

激光束在大气中的传播特性研究

刘 丽, 何志伟, 钟家富

(商丘科技职业学院, 河南 商丘 476000)

摘 要: 激光大气传输特性是研究激光在通过大气传播的过程中, 大气与激光相互作用产生的一系列线性与非线性效应以及这些效应对激光传输的影响。文章基于正的共焦非稳定谐振腔的激光场, 采用快速傅里叶变换 (FFT) 等方法研究激光光束在大气中的传播特性, 分析了强激光器如二氧化碳激光器在大气传输中产生的一些线性光学效应, 并在只考虑大气折射、大气分子吸收等对激光光束的影响下, 求出了激光光束在大气中的偏移、光束的扩展和光束质量等, 进而利用 β 参数和 Strehl 比来评价高能激光器的光束质量特性, 给出了这两个参数随着最高能量变化的图形。

关键词: 激光传输; 大气折射; 大气吸收; 光束质量; 光束偏转

中图分类号: TN248

文献标识码: A

引 言

多年以来, 许多学者对高能激光器的发展很感兴趣。高能激光器的优点是高亮度和高效能, 所以它们有很广泛的应用, 诸如材料加工、远程探测、远程通信等。在通信领域, 激光器的利用得到了飞速发展, 尤其是高能激光器的应用大大提高了这方面的研究, 这些研究对激光在大气中的传输有十分重要的意义^[1]。近年来, 环形和空心光束吸引了越来越多人的注意, 这是由于它们在现代光学和原子光学里有着广泛的应用^[2]。Y. Baykal 和 H. T. Eyyuboglu 等^[3,4]提出了更高阶环形光束在自由空间的传播以及它们指数振幅和相位在湍流大气中的波动变化, 然后, 他们也研究了更高阶环形高斯光束 (HOAG) 在湍流大气中的传播特性^[5]。Yangjian Cai 和 Sailing He^[6]研究了圆形、椭圆形和矩形对称的空心光束 (DHB) 在湍流大气中的传播。M. H. M ahdiéh 和 B. Lotfi^[7]求出了一个从高能 CO₂ 激光器的不稳定谐振腔发出的环状模式的光束通过高压 CO₂ 气体时的传播。本文是利用从 CO₂ 高能激光器的正的共焦非稳定谐振腔发出的 10.6 μm 的激光束来研究激光在大气中的传输特性, 和以前的研究不同, 以前的研究大都用的是设定好的激光光束表达式来进行计算的, 而我们采用的是直接从激光器输出光束的物理量开始往后计算, 是

从激光器本身出发的, 从激光谐振腔开始算起, 一直计算到激光光束远场。本文采用快速傅里叶变换 (FFT), 通过 MATLAB 编程进行数值计算等方法来研究高能激光光束通过大气时的传播路线的偏移特性, 以及求出光束质量特性。这对更进一步理解激光光束通过大气时的传播特性的影响是有帮助的。

1 激光的光束质量特性

在激光谐振腔中沿着给定方向的传播幅度可以表述为 $E(x, y, z) \exp(ikz - i\omega t)$, 对于一个空的谐振腔, 利用直角坐标系, 光波场的传播可以用傍轴波动方程完全地描述出

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial E}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

这里复振幅 E 是沿着 z 轴传播的, 并且是在 x, y 平面横向分布的。我们利用二维快速傅里叶变换 (FFT) 来解决式 (1)。

激光器谐振腔外面的孔径被一个较小的凸镜定义, 在输出镜中的激光场的中心部分被反射到空腔然后被移走, 而剩下的则传播到远场。在谐振腔输出平面的输出光波可表示为

$$E_0(x, y) = E_f(x, y) \cdot W(x, y) \quad (2)$$

$W(x, y)$ 是在 $z=0$ 时的输出孔径的方程, 即

$$W(x, y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{x^2 + y^2} < a_f \\ 1 & \sqrt{x^2 + y^2} \geq a_f \end{cases} \quad (3)$$

