

文章编号: 1000-5277(2001)02-0035-05

激光准直系统的设计

翁开华, 刘金清

(福建师范大学实验中心, 福建 福州 350007)

摘要: 介绍长距离激光准直指向系统的设计方法, 阐述半导体激光水准仪的设计.**关键词:** 发散角; 光束变换; 准直指向; 半导体激光器**中图分类号:** O434.19 **文献标识码:** A

激光指向仪广泛应用于各种工程施工测量中, 特别是地下照明条件较差的工程施工测量, 使用激光指向来建立作业基准线. 对指向仪器一个很基本的要求是激光束的发散角要小, 从激光器射出的激光束, 由于其发散角往往都不是很小, 有的甚至很大. 所以在应用时, 要经过光学系统进行准直. 所谓准直, 就是减少高斯光束的发散角, 使其变成平行光束. 由高斯光束远场发散角关系式 $\theta = \frac{\omega_0}{Z_0} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$ 可知, 只有通过变换高斯光束增大它的束腰半径 ω_0 或等效共焦参数 Z_0 , 才能减小高斯光束的发散角.

1 准直系统的设计

以单横模 He—Ne 激光器为光源的指向仪, 由于其发射的光束是轴对称光束, 发散角只有一毫弧度左右, 作为长距离测量指向, 其准直光学系统的设计较为简单. 可以籍助于一个镜组, 例如单透镜, 使入射高斯光束的束腰与光学系统的前焦面重合, 而透镜本身是长焦距的就可以. 这种减小激光束的发散角方法, 由于仪器外形尺寸庞大而不适用.

1.1 双镜组(逆向望远镜)系统

最合理减小激光束发散角的系统是双镜组系统, 对激光束连续两次交换. 系统的第一镜组可以是正的, 也可以是负的. 负的镜组能够得到更紧凑的系统. 第二镜组往往是正的, 这种系统的角放大率按下式确定:

$$\nu = \frac{2\theta_2'}{2\theta_1} = \frac{2\omega_{01}}{2\omega_{02}'} = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}'}} \quad (1)$$

式中 $2\theta_1$ 、 $2\theta_2'$ 分别为入射激光束和变换后的激光束的发散角, $2\omega_{01}$ 、 $2\omega_{02}'$ 分别为入射光束和变换后的光束的束腰直径, Z_{01} 、 Z_{02}' 分别为入射光束和变换后光束的等效共焦参数.

现在讨论双镜组计算的基本关系式. 高斯光束经双镜组变换的示意图如图 1, 束腰直径为 $2\omega_{01}$ 的激光束经第一镜组变换后束腰位置和等效共焦参数为:

$$\chi_1' = -\frac{\chi_1 f_1'^2}{\chi_1^2 + Z_{01}^2} \quad (2)$$

$$Z_{01}' = \frac{Z_{01} f_1'^2}{\chi_1^2 + Z_{01}^2} \quad (3)$$

收稿日期: 2000-11-23

基金项目: 福建省教委基金资助项目 (KD1024)

作者简介: 翁开华 (1945—), 男, 福建仙游人, 高级工程师

为了使经第二镜组变换以后的激光束得到最小的发散性, 必须使入射激光束经第一镜组变换后束腰直径具有最小的尺寸, 并位于第二镜组的前焦面上, 即 $\chi_2 = 0$. 可以应用短焦距镜组来保证上述第一个条件. 换言之, 第一镜组要解决的问题与激光束会聚的问题是相似的. 满足上述第二个条件意味着, 第一镜组的后焦点应位于离第二镜组前焦点距离 χ_1' 处, $\chi_1' = -\frac{\chi_1 f_1'^2}{\chi_1'^2 + Z_{o1}^2}$. 这一距离称为光学间隔, 用 Δ 表示, 即 $\chi_1' = \Delta$.

应该指出, 大多数实际情况中, $Z_{o1} \gg f_1'$, 因此 Δ 值比较小. 因而, 采用双镜组系统减小激光束的发散性时, 应接近于望远系统, 其散焦量 $\chi_1' = \Delta$.

