摘要

激光光束由于其良好的方向性、高亮度及高稳定性等优点,常被作为测量基准广泛应 用于超精密加工设备及测量设备中。但是激光器由于受其本身的热变形、环境振动和空气 扰动等因素的影响,出射激光光束的方向常会产生漂移,这一弱点限制了激光器准直精度 的进一步提高,影响了其在实际中的运用。因此有必要测出该漂移量,并对其进行控制。 为此,本文设计一个光斑漂移检测与控制系统,以检测激光器工作时激光光束的漂移,并 对其进行控制。具体工作如下:

1、设计了一套检测与控制光斑漂移的系统。本系统由激光器及其控制装置、高反射 率衰减片、CCD 摄像机、图像采集处理系统及计算机组成。该系统能实时地采集到激光 光束照射到 CCD 光敏面上所形成的光斑,将所得的信息送到计算机里经由专门的软件处 理,同时在监视器中,可以实时地看到光斑的原始图像,以及经过数据处理后光斑中心位 置随时间变化的情况:并能通过给激光器周围建立补偿温度场来控制光束的漂移。

2、编写了一套专门的数据处理软件。该软件能显示出从任意时刻开始到最后光斑中 心位置的移动轨迹,并对该轨迹进行了拟合。得出了这段时间内激光光束在 X 方向、Y 方 向以及空间立体角内漂移大小的最大值、标准差以及其随时间变化的趋势等。

3、对激光光源加上不同的控制,如使之裸露在自然环境之中,或给其加上外罩(分不开孔和开孔两种情况),或对其进行温控等,然后通过实验测量和计算,得到了不同情况下激光光束漂移量的大小,并分析了在给激光光源加上不同的控制时,光束的漂移量有什么不同,以及产生这些变化的原因。

关键词: 激光器; CCD 摄像机; 光斑漂移; 图像处理; 温度控制

Abstract

Laser beam, for its good directivity, high brightness, and high stability, is widely used in super-fine machining equipment as well as testing equipment frequently as a measuring reference. However, Laser beam from laser, which is subject to the influence of thermal deformation, environmental vibration and air disturbance etc., will shift when propagates. The said disadvantages limit further improvement of the laser's precision of collimation, and play a passive part in the application of laser. Therefore, it's necessary to measure and control the shift quantity of laser beam. A system for detecting and controlling the laser focus drift is proposed in this paper.

The main work has been done as follows:

- 1. A system for detecting and controlling laser flare is designed, which is made up of a laser with controlling device, antireflective attenuation plate, a CCD camera, image acquiring system. The system can real-time acquire the laser flare formed by laser beam impinging on the CCD photosensitive plane. The information then is transferred to a computer and processed by special software. And meanwhile, the original image of the flare and the status of flare centre varying with time can be monitored. The beam drift is controlled by a steady temperature field around the laser.
- 2. Data processing software is programmed. The shift track of flare centre from any time to the end can be displayed, and the maximum value, standard variation, and trend of drift in the X and Y direction are obtained.
- 3. Various control are used to the laser source, for example, being exposed to the environment, or adding a mask (with hole or not), or maintaining the internal thermal field when adding a mask. The quantity of drift is obtained for the above case respectively by experimental measurement and calculation. At last, this paper analyzed the difference of beam drift with different controlling condition and the reason for the difference.

Keywords: laser, CCD camera, flare drift, image process, thermal control

图表目录

图	2-2-1	光斑漂移检测与控制系统原理图	4
图	2-3-1	激光光束在空间立体角上的漂移	6
图	2-3-2	光源系统温控装置示意图	
图	2-3-3	温控仪控制下的罩内温度趋于稳定的过程	7
团	3-1-1/4) CCD 米赖面上激光光研的形状(前一时刻)	8
া মি মি	2 1-1(a) CCD 光敏面上激光光斑的形状(后一时刻)	0
团团	3-1-1(0		Q
团	3-1-2(8		10
ाडा स्ट	3-1-2(0	》 2021年13年17月又17日13日33(1777年)	11
网	3-2-1	每 50 个占取平均后光度中心的勃济	
图	3-2-3	→ 光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
网	3-2-4	激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量	
图	3-2-5	激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	
图	3-2-6	教报外理结果	
图	3-2-7	20 分钟以后光窗中小随时间变化的轨迹	
图	3-2-8	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图	3-2-9	20 分钟后光束 X 方向上的漂移量	
图	3-2-10	20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量	
图	3-2-11	20 分钟后激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	
图	3-2-12	数据处理结果(20分钟以后)	
图	3-3-1	"光斑采集与分析"软件与"光斑漂移的计算"程序的工作流程图	
图	4-2-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	
图	4-2-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图	4-2-3		
图	4-7-4	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
1251		激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	18 18
31	4-2-5	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
图图	4-2-5 4-2-6	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	18 18 18 19
田图图	4-2-5 4-2-6 4-2-7	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	18 18 18 19 19
国国国	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日国国国国	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日田田田田田	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日田田田田田田田	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-11	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	18 18 19 20 20 20 20 20
日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-11 4-2-12	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日国国国国国国国	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13	 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13 4-2-14	 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量 数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 光斑稳定以后光斑中心的轨迹 母 50 个点取平均后光斑中心的轨迹 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 S 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量 数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 	
A B B B B B B B B B B B B B B B B B B B	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13 4-2-14 4-3-1	 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量 数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 P 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量 数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 	
日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13 4-2-13 4-2-14 4-3-1 4-3-2	 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	
日国国国国国国国国国国	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13 4-2-13 4-2-14 4-3-1 4-3-2 4-3-3	 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量 数据处理的结果 ** 用稳定以后光斑中心的轨迹 # 50 个点取平均后光斑中心的轨迹 ** 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量 ** 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 ** 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 ** 班稳定后光束空间立体角内的漂移量 ** 数据处理的结果 ** 1~8 组数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 ** 30 个点取平均后光斑中心的轨迹 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹 	18 18 19 20 20 20 20 20 20 20 20 21 23 23
日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日日	4-2-5 4-2-6 4-2-7 4-2-8 4-2-9 4-2-10 4-2-11 4-2-12 4-2-13 4-2-14 4-3-1 4-3-2 4-3-3 4-3-4	激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量 数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 光斑稳定以后光斑中心的轨迹 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量 机容稳定后光束空间立体角内的漂移量 就器处理的结果 1~8 组数据处理的结果 1~8 组数据处理的结果 新光光斑中心位置随时间变化的轨迹 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹 新光光斑中心位置随时间变化的轨迹 新光光斑 X 方向上的漂移量	

图 4-3-6	数据处理的结果	24
图 4-3-7	¹ 1~8 组数据处理的结果	24
图 4-3-8	20 分钟后光斑中心的轨迹	25
图 4-3-9	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	25
图 4-3-1	0 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量	25
图 4-3-1	1 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量	25
图 4-3-1	2 20 分钟后光束空间立体角内的漂移量	25
图 4-3-1	3 数据处理的结果	25
图 4-3-1	4 1~8 组数据处理的结果	26
图 4-3-1	5 光斑稳定后光斑中心的轨迹	26
图 4-3-1	6 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	26
图 4-3-1	7 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量	27
图 4-3-1	8 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量	27
图 4-3-1	9 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量	27
图 4-3-2	0 数据处理的结果	27
图 4-3-2	1 1~8 组数据处理的结果	
图 4-4-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	
图 4-4-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图 4-4-3	激光光束 X 方向上的漂移量	
图 4-4-4	激光光束 Y 方向上的漂移量	31
图 4-4-5	激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	31
图 4-4-6	数据处理的结果	32
图 4-4-7	1~9 组数据处理的结果	
图 4-4-8	20 分钟后光斑中心的轨迹	
图 4-4-9	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图 4-4-1	0 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量	
图 4-4-1	I 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量	
图 4-4-1	2 20 分钟后光束空间立体角内的漂移量	
图 4-4-1	3 数据处理的结果	
图 4-4-14	4 1~9 组数据处理的结果	
图 4-4-1:	5 光斑稳定后光斑中心的轨迹	
图 4-4-10	5 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图 4-4-1	7 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量	
图 4-4-18	3 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量	
图 4-4-19	> 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量	
图 4-4-20) 数据处理的结果	
图 4-4-2	l 1~9 组数据处理的结果	
图 4-5-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	
图 4-5-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	
图 4-5-3	激 光光束 X 方向上的漂移量	
图 4-5-4	激 光光束 Y 方向上的漂移量	
图 4-5-5	激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	
图 4-5-6	数据处理的结果	40
图 4-5-7	1~6 组数据处理的结果	40

团 4-5-8	20 分钟后光疳中心的轨迹	.41
国 +-5-0	每 50 个占取平均后光费中心的轨迹	.41
图 4.5-10	20 分钟后光束 X 方向上的漂移量	.41
图 4-5-11	20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量	.41
图 4-5-12	20 分钟后光束空间立体角内的漂移量	.41
图 4-5-13	20 3 7 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2	.41
图 4-5-14	1~6 组教据处理的结果	.42
图 4-5-15	光密稳定后光研中心的轨迹	42
图 4-5-16	每 50 个占取平均后光斑中心的轨迹	.42
图 4-5-17	光· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.43
图 4-5-18	光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量	.43
图 4-5-19	光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量	43
图 4-5-20	数据处理的结果	43
图 4-5-21	1~6 组数据处理的结果	44
图 4-6-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	46
图 4-6-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	46
图 4-6-3	激光光束 X 方向上的漂移量	47
图 4-6-4	激光光束 Y 方向上的漂移量	47
图 4-6-5	激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	47
图 4-6-6	数据处理的结果	47
图 4-6-7	1~3 组数据处理的结果	48
图 4-7-1	图 4-7-2~图 4-7-10 的图例说明	49
图 4-7-2	从实验开始到结束不同情况下 X 方向上漂移最大值的范围	49
图 4-7-3	从实验开始到结束不同情况下 Y 方向上漂移最大值的范围	49
图 4-7-4	从实验开始到结束不同情况下空间立体角内漂移最大值的范围	49
图 4-7-5	20 分钟后不同情况下 X 方向上漂移最大值的范围	49
图 4-7-6	20 分钟后不同情况下 Y 方向上漂移最大值的范围	50
图 4-7-7	20 分钟后不同情况下空间立体角内漂移最大值的范围	50
图 4-7-8	光斑稳定后不同情况下 X 方向上漂移最大值的范围	50
图 4-7-9	光斑稳定后不同情况下 Y 方向上漂移最大值的范围	50
图 4-7-10	光斑稳定后不同情况下空间立体角内漂移最大值的范围	50
表 4-2-1	从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围	22
表 4-2-2	光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	22
表 4-3-1	从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围	29
表 4-3-2	20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	29
表 4-3-3	光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	30
表 4-4-1	从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围	37
表 4-4-2	20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	37
表 4-4-3	光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	38
表 4-5-1	从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围	44
表 4-5-2	20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	45
表 4-5-3	光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围	45
表 4-6-1	从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围	48

表 4-7-1	不同控制条件下光斑到达稳定状态所需的时间51
---------	------------------------

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研 究成果.尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已 经发表和撰写过的研究成果,也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学 位或证书而使用过的材料.与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文 中作了明确的说明并表示谢意.

学位论文版权使用授权书

本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国 防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档,允 许论文被查阅和借阅;可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密学位论文在解密后适用本授权书。)

学位论文题目: <u>激光光斑漂移的检测与控制</u> 学位论文作者签名: <u>王春阳</u> 日期: 2006年 5月15日 作者指导教师签名: <u>1112</u> 日期: 2006年 5月15日

第一章 绪论

§1.1 对激光光束的漂移进行检测与控制的意义

He-Ne 激光光束由于其良好的方向性、高亮度及高稳定性等优点,常被作为测量基准 广泛应用于超精密加工设备及测量设备中^[1,2]。激光准直^[3-5]技术已经在机床准直、大型机 械设备的装调,形位误差测量等领域得到广泛应用。在这些应用中,激光束被用作必要的 长距离参考光线,激光准直光束的功率不稳定,将导致参考光线的漂移,激光光斑的强度 分布不均匀将使参考光线中心难于确定,从而影响准直精度。

众所周知,激光器点亮后,由于放电管自身管体、放电管内外存在不稳定的温度梯度 以及激光管材料的不均匀性等因素的影响,会造成激光器谐振腔两反射镜的相对位置发生 变化,从而引起激光束的漂移、激光输出功率不稳定、激光光斑形状不稳定。另外,周围 环境的振动,光束传播途径的空气折射率不均匀及其随机变化(大气湍流等造成)^[6]等,也 是造成激光光束漂移的重要原因。

激光光束在传播过程中产生的漂移,主要表现为激光束的平漂、角漂及随机漂移,其 量级一般在 10⁻⁴~10⁻⁶rad,这一弱点限制了激光光束准直精度的进一步提高,影响了其在实 际中的应用。因此有必要对激光器输出光束的指向稳定性进行检测和监控,并采取措施对 其进行控制,以减小激光光束的漂移。

§1.2国内外提高激光光束指向稳定性的研究现状

为了提高激光光束的指向稳定性,国内外学者针对不同的使用情况,提出了诸多光束 准直方法:一类是在长距离激光准直系统中,采用波带片、相位板、双缝等产生的干涉和 衍射条纹的空间连线作为基准线,利用它们对漂移量不敏感这一特点,来达到准直的目的, 典型方法有相位板衍射准直法、双光束补偿准直法等,此类方法的准直精度一般在 10⁻⁶ rad 量级左右;另一类是在超精密加工设备及测量设备中常用的激光准直技术,如激光方向稳定 法和单模光纤准直法等,此类方法尽管准直距离短,但其准直精度要求高,因而技术难度 大。通常此类短距离激光准直系统所处的环境较好,造成光束漂移的原因主要是激光器谐 振腔的热变形。

§1.3 开展本课题的目的和在研究中所进行的主要工作

开展本课题的目的是设计出一套系统,该系统要能够实时检测激光光斑的漂移,从而 得到激光光束在空间立体角上的漂移。在此基础上,对激光光源加上不同的控制,如使之 裸露在自然环境之中,或给其加上外罩(分不开孔和开孔两种情况),或对其进行温控等, 通过实验测量和计算,得到不同情况下激光光束漂移量的大小,并分析在给激光光源加上 不同的控制时,光束的漂移量有什么不同,以及产生这些变化的原因。

本课题主要进行了以下几个方面的工作:

1、设计了一套检测激光光斑漂移的系统^[7]。检测系统由激光器、高反射率衰减片、CCD 摄像机^[8]、图像采集处理系统及计算机组成。该系统能实时地采集到激光光束照射到 CCD 光敏面上所形成的光斑,并将所得的信息送到计算机里经由专门的软件处理,同时在监视 器中,可以实时地看到光斑的原始图像,以及经过数据处理后光斑中心位置随时间变化的 情况。

2、编写了一套专门的数据处理软件。该软件能显示出从任意时刻开始到最后光斑中 心位置的移动轨迹,并对该轨迹进行了拟合。得出了这段时间内激光光束在 X 方向、Y 方 向以及空间立体角内漂移大小的最大值、标准差以及其随时间变化的趋势等。

3、对激光光源加上不同的控制(如前面所述),通过多组实验,测量了不同情况下激 光光束漂移量的大小及其变化情况,并分析了产生这些变化的原因。

第二章 光斑漂移检测与控制系统的设计

§2.1影响氦氖激光光束传输质量^[9]的主要因素

在激光准直测量中,一般采用输出 TEM₀₀ 基模的氦氖激光器。由于激光的波动性, TEM₀₀ 基模应满足赫姆霍兹方程

$$\nabla^2 U(x, y, z) + k^2 U(x, y, z) = 0$$
(2-1-1)

当 U(x,y,z) 是沿 z 方向传输的基模激光束,则基模解为

$$U(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}] \exp[-jkz + \frac{k}{2\omega(z)}(x^2 + y^2) - \phi(z)]$$
(2-1-2)

其中

$$\omega(z) = \omega_0^2 [1 + (\lambda z / \delta \omega_0^2)^2]$$
(2-1-3)

由(2-1-3)式可知光斑尺寸随传输距离增加而增大,这是影响光斑质量的一个因素,主要通过加入准直光学系统,增大激光束束腰半径 *ω*。以及调整束腰适当位置等来降低影响。由于在激光准直中主要关心的是激光光能,无需考虑光束的位相信息,所以在(2-1-2)式中可提取光束振幅 A(x,y,z)为

$$A(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp[-\frac{(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}]$$
(2-1-4)

上式表明理想情况下,沿激光传输方向光斑呈高斯分布。实际上由于激光器谐振腔的不严 格平行,导致 A(x,y,z)随 x,y 变化而变化,即

$$dA(x, y, z) = -\frac{2\omega_0 x}{\omega^3(z)} \exp[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}] dx - \frac{2\omega_0 y}{\omega^3(z)} \exp[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}] dy$$
(2-1-5)

dx,dy 即为激光器谐振腔的不严格平行所致。从(2-1-5)式分析可知,如果我们能同时控制 激光器谐振腔在互相正交的 x,y 方向的不平行度使 dx,dy 均趋近于零,即可改善准直光束 质量。

