

摘要

可调谐 TEA CO₂激光器在许多领域有着广泛的应用。本文针对光栅调谐 TEA CO₂激光谐振腔开展了自动调整技术和稳定性研究，其中涉及到激光谐振腔、激光探测、数字图像处理和计算机控制等方面技术。

本文在研究了激光谐振腔自动调整技术相关理论和前人的工作之后，针对大能量光栅调谐 TEA CO₂激光谐振腔，选择非制冷焦平面红外热像仪作为探测器件，建立了可调谐 TEA CO₂激光采样系统。在该系统的基础上，从分析光斑质量入手，提出了光斑鉴别的简单判据，开发了基于 Matlab 的光斑鉴别图像处理软件，并利用该软件对计算机捕获到的某支谱线的一组光斑进行图像处理，鉴别出质量最好的光斑，实现了激光谐振腔的自动调整。进而又开展了激光谐振腔稳定性研究，通过实验研究了大能量光栅调谐 TEA CO₂激光器的输出能量、光束指向和远场发散角等参数的变化，分析和总结了影响激光谐振腔稳定性的因素。

自动调整技术一直是激光技术研究中的重要课题，本论文的工作研究了一种新型的激光谐振腔调整方法，实现了光栅调谐 TEA CO₂激光谐振腔调整的自动化。随着数字图像处理技术的发展和激光探测水平的提高，该技术将逐渐得到发展和实际应用。

关键词：光栅调谐 TEA CO₂激光器 自动调整 光斑鉴别 稳定性

Abstract

Tunable TEA CO₂ lasers have wide applications in many fields. In this thesis, the automatic adjustment technology and resonator stability technology of grating tunable TEA CO₂ laser are studied, including resonator technology, laser detection, digital image processing and computer controlling.

After investigating the theories and achievements on automatic resonator adjustment technology, a laser sampling system utilizing an uncooled focal plane infrared imagery as the detector is built for large-energy grating tunable TEA CO₂ resonator adjustment. Based on this system, the criterion for selection of spot qualities is proposed, and the image processing software of spots selection is also developed to process a group of spot images captured by the imagery and select the best one according to the criterion. The result is fed back and the automatic adjustment of grating tunable TEA CO₂ laser is realized. In order to investigate the resonator stability of large-energy grating tunable TEA CO₂ laser, its output energy stability, beam pointing stability and far-field divergence angle stability are measured respectively and the factors affecting the stability are analyzed.

The automatic adjustment technology of resonator is an important part of laser technology. In this work, a novel resonator adjustment method is presented and the automation of grating tunable TEA CO₂ laser resonator adjustment is realized. This technology will obtain practical application with the development of digital image processing technology and the improvement of laser detection.

Keywords: Grating tunable TEA CO₂ laser Automatic adjustment
Spots selection Stability

研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院电子学研究所或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签名：陈静 日期：2006.4.29

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解中国科学院电子学研究所有关保留、使用学位论文的规定，其中包括：①电子所有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②电子所可以采用影印、缩印或其他复制手段复制并保存学位论文；③电子所可允许学位论文被查阅或借阅；④电子所可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤电子所可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名：陈静 日期：2006.4.29

导师签名：谭慧波 日期：2006.4.29

第一章 引言

众所周知, CO₂激光器是目前转换效率高、输出功率大、在9~11微米范围内可调谐的一种既可连续工作又可脉冲工作的最常见的分子气体激光器。1964年,贝尔实验室的库马·帕特尔(C. Patel)发明了CO₂激光^[1], 1965年我国第一台可产生大功率激光的器件——CO₂激光器诞生^[2]。

§ 1.1 本论文研究的目的和意义

自问世以来, 封离型、横流型、快速轴流型等形式的CO₂激光器相继出现, 并且其中的大部分器件已实现系列化和商品化^[3]。在这些应用广泛的CO₂激光器中, TEA(Transversely Excited Atmospheric) CO₂激光器的出现是脉冲激光器的一项重大突破^{[4][5][6]}。它可使输出能量达数千焦耳, 输出峰值功率高达几千兆瓦, 能量转换效率达10%~20%^[7], 这种特点使其在激光与物质的相互作用方面具有一些独特的应用。随着这些应用领域的不断推广, 人们不仅需要输出波长为10.6 μm的CO₂激光器, 还需要输出波长为9.6 μm甚至其他波长的CO₂激光器, 由此开展了可调谐TEA CO₂激光器的研究。

高重复频率可调谐TEA CO₂激光器因兼有高脉冲峰值功率、高平均功率和波长可调的优点, 使得它在激光表面清除、冲击硬化、大气污染探测雷达、激光化学、光泵远红外研究等领域有着广泛的应用。这类激光器的调谐方案有注入锁定、低锐度F-P耦合、光栅选线等多种, 其中采用光栅选线的常用方法主要有两种^[8]: 一种是零级耦合输出, 即采用球面镜或平面镜作为全反镜, 工作方式为光栅的一级衍射作为反馈, 零级衍射直接耦合输出, 该方案可以将光栅损失的影响降到最小。另一种是光栅谐振腔方案, 即采用球面镜或平面镜作为输出耦合镜与反射式光栅组成激光谐振腔, 工作方式为一级衍射反馈, 一级耦合输出, 通过控制光栅的转动角度达到对不同谱线的选择, 该方案的优点是腔体结构简单、易于控制。本课题所针对的是其

中的光栅谐振腔调谐 TEA CO₂ 激光器。该激光器在工作时，一方面因为光栅加工误差、光栅零位误差、电机定位误差等误差的存在，另一方面因为光栅转动有滞回现象以及环境影响（主要是振动或者温度变化影响）等原因，使得在输出每条谱线时，得到光斑质量最好的光栅位置，即最佳调谐位置，并不在理论位置，而是在其附近一个小范围内的某个位置，并且这个位置会随时间或环境的变化而产生漂移。为了在使用激光器时获得最好的光斑质量，解决该问题的传统方法是在激光器每次使用之前用热敏纸接收光斑并凭人工经验判断其好坏，然后通过手动调整实现光斑模式的均匀。这种方法不仅繁琐费时，而且带有很大的主观性，很难保证激光器高质量高效率的运转。为了解决这一问题，我们在激光器输出的某些谱线附近，利用探测器件捕获一定量的激光脉冲并将这些光斑图像通过图像采集卡存入计算机，在计算机中对这些图像进行处理，通过参数计算鉴别出符合标准的光斑，再由反馈系统控制电机带动光栅转至输出该光斑的位置，即建立了一套激光谐振腔自动调整系统。该系统用计算机操作代替人工操作、用参数计算代替经验判断，能够稳定激光输出，提高工作效率，具有重要的实用价值。这就是 CO₂ 激光谐振腔自动调整的目的和意义所在。

§ 1.2 激光谐振腔自动调整技术发展简述

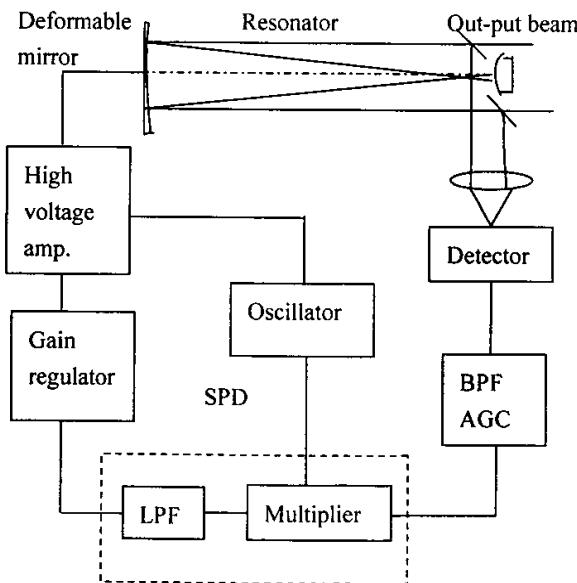
事实上，自从激光器问世以来，光学谐振腔自动调整技术就一直是激光技术研究的一个重要课题。长期以来，人们为了提高 CO₂ 激光器的稳定性得到高质量的光斑输出在谐振腔的自动调整方面做了大量的工作，但是这些工作主要针对非调谐的连续 CO₂ 激光器，从全方位调节腔镜入手，补偿因为谐振腔的不准直而导致的光束质量降低，对于光栅调谐的激光谐振腔进行调整则很少有人涉及。

目前看来，人们对 CO₂ 激光谐振腔自动调整技术的研究大致分为两种情况^[9]，一种是自适应光学谐振腔技术，所谓自适应，就是当外部环境或系统内部结构发生某种变化，系统能自行调节以保持其性能水平的一种能力。自适应光学谐振腔的原理是：实时探测外部扰动对激光腔内波前像差的影响，从而通过对谐振腔反射镜面形

的控制来消除腔内像差，使得激光器输出功率最大，即保证激光器在特定条件下，在最高效率下运行^[10]。除此之外，还有一种方法是通过研究输出光斑特性来实时校正谐振腔的自动准直系统。

首先介绍第一种自适应光学谐振腔技术的发展。自 1978 年 Freeman 等人首次报道闭环自适应激光谐振腔的可行性研究以来^[11]，国内外在校正腔内动态波面误差方面做了大量的工作，取得较大的进步，这些研究的共同之处都是先给谐振腔一个微小扰动，观察输出光束的变化趋势，再逐步校正腔镜使之准直。

华中理工大学光学工程系叶嘉雄、康健等人在九十年代中后期做了这方面的许多工作^{[12][13][14][15]}，他们以古典控制理论中的多变量频域稳定性判据为基础，针对千瓦级 CO₂ 激光非稳腔和五通道弱关联自适应光学系统进行了计算机模拟，分析并证实了此自适应激光谐振腔系统是稳定的。



该模拟实验采用多路高频振荡法^[13]。多路高频振荡方法就是在光学谐振腔中引入多元自适应可变形反射镜构成一个自适应光学谐振腔，可变形反射镜在控制

信号的作用下，实时地实施波面修正，最终使被控参数达到最佳值。这是一个典型的多个时空变量动力学系统，它包括光学谐振腔、波前测量装置和伺服控制系统三部分。图 1.1 是该自适应谐振腔系统的环路框图，其中变形反射镜采用连续表面分立致动器控制，谐振腔为正支共焦望远镜型非稳腔，探测器采用高响应频率的热释电探测器。此工作在理论上研究的比较透彻，但是多为计算机模拟，无具体实验。

另外，关于激光谐振腔的自适应调整，华中科技大学的贺昌玉在 2003 年研究了相关的单片机精密控制系统，他针对 HGL-20 型横流 CO₂激光器光腔设计出一种光腔调节装置^[16]，该装置由单片机控制两个三相六排的步进电机驱动精密丝杆传动达到精确调整激光输出镜的 X、Y 坐标，实现了激光腔镜俯仰、左右两种自由度的调节，很好地起到稳定光腔和手动、自动调节的作用。其控制系统结构图如图 1.2 所示：

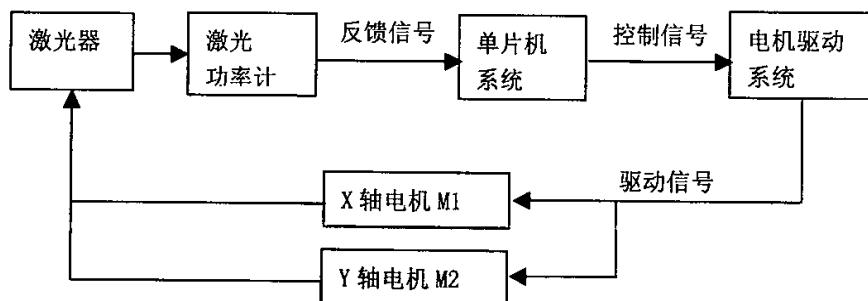


图 1.2 华中科技大学贺昌玉的控制系统结构图

该系统虽然经过调试运行后被证明是稳定的，但其缺点是还不能实现全自动调整，在自适应调整精度下降、效果变差的情况下，必须手动调回初始的记忆状态。

在通过研究输出光斑特性来实时校正谐振腔方面，在九十年代初期，加拿大阿尔伯特大学电子工程系的 D. R. Akitt 等人对 20 千瓦 CO₂激光器的自动谐振腔准直系统进行了研究^{[17][18]}。他们采用的是折叠式光学谐振腔，如图 1.3 所示：

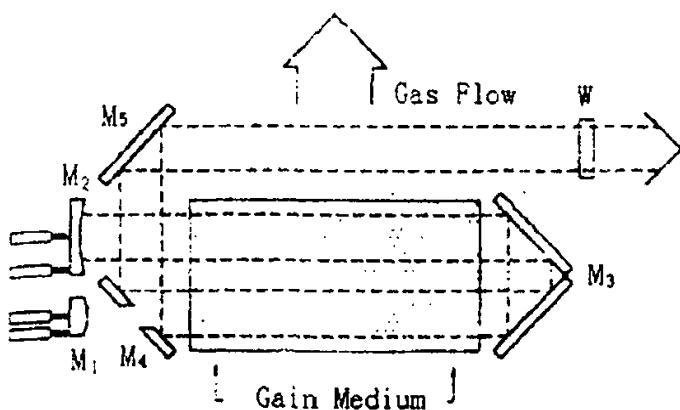


图 1.3 加拿大 D. R. Akitt 等人的折叠式光学谐振腔

在 D. R. Akitt 实验中，把光束投射到一个轮廓传感器上，该传感器由 32 个热敏探测器组成，热敏探测器矩阵被划分成四个象限，在每个象限中，矩阵又被进一步分成三个同心圆弧。这样就可以在距离谐振腔固定距离处实时监控光束的中心位置，使得光束指向角通过光束中心位置确定。其自动阵列控制系统框图如图 1.4 所示：

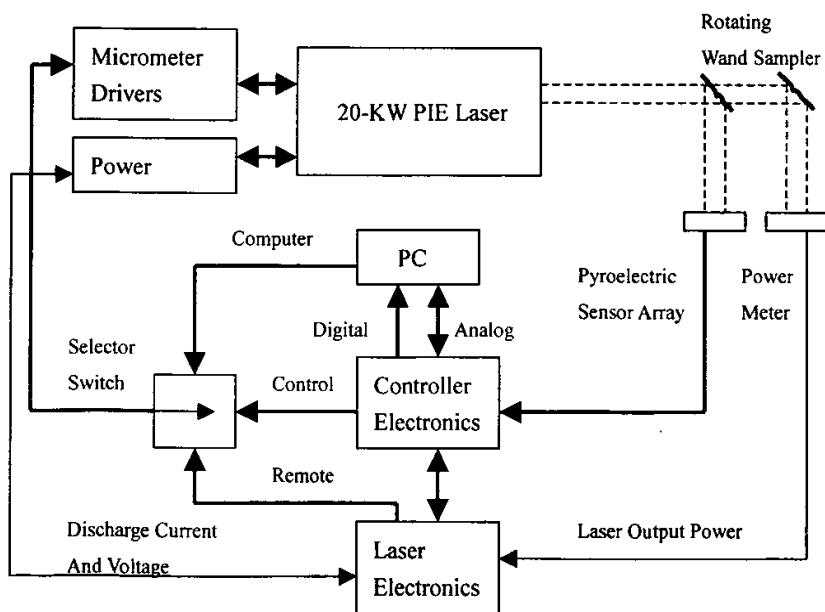


图 1.4 D. R. Akitt 实验中的自动阵列控制系统框图

该系统研究中主要考虑光束质量的两个重要因素：光束的指向角和模式均匀性。通过比较在四个象限内环形布局的探测器输出积分强度，得到水平方向和垂直方向上模式均匀性的描述值；通过环形输出的边缘探测可以获得光束位置（光束指向角）。该实验中设计两个控制环，调节 M₁（凸面镜）控制环形光束的模式均匀性，调节 M₂（凹面镜）控制光束中心位置（光束的指向角），以此保证了激光器始终工作在最佳状态。

综上可以看出，对 CO₂ 谐振腔的自动调整一般选择激光功率或光束指向作为测试参数，通过分析这些参数的变化来相应地调整腔镜，使得输出光束模式均匀。然而对于大能量快脉冲光栅调谐 TEA CO₂ 激光器而言，由于其自身的特点，一般在调试激光器的过程中更多的利用到其光斑特性，所以针对这种谐振腔的自动调整技术与前人的工作应有所不同。

§ 1.3 非制冷焦平面探测技术

激光光斑探测技术是谐振腔自动调整的关键技术之一。由于 CO₂ 激光器输出波段位于长波红外波段，对其输出光斑的探测方法也是多种多样、繁简不一。随着红外探测器件工艺水平的提高和技术的发展，利用非制冷焦平面探测阵列构成的红外热成像系统越来越受到人们的重视。在这里简单介绍一下该探测技术的发展概况。

