

文章编号 1004-924X(2007)11-1678-08

几种波片位相延迟测量方法的比较

张志勇, 邓元勇, 王东光, 孙英姿, 玄伟佳

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要:建立了用于波片位相延迟测量的高精度多功能测试系统,实现了在同一测试系统上应用不同的测试方法,使测试具有可比性。对光谱扫描法、Soleil补偿器法及两种光强法进行了比较测量,并结合测试结果对各种方法进行了系统的误差分析。分析结果表明,对本测试系统而言,光谱扫描法适于测量 $\lambda/2$ 波片,测量精度主要由单色仪的精度所决定,其误差 $<0.032\%$;Soleil补偿器法测量精度主要由Soleil补偿器精度决定,其误差 $<0.18\%$;光强法误差与待测波片的延迟量有关,且测试光路与偏振器的缺陷对测量精度影响较大。光谱扫描法与Soleil补偿器法测量 $\lambda/2$ 波片的结果在误差范围内相符,光强法测量结果产生较大差异的原因来自光路、偏振器及方法本身的缺陷。实验结果为不同条件下选择最佳测量方法提供了参考依据。

关键词:应用光学;波片;位相延迟;误差分析

中图分类号:O436.3 **文献标识码:**A

Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation

ZHANG Zhi-yong, DENG Yuan-yong, WANG Dong-guang, SUN Ying-zi, XUAN Wei-jia

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to optimize the measuring methods of waveplate retardation and determine the discrepancy in experimental results from different measuring methods and instruments, a high-precision multifunctional experimental system was established to measure the waveplate retardation in different measuring methods and to make a comparison with these methods. A comparative experiment of scanning spectrum method, Soleil compensator method and two light intensity measuring methods was carried out. Combined with the experimental results, the errors of these methods were analyzed. The results show that the scanning spectrum method is appropriate for measuring $\lambda/2$ waveplate with error less than 0.032% , whose measurement accuracy is mainly determined by the accuracy of monochromator; The error of Soleil compensator method is less than 0.18% , which primarily comes from the accuracy of Soleil compensator, and for the measurement of $\lambda/2$ waveplate, scanning spectrum method and Soleil compensator method can verify each other within the error limits; The error of the light intensity measuring methods is related to the sample waveplate retardation, defects of optical path ar-

收稿日期:2007-04-25;**修订日期:**2007-08-01.

基金项目:国家自然科学基金资助课题(No. 10473016);中国科学院方向性资金资助项目(No. KJ CX2-T04);国家973资金资助项目(No. 2006CB806301)

rangement, polarizers and the defects from measuring methods.

Key words: applied optics; waveplate; retardation; error analysis

1 引言

波片是偏振光学技术中的重要元件,被广泛应用于光弹力学、现代光通讯技术、医疗诊断和物理学研究等诸多领域。在太阳物理研究领域,通过观测和分析太阳光的偏振状态可以得到太阳大气中磁场分布和演化等信息,以此可研究黑子、耀斑及日冕物质抛射(CME)等与磁场有关的太阳活动现象。现代太阳物理对磁场偏振测量精度要求甚高(10^{-3} 以上),而由于在太阳磁场测量设备的偏振分析器和滤光器中使用了大量波片,因而波片位相延迟精度将直接影响太阳磁场望远镜偏光系统的测量精度^[1]。随着研究的日益深入,人们对偏振测量精度提出了更高的要求,有些仪器,例如我国正在研制的大型空间太阳观测设备—空间太阳望远镜(SST),要求偏振测量精度达到 10^{-4} 以上^[2],这对波片的加工和测量精度都是一个挑战。因此,研究波片高精度测量方法有着极其重要的意义。

测量波片位相延迟的方法有很多,例如光强法、光谱扫描法、补偿法和调制法等,许多文献对这些方法已有所论述^[3-9]。然而值得注意的是,在实际测量中,来自不同的方法或不同的仪器的测量结果往往存在差异,有些结果之间的差异甚至超出了文献所述的误差范围。因此,确定产生测量差异的原因便成为亟待分析和解决的实际问

题。针对这个问题,并结合 SST 等项目对测试的具体需求,本文建立了一套高精度多功能测试系统,可以在该测试系统上用多种不同的方法测量波片的位相延迟,从而便于对不同的测量方法进行比较研究,以确定误差来源,优化测量方法。

