第 25 卷 第 6 期
2005 年 6 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 25, No. 6
June, 2005

文章编号：0253-2239(2005)06-799-4

精确标定光弹调制器的新方法*

曾爱军[1,2] 王向朝[1] 李代林[1] 黄立华[1] 董作人[1]

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所，上海 201800
2 中国科学院研究生院，北京 100039)

摘要： 针对现有光弹调制器标定方法的不足，提出了一种精确标定光弹调制器的新方法。首先利用起偏器、波片、光弹调制器和检偏器构成标定光路，通过寻找探测信号基频分量的极大值进行粗略标定，使光弹调制器的峰值延迟量处在 1.841 rad 附近。然后撤走波片形成光弹调制器的精确标定光路，在检偏器旋转 90°前后获得探测信号的直流分量和二次谐波分量。最后利用这两种探测信号的直流分量和二次谐波分量精确地计算出光弹调制器的峰值延迟量。实验验证了此光弹调制器标定方法，实验结果表明其标定误差仅为 0.7%。在此光弹调制器标定方法中，光弹调制器的标定精度和入射光强、电路参量无关。同时，标定要求的峰值延迟量小，非常适合于光弹调制器在其使用波长范围长波段的标定。

关键词： 偏振；光弹调制器；标定；峰值延迟量；贝塞尔函数

中图分类号：O436.3 文献标识码：A

A New Method to Calibrate Accurately a Photoelastic Modulator

Zeng Aijun[1,2] Wang Xiangzhao[1] Li Dailin[1] Huang Lihua[1] Dong Zuoren[1]

(1 *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201800
2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039)

Abstract: A new method to calibrate accurately a photoelastic modulator is proposed to compensate for the shortcomings of current calibration methods. Firstly, the photoelastic modulator is calibrated roughly to locate its peak retardation around 1.841 rad using the fundamental component's maximum of the detection signal in an optical system for calibration which is composed of polarizer, waveplate, photoelastic modulator and analyzer. Then the waveplate is taken away to form an optical system for accurate calibration. Before and after the analyzer is rotated, the direct current and secondary harmonic components of the detection signals are obtained to calculate the peak retardation of the photoelastic modulator. The accurate calibration for the photoelastic modulator is realized and its precision is independent of the incident intensity and the circuit parameters. The calibration method was verified by experiments. The calibrated error of the method is less than 0.7%. The peak retardation of the photoelastic modulator is small in the calibration, so the photoelastic modulator can be calibrated in the long-wave band of its spectral range using this calibration method.

Key words: polarization; photoelastic modulator; calibration; peak retardation; Bessel function

1 引 言

光弹调制器是一种基于光弹性效应的相位调制器件，具有通光孔径大、全视场角大、调制频率高、使用波段宽、驱动电压低、功耗小等优点[1]，被广泛应用在高精度的偏振调制和偏振检测技术中[2,3]。在光弹调制器中，电压驱动的压电材料（如压电陶瓷）在各向同性的光学材料（如熔石英）上施加周期性变化的机械力使光学材料产生共振而形成周期性的光弹性效应，即该光学材料产生周期性变化的双折射，因此光通过光弹调制器后其延迟量被调制[4]。一般

