

## 摘 要

本文以单片机和模糊控制理论为基础, 针对半导体激光器关键性问题——注入电流的稳定性和半导体激光器的温度控制, 进行了理论研究和实验验证。

通过半导体激光器的调制特性和热特性的分析, 提出了半导体激光器激光光源系统的实验设计指标——注入电流的波动必须小于  $50 \mu\text{A}$ , 半导体激光器的温度变化应在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  的范围内。

提出了频率调制的程序化控制。这种方法具有硬件电路简单、单片机容易实现、可控性好, 并且, 通过简单的编程就可产生各种波形的调制信号等优点。本系统将整个波形的调制信号以最佳断点的形式存于单片机 89C52 的 Flash 程序存储器中, 通过调整中断时间来实现频率调整。从而, 避免了大量的计算, 提高了信号的频率和精度, 此外, 它还具有防止电信号的漂移的功能。软启动电路、滤波电路等保护电路的联合使用, 大大降低了噪声对半导体激光器所产生的干扰, 与此同时, 实现了电源电压的缓升缓降, 在很大程度上避免了浪涌击穿事件的发生。

将整体控温和模糊控制技术相结合, 实现了半导体激光器的温度控制。该控制通过检测半导体激光器的温度变化, 从而实现了半导体激光器的双输入单输出的模糊控制系统, 减少了超调量和振荡现象, 保证了系统的稳定性; 建立了模糊控制规则库, 并制成了模糊控制规则表。在反模糊化的过程中, 最大隶属度法的使用, 省略了大量的模糊判决, 使程序大大简化的同时提高了温控精度。

本系统应用于以半导体激光器为光源的高精度干涉测量系统中。通过实验验证, 基本上实现了半导体激光器注入电流的稳定性和温度控制的恒定性的指标要求, 即半导体激光器的注入电流的波动小于  $40 \mu\text{A}$ , 整个系统的温度稳定性为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 取得了很好的控制效果。

**关键词** 半导体激光器; 频率调制; 程序控制; 模糊控制

温度控制

## Abstract

Base on the theory of single chip microcomputer and fuzzy control, I had a study and test on the key problem of laser supply of LD, such as the linear of input current, the control of temperature.

Target of design of supply of LD was put forward, as the disturbance of input current must be less to  $50\mu\text{A}$ , and the range of difference of temperature is between  $-1^\circ\text{C}$  and  $+1^\circ\text{C}$ .

In this article, the program control of the modulation of frequency was made. It has some merit, for example, the simple circuit, the easy realization by single chip microcomputer, the best character of control, producing several kinds of wave by program, such on. One period signal was divided into the most proper points, then kept in the AT89c52. In the producing, the frequency modulation was realized by modulate the period of interrupt, reduce lots of counts, make progress of frequency and precision of signal, moreover, avoid drift of electricity signal. Combine the circuit of gradually switching on and the filter for wave will cut down the interference of noise. In the same time, realize the gradually rising and fall of supply power potential, otherwise, prohibit the incidence of surge puncture.

The temperature is dominated by the skill of whole temperature control and fuzzy control. The system will run a double inputs and single output, prevent it from the above quote and vibration, guarantee the stability, establish the warehouse of regulations of fuzzy control, form a table of regulations of fuzzy control. In the process of defuzzification, combining the method of intensity transformation and consultation tables. All of them promote the speed of the controller and the precision.

This system were tested and verified that get the target of the stability of input current and constant performance of temperature, will be used in inference system that the light source is laser diode. In other words, the fluctuate of input current of laser diode is less to  $40\mu\text{A}$ , and the stability of temperature is  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , in brief, achieve good results.

**Key Words** Laser diode, Frequency modulation, Programmed control,  
Fuzzy control

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

众所周知，距离测量问题是基本的物理量测量问题之一，高精度、高效率的光学测量方法在航天、航空、电子、机械制造以及军事等领域都有极其重要的理论价值和实际意义。激光以其所具有的亮度高、方向性好、单色性和相干性好等优点，正逐步发展为光学测量领域的主要光源。

距离的测量，按所用光源的不同可以分为两大类：一类是以气体激光器作为光源；另一类是以半导体激光器作为光源。目前在现场和测量室研究中，普遍使用的高精度的距离测量系统是基于气体激光器（He-Ne）的光学干涉方法。其特点是性能稳定，测量不确定度可达到 $4 \times 10^{-7} \text{ m}^{[12]}$ ，抗干扰能力强，量程大，技术成熟，在不同的场合有广泛的应用。但是（He-Ne）气体激光器的光学干涉距离测量系统的结构复杂，造价高，灵活性较差<sup>[3]</sup>。并且，使用气体激光器距离测量系统，测量不同环境中的距离时，要求对光学系统进行重新安装，调试，且过程复杂，只有熟练的技术人员才能完成。于是，半导体激光器以其体积小，价格低，易于调整、使用等优点，以极大的速率发展着，大有取代气体激光器趋势。

研究表明，半导体激光器（LD）输出光频的稳定性对于激光干涉测量是十分重要的，而制约 LD 输出光频稳定的因素是其注入电流和温度，欲将光频漂移减小到激光测量要求的 10MHz 以下，注入电流的波动必须小于 50  $\mu\text{A}$ ，同时，温度漂移必须在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  的范围内<sup>[4][5]</sup>。因而，半导体激光器调制电源应具备很好的线性和稳定性。

为了降低成本、提高灵活性，目前国内外在高精度距离测量方面的研究，主要集中于以注入电流连续光频率调制(FMCW)半导体激光器为特征的干涉测量方法<sup>[6]</sup>。

## 1.2 半导体激光器的发展及应用

### 1.2.1 半导体激光器的发展概述

半导体激光器（Laser Diode,以下简称 LD）出现于 1962 年，该年 3 月，通用电话和电子仪器公司（GT&E）的梅伯格（Mayburg）宣称在 77K 的情况下 GaAs 电致发光的效率很高<sup>[7]</sup>。

1967年, Bell 实验室的帕尼什(Panish)和哈雅希(Hayashi)提出用异质结构得到了阈值电流密度为  $8.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  [7]。

1970年, 美国康宁公司把光纤的传输损耗从 1000dB/km 降到 20dB/km。同年, Bell 实验室等研究单位相继研制出室温连续振荡的 GaAlAs/ GaAs 双异质结构(DH)把阈值电流密度降到  $0.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 。从此世界上许多实验室对 DH 和更复杂的异质结构激光器进行了大量的研究工作, 对激光器的结构做了改进, 提出了许多新的结构, 为扩大激光器的波长范围, 研制了许多新材料; 改进了系统的生长和制作工艺以后, 得到了寿命特别长的激光器 [8]。

世界上第一个激光器的发明距今已经 40 年了, 40 年来, 激光科学技术以其强大的生命力推动着光学的发展, 它的应用已经遍及科技、经济、军事、和社会发展的许多领域, 远远超过了 40 年前人们原有的预想。激光干涉方法由于具有可实现非接触测量, 对电磁干扰信号无影响等优点, 使它在高分辨力测量领域以极大的速度发展着。与此同时, 半导体激光器以其体积小、可通过注入电流调谐等优点, 逐步发展为激光干涉仪, 尤其是大量程连续测量距离的激光干涉仪的主要光源 [9]。

目前 LD 的几个主要性能指标的发展状况如下所述:

1) 阈值电流 阈值电流是 LD 的重要参数之一, 降低阈值电流可以减小功耗, 延长寿命提高系统的稳定性;

2) 功率 LD 在室温的连续输出的功率不断提高, 单个 LD 的输出功率已由 70 年代的数毫瓦提高到目前的数瓦, 列阵 LD 已由最初的几十毫瓦提高到目前的数千瓦;

3) 波长 LD 的波长由最初的 870nm 不断向两侧延伸, 从 635nm~1600 nm 的波长范围都可以得到能在室温下连续工作的 LD。可见光 LD 具有广泛的销售市场, 也是人们致力研究的主要方面, 但是, LD 要真正代替 He-Ne 激光器成为最常用的激光光源, 必须使其波长更接近 633nm, 现在已经得到性能较稳定的波长为 633nm 的红光 LD [10];

4) 寿命 LD 的寿命也不断提高, 由第一个同质结 LD 仅工作 12 分钟已提高到目前的 75 万小时, 这是任何其他激光器无法比拟的。

### 1.2.2 半导体激光器的应用

1978年, LD 在美国开通的第一条商用光纤通信系统发挥了重要的作用。从此, LD 得到了突飞猛进的发展 [11]。

1982年, S.Kobayashi 对半导体激光器 LD 的光频调制特性进行了深入细致的研究, 指出在低频调制区内, 半导体激光器的电流—频率特性是线性的<sup>[12]</sup>。它的意义不只在发现了半导体激光器的一个特性, 更重要的是为后来半导体激光器的应用指出了一个新的方法。继文献[12]工作之后, 以半导体激光器作为光源的测量系统, 利用其光频调制特性进行干涉测量, 取得了许多成果。

1986年, H.Kikuta 等利用半导体激光器的调频特性进行了绝对测距的研究<sup>[13]</sup>。这一研究工作对半导体激光器应用于绝对测距有非常重要的影响。1987年, H.Kikuta 又对文献[13]所述的系统进行了详细的误差分析<sup>[14]</sup>, 认为来自光源和光学系统的误差主要有三个: 光反馈效应, 光源纵模的分布及光学系统的反射光。

同年, O.Sasaki 提出了用于测量表面轮廓的半导体激光器正弦相位调制干涉仪<sup>[15]</sup>, 并对该系统的误差进行了分析, 指出测量精度取决于倍乘噪声和叠加噪声的抑制程度, 同时详细分析了噪声的来源及影响。

1987年, A. J. den boef 提出了另一种利用正弦电流调制半导体激光器的测距方法<sup>[16][17]</sup>, 其主要特点是可用于目标为粗糙表面的绝对距离测量。

同年, T.Kubota 研究了用于测量位移和距离的干涉仪<sup>[18]</sup>。该系统利用三角波电流驱动半导体激光器, 使光频随时间线性变化, 在接收端获得与光程差呈正比的拍频信号, 通过计数拍频全周期数, 即可测得距离值。

1989年, 清华大学博士生徐勇进行了光程差为 3.5m 的测距系统的研究<sup>[19]</sup>, 并取得了 0.1—0.3mm 的精度。

同年, K.Hotate 研制了一种光学相干域反射计 (Optical Frequency-domain Reflectometry)<sup>[20]</sup>, 其采用分离的阶梯拨电流调制半导体激光器, 取得了 0.7m 范围内几个毫米的精度。该方法没有机械移动部件, 系统比较简单, 尤其半导体激光器的调制驱动源引入程控的思想很有意义。但是, 由于使用了声光调制器和高频注入电流, 使其调整困难。

1991年, M.Suematsu 等分析了利用半导体激光器的调制特性进行绝对测距的方法, 提出了基于多光束干涉仪的测距新技术。它联合使用了 Fourier 变换技术和参考技术, 解决了由于干涉信号包含多个频率项而无法使用条纹技术的技术问题, 并且减小了半导体激光器电流—波长特性的非线性扰动等因素的影响, 提高了系统的抗干扰能力<sup>[21]</sup>。

1993年, P.de Groot 提出了利用半导体激光器自身的多纵模来合成波长进行干涉测量的方案<sup>[22]</sup>。实验结果表明该项技术需要高度稳定的合成波长,

尽管精密控制这个波长是十分困难的，但是，如果此问题得到解决，用半导体激光器替代气体激光器来实现合成波长法测量距离，在成本和体积上都有极大的优势。

1994年，孙晓明等人应用半导体激光器连续波频率调制进行三束干涉的距离测量方法的研究<sup>[23]</sup>。

1995年，文献[24]研制了一种集成光波导式干涉型距离测量系统，分辨率高达10nm。

1996年，文献[25]指出，在很多重要的场合，只能用非接触、易于调整的光学测量方法，因此，光纤距离测量的应用领域将不断扩大。

1997年，SDL公司推出了5700/6700系列Distribute feed Back (DFB)型半导体激光器，它工作的波长范围是852nm--1083nm，其中波长为852nm的半导体激光器的最高输出功率为100mW。1998年，它又推出了工作波长为630nm--680nm的DFB型半导体激光器，功率为50mW<sup>[26]</sup>。

1999年，文献[27]成功的把Multiple Quantum Well (MQW)单纵模半导体激光器制成在可见光区(660nm)，功率可以达到400mW。由于工作在可见光区内，更加方便于系统的设计、调试和使用。

综上所述，高精度距离的干涉测量具有重要的理论意义和实用价值。使用半导体激光器作为干涉测量系统的光源，利用其特性进行干涉测量，提高抗干扰能力，使系统具有可测范围大、精度和分辨率高等特点，将是今后光学干涉测量的主要发展方向。因此，高频率抗干扰的激光器调制电源的研制是急待解决的问题，具有很高的实用价值。

### 1.3 LD 的光纤干涉测量系统存在的问题

1. 半导体激光器自身受温度和注入电流的影响而产生光频的漂移，对重复性有较大影响。一个解决途径就是在使用高精度信号驱动源的同时，严格控制激光器的温度，但是温度的控制一直不尽人意。

2. 锯齿波调制的吉布斯效应问题。目前，半导体激光器的频率调制多使用锯齿波信号，原因是其干涉信号解调方便，且可以在时域进行。但是，在干涉系统中，信号的处理和解调都是采用数字处理方法进行的，不一致连续函数在FFT和IFFT的过程中，在不可导位置，将产生吉布斯振荡。而锯齿波信号在调制到最高点后，必须回到最低点，由于下降过程不够快，以及驱动电路的过渡过程等原因，必将造成解调过程中的吉布斯效应问题。它将严

重影响测量精度。

## 1.4 本课题研究的主要内容

由上述问题可见, 半导体激光器 (LD) 输出光频的稳定性对于激光干涉测量是十分重要的。然而, 制约 LD 输出光频稳定性的因素是其注入电流和温度。欲将光频漂移减小, 以满足利用激光器的电流---频率线性区 (10MHz 以下) 的特性所进行的干涉测量的要求, 注入电流的波动必须小于  $50 \mu\text{A}$ , 同时, 温度漂移必须在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  的范围内。因此, 半导体激光器调制电源应具备很好的线性和稳定性。

### 1.4.1 半导体激光器的频率调制源

注入电流低频调制 LD 有两种方法。一为模拟电源调制, 该方法是最为常用的方法, 其主要思想是在直流信号的基础上叠加一个调制信号, 二者合成后, 经功率放大去驱动 LD。由于, LD 的工作特性要求其注入电流的波动小于  $50 \mu\text{A}$ , 而通过硬件实现这个参数是十分困难的, 其主要原因是它的结构非常复杂, 而每一个电路元件又在另一方面成为干扰源, 另外, 模拟电流调制源的功能单一, 通用性差。

二为程序驱动: 以计算机为核心的频率调制源, 其性能比较理想, 但是, 它的体积过于庞大, 不符合测量系统小型化、模块化发展的要求, 因而单片机的便成为实现激光调制电源的最佳选择。

本文研究的半导体激光器的调制电源, 采用以单片机 89C52 为核心的程控调制, 它将各种电压信号的形成过程转化为: 单片机自动查表、取值, 再经过 D/A 转换和以 LF356 为核心的深度负反馈电路、功率放大电路, 以达到稳定地输出电流的目的。它能够提供四种电流的输出方式: 方波、三角波、锯齿波和正弦波。并且, 在硬件不变的条件下, 通过软件的开发获得更高的精度。

### 1.4.2 温度控制系统

温度控制系统是采用整体控温和模糊控制技术相结合的原则。首先, 将全部光学元件同金属外壳用导热绝缘胶固化在一起, 再通过半导体制冷器对激光器进行整体控温。在模糊控制过程中, 同时将温度偏差和偏差的变化率作为模糊输入量, 采用 “If A And B Then C” 的控制规则形式和三角形隶属

函数制定控制规则表，并且将强度转移法与查表法相结合，使模糊控制器在获得较高的执行速度的同时又大大提高了控制精度。

## 1.5 本章小结

本章介绍了课题的理论和实际意义，通过引用国内外相关领域的文献，综述了目前国内外以半导体激光器为基础的干涉式距离测量系统的研究进展及主要成果，最后，提出该测量系统中急待解决的主要问题和本文的研究内容，以及欲达到的研究目标。

## 第 2 章 半导体激光器的频率调制

### 2. 1 引言

半导体激光器 (Laser Diode, 以下简称 LD) 作为人类的一种崭新的光源, 得到了广泛的应用。使用单片机对激光电源进行程序化控制, 能有效地提高性能价格比, 简化激光电源的硬件结构, 增强整机的自动化程度, 为整机的功能扩展提供了有利的条件。

