

高稳定度步进电机驱动电路设计

张 瑞, 常静波, 刘银年

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要:介绍了一种采用细分技术的高精度、高稳定度的步进电机驱动电路, 其以 EPROM 与 FPGA 为核心器件构成环形分配器, 采用升频启动, 电机根据升频曲线从启动状态平稳地过渡到工作状态。实验结果表明, 电机按该驱动方案工作时, 可以获得很高的周期稳定性。
关键词:步进电机; 周期稳定性; 升频启动; 细分技术

Circuits Design of High Stability Stepping Motor Drive

ZHANG Rui, CHANG Jingbo, LIU Yinnian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

【Abstract】A circuit for the high precision and stability drive which uses subdivision technology is described. The circuit mainly uses EPROM and FPGA to constitute the pulse distributor. The circuit adopts the ascending frequency startup to make the stepping motor have a smooth transition from startup state to the working state. The experimental data illustrates that the stepping motor can have high period stability in use of the drive circuit.

【Key words】Stepping motor; Period stability; Ascending frequency startup; Subdivision technology

步进电机是一种将电脉冲信号转换成相应的角位移或转速的精密执行元件, 其转速只与脉冲频率成正比, 在负载能力范围内这些因素不因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化。步进电机采用开环控制, 避免了闭环控制的复杂性、减小了系统的成本, 却可以获得接近闭环的良好控制性能, 基于以上优点, 步进电机在航空航天遥测中被广泛应用。

某对地观测系统使用了四相感应子式步进电机, 此步进电机驱动双面镜扫描实现对地观测, 为了保证获得的扫描图像没有错位, 要求电机驱动的双面镜的转速周期不稳定性不大于 $9\mu\text{s}$ 。高稳定度的电机驱动电路不仅要保证电机在连续运行时具有很好的周期稳定度, 更要保证电机能够从起始状态稳定地过渡到连续运行状态。由于红外相机总体的功耗一定且有限, 因此作为子系统的步进电机驱动电路要保证能够在低功耗的状态下工作。本系统采用了 FPGA、EPROM、升频启动和细分技术, 设计实现了空间用高稳定度步进电机驱动电路。

1 驱动电路总体框架

步进电机需要专门的驱动电路驱动, 驱动电路和步进电机构成一个有机整体。在电机一定的情况下, 电机的运行性能取决于驱动电路。驱动电路一般由变频信号源、环形分配器、功率放大器这 3 部分组成。其中变频信号源是一个频率连续可变的脉冲信号发生器, 脉冲分配器将脉冲信号按一定的逻辑关系加到放大器上, 使步进电机按一定的运行方式运转。功率放大电路有单一电压源、高低压切换型电源、单电压斩波恒流电源, 细分电路等形式。

四相步进电机有以下 3 种运行方式: 四相单四拍, 四相八拍, 四相双四拍。其通电顺序分别为: 四相单四拍: A->B->C->D->A...; 四相双四拍: AB->BC->CD->DA->AB...; 四相八拍: A->AB->B->BC->C->CD->D->DA->A...

四相单四拍在换相瞬间可能导致相电流的缺失从而影响系统工作的稳定性, 其余两种方式在任何时刻至少有一相通电, 避免了这样的问题; 步进电机在两相通电时力矩较大, 大约是单相的 1.4 倍, 因此四相双四拍可以取得最大的驱动力矩, 但其牺牲了一定的定位精度。由于系统对与电机的周期稳定性有很高要求, 因此系统中采用的是四相八拍的运行方式。

图 1 为本系统的驱动电路结构框图, 晶振、反相器、电容、电阻构成的外部串联谐振晶体振荡器电路产生 15MHz 的时钟, 此时钟输入给 FPGA, 在 FPGA 中分频产生系统所需要的时钟信号, 相当于一变频信号源; FPGA 与 EPROM 及 D/A 转换器构成了系统所需的环形分配器, EPROM 中存放四相八拍运行时所需数据, FPGA 产生 EPROM 的地址信号、选通信号及 D/A 转换器的片选信号, EPROM 的数据读出后经过 4 个 D/A 转换器, 分别经过 4 个功率放大电路产生四相绕组所需要的电流, 此电流输入给电机从而驱动电机转动。

