

# 一种消除可调谐激光器空回误差的方法

相成志<sup>1</sup> 龚 威<sup>1</sup> 马 昕<sup>1</sup> 程学武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)  
<sup>2</sup> 中科院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要** 高精度的激光雷达探测对发射波长的精确定标和稳定有极其严格的要求, 可调谐激光器进行多次波长调节时存在的激光器空回问题会严重影响系统的探测精度。为此, 提出了一种解决可调谐激光器空回问题的算法, 得出了通过来回跳转使正负误差相抵消以消除空回误差的方法, 并首先将其应用到大气 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线高精度探测中的稳频部分。通过多次实验表明, 该算法提高了可调谐激光器的激光波长调节精度, 消除了激光器多次反转调节波长时空回误差对测量精度的影响, 弥补了机械转动进行波长调节的不足, 对高光谱激光技术的发展有十分重要的意义。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 可调谐激光器; 空回误差; 稳频; 高光谱技术

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0912003

## A Method To eliminate the Backlash Error of Tunable Laser

Xiang Chengzhi<sup>1</sup> Gong Wei<sup>1</sup> Ma Xin<sup>1</sup> Cheng Xuewu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

<sup>2</sup> Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

**Abstract** Lidar detection requires strict calibration and stabilization on transmitted wavelength. The backlash errors, which occurs in wavelength control of the tunable laser, seriously reduce the detection accuracy. In order to solve the backlash problem of the tunable laser, a algorithm which can offset the positive and negative backlash error by jumping back and forth is proposed and firstly applied to the frequency stabilization of the high detection of vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. The experiment result indicates that the algorithm not only can improve the adjusting precision of the tunable laser's wavelength, but also eliminate the backlash error of the laser's wavelength adjustment caused by multiple reverse. This method reduces the shortage of the wavelength adjustment caused by mechanical rotating and has great significance for the development of hyperspectral laser technology.

**Key words** remote sensing; lidar system; tunable laser; backlash error; frequency stabilization; hyperspectral technology

**OCIS codes** 120.4880; 130.7405; 140.3518; 140.3600; 280.1910

## 1 引 言

激光是 20 世纪自然科学的一项重大科技成就, 以其方向性强、单色性好、高亮度和高时空相干性等优点引起了科学家们的广泛关注, 在人们生产生活的各个领域都有十分重要的应用<sup>[1-2]</sup>。目前激光技术主要向高能量与高光谱分布技术发展, 高能量

激光技术主要通过加大激光器的体积跟功率来实现, 对高功率激光器而言, 如何有效地对激光介质进行散热处理是获得高光束质量高功率输出的关键<sup>[3-4]</sup>; 高光谱分布技术的发展则以高光谱精细测量为主, 其中主要通过可调谐激光器进行多波长激光的获取。可调谐激光器具有波长可调谐、高转换

**收稿日期:** 2013-12-03; **收到修改稿日期:** 2014-05-16

**基金项目:** 国家 973 计划(2011CB707106)、国家自然科学基金(41127901)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014619020201)

**作者简介:** 相成志(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学与激光遥感、大气 CO<sub>2</sub> 监测等方面的研究。

E-mail: xcz0726@gmail.com

**导师简介:** 龚 威(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学和激光遥感、地物与大气目标探测等方面的研究。

E-mail: weigong@whu.edu.cn

效率、结构紧凑等特点,有着十分广泛的应用<sup>[5]</sup>。对可调谐激光器而言,如何精确地进行波长调节是其技术关键。不同激光器具有不同的波长调节方式,其中,光字参量振荡器(OPO)激光器通过调节激光器内部的晶体角度来实现波长可调,染料激光器的波长调节则通过光栅的转动来实现等。虽然可调谐激光器调节输出波长的方式不同,但无论晶体调节还是光栅调节都是依靠机械转动来实现。因此,激光波长调节与机械操作有着密切联系,机械操作带来的误差会影响到可调谐激光器的激光波长调节机制,使激光器不能准确输出特定波长的激光光束,对仪器的测量精度也有着一定的影响。

机械传动过程中都会产生空回误差,在齿轮传动系统中,空回主要由传动部件的弹性变形以及为保证齿轮能够正常传动、减轻齿面磨损等预留的齿侧间隙造成,其中,齿侧间隙是产生空回误差的主要原因<sup>[6-8]</sup>,这类原因是齿轮本身所固有的,是最基本的,不能完全避免,是空回误差的最主要来源。由于齿侧间隙引起的空回误差无法完全避免,因此通过硬件方法只能将其尽可能减小,但却无法完全消除。目前,机械方面对于齿轮转动精度的研究已经十分成熟,其中控制空回误差的方法有很多种,其基本原理都是在齿间加载力矩,确保啮合齿轮完成无空程的换向,控制或消除侧隙产生的影响,机械上常用的减小或消除空回的方法主要有调整中心距消除法、弹簧加载分片齿轮消除法、接触游丝法等<sup>[9]</sup>。

