

文章编号:1673-1255(2006)02-0005-04

## 高斯光束聚焦光学系统研究

卢毅,何友金,任建存,李楠

(海军航空工程学院,山东烟台 264001)

**摘要:**研究了高斯激光经过失调望远镜系统聚焦的特点.通过改变失调望远镜系统两透镜间距获得不同距离处的小光斑,推导出了它们之间的关系式,为聚焦参数的计算提供了方便的计算依据.分析了工程应用中应考虑失调望远镜系统的装配尺寸的限制和装调误差影响等问题,提出了在确定的聚焦要求下,选择聚焦光学系统参数的方法.

**关键词:**激光聚焦;高斯光束;光束束腰;失调望远镜

**中图分类号:** TN249; TH743

**文献标识码:** A

## Study of the Adjustable Focusing Optic System for Gaussian Beam

LU Yi, HE You-jin, REN Jian-cun, LI Nan

(Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The focusing characteristics of Gaussian beam passing through the maladjusted telescope optic system are studied. Changing the distance between the two lenses of maladjusted telescope system can get small focalae in the places of different distance. The relational formulas are given, which brings convenience to calculate the focusing parameters. The restriction of assemblage dimension, the effect of fitting and adjusting errors which should be considered in engineering application are studied, and then a method to choose the right parameters of focusing optic system by the focusing requirement is put forward.

**Key words:** laser focusing; Gaussian beam; beam waist; maladjusted telescope

激光器在许多实际应用场合中,需要在不同距离处的作用对象上得到细小的光斑,以提高能量密度.因为稳定腔的几何偏转损耗很低,绝大多数中、小功率激光器件都采用稳定腔<sup>[1]</sup>.采用稳定腔的激光器所发出的激光,将以高斯光束的形式在空间传播.因此,对高斯光束的聚焦特性的研究具有重要意义.而高斯光束在束腰位置处的光束尺寸最小,故需要将高斯光束的束腰调节到作用对象所在位置,并且,对于运动的作用目标应能根据其距离变化自动调节聚焦位置.本文考虑设计一套光束控制系统,其功能就是根据目标距离自动调焦,尽量缩小照射到目标上的光斑尺寸,即通过对失调望远镜系统的透镜间距的调节来调节高斯激光束的束腰位置和束腰半径,使束腰位于目标附近,用小光斑照射目标.

## 1 高斯光束通过薄透镜的变换

通常激光器产生的相干辐射光,呈现为发散角很小的细光束,其光束横向尺寸比辐射波长要大.场强分布具有高斯型的轮廓.实际应用中采用高斯近似得到的结果,在工程计算中已足够精确<sup>[2]</sup>.以单横模激光器为光源在单透镜前后,光束性质的变化如图 1 所示.

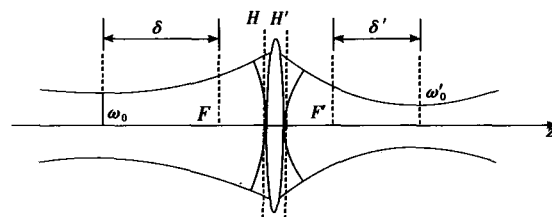


图 1 高斯光束经过单透镜的变换

收稿日期:2005-11-14

作者简介:卢毅(1981-),男,湖南桃江人,硕士研究生,主要从事光电工程技术研究.

定义  $\omega(z)$  为  $z$  点的光斑半径,它是  $z$  的函数,即<sup>[3]</sup>:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $\omega_0$  为  $z=0$  处的光斑尺寸,称为光束的“束腰”,束腰位置光束半径最小;  $\omega'_0$  为经过单透镜变换后的高斯光束的束腰半径;  $\delta$  为入射光束的束腰位置到透镜前焦点的距离,入射光束束腰位置在透镜前焦点前方时  $\delta$  为正,否则为负;  $\delta'$  为出射光束的束腰位置到透镜后焦点的距离,出射光束束腰位置在透镜后焦点后方时  $\delta'$  为正,否则为负。

式(2)为像方束腰位置方程,式(3)为像方束腰半径方程. 变换关系式为:

$$\delta' = \delta f^2 / (\delta^2 + (\pi\omega_0^2/\lambda)^2) \quad (2)$$

$$\omega'_0 = f\omega_0 / \sqrt{\delta^2 + \pi^2\omega_0^6/\lambda^2} \quad (3)$$

