

## 摘 要

本文主要研究了一种集晶片频率测量、分选于一体的新型石英晶片测量与分选的自动控制系统。此系统由两个子系统组成，都是以计算机为中心，基于 ISA 总线接口的单片机控制的测量系统和分选系统；其中测量系统采用  $\pi$  网络最大传输法测量石英晶片的电参数，使用直接数字频率合成器 (DDS) 生成期望的频率扫描信号并激励  $\pi$  网络的方法，从而获得石英晶片谐振频率、活力、寄生频率、杂波数等参数的测量；分选系统选用圆振与直振实现自动上料、步进电动机及其驱动器实现传输分档以及电磁铁实现自动下料。

石英晶片测量分选系统是先进的测控技术、现代微电子技术及计算机应用技术结合的产物，在电路设计和软件编制中使用了大量的创新技术工艺和技术方法，极大的丰富了石英晶片测量与分选系统的内容和技术含量，使得系统具有稳定性好、测量精度高、分选速度快、晶片重复性好等优点。美观友好、功能齐全、操作方便的主监控界面使人机交互变得更加简便。本文论述了石英晶片测量系统之后，还详细介绍了分选系统的设计以及所使用的关键技术，最后实现整个系统的各部分之间的通信及人机交互界面。本文最后用理论结合实验数据的方法对系统进行了精度的分析。

**关键词：**石英晶片， $\pi$  型网络测量法，单片机，步进电动机

## ABSTRACTS

This paper studies a kind of new autocontrol system across-the-board, which can realize both the measurement of frequency and the separation of quartz crystal wafer. The system is controlled by a computer which the singlechip is connected with basing on ISA bus interface, and consists of wafer measurement and separation. The frequency measurement system adopts pi-network most transmission method to measure the electrical parameters of the quartz crystals, such as the frequency, the energy and clutter, moreover, it applies direct digital synthesizer(DDS) to produce the wishing frequency scanning signal and stimulate  $\pi$  network, so as to get the resonate frequency, autoeciuousness frequency, activity and so on; The separation system choose circle and line motor, step motor, and electromagnet to realize auto-sorting of the wafers.

Automatic measureing and sorting system of quartz crystal wafer is the combination of the advanced control technology, modern micro-electronics technology and the computer application, which riches the content of measuring and selecting technology at a large scale, what's more, it uses a lot of innovative technics and methods in the circuit designment and software workout, endowing the whole system with many merits, for instance,good stabilization, high precision and rapidity, good repetition. The main control page with good-looking, self-contained function and easy operation is a obvious characteristic of the system.

The paper not only elaborate the measuring system and the key techonogy and methods, but also introduce the separating driving system design. At last, it particularly tells the system frame, software programme and communication realization. The article adopts the method of theory combining practice to analysis the precision of the system.

Keywords : quartz crystal wafer, pi-network measure method, singlechip,step motor

## 原创性声明

本人声明,所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了论文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 罗凌辉 日期: 2009年5月20日

## 关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留学位论文,允许学位论文被查阅和借阅;学校可以公布学位论文的全部或部分内容,可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文;学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名: 罗凌辉 导师签名: 林华 日期: 2009年5月20日

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

石英晶体是硅石( $\text{SiO}_2$ )的一种。天然和人工制造的石英晶体都是六角锥体,具有各向异性的物理特性。按其自然形状有三个对称轴:电轴 X、机械轴 Y、光轴 Z。晶振中的各种晶片,就是按与各轴不同角度,切割成正方形、长方形、圆形的薄片,不同切型的晶片性能有所不同<sup>[1]</sup>。

自 20 世纪 20 年代初石英晶体问世以来,石英晶体在电子领域获得了广泛的应用。由于石英晶体具有较高的品质因数,因而其频率稳定度极高,被广泛用做时间频率基准和为时序逻辑电路提供同步脉冲,如卫星通讯、广播电视系统及全球导航定位系统等,均采用各类晶体及其器件作为频率标准控制信号源。又如近代物理实验、精密时频计量、精密频率合成器等电子仪器,都有赖于高稳定性晶体提供精确的频率标准和时间基准。

石英晶体元器件是用压电单晶石英(即水晶)制成的压电器件,它不仅具有高度稳定的物理化学性能,而且弹性振动损耗极小。与其它电子元器件相比,压电石英晶体还有着很高的频率稳定度和高 Q(品质因素)值,其主要原材料人造石英水晶的价格又较低,由于这些突出的优点,使其成为稳定频率和选择频率的重要元器件。石英晶体元器件在电子整机中的应用非常广泛,从普通的儿童玩具、电子钟表到彩电、音响、VCD、微处理机、无线通讯、电视信号转播等都离不开它。随着电子信息产业的飞速发展,尤其是数字化电路的广泛应用,石英晶体元器件的市场需求量快速增长。对晶体元器件的片式化、小型化、高频率稳定度以及一些特殊要求也越来越高。近几年,国内外石英晶体元器件生产、工艺以及产品质量的技术水平都有了跨越式的发展。

石英晶体加工工业需要对大批的石英晶体原料选择、定向、切割及研磨抛光等制备成石英晶体半成品,然后对半成品按其频率进行严格分选,复上电极进行频率调整,最后进行不同规格的成品封装<sup>[2][3]</sup>。比如,从原始材料经过定向、划线、切割、测角、研磨抛光、腐蚀清洗等工序都是非常严格的,而对石英晶片半成品的分选也必须非常准确,如活力差、杂波多的晶片即是废品要单独分选出来,所以需要石英晶片按其各电参数进行严格分选才能投入进一步的加工生产。

当今世界,由于电子技术、计算机技术及软件技术的高速发展,有力地促进了晶片分选系统的发展。特别是测控技术的飞速发展,使测控系统的结构概念和设计观念等都发生了突破性的飞跃。

随着数字技术、通讯技术及其它相关领域的技术的发展,对石英晶体的数

量和质量提出了更高的要求。而国内晶片测量分选技术比较落后,用于晶体生产过程中的测控仪、分选设备基本上依赖于进口,这大大制约了国内晶体制造业的发展。由于社会需求要求发展国内晶片测量分选技术、研制国产石英晶片分选系统达到与先进的进口设备技术同步<sup>[4]</sup>,因此,开发出一套测量精度高、分选速度快、分档准确的石英晶片分选系统显得尤为重要。

目前,在许多晶片生产企业中这种分选工作仍然采用原始陈旧的手工进行,致使分选精度很低,速度慢,误选率高,劳动强度大,效率差,造成人力、物力和财力的浪费。

本文介绍石英晶片测量与分选自动控制系统的开发与研究,就是采用先进的计算机技术,使用单片微机控制方法,实现石英晶片的自动测量与分选,一改传统的人工检测,大大减轻劳动强度、提高速度、保证精度、消除误检、安全可靠,取得了显著的社会效益和经济效益。

## 1.2 国内外发展现状

在国外,美国和日本是全球石英晶体器件研究、开发生产强国,他们在开发晶片测量分选系统方面一直走在世界的前列。目前我国市场上出现的大部分晶片测量分选系统就是借鉴国外的先进理论自主创新研发的成果。

我国的晶体行业整体水平比较落后,虽然年产量不小,但分布散乱、规模小、档次低,难以满足石英晶体元器件市场的要求。晶体行业经过“八五”和“九五”的发展,目前全国有生产厂家 200 个左右,年元器件产量超过 15 亿只,就产量来说可谓是大国,但产品档次、经济效益尚存在很大差距。产品档次偏低、相关产业不配套、新产品技术开发力量不足、工艺技术落后、生产厂家规模小和力量分散是我国晶体行业的现状。

1988 年我国晶体元器件年产量已达 4000 万只,人造水晶 158 吨,销售额 10638 万元,利润 2631 万元,出口创汇 679 万美元。到 2000 年,晶体元器件的产量为 16 亿只,人造水晶约 1600 吨,销售额约 20 亿元,出口创汇 20000 万美元,比 1988 年分别增长 40 倍、10 倍、12 倍、26 倍。我国石英晶体元器件的产量约为日本产量的一半,在亚洲居第二位。目前国内市场对石英晶体元器件的年需求量约 20 亿只,年增长率近 20%。

目前,国内许多厂家仍沿用手工的方法来检测石英晶体的各项电气特性(如频率、阻抗等),但随着晶体产量的不断增加及测频范围的提高,人工测量越来越不能满足生产的需求,其原因一是人工检测效率低,且易出现人为的读数错误;二是对于高频石英晶片,人工拿捏易使其破碎。因此,为提高生产效率和测量准确度,发展国产的自动化检测设备已成为必然。



在我国,石英晶体元器件的参数测量和分选系统基本依赖于进口。就世界范围来说 Saunders & Associates 是业界权威<sup>[6]</sup>。在国内南京熊猫机电和北京世纪隆宇公司开发出来的晶片分选系统成为市场的主流。由于我国的测控技术和微电子技术与世界先进水平尚有一定的差距,所以目前国内市场上大多数晶片分选系统仅停留在低级水平,而且系统各项性能指标还有很大的上升空间。

鉴于目前市场上的石英晶片分选系统的高端产品主要依赖于进口,但其价格相对昂贵,全外文的操作监控界面不易在底层推广应用。而由国内公司自主开发研制的石英晶片分选系统精度偏低、分选速度不够快。所以开发一套测量精度高、分选速度快的系统有着广阔的市场前景。

### 1.3 研究内容及基本思路

本课题的任务是研制石英晶片测量与分选系统。石英晶片的生产工艺过程:将石英晶体原料进行初步挑选,然后进行定向、划线、切割、测角、研磨抛光、腐蚀清洗等工序制备石英晶片,石英晶片是石英晶体成品在镀电极和封装前的半成品,为保证石英晶体成品的质量,要对石英晶片进行准确分选。它是本课题研究的内容。石英晶片电参数精确测量是石英晶片准确分选的主要依据,石英晶片的分选是晶体成品生产工艺的一个重要环节,石英晶片测量精度、分选速度、分选精度即是本文研究的重要部分。

石英晶片测量采用  $\pi$  网络最大传输法测量石英晶片的电参数,使用直接数字频率合成器(DDS)生成期望的频率扫描信号并激励  $\pi$  网络的方法,从而获得石英晶片谐振频率、活力、寄生频率、杂波数等参数的测量;分选系统以单片机为控制中心,首先控制圆振与直振频率从而实现石英晶片的自动上料,其次控制步进电动机及其驱动器,这一部分作为分选系统的机械传输分选机构,主要任务就是将存放经检测过的石英晶片接料盒转动到该档晶片料盒上方,最后控制接料盒下方分料器档片与电磁铁的吸合,实现石英晶片的自动落料。

该系统的特点就是计算机处于核心地位,系统应用软件集成了采集、控制、数据分析、全部的输入显示和用户界面等功能,在屏幕上实时显示晶片谐振波形,包括主振、寄生、频率、活力等,还可直接读取每档分选的晶片数量,并实时显示分选的状态。这些内容的显示使用户第一时间掌握了系统工作各项指标,使分选系统完全处于自动控制。

在对当前主流的晶片分选系统进行全面的调研之后,针对目前国内晶片测量精度不高,分选不准确,系统的稳定性不好、可靠性低、重复性差的问题,提出了一些新型理论与创新方法,如:采用  $\pi$  网络传输法测量石英晶片电参数,用

DDS（直接数字合成）技术为核心设计系统的测频部分的激励信号源，这样测量系统的稳定性和测量精度都有较大幅度的提高；用数字式光纤传感器保证了晶片准确定位，最大限度的降低了跑片、漏片的现象；采用基于 ISA 总线的单片机控制步进电动机及其驱动器，为分选系统进一步提高了分档的准确性；利用电磁铁进行落料，极大的提高了晶片分选的速度和精度。使系统实时性和可靠性得到有力保障。

本文首先根据石英晶片测量与分选系统的工艺要求对测量系统进行了研究，然后设计了分选自动控制系统,其中包括圆振与直振的自动上料、步进电动机及其驱动器实现分选、控制电磁铁实现自动落料，最后实现整个测量与分选系统与主机的通信以及人机交互界面。

#### 1.4 论文构成

本文在分析晶体行业的发展现状与前景的基础上，介绍了国内外在这一领域中的研究成果，针对目前我国市场上存在的石英晶片分选系统的测量精度偏低，重复精度不高的情况，对石英晶片测量与分选系统的研究与开发具有重要意义。

第二章从分析石英晶体测量与分选自动控制系统的需求出发，对整个系统进行了总体设计，整个系统分为测量与分选两个子系统。

第三章从分析石英晶体的等效电模型入手，在分析石英晶体电参数的基础上，提出晶体谐振频率的测量方法。在比较各种测频方法的优缺点后，设计了本晶片测量分选系统的测频方法以及测量系统。

第四章从分选系统的需求和工艺出发，对分选的驱动系统进行了介绍，如上料圆振与直振的控制，分选过程中步进电动机驱动器的设计，最后是下料电磁铁的控制。

第五章从软件设计方面说明系统应用软件提供的功能。详细讨论了在软件实现过程中所用到的方法，及其界面设计及分选速度控制程序，最后对测量与分选的结果进行了分析。

第六章结论对系统的自动测量与分选进行了总结。

## 第二章 石英晶片测量与分选系统总体设计

石英晶片测量与分选系统作为一种自动化测量与分选控制仪器，它的主要功能是测量晶片的频率，然后按不同的频率段对晶片进行分选。系统要实现从测量到分选的控制，其中以一定的机械工艺作为基础，系统以 PC 机（上位机）为主控中心，直振、圆振、光纤传感器、步进电动机及其驱动器等作为系统的下位机组成，分别通过单片机控制，最后由 ISA 总线与 PC 机通信，并与 PC 机一起实现石英晶片测量与分选功能。

### 2.1 石英晶片测量与分选工艺过程及自动控制系统设计

#### 2.1.1 石英晶片测量与分选系统的工艺过程

整个石英晶片测量与分选的工艺过程是：晶片被倒入圆振料斗中，圆振以一定的频率持续振动使晶片按顺序排列，并作行进式移动，晶片从圆振行进至直线料道，对直线料道进行调整，保证晶片单片平稳的行进到测头下（测量位置），

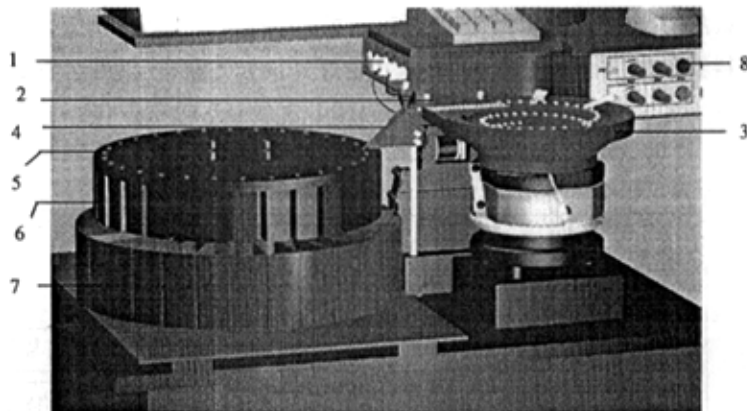


图 2-1 系统工艺

- |        |        |
|--------|--------|
| 1. 测量盒 | 5. 接料盘 |
| 2. 直振  | 6. 分料器 |
| 3. 圆振  | 7. 料盒  |
| 4. 出料口 | 8. 控制盒 |

此时晶片位于上下测量板中心，控制盒接收到光纤感侧器探测到晶片到位信号，



然后测量盒对待测晶片进行准确测量，此时，直线料道停止振动，测量完毕后直线料道恢复振动，该晶片受到其右侧晶片的推动从出料口经过接料盘孔落入分料盒中；接料盘和分料器通过法兰盘与主轴相连，步进电动机通过皮带传动，带动主轴连续转动，转动一周为 30 步，每转动一步接料盘孔始终与出料口相对应，分料器始终与下面的料盒相对应。电磁铁固定不动。当计算机根据测量数据确定分档号，由步进电动机将装有某档晶片的分料器转动至该档料盒上方时，控制盒控制电磁铁与分料器活动挡片吸合，分料盒下端开启，最后晶片滑落到料盒中。

计算机采用可视化编程语言，实现与测量、控制盒单片机的通信，传送测量和控制信息、状态信息及相关参数，实时监控它们的工作状态，测量盒和控制盒通过总线接口接收计算机发送的命令，启动工作程序进行测量、分选。用户通过界面显示获知系统的工作状态。

## 2. 1. 2 石英晶片测量与分选自动控制系统设计

### 1、石英晶片测量与分选系统的结构

整个系统是由硬件电路配合软件来实现晶片分选，石英晶片测量与分选系统硬件结构框图如图 2-2 所示。它以计算机为控制中心，通过 ISA 总线与测量盒和控制盒进行通信，每个盒子里都装有一个微处理器，分别来进行测量和分选的控制。测量盒控制频率合成器，通过频率扫描，获得晶片的频率响应数据。控制盒控制下料器、电磁铁、光纤传感器（定位和计数）、圆振、直振（振动幅度和频率）以及步进电动机驱动器。

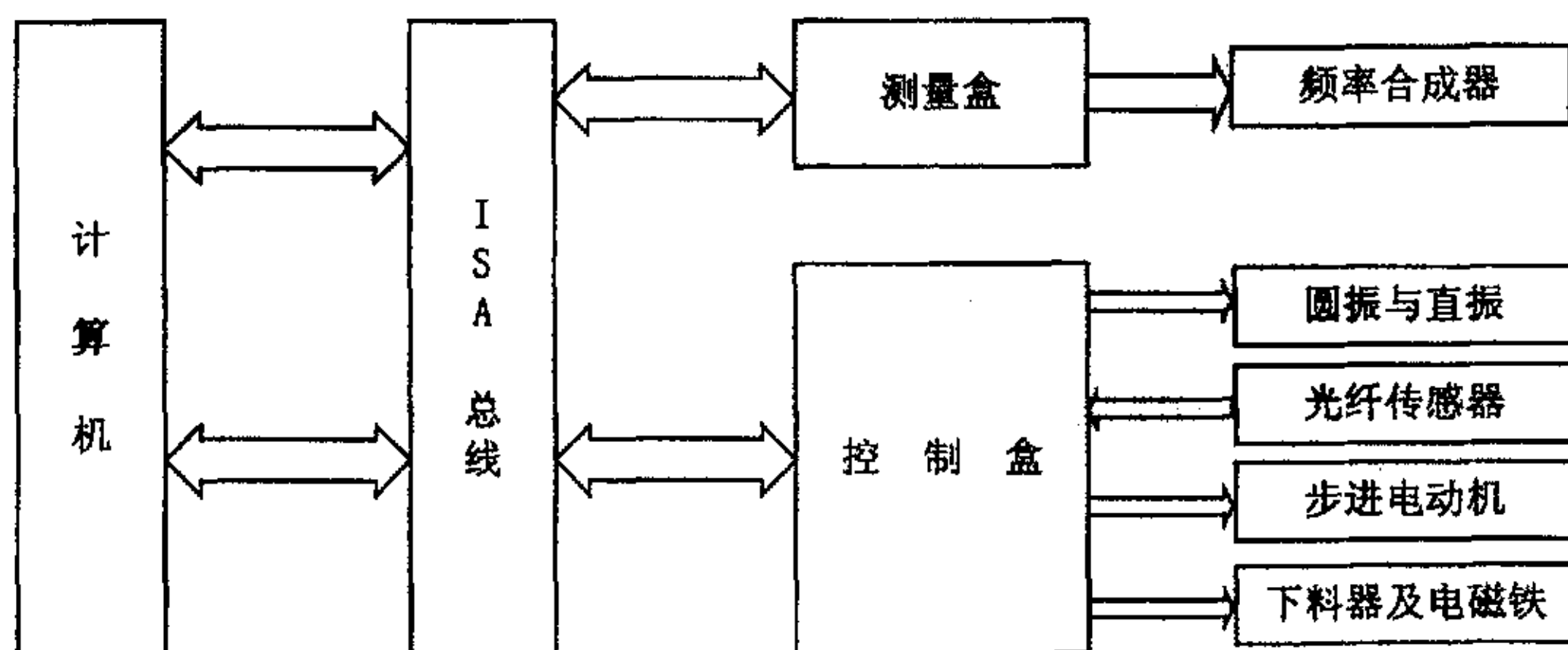


图 2-2 测量与分选系统结构

### 2、石英晶片测量与分选自动控制系统的组成

石英晶片测量与分选的自动控制系统组成如图 2-3 所示。

## (1) 自动上料机构

它由圆振与直线料道（直振）组成，由控制盒中的单片机控制。

## (2) 自动定位机构

自动定位是由光纤传感器来实现，光纤感测器也是由控制盒中的单片机控制。

## (3) 自动测量机构

它是由频率合成器、高速比较器、A/D 转换芯片等组成，由测量盒中的单片机控制。

## (4) 自动分选机构

它是由步进电动机及其驱动器组成，控制盒单片机控制步进电动机的速度与走步来实现准确定位，不失步也不超步。

## (5) 自动下料机构

它是由分料器各分料盒的活动档片和电磁铁组成，也是由控制盒的单片机控制。

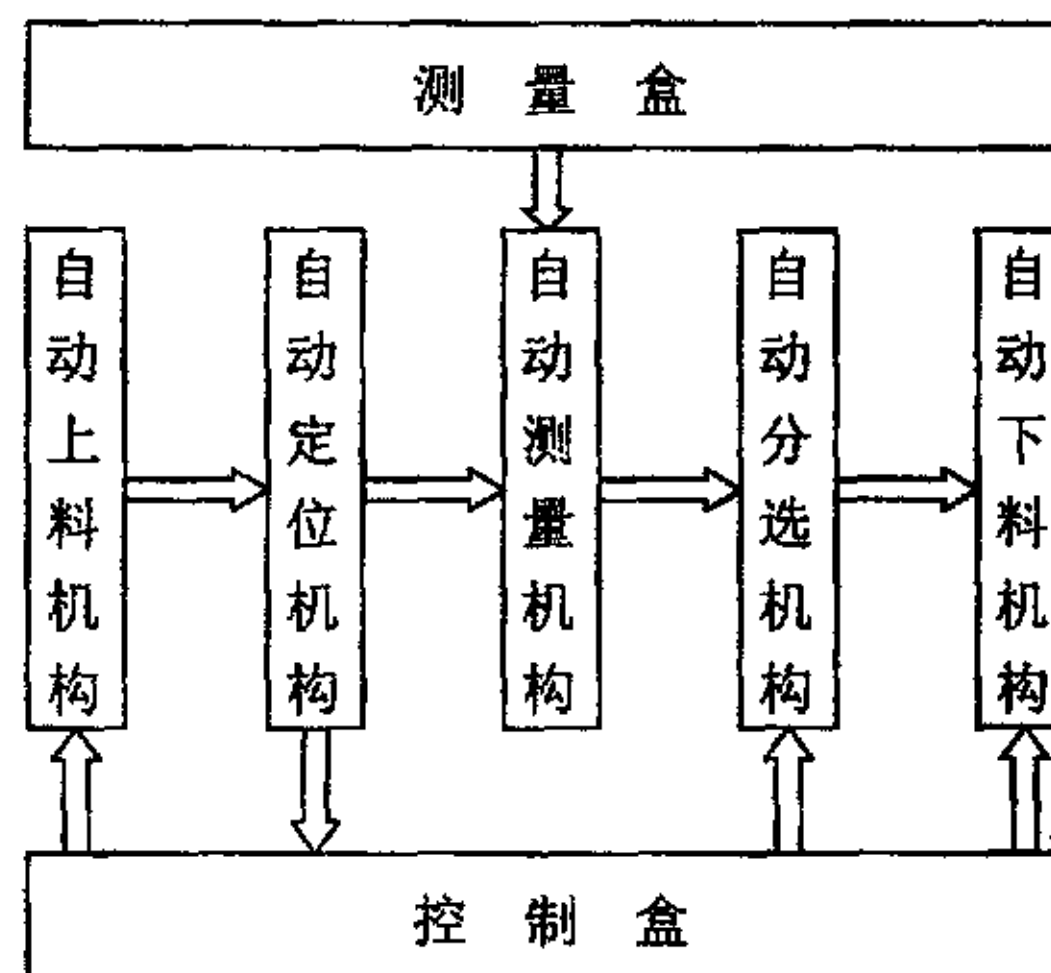


图 2-3 自动控制系统的组成

## 2. 2 石英晶片测量与分选系统的要求

石英晶片测量与分选系统可用于各种石英晶片（如 49U 系列  $\Phi 6.0 \sim \Phi 8$  圆片、49U/S 系列  $8 \times 2$  矩形片、UM 系列  $\Phi 3.0 \sim \Phi 6.0$  圆片等等）的自动测量与分选。

本文讲述的自动控制系统是按生产厂家提出的技术要求设计的。

### 1、测量与分选自动控制系统的主要技术指标

(1) 能对三种石英晶片（49U 系列  $\Phi 6.0 \sim \Phi 8$  圆片、49U/S 系列  $8 \times 2$  矩形片、

UM 系列  $\Phi 3.0 \sim \Phi 6.0$  圆片) 进行 30 个档次的分选, 以标称值为中心 ( $\pm 2\text{kHz}$  为一档), 测量频率范围: 全频率测量 基频  $1\text{MHz} \sim 65\text{MHz}$ 。

- (2) 测量精度:  $\pm 0.01\%$  之间。
- (3) 分选精度:  $\pm 0.1\%$ 。
- (4) 分选速度:  $\geq 2$  片/秒。

## 2、测量与分选自动控制系统应具有的功能特点

- (1) 能自动随时打印各档分选数量。
- (2) 可随打印单个料量以备检查分选是否准确。
- (3) 具有分选状态显示和已分选数量显示。
- (4) 具有自动复位, 程序连续工作, 各料盒分选数量连续记录功能。
- (5) 该系统备有自动判断测量与分选可靠性的校验装置, 保证系统测量与分选准确可靠。
- (6) 具有断电保护功能, 当突然断电时, 分选数量及有关数据得到保护。
- (7) 可随机显示标称值、分档数、各档晶片分选数和分选总数, 可实时显示晶片谐振波形, 包括主振和寄生频率、杂波数、活力等参数。
- (8) 传动装置简单, 机械磨损率低, 噪声小, 保养维护方便。
- (9) 系统软件独有的操作员管理功能, 可查看和打印系统操作全程记录及操作员工作记录, 为日常管理提供了极大方便。
- (10) 可直接读取每档占总数的百分比, 可显示选分瞬时速度。

## 2.3 石英晶片测量与分选系统的总体设计

石英晶片测量与分选自动控制系统由测量系统与分选系统两个子系统组成, 其系统工作流程图如图 2-4 所示。图中测量系统包括光纤感测器定位与计数、频率合成器激励  $\pi$  网络法测量及数据采集等; 分选系统包括圆振与直振振动上料、步进电动机及其驱动器实现传输分档及分料器和电磁铁实现自动落料。测量系统与分选系统作为下位机由单片机控制通过 ISA 总线与上位主机连接, 最后实现上位机与下位机的通信, 用户通过操作界面获知整个系统测量与分选的工作状况。

### 1、系统总体设计方法

测量系统通过直接测量的方法获得石英晶片的电参数, 分选系统通过将测量参数与设置参数进行比较的方法获实现分选。

系统通过软、硬件相结合的方法进行设计来达到生产厂家的技术指标及系统应具有的功能。在硬件电路设计上, 通过选用分辨率高、精度高、运行速度快的

芯片来提高系统的精度及响应速度。软件设计采用了 Visual C++6.0 和汇编语言：如单片机控制采用汇编语言，界面设计采用 Visual C++6.0。

系统首先采用了  $\pi$  型网络传输法（精度达到  $\pm 10^{-7}$ ）保证了测量精度；其次，经过选用混合式步进电动机及其驱动器的设计（精度达到  $\pm 10^{-5}$ ）来实现分选精度；最后通过自动上料、定位、测量、分选及下料的速度设计来实现整个系统的测量和分选速度。

