

具有负调整镜的激光准直系统的分析

王立新

(福建师范大学激光研究所)

提要: 本文着重分析了调整镜位置偏差对激光准直系统特性的影响,得到了关于调整镜误差容限等的结果,并据此给出了一种实用的设计方法。

Analysis of laser collimating system with a negative adjustment lens

Wang Lixing

(Institute of Lasers, Fujian Normal University)

Abstract: The effects of offseting of negative adjustment lens on the characteristics of the laser collimating system is emphatically analyzed. A practical design method is suggested.

一、引言

激光准直系统是激光技术和激光工程中常用的部件。由目镜和物镜构成的两镜组望远系统的镜筒长,在要求高倍数改善发散角时,可在物镜组和目镜组之间加一负调整镜来缩短筒长。这时调整镜焦距和位置对于系统特性将带来重大影响。然而迄今对于激光准直系统的分析均将光学系统简化为两镜组系统,未能详细讨论这一有实际意义的问题^[1~3]。下面报道我们的分析结果。

二、高斯光束通过准直系统的变换

图1给出具有负调整镜的激光准直系统

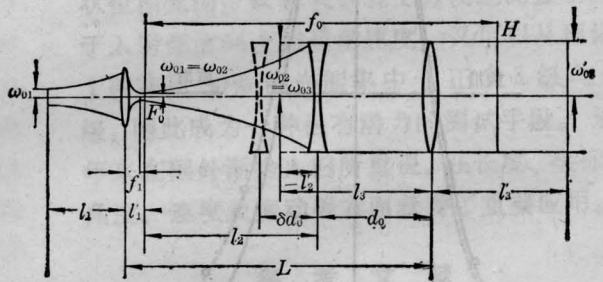


图1 具有负调整镜的激光准直系统

的示意图。依文献^[2,3]的结论,欲使系统达最大扩束比,调整镜与物镜构成的合成物镜的焦点必须与激光束经目镜变换后的束腰重合。推得系统的筒长 L 、目镜、调整镜和物镜的焦距 f_1 、 f_2 和 f_3 ,激光束经目镜变换后的束腰与目镜的距离 l_1 等与调整镜和物镜间的距离 d_0 之间的关系为:

收稿日期: 1984年7月16日。

$$d_0 = \frac{(L - l_1 + f_3)}{2} - \frac{\sqrt{(L - l_1 + f_3)^2 - 4[(L - l_1)(f_2 + f_3) - f_2 f_3]}}{2} \quad (1)$$

设调整镜的偏差为 δd_0 , 为研究它产生的影响, 我们引用透镜模象变换公式^[1,2]对系统进行光路追迹, 求得:

$$l_3 = f_3 - \frac{f_2^2 uv}{u^2 + f_2^2 (Z'_{01})^2} \quad (2)$$

$$Z'_{03} = \frac{Z'_{01} f_2^2 f_3^2 v}{u^2 + f_2^2 Z'_{01}^2} \quad (3)$$

式中,

$$u = AZ'_{01} + \left[f_2^2 - \left(\frac{f_2^4}{A^2} + Z'_{01}{}^2 \right) \right] \delta d_0 + \left(A - 2 \frac{f_2^2}{A} \right) (\delta d_0)^2 \quad (4)$$

$$v = \frac{f_2^4}{A^2} + Z'_{01}{}^2 + 2 \frac{f_2^2}{A} \delta d_0 + (\delta d_0)^2 \quad (5)$$

Z_{0i} 和 Z'_{0i} 分别表示激光束在第 i 块透镜的物方和像方的瑞利距离, 它与光束发射角 θ_i , θ'_i 及光腰半径 ω_{0i} 和 ω'_{0i} 的关系为:

$$Z_{0i} = \frac{\lambda}{\pi \theta_i^2} = \frac{\pi \omega_{0i}^2}{\lambda} \quad (6)$$

$$Z'_{0i} = \frac{\lambda}{\pi \theta_i'^2} = \frac{\pi \omega'_{0i}{}^2}{\lambda} \quad (7)$$

$$A = f_3 + f_2 - d_0$$

图2是根据(2)、(3)两式用计算机计算而作出的 l_3 和 Z'_{03} 随 δd_0 变化的关系曲线。可以看出, Z'_{03} 的极大值和 l_3 变化急剧之处均

