

doi:10.3788/gzxb20134206.0699

# 斯托克斯矢量法在全光纤电流传感器中的应用

黄爱显<sup>1</sup>, 张昊<sup>1,2</sup>, 邱怡申<sup>1</sup>, 王宁<sup>3</sup>, 李高明<sup>1</sup>, 陈书明<sup>2</sup>, 宋磊<sup>2</sup>

(1 福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室; 福建省光子技术重点实验室, 福州 350007)

(2 福建江夏学院, 福州 350007)

(3 威海教育教学研究中心, 山东 威海 264200)

**摘 要:**针对目前全光纤电流传感器中光信号检测环节多是采用双路光强分析偏振度这一现状, 提出将斯托克斯矢量法应用于光纤电流传感器信号偏振度的演变分析, 在近似条件下, 推导得到基于穆勒矩阵的光纤电流传感器简化传输矩阵. 从琼斯矢量法和实验结果比较可知, 斯托克斯矢量法与琼斯矢量法的模拟效果十分接近, 此外它还具有传输矩阵中不存在复数、容易简化为稀疏矩阵以及最终偏振度只需计算总传输矩阵的第 2 个对角元即可等运算优势. 这些优势使得该方法不仅可以很好地进行理论分析, 还可以有效地简化分析过程和运算过程.

**关键词:**斯托克斯矢量法; 全光纤电流传感器; 穆勒矩阵; 琼斯矩阵; 偏振度

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)06-0699-6

## Application of Stokes Vector Method on the Full-Fiber Current Sensor

HUANG Ai-xian<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, QIU Yi-shen<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>3</sup>,

LI Gao-ming<sup>1</sup>, CHEN Shu-ming<sup>2</sup>, SONG Lei<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine Ministry of Education;  
Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Fujian Normal University,  
Fuzhou 350007, China)

(2 Fujian Jiangxia College, Fuzhou 350007, China)

(3 Weihai Education and Teaching Research Center, Weihai, Shandong 264200, China)

**Abstract:** Considering that the signal analysis is usually based on dual-way intensity detection, a novel method is demonstrated that uses Stokes vector method to analyze the degree of polarization degree in the optical fiber current sensor. In approximate conditions, the reduction transmission matrix is deduced and obtained of the full optical fiber current sensor based on Mueller matrix. It is found that the effect of the Stokes vector method is similar to the Jones vector method; by comparing the Jones vector method with the actual experimental results, it is easy to know that the Stokes vector has more operational advantages, such as only real numbers included in the Mueller matrix, easily being changed to sparse matrix and the final polarization degree being obtained by calculating the second diagonal element of the total transmission matrix. This method can be used in the theoretical analysis of the degree of polarization, and simplify the analysis process and operation process effectively.

**Key words:** Stokes vector method; Full-fiber current sensor; Mueller matrix; Jones matrix; Degree of polarization

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61178089)、福建省自然科学基金(Nos. 2010J01325, 2012D077)和福建教育厅 A 类科技项目(No. JA11271)资助

第一作者: 黄爱显(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光通信. Email: huangaixian058@163.com

导师(通讯作者): 邱怡申(1954-), 男, 教授, 主要研究方向为光波导和光电子技术. Email: ysqiu@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2012-09-21; 录用日期: 2013-03-18

## 0 引言

随着电力工业的发展,传统的电磁式电流测量仪器已经远远不能满足高电压、大电流、实时带电测量的要求.光学电流传感器由于其具有抗电磁干扰能力强、安全性能高等优点,得到了广泛的重视和研究<sup>[1-4]</sup>.光学电流传感器主要分为全光纤型以及磁光型和热光混合型,其中全光纤型电流传感器是当前的研究热点<sup>[4-5]</sup>.目前,光学电流传感器的研制已取得一定进展,并出现一些商用的案例<sup>[6-7]</sup>,但在全光纤电流传感器的研究上还存在着一些不足:例如对于偏振光信号在光纤电流传感器中传输时,其偏振态到底是如何演变的这一类理论研究依然有继续讨论的价值.

