细分驱动器设计^{*}

陈兴文¹, 刘 燕²

(1. 大连民族学院, 辽宁 大连 116600; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘 要: 在对步进电机细分驱动技术和控制环节研究的基础上, 提出了基于电流矢量恒幅均匀旋转和电流追踪型脉宽调制技术, 实现三相混合式步进电机细分驱动器设计。对整个系统的架构及硬件电路和驱动软件的实现都做了详细介绍, 通过试验对该系统的可靠性和步进精度进行了测试。试验结果表明该系统能够满足用户的定位精度要求, 有效抑制了运行噪声和机械振动。同时由于该系统实现了恒力矩细分驱动, 从而提高了系统的可靠性, 降低了成本, 具有较强的实用性。

关键词: 正弦脉宽调制; 混合式步进电机; 细分驱动

中图分类号: TM302 : TM383.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)07-0030-04

Design of Micro-Stepping Driver for Stepper Motor Based on MCU

CHEN Xing-wen¹, LIU Yan²

(1. Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With researching of micro-stepping driver and control technology for stepper motor, the current vector even rotation with uniform amplitude and current tracking PWM technology are presented. The micro-stepping driver for three-phase hybrid stepper motor has been designed. The system structure, hardware circuit and software driving are introduced in detail. The system reliability and stepper accuracy are tested by experiment. The experiments indicate this system can meet user accuracy needs and effectively reduce operation noise and mechanical vibration. Meanwhile, the realization of invariable torque micro-stepping drive technology can effectively reduce the cost, improve system reliability and application.

Key words: SPWM; hybrid stepper motor; micro-stepping driver

0 引 言

步进电机是一种将电脉冲信号转换为角位移的执行机构, 步进电机的主要优点是: 有较高的定位精度, 无位置累积误差及特有的开环运行机制, 与闭环控制系统相比, 可减少系统成本, 并提高了可靠性, 在数控领域得到了广泛应用。步进电机的使用离不开步进电机驱动器, 步进电机的运行性能与步进电机驱动器的优劣密切相关, 而且步进电机和配套驱动器的品种繁多, 通用性差。

本文在调研各种驱动技术的基础上, 设计实现了基于电流矢量恒幅均匀旋转和电流追踪型脉宽调制 (PWM) 技术的多细分三相混合式步进电机驱动器。为了满足不同用户和不同电机的要

求, 本设计具有多种细分方式和步距角种类, 可以输出不同的相电流。试验表明, 驱动器细分运行时减弱了混合式步进电机的低速振动, 电机运转平稳, 大大减轻了噪声。

1 细分驱动器设计原理

1.1 细分驱动方案论证

通常步进电机细分驱动有等电流细分驱动法和电流矢量恒幅均匀旋转法。等电流细分驱动法在每次绕组电流进行切换时, 不是将绕组电流全部通入或切除, 而是在一相绕组电流保持不变的情况下, 另一相绕组电流均匀的增大或减小, 这样使得电机的合成磁场只旋转原电角度的一部分, 转子转过的角度也为步距角的一部分, 实现了细

^{*} 辽宁省教育厅科研基金 (2007098)

分驱动。但是等电流法不能实现均匀细分步距角,而步距角不均匀又容易引起步进电机的振荡和失步;另外,由于电流矢量的幅值不断改变,输出力矩的大小也无法保持恒定。

为了使细分后的步距角均匀一致,且输出力矩恒定,本设计采用了电流矢量恒幅均匀旋转的细分驱动方法。该方法在空间上将彼此相差 $2\pi/m$ 的 m 相绕组,分别通以相位相差 $2\pi/m$ 而幅值相同的正弦电流,则合成的电流矢量(或磁场矢量)便在空间作旋转运动,且幅值保持不变。这样每当辐角矢量 α 的值发生变化时,合成的矢量都转过一个相应的角度,且幅值大小保持不变,从而实现恒力矩、均匀步距角的细分驱动。