经第一镜组变换后的激光束对于第二镜组来说, 是物空间的光束, 即 $2\omega_{o1}' = 2\omega_{o2}$, $Z_{o1}' = Z_{o2}$, 所以

在 $\chi_2 = 0$ 时, 由 $Z_{o2}' = \frac{Z_{o2} f_2'^2}{\chi_2'^2 + Z_{o2}^2}$ 式得

$$Z_{o2}' = \frac{f_2'^2}{Z_{o2}} = \frac{f_2'^2}{Z_{o1}'} \quad (4)$$

此时第二镜组的像方等效共焦参数 Z_{o2}' 为极大值. 根据 (1) 式, 高斯光束通过双镜组系统的角放大率等于:

$$\nu = \sqrt{\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}'}} = \frac{f_1'}{f_2'} \sqrt{\frac{Z_{o1}^2}{\chi_1'^2 + Z_{o1}^2}} \quad (5)$$

在 $\Delta = 0$ 时, 双镜组系统为望远系统, 它的角放大率为:

$$\nu = \frac{f_1'}{f_2'} \quad (6)$$

由于 (5) 式根号内表达式总是小于 1, 比较 (5) 式与 (6) 式可知, 对于散焦系统, 其角放大率以及激光束的发散性都较望远系统为小. 由于第二镜组物方束腰位于前焦平面上, 其像方束腰必然在后焦平面上, 这种形式结构准直效果最理想.

综上所述, 为了减小激光束的发散性, 双镜组的计算可以按以下步骤进行:

(a) 对于给定的激光器, 已知光束的角发散性为 $2\theta_1$, 束腰直径为 $2\omega_{o1}$, 根据结构或外形尺寸条件, 选定束腰相对第一镜组前焦点的位置为 χ_1 , 第一镜组通光口径 $D_1 = 3\omega_{1z}$, ω_{1z} 为第一镜组主面位置上光束截面半径. 在系统像差校正 (只需校正球差与正弦差) 不产生很大困难的条件下, 确定第一镜组的相对孔径 $\frac{D_1}{f_1'}$ 值, 然后选择第一镜组的焦距 f_1' .

(b) 按照 (2) 式求出光学间隔 $\Delta = \chi_1'$.

(c) 按照 (3) 式求出经第一镜组变换的激光束的等效共焦参数 Z_{o2} ($Z_{o2} = Z_{o1}'$).

(d) 由仪器技术要求所给的系统输出光束所必需的发散角 $2\theta_2'$, 按照 (1) 式确定系统的角放大率 ν .

(e) 按 (5) 式计算出第二镜组 (正镜组) 的焦距: $f_2' = \frac{f_1'}{\nu} \sqrt{\frac{Z_{o1}^2}{\chi_1'^2 + Z_{o1}^2}}$.

第二镜组的通光口径 $D_2 \geq 3\omega_{2z}$, 可由下两式求出:

$$\omega_{2z}' = \sqrt{\frac{\lambda Z_{o2}'}{\pi}}, \quad \omega_{2z} = \omega_{2z}' = \omega_{2z}' \sqrt{1 + \left(\frac{f_2'}{Z_{o2}'}\right)^2}$$

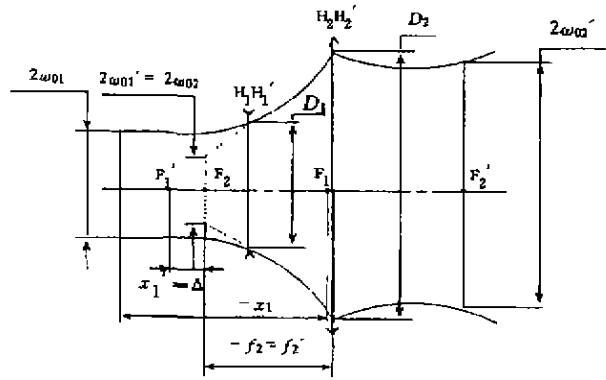


图 1 高斯光束经双镜组变换的示意图

ω_{2z} 为第二镜组主面位置上光束截面半径.

1.2 逆向望远镜失调情况

当双镜组系统装校存在误差时, 即 $\chi_2 = \pm\delta$, 这时 $\omega_{01}' = \omega_{02}$ 束腰不位于第二镜组的前焦面上, 由透镜对高斯光束变换关系式不难得到此时束腰位置和等效共焦参数:

$$\chi_2' = \frac{\delta f_2'^2}{\delta^2 + Z_{02}^2}, \quad (7)$$

$$Z_{02}' = \frac{Z_{02} f_2'^2}{\delta^2 + Z_{02}^2}. \quad (8)$$

χ_2' 为第二镜组后焦点到出射光束束腰的距离

由 (8) 式可见, 随着 $|\delta|$ 值的增大, Z_{02}' 值单调减小. 因而发散角 θ_2' 相应的增大, 此时, ω_{02}' 值也相应地减小, 只有 $\delta=0$, 即满足 (4) 式时, Z_{02}' 与 ω_{02}' 均分别达到最大值 $Z_{02\max}'$ 和 $\omega_{02\max}'$.

为了分析 χ_2' 随 δ 的变化情况, 将 (7) 式对 δ 取导并令其等于零, 得到:

当 $\delta = \pm Z_{02}$ 时, χ_2' 有极值.

