

消除萨尼亚克光纤电流传感器振动干扰的 光纤补偿环研究

李绪友 郝金会* 杨汉瑞 杨峻巍 陈亮 何周

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 与传统电磁式电流互感器相比,基于法拉第效应的光纤电流传感器有许多明显的优点,因而获得了广泛的研究。萨尼亚克(Sagnac)环形电流互感器是在干涉式光纤陀螺结构上发展起来的一种互感器结构。外界环境的振动因素是抑制 Sagnac 光纤电流互感器的最重要因素之一。为了消除振动对电流互感器测量结果的影响,给出了一种新型的光纤电流互感器免疫方案,其基本原理是增加外部闭环线圈来补偿所受振动影响。利用琼斯矩阵对此种光纤电流互感器结构进行了详细的理论分析。理论分析及实验结果均能证明此种方案可以完全消除电流互感器在实际环境中所受振动因素的不利影响。为高精度 Sagnac 干涉式光纤电流互感器的实现提供了可行的解决方法。

关键词 光纤光学;法拉第效应;振动免疫;补偿光纤环;光纤传感器

中图分类号 TM452⁺.94 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0205005

Research on the Compensating Fiber Loop for Eliminating Vibration in Sagnac Optic Current Sensor

Li Xuyou Hao Jinhui Yang Hanrui Yang Junwei Chen Liang He Zhou

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Optical fiber current sensors based on Faraday effect have a lot of advantages over conventional current sensors and have been studied extensively. The structure of Sagnac optical current sensors are developed on the structure of interferometric fiber-optic gyroscope. The external vibration is one of the most important limitations of Sagnac optical current sensors. To eliminate the effect of vibration, a new scheme is given out. The basic principle of the scheme is that there is an extra closed loop to compensate the vibration effect received by the sensing head. Then the polarization states of the lights spreading in the new scheme are analyzed with Jones matrix. The theoretical analysis and the result of the experiment both show that the novel structure of the optical current sensor could completely eliminate the vibration effect in the environment. It is useful to the high accuracy of Sagnac optical current sensor.

Key words fiber optics; Faraday effect; vibration immunity; compensating fiber loop; fiber optics sensors

OCIS codes 060.2370; 230.3810; 230.2090; 230.1150; 230.0250

1 引 言

随着电力系统中电网电压等级的不断提高、容量不断增加,对电流传感器的要求越来越高。而在高电压、大电流和强功率的电力系统中,测量电流采用的常规技术——以电磁感应原理为基础的电流传

感器(CT),暴露出一系列严重的缺点:绝缘困难、制造成本高、体积大、质量重以及由于 CT 固有的磁饱和、动态范围小、频带窄等已难以满足新一代电力系统的在线检测、高精度故障诊断、电力数字网等发展的需要^[1~3]。全光纤电流互感器因为采用光纤作为

收稿日期: 2011-09-14; 收到修改稿日期: 2011-11-08

基金项目: 中俄科技合作专项(2010DFR80140)资助课题。

导师简介: 李绪友(1964—),男,博士后,教授,主要从事光纤陀螺及光纤陀螺捷联惯导系统等方面的研究。

E-mail: lixuyou@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: tellersky@163.com

传感介质,所以在绝缘性、抗电磁干扰、可靠性等方面比传统的电磁式电流互感器有很大的优势,而且它不含有交流线圈,不存在开路危险。因而作为在高压大电流场合取代传统电磁式电流传感器的一种换代产品而备受关注^[4,5]。

但由于光纤电流互感器在实际的应用环境中会受到振动因素的影响,而萨尼亚克(Sagnac)干涉环结构极易敏感振动因素的影响,从而在输出中夹杂了振动信号的输出,大大降低了系统的测量精度。有研究者给出了一种新型的振动不敏感结构,但是由于其中加入了额外的半波片,其对接误差及相位延迟特性均对这种方案的可靠性带来了很大的影响^[6~9]。本文介绍了一种新型的传感方案,只在系统中增加了额外的补偿光纤环来消除光纤传感线圈所接收到的振动噪声,减小了额外器件的增加对系统稳定性的影响,从而提高系统的测量精度。

