

单片机控制的步进电机 定频脉宽调制可变细分驱动系统

王菁蕙 梅安华

(武汉测绘科技大学, 光学仪器系, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

摘要 本文介绍所研制的由 MCS-51 单片机控制的步进电机定频脉宽调制可变细分驱动系统。该系统采用单电压驱动。配有软件。在不改变硬件电路的前提下, 通过键盘操作, 可以改变细分数。系统采用数字式定频脉宽调制技术, 直接对细分电流进行反馈控制。最后提出了用实验确定均匀细分电流状态字的新方法, 并验证了其可行性。

关键词 单片机控制; 步进电机; 定频脉宽调制; 可变细分; 均匀细分

分类号 TP273 TP211

0 引言

步进电机是一种能将电脉冲信号转换成角位移或线位移的电磁式机电元件, 被广泛应用于各种自动控制系统。步进电机的性能不但决定于电机本身还与其使用的驱动源密切相关。为了提高步进电机的分辨率及其定位精度, 步进电机细分驱动技术不断发展, 国外又称之为微步驱动技术。近年来国外微步驱动领域的研究很活跃, 发展迅速, 相继研究出一些高性能的微步驱动器, 但技术极为保密。国内对细分驱动技术的探索, 也相当活跃, 但高性能, 实用化细分驱动技术的研究仍有待于进一步深入。近年来, 国内有人提出了定频脉宽调制原理性驱动电路^[1], 也有人提出用数字式脉宽调制对步进电机作细分驱动^[2]。如何使步进电机细分驱动电源体积小, 重量轻, 功耗低, 性能高是追求的目标。如何实现细分步距的均匀性, 使步进电机运行更趋平稳也一直是研究的热点。本文同时顾及定频脉宽调制和可变细分技术, 通过实验研制单片机控制步进电机定频脉宽调制可变细分驱动系统。本系统设计要求具有以下主要特点并且采用如下技术实现系统功能:

- ①细分数可在 0 至 255 之间选择, 可用于非细分、固定细分和可变细分等不同情况。
- ②可以进行步进电机的转速、转向和位移等方式控制。
- ③通过实验反复调节细分电流状态控制字, 实现细分步距均匀性。
- ④由 MCS-51 单片机控制。
- ⑤单电压驱动, 采取抗干扰隔离措施。
- ⑥采用数字式定频脉宽调制技术。
- ⑦直接对细分电流进行反馈控制。

本文将分别阐述系统硬件结构和软件结构的设计,并介绍对细分步距均匀性的专题研究成果。

1 系统硬件电路及其特点

电路分为三部分:第一部分是细分脉冲分配器;第二部分为功放电路;第三部分为提供芯片工作电压、基准电压、电机电压的电源部分,系统原理电路见图1。下面分别介绍各部分工作原理及特点。

