

# 高精度激光准直及其可能应用

王绍民 王效敬 应成仁  
周祖利 朱精敏 纪际义

(杭州大学物理系)

## 提 要

我们对三点法点光源的稳定性和光束传输的影响因素作了实验研究,制成一台21米长、精度为 $\pm 0.6\sim 0.8$ 微米(或 $\pm 3\sim 4\times 10^{-8}$ )的激光准直实验装置。利用这台装置,测出了人造断层的潮汐变化,小潮期间,24小时水平位移最大变幅不超过11微米。分析了用于地震预报、测定大坝变形和调整粒子加速器的可能性,讨论了广义相对论时空弯曲对准直光束的影响。

## High accuracy laser alignment and its potential applications

Wang Shaomin Wang Xiaojing Yin Chengren  
Zhou Zuli Zhu Jingmin Ji Jiayi

(Department of Physics, Hangzhou University)

## Abstract

Experimental researches on the stability of the point light source in the "three point method" and the factors affecting the transmission of light beam were carried out, and a 21m long experimental arrangement for laser alignment with an accuracy of  $\pm 0.6\sim 0.8\mu\text{m}$  (or  $\pm 3\sim 4\times 10^{-8}$ ) was developed. The tide change of an artificial fault was measured with the arrangement, the maximum change for level displacement in 24 hours for a small tide period is within  $11\mu\text{m}$ . The potentiality for prediction of earthquake, measurement of dam deformation and adjustment of particle accelerators are analyzed, effects of generalized relativistic temporal-spatial bending on aligning light beam are discussed.

## 一、引 言

由于激光器工作时谐振腔的热变形,传

输空间又难免存在空气和不均匀温度场,因此,光束产生漂移并限制了准直的精度。尽管采取了不同方案和种种措施,激光准直的

收稿日期:1979年4月19日。

精度,若用角度中误差表示,一般仍为  $\pm 1 \times 10^{-6}$  [1~3] 左右。而且,准直距离愈短,精度就愈难保证。

Herrmanusfeldt 等 [4] 成功地采用了点光源经方形菲涅耳透镜成像(三点法),并由圆形真空管道传输,在 3050 米的距离内,获得高于  $\pm 0.25$  毫米 ( $\pm 1 \times 10^{-7}$ ) 的准直精度。测得直线加速器数月内水平、垂直毫米级的累计位移,满足了长距离直线加速器安装、调整的要求。

短距离高精度在设计上有什么不同?它还有哪些潜在的应用?这就是本实验的主要目的。

## 二、实验装置概述

实验装置建立在地下 2.8 米东西向的隧道内,见图 1。隧道用钢筋混凝土分两段筑成,7 为伸缩缝。地基为 20~30 米厚的沉积海淤泥。气温年变化  $14^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 日变化  $0.5^\circ\text{C}$  左右。

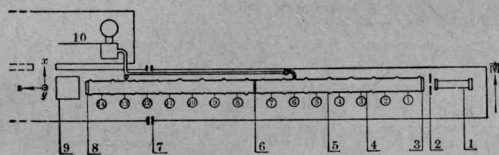


图1 实验装置俯视图

1 是普通的 190 毫米、GG-11 玻壳的全内腔 He-Ne 激光管,全反镜  $r_1=1$  米、部分反射镜  $r_2=\infty$ , TEM<sub>00</sub> 模,输出功率 1.2 毫瓦;为了减少热变形,外壳包上一层 0.5 毫米厚的铜皮。2 是小孔光阑,  $\phi 0.08$  毫米。3 是管道输入窗, 8 是输出窗。4 是 1.3 米长、150 厘米  $\times$  150 厘米见方,上下为绝热材料,南北是金属薄板的方形管道;南北向可加温度场,管道内可测温度梯度。5 表示管道之间是软连接的。①……⑭是管道的编号。6 是成像元件,采用粗制的长焦距透镜(集光镜制造工艺),厚 4 毫米、孔径 6 厘米。9 是