目前,分析光信号偏振态常见的方法有琼斯矢量法、斯托克斯矢量法、偏振干涉仪法、固定偏振镜法等<sup>[8]</sup>.其中,偏振干涉仪法和固定偏振镜法需要大量仪器设备,存在成本高、精确度和采样频率低等问题.斯托克斯矢量法基于光强描述,其传输矩阵为穆勒矩阵,有 $4 \times 4$ 个元素,常用于多光束干涉问题的研究中,由于矩阵结构和运算复杂,较少在光纤电流传感器的理论研究中采用<sup>[8]</sup>.琼斯矢量法直接采用电场复振幅描述,可以很好地解决相位相关问题,传输矩阵只有 $2 \times 2$ 个元素,结构简单,运算量相对小,目前在光纤电流传感器理论研究中得到较为广泛的应用<sup>[8-10]</sup>.但考虑目前光学电流传感器传感信号的检测技术多是采用双路光强探测,再通过两路强度运算进行分析信号偏振度<sup>[8-9]</sup>,这与采用复振幅描述的琼斯矢量之间尚有一定差距;其次由于光在光纤电流传感器中传输时受到一系列因素影响,实际的偏振态变化极其复杂,用琼斯矢量法完全描述十分困难.此外,尽管琼斯矩阵只有4个元素,但由于存在复数,加上整个系统不同器件的叠加,给实际系统的传输矩阵计算带来极大的复杂性.

鉴于琼斯矢量法在光纤电流传感器的研究中存在上述问题,特别是考虑到实际中多是采用双路光强测量分析信号偏振度,本文提出一种将斯托克斯矢量法应用于光纤电流传感器偏振度演变分析的方法.在近似条件下,推导出光纤电流传感器的传输矩阵,并指出在特定的输入信号下,可以简化传输矩阵并减少系统分析的运算量.通过理论计算结果与实际实验结果的比对,证明了该方法具有和琼斯矢量法相同的模拟效果,并且具有降低了运算难度的优点.

## 1 基于斯托克斯矢量法的偏振度演变分析

光纤电流传感器的基本结构如图1,利用输入光信号的偏振态在电流产生的磁场中会发生变化的法拉第效应对电流大小进行检测<sup>[9-10]</sup>.光信号偏转

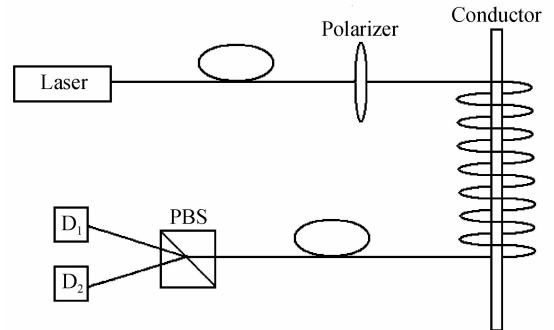


图1 基于光信号偏振度分析的全光纤电流传感器  
Fig. 1 The full fiber current sensor based on the optical signal of degree of polarization analysis

角 $\Omega$ 与电流 $I$ 的关系为

$$\Omega = VNI \quad (1)$$

式中, $V$ 是光学材料的Verdet常量, $N$ 为光纤线圈的匝数,在二者给定的情况下,通过对法拉第偏转角的测量,可计算得到电流大小.如琼斯矢量法一样,在斯托克斯矢量法中,任意一个光学系统的性质都可以用一个对应的 $4 \times 4$ 传输矩阵来描述,即穆勒矩阵 $M$ <sup>[12]</sup>为

$$S_{\text{out}} = M \times S_{\text{in}} \quad (2)$$

图1为基于光信号偏振度分析的全光纤电流传感器.图中PBS为光偏振分束器,其将检测光信号分解为振动方向相互垂直的2路光,再送入光强探测器进行检测分析.