§2.2 光斑漂移检测与控制系统的结构与组成

如下图所示,光斑漂移检测与控制系统由激光器、高反射率衰减片、CCD 摄像机、

图像采集处理系统及计算机组成。



图 2-2-1 光斑漂移检测与控制系统原理图

整个系统被放置在一米多厚的水泥实验平台之上,这样可以减小外界环境振动对实验 造成的影响。在做实验的过程中也要紧闭门窗,尽可能减小光束传播途径中由于空气折射 率波动而造成的激光光束漂移。

(1) 光源部分 光源部分包括 He-Ne 激光器以及温度控制装置。实验中所用的激光器是自制的小型 He-Ne 激光器,其额定功率为 4.5mW,最佳工作电流为 6.0mA。温度控制装置包括一个简易的外罩和数显温控仪,其中数显温控仪采用的是宁波自动化仪表研究所生产的 XMT-152 型数显调节仪,XMT-152 系列是一种全新技术的抗积分饱和 PID 温控仪, 其最大优点是升温过程中无过冲或过冲很小,且温度分辨率达 0.01C°。数显温控仪外接 热敏电阻和加热块,将之放入外罩之中,即可实现对罩内温度的检测与控制。

(2) 衰减片 因为 He-Ne 激光器出射光束的功率很大,而在本实验中采用的是 CCD 光电接收系统,如果 CCD 光敏面上的光照度过大,就会使得 CCD 光电接收系统的输出饱 和而无法工作。因此需要对出射激光进行大幅度的衰减,本实验中采用的是两片衰减片, 其透射率极低。另外在调节光路的过程之中要注意衰减片镀有膜的一面,应该放置在靠近 激光器的一端,这是因为如果将镀有膜的一面放置在远离激光器的一端,激光器的出射光 束照射到该膜面上以后会产生很强的反射光,再经由衰减片的另一面会产生二次反射,该 二次反射不利于光斑漂移的检测,可能会对实验结果造成影响。

(3) CCD 摄像机 CCD 摄像机的作用是通过光敏元及其输出电路将光信号转化成电信号^[10,11]。本实验中采用的是面阵 CCD,不含摄像头,该摄像机采用的是台湾敏通公司的 MTV1881EX 科研用摄像机,它使用 SONY 公司提供的 ICX039DLACCD 面阵,具有灵敏 度高、畸变小、寿命长、抗震动、抗磁场、体积小、无残像、响应的非均匀性低、响应的 非线性度低等优点,MTV1881EX 摄像机特性参数如下:图像像素为 795 (H) ×596(V); 分辨率为 600TVL;最小照度为 0.02 Lux(F1.2, 5600°K); 信噪比大于 50dB; 像素尺寸为 8.6 µm × 8.3 µm。

(4) 图像采集与处理^[12]系统 该子系统包括图像采集卡与"光斑采集与分析"软件。 其作用是将电信号转化成视频图像,并通过软件在监视器上实时地再现光斑图像及其中心 位置随时间变化的轨迹。其中图像采集卡采用的是北京嘉恒中自图像技术有限公司生产的 OK-M10M 卡,它是基于 PCI 总线的标准视频黑白图像采集卡。其技术特点和指标如下: 8 位高精度高信噪比 A/D,宽范围亮度对比度软件调节;输入的视频幅度可适应 0.2V-3V 峰 峰,零点调整可适应±1.5V 变化范围;图像采集采用高效总线分享技术,提高 CPU 并行处 理能力;可支持 1:1 和 4:3 采集点阵比例,最大采集分辩率 768×576;高带宽输入, 数字抗混迭滤波技术,图象水平分辨达 600 线;可采集单场,单帧,连续帧,精确到场。 "光斑采集与分析"软件具体在第三章详述。

(5) 计算机与监视器 计算机与监视器是图像采集与处理系统正常工作的基础和平 台,是数据处理与分析的核心。

最后,将整个实验装置放置到恰当的位置,对好光路之后,用 502 强力胶将所有部件 都粘牢在水泥平台之上,将整个实验装置都固定下来,以避免碰撞及其它人为的原因对实 验结果造成影响。

§2.3光斑漂移检测与控制系统的工作原理

2.3.1 检测系统的工作原理

在 2.1 节的推导中,我们知道在理想情况下,对于不同的传播距离 z,激光输出强度均 呈高斯分布。通常用强度分布半宽的中心位置代表光束传播方向比较合理,此时,测量此 中心位置的位移即可检测出光束方向的变化。

如图 2-2-1 所示, He-Ne 激光器发出的光束通过高反射率的衰减片被衰减之后,直接 照射到 CCD 摄像机的光敏面上。CCD 的光敏像元将其上的光强度转换成电荷量,然后 CCD 在一定频率的时钟脉冲的驱动下,在其输出端可以获得被测对象的视频信号。视频信号中 的每一个离散的电压信号的大小对应于该光敏像元上图像的光强,信号输出的时序对应于 该光敏像元在 CCD 上的空间位置。该信号经图像采集卡采集,所得数据再被送入计算机 中进行相关处理。

通过 CCD 和图像采集卡的采集,可以得到每一帧图像内激光光斑上每一点(像素单元)的位置和光强。将这些数据传送到计算机,通过一定的数学方法即可求出光斑的中心。 具体算法如下: 在这里我们以 CCD 光敏面上激光光斑的强度分布为研究对象,选取强度分布半宽中 心位置的光强为阈值,对阈值范围以内的像素点,以求质心的方式求出光斑的中心位置。 设光敏面上任意一像素点的位置为 p,光强为 I,则该光斑的中心位置可以表示为:

$$p_{\oplus,\phi} = \frac{\sum_{i} p_i I_i}{\sum_{i} I_i}$$
(2-3-1)

由此可知,只要以一定的时间间隔连续不断的采集光敏面上光斑的图像,通过(2-3-1) 式,即可求出它在不同时刻的中心位置,从而检测出该激光光斑在光敏面内的漂移量^Δp。

最后根据几何光学的方法即可求出激光光束在空间立体角上的漂移。如图 2-3-1 所示, 设实际出射光束的方向与基准光轴方向的夹角为θ,激光器输出端到 CCD 光敏面的距离为



图2-3-1 激光光束在空间立体角上的漂移

1,则光束在空间立体角上的漂移为:

$$\theta \approx tg\theta = \Delta p/l \tag{2-3-2}$$

2.3.2 光源系统的温度控制

激光器点亮后,由于放电管自身管体、放电管内外存在不稳定的温度梯度以及激光管 材料的不均匀性等因素的影响,会造成激光器谐振腔两反射镜相对位置变化,从而引起激 光束的漂移、激光输出功率不稳定、激光光斑形状不稳定。因此有必要给激光器周围建立 一个补偿温度场,以减小温度对激光器谐振腔造成的影响。在本实验中,我采用了简易外 罩,并对其各表面开孔,同时内置加热源,通过数显温控仪(包括热敏电阻和加热块)来 检测并保持外罩内的温度场基本不变。其示意图如图 2-3-2。

当激光器工作时,无论外罩开孔或不开孔,谐振腔内的温度都会随着时间逐渐升高, 外罩内的温度也会跟着逐渐升高,直到最后光源系统与外界环境建立起热交换平衡。但是, 外界环境并不是始终不变的,建立起的热平衡将会随时被打破,罩内的温度场也就会随时 发生变化。因此,需要在罩内放置加热源,通过数显温控仪来检测并保持外罩内的温度场 基本恒定。



1-实验平台,2-热敏电阻,3-通光小孔,4-散热小孔, 5-激光器,6-可调节的光具座,7-加热块,8-导线,9-数显温控仪 图2-3-2 光源系统温控装置示意图

如图 2-3-2 所示,当激光器工作时,给温控仪设定一个适当的温度,此时温控仪的热 敏电阻开始检测罩内空气的温度,如果温度小于设定值,则金属加热块开始加热,直到温 度达到设定值时停止加热。由于加热块温度过冲,罩内温度会持续上升一段时间,然后自 然冷却到设定温度附近,当其低于设定值时,加热块又开始加热,但是此时加热块的温度 过冲会比上一次减小,如此反复,加热块的温度过冲就会越来越小直到趋近于零,罩内温 度也就会逐渐稳定在设定温度附近,见图 2-3-3。



图 2-3-3 温控仪控制下的罩内温度趋于稳定的过程

第三章 光斑采集与分析软件与光斑漂移计算程序的介绍

§3.1 光斑采集与分析软件的介绍

光斑采集与分析软件的主要功能是实现对图像采集卡的参数设置以及图像采集与处理的参数设置,驱动图像采集卡采集从 CCD 上传来的信号,在监视器上实时地再现激光 光斑的形状,并通过数据分析与处理实时地描绘出激光光斑中心位置的坐标(X 坐标和 Y 坐标)随时间变化的曲线。

光斑采集与分析软件包括"采集主页面"和"绘图显示"两个界面,如图 3-1-1 和图 3-1-2 所示。

"采集主页面"主要是实时的再现 CCD 光敏面上激光光斑的形状,通过图 3-1-1(a)与 3-1-1(b),我们能清楚地看到由于温度,光束传播途径中大气折射率的波动等因素引起的激 光光斑的变形。在该页面下面的工具栏上还有亮度、对比度、阈值三个选项,用户在实验 中可以根据实际情况适当的调节亮度、对比度参数以达到最佳的显示效果。阈值选项是用 于数据处理的,选取适当的阈值,打开"并行处理"开关,软件即可自动求出在不同时刻 光斑中心位置的坐标。



图 3-1-1(a) CCD 光敏面上激光光斑的形状 (前一时刻)



图 3-1-1(b) CCD 光敏面上激光光斑的形状(后一时刻)

"绘图显示"页面用于描绘前面所得的激光光斑中心位置的坐标(X坐标和Y坐标) 随时间变化的曲线,如图 3-1-2 所示。通过该曲线,可以看到光斑的中心位置随着时间在 不断的变化,而且其总体趋势是沿着某一大致的方向变化的。由图 3-1-2(b)我们还可以看



图 3-1-2(a) 光斑中心坐标随时间变化的曲线



图 3-1-2(b) 光斑中心坐标随时间变化的曲线(有坏点)

到由于外界环境的突然震动而给激光光束造成的巨大偏移,曲线上这样的点称之为坏点, 在做数据处理时,首先要去掉这样的点。

当激光光束照射到 CCD 光敏面上之后, CCD 摄像机和图像采集卡组成的图像采集子 系统对光敏面上的光斑进行采集,并将数字图像信号(光斑上每一点的光强和位置)传送 到计算机中。然后,"光斑采集与分析"软件一边根据获得的数据将 CCD 光敏面上的光斑 图像还原出来,一边根据数据处理的结果自动绘制光斑中心位置随时间变化的曲线。

§3.2 光斑漂移计算程序的介绍

"光斑采集与分析"软件主要是驱动采集卡实现采集功能,得到光敏面上激光光斑的 相关信息,即光斑内每一个象素点上的光强和位置,并作了简单的数据处理。要想得到某 一段时间内,光斑中心位置在光敏面上随时间变化的轨迹,X方向上漂移的最大值、标准 差和随时间变化的详细曲线,Y方向上的漂移的最大值、标准差和随时间变化的详细曲线 等,仅靠"光斑采集与分析"软件是无法实现的。因此在采集到一组数据之后,还需要用 "光斑漂移的计算"程序^[13,14]来进行详细的数据处理。

下面是对一组数据进行处理之后的结果。





100.

150

50

图 3-2-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> ********从实验开始到实验结束这段时间内一一以第一个点为标准 (第1组)********

考察方向	漂移量大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐	标(像素单元)			
X	7.0019e-DD5	143. 161	22, 4253	26.0123			
Y	0.00011624	19.598	20. 3594	24.2579			
L	0.00012534	19.837	20, 7421	24. 3293			
在整个CCD光敏面上漂移距离最大的点与水平方向的夹角为:							
B=-66, 9673	B=-66,9673						

经过曲线拟合后,所得直线与水平方向的夹角为:

C=-44.8407

在整个CCD光敏面上,光斑中心首尾位置(取100个点求平均)的连线与水平方向的夹角为: D=-61.2013

图 3-2-6 数据处理结果

二、光斑稳定以后到实验结束这段时间内。



图 3-2-7 20 分钟以后光斑中心随时间变化的轨迹









图 3-2-11 20 分钟后激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(第1组)*********					
考察方向	漂移量大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
X	1.6585e-005	86.518	22.3103	26.357	4. 7775e-006
Y	1.4553e-005	113.286	20. 9204	26. 7875	4.1198e-006
L	1.9002e-005	86. 757	22, 3033	26, 3762	3, 5446e-006

图 3-2-12 数据处理结果(20分钟以后)

通过图 3-2-1~3-2-12 可以看出,当一组实验数据被读入到"光斑漂移的计算"程序之后,该程序能够迅速地计算出结果,相关参数如下:

(1) 这段时间内激光光束在 X 方向、Y 方向上漂移的最大值,最大值点对应的时间、 坐标,以及该方向上所有点相对于标准点产生漂移的标准差。

(2)这段时间内激光光束在在整个空间立体角内漂移的最大值,最大值点对应的时间、 坐标,以及所有点相对于标准点产生漂移的标准差。

(3) 三个夹角: 在整个 CCD 光敏面上漂移距离最大的点与水平方向的夹角, 经过曲线 拟合后所得直线与水平方向的夹角以及光斑中心首尾位置(取 100 个点求平均)的连线与 水平方向的夹角。通过这些夹角,能够判断出光斑在整个时间段内漂移的大致方向。

在计算出结果的同时,该程序将激光光斑中心位置随时间变化的轨迹以及激光光束在 各个方向上的漂移量随时间变化的趋势描绘成曲线,通过图形,我们能够直观地看到光斑 漂移的方向、趋势、大小以及逐渐稳定的过程。

§3.3 光斑采集与分析软件与光斑漂移计算程序的工作流程

CCD 光敏面上的激光光斑经由图像采集子系统采集,相关采集参数由"光斑采集与分析"软件进行设置,采集获得的数据(光斑内每一点的光强和位置)随之被送入到"光斑 采集与分析"软件进行处理,在监视器上实时地再现激光光斑的形状和光斑中心位置坐标 随时间变化的曲线,同时将该组数据保存到计算机中。实验结束后,"光斑漂移的计算" 程序从计算机中读出数据,进行详细的数据处理,最后得到一系列描绘光斑漂移的曲线和 计算结果。

"光斑采集与分析"软件与"光斑漂移的计算"程序的工作流程如下图所示:



第四章 实验结果与分析

本实验所用系统采用图 2-2-1 所示的装置,光源系统部分如图 2-3-2 所示。激光器输出 端到 CCD 光敏面的距离为 0.69 m。在实验中,对激光光源加上不同的控制,如使之裸露 在自然环境之中,或给其加上外罩(分不开孔和开孔两种情况),或对其进行温控等。分 别在这些情况下进行多组实验,然后利用"光斑采集与分析"软件与"光斑漂移的计算" 程序对所得的多组数据进行数据处理,得到不同情况下激光光斑的漂移大小,从而进一步 得到激光光束在空间立体角上的漂移大小,同时分析在给激光光源加上不同的控制时,光 束的漂移量有什么不同,以及产生这些变化的原因。

§4.1激光光斑漂移的算法

在数据处理与分析中,当激光器裸露在自然环境中时,需要把每一次实验都分为"从 实验开始到实验结束"和"光斑稳定以后到实验结束"这两个时间段来进行研究:当给激 光器加上不开孔或开孔外罩,或对其进行温控时,需要把每一次实验都分为"从实验开始 到实验结束"、"实验开始 20 分钟以后到实验结束"和"光斑稳定以后到实验结束"这三 个时间段来进行研究。对不同的时间段,激光光斑的漂移有不同的算法。

此外,本实验中采用的是 CCD 光电接收系统,为减小 CCD 噪声对实验结果造成的影响,常采用多次平均抑制噪声法,也就是在一段时间内测量多幅图象来代替某一时刻的图 象。将由"光斑采集与分析"软件得到的不同时刻光斑中心的位置,每相邻的 50 个点取 平均,用该平均值点来代替这段时间内某一时刻光斑中心的位置,然后"光斑漂移的计算" 程序再对这些平均值点组成的数组进行进一步处理。

4.1.1 从实验开始到实验结束这段时间内,激光光斑的漂移

此时激光光斑的漂移是相对于实验中所采得的第一个点而言的,如图 4-2-1 和图 4-2-2 中的 **" 点。

设将不同时刻的光斑中心位置,每相邻的 50 个点取平均后,这些平均值点组成的数 组为 m×2 维的矩阵 A。可以看出这个矩阵一共包含 m 个点,其第一个列向量即为所有点 的 X 坐标,第二个列向量即为所有点的 Y 坐标。因此第 i 个点的坐标可表示为 (X_i,Y_i)。 设光斑在 X 方向上的漂移为 delta_X,在 Y 方向上的漂移为 delta_Y,在整个光敏面上漂移 的距离为 delta_L。

则在 X 方向上第 i 个点(X_i,Y_i)相对于第一个点(X₁,Y₁)的漂移为:

$$delta_X_i = X_i \cdot X_1 \tag{4-1-1}$$

在 Y 方向上第 i 个点(X_i,Y_i)相对于第一个点(X₁,Y₁)的漂移为:

$$delta_Y_i = Y_i - Y_1 \tag{4-1-2}$$

在整个光敏面上第i个点(X_i,Y_i)距离第一个点(X_i,Y_i)的距离为:

$$delta_{L_{i}} = \sqrt{(X_{i} - X_{1}) \times (X_{i} - X_{1}) + (Y_{i} - Y_{1}) \times (Y_{i} - Y_{1})}$$
(4-1-3)