硅光电池、电桥和检流计组成的可测水平或垂直位移的光电指零检测系统。10 是 2X-30 真空泵。

准直距离为 20.9 米。透镜焦距为 5.5 米。位移值的最小刻度是 0.1 微米。系统的灵敏度是 1.5~2.0 格/微米。

可见,基本原理类同于文献 [4]。区别是:准直距离短,点光源结构不同,成像元件简单,检测系统绝对灵敏度较高,管道可加置和测定温度场,并跨在人造的断层上。

## 三、光点位置的锁定

以多元件两镜腔输出镜面热变形为例,我们已从理论上得出了激光器的光轴 [5]:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(1-D)(\alpha\varepsilon + \beta\varepsilon') - B(\gamma\varepsilon + \delta\varepsilon')}{2-A-D}, & (1) \\ x'_0 = \frac{C(\alpha\varepsilon + \beta\varepsilon') - (1-A)(\gamma\varepsilon + \delta\varepsilon')}{2-A-D}. & (2) \end{cases}$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  是谐振腔内各元件的往返传输矩阵元,  $\alpha=1-a$ 、 $\beta=-b$ 、 $\gamma=-c$ 、 $\delta=1-d$  为变形反射镜的失调矩阵元,  $a$ 、 $b$ 、 $-c$ 、 $-d$  是该反射镜的传输矩阵元;  $\varepsilon$ 、 $\varepsilon'$  是变形反射镜相对冷态或平衡态的平移和倾角,  $x_0$ 、 $x'_0$  则为变形输出镜处的激光光轴相对于冷态或平衡态时的平移和倾角。也就是说,方向漂移可分解成平移和倾角两部分。这从实验也能观测出来。例如,在环境温度为  $13.45^\circ\text{C} \pm 0.05^\circ\text{C}$  的隧道里,选择三个不同的距离,分别测定上述激光管开启后 5 分钟到 1 个半小时内光轴水平方向的漂移,如图 2(a) 所示。若将这段时间里的最大漂移量和测定距离作图,即图 2(b),可得:  $x_{0\max} \approx 24$  微米,  $x'_{0\max} \approx 22 \times 10^{-6}$ 。

从准直角度中误差来看,倾角漂移和准直距离无关,但平移漂移造成的影响随距离的缩短线性增大。因此,近距离高精度对光源的方向稳定提出了更高的要求。

改进激光管的设计和制造工艺 [6], 这是

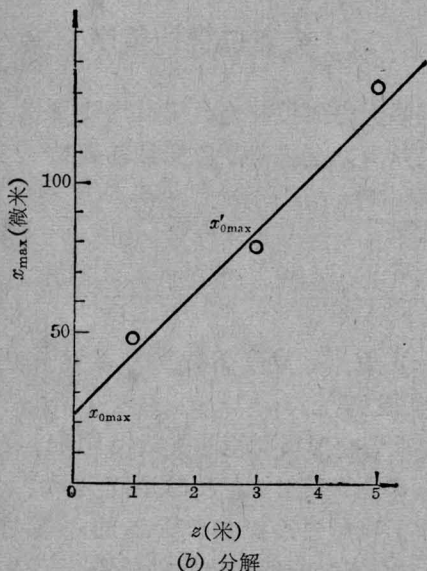
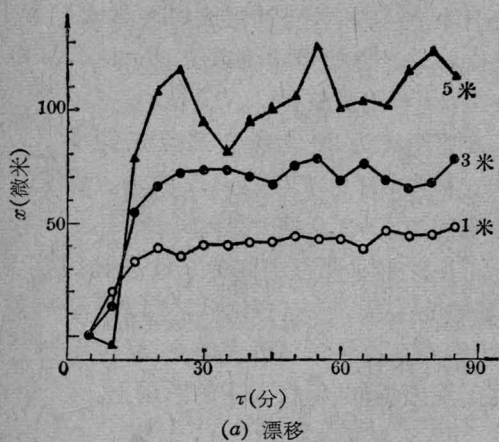


