

·激光技术·

高能激光大气传输通道模拟装置SLAP设计

张岩岫, 王冰, 马娜, 高穹, 雷平, 王娟锋

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 高能激光大气传输的效能与大气因素密切相关, 大气中的气体分子、气溶胶等导致了激光大气传输的衰减效应、湍流效应和热晕效应, 进而使得到达目标处的激光功率密度下降。由于实际大气环境的复杂性, 多种大气因素的耦合制约了高能激光传输机理的研究, 数学物理模型的检验存在着许多不确定性因素。采用大气因素可控的激光大气传输通道模拟器进行实际大气环境的模拟对于高能激光大气传输研究极其重要, 它不仅能够量化探索大气各因素对激光大气传输的影响机理, 验证物理模型仿真结果的准确性并完善模型的可靠性, 还可以为激光传输效果的评估提供基础数据。文中介绍了一种可同时模拟激光大气传输湍流效应、衰减和热晕等效应的实验装置的设计。

关键词: 高能激光; 传输通道模拟; 湍流; 热晕; 衰减

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0027-04

Design of Simulation Device SLAP of High Energy Laser Atmospheric Propagation Channel

ZHANG Yan-xiu, WANG Bing, MA Na, GAO Qiong, LEI Ping, WANG Juan-feng

(China Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: The efficiency of high-energy laser atmospheric propagation is closely related to atmospheric factors. The gas molecules and aerosols in the atmosphere cause the attenuation effect, turbulence effect and thermal blooming effect, and the laser power density at the target is reduced. Due to the complexity of the actual atmospheric environment, the coupling of various atmospheric factors constrains the research of high-energy laser propagation mechanism. There are many uncertain factors in the testing of mathematical physical models. The simulation of the actual atmospheric environment using the laser atmospheric propagation channel simulator controlled by atmospheric factors is extremely important for the study of high-energy laser atmospheric propagation. It can not only quantitatively explore the influence mechanism of atmospheric factors on laser atmospheric propagation, and verify the simulation results of physical models. Accuracy and improved model reliability also provide basic data for the evaluation of laser propagation effects. The design of an experimental device that can simultaneously simulate the laser propagation effects of turbulence, attenuation and thermal blooming is introduced.

Key words: high energy laser; propagation channel simulation; turbulence; thermal blooming; attenuation

高能/高功率激光在大气传输过程中, 制约激光大气传输效能的主要因素中除了衍射造成激光空间上发生展宽之外, 其他所有的线性效应和非线性效应均与大气参数密切相关。其中线性效应中的大气湍流效应会造成激光相位畸变, 影响激光传输

路径的强度分布; 大气衰减会直接导致激光能量的衰减。非线性效应(如逆向韧致辐射、多光子吸收、多光子电离、拉曼效应等)主要受大气分子成分、气溶胶类型、大气温湿压等因素的影响。由于实际大气环境的复杂性, 多种大气因素的耦合对高能/高功

收稿日期: 2018-09-03

作者简介: 张岩岫(1979-), 男, 辽宁岫岩人, 硕士, 主要研究方向为光电技术。

率激光传输机理研究是十分不利的,物理模型的实验检验存在着许多不确定性因素。另外实际大气环境是不可控的,增加了激光大气传输机理研究的复杂性。为了定量化探索大气各因素对激光大气传输的影响机理,验证物理模型仿真结果的准确性并完善模型的可靠性,建立大气因素可控的激光大气模拟通道是十分必要的。

此前已有许多学者提出了多种大气模拟方法和装置,但大多用于模拟激光大气传输中的湍流效应^[1-7],也有学者设计了能够同时模拟激光大气传输湍流和气溶胶衰减效应的实验装置^[8],然而,能够同时模拟激光大气传输湍流效、衰减和热晕等效应的实验装置的设计与研制却鲜有公开报道。

文中介绍了一种用于模拟激光传输的大气环境通道的装置(simulator for laser atmospheric propagation,缩写为SLAP),不仅可以为连续、短脉冲等不同体制激光大气传输机理及规律的实验研究提供模拟条件,弥补数学仿真、靶板仪等方式的不足,还可以为激光传输效果的评估提供基础数据。

1 基本原理

激光在大气中传输时,大气温度的随机起伏引起的折射率的变化对光束产生了扰动,即湍流效应;气体分子对高能激光束能量的吸收使得大气显现出了“负透镜”效果,导致热晕效应的产生;而与此同时,气溶胶散射和分子吸收也对激光的能量进行了衰减。