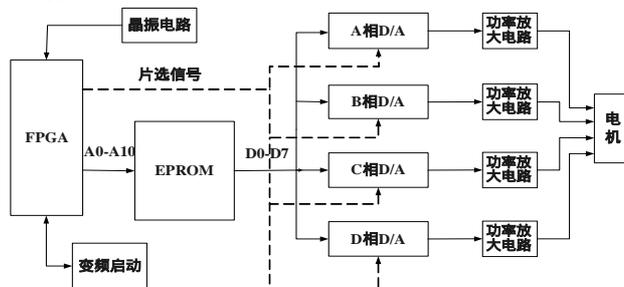


图 1 电机驱动电路原理

作者简介:张 瑞(1981 -), 女, 硕士生, 主研方向: 红外光电遥感电子学系统; 常静波, 硕士生; 刘银年, 研究员

收稿日期:2006-04-25 **E-mail:** zhang_rui@ustc.edu

2 升频启动

在一定的负载转矩下,电机能够不失步、不丢步、正常启动时所加的最高控制频率称为启动频率,其启动频率要比连续运行频率低很多。因此电机不可能一步达到运行频率,必须从一个较低频率开始启动;但是步进电机自身存在不可避免的低频共振现象。即当控制脉冲频率等于或接近步进电机振荡频率的 $1/k(k=1,2,3,\dots)$ 时,电机就会出现强烈振荡甚至失步或者无法工作,因此电机的启动过程要尽量避开电机的低频共振点。

常用的升频曲线主要有以下几种:直线型,指数曲线型,抛物线型。直线型升频没有考虑到电机的矩频特性,其整个加速过程需要的转矩是恒定的,使得启动过程在低频时不能充分利用电机提供的较大转矩,而在高频时又容易失步;指数型升频过程认为步进电机的转矩在频率较低时恒定,随着频率上升转矩近似于线性下降;抛物线型升频过程认为在启动频率后的一段时间内,转矩随频率线性下降,其倾斜率不大,而当频率较大时,转矩随频率的下降加快。在系统的研制过程中,测定了系统所使用电机的矩频特性,此特性能够与抛物线型升频曲线所设定的矩频特性很好地吻合,从而保证步进电机从起始状态稳定地升频到工作状态。因此,电路中采用抛物线型启动曲线,其数学模型为

$$f = \frac{f_2 - f_1}{T^2} \times t^2 + 2 \times \frac{f_2 - f_1}{T} \times t + f_1$$

图2为升频曲线。

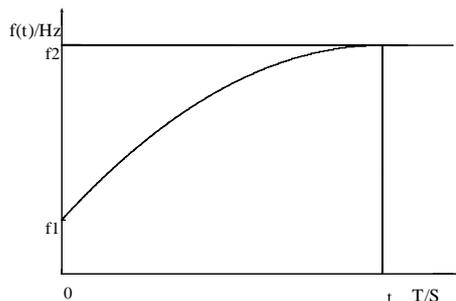


图2 升频曲线

本系统要求的运行频率是固定的,因此曲线中的 f_2 是固定的,但是如何选取起始频率 f_1 是研究过程中亟待解决的问题。在系统的研究过程中,尝试了各种起始频率的选取方法,最终发现若电机起始频率 f_1 的选取遵循以下的原则,步进电机就能够稳定地启动。

(1)若电机的低频共振点低于电机启动频率,则起始频率 f_1 应高于电机的低频共振频率、低于电机自身的启动频率,并且与二者间都应留有足够的余量;

(2)若电机自身的低频共振频率高于电机的启动频率,则不可能按照原则(1)的方法选取,即电机在启动过程中会不可避免地遇到低频共振点,此时起始频率 f_1 的设定应低于启动频率并留出余量。为了避免电机在共振点处振荡,按下述方法修改升频曲线:增大升频曲线在低频共振点附近的斜率,此时电机运行到低频共振点附近时,可在短时间内跳过此频率,从而稳定的加速。

在电路设计中,将升频曲线的数据存放于 EPROM 中, FPGA 将 15MHz 时钟分频后产生需要的时钟信号,基于此时钟产生 EPROM 需要的地址信号和片选信号, EPROM 的数据读出后经过数模转换器、压频变换器产生需要的频率值。

3 细分技术

步进电机在运行状态下,转子运动是一衰减振荡过程,

即转子环绕平衡位置做振幅不断衰减的振荡,最后稳定于平衡位置。其振荡的幅度与电机的步矩角有很大关系:步矩角越大,振荡的幅度也越大,因此可通过减小步矩角使转子振荡趋势减小。

