

李伟凯 著



作者简介

李伟凯，男，工学博士，教授，硕士研究生导师。1965年4月生，山东省安丘市人。现任黑龙江八一农垦大学教务处处长，并担任教育部普通高校本科教学工作水平评估专家、教育部农林类计算机基础课程教学指导分委员会委员、黑龙江省自动化学会理事、黑龙江省人工智能学会理事等职务。

自1986年以来长期从事电子技术、现代电路技术等领域的教学和科研工作。先后出版专著1部、高校教材6部，其中《计算机文化基础》获得“2005年度全国高等农业院校优秀教材奖”；在国内外专业期刊上发表学术论文30余篇，其中10篇被EI、ISTP检索；主持省部级科研项目7项，其中《高校计算机实验室条码卡上机管理系统》获得黑龙江省高校教学成果一等奖。

责任编辑 丁一平

技术编辑 王秀艳

责任校对 徐 岩

封面设计 姜立新



黑龙江教育出版社



电力系统是国民经济的命脉，电压互感器是电力系统获得保护与计量用电压信号的重要设备。随着输配电网朝着高电压、大容量方向发展，传统的电磁式电压互感器因其传感机理而出现不可克服的困难：如体积大，造价高，绝缘结构日趋复杂，充油的电压互感器存在爆炸的危险等。光学电压互感器克服了由于磁饱和导致的波形畸变和传统电压互感器本身压降导致的测量精度降低等问题，具有结构紧凑，无燃烧和爆炸的危险，测量频带宽，动态范围大，抗干扰能力强，无二次开路高压，便于与计算机接口，适应电力系统自动化数字化要求等特点，成为国内外学者研究的重点。笔者在已有研究成果的基础上，提出一种新型的基于因瓦合金电容分压式光纤电压互感器，实现了对应用于不同电压等级的电压互感器，只需改变电容分压器的分压比，而无需改变传感器的结构即可满足测量的要求。因此，新型光纤电压互感器不仅便于规模化生产，而且测量精度也有显著提高。

首先，笔者对近年来光学电压互感器的研究现状进行了综合评述；总结了基于Pockels电光效应的OVT、基于电容分压的OVT以及传统技术加光纤传光的电压互感器存在的主要问题，提出一种新型的光电式电压互感器结构；并对基于椭圆芯双模光纤模间干涉原理和石英晶体逆压电效应的光纤电压互感器进行了理论探讨，对基

于多模激光的白光干涉仪以及直流相位跟踪系统进行理论分析,建立了零相位跟踪误差的数学模型和零相位误差补偿的具体方法。

其次,对基于因瓦合金的电容分压器进行了深入的理论研究,建立了完整的系统理论模型;推导出在高压绝缘条件下,建立电容分压器的数学模型;得出了圆柱形电容器半径尺寸设计的一般计算公式。对影响电容分压器测量精度的各种因素进行了全面的理论分析和仿真研究,建立了电容分压器误差与温度、不同轴度、圆柱半径、静电场力的数学模型,得到了这些影响因素对系统响应的作用规律。应用有限元分析方法对电容分压器进行电场分析,给出了电容分压器关键点的电位分布的数值和等值线曲线。

再次,设计了电压互感器的数字接口,依据IEC60044-7的标准对电子式互感器过程层通讯模块进行了总体设计,详细分析了各部分设计的功能,给出了过程层通讯系统的硬件部分的电路设计与仿真。

最后,对传感器系统进行了光路设计和数值分析,计算了加在石英晶体上的最佳电压、光纤缠绕的匝数、传感光纤的长度等具体数值;对圆柱电容器和石英晶体的膨胀性能、圆柱电容器在不同电压作用下的参数进行了测试;对实验工艺进行了研究,提出了激光二极管与单模保偏光纤的耦合方法、光纤的缠绕方法和单模光纤与双模光纤的熔接方法;确定了所用实验器件的参数。