根据目前红外热成像系统的发展情况及对今后的预测，热成像系统大致可分为三代。第一代红外热成像系统以数目有限的探测单元为特征，借助光机扫描来实现图像探测，同时还需要低温制冷器协同工作；第二代以二维 N×M 元焦平面阵列(FPA)探测器为特征，探测单元数目在万元以上，且自带信号读出电路，其中又分为低温制冷和非制冷两种；第三代称为“灵巧”凝视大阵列焦平面，其特征是集成探测器后续的信号处理电路，包括信号读出电路、前放、模数转换器等^{[19][20]}。

非制冷红外热成像系统的核芯是 UFPA (Uncooled Focal Plane Array 非制冷焦平面探测阵列)，其探测原理是在焦平面上排列着感光元件阵列，从无限远处发射的红外线经过光学系统成像在系统焦平面的这些感光元件上，探测器将接收到光信号

转换为电信号并进行积分放大、采样保持，通过输出缓冲和多路传输系统，最终送达监视系统形成图像。典型的 UFPA 热成像系统的基本构成如图 1.6 所示^[21]：

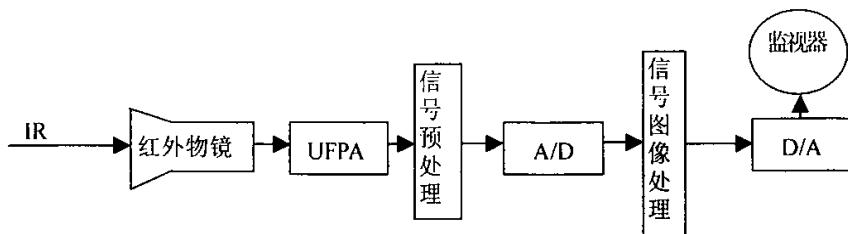


图 1.6 典型的 UFPA 热成像系统的基本构成

UFPA 根据所使用的探测材料可以分为三类：热电偶 UFPA、热释电 UFPA 和微测辐射热计 UFPA。热电偶 UFPA 的工作原理是根据温差电效应，采用微加工技术在每个探测器单元上制作几十对温差热电堆，通过电堆热端和冷端之间的温度梯度变化，将红外辐射转换为电压信号，从而获得与景物对应的热图像。热释电 UFPA 所使用的铁电材料分为两大类^[22]：常规热释电材料和介电热辐射计材料。前者有 TGS、LiTaO₃ 等铁电单晶以及 PZT 铁电陶瓷材料，后者主要有钛酸锶钡(BST)和钪钛酸铅(PST)。其工作原理是根据热释电效应，当外界入射辐射温度发生变化时，这些具有自发电极化特性的晶体材料会因为电极化发生改变而对外显现电性或在外部电路产生电流，利用这些电信号便可以探测到热图像。正是由于热释电材料的这种特性，需要以适当的频率交替改变入射的场景温度和参考温度，才能不断地获得目标探测信号，因此它很明显的一个特征就是需要使用调制。微测辐射热计 UFPA 的敏感元是热敏电阻，使用的材料主要为氧化钒(VO_x)、非晶硅(α -Si)和多晶硅，其工作原理是敏感元材料吸收外界红外辐射，引起自身温度的上升，且电阻阻值随温升的变化而灵敏改变，并造成输出电压改变，输出电压达到的稳定值反映了入射辐射功率的大小。这三类中目前发展较快、前景较好、应用较广的是热释电 UFPA 和微测辐射热计 UFPA。

非制冷焦平面探测器的发展水平直接决定了非制冷热成像系统的发展。在过去的几年内，非制冷焦平面已由原来的小规模，发展到中、大规模 320×240 和 640×480 阵列，在未来的几年内有望获得超大规模的 1024×1024 非制冷焦平面阵列^[23]。像素

尺寸也由 50μm 减小到 25μm，提高了焦平面的灵敏度。随着焦平面阵列规模的不断增大、像素尺寸的进一步减小，非制冷焦平面成像系统不仅在军事领域的应用越来越广泛，在民用领域也得到了成功的应用。

UFPA 的研究居世界领先水平的国家主要有美国、法国、英国和日本^{[24][25][26][27]}。其中美国在这方面的研究开始的最早，发展的最为迅速，目前研究 UFPA 最具有代表性的两家公司就是美国的德克萨斯仪器公司(TI 公司)和霍尼威尔公司(Honeywell 公司)。我国在非制冷焦平面阵列技术上起步较晚，近年来国家投入了大量人力物力用于非制冷焦平面阵列的研究，主要集中在部分高等院校和研究所，如中科院长春光学精密机械研究所和中科院上海技术物理研究所等，目前也取得了初步进展。

§ 1.4 本论文的主要内容

本章在主要介绍了 CO₂ 激光谐振腔自动调整技术的研究背景和发展概况之后，对于本论文主要应用到的非制冷焦平面探测技术作了简单的说明。论文的第二章对光栅调谐 TEA CO₂ 激光谐振腔自动调整系统的整体结构、基本原理和工作流程进行了概括，并在此基础上分别对系统的各个部分做了全面细致的描述。在第三章里，针对系统的光斑鉴别部分，阐述了数字图像处理技术的相关理论，并较为详尽地研究了其中的关键技术，提出了光斑鉴别的简单判据，通过实验给出了光斑鉴别的最终结果以及对该结果的分析。此后的第四章又将光斑鉴别技术运用到光栅调谐 TEA CO₂ 激光谐振腔的稳定性研究，在大量实验数据的基础上从输出能量、光束指向性和远场发散角三方面分别测试了该激光谐振腔在相同谱线之间的稳定性和不同谱线之间的一致性，并分析了影响谐振腔稳定性的内在和外在因素。最后第五章是全文的总结。

第二章 可调谐激光谐振腔自动调整系统整体结构

§ 2.1 系统组成及工作流程

可调谐激光谐振腔的自动调整技术是一种集激光谐振腔技术、激光探测技术、数字图像处理技术和计算机控制技术于一体的综合技术，因此整个实验系统也相应地分为可调谐激光器、光斑探测系统、图像处理软件系统以及计算机控制系统三部分。系统的整体结构硬件设备示意图如图 2.1 所示：电机、光栅、激光器腔体与触发器组成可调谐 TEA CO₂ 激光器；反射镜、漫反射板和红外热像仪组成光斑探测系统；计算机、图像采集卡、伺服电机驱动器和控制电路板组成计算机控制系统。

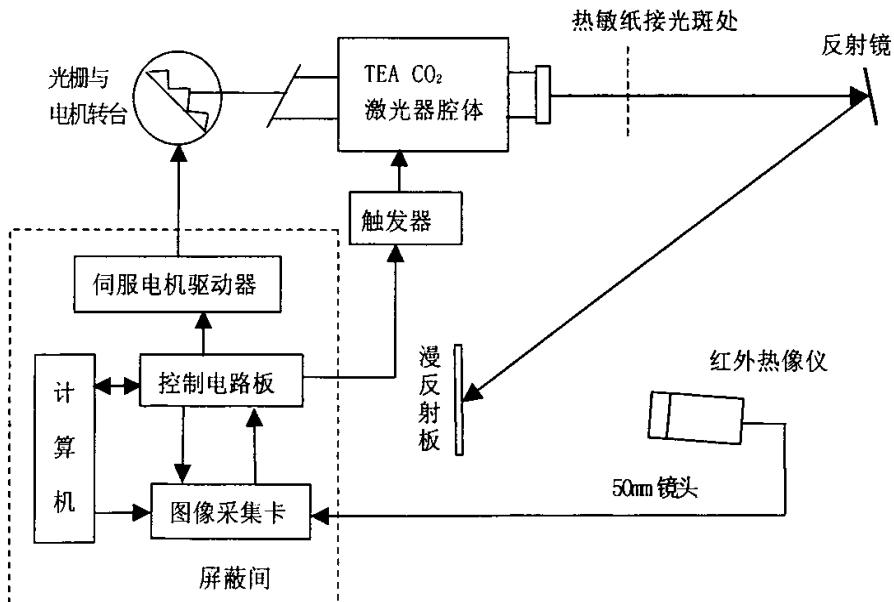


图 2.1 自动调整系统硬件设备示意图

当系统工作时，这三部分互相协调、各司其职，通过有序的组织和控制共同完成对激光谐振腔的自动调整。首先计算机发出命令，由控制电路板给出信号通过电机驱动器控制直驱交流伺服电机带动光栅转动到某一谱线的理论位置，在该位置附

近一个小角度范围内由图像采集卡提取红外热像仪的场同步信号通过控制电路板触发激光器发射一组激光脉冲，该组脉冲通过反射镜到达漫反射板，红外热像仪采集到其漫反射像，并通过图像采集卡存入计算机硬盘，由所开发的光斑鉴别软件对该组光斑进行鉴别并反馈回结果，由直驱交流伺服电机带动光栅转至输出光斑质量最好的位置，即完成了对可调谐激光谐振腔的自动调整。

可调谐 TEA CO₂激光器输出波段范围覆盖 9~11 μm，其谱线根据转动跃迁选择定则可以分为 9P、9R、10P、10R 四支，这里针对这四支中增益较高比较具有代表性的 9R(20) 线、9P(20) 线、10R(20) 线、10P(20) 线做自动调整。在调整时，一般先转动到某一谱线的理论位置，在这个位置存取一幅背景图，编号为 p0。然后在这个位置附近 ± 56" 范围内等间隔改变光栅位置并连续触发激光器使得热像仪采集到 15 个光斑，依次命名为 p1 至 p15，并存入计算机。在这 15 个光斑里进行鉴别挑选出质量最好的光斑，输出此光斑的光栅位置即为该谱线的最佳调谐位置。最后将光栅转动到下一谱线，工作流程与此相同，不再赘述。

以下几小节将分别介绍激光器、光斑探测系统和计算机控制系统三部分，有关数字图像处理软件的开发是本论文的重点工作，将在第三章详细说明。

§ 2.2 光栅调谐 TEA CO₂激光器

选频激光器中多采用反射光栅作为元件。光栅的衍射特性决定了其很好的频率选择能力，尤其适用于腔长较长、增益较高的情况。TEA CO₂激光器采用光栅谐振腔，即以闪耀光栅和球面镜或平面镜组成可调谐激光谐振腔，利用光栅的自准直衍射级实现激光振荡，工作方式为一级衍射反馈，一级耦合输出，通过控制光栅的转动角度达到对不同谱线的选择，该谐振腔结构简单、易于控制^[8]。

如图 2.2 所示，激光谐振腔由 100 线/mm 的金属基底的反射式平面光栅和透过率为 35% 的 ZnSe 凹面镜组成，腔长为 2.1m。光栅的一级衍射效率达 95%，其精确快速的转动和定位由直驱伺服电机完成，可以实现在 20ms 以内的相邻谱线输出转换和 60ms 以内的任意 9~11 μm 波段的两条谱线间的转换。ZnSe 输出镜曲率半径为 10m。

腔内放电电极间距为 50mm、长度为 1000mm，有效放电宽度为 40mm。实验中采用的气体混合比为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4$ ，总气压 33kPa。在自由振荡的情况下，激光器输出的 $10.6 \mu\text{m}$ 激光的单脉冲能量可达 14J。

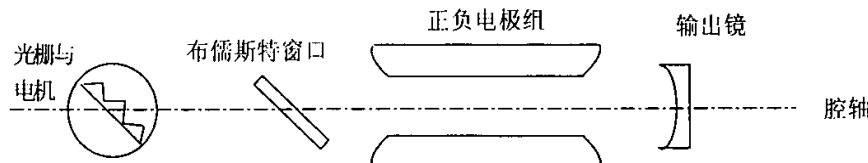


图 2.2 光栅调谐激光谐振腔结构俯视图

该激光器放电电路如图 2.3 所示，得到的近场光斑轮廓为长方形，面积约 $45\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，如图 2.4(a)，激光脉冲 10% 极大值处的全宽度约为 $3\mu\text{s}$ ，半极大值处全宽度小于 200ns，如图 2.4(b)。

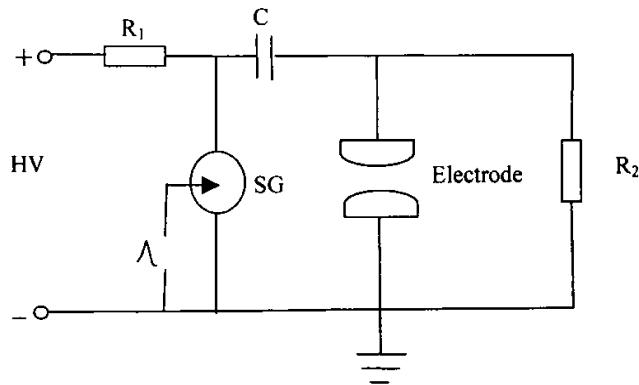


图 2.3 光栅调谐 TEA CO_2 激光器放电电路

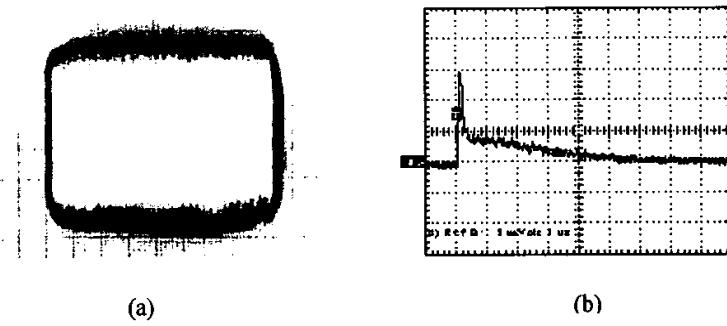


图 2.4 光栅调谐 TEA CO_2 激光器输出光斑形状和脉冲波形

§ 2.3 光斑探测系统

CO₂激光器输出波段位于 9~11μm，属于长波红外波段，人们对其光斑的探测方法多种多样，一般从探测器接收光路方面可以分为直接探测和间接探测两种方法。直接探测即直接接收输出光束，这种探测方法由于简单直接，所探测到的光斑与实际光斑的误差较小，但是由于激光脉冲能量很高，要直接接收输出光束就要对其进行多层衰减才不至于损伤探测元件，所以一般探测光路比较复杂，极易损伤探测器，并且因为需要大幅度衰减一般很难探测远场光斑。间接探测即不直接接收输出光束，这种方法又可以分为两种：荧光探测和漫反射探测。其中荧光探测是指输出激光经过荧光材料转换成可见光，然后利用 CCD 等探测可见光的成像器件捕获其光斑图像^[28]。这种方法一般光路简单，CCD 等探测器的使用也较为普遍，但是由于 CO₂激光转换为可见光的过程跟荧光材料的好坏有很大关系，所以误差比较大，探测精度不高。漫反射探测是将激光光束输出到漫反射板，利用探测器捕获光束的漫反射像。采用这种方法不易损伤探测元件，探测到的图像基本反映光斑形状，而且可以探测远场光斑。综合上述几种探测方案，本系统采取漫反射探测方案探测激光光斑。

近几年来红外探测器的迅速发展给 CO₂激光的探测带来了便利，可以探测这个波段的探测器也有很多种，如四象限探测器和 PSD 位置探测器^{[29][30]}，还有碲镉汞探测器以及非制冷焦平面阵列探测器等。这些探测器各有优缺点，四象限探测器灵敏度和探测精度较高但必须附带制冷系统使得安装和调试十分复杂；PSD 位置探测器可以直接定位光斑中心但灵敏度和探测精度不高；碲镉汞探测器的灵敏度和探测精度很高但价格又十分昂贵。然而非制冷焦平面阵列(UPPA)自七十年代后期开始研制以来，取得了长足的发展；近几年来对它的应用已经从军事领域扩展到了民用方面。这种探测器调试方便，不需要致冷，灵敏度高，精度高，探测与信号处理一体化，图像采集简单易行，便于二次开发。综合考虑操作复杂度、探测精度和价格等因素，本系统选取非制冷焦平面型红外热像仪作为激光探测器件，其中的核心成像器件是多晶硅材料的微测辐射热计 UPPA。

该红外热像仪的外观如图 2.5 所示，主要参数如表 2.1 所示：

表 2.1

系统类型	非制冷焦平面
光谱范围	8~14μm
温度分辨率	0.06°C
像素	320×240 像素
数字化图像	16Bit
空间分辨率	1mRad
精度	±1°C ±1%
测温范围	-20°C~400°C (可扩展到 1500°C)
帧频	50 幅/秒
视频输出	PAL/NTSC
聚焦范围	0.5m~∞
镜头尺寸	50mm
存储	通用 CF 卡 (1000 幅)
体积	164mm×90mm×98 mm
重量	1.5 kg
工作环境	-20~+50°C