#### 2. 1. 1 以半导体激光器为光源的光学测量系统

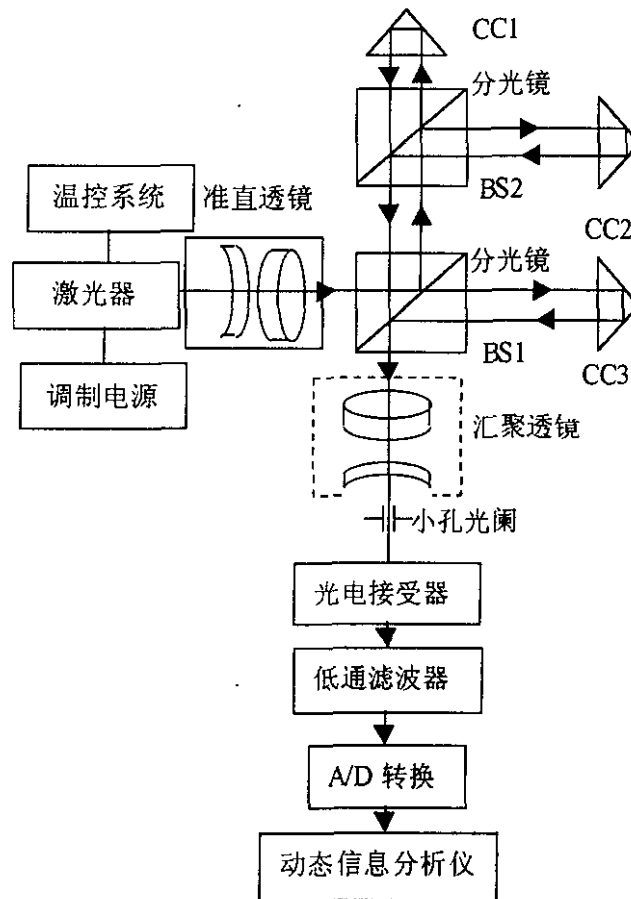


图 2-1 半导体激光器多光束干涉绝对测距系统

Fig. 2-1 Absolute distance measurement of multi-beams interference by LD

如图 2-1 所示。本课题中所研制的以半导体激光器为核心的激光光源，将应用于改型的双光束迈克尔逊干涉测距体系，进行距离和位移的高精度测量。其工作原理如下：通过对半导体激光器的注入电流进行三角波调制，以实现半导体激光器输出光频的线性调制，进行测量工作时，激光器的出射光经准直透镜后，被分光镜 BS1 分成两束，一束射向 CC3，另一束又被分光镜 BS2 分成两束，分别射向 CC1 和 CC2，经三个角锥棱镜反射回的三束光相遇后，发生干涉，形成光强信号，即纹波信号，被探测器接收后，经光电转换和 A/D，再经低通滤波，最后成为电流信号进入动态分析仪进行分析与处理，由此，本系统实现了高精度的距离测量。

## 2. 1. 2 半导体激光器的结构特点及振荡条件

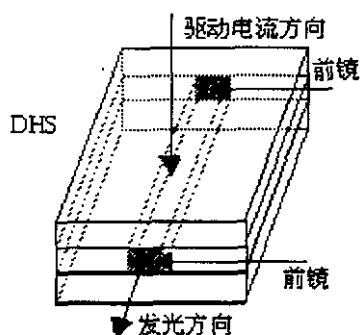


图 2-2 半导体激光器的内部结构

Fig.2-2 Internal structure of laser diode

半导体激光器形成激光振荡必须同时具备三个条件：激活介质、泵浦源及光学谐振腔。其中，激活介质是指处于粒子数反转分布的工作物质。处于热平衡条件下的物质将不可能对光进行光放大，因此，需外加能量，即泵浦源，从而，实现能级间的粒子数反转分布。但是这并不能获得激光，为了产生激光，还必须具备一个光学谐振腔。正如图 2-2 所示<sup>[28]</sup>。光学谐振腔是由放置在激活物质两边相互平行的平面反射镜构成，其中，前反射镜的反射系数为 100%，后反射镜的反射系数为 95%，以便从此镜获得激光输出。

当激光器工作时，光在谐振腔内不断反射，并且当两镜面距离为光波长的整数倍时，不同部分的波同相叠加，所发的光就是激光。在半导体激光器内部多次反射的光损耗，通过在谐振腔内部由受辐射而产生的光相干放大来加以补偿。为了产生这种效应，半导体激光器的注入电流必须大于一定的最

小电流，即大于阈值电流。此时，激光器产生激光振荡，并且，发射的光功率随着驱动电流的增大而陡直上升，如图所示。先后经普通光、多模激光，最后转化为单模激光<sup>[29][30]</sup>。

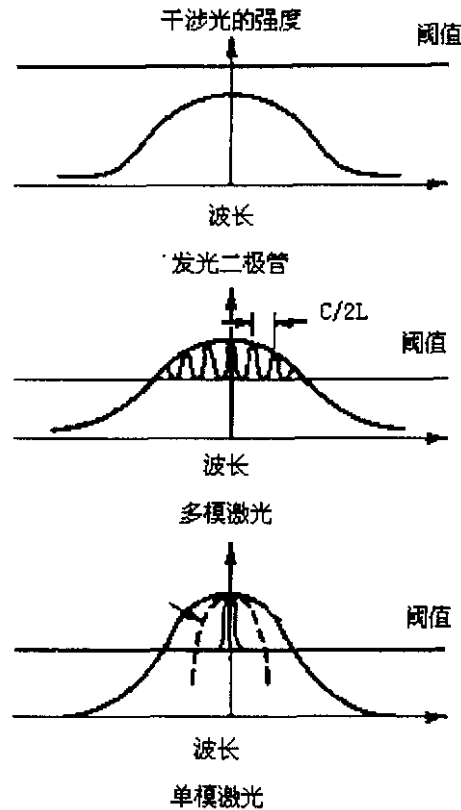


图 2-3 激光光谱输出特征

Fig.2-3 Characteristic graph of laser spectrum output

### 2. 1. 3 半导体激光器的调制特性

半导体激光器是以半导体材料为工作物质的一类激光器，亦称半导体激光二极管。透彻地了解半导体激光器的调制特性，是将半导体激光器作为干涉测量系统光源的前提。目前，半导体激光器的主要调制方法有：电流调制、温度调制、压力调制等<sup>[31][32]</sup>。本文所研究的是半导体激光器的电流调制。

研究表明，当半导体激光器的注入电流发生改变时，其特性也随之变化。根据注入电流频率的大小，可将半导体激光器的输出光频特性分为线性区和

非线性区两个区域：当调制电流频率小于 10MHz 时，半导体激光器的输出光频的偏移主要是由工作区温度的变化而引起的，此时输出光频随调制电流线性变化；当大于 10 MHz 时，则主要是由载流子效应引起的，此时输出光频与电流的关系不再是线性，如图所示<sup>[33]</sup>。以半导体激光器作为干涉系统的光源，就是利用其在低频调制时，注入电流与输出光频的线性关系而制成的，即：在这个区域，调制频率的变化会造成激光器的频率移动。因而，必须提高调制频率的稳定性以确保半导体激光器的输出光频的稳定性，来实现高精度测量的目的。

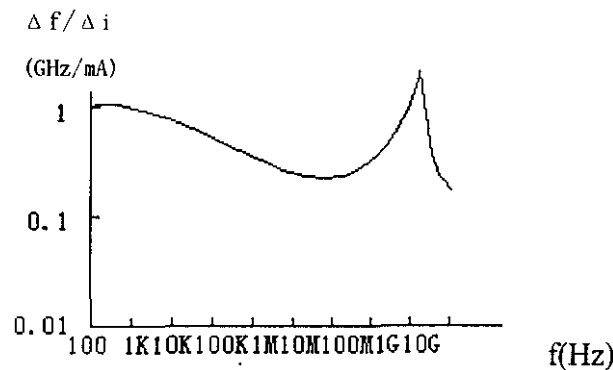


图 2-4LD 频移与调制电流频率的关系

Fig.2-4 Relationship between LD frequency removal and LD modulation electron current frequency

## 2. 2 LD 的线性频率调制

### 2. 2. 1 LD 的线性频率调制信号

目前，半导体激光器的频率调制多使用锯齿波调制信号，原因是干涉信号的解调比较方便。但是，当注入电流的波形线性区间结束时，也就是一个周期运行完毕，由于调制信号将从最高点迅速回到最低点，由于下降过程不够快，以及驱动电路的过渡过程等原因，将造成数据解调过程的吉布斯效应问题，即给激光器的输出光频带来一个大的非谐波信号，无论用何种处理方式，这个非谐波信号都将严重影响测量的精度。针对与此，本文采用调幅式三角函数光频调制信号。

以三角函数为调制信号，其优点在于它的调制曲线，在时域上是一直连续的，有无穷阶导数，在使用傅立叶变换域处理时，没有吉布斯效应。所以由这种调制方法构成系统的稳定性好。虽然其解调比较烦琐，但随着计算机的

高速发展, 这个问题已经不复存在了<sup>[34]</sup>。

## 2. 2. 2 三角波调制函数

由于在一定条件下, 半导体激光器输出光频率与注入电流呈线性关系。因而, 利用半导体激光器作为光学测量系统的光源正是利用了它的这个特性。本系统中, 注入电流是由直流偏置和周期性三角波调制电流组成, 如公式所示:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 + 2\frac{\Delta I}{T}(t - nT) & nT < t < nT + T/2, n = 0, 1, 2, \dots \\ I_0 + I - 2\frac{\Delta I}{T}(t - nT) & nT + T/2 < t < nT + T, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2-1)$$

式中  $I_0$  —— 直流偏置电流;

$\Delta I$  —— 三角波电流调制幅度;

$T$  —— 为电流调制周期。

在此注入电流作用下, LD 的输出光电场矢量幅度和振荡频率均被调制:

$$E(t) = E_0 + 2\frac{\Delta E}{T}(t - nT) \quad nT < t < nT + T/2, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2-2)$$

$$f(t) = f_0 + 2\frac{\Delta f}{T}(t - nT) \quad nT + T/2 < t < nT + T, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2-3)$$

式中  $E_0$  —— 直流偏置的电场矢量幅度;

$\Delta E$  —— 幅度调制量;

$f_0$  —— 直流偏置的光频率;

$\Delta f$  —— 频率偏移量,  $\Delta f = \frac{\partial f}{\partial I} \Delta I$  (其中  $\frac{\partial f}{\partial I}$  为激光器光频随注入电流的变化率)。

设激光器谐振腔前辐射面射出的光电场矢量在  $t$  时刻相位为  $\varphi(t)$ , 经  $2L$  光程反馈回前辐射面时相位为  $\varphi(t + \tau)$ ,  $\tau$  为往返时间,  $\tau = \frac{2L}{C}$ ,  $L$  为被测物体与激光器前辐射面之间的距离。则相位差  $\Delta\varphi(t)$  为:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t + \tau) - \varphi(t) = \int_t^{t+\tau} 2\pi f(t) dt \approx 2\pi f_b t + \varphi_0 \quad (2-4)$$

式中  $f_b$  —— 拍波频率,  $f_b = 2\frac{\Delta f}{T} \tau$ ;

$\varphi_0$ ——拍波初始相位,  $\varphi_0 = 2\pi f_0 \tau$ 。

最后通过公式  $L = \frac{cT}{4\Delta f} f_b$  求出被测距离。

## 2. 3 调制电路的硬件设计

### 2. 3. 1 调制电路原理

半导体激光器调制驱动源的基本原理如图 2-5 所示。本系统包括以单片机 AT89C52 为核心的控制部分, DAC1210 等集成电路组成的数模转换部分以及由可编程并行 I/O 芯片 8279 的扩展口所支持的键盘和显示部分。

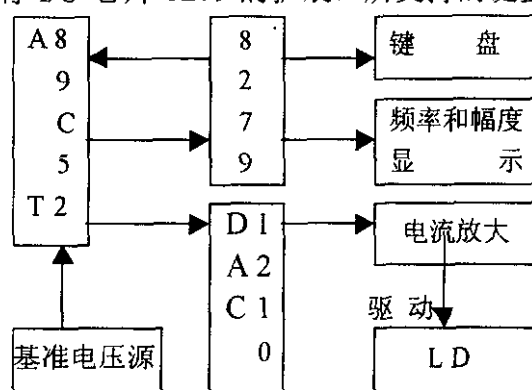


图 2-5 调制驱动电源原理框图

Fig.2-5 Draft of principle of modulation drive power

采用键盘输入和数码显示, 进一步完善了人机对话功能。通过键盘控制调节输出电信号的波形的种类和频率。

系统的核心部分是单片机 AT89C52。其指令系统与 MCS-51 完全兼容, 且片内带有 8Kb 的 EPROM, 可以用来存储应用程序。这个 Flash 程序存储器除了允许用一般的编程器离线编程外, 还允许在应用系统中实现在线编程。并且还提供了对程序进行三级加密保护的功能。单片机 AT89C52 的另一个特点是工作速度更高, 晶振频率可高达 24MHz, 一个机器周期仅 500ns, 比 MCS-51 快了一倍<sup>[35]</sup>。

采用了美国 National Semiconductor 公司的产品 DAC1210。该 D/A 转换器的结构特征是: 具有数字输入锁存功能电路; 能和单片机数据总线直接相连; 带有数据寄存器及 D/A 转换控制端, 单片机可直接控制数字量的输入和

转换，具有 12 位分辨率。完全满足系统的技术指标<sup>[36]</sup>。

系统工作时，由 DAC1210 输出的电流进入电流放大电路后，驱动半导体激光器工作，电流放大电路是以运算放大器 LF356 为核心的深度副反馈电路，此放大器具有极高的转换速率，较宽的带宽，极快的建立时间，低的电压和电流噪声等特点，可以保证电流输出的稳定。

### 2. 3. 2 参考电压电路

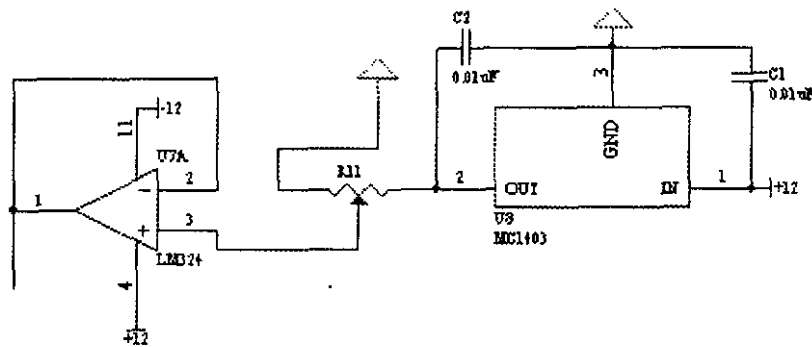


图 2-6 参考电压电路

Fig. 2-6 Datum electric potential electric circuit

由于 DAC1210 的输出电压值是由输入的数字量和基准电压决定的，所以基准电压的稳定性是决定 DAC1210 输出精度的主要因素。为此以 MC1403 为核心构成了如图所示的基准电压电路，可以提供 2.4V 的基准电压，实验测得每小时的电压漂移小于 40mV，满足系统的精度要求。

### 2. 3. 3 保护电路

半导体激光器以其高效、可靠性高、工作寿命长、供能简便和可固化等优良性能被越来越广泛地应用于国防、科研、医疗、加工等领域。然而，对于所有的激光二极管，其驱动电源的工作方式和性能都有共同的问题，即如果输出的电流波形质量不高，又缺乏有效的保护措施，就会使激光二极管的性能下降或造成永久性损伤。

研究表明，仅纳秒宽度的瞬态电压或电流尖峰，都能引起激光二极管内部小平面的瞬时过热，造成损伤。产生这些瞬态的原因有许多种：电网冲击、静电感应、电流或电压源的开启及关闭以及外部高频电路的辐射等等。因此，

实用、小型化、性能好的供电电源是半导体激光器应用于光学干涉测量领域的决定性环节<sup>[37]</sup>。

开关电源是一种小型化的电源，与其他类型电源相比，具有体积小、重量轻、效率高等优点，符合激光器工作性能的需要，因而，本系统选择开关电源作为供电电源。但是，启动开关电源时，输出端所产生很大的电流和电压过冲，将对激光二极管造成伤害。为了避免各种环境下瞬态电压或电流尖峰对激光二极管造成的影响，我们在使用开关电源给激光二极管供电时，设计、采用了多种安全防护措施<sup>[38]</sup>。

1) 慢启动电路 图 2-7 是慢启动电路原理图。由图 2-7 可见, 在开关电源开启和关闭时的合闸瞬间, 由于电感 L 的作用, 电容 C 上的电压不可能发生突变, 因此避免了由电源开关引起的瞬间电压变化和浪涌电流对半导体激光器的冲击。

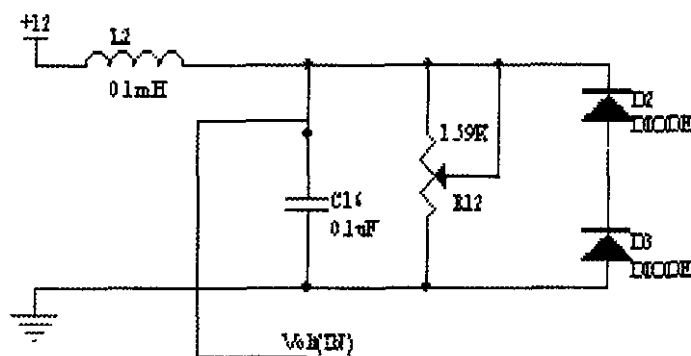


图 2-7 慢启动电路原理

Fig. 2-7 Draft of principle of gradually switching

一旦滤波电容两端的电压值等于二极管 D 的稳压值时，即软启动结束。此时，电感 L 导通，滤波电压 C 上的电压值恒定，所以，软启动不再影响控制电路的正常工作。在关机后，电容器 C 上的电压经电阻及电感放电，此时输出端电压呈缓慢趋势下降，并且，保证下一次开机时软启动电路正常工作。

2) 噪声滤波电路 在开关电源的输出端，用示波器观察波形，可以发现由开关电源所产生的噪声，它不仅包括 100Hz 的低频波纹和 40KHz 高频波纹，而且包括 500KHz、5MHz，乃至 10 MHz 左右的高频噪声部分。因此，为了尽量避免噪声对半导体激光器的干扰和破坏，本系统在开关电源的输出端设计使用由电感 L 和电容 C 组成的噪声滤波电路。它采用共模电感，同时，电容采用高频特性良好的陶瓷电容。