E_f 表示激光谐振腔前镜的能量,表述如式(1)。

在许多情况下,基于二阶力矩的 M^2 因子作为评价激光光束质量的标准。但是,对于从不稳定谐振腔发射的环形光束, M^2 因子^[8]是不适用的。在本篇文章里,我们用远场中心偏转、 β 参数和 Strehl比来代替 M^2 因子作为评价光束质量特性的参数,并且研究了环形光束在有相位失真的情况下的变化。远场强度分布 $I_\infty(x, y)$ 的重心表述为

$$x_0 = \frac{\int_S I_\infty(x, y) dx dy}{\int_S I_\infty(x, y) dx dy} \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{\int_S I_\infty(x, y) dx dy}{\int_S I_\infty(x, y) dx dy} \quad (5)$$

S 是远场的整个面积。发光区域的半径 r_0 定义为

$$\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} I(r \cos \varphi, r \sin \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} I(r \cos \varphi, r \sin \varphi) r dr d\varphi} = \frac{e^2 - 1}{e^2} \approx 0.865 \quad (6)$$

由于一些因素导致的相位改变或是光束漂移,远场重心产生偏斜,这个偏斜角定义

$$\theta = \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{f} \quad (7)$$

f 是透镜的焦距。

为了表示远场的光束质量, β 参数和 Strehl比在某些实际的应用中是经常用到的,例如能量的聚焦能力等。通常, β 参数^[9-10]定义为

$$\beta = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{A_0}} \quad (8)$$

A 和 A_0 代表标准的面积,分别对应于远场中真实光束和理想光束总能量的 63%。 β 越小,激光能量聚焦能力越好,光束质量也就越好。

对于共焦不稳定谐振腔来说, Strehl比也是评价环形激光光束特性的标准。远场实际轴上的峰光强与理想轴上的峰光强的比值叫 Strehl比^[11]

$$S_R = \frac{I_{m, \max}}{I_{0, \max}} \quad (9)$$

$I_{m, \max}$ 和 $I_{0, \max}$ 分别是实际和理想光束的最大光强。Strehl比越大意味着峰光强越大,激光光束越好。

2 大气参数

为了研究激光光束在大气中的传输特性,知道折射率指数和吸收系数等大气参数是必要的,这些大气参数

都与大气压力和温度有密切的关系。为了便于计算,在本篇文章里只考虑晴朗的并具有某一风速的天气,其它的任意不稳定介质在大气中的传输是被忽略的。

由修正的 Edlén公式^[12]中,大气折射率是由温度、压力、湿度和光波长决定的

$$(n-1) = \frac{P \cdot (n-1)_s}{96095.43} \times \frac{[1 + 10^{-8}(0.601 - 0.00972T_t)P]}{(1 + 0.0036610T_t)} \quad (10)$$

n 是在温度 T_t (unit °C)和大气压力 P (unit P_a)下的折射率, $(n-1)_s$ 是从下式的修正色散公式中得到的。

$$(n-1)_s \times 10^8 = 8342.54 + 2406147(130 - 1/\lambda^2)^{-1} + 15998(38.9 - 1/\lambda^2)^{-1} \quad (11)$$

λ 是光波波长,单位是 μm 。对于潮湿空气的折射率的差别,包含水汽压和干燥空气的总共的压力,差量要重新写为

$$n_f = n - P_f(3.7345 - 0.00401/\lambda^2) \times 10^{-10} \quad (12)$$

众所周知,大气压力随着地球表面到中间层顶部的高度缓慢变化。当标准气温递减率的值不等于零时,在 86km 以下计算压力的公式^[13]是

$$P = P_j \cdot \left[\frac{T_j}{T_j + L_j \cdot (h - h_j)} \right]^{\frac{M_e}{R^*}} \quad (13)$$