* 国家 863 计划（2002AA404050）和上海市纳米专项（0214nm091，0359nm04）资助课题。

作者简介：曾爱军（1975～），男，湖南人，博士研究生，主要从事精密光电检测技术与光学仪器的研究。
E-mail：aijunzeng@siom.ac.cn

收稿日期：2004-09-15；收到修改稿日期：2004-11-12

情况下，光弹调制器的峰值延迟量调整为 $\pi/2$ 或 π，即作为一个可变 1/4 波片或半波片使用。

在制造加工后以及使用过程中，光弹调制器的精确标定是非常必要的。标定光弹调制器通常采用基频分量为零、二次谐波分量为零和直流分量恒定三种方法[5]，近些年有人提出了单光子计数[6]和直接测量直流分量[7]的两种光弹调制器标定方法。在基频分量、二次谐波分量为零两种标定方法中，光弹调制器标定时的峰值延迟量大于 π。对于特定的光弹调制器，在其使用波长范围的长波段，它的峰值延迟量小于 π，则在此波段范围内无法采用这两种方法进行标定。在直流分量恒定和直接测量直流分量两种标定方法中，需要对直流分量的某一个非零值进行判断，故光强的波动会严重影响标定精度。采用单光子计数技术标定光弹调制器的光学系统复杂，此标定方法并不实用。针对上述各种标定方法的不足，本文提出了一种精确标定光弹调制器的新方法，其光学系统及信号处理简单且标定精度和入射光强、电路参量无关，同时要求的峰值延迟量小，非常适合于光弹调制器在其使用波长范围长波段的标定。

2 标定原理

粗略标定光路如图 1 所示，激光束经过起偏器、波片、光弹调制器和检偏器后由光电探测器接收。起偏器和检偏器的通光轴相互垂直并和光弹调制器的振动轴成 45°夹角，波片的快轴方向和光弹调制器的振动轴相同。光通过光弹调制器时，在振动轴方向及其垂直方向上两偏振分量之间的延迟量为[4]

$$\phi(t) = \alpha_0 \sin \omega t, \tag{1}$$

其中 α_0 为峰值延迟量，它是压电控制电路的峰值电压的线性函数。

在上述标定光路中，光电探测器探测的光强为[5]

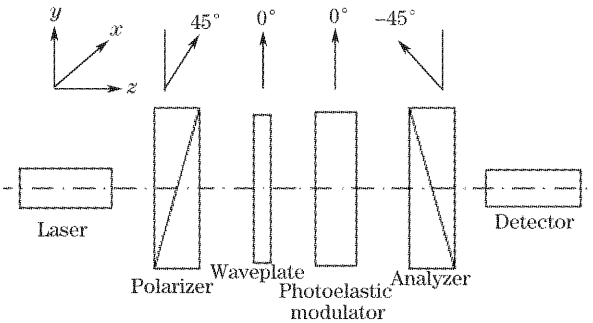

图 1 光弹调制器的粗略标定光路

Fig. 1 Optical system for rough calibration of photoelastic modulator

$$I = I_0[1 - \cos B\cos(\alpha_0 \sin \omega t) + \sin B\sin(\alpha_0 \sin \omega t)], \tag{2}$$

I_0 为入射光强，B 为波片产生的延迟量。(2) 式进行傅里叶级数展开为[8,9]

$$I = I_0[1 - \cos B \cdot \mathrm{J}_0(\alpha_0) + 2\sin B \cdot \mathrm{J}_1(\alpha_0) \cdot \sin \omega t - 2\cos B \cdot \mathrm{J}_2(\alpha_0) \cdot \cos 2\omega t + \cdots]/2, \tag{3}$$

$\mathrm{J}_k(\alpha_0)$，$k = 0,1,2$ 分别为零阶、一阶、二阶贝塞尔函数。可见，探测光强包含直流分量、基频分量、二次谐波分量以及高次谐波分量，其中探测光强的基频分量 I_{1f} 为

$$I_{1f} = I_0 \sin B\mathrm{J}_1(\alpha_0)\sin \omega t. \tag{4}$$

探测光强光电转换后经过前置放大电路、滤波电路后分为直流分量和交流分量，利用光弹调制器压电控制电路输出的另一路调制信号作为锁相放大电路的参考信号，则交流分量经过锁相放大电路后得到探测信号的基频分量 V_{1f}：

$$V_{1f} = M_{ac}\eta I_0 \mathrm{J}_1(\alpha_0)\sin B, \tag{5}$$

其中 M_{ac} 是交流分量的电路增益，η 是光电转换系数。当 α_0 为零时 $\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 为零，即探测信号的基频分量为零。$\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 随着 α_0 的增加而逐渐增大，当 α_0 为 1.841 *rad* 时，$\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 达到极大值，探测信号的基频分量也达到极大值。因此，可以利用基频分量的极大值对光弹调制器进行标定。即从零开始逐步增加光弹调制器压电控制电路的峰值电压，探测信号的基频分量也相应地从零开始逐渐增大，当峰值电压增加到一定值时基频分量达到极大值，此时光弹调制器的峰值延迟量为 1.841 *rad*。