利用该测试系统,本文对光谱扫描法,Soleil补偿器法及两种光强法进行了比较测量,并结合测试结果对上述方法的原理及误差来源进行了比较研究,分析了产生测量差异的原因。通过上述研究,总结出不同测量方法的适用条件,从而为不同实验条件下选择最佳测量方法提供了参考依据。

2 实验测试系统

测试系统如图 1 所示。为满足从可见光到近红外的多波段测试需求,测试系统采用具有连续谱的溴钨灯作为光源并配合以单色仪。光源配备的稳流电源使输出光强波动 $<0.14\%$ 。光源出射光经准直镜转化为平行光。起偏器和检偏器为两个 Glan 棱镜,能够保证测试系统从可见光到近红外都具有优秀的消光比。两个 Glan 棱镜及置于其间的待测样品分别安装在可以 360° 自由旋转的精密转台上,转台的精度优于 $1'$,可由计算机控制转动,并记录转动信息。

选用最大累计误差为 0.18% 的高精度

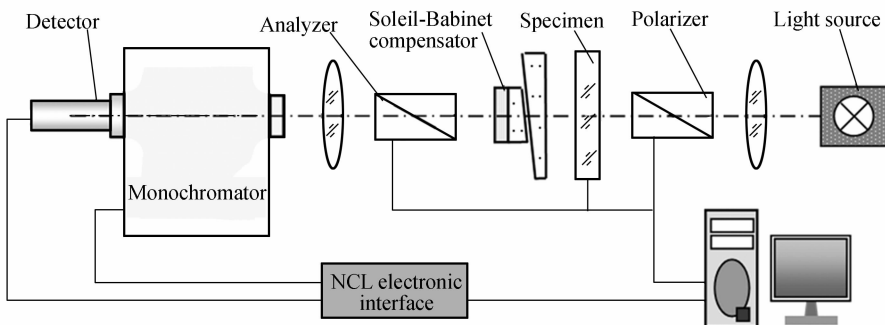


图 1 波片测试系统仪器设备及光路图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus and optical configuration for retardation measurements

Babinet-Soleil 补偿器。补偿器安装于精密平移台上,可以保证其移入、移出光路时位置不变。接收端选用的单色仪光谱精度为 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 。NCL 是与单色仪配套的数据采集系统,可准确读取最小电流信号为 0.1 nA 。计算机可以通过 NCL 实现对单色仪的控制,并记录由探测器获得的测量数据。本文所述实验是在可见光波段进行的,选用 EMI 9658R 型光电倍增管作为探测器,其阳极灵敏度可达 200 A/lm 。此外,为了避免市电系统不稳定对测试造成的干扰,所有的电子仪器都经由 UPS 稳压电源供电。光谱扫描法,补偿法和光强法等测量方法都可以在这套测试系统上进行对比测试。

3 几种延迟测量方法原理及误差分析

3.1 光谱扫描法

3.1.1 测量原理

光谱扫描法^[7]是利用波片延迟与入射波长的函数关系,通过改变系统入射光波长,记录不同波长系统透过光强从而测得位相延迟的方法。测试系统由起偏器和检偏器及置于其间的待测元件等构成。若以起偏器透振方向沿 x 轴,双折射器光轴方位角为 Ω ,延迟为 φ ,检偏器透振方向为 θ 方向,则系统 Jones 矩阵可表示为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} + j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\Omega & j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\Omega \\ j \sin \frac{\varphi}{2} \sin 2\Omega & \cos \frac{\varphi}{2} - j \sin \frac{\varphi}{2} \cos 2\Omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

若以强度为 I_0 的自然光入射,则系统出射光强可表示为:

$$I(\lambda) = \frac{1}{2} I_0 \cdot$$

$$\left\{ \sin^2 \frac{\varphi(\lambda)}{2} [\cos^2 (2\Omega - \theta) - \cos^2 \theta] + \cos^2 \theta \right\}, \quad (2)$$

因此,测得 Ω 、 θ 、 $I(\lambda)$ 及 I_0 值即可计算出该波长所对应的延迟值。这种方法便于测量不同波长对应的位相延迟,若辅以精密的单色仪便可以方便快捷地获得大量数据。但考虑到系统表面反射及吸收损失, I_0 不易准确测得,所以该方法只适于找到光强随波长变化规律而不易准确测得延迟值。

