

# 电力系统中光学互感器的研究与评述

肖智宏

(国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

**摘要:** 高可靠性和测量精确性是电力系统光学互感器实用化的前提和基础。应用电力传感光学理论, 从结构模型出发, 对磁光玻璃型和全光纤型光学电流互感器、电光晶体型和全光纤型光学电压互感器的实现方案进行了分类和技术比较, 指出了各种方案在检测算法和制造工艺的优缺点。最后, 对光学传感技术实用化需要关注的问题和研究方向进行了探讨。

**关键词:** 电力系统; 光学电流互感器; 光学电压互感器; 法拉第效应; 普克尔效应; 逆压电效应

## Study and comment of the optical transformers in power system

XIAO Zhi-hong

(State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

**Abstract:** High reliability and measurement accuracy are the premises and foundations of the practical use of optical transformer in power systems. Based on the theory of power optic sensor and model structure, the implementation plans for magneto-optical glass type as well as all-fiber type current transformer and electro-optic crystal type as well as all-fiber type voltage transformer are classified and compared, the advantages and disadvantages in the aspects of detection algorithms and manufacturing processes are also pointed out. Finally, the problems associated with the practical use of optical sensing technology and research directions are discussed.

**Key words:** power system; optical current transformer; optical voltage transformer; Faraday effect; Pockels effect; converse piezoelectric effect

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0148-07

## 0 引言

互感器是电力系统中进行电网信息采集的关键设备, 是连接一、二次设备的重要纽带, 其精度和可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行密切相关。随着特高压工程的实施与智能电网的全面建设, 我国电网发展迈入大容量、特高压、智能化的新阶段。此时, 传统的电磁式互感器暴露出一系列严重缺点: 绝缘结构复杂、体积笨重庞大、固有磁饱和、铁磁谐振等缺点, 已难以满足信息精准测量、绝缘安全可靠、设备嵌入安装的发展需要。研究与应用新型互感器已经势在必行<sup>[1]</sup>。

与传统电磁式互感器相比, 电子式互感器具有绝缘简单、无磁饱和、动态范围宽、输出数字化、体积小易集成等特点, 电压互感器无谐振现象、电流互感器二次输出可以开路等优点, 受到普遍关注, 并逐步在工程中试点应用<sup>[2]</sup>。电子式互感器研究已

经开展了 30 多年, 经过了大量的理论分析、实验研究及挂网运行, 但到目前为止还没有一种大批量的商品化产品应用市场。其根本原因在于: 虽然原理和技术可行, 但要在高电压、高温差等环境影响下长期、稳定、可靠运行还需付出更多努力<sup>[3]</sup>。

电子式互感器根据构成原理的不同, 可分为有源电子式互感器<sup>[4]</sup>和光学(无源电子式)互感器<sup>[5-8]</sup>。光学互感器是一门融电气工程、光学与微电子等学科为一体的新技术应用, 对其基础理论研究、高可靠性设备研制并解决实用化问题是目前光学互感器应着力解决的问题。本文通过对光学电流互感器和光学电压互感器的基本原理和结构模型进行论述与分析, 对不同技术路线的实现方案进行了比较。对在光学互感器试点工程应用中暴露出来的问题进行了分析, 提出了制约推广的解决措施, 并对远景技术路线进行了展望。

## 1 基本原理分析

光束从具有电磁场的介质反射和透射后, 因介

质中电子运动规律受到电磁场的影响,使原本各向同性介质的电子极化特性发生改变,从而使光的偏振状态会发生变化,产生磁光和电光效应。利用介质与电磁场相互作用的结果实现光学互感器对电流和电压的测量。