由贝塞尔函数的变化特性可知，$\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 在其峰值（$\alpha_0 = 1.841$）附近的变化较为缓慢。当 α_0 在 1.673～2.010范围内变化，即 α_0 相对变化 9.1%时，$\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 的变化范围为 0.5760～0.5819，也就是说 $\mathrm{J}_1(\alpha_0)$ 的相对变化仅为 1%。由(5)式可知，利用基频分量的极大值对光弹调制器进行标定时，光强波动 1%将产生 9.1%的标定误差，故它只能是一种粗略标定。

采用基频分量的极大值进行粗略标定后，不妨设实际的峰值延迟量为 $\alpha_{0\max}$。若将粗略标定光路（即图 1）中的波片撤走，形成如图 2(a)所示的精确标定光路，则探测光强变为

$$I = I_0[1 - \mathrm{J}_0(\alpha_{0\max}) - 2\mathrm{J}_2(\alpha_{0\max}) \cdot \cos 2\omega t + \cdots]/2. \tag{6}$$

光弹调制器压电控制电路的调制信号倍频后作为锁相放大电路的参考信号，探测信号经过信号处理电路

后获得其直流分量 V_{dc1} 和二次谐波分量 V_{2f1}，且有

$$\begin{cases} V_{dc1} = M_{dc}\eta I_0[1-J_0(\alpha_{0max})]/2, & (7) \\ V_{2f1} = M_{ac}\eta I_0 J_2(\alpha_{0max}), & (8) \end{cases}$$

其中 M_{dc} 为直流分量的电路增益。为了消除光强波动的影响，将(7)式和(8)式作除法运算，得到直流分量和二次谐波分量的比值 R_1

$$R_1 = \frac{V_{dc1}}{V_{2f1}} = \frac{M_{dc}}{M_{ac}} \cdot \frac{1-J_0(\alpha_{0max})}{2J_2(\alpha_{0max})}. \quad (9)$$

比值 R_1 只和延迟量 α_{0max}、直流分量和二次谐波分量的电路增益 M_{dc} 和 M_{ac} 相关，而与入射光强无关。

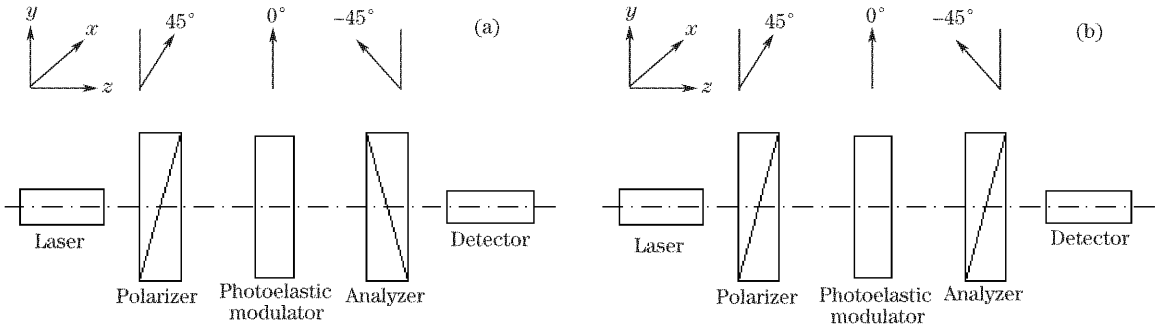

图 2　光弹调制器的精确标定光路。(a)检偏器旋转之前，(b)检偏器旋转之后

Fig. 2　Optical systems for accurate calibration of photoelastic modulator.