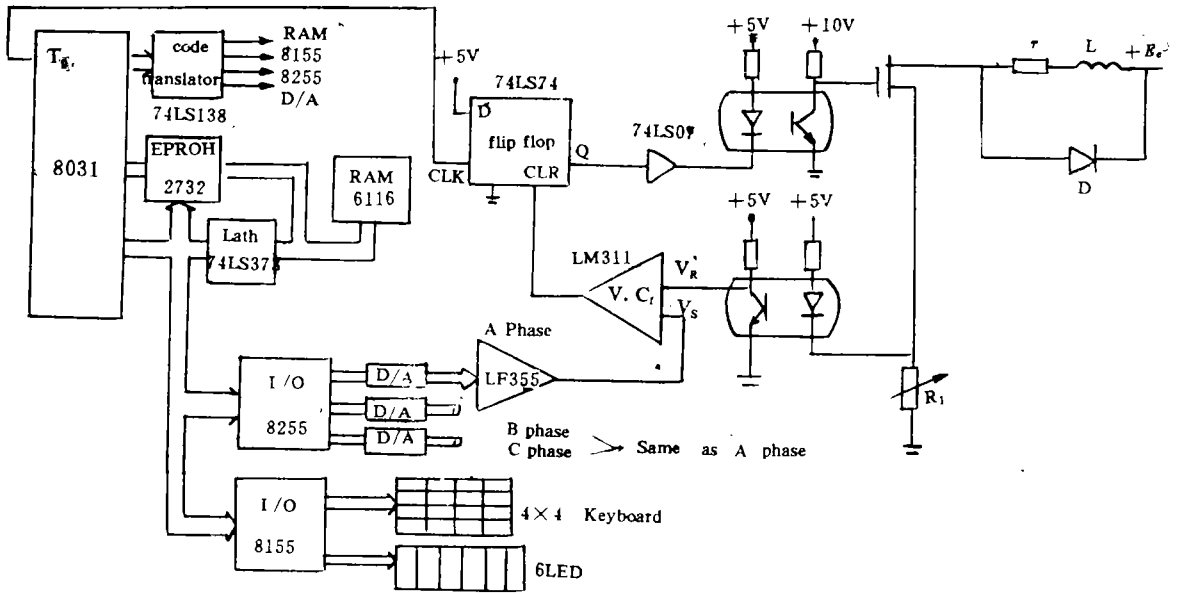


图1 系统原理电路

1.1 细分脉冲分配器

将传统电路中的硬件软化,其作用是根据需要通过软件控制,灵活产生各种所需的细分阶梯电流波形信号。在同样硬件电路条件下,可用于非细分、固定细分和可变细分等不同情况。

本系统选用MCS-51系列单片机,主芯片为8031,外扩EPROM和RAM分别存放步进电机控制程序和键入的数据及中间运算结果。系统通过I/O口扩展芯片8155配有4×4非编码键盘和6个LED显示器,作为外部控制器。操作者可以通过它们直接与系统进行信息交流,选择和细分阶梯电流波形信号。系统扩展I/O口芯片8255将其三输出口分别作为A、B、C三相细分路数,每相各有8条I/O口线,可作0至255之间任意整数细分。通过三片D/A转换芯片DAC0832,获得由外部控制器和软件控制的所需各相细分路数叠加后的细分阶梯电流,通过运放得到相应电压信号。值得注意的是,D/A转换芯片的选择有两条要求:第一,芯片位数要与细分范围相适应;第二,注意三相D/A转换芯片的同时选通,以保持三相细分阶梯信号之间所需相位差不变,这个问题由软件解决(见软件介绍)。细分脉冲分配器输出的阶梯信号的阶梯数 n 由所选细分分数确定,当 $n=4$ 时,波形如图2所示。

1.2 功放电路

本系统采用单电压驱动。在常用的功放电路中,这种线路最为简单,元件少。但是一般单电压驱动电路必须具有一个串联电阻,限制稳态电流和减小时间常数以加大电流波形上沿陡

度,该电阻上损耗大,发热厉害,降低了其实用性。本电路采用一个比原电阻阻值小 5 倍的采样电阻,进行细分电流反馈控制。因此,损耗仅为 1/5,发热大幅度降低。关键在于采用了脉宽调制控制方式,而且是数字式脉宽调制,不是常规的三角波折波 PWM 电路,使电路进一步简化,系统柔性进一步提高。通过两相细分电流的反馈控制自动调节脉宽,将电流限制在一定范围内,可以通过调节有关电阻值方便地调节这个范围。另外,在三相绕组上同时加上一个 19.5kHz 的定频调制波,其频率超过人耳听觉上限频率(约为 15kHz 左右),消除了斩波电磁噪声。

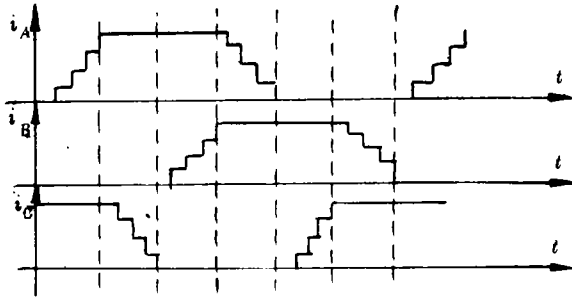


图 2 四细分三相电流波形

如图 1 所示,三相绕组的 D 触发器 74LS74 的 D 端加 +5V 电压,即保持高电平,CLK 端加上由 8031 定时器 1 产生的斩波频率为 19.5kHz 的时钟脉冲,脉冲分配器来的与细分电流阶梯对应的电压作为电压比较器 LM311 的输入 V_i ,电压比较器的参考电压 V_R 为细分电流反馈控制采样电压。所以, V_R 随采样相电流成正比例变化,当相电流升高时, V_R 升高;当相电流降低时,则 V_R 降低。