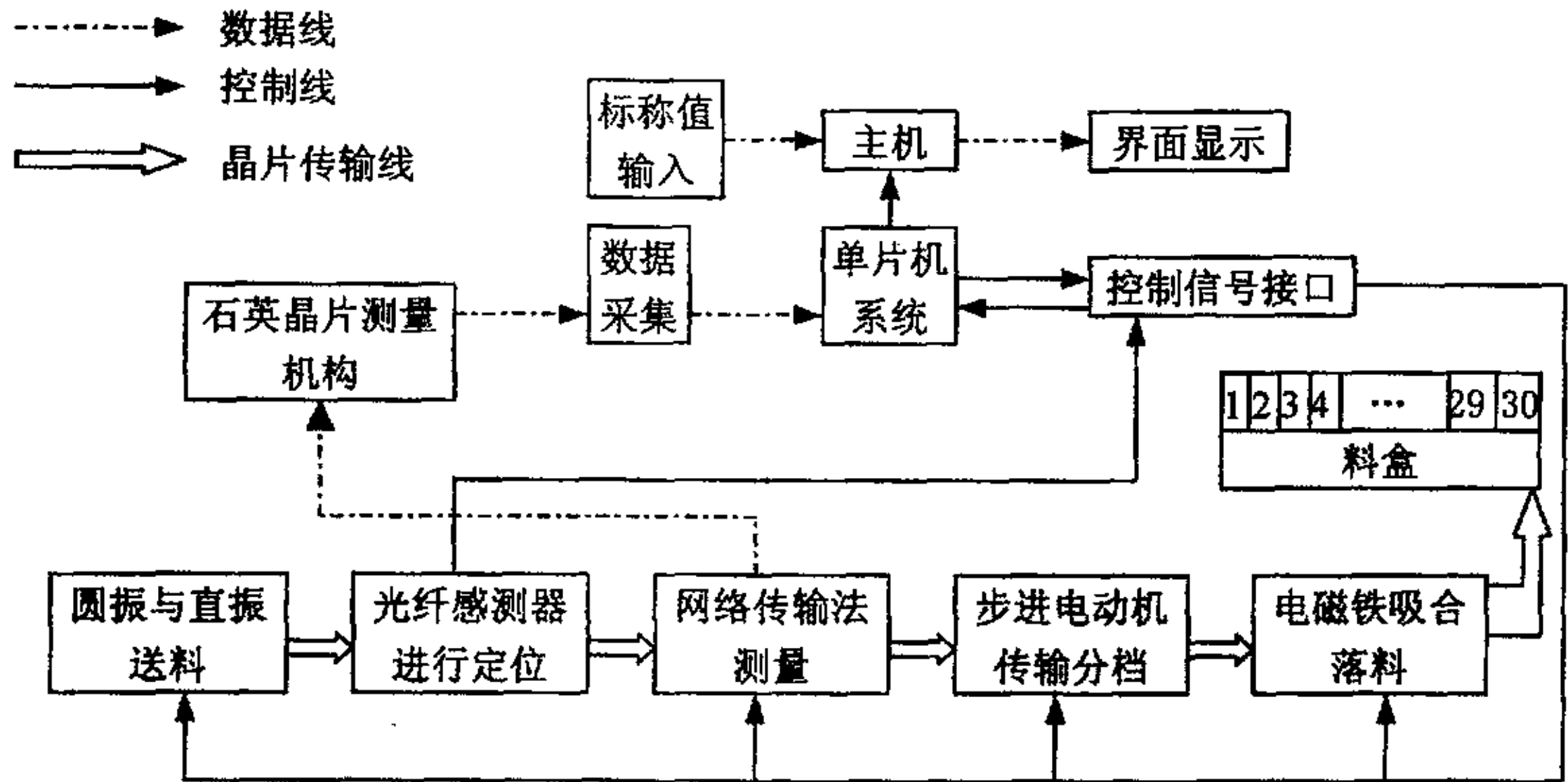


图 2-4 测量与分选自动控制系统的设计方案

## 2、系统通信

采用的通信方式是 ISA(Industry Standard Architecture)总线通信方式，通信结构图如图 2-5 所示，其中 A 端、B 端分别表示上位机端和下位机端。

A 端和 B 端通过 8 位数据线连接，各有两个输入口和两个输出口，分别定义为数据口 D1,D2 和状态口 S1,S2。状态口 S1 和 S2 低 6 位用来表示命令，高 2 位用于握手。空闲时， $S1=S2=00h$ 。

本协议采用查询的方式。在没有发送数据的时候，S1 端口为 0。当发送方 A 要发送数据时：先把要发送的数据锁存于数据端口，同时置状态口 S1 的高两位为 01（表示送了新的数据），低六位为该数据的发送命令号。而接收端 B 一直查询 S1，当发现 S1 不等于 0 时（A 端已发出数据），接受端就把锁存在数据端口中的数据读走，同时把 S2 置为 S1 此刻的值。然后 A 方就一直读端口 S2，并判断 S1 和 S2 是否相等。如果相等，就表示接收方已把数据取走，否则就一直等待。如果还要继续通信，就要把 S1 的高两位取反，再进入下一次写数据的过程，

如果通信就此结束只需把 S1 置 0 即可。此时接收方 B 一直在读端口 S1，并判断

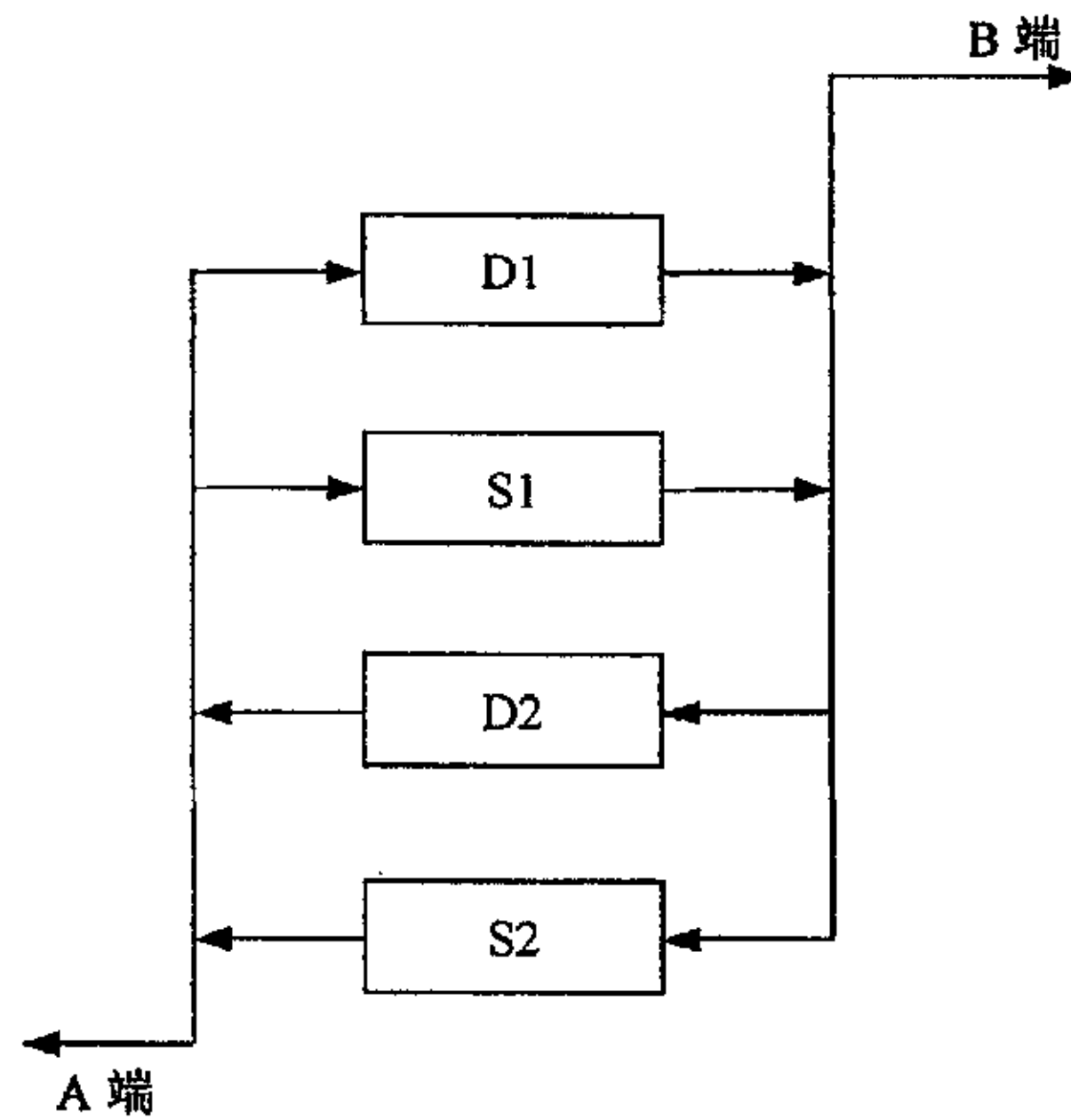


图 2-5 通信结构示意图

通信是否结束（S1 是否等于 0）。如果通信没有结束，再判断 S1 和 S2 的高两位是否相等，相等时表示有新数据过来，可以开始第二次通信；如果通信就此结束只需把 S2 置 0 即可。

## 2.4 小结

本章首先详细介绍了石英晶体测量与分选系统的工艺过程，然后重点介绍了系统的整体结构，并对各部分如：自动上料机构、自动定位与计数机构、自动测量机构、自动分选机构、自动下料机构和通信模块等作了进一步的阐述，这些内容的介绍为本文后几章的阐述功能及实现打下了基础。



## 第三章 石英晶片测量系统

石英晶片测量系统是基于 ISA 总线接口、采用单片机控制的测量系统，选用  $\pi$  网络法测量石英晶片的电参数，使用直接数字频率合成器 (DDS) 生成期望的频率扫描信号并激励  $\pi$  网络，获得石英晶片的谐振频率、活力、杂波数等电参数。

### 3.1 石英晶片电参数

#### 1、石英晶片等效电路

在石英晶片（石英晶体材料切割下来并研磨成片状）上加上电场时晶片就产生机械变形，对石英晶片施加作用力则在相应的方向上产生电场，这就是所谓的石英晶体压电效应<sup>[6]</sup>。如果在晶片上加上交变电场，晶片就产生机械振动，若外加交变电场的频率与晶片的固有频率相同时，产生的机械变形最大，这种现象称为压电谐振现象<sup>[7]</sup>。晶片的机械振动通过压电效应与电气系统相耦合组成振荡电路，其效果相当于由电感、电容和电阻构成的谐振电路，该谐振电路具有很高的频率稳定性。

石英晶片等效电路如图 3-1 所示， $L_1$  为晶片的动态电感， $C_1$  为晶片的动态电容， $R_1$  为晶片的谐振电阻， $C_0$  为晶片的静态电容。

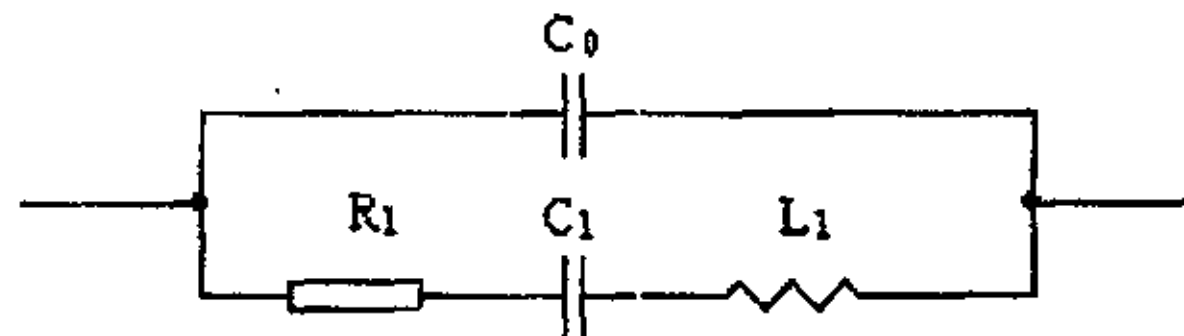


图 3-1 石英晶片等效电路

#### 2、石英晶片电参数

**谐振频率：**当外加激励频率使得石英晶片阻抗最小，呈纯阻性。这时石英晶片处于谐振状态，此时测得的频率即是石英晶片的谐振频率。

**活力：**它是石英晶片在特定激励下响应的电压值，这个值是通过 A/D 转换所得到。它实际上是个相对值，它是对石英晶片谐振电阻的定性描述。当这个值越大时，表示晶体的等效（动态）电阻越小，同时石英晶体两端的压降就越小，网络的输出电流值就越大。

**寄生频率范围：**即谐振频率附近正负 10% 的范围。

**杂波数：**在寄生频率范围内除了谐振频率外另外还出现其它的谐振点，且该

点产生的波形即是一个杂波，通过计算杂波的数量得到杂波数。

### 3.2 石英晶片电参数测量方法及基本原理

#### 3.2.1 基本测量方法的选择

石英晶片的测量方法主要由阻抗计法、 $\pi$  网络传输法和零相位法、振荡器法等，其中  $\pi$  网络法测量石英晶片电参数和谐振频率是国际电工委员会推荐的标准方法，也是我国石英晶片电参数测量的电子行业标准， $\pi$  网络传输法在国内同行业中属于领先水平<sup>[8]</sup>。采用振荡器法和阻抗计法的主要缺点是测试的谐振频率低（一般在 30MHz 以下）， $\pi$  网络法能检测的范围达到 60MHz，同时还能检测出被测石英晶片的寄生频率范围，从而克服了振荡器法和阻抗计法不能测出石英晶片的寄生频率范围的不足。

石英晶体电参数检测设备用来测量晶体的谐振频率  $F_r$ 、谐振电阻  $R_r$ 、动态电容  $C_1$ 、动态电感  $L_1$ 、并联（静态）电容  $C_0$  等参数。阻抗法的特点是设备简单，操作方便，测量精度一般能满足要求，适于生产上使用。 $\pi$  网络传输法和零相位法测量精度较高，国际上规定为石英晶体参数测量的标准方法<sup>[9]</sup>，它们需要高稳定度的频率合成器，高灵敏度的指示器与相位计，而且测试网络设计和制造要求很严格，操作也不太方便，故只适于试验研究和作为标准仪器使用。现将主要方法介绍如下：

#### 1. $\pi$ 型网络传输法

该方法是国际电工协会推荐的标准方法<sup>[8]</sup>，测量电路如图 3-2 所示。它由频率合成器、 $\pi$  型网络和检测仪器三部分组成。

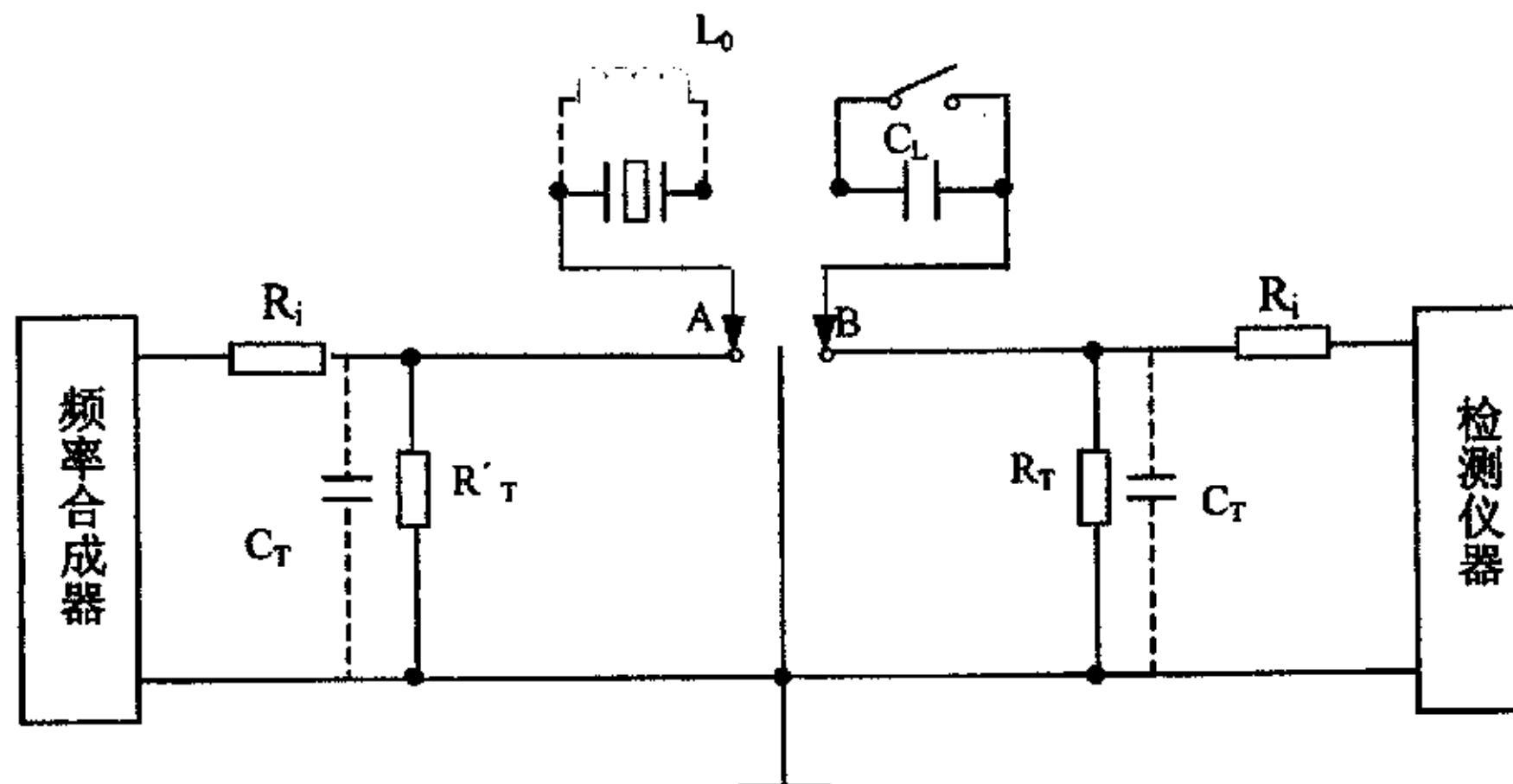


图 3-2  $\pi$  型传输法测量线路

晶体接在 $\pi$ 型网络串臂支路中,测量串接 $C_L$ (负载电容)和不接 $C_L$ 时的最大传输频率,以此获得负载谐振频率 $F_L$ 和串联谐振频率 $F_r$ ,并可计算出动态电容 $C_i$ 和动态电感 $L_i$ ,以及谐振电阻。当改变信号发生器的频率时,被测晶片的阻抗随着频率的变化而变化,因而通过晶片的传输电流也随之变化,当被测晶片的导纳达到最大(阻抗最小)时,通过晶片的传输电流也达到最大,这时检测电压也达到最大。为了保证测量精度,要求输出电压变化小于1%,正弦波10%,谐波低于主信号30dB以上,输出功率要满足石英晶体激励电平的要求。

对于 $\pi$ 型网络,要求分布电抗 $X_r$ ( $X_r=1/\omega C_r$ )应大于并联电阻 $R_r$ ;石英晶体插座之间的分布电容 $C_{AB}$ 应远小于静态电容 $C_0$ ,其电抗应远大于动态电阻 $R_r$ 。该方法测频精度可以达到 $2 \times 10^{-7}$ ,电阻测量误差为 $\pm 10\%$ (0~100 $\Omega$ )。

## 2. $\pi$ 型网络—零相位法

该方法就是在 $\pi$ 型网络中采用零相位技术测量1~300MHz频率范围内石英晶体的谐振频率、谐振电阻和其它等效参数,也可认为是传输法的一种。根据晶体的不同型号,频率测量精度可达 $1 \times 10^{-8}$ ~ $5 \times 10^{-8}$ ;根据电压测量精度,谐振电阻的测量精度为 $\pm 5\%$ <sup>[9]</sup>。

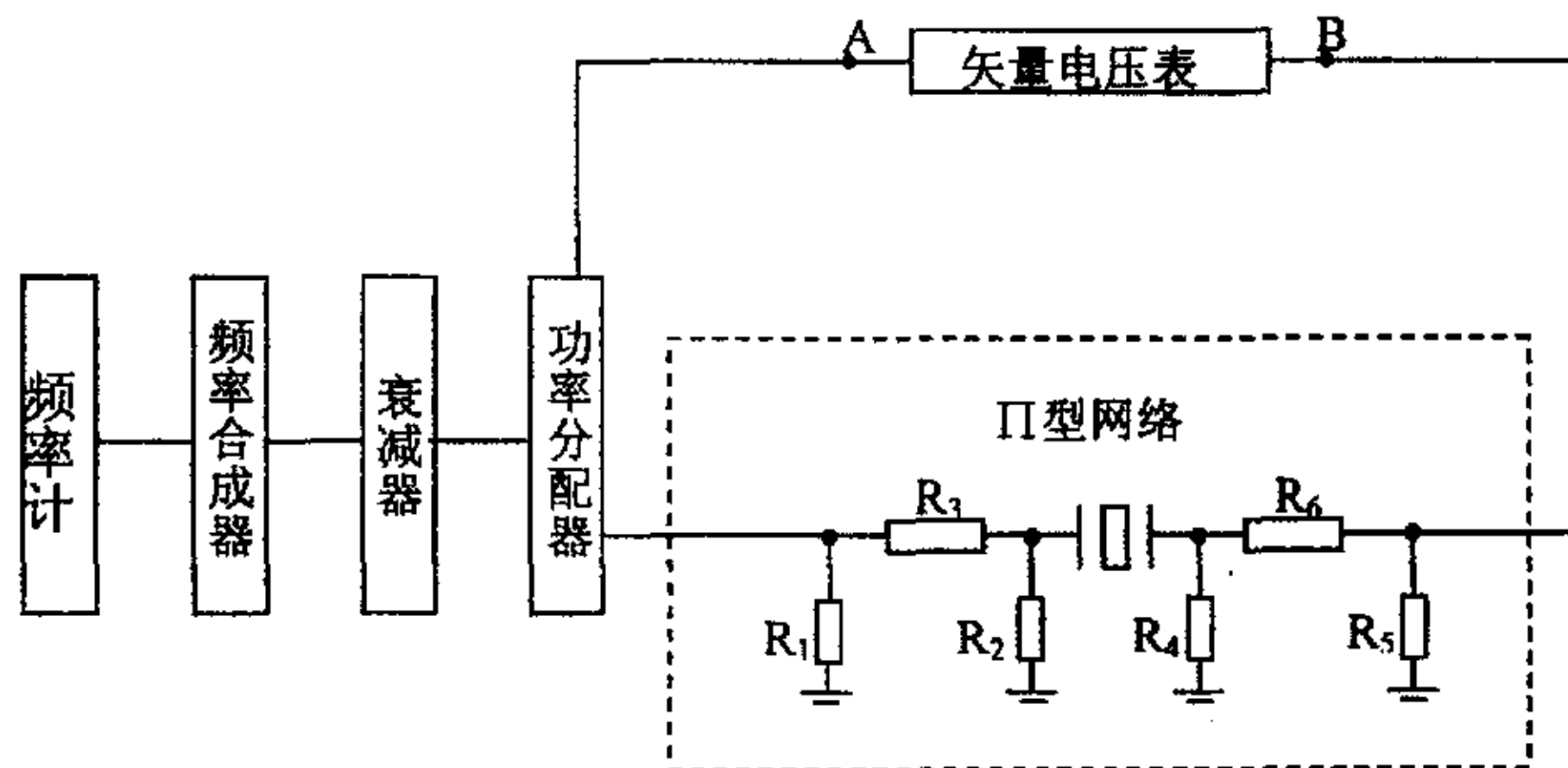


图 3-3  $\pi$ 型网络零相位测试系统

图 3-3 给出了 $\pi$ 型网络零相位测试系统示意图。由于 $\pi$ 型网络的输入电阻是50欧姆,所以A处和B处的电压和相位是相等的,矢量电压表实际测量的是 $\Pi$ 型网络两端的相位差。当在某一频率时(接近被测晶体的频率),使晶体插脚两端短路,此时网络就是一个电阻衰减器,调节矢量电压表,使输入和输入端相位为零。然后插入晶体,矢量电压表产生相移,再调整信号源频率使相位指示再次为零,此时信号源的频率就是石英晶片的谐振频率,谐振电阻可以通过所测的电压计算得到。

IEC 规定的标准  $\pi$  型网络如图 3-3 所示, 其中  $R_1=R_5=159\Omega$ ,  $R_2=R_4=14.2\Omega$ ,  $R_3=R_6=66.2\Omega$ 。对讯号源的要求是: 讯号源频率稳定性和分辨率应优于  $1 \times 10^{-7}$ , 当测量高 Q 值晶体时, 其相位抖动应小于 0.2 度。

目前这种方法被广泛用作晶体测量的标准方法, 受到国际承认的标准仪器有美国 Sanders 公司的 250AII 型网络测试仪; HP E5100 网络测试仪等。

### 3. 阻抗计法

阻抗计法是以“ $\pi$  型网络”作为反馈电路的振荡器, 原理图如图 3-4 所示。石英晶体谐振器接在  $\pi$  型网络的串联臂中, 当调谐放大器 LC 回路调谐到被测晶体的串联谐振频率时, 晶体可以认为是一个纯电阻, 振荡器反馈最强, 此时晶体的两端的阻抗最小, 振荡电路的频率为晶体的谐振频率。