使用可调谐激光器进行波长调节主要有两种情况:1)有限次数的波长调节,波长调节之后一般不再进行变动;2)对波长进行多次调节,反复进行波长变换。机械方面对于齿轮转动精度的研究已经十分成熟,对于1)所需精度,机械技术完全可以满足;但对于2),单纯的机械转动无法满足高精度要求,在这种情况下,就需从算法方面进行弥补完善,以达到波长调节所需精度。

针对大气 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线高精度探测要求,以稳频部分为出发点,在解决稳频过程中出现的脉冲染料激光器空回问题的基础上,探索并完善算法,提出了一种从算法上解决激光波长多次调节遇到空回问题的技术方法,遵循来回跳转使正负空回误差相抵消的原则,消除了空回误差对波长调节精度的影响。并以激光稳频部分为实例,进行多次实验,分析实验结果,验证了算法在消除空回误差方面的有效性。从算法上解决了机械处理无法完全消除的空回误差问题,从可调谐激光器进行波长输出的实现

过程中进行误差消除,可提高任何通过机械带动而调节输出波长的可调谐激光器调节精度,并对高光谱精细测量有着重要意义。

## 2 激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 稳频系统及空回误差的产生

本研究主要针对大气 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线高精度探测要求。在窄线宽激光器的应用领域中,激光频率稳定度是一个极其重要的指标参数,表征频率稳定的程度<sup>[10]</sup>。系统中稳频部分存在的脉冲染料激光器空回问题严重影响波长的精确定标与稳定,从而大幅降低系统的探测精度,目前的硬件技术无法满足高精度波长调制的需求,需通过实验进行数据分析从而提出并完善算法。

### 2.1 差分吸收激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 稳频系统

激光雷达具有很好的时空分辨率,是大气研究与环境监测的有力工具<sup>[11-12]</sup>,随着激光技术的发展,激光探测手段在大气探测领域中越来越凸显出重要的作用<sup>[13]</sup>。差分吸收激光雷达是一种适用于重复性测量大气痕量气体的先进技术<sup>[14]</sup>,在差分吸收激光雷达探测大气组分实验中,一般发射两束相近波长的激光束,其中一束激光的波长选在所探测组分吸收峰的中心,使其受到最大吸收,称为 on 波长;另一束激光波长则选在吸收谷附近,使其受到的吸收尽可能小,称为 off 波长<sup>[15-16]</sup>。其中在吸收线附近的波长选择是十分重要的,它决定了探测精度高敏感性的范围,对温度的灵敏程度以及对频率的稳定性要求。例如,对多普勒测风激光雷达而言,种子注入激光器作为多普勒测风雷达的发射光源,其频率稳定性直接影响了整个测风雷达系统的测风探测性能<sup>[17]</sup>。对大气 CO<sub>2</sub> 探测而言,从对系统误差分析来源得出,估计误差为 0.08%,其中激光发射 ±0.3 MHz 的频率稳定性是在 1.6 μm 波长处的 CO<sub>2</sub> 探测系统的关键要求<sup>[18]</sup>。运用差分吸收激光雷达探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度的垂直廓线,需要不同波长的近红外光进行扫描稳频,并进行 on 与 off 波长的反复切换。其中,将发射激光波长,特别是 on 波长长期稳定在 CO<sub>2</sub> 吸收峰上是一个十分关键的技术,其精确程度直接影响到回波信号质量以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测的精度。目前国际上常用的一种稳频方法是利用信号的相位信息进行相位调制,产生 error 信号,通过检测 error 信号,来改变激光的输出波长,当 error 信号为 0 时所对应的波长就是吸收

峰<sup>[19-20]</sup>。但这种方法只适用于连续波的稳频操作，而探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度廓线所使用的是脉冲激光，没有相位信息，不能利用相位调制进行激光稳频，同时脉冲激光能量波动较大，在这种情况下，高精度的稳频显得尤为困难。

差分吸收激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 稳频操作主要采用分子吸收池进行频率检测与锁频。在实际实验中，利用一个 16 m 光程的分子吸收池，内充高纯度 CO<sub>2</sub> 气体，通过智能反馈的形式把输出激光的波长锁定在大气 CO<sub>2</sub> 的某个吸收峰上。

高精度稳频控制系统如图 1 所示，当多波长扫描差分可调谐激光器输出 1572.018 nm 波长时，利用分光镜进行分束，使部分激光输出信号进入充满 CO<sub>2</sub> 气体的分子吸收池，并在其中来回多次反射后被探测器接收，产生一个反馈控制信号，用于调整染料激光器的输出波长，使得最终输出激光波长始终保持在 1572.018 nm 的 CO<sub>2</sub> 吸收峰处。通过设计高精度的反馈控制装置，保证发射激光波长的频率稳定度，来满足精确大气 CO<sub>2</sub> 浓度探测的要求。