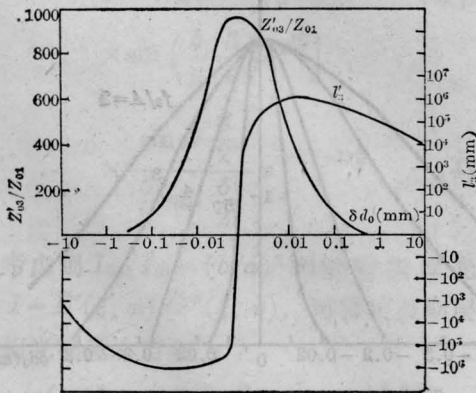


图2 Z'_{03}/Z_{01} 及 l_3 与 δd 的关系曲线

在 $\delta d_0 = 0$ 附近, 为此, 我们仅需对这个区域作进一步分析。

三、分析与讨论

1. 筒长缩短量

当 $\delta d_0 = 0$ 时, 由(3)、(7)式可求得光束发散角改善倍数为

$$r = \frac{f_0}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{f_1 - l_1}{Z_{01}} \right)^2} \quad (8)$$

式中 $f_0 = \frac{f_2 f_3}{A}$ 为调整镜与物镜合成系统的焦距。这时系统的筒长为

$$L = l_1 + d_0 + \frac{f_2(f_3 - d_0)}{A} \quad (9)$$

若采用两片式结构, 要达到同样的倍数 r , 筒长 L' 为

$$L' = l_1 + f_0 = l_1 + \frac{f_2 f_3}{A} \quad (10)$$

所以筒长缩短量为

$$\Delta L = L' - L = d_0 \left(\frac{f_2}{A} - 1 \right) \quad (11)$$

可见, 只要合理选择参数使得 $f_2/A > 1$ 则可以缩短筒长。而且对于一定的 d_0 , f_2/A 值越大, 筒长缩短比例也越大。

2. 调整镜的调整误差容限

在 $\delta d_0 = 0$ 附近将(3)式展为幂级数, 取至 δd_0 的二次项, 并作一些合理的近似得,

$$Z'_{03} = \frac{f_2^2 f_3^2}{A^2 Z'_{01}} + \frac{2f_2^2 f_3^2}{A^3 Z'_{01}} \delta d_0 - \frac{f_2^2 f_3^2}{A^2 Z'_{01}^3} \left[\left(\frac{f_2}{A} \right)^2 - 1 \right]^2 (\delta d_0)^2 \quad (12)$$

由(12)式推得 Z'_{03} 的极大值并不在 $\delta d_0 = 0$ 处, 而是在

$$(\delta d_0)_m = \frac{Z'_{01}{}^2}{A \left[\left(\frac{f_2}{A} \right)^2 - 1 \right]^2} \quad (13)$$

处, 且极大值为

$$(Z'_{03})_m = \frac{f_2^2 f_3^2}{A^2} \left[\frac{1}{Z'_{01}} + \frac{Z'_{01}}{A^2 \left[\left(\frac{f_2}{A} \right)^2 - 1 \right]^2} \right] \quad (14)$$

这与文献[2,3]的结果不一致。这种不一致是

由于调整镜的移动导致合成物镜焦距变化,这与文献[2,3]的推导前提不一致引起的。当然,对于

$$\left[\left(\frac{f_2}{A}\right)^2 - 1\right] > 1 \quad \text{和} \quad A \gg Z'_{01}$$

一般场合下这种偏离是可以忽略的。

令 $x = |\delta d_0 - (\delta d_0)_m|$ 为调整镜对其最佳位置的偏离,由此引起 Z'_{03} 与其极大值的相对偏离为

$$\frac{(Z'_{03})_m - Z'_{03}}{(Z'_{03})_m} = \frac{\left[\left(\frac{f_2}{A}\right)^2 - 1\right]^2 x^2}{Z'_{01}{}^2} \quad (15)$$