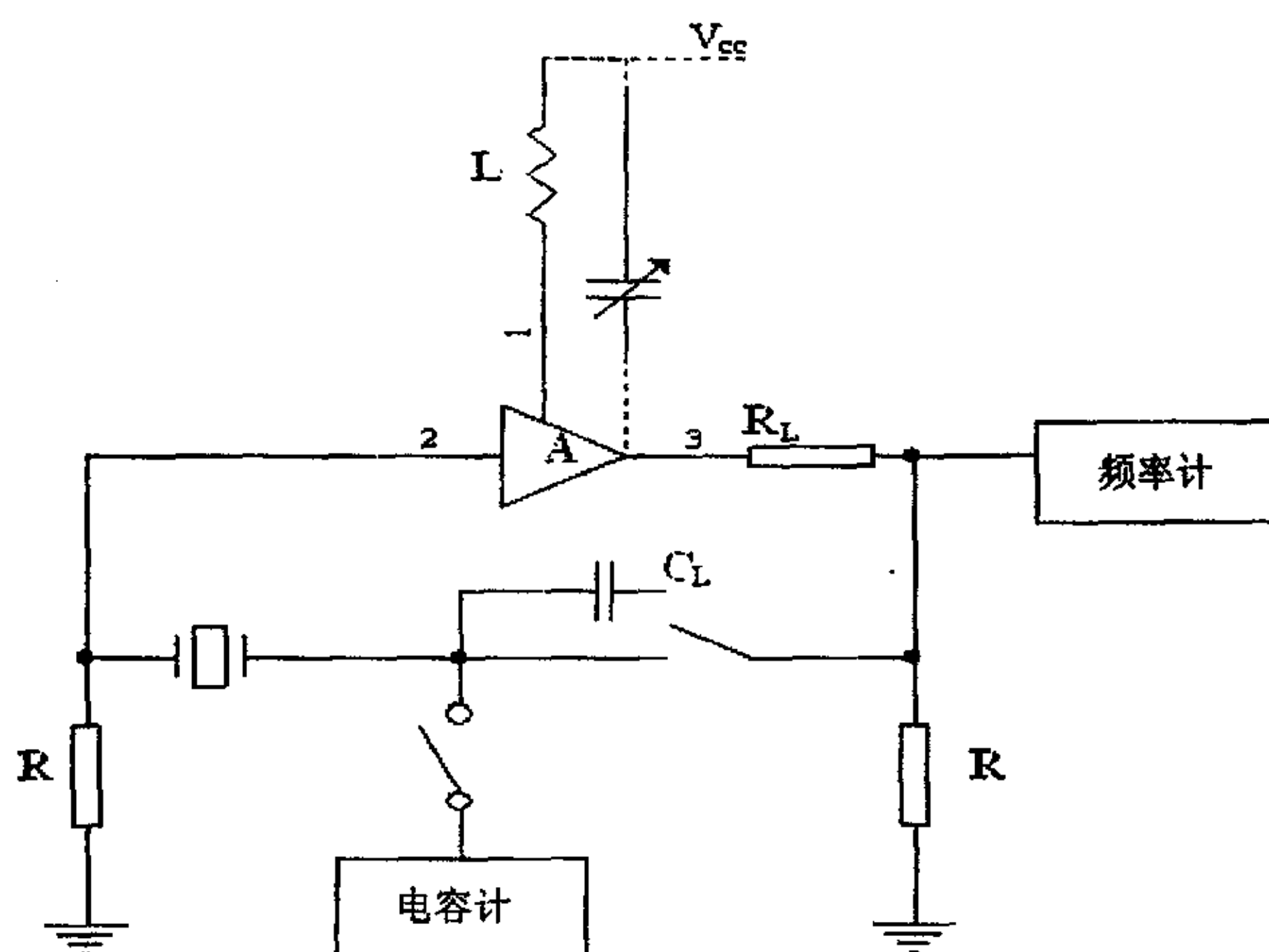


图 3-4 阻抗计法测频原理电路

目前阻抗计法测量的主要仪器有美国 Sanders 公司的 150D, 测频范围 1~60MHz, 精度  $\pm 2\text{ppm}$ <sup>[10][11]</sup>。

### 4、系统测量方法选择

由上面对  $\pi$  型网络传输法、 $\pi$  型网络一零相位法和阻抗计法的比较<sup>[12][13]</sup>我们可以看出,  $\pi$  型网络一零相位法测量相对准确但对测量器件的要求比较高, 测量过程相对复杂, 而阻抗法虽然容易实现但精度较之前两种方式偏低。但用  $\pi$  型网

络传输法所需要的高精度和高稳定性的信号源能得到满足,随着计算机运算速度的提高使得单次测量所需时间不断减少,从而解决了上述方法所带来的效率低下、性价比不高的问题。本系统的设计中采用了  $\pi$  型网络传输法。

### 3.2.2 $\pi$ 网络传输法的原理

通过分析石英晶片的等效电路,可知石英晶片有一固有的谐振频率(串联谐振频率),当外加激励频率等于该谐振频率时,石英晶片阻抗最小,呈纯阻性。当石英晶片处于谐振状态时, $\pi$  网络为一个纯电阻网络, $\pi$  网络两端的电压信号相位差为零,压降最小,从而将对石英晶片电参数的测量简化为对  $\pi$  网络的阻抗进行测量, $\pi$  网络法测量石英晶片电参数原理如图 3-5 所示。

频率合成器(信号发生器)<sup>[4]</sup>作为信号源,输出连续频率正弦波扫描信号。在输出端 B 检测其经过石英晶片后的电压信号,比较 A 点和 B 点的电位差,当 AB 两点的电位差最小时,石英晶片处于谐振状态。此时信号发生器输出的频率就是石英晶片的谐振频率,输出端 B 点的电位  $V_B$  与信号源的输出频率  $f$  的关系

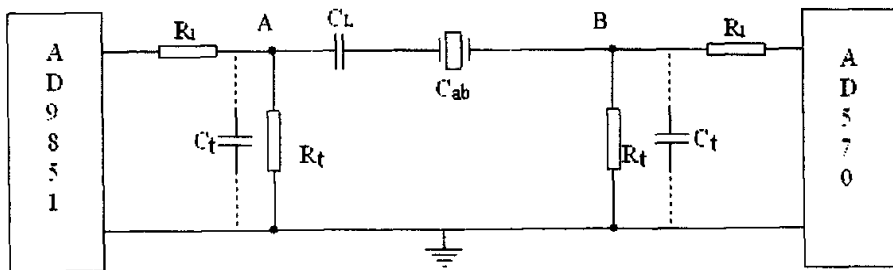


图 3-5  $\pi$  网络最大传输法测试石英晶片电参数

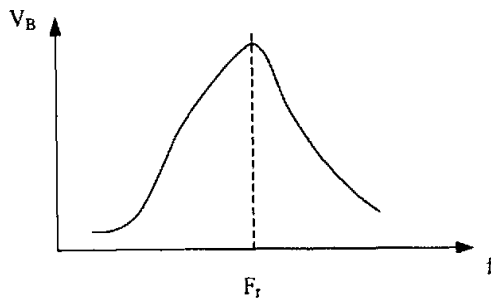


图 3-6  $\pi$  网络输出端电压频率特性

曲线如图 3-6 所示。信号源的幅度在频率扫描时恒定不变;在谐振频率点  $F_r$  处, $\pi$  网络输出端  $V_B$  值越大,表明石英晶片的谐振电阻越小,活力越大,石英晶片



越易起振。

### 3.3 基于 ISA 总线接口的 $\pi$ 网络法石英晶片测量系统设计

#### 3.3.1 石英晶片定位与测量

光纤感测器在整个测量系统中起定位作用,系统通过它感知晶片是否通过测头。系统采用 12 位精度的光纤传感器,完全能够保证晶片的准确定位,保证不跑片、不漏片<sup>[18][19]</sup>。

光纤感测器由放大器和光纤探头组成,放大器固定在打印机底部的桌面上,光纤探头固定在下测量板的小孔中,并与之平齐,用于识别晶片并使晶片停留在测量板中心部位。每个上测量板都有小孔与下测量板的小孔对应,起透光作用。在安装测量板时,光纤放大器的指示灯红灯不亮,表示上下测量板的小孔已对齐,光纤感测器的设置应在上下测量板的小孔已对齐以后进行,光纤放大器红灯不亮,表示光纤探头没有被测物遮挡,红灯亮,表示光纤探头有被测物遮挡。

测量部分如图 3-7,由上测量板、下测量板、光纤感测器、测量盒组成。其中下测量板镶嵌在直线料道上,并与直线料道表面平齐。

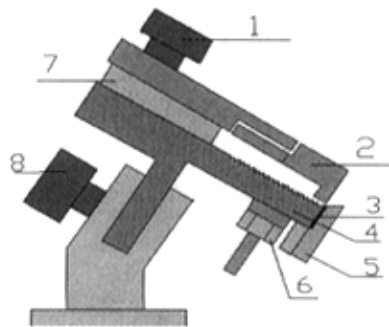


图 3-7 测量部分示意图

- |             |             |
|-------------|-------------|
| 1. 上测量板固定螺丝 | 5. 滑板       |
| 2. 上测量板     | 6. 下测量板固定螺母 |
| 3. 挡片       | 7. 垫片       |
| 4. 下测量板     | 8. 直线料道固定螺丝 |

该定位方式与测量机构自动测量、分选机高速自动运转相适应,当光纤感测器红灯亮时,测头已感知晶片到来,向控制盒单片机发信号,这时上位主机接到信号,分别向测量盒和控制盒放出测量与分选控制信号。测量盒单片机使用直接

数字频率合成器 (DDS) 生成期望的频率扫描信号并激励  $\pi$  网络的方法, 从而获得石英晶片谐振频率、活力、寄生频率、杂波数等参数的测量。

### 3.3.2 测量系统的结构

基于 ISA 总线接口的  $\pi$  网络法石英晶片测量系统主要由 ISA 总线、单片机系统、 $\pi$  网络、高速比较器、电压检测和转换电路组成。其系统框图如图 3-8 所示。

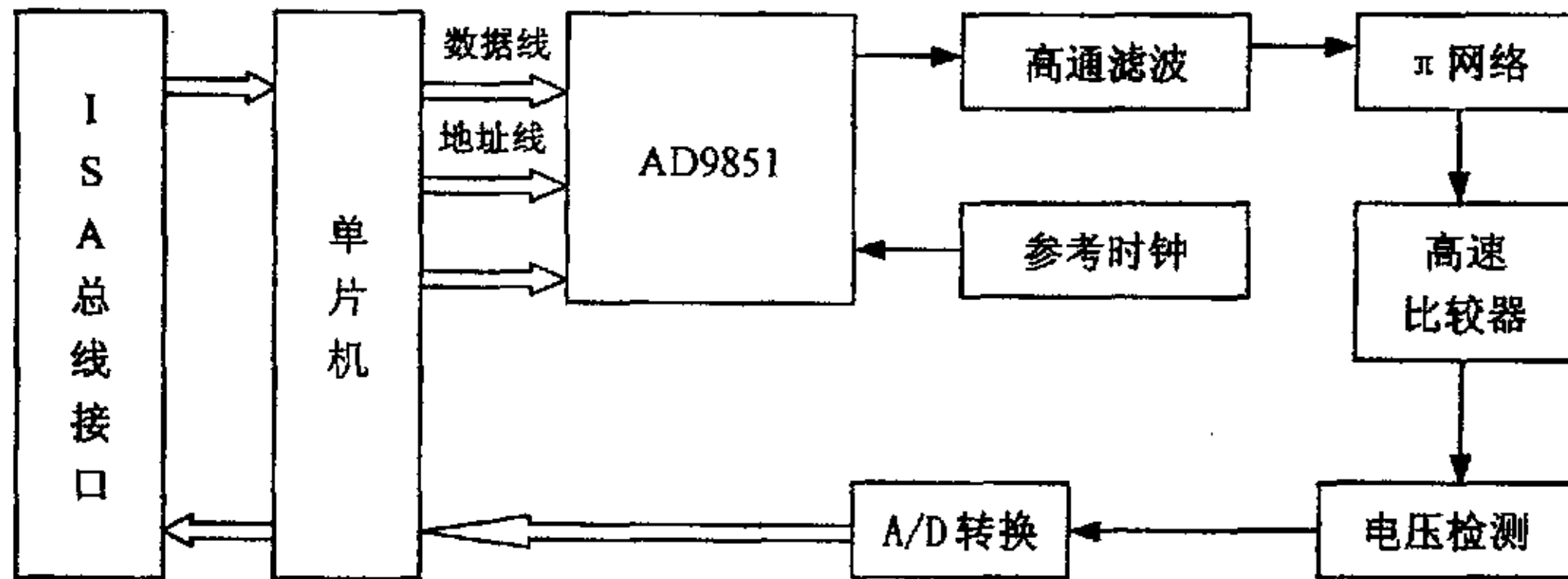


图 3-8 石英晶片测量系统框图

单片机 (AT89C52) 控制频率合成器 (AD9851) 合成输出频率扫描信号并激励  $\pi$  网络, 经过高速比较器 (AD96685) 进行有效值检测, 电压检测单元将检测到的网络输出端的交流信号转化成对应的直流信号, 此直流信号经 A/D 转换后输入单片机, 由单片机判断  $\pi$  网络输出电压是否达到最大值 (即石英晶片两端的压降是否最低), 从而判断石英晶片是否处于谐振状态, 当判断出石英晶片谐振时, 通过系统界面显示其谐振频率。

#### 1、ISA 总线 8 位 I/O 接口方式

ISA 总线是在 IBM PC 总线的基础上发展起来的, IBM 公司在 PC 总线的基础上增加了一个 36 引脚的 AT 扩展槽而形成 AT 总线<sup>[17]</sup>。在 IBM PC/AT 及其兼容机的机箱中, 通常在母板上分别设置几个 AT 插槽和 PC 插槽, 这种结构成为 IBM 公司的 ISA 结构。这种 IBM PC/AT 总线称为 ISA 总线。

ISA 总线是 8 位和 8/16 位兼容的总线, 16 位总线最大传输速率为 2M byte/s, 8 位总线最大传输速率为 1 M byte/s。在总线选择上, PCI 总线比 ISA 总线速度快很多, 但不能缩短整个传输过程时间, 因为下位机采用单片机 AT89C52 来控制接口电路与上位主机计算机通信, 接口电路与计算机之间的通信速度是由单片机的运行速度决定的, 即使提高总线的速度也不会使上下位机的通信速度得到很大

的提高, 根据性能价格权衡, 因此选择 8 位 62 引脚的 ISA 总线<sup>[20]</sup>。

## 2、频率合成器 AD9851 的工作原理

### (1) 频率合成器的选择

频率合成是指对一个高精度、高稳定度的标准信号频率, 经过一系列算术运算, 产生有相同稳定性和精度的大量离散频率的技术。频率合成器(信号发生器)是用来生成期望的频率扫描信号并激励  $\pi$  网络, 因此要求其输出的频率信号分辨率高、转换速度快、频率范围宽及信号纯度高。

频率合成器有多种方法实现, 其中 DDS(直接数字合成)技术与传统频率合成技术相比, 后者通常由多个石英晶体振荡器产生各种频率并通过开关进行频率混合, 其输出的频率信号质量较差, 前者具有频率切换速度快、分辨率高、频率和相位易于控制等优点。在本系统设计中使用了 AD 公司生产的集成直接数字合成器 AD9851<sup>[15]</sup>。

### (2) AD9851 工作原理及使用

AD9851 是 AD 公司采用先进 DDS 技术<sup>[16]</sup>, 推出的具有高集成度 DDS 电路的器件, 它内部包含高速、高性能 D/A 转换器及高速比较器, 可作为全数字编程控制的频率合成器和时钟发生器。外接精密时钟源时, AD9851 可以产生一个频谱纯净、频率和相位都可以编程控制且稳定性很好的模拟正弦波, 这个正弦波能够直接作为基准信号源, 或通过其内部高速比较器转换成方波输出, 作为灵敏时钟产生器。AD9851 接口简单, 可用 8 位并行口或串行口直接输入频率、相位控制数据, 而且它内含 6 倍于参考时钟倍频器, 可避免对外部高速参考时钟振荡器的需要, 减小了由于外部频率源过高而可能产生的相位噪声。AD9851 频率分辨率高, 其高速 DDS 内核可接受 32 位频率控制字和 5 位相位控制字, 使得它在 180 MHz 系统时钟下输出频率的精度可达 0.04 Hz 且输出相位可调。因此使用 AD9851 芯片作为  $\pi$  网络法测量系统的频率合成器非常合适。测量系统采用并行装入方式, 通过 8 位数据总线将数据装入寄存器。在频率更新信号的上升沿将控制字从缓冲寄存器装入到控制寄存器, 更新输出频率和相位, 同时把地址指针复位到第一个输入寄存器。接着在写时钟信号上升沿装入 8 位数据, 并把指针指向下一个输入寄存器, 连续 5 个写时钟信号上升沿后, 写时钟信号的边沿就不再起作用, 直到复位信号把地址指针复位到第一个寄存器。

## 3、电压检测及 A/D 转换

由  $\pi$  网络传输法可知, 当信号源输出的扫描频率与石英晶片的谐振频率一致时,  $\pi$  网络两端的压降最小,  $\pi$  网络输出端的电压最高。而扫描频率信号连续激励  $\pi$  网络, 因此, 系统需要具有很高的检测速度和分辨率的电压检测单元和 A/D 转换单元。

$\pi$  网络输出端的电压是与信号源同频的正弦信号, 采用峰值检测将  $\pi$  网络输出端的交流信号转换成对应的直流电压信号, 通过 A/D 转换电路送单片机 (AT89C52) 判断。当输出端的电压达到最大值时记下对应的输出频率即石英晶片的谐振频率。A/D 转换电路必须实时跟踪  $\pi$  网络输出端的电压变化, 以便单片机及时判断该石英晶片是否处于谐振状态。由扫描频率范围内的 A/D 转换结果还可得晶片相对活力和杂波等电参数。

### 3.4 小结

晶片测量系统是是分选系统的前提和关键依据。本章所介绍的石英晶体等效模型以及基本电参数的测量方法是研究测量系统的理论基础。从各种电参数测量原理的分析和比较中, 把测量精度较高的  $\pi$  型网络传输法作为本系统的测量方法, 并对系统提供部分参数进行了定义。该方法是系统设计的关键。

## 第四章 石英晶片分选系统

石英晶片分选系统由上料机构、分选机构及下料机构组成。晶片被置于振动料斗中，圆振与直振作为上料机构将晶片自动排序依次沿着圆振内径螺旋式向上移动，然后进入直线料道，经过直振（直线料道）末端上下测量板之间时由光纤感测器进行定位，然后测量。经检测后的石英晶片落入到接料盘，由单片机发送脉冲控制步进电动机来驱动接料盘和分料器连续旋转，驱动分料器转到对应档料盒上方，这就是分选机构。下料机构即是由单片机控制电磁铁吸合实现自动落料，即分料盒的档片与电磁铁吸合，分料盒下端开启，石英晶片滑落到该档料盒中。

### 4.1 石英晶片分选系统过程分析

#### 1、上料机构

上料机构如图 4-1 所示，振动料斗由圆振和直线料道组成。在圆振上，挡片可调，用途是只允许单片晶片通过，有碎片出口避免了待侧位置出现卡料现象，确保了水平送料的平稳和准确。直线料道由下测量板、滑板、挡片、高度调整板、挡板微调螺钉组成，其作用是保证晶片单片行进至测头下面<sup>[21]-[24]</sup>。

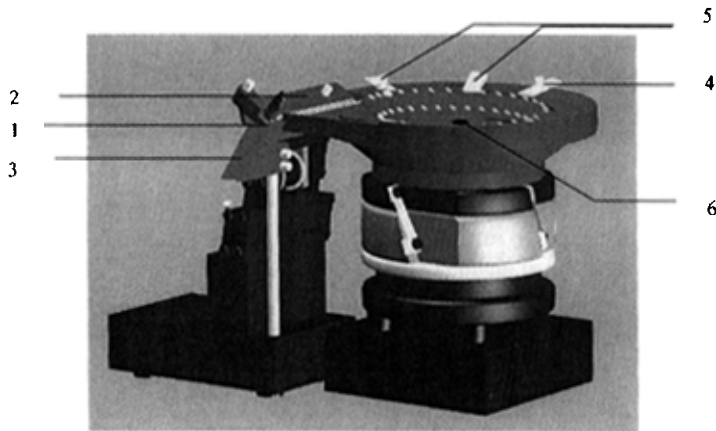


图 4-1 上料机构示意图

1 测量板 2 直振 3 挡片 4 高度调整板 5 挡板微调螺钉 6 圆振

通过控制盒的按钮可调节振动的频率和幅度。从而调节晶片移动速度。对于不同晶片通过调节微调螺钉、垫片以及振动频率来达到相同的传送速度。



## 2、分选机构

分选机构由单片机控制步进电动机及其驱动器来实现。分档是依据所测晶片的谐振频率减去标称值(中心频率)所得结果乘 10000 (为了避免小数点运算复杂的缺点), 超过料盒设定范围及活力小(差)杂波数多的晶片均归为不合格档, 其余按所得结果与各档号盒范围进行比较, 如图 4-2 所示。通过比较, 计算机判断出被分选晶片所属的档号, 并把该档计数单元加 1, 然后输出控制脉冲, 步进电动机驱动分料器转到相应档料盒上方。

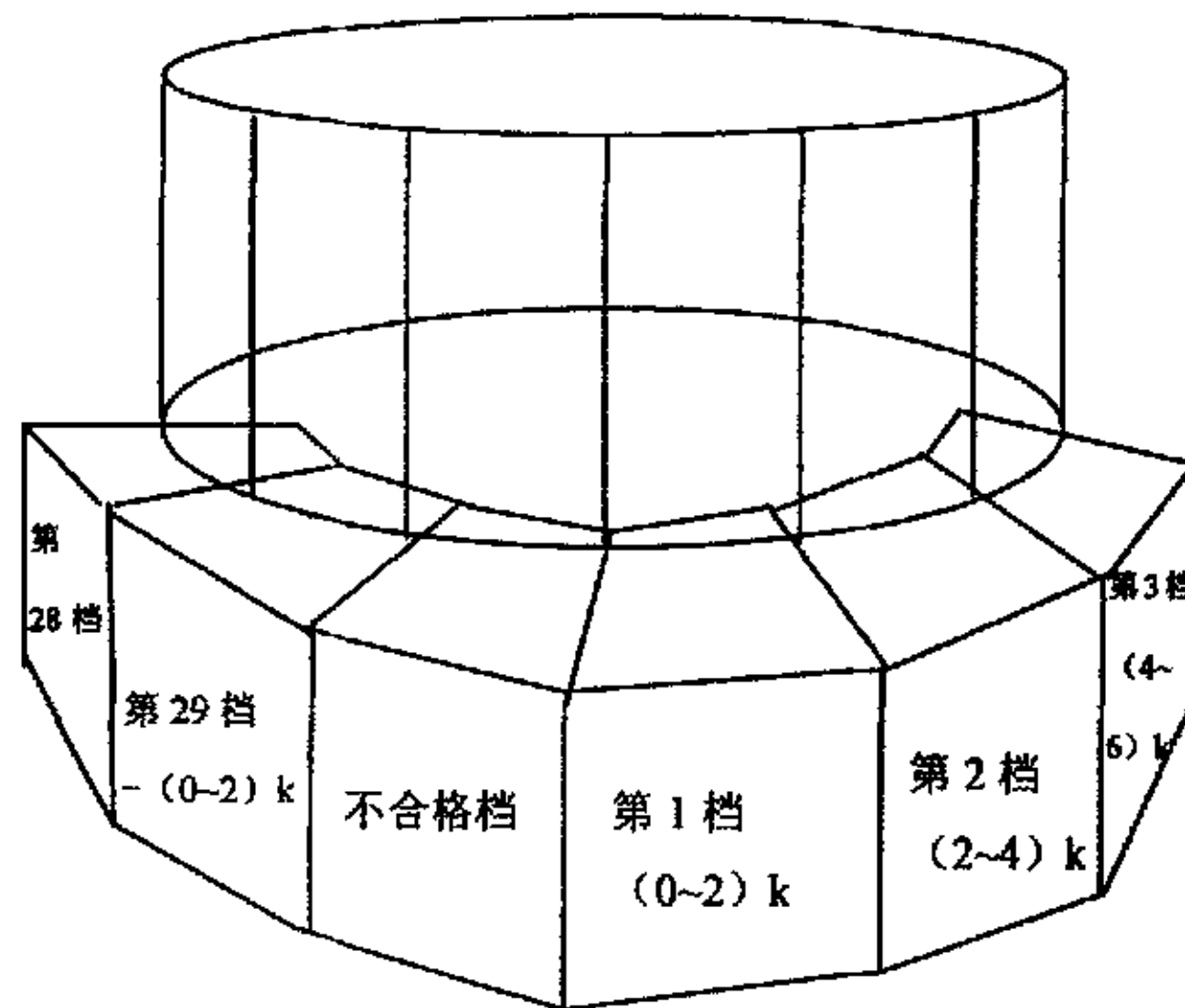


图 4-2 分选传动示意图

## 3、下料机构

下料机构是由单片机控制电磁铁与分料盒的档片吸合实现自动落料。当分料盒转到某料盒上方下料时, 分料盒的档片受到电磁铁的吸引, 分料盒下端开启, 分料盒中的晶片自动滑落到料盒中, 然后电磁铁失电, 分料器的档片回到原位。

## 4. 2 石英晶片分选系统的设计

### 4. 2. 1 上料机构—圆振与直振电机的控制

#### 1、控制原理

首先采用 MOSFET 管(场效应管)作为功率驱动器件, 用 50 伏单极性 PWM(脉宽调制)来控制圆振和直振的振动幅度和频率。PWM 驱动装置是利用大功率晶体管的开关作用, 将恒定的直流电源电压转换成一定频率的方波电压, 加在圆振或直振电磁线圈上, 通过对方波脉冲宽度的控制, 改变输出平均电压。

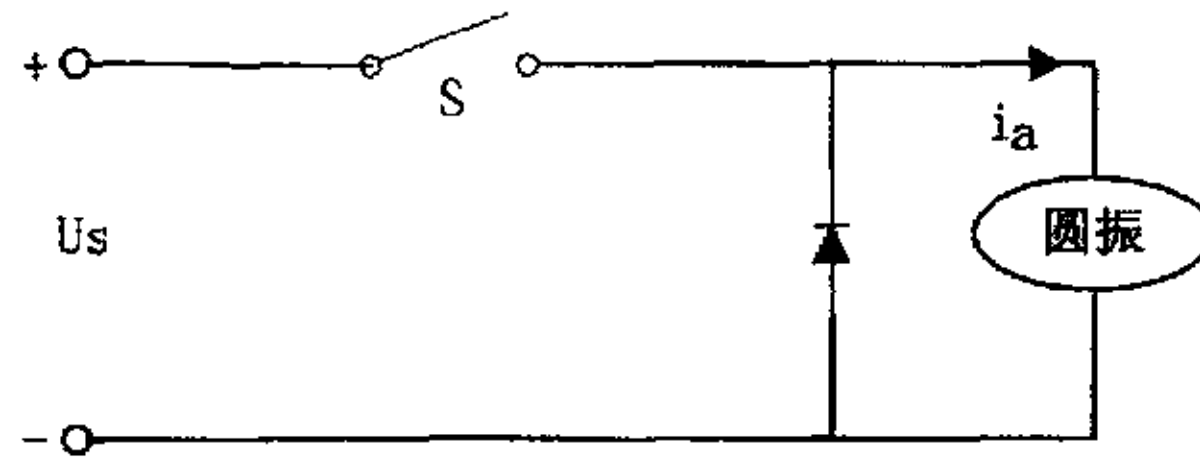


图 4-3 PWM 控制原理图

图 4-3 所示是 PWM 控制原理图。可控开关 S 以一定的时间间隔重复地接通和断开。当 S 接通时，供电电源  $U_s$  通过开关 S 施加到圆振或直振上，电源提供能量，圆振或直振储能；当开关 S 断开，则中断了供电电源  $U_s$  向圆振或直振提供能量。在 S 接通期间圆振或直振所存储的能量将通过续流二极管，圆振或直振电流继续流通。于是在圆振或直振两端得到的电压波形如图 4-4 所示，电压的平均

