

新型光电式高电压测量器和电流互感器

New Optoelectronic High-Voltage Measuring Instrument and Current Transducer

郑州大学电气工程学院 邓隐北 (450052)

郑州大学物理工程学院 白蓉 (450052)

摘要：本文介绍了应用于高电压计测和电流互感器的光电技术及其工作原理。并展示了这种新型光电技术在电力系统计测中所具有的优越特性。

关键词：光电技术；电光效应；磁光效应；高电压计测；大电流计测；传感器；互感器。

中图分类号：TM4

文献标识码：B

文章编号：1606-7517(2007)09-07-129

0 引言

随着电力系统传输容量的增大和电压等级的提高，保护、控制、测量和数据通讯的一体化发展，传统电磁式电压互感器和电流互感器不仅体积、重量大，制造成本高，而且，因自身的传感机理所限，呈现出种种难以克服的问题，很难满足电力系统自动化、数字化以及小型轻量化的发展要求。因而，在电气工业中的信息传输、计测诊断、太阳能电池等各种现场，均在逐步开发和有效利用新型光电技术。作为计测、诊断领域的典型实例有：光控无触点探测器（光PD）、光电式电流互感器（光CT）、光导纤维分布式测温计、红外线温度计等。

利用光的计测、诊断技术，由于具有以下特点而尤其引人注目。（1）能实现测定点的电气绝缘，对测定对象的干扰最小；（2）藉光学的信息传输，抗电磁波噪音的能力强；（3）可望达到直流GHz（ 10^9 Hz）级的频率响应。

本文的前面部分对充分发挥上述特色而相继开发的传感器，以及利用这种传感器测量高电压的光电技术进行了描述；后面部分，则重点介绍了新型光电式电流互感器的组成与工作原理，并展示了目前的研制现状和广阔的应用前景。

1 电光效应及其应用原理

1.1 电光效应

在晶体上施加的恒定电场和频率如远远低于光频率的交变电场，则将引起组成介质的粒子内束缚电荷分布的显著变化，影响到极化特性和微观结构的对称性，影响到介质或晶体的光学性质。这就是电光效应。电光效应改变了介质的电容率（介电常数），还可能使各向同性介质转变为各向异性；或者导致原有的各向异性性质的改变，产生人工双折射现象。这种由外加电场引起介质折射率变化的效应已成为光电调制器件工作的物理基础。

电光效应表现为普克尔斯（Pockels）效应和克尔（Kerr）效应两种。Pockels效应引起介质折射率的变化，与外加电场强度成正比，即 $\Delta n \propto E$ ，也叫线性电光效应（应用更广）；而Kerr效应引起的折射率变化与电场的平方成正比比例，即 $\Delta n \propto E^2$ ，故称二次电光效应。立方（3次）以上的高次项极其微小故可忽略。Pockels效应和Kerr效应两者的大小不同，按构成物质结晶的对称性或极化分子的结构，仅凸出显示其中的一种效应。

电光效应已在激光技术、光学信息处理和光通信等领域中有着广泛的应用。

1.2 应用电光效应的工作原理

如图1所示，将物质中传播的光波，分解为垂直于进行方向的物质固有振动面上的2个偏振波（极化波）。这2个偏振波如图1的 e_x 、 e_y ，其传播速度随所传感的偏振波的折射率呈反比例变化。

在某些物质中，由于从外部施加的电场及其极化状态的变化，将导致介质常数的各向异性。从那里传输的2个极化波所反应的折射率也呈现各向异性，显示出所谓的双折射现象(电光效应)。2个偏振波 e_x 、 e_y ，在具有电光效应的物质内传播时，结果反应出不同的折射率 n_x 、 n_y ，产生于2个偏振波之间的折射率之差，按照下式用所施加电场 E 的展开级数表示（这里忽略了稳态项）：

$$n_x - n_y = n_0^3 r_p E + \lambda B E^2 + \dots \quad (1)$$

式中， n_0 —无电场情况下，通常的折射率； r_p —Pockels系数； λ —光的波长； B —Kerr常数。

偏振波的传播速度，是由真空中的光速除以折射率所得的值，其结果，2个偏振波 e_x 、 e_y 将以不同的光速传播。从长度 L 的物质射出时，偏振波产生如下的相位差

