

哈爾濱工業大學

# 毕业论文

题    目    光纤拉锥电机控制  
              系统的设计与搭建

专        业    理学院光信息科学与技术

学        号        111010109

学        生        张育鑫

指 导 教 师        潘玉寨

答 辩 日 期        2015 年 6 月 26 日

## 摘 要

锥形光纤作为重要的基础器件，在光纤传感器和滤波器当中有着关键的作用，许多实验室开始对其结构和性能进行研究。本研究关注光纤拉锥的整个过程，分析了锥形与热源宽度和拉锥速度的关系，讨论了电弧放电的机理和特性，研究了步进电机的受控原理和工作原理。基于步进电机滑台，本研究设计出一套低成本且相对稳定的光纤拉锥控制系统，能在给定合理参数的条件下，制作出锥形较好的锥形光纤。本系统以单片机控制为中心，结合外围电路，步进电机和电弧熔融系统组成硬件结构，合理设计编写控制程序，组成软件结构。在系统试验中能稳定输出符合一定条件的光纤锥形。最后对本系统的优缺点进行了分析，并提出改进方案。

**关键词：**锥形光纤；光纤拉锥；光纤拉锥系统；单片机；步进电机

## Abstract

As an important kind of basic device, tapered fiber has become the indispensable part of FOS(Fiber Optic Sensor) and optic filter, whose structure and performance are studied in many labs. This thesis focused on the progress of processing tapered fiber, discussed the relation between the shape of tapered fiber and the width of heat and the relation between the shape and the speed of motor, the principle of discharge through arc, the control and work method of step motor. Furthermore, this thesis gives a design of tapered fiber processing system that is a relative stable and low cost system based on step motor. With 8 fine parameters sent through serial port, this system can taper optic fiber to get tapered fiber structure. This system includes microcontrollers as the control center, step motor, arc heat system and logical control program. In running experiment, this system produced several fine tapered fibers. At last, this thesis points out the weakness of this system and gives the update plan.

**Keywords:** tapered fiber, tapered fiber processing system, microcontroller, FOS

# 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	II
 <b>第 1 章 绪论</b>	
1.1 研究背景 .....	1
1.2 锥形光纤的特性 .....	2
1.3 锥形光纤的制作系统 .....	3
1.4 锥形光纤的应用——锥形光纤传感器 .....	4
1.5 光纤拉锥系统设计目的 .....	7
1.6 论文主要的研究内容 .....	7
 <b>第 2 章 光纤拉锥系统的理论分析</b>	
2.1 光纤受热融化理论 .....	8
2.2 光纤拉锥过程分析 .....	14
2.3 步进电机及其工作原理 .....	16
2.4 电弧放电理论 .....	18
2.5 本章小结 .....	21
 <b>第 3 章 光纤拉锥电机控制系统的设计</b>	
3.1 系统设计思路 .....	22
3.2 单片机控制系统 .....	23
3.3 步进电机及驱动装置 .....	27
3.4 电弧放电光纤熔融系统 .....	28
3.5 光纤拉锥电机控制系统的程序设计 .....	33
3.6 本章小结 .....	41
 <b>第 4 章 光纤拉锥电机控制系统实验结果与分析</b>	
4.1 对单模光纤进行拉锥操作的实验 .....	43
4.2 实验结果分析 .....	45
4.3 本章小结 .....	47

<b>结论</b> .....	48
<b>参考文献</b> .....	49
<b>致谢</b> .....	50
<b>附录</b>	
光纤拉锥电机控制系统使用手册 .....	51

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景

光纤的出现使得通信技术不断成熟，而随着光纤通信系统的发展和完善，各种不同需求的光纤品种和光纤传感器相继问世，如光纤传感器、光纤耦合器、波分复用器、光滤波器等。

光纤传感器技术发展的主要方向是多用途的功能光纤传感器，一种光纤传感器不仅只是针对一种形式的物理量，而且要能对多种形式的物理量进行同时的测量。在提高分布式传感器的灵敏度、空间分辨率，降低其成本方面；在设计复杂的传感器的网络工程方面；在新型传感材料、传感技术的开发方面；在恶劣条件下（化学腐蚀、高温、高压）低成本传感器的开发和应用方面；在光纤连接器及和其他微光纤技术方面，光纤传感器都拥有着极大的潜能和发展空间。

而在光纤通信中，锥型光纤器件是最具代表性，也是光学器件制作中的一种基础器件，其在光纤用户网，光纤 CATV 和无源光网络等领域有着广泛的应用潜能。其具有的高灵敏度，高响应速度，低损耗以及光场特性使得该产品极具研究价值。而其核心部分，锥形光纤不仅有着更好的光学性能，而且有着超高的灵敏度，在如微光波导耦合，超连续谱的产生等新领域有着广阔的应用。激光光束在锥形光纤中传播，相较普通光纤，其反射次数大大减少，能够增大其数值孔径，而且是激光在入射过程汇总中使入射角逐渐增大，从而缩短光束传播的路径，使得损耗进一步降低，提高了与光纤的耦合效率。

研究光纤的拉锥技术成为研究的一个热点。锥形光纤是通过拉锥技术，将常规光纤进行加热熔融拉伸处理制作而成。通过不同的工艺，可以控制拉锥形状从而制成适应不同场合和应用条件的光学器件。

光纤拉锥技术包括化学腐蚀法，研磨法，熔拉法。在熔拉法中，移动火焰拉锥具有拉锥光纤形状可控的优点，是制作精确形状拉锥光纤的主要方法。在移动火焰拉锥技术时，如果已知火焰的移动速度，光纤夹具移动速度以及每次火焰的摆动距离，就可以计算出拉锥光纤的形状。反之，如果预先设定了拉锥光纤的形状，包括腰长腰粗和变形区形状等，也可以计算得出光纤的拉锥过程参数。然而虽然熔拉法有着许多优点，如极低的附加损耗，方向性好，良好的环境稳定性，控制方法简单灵活和适于批量生产等，但其加热过程常常会不均匀，从而使得圆柱形光纤在不同

方向的机械性能会有差异，这样一来在拉力的作用下，其产生的锥形光纤往往不能够产生对称和匀称的结构，降低了锥形光纤的使用性能。

## 1.2 锥形光纤的特性

锥形光纤的形状是不规则的，故描述普通均匀光纤所运用的波动理论方法不能很好地适用于锥形光纤的描述，故尝试使用射线理论得方法对锥形光纤进行理论分析。

射线理论方法，也叫作几何分析法，是对满足全反射条件，以一定角度射入光纤中的无损耗传输光线为对象，通过忽略光的波动性来进行研究的。在普通单模光纤中，入射光在芯层的传输路径如图 1-1 入射光在纤芯的传输路径所示。

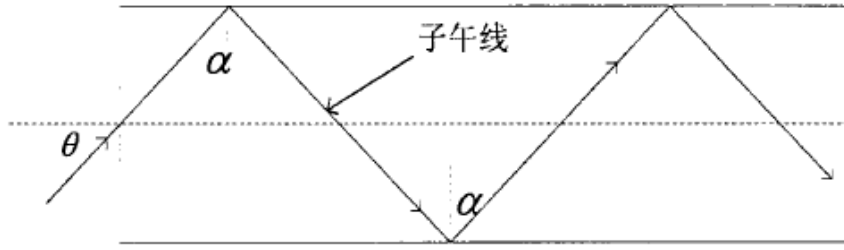


图 1-1 入射光在纤芯的传输路径

图中，光线以一定角度  $\theta$  入射，当光线的入射角  $\theta$  满足光纤数值孔径要求时，其在光纤中将不断以全反射的方式在纤芯中传播，此时传输光线的反射角  $\alpha$  将保持不变。数值孔径是反映光纤横断面耦合能力的参数，普通光纤的数值孔径  $NA$  为：

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

其中， $n_1$  和  $n_2$  分别为芯层和包层的折射率。 $\Delta$  是光纤的相对折射率差，表达式为：

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

在普通均匀光纤中，通常数值孔径保持不变。而锥形光纤的数值孔径和切面两端的光纤半径有关，其表达式为：

$$NA' = \arcsin\left(\frac{b}{a} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)$$

$a$  和  $b$  分别为锥形光纤的大口径端和小口径端的半径。由上式可看出，锥形光纤的数值孔径是小于普通均匀光纤的。 $b$  和  $a$  比值越小，锥形光纤的锥度越大，其数值孔径也越小，也就是说在锥形光纤中能全反射的传输光线比普通均匀光纤中

有所减少。同时，当两种光纤耦合时，因数值孔径不同，将产生损耗。

由以上分析可知，光线在通过锥形光纤时，会产生一部分损耗，而经过特殊加工的锥形可以利用损耗，制成特定功能的滤波结构。经过特殊的拉锥工艺和锥形设计，锥形光纤在光信号通过的时候可以对其进行波段选择和消噪处理，从而使得制成各种功能的光纤传感器成为可能。

### 1.3 锥形光纤的制作系统

锥形光纤由普通光纤经过特殊的加工过程得到的。加工方法分为化学腐蚀法和熔融拉锥法。熔融拉锥法因其熔融热源温度相对可控，拉锥速度可调，输出锥形相对稳定且多样，被广泛采用。近年来，基于普通的熔融拉锥法，又发展出不少改进的锥形光纤制作工艺和系统。

#### 1.3.1 移动大热区拉锥系统

哈尔滨工程大学理学院的孙伟民，袁明和曾宪金研究了移动大热区拉锥系统。此系统可以对大口径光纤器件进行拉锥。研究员通过控制加热火焰移动速度，加热火焰移动距离，光纤拉伸速度等系统参数，对系统热炉的表现进行分析和仿真。发现拉锥过程中光纤的结构变化并不连续，且其锥腰宽度可由火焰每次移动的距离和加热火焰移动次数得到，同如果调节拉锥速度和火焰移动速度可以在一定范围内调整锥腰的半径。

#### 1.3.2 USB 光纤拉锥机的控制系统

武汉理工大学的罗丽容和黄秋元在研究光纤熔融拉锥机时，提出了一种基于 USB 接口的光纤熔融拉锥机控制系统。其由 ATmega8 对光功率进行采集，由 USB 芯片 PDIUSB12 实现数据的传输，界面程序基于 VC++.NET 编写。系统首先由 ATmega8 控制 ADC 进行采样，采样数据倍润放在 RAM 中，并等待请求后通过芯片传送到主机。系统可以实时观察并控制光纤的整个拉锥过程，同时在 PC 上实时观察拉锥过程中光功率的变化。

#### 1.3.3 新型电加热熔融拉锥系统

中南大学的，研制出一种电加热器作为热源的熔融拉锥系统。普通加热器为火焰气体加热器，因为热应力过大，容易使得光线在棱角处断裂，不利于实际应用。



其新型电加热器采用平行环状圆弧过渡结构，确保了发热端能够有效发热，保证了足够的热效率。在实际应用中，在此热源的基础上在发热体外加盖陶瓷保护层，减少热量的流失，达到足够的温度并利于维持光纤被加热区的温度。

## 1.4 锥形光纤的应用——锥形光纤传感器

锥形光纤以其优良的性能，如超高的灵敏性，良好的光学特性和非线性，有着极大的应用领域和开发前景。由锥形光纤为基本元件而制成器件有着极大的优势，如成本低，尺寸紧凑，分辨率高，复用能力强，抗电磁式遗传干扰的优点，得到了快速的发展。下面将对其中一种光学器件，锥形光纤传感器进行介绍。

### 1.4.1 锥形光纤湿度传感器

由西班牙纳瓦拉公立大学（Universidad Pública de Navarra, Pamplona）的 Jesus M. Corres 研究的锥形光纤湿度传感器，其结构如图 1-2 所示。此结构是由一个涂覆有[PDDA/聚 R-478]纳米结构的单模锥形光纤叠加而成的，可以实现从 75%到 100%湿度检测，并以光功率的大小来进行响应，响应时间为 300 毫秒。高动态性能和高低温交叉灵敏度允许该传感器用于人体呼吸监测。对光纤的熔融拉锥的加工处理，可以使用火焰或电弧放电系统并通过精密的机械控制完成。

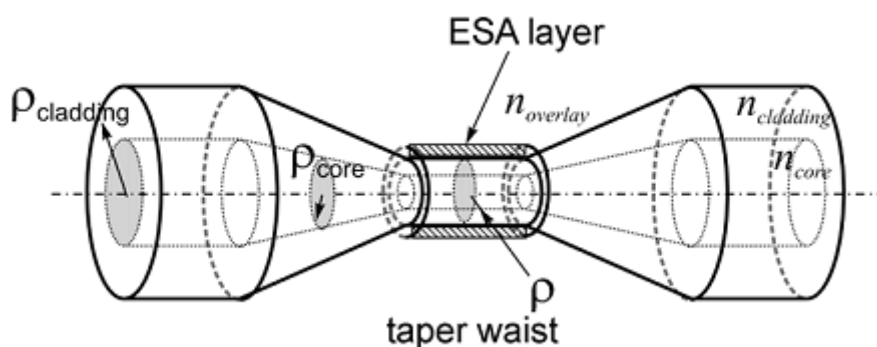


图 1-2 湿度传感器结构 锥形结构和 ESA 结构的叠加

### 1.4.2 消逝场折射传感器

北京交通大学的李冰和刘艳制作了一种基于多模干涉原理和 STMS 结构的新型光纤温度传感器，其锥形结构如图 1-3 所示。



图 1-3 具有 STMF 结构的光纤温度传感器

如图 1-4 为 STMS 结构外形示意图。锥腰中间的平坦区有着较小的纤芯半径，对外界的响应十分敏感，因此利用 STMS 结构中的双锥形设计可以更好地实现更高灵敏度的传感。该结构在试验中对外界温度产生了精确的反应，温度变化使特征波长产生有规律的漂移，变化灵敏度为  $68.57\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

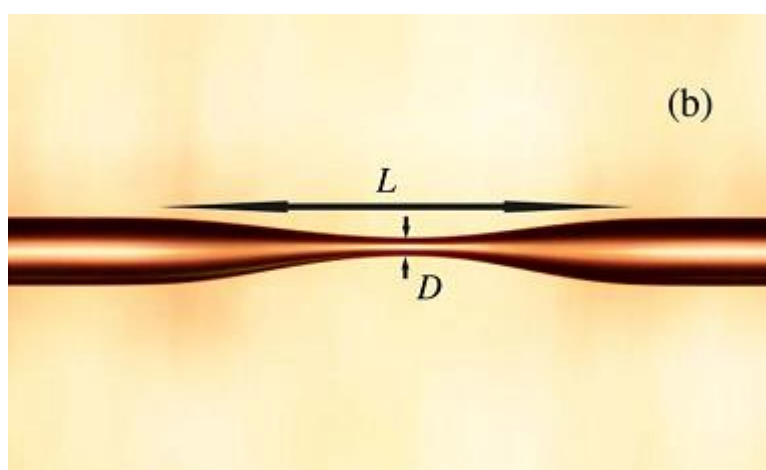


图 1-4 锥形 MMF 的显微镜图像

### 1.4.3 超灵敏的温度传感器

由吉林大学物理学院集成光电子学国家重点实验室研究的一种超灵敏的温度传感器如图 1-5 所示。此传感器核心部分由电弧放电系统加工而成，并在光学超细锥度（OMT）的毛细管里密封异丙醇。OMT 是高度敏感的，环境折射率（RI）在 1.3955-1.4008 范围内，温度范围在  $20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，最大灵敏度为  $18989\text{nm}/\text{RI}$ ，超灵敏的温度传感器的最高感光度为  $-3.88\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