任意平面内,光信号的斯托克斯矢量可定义为<sup>[12]</sup>

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle |E_x|^2 + |E_y|^2 \rangle \\ \langle |E_x|^2 - |E_y|^2 \rangle \\ \langle 2E_x E_y \cos \delta \rangle \\ \langle 2E_x E_y \sin \delta \rangle \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, $E_x$ 、 $E_y$ 为 $X$ 、 $Y$ 轴两个方向的电矢量, $I_x$ 和 $I_y$ 为对应光强,式中的 $\delta$ 为 $E_x$ 、 $E_y$ 的相位差.

从图1中可以看到,即使是最简单的光纤电流传感器也涉及多个光学器件,并且它们中的双折射如何分布以及受到外力影响并不确定,如果将他们的传输矩阵一一表示出来并进行计算将是极其复杂的工作.考虑到光纤系统的传输矩阵总可以由一个相位片加上一个旋光片来表征<sup>[13]</sup>,因此可以用该方法来近似表示光纤电流传感器的整体传输特性,其表达式为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta+2\Omega) & -\sin(2\theta+2\Omega) & 0 \\ 0 & \sin(2\theta+2\Omega) & \cos(2\theta+2\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(2\tau) & \sin(2\tau) \\ 0 & 0 & -\sin(2\tau) & \cos(2\tau) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta+2\Omega) & -\sin(2\theta+2\Omega) & 0 \\ 0 & \sin(2\theta+2\Omega) & \cos(2\theta+2\Omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  是系统中存在的圆双折射引起的偏转角,  $\tau$  是系统存在的线性双折射引起的相移,  $\Omega$  是电流引起的偏转角, 经过整理, 可化为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta+2\Omega) - \sin^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) & -\frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega) - \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega)\cos(2\tau) & -\sin(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) \\ 0 & \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega) + \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega)\cos(2\tau) & -\sin^2(2\theta+2\Omega) + \cos^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) & \cos(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) \\ 0 & -\sin(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) & -\cos(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) & \cos(2\tau) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)即采用穆勒矩阵描述的光纤电流传感器的近似传输矩阵, 可以看到该式依然相当复杂, 并不利于应用分析, 但在某些特殊的条件下可以进行简化. 考虑到目前常用于描述信号光偏振态的偏振度  $P$  可以定义为<sup>[8-10]</sup>

$$P = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y} \quad (6)$$

与斯托克斯矢量的定义式(2)相结合, 容易发现有  $P = S_1/S_0$ , 这意味着如果检测系统只检测偏振度的话, 只需要斯托克斯矢量的前 2 项即可以对应分析, 假设输入的光信号为平行 X 或 Y 轴的线偏振光, 则输入的斯托克斯矢量可以表为  $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ , 考虑到输入矢量后两项都为 0, 并且只需要输出矢量的前两项进行分析, 因此可以将传输矩阵  $M$  简化为  $2 \times 2$  矩阵, 即

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta+2\Omega) - \sin^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则输出信号的偏振度  $P$  实际上就是传输矩阵的第 2 个对角元素, 即

$$P = \frac{S_1}{S_0} = \cos^2(2\theta+2\Omega) - \sin^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) \quad (8)$$

通过给定  $\theta$  和  $\tau$ , 即可通过电流与偏转角  $\Omega$  的对应关系得到输出信号的偏振态. 此外, 如果认为系

统不存在因外界因素而引入的圆双折射  $\theta$ , 则上式可以进一步简化为

$$P = \cos^2(2\Omega) - \sin^2(2\Omega)\cos(2\tau) \quad (9)$$

当没有电流输入时, 则有  $P=1$ , 即偏振度保持不变.

实际中, 考虑到光纤系统中存在的双折射会对光信号的偏振度产生极大的影响<sup>[14]</sup>, 为了减少这种影响带来的测量误差, 需要对双折射进行抑制. 一种常见的方法是加入正交共厄反射镜(OCR)对线性双折射进行补偿<sup>[9,15]</sup>, 其结构如图 2.

