

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	7
图 2-3-3 温控仪控制下的罩内温度趋于稳定的过程	7
图 3-1-1(a) CCD 光敏面上激光光斑的形状 (前一时刻)	8
图 3-1-1(b) CCD 光敏面上激光光斑的形状 (后一时刻)	9
图 3-1-2(a) 光斑中心坐标随时间变化的曲线	9
图 3-1-2(b) 光斑中心坐标随时间变化的曲线 (有坏点)	10
图 3-2-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	11
图 3-2-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	11
图 3-2-3 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	11
图 3-2-4 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量	11
图 3-2-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	11
图 3-2-6 数据处理结果	12
图 3-2-7 20 分钟以后光斑中心随时间变化的轨迹	12
图 3-2-8 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	12
图 3-2-9 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量	12
图 3-2-10 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量	12
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	13
图 3-2-12 数据处理结果 (20 分钟以后)	13
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	14
图 4-2-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	18
图 4-2-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	18
图 4-2-3 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量	18
图 4-2-4 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量	18
图 4-2-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	18
图 4-2-6 数据处理的结果	19
图 4-2-7 1~8 组数据处理的结果	19
图 4-2-8 光斑稳定以后光斑中心的轨迹	20
图 4-2-9 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	20
图 4-2-10 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量	20
图 4-2-11 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量	20
图 4-2-12 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量	20
图 4-2-13 数据处理的结果	20
图 4-2-14 1~8 组数据处理的结果	21
图 4-3-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹	23
图 4-3-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	23
图 4-3-3 激光光束 X 方向上的漂移量	23
图 4-3-4 激光光束 Y 方向上的漂移量	23
图 4-3-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量	23

图 4-3-6	数据处理的结果.....	24
图 4-3-7	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 4-3-10	20 分钟后光束 X 方向上的漂移量.....	25
图 4-3-11	20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量.....	25
图 4-3-12	20 分钟后光束空间立体角内的漂移量.....	25
图 4-3-13	数据处理的结果.....	25
图 4-3-14	1~8 组数据处理的结果.....	26
图 4-3-15	光斑稳定后光斑中心的轨迹.....	26
图 4-3-16	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹.....	26
图 4-3-17	光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量.....	27
图 4-3-18	光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量.....	27
图 4-3-19	光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量.....	27
图 4-3-20	数据处理的结果.....	27
图 4-3-21	1~8 组数据处理的结果.....	28
图 4-4-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹.....	31
图 4-4-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹.....	31
图 4-4-3	激光光束 X 方向上的漂移量.....	31
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.....	32
图 4-4-8	20 分钟后光斑中心的轨迹.....	33
图 4-4-9	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹.....	33
图 4-4-10	20 分钟后光束 X 方向上的漂移量.....	33
图 4-4-11	20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量.....	33
图 4-4-12	20 分钟后光束空间立体角内的漂移量.....	33
图 4-4-13	数据处理的结果.....	34
图 4-4-14	1~9 组数据处理的结果.....	34
图 4-4-15	光斑稳定后光斑中心的轨迹.....	35
图 4-4-16	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹.....	35
图 4-4-17	光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量.....	35
图 4-4-18	光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量.....	35
图 4-4-19	光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量.....	35
图 4-4-20	数据处理的结果.....	36
图 4-4-21	1~9 组数据处理的结果.....	36
图 4-5-1	激光光斑中心位置随时间变化的轨迹.....	39
图 4-5-2	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹.....	39
图 4-5-3	激光光束 X 方向上的漂移量.....	39
图 4-5-4	激光光束 Y 方向上的漂移量.....	39
图 4-5-5	激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量.....	39
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

图 4-5-8	20 分钟后光斑中心的轨迹	41
图 4-5-9	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	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	数据处理的结果	41
图 4-5-14	1~6 组数据处理的结果	42
图 4-5-15	光斑稳定后光斑中心的轨迹	42
图 4-5-16	每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹	42
图 4-5-17	光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量	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。

学位论文题目： 激光光斑漂移的检测与控制

学位论文作者签名： 王春阳

日期： 2006 年 5 月 15 日

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： 激光光斑漂移的检测与控制

学位论文作者签名： 王春阳

日期： 2006 年 5 月 15 日

作者指导教师签名： 花 2 2 1

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 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{rad}$,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

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

当 U(x,y,z)是沿 z 方向传输的基模激光束,则基模解为

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

其中

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

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_0 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

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

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

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

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。

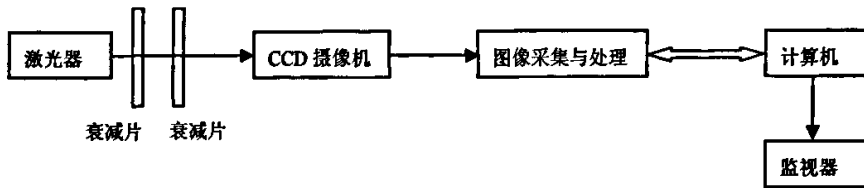


图 2-2-1 光斑漂移检测与控制系统原理图

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 0.01°C 。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 $8.6\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$ 。

(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 $\pm 1.5\text{V}$ 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,最大采集分辨率 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:

$$p_{\text{中心}} = \frac{\sum p_i I_i}{\sum I_i} \quad (2-3-1)$$

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

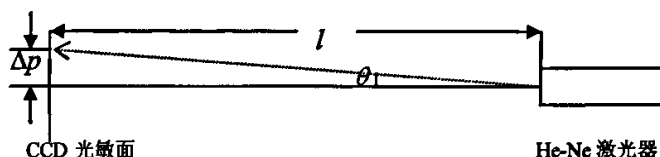


图2-3-1 激光光束在空间立体角上的漂移

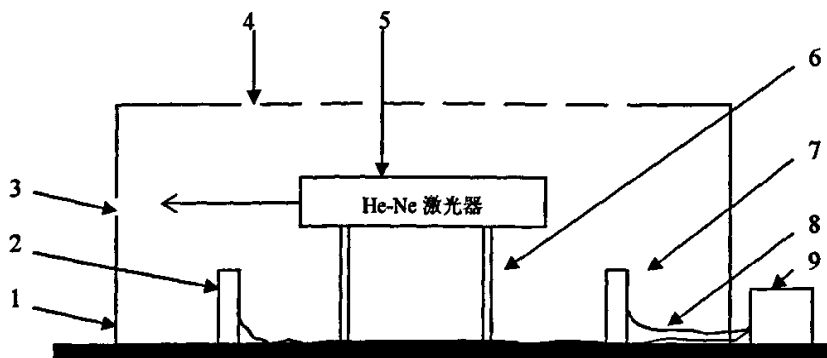
l , 则光束在空间立体角上的漂移为:

$$\theta \approx \tan \theta = \Delta p / l \quad (2-3-2)$$

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, 建立起来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。

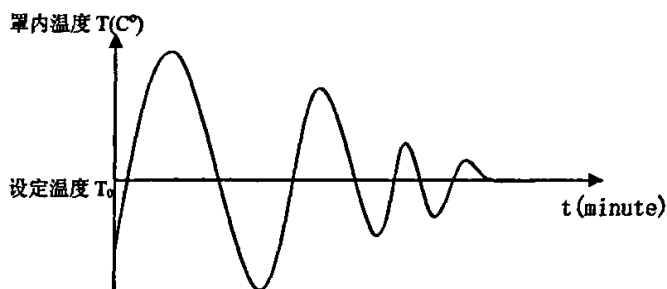


图 2-3-3 温控仪控制下的罩内温度趋于稳定的过程

§ 3.1 光斑采集与分析软件的介绍

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。

第 8 页

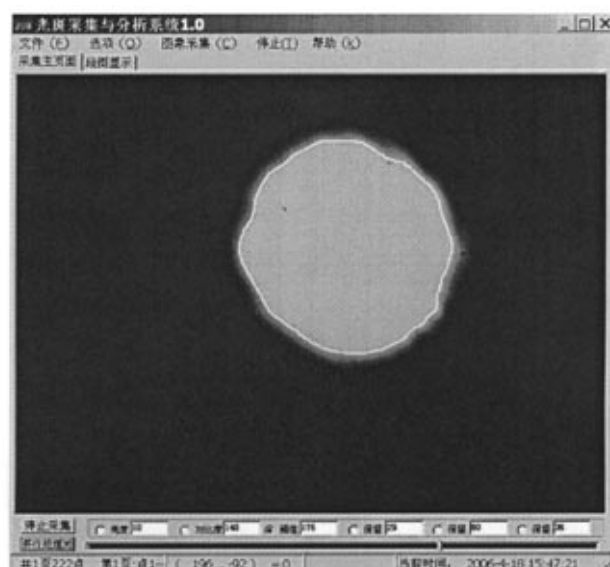


图 3-1-1(b) CCD 光敏面上激光光斑的形状(后一时刻)

“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

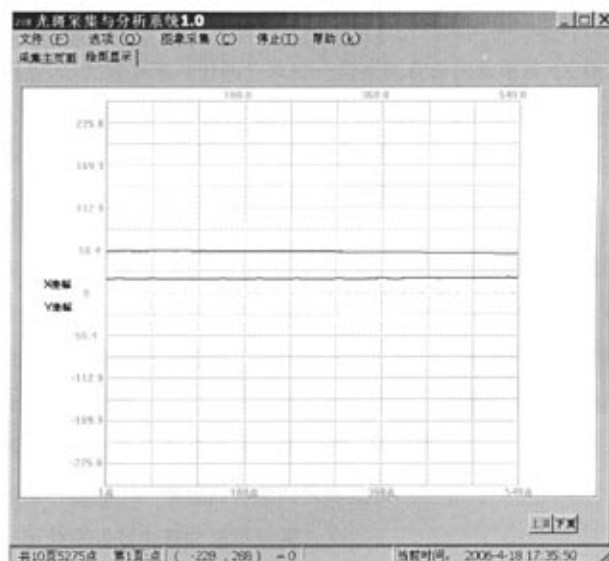


图 3-1-2(a) 光斑中心坐标随时间变化的曲线

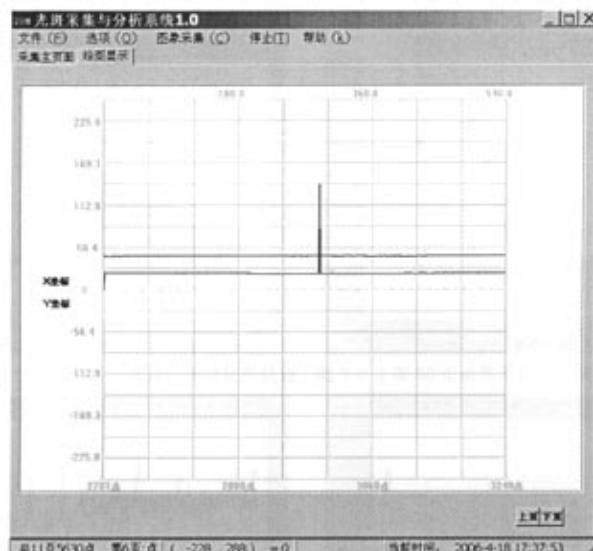


图 3-1-2(b) 光斑中心坐标随时间变化的曲线(有坏点)

