

# PZT光纤相位调制器调制特性研究

赖家仓<sup>1\*</sup>, 肖浩<sup>2</sup>, 王强龙<sup>2</sup>, 刘东伟<sup>2</sup>, 刘博阳<sup>2</sup>, 李建光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江西理工大学, 江西 赣州

<sup>2</sup>北京世维通光智能科技有限公司, 北京

Email: \*18879739470@163.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月27日

## 摘要

锆钛酸铅压电陶瓷(PZT, Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics)在极化后具有良好的压电性能, 由PZT压电陶瓷和缠绕在PZT上的光纤组成的相位调制器可以通过逆压电效应实现相位调制。相较于常用的铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)相位调制器, PZT具有成本低、接入系统损耗小等优点, 本文对PZT相位调制器的调制原理进行了理论分析, 推导得到了PZT驱动电压和相位改变量、调制深度之间的关系, 并基于开环光纤电流传感器(FOCS)搭建了试验样机, 试验验证了PZT相位调制器良好的调制性能和温度稳定性, 对PZT的灵敏度提升、优化设计和应用提供了理论指导。

## 关键词

PZT, 相位调制, 逆压电效应, FOCS, 调制深度

# Modulation Characteristics of PZT Optical Fiber Phase Modulator

Jiacang Lai<sup>1\*</sup>, Hao Xiao<sup>2</sup>, Qianglong Wang<sup>2</sup>, Dongwei Liu<sup>2</sup>, Boyang Liu<sup>2</sup>, Jianguang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

<sup>2</sup>Beijing SWT Optical Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing

Email: \*18879739470@163.com

Received: Oct. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

PZT (Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics) has good piezoelectric properties after polarization. A phase modulator composed of PZT piezoelectric ceramics and optical fibers wound

\*通讯作者。

on PZT can achieve phase modulation through the Inverse Piezoelectric Effect. Compared with the commonly used lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) phase modulator, PZT has the advantages of low cost and low access system loss. A theoretical analysis of the modulation principle of the PZT phase modulator is carried out, and the relationship between the PZT drive voltage and the amount of phase change and modulation depth is derived. A test prototype was built based on the open-loop fiber optic current sensor (FOCS), which verified the excellent modulation performance and temperature stability of the PZT phase modulator and provided theoretical guidance for the sensitivity improvement, optimization design, and application of the PZT.

## Keywords

PZT, Phase Modulation, The Inverse Piezoelectric Effect, FOCS, Modulation Depth

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

PZT 在极化后具有良好的压电性能，其压电系数大、居里温度高、各项机电参数受温度影响小、时间稳定性好、易于集成[1] [2] [3]，加上本身材质坚硬，不受外界恶劣环境影响等优点[4] [5]，常用于光纤相位调制器的制作，以实现信息在光纤中的传输[6] [7]。

PZT 压电陶瓷通过逆压电效应实现相位的调制[8] [9]。逆压电效应是指在陶瓷管上施加一个与极化方向相同或者相反的电场，会使陶瓷管产生极化方向上的伸缩形变的现象[10] [11] [12]。开环光纤电流传感器是 PZT 压电陶瓷作为相位调制器的典型应用。原理图如图 1 所示：