图2 激光管光轴的  $x$  方向漂移和分解

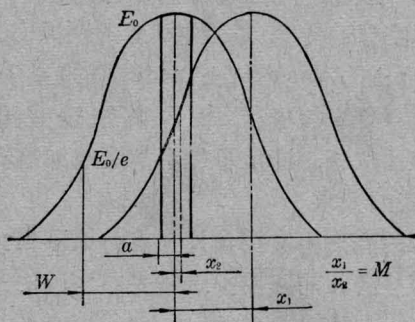
一条途径。让光束通过适当的光学变换，这是下面要讨论的第二条途径。

激光管配置相互绝热的望远镜，可使倾角漂移缩小到角放大率分之一，但使平移漂移扩大了角放大率倍<sup>[2]</sup>，这对远距离准直是可取方案之一；但对近距离，则弊多利少。

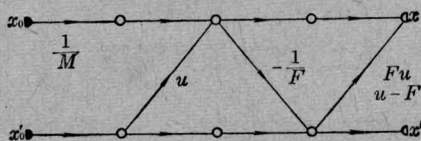
**三点法**是一种有效的变换系统。其关键性的部件——点光源，除了目前所采用的透镜聚束并扩束<sup>[4]</sup>外，我们提出一种新的结构：利用小孔半径远小于光束半径的光阑，直接截取由激光管输出的高斯光束，同时利用小孔光阑的衍射，使光束充满成像元件。小孔截束，对光束漂移有控制作用，见图 3(a)。控

制系数  $M = x_1/x_2$ 。这种可称为光阑三点法的系统，对光束漂移的变换，若用流图<sup>[7]</sup>表示，见图 3(b)，得：

$$x = -\frac{1}{M} \frac{F}{u-F} x_0 \quad (3)$$



(a) 光阑截束的控制作用



(b) 漂移变换的流图结构

图3 光阑三点法对光点稳定性的变换

式中， $F$  是成像元件的焦距， $u$  是光阑到成像元件的距离。(3)式的含意是：测定处位移的漂移，与激光管光轴的倾角漂移无关，仅保留了平移漂移项；同一系统的不同测点数值有所不同。但和系统的总长度是无关的，也就是说：短距离要获得高精度仍然比较困难。然后通过选择控制系数，满足所需的精度。这种方法，我们叫做光点位置锁定。

在环境温度为  $13.70^\circ\text{C} \pm 0.10^\circ\text{C}$  的地道里，做了一组原理性试验。光阑处高斯光束光斑尺寸 0.28 毫米，光阑半径 0.04 毫米，成像元件为  $\phi 1$  厘米、 $F=88$  厘米的圆形菲涅耳透镜，准直距离 3.52 米。对比了激光管开启后 1 个半小时内光点垂直方向的漂移，见图 4。得  $y_{Q\max} \approx 309$  微米， $y_{\text{max}} \approx 20$  微米，效果是显见的。

高稳定是牺牲功率换取的。 $P(a)/P(\infty) = \int_0^a \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W}\right)^2 e^{-2\gamma^2/W^2} 2\pi\gamma d\gamma / \int_0^\infty \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{W}\right)^2 e^{-2\gamma^2/W^2} 2\pi\gamma d\gamma = 1 - e^{-2a^2/W^2}$ 。上例中， $P(0.04)$