电路采用四相八拍的运行方式,其步距角是单拍制步距角的一半,但是其仍然不能满足系统提出的电机运行速度稳定性的要求,因此电路设计采用细分技术。

细分技术是指把步进电机的步距角减小,把原来的一步分成若干步,这样步进电机的运动近似地变为匀速运动,明显提高了步进电机的分辨率;而且由于每一单步增量小,即使在谐振区也不容易失步,电机运行平稳、振动小、噪声低。

为了实现细分驱动目的,步进电机绕组用阶梯电流波供电。阶梯等级与细分数有关,系统中采用 32 细分技术,即将原来的一步分成了 32 小步来完成,如图 3 所示。

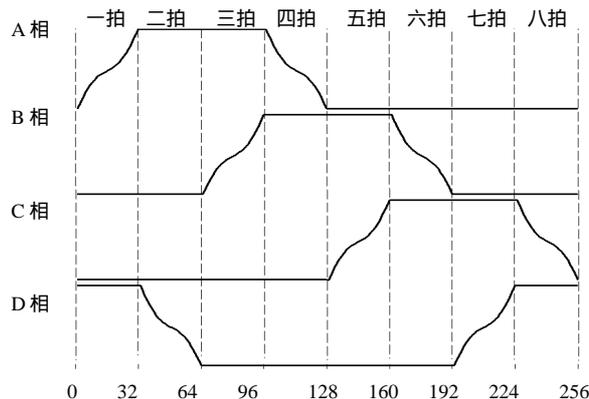


图3 四相八拍细分电流波形

细分电流波形采用线性和正弦组合的方式,这种方式与步进电机矩频特性的非线性趋势吻合较好,用此波形驱动较均匀、性能好、振动最小。其上升沿、下降沿的数学模型为

$$\text{上升沿: } C(n) = 255 * \frac{n}{32} + 25 * \sin(2 * \pi * \frac{n}{32})$$

采用软硬件结合的方法实现上述细分驱动:将以上细分数据存放于 EPROM 中,在 FPGA 的控制下,将 EPROM 的数据依次读出,输出给 D/A 转换器, FPGA 产生 D/A 所需要的片选信号,将各相对应的数据依次转换后送给功率放大电路,产生各相所需电流。

若各相数据单独存放于一个 EPROM 中,则电路共需 4 个 EPROM,电路的体积变大、复杂性提高,因此实现时采用四相数据共用一个 EPROM 的方式。根据图 3 可以计算出 EPROM 中需要存放的数据个数,各相一拍采用 32 细分,则需 32 个数据,各相八拍所需数据为个数为 $32 \times 8 = 256$,四相八拍共需数据个数为 $256 \times 4 = 1024$ 。

系统中采用 M2716 的 EPROM,其容量为 $2K \times 8$,即 2048B,可以满足存储的要求。EPROM 中数据的存放顺序为四相数据依次交叠存入,即 EPROM 中的数据依次为:A 相第 1 个数据, B 相第 1 个数据, C 相第 1 个数据, D 相第 1 个数据, A 相第 2 个数据, B 相第 2 个数据, C 相第 2 个数据, D 相第 2 个数据,依次类推,直到 A、B、C、D 四相的第 256 个数据,如图 4 所示。

电路中采用的数模转换器 AD7224 有 3 个片选信号,分别为 CS、WR、LDAC,均为低电平有效,其中 CS、WR 组合控制输入寄存器,当二者均为低电平时,输入数据进入输入寄存器。WR、LDAC 组合控制 DAC 寄存器,当二者均为低电平时,输入寄存器中的数据进入 DAC 寄存器进行数模转换

并输出。

EPROM		EPROM	
000H	A相数据1	000H	00100100
001H	B相数据1	001H	00011111
002H	C相数据1	002H	00011111
003H	D相数据1	003H	11111111
004H	A相数据2	004H	00110000
005H	B相数据2	005H	00011111
006H	C相数据2	006H	00011111
007H	D相数据2	007H	11111111
	⋮		⋮
3FCH	A相数据256	3FCH	00011111
3FDH	B相数据256	3FDH	00011111
3FEH	C相数据256	3FEH	00100100
3FFH	D相数据256	3FFH	11111111
	⋮		⋮