编 者

2006年11月1日



第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 光学电压互感器基本原理及分类	3
1.3 光学电压互感器的研究现状	10
1.4 光学电压互感器存在问题及解决方法	13
1.5 研究的主要内容	20
第2章 光纤电压互感器的理论基础	23
2.1 引言	23
2.2 多模激光光源特性	23
2.3 椭圆光纤模式理论	29
2.4 石英晶体与压电晶体逆压电效应研究	39
2.5 本章小结	45
第3章 基于模间干涉光纤电压互感器的传感理论研究	46
3.1 引言	46
3.2 光纤电压互感器的传感理论研究	47
3.3 基于多模激光的白光干涉仪理论分析	52
3.4 直流相位跟踪系统的理论分析	54
3.5 光纤电压互感器误差分析	58
3.6 本章小结	64

第4章 基于因瓦合金电容分压器的理论与结构研究	65
4.1 引言	65
4.2 因瓦合金的性能分析	65
4.3 精密电容分压器结构研究	66
4.4 电容分压器随温度变化的数学模型	71
4.5 电容分压器电场分析	73
4.6 精密电容分压器的误差分析	86
4.7 本章小结	94
第5章 光电式电压互感器数字接口设计与仿真	96
5.1 引言	96
5.2 IEC60044-7对数字化输出的规定	97
5.3 过程层通讯模块总体设计	102
5.4 串并转换和缓冲器的设计	104
5.5 数字信号处理部分的设计	107
5.6 FIFO的设计	111
5.7 整帧信号输出的设计	112
5.8 光纤通信电路	113
5.9 本章小结	115
第6章 光电式电压互感器数值分析与实验研究	116
6.1 引言	116
6.2 光电式电压互感器数值分析	117
6.3 实验器件的参数确定方法	120
6.4 光电式电压互感器实验工艺研究	124
6.5 光电式电压互感器实验结果分析	126
6.6 本章小结	132
结论	134
参考文献	136

绪 论

第1章

CHAPTER 1

1.1 研究背景

电压互感器是电力系统获得计量用电压信号并进而对系统进行保护的重要设备。传统的电压互感器分电磁感应式和电容式两种。电磁感应式电压互感器是在较低电压中常用的一种电压互感器,它实际上是一台容量很小的变压器。现在的电力系统高电压部分通常采用电容式电压互感器,它主要由电容分压器部分和电磁部分构成,其中的电磁部分也是一台变压器,只是一次侧电压是经过电容分压后的较低电压。近年来随着各国经济的迅速发展,对电力的需求日益增大,电力系统的额定电压等级和额定电流都有大幅度的提高。例如,20世纪60年代前苏联和欧洲某些发达国家纷纷将原来的220 kV的骨干电网发展为500 kV的骨干电网,到80年代前苏联甚至出现了1 150 kV的特高压输电线路,而中国也由80年代的220 kV骨干电网发展到目前500 kV骨干电网,进入21世纪后随着金沙江等大容量等级电站的建设,中国将出现特高压(1 200 kV)的输电线路。^[1,2] 随着输配电网朝着高电压、大容量方向发展,传统的电磁式电压互感

器因其传感机理而出现不可克服的困难:如体积大,给运输和安装带来困难;造价高,绝缘结构日趋复杂,充油的电压互感器存在爆炸的危险等;同时,电磁感应式电压互感器还存在磁饱和、铁磁谐振、测量动态范围小、频带窄、易受干扰、容量有限、输出无法和计算机直接相连等问题;并且一旦二次侧短路还将威胁周围设备的正常运行和操作人员的安全,因此促使人们研制更为先进的传感系统。

随着三峡、龙滩等电站及西部产煤地区坑口电厂的建设,输配电的容量及距离不断地增加,因而对其可靠性提出了更高的要求。尤其是2003年12月末以来美国、加拿大及意大利等国发生大面积停电事故,给世界各国的电力部门敲响了警钟。因此,体积小、重量轻、性能优良、能与先进的光通信技术兼容的光学电压互感器(Optical Voltage Transducer,简称OVT)成为当前的研究热点。