(a) Before and (b) after the analyzer is rotated

将图 2(a)中的检偏器旋转 90°，使检偏器和起偏器的通光轴相互平行，即形成图 2(b)所示的精确标定光路。探测光强变为[10]

$$I = I_0[1+J_0(\alpha_{0max}) + 2J_2(\alpha_{0max}) \cdot \cos 2\omega t + \cdots]/2, \quad (10)$$

其探测信号的直流分量 V_{dc2}、二次谐波分量 V_{2f2} 分别为

$$\begin{cases} V_{dc2} = M_{dc}\eta I_0[1+J_0(\alpha_{0max})]/2, & (11) \\ V_{2f2} = M_{ac}\eta I_0 J_2(\alpha_{0max}). & (12) \end{cases}$$

将(11)式和(12)式做除法运算，得到直流分量和二次谐波分量的比值 R_2：

$$R_2 = \frac{V_{dc2}}{V_{2f2}} = \frac{M_{dc}}{M_{2f}} \cdot \frac{1+J_0(\alpha_{0max})}{2J_2(\alpha_{0max})}. \quad (13)$$

将(13) 式和(9) 式相除，得到其比值 R

$$R = \frac{V_{dc2} \cdot V_{2f1}}{V_{dc2} \cdot V_{dc1}} = \frac{1+J_0(\alpha_{0max})}{1-J_0(\alpha_{0max})}. \quad (14)$$

从(14)式可以看出，R 只和零阶贝塞尔函数相关，而根据贝塞尔函数的性质有

$$J'_0(\alpha_0) = -J_1(\alpha_0), \quad (15)$$

因此当基频分量处于极大值附近时，α_0 的微量变化将引起 R 的显著变化。通过获得图 2 中探测信号的直流分量和二次谐波分量，则可以利用(14)式精确地数值计算出 α_{0max}，从而实现光弹调制器的精确标定，且其标定精度和光强、电路参量无关。

3　标定实验

标定光弹调制器的实验光路如图 1、图 2 所示，光源采用带准直透镜的半导体激光器，其波长为 785 nm。光弹调制器为 Hinds 公司 PEM-90 系列的Ⅰ/FS50型光弹调制器，调制频率为50 kHz，其压电材料的驱动电压由配套的控制器提供和调节，同时控制器可输出 50 kHz、100 kHz 的参考信号。Ⅰ/FS50型光弹调制器已经采用基频分量为零方法进行精确标定，则控制器显示的峰值延迟量可以作为标定实验的真值。起偏器和检偏器都为格兰-泰勒棱镜，波片为 700～1100 nm 波段内消色差的 1/4 波片，探测器为光电二极管。光电二极管输出的探测信号经过前置放大电路进入信号调理器，从信号调理器输出的直流信号直接进入数据采集卡，而从信号调理器输出的交流信号经过锁相放大器后得到基频分量或二次谐波分量再进入数据采集卡，计算机对采集的直流分量、基频分量和二次谐波分量进行处理。

调整起偏器的通光轴、波片的快轴、光弹调制器的振动轴和检偏器的通光轴的方位如图 1 所示。锁相放大器参考信号的频率为 50kHz。通过调节控制器增加光弹调制器的峰值延迟量，使光弹调制器的峰值延迟量从 1.759 rad 逐渐增加到 1.910 rad 时(处于基频分量极大值对应的峰值延迟量附近)，计算机采集的基频分量值 V_{1f} 如表 1 所示。

从实验数据可以看出，基频分量的变化不明显，仅在范围 7.370～7.393 V 内变化。同时，基频分量达到极大值的峰值延迟量不是 1.841 rad 而是 1.791 rad，这主要是光强波动的影响所导致。

表 1 粗略标定的实验数据

Table 1 Data in the rough calibration

α'_0/rad	V_{1f}/V	α'_0/rad	V_{1f}/V
1.759	7.370	1.841	7.386
1.772	7.384	1.854	7.387
1.791	7.393	1.872	7.387
1.810	7.382	1.891	7.383
1.822	7.383	1.910	7.374

从图 1 所示的标定光路中撤去波片，形成如图 2(a)所示的标定光路，同时锁相放大器改用 100 kHz的参考信号。将光弹调制器的峰值延迟量再调节到 1.791 rad，计算机采集的探测信号直流分量 V_{dc1}、二次谐波分量 V_{2f1} 以及它们的比值 R_1 如表 2 所示。