电压比较器 LM311 差动输入电压 $V_i = V_i - V_R$, 功放电路有两种工作状态:
 第一,当 $V_i > V_R$ 时,比较器立即转入正饱和状态,其输出电压为高电平,故 D 触发器的 CLR 端为高电平。这时,斩波时钟脉冲上升沿到来并保持一段时间,其输出端 Q 的高电平经同相驱动器 74LS07,光电耦合器 1,4N25 内的发光二极管截止,光电三极管关断,功率开关管 IRF830 的控制极加上 +10V 电压,开关管导通,电机绕组通电,电流上升。这时一相等效电路如图 3 所示:

电压比较器 LM311 差动输入电压 $V_i = V_i - V_R$, 功放电路有两种工作状态:

第一,当 $V_i > V_R$ 时,比较器立即转入正饱和状态,其输出电压为高电平,故 D 触发器的 CLR 端为高电平。这时,斩波时钟脉冲上升沿到来并保持一段时间,其输出端 Q 的高电平经同相驱动器 74LS07,光电耦合器 1,4N25 内的发光二极管截止,光电三极管关断,功率开关管 IRF830 的控制极加上 +10V 电压,开关管导通,电机绕组通电,电流上升。这时一相等效电路如图 3 所示:

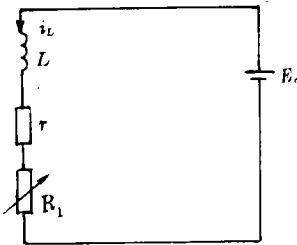


图 3 电机绕组通电时一相等效电路

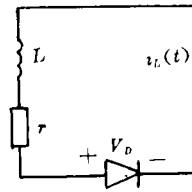


图 4 电流泄放回路

图 3 中 L 为一相绕组等效电感, r 为一相绕组等效集中电阻, R_1 为电流反馈控制采样电阻。很明显,这是一个典型的一阶网络,根据电路理论,假定:

$$i_L(0) = 0 \tag{1}$$

则有

$$L \frac{di_L(t)}{dt} + i_L(t)(r + R_1) = E_c \tag{2}$$

$$i_L(t) = \dot{i}_L(t) + \ddot{i}_L(t) \tag{3}$$

其中 $\dot{i}_L(t)$ 为(2)式对应齐次微分方程的通解, $\ddot{i}_L(t)$ 为(2)式对应微分方程的特解。可解得:

$$i_L(t) = \frac{E_c}{r+R_1} [1 - e^{-\frac{r+R_1}{L}t}] \quad (4)$$

第二:当 $V_s < V_R$, 电压比较器将处于负饱和状态, 其输出为低电平, 产生 CLR 清零信号使 D 触发器复位, 经放大和光耦合器 2 后, 开关管截止, 电机绕组断电, 电流下降, 其能量泄放回路如图 4 所示:

图 4 中 V_D 为二极管正向压降。根据一阶网络理论, 可以求出回路电流为:

$$i_L(t) = I_0 - \frac{V_D}{r}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

式中第一项 I_0 为网络的零状态响应, 即开关管截止前的绕组电流, 其值可由(4)式求得。第二项 $-\frac{V_D}{r}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ 为网络的零输入响应。

电流泄放, V_R 减小, 直至 $V_s < V_R$ 时的下一个 CLK 时钟上升沿, 开关管又导通, 电机绕组中电流上升, 直到 $V_s < V_R$, 开关管又截止, 电机绕组中电流再一次下降。如此反复使得电机绕组中电流保持在一个稳定电流 i_L 的极小范围内变动。

这个电流 i_L 大小可以通过改变 R_1 的大小来调整。功率开关管 T 的导通频率由外时钟频率 19.5kHz 确定, 其导通时间由电流达到给定值所需时间确定, 是可变的, 即实现了定频脉宽调制控制。