图4 EPROM中存放的电流细分数据

电路中由FPGA产生所需要的片选信号：WR，LDAC，CS1，CS2，CS3，CS4。其中4个AD7224共用WR、LDAC，其CS信号分别为CS1、CS2、CS3、CS4。为了以正确的时序从EPROM中读出各相所需数据，产生相应的细分波形，片选信号要满足一定的时序关系，电路设计中采用图5所示的时序关系(其中，ADDR为FPGA输出的EPROM的地址信号)。

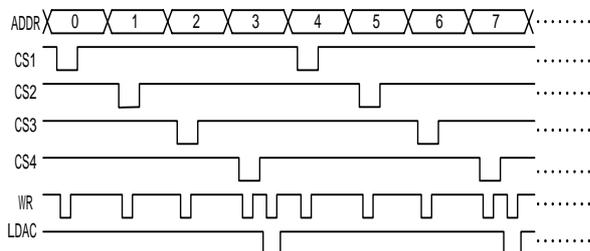


图5 AD7224片选信号

(上接第246页)

PROFIBUS总线完全可以保证数据的实时传输。同时采用小波算法可以大大降低图像的编码率。

5 结语

本文针对工业系统提出了基于现场总线的图像传输系统，结合了当前工业领域中图像监控系统的发展趋势，适应工控领域中带宽窄，图像传输效率较低的特点，为解决工业系统的图像传输提供了一个新的思路和方法。目前，我们在静态图像传输研究的基础上，对动态图像的传输和压缩处理等尚处于进一步的研究和开发中。

参考文献

1 苏琪, 王金刚. 型网络数字摄像系统的设计[J]. 电子技术应用,

4 结论

本文使用FPGA、EPROM、升频启动和细分技术，设计了步进电机驱动电路。此电路能够驱动红外相机系统的步进电机正常启动，平稳地从启动状态过渡到工作状态。在电机工作状态下，连续测量1000个电机转动的周期数据，从而判断电机周期稳定度是否满足要求。其测量结果如图6所示，转动周期的最大值为 $0.874\ 349\ 980\ 1s+2.991\ 1\mu s$ ，转动周期的最小值为 $0.874\ 349\ 980\ 1s-2.407\ 6\mu s$ ，不稳定性为 $5.398\ 7\mu s$ ，小于系统所要求的 $9\mu s$ 。

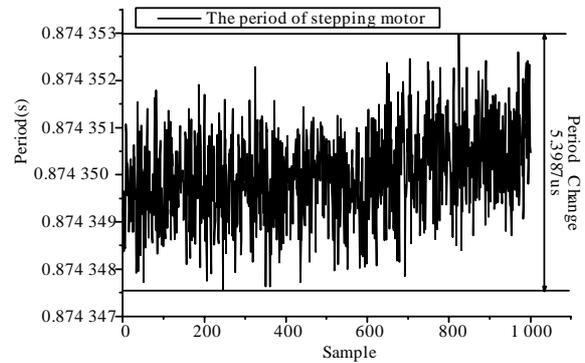


图6 电机转速周期稳定性

从实验数据可知，系统设计的步进电机驱动电路能够满足红外相机对地扫描的要求，从而获得准确、无错位的图像。

参考文献

- 1 Toshihiko W. Powerful Magnet Pushes Stepping Motor Technology Ahead[J]. Journal of Electronic Engineering, 1991, 28(295): 68-71.
- 2 Pera M C, Robert B, Goedel C. Quasiperiodicity and Chaos in a Step Motor[C]//Proc. of the 8th European Conference on Power Electronics and Applications. 1999.
- 3 陈隆昌, 阎治安, 刘新正. 控制电机[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- 4 步进电机及其控制系统[M]. 王宗培, 孔昌平, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版, 1984.
- 5 诸邦田. 电子电路实用抗干扰技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.

2003, 23(6).

- 2 Jasperneite J. Switched Ethernet for Factory Communication[C]//Proc. of the 8th IEEE International Conference on ETFA' 01. 2001: 205-212.
- 3 魏庆福. 现场总线技术的发展与工业以太网综述[J]. 工业控制计算机, 2001, 14(1).
- 4 夏德海. 现场总线技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- 5 李弼程, 胡宗云. 基于小波变换的图像矢量量化[J]. 信号处理, 2000, 16(1).
- 6 Tovar E. Real-time Fieldbus Communications Using Profibus Net-workings[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999, 46(6).