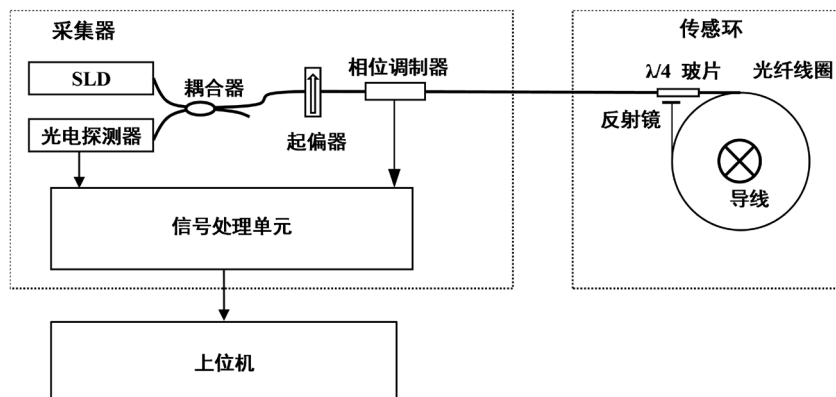


Figure 1. Principle diagram of FOCS

图 1. 开环光纤电流传感器原理图

开环 FOCS 是基于法拉第效应和安培效应，以光纤作为传输和测量介质，PZT 压电陶瓷作为相位调制器[13]，解调光纤中传输的一束正交偏振光的相位差得到电流信号的一种电流测量装置[14] [15]。随着智能电网战略的推进深化和直流输电工程的快速建设，开环光纤电流传感器以其抗电磁干扰能力强、测量范围大，响应速度快、稳定性好、易于安装等优点，被越来越多地应用在电力自动控制，故障诊断、计量等领域[16] [17] [18]。PZT 相位调制器的调制性能是决定开环光纤电流传感器测量精度和稳定性的基本和关键因素之一[19] [20]。

本文对用在开环光纤电流传感器中的 PZT 相位调制器的调制机理进行了阐述说明和理论分析,对影响 PZT 的调制性能的参数进行了分析研究,推导了在 PZT 相位调制器上加载的驱动电压与相位改变量之间的关系,并通过搭建开环光纤电流传感器试验样机从试验上对推导结果和代表 PZT 相位调制性能的参数——调制深度的温度稳定性进行了验证。

## 2. PZT 相位调制机理

### 2.1. 加载电压与相位变化

PZT 相位调制器通过在 PZT 上施加调制电压产生逆压电效应,使 PZT 发生伸缩形变,引起缠绕在 PZT 管上的光纤长度、纤芯直径和折射率的变化,使在光纤中传输的光波发生相位变化,进而实现相位调制的目的,其示意图如图 2 所示。

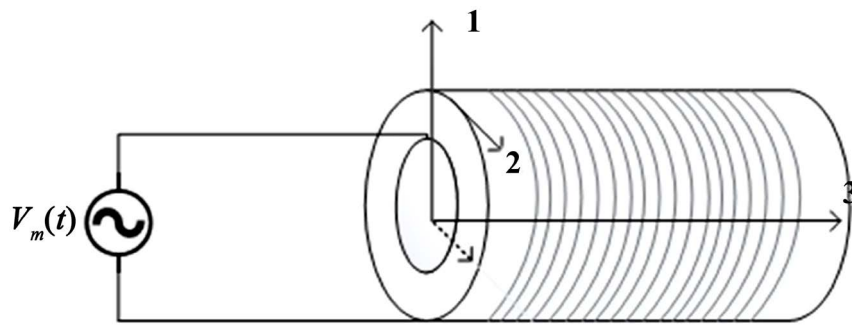


Figure 2. PZT phase modulation  
图 2. PZT 相位调制器

在 PZT 相位调制器的内壁和外壁间施加电压  $V_m(t)$  时, PZT 管上的周长变化量可表示为[15] [16]:

$$\Delta l(t) = \frac{d_{11}lV_m(t)}{D_o - D_i} \cdot \frac{w_0^2}{\sqrt{(w_0^2 - w_m^2)^2 + (Cw_0w_m)^2}} \quad (1)$$

式中  $d_{11}$  为压电应变系数(脚注中第一位数字表示 PZT 压电陶瓷的极化方向;第二位数字表示 PZT 压电陶瓷的机械振动方向),  $l$  和  $\Delta l$  分别为 PZT 压电陶瓷管的周长及其变化量,  $D_o, D_i$  分别为 PZT 管的外直径和内直径,  $w_0$  为谐振频率,  $w_m$  为调制频率,  $C$  为弹光系数。