功放电路电压电流波形如图 5 所示(以二细分为例)。

本系统在数字电路和模拟电路之间采用了两个光电耦合器件 4N25, 这样既保证了信号的传送, 又具有良好的电的隔离性, 因而提高了系统抗干扰能力。

1.3 系统电源电路

利用固定三端稳压芯片 7805、7815、7915 及 7810 分别产生 +5V、±15V、+10V 芯片电源。用 LM336 产生 -5V 作为 D/A 芯片 0832 基准源。用可调三端稳压芯片 LM350 获得步进电机正电压 E_c , 可在 1.2V 至 30V 之间选择。

2 系统软件功能及特点

本系统软件用 MCS-51 汇编语言编写。其主程序框图如图 6 所示。

系统配以键盘和显示器管理软件。通过键盘的扫描、识别管理来完成对整个软件的控制, 其它子程序块结束后, 都要回到显示和键盘主程序上来。

接收、存贮数据。要正确接收从键盘输入的步进电机转向控制字、细分数、启动频率、运行

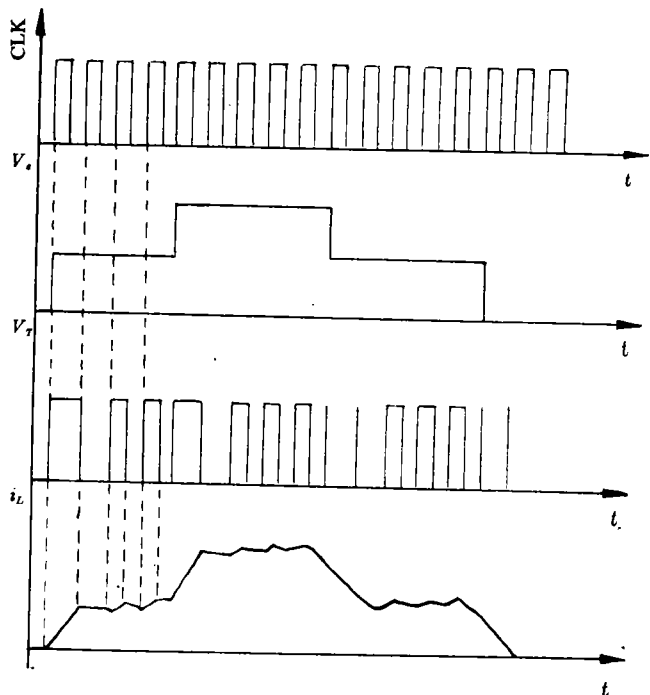


图 5 功放电路电压、电流波形

频率、运行步数,经拼装后依次存放在数据存储区内,必要时能从数据区调出并在显示器上依次显示。

数据处理。为方便用户,输入十进制数,必须把这些数据从 BCD 码转换成控制器所能接受的二进制码。为完成数据在原始数区和显示缓冲区的传送,必须完成数据的拼装、拆装。考虑到系统使用方便,必须能自动计算出脉冲个数,脉冲间隔和实现升、降速判断所需的缓冲步长。