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。

一、从实验开始到实验结束这段时间内。

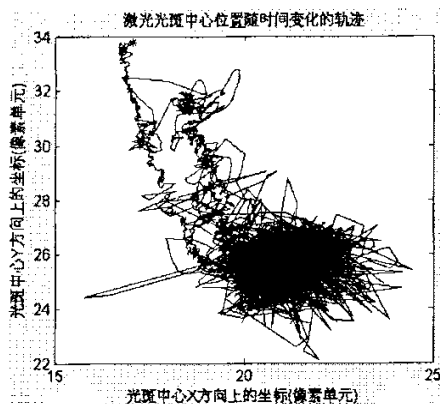


图 3-2-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

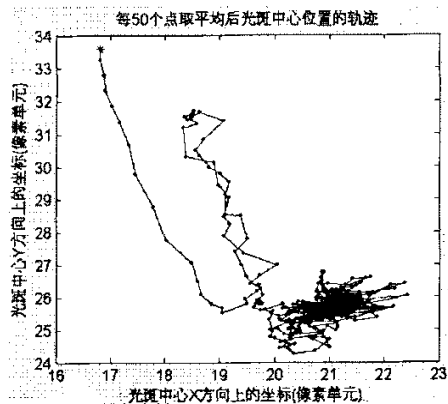


图 3-2-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

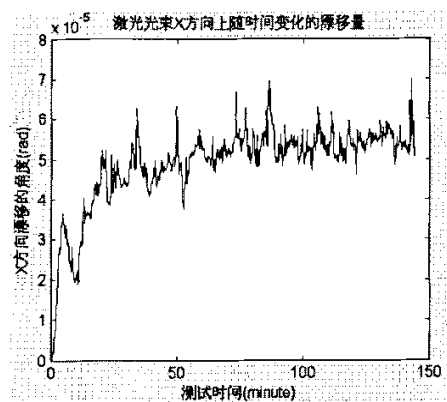


图 3-2-3 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量

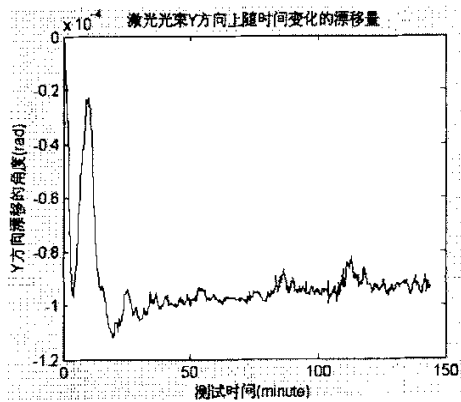


图 3-2-4 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量

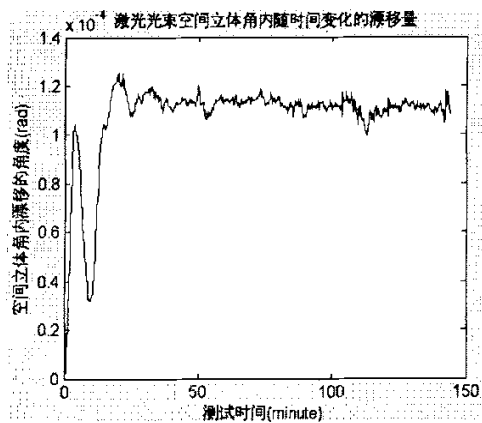


图 3-2-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> *****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 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)
X 7.0019e-005 143.161 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
经过曲线拟合后,所得直线与水平方向的夹角为:
C=-44.5407
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。

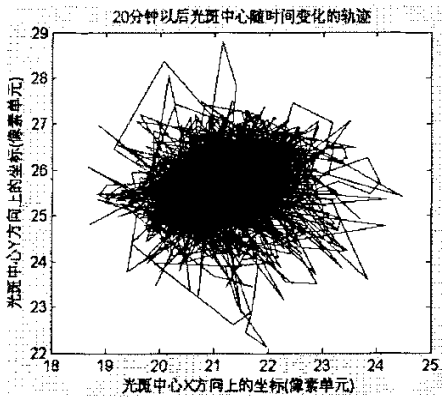


图 3-2-7 20 分钟以后光斑中心随时间变化的轨迹

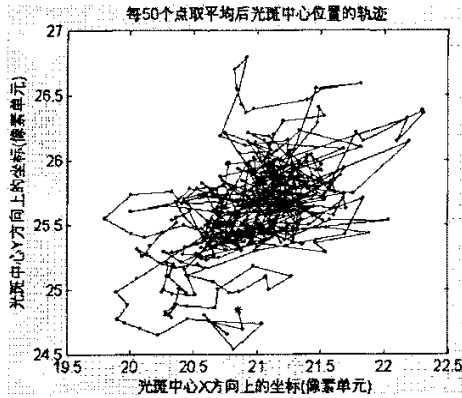


图 3-2-8 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

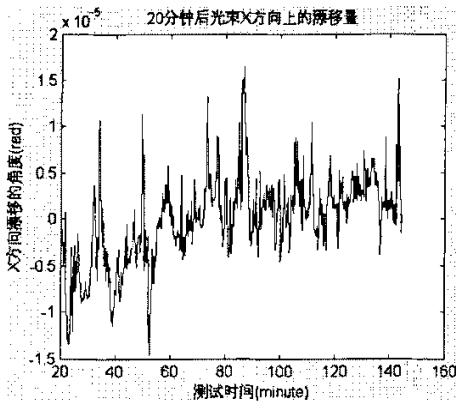


图 3-2-9 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量

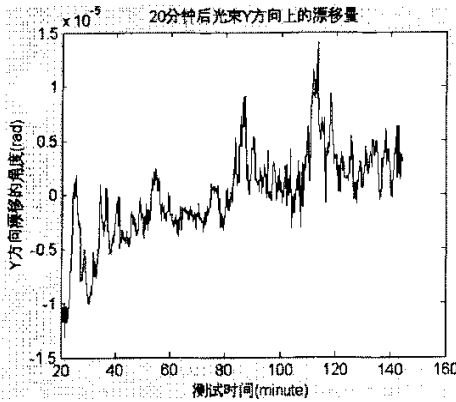


图 3-2-10 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量

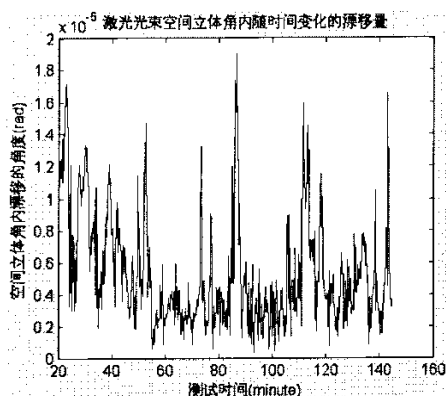


图 3-2-11 20 分钟后激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> *****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	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	3.5445e-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:

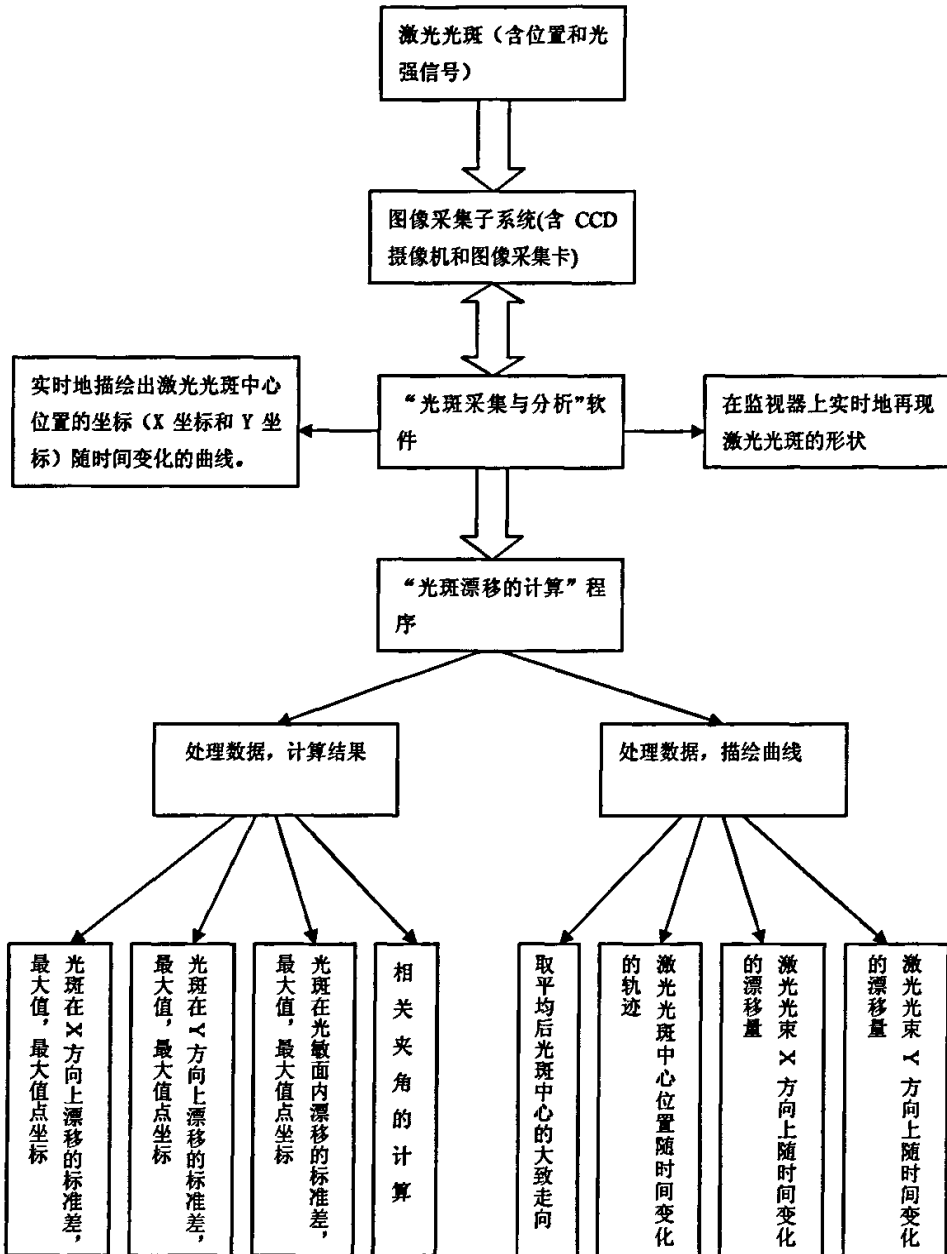


图 3-3-1 “光斑采集与分析”软件与“光斑漂移的计算”程序的工作流程图

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 $m \times 2$ 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 (X_1, Y_1) 的漂移为:

$$\Delta X_i = X_i - X_1 \quad (4-1-1)$$

在 Y 方向上第 i 个点 (X_i, Y_i) 相对于第一个点 (X_1, Y_1) 的漂移为:

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_1 \quad (4-1-2)$$

在整个光敏面上第 i 个点 (X_i, Y_i) 距离第一个点 (X_1, Y_1) 的距离为:

$$\Delta L_i = \sqrt{(X_i - X_1) \times (X_i - X_1) + (Y_i - Y_1) \times (Y_i - Y_1)} \quad (4-1-3)$$

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 $l=0.69\text{ m}$ 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 $\bar{X}$, Y 坐标的平均值为 $\bar{Y}$,则平均值点的坐标为 $(\bar{X}, \bar{Y})$ 。此时激光光斑的漂移是相对于平均值点 $(\bar{X}, \bar{Y})$ 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 ΔX ,在 Y 方向上的漂移为 ΔY ,在整个光敏面上漂移的距离为 ΔL 。

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

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (4-1-4)$$

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

$$\Delta Y_i = Y_i - \bar{Y} \quad (4-1-5)$$

在整个光敏面上第 i 个点 (X_i, Y_i) 距离平均值点 $(\bar{X}, \bar{Y})$ 的距离为:

$$\text{delta_}L_i = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4-1-6)$$

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 $(\bar{X}, \bar{Y})$ 的漂移,找出其绝对值的最大值,该最大值 $\text{delta_}X_{\text{max}}$ 、 $\text{delta_}Y_{\text{max}}$ 、 $\text{delta_}L_{\text{max}}$ 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 $l=0.69 \text{ m}$ 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:

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

这些点在 Y 方向上相对于平均值点漂移的标准差为:

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

这些点到平均值点的距离相对于平均距离的标准差为:

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

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

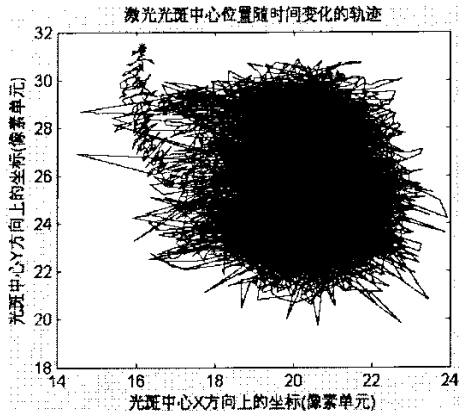


图 4-2-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

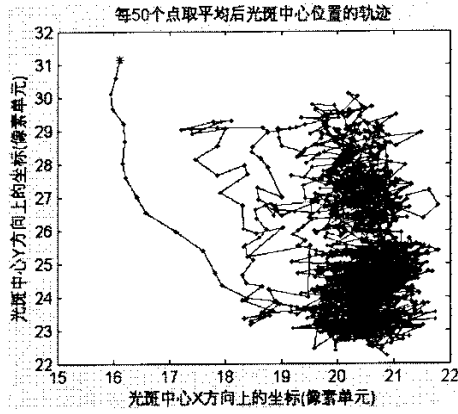


图 4-2-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

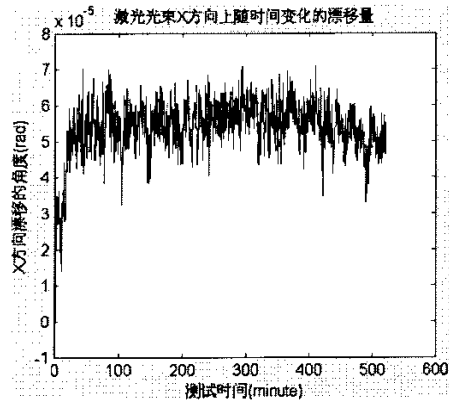


图 4-2-3 激光光束 X 方向上随时间变化的漂移量

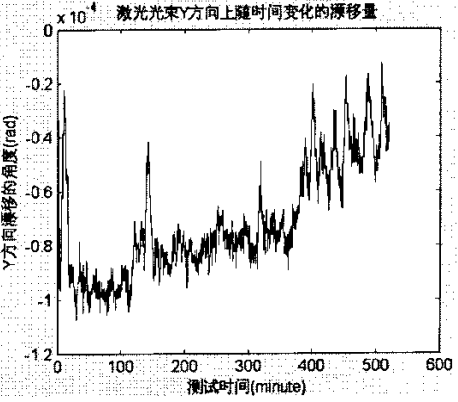


图 4-2-4 激光光束 Y 方向上随时间变化的漂移量

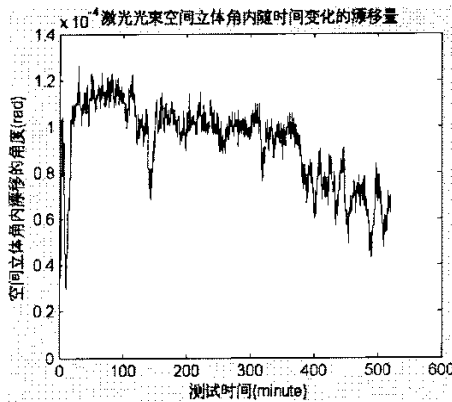


图 4-2-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

```
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准 (第1组)*****
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)
X           7.0936e-005      410.124                 21.7984    26.7491
Y           0.00011148       29.875                  20.881     22.2252
L           0.00012636       29.875                  20.881     22.2252

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=61.9082
经过曲线拟合后, 所得直线与水平方向的夹角为:
C=17.3682
在整个CCD光敏面上, 光源中心首尾位置 (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束这段时间内——以第一个点为标准 (第1组)*****
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)
X           7.0936e-005      410.124                 21.7984    26.7491
Y           0.00011148       29.875                  20.881     22.2252
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)   最大值点坐标 (像素单元)
X           5.9332e-005      46.127                  21.2453    30.5648
Y           0.00011049       5.258                   19.3649    24.8487
L           0.00011757       4.541                   19.8125    24.8867
>> *****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组)*****
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)
X           6.4811e-005      119.022                 22.2689    26.3937
Y           0.00011679       23.9                    20.4109    24.1339
L           0.00012983       23.9                    20.4109    24.1339
>> *****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)   最大值点坐标 (像素单元)
X           7.0019e-005      143.181                 22.4253    26.0123
Y           0.00011824       19.598                  20.3594    24.2579
L           0.00012534       19.837                  20.7421    24.3293
>> *****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组)*****
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)
X           6.046e-005        105.838                 21.6489    28.8754
Y           0.0001243       20.076                  20.0849    24.4002
L           0.00013127       20.554                  20.2764    24.4318
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准 (第6组)*****
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)
X           5.2354e-005      175.904                 18.9394    32.9705
Y           8.4196e-005       8.365                   18.4927    24.3635
L           8.6987e-005       8.365                   18.4927    24.3635
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准 (第7组)*****
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)
X           5.3942e-005      125.236                 3.65643    41.2593
Y           7.4599e-005       6.214                   -0.0342896  43.0933
L           7.8474e-005      287.995                 3.34083    41.9602
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准 (第8组)*****
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)
X           5.1842e-005       37.523                  3.70002    40.4046
Y           8.2781e-005      252.384                 2.50141    43.9073
L           9.0552e-005      252.384                 2.50141    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

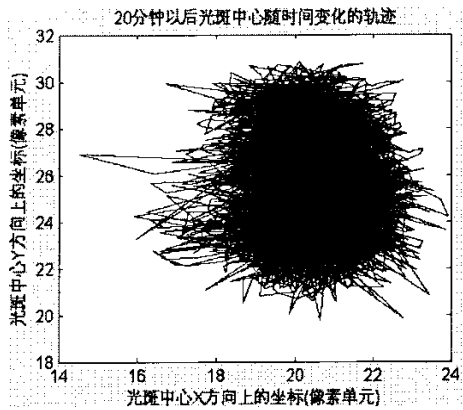


图 4-2-8 光斑稳定以后光斑中心的轨迹

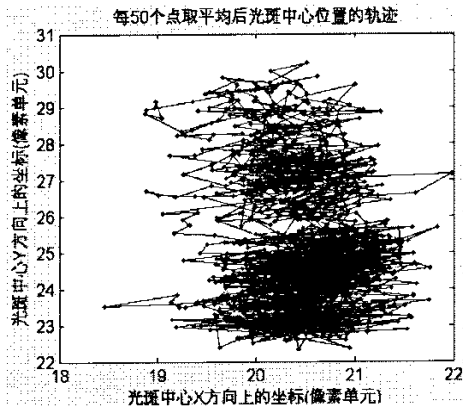


图 4-2-9 每 50 个点取平均后光斑中心位置的轨迹

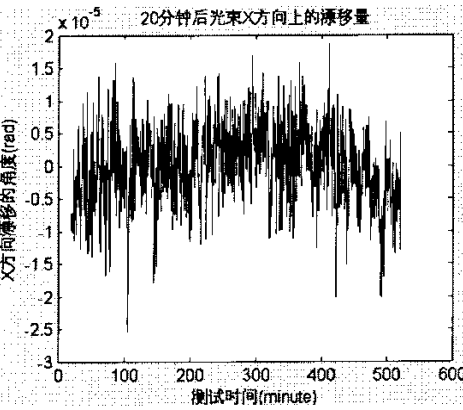


图 4-2-10 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量

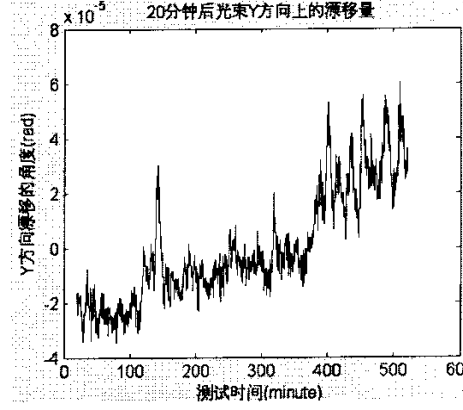


图 4-2-11 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量

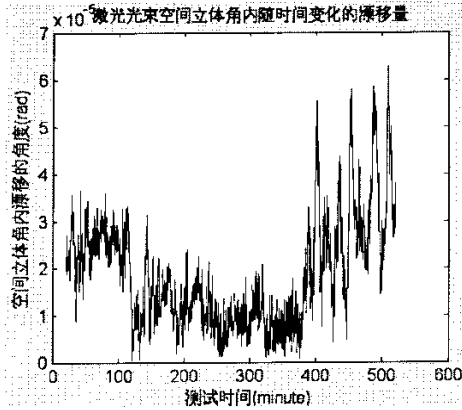


图 4-2-12 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量

>> *****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	2.5296e-005	105.877	18.4576 23.5198	5.5949e-006
Y	6.2703e-005	508.831	20.5148 30.2229	2.0319e-005
L	6.2704e-005	508.831	20.5148 30.2229	1.1447e-005

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——以平均值点为标准 (第1组)*****					
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	2.5295e-005	105.877	18.4578	23.5198	5.5949e-005
Y	6.2703e-005	508.831	20.5148	30.2229	2.0319e-005
L	8.2704e-005	508.831	20.5148	30.2229	1.1447e-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)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	1.974e-005	81.25	21.2044	30.2321	6.22e-006
Y	3.4409e-005	35.133	19.8443	28.7541	1.3982e-005
L	3.4411e-005	35.133	19.8443	28.7541	7.8984e-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3组)*****					
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	2.3643e-005	28.919	19.1183	25.2903	5.8267e-006
Y	4.1255e-005	93.688	20.8194	28.8518	7.891e-005
L	4.1326e-005	93.688	20.8194	28.8518	8.2234e-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4组)*****					
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	1.8585e-005	86.518	22.3103	28.357	4.7775e-006
Y	1.4553e-005	113.288	20.9204	28.7875	4.1198e-006
L	1.9002e-005	86.757	22.3033	28.3782	3.5448e-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组)*****					
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	1.3602e-005	87.713	19.588	28.8361	3.5449e-006
Y	2.4867e-005	105.16	20.7126	28.2028	9.0844e-006
L	2.4871e-005	105.16	20.7126	28.2028	5.4742e-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6组)*****					
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	2.5432e-005	32.026	15.4553	31.397	7.5329e-006
Y	3.918e-005	21.51	15.5183	28.8194	8.4591e-006
L	4.627e-005	21.51	15.5183	28.8194	8.3218e-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7组)*****					
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	2.5752e-005	35.85	0.519059	39.4549	5.878e-006
Y	3.7373e-005	20.315	1.77463	37.6787	1.1112e-005
L	3.9348e-005	22.227	1.18174	37.8585	7.0277e-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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	1.5265e-005	38.24	3.71056	40.2958	4.1914e-006
Y	3.8223e-005	20.315	2.23008	38.9608	1.0714e-005
L	3.8358e-005	20.315	2.23008	38.9608	5.8833e-006

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 (X_1, Y_1) , 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	$5.1 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 7.1 \times 10^{-5}$
Y 方向	$7.4 \times 10^{-5} < \delta Y_{\max} < 1.3 \times 10^{-4}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$7.8 \times 10^{-5} < \delta L_{\max} < 1.4 \times 10^{-4}$

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 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 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 4-2-2 光斑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	$1.3 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 2.6 \times 10^{-5}$
Y 方向	$1.4 \times 10^{-5} < \delta Y_{\max} < 6.3 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$1.9 \times 10^{-5} < \delta L_{\max} < 6.3 \times 10^{-5}$

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

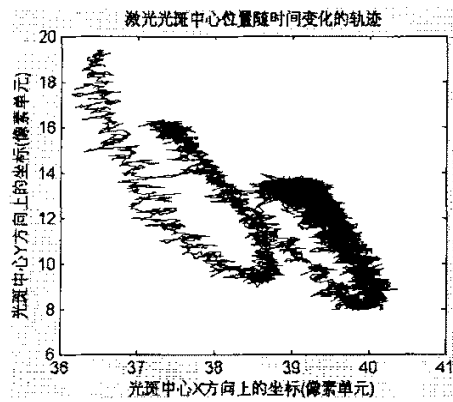


图 4-3-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

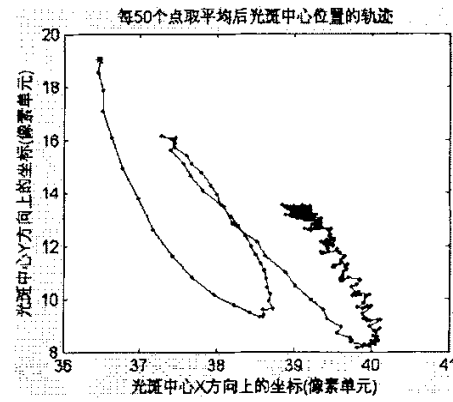


图 4-3-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

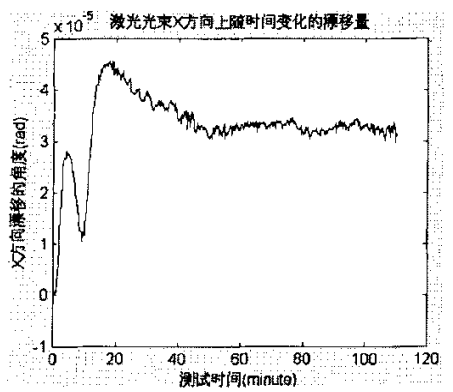


图 4-3-3 激光光束 X 方向上漂移量

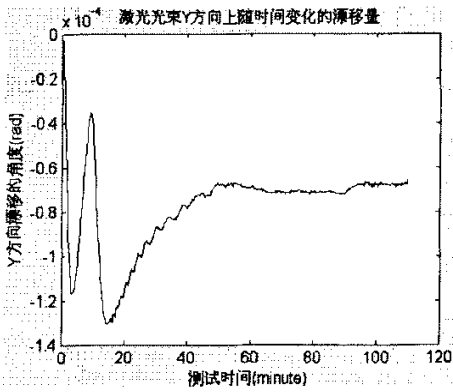


图 4-3-4 激光光束 Y 方向上的漂移量

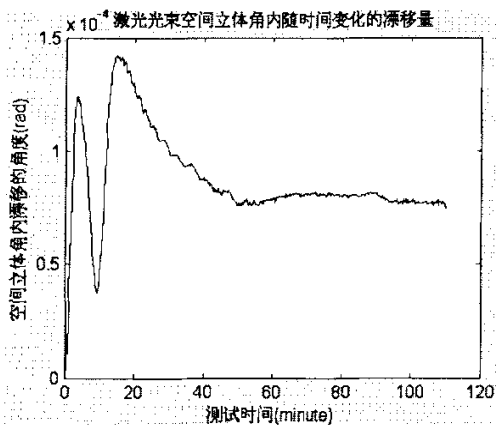


图 4-3-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