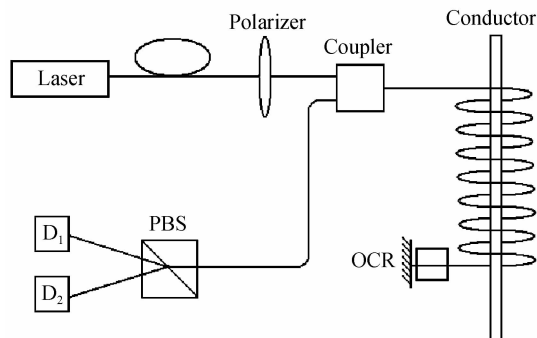


图 2 采用 OCR 的全光纤电流传感器  
Fig.2 The full fiber current sensor using OCR

其中光纤环部分的传输矩阵  $M$  仍然可用式(5)表示, 整个传感头部分的传输矩阵  $J$  可表示为

$$J = M' \times R \times M \quad (10)$$

$M'$  是信号反向通过光纤环的传输矩阵, 表示为

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta+2\Omega) - \sin^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) & -\frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega) - \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega)\cos(2\tau) & \sin(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) \\ 0 & \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega) + \frac{1}{2}\sin(4\theta+4\Omega)\cos(2\tau) & -\sin^2(2\theta+2\Omega) + \cos^2(2\theta+2\Omega)\cos(2\tau) & -\cos(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) \\ 0 & \sin(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) & \cos(2\theta+2\Omega)\sin(2\tau) & \cos(2\tau) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$R$  为 OCR 的传输矩阵,可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

当输入偏振度为 1 的光信号  $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$  时,同理可以计算得到偏振度等于传输矩阵  $J$  的第 2 个对角元为

$$P = J_{22} = \frac{1}{4} \sin^2(4\theta + 4\Omega) [1 + \cos(2\tau)]^2 - \sin^2(2\theta + 2\Omega) \sin^2(2\tau) - [\cos^2(2\theta + 2\Omega) - \sin^2(2\theta + 2\Omega) \cos(2\tau)]^2 \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta + 2\Omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(2\theta + 2\Omega) \cos(2\tau) & \cos(2\theta + 2\Omega) \sin(2\tau) \\ 0 & 0 & -\cos(2\theta + 2\Omega) \sin(2\tau) & \cos(2\tau) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta + 2\Omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2(2\theta + 2\Omega) \cos(2\tau) & -\cos(2\theta + 2\Omega) \sin(2\tau) \\ 0 & 0 & \cos(2\theta + 2\Omega) \sin(2\tau) & \cos(2\tau) \end{bmatrix} \quad (15)$$

则传感头部分的传输矩阵为

$$\tilde{\mathbf{J}} = \tilde{\mathbf{M}}' \times \mathbf{R} \times \tilde{\mathbf{M}} \quad (16)$$

容易计算得到偏振度  $\tilde{P}$  近似为

$$\tilde{P} \approx -\cos^4(2\theta + 2\Omega) \quad (17)$$

可以看到当系统圆双折射足够小时,采用 OCR 结构的偏振度可近似看成与线性双折射  $\tau$  无关.从式(14)~(17)可以看到,相对于琼斯矩阵法,由于穆勒矩阵被简化为稀疏矩阵,并且最终只需计算总传输矩阵的第 2 个对角元,使得实际计算更为简便.

## 2 实验与讨论

普通光纤电流传感器实验采用光路配置如图 3,采用 1 550 nm 的脉冲半导体激光器(LD)作为光源,信号光经过与 Y 轴方向垂直偏振片后进入光纤环.光纤环由标准单模光纤作绕制,直径 10 cm,考虑到室温下,标准单模光纤在 1 550 nm 时,Verdet 常量较低,为了提高系统对电流的敏感性,实验中采用多匝光纤环,分别使用了 750 匝,1 050 匝二组光纤环.信号通过光纤环后,经由偏振分束器(PBS)分为偏振方向与 X,Y 轴平行的 2 路光信号,最后由光电探测器接收,通过两路光强得到信号光偏振度.实验中检测电流范围为 0 到 500A.