式中:  $f$  为透镜焦距;  $\omega'_0$  的符号由  $f$  决定,为负时说明是虚束腰. 对于一个聚焦光学系统,确定了透镜的几何焦距后,只能通过改变  $\delta$  和  $\omega_0$  来调节聚焦后高斯光束的束腰位置和尺寸. 在定向能应用中,通常要求光束在远场聚焦获得较高的功率密度,这就要求  $\delta'$  较大,  $\omega'_0$  较小. 仅考虑  $\delta$  的影响时,由式(2)可知  $\delta'$  存在最大值,即当  $\delta = \hat{\delta} = \pi\omega_0^2/\lambda$  时,  $\delta'_{\max} = \lambda f^2 / (2\pi\omega_0^2)$ . 当  $\delta$  在区间  $(0, \hat{\delta})$  上或在区间  $(\hat{\delta}, \infty)$  上变化时,可以将  $\delta'$  在区间  $(0, \delta'_{\max})$  上调节.  $\delta$  越大,  $\omega'_0$  越小.

## 2 实现束腰位置和尺寸调节的原理

采用图2所示的失调望远镜系统来实现束腰位置和束腰半径的调节.

从激光器出来的高斯光束经负透镜变换后的高斯光束束腰半径减小为  $\omega'_{01}$ ,位于距凸透镜的前焦点  $\delta_2$  处,再经凸透镜(焦距为  $f_1$ )变换后,束腰位于远场距凸透镜(焦距为  $f_2$ )后焦点  $\delta'_2$  处,半径为  $\omega'_{02}$ . 根据式(2)、式(3)有:

$$\delta'_1 = \delta_1 f_1^2 / (\delta_1^2 + (\pi\omega_{01}^2/\lambda)^2) \quad (4)$$

$$\omega'_{01} = f_1 \omega_{01} / \sqrt{\delta_1^2 + \pi^2\omega_{01}^6/\lambda^2} \quad (5)$$

$$\delta'_2 = \delta_2 f_2^2 / (\delta_2^2 + (\pi\omega_{02}^2/\lambda)^2) \quad (6)$$

$$\omega'_{02} = f_2 \omega_{02} / \sqrt{\delta_2^2 + \pi^2\omega_{02}^6/\lambda^2} \quad (7)$$

设  $b$  为两透镜间距,  $R$  称为聚焦距. 由图

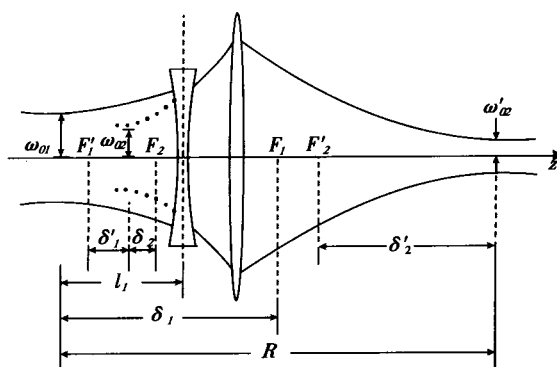


图2 高斯光束经过失调望远镜的变换

2的几何关系显然有:

$$b = f_1 + \delta'_1 + \delta_2 + f_2 \quad (8)$$

$$R = \delta_1 + 2f_1 + \delta'_1 + \delta_2 + 2f_2 + \delta'_2 \quad (9)$$

用一负透镜来控制  $\omega_0$  是因为负的镜组能够得到更紧凑的系统<sup>[4]</sup>. 因为  $f_1 < 0$ , 所以  $\omega'_{01}$  为负,说明这是虚束腰. 且  $\omega'_{01} = -\omega_{02}$ . 若入射激光波长为  $\lambda = 0.808 \mu\text{m}$ , 束腰半径  $\omega_{01} = 0.05 \text{ m}$ . 根据前面单透镜情况下分析的结论可知, 当  $\delta' = \hat{\delta} = \pi\omega_{01}^2/\lambda = 9720.3 \text{ m}$  时,  $\delta'_1$  最大. 而激光器与负透镜距离  $l_1$  不可能太远, 在负透镜焦距  $f_1$  不太大的情况下,  $\delta_1 = l_1 - f_1 = \hat{\delta}$ , 故  $\delta'_1$  很小, 趋于零, 且  $l_1$  在小范围内变化时, 对  $\delta'_1$  影响很小.  $f_1$  较小时能够得到压缩的光束. 因此, 负透镜主要用来压缩从激光器出来的光束的束腰半径.