### 1.1 光学电流互感器实现原理

自 Rogers 等学者提出光学电流传感方法以来,基于法拉第磁光效应的光学电流互感器得到广泛研究:线偏振光在电流产生的磁场作用下通过介质时,其偏振面将发生旋转,偏转角度与磁感应强度和光路穿越介质长度的乘积成正比

$$\varphi = \mu V \int_L \mathbf{H}(l) \cdot dl \quad (1)$$

其中: $\varphi$  为法拉第旋光角; $\mu$ 、 $V$  分别为介质的磁导率和费尔德常数; $\mathbf{H}$  为磁场强度; $L$  为通过介质偏振光的光程长度。由于磁场强度由电流  $I$  产生,根据安培环路定律,式(1)可表达为

$$\varphi = \mu VNI \quad (2)$$

由于目前无法实现高精度测量偏振面角度,通常将偏振面角度变化转化为光强变化,进而采用偏振检测和干涉检测方法实现电流测量。法拉第磁光效应原理具有良好的测量线性度,可以测量变化的电流和稳恒电流,不存在测量频带问题。

### 1.2 光学电压互感器实现原理

光学电压互感器有基于电光普克尔效应、科尔效应和基于逆压电效应实现方式,目前理论研究和示范应用均重点围绕电光普克尔效应开展。晶体介质在没有外加电压作用时是各向同性的,而在外加电压作用下变为各项异性的双轴晶体,从而导致其折射率和通光偏振态发生变化,产生双折射,一束光变成两束线偏振光,横向电光调制和纵向电光调制方式时,出射两束线偏振光的相位差可分别表示为式(3)、式(4)。

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{l}{d} U = \frac{\pi}{U_{\pi 1}} U \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} U = \frac{\pi}{U_{\pi 1}} U \quad (4)$$

其中: $\lambda$  为光波波长; $n_0$ 、 $\gamma_{41}$  分别为晶体的折射率和电光系数; $d$  和  $l$  分别为晶体的厚度和通光长度; $U$  是外加电压; $U_{\pi 1}$  和  $U_{\pi 2}$  分别是使两束光产生  $\pi$  相位差所需的半波电压。

利用偏光干涉的方法将相位差变化转换为输出光强的变化,经光电变换及相应的信号处理便可求得被测电压。

## 2 模型结构比较

根据传感头类型的不同,将光学电流互感器划分为磁光玻璃型光学电流互感器和全光纤型光学电流互感器。根据传感机理不同,可将光学电压互感器划分为基于普克尔效应的电光晶体型光学电压互感器和基于逆压电效应的全光纤型光学电压互感器。

### 2.1 光学电流互感器模型

#### 2.1.1 磁光玻璃型光学电流互感器

典型磁光玻璃型光学电流互感器物理结构表现为起偏器、磁光材料元件和检偏器等偏振器件的级联形式,如图 1 所示。光源发出的光经光纤送至准直透镜和起偏器后变为线偏振光;通过传感材料时在被测电流产生磁场作用下其偏振面将发生旋转;检偏器将线偏振光偏振面的角度变化转变为输出光强的变化;由耦合透镜耦合至输出光纤并送至 PIN;最后由信号处理电路对偏光干涉检测进行处理,即可得到与被测电流成正比的小电压信号。

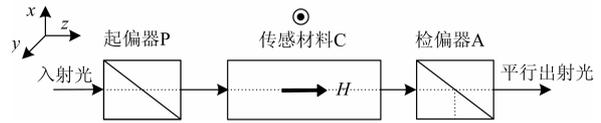


图 1 磁光玻璃型光学电流互感器结构模型

Fig. 1 Model structure of magneto-optical glass type optical current transformer

磁光玻璃型光学电流互感器数学上表现为各光学器件琼斯矩阵连乘,输出光强表示为

$$I_{out} = 0.5I_0[1 + \sin(2\varphi)] \quad (7)$$

其中: $I_0$  为入射光经过起偏器后的光强; $\varphi$  为法拉第旋光角。

为了减少外部磁场影响,传感头采用全反射方式的闭合光路结构。全反射将使线偏振光改变为椭圆偏振光,从而影响光学电流互感器的测量灵敏度,通常采用双正交反射保偏和临界角反射保偏方法解决。