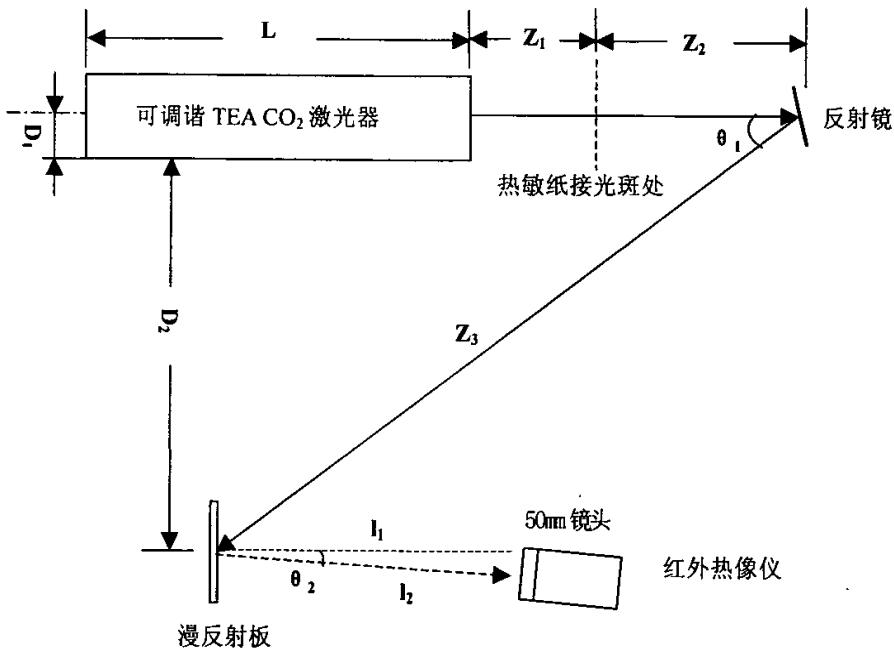
图 2.5 非制冷焦平面
红外热像仪

图 2.6 光斑探测系统光路

图 2.6 所示的是光斑探测部分的详细光路。输出光束经过反射镜后到达漫反射板，由红外热像仪接收漫反射光斑，为了防止激光脉冲的能量超过红外热像仪的饱和阈值损伤探测像元，一方面要在热像仪镜头外用直径为 50mm 的锗玻璃高温镜头衰减光束，另一方面要将红外热像仪的光圈缩小。另外，在激光器近场 Z_1 距离处可以用热敏纸接收光斑以便与热像仪探测到的光斑相比较，角度 θ_1 、 θ_2 可以根据测量相关距离计算出来。

§ 2.4 计算机控制系统

计算机控制系统部分的核心是控制电路板，它一方面通过激光器的触发器控制激光脉冲与红外热像仪中的 UFPA 时序同步，一方面通过电机的伺服驱动器控制直驱交流伺服电机的转动。

控制激光脉冲与 UFPA 时序同步是自动调整中的一个关键技术，激光脉冲的脉宽很窄，在半极大值处只有 200ns，若不能很好的将触发激光脉冲的时间和 UFPA 的帧频同步，则很有可能捕获到半个光斑甚至完全捕获不到光斑，因此这里首先介绍如何通过控制使得红外热像仪能够捕获到完整的光斑图像。

红外热像仪中非制冷焦平面探测器的像元数为 320×240 ，场周期 20ms，其中场同步信号脉宽为 $160\mu\text{s}$ ，时序如图 2.7 所示，其工作机理为：当激光辐射能量到达焦平面时，多晶硅材料吸收能量，温度上升，材料阻值变化使电桥失衡，积分电路开始积分导致负载电压变化从而将光信号转变为电信号。热像仪在开机后即连续工作，输出标准 PAL 制视频信号。在一个场周期内，每一行像元顺次积分，在第二行像元积分的同时读出第一行像元积分的数据，每一行像元积分的时间约为 $64\mu\text{s}$ 。等到 240 行像元全部积分完毕后，探测器清零，准备下一场积分。该类型成像探测器件既不同于机械扫描式成像器件，也不同于完全凝视型成像器件，因其在某个时刻（或瞬态）只有一行 320 个像元在积分，我们称这种以电扫描型红外探测器为成像器件的热像仪为“准凝视型”红外热像仪。虽然激光脉冲的半宽度为 200ns，总时间在 $3\mu\text{s}$ 左右，远小于热像仪的行积分时间，但是由于多晶硅材料对辐射能量的存储作用，加

之探测器的响应上升时间很短，并且其采用的是探测一场后统一清零的方式，所以原理上这种“准凝视型”红外热像仪能够捕捉到完整真实的光斑图像^[31]。

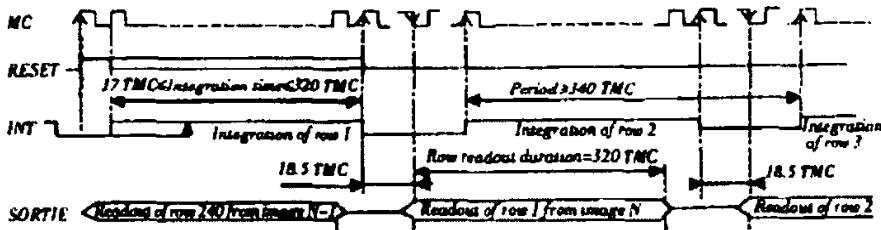


图 2.7 红外热像仪工作时序图

然而，由于激光器发射单脉冲时刻与热像仪积分过程在时间上的这种随机性，所以要想实现对完整光斑图像的稳定捕获必须采取同步措施。实现同步的方法主要有四种^{[32][33]}：第一种是利用激光器的电源信号来控制成像器件同步；第二种是用激光信号转化的电信号来控制成像器件同步；第三种是利用成像器件的场周期信号控制激光电源；第四种是利用计算机在图像采集过程中发出信号控制激光电源。前两种方法需要控制成像器件，这对于技术刚刚成熟的非制冷红外焦平面器件来说要求较高，且难以主动控制激光脉冲的发射。对于第三种方法，由于热像仪视频信号中分离出的单个场同步信号与计算机控制的图像采集过程无关，并且软件中采集函数的启动时间与图像采集卡真正开始采集的场同步信号之间的关系也是随机的，导致延时误差经常达到 1 场以上。这样由视频场同步信号来同步触发激光器的方法不能在一场比赛内稳定捕获完整的光斑图像，只能先由计算机开始一个采集连续场图像序列的过程，然后在这个时间内产生同步信号触发激光器发射光脉冲，最后在所保存的图像序列中挑出捕获到的光斑图像。这样做的缺点是捕获光斑所用时间较长，而且难以由计算机自动完成。因此本系统采用的是第四种方法，即由计算机统一控制触发激光器和采集一场图像这两个过程，并在软件中使它们同步。

控制系统的工作时序图如图 2.8 所示。从用户程序调用采集函数启动采集一场的线程到硬件执行该线程的时间 t_1 是不确定的，若要使采集与场时序同步，采集命令被

执行后即切入场时序等待场同步信号，然后不等采集结束立即返回用户程序，从采集开始时间到调采集函数返回时间的延时约在 500μs 到 1.5ms 之间，在返回用户程序后立即由计算机从串口给控制电路板输出一个中断信号，该信号经过适当延时 t_2 后输出一个符合要求的触发信号触发激光器发射光脉冲，采集结束后再从缓存中读取该场的数据保存为位图文件。应用这种方法，只采集一场数据即能捕获到完整、清晰的单脉冲 CO₂激光光斑图像，采集时间小于 100ms。

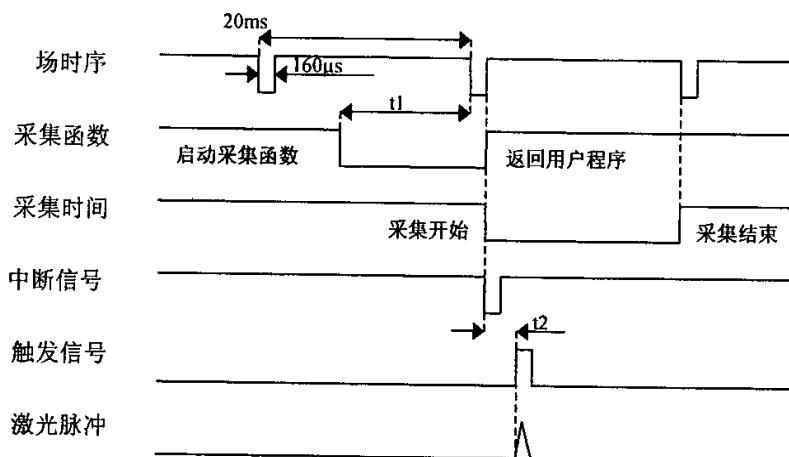


图 2.8 控制系统工作时序示意图

控制电路板控制电机转动是通过伺服驱动器完成的。本激光器采用直驱交流伺服电机带动光栅转动，与驱动光栅转台通常采用的高频步进电机相比，它具有加速性能好，过载能力强，与高精度光电编码器配合使用可实现闭环控制，从而可实现快速启停和高精度定位等优点^[34]。该电机的额定转速为 200min⁻¹，最大转速为 500min⁻¹，角分辨率为 1.24 角秒/步，绝对定位精度为 15 角秒，重复定位精度为 1.3 角秒，角加速度为 980rad/s²。本系统利用伺服驱动器可以设置脉冲驱动的优点，在设定了 2 角秒/脉冲的参数后，通过改变向驱动器发送的脉冲数，可以达到改变电机转动的角度。另外通过设置电平的高低可以控制电机转动的方向，这里高电平控制顺时针旋转，低电平控制逆时针旋转。

第三章 基于 Matlab 的激光光斑鉴别技术

§ 3.1 数字图像处理的相关技术

数字图像处理技术起源于 20 世纪 20 年代，经过几十年的迅速发展，目前已成为工程学、计算机科学、信息科学、统计学、物理学、化学、生物学、医学甚至社会科学等领域各学科研究的对象。如今数字图像处理技术已给人类带来了巨大的经济和社会效益，它不仅在理论上得到了深入地发展，在应用上也已成为科学研究、社会生产乃至人类生活中不可缺少的强有力的工具。

§ 3.1.1 数字图像处理相关理论

数字图像处理 (Digital Image Processing) 一般用计算机处理或实时的硬件处理，因此也称为计算机图像处理 (Computer Image Processing)^[35]。其优点是处理精度高，处理内容丰富，可进行复杂的非线性处理，有灵活的变通能力，一般来说只要改变软件就可以改变处理内容，然而由于其图像信息量大，处理速度就相对较慢。但是本系统对处理速度要求不高，因此在光斑鉴别软件的开发中主要运用的是数字图像处理技术。

数字图像处理方法大致可以分为两大类，即：空域法和变换域法。其中变换域法是首先对图像进行正交变换，得到变换域系数阵列后再施行各种处理，处理后再反变换到空间域得到处理结果。这种方法在本论文中没有涉及。而空域法是把图像看作是平面中各个像素组成的集合，然后直接对这个二维函数进行相应的处理，可以分为邻域处理法和点处理法。邻域处理法主要包括梯度运算、拉普拉斯算子运算、平滑算子运算和卷积运算等。点处理法即灰度处理，包括面积、体积、重心运算等。本论文主要用到的是这两种处理方法。

1. 图像平滑化

一幅图像可能存在着各种寄生效应。这些寄生效应可能在传输中产生，也可能在量化等处理过程中产生。一个较好的平滑方法应该是既能消掉这些寄生效应又不使图像的边缘轮廓和线条变模糊。这就是研究图像平滑化处理所要追求的主要目标。图像平滑化处理方法主要有邻域平均法，低通滤波法，多图像平均法等等。本论文中对图像的平滑处理主要使用邻域平均法。

邻域平均法的基本思想是用几个像素灰度的平均值来代替每个像素的灰度值。假定有一幅 $N \times N$ 个像素的图像 $f(x, y)$ ，平滑处理后得到一幅图像 $g(x, y)$ 。 $g(x, y)$ 由下式决定：

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(m, n) \in S} f(m, n) \quad (3.1)$$

式中 $x, y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ， S 是 (x, y) 点邻域中心的坐标的集合，但其中不包括 (x, y) 点， M 是集合内坐标点的总数。式 (3.1) 说明，平滑化的图像 $g(x, y)$ 中的每个像素的灰度值均由包含在 (x, y) 的预定邻域中的 $f(x, y)$ 的几个像素的灰度值的平均值来决定。图 3.1 给出了两种从图像阵列中选取邻域的方法，均以一点为中心作圆，选取该圆内部或边界上的点的集合，其中 (a) 为四邻域，(b) 为八邻域。

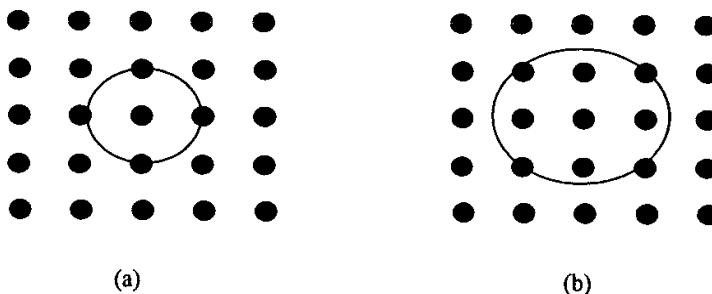


图 3.1 邻域选取方法示例

图像处理结果表明，类似于图 3.1 的选择邻域的方法对抑制噪声是有效的，但是随着邻域的加大，图像的模糊程度也愈加严重。因此应选择合适的邻域，使得既不让图像的边缘轮廓过于模糊，又能够达到图像平滑的目的。

2. 图像分割

图像处理的一个主要分支就是图像分析，这类处理的输入仍然是图像，但是所要求的输出是对已知图像或景物的描述^[36]。为了描述图像，首先要进行图像分割，分割的目的是把图像空间分成一些有意义的区域。最常用的图像分割方法是把图像灰度分成不同的等级，然后用设置灰度门限的方法确定有意义的区域或欲分割的物体之边界。

假定一幅图像具有图 3.2 所示的直方图，可以设一个阈值 T ，把直方图分成两部分， T 的选择要本着以下原则： B_1 应尽可能包含与背景相关联的灰度级，而 B_2 则应包含物体的所有灰度级。当扫描这幅图像时，从 B_1 到 B_2 之间的灰度变化就指示出有边界存在。当然，为了找出水平方向和垂直方向上的边界，要进行两次扫描。为了得到边缘图像，一种方法是把图像变成二值图像，另外还有一种半阈值法，这种方法是将灰度级低于阈值的像素灰度变换为 0，而其余的灰度级不变，仍保留原来的灰度值。总之，设置灰度级阈值的方法不仅可以提取物体，也可以提取目标物的轮廓。这些方法都是以图像直方图为基础去设置阈值的。

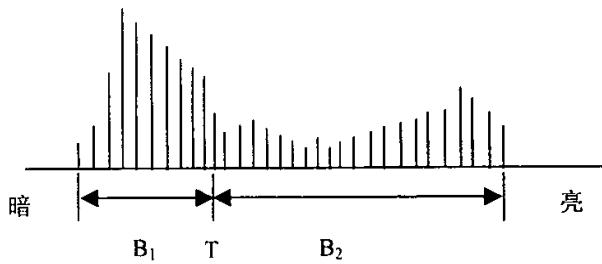


图 3.2 图像 $f(x,y)$ 的直方图

对于复杂图像，在许多情况下对整幅图像用单一阈值不能给出良好的分割结果。例如，图像背景不是很均匀，在图像的中间部分物体和背景的灰度有反差，但在边缘部分背景和物体的亮度差不多，那么如果在整幅图像中使用单一阈值，很容易把背景当作物体分割下来。这时我们可以先进行灰度均匀性校正再使用单一阈值进行分割处理或者选取灰度比较均匀的小块进行处理。

§ 3.1.2 基于 Matlab 的数字图像处理

Matlab 软件开发于七十年代，经过飞速的发展，现在已经成为功能完善、可扩展性强、界面友好、使用方便的新一代科技应用软件，在国内外广泛流行。由于它在图像处理、数值计算、数据分析等方面功能强大，本系统采用 Matlab 软件作为数字图像处理工具。根据上一小节的数字图像处理基本理论，这一小节介绍如何利用该软件实现数字图像处理。

实际获得的图像一般都因受到某种干扰而含有噪声。根据噪声和信号的关系可以将其分为两种形式^[37]：加性噪声和乘性噪声。加性噪声与图像信号无关，而乘性噪声有关，或是某像素处的噪声与该像素处的信号有关，或是某像素处的噪声与该像素处的信号以及其邻域的信号都有关。另外，还可以根据噪声服从的分布对其进行分类，这时可以分为高斯噪声、泊松噪声和颗粒噪声等。一般情况下的噪声通常为加性高斯噪声。

