

STUDY ON THE DRIVE CONTROL SYSTEM OF LINEAR PULSE MOTOR (LPM)

Abstract

Input pulse signal can be directly transformed into micro-step linear motion by use of linear pulse motor, which have found wide applications in the digital linear servo systems with high positional accuracy and high reliability. Taking SLPMU-025A, a two-phase hybrid LPM manufacturing by SHINKO Motor Company Ltd, as a specimen, the study on the drive control system is carried out in this thesis, which contains: (1) Three kinds of drive circuits are designed and comparison analysis in theory is done; (2) Introduction to AT89C51 microchip as controller and special micro-step constant current driver, a great variety of running modes driver control are developed; (3) Experimental testing and theoretical analysis of current waveforms and displacement graphs and velocity graphs are carried out in case of different micro-step constant current driver.

Keywords: stepping motor linear pulse motor driver open-loop control closed-loop control

1 绪 论

1.1 直线脉冲电机（LPM）驱动控制系统概述

直线脉冲电机（Linear Pulse Motor,简称 LPM）是步进电动机（Step Motor）家族中近年来发展较快、具有广阔应用前景的重要一员，它可将输入的电脉冲信号直接转换成相应的微步直线运动。直线脉冲电机是旋转步进电机电磁拓扑的变种，然而在需要直线驱动的场所，由于省去了旋转类步进电机必需的丝杠和链条等机械转换装置，结构大为简化，在定位精度、工作效率、能源节约等方面显示出愈来愈明显的优势，特别是随着微机技术、集成电路的发展、直线脉冲电机本体的日臻完善、以及直线运动领域的增多，正朝着其它直线运动驱动装置所不能满足或者使用旋转电机有困难、技术经济指标不满足要求的领域发展，可以预计，直线脉冲电机的应用前景将非常广阔^{[1][2][46][47]}。

人们对于旋转步进电机驱动控制系统的研发日趋成熟而深入^{[3][45]}，而对于直线脉冲电机驱动控制系统的研究开发，近年来才有了较快的发展。在国外，特别是日本，直线脉冲电机及其驱动控制系统更多的是由不同的专门公司研制和开发，因而直线脉冲电机驱动的新产品研发周期相对缩短，不仅产品种类繁多，而且应用范围宽广。在我国，有关直线脉冲电机及其驱动控制的科研机构与生产企业联系较少以及没有广泛开拓其市场影响了直线脉冲电机的生产与应用，因而国内的科研人员与有关机构应携起手来共同开发，这对于技术相对薄弱、研发能力不足的中小型电机生产企业来说，更具有现实意义。本文作者在研究生学习期间，参阅了大量文献资料，通过实验研究，力图将旋转步进电机驱动控制方面的成果应用于直线脉冲电机的驱动控制中。

1.2 本文研究内容及所做的工作

本文以日本神钢电机株式会社生产的 SLP MU-025A 两相混合式直线脉冲电机为研究样机，对两相混合式直线脉冲电机的驱动控制系统进行了研究：

- (1) 直线脉冲电机的结构和动作原理的分析；
- (2) 直线脉冲电机驱动方法的研究；
- (3) 用 AT89C51 单片机作为直线脉冲电机控制器，采用专用恒流细分驱动器，实现了开环控制方式下恒流细分驱动时各种方式的运行；
- (4) 实验测取了不同细分数下恒流驱动的电流量波形；
- (5) 实验测取了直线脉冲电机在各种运行方式下的位移图和速度图，并进行对比分析研究。

2 LPM 的结构原理及 SLPMU—025A 样机简介

2.1 LPM 的基本结构和工作原理

直线脉冲电机 (LPM) 有多种结构, 就其原理来分, 有变磁阻式和混合式两类^[3]。

2.1.1 变磁阻式 LPM

变磁阻式直线脉冲电机可以做成不同的相数。图 2-1 是一台四相变磁阻式直线脉冲电机的结构原理图。它主要由定子、可动子和相应的结构件所组成。定子为呈短形齿的齿条, 由磁性材料叠合而成, 固定在相应的机架上。可动子是由一组呈 E 字形的叠片铁心所组成, 在 E 字形动子的铁心柱上有线圈。为了保证可动子和定子之间的极隙 (气隙) 和相对运行, 在可动子和定子之间装有液柱轴承和极隙调整器。动子和极隙调整器为刚性连接。

定子和可动子的齿形和齿槽尺寸是一致的, 齿形一般为矩形齿。但是, 在动子 E 字形铁心的四个柱上各齿中心线必须互相错开 $1/4$ 齿距。这就与旋转式步进电动机不同, 大多数旋转式步进电动机均利用极距角与齿距角之间的特定关系来保证步进运动, 而直线脉冲电机只能靠人为地移动四个柱的相互距离来实现。

我们知道, 根据能量最小原理, 磁力线总是具有沿着磁阻最小的路径闭合并力图缩短磁通路径以减小磁阻的本性, 而变磁阻式直线脉冲电机正是利用这一原理, 通过让各相绕组按特定规律通电从而使定转子位置规律性变化而动作的。由于磁极 1、2、3 和 4 的齿与二次侧的齿相对顺次错开 $1/4$ 齿距, 当只有 A 相绕组通电时, A 相铁心柱中的磁通最大, 所受磁力最大, 由磁力线的张力特性, 二次侧的齿将和极 1 下的齿对齐, 同样当 B

相通电时,二次侧的齿将和极 2 下的齿对齐,从而可动子前进 $1/4$ 的齿距。于是四相绕组若按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 的顺序来轮流通电励磁时,可动子就将以 $1/4$ 齿的步距作直线步进运动。

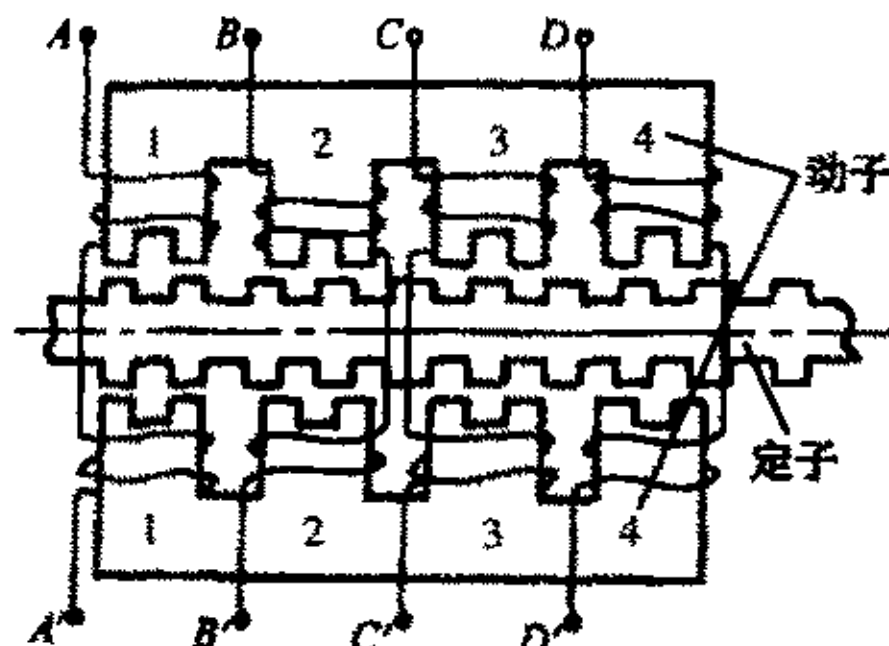


图 2-1 四相变磁阻式直线脉冲电机的结构原理图

2.1.2 混合式 LPM

混合式直线脉冲电机有两种结构：一为压电型，另一为混合磁路型。混合磁路型为索耶所发明，所以也称索耶直线脉冲电机。

(1) 压电直线脉冲电机

压电直线脉冲电机主要是利用压电陶瓷的磁致伸缩原理制成微步距运动的高精度脉冲电机。图 2-2 是这种电动机最简单的结构形。压电陶瓷管的两端固接在二个电磁铁上，电磁铁则配放在精密 V 形导轨上，两端的电磁铁即是磁压板，又起支撑的作用。当施加电压时，压电陶瓷管会伸缩，只要对施加电压加以适当控制，可任意改变运行体（压电管和电磁铁）的步距、速度和运动方向。

其动作原理是，开始时电动机两端是压紧的，若要向前移动，则去掉后面电磁铁的激磁，于是压电管后端不再压紧。当压电管内外壁加上电，由于电效应使压电管缩短（缩短的长度由所加电压决定），这时后端电磁铁也向前移动一距离；然后是后端电磁铁激磁，前端电磁铁去磁，压电管去掉所施加的电压，又恢复到原来的长度，则前端电磁铁向前移动一步，最后仍通电激磁完成一步运动。重复上述过程，则电动机就一步一步向前移动。反之，向后移动程序也相仿。

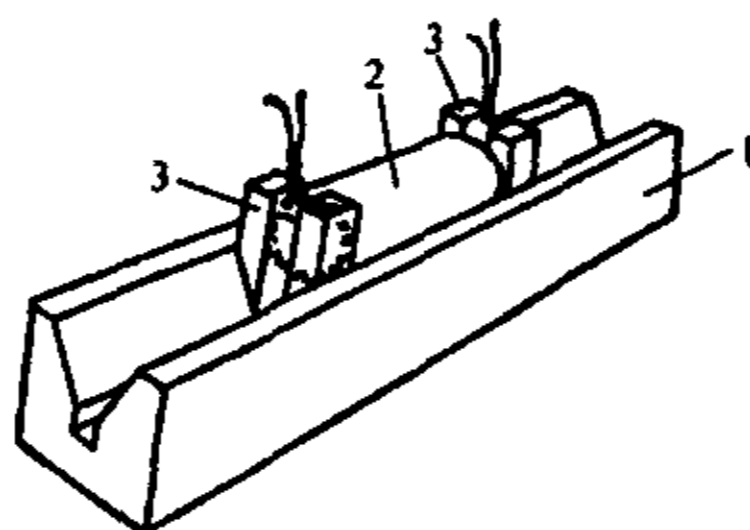


图 2-2 压电陶瓷直线脉冲电机

(2) 索耶（混合磁路型）直线脉冲电机

这种电动机的结构如图 2-3 所示，电动机由上下两部分组成，上面的可动部分称为动子，下面的固定部分称为定子。定子部分是用铁磁材料做成的平板条，长度可按需要确定。在平板条的上平面铣有槽以形成齿形，在槽里浇注环氧树脂后与平面一起磨平。齿槽可以等宽，也可不等宽。动子是一个电磁组件，由一个马蹄形永久磁钢 PM 和二个 Π 型电磁铁 EMA 和 EMB 组成，在 EMA 和 EMB 上均绕有激磁线圈。动子与定子相对的表面上也有槽，槽中也浇注环氧树脂并磨平，在动子表面上还开有若干小孔，这些小孔与外界的压缩空气皮管相通。当从外界打入压缩空气时，借助空气压力以克服由于永久磁钢和定子的吸力，同时将动子悬浮在定子表面。因此，控制空气压力就可以调节动子和定子之间的气隙保持极小。

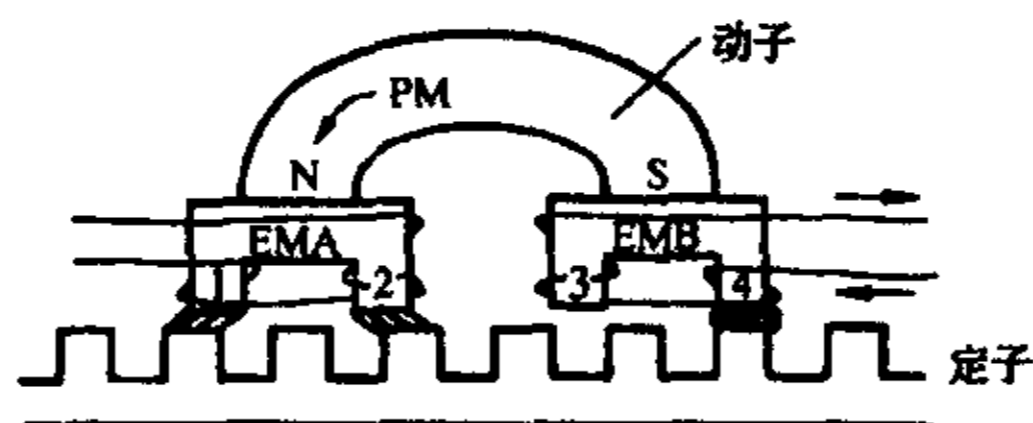


图 2-3 索耶直线脉冲电机结构示意图

索耶直线脉冲电机是利用具有一定规律变化的电磁铁与永久磁钢的复合作用来形成步进运动的。这与二相变磁阻式再加上一块永久磁钢的电动机作用原理一样。电动机由正负脉冲控制，具体运行过程由图 2-4 表示。

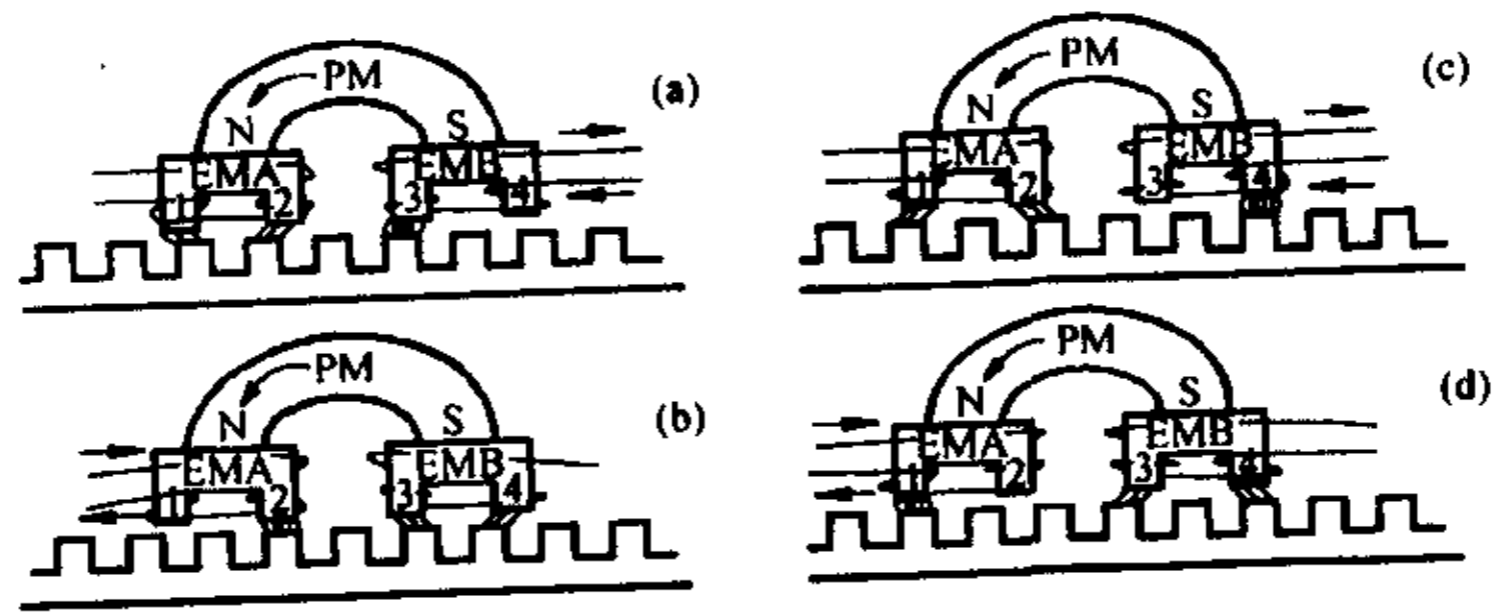


图 2-4 索耶直线脉冲电机运行原理图

电磁铁 EMA 和 EMB 各有两个小极, 分别相对于定子齿错开半个齿形。当绕组中无激磁电流时, 磁钢产生的磁通均等地通过 4 个极, 与定子齿形成闭合磁路。

当线圈 A 中通以正向电流时, 则该电流产生磁通 Φ_A , 此时极 1 下的磁通 $\Phi_1 \approx \Phi_m / 2 + \Phi_A$, 设 $\Phi_A \approx \Phi_m / 2$, 则 $\Phi_1 \approx \Phi_m$, 而极 2 下的磁通 $\Phi_2 \approx \Phi_m / 2 - \Phi_A \approx 0$, 此时, 极 3、4 下的磁通仍为 $\Phi_m / 2$ 。显然, 这时极 1 受的磁场力最大, 极 2 受到的磁场力几乎为 0, 极 3 和极 4 受到的磁场力由定、动子的相对位置决定, 其水平方向的分力方向相反, 因此动子的运动主要是由极 1 所受的磁场力决定。最后, 极 1 必定运动到和定子齿对齐为止, 如图 2-4d 所示。因为只有在齿对齐的情况下, 对应磁路的磁导才最大, 这时动子所受水平推力为零, 动子就处在稳定平衡的位置上。如果此时线圈 B 通电, 最终动子由图 2-4d 过渡到 2-4c 的位置, 动子向右移运了 1/4 齿距。如果通电方式再变为图 2-4b, 即 A 相反向通电, 则极 2 受磁力最大, 并使极 2 对准定子齿中心, 此时动子又向右移运了 1/4 齿距。同样分析可得, 当按图示顺序 d→c→b→a→d 通电时, 动子就会以 1/4 齿距向右移动。

