

文章编号 1004-924X(2017)01-0015-06

## 空间飞行器平台大气密度的在轨测量

王超杰<sup>1,2</sup>, 王博<sup>3</sup>, 郭惠楠<sup>4</sup>, 秦来安<sup>5\*</sup>

(1. 国防科学技术大学, 湖南长沙 410073;

2. 空间物理重点试验室, 北京 100076;

3. 北京八中高2(4)班, 北京 100033;

4. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119;

5. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽合肥 230031)

**摘要:**针对飞行器在轨飞行时空大气密度波动剧烈、气动特性辨识难度大等特点,提出了一种基于瑞利散射理论的成像激光雷达大气密度测量方法。利用气体分子的瑞利散射光强与分子密度成正比的特性,通过分析电子倍增成像探测器(EMCCD)拍摄的测量流场区域内激光后向瑞利散射光柱,得到了不同距离处高精度的在线大气密度数据。搭建了基于空间飞行器平台的大气密度在轨测量装置,并对该装置进行了标定。结果表明,所述方法对大气密度的测量精度不大于5%,且具有非接触、时间分辨率高等特点,因此在优化飞行器结构设计、提高气动辨识等方面具有良好的应用前景。

**关键词:**激光雷达;大气密度;瑞利散射;飞行器

**中图分类号:** TP391.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0015

## Online measurement of atmospheric density based on space vehicle platform

WANG Chao-jie<sup>1,2</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, GUO Hui-nan<sup>4</sup>, QIN Lai-an<sup>5\*</sup>

(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on  
Near-space Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

3. Beijing No. 8 High School, Beijing 100033;

4. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

5. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: qinlai@163.com

**Abstract:** In view of the high-altitude atmospheric density fluctuation and the difficulty to identify aerodynamic characteristics of the aircraft in orbit, a technical solution for atmospheric density measurement by lidar based on Rayleigh scattering principle was proposed. The online data of atmospheric density at different distances was acquired through the analysis of the laser backscattering Rayleigh optical cylinder, which was captured by the Electron-Multiplying Charge Coupled Device (EMCCD) in the measuring flow field based on the principle that the density of gas molecules is in

收稿日期:2016-09-06;修订日期:2016-10-12.

基金项目:中科院“西部之光”基金资助项目(No. XAB2015B21)

direct proportion to Rayleigh scattering intensity. Furthermore the atmospheric density online measuring instrument was developed and calibrated. Experimental and calibration results show that the online measurement precision of atmospheric density is controlled within 5%. The instrument has a promising application in optimization of spacecraft appearance and improvement of aerodynamic identification.

**Key words:** lidar; atmospheric density; Rayleigh scattering; spacecraft

## 1 引言

为保证空间飞行器的正常飞行,飞行器的气动特性研究至关重要。根据相似律理论,飞行器的气动力特性由无量纲的气动力特性参数(升力系数、阻力系数、俯仰力矩系数等)来表征,定义为气动力与飞行动压和参考面积乘积之比(或者气动力矩与飞行动压或参考面积和参考长度的乘积之比)。根据飞行试验数据辨识气动力特性参数,不仅需要根据过载、角速度等信息来获取作用在飞行器上的气动力或气动力矩,还需要知道飞行动压的确切值。飞行动压定义为大气密度与飞行速度的平方相乘除以二。因此,准确获取当地的大气密度对于气动辨识具有重要的意义,尤其高空大气密度波动剧烈,增加了对高空气动辨识的难度。

目前,国内外对静态大气密度测量进行了大量的研究,主要测量仪器有大气密度探测器、非相干散射雷达、质谱仪等<sup>[1-5]</sup>。大气密度探测器通过直接探测传感器内的气体压力和温度,并结合由气体分子动力学理论所建立的基本关系式来获得自由大气密度。在地面上采用活性气体校准系统对探测器分别用标准气样 O<sub>2</sub>、He 等进行标定和定期复校。但此方法不能应用于高空、高速环境中。而非相干散射雷达、质谱仪等遥感测量方法受其自身测量体制的限制,多用于地基测量静态环境或低速动态环境中,难以在高超声速飞行环境下得到高时空分辨率、高精度的大气密度数据。