#### 2.1.2 全光纤型光学电流互感器

全光纤型光学电流互感器以光纤作为传感材料,将光纤缠绕被测电流导线周围,形成闭合光回路。根据信号检测方法不同,又可分为偏振调制型和相位调制型。本文以反射型为基础进行建模分析,其结构模型如图 2 所示。其基本原理为:由光源发出的光经过耦合器后由光纤偏振器起偏,形成线偏振光。线偏振光再以  $45^\circ$  注入保偏光纤的  $x$  轴和  $y$  轴传输,并输出到相位调制器进行初始相位调制。

当这两束正交模式的线偏振光通过  $\lambda/4$  波片后, 分别转变为左旋和右旋的圆偏振光, 进入传感光纤。由于传输电流产生磁场的法拉第效应, 这两束圆偏振光以不同的速度传输, 产生位相差。两束圆偏振光由传感光纤端面反射后, 偏振模式互换(即左旋光变为右旋光, 右旋光变为左旋光)第二次穿过传感光纤, 并和电流产生的磁场再次发生相互作用, 使产生的相位差加倍。再次通过  $\lambda/4$  波片恢复为线偏振光, 在光纤偏振器发生干涉, 并有耦合器进行探测。

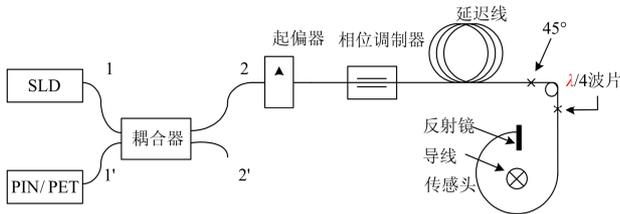


图 2 全光纤型光学电流互感器结构模型

Fig. 2 Model structure of all-fiber type optical current transformer

全光纤型光学电流传感器输出光强表达式为

$$I_{out} = 0.5I_0[1 + \cos(4\varphi + \phi(t-\tau) - \phi(t))] \quad (9)$$

其中:  $I_0$  为入射光经过起偏器后的光强;  $\varphi$  为法拉第旋光角;  $\phi(t-\tau)$  和  $\phi(t)$  分别表示  $t-\tau$  和  $t$  时刻相位调制器的调制相位。

由式(9)可知, 由于余弦函数的特性, 在小电流情况下检测灵敏度很低, 因此对检测信号附加一个相位偏差, 使输出信号在零点附近获得最大的灵敏度。通常采用  $90^\circ$  静态偏置和方波动态调制。当采用方波调制条件下, 令  $\phi(t) - \phi(t-\tau) = \pm \frac{\pi}{2} + \phi_f$ ,  $\phi_f$  为反馈相移。则式(9)可转换为

$$I_{out} = 0.5I_0[1 \pm \sin(4\varphi - \phi_f)] \quad (10)$$

由闭环条件可得:  $\sin(4\varphi - \phi_f) = 0$ , 即  $\phi_f = 4\varphi$ 。将  $\phi_f$  经调制解调后分别相位调制器和输出检测电路, 从而实现互感器的闭环控制。

### 2.1.3 对比分析

#### 1) 原理比较

在实现原理方面, 两种光学电流互感器均基于法拉第磁光效应, 磁光玻璃型直接检测光偏振面的旋转角度变化引起光强的变化, 而全光纤型应用萨格纳克干涉原理和动态补偿方式实现两束偏振光干涉并检测其相位差变化。各技术类型的电流互感器主要技术特征比较情况详见表 1。