两种直线脉冲电机都有各自的特点: 变磁阻式脉冲电动机结构简单, 耐用, 频率响应快, 控制电路简单; 而混合式脉冲电动机在相同体积下较反应式有较大的推力, 容易实现细分控制, 并且不通电时有一定定位力, 对于要求失电时必须保持在所希望的位置的用户来说是一种很有用的特性^[4]。

2.1.3 直线脉冲电机的应用

直线脉冲电机的发展历史虽然比较短，但应用的领域已很广泛。绘图仪、打印机、软盘驱动器等计算机外围设备中的应用被认为是直线脉冲电机应用的主要领域，如美国 IBM 公司的打印机和 X-Y 平面仪均采用直线脉冲电机；美国奥基电气公司在软盘驱动方面则采用圆柱型 LPM 等。在数据设备、情报设备中直线脉冲电动机也有着广泛的应用。另外，日本正在进行将直线脉冲电机作为人工心脏动力源的研究工作，从而将直线脉冲电机的应用拓展到一个全新的领域^{[1][6]}。

2.2 本文研究用样机 SLPMU-025A 简介^[5]

本文以日本神钢电机株式会社生产的两相混合式直线脉冲电动机 SLPMU-025A 为研究样机，对两相混合式直线脉冲电动机的驱动控制进行研究分析。SLPMU-025A 是作为微型计算机末端的薄型打印机的早期产品而设计开发的，它设计独特，性能良好。SLPMU-025A 的参数见附录一，其外观构造和基本结构如图 2-5、图 2-6 所示。

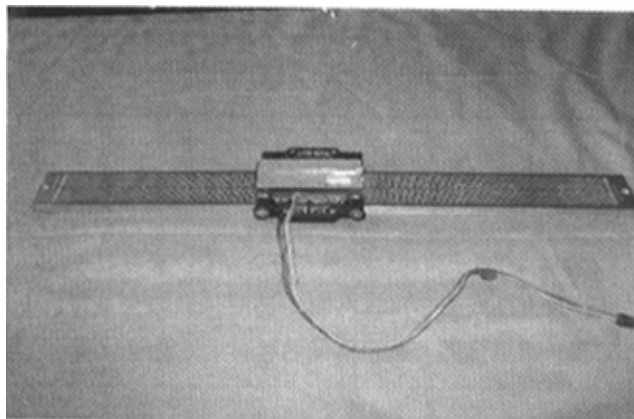


图 2-5 SLPMU-025A 的外观图

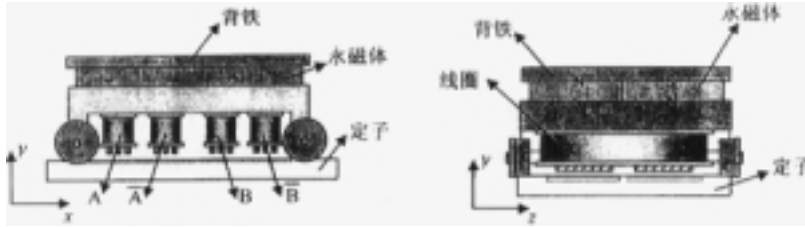
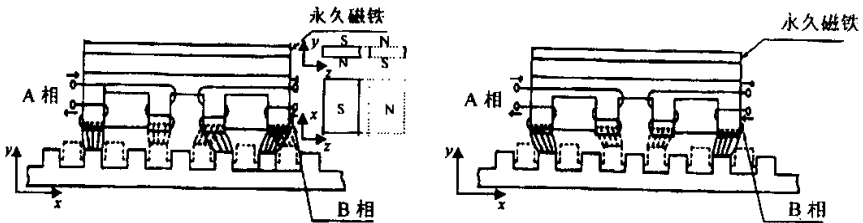


图 2-6 SLPMU-025A 的结构图

永久磁铁、背铁和绕组铁心组合成为动子，具有相同步长的齿极和齿槽构成电机的定子。动子的铁心是由硅钢片叠制而成，定子则是由矽铁片刻成两排栅网状贴于软铁上加工而成。

SLPMU-025A 的工作原理与前面所描述的两相混合式直线脉冲电机的工作原理实质相同，不同之处只是在于，从 SLPMU-025A 的结构以及永磁体的充磁方式可知，SLPMU-025A 的磁通路径具有三维性。图 2-7 给出了一相激磁和两相激磁方式下电机处于某一平衡位置时的磁通路径图。



(a) 一相激磁某平衡位置时磁通路径 (b) 两相激磁某平衡位置时磁通路径

图 2-7 SLPMU-025A 平衡位置处的磁通路径

3 LPM 驱动器

3.1 LPM 驱动器的构成

对 LPM 驱动器的研究几乎是与对 LPM 本体的研究同步进行的，因为 LPM 不能直接接到交直流电源上工作，须使用专用设备——LPM 驱动器。LPM 驱动器的优劣在很大程度上决定了 LPM 驱动系统的性能。由于 LPM 具有许多不同于旋转步进电机的特性，在驱动方法的选择和驱动器的设计方面虽可借鉴常见的旋转类步进电机，但仍需做大量的研究实验工作。

图 3-1 是 LPM 驱动器构成框图。环形分配器将来自控制环节的 CP 脉冲串按一定的规律分配给 LPM 驱动器，这种驱动信号是按 LPM 状态转换表要求的状态顺序生成各相导通或截止的信号，因而 CP 脉冲的有无、频率的大小及控制环节提供的方向信号共同决定了 LPM 运行速度的高低，加减速、启停、正反向、定位等功能的实现。

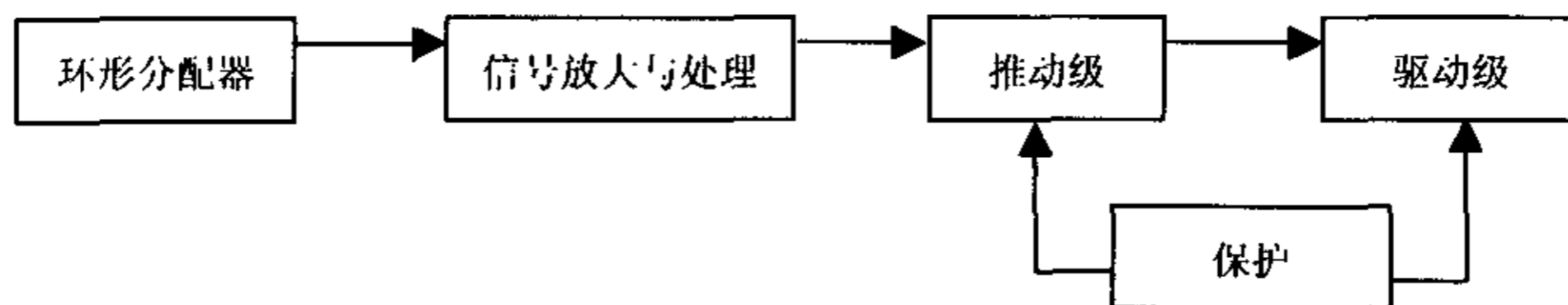


图 3-1 LPM 驱动器构成框图

信号放大与处理环节对环形分配器输出的各相导通或截止信号进行电压电流放大后加以转换、合成，并与各种保护电路、控制电路一起实现特殊功能的驱动。

推动级将信号进一步放大送入驱动级后，控制 LPM 各相绕组的导通与截止。

保护级可设置如过流、过热、过压、欠压等保护，并监护输入信号，使驱动级安全可靠地工作。

本文将在下面就 LPM 的驱动方法及驱动器电路的设计方面提出几种方案，并加以对比分析。

3.2 LPM 的驱动方法

3.2.1 LPM 驱动的特点

- (1) 各相绕组均处于开关状态，故各相绕组电流是断续的；
- (2) 各相绕组因存在比较大的电感，限制了通电相电流的上升率，影响绕组平均电流的大小；
- (3) 须设计续流回路以使截止相电流尽快泄放；
- (4) 绕组中电感电势、互感电势、运行电势与外加电压相叠加产生的过电压使驱动器工作条件恶化，必须考虑驱动级功率放大器件的耐压值；
- (5) 运行速度愈高，运行电势将愈大，绕组电流将愈小，则输出转矩将下降。

根据以上特点，应选用合适的功率器件来设计合理的驱动线路。常见的功率放大器件有晶体管、达林顿晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 等^{[48][49]}。SLPMU-025A 型 LPM 为输入功率 4.22W，额定电流 1.2A / 相的微电机，可选用晶体管构成功率放大器，以获得高放大倍数并简化驱动线路。

3.2.2 步进电动机的各种驱动方法

步进电机的驱动方法较常见的有：单电压驱动、单电压串电阻驱动、双电压驱动、高低压驱动、斩波恒流驱动、H 桥驱动、升频升压驱动、微步驱动（细分驱动）等。

(1) 单电压驱动器尽管线路简单、成本低、低频时响应较好，但低频共振和高频带载能力差，使得这种驱动方法应用较少，只适合于小机座号电机的简单应用；

(2) 单电压串电阻驱动通过减小电气时常 ($\tau = L / R$) 提升了导通相

绕组电流上升率，但所串电阻发热严重，若考虑到加装通风散热设备时也带来了整个驱动器体积增加，结构复杂的弊端；

(3) 采用在较低频段用较低的电压驱动，而在高频时用较高的电压驱动，即双电压驱动，可有效地提高绕组导通电流的上升前沿，改善高频响应。存在的问题是仍然有发热现象，且整个频段被划分成两段造成特性的不连续、突变；

(4) 高低压驱动可保证在很宽频段范围内相绕组电流均有较大的平均值，同时续流回路通过给高压电源回馈能量加快了截止相电流的泄放，电磁转矩大而平稳，驱动系统可得到较高的响应，该驱动方式目前应用较多。但低频时绕组电流的上冲较大，电机振动噪声大，低频共振现象依然存在；

(5) 斩波恒流驱动方式集前述驱动的优点于一身，并消除了共振现象，是混合式步进电机驱动主电路的典型模式；

(6) H 桥驱动是针对必须用双极性电源供电的永磁步进电机及混合式步进电机的驱动而提出的，每相桥对角线的两个放大元件同时导通，会造成两管直通，从而产生很大的短路电流，发生危险；

(7) 升频升压驱动能根据频率的变化改变对绕组提供的电压，使低速时电流上升前沿较平缓，减小低频共振，高速时较陡的电流上升前沿保证了足够的绕组电流，能提高电动机带载能力；

(8) 微步驱动技术的应用标志着步进电动机驱动器的发展水平进入了一个全新的阶段，日益引起人们的高度重视，应用该技术可将步进电动机的脉冲细化，减小步距角，保证电动机在低速平稳运行，在电机相数和极数一定的情况下能提高电机的分辨率，实现精确定位，采用斩波恒流细分驱动技术，能有效地控制电机绕组电流，进一步提高步进电机系统的运行性能，它必将成为步进电动机控制驱动器发展的主要趋势^[3]。

步进电动机驱动控制电路由采用分立元件设计向采用集成电路专用芯片方向发展。目前，一类是通用的功能控制芯片，如 F / V 变换器(LM2917)、V/W 变换器(SG3524、TL494)、环形分配器(CH250、PMM8713、PMM8714、C293)、步进电动机控制器(L297)和双 H 桥式驱动器(L298)、细分驱动

器(3717)等;另一类是集成的综合驱动控制电路,如微步驱动控制芯片(IXM150、DDR1002AD、TA8425)等^[4]。

3.2.3 LPM 的驱动方法

关于步进电动机驱动控制方面的研究较多,例如文献[8]~[32]。本文旨在将步进电动机驱动控制的成果搜集汇总,研究设计应用于 LPM 的驱动控制系统,并进行对比分析研究。

(1) 用分立元件构成的 LPM 驱动器

SLPMU-025A 为两相混合式 LPM,要求 A、B 两相绕组均能正反向励磁,即能够双极性供电。可采用双 H 桥驱动电路,如图 3-2 所示为 A 相绕组的驱动主电路原理图。当 I_R 为高电平时,绕组中流过正向电流,当 I_R 为高电平时,绕组中流过反向电流。

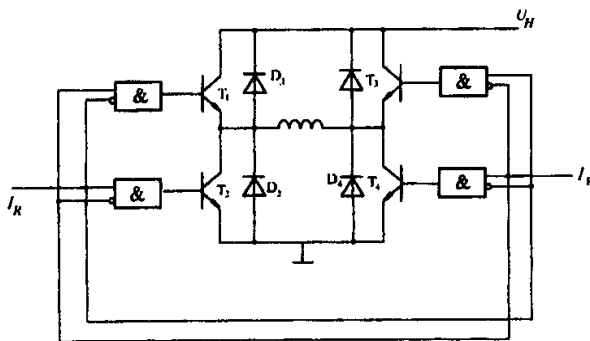


图 3-2 A 相绕组的 H 桥驱动主电路原理图

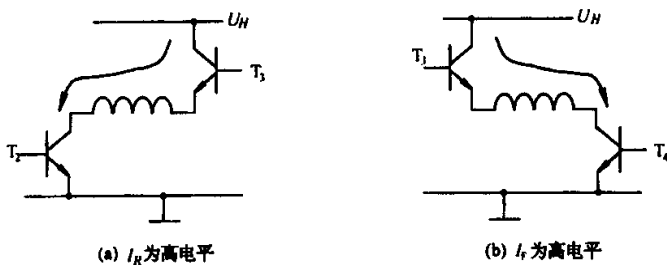


图 3-3 不同对角线晶体管导通时电流的方向

下面给出用分立元件构成的样机 SLP MU-025A 的自激式斩波恒流驱动器 A 相通正向电流单元线路图, 如图 3-4 所示, 工作电压为 24V, 相电流 1.2A。用该单元线路可组成两相混合式直线脉冲电机驱动器。A 相通反向电流的电路与该单元电路相同, 只需将 A 相绕组反接即可, B 相两单元电路同 A 相。

环形分配器如图 3-22 所示。相同的电源部分同时示于图 3-6。

另有一公共的过流保护电路示于图 3-5 中, 各相的过流信号都送入此保护电路, 由此发出信号封锁各相绕组工作。

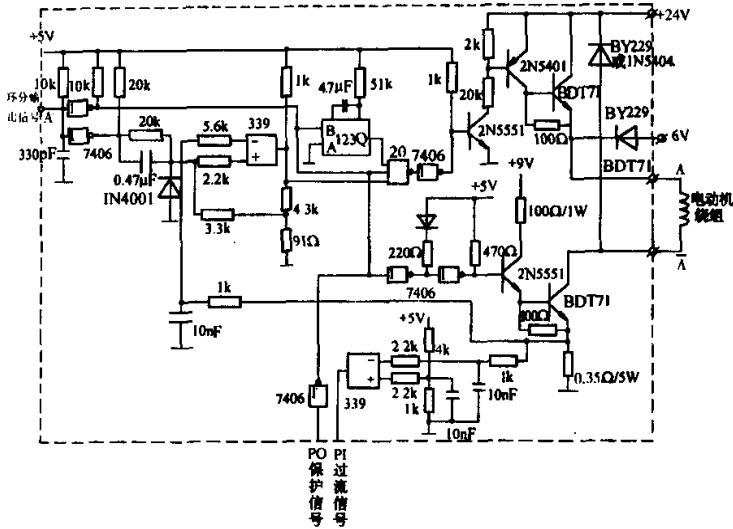


图 3-4 自激式斩波恒流驱动 A 相通正向电流单元电路

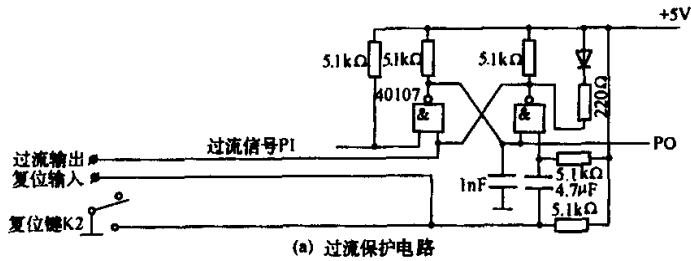


图 3-5 过流保护电路

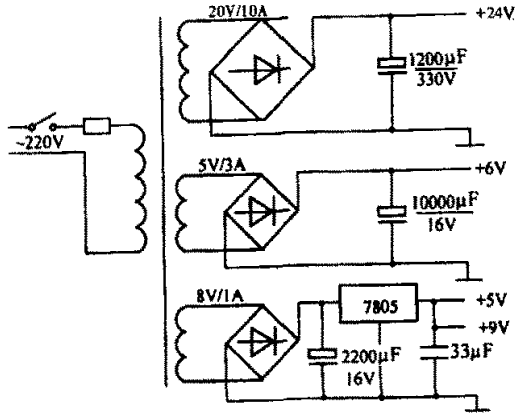


图 3-6 电源部分

本驱动器具有如下一些特点：

a. 电路前沿的提升功能

性能较高的驱动器都要求有电流前沿的提升功能，本电路是通过给给定电平电路加提升电容来实现的，局部线路图如图 3-7 所示。

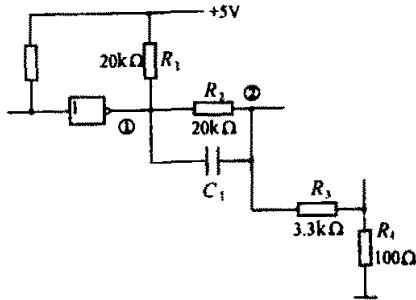


图 3-7 电流前沿提升电路

当输入为高电平时，反相器输出为低电平，点①和点②电位均为零，相绕组处于截止状态。

当相绕组要导通时，输入为低电平，反相器输出为高电平。这里用的反相器是 7406，是一种集电极开路输出（OC）的反相器，输出高电平时是一种开路状态，此时，由于电容 C_1 两端电压原为零，不能突变，所以①、