2. 3. 4 调制电路原理图

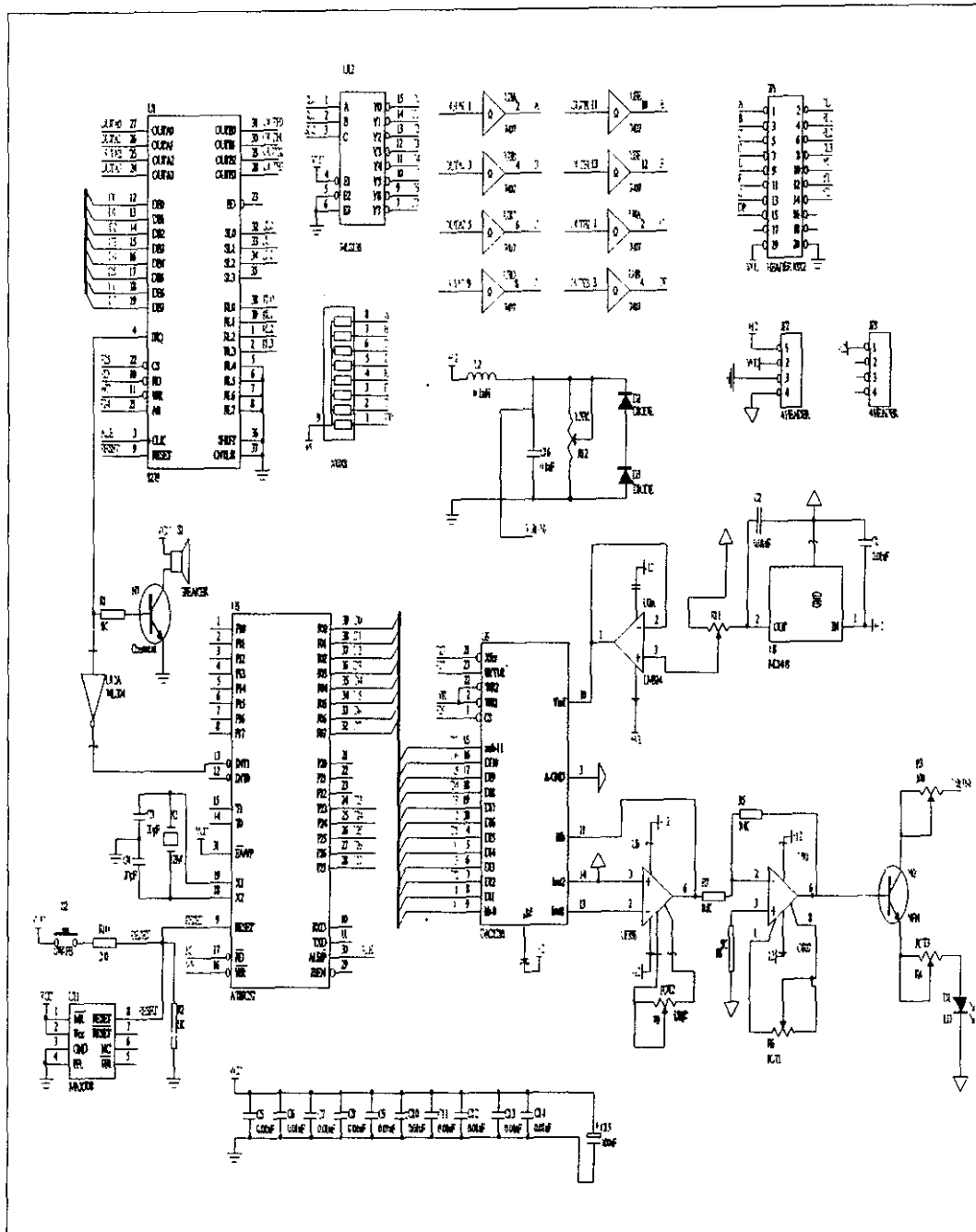


图 2-8 调制电路原理图

Fig.2-8 Draft of principle of modulation frequency

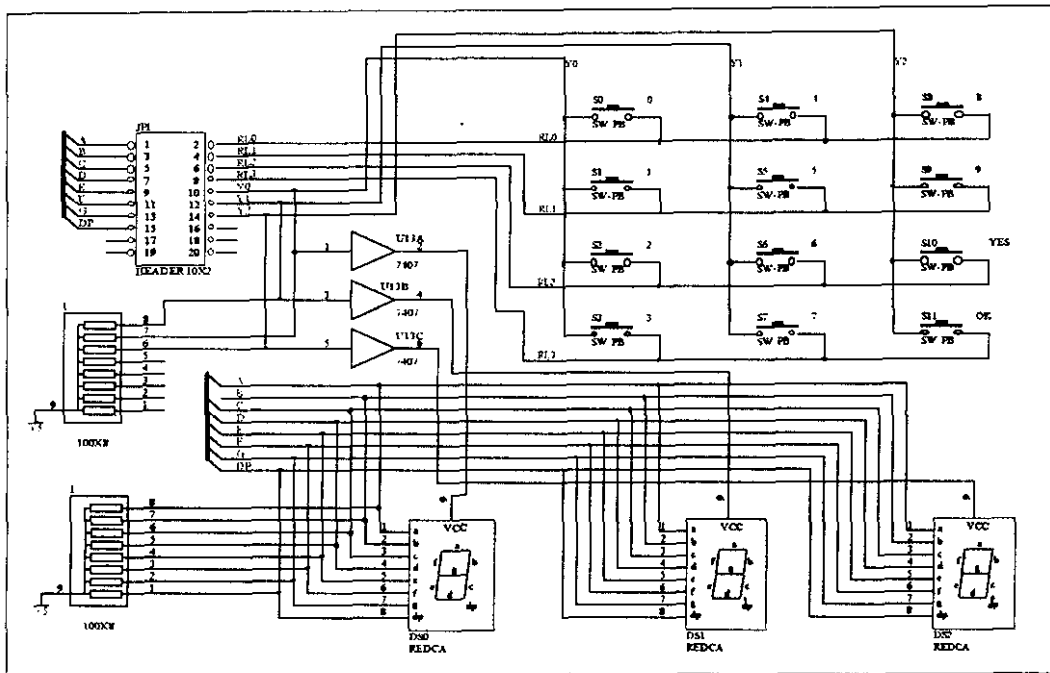


图 2-9 键盘与显示电路原理图

Fig. 2-9 Principle of key and display

## 2. 4 本章小结

本章详细介绍了半导体激光器的结构、机理，以及调制特性，将三角形调制函数与锯齿波调制函数的优、缺点进行了对比，从而，说明了将三角形调制函数作为调制信号的先进性。另外，本章中还对调制电路的原理图、单片机控制系统、基准电源电路及保护电路等系统进行了全面的介绍与分析。

## 第 3 章 半导体激光器模糊控制器的设计

### 3.1 模糊控制理论基础

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊推理为数学基础的一种计算机数字控制。从线性控制与非线性控制的角度分类,模糊控制是一种非线性控制。从控制器的智能性看,模糊控制属于智能控制,而且它已经成为目前实现智能控制的一种重要而又有效的形式。模糊控制的基础是模糊数学,实现手段是计算机或单片机<sup>[39]</sup>。

#### 3.1.1 模糊控制的基本思想

现代控制和古典控制为解决控制问题提供了许多方法和手段。例如,线性多变量系统可以用传递矩阵和特性根轨迹技术来处理;Kalman 原理可用来从有噪声的测量信号中估计系统的状态;极大值原理可用来解决最优控制问题;利用分离定理可以解决线性随机系统的控制问题。此外,某些特殊的确定性以及随机的非线性问题也得到了解决,这些技术都在实践中取得了不同程度的成功。但他们都有一个共同的特征—即都要求对被控过程有一个有效的、准确的模型。然而,在许多复杂的工业控制过程中,这样的模型是难以找到的。虽然有许多自适应技术,可以用来部分地补偿模型不准确这一缺陷,但是,如果不能在理论假定的有效范围内有效地建立模型,将不可能得到满意的控制效果。对于这样复杂的系统,往往可以从实际经验中总结出一套行之有效的控制规则,这些规则是用语言描述的,是一些不精确的信息,在这种情况下,现有的控制理论是难以应付的。

然而,模糊控制理论却可以用来解决上述问题,它依赖于被控系统的物理特性,其数学工具是 Zadeh 提出的模糊集合论。模糊控制运用比较严密的数学处理过程,实现模糊推理,进行模糊判断决策,达到令人满意的控制效果;在工程控制过程中,使用模糊逻辑语言分析方法,且这种语言可转化为计算机能够接受的算法语言,这种算法有三个特点:第一,不用数值变量而用语言变量来描述系统;第二,利用附带条件的命题来描述变量之间的关系;第三,使用模糊运算法则进行推理。正是这些特点赋予了模糊控制的非线性控制的能力<sup>[40]</sup>。

著名的控制论专家扎德教授举过的一个停车的例子，即把汽车停在拥挤的停车场上两辆车之间的一个空隙处，正如维纳所描述的那样，人不断的从外界(对象)获取信息，再存储和处理信息，并给出决策反作用与外界(输出)，从而达到目标。

纵观模糊控制技术，正如控制论的创始人维纳在研究人与外界相互作用的关系时曾指出：“人通过感觉器官感知周围世界，在脑和神经系统中调整获得的信息，经过适当的存储、校正、归纳和选择(处理)等过程而进入效应器官反作用与外部世界(输出)，同时也通过像运动传感器末梢这类传感器再作用于中枢神经系统，将新接受的信息与原储存的信息结合在一起，影响并指挥将来的行动”。模糊控制正是把熟练技术工人或者技术人员的实践经验进行总结和形式化描述，用语言表达成一组定性条件语句和不精确的决策规则，然后利用模糊集合作为工具使其定量化，设计成一个控制器。

这种总结人的控制行为，正是遵循反馈与负反馈的思想，将其控制决策用语言加以描述，即形成控制规则，再描述控制规则的条件语句中的一些词，如“较大”、“稍小”、“偏高”等都具有一定的模糊性。因此，用模糊集合来描述这些模糊条件语句，即组成了模糊控制器。

由于人的决策过程具有模糊性，因此，控制动作并非稳定一致，且带有一定主观性。但是有经验的模糊控制设计工程师可以通过对操作人员控制动作的观察和与操作人员讨论，用语言把操作人员的控制策略描述出来，使其定量化，设计一个控制器，并用形式化的经验法则模仿人的控制策略，于是模糊控制器就形成了<sup>[39]</sup>。

### 3.1.2 模糊控制系统的构成

模糊控制属于计算机数字控制的一种形式，因此，模糊控制系统具有数字控制系统的一般结构形式，其系统构成见图 3-1 所示。

其中，模糊控制器(Fuzzy Controller)在整个模糊控制系统中具有举足轻重的作用，它是整个系统的核心。主要完成输入量的模糊化(Fuzzification)、模糊关系运算、模糊决策以及决策的反模糊化处理(Defuzzification)。可以说，一个模糊控制系统性能指标的优劣在很大程度上取决于模糊控制器的“聪明”程度。输入输出接口电路主要包括前项通道中的 A/D 转换电路以及后项通道中地 D/A 转换电路等两个信号转换电路。选择 A/D 或 D/A 转换器主要应该考虑转换精度、转换时间以及性能价格等因素。广义对象包括执行机构和

对象，它们可以是线性的，也可以是非线性的；可以是定长的，也可以是时变的。传感器也就是检测装置。它负责把被控对象的输出信号转换为对应的电信号，在模糊控制系统中，应选择精度高并且稳定性好的传感器。否则，不仅控制的精度没有保障，而且可能出现失控现象，甚至发生事故。

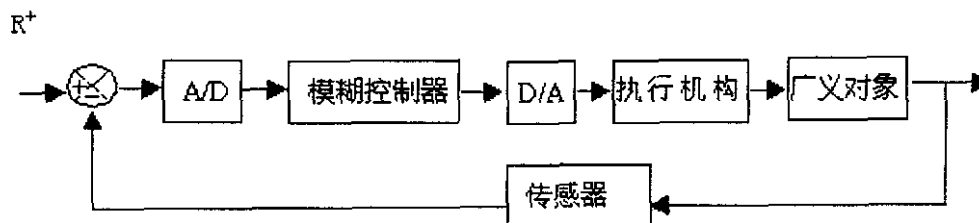


图 3-1 模糊控制系统的方框图

Fig.3-1 Chart of fuzzy control system

### 3.1.3 模糊控制规则的设计

模糊控制器的控制规律是由计算机(或单片机)的程序实现的，实现模糊控制算法的过程是：微机经中断采样获取被控制量的精确值，然后将此量与给定值比较得到误差信号 E，把误差信号 E 的精确量进行模糊化变成模糊量，误差的模糊量可用相应的模糊语言表示。至此，得到了误差 E 的模糊语言的一个子集 e。再由 e 和模糊控制规则 R 根据推理的合成规则进行模糊决策，得到模糊控制量 u 为：

$$u = e \cdot R \quad (3-1)$$

因此，实现语言控制的模糊逻辑控制器，必须解决三个基本问题：

1. 精确量的模糊化 按 Mamdani 法，就是把系统的实际输出值与设定的期望值间的偏差值 E 在其论域范围内，离散成几个隶属度函数 MF(Membership Function)，习惯上分成八个等级：“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“正零”(PZ)、“负零”(NZ)、“负小”(NS)、“负中”(NM)、“负大”(NB)。选择较多的词汇描述输入、输出，可以使制定控制规则方便。但是，控制规则相应变得复杂，而且，等级越多，模糊控制规则会成几何指数增加，所以控制速度会大幅下降。选择词汇较少，使得描述变量变得粗糙，导致控制器的性能变坏。一般情况下，都选择“正大”(PB)、“正中”(PM)、“正小”(PS)、“零”(Z)、“负小”(NS)、“负中”(NM)、“负大”(NB) 这七个词

汇。但也可根据实际系统需要选择三个或五个语言变量,即遵守在控制精度允许的范围内,尽量减少等级数(隶属函数),从而可以减少模糊控制规则数的原则。

2. 模糊控制规则的形成和推理 常用的几种控制规则形式是:

- (1) “如果 A, 那么 B” (If A Then B);
- (2) “如果 A, 那么 B, 否则 C” (If A Then B Else C);
- (3) “如果 A 且 B, 那么 C” (If A And B Then C)。

其中, A, B, C 为模糊集合 (Fuzzy Set), 这些模糊规则的形成是根据操作者或专家的控制知识和经验制定出来的。在模仿人的模糊逻辑推理过程中, 对于不同的模糊规则形式确定不同的推理方法:

(1) 对 “If A Then B” 采用的合成规则为:

$$B' = A' \cdot R \quad (3-2)$$

式中 A——输入;

B——输出;

R——模糊关系,  $R=A \times B$ , 这个二维模糊集合被定义为:

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (3-3)$$

(2) 对 “If A Then B Else C” 采用如下的模糊推理:

$$B' = A' \cdot \bar{R}, \quad C' = A' \cdot \bar{R} \quad (3-4)$$

其中模糊关系式  $R=A \times B$ ,  $\bar{R}=(\bar{A} \times C)$ ,  $\bar{R}$  定义为:

$$\bar{\mu}_R(x, y) = \min[\bar{\mu}_A(x), \mu_C(y)] \quad (3-5)$$

(3) 对 “If A AND B Else C” 类型的推理规则是实际模糊控制器的最常用的规则形式。在这类规则中, A 一般用来表示被控制量的测量置于期望值的偏差 E 的隶属函数, 而 B 一般表示偏差变化率  $EC=dE/dt$  的隶属函数。E 和 EC 可以分别定义为若干个不同等级的隶属函数。那么类型 (3) 可以表示为 “If E AND EC Then U”, 则模糊控制输出集合  $U=(E \times EC) \cdot R$ , 即

$$\mu_U(x, y) = \vee[\mu_R(x, y, z) \wedge \mu_E(x) \wedge \mu_{EC}(y)] \quad (3-6)$$

在模糊控制过程中, 同时把偏差和偏差变化率作为模糊输入量的方法, 不仅可保证系统的稳定性, 而且还可减少超调量和振荡现象, 基本上解决了模糊控制系统的稳定性问题<sup>[41][42][43]</sup>。

3. 精确输出量的反模糊化 反模糊化 (Defuzzification) 是指, 在模糊推

理得到的模糊集合中选取一个最能代表这个模糊集合的单值过程。方法有最大隶属度法、重心法、加权平均法、隶属度限幅元数平均法、插值法(Interpolation)、最大典型值法 MTV (Most Typical Value)。其中,最大隶属度法最简单,使用最方便<sup>[44]</sup>。

### 3.1.4 单片机实现模糊控制

模糊控制算法的方法有:合成推理的关系矩阵法、合成推理的查表法、合成推理的解析公式法、强度转移法和后件函数法等。其中,查表推理方法避免了复杂的数学运算,最适合在单片机中实现,因为它避免了复杂的矩阵运算,计算工作量小,能满足控制实时性要求<sup>[45]</sup>。

具有并行运算结构的模糊控制专用芯片,直接通过硬件实现模糊逻辑运算及推理,极大地提高推理速度和控制精度,但是模糊控制专用芯片价格太高,模糊芯片的输入、输出以及模糊规则数目有限,与软件实现相比不够灵活,性能价格比不够理想<sup>[39][40]</sup>。因而,本系统采用 8031 单片机外扩存储器来实现模糊控制。

## 3.2 温度变化对半导体激光器的影响

半导体激光器是指以半导体材料为工作物质的一类激光器,亦称半导体激光二极管(LD),它的输出波长主要由其掺杂浓度、工作电流和工作温度决定的,一般通过改变其工作温度来微调它的输出波长,变化规律大致为 $0.2\sim 0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。若利用改变其工作温度来微调它的输出光频,一般变化为 $20\sim 30\text{Hz}/^\circ\text{C}$ ,而且,大功率的半导体激光二极管(LD)正常工作时的热损耗很大,约占总功率的 $50\sim 75\%$ 。若不及时散热就会使芯片的温度急剧升高,输出功率严重下降,并且影响寿命。另外,利用半导体激光器的电流调制特性时,温度的变化将影响半导体激光器的电流—波长的线性特性,并且,引起调制光波的偏移,从而影响测量精度。所以,如何控制半导体激光器(LD)的工作温度是以 LD 作为光源的关键性问题<sup>[46]</sup>。

### 3.2.1 温度变化对 LD 寿命的影响

温度变化对 LD(半导体激光器)的影响如图 3-2 所示。半导体激光器优于气体激光器的特性之一便是半导体激光器的寿命长,一般为 75 万小时,这是

其他激光器无法比拟的，但是，温度变化对寿命的影响仍然是不可忽视的。

### 3.2.2 温度变化对 LD 阈值电流的影响

实验结果表明，半导体激光器的阈值电流密度  $J_{th}$  对温度  $T$  表现出很灵敏的依赖关系。如图 3-3 所示，所有的半导体激光器的阈值电流密度均随温度的升高而明显增大，增大的幅度随不同激光器而异<sup>[47]</sup>。