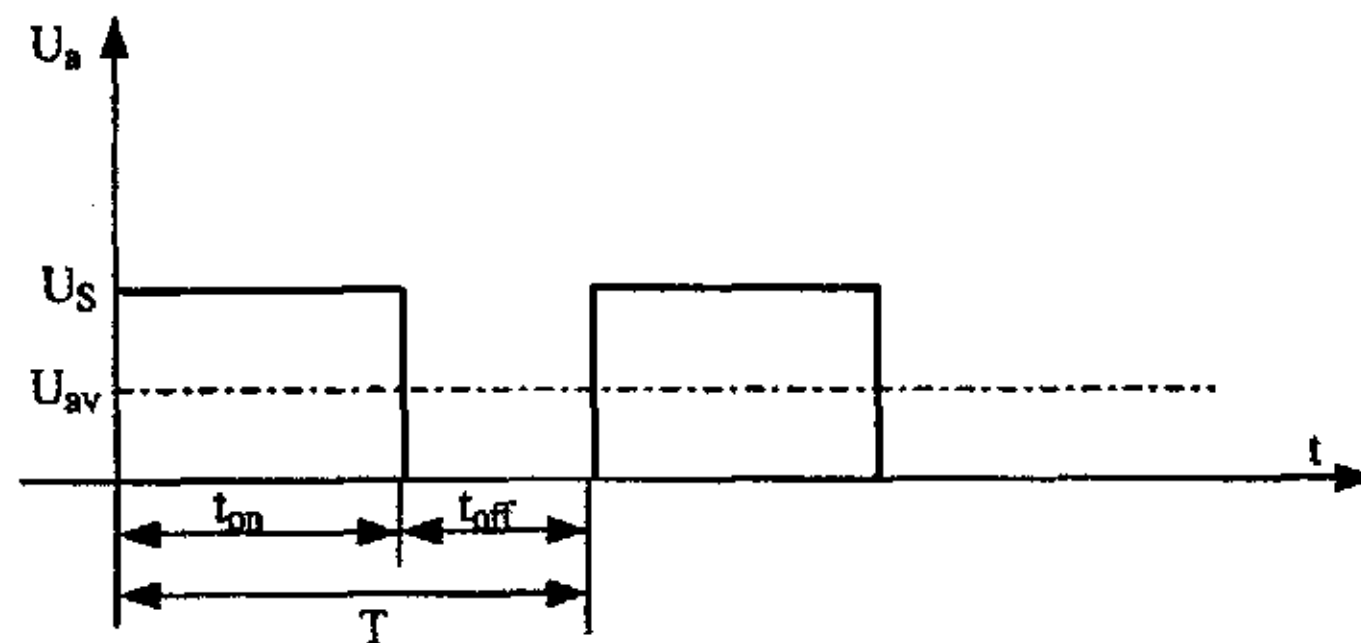


图 4-4 电压波形图

值为：

$$U_{av} = \frac{t_{on}}{T} U_s = \alpha U_s \quad (4-1)$$

式中  $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$  表示占空比。由式 4-1 可见，改变开关接通时间  $t_{on}$  和开关周期  $T$  的比例，即改变了脉冲的占空比  $\alpha$ ，圆振电磁线圈两端电压的平均值也随之改变，振动幅值随即发生变化。

## 2、硬件实现

### (1) PWM 波形发生器集成电路

SG3524 是应用极为广泛的一种 PWM 波形发生器集成电路，可直接驱动中小型功率 MOSFET 管，它的内部结构和工作原理如图 4-5 所示。从图中可见，该单片集成电路包含了开关电源几乎全部的控制电路，内含电压基准源  $V_{REF}$ 、误差放大器 (Error Amplifier)、可外设频率的振荡器 (Oscillator)、脉宽调制比较

器 (Comparator)、触发器 T、两个输出晶体管、故障保护比较器 (CURR LIM) 和输出关断电路等。它的工作机理是：当关断信号为低电平，且故障保护比较器输出为高电平时，送到 PWM 比较器同相端的、由  $R_1C_1$  所决定频率的三角波与误差放大器输出（或引脚 9 直接输入）的电平信号进行比较，形成 PWM 脉冲波，该脉

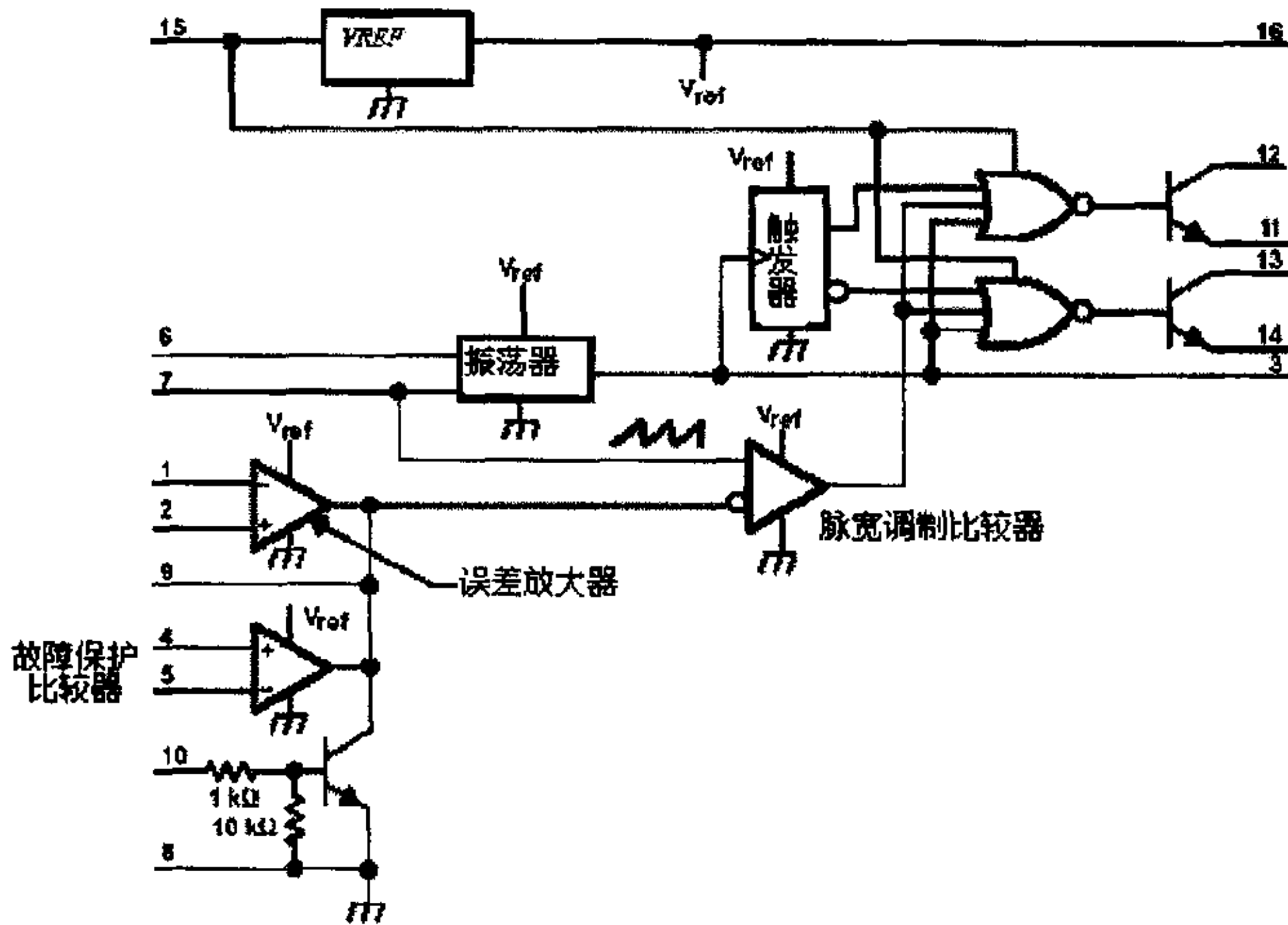


图 4-5 SG3524 内部结构和工作原理

冲波在触发器输出的相位互差  $180^\circ$  的方波信号控制下，周期性的加在输出晶体管的基极上，经功率放大后输出，当 SG3524 工作于推挽输出方式时，两输出晶体管输出相位互差  $180^\circ$  的两路脉冲，频率为振荡频率  $f_0$  的  $1/2$ ，占空比随误差放大器输出（或引脚 9 直接给定）的电平不同可在  $0\sim 45\%$  之间变化，当 SG3524 工作于单端输出模式时，两输出晶体管并联后接地，在  $V_{cc}$  端 (15 引脚) 接一个电阻到用户供电电源，从  $V_{cc}$  端输出与  $f_0$  同频的 PWM 脉冲波，占空比变化范围为  $0\sim 99\%$ ，只要故障保护比较器、误差放大器或关断电路晶体管集电极有一个输出低电平，都可能使 SG3524 输出恒为低电平，从而实现故障保护和关断控制。

## (2) 电路实现

圆振与直振电磁线圈控制原理一样，如图 4-6 所示。采用这种电路结构简单，控制精度高，可靠性好。从图中可知，通过调节  $R_1$  的范围就可以调节脉冲的占空比，改变  $R_1$  和  $C_1$  可以调节脉冲周期； $I_+$ 、 $I_-$  为内部故障保护端，因为该电路工作时，只是发出 PWM 波形，故不需要该保护功能，所以将其屏蔽，按照电路工作典型原理图可将  $I_+$  通过电阻上拉电源， $I_-$  接地； $C_a$ 、 $C_b$  两路脉冲输出端，由于主

电路不工作在推挽输出时，所以  $C_a$ 、 $C_b$  通过一个电阻上拉接到电源； $E_a$ 、 $E_b$  为两路脉冲输出参考地端，由于电路工作在单端输出时，该两端相连作为 PWM 脉冲输出；LOCK 为保护端也可用作封锁端，LOCK=1 时，电路不输出波形，当需要圆振或直振工作时，LOCK=0，不需要工作时，LOCK=1。

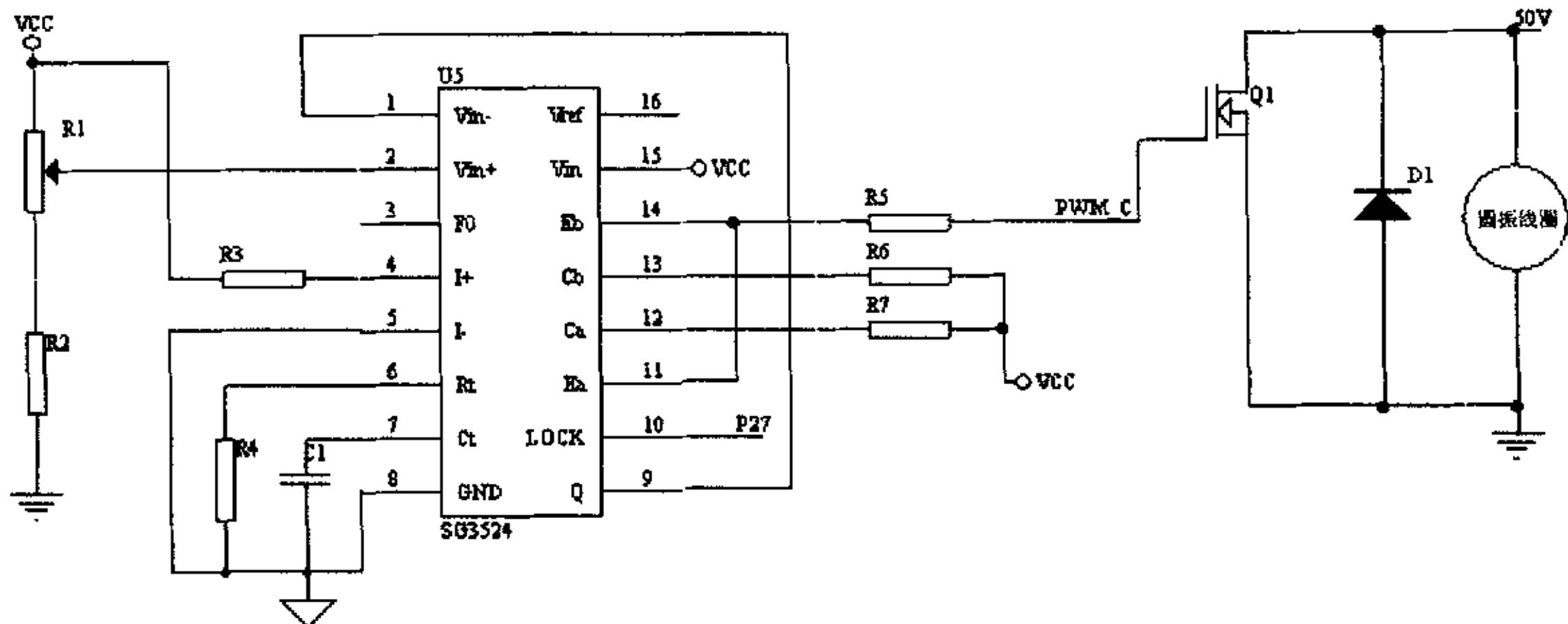


图 4-6 圆振控制电路

#### 4. 2. 2 分选机构—步进电动机及其驱动器的控制

##### 一、步进电动机的选用

步进电动机是一种把电脉冲信号变换成直线位移或角位移的执行元件。步进电动机的转子做成多极的，定子上嵌装有多相星形连接的控制绕组，有专用的驱动电源供给电脉冲，每输入一个电脉冲，步进电动机就转动一个角度或前进一步，所以也叫脉冲电动机<sup>[27]</sup>。

步进电动机按励磁方式可分为反应式、永磁式和混合式（感应子式）。反应式步进电动机（VR）结构简单，生产成本低，步距角小，但动态性能差；永磁式步进电动机（PM）出力大，动态性能好，但步距角大；混合式步进电动机（HB）综合了反应式、永磁式步进电动机两者的优点，它的步距角小，出力大，动态性能好，是目前性能最好的步进电动机。

根据本系统的需求选用了四相混合式步进电动机，它的定子铁心与反应式步进电动机相同，即分成若干个极，每个极上有小齿及控制绕组，定子控制绕组与永磁式步进电动机相同，也是两相集中绕组，每相为两对极，按 A-B-(-A)-(-B)-A... 次序轮流通以正负电脉冲（也可在同一相的极上绕上二套绕向相反的绕组，通以正脉冲），转子的结构与永久磁钢的电磁减速式同步电动机相同，两段转子铁心上也开有齿槽，其齿距与定子小齿齿距相同。

四相混合式步进电动机常见的通电方式有单四拍 (A-B-C-D-A)、双四拍

(AB-BC-CD-DA-AB-)及八拍(A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A-)。步进电动机每改变一次通电状态,转子就转过一个步距角,例如步距角为 $1.8^\circ$ 的混合式步进电动机,定子绕组按双四拍通电时,每改变一次通电状态,转子转过 $1.8^\circ$ ,当按八拍通电时,每改变一次通电状态,转子转过 $0.9^\circ$ 。

## 二、步进电动机分选精度及速度的控制

步进电动机分选精度及速度由步进电动机的启动频率、运行频率和控制脉冲来决定的。步进电动机分选精度及速度的控制就是控制分料器以最快的速度运行到该档晶片料盒上方的位置。对电机而言,就是从一个锁定位置,运行若干步数,尽快到达另一个锁定状态,即总步数要求符合晶片分选系统的要求,每走一步时间尽量短才能提高分选速度<sup>[25][26]</sup>。

步进电机的最高启动频率一般比最高运行频率低许多,如果直接按最高运行频率启动将产生丢步或根本不运行的情况,而对于正在快速运行的步进电机,当到达终点附近,立即停发脉冲让其立即锁定,也很难实现,由于旋转系统的惯性,会发生冲过终点的现象。在控制过程中,运行速度要有一个加速→恒速→减速→锁定的过程。对电动机的准确而快速定位就能提高步进电动机分选精度及速度。

电动机运行速度由控制脉冲频率确定,而旋转角度则由脉冲个数来决定。步进电动机的旋转角度正比于输入的脉冲数,对应于脉冲信号的数量。

CP 脉冲的控制按电动机转速度的要求,根据相应周期间隔发出。需电动机恒转速运行时,就发出恒定周期的脉冲串,当需要加减速运行时,就发出周期递减或递增的脉冲串,当需要锁定状态时,只要停止发脉冲串就可以了。为了简化硬件线路,降低成本,省去了脉冲发生器,用单片机来代替它的作用,通过对单片机编程来实现脉冲 CP 的控制。步进电动机转速的高低、升速或降速、启动或停止都取决于 CP 脉冲的有无或频率。

CP 脉冲的设计主要要求其要有一定的脉冲宽度(一般不小于 $5\mu\text{S}$ )、脉冲序列的均匀度以及高低电平方式(要求为负脉冲方式),如图 4-7 所示。电机换向时,一定要在电机降速停止后再换向。换向信号一定要在前一个方向的最后一个 CP 脉冲结束后以及下一个方向的第一个 CP 脉冲前发出。

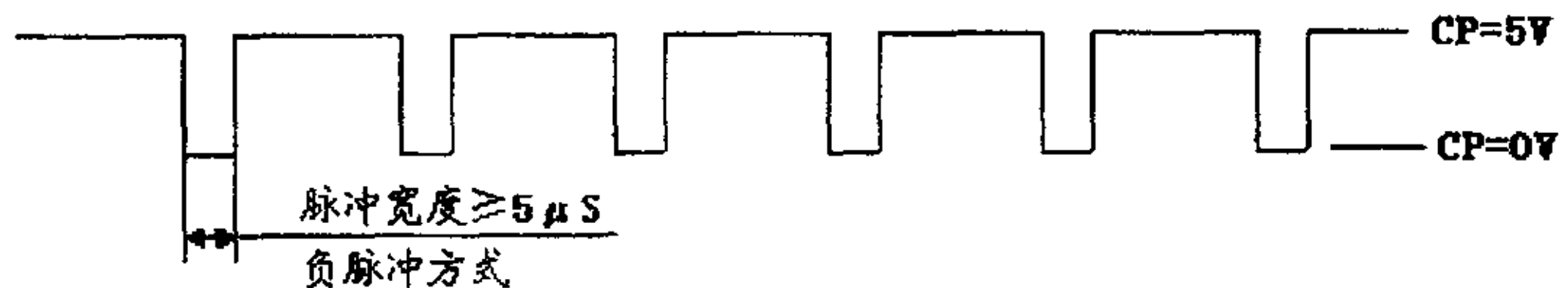


图 4-7 CP 的脉冲宽度及高低电平方式

### 1、步进电动机启动频率



起动频率又称突跳频率,是指步进电动机能够不失步起动的最高控制脉冲频率,是步进电动机一项重要指标。在一定的负载惯量下,起动频率随负载转矩变化的特性称为起动矩频特性,又称牵入特性。实际起动时,起动频率比连续运行频率低得多,因为电机刚起动时的转速为零,在起动过程中,电磁转矩除了克服负载阻转矩外,还要克服转子和负载的惯性矩,所以起动时的负载要比连续运行时重。如果起动时施加脉冲频率过高,则转子转速跟不上磁场转速,以致第一步完成的位置落后于平衡位置较远,造成以后各步转子转速增加不多,而定子磁场转速仍正比于脉冲频率而向前旋转,使转子与平衡位置的偏差越来越大,因转子位置落后到动稳定区以外而出现失步或振荡现象,电机不能起动。当电机带负载起动时,作用在电机转子上的加速转矩为电磁转矩与负载转矩之差,因而负载转矩越大,加速转矩越小,电机不易起动。只有脉冲频率较低时,使电机每一步长有较长的加速时间,逐渐升高脉冲频率,这时转子角加速度较小,惯性矩不大,电动机才能起动并逐渐升速。

## 2、步进电动机的运行频率

步进电动机起动后,当控制脉冲频率连续上升时能不失步的最高频率称为运行频率。当电机带着一定负载运行时,运行频率(或输入脉冲频率)与负载转矩大小有关,两者的关系称为运行矩频特性,又称牵出特性。矩频特性的一般情况是,在驱动脉冲频率较低时,电机的转矩较大,也比较稳定;当频率上升时,在矩频特性中转矩随频率上升是近似于线性下降的。

脉冲频率升高后,步进电动机的负载能力下降,主要是受定子绕组电感的影响。因为电感有延缓电流变化的作用,当某相绕组加上了电压,但绕组中的电流不会立即上升到规定的数值,而是按指数规律上升,同样当绕组断电时,绕组中的电流也不会立即下降到零,而是通过放电回路按指数规律下降。其波形如图 所示。

当输入脉冲频率比较低时,每相绕组通电和断电的周期  $T$  比较长,电流  $I$  的波形接近于理想的矩形波,如图 4-8(a)所示。通电时间内电流的平均值也比较大,当频率升高后,周期  $T$  缩短,如图 4-8(b)所示,电流  $I$  的波形就和理想的矩形波有了较大的差别。当频率进一步升高,周期  $T$  进一步缩短时,电流  $I$  的波形将接近于三角形波,幅值也降低,因而电流的平均值大大减小,如图 4-8 (c) 所示,电机产生的平均转矩大大降低,负载能力也就明显下降。

## 3、速度控制

速度的控制方法由两种——线性加速和指数加速。

## (1) 线性加减速

(a) 线性加速可用下式表示:

$$f = g + \beta t \quad (4-2)$$

式中  $g$ —低于起动频率  $f_0$  的某一速率; $\beta$ —加速度; $f$ —连续变化的步进频率;

脉冲定时为:

$$t_1=0, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots$$

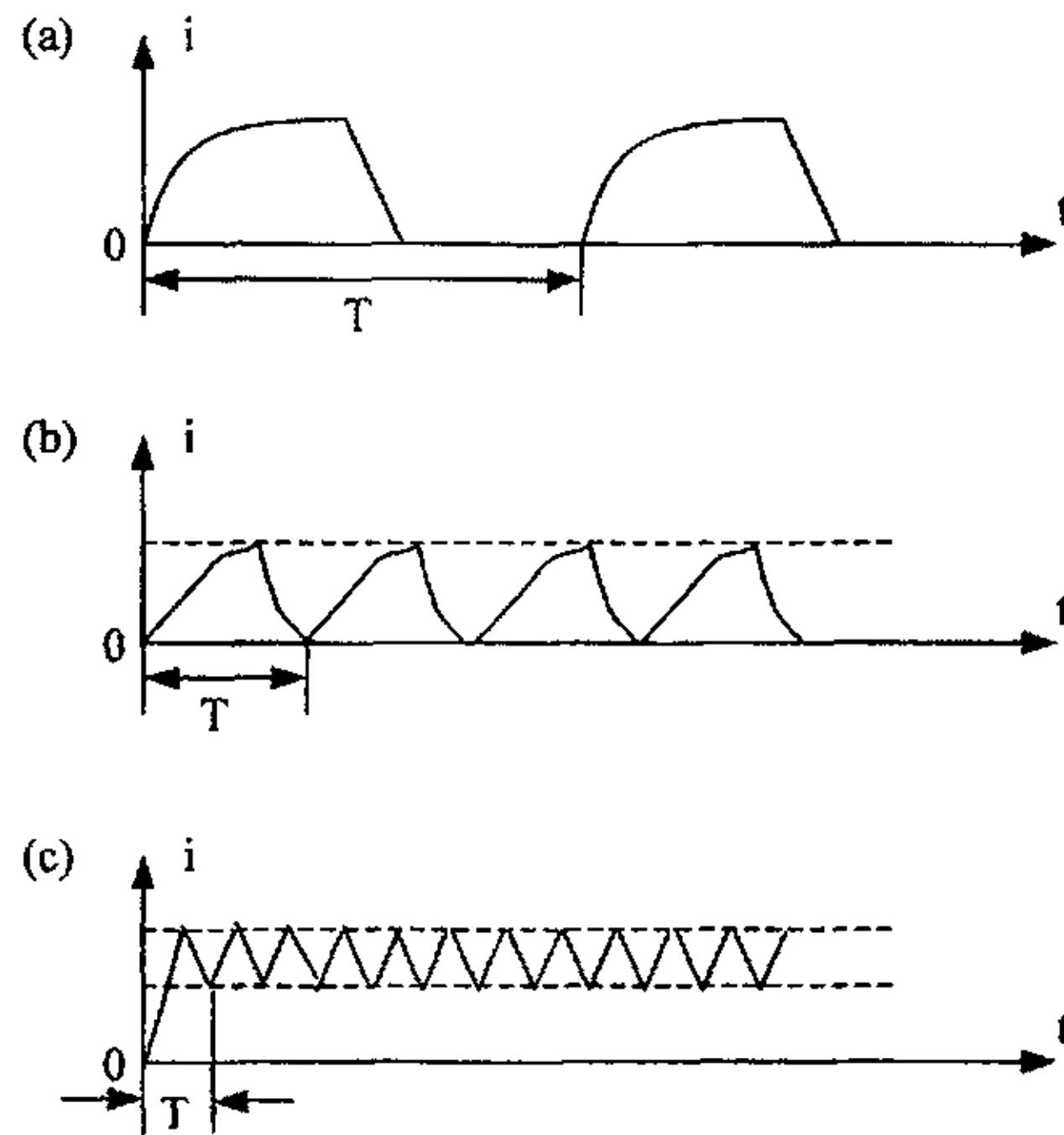
从第  $m$  个脉冲到第  $m+1$  个脉冲的每个时间间隔里, 旋转的角度等于一个步矩角,

图 4-8 不同频率时的电流波形

因此每个小梯形的面积都等于一个脉冲。设脉冲时间间隔为  $\Delta t_m$ , 所以

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m \quad (4-3)$$

与  $\Delta t_m$  所对应的脉冲频率或步进频率  $f_m$  为:

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} \quad (4-4)$$

这个值与方程 (4-2) 在  $t = t_m + \frac{\Delta t_m}{2}$  或每个脉冲间隔中点  $f$  的值是相同的。

当  $t = \frac{\Delta t_1}{2}$  时,  $f = f_0$  就可决定方程 (4-2) 中的  $g$ 。因为  $\Delta t_1 = \frac{1}{f_0}$ , 所以,

方程 (4-2) 变为:

$$g = f_0 - \frac{\beta}{2f_0} \quad (4-5)$$

图 4-9 中 abcd 所包围的面积为  $(m-1)$  步, 即

$$\{g + (g + \beta t_m)\} t_m = 2(m-1) \quad (4-6)$$

即可得到一个二次方程

$$\beta t_m^2 + 2g t_m - 2(m-1) = 0 \quad (4-7)$$

由上式可求得脉冲定时  $t_m$

$$t_m = \frac{(\sqrt{[g^2 + 2(m-1)\beta]} - g)}{\beta} \quad (4-8)$$

脉冲时间间隔  $\Delta t_m$  为:

$$\Delta t_m = \frac{(\sqrt{g^2 + 2m\beta} - \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta})}{\beta} \quad (4-9)$$

每个脉冲间隔所表示的步进频率为:

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} = \frac{(\sqrt{g^2 + 2m\beta} + \sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta})}{2} \quad (4-10)$$

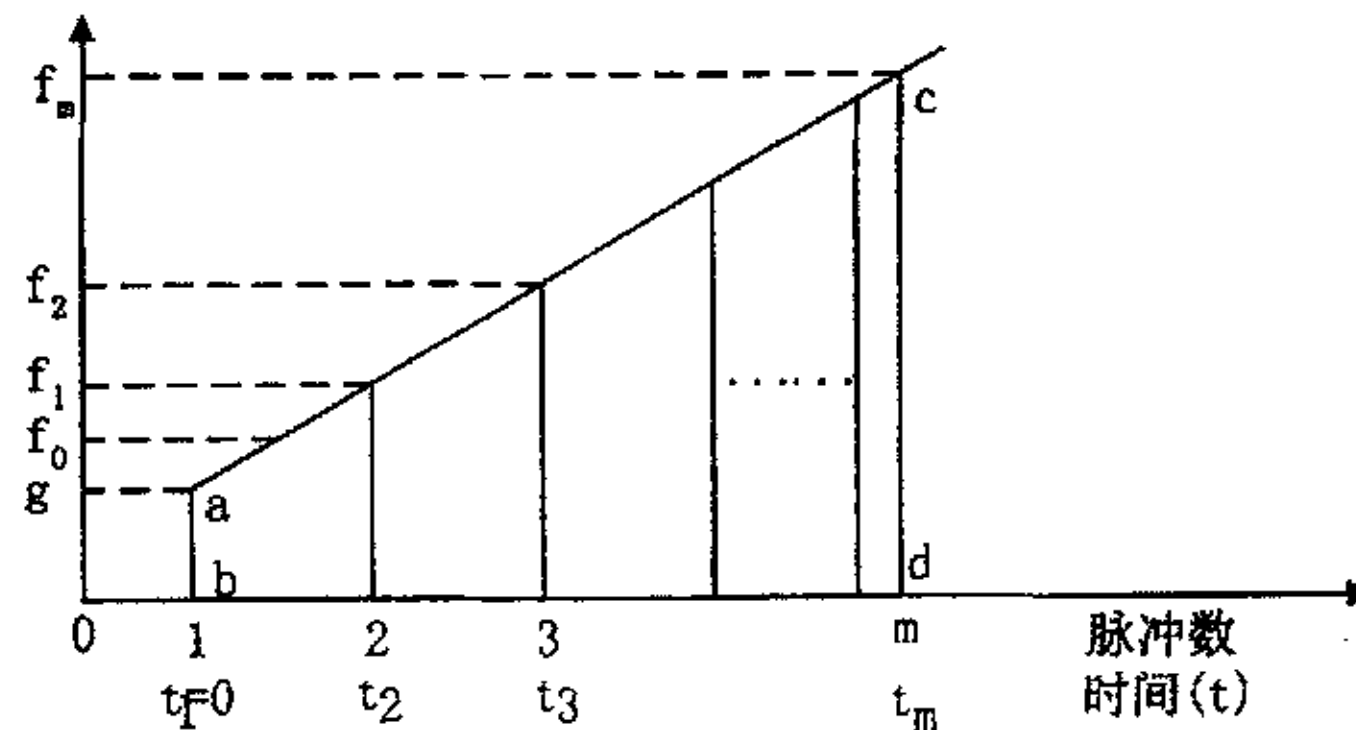


图 4-9 线性加速时速度与脉冲序列的关系

$M$  — 从开始加速时起, 到恒速运行时的脉冲数编号, 从起动频率  $f_0$  到运行频率  $f_n$ ,

由下式可确定  $\beta$  值:

$$\beta = \frac{2(f_n^2 - f_0^2)}{\sqrt{(2M-3)^2 + (f_n/f_0)^2 - 1} + (2M-3)} \quad (4-11)$$

