

文章编号:1006-544X(2003)04-0360-05

一种步进电机 PWM 恒流驱动技术的研究

蒋存波, 张 玉, 陈小琴, 金 红
(桂林工学院 电子与计算机系, 广西 桂林 541004)

摘 要: 介绍了利用 PWM 技术对步进电机进行恒流驱动的原理和一种具体的实现电路, 以及驱动器功耗的估算公式; 给出了一种可靠且简便的电机绕组电流检测方法. 利用该技术设计的步进电机驱动器与传统的电阻限流和线性恒流驱动方式相比, 可以显著提高电机绕组的电流上升率和步进电机的运行性能, 降低驱动器的发热, 提高效率, 减少驱动器的体积. 经实测, 该驱动器显著提高了电源电压适用范围和电机运行的稳定性.

关键词: 步进电机; PWM; 单片机

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A^①

步进电机是广泛用于计算机控制系统和计算机外部设备的驱动元件. 步进电机使用脉冲电流驱动, 利用环形脉冲分配器给各绕组分配驱动脉冲, 每向环形分配器输入 1 个脉冲, 步进电机绕组的通电状态改变一次, 电机的转子转过 1 个步距角. 步进电机的运行性能例如运行频率、输出力矩等, 除受电机自身性能的影响外, 还直接受驱动器的制约. 步进电机伺服系统具有价格低、简单、可靠等交直流伺服系统无法比拟的优点, 但由于它的运行速度低、驱动器效率低和发热量大等缺点, 使它的使用范围受到限制. 随着现代电力电子技术、微电子技术特别是微处理器技术的发展, 为步进电机驱动器性能的提高提供了条件, 使步进电机驱动器的性能有了很大提高, 从而使传统的步进伺服系统得到了广泛的应用.

1 步进电机的控制原理

步进电机是脉冲电流驱动的伺服执行元件, 在环形脉冲分配器的控制下, 每输入 1 个控制脉冲, 电机绕组的通电状态改变 1 次. 以三相步进电机为例, 在三相六拍控制方式下, A, B, C 三

相的通电状态转换为: A—AB—B—BC—C—CA—A……, 其波形如图 1 所示.

图中所示为理想波形: 电流上升时绕组电流能迅速从 0 上升到额定电流, 而下降过程则能从额定电流迅速下降到 0, 但实际情况并非如此. 电机绕组是一个感性负载, 电流不能突变, 只能在一定的时间常数下按指数规律变化. 其电流上升过程可以用公式 (1) 描述, 电流的下降过程可以用公式 (2) 描述^[1].

$$I(t) = I_M(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (1)$$

$$I(t) = I_M e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2)$$

式中: $I(t)$ —绕组电流 (A); I_M —峰值电流 (A); T —时间常数 (ms).

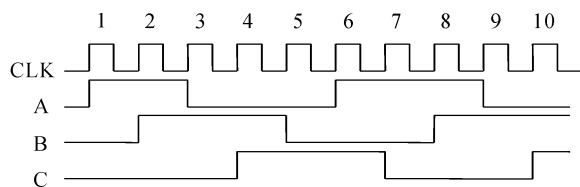


图 1 三相六拍方式波形图

Fig. 1 Waves of three-phase six-time

① 收稿日期: 2003-07-02; 修订日期: 2003-07-31

基金项目: 广西区科技攻关项目 (桂科攻 0235009-5)

作者简介: 蒋存波 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 计算机测量与控制, 特种加工工艺与装备.

驱动器的设计研究,其目的就是尽可能的降低绕组电流的上升和下降时间,提高电机的运行性能,同时提高驱动器的效率,降低损耗,减少发热.

1.1 传统的驱动方式^[2]

传统的驱动方式有单电源电阻限流驱动方式、线性恒流驱动方式等。一相单电源电阻限流驱动方式的原理见图 2a, 线性恒流方式一相主回路原理图见图 2b.

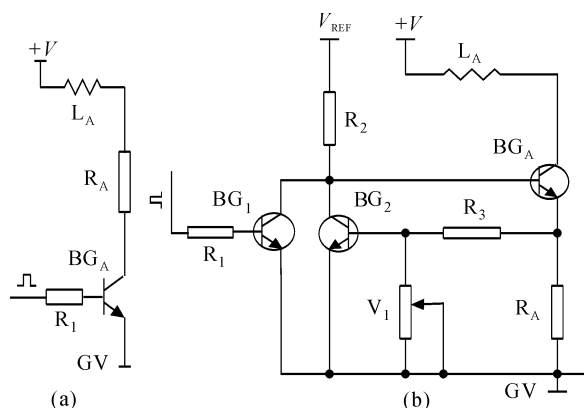


图2 两种传统的驱动电路主回路

Fig. 2 Two kinds of circuits in traditional drive

(a) 电阻限流方式; (b) 线性恒流方式

对于图 2a 所示的电阻限流方式, 其主回路时间常数用式 (3) 计算^[3]

$$T = L_{\Lambda}/(R_{\Lambda} + r_{\Lambda}). \quad (3)$$

式中: L_A —电机 A 相绕组电感 (mH); r_A —电机 A 相绕组电阻 (Ω); R_A —外加限流电阻 (Ω).