#### 2) 技术比较

磁光玻璃型光学电流互感器用磁光玻璃作为传

表 1 光学电流互感器的比较

Table 1 Comparison of optical current transformer

电磁式 互感器	电子式互感器			
	有源	磁光玻璃型 光学	全光纤型 光学	
基本原理	法拉第电磁感应	法拉第旋光效应		
传感结构	铁心线圈	空心线圈	磁光玻璃	传感光纤
稳态品质	品质优良	条件满足	不满足要求	不满足要求
动态品质	不满足	条件满足	品质优良	品质优良
长期可靠性	品质优良	品质优良	品质优良	品质优良
抗电磁干扰	不受影响	较大影响	不受影响	不受影响
双折射影响	不受影响	不受影响	受影响	较大影响
温度影响	不受影响	不受影响	受影响	较大影响
震动影响	不受影响	不受影响	较大影响	受影响

感头, 通过材料内部多次反射形成环绕导体的闭合光路。这种传感头可以选用高费尔德常数的玻璃材料, 它不受光纤中存在的本征双折射及弯曲引起的线性双折射的影响, 温度双折射和应力双折射也都比较小。块状玻璃的主要问题是反射引起的光偏振态变化。在多次全反射形成围绕被测电流的光回路中, 当入射角大于临界角时, 光矢量 s 分量和 p 分量全反射后会产生一定的相位差, 使线偏振光的偏振态发生变化, 这与光纤中双折射产生的效果是一样的。因此, 如何消除内反射引起的偏振态变化是该种技术实用化的关键。此外, 磁光玻璃型光学电流互感器主要缺点是闭合光路结构的传感头的加工精度要求较高, 同时受震动影响较大。

全光纤型光学电流互感器用采用萨格纳克干涉原理完成测量, 输入和输出光路通过同一根光纤, 抗干扰能力大大提高。同时, 由于采用互易结构, 传感光信号在发送和接收时通过同一光纤和同样的光学系统, 提高了系统抗震动和抗温度变化等性能。全光纤型光学电流互感器主要缺点是传感光纤的固有双折射难以处理。由于普通硅光纤的费尔德常数较小, 光纤固有双折射引起的光偏振态的改变倾向于淹没法拉第旋转角。要提高灵敏度, 就必须增加传感光纤圈数, 但同时又会增加本征双折射和弯曲引起的线性双折射, 从而使传感器灵敏度低于理论值。此外, 光纤的双折射及费尔德常数还是温度的函数, 进一步增加了实用化难度。

#### 3) 装置比较

在装置实现方面, 磁光玻璃型光学电流互感器的光学元件少, 传感部分结构简单; 采用普通磁光玻璃, 材料成熟, 并无需进行温度控制。其实用化难点主要是光学元件与磁光玻璃之间封装技术、闭

合玻璃回路之间粘合技术和抗震动问题, 制造工艺决定了互感器长期运行可靠性; 全光纤型光学电流互感器中各光纤元件间连接较为简单, 容易实现; 传感环安装方式灵活, 易于其它设备集成。其实用化难点主要是系统结构复杂, 环节多, 所用光学元件多, 需要专门的温度控制, 多种光学元件的环境适应性和可靠性是决定长期运行的主要因素。当被测电流较小时, 信噪比较低, 对全光纤型光学电流互感器的信号调制和解调均提出了更高的要求。

## 2.2 光学电压互感器模型

### 2.2.1 电光晶体型光学电压互感器

电光晶体型光学电压互感器利用普克尔效应实现电压测量, 外加电场作用下的晶体实质上是一个相位延迟器, 主要光学器件包含起偏器、 $\lambda/4$ 波片、电光晶体和检偏器, 如图3所示。其中, 起偏器和检偏器放置在光路系统的两端构成偏振光干涉检测系统, 用于测量光路中因线性电光效应引起的相位差。

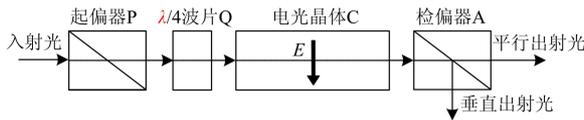


图3 电光晶体型光学电压互感器基本结构

Fig. 3 Basic structure of all-fiber type optical voltage transformer

普克尔效应电压互感器输出光强表达式为

$$I_{\text{out}} = I_0 [-\sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} + \cos^2(\alpha - \beta)] \quad (12)$$