假设保偏光纤中的固有双折射为  $\Delta n$ , 光纤中传输的光波波长为  $\lambda$ , 长度为  $l$  的单匝光纤产生的轴向应变为  $\varepsilon_z$ , 相应的径向应变为  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\varepsilon_z$ , 光线的轴向应变  $\varepsilon_z$  引起径向应变的  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  产生的应变双折射为  $\Delta n_{\varepsilon z}$ 。应变模式双折射  $\Delta n_{\varepsilon z}$  产生的相位差:

$$\Delta \varphi_{n_{\varepsilon z}} = 2\pi(\Delta n + \Delta n_{\varepsilon z})\varepsilon_z / \lambda \quad (2)$$

由于掺杂区与包层的泊松系数差异,当光纤发生轴向应变时,会产生附加的双折射。由于泊松系数的差异,在横截面上产生非圆对称的应力分布,轴向应力产生的应力模式双折射  $\Delta n_{st}$ , 则双折射  $\Delta n_{st}$  为:

$$\Delta n_{st} = -\frac{CE\varepsilon_z}{1-\nu} \int_0^1 \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \gamma(r, \theta) \cos 2\theta d\theta (r^{-1} - 3r^3) dr \quad (3)$$

其中  $C$  为弹光系数,  $E$  是杨氏模量,  $\gamma(r, \theta)$  是纤芯的应变系数随归一化半径  $r$  (光纤的外径为  $r = 1$ ) 和角度  $\theta$  分布函数, 其中  $\nu$  是光纤材料的泊松比。由(2)式可知,对于应力型高双折射光纤发生轴向应变  $\varepsilon_z$  时,应力模式双折射  $\Delta n_{st}$  产生的相位差为:

$$\Delta n_{st} = \frac{2\pi\Delta n_{st}l}{\lambda} = \frac{2\pi l k_{st} \varepsilon_z}{\lambda} \quad (4)$$

其中  $k_{st}$  为与光纤材料本身有关的比例系数。综上所述，当薄片光纤在轴向应力的作用下发生轴向应变  $\varepsilon_z$  时，一段保偏光纤中的相位差  $\Delta\varphi$  可表示为：

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\varepsilon_z} + \Delta\varphi_{st} \quad (5)$$

由于纤芯的直径变化引起的光波相位变化比其他两种应变所引起的相位变化小很多，可以忽略。

假设 PZT 管的径向变化与绕制的多匝光纤的轴向变化传递函数为 1，则 PZT 管的周长变化量为每匝光纤长度的变化量，在压电陶瓷曲面绕制  $N$  匝保偏光纤，波长为  $\lambda$  的光波通过光纤总长度为  $L(L = n \cdot l)$  的光纤相位调制器后，发生的相位变化可表示为：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta n \cdot \Delta L + L \cdot \Delta n_{st}) = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta n + L \cdot k_{st})\Delta L \quad (6)$$

式中， $\Delta L = N \cdot \Delta l$  为光纤总长度变化量。此外，在输入高频电压信号的情况下，折射率变化引起的相位变化远大于长度变化引起的相位变化，所以在实际应用中仅考虑折射率变化引起光波相位变化。设定 PZT 加载的调制电压频率大小与 PZT 管的谐振频率相同，综合式(1)、式(6)可得：

$$\Delta\varphi = \frac{4Nd_{11}\pi^2}{(D_o - D_i)\lambda}(\Delta n + 2\pi D_o N k_{st}) \cdot V_m \quad (7)$$

## 2.2. 相位变化与调制深度

假设 PZT 采用正弦电压进行调制，PZT 在  $t$  时刻产生的相位为

$$\varphi(t) = K_m V_m(t) = K_m A_{mp} \sin(\omega_m t) = \varphi_{m0} \sin(\omega_m t) \quad (8)$$

式(8)中  $\varphi(t)$  为相位调制器在  $t$  时刻作用于光纤传感环产生的相位延迟， $K_m$  为 PZT 相位调制器的调制系数， $V_m$  为施加在相位调制器的调制电压， $A_{mp}$  为调制电压幅值， $\omega_m$  为调制电压信号的频率。

光源光信号经调制后产生的输出光信号为

$$P_D = kP_0 \left\{ 1 + \cos \left[ \varphi_F(t) + 2\varphi_{m0} \sin \frac{\varphi_m}{2} \cos \omega_m \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