然而,对 $\lambda/2$ 波片情况则较为特殊,这里做进一步分析,式(2)对 φ 的一阶导数为:

$$\frac{dI}{d\varphi} = \frac{1}{4} I_0 \cdot \sin \varphi \cdot [\cos^2 (2\Omega - \theta) - \cos^2 \theta], \quad (3)$$

当 $\varphi = \pi$ 时, $\frac{dI}{d\varphi} = 0$ 。可见光谱扫描曲线中, $\lambda/2$ 波片在相应波长处光强值为最大或最小,所以仅从曲线极值所在位置便可精确确定波片在该波长处延迟为 π 。这为精确测量 $\lambda/2$ 波片提供了有效的办法。测量 $\lambda/2$ 波片时将起偏器与检偏器平行放置,待测元件光轴方位角为 45° ,即可获得最佳对

比度。透过光强随波长变化关系为:

$$I(\lambda) = \frac{I_0}{2} \cos^2 \frac{\varphi(\lambda)}{2} = \frac{I_0}{2} \cos^2 \frac{\pi \mu(\lambda) d}{\lambda}, \quad (4)$$

其中, μ 为双折射率, d 为波片的厚度。

若在一定波长带宽范围内,忽略 μ 随波长的变化,便可推算出波片在该带宽范围内不同波长处的延迟值:

$$\varphi(\lambda) = \frac{\pi \cdot \lambda_0}{\lambda}, \quad (5)$$

其中, λ_0 为取光强最小值时的对应波长, λ 为所求延迟的波长。

3.1.2 误差分析

这里主要分析 $\lambda/2$ 波片测量误差,因此主要分析各测量参量对光谱曲线中最小值位置的影响。(1)角度取值对测量的影响:

由式(3)可见, Ω 及 θ 的取值并不影响最小值的位置,但二者的取值对光强读数有一定的影响。式(2)对 Ω 及 θ 求偏导数得:

$$\frac{\partial I}{\partial \theta} = \frac{I_0}{2} \cdot \left[\sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \sin 2(2\Omega - \theta) - \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \sin 2\theta \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial \Omega} = -I_0 \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \sin 2(2\Omega - \theta), \quad (7)$$

注意到,当 $\Omega = 45^\circ$ 及 $\theta = 0^\circ$ 时,有 $\frac{\partial I}{\partial \theta} = \frac{\partial I}{\partial \Omega} = 0$,可见

此时两角度对光强的影响最小。

(2) 偏振器消光比的影响:

以 α 表示偏振器的消光比,当 $\theta=0^\circ$ 时,系统的透过光强可以近似表示为:

$$I(\alpha) = \frac{I_0}{2} [(2\alpha^2 - 2\alpha + 1) - \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot (2\alpha - 1)^2], \quad (8)$$

由式(8)可见,当 $\varphi=\pi$ 时,系统的透过光强仍取得最小值,只是此时的最小值不为 0。因此偏振器的消光比并不影响最小值的位置。

(3) 带宽对测量的影响:

实际光强测量值是一定带宽的积分结果,可以由式(4)积分来表示:

$$I(\Delta\lambda) = \frac{I_0}{2} \cdot \int_{\Delta\lambda} \cos^2 \frac{\pi\mu d}{\lambda} \cdot d\lambda. \quad (9)$$

单色仪狭缝的带宽分布约 2.7 nm/mm,实际测量中狭缝宽取值约为 0.5 mm。以 $\lambda=637.8$ nm 处的 $\lambda/2$ 波片为例,用计算机计算并绘制存在一定带宽的光强曲线与理想条件下光强曲线进行比较(图 2),可见实验条件下的带宽并未影响光强曲线最小值位置。

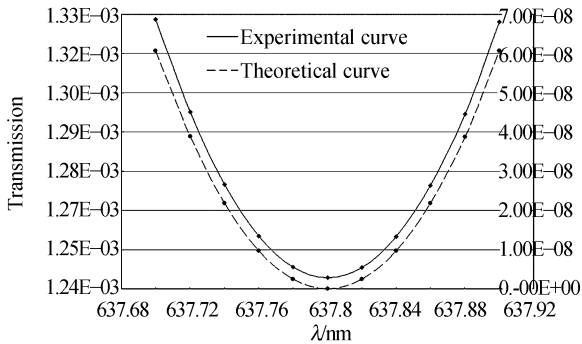


图 2 实验带宽条件下光谱曲线与理想条件下光谱曲线的比较

Fig. 2 Comparison of spectrum curve between theoretical and experimental bandwidths