其中:  $I_0$  为入射光经过起偏器后的光强;  $\varphi$  为电光效应产生相位差;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为起偏器和检偏器与主轴的偏转角。

由式(12)可知, 输出光强不仅与外加电压产生相位差有关, 而且与起偏器、检偏器的偏振轴方向及光的偏振方向之间关系有关。在设计光路时, 将起偏器与晶体本征方向成  $45^\circ$  角、与检偏器成  $90^\circ$  角, 可获得最大偏光干涉, 则式(12)表示为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0^2}{2} (1 - \cos \delta) \quad (13)$$

电光晶体受交流电压产生相位差  $\delta$  也是交流量, 而式(13)是偶函数, 在  $\delta$  的变化范围  $-\pi \leq \delta \leq \pi$  内, 输出光强  $I_{\text{out}}$  频率是  $\delta$  频率的两倍, 光强的变化不能正确的反应电压的变化。因此, 有必要采用电偏置法和光偏置法实现  $I_{\text{out}}$  和  $\delta$  的一一对应的关系。光偏置法在电光晶体和起偏器间加入一个快慢轴与晶体快慢轴一致的  $\lambda/4$  波片, 在两束偏振光间

增加一个固定的  $\pi/2$  相移, 式(13)进一步调整为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0^2}{2} (1 - \sin \delta) \quad (14)$$

### 2.2.2 全光纤型光学电压互感器

全光纤型光学电压互感器基于石英晶体的逆压电效应。被测电压加在石英晶体两端金属电极, 使其产生径向应变, 并将椭圆芯双模光纤缠绕和感知应变。调制光纤中 2 个传导模式间相位差, 利用零差相位跟踪技术测量相位调制量, 可得被测电压的大小和相位。

逆压电光学电压互感器结构原理如图4, 系统由传感头、光源、相位跟踪器和干涉仪等组成。在石英晶体构成的传感头施加交变电压时, 某方向将产生交变的压电应力从而晶体的周长被调制, 使得双模光纤中传播的两种模式(LP<sub>01</sub>模和LP<sub>11</sub>模)产生相位差为

$$\Delta\phi = -\pi \frac{Nd_{11}EL_t}{\Delta L_{2\pi}} \quad (15)$$

式中:  $N$  为光纤的匝数;  $E$  为电场强度;  $L_t$  为压电系数;  $d_{11}$  和  $\Delta L_{2\pi}$  分别为晶体的压电系数和晶体产生  $2\pi$  相位差时光纤长度变化量。

通过采用低相干干涉法, 在选择合适双模光纤长度后, 利用压电陶瓷构成的相位跟踪器实现调制相位, 并根据相位跟踪器的控制电压实现对电压大小和相位的测量。

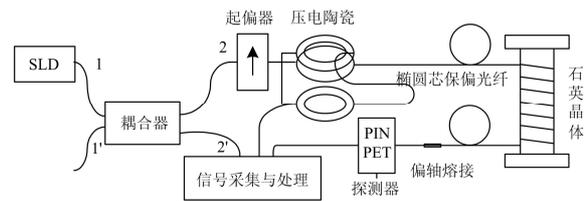


图4 全光纤型光学电压互感器基本结构

Fig. 4 Basic structure of all-fiber type optical voltage transformer

### 2.2.3 技术比较

#### 1) 原理比较

两种光学电压互感器测量的相位差均是电场的积分, 因而不会对附近的相位差产生影响。两种光学互感器利用不同原理实现电压测量, 电光晶体型应用普克尔效应, 采用偏光干涉法和  $45^\circ$  偏置方式建立模型实现对电压的测量, 而全光纤型应用逆压电原理, 采用模间干涉方法和零差相位跟踪技术实现测量。各技术类型的电压互感器主要技术特征比较情况详见表2。