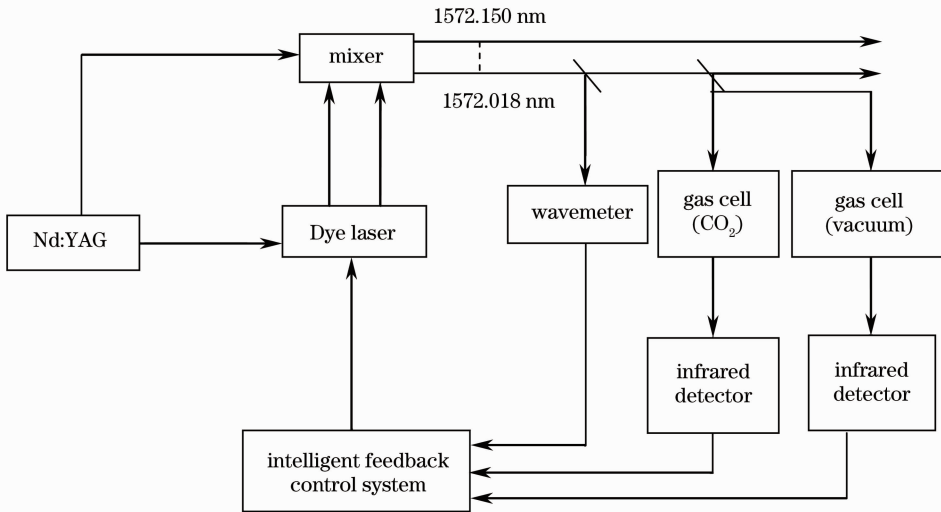


图 1 高精度稳频控制系统结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of precise frequency stabilization unit

## 2.2 脉冲染料激光器空回误差的产生

### 2.2.1 空回误差

空回误差是指在工作状态下，齿轮机构主动轮由正向改为反向旋转时，从动轮在转角上的滞后量。由于齿轮副存在着侧隙，当主动齿轮反向转动的瞬间，输出运动的齿轮先补偿所有齿轮副的侧隙，经过一定的时间后才能输出运动，从而造成运动的滞后，滞后对应的转角即为空回误差角。

产生空回的原因主要有三点：1) 齿轮本身的固有误差，包括齿轮厚度变化，齿侧间隙等；2) 齿轮与轴、轴承等组成部件在安装过程引入的误差；3) 使用中因温度变形、弹性变化的影响而引入的误差。其中齿侧间隙的存在是产生空回误差的主要原因，也是最基本的，不可完全避免，是空回误差的最主要来源。侧隙主要是由齿轮厚度的减薄和中心距的增大产生的，现对这两者造成的空回误差进行计算。

#### 1) 齿轮厚度引起的空回误差

为了补偿齿轮制造和安装误差、补偿热膨胀变形以及为了齿轮便于润滑所留有的齿轮最小间隙，

可以根据齿厚极限偏差来确定。假定齿厚的下偏差为  $E_{G1}$ ，一对齿轮由此而引起的侧隙最大值为

$$j_1 = E_{G1} + E_{G2}. \quad (1)$$

#### 2) 由中心距的增大量引起的空回误差

由齿轮中心距增大而引起的侧隙误差如图 2 所示，两齿轮圆心分别为  $O_1$ 、 $O_2$ ，机械上，齿轮模数和压力角均为标准值的圆称为分度圆；两齿轮进行传动时，不论两齿轮轮廓在何位置接触，过接触点所作的两齿廓公法线与连心线相交于定点  $M$ ，此点称为节点，过节点所作的两圆则称为节圆。图中，分度圆半径分别为  $r$ 、 $r'$ ，节圆半径分别为  $r_1$ 、 $r'_1$ 。

当齿轮之间间距增大时，假设齿轮 1 位置不变，齿轮 2 沿中心线移动了距离  $f_0$ ，如图 2 所示，即  $O_2$  沿中心线移动到  $O'_2$  处，同时随着中心距增大，点  $M$  移动到  $N$  点处，而产生间隙，造成误差。