(a) 当 $\chi_2 = +\delta = Z_{02}$ 时, χ_2' 有极大值, 束腰 ω_{02}' 位于最远处.

$$\chi_{2\max}' = \frac{f_2'^2}{2Z_{02}}.$$

(b) 当 $\chi_2 = -\delta = -Z_{02}$ 时, χ_2' 有极小值, 束腰 ω_{02}' 是虚束腰.

$$\chi_{2\min}' = -\frac{f_2'^2}{2Z_{02}}.$$

对于 $\delta = \pm Z_{02}$ 的两种情况, 双镜组系统射出的高斯光束的 Z_{02}' 均等于 $Z_{02\max}'$ 一半, 即 $Z_{02}' = \frac{Z_{02\max}'}{2}$.

因此, 相应的束腰半径 ω_{02}' 比 $\omega_{02\max}'$ 缩小 $\sqrt{2}$ 倍, 而发散角 θ_2' 比最小值 $\theta_{2\min}'$ 增大 $\sqrt{2}$ 倍. 上述分析对于望远镜调焦情况也同样适用. 以笔者研制的矿用激光指向仪为例, $f_2' = 297.20$ mm, $Z_{02} = 0.23$ mm, 当装校误差 $\delta = \pm 0.23$ mm 时 $\chi_{2\max}' = 192$ m, $\chi_{2\min}' = -192$ m, 由此可见, 不太大的装校误差 δ , 使得双镜组系统 (逆向望远镜) 射出的高斯光束束腰位置有很大的变化, 从而使准直性能成倍地下降.

对于长距离准直指向, 对双镜组系统的主要要求是射出的准直光束直径小和发散角小, 前者要求将使光电探测靶准直精度高, 后者要求虽有长的射程, 但却使准直光束直径变大. 因此, 这两个要求是互相矛盾的, 应根据仪器最大工作射程来兼顾这两个要求. 在合理选择准直系统倍数之后, 为了在工作射程内有小的光束直径, 需将准直光束束腰调焦到第二镜组前一段距离, 这样光束的发散角是增大一些, 但光束束腰半径变小了^[1].

2 实用半导体激光水准仪的设计

近年来, 迅速发展起来的红色可见波段的半导体激光器具有体积小, 驱动简单, 功耗小, 寿命长等特点, 为激光指向测量带来了巨大的希望. 然而, 半导体激光器从结构上来说, 相当于一个矩形波导式的谐振腔, 光束的发散角很大, 且发射的光波为非球面波, 与此非球面波相垂直的分别位于子午和弧矢平面内的光束不交于一点, 发散角不对称, 所以半导体激光器出射的光束是非轴对称的椭圆光束, 若经球面光学系统之后, 在像空间仍为非对称光束, 变化的只是光束的发散角, 这对于指向测量是不能接受的. 从理论上讲, 只有采用非轴对称的柱面透镜组系统或棱镜对系统来转变成轴对称光束, 显然这作为指向测量的产品, 在加工和成本上都是不适宜推广^[2].

对于单横模输出的半导体激光器发出的椭圆高斯光束, 若用圆高斯光束来处理, 引入误差很小, 可以大大地简化理论计算^[3]. 所以作为长距离准直指向, 在准直系统设计中用圆高斯光束来代替进行光束变换. 对于光束束斑椭圆问题, 在准直头前加上合适圆光栏, 限制圆光栏外的激光束通过, 从而在像

方空间得到近似的轴对称圆光束,以满足指向测量的要求.这种以损失边缘能量的办法只是使光束束斑变小,对束斑亮度影响不大,不降低指向作用距离,是一种光束整圆的简单有效的措施.

在笔者研制的S₃激光水准仪中,半导体激光准直头光学原理图如图2所示.

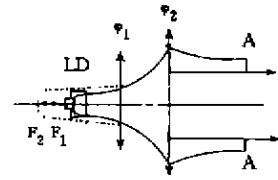


图2 半导体激光准直头

图2选用一个较大相对孔径的镜组 φ_1 ,先将半导体激光器LD发出的光束的发散角进行一定的压缩.假设高斯光束的束腰近似位于激光器的管芯处(不考虑光束本身的固有像数,其为微米级),经镜组 φ_1 变换后,在镜组 φ_2 的物方焦平面之左很近的平面上将得到一个放大的虚束腰,该虚束腰经过镜组 φ_2 的变换,在其像空间近似无穷远处得到一个放大的实束腰.

这时像方空间的光束可看作是近似平行光束组成的椭圆形光柱,然后在镜组 φ_2 后设置一个光阑($\phi 2$ mm) A—A,用以限制边缘部分光束的通过,使得在象空间的光束为轴对称的圆柱形平行光束.