上式中  $k$  为光路中光信号传输时与器件连接时产生的线性叠加损耗的相关系数。 $\varphi_F(t)$  为 Faraday 磁光效应产生的相位偏移。 $\tau$  为顺、逆时针相向传输光波在光纤环中先后的渡越时间。定义输出光信号中由相位调制器产生的不含时间变量的系数为调制深度为  $\varphi_{md}$ ，式(8)中的调制深度为

$$\varphi_{md} = 2\varphi_{m0} \sin \frac{\varphi_m}{2} \quad (10)$$

因此，光电探测器接收的光信号可改写为：

$$P_D = kP_0 \left\{ 1 + \cos \left[ \varphi_F(t) + \varphi_{md} \cos \omega_m \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

光电探测器将探测到的光信号转换为电信号输出，再经信号调理、模数转换后通过贝塞尔函数对电压信号进行谐波分析和算法解调得到调制深度。调制信号的幅值和 PZT 相位调制器调制的灵敏度与调制深度  $\varphi_{md}$  有关，PZT 的工作状态可以用调制深度  $\varphi_{md}$  表示[20] [21] [22]。

### 3. 试验和分析

通过对 PZT 相位调制器的理论分析可知, 在理想状态下对于同一个 PZT 相位调制器, PZT 相位调制器上施加的调制电压, 会等比例的引起在光纤中传输的相位变化, PZT 的调制性能优劣决定调制电压与相位变化之间的线性关系。

对于光纤电流传感器, 温度变化对测量准确度的影响是衡量其性能的关键指标[23]。为测试 PZT 相位调制的温度特性, 在温箱中模拟外界环境变化, 搭建了开环光纤电流传感器进行试验。

#### 3.1. PZT 的调制性能试验

为验证 PZT 的调制性能和温度稳定性, 搭建了如图 1 所示的开环光纤电流传感器样机进行试验。在开环 FOCS 样机中, 在 PZT 管内外壁之间施加正弦调制电压信号, 设定 PZT 调制电压频率与其谐振频率大小相等为 83.33 kHz, 调节 PZT 加载电压幅值的大小, 得到 PZT 调制电压与对应调制深度的关系如图 3 所示:

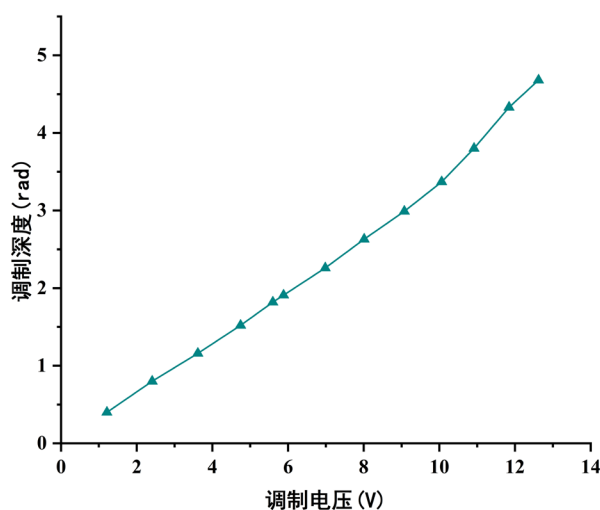


Figure 3. The relation curve of the voltage applied on the PZT and modulation depth  
图 3. PZT 加载电压与调制深度的关系曲线

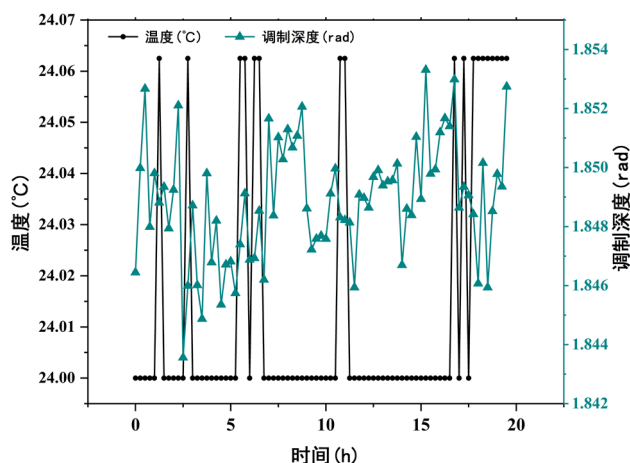
由图 3, 在 0~10 V 调制电压范围内 PZT 的调制深度与加载电压呈线性关系, 表明了 PZT 在加载调制电压时具有良好的调制性能, 施加合适的调制电压可实现对 PZT 相位调制器调制性能的精确控制。

