

# 光学电流传感器的新进展

宁雅农

(重庆大学光仪系, 重庆)

D. A. Jackson

(肯特大学物理实验室, 英国)

## 提 要

利用法拉第磁电效应可实现电流的光学法测量. 采用光学纤维或光学玻璃作为传感元件的电流传感器一直是研究和发展的主要课题. 在本文中概述光纤电流传感器中的主要问题, 并着重介绍光学玻璃电流传感器的最新发展成果.

**关键词** 光学电流传感器.

## 1 引 言

根据所采用的测量机理和所使用的探测材料, 光学电流传感器的探头可分为三种类型, 即全光纤式探头<sup>[1,2]</sup>; 光学玻璃探头<sup>[3,4]</sup>; 以及电-光混合式探头<sup>[5,6]</sup>. 一般来说, 前两种探头的工作原理是基于法拉第磁光效应, 而后一种则是将常规的电感式(或霍尔效应式)电流传感器与不同的光学传感技术相结合而构成的不同档次的混合式电流传感器.

自从利用光纤做为电流传感元件的方案提出以来, 大量的探索、研究工作先后在国际范围内展开. 有关这方面的研究资料可以从历届光纤传感器年会论文集及有关的学术期刊中得到. 本文只是指出光纤电流传感器中存在的主要问题, 并重点介绍光学玻璃传感元件的最新研究成果.

## 2 光纤电流传感器的主要问题

光纤作为电流传感元件的方案提出以来<sup>[7]</sup>, 虽然经过了大量的探索和研究, 光纤电流传感器仍不能进入实用化和商品化阶段. 其主要原因之一是光纤中双折射引起的探测灵敏度下降及不稳定的问题.

如果光纤电流探头设计成由光纤绕成的螺旋管形状, 这样制作光纤时留下的线性双折射就会由弯曲引入传感元件. 外界磁场对光线偏振面作用将受到调制, 从而使电流测量灵敏度减小并且不稳定. 这些影响可归纳为以下几个方面:

1) **减小了电流测量灵敏度** 这是因为双折射使线偏光的两个正交光振动分量之间产生一个位相差, 结果输出光变成了椭圆偏振光. 当使用偏振仪进行测量时, 由于椭圆偏光转角的测量灵敏度比线偏光要小, 因此整个仪器的测量灵敏度就相应地减小了. 在最不理想的情况下,

当两个正交分量间的位相差为  $90^\circ$  时,输出光则成为了圆偏光,这时的测量灵敏度将下降为零.

2) **对于不同的入射偏振面,传感器具有不同的测量灵敏度** 在光纤电流传感器探头中,由于线性双折射的存在,对不同偏振面的入射线偏光,双折射引入的位相不同.因而使整个探头的灵敏度随偏振面方位的改变而周期性变化.

3) **测量灵敏度受外界温度的调制** 由于弯曲光纤引入的线性双折射分布是随温度的变化而改变的.从而传感器的测量灵敏度也随温度变化而产生漂移,且沿光路上不同部分的灵敏度是逐渐变化的,因而在一个封闭的环形光路中灵敏度的分布是非均匀的.这样传感元件的输出信号不但会受被测导体位置的调制,而且还会受到外界电磁场的干扰<sup>[8]</sup>.过去几年中,有关克服这些线性双折射的方案不断地被提出,例如采用特殊退火处理<sup>[9]</sup>,或设计特殊结构的光纤探头<sup>[10]</sup>等.但有关灵敏度随温度变化的问题,仍需进一步的研究才能解决.

### 3 光学玻璃传感元件

在光纤电流传感器不断发展的同时,光学电流传感器的另一个分支——用光学玻璃作为探头的电流传感器获得了突破性的进展<sup>[3,4,11]</sup>.具有不同结构和不同功能的光学玻璃传感元件先后被研制出.其中有些元件经过了长时间的现场测试,证明了它们的性能基本上达到了实用化的要求.其优点:

1) **光学玻璃材料的选择范围比光纤要宽的多** 各种具有高数值 Verdet 常数的光学玻璃均可用来制作传感元件.

2) **光学玻璃中的残余双折射极小** 经过退火处理以后,其双折射可减小  $3 \text{ nm/mm}$  以下.这样小的双折射对光线的偏振面的作用几乎可以忽略不计.

3) 光学玻璃制作的传感元件中光束经过反射而形成的环形光路,不存在线性双折射.避免了光纤电流传感器中的灵敏度减小及漂移等问题.