因而，在实际应用中，半导体激光器的阈值电流密度具有较高的温度灵敏度这一不利因素，给半导体激光器附加了一些严格的高温工作限制条件<sup>2</sup>。

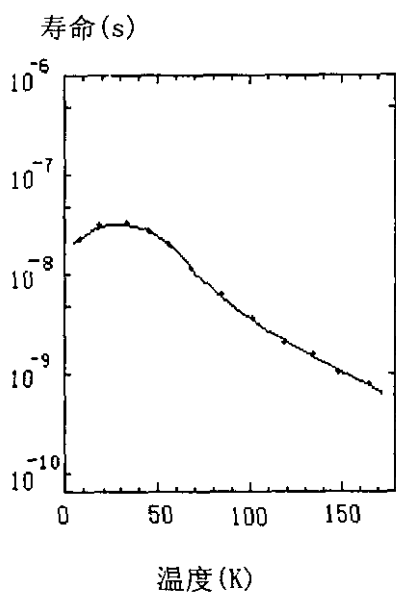


图 3-2 LD 温度与寿命的关系曲线  
Fig.3-2 Graph of relation between life-pan and temperature of LD

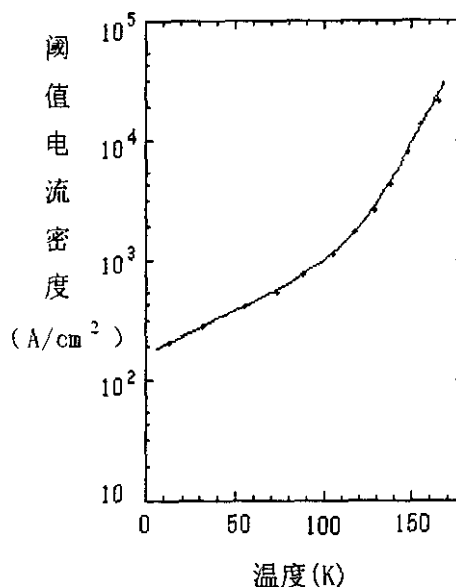


图 3-3 LD 温度与阈值电流的关系曲线  
Fig.3-3 Graph of relationship between threshold value and temperature of LD

### 3.2.3 温度变化对 LD 输出波长的影响

正如如图 3-4 所示，LD 的输出波长与温度也有很大的关系，当 LD 内部温度增加时，输出波长也随之增加，其典型值为  $0.3 \sim 0.4 \text{nm}/^\circ\text{C}$ <sup>[47]</sup>。

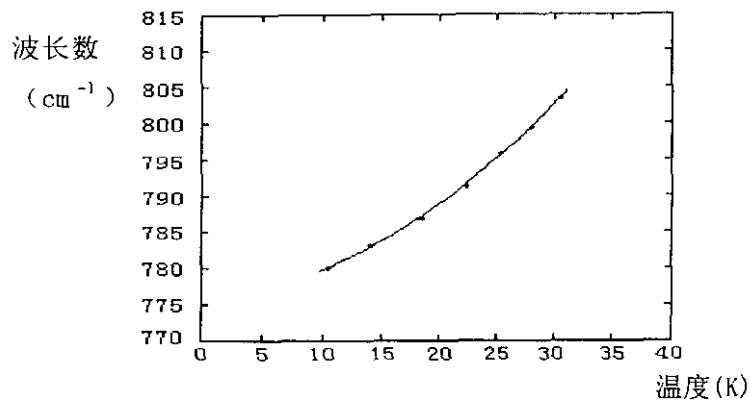


图 3-4 LD 的温度与波长的关系曲线

Fig. 3-4 Graph of relation between temperature and wavelength of LD

### 3.3 LD 工作温度控制的模糊化

LD 的最佳工作温度 (Optimum Temperature for Laser Diode) 一般为 23°C, 而 LD 的正常工作 (Laser Diode's Normal Temperature) 的温度范围是 -20~+60°C, 所以两者的温差 ROTNT (Range of Optimum Temperature and Normal Temperature) 范围是 -37~43°C。对 DOTNT 的模糊化的词集确定为: “负大 (NB)”、“负中 (NM)”、“负小 (NS)”、“负零 (NZ)”、“正零 (PZ)”、“正小 (PS)”、“正中 (PM)”、“正大 (PB)”, 共 8 级。

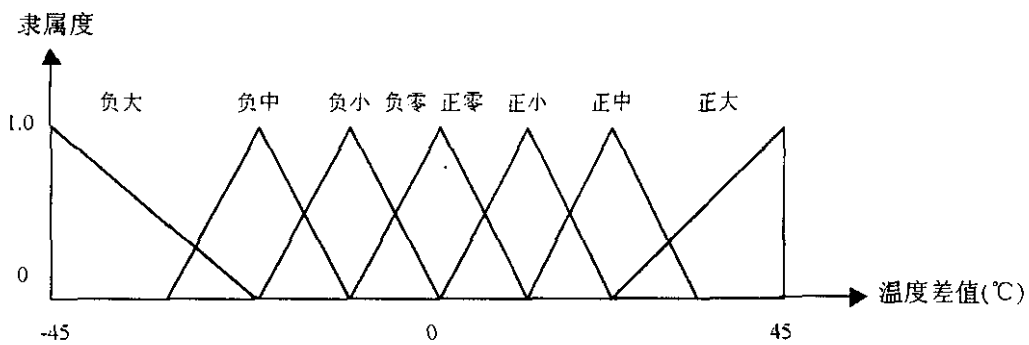


图 3-5 最佳工作温度与 LD 控制温度温差 ROTNT 的隶属函数

Fig. 3-5 MF of Range between optimum temperature and normal temperature

隶属函数 MF (Membership Function) 采用三角函数, 这是由于三角函数作为隶属函数曲线具有以下优点: 1) 形状简单; 2) 计算工作量少, 可节约存储空间; 3) 当输入值变化时, 三角形的隶属函数比起正态分布状隶属度函数具

有更大的灵敏性<sup>[39]</sup>。ROTNT 的隶属函数分布如图 3-5 所示，其中，在负大和正大两个区间用半三角隶属函数，从而避免冗余的模糊判决。

### 3.3.1 ROTNT 模糊算法描述

在以 8 位单片机 8031 为核心的单片机系统中，考虑到本系统的温度控制精度及运算方便，将模糊输入量 ROTNT 的论域  $U_r = -37 \sim +43^\circ\text{C}$ ，并采用  $0.2^\circ\text{C}$  作为精度单位，进行取值，隶属度  $\mu_r$  范围为  $[0, 1]$ ，描述方法采用强度转移法，如图 3-6 所示。

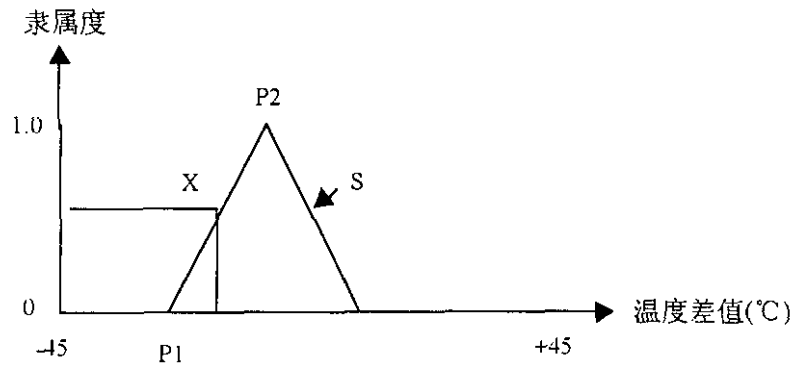


图 3-6 ROTNT 的隶属函数算法描述

Fig. 3-6 MF algorithm description of ROTNT

在单片机实现时，需要的三个字节分别是：P1：三角形的第一个底点 A 的 x 轴坐标值； P2：三角形的第一个顶点 B 点的 X 坐标值； S：三角形的斜边斜率， X 为该函数中的任意一点，则斜率  $S = \frac{1}{15}$ ，所以对于在该三角形范围内的待定输入量  $X_r$  的隶属度  $\mu_r(x)$  为：

$$\text{当 } P1 < X < P2 \text{ 时, } \mu_r(x) = \frac{X - P1}{P2 - P1} \times S;$$

$$\text{当 } X \geq P2 \text{ 时, } \mu_r(x) = 1 - (X - P2) \times S.$$

对于图 3-5 中的两个半三角形隶属函数，由于没有第二个斜边，因此顶点不必存储，即单片机只需要 2 个字节 P、S 来存储。所以在第一个三角形函数  $\mu_r(x) = 1$ 。在第二个半三角形函数中求特定输入量的隶属函数有：当  $X > P$ ， $\mu_r(x) \geq 1$ ，取  $\mu_r(x) = 1$ 。

### 3.3.2 温差 ROTNT 的模糊化

把精确量模糊化，即将 ROTNT 的论域  $[-37, +43]^\circ\text{C}$  之间变化的连续量分为

几个档次，每个档次对应于一个模糊集，这样处理使模糊化过程简单，否则，将每一个精确量对应于一个模糊集，有无穷多个模糊子集，使模糊化过程复杂化。

由于半导体激光器对温度变化的敏感性，以及温度变化对半导体激光器的光频特性的影响的严重性，因此，将温差 ROTNT 在  $-37 \sim +43^\circ\text{C}$  之间的输入值量化为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。其中，在区间  $-37 \sim -0^\circ\text{C}$  的量化因子为  $\frac{6}{37}$ ，而在区间  $+0 \sim +43^\circ\text{C}$  的量化因子为  $\frac{6}{43}$ 。即把精确量 ROTNT 的实际变化范围  $[-37, +43]^\circ\text{C}$ ，转换为  $[-6, +6]$  区间，精确量 ROTNT 也通过公式 3-7 和公式 3-8 转换为该区间的变量  $e$ 。当通过公式计算出的  $e$  值不是整数时，可以把它归入最接近  $e$  的整数，并且，隶属度范围取为  $[0, 1]$ 。

$$e = \frac{6}{37} \text{ROTNT} \quad (-37 \leq \text{ROTNT} \leq 0) \quad (3-7)$$

$$e = \frac{6}{43} \text{ROTNT} \quad (0 \leq \text{ROTNT} \leq 43) \quad (3-8)$$

根据三角形隶书函数及公式 3-7 和公式 3-8 的计算，即可得到表 3-1 所示的表格式的模糊表达，即模糊变量的赋值表。

表 3-1 模糊变量 E 的赋值表

Table3-1 Assigned table of fuzzy variable

$e$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0		0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

当然，这时既可以按照图 3-6 中的强度转移法来求温差 ROTNT 的隶属度，也可以用查表法来求，由表 3-1 可知，该查表法共占用单片机 112 个字节的 EPROM，所以说查表法占用单片机的 EPROM 多一些，控制精度低一些，但是查

表法实现单片机编程比强度转移法简单，执行速度比强度转移法快，因此把强度转移法和查表法相结合，发挥各自的优点，使模糊控制器的执行速度和内存占用量得到优化组合。

### 3.4 控制温度温差变化率的模糊化

在本模糊控制过程中，LD 的偏差和偏差变化率均被作为模糊控制系统的输入量，以确保系统的稳定性，与此同时，还将在很大程度上减少超调量和振荡现象的发生，以至于从基本上解决模糊控制系统的稳定性问题。

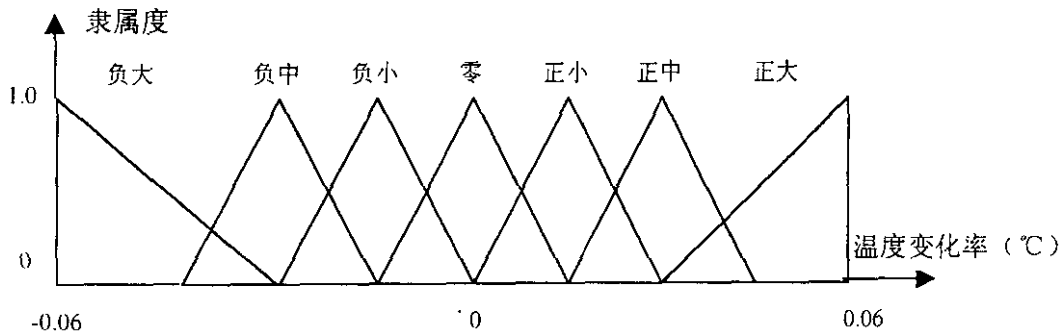


图 3-7 最佳工作温度与 LD 控制温度温差变化率 RROTNT 的隶属函数

Fig.3-7 MF of rate of range between optimum temperature and normal temperature

根据本文中 3.2 的论述表明，欲将光频漂移减小，以达到激光测量的要求，LD 温度的变化必须控制在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  的范围内，由此，本文将温差变化率 RROTNT (Rate of Range between Optimum Temperature and Normal Temperature) 的范围确定为  $-0.06 \sim +0.06^\circ\text{C}$ ，而将 RDOTNT 的语言变量词集选取为：“负大 (NB)”、“负中 (NM)”、“负小 (NS)”、“零 (0)”、“正小 (PS)”、“正中 (PM)”、“正大 (PB)”，共 7 级。隶属函数 MF (Membership Function) 采用三角函数(原由见 3.3)。RROTNT 的隶属函数分布如图 3-7，隶属度范围是  $[0, 1]$ 。其中，在负大和正大两个区间采用半三角隶属函数，从而避免冗余的模糊判决。

#### 3.4.1 RROTNT 的模糊算法描述

在本温控系统中，根据温度控制精度的指标要求，将模糊输入量 RROTNT 的论域  $U_{EC} = -0.06 \sim +0.06^\circ\text{C}$  的取值单位确定为  $0.001^\circ\text{C}$ ，隶属度  $\mu_{EC}$  的范围为范围  $[0, 1]$ ，描述方法采用强度转移法，见图 3-8。

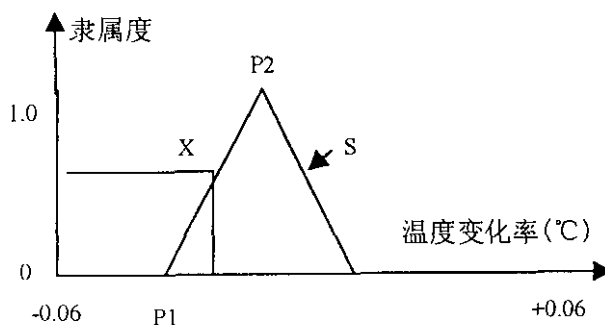


图 3-8 RROTNT 的隶属函数算法描述

Fig.3-8 MF algorithm description of RROTNT

在单片机实现时，同样需要的三个字节分别是：P1：三角形的第一个底点 A 的 x 轴坐标值； P2：三角形的第一个顶点 B 点的 X 坐标值； S：三角形的斜边斜率，X 为该函数中的任意一点，则斜率  $S = \frac{1}{0.02} = 50$ ，所以对于在该三角形范围内的待定输入量  $X_{EC}$  的隶属度  $\mu_{EC}(x)$  为：

$$\text{当 } P1 < X < P2 \text{ 时, } \mu_{EC}(x) = \frac{X - P1}{P2 - P1} \times S;$$

$$\text{当 } X \geq P2 \text{ 时, } \mu_{EC}(x) = 1.0 - (X - P2) \times S;$$

对于图 3-7 中的两个半三角形隶属函数，由于没有第二个斜边，因此顶点不必存储，即单片机只需要 2 个字节 P、S 来存储。所以在第一个三角形函数中求特定输入量的隶属函数有： $\mu_{EC}(x) = (P - X) \times S$ ，若  $\mu_{EC}(x) \geq 1.0$ ，取  $\mu_{EC}(x) = 1.0$ 。在第二个半三角形函数中求特定输入量的隶属函数有：

$$\text{当 } X \leq P \text{ 时, } \mu_{EC}(x) = (X - P) \times S;$$

$$\text{当 } X > P, \text{ 当 } \mu_{EC}(x) \geq 1.0, \text{ 取 } \mu_{EC}(x) = 1.0。$$

### 3.4.2 RROTNT 的模糊化

把变量 RROTNT 的精确量模糊化，即将 RROTNT 的论域  $[-0.06, +0.06]$  °C 变化的连续量分为几个档次，每个档次对应于一个模糊集，这样处理使模糊化过程简单，否则，将每一个精确量对应于一个模糊集，有无穷多个模糊子集，使模糊化过程复杂化。

为了满足半导体激光器对温度变化的要求，本系统将温差变化率 RROTNT 在  $-0.06 \sim +0.06$  °C 之间的输入值量化为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。其量化因子为 100。即把精确量 RROTNT 的实际变化范围  $[-0.06, +0.06]$  °C，转换为  $[-6, +6]$  区间，精确量 RROTNT 也通过公式转换为此区间的变量 ec。当通过公式 (3-9) 计算出的 ec 值不是整数时，可以把它归入最接近 ec 的整数，并且隶属度范围是  $[0, 1]$ 。

$$ec = 12 \left[ RROTNT - \frac{(-0.06 + 0.06)}{2} \right] / (0.06 + 0.06) \quad (3-9)$$

根据三角形隶属函数及公式 3-9 的计算，即可得到表 3-2 所示的表格式的模糊表达，即模糊变量 (ec, u, EC) 的赋值表。

表 3-2 温差 RROTNT 的隶属函数存放形式

Table 3-2 Storage format of RROTNT's MF

ec u EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB		0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0		0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.7	0.2	0	0
0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.7	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

当然这时既可以按照图 3-8 中的强度转移法来求温差 RROTNT 的隶属度，也可以用查表法来求，由表 3-2 可知，该查表法共占用单片机 91 个字节的 EPROM，所以说查表法占用单片机的 EPROM 多一些，控制精度低一些，但是查表法实现单片机编程比强度转移法简单，执行速度比强度转移法快，因此把强度转移法和查表法相结合，发挥各自的优点，使模糊控制器的执行速度和内存占用量得到优化组合。