表 2 精确标定的实验数据

Table 2 Data in the accurate calibration

V_{dc1}/V	V_{2f1}/V	R_1	V_{dc2}/V	V_{2f2}/V	R_2
2.580	3.737	0.6922	5.240	3.743	1.3999
2.569	3.716	0.6913	5.248	3.745	1.4013
2.575	3.727	0.6909	5.237	3.739	1.4006
2.593	3.741	0.6931	5.219	3.740	1.4003
2.600	3.744	0.6944	5.243	3.740	1.4003
2.581	3.728	0.6923	5.268	3.762	1.4003
2.579	3.729	0.6916	5.261	3.760	1.3992
2.583	3.732	0.6921	5.246	3.748	1.3997
2.585	3.732	0.6927	5.253	3.758	1.3978
2.601	3.747	0.6942	5.269	3.768	1.3984

将图 2(a)中的检偏器旋转 90°形成如图 2(b)所示的标定光路，计算机采集的探测信号直流分量 V_{dc2}、二次谐波分量 V_{2f2} 以及它们的比值 R_2 如表 2 所示。利用表 2 中的数据得到 R_2 和 R_1 的平均值后计算出它们的比值 R 为 2.0216，运用(14)式计算出 R 对应的峰值延迟量为 1.8034 rad，则光弹调制器的标定误差仅为 0.7%。由此可见，此标定方法能实现光弹调制器的精确标定。

4 结 论

本文提出了一种精确标定光弹调制器的新方法。首先采用探测信号基频分量的极大值进行粗略标定，使光弹调制器的峰值延迟量处在 1.841 rad 附近。然后改变标定光路并获得探测信号的直流分量和二次谐波分量，利用直流分量和二次谐波分量精确计算出光弹调制器的实际峰值延迟量，从而实现了光弹调制器的精确标定。本文用实验验证了此光弹调制器标定方法，实验结果表明其标定精度达到了 0.7%。本文提出的光弹调制器标定方法具有光学系统简单、标定精度和入射光强、电路参量无关的特点，同时要求的峰值延迟量小，非常适合于光弹调制器在使用波长范围长波段的标定。

参 考 文 献

1 J. Badoz, M. P. Silverman, J. C. Canit. Wave propagation through a medium with static and dynamic birefringence: theory of the photoelastic modulator[J]. *J. Opt. Soc. Am.* (*A*), 1990, **7**(4): 672～682

2 Yohji Shindo. Application of polarized modulation techniche in polymer science[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(12): 3369～3384

3 Arnaud Dubois. Phase-map measurements by interferometry with sinusoidal phase modulation and four integrating buckets[J]. *J. Opt. Soc. Am.* (*A*), 2001, **18**(8): 1972～1979

4 James C. Kemp. Piezo-optical birefringence modulators: New use for a long-known effect[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(8): 950～954

5 J. C. Cheng, L. A. Nafie, S. D. Allen *et al.*. Photoelastic modulator for the 0.55～13 μm range[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **15**(8): 1960～1965

6 R. A. Cline, W. B. Westerveld, J. S. Risley. A new method for measuring the retardation of a photoelastic modulator using single photon counting techniques[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**(5): 1169～1174

7 Zhou Jun, Su Guiying, Li Guohua. A new method for calibration of photoelastic modulator[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2001, **30**(1): 81～84 (in Chinese)
周 军，苏桂英，李国华. 光弹调制器定标新方法[J]. 光子学报，2001，**30**(1)：81～84

8 Sheng Zhongyan, Zhou Kejiang. A differential optic phase tracing method in fiber optic gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 352～356 (in Chinese)
盛钟延，周柯江. 光纤陀螺中一种光相位差跟踪方法[J]. 光学学报，2001，**21**(3)：352～356

9 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. A laser diode interferometer with a feedback control system for realtime microvibration measurements[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 402～406 (in Chinese)
宋 松，王向朝，王学锋 等. 半导体激光微小振动实时反馈式干涉测量仪[J]. 中国激光，2002，**A29**(5)：402～406

10 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. An new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1121～1123 (in Chinese)
王 伟，李国华，吴福全 等. 测量波片延迟量和快轴方位的新方法[J]. 中国激光，2003，**30**(12)：1121～1123