

双极性步进电机细分驱动器的设计与实现

孔令山 熊 坚

(中国科学院光电技术研究所, 成都, 610209)

摘要 论述了一种双极性步进电动机细分驱动器的工作原理, 该驱动器能较好地改善步进电动机的运行性能, 具有实用性强、结构简单、成本低的优点。针对实际调试中出现的问题分析后, 提出了对策; 最后给出了试验结果。

主题词 步进电机, 细分, 脉宽调制。

分类号 TM383.3

TM383.3

The Design and Realization for Double-Pole Stepping Motor Subdivision Driver

Kong Lingshan, Xiong Jian

(Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610209)

Abstract The operating principle of double-pole stepping motor subdivision driver is described in the paper. The driver can further improve the running performance of the stepping motor and it has the advantages of good adaptability, simple constitution and low cost. The measures have been adopted against the problems discovered in the adjusting process, and the experimental results are given in the end.

Subject terms Stepping motors, Subdivision, Pulse width modulation.

Classification number TM383.3

孔令山, 男, 1969年12月生, 1989年毕业于上海交通大学自动化专业, 1997年毕业于中国科学院光电技术研究所物理电子学与光电子学专业(理学硕士)

熊 坚, 男, 1944年12月生, 1967年毕业于电子科技大学(成都电讯工程学院)雷达专业。研究员, 长期从事计算机技术、自动控制、激光干涉测量技术、大规模集成电路专用设备等领域的工作。作为负责人或主要参加者的研究成果: "JQI-150型激光全息球面干涉仪"获1980年中国科学院重大科技成果一等奖, "AMDIS-1型掩模缺陷自动检查系统"获1992年中国科学院科技进步一等奖。

收稿日期: 1997-11-28

引言

在自动定位控制领域,步进电机广泛用作执行部件,为达到较高的定位精度,宜采用细分方式运行。细分技术的研究近年来很活跃,已有多种规格的产品投放市场;但我们在实际应用中发现:步进电机开环运行时实现细分步距均分定位的效果并不理想;从控制理论上讲,驱动器应为一“比例环节”,即 V/I 转换,其中 V 为给定的控制电压, I 为绕组细分电流,在此基础上采取匀化手段加以改进,可达到较高的细分步距均匀度,步进电机细分的效果与驱动器的性能密切相关^[1,2]。针对两相混合式双极性步进电机,考虑到矩频特性、驱动速度、控制精度、功耗、成本等因素,我们设计了一种“恒频 PWM 双极性细分驱动器”。

1 电路工作原理和特点

随着半导体技术的发展, PWM 是目前步进电机细分驱动电路中普遍采用的技术,具有功耗低、体积小、适合于复杂的电流波形控制、动态性能好等优点。L298 是内含两个 H 桥的高电压大电流单片集成电路^[3]。虽然最大连续电流只有 2A,但在步进电机驱动电路中导通时间有一个“占空比”的限制,所以实际可驱动 3~4A 的步进电机^[4],与分立元件构成的达林顿管驱动电路相比,线路简单。利用恒频 PWM 原理,组成细分驱动电路(以一相为例)如图 1。由于晶体管开关频率的限制时钟频率不能太高^[6],为 25kHz 左右, V_s 为 D/A 输出的给

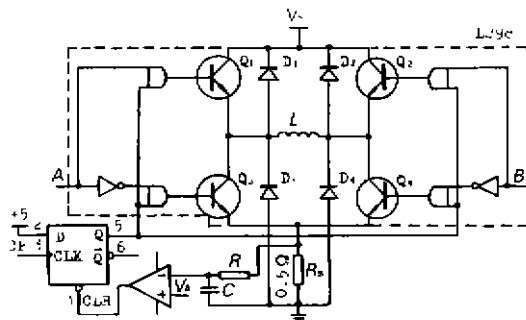


图1 电路原理图

Fig. 1 Schematic of circuit

定电压值, R_s 为电流检测电阻, RC 积分电路用于消除二极管的反向恢复等因素产生的冲击电流的影响。工作过程如下:当整步信号 A, B 互异时,假设 $A=1, B=0$, 电机绕组 L 便接通电源,电流从 0 逐渐上升,方向由 $V_s \rightarrow Q_1 \rightarrow L \rightarrow Q_4 \rightarrow R_s \rightarrow$ 地,当 $I_s R_s < V_s$ 时,比较器输出高电平, D 触发器输出端 Q 为高电平,三极管 Q_1 和 Q_4 一直导通,电流一直上升,直到 $I_s R_s$ 稍大于 V_s 时,比较器输出使 CLR 为低电平, D 触发器清 0, Q_1 和 Q_4 便截止,由于电感 L 的储能作用,电流通过 $D_2 \rightarrow V_s \rightarrow$ 地 $\rightarrow D_3$ 续流,开始下降,但在下一个振荡脉冲的上升沿到来时, Q 端又被置位,三极管又导通,电流开始上升,同理,当 $I_s R_s$ 稍大于 V_s 时,电流又开始下降,直到又下一个振荡脉冲的上升沿到来……,当振荡频率很高时,电流波动极小, $I_s = V_s / R_s$ 成立。