#### 2) 技术比较

表 2 电压互感器的比较  
Table 2 Comparison of voltage transformer

	电磁式 互感器	电子式互感器		
		有源	电光晶体型 光学	全光纤型 光学
基本原理	法拉第电 磁感应	分压	普克尔/科 尔效应	逆压电效应
传感结构	铁心线圈	电容/电 阻分压	晶体	双模光纤
稳态品质	品质优良	品质优良	不满足要求	不满足要求
动态品质	不满足	条件满足	品质优良	品质优良
抗电磁干扰	不受影响	较大影响	横向影响, 纵向不影响	不受影响
双折射影响	不受影响	不受影响	受影响	较大影响
温度影响	不受影响	不受影响	受影响	较大影响
震动影响	不受影响	不受影响	较大影响	受影响
制作难度	成熟产品	难度较低	难度较大	难度很大

基于普克尔电光效应的光学电压互感器已实现挂网运行，在晶体材料选择和加工工艺方面仍在不断研究与改进优化。这种光学电压互感器需要自聚焦透镜、起(检)偏器、波片或转角棱镜、电光晶体等光学部件组合粘接而成，光学器件的加工和粘接工艺比较复杂。全光纤型光学电压互感器信号的传输和检测都用光纤，不需要偏振光学元件，因而加工工艺大大简化。

### 3) 装置比较

电光晶体型光学电压互感器具有和磁光玻璃型光学电流互感器相同的优缺点。横向电光调制互感器与纵向相比，纵向电光调制不受邻相电场或其他干扰电场的影响，但要求电极既透明又导电，这给实际装置研制带来较大的困难。全光纤型光学电压互感器中相位传感头和相位跟踪器均椭圆芯双模光纤和压电晶体构成，所用晶体元件较多，同时需要合理调整传输光波波长和多模光纤长度从而完成两种模式的传输与干涉，实现方式较复杂，目前仍需进行实用化和各种影响机理的研究。

## 3 研究与发展概况

光学互感器的研究主要包括光学测量机理研究和工业实用化研究，能否长期可靠及稳定运行是衡量其技术成熟性的基础。

### 3.1 基础理论研究概况

#### 3.1.1 介电张量矩阵特征

根据偏振光学理论，利用光波在介质中传播特性的改变可以实现电场、磁场、压力和温度等物理

量的测量，其本质可归结为介质介电张量矩阵的变化<sup>[9]</sup>。光学互感器传感模型的数学建模方法也是求解介电常数矩阵特征值和特征向量的问题，光波的波数是特征根的函数，坐标转移矩阵是特征矩阵的函数。在电光、磁光和弹光等各种效应影响下，介电张量矩阵变化仍满足埃尔米特矩阵特点，因此在分析各种效应对光学互感器温度、振动等影响时，可以借助埃尔米特矩阵性质进行多重效应量化分析。

#### 3.1.2 聚磁理论

为了解决磁光玻璃型光学电流互感器闭合光路长、环节多，受反射面影响等问题，文献[5, 10]进行了聚磁理论研究。在同样积分长度边界条件下，利用圆环电流比直导线电流产生至少大两倍磁场的聚磁效应，将偏振光通过螺线管的轴向方向测量电流，实现了“光绕电”和“电绕光”对偶传感原理。由于聚磁光路结构采用最简化的直通光路，取消了反射面，从而增加了系统的稳定性，并可以通过改变螺线管的形状或增加单位长度的匝数来提高测量灵敏度。

#### 3.1.3 御磁理论

为抵御外磁场干扰与运行可靠性间矛盾，文献[11]在磁场积分环路的等价解环条件的基础上，提出了磁场积分环路的正交解环法和零和解环法。证明了正交解环定理、零和解环定理和均匀磁场矩形环路的解环定理，并将安培环路定律等价地推广到非环路情况，解决了非闭合传感头抵御磁场干扰问题。