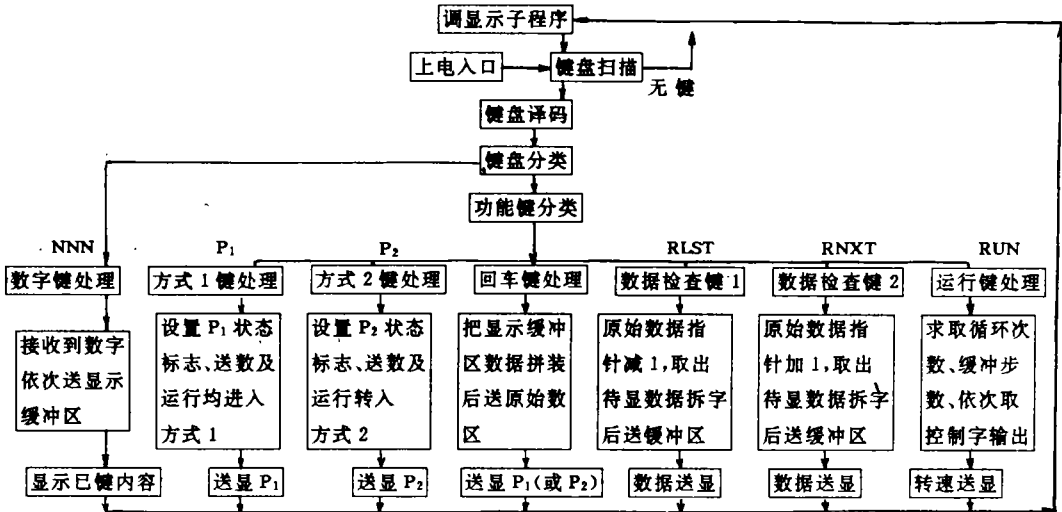


图 6 系统软件主程序框图

软件具有两种运行方式。分别对步进电机进行转速、转向和位移控制。系统工作于方式 1 状态下,在一定细分要求要求和转向设定下,步进电机由起动频率自动升频到所要求的运行频率后将连续运行,靠硬件设置开关可随时停止。系统工作于方式 2 的状态下,步进电机能作变向、变速、定长运转。在键盘发出运行(RUN)命令后,8031 要依次作细分、转向、转速的判定,并取出相应的脉冲个数和间隔,控制步进电机的运行。

D/A 转换芯片采用 DAC0832,每相一片,三相共三片。扩展并行 I/O 口芯片 8255,其 A、B、C 三口分别作为电机三相绕组细分逻辑通电压状态字的输出口,分时将数据送入三口。利用 8255 芯片的锁存功能,使输出的数据锁存于端口输出锁存器中内容不变,等待 DAC0832 的读取。三片 DAC0832 处于单缓冲工作方式,将 8 位 DAC 寄存器处于直通方式,通过译码器输出一个 RAM 地址信号同时控制 3 片 DAC0832 的 \overline{CS} 端,控制其输入寄存器的导通或锁存,从而,可以用一条指令同时选通三相 D/A 转换芯片,确保电机三相绕组之间相位关系正确。

通过软件,采用中断方式,控制 8031 定时器 T。产生 19.2kHz 斩波频率。

根据系统使用细分要求范围,编写细分状态字表,存入 EPROM,以备调用。

3 步进电机步距角细分均匀性的实现

3.1 确定细分矩角特性

为了使问题简化,假设矩角特性为理想情况,即为一正弦波,并且各相绕组是均匀的。所以可以用向量来表示力矩,并且进行合成。

设步进电机工作方式三相六拍,即循环分配方案为 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA$,在每拍中

细分。以 A 相为参考,确定 A→AB 时的矩角特性。

开始 A 相通以额定电流,相应转矩为 M_A ,而后 B 相电流从零开始分 N 级(N 为细分数)增加,直至达到额定值,相应转矩为 M_B ,其向量图如图 6 所示。当 N 由 0 开始向 1,2,⋯, N 分级增加时,B 相分级电流对应的转矩 M_{BN} 向 M_B 方向逐步增大。根据力的矢量合成原理,电机合力矩 M_i 由 M_A 和 M_{BN} 叠加而成,即: $M_i = M_A + M_{BN}$ 。 M_i 末端在 $M_A M_{AB}$ 线段上滑动,其最大值 $M_{AB} = M_A + M_B$ 。合力矩 M_i 与 M_A 的夹角 α 随 N 增大而增大,而 α_i 为 B 相电流增加 N 级时转子转过的角度,即 N 级步距角之和。由图 6 可得:

$$\frac{M_i}{\sin(180^\circ - \alpha)} = \frac{M_{BN}}{\sin\alpha_i} \tag{12}$$

其中 α 为 M_A 与 M_B 的夹角,此时应为 120° 。

可见,合力矩 M_i 与对应步距角之和 α_i 的关系为非线性的。

3.2 由最大静转矩特性确定转矩与电流 I 的关系

根据电机的机电能量转换原理推导出的最大静转矩特性如图 8 所示,可知,当磁路不饱和时,转矩 M 与控制绕组中电流 I 的平方成正比;电流稍大时,由于磁路饱和的影响,气隙磁势增加变慢,转矩 M 的上升就低于电流的平方关系;电流再加大时,磁路饱和,气隙磁势增加极少, M 上升亦很小,呈饱和状态。综上所述,静转矩 M 与电机绕组电流 I 之间也是非线性的。