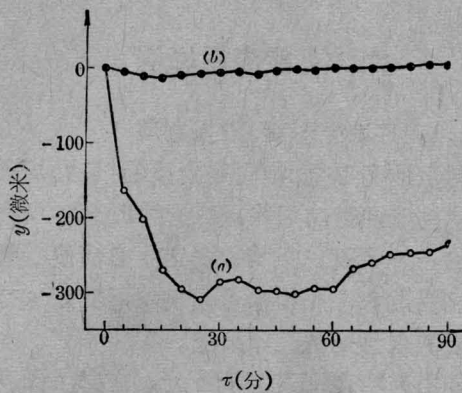


图4 光阑三点法原理性试验

(a) 激光管光轴  $y$  方向漂移; (b) 光阑三点法  $y$  方向漂移  
 $/P(\infty) \approx 0.04$ ; 与实测相符。因此,相应地要提高检测灵敏度。成像元件换为普通的透镜,结果也是相同的。

#### 四、传输管道的要求

准直光束经空气传输,空气的温度梯度、压力梯度以及温度梯度、压力梯度随时间的变化,造成折射率梯度和折射率梯度的变化,使光束产生折射和抖动,影响了准直的精度。因此,高精度准直,有必要建立管道。

我们从折射定律的微分形式和空气折射率与温度、压力的关系式出发,可以导出温度梯度、压力梯度与准直误差的一般关系式:

$$\Delta x, \Delta y = \frac{z^2}{2} \frac{\sin i}{n} \frac{T_0}{P_0} (n_0 - 1) \left( \frac{1}{T} \frac{\partial P}{\partial W} - \frac{P}{T^2} \frac{\partial T}{\partial W} \right) \quad (4)$$

式中,  $z$  是传输距离,  $i$  是传输方向与温度梯度、压力梯度的夹角,  $n$  是空气折射率,  $n_0$  是标准态空气折射率,  $T$  和  $P$  分别是绝对温度和气压,  $T_0$  和  $P_0$  分别是标准态的绝对温度和气压;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  是由此而引起的水平方向和垂直方向的准直误差。

管道抽真空的作用,可用方形管道人为加置温度场,进行实验观察。③-⑥、⑨-⑫8节管道的南侧,各安一条1000瓦电热丝,电压加至160伏左右,形成人造温度梯度。在

相同热源不同气压下,温度场分布的例子,如图5所示。气压、不同部位加置温度场,对准直精度及光束折射的影响,见表1。可以认为:由于空气对流热交换,因而在相同热源作用下气压愈高温度梯度愈小。但是,温度梯度是和气压的乘积影响准直精度的;所以,在难免存在热源的情况下,抽真空与否,测定误差和光束移动有明显区别。传输管道抽真空是提高精度和保证测定值可靠性的重要措施。

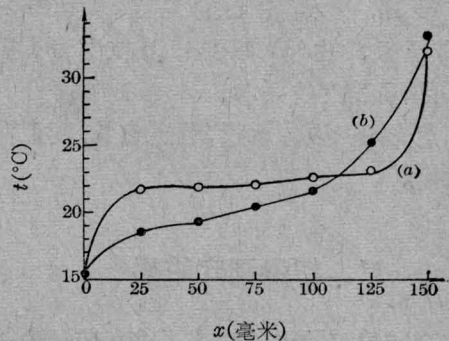


图5 人为加置的温度场  
 (a) -760托; (b) -0.4托

表 1

管道气压 (托)	加置温度场	测定中误差 (微米)	光束移动 (微米)
760		$\pm 3.2$	-147
	③~⑥	$\pm 34.6$	
5		$\pm 1.5$	-20
	③~⑥	$\pm 1.8$	
760		$\pm 5.4$	-119
	⑨~⑫	$\pm 17.5$	
1		$\pm 1.3$	-9
	⑨~⑫	$\pm 1.8$	

真空度可按准直距离、所需精度和现场条件合理选取。例如,  $z \approx 20$  米, 要求精度  $\pm 5 \times 10^{-8}$ , 可取  $\Delta x \approx \Delta y \approx 3$  微米; 设  $i = 0$ , 考虑  $n \approx 1$ , 并将  $T_0 \approx 273$  K、 $P_0 = 760$  托、 $n_0 \approx 1.0003$ , 代入(4)式, 得出对传输管道的要求为:

$$\left( \frac{1}{T} \frac{\partial P}{\partial x, y} - \frac{P}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x, y} \right) \approx 1.4 \times 10^{-6} \text{ 托/厘米} \cdot \text{K}. \quad (5)$$