其中, g_0 是重力常数 ($9.80665 m/s^2$), M_e 是地球大气的摩尔质量 ($28.9644 g/mol$), R^* 是通用气体常数 ($8314.32 N \cdot m / (kmol \cdot K)$)。 P 代表静压力 (Pa), h 是海拔高度 (m)。 L_j 表示标准温度递减率 (K/m), P_j 是相对于 L_j , h_j 的初时静压力 (Pa), T_j 是初时标准温度 (K)。

$$T_j = T_{j-1} + L_{j-1}(h_j - h_{j-1}), \quad j = 1, 2 \quad (14)$$

当标准温度递减率等于零时,计算大气压力的公式(13)重写为

$$P = P_j \cdot \exp\left[\frac{-g_0 \cdot M_e \cdot (h - h_j)}{R^* \cdot T_j} \right] \quad (15)$$

同样地,计算静止大气密度的公式得到

$$\rho = \rho_j \left[\frac{T_j}{T_j + L_j \cdot (h - h_j)} \right]^{\frac{M_e}{R^*} + 1}, \quad L_j \neq 0 \quad (16)$$

$$\rho = \rho_j \exp\left[\frac{-g_0 M_e (h - h_j)}{R^* T_j} \right], \quad L_j = 0 \quad (17)$$

相对地,标准大气的吸收系数通过两个不同的方程给出,由于吸收系数正比于大气密度,这两个方程相似于公式(16)和(17)

$$\alpha = \alpha_j \left[\frac{T_j}{T_j + L_j \cdot (h - h_j)} \right]^{\frac{M_e}{R^*} + 1}, \quad L_j \neq 0 \quad (18)$$

$$\alpha = \alpha_j \exp\left[\frac{-g_0 M_e (h - h_j)}{R^* T_j} \right], \quad L_j = 0 \quad (19)$$

在第 j 大气层中当标准温度递减率 L_j 的值是一个常数, 在 86m 以下计算大气压力, 大气密度的公式如文献 [13] 中的公式所表述的一样。

3 激光束在大气中的偏转

如图 1 所示, 当激光光束在大气层中传播时, 光束发生了偏转。当激光光束从起始位置 A, 沿直线在大气中传播时, 光束到达大气层外的 A' , 由于大气折射率的不均匀分布, 同样的光束传播到同样的海拔高度时, 激光光束到达大气层的位置是 A_M , 为了研究的方便, 把距离海平面高度为 H 的大气层分成 M 小份, 每一份的厚度为 $\Delta h = H/M$, 在这很小的厚度内的大气层折射率被认为是个常数。

光束在大气中的传播遵循 Snell 定律, 即

$$n_i R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta_0\right) = n_i \times (R + i\Delta h) \times \sin\theta_i = C \quad (20)$$

R 是平均地球半径, $R = \overline{OA}$ (见图 1)。 β_0 是激光发射时的初始仰角, 是激光光束和地球水平面的夹角。 n_i 代表在大气层第 i 层时的大气折射率 ($i = 1, 2, \dots, M$), $\theta_i = \angle A_{i-1}A_iO$, C 是个常数。

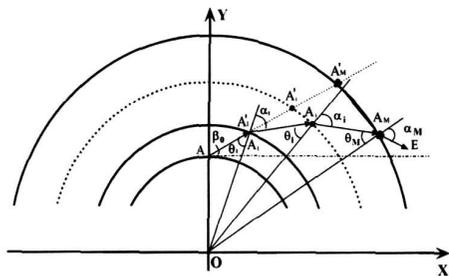


图 1 激光光束在大气层中传播的折射图

从图 1 中很容易得到下面的几何关系:

$$\sin\theta_i = \frac{R + (i-1)\Delta h}{R + i \cdot \Delta h} \sin\alpha_{i-1}, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (21)$$

$$\sin\angle AA_iO = \frac{R}{R + i \cdot \Delta h} \cos\beta_0, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (22)$$

在第 i 层和第 $i+1$ 层大气层分界处, 激光光束的折射有下式决定:

$$n_i (\Delta h) \sin\theta_i = n_{i+1} (i\Delta h) \sin\alpha_i \quad (23)$$

在大气层第 i 层的边界光束偏离路径 AA'_M 的偏斜角为:

$$\varphi_i = \alpha_i - \theta_i \quad (24)$$

在第 M 层的边界光束偏离路径 AA'_M 的总的偏斜角为:

$$\Phi = \sum_{i=1}^M \varphi_i = \sum_{i=1}^M (\alpha_i - \theta_i) \quad (25)$$