1.2 控制环节设计方案

根据细分电流原理的分析,驱动器的控制系统对提高步进电机的运行性能至关重要。驱动器的控制环节采用电流跟踪型正弦脉宽调制(SPWM)方式,由细分信号发生环节、细分控制环节和 PWM 环节等组成。将给定信号与电机电流实测信号相比较,若实际电流值大于给定值,则通过逆变器开关器件的动作使之减小;反之,则增加。实际输出电流围绕着给定的正弦波电流作锯齿形变化,并将偏差限制在一定范围内;与此同时逆变器输出的电压波成为 PWM 波。如果逆变器的开关器件具有足够高的开关频率,则电机电流就能很快地调节其幅值和相位,使电机电流得到高品质的动态控制。

2 步进电机细分驱动器的设计

驱动器的总体方案如图 1 所示,整体上可分为主回路、控制电路和开关电源三大部分。主回路部分采用交直交电压型逆变电路形式,由整流滤波电路、三相逆变电路及混合式步进电机等组成。三相逆变桥电路实现从直流到交流的转换,为三相混合式步进电机的定子绕组提供要求的交流电流。三相逆变电路由一块智能功率模块(IPM)构成,内部集成了 6 只绝缘栅双极晶体管(IGBT)和相应的保护电路,构成三相逆变桥式电路。驱动器采用 2 只霍尔电流传感器检测步进电机线电流的瞬时值。

控制电路部分由单片机控制器、比例积分调节电路、SPWM 电路和接口电路组成。单片机根

据电机控制器发来的步进脉冲、方向信号和细分设置值,发出相位相差的正弦波,与电机绕组反馈电流相减后再经过比例积分调节器,与三角波进行电压比较,生成 SPWM 信号,通过接口电路控制 IPM 内的开关,从而使三相混合式步进电机的绕组电流按正弦规律变化,驱动电机转子运转。开关电源用来给驱动器内部的控制电路和 IPM 的控制侧提供多路电源。下面就总体设计方案中的核心部分设计进行具体讨论。

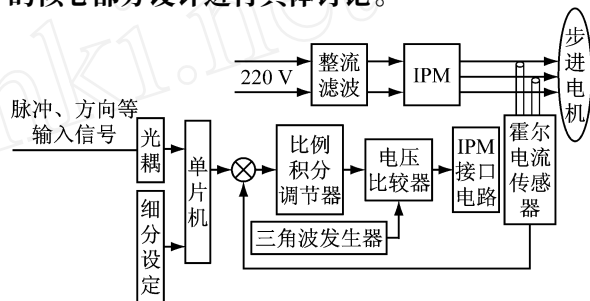


图 1 细分驱动器总体框图

2.1 单片机控制电路

单片机需要处理步进脉冲信号(CP)、方向控制信号、脱机信号和 IPM 的故障信号等输入信号,这几种信号均通过光耦连接到单片机的引脚上。另外还有细分步数设置信号。

在实际运行中,电机绕组电流为阶梯状,正弦阶梯电流的每一阶与电机的每一步相对应,电机每转的步数就是每一个周期正弦电流的阶梯数与电机的磁极对数(转子齿数)的乘积。典型的三相混合式步进电机转子为 50 齿,如果一个周期的正弦阶梯电流阶梯数是 20,那么电机的每转步数为 $20 \times 50 = 1\,000$ 步/转。如果用一个 8 位数模转换器,理论上可把相电流最大 256 等分,则电机的每转最大步数为 $256 \times 50 = 12\,800$ 步/转。本设计选用的是 Philips 公司的 P87LPC769 单片机,本身自带 8 位 D/A。电路工作时,单片机根据 CP、方向信号和当前的细分设置,从单片机存储器中取出相应的正弦阶梯波的数字量,写入 DAC 寄存器,经过 D/A 转换后输出正弦阶梯波到电平转换电路。

当出现脱机信号时,驱动器输出到电机的电流被切断,电机转子处于自由状态(脱机状态)。电机运行中,单片机收到 IPM 的故障信号时,要在 1.8 ms 内通过 I/O 口立即输出封锁信号,使输

入 IPM 的 PWM 信号无效以保护 IPM, 等故障排除后方可重新有效。

2.2 电平转换与第三相正弦波合成电路

由于单片机的数模转换器的输出电压范围是 $0 \sim 5 \text{ V}$, 需要进行电平转换, 从 $0 \sim 5 \text{ V}$ 变换为 $-5 \sim 5 \text{ V}$, 该电路如图 2 所示。该电路中运放的正相输入端接来自单片机输出的正弦波, 即: $U^+ = 2.5 + 2.5 \sin \omega t$, 通过该电路可将正弦波由 $0 \sim 5 \text{ V}$ 变为 $-5 \sim 5 \text{ V}$ 。