显然当系统存在圆双折射(即存在  $\Omega$  和  $\theta$ )的情况下并不能消除线性双折射  $\tau$  的影响,这一点在文献[9]和[15]中已经得到证明.而当圆双折射足够小时,则可近似认为线双折射可得到补偿,因此采用 OCR 方法消除线性双折射影响的关键是尽可能减少系统中圆双折射的存在.考虑到单模石英光纤能够被电流引起的偏转角  $\Omega$  非常小(1 550 nm 时,其 Verdet 常量约为  $0.8 \mu\text{rad}/\text{A}$ )<sup>[16]</sup>,因此只要保证系统中其他作用引起的圆双折射  $\theta$  足够小,光纤传输矩阵  $M$  和  $M'$  就可以简化为稀疏矩阵  $\tilde{M}$  和  $\tilde{M}'$ ,即

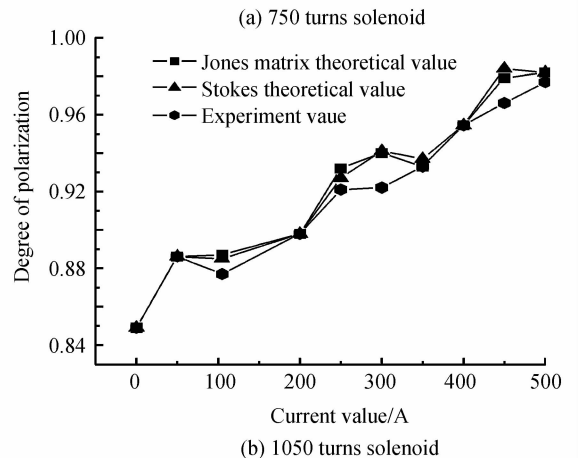
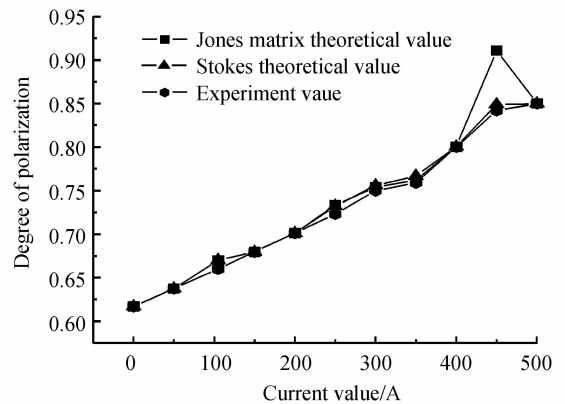


图 3 普通光纤电流传感器的信号光偏振度随光强变化情况  
Fig. 3 The degree of polarization of the optical signal changes with light intensity in original fiber current sensor

为了比较斯托克斯矢量法与琼斯矢量法的效果,在图 3 中分别绘制了两种方法的模拟结果与实际实验结果的对比情况.其中基于琼斯矢量法的偏振度可以表示为<sup>[16]</sup>

$$P = \frac{2\theta^2}{\varphi^2} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) - 1 \quad (18)$$

式中  $\theta$  是电流和外界因素引起的圆双折射偏转角,  $\varphi$  是线双折射和圆双折射共同引起的相位差.

OCR 式电流传感器的光路布置如图 2, 偏振光信号通过  $2 \times 1$  口耦合器进入光纤环的一端, 当信号光达到光纤环另一端时经过 OCR 的偏振态旋转再反向通过光纤环回到耦合器, 最终经过耦合器另一端输出到 PBS 进行探测分析, 系统通过加入 OCR 抑制线性双折射对偏振度的影响. 考虑到需要保证系统中圆双折射足够小才能实现这种抑制, 实验中光纤的匝数分别减少为 150 匝和 200 匝, 并在绕制中尽量避免出现扭转, 其实验结果如图 4 所示.