### 3.5 半导体制冷器驱动电压的模糊化

半导体制冷器(PELTIER)的驱动电压(Drive Voltage of Peltier, 以下简称 DVP)的论域范围是[-2.1, +2.1]V, DVP 的模糊化方法与 ROTNT 的模糊化方法是一样的，对 DVP 的模糊化取值为：“负大 (NB)”、“负中 (NM)”、“负小 (NS)”、“零 (Z)”、“正小 (PS)”、“正中 (PM)”、“正大 (PB)”，共 7 级。隶属函数 MF (Membership Function) 采用三角函数(原由见 3.3)。DVP 的隶属函数分布如图 3-9，隶属度范围是[0, 1]。其中，在负大和正大两个区间采用半三角隶属函数，因为 DVP 在这两个区间出现的几率小，从而避免冗余的模糊判决。

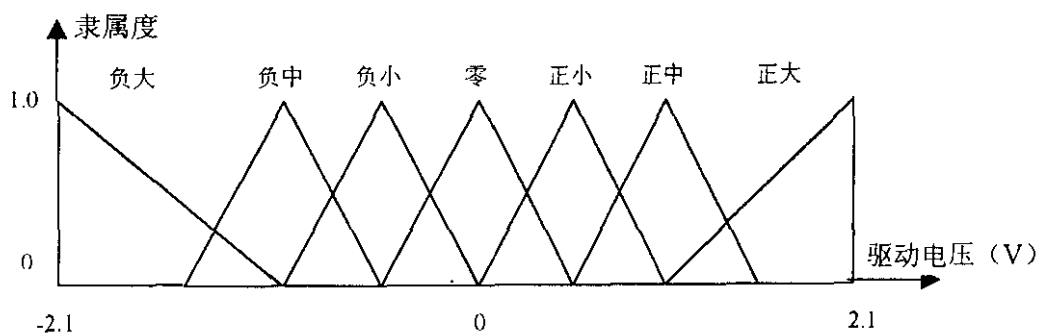


图 3-9 半导体制冷器的驱动电压 DVP 的隶属函数

Fig. 3-9 MF of drive voltage of Peilter

### 3.5.1 DVP 的隶属函数及隶属度存储

由于半导体致冷器的驱动电压 DVP 在  $-0.7 \sim 0V$  和  $0 \sim +0.7V$  的区间内, 出现的频率最大; 在  $-1.4 \sim -0.7V$  和  $+0.7 \sim +1.4V$  的区间内, 出现的频率较大; 在  $-2.1 \sim -1.4V$  和  $+1.4 \sim 2.1V$  的区间内, 出现的频率小; 所以, 在  $-0.7 \sim 0V$  和  $0 \sim +0.7V$  的区间, DVP 的取值精度为  $0.05V$ ; 在  $-1.4 \sim -0.7V$  和  $+0.7 \sim +1.4V$  的区间内, DVP 的取值精度为  $0.1V$ ; 在  $-2.1 \sim -1.4V$  和  $+1.4 \sim 2.1V$  的区间内, DVP 的取值精度为  $0.2V$ 。隶属度  $\mu_{DVP}$  的范围取为范围  $[0, 1]$ , 描述方法采用强度转移法, 如同 RROTNT。在单片机实现时, 所采用的方式方法如同 RROTNT。

### 3.5.2 DVP 的模糊化

把变量 DVP 的精确量模糊化, 即将 DVP 在  $[-2.1, +2.1] V$  之间变化的连续量分为几个档次, 每个档次对应于一个模糊集, 这样处理使模糊化过程简单, 否则, 将每一个精确量对应于一个模糊集, 有无穷多个模糊子集, 使模糊化过程复杂化。

考虑到系统的精度要求和半导体致冷器的驱动电压 DVP 在各区间的频繁度, 将在区间  $-2.1 \sim +2.1V$  内的精确量—半导体致冷器的驱动电压 DVP 量化为  $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7\}$ , 其比例因子为  $\frac{10}{3}$ , 即把精确量 DVP 的实际变化范围  $[-2.1, +2.1] V$ , 转换为  $[-7, +7]$  区间, 精确量 DVP 也通过公式转换为此区间的变量  $v$ 。当通过 3-10 公式计算出的  $v$  值不是整数时, 可以把它归入最接近  $v$  的整数, 并且, 隶属度范围取为  $[0, 1]$ 。

$$v = 14 \left[ DVP - \frac{(-2.1+2.1)}{2} \right] / (2.1+2.1) \quad (3-10)$$

根据三角形隶属函数及公式 3-10 的计算, 即可得到表 3-3 所示的表格式的模糊表达, 即模糊变量 (v, u, V) 的赋值表。

由表 3-3 可知, 该查表法共占用单片机 105 字节的 EPROM。当然这时也可以将查表法和强度转移法结合起来, 达到优化组合的目的。

表 3-3 温差 DVP 的隶属函数存放形式

Table 3-3 Storage format of MF of DVP

$\begin{matrix} v \\ u \\ v \end{matrix}$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 3.5.3 模糊控制规则表

为了便于表示, 下面将 RTOLD、RRTOLD 和 DVP 分别用 E、EC、U 来表示。根据它们的模糊集和论域, 采用  $\mu_U(x, y) = \vee [\mu_R(x, y, z) \wedge \mu_E(x) \wedge \mu_E(y)]$  运算, 将温控系统制成如表 3-4 所示的控制规则表。即将模糊控制规则转化为一个查询表又称控制表。

该控制规则表是事先由计算机离线计算好, 并将其存储在以 8031 为核心的温控系统的 EPROM 中。实时控制中, 温控系统根据模糊量化的误差值及误差变化值, 直接查找查询表以获得控制量的变化值 V, V 再乘以比例因子  $K_r$ , 即可作为输出去控制被控对象。

表 3-4 模糊控制规则

Table 3-4 Regulation table of fussy control

EC \ E \ V	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-3	7	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
-1	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-3	-2	-1
0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+1	2	2	2	2	0	0	-1	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+2	1	2	1	2	0	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+3	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
+4	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7
+5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
+6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7

### 3.5.4 DVP 反模糊化方法

在模糊控制系统中，模糊控制器的输入是模糊量，输出也是模糊量。但是，对于实际被控对象，它所需要的控制信号是有一定物理意义的精确值，为了使模糊控制器的输出能对被控对象进行控制，要把它输出的模糊量转化为精确量，即反模糊化。

反模糊化的方法有很多，常有的有最大隶书度法、中位数法和重心法。本系统所采用的是最大隶属度法，它有简单、方便、容易实现等优点<sup>[47]</sup>。在处理过程中，模糊控制器的推理输出是模糊量  $V'_{out}$ ，则其隶属度最大的元素  $v^*$  就是精确化所得的对应精确值。当隶属度最大的元素  $v^*$  有多个时，即：

$$\mu(v_1^*) = \mu(v_2^*) = \dots = \mu(v_p^*) \quad v_1^* < v_2^* < \dots < v_p^* \quad (3-11)$$

此时，取这些元素的平均中心值为反模糊化的精确值，即：

$$v^* = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v_i^* \quad (3-12)$$

至此，完成了整个模糊控制器的设计。

### 3.6 本章小结

本章简单介绍了模糊控制基础理论。在模糊控制中，将半导体激光器的温差和温差的变化率作为输入量，半导体致冷器的控制电压作为输出量，建立了双输入单输出的模糊控制系统。反模糊化则采用了最大隶属度法，并且将模糊控制规则制成模糊控制规则表，简化了控制方法，节省了控制时间，实现了温度控制的最优设计。

## 第 4 章 温度控制的硬件设计和软件仿真

### 4.1 温度控制的硬件设计

#### 4.1.1 温度控制原理

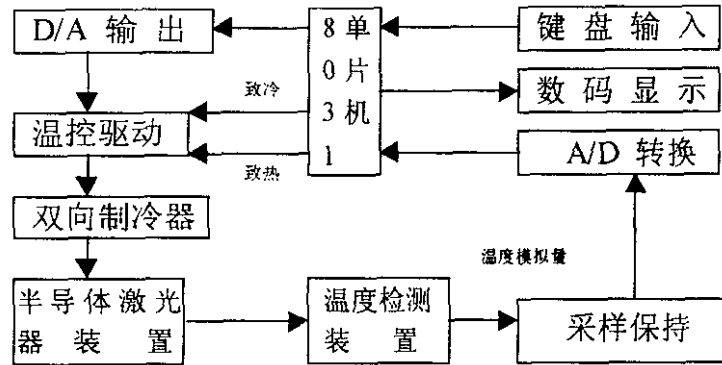


图 4-1 温度控制的原理框图

Fig.4-1 Draft of principle of control temperature

温度控制系统由温度传感器、单片机控制部分和半导体双向致冷器三部分组成。其中，单片机 8031 通过采集温度传感器的温度信号，根据温度采样值和给定值的差值，进行模糊逻辑运算后，去控制双向致冷器的输入电压值，正向电流致冷，反向电流致热，以保持 LD 温度的恒定。整体框图如图 4-1 所示。

该电路有以下特点：1.采用键盘输入、数码显示。使人机对话功能更为完善，可设定所需要的温度值，查询系统的各种参数和系统的工作状态。2.采用 12 位精度的 A/D 和 D/A 的转换器实现采样和转换功能。保证温度控制的精度和准确性，因温度传感器信号的传输会夹带噪声，所以在前置端加低通滤波器以滤出噪声。3.采用双向致冷器。当驱动电压为正时，致冷开关开通，正向电流致冷，当驱动电压为负时，致冷开关断开，反向电流致热。电流的大小及开关的方向由单片机控制，并通过反馈实现稳流。

#### 4.1.2 数据采集电路

热敏电阻是采用半导体材料制成的热敏器件，与一般的金属热电阻相比，它主要具备以下特点：1)电阻温度系数大，热敏度高，比一般金属电阻大

10~100 倍；2)结构简单，体积小，可以测量点温度；3)电阻率高，热惯性小，适宜动态测量。目前,热敏电阻的使用上限温度约为 300℃<sup>[48]</sup>。

本系统选用三晶公司的 MF5A-4 型热敏电阻，其主要特点：1) 环氧封装、小型化、精度高；2) 可靠性高、响应时间快；3) 引线采用聚脂漆包线、耐热、绝缘性好。性能指标如下：1)工作温度范围 (°C)：-40~100；2) R (25°C)：50 KΩ；3) B (K)：3950；4)：互换精度：±1%。

其温度采集电路如图 4-2 所示，工作原理是：分压电阻上取得的信号可以直接送给 A/D 进行采集，转换成数字信号，省去了信号放大电路。

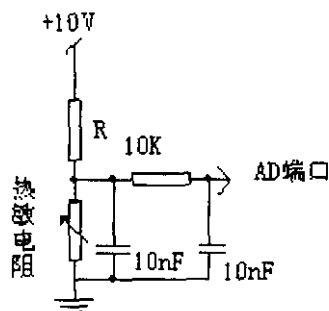


图 4-2 A/D 采集电路

Fig.4-2 Circuit of A/D acquisition

该热敏电阻 R, 是负温度系数热敏电阻，其阻值随温度的变化关系如公式 4-1 所示：

$$R_t = A(T - 1)\exp(B/T) \quad (4-1)$$

式中  $R_t$ ——温度为 T 时的电阻值；

A——与材料和几何尺寸有关的常数；

B——热敏电阻常数。

已知 T 时的电阻值  $R_t$  和热敏电阻常数 B，即可求出 A 的值，即

$$A = R_t \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (4-2)$$

### 4.1.3 A/D 转换电路

本温控系统的 A/D 转换是 12 位 12 路的 AD574AJ，其内部包含有与微机接口的逻辑电路，可以很好地与微机系统相连。AD574A 内部具有参考电压源和时钟电路，可以提供  $10.00 \pm 0.1V$  的参考电压，其转换速度为  $15 \mu s$ 。

AD574AJ 是内部具有数据寄存器和缓冲器的高速型 A/D 转换器，其工作时，须与采样保持器 LF198 配合使用。LF198 的信号保持时间是  $6 \mu s$ ，它工



参考电压源因为其精度直接反映到误差信号中去，因而，其精度至关重要。本文的参考电压源采用 LM399 精密基准，LM399 是精密的带有温度稳定器的单片齐纳基准，它的温度系数只有那些高质量的齐纳基准的十分之一。它具有很低的热噪声和很好的时间稳定性。在封装上采用热保护罩，是加热器功耗最小，在系统中以 LM399 为核心构成了如图 4-3 所示的基准电压电路，它可以提供-7~+7V 基准电压<sup>[50]</sup>。

#### 4.1.6 温度控制原理图

温度控制原理图如图 4-4、4-5 所示

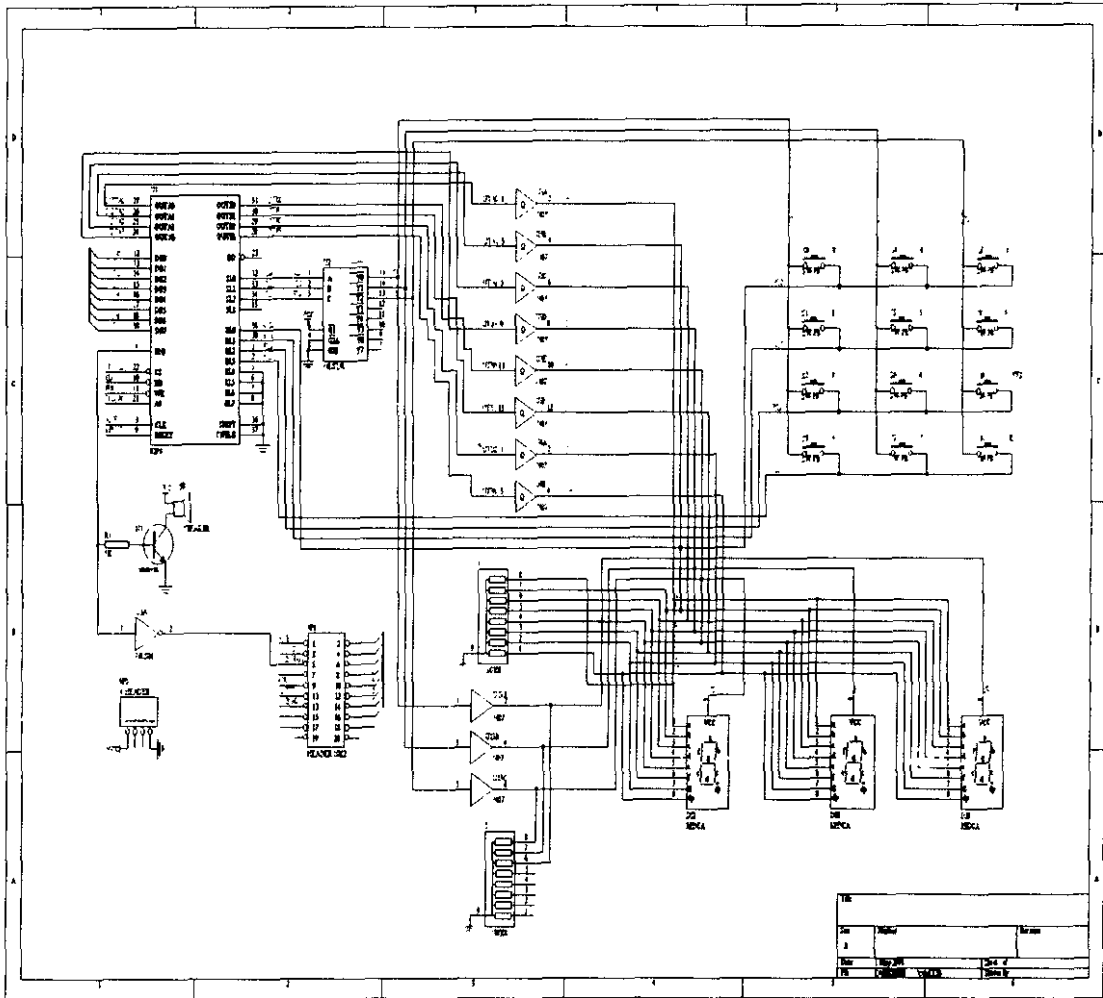


图 4-4 键盘与显示原理图

Fig. 4-4 Principle of key and display

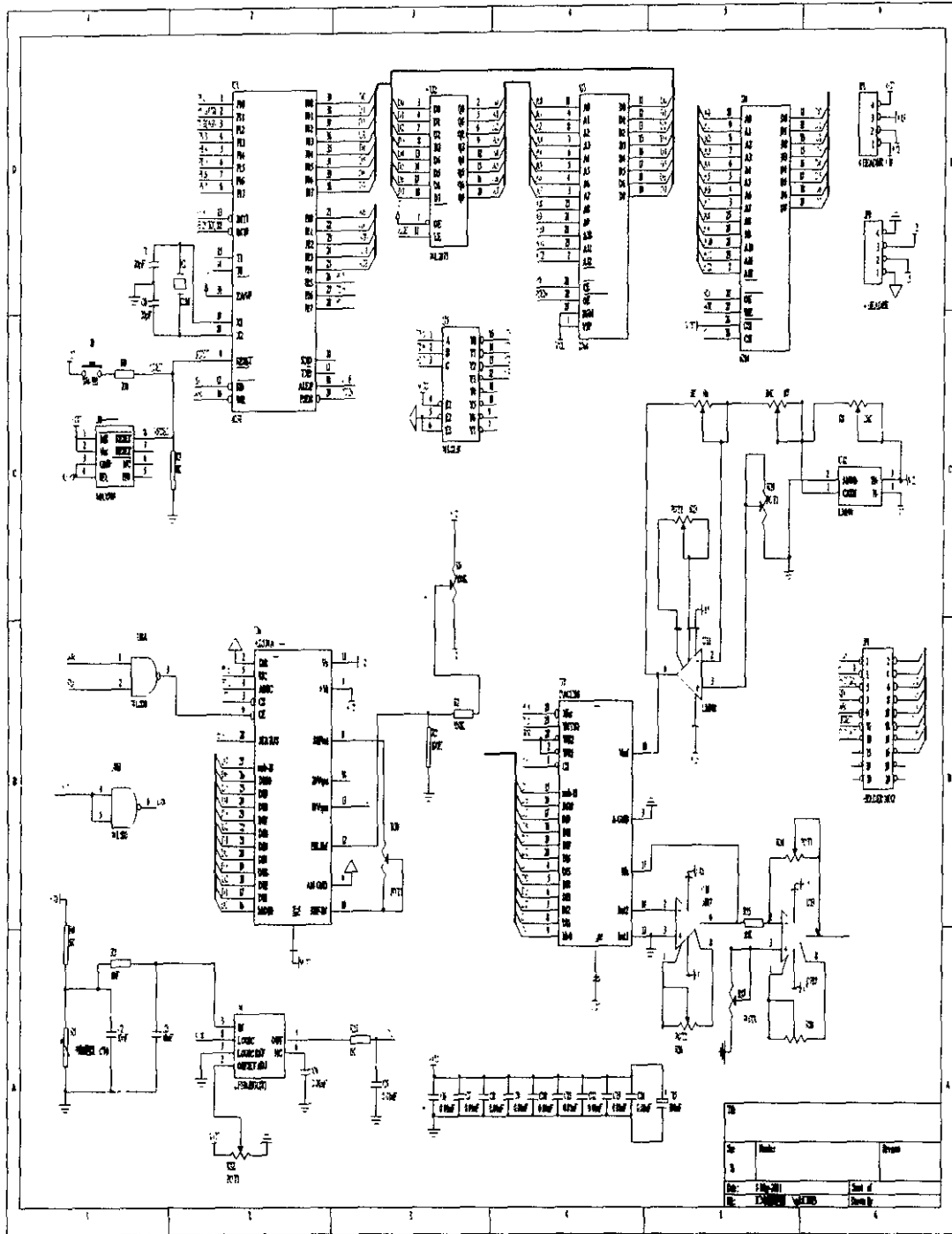


图 4-5 温度控制原理图

Fig. 4-5 Principle of control of temperature

## 4.2 温控系统的软件仿真

温控系统的软件仿真是通过对仿真过程的描述和仿真结果的分析与比较,验证单片机控制的模糊控制器在温度控制系统中的应用的可行性、有效性和先进性。从而,减少设计中不必要的重复操作和反复实验,在节省了设计者的时间和资金的同时,促进了科学研究的发展。