针对空间飞行器在轨大气密度测量的实际需求以及传统测量方法的局限性,本文提出了基于瑞利散射理论的成像激光雷达大气密度在轨测量方法。利用气体分子的瑞利散射光强与分子密度成正比的特性<sup>[6-9]</sup>,对电子倍增成像探测器(EMCCD)拍摄的测量流场区域内激光后向瑞利散射光柱进行分析,得到了不同距离处高精度的在线大气密度数据。

## 2 大气密度测量的基本原理

瑞利散射成像是基于流场本身分子光学的测量方法,该方法不仅适合于气体分子流场的测量,在等离子体流场的测量方面也具有独特的优势,因此特别适合高速条件下,如超高声速、高温、高焓值的等离子体流场测量,而且对测量波长和物质不存在依赖问题<sup>[9-12]</sup>。

飞行器的飞行区域内,尤其是在临近空间飞行时,大气中气溶胶的含量极微,可以把该测量区域内的大气视作无气溶胶的洁净大气。成像激光雷达接收的大气回波主要是大气分子产生的散射信号,气体流场中分子散射可由瑞利散射理论来描述。若光波作用在分子的有效光场为  $E$ ,对于  $N$  个随机分布、各向同性且直径比工作光波长小很多的气体分子,它在  $H$  方向的辐射强度  $I$  可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$I = \frac{8\pi N e^4 E^2}{M^2 k_0^4 \lambda^4} (1 + \cos^2 H), \quad (1)$$

其中: $e$  为电量; $M$  为粒子质量; $k_0$  为偶极子的固有频率。

由式(1)可以看出,瑞利散射光强与气体的分子数密度成正比。因此,由接收散射信号的强度可以反演出大气密度的空间分布。

## 3 基于瑞利散射理论的成像激光雷达大气密度测量方法

### 3.1 基于瑞利散射的成像激光雷达测量方法

瑞利散射成像激光雷达原理如图 1 所示。激光雷达方程可表示为:

$$E_r = \frac{K E_l A T_{atmz} T_{atmk} \beta(\theta, \Phi, z) dz}{R^2}, \quad (2)$$

其中: $E_r$  为高度  $z$  处、视场角  $d\theta$  内单位像素接收到的能量; $R$  为 CCD 到  $dz$  的距离; $E_l$  为曝光时

间内发射激光的总能量;  $A$  为有效接收孔径面积;  $T_{\text{atm}z}$  为激光器到高度  $z$  的大气透过率;  $T_{\text{atm}R}$  为高度  $z$  到 EMCCD 相机间的大气透过率;  $\beta(\theta, \Phi, z)$  为散射系数, 与散射角  $\theta$ 、偏振角  $\Phi$  和高度  $z$  有关;  $dz$  为光斑图像单位长度对应的距离分辨率;  $K$  为激光雷达定标常数。根据中分辨率大气辐射传输软件 Modtran 的模拟计算结果, 532 nm 波长的激光在 30~80 km 的大气透过率变化小于 0.5%。由于测量距离较短, 大气透过率在该雷达系统中可视为常数。根据几何关系可得:

$$dz = \frac{R^2 d\theta}{D} \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)可得:

$$E_r = \frac{KE_l AT_{\text{atm}z} T_{\text{atm}R} \beta(\theta, \Phi, z) d\theta}{D} \quad (4)$$

忽略高空气溶胶的影响, 成像激光雷达接收的光子回波基本上全是分子瑞利散射信号, 而且在测量区域内的大气衰减极小。由于大气分子的散射可以认为是独立散射, 单位体积大气分子的光散射系数为单个大气分子的光散射截面与大气分子数密度  $n$  的乘积。因此, 式(4)可表示为:

$$E_r = \frac{KE_l AT_{\text{atm}z} T_{\text{atm}R} n(z) \sigma_{\text{Ray}} d\theta}{D} \quad (5)$$

其中:  $\sigma_{\text{Ray}}$  为 532 nm 波长的瑞利后向散射截面。

根据大气密度与大气分子数密度  $n$  的关系, 不同高度的大气密度为:

$$\rho(z) = \frac{n(z)k}{R} = \frac{E_r Dk}{KE_l AT_{\text{atm}z} T_{\text{atm}R} \sigma_{\text{Ray}} R d\theta} \quad (6)$$

