

立即达到稳定值,而是按指数曲线的规律上升<sup>[3]</sup>。

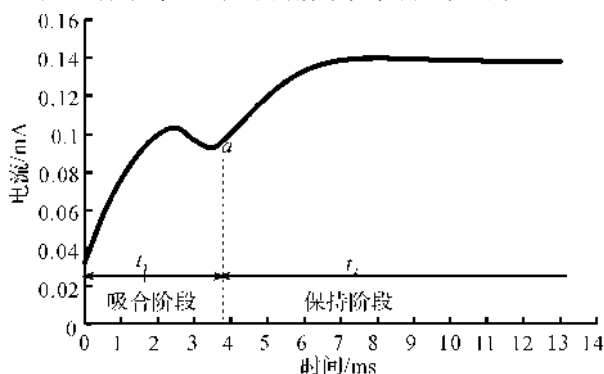


图1 线圈中电流的变化

图1中a点为选针片吸合点, $t_1$ 为吸合阶段的时间, $t_2$ 为保持阶段的时间。

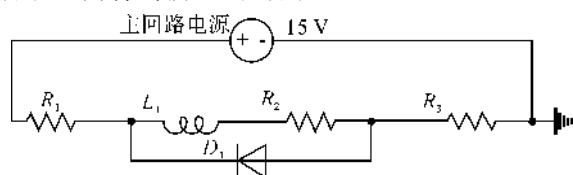


图2 外部电路

图2中 $L_1$ 和 $R_2$ 为电磁铁的电感与电阻,该电路的原型为本研究所设计的电磁铁主回路电路图。

2.1节的模拟仿真也是在此基础上进行的。

电磁铁的快速响应时间主要体现在选针片在吸合阶段能快速吸合,在释放过程能够快速分离。提高初始电压值,增加电磁吸力,减轻选针片重量和缩短选针片行程可以减少吸合时间 $t_1$ <sup>[4]</sup>。在释放过程中,电磁铁刚断电时,线圈电流不能突变。线圈电流逐渐减少,吸力也逐渐减弱,当电磁吸力降低到不足以吸住衔铁时,衔铁就开始释放。要减少电磁铁的释放时间,可以减轻衔铁重量、缩短衔铁行程、减小电磁铁保持阶段的电流值<sup>[4]</sup>。下面讨论下常见的两种加速电路的原理。

## 1.2 两种常见的加速电路

### 1.2.1 阻容加速电路

在电路中应用附加电容(见图3),通电瞬间电容相当于短路,回路总阻值为电磁铁的电阻 $R_1$ ,此时回路电流较大,可使电磁铁的动作过程加速。当电容充电饱和之后,电容开路,此时回路总阻值为 $R_1 + R_2$ ,电流减小。

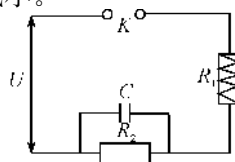


图3 阻容加速电路

### 1.2.2 高电压吸合低电压保持电路

这类电路常有两组电压,在电磁铁吸合阶段给其两端加一个高电压,流过线圈的电流也增加,电磁吸力增大,使电磁铁快速吸合。在吸合阶段结束后,保持阶段开始,电磁铁两端电压切换为低电压,用较小的电流维持电磁铁的吸力。在释放时,由于线圈流过的电流较小,释放时间也缩短。

## 2 选针器驱动电路设计

上述两种加速电路实质上都是在电磁铁吸合阶段用一个较大的电流来加速选针片的吸合,在保持阶段,切换为一个较小的电流来维持选针片的吸合。但是两种电路在保持阶段的电流值是由硬件电路决定的,电流稳定后就是一个固定的值,不可调,这样造成在不同工况下,又要去修改硬件电路。同时采用双电压控制电路,需要两个电压源,提高了硬件电路的复杂程度。

