

文章编号:1002-2082(2015)06-0965-06

# 基于压电陶瓷的激光频率调谐技术

张欣婷<sup>1,2</sup>, 安志勇<sup>2</sup>, 亢磊<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学 光电信息学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

3. 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 100083)

**摘 要:**在充分研究各种激光调谐方法优缺点的基础上, 针对其调谐范围、调谐速率、调谐线性等方面存在的不足, 提出一种基于压电陶瓷的激光频率调谐技术。该方法将压电陶瓷与光纤光栅激光器的布拉格光栅进行粘结, 通过调整压电陶瓷的驱动电压来带动布拉格光栅的伸缩, 实现波长(即频率)的调谐。同时, 利用虚拟仪器中的计算机软件拟合技术, 校正压电陶瓷输入电压与输出位移之间的非线性, 使系统呈线性频率调谐, 以提高测量精度。实验结果表明, 当压电陶瓷的驱动电压变化 126 V 时, 可实现 0.8 nm(即 100 GHz)的调谐范围。

**关键词:**频率调谐; 压电陶瓷; 轴向应力调谐; 线性化校正; 虚拟仪器

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0605003

## Laser frequency tuning technology based on piezoelectric ceramics

Zhang Xinting<sup>1,2</sup>, An Zhiyong<sup>2</sup>, Kang Lei<sup>3</sup>

(1. School of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China; 2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd, Changchun 130000, China)

**Abstract:**Based on sufficient investigation of the advantages and disadvantages of several laser tuning methods, aiming at the shortcomings in tuning range, tuning speed, tuning linearity, etc., we proposed a new laser frequency tuning technology based on piezoelectric ceramic. In this method, the fiber Bragg grating(FBG) was stuck to the piezoelectric ceramics, and the driving voltage of the piezoelectric ceramics was adjusted to driven the Bragg grating telescoping, so as to achieve the wavelength (ie frequency) tuning. Meanwhile, the nonlinearity between piezoelectric ceramics input voltage and output displacement was corrected by using the fitting software in virtual instrument to make the system exhibit a linear frequency tuning, in order to improve the measurement accuracy. Experiment results show, when the drive voltage of piezoelectric ceramics changes to 126 V, the 0.8 nm (ie 100 GHz) tuning range can be realized.

**Key words:**frequency tuning; piezoelectric ceramics; axial stress tuning; linearization correction; virtual instruments

收稿日期:2015-07-29; 修回日期:2015-08-19

基金项目:吉林省科技厅重大专项

作者简介:张欣婷(1984—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学设计与光学仪器及检测方面的研究。

E-mail:463151345@qq.com

## 引言

随着激光测量系统在各类光电仪器中的广泛应用,对其调谐技术的要求也越来越高,主要体现在调谐范围、调谐速度、调谐线性等方面。传统的激光调谐技术主要有声光调谐、电光调谐、温度调谐、电流调谐等。声光调谐速度慢,调谐范围在 MHz 的量级,需要外置声光频移器;电光调谐速度快,可达  $\mu\text{s}$  量级,但多为调幅,用于光通信;温度调谐速度慢,且调谐范围小;电流调谐速度较快,在 ns 量级,调谐范围宽,但制作较复杂。本系统是与中车集团长春轨道客车股份有限公司合作的针对大尺寸三维形貌测量项目的一个关键技术,项目要求在  $2\text{ m}\sim 18\text{ m}$  的测量范围内,测距精度能达到  $0.02\text{ mm}+10\text{ }\mu\text{m/m}$ 。计算可知,需要激光器调谐频率  $100\text{ GHz}$ ,即  $0.8\text{ nm}$ ,调谐周期  $2\text{ ms}$ 。由此可见,本系统的调谐范围并不大,但调谐速度较快,且为了保证测量精度,需要调谐过程具有很好的线性。综合考虑上述各种调谐方式的优缺点,单独采用某一种调谐方法均无法满足系统要求,因此本文提出一种新的激光频率调谐技术,将压电陶瓷与激光器的布拉格光栅粘结,利用电驱动压电陶瓷振动来实现测量。

## 1 压电陶瓷特性

压电陶瓷的典型特性是具有逆压电效应,即在电场作用下会使其自身产生形变。结合这一特性,我们将压电陶瓷与光纤光栅粘结,通过对压电陶瓷施加外部电压来使其发生形变,进而实现对光纤光栅的拉伸。理论上,在压电陶瓷的弹性限度内,光纤光栅产生的形变与加在其上的外部电压呈线性关系<sup>[1-4]</sup>,即

$$\Delta L = \frac{t \cdot V \cdot L}{d} \quad (1)$$

式中: $\Delta L$  为施加外部电压为  $V$  时,光纤光栅所产生的形变量; $t$  为压电应变常数; $V$  为在压电陶瓷上所施加的电压; $L$  为压电陶瓷的长度; $d$  为压电陶瓷片的厚度。当施加电压为  $V$  时,光纤光栅的轴向应变为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{t \cdot V}{d} \quad (2)$$