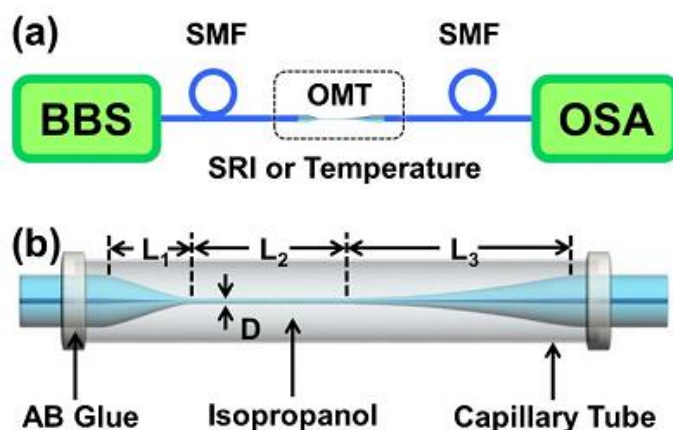


图 1-5 a 光纤传感测量实验装置 b 异丙醇密封在毛细管 OMT 的原理

#### 1.4.4 双锥形光纤应变传感器

龙岩学院物理与机电工程学院的邱晖晔，单淑萍和王宇飞研制出了双锥形光纤应变传感器，如图 1-6 所示。本装置利用光纤环型腔衰震荡光谱技术，对腔内微小的光损耗进行检测。当外界应变施加在双锥形光纤上时，会引起光纤环型腔内光脉冲的传输能量和角度的变化，通过测量衰荡时间，间接得到应变的大小。在组成的光纤环形腔中用高速采集卡进行实验测量，得到此传感器最小测量的位移量为 30nm，即 0.8 个  $\mu\epsilon$ 。

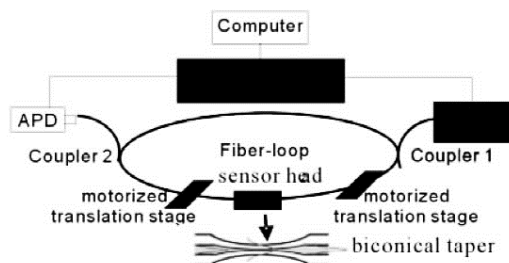


图 1-6 双锥形光纤应变传感器

上述光纤传感器是由非晶态石英玻璃构成的，在低于脆性温度 1062℃时可保持弹脆态，因此使用温度范围较高；因它们的结构尺寸非常精细，故它们具有超高的灵敏度。而制备这样超精细的锥形结构就需要特别的系统对其加工制作，基于步进电机控制系统的光纤拉锥装置可以实现对光纤的拉锥处理。

## 1.5 光纤拉锥系统设计目的

因拉锥光纤的优良特性和广阔的发展空间，使得实验室对拉锥光纤的制备和研究有所需求。本研究着眼于低成本光纤拉锥平台的搭建，以便在小型实验室中完成拉锥光纤的制作。

本设计基于简单的实验室设备，如 89C51 单片机，单片机开发板，2M542 步进电机驱动器，一维滑轨，NORMAG1302-2-B3 滑台和高压放电熔融装置，搭建稳定可控的光纤拉锥系统。随着研究的深入，将编写较高精度，拉锥时序和加热时序可独立控制的综合系统，以随需求制作不同种类，不同锥形的拉锥光纤。相较于市面上的成品光纤拉锥机，本系统成本较低，灵活性强，加工出的光纤虽不能达到与市面成品机所得的高精度锥形，但对小型实验室的锥形光纤制作和研究提供了可能性。

## 1.6 论文主要的研究内容

本论文着眼于光纤拉锥电机控制系统的设计与搭建。主要研究系统的搭建设计和电机控制系统的设计。不断优化系统的结构电路，不断论证程序的逻辑关系，优化流程以期得到安全可控的控制方案和稳定的系统结构。同时进行拉锥实验，根据结果对系统进行稳定性和精度的校正和修改。

第一章主要介绍课题背景，锥形光纤的光学特性，基于锥形光纤的传感器发展成果，本光纤拉锥电机控制系统的设计目的。

第二章对拉锥系统进行理论分析，包括光纤受热融化理论分析，制作拉锥光纤的几种具体方法和其优劣特性，步进电机的工作原理，单片机基础理论，电弧放电理论。

第三章为光纤拉锥电机控制系统的设计，包括整体设计思路，单片机及外围电路设计，步进电机和驱动装置的连接控制方法，电弧放电熔融系统的使用与调整，控制程序的逻辑结构。

第四章为光纤拉锥电机控制系统的实验结果与分析，包括拉锥实验的准备，过程，后期处理和不同参数下系统制成的锥形光纤的比较。

## 第 2 章 光纤拉锥系统的理论分析

此拉锥系统的目的在于对光纤进行拉锥处理，需对光纤结构，融化理论，光纤的拉锥过程，所用电机的原理，加热熔融装置进行理论分析。

### 2.1 光纤受热融化理论

对光纤进行加工，需明确被加工材料的性能和加工过程材料物理性质的改变，以明确加工前后，所得到的样本为目标样本。

#### 2.1.1 光纤的结构

光纤(OpticalFiber, OF)如图 2-1 所示，就是用来导光的透明石英玻璃光学纤维，一根成品光纤是由多层透明石英玻璃构成的，一般可分为三部分：纤芯、包层和涂覆层。纤芯由高度透明的材料构成，折射率较高；纤芯折射率略大于包层，从而可以构成光波导结构部，形成光波导效应，使纤芯能够束缚大部分光并使之在其中传播；涂覆层的作用就是增强光纤的柔韧性。目前使用的光纤多数为石英光纤，也就是由非晶态石英玻璃构成的光纤，其材料以纯净的二氧化硅为主，其中掺以适当的杂质以改变其折射率。

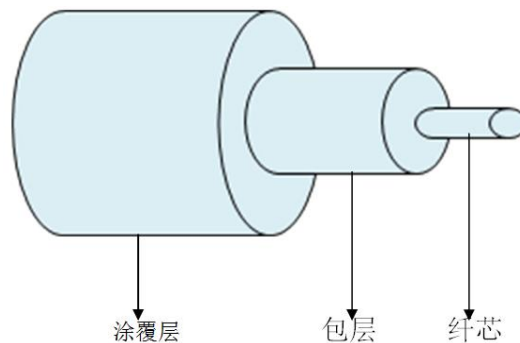


图 2-1 光纤的结构

根据不同数量的传导模式，光纤可分为单模多模光纤两类。

单模光纤：光纤中只传输一种模式，即基模（最低阶模式）。单模光纤的纤芯直径极小，为  $4\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ ，包层直径为  $125\mu\text{m}$ 。

多模光纤：多模光纤的纤芯一般为  $50\mu\text{m}$ ，其横截面的折射率分布为渐变型，包层的外径为  $125\mu\text{m}$ 。

目前，ITU-T(国际电信联盟—电信标准化机构)分别对 G.651 光纤、G.652

光纤、G.653 光纤、G.654 光纤、G.655 光纤的主要参数特性进行了标准化。

（1）G.651 光纤称为渐变型多模光纤，这种光纤在光纤通信发展的初期广泛应用于中小容量，中短距离的通信系统。

（2）G.652 光纤为 1310nm 波长性能最佳单模光纤（或称非色散位移光纤）是目前最常用的单模光纤。

（3）G.653 光纤为 1550nm 波长性能最佳的单模光纤，G.653 光纤将零色散波长由 1310nm 一道最低衰减的 1550nm 波长区，在 1550nm 波长处，它不仅具有最低衰减特性，而且又是零色散波长。

（4）G.654 光纤为 1550nm 波长衰减最小单模光纤，一般多用于长距离海底光缆系统。陆地传输一般不采用。

（5）G.655 光纤是非零色散位移单模光纤，适合应用于采用密集波分复用的大容量的骨干网中。

### 2.1.2 非晶态石英玻璃的结构

理想晶体原子是按照周期性进行排列的，称其为长程序，非晶态石英玻璃原子排列没有周期性，因此不具有长程序。但非晶态石英玻璃中原子排列并不是杂乱无章的，仍然保留着原有原子排列的短程序。石英玻璃拥有的许多特性，如各向同性、物理性质随组成连续变化和没有固定熔点等，都说明石英玻璃中离子的排列是相对无规则的，如图 2-2 所示。因此无规则连续网络学说反映了石英玻璃内部结构远程无序，近程有序的特点。

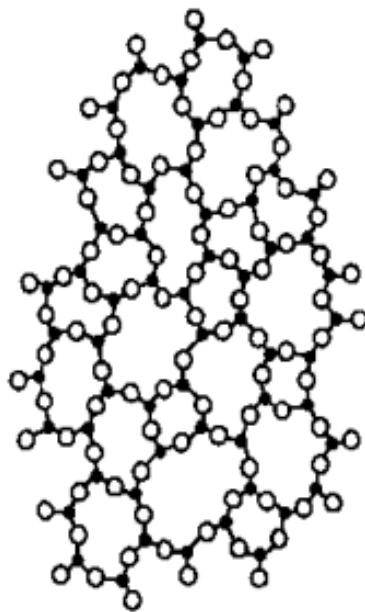


图 2-2 石英玻璃网络结构示意图

### 2.1.3 非晶态石英玻璃的通性

#### （1）各向同性

无内应力存在的均质玻璃，在各个面的导电性、折射率、热导热系数、膨胀系数、硬度、弹性模量等物理性质都是相同的。当非均质玻璃存在内应力时，则会显示出各向异性，出现明显的光程差。

#### （2）介稳性

在一定的热力学条件下，系统虽然没有处于最低的能量状态，却处于一种可以较长时间维持的状态，称之为介稳状态。当熔体冷却成玻璃体时，其状态并不处于最低的能量状态。它能较长时间在低温下保留高温时的结构而不变化，因而为介稳态，它含有过剩的内能，有析晶的可能，熔体冷却过程中物质内能（ $Q$ ）与体积（ $V$ ）变化如图 2-3 所示。从热力学观点看，玻璃是一种高能量状态，它必然有向低能量状态转化的趋势，即有析晶的可能。

#### （3）熔融态向玻璃态转化是可逆的与渐变的。

当熔体向固体转变时，当温度降低至熔点  $T_M$  时，若存在析晶过程，随着新相的出现，会同时伴随着内能、体积及其他一些性能的突变（内能、体积突然下降与黏度的剧烈上升），若向玻璃转变，当熔体冷却到  $T_M$  时，体积、内能不发生异常变化，而是沿着  $be$  变为过冷液体，当达到  $f$  点时，熔体开始固化。

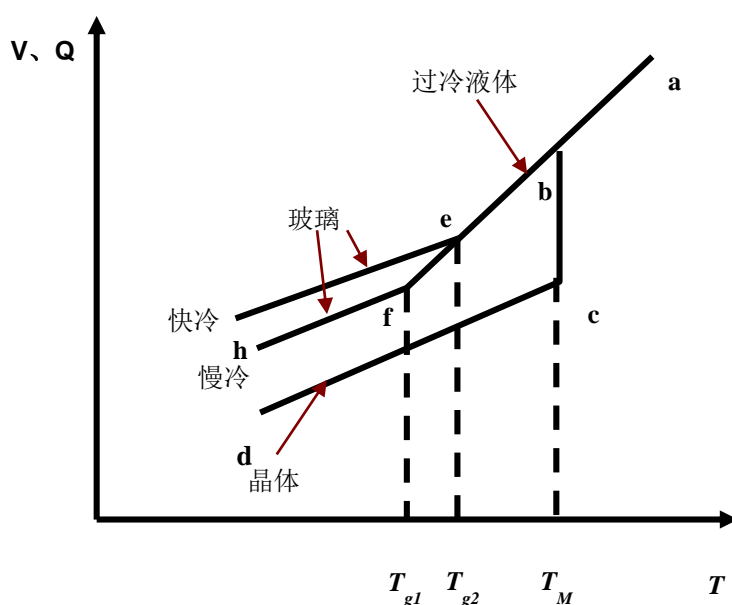


图 2-3 结晶态、玻璃态与过冷液体之间的关系

（4）由熔融态向玻璃态转化时性质随温度、成分的变化是连续的。

玻璃体由熔融态冷却转变为固态或者加热的由固态变为熔融态的转变过程，其物理化学性质连续变化的。如图 2-4 表示玻璃性质随温度变化的关系。由图可见，玻璃性质随温度的变化可分三类：第一类性质如电导、黏度等按曲线 I 变化；第二类性质如热容、膨胀系数、密度、折射率等按曲线 II 变化；第三类性质如导热系数和一些机械性质如曲线 III 所示，它们在  $T_g \sim T_f$  转变范围内有极大值得变化。

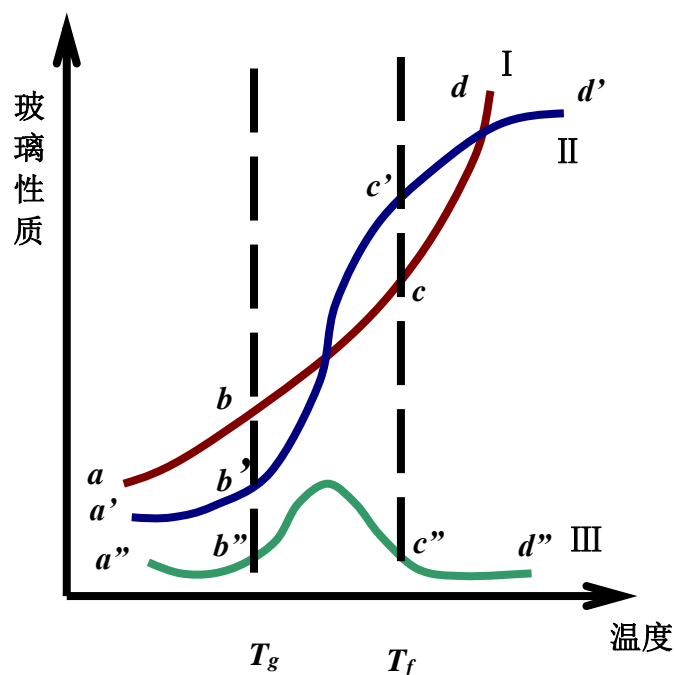


图 2-4 石英玻璃性质随温度的变化

在图 2-4 中石英玻璃性质与温度变化的曲线上有两个特征温度，即  $T_g$  与  $T_f$ 。它们的温度如表 2-1 所示

（a） $T_g$  温度相应性质与温度曲线上低温直线部分转向弯曲部分的温度，称为玻璃的脆性温度，它是石英玻璃开始出现脆性的最高温度，相应的黏度为  $10^{13} \text{ dPa.s}$ ，此温度下石英玻璃物理性质等发生突变，玻璃结构也发生变化，高于此温度玻璃进入粘滞态，低于此温度处于脆性态，由于在该温度时，可以消除玻璃制品因不均匀冷却而产生的内应力，因而也称为退火上限温度。



表 2-1 黏度与温度的关系

黏度 $\lg\eta$	特征点	熔融石英玻璃 温度 (K)
14.5	应变点	1260
13.0	退火点	1335
7.6	软化点	1867

(b)  $T_f$  温度从曲线部分开始转向高温的直线部分的温度，又称为玻璃软化温度，此温度下玻璃开始出现液体状态典型性质，相应的黏度为  $10^{7.6}$  dPa.s，是玻璃拉制成丝的最低温度，为操作温度的下限。

(c) 石英玻璃黏度为  $10^{14.5}$  dPa.s 时的温度，此温度实际上是加热石英时内应力开始消除的温度，为退火下限温度。

通过查阅资料对于由  $\text{SiCl}_4$  合成石英玻璃（羟基含量  $1200 \times 10^{-6}$ ）的经验公式：

$$\lg\eta = \frac{2.67 \times 10^4}{T} - 6.7$$

#### 2.1.4 非晶态石英玻璃的形成

##### (1) 石英玻璃的形成方法

石英玻璃经加热、熔融并在常规条件下进行冷却后形成玻璃态物质。

##### (2) 石英玻璃形成的热力学条件

熔体是物质在熔融温度以上时的一种状态，此状态有着较高的能量。随着温度的降低，熔体释放出大小不同的能量，冷却途径可以分为三种。

**A：结晶化。**有序度不断增加，直到释放出全部多余的能量而使整个熔体结晶化为止。

**B：玻璃化。**过冷熔体到达转变温度  $T_g$  后硬化为固态玻璃的过程。

**C：分相。**熔体内某些组成因质点移动而偏聚，从而形成了互不混溶的结构，组成不同的两个玻璃相。

从热力学的观点分析，玻璃态物质总有降低其内能向晶态进行转变的趋势，在一定的条件下放出能量通过分相或析晶使其处于低能量的稳定状态。

### （3）石英玻璃形成的动力学条件

熔体玻璃化和结晶化相互毛肚的，即对不利于熔体结晶的因素，恰恰是玻璃形成的有利因素。从动力学的角度看，析晶过程须克服一定的能垒，包括形成晶核所建立的新界面能以及晶核长大成晶体所需要的质点扩散的活化能等。如果这些能垒较大，尤其当熔体冷却速率很快时，黏度增加很大，质点来不及进行有规则排列，晶核形成和晶体长大均难以实现，从而有利于玻璃的形成。

$$\frac{V_L}{V} \approx \frac{\pi}{3} I_r u^3 t^4 \quad (2-2)$$

$$u = \frac{L(T_m - T)}{3\pi a^2 \eta T_m} \quad (2-3)$$

$$I_r = k \exp\left(\frac{\Delta G^*}{RT}\right) \quad (2-4)$$

$$\Delta G^* = -\frac{16\pi\gamma^3 V^2 T_m^2}{3L^2 (\Delta T)^2} \quad (2-5)$$

式中  $I_r$  为单位时间成核数目； $u$  为晶体的生长速度； $L$  为  $T_m$  时的熔融热； $a$  为晶格常数； $\eta$  为  $T_m$  附近的黏度； $k$  为决定于温度的系数； $\Delta G^*$  为形成临界晶核的功； $V$  为液体的分子体积； $\gamma$  为表面张力； $\Delta T$  为实际温度和熔点  $T_m$  之差。取  $\frac{V_L}{V} = 10^{-6}$ （玻璃中能测出的最小晶体体积与熔体之比）通过以上公式做出 T-T-T 曲线：