为了遵照安培电流定律来测量电流,测量光束应围绕被测导线形成封闭的光路.因此,在光学玻璃传感元件中,需要设计若干个全反射面,使光束经过这些全反射面构成封闭的光路.由于全反射面的存在,另一个问题相应地出现:即线偏光经全反射后,它的两个正交分量之间要产生一个相位差.这个位相差对传感元件测量灵敏度的影响与光纤中双折射所起的作用相似,可使得传感元件的灵敏度沿光路的不同部分以及对应不同的入射偏振角有不同的数值.因而传感元件的输出信号会受到被测导体位置以及外界磁场的调制.为了解决上述问题,在设计光学玻璃传感元件时,就必须有效地消除这个反射位相差.根据已报道的资料,至少有两种方案可用于消除反射位相差.它们是“双全反射法”和“临界角全反射法”.

根据已研制出的光学玻璃电流传感器的结构和工作特性,它们可大体上分为四个不同的类型:三维四方形传感元件;二维三角形传感元件;二维环形传感元件以及三角形夹剪式传感元件.在本文中,仅是将这些元件的设计结构和测试结果分别地介绍,有关的详细资料可按所提供的参数资料查询.

### 3.1 三维正方形传感元件

这种三维正方形传感元件是采用“双全反射抵消法”来消除全反射引入的相位差. 该设计方案是由日本的 Sato 等在 1983 年首先提出的<sup>[12]</sup>, 在这个设计方案中, 光学传感元件是由一整块光学玻璃制成. 它是一个中心有一穿孔的正方形, 如图 1 所示. 当光束经过第一个直角射入这个传感元件中后, 它将在正方形的另外三个直角的每一个角上经过两次 45° 的全反射, 然后构成一个近似封闭的环路. 由于这两次反射的反射面是正交的, 由第一次反射产生的位相差可在第二次反射过程中抵消. 从而达到了消除反射位相差、维持光线偏振状态的目的.

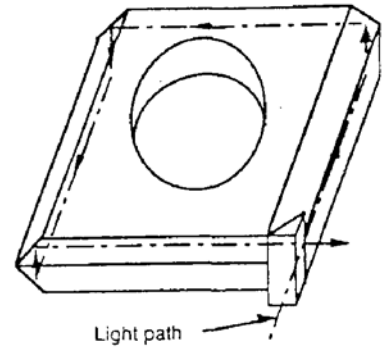


Fig. 1 3D square-shaped sensing element

利用这个原理设计的传感元件, 在 0.2~2 kArms 的交流电流范围中测试时, 试验曲线的线性度为  $\pm 0.4\%$ . 而温度从  $-20^\circ$  变到  $90^\circ$  对输出信号的影响只有  $\pm 0.3\%$ . 当该元件用于短路电流测量时, 在 30~150 kA 的峰值电流范围内, 测量的误差只是 0~4%<sup>[13]</sup>.

1986~1987 年间, 美国 TVA 公司为了替换易出故障的充油式电流传感器, 采用了由 Westing house 设计、制造的三维正方形光学电流传感元件, 并且安置于 161 kV 的实际现场进行了长达一年多的测试. 结果表明其测量精度及稳定性均达到了电量计量的要求<sup>[13]</sup>, 证明了采用光学玻璃制做传感元件的可行性, 使光学电流传感器与实际应用间的距离大大缩小.

### 3.2 二维三角形传感元件

虽然三维正方形传感元件在实际测试中获得了成功, 但是就其元件自身的结构看, 仍然有一定的缺点: 1) 元件加工工艺复杂; 由于有 6 个全反射面需经过很多道加工工序才能制成. 2) 由于采用了多面反射, 入射光的准直精度要求很高. 3) 由于光束在元件中是近似封闭的; 被测导线的位置以及外界磁场对其输出信号会产生一定的影响.

为了简化玻璃传感元件的结构, 同时又能保持三维正体形元件的功能, 在大量理论分析和计算机模拟的基础上, 英国肯特大学的研究人员首先提出了“临界角全反射”的设计方案, 并且设计出了二维三角形传感元件<sup>[14]</sup>. 该设计方案的技术关键之处是利用线偏光在临界角全反射时, 其偏振状态不变的特性, 采用两个临界角全反射面, 使光束在二维的平面中形成了一个三角形封闭光路(如图 2 所示). 这个设计方案不但保留了三维正方形元件的测量精度, 还大大地简化了加工要求. 实验测试的结果表明, 这个二维三角形传感元件在 1~3000 A 的测量范围内具有  $20 \text{ mA}/\sqrt{\text{Hz}}$  的分辨精度, 其频谱响应为 0~12 kHz<sup>[14]</sup>.