电流峰值用式 (4) 计算.

$$I_M = +V/(R_A + r_A). \quad (4)$$

式中: $+V$ —驱动电源电压 (V); I_M —峰值电流 (A).

在该方式中, I_M 就是额定电流. 绕组中的电流按 (1)、(2) 式的规律变化如图 3 所示, 经过 $2 \sim 3 T$ 的时间, 可以认为电流基本达到稳态值 I_M . 要减少电流的上升时间, 只有降低时间常数 T , 也就是只有加大限流电阻. 电机的额定电流要维持不变, 需要提高驱动电源的电压 $+V$. 但这样将使功耗增加.

以 90BC5100A 步进电机为例,电机基本参数为:额定电流 $I=3\text{ A}$,绕组电阻 $r_A=0.8\ \Omega$,电感 $L=10\text{ mH}$,若要求电流上升时间为 1 ms ,则时间常数至少为 $T=0.5\text{ ms}$,按(3)式可计算得外接

限流电阻 $R = 20 \ \Omega$. 这时为了得到要求的稳态额定电流 $I = 3 \text{ A}$, 按公式 (4) 可求出所需的驱动电源电压 $V = 62 \text{ V}$, 电阻上的功耗 $P = I^2 \times R = 3^2 \times 20 = 180 \text{ W}$.

对于图 2b 所示的线性恒流驱动方式, R_A 一般为 $0.05 \sim 0.33 \Omega$, 电源电压一般为 $12 \sim 30 \text{ V}$, 时间常数和峰值电流同样可以使用公式 (3) 和 (4) 计算. 虽然这时时间常数较大, 但由于峰值电流非常大, 绕组电流基本上可以认为按线性快速上升到额定电流, 电流上升到额定电流后, R_A 上的取样信号作为反馈信号使 BG_2 进入放大状态, 控制 BG_A 的基极电流从而使电路进入恒流状态, 其绕组电流变化波形见图 4.

线性恒流方式不使用限流电阻，而是直接使功率控制管工作在放大状态，由它来承担功耗，它比电阻限流方式的效率高，电流波形也要好，但功率管的功耗还是太大，给它的散热造成困难。

同样以 90BC5100A 电机为例, 对于线性恒流方式, 取样电阻 $R_A = 0.22 \Omega$ 时, 按公式 (3) 计算的时间常数 $T = 10 \text{ ms}$, 要求在 1 ms 内电流上升到额定电流, 也就是 $1/10$ 的时间常数内, 电流要达到 3 A , 电流峰值至少应达到 $I_M = 30 \text{ A}$, 此时, 按公式 (4) 可求出驱动电源电压 $V = 30 \text{ V}$, 晶体管上的功率损耗为电源总功率减去取样电阻和电机绕组的功率, $P = 30 \times 3 - 3^2 \times (0.22 + 0.8)$, 约为 80 W . 其功耗指标明显优于电阻限流方式.

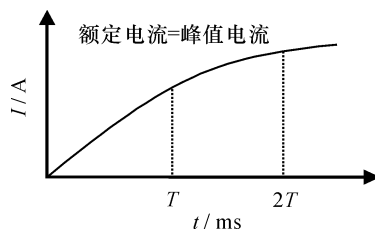


图3 电阻限流方式电流波形图

Fig. 3 Wave in a restrict current by resistance

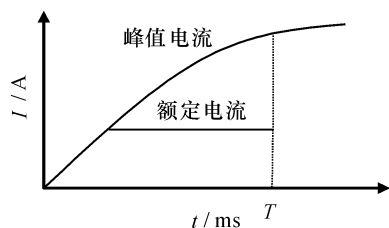


图 4 线性恒流方式电流波形图

Fig. 4 Wave in a constant current of linearity

1.2 PWM 恒流控制^[4,5]

PWM 恒流控制方式针对线性恒流方式的缺点作了改进. 其原理框图如图 5 所示.