因此,采用一定直径的管道实现传输通道与外界环境的隔绝,充入对拟研究波长的光波吸收截面较大的气体或者气溶胶粒子,在管道内安装风速产生装置产生垂直于传输方向的切向风,安装加热冷却装置实现热对流产生湍流,从而实现一定范围内的大气衰减、吸收和湍流的模拟。通过对压力、温度、相对湿度、气溶胶物化特性、分子成分、风速等大气参数的单因素及多因素联合控制,在密闭管道内可以模拟不同海拔、气压、天气条件、湍流条件下的大气环境,并结合实验过程中对上述大气参数的高精度准确监测,能够实现激光大气传输湍流效应、衰减效应和热晕效应的模拟,并进一步为激光关键特征参量与大气参数间反馈关系的探索提供

模拟环境。

SLAP的工作原理框图如图1所示。

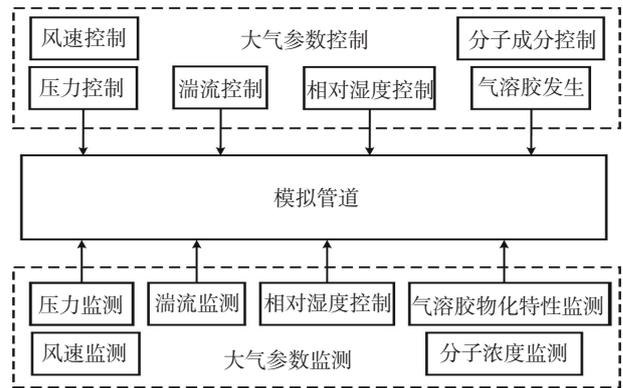


图1 激光大气传输模拟器的工作原理框图

该装置由模拟管道、大气参数控制设备、大气参数测量设备等组成。模拟管道由多节分立的管道组成,每节管道可单独控制温、湿、压、风速、大气湍流状态、大气分子成分浓度及气溶胶物化特性。每节管道两端均有通光窗口玻璃,最后一节管道有侧面观察窗口,以满足在管道外部对管道内激光光束参数的测量要求。模拟管道外侧通过循环管道连接真空泵和气溶胶、配气及致冷系统。通过电线、网线等连接模拟管道内温湿压传感器、湍流发生与控制装置至外部电控系统。

2 装置设计

激光大气传输模拟管道装置如图2所示。其主要技术参数为:

- 长度:15 000 mm
- 直径:1 000 mm
- 粒径尺度:0.2 nm ~ 105 μm
- 湍流强度: $10^{-17} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ 量级
- 切向风速:0 ~ 1 000 mm/s,精度:±3 mm/s
- 气压:50 ~ 760 mmHg,精度:±0.25%

模拟管道每节中心靠上部分安置大气湍流发生与控制系统,管道右侧安置风轮实现风速的控制,左侧靠下安装有温湿度传感器、压力传感器和风速传感器。前3节管道左侧安置有温度脉动仪和高精度光纤湍流强度探头。