假定两项均匀分配, 则:

$$\begin{cases} \left| \frac{\partial P}{\partial x, y} \right| < 1.9 \times 10^{-4} \text{ 托/厘米}, \\ \left| P \cdot \frac{\partial T}{\partial x, y} \right| < 4 \times 10^{-2} \text{ 托} \cdot \text{K/厘米}. \end{cases} \quad (6)$$

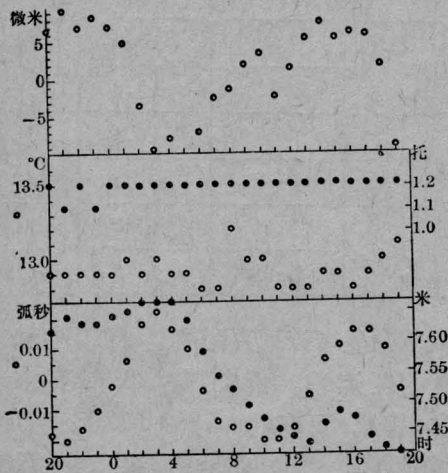
在隧道里, 温度的日变化在  $0.5^\circ\text{C}$  以内, 管道两侧的温差不会超过  $0.2^\circ\text{C}$ , 再由图 5 温度场分布推算, 管道中心的温度梯度约为  $0.01^\circ\text{C/厘米}$ 。由(6)式可知, 真空度为 4 托时, 就可满足精度的要求。

和点光源的要求相反, 管道愈长, 真空度要求愈高。

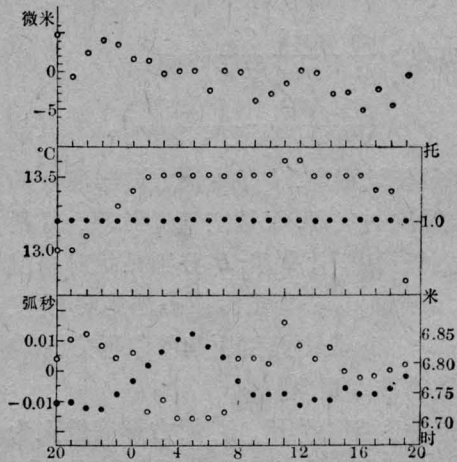
### 五、初步测定结果

在不同的时段里, 检查了整套装置的一次测定中误差。x 方向分 60 组, 每 10 分钟测 10 次为一组, 算得的中误差是  $\pm 0.70$  微米, 或  $\pm 3.3 \times 10^{-8}$ 。y 方向分 38 组, 得  $\pm 0.66$  微米, 或  $\pm 3.1 \times 10^{-8}$ 。

准直光束长时间连续变化, 具有一定的规律, 列举于图 6。



(a) 大潮日变化(1979.3.13~14)



(b) 小潮日变化(1979.3.21~22)

图 6 24 小时变化及其影响因素

## 六、可能应用举例

### 1. 测定地壳形变, 预报地震

测定地壳形变, 特别是断层的错动, 是研究地球构造的运动规律, 掌握地震前兆, 预报地震的一种手段。目前, 测定 y 方向倾斜的主要仪器是水平摆和水管倾斜仪, 测定 z 方向伸缩的仪器是激光干涉仪。