不同的使用场合对此偏离有不同的容限。设此容限为 k , 则得相应的调整误差容限为

$$x \leq \sqrt{k} Z'_{01} / \left[\left(\frac{f_2}{A}\right)^2 - 1\right] \quad (16)$$

综上所述,可得如下结论:

(1) 系统处于最大扩束比状态时输出光束的瑞利距离随 Z'_{01} 减小而增大。从获得最佳扩束比出发,应尽量减小 Z'_{01} 值,亦即目镜焦距越短越好。

另一方面,由(16)式可知,对于焦距一定的调整镜和物镜, Z'_{01} 值越小调整误差容限亦越小;因而调整越困难。若不考虑实际的加工和装调水平,追求减小 Z'_{01} 来达到增大 Z'_{03} 的目的是不足取的。

图3是具有同样的调整镜和物镜,但因目镜焦距不一样从而 Z'_{01} 值不一样的几个系统的 Z'_{03}/Z_{01} 与 δd_0 的关系曲线。从图中看出,随着 Z'_{01} 的减小,曲线的极大值增大但整条曲线变得尖锐。当 δd_0 达到一定值时,小 Z'_{01} 对应的曲线反位于大 Z'_{01} 对应的曲线下方。这就直观地说明了上述关于发散角改善倍数及调整误差容限与 Z'_{01} 关系的结论。

(2) 对于 Z'_{01} 一定的系统,调整镜的调整误差容限 x 随 f_2/A 减小而增大,即 f_2/A 值越小,调整越容易。由于合成物镜的焦距为

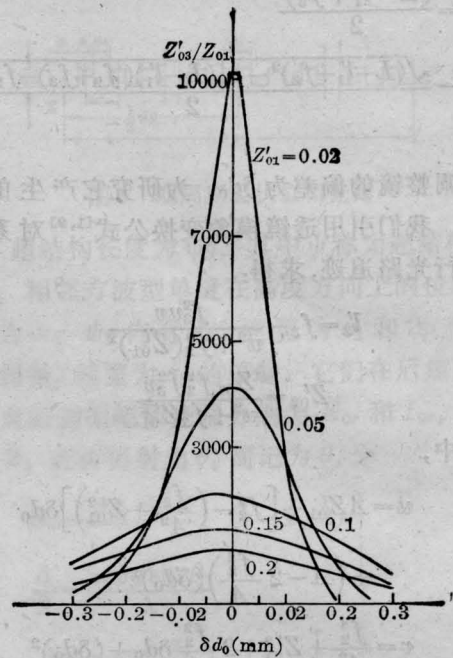


图3 Z'_{01} 不同的 Z'_{03}/Z_{01} 与 δd_0 关系曲线

$$f_0 = \frac{f_2}{A} f_3,$$

这就提示我们在设计时可采用小的 f_2/A 以降低对调整程度的要求,同时增大 f_3 以使 f_0 不变而保证扩束比。图4给出了 f_0 相同,但 f_2/A 值不同的几个系统中 Z'_{03}/Z_{01} 与 δd_0 的变化情况。从图中可见,随着 f_2/A 值的减小, δd_0 允许变化范围变宽,而曲线的极大值则基本上相等。另一方面,由(11)式看出当 f_2/A 值减小时,筒长缩短量也随之减小。可见依

