

激光能量穿过大气层的传输过程

高凤彬, 赵长明, 关 哲, 张海洋, 杨苏辉, 王 予

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 空间太阳能电站(SSPS)方案之一是采用激光束实现天-地能量传输。研究激光能量传输的可行性,需要对激光束穿过大气层的过程进行分析。理论分析并数据模拟了激光在大气层中传输的过程,分析了大气在不同高度处对激光的作用,计算了不同高度处的激光光强和分布,同时分析了相应的大气温度和折射率的变化规律。研究发现,利用激光实现大气层垂直方向上的能量传输,需要控制激光的功率密度在一定范围,以减小能量的损失,同时避免对大气产生明显影响。在一定传输功率下,可以通过增加光束口径来减小激光的功率密度。

关键词 激光光学; 大气吸收系数; 激光热晕效应; 大气折射率分布; 激光能量传输

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041404

Laser Beam Propagation Process in Atmosphere

Gao Fengbin, Zhao Changming, Guan Zhe, Zhang Haiyang, Yang Suhui, Wang Yu

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract One scheme of the space solar power station (SSPS) is based on the laser beam for energy transfer from space to the earth. In order to demonstrate the feasibility of laser energy transfer, the analysis of the propagation process of laser beam in atmosphere is needed. Modeling and simulating processes are conducted. We analyze the effect of atmosphere towards laser beam at different heights, simulate the intensity profile of laser beam, and discuss the change of atmospheric temperature and refractive index at different heights. The results show that in order to reduce influence of atmosphere and avoid energy loss, the laser power density should remain within a certain range. Increasing the laser beam size can reduce the laser power density at a certain power level.

Key words laser optics; atmospheric absorption coefficient; laser thermal blooming effect; atmospheric refractivity profile; laser energy transfer

OCIS codes 140.6810; 010.1290; 010.1230

1 引言

激光无线能量传输技术源于20世纪70年代,随着技术的不断进步,其传输功率和传输距离在不断增加,应用方向不断扩展。其中一个方向是用于卫星与和地面间的能量传输,这种能量传输的特点是传输距离远,传输功率高。目前可行的能量传输方式有微波传输和激光传输^[1]。相比于微波传输,激光无线能量传输的方向性更好,功率密度更高,相应的接收系统体积更小,效率更高,可以实现远距离、高效率、大功率的能量传输。

这种远距离大功率的激光能量传输主要应用于空间太阳能电站(SSPS)。SSPS概念出现于1968年,其基本构想是在地球同步轨道上建设太阳能电站,将太阳能转换成微波能量或激光能量,再传输至地面,为人类所用。相比于地面太阳能电站,空间太阳能电站接收的太阳光功率更高,并且不受昼夜和天气的限制,

收稿日期: 2016-11-01; **收到修改稿日期:** 2016-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61378020)

作者简介: 高凤彬(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光器和激光光束传输方面的研究。

E-mail: gaojiagongguan@163.com

导师简介: 赵长明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事新型固体激光技术、激光雷达等方面的研究。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

具有极大的优势。SSPS 目前还处于概念设计阶段,而最有前景的方案是采用太阳光抽运激光器,将太阳光直接转化为激光,传输到地面。这种方案可以简化系统结构,提高转化效率。

由于激光具有能量密度高的特性,在传输过程中势必会对大气产生一定的影响,导致其自身能量特性改变,因此需要对激光束穿过大气层的过程进行分析。由于空间太阳能电站的总功率很高,用于能量传输的激光束同样具有很高的功率(达到吉瓦量级),因此需要针对激光的热效应对传输过程进行分析。

高功率激光引起的热效应使大气能量升高、温度上升,也称作热晕效应,其产生原因是大气对激光的吸收^[2];而大气的热扩散、大气压强基本维持不变,导致大气密度下降,从而引起大气折射率降低,影响激光光束,导致其扭曲变形,严重影响光束功率密度^[3]。

分析激光的大气热晕效应,目前已经具有相对完整的理论研究模型,对于激光能量分布变化的理论和实验验证也比较完善。但目前研究主要集中在地面水平传输过程,对于激光照射下的大气变化规律则缺少系统的研究。另外,在不同大气条件下热晕效应的研究也相对较少。为了分析空间太阳能电站的对地传输能量过程,要分析自大气层顶入射的激光,在垂直方向上穿过大气层到达地面的过程中,大气发生的变化及其对激光束的影响。