通过沿光轴移动凸透镜从而改变两透镜的间距  $b$  (也就是改变  $\delta_2$ ), 即可实现束腰位置的调节. 当  $\delta_2 = \hat{\delta} = \pi\omega_{02}^2/\lambda$  时,  $\delta'_2$  达到最大值. 与  $\delta_2$  在  $(0, \hat{\delta})$  之间调节相比, 当  $\delta_2$  在区间  $(\hat{\delta}, \infty)$  上调节时, 不仅能明显增加  $\delta_2$  的调节动态范围, 而且由式(7)可知能得到更小束腰尺寸.

## 3 聚焦光学系统的设计

聚焦光学系统的设计就是要确定透镜组的焦距  $f_1$  和  $f_2$ . 设计应根据具体应用需要而定, 但在设计时必须考虑对镜筒长度 ( $b_{\max}$ )、透镜尺寸  $D$  和装调误差  $\alpha$  的要求. 以下结合特定的数据对聚焦系统的设计进行说明.

对波长为  $\lambda = 0.808 \mu\text{m}$ , 束腰半径为  $\omega_{01} = 0.05 \text{ m}$  的激光作为激光源, 要求在距离  $R_0 =$

100 m 内得到的聚焦光斑尺寸  $\omega_0$  小于  $r = 1\text{mm}$ .

### 3.1 $f_1$ 和 $f_2$ 的基本关系

通过分析得出, 当  $\delta_2$  在  $(\hat{\delta}, \delta_{2\max})$  上调节时,  $R$  越小, 则该处的束腰半径  $\omega'_2(R)$  也越小. 因此只要确保  $R_0$  处束腰半径小于  $r$ , 当束腰位置在  $R_0$  内变化时, 其束腰半径也小于  $r$ .

前面已经分析了  $l_1$  在小范围内变化时, 对  $\delta'_1$  影响很小, 因此不妨取  $l_1 = 0.5\text{m}$ , 则  $\delta_1 = 0.5 - f_1$ . 任取数对  $(f_1, f_2)$ , 其中,  $f_1 \in (-\infty, 0)$ ,  $f_2 \in (0, +\infty)$ , 由式(4)、式(5)可得对应的  $\delta_1$  和  $\omega'_{01}$ , 又  $\omega_{02} = \omega'_{01}$ , 代入式(6)、式(9)经适当变换可得到关于  $\delta_2$  的三次方程:

$$\begin{aligned} & \delta_2^3 + (\delta_1 + \delta'_1 + 2f_1 + 2f_2 - R)\delta_2^2 + \\ & [(\frac{\pi\omega_{02}^2}{\lambda})^2 + f_2^2]\delta_2 + (\delta_1 + \delta'_1 + 2f_1 + 2f_2 - R) \cdot \\ & (\frac{\pi\omega_{02}^2}{\lambda})^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

将  $R = R_0$  代入式(10)可计算得到对应的  $\delta_2(R_0)$ ,  $\delta_2(R_0)$  有 3 个不同解, 根据分析和计算发现, 要得到小的光束尺寸应当选取略大于  $\hat{\delta}$  的值. 再代入式(7)即可得  $R_0$  处的束腰半径  $\omega_0$ . 若  $\omega_0 = r$ , 则所选取的数对  $(f_1, f_2)$  满足要求.

经计算发现, 对任意一个  $f_1$  值都有唯一对应的  $f_2$  值满足要求. 且满足要求的  $f_1$  和  $f_2$  大致呈线性关系,  $f_2/(-f_1) \approx k$ . 如, 当  $\lambda = 0.808\ \mu\text{m}$ ,  $\omega_{01} = 0.05\text{m}$ ,  $R_0 = 100\text{m}$ ,  $r = 1\text{mm}$  时,  $k \approx 10$ . 且  $r$  越大则  $k$  越小,  $R_0$  越小则  $k$  越小,  $\omega_{01}$  越大则  $k$  越小,  $\lambda$  越小则  $k$  越小.