在此基础上提出了一种基于电流控制的提花机选针器驱动电路,在吸合阶段保证电磁铁快速有效的吸合,在保持阶段实行对电流的控制。因高电流吸合阶段时间太快,还未对电流进行控制,电磁铁已吸合,故对电磁铁的电流控制是在保持阶段进行的。首先根据提花机的转速及工况选取合适的主回路电压值,在保证电磁铁快速有效吸合后,如何控制保持阶段的平均电流值是节省能耗的关键。因此电磁铁保持阶段电流平均值的计算及驱动电路的实现是本研究重点。

### 2.1 吸合阶段主回路电压选取

假设提花机转速 600 r/m,即一转所需要的时间为 100 ms,吸合角度为  $55^\circ$ ,则电磁铁在一转周期内的动作和释放时间为  $t = 100 \times \frac{55^\circ}{180^\circ} \approx 30$  ms。根据提花机机械结构上的需求,必须保证选针片在  $7^\circ$  左右吸合, $7^\circ$ 所占用的时间  $t = \frac{7^\circ}{55^\circ} \times 30 \approx 4$  ms,因此在设计的过程当中要保证吸合阶段的时间少于 4 ms。

为确定提花机在 600 r/m 的转速下合适的主回路电压值,按照本文 1.1 节中的方法,对电磁铁吸合瞬态过程进行仿真分析,按照经验值更改主回路不同的电压值,得出了电磁铁在不同电压下吸合电流曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以看出不同电压下,选针片吸合时间是不同的。11 V 电压下吸合时间为 4.5 ms,13 V

电压下为 4 ms, 15 V 电压下为 3.5 ms, 17 V 电压下吸合时间为 3 ms。电压值越高选针片所用的吸合时间越短。因此, 提花机在 600 r/m 的转速下, 为满足吸合要求, 主回路电压值至少要大于 13 V。

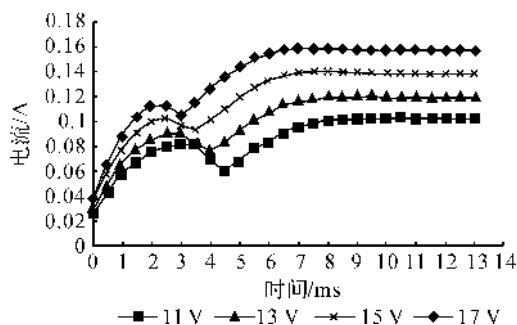


图4 电磁铁吸合电流曲线

在此若选取的电压值过高则会造成电能的浪费, 过低则会影响电磁铁的吸合动作。故本文选取 15 V 为主回路电压值。电磁铁在 4 ms 内完成选针片的吸合, 在此之后进入 26 ms 的保持阶段, 通过本文的驱动电路, 降低保持阶段的平均电流。

## 2.2 保持阶段电流控制方案

### 2.2.1 电流测量方法

从可行性、测量精度、电路设计难易等方面考虑, 选择回路串电阻的电流检测方法<sup>[5]</sup>。电磁铁主回路中串联一个精密小电阻即采样电阻, 通过测量其两端的电压值来间接测量其线圈上的电流值。

### 2.2.2 总体方案

如图 5 所示, 待选针片完成吸合后, 进入保持阶段, 比较电压电路实时采样电磁铁驱动电路上的采样点, 将得到的采样电压与参考电压进行比较, 当大于参考电压时, CPLD/FPGA 拉低脉冲 *Send*, 切断驱动电路的回路。此时电磁铁主回路的线圈电感电流逐渐减小, 在一段时间 ( $\Delta T$ ) 内仍能维持对选针片的吸合。过了这段时间 ( $\Delta T$ ), 切换 *Send* 为高电平, 电流值又重新升高到参考电压对应的电流值, 如此