因此只要逐个求出每一个点在X方向、Y方向以及整个平面内相对于第一个点的漂移, 找出其绝对值的最大值,该最大值 delta_X_max、delta_Y_max、delta_L_max 即为激光光 斑在 X 方向、Y 方向以及整个平面内漂移的最大值。然后将激光器输出端到 CCD 光敏面 的距离 1=0.69 m 代入 2-3-2 式中,即可求出激光光束在各方向上漂移的最大角度。

"实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内"和"光斑稳定以后到实验结束这段时间内",激光光斑的漂移都是相对于这段时间内所有数据点的平均值点而言的,两者算法相同,下面仅以"光斑稳定以后到实验结束这段时间内"光斑漂移的算法为例进行说明。 4.1.2 激光光斑稳定以后到实验结束这段时间内,光斑的漂移

激光光斑稳定的标准是根据数据处理的结果来大致判断的。如图 3-2-3~3-2-5,通过 激光光束在三个方向上的漂移随时间变化的曲线图,可以看出此次实验经过大约 20 分钟 后,光束在各方向上都不会再产生较大的漂移,CCD 光敏面上的光斑趋于稳定,因此可以 认为此次实验中光斑稳定的时间为大约 20 分钟。其它组实验中,判断光斑稳定所需时间 的方法与之类似。

设光斑稳定以后到实验结束这段时间内,所有数据点 X 坐标的平均值为 x, Y 坐标的 平均值为 y,则平均值点的坐标为(x, y)。此时激光光斑的漂移是相对于平均值点(x, y)而 言的,如图 4-2-8 中的"☆"点, "*"点仍然是所有数据点中的第一个点。

此时,计算漂移最大值的方法与 4.1.1 节中的方法类似。设光斑在 X 方向上的漂移为 delta_X,在 Y 方向上的漂移为 delta_Y,在整个光敏面上漂移的距离为 delta_L。

则在 X 方向上第 i 个点 (X_i, Y_i) 相对于平均值点 $(\overline{x}, \overline{y})$ 的漂移为:

$$delta_X_i = X_i - \overline{X}$$
(4-1-4)

在 Y 方向上第 i 个点 (X_i, Y_i) 相对于平均值点 $(\overline{x}, \overline{Y})$ 的漂移为:

$$delta_{Y_i} = Y_i - \overline{Y}$$
(4-1-5)

在整个光敏面上第i个点(X_i,Y_i)距离平均值点(x̄, ȳ)的距离为:

delta_L_i=
$$\sqrt{(X_i - \overline{X}) \times (X_i - \overline{X}) + (Y_i - \overline{Y}) \times (Y_i - \overline{Y})}$$
 (4-1-6)

同样,只要逐个求出每一个点在 X 方向、Y 方向以及整个平面内相对于平均值点($\overline{x},\overline{y}$)的漂移,找出其绝对值的最大值,该最大值 delta_X_max、delta_Y_max、delta_L_max 即 为激光光斑在 X 方向、Y 方向以及整个平面内的漂移最大值。然后将激光器输出端到 CCD 光敏面的距离 1=0.69 m 代入 2-3-2 式中,即可求出激光光束在各方向上漂移的最大角度。

设光斑稳定以后到实验结束这段时间内,共有n个数据点,则这些点在X方向上相对 于平均值点漂移的标准差为:

$$\sigma(X) = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4-1-7)

这些点在 Y 方向上相对于平均值点漂移的标准差为:

$$\sigma(Y) = \left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \overline{Y})^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4-1-8)

这些点到平均值点的距离相对于平均距离的标准差为:

$$\sigma(L) = \left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (L_i - \overline{L})^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4-1-9)

根据标准差,我们就可以判断出激光光斑的漂移相对于平均值点的偏离程度

§4.2 激光器裸露在自然环境中时激光光斑的漂移

将激光器直接裸露在自然环境之中,不对其加上任何控制。对激光光斑进行多次测量, 处理数据并对结果进行分析。

4.2.1 数据处理的结果

- 一、从实验开始到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



¥.	1.03301-003	41U. 124	21, 7994	26, 749
T	0.00011148	29.875	20. 961	22.2252
L	0.00012636	29.675	20. 891	22.2252
在整个CCD光	數面上課稿距离最大	的点与水平方向的夹	角方:	
3=-61, 9082				

经过曲线报合后。所得直线与水平方向的夹角为:

C=-17, 3882

在整个CCD光敏而上,光亮中心首尾位置《取100个点求平均》的连线与水平方向的夹角为: D=-37.2319

图 4-2-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果_

>> *********	从实验开始到实验结	東这段时间内以第一1	ト点力标准 (第	1虹)*******
考察方向	運移量大值 (red)	是大值对应时间(分钟)	量大值点生	と标(源素単元)
X	7.0936e-005	410. 124	21, 7984	26. 7491
T	0.00011148	29.875	20.681	22. 225Z
L	0.00012636	29.875	20.881	22. 2252
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内以第一个	卜点为标准 (第	2姐)*******
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间(分钟)	最大值点的	と标(像素単元)
X	5.9332e-005	45.127	21.2453	30. 5648
T	0.00011049	5.258	19.3549	24. 8487
L	0.00011757	4.541	19. 8125	24. 886T
>> ********	以实验开始到实验结	束这段时间内以第一个	点为标准(第	32)*******
考察方向	張暮覺大值 (red)	是大位对应时间(分钟)	量大值点生	(探 (課業単元)
X	6.4811e-005	119.022	22, 2589	25. 3937
T	0.00011679	23.9	20. 4109	24. 1339
L	0.00012393	23.9	20. 4109	24. 1339
>> ********	人实验开始到实验结	束这段时间内——以第一1	点为标准 (第	(紅)+++++++
考察方向	课移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	是大值点生	标(像素单元)
I	7.0019e-005	143. 151	22. 4253	25.0123
Y	0.00011524	19.598	20. 3594	24.2579
L	0.00012534	19.837	20. 7421	24. 3293
>> ********	人实验开始到实验结	束这段时间内——以第一1	、点为标准 (第	5虹)*******
考察方向	漂移是大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点生	と标(像素单元)
I	6.045e-005	105.638	21.6489	28. 8754
Y	0.0001243	20.075	20.0649	24. 4002
L	0.00013127	20.554	20. 2764	24. 4318
>> ********	人实验开始到实验结束	家这段时间内——以第一个	、点为标准(第	;粗)*******
考察方向	運移量大值 (red)	最大值对应时间(分钟)	量大值点生	「「「「「「「「「「」」」」
I	5.2354=005	175.904	18, 9394	32, 9705
T	6.4195=005	8.365	16. 4927	24, 3635
L				
	6.6967e-005	8. 365	16. 4927	24, 3635
»» *********	8.6987e-005 认实验开始到实验结!	8.365 发这段时间内——以第一1	16.4927 点方标准 (第	24.3635 7 <u>虹</u>)++++++++
>> ******** 考察方向	8.8987e-005 以实验开始到实验结! 课移最大道 (red)	8.385 束这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟)	16.4927 、点为标准(第 最大值点当	24.3635 7 <u>虹</u>)++++++++ 板(康素单元)
>> ********* 考察方向 I	8.5987e-005 从实验开始到实验结 课移最大值 (red) 5.3942e-005	8.385 東这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟) 125.236	16.4927 点力标准(第 景大值点当 3.65643	24.3835 (哲)******* (像素单元) 41.2593
》********* 考察方向 I I	8.5987e-005 从实验开始到实验结 课移最大值 (red) 5.3942e-005 7.4599e-005	8.365 款这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟)) 125.236 6.214	16.4927 点方标准(第 最大值点当 3.65543 0.0342896	24.3635 7哲)+++++++ 体(康素单元) 41.2593 43.0933
》********* 考察方向 I I L	8.5987e-005 从实验开放到实验结 课移最大值 (red) 5.3942e-005 7.4599e-005 7.8474e-005	8.385 束这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟) 125.236 6.214 287.995	16.4927 点方标准 (第 景大值点当 3.65843 -0.0342896 3 34083	24.3635 7祖)******** 年(康東単元) 41.2593 43.0933 41.9602
》。 考察方向 I L 》。	8.5987 e-005 从实验开放到实验结测 课都最大值 (red) 5.3942 e-005 7.4599 e-005 7.8474 e-005 从实验开放到实验结别	8.385 末这段时间内——以第一1 是大道对应时间(分钟) 125.236 6.214 287.995 末这段时间内——以第一1	16.4927 点为标准 (第 最大值点当 3.65643 -0.0342896 3 34083 点为标准 (第)	24.3635 7哲)******* 经际(課業单元) 41.2593 43.0933 41.9502 9祖)*******
>> **********。 考察方向 I L >> *********。 考察方向	8.5987 e-005 从实验开放到实验结测 课都最大值 (red) 5.3942 e-005 7.4599 e-005 7.8474 e-005 从实验开放到实验结测 课都最大值 (red)	8.385 末这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟) 125.236 6.214 287.995 末这段时间内——以第一1 最大值对应时间(分钟)	16.4927 点方标准 (第 最大值点些 3.65843 -0.0342896 3.34083 点为标准 (第4 最大值点坐	24.3835 7哲)******* 全际(康素单元) 41.2593 43.0933 41.9602 9哲)******** 标(康素单元)
>> *********。 考察方向 I L >> ******** 考察方向 I	8.5987c-005 从实验开始到实验结测 课都最大值(red) 5.3942c-005 7.4599c-005 7.8474c-005 从实验开始到实验结验 课都最大值(red) 5.1842c-005	8.385 末这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟) 125.236 6.214 287.995 末这段时间内——以第一1 最大值对应时间(分钟) 37.523	18.4927 点为标准 (第 最大值点当 3.65643 -0.0342896 3.34083 点为标准 (第4 最大值点当 3.70002	24.3835 7祖)+++++++ 标 (建文单元) 41.2593 43.0933 41.9502 9祖)+++++++ 标 (建文单元) 40.4045
>> ********* 考察方向 I I ン ******** 考察方向 I I	8.6987e-005 从实验开始到实验结测 课移最大值(red) 5.3942e-005 7.4599e-005 7.8474e-005 从实验开始到实验结验 课移最大值(red) 5.1842e-005 8.2781e-005	8.385 末这段时间内——以第一1 量大值对应时间(分钟) 125.236 6.214 287.995 末这段时间内——以第一1 最大值对应时间(分钟) 37.523 252.384	18.4927 点为标准 (第 最大值点当 3.65543 -0.0342895 3 34083 点为标准 (第 最大值点当 3.70002 2.50141	24.3835 7個)+++++++ 标(國東阜元) 41.2593 43.0933 41.9502 9個)++++++ 标(國東阜元) 40.4045 43.9073

图 4-2-7 1~8 组数据处理的结果

- 二、光斑稳定以后到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



图 4-2-13 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> ########20分钟以后到实验结束这段时间内一一以平均值点为标准(第1组)#########						
考察方向	课移是大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点	坐标 (像素单元)	标准差	
X	2.5296-005	105. 877	18. 4578	23. 5198	5, 5949+-006	
Y	6.2703e-005	508. 831	20. 5148	30. 2229	2.0319e-005	
L	5.2704e-005	500.831	20.5148	30.2229	1.1447e-005	
>> ******	+20分钟以后到实验结?	表这段时间内——以平均值	点为标准 (第:	? <u>钜</u>)********		
考察方向	福馨是大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点	坐标 (建素单元)	标准差	
X	1.974e-005	81.25	21.2044	30. 2321	5.22 = -006	
Y	3. 4409e-005	35.133	19.6443	26. 7541	1.3962=005	
L	3.4411e-005	35. 133	19.6443	26. 7541	7, 8964 e-006	
>> *******	*20分钟以后到实验结测	束这段时间内——以平均值	[点为标准 (第:	通)*******		
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间(分钟)	最大值点	坐标 (像素单元)	标准差	
X	2.3643e-005	28.919	19.1163	25. 2903	5.8267=-006	
Y	4.1255 - 005	93. 565	20. 8194	28.6515	7.891e-005	
L	4.1325e-005	93.668	20, 8194	28.6516	8. 2234e-005	
>> *******	*20分钟以后到实验结测	束这段时间内以平均值	试力标准 第 4	(紅)********		
考察方向	複移是 大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点	坐标 (孝素单元)	标准差	
x	1.6585e-005	86. 518	22. 3103	26. 357	4.7775e-006	
T	1.4553e-005	113.286	20, 9204	26. 7875	4.1198a-005	
L	1.900Ze=005	66. T 57	ZZ. 3033	25. 3752	3, 5448 - 00 5	
>> ++++++	*20分钟以后到实验结!	東这段时间内——以平均值	远力标准 (第)	5姐)********		
考察方向	漂都是大值(red)	量大值对应时间(分钟)	量大值点	坐标(像素单元)	标准差	
X	1.3602 -005	8T. 713	19.566	28, 8361	3. 5449e-006	
T	2.4867e-005	105.16	20. 7126	28. 2028	9.0844e-006	
L	2.4571e-005	105.16	20.7126	28.2028	5. 4742 e-006	
				-		
>> +++++++	中20分钟以后到实验结	>> ########20分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第8组)#########				
海棠万百						
	張移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	是大值点	坐标(像素单元)	标准差	
X	谋移最大值 (rad) 2.5432g=005	最大值对应时间(分钟) 32.026	最大值点 15.4553	坐标(像素单元) 31.397	标准差 7.5329e=006	
X Y	漢移最大值 (rad) 2.5432g-005 3.916g-005	最大值对应时间(分钟) 32.026 21.51	量大值点 15.4553 15.5183	坐标(康素单元) 31.397 28.8194	标准差 7.5329e-005 8.4591e-005	
X Y L	源移最大值 (rad) 2.5432;=005 3.916=-005 4.627=-005	量大值对应时间(分钟) 32.026 21.51 21.51	量大值点 15.4553 15.5163 15.5163	坐标 (康素单元) 31.397 28.8194 28 8194	标准差 7.5329e-005 8.4591e-005 6.3218e-005	
X Y L >> ++++++	源移最大值 (red) 2.5432 ar-005 3.916 ar-005 4.627 ar-005 ∞20分钟以后到实验结	量大值对应时间(分钟) 32.025 21.51 21.51 束这段时间内──以平均1	最大值点 15.4553 15.5183 15.5183 直点为标准 (第	坐标(像素单元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194	标准差 7.5329=006 8.4591=005 6.3218=006	
X Y L 考察方向	孫移最大值(rad) 2.5432e-005 3.918e-005 4.627e-005 ∞20分钟以后到实验结 语称最大值(rad)	最大值对应时间(分钟) 32.028 21.51 21.51 束这段时间内──以平均的 最大值对应时间(分钟)	量大值点 15.4553 15.5183 15.5183 直点为标准 (第 量大值点	坐标 (康素单元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 28.6194	标准差 7.5329e-005 8.4591e-005 6.3218e-005 标准差	
X Y L 为》******* 考察方向 X	漢称最大值 (red) 2.5432 = 005 3.916 = 005 4.627 = 005 ≈20分钟以后到实验结 误称最大位 (red) 2.5752 = 005	最大值对应时间(分钟) 32.025 21.51 21.51 束这段时间内──以平均的 最大值对应时间(分钟) 35.65 85.55	最大值点 15.4553 15.5183 15.5183 直点为标准(第 最大值点 0.519059	坐标(像素単元) 31.397 28.8194 28 8194 71型) ※ ※ (像素単元) 39.4549 39.4549	标准差 7.5329=-005 8.4591=-005 6.3218=-005 标准差 5.876=-005	
X Y L 対象方向 X Y	漢称最大值 (red) 2.5432 = -005 3.916 = -005 4.627 = -005 ⇒20分钟以后到实验结 漂都最大位 (red) 2.5752 = -005 3.7373 = -005	最大值对应时间(分钟) 32.025 21.51 21.51 束这段时间内→以平均0 最大值对应时间(分钟) 35.85 20.315 37.315	■大值点 15.4553 15.5183 15.5183 15.5183 直方标准(第 ●大位点 0.519059 1.77483	 坐标(爆素単元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 71担)********** 坐标(爆素単元) 39.4549 37.5787 	标准差 7.5329=-005 8.4591=-005 6.3218=-005 标准差 5.876=-005 1.1112=-005	
X Y L 》 ******* 考察方档 I I L	漢称最大值 (red) 2.5432 = 005 3.916 = 005 4.627 = 005 ≈20分钟以后到实验结 漂都最大位 (red) 2.5752 = 005 3.7373 = 005 3.9346 = 005	最大值对应时间(分钟) 32.025 21.51 21.51 束这段时间内→-以平均0 最大值对应时间(分钟) 35.65 20.315 22.227 ★260720 + 118755	■大值点 15.4553 15.5163 15.5163 直点为标准(第 量大值点 0.519059 1.77463 1.16174	本示(課業単元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 7(担) 39.4549 37.8787 37.8585 37.8585	标准差 7.5329=-006 8.4591=-005 6.3218=-005 5.875=-005 1.1112=-005 7.0277=-008	
I I L >> ******** 考察方向 I L >> ********	深移最大值 (red) 2.5432 = -005 3.916 = -005 4.627 = -005 **20分钟以后到实验结 深移最大位 (red) 2.5752 = -005 3.7373 = -005 3.9346 = -005 **20分钟以后到实验结	最大值对应对问(分钟) 32.125 21.51 21.51 束这段时间内→-以平均值 最大值对应对回(分钟) 35.85 20.315 22.227 束这段时间内→-以平均值 最大值和(可可)(2.25)	■大值点 15.4553 15.5163 直点为标准(第 量大值点 0.519059 1.77463 1.16174 直点为标准(第 二年)	▲示 (康素单元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 29.4549 39.4549 37.6587 37.6587 37.8585 841)**********	标准差 7.5329=-006 8.4591=-005 6.3218=-005 5.876=-005 1.1112=-005 7.0277=-008	
I I L 为第六内 I I L 次 参数方向	深移最大值 (red) 2.5432 = -005 3.916 = -005 4.627 = -005 ⇒20分钟以后到实验结 深移最大值 (red) 2.5752 = -005 3.7373 = -005 3.9346 = -005	最大值对应时间(分钟) 32.125 21.51 21.51 束这段时间内→-以平均的 最大值对应时间(分钟) 35.85 20.315 22.227 束这段时间内→-以平均的 最大值对应时间(分钟)	■大恒点 15.4553 15.5183 15.5183 直点为标准(第 量大值点 0.519059 1.77463 1.16174 直点为标准(第 量大值点 量大值点	 坐标(像素单元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 29.4549 37.6787 37.6585 841)******* 坐标(像素单元) 	标准差 7.5329=-006 8.4591=-005 6.3218=-005 5.876=-005 1.1112=-005 7.0277=-005 标准差	
I I L 为第方向 I I L 为第方向 I I	漢称最大值 (red) 2.5432 = -005 3.916 = -005 4.627 = -005 5 = 20分钟以后到实验结 深都最大值 (red) 2.5752 = -005 3.7373 = -005 3.9346 = -005 3.9346 = -005 5 = 20分钟以后到实验结 深都最大值 (red) 1.5255 = -005	最大值对应时间(分钟) 32.125 21.51 21.51 束这段时间内→-以平均的 最大值对应时间(分钟) 35.85 20.315 22.227 束这段时间内→-以平均的 最大值对应时间(分钟) 38.24 29.315	■大恒点 15.4553 15.5183 15.5183 直方有标准(第 重大值点 0.519059 1.77463 1.16174 重大位点 3.71066	 坐标(课案单元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 29.4549 37.6787 37.6585 811)******** 坐标(课案单元) 40.2958 29.650 	标准差 7.5329=-006 8.4591=-005 6.3218=-005 5.875=-005 1.1112=-005 7.0277=-005 标准差 4.1914=-005	
I I L う家方内 I L う家方内 I I I I J -	漢称最大值 (red) 2.5422 = 005 3.918=005 4.627 = 005 ※20分钟以后到实验结 2.5752 = 005 3.7373 = 005 3.8348 = 005 *20分钟以后到实验结 漢称最大值 (red) 1.5255 = 005 3.8223 = 005 3.8223 = 005	量大值对应时间(分钟)	局大值点 15.4553 15.5183 直方标准(第 重大值点 0.519059 1.77463 1.16174 直方标准(第 量大值点 3.71056 2.23008	 坐伝(康東単元) 31.397 28.8194 28.8194 28.8194 28.8194 29.4549 37.6787 37.8585 8世)******** 坐标(康東卓元) 40.2959 38.9608 29.000 	标准差 7.5329=-006 8.4591=-005 6.3218=-005 5.876=-005 1.1112=-005 7.0277=-005 标准差 4.1914=-005 1.0714=-005	