### 4.2.1 仿真方法和软件简介

利用计算机作为研究工具,将实际系统简化成数学“模型”,并将其在计算机上运行,借以分析、研究实际系统的动态特性、各种工况、最佳控制方法、最优参数等,这一过程就是计算机分析法,通常称之为仿真。

在任何一种控制方法应用于实际之前,均对其进行仿真研究,这样不仅有利于控制方法的研究和掌握,而且更有利于运用仿真技术进行仿真实验和参数调整,实现系统的最优设计和最优控制,为实际应用提供参考依据。

本文采用的仿真软件是 MATLAB 软件包。它集数值计算、矩阵运算、信号处理、图形显示于一体,可视化好、交互性强。MATLAB 提供了极其丰富的矩阵处理功能,其强大的扩展功能为各个领域的应用提供了强有力的基础,同时,各学科领域专家又为其提供功能众多的工具箱,这些工具箱反过来又进一步促进了 MATLAB 应用<sup>[51]</sup>。

### 4.2.2 温控系统的仿真模型

数字 PID 控制在生产过程中是一种普遍采用的控制方法,也是一种技术十分成熟的控制方法。由于 PID 控制器具有简单而固有的形式,在很宽的操作条件范围内,能保持较好的鲁棒性;另一方面因为 PID 控制器允许工程技术人员以一种简单而直接的方式来调节系统,所以 PID 是目前采用最多的控制方法。然而,在实际过程控制中,特别是受控系统发生时变时, PID 控制的参数整定变得十分复杂。

模糊控制法的优点在于不要求辨识系统的精确数学模型,它模仿人的思维方式,根据操作者的经验绘制出控制命令,适用于非线性、时变、难以辨识的系统,且实现比较容易。

半导体温度控制系统是一个十分复杂的控制系统,其在脉冲工作方式下所产生的热损耗为:

$$P_T = (IV + I^2 r_s - P_p) \tau f \quad (4-3)$$

式中  $I$ ——半导体激光器上的脉冲工作电流；  
 $V$ —— 半导体激光器上的工作电压；  
 $r_s$ —— 串联电阻；  
 $P_p$ —— 输出的光脉冲峰值功率；  
 $\tau$ —— 脉冲宽度；  
 $f$ ——脉冲重复频率；  
 $f\tau$ —— 占空比。

热耗散功率使激光器产生的温升为：

$$\Delta T = r_T P_T \quad (4-4)$$

式中  $r_T$ ——激光器的热阻，单位为 K/W 或 °C/W。

此时，半导体激光器的温度为：

$$T = T_s + \Delta T = T_s + (VJ + r_s J^2) r_T \quad (4-5)$$

式中  $J$ ——激光器的工作电流密度。

根据半导体激光器的温度特性和半导体双向制冷器的工作特性，设计成如图 4-6 所示的仿真模型。

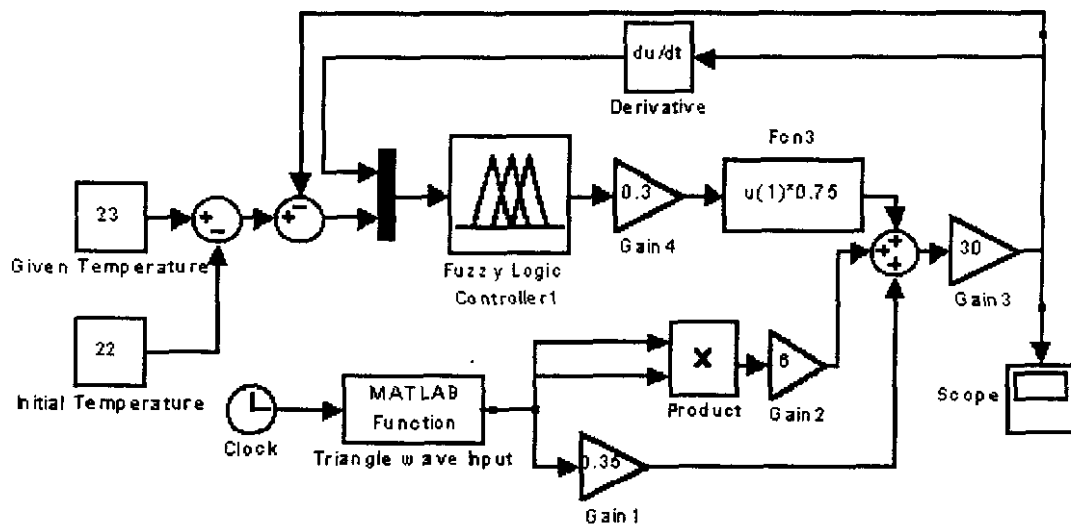


图 4-6 温控系统仿真模型

Fig.4-6 Emulation model of temperature control system

### 4.2.3 温控系统的仿真结果

在温控系统的仿真工作中，根据上述所得到的模糊控制表编制成 MATLAB 中的模糊推理系统（FIS）进行仿真<sup>[52]</sup>，其中温差的论域取为  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ ，温差变化率的论域取为  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。对控制输出可通过改变比例因子  $k_p$  来调节控制强度。该仿真系统的结果如图 4-7 所示，证明了该温控系统的合理性。

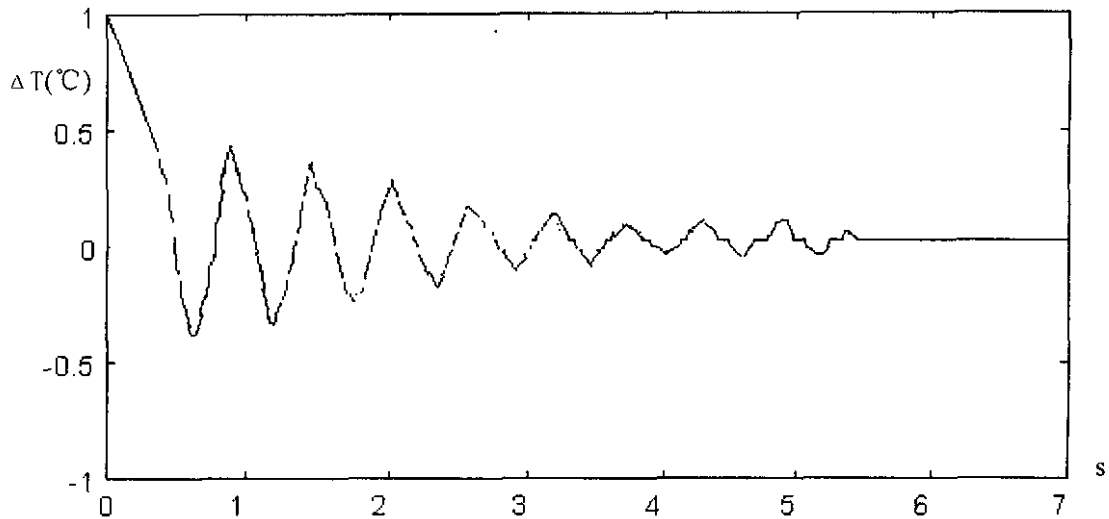


图 4-7 仿真结果曲线

Fig. 4-7 Graph or emulation of temperature control system

### 4.3 本章小结

本章首先介绍了半导体激光器的温控系统的硬件设计，论述了基准电压电路、采样保持电路以及半导体制冷器的设计及选择原理。通过对半导体激光器热特性进行分析，建立了该系统的仿真模型，实现了对其控制性能的分析与验证，其结果满足本系统的技术要求。

## 第 5 章 实验及其分析

### 5.1 实验结果

本文在完成了半导体激光器的调制电源和温度控制系统的设计之后对整个系统进行了实验验证，其验证条件是：1)开机一小时，使系统尤其是半导体激光器工作状态稳定；2)半导体激光器调制信号源输出的调制电流随时间呈周期性变化。

实验中使用的激光二极管为 AL6507-5，其主要指标为：工作温度范围是  $-10\sim+50^{\circ}\text{C}$ ；阈值电流  $I_{th}\leq 20\text{mA}$ ；正向压降： $V=2\text{v}$ ；最大功率  $W\leq 230\text{mW}$ 。

#### 5.1.1 半导体激光器的调制信号

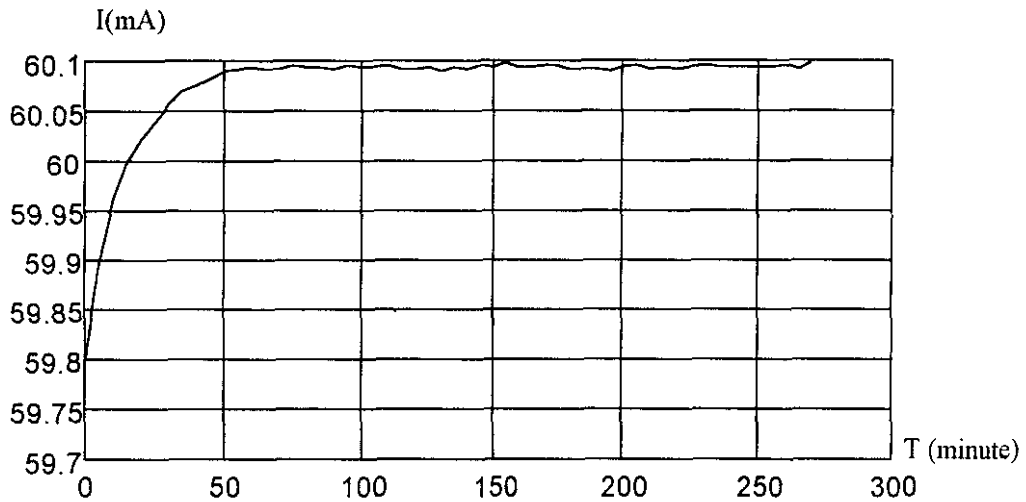


图 5-1 调制电源的稳定性实验曲线

Fig. 5-1 Graph of Steady test of Modulation Power Source

图 5-1 是调制电源的稳定性实验曲线。经过数小时的稳定性实验数据的采集，以及实验数据分析得出结论，即该调制电路所输出的调制电流的脉动为  $40\mu\text{A}$ ，基本上满足光测系统的技术指标的要求。

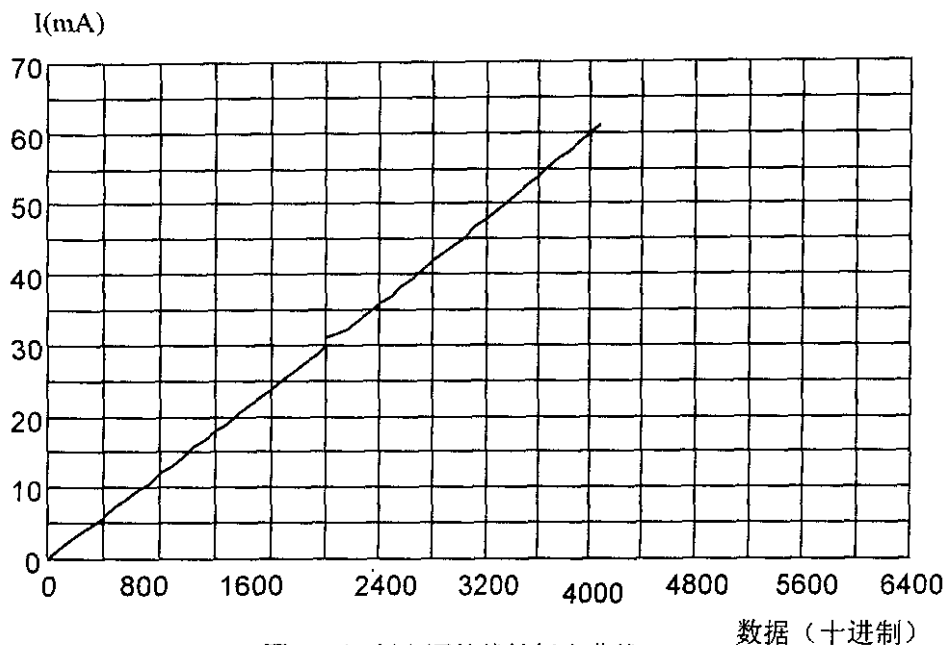


图 5-2 调制电源的线性标定曲线

Fig.5-2 Graph of Linear Demarcation of Modulation Power Source

图 5-2 是调制电源的线性标定曲线。该调制制电流的精度取决于 D/A 转换器的精度，即等于  $1/4096 = 0.00024414$ ，实验结果表明调制电源的线性比较理想。

### 5.1.2 半导体激光器的恒温系统

为了便于对半导体激光器的温控效果的检验，首先对半导体激光器进行了典型工作状态的温控实验，即：半导体激光器工作在调制信号源输入的调制电流随时间呈周期性的变化，且调制电流幅值为 60mA。

图 5-3 是在基于模糊控制的温度控制系统的控制之下，半导体激光器工作时的温度曲线，从图中可以看出，半导体激光器的温度变化达到了稳定工作时的技术要求。

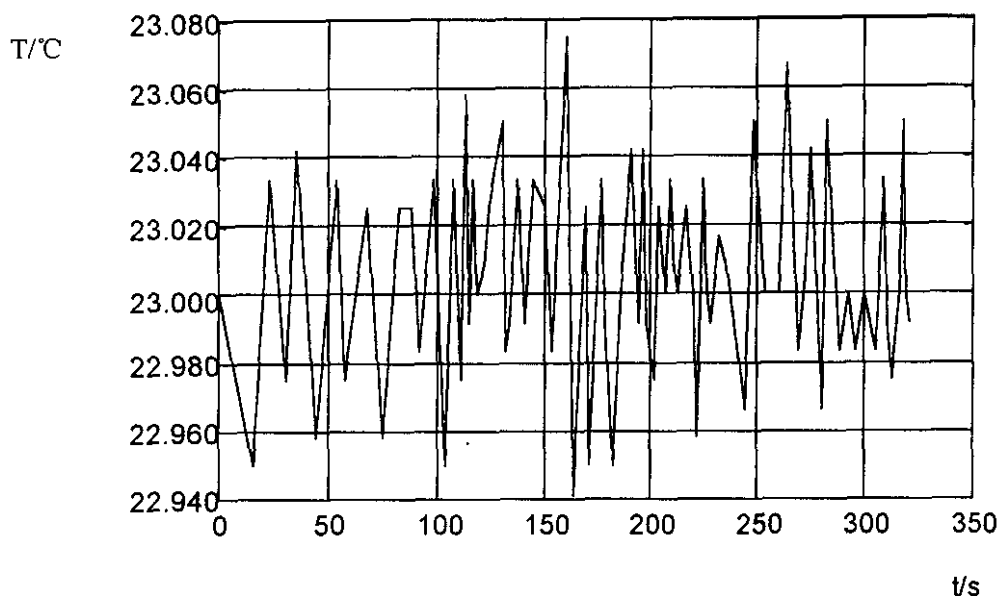


图 5-3 半导体激光器的温控曲线

Fig. 5-3 LD graph of controlled temperature characteristic

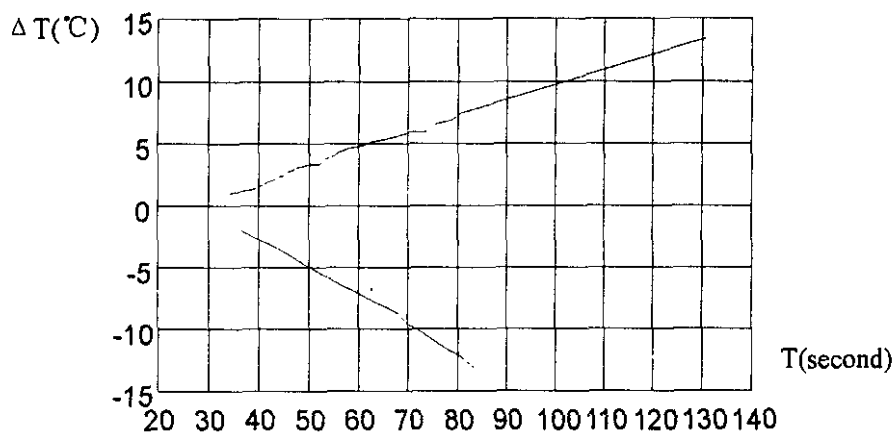


图 5-4 不同温差时的调节时间曲线

Fig. 5-4 Graph of Modulation Time of different Temperature Point

图 5-4 是半导体激光器的工作起始温度低于或高于  $23^{\circ}\text{C}$  时，控制电路使半导体激光器首次达到  $23^{\circ}\text{C}$  的时间值。该实验结果表明，当温度低于  $23^{\circ}\text{C}$  时控制电路使半导体激光器达到  $23^{\circ}\text{C}$  的时间值小于当温度高于  $23^{\circ}\text{C}$  时控制电路使半导体激光器达到  $23^{\circ}\text{C}$  的时间值。