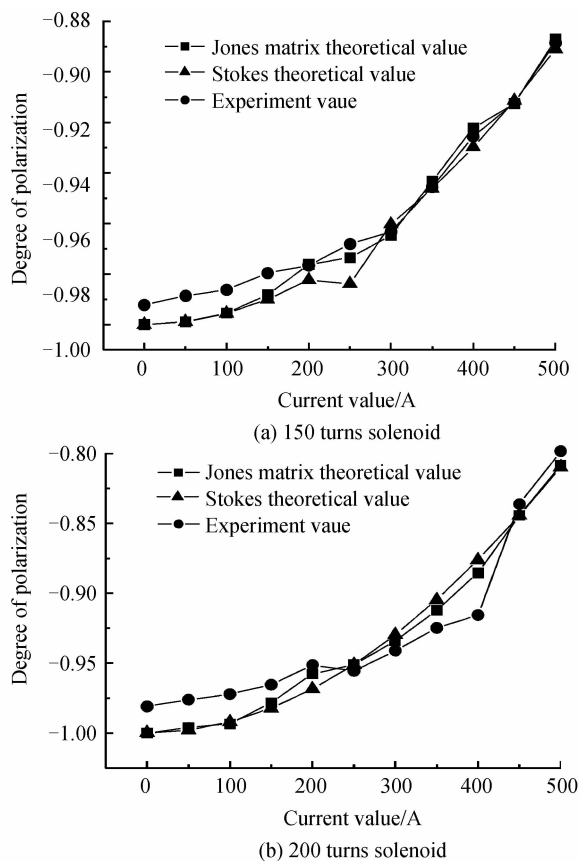


图 4 OCR 式光纤电流传感器的信号光偏振度随光强变化情况

Fig. 4 The degree of polarization of the optical signal changes with light intensity in fiber current sensor with OCR

从图 3 中可以看到由于实际系统中存在扭曲等外界影响使得引入圆双折射导致输出的偏振度在没有电流输入时 ( $I=0A$ ) 也并不能与输入偏振度保持一致. 图 4 采用 OCR 进行双折射补偿, 但由于实际中并不能完全消除这种双折射, 因此误差依然存在.

并且, 为了降低圆双折射而牺牲了一部分电流灵敏度, 但该方法最大价值在于降低了线性双折射的影响, 从而可以有效降低由此带来的震动敏感性<sup>[17]</sup>.

从两图中都可以看到用斯托克斯矢量法模拟得到的结果与琼斯矢量法的模拟结果十分接近, 两者之间并没有明显区别, 并且和实验值都很接近, 说明了对光纤电流传感器中的信号光偏振度演变进行理论分析时, 运用斯托克斯矢量法具有和琼斯矩阵相同的结果. 琼斯矩阵虽然具有较为简单的形式, 但是它里面的元素含有复数, 使得进一步的计算难度增大. 我们知道两个复数相乘他们的运算量相当于进行了 4 次乘法和 2 次加法, 如果两个  $2 \times 2$  复数矩阵相乘其运算量相当于进行了 32 次乘法和 16 次加法, 即使实际中的矩阵中有 2 个是复数 2 个是实数, 那么两个矩阵相乘的运算量也达到 20 次乘法, 10 次加法. 如果进行高次运算的时候计算量是相当可观的, 尤其是面对多器件组合的光学系统, 这种运算难度的增加是几何性的. 虽然斯托克斯矢量法的矩阵元素多, 但都是实数, 使得实际计算时免去复数计算的复杂性; 同时在进行系统的近似时, 矩阵容易简化为多零的稀疏矩阵, 并且最终偏振度只需计算总传输矩阵的第 2 个对角元即可得到, 这些优势大大降低了运算的难度. 而且偏振度中只有两个未知量, 我们可以根据前两个测到的数值求出未知量, 进而得到矩阵的所有元素值, 那么我们的计算就变成了数值已经确定的两个实数矩阵的计算, 由于矩阵中不存在未知数所以计算难度大大降低. 使用简单的计算工具即可迅速求出. 实验结果的对比证明了斯托克斯矢量法可以较好地应用在光纤电流传感器的信号光偏振度演变分析中.