### 3.2 镜筒长度 ( $b_{\max}$ )、透镜尺寸 $D$ 的限制

考虑到实际工程应用, 镜筒的长度  $b_{\max}$  不宜太大. 根据式(9)可知, 镜筒的长度主要由  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $\delta'_1$  和  $\delta_2$  决定. 对确定的透镜组合, 通过调节  $\delta_2$  就可以将激光束腰调节到不同距离处. 这里选择的是将  $\delta_2$  在  $(\hat{\delta}, \infty)$  上进行调节, 束腰位置到光学系统的距离越近, 则要求  $\delta_2$  越大, 当束腰位置在凸透镜像方焦平面时,  $\delta_2$  趋向无穷大. 因此, 受镜筒长度的限制, 聚焦距离不能无限小. 当最小聚焦距离确定时, 由式(10)即可确定  $\delta_2$  的最大值  $\delta_{2\max}$ . 若光源参数和聚焦要求不变, 最小聚焦距离为 50 m 时,  $b_{\max}$  与  $f_1$  的关系如图 3.

从激光器出来的光束经凹透镜聚焦后束腰位置到凸透镜的距离为  $\delta_2 + f_2$ , 当  $\delta_2$  最大时,

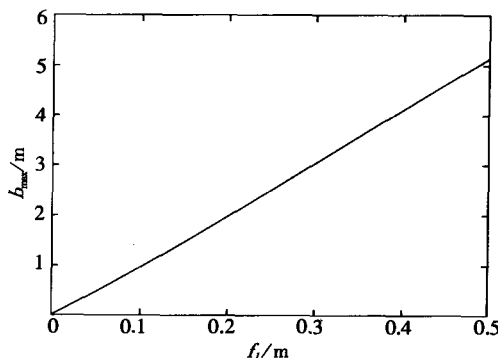


图 3 镜筒长度的限制

凸透镜处光束半径最大, 根据式(1)可知光束在凸透镜位置的光束半径为:

$$\omega_T = \omega_{02} [1 + (\frac{\delta_{2\max} + f_2}{\pi\omega_{02}^2})^2]^{1/2}$$

此时, 要求凸透镜尺寸  $D = 3\omega_T$ , 一般来说, 尺寸超过 1 m 的透镜加工就很困难, 因此  $D$  不能太大. 若光源参数和聚焦要求不变, 最小聚焦距离为 50 m 时,  $D$  与  $f_1$  的关系如图 4 所示.

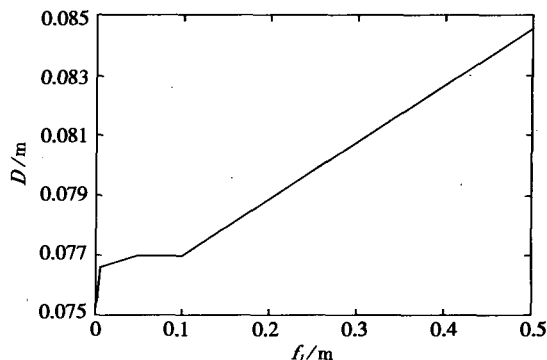


图 4 透镜尺寸的限制

### 3.3 装调误差的影响

对已知  $f_1$  和  $f_2$  的聚焦系统确定  $R$  处的光束尺寸时, 由于存在装调误差, 束腰位置要偏离  $R$  处. 装调误差为  $\alpha$ , 为了确定由装调误差引起的实际束腰位置  $\delta'_2$  和束腰半径  $\omega'_{02}$ , 首先按照式(11)选取对应的  $\delta_2(R)$ , 将  $\delta_2 = \delta_2(R) \pm \alpha$  代入式(6)、式(7), 计算得到由装调误差引起的实际束腰位置  $\delta'_2$  和束腰半径  $\omega'_{02}$ , 因为实际束腰位置不在  $R$  处, 而在  $R' = \delta_1 + 2f_1 + \delta'_1 + \delta_2 + 2f_2 + \delta'_2$  处. 所以  $R$  处的光束半径比束腰半径  $\omega'_{02}$  大, 根据式(1)可知  $R$  处的光束半径为:

$$\omega(R) = \omega'_{02} [1 + (\frac{|R' - R|\lambda}{\pi\omega'_{02}^2})^2]^{1/2} \quad (11)$$

因为  $\delta_2$  有两个不同取值, 所以  $\omega(R)$  也有两个不同取值, 取两者中较大的作为由装调误差引起的实际光束半径. 当  $\alpha = 10^{-5}$  m 时, 不同  $R$  处的光束半径如图 5 所示.