:

$$\Delta\theta = 2\pi L(n_x - n_y) / \lambda = \pi(E/E_\pi) + \pi(E/E_m)^2 \quad (2)$$

$$E_\pi = \lambda / (2n_0^3 r_p L), E_m = 1 / \sqrt{2BL} \quad (3)$$

图1中，将2个波强度相等，且无相位差的直线偏振光（线偏光）向物质发射，在物质内部产生相位差以后，从物质射出时合成2个偏振波，形成椭圆偏振光（圆偏光）。使用只透过某一特定方向偏波成分的检偏器，对圆偏光进行检波。所透过光的强度 I_0 与向物质入射光的强度 I_i 之比，按下式求得：

$$I_0 / I_i = |1 - \cos(\Delta\theta)| / 2 \quad (4)$$

在主要显示Pockels效应的场合下：

$$I_0 / I_i = [1 - \cos[\pi(E/E_\pi)^2]] / 2 \quad (5)$$

在Kerr效应支配场合下：

$$I_0 / I_i = [1 - \cos[\pi(E/E_m)^2]] / 2 \quad (6)$$

由上可知，电场的强度被转换为光的强度（明暗）。

电场 E 一旦达到 E_π 、 E_m ，透过光的强度 I_0 即为极大值。也就是说，对应于相同电场（电压）下， E_π 、 E_m 的值越小，光强度的变化越大。因而，将以此表示相应于电光效应灵敏度的指标。Pockels 效应主要出现于固体物质；Kerr 效应主要表现在液体、气体中。表1引出有电光效应的物质及其灵敏度指标。

由于电场为矢量，测定的电场方向和光的传播方向之间的关系列于表2。按横型调制方式，可测定与光的传播垂直方向的电场，特别是藉改变检偏镜的方向，能分离出正交的2个电场分量并进行测定。因此，可用于测量电场。按纵型调制方式，则能测定与光的传播方向平行方向的电场，从而，就能

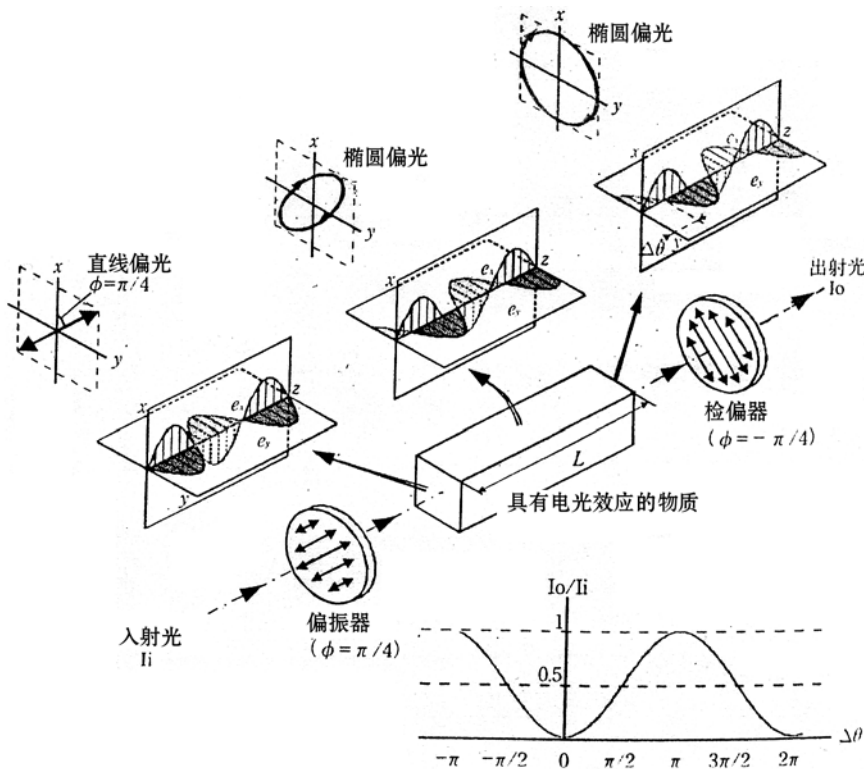
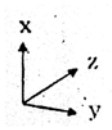
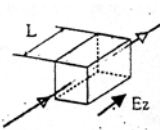