## 5.2 误差分析

半导体激光器输出光频的稳定性取决于它的注入电流和温度，为了更有利于今后设计的提高，下面将本系统中所产生的误差的影响因素归结为以下几点：1)调制信号的精度；2)参考电压源的稳定性；3)执行元件的稳定性 4)控制算法的精度；5)环境温度的影响。

### 5.2.1 调制信号精度的影响

在本系统中，调制信号是由软件控制产生的，即将一个周期的波形调制信号分割为一定个数的点，然后储存在单片机的 EPROM 中，由单片机将这些数据连续的送入 D/A 转换器中形成连续的波形信号，注入到半导体激光器中。所以，如何分割调制信号是一个必须解决的问题，因为随着分割点数增加，波形的周期也相应地延长，从而导致频率降低；反之，分割点数减少，频率上升，但是，波形却有些失真。

因此，虽然本系统所采用的 AT89C52 的工作频率范围是 0~24MHz，但，DAC1210 的转换周期为 1 $\mu$ s，因此，为了保证转换器的正常工作，设计时，AT89C52 的工作频率确定为 12 MHz，这大大影响了信号的频率。所以，在以后的设计中，应首选转换周期短、精度高的 A/D 转换和 CPU，同时，开发最好的应用软件，以达到提高半导体激光器的光频精度和频率的目的。

### 5.2.2 参考电源的稳定性

在半导体激光器的工作过程中，参考电源的变化将一比一地反映到控制结果中去。因此，对于半导体激光器这个十分敏感的元件，参考电源的稳定性对其工作稳定性的影响是十分显著的。

### 5.2.3 执行元件的稳定性

这项误差主要包括帕尔贴元件的响应速度和功率放大环节的稳定性。功率放大环节是否能够把转换器的输出值准确地放大送给执行元件也将在很大程度上影响控制精度。

### 5.2.4 控制算法的精度

在温度控制系统中，考虑模糊控制器实现的简易性、快速性，以及控制系统的稳定性，将温差和温差变化率作为系统的输入量进行温度控制，虽然

控制精度达到了系统的技术要求，但是，其结果仍有待于进一步提高。在本模糊控制系统中所采用的二维模糊控制器，具有类似于常规 PD 控制器的作用，可获得良好的动态特性，但静态特性不能令人满意。由线性控制理论可知，积分作用能消除稳态误差，但动态响应慢；比例控制作用动态响应快，因此，比例积分控制作用既能获得较高的稳态精度，又能具有较高的动态响应。因此，把 PI 控制策略映入 Fuzzy 控制器，构成 Fuzzy-PI（或 PID）复合控制，是改善模糊控制器动态性能的一种途径。

为了获得一个更为满意温控效果，在温控进入稳态控制之后，该为 PI 控制以消除振荡，Fuzzy 和 PI 的切换由误差  $E$  来决定，当偏差大于一个给定值  $E_m$  时，采用 Fuzzy 控制；当偏差小于  $E_m$  时，切换为 PI 控制，这样既保证了系统响应的快速性和较强的抗干扰性能，又保证了系统的稳态精度。

将模糊控制和 PID 控制器结合起来，扬长避短，既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。这种 Fuzzy-PID 复合型控制器，对复杂、高精度的温度控制系统具有良好的控制效果，将是以后的温控设计中首选方案。

### 5.2.5 环境温度的影响

环境温度的影响主要包括对 LD 温度的影响，以及对 A/D 和 D/A 转换器的参考电压和参考电压源的影响，从而，引起对整个系统的影响。在本系统的实验过程中，整个系统是暴露在外部环境中，然而，在实际使用中，整个信号调制系统将被封闭在一个外包屏蔽罩的绝热体内，因此，这些干扰将被最大程度地降低。

半导体激光器的频率调制与温度控制系统的照片如图 5-5、5-6 所示。

### 5.3 本章小结

本章通过实验数据绘制出半导体激光器的调制信号的稳定性实验效果图，以及在模糊控制下的半导体激光器的温控实验效果图。该实验结果表明含有模糊控制技术的温度控制系统，有很强的控制性能和很好的控制效果，程序化控制调制信号的方法有一定的先进性。同时，从另一方面，暴露了它们的一些不足之处。通过对误差影响因素的分析，找到了解决办法，以期在今后的研究与实验中取得更高的研究水平。

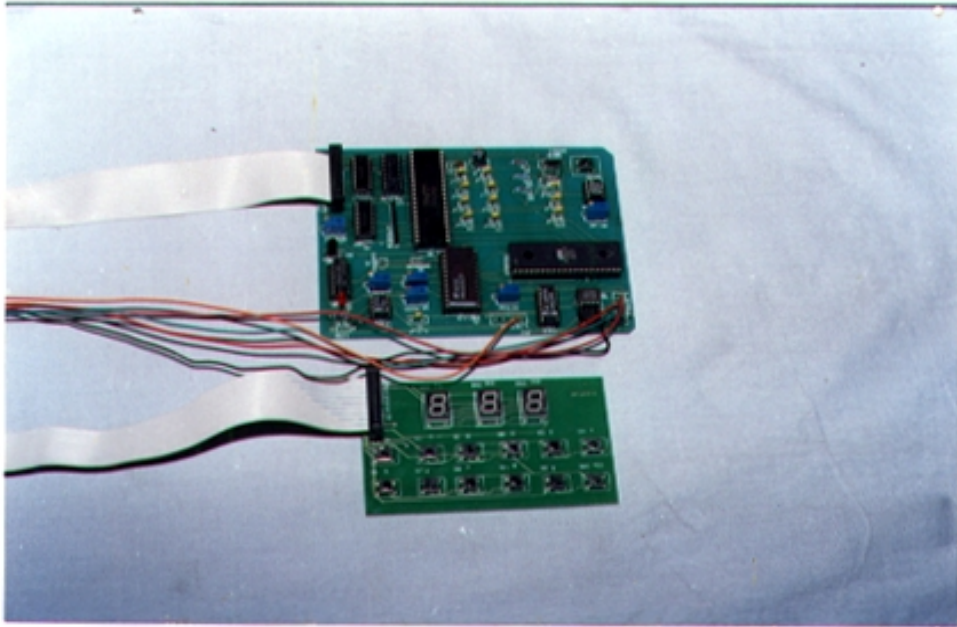


图 5-5 半导体激光器的频率调制系统的照片

Fig. 5-5 Photo of Modulation of Frequency of LD

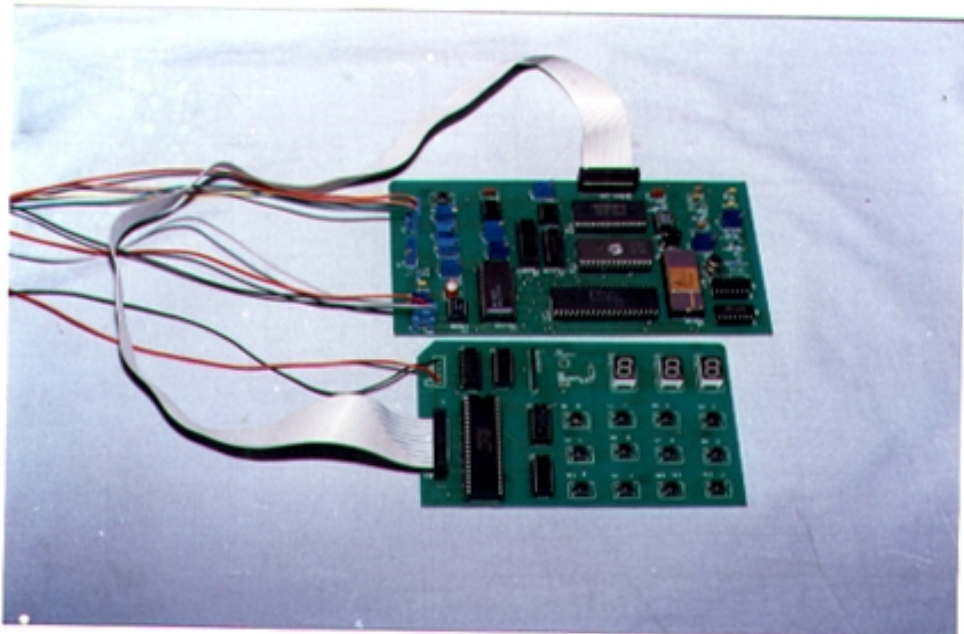


图 5-6 半导体激光器温度控制系统的照片

Fig. 5-6 Photo of Control of Temperature of LD

## 结 论

本文根据光学测量系统对半导体激光器的技术要求，针对于半导体激光光源的两大热点问题：半导体激光器的频率调制和温度控制，在广泛查阅了国内外大量资料的基础上，系统分析、总结了半导体激光器的调制特性和热特性，提出了半导体激光器频率调制的程序化控制，以及将整体控温技术与模糊控制技术相结合的温度控制，从而，设计出小型化、集成化的半导体激光光源。

本文研究的特点如下：

1. 全面讨论了调制信号函数对半导体激光器的重要影响。指出了以锯齿波为调制函数的激光光源，将产生吉布斯震荡；而以正弦波为调制函数的测量系统测量精度高，但是测量的有效距离短；针对于上述问题，提出了三角型函数的作为激光光源的调制信号，以提高系统的精度及可测距离；

2. 分析了系统的热特性。本文结合图表，从半导体激光器的阈值电流、寿命、输出波长等方面，论述了温度对半导体激光器的负面影响，为温度控制的设计提供理论依据；

3. 设计了软启动等保护电路。针对于半导体激光器的抗干扰能力差，以及在半导体损坏的原因中浪涌击穿占 20% 的严重问题，设计了滤波、软启动等保护电路，在很大程度上避免了浪涌击穿等现象的发生，提高了半导体激光光源的性能指标；

4. 提出了调制信号源的程序化控制。指出了模拟电路调制信号的优、缺点，设计了程序化控制的调制信号源，在很大程度上简化了系统的硬件结构，增强了调制信号的可控性，提高了调制信号的频率和稳定性，进一步拓宽了半导体激光器的在高精度测量中的应用；

5. 整体控温技术的采用。半导体激光器主要由泵浦源、激光晶体、和倍频三部分组成，如果对这三部分进行温度控制，则激光器的体积将大大增加，成本也将提高，另外，在操作、固化器件等方面也有很大的困难，而整体控温技术的采用，增强了半导体激光器的温控效果，减少了系统中的可移动部件，提高了激光光束，以及器件长期的稳定性；

6. 基于模糊控制的温度控制系统。本设计所采用的温控系统具有功能全面、智能化程度高、单片机实现方便，控制精度高等优点，与整体控制技术的接合使用，使半导体激光器的温度控制，取得了满足系统技术要求的控制效果；

7. 对新方法的探索。本温度控制系统，将温差和温差变化率作为系统的输入量进行温度控制，虽然控制精度达到了系统的技术要求，但是，其结果仍有待于进一步提高。在本模糊控制系统中所采用的二维模糊控制器，具有类似于常规 PD 控制器的作用，可获得良好的动态特性，但静态特性不能令人满意。由线性控制理论可知，积分作用能消除稳态误差，但动态响应慢；比例控制作用动态响应快，因此，比例积分控制作用既能获得较高的稳态精度，又能具有较高的动态响应。因此，把 PI 控制策略映入 Fuzzy 控制器，构成 Fuzzy-PI（或 PID）复合控制，扬长避短，既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。这种 Fuzzy-PID 复合型控制器，将是今后的精度高、控制对象复杂的温控设计中的首选方案；

综上所述，本文针对于半导体激光器的频率调制和温度控制问题所进行的研究工作，对提高半导体激光光源的性能指标，以及促进其在测量系统中的应用具有一定的理论与实用价值。

## 参考文献

- 1 C.W.Gillard, N.E.Buholz. Absolute Distance Interferometry Optical Engineer 1981,20(1):129~134
- 2 C.W.Gillard,N.E.Buholz. Progress in Absolute Distance Interferometry Optical Engineer 1983,22(3):348~353
- 3 孙晓明 半导体激光器多光束干涉绝对测距系统研究, 哈尔滨工业大学博士论文, 1994:1~20
- 4 Kakuma,S.,et al,Opt Eng,1994,Vol.33,No.9
- 5 A Abou-Zeid,Pre.Eng,1989,Vol.11,No.3,139~144
- 6 Martinelli,Mario. Interferometric Optical FiberSensors.Proce--edings of SPIE The International Society for Optical Engineering Optics as a Key to High Technology Proceedings of the 16th Congress of the International Commission for Optics, Aug 9-13.1993,Bukdapest, Hung, Published by Society of Photo Optical Instrumentation Engineers Bellingham WA USA,v1983:1034~1051
- 7 W.T.Tsang. 半导体注入型激光器 II 江剑平 清华大学出版社 电子工业出版社 1991:219~255
- 8 张瑞华. 半导体激光器的发展趋势和最新研制动态. 半导体技术. 1991,1: P8, P11, P13
- 9 小晨. 激光技术的经济意义及前景. 激光与光电子学进展. 1995,10: P35
- 10 赵建新. 0.63  $\mu$  m 短波长红光激光二极管发展动态. 激光与红外. 1995,10: P36
- 11 黄德修. 前进美好的半导体激光器. 激光与红外. 第 22 卷第 6 期: P6
- 12 Kobayashi S., Yamamoto Y., Ito M. and Kimura T., Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers,IEEEJ Quantum Elect-ronics 1982, 18(4):582~595
- 13 Kikuta H., Iwata K. and Nagata R., Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light, Appl. Opt.,1986, 25(17):2976~2980
- 14 Kikuta H., Iwata K. and Nahata R., Absolute Distance measurement by the wavelengrh shift interferometry with a laser diode light, Appl. Opt., 1987, 26(9):1654~1660
- 15 Sasaki O. and Okazaki H., Sinusoidal phase modulating interferometry for

- surface profile measurement, *appl. Opt.*, 1986, 25(18):3137~3140
- 16 A.J.den Boef, Interferometric laser range finder using a frequency modulated diode laser, *Appl. Opt.*, 1987,26(21): 4545~4550
- 17 A.J.den Boef, Two wavelength scanning spot Interferometric laser range finder using a frequency modulated diode laser, *Appl. Opt.*, 1988,27(2):306~311
- 18 Kubota T., Nara M. and Yoshino T., Interferometer for measuring displacement and distance, *Opt. Lett.*, 1987, 12(5) : 310~313
- 19 徐勇, 半导体激光器在大尺寸绝对测量中的应用研究, 清华大学博士论文, 1989
- 20 Hotate K. and Kamatani O., Reflectometry by means of optical-conerence modulation, *Elec. Lett.*, 1989, 25 (22) : 1503~1505
- 21 Suematsu M., and Takeda M., Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis, *Appl. Opt.*,1991,30(28):4046~4055
- 22 Peter de Groot Use of a multimode short-external cavity laser diode for absolute distance interferometry, *Appl Opt.* 1993,32(22):4193~4198
- 23 孙晓明. 半导体激光器多光束干涉绝对测量系统研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1994, 3: 1~20
- 24 O.V.Helleso interferotric Displacement Sensor Made by Intergrated Optics on a Glass Sens Actuators A. *Phys.* 1995, (4):478~481
- 25 H.P.Zappe, D. Hofstetter, B.Maisenholder. Monolithic Optical interferometers for MEMS Applications. LEOS Summer Topical Meeting Advanced Applications of Lasers in Materials and Proceeding Proceedings of the 1996 IEEE/LEOS Summer Topical Meeting Aug 5~9, 1996, Keystone, CO, USA, Sponsored by IEEE, OSA, LEOS IEEE Piscataway NJ USA: 1022~1030
- 26 B.Pezeshki, et al. High power and short wavelength red DFB lasers. IEEE international Semiconductor Laser Conference Proceedings of the 1998, 16th IEEE International Semiconductor Laser Conference, ISLC Oct 4—8, 1998, Nara, NJUSA:143~144
- 27 B.Pezeshki, et al.400-mW Single-frequency 660-nm Semiconductor Laser IEEE Photonics Technology Letters.1999,(7):791~793