### 3.3 二维环形传感元件

根据线偏光的偏振面转角与被测电流的大小以及光束围绕导线的圈数  $N$  成正比的关系, 当圈数  $N$  增加时, 电流测量灵敏度将增加相应的倍数. 基于这个原理, 一种全新的小型电流传感元件被英国肯特大学的研究人员研制成功<sup>[15]</sup>. 这种高灵敏度, 大测量范围的圆环形电流传感元件是由一个外径约 80 mm, 内径为 35 mm 的玻璃圆环加上一个匹配棱镜组成(如图 3 所示). 这个玻璃环的外缘是经过高精度光学抛光处理过的, 并且具有较高的圆环度. 匹配棱镜除了与圆环接触的侧面需要抛光以外, 另外两个侧面, 即光束的入射和出射窗口也需要抛光. 当

这个传感元件放在被测系统中时,一束线偏光经过匹配棱镜的入射窗射入传感元件中. 通过调整入射光束的入射角,可使光束在传感元件中产生多次临界角全反射. 最后的反射光束再从匹配棱镜的出射窗射出. 在这个二维的环形传感元件中,线偏光一共经过了 15 次临界角全反射,使光束形成了 5 个围绕电流导线的环路. 从而使测量系统的灵敏度提高了 5 倍. 对这个元件的初步测试的结果表明,其最小测量电流为 1 安培,频率响应不小于 10 kHz.

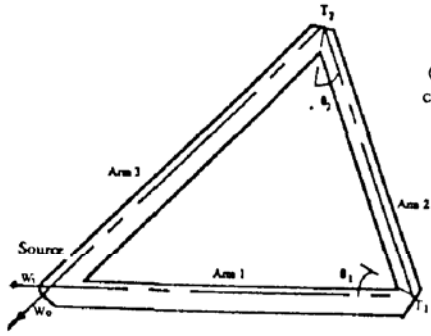


Fig. 2 Triangular-shaped sensing element

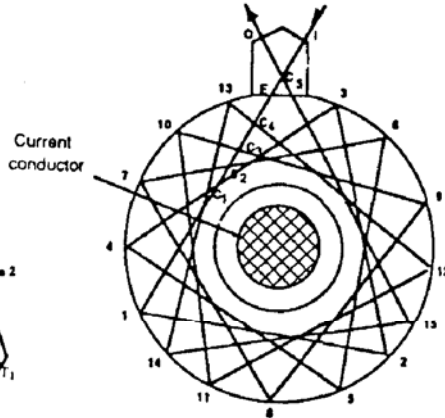


Fig. 3 Ring-shaped sensing element

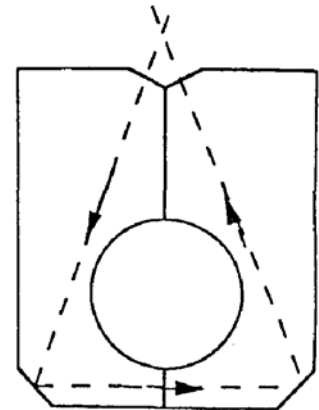


Fig. 4 Optical current clamp

### 3. 4 三角形夹剪式传感元件

在实际工程应用中,常常希望能够在不断电的条件下进行电流的测量,以便对电网系统的运行情况作及时的检测. 在目前的电力系统中,这种测量通常是使用电感式电流测量夹剪 (Current Transformer clamp) 来实现的. 如果在高电压区,大电流的情况下,这种测量方法则由于绝缘及电磁饱和等问题而不再适用了. 针对这类实际工程的要求,一种新型的,可打开的光学夹剪式传感元件在肯特大学研制成功<sup>[11,15]</sup>. 这种光学电流传感器 (Optical Current Clamp) 是由两块面积为 86×35 mm 的相同形状的光学玻璃组成. 如图 4 所示,当光线通过入射窗进入传感元件中的,它经过两次临界角全反射后又从出射窗口射出. 这样光束在传感器中形成了一个三角形的封闭环路,因而可按照安培电流定律测量通过该环路中心的电流. 实验测量的结果表明,在 -1500~1500 A 的直流电流测量范围中,该元件的测量灵敏度为  $2.21 \times 10^{-5}$  rad/A, 它与理论灵敏度值  $2.23 \times 10^{-5}$  rad/A 十分接近. 如用该元件测量交流电流,其最小的可检测电流为 9.95 mA (在 79 Hz 频率时),相对应的系统分辨率为  $7.2 \text{ mA}/\sqrt{\text{Hz}}$ . 由于这个光学电流夹剪具有体积小,重量轻,可拆卸以及绝缘特性好等性能,它为光学电流传感器进入实际应用提供了良好的条件.