2 地球大气环境及其对激光束的影响

地球大气层环境复杂,且变化迅速。由于地球自转和对太阳辐射吸收的差异,大气在水平方向分布比较均匀,在垂直方向上呈现出明显的层状分布,在处理局部问题时可以视为几何平面^[2]。为了简化分析过程,需要将具有连续变化的物理参数的大气划分为不同厚度的空气层,每层空气层可以认为具有相同的物理参数,由此计算大气对激光的影响。

在划分大气层时,参考常用的大气垂直分层方法,即以大气的温度变化为依据,将大气在垂直方向上分为对流层、平流层、中层和热层^[1],在此基础上进一步分层讨论激光传输过程。由于 100 km 上的高空大气十分稀薄,所以只需考虑距离地面 0~100 km 高度的大气对激光的影响;近地面的大气分子数和密度最高,变化也最快,由于大气的这种不均匀变化特性,在划分空气层时,要依据距离地面的高度,选择空气层的厚度。近地面的对流层和平流层底层,划分的空气层数量较多,选择厚度为 100 m;而在平流层上层,空气层厚度选择为 1 km、2 km,以减少空气层的数量,简化分析和计算过程;在中间层和热层,由于大气已经十分稀薄,因此将空气层厚度设定为 10 km。根据划分的空气层,计算大气参数,包括大气的温度、压强、密度、折射率等,还有大气对激光的吸收系数,激光穿过大气时的衰减率等。

大气对激光的影响主要来自大气的折射率,大气的折射率则与大气的密度紧密相关^[4],而大气的温度、湿度和气压、组成成分等都会影响大气密度,因此大气的折射率也具有高度分布特征。描述大气折射率分布的模型主要有线性模型、指数模型和伽马模型,模型的计算参数则是在对大气的长期观测基础上总结得到的。一般在描述大气折射率分布时,在距离地面高度 1 km 内采用线性描述,在 10 km 以下采用指数分布,高度大于 10 km 时采用另一种指数分布。

对于线性模型的折射率,目前认为具有较高精度的公式为^[5]

$$N_0(\lambda) = 272.5794 + 1.5832\lambda^{-2} + 0.015\lambda^{-4}, \quad (1)$$

式中 N_0 为地面处的标准大气状况下的折射率模数, λ 为光波长,单位为 μm ,不同波长的初始折射率模数如表 1 所示。

表 1 不同波长的折射率模数

Table 1 Refractive index module of different wavelengths

Wavelength / μm	0.55	0.98	1.06	1.55	2.00
N_0	277.9770	247.2476	273.9922	273.2418	272.9765

当大气高度超过 2 km 时,折射率的描述需要更精确的公式,一般对于对流层大气,其空气折射率可以表示为^[6]

$$n - 1 = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3}\lambda^{-2})(P/T) \times 10^{-6}, \quad (2)$$

式中 P 为大气压强, T 为大气温度。对于更高处的大气,由于其密度分布具有指数衰减规律,其折射率分布

应具有相同规律,因此可以将折射率分布表示为

$$N(h) = N_S \exp\left(-\frac{h}{H_N}\right), \quad (3)$$

式中 N_S 为地面折射率, H_N 称为大气折射率标高。通过对比全球平均折射率分布,可以得到拟合参数 $N_S = 359.9$, $H_N = 6.84$ km, 为了更精确地进行描述,可以利用具有三个参数的伽马模式分布:

$$N(h) = ah^b \exp(-ch), \quad (4)$$

同样根据数据进行拟合,得到参数的结果 $a = 300$, $b = -0.01$, $c = 1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^{[5]}$ 。

另外还有一种计算大气折射率的方法,是通过分析大气的组成成分,根据各成分的分子极化率分别计算其对光束的折射率,再求和得到大气对光束的折射率,即 Gladstone-Dale 关系式:

$$n - 1 = k_{G-D} \rho, \quad (5)$$

式中 k_{G-D} 为 Gladstone-Dale 常数,与大气分子种类有关,常见的大气成分及 Gladstone-Dale 常数见表 2。Gladstone-Dale 常数可以表述大气中不同组成成分对光束的折射率影响。通过调整大气组成成分,可以快速计算出对应的大气折射率,从而使建立的模型适应性更强。可以获得大气对光束的折射率为

表 2 2002 年空气及各组分的 Gladstone-Dale 常数

Table 2 Gladstone-Dale constant of air and its compositions in 2002

Composition	CH ₄	O ₂	H ₂ O	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	Air
$k_{G-D} / (10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg})$	6.15	1.89	3.12	2.26	2.67	1.54	2.38	2.26

$$n_{\text{air}} - 1 = \sum_i \rho_i k_{G-D,i}. \quad (6)$$

3 大气吸收系数计算

大气对光束的影响的表征参数,主要有散射系数、吸收系数、透射系数等,对应的散射率 ρ 、吸收率 α 和透射率 τ 满足 $\rho + \alpha + \tau = 1$ 。其中散射系数和吸收系数之和也称为大气的衰减系数^[6],表示为 $\mu = \alpha + \rho$ 。