为有一个量的概念,取一组实际数据对比计算:设 PWM 频率为 22kHz,周期 $T=45\mu s$,电机额定电流为 1.2A,线圈电阻 $r_s=0.68\Omega$,检测电阻 $R_s=0.51\Omega$,线圈电感 $L=0.01H$,电源内阻 $r=1\Omega$,则放电时间常数 $\tau=L/(r_s+r)$,代入计算 $\tau=5.95ms$,远大于 T ,绕组断电后单纯的放电使电流下降很少;考虑放电时电源的反向充电,取 $V_s=24V$,充电电流为 $I=V_s/(r-r_s) \cdot (1-e^{-t/\tau})$,充电时间常数 $\tau=L/(r+r_s)$ 。当 t 很小时,充电电流与电阻无关,只与时间有关,有

下式成立

$$I \approx \frac{V_s}{r + r_a} \cdot \frac{t}{\tau} = \frac{V_s}{L} \cdot t \quad (1)$$

取最大电流 $I = 1.2\text{A}$, 所需 $t = 500\mu\text{s}$, 16 细分时最小电流 $I = 0.12\text{A}$, $t = 50\mu\text{s}$, 大于 T , 实际上在一个周期 T 内, 绕组放电时间约为 $20\mu\text{s}$, 所以在三极管关断和下一个脉冲到来之间, 电流不会下降到零, 斩波频率越高, 电流波动越小。

两相混合式双极性步进电动机相当于四相, 斩波运行时, 矩频特性^[6]为

$$T_{po} = \frac{8}{\pi} N_r \lambda_m \frac{V_s + I_o R}{\omega L} \sin \frac{I_o \omega L}{V_s + I_o R} \quad (2)$$

其中 T_{po} ——输出转矩, N_r ——转子齿数, λ_m ——每相磁链幅值, R ——回路总电阻, ω ——转动角频率, I_o ——绕组额定电流, V_s 、 L 同上。

从上式可见, 当电机运行频率 ω 逐渐趋近于零时, $\sin[I_o \omega L / (V_s + I_o R)]$ 趋近于 $I_o \omega L / (V_s + I_o R)$, 输出转矩趋于一定值, $T_{po} = (8/\pi) N_r \lambda_m I_o$, 而无论电源电压取值高低; 另一方面, 当电源电压 V_s 趋于无穷大时, 同理无论频率取值高低, 输出转矩趋于同一值。这意味着较高的电源电压将大大减缓转矩随频率的下降, 使电机的矩频特性在一定范围内近似为一水平直线。

该方案有以下优点: 较好地克服了步进电动机绕组中电感等因素的影响, 细分电流与控制电压近似成正比, 矩频特性好; 绕组电流经电源泄放, 放电较快, 驱动速度快, 将电磁储能回馈电源, 效率较高; 功放管工作于开关状态, 功耗小, 体积小; 电机绕组各相用同一斩波频率, 消除了一般斩波电路中各相斩波不同步造成的差拍现象, 其斩波频率设置大于人耳听觉上限频率, 消除了电磁噪声。

采用 8 位 D/A, 理论上可把相电流 256 等分, 进行细分步距的非线性校正后, 16 细分时步距均匀性较高。市场上类似的产品有东芝公司的专用 IC: TA7289P, 但该电路中封装的 D/A 只 4 位, 最多只能把相电流 16 等分, 细分时量化误差较大, 考虑到非线性因素, 16 细分时难以达到较高的精度; 其他专用 IC 常常输出电流较小, 或者分为控制和驱动两个集成电路, 成本较高, 线路较复杂, 如 L297 需和 L298 联用组成双极性恒流驱动, 恒流原理与此类似, 且由于 L297 中两个比较器的给定电压输入端连在一起, 两相的导通电流相同, 故只能用于整步驱动。

2 存在的问题及对策

2.1 二分频和高频噪音

在调试中发现驱动器性能不稳, 有时工作正常, 有时斩波频率自动下降为原来的一半, 即为 11kHz , 电流波动增大约一倍。发出噪音, 从示波器上观察到如图 2 的现象。

图中, V_c 为 C 上电压, 它上升时表示绕组导通, 下降和为零时表示绕组关断, CP 为时钟。第 1、3 个脉冲上升沿到来时, D 触发器 Q 端置 1, 绕组正常导通, 但当第 2、4 个脉冲到来时, 绕组刚关断, V_c 开始下降, 但仍较