2 原 理

图1为Sagnac结构的光纤电流传感器的原理图,其光路结构类似于光纤陀螺,也是非互易性光路。图中 $\lambda/4$ 波片1和波片2的快轴与保偏光纤的

主轴分别以 45° 对接。光源发出的光经过Y波导的起偏器被起偏为线偏光,然后被Y波导中的分束器分成两路,这两束线偏振光分别通过 $\lambda/4$ 波片1、2后被转换成旋向相同的圆偏振光,分别沿顺时针方向和逆时针方向通过传感光纤圈。法拉第效应使其两束圆偏振光的偏振面发生旋转,然后再次经过另一个 $\lambda/4$ 波片又被重新转换成线偏振光返回到Y波导中进行干涉^[10~12]。

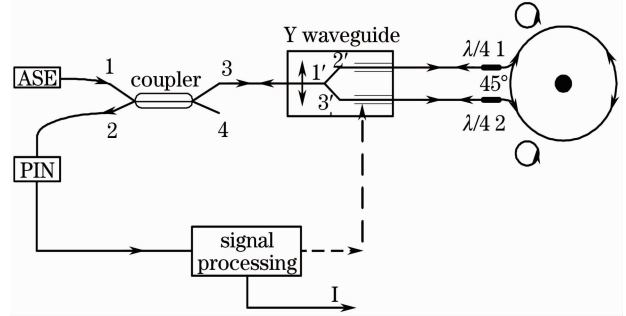


图1 光纤电流互感器原理图

Fig.1 Principle diagram of optical current sensor

图2为提出的新型的改进结构,此种方案与以前基本的原理图不同之处是在两个 $\lambda/4$ 波片及光纤传感头间加入了外部补偿线圈。

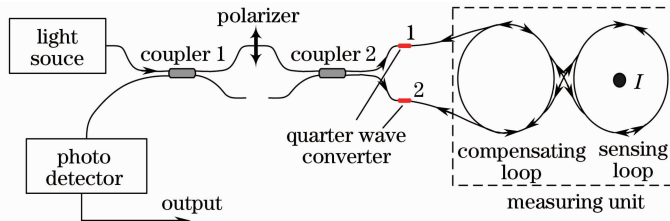


图2 新型振动免疫光纤电流互感器光路结构

Fig.2 Optical structure of the novel vibration immunity current sensor

由于补偿线圈与传感线圈只是在缠绕方式上完全相反,其感受到的振动因素亦完全相反,从而能够完全抵消传感头所受到的影响。另外,补偿线圈与传感线圈是同一根光纤缠绕的,并没有增加额外的器件从而减少了器件的复杂性对系统的影响。经过波片1的上行光在补偿线圈中顺时针旋转后进入到传感光纤线圈中进行逆时针旋转;经过波片2的下行光在补偿线圈中逆时针旋转后进入到传感光纤线圈中进行顺时针旋转。这样就能保证补偿线圈所敏感的振动因素与传感头所接收到的振动因素大小相等,方向相反,从而从理论上这种方案能够完全抵消传感头所接收到的外部振动因素的影响。

3 建模分析

在建立系统开环模型中,有两点假设:1) 介质

无散射与背向反射;2) 系统是互易的,即介质是线性的。

宽谱光源的琼斯矩阵为

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

起偏器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

方向矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

设外界振动因素引起的两束反向传播光的相位

差为 δ ，当载流体中有电流流过时，电流磁场对顺时针和逆时针两束圆偏振光所引起的相位差为 f_θ ，由于任何线圈外部的电流都不会改变两相反方向传播光间的相位差^[13,14]，所以对应的两束光的补偿线圈与传感线圈的琼斯矩阵分别如下所示：

经过耦合器 2 后上行光补偿线圈的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{comu}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

经过耦合器 2 后下行光补偿线圈的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{comd}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当载流体中无电流流过时，传感头中两束相反传播的光无相位差，上行光经过传感头的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{senu}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (7)$$