由 T-T-T 曲线“鼻尖”之点可粗略求得该物质形成的临界冷却速度  $\left(\frac{dT}{dt}\right)_c \approx \frac{\Delta T_N}{\tau_N}$  式中  $\Delta T_N = T_m - T_N$ ， $T_m$  为石英晶体的熔点， $T_N$  为 T-T-T 曲线“鼻尖”之点的温度； $\tau_N$  为 T-T-T 曲线“鼻尖”之点的时间。

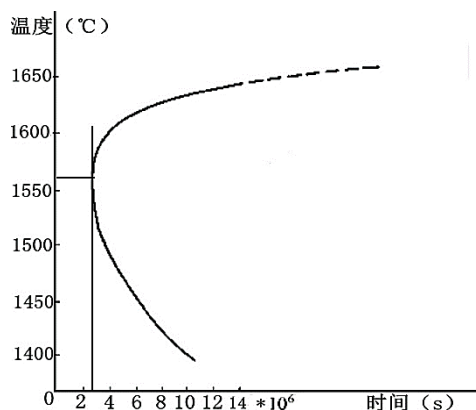


图 2-5 SiO<sub>2</sub> 的 T-T-T 的曲线（结晶容积率=10<sup>-6</sup>）

由图 2-5 可知  $T_N = 1560\text{k}$   $\tau_N = 2.6 \times 10^6\text{s}$   $T_m = 1710\text{k}$   $\Delta T_N = 150\text{K}$

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_c \approx \frac{\Delta T_N}{\tau_N} = 5.76 \times 10^{-5} \text{ k/s.}$$

所以在冷却熔融的石英玻璃的冷却速度要大于  $5.76 \times 10^{-5} \text{ k/s}$  才能保证生成的是石英玻璃而不是石英晶体。在室温条件下，满足生成石英玻璃的条件，故当融化的光纤纤芯冷却后，所形成的是石英玻璃而不是石英晶体。

## 2.2 光纤拉锥过程分析

对光纤进行拉锥加工，有两种方法，分别是熔融拉锥法和化学腐蚀法。因本实验所用电弧加热装置为熔融法，故只分析熔融拉锥过程中光纤的熔锥形成过程。

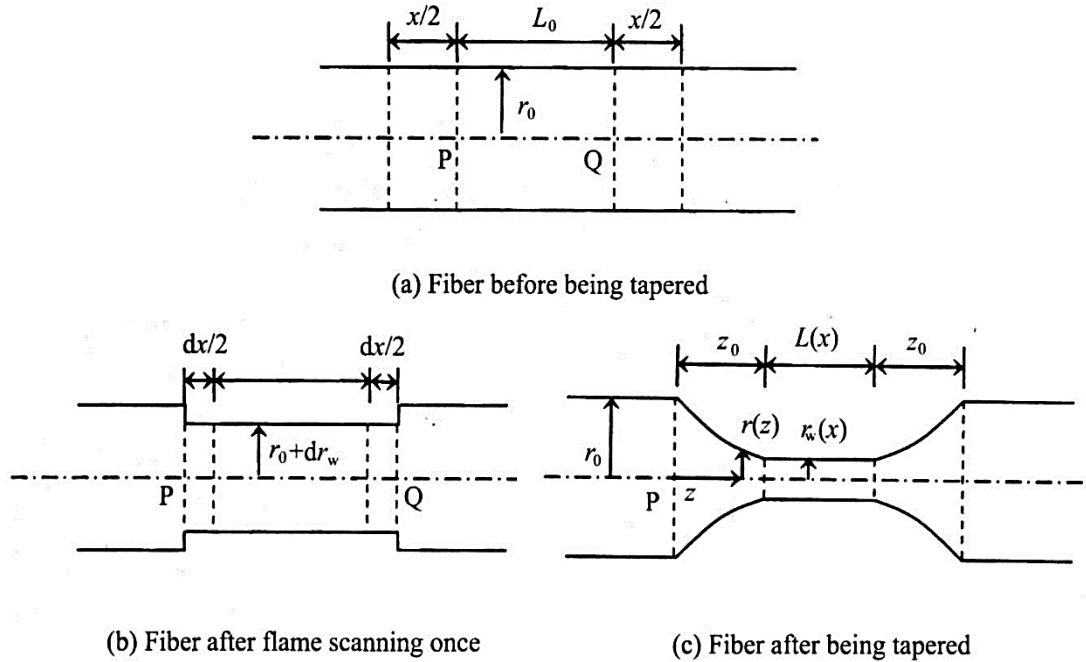


图 2-6 拉锥过程中纤芯的熔锥形成过程

图 2-6 (a)中，光纤经过一次扫描加热后，光纤被拉长 $dx$ ，半径变化 $dr_w$ ，但光纤被拉伸的部分总体积不变。因为电弧加热的范围小，可以视作点热源，扫描过程中只有电弧区会被热源加热到熔融态并被拉伸，其他部分因二氧化硅导热性能差而没有发生形变，所以一次扫描距离为 $L_0$ 的电弧扫描过程可以认为是光纤被 $L_0$ 宽度的火焰加热下的拉锥过程。

图 2-6 (c)中，拉锥后， $PQ$  两点间距离增加了  $x$ ，锥腰的长度是  $L(x)$ ，对应光纤腰半径为 $dr_w(x)$ ，两侧的变形区的长度为 $z_0$ 。为描述锥形光纤变形区的形状，引入变形区半径函数， $r(z)$ ， $z$  是纵向坐标，沿光纤轴线，锥型起始点  $P$  处为坐标原

点。因此 $r(0) = r_0$ ，而 $r(z_0) = r_w(x)$ 。

在利用移动热源拉锥技术时，如已知热源的移动速度  $v$ 、光纤夹具的移动速度  $u$  以及每次热源的摆动距离  $L(x)$ ，就可以得到拉锥光纤的形状；反之，如果对拉锥光纤的形状，包括腰粗、腰长和变形区形状等进行预先的设定，也可以计算得出光纤拉锥的过程参数。

拉锥系统中，为保证光纤锥形可控，需要满足 2 个约束方程：

$$L(x) \geq 0$$

$$\frac{dL(x)}{dx} \leq 1$$

上式说明，热源在一定区域运动，且  $L(x)$  为运动的距离；约束条件中，保证每次电弧扫描后的端点部分不会被再次加热，从而保证可以将光纤加工成不同的锥形。

并且，拉锥的前后光纤体积应保持不变，即满足守恒关系

$$\pi(r_w + dr_w)^2(L + dx) = \pi r_w^2 L$$

忽略高阶小量，可以导出

$$\frac{dr_w}{r_w} = -\frac{dx}{2L(x)}$$

考虑光纤拉伸长度从 0 变成  $x$ ，对应的半径为从  $r_0$  到  $r_w$ ，可以推导出

$$\int_0^{r_w} \frac{dr_w}{r_w} = -\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx}{L(x)}$$

解得

$$r_w(x) = r_0 \exp\left[-\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx}{L(x)}\right]$$

这样可以依照每次热源的扫描范围  $L(x)$  的变化规律，解出最终在不同拉锥距离  $x$  下对应相应的光纤锥腰的半径。在考虑到光纤锥形区不同直径实际上就是不同时刻的锥腰被拉出加热区后形成的，而且从图 2-6 可以看出

$$2z_0 + L(x) = x + L_0$$

这样可以推导出拉锥距离和变形区长度之间的关系

$$x = 2z_0 + L(x) - L_0$$

由图 2-6 (c) 容易看出，在拉锥过程中，腰区起点的左边就是  $z_0$ ，因此可以在上式中用  $z$  代替  $z_0$ ，得到  $x$  与  $z$  的关系，进而能够得出拉锥光纤变形区形状函数

$$r(z) = r_w[x(z)]$$

若热源扫描范围固定不动或采用固定宽度的热源加热，即满足关系式

$$L(x) = L_0$$

则解得

$$r_w[x] = r_0 \exp\left(-\frac{x}{2L_0}\right)$$

$$x = 2z$$

则可得出最后的光纤锥形区形状

$$r_w(z) = r_0 \exp\left(-\frac{z}{L_0}\right)$$

是一指数衰减型锥形函数。

## 2.3 步进电机及其工作原理

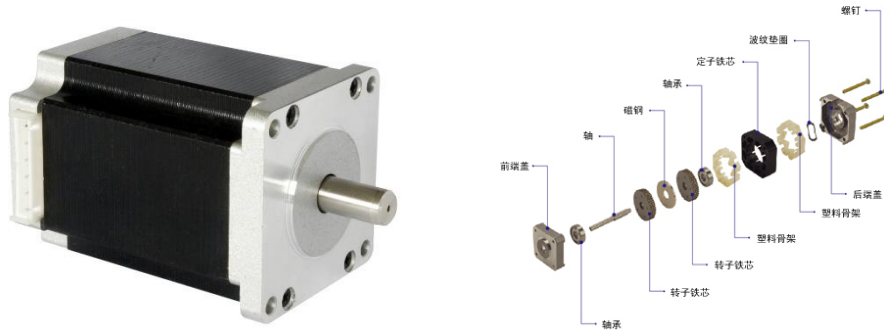


图 2-7 步进电机

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元步进电机件，主要由励磁线圈，定子，转子以及外壳组成。在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不会受负载变化的影响，当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就会驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度，称为“步距角”，它的旋转是以固定的步距角一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而能够进行准确的定位；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转速和加速度，从而达到进行调速的目的。因为步进电机只有周期性的误差而并无积累误差等优点，使得步进电机在速度、位置等领域的控制操作非常简单。本实验就是用步进电机提供光纤拉锥动能的。

### 2.3.1 步进电机的工作原理

步进电机具有的快速启、停的能力，在电机的负荷在提供的动态转矩以内工作时，可以通过输入脉冲来控制它在一瞬间的启动和停止。

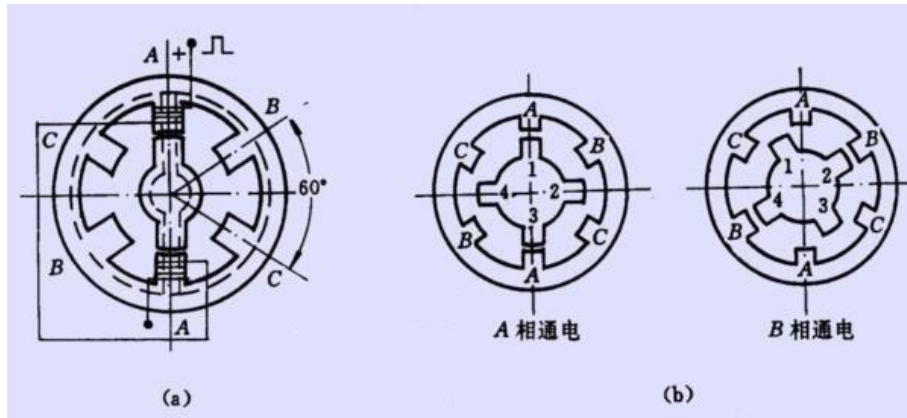


图 2-8 步进电机的工作原理

电机的控制是以脉冲信号电流来驱动电机转动。以四相步进电机为例，它有 4 条励磁信号引线， $A$ ， $\bar{A}$ ， $B$ ， $\bar{B}$ ，通过正确的励磁顺序，控制这四条引线上的脉冲产生的时刻和频率，能够对步进电机的转动进行控制，如图 2-8 所示。每产生一次励磁信号，转子在磁场的作用下转动且只转动一个步距角，故依照励磁顺序输出连续的脉冲信号，步进电机就可以实现连续转动。其转动方向也由脉冲顺序的正反来控制。

### 2.3.2 步进电机的驱动

因步进电机是由不同的电脉冲控制而进行工作的，所以普通的直流信号源是无法驱动步进电机工作，需要专用的电机驱动模块。

步进电机驱动模块首先要求能够提供较快的电流上升和下降速度，使电流波形尽量接近矩形。具有在截止期间释放电流的回路，以降低绕组两端的反电动势，加快电流的衰减。并且要求具有较高功率及效率，以便在短时间内输出具有稳定的电压和足够大电流的脉冲，以便驱动励磁线圈使转子转动。

## 2.4 电弧放电理论

### 2.4.1 电弧放电的结构

电弧可分为三个区域如图 2-6 所示：阴极区、正柱区和阳极区。

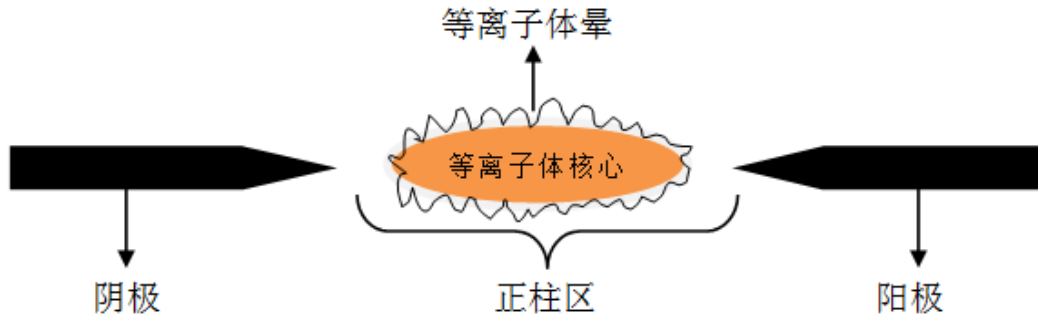


图 2-9 电弧放电示意图

阴极区：是维持放电必不可少的区域，它包括阴极、阴极斑点和阴极鞘层。阴极是负电极，通常靠热电子发射、场致发射两种模式来产生电子并维持放电电流。阴极斑点是阴极上一个或多个高电流密度、高温的等离子附着点。阴极鞘层叫阴极位降区，通常小于 1mm，阴极位降一般为 10V 左右。

正柱区：正柱区起着传导电流的作用，它的长度取决于电极间的距离和气压。电弧放电的正柱区是一个等离子区，它分成等离子体核心和等离子体晕两个区域：等离子体核心是热等离子体的基本组成部分。在此区域中大部分气体被电离，并且对于运行于大气压下的电弧来说，等离子体核心处在热力学平衡中，并且像黑体辐射一样，电弧放电的正柱温度与电极材料、工作气体和电流密度相关，对大气空气中的电弧，典型的温度为 4000k~6500k；等离子体晕是围绕核心的，不处在热力学平衡态的一个发光气体区域，等离子体的化学过程在此区域发生。

阳极区：阳极区是紧靠阳极表面的很小区域，包括阳极、阳极斑点、阳极鞘层，一般只有一个电子平均自由程。与阴极区相反，阳极区起着被动的作用，通过调解阳极位降的大小，使阳极接受的电子流满足外电路所需的电流数值，阳极是收集电子电流的电极，在大气压下阳极温度与阴极温度相同为 2500k~4200k。阳极斑点中电流密度低，且只存在一个阳极斑点，它在阳极上接近电弧的位置形成，并且随总电流的增加反向扩大。阳极鞘层与阴极鞘层类似，在阳极鞘层内电场将自由电子加速到阳极斑点上。