②两点电压相同，可通过电阻分压计算得到

$$U_2 = U_1 = UR_3 / (R_1 + R_3) = 5 \times 3.3 / (20 + 3.3) = 0.708V$$

随着电容的充电，点②的稳定电压为

$$U'_2 = UR_3 / (R_1 + R_2 + R_3) = 5 \times 3.3 / (20 + 20 + 3.3) = 0.381V$$

变化过程的时间常数取决于 R_1 、 R_2 、 R_3 各电阻之值，即

$$\tau = [R_2 // (R_1 + R_3)]C = 20 \times (20 + 3.3) \times 10^3 / (20 + 20 + 3.3) \times 0.1 \times 10^{-6} = 1.08ms$$

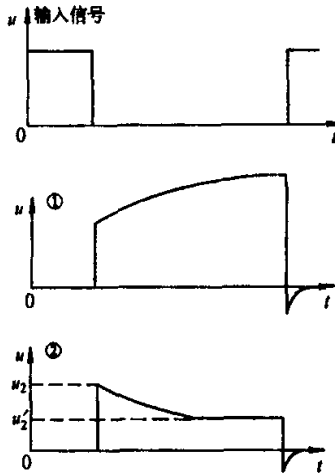


图 3-8 比较器给定电压波形

图 3-8 画出了①和②的波形变化过程。注意看②点，可见输入到比较器的给定电压在导通前沿时高，而在导通后维持较低。这样的给定电平使绕组电流前沿很高，电流有固定的上冲，可有效地提高电动机的极限起动频率及极限运行频率。

电路中，驱动级相绕组的取样电阻为 0.35Ω ，由给定电压可知导通前沿电流的峰值为

$$I_{\max} = U_2 / R = 0.708 / 0.35 = 2.02A$$

可见前沿电流已超过额定值，形成上冲。

电容 $C_1 = 0.1 \mu F$ ，称为前沿提升电容。调节 C_1 的大小可改变充放电时间常数，从而改变上冲衰减的时间。调节 R_1 、 R_2 、 R_3 的大小可改变上冲量

和稳定后给定电平的大小。

上述讨论中，没有考虑电阻 R_4 的作用，这是因为 $R_4=100\Omega$ ，相比之下很小，对导通前沿的给定电平影响可忽略不计。

b. 高频运行绕组电流的提升功能

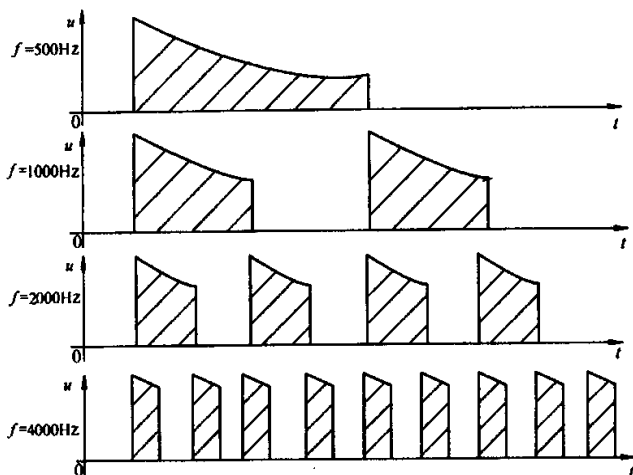


图 3-9 不同频率时给定电压的平均值

一般驱动器的普遍缺点是低速时绕组电流大，而高速时绕组电流小，这是由于电感和反电势的作用，结果影响电动机高频运行特性。图 3-7 所示的前沿提升电路同时也起到了高频运行时绕组电流的提升作用。给定电平是按指数曲线下降，时间常数是固定的，频率越高，导通时间越短，导通期间给定电压的平均值越大，如图 3-9 中阴影所示。于是，频率越高，绕组电流的平均值越大，因此，电动机的高频特性可大大改善。当然，电动机中绕组的实际电流同给定电压随频率变化的关系并不完全一致。这是由于当频率较高时，反电势增加，引起电流的前沿上升率下降，相电流的平均值有所减少。但是，这种提升电路的作用结果，总是能有效地提高电动机高频时的输出转矩。

c. 斩波器的回差特性

给定电平和反馈信号分别送入比较器的两个输入端，当反馈信号高于

给定电平时，比较器输出低电平，高压管截止，电动机绕组电流下降；但当反馈低于给定电平时，比较器输出高电平，高压管导通，电动机绕组电流又开始上升。按这种模式工作，如果忽略各级电路的器件延迟作用，从理论上讲此时斩波频率应该无穷大。但是由于各级电路的导通和截止都有一定的延迟。所以斩波频率并不是无穷大。由于线路器件固有的延迟很小，所以斩波频率很高。过高的斩波频率会增加开关损耗，使发热严重，效率降低，可靠性下降。因此，必须特殊设计具有一定回差的比较器。

比较器的回差是由图 3-10 所示的电路实现的，为分析方便，图中给定电压的线路稍有简化。当反馈低于给定电平时，比较器输出点②为高电平，此时电阻 R_3 上的压降为

$$U_3 = UR_3 / (R_1 + R_2 + R_3) = 5 \times 0.1 / (1 + 4.3 + 0.1) = 0.0926V$$

这里，由于 R_4 、 R_5 支路阻抗很大，该支路电流在 R_3 上的压降可忽略不计，所以计算 U_3 时没有计入。此时①点的给定电平为

$$U_1 = (U - U_3) R_4 / (R_4 + R_5) + U_3 \\ = (5 - 0.0926) \times 3.3 / (3.3 + 40) + 0.0926 = 0.4666V$$

此时，绕组电流上升，反馈信号加大。当反馈高于 U_1 时，比较器才翻转变输出低电平。这时给定电平变成

$$U'_1 = U (R_3 + R_4) / (R_3 + R_4 + R_5) = 5 \times (0.1 + 3.3) / (0.1 + 3.3 + 40) \\ = 0.3917V$$

此时，高压管截止，绕组电流下降，当反馈信号低于 U'_1 时比较器才再

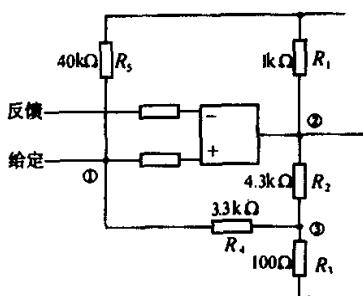


图 3-10 回差电路

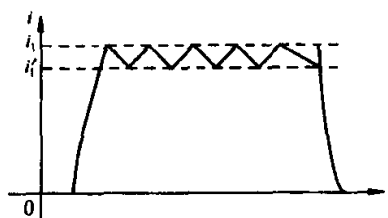


图 3-11 绕组电流波形

次翻转为高电平。U₁ 与 U'₁ 的差即是比较器的回差。由于回差的存在，使绕组电流如图 3-11 所示。电流的上峰值为

$$i_1 = U_1 / R = 0.4666 / 0.35 = 1.333A$$

电流的下峰值为

$$i_1' = U_1' / R = 0.3917 / 0.35 = 1.119A$$

电流的平均值为

$$I_{av} = (i_1 + i_1') / 2 = 1.226A$$

电流纹波的峰-峰值为

$$\Delta I = i_1 - i_1' = 0.214A$$

因此，斩波恒流的结果，使绕组电流形成具有很小纹波的锯齿波。

回差的大小，直接关系到斩波频率的高低。回差越小，斩波频率越高；反之，越低。

d. 锁定电流的减半功能

电动机在运行过程中，为输出较大的转矩及高的响应，我们总是力图保持绕组电流为额定值而不使其下降。但在电动机的锁定状态通常没必要输出大的转矩。为了减少电动机的发热，提高系统的效率，减轻驱动器的负担，可在锁定状态适当降低绕组的电流。设定为额定电流的 1 / 2。

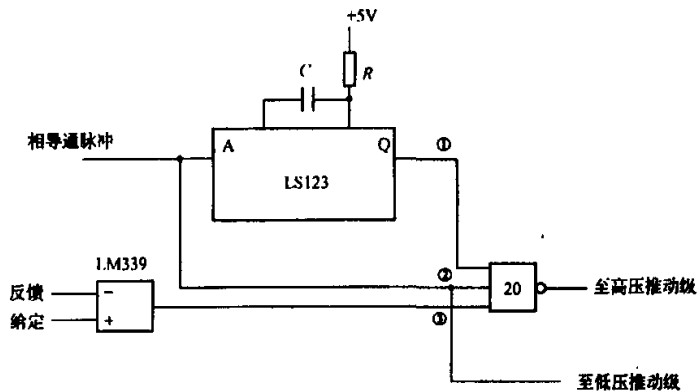


图 3-12 电流解半功能的门控电路

本驱动器的锁定电流减半功能是靠关断高压而由低压电源独立对电动机绕组提供锁定电流实现的。相绕组导通期间，本来是由比较器产生斩波脉冲去控制高压晶体管。但在本电路中，高压斩波脉冲不是直接耦合到高压推动极，而是通过由 LS123 和 LS20 两芯片组成的门控电路来进行控制，见图 3-12。相导通脉冲同时送入单稳态触发器 LS123 和与非门 LS20，由于脉冲从 LS123 上升沿触发端 A 进入，故当导通脉冲前沿到来时，单稳态翻转，输出端 Q 变高电平，此时 LS20 输入端①和②均为高电平，由比较器产生的斩波脉冲可以从 LS20 中通过。导通开始，绕组电流经低压管、地线、低压电源（6V）、二极管 BY229 续流靠磁场能量及低压电源维持一定的速率下降。当降至一定值时，反馈电压低于给定值，比较器翻转输出高电平，重新开通高压管重复上述过程。但单稳态电路 Q 输出端高电平是暂态，经过 RC 阻容回路决定的时间 T 之后，即翻转为低电平，该低电平封锁与非门 LS20，使比较器产生的斩波脉冲不能通过，高压处于截止状态，此时绕组电流只靠低压电源供电。各点的波形如图 3-13 所示。

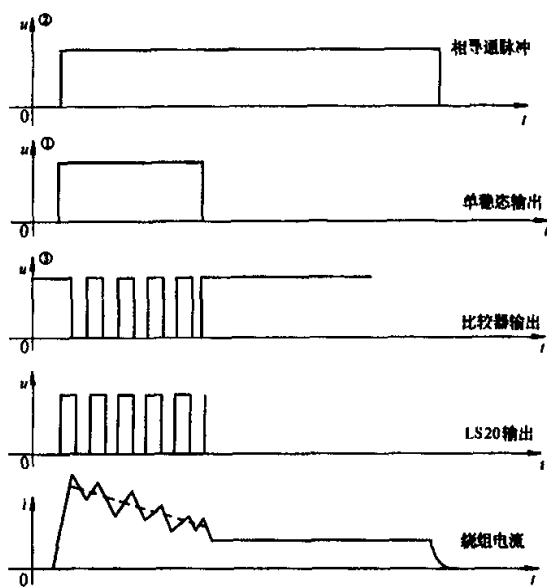


图 3-13 门控电路各点的波形

高压管斩波工作的时间，由单稳态输出高电平的时间决定，可由

$$T=0.45RC$$

计算。这样，在相导通脉冲前沿到来的 T 时间内，绕组电流主要由高压供给，进行斩波恒流控制，而在 T 以后至相绕组导通脉冲后沿这段时间内，绕组电流由低压电源供给。电动机在锁定状态时，除初始时间 T 内斩波器工作之外，其余都处于低压供电状态。锁定电流的大小取决于低压电源的高低及相绕组电阻的大小，由于电动机绕组电阻很小，所以低压电源只需数伏电压即可。一般可设计锁定电流在 $I_N/2$ 左右。由此实现了锁定状态的减半功能。图中

$$T=0.45RC=0.45 \times 51 \times 10^3 \times 0.47 \times 10^{-6}=10.78\text{ms}$$

当相绕组导通时间小于或等于 T 时，将不存在锁定时间。对于单双相八拍运行，相绕组导通时间占三拍，设相绕组导通时间等于 T ，此时电动机运行速度为

$$f=1/[(T/3) \times 8]=3/(10.78 \times 8)=35\text{PPS}$$

在此速度以下至静止状态，减半电流功能都起作用，在此速度之上，减半功能电路不起作用，相绕组导通期间一直处于高压斩波状态。

e. 具有过流保护功能

过流保护电路如图 3-14 所示。来自取样电阻的取样信号首先经过 $1\text{k}\Omega$ 电阻和 10nF 电容组成的滤波网络滤除尖峰干扰后送入电压比较器中。该比较器的给定电压是经两个电阻 $4\text{k}\Omega$ 和 $1\text{k}\Omega$ 分压后得到，给定电平为 1V 。由于取样电阻为 0.35Ω ，所以当绕组电流为 2.9A （额定电流的 2.4 倍）时，该比较器翻转，输出低电平。过流保护电路的比较器输出都接到由 CD40107 组成的 R-S 角发器输入端。当相绕组过流时，该触发器输入端变低电平，使 R-S 触发器翻转，CD40107-1 输出高电平，这个高电平经四个反相器分别接到相绕组导通脉冲输入后的第一个反相器输出，从而切断低压管的导通信号和关闭 LS20 与非门，使高低压管都处于截止状态，达到保护各电路的作用。

比较器 LM339 是一种集电极开路输出的器件，所以四个比较器输出可

“线或”接到一起，使用同一个 R-S 触发器。同理，由于 7406 是集电极开路输出的反相器，所以过流保护的输出经非门 7406 可直接与相绕组导通脉冲的反相器输出“线或”在一起。

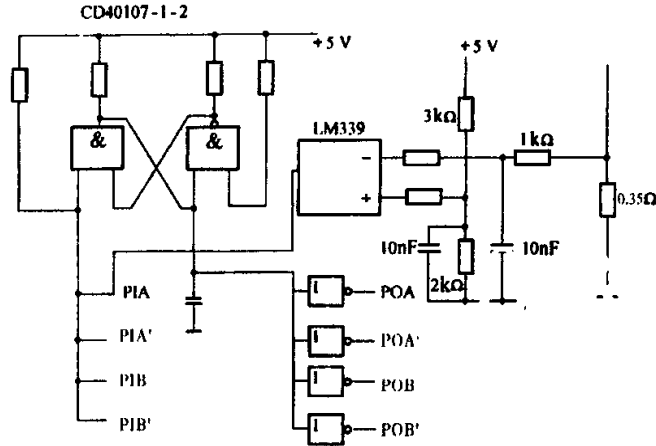


图 3-14 过流保护电路

f. 驱动器的防共振功能

直线脉冲电机的低频共振一直是个问题，本驱动器具有防共振功能，原因是：

1) 自激式斩波恒流方式有利于消除电动机的共振，因为共振是由于能量过剩引起的。在高压导通期间，电动机从电源吸收能量，当电流达到一定值，也就是说能量增加到一定值时，高压停止供电，此时绕组的续流是在消耗磁场的储能。如此反复的过程，磁场储能是有限的，绕组续流本身就是一个很好的阻尼过程，因此电动机不易发生共振。

2) 给定电平的下降特性有利于消除共振。由前面分析给定电平的线路可知，电流前沿的提升电路使绕组电流有一定的过冲，但接着给定电平是按指数曲线下降，因此绕组电流逐渐下降，电动机磁场的储能逐渐减少。在轻载时，高压供电的时间极短，续流时间相对延长，这样就把电动机中多余的磁储能消耗掉，因此可有效地防止能量的积累，大大减少共振的可

能。

3) 电流减半功能的引入也有效地防止了共振。该功能不但在锁定状态起作用,而且在较低频率时也起作用。相绕组导通超过时间 T 以后,驱动器转为单独由低压提供绕组的维持电流,而低压电源电压很低,所提供的能量不可能达到产生共振的程度^[3]。

(2) 用集成模块构成的 LPM 驱动器

由于分立元件构成的 LPM 驱动器不仅线路复杂、成本高,而且运行可靠性差。若采用集成模块与微处理机连接,不仅需要的元件少、成本低、可靠性高,而且应用十分灵活。

两相混合式脉冲电机 SLPMU-025A 是一种小机座号的 LPM,应用 SGS 公司推出的 L298 芯片可方便地组成其驱动器,如图 3-15 所示。L298 芯片是一种高压,大电流双全桥驱动器,具有抑制输入来使器件不受输入信号影响。每桥的三极管的射极是连接在一起的,相应外接线端可用于连接外设传感电阻。可安置另一输入电源,使逻辑能在低电压下工作。