## (b) 线性减速

一般来说, 减速时的加速度  $\gamma$  往往比加速时的加速度  $\beta$  取得大些, 停止时的脉冲间隔往往比起动时的脉冲间隔取得短些, 根据新的加速度来计算新的脉冲间隔, 如图 4-10 所示, 从恒速运行频率  $f_n$  开始减速, 在  $N$  号脉冲停止, 这是根据图 (4-10) 和方程 (4-11) 进行推导得:

$$\gamma = \frac{2(f_n^2 - f_1^2)}{\sqrt{(2N-1)^2 + (f_n/f_1)^2 - 1} + (2N-1)} \quad (4-12)$$

式中  $f_1$ —停止时的步进频率;

$N$ —从开始减速时起, 到停止时的脉冲数编号。

脉冲间隔为:

$$\Delta t_{d+n} = \frac{2}{\sqrt{f_n^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_1^2 - 2(n-1)\gamma}} \quad (4-13)$$

式中  $n$ —在  $1 \sim N$  之间的数值;

$d$ —恒速范围里的最后脉冲数。

$$f_{d+a} = \frac{\sqrt{f_n^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_1^2 - 2(n-1)\gamma}}{2} \quad (4-14)$$

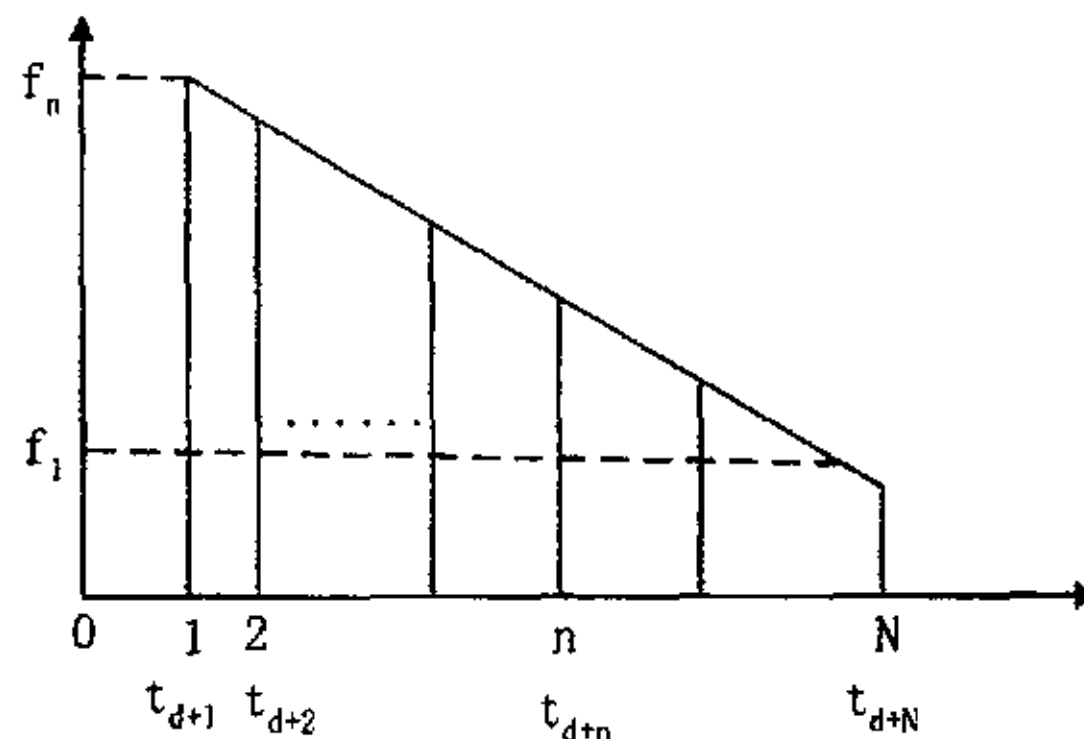


图 4-10 线性减速时速度与脉冲序列的关系

## (2) 指数加减速

升速规律从步进电动机的矩频特性出发, 即按指数规律, 根据步进电机输出转矩随频率(或转速)的变化情况选择一条升降频运行曲线(如图 4-11 所示), 试图使升降频过程达到最优。升速过程由突跳频率加升速曲线组成(降速过程反之), 理想的升降速曲线为指数曲线, 根据负载情况选择不同的突跳频率和不同的指数曲线, 以找到一条最理想的曲线, 一般需要多次‘试机’。

## (a) 指数加速

一般输出转矩随步进频率的增加而减少, 假设失步转矩是要求产生的转矩上

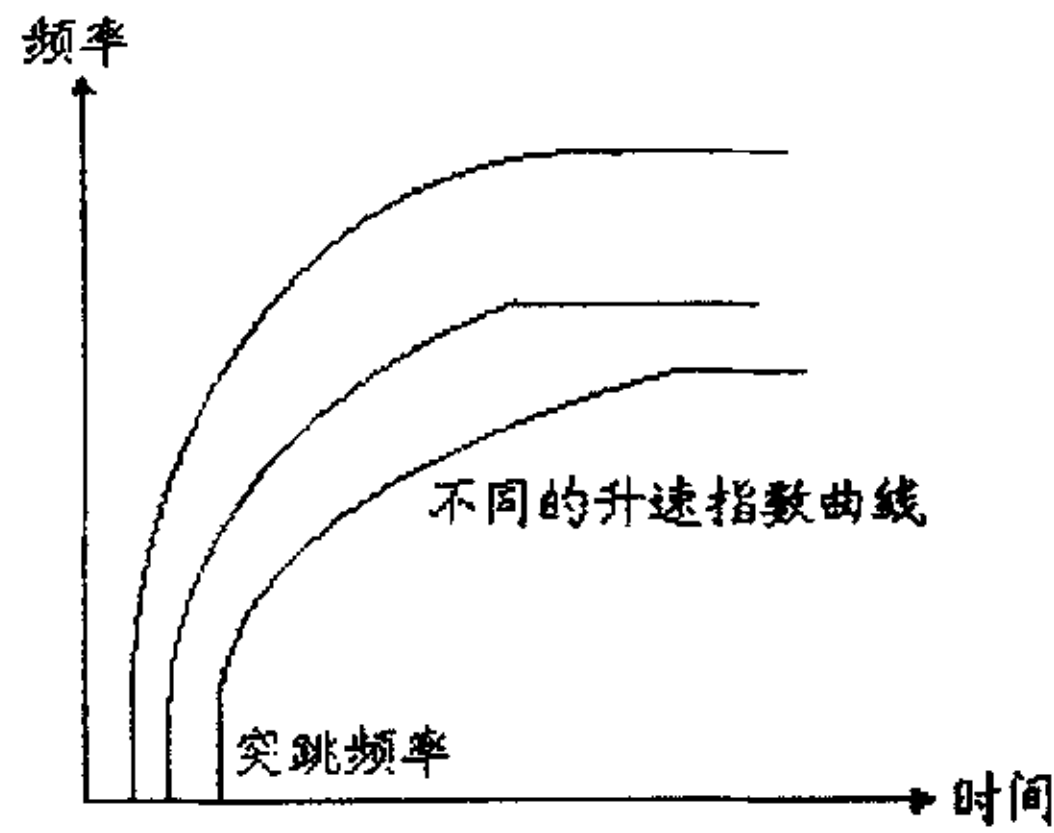


图 4-11 升速曲线

限，起动之后的运动一定满足下式：

$$J\theta_b \frac{df}{dt} + D\theta_b f + T_L \leq T_{out} \quad (4-15)$$

式中：  $\theta_b$ —步矩角；

$J$ —转动惯量；

$D$ —阻尼系数；

$T_L$ —负载转矩；

$T_{out}$ —电机输出转矩。

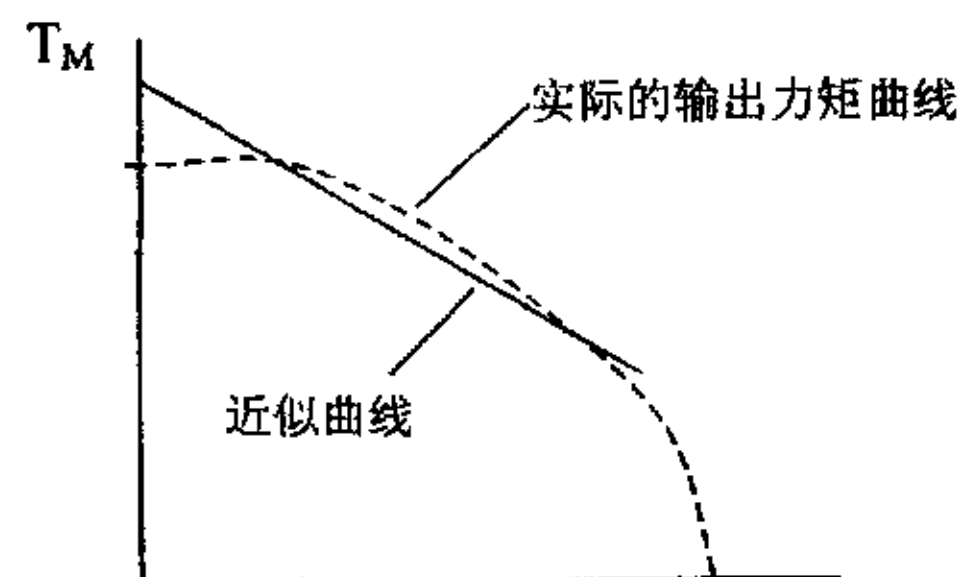


图 4-12 输出力矩的线性近似

电机产生的转矩可由下式近似的求出：

$$T_M = T_{MO} - kf \quad (4-16)$$

式中  $T_M$ —最大转矩，

$k$ —输出转矩随步进频率变化的斜率。

在图 4-13 所示的速度范围内，不等式 4-15 改为方程：

$$J\theta_b \frac{df}{dt} + D\theta_b f + T_L = T_{MO} - kf \quad (4-17)$$

即

$$J\theta_b \frac{df}{dt} + (D\theta_b + k)f + (T_L - T_{MO}) = 0 \quad (4-18)$$

由上可求得:

$$f = g + \left( \frac{T_{MO} - T_L}{D\theta_b + k} - g \right) \left[ 1 - \exp \frac{-(D\theta_b + k)t}{J\theta_b} \right] \quad (4-19)$$

将上式积分, 就可得到用步数表示的旋转角  $x$ :

$$x = \int_0^t f dt = \frac{(T_{MO} - T_L)t}{k_1} + \left( \frac{T_{MO} - T_L}{k_1} - g \right) \left( \frac{J\theta_b}{k_1} \right) \left\{ \exp \left( \frac{-k_1 t}{J\theta_b} \right) - 1 \right\} \quad (4-20)$$

式中  $k_1 = k + D\theta_b$

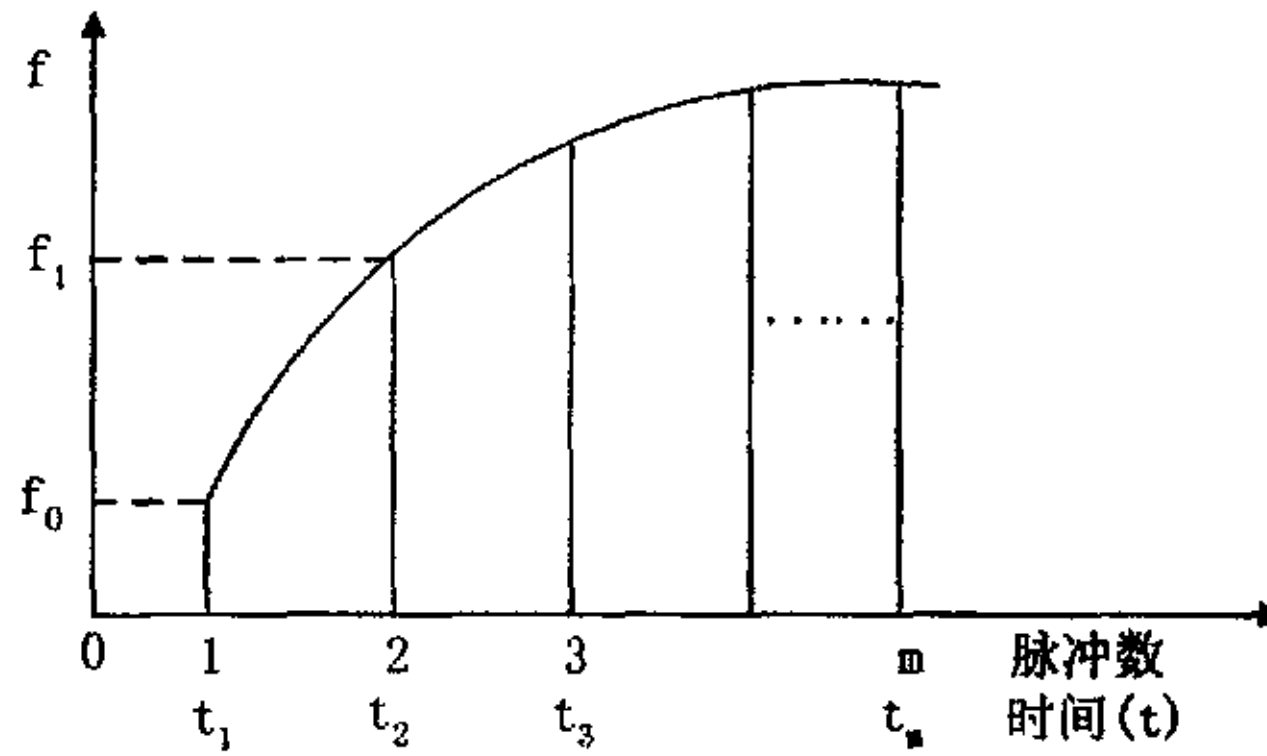


图 4-13 指数加速时速度与脉冲序列的关系

在  $t = \frac{1}{f_0}$  时  $x$  的值就相当于一步, 因此得到  $g$  的值:

$$g = \frac{T_{MO} - T_L}{k_1} - \left( 1 - \frac{T_{MO} - T_L}{f_0 k_1} \right) \left( \frac{k_1}{J\theta_b} \right) \frac{1}{\exp \left( \frac{-k_1}{J\theta_b f_0} \right) - 1} \quad (4-21)$$

因此

$$x(t) = \frac{(T_{MO} - T_L)t}{k_1} - \left( \frac{T_{MO} - T_L}{f_0 k_1} - 1 \right) \frac{\exp \left( \frac{-k_1 t}{J\theta_b} \right) - 1}{\exp \left( \frac{-k_1}{J\theta_b f_0} \right) - 1} \quad (4-22)$$

脉冲定时可通过下式方程求得:

$$x(t_m) - m = 0 \quad (4-23)$$

$$\text{脉冲时间间隔 } \Delta t_m = t_m - t_{m-1} \quad (4-24)$$

$$\text{步进频率 } f_m = \frac{1}{\Delta t_m} \quad (4-25)$$



初始加速度

$$\alpha = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{t=0} = \left(\frac{T_{MO} - T_L}{k_1 - g}\right) \left(\frac{-k_1}{J\theta_b}\right) \exp\left(\frac{-k_1}{J\theta_b f_0}\right) \quad (4-26)$$

为了提高升降速处理的速度和编程的方便性,需将升降频曲线离散化,升频时总共需  $N$  步,即设  $N$  个离散点, $N$  越大,步进电机的运行将越平稳,但必须满足:

$$f(t_m) - f(t_{m-1}) < f_0 \quad (m=1,2,\dots,N)$$

$$f_m = f_0 + \left(\frac{f_n - f_0}{k_1}\right) (1 - \exp(-k_2 \sum_0^N \Delta t_m)) \quad (4-27)$$

式中  $k_2 = -[\ln(1 - k_1)] / (N * \Delta t_m)$

指数减速时与加速时情况一样。

从以上两种方法,升频与降频之频率的变换是通过脉冲定时  $t_m$  来实现,并控制在脉冲时间间隔  $\Delta t_m$  下,步进电机运行的步数  $M$  通过计算获得,就可以实现逐级自动变频。它可使步进电机从某一低频(突跳频率  $f_0$ )起步运行,逐级升到某一较高频率来运行;在停止前,逐级降到某一低频(通常等于突跳频率  $f_0$ )再停止,达到不失步、不超步。在实际调试中,分料器转动一步,指数加速所用的时间比用直线加速的时间少,因此选用指数加速比较好。

### 三、步进电动机驱动器的设计

步进电动机及其驱动器主要由控制盒单片机对其进行控制,采用串行开环控制<sup>[31]~[33]</sup>。在串行控制中,单片机与步进电动机功率驱动接口之间只需两条控制

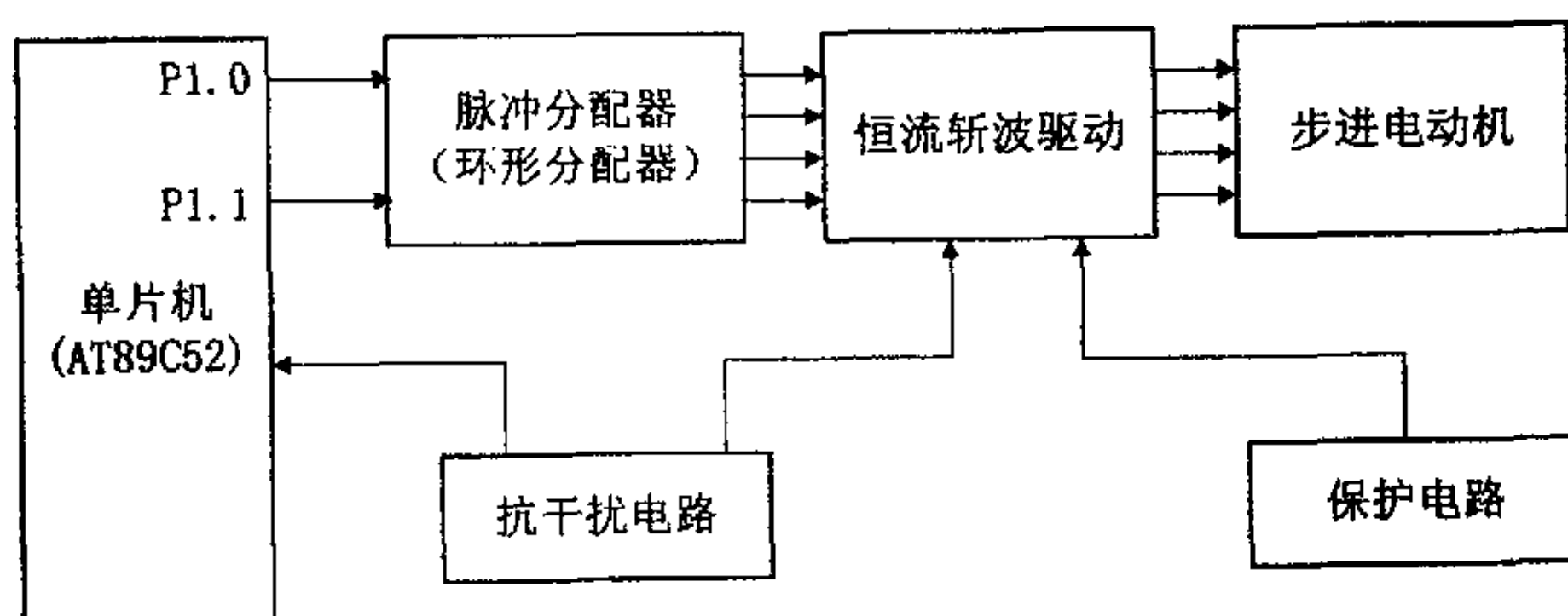


图 4-14 单片机串行控制

线,一条用来发送脉冲,另一条用来发送指定旋转方向的电平信号,如图 4-14 所示。

步进电动机驱动器<sup>[28][29]</sup>还包括环形分配器、功率驱动、及一些抗干扰、保

护电路, 环形分配器用来接受来自单片机的 CP 脉冲, 并按步进电动机状态转换表要求的状态顺序产生各相导通或截止的信号, 每来一个 CP 脉冲, 环形分配器的输出转换一次。采用恒流斩波驱动对于以后进一步步距角细分和系统更平稳提供了方便。抗干扰电路主要是避免单片机受到步进电动机驱动部分高压的影响, 以致不能正常工作, 因此采用光电耦合电路对其进行隔离。保护电路主要是保护驱动部分的安全性, 为了防止驱动系统的异常, 对此设置了过流保护、过压保护、过热保护电路。

## 1、单片机

AT89C52 是一个低电压, 高性能 CMOS 8 位单片机, 片内含 8k bytes 的可反复擦写的只读程序存储器(PEROM)和 256 bytes 的随机存取数据存储器(RAM), 器件采用 ATMEL 公司的高密度、非易失性存储技术生产, 兼容标准 MCS-51 指令系统, 片内置通用 8 位中央处理器和 Flash 存储单元, AT89C52 有 40 个引脚, 32 个外部双向输入/输出 (I/O) 端口, 同时内含 2 个外中断口, 3 个 16 位可编程定时计数器, 2 个全双工串行通信口, 2 个读写口, AT89C52 属于 MCS-51 系列, 可以按照 MCS51 系列的汇编语言进行编程, 将通用的微处理器和 Flash 存储器结合在一起, 特别是可反复擦写的 Flash 存储器可有效地降低开发成本<sup>[30]</sup>。

## 2、环形分配器

在步进电动机的驱动器中, 脉冲源本身不能把脉冲信号按一定的规律, 顺次加给步进电动机各绕组, 环形分配器是把脉冲信号依次送给绕组的环节, 它是一个逻辑单元, 接受一个单相的脉冲信号, 输出多路电平信号。

### (1) 环形分配器的结构

如果完全用硬件实现脉冲分配, 那么构成环形分配器的基本单元电路是双稳态触发器, 一般情况下, 给几相步进电动机供电, 环形分配器即由几个双稳态电路构成。在驱动器中, 为简化硬件电路, 采用软硬件结合的方法, 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。环形分配器由锁存器 74LS373 和 EPROM2716 组成, EPROM 存储器是一种紫外线擦除的可编程只读存储器, 其基本思想是: 结合驱动系统线路按步进电动机励磁状态转换表求出所需的环形分配器输出状态 (输出状态表与状态转换表相对应), 以二进制码的形式依次取出地址的内容, 则 EPROM 的输出端即以此表示各励磁状态。用这种 EPROM 组成的环形分配器的原理框图如图 4-15 所示。地址锁存器的输出端接到 EPROM 地址线上, 并使 EPROM 总是处于读出状态, 因此, 地址锁存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。

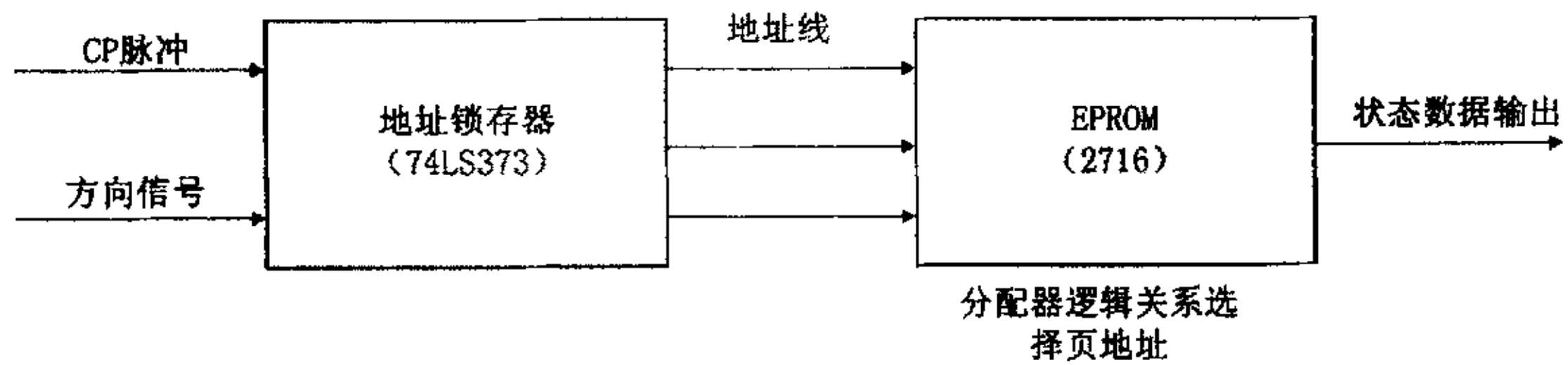


图 4-15 含有 EPROM 的环形分配器

用 EPROM 设计的环形分配器的特点：

(a) 线路简单。只有地址锁存器和存储器两部分，锁存器用来锁存电动机励磁状态转换表所对应的地址，选通存储器一个地址，存储器就输出一个数据，也就是环分的一个状态，通过对 EPROM 编程实现存状态表。