(4) 单色仪光谱精度对测量的影响:

单色仪光谱精度可以视为单色仪对最小值的光谱标定精度,因而可表示为:

$$\Delta\varphi = -2\pi\mu d \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = -\varphi \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (10)$$

单色仪的光谱精度 < 0.2 nm,仍以 637.8 nm 的 $\lambda/2$ 波片为例,可得到相对误差 $< 0.032\%$ 。

(5) 光源强度波动对测量的影响:

为充分估算误差,设由于光强发生了最大波动,使得真实延迟值为 φ' 的位置成为光强的最小值,用下式表示:

$$I(\varphi')(1 - \frac{\Delta I_0}{I_0}) = I(\pi). \quad (11)$$

由式(7),代入 Glan 棱镜消光比 $\alpha \approx 10^{-5}$ 及 $\Delta I_0/I_0 \leq 0.14\%$,计算可得误差 $< 0.011\%$ 。而光源波动属于偶然误差,所以利用计算机处理光谱曲线或进行多次测量平均都会进一步降低该项误差。

综上所述,光谱法测 $\lambda/2$ 波片的精度主要取决于单色仪光谱精度;对本测试系统而言,综合各项误差 $< 0.032\%$ 。

3.2 补偿法

3.2.1 测量原理

补偿法是利用位相补偿器件将由待测元件产生的位相延迟补偿为 0(或 2π),从而测量波片位相延迟。通常有 $\lambda/4$ 波片补偿法(Senamont 法和 Tardy 法)和 Soleil 补偿器法。 $\lambda/4$ 波片补偿法由于需要已知某波长处精确的 $\lambda/4$ 波片,而且测不同波长的位相延迟需要不同波长的 $\lambda/4$ 波片,所以此方法在高精度测量中并不可取,这里不再赘述。而 Soleil 补偿器的位相延迟连续可调,适用于不同波长延迟的测量,下面讨论这种方法。测试系统由起偏器、检偏器、待测元件和 Soleil 补偿器构成。通常起偏器和检偏器正交放置,Soleil 补偿器的光轴与待测元件的光轴垂直且与起偏器的夹角为 45° 。若以 φ_s 表示 Soleil 补偿器的延迟,则系统的透过光强可表示为:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cdot \sin^2 \frac{\varphi - \varphi_s}{2}, \quad (12)$$

上式可见,当 $\varphi = \varphi_s$ 时,系统透过光强最小。因此测量时具体操作是,调整 Soleil 补偿器使系统消光,记录此时 Soleil 的光楔位置读数为 t ;然后将待测元件移出光路,对 Soleil 进行自定标,即将 φ_s 分别调整到 0 和 2π ,将对应光楔位置读数分别记作 t_0 及 $t_{2\pi}$,则待测波片的延迟值为:

$$\varphi = \frac{t - t_0}{t_{2\pi} - t_0} \times 360^\circ. \quad (13)$$

Soleil 补偿器法仅需测量相对的光强,对光路及探测仪器有一定的宽容性。在寻找消光位置时采用“等偏离法”^[10]以进一步提高测量精度。

3.2.2 误差分析

Soleil 补偿器法的误差分析在文献[10]中有

详细的推导,故这里仅给出结论,见表 1。其中 Ω_s 表示 Soleil 补偿器光轴与起偏器透光轴的夹角。

表 1 Soleil 补偿器法的各项误差

Tab. 1 Measuring errors of Soleil compensator method

消光比	带宽	θ	Ω_s	Ω^*	Soleil * *
忽略	忽略	忽略	忽略	0.017°	0.18%

* 此项误差与待测元件延迟有关,当 $\varphi=90^\circ$ 时,影响最大, $\Delta\varphi=0.017^\circ$; 当 $\varphi=180^\circ$ 时,则影响可以忽略。

