

激光准直仪的漂移问题

王绍民 王效敬 周祖利

(杭州大学物理系)

提 要

本文用光学矩阵导出望远镜对准直光束方向漂移的变换作用关系式。由此,提出减小方向漂移的措施——主要是减少激光管对望远镜的热传播。经过这样考虑和处理的激光准直仪,在一定条件下,可以获得 $\pm 0.1''$ (或 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$) 的稳定精度。

一、引 言

激光准直,在激光应用中是一门比较成熟的技术。但到目前为止,仍然存在一些有待解决的关键问题,例如漂移问题。

准直光束的漂移,有强度漂移、位相漂移和方向漂移。对激光准直技术来说,所关心的主要是方向漂移。方向漂移常用漂移角来度量。方向漂移产生的原因,一般认为有以下几方面:(1)由于发射基点不稳,振动、冲击、变形,引起光束方向的周期振荡、阻尼振荡和缓慢变化。(2)由于准直通用的 He-Ne 激光管工作时温度可达 $60 \sim 70^\circ\text{C}$,以及周围环境温度的变化,致使激光管外壳、毛细管和谐振腔受热不均匀而变形,引起激光轴的变化。(3)由于光束经过大气,大气温度梯度、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随时间的变化,使光束产生折射和抖动。(4)由于光电检测靶结构不完善,杂散光变化、电源变化、温度变化,对测定值的影响。就激光准直仪本身而言,通常认为:主要是激光管的热变形引起的。它使激光轴平行移动可高达 0.02 毫米,它使激光轴产生相对倾斜可高达 $10''$ 。因此,国内外采取了一些措施,例如:使激光

管通风散热,或激光管加置高导热系数(如铜、铝、钢等金属)的圆形、波形管套,外部再填充低导热系数高比热容量(如氧化镁、石蜡、变压器油等)的储热层,使激光管均热恒温;以及激光管做成外极式、外腔式,再用石英、微晶玻璃等支撑谐振腔,以减小谐振腔的变形。这对于改善光束的方向漂移,取得了不同程度的效果。

本文讨论的对象是:配制倒置望远镜的激光准直仪,望远镜对准直光束方向漂移的变换作用,从而提出新的认识。

二、望远镜对漂移的变换作用理论

配制倒置望远镜的目的,是为了增加准直距离。例如:激光指向仪、激光照准仪、激光导向仪、激光经纬仪、激光水准仪、激光垂线仪等,往往都配有倒置望远镜,以满足设计的要求和指标。

另一方面,必须注意,望远镜对准直光束的方向漂移,起了重要的变换作用。这种变换作用,可分为两个物理过程:(1)激光管热变形,引起激光轴变化,经过望远镜传输,将产生变换;(2)激光管热传播使望远镜热变形,对激光轴所起的作用。这两个物理过程,可用几何光学进一步分解。以简单的开普勒

望远镜为例,如图1所示。图中 f_1 、 f_2 是望远镜聚焦镜、发射镜的焦距, x_1 、 x'_1 是激光管热变形引起激光轴相对于聚焦镜光轴的平移和倾角, x_2 、 x'_2 是望远镜热变形造成发射镜光轴相对于聚焦镜光轴的平移和倾角, x_3 、 x'_3 是望远镜输出的激光轴相对于聚焦镜光轴的平移和倾角。

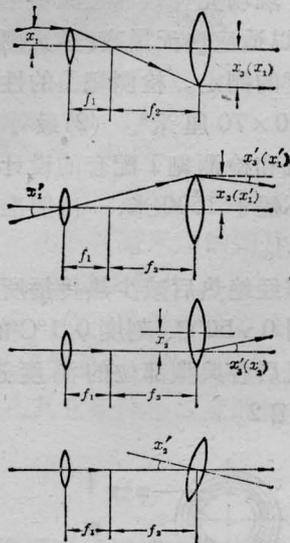


图1 望远镜对方向漂移变换作用的分解图

激光高斯光束的能量中心(即激光轴)在均匀介质中按直线传播,望远镜对激光轴的变换是线性的,漂移的激光轴又满足近轴光线的条件($<2^\circ$);因而,可以利用光学矩阵来处理,从而得出综合考虑的关系式。