在 A_M 和 A'_M 之间的总的偏斜距离为:

$$\Delta S = \overline{A_M A'_M} = 2 \cdot (R + H) \sin\left[\frac{\gamma_M - \gamma'_M}{2}\right] \quad (26)$$

$$\gamma'_M = \left(\frac{\pi}{2} - \beta_0\right) - \arcsin\left[\frac{R}{R + M \cdot \Delta h} \cos\beta_0\right] \quad (27)$$

$$\gamma_M = \sum_{i=2}^M (\alpha_{i-1} - \theta_i) + \gamma_1 \quad (28)$$

4 激光光束在大气层中传播的折射图计算结果和分析

对于没有微扰的标准大气情况, 激光束从地面传播到高空时, 光束偏斜是由于在传播路途中, 折射率不均匀的分布引起的。根据公式 (25) 得出图 2, 此图说明了偏斜角 Φ 随初始仰角 β_0 的变化。初始仰角越小, 偏斜角越大; 同时, 偏斜角在高度为 20, 30, 50, 80 千米时几乎相同, 而这个结果是由于折射率在这些高度比较接近真空的。根据公式 (26), 偏斜距离在不同高度作为初始仰角的函数可以分别得到, 如图 3 所示。我们发现在某一高度的光束偏斜距离与初始仰角有很大的关系, 尤其是在仰角为 15° 时的情况。所以, 大气折射率对光束传播的影响不能忽视, 特别是从地面到高空的激光定位和激光探测方面的应用。

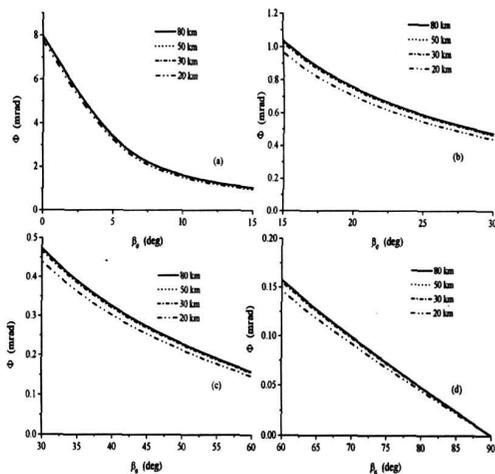


图 2 偏斜角与初始仰角的变化关系图

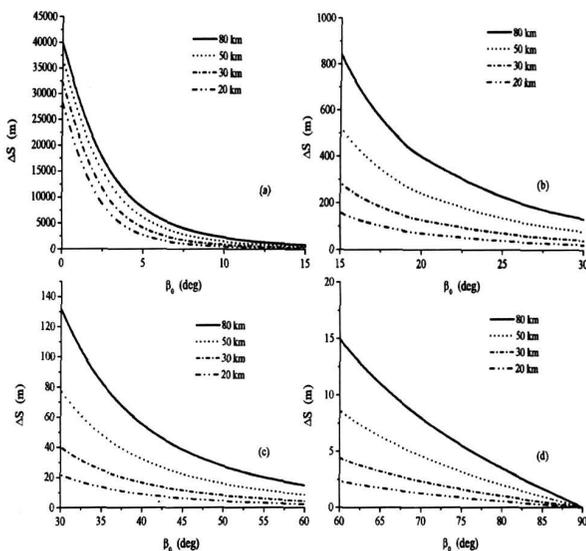


图 3 偏斜距离与初始仰角的变化关系

为了表征环形激光束的光束质量,用 β 参数来表征远场的特性。 β 参数和 M^2 的因子相比,避免了有孔径边缘引起的高衍射困难。按公式(8),环形激光束的 β 参数随理想光束的中心能量的变化如图4所示。此图阐明了激光光束能量越大,大气的热效应越明显, β 参数越大,光束质量越差,而理想光束的 β 参数等于一个单位。