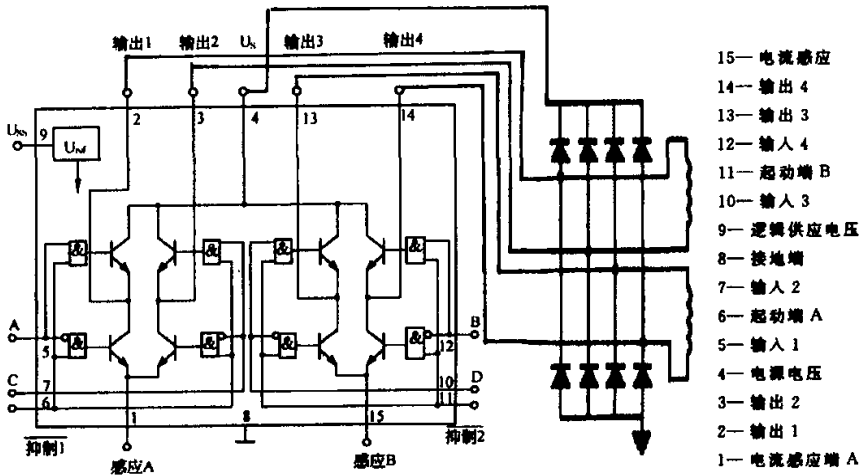


图 3-15 由 L298 芯片构成的驱动器

(3) LPM 专用综合驱动器

本文采用北京 START 机电公司生产的 SH-2H057M 型两相混合式步

进电动机驱动器来实现对样机 SLPMU-025A 的恒流微步驱动，如图 3-16 所示。SH-2H057M 最大相电流 3A，最大细分度为 40 细分^[7]。

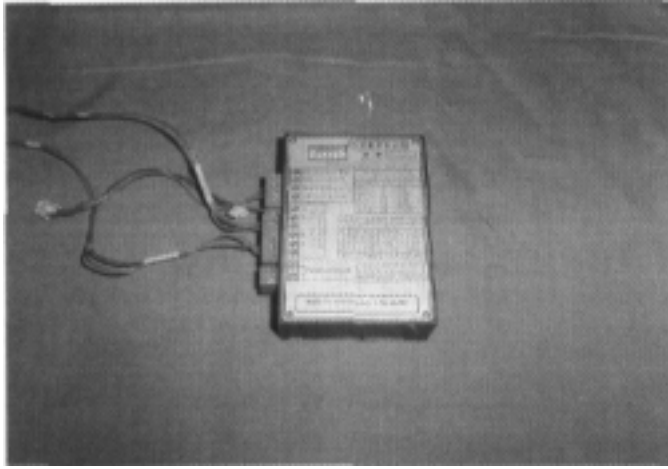


图 3-16 SH-2H057M 型两相混合式步进电动机驱动器

3.3 LPM 的微步驱动

3.3.1 LPM 微步驱动的原理

当 LPM 绕组电流不是一个方波，而是阶梯波，额定电流是台阶式的投入或切除，电流合成多少个台阶，则可动子就以同样的次数移动一个步距长度，这种将一个步距长度细分成若干步的驱动方法，称为微步（细分）驱动。对 LPM 进行微步驱动，能提高分辨率、减小电机振动和噪声、实现精确定位等，从而有效地改善电机运行特性。

以两相混合式直线脉冲电机为例，用磁势转换图来分析 LPM 二细分驱动的原理。

对应于半步工作状态，状态转换表为 A-AB-B-BA-A-AB-B-BA-A，如果要将其每一步细分成两步走完，则可将电动机每相绕组的电流分两个台阶投入或切除。图 3-17 画出了二细分时 A、B 两相电流的变化情况，横坐标上标出的数字为切换输入 CP 脉冲的序号，同时也表示细分后

的状态序号。初始状态 0 为 A 相通额定电流，即 $i_A=I_N$ ，当第一个 CP 脉冲到来时，B 相不是马上通额定电流，而是只通额定电流的二分之一，即 $i_B=I_N/2$ ，此时电动机的合成磁势由 A 相中 I_N 与 B 相中 $I_N/2$ 共同产生。未加细分时，从 A 到 AB 状态只需一步，而在细分工作时经两步才运行到 AB。

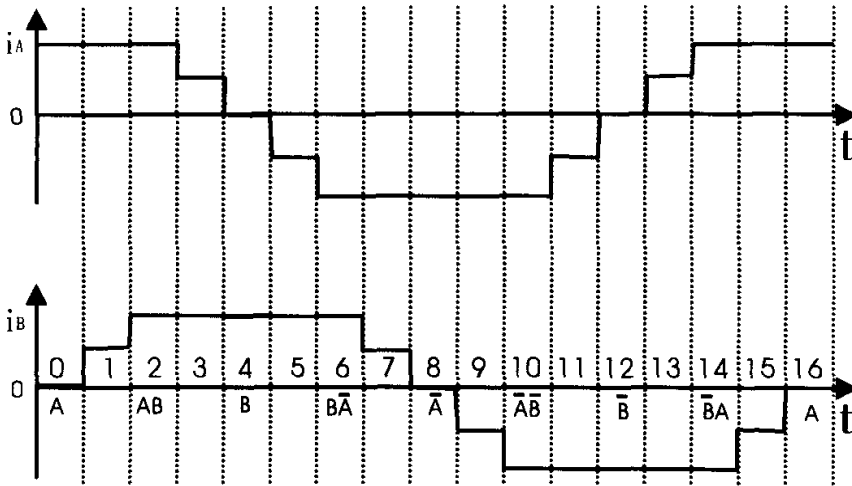


图 3-17 单双相八拍二细分两相电流波形

3.3.2 LPM 微步驱动的实现

利用集成驱动芯片 3717 或 LM298 很容易实现对小功率两相混合式直线脉冲电机的微步驱动。如图 3-18 和 3-20 所示。

(1)图 3-18 所示电路中的 3717 芯片是一种专用的集成电路驱动片，美国 Unitrode、RIFA、TEA 等公司均有成品出售，其结构见图 3-19。电动机绕组外接于 H 桥的输出端 M_A 和 M_B ；相位控制端 Phase 为高电平时，电流从 M_A 经绕组流向 M_B ，相反，Phase 为低电平时，电流从 M_B 经绕组流向 M_A ； I_1 和 I_0 的逻辑状态控制电动机绕组电流的大小，当 I_1 和 $I_0=00$ 时，绕组平均电流最大，适用于整步运行， I_1 和 $I_0=01$ 时，绕组平均电流为中等大小，适用于半步运行， I_1 和 $I_0=10$ 时，绕组平均电流最小， I_1 和 $I_0=11$ 时，绕组平均电流为零； U_R 为外加的基准电压， I_1I_0 固定不变时，

若 U_R 按某一规律变化, 则绕组平均电流也将按此规律变化, 据此可实现微步控制, 只需将细分电流值存于 ROM 中, 通过 P 口送到 DAC0808, 再将 DAC0808 输出经运算放大器送到 U_R 端作为基准电压即可^[3]。

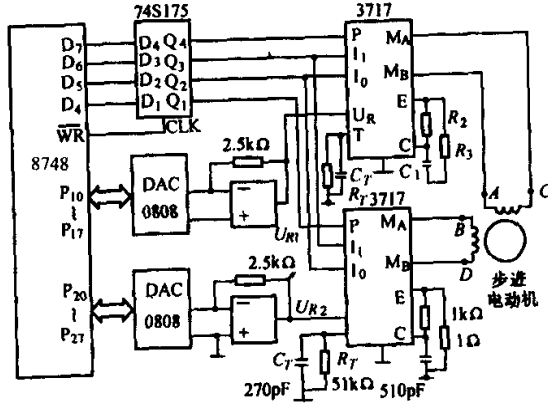


图 3-18 3717 构成的细分驱动电路原理图

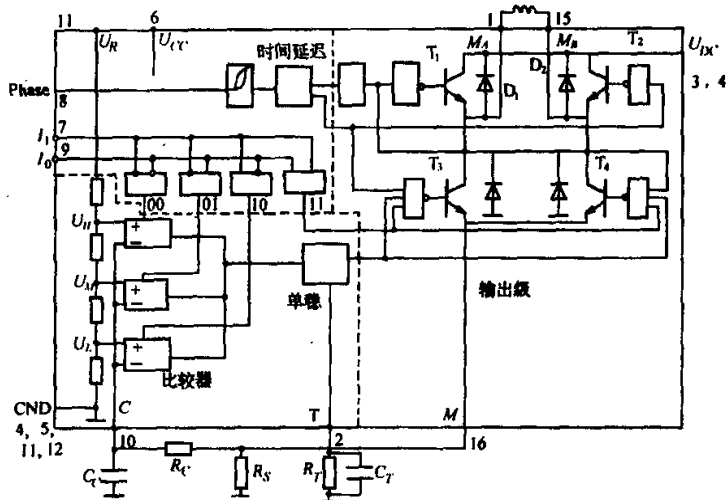


图 3-19 3717 芯片结构图

(3) 直线脉冲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, 针对两相混合式 LPM, 考虑到矩频特性、驱动速度、控制精度、功耗、成本等因素, 采用恒频 PWM 双极性细分驱动器较为理想, 如图 3-20 所示。

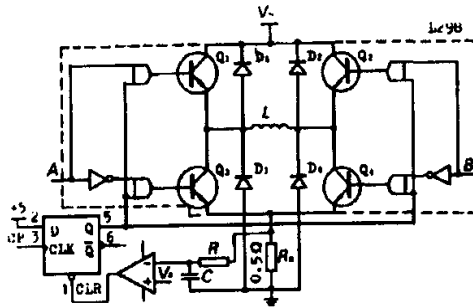


图 3-20 电路原理图

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。利用恒频 PWM 原理, 组成细分驱动电路 (以一相为例)。由于晶体管开关频率的限制, 时钟频率不能太高, 为 25kHz 左右, V_a 为 D/A 输出的给定电压值, 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 $I_a R_s < V_a$ 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 $I_a R_s$ 稍大于 V_a 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 $I_a R_s$ 稍大于 V_a 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, $I_a = V_a / R_s$ 成立。设 PWM 频率为 22kHz, 则周期 $T = 45 \mu s$, 而电机额定电流为 1.2A, 每极电阻 $r_a = 1.65 \Omega$, 检测电阻 $R_s = 0.51 \Omega$, 若每极电感 $L = 0.01H$, 电源内阻 $r = 1 \Omega$, 则放电时间常数 $\tau = L / (r_a + r)$, 代入计算 $\tau = 3.77ms$, 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 $I = V_s / (r + r_a) \cdot (1 - e^{-t/\tau})$, 充电时间常数 $\tau = L / (r + r_a)$ 。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

$$I \approx V_s / r + r_a \cdot t / \tau = V_s / L \cdot t$$

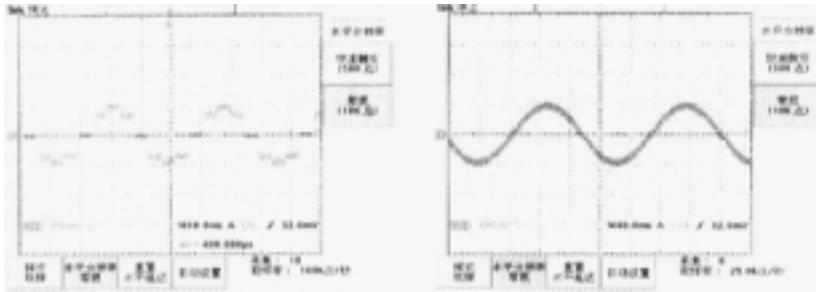
取最大电流 $I = 1.2A$, 所需 $t = 500 \mu s$, 16 细分时最小电流 $I = 0.12A$, $t = 50 \mu s$, 大于 T , 实际上在一个周期 T 内, 绕组放电时间约为 $20 \mu s$, 所以在三极管关断和下一个脉冲到来之间, 电流不会下降到零, 斩波频率越高, 电流波动越小。

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, 驱动速度高, 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^[8]。

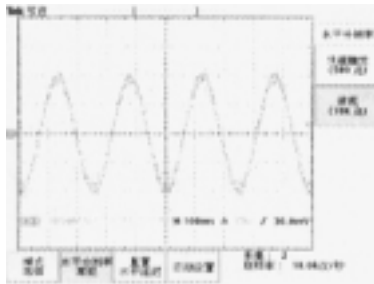
(4) 本文采用北京 START 机电公司产品 SH-2H057M 型两相混合式步进电动机驱动器对样机 SLPMU-025A 实现恒流微步驱动, 测得的电流

波形如下：



(a) 2 细分

(b) 10 细分



(c) 40 细分

图 3-21 实测电流波形

3.4 环形分配器

3.4.1 用 EPROM 构成的环形分配器

步进电动机按类型、相数划分种类繁多，不同种类、不同相数、不同分配方式都必须有不同的环形分配器，可见所需的环形分配器品种是很多的。如果全部用硬件来搭成这些环形分配器，结构是相当复杂的。目前集成化的环形分配器所见产品甚少，不能满足步进电动机驱动系统的需要。EPROM 存储器是一种紫外线擦除的可编程只读存储器，目前国内市场上

有 2716、2732 等数种，市场来源极其丰富。这种存储器各地址的内容可以由使用者自行编程，且可用紫外线照射擦除后重新使用。用这种 EPROM 可以搭成各种环形分配器，其基本思想是：首先结合驱动器线路按 LPM 励磁状态转换表求出所需的环形分配器输出状态表（输出状态表与状态转换表相对应），以二进制码的形式依次存入 EPROM 存储器中，在线路中只要按照地址的正向或反向顺序依次取出地址的内容，则 EPROM 的输出端即依次表示各励磁状态。用这种 EPROM 搭成的环形分配器的原理框图如图 3-22 所示，由两部分组成。前一部分是一种可逆循环计数器，计数脉冲

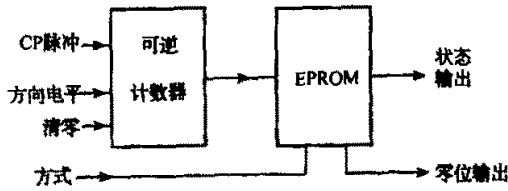


图 3-22 用 EPROM 搭成的环形分配器

端即是控制电动机运行的 CP 脉冲输入端，计数器的加减控制端即是作为控制电动机正反转的方向控制端，如果高电平时计数器加计数，电动机前进，则低电平时计数器减计数，电动机后退。计数器的计数长度应等于电动机运行一步的拍数或拍数的整数倍。计数器的输出端接到 EPROM 地址线上，并使 EPROM 总是处于读出状态，这样，对应计数器每一个输出状态，都对应存储器的一个地址，输出端数据线上就会出现该地址的内容，实际上也就是对应一种励磁状态。我们事先按电动机励磁状态转换表的次序依次设计出驱动器各相输入端对应的输入状态，并存入存储器中。简单地说，存储器存入一个环形分配器输出状态表。计数器每输入一个脉冲，计数器计一个数，计数器输出计数值的二进制编码，该数值选通存储器的一个地址，存储器输出一个数据，即是环分的一个状态。如果计数器执行加法计数，则存储器按地址递增方向依次取出状态表的内容；反之，计数器执行减法计数，则存储器按地址递减的方向取出状态表的内容，从而控制电动机正反向运行。

使用 EPROM 设计环形分配器是一种软硬件结合的技术。只有一种硬件线路，通过软件编程，即可实现不同励磁方式的输出。

用 EPROM 设计成的环形分配器，具有如下特点：

(1) 线路简单。只有循环计数器和存储器两大部分。计数器尽可能利用现有的器件，计数长度可用简单的外围电路实现。对 EPROM 主要是编程，存状态表，所以工作量小。

(2) 一种线路可实现多种励磁方式的分配，只要在不同的地址区域存储不同的状态表，除软件工作之外，硬件电路无需变动。

(3) 可彻底排除非法状态。驱动器输入的非法状态可能损坏驱动器，是非常危险的。存储器中存储的内容，除在需选通的地址存储所需的状态表之外，其它所有无用的地址都存储各相截止的信号。因此，即使存储器有非法地址输入，输出端出现的是全截止信号，可保护驱动器不受损坏，从而把非法状态彻底排除。

(4) 可有多种输入端，便于同控制器接口^[3]。

3.4.2 两相混合式 LPM 的环形分配器

本文采用的是单片机控制的用 EPROM 构成的环形分配器如图 3-23 所示。

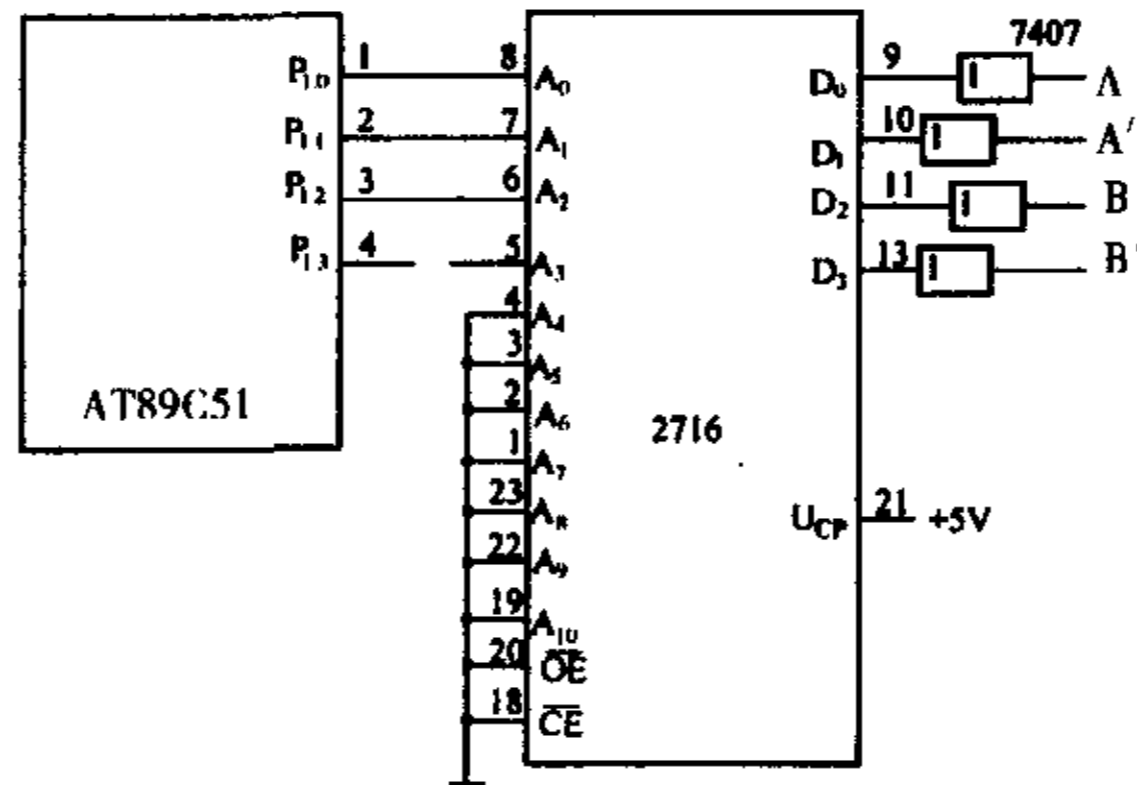


图 3-23 两相混合式 LPM 环分

设 A 相桥两个输入信号为 A（正向导通）和 A'（反向导通），B 相桥两个输入信号为 B 和 B'，四个输入信号各占 EPROM 的一条数据线

($D_0 \sim D_3$), 则 EPROM 存储的状态表为:

表 3.1 两相 H 桥驱动的环形分配器

地址	内容	$B' \ B \ A' \ A$	励磁状态
000H	FEH	1 1 1 0	A
001H	FAH	1 0 1 0	AB
002H	FBH	1 0 1 1	B
003H	F9H	1 0 0 1	$B\bar{A}$
004H	FDH	1 1 0 1	\bar{A}
005H	F5H	0 1 0 1	$\bar{B}\bar{A}$
006H	F7H	0 1 1 1	\bar{B}
007H	F6H	0 1 1 0	$\bar{B}A$
		008H~00FH 重复上述	

4 基于 AT89C51 单片机控制的 两相混合式 LPM 驱动系统

4.1 SLPMU—025A 样机驱动控制系统的设计

4.1.1 AT89C51 单片机简介

AT89C51 单片机是美国 Atmel 公司生产的具有 51 内核的 8 位单片机，其内部结构框图如图 4-1 所示；有 40 个引脚，双列直插方式封装，其引脚图如图 4-2 所示。

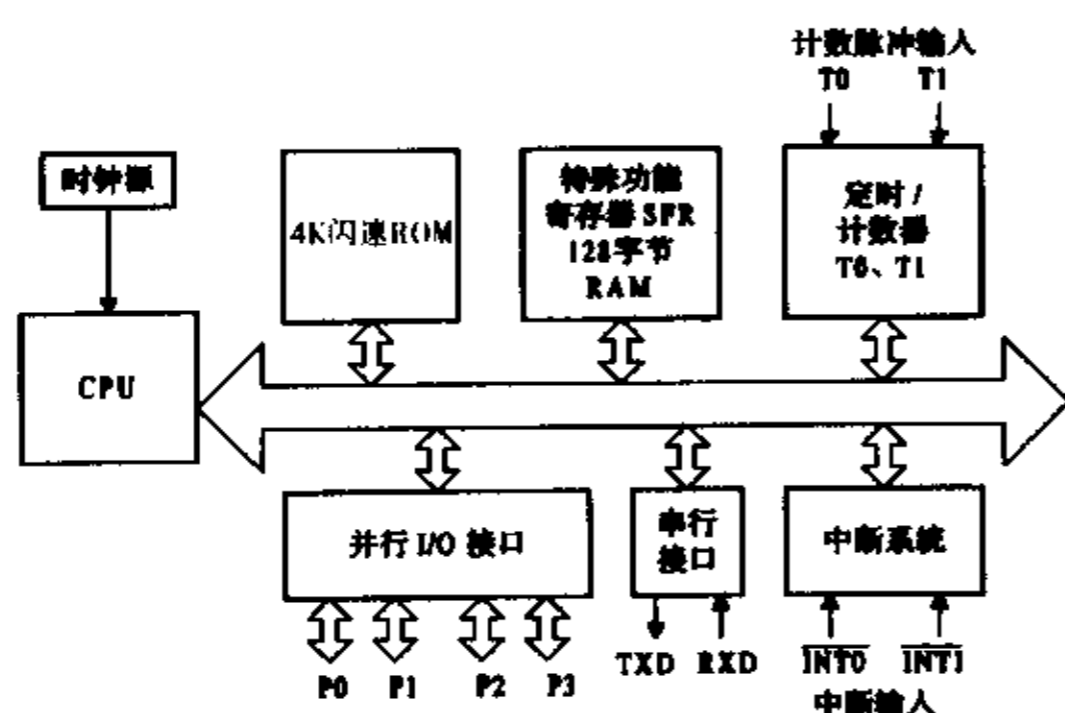


图 4-1 AT89C51 单片机结构框图

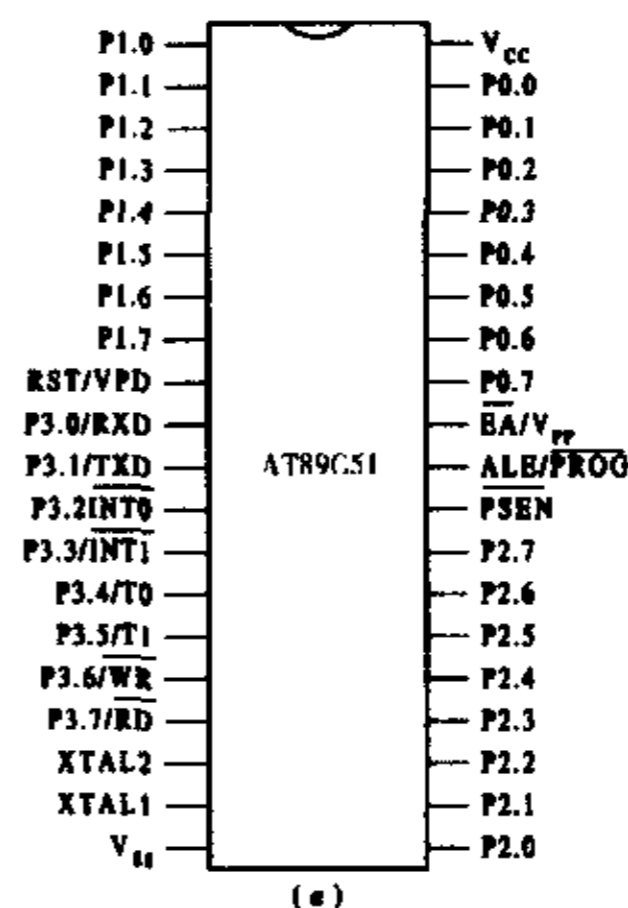


图 4-2 AT89C51 引脚图

AT89C51 单片机含一个 8 位 CPU；4KB FLASH ROM；128 字节 RAM 数据存储器；21 个特殊功能寄存器 SFR；4 个 8 位并行 I/O 口，其中 P₀、P₂ 为地址 / 数据线，可寻址 64KB ROM 和 64KB RAM；一个可编程全双工串行口；具有 5 个中断源，两个优先级，嵌套中断结构；两个 16 位定时器 / 计数器；一个片内振荡器及时钟电路。

AT89C51 单片机的 40 条引脚说明如下：

(1) V_{CC} : 电源引脚。正常运行和编程校验时为 5V;

V_{SS} : 接地端。

(2) $P_{0.0} \sim P_{0.7}$: P_0 口 I/O 线;

$P_{1.0} \sim P_{1.7}$: P_1 口 I/O 线;

$P_{2.0} \sim P_{2.7}$: P_2 口 I/O 线;

$P_{3.0} \sim P_{3.7}$: P_3 口 I/O 线。

(3) XTAL1、XTAL2: 振荡电路的输入端和输出端。

(4) $\overline{ALE} / \overline{PROG}$: 地址锁存允许 / 编程信号线。当 CPU 访问外部存储器时, ALE 用来锁存 P_0 输出的地址信号的低 8 位。它的频率为振荡器频率的 $1/6$ 。在对 AT89C51 编程时, 此引脚输入编程脉冲信号。

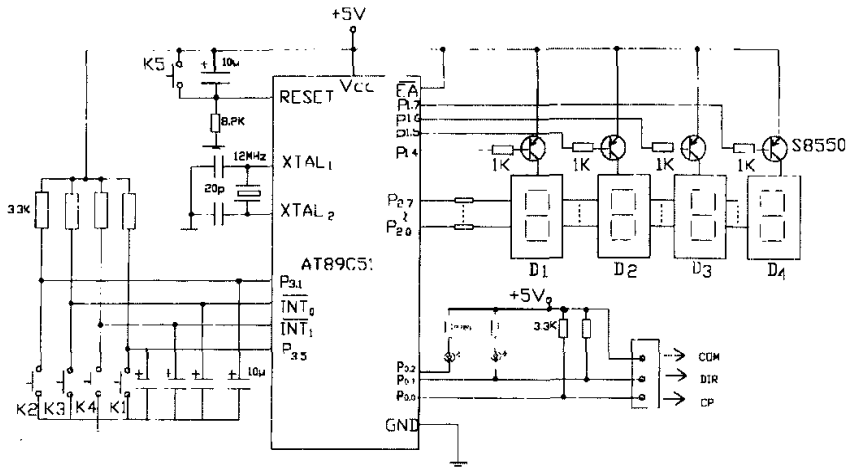
\overline{PSEN} : 外接程序存储器读选通信号。

\overline{EA} / V_{PP} : 访问内部程序存储器的控制信号。当 $\overline{EA}=1$ 时, CPU 从片内 ROM 读取指令; $\overline{EA}=0$ 时, CPU 从片外 ROM 读取指令。此外, 当对 AT89C51 内部 FLASH ROM 编程时, 12V 编程电源由此端输入。

RST / VPD: 复位输入信号。当该引脚上出现 2 个机器周期以上的高电平时, 可实现复位操作。此引脚为掉电保护后备电源之输入引脚^[33]。

AT89C51 单片机软件与 MCS-51 指令完全兼容。

4.1.2 硬件电路的设计



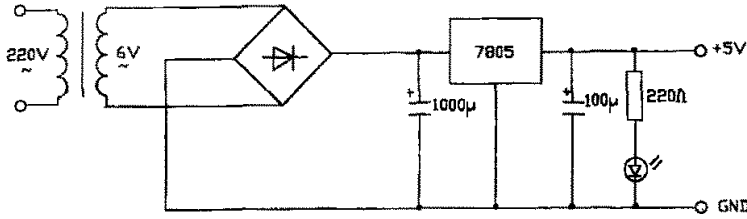


图 4-3 AT89C51 单片机控制的 SLPMU-025A 型 LPM 驱动系统的硬件电路图

硬件电路如图 4-3 所示，由单片机 AT89C51、4 块 LED 八段显示器、5 个按钮、三个发光二极管、5V 和 24V 直流电源、SH-2H057M 型两相混合式步进电动机驱动器及研究用样机 SLPMU-025A 型 LPM 组成。

LED 为共阳极八段显示器 (a~g 和 DP 小数点)，显示方式为动态显示，单片机 P1 口的 P1.4~P1.7 四条 I/O 线为四块 LED 显示器提供字位选择输出，P2 口为显示数据输出。该显示器可以显示电机运行的速度和步进距离。单片机 P0 口的 P0.0、P0.1 I/O 线输出的信号分别送 SH-2H057M 型驱动器的 CP、DIR (方向) 端，驱动器加 24V 直流电源^{[43][44]}，输出端 A、 \overline{A} 、B、 \overline{B} 直接接 SLPMU-025A 型 LPM 的 A、B 相绕组。

按钮 K1~K5 输入信号送单片机 P3.5、P3.1、 $\overline{INT0}$ 、 $\overline{INT1}$ 、RST 端，其中，K1 按钮能实现两种运行功能间的切换，当单片机复位进入初始状态时为正反向调速功能，K1 按钮第一次按下为定位功能，第二次按下转为正反向调速功能，第三次按下又变为定位功能，以后 K1 按钮每按下一次交替切换一次功能；K2 按钮用于启停控制；K3 按钮用于控制速度增加或距离增加；K4 按钮用于控制速度减小或步进距离减小；K5 按钮为单片机的复位按钮。

三个发光二极管为电源显示和电机正反向运行显示。

单片机 XTAL1、XTAL2 所接外部时钟电路的频率为 12MHZ。

该驱动控制装置，能完成对样机 SLPMU-025A 启停、正反向、调速、定位等的控制及记录、显示的功能，具有智能化程度高、结构简单、体积小、价格低廉、可移植性强等优点^{[35]-[42]}。

SLPMU-025A 型两相混合式 LPM 驱动控制装置外观图和内部结构图如图 4-4 和图 4-5 所示。

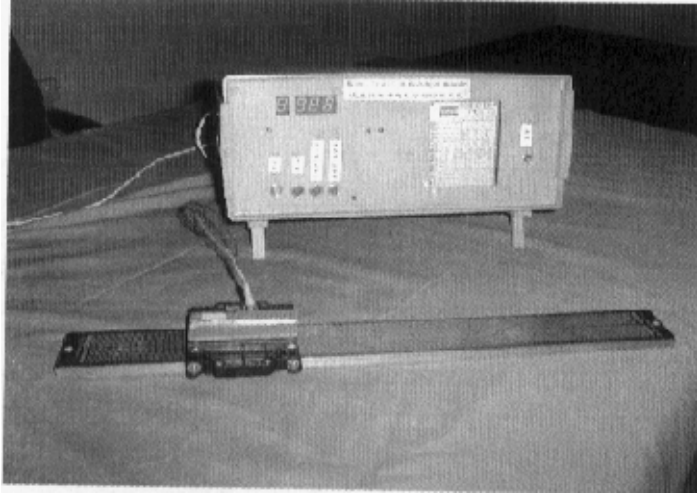


图 4-4 SLPMU-025A 型两相混合式 LPM 驱动控制装置

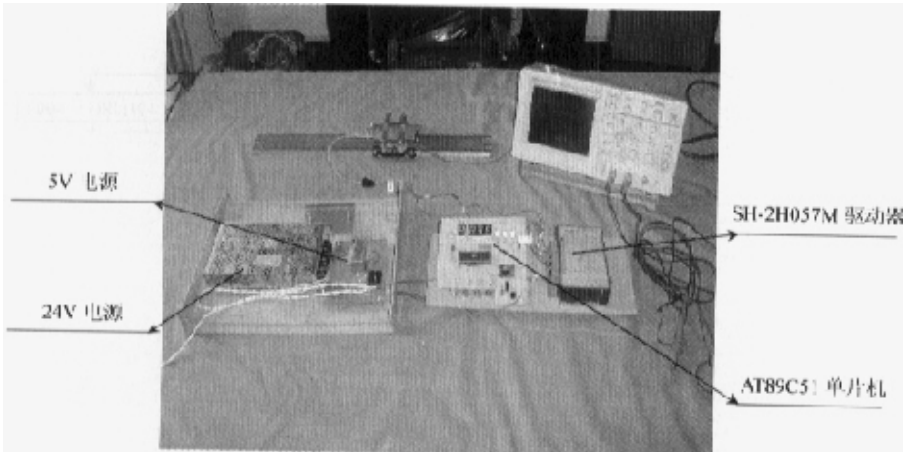
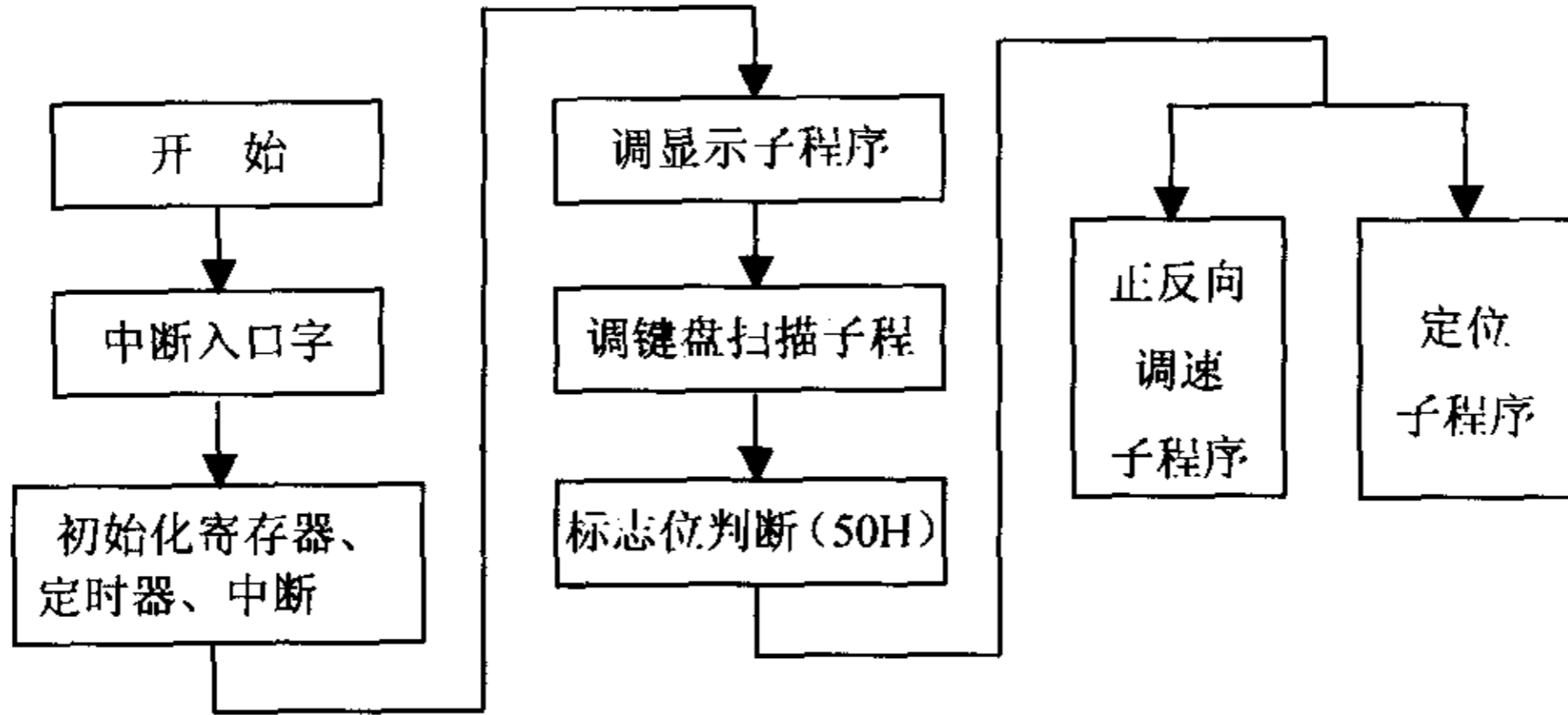