主控制管使用功率场效应管, 通过 1 个 PWM 控制器进行控制. I_G 是电流给定, I_F 是电流反馈信号, PWM 控制器依据电流误差 $E_I = I_G - I_F$ 调节输出脉冲的宽度, 也就是调整功率控制晶体管 BG_A 的导通与截止的比例, 从而控制电机绕组中的电流. PWM 方式下的电流波形见图 6. 其中粗实线为 PWM 方式电流波形, 虚线为不受控时的电流曲线, 细实线为线性方式的电流曲线. 线性恒流方式与 PWM 方式回路时间常数和电源电压相同, 因此, 绕组电流上升率基本相同, 由于 PWM 方式的功耗小, 它可以取更高的峰值电流, 因此可以做到 $t_1 < t_2$.

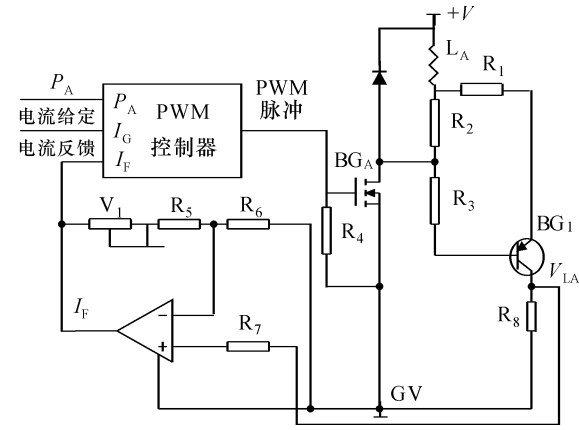


图 5 PWM 恒流控制原理图 (一相)

Fig. 5 Control theory in a constant current by PWM (a phase)

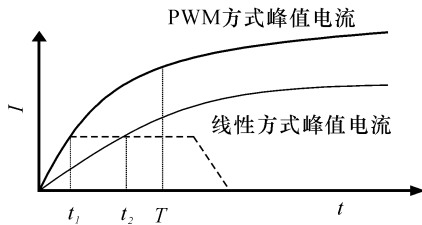


图 6 PWM 方式电流波形

Fig. 6 Wave of current by PWM

对于 PWM 方式, 其功耗明显低于上述两种方式. 同样以 90BC5100 A 电机为例, BG_A 使用功率场效应管 2SK901, 其主要参数为: 额定电流 20 A, 电压 250 V, 导通时间 $t_{on} = 100$ ns, 关断时间 $t_{off} = 520$ ns, 导通状态电阻 $R_{on} = 0.15 \Omega$. 电源电压为 30 V, 取样电阻为 0.22Ω . 晶体管的损耗由

开关过渡损耗和导通损耗两部分组成. 过渡过程的损耗可以用式 (5) 计算

$$P_{\text{开关损耗}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_e} U \cdot I \cdot dt. \tag{5}$$

式中: T —PWM 周期 (ms); t_e —过渡过程时间, 分别为 t_{on} 和 t_{off} (ms); $P_{\text{开关损耗}}$ —过渡损耗 (W). 晶体管开关过程的电压波形可以用图 7 近似描述.

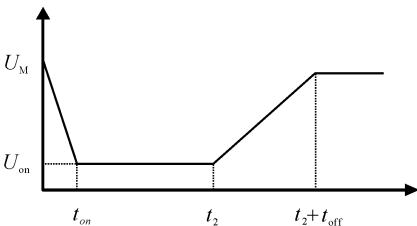


图 7 过渡过程电压曲线

Fig. 7 Voltage plot of transition

导通过程的电压可以近似表示为 $U = U_M (1 - t/t_{on})$, 对于截止过程电压可以近似表示为 $U = U_M t/t_{off}$, 由于要求绕组电流恒定, 因此, $I = I_e = 3$ A 为常数. 将它们代入式 (5) 得导通过程的损耗计算公式 (6) 和截止过程的损耗计算公式 (7).

$$P_{on} = I_e \cdot U_M \cdot t_{on} / 2T, \tag{6}$$

$$P_{off} = I_e \cdot U_M \cdot t_{off} / 2T. \tag{7}$$

式中: U_M —驱动电源电压 (V); P_{on} —导通过程损耗 (W); t_{on} —导通时间 (ms); t_{off} —晶体管关断时间 (ms); P_{off} —关断损耗 (W). 其他符号与前面公式相同.