* * 此项误差系对 1 个波长而言,见文献[10]。

误差分析表明, Soleil 补偿器法测量误差主要来自补偿器自身精度。对本测试系统而言,测量误差 $<0.18\%$ 。

3.3 光强测量法

3.3.1 测量原理

所谓光强测量法是通过测量测试系统透过的光强值,利用透过的光强与待测元件位相延迟关系计算出待测元件延迟值。测试系统构成与光谱扫描法相同,系统出射光强表达式同式(2)。式中 Ω 和 θ 是两个最活跃的量,容易改变并准确测量。因此理论上讲,为避开对 I_0 的测量,可任意测定两组不同的 Ω 和 θ 的光强值 I_1 及 I_2 ,即可求出待测元件的延迟,其结果可以表示为:

$$\varphi = 2\arcsin \left(\frac{I_2 \cos^2 \theta_1 - I_1 \cos^2 \theta_2}{I_1 \cdot [\cos^2(2\Omega_2 - \theta_2) - \cos^2 \theta_2] - I_2 \cdot [\cos^2(2\Omega_1 - \theta_1) - \cos^2 \theta_1]} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

式(14)是光强法的通解。当保持 θ 不变,改变波片方位角 Ω 进行测量的方法为旋转待测波片法;而当保持 Ω 不变,改变 θ 的测量方法为旋转检偏器法。下面简述这两种常用方法的原理。

(1) 旋转待测波片法:

旋转波片法通常采用读取旋转过程中光强的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} 的办法,从而可以避开对光轴方位角 Ω 的测量误差。对式(2)分析可知,当 $\Omega = \frac{\theta}{2}$ 时,系统光强取得最大值;当 $\Omega = \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}$ 时,光强取得最小值,则波片的位相延迟 φ 可表示如下^[11-12]:

$$\varphi = 2\arcsin \sqrt{\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} \cdot \tan^2 \theta}}, \quad (15)$$

其中, $\theta \neq 90^\circ$ 。

(2) 旋转检偏器的方法:

旋转检偏器的方法通常取 $\Omega = 45^\circ$, θ 分别取 0° 和 90° , 因为误差分析表明此时由角度测量造成的误差最小(详见误差分析)。分别记录 $\theta = 0^\circ$ 和 90° 时的光强为 I_{\parallel} 及 I_{\perp} , 则波片的位相延迟 φ 可表示为^[13]:

$$\varphi = 2\arctan \sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}}. \quad (16)$$

这两种测试方法的优点是便于实现计算机控制和数据的采集及处理,测试速度快。采用多次测量及曲线拟合等办法可以有效降低光源波动和其它偶然误差的影响。

3.3.2 误差分析

(1) 各参量测量误差对测量结果的影响:

分析各参量误差对测量结果的影响可以从式(14)出发,分别考察当各量存在微小变化时得到的延迟测量结果与理论结果相对照,并以二者差值来表示各量误差对测量结果的影响。由公式可见,各项误差比较复杂不但与各个参量的取值有关,而且与待测波片的延迟 φ 有关,因此这里仅针对常用的 $\lambda/4$ 与 $\lambda/2$ 波片,分析式(15)和式(16)两种方法的误差。代入测试系统的精度,转台精度 $\Delta\theta, \Delta\Omega \leq 1'$ 光源强度波动为 $\Delta I_0/I_0 \leq 0.14\%$, 由此得出误差分析结果列表如下:

表 2 旋转波片法的误差

Tab. 2 Errors of rotating sample waveplate method

波片	θ (°)	I_{\max} 影响 (%)	I_{\min} 影响 (%)	θ 影响 (%)	综合误差 (%)
$\lambda/4$	0	0.089	0.089	0.000 003	0.18
	45	0.067	0.067	0.019	0.14
$\lambda/2^*$	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	0

* 实验条件下各参量测量误差对 $\lambda/2$ 波片测量结果影响很小,说明该项影响不是误差主要来源。

表 3 旋转检偏器法的误差

Tab. 3 Errors of rotating analyzer method

波片	I_{\perp} 影响 (%)	I_{\parallel} 影响 (%)	θ_1 影响 (%)	θ_2 影响 (%)	Ω 影响 (%)	综合误差 (%)
$\lambda/4$	0.045	0.045	0	0	0.000 03	0.064
$\lambda/2$	0	0	0	0.019	0.037	0.042

(2)带宽对测量的影响:

实测光强值可表示为, $I = \int_{\Delta\lambda} i(\lambda) \cdot d\lambda$ 。而

式(14)虽然是在理想情况下得到的,但可以将光强测量值理解为 $I' \approx i(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ 。因此,误差可以表示为, $\Delta\varphi = |\varphi(I) - \varphi(I')|$ 。仍以实测情况为例,在中心波长 $\lambda = 637.8 \text{ nm}$ 处,带宽对 $\lambda/4$ 波片误差 $< 0.0005\%$;对 $\lambda/2$ 波片误差 $< 0.07\%$ 。可见实验条件下带宽对测量的影响很小。