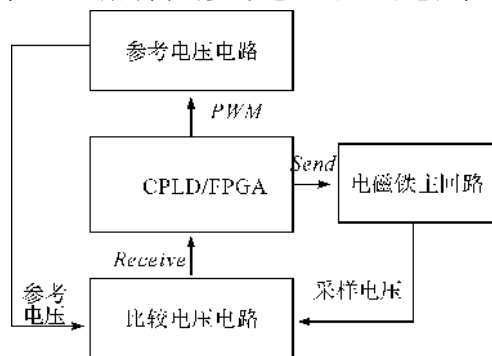


图5 系统总体方案

循环下去。这段时间 ( $\Delta T$ ) 在下面的叙述中称为断电时间。

### 2.2.3 参考电压电路设计

参考电压电路的作用是产生 0~3.3 V 之间的一个参考电压, 参考电压电路如图 6 所示。由 FPGA 发送的一定占空比的脉冲波 *Pulse*, 其占空比为  $\frac{V_{ref}}{3.3}$ , 即参考电压与 IO 口高电平 3.3 V 的比值。在多次实验测试中, *Pulse* 脉冲频率取 1 kHz 时, 输出的参考电压比较稳定。电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  起到滤波的作用。 $U_1$  是一个电压跟随器, 提高后级的带负载能力, 保证参考电压的值不会受到后级电路的干扰, 维持一个稳定的值。

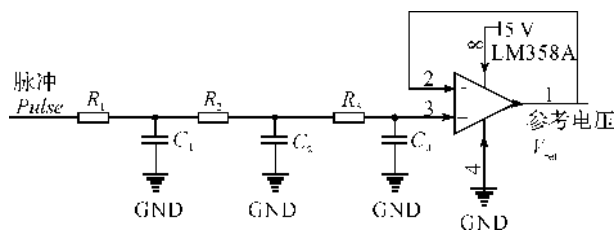


图6 参考电压电路

### 2.2.4 比较电路与主回路设计

比较电路实时地采集采样点的电压值。如图 7 所示, 比较器  $U_2$  将采样电压值与参考电压值  $V_{ref}$  进行比较, 比较的结果通过 *Receive* 反馈给 FPGA。当采样值比参考值大时, FPGA 拉低脉冲电平 *Send*, 切断驱动电路的回路。其中,  $D_1$  二极管起到断电续流及保护作用, 防止电磁铁断电时电感反向电压突然增大。 $R_6$  是精密采样电阻,  $P_1$  是由一个电感与电阻串联的电磁铁 R-L 等效电路。

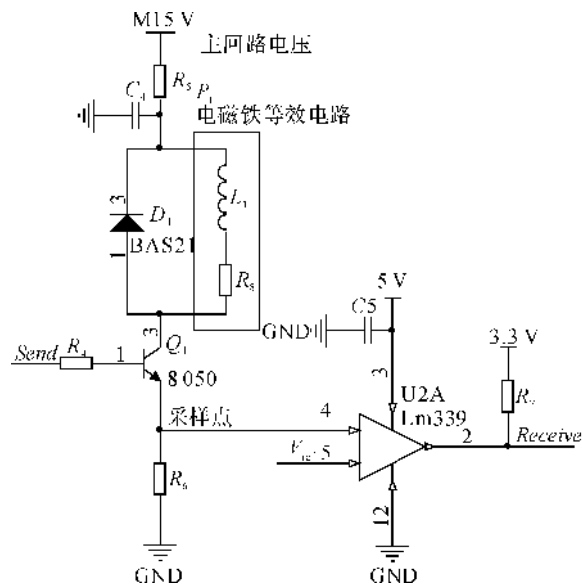


图7 主回路与比较电路

### 2.2.5 程序

本研究所选的 FPGA 芯片是 Lattice 公司的 LMX02-1200HC, 该现场可编程门阵列芯片具有运行可靠、稳定, 保证了扩展系统的安全运作; 响应快速、高效, 能够满足电子提花机系统的正常工作; 集成度高、功能强, 扩展便捷灵活, 可以缩短系统的开发周期<sup>[6]</sup>。设计软件采用的是 Lattice 公司 FPGA 的开发平台 Lattice Diamond。运用 VerilogHDL 语言编写程序, 程序采用结构化设计, 按功能划分模块, 程序流程如图 8 所示。