无电流流载体时，下行光经过传感头的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{send}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

上行光对应的测量单元的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\text{mearu}} &= \mathbf{L}_{\text{senu}} \mathbf{L}_{\text{comu}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (9)$$

下行光对应的测量单元的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\text{meard}} &= \mathbf{L}_{\text{comd}} \mathbf{L}_{\text{send}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

当载流体中有电流流过时，传感头中上行光对应的传感线圈的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{sensiu}} = \begin{bmatrix} \cos(f_\theta + \delta) & \sin(f_\theta + \delta) \\ -\sin(f_\theta + \delta) & \cos(f_\theta + \delta) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

当载流体中有电流流过时，传感头中下行光对应的传感线圈的琼斯矩阵为

$$\mathbf{L}_{\text{sensid}} = \begin{bmatrix} \cos(f_\theta + \delta) & -\sin(f_\theta + \delta) \\ \sin(f_\theta + \delta) & \cos(f_\theta + \delta) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

当载流体中有电流流过时，上行光对应的测量单元的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\text{meariu}} &= \mathbf{L}_{\text{sensiu}} \mathbf{L}_{\text{comu}} = \\ &\begin{bmatrix} \cos(f_\theta + \delta) & \sin(f_\theta + \delta) \\ -\sin(f_\theta + \delta) & \cos(f_\theta + \delta) \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos f_\theta & \sin f_\theta \\ -\sin f_\theta & \cos f_\theta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

当载流体中有电流流过时，下行光对应的测量单元的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{\text{meariu}} &= \mathbf{L}_{\text{comd}} \mathbf{L}_{\text{sensid}} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} \cos(f_\theta + \delta) & -\sin(f_\theta + \delta) \\ \sin(f_\theta + \delta) & \cos(f_\theta + \delta) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \cos f_\theta & -\sin f_\theta \\ \sin f_\theta & \cos f_\theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

3.1 载流体中无电流通过时，系统的开环模型

设上行光的电场矢量为 \mathbf{E}_1 ，下行光的电场矢量为 \mathbf{E}_2 ，则两束光分别通过波片，补偿线圈及传感线圈后的光矢量分别为

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mathbf{PK}_2 \mathbf{RL}_{\text{mearu}} \mathbf{K}_1 \mathbf{PE}_{\text{in}}, \quad (15)$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mathbf{PK}_1 \mathbf{RL}_{\text{meard}} \mathbf{K}_2 \mathbf{PE}_{\text{in}}, \quad (16)$$

式中，常量系数是由两个 2×2 耦合器引入的光强衰减^[15,16]。探测器响应为

$$I = |\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2|^2 = \frac{1}{16} |\mathbf{E}_x|^2. \quad (17)$$

3.2 载流体中有电流通过时，系统的开环模型

导体中有电流通过的情况下，到达探测器中的上行光与下行光的光矢量分别为

$$\mathbf{E}'_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mathbf{PK}_2 \mathbf{RL}_{\text{meariu}} \mathbf{K}_1 \mathbf{PE}_{\text{in}}, \quad (18)$$

$$\mathbf{E}'_2 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \mathbf{PK}_1 \mathbf{RL}_{\text{meard}} \mathbf{K}_2 \mathbf{PE}_{\text{in}}. \quad (19)$$

此时探测器的响应为

$$I' = |\mathbf{E}'_1 + \mathbf{E}'_2|^2 = \frac{1}{8} \cos^2 f_\theta |\mathbf{E}_x|^2. \quad (20)$$

4 实验验证

实验室的实验条件为传感光纤线圈和补偿线圈均为由低双折射普通单模光纤分别缠绕 60 圈，外界振动因素是通过在振动台上外加 3 g 的振动强度来实现的。采用方波偏置信号和阶梯波反馈信号的信号调制方案。