OVT是利用光学材料敏感电压,利用光纤传输信号,无铁芯和电感,不存在铁磁谐振和铁芯饱和,克服了由于磁饱和导致的波形畸变和传统电压互感器本身压降导致的测量精度降低等问题。它具有结构紧凑,安全性高,测量频带宽,动态范围大,抗干扰能力强,无二次开路高压,便于与计算机接口,适应电力系统自动化数字化要求等特点。同光纤传输联网可以实现系统的遥测和遥控,易满足小型化、智能化、多功能的要求,这些都是传统的电压互感器所无法比拟的。OVT还可以测量直流电压,这在冶炼和直流电力系统是必须的。^[4,5]

因此,OVT一经问世,便引起了业界的极大关注。目前,欧美、日本等发达地区和国家已经开始利用光纤传感器来开发新型电压互感器。^[6-9]本章将对OVT的基本原理、分类、发展现状、存在的问题及笔者的工作作一个综合性的阐述。

1.2 光学电压互感器基本原理及分类

OVT从测量原理上大致可分为基于Pockels效应(一级电光效应)和基于Kerr效应(二级电光效应)以及基于逆压电效应或电致伸缩效应三种^[10],从类型和结构上可以分为有分压型和无分压型。现在研究的OVT大多是基于Pockels效应的(包括集成光学电压互感器)^[11]。下面分别介绍它们的基本原理。

1.2.1 Pockels效应型OVT

Pockels效应是指某些晶体在外加电场的作用下导致其光折射率改变的一种线性电光效应,其表达式为

$$\Delta n = K_1 E, \quad (1-1)$$

式中: n 为入射光的折射率; E 为外加电场强度; K_1 为常数。

由于外加电场所引起的介电常数变化一般很小,这种微小的变化在其他频段很难探测出来,但在光频波段,介电常数的微小变化相当于折射率的微小变化,折射率的这种微小变化将产生明显的光学效应,这种变化可以借助于双折射效应和干涉的办法精确地测量出来。

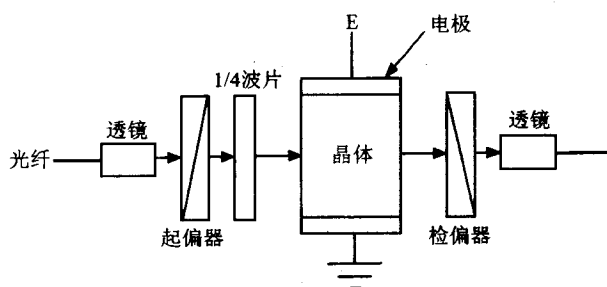
这种折射率的变化将使沿某一方向入射晶体的偏振光产生相位延迟,且相位延迟量与外加电场强度成正比,具有这种效应的晶体称为Pockels晶体或线性电光晶体。目前常用的Pockels晶体主要有铌酸锂(LiNbO_3 ,简称LN)、硅酸铋($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_3$,简称BSO)和锗酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$,简称BGO)。其中,BGO晶体是一种透过率高、无自然双折射性和自然旋光性、

不存在热电效应的电光晶体,在电压传感方面具有优良的性能,许多OVT均采用它作为敏感元件。^[12-15]

基于Pockels效应的OVT传感头主要有横向调制和纵向调制两种结构形式。

1. 横向调制

如图1-1所示为横向调制原理图,横向调制就是外加电场方向和通光方向互相垂直,这种结构经常用在有分压器的光学电压互感器中,^[5,16,17]若增大电极间的距离以降低电场强度的大小实现对高电压的测量,也可以不需要分压器,高低压电极之间用绝缘材料连接起来。^[15,18]电光晶体处在电场中,受该电场作用。