```
>> *****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  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)
X          4.5601e-005      18.881                40.1192    9.21195
Y          0.00013572       14.818                39.8187    8.15009
L          0.00014203       14.818                39.8187    8.15009

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=72.8605
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:
B=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束这段时间内——以第一个点为标准(第1组)*****
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)
X          4.5601e-005      18.881                40.1192    9.21195
Y          0.00013572       14.818                39.8187    8.15009
L          0.00014203       14.818                39.8187    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组)*****
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)
X          4.0499e-005      13.145                39.4836    7.75829
Y          6.1251e-005      12.428                39.4199    7.53146
L          7.313e-005        12.428                39.4199    7.53146
>> *****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组)*****
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)
X          4.6785e-005      15.298                39.4887    7.66807
Y          0.00010686       13.862                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)  最大值点坐标(像素单元)
X          3.1755e-005      11.95                 40.1979    7.82048
Y          6.7151e-005      6.453                 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——以第一个点为标准(第5组)*****
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)
X          1.949e-005        14.579                1.23875    35.3248
Y          6.3609e-005      326.474                0.399121   42.9448
L          6.4246e-005      326.474                0.399121   42.9448
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第6组)*****
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)
X          2.6992e-005      339.141                0.878229   40.3971
Y          7.718e-005        6.214                 -1.88669   41.5811
L          7.7374e-005      6.214                 -1.88669   41.5811
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第7组)*****
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)
X          1.6043e-005      14.34                  -0.211504   36.4185
Y          8.6349e-005      387.419                -0.858288   44.0779
L          8.6985e-005      387.419                -0.858288   44.0779
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第8组)*****
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)
X          1.6304e-005      319.085                -0.797887   43.6589
Y          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

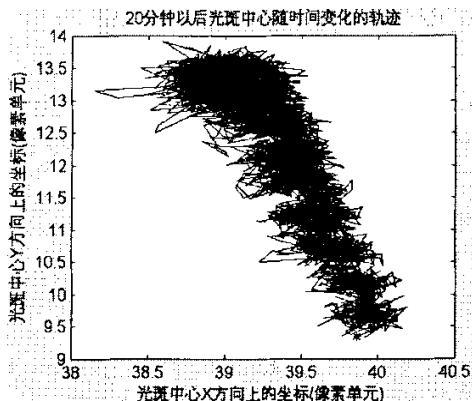


图 4-3-8 20 分钟后光斑中心的轨迹

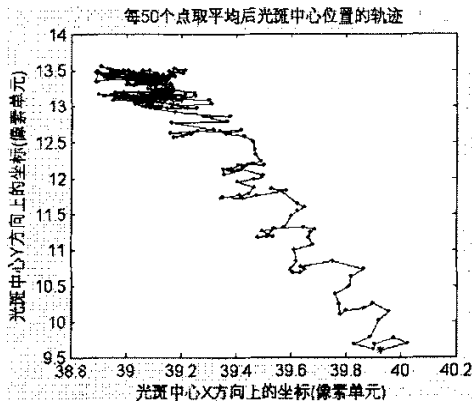


图 4-3-9 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

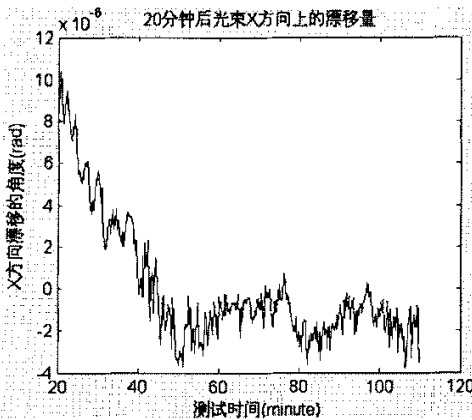


图 4-3-10 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量

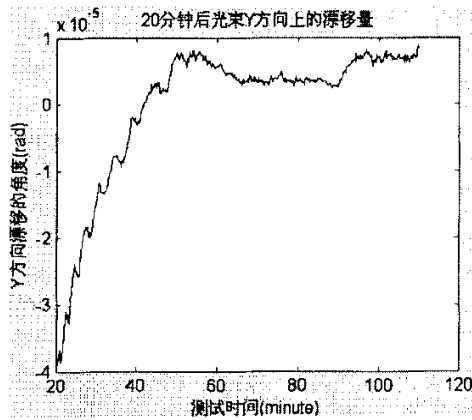


图 4-3-11 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量

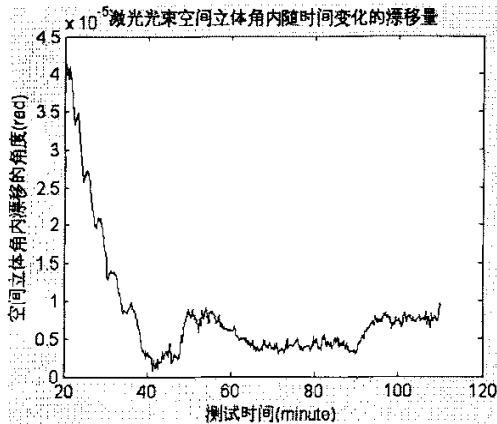


图 4-3-12 20 分钟后光束空间立体角内的漂移量

>> *****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	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-006

图 4-3-13 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---以平均值点为标准 (第1组)*****					
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	1.0389e-005	20.554	40.0259	9.69525	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-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)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	1.1178e-005	47.8	36.9432	18.0058	4.1691e-006
Y	4.8479e-005	20.554	38.5637	11.4044	8.8503e-006
L	4.9354e-005	20.315	38.6059	11.409	7.3932e-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3组)*****					
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	1.5737e-005	20.315	39.1181	9.42978	4.9547e-006
Y	4.9639e-005	20.315	39.1181	9.42978	1.5581e-005
L	5.2074e-005	20.315	39.1181	9.42978	1.0162e-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4组)*****					
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	1.1972e-005	20.315	39.5116	11.0085	3.6894e-006
Y	4.3083e-005	20.315	39.5116	11.0085	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这段时间内---以平均值点为标准 (第5组)*****					
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	7.4934e-006	29.397	0.916197	38.0604	2.0963e-006
Y	6.135e-005	20.315	0.897273	36.7228	1.4059e-005
L	6.1778e-005	20.315	0.897273	36.7228	9.8888e-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6组)*****					
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	3.5895e-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这段时间内---以平均值点为标准 (第7组)*****					
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	5.6825e-006	20.554	-0.289583	38.7612	1.4304e-006
Y	5.882e-005	20.315	-0.359738	38.7329	8.4519e-006
L	5.9016e-005	20.315	-0.359738	38.7329	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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	4.9874e-006	319.304	-0.810069	43.6485	2.2041e-006
Y	6.5271e-005	20.315	-1.41097	37.4687	1.7142e-005
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

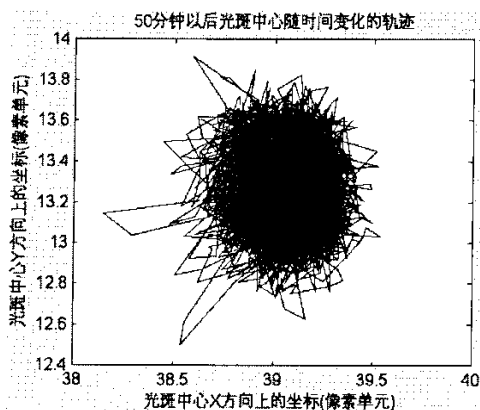


图 4-3-15 光斑稳定后光斑中心的轨迹

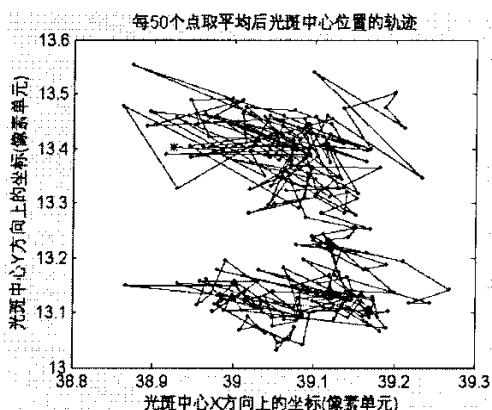


图 4-3-16 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

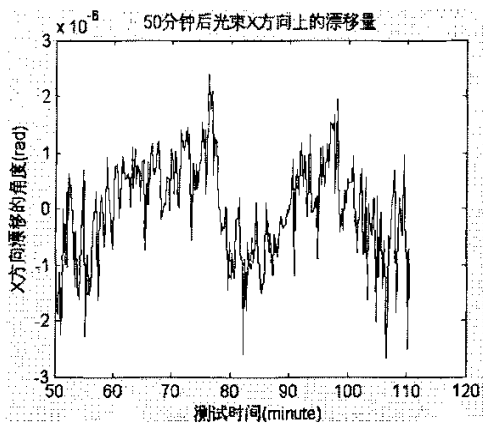


图 4-3-17 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量

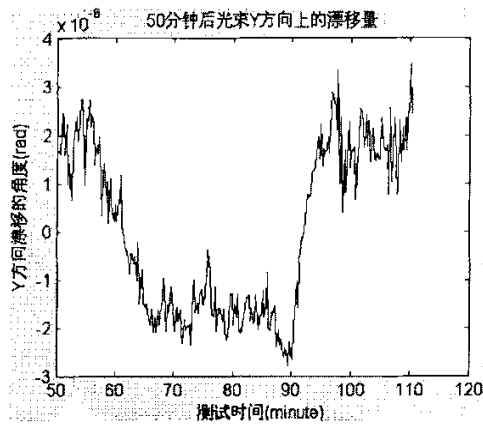


图 4-3-18 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量

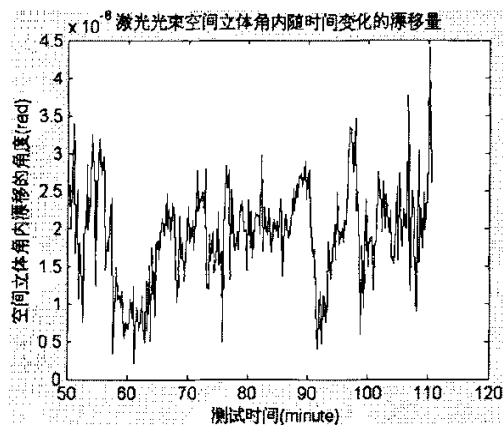


图 4-3-19 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量

>> *****50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(rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐标(像素单元)	标准差
X	2.6591e-006	106.594	38.863 13.4775	9.1591e-007
Y	3.6221e-006	110.179	38.8742 13.5539	1.7423e-006
L	4.4126e-006	110.179	38.8742 13.5539	6.8654e-007