图 4-5 SLPMU-025A 型两相混合式 LPM 驱动控制装置内部结构图

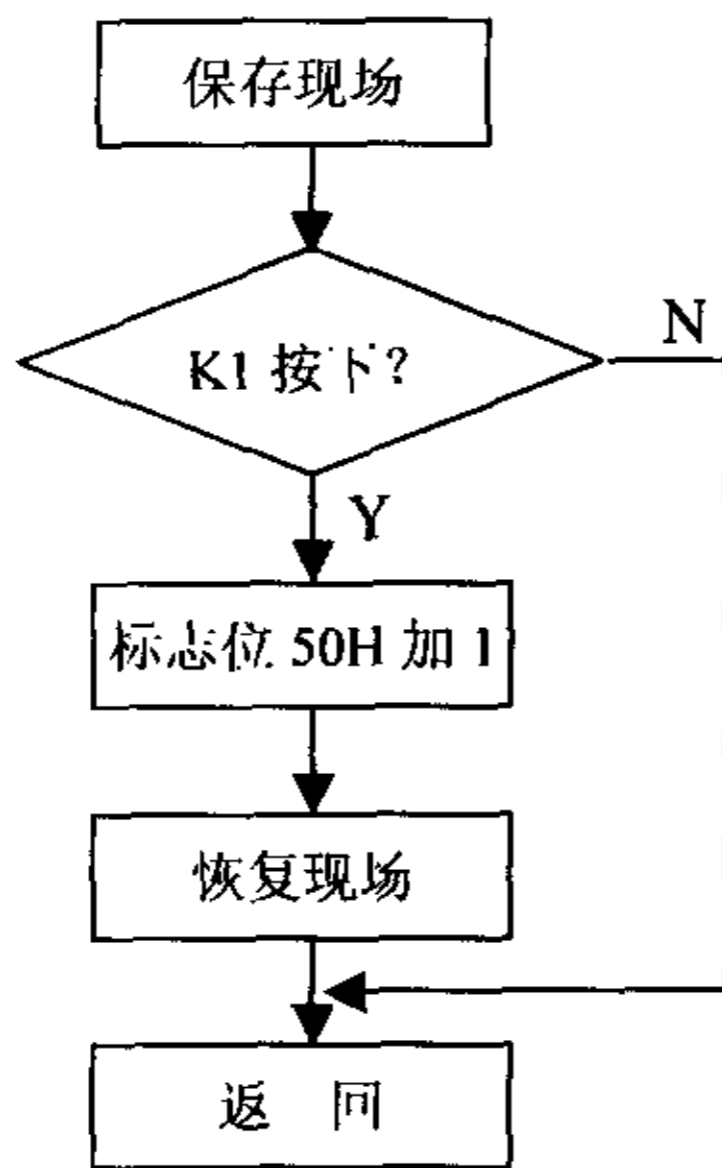
4.1.3 软件设计

(1) 程序流程图如下:

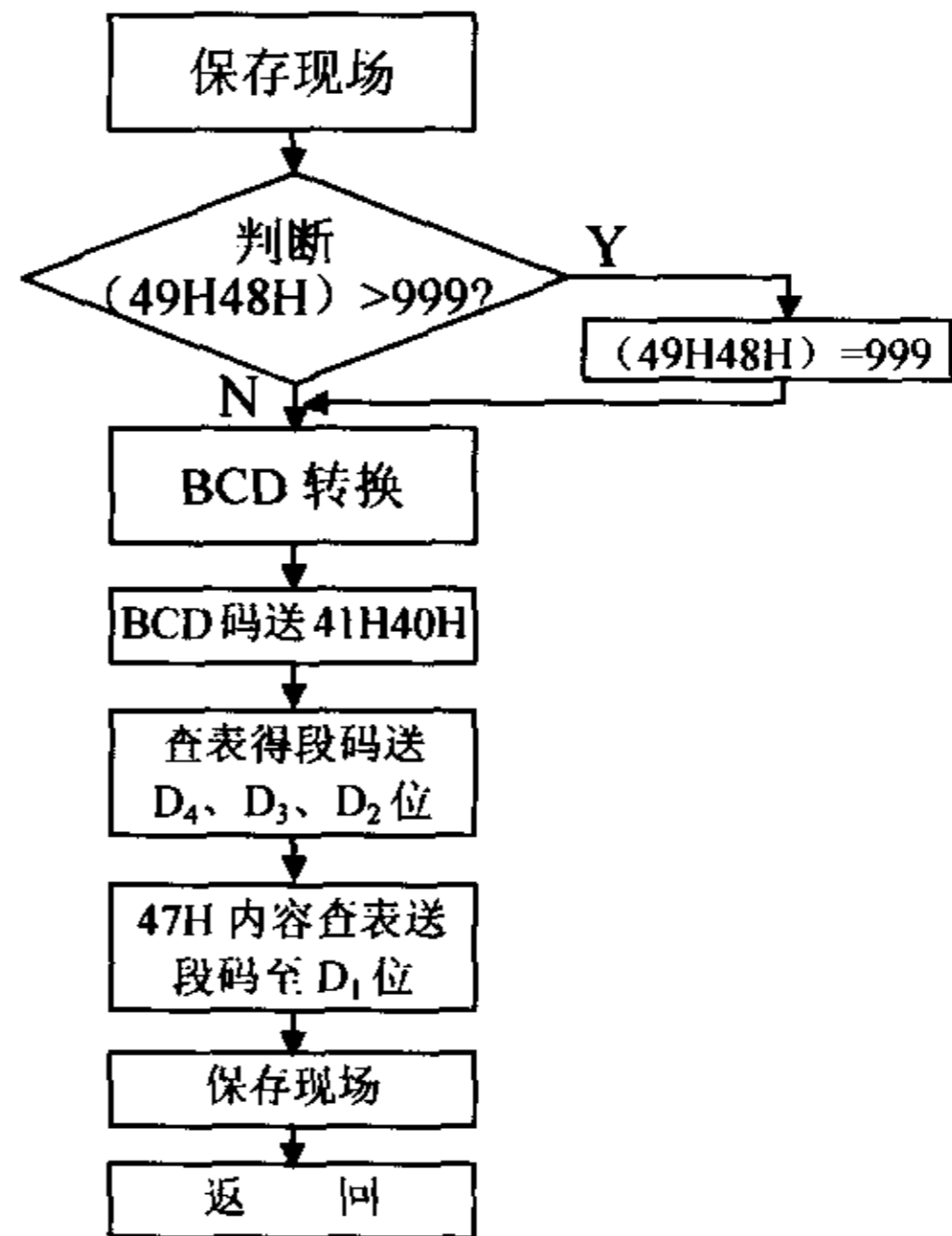
主程序 (Main):



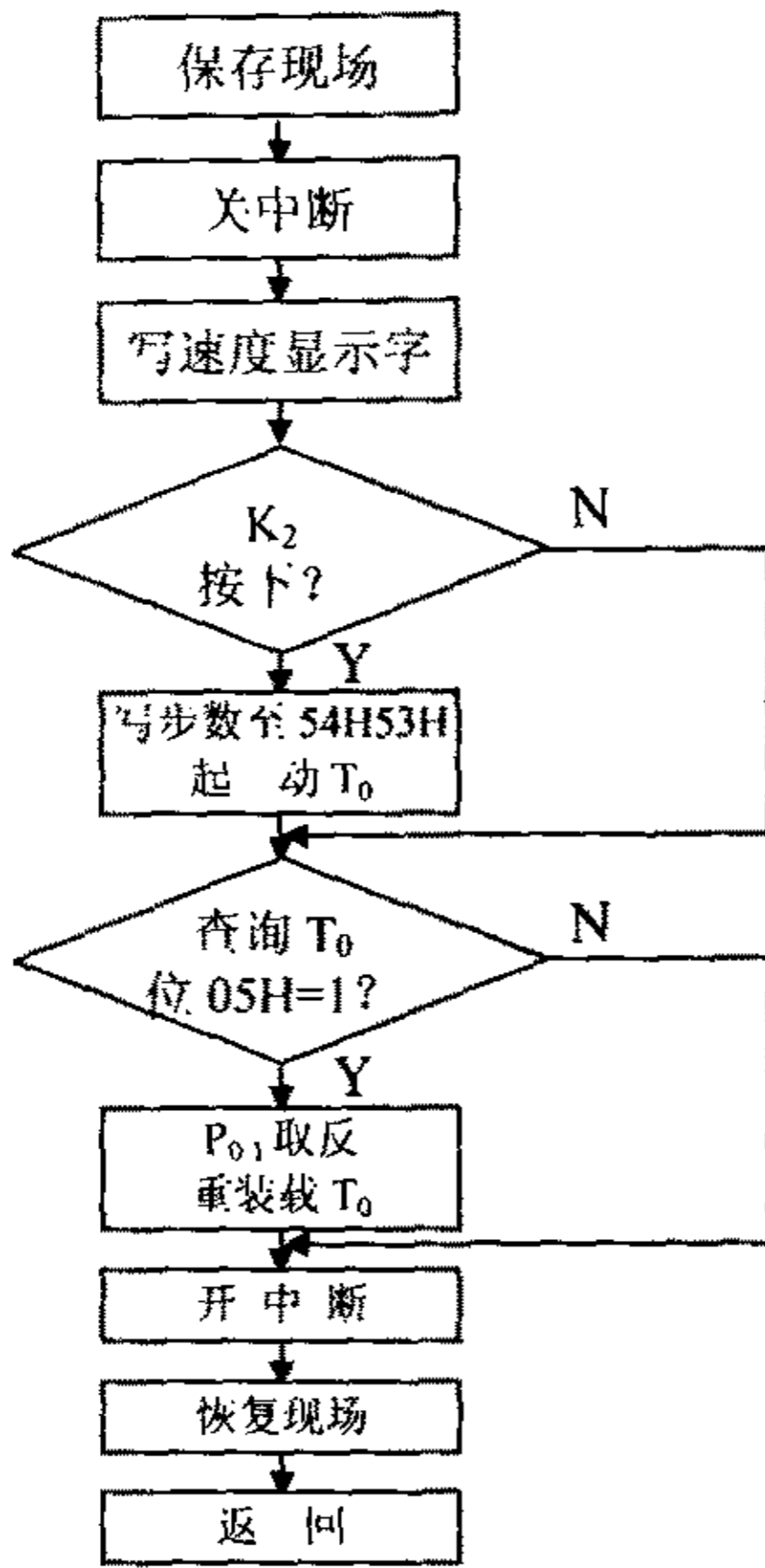
键盘扫描子程序 (Kbod):



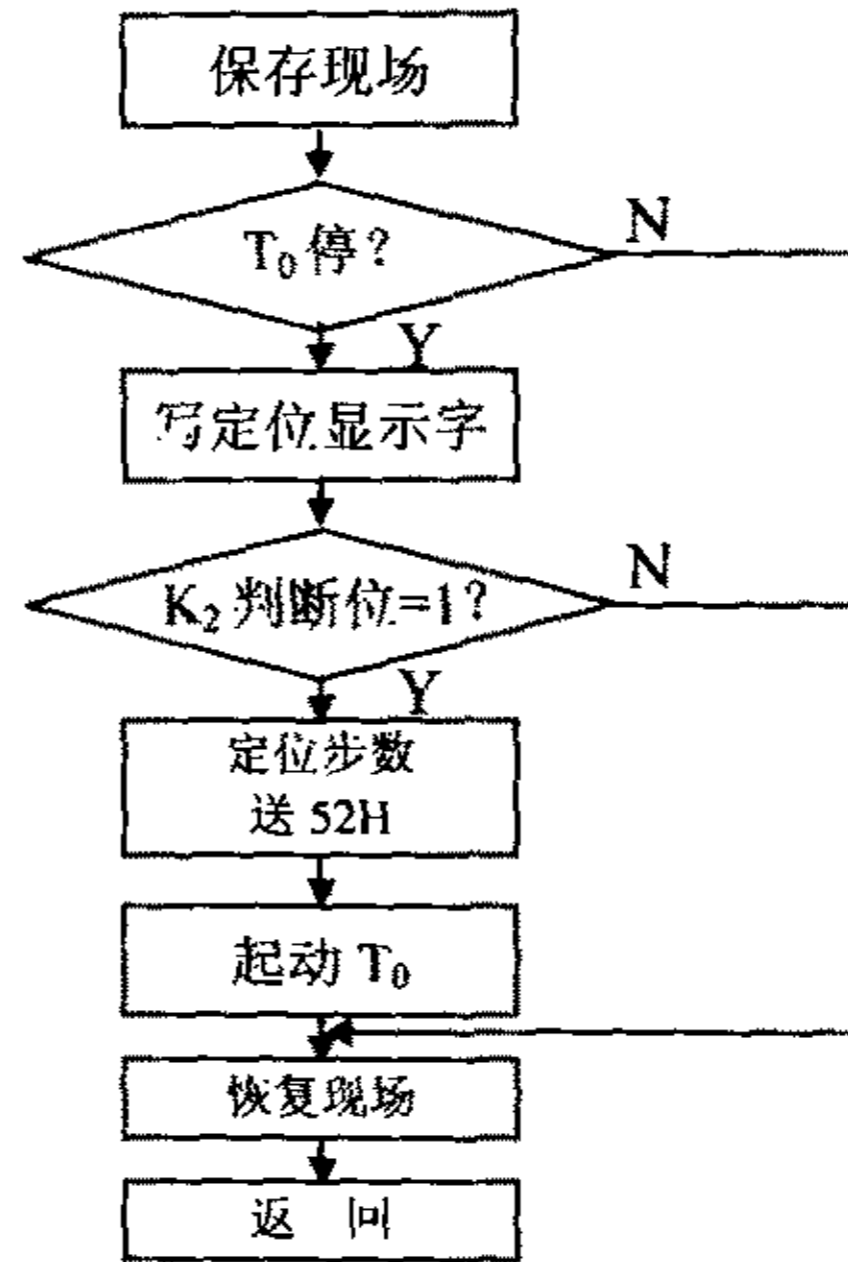
显示子程序 (Disp):



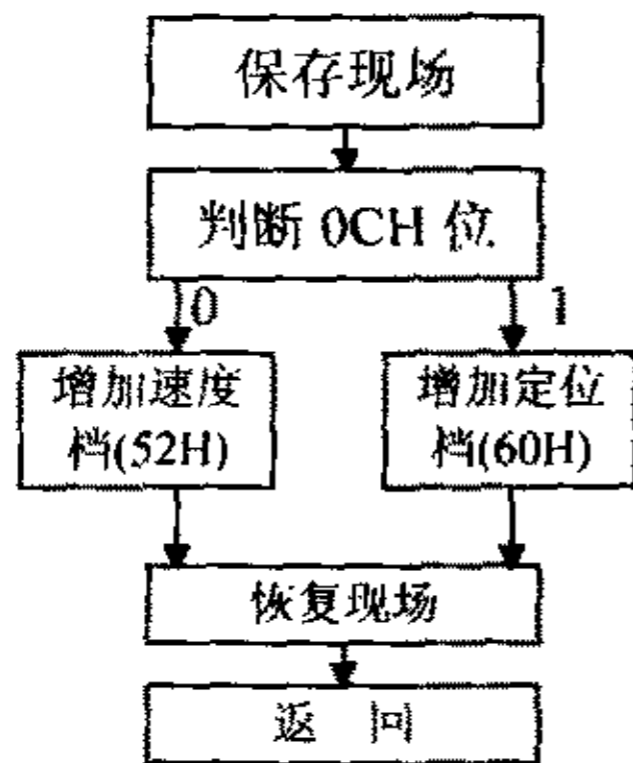
正反向调速子程序 (Sub1):