将矩形框内图形进行放大，如图 3 所示。

对于理想齿轮传动，当中心距取标准值时，齿轮间的侧隙为 0。实际上，中心距一般不会为标准值，有时候会产生偏差，造成齿间侧隙，如图 3 所示。当

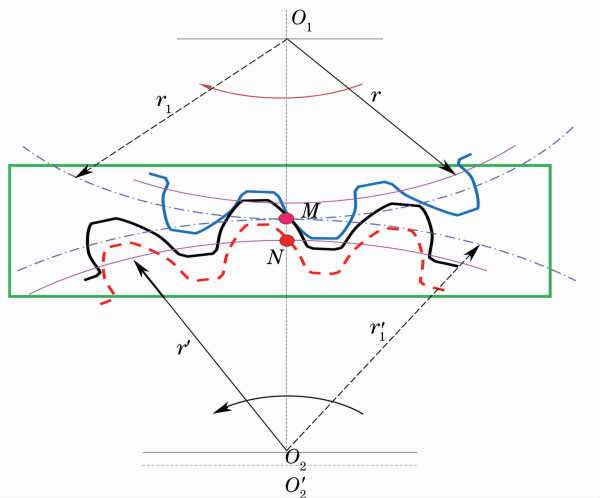


图 2 齿轮中心距增大侧隙误差图

Fig. 2 Graph of backlash error caused by the increases of gear center distance

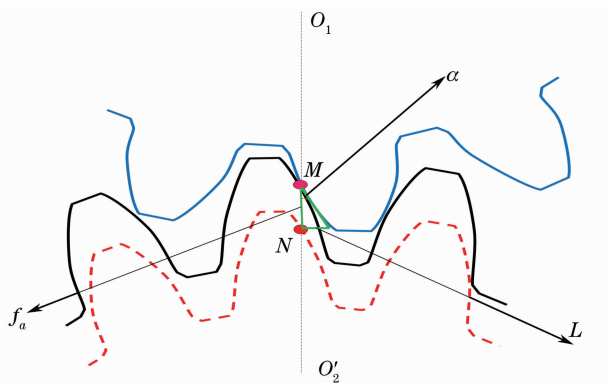


图 3 侧隙误差放大图

Fig. 3 Enlarged graph of backlash error

中心距偏差为中心距极限偏差的上限 +  $f_a$  时,由中心距增大所引起的侧隙最大,其值为

$$j_2 = 2L = 2f_a \tan \alpha. \quad (2)$$

侧隙主要是由齿轮厚度的减薄和中心距的增大产生的,当齿厚取极限下偏差且中心距取极限上偏差时,所对应的侧隙最大,最大侧隙为

$$j_t = j_1 + j_2 = E_{Gt1} + E_{Gt2} + 2f_a \tan \alpha, \quad (3)$$

根据空回侧隙可以计算出空回误差角的大小。

由齿间切向侧隙引起的空回误差角  $\Delta\theta_{bc}$  大小为

$$\Delta\theta_{bc} = \frac{j_t}{r}, \quad (4)$$

式中  $r$  为副从动轮分度圆半径,  $j_t$  为切向侧隙值。

将各级齿轮间最大切向侧隙在该级引起的转角误差折算到输出齿轮上,然后再累加起来就是反向输出瞬间最大空回误差角  $\Delta\theta_{max}$ 。

$$\Delta\theta_{max} = \sum_{j=1}^m \frac{j_{t,max}}{i_{jm} r_j}, \quad (5)$$

式中  $j_{t,max}$  为第  $j$  级齿轮最大切向侧隙,  $r_j$  为第  $j$  级

齿轮副从动轮分度圆半径。

将空回误差角的单位转换为分(arc min):

$$\Delta\theta_{max} = \frac{180 \times 60}{1000\pi} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{j_{t,max}}{i_{jm} r_j}. \quad (6)$$

### 2.2.2 脉冲染料激光器空回误差的产生

可调谐激光器进行波长调节过程,其实就是伺服系统反馈调节过程。对伺服系统而言,理想的精密传动装置,其输出与输入之间的关系应当是线性的。但由于齿轮本身的固有误差的存在,会产生空回误差,在进行机械转动调节激光输出波长时,就会表现出来,使输出与输入之间呈非线性关系。

由于空回误差角的原因,会使得可调谐激光器进行波长调节时,光栅或晶体的角度跟所设定的角度出现偏差,表现在输出上则是输出激光的波长与输入设定的激光波长不一致,产生误差,对精度造成较大影响。

大气  $CO_2$  浓度的垂直廓线探测过程中,波长调节主要通过脉冲染料激光器来实现。染料激光器是以某种有机染料溶解于一定溶剂中作为激活介质的激光器,其最突出的优点是其输出波长可调谐,此外,它还具有光谱分辨率高、结构简单、价格便宜等优点<sup>[21]</sup>。染料激光器主要是通过外来抽运光入射到激光器的染料池中,将染料分子从基态抽运到激发态,激发态原子由于受激辐射而产生荧光,再通过染料池两边的光栅和半反射镜谐振腔进行频率选择得到输出激光。通过染料种类可以获得频率覆盖一定频率范围的激光<sup>[22]</sup>。其核心部件主要为染料池与光栅,染料池的出口连接到染料循环机,波长的变化通过染料吸收池内光栅的转动进行选择,光栅则依靠步进电机进行机械带动,这样就不可避免地产生空回问题,带来空回误差,表现在波长上则是不能准确输出所需特定波长的激光。

## 3 一种消除可调谐激光器空回误差的技术方法

### 3.1 稳频操作中 $CO_2$ 吸收峰的精确锁定

为消除激光扫描过程中产生的空回误差,使波长能够长期稳定地锁定在  $CO_2$  吸收峰上,消除空回误差的影响,获得更高的测量精度,本研究将提出的消除可调谐激光器空回误差的技术方法首先应用到解决此问题上,具体所采用的技术方法主要过程如下:

1) 数据预处理:奇异点剔除;多项式拟合

激光能量具有波动性,采集的回波信号有时候会出现奇异点的情况(如图 4),影响实验的准确度。

因此在稳频前需进行数据预处理,剔除奇异点,并对数据进行多项式拟合。经过多次实验结果分析比较,发现采用6次多项式拟合效果最好,因此采用6次多项式拟合,拟合效果如图5所示。