图 4-3-20 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> *****50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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	2.6591e-006	106.594	39.863	13.4775	9.1591e-007
Y	3.8221e-006	110.179	39.8742	13.5539	1.7423e-006
L	4.4126e-006	110.179	39.8742	13.5539	6.8654e-007
>> *****60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)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	6.173e-006	61.423	37.4699	15.9536	2.3411e-006
Y	6.4206e-006	61.423	37.4699	15.9536	2.6256e-006
L	6.9069e-006	61.423	37.4699	15.9536	1.4259e-006
>> *****50分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准 (第3组)*****					
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	2.2603e-006	51.824	37.3976	14.1478	9.2665e-007
Y	3.2365e-006	50.429	37.651	14.0758	1.1132e-006
L	3.3589e-006	50.429	37.651	14.0758	6.8609e-007
>> *****60分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准 (第4组)*****					
考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	4.2966e-006	61.184	36.0376	14.9068	1.5367e-006
Y	6.4475e-006	61.662	36.3513	14.7419	3.2009e-006
L	6.4593e-006	61.662	36.3513	14.7419	1.4263e-006
>> *****150分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准 (第5组)*****					
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	6.1691e-006	402.715	0.798164	42.0678	1.9428e-006
Y	6.2715e-006	326.713	0.445891	42.9366	2.7785e-006
L	6.4646e-006	326.713	0.445891	42.9366	1.3937e-006
>> *****150分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准 (第6组)*****					
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	7.8519e-006	361.846	-0.22381	40.5458	3.1465e-006
Y	6.03e-006	161.086	0.13706	39.7447	2.2669e-006
L	6.7917e-006	361.846	-0.22381	40.5458	1.4682e-006
>> *****100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)*****					
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	4.7108e-006	118.305	-1.13531	43.5337	1.3923e-006
Y	5.7554e-006	566.267	-0.591701	43.2086	2.2334e-006
L	6.1145e-006	566.267	-0.591701	43.2086	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组)*****					
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	4.677e-006	303.53	-1.41428	43.6557	1.0615e-006
Y	3.6615e-006	278.674	-0.953367	43.4817	1.2591e-006
L	4.9157e-006	303.53	-1.41428	43.6557	7.6699e-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, 短时间内, 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 (X_1, Y_1) , 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 4-3-1 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

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	$1.6 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 4.7 \times 10^{-5}$
Y 方向	$6.1 \times 10^{-5} < \delta Y_{\max} < 1.4 \times 10^{-4}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$6.4 \times 10^{-5} < \delta L_{\max} < 1.5 \times 10^{-4}$

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 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 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表 4-3-2 所示。

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

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	$4.9 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 1.6 \times 10^{-4}$
Y 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)	$4.1 \times 10^{-5} < \delta L_{\max} < 6.6 \times 10^{-5}$

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 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 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表 4-3-3 所示。

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

	漂移最大值的范围(rad)
X 方向	$2.2 \times 10^{-6} < \delta X_{\max} < 7.9 \times 10^{-6}$
Y 方向	$3.2 \times 10^{-6} < \delta Y_{\max} < 8.3 \times 10^{-6}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$3.3 \times 10^{-6} < \delta L_{\max} < 9.0 \times 10^{-6}$

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^{-6} rad 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

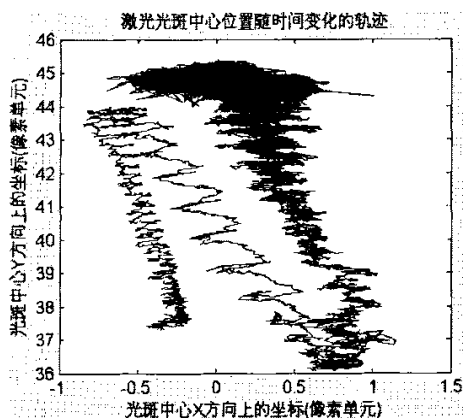


图 4-4-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

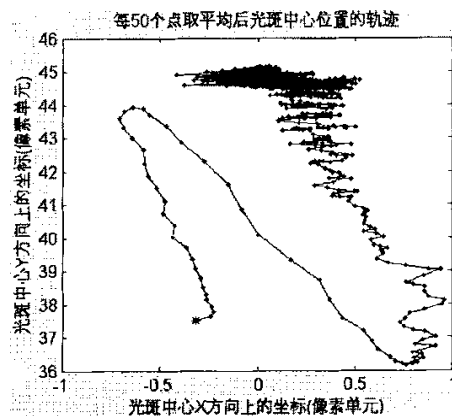


图 4-4-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

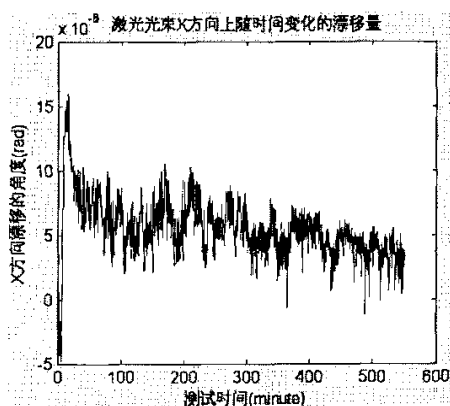


图 4-4-3 激光光束 X 方向上漂移量

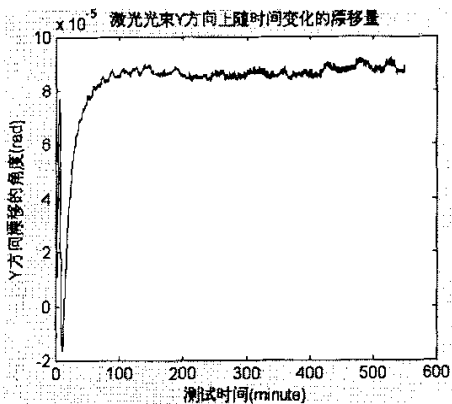


图 4-4-4 激光光束 Y 方向上的漂移量

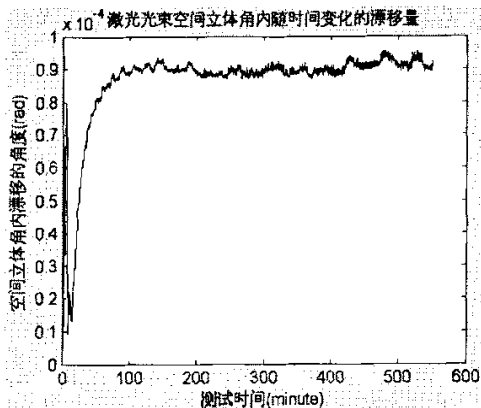


图 4-4-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

```

>> *****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   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)
X           1.599e-005       15.057                 0.96222      38.1228
Y           9.5429e-005       527.951                0.0085618   45.1689
L           9.5517e-005       527.951                0.0085618   45.1689
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=87.5377
经过曲线拟合后,所得直线与水平方向的夹角为:
C=-68.4033
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=88.3803

```

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束这段时间内——以第一个点为标准(第1组)*****
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)
X           1.599e-005       15.057                 0.96222      38.1228
Y           9.5429e-005       527.951                0.0085618   45.1689
L           9.5517e-005       527.951                0.0085618   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组)*****
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)
X           1.8111e-005       12.189                 0.832944     36.0024
Y           9.8248e-005       258.12                 -0.121977    45.0439
L           9.8448e-005       258.12                 -0.121977    45.0439
>> *****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组)*****
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)
X           1.7099e-005       214.383                47.5241      51.7804
Y           8.4637e-005       4.063                  45.4645      59.9221
L           8.5203e-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组)*****
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)
X           2.6582e-005       64.291                 48.5884      82.344
Y           7.0388e-005       5.975                  47.8973      83.551
L           7.1493e-005       5.975                  47.8973      83.551
>> *****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组)*****
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)
X           4.1902e-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束这段时间内——以第一个点为标准(第6组)*****
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)
X           4.2182e-005       100.141                 25.5744      43.8425
Y           8.98e-005         14.101                 25.1792      40.142
L           9.7883e-005       15.057                 25.3208      40.1445
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第7组)*****
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)
X           3.7059e-005       10.038                 24.0122      39.5392
Y           0.00011345         8.643                  23.8954      39.2482
L           0.00011911         9.082                  23.9534      39.2471
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第8组)*****
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)
X           2.1007e-005       3.348                  -7.41157     28.2769
Y           8.108e-005         3.585                  -7.4927      28.2517
L           8.3727e-005       3.107                  -7.41879     28.2823
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准(第9组)*****
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)
X           3.7418e-005       11.472                 -7.5412      31.6065
Y           0.0001185         10.755                 -7.84378     31.3481
L           0.00012399        10.755                 -7.84378     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

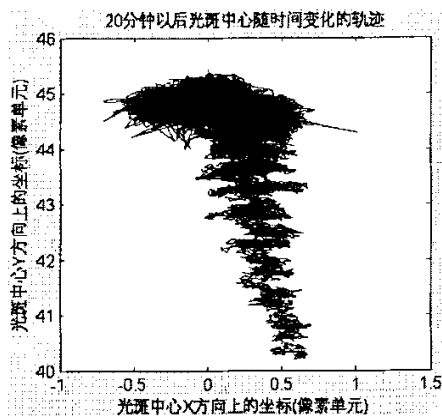


图 4-4-8 20 分钟后光斑中心的轨迹

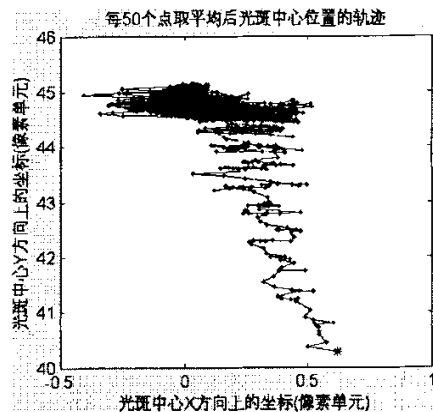


图 4-4-9 每 50 个点取平均后光斑中心位置的轨迹

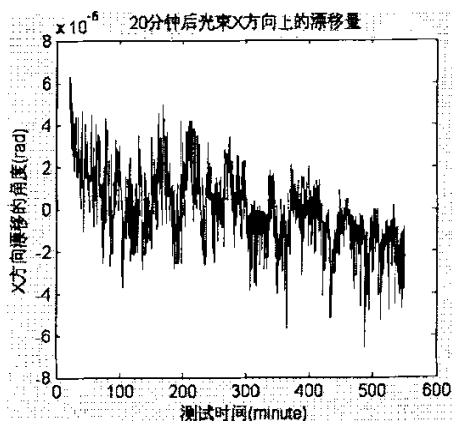


图 4-4-10 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量

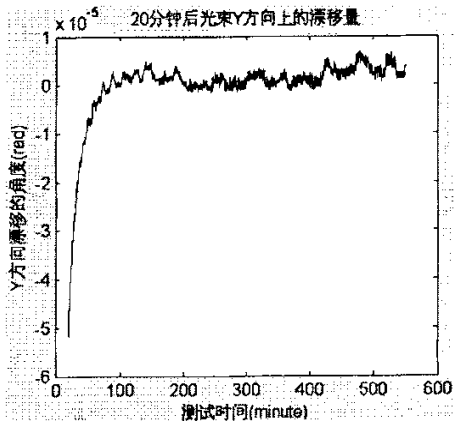


图 4-4-11 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量

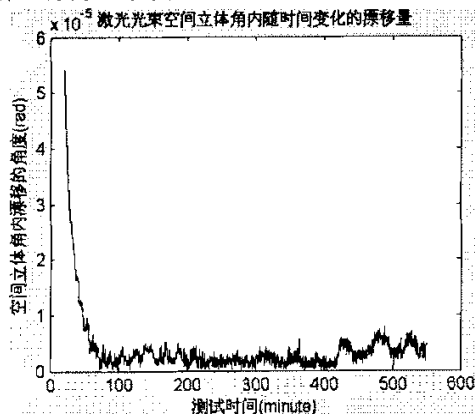


图 4-4-12 20 分钟后光束空间立体角内的漂移量

>> *****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	8.5531e-008	488.518	-0.40719 44.9344	1.7977e-008
Y	5.3772e-005	20.315	0.821089 40.2807	8.5318e-006
L	5.4135e-005	20.315	0.821089 40.2807	5.8458e-006

图 4-4-13 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——以平均值点为标准 (第1组)*****

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	8.5531e-008	488.518	-0.40719 44.9344	1.7977e-008
Y	5.3772e-005	20.315	0.821089 40.2807	8.5318e-006
L	5.4135e-005	20.315	0.821089 40.2807	5.8458e-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)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	8.5057e-008	284.171	-0.734395 44.5337	3.4773e-006
Y	5.7485e-005	20.315	0.452106 39.8236	9.8304e-006
L	5.7828e-005	20.315	0.452106 39.8236	7.9172e-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3组)*****

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	1.8337e-005	20.793	45.5538 56.9311	3.6498e-006
Y	6.7614e-005	20.315	45.7258 57.3858	8.3413e-006
L	6.9526e-005	20.315	45.7258 57.3858	7.6805e-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4组)*****

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	1.3879e-005	21.271	48.215 81.8122	4.9398e-006
Y	1.2249e-005	20.315	48.1374 81.3147	2.6494e-006
L	1.7790e-005	20.315	48.1374 81.3147	2.144e-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组)*****