要消除这些噪声就要对图像进行平滑滤波。Matlab 工具箱里提供了三种滤波方法去除图像噪声：线性滤波、中值滤波和自适应滤波。这里只介绍线性滤波。根据上一小节的图像平滑理论，采用邻域平均滤波能够去除通过扫描得到的颗粒噪声。

在 Matlab 中邻域平均滤波基于二维卷积处理，处理时首先产生一个平滑滤波模板 h ， h 根据邻域选取：如果选取的是四邻域，则 h 为 2×2 模板，如图 3.3(a)；如果选取的是八邻域，则 h 为 3×3 模板，如图 3.3(b)；对均值滤波模板加以修改就可以得到加权平均滤波模板，如图 3.3(c)；另外考虑到距离越近的点对中心点的贡献比较大，加权系数越大，可以将加权平均模板改为高斯模板，如图 3.3(d)，这个模板通过采样二维高斯函数得到的。

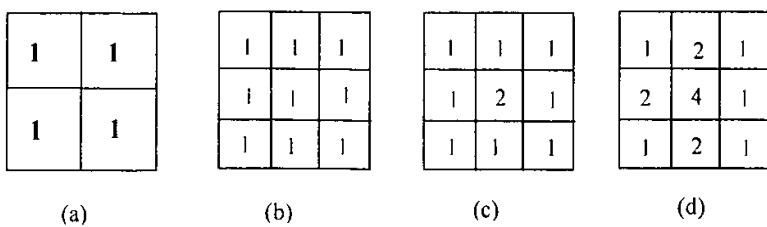


图 3.3 平滑滤波模板示例

选取平滑模板之后，对模板进行归一化，然后用归一化后的模板与图像矩阵做二维卷积，这里可以利用基于卷积的函数，如 conv2、filter2 等。设待平滑的图像灰度矩阵为 I ，平滑后的图像灰度矩阵为 J ，则示例语句如下：

```

h = [ 1 1
      1 1 ]; %产生平滑滤波模板
h = h/4; %对滤波模板归一化
J= conv2(double(I), double(h)); %图像平滑化
figure, imshow(J)

```

§ 3.2 光斑鉴别软件系统的设计

光斑鉴别，即是在一组具有某种相关性的光斑里利用计算机进行相应的参数计算识别出图像质量最好的光斑。该软件基于图 2.1 所示的实验系统。在红外热像仪捕获到某一条谱线理论位置附近 $\pm 56''$ 范围内的 15 个光斑之后，通过图像采集卡将这组光斑存入计算机，然后利用光斑鉴别软件分别对各个光斑进行图像处理并计算参数，从中挑选出参数值最大的那个光斑，给出该光斑图像和序号，将鉴别结果保存。

§ 3.2.1 光斑图像预处理

计算机中存取的原始光斑为图像采集卡存取的光斑图像，由于图像采集卡与红外热像仪没有完全匹配，显示方式有所不同。一般来说，摄像机获取图像形成视频

信号是用扫描的方式隔行顺序进行的，先扫描完奇行形成一幅奇场图像，再扫描偶行形成一幅偶场图像，然后将奇偶场的图像叠加形成一幅完整的图像。这种隔行方式在同样的分辨率、没有因人眼惰性有限而带来太大闪烁的情况下，视频信号的频带带宽几乎减低了一倍，节省了宝贵的通信资源。图像采集卡默认的扫描方式即为这种隔行方式，而红外热像仪采用逐行扫描获取视频信号。所以必须将图像采集卡选为逐行方式扫描显示的才是一幅完整的图像，然而在采集卡和热像仪屏幕显示比例同为 4:3 并且采集卡的显示尺寸比热像仪显示尺寸大一倍的情况下，图像采集卡选择逐行扫描方式显示的图像，也就是计算机里存取的光斑图像，比红外热像仪上显示的光斑图像在水平方向上拉伸了一倍。因此在进行图像处理之前要把图像复原为红外热像仪上显示的真实光斑图像才会让光斑鉴别更加准确。

另外，由于激光光束在传输的过程中受到的外界环境的影响、衰减系统的影响，以及热像仪本身背景不均匀的影响，使得通过计算机所存储的光斑图像中包含了各种噪声，其中主要就是外界杂散光噪声，其次还有热像仪信号处理电路中的高频噪声^[38]。这些噪声在图像上表现为两方面，一方面使图像的背景不均匀不稳定，对有用的图像信号造成了干扰，另一方面，在图像上形成了异常点，即某个像素的灰度与周围邻域内像素灰度相比呈现异常偏高或偏低，产生了颗粒噪声。为了获得更好的图像质量，便于图像分析，需要对光斑图像进行去噪处理，使图像信号更真实更清晰。

综合上述两方面原因，对原始光斑图像的预处理也相应地分为两个方面：一方面要复原真实光斑图像，另一方面要去除图像的噪声干扰。

首先复原光斑图像。因为热像仪像元数为 320×240，其屏幕显示尺寸也为 320×240，而图像采集卡屏幕显示尺寸为 768×576，并且由于选择逐行扫描方式，光斑图像只显示在图像的上半部分，图 3.4(a) 所示的即是 9P(20) 线某光斑的原始显示图像。由于屏幕显示只利用到整幅屏幕的上半部分，因此为了减少不必要的数据冗余，截取整幅图像中的显示部分并去除多余的温度指示，得到如图 3.4(b) 所示的图像，其尺寸为 233×634。利用 Matlab 中的 imresize 函数再将其水平方向上的拉伸复原，

此时显示比例为 4:3，显示尺寸为 233×311 ，与热像仪一致，如图 3.4(c)。

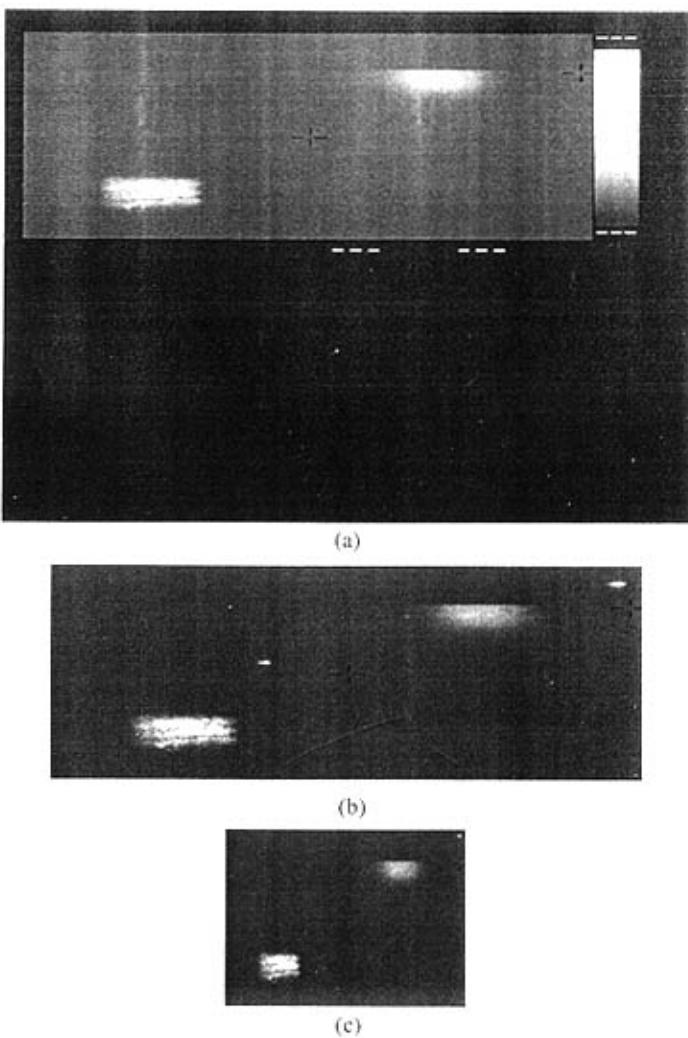


图 3.4 9P(20) 线某光斑复原图像示意图

其次，对复原后的光斑进行去噪处理。对于背景干扰采用背景相减法去噪：在每次实验所存储的一组光斑图像 $p0$ 至 $p15$ 中， $p0$ 为不发射激光脉冲存取的背景图，因此每次进行图像分析时可以使一组中的各光斑灰度矩阵与该组中的背景图 $p0$ 的灰度矩阵相减，既能消除杂散光噪声，又能消减因红外热像仪的不稳定而带来的背景误差，给轮廓检测带来了方便。然后利用邻域平均法使图像平滑化，既能够消除热

像仪所带来的高频噪声，又有利于 MATLAB 对该图像进行处理。图 3.5 为 9P(20) 谱线某一个光斑去噪前后的图像，其中 (a) 为原光斑，(b) 为减去背景后的光斑，(c) 为平滑后的光斑。

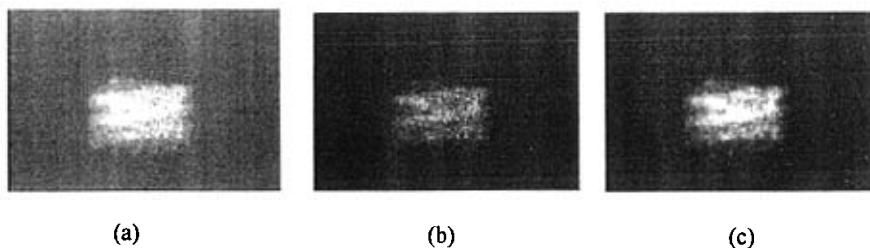


图 3.5 9P(20) 线某光斑去噪前后的图像

§ 3.2.2 光斑图像分割

如何通过图像处理评价光斑质量是该鉴别系统的关键技术，根据人们的经验，判断光斑的好坏一般依据光斑的形状和强度两个方面。形状方面包括光斑的轮廓是否接近理想光斑，边缘是否饱满等，强度方面包括光斑强度的大小、均匀性和对称性等。计算机模拟的这些判断标准越精确，鉴别的误差就会越小。针对该系统所使用的 TEA CO₂ 激光器输出光斑的情况，并综合考虑精确度和复杂度两个方面，我们选取光强的大小、均匀性和对称性作为图像鉴别的依据。

要从光斑图像上判断光斑的强度大小、均匀性和对称性等，必须先要进行图像分割，检测出光斑的轮廓，把光斑从背景中分离出来。进行预处理后的光斑即可进行图像分割，分割的目的是把图像空间分成一些有意义的区域，这里也就是要把光斑和背景分割开来。最常用的图像分割方法是把图像灰度分成不同的等级，然后用设置灰度阈值的方法确定有意义的区域或欲分割的物体之边界^[35]。而灰度阈值的选取本身就是数字图像处理技术中的难点^[39]，在这里，绘出去噪以后的光斑图像的直方图，图 3.6 所示的即为图 3.5(c) 所示光斑的灰度直方图，通过该图可以看出，绝大部分背景灰度级集中在 20 以下，光斑灰度从 20 到 255 均有分布，因此选取图像分割的灰度阈值 T 为 20。

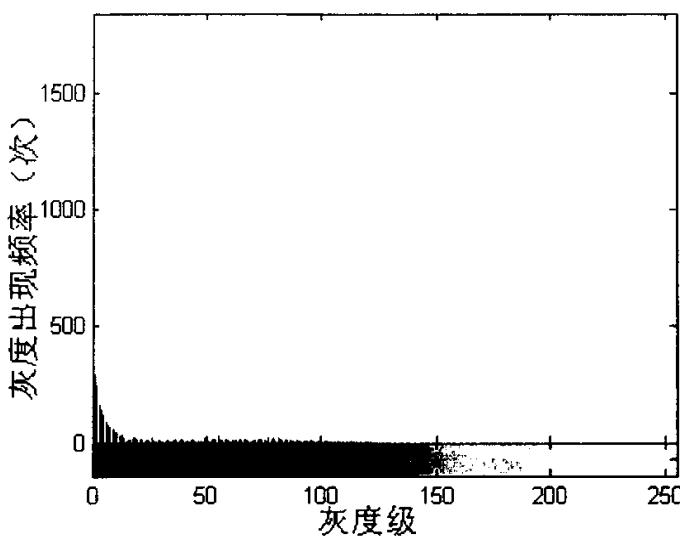


图 3.6 9P(20) 线某光斑去噪后灰度直方图

设分割前光斑灰度矩阵为 $Gray$, 分割后光斑灰度矩阵为 $SpotGray$, 在 MATLAB 里建立与光斑灰度矩阵 $Gray$ 相同大小的模板矩阵 $Temp$, 模板内原图像灰度大于或等于阈值 T 的点设为 1, 原图像灰度小于阈值 T 的点设为 0, 如式(3.2)所示:

$$Temp(i, j) = \begin{cases} 1 & Gray(i, j) \geq T \\ 0 & Gray(i, j) < T \end{cases} \quad (3.2)$$

将光斑矩阵 $Gray$ 与模板矩阵 $Temp$ 作点乘即可将光斑分割出来, 如式(3.3)所示:

$$SpotGray = Gray.*Temp \quad (3.3)$$

分割后的光斑图像如图 3.7 所示, 除光斑外其余背景灰度均为 0:

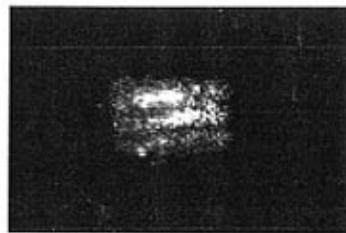


图 3.7 9P(20) 线某光斑分割后的图像

§ 3.2.3 光斑参数计算

根据所选取的光斑强度的大小、均匀性和对称性可以设置相应的光斑图像质量参数，利用分割出的光斑图像可以分别计算这些参数。

首先计算光斑强度大小。实验中捕获光斑时要预先调节好红外热像仪的光圈和焦距，并在软件处理时选取合适的灰度等级，使得在图像的灰度直方图里光斑灰度大致均匀分布在灰度等级之内，这样其亮度就不至于饱和或过于暗淡。此时利用光斑轮廓内各个像素的灰度值求和，得到的灰度总和即可代表光斑强度，记为 I_0 。

其次，判断光强均匀性采用计算光斑图像的形心与质心偏差的方法。这里的形心和质心借用物理学中形心和质心的概念，前者表示光斑形状的中心，后者表示光斑的强度加权平均中心。系统确定光斑形心是在已检测出光斑轮廓的图像基础上，先求出光斑图像的行灰度之和及列灰度之和，平滑这些灰度曲线，求出灰度最大值，通过设定的阈值 T_1 对该曲线从左至右依次进行检测，将大于 T_1 的第一个点的位置 x_1 和最后一个点的位置 x_2 记录下来，然后设定阈值 T_2 用同样的方法再将纵坐标上 y_1 、 y_2 找出，则通过坐标 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 可以根据式(3.4)确定光斑的中心点 (x, y) 。

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}, y = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (3.4)$$

这里应该注意的是，根据高斯基模光束包含在发散角内的功率占光束总功率的 86.5%^[40]，一般取灰度最高值的 13.5% 作为阈值，所以选取的阈值 T_1 、 T_2 均为检测出灰度最高值的 13.5%。图 3.8 绘出的就是图 3.7 所示的 9P(20) 线某个光斑的行灰度和曲线，图 3.9 绘出的是列灰度曲线，其中(a) 为未平滑的灰度和曲线，(b) 为平滑后的灰度和曲线。

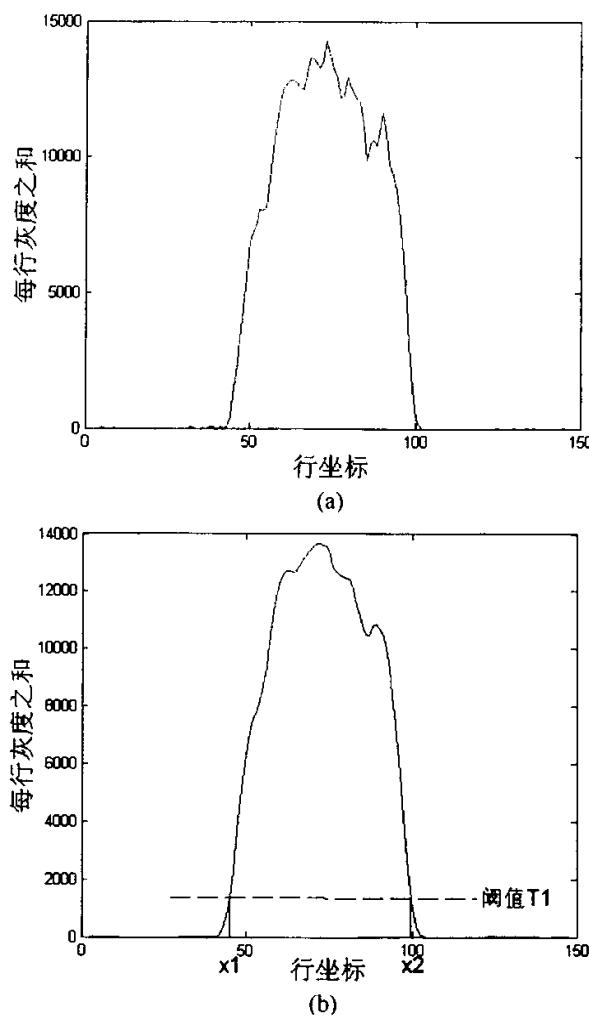
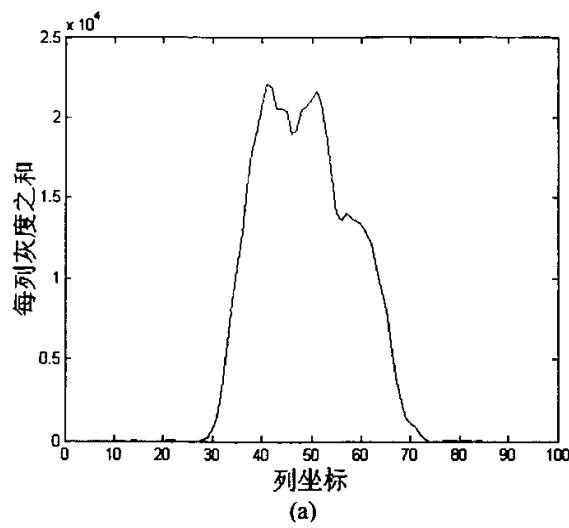