场效应晶体管 BG_A 导通后, 可以作为一个电阻看待, 其损耗为 $P_r = I^2 R$. 一个 PWM 周期的总功耗为上述三部分之和. 将式 (5), (6), (7) 相加得到晶体管的损耗估算公式 (8)

$$P = P_{on} + P_{off} + P_r = \frac{I_e \cdot U_M}{2T} (t_{on} + t_{off}) + I^2 \cdot R_{on} \tag{8}$$

在 PWM 频率为 100 kHz 时, 将 $U_M = 30$ V, $I_e = 3$ A, 晶体管 BG_A 为 2SK901 的参数代入上式, 可求得晶体管的总功耗约为 4 W.

除晶体管外, 续流二极管也造成损耗, 以二极管 MUR860 为例, 其导通压降约为 1.3 V, 电流同样为 3 A, 其损耗 $P_D = 4$ W, 开关时间 < 100 ns, 因此开关损耗不大于 1 W. 这样, 对于 PWM 方式, 其总损耗不超过 10 W.

PWM 方式的损耗不到 10 W，远小于线性恒流方式的损耗。同时，通过提高电源电压 +V 来进一步缩短电流上升到额定值的时间，所带来的损耗的增加也不大。PWM 技术的使用，可以显著提高驱动器的性能，但也带来一些缺点，主要是电流波形中包含有高频成分，但只要 PWM 的频率足够高，经过电机绕组电感的滤波，在绕组中的电流就是基本平稳的直流电流，电流高频成分不影响电机的运行性能。

1.3 绕组电流的测量

电路中的 R_A 是电流取样电阻，它将绕组电流变换为电压。该驱动器使用一个较特别的方式将 R_A 上的取样信号变换成以公共地 GV 为基准的电流反馈信号 I_F 。其原理简述如下。

BG₁ 导通时，其等效的主回路如图 8 所示。

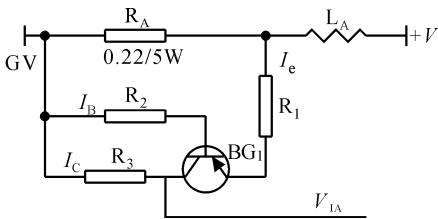


图 8 BG₁ 导通时的主回路
Fig. 8 Main loop of BG₁

电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和晶体管 BG₁ 将取样电阻 R_A 上的信号变换成以公共基准 GV 为基准的信号 I_A 。电机绕组电流 I 在 R_A 上产生压降

$$V_{RA} = I \cdot R_A.$$

当 V_{RA} 达到一定值后，BG₁ 开始进入放大状态，其回路方程为

$$\begin{aligned} V_{RA} &= I_e \cdot R_1 + V_{BE} + I_b \cdot R_2 \\ &= I_e \cdot R_1 + V_{BE} + \frac{1}{\beta} \cdot I_e \cdot R_2, \\ I_e &= \frac{V_{RA} - V_{BE}}{R_1 + \frac{1}{\beta} R_2} \approx \frac{V_{RA} - V_{BE}}{R_1} = \frac{I \cdot R_A - V_{BE}}{R_1}, \\ (\beta &\gg 1). \end{aligned}$$

由于 $I_C \approx I_E$ ，故有：

$$V_{IA} = I_C \cdot R_3 \approx \frac{R_3}{R_1} (I \cdot R_{BE}) = \frac{R_3 \cdot R_A}{R} \cdot I - \frac{R_3}{R_1} \cdot V_{BE}.$$

对于确定的晶体管，可以认为 V_{BE} 是一个常数。因此，只要晶体管 BG₁ 的 $\beta \gg 1$ ， V_{IA} 与绕组电流的关系就可以用一个直线方程来描述。该信号经过

放大后就是送到 PWM 控制器的反馈信号 I_F 。电流反馈信号 I_F 用式 (9) 计算

$$\begin{aligned} I_F &= K_1 V_{IA} = K_1 \frac{R_3 \cdot R_A}{R_1} \cdot I - K_1 \cdot \frac{R_3}{R_1} \cdot V_{BE} \\ &= K \cdot I - C. \end{aligned} \tag{9}$$

式中： R_1, R_2, R_3, R_A —电阻值 (Ω)； I —电机绕组电流 (A)； K_1 —放大倍数； V_{BE} —晶体管 BE 结压降 (V)； K —系数， $K = K_1 \cdot R_3 \cdot R_A / R_1$ ； C —与 V_{BE} 相关的常数， $C = K_1 \cdot R_3 \cdot V_{BE} / R_1$ 。

2 驱动器的组成

该驱动器用于异型罐体自动焊接设备手臂驱动，它需要接收主控制器的控制命令，驱动手臂按要求运动。使用的步进电机为 90BF006，5 相，额定电流 4 A。其结构简图见图 9。