其中:  $k$  为波尔兹曼常数,  $R$  为气体常数。

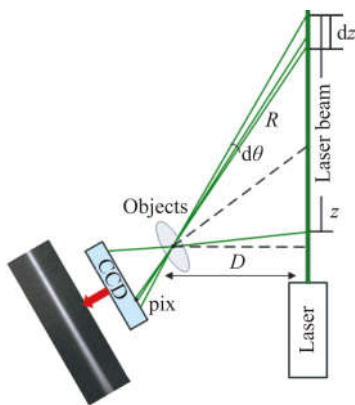


图 1 瑞利散射成像激光雷达原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Rayleigh scattering imaging lidar

激光回波图像由信号光柱和背景组成, 光柱不同位置的点对应不同高度的大气密度分布。对采集到的激光回波图像进行图像处理、平均和去噪, 并根据式(6)计算得到不同高处的大气密度。

### 3.2 基于空间飞行器平台的大气密度在轨测量装置

根据瑞利散射理论及成像激光雷达的应用特点, 设计了一种采用主动式激光雷达遥感技术的大气密度在轨测量装置。该系统的结构示意图如图 2 所示, 激光器输出 532 nm 波长的激光束, 垂直射向大气中。激光束受到大气分子的作用产生瑞利散射。瑞利散射的一部分散射光被探测器收集, 收集的回波信号反映了大气分子密度, 密度愈大, 回波信号愈强。

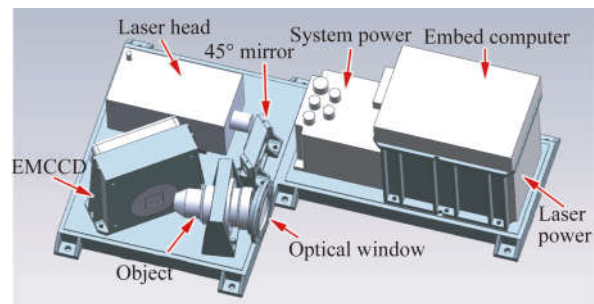


图 2 大气密度在轨测量系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of orbiting measurement system of air density

测量系统可分为激光发射、光学接收和数据采集及控制 3 部分。激光发射部分包括固体激光器、光束准直部件及导光镜。为了监视激光发射能量, 在激光器前安装分光镜, 用于能量监测仪器检测; 光学接收部分主要采用 EMCCD 相机和接收镜头。为了消除等离子体的等杂散光干扰, 在镜头与 EMCCD 之间安装了窄带滤光片; 数据采集及控制部分采用嵌入式芯片处理, 通过软件实现控制和数据的采集、处理、存储及传送。成像激光雷达的主要技术指标如表 1 所示。其中, 测量距离为空间飞行器平台测量要求达到的技术指标。激光功率、接收口径等参数是根据平台飞行高度区域的大气特性, 利用瑞利散射模型仿真计算得到的系统参数。

表 1 瑞利散射成像激光雷达的主要技术指标

Tab. 1 Main technological indexes of Rayleigh scattering imaging lidar

主要参数	技术指标
激光波长/nm	532
激光功率/W	2
接收口径/mm	30
系统焦距/mm	50
收发夹角/(°)	9
滤光片带宽/nm	0.3
测量距离/mm	20~3 000

### 3.3 测量装置的环境适应性设计

为了使空间飞行器在轨飞行时能够实时测量大气密度,空间环境适应性是必须要考虑的设计问题。空间适应性主要分为温控以及冲击振动两个方面的问题。其中,设备的抗冲击震动性能靠机械设计来保证,并辅以相关试验对设计进行验证。在设计及安装工艺合理的情况下,这方面对测量的影响很小。而由于设备只能采取被动温控技术进行温度控制,设备内部温度会有一些的波动。根据窄带干涉滤光片及激光器等光学器件的温度特性,这种波动会对测量造成一定的影响。