(3)偏振器的消光比对测量的影响:

当考虑偏振器的消光比时,系统透过光强的表达式非常复杂。仅以式(15)为例,当 $\theta = 0^\circ$ 时,系统透过光强最小值表达式同式(8),最大值则可近似表示为:

$$I_{\max}(\alpha) = \frac{I_0}{2}(2\alpha^2 - 2\alpha + 1), \quad (17)$$

若以 $\varphi(0)$ 表示理想偏振器的测量值, $\varphi(\alpha)$ 表示考虑消光比的测量值,则误差可以按下式估算:

$$\Delta\varphi = |\varphi(\alpha) - \varphi(0)|, \quad (18)$$

若按 $\alpha \approx 10^{-5}$ 计算,对旋转波片法而言,当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\lambda/4$ 波片误差 $< 0.002\%$, $\lambda/2$ 误差 $< 0.29\%$;当 $\theta = 45^\circ$ 时, $\lambda/4$ 波片误差 $< 0.2\%$, $\lambda/2$ 误差 $< 0.45\%$ 。对旋转检偏器法而言, $\lambda/4$ 波片误差很小可以忽略, $\lambda/2$ 误差 $< 0.29\%$ 。

(4)其它误差

综合考虑上述各项误差,不难发现测量误差最大者也仅仅为 0.46% ,但从第 4 节的测量数据看,实测差异远远大于上述分析结果。上述分析证明,上述各项误差不足以造成较大的测量差异,因而仅考虑上述测量误差对光强法还远不够全面。这是因为与光谱法和 Soleil 补偿器法不同,光强法需要读取绝对光强值,而诸如杂散光、光路的缺陷和光学元件的缺陷等许多复杂因素最终都将反映在光强测量值中,从而影响测量结果。由于这些误差非常复杂,定量分析将另文讨论,这里仅做定性描述:

(a)由测量方法缺陷带来的误差。测量 $\lambda/2$ 波片时,由待测波片自身带来的杂散光、仪器本底等原因使得光强的最小值 I_{\min} 和 $I_{//} \gg 0$,因而代入式(15)、(16)计算时将无法得到 180° 延迟量;

(b)Glan 棱镜应用于扩展光束光路中会导致消光比的损失^[14];

(c)Glan 棱镜的制造缺陷通常会带来 $3 \sim 6'$

的光束偏离^[14],若扩展光束光强分布不均匀(例如灯丝像分布),那么在旋转检偏器的时候会出现严重的问题。由第 4 节测量结果可见,此类误差对旋转检偏器的方法测量会造成巨大的影响。

综合上述分析可见,实验条件下各参量测量误差及带宽影响不是影响测量精度的主要因素,测量误差主要来源于 Glan 棱镜的光束偏离及其应用于扩展光束中的消光比损失等造成的影响。由此可见,光强法对光路及光学元件等要求较高,在本文所采用实验系统中难以获得较高的测量精度。

4 实验数据

实验中,在前述测试系统上用上述几种方法测量了两片样品的位相延迟。两测试样品标称值分别为: 630.2 nm 附近的 $\lambda/2$ 波片和 532.4 nm 附近的 $\lambda/4$ 波片。光谱扫描曲线见图 3,测量数据见表 4、5。

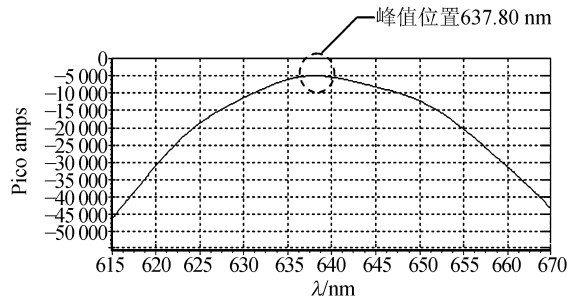


图 3 光谱法测 630.2 nm 附近 $\lambda/2$ 波片的扫描曲线
Fig. 3 Scan spectrum curve of $\lambda/2$ at 630.2 nm