大气的吸收与波长强烈相关,大气的成分和物理参数都对吸收系数有影响。大气的吸收光谱实际是单根谱线的集合,单根谱线(也称单色谱线)是大气分子对单一频率光波的吸收效应。但是一般情况下,分立的吸收谱线具有一定的宽度和形状,其中心谱线表示吸收谱线中心的频率,谱线的加宽原因主要有自然展宽、多普勒展宽、压力展宽等。另一方面,激光的频率也具有一定的宽度,在中心频率附近范围内的激光都会对大气产生一定的影响。为了便于分析,选择常见的红外激光器的工作波长作为分析样本,波长分别为 980, 1064, 1550, 2000 nm。

分立谱线的吸收系数计算公式为

$$\alpha(\nu) = S \cdot f(\nu - \nu_0), \quad (7)$$

式中 S 为谱线吸收强度,强度的数值与气体分子的特性有关,谱线强度可以由吸收系数求出, $S = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha(\nu) d\nu$, ν_0 为谱线的吸收中心频率, $f(\nu - \nu_0)$ 是谱线的展宽函数。

吸收谱线的具体形式取决于谱线展宽的类型,在计算气体的吸收系数时,主要考虑三种展宽类型:自然展宽、多普勒展宽、压力展宽,分别表示为:

$$\alpha_N(\nu_0) = \frac{2S}{\pi\delta}, \quad (8)$$

$$\alpha_D = \frac{\nu_0}{c} \left(\frac{2kT}{m} \right) = 4.301 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{T/M}, \quad (9)$$

$$\alpha_L(\nu_0) = \frac{S}{\pi\gamma_L}, \quad (10)$$

式中 δ 为光波的谱线展宽, m 为分子质量, $k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数, M 为相对分子质量, γ_L 为展宽的半峰全宽。

综上,大气的吸收系数可以表示为 $\alpha = \alpha_N + \alpha_D + \alpha_L$ 。

考虑上述三种展宽因素,在大气底层(30 km 以下),压力展宽为主导因素;在大气高层(50 km 以上),多普勒展宽为主要因素;而在大气中层(30~50 km),需要综合考虑各种展宽因素。

针对上述四个波长,以 1976 年美国标准大气模式下大气的温度、成分等为计算参数,同时参考美国 HITRAN 数据库记载的大气成分吸收强度系数,计算大气吸收系数随海拔高度的变化,计算结果如图 1 所示。

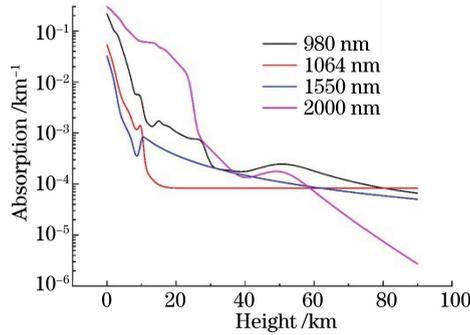


图 1 不同高度处大气对不同波长的吸收系数

Fig. 1 Absorption coefficient of atmosphere for different wavelength at different height

4 激光大气垂直传输过程分析

在分析激光光束穿过大气层的过程时,需要考虑激光的热晕效应对光束质量的影响,以及引起的大气温度和折射率的变化。另外,在分析大气问题时,不可避免地会引入湍流,大气湍流会导致激光束的扩展,影响光场分布^[7]。采用高斯光束作为分析过程中激光的能量分布模型,在分析时忽略激光的发散角和会聚角,使光束分布不受大气之外的其他因素影响。

激光热晕效应的产生是因为传输介质对激光的吸收作用,当激光穿过大气时,大气分子和其他微粒会吸收激光的辐射能量,导致自身能量增加,温度升高。根据气体方程,当局部气体温度升高时会导致气体体积膨胀,膨胀速度约等于介质声速,并维持气体压强基本恒定,因此大气的密度减小,对应的大气折射率也会减小^[8]。对于能量分布为高斯分布的激光光束,其中央区域的光束功率密度更高,位于光束中心的大气具有更高的温度,其折射率比其他地方小。此时空气介质相当于一个负透镜,光束向折射率较大的光束外围偏折,导致了光束扩展发散,光束质量下降,从而产生了热晕效应。图中 I 为激光初始光强, I' 为进过大气介质传输后的光强。