(b) 虽只有一种硬件电路，但可以实现多种励磁方式的分配，在不同的地址区域存储不同的状态表，无需改动硬件电路，只需在程序上稍作改动。

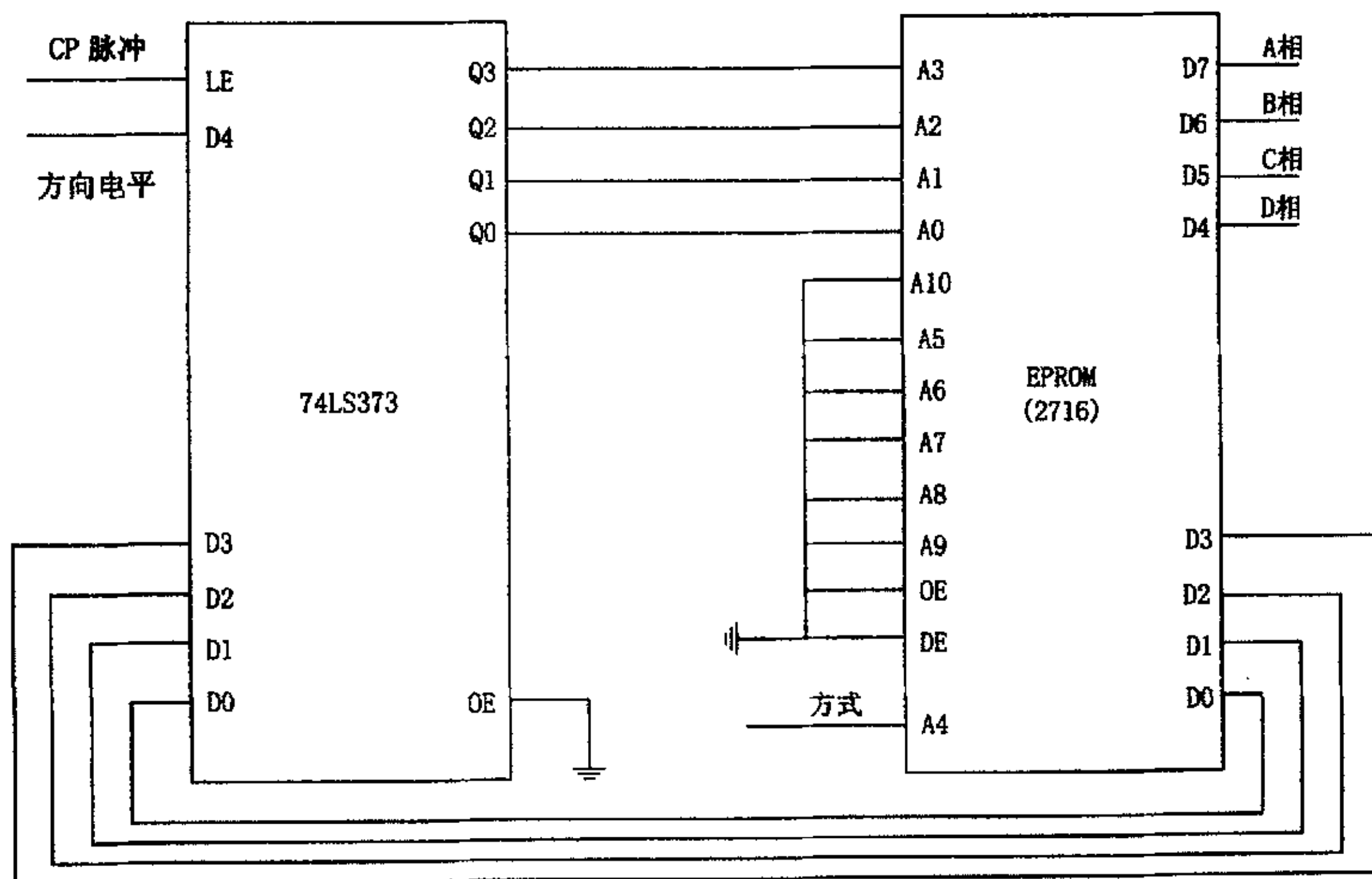


图 4-16 环形分配器

(c) 可彻底排除非法状态。驱动中输入的非法状态可能会损坏驱动系统，因此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。所以，即使存储器有非法地址输入，输出端出现的都是截止信号，可保护驱动系统不受损坏，从而彻底将非法状态排除。

(2) 环形分配器的工作原理

表 4-1 四相混合式步进电动机存储状态表

地址 A <sub>4</sub> A <sub>3</sub> A <sub>2</sub> A <sub>1</sub> A <sub>0</sub>	数据 D <sub>7</sub> D <sub>6</sub> D <sub>5</sub> D <sub>4</sub> D <sub>3</sub> D <sub>2</sub> D <sub>1</sub> D <sub>0</sub>	DCBA	励磁状态
00000	1110 0001	1110	A
00001	1100 0010	1100	AB
00010	1101 0011	1101	B
00011	1001 0100	1001	BC
00100	1011 0101	1011	C
00101	00110110	0011	CD
00110	0111 0111	0111	D
00111	0110 1000	0110	DA
01000	1110 1001	1110	A
01001	1100 1010	1100	AB
01010	1101 1011	1101	B
01011	1001 1100	1001	BC
01100	1011 1101	1011	C
01101	0011 1110	0011	CD
01110	0111 1111	0111	D
01111	0110 0000	0110	DA
10000	1100 0001	1100	AB
10001	1001 0010	1001	BC
10010	0011 0011	0011	CD
10011	0110 0100	0110	DA
10100	1100 0101	1100	AB
10101	1001 0110	1001	BC
10110	0011 0111	0011	CD
10111	0110 1000	0110	DA
11000	1100 1001	1100	AB
11001	1001 1010	1001	BC
11010	0011 1011	0011	CD
11011	0110 1100	0110	DA
11100	1100 1101	1100	AB
11101	1001 1110	1001	BC
11110	0011 1111	0011	CD
11111	0110 0000	0110	DA

如图 4-16 所示, 2716 中存放着步进电机相序字表, 373 则用来锁存某步的相序字所在的地址, 如表所示为四相八拍和双四拍工作方式时 2716 中的数据及对应的控制规律。环形分配器有两个输入信号(脉冲信号和方向信号): 每个步进脉冲信号使步进电机转动一步, 方向信号从而决定环形分配器的输出状态转换

是按正序还是按反序转换, 步进电机转动的方向则由转向电平决定—0 为正转, 1 为反转。具体工作原理如图 4-16 所示。

时钟脉冲从 CP 端引入, 74LS373 的 LE 引脚接受来自单片机的步进脉冲 CP, 方向信号接到锁存器的  $D_4$  上, 将当前步的相序字地址  $D_0\sim D_3$ , 锁存起来并稳定在 2716 的地址引脚  $A_0\sim A_3$  上, 锁存器的输出  $Q_0\sim Q_3$  直接接 EPROM2716 低四位地址线  $A_0\sim A_3$ , 这样可以选通 2716 的十六个地址, 存储器的内容从数据线读出, 用高四位数据线 ( $D_4\sim D_7$ ) 作为四相驱动级各相输入线, 2716 的第四条地址线  $A_4$  为励磁方式的转换信号输入端, 其它地址线都接地。地址线  $A_4$  作为方式控制端, 当  $A_4$  为低电平时, 选通四相八拍状态, 当  $A_4$  为高电平时, 选通双四拍状态。2716 则根据表中的对应关系输出数据  $D_0\sim D_7$ , 而  $D_0\sim D_2$  则反馈接到 373 的输入端  $D_0\sim D_2$  组成下一步相序字的地址值。2716 的管脚 OE 和 DE 分别为输出允许和片选端, 都直接地使之处于选通状态。如此循环往复就实现了环形分配的工作。由于相序数据的  $D_0\sim D_2$  位的巧妙安排, 步进电动机在任何时候都可以作正转或反转而且相序不会乱。表 4-1 为步进电动机环形分配器的工作状态, 脉冲波形如图 4-17 所示。

### 3、功率放大电路

由环形分配器输出的电流只有几个毫安, 不能直接驱动步进电动机, 因为一般步进电动机需要几个安培的电流, 因此, 环形分配器后面都接有功率放大电路, 用放大后的信号去推动步进电动机。

#### (1) 恒流斩波功率驱动原理

恒流驱动的设计思想是: 设法使导通相绕组的电流不论在锁定、低频、高频工作时均保持固定数值, 使电机具有恒转矩输出特性。斩波恒流功率接口原理如图 4-18 所示, 主回路由高压晶体管、电动机绕组、低压晶体管串联而成。图中, 低压管发射极串联一个小的电阻  $R$  接地, 电动机绕组的电流经这个小电阻通地, 它是一个用于电流采样的小阻值电阻, 即采样电阻, 小电阻  $R$  的压降与电动机绕组电流成正比, 当电流不大时,  $T_L$  和  $T_H$  同时受控于走步脉冲, 当电流超过恒流给定的数值,  $T_H$  被封锁, 电源  $U_H$  被切除, 由于电机绕组具有较大电感, 此时靠二极管  $D_H$  续流, 维持绕组电流, 电机靠消耗电感中的磁场能量产生出力, 此时电流将按指数曲线衰减, 同样电流采样值将减小。当电流小于恒流给定的数值,  $T_H$  导通, 电源再次接通。

$IC_1$  和  $IC_2$  分别是两个控制门, 控制  $T_H$  和  $T_L$  两个晶体管的导通和截止。由环形分配器来的相绕组导通脉冲, 波形如图 4-19 所示(a), 送到门  $IC_2$  与  $IC_1$  中, 通过  $IC_2$  直接开通晶体管, 而门  $IC_1$  除环形分配器来的信号之外, 还有一路信号来自比较器。比较器的两个输入端, 其中之一接给定电平, 另一个接来自取样电



阻的电压信号。在环形分配器导通脉冲到来之前， $IC_1$  和  $IC_2$  都处于关门状态，输出低电平， $T_H$  和  $T_L$  都截止，取样电阻中无电流流过，反馈到比较器的输入信号为零，比较器输出高电平，如图 4-19 所示(b)。

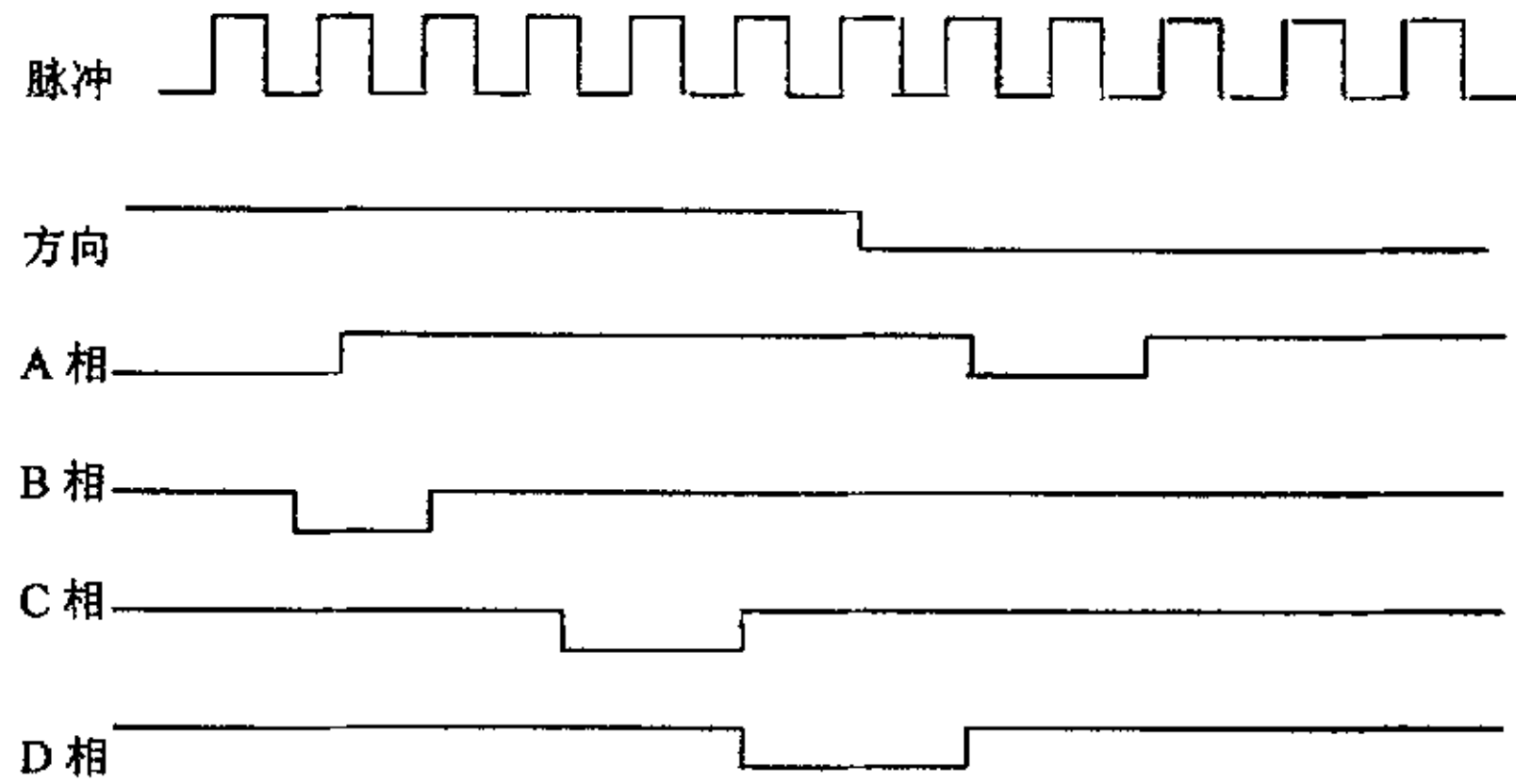


图 4-17 脉冲分配波形图

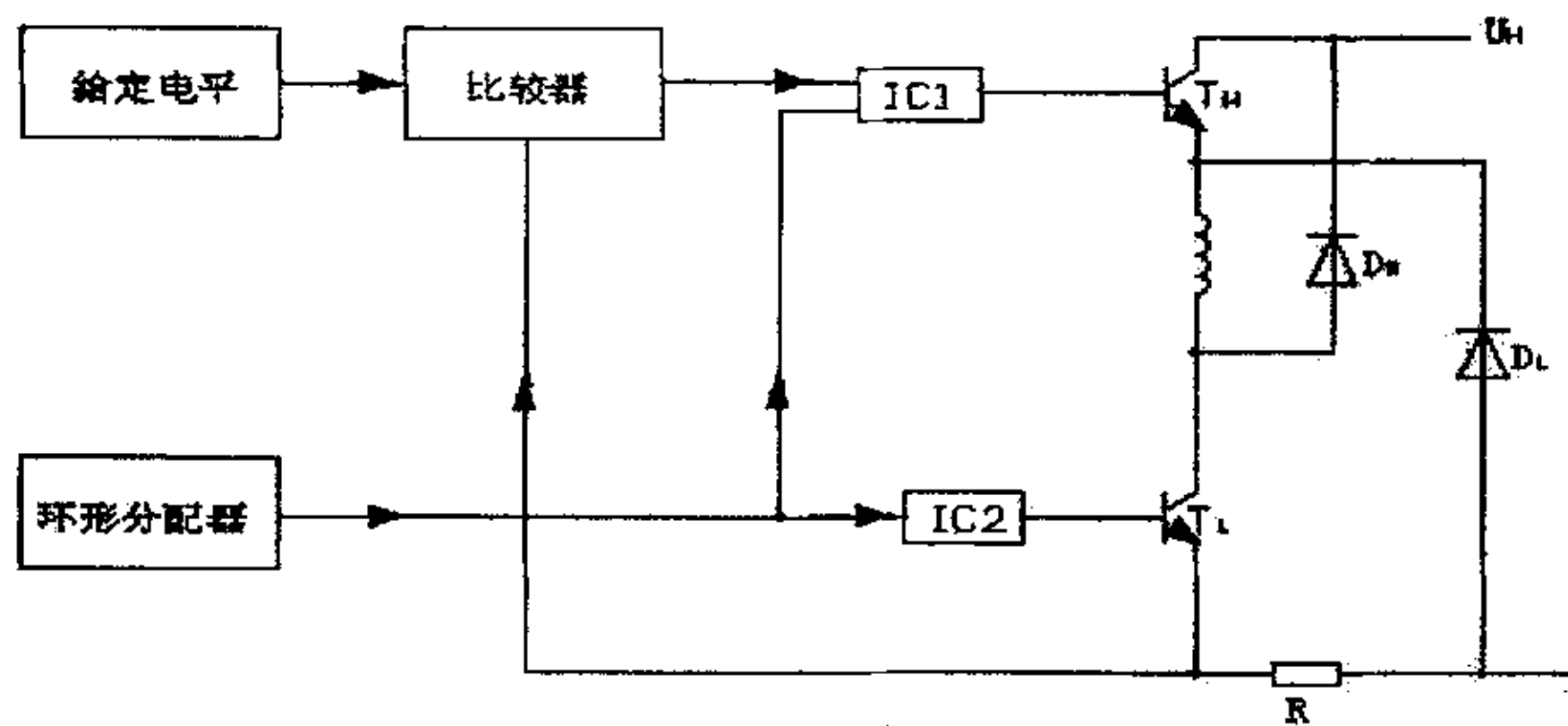


图 4-18 斩波恒流驱动

当环形分配器输出导通信号时，高电平使门  $IC_1$  和  $IC_2$  打开，输出高电平使  $T_H$  和  $T_L$  两管导通，高电压经  $T_H$  向电动机绕组供电，电流回路如图 4-20 所示(a)。由于电动机绕组有较大电感，所以电流成指数上升，但所加电压较高，所以电流上升较快。取样电阻上的电压代表了电流的大小。

当电流超过所设定值时，比较器输入的取样电压超过给定电压，比较器翻转，输出变低电平，从而  $IC_1$  也输出低电平，关断高压管  $T_H$ 。此时磁场能量将使绕组电流按原方向继续流动，经由低压管  $T_L$ 、取样电阻、地线、二极管  $D_1$  构成的续流回路消耗磁场的能量，如图 4-20 (b)。此时电流将按指数曲线衰减，逐渐下降。当取样电阻上得到的电压小于给定电压时，比较器又翻转回去，输出高电平，打开高压管，电源又开始向绕组供电，电流又会上升。如此反复，电动机绕组的电流就稳定在由给定电平所决定的数值上，形成小小的锯齿波，波形如 4-19



(c)。

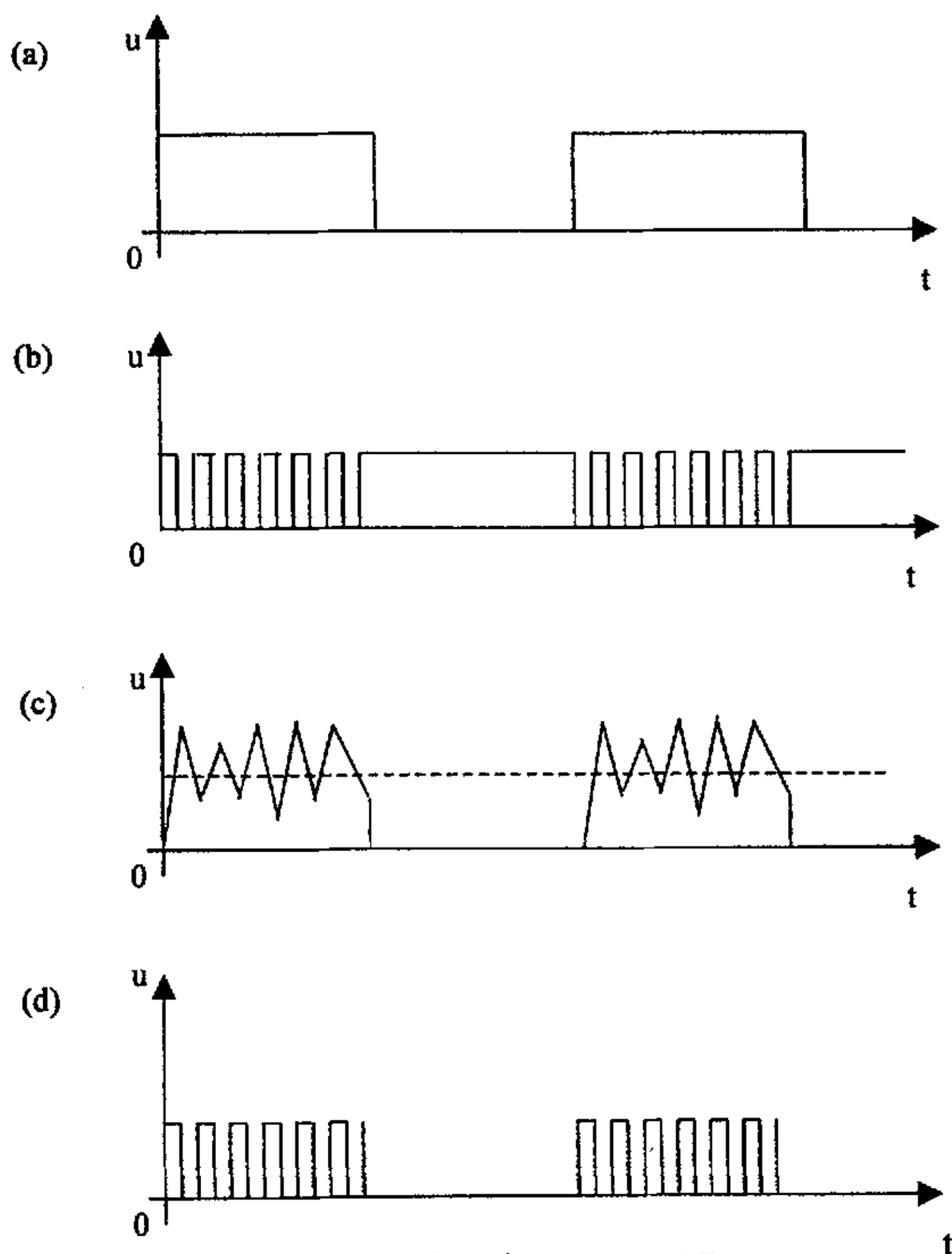


图 4-19 各种情况下的波形图

当环形分配器输出低电平时，高低压管都截止，此时绕组的电流进入续流状态，续流回路如图 4-20(c)所示，电流将经  $D_L$ 、电动机绕组、 $D_H$  泄放，磁场的能量将回馈给高压电源，这样达到了缩短泄放时间，又可节约电能的作用。快速的泄放有利于提高驱动系统的高频响应。

恒流斩波驱动中，由于驱动电压较高，电动机绕组回路又不串联电阻，所以电流上升很快，当到达所需要的数值时，由于取样电阻反馈控制作用，绕组电流可以恒定在确定的数值上，而且不随电动机的转速而变化，从而保证在很大的频率范围内电动机都能输出恒定的转矩。

如图 4-19 (d) 所示，在环形分配器所给出的相绕组导通时间内，电源电压并不是一直向绕组供电，而只是一个一个的窄脉冲。总的输入能量是各脉冲时间的电压与电流乘积积分的总和。

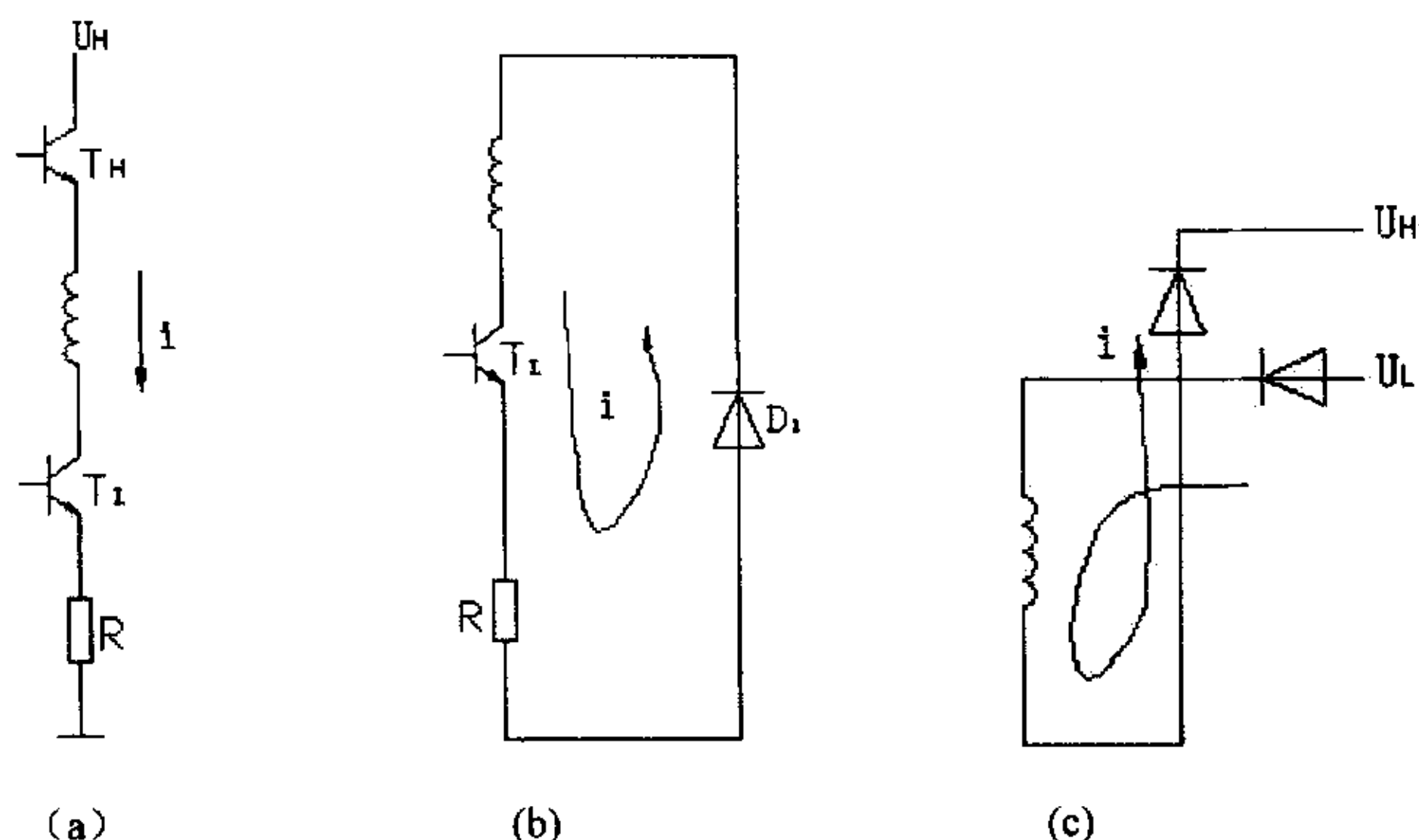


图 4-20 供电时电流路径及续流回路

这种驱动的优点可以减少电动机共振现象的发生,由于电动机共振的基本原因是能量过剩,而斩波恒流驱动输入的能量是自动随着绕组电流调节。能量过剩时,续流时间延长,而供电时间减小,因而可减小能量的积聚。

### (2)功率放大器

驱动级功率放大器件选择达林顿晶体管,它是一种复合三极管,一般由二个三极管复合而成。前一个晶体管的发射极深入后一个晶体管的基极,这样的复合管的放大倍数就相当于两个晶体管放大倍数的乘积,所以其电流放大倍数可达千倍以上,因此,这种晶体管只需很小的基极电流就可以产生很大的输出电流。这种达林顿管已成为步进电动机驱动的主流。

### (3)光耦合器

驱动级都有两个晶体管,一个是集电极直接接高压的高压管,另一个是发射极接地的低压管。从环形分配器输出的各相导通信号是一种低电压的信号,恒流斩波驱动中对高压管的斩波信号就是较低电压的信号,这些信号都必须经过一定的耦合方法转换成高压管的推动信号。光耦合器是一种用发光来传递电信号的器件,输入端是一个发光二极管,通电后发出光束。输出端是一个光控基极的三极管或光电二极管,接受光照后其阻抗会减小。在步进电动机驱动中用来传递开关信号。

用光耦合器传递高压管导通信号,它与后续电路结合就构成了前置驱动电路,它可保证功率开关迅速导通,迅速关断,对功率开关的饱和程度进行最佳控制。这种耦合电路由于是由光来传输电信号的高压管的推动级电路与前置信号电路完全隔离,用于恒流斩波高压驱动电路中非常可靠。一是把低压部分(微机系统)和高压部分的步进电机及驱动电路隔离开来,以保证微机系统的安全;另一