- 28 W.T.Tsang. 半导体注入型激光器 I. 清华大学出版社. 1990, 1: 12 ~ 23  
6~7
- 29 Eric Udd. Fiber Optic Sensors, An Introduction for Engineering and Scientist,  
A. Woley Interdscience Publication, 1990: 1~8 , 139~143, 140, 47~66, 303~  
310
- 30 A. Valle., High Frequency current Modulation of High Order Transverse  
Modes in Vertical-cavity Surface Emitting Lasers. Conference on Lasers and  
Electro Optics Europe Technical Digest Proceedings of The 1998  
international Symposium on Information Theory, CLEO/EUROPE'98. Sep  
14-18. 1998. Glasgow. Scotland , IEEE Piscataway NJ USA: 93~95
- 31 蔡伯荣等. 《激光器件》. 湖南科学技术出版社, 1983: 25~48
- 32 Galawa A. R. and Dimmoch J.O., Magnetic field dependence of laser emission  
in PbSnSe diode, Phys. Rev. Lett., 1969, 25(7): 335-338
- 33 Kobayashi S., Yamamoto Y., Ito M. and Kimura T., Direct frequency modulation  
in ALGaAs semiconductor lasers. IEEE J. Quantum Electronics, 1982, 18(4):  
582-595
- 34 A. A. Saavedra, P.J. Rigole, E. Goobar. Measurement of Amplitude and  
Frequency Modulation Responses of widely tunable GCSR lasers IEEE  
International Semiconductor Laser Conference Proceedings of the 1998 16th  
IEEE International Semiconductor Laser Conferen-ce, ISLC. Oct 4-8, 1998,  
Nara, Japan, ponsored by IEEE Piscataway NJ USA: 179~180
- 35 何立民. 单片机应用系统设计. 北京航空航天大学出版社 1996: 681~691
- 36 扬振江等. 转换器接口技术. 西安电子科技大学出版社. 1998. 9: 179~785
- 37 梅遂生等. 关于激光二极管的腔面污染和浪涌击穿. 激光与红外.  
1998, 2: 2~4
- 38 叶慧贞 杨兴洲. 开关稳压电源原理、设计及实用电路. 西安电子科技大学  
出版社. 1997: 67~70
- 39 李士勇, 模糊控制 • 神经控制和智能控制, 哈尔滨工业大学出版社,  
1996: 381~ 399
- 40 谢宋和 甘勇. 单片机模糊控制系统设计与应用实例. 电子工业出版社.  
1999: 1~38, 234~293
- 41 S.G.Cao, N.W.Rees and G.Feng. Stability Analysis of Fuzzy Control  
Systems. IEEE Trans. on SMC, 1996, 26(1): 201~204

- 42 Liang-jiong Huang, Masayoshi Tomizuka. A self-Paced Fuzzy Tracking controller for Two-Dimensional Motion Control. IEEE Trans. on SMC. 1990, 20(5): 1115~11233
- 43 Li-Xin Wang. Automatic Design of Fuzzy controller. Automatica, 1999, 35(8): 1471~1475
- 44 戴永, 谢康林. 单片机模糊算法优化研究. 湘潭大学自然科学学报. 1998, 20(4): 32~35
- 45 张辉, 陈粤初等. 单片机应用技术, 北京航空航天大学出版社, 1999: 128~139
- 46 陈梁等. 大功率激光二极管的精密恒温制冷系统. 激光与红外. 1999, 8: 249~252
- 47 半导体光电子学. 电子科技大学出版社. 黄德修. 1994: 106~108
- 48 强锡富. 传感器. 机械工业出版社. 1993: 252~254
- 49 半导体致冷器件及其应用. 科学出版社. 1989: 25~70
- 50 袁瑞舜等编译. 《美国国家半导体公司线性集成电路特性与应用手册》. 上海半导体器件研究所. 1992: 38~96
- 51 龚剑, 朱亮编著《MATLAB 5.x 入门与提高》. 清华大学出版社. 2000, 3: 1~110
- 52 闻新, 周露等. 《MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用》. 科学出版社. 2001, 4: 112~128

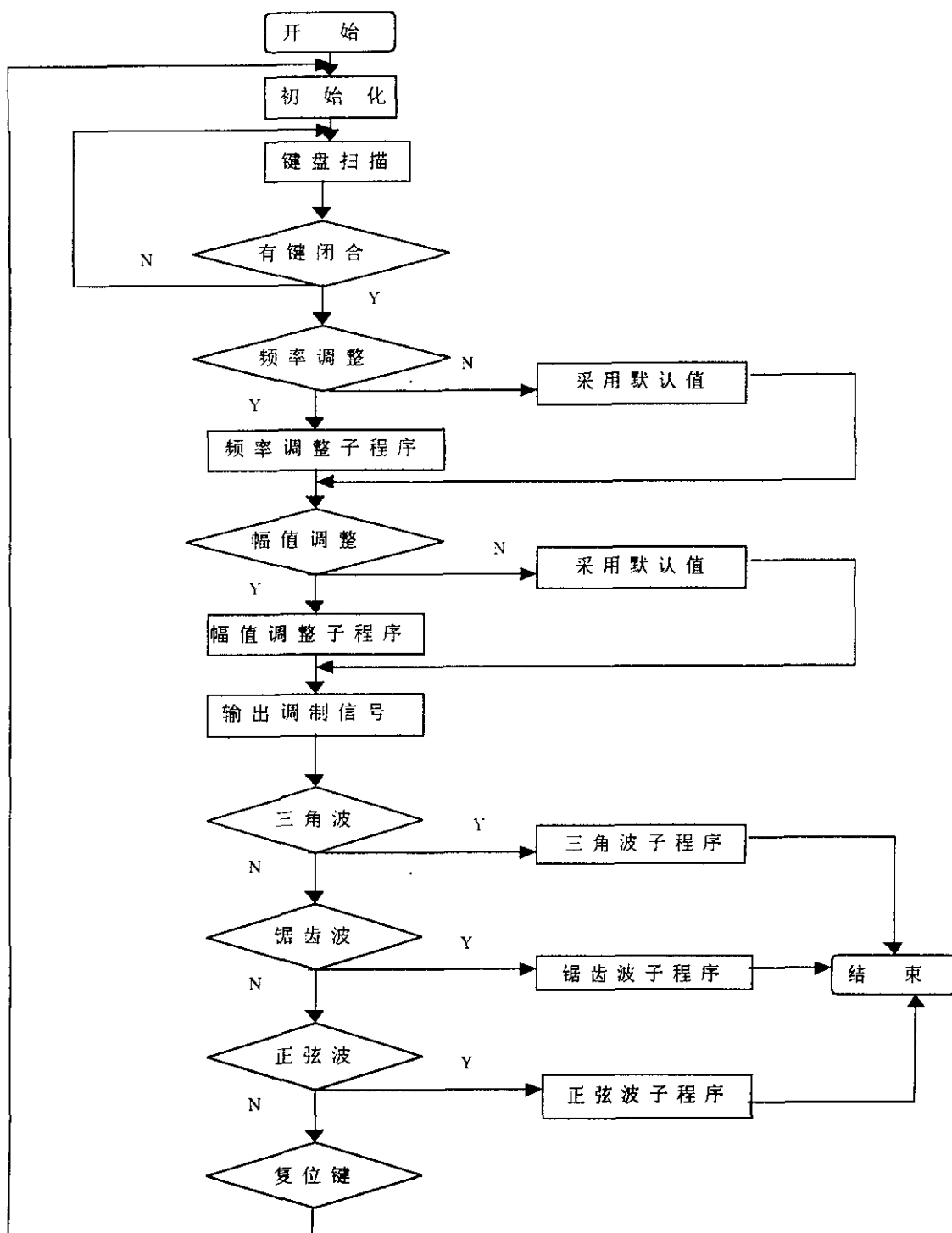
附录 1: 半导体激光器调制电源稳定性实验数据表

测量时间 (分)	0	5	10	15	20
输出电流 (mA)	59.795	59.895	59.962	59.999	60.022
测量时间 (分)	25	30	35	40	45
输出电流 (mA)	60.041	60.056	60.071	60.076	60.085
测量时间 (分)	50	55	60	65	70
输出电流 (mA)	60.090	60.091	60.094	60.092	60.093
测量时间 (分)	75	80	85	90	95
输出电流 (mA)	60.096	60.094	60.095	60.093	60.097
测量时间 (分)	100	105	110	115	120
输出电流 (mA)	60.094	60.095	60.096	60.093	60.092
测量时间 (分)	125	130	135	140	145
输出电流 (mA)	60.094	60.091	60.094	60.092	60.095
测量时间 (分)	150	155	160	165	170
输出电流 (mA)	60.095	60.094	60.095	60.097	60.096
测量时间 (分)	175	180	185	190	195
输出电流 (mA)	60.093	60.092	60.093	60.090	60.094
测量时间 (分)	200	205	210	215	220
输出电流 (mA)	60.096	60.093	60.094	60.092	60.095
测量时间 (分)	225	230	235	240	245
输出电流 (mA)	60.097	60.095	60.095	60.094	60.096
测量时间 (分)	250	255	260	265	270
输出电流 (mA)	60.094	60.091	60.093	60.098	60.096

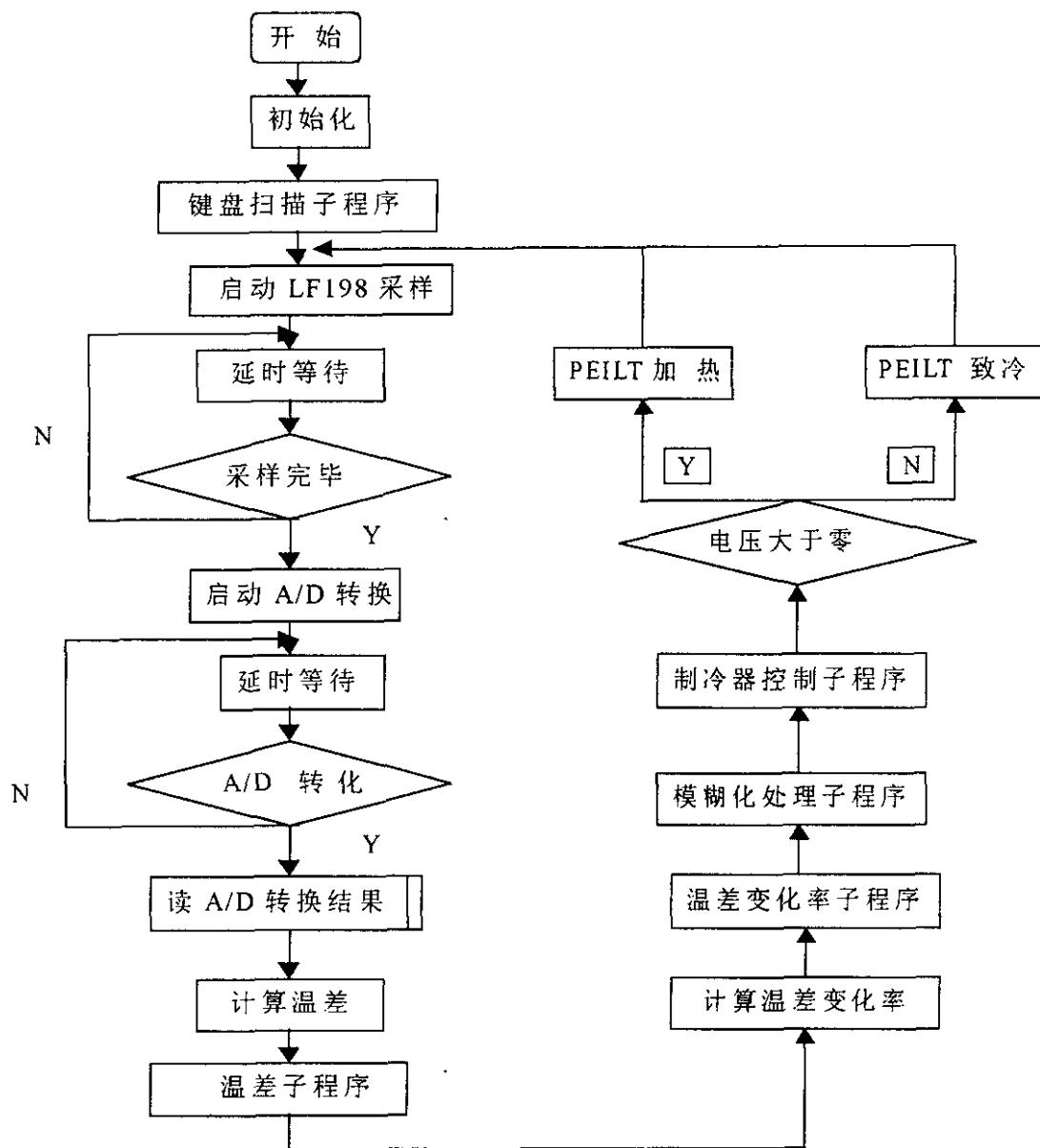
## 附录 2：半导体激光器调制电源线性标定

输入数据	0	80	160	240	320
输出电流 (mA)	0.000	1.194	2.390	3.584	4.781
输入数据	400	480	560	640	720
输出电流 (mA)	5.978	7.172	8.367	9.563	10.772
输入数据	800	880	960	1040	1120
输出电流 (mA)	11.953	13.148	14.344	15.542	16.736
输入数据	1200	1280	1360	1440	1520
输出电流 (mA)	17.933	19.130	30.324	21.521	22.717
输入数据	1600	1680	1760	1840	1920
输出电流 (mA)	23.910	25.106	26.301	27.499	28.695
输入数据	2000	2080	2160	2240	2320
输出电流 (mA)	29.891	31.092	32.290	33.485	34.630
输入数据	2400	2480	2560	2640	2720
输出电流 (mA)	35.878	37.075	38.276	39.475	40.669
输入数据	2800	2880	2960	3040	3120
输出电流 (mA)	41.864	43.06	44.263	45.461	46.662
输入数据	3200	3280	3360	3440	3520
输出电流 (mA)	47.856	49.055	50.258	51.455	52.651
输入数据	3600	3680	3760	3840	3920
输出电流 (mA)	53.855	55.055	56.254	57.460	58.657
输入数据	4000	4080	4095		
输出电流 (mA)	59.856	61.05	61.103		

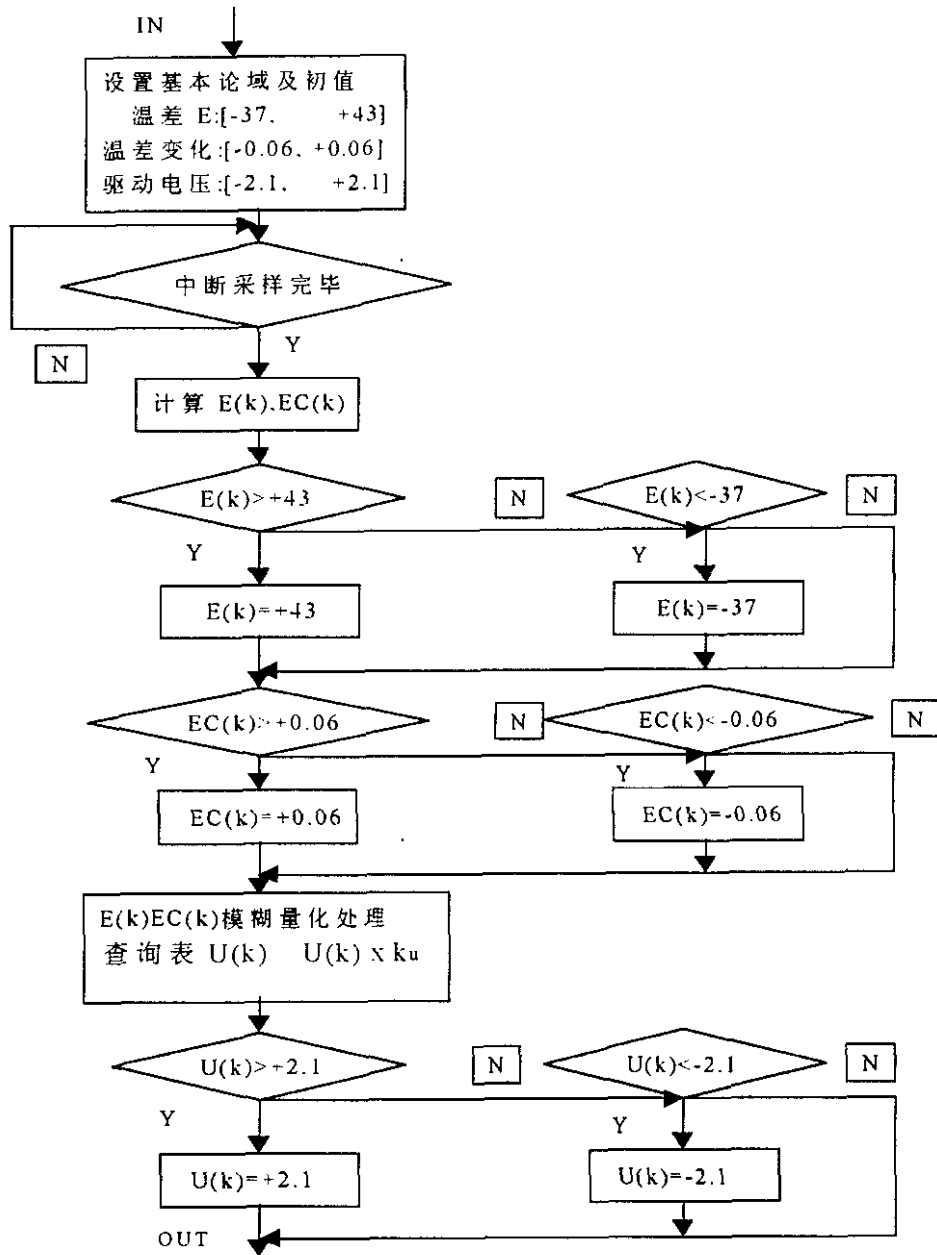
### 附录 3： 半导体激光器频率调制的流程图



附录 4: 半导体激光器模糊温控流程图



附录 5: 子程序流程图



模糊控制算法流程图

## 攻读硕士学位期间所发表的论文

1. 崔永红, 傅继盈, 周延周. 高频率抗干扰的激光器调制电源的研究. 黑龙江, 江苏, 山东, 河南, 江西五省光学联合会(已录用)

## 致 谢

本论文是在导师傅继盈教授的精心指导和严格要求下完成的。值此论文完成之际，谨向辛勤培育我的导师致以最衷心的感谢。导师严谨求实的学风、丰富的理论知识和实践经验、严于律己的作风，使我终生受益。同时导师的谆谆教诲和无微不至的关怀，令我此生难忘。

同时也向周延周老师和航天学院可调谐激光实验室的申作春老师表示最诚挚的谢意，感谢他们对我研究课题的大力支持和提出的指导性建议。

本人在攻读硕士学位期间，53专业的梁军老师和信息产业部第四十九研究所的王达明工程师提供了大量的技术帮助，促进了论文和课题的顺利完成，在此再次向他们表示由衷的感谢。

最后，感谢师弟们和室友们，以及本专业同学的关心和帮助。