如果把聚焦镜和发射镜都看作薄透镜,望远镜成象无穷远,则不难写出产生漂移时 x_3 和 x'_3 的矩阵表达式:

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -x_2 \\ -x'_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & f_1+f_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_2 \\ -x'_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)式的计算结果:

$$\begin{cases} x_3 = -\frac{f_2}{f_1} x_1 + (f_1+f_2)x'_1 \\ x'_3 = -\frac{f_1}{f_2} x'_1 + \frac{x_2}{f_2} \end{cases} \quad (2)$$

这就是望远镜对准直光束方向漂移的变换作用关系式。

(2)式的物理意义是:(1)激光管热变形引起的光束方向漂移经过望远镜后产生变化。位移,方向相反,并扩大到角放大率倍。倾斜,方向相反,却减小到角放大率分之一。倾斜还产生附加位移,附加位移等于倾角和望远镜长度的乘积。(2)激光管热传播使望远镜热变形也引起光束的方向漂移。发射镜位移,可引起光束相当可观的倾斜,倾角等于位移和焦距的比值。发射镜倾斜,不会显著影响光束的方向漂移。

三、减小方向漂移的措施

先举一个估算的例子:某激光准直仪配备了倒置望远镜。激光管是内腔式,长度 $d_1=190$ 毫米,用95料玻璃制成,线胀系数 $\alpha_1=4 \times 10^{-6}$,工作时可能产生的温差 Δt_1 为 10°C 左右;由于热变形,激光轴平移 $x_1 \approx d_1 \alpha_1 \times \Delta t_1 \approx 0.01$ 毫米,倾角 $x'_1 \approx \alpha_1 \Delta t_1 \approx 40 \times 10^{-6}$ 。望远镜 $f_1=8.3$ 毫米, $f_2=216$ 毫米,角放大率 $M \approx f_2/f_1 \approx 26\times$,镜筒长度 $d_2 \approx f_1+f_2 \approx 224$ 毫米,用铝合金制成,线胀系数 $\alpha_2=24 \times 10^{-6}$;由于激光管热传播使望远镜可能产生的温差 Δt_2 为 2°C 左右;望远镜热变形,物镜平移 $x_2 \approx d_2 \alpha_2 \Delta t_2 \approx 0.01$ 毫米。上述估算值代入(2)式,得: $x_3 \approx -26 \times 0.01 + 224 \times 40 \times 10^{-6} \approx (-0.26 + 0.001)$ (毫米), $x'_3 \approx -\frac{1}{26} \times 40 \times 10^{-6} + \frac{0.01}{216} \approx -1.5 \times 10^{-6} + 49 \times 10^{-6}$ 。若准直距离 $L_1=10$ 米,则可能产生的漂移角 $\theta_1 \approx \frac{x_3}{L_1} + x'_3$, $\theta_{1\max} \approx | -Mx_1/L_1 | + | d_2 \alpha'_1/L_1 | + | -x'_2/M | + | x_2/f_2 | \approx 77 \times 10^{-6}$ (或 $15''$);若 $L_2=100$ 米,则 $\theta_{2\max} \approx 54 \times$

10^{-6} (或 $11''$)；若 $L_3=1000$ 米，则 $\theta_{3\max} \approx 51 \times 10^{-6}$ (或 $10''$)。