图1 光电效应的原理

表1 具有电光效应的物质及灵敏度指标

| 有 Pockels 效应的物质 | 相对介电常数 | 半波 长 电 压 (KV) |
|---|--|------------------------|
| B ₁₂ G ₁₂ O ₁₂ (BGO) | 16 | 31 |
| 水晶 | 4 | 450 |
| ADP, KDP | Z 20, Z _⊥ 50 | 10 |
| ZnS, ZnTe | 7-10 | 4-8 |
| B ₁₂ SiO ₂₀ (BSO) | 50-60 | 4-8 |
| B ₁₂ G ₁₂ O ₂₀ (BGO) | 50-60 | 4-8 |
| LiNbO ₃ , LiTaO ₃ | Z 50, Z _⊥ 100 | 3-8 |
| 有 kerre 效应的物质 | 相对介电常数 | Em(MV/m) L-光程长度 |
| 硝基代苯 | 36 | 0.4L ^{-1/2} |
| 纯水 | 80 | 4 L ^{-1/2} |
| 变压器油 | 2 | 13 L ^{-1/2} |
| SF ₆ | 1 | 2000 L ^{-1/2} |
| 空气 | 1 | 960 L ^{-1/2} |
| CO ₂ | 1 | 400 L ^{-1/2} |

表2 光的入射方向与测定电场的方向

| | 横型调制 | 纵型调制 |
|------------------|---|---|
| |  |  |
| 按 Pockels 效应的测定值 | $\int_0^L E_x dz, \int_0^L E_y dz$ | $\int_0^L E_z dz = V$ |
| 按 Kerr 效应的测定值 | $\int_0^L E_x^2 dz, \int_0^L E_y^2 dz$ | 无灵敏度 |

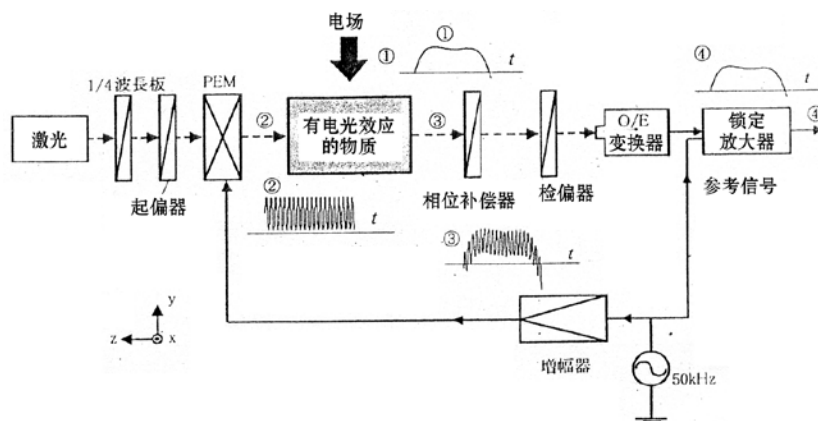


图2 藉光相位调制方式的高灵敏度测量

直接得到与光传播路径上的电场积分值成正比例的、也即与电位差（电压）成比例的信息。

2 高灵敏度的计测

将电光效应应用于实际的计测，如表1所示，相应于电场灵敏度很低，或因传感器的介电常数比周围介质的介电常数大，施加于传感器的电场小，难以获得大的输出等，故在很多场合需要开发高灵敏度的计测技术。