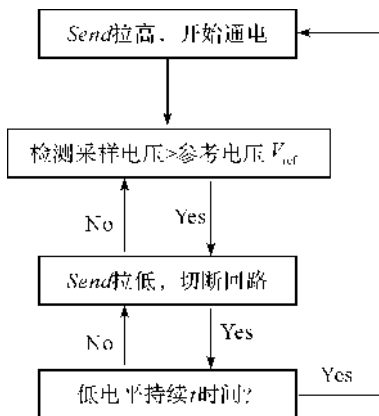


图 8 程序流程

### 2.3 断电时间 $\Delta T$ 的选取与平均电流的计算

从上面的控制方案可以看出电磁铁内的电流在保持阶段内是一个波动的值, 在实际应用中, 我们需要知道它的平均电流值。平均电流的大小与参考电压的值以及断电时间  $\Delta T$  有关。

#### 2.3.1 断电时间的选取

断电时间  $\Delta T$  应根据参考电压的值以及电磁铁线圈断电后自身能维持的续流时间来选取。如果断电时间  $\Delta T$  过短, 即线圈的电流还未降下来, 主回路又继续通电, 那么会造成平均电流降不下来, 控制也没有了意义。如果断电时间  $\Delta T$  过长, 断电后逐渐减小的线圈电流产生的电磁吸力不足以抵抗选针片的弹性反力, 选针片因吸力不够而释放。合适的断电时间  $\Delta T$  一般是根据实验调试得到的。

#### 2.3.2 平均电流的计算

一个通断电周期内流过电磁铁线圈的电流由两部分组成, 一部分是回路通电时间的电流, 即回路通电后电流上升到参考电压对应的电流值时的电流, 另一部分是断电期间电磁铁线圈依靠电感续流的电流。

在电磁铁低电流保持吸合过程中, 图 7 电路中的回路处在断电期间, 功率晶体管  $Q_1$  不导通, 此时电磁铁的电感和自身电阻组成了一个 R-L 电路。

该电路中无外加激励电源, 仅由动态元件初始储能所产生的响应, 是一个动态电路零输入响应的 R-L 电路。R-L 电路零输入响应的电流公式<sup>[7]</sup>如下:

$$i = Ae^{-\frac{R}{L} * t} \quad (1)$$

其中  $R$  为回路的电阻,  $L$  为电感, 积分常数  $A = i(0_+) = I_0$ ,  $I_0$  为初始电流。该电磁铁 R-L 电路的电阻  $R = 100 \Omega$ , 电感  $L = 25 \text{ mH}$ ,  $I_0 = \frac{V_{\text{ref}}}{R_0}$ ,  $R_0 = 2.2 \Omega$ 。

在断电时间  $\Delta T_1$  内电流总和:

$$S_1 = \int_0^{\Delta T_1} I_0 e^{-4.650t} dt = I_0 * 1.478 * 10^{-4} \quad (2)$$

在通电时间内, 电磁铁线圈电流从经过断电时间后的剩余电流又升到参考电压对应的电流值。从实验结果可以看出, 这段上升的电流曲线近似一条直线。故这段时间内的平均电流可以取两端最小电流与最大电流之和的一半, 在通电时间内电流总和:

$$S_2 = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} * \Delta T_2 \quad (3)$$

其中  $I_{\min}$  为通电时间内最小电流值,  $I_{\max}$  为通电时间内最大电流值,  $\Delta T_2$  为通电时间。

一个周期内的平均电流可以近似计算:

$$I_{\text{平均}} = \frac{S_1 + S_2}{T} \quad (4)$$

其中  $T$  为断电时间与通电时间的总和, 即通断电周期。

## 3 实验调试结果

实验中参考电压的值为 200 mV, 断电时间  $\Delta T$  为 250  $\mu\text{s}$ , 示波器采集到的各通道波形图如图 9 所示。示波器通道 1 显示的是 Pulse 脉冲波的波形图, 通道 2 显示的是参考电压  $V_{\text{ref}}$  的波形图, 通道 3 显示的是采样点的电压波形图, 通道 4 显示的是 FPGA 的脉冲 Send 波形图。