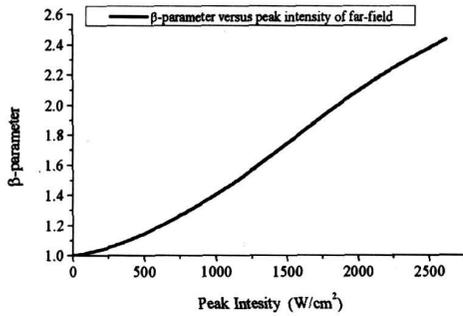


图4 光束质量 β 参数与理想光束峰值之间的关系图

假设远场失常完全是由于大气热效应和 $2m/s$ 的风速引起的。根据公式(9),则得到失常存在下的Strehl比分布。在图5中破折线表明光束的Strehl比随着远场激光中心能量的增加而变小,与理想情况相比,这是由于大气吸收激光能量而引起的失常导致的。Strehl比越小表明光束能量越差,远场聚焦能力越低。此外,根据公式(7),在大气中的远场衍射图的重心偏斜角绘制在图5,如实心线所示,从此图中很容易看出由大气吸收引起的偏斜角的变化随着光束能量的增加而变大。

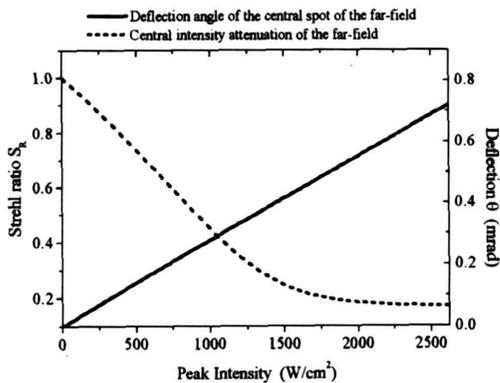


图5 光束质量参数与最高能量的关系

注:实线表示远场重心偏斜角,虚线表示光束Strehl比

5 结论

在研究中,我们已经计算出了激光光束通过自然大气中的偏斜角 Φ 和偏斜距离 ΔS 作为初始仰角 β_0 的函数变化关系。对于不同的几何高度,偏斜距离是不同的,但是对于一定的初始仰角,在20千米以上的偏斜角几乎是不变的。而且我们利用 β 参数和Strehl比来评价

光束质量特性。从本章的计算结果中,我们可以得到随着光束能量的增加,光束质量变差。希望本文得出的结果能为更进一步理解激光谐振腔的结构和大气环境对激光光束的影响的研究有所帮助。

参考文献

- [1] Seery B D, Holcomb T L High power laser diodes for the NASA direct detection laser transceiver experiment in High power laser diodes and applications Proceedings of the Meeting[C]. Los Angeles CA, Jan 14 15 1988(A89-17878 05-36): 70-78
- [2] Yin J Gao W, Zhu Y. Generation of dark hollow beams and their applications[J]. Progress in Optics 2003 45 119-204
- [3] Baykal Y. Log-amplitude and phase fluctuations of higher order annular laser beams in a turbulent medium[J]. Journal of the Optical Society of America 2005 A22 672-679
- [4] Eyyuboğlu H T, Yenicice Y E, Baykal Y. Higher order annular Gaussian laser beam propagation in free space[J]. Optical Engineering 2006 45(3): 038002
- [5] Eyyuboğlu H T, Altay S, Baykal Y. Propagation characteristics of higher order annular Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Communications 2006 264 25-34
- [6] Cai Y, He S. Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere[J]. Optics Express 2006 14(4): 1353-1367
- [7] Mähdiç M H, Lotfi B. Two-dimensional simulation of thermal blooming effects in ring pattern laser beam[J]. Optical Engineering 2005 44(9): 096001
- [8] Lü B, Ji X, Luo S. The beam quality of annular lasers and related problems[J]. Journal of Modern Optics 2001, 48(7): 1171-1178
- [9] Kang X, He Z, Lü B. Far field properties and beam quality of vectorial Hermite-Laguerre-Gaussian beams beyond the paraxial approximation[J]. Opt & Laser Technology 2007 39(5): 1046-1053
- [10] Garay A. Continuous wave deuterium fluoride laser beam diagnostic system[J]. SPE, 1998 888 17-22
- [11] <http://gus.berkeley.edu/~jig/Aberrations/node14.htm> 2007-03-17
- [12] Birch K P. Correction to the Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air[J]. Metrology 1994 31 315-316
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_pressure 2007-04-22