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	3.0627e-008	162.52	24.5885 43.4201	8.9352e-007
Y	2.8078e-005	20.793	24.9205 41.347	5.1208e-006
L	2.8101e-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——以平均值点为标准 (第6组)*****

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	8.0361e-008	107.789	24.8407 43.4753	1.2878e-006
Y	2.8115e-005	20.315	25.3546 41.1414	6.6894e-006
L	2.8118e-005	20.315	25.3546 41.1414	4.6485e-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7组)*****

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	2.3036e-008	77.197	23.508 48.0084	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

>> *****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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	5.2866e-008	90.342	-8.31839 35.1129	2.4495e-006
Y	1.0005e-005	20.554	-8.84223 34.7539	3.5663e-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——以平均值点为标准 (第9组)*****

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	2.898e-008	104.443	-7.84255 37.0854	6.8526e-007
Y	2.8347e-005	20.554	-8.1042 34.7283	7.5445e-006
L	2.8349e-005	20.554	-8.1042 34.7283	4.8435e-006

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

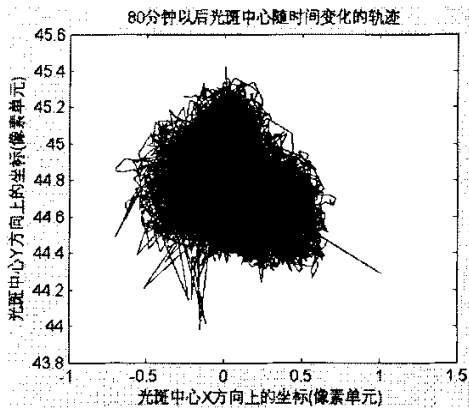


图 4-4-15 光斑稳定后光斑中心的轨迹

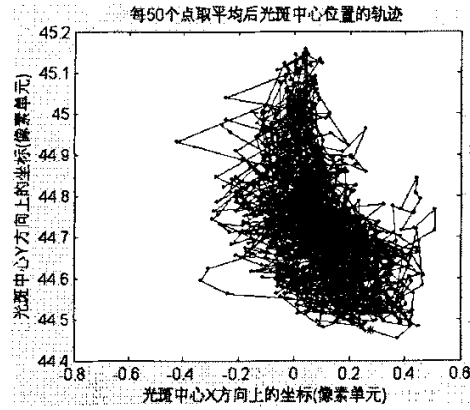


图 4-4-16 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

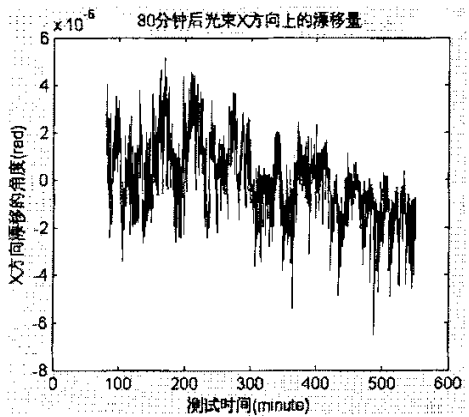


图 4-4-17 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量

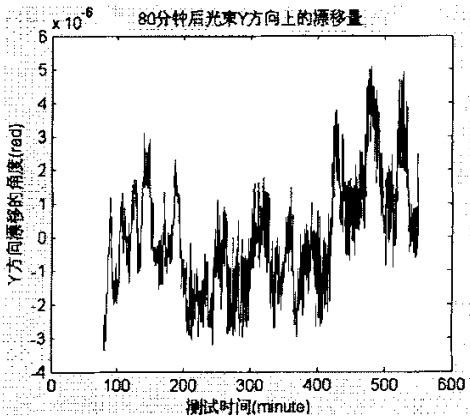


图 4-4-18 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量

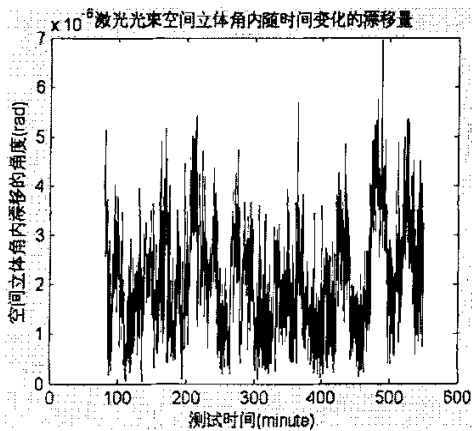


图 4-4-19 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量

>> *****80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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	6.4995e-006	488.516	-0.424898	44.9329
Y	5.2775e-006	480.151	0.0398868	45.1573
L	6.9589e-006	488.516	-0.424898	44.9329

图 4-4-20 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> *****80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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	6.4995e-006	488.516	-0.424898	44.9329
Y	5.2775e-006	480.151	0.0398868	45.1573
L	6.9589e-006	488.516	-0.424898	44.9329

>> *****70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)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	4.2383e-006	188.973	0.511442	44.7418
Y	4.1242e-006	140.054	0.0837978	45.0015
L	4.7344e-006	77.436	0.475223	44.4427

>> *****50分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第3组)*****

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	5.4158e-006	214.522	47.5307	51.8086
Y	6.5212e-006	89.071	47.075	51.3394
L	6.5887e-006	66.442	46.961	51.3517

>> *****100分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第4组)*****

考察方向	漂移最大值 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	6.3205e-006	109.701	47.675	62.3288
Y	3.0082e-006	146.029	46.8829	61.9341
L	6.5374e-006	109.701	47.675	62.3288

>> *****50分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第5组)*****

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	2.7025e-006	98.229	24.8022	43.6614
Y	4.6701e-006	198.609	24.6686	43.9448
L	5.0323e-006	198.609	24.6686	43.9448

>> *****50分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第6组)*****

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	4.1888e-006	114.481	24.9802	43.8176
Y	9.5362e-006	141.488	25.0479	44.3936
L	1.0106e-005	141.488	25.0479	44.3936

>> *****50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)*****

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	2.4439e-006	77.436	23.631	48.0092
Y	3.0001e-006	81.26	23.4556	48.0086
L	3.8638e-006	77.436	23.631	48.0092

>> *****40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 (rad)	最大值对应时间 (分钟)	最大值点坐标 (像素单元)	标准差
X	4.1466e-006	90.342	-8.31954	35.1776
Y	7.4853e-006	89.864	-8.37185	35.0853
L	8.2619e-006	89.864	-8.37185	35.0853

>> *****60分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第9组)*****

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	2.7024e-006	80.945	-8.27807	37.2953
Y	6.8726e-006	88.115	-7.98279	36.6534
L	6.9363e-006	88.115	-7.98279	36.6534

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 (X_1, Y_1) , 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 4-4-1 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	$1.5 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 4.3 \times 10^{-5}$
Y 方向	$6.4 \times 10^{-5} < \delta Y_{\max} < 1.2 \times 10^{-4}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$6.5 \times 10^{-5} < \delta L_{\max} < 1.3 \times 10^{-4}$

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 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 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	$2.3 \times 10^{-5} < \delta X_{\max} < 1.9 \times 10^{-5}$
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 $(\bar{X}, \bar{Y})$, 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 4-4-3 光斑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	$2.4 \times 10^{-6} < \delta X_{\max} < 8.4 \times 10^{-6}$
Y 方向	$3.0 \times 10^{-6} < \delta Y_{\max} < 9.6 \times 10^{-6}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$3.8 \times 10^{-6} < \delta L_{\max} < 1.1 \times 10^{-5}$

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^{-6}rad 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多。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

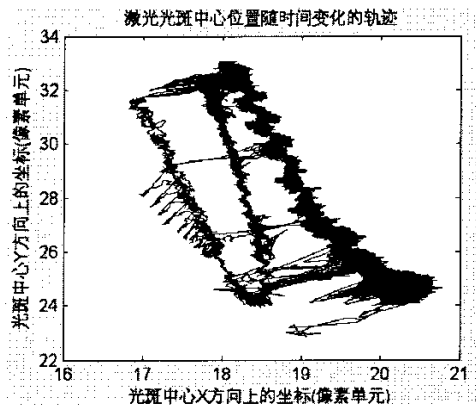


图 4-5-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

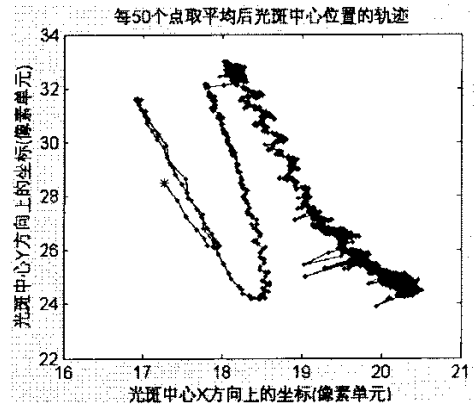


图 4-5-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

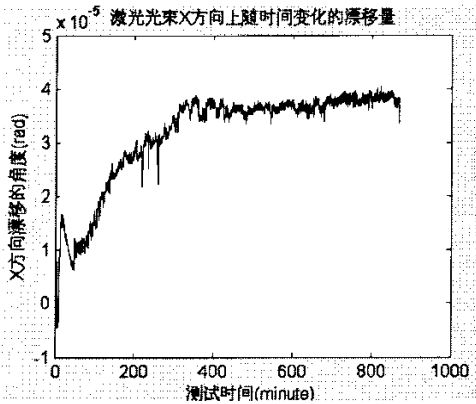


图 4-5-3 激光光束 X 方向上漂移量

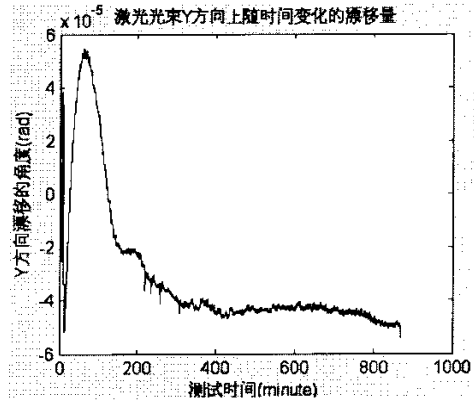


图 4-5-4 激光光束 Y 方向上的漂移量

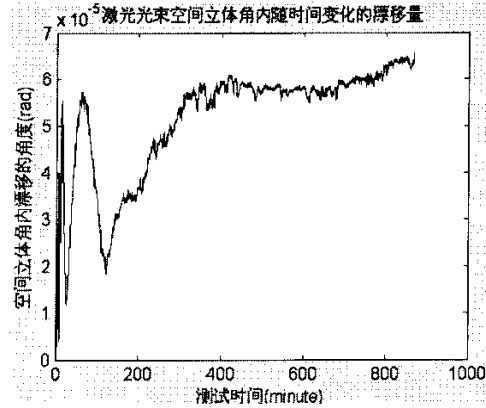


图 4-5-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

```

>> *****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   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)
X           4.0346e-005      821.443                  20.5091    24.4787
Y           5.8698e-005      868.048                  19.9427    23.9119
L           6.5747e-005      868.048                  19.9427    23.9119

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=58.5838
经过曲线拟合后, 所得直线与水平方向的夹角为:
C=69.3314
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=56.8284

```

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1组)*****
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)
X           4.0346e-005      821.443                  20.5091    24.4787
Y           5.8698e-005      868.048                  19.9427    23.9119
L           6.5747e-005      868.048                  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组)*****
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)
X           1.9029e-005       5.258                   18.1254    30.3059
Y           8.5782e-005      52.102                  18.6747    31.8761
L           8.6488e-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组)*****
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)
X           2.2092e-005      13.145                   2.58722    37.4188
Y           9.375e-005       50.907                  -0.24358   45.4075
L           9.4736e-005      59.75                    -0.443686   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4组)*****
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)
X           2.2785e-005      81.977                   1.35986    37.1808
Y           7.2913e-005      5.019                    -0.929873   44.3927
L           7.314e-005       5.019                    -0.929873   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组)*****
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)
X           4.8328e-005      37.045                   24.8331    33.6806
Y           8.482e-005       315.958                  23.0176    30.7825
L           8.9559e-005      392.918                  23.3652    30.8728
>> *****从实验开始到实验结束这段时间内——以第一个点为标准 (第6组)*****
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)
X           3.357e-005       575.034                  13.7945    38.7479
Y           0.00015208      550.856                  14.1187    39.0351
L           0.00015492      550.856                  14.1187    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