最近，光源中装入相位调制器，由于引入了将调制信号重叠于光极化波之间相位差的方式（光相位调制方式），将灵敏度极低的气体Kerr效应用于测量也是可能的。

图2所示，藉声光调制元件（PEM）对偏振波之间的相位差，用频率 f 进行调制。已透过检偏镜的检测信息，由锁定（lock-in）放大器同期检波。通过PEM的相位调制量 θ_{PEM} ，按下式以时间 t 的函数给出：

$$\theta_{PEM} = \theta_p \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

通过锁定放大器仅对频率成分检波过的输出强度，以 I_f 表示。 I_f 与入射光强度 I_i 之比，按下式以电光效应产生相位差（式2）的函数表示：

$$I_f / I_i = J_1(\theta_p) \sin(\Delta\theta) \quad (8)$$

式中， $J_1(\theta_p)$ 一对应于 θ_p 的1次贝塞尔（Bessel）函数， θ_p 调整为1.84， $J_1(\theta_p)$ 设定为最大值的0.52。

仅按式（8）提高的灵敏度，仍不能直观地实际感觉，但通过上述调制，可望达到以下效果：（1）只透过要测定的频率范围，可实现能增幅的理想带通（band-pass）滤波器；（2）由于调制频率的引入，可在噪音低的频率范围内测定；（3）因为式（8）所列的正弦函数形式，故在电场极小的0值附近灵敏度提高。这能改善信噪比 $(S/N)10^3 \sim 10^5$ 倍。

采用这种光相位调制方法（调制频率 $f = 50\text{kHz}$ ），能使激光5次往返而

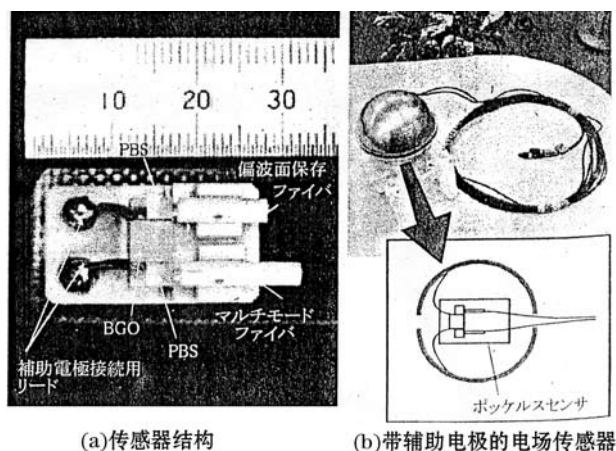


图3 Pockels传感器

增大了光程长度（5~13m）。由此，0.2~0.5MPa的六氟化硫（SF₆）、氮（N₂）、CO₂气体中的直流均匀电场，以及大气压空气中的50Hz交流电场均可进行测定。大气压空气中的最低检测电场强度为300V/mm（偏振波之间相位差为 2×10^{-5} rad）。

利用被测定空间介质自身的Kerr效应，因能非接触式测定电场，故可以说，藉Kerr效应的电场测量是理想的计测方法。

在调制频率为数10kHz场合下，测定带域能对应于工业频率级，如调制频率更高时，则对雷电脉冲等更快速的现象也能适应。

3 传感器的结构及应用

图3（a）所示为Pockels传感器的一个实例，这是由Bi₄Ge₃O₁₂（铋锗氧，BGO）结晶的波长板紧贴着偏振光束分裂器（PBS），通过微型透镜连接光导纤维的一体化传感器。BGO结晶如按表2的纵型调制方式配置，则能测定施加于光的入射面和出射面之间的电压。因而，在结晶的两面装设透明电极，与施加电压用的引线连接。在光源与传感器之间采用保偏光纤；而在传感器与受光部分之间，则用多传输模（multimode）光纤。