前面误差分析表明,光谱法测量 $\lambda/2$ 波片的误差最小,因而可以作为参考标准,其它方法测量结果可以与之相比较。由测量结果可见,光谱法与 Soleil 补偿器法测得结果的偏差约为 0.19% ,两种方法在误差范围内符合很好,得到了相互印证。而两种光强法的测量结果比照光谱法及 Soleil 补偿器法测量结果差异较大。而且按照式(15)和(16)无法判断 $\lambda/2$ 波片的延迟是小于还是 $> 180^\circ$,因此在括号中给出了 $> 180^\circ$ 的情况。特别值得注意的是,由于 Glan 棱镜及光路缺陷对旋转检偏器法影响非常严重,导致 $\lambda/4$ 波片的测量出现错误,表明本测试系统不适用旋转检偏器法。

表 4 用不同方法测量 630.2 nm 附近 $\lambda/2$ 波片延迟结果Tab. 4 Measurement results of $\lambda/2$ waveplate at 630.2 nm

测量方法	仪器状态	位相延迟($^{\circ}$)	
		637.8 nm	630.2 nm
光谱扫描法	平行偏振器,波片 45° ,转动单色仪光栅,步长为 0.1 nm	180	182.17
Soleil 补偿器法	正交偏振器,波片 45° ,单色仪位置分别在 637.8 和 630.2 nm	180.67	182.82
旋转检偏器	波片与起偏器夹角 45° ,旋转检偏器		
	$I_{\perp} = 0.349\text{E}-04\text{A}, I_{//} = 0.296\text{E}-07\text{A}@637.8\text{ nm}$ $I_{\perp} = 0.332\text{E}-04\text{A}, I_{//} = 0.525\text{E}-07\text{A}@630.2\text{ nm}$	176.66 (183.34)	175.45 (184.55)
旋转波片法	起偏器与检偏器夹角 45° ,转动波片		
	$I_{\max} = 0.383\text{E}-04\text{A}, I_{\min} = 0.110\text{E}-07\text{A}@637.8\text{ nm}$ $I_{\max} = 0.377\text{E}-04\text{A}, I_{\min} = 0.223\text{E}-07\text{A}@630.2\text{ nm}$	177.25 (182.76)	176.02 (183.98)

表 5 用不同方法测量 532.4 nm 附近 $\lambda/4$ 波片延迟结果Tab. 5 Measurement results of $\lambda/4$ waveplate at 532.4 nm

测量方法	仪器状态	位相延迟($^{\circ}$)	
		525.0 nm	532.4 nm
Soleil 补偿器法	正交偏振器,波片 45° ,单色仪位置分别在 525.0 和 532.4 nm	91.72	90.63
旋转检偏器	波片与起偏器夹角 45° ,旋转检偏器		
	$I_{\perp} = 0.207\text{E}-04\text{A}, I_{//} = 1.004\text{E}-05\text{A}@525.0\text{ nm}$ $I_{\perp} = 0.270\text{E}-04\text{A}, I_{//} = 1.139\text{E}-05\text{A}@532.4\text{ nm}$	48.84 *	51.92 *
旋转波片法	起偏器与检偏器夹角 $\theta = 45^{\circ}$,转动波片		
	$I_{\max} = 0.887\text{E}-05\text{A}, I_{\min} = 0.276\text{E}-05\text{A}@525.0\text{ nm}$ $I_{\max} = 0.998\text{E}-05\text{A}, I_{\min} = 0.320\text{E}-05\text{A}@532.4\text{ nm}$	92.91	91.40
旋转波片法	平行偏振器 $\theta = 0^{\circ}$,转动波片		
	$I_{\max} = 0.206\text{E}-04\text{A}, I_{\min} = 1.009\text{E}-05\text{A}@525.0\text{ nm}$ $I_{\max} = 0.225\text{E}-04\text{A}, I_{\min} = 1.133\text{E}-05\text{A}@532.4\text{ nm}$	91.17	89.59

* 由于 Glan 棱镜及光路缺陷对旋转检偏器法影响非常严重,导致 $\lambda/4$ 波片的测量出现错误,表明本测试系统不适用旋转检偏器法。

5 结 论

在所采用的实验系统前提下,对光谱扫描法、Soleil 补偿器法和两种光强法进行了对比测试及误差分析。由于测试误差来源于同一测试系统,所以便于对各种误差和不同测量方法做系统的研究和比较。分析得出:(1)光谱扫描法测波片的误差源较少,在测量 $\lambda/2$ 波片时,只需要从光谱曲线的极值就可以准确测定延迟值,其测量误差主要来源于单色仪精度,误差 $< 0.032\%$ 。由于不需要测量绝对光强值,因而对光路有较大的宽容性,并可实现自动化测试。(2)Soleil 补偿器法测量延