若用高精度准直, 可测 y、x 方向。图 6 中, 大潮期间, 24 小时 x 方向最大变幅为 0.02 毫米, 相当于  $1 \times 10^{-6}$  (或  $0.2''$ ), 具有月、日潮汐影响的双峰特征。小潮, 最大变幅为 0.01 毫米 ( $5 \times 10^{-7}$  或  $0.1''$ ), 也有双峰。这些变化, 和气压、温度的微小变化没有明显的依赖关系。离装置西南方约 2 千米杭州地震台东西向安置在石英砂岩洞里的水平摆, 在相应时间里 y 方向的最大变幅分别为  $0.04''$  和  $0.03''$ 。离装置南方约 4 千米钱江水文站, 在相应时间里 y 方向水位的最大变幅分别为 24 厘米和 12 厘米。联系到隧道基础的地质条件, 可以初步认为: 所测出的变化, 主要是地道伸缩缝(人造断层)在固体潮和钱江潮(通过固体传递和地下水位)的混合影响。

高精度准直,为测定地倾斜和断层位移,特别是大范围 $\omega$ 方向的错动,提供了一种可能方法。

## 2. 大坝外部变形的高精度自动化测量

大坝水平位移的测定,目前的主要方法是:视准线、引张线、激光测距、激光照准、大气中激光三点准直,但仍满足不了日益发展的生产需要。垂直位移的测定,则另用一套二等水准。

通过上述试验,有可能做到:垂直位移、水平位移同时测定,精度提高十倍左右,效率提高数十倍,操作人员减少到四分之一,并可配置 $xy$ 自动记录仪。

## 3. 安装、调整粒子加速器

直线加速器或回旋加速器的直线段,准直要求一般高于 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 。这是其它任何方法无法满足的。长距离(3050米),国外已有成功的经验。

上述试验和分析表明:短距离对光源稳定性要求较高,但对温度场和真空度的要求可以放宽。选择没有断层的坚实的地基地质结构,并尽量避开朔望、利用上下弦时装校。则,从20米到3000米的范围内,达到要求的精度,从激光技术上说,没有原则的困难。

## 七、时空弯曲的讨论

引力场造成的时空弯曲,对准直光束会产生轻微的影响。我们从广义相对论<sup>[8]</sup>出发,对有限范围做进一步的演算,有:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{4GM}{c^2 R} \left\{ \frac{z/2}{[(z/2)^2 + R^2]^{1/2}} - \frac{z/2}{[(z/2)^2 + R^2]^{3/2}} \cdot R^2/z \right\}; \quad (7) \end{aligned} \right.$$

$$\theta_2 = \frac{4GM}{c^2 R}, \quad \text{当 } z \gg R; \quad (8)$$

$$\theta_3 = \frac{4GM}{c^2 R} \cdot \frac{z}{4R}, \quad \text{当 } z \ll R. \quad (9)$$

式中, $G$ 是引力常数, $M$ 是天体质量, $c$ 是光速, $R$ 是撞碰参数, $z$ 是准直距离; $\theta$ 是因此而产生的光线偏折角度。

运用(8)、(9)两式,可算得日、地、月对准直光束的直接影响,列于表2。在目前的准直距离和准直精度范围内,引力场的影响可以忽略不计。

表 2

光束位置	光束长度	日	地	月
天体表面	$\infty$	$8.5 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-10}$
地球表面	$\infty$	$4 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-13}$
	3000米	$2 \times 10^{-16}$	$4 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-18}$
	20米	$1 \times 10^{-18}$	$2 \times 10^{-15}$	$8 \times 10^{-21}$

## 参 考 文 献

- [1] A. Chrzanowski *et al.*; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 12, 319.
- [2] 王绍民,王效敬,周祖利;《激光》,1978, **5**, No. 1, 12.
- [3] P. W. Harrison; *Water Power & Dam Construction*, 1978, **30**, No. 4, 52.
- [4] W. B. Herrmanusfeldt *et al.*; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, No. 6, 995.
- [5] 王绍民,《杭州大学学报(自然科学版)》, 1979, No. 3, 42.
- [6] 郁曾期;《激光》, 1979, **6**, No. 3, 33.
- [7] 王绍民;《激光》, 1979, **6**, No. 2, 1.
- [8] L. I. Schiff; *Am. J. Phys.*, 1960, **28**, 340.