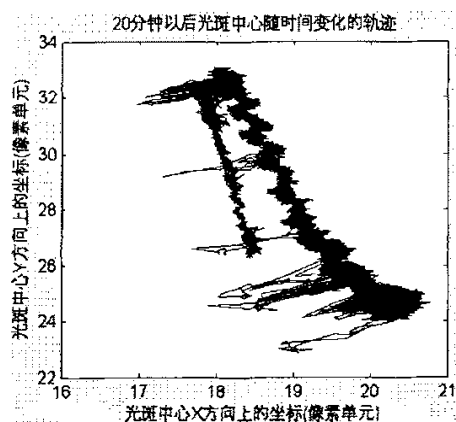


图 4-5-8 20 分钟后光斑中心的轨迹

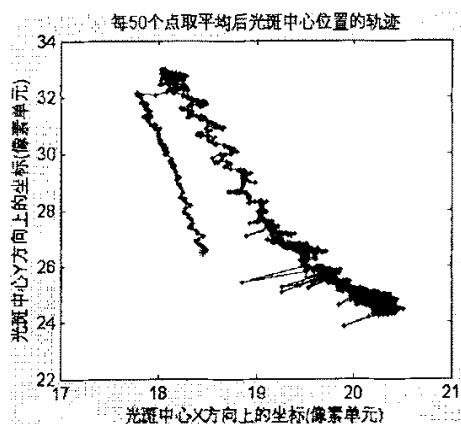


图 4-5-9 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

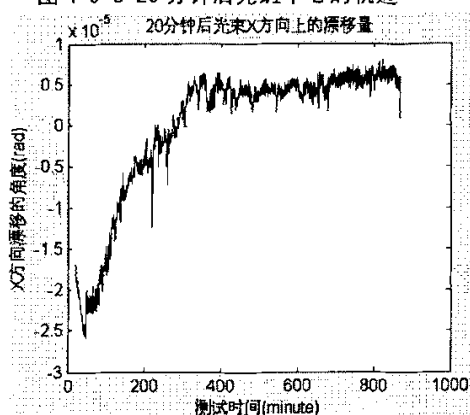


图 4-5-10 20 分钟后光束 X 方向上的漂移量

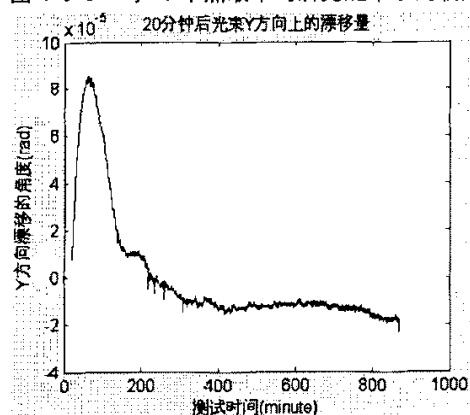


图 4-5-11 20 分钟后光束 Y 方向上的漂移量

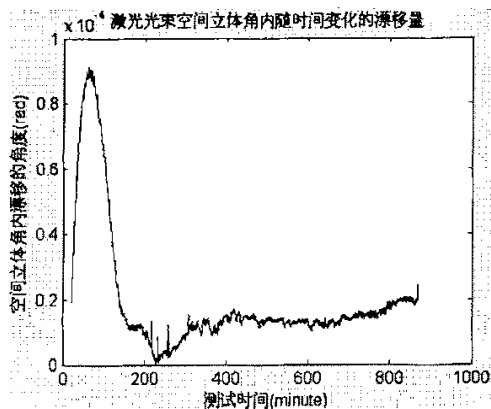


图 4-5-12 20 分钟后光束空间立体角内的漂移量

>> *****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	2.5841e-005	46.366	17.7778 32.1479	8.2545e-006
Y	8.8919e-005	62.14	18.041 32.9907	2.5579e-005
L	9.1668e-005	62.379	18.0189 32.9874	1.9488e-005

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---以平均值点为标准 (第1组)*****					
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	2.5841e-005	46.366	17.7778	32.1479	0.2545e-006
Y	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)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	1.7913e-005	59.272	18.3406	31.5324	6.7473e-006
Y	8.9819e-005	52.102	18.6427	31.8635	3.0072e-005
L	9.0926e-005	52.102	18.6427	31.8635	1.9923e-005
>> *****20分钟以后到实验结束这段时间内---以平均值点为标准 (第3组)*****					
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	2.3213e-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)	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	1.8318e-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分钟以后到实验结束这段时间内---以平均值点为标准 (第5组)*****					
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	2.5002e-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-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6组)*****					
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	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	27.7485	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