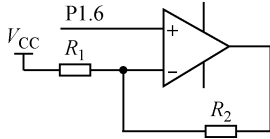


图 2 电平转换电路

三相混合式步进电机一般把三相绕组连接成星形或者三角形, 按照电路基本定理, 三相电流之和为零, 即 $I_a + I_b + I_c = 0$ 。单片机只需要产生二相绕组的给定信号, 第三相绕组的给定信号可根据其他二相求得, 第三相正弦波合成电路见图 3。

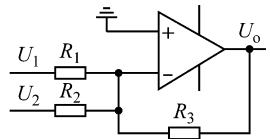


图 3 第三相正弦波合成电路

2.3 电流反馈和比例积分电路

在本驱动器中, 用两个霍尔电流传感器分别测量三相电机中二相绕组的实际电流, 第三相绕组的实际电流也用图 4 所示电路产生。

选用的霍尔电流传感器检测电流与输出值之比为 $500:1$, 电流反馈信号通过电阻转化为电压信号, 经电压跟随器送入比例积分调节电路。电压跟随器输出电阻很小, 输入电阻很大, 能真实地将信号传递给负载, 而向信号源索取的电流极小。

比例积分调节器可使系统动态响应速度较快, 而其积分调节作用又使系统基本无静差。图 4 是电机一相绕组的电流反馈和比例积分电路, 该电路比例放大系数为 R_2/R_1 , 积分时间常数为 R_{IC} 。

2.4 IPM 接口电路的设计

从图 5 接口可以看出, IPM 通过专用高速光耦与 PWM 信号相连。为了保证 IPM 的正常工作, 要求同一通道的上下两臂的控制信号在导通时间上有一个时间间隔, 即“死区时间”。本设计

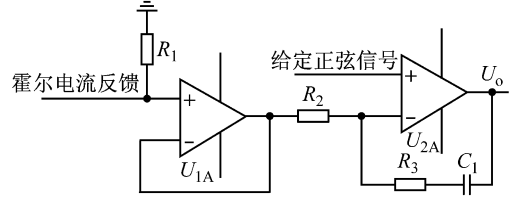


图 4 电流反馈和比例积分电路

通过与 PWM 信号相连接的电阻 R 和电容 C 组成的电路来达到死区时间要求。在 IPM 中设有故障输出信号 F0, 当出现欠压、过热、过流、短路等任意一种故障时, IPM 内部保护电路都会关断 IGBT, 并使相应的输入信号无效, 并将 F0 信号通过光耦连接到单片机。

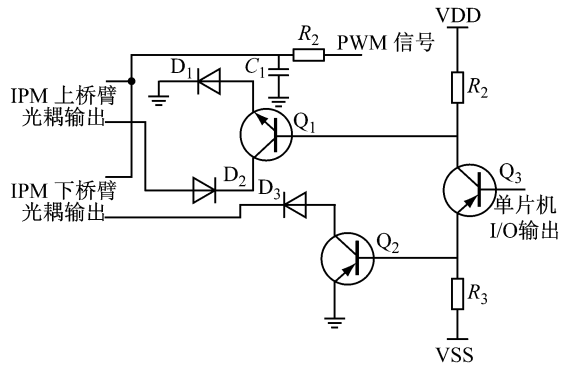


图 5 IPM 接口电路

3 细分驱动软件修正方法

利用“电流矢量恒幅均匀旋转”的细分方法, 从原理上解决了实现高精度细分方法的技术问题。但在建立细分电流波形的数学模型时, 假设了: (1) 矩角特性曲线是正弦曲线; (2) 多相通电时的矩角特性曲线可以由各相通电的矩角特性曲线迭加而得; (3) 电流与力矩具有平方关系。由此可判断步进电机内部存在非线性误差。因此, 即使采用了电流矢量恒幅均匀旋转的细分方法, 由于电机绕组电流与合成磁场间非线性的存在, 合成的磁场矢量不能跟随电流矢量旋转, 按照理想细分电流模型得到的细分步距角有一定误差。