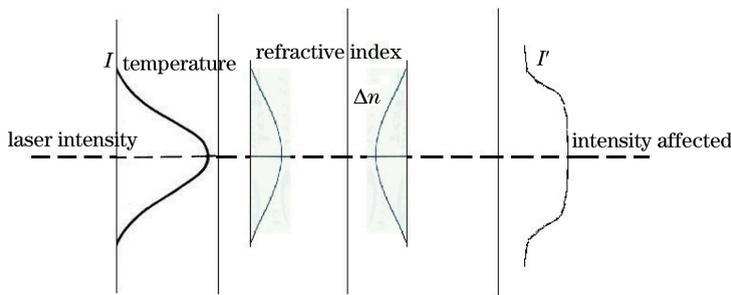


图 2 热晕原理图

Fig. 2 Schematic of thermal blooming effect

激光的热晕效应对光束和大气都会产生影响,大气的能量守恒方程可以描述为

$$\rho_a \frac{du}{dt} = \nabla(K\nabla T) - p\nabla\mathbf{v} + \alpha I, \quad (11)$$

式中 p 为大气压强, ρ_a 为大气密度, \mathbf{v} 为大气速度, u 为单位质量大气内能, α 为大气吸收系数, I 为激光的初

始光强, K 为大气热导率, T 为大气温度。

由热力学第一定律和气体的热容比关系, 可以获得大气在激光照射下的密度变化方程。由于激光热效应所引起的密度变化远小于大气初始状态时的密度数值, 因此可以通过微扰方程来代替流体力学方程, 即令 $\rho_a = \rho_0 + \rho_1$, ρ_0 为初始密度数值, ρ_1 为密度微扰变化项。由于大气满足等压近似, 即 $p_1 \approx 0$, 同时考虑大气风速沿 x 轴线方向, 则方程可以化简, 得到基本方程:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v_x \nabla \rho_1 = -(\gamma_s - 1) \alpha I / C_s^2, \quad (12)$$

式中 C_s 为大气声速。求解大气密度的变化, 需要根据情况进一步对基本方程进行近似。当激光持续时间较长时, 大气的热扩散和热吸收将达到平衡状态, 假定光束在 $x = \infty$ 处, 光强 $I(x, y, z) = 0$, 则可以得到大气密度变化量的表达式为

$$\rho_1 = \frac{1 - \gamma}{v_x C_s^2} \alpha \int_{-\infty}^x I(x', y, z) dx'. \quad (13)$$

由于大气对流风是非定常问题, 流场是弱可压的, 并且在远距离情况下作用效果有限^[9], 因此在分析激光大气传输时考虑无风的平均情况, 即 $v_x = 0$, 则密度变化的近似解为

$$\rho_1 = -\frac{\gamma_s - 1}{C_s^2} \alpha t I, \quad (14)$$

式中 t 为光束半径 α 与 C_s^2 之比。

大气折射率的变化与密度关系可以描述为

$$n^2 = n_0^2 + (n^2 - 1) \frac{\rho_1}{\rho_0}, \quad (15)$$

再由大气的能量守恒方程, 可以计算大气的温度变化和分布:

$$K \nabla^2 T = \alpha I, \quad (16)$$

$$\frac{K}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \alpha I. \quad (17)$$

5 激光大气作用过程模拟及结果

如前所述, 激光的能量分布为高斯分布, 因此可以用公式描述为

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/R^2), \quad (18)$$

式中中心光强 $I_0 = 4eP_a/\pi R^2$, 其中 P_a 为激光器的输出功率。在模拟激光传输时, 将激光的功率与太阳辐射功率 $I_s = 1368 \text{ W/m}^2$ 相对比, 即选取 1 倍、2 倍、5 倍、10 倍太阳常数值作为模拟的激光功率参数, 此时激光的总功率分别为 44, 88, 215, 440 MW。分析激光的光斑分布, 由于激光光束看作平面波, 其光强为 $I_E(x, y, z)$,

$$I(x, y, z) = I(x, y, 0) \exp(-\alpha z) \exp \left[-\int_0^z (\nabla + I^{-1} \nabla I) \cdot \int_0^{z'} \frac{\nabla n}{n_0} dz'' dz' \right], \quad (19)$$

获得高斯光束 $I(r) = I_0 \exp(-r^2/a^2)$ 对于热畸变方程的微扰解

$$I(r, z) = I(r, 0) \exp(-\alpha z) \exp \left\{ \frac{n_T P}{\pi k n a^2} \left[\exp \left(-\frac{r^2}{a^2} \right) \cdot \left(z - \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \right) \right] \right\}, \quad (20)$$

$$n_T = \frac{dn}{dT} = - \left(77.6 + \frac{0.459}{\lambda^2} \right) \frac{P}{T^2} \times 10^{-8}. \quad (21)$$