无电流无振动及输入电流为 20 A 无振动情况下的系统输出分别如图 3 和图 4 所示。

在有振动输入无电流通过载流体情况下对原始方案及新方案进行了实验验证。这两种方案的最后实验结果分别如图 5 和图 6 所示。

在有振动输入无电流通过载流体情况下对原始方案及新方案进行了实验验证。测试中所加的载体

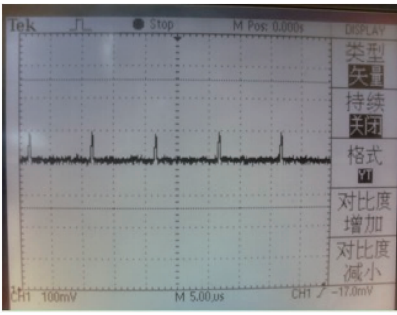


图 3 无电流无振动情况时的系统输出
Fig. 3 system result of original scheme when there is no vibration and no current in the conductor

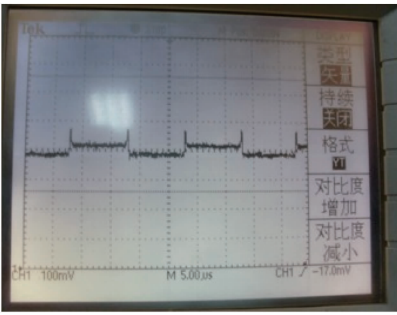


图 4 电流值为 20 A 且无振动情况时的系统输出
Fig. 4 System result of original scheme when there is no vibration and current value as 20 A

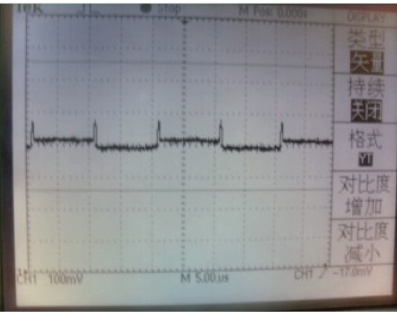


图 5 无电流情况下原始方案振动实验结果
Fig. 5 Experimental vibration result of original scheme when there is no current in the conductor

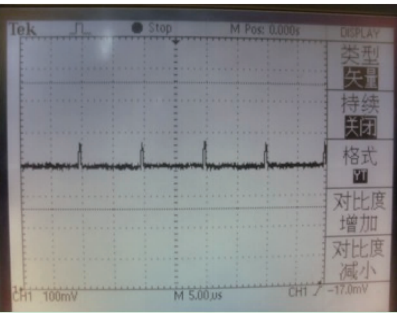


图 6 无电流情况下新方案振动实验结果
Fig. 6 Experimental vibration result of new scheme when there is no current in the conductor

电流值为 50 A, 振动强度为 3 g, 最后的实验结果分别如图 7 和图 8 所示。



图 7 电流值为 20 A 时原始方案振动实验结果
Fig. 7 Experimental vibration result of original scheme when current value as 20 A

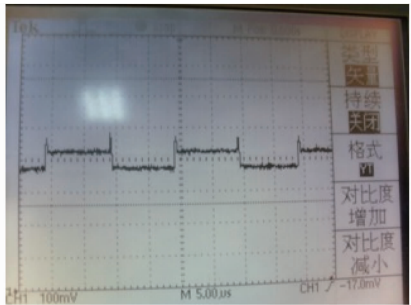


图 8 电流值为 20 A 时新方案振动实验结果
Fig. 8 Experimental vibration result of new scheme when current value as 20 A

从图 5 与图 3 的对比中明显看出, 原始方案在无电流输入而且有外界振动输入时有明显的输出, 这是由于实验条件的不理想造成的, 而图 6 与图 3 存在很小的差异, 从而说明了这种方案在该实验条件下能够起到抑制振动因素的影响。另外, 从图 7、图 8 与图 4 的对比中可知, 同样在有电流流过并且有外界振动输入的情况下, 新方案的输出要比原始方案的输出小, 这表明该方案在有电流情况下亦能很好地抑制振动因素的影响。