图 3.8 9P(20) 线某光斑行灰度和曲线



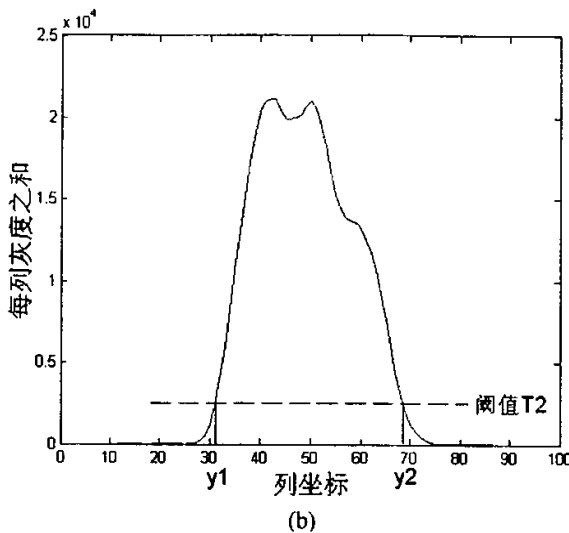


图 3.9 9P(20) 线某光斑列灰度和曲线

物理学中，计算质心坐标的公式为(3.5)式，对于光斑图像而言， x_i 、 y_i 分别代表第*i*个像素的横轴和纵轴坐标值， C_i 代表第*i*个像素的灰度值：

$$x = \frac{\sum_i x_i C_i}{\sum_i C_i}, y = \frac{\sum_i y_i C_i}{\sum_i C_i} \quad (3.5)$$

由此可求出质心(\bar{x} , \bar{y})与形心(x , y)的偏差值 Δd 为：

$$\Delta d = \sqrt{(\bar{x} - x)^2 + (\bar{y} - y)^2} \quad (3.6)$$

最后计算光斑强度对称性。求对称性借用四象限探测器定位光斑中心的算法，根据计算出来的形心将光斑分为四部分，如图 3.10 所示，分别计算这四部分的灰度和 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 ，将光斑上半部分灰度与下半部分灰度相减得出其关于 x 轴的不对称度 E_x ，将光斑左半部分与右半部分相减得出其关于 y 轴的不对称度 E_y ， E_x 和 E_y 的最大值均为 1，将两者耦合得总不对称度 E ，如式(3.7)、(3.8)、(3.9)所示：

$$E_x = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (3.7)$$

$$E_y = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (3.8)$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (3.9)$$

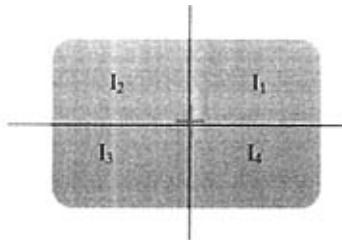


图 3.10 求光斑对称性示意图

综上可以看出，光斑强度 I_0 越大该光斑图像质量越好，而光斑不均匀度 Δd 与不对称度 E 越小该光斑图像质量越好。如果把这三个参数处理为数值取向一致并且将其归一化则能使参数判断更加方便直接。因此根据分割后的光斑图像(图 3.7)求出光斑图像的总像素数 S ，设单个像素的饱和灰度为 I_s ，对这三个参数分别进行处理得：

$$par1 = \frac{I_0}{S \times I_s} \quad (3.10)$$

$$par2 = 1 - \frac{2\Delta d}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (3.11)$$

$$par3 = 1 - \frac{E}{\sqrt{2}} \quad (3.12)$$

为了便于比较，将这三个参数进行耦合得：

$$par = \rho_1 \cdot par1 + \rho_2 \cdot par2 + \rho_3 \cdot par3 \quad (3.13)$$

其中， ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为根据三个参数重要性不同而设的权重因子，一般来说同一组光斑位于同一谱线附近，光斑形状和强度相差不大，主要是对称性和均匀性有所差别，所以 ρ_1 取值一般较小， ρ_2 、 ρ_3 相对较大。

§ 3.2.4 软件流程

整套图像处理软件基于 Matlab 设计，由两部分组成：函数 SpotPar 和函数 BestSpot。函数 SpotPar 是子程序，实现的功能是针对一幅光斑图像进行预处理后将光斑从背景中分割出来，并计算出该光斑参数 par 。函数 BestSpot 是主程序，实

现的功能是：首先读取一组光斑图像，判断这组光斑里有无空光斑，若有空光斑则将其图像质量参数 *par* 设为 0，对于其余非空光斑则分别调用子程序 SpotPar 计算各自的图像质量参数，然后比较这组光斑的参数，参数值最大的光斑图像即为图像质量最好的光斑，输出此光斑的光栅位置为最佳调谐位置，显示该光斑的图像、序号及灰度分布图，并将其序号保存为文档以便控制程序调用该结果将光栅转动到最佳调谐位置。

主程序 BestSpot 流程图如图 3.11 所示：

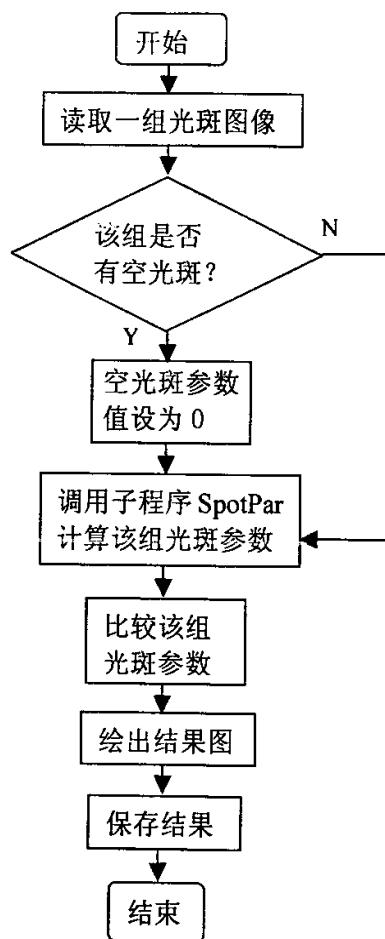


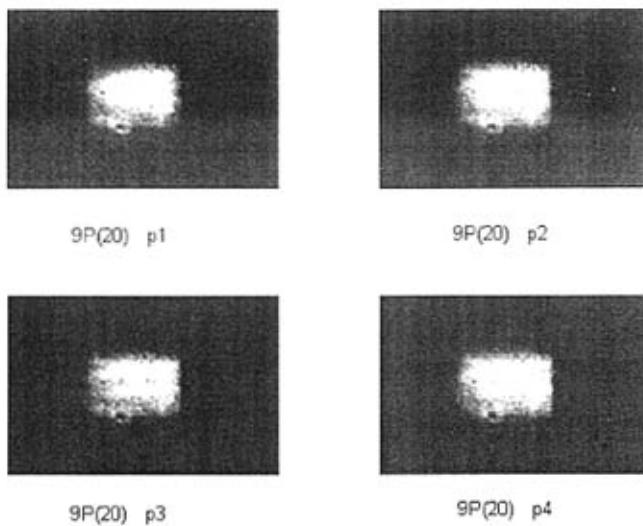
图 3.11 程序流程图

§ 3.2.5 实验结果

根据第二章图 2.1 所示的硬件设备示意图建立实验系统，使光栅调谐 TEA CO₂ 激光器工作在 30KV、1 个大气压的条件下，分别输出 9R(20)、9P(20)、10R(20)、10P(20) 四条谱线，在这四条谱线附近按照第二章 2.1 小节介绍的工作流程分别获取四组光斑图像存入计算机，然后利用所开发的软件对这四组图像进行鉴别，均获得了成功。经多次实验证明，通过该软件鉴别出的最佳调谐位置与通过人工鉴别出的位置误差在±16 角秒以内，由于 CO₂ 激光输出的每两条谱线之间相差约 160”，所以鉴别误差在±10% 以内。以下仍以 9P(20) 线为例介绍光斑鉴别实验所得的结果。

计算机控制红外热像仪在 9P(20) 线附近±56” 范围内捕获一组光斑，这一组光斑有 15 个，如图 3.12 所示，输出相邻两个光斑的光栅位置均相差 8”。

实验中，红外热像仪光圈数为 1.4，光斑鉴别软件子程序 SpotPar 里求光斑参数（式 3.13）的权重因子 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别取 0.1、0.5 和 0.4，鉴别后所得到的图像质量最好的光斑是这组中的第 6 幅光斑“p6”，计算出该光斑参数为 2.5561，代表的光栅位置在 9P(20) 线理论位置的-16” 处。人眼鉴别出的最佳光斑为第 8 幅 p8，其代表的光栅位置为 9P(20) 线理论位置，两者相差 16”。



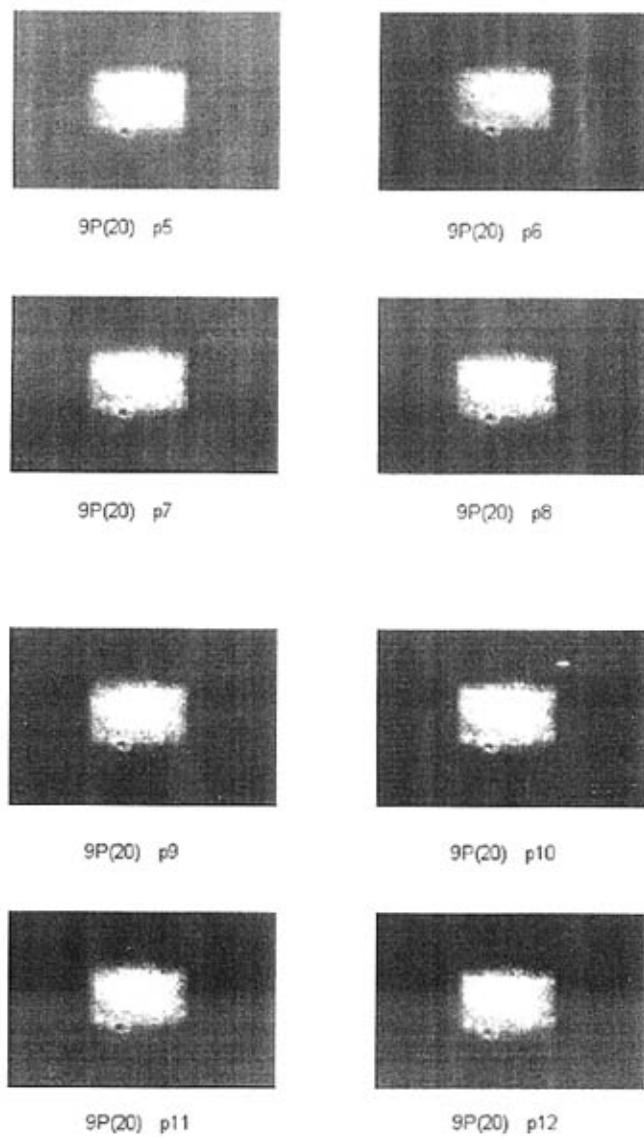


图 3.12 9P(20) 线某组光斑图像

图 3.13 为软件处理最后给出的结果图, 其中左上图为鉴别出的光斑图像, 标题“6”表示被该光斑的序号, 右上图绘出了该光斑三维灰度分布, 左下图和右下图分

别表示从该光斑形心处切开的整个图像横切面与纵切面的灰度分布图。图 3.14 给出了在输出镜附近用热敏纸接收的该光斑形状。

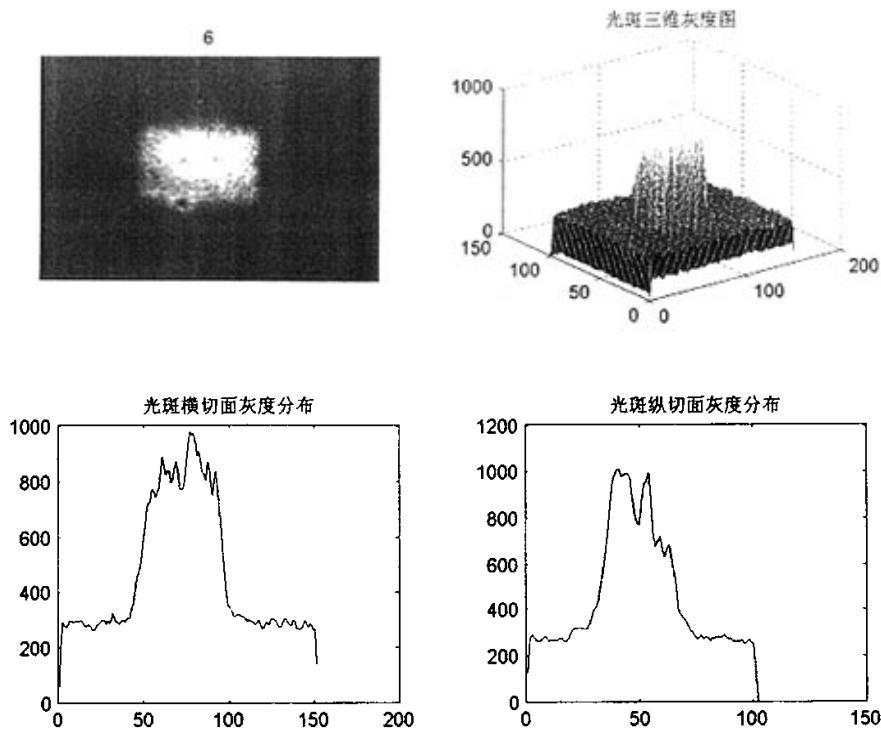


图 3.13 9P(20) 线光斑鉴别结果图



图 3.14 9P(20) 线热敏纸接收实际光斑形状

§ 3.3 小结

本章针对光栅调谐 TEA CO₂激光器，利用非制冷焦平面红外热像仪捕获光斑，通过计算机对采集到的光斑图像进行图像分析，应用数字图像处理技术中的图像复原、图像增强、图像分割等相关理论，在 Matlab 语言的基础上设计并开发了用于光斑鉴别的图像处理软件，通过多次系统实验和调试，最终实现了误差为±10%的光斑鉴别，得到了最佳光斑输出，这一方法代替了人工操作，能够提高工作效率稳定激光输出。

随着激光探测器件的发展和计算机处理水平的提高，利用计算机处理光斑图像进而分析激光特性将成为激光探测和应用中的关键技术，尤其是对于处于长波红外波段的可调谐脉冲 CO₂激光，由于其自身的特点所限，对它的探测还并非十分完善。本系统所采用的光斑鉴别技术利用到了非制冷焦平面红外热像仪，使对激光的探测更加简便直接，该技术不仅可以鉴别出最佳光斑，还可以分析光斑特性，应用到激光探测的其他方面，第四章介绍的测量激光输出稳定性即是对该技术的扩展应用。

第四章 光栅调谐 TEA CO₂ 激光谐振腔稳定性研究

激光谐振腔稳定性技术是激光器的一门重要技术。激光器的光束参数如能量、发散角、光斑尺寸以及指向性都是表征激光器性能的重要参数，对于许多激光应用，都要求输出激光束的这些参数稳定不变，这就要靠良好的激光谐振腔稳定性来保证。研究谐振腔稳定性同样也是光栅调谐 TEA CO₂ 激光器的关键技术。前人在如何测量 CO₂ 激光光束的能量、发散角、光斑尺寸等方面做了许多工作，但是关于研究这些参数的稳定性方面的报道很少。在检测激光束输出指向稳定性方面，前人已经做的工作一般是针对的是 He-Ne 激光器、半导体激光器及氩离子激光器等可见光波段的激光器^{[42][43]}，而针对高功率的可调谐脉冲 CO₂ 激光器的输出光束指向稳定性研究还鲜有报道。