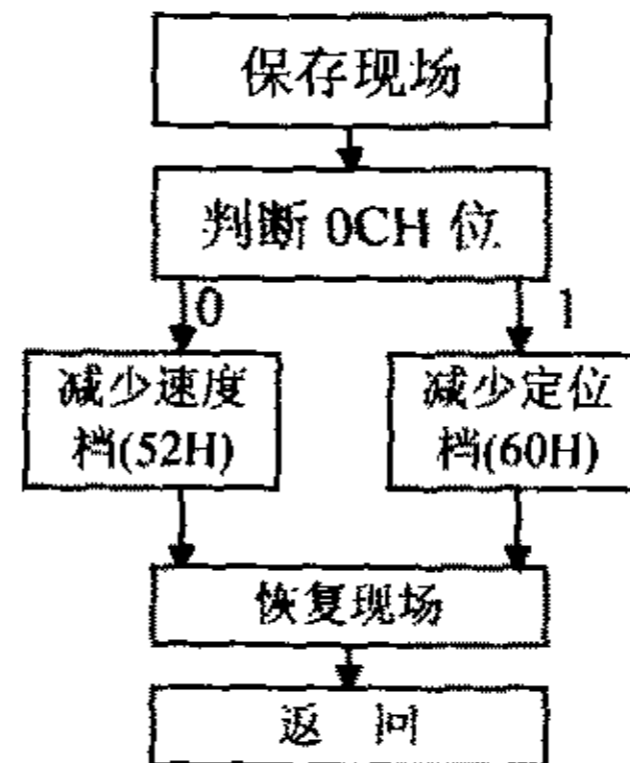
定位子程序(Sub2):



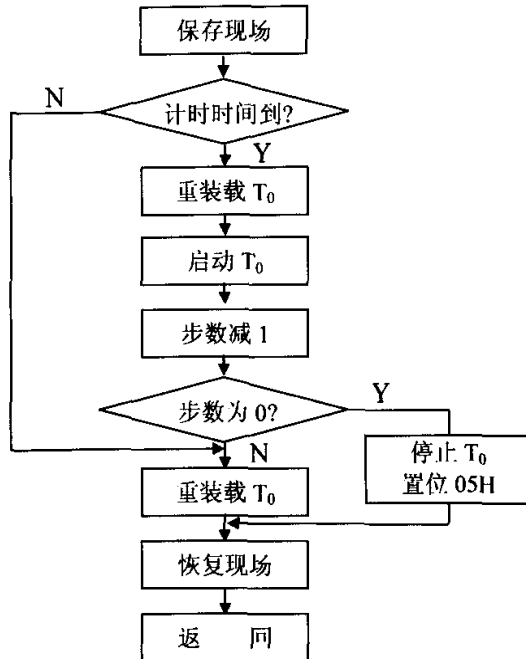
中断子程序 (INT₀):



中断子程序 (INT₁):



CP 中断子程序:



(2) 程序清单见附录二

4.2 SLP MU-025A 运行实验与研究

实验装置如图 4-6 所示。测速电机将电机运行速度线性转换为电势送入记录示波器测试，多圈电位器 a、b 端加+5V 电压，c、b 端输出电压信号送入记录示波器测试，该电位器能将电机位移值线性转换为电压信号从 c、b 端输出。

实测波形如图 4-7、4-8 所示。

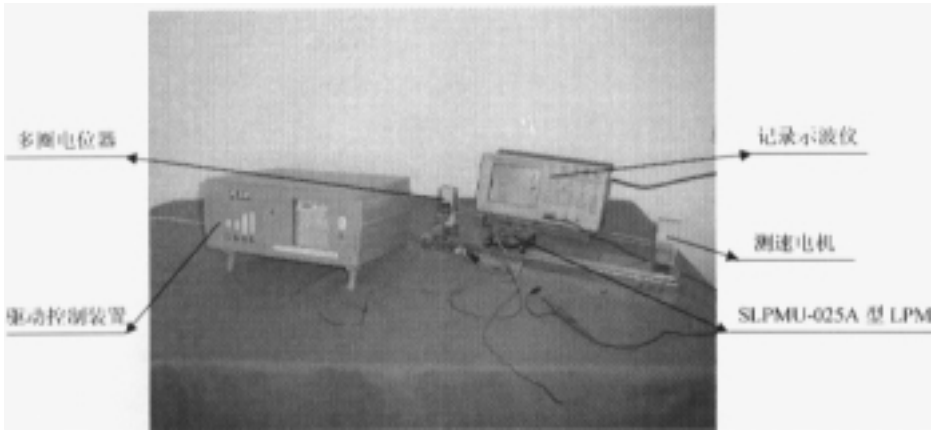
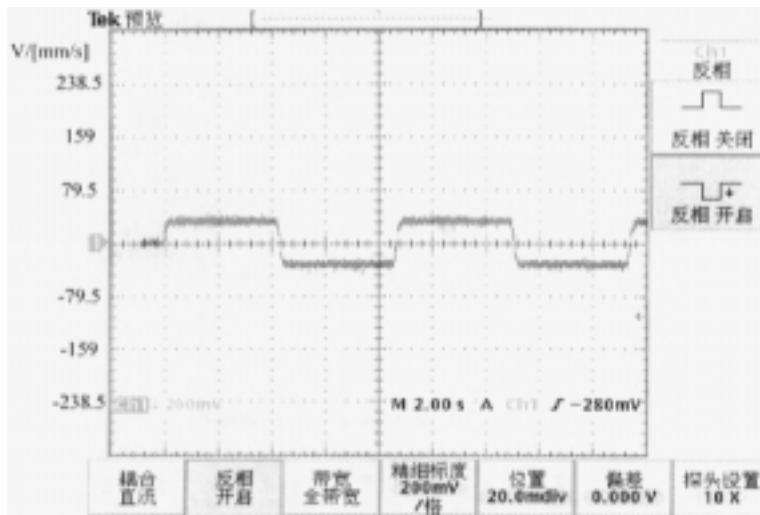
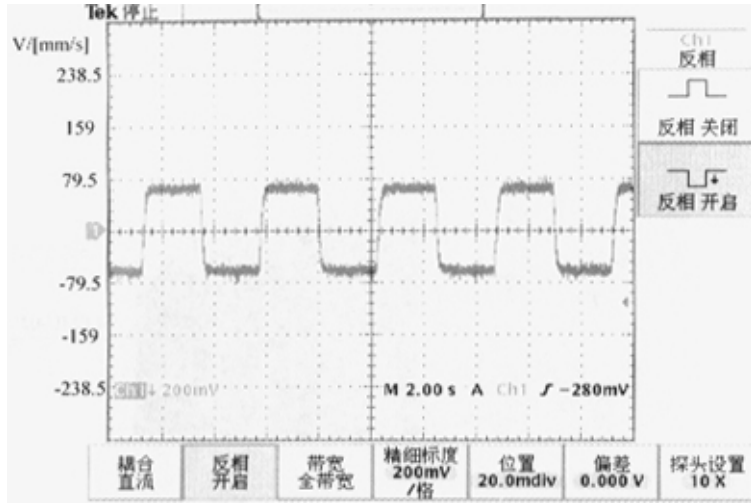


图 4-6 SLPMU-025A 运行实验装置图

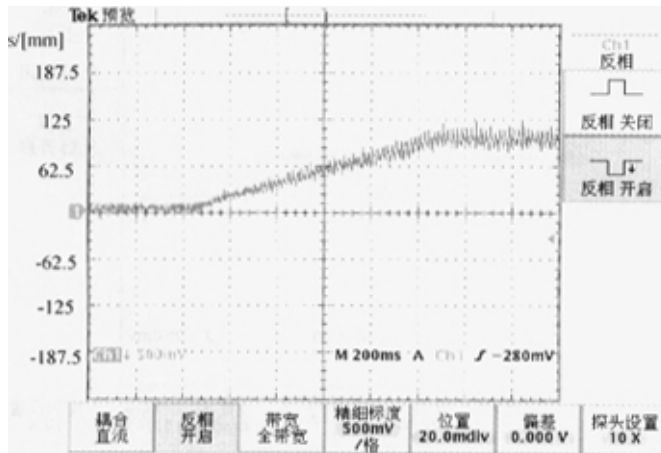


(a) $f=150\text{pps}$

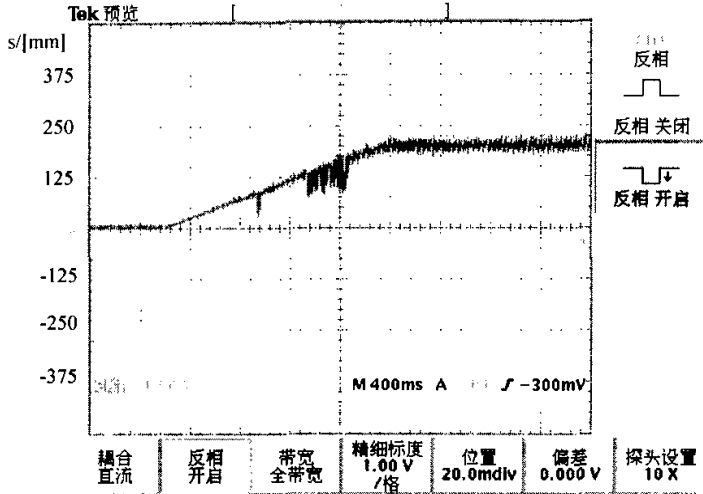


(b) $f=300\text{pps}$

图 4-7 正反向调速运行方式下实测的速度图



(a) 定位 100mm



(b) 定位 200mm

图 4-8 定位方式下实测的位移图

SLPMU-025A 的步长为 0.212mm,当 $f=150\text{pps}$ 时,其运行速度 $v=31.8\text{mm/s}$,当 $f=300\text{pps}$ 时, $v=63.6\text{mm/s}$,从图 4-7(a)、(b)可知电机实际运行速度与理论值间的误差微小,产生误差的主要原因是由单片机 T0 定时器时间常数重载时的时间补偿不准确造成的,同时,也与电机运行时测速电机打滑有关;由于电机每运行一步均会发生微小的颤动,这一特性较明显地体现到速度波形和位移波形的抖动上;从图 4-8(a)、(b)可知该电机的定位精度达到 0.03mm,测试误差与多圈电位器的打滑有关。

从以上分析知,实测结果与理论值基本吻合。

5 直线脉冲电机驱动控制系统未来展望

基于数字控制器的直线脉冲电机驱动系统，其性能指标不仅依赖于处理器的结构，计算能力及执行速度，而且也依赖于所实行的控制算法。这些因素相互影响，因此当欲改善控制性能时，必须对它们加以综合考虑。近年来，一大批高档微处理器相继问世，包括数字信号处理器，简化指令系统计算处理器和并行处理器等，与传统微处理器相比，新一代处理器的性能大大提高了，如具有较高的计算能力和执行速度，可增加采样速率，降低量化噪声和计算延迟，带宽、稳定性和抗负载扰动能力均可得到改善。同时，控制算法如状态反馈、自适应，模糊控制及神经元控制等人工智能领域这方面的研究，引起相当一批科学家和工程团体的浓厚兴趣，成果卓著，令人激动，已在包括电力电子与传动等诸多领域中得到了应用^[34]。

展望未来，随着高档微处理器及相关外围器件在同一块芯片上的合并，随着神经网络和模糊逻辑芯片的大量涌现，直线脉冲电机的实时驱动控制系统必将迈入一个更加辉煌壮阔的发展阶段。

5.1 直线脉冲电机驱动控制系统用新型高档微处理器

新型高档微处理器按其结构划分为三大类：数字信号处理器（DSP）简化指令系统计算处理器（RISC）和并行处理器（Transputer），这些处理器计算能力强大、执行速度快，从而使人们有可能设计出更为复杂的直线脉冲电机实时驱动控制系统，并最终使直线脉冲电机多任务运动控制系统得以实现。

1979年DSP开始出现至今，各厂商推出了大量的系列产品，如AT&T公司的DSP 16 / 16A、DSP 32 / 32C，Motorola公司的DSP 5600、DSP 9600，

NEC 公司的 μ PD77、 μ PD63 以及 Texas 仪器公司的 TMS 320C 等。这些芯片被专门用来进行数字信号处理的实时计算,应用于 LPM 运动控制系统中可实现无位置和速度传感器,有效地利用 DSP,还可估算出 LPM 自适应控制中的系统参数、状态变量^{[50][51][52]}。尽管 DSP 在运动控制中具有缺少支持实时运算的资源这一缺点,但芯片制造商采用两种方法予以弥补:

(1) 对现有 DSP 增加实时控制资源;(2) 在现有微控制器上增加 DSP 能力。

RISC 强调的是其处理器的简单化和经济性,它是利用流水线结构并包含有限个简单指令的简化指令系统,将复杂运算转移至软件完成,这样的微处理器有 Motorola 公司生产的 MC88100 和集成器件技术公司生产的 IDT79R3000A 等,将新一代特殊 RISC 芯片嵌入 LPM 控制器定会收到良好的效果。

IMS T800 及 IMS T9000 均是 INMOS 公司最新提供的 Transputer,内部分别含有 32 位 10MIPS 处理器和 64 位 200MIPS 处理器以及串行通信接口等,将其应用于 LPM 驱动系统的控制中具有很多优点:并行计算使控制功能可以分配给数个处理器同时完成,结果计算时间很快,可能得到很高的采样速度,同时,并行处理使多任务的运动控制容易实现。

5.2 专家系统、模糊逻辑在 LPM 驱动系统中的应用

专家系统、模糊逻辑属于计算机学科中一个主要的分支——人工智能的范畴。在科学和工程中,人工智能技术近年来得到了广泛应用。专家系统属于“硬计算”(精确计算),而模糊逻辑属于“软计算”(近似计算),它们均是试图模仿具有智能的人类的思维过程。事实上,人工智能技术在各个领域都获得了广泛的应用,可以想象到人工智能技术必定能应用于 LPM 驱动系统中。

专家系统基本上是一种“智能”数字计算和程序,在许多方面专家系统程序已超过了人类专家,如果内嵌了 LPM 驱动控制方面人们的专业知识

(知识库) 并辅以功能强大的用户界面, 使计算机流程路径可由逻辑信号进行切换, 那么, 熟练或半熟练的用户在键入数据和参数值后即可得到相关结果信息。

与专家系统不同, 模糊逻辑是处理那些含混不清、不确定、不精确或量化的问题, 实际上也是模仿人类思维, 因为思维本质上常常是模糊不清的。基于模糊逻辑描述一个过程的控制算法就是模糊控制。如果在模糊控制器内嵌入人们对 LPM 驱动控制方面丰富的实际经验和直觉知识, 则可以抛开并不完善的、多变量的、复杂的和非线性的 LPM 动态数学模型, 仅依赖于操作人员的经验和直观推断, 因其基本上是自适应的, 具有很强的鲁棒性¹。

总之, 采用新一代高档微处理器并能将专家系统或模糊逻辑的控制算法应用于 LPM 驱动系统的控制中, 定会是一场新的革命。

结 论

本文以日本神钢电机株式会社生产的两相混合式直线脉冲电机 SLPMU-025A 为研究样机,对直线脉冲电机的驱动方法进行了研究分析,设计了开环方式下基于 AT89C51 单片机的两相混合式直线脉冲电机驱动控制装置,能实现对电机启停、调速、正反向运行、定位等的控制,并具有记录,显示步进距离和运行速度的功能,实验测取了不同细分数下恒流驱动的电流感应波形以及不同运行方式下的速度图和位移图。

该驱动控制装置由于采用了专用综合驱动器和单片机控制技术,所需外围器件较少,结构简单,而且由于编程的灵活性,使修改控制方案十分方便,因而可以用很低的成本实现较复杂的控制功能。实验表明,电机实际运行性能与理论分析结果基本吻合。

本文仅就两相混合式直线脉冲电机驱动器和开环方式下的控制做了分析研究,还需要在许多方面做大量深入细致的研究工作,本人将在今后继续进行如下工作的研究:(1)直线脉冲电机电磁分析及静态、动态特性;(2)具有位置反馈和速度反馈能提高直线脉冲电机带载情况下定位精度和运行稳定性的闭环控制;(3)直线脉冲电机驱动系统的实时 DSP 模糊控制。

附录 I

两相混合式直线脉冲电机 SLPMU-025A 的参数

定子齿数	3	[/极]
动定子齿宽	0.8	[mm]
动定子槽宽	0.89	[mm]
动定子齿距	1.693	[mm]
气隙	0.05	[mm]
极数	4	
线圈匝数	114	[匝/极]
线径	0.4	[mm]
每极电阻	1.65	[Ω /极]
额定电压	24	[v]
额定电流	1.2	[A/相]
输入功率	4.22	[W]
有效行程	342	[mm]
定位精度	0.03	[mm]
步长	0.212	[mm]
励磁方式	1-2	相励磁
速度	0.6	[m/s]
最大自启动周波数	420	[pps]
静推力	24.5	[N]
制动力	2	[N]