作为光源，有激光、LD（激光二极管）、SLD（超发光二极管）、LED（发光二极管）等。这一顺序是按光波的强度和相干（干涉）性、由大到小排列的。在将光强度变换为电气信号的受光部分，当然，不仅要注意灵敏度，而且要注意其频率特性。

若把两根引线接到被测定对象，则形成一电压测定器，如图3（b）所示。传感器本体装入一对半球电极的内部，并将引线接至每个电极。这样，就可测定半球电极之间的感应电压。同时，传感器的输入静电容（量）能达到PF（微微法拉）级，因而，也能用于放电路内电位差的测定。而且，图3（a）的传感器中未接引线时，如配置按模型调制的Pockels结晶，则可构成仅使用电介质的电场传感器。

针对传感器的超小型化，还研制了Pockels结晶上的光波导电路。在YZ截面传播的LiNbO₃基板上设有宽7μm，长500μm波导面，对此波导型电场传感器进行了开发。电晕放电下的电极表面电场的计测，以及表面放电时的绝缘物表面电场的计测均适用。

4 高电压测量器

4.1 Pockels高电压测量器

与原来落地式结构不同的是，Pockels高电压测量器采用图4所示，从测定部位吊挂的轻量型高电压测量器，具有适当的电阻率和相对电容率。可按自然双折射小的纵型调制方式工作。使用了适合于高电压测量的BGO结晶。8块的结晶串联配置。施加其两端的电压无须分压，是一种可直接测量的结构。

检测出的光强度与被测定的所施加电压的关系式，采用式（5）那样易于理解的三角函数表示。施加某一定电压（半波电压： $V = E \cdot L$ ）以上，光强度比与施加电压之间不存在一对一的相应关系，也即，不可能由光强比直接确定所施加的电压值。在测定信号强的高电压区，对高灵敏的测量更费事，故需要解决这一课题。

半波电压 V 取决于传播光的波长而变化。利用这一特性，将波长1.31μm， $V = 75.5$ KV和波长1.55μm， $V = 91.0$ KV两个波长的光同时入射，观测其输出。由此，允许扩展可测定的电压范围达到数MV。

Pockels高电压测量器的优点是完全不会受测量器周围结构部分的影响，而且，无论直流、交流或脉冲的高电压，用一个装置就能测定。今后应该解决的课题是：存在结晶的压电振动可能导致光输出的杂音重叠，如何抑制这一现象，目前正处于探讨阶段。