5 结 论

本文提出了一种振动免疫的 Sagnac 光纤电流互感器方案, 对这种方案的工作原理进行了详细的理论分析。通过在系统中加入额外的补偿线圈, 来抵消传感头所受到的外界振动因素的影响。由于补偿线圈与传感线圈只是在缠绕方式上完全相反, 其感受到的振动因素亦完全相反, 从而能够完全抵消传感头所受到的影响。另外, 补偿线圈与传感线圈是同一根光纤缠绕的, 并没有增加额外的器件从而减少了器件的复杂性对系统的影响。从(17)式及(20)式可以看出, 此种方案无论是在有电流及无电

流的情况下,输出公式中完全没有振动因素的影响,从而证明了此种方案的理论可行性,最后给出了相应的实验结果。实验结果表明,这种新的结构能够很好地消除外界振动因素对系统造成的误差,为高精度光纤电流互感器的可行性提供了理论及实验基础。

参 考 文 献

- 1 Li Li, Zhang Xintian. Optic-fiber current sensor and its present research[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(2): 37~41
李 莉, 张心天. 光纤电流传感器及其研究现状[J]. 光电子技术与信息, 2002, **15**(2): 37~41
- 2 Y. N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer. Recent progress in optical current sensing techniques[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **151**(6): 734~743
- 3 Zhong Zheng, Guo Congliang. Interferential fiber-optic current sensor[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 732~734
仲 正, 郭从良. 干涉式光纤电流传感器[J]. 光电技术, 2006, **32**(5): 732~734
- 4 Xiang Yanling, Zhang Hong, Zhao Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
熊燕玲, 赵 洪, 张 剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 949~953
- 5 Wang Xitao, Liu Bingyi, Wu Songhua *et al.*. 1.55 μm all-fiber laser heterodyne detection and data analysis with high measurement accuracy of velocity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 060301
王希涛, 刘秉义, 吴松华等. 高精度1.55 μm 全光纤激光相干测速实验及数据分析[J]. 激光与光电子进展, 2011, **48**(6): 060301
- 6 Wang Wei. Noise Analysis and Digital Closed-Loop Control System Design for FOG [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007
王 维. 光纤陀螺噪声分析与数字闭环控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007
- 7 Liu Bin, Zhang Junzheng, Zhang Qiuchan *et al.*. Designing of an optic fiber interferometer high voltage current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 351~354
刘 彬, 张君正, 张秋婵等. 一种光纤干涉式高压电流传感器的设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 351~354
- 8 He Jingyi, Liu Deming, Zhang Xinliang *et al.*. Polarization state auto-compensated optical fiber current transducer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1678~1681
何竟翼, 刘德明, 张新亮等. 光纤偏振态自动补偿的光纤电流互感器[J]. 光学学报, 1999, **19**(12): 1678~1681
- 9 P. A. Nicati, P. H. Robert. Stabilized sagnac optical fiber current sensor using one phase and two amplitude modulations [C]. The 8th Optical Fiber Sensors Conference, 1991. 402~405
- 10 Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang *et al.*. Study of polarization errors of all fiber optical current transformers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 320~323
王夏霄, 张春熹, 张朝阳等. 全光纤电流互感器的偏振误差研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(2): 320~323
- 11 Tao Hu, Yong Zhao, Xing Li. Novel optical fiber current sensor based on magnetic fluid[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 392~394
- 12 Zu Peng, Xiang Wanghua, Bai Yangbo *et al.*. A novel fiber sagnac magnetic field sensor based on magnetic fluid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806005
祖 鹏, 向望华, 白扬博等. 一种新型的基于磁性液体的光纤 Sagnac 磁场传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0806005
- 13 Wang Jia, Hou Honglu, Xu Jintao. 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 式光纤电流互感器[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 57~61
- 14 A. J. Rogers, Jincheng Xu, Jialing Yao. Vibration immunity for optical-fiber current measurement[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1371~1377
- 15 Klaus Bohnert, Hubert Brändle, Martin Georg Brunzel *et al.*. Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**(1): 180~187
- 16 Jiao Binliang. Research on Sagnac Interferometer Based Fiber Optic Current Sensor [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2004. 34~35
焦斌亮. Sagnac 干涉型光纤电流传感器研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004. 34~35

栏目编辑:何卓铭