对于BGO晶体,外加电场E平行于晶体的(110)方向,光的传播方向与电场方向垂直,晶体由各向同性变成各向异性的双折射晶体,电场引起的双折射使晶体中出射的两束线偏振

图1-1

横向调制原理

Fig. 1-1

Schematic

Diagram of Tran-

verse Modulation

光产生相位差,其相位差 φ 为^[19]

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{l}{d} V = \pi \frac{V}{V_\pi}, \quad (1-2)$$

式中: l 是晶体内的通光长度; λ 为光波长; n_0 为晶体未加电场时的折射率; γ_{41} 为BGO晶体的线性电光系数; V 为加在晶体上的电压; d 为晶体(110)方向的厚度; V_π 是使晶体中的两光束产生 180° 相位差的外加电压,又称为半波电压,它只与晶体的电光性能和几何尺寸有关; $V_\pi = \lambda d / (2\gamma_{41} n_0^3 l)$ 。式(1-2)说明只要测出相位差 φ 的大小就可以测定 E 或 V ;但相位差 φ 的大小一般无法直接测量,常用偏振光干

涉原理来测量。

在晶体两端加起偏器、检偏器,使起偏器、检偏器的偏振轴互相垂直,且起偏器与晶体内光的偏振方向成 $\pi/4$ 角时,可以获得最大的偏振光干涉输出,其输出光强为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi V}{2V_\pi} \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi V_0}{2V_\pi} \sin \omega t \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\Gamma_m}{2} \sin \omega t \right), \quad (1-3)$$

式中: $V = V_0 \sin \omega t$; $\Gamma_m = \pi V_0 / V_\pi$ 称为调制度。

此时系统响应是非线性的,在BGO晶体与起偏器或检偏器之间加 $\lambda/4$ 波片,使其在偏振光的两个分量间产生一个固定的 $\pi/2$ 相移,这时输出光强为

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Gamma_m}{2} \sin \omega t \right) = \frac{I_0}{2} [1 + \sin(\Gamma_m \sin \omega t)], \quad (1-4)$$

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \Gamma_m \sin \omega t), \text{ 当 } \Gamma_m \ll 1 \text{ 时。} \quad (1-5)$$

输出光信号经过光探测器和信号处理电路后,可将其分离为直流分量 $V_{dc} = ARI_0$ 和交流分量 $V_{ac} = \pi ARI_0 V / V_\pi$, 其中 R 为探测器的响应度, A 为电路的放大倍数。令 $g = V_{ac} / V_{dc}$, 则 $g = \pi V_0 / V_\pi$, 可知, g 与被测电压成正比关系。这样就可以利用偏光干涉原理实现对电压信号的测量。

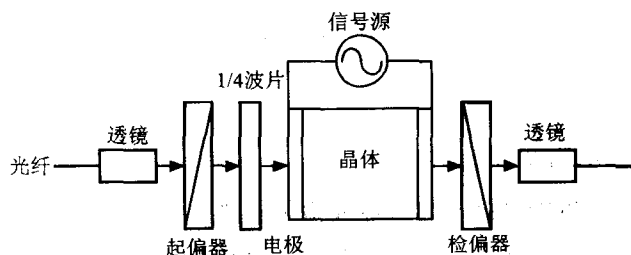
横向调制的相位延迟量和晶体的长度比 l/d 有关,因此可以通过改变晶体的纵横比来降低半波电压,提高灵敏度。^[16] 但是,横向调制中存在自然双折射造成的位相差,这一项无法人为控制,且易受环境温度的影响,测量结果需要复杂的处理,信号处理难度大。

2. 纵向调制

纵向调制就是外加电场方向与通光方向一致,如图1-2所示。纵向调制是在BGO晶体的(001)方向施加电场,光经起偏器进入晶

体后,分裂成相位相同而电位矢量相互垂直的两束光;由于折射率的不同导致在晶体内的传播速度不同,从而形成相位差 φ ^[20]

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} V = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (1-6)$$