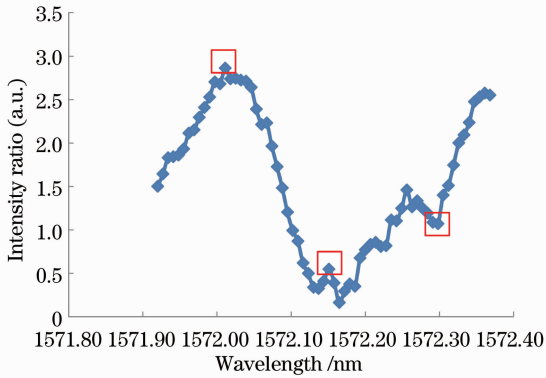


图4 奇异点现象

Fig. 4 Sketch diagram of the singularity phenomenon

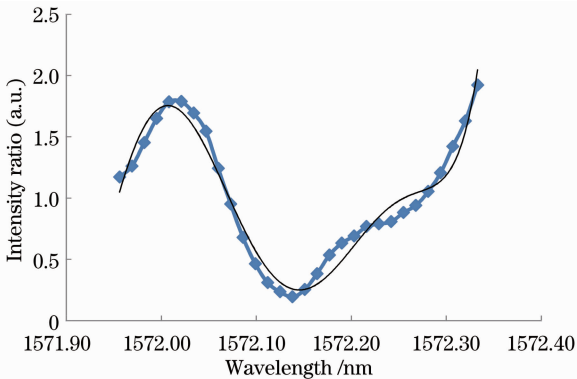


图5 多项式拟合

Fig. 5 Results of the polynomial fitting

2) 消除空回误差,锁定 CO<sub>2</sub> 吸收峰

① 从较大波长范围(假设从 1571.872 ~ 1572.148 nm)内进行大步长的激光扫描(如图6),得到 CO<sub>2</sub> 吸收谱线的整体形状,并以此得到吸收峰的大体位置。

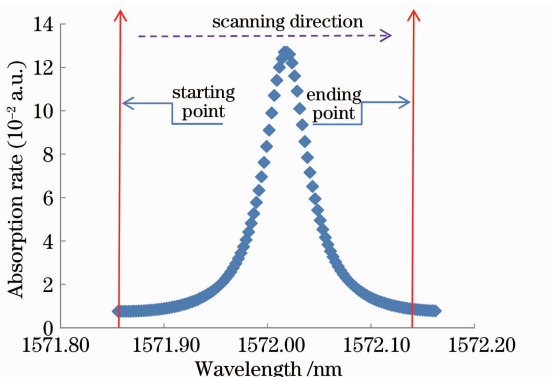


图6 CO<sub>2</sub> 谱线粗扫描

Fig. 6 CO<sub>2</sub> absorption spectrum at coarse resolution

② 从终止点跳回到重新定义的起始点(这里假设为 1571.994 nm),产生第一个空回,方向为反向空回(这里假设从起始点到终止点为正向),由于激光器中光栅反向转动产生空回误差,使得以相同的步长返回之后所在位置不在起始点处,而位于起始点的右端(如图7所示)。

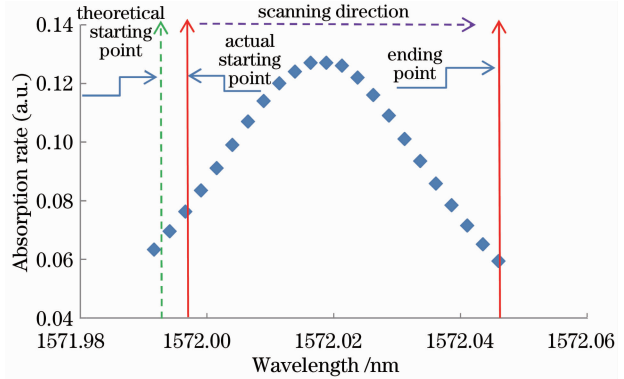


图7 CO<sub>2</sub> 谱线细扫描

Fig. 7 CO<sub>2</sub> absorption spectrum at fine resolution

缩小扫描范围(假设从 1571.997 ~ 1572.046 nm),从起始点开始进行小步长的激光扫描(产生第二个空回,方向为正向空回),得到 CO<sub>2</sub> 吸收峰附近的精细吸收谱线。

③ 按照相同的步长返回起始点(产生第三个空回,方向为反向空回),这时候由于激光器中光栅转动产生空回的原因,同样会使得返回之后的位置位于起始点的右端(如图8所示)。

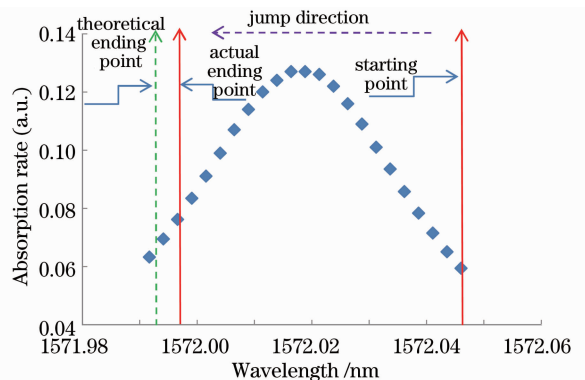


图8 扫描方向跳转

Fig. 8 Direction jump of scanning

④ 反方向进行跳转,步长设为理论起始点与吸收峰差值,产生第4个空回,方向为反向空回),由于空回的又一次产生,使得4次空回所造成的误差相互抵消,使跳转后能够将波长的位置精确锁定在 CO<sub>2</sub> 吸收峰上(如图9所示)。