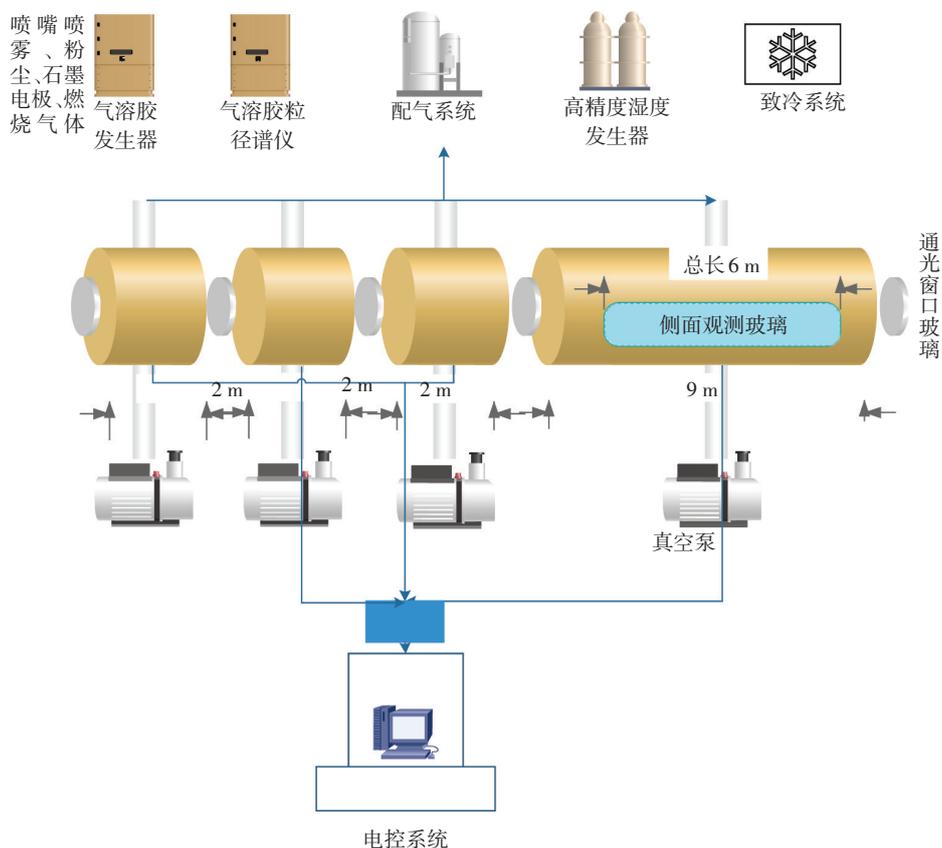


图2 激光大气传输模拟器装置图

大气湍流模拟单元的系统剖面图如图3所示。

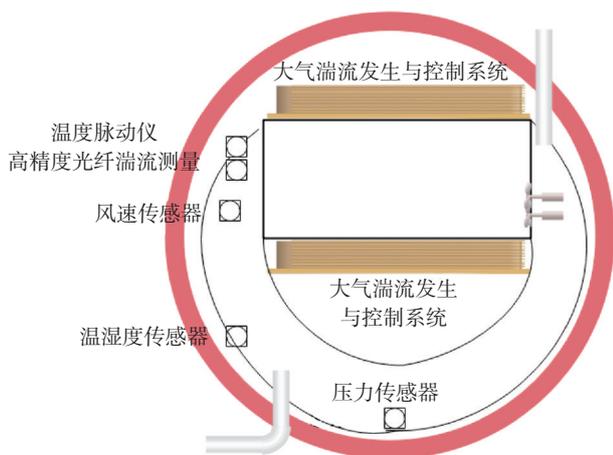


图3 湍流单元系统剖面图

其采用加热板和冷却板产生温差环境,形成类似于地球大气环境的近地面与上空条件。湍流的强度通过温差的调控来达到。结构设计中,在通光窗口的上下分别安装有冷却板和加热板。冷却板

上分布有冷水管使之保持较低温度,加热板则通过电阻丝进行加热,在冷板之间形成不同的温差。

大气分子吸收模拟主要由配气系统来实现。将管道抽至适当真空度,由配气系统将不同种类气体定量混合,输入至管道内实现大气气体成分及浓度的控制。由于不同大气分子对激光传输的影响是不同的,因此需要控制模拟管道内的大气成分及其浓度,对各种成分在传输过程中各种效应的贡献比例进行统计分析。利用此方法对激光大气传输中分子的衰减特性和吸收特性进行研究的相关工作可参阅相关团队的研究工作^[9-10],其采用的相关技术仍可用于本装置中模拟大气分子的吸收。

大气气溶胶散射和吸收特性模拟由气溶胶发生器产生指定类型的气溶胶后运输至模拟管道内。气溶胶粒径谱仪、气溶胶粒子计数器实时管道内的粒径分布和数浓度进行实时监测,气溶胶的吸收则由物化特性决定,由产生气溶胶时使用的溶液成分决定,可根据需要产生陆地型、海洋型等不同类型的氣溶胶。气溶胶模拟单元系统剖面图如