迟与光谱法相似,只要求找到透过光强最小值位置,因而同样具有较好的宽容性。其误差主要由补偿器自身的精度决定,本实验的补偿器误差 $< 0.18\%$ 。对 $\lambda/2$ 波片测量结果显示 Soleil 补偿器法与光谱扫描法测试结果在其精度范围内很好地相互印证。但由于补偿法需要由等偏离法提高精度,因而不易实现计算机自动化测试。(3)各种光强法测量误差与待测波片的延迟量有关,虽然易于实现自动化测试,但是由于需要读取系统出射光的绝对光强值,因而对光路及光学元件等都有较高的要求,特别是 Glan 棱镜及光路的缺陷对旋转检偏器法影响非常严重。这些也正是光强法测量结果产生较大差异的原因所在,因而在本文所

述的实验条件下,光强法较难实现高精度测量。

系统的建立和完善方面给予的大力支持,以及国家天文台 CCD 实验室给予的诸多帮助。

致谢:感谢胡柯良、林佳本等同事在数据采集

系统建立和完善方面给予的大力支持,以及国家天文台 CCD 实验室给予的诸多帮助。

参考文献:

- [1] WANG D G, AI G X, SUN C H, *et al.*. Optical design of polarimeter for Space Solar Telescope [J]. *SPIE*, 2000, 4013: 616-624.
- [2] WANG D G, DENG Y Y, AI G X. Analysis of a new polarimeter for Space Solar Telescope [J]. *SPIE*, 2002, 4843: 406-413.
- [3] 苏美开, 宋连科, 李艺, 等. 波片测量中的补偿法[J]. *应用激光*, 1990, 10(5): 220-222.
SU M K, SONG L K, LI Y, *et al.*. Compensation method for measuring wave plates [J]. *Applied Lasers*, 1990, 10(5): 220-222. (in Chinese)
- [4] 朱莉, 李锡善, 徐文东. 用相位调制方法测量光盘应力双折射精度分析[J]. *光学学报*, 1995, 15(9): 1258-1265.
ZHU L, LI X SH, XU W D. Precision analysis of phase modulation method for measuring stress birefringence of optical disk substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(9): 1258-1265. (in Chinese)
- [5] WILLIAMS P A, ROSE A H, WANG C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6486-6472.
- [6] 王伟, 李国华, 吴福全, 等. 测量波片延迟量和快慢轴方位的新方法[J]. *中国激光*, 2003, 30(12): 1121-1123.
WANG W, LI G H, WU F Q, *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(12): 1121-1123. (in Chinese)
- [7] 金国藩, 李景镇. *激光测量学*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
JIN G F, LI J ZH. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [8] LI CH SH, CUI X, YAMAGUCHI I, *et al.*. Optical voltage sensor using a pulse-controlled electrooptic quarter waveplate [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2005, 54(1): 273-277.
- [9] 胡建明, 曾爱军, 王向朝. 精确测量 1/4 波片相位延迟量的新方法[J]. *中国激光*, 2006, 33(5): 659-662.
HU J M, CENG AI J, WANG X ZH. New method for measuring retardation of quarter-wave plate [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(5): 659-662. (in Chinese)
- [10] 王东光. 空间太阳望远镜偏振分析器的设计与研制[D]. 中国科学院, 2003.
WANG D G. *Design and Development of a Polarimeter for Space Solar Telescope*[D]. Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [11] ZHANG ZH Y, DENG Y Y, WANG D G, *et al.*. Near-infrared HeI 1083nm Stokes polarimeter based on liquid crystal variable retarders [J]. *SPIE*, 2005, 5901: 377-388.
- [12] 孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测量方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 685-688.
SUN Y Z, WANG D G, ZHANG H Q, *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 685-688. (in Chinese)
- [13] WU SH T, EFRON U, HESS L D. Birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(21): 3911-3915.
- [14] 李景镇. *光学手册*[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986.
LI J ZH. *Handbook of Optics*[M]. Xi'an: Shanxi Science & Technology Press, 1986. (in Chinese)

作者简介: 张志勇(1972—), 男, 辽宁锦州人, 中国科学院国家天文台博士研究生, 主要从事偏振光学领域的研究。

E-mail: polarimetry@163.com