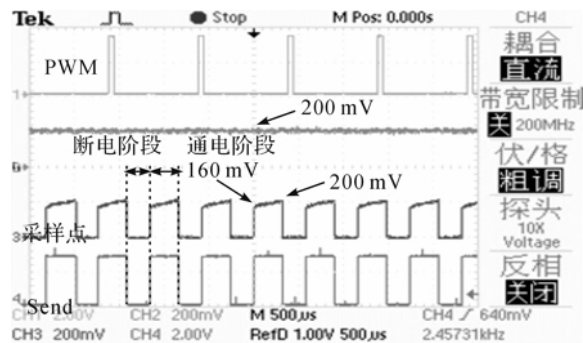


图 9 参考电压值为 200 mV 的实验波形

通道 1 显示的 *Pulse* 脉冲波的占空比为  $\frac{V_{ref}}{3.3} = \frac{0.2}{3.3} = 6\%$ 。

通道 2 显示了 *Pulse* 脉冲波经参考电压电路后得的 200 mV 参考电压,可以看出该 200 mV 电压波形稳定,毛刺较小,验证了参考电压电路的准确性及可靠性。

通道 3 显示的是采样点的电压波形,低电平阶段表示断电时间 250  $\mu\text{s}$ ,可以看出高电平近似一条斜线,该斜线反映了采样点在通电阶段内的电压变化,间接反映了磁铁线圈上的电流变化曲线。在断电时间内电磁铁线圈依靠自身电感的续流作用来维

持选针片的吸合。在通电时间内电流由  $\frac{160 \text{ mV}}{2.2 \Omega} =$

73 mA,增加到  $\frac{200 \text{ mV}}{2.2 \Omega} = 91 \text{ mA}$ 。依据 3.3 节平均电流的计算方法可以计算出参考电压为 200 mV 时所对应的平均电流为  $I_{\text{平均}} = 77.7 \text{ mA}$ 。

通道 4 显示的脉冲波形 *Send* 是用来驱动晶体管  $Q_1$ ,高电平使晶体管导通,主回路导通,电磁铁线圈处于通电阶段。低电平使晶体管断开,主回路不导通,电磁铁线圈处于断电阶段。

依照上面的控制方法,改变参考电压值,可测出各采样点的电压波形,计算出在不同参考电压下的电流平均值,如表 1 所示。

表 1 不同参考电压下的平均电流值

参考电压值/ mV	断电时间/ $\mu\text{s}$	通电时间/ $\mu\text{s}$	通电时间 电流积分 $S_2/10^{-6}$	断电时间电流 积分 $S_1/10^{-4}$	平均电流 $I/\text{mA}$
280	250	1 190	$0.118 * 1 190$	0.188	110.5
260	250	680	$0.109 * 680$	0.175	99.6
240	250	530	$0.102 * 530$	0.161	89.9
220	250	350	$0.091 * 350$	0.148	77.7
200	250	264	$0.082 * 264$	0.134	65.0
180	250	192	$0.076 * 192$	0.120	60.0
160	250	136	$0.069 * 136$	0.102	52.3

从表 1 数据可以看出,在电磁铁保持阶段,断电时间同样是 250  $\mu\text{s}$  的情况下,不同的参考电压值对应不同的平均电流值,验证了该电流控制方法的正确性。

在实际应用过程中,参考电压值的选取与保持阶段电磁吸力有关,在电磁吸力足够有效地吸住选针片的情况下,可当选取较低的参考电压值,以使平均电流最合理,从定性上可以看出一方面通过降低保持阶段的电流,可以使电磁铁释放速度提高,提高响应速度,另一方面不会使过大的保持电流造成对电能的浪费。