图4所示。其与湍流单元集成在一起,通过进气口1和出气口2将气溶胶送至光传输区域。

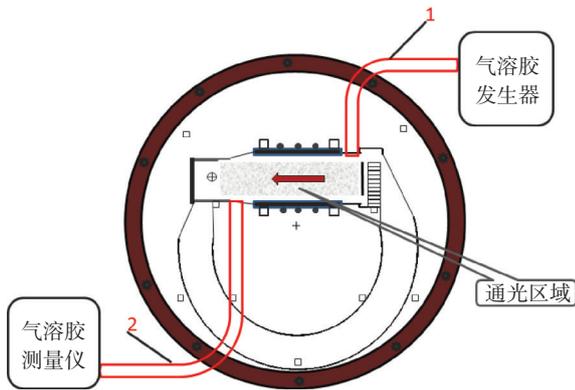


图4 气溶胶单元系统剖面图

3 性能测试

系统组成及功能见表1。

表1 系统组成及功能

序号	组件名称	功能说明
1	模拟管道	
1.1	管道	主体框架
1.2	电控系统	用于通道的控制
1.3	通光窗口玻璃	用于激光传输及测试
1.4	侧面观测玻璃	用于横向激光参数诊断测试
2	大气常规气象参数控制与监测	
2.1	温湿度传感器	通道内温度、湿度监测
2.2	压力传感器	通道内压力监测
2.3	风速传感器	通道内风速监测
2.4	真空泵	用于通道内压力的控制
2.5	制冷系统	用于通道内温度的控制
3	大气成分与气溶胶控制与观测	
3.1	高精度湿度发生器	通道内湿度含量的控制
3.2	喷嘴喷雾式气溶胶发生器及检测系统	用于生成及检测海洋型气溶胶并检测海洋型气溶胶粒径分布
3.3	粉尘气溶胶发生器	用于生成陆地型粉尘类气溶胶
3.4	石墨电极激发炭黑气溶胶发生器	用于生成陆地型炭黑类气溶胶
3.5	燃烧气体炭黑气溶胶发生器	用于生成陆地型炭黑类气溶胶
3.6	气溶胶粒径谱仪	用于对管道内粉尘及炭黑类气溶胶的粒径分布进行监测
3.7	配气系统	用于控制通道内大气成分及浓度
4	大气湍流控制与监测系统	
4.1	大气湍流产生控制系统	用于模拟通道内湍流强度控制
4.2	温度脉动仪	通道内湍流强度的监测
4.3	光纤湍流测量系统	通道内湍流强度的监测。

对于大气湍流模拟的测试,可以采用光波到达角起伏的方差和频谱来检验,由于到达角描述了波前相位的随机平均倾斜,且理论研究结果表明,在局地均匀各向同性 Kolmogorov 湍流和均匀大气风速条件下,到达角起伏谱斜率在高频段满足“-8/3”幂律。通过测量在传输管道中光波的到达角起伏频谱是否满足“-8/3”幂律就可以判定模拟的大气湍流是否符合 Kolmogorov 湍流条件。而通过测量到达角起伏的方差 σ_A 并进而反演得到大气相干长度,则可以反映出管道内湍流的强弱,其强弱的变化范围则是否满足模拟激光在实际大气中传输时的湍流条件。

图5给出了到达角起伏的频谱。

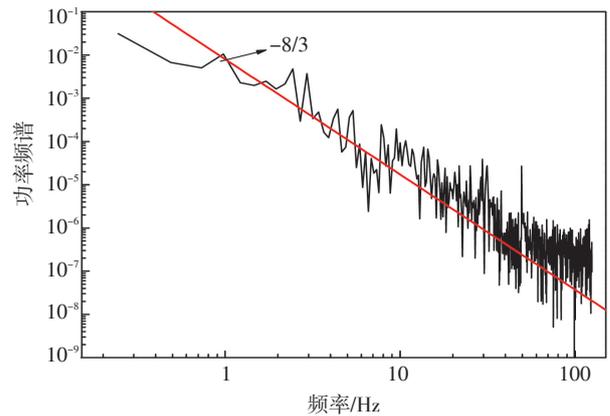


图5 到达角起伏频谱

从图中可以看出,该装置模拟的大气湍流符合真实大气统计条件下的Kolmogorov湍流。

图6给出了管道内大气湍流模拟的情况。

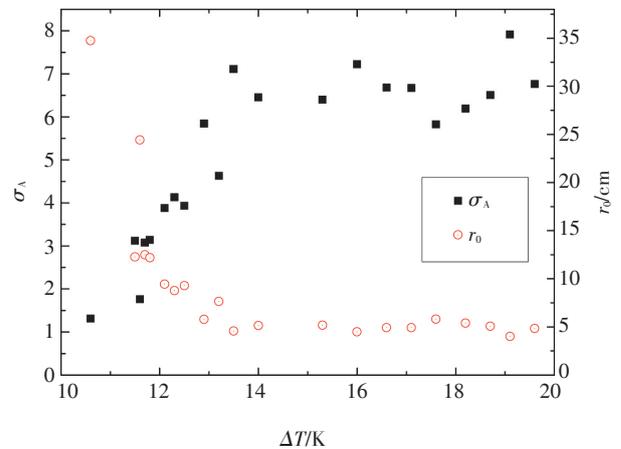


图6 管道内温差与到达角起伏方差和湍流强度的关系

(下转第68页)