## 3.2 实用技术研究概况

### 3.2.1 闭环控制技术

光学互感器本质的开环特性，决定其易受温度和光强变化影响，有必要采用闭环控制技术提升光学测量的精准度。文献[10, 12]研究了自适应光学电流和电压传感原理，以稳态电流、电压参考模型和光学互感器为基础，应用卡尔曼理论和小波分析理论，构成了自适应闭环控制系统，消除了温度等因素对光学互感器测量的影响。文献[13, 14]提出了基于方波调制、相关解调和阶梯波反馈的闭环全光纤光学电流互感器和电光调制光学电压互感器的信号处理方法，实现了输出动态补偿并降低了传感头外的干扰影响。文献[8]提出了应用逆压电效应调制和温度自适应补偿方案的全光纤光学电压互感器。

### 3.2.2 双折射抑制技术

线形双折射对于温度与振动等环境因素十分敏感，是影响光学互感器实用化重要问题。在全光纤

测量方面,通常采用特种光纤和结构处理方式降低双折射影响<sup>[15]</sup>,如利用高园双折射光线或扭转光纤以增加其固有圆双折射,利用退火光纤可以消除光纤弯曲和光纤几何形状误差引起的线性双折射;利用光纤圈特殊绕法和几何结构分离方法去抵消线性双折射影响。在采用玻璃或晶体设计传感头时,它不受光纤中存在的本征双折射及弯曲引起的线性双折射的影响,主要应减少温度引起的暂态双折射和安装引起的应力双折射<sup>[16]</sup>。在信号处理中,也可采用偏振角和椭圆度的分离检测法<sup>[17]</sup>,分析瞬态电流和温度值。

### 3.3 前景应用展望

高品质的光学互感器长期以来一直是电力系统光学测量领域的研究热点。经过30多年的探索与研究,已经形成了基于不同原理和多种技术光学互感器结构,文中介绍的几种主流结构也都有挂网运行的经历及产品出现,但由于造价成本、测量精度、长期运行可靠性等方面的原因,目前尚不能全面替代传统电磁式互感器,仍有必要在原理、工艺和材料方法上进一步研究,提高可靠性和实用化水平。

在原理上,进一步深化光学测量技术机理研究,系统分析电光、磁光、弹光、热光因子对光学互感器灵敏度影响;利用御磁、聚磁等技术提高测量精准度和抗外部干扰问题。在技术上,研究闭环控制结构和相位补偿方法,优化光路设计,提高传感头的易加工性,解决温度、振动等制约互感器实用化问题。在工艺上,解决块状介质材料粘合问题和光纤器件融接技术,降低光路损耗。在材料上,研发高菲尔德长度常数且对温度不敏感的光纤和介质材料,克服双折射效应;研制高可靠性光学器件和电子器件,解决光源等敏感器件的慢变和温漂问题。

从未来发展来看,光学互感器除具备自身动态测量范围宽、无高压绝缘等优点外,可有效推动智能设备和二次保护控制技术的进步。利用设备体积小、重量轻、绝缘简单等特点,便于与瓷柱式断路器、GIS/HGIS等设备集成组合,提高设备安装灵活性,有效节约变电站占地面积。利用光学测量的数字化和精准化特点,实现了变电站信息采集的数字化和传输光纤网络化,简化了接线,提高了抗电磁干扰能力;有效支撑了继电保护故障判别的速动性、灵敏性和可靠性;促进以暂态量和采样值为判别基础的新原理保护和电力系统动态观测技术的实用化。

## 4 结语

光学互感器是传感光学在电力系统中典型应

用,由于其具有许多传统的电磁感应式互感器无法比拟的优点,具有广阔的应用前景。本文对电力系统中光学互感器的基本原理、结构模型及其主要特点进行了讨论,对研究现状与未来发展趋势进行了论述,提出了制约推广应用的问题和解决措施。