此时,布拉格波长  $\lambda_B$  的偏移量  $\Delta\lambda_S$  为

$$\Delta\lambda_S = (1 - p_e) \cdot \epsilon \cdot \lambda_B \quad (3)$$

式中  $p_e$  为光弹性常数。

将(2)式和(3)式联立,可以求出在压电陶瓷

的作用下,光纤光栅布拉格波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B(1 - p_e) \cdot t \cdot V}{d} \quad (4)$$

实际应用中,可以根据其所需的伸缩量大小,选择单片压电陶瓷或者多片的层叠结构<sup>[5-6]</sup>。两者的区别在于,单片压电陶瓷的伸缩量比层叠结构小,层叠式的结构多用于对伸缩量要求较大的测量中。它相当于将几个单片压电陶瓷在机械上串联,电路上并联。层叠结构的总伸缩量为

$$\Delta l = \frac{n \cdot L \cdot t \cdot V^2}{d} \quad (5)$$

式中: $\Delta l$  为层叠结构的压电陶瓷产生的总伸缩量; $n$  为压电陶瓷的层数,即胶合片数; $d$  为每片晶体的厚度。因为本系统的调谐范围较小,重点是要保证调谐速度,因此采用单片压电陶瓷即可。

## 2 压电陶瓷线性化校正

### 2.1 压电陶瓷线性化校正原理

压电陶瓷输入电压与输出位移之间的非线性是由压电陶瓷的迟滞、蠕变等不良特性,以及制造工艺上的一些影响因素所导致的<sup>[7-9]</sup>。当其非线性大于某一阈值,不能满足设计要求时,则必须校正。

针对压电陶瓷的控制电压  $V$  和测得的非线性位移  $S(V)$ ,利用最小二乘法进行拟合,所采用的理论依据是按沿轴方向传播光束的谐振条件:

$$nl = q \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

式中: $l$  为谐振腔长度; $n$  为激活介质的折射率; $q$  为一正整数; $\lambda$  为振荡波长。其最小二乘法的正规方程为

$$\begin{cases} (\sum_n V_i^4)A + (\sum_n V_i^3)B + (\sum_n V_i^2)C = [\sum_n V_i^2 \cdot S(V_i)] \\ (\sum_n V_i^3)A + (\sum_n V_i^2)B + (\sum_n V_i)C = [\sum_n V_i \cdot S(V_i)] \\ (\sum_n V_i^2)A + (\sum_n V_i)B + (\sum_n 1)C = [\sum_n S(V_i)] \end{cases} \quad (7)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是拟合曲线系数,对其计算后,可以得到曲线关系式:

$$AV^2 + BV + C = S(V) \quad (8)$$

解得:

$$V = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4[C - S(V)] \cdot A}}{2A} \quad (9)$$

由(8)式计算得到等间距变化位移量  $S(V)$ ,可

以求出其非等间距下的变化电压  $V$ 。为了能使压电陶瓷在时间上的位移线性化更精确地实现,需要对  $S(V)$  进行多次测量,同时调节非等间隔电压  $V$ 。

## 2.2 压电陶瓷线性化校正方案

本文采用补偿的方法对压电陶瓷进行线性化校正,即改变驱动电压的步长,使电压本身在时间域上呈现非线性变化,用电压的非线性补偿压电陶瓷的非线性,使得最终整体呈现线性变换<sup>[10-13]</sup>。压电陶瓷线性化系统的组成如图 1 所示。