个作用是防止步进电机和驱动电路产生的干扰信号通过接口进入单片机系统,影响它的正常运行。

(4)恒流斩波驱动电路实现

如图 4-21 所示为恒流斩波驱动电源电路,当电路没有故障输入时,即过压保护信号输出为高电平,过流保护信号和过热保护信号均为低电平时,环形分配器输入低电平信号,则反相器  $T_2$ 、 $T_3$  都同时输出低电平,光耦  $D_1$  和  $D_2$  的光敏三极管导通。 $T_4$ 、 $T_5$  为达林顿反相驱动阵列,并在此时输出高电平,从而使前级推动管  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  导通,进而使大功率管  $N_4$ 、 $N_5$  导通,电机绕组得电。由于回路的阻抗值很小,电流迅速上升,直至采样电阻  $R_f$  上的压降达到一定值时光耦  $D_3$  的发光二极管导通,从而使其光敏三极管的输出产生从高电平到低电平的跳变。这是与非门  $T_2$  输出高电平,  $D_1$  截止,  $T_4$  输出低电平,  $N_1$ 、 $N_3$ 、 $N_5$  截止,回路断电,使电机绕组中的电流又下降,从而使电机绕组的电流恒定在额定值附近,实现恒流斩波驱动。

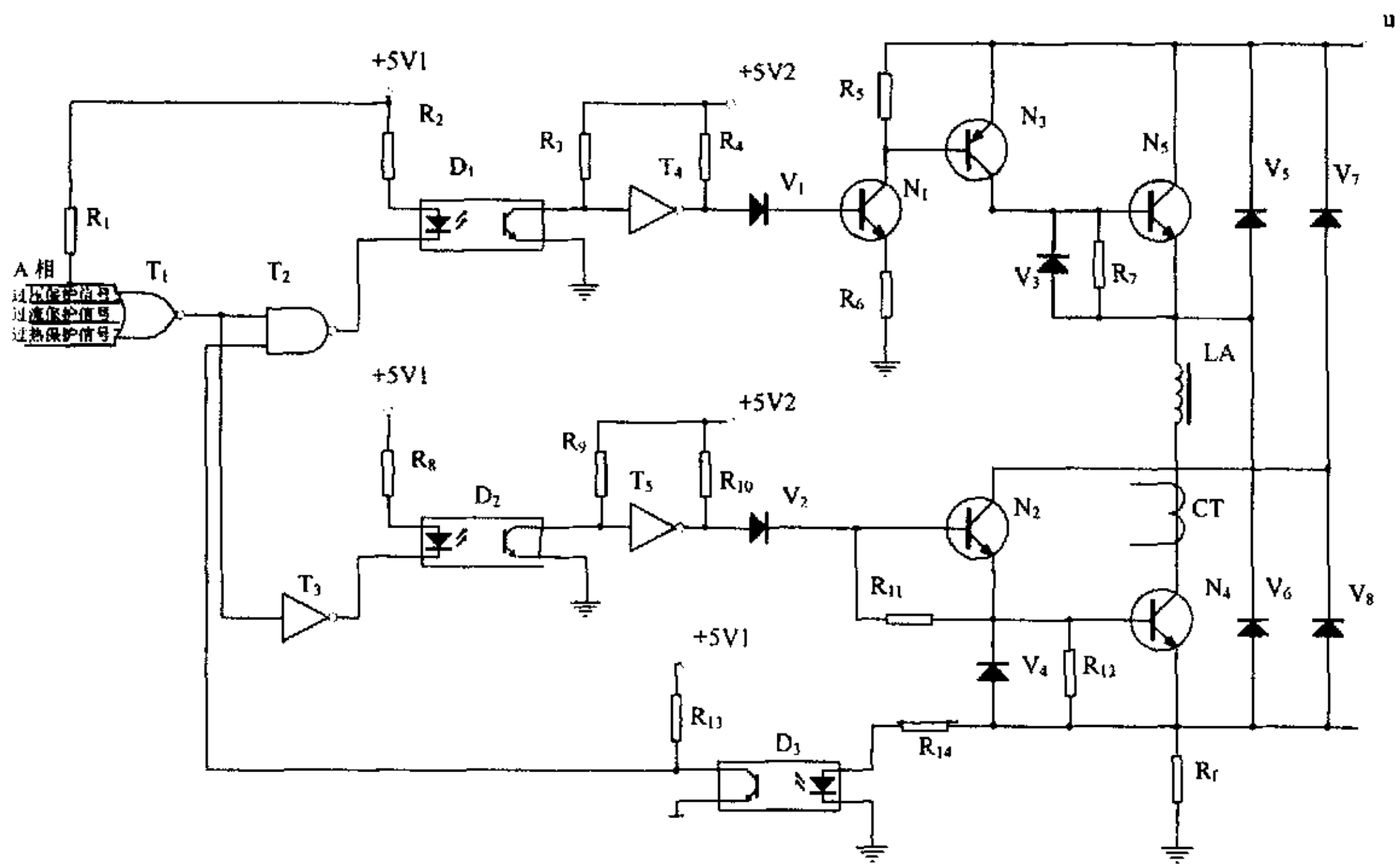


图 4-21 恒流斩波驱动电路图

当斩波管截止时,电路中有两个电流泄放回路。一个是  $V_7$ 、 $u$  和地构成的续流回路,另一个是由  $N_4$  和  $V_8$  构成的续流回路。 $V_3$  和  $V_4$  在电路中对大功率管起到反相冲击电压保护作用。当任何一个保护信号到来时,即  $T_1$  输出为高电平,则反相器  $T_2$ 、 $T_3$  都同时输出高电平,进而使功率管  $N_4$ 、 $N_5$  关断,起到了保护电机的作用。

## 4、保护电路

### (1) 过压保护

步进电机具有较大的电感，当电流迅速变化时，就会感应出高达几百伏的反电动势，使电路中的某些器件形成永久性损坏，如晶体管击穿、电容击穿或电子线路失控。因此，对感应电动势要进行抑制，监视电源过电压，当超过某一值是将整个电源切除。

如图 4-22 所示为过电压保护电路，它采用继电器实现。将交流电压经一定的变换变成正的直流电压，加到电路中。如果电路输出电压过高时，则  $D_1$  被击穿，SCR1 被触发，继电器  $J_1$  吸合，则过压保护信号输出信号为高电平。图中  $J_1$  为过电压继电器的输出，调整  $R_1$  可调整过电压的阈值，改变稳压二极管  $D_1$  的击穿电压可调整电压监视的范围。特别值得注意的是，当  $J_1$  动作时，为保证过压保护信号为高电平，电阻  $R_3$ 、 $R_4$  必须满足  $R_4/(R_3+R_4)$  比值大于高电平范围 (TTL  $\geq 3.5V$ )。

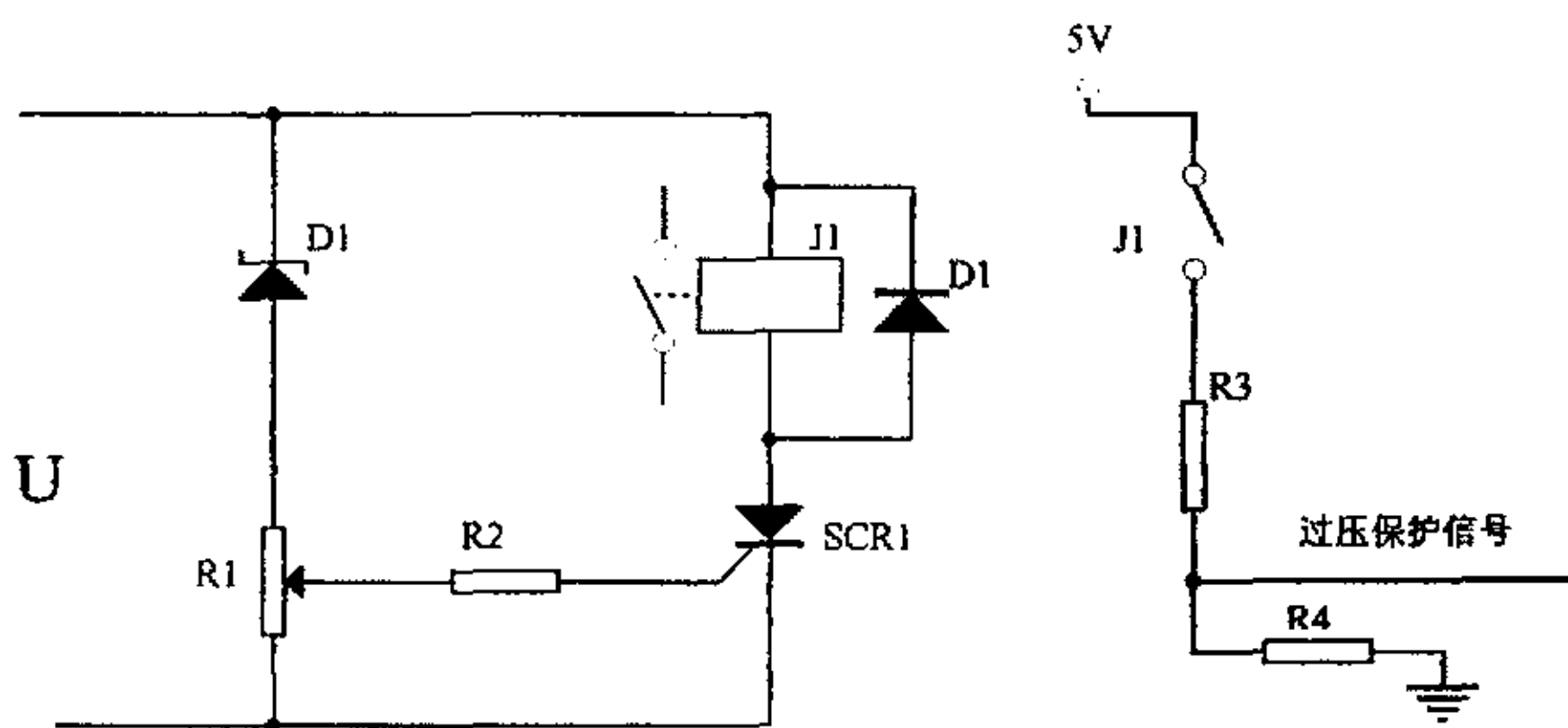


图 4-22 过压保护电路

### (2) 过流保护

这种保护电路是在相绕阻电流或整个驱动级电流发生异常增大时发出报警信号。无论是控制检测环节或者短路保护环节，都需要检测高频非正弦电流的波形和数值。这就需要具有快速反应能力的电流传感器。无感电阻、热敏电阻、脉冲互感器和霍尔电流传感器等都可以作为快速型电流检测元件，如图 4-23 所示，对工作电流的检测采用取样电阻与电压比较器及其附属电路产生过电流保护信号。取样电阻串联在电流回路中，取值为  $0.2\Omega$  左右。取样电阻上的压降与回路电流成比例。取样电压  $u_r$  经  $R_2$  送入比较器的负输入端。在开关过程中有许多干扰尖峰，使比较器发生误动作，因此用电容  $C_1$  来滤除尖峰干扰。电阻组成的分压器提供比较器的给定电压，一般可按工作电流的 2~5 倍选择，视设定的保护门

而定。电容是为了滤除给定电平中的尖峰干扰，避免保护电路发生误动作。给定电平加到比较器的正输入端。当取样信号小于给定电平，也即工作电流低于保护值时，比较器输出低电平；当取样信号高于给定电平时，比较器输出高电平。用低电平去控制驱动器的前级，使其关闭，切断绕阻中的电流达到过电流保护的日的。

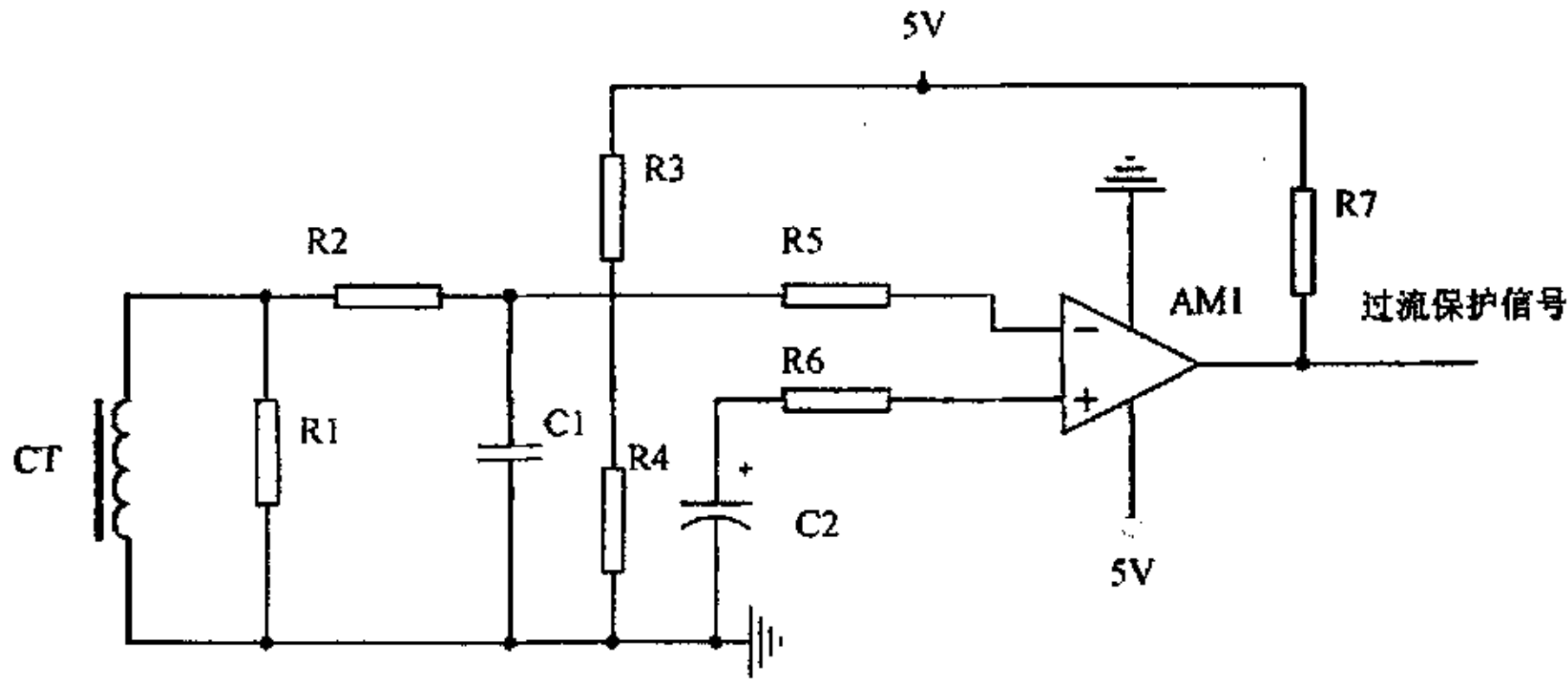


图 4-23 过流保护电路

(3) 过热保护

功率器件过热会使其承受耐压能力下降，严重时产生热击穿。因此要设置过热保护装置。功率晶体管一般需加散热器，过热保护信号可以从散热器取出。一种方法是采用温度保险丝（一种用低熔点合金制成的器件），另一种方法是选用标准的半导体温度传感器 AD590 来作为检测温度的器件，这里的过热保护选择后者。AD590 是一种恒流器件，它的电流与器件的绝对温度成正比，工作范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，测量精度可达  $0.5^{\circ}\text{C}$ ，工作电压在 $+4\text{V}\sim +30\text{V}$  之间，如图 4-24 表示这种器件的输出特性，其输出电流为  $1\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$ 。

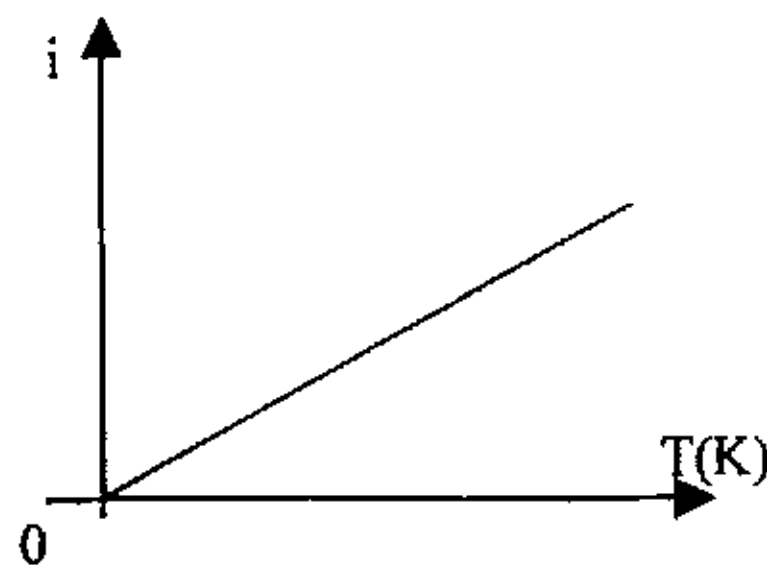


图 4-24 AD590 输出特性

图 4-25 表示过热保护线路，其中 AD590 可用环氧树脂胶贴在功率管的散热器上，电阻  $10\text{k}\Omega$  作为 AD590 的负载，其上压降约为每度  $10\text{mV}$ 。取样电压送入电压比较器的负输入端，正输入端接给定电平，代表要求保护的溫度极限，这个溫度可通过  $R_1$ 、 $R_2$  的分压来调节，电容  $0.1\mu\text{F}$  为防止干扰用。当散热器溫度高于某一给定值时，比较器输出为低电平，以此保护信号来驱动其它电路，将驱动系统的

电源切断。

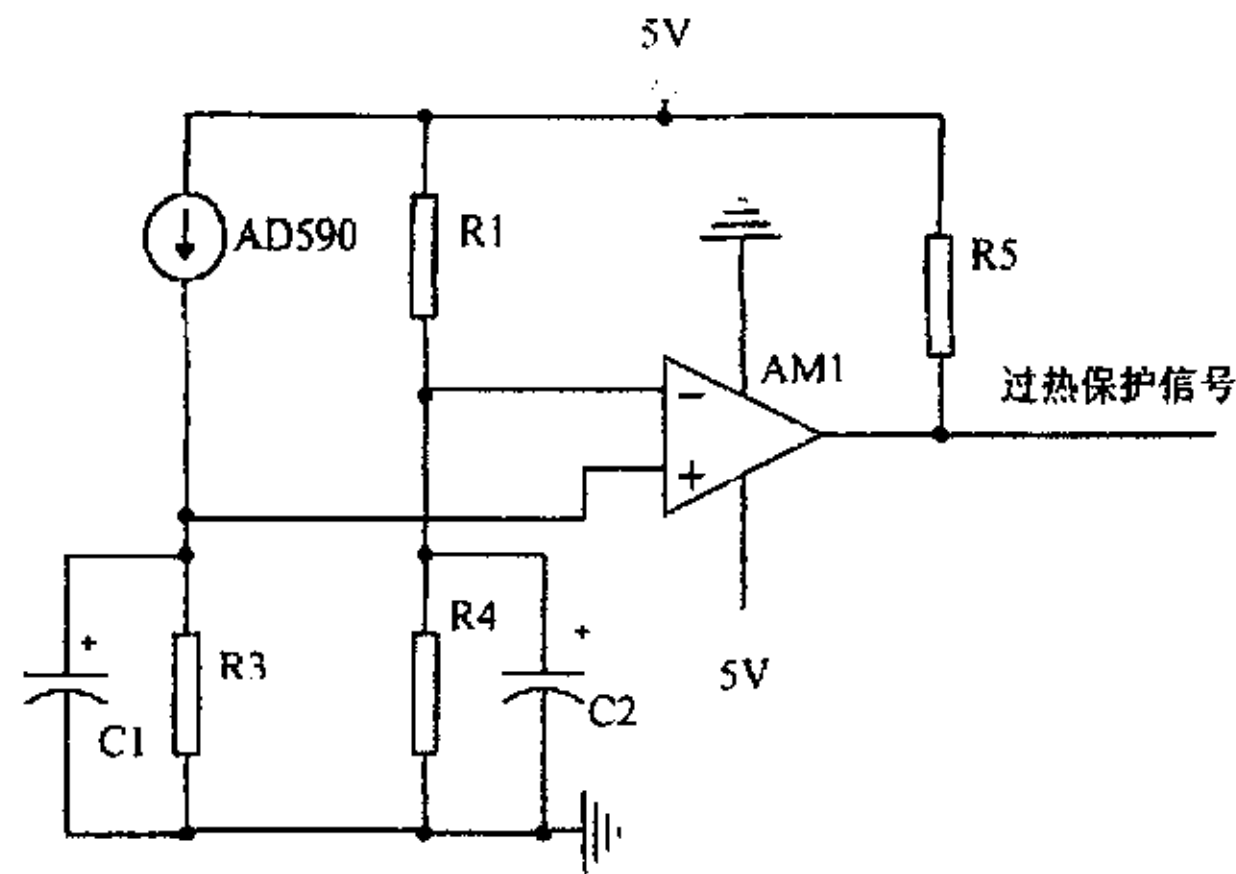


图 4-25 过热保护电路

#### 4. 2. 3 下料机构—电磁铁的控制

下料机构是由单片机控制电磁铁与分料盒的档片吸合实现自动落料<sup>[34]</sup>。电磁铁的通断由单片机发送下料信号来决定，然后通过 30 个分料盒的档片翻转方式进行落料。下料控制信号由单片机和两片 8255 芯片输出，经光电耦合器耦合，控制下料器档片与电磁铁的吸合，如图 4-26 所示。8255 芯片内部包含三个 8 位端口，并具有锁存/缓冲功能，当 8255 所有端口工作在方式 0 时，即工作方式为基础输入/输出。

电磁铁的控制如图 4-27 所示。当需要档片与电磁铁吸合时，以 PA00 为例，先选通第一片 8255，使单片机中的 P20 口输出为高电平，然后通过控制 8255 中的  $A_0$ 、 $A_1$  端口，并配合 WR 信号，将数据写入第一片 8255 即可实现。

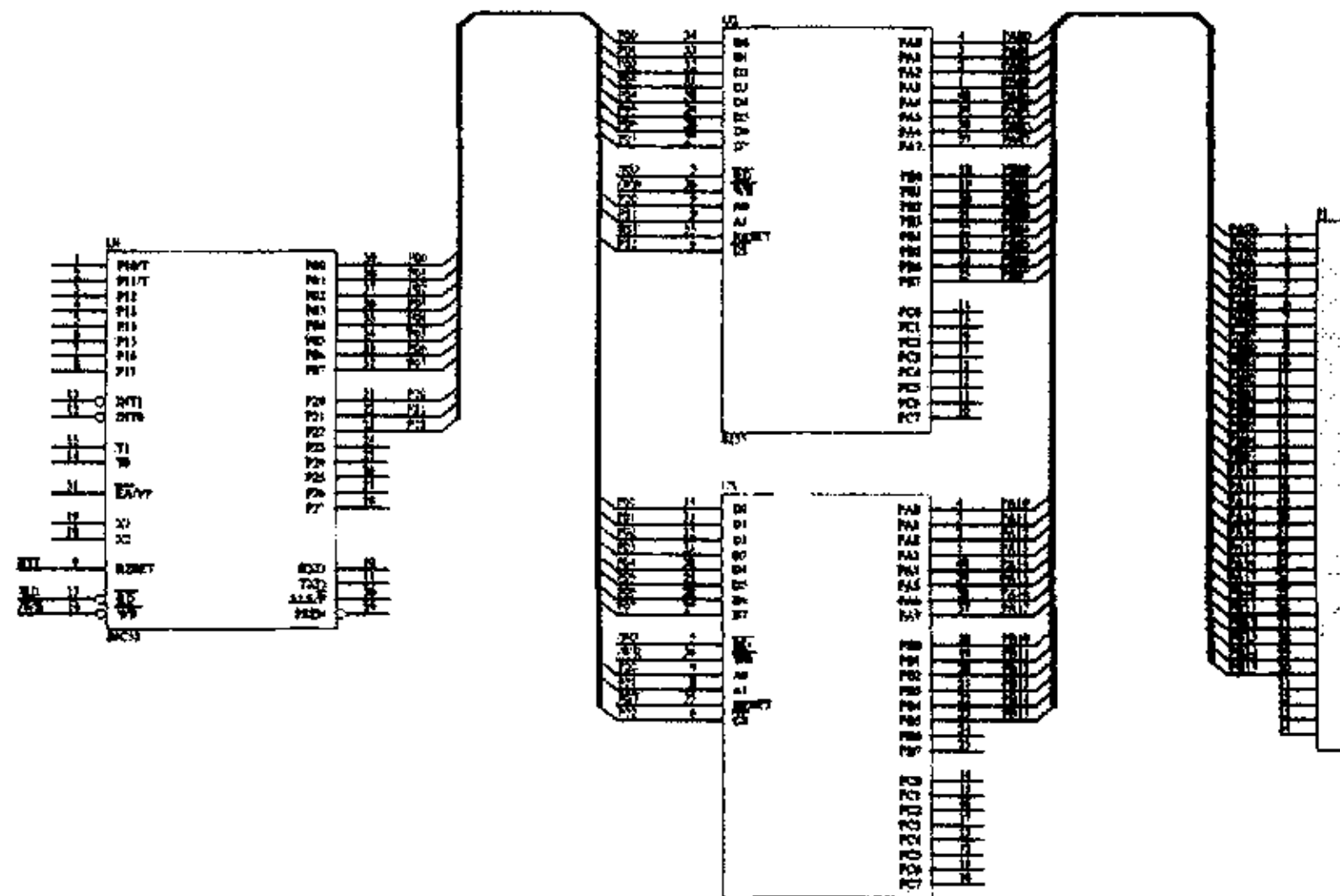


图 4-26 单片机与 8255 控制输出



当 PA00 为低电平时，光电耦合电路 OPT 导通，从而达林顿管 Q<sub>1</sub> 导通，电磁铁线圈上电，电磁铁吸合。当电路保持一段时间后，即晶片顺利滑落料盒后，只需 PA00 为高电平，电磁铁线圈失电，电磁铁释放。

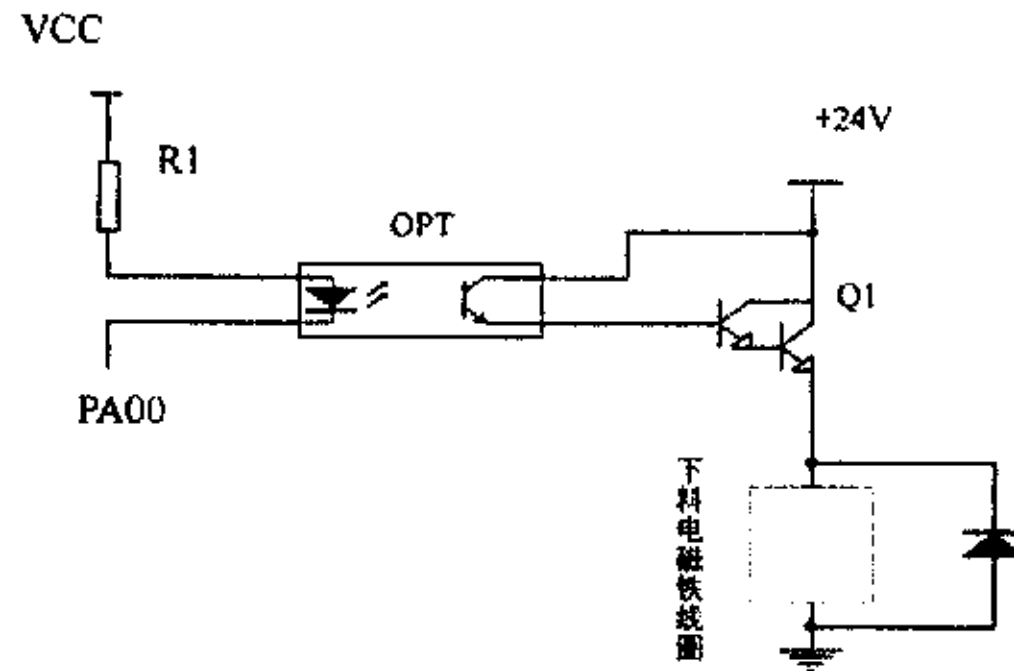


图 4-27 电磁铁的控制

#### 4. 2. 4 系统抗干扰设计

在步进电机高速运转系统中，单片机电路是受干扰的主要对象。为防止单片机电路受到来自空间高频电磁场的干扰，在单片机电路加一个金属屏蔽罩，同时，为防止单片机受到来自电源等线路的干扰，还增加了滤波电路，它除能滤除电源电压中的高次谐波外，还能有效抑制由公共电源内阻形成的寄生耦合，并滤除来自信号的谐波干扰，另外，为增强自身电路抗干扰性，在总线上加上拉电阻，即由总线接电阻到电源处，使总线处于稳定的高电位，这种措施增加了总线的抗干扰能力。