3.3 定性确定电机步距角与电机控制绕组电流 I 之关系

由于电机步距角与转矩之间为非线性关系,而控制绕组电流与转矩之间也是非线性关系,故可推论,步距角与控制绕组电流之间为非线性关系。因此要使步距角实现均匀细分,则驱动电流就不能按线性阶梯增长,而应该近非线性阶梯增长。

3.4 用实验确定均匀细分电流状态控制字

假定存在使步距角均匀的细分电流 I ,那么电流与步距角两者的非线性关系(以四细分为例)应如图 8 所示:横坐标为均匀细分步距为 α_n ,纵坐标为电流。根据图形对称性可见,在步数为第一至第四步时,步进电机某相电流递增,如果通过控制字找到单调上升的电流序列,使之满足 $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ 是步距角均匀细分条件,那么在第五至第八步时该电机同一相电流则要求递减,其序列应为 $I_4 > I_3 > I_2 > I_1$ 。

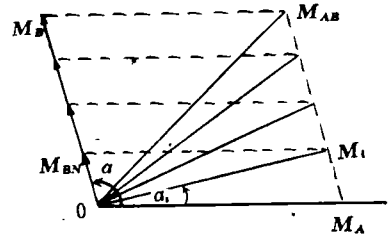


图 7 力矩合成矢量图

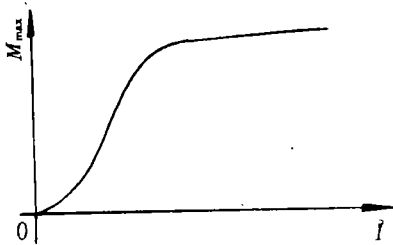


图 8 最大静转矩特性

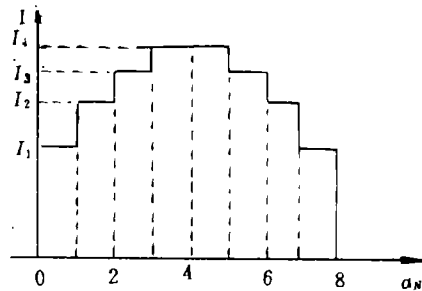


图 9 均匀细分步距角与电流的非线性关系

根据本系统工作原理,输出细分阶梯电流信号的电路由电流源解码网络、模拟电子开关和运算放大器组成。DAC0832 芯片为 8 位,相当 8 条电流源,通过控制字直接操纵模拟电子开关,其输出电流和控制字代码的权值成正比,输出即为细分阶梯电流信号。这个权值与细分数

N 一一对应,可从 0 至 255 之间变化。通过调节控制字可以调节细分分数,控制细分电流的大小。该信号直接送到运算放大器的输入端,通过比例放大得到相应的阶梯电压信号。综上所述,本法通过实验反复调节细分电流状态控制字,使相电流在递增段细分步距趋于均匀。根据对称性,直接写出相电流在递减段的控制字。如需要进一步提高细分步距均匀性的精度,可通过提高 D/A 转换芯片位数来实现。

4 测试实验

使用 45BF005-I 型步进电动机,额定电流 2A,以三相六拍方式工作。使用本文所设计系统作为驱动电源,测功仪一台。测定步进电机非细分和四细分两种状态下的起动矩频特性,由