图 4-2-14 1~8 组数据处理的结果

4.2.2 结果分析

由图 4-2-2 和图 4-2-8 可以看出,激光器刚开始工作时,激光光束的指向是不稳定的, 在极短的几秒钟时间内,光敏面上的光斑会在小范围内做上下左右的摆动,但是随着时间 的延长,光斑在总体趋势上会沿着某个大致的方向逐渐漂动,大约 20 分钟之后,光斑逐 渐稳定在一个较小的区域之内,并在该区域之内作上下左右的无规则摆动。

光斑之所以会产生这样的漂移,是因为激光器点亮后,由于放电管自身管体、放电管 内外存在不稳定的温度梯度以及激光管材料的不均匀性等因素的影响,会造成激光器谐振 腔两反射镜相对位置变化,另外周围环境的振动,光束传播途径的空气折射率波动等这些 因素都会造成激光光束发生漂移,照射到 CCD 光敏面上的光斑也会随之产生漂移。随着激光器的持续工作,激光器谐振腔的温度会逐渐上升,腔壁受热膨胀慢慢变形。经过大约 20 分钟之后,腔内温度场基本稳定下来,腔壁的变形不会再产生较大的变化,因此激光器 的出射光束也不会再发生较大的漂移,而逐渐趋于稳定,反映到 CCD 光敏面上,激光光 斑就会稳定在一个较小的范围之内,如图 4-2-8 所示。

经过多次测量,由图 4-2-7 可知,从实验开始到实验结束这段时间内,相对于第一个 点(X₁,Y₁),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最大值的 范围如下表所示:

表 4-2-1 从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	5. 1×10 ⁻⁴ <delta_x_max<7. 1×10<sup="">-6</delta_x_max<7.>
Y 方向	7. $4 \times 10^{-6} < \text{delta}_Y = 1.3 \times 10^{-6}$
整个空间立体角内(L方向)	$7.8 \times 10^{-6} < \text{delta}_L \text{max} < 1.4 \times 10^{-6}$

经过多次测量,由图 4-2-14 可知,从光斑稳定以后到实验结束这段时间内,相对于平均值点($\overline{\mathbf{x}},\overline{\mathbf{y}}$),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最大值的范围如下表所示:

	漂移最大值的范围(rad)
X方向	$1.3 \times 10^{-5} < \text{delta}_X \text{max} < 2.6 \times 10^{-5}$
Y 方向	$1.4 \times 10^{-4} < delta_Y_max < 6.3 \times 10^{-4}$
整个空间立体角内(L方向)	$1.9 \times 10^{-6} < \text{delta}_L \text{max} < 6.3 \times 10^{-6}$

表 4-2-2 光班稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

从上表可以看出,在对激光器不加任何控制时,激光器受环境和温度的影响很大,出 射光束的漂移较大,20分钟以后,激光器趋于稳定,出射光束的漂移角也随之减小,但是 由于没有给激光器加上任何控制,激光光束指向受环境和温度的影响仍然很大。因此,要 想在此基础上提高激光光束的准直精度,减小漂移,就需要给激光器加上一定的控制,以 减小外界因素对其造成的影响。

§4.3 给激光器加上不开孔外罩时激光光斑的漂移

当激光器工作时,在其外面加上一个简易外罩,外罩不开孔,罩内也不加任何温度控

制装置。对激光光斑进行多次测量,处理数据并对结果进行分析。

- 4.3.1 数据处理的结果
- 一、从实验开始到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



图 4-3-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> ********从实验开始到实验结束这段时间内----以第一个点为标准 (第1组)****** 考察方向 深移最大值 (rad) 最大值对应时间 (分钟) 最大值点坐标 (徽素单元) X 4 5601 =-005 18. 881 40.1192 9.21195 0 00013572 14.818 T 39.8187 8, 15009 0 00014203 14.818 8, 15009 L 39. 8187 在整个CCD光敏面上漂移距离最大的点与水平方向的夹角为: 8=-72,6605 经过曲线拟合后,所得直线与水平方向的夹角为: C=-61,9728 在整个CCD光敏面上,光亮中心首尾位置(取100个点求平均)的连线与水平方向的夹角为: **D=-64**, 755

图 4-3-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> ******	从实验开始到实验结	荣这段时间内——以第一	个点方标准(第)	粗)*******
考察方向	運移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)) 最大值点坐	标(像素单元)
X	4. 5601 a-005	18.881	40.1192	9.21195
Y	0.00013572	14.815	39. 6187	8. 15009
L	0.00014203	14.615	39. 6187	8.15009
>> *******	从实验开始到实验结	束这段时间内以第一	个点为标准 (第2	粗)******
考察方向	源移量大值 (red)	最大值对应时间(分钟)) 最大值点坐	标(爆索单元)
X	4.0499a-005	13. 145	39.4636	7.75829
Y	6.1251e-005	12. 428	39.4199	7.53145
L	7.313e-005	12. 429	39. 4199	7.53146
>> =======	从实验开始到实验结	束这段时间内以第	个点为标准 (第3	组)******
考察方向	復移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)) 最大值点坐	标(像素单元)
I	4. 6785e-005	15.296	39.4587	7.66607
Y	0.00010665	13.662	39. 413	7.37534
L	0.00011637	13.862	39.413	7.37534
>> ******	从实验开始到实验结	束这段时间内以第一	个点为标准(第4	组)+++++++
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	1 最大值点坐	标(像素单元)
I	3.1755e-005	11.95	40, 1979	7.92048
T	6.7151e-005	5. 453	37, 2921	15.9727
L	6. 7299e-005	6. 453	37, 2921	15. 9727
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内以第	卜点为标准(第5	虹)****** *
考察方向	運移最大值 (rad)	是大值对应时间(分钟)	一 量大值点坐	标(像素单元)
X	1.949e-005	14. 579	1.23875	35. 3249
T	5. 3609e-005	326, 474	0. 399121	42, 9448
L	8. 4246e-005	325.474	0.399121	42. 9448
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	卜点方标准 0第8	值)*******
考察方向	课移最大值 (red)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)
X	2.0992=005	339.141	0. 976229	40. 3971
Y	7.718e-005	8.214	-1. 99669	41.5811
L	1.7374e-005	6.214	-1.69569	41.5511
»» *******	从实验开始到实验结果	束这段时间内——以第一个	点为标准(第7组	() ******
考察方向	源移量大値 (rad)	量大值对应时间(分钟)	最大值点坐相	家(康素单元)
I	1.5043e-005	14.34	-0.211504	36. 4185
T	8. 6349e-005	387. 419	-0. 656268	44. 0779
L	8. 6985e-005	387, 419	-0. 556255	44.0779
>> *******	从实验开始到实验结束	束这段时间内——以第一个	点为标准(第8	[)*******
考察方向	课移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐持	〒(像素単元)
X	1.6304=005	319.065	-0. 797867	43, 6589
Ŧ	0.00010354	327, 43	-0.911247	44.0537
L	0 00010461	327, 43	-0.911247	44.0537

图 4-3-7 1~8 组数据处理的结果

二、实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内:

(1) 一次测量的结果



(2) 多次测量的结果

>> *******	*20分钟以后到实验结	束这段时间内以平均值	重点为标准(第1	<u>组</u>)********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点的	☆标(像素单元)	标准差
X	1.0389e-005	20. 554	40.0259	9.69526	2.9069e-006
Y	4.0328e-005	20.315	39.924	9.58862	1.0581e-005
L	4.1347e-005	20.315	39.924	9.58862	7.7318e-DO6
>> *******	*20分钟以后到实验结测	束这段时间内以平均值	i点为标准 (第2)	值)*******	
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间 (分钟)	量大值点生	标(像素单元)	标准差
X	1.1178e-005	47.8	36.9432	16.0058	4.1691e-006
Y	4.8479e-005	20, 554	30, 5637	11.4044	8.8503e-006
L	4. 9354e-005	20. 315	38.8059	11.409	7.3932e-006
>> *******	#20分钟以后到实验结验	束这段时间内以平均值	i点为标准 (第3)	团)*******	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
X	1.5737e-005	20. 315	39, 1181	9, 42978	4.9547e-006
¥	4.9639e-005	20.315	39.1181	9. 42978	1.5581e-005
L	5.2074e-005	20.315	39.1181	9. 42970	1.0162e-005
>> *******	*20分钟以后到实验结药	束这段时间内以平均值	[点为标准 (第4)	<u>组</u>]*********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐	統(傷素单元)	标准差
X	1.1972e-005	20.315	39.5116	11,0085	3.6894e-006
Y	4. 3083e-005	20.315	39.5116	11.0005	1.2591e-005
L	4. 4715e-005	20. 315	39.5116	11.0085	8.5547e-006
»» ******	*20分钟以后到实验结束	使这段时间内以平均值	点为标准 (第5)	<u>I)</u> ********	
考察方向	漂移最大值(red)	量大值对应时间 (分钟)	最大值点坐	「标(像素单元)	标准差
X	7.4934e-006	29.397	0.916197	38, 0604	2.0963e-006
Y	6.135e-005	20.315	0, 097273	36.7228	1.4059e-005
L	6.1778e-005	20.315	0.897273	36.7229	9.8888e-006
>> ********	20分钟以后到实验结束	反这段时间内以平均值	点为标准 (第6)	<u>[]</u>)********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐	标 (像素单元)	标准差
X	9.5903e-006	87.235	-0. 455707	38, 5093	3.5895 e -006
Y	5.3803e-005	20. 793	-0.128861	35, 3238	1.2545e-005
L	5.4085e-005	20. 793	-0.128861	35.3238	8.0609e-006
>> *******	20分钟以后到实验结束	起我时间内以平均值	点为标准 (第7集	₫)********	
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐	标(像素单元)	标准差
X	5.6825e-006	20.554	-0.289583	38, 7612	1.4304e-DD6
Y	5.882e-005	20. 315	~D. 359738	38, 7329	B. 4519e-006
L	5.9016e~005	20. 315	-0.359738	36. 7329	7.1333e-006
>> *******	20分钟以后到实验结束	这段时间内以平均值	点为标准(第8组])********	
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间 (分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
X	4.9874e-006	319.304	-0.810069	43.6485	2. 2041 e=006
Y	6. 5271 e-005	20. 315	-1.41097	37.4687	1.7142e-D05
L	6,5319e-005	20. 315	-1.41097	37.4687	1.0014e-005

图 4-3-14 1~8 组数据处理的结果

- 二、光斑稳定以后到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果







(2) 多次测量的结果

>> *******	●50分钟以后到实验结	专这段时间内——以平均	宜点为标准 (建	[1 2]]#########	I
考察方向	連移量大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)) 最大復点	全标 (建食单元) 标准差
X	2.6591 e-005	105.594	38,863	13. 4775	9.1591e-007
T	3.8221005	110.179	38.8742	13.5539	1.7423=-006
L	4.4125#-005	110, 179	38,8742	13,5539	6.8654e-007
>> ******	1960分钟以后到实验线	使这段时间内	南点为标准に	201 1 *******	
考察方向	運移量大信(rad)	最大值对应时间(分钟)) 景大復点) 标准美
1	6.173e-006	51, 423	37.4699	15.9536	2.3411=006
T	5.4208e-005	61.423	37.4699	15,9535	2.6256#-006
T.	8 9059-006	61 423	377 4600	15 9536	1 4259-005
>> entered		专注段时候内	百占为标准门	L'ALL LARGERSON	
美洲大台	······································	着大值对应时间(分钟)	● 一番大信さ	坐标 (儒客单元	したなた芽
¥	2 2603-006	51 824	37 3976	14 1478	9 2665=-007
Ť	7 2365006	50 429	37 651	14.0758	1 1132-005
• •	3 3588	50.420	37 451	14 1759	6.9970-007
		古汝段财间出	かんせんちょう	29.0000 1485)	0.00/28 00/
****	「変換長子信」」)	朱达3511月17 - 51 41		坐后,通去自示	
~>#///5	4 2006		20 0278	14 0050	1 E297006
A V	4.2008-000	01.104 61 665	30.03/0	14.7000	2,3000006
*	0.44(3#"000	01.002	30, 3313	14. [419	3.2009(-000
r	6.4593e-106	61.002	30. 3513	14.1418	1,42036-300
>> +++++++	150分钟以后到实验结	束这段时间内以平均值	点为标准 (第	組)*******	
考察方向	運移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标 (康素单元)	标准差
I	6.1891e-006	402.715	0.798154	42.0678	1.9428e-006
Y	8.2715e-006	326. 713	Ö. 445891	42. 9366	2.7785e-006
L	8.4648a-006	326. 713	0.445891	42. 9366	1.3937=-006
>> +++++++++	150分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均的	1点为标准 (第)	组)******* *	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点生	标(像素单元)	标准差
X	7.8519 -006	361.846	-0 22361	40. 5458	3.1455a-006
T	6.03e-006	161. D96	0.13706	39. 7447	2.2269-008
L	8. 7917 e-005	361.846	~0. 22381	40.5458	1.4982e-005
>> *****	100分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均值	L点力标准(第1	/虹)********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
X	4.7108s-006	118.305	-1.13531	43. 5337	1, 3923a-006
Y	5.7554a-006	566.267	-0.591701	43.2006	2.2334e-006
l,	6.1145e-006	586.267	-0.591701	43, 2066	1.1484e-006
>> *******	200分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均值	[点为标准 (第8	姐)*******	
考察方向	標移量大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点生	标(儒素单元)	标准差
I	4.677e-006	303 53	-1.41428	43.6557	1.0815=006
T	3.6615e-006	276. 574	-0. 953387	43, 4817	1,2591=-006
L	4,9157=006	303, 53	-1.41428	43.8557	7.8699#~007