本章分别从能量、光束指向性、远场发散角三个参数出发，测量光栅调谐 TEA CO₂ 激光谐振腔在两个小时之内的稳定性。由于激光束传播过程中光束本身的扩散，使得在远场时光斑强度比较微弱，并且使用普通的热敏纸探测很难固定地记录光斑的空间位置，这样就不能比较不同光斑的位置变化，无法探测光束指向的稳定性。因此采用非制冷焦平面红外热像仪捕获远场光斑图像，实现电子记录和自动存储，利用第三章设计的图像处理软件对其进行处理，以确定光斑的轮廓和中心，还可以用定标的方法求出光斑的实际大小，这不仅是对上一章激光光斑鉴别技术的扩展应用，还是研究可调谐 CO₂ 激光谐振腔稳定性的一个重要方法。

CO₂ 激光的谱线覆盖 9~11 μm 波长范围，这些谱线根据转动跃迁选择定则可以分为 9P、9R、10P、10R 四支，这里选择这四个支中增益较高具有代表性的 9R(20)、9P(20)、10R(20)、10P(20) 谱线研究谐振腔稳定性。分别在两个小时之内连续测量这四支较强谱线的能量、光束指向性和远场发散角，根据这些数据绘出稳定性曲线，给出两个小时之内输出激光光束这三个参数的平均值和波动范围，并分别比较激光输出同

一谱线的稳定性和不同谱线的一致性。

§ 4.1 能量稳定性分析

光束能量是脉冲激光器的一个极其重要的光束参数，在激光器的物理和几何结构确定后，影响大能量快脉冲CO₂激光器输出能量的主要因素是激活区内放电的空间分布不均匀性和时间上的不稳定性等。

测量光束能量的实验光路如图 4.1 所示，激光器输出激光后直接进入能量计的炭斗，由控制电路板控制电机转到四个支较强谱线的相应角度分别测量激光脉冲能量，由能量计显示出所测能量。

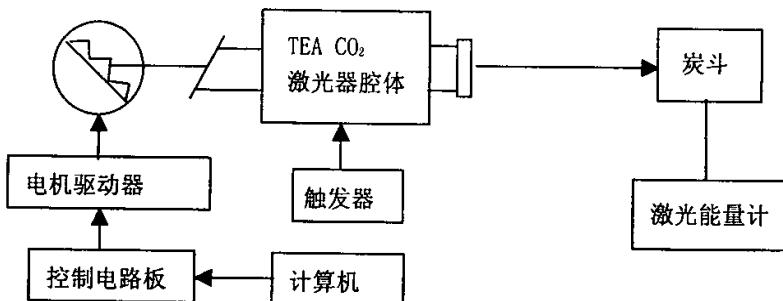


图 4.1 激光谐振腔能量稳定性实验光路

能量稳定性实验中光栅调谐 TEA CO₂ 激光器工作在 25.3KV、33KPa 的实验条件下，放电体积大约为 2L。在实验开始后的两个小时之内按 9R(20)、9P(20)、10R(20)、10P(20) 的顺序测量能量为一组，连续测量十组能量。这种测量方法既可以比较同一谱线的激光束能量的稳定性，也可以很方便得比较不同谱线之间能量的差异。

图 4.2 给出的分别是各支较强谱线的能量稳定性曲线，由图中可以看出，9R(20)、9P(20)、10R(20)、10P(20) 四条谱线的能量均大于 10J，平均值分别为 10.4J、10.9J、10.6J 和 10.5J，能量波动分别是其平均值的 3%、4%、3% 和 4%。

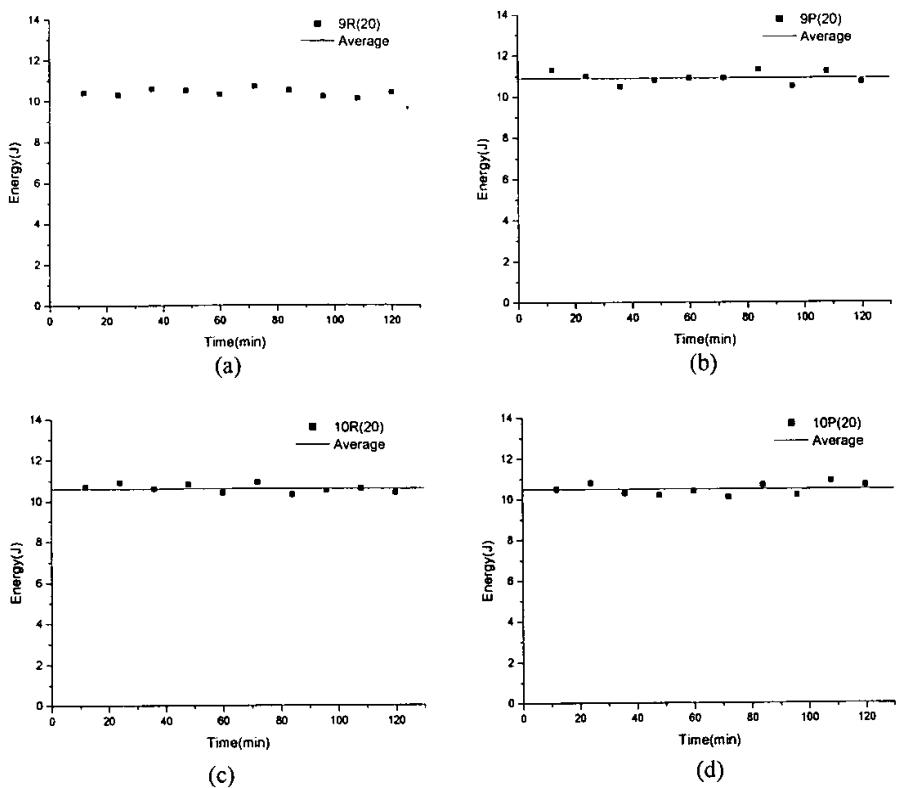


图 4.2 各支较强谱线的能量稳定性曲线

表 4.1 给出的分别是这四支的较强谱线多次测量的能量最大值、能量最小值和能量平均值，从表中可以看出，两个小时之内这四支的强线相比较其能量最大值相差 0J~0.6J，能量最小值相差 0J~0.4J，能量平均值相差 0.1J~0.5J，均在能量平均值的 6% 以内。

表 4.1 各支的较强谱线能量比较

参数 \ 谱 线	9R(20)	9P(20)	10R(20)	10P(20)
能量最大值(J)	10.7	11.3	10.9	10.9
能量最小值(J)	10.1	10.5	10.3	10.1
能量平均值(J)	10.4	10.9	10.6	10.5

图 4.3 所示的是四支的较强谱线之间输出能量差异在不同时刻的变化曲线，由图中可以看出，在两个小时内的不同时刻这四条谱线的能量差异为 0J~1.1J，在能量平均值的 10% 以内。

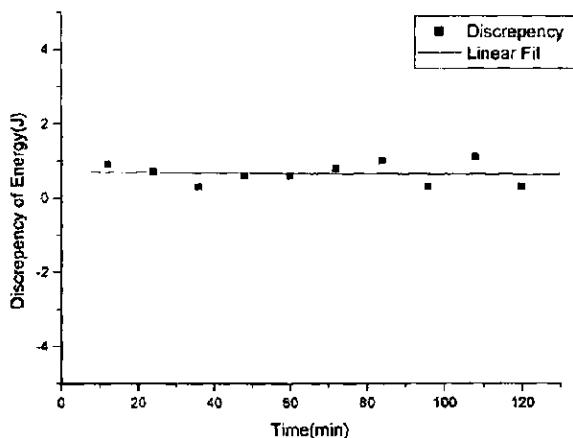


图 4.3 不同时刻各支较强谱线输出能量差异变化曲线

该实验通过定时监测激光器输出脉冲能量，完成了对能量稳定性的测量。由实验数据可以看出，光栅调谐 TEA CO₂ 激光器同一谱线的输出脉冲能量在一定的激励电压和一定的腔体气压下能够保持良好的时间稳定性及重复性，不同谱线之间的输出能量也能够保持较好的一致性，并且在一定时间内这种一致性也相对较稳定。

§ 4.2 光束指向稳定性分析

激光器工作时，由于温度及机械因素的影响，输出光束的方向会产生漂移，从而影响激光器在许多方面的应用，因此要求对激光器输出光束的指向稳定性进行检测和监控。由于大能量脉冲 CO₂ 激光器出口光斑面积均较大且一般为多模，光束发散角也较大，如何精确地确定光束的指向，是一个关键技术问题。一般可以将输出激光束采用聚焦镜聚焦，在聚焦镜的焦平面上观察聚焦焦斑位置的移动情况，但是由于输出光束的指向性变化很小，聚焦后的光斑有一定大小等原因，尽管这种方法在原理上是正确的，采用该方法仍难以测量激光束指向性变化。

本论文采用的实验方案是在远处用漫反射板接收激光器输出的光脉冲，用红外热像仪观察并记录激光脉冲的漫反射像，利用上一章设计的光斑鉴别软件测量光束的指向性变化。由于光斑鉴别软件能够计算出光斑的轮廓和中心，能够利用实物定标计算出光斑的真实大小及实际指向偏移角度，并且红外热像仪能够定点重复测量光斑中心，这些优点使得测量激光光束指向稳定性十分方便。

实验光路图如图4.4所示，激光器输出光束经反射镜反射到达漫反射板，采用红外热像仪分别记录两个小时内接收到的四个支较强谱线的光斑，经过处理后给出光斑中心位置和光束偏转角度。其中Z₁、Z₂、Z₃的实际值分别1.08m、3.51m、8.19m，则激光器到漫反射板的距离为三者之和应为11.7m。

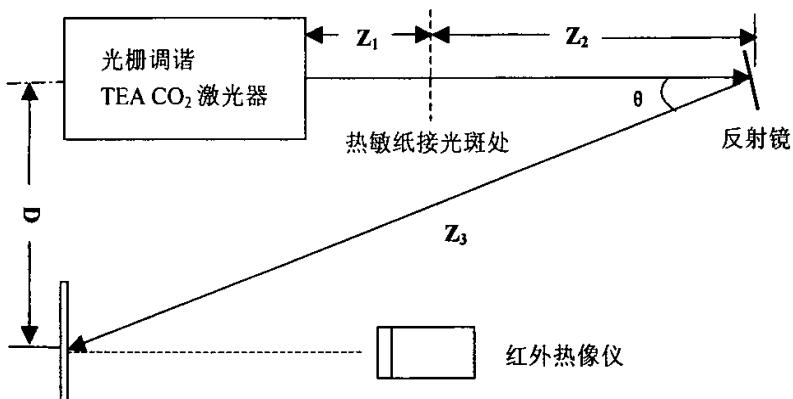


图 4.4 激光谐振腔指向稳定性实验光路

光路中的其他实验条件与能量稳定性实验基本类似，不过为了使红外热像仪捕获的光斑更加清晰便于处理，指向稳定性实验采用的激励电压提高到28KV。实验过程分为两部分：第一部分是在两个小时之内就某一谱线连续测量光束指向，比较同一谱线光束指向的时间稳定性；第二部分是以9R(20)、9P(20)、10R(20)、10P(20)的顺序轮流捕获光斑图像为一组，两个小时内测得了四组光斑，比较不同谱线之间的指向一致性。这两部分的光斑中心分别与实验起始时第一次激光输出光斑中心相比较，计算出各自的水平角度偏移和垂直角度偏移，并绘出相应的曲线。

这里以9P(20)线为例，说明同一谱线的指向稳定性实验结果。图4.5所示的是

红外热像仪捕获到的 A、B、C、D 四组光斑图像。利用光斑鉴别软件进行图像分割后能得到光斑的轮廓和中心点坐标，比较四组图像光斑中心点位置变化可以分别得出光斑在水平和垂直方向的偏移距离，但此时得到偏移距离是红外热像仪屏幕上显示的以像素为单位的距离，想求出在漫反射板上光斑真实的偏移距离还需要进行定标。

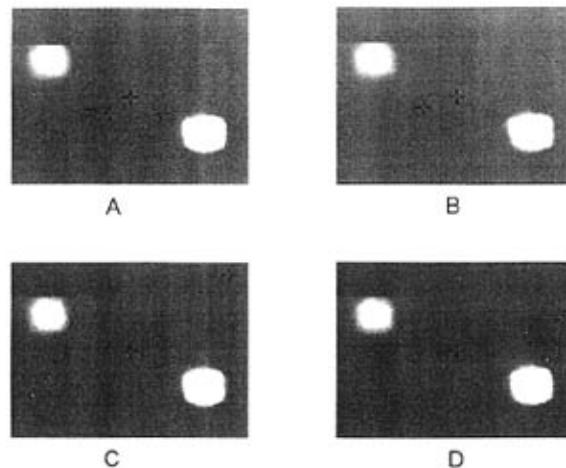


图 4.5 红外热像仪捕获到的 9P(20)谱线光斑图像

图 4.6(a)给出的是定标图像，图中的 S 为目标点， L 为目标点到漫反射板边缘的距离。图 4.6(b)绘出的是目标点所在行的灰度分布，可以看出，灰度差别较大的地方是漫反射板的边缘，灰度值最高的地方是目标点 S，经检测后得到所显示的 L 的距离是 106 个像素，而测得的实际距离是 305.5mm，因此在图 4.4 所示的光路条件下，光斑图像中每个像素代表的实际距离 σ 为：

$$\sigma = \frac{305.5}{106} = 2.88\text{mm} \quad (4.1)$$

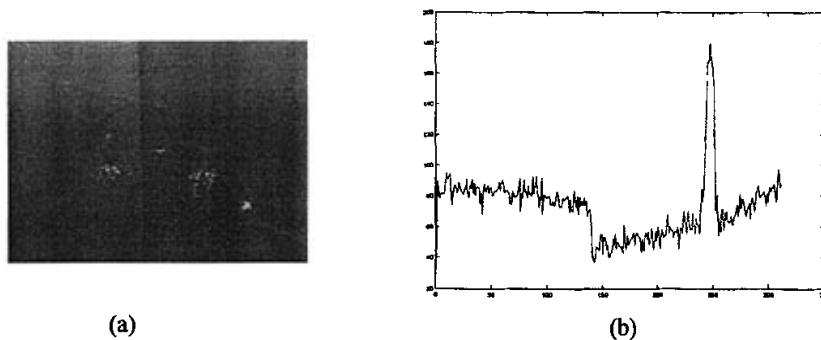


图 4.6 红外热像仪定标图像及其灰度图

定标后的光斑图像可以求出光斑的实际大小，经计算，漫反射板上实际光斑的尺寸大约为 159×137mm²。还可以求出每组光斑在漫反射板上的实际指向偏移距离，然而偏移距离这个参数跟激光的传输距离有关，并不直观，如果换算成光束的偏转角度会更加贴切地描述光束的指向变化。图 4.7 是由图 4.4 简化而来的光束偏转示意图，由图可以求出角度 θ ，如式 4.2 所示，在此基础上激光器输出光束的偏转角度可以根据式 4.3 近似求得：

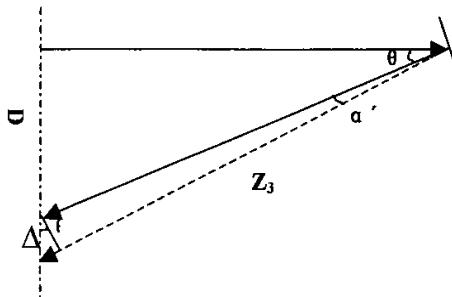


图 4.7 光束指向性偏转示意图

$$\theta = \frac{D}{Z_3} \quad (4.2)$$

$$\alpha' = \frac{\Delta \cdot \cos \theta}{Z_3} = \frac{n \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{Z_3} = n \cdot 0.12 \quad , \quad \alpha = \frac{\alpha'}{2} \quad (4.3)$$

式中 α 为原始偏转角度， α' 反射后光束的偏转角度， Δ 为偏移距离， n 为偏移像素数， θ 经计算为 18.88°。这里应注意的是：水平偏转角度的正负值分别代表光束沿输出方向的左右偏转，垂直偏转角度的正负值分别代表光束的上下偏转。

根据实验数据整理出的 9P(20) 谱线光束指向稳定性曲线如图 4.8 所示，其中(a) 图绘出的是该谱线的水平偏转角度变化，(b) 图绘出的是垂直偏转角度变化。由图中可以看出水平偏转角度的平均值为 -0.01mrad，两个小时之内光束指向在水平方向的偏转范围为 -0.24mrad~0.12mrad，偏转最大值约为远场水平发散角的 4%；垂直偏转角度的平均值为 -0.11mrad，两个小时之内光束指向在垂直方向的偏转范围为