在 $0 \leq V/V_\pi \leq 1$ 时,光强 I 与外加电压 V 是非单值对应关系,仅由一路输出光不可能复现被测电压,则必须增加一路输出光。使起偏器与检偏器的偏振轴互相垂直,在其中一光路中

安插一块 $\lambda/4$ 波片,使其快慢轴分别与光在晶体中的两个主振动方向平行。设经过起偏器后的入射光强为 I_0 ,两路输出的光强为 I_{m1} 、 I_{m2} ,则

有

$$I_1 = I_{m1} \sin^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi}\right), \quad (1-7)$$

$$I_2 = I_{m2} \sin^2\left(\frac{\pi V}{2V_\pi} + \frac{\pi}{4}\right), \quad (1-8)$$

$$I_0 = I_{m1} + I_{m2} \quad (1-9)$$

故此双光路提供两个互相正交的信号,尽管一个周期电压范围内信号变化了几个周期,但是通过计数信号的峰值点,并利用插值法进行数字信号处理,即可完整地重构电压信号波形。

与横向调制不同的是纵向调制的半波电压与晶体的尺寸无关,只决定于晶体的光学性能。采用纵向调制的OVT可以对加在晶体两端的电压实现直接测量,两极间电压与电场分布无关,所以外电场的干扰和极间电场分布的不均匀都不会对电压测量造成影响,^[21]传感头的设计相对比较容易。但是,由于电场方向与通光方向平行,因此必须采用特殊的电极,如采用“半透”的金属涂层

图1-2

纵向调制原理

Fig.1-2

Schematic Diagram -

am of Longitudinal

Modulation

电极、金属氧化物透明电极或环形电极。设计中应注意内部晶体绝缘和传感头内外绝缘。^[22]

1.2.2 Kerr效应型OVT

电光Kerr效应是存在于某些光学各向同性介质中的一种二次电光效应,其表达式为^[23]

$$\Delta n = K_2 E^2, \quad (1-10)$$

式中: Δn 为介质折射率的变化量; E 为外加电场强度; K_2 为常数。介质折射率的变化量将引起光波偏振状态的变化,故通过检测光波偏振态可获知被测电场。^[24]但Kerr效应很弱,而且介质折射率的变化量与外加电场强度不是线性关系。

1.2.3 逆压电效应型OVT

当压电晶体受到外加电场作用时,晶体除了产生极化现象以外,同时形状也将产生微小变化,即产生应变,这种现象称为逆压电效应。若将逆压电效应引起的晶体形变转化为光信号的调制并检测光信号,则可实现电

场(或电压)的光学传感。其结构如图1-3所示,^[25]是以压电陶瓷(PZT)和单模光纤作为传感头的逆压电效应型OVT结构。将单模光纤固绕在压电陶瓷圆柱上(匝数为 N),被测电压(U)施加于圆柱两端,则它的横向应变将引起光纤中传输光的相位移($\Delta\varphi$),且有

$$\Delta\varphi = K_3 N U, \quad (1-11)$$

式中: K_3 为与光波长、光纤及压电陶瓷有关的常数。可见,测量 $\Delta\varphi$ 即可获知被测电压 U 。

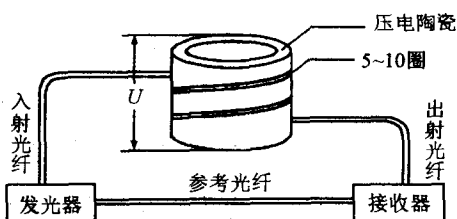


图1-3
逆压电效应OVT基本结构

Fig.1-3
Basic Structure of
Converse Piezo-
electric Effect OVT

1.2.4 有分压型OVT

有分压型多是采用电容分压器将高电压分成较低的电压加在电光晶体上。华中理工大学设计在广东新会市某变电站挂网运行的110 kV光学电压互感器^[16],东京电力公司和东芝公司联合开发的光学电流和电压互感器就是采用这种结构。^[26]使用电容分压器分压,可以使一个较低的合适的电压加在电光晶体上,降低作用在电光晶体上的电压,有利于提高传感器的温度稳定性;^[27]但是,电容器的长期运行引进了额外的测量误差。