### 3 结论

本文针对常见光纤电流传感器应用中多是检测信号光的偏振度变化这一特点, 提出了一种将斯托克斯矢量法应用于光纤电流传感器偏振度演变分析的方法, 并且可通过近似条件, 对光纤电流传感器的传输矩阵进行简化. 通过理论结果和实验数据的比较, 说明采用斯托克斯矢量法和琼斯矢量法具有相同的效果, 并且由于传输矩阵中没有复数, 容易简化为多零的稀疏矩阵, 只需计算总传输矩阵的第 2 个对角元即可得到相应偏振度, 这些特点都极大降低了运算难度. 该方法不仅可以很好地对应分析偏振度演变过程, 还可以有效地简化理论分析过程和运算过程.

#### 参考文献

- [1] BOHNERT K, GABUS P, KOSTOVIC J, *et al.* Optical fiber

- sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(3-5): 511-526.
- [2] XU Shi-qing, DAI Shi-xun, ZHANG Jun-jie, *et al.* The new progress of full optical fiber current sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(1): 41-45.  
徐时清,戴世勋,张军杰,等. 全光纤电流传感器研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(1): 41-45.
- [3] BOHNERT K, GABUS P, BRÄNDLE H, *et al.* Fiber-optic DC current sensor for the electro-winning industry[C]. 17th Int. Conference on Optical Fiber Sensors, ProcSPIE 5855, 2005.
- [4] WATEKAR P R, JU S, KIM S, *et al.* Development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 17096-17105.
- [5] WANG Mei-Rong, ZHOU Wang-Min, ZHANG Peng, *et al.* Investigations of magneto-optical properties of BGO crystal utilized for optical fiber current sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 100-104.  
王美蓉,周王民,张鹏,等. 用于光纤电流传感器的BGO晶体磁光特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):100-104.
- [6] SANDERS G A, BLAKE J N, ROSE A H, *et al.* Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors at NxtPhase [C]. IEEE Proc. 7289, Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002.
- [7] SHANG Hai-ying, WU Jing. The commercial of optical fiber current sensor and voltage sensor [J]. Huai Nan: China Electronics Technology Group Corporation No. 8 Research Institute, 2004, **4**: 32-36.  
商海英,吴静. 光纤电流传感器和电压传感器的商用[J]. 淮南: 中国电子科技集团公司第八研究所, 2004, **4**: 32-36.
- [8] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 47-55.
- [9] DREXLER PETR, FIALA PAVEL. Utilization of faraday mirror in fiber optic current sensors[J]. *Radio Engineering*, 2008, **17**(4): 101-107.
- [10] RIPKA P. Magnetic sensors and magnetometers [M]. London: Artech House, 2001.
- [11] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J, *et al.* Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *Light wave Technology*, 2002, **20**(2): 267-276.
- [12] HONG Ran, ZHU Ying. The stokes vector analysis of the optical rotation on liquid crystal [J]. *Physics and Engineering*, 2009, **19**(5): 60-63.  
洪然,朱英. 用斯托克斯矢量分析液晶的旋光特性[J]. *物理与工程*, 2009, **19**(5):60-63.
- [13] LIAO Yan-biao. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 82-83.
- [14] WANG Jia, HOU Hong-Lu, XU Jin-Tao. Sagnac Fiber-optic current sensor without vibration sensitivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 57-61.  
王嘉,侯宏录,徐金涛. 一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1):57-61.
- [15] WANG Zheng-ping, LIU Xiao-yu, HUANG Zong-jun. Theoretical analysis of reciprocity problems in bulk glass opticalcurrent sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1333-1335.  
王政平,刘晓瑜,黄宗军. 光学玻璃电流互感器中互易性问题的理论研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1333-1335.
- [16] ZHANG Hao, QIU Yi-shen, LI Hui, *et al.* High-current-sensitivity all-fiber current sensor based on fiber loop architecture[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 18591-18593.
- [17] CESAR D, PERCIANTE, JOSE A. Ferrari. Faraday current sensor with temperature monitoring [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(32): 6910-6912.