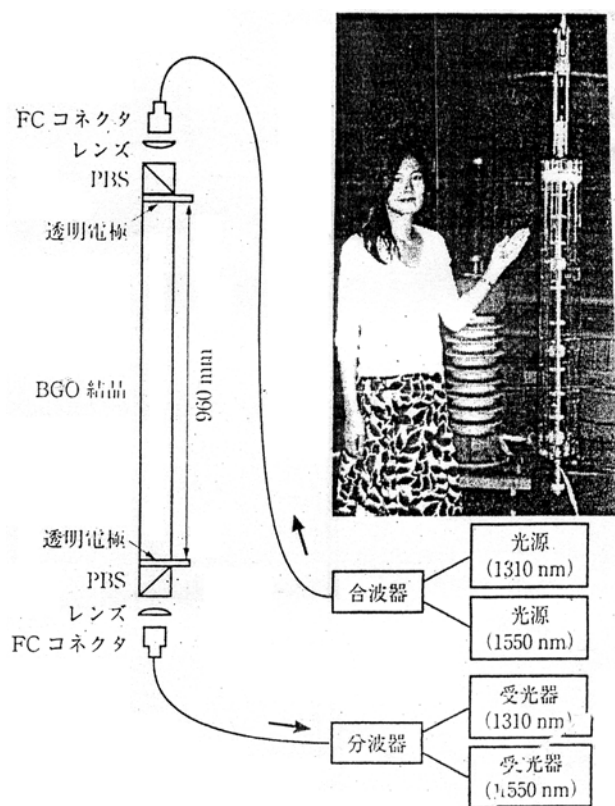


图4 Pockels高电压测量器

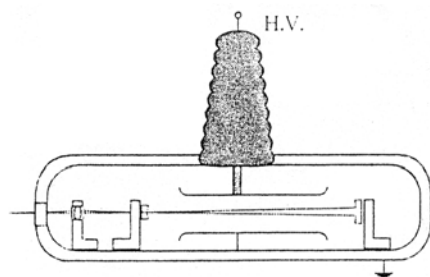


图5 Kerr高压测量器

4.2 Kerr高电压测量器

图5为利用Kerr效应的高电压测量器（落地式）的概念图。结构上是平行平板电极配置于介质（高压的气体）中。对上部电极施加被测定的高电压，利用介质的Kerr效应而测量电极间所形成的电场。考虑到介质密度的不均匀性和波动产生的噪音，作为Kerr效应的介质，气体要比液体更好。由于气体Kerr效应小，藉测定系统内设置100m左右的长光程可提高灵敏度。但因局部放电，一旦产生离子，介质的Kerr常数就会改变，故应注意避免局部放电的发生。

5 光电式电流互感器及其工作原理

现在电力系统中普遍使用电磁式电流互感器（CT）测量一次侧的大电流，二次侧（副边）为计量、控制、保护等设备提供电流信号，一般输出电流小（5A或1A）。随着电压等级的提高和传输容量的增大，电磁式CT存在以下缺点：（1）绝缘结构复杂、体积大、造价高；（2）动态范围小，出现的谐波暂态信号容易使保护误动作；线性度不好，电流较大时会出现饱和现象，影响二次的保护设备正确识别故障；（3）输出不能直接与微机化计量及保护设备接口；（4）易产生铁磁谐振，易燃易爆等。和电磁式CT相比，基于光学技术、微电子技术、微机技术的光电式电流互感器，则具有无铁芯、绝缘结构简单可靠、体积小重量轻、线性度好、动态范围大、无饱和现象、输出信号可直接与微机化计量及保护设备接口等优点。这些正好满足了电力系统发展的需要，也正是今后发展光电式电流互感器的充分理由。

5.1 无源光电式电流互感器（OCT）

根据IEC标准规定，光电式互感器是一种电子式互感器。从传感头有无电源的角度可区分为：无源式和有源式两类。OCT主要利用了Faraday磁光效应。1846年Faraday首次发现：磁场不能对自然光产生直接作用，但在光学各向同性的透明介质中，外加磁场H可使在介质中沿磁场方向传播的平面偏振光的偏振面发生旋转。这种现象被称为磁致旋光效应或Faraday效应。

当一束线性偏振光通过置于磁场中的Faraday旋光材料（如重火石玻璃）时，若磁场方向与光的传播方向相同，则光的偏振面将产生旋转。旋转角正比于磁场强度H沿偏振光通过材料路径的线积分：

$$\theta = V \oint H \cdot dl = V \cdot i \quad (9)$$

式中，V为磁光材料的Verder常数，角度与被测电流成正比。利用检偏器将角度的变化转换为输出光强度的变化，经光电变换及相应的信号处理，便可求得被测电流i，如图6所示。

实际应用中还有一种全光纤（all-fiber）式CT，其工作原理与OCT的相同，如图7所示。

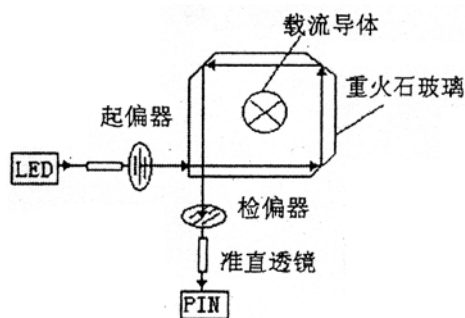


图6 OCT的传感头

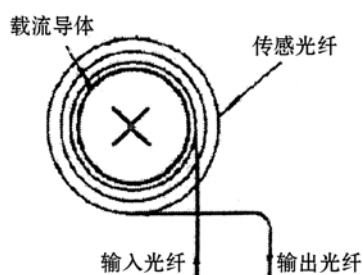


图7 AFOCT的传感头

5.2 全光纤电流互感器 (AFOCT)