#### 3.2. PZT 调制性能的温度特性试验

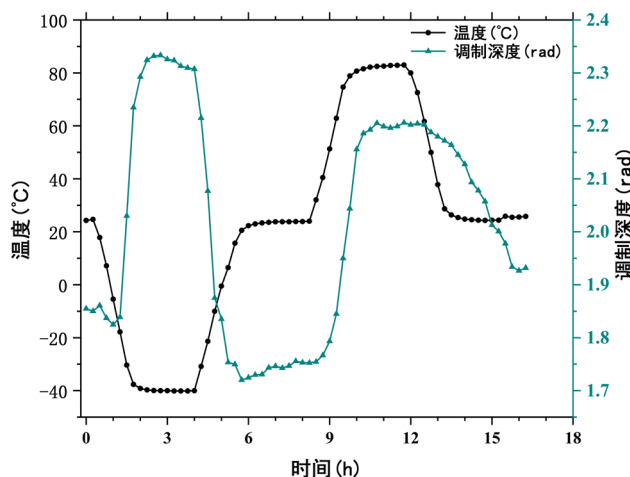
调节加载电压, 使 PZT 相位调制器的调制深度为 1.84, 此时加载电压为 5.6 V, 保持加载电压不变, 室温控制在 24℃, 进行 PZT 调制特性的稳定性试验, 试验结果如图 4 所示, PZT 的调制深度在常温下的误差为 1.2%, 表明了 PZT 在常温下良好的调制性能和稳定性。

为验证 PZT 相位调制器调制性能的温度稳定性, 将试验样机中的 PZT 相位调制器放置在温箱中, 设置温箱温度范围-40℃~+85℃, 温变速率为 1℃/3min, 温度循环曲线和测得的 PZT 相位调制器温度与调制深度的关系曲线如图 5 所示。

由图 5 在温度变化过程中, 调制深度随时间变化, 但在恒温+85℃、-40℃和+25℃时, PZT 相位调制器的调制深度大小基本保持不变, 表明了 PZT 调制性能随温度变化的温度特性。同时在从低温(-40℃)回常温(+25℃), 和高温(+85℃)回常温(+25℃)变温过程结束后, PZT 的调制深度可以回到初始常温时的大小, 因此可以通过对 PZT 调制深度进行温度补偿来保证 FOCS 的精度[23] [24]。



**Figure 4.** The modulation characteristics of PZT at a room temperature  
**图 4.** PZT 常温调制特性



**Figure 5.** The curve of the modulation depth of PZT, when FOCS is in a high-low temperature cycle  
**图 5.** PZT 调制深度温度特性曲线

#### 4. 结语

本文对开环 FOCS 的原理进行了概述, 阐述了 PZT 相位调制器的调制原理, 并对开环 FOCS 用到的 PZT 相位调制器的调制特性进行了理论分析, 该模型可以准确分析出引起相位变化的原因, 从由 PZT 管周长变化引起的光纤应变和应变模式下光纤长度变化量和折射率变化上分析, 推导出了引起相位变化的主要是由光纤伸缩引起的光纤折射率变化引起的, 得到了 PZT 相位调制器加载电压后由逆压电效应引起的相位变化与代表其调制性能的参数——调制深度的关系, 并根据推导结果对 PZT 相位调制器调制性能进行了常温稳定性与全温稳定性验证测试, 试验结果表明了 PZT 相位调制器调制性能的温度特性, 并通过数据结果分析得到可以通过温度补偿来实现 PZT 相位调制器调制深度的温度稳定性的结论, 这对 PZT 调制特性的精确控制、灵敏度的提升与 PZT 相位调制器的优化设计和工程化应用具有重要指导意义。