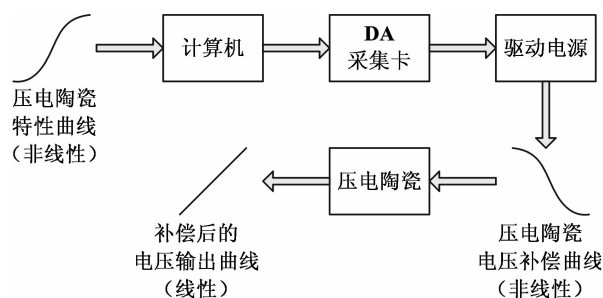


图 1 压电陶瓷线性化系统示意图

Fig. 1 Schematic of piezoelectric ceramic linear system

首先,对压电陶瓷特性曲线的数据进行统计,并通过实验,记录压电陶瓷每伸长一个单位长度时所对应的电压值的改变量。再将这些电压值输入到计算机中,通过相关的计算机软件进行拟合,得到输出电压曲线。其次,利用 DA 采集卡,在压电陶瓷的驱动电源中,将之前拟合出的电压曲线输入进去。利用该驱动电源将之前的电压曲线进行放大,并将放大后的电压曲线在压电陶瓷管上输出,得到压电陶瓷的电压补偿曲线。该曲线与压电陶瓷输出电压曲线具有相互补偿的关系,依旧为非线性曲线。最后,将压电陶瓷电压补偿曲线与压电陶瓷输出电压曲线进行补偿,最终将伸长量线性输出。

通过上述方法,即可实现压电陶瓷的线性化。在整个线性化过程中,压电陶瓷的电压补偿曲线的获取方式和步骤如图 2 所示。



图 2 压电陶瓷电压补偿曲线获取示意图

Fig. 2 Block diagram for acquiring compensation curve of piezoelectric ceramic voltage

在获取电压补偿曲线的实验中,采用的是虚拟仪器(LabView)技术<sup>[14-15]</sup>,并结合相关的计算机编程。首先,将压电陶瓷固定在迈克尔逊干涉仪的固定反射镜上,并调出干涉条纹。此时,观察迈克尔逊干涉仪上的条纹图像,通过调整压电陶瓷的驱动电压值来对干涉条纹进行相应的调整。当条纹最亮,即光强最大时,记录下此时对应的电压值;然后缓慢增加电压,记录每变化一个条纹时,对应的电压变化。上述过程完成后,开始统计电压与压电陶瓷伸长量的关系。为了后续工作的方便,将已经记录的这些非等间隔电压序列存储到计算机中作成测试文件,以供日后调用。这样,当日后变换不同的压电陶瓷时,只需选取不同的测试文件即可。

由于上述的电压补偿曲线数据的获取属于一个闭环系统,因此大大提高了系统的线性化精度。而且在测试系统的前面板上,可直接显示出非等间隔电压控制序列。这样,就可以通过键盘微调并修改各个节点的电压值,使压电陶瓷在时间域上呈现线性化的位移。

压电陶瓷线性化控制程序的前面板如图 3 所示。

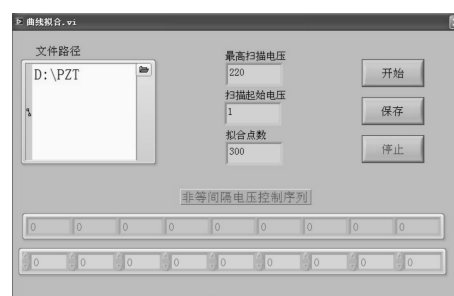


图 3 压电陶瓷线性化程序前面板

Fig. 3 Front panel of piezoelectric ceramic linear programming

由于之前的实验中已经生成测试文件,所以这里针对不同的压电陶瓷,只需去调取相应的测试文件即可。而且所选取的压电陶瓷的电压曲线数据也会在该面板上显示出来,方便工作人员操作和核对。

测试系统的程序流程如图 4 所示。

在程序运行过程中,若要使线性化效果得到改善,我们可以通过调整各个离散电压点的值来实现。

综上所述,该方案是通过改变电压值来校正压电陶瓷的线性度的,其输出波形也是提前存储

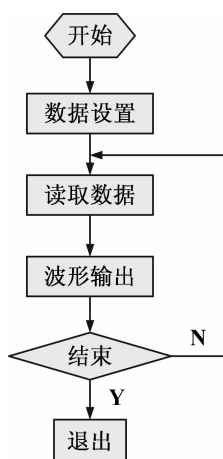


图4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

到测试文件中的。使用的时候,只需根据自身的设计要求进行调用或稍加修改即可,而不需对硬件进行任何改动。当有新的压电陶瓷被使用时,测试文件可以随时更换,操作起来方便快捷。虚拟仪器技术的引用,也使得该线性化系统具备一定的通用性,且成本较低。通过实验,证实了该方法使得压电陶瓷的线性度有了很大的改善。

### 3 实验验证

通过对大量激光器产品性能参数的比较,本文选取了 New Focus 公司的光纤光栅外腔半导体激光器。该激光器具有很好的可调谐性,调谐精度高,跳模自由;具有低噪音、高精度和可重复性。