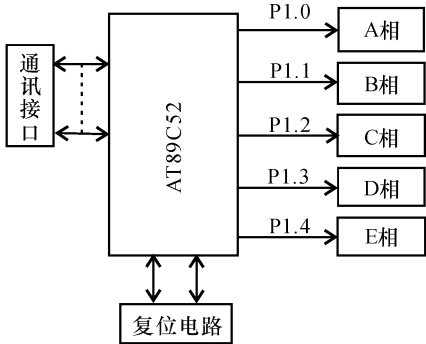


图 9 驱动器硬件结构框图
Fig. 9 Frame of hardware driver

该驱动器以 AT89C52 单片机为核心，包含上电复位、看门狗定时复位电路和通讯接口电路，这两部分电路与通常的单片系统相似，使用专用集成电路；电机 5 相绕组的驱动电路相同（图 5）。PWM 控制器使用 3525PWM 控制集成电路，各相驱动电路的电流给定信号由 PWM 芯片内部提供的基准电压产生；用 AT89C52 完成脉冲的环形分配，通过 P1.0 ~ P1.4 等 5 个输出口线进行控制，P1.0 = 0，A 相绕组通电，P1.1 = 0，B 相绕组通电……5 相驱动电路的 BG_A、AD₃ 安装在 2 片有效面积为 200 mm² 的铝合金散热器上。

控制软件主要完成：（1）接收主控制器的控制命令、数据；（2）产生 A，B，C，D 和 E 相的控制信号，对电机的运行进行控制；（3）对驱动器的运行状态进行检测，并向主控制器报告。控

制程序用汇编语言编写,限于篇幅,控制程序的流程图和程序清单略。

3 试验测试

测试内容包括绕组电流波形、电机运行性能、驱动器的损耗和发热、电源电压变化对驱动器运行性能的影响等。在电源电压 $+V=20\text{ V}$ 时,实测绕组电流波形见图 10。

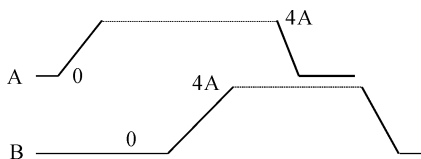


图 10 实测 PWM 方式的电流波形 (两相)

Fig. 10 Wave of current by PWM (two phases)

运行测试运行频率 $>2\text{ kHz}$, 经长时间运行测试,电机运行稳定;驱动器温升比同等条件下的线性恒流方式 (其散热器面积为 $2\,000\text{ mm}^2$) 还小;当电源电压在 $15\text{ V} \sim 50\text{ V}$ 之间变化时,驱动器的发热量无明显增加,步进电机的运行效率没有变差且最高运行频率提高。经实际带负荷运行,完全满足自动焊接设备手臂驱动的要求。

4 结 论

PWM 恒流驱动方式可以明显的提高步进电机伺服系统的性能,如电机的运行频率、高速运行时的输出力矩等,并可显著提高驱动器的效率,减少驱动器的发热,缩小其体积。所研制的驱动器经试验测试和运用测试,具有较高的性能,满足焊接设备手臂驱动的要求。与线性恒流驱动方式比较,电机绕组电流波形含有一定的高频分量,导致电机运行时的高频噪音比电阻限流方式、线性恒流方式稍大。但相对于其它性能的提高,这点稍微增加的噪音是微不足道的。

参考文献

- [1] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础 (第 3 版) [M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 李忠杰,宁守信. 步进电动机应用技术 [M]. 北京:机械工业出版社,1988. 94 - 126.
- [3] 阎石. 数字电子技术基础 (第 4 版) [M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- [4] 唐介. 电机与拖动 [M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [5] 李发海. 电机与拖动基础 [M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [6] 薛学民. 稳定电源及其电源实例 [M]. 北京:中国人民大学出版社,1990.

Research on a constant-current drive in step motor by PWM

JIANG Cun-bo, ZHANG Yu, CHEN Xiao-qin, JIN Hong

(Department of Electronics and Computer Science, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The operation of step motor is decided by drive. How to use the PWM technology in driving step motor by a constant current is described with the estimating formula of power loss. A reliable and convenient method to test current of winding is provided. Compared with traditional restrict current by resistance and constant-current drive of linearity, the drive of step motor used by PWM can increase the rising rate of winding current and the operation step motor, cut down the heat with improved efficiency and reduced volume. In addition, the drive increases the scope of power and stabilization of motor.

Key words: step motor; PWM; microcontroller