为进一步减小步进电机细分步距角的误差, 提高电机运行精度, 在软件设计上采用最小二乘法对步进电机非线性造成的误差进行了拟合与修正。由于采取电流矢量恒幅均匀旋转的细分驱动方法在电机运行时, 各绕组电流值同时改变, 所以要拟合出细分步距角与绕组电流函数较困难。

经过分析可知,绕组在通入电流较小时,磁场处于欠饱和状态,通入电流较大时,磁场与电流近似成正比。电机运行时,一相绕组电流由零增加至最大值,另一相绕组电流由最大值减小到零。因此可认为电流较小的绕组相磁场处于欠饱和,存在非线性,而电流较大的绕组相电流与磁场近似成正比,不存在非线性。为了简化问题,采取了分段拟合的方法,即在电机运行的上半程(转子转过的角度小于 0.90°)用一相绕组电流进行拟合,在电机运行的下半程(转子转过的电角度小于 1.80° ;大于 0.9°)用另一相绕组电流进行拟合,这样函数 $\theta = f(i_1, i_2)$ 就分为两部分:

$$\begin{cases} \theta = f(i_1), 0 < \theta < 0.9^\circ \\ \theta = f(i_2), 0.9^\circ < \theta < 1.8^\circ \end{cases}$$

4 驱动器性能测试

借助旋转编码器,对电机细分设置为 12 800 步/转和 400 步/转两种情况进行测试。当电机转子转 10 圈,则旋转编码器也应该转 10 圈,信号采集器理论接收 $1\,024 \times 10 = 10\,240$ 个脉冲。10 次测试结果如表 1、2 所示。从测试结果可看出,无论是在无细分(400 步/转)和最大细分下(12 800 步/转),电机的运行都有很高的精度。

表 1 400 步/转精度测试

频率	次数										平均绝对误差	相对误差 / %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
500 Hz	10 242	10 239	10 239	10 240	10 240	10 241	10 239	10 239	10 238	10 238	1.1	0.01
5 KHz	10 237	10 237	10 238	10 239	10 236	10 238	10 235	10 237	10 239	10 235	2.9	0.03

表 2 12 800 步/转精度测试

频率	次数										平均绝对误差	相对误差 / %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
16 KHz	10 241	10 240	10 239	10 243	10 238	10 241	10 242	10 242	10 244	10 242	1.8	0.02
150 KHz	10 244	10 240	10 242	10 239	10 238	10 246	10 239	10 237	10 242	10 245	2.4	0.02

【参考文献】

[1] 陈兴文,刘燕.基于单片机控制步进电机细分驱动的实现[J].机械设计与制造,2005,178(12):91-92
[2] 林伟杰,李兴,潘安克.三相混合式步进电机正弦波

细分驱动的研究[J].中小型电机,2003(5):26-28
[3] 周明安,朱光忠,宋华晓,等.步进电机驱动技术发展及现状[J].机电工程技术,2005,34(2):16-17.
收稿日期:2008-02-24

(上接第 18 页)

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} = \frac{10^6}{60 \times 3\,000} \times 169 = 940 \text{ 工作小时}$$

(4) 确定可靠性系数 a_1 。由于可靠性要求为 90%,所以 a_1 取 1。

(5) 确定 a_{SKF} 。通过查表得出: d_m 为 72.5 mm, k 为 $2.45 \text{ mm}^2/\text{s}$, P_u/P 为 0.134,污染系数为 0.8,再根据图 3 得出 a_{SKF} 为 8。

(6) 根据可靠性为 90%,SKF 额定寿命 L_{10m} 为 1 352 百万转,折算成时间为 7 512 工作小时。

(7) 根据计算结果,对比表 1 或客户需求来确定初选方案是否满足条件。如不满条件,就要适度放大或者缩小轴承,或者更换轴承类型。至此,轴承寿命校核结束。

5 结 语

轴承的疲劳寿命校核计算(或者说额定寿命计算),是轴承选型设计时候的一个非常重要的工具。工程实际中很多情况的校核计算都可以用上述方法进行粗略校核。但如果需要更加精确的计算,需要借助于一些计算机辅助程序进行。

【参考文献】

[1] SKF(中国)有限公司. SKF 轴承综合型录[G]. 2008

收稿日期:2009-06-03