## 2.4.2 电弧放电的产生

电弧放电的定义：在正常情况下，气体有良好的绝缘性能。但当在气体间隙的两端加上足够大的电场时，就可以引起电流通过气体，这种现象就称为电弧放电。

电弧放电的特征：

（1）电流密度大，电弧放电正柱区的电流密度可达  $10^6\text{A/m}^2$  或者更高的，阴极位降区的电流密度为  $10^6\text{A/m}^2\sim 10^9\text{A/m}^2$ 。

（2）阴极位降低，一般来说，电弧放电的阴极位降量级为 10V。

（3）温度和发光度高，电弧放电时呈现弧柱白光并产生高温。尤其在高气压电弧的正柱区，发光度非常高。

## 2.4.3 电弧放电的机理

（1）阴极的发射机理

自持热阴极电弧放电是最主要的一种电弧放电，发生在钨、碳等高熔点电极情况。放电时阴极会被烧得白炽化，温度要大于 3600K，放电电流靠热电子发射维持。阴极发射电子集中在阴极斑点上。阴极鞘层的厚度是一个电子平均自由程的量级，因此通过阴极鞘层的电子几乎不与气体原子发生碰撞。当外加电压足够大时，则电子在阴极鞘层获得足够的能量，经过一个自由程的距离后，电子与气体原子发生碰撞并使其电离。由于电子的迁移速率比正离子大很多，碰撞电离后会正离子聚集在阴极鞘层处，形成正的空间电荷。正离子在阴极的加速下，撞击电极，把能量交给阴极，以维持阴极足够高的温度。

（2）正柱区等离子体特性

在正柱区中带电粒子被电场加速并获得动能，带电粒子与中性粒子碰撞而分出一部分能量给中性粒子，这样中性粒子也间接被加热。由于电子比粒子轻很多，电子一方面从电场中得到较多的能量，另一方面也在碰撞中把一小部分能量传给其他粒子，但是前者的作用是主要的，所以在低气压下电子的平均能量比离子的高很多。电子、离子和中性粒子都有它们各自的温度，电子的温度要比离子和中性粒子的大很多。在较高气压下，电子平均自由程减小了，这是电子在两次碰撞间从电场得到的能量比较少，加之碰撞频率的增加使电子损失的能量也进一步增加，因此电子、离子和气体的温差变小，气体变得更热。在压强大约为  $10^5\text{Pa}$  时电子温度和气体温度的差别已经可以忽略不计，等离子体达到了热平衡，因此在高气压电弧中只有一个等离子体温度。



### （3）阳极位降

在电弧放电中，阳极位降和阴极位降差不多，阳极温度比阴极温度要高，这种现象是由于在阳极上全部电流系由轰击阳极的电子来承担，电子不仅给出其在阳极鞘层内获得的全部动能，并且还有逸出功。在阴极上，冲击阴极并使之发热的正离子比同样电流下冲击阳极的电子要少，阴极上其余部分的电流是由电子构成的，在热电子电弧中，当电子从阴极逸出时，将消耗阴极的热能，并使之变冷。从热力学平衡视角来看，电子轰击阳极的能量等于这些电子在阳极位降的加速下获得的动能再加上电子的凝结能。

### 2.4.4 直流电弧放电的伏安特性

在直流情况下，在大气中的两个碳电极间产生的电弧其伏安特性可以用下面的埃依尔顿的经验公式 2.4.1 来表示：

$$U = a + bl + \frac{(c + dl)}{I} \quad 2.4.1$$

式中：\$U\$-极间电压 \$I\$-电弧电流 \$l\$-电弧长度

\$a\$、\$b\$、\$c\$、\$d\$—四个常数，它们取决于气体种类和电极材料。

式 2.4.1 可以改写为：

$$UI = (a + bl)I + (c + dl) \quad 2.4.2$$

可知若电弧长度固定，则电弧功率与电流呈线性的关系。

在大气压下，各常数数值如表 2-2 所示：

表 2-2 大气压下各常数的大小

电极材料	气体	\$a(V)\$	\$b(V/mm)\$	\$c(VA)\$	\$d(VA/mm)\$
碳	空气	38.9	2.0	16.9	10.5

（1）系统设计的电弧长度 取 \$l = 5mm\$ 电流变化范围\$(1-15)mA\$ 由式 2.4.1 得

到 \$U = \frac{69.4}{I} + 48.9\$ 用 MATLAB 作图得 图 2-10。

（2）取 \$l = 5mm\$ 电流变化范围\$(1-15)mA\$ 由式 2.4.2 得： \$P = 48.9I + 69.4\$ 由 MATLAB 作图得 图 2-11。

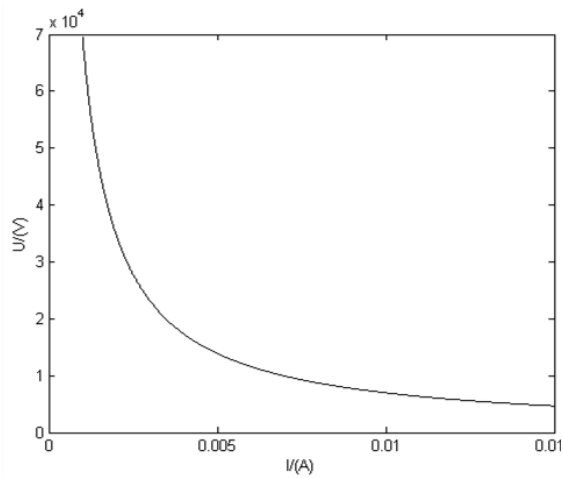


图 2-10 极间电压与电弧电流的关系

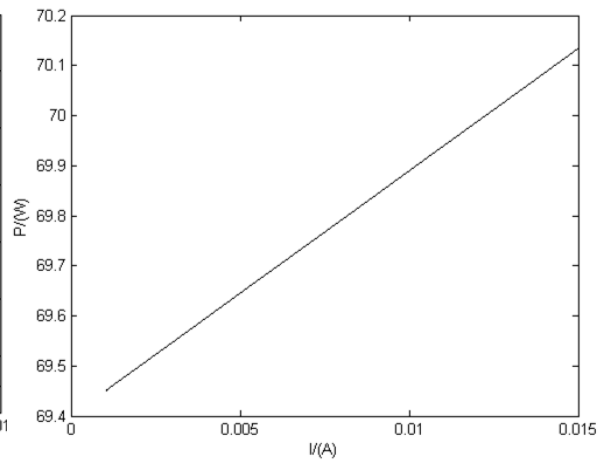


图 2-11 电弧功率与电弧电流的关系

## 2.5 本章小结

本章通过对光纤纤芯主要材料二氧化硅的性质进行了研究，并分析讨论了二氧化硅的熔融过程，玻璃化过程和结晶化过程。论证了在电弧加热系统中，纤芯可以被加热到熔融状态并被进行拉锥处理。而在室温条件下，被加热融化后的二氧化硅可以冷却还原成玻璃态。

分析了在固定热源和移动热源的加热下对光纤进行拉锥处理后锥形的变化。得出了光纤拉伸速度与锥形结构的关系公式。

介绍了步进电机的基本结构和工作原理，并介绍了选取步进电机作为光纤拉锥系统的拉锥电机的优点，步距角固定可控，步数精密，满足对光纤的精密加工的要求。

随后介绍了电弧放电理论，对电弧的伏安特性进行了分类描述，并讨论了利用电弧激发等离子体从而得到热源的可行性。

本章为光纤拉锥电机控制系统提供了理论基础。

### 第 3 章 光纤拉锥电机控制系统的设计

要完成对光纤拉锥的处理，需要一个完整的系统才能够实现。如何将电源，程序控制部分，电机拉锥部分，电弧加热部分结合在一起，对其进行综合而有序的控制，需要一个清晰的思路和严密的流程设计。

#### 3.1 系统设计思路

作为一个整体，本拉锥系统由，单片机控制系统，显示系统，按键手动控制系统，步进电机及驱动系统，电弧放电驱动和加热系统，电源等组成。结构如图 3-1 所示。

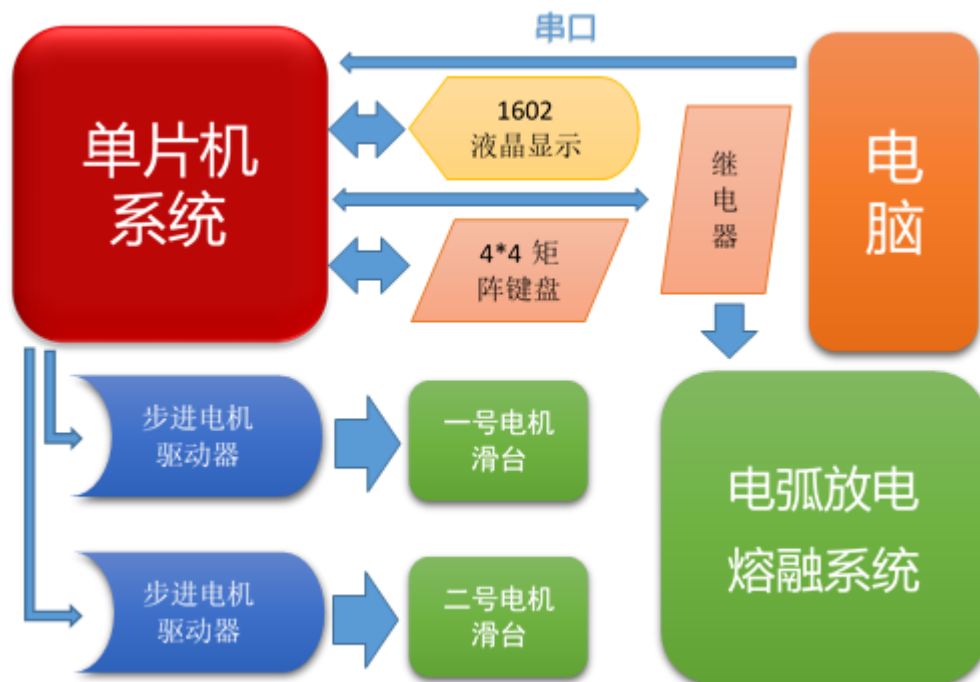


图 3-1 光纤拉锥电机控制系统结构图

本系统以单片机为控制中心，完成对步进电机的行进方向，前进速度和上电断电的控制，和对电弧熔融系统的开关控制。通过 1602 液晶显示和矩阵键盘进行人机交互，对用户发送提示语和允许用户对电机和熔融系统进行手动控制。通过电脑端的串口与单片机系统相连，以完成机器参数的传递和修改。整合一维滑台、步进电机载物台与电弧加热端，实现对光纤的放置，固定，熔融，拉伸，冷却，保护和移除。

## 3.2 单片机控制系统

单片机（Microcontrollers）是一种集成电路芯片，是采用超大规模集成电路技术把具有数据处理能力的中央处理器 CPU、随机存储器 RAM、只读存储器 ROM、多种 I/O 口和中断系统、定时器/计数器等功能（可能还包括显示驱动电路、脉宽调制电路、模拟多路转换器、A/D 转换器等电路）集成到一块硅片上构成的一个小而完善的微型计算机系统，在工业控制领域广泛应用。

### 3.2.1 STC90C51 单片机介绍

51 单片机系列是目前国内外应用最为广泛的单片机类型，其均是以 51 内核扩展出来的单片机。本系统选用的是 STC90C516RD+ 芯片，与 89C51 系列相比，其具有抗干扰能力强，防静电，读写次数和响应次数高等优点。

P10	VCC
P11	P00
P12	P01
P13	P02
P14	P03
P15	P04
P16	P05
P17	P06
RESET	P07
RXD/P30	EA/ $\overline{VP}$
TXD/P31	ALE/ $\overline{P}$
INT0/P32	PSEN
INT1/P33	P27
T0/P34	P26
T1/P35	P25
$\overline{WR}$ /P36	P24
RDP37	P23
X2	P22
X1	P21
GND	P20

图 3-2 STC90C51 单片机引脚封装图

图 3-2 为单片机封装引脚图，40 个引脚根据功能分为三类，电源时钟引脚，编程控制引脚，I/O 口引脚。

V<sub>cc</sub>（40 脚）、GND（20 脚）为单片机电源引脚，常压为+5V，低压为+3.3V。

XTAL（19 脚）、XTAL2（18 脚）为外接时钟引脚。XTAL1 为片内振荡电路的输入端，XTAL2 为片内振荡电路的输出端。

RST（9 脚）为单片机的复位引脚。当输入连续两个机器周期以上的高电平时为有效，用来完成单片机的复位初始化操作，复位后程序计数器 PC=0000H，即复位后将从程序存储器的 0000H 单元读取第一条指令。

P0 口（39 脚~32 脚）为双向 8 位三态 I/O 口，每个口可独立控制。

P1 口（1 脚~8 脚）为准双向 8 位 I/O 口，每个口可独立控制，内带上拉电阻。此口输出没有高阻态，输入不能锁存，故不是真正的双向 I/O 口。使用时要先向该口进行写 1 操作，然后单片机内部才能正确读出外部信号。

P2 口（21 脚~28 脚）为准双向 8 位 I/O 口，每个口可独立控制，内带上拉电阻。

P3 口（10 脚~17 脚）为准双向 8 位 I/O 口，每个口可独立控制，内带上拉电阻。这 8 个引脚作为第一功能使用时是普通的 I/O 口，而当第二功能使用时，各引脚有不同的特殊功能。P3 口的每个引脚均可定义为第一功能或者第二功能。

### 3.2.2 单片机外围电路

本实验采用的外围电路为东流电子生产的 HOT-51 开发板，外观图如图 3-3 所示。

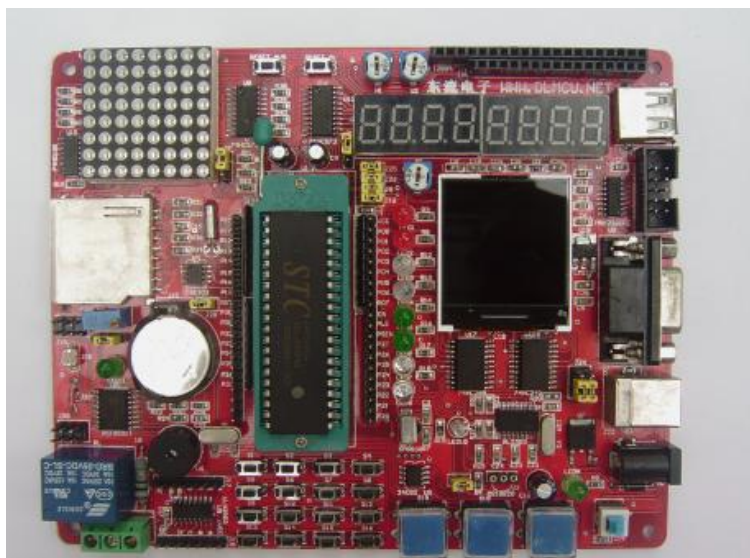


图 3-3 东流电子 HOT-51 开发板外观图

本开发板装载 PCF8591T 的 AD-DA 芯片，SPT 协议控制芯片 DS1302，I2C 协议控制芯片 AT24C02，通讯芯片 MAX232，USB 转串口芯片 PL2303HX，三态缓冲门电路 74HC245，三八译码器 74HC138，锁存器 74HC573，稳压芯片 7805，LM1117-2.85，并且配备彩屏液晶，八位 LED 灯，8\*8 点阵，1602 液晶，三个独立按键，4\*4 矩阵键盘，继电器，蜂鸣器以及串口和 USB 接口。