-0.24mrad~0mrad, 偏转最大值约为远场垂直发散角的 3%。

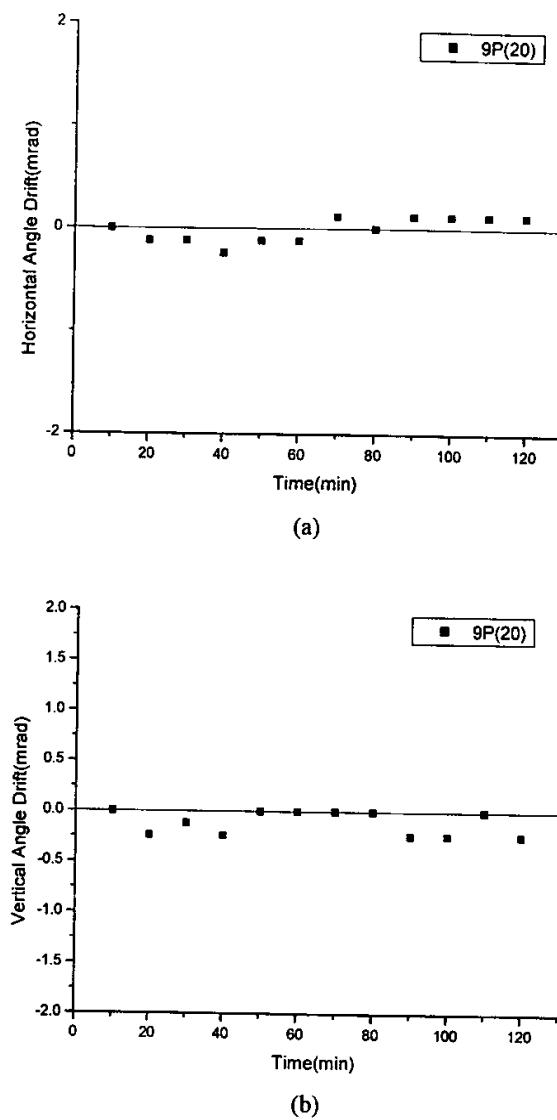


图 4.8 9P(20) 谱线光束指向稳定性曲线

下面给出四支的较强谱线之间的光束指向一致性结果。图 4.9 所示的是红外热像仪捕获到的这些谱线光斑的比较图。图 4.10 绘出的是不同时刻四个支较强谱线之间的光束指向一致性曲线, 其中 (a) 图表示的是不同谱线的水平偏转角度差异, (b) 图表示的是垂直偏转角度差异。由图中可以看出 9R(20)、9P(20)、10R(20) 和 10P(20) 谱线的水平偏转角度的平均值分别为 0mrad、0.03mrad、0mrad 和 -0.12mrad, 它们之

间的差别在 0mrad~0.15mrad 之间, 约在远场水平发散角的 2% 以内; 9R(20)、9P(20)、10R(20) 和 10P(20) 谱线的垂直偏转角度的平均值分别 0.12mrad、-0.06mrad、-0.18mrad 和 -0.27mrad, 不同谱线之间的偏转角度差别在 0.12mrad~0.39mrad 之间, 约在远场垂直发散角的 7% 以内。

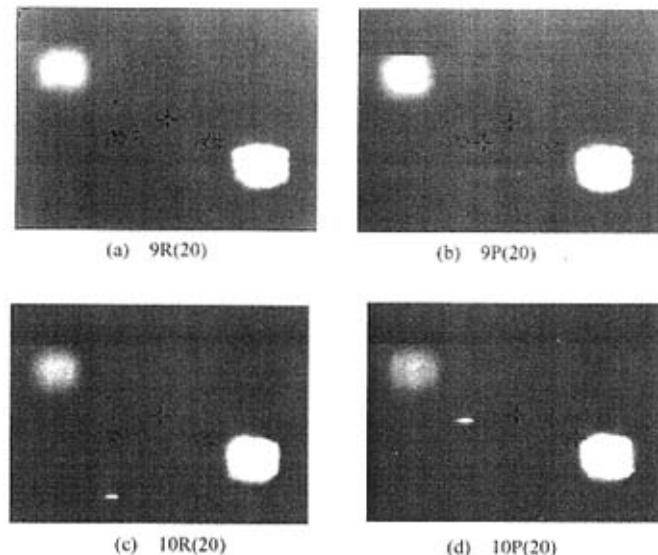
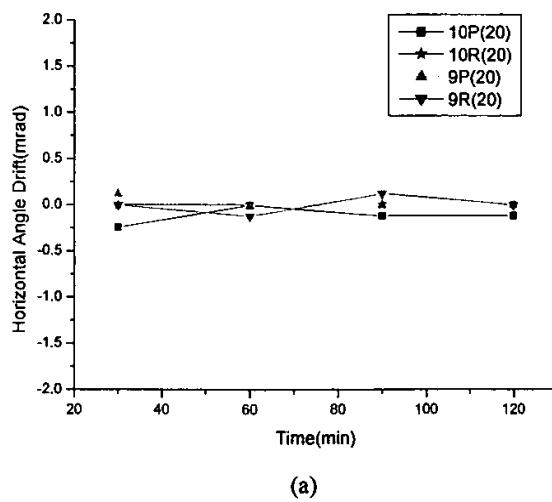


图 4.9 四支的较强谱线远场光斑图像



(a)

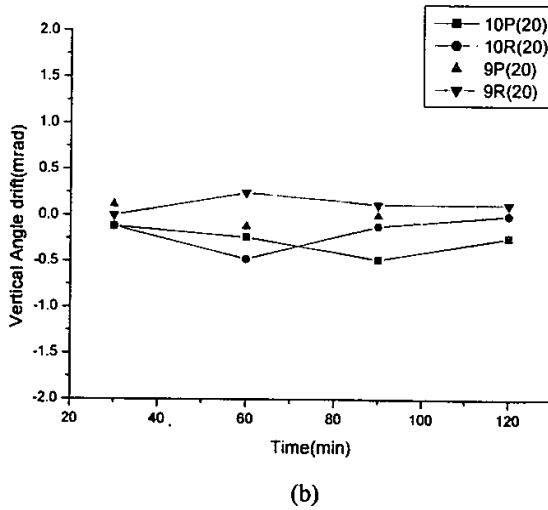


图 4.10 不同时刻四支的较强谱线光束指向变化曲线

另外，通过图 4.10 还可以看出，两个小时內不同时刻四个支较强谱线其水平偏转角度偏差分别为 0.36mrad、0.12mrad、0.24mrad、0.12mrad，垂直偏转角度偏差分别为 0.24mrad、0.72mrad、0.60mrad、0.36mrad，这说明一定时间内不同谱线水平方向的光束指向一致性比垂直方向光束指向一致性要稳定。

以上实验完成了对激光器输出光束指向性变化的测量。由实验数据分析可以看出，光栅调谐 TEA CO₂ 激光器在实验环境基本不变的条件下同一谱线的输出光束指向变化不大，具有良好的时间稳定性，而不同谱线之间的光束指向在水平方向比较一致并且这种一致性基本很稳定，但在垂直方向有一定差别，这种差别在一定时间内也基本稳定。在环境温度基本不变和激光谐振腔具有良好的稳固性的前提下，影响激光束指向的一致性（对不同波长）、重复性或稳定性（对同一波长）的因素应与光栅的定位精度及重复精度有关。

§ 4.3 远场发散角稳定性分析

激光的远场发散角是评价激光质量的又一个重要参数。一方面它反映了激光在远距离传输时的发散特性，另一方面它与束腰的乘积是M²参数，该参数则包含了光束

质量的综合特性，能够较为直观地说明了该光束可聚焦的程度^[44]。过去常规的远场发散角测量方法有套孔法、刀口法等，本实验采用两种方案测量远场发散角：一种方案是通过利用上一小节中测量光束指向的方法，用红外热像仪接收激光光斑，通过图像处理得出光斑轮廓，然后计算光束远场发散角；另一种方案是采用聚焦法测量输出光束的发散角，即采用聚焦透镜对输出光束聚焦，测量聚焦焦斑的尺寸，进而求出激光束的远场发散角，这种方法又可以分为反射式聚焦和透射式聚焦，由于透射式聚焦光束没有偏折，测量更为简单可靠，因此本实验中采用的是透射式聚焦方法。

1. 利用红外热像仪观察测量远场发散角

该方案的实验光路图与测量光束指向性的光路图(图4.4)完全一样，但是为了计算光束发散角，在红外热像仪接收每个远场光斑之前要用热敏纸在激光器输出镜附近接收近场光斑。实验条件和实验过程与光束指向稳定性实验基本相同。发散角的计算公式为：

$$\theta_x = \frac{D_x - d_x}{Z}, \quad \theta_y = \frac{D_y - d_y}{Z} \quad (4.4)$$

其中 θ_x 表示水平方向光束发散角， D_x 和 d_x 分别表示近远场光斑的水平尺寸； θ_y 表示垂直方向光束发散角， D_y 和 d_y 分别表示近远场光斑的垂直尺寸； Z 表示光束从近场到远场的传播距离，可以根据图4.4计算出来。

图4.11给出了热敏纸接收这四个支较强谱线的近场光斑图像，其尺寸大小可以实际测量得到。红外热像仪探测到的光斑其实际尺寸可以根据实物定标求出。对于同一谱线发散角稳定性仍以9P(20)谱线为例说明实验结果。图4.12所示的为两个小时内9P(20)谱线的发散角稳定性曲线，其中(a)表示的是水平发散角的稳定性，(b)图表示的是垂直发散角的稳定性。由图中可以看出水平发散角的平均值为8.9mrad，不同时刻角度与平均值的差别在-0.5mrad~0.5mrad之间，约为发散角平均值的6%以内；垂直发散角的平均值为8.2mrad，不同时刻角度与平均值的差别在-0.4mrad~0.6mrad之间，约为发散角平均值的7%以内。

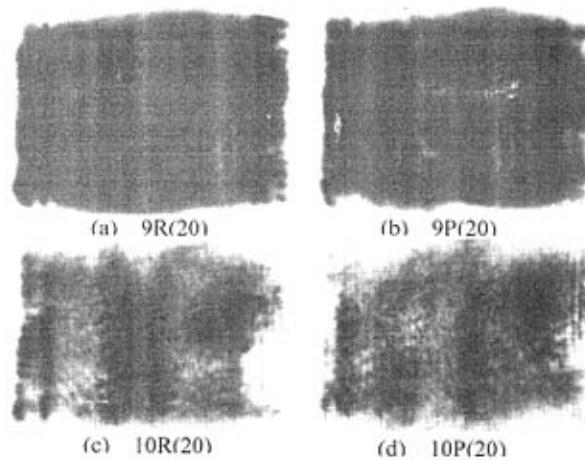
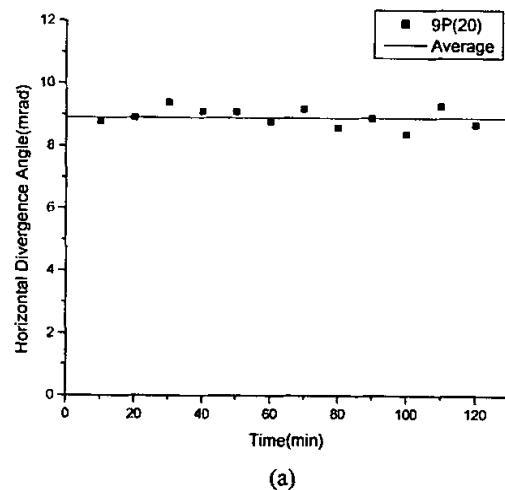
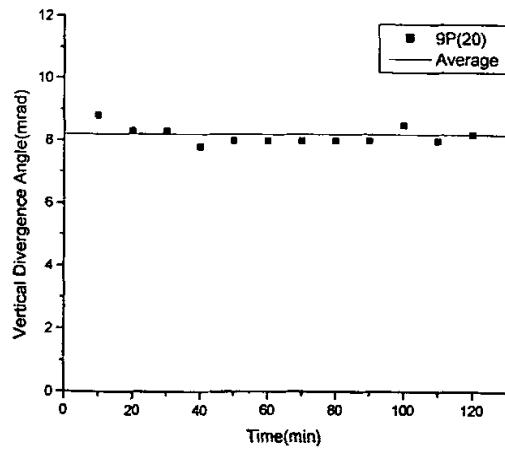


图 4.11 四支的较强谱线近场光斑图像



(a)



(b)

图 4.12 9P(20)谱线远场发散角稳定性曲线

图 4.13 绘出的是两个小时内不同时刻四个支较强谱线的远场光束发散角，其中(a)图表示的是它们的水平发散角变化，(b)图表示的是垂直发散角变化。由图中可以看出 9R(20)、9P(20)、10R(20) 和 10P(20) 谱线的水平发散角平均值分别为 8.9mrad、9.4mrad、9.0mrad 和 9.6mrad，它们之间的差别在 0.2mrad~0.7mrad 之间，约为其平均值的 4% 以内；9R(20)、9P(20)、10R(20) 和 10P(20) 谱线的垂直发散角平均值分别为 8.5mrad、8.4mrad、8.8mrad 和 9.2mrad，它们之间的差别在 0.1mrad~0.8mrad 之间，约为其平均值的 6% 以内。

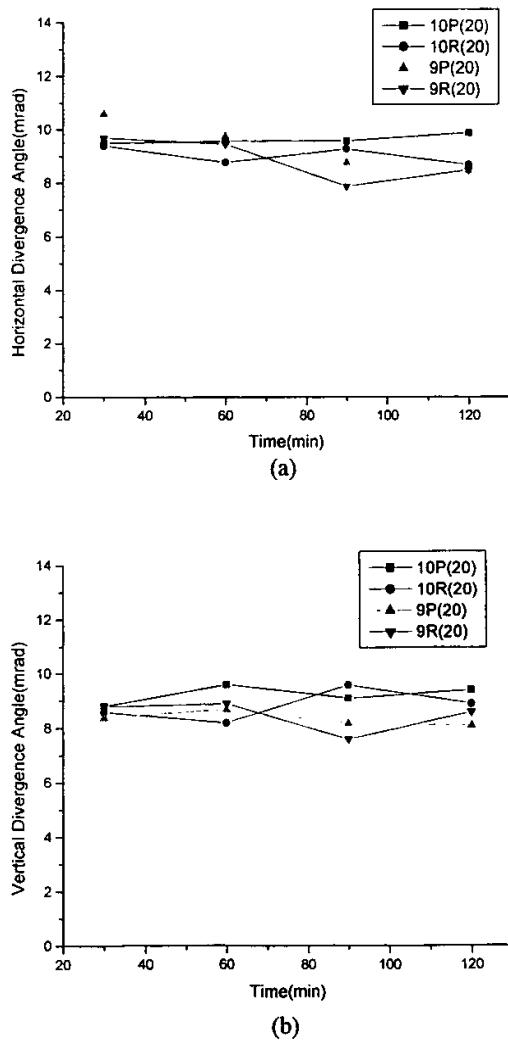


图 4.13 不同时刻四支的较强谱线远场发散角变化曲线

另外通过图 4.13 还可以看出，两个小时內不同时刻四个支较强谱线的远场水平发散角差别分别为 1.2mrad、1.0mrad、1.7mrad、1.4mrad，远场垂直发散角差别分别为 0.4mrad、1.4mrad、2.0mrad、1.3mrad，这说明一定时间内不同谱线之间远场发散角水平方向的差异比垂直方向的差异要稳定。