在分析过程中, 激光模型的参数如表 3 所示。

表 3 模拟激光相关参数表

Table 3 Simulating laser parameters

Wavelength	Average intensity	Central intensity	Spot radius	Laser power	Radiation time
980 nm	6800 W/m ²	4.56 × 10 ⁴ W/m ²	100 m	439.6 MW	1 s

计算各个高度光强分布, 得到光强分布曲线如图 3 所示, 不同高度处光斑图像如图 4 所示。通过计算大气密度的变化, 也会得到大气温度的改变值, 温度改变量随高度变化如图 5 所示。

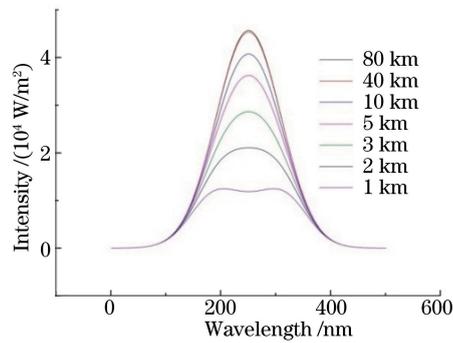


图 3 不同高度处的激光强度分布曲线

Fig. 3 Intensity distribution at different height



图 4 不同高度的光斑分布图。(a)初始光斑;(b)40 km 处光斑;(c)1 km 处光斑

Fig. 4 Laser spots at different height. (a) Initial laser spot; (b) laser spot at 40 km; (c) laser spot at 1 km

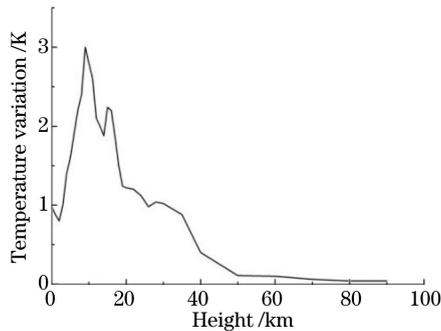


图 5 大气温度的改变量廓线

Fig. 5 Profile of temperature variation

6 结 论

通过分析激光束穿过大气层的过程,发现大气温度和折射率的变化与光功率密度紧密相关,因此用于激光能量传输的光束口径不能过小,否则不仅影响了光束质量,降低了传输效率,还会对大气环境造成明显影响。当光束口径在 1 km 左右时,激光的光强太阳常数值值的 10 倍时,激光的中心光强为 $1.48 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,在光束中心处,温度的变化值最大值可以达到 3 K,当光强进一步增大,即激光总功率增加或者光束直径减小,势必会造成大气温度的进一步升高,这也会在一定程度上限制空间太阳能电站的发电功率。因此在未来的发展中,可以通过分散的多光束实现对地能量传输,或者增大地面接收面积,降低光束中心的激光强度,以减小激光能量传输对环境的影响。

参 考 文 献

- [1] 吴 健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 128-131.
- [2] Yan Wei, Chen Zhihua, Du Taijiao. Numerical simulation of correction thermal blooming based on deformable mirror

- eigen model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101001.
- 闫 伟, 陈志华, 杜太焦. 基于变形镜本征模式法校正大气热晕的数值模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1101001.
- [3] 盛裴轩, 毛杰泰, 李建国. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [4] 邱金桓, 陈洪滨. 大气物理与大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [5] 严豪健, 符 养, 洪振杰. 现代大气折射引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2005.
- [6] Luo Chuanwei, Jiao Mingyin. Simulated calculation for effect of temperature on refractive index in optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 234-239.
- 罗传伟, 焦明印. 光学系统折射率温度效应的模拟计算[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 234-239.
- [7] Zeng Xuewen, Lu Qisheng, Xu Xiaojun. Comparisons of turbulence and thermal blooming effects of high-energy laser with its sampled one propagating in the atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(5): 617-621.
- 曾学文, 陆启生, 徐晓军. 高能激光及其采样后大气传输中湍流及热晕效应的比较[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 617-621.
- [8] Yao Youqun. Simulation study on laser propagation through the atmosphere in optoelectronic countermeasures[D]. Xi'an: Xidian University, 2006: 72-88.
- 姚友群. 强激光在大气中传输的热晕效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006: 72-88.
- [9] Chen Yong, Guo Longde, Zhang Long. Simulation and study about thermal blooming of high power laser affected by the convective wind[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1569-1573.
- 陈 勇, 郭隆德, 张 龙. 对流风作用下的强激光热晕效应数值模拟研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1569-1573.