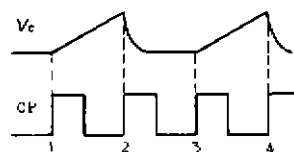


图 2 电压波形

Fig. 2 Voltage waveform

高,比较器仍输出低电平清零D触发器,Q端不能置1,绕组继续关断,直到下一个脉冲才导通,丢失一半脉冲,故产生二分频现象。减小RC时间常数,仍不能可靠地消除。在 V_s 两端并联电容,消除分布电感影响,减小绕组关断时的感应电压后,驱动器立即恢复正常,噪音消失。

当 V_s 增大后,又有更尖的噪音出现。直接观察绕组的占空比,发现工作频率正常,但PWM波形出现一有趣现象,如图3。

在两相邻周期中,占空比可变,分别约为6/1和1/6,绕组的导通频率仍为22kHz,但其关断频率减半,且有两个不同相位的噪音源,故有一特殊的高频噪音。分析认为这与比较器电路太灵敏有关,增加RC的常数,一切恢复正常;但增加过多,又将产生二分频现象。

2.2 小电流误差

在调试中发现PWM的占空比变化较小,不管绕组电流大小,驱动器工作时关断时间大约总为20 μ s。当绕组电流太小时,在20 μ s内电流将下降到零,由(1)式可求得在斩波周期内将下降到零的最大电流 $I_{max}=2400 \times 20 \times 10^{-6} = 0.048$ A,当细分分数较多, $V_s/R_s < I_{max}$ 时,绕组电流将在0~ V_s/R_s 之间波动,其等效直流电流值约为理论值 V_s/R_s 的0.5~0.6倍,相对误差较大。当 V_s 由D/A输出时,可将此时的输入数据增加约一倍,以补偿驱动器比例系数的下降。实际上,即使绕组电流 I 大于 I_{max} ,当 I 越小,波动分量所占的比例越大,相对误差也越大,只是相对于小电流误差要小,可将D/A输入数据乘一比例因子进行修正。

2.3 短接电源现象

在 L 中通以正向电流, $A=1, B=0, Q_1, Q_2$ 导通时,如突然整步换相, $A=0, B=1$,要在 L 中通以反向电流,则 Q_2, Q_3 将导通;由于三极管有一个截止时间, Q_1, Q_2 还要导通一段时期,引起电源瞬间短路,且持续时间较长(微秒级),可能击穿三极管,损毁电源^[5]。解决方法:在电流反向时,先使 $A=B=1$ (或0), $Q_1 \sim Q_6$ 都关断,延迟数微秒后再使 $A=0, B=1$ 。单片机控制时很容易用软件实现。另外在初次调试时,为保证L298和步进电机的安全,宜采取限流保护措施。

3 试验结果

驱动器正常工作时电流波形如图4、图5。

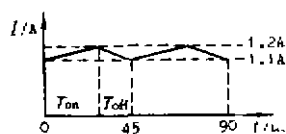


图4 绕组电流波形

Fig. 4 Current waveform of the winding

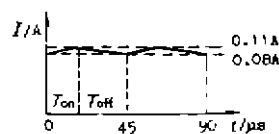


图5 绕组电流波形

Fig. 5 Current waveform of the winding

表1 驱动器输入、输出测量值表

Table 1 Measured input and output values of the driver

D/A input digits (hexadecimal)	Theoretical current values	Measured DC values	PWM Duty ratio
00	00	0.00	
19	0.115	0.10	0.917
4A	0.341	0.32	1.026
8E	0.655	0.63~0.64	1.101
D4	0.978	0.95	1.213
FF	1.176	1.15	1.290

其中 $V_s=24V$, $R_s=0.51\Omega$, D/A 输出 V_s 满量程 $=0.600V$, 斩波周期 $T=45\mu s$, 绕组内阻 $r=0.68\Omega$, 电感 $L=0.01H$ 。测量结果表明: 电流相对误差约为 $15\%\sim 2\%$, 且包含 D/A 转换误差(约 1%)。随着电流的增加, 相对误差逐渐变小, 占空比逐渐增大, 与理论分析基本吻合。

参考文献

- 1 叶树林等. STD 步进电机细分驱动模块的设计. 微特电机, 1995(1), 29~31
- 2 王宗培, 陈培民. 步进电动机 PWM 微步驱动方式的实现. 微特电机, 1991(1), 17~24
- 3 谭建成. 运动控制专用集成电路及应用(续 3). 微电机, 1993(1), 14~16
- 4 步进电机桥式驱动电路和双极性 PWM 恒流驱动. 微特电机, 1995(6), 37
- 5 刘维澄等. 不同驱动电源下混合式步进电机的运行矩频特性. 微电机, 1988(3), 25~30
- 6 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 上海: 上海工业大学自动化系出版(内部发行), 1991, 172~178.