2. 透射聚焦法测量远场发散角

透射聚焦法测量远场发散角的公式为：

$$\theta_x = \frac{D_x}{f}, \theta_y = \frac{D_y}{f} \quad (4.5)$$

其中 D_x 、 D_y 为聚焦后光斑沿水平和垂直两个方向的光斑尺寸， f 为透镜焦距。

实验光路图如图 4.14 所示，激光器输出激光经过 ZnSe 透镜聚焦在接收屏上，ZnSe 透镜的焦距为 2m。

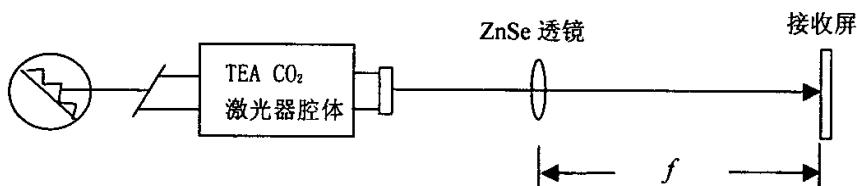


图 4.14 透射聚焦法测量光束发散角示意图

焦点处的激光光斑如图 4.15 所示，光斑尺寸可以根据光斑轮廓测量出来。

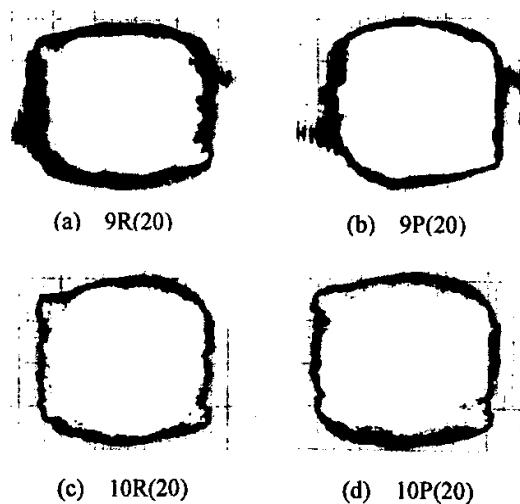
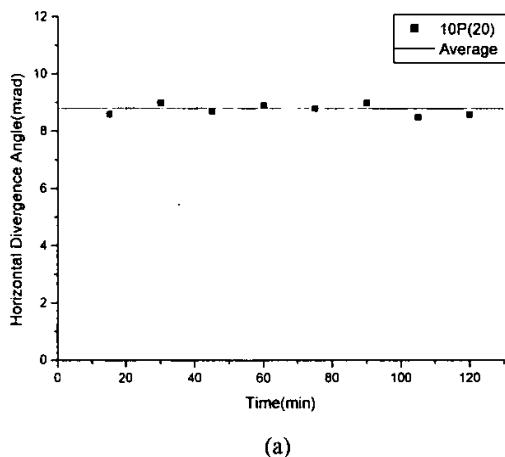
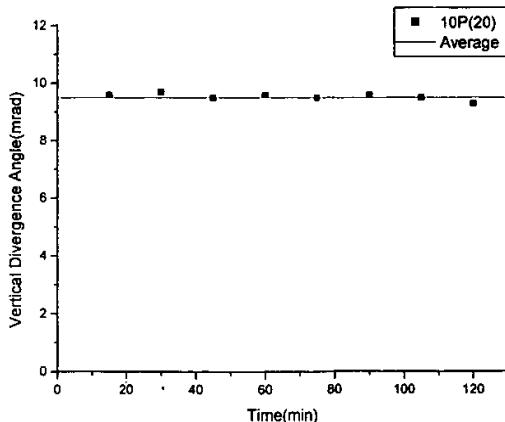


图 4.15 四支的较强谱线在焦点处的激光光斑

图 4.16 所示的是应用透射聚焦法测量的 10P(20) 谱线发散角稳定性曲线，其中 (a) 图表示水平发散角的角度变化，(b) 图表示垂直发散角的角度变化。由图中可以看出 10P(20) 谱线的水平发散角平均值为 8.8mrad，不同时刻角度与平均值的差别在 -0.3mrad~0.2mrad 之间，约在发散角平均值的 3% 以内；垂直发散角的平均值为 9.5mrad，不同时刻角度与平均值的差别在 -0.2mrad~0.2mrad 之间，约在发散角平均值的 2% 以内。



(a)



(b)

图 4.16 10P(20) 谱线稳定性曲线（聚焦法）

图 4.17 绘出的是四个支较强谱线的光束远场发散角差异曲线，其中上部的曲线

表示的是各谱线的水平发散角，下部的曲线表示的是各谱线的垂直发散角。由图中可以看出四个支较强谱线的水平发散角的平均值为 9.2mrad，不同谱线的角度差别在 0.1mrad~0.2mrad 之间，约在发散角平均值的 1% 以内；垂直发散角的平均值为 8.8mrad，不同谱线的角度差别在 0.3mrad~0.7mrad 之间，约在发散角平均值的 6% 以内。

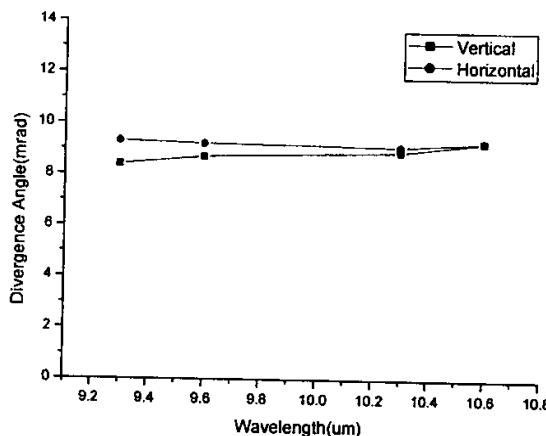


图 4.17 四支的较强谱线远场发散角比较（聚焦法）

由红外热像仪法和聚焦法两种测量远场发散角的方案所得的实验数据可以看出，两种方法测量得出的远场发散角平均值结果比较接近。

综合这两种方案看来，光栅调谐 TEA CO₂ 激光器同一谱线输出光束远场发散角在小范围内有一定波动，究其原因，可能是温度和气体成分的微小变化导致了增益的微小变化，进而引起激光器输出模式构成成分的变化，造成了输出光束远场发散角的微小波动。不同谱线之间的输出光束远场发散角也存在差异，这种差异一方面可能是由于不同波长激光的总增益略有不同，引起不同波长激光的输出模式构成成分有一定差异所致，另一方面不同谱线同阶模式输出光束的远场发散角本身也存在一定差异。在一定时间内，这四条谱线之间的远场发散角差异是相对稳定的。

第五章 总结

可调谐激光谐振腔的自动调整技术是一种集激光谐振腔技术、激光探测技术、数字图像处理技术和计算机控制技术于一体的综合技术，本论文在理论研究的基础上，针对光栅调谐 TEA CO₂ 激光器建立实验装置，开发图像处理软件，通过鉴别光斑质量完成了谐振腔的自动调整。整个论文的主要工作和成果包括以下几个方面：

1. 在实验室已有激光器的基础上，完成了对光栅调谐 TEA CO₂ 激光器的调试，该激光器采用 100 线/mm 原刻光栅，脉冲输出能量大于 10J。通过对非制冷焦平面技术的研究，采用红外热像仪接收光斑的漫反射像作为激光探测方案，实现了对大能量快脉冲可调谐 CO₂ 激光的采样与记录，建立了谐振腔自动调整实验系统
2. 提出了光斑鉴别的判据，运用数字图像处理技术中的图像增强、图像复原、图像分割、直方图等相关理论，开发了基于 Matlab 的 CO₂ 激光光斑鉴别软件。该软件从分析光斑质量入手，能够在一组光斑中识别出质量最好的光斑，实现了光栅调谐 TEA CO₂ 激光器的自动调整，实验中自动调整的误差在±16 角秒以内。
3. 在上述工作的基础上，开展了激光谐振腔的稳定性研究，分别从能量、光束指向、远场发散角三方面分析了激光器输出同一谱线的稳定性和不同谱线的一致性。实验证明，光栅调谐 TEA CO₂ 激光器输出能量波动能够保持在平均值的 4% 以内，光束指向的变化能够保持在远场发散角的 4% 以内，远场发散角的变化能够保持在平均值的 7% 以内，并且其不同谱线之间的一致性也较好，造成这种参数小范围变化和不同谱线之间不一致性的原因不仅与环境和谐振腔结构有关，还与光栅调谐精度有关。

本工作完成了对大能量光栅调谐 TEA CO₂ 激光的采样和记录，首次实现了对光栅调谐 TEA CO₂ 激光谐振腔的自动调整，并研究了其输出光束相同谱线稳定性和不同谱线一致性。

参考文献

- [1] C. Patel. Phys. Rev., 1964, 136(5A):1187-1193.
- [2] 邓锡铭。中国激光史概要。北京:科学出版社。1991。
- [3] 陈梅。可调谐 TEA CO₂序列带激光放大研究—设计, 同步放电和寄生振荡抑制, 四川大学硕士学位论文, 2002 年。
- [4] 万重怡, 蹇庄华, 夏生芹, 刘世明, 王瑞泉, 谭江. 紫外预电离高气压可调谐 CO₂激光器. 电子学报, 1978, 1(1):42-48.
- [5] Chongyi Wan, Rongqing Tan, Jin Wu, Shirring Liu, Jinwen Zhou, Jilan Qi, Donglei Wang, Peng Wan, Xianzhao Peng, Wenjie Xie. High Average Power TEA CO₂ Laser with Rotating Spark Gap Switch. SPIE, 2000, 3889: 725-731.
- [6] Yanning Yu, Chongyi Wan, Yan Lv, Rongqing Tan, Jinwen Zhou, Shiming Liu, Chong Zhao. A 3kW Average Power Tunable TEA CO₂ Laser. Opt. Laser Techol., 2005, 37(7):560-562.
- [7] 楼祺洪, 徐捷, 傅淑芬, 庄斗南, 陈建文。《脉冲放电气体激光器》。北京: 科学出版社。1993。
- [8] 谭荣清, 万重怡, 吴谨, 刘世明, 王东蕾, 周锦文, 唐永新, 王永, 赵冲, 万朋, 程亮, 芦葱葱, 齐继兰等。高重复频率可调谐 TEA CO₂激光研究, 中国激光, 2005, 32(6):739-742。
- [9] 胡亚红。全自动光学谐振腔稳定调节系统的可行性研究, 中国科学院西安光学精密机械研究所硕士学位论文, 2001。
- [10] Robert K. Tyson, Robert Q. Fugate. Adaptive optics systems and technology, 21-22, July, 1999.
- [11] R. H. Freeman. Adaptive laser resonator, Optics Letter, 1978, 2(3):61.

- [12] 康健。多变量自适应光学谐振腔系统动态特性的研究, 光学学报, 1994, 14(7): 752—757。
- [13] 叶嘉雄, 汪伟峰, 张国平, 竺子兰。自适应激光谐振腔模式象差的微机控制器, 光电工程, 1996, 23(2): 53—56。
- [14] 叶嘉雄, 康健, 张国平, 竺子兰。自适应激光谐振腔系统的稳定性分析, 光电工程, 1996, 23(1): 18—22。
- [15] 叶嘉雄, 汪伟峰, 张国平。采用模式变形反射镜的激光谐振腔象差的自适应校正, 光电工程, 1997, 24(1): 56—60。
- [16] 贺昌玉。激光谐振腔的单片机精密控制系统, 应用激光, 2003, 23(6): 335—336。
- [17] D. R. Akitt, H. J. J. Seguin, C. V. Sellathamby, and K. Rogozinski, An industrial quality automatic resonator alignment system For a 20 KW CO₂ laser, Optics & Laser Technology, 1993, 25(7):315—322.
- [18] D. R. Akitt, H. J. J. Seguin, M. R. Cervenan, S. K. Nikumb, Electronic mode and power control of a high-power CO₂ laser, Quantum Electronics, IEEE Journal of, 1990 26(8): 1413—1417.
- [19] 吴诚, 苏君红, 潘顺臣, 冯生荣, 金伟其, 高稚允。非制冷红外焦平面技术述评(上), 红外技术, 1999, 21(1):6—9。
- [20] 吴诚, 苏君红, 潘顺臣, 冯生荣, 金伟其, 高稚允。非制冷红外焦平面技术述评(下), 红外技术, 1999, 21(2):1—3。
- [21] 冯生荣, 张毓荣。非制冷焦平面热成像技术, 应用光学, 1999, 20(3):11—18。
- [22] 邢素霞, 张俊举, 常本康, 钱芸生。非制冷红外热成像技术的发展与现状, 红外与激光工程, 2004, 33(5):441—444。
- [23] 陈伯良。红外焦平面成像器件发展现状, 红外与激光工程, 2005, 34(1):1—7。
- [24] J. L. Tissot. Advanced IR detector technology development at CEA/LETI , Infrared Physics & Technology, 2002 , 43:223—228.

- [25] J.L.Tissot. IR detection with uncooled sensors, Infrared Physics & Technology, 2004 , 46:147-153.
- [26] Antoni Rogalski. New trends in infrared detector technology, Infrared Physics & Technology, 1994 , 35(1):1-21.
- [27] J.L.Tissot. 320×240 microbolometer uncooled IRFPA development, Proc. SPIE, 2000 , 4130:473-479.
- [28] N.C.Kerr. Single pulse two-dimensional CO₂ laser beam profiling, J. Phys. E:Sci. Instrum , 1989 , 22:1034-1036.
- [29] 饶长辉, 张学军。光子计数式光电倍增管四象限型和弱光像增强 C C D 跟踪系统的性能比较, 光学学报, 2002, 22(1):67-73。
- [30] 袁红星。PSD 光斑特性与光斑及背景的关系研究, 东南大学学报, 1999, 29 (2): 145—149。
- [31] 宋海平, 叶征宇, 柯常军, 吕跃广, 李港。非制冷焦平面热像仪获取脉冲 CO₂ 激光光斑研究, 激光与红外, 2004, 34(3):203-205。
- [32] 汪震, 江为俊。面阵 CCD 同步接收系统方案探讨, 量子电子学报, 2002, 19(3):266-268。
- [33] 陈军等。脉冲激光光强空间分布的 CCD 同步接收技术, 中国激光, 1996, 23(6):490-494。
- [34] 程永强, 谭荣清, 陈静, 郑义军, 柯常军, 王东蕾, 张阔海。光栅选线 TEA CO₂ 激光快速调谐技术研究, 激光与红外, 2006, 36(4):250-253。
- [35] 阮秋琦。数字图像处理学。北京: 电子工业出版社, 2001。
- [36] 冈萨雷斯。数字图像处理(第二版)。北京: 电子工业出版社, 2003。
- [37] 孙兆林。MATLAB 6.x 图象处理。北京: 清华大学出版社, 2002。
- [38] 李伦, 巩马理, 刘兴占, 李振宇, 王宇兴。Matlab 用于激光光束质量分析, 激光技术, 2000, 24 (6): 405-408。
- [39] 赖志国, 余啸海。Matlab 图像处理与应用。北京: 国防工业出版社, 2004。

- [40] 周炳琨。激光原理。北京：国防工业出版社，1995。
- [41] 夏江帆，王乃彦。图像分析在测量激光光束品质中的应用，中国体视觉与图像分析，1998，3(4)：200-203。
- [42] 张国轩，陈刚，何红，胡企铨。用 CCD 摄像机检测激光器输出光束的指向稳定性，应用光学，1998，19(2)：15-18。
- [43] 胡林亭，卢显葵，金俊坤，韩福利。CCD 测量激光光斑方法研究，激光技术，2001，25(2)：155-157。
- [44] 陈军，黄鹏。利用 CCD 准确测量激光远场发散角，强激光与粒子束，1997，9(4)：552-556。

在学期间发表的文章目录

1. 陈静, 谭荣清, 安然, 程永强, 柯常军, 郑义军, 王东蕾。基于 MATLAB 的 CO₂激光光斑鉴别技术, 已录用, 拟发表于《激光与红外》第 9 期。
2. 程永强, 谭荣清, 陈静, 郑义军, 柯常军, 王东蕾, 张阔海. 光栅选线 TEA CO₂激光快速调谐技术研究. 激光与红外, 2006, 36(4): 250~253.
3. 谭荣清, 程永强, 王永, 刘世明, 张阔海, 柯常军, 陈静. 光栅选支快调谐激光谐振腔 [P]. 国家发明专利, 已通过初审.

致 谢

在三年的硕士学位攻读期间，许多老师、朋友和家人在各方面给予我很多的指导、帮助和关心。在论文完成之际，向他们致以最真诚的谢意！

首先衷心地感谢我的导师谭荣清研究员，感谢谭老师三年来给予我的悉心培养和关怀，他严谨求实、细致认真的科研作风，渊博的知识和高尚的品德，不仅让我在科研工作中受益匪浅，还深深地影响了我的做人做事，并促进我在以后的工作和生活中不断进步不断向前！

在读期间，还得到了万重怡研究员和刘世明研究员的指导，在此向两位随和可亲的长者致以深深的谢意。同时感谢吴谨研究员、柯常军副研究员、王东蕾副研究员、于延宁副研究员、唐永新助理研究员和王永工程师，他们都在工作学习中给我许多指导和启发。

感谢安然、程永强、郑义军、石海霞，有了他们帮助操作实验，我的论文工作才得以顺利完成。还要感谢实验室的丁长林、张昭、郑光、张云、汪训忠、王云飞、蔡建华、张阔海、王道霞、张红军等，与他们一起走过的日子让我永远难以忘怀。

感谢那些在求学道路上曾经帮助支持我的老师同学们，感谢那些在日常生活中曾经相互关心相互鼓励的知心好友们，我愿将毕业的喜悦与他们一起分享。

最后感谢我的爷爷、爸爸妈妈和其他亲人！正是由于他们一贯的支持和鼓励，才使我有信心有毅力完成全部学业，正是由于他们无私的爱和奉献，才使我更坚强更乐观地面对明天。我爱他们，愿在以后的人生道路上，以更加丰厚的成果来答谢他们！