## 4 总 结

光学电流传感器技术正经历着一个向实用化发展的新阶段. 结果使得光学电流的测量技术从实验室到实际工程应用的距离不断地缩小. 由于这些光学玻璃传感元件同时具有测量精度高,动态范围大以及频率响应宽的特性,因此,它们既可以用在电力计量仪表中,又可以装在电力系统的保护装置上. 从而使得发电,供电系的检测和保护手段大大加强. 由于这些元件具有体积小,重量轻,结构坚固,绝缘性能好以及制造成本低等优点,这就使它们在实际应用中具有较强的竞争能力.

## 参 考 文 献

- [1] A. J. Rogers, Optical-fibre current measurement. *International J. of Optoelectronics*, 1988, 3(5):391~407
- [2] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, Practical considerations in the design of optical fibre current sensors. *Proc. SPIE*, 1990, 1267; *Fibre Optic Sensors IV*, 29~34
- [3] M. Kanoi, G. Takahashi, T. Sato *et al.*, Optical voltage and current measuring system for electric power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1986, PWRD-1:91~97
- [4] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson, Miniature Faraday current sensor based on multiple critical angle reflections in a bulk-optic ring. *Opt. Lett.*, 1991, 16(24):1996~1998
- [5] Edward A. Ulmer, Jr., A high-accuracy optical current transducer for electric power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5(2):892~898
- [6] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson, Interrogation of a conventional current transformer by a fibre-optic interferometer. *Opt. Lett.*, 1991, 16(18):1448~1450
- [7] A. J. Rogers, Optical measurement of current and voltage on power systems. *IEE J. Elect. Power Applications*, 1979, 2(4):120~124
- [8] S. P. Bush, D. A. Jackson Numerical investigation of the affects of Birefringence and total internal reflection on Faraday effect current sensors. *Appl. Opt.*, 1992, 31(25):5366~5373
- [9] D. Tang, G. W. Day, Progress in the development of miniature optical fibre current sensors. *IEEE 1988 LEOS Annual Meeting*, Santa Clara California; 1988:306~307
- [10] A. Ben-Kish, M. Tur, Geometrical separation between the birefringence components in Faraday-rotation fibre-optic current sensors. *Opt. Lett.*, 1991, 16(9):687~689
- [11] B. C. B. Chu, Y. N. Ning, D. A. Jackson, Faraday current sensor using a triangular-shaped bulk optic sensing element. *Opt. Lett.*, 1992, 17(16):1167~1169
- [12] T. Sato, G. Takahashi, Y. Inui, Method and apparatus for optically measuring a current. *European Patent Application*, Application No. 83102230. 6, Publication No. Ep 0088419 A1
- [13] T. W. Cease, Pual Johnston, A magneto-optic current transducer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5(2):548~555
- [14] Y. N. Ning, D. A. Jackson, Optical current sensor. *British Patent Application*, Application No. 9213736. 3, Filing Date: 29 June 1992
- [15] Y. N. Ning, D. A. Jackson, Optical current clamp. *Submitted to Optics Letters*, 1992

## Recent advances in optic current sensors

NING Yanong

*(Department of Opto-electronic Instrumentation ChongQing University, Sichuan, China)*

D. A. Jackson

*(Physics Laboratory University of Kent at Canterbury, Kent, UK)*

(Received 28 September 1992; revised 29 January 1992)

## Abstract

Electric current may be measured optically by utilising the Faraday magnetic-optic effect. Devices using optic fibre or optical bulk glass as their sensing elements have been intensively researched and developed. This paper outlines the main problems associated with Fibre optic current sensors and reviews recent development in the optic bulk glass current sensors based upon the Faraday effect.

**Key words** optic current sensors.