根据实际工程经验,测量装置的外部环境为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测量装置的核心器件激光头和 EMCCD 对温度变化有特定要求。当激光头温度超出工作温度时,激光头工作不稳定,激光能量产生较大波动,温度过高时甚至会烧坏激光头。EMCCD 器件产生的热量若不能及时散发,将导致 EMCCD 温度急剧上升且波动较大,造成 EMCCD 的热噪声和暗电流增大,使系统信噪比降低,从而影响到 EMCCD 的成像质量,所以必须采取热控措施。为了保证测量精度,装置的最佳环境温度为 $10\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,这里对上述器件进行了被动热控绝热处理。

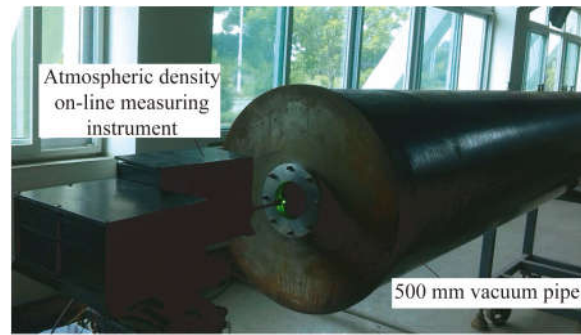
综合考虑各项因素,选用相变温度为 $28\sim 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的正十八烷相变材料。该材料属于石蜡类材料,相变过程为固-液相变,乙酸十八(烷)醇酯含量大于 99%,具有相变潜热较高、性能稳定、无毒、无腐蚀性及价格低廉等特点。

## 4 大气密度在线测量仪的标定

### 4.1 实验室标定环境

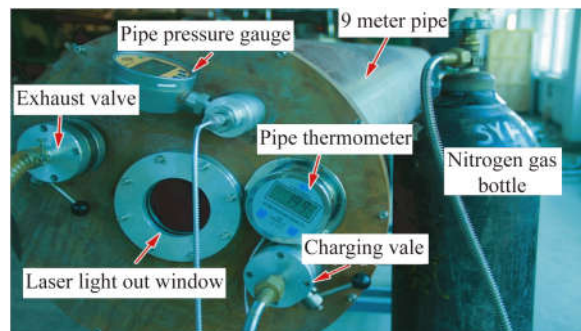
为了满足工程需求,大气密度测量装置在在

轨测量前必须进行实验室标定,即通过地面模拟飞行状态进行静态标定。为避免大气中气溶胶的影响,定量标定装置在纯净大气中的测量精度,测试在实验室真空管道中进行<sup>[12]</sup>,标定所使用的真空管道如图 3(a)所示。真空管道长 9 m,直径为 0.5 m。管道内抽真空后充入氮气,管道内部的氮气压力通过充气阀和抽气阀进行控制,从而实现管道内部氮气密度的连续可调。管道内部的压力数值及温度可以实时测量,测量装置如图 3(b)所示。压力测量误差为 $\pm 0.5\%$ ,温度测试误差为 $\pm 1\%$ 。激光入射窗口片的直径为 100 mm,双面镀 532 nm 的增透膜,激光透过率在 99.9%以上。



(a)真空管道前端面视图

(a)Front end view of vacuum pipe



(b)真空管道后端面传感器分布图

(b)Sensor distribution on end face of vacuum pipe

图 3 标定真空管道

Fig. 3 Calibration vacuum pipe

通过充气阀改变管道内的氮气密度,大气密度测量装置测得一组标定数据,以分析计算此时管道内的氮气密度。同时,利用温度计和压力表的读数,根据大气状态方程计算出此时管内气体密度的理论值,并和测量值进行对比。不断改变管内的压力,即可测量得到一系列压力下测量值与理论值的对比。