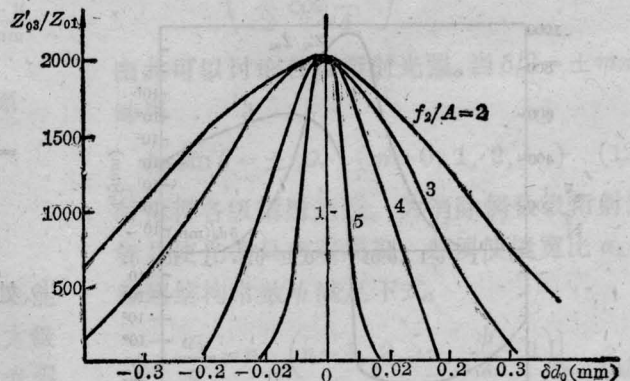


图4 f_0 相同当 f_2/A 不同的系统的 $Z'_{03}/Z_{01} \sim \delta d_0$ 关系

靠减小 f_2/A 值降低调整精度也受到缩短筒长的限制,在设计时应兼顾筒长和调整精度作折衷处理。

3. 出射光束束腰位置随 δd_0 的变化

掌握出射光束束腰离系统的距离随 δd_0 的变化情况是很有意义的。由图 1 可见,在 $l_3 \sim \delta d_0$ 曲线上有两个极值点,分别代表在 δd_0 变化过程中,出射光束束腰在系统的前、后两个最远点。简单的分析可得,这两个最远点发生在

$$(\delta d_0)_1 = \frac{-AZ_{01}'^2/f_2^2 - Z_{01}'}{(1-f_2/A)} \quad (17)$$

$$(\delta d_0)_2 = \frac{-AZ_{01}'^2/f_2^2 + Z_{01}'}{(1-f_2/A)} \quad (18)$$

处,且两个远点所对应的 l_3 分别为:

$$(l_3)_1 = f_3 + \frac{1}{2} \left(\frac{f_2}{A} \right)^2 \frac{f_3^2}{Z_{01}'} \quad (19)$$

$$(l_3)_2 = f_3 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_2}{A} \right)^2 \frac{f_3^2}{Z_{01}'} \quad (20)$$

上式中 $(l_3)_2$ 为负值表示出射束腰在系统的后侧。而且由以上各式可见当 f_2/A 增大或 Z_{01}' 值减小,两极值点所对应的调整镜位置靠拢,且两远点距离增大。

四、设计步骤

从使用角度提出的准直系统的性能指标往往是要求出射激光束的发散角 θ_3' 小于某一值或经远距离传输后光束截面半径 $\omega_3'(Z)$ 小于某一值。这些要求,均可换算成对出射光束瑞利距离的要求。考虑以上讨论所得结论,我们给出下述设计步骤:

(1) 由使用提出的 θ_3' 或 $\omega_3'(Z)$ 求得 Z_{03}' ,再由入射高斯光束的 Z_{01}' 求得

$$r = \sqrt{\frac{Z_{03}'}{Z_{01}'}}$$

(2) 选择合适的 f_1 和 l_1 , 按模象变换公式求 Z_{01}' 和 l_1 。

(3) 从使用需要提出输出高斯光束瑞利距离的最大允许偏差 k ; 从实际加工装调水平确定调整镜装配最大允许误差 x , 并据此由(16)式求得满足这一要求的结构参数 f_2/A 。

(4) 由(8)式求出 f_3 。

(5) 依给定的 L 值,用(9)式求出 d_0 ,最后由 $f_2/A = f_2/(f_3 + f_2 - d_0)$ 求 f_2 值。

例如矿用激光指向仪中使用的 He-Ne 激光器发出的激光的发散角为 6.8×10^{-4} rad, 我们要求光束经系统准直后能以小于 60 mm 的光斑直径传播 500 m^[4], 由此可求得

$$Z_{03}' = 647.89 \text{ 米,}$$

取

$$l_1 = 50 \text{ mm, } f_1 = 10 \text{ mm,}$$

$$L = 200 \text{ mm, } k = 0.3, x = 0.1 \text{ mm,}$$

可求得

$$f_2 = -2.6 \text{ mm,}$$

$$f_3 = 171.9 \text{ mm, } d_0 = 157.44 \text{ mm.}$$

本工作自始至终得到关世荣老师、邱锦辉老师的精心指教,在此谨致衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Н. Когелик; ВСТЖ, 1965, 44, No. 3, 455.
- [2] Е. Ф. Ищенко, М. Кимков; Светотехника, 1968, No. 5.
- [3] 魏光辉, 朱宝亮;《激光》, 1982, 9, No. 2, 589.
- [4] 福建师大物理系激光研究室, 光仪厂;《福建师大学报》, 自然科学版, 1976, No. 2, 56.