1.2.5 无分压型OVT

无分压型是指高电压直接加在电光晶体上,没有分压器,提高了测量精度,同时适当的高电压可以提高传感器的灵敏度。^[27]由于高电压直接加在晶体上,必须防止晶体被击穿,同时对传感头的绝缘要求更高。华中理工大学研制了110 kV无分压型光纤电压互感器,采用SF₆做绝缘气体,高电压就是直接加在BCO晶体上。^[18]丹麦电力研究学会学者Lars.H Christensen也介绍了用于132~150 kV系统的基于Pockels效应的光学电压互感器,采用BCO晶体,无电容分压。^[15]

1.2.6 集成光学型OVT

集成光学OVT也是利用晶体的Pockels效应测量电压的一种光学电压互感器,但它是利用平面光无源调制器件进行光调制。传统的集成光学马赫-泽德尔(Mach-Zehnde)OVT结构如图1-4所示,^[6,28]其工作原理为:当被测电压加在互感器上时,加在Mach-Zehnder干

涉仪两臂上的电场方向相反,当光通过波导时,每臂上均发生Pockels效应,产生大小相等且方向相反的相移,因此,可通过相移差来推知被测电压的大小。

在图1-4中,输入光纤和输出光纤均为保偏光纤。在传感器输出端波导的两个模之间的本征相位差取决于波导的长度以及两个模的传播常数差,即

$$\varphi_i = (\beta_{TE} - \beta_{TM})L. \quad (1-12)$$

电光晶体LiNbO₃在电场的作用下发生双折射,光率体发生变化。传感器输入光强与输出光强之间具有如下关系

$$S = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \cos(\varphi_\infty + \varphi_i)], \quad (1-13)$$

式中: $\varphi_\infty = 2\pi n_0^3 \gamma_{22} LE / \lambda$,为电光晶体双折射两光波之间的相位差; α 是考虑到传感器制造不完善引入的系数,一般 $\alpha \leq 1$; φ_i 是由式(1-12)确定的本征相位差; n_0 是晶体的折射率; λ 是光波长; L 是波导长度; γ_{22} 为电光系数; E 为电场强度。

选择合适的尺寸 L ,使 $\varphi_i = \pi/2$,则传感器能获得线性响应。该传感器样品试验获得了1 MHz的带宽,能测量波头时间为0.5 μs 的闪电电脉冲。

集成光学OVT具有灵敏度高、频率响应好、可靠性高、易于大规模生产以及无需由透镜、起偏器、检偏器等组成的光学系统,制作简单等很多优点,因而有非常好的应用前景,是光学电压互感器的

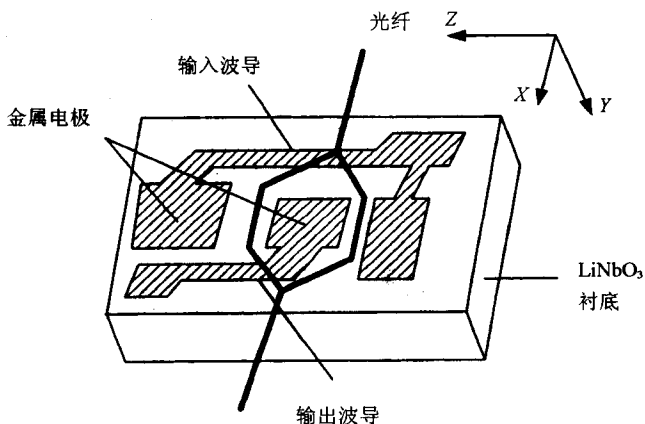


图1-4
集成光学马赫-泽
德尔干涉仪结构

Fig.1-4
Structural Diagram of Integrated
Optics Mach-Zehnder Interferometer