经过上面的分析，我们可以找到主要矛盾，也就是配装倒置望远镜的激光准直仪，方向漂移的主要来源是：望远镜的热变形。因此，可以提出减小方向漂移的措施。

1. 关键在于减少激光管对望远镜的热传播，特别是非均匀热传播。也就是减少传导、对流和辐射的影响，特别是非均匀影响。

2. 热传播的主要形式是传导。因此，激光管和望远镜的配装，需要相互绝热。

3. 为了减少非均匀热传播，必须顾及激光管和望远镜的相应位置。一般来说，直线配装较好。但在特殊情况下，也可采取不同的配装方式，例如测定水平方向的激光准直仪，激光管也可配在上面(折叠背负)；测定垂直方向的激光准直仪，激光管也可配在侧面(折叠侧装)。

4. 引言中所述国内外采取的种种措施，有不少仍然可取。这些措施之所以取得某些成效，一方面是由于减少了激光管本身的漂移，更重要的是间接地减少了激光管对望远镜的热传播。

四、有关验证性实验

在水电部委托杭州大学，并由富春江电厂、丰满电厂协助的“高精度激光照准仪”和“利用激光照准测定大坝水平位移”的试制、试验过程中，我们对上述基本观点进行了某些验证。

使用的主要仪器是：“高精度激光照准仪”的主机、检测靶 I 和 JD-1 型激光电源。主机的特点是：(1) 激光管和望远镜折叠背负配装，并用两层聚四氟乙烯绝热，以减小水平方向的漂移。(2) 由 T_3 经纬仪改装，激光从分划板和调焦镜之间通过反红透绿立方棱镜输入；因而可以激光一目测两用，对激光来说能增大角放大率和加置小孔光阑，对目测

来说不影响视场角和照准精度，并可倒镜。主机的性能是：(1) He-Ne 激光管用 95 料玻璃制成，长 185 毫米，全内腔，波长为 6328\AA ，TEM₀₀ 模输出，发散角 < 2.5 毫弧度，功率 > 1 毫瓦。(2) 激光所经过的倒置望远镜角放大率 $55\times$ ，小孔光阑直径 0.08 毫米。检测靶 I 的特点是：采用遮光罩、透镜组合聚焦、干涉滤光片、现场光补偿和直流供电的运算放大器结构，以适应白天黑夜、雾天雨天以及长距离高精度的测定。检测靶 I 的性能是：(1) 检测孔径 70×70 厘米²。(2) 最小读数 0.1 毫米。主机和检测靶 I 配套的设计指标是：准直距离不短于 1500 米，一次照准中误差不大于 $\pm 0.2''$ 。

为了解经绝热后减少热传播所取得的效果，我们用 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 、刻度 0.1°C 的温度计，对主机开机后各典型部位的温度进行了测定，结果见图 2。

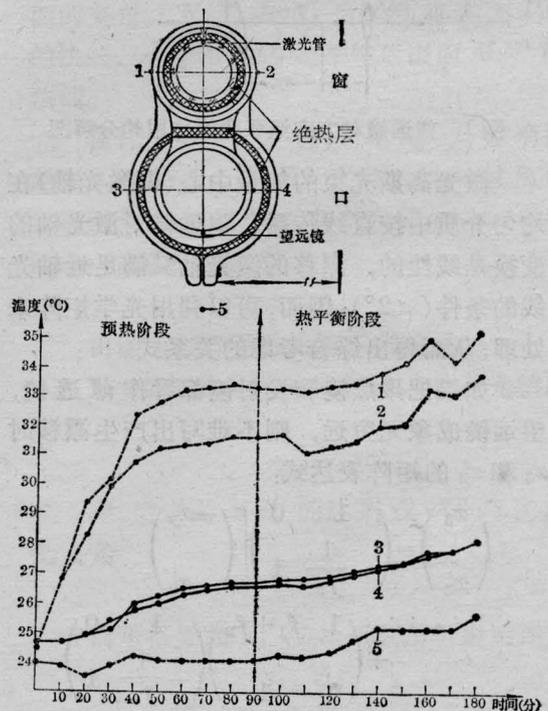


图2 激光准直仪的有关结构示意图和温度变化曲线

1,2 最大温差 2.1°C (一层绝热)
3,4 最大温差 0.3°C (二层绝热)