### (a) 1602 液晶显示器

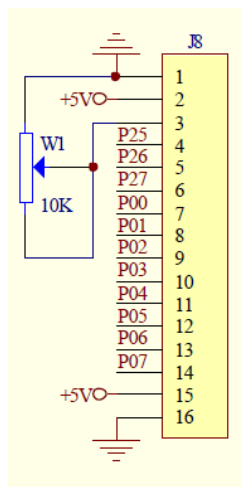


图 3-4 1602 液晶显示器接口电路图

如图 3-4 为 1602 液晶显示器接口电路图。

其中控制口为 4~6 口。4 号口为数据/命令选择端，5 号口为读/写选择端，6 号口为使能信号端。数据口为 7~14 口，其所接高低电平用于发送液晶显示数据。

由图中可以看出 4~6 口接 P25~P27 口，7~14 口 P00~P07 口。

### (b) 矩阵键盘

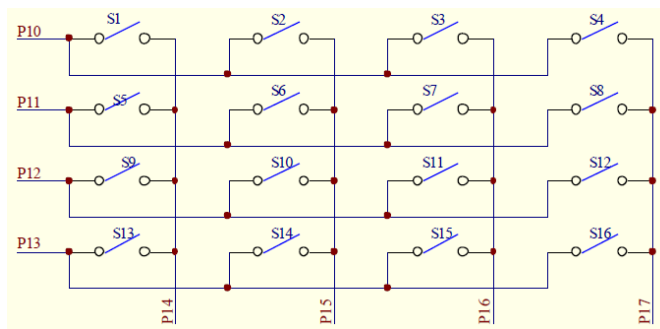


图 3-5 4\*4 矩阵键盘电路

如图 3-5 为 HOT-51 单片机开发板矩阵键盘电路。

矩阵键盘为独立按键的一种拓展方式。不同于一个按键占用一个单独的 I/O 口的独立按键，4\*4 的矩阵键盘仅占用 8 个 I/O 口就可以完成 16 个按键的功能。

4\*4 矩阵键盘对的工作原理相对独立键盘复杂一些，需要检测两次按键的按下情况。8 个 I/O 口中，有 4 个口负责行检测，另外 4 个负责列检测。当进行行检测的时候，置 4 个列检测 I/O 口为低电平，若检测到某一行 I/O 口为低电平，则说明这一行的某个按键被按下。同理，进行列检测的时候，置 4 个行检测 I/O 口为低电

平，若检测到某一列的 I/O 口为低电平，则说明这一列的某个按键被按下。当确定了被按下按键的行号和列号后，即可确定被按下按键的精确位置。

HOT-51 单片机开发板上的矩阵键盘占用了 P10~P17 口。

### (c) 继电器

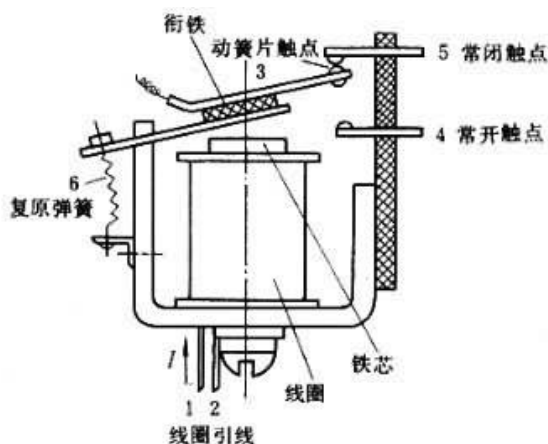


图 3-6 继电器原理图

继电器是一种电子控制器件，它具有控制系统（又称输入回路）和被控制系统（又称输出回路），通常应用于自动控制电路中，它实际上是用较小的电流去控制较大电流的一种“自动开关”。故在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用。

开发板上装载的是电磁式继电器，其由铁芯，线圈，衔铁，触点簧片组成，如图 3-6 所示。只要在线圈两端加上一定的电压，线圈中就会流过一定的电流，从而产生电磁效应，衔铁就会在电磁力吸引的作用下克服返回弹簧的拉力吸向铁芯，从而带动衔铁的动触点与静触点（常开触点）吸合。当线圈断电后，电磁的吸力也随之消失，衔铁就会在弹簧的反作用力返回原来的位置，使动触点与原来的静触点（常闭触点）吸合。这样吸合、释放，从而达到了在电路中的导通、切断的目的。

将电弧熔融装置的电源端连接到继电器的常开端口，调整好电弧的电源电压之后，控制继电器的开闭就可以控制熔融系统的开闭，从而控制加热时间的长短。

电路板上继电器通过 ULN2003 来驱动，通过杜邦线连接 P37 端口实现对其的控制。

将此开发板作为单片机控制电路不仅方便，而且通过各个接口的控制和 LED 灯的反馈，便于对程序的调试和理解。

### 3.3 步进电机及驱动装置

步进电机滑台选用 NORMAGE 1302 系列滑台，如图 3-7 所示。

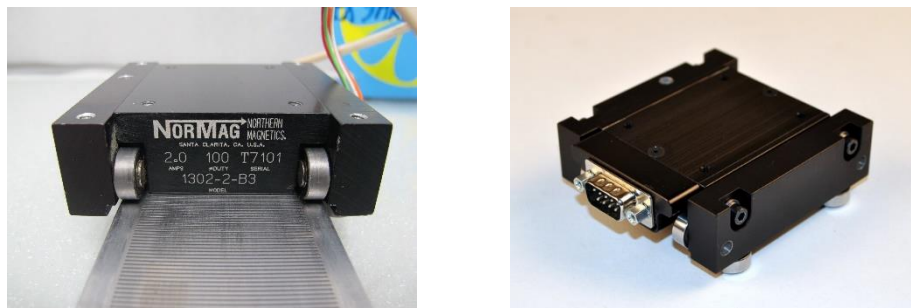


图 3-7 NORMAGE 1302 系列滑台实物图

滑台为四相步进电机脉冲驱动，相电流 2.0A，额定载重 2KG。

步进电机驱动器选用 2M542-N 驱动器，如图 AA 所示。



图 3-8 2M542-N 驱动器实物图

2M542-N 为一款等角度恒力矩细分型驱动器，驱动器电压直流 24-58V，适配电流在 4.2A 以下，外径 42、57MM 的各种型号的二相混合式步进电机。该驱动器内部采用类似伺服控制原理的电路，此电路可以使电机低速运行平稳，几乎没有震动和噪音，电机运转平稳，发热小，步进脉冲停止超过 100ms，驱动器电流自动减半。定位精度最高可达 25600 步/转。

2M542-N 驱动器的 A+, A-, B+, B-接口分别对应步进电机的相应引线。PLS+, DIR+, ENA+接口均为输入信号光隔离正端，输入+5V 供电电源，连接单片机输出为+5V 的 V<sub>cc</sub> 电源引脚。PLS-接口为步进脉冲信号输入端，下降沿有效，每当脉冲由高变低时电机走一步。DIR-接口为方向控制信号端，用于改变电机转向，有效低电平 0V~0.5V，高电平为 4V~5V，脉冲宽度需>2.5μs。ENA-接口为电机释放信号，输入低电平信号时关断电机线圈电流，驱动器停止工作，电机处于自由状态。

电机控制系统使用两个 2M542-N 驱动器分别控制 1 号和 2 号两个步进电机滑



台的速度，前进方向和关断电状态。因矩阵键盘，继电器，独立按键和 1602 液晶显示器占用了许多端口，为了正常工作，故选用剩余的 P21、P24 和 P36 口为一号电机驱动器的 PLS-，DIR-和 ENA-控制端口，P20、P22 和 P23 口为一号电机驱动器的 PLS-，DIR-和 ENA-控制端口。

### 3.4 电弧放电光纤熔融系统

此熔融系统主要由高压包、脉冲调制芯片 TL494、功率驱动电路、数模转换电路、单片机控制电路、显示模块和按键模块组成。

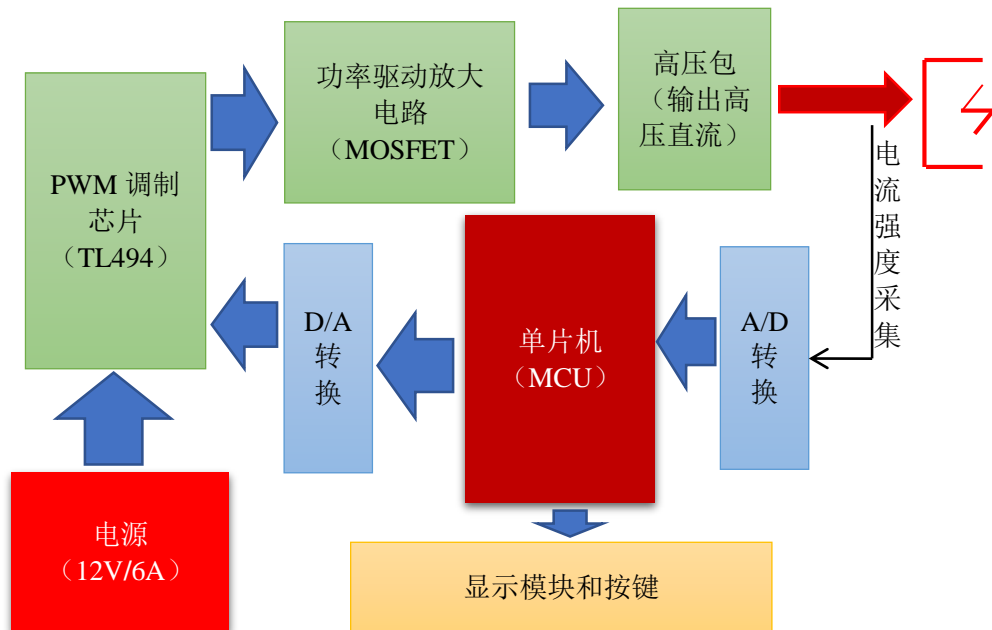


图 3-9 电弧放电光纤熔融系统设计框图

如图 3-9 此放电系统采用 12V/6A 的直流电源供电，放电回路的主控制模块是单片机，单片机输出的 PWM 信号经过 D/A 转换芯片后驱动 PWM 调制芯片 TL494，产生电压受控的脉冲波，电压驱动后级的大功率 MOS 管产生受脉冲调制的电流信号，经过高压包后产生强度可控的高压直流，将空气击穿，产生电弧。

### 3.4.1 高压包及其驱动电路

高压包，学名为行输出变压器，它可以将行频扫描式的高频率脉冲电压，经升压变压器升压和倍压整流电路整流后输出直流高压。

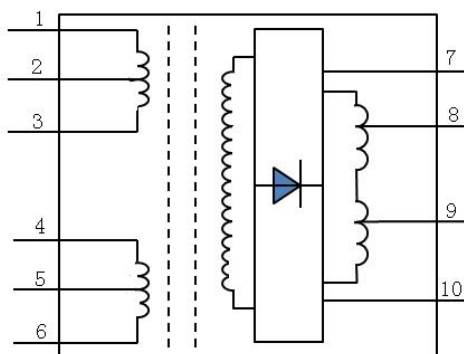


图 3-10 高压包的基本结构

高压包一般采用的电路设计，为高压脉冲信号首先经过升压变压器升压，之后经过倍压整流电路，实现输出高压直流输出。在众多高压直流电源中，高压形成电路部分大多将倍压整流电路和脉冲变压器相结合。在高压形成电路中，如采用倍压整流这一方法，所用的整流二极管和电容等元器件不仅较多，而且对其的耐压值要求也很高。电路的内阻和体积也较大，不能较好地改善高压负载特性。其次，因脉冲变压器受初次级间的漏感和分布电容的影响，匝数比不能做得太大，故要利用倍压整流电路的方法来产生较高的直流高压。所以此电路只适用于要求输出电压较高，负载电流比较小的场合。由于变压器的绕组匝数太多导致体积增大和寄生电容等原因，通过增加绕组的匝数来提高变压器的副边输出电压的方法并不可取。所以高压包一般采用升压变压器和倍压整流电路的方法提高副边输出电压，其原理图如图 3-11 所示。

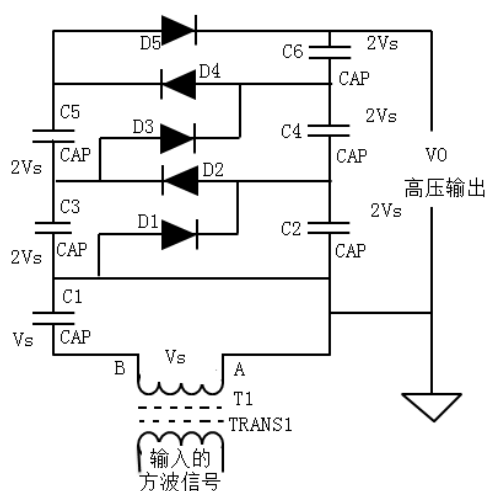


图 3-11 倍压整流电路原理图

在已有的电弧发生电路中，采用 ZVS 驱动高压包，在高压包的输出端产生高压直流，将空气击穿，产生电弧放电现象。

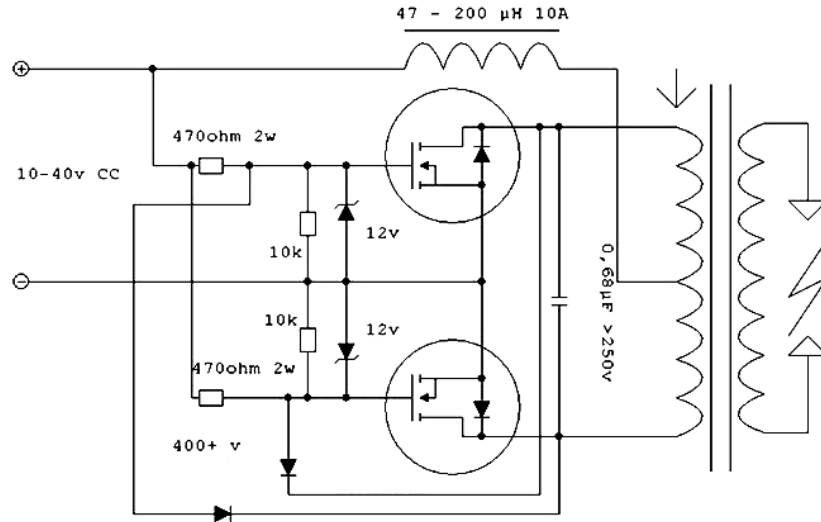


图 3-12 高压包的驱动电路

ZVS 机零电压开关，英文名 zero voltage switch. ZVS 电路图如图 3-12 所示：ZVS 驱动器是一种功率大，简单又高效的振荡器，它通常用于产生高频正弦波。

ZVS 的简化电路如 3-13 所示：

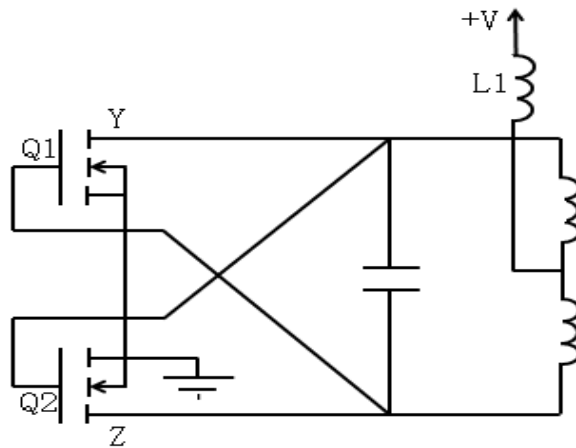


图 3-13 ZVS 的简化电路

当电源电压为正时，电流开始同时通过两侧的初级并施加到 MOS 管的漏极（D）上。电压会同时出现在两个 MOS 的门极（G）上并开始将 MOS 开启。因为没有任何两个元件是完全一样的，一个 MOS 比另一个开的快一些，更多的电流将流过这个 MOS。通过导通侧初级绕组的电流将另一侧 MOS 的门极电压拉低并开始关断它。图中电容和初级的电感发生 LC 谐振并使电压按正弦规律变化。如果没有这个电容，通过 MOS 的电流会一直增大，直到变压器饱和，MOS 管被烧坏。

假设 Q1 首先开启。当 Z 点电压跟着 LC 谐振的半个周期上升到峰值再回掉时，Y 点电压会接近 0。随着 Z 点电压下降为 0，Q1 的门极（G）电压消失，Q1 关闭。同时 Q2 开启，此时 Y 点电压开始上升。Q2 的导通把 Z 点电压拉低到接近地，这可以确保 Q1 完全关断。Q2 完成 LC 振荡的半周后会重复上述过程，此振荡器会继续循环工作。为了防止本电路从电源拉取巨大的峰值电流而造成损坏，特意增加 L1 在变压器抽头处和 V+ 之间作为缓冲。LC 阻抗限制着实际的电流（L1 只是减少峰值电流，因为电感有续流作用）。