3.2 消除可调谐激光器空回误差的原则

在实际操作中,将提出的消除可调谐激光器空



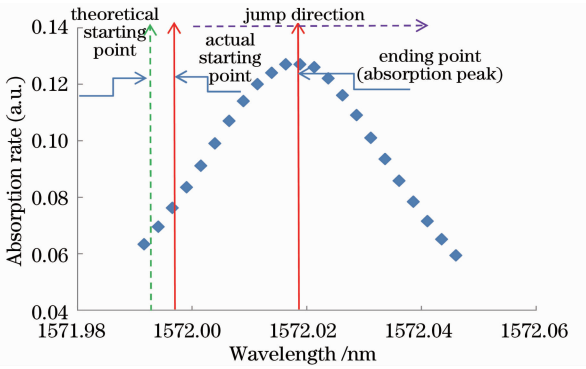


图 9 吸收峰锁定

Fig. 9 Locking of absorption peak

回误差的技术方法首先应用到大气 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线探测上,实现了发射激光 on 波长的精确锁定,并进行总结,从算法上消除可调谐激光器多次调节波长及波长锁定时所产生的空回误差需基于以下三个主要原则:

- 1) 激光扫描中,当进行激光器单次反向波长调节时,必须先从当前波长大步长跳转到所需波长与当前波长相对的另一侧,然后再跳转到所需波长上;
- 2) 激光扫描中,在进行多次反复激光波长调节时,必须要保证每一次波长调节正负空回误差(假设当前波长位置空回误差为 0)的产生次数相等,使正负空回误差相抵消;
- 3) 当进行激光扫描并锁定某一波长时,需同时

表 1 粗扫描 CO<sub>2</sub> 吸收峰位置(单位: nm)

Table 1 CO<sub>2</sub> absorption peak position of crude scanning (unit: nm)

	The first absorption peak	The second absorption peak	The third absorption peak
First group	1572. 1412	1572. 4236	1572. 6937
Second group	1572. 1289	1572. 4174	1572. 7060
Third group	1572. 1350	1572. 4297	1572. 7060
Fourth group	1572. 1412	1572. 4174	1572. 6937
Fifth group	1572. 1473	1572. 4174	1572. 7060
Sixth group	1572. 1473	1572. 4297	1572. 6999
Seventh group	1572. 1412	1572. 4174	1572. 6937
Eighth group	1572. 1596	1572. 4236	1572. 6876
Ninth group	1572. 1535	1572. 4174	1572. 6937

2) 进行小范围扫描,获取吸收峰的精确位置  
对所扫描得到的三个吸收峰进行比较分析,最后发现第二吸收峰处 CO<sub>2</sub> 的吸收现象更明显,数据质量更好,因此选择第二吸收峰作为本次实验所用吸收峰。选定吸收峰后,进一步较精确地确定吸收峰的位置,对第二吸收峰的 9 次测量数据进行分析,选取了一个包含所有吸收峰在内的扫描范围,即 1572. 350 ~ 1572. 550 nm,并将扫描步长缩小为

满足 1)、2) 两条。

## 4 实验结果及误差分析

提出了一种从算法上消除可调谐激光器空回误差的技术方法,为验证此方法的有效性,将消除空回误差方法用 labview 语言实现并应用到探测 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线中的稳频部分上,以此来解决稳频操作中脉冲染料激光器产生空回误差的问题,并对实验结果进行处理分析,以探究该算法的精确度与准确性。

由于现有波长计的测量精度是 5 pm,而空回引起的精度误差较小(约为 1 pm),单纯地进行波长测量比较分析不可行,因此采用间接分析验证,通过两个不同的稳频程序进行实验,并将稳频所得的波长作为激光输出波长,测量激光通过充满 CO<sub>2</sub> 吸收池后的能量残余相关值并进行比较分析来验证提出算法的有效性。

- 1) 进行较大范围的扫描,找到合适的吸收峰

设定初始扫描波长范围为 1572 ~ 1573 nm,扫描步长为 1 pm(染料激光器波长,转换成输出激光波长为 6 pm),一共进行 9 组实验,最后对实验采集的数据进行分析比较,发现在此扫描范围内有三个 CO<sub>2</sub> 的吸收峰,各吸收峰的位置如表 1 所示(单位: nm)。

0.5 pm 进行扫描,一共进行了 9 组实验,最后对实验采集的数据进行比较分析,得到 9 次吸收峰的位置如表 2 所示(单位: nm)(注:吸收峰波长小数点前均为 1572,表格中只显示小数点后四位数值)。

得到 CO<sub>2</sub> 吸收峰的位置后,将吸收峰组成的区间记录下来,作为后续稳频操作去除异常结果的判断标准。

表 2 细扫描 CO<sub>2</sub> 吸收峰位置(单位: nm)Table 2 CO<sub>2</sub> absorption peak position of fine scanning (unit: nm)

	First group	Second group	Third group	Fourth group	Fifth group	Sixth group	Seventh group	Eighth group	Ninth group
Absorption peak (1572.)	4697	4728	4667	4728	4697	4697	4820	4759	4728