光纤电流互感器 (FOCT) 同样是基于Faraday效应来测定电流的。因为采用光纤作为传感介质, 故在绝缘性、抗电磁干扰、可靠性等方面, 比传统的电磁式CT有很大优势。而且, 它还不含交流线圈, 不存在开路危险。以前, 光纤CT的研究主要集中在磁光晶体结构的传感头方案上。欧洲ABB公司研制出达到IEC标准0.2级晶体结构的FOCT。近年来, 北美Nxtphase公司已研制出超过IEC0.2S级的全光纤AFOCT; 我国清华、华中科技大学也相继研制出正常环境下精度为0.3%的块状结构AFOCT。北航研制的新型AFOCT, 传感光纤采用共光路设计, 因而具有较好的互易性和较强的抗干扰能力。全温下比例因数变化 $< 0.5\%$ 。

AFOCT的结构及工作原理: 全光纤CT系统构成如图8。整个结构按功能可分为光学传输、光学传感头和信号处理电路三部分。其中光学传输部分完成光信号的产生、传输、转换和干涉; 光学传感头部分则传感导线中的电流, 并将它转换为干涉光的相位信息; 信号处理电路产生调制电压; 对信号进行解算得到电流值。

SLD光源发出的光经过单模耦合器后由起偏器起偏成为线偏光。线偏光以 45° 注入保偏光纤分别沿X轴和Y轴向前传播。当这两束正交模式的光经过 $\lambda/4$ 波片后, 分别变

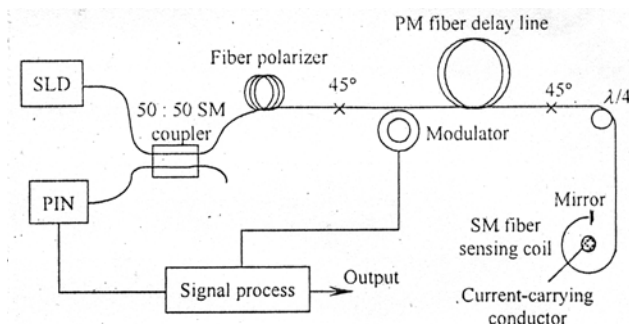


图8 AFOCT系统组成

为左旋和右旋的圆偏振光进入传感光纤。由于受到导线中的电流产生的磁场作用, 左右旋圆偏振光以不同的速度传播, 从而引起光波相位变化。光在由传感光纤端面的镜面反射后, 这两束圆偏振光的偏振模式互换, 再次通过传感光纤而再次受到磁场作用, 使所受的作用效果加倍。这两束返回的光再次通过 $\lambda/4$ 波片后, 恢复为线偏振光, 并在起偏器处发生干涉。最后, 携带相位信息的光由耦合器耦合进入探测器。在整个光的传播过程中, 光都经历了保偏光纤的X轴和Y轴与传感光纤的左旋和右旋模式, 只在时间上略有差异。因此, 到达探测器的光只携带了由于Faraday效应产生的非互易相位差 Φ_f , 那么探测器输出的光强为:

$$P_d = \text{loss} \cdot 0.5 \cdot P_0 [1 + \cos(\Phi_f + \Phi_m)] \quad (10)$$

式中, loss — 光路损耗; P_0 — 光源输出光强; Φ_m — 调制相移; $\Phi_f = 4\pi N V I$ — 法拉第相移, 其中 N 为传感光纤的匝数, V 为Verder常数, I 为导线中的电流。

5.3 有源光电式电流互感器

这是一种基于传统互感器传感原理, 利用有源器件调制技术、以光纤为信号传输媒介将高压侧转换得到的光信号送到低压侧解调处理, 并得到被测电流信号的新型互感器。它既发挥了光纤系统的绝缘性能好、抗干扰能力强的优点, 明显降低了高压、大电流互感器的体积、重量和制造成本, 又利用了传统互感器原理技术成熟的优势, 避免了纯光学互感器光路复杂、稳定性差等技术难点。