#### 4. 3 小结

本章主要介绍晶片分选系统的工作过程及设计，实现石英晶片的自动上料、自动分选及自动下料。针对自动分选要实现的主要功能，详细说明了圆振与直振的工作原理及硬件实现，步进电动机驱动器设计，电磁铁的控制及实现。

## 第五章 软件设计及实现

### 5.1 软件设计

当硬件基本定型后，软件的功能也就基本上决定下来。软件设计规划是为软件的整体构造一个具体的实现蓝图。从软件的功能不同可分为两大类：一是监控软件，它是整个控制系统的核心，专门用来协调各执行模块和操作者的关系，系统监控程序是控制单片机系统按预定操作方式运转的程序。二是执行软件，它是用来完成各种实质性的功能如参数测量（如图 5-1 所示）、分析计算、界面显示、通讯、测量与分选的实时状况（如图 5-2 所示）等。每一个执行软件就是一个小的功能模块。设计时将各执行模块一一列出，并为每一个执行模块进行功能定义和接口定义。各执行模块规划好后，就可以规划监控程序了。

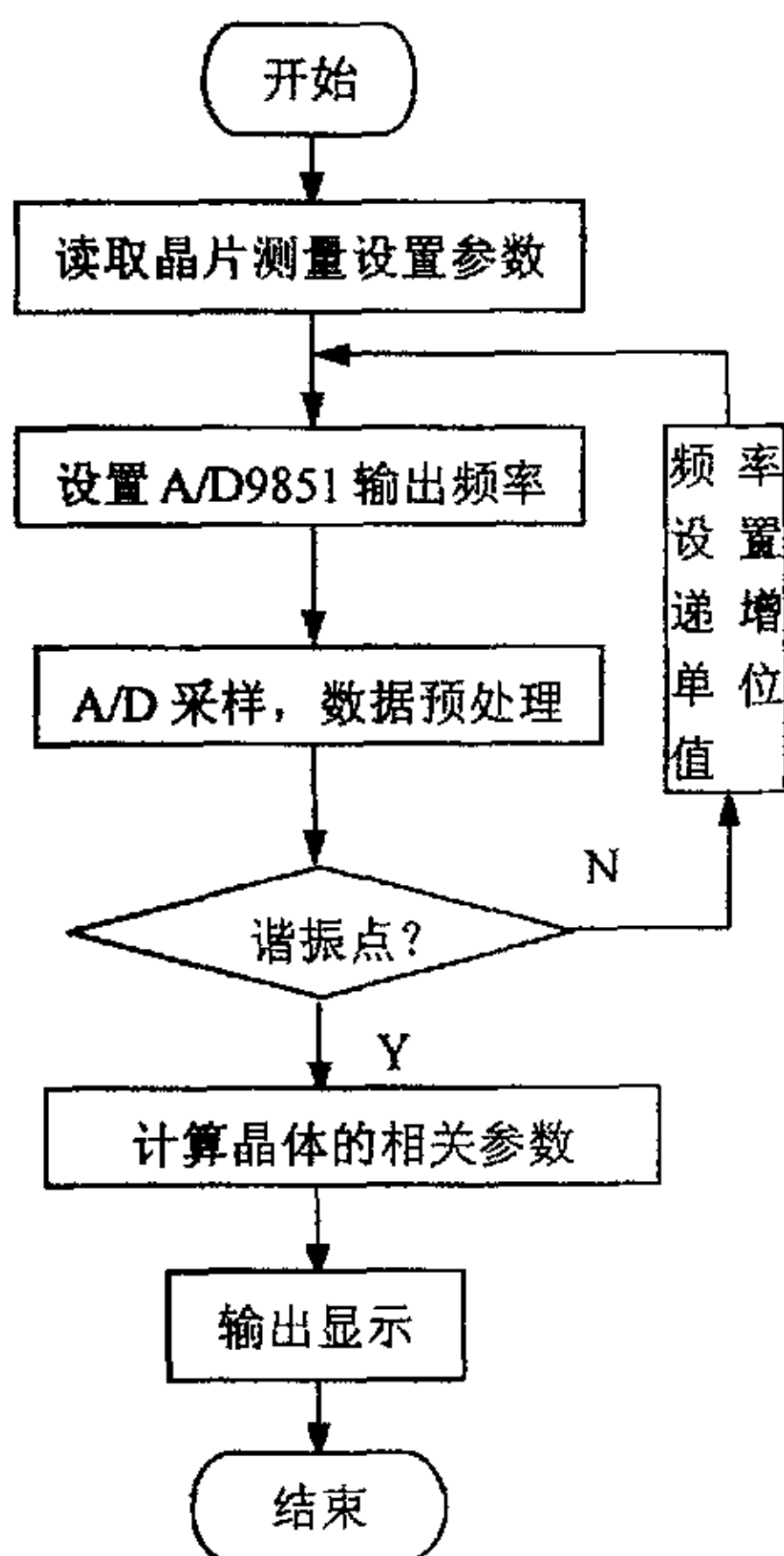


图 5-1 测量模块程序框图

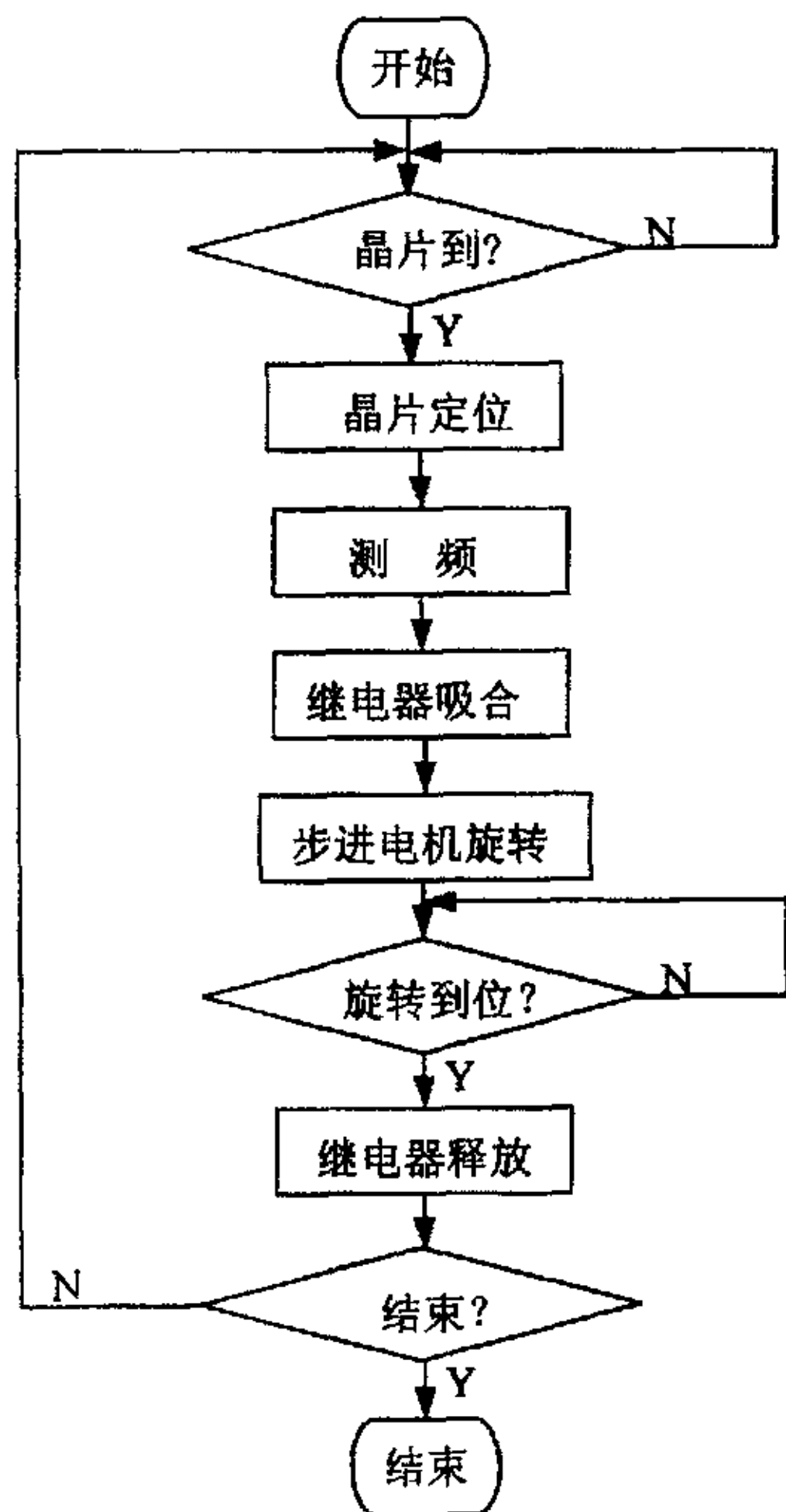


图 5-2 测量与分选控制流程图

整个系统的各个模块之间有着各种因果关系，互相之间要进行各种信息传递。每个执行模块的不同状态，都对应着不同的输出信息。而与此相适应的执行模块根据接收到的这些不同信息执行不同（也有相同）的任务。这样各种不同的信息都要占用系统的资源。因此就要协调好个模块工作，以免发生冲突。

系统运行的最初时刻，应对系统进行自检和初始化。自检在系统初始化之前进行。如果自检无误，则对系统进行正常初始化。初始化通常包括硬件初始化和软件初始化两个方面。硬件初始化工作是指对系统的各个硬件资源设定明确的初始状态，为单片机的硬件资源分配任务等。软件初始化包括对中断的安排、堆栈的安排、状态变量的初始化、各种软件标志的初始化、系统时钟的初始化和各种变量存储单元的初始化等。

本系统中不仅有高层次的、面向磁盘文件的操作，也有许多直接控制硬件的操作，采用了 C++语言、Visual C++6.0 及汇编语言编程技术，各模块根据各自操作对象的不同来选择适当的语言。这样可以同时利用高级语言和低级语言各自的特殊性和优点：C++和 Visual C++6.0 编程方便、结构性好；汇编语言快速、灵活、针对性强<sup>[35]</sup>。

## 5.2 界面与分选速度软件设计

### 1、界面设计

系统软件的主要功能是为用户提供一个良好的操作环境，及时响应用户的命令。用户操作界面采用一系列命令按键，将测量测量系统采集到的实际信号的波形、故障发生的时刻等映射到计算机屏幕上，用户可以对采集到的信息有一个直观的认识。在屏幕上实时显示晶片谐振波形，包括谐振频率、寄生频率、活力和杂波等情况，其具体数据就在左侧的编辑框中。可直接读取每档已分选的石英晶片，及时反映分选系统的状况，还显示了分选速度。这些内容的显示使用户第一时间掌握了各项性能指标，真正体现了软件的监控能力。用软件虚拟硬件操作界面，可以充分利用计算机的强大运算功能、灵活多变的软件优势和强大的显示功能。为了便于系统的扩充和软件复用，整个软件分为几个相对独立的功能模块，模块内代码封装，相互之间设立统一的接口规范。界面的设计如图 5-3 所示。

数据分析单元主要是对采样信号进行后处理，通过比较、有效值转换最后确定其谐振频率及 A/D 值，将这些数据送入分选系统，然后确定分档号，最后又命令单片机控制步进电动机带动接料盒和分料器旋转，将晶片送入该档料盒。这其中完成小波变换、信号奇异性检测、谱分析和相关分析等数据处理功能，并通过波形输出单元实时将曲线显示出来。

界面设计使用流行的 OOP 方法对其进行分析, 先对界面进行模块化, 例如文件、编辑等, 理清每一模块包含的部件和所要执行的操作, 然后将各模块封装成 C++ 类, 以便在其它程序里调用。整个系统提供给用户的是一个基于 WINDOWS 的快速操作界面, 系统主控程序协调整个系统的运行, 控制硬件自动运行。在系统界面上包括用于波形显示的高速窗口和命令按键等, 可以通过简单操作的观察实时采集到的数据波形、幅值和故障发生的时刻。同时提供了对外的软件接口, 用户可以按照规定的格式组织数据, 利用本系统强大的数据分析功能处理数据<sup>[39][40]</sup>。

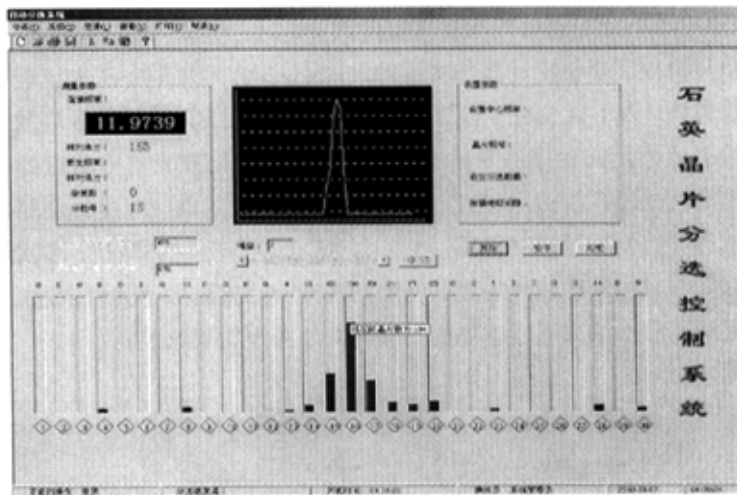


图 5-3 界面设计

操作用户可通过显示界面可知标称值、分档数、各档晶片分选数和分选总数, 界面还实时显示石英晶片谐振波形, 包括主振、寄生、频率、活力、杂波数等情况, 并显示晶片活力分布曲线图。界面包括菜单栏、测量参数显示栏、设置参数显示栏、波形显示窗口、晶片分布柱状图及状态栏等。

**菜单栏:** 菜单栏的功能是进行任务管理、打印、操作员管理、设置分选参数、查看操作记录等功能。

**测量参数显示栏:** 测量参数显示栏的功能是在测量过程中, 实时显示晶片频率测量值、相对活力、寄生频率以及相对活力的实际测量值、杂波数, 并显示分档号, 用户可以直接从屏幕得知晶片将落入几号料盒。

**设置参数显示栏:** 设置参数显示栏的功能是将用户已设好的被测晶片中心频率、晶片的规格、数量以及测量用电极号显示在屏幕上。

**波形显示窗口:** 波形显示窗口的功能是在测量过程中实时显示被测晶片的谐

振波形，用户可直接检查晶片的活力及寄生情况。鼠标指向波形显示窗口，单击左键，显示网格增大；单击右键，显示网格减小。用此方法可调节波形显示的幅度。（波形的实际幅度未变化）。

控制按钮：控制按钮的功能是控制系统开始运行、暂停和结束运行时清理分料器。

晶片分布柱状图：实时显示料盒内晶片数量分布情况。

状态栏：显示系统运行状况（正在运行、暂停、停止）；分选速度：（ $\times\times$ 片/小时）；操作员姓名；开机时间；当前的日期以及时间。

## 2、步进电动机分选速度控制软件实现

单片机控制步进电动机加减速的过程中，一般用离散办法来逼近理想的指数升降速曲线。为了减少每步计算装载值的时间，系统设计就把各离散点的速度所需的装载值固化在程序的表格中，系统在运行中用查表的方法查处所需的装载值，从而大幅度减少占用 CPU 的时间，提高系统的响应速度。在第四章对步进电动机速度控制作了详细介绍，步进电动机有两种方法加减速，多次试机发现在相同时间指数加速比线性加速的所用的脉冲少，指数加速到恒定速度的时间快，因此采用离散办法来逼近理想的指数升降速曲线加减速控制。

部分程序如下：

```

INT:      PUSH  ACC          ; 保护现场
          PUSH  PWS
          MOV   R0,#20H     ; 取状态计数器
          INC   @R0         ; 计数器增 1，正转 1 步
          MOV   P1,@R0     ; 送输出口
          .....
          .....
SUB1:     SETB  EA          ; 开中断
          CJNE R4,#24H,SUB4 ; 判断在哪个阶段
          MOV   R0,#24H     ; 升速段
          DEC   @R0         ; 升数步数减 1
          .....
          .....
SUB2:     DJNZ  R3,SUB3     ; 该档速度走完否
          INC   R1          ; 走完，增一档
          MOV   A,R1        ; 计算该档步数

```

```

.....
.....
SUB3   MOV   A,24H           ; 升速结束否
        ORL   A,25H
        JNZ   SUB9           ; 未结束, 重新装载
        MOV   R4,#26H       ; 结束, 置指针恒速段
.....
SUB4:   CJNE  R4,#26H,SUB6   ; 判断是否是恒速段
        MOV   R0,#26H       ; 是, 恒速步数减 1
.....
.....
SUB5:   MOV   A,26H           ; 恒速段结束否
.....
.....
        MOV   R4,#29H       ; 置指针为降速段
.....
SUB6:   MOV   R0,#29H       ; 处理降速段
.....
.....
SUB8:   MOV   A,29H           ; 判断降速走完否
        ORL   A,2AH
        JNZ   SUB9
        CLR   TR0           ; 走完, 清定时器
        LJMP SUB10
SUB9:   MOV   DPTR,#8000H    ; 准备装载定时器
.....
.....

```

有关程序当中用到的寄存器定义如下:

R0:中间寄存器  
 20H: 状态计数器  
 21H~23H: 系统绝对坐标值  
 R1: 存储过程速度字  
 R3: 每档速度运行步数  
 26H~28H: 恒速过程总步数



29H~2AH: 降速过程总步数

R4: 数据指针, 初试值 24H

### 5.3 实验结果与分析

石英晶片测量与分选系统<sup>[36]~[38]</sup>经过多次对石英晶片进行测量与分选试验, 它测试的石英晶片的谐振频率的标值分别为: 6MHz、11.98MHz、19.98MHz、33.74MHz 和 60MHz。

下面是标称频率分别为 19.98MHz (表 5-1)、33.74MHz (表 5-2) 的石英晶片测量结果:

表 5-1 标称 (中心) 频率为 19.98MHz 晶体的测量结果

测量序号	测量结果	测量序号	测量结果	测量序号	测量结果	测量序号	测量结果
1	19.985041	11	19.987705	21	19.987391	31	19.987447
2	19.985467	12	19.986145	22	19.987604	32	19.985726
3	19.985334	13	19.987281	23	19.985902	33	19.987771
4	19.987500	14	19.986827	24	19.985153	34	19.987538
5	19.986169	15	19.985961	25	19.985292	35	19.986869
6	19.985724	16	19.985491	26	19.985382	36	19.986912
7	19.987478	17	19.987995	27	19.987421	37	19.986667
8	19.987358	18	19.987942	28	19.985716	38	19.987299
9	19.987962	19	19.986827	29	19.986718	39	19.987035
10	19.985464	20	19.987436	30	19.986895	40	19.985894

表 5-2 标称 (中心) 频率为 33.74MHz 晶体的测量结果

测量序号	测量结果	测量序号	测量结果	测量序号	测量结果	测量序号	测量结果
1	33.740041	11	33.745705	21	33.752391	31	33.745447
2	33.758467	12	33.748145	22	33.754604	32	33.741726
3	33.746334	13	33.743281	23	33.743902	33	33.754771
4	33.746500	14	33.756827	24	33.740153	34	33.741869
5	33.759169	15	33.749961	25	33.740292	35	33.759912
6	33.755724	16	33.740491	26	33.752382	36	33.745667
7	33.751478	17	33.742995	27	33.757421	37	33.746299
8	33.749358	18	33.751942	28	33.758716	38	33.757035
9	33.746962	19	33.744827	29	33.759718	39	33.749894
10	33.744464	20	33.745436	30	33.759895	40	33.748703

将以上两组测试结果再分别进行了重复性测试（20次），试验结果表明石英晶片的谐振频率的重复测试精度可以达到 $\pm 10^{-5}$ ，重复性很好，分档号仍然不变，完全满足石英晶片测量分选系统生产厂家的要求。

#### 5.4 小结

本章主要介绍系统应用软件的设计和实现。在明确硬件设计的基础上，介绍了软件设计思想及方法，详细说明了界面显示技术，并从使用方便的角度，对系统界面软件所实现的功能进行了全面的阐述。

软件的实现结果是本章主要分析的对象。对实验内容进行了深入的探讨，对结果进行了分析，其中指出的数据有效性、数据准确性、重复性等都是系统优越性的集中体现。

## 结 论

本系统的开发过程融入了计算机应用技术、机电控制技术和现代自动控制技术，作为晶体行业的测量与分选自动控制系统，该系统的研制开发无疑是一个很具经济意义和社会意义的课题，本系统的开发具有良好的市场前景。

本文主要论述了石英晶片测量与分选系统的硬件结构和系统软件的设计及实现。在分析晶体测量原理的基础上，设计了频率测量及分选控制系统的方案，并予以具体的实施。系统的创新之处在频率测量方法的选择上和分选系统的设计过程中都得以体现。大量的实验结果证明，本系统具有很好的可靠性和实时性，晶片的频率测量也能保证高稳定性和重复性，具有很高的性能/价格比。

同时，本系统也存在许多不足，如对于上料过程中，由于圆振与直振持续振动，使得测量结果与实际值有一些的偏差，相比发达国家测量精度还是有一定的距离。这也是系统下一步开发的方向，相信科学的不断进步，特别是测控技术和微电子技术的不断发展，能使晶片测量系统向着更高的领域迈进。

## 参考文献

- [1] C. J. Wils. Vibration Modes of AT-Cut Convex Quartz Resonators. J. Phys, D7. 2449
- [2] 周谱福. 国外晶体加工业的现状与发展趋势. 压电晶体技术. 1995, 1: 1-30
- [3] 林勇, 陈桦. 石英晶体谐振器生产工艺流程综述. 电讯技术. 1997, 37(3): 15-20
- [4] 李东, 刘贵礼. CIM-2 晶体测试仪的研制. 第三届中国自动化与智能仪器学会论文集
- [5] Burns, J. E. 150D 1 TO 60MHz Quartz Crystal Oscillator test system. Saunders&Assoc. Inc.
- [6] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量. 北京: 国防工业出版社, 1983 年
- [7] 品田敏雄. 石英谐振器的原理与制造. 1972 年
- [8] Basic Method for the measurement of resonance frequency and resistance of quartz crystal units by zero equivalent in a pi-network. IEC publication 444 1990
- [9] Measurement of Quartz crystal unit parameters by zero phase technique in pi-network. IEC publication 444-1.
- [10] 顾林坪. 几种阻抗计的特性和测量误差. 压电晶体技术. 1994, 3: 25-28
- [11] Dwane Rose. LOAD RESONANT MEASUREMENTS OF QUARTZ CRYSTALS . Saunders and Associates, Inc
- [12] 王艳林, 李东, 刘桂礼. 数字频率合成技术在晶振测量中的应用. 北京机械工业学院学报. 2001, 第 16 卷, 第 3 期, 23-27
- [13] 李东, 刘桂礼, 赵双琦. 石英晶体谐振器电参数模型及其对测量精度的影响. 天津大学学报. 1999, 11(6), 781-784
- [14] 段传华, 王建和, 杜晋军. 直接数字式频率合成器的原理及应用. 电讯技术. 1995, 10 (5): 1 - 4
- [15] Analog Devices. CMOS 180MHz DDS/DAC Synthesizer. 1999 年
- [16] 姜伟光. PC 机并口与 AD 接口的时序分析. 电子测量技术. 1998, 6: 57-59
- [17] 尤一鸣. 单片机总线扩展技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993 年
- [18] 赵育良, 李开端. 光纤感测器在测量领域的发展与应用. 新技术新仪器. 2001, 第 21 卷, 第 6 期, 22-26
- [19] W. R. Philp. 一种用于振动频率测量的光纤感测器. 现代计量测试. 1994, 第 6 期, 64-65
- [20] 董渭清, 王换招. 高档微机接口技术与应用. 西安: 西安交通大学出版社,

- 1995 年
- [21] H. D. Chai. Permeance-based step motor model revisited. Proc of 1985 IMCSD, University of Illinois
- [22] 程树康, 王宗培. Application and development of teech layer specific permeability method for calculating step motor's static torque. International conf on electric machines. 1986, Muchen
- [23] Tak. Kenjo. Electric Motors and their Controls on introduction. Oxford, New York, Tokyo, 1991
- [24] Charles I. Hubert. Electric Machines. Theory, Operation, Applications, Adjustment and Control. Oxford, New York, 1991
- [25] 王晓初, 何捷. 步进电机自动升降速及其单片机控制. 微特电机, 1998, 2
- [26] 程智, 任雷, 韩光鲜, 王宗培. 两相步进电动机系统高频运行牵出转矩的提升. 微电机, 2000, 33 卷, 第 3 期
- [27] S. A. Nasar. Electromagnetic. Energy Conversion Devices and Systems, Prentice-Hall, Englewood cliffs, N. J., 1970
- [28] T. Hindmarsh. Electrical Machines and Drives. Worked Example, Second Edition. Oxford, New York, 1985
- [29] 杨金才, 王桂琴, 刘富. 链板自动分选整列机自动分选系统. 吉林工业大学学报. 1996, 第 4 期, 第 26 卷, 40-44
- [30] 张建军. 弹簧刚度自动测试及分选系统的研制. 电子与自动化. 1995, 第 3 期, 17-21
- [31] 谢剑英. 微型计算机控制技术. [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990 年
- [32] 朱正德. 离合器支承铆钉全自动分选系统. 实用测试技术. 1995, 第 3 期, 9-13
- [33] 文哲雄. 电池参数测量与分选系统的研制方法. 现代计算机. 1996, 第 51 期, 7-10
- [34] 张冠生. 电磁铁与自动电磁元件. 北京: 机械工业出版社, 1982 年
- [35] 郝雪峰. 计算机与数据通信. 上海: 复旦大学出版社
- [36] S&A 2100 Temperature Test System. Saunds&Assoc. Inc 1991
- [37] H. F. Tiersten. The influence of an asymmetric air gap on the vibration characteristics of Quartz trapped energy resonators. 1995 IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM
- [38] Horton, W. Payne. Comparison of Methods for Measurement of Quartz Crystal Resonator with Load Capacitance. Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium

- [39] 李伯成. IBM-PC 微机应用系统设计. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994 年
- [40] 李中健. 32 位 Windows 下使用 VC++ 进行多任务编程. 微计算机信息. 2000, 16 (2): 38-40



## 致 谢

在本课题的研究过程中，我始终得到了导师桂卫华教授的悉心指导。导师在自动控制领域的渊博学识以及严谨治学的科研作风，使我终生受益无穷。在课题研究中，当我遇到科研和论文写作中的困惑时，桂老师总能给予我深刻的启发。导师敏锐的科学洞察力和丰富的实践经验往往引导我找到解决问题的方法。在此，谨向桂老师表达我最真挚的感激之情。

我还要深切感谢喻寿益教授从理论研究到现场调试给予我很多的指导，使我能够顺利地完成科研任务。在此表示衷心的感谢。

另外，我还要感谢信控所其他的老师和同学对我的帮助，在此表示深深的谢意。

最后，我还要感谢我的父母给予我生活上和精神上很大的支持。