### 4.2 标定结果分析

标定时,大气密度测量装置发射的激光由真空管道的前端入射窗口打入,后向散射光经由前端窗口后由光学接收系统接收并成像,所采集到的图像如图 4 所示。

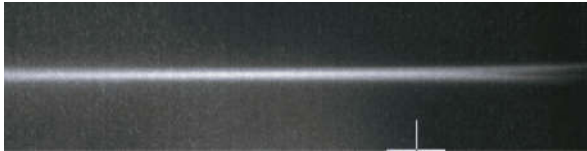
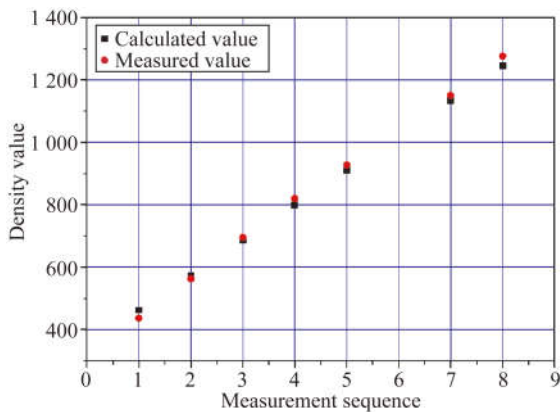


图 4 EMCCD 采集的瑞利后向散射图像

Fig. 4 Rayleigh backscattering image captured by EMCCD

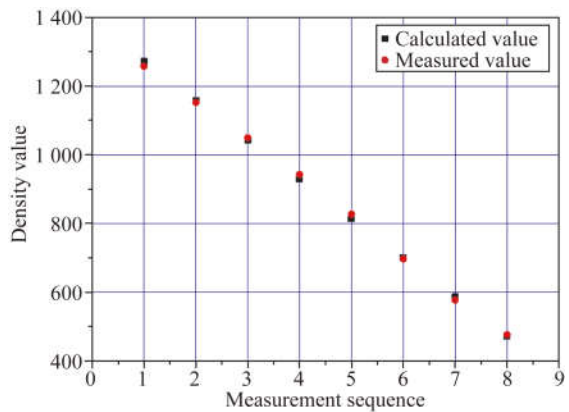
对所获取的图像数据进行平场校正、减背景等处理,然后进行统计,可获得测量区域内回波光子数随距离分布的变化曲线。将该数据带入式(6),即可得到不同测量高度的大气密度数据。

为测试仪器在不同气体密度环境下的检测精度,在真空泵配合下进行了一系列密度递增、递减的标定试验。通过分析和计算采集的图像数据得到了气体密度值( $g/m^3$ ),并与由管道监测仪器测量温度、气压计算得到的气体密度( $g/m^3$ )进行对比,结果如图 5 所示。其中,每个测量序列值代表一个密度采样点。从图中可以看出,多次测量得到的数据比较稳定,且与根据气压和温度计算得到的理论值一致。密度递增和递减两种情况下,测量装置实测值与气压计算值之间的误差分别为 1.1%、2.4%。不过不同时间测得的数据计算误差存在起伏,通过大量重复标定验证,所设计的大气密度测量装置的测量误差可以控制在 5% 以内。



(a)密度递增对比测试结果

(a)Results of density increment contrast test



(b)密度递减对比测试结果

(b)Results of density decline contrast test

图 5 气体密度标定值与理论计算值对比

Fig. 5 Comparison of gas density calibration values with theoretical calculation values

根据温控设计,为了检测设备在不同温度环境下的工作性能,在温度试验箱的配合下,对该设备进行了温度试验。试验时,标定管道内部的气体密度不变,试验箱的温度分别设置在 10, 25, 35, 45  $^{\circ}C$ , 每个温度下至少连续工作 20 min。测试结果如图 6 所示。

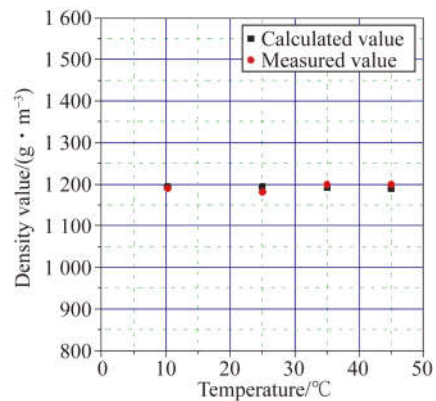


图 6 温度对密度测量的影响

Fig. 6 Influence of temperature on density measurement

从测试结果可知,当环境温度分别为 10, 25, 35, 45  $^{\circ}C$  时,设备工作正常,测量值与理论计算值一致,由环境温度变化带来的气体密度测量的不确定度为 0.7%。因此,根据 3.3 节的温度控制设计方案,将设备工作温度控制在 50  $^{\circ}C$  以内,此时温度变化对测量精度造成的影响极小。