有源OCT的结构原理: 它是通过一次采样传感器 (空心线圈或小CT, 电阻分流器) 将电流信号传递给发光元件而变成光信号, 再由光纤传递到低电位侧、转换成电信号以后输出。高压侧电子器件供电方式有光供电、母线电流

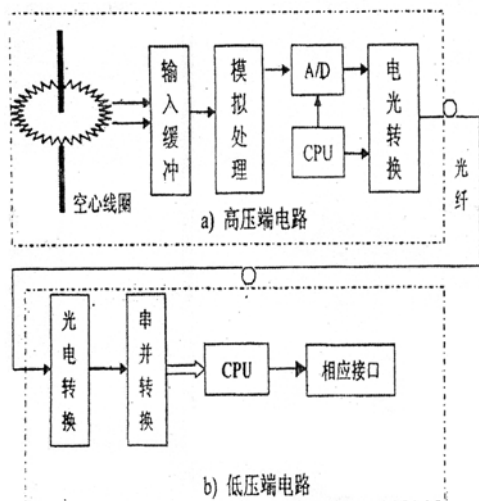


图9 有源光电式电流互感器组成原理框图

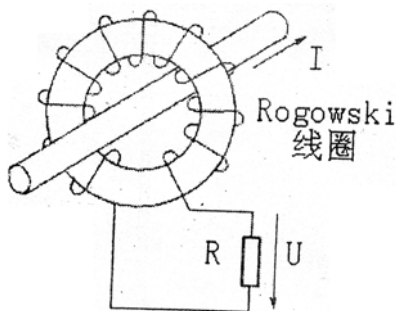


图10 Rogowski线圈的测量原理图

供电和太阳能电池供电等。目前应用最多的是采用空心线圈的有源式OCT，其组成原理如图9所示。

空心线圈（Rogowski线圈）实际上是均匀密绕在一环形非磁性骨架上的空心螺管线圈。这是由Rogowski.w等人提出的，其输出电压正比于被测电流的变化率，结构原理如图10所示。

Rogowski线圈的截面为矩形或圆形，根据全电流定律和电磁感应定律，可推导出正方形截面线圈所交链的磁链为：

$$\psi = N \oint_S B \cdot dS = N \oint_S \frac{\mu_0 i}{2\pi R} dS = \frac{N\mu_0 i h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_b} \quad (11)$$

当被测电流*i*发生变化时，线圈的输出端所产生的感应电动势为：

$$e(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_b} \frac{di}{dt} \quad (12)$$

式中，*i*为被测电流，*h*为骨架高度，*N*为线圈匝数， μ_0 为真空磁导率（ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ）， R_a 为骨架外径， R_b 为骨架内径。

由式（12）可知，Rogowski线圈的感应电动势与线圈的尺寸、匝数以及一次电流有关，受外磁场和母载流导体位置的影响小。因此，对Rogowski线圈的输出电压积分即可还原为被测电流。

6 应用前景

随着我国经济的快速发展，对电力系统提出了更高要求。为了协调发展与环境保护的关系，高电压、长距离输电势在必行。这就对承担着计量和保护重要责任的互感器也提出了更高要求。新型电子式互感器的优点正好满足了电力发展的需要。它将随着加工工艺、材料工艺的提高，微电子技术、微机技术、光电子技术的发展，在电力系统将有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 日高帮彦，利用光传感器的高电压测量技术，，《电气评论》2005，No. 7
- [2] 陈卓娅，赵玉富、谷晓冉，任颖，新型电子式电流互感器，《河南电力》2006，No. 1
- [3] 袁玉广，冯丽爽，王夏霄，姜中英，全光纤电流互感器，检测系统的设计，《光电工程》2006年，No. 5。