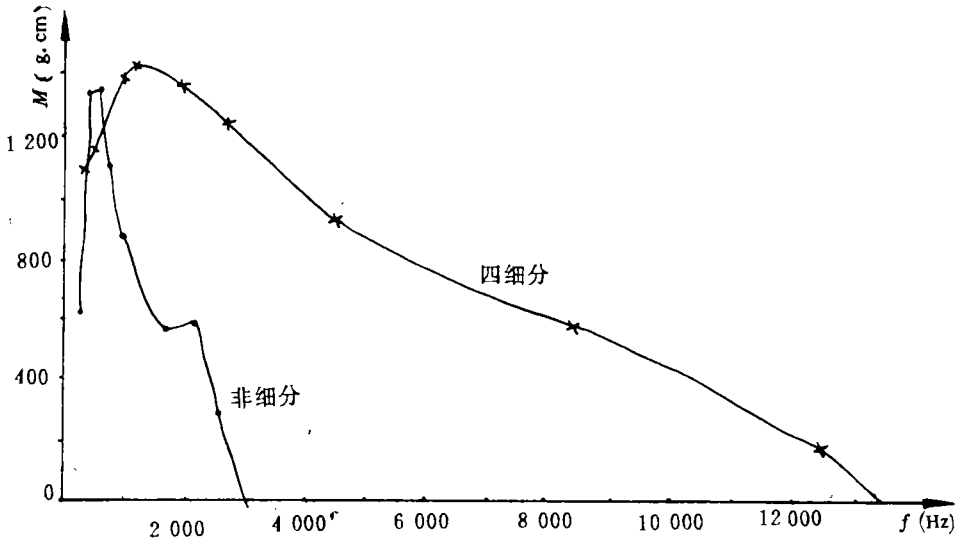


图 10 起动矩频特性

测试所得曲线如图 10 所示。利用上述测试设备,再配两台 DJ20 经纬仪,即可测试四细分状态下细分步距角的均匀性。测试结果列表 1,平均误差 $1'45''$ 。

5 结论

①细分后,步距角减小,为原来的 $1/N$, N 为细分分数。以四细分实验为例,可观察到运行较平稳,振动较非细分时大大减小。通过电机起动矩频特性对比可见,细分时起动频率提高到非细分时的 3 倍多,而高频出力情况有明显改善。

②本系统采用单片机进行可变细分控制,可大幅度提高步进电机的分辨率及其定位精度。在不改变硬件条件下,通过软件控制,原则上可以实现 $0 \sim 255$ 之间的任意细分,注意细分范围与 EPROM 容量相对应。

表 1 细分步距角均匀性精度

	控制字	理论步距值	该步实测步距值
电	78H	$22'30''$	29'
流	99H	$22'30''$	22'
递	E0H	$22'30''$	24'
增	FFH	$22'30''$	21'
电	FFH	$22'30''$	25'
流	E0H	$22'30''$	28'
递	99H	$22'30''$	22'
减	78H	$22'30''$	23'

③通过实验证明,在其它系统参数不变的情况下,降低斩波频率到 15kHz,发现电磁噪声明显增大,这是因为电流波波顶波动形成的噪声频率在人耳听觉敏感区的缘故。斩波频率过高,对电路中的元器件性能要求也高。实验证明斩波频率取在 20kHz 左右为宜,这时电磁噪声可以基本消除。

④本系统采用了电流反馈控制电路,而且本电路采样电阻比一般单电压驱动电路限流电阻减小到 20%,功耗下降,电源效率提高。

⑤均匀细分实验所得四细分步距角均匀性平均误差为 $1'45''$,如果进一步调整细分电流状态控制字,还可以进一步提高细分步距角均匀性精度。实验验证了本文所提方案的可行性。

参 考 文 献

- 1 宋启敏. 高效步进电机驱动源. 微特电机, 1988(4): 23~27
- 2 毛希祥. 数字式脉宽调制在步进电机细分驱动中的应用. 微特电机, 1988(2): 24~27
- 3 首之. 步进电机平滑驱动方式. 微特电机, 1988(4): 28~30
- 4 王宗培. 五相混合式步进电动机的 E+P 型微步驱动方式. 微特电机, 1988(6): 31~34
- 5 张军. 光电耦合器及应用电路. 无线电, 1987(12): 34~38
- 6 赵依军. 单片微机接口技术. 北京: 人民邮电出版社, 1989.
- 7 鄢定明. 单片机应用技术. 北京: 人民邮电出版社, 1989.

The Adjustable Microstep-driven System of the Step-motor Controlled by the Single-chip Computer with the Frequency Fixing PWM

Wang Jinghui Mei Anhua

(Dept. of Optical Instrumentation, WTUSM, Luoyu Road 39, Wuhan, China)

Abstract The frequency fixing pulse width modulation and adjustable microstep-driven system is discussed. The system of the step-motor was controlled by the MCS-51 single-chip computer. The system is single-voltage driving. The system is configured the proprietary software. On the same hardware supporting, the numbers of the microstep can be changed by operating the keyboard. The system applies the technology of the digital frequency fixing PWM and the feedback control of the microcurrent. At the last, the article brings up the new method which determines the state words of the equal micro-step current by the experiments. The feasibility of this method is proved by the experiments.

Key words controlled by single-chip computer; step-motor; frequency fixing PWM; adjustable microstep; equal-microstep