附录 II

程序清单

```
ajmp start
org 03h
ajmp inte0
org 0bh
ajmp cp
org 13h
ajmp intel
org 30h
start:cpl p0.1
mov 4ah, #0e2h
mov 4bh, #0ffh
mov t10, 4ah
mov th0, 4bh
mov 52h, #00h
mov 60h, #00h
mov 50h, #00h
mov 48h, #00h
mov 49h, #00h
mov 47h, #00h
mov p3, #0ffh
mov tmod, #00000001b
```

```
    mov ip, #02h
    mov ie, #8fh
    mov 4ch, #10
    mov sp, #2ah
main: acall disp
      acall kbod
      acall sign
      mov 02h, c
      mov c, p0.1
      cpl c
      mov p0.2, c
      mov c, 02h
      ajmp main
disp: push acc
      mov a, 49h ;if display>999 then =999
      clr c
      subb a, #03h
      jc nd2
      clr c
      mov a, 48h
      subb a, #0e7h
      jc nd2
      mov 49h, #3h
      mov 48h, #0e7h
nd2:  setb psw.3
      mov p1, #0ffh
      mov p2, #0ffh
      mov r7, 47h ;D1 table code DEC
```

```
mov a, r7
acall change
mov p2, a
clr pl.4
acall delay1
setb pl.4
mov r6, 48h
mov a, r6    ;BCD change
mov b, #100
div ab
mov 41h, a
mov a, #10
xch a, b
div ab
swap a
add a, b
mov 40h, a
mov a, 49h  ;3 wei zhuan huan SUB
mov 21h, c
clr c
rrc a
mov b, a
jnc b9
clr c
mov a, 40h
add a, #56h
da a
mov 40h, a
```

```

    mov a, 41h
    addc a, #2h
    da a
    mov 41h, a
b9: mov a, b
    clr c
    rrc a
    jnc nd1
    clr c
    mov a, 40h
    add a, #12h
    da a
    mov 40h, a
    mov a, 41h
    addc a, #5h
    da a
    mov 41h, a
nd1: mov c, 21h
    mov a, 41h ;D2 diaplay
    acall change
    mov p2, a
    clr pl.5
    acall delay1
    setb pl.5
    mov a, 40h ;D3 display
    anl a, #0f0h
    swap a
    acall change

```

```
mov p2, a
clr pl.6
acall delay1
setb pl.6
mov a, 40h ;D4 display
anl a, #0fh
acall change
mov p2, a
clr pl.7
acall delay1
setb pl.7
clr psw.3
pop acc
ret

change:mov dptr, #table1
        movc a, @a+dptr
        ret

table1:db 0c0h, 0f9h, 0a4h, 0b0h, 99h, 92h, 82h, 0f8h
        db 80h, 90h, 88h, 83h, 0c6h, 0a1h, 86h, 8eh
        db 8eh; (F)

delay1:mov r5, #30
        ll:mov r4, #1
            djnz r4, $
            djnz r5, ll
        ret

kbod:  jb p3.5, no
        k1: acall delay1
            jnb p3.5, k1
```

```
        inc 50h
no:     ret
sign:  push ie
        push acc
        mov ie, #00h
        mov a, 50h
        cjne a, #00h, next1
        mov 47h, #16
        clr 0ch
        mov a, 52h ;sub1 display
        add a, 52h
        mov b, a
        mov dptr, #table4
        movc a, @a+dptr
        mov 49h, a
        mov a, b
        inc a
        mov dptr, #table4
        movc a, @a+dptr
        mov 48h, a
        jb p3.1, exit1
nns1:  acall delay1
        jnb p3.1, nns1
        clr 0bh
        cpl tr0
        cpl 03h
        ajmp exit
exit1: jnb 03h, nsub1
```



```
    ajmp exit
nsub1:jnb 05h, exit
    cpl p0.1
    mov 54h, #5h
    mov 53h, #84h
    clr 05h
    setb tr0
    ajmp exit
next1: cjne a, #01h, next2
    jb 0ch, nsub2
    mov 47h, #13
    jnb 05h, exit          ;sub2
    jnb p0.1, nsub2
    mov 54h, #5h
    mov 53h, #84h
    setb 0ch
    clr 05h
    clr 0bh
    clr p0.1
    setb tr0
    ajmp exit
nsub2:setb p0.1
    setb 0ch
    mov 47h, #13
    mov a, 60h
    add a, 60h
    mov b, a
    mov dptr, #table5
```

```
    movc a, @a+dptr
    mov 49h, a
    mov a, b
    inc a
    mov dptr, #table5
    movc a, @a+dptr
    mov 48h, a
    jb p3.1, exit          ;start
sb2:acall disp
    jnb p3.1, sb2
    mov a, 60h
    add a, 60h
    mov b, a
    mov dptr, #table6
    movc a, @a+dptr
    mov 54h, a
    mov a, b
    inc a
    mov dptr, #table6
    movc a, @a+dptr
    mov 53h, a
    setb tr0
    ajmp exit
next2:mov 50h, #00h
exit: pop acc
    pop ie
    ret
cp:push acc
```

```
    djnz 4ch, nextt0
    mov 4ch, 4dh
    mov 02h, c
    mov c, p0.1
    cpl c
    mov p0.2, c
    mov c, 02h
    jb 0bh, zheng
fan:clr c
    mov a, 53h
    subb a, #01h
    mov 53h, a
    jnc exit2
    clr c
    mov a, 54h
    subb a, #01h
    mov 54h, a
    jnc exit2
    mov 53h, #00h
    mov 54h, #00h
    clr tr0
    setb 05h
    ajmp exitcp
zheng:mov dph, 54h
    mov dpl, 53h
    inc dptr
    mov 54h, dph
    mov 53h, dpl
```

```
    mov a, 54h
    cjne a, #06h, exit2
    mov a, 53h
    cjne a, #0a4h, exit2
    clr tr0 ;stop t0
    setb 06h
    ajmp exitcp
exit2:clr p0.0
    nop
    nop
    nop
    nop
    nop
    nop
    nop
    setb p0.0
nextt0:mov 4ah, #0e2h
    mov 4bh, #0ffh
    mov t10, 4ah
    mov th0, 4bh
    mov tmod, #01100001b
    setb tr0
    pop acc
    reti
exitcp:pop acc
    reti
intel:push acc
    d5:acall disp
```

```
jnb p3.3, d5
jb 0ch, sub2k4
mov a, 52h
jz zero1
dec 52h
zero1:mov a, 52h
      mov dptr, #table2
      movc a, @a+dptr
      mov 4dh, a
      ajmp exitint1
sub2k4:mov a, 60h
      jz zero2
      dec 60h
zero2:mov a, 60h
      add a, 60h
      mov b, a
      mov dptr, #table5
      movc a, @a+dptr
      mov 49h, a
      mov a, b
      inc a
      mov dptr, #table5
      movc a, @a+dptr
      mov 48h, a
exitint1:pop acc
         reti
inte0:push acc
      d3:acall disp
```

```
    jnb p3.2, d3
    acall delay1
    jb 0ch, sub2k3
    mov a, 52h
    cjne a, #07h, nte0
    mov 52h, #7h
    sjmp nte02
nte0: inc 52h
nte02: mov a, 52h
       mov dptr, #table2
       movc a, @a+dptr
       mov 4dh, a
       ajmp exitit0
sub2k3: mov a, 60h
        cjne a, #05h, ntel
        mov 60h, #5h
        sjmp nte02
ntel:  inc 60h
ntel2: mov a, 60h
       add a, 60h
       mov b, a
       mov dptr, #table5
       movc a, @a+dptr
       mov 49h, a
       mov a, b
       inc a
       mov dptr, #table5
       movc a, @a+dptr
```

```
        mov 48h, a
exitit0:pop acc
        reti
table2:db 100, 66, 50, 40, 33    ;Time 4Dh
        db 28, 25, 20
table3:db 75, 37, 50, 63, 75    ;step number
        db 87, 100, 125
table4:dword 100, 150, 200, 250 ;display number
        dw 300, 400, 500
table5:dword 50, 100, 150, 200 ;ding wei
        dw 250, 300
table6:dword 235, 470, 705, 941 ; ding wei CP
        dw 1176, 1412, 1647
        end
```

附录III

符号表

- C: 电容, [μF];
 f : 电源频率, [HZ]或步进电动机运行速度, [pps];
 i : 瞬时电流, [A];
 I : 直流电流, [A];
 I_{av} : 平均电流, [A];
 I_{max} : 峰值电流, [A];
 I_{N} : 电动机相绕组额定电流, [A];
 L : 电感, [H];
 R : 电阻, [Ω];
 R_{s} : 检测电阻, [Ω];
 r : 电源内阻, [Ω];
 r_{a} : 电动机每极绕组电阻, [Ω];
 S : 电动机位移, [mm];
 T : 时间, [ms];
 U : 直流电压, [V];
 v : 步进电动机运行速度, [mm/s];
 τ : 电气时间常数, [ms];

附录IV

器件及芯片

7406: 反相器;
LS20: 与非门;
LS123: 单稳态触发器;
LM339: 比较器;
BY229: 二极管;
CD40107: RS 触发器;
LPM: 直线脉冲电机;
SLPMU-025A: 两相混合式直线脉冲电机;
LM2917: F/V 变换器;
SG3524: V/W 变换器;
TL494: V/W 变换器;
CH250: 环形分配器;
PMM8713: 环形分配器;
PMM8714: 环形分配器;
C293: 环形分配器;
C297: 步进电动机控制器;
C298: 步进电动机双 H 桥式驱动器;
3717: 步进电动机微步驱动芯片;
IXM150: 步进电动机微步驱动控制芯片;
DDR1002AD: 步进电动机微步驱动控制芯片;
TA8425: 步进电动机微步驱动控制芯片;

TA72899: 步进电动机微步驱动控制芯片;
SH-2H057M: 两相混合式步进电动机驱动器;
8748: 单片机;
AT89C51: 单片机;
0808: 数/模转换器;
2716: 紫外线擦除可编程只读存储器;
2732: 紫外线擦除可编程只读存储器。

参考文献

- [1] 杨大伟.直线电机应用概况及发展动态.电子机械工程,1998,(5):1~3
- [2] 郭宏.步进电动机驱动器的发展概况及趋势.世界电子元器件/ECN,1999,(8):36~37
- [3] 刘宝廷,程树康.步进电动机及其驱动控制系统.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997,11
- [4] 呼志杰.二相混合式直线步进电动机动态特性研究.太原理工大学硕士学位论文,2001
- [5] 卜庆华.リニアバルモータの特性解析に関する研究.日本信州大学博士学位论文, 1998
- [6] 赵国柱.两相混合式直线步进电机的研究.太原理工大学硕士学位论文,2000
- [7] 北京斯达特机电科技发展有限公司.SH 系列步进电机驱动器使用说明书
- [8] 孔令山,熊坚.双极性步进电机细分驱动器的设计与实现.应电工程,1997,24(6):39~43
- [9] 陈培民.步进电机的高性能驱动.华侨大学学报(自然科学版),1998,19(4):347~349
- [10] 卢智良.步进电机恒频脉宽调制驱动电路.电加工,1994,(1):26~28
- [11] 路敦民,俞瑛,张立勋,付连芳.一种步进电机控制驱动器.应用科技,2001,28(5):23~25
- [12] 韩唏春.步进电机微步驱动系统的设计.电气传动自动化,1998,20(4):57~59.
- [13] 孙胜利.步进电机细分驱动获得均匀步距的方法研究.微特电

- 机,1998,(5):22~24
- [14] 华蕊.步进电机细分驱动技术综述.佛山科学技术学院学报,1999,17(3):50~54
- [15] 马宏伟,薛河,杜功儒.单片机控制步进电机脉宽调制式细分驱动系统.煤 COAL,1996, 5(2):36~37
- [16] 王菁蕙,梅安华.单片机控制的步进电机定频脉宽调制可变细分驱动系统.武汉测绘科技大学学报,1994,19(1):73~80
- [17] 叶树林,刘晋春.单片机控制的步进电机脉宽调制式细分驱动系统.机械与电子,1994, (5):16~17
- [18] 周开勇.高性能步进电机驱动芯片组 PBL3771/PBM3960 及应用.电工技术应用,1997, (5):49~51
- [19] 唐竞新,祝永进.脉冲电流源型步进电机驱动器的研究.清华大学学报,1999,39(9):122~126
- [20] 陈承勤.直线电机变频调速控制的实现.苏州丝绸工学院学报,17(5):72~78
- [21] 张丹红,文小玲,程昌银.一种基于单片机的步进电机控制器的研制.武汉化工学院学报,2000,22,(3):62~64
- [22] 蒋永平,徐杜.基于单片机的一种步进电机全数字任意细分及驱动方法.自动化与仪表,1999,14(2):47~49
- [23] 马车斌,韩亮.基于单片机的步进电机控制系统.电子与自动化,1998,(1):21~22
- [24] 张廷录.步进电动机的单片机细分驱动实现.微特电机,1988,(3)13~15
- [25] 潘金火,吴金灿.步进电动机调频调压供电斩波型驱动电路.华侨大学学报(自然科学版),1994,15(4):385~388
- [26] 王作义.细分步进电机均匀步距的实现方法.电子工业专用设备,1995,(3):28~31
- [27] Du Xu, Yongping Jiang. A Method and Implementation of Fully Digitized Continuous Microstep for Step Motor [J]. IEMDC'97, 1997 IEEE

- INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES
CONFERENCE RECORD, held in Milwaukee, Wisconsin, USA, 18-21
May, 1997
- [28] Muhammed F. Rahman, An Application-Oriented Test Procedure for
Designing Microstepping Controllers [J]. IEEE, Transaction on Industrial
Electronics, 1988, 35(4)
- [29] 首之,王志良.步进电动机的斩波型平滑驱动方式.微特电机,1988,(4)
- [30] 王宗培,王志良.步进电动机的一种新型驱动方式.电机学术年
会,1988,11
- [31] Muhammed F.Kaham. Approaches to Design of Ministepping Step Motor
Controllers and Their Accuracy Considerations [J]. IEEE Transaction on
Industrial Electronics, 1985, IE32(3)
- [32] V.Sh.Artyunyan. An Optimum Method and Device for Subdividing the
Step of an m-Phase Step Motor [J]. Radio Techniko, 1991,(11):99-103
- [33] 余锡存,曹国华.单片机原理及接口技术,西安的西安电子科技大学出版
社,2000,7
- [34] [美]B.K.博斯主编,姜建国等译.电力电子学与变频传动技术和应用.徐
州:中国矿业大学出版社,1999,9
- [35] 仲焜维.步进电机的单片机控制方法.自动化与仪表,1999,(5):67~68
- [36] 李朝青.单片机原理及接口技术.北京:北京航空航天大学出版社,1992,9
- [37] 刘光斌,王雪梅.基于单片机 892051 单步进电机控制装置.工业自动控
制,2000,(2):9~10
- [38] 闫贵军等.提高步进电机步距精度的研究.国防科技大学学报,1994,16
- [39] PIC 16/17 Microcontroller Datebook.Microship.1995/1996
- [40] 潘新民等.单片微型计算机实用系统设计.北京:人民邮电出版社,1992
- [41] 何立民.单片机应用系统设计(系统设计与接口技术).北京:北京航空航
天大学出版社,2001,2
- [42] 纪宗南.单片机外围器件实用手册.北京:北京航空航天大学出版

- 社,2000,10
- [43] 宋洪侠,王晓东.一种在细分平衡位置准确定位的步进电机驱动电源.微特电机,1995, (6):32~33
- [44] 刘爱和.步进电机新型恒流驱动电源,微特电机,1992(5):14~16
- [45] 王宗培,孔昌平,李楚武等译.步进电动机及其控制系统.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1984
- [46] S.A.Nasar, I.Boldea. Linear Motion Electric Machines[M]. A Wiley-Intersciences Dublication, 1982
- [47] 陈理碧.步进电动机及其应用.上海:上海科技出版社,1985,6
- [48] 廖晓钟.电力电子技术与电气传动.北京:北京理工大学出版社,2000,1
- [49] 陈伯时.电力拖动自动控制系统.北京:机械工业出版社,1995,5
- [50] Peter Cmosija, Braiislav Kuzmanovic, Stipe Ajdukovic. Microcomputer Implementation of Optimal Algorithms for Closed-loop Control of Hybrid Stepper Motor Drive[J]. IEEE Trasaction on Industrial Electronics, 2000, 47(6):1319-1325
- [51] Dr, Finbarr Moynibar, Dr, Paul Kettel. 嵌入 DSP 在电机控制器中的应用 [J]. 电子产品世界, 1999, (9):66-67
- [52] Yunhyun Cho, Jacobong Lee, Daehyun Koo. The Analysis of the Static Thrust of a Hyhbird Type Double-sided Linear pulse Motor[J]. IEEE Transactions on Magetics, 1995, 31(3):2084-2087

研究生学习期间发表的论文

- [1] 王爱乐, 王跃龙. 国外直线电机驱动产品的发展. 科技情报开发与经济, 2003, No.07 期
- [2] 王跃龙, 王爱乐. 两种永磁直线直流电机的结构与磁场分析, 科技情报开发与经济, 2003, No.07 期
- [3] 卜庆华, 王爱乐, 山田 一. 日本直线电机驱动新产品的开发. 全国微电机学术会议, 2002, 7. [中国·西安]

致 谢

首先，我向我的导师卜庆华教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！长期以来，卜老师在学业上对我严格要求，从课程学习、外出调研、参加学术交流会议到论文选题、研究思路、实验设计分析各个环节都给予了悉心指导和热情支持。同时，在工作中、生活上，卜老师更给了我无微不至的关怀，他严谨的治学态度、勤勉的工作作风、渊博的学识、诙谐幽默的言谈、乐观向上的精神、平易近人的品行将永远印在脑海，为我今后的做人做事指明了方向。

在科学研究的思想、在实验装置设计、实验测试方法、实验结果分析诸多方面，得到了熊光煜教授的谆谆教诲和热情帮助，我衷心地感谢熊老师！同时感谢卜颖刚、李志锋同学在实验中给予的大力帮助！感谢师弟张灵在处理论文数据资料中的支持和帮助！

在几年的工作学习期间得到了学校、学院和研究生部老师们的关心和帮助，在此谨向他们致以诚挚的谢意！

感谢所有关心、支持、帮助过我的人，衷心祝愿他们健康、快乐！