- infrared view ability of objects[P]. US6373058. 2002-04-16.
- [2] 孙浩, 吴文健. 石蜡微胶囊及其红外伪装隐身性能研究[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 41-44.
- [3] 杨爱弟, 王智慧, 张存, 等. 热红外降温一相变复合隐身涂层的研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(5): 21-24.
- [4] 刘姜伟, 时家明, 陈宗胜, 等. 红外迷彩伪装对发射率要求的数值分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 442-445.
- [5] 陈翻, 杨立. 基于辐射对比度的涂料隐身性能优化与评估[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1043-1047.
- [6] 王长胜. 典型地物表面温度特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [7] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004, 110-111.
- [8] 王世喜, 朱永豪. 用光谱辐射计测量大气光学厚度的研究[J]. 量子电子学报, 1998, 15(3): 326-331.
- [9] Volle Vr, Cross M. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1981, 24(5): 545-556.
- [10] 邵晓鹏. 红外纹理生成方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [11] 姜会飞, 温德永, 李楠, 等. 利用正弦分段法模拟气温日变化[J]. 气象与减灾研究, 2010, 33(3): 61-65.
- [12] 杨德贵, 黎湘, 庄钊文. 基于统一模型的典型地表红外辐射特性对比研究[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(4): 263-266.

(上接第30页)

图中横坐标是管道内上下的温差, ○表示大气相干长度的变化, ■表示到达角起伏方差。

从图6中可以看出, 随着管道内温差的增加, 到达角起伏方差也随之增加, 湍流强度(以相干长度值 r_0 衡量)逐渐减小, 其变化范围(r_0 值)从 35 cm 下降到 5 cm。

4 结论

阐述了一种可以同时模拟激光大气传输湍流效应、衰减效应和热晕效应装置的设计, 从大气湍流模拟性能的测试结果来看, 该装置可以比较准确的模拟 Kolmogorov 湍流, 湍流强度的范围覆盖 5 ~ 35 cm。

对于大气分子吸收和气溶胶衰减的性能测试尚未开展, 不过, 对于大气分子吸收而言, 由于特定大气分子浓度在指定气压和温度条件下与其吸收系数存在固定的已知关系。因此, 只要准确测量管道内的气压、温度和气体分子浓度, 则该种气体对激光的吸收系数则可以精确确定。对于气溶胶而言, 由于管道内气溶胶发生器产生的气溶胶的物理化学特征参数均为已知, 根据相关理论^[11]可知, 其散射系数和吸收系数均可以通过经典 Mie 散射理论计算得到。文中重点测试了反映大气随机特性的湍流模拟效果, 其他性能测试工作待设备研制完成

后将逐一开展。

参考文献

- [1] 张智露. 室内大气湍流模拟系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [2] 李华, 陈前荣, 王彦斌, 等. 利用液晶空间光调制实现激光大气湍流效应动态仿真[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 709-715.
- [3] 艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3103-3109.
- [4] 遆培培. 大气湍流动态模拟控制平台的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [5] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188-193.
- [6] 王奇涛. 基于空间光调制器的大气湍流模拟与校正技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [7] 段梦云, 单欣, 艾勇. 激光大气湍流模拟装置的研究与进展[J]. 光通信技术, 2014, 38(1): 49-52.
- [8] 李晨, 杨建昌, 李鉴. 大气湍流与气溶胶环境室内模拟方法的研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 973-977.
- [9] 曹百灵, 邬承就, 魏合理, 等. 碘激光的大气衰减特性[J]. 光学学报, 2003(4): 496-500.
- [10] 曹百灵, 邬承就, 饶瑞中, 等. HF/DF 激光传输的大气衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2003(1): 17-20.
- [11] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)[M]. USA: Elsevier Science, 2002.