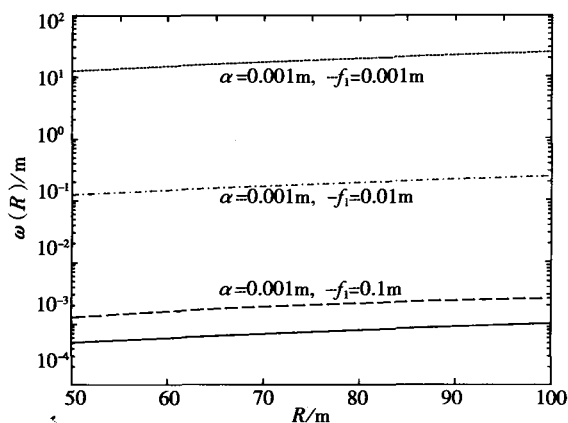


图5 装配误差对聚焦光束半径的影响

经仿真发现, 光源参数和聚焦要求一定的情况下,  $-f_1$  越大则  $\omega(R)$  越接近无装调误差时的  $R$  处的束腰半径  $\omega'_{02}(R)$ .

#### 4 结束语

许多实际应用技术中, 要求在一定距离范围

$R_0$  内得到较小的光斑尺寸  $r_0$ . 可以采用失调望远镜系统来实现. 为了实现这一聚焦要求, 必须选择合适的激光源参数 ( $\omega_{01}, \lambda$ ) 和聚焦光学系统参数 ( $f_1, f_2$ ). 在此聚焦要求下, 对任一确定的激光源,  $f_1, f_2$  呈线性关系,  $f_2/(-f_1) \approx k$ .  $f_1$  越大, 由装配误差引起的光束半径变化越小. 但考虑到镜筒长度和凸透镜尺寸的限制,  $f_1$  不能太大. 因此, 在确定的聚焦要求下, 对于不同的激光源, 通过求得其对应的  $k$  值后, 考虑镜筒长度、透镜尺寸的限制和装调误差的影响, 获得满足要求的透镜组合, 实现聚焦光学系统聚焦所要求得到的光斑.

#### 参 考 文 献

- 1 周炳琨, 高以智. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 24.
- 2 王之江. 光学技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 301.
- 3 范志刚. 光电测试技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 107-111.
- 4 邓元龙, 姚建铨, 阮双琛, 等. 大功率激光光纤透镜耦合系统设计[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 7-10.

(上接第4页)

收剂、纳米 SiC 吸收剂、纳米铁氧体吸收剂、纳米石墨吸收剂、纳米 Si/C/N 和 Si/C/N/O 吸收剂、纳米金属膜/绝缘介质膜吸收剂、纳米导电聚合物吸收剂、纳米氮化物吸收剂等<sup>[2]</sup>.

#### 5 结束语

传统隐身涂层材料在结构上存在许多不足, 主要体现在: 隐身波段单一, 波段较窄, 迄今为止的雷达吸波涂层最多频带宽为 2~18 GHz, 但随着先进的米波、毫米波雷达、红外探测器、激光雷达等的问世, 要求涂层同时具备较宽的雷达波、红外、光学等多波段隐身功能; 此外, 传统隐身涂层质量较大, 涂层较厚, 吸波能力不够, 也成为亟

待解决的主要问题.

纳米磁性粒子与高分子材料或其他材料复合具有良好的微波吸收特性和宽频带红外吸收性能, 使其在隐身材料技术领域的应用日益得到关注. 尤其在涂层厚度、面密度等方面, 纳米复合材料有无可比拟的优势. 因此, 目前世界军事发达国家正在大力研究可覆盖可见光、红外、微波等波段隐身的纳米复合材料.

#### 参 考 文 献

- 1 赵文元, 王亦军. 功能高分子材料化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 361-363, 384-386.
- 2 胡传裕. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 286-288.