图3为半导体激光水准仪光学系统原理图,聚焦镜组L₄($f'=10.6$ mm)与立方棱镜M构成耦合系统,M的膜系是对 $\lambda=0.555$ μm 光增透,对 $\lambda=0.635$ μm 光增反.C'是分划板C被立方棱镜M所成的镜像,聚焦镜组L₄的位置满足激光束束腰 ω_{01}' 与C'重合.当眼睛通过目视水准测量系统(原S₃水准仪测量系统)看清距望远物镜物方焦点前 χ 处测量标尺B时,从准直头射出的平行高斯光束通过聚焦镜组L₄聚焦后,经过立方棱镜M反射及内调焦望远镜物镜组

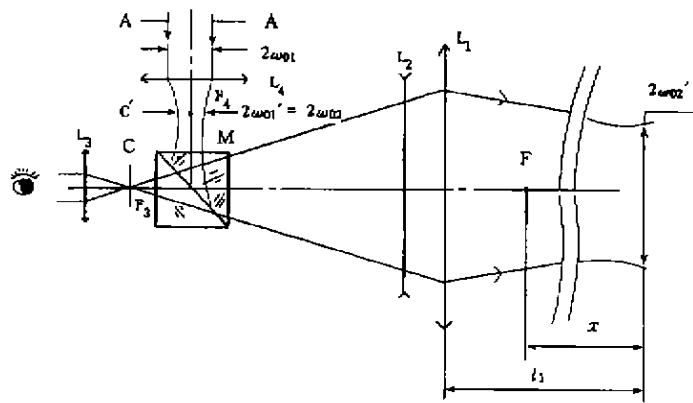


图3 半导体激光水准仪光学系统原理图

变换,也在测量标尺B上得到一个清晰可见的红色光斑,测量标尺B与激光束束腰 $2\omega_{01}'=2\omega_{02}'$ 位置(C'处)是内调焦望远镜物镜组L₁、L₂的一对物象共轭面,所以标尺B上激光光斑直径 $2\omega_{02}'$ 与测量距离 χ 有如下关系:

$$2\omega_{02}' = 2 \frac{\omega_{01}'}{f_{\text{物合}}} \chi$$

式中 $f_{\text{物合}}$ 为内调焦物镜组的组合焦距, ω_{01}' 为准直头射出来的激光束经聚焦透镜组L₄后在其象方焦面上光斑半径,当测量标尺B在不同距离上,内调焦物镜组焦距不同,光斑直径 $2\omega_{02}'$ 也是不一样的.仪器进行高程测量时,只要读取标尺上光斑中心所截标尺的数值,当仪器作为普通S₃水准仪使用时,只需把激光器电源关闭.

表1是不同工作距离时,内调焦望远镜物镜组的组合焦距.

表1 $l_1-f_{\text{物合}}'$ 表

l_1/m	∞	55.73	27.94	18.68	14.04	9.45	7.14	5.76	4.17	2.99	2.36	2.14
$f_{\text{物合}}'/\text{mm}$	298.8	293.69	288.71	283.89	279.22	270.35	262.02	254.18	239.84	221.13	205.12	197.96

l_1 为望远镜物镜L₁主面位置到标尺B的距离

参考文献:

[1]翁开华,邱锦辉,林立涓,等.光电探测式激光管道准直仪的研制[J].应用光学,1994,15(5):55—56.
 [2]林立涓,翁开华.半导体激光水准仪的设计[J].福建师范大学学报(自然科学版),2000,16(1):46—47.

[3]夏秀兰, 龚正烈. 半导体激光器光束的准直[J]. 光电子·激光, 1996, 7(5): 284.

Laser Collimated System Designing

WENG Kai-hua, LIU Jin-qing

(Center of Experiment, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Introduce long-distance laser collimated semiconductor laser leveling instrument design.

Key words: diverging angle; light beam transformation; collimated direction; Semiconductor laser

(责任编辑 黄家瑜)

~~~~~  
(上接第 31 页)

## A Recurrent Formula and Algorithm for the Divided Difference Expanded Coefficients

PAN Ri-jing

(Department of Computer Science, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A recurrent formula for the divided difference expanded coefficients is derived. Based on this recurrent formula, a new algorithm for the calculation of the divided difference expanded coefficients is given. This algorithm is more understandable than the existing algorithm and is more suitable for the calculation of the expanded coefficients of several contiguous divided differences of order  $k$  on a knot vector simultaneously. When being used to calculate the expanded coefficients of all divided differences of order  $k$  on a knot vector, this algorithm is more efficient. In this case, the time complexity of the algorithm is  $O(k^2 \max(k, n+1))$ , where  $k$  is the order of divided difference,  $n+k+1$  is the number of knots in the given knot vector.

**Key words:** divided difference; recurrent formula; algorithm

(责任编辑 林 敏)