在完成上述激光器调谐理论和压电陶瓷线性化校正理论的基础上,给出了具体实施方案,如图5所示。

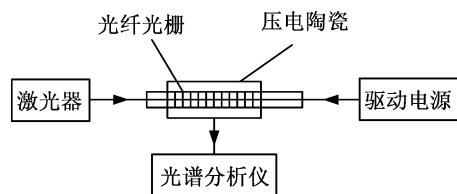


图5 压电陶瓷调谐方案实验原理图

Fig. 5 Experiment schematic of piezoelectric ceramic tuning scheme

实验中,需要将激光器的光纤光栅粘结或耦合在压电陶瓷上。利用压电陶瓷的逆压电效应,由驱动电源来对压电陶瓷施加外部电压,使其产生振动,进而使光纤光栅的长度随之改变,达到激光波长调谐的目的。同时,通过对该驱动电压数值的调整,使压电陶瓷产生不同程度的形变,实现

对光纤光栅不同程度的拉伸,达到不同的调谐范围。利用光谱分析仪分析出射光谱,以此来监测调谐范围的大小。

本实验所选用的压电陶瓷的型号为 FT-10-20AT,其谐振频率为  $(20 \pm 1.5)$  kHz,谐振电阻  $\leq 500 \Omega$ ,电容量  $(1\ 000(1 \pm 20\%))$  PF,金属片直径  $10\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ ,陶瓷片直径  $7\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ ,总厚度  $0.25\text{ mm} \pm 0.08\text{ mm}$ 。选取的压电陶瓷驱动电源的驱动电压范围为  $0\text{ V} \sim 200\text{ V}$ ,所能控制的最小电压变化量是  $0.1\text{ V}$ 。激光器出射端的光纤光栅长度为  $55\text{ mm}$ ,最大伸长量  $56\text{ }\mu\text{m}$ 。利用高强度结构胶 XH-11 将光纤光栅与压电陶瓷固连,该光纤光栅的中心波长为  $1\ 550\text{ nm}$ ,带宽为  $0.435\text{ nm}$ 。选取部分实验结果给出,如表1所示。

表1 激光调谐实验数据

Table 1 Experimental data of laser tuning

序号	压电陶瓷 驱动电压/V	光纤光栅中心 波长/nm	光纤光栅中心 波长变化量/nm
1	0	1550	0
2	20	1550.122	0.122
3	40	1550.249	0.249
4	60	1550.381	0.381
5	80	1550.509	0.509
6	100	1550.639	0.639
7	120	1550.763	0.763
8	140	1550.886	0.886
9	160	1551.012	1.012
10	180	1551.136	1.136
11	200	1551.26	1.26

该实验结果表明,在驱动电压从  $0\text{ V}$  增加到  $200\text{ V}$  的过程中,光纤光栅的中心波长从  $1\ 550\text{ nm}$  增加到  $1\ 551.26\text{ nm}$ ,即该实验实现了中心波长  $1.26\text{ nm}$  的调谐量。而本设计所要求的调谐频率为  $100\text{ GHz}$ ,换算成波长为  $0.8\text{ nm}$ ,通过实验可知,当压电陶瓷的最大电压加到  $126\text{ V}$ ,即可实现  $0.8\text{ nm}$  的调谐范围。

现利用 Matlab 软件编程,将上述实验数据输入,可得光纤光栅的中心波长与驱动电压的关系,如图6所示。图中的点表示实际测量值,通过最小二乘法对这些点进行拟合,得到图中所示的直线。从图中可以得出结论,光纤光栅的中心波长是受驱动电压影响的,两者呈线性函数变化。

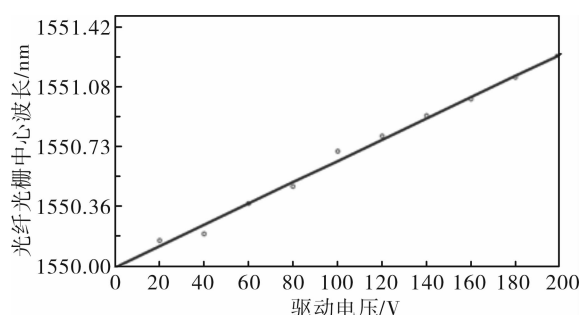


图6 不同电压下布拉格光纤光栅的中心波长

Fig. 6 FBG center wavelengths at different voltages

此外,在不同电压下,光纤光栅的带宽与驱动电压的关系如图7所示。

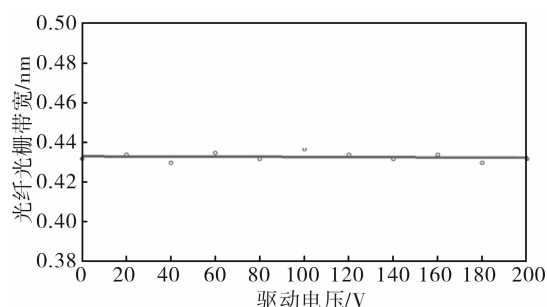


图7 不同电压下布拉格光纤光栅的带宽

Fig. 7 FBG bandwidths at different voltages

图7中的点表示实际测量值,通过最小二乘法对这些点进行拟合,得到图中所示的直线。从图中可以看出,布拉格光纤光栅的带宽一直保持在0.435 nm左右,并没有随着驱动电压的变化而变化。