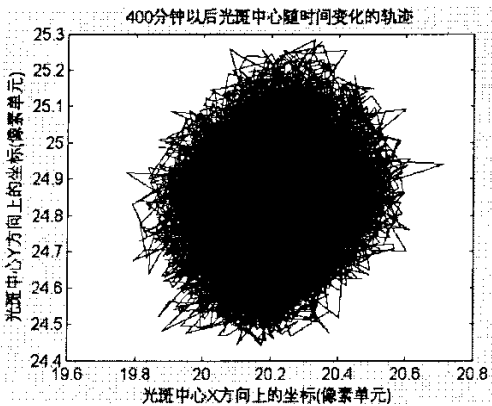


图 4-5-15 光斑稳定后光斑中心的轨迹

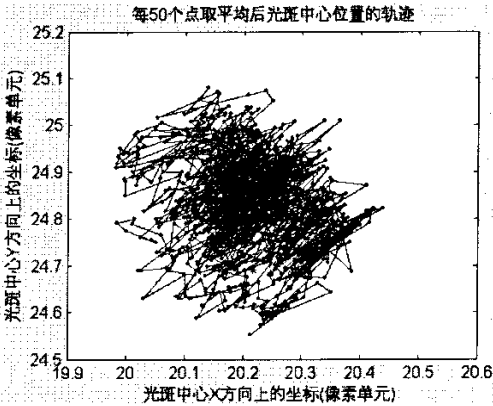


图 4-5-16 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

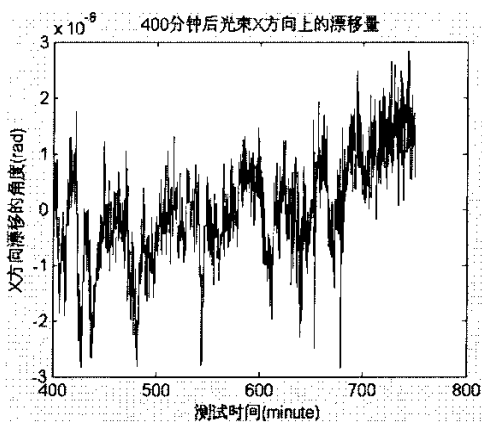


图 4-5-17 光斑稳定后光束 X 方向上的漂移量

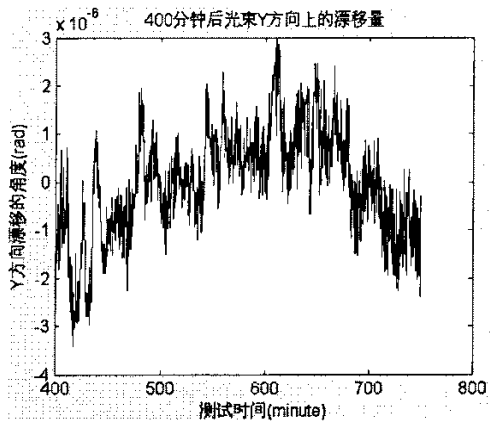


图 4-5-18 光斑稳定后光束 Y 方向上的漂移量

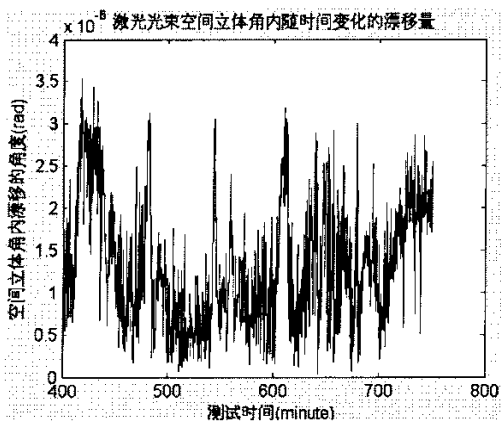


图 4-5-19 光斑稳定后光束空间立体角内的漂移量

>> *****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(rad)	最大值对应时间(分钟)	最大值点坐标(像素单元)		标准差
X	2.8578e-006	678.76	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

```

>> *****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(rad)  最大值对应时间(分钟)  最大值点坐标(像素单元)  标准差
X          2.8578e-008      678.78                19.9814    24.9086    9.6543e-007
Y          3.5311e-008      417.533               20.2125    24.5512    1.1061e-006
L          3.5312e-008      417.533               20.2125    24.5512    7.2112e-007
>> *****400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)  最大值点坐标(像素单元)  标准差
X          4.3054e-008      630.721               20.4336    23.2968    1.1943e-006
Y          3.1573e-008      437.848               20.1049    23.4981    9.7299e-007
L          4.354e-008       630.721               20.4336    23.2968    7.1981e-007
>> *****450分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第3组)*****
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          8.0201e-008      469.157               2.31002    36.4549    3.178e-006
Y          7.1067e-008      455.773               1.55111    36.7096    2.5735e-006
L          6.9863e-008      469.635               2.3089     36.469     1.5034e-006
>> *****300分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第4组)*****
考察方向  漂移最大值(rad)  最大值对应时间(分钟)  最大值点坐标(像素单元)  标准差
X          6.6939e-008      334.361               -0.0037032  40.3013    1.681e-006
Y          3.9418e-008      398.852               -0.280319   40.8668    1.4857e-006
L          6.7243e-008      334.361               -0.0037032  40.3013    9.453e-007
>> *****260分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第5组)*****
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          6.7964e-008      299.706               23.7052    31.5869    2.9579e-006
Y          7.2057e-008      315.958               23.049     30.7836    3.4928e-006
L          9.2153e-008      281.542               23.6401    31.9239    1.6569e-006
>> *****250分钟以后到实验结束这段时间内——以平均值点为标准(第6组)*****
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          3.2237e-008      398.852               15.108     33.5509    1.031e-006
Y          8.8663e-008      250.95                15.3827    33.7259    3.2972e-006
L          8.8715e-008      250.95                15.3827    33.7259    1.8935e-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(X_1, Y_1),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 4-5-1 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	$1.8 \times 10^{-8} < \delta_{X_max} < 4.9 \times 10^{-8}$
Y 方向	$5.6 \times 10^{-8} < \delta_{Y_max} < 1.6 \times 10^{-7}$
整个空间立体角内(L 方向)	$6.5 \times 10^{-8} < \delta_{L_max} < 1.6 \times 10^{-7}$

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($\bar{X}, \bar{Y}$),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 4-5-2 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	$1.7 \times 10^{-5} < \delta_{X_max} < 2.6 \times 10^{-5}$
Y 方向	$5.2 \times 10^{-5} < \delta_{Y_max} < 9.6 \times 10^{-5}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$5.2 \times 10^{-5} < \delta_{L_max} < 9.7 \times 10^{-5}$

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($\bar{X}, \bar{Y}$), 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 光斑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	$2.8 \times 10^{-6} < \delta_{X_max} < 8.1 \times 10^{-6}$
Y 方向	$3.1 \times 10^{-6} < \delta_{Y_max} < 8.9 \times 10^{-6}$
整个空间立体角内 (L 方向)	$3.5 \times 10^{-6} < \delta_{L_max} < 9.3 \times 10^{-6}$

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^{-6} rad 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

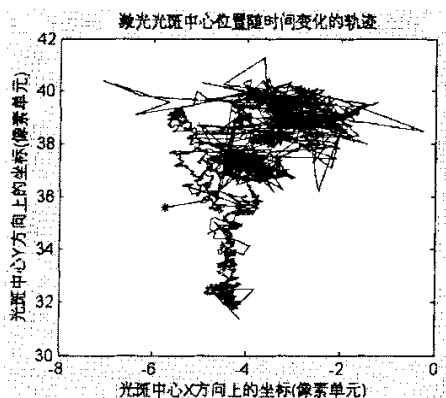


图 4-6-1 激光光斑中心位置随时间变化的轨迹

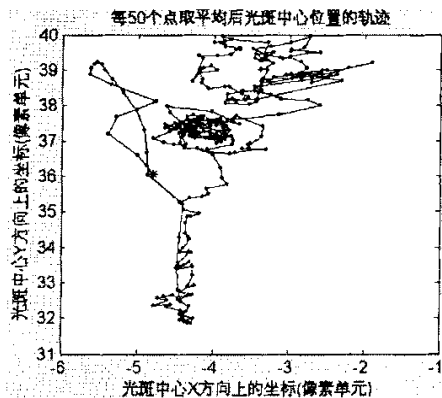


图 4-6-2 每 50 个点取平均后光斑中心的轨迹

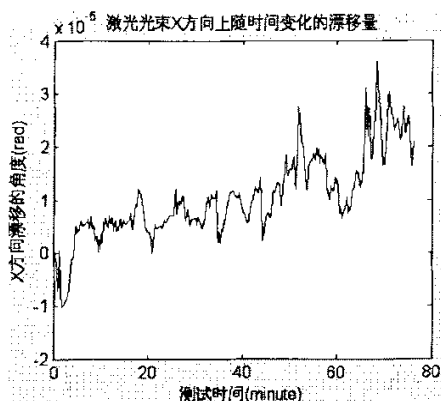


图 4-6-3 激光光束 X 方向上的漂移量

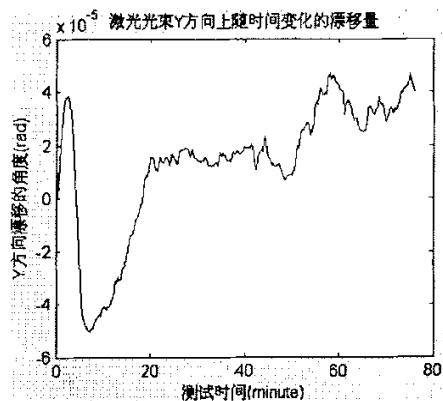


图 4-6-4 激光光束 Y 方向上的漂移量

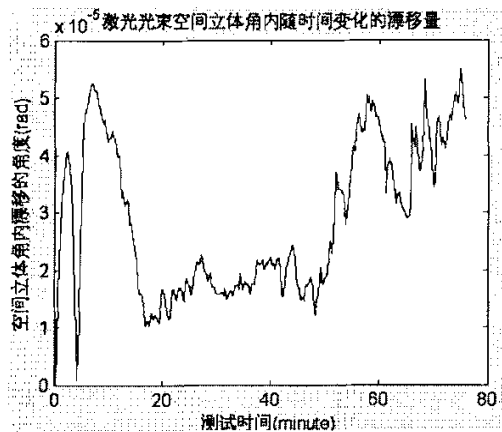


图 4-6-5 激光光束空间立体角内随时间变化的漂移量

>> *****相对于刚开始的位置*****

考察方向	漂移最大值(rad)	第几分钟	最大值点坐标(像素单元)		标准差
X	3.5978e-005	68.354	-1.9051	39.1944	7.9013e-006
Y	5.2186e-005	6.931	-4.32255	31.8562	2.4465e-005
L	5.5081e-005	75.046	-2.7186	39.9461	1.3195e-005

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=62.0241

经过曲线拟合后,所得直线与水平方向的夹角为:

C=54.0353

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=63.4535

图 4-6-6 数据处理的结果

(2) 多次测量的结果

>> *****相对于刚开始的位置*****					
考察方向	漂移最大值 (rad)	第几分钟	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	4.5448e-005	57.398	-0.580286	33.9904	1.2404e-005
Y	5.4994e-005	52.379	-1.48289	33.1211	2.5485e-005
L	6.6888e-005	68.832	-0.979058	33.281	1.9115e-005
>> *****相对于刚开始的位置*****					
考察方向	漂移最大值 (rad)	第几分钟	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	3.5978e-005	68.354	-1.9051	39.1944	7.9013e-006
Y	5.2186e-005	6.931	-4.32255	31.6582	2.4465e-005
L	5.5081e-005	75.046	-2.7185	39.9481	1.3195e-005
>> *****相对于刚开始的位置*****					
考察方向	漂移最大值 (rad)	第几分钟	最大值点坐标 (像素单元)		标准差
X	4.9374e-005	115.198	-0.180385	34.6488	9.7261e-006
Y	8.2902e-005	95.6	-0.498841	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:

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

	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)	$5.5 \times 10^{-5} < \delta_{L_max} < 9.6 \times 10^{-5}$

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:

- 激光器裸露在自然环境中时光斑漂移的最大值
 - - - - 激光器加上不开孔外罩时光斑漂移的最大值
 激光器加上开孔外罩时光斑漂移的最大值
 - - - - 激光器绑上烙铁芯时光斑漂移的最大值
 * * * * 激光器加上温控装置时光斑漂移的最大值

图 4-7-1 图 4-7-2~图 4-7-10 的图例说明

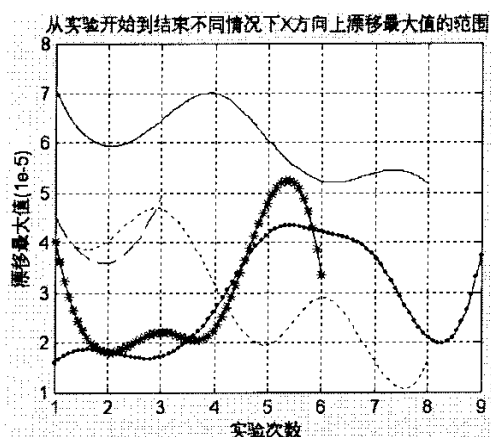


图 4-7-2 从实验开始到结束不同情况下
X 方向上漂移最大值的范围

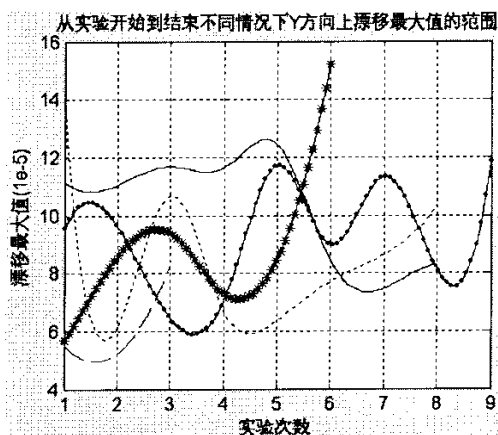


图 4-7-3 从实验开始到结束不同情况下
Y 方向上漂移最大值的范围

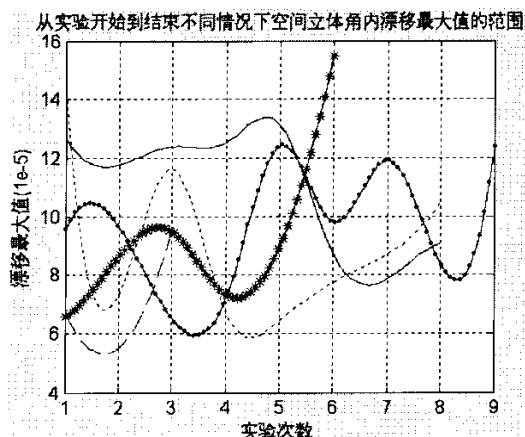


图 4-7-4 从实验开始到结束不同情况下
空间立体角内漂移最大值的范围

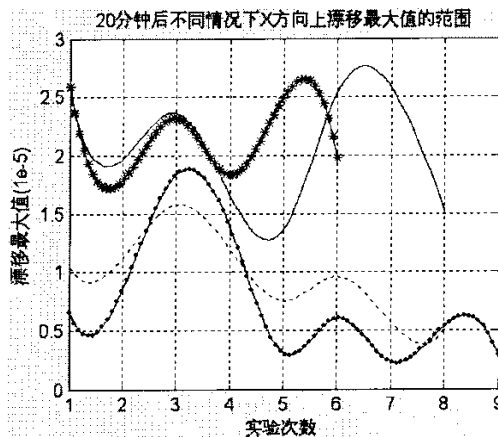


图 4-7-5 20 分钟后不同情况下
X 方向上漂移最大值的范围

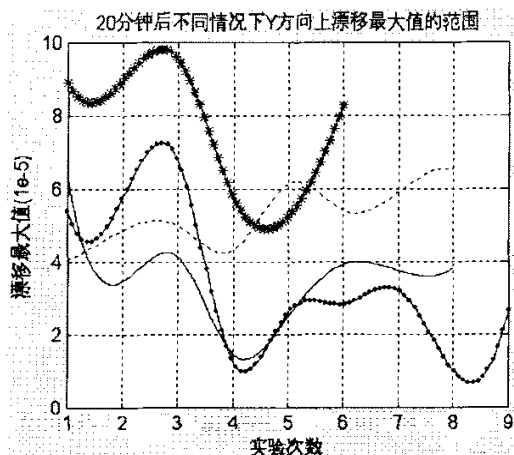


图 4-7-6 20 分钟后不同情况下
Y 方向上漂移最大值的范围

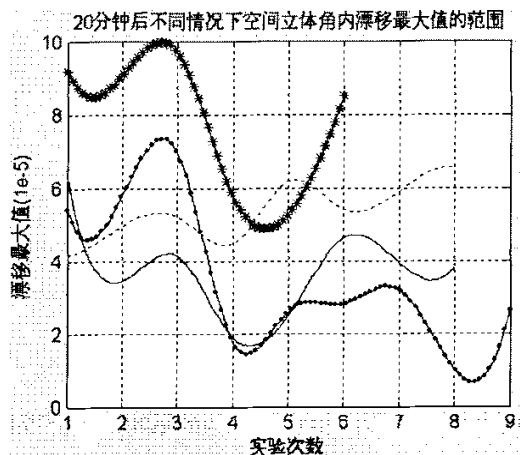


图 4-7-7 20 分钟后不同情况下
空间立体角内漂移最大值的范围

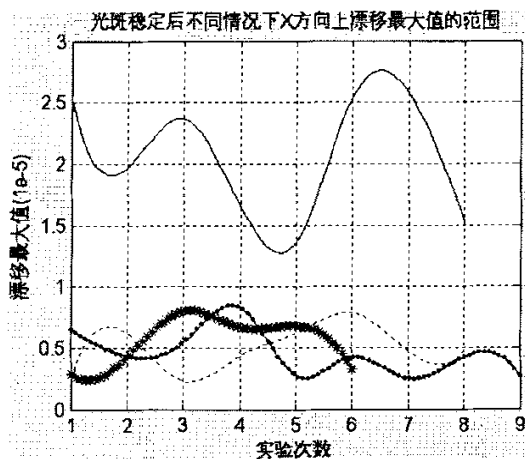


图 4-7-8 光斑稳定后不同情况下
X 方向上漂移最大值的范围

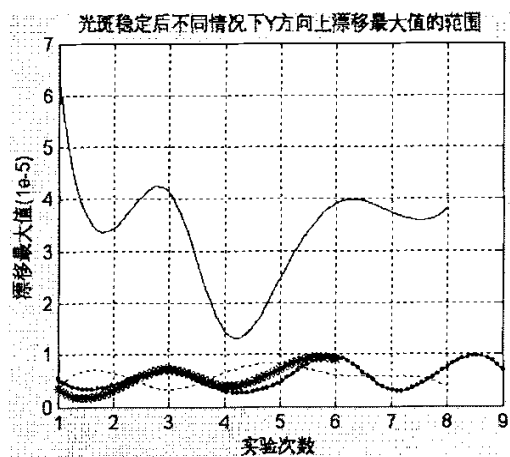


图 4-7-9 光斑稳定后不同情况下
Y 方向上漂移最大值的范围

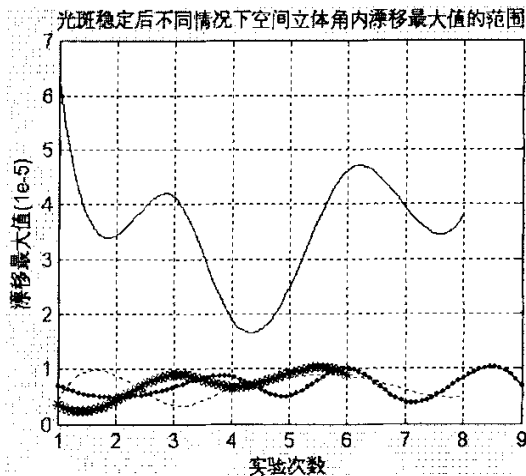


图 4-7-10 光斑稳定后不同情况下空间立体角内漂移最大值的范围

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^{-5}rad 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^{-6}rad 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:

表 4-7-1 不同控制条件下光斑到达稳定状态所需的时间

	从实验开始到“光斑小范围内趋于稳定,大范围内在狭长区域内作长距离漂移”状态所需的时间	从实验开始到“光斑最终稳定在一个较小的范围之内”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

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^{-5} rad 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^{-6} rad 量级,个别的实验甚至达到了 10^{-7} rad 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，温控精度将会更进一步提高。

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，他给了我课题很大的帮助，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 Laser 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. Aviation 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