(下转第 749 页)

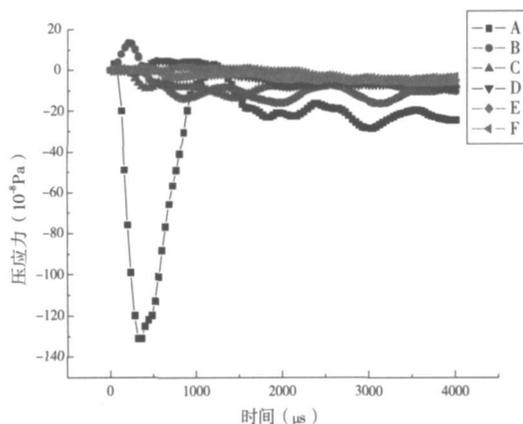


图 11 压应力时程曲线

1) 在爆破过程中,拱底和墙脚处围岩分别出现最大压应力和最大拉应力。随着爆炸波的传播,应力逐渐减小。

2) 对爆破振动响应,拱顶部位出现最大速度和加速度,其应该作为振动测试的主要控制点。

3) 在隧道爆破开挖时,尽量增加爆破自由面。自由面对提高岩石破碎效果,减小岩石损伤是有利的。

总之,在进行隧道岩石爆破时,应尽量采用台阶法

或分部开挖方法,多自由面爆破,同时考虑工程造价、工期以及施工单位自身的施工能力、施工机械、施工技术水平等条件,综合选择施工方案。

参考文献:

- [1] 王庆国. 隧道岩石爆破理论与数值模拟[D]. 西南交通大学, 2008
- [2] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003
- [3] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [4] 宇文慧鑫. 炮孔双介质不耦合装药断裂控制爆破理论与数值模拟[D]. 太原理工大学, 2006
- [5] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [6] 王志亮, 李永池. 工程爆破中径向水不耦合系数效应数值仿真[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1926-1930
- [7] 刘殿中. 工程爆破实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- [8] LSTC. LS-DYNA971 User's Manual[M]. California Livermore Software Technology Corporation, 2006

Three-dimensional Numerical Simulation on Horseshoe Tunnel Cut Blasting

WANG Qing-guo^{1,2}, PANG Xu-qing¹, HE Zhang-yi²

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract By using the ANSYS/LS-DYNA and three-dimensional numerical calculation method, dynamic simulation on process of horseshoe tunnel cut blasting is done and some conclusions that have reference value are drawn. When tunnel rock is blasted, dangerous areas should be monitored and favorable effect of free surface on blasting effect should be used.

Key words numerical calculation; horseshoe tunnel cut blasting; explosive

(上接第 744 页)

Propagation Offset Characteristics of Laser Beams Through the Natural Atmosphere

LIU Li, HE Zhiwei, ZHONG Jiafu

(1. Shanghai Vocational College of Science and Technology, Shanghai 476000, China)

Abstract Based on the laser field from a positive confocal unstable resonator, the propagation characteristics of the beam through atmosphere are investigated by means of fast Fourier transform (FFT), and it is assumed that the refractive index and absorption of atmosphere are only decided by the air molecules. Meanwhile, we evaluate the beam offsets and beam qualities of the laser field transmitting from the resonator through the natural atmosphere. β parameter and Strehl ratio, which are usually used for high-power lasers, are introduced to estimate the beam quality characteristics.

Key words laser propagation; refraction; absorption; beam qualities; beam offsets