## 4 结论

本文介绍了一种基于压电陶瓷的激光频率调谐技术。该方法是将压电陶瓷与光纤光栅激光器的布拉格光栅进行粘结,通过调整压电陶瓷的驱动电压来实现波长(即频率)的调谐。同时,为了校正压电陶瓷输入电压与输出位移之间的非线性,采用虚拟仪器技术获得其特性曲线和补偿曲线,使系统呈线性频率调谐,以提高测量精度。实验结果表明,当驱动电压变化126 V时,可实现0.8 nm(即100 GHz)的调谐范围,且调谐速度快、调谐线性好,满足在2 m~18 m的测量范围内,测距精度能达到0.02 mm+10  $\mu$ m/m的测量要求。

## 参考文献:

[1] Kakuma S, Ohba R. Atomic transition spectra mark-

ers for accurate frequency-modulated continuous-wave laser distance-meter Original[J]. Research Article Optics Communications, 2009, 239 (4-6): 445-454.

[2] Xu Sheng, Xu Yuanming. Scheme for nonlinear frequency modulated signal cancelling system[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 4896-4900.

[3] Jin Jie, Ouyang Lixia, Zhang Yan. Research on laser wavelength tuning method of fiber grating external cavity semiconductor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(4): 437-440.

金杰, 欧阳丽霞, 张妍. 光纤光栅外腔半导体激光器波长调谐方法研究[J]. 红外与激光工程. 2006, 35 (4): 437-440.

[4] Supplee J M, Whittaker E A, Lenth W. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy[J]. Applied Optics, 2013, 33(27): 6294-6302.

[5] Yavuz D D. High-frequency modulation of continuous-wave laser beams by maximally coherent molecules[J]. Physical Review A, 2007, 76(1): 011805 (R).

[6] Moesta K T, Kaschke M, Gaida G, et al. 670 high frequency modulation improves diagnostic value of dual wavelength laser transillumination of the breast-a pilot study[J]. European Journal of Cancer, 2005, 31: S140.

[7] Li Qianghua, Li Chunfei, Li Junqing, et al. Fiber-grating sensor using dynamic PZT modulation[J]. Optics Communications, 2002, 211(1-6): 129-133.

[8] Li Bin. Reserch of fiber grating external cavity semiconductor lasers intelligent tuning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.

李彬. 光纤光栅外腔半导体激光器智能调谐的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

[9] Xu Q, Yan M, Xu C, et al. Direct modulation of multimode fiber Bragg grating external cavity lasers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53: 1615-1618.

[10] Liu Jianfang, Yang Zhigang, Fan Zunqiang, et al. Precise PZT linear step actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(1): 65-72.

刘建芳, 杨志刚, 范尊强, 等. 压电直线精密驱动器研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 65-72.

[11] Burianova L, Hana P, Pustka M. Non-linear properties of PZT ceramics in the wide temperature range

- [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014 (12):2405-2409.
- [12] Zhao Li, Zhuang Ling, Zhang Chunlin. Piezoelectric ceramics control system and its application in lasers [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(5): 550-552.  
赵丽, 壮凌, 张春林. 压电陶瓷控制系统及其在激光器中的应用[J]. 压电与声光, 2007, 29(5): 550-552.
- [13] Guyomar D, Aurelle N, Eyraud L. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior. Application to Langevin Transducer[J]. Journal de Physique III, 1997, 7 (6):1197-1208.
- [14] Qin Wengang, Chen Zhichao, Wu Wei. The research of piezoelectric ceramic linearization based on labview [J]. Theory and Method, 2008, 27(5): 4-5.  
秦文罡, 陈志超, 吴威. 基于虚拟仪器的压电陶瓷线性化研究[J]. 理论与方法, 2008, 27(5): 4-5.
- [15] Suo Z, Kuo C, Barnett D, et al. Fracture mechanics for piezoelectric ceramics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2013, 40(4):739-765.