## 5 结 论

大气密度的在轨实时测量是空间飞行器设计中的重要问题。本文提出了一种基于瑞利散射理论的成像激光雷达大气密度测量方法,通过图像

### 参考文献:

- [1] 罗志勇,刘子勇,刘吉萍,等. 便携式空气密度精密测量仪的研制[J]. 计量学报, 2001, 22(1): 52-56.  
LUO ZH Y, LIU Z Y, LIU J P, *et al.*. The development of a portable precise instrument for measuring air density [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2001, 22(1): 52-56. (in Chinese)
- [2] 杨词银,曹立华,张建萍. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1751-1759.  
YANG C Y, CAO L H, ZHANG J P. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1751-1759. (in Chinese)
- [3] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 大气相干长度的稳定测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 911-918.  
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 911-918. (in Chinese)
- [4] 梅冰. 非相干散射雷达的电离层电子浓度剖面观测数据的经验正交函数分析[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所), 2007.  
MEI B. *An Empirical Orthogonal Function(EOF) Analysis of the Ionospheric Electron Density Profiles based on the Observation of Incoherent Scatter Radars* [D]. Wuhan: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [5] 杨自芹. 气溶胶颗粒密度测量方法研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2014.  
YANG Z Q. *Measurement of Aerosol Particle Density* [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2014. (in Chinese)
- [6] 唐磊,吴海滨,孙东松,等. 瑞利散射多普勒测风激光雷达系统误差分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3570-3576.  
TANG L, WU H B, SUN D S, *et al.*. Analysis of

### 作者简介:



王超杰(1972—),男,山东曹县人,博士研究生,高级工程师,2004 于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事航天测量系统工作,对于航天测量设备、测量系统与各种传感器有深入的研究。  
E-mail: daocaoren110@126.com

传感器的像素分辨率来解算探测目标的空间分辨率,基本实现了零盲区测量。该方法具有非接触、高时间分辨率、高精度测量等特点,测量精度不大于 5%,是一种在轨测量周围大气密度参数的有效方法。实际项目应用表明,文中设计的测量装置具有良好的环境适应性及稳定的测量精度。

- system accuracy for Rayleigh backscattering Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3570-3576. (in Chinese)
- [7] 胡亚东,胡巧云,孙斌,等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 652-659.  
HU Y D, HU Q Y, SUN B, *et al.*. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 652-659. (in Chinese)
- [8] 王杰,施翔春,肖绪辉,等. 瑞利散射用于分子流场多参数测量[J]. 天津大学学报, 2000, 33(1): 21-24.  
WANG J, SHI X CH, XIAO X H, *et al.*. Multiplex parametric measurements for molecules flow by Rayleigh scattering [J]. *Journal of Tianjin University*, 2000, 33(1): 21-24. (in Chinese)
- [9] 王杰,施翔春,李喜福,等. 瑞利散射/激光诱导荧光技术用于空气、O<sub>2</sub> 流场的二维瞬态测量[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1375-1380.  
WANG J, SHI X CH, LI X F, *et al.*. Instantaneous two-dimensional measurements of oxygen and air flow by pulsed UV-Rayleigh scattering and laser-induced fluorescence image [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(10): 1375-1380. (in Chinese)
- [10] ERIKSEN T, HOPPE U P, THRANE E V, *et al.*. Rocketborne Rayleigh lidar for in situ measurements of neutral atmospheric density [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2605-2613.
- [11] HOPPE U P, ERIKSEN T, THRANE E V, *et al.*. Observations in the polar middle atmosphere by rocketborne Rayleigh lidar: First results [J]. *Earth Planets and Space*, 1999, 51(7-8): 815-824.
- [12] FRACZEK M, BEHRENDT A, SCHMITT N. Optical air temperature and density measurement system for aircraft using elastic and Raman backscattering of laser light [J]. *SPIE*, 2010, 7835(1): 78350D-78350D-14.

### 通讯作者:



秦来安(1983—),男,河南南阳人,博士,副研究员,2006 年于郑州大学获得学士学位,2011 年于中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位,主要从事激光大气传输及激光大气参数测量等方面的研究。E-mail: qinlai'an@163.com