## 3) 进行激光稳频操作

用稳频程序进行稳频,来验证消除空回方法的有效性。稳频操作主要分原始稳频方法和改进稳频方法两种方式进行。

## ① 使用原始稳频方法进行稳频操作

在没有采用来回跳转消除空回误差的情况下,稳频操作主要是采用简单的逐点比较来找到最大值,然后直接跳到吸收峰上的方法来进行稳频操作(称此方法为原始稳频方法),这个过程中会出现多次齿轮反转,产生空回误差。

## ② 使用改进稳频方法进行稳频操作

采用所提出的消除空回误差的算法进行稳频操作(称此方法为改进稳频方法),将稳频得到的吸收峰波长作为所需求的 on 波长,进行后续实验。

## 4) 激光稳频后残余能量相关值测量

表 3 两种稳频方法稳频后激光残余能量相关值及方差

Table 3 Value of residual correlation energy and its variance of two methods

	Residual correlation energy		Variance	
	Original method	Improved method	Original method	Improved method
First group	0.470558	0.450200	0.186642	0.150574
Second group	0.455742	0.449263	0.182393	0.137959
Third group	0.462713	0.451054	0.172044	0.165708
Fourth group	0.477120	0.433652	0.185347	0.145197
Fifth group	0.467557	0.447247	0.152108	0.151413
Sixth group	0.466426	0.433771	0.168205	0.117278
Seventh group	0.445575	0.444982	0.161691	0.143084
Eighth group	0.468665	0.423520	0.145181	0.130315
Ninth group	0.459291	0.443605	0.165764	0.142228
Mean	0.463739	0.441922	0.168820	0.142640

为形象地比较两种方法的实验效果,将结果用折线图表示出来,如图 10 所示。

从图 10 可以看出,改进稳频方法稳频操作后所测得的通过 CO<sub>2</sub> 吸收池后激光的残余能量相关值普遍小于原始稳频方法稳频操作后的残余能量相关值,并且利用改进稳频方法稳频后所测得的激光残余能量相关值方差要比原始稳频方法稳频后的残余能量相关值方差小得多。

## 6) 结论

对两次稳频操作选定的吸收峰波长通过吸收池后测得的能量相关值进行比较,发现连续多次实验

进行稳频操作后,通过扫描所得的 9 个吸收峰的结果作为判断标准,不在此区间内的稳频结果则判定为奇异值,将其剔除,得到正常的吸收峰,将稳频得到的吸收峰波长作为激光器的设定波长,然后将输出波长通过充满 CO<sub>2</sub> 气体的吸收池,用示波器以及设计的能量积分软件来测量此时通过 CO<sub>2</sub> 气体吸收池之后的激光残余能量相关值并进行记录。

## 5) 数据处理及分析

① 用两种稳频方法分别进行稳频操作,总计 9 组实验,测量每次稳频之后相应波长激光通过吸收池之后的残余能量相关值并进行比较。

② 为查看稳频结果的波动情况,将 9 次稳频结果所得残余能量相关值的方差求出,间接表示稳频的稳定情况。

实验所得到的测量数据如表 3 所示。

采用改进稳频方法比原始稳频方法所测得的残余能量相关值低,并排除了偶然情况出现的可能,说明改进稳频方法能够使得稳频所得的吸收峰更加靠近实际 CO<sub>2</sub> 的吸收峰,间接地证明了改进稳频方法能够取得更高的稳频精度;通过对实验数据的方差进行比较,发现改进稳频方法比原始稳频方法稳频所得结果的方差值更低,表明改进稳频方法不仅能够精确地锁定 CO<sub>2</sub> 吸收峰,而且还具有比原始稳频方法更高的稳定性,说明改进稳频方法要优于原始稳频方法,证明了提出的消除空回误差方法在可调谐激光器波长反复调节应用上的可行性与准确性。

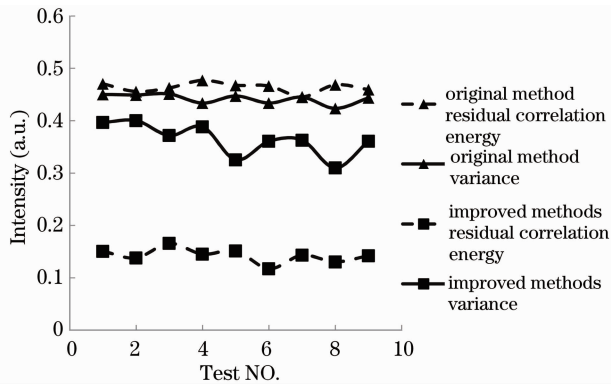


图 10 两种稳频方法稳频后激光残余能量  
相关值及方差

Fig. 10 Value of residual correlation energy and its  
variance of two methods

## 5 结 论

依托探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线项目中的稳频部分,在解决稳频过程中出现的脉冲染料激光器空回问题基础上,提出了一种从算法上解决激光波长多次来回调节产生空回误差问题的技术方法,并遵循来回跳转使正负空回误差相抵消的原则,以激光稳频部分为实例,将算法应用到解决稳频过程中空回误差问题上,经过多次实验与结果分析,证明了提出的消除空回误差方法的有效性与准确性。