在实际的电路中，如果门极（G）和源极（S）之间的电压超过正负 30V，MOS 会损坏。为了预防这种事情发生，我们需要门极（G）的保护措施；只需要简单地增加几个额外的元件。如图 3-14 所示：

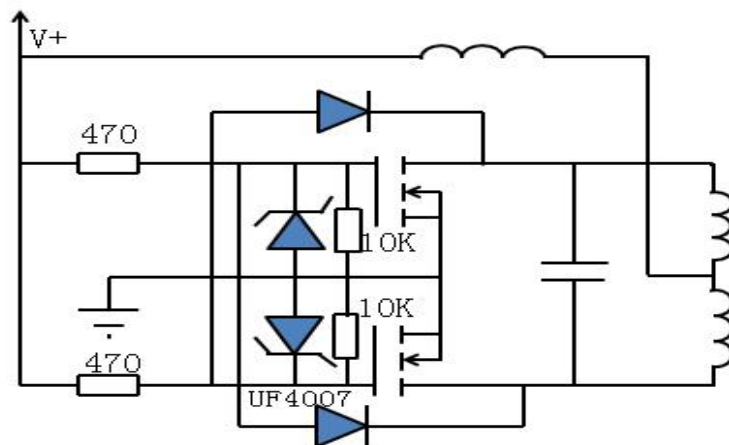


图 3-14 改装后的高压包驱动电路

470 欧姆电阻限制门极电流，防止烧坏；10K 欧姆电阻用于确保 MOS 管开关可靠；稳压二极管 MOS 的门级电压限制在稳压二极管的击穿电压（12V）之内；当一侧的 MOS 管导通时，UF4007 将另一侧 MOS 管的门级电压拉低。

实物图如 3-15 所示：

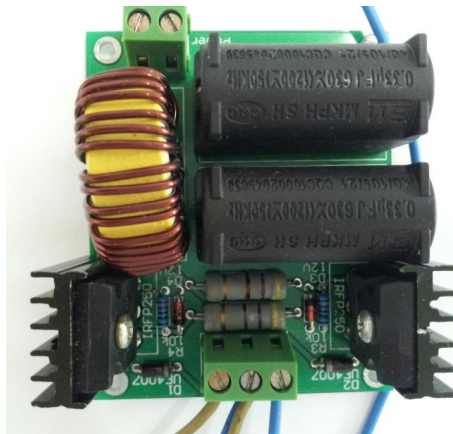


图 3-15 高压包驱动电路实物图

### 3.4.3 TL494 脉冲调制芯片

在此以高频大功率开关电源为核心的放电电路中，为能够提高直流电源的稳压调整精度以及易于完成各种自动保护功能，常用到各种专用的脉宽调制组件。可以采用 TL494 芯片，此组件为它激式开关电源控制芯片，采用电压驱动型脉宽调制组件。

主要功能特性有驱动 200mA 的负载；末级输出可使用单端输出或者双端对称输出方式；有死区时间可控制端；误差信号放大器具有较大共同相位输入范围；防止双脉冲产生；内嵌电路防止低电压供电情况下的失误操作。

主要参数为 PWM 控制芯片 TL494 最小电压为 7V，低于 7V 时器件将不能工作。最高工作电压为 40V，最大输出电流可达 250mA，内部基准电压输出为 (5V  $\pm$  5%)，基准输出电流 10mA，工作频率 1 — 300kHz，死区电压调整范围 0 — 3V，芯片总损耗为 1W。封装图如 3-16 所示：

#### PIN CONNECTIONS

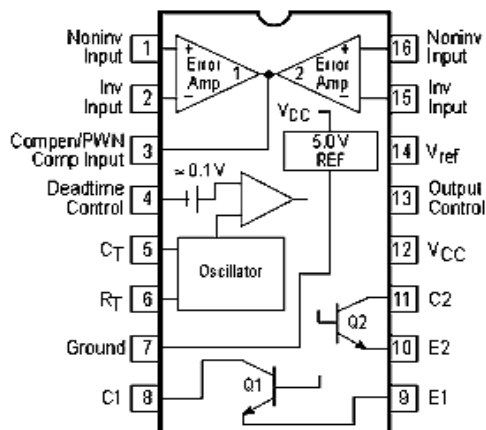


图 3-16 TL494 的封装图

### 3.5 光纤拉锥电机控制系统的程序设计

整个系统包括单片机控制电路，4\*4 矩阵键盘电路，1602 液晶显示电路，独立按键电路，NORMAG 1302-2-B3 步进电机及 2M542 步进电机驱动器，电弧放电熔融系统以及通过串口与单片机连接的电脑端。若要综合控制以上各部分，有序且稳定地完成对光纤的拉锥处理过程，需要一个完整且逻辑严密的控制程序。

控制程序主要分为主函数部分和 5 个主要功能子函数，分别为串口数据接收反馈函数，电机驱动光纤处理函数，电机复位函数和手动模式函数。

#### 3.5.1 串口数据接收反馈函数

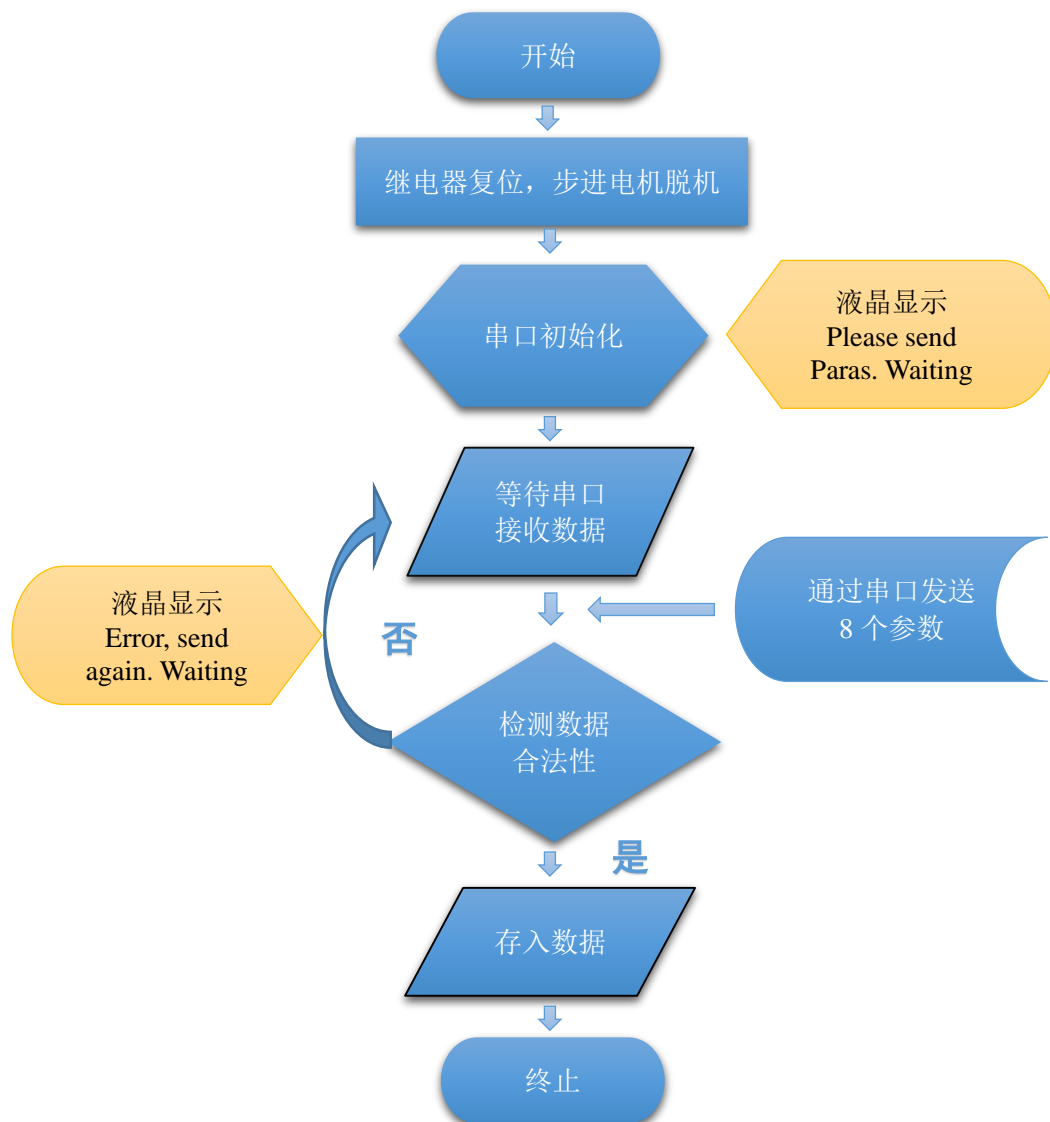


图 3-17 串口数据接受反馈函数的逻辑顺序图

光纤拉锥电机控制系统共有 8 个可编写参数，分别为 1 号和 2 号电机的启动

延时，工作时长，移动速度和继电器的启动延时和关闭延时。对参数的修改在电脑端完成。当选取好参数之后，通过电脑端的串口控制程序，连续发送这 8 个参数到单片机中，即完成系统参数的写入过程。如图 AA 所示为串口数据接受反馈函数的逻辑顺序图。

进入函数后首先将继电器复位，将步进电机转换至脱机状态，防止在数据传送时因噪音和干扰而使其意外工作。将串口初始化，等待接收数据。液晶显示“Please send para Waiting.”字样，提示用户已经进入串口接收函数且单片机已经做好接收数据的准备，可以从电脑端输入数据并将数据发送至单片机。当 8 个数据通过串口传送完毕时，对数据的合法性进行检测，若所得数据超出范围，提示“Error, send again. Waiting.”并清空数据准备重新接收新的数据；若所得数据通过检测，则将数据存储至单片机中，液晶显示器提示“Paras received. Manual OR Run”等待用户的下一步操作。

```

/*****串口数据接收反馈函数部分内容*****/
/*****代码编写者：张育鑫*****/

{
EA=0;
REN=0;          //关串口中断****此处应关闭串口接收功能
if(Num_Check()>0) //数据合法性检查
{
    //未通过检查，重新输入数据
    DATA_Count=0; //数据计数归零
    wcmd(0x01);    //液晶屏清空
    L1602_string(1,1,"Error,send again");
    L1602_string(2,1,"Waiting");
    REN=1;
    EA=1;          //开串口中断，重新开始接收数据
}
else
{
    //通过检查，显示提示语，跳出循环进入下一步
    IE=0x00;       //中断允许寄存器清零，关闭所有中断
    TCON=0x00;     //停止所有定时器
    DATA_Count=0; //数据计数归零
    wcmd(0x01);    //液晶屏清空
    L1602_string(1,1,"Paras received");
    L1602_string(2,1,"Manual OR Run");
    break;
}
}

```

### 3.5.2 电机驱动光纤处理函数

对光纤进行处理的过程就是根据所得参数，同时控制电弧放电熔融系统，1 号电机和 2 号电机的开关，运动的过程。电机驱动光纤处理函数的逻辑顺序图如图 3-18 所示。

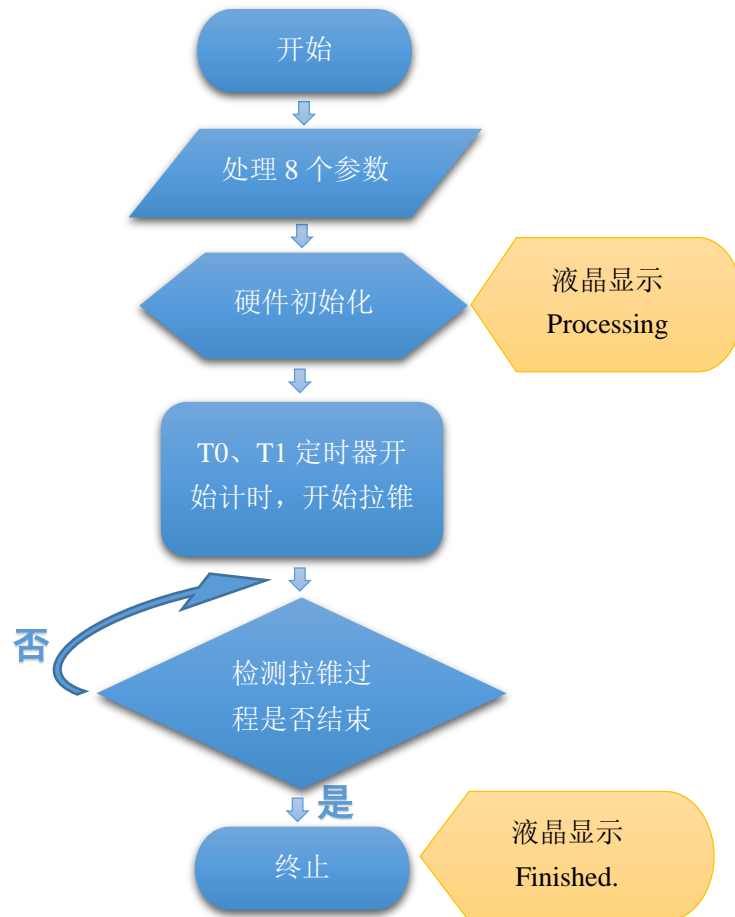


图 3-18 电机驱动光纤处理函数的逻辑顺序图

函数首先对接收到的 8 个参数进行处理，使其可被用于控制步进电机和电弧熔融系统。对硬件设备初始化，使继电器归位，步进电机掉电，1 号电机和 2 号电机的运动方向均向外，更改液晶显示 “Processing”，提示用户已经进入光纤处理程序。

因为要精确控制三个装置的开闭时间并在步进电机开启时独立控制两个步进电机的速度，发出不同频率的脉冲，所以要用到单片机中的 T0 和 T1 定时器。



```

/*****电机驱动光纤处理函数部分内容*****/
/*****代码编写者：张育鑫*****/
L1602_string(1,1,"Processing"); //显示提示语
TMOD=0x21; //设置定时器 0 为工作方式 1，定时器 1 为工作方式 2
TH0=0xdc; //设置定时器 0 初值，10ms 中断一次
TL0=0x10;
TH1=0xa4; //设置定时器 1 初值，100us 中断一次
TL1=0xa4; //作为基础脉冲时序
IE=0x8a; //开 T1，T0 中断以及总中断
TR1=1; //启动 T1，T0 计时器
TR0=1;
while(ProcessMark!=6)
{
    if(M1) //一号电机工作标志检测
    {
        if(VCount1>=V11) //运行脉冲频率控制，计数达到则发出脉冲
        {
            PLS1=~PLS1;
            VCount1=0; //脉冲计数归零
        }
    }
    if(M2) //二号电机工作标志检测
    {
        if(VCount2>=V21) //运行脉冲频率控制，计数达到则发出脉冲
        {
            PLS2=~PLS2;
            VCount2=0; //脉冲计数归零
        }
    }
}
}

```

T0 定时器逻辑顺序图如图 3-19 所示。先设置 T0 定时器为步进电机和电弧熔融系统的开关机计时，每 10ms 中断一次，检测是否达到开关机的时间并作出相应处理。

T1 定时器逻辑顺序图如图 3-20 所示。先设置 T1 定时器为步进电机提供基础脉冲时序，每 0.1ms 中断一次，当满足参数设定的速度频率时，则输出一个脉冲使步进电机走一步。如此可灵活控制步进电机以不同的速度向前行进。

当时间满足步进电机运行的时刻，给电机上电，并以参数设定的速度给步进电机发送位移脉冲；当时间满足步进电机停机的时刻，保持给步进电机上电，停止发送位移脉冲，将步进电机锁定在当前位置。当时间满足电弧熔融装置开启的时刻，将 P37 口置高电平，继电器转换至常开端口，接通电弧熔融装置，开始给光纤加热并使之融化；当时间满足电弧熔融装置关闭的时刻，将 P37 口置低电平，继电器转换至常闭端口，停止供电，切断热源，光纤在室温下冷却。

当以上所有步骤全部完成时，关闭 T0 和 T1 定时器，液晶显示器显示文字“Finished. Press Manual OR Reset”，提示用户拉锥已完成，可以取下处理完的光纤并进行下一步操作。