表 1

| 现 场 | 距离(米) | 光束高度 (米) | 时 间 | 天 气 | 光斑直径 (厘米) | 测定次数 | 一次照准 中误差* |
|----------------|-------|-------------|-------------------|-----|--------------|------|--------------|
| 富春江电厂 右→左 | 660 | 52~53 | 77. 6.9 18~20 | 阴有雨 | 1 | 60 | ±0.09" |
| 丰满电厂 新左→新右 | 1159 | 25~11 | 77. 7.18 21~22 | 晴 | 2 | 60 | ±0.11" |
| 丰满电厂 旧左→旧右 | 1220 | 38~15 | 77. 7.16 17~18 | 阴 | 2 | 60 | ±0.10" |
| 丰满电厂 新左→大丰满 | 2074 | 25~30 | 77. 7.19 19~20 | 晴 | 3 | 20 | ±0.10" |

* 一次照准中误差由 $\sigma_1 = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2 / (n-1)}$ 计算。式中, n 是测定次数, a_i 是测定值, \bar{a} 是平均测定值。

验证时, 尽量减小其它因素对方向漂移的影响。我们有选择地利用现有的水坝水平位移变形观测系统。这种系统具有下列特点: 基点稳定, 光束远离地面、水面和建筑物, 因而大气传输影响较小。

验证前后, 检查了全套仪器的准直距离和照准精度, 结果列于表 1。

验证方法是: 选用另一台激光水准仪, He-Ne 激光管也是用 95 料玻璃制成, 但激光管和望远镜折叠侧装, 不绝热; 与上述主机作水平方向的对比漂移实验。现场是: 富春江电厂水坝, 准直距离 660 米, 下垫面主要是混凝土, 光束高于下垫面 52 米。开机后, 每

隔 10 分钟测定三次, 取平均值作为结果, 故平均值中误差为

$$\sigma_3 = \sigma_1 / \sqrt{3} \approx \pm 0.05''.$$

两台仪器的漂移曲线如图 3 所示。

激光管和望远镜配装位置作了考虑和采取绝热处理的激光准直仪, 漂移显著减小。它在上述较稳定现场, 经过 1.5 小时预热, 可以获得 ±0.1" 以内的稳定精度。

本文的观点是否带有普遍性, 有待在其它类型的激光准直仪, 以及激光通讯、激光射击等系统的研制中, 作出广泛的验证和更深入的讨论。

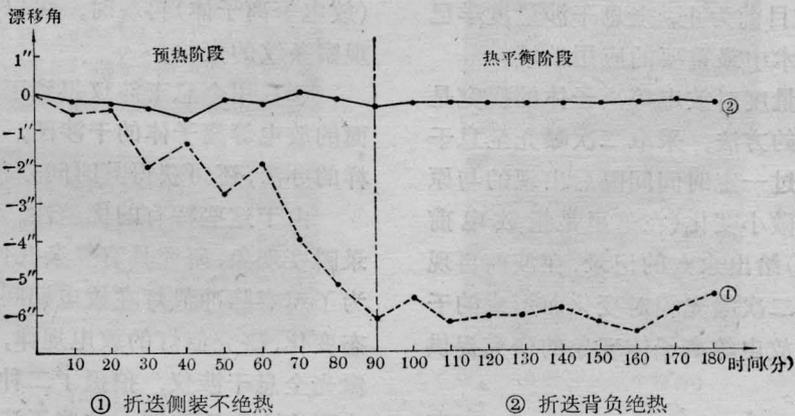


图 3 激光准直仪水平方向漂移曲线

预热阶段: ①最大漂移 6" (或 30×10^{-6}) ②最大漂移 0.7" (或 3.5×10^{-6})
热平衡阶段: ①最大漂移 1" (或 5×10^{-6}) ②最大漂移 0.1" (或 0.5×10^{-6})