图 4-3-21 1~8 组数据处理的结果

4.3.2 结果分析

由图 4-3-1、图 4-3-8 和图 4-3-15 可以看出,此时激光光斑的漂移可以分为三个阶段: 首先,在激光器刚开始工作的一段时间内,光敏面上的光斑会沿着一定的轨迹逐渐漂动, 当然在间隔极短的几秒钟时间内,光斑仍然会在小范围内做上下左右的摆动;然后,随着 实验时间的延长,在同样大小的区域内采集到的点数越来越多,大约 20 分钟后,光斑逐 渐趋于稳定,但是此时光斑不会像激光器裸露在自然环境中时那样迅速的稳定在一个较小 的固定范围内,而是如图 4-3-8 所示沿着某个方向作长距离的漂移;最后经过大约 50 分钟 之后,光斑才渐渐稳定在一个较小的固定区域内。

光斑之所以会产生这样的漂移,是因为这次实验给激光器加上了一个外罩,激光器点

亮后,激光器谐振腔温度上升,向外散发出热量,使得外罩内气体的温度也会上升,短时 间里,罩内热空气上升,冷空气下降,空气对流比较剧烈,温度场不稳定,所以在实验初 始阶段,激光光斑总体趋势上会忽上忽下的以某种轨迹运动。

随着激光器的持续工作,激光器谐振腔不断向外散发热量,因为外罩没有开孔,罩内 热量散发不出去,所以罩内温度会持续上升。经过大约 20 分钟以后,虽然罩内温度仍会 上升,但是罩内大气的对流已趋于稳定,罩内各点之间的温度差趋于稳定,因此光斑在小 范围内将趋于稳定;同时,由于罩内的温度持续上升,谐振腔的管壁也会慢慢的持续变形, 出射光束的方向也就渐渐发生漂移,因此 20 分钟时,激光光斑不会逐渐稳定在一个较小 的固定区域内,而是沿着某个方向作长时间长距离的漂移。50 分钟后,由于谐振腔的管壁 变形不再产生较大的变化,光斑不会在大范围的漂移,而逐渐稳定在一个固定的范围之内。

经过多次测量,由图 4-3-7 中数据可知,从实验开始到实验结束这段时间内,相对于 第一个点(X₁,Y₁),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最 大值的范围如下表所示:

	漂移最大值的范围(rad)
X方向	1.6×10 ⁻⁵ <delta_x_max<4.7×10<sup>-5</delta_x_max<4.7×10<sup>
Y方向	6. $1 \times 10^{-5} < \text{delta}_Y = 1.4 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内(L 方向)	$6.4 \times 10^{-5} < \text{delta} L_{\text{max}} < 1.5 \times 10^{-4}$

表 4-3-1 从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围

经过多次测量,由图 4-3-14 中数据可知,从实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内,相对于平均值点(x, x),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最大值的范围如表 4-3-2 所示。

	漂移最大值的范围(rad)
X方向	$4.9 \times 10^{-6} < delta_X_max < 1.6 \times 10^{-6}$
¥方向	$4.0 \times 10^{-5} < delta_Y_max < 6.6 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内(L方向)	4. $1 \times 10^{-6} < \text{delta}_L = \max < 6.6 \times 10^{-6}$

表 4-3-2 20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

经过多次测量,由图 4-3-21 中数据可知,从光斑稳定以后到实验结束这段时间内,相 对于平均值点(x, x), He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移 最大值的范围如表 4-3-3 所示。

ATT TO THAT ADA	
	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	2. 2×10 ⁻⁴ <delta_x_max<7. 9×10<sup="">-6</delta_x_max<7.>
Y 方向	3. 2×10 ⁴ <delta_y_max<8. 3×10<sup="">4</delta_y_max<8.>
整个空间立体角内(L方向)	3. 3×10 ⁴ <delta_l_max<9. 0×10<sup="">4</delta_l_max<9.>

表 4-3-3 光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

将上面的数据与"激光器裸露在自然环境中"时的数据比较可知(参见图 4-7-1~图 4-7-10),给激光器加上不开孔的外罩之后,无论从实验开始到实验结束还是实验开始 20 分钟后到实验结束,激光器出射光束在 X 方向上的漂移明显减小,但是在 Y 方向和整个空 间立体角内光束的漂移两者相差不多,有时甚至变得更大。这是因为在只给激光器加上不 开孔的外罩时,激光器工作期间,罩内的热量散发不出去,罩内温度随着时间的延长而持 续上升,使得罩内热空气上升,冷空气下降,从而在罩内形成一个上高下低的温度场,使 得谐振腔的管壁持续变形,所以,与激光器裸露在自然环境中时相比,直到 CCD 光敏面 上的光斑最终稳定之前,这种情况下的激光器受温度的影响更加直接,激光光束的漂移更 大。而在同一个水平面内,由于温度场的作用,管壁两侧的温度几乎相同,所以在 X 方向 实际上对激光管进行了较好的温控,其漂移反而会变得较小。

从实验开始 50 分钟以后到实验结束这段时间内,光斑达到最终稳定状态,整个光源 系统与外界建立了平衡,激光管壁的变形不再产生较大的变化,激光光束不会再产生较大 的漂移。从图 4-7-1~图 4-7-10 可以看出与激光器裸露在自然环境中时相比,此时光束在 各个方向上的漂移都大大减小,基本上控制在 10⁻⁶rad 量级。

§4.4 给激光器加上开孔外罩时激光光斑的漂移

当激光器工作时,在其外面加上一个简易外罩,外罩各表面都开有散热小孔。对激光 光斑进行多次测量,处理数据并对结果进行分析。

4.4.1 数据处理的结果

- 一、从实验开始到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



>> #######从实验开始到实验结束这段时间内----以第--个点为标准(第1组)####### 考察方向 福希景大值(#ad) 最大值对应时间(分钟) 最大值点坐标(像素单元)

X	1.599e-005	15.057	0.96222	36. 1228
Y	9. 5429e-005	527.951	0.0085819	45. 1689
L	9.5517e-005	527.951	0.0085618	45. 1689
在整个CCI的	後面上課幕距离最大	的点与水平方向的夹角为	:	
8=87.5377				
经过曲线指令	合后,所得直线与水 ³	平方向的实角为:		

C=-68, 4033

在整个CCD光敏面上,光亮中心首尾位置(取100个点求平均)的连线与水平方向的夹角为: 1=68.3803

图 4-4-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> *******	从实验开始到实验结	東这段时间内——以第一个	点为标准(第1	()*******
考察方向	课移量大但 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐得	际(像素单元)
X	1.599-005	15.057	0.95222	36, 1226
Y	9. 5429e-005	527.951	0.0085618	45.16 8 9
L	9.5517e-005	527.951	0.0085518	45. 1689
>>	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准(第2)	()********
考察方向	張琴最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	最大值点坐得	尿(爆素单元)
I	1.8111e-005	12.189	0. 832944	36.0024
T	9.6248 = -005	258.12	-0, 121977	45.0439
L	9.6448=-005	258.12	-0. 121977	45.0439
» ********	从实验开始到实验结	来这段时间内——以第一个	点为标准 (第3)	()******
考察方向	運移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐得	家(康素单元)
I	1. 7099e-005	214. 383	47. 5241	51.7804
Y	6.4637 e-005	4.053	45. 4645	59.9221
L	6.5203e-005	4.063	45. 4645	59.9221
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准 (第4)	E)+++++++
考察方向	運移最大值 (red)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐椅	家(像素单元)
X	2.6592e-005	54.291	46.5684	62. 344
T	1.0368e-005	5.975	47.6973	63.551
L	7. 1493e-005	5. 975	47.6973	63, 551
»» *******	从实验开始到实验结	表这段时间内以第一个	点为标准 (第5集	E)++++++
考察方向	漂暮最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐得	家(康実単元)
X	4.1902-005	28.919	25.0115	42, 5044
Y	0.00011737	19.359	24. 8997	41.1948
L	0.00012417	19.359	24. 8997	41.1948
>> ++++++++	从实验开始到实验结果	束这段时间内——以第一个	点力标准 (第6集	[] ***** **
考察方向	漂移最大值 (rad)	是大值对应时间(分钟)	最大值点坐得	家(像素单元)
I	4. 2182=005	100, 141	25. 5744	43.5425
Y	8. 98e-005	14, 101	25, 1792	40.142
L	9.7883=-005	15.057	25. 3208	40. 1445
\\		医法氏动脉病 11 第一条	. E dedictalia riskera	·
***	「赤大型汀和到大型気」 「海安島十度と」」)	来这权则吗约——以第一了 ————————————————————————————————————	見入る法律の制度	임/유송효고)
*	104974LA1E(0164)	10 010	ALA 19.75-21	5 UK AL-F-JLJ
1 T	3. 10396-003	10.030	24.0122	39.33% 30.3480
1	0.00011343	0.043	43.0334 43.0534	33.2402
L		9.002, 东达约66日由——巴第——————————————————————————————————	La. 3339 L'Additation	39.2411 6)
	次会選刀和判会選究: 連会是十度に		見た方にしたの	님/######## 남/#######
つ素カ門			-7 41457	
*	2.10071-005	3.240	-1.41135	20.2(04
	0.1008-103 0.2227005	J. 207	-1.4321	10.2011 nd ataa
	0. JIZI CUUD	101.L A. 100	-r. 41019 .http://www.com/color	20.2023
// ***********************************	れ 失惑 オ 知 乳 失 聖 若 ! 「 海 教 美 子 法 人		品力保健し影響	▋J ₽₽₽₽₽₽₽ ╡ <i>╽</i> ┺╼╴┷╶┈╺
「安奈刀門」	编码无人词 (red)	電大區河燈的詞(分钟)	三天道泉堂(「山東早元」
	J. 1410e-105	11.472		31.0005
	U. LUUI 185	10.755	-7.54370	31.3491
L	u. UUU12369	10, 755	-7.64378	31, 3491

图 4-4-7 1~9 组数据处理的结果

- 二、实验开始20分钟以后到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



>> *******	*20分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均值	点为标准 (第1集])********	
考察方向	课移量大值(rad)	景大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标 (康素单元)	标准差
X	8.5531 e-008	486.516	-0.40719	44. 9344	1.7977e-006
T	5 31T2-005	20, 315	0. 521059	40 2607	8.5316e-006
L	5.4135e-005	20.315	0. 621069	40. 2807	5. 8458 e-005

图 4-4-13 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

.