#### 基金项目

国家重点研发计划项目 2019YFC1509502。

## 参考文献

- [1] Panda, P.K., Sahoo, B., Ramakrishna, J., Manoj, B. and Prasada Rao, D.S.D. (2018) Recent Studies on Vibrational Energy Harvesting of PZT Materials. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 21512-21516. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.562>
- [2] Wang, R.Z., Tang, E.L., Yang, G.L. and Han, Y.F. (2020) Experimental Research on Dynamic Response of PZT-5H under Impact Load. *Ceramics International*, **46**, 2868-2876. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.280>
- [3] 程沁蕊. 基于 PZT 相位调制实时补偿的全光纤傅里叶变换光谱仪建模与设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [4] 王廷云. 用压电陶瓷实现的光纤相位调制理论与试验分析[J]. 光子学报, 1999(2): 3-5.
- [5] Gao, B., Yao, Z.H., Lai, D.Y., et al. (2020) Unexpectedly High Piezoelectric Response in SM-Doped PZT Ceramics beyond the Morphotropic Phase Boundary Region. *Journal of Alloys and Compounds*, **836**, Article ID: 155474. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155474>
- [6] Liu, C.Y., Xu, P., Zheng, D.Y. and Liu, Q.B. (2020) Study on Microstructure and Properties of a Fe-Based SMA/PZT Composite Coating Produced by Laser Cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, **831**, Article ID: 154813. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154813>
- [7] 任仲豪, 周慎杰. 薄膜压电材料压电系数测试方法研究进展[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 1-4.
- [8] Kahn, V. (1985) Acoustic and Elastic Properties of PZT Ceramics with Anisotropic Pores. *Journal of the American Ceramic Society*, **68**, 623-628. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb16165.x>
- [9] 褚涛, 王安玖, 张元松, 何婧, 王学杰, 张静, 张珍宣, 张田才. 高压电常数 PZT-PNN-PSN-PMW 压电陶瓷的制备及性能研究[J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(3): 213-218.
- [10] 杜春雷. 压电陶瓷材料研究现状及其应用[J]. 江西建材, 2020(5): 4+6.
- [11] 莫国伟. PZT8 与 PZT4 压电陶瓷材料的性能对比[J]. 造纸装备及材料, 2020, 49(3): 59.
- [12] 金锋, 姬文越. 对光纤 PZT 相位调制器的研究[J]. 光通信技术, 1989(1): 84-87.
- [13] 袁超. 光纤干涉式传感系统中 PZT 调制器的特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [14] 刘相果, 蹇胜勇, 蒋洪平, 刘光聪. 基于 PZT 陶瓷谐振技术的光纤相位调制器研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 699-701.
- [15] 杨远洪, 张惟, 叙马静. 开环 FOG 中 PZT 调制器的在线研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999(6): 735-738.
- [16] 杨远洪, 马静, 张惟叙. 光纤陀螺中 PZT 调制器的建模[J]. 航空精密制造技术, 1996(1): 38-41.
- [17] 刘志波, 李阳, 苏耘, 刘艳, 谭中伟, 马林, 简水生. 基于压电陶瓷的光相位调制器的调制系数测量及验证[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 83-88.
- [18] 王巍, 杨清生. 全光纤陀螺及其相位调制器设计[J]. 航天控制, 1995(2): 16-21.
- [19] 胡科可. 光纤干涉信号的数字处理方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [20] 毛献辉. 环形干涉光纤传感器若干关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
- [21] 卢成杰. 开环光纤陀螺数字解调关键问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [22] 张敏杰. 开环 Sagnac 干涉仪的数字信号处理[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [23] 肖浩, 刘博阳, 湾世伟, 赵玉才. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 91-95.
- [24] 尹士玉, 张世昌, 吴甜. 全光纤电流互感器温度误差分析与温度误差补偿[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 16-21.