目前,尽管光学互感器在基础理论和关键技术研究方面取得了一些成果,也有部分样机试点应用,但要真正实现高可靠、长时间稳定运行,还需要进入深入和细致的研究与实验工作。

### 参考文献

- [1] 郭志忠. 电子式互感器评述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 1-5.  
GUO Zhi-zhong. Review of electronic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 1-5.
- [2] 李文胜. 220 kV GIS 电子式电流电压互感器在午山数字化变电站的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 158-162.  
LI Wen-sheng. Application of 220 kV GIS electronic transformer in Wushan digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 158-162.
- [3] 黄学卫, 董玉玲, 董丽丽. 数字化变电站中的非常规互感器[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 90-93.  
HUANG Xue-wei, DONG Yu-ling, DONG Li-li. Unconventional mutual inductor of digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 90-93.
- [4] 刘延冰, 李红斌, 余春雨, 等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 张国庆. 光学电流互感器理论与实用化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [6] 绍霞, 周有庆, 彭红海. 一种改进的直测电容电流型电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 241-247.  
SHAO Xia, ZHOU You-qing, PENG Hong-hai. As improved electronic voltage transformer based on directing capacitor current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 241-247.
- [7] 于文斌, 张国庆, 路忠峰, 等. 光学电流互感器的抗干扰分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 9-18.  
YU Wen-bin, ZHANG Guo-qing, LU Zhong-feng, et al. Analysis of resistance disturbance capability of optical current transformers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 9-18.

- [8] 刘丰, 郭璇, 卢鑫. 基于保偏光纤模间干涉的光学电压互感[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 560-565.  
LIU Feng, GUO Xuan, LU Xin. Digital closed-loop control system model analysis of a new type optical fiber voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 560-565.
- [9] 孙刚, 金世龙. 双折射晶体琼斯矩阵分析[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 17-21.  
SUN Gang, JIN Shi-long. Analyses of Jones matrix of birefringence crystal[J]. Applied Optics, 2005, 26(4): 17-21.
- [10] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.  
LI Yan-song, GUO Zhi-zhong, YANG Yi-han, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 21-26.
- [11] 路忠锋, 郭志忠. 磁场环路积分的等价解环[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1781-1784.  
LU Zhong-feng, GUO Zhi-zhong. Equivalent uncoupling of magnetic field integral loop[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1781-1784.
- [12] 王红星, 张国庆, 于文斌, 等. 自愈光学电压传感器[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 135-138.  
WANG Hong-xing, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Self-healing optical voltage sensor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 135-138.
- [13] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46.  
ZHANG Chao-yang, ZHANG Chun-xi, WANG Xia-xiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46.
- [14] 肖庆亮, 张朝阳, 杨德伟. 一种新型光纤电压互感器数字闭环控制系统模型研究[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(1): 90-94.  
XIAO Qing-liang, ZHANG Chao-yang, YANG De-wei. Digital closed-loop control system model analysis of a new type optical fiber voltage transformer[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(1): 90-94.
- [15] 姜中英, 张春熹, 徐宏杰, 等. 线性双折射对光纤电流互感器影响的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(8): 218-223.  
JIANG Zhong-ying, ZHANG Chun-xi, XU Hong-jie, et al. Study of fiber optic current transducer error due to linear birefringence[J]. Optical Technique, 2006, 32(8): 218-223.
- [16] 王政平, 刘晓瑜. 线性双折射对不同类型光学玻璃电流互感器输出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 75-79.  
WANG Zheng-ping, LIU Xiao-yu. Effects of linear birefringence upon performances of different designs of optical glass current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 75-79.
- [17] 康崇, 吕文磊, 欧阳鸿, 等. 光学电流互感器中线性双折射与法拉第效应的分离检测[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 163-168.  
KANG Chong, Lü Wen-lei, OUYANG Hong, et al. The separate detection of linear birefringence and Faraday effect in optical current transformer[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 163-168.

收稿日期: 2013-08-31; 修回日期: 2013-10-25

作者简介:

肖智宏(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、智能电网规划与设计、电力传感光学研究等方面的工作。E-mail: xiaozhihong@chinasperi.sgcc.com.cn