#### 4 结束语

本研究从理论上分析了电磁铁吸合的过程,讨论了两种常见的加速电磁铁快速响应两种方法,在此基础上设计了基于电流控制选针器驱动电路,给出了电磁铁保持阶段软件算法与平均电流的计算方法,最后进行了实验验证。实验结果表明,基于电流控制的方法能有效地调节驱动回路的平均电流,相比双电压驱动电路少了一个电压源,同时保持阶段的电流可以根据工况需要进行调节,更具灵活性。

将上述电流控制方法应用在提花机选针器驱动

电路中,可以实现电磁铁高电流快速吸合,低电流保持的目的,这样既能保证电磁铁有效的吸合,又能实现低功耗保持,节省了能源,可为国产提花机在提高快速响应与节省能耗方面上提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 宋 军,李书泽,李孝禄,等. 高速电磁阀驱动电路设计及试验分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(5): 546-549.
- [2] 张 华,胡旭东. 嵌入式电子提花机控制系统研究[J]. 机电工程, 2006, 23(2): 30-32.
- [3] 郭凤仪,李 靖. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 163-167.
- [4] 郭月洋,陈瑞琪. 电子多臂机电磁铁吸合过程分析及加速措施探讨[J]. 棉纺织技术, 2000, 28(10): 16-19.
- [5] Harirak A, Sangwongwanich S. A novel source-current detection type active filter equivalent to load-current detection type [C]//Industry Applications Conference, 2005. Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005. IEEE, 2005, 2: 1205-1212.
- [6] 张建义,张露露,袁嫣红. 基于 FPGA 的大针数提花机控制器设计[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(3): 353-356.
- [7] 邱关源. 电路[M]. 5 版. 西安: 高等教育出版社, 2006: 140-146.

## Design and Analysis of Driving Circuit of Needle Selector of Jacquard Machine Based on Current Control

FAN Jian-guo, YUAN Yan-hong, ZHANG Jian-yi

(Modern Textile Equipment and Technology Engineering Research Center of Ministry of Education,  
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The response speed and energy consumption of electromagnetic needle selector are two important factors concerning the performance of electronic jacquard machine with high number of threads. This paper theoretically analyzes the process of electromagnet actuation, discusses two common methods of accelerating rapid response of electromagnet, designs a driving circuit of needle selector of jacquard machine based on current control on this basis and gives the computing method of average current of driving circuit. The experimental result shows that this current control method can make electromagnet realize high-current, rapid and effective actuation in actuation stage and realize the maintenance of low current and low energy consumption in the stage of maintenance.

**Key words:** electronic jacquard machine; needle selector; response speed; energy consumption; current control method

(责任编辑: 康 锋)

---

(上接第 280 页)

## Analysis on Operating Performance of Permanent Magnet AC Servo System Based on Vector Control

LIU Hu, YUAN Yan-hong, LU Wen-qi

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University,  
Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Permanent magnet synchronous motor vector control system has been applied in many situations. However, as vector control technology relies on the mathematical model of permanent magnet synchronous motor, its system performance is greatly influenced by motor parameters. This paper uses SIMULINK to establish current and revolving speed double closed-loop vector control system based on vector control, uses  $I_d=0$  magnetic field oriented vector control theory to analyze the influence of electrical parameters and mechanical parameters of motor on speed control system performance of PMSM and conducts simulation analysis on the influence of different given revolving speeds and parameters on the operating performance of motor. The simulation result shows that sudden increase of stator resistance does not have significant influence on the operating performance of motor, sudden increase of mechanical parameters impairs the dynamic performance of motor, the rise time of revolving speed waveform becomes obviously longer and electrical parameters have little influence on dynamic performance of motor. This research provides foundation for subsequent motor parameter identification and compensation researches.

**Key words:** vector control; permanent magnet synchronous motor (PMSM); servo control system

(责任编辑: 康 锋)