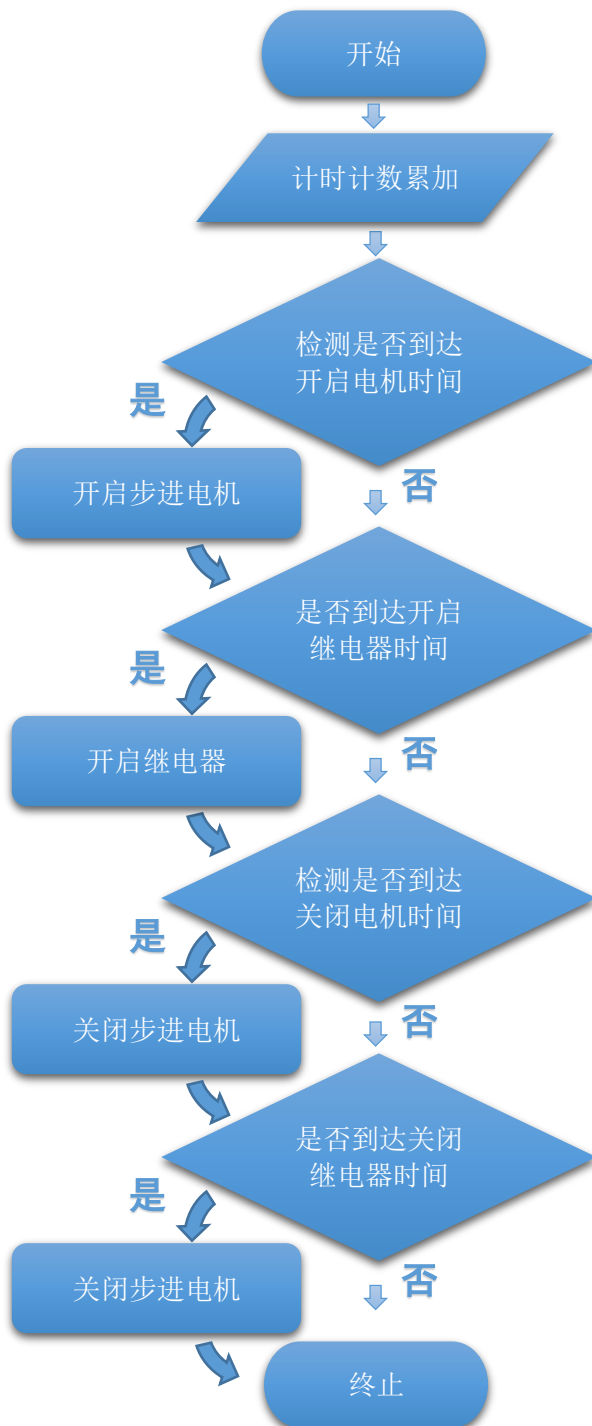


图 3-19 T0 定时器逻辑顺序图

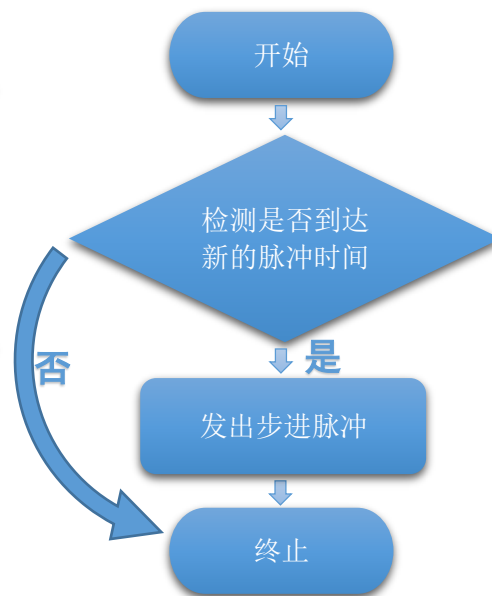


图 3-20 T1 定时器逻辑顺序图

### 3.5.3 电机复位函数

用户取下处理完成后的光纤后，可以选择进入电机复位函数，将电机复位到拉锥过程之前的位置。因电机的移动距离和发出的脉冲个数呈正相关，则可以根据电机工作的时间和电机的速度来计算出移动的步数，只要向相反的方向移动相同的步数，两个电机就可以回到起始位置。图 3-21 为电机复位函数的逻辑顺序图。

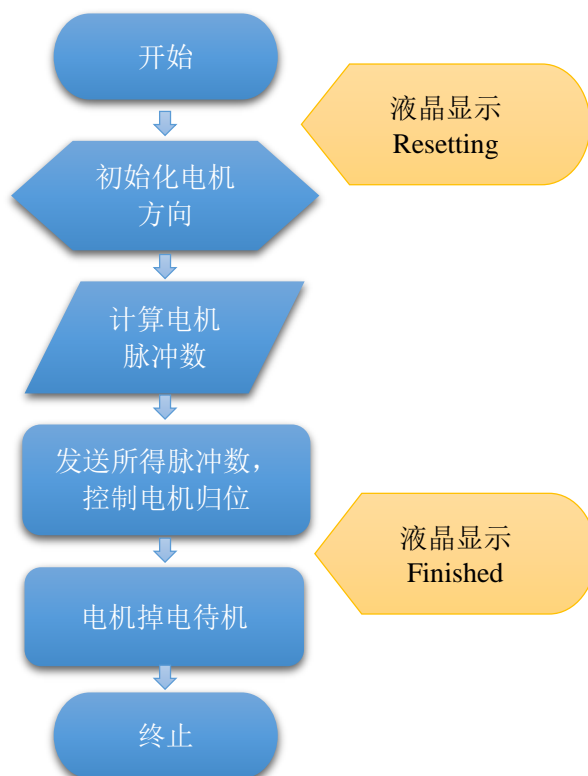


图 3-21 电机复位函数逻辑顺序图

进入电机复位函数后，液晶显示器显示文字“Resetting”，提示用户进入复位函数，将 1 号电机和 2 号电机方向调整为向内侧移动。分别计算 1 号电机和 2 号电机所走的步数，并以一定的频率发送相同的脉冲个数，控制电机回归到原来的位置。归位后控制电机进入掉电模式，并控制液晶显示“Finished. Press Manual OR Start”，提示用户进行下一步操作。

### 3.5.4 手动模式函数

为增加此系统的灵活性和可操作性，特别编写了手动模式。用户可在每个阶段完成的时候按 Manual 键选择进入手动模式。此模式由 4\*4 矩阵键盘控制，并通过液晶显示器显示电机的开关，运行速度，电弧熔融装置的开关。通过矩阵键盘可分别对 1 号步进电机和 2 号步进电机进行开关，左移右移，速度的加减操作，并可独

立开关电弧熔融装置。再次按下 **Manual** 键可退出手动模式。

此函数为用户熟悉此系统提供了方便，并可以在实验过程中随时调整滑台的位置，调试电弧熔融装置的温度。

### 3.5.5 主函数

综合控制四个主要功能函数并合理安排其逻辑顺序和循环方式。因为要在进行完一次拉锥之后可以进行第二次拉锥，第三次拉锥，并且可以重复发送参数，不断调整参数，所以将主功能函数包含在一个循环当中，不断重复主要处理功能。如图 3-22 为主函数逻辑顺序图

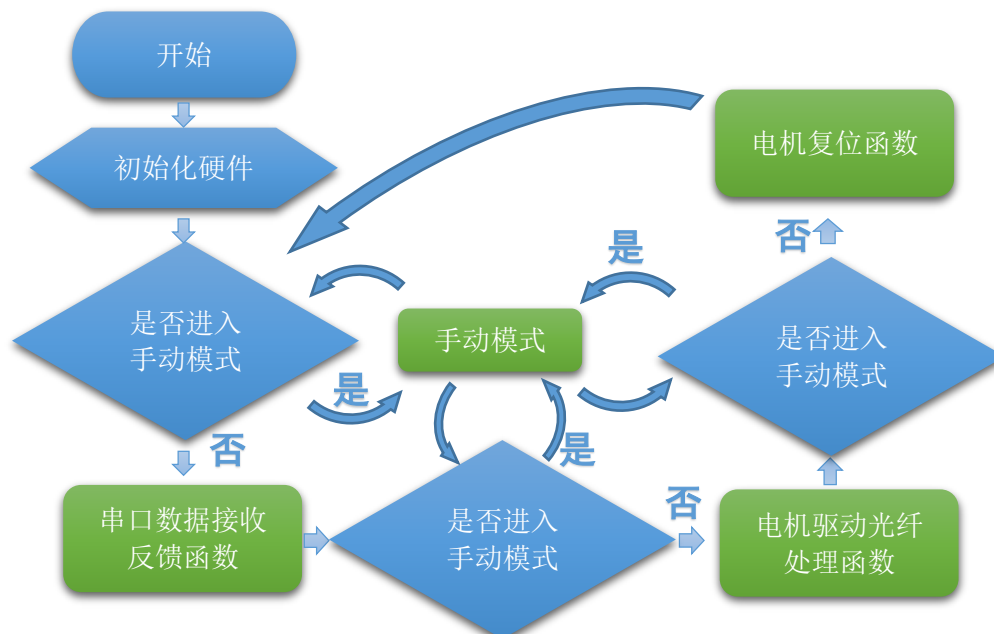


图 3-22 主函数逻辑顺序图

开启时，初始化所有的部件，包括液晶显示器，步进电机滑台，步进电机驱动器和电弧熔融装置。首先选择进入手动模式还是进行参数的接受，若选择进入手动模式，当退出手动模式则返回之前菜单。若选择开始接收参数，则进入串口数据接收反馈函数，准备接收参数。当接收完毕，用户可以选择进入手动模式或开始对光纤进行处理，此时可完成对光纤的装载和固定。同样，若选择进入手动模式并返回，仍会提示选择进入手动模式还是开始处理光纤。当用户选择开始处理光纤时，程序进入电机驱动光纤处理函数。完成对光纤的处理后，提示用户选择进入手动模式或对电机进行复位操作。此时可将处理完成的光纤从固定架上取下。若选择进入复位操作，则进入电机复位函数。当步进电机滑台返回初始值之后，程序返回到一开始的第一步，提示用户选择进入手动模式或开始接收新的一串参数。如此便可重复传

输数据并对数根光纤进行拉锥操作。

```

/*****主函数部分内容*****/
/*****代码编写者：张育鑫*****/

while(Start)
{
    if(Manual==0)          //手动模式按键检测
    {
        Delay(10);
        if(Manual==0)
        {
            while(!Manual);
            ManualMode();  //启动手动模式
            wcmd(0x01);    //液晶屏清空
            L1602_string(1,1,"Press Manual OR ");
            L1602_string(2,1,"Start");
        }
    }
}
DataDeliver();
while(Start)
{
    if(Manual==0)          //手动模式按键检测
    {
        Delay(10);
        if(Manual==0)
        {
            while(!Manual);
            ManualMode();  //启动手动模式
            wcmd(0x01);    //液晶屏清空
            L1602_string(1,1,"Press Manual OR ");
            L1602_string(2,1,"Run");
        }
    }
}
Processing();
while(Start)
{
    if(Manual==0)          //手动模式按键检测
    {
        Delay(10);
        if(Manual==0)
        {
            while(!Manual);
            ManualMode();  //启动手动模式
            wcmd(0x01);    //液晶屏清空
            L1602_string(1,1,"Press Manual OR ");
            L1602_string(2,1,"Reset");
        }
    }
}
ResetMotor();
```

### 3.6 本章小结

本章介绍了拉锥系统的硬件和软件部分的搭建和设计思路。

硬件部分以单片机为系统控制、指令处理和数据存储中心，控制 1602 液晶显示器同用户进行人机交互信息提示，控制 4\*4 矩阵键盘在手动模式对系统进行操作，控制继电器的开启和闭合来间接控制电弧熔融系统的开关，控制步进电机驱动器进而控制步进电机滑台的运动方向和运动速度。

软件部分以 C 语言为编程语言，综合四个主功能子函数，完成系统的功能。

（1）串口数据接收反馈函数用于接收并存储由电脑端串口传送过来的系统参数，对参数的合法性进行检查并存储合法参数。（2）电机驱动光纤处理函数用于精确控制 T0 和 T1 定时器，进而计算步进电机和电弧熔融系统的工作时间。计算并发出基础步进电机脉冲，进而控制步进电机的移动速度。检查光纤处理过程的工作阶段，在阶段完成时锁定步进电机并提示用户取下光纤。（3）电机复位函数用于在将处理的光纤取走后将电机滑台复位到原位置。（4）手动模式提供给用户用矩阵键盘控制各个部件的渠道，以灵活控制各个系统，理解工作流程和工作方式。

四个子函数相辅相成，顺序工作，共同完成对光纤处理过程的精确控制。

硬件和软件部分有机结合，能够进行稳定且可控的光纤拉锥操作。

搭建完成的系统如图 3-23 所示。



图 3-23 光纤拉锥电机控制系统实物图

## 第 4 章 光纤拉锥电机控制系统实验结果与分析

此系统用于对光纤的拉锥处理。在进行处理实验中不断对系统的工作状态和结构进行调整，对实际操作方式进行论证和修改，对不同输入参数所输出的光纤结构和锥形进行检测和讨论。

### 4.1 对单模光纤进行拉锥操作的实验

采用单模光纤对系统的工作状态进行检测和实验。完整的实验过程陈述如下。

#### 4.1.1 实验准备

在启动系统之前需做相应的准备工作。

- (1) 确认线路是否连接正确。单片机各引脚与 2 个 2M542 步进电机驱动器、1602 液晶显示器、继电器、电脑的连接，2M542 步进电机驱动器与步进电机滑台的连线方式如表 4-1 所示。

表 4-1 系统接线表

编号	接线端	接线端
1	1 号驱动器 PLS+、DIR+、ENA+	单片机 Vcc
2	1 号驱动器 PLS-	单片机 P21 口
3	1 号驱动器 DIR-	单片机 P24 口
4	1 号驱动器 ENA-	单片机 P36 口
5	2 号驱动器 PLS+、DIR+、ENA+	单片机 Vcc
6	2 号驱动器 PLS-	单片机 P20 口
7	2 号驱动器 DIR-	单片机 P22 口
8	2 号驱动器 ENA-	单片机 P23 口
9	继电器 RELAY	单片机 P37 口
10	步进电机滑台白线	驱动器 B+
11	步进电机滑台红线	驱动器 B-
12	步进电机滑台绿线	驱动器 A-
13	步进电机滑台橙线	驱动器 A+
14	单片机串口端	电脑 USB 端（经串口转 USB 线连接）

- (2) 调整 2M542 步进电机驱动器的八位拨码设定。其中 1~3 设定为 1.91A（101），4 设定为 Full Current(1)，5~8 设定为 4000 细分（1010）。



- (3) 预先处理光纤。利用光纤钳将所要处理的光纤的涂覆层剥去，将纤芯裸露在外。静止在旁边，等待装入机器。
- (4) 打开电弧放电熔融装置的直流电源，转动旋钮将输出电压调整为合适的大小（推荐为 20V）。并确认电路电极的正负极连接到直流电源的正负极。之后关闭直流电源。
- (5) 电脑端开机并打开串口助手界面，调试 USB 的 COM 口设置，准备输入待传输参数。
- (6) 接通步进电机驱动器的电源，打开单片机开发板的开关。按下“Manual”键进入手动模式，通过按键调整滑台的位置。调整完毕后，再次按下“Manual”键退出手动模式，关闭所有电源。

#### 4.1.2 实验步骤

- (1) 给步进电机驱动器和电弧熔融装置接通电源（注意此时不要将光纤放置在光纤夹具上）。
- (2) 按下“Start”键，进入数据传输阶段，液晶屏幕上提示“Please send Paras. Waiting.”字样。等待用户在电脑端的操作。
- (3) 在电脑端串口助手上按照“1 号电机启动延时、1 号电机工作时长、2 号电机启动延时、2 号电机工作时长、继电器启动延时、继电器关闭延时、1 号电机移动速度和 2 号电机移动速度”的顺序输入 8 个工作参数。点击串口助手的发送按钮，单片机接收到合法数据后通过液晶屏幕提示“Received.”
- (4) 数据传输完毕后，将之前剥去涂覆层的光纤放置到光纤夹具的单模光纤槽中，将光纤绷紧，固定牢固。
- (5) 按下“Start”键，开始光纤拉锥操作。
- (6) 拉锥完成后，请小心取下处理好的锥形光纤。（关于锥形光纤的取下方式请参看注意事项）。
- (7) 取下光纤后，按下“Start”键，将电机滑台归位。