提出的算法克服了机械领域无法解决的可调谐激光器进行多次波长调节时遇到的空回问题,从软件方面入手,利用算法消除了机械调节激光波长的激光器空回误差对调节精度的影响,对高光谱精细测量有着重要意义,将提高高光谱技术精细测量的精度,有利于激光技术的发展。

## 参 考 文 献

- Xu Baozhong. Research on Pulse-Shaping YAG Laser Technology and Applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. 1.  
许宝忠. 成形脉冲 YAG 激光技术及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2010. 1.
- Li Yongqiang, Huang Cunyou. Application and development of laser technology [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013, (1): 87-88.  
李永强, 黄存友. 激光技术的应用研究进展[J]. 装备制造技术, 2013, (1): 87-88.
- Lou Qihong. Recent progress of laser technology and its application in solar cell research [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3187-3192.  
楼祺洪. 激光技术新进展及其在光伏产业中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3187-3192.
- Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Cuiyun. Progress and current state of space-borne laser altimetry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.  
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Wang Weimin, et al.. High-

efficiency 2.7  $\mu\text{m}$  tunable mid-infrared laser [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2624-2628.

彭跃峰, 魏星斌, 王卫民, 等. 高效率中红外 2.7  $\mu\text{m}$  可调谐激光器[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2624-2628.

6 Wang Baomin, Zhang Guohai, Jiang Xuequan. Accuracy design and motion error calculation of less toothed gear drive [J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(3): 44-46.

王保民, 张国海, 蒋学全. 少齿数齿轮传动精度设计及运动误差计算[J]. 机械设计, 2008, 25(3): 44-46.

7 Fu Shenglin. Influence of retrace tolerance on gear driving precision [J]. Electro-Optic Technology Application, 2004, 18(5): 51-54.

付圣林. 齿轮传动回差对传动精度的影响[J]. 光电技术应用, 2004, 18(5): 51-54.

8 Ruan Ping. Design of image-rotation eliminated structure and accuracy analysis [J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(2): 190-192.

阮萍. 一种消象旋传动机构的设计与精度分析[J]. 光子学报, 2000, 29(2): 190-192.

9 Hu Chao, Shi Huli, Ning Chunlin. Research on functional implementation of gear clearance eliminating [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(2): 11-14.

胡超, 施泮立, 宁春林. 齿轮消隙功能实现探索[J]. 机电工程, 2008, 25(2): 11-14.

10 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, et al.. Research of laser frequency stabilization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 48(8): 081401.

苑丹丹, 胡妹玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 48(8): 081401.

11 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing, et al.. Measurement of CO<sub>2</sub> concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0801003.

于海利, 胡顺星, 吴晓庆, 等. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0801003.

12 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, et al.. Study of accuracy of lidar inversion PM<sub>2.5</sub> concentration [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0113001.

何涛, 侯鲁健, 吕波, 等. 雷达探测反演 PM<sub>2.5</sub> 浓度的精度研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0113001.

13 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, et al.. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0514001.

陈涛, 赵玉洁, 刘东. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0514001.

14 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, et al.. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 597-600.

胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 597-600.

15 Ma Xin, Lin Hong, Ma Yingying, et al.. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric CO<sub>2</sub> lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1101003.

马昕, 林宏, 马盈盈, 等. 差分吸收大气 CO<sub>2</sub> 激光雷达的大气压力宽线修正算法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1101003.

16 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. Environmental Monitoring Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001. 184.

阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 184.

17 Bian Zhenglan, Huang Chongde, Gao Min. Research on control technique for pound-drever-hall laser frequency stabilizing system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302001.

卞正兰, 黄崇德, 高敏. PDH 激光稳频控制技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302001.

18 G Ehret, C Kiemle, M Wirth, et al.. Space-borne remote sensing



- of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. Appl Phys B, 2008, 90(3-4): 593-608.
- 19 S Kameyama, M Imaki, Y Hirano, *et al.*. Development of 1.6 micron CW modulation ground-based DIAL system for CO<sub>2</sub> monitoring [C]. International Society for Optics and Photonics on Asia-Pacific remote Sensing, 2008: 71530L.
- 20 K Numata, J R Chen, S T Wu, *et al.*. Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide [J]. Appl Opt, 2011, 50(7): 1047-1056.
- 21 Ju Yangfeng, Luo Feng, Jiang Lianbo, *et al.*. Advance in tunable ultraviolet laser [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2001, 18(3): 13-18.  
巨养锋, 罗 烽, 姜连勃, 等. 可调谐紫外激光器研究进展[J]. 深圳大学学报(理工版), 2001, 18(3): 13-18.
- 22 Cheng Xuewu, Li Faquan, Song Juan, *et al.*. Atomic frequency stabilized pulsed dye laser and its frequency stabilization method: China, CN200510019816.X [P]. 2005-11-16.  
程学武, 李发泉, 宋 娟, 等. 原子分子稳频的脉冲染料激光器及其稳频方法: 中国, CN200510019816.X [P]. 2005-11-16.

栏目编辑: 张浩佳