与新方向 課事業大値(+4) 最大位別短时间(分钟) 最大位点坐琴(健東単元) 称准差 I 6.5531+-006 448.515 -0.47119 44.9344 1.7777+005 I 5.5315+-005 20.315 0.821069 40.2307 5.6455e-003 I 5.5315+005 20.315 0.821069 40.2307 5.6455e-003 S=531767 205 20.315 0.821069 40.2307 5.6455e-003 S=531767 205 20.315 0.821089 40.2307 5.6455e-003 I 5.5357+005 20.4171 -0.73495 44.5337 3.4773e-005 I 5.7465e-005 20.315 0.452108 39.8238 9.6304e-003 I 5.7465e-005 20.315 0.452108 39.8238 7.6055 I 6.75146-005 20.315 45.7238 57.3053 9.3413-006 I 6.7514e-005 20.315 45.7238 57.3053 9.3413-006 I 6.7514e-005 20.315 45.7238 57.3053 9.3413-006 I 6.7514e-005 20.315 45.7238 57.3053 9.3413-006 I 1.3779e-005 21.271 48.213 81.8122 4.6396e-003 I 1.3799e-005 21.271 48.213 81.812 4.6396e-003 I 1.3799e-005 21.271 48.213 81.812 4.6396e-003 I 1.3294e-005 20.315 40.1374 81.3147 2.6469e-003 I 2.6101+r035 20.315 40.1374 81.3147 2.144e-005 I 2.6101+r035 20.315 40.1374 81.3147 2.6469e-003 I 2.6101+r035 20.315 40.1374 81.3147 4.1036+003 I 2.6101+r035 20.315 25.354 41.414 4.6455+006 I 2.6101+r035 20.315 25.354 41.414 4.6455+006 I 2.6101+r035 20.315 25.354 41.1414 4.6455+006 I 2.6101+r035 20.315 25.354 41.1414 4.6455+006 I 2.6101+r035 20.315 25.354 41.1414 4.6455+006 I 2.0318+r025 20.315 23.4614 45.1759 5.8252+007 I 2.0308+r025 20.315 23.4614 45.1759 5.8252+007 I 2.0308+r025 20.315 23.4614 45.1759 5.8252+007 I 2.030	»» *******	20分钟以后到实验结!	束这段时间内以平均值	点为标准 (第1)	()++++++++	
I 6. SS31 = 008 468. S15 -0. 40719 44. 9344 1. 7977 = 005 I 5. JTZ= 705 20. 315 0. 821089 40. 2007 8. 5318=-005 >>==================================	考察方向	深移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	是大值点坐	标(像素单元)	标准差
I 5. 3772-005 20. 315 0. 821099 40. 2007 8. 5316+-005 L 5. 4155+-005 20. 315 0. 821089 40. 2007 8. 6531-005 Semantana Contraction 20. 315 0. 821089 40. 2007 8. 6531-005 Semantana Contraction 20. 171 -0. 734095 44. 5337 3. 4773-006 I 5. 7620-005 20. 315 0. 452106 39. 8223 9. 6004-003 S. 7620-005 20. 315 0. 452106 39. 8223 7. 6172-005 S. 7620-005 20. 315 0. 452106 39. 8223 7. 6105-006 I 1. 3337-005 20. 315 45. 5538 56. 9311 3. 6496-006 I 1. 3337-005 20. 315 45. 7538 57. 3953 7. 6805-006 I 1. 3377-005 20. 315 45. 1774 81. 3147 2. 6494-006 I 1. 3377-005 20. 315 45. 1774 81. 3147 2. 6494-006 I 1. 3979-005 20. 315 45. 1774 81. 3147 2. 6494-006	X	6.5531 e-006	468, 516	-0.40719	44, 9344	1.7977e-005
L 5.4125m-005 20.315 0.621069 40.2007 5.8458005 プ事方内 課事先点値(-a) 単大値内波可汚(分中) 単大位点並率(確定単) 新た口点 不能生 プ事方内 課事先点値(-a) 単大値内波可汚(分中) 単大位点並率(確定単) 第 第 3 6.5557 = 0.05 20.315 0.452106 39.6236 9.6304-005 L 5.7465 = 0.05 20.315 0.452106 39.6236 7.8172 = 0.05 >>**********************************	Y	5. 3772 e-005	20.315	0.621069	40.2807	6.5316+-006
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	L	5.4135e-005	20. 315	0. 621069	40.2807	5.8456-006
今期方向 張琴士位(-a1) 量大値对反时间(分中) 量大位点坐标(建東中元) 标准差 3、4773=-005 24、57485=-005 20、315 0.452105 3、4773=-005 1、5.7485=-005 20、315 0.452105 3.8236 7.8256=-005 20、315 0.452105 3.8236 7.8256 7.8257=-005 20、315 0.452105 3.8236 7.8258 7.8259 7.8258 7.8259 7.8258 7	»» •••••••	20分钟以后到实验结	家这段时间内以平均值	点为标准 (第2)	g)********	
I 8.5057 (= 0.08 294.171 -0.734395 44.5337 3.4773 = 0.06 I 5.7425 = 0.05 20.315 0.452106 39.8238 9.8304 = 0.06 I 5.7628 = 0.05 20.315 0.452105 39.8238 9.8304 = 0.06 I 5.7628 = 0.05 20.315 0.452105 39.8238 7.9172 = 0.05 Y 6.76314 = 0.05 20.733 45.5538 56.9311 3.6468 = 0.06 I 6.9526 = 0.05 20.315 45.7528 57.3958 7.6805 = 0.05 S 6.9526 = 0.05 21.271 48.215 81.8122 4.9398 = 0.06 I 1.2294 = 0.05 21.271 48.174 61.3147 2.6494 = 0.06 I 1.2294 = 0.05 21.315 46.1374 61.3147 2.144 = 0.06 V 2.8078 = 0.05 20.315 46.1374 61.3147 2.144 = 0.06 I 1.3279 = 0.05 20.315 45.1374 61.3147 2.144 = 0.06 I 1.3078 = 0.05 20.315 2.4205 41.34	考察方向	深郡最大值(rad)	最大值对应时间(分钟)	最大道点坐	标 (儒素单元)	标准差
Y 5.7485=005 20.315 0.452105 39.8238 9.8304=005 L 5.7628=005 20.315 0.462105 39.8236 7.9172=005 考察方向 選事是大位(+a) 最大位対反时(-3)中地位(-3)方能で(第33)===================================	X	8.5057-005	284.171	-0. 734395	44, 5337	3.4773a-006
1 5. T822e-005 20. 315 0. 452105 39. 8238 T. 91 T2 e-005 3 #************************************	Y	5.7485-005	20.315	0.452106	39, 5236	9.8304 <i>e</i> -005
>> *******20分钟以后到梁敏喆求送速时间内一	L	5.7628e-005	20.315	0.452105	39.8236	7.9172a-005
当葉方内 孤寒皇大位 (>> ++++++++++	20分钟以后到实验结?	表这段时间内以平均值	点方标准 (第3)	<u>************</u>	
I 1.8337 m 005 20.793 45.5538 56.9311 3.6466 m 005 I 6.7614 m 005 20.315 45.7258 57.3658 8.3413 m 006 L 8.9526 m 005 20.315 45.7258 57.3658 7.6605 m 005 >> **********************************	考察方方	張移最大値 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐	标(像素单元)	标准差
T 6. 7614e-005 20. 315 45. 7258 57. 3858 8. 3413e-005 L 6. 9626e-005 20. 315 45. 7258 57. 3858 7. 6805e-005 Smatterstersterstersterstersterstersterster	I	1.8337a-005	23.793	45.5538	56.9311	3.6468 - 006
1. 8.9528=005 20.315 45.7258 57.3658 7.6805=006 > *******20分钟以后到实验结束这段时间内一以平均值点为标准(端4道)******** 第 第 第 第 第 第 3.0027 1.2248=005 21.211 48.215 81.8122 4.9398=006 1 1.3379=005 20.315 48.1374 61.3147 2.6494=006 1 1.3790=005 20.315 48.1374 61.3147 2.6494=006 2 1.7790=005 20.315 48.1374 61.3147 2.6494=006 2 1.7790=005 20.315 48.1374 61.3147 2.6494=006 3 3.0627=006 162.52 24.5865 43.4201 8.9322=007 3 3.0627=005 20.733 24.9205 41.347 5.1208=006 1 2.6078=005 20.733 24.9205 41.347 5.1208=005 2 2.078±25476(±0.4) 最大位市投加対内(549) 最大位市支半56 43.4753 1.2078=005 2 8.0361=005 20.315 25.3546 41.1414 6.	T	6.7614-005	20. 315	45.7258	57.3858	8.3413#-006
>> *******20分钟以后到实验结束这段时间内一	L	8.9526=-005	20.315	45.7250	57.3858	7,6805+-006
考察方向 課修量大值(5-43) 最大值对应时间(分钟) 最大值点坐标(錄素単元) 标准差 I 1.3879+005 21.271 48.215 81.8122 4.9396+006 I 1.2245-005 20.315 48.1374 61.3147 2.64694+006 L 1.7798+005 20.315 48.1374 61.3147 2.144=-006 >> 1.7798+005 20.315 48.1374 61.3147 2.144=-006 >> 1.7798+005 20.315 48.1374 61.3147 2.144=-006 >> 3.0627+006 162.52 24.5985 43.4201 8.9352+007 I 2.6078+005 20.793 24.9205 41.347 5.1208+006 L 2.6101+005 20.793 24.9205 41.347 4.1366+006 L 2.6101+005 20.793 24.9205 41.347 4.1366+006 L 2.6101+005 20.315 25.3548 41.1414 6.694+006 L 2.8115=005 20.315 25.3548 41.1414 6.694+006 L 2.8118	>> =======	20分钟以后到实验结	束这段时间内以平均值	点方标准 (第4)	E)+++++++	
I 1.3879+005 21.271 48.215 81.8122 4.9398+006 I 1.2249+005 20.315 48.1374 61.3147 2.6494+006 L 1.7789+005 20.315 49.1374 61.3147 2.144=006 >> exexexes20分钟以后到实验结束这段时间内→以平均位式方容在(建)到) 東大道点型板(電)東手元) 标准整 考察方向 課書量大値(rad) 最大信对皮町同(分钟) 最大道点型板(電)重) 8.0352=007 I 3.0527=006 182.52 24.5855 43.4201 8.9352=007 I 2.6078=005 20.793 24.9205 41.347 5.1205=006 I 2.6189=005 20.793 24.9205 41.347 4.1306=006 > execcccc20分钟以后到实验结束这段时间内→以平均位点方标准(建)====================================	当寨方向	運移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点当	标(康素单元)	标准差
I 1.2249<-005	I	1,3879-005	21.271	48.215	51.5122	4, 9398e-005
L 1.7759-005 20.315 48.1374 81.3147 2.144=-006 沙 ************************************	T	1.2249-005	20.315	48.1374	61.3147	2.6494a-006
>> **********************************	L	1.7798-005	20.315	48.1374	61.3147	2.144=-006
考慮方向 課事違大値(sna) 東大道対反时间(分钟) 東大道点坐标(違素单元) 标准差 I 3.0827e-006 162.52 24.5865 43.4201 8.9352e-007 I 2.6079e-005 20.753 24.8205 41.347 5.1208e-006 L 2.6101e-005 20.753 24.8205 41.347 4.1306e-006 >***********************************	>>	20分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均值	点为标准 (第5)	*********	
I 3.0827 e ^{-0.06} 182.52 24.5855 43.4201 8.9352 e ^{-0.07} I 2.6079 e ^{-0.05} 20.753 24.8205 41.347 5.1208 e ^{-0.06} L 2.6101 e ^{-0.05} 20.753 24.8205 41.347 4.1306 e ^{-0.06} > ***********************************	考察方向	派務量大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(爆索单元)	标准差
Y 2.6079e-005 20.793 24.9205 41.347 5.1208e-006 L 2.6101e-005 20.793 24.9205 41.347 4.1306e-006 > ********20分钟以后到实验结束这段时间内	I	3.0527 -006	162, 52	24.5865	43. 4201	8.9352e-007
Ⅰ 2.6101 e-005 20.793 24.9205 41.347 4.1306 e-006 >> ********>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	Y	2.6079e-005	20. 793	24. 9205	41.347	5.1205e-005
>> ********>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>	L	Z. 6101 - 005	20.793	24.9205	41.347	4.1306=-006
考察方向 課題集大值 (+ e4) 集大復対臣町间 (分钟) 集大復点坐标 (課素単元) 标准差 I 6.0361 e-005 107.799 24.8407 43.4753 1.2878 e-005 I 2.8115 e-005 20.315 25.3548 41.1414 8.694 e-005 I 2.8118 e-005 20.315 25.3548 41.1414 8.685 e-006 I 2.8118 e-005 20.315 25.3548 41.1414 4.6455 e-006 >> execcesses/2004 PHUL后到实验结束这段时间内	>> ++++++++	20分钟以后到实验结3	表这段时间内-一以平均值	点方标准 (第8)	E)******	
I 8.036/s=005 107.799 24.8407 43.4753 1.2978=-005 Y 2.8115=-005 20.315 25.3548 41.1414 8.694s=-006 L 2.8118=-005 20.315 25.3548 41.1414 8.694s=-006 >> ==================================	考察方向	運移着大但 (red)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
Y 2.8115=-005 20.315 25.5545 41.1414 6.6854=-006 L 2.8118=-005 20.315 25.3546 41.1414 4.6485=-006 >> *******20分钟以后到实验结束这段时间内	I	5.0361 g-005	107.709	24.8407	43, 4753	1.2878a-006
L 2 8/18=-005 20.315 25.3548 41.1414 4.6485=-006 >> exxxxxxx20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(第7组)exxxxxxx 考索方向 漢事是大值(real) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(漆素单元) 标准差 X 2.3036=-006 17.197 23.808 46.0084 7.7984=-007 Y 3.1992=-005 20.315 23.4814 45.1758 9.1398=-006 L 3.2e-005 20.315 23.4814 45.1758 5.8325=-006 >> exxxxxxx20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(第0組)====================================	Ŧ	2.8115e-005	20, 315	25, 3546	41, 1414	5 5594e-005
 >> extensest20分钟以后到实验结束这段时间内──以平均值点为标准(第7型)extensest3 考察方向 源準量大值(r ed) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(像素单元) 标准差 X 2.3036=-006 177.197 23.808 46.0084 7.7984e=007 Y 3.1992e=005 20.315 23.4814 45.1758 9 1398e=006 L 3.2e=005 20.315 23.4814 45.1758 5.8325e=006 >> extensest20分钟以后到实验结束这段时间内──以平均值点力标准(第0組)extensest 考察方向 液準量大值(r ed) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(像素单元) 标准差 X 5.2866e=005 20.554 -0.8422 34.1753 3.5663e=005 L 1.0005e=005 20.554 -0.84223 34.17539 2.1083e=006 X 1.0005e=005 20.554 -0.84223 34.17539 2.1083e=006 X 1.0005e=005 20.554 -0.84223 34.17539 2.1083e=006 X 2.8468=005 10.4.443 -7.84225 37.0854 6.8525e=007 X 2.8347e=005 20.554 -0.1042 34.7233 7.5445e=007 X 2.8347e=005 20.554 -0.1042 34.7233 7.5445e=007 	L	2 8118e-005	20.315	25.3548	41. 1414	4.6465+-006
 >> *********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均但点分存在(準/型)********* 考察方向 環象量大位(rea) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(像素单元) 标准差 X 2.3038=-006 177.197 23.808 48.0084 7.7984=-007 Y 3.1992=-005 20.315 23.4814 45.1758 9.1398=-006 L 3.2e-005 20.315 23.4814 45.1758 5.825e-006 >> *******20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(地包組)******** ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(地包組)******** ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(地包組)******** ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(地包組)******** ********20分钟以后到实验结束这段时间内						
考察方向 漢序集大值(rai) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(原菜早元) 标准差 X 2.3036=-006 77.197 23.808 46.0094 7.7984=-007 Y 3.1992=-005 20.315 23.4814 45.1758 9.1398=-005 L 3.2e-005 20.315 23.4814 45.1758 5.8325=-006 >> ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(想8相)******** 考察方向 漢序量大值(rai) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(建食单元) 标准差 X 5.2866=-008 90.342 -8.31839 35.1129 2.4495=-006 Y 1.0005=-005 20.554 -8.84223 34.7539 3.5663=-006 L 1.0005=-005 20.554 -8.84223 34.7539 3.5663=-006 L 1.0005=-005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1083=-006 S *********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(想9祖)******** 考察方向 漢序量大值(rai) 量大值对应时间(分钟) 量大值点坐标(建家单元) 标准差 X 2.888=-005 104.443 -7.84255 37.0654 8.6525e=-007 X 2.8347e=-005 20.554 -8.1042 34.7233 7.5445e=-005 L 2.8347e=-005 20.554 -8.1042 34.7233 4.8435e=-005	>> *******	20分钟以后到头着话:	灾运度时间内——以半均值	点为存在 (第7	型)********	terine in the
X 2.3036=-006 77.197 23.808 48.0084 7.7984=-007 Y 3.1992=-005 20.315 23.4814 45.1758 9.1398=-005 L 3.2=-005 20.315 23.4814 45.1759 5.8225=-006 >> **********************************	考察方方	清晰最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	着大但点3	2标(康文早元)	称在是
Y 3.1992er005 20.315 23.4814 45.1759 9.1398er005 L 3.2er005 20.315 23.4814 45.1759 5.8325er005 >> ********20分钟以后到实验结束这段时间内~~以平均值点为标准(第0知)******* 考察方向 漢書 未工值 (red) 最大值对应时间 (分钟) 最大值 点坐标 (爆素 単元) 标准差 X 5.2866er004 90.342 -0.31839 35.1129 2.4495er005 Y 1.0005er005 20.554 -0.94223 34.7539 3.5663er006 L 1.0095er005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1083er005 > *******20分钟以后到实验结束这段时间内~~以平均值点为标准 (第9組)******** ************************************	X	2.3036=-006	77, 197	23.808	48.0064	7.7984e-007
L 3.2e-005 20.315 23.4014 45.1759 5.8325=006 >>******** 分析以后到次验结束这段时间内~~以平均值点为标准(第0組)****** 考察方向 復春東大位(seal) 最大位对应时间(分仲) 最大位点型标(康貴単元) 标准差 Y 5.2866=006 90.342 -6.31539 35.1129 2.4495=006 Y 1.0005=005 20.554 -6.94223 34.7539 3.5663=006 L 1.0005=005 20.554 -6.84223 34.7539 2.1083=006 >>*******20分钟以后到实验结束这段时间内~~以平均值点为标准(第9組)******* ******* ******* ******* 考察方向 漂春貴大位(seal) 貴大位对应时间(分钟) 最大位点型标(康素单元) 标准差 *******20分钟以后到实验结束这段时间内~~以平均值点力标准(第9組)******** ************************************	Ŧ	3.1992e-005	20.315	23. 4814	45, 1759	9 1398s-006
 >> *********20分钟以后到实验结束这段时间内~~~以平均值点方标准(课的组)********* >> //////////////////////////////////	L	3.2**005	20.315 2	3. 4814	45.1759	5.8325=-006
今第方向 课都最大值(seal) 最大值对应时间(分钟) 最大值点坐标(课景单元) 标准是 S.2866s=008 90.342 -8.31838 35.1123 2.4495=006 Y 1.0005s=005 20.554 -8.84223 34.7539 3.5663s=006 L 1.0085s=005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1063s=006 >> *******20分钟以后到实验结束这段时间内──以平均值点为标准(课9组)******** 考察方向 课都最大值(seal) 最大值对应时间(分钟) 最大值点坐标(课素单元) 标准差 X 2.898s=005 104.443 -7.84255 37.0854 8.8525s=007 Y 2.8347s=005 20.554 -8.1042 34.7283 7.5445s=005 L 2.8348s=005 20.554 -8.1042 34.7283 4.8435s=006	>> +++++++++	20分钟以后到实验结	東这段时间内以平均值	[点为标准 (第8	粗)********	
X 5.2866e-006 90.342 -8.31639 35.1129 2.4495e-006 Y 1.0005e-005 20.554 -8.84223 34.7539 3.5663e-006 L 1.0095e-005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1063e-006 > *******20分钟以后到实验结末这段时间内	为察方向	復移最大值(rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点生	と标(康貴阜元)	标准差
Y 1.0005e=005 20.554 -0.84223 34.7539 3.5663e=006 L 1.0095e=005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1063e=006 >> *******20分钟以后到实验结末这段时间内	X	5.2966=-006	90. 342	-8.31639	35.1129	2.4495±-006
L 1.0085e-005 20.554 -8.84223 34.7539 2.1083e-006 >> *******20分钟以后到实验结束这段时间内	Ŧ	1.0005#*005	20.554	-8. 84223	34. 7539	3.5663 -005
>> ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★	L	1.0085=-005	20.554	-8.84223	34, 7539	2.1063e-006
考察方向 演移量大值(red) 量大值対应时间(分钟) 量大值点坐标(國家单元) 标准差 I 2.988e=005 104.443 ~7.84255 37.0854 8.5525e=007 I 2.6347e=005 20.554 ~8.1042 34.7283 7.5445e=005 L 2.6348e=005 20.554 ~8.1042 34.7283 4.6435e=006	>> *******	20分钟以后到实验结	束这段时间内——以平均信	点为标准(第9	鉏)*******	
I 2.888e-005 104.443 -7.84255 37.0854 8.8525e-007 I 2.8347e-005 20.554 -8.1042 34.7283 7.5445e-005 L 2.6348e-005 20.554 -8.1042 34.7283 4.8435e-006	考察方向	漢称最大徑 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点的	皆标 (像素单元)	标准差
I 2.8347#-005 20.554 -8.1042 34.7283 7.5445#-005 L 2.6349#-005 20.554 -8.1042 34.7283 4.8435#-006	X	2. 998e-006	104. 443	~7.04255	37.0854	6.6526 e-007
L 2. 6349-005 20. 554 -6. 1042 34. 7263 4. 6435-006	T	2.8347e-005	20. 554	-8.1042	34. 7263	7.5445e-005
	L	2.6349=-005	20. 554	-8.1042	34. 7263	4.6435=-008

图 4-4-14 1~9 组数据处理的结果

- 三、光斑稳定以后到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果





>> *******	60分钟以后到实验结	東这段时间内一一以平均值,	点为标准(第1组)	*****	
考察方向	漂移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐存	(康素单元)	标准差
1	6.4995 =-006	488.515	-9. 424696	44. 9329	1.6439e-005
Y	5.2775=-006	480, 151	D. 0398868	45. 1573	1.64e-005
L	S. 9569 - 006	488.516	-0. 424698	44. 9329	1,1367e-006