#### 4.1.3 注意事项

- (1) 输入参数时，第 1 个~第 6 个参数，即所有的时间参数范围在 0~255，单位 0.01s，第 7 个和第 8 个参数的范围为 1~100，若超出合理范围，传输会出错并且机器会提示用户“Error. Please send again.”，请用户重新输入参数。注意输入到串口界面的参数为 16 进制，请转换完毕之后

再输入。

- (2) 对光纤进行剥除涂覆层操作时，可以只对拉锥处理的一小截进行剥除。剥除时要剥干净，否则会在加热融化的时候对芯层引入杂质，影响锥形光纤的光学特性。
- (3) 光纤处理完毕后，请小心取下光纤。因处理完后锥腰极细且属于玻璃，极易断裂，故建议双手托起光纤将其取下或另备光纤夹将光纤取走。
- (4) 在系统操作过程中，每次可以按键的时候均可按下“Manual”键选择进入手动模式，对当前电机滑台的位置进行调整，对电弧熔融装置的温度进行更改。
- (5) 因实验室中实验设备未封装，高压包输出线路裸露在外，故在使用电弧熔融装置的时候，一定要注意安全。上电的时候务必远离接线，并且避免将水洒到机器上。避免潮湿的环境。

## 4.2 实验结果分析

经测验，输入合理的参数可以得到较为理想的锥形光纤。图 4-1 分别对应表 4-2 中的拉锥参数。

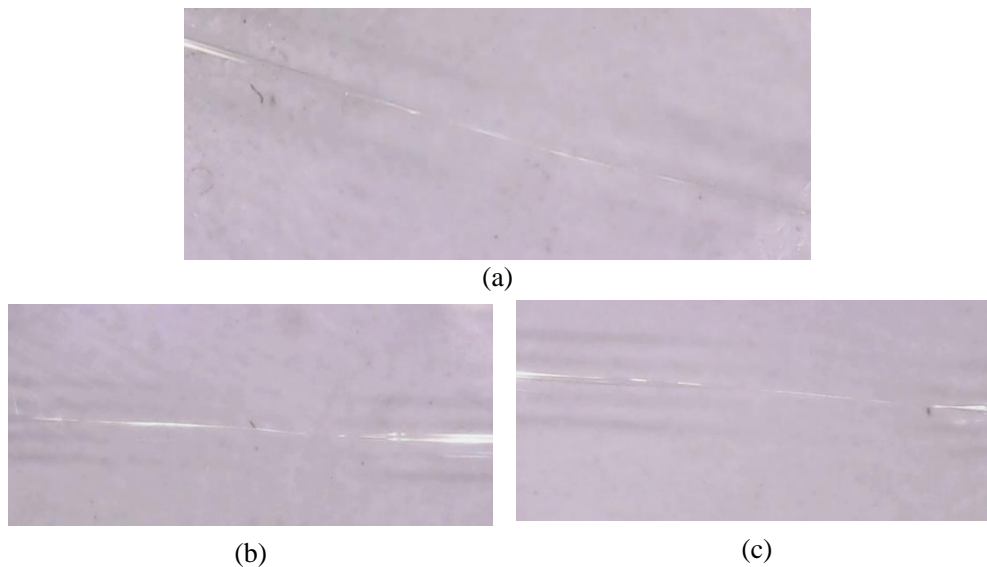


图 4-1 系统所加工得到的锥形光纤

表 4-2 参数与所得光纤对应表

编号	参数	图片
1	20 32 20 32 10 45 50 50	4-1 (a)
2	30 64 30 64 10 85 30 30	4-1 (b)
3	40 64 40 64 10 95 40 40	4-1 (c)

精细的锥形结构如图 4-2 所示。

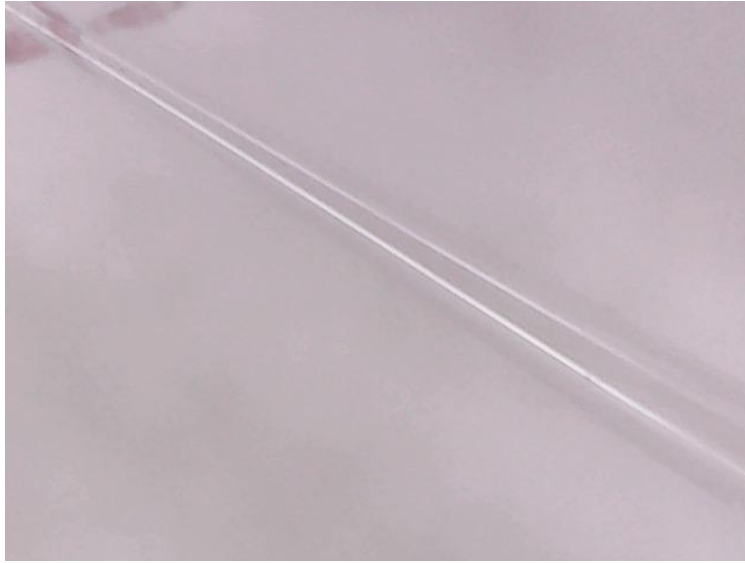


图 4-2

可见由拉锥系统可以得到光滑均匀的锥形光纤。

在运行光纤拉锥系统不断尝试新参数时，发现系统仍有需要改进之处。

- (1) 电弧放电熔融系统的电极位置不固定，在运行时所激发的等离子体会不断发生漂移，闪烁，使得在加热过程中纤芯的温度不能恒定，使得长时间的拉锥过程中，纤芯受热不均匀，所得锥形不均匀。应改进电极，对电极表面进行抛光，锐化处理，使得放电过程稳定且等离子体固定。并且避免室内的空气流动，最佳方案为将拉锥操作放置在真空环境中进行。
- (2) 电弧放电熔融系统的电极加热面积小，为点热源，故在拉制长锥形，锥腰长且均匀的光纤时，会使得所融化的纤芯来不及被拉长便冷却，在拉锥过程结束前还原为玻璃态，最终导致锥形中部断裂。若要改进，则应将热源扩展为线型热源或控制热源进行扫描处理。
- (3) 电机在拉锥过程结束的一刹那会有微弱的抖动，若两电机距离较远，中间垂落的自由光纤较长，会发生光纤的抖动，进而影响到尚未完全冷却的锥腰部位，故电机的起始间距不应过大。应改进电机运动程序，加入缓停操作，尽量避免急启急停，并在锥形形成的下方或附近增加固定装置，既可以避免抖动，又可以为拉锥光纤的取下提供安全的固定方案。

### 4.3 本章小结

本章对得到的光纤拉锥电机控制系统的实验进行了描述，详细说明了系统的使用前的准备工作，使用步骤以及使用中的注意事项。对一定参数下，经过系统处理的光纤进行了描述和讨论。经过调试发现了系统的一些不足之处并说明了改进方案。

本系统在给定参数后可以进行较稳定的光纤处理，所得锥形均匀，锥曲度明显。基本达到设计要求。

## 结论

因锥形光纤的性能优良，基于锥形光纤的光纤传感器应运而生，其高灵敏度和高适应性使得许多实验室争相开始研究。对于小型实验室，对锥形光纤的制备要求和负担不起光纤拉锥机的经济限制使得对基于普通器件的低成本的小型光纤拉锥系统有所需求。本文阐述并讨论了光纤拉锥电机控制系统的理论要求，并描述了设计此系统的过程。

在理论方面，讨论了光纤纤芯的熔化过程和冷却结晶、玻璃化过程，对冷却并还原为玻璃态的温度条件提出了要求；讨论了光纤拉锥过程中，锥形与拉锥速度，热源宽度的关系；描述了步进电机的结构和原理，为稳定驱动并精确控制电机提供了理论基础；讨论了电弧放电理论，为热源的设计和搭建提供了理论支持。

在设计方面，介绍了单片机控制方法，单片机外围电路的设计思路，选用的步进电机驱动器和步进电机滑台的型号和性能以及电弧放电熔融系统的搭建过程和控制方法。详细描述了以 C 语言为基础的系统程序设计思路，介绍了四个主要功能的实现和运行方法。

最后通过实验，介绍了此系统的运行准备工作，运行过程和注意事项。讨论了不同输入参数得到的不同锥形的光纤。讨论了此系统的优缺点以及可以改进的部分。

此光纤拉锥电机控制系统的设计与搭建，硬件成本为千元以内，为小型实验室提供了低成本的制作锥形光纤的方法，此系统的灵活性和实用性为光纤拉锥的教学和研究提供了新的可能。相信经过不断地改进，此系统可以更好地为锥形光纤的研究和锥形光纤传感器的制作服务。

## 参考文献

- [1] Corres J M, Arregui F J, Mat ás I R. Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 122(2): 442-449.
- [2] F. P. Payne,C. D. Hussey.Modeling fused single-mode-fibre couplers. Electronics Letters . 1985
- [3] H. C. Nguyen,B. T. Kuhlmeier.Tapered photonic crystal fibres: properties, characterisation and applications[J]. Applied Physics B . 2005 (2-3)
- [4] L.S.Liu,,L.Zhang.The integrated fabrication system of melt-drawn fiber tapers and microsphereresonators. 4th International Workshop on Microfactories . 2004
- [5] Li-Peng Sun, Jie Li, Long Jin, and Bai-Ou Guan. Structural microfiber long-period gratings[J], Optics express,2012,20(16):18079-18084
- [6] Liu Y, Qu S L. Single micro channel high-temperature fiber sensor by femtosecond laser-induced water break down [J]. Optics letters, 2013, 38(3): 335-337.
- [7] Williamson R L,Miles M J.Melt-drawn scanning near-field optical microscopy probe profiles. Journal of Applied Physics . 1996
- [8] 陈子伦,奚小明.光子晶体光纤的空气孔膨胀和拉锥技术研究[J].国防科技大学学报.2011(02)
- [9] 顾晓仪, 光纤通讯, 北京: 人民邮电出版社, 2011 143-144
- [10] 郭强. 熔锥型光纤耦合器拉锥系统及工艺的研究[D].山东大学,2007.
- [11] 黄昆 , 固体物理学, 北京: 高等教育出版社, 1988 41~44
- [12] 邱晖晔,单淑萍.双锥形光纤应变传感器[J].龙岩学院学报.2009(05)
- [13] 王其平, 电器电弧理论, 西安: 机械工业出版社, 1991 7-8
- [14] 王献宇. 光纤熔接机放电电子系统的设计[D]. 华北电力大学 (北京), 2009.
- [15] 王玉芬 刘连城 石英玻璃, 北京: 化学工业出版社, 2007 128~130
- [16] 武占成 张希军 胡有志, 气体放电, 北京:国防工业出版社, 2012 102-113
- [17] 奚小明. 拉锥光纤的特性和应用研究[D].国防科学技术大学,2010.
- [18] 夏娟,诸跃进. 熔融拉锥过程中熔锥形状特性的研究 [J]. 光通信研究,2012,06:49-51.
- [19] 薛春荣,田华,吕志娟. 熔锥光纤器件的锥区特性[J]. 光通信技术,2006,06:17-18.
- [20] 杨祥林著.光纤通信系统[M]. 国防工业出版社, 2000
- [21] 张从国. 锥形光纤的理论研究[D].北京交通大学,2011

## 致谢

在论文截稿之前，感谢一直关心我爱我的家人，我的父母。衷心感谢我的指导老师，潘玉寨老师。本文是在潘玉寨老师的指导和关心下完成的。从选题构思，实验设计，器件选择购买，设备的制作搭建，程序的构思编写和调试的过程中，都得到了潘玉寨老师的精心指导。他对本文的工作投入了大量的精力和时间，使得本文能够顺利完成。在课题的研究过程中，潘老师动用实验室中的大量资源为我的实验顺利进行提供了良好的科研条件，在遇到难题时，给与我悉心的解答和教导，指导我并和我一并对未知领域进行探索。在他的帮助下我接触到了更多的科研方面的最新知识和前沿科技，同时也训练了我的思辨能力和动手能力。

本课题也得到了王玉宝学长的指导和帮助，他对实验的完成和论文的顺利成稿起到了巨大的帮助。在此一并表示感谢。

还要特别感谢的是我的老婆大人邱云，她在我写作的过程中不断鼓励我，陪伴我，在精神上和生活上给予了我大力的支持，让我能够坚持完成论文的书写。

感谢我身边的同学和朋友他们在这个课题研究中给予我很大的帮助。拜京同学在程序设计方面给我提供了不少建议，使得程序能够顺利完成，李学深同学帮助我一起进行器件的制作和设备的搭建。还要感谢母校哈工大威海，感谢本科学习中教导我的老师们，有了你们的指引我才能具有足够的知识储备完成此实验。

## 附录

### 光纤拉锥电机控制系统使用手册

#### 使用注意事项：

（1） 确认线路是否连接正确。单片机各引脚与 2 个 2M542 步进电机驱动器、1602 液晶显示器、继电器、电脑的连接，2M542 步进电机驱动器与步进电机滑台的连线方式如表 1 所示。

编号	接线端	接线端
1	1 号驱动器 PLS+、DIR+、ENA+	单片机 Vcc
2	1 号驱动器 PLS-	单片机 P21 口
3	1 号驱动器 DIR-	单片机 P24 口
4	1 号驱动器 ENA-	单片机 P36 口
5	2 号驱动器 PLS+、DIR+、ENA+	单片机 Vcc
6	2 号驱动器 PLS-	单片机 P20 口
7	2 号驱动器 DIR-	单片机 P22 口
8	2 号驱动器 ENA-	单片机 P23 口
9	继电器 RELAY	单片机 P37 口
10	步进电机滑台白线	驱动器 B+
11	步进电机滑台红线	驱动器 B-
12	步进电机滑台绿线	驱动器 A-
13	步进电机滑台橙线	驱动器 A+
14	单片机串口端	电脑 USB 端（经串口转 USB 线连接）

表 1 系统连线

（2） 调整 2M542 步进电机驱动器的八位拨码设定。其中 1~3 设定为 1.91A（101），4 设定为 Full Current(1)，5~8 设定为 4000 细分（1010）。

（3） 预先处理光纤。利用光纤钳将所要处理的光纤的涂覆层剥去，将纤芯裸露在外。静止在旁边，等待装入机器。

编号	参数内容	范围
1	1 号电机启动延时	0-255
2	1 号电机工作时长	0-255
3	2 号电机启动延时	0-255
4	2 号电机工作时长	0-255
5	继电器启动延时	0-255
6	继电器关闭延时	0-255
7	1 号电机移动速度	0-100
8	2 号电机移动速度	0-100

表 2 传输参数



（4）对光纤进行剥除涂覆层操作时，可以只对拉锥处理的一小截进行剥除。剥除时要剥干净，否则会在加热融化的时候对芯层引入杂质，影响锥形光纤的光学特性。

（5）光纤处理完毕后，请小心取下光纤。因处理完后锥腰极细且属于玻璃，极易断裂，故建议双手托起光纤将其取下或另备光纤夹将光纤取走。

## 使用方法：

接通电源后通过液晶显示器会提示下一步需要进行的操作。

- （1）当提示“Press Manual OR Start”时，按下 Start 键开始传输参数。按下 Manual 键进入手动模式。
- （2）当提示“Press Manual OR Run”时，按下 Start 键开始进行拉锥，按下 Manual 键进入手动模式。
- （3）当提示“Press Manual OR Reset”时，按下 Start 键开始对电机滑台进行复位，按下 Manual 键进入手动模式。
- （4）当提示“Paras received Manual OR Run”时，按下 Start 键开始进行拉锥，按下 Manual 键进入手动模式。

## 手动模式功能

手动模式时，液晶显示器上会显示如下字样。

“M1 V=50 ON R OFF”

“M2 V=50 ON ”

M1 表示一号步进电机滑台，M2 表示二号步进电机滑台，R 表示继电器。V 代表相应的步进电机速度，ON 表示上电，OFF 表示断电。

此时相应的按键代表相应的功能。

编号	功能	编号	功能
1	一号电机速度+1	9	一号电机向右移动
2	一号电机速度-1	10	一号电机向左移动
3	二号电机速度+1	11	二号电机向右移动
4	二号电机速度-1	12	二号电机向左移动
5	一号电机电源	13	待定
6	二号电机电源	14	待定
7	继电器开关	15	待定
8	待定	16	待定