图 4-4-20 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> ++++++	480分钟以后到实验结束	收这段时间内以平均值。	5.为标准(第1)	()********	
考察方向	漂移最大值 (red)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
x	6.4995s-D06	488.515	~0. 424698	44. 9329	1.6439a-006
T	5.2775e-006	480. 151	0.0396668	45, 1573	1.64e-006
L	8.9569e-006	486.516	-0. 424698	44. 9329	1.1357e-005
»» *******	70分钟以后到实验结束	友这段时间内——以平均值。	5.为标准(第2)	[]]##########	
考察方向	深移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标 (康素单元)	标准差
I	4.2363=005	168. 973	0.511442	44.7418	1.5258a-005
T	4.1242 -005	140.054	0.0837975	45.0015	1. 3409=-005
L	4. 7344e-006	77.435	0. 475223	44. 4427	9.7854e-007
>> +=====	50分钟以后到实验结束	收这段时间内——以平均值,	5为标准 (第3)	<u>[]+++++++++</u>	
考察方向	漂移最大道 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐	标(像素单元)	标准差
x	5.4155s-008	214. 522	47.5307	51.9086	2.5754=-006
T	6. 5212 e-006	59.071	47.075	51, 3394	2. 8176#1005
L	5.5867e~006	66. 44 2	45 951	51,3517	1.0291e-005
>> ******	+100分钟以后到实验结	束这段时间内一一以平均值	点为标准(第4	组)****** **	
考察方向	源移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标 (像素单元)	标准差
I	8. 3205e-006	109. 701	47.675	62.3299	4.6763#-006
T	3.0082e-008	145.029	45. 8829	61.9341	1,1498a-008
L	8. 5374 - 005	109.701	41.015	52.3266	1.7678e-006
>> ******	50分钟以后到实验结束	复这段时间内——以平均值。	5为标准(第54	E)+++++++++	
考察方向	温移是 大値(red)	是大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标 (康策单元)	标准差
X	2. 7025x-006	96. 229	24.6022	43.6614	0.4923e-007
Y	4.5701e-005	198.609	24.6686	43.9448	2.1361 - 00 6
L	5.0323e-006	195.609	24 6666	43.9448	1.1245e-008
>> *******	50分钟以后到实验结束	1这段时间内——以平均值点	3为标准 (第8)	<u> </u> }********	
考察方向	張暮覺大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像素单元)	标准差
I	4.1889e-005	114.481	24.9802	43.8175	1.4057e-006
T	9 5362 e-006	141. 400	25.0479	44. 3936	3.8956 <i>e</i> -006
L	1.0106e-005	141.488	25.0479	44. 3936	2.1184e-006
	的分钟以后新闻装持	专这段时间内以平均值	「点为标准 (第	7 9 []********	
清洁方白	清林县大信(rai)	長大信对来时(同(分钟)	最大信点	坐标(康素单元) 标准差
X	2 4439-008	17.435	23, 631	48,0092	9.0938=-007
- Y	3 0001-005	81.25	23, 4555	45,0096	1.5633e-006
• 1	3 8638-008	77 436	23, 631	48.0092	6.3635=-007
>>		专该段时间内以平均值	「古力伝律 (集)	 B \$ ET)####################################	
动士方位	「海豚骨大信 (rad)	量大值对应时间(分钟)	最大值点	 半标 (像客单元)) 标准差
Y SHOLES	4 1456-005	90.342	-8.31954	35.1775	1.7545-006
- -	7 4953-008	89 864	-8 37165	35 0653	3.0122-006
1.	8 2519=-005	59.864	-8.37165	35, 0853	1.7273=-006
>> extension	1997日前に「日本」の「日本」	电改叠时间内——以平也值	「古光枝花(菫)		
****	「「「「「「「「」」」、「「「」」、「「」」、「「」、「」、「」、「」、「」、「	最大值财废财间(公益)	書士信占	坐标(建士主干)	() 「「「「」」
つ家4円 ず	9 7024 and 04		-8 273(17	37 2953	9.3558-0077
- -	A 8726	50. TU 52 115	-7 09778	35 8534	2.7259-004
3 T	0.01208-000 6.0393-008	80.113 88 115	-7 00270	26,6524	1 1050-005
ط	0.33036-100	00.113	- 1. 30Z (1)	30.0334	1.000.000

图 4-4-21 1~9 组数据处理的结果

4.4.2 结果分析

由图 4-4-1、图 4-4-8 与图 4-4-15 可以看出,此时激光光斑的漂移规律与外罩不开孔时 是基本相同的。即:激光器刚开始工作的一段时间内,光敏面上的光斑会沿着一定的轨迹 忽上忽下的逐渐漂动,当然在极短的几秒钟时间内,光斑仍然会在小范围内做上下左右的 摆动。大约 20 分钟之后,在同样大小的区域内采集到的点数越来越多,光斑逐渐趋于稳 定,但是光斑仍然在作长距离漂移,直到 80 分钟之后才逐渐稳定在一个较小的范围之内。

光斑之所以会产生这样的漂移,是因为激光器点亮后,激光器谐振腔温度上升,向外 散发出热量,使得外罩内气体的温度也会上升,虽然本次实验给外罩开了孔,而且开孔的 个数使得外罩的散热速度大于激光器的散热速度,但是罩内空气与罩外空气也有一个从相 互开始对流到逐渐稳定的过程,激光器散发出的热量并不是一下子散发到罩子外面去,而 是先充满罩内,同时慢慢的通过散热小孔与外界大气进行热交换,直到整个系统达到平衡。 所以在 80 分钟以前,光斑仍然有一个长距离漂移的过程。80 分钟以后,由于此时开孔的 个数较多,罩内的热量逐渐散发出去,罩内温度不会在持续上升,系统逐渐达到平衡,激 光器也逐渐稳定下来,因此,最后光斑不会再做长距离漂移,而是逐渐稳定在一个固定的 区域之内。

经过多次测量,由图 4-4-7 中数据可知,从实验开始到实验结束这段时间内,相对于 第一个点(X₁,Y₁),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最 大值的范围如下表所示:

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	$1.5 \times 10^{-5} < delta_X_max < 4.3 \times 10^{-5}$
Y方向	6. $4 \times 10^{-5} < \text{delta}_Y = 2 \times 10^{-4}$
整个空间立体角内(L方向)	$6.5 \times 10^{-6} < delta_L_max < 1.3 \times 10^{-4}$

表 4-4-1 从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围

经过多次测量,由图 4-4-14 中数据可知,从实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内,相对于平均值点(x, y),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最大值的范围如下表所示:

表 4-4-2 20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

	漂移最大值的范围(rad)
X方向	2. 3×10 ⁻⁶ <delta_x_max<1. 9×10<sup="">-6</delta_x_max<1.>
Y方向	$1.0 \times 10^{-5} < delta_Y_max < 6.8 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内(L 方向)	$1.0 \times 10^{-5} < delta_L_max < 7.0 \times 10^{-5}$

经过多次测量,由图 4-4-21 中数据可知,光斑稳定以后到实验结束这段时间内,相对于平均值点 $(\overline{x},\overline{y})$, He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最

大值的范围如下表所示:

夜中中のノルルなど	点成九九木仁古川冯上凉梦敢入道\$12°位
·	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	2. $4 \times 10^{-4} < delta_X_max < 8. 4 \times 10^{-4}$
Y方向	3.0×10 ⁴ <delta_y_max<9.6×10<sup>4</delta_y_max<9.6×10<sup>
整个空间立体角内(L方向)	$3.8 \times 10^{-4} < delta_L_max < 1.1 \times 10^{-4}$

表 4-4-3 光斑稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

由上面的结果可知(参见图 4-7-1~图 4-7-10),给激光器加上开孔的外罩之后,与激 光器裸露在自然环境中时相比,无论从实验开始到实验结束还是实验开始 20 分钟后到实 验结束,激光器出射光束在 X 方向上的漂移明显减小,但是在 Y 方向和整个空间立体角内 光束的漂移两者相差不多;与激光器加上不开孔外罩时相比,两种情况下激光光束的漂移 规律和大小基本相同,只是在实验开始 20 分钟后到实验结束这段时间内,光束的漂移在 各方向上都略微减小。

从实验开始 80 分钟以后到实验结束这段时间内,光斑达到最终稳定状态,谐振腔管 壁的热变形不再产生较大的变化,激光器出射光束不会再发生较大的漂移。从图 4-7-1~图 4-7-10 可以看出与激光器裸露在自然环境中时相比,此时光束在各个方向上的漂移都大为 减小,基本上控制在 10⁻⁶rad 量级。

由前面的分析已知,在给激光器加上开孔和不开孔的外罩时,光斑的漂移规律基本相同,形成这种规律的原因也大致相同,所以两种情况下激光器出射光束的漂移大小也相差不大。但是,由于此时给外罩开了孔,罩内热量向外散发的速度大大加快,减小了给激光器加上不开孔外罩时,罩内温度对激光器造成的直接影响,缩短了光斑达到稳定状态所需的时间,所以在实验开始 20 分钟后到实验结束这段时间内,光束的漂移比激光器加上不 开孔外罩时在各方向上都略微减小。同时,与激光器裸露在自然环境之中时相比,外罩的存在,也减小了外界环境因素对激光器的影响,所以,当光斑最终稳定后,光束在各个方向上的漂移都大大减小了。

§4.5 对激光器进行温控时激光光斑的漂移

在本节的实验中,我们采用图 2-3-2 所示的装置,通过外罩和温控仪给激光器周围建 立起补偿温度场,同时对激光光斑进行多次测量,处理数据并对结果进行分析。本节对激 光光斑的漂移一共进行了六组测量,每次实验持续10小时以上,温控精度为1 C°。

- 4.5.1 数据处理的结果
- 一、从实验开始到实验结束这段时间内:
- (1) 一次测量的结果



>> ********从实验开始到实验结束这段时间内~~-以第一个点方标准(第1组)********

考察方向	滅移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	家(健業単元)
X	4 0346=-005	B21.443	20.5091	24. 4787
Ŧ	5.8898=-005	958. D48	19.9427	23. 9119
L	6.5747=-005	865.045	19.9427	23.9119
在整个CCD并	建而上漂着距离最大	的点与水平方向的夹角方:		
8=-59. 5838				
经过曲线机	合后,所得直线与水平	了向的夹角为:		
C=-69, 3314				
在整个CCI的	·黄茵上,光斑中心首;	尾位置(取100个点求平均) 的连线与水 ³	平方向的夹角为:
D=-56. 6264				

图 4-5-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> ======	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准 (第)	值)*******
考察方向	濃暮最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	最大值点当	标(健素单元)
I	4.0346 - 005	B21. 443	20, 5091	24, 4787
Y	5. 6698 e-005	866.048	19.9427	23, 9119
L	6. 5747 e-005	866. 046	19. 9427	23, 9119
>> *******	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准 (第2	坦)******
考察方向	運移量大值 (red)	量大值对应时间(分钟)	量大值点当	标(像素单元)
I	1.0029-005	5.258	18, 1254	30, 3059
Y	8. 5782 - 005	52.102	18.6747	31. 0761
L	8. 6488 - 005	52.102	18. 6747	31.8761
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准 (第3	姐)*******
考察方向	這種是大值 (red)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(康奎阜元)
X	2.2092e-005	13, 145	2.50722	37, 4188
Y	9.375e-005	50 907	~0. 24358	45. 4075
L	9. 4736e-005	59.75	~0, 443696	45. 3818
»» ********	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准(第	纽)****** *
考察方向	運移量大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(像集单元)
I	2.2785a-005	81.977	1, 35996	37, 1808
Y	7.2913e-005	5.019	-0.929973	44 3927
L	7.314a-905	5.019	-0.929973	44, 3927
>> ********	从实验开始到实验结	束这段时间内——以第一个	点为标准(第5	趙)******
考察方台	语移量大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐	标(源素单元)
X	4. 63284-005	37,045	24 6331	33, 6606
Y	8.482 - 005	315.958	23.0175	30, 7825
L	6.9559e-005	392. 916	23. 3652	30.6729
»» ******* *	从实验开始到实验结果	束这段时间内——以第一个	点方标准 (第6	虹)*******
考察方向	温春 量大道 (rad)	量大值对应时间(分钟)	最大值点坐	标(像素单元)
I	3.357=-005	ST5. D34	13.7945	38.7479
T	0.00015208	550 556	14. 1187	39.0351
L	0.00015492	550.656	14.1197	39.0351

图 4-5-7 1~6 组数据处理的结果

二、实验开始20分钟以后到实验结束这段时间内:

(1) 一次测量的结果



图 4-5-13 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> *******	*20分钟以后到实验结	束这段时间内以平均值	1点为标准 (第1	蛆)********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点。	坐标(像素单元)	标准差
X	2.5841 e-005	46.366	17.7778	32.1479	0.2545e-006
ĭ	8.8819e-005	62.14	18.041	32.9907	2.5579e-005
L	9.1668e-005	62.379	18.0189	32.9874	1.9488e-005
>> ********20分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准 (第2组)********					
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点的	と标(像素单元)	标准差
X	1, 7913e-005	59. 272	18.3406	31, 5324	6.7473e-006
Y	0.9819e-005	52.102	18.6427	31.8635	3.0072e-005
L	9.0926e-005	52.102	18.6427	31.8635	1.9923e-005
>> *** * ***	#20分钟以后到实验结验	束这段时间内以平均值	1点为标准 (第3	狙)********	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点的	と标(像素单元)	标准差
X	2.3213e-005	85, 323	-0.647611	44.5218	7.6889e-006
Y	9.505e-005	50.907	-0.231192	45. 4113	3.118e~005
L	9.6759e-005	59.989	-0, 407023	45. 3771	2.1222e-005
>> ******	*20分钟以后到实验结?	束这段时间内以平均值	i点为标准 (第4	狚)*******	
考察方向	漂移最大值(rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点的	と标(像素単元)	标准差
X	1.0310e-005	75.046	1.41075	37. 1341	5. 8083e-006
Y	5. 7617e-005	25.812	0. 0427946	44, 2355	1.2563e-005
L	5.7685e-005	26.529	-0.386206	44.2293	7.939e-006
>> *****	*20分钟以后到实验结实	東这段时间内以平均值	[点为标准 (第5	粗)*******	
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点台	皆标(像素单元)	标准差
X	2.5002e-005	505.963	21.3447	32.6934	5,1586e-006
Y	5.242e-005	91.059	23. 6954	37.2739	2, 5047e-005
L	5.2595e-005	91.059	23.6954	37.2739	1.1788e-D05
>> ******	20分钟以后到实验结束	東这段时间内以平均值	[点为标准(第6	组)********	L
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点的	e标(像素单元)	标准差
X	1.982e-005	21.51	16.8409	28.18	6.5511e-006
Y	8.2809e-005	20.554	16.7713	27.7485	2.1341e-005
L	8.495e-005	20. 554	16. 7713	27.7405	1,4609e-005

图 4-5-14 1~6 组数据处理的结果

三、光斑稳定以后到实验结束这段时间内:

(1) 一次测量的结果







图 4-5-19 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量

>> ********400分钟以后到实验结束这段时间内以平均值点为标准(第1组)*********					
考察方向	漂移最大值 (red)	量大值对应时间(分钟)	最大值点生	标(像素单元)	标准差
X	2.8578e-006	67 8 . 76	19,9814	24, 9086	9.6543e-007
Y	3.5311e-006	417.533	20. 2125	24.5512	1.1061e-006
L	3.5312e-006	417.533	20.2125	24. 5512	7.2112e-007

图 4-5-20 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> **********00分钟以后到实验结束这段时间内一一以平均值点为标准(第1组)*********					
考察方向	濃移量大値(rad)	最大值对应时间(分钟)	量大值点坐	彩(康素单元)	标准差
I	2.8578-006	6 76 76	19.9814	24. 9085	9.6543e-007
T	3.5311e-008	417.533	20.2125	24.5512	1.1061e-005
L	3. 5312 - 006	417.533	20.2125	24.5512	7.2112e-007
>> *******	+400分钟以后到实验结	谏这段时间内——以平均位	直点为标准 (第2)	<u>()********</u>	
考察方向	漂移量 大値(rad)	最大值对应时间 (分钟)	量大值点坐机	第(課業单元)	标准差
I	4.3054-005	630. T21	20. 4336	23.2966	1, 1943005
T	3. 1573e-006	437 848	20.1049	23. 4961	9.7299e-007
L	4.354=008	530. 721	20 4336	23.2968	7.1981 <i>e</i> -007
>> ******	450分钟以后到实验第	读这段时间内——以平均的	1点为标准 0萬3	<u>()*******</u>	
考察方向	课移最大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐椅	家(康素単元)	标准差
X	8 0201 - 006	469.157	2.31002	36.4549	3.178e-005
T	7.1067 - 00 6	455, 773	1.55111	36, 7096	2.5735e-006
L	6.9983=-006	469.635	2.3099	36.469	1.5034=-005
>> *******	1300分钟以后到实验统	谏 注段时间内——以平均的	点为标准(第4)	<u>8)********</u>	
考察方向	張移量大値 (rad)	是大值对应时间(分钟)	最大值点坐椅	家(像素単元)	标性差
X	6.6939e-006	334, 361	-0.0037032	40.3013	1.681e~005
Y	3.9418e-006	398.852	-0.280319	40, 5688	1,4857#*006
L	5. 7243e-006	334, 361	-0.0037032	40, 3013	9.453e-007
>> *******	250分钟以后到实验组	速这段时间内一一以平均值	1点力标准(第5	()*********	
考察方向	漂暮量大値(rad)	景大值对应时间(分钟)	最大值点坐得	ま(康実単元)	标准差
1	6. 1954 - 106	299. 705	23. 7052	31.5969	2.9579e-006
Y	7,2057e-006	315, 958	23.049	30, 7836	3. 4928e-006
L	9.2153e-006	281. 542	23 6401	31.9239	1.6569-006
>> #######250分钟以后到实验结束这段时间内一一以平均值点为标准(第6组)#########					
考察方向	漢都是大值 (rad)	量大值对应时间(分钟)	量大值点坐得	家(像素单元)	标准差
X	3.2237 e-006	398.652	15.108	33, 5509	1.031e-006
I	8. 8693e-006	250 95	15. 3827	33. 7259	3.2972 -008
L	8. 9715e-006	250.95	15. 3827	33. 7259	1.8935=-006

图 4-5-21 1~6 组数据处理的结果

4.4.2 结果分析

由于给激光器周围建立补偿温度场是一个非常缓慢的过程,在给激光器进行温控时, 激光光斑的漂移规律与只给激光器加上外罩时是基本相同的,光斑从开始漂移到最终稳定 的过程中间也有一个"小区域内稳定,大范围内长距离漂移"的过程。

经过多次测量,由图 4-5-7 中数据可知,从实验开始到实验结束这段时间内,相对于 第一个点(X₁,Y₁),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最 大值的范围如下表所示:

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	1.8×10 ⁻⁵ <delta_x_max<4.9×10<sup>-5</delta_x_max<4.9×10<sup>
Y方向	5.6×10 ⁻⁴ <delta_y_max<1.6×10<sup>-4</delta_y_max<1.6×10<sup>
整个空间立体角内(L方向)	$6.5 \times 10^{-4} < delta_L_max < 1.6 \times 10^{-4}$

表 4-5-1 从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围

经过多次测量,由图 4-5-14 中数据可知,从实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内,相对于平均值点(x, x),He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最大值的范围如下表所示。

	漂移最大值的范围(rad)	
X 方向	$1.7 \times 10^{-5} < delta_X_max < 2.6 \times 10^{-5}$	
Y方向	$5.2 \times 10^{-6} < \text{delta}_Y = 0.6 \times 10^{-6}$	
整个空间立体角内(L 方向)	$5.2 \times 10^{-5} < \text{delta}_L = 0.7 \times 10^{-5}$	

表 4-5-2 20 分钟后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

经过多次测量,由图 4-5-21 中数据可知,光斑稳定以后到实验结束这段时间内,相对 于平均值点(x, y), He-Ne 激光器输出光束在 X 方向、Y 方向、整个空间立体角内漂移最 大值的范围如下表所示。

表 4~5-3 光班稳定后激光光束在各方向上漂移最大值的范围

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	$2.8 \times 10^{-6} < \text{delta}_X \text{max} < 8.1 \times 10^{-6}$
Y方向	3. 1×10 ⁻⁶ <delta_y_max<8. 9×10<sup="">-6</delta_y_max<8.>
整个空间立体角内(L方向)	$3.5 \times 10^{\circ} < \text{delta}_L \text{max} < 9.3 \times 10^{\circ}$

将上面的结果与前三种控制条件下所得到的结果比较可知(参见图 4-7-1~图 4-7-10), 对激光器进行温控后,从实验开始到实验结束,激光器出射光束的漂移规律与给激光器加 上外罩时基本相同。从实验开始 20 分钟以后到实验结束这段时间内,相对于前三种情况 而言,激光光束在各方向上的漂移都有明显偏大。这是因为在实验中,我们发现在对激光 器进行温控时,光斑稳定下来需要 250-400 分钟左右,比前三种情况下光斑稳定下来所花 的时间要长的多,因此光斑稳定下来之前持续漂移的时间相对较长,漂移的大小就相对较 大了。

从实验开始 250-400 分钟以后到实验结束这段时间内,光斑达到最终稳定状态,谐振 腔管壁的热变形不再产生较大的变化,激光器出射光束不会再发生较大的漂移。从图 4-7-1~图 4-7-10 可以看出与激光器裸露在自然环境中时相比,此时光束在各个方向上的漂 移都大为减小,基本控制在 10⁻⁶rad 量级。但是与只给激光器加上开孔或不开孔外罩时相比, 此时光束的漂移没有明显的变化,控制效果并不理想,达不到预期目标,如果激光器周围 的温度场控制的足够稳定和精确,激光光束的漂移应该比测得的数据更小。分析整个实验 过程,效果不理想的原因可能有以下几个:一是实验装置设计得不理想,因为采用的外罩 较小,罩内的加热块离激光器离得太近,其散发的热量会直接影响到激光器,散发的热量 稍微不均匀,CCD 光敏面上的光斑就会受到影响;二是温控精度不高,实验中采用的只是 简易外罩,外罩内层没有粘上保温材料,实验平台是水泥平台,也没有垫上保温材料,所 以很难实现很高的温控精度。因此这种控制方法有待改进实验装置,提高温控精度之后, 再通过多组实验来检验其对光斑漂移的控制效果。

§4.6 给激光器预热时激光光斑的漂移

在本节的实验中,给激光器的左上侧和右上侧分别绑上两根由温控仪控制的烙铁芯 (共四根),每侧的两根烙铁芯都在一条直线上,与另一侧的直线成轴对称放置。通过对 烙铁芯的加热来实现对激光管上壁的预热。

实验开始后,给温控仪设定一个合适的温度(30 摄氏度到 40 摄氏度之间),然后温控 仪控制烙铁芯给激光管上壁进行预热,经过一段时间后,关闭温控仪,点亮激光器,并对 激光光斑进行检测。因为给激光管进行了预热,使得激光管上壁提前受热变形,这样就可 以减少激光器点亮后,光斑从开始漂移到最终稳定这一过程所花的时间,从而也就减少了 这一段过程中光斑所产生的漂移。因此本节主要通过实验来检验这种方法对从实验开始到 实验结束这段时间内光斑漂移的控制效果。

4.6.1 数据处理的结果(从实验开始到实验结束这段时间内)

(1) 一次测量的结果



图 4-6-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹



图 4-6-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹



图 4-6-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> ********	相对于例开始的位置****				
考察方向	混移量 大值 (rad)	第几分钟	量大值点坐领	家(康素单元)	标准差
I	4.5448=-005	87.398	-0.580286	33, 9904	1.2404 - 005
Ŧ	5.4994+-005	62. 379	-1.48269	33, 1211	2.5495a-005
L	5.5896a-005	68. 632	-0, 979058	33.251	1,9115e-005
>> ******	相对于刚开始的位置***	njaju kaju			
考察方向	课移量大值 (rad)	第几分钟	量大值点坐板	「(康文单元)	标准差
I	3.5978e-005	68.354	-1,9051	39.1944	7.9013e-006
Y	5.2196e-005	6.931	-4.32255	31. <i>6</i> 582	2.4465e-905
L	5. 5081 e=005	75. D46	-2.7165	39.9481	1.3195e-005
>> *******	构对于例开始的位置++++	****			
考察方向	课移量大值 (red)	第几分钟	量大值点坐板	前(像素单元)	标准差
x	4. 9374e-005	115.198	-0, 160395	34.6488	9. 7261 e-006
T	8.2902e-005	95i. ô	-0. 498641	31.6574	2.7979e-005
L	9.5233e-005	94, 883	-0.266396	31.7109	2,0913e-005

图 4-6-7 1~3 组数据处理的结果

4.6.2 结果分析

通过数据处理的结果可以发现,光斑稳定下来的时间与激光器裸露在自然环境中时差 不多,并没有有所变短,这是因为开始对激光管进行了预热,使得激光管上壁提前受热变 形,当温控仪关闭后,加热块停止了加热,而激光器才刚开始点亮,谐振腔内气体的温度 不会一下升高到足够的温度来保持激光管上壁的变形基本不变,随之激光管壁会发生慢慢 变形直到最终稳定,所以此时激光器稳定下来也需要一段时间。但是,我们发现,与激光 器裸露在自然环境时相比,光斑漂移经过一段时间之后,其稳定下来时的位置又回到了起 始位置附近,所以从实验开始到实验结束这段时间内,光斑的漂移确实变小了(见图 4-7-2~ 图 4-7-4)。此时光斑漂移最大值的范围如下表所示:

	漂移最大值的范围(rad)
X方向	$3.5 \times 10^{-5} < delta_X_max < 5.0 \times 10^{-5}$
Y 方向	$5.2 \times 10^{-5} < delta_Y_max < 8.3 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内(L 方向)	$5.5 \times 10^{-6} < delta_L_max < 9.6 \times 10^{-6}$

表 4-6-1 从实验开始到结束激光光束在各方向上漂移最大值的范围

在实验中我们还发现光斑在稳定之后,有时仍会发生较大的漂移,这是因为此时激光 器是隔着烙铁芯被外面的铁皮固定在支架上的,谐振腔管壁与烙铁芯的接触面积太小,管 壁受热膨胀很可能使得两者的相对位置发生变化,甚至使管壁的位置发生跳变,因此这种 控制方法对于减小激光器稳定之后光斑的漂移是不利的。

§4.7 本章小结

本章主要对激光器工作时,激光光斑的漂移进行了检测,并在实验中给激光器加上不

同的控制,通过多组实验测量和数据处理,得到不同情况下激光光斑的漂移大小及激光光 束在空间立体角上的漂移大小。同时,分析在给激光器加上不同的控制时,光束的漂移量 有什么不同,以及产生这些变化的原因。

在实验中主要对激光器加上以下几个控制:使之裸露在自然环境之中,加上不开孔外罩,加上开孔外罩,对其进行温控,对其进行预热。通过实验测量和数据处理得到不同控制情况下,激光光束漂移最大值的范围如图 4-7-1~图 4-7-10 所示:





通过这些图可以发现:

从实验开始到实验结束这段时间内,与激光器裸露在自然环境中时相比,当给激光器 加上不开孔或开孔的外罩,或对其进行温控时,激光光束在 X 方向上的漂移明显减小,但 是在 Y 方向和空间立体角内的漂移却相差不大;给激光器绑上烙铁芯预热之后,各方向上 的漂移都有明显的减小,光束的漂移被控制在 10⁻⁵rad 的量级上,这说明这种控制方法在减 小这一时间段的光斑漂移上是行之有效的。

从实验开始20分钟以后到实验结束这段时间内,与激光器裸露在自然环境中时相比, 当给激光器加上不开孔或开孔外罩时,激光光束在X方向上的漂移得到了明显的抑制,但 是在Y方向和空间立体角内的漂移却显得相对较大;在对激光器进行温控时,相对于前三 种情况而言,激光光束在各方向上的漂移都明显较大。

从光斑稳定后到实验结束这段时间内,不论给激光器加上开孔或不开孔的外罩,或对 其进行温控,从图中可以看出来与激光器裸露在自然环境中时相比,此时激光光束在各个 方向上的漂移都大大减小了,基本都控制在 10⁻⁶rad 的量级上。

通过不同情况下的多组实验可以发现,各种情况下光斑达到稳定状态的时间有所不 同,如下表所示:

	从实验开始到"光斑小范围内趋于稳	从实验开始到"光斑最终稳
	定,大范围内在狭长区域内作长距离漂	定在一个较小的范围之内"
	移"状态所需的时间	所需的时间
自然环境之中		大约 20 分钟
加上不开孔外罩	大约 20 分钟	50-100 分钟左右
加上开孔外罩	大约 20 分钟	50-100 分钟左右
温控	大约 20 分钟	250-400 分钟左右

表 4-7-1 不同控制条件下光班到达稳定状态所需的时间

第五章 结语

§5.1 主要工作和结论

本文主要针对激光光斑的漂移进行检测与控制,在用实验测量激光光斑漂移大小的同时,通过给激光器加上不同的控制来减小其漂移,以提高激光光束的准直精度。

本文首先设计出了一套检测与控制光斑漂移的系统。系统由激光器及其控制装置、高 反射率的衰减片、CCD 摄像机、图像采集处理系统及计算机组成。该系统能实时地采集 到激光光束照射到 CCD 光敏面上所形成的光斑,将所得的信息送到计算机里经由专门的 软件处理,同时在监视器中,可以实时地看到光斑的原始图像,以及经过数据处理后光斑 中心位置随时间变化的情况;并能通过给激光器周围建立补偿温度场来控制光束的漂移。

接着编译出了一套专门的数据处理软件。该软件能显示出从任意时刻开始到最后光斑 中心位置的移动轨迹,并对该轨迹进行了拟合。得出了这段时间内激光光束在 X 方向、 Y 方向以及空间立体角内漂移大小的最大值、标准差以及其随时间变化的趋势等。

最后,对激光光源加上不同的控制,通过实验测量和计算,得到了不同情况下激光光 束漂移量的大小,并分析了在给激光光源加上不同的控制时,光束的漂移量有什么不同, 以及产生这些变化的原因。

本文通过大量的实验,得到了在不同控制条件下,激光光束在各方向上漂移的范围, 如图 4-7-1 至 4-7-10 所示,具体实验结论在 4.7 节中已有详述。由实验结论可知,当给激 光器绑上烙铁芯时,光斑从实验开始到实验结束所产生的漂移得到了很好的控制,其本上 控制在 10⁻⁵rad 量级;当给激光器加上不开孔或开孔外罩,或对其进行温控时,光斑在最终 稳定以后所产生的漂移也得到了很好的控制,在各方向上已基本控制在 10⁻⁶rad 量级,个别 的实验甚至达到了 10⁻⁷rad 量级。

§5.2 展望

就控制条件而言,还可以考虑其它的方法。比如既然可以在激光管上侧绑上烙铁芯给激光管预热,也可以试着在激光管下侧绑上烙铁芯(最好内垫一层铁皮来加速导热),通 过温控减小激光管上下壁的温度差。此外,在4.6.5节中给激光器周围建立补偿温度场时, 可以考虑采用更合适的实验装置,比如采用两层外罩代替一层外罩,将加热块放在两层外 罩之间,这样内层罩子里温度场将更加均匀,受外界的影响最小,温控精度将会更一步提高。

就软件程序而言,可以进一步使"光斑漂移的计算"程序界面化,以便于用户使用。

就整个系统而言,如果能得知光斑漂移的大小和方向与谐振腔管壁变形大小的关系, 就可尝试使整个系统实现闭环,自动检测与控制激光光束的漂移,实现整个系统的光机电 一体化,那么本系统也将会实现一个极大的飞跃。

致谢

回顾我这两年多的研究生学习生涯中,近半年以来,是我感觉最辛苦,但也最充实的 半年,这半年的学习帮助我掌握了许多有用的知识,让我感受到了丰收的喜悦,也感受到 了做人的踏实,而这份喜悦和踏实是与许多人的支持和帮助分不开的。在此,我要向他们 表示衷心的感谢,感谢我的导师、同学和所有帮助过我的人。

首先我要感谢的是我的导师龙兴武教授和指导我课题的张斌老师、袁杰老师。龙老师 给了我一个好好锻炼自己的机会,对于散射显微镜这个课题,即使没有做成功,只要认真 去做,尽最大的努力做出自己的成绩,对自己的能力就是一个很大的提高,可是我没有好 好把握这个机会,在后面的课题中,龙老师也不时关注着我课题的进度,对我能尽快的完 成课题是一个很大的督促。在这里我还要重重感谢的是张斌老师和袁杰老师,是张斌老师 给了我这个机会让我去设计这样一个系统,让我在这个过程中,了解到了激光器的方方面 面,感受到了 Labview 和 Matlab 编程的乐趣,同时张斌老师在整个过程中给了我悉心的指 导和及时的帮助,老师严谨的治学态度、细腻的教学方式、敏捷的思维、丰富的科研能力 让我深深的感到敬佩。袁杰老师,给予了我最直接的辅导,从开始的搭建系统、编写程序 一直到后来的处理数据、撰写论文,可以说课题从整个方案到每一个细小环节都有袁老师 的影子,没有袁老师的帮助,本课题几乎无法完成,首先光斑的采集程序这一关就过不去。 在这里,我对袁老师致以最深深的谢意!

其次,我要感谢罗晖老师、王飞老师和赵洪常老师。罗老师一直关注我课题的进展程度,不时对我进行耳提面命,让我获益匪浅。王老师一直很主动的帮我寻找并调试仪器, 比如激光器以及电源等等,老师的热心让我深受感动,赵老师也是有求必应,帮我解决了 不少难题,在此对三位老师表示特别的感谢!

最后,我要感谢的是我的同学汪之国,他给我了课题很大的帮助,尤其是英文翻译, 帮我解决了不少难关,师姐张梅、师弟陈栋等也跟我一起探讨了很多问题,让我对本课题 有了更深的理解,在这里一并表示感谢。

本论文还得到了教研室其它老师和同学的关心与帮助,在此一并表示感谢。最后祝老 师和同学们身体健康、工作愉快!

作者攻读硕士期间发表论文情况

1、王春阳,紫外告警系统结构分析与设计,第四届全国信息获取与处理学术会议,2006.7。
 2、王春阳、李金石,激光光斑漂移的检测,应用光学,2006。(已录用)

参考文献

[1] Wan De' an. The Technology of High Accuracy Measurement Using L aser Beam as a Straight (激光准直高精度测量技术). Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 2~ 12(in Chinese)

[2] Zhou Jianmin, Bai Suping. The application of laser beam in error autorectification of machine tool working table. J. Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics (长春光学精 密机械学院学报), 2001, 24 (1):28~30 (in Chinese)

[3] 刘银辉,周崇喜,杜春雷,微透镜面形误差影响 LD 光束准直的研究[J],光电工程, 2003, 30(2): 5-7.

[4] 杨坤涛,陈 捷,光纤准直器自动调试装配系统设计[J],光电工程,2003,30(2):36-38.
[5] 陈元培,李 展,陈旭南. 超细激光束准直器的原理与设计[J],激光杂志,2003,24(2):19-20.

[6] Fang Zhongyan, Yin Chunyong, Yin Chunyong et al. Study on high accuracy laser alignment technique. A viation Measurement Technique (航空计测技术), 1997, 17 (1):3~8 (in Chinese)

[7] 张国轩,陈刚等,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

[8] 王庆有,《CCD 应用技术》,天津,天津大学出版社,2000

[9] 吕百达. 激光光束学[M]. 成都, 四川大学出版社, 1993.

[10] 邹异松,刘玉凤,白廷柱,光电成像原理,北京理工大学出版社,2003年

[11] 向世明,倪国强,光电子成像器件原理,北京,国防工业出版社,1999年

[12] 孙即祥, 数字图像处理, 石家庄, 河北教育出版社。1993 年

[13] 张志涌,精通 MATLAB6.5 版,北京,北京航空航天大学出版社,2003 年

[14] 阮沈勇, MATLAB 程序设计,北京,电子工业出版社,2004 年