

光学电流互感器理论、 方法与应用

李岩松 著



科学出版社

光学电流互感器 理论、方法与应用

李岩松 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述了 Faraday 磁光效应的光学电流互感器的原理、建模、光学传感、信号处理和测试方法等,包括 Faraday 磁光光学传感机理分析,自适应光学电流互感器的理论技术体系,光学传感多物理场 COMSOL 分析,光学传感信号处理方法,光学电流互感器的测试方法,以及光学电流互感器的其他技术等。

本书可供从事电气设备制造、试验及电力系统运行、设计和管理人员阅读,也可供高等院校相关领域的教师、高年级本科生和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学电流互感器理论、方法与应用/李岩松著. —北京:科学出版社,2015.6
ISBN 978-7-03-044733-1

I. ①光… ①李… Ⅱ. ①李岩松著 Ⅲ. ①光电电流互感器 Ⅳ. ①TM452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124386 号

责任编辑:姚庆爽 邢宝钦 / 责任校对:张怡君

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 6 月第一次印刷 印张:11

字数:220 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

人们对基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器的研究始于 20 世纪 60 年代。历经几十年的努力,已取得了丰硕的成果。近年来随着智能变电站的发展,作为智能变电站基础设施之一的光学电流互感器正面临着前所未有的机遇和挑战。为此需要科研人员进一步提高和完善光学电流互感器的理论与技术,不断推进光学电流互感器的发展和应用。

作者从事光学电流互感器的研究有十余年,首次提出并完善了自适应光学电流互感器的理论技术体系。2002 年作者所在课题组研制成功了首台 110kV 自适应光学电流互感器并挂网运行,该项目通过了中国电机工程学会组织的技术鉴定。之后,课题组还研制成功了首套自适应光学电流互感器与保护一体化系统,并获得了中国电力科技二等奖。作者的博士学位论文《高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究》被评为河北省优秀博士学位论文。本书的目的是总结作者多年来的研究成果和经验,以期能为光学电流互感器的发展尽绵薄之力。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“获取光学电流互感器关键时变参数的复合反馈传感技术研究”(51277066)的资助,在此表示感谢。

本书融入了作者十余年的科研成果。首先要感谢作者的博士生导师杨以涵教授,杨先生的鼓励和支持是作者科研工作前行的动力。感谢作者的博士后合作导师郭志忠教授,在博士后研究工作期间郭老师为作者提供了良好的科研条件和支持。感谢天津大学贺家李教授对作者的热情指导和帮助。在自适应光学电流互感器的挂网运行过程中,国网保定供电公司、课题组和有关制造厂给予了大力的支持,在这里一并表示感谢。

感谢作者所指导的硕士研究生王倩、周浩、季遥遥、孟璐、向勇、王妍艳、贺鸿鹏、欧阳进、曹丽欣、王小虎等在光学电流互感器的多物理场分析、微弱信号检测、实时信号处理等方面的研究工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

李岩松

2015 年 1 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光学电流互感器的基本原理	2
1.2 光学电流互感器的发展历程	6
1.3 光学电流互感器存在的主要问题	9
第 2 章 光学电流互感器的传感机理分析	11
2.1 光学电流互感器的模型化分析.....	11
2.1.1 引言	11
2.1.2 光学电流互感器模型化分析	11
2.2 Faraday 磁光效应的数学模型	12
2.2.1 Faraday 磁光效应的宏观理论模型	12
2.2.2 Faraday 磁光效应的电子动力学理论模型	15
2.3 磁光效应中线性双折射的数学模型.....	18
2.4 光学电流互感器中光学变换的数学建模.....	22
2.4.1 光学电流互感器的直接时域调制的系统模型	22
2.4.2 光电转换系统的数学模型	23
2.5 光学电流互感器的开环机理.....	23
第 3 章 自适应光学电流互感器	27
3.1 自适应光学电流互感器的理论技术体系.....	27
3.1.1 独立量自适应光学电流传感原理	27
3.1.2 自适应光学电流互感器	30
3.1.3 自适应光学电流互感器的理论技术体系	33
3.2 光学电流自适应传感技术.....	33
3.2.1 自适应滤波理论	34
3.2.2 光学电流传感的自适应算法	36
3.2.3 平方根 Kalman 自适应的时变噪声统计估值器	41
3.2.4 光学信息的小波分析及突变量检测.....	43
3.3 螺线管聚磁光路结构技术.....	49
3.3.1 螺线管聚磁光学传感方法	49
3.3.2 光学传感头	58

3.3.3	螺线管聚磁光路的相间磁场正交技术	65
3.4	自适应光学电流互感器的现场应用	66
3.4.1	自适应光学电流互感器挂网运行	66
3.4.2	自适应光学电流互感器与线路差动保护现场一体化运行	69
第4章	光学电流互感器的多物理场分析	74
4.1	光学电流互感器的物理场概述	74
4.2	多种载流形式的电磁场分析	76
4.2.1	电磁场的数学模型	76
4.2.2	螺线管磁场的 COMSOL 分析	77
4.2.3	相间磁干扰的仿真分析	80
4.2.4	其他载流形式的仿真分析与比较	82
4.2.5	螺线管聚磁式传感单元的电磁力问题	85
4.3	电磁场-温度场耦合分析	86
4.3.1	热传导定律及其边界条件	86
4.3.2	温度场	87
4.3.3	光学电流互感器传感单元的内热源问题	88
4.3.4	基于 COMSOL 的光学电流互感器传感单元的电磁-热耦合仿真	89
4.4	温度场-热应力双折射分析	92
4.4.1	热应力	92
4.4.2	应力双折射	94
4.4.3	光学电流互感器传感单元的热应力 COMSOL 分析	95
4.5	电磁场-光场耦合分析	99
4.5.1	磁光传感的 COMSOL 建模	99
4.5.2	磁光传感的 COMSOL 分析	100
第5章	光学电流互感器的信号处理方法	103
5.1	光学电流互感器的噪声分析	103
5.2	基于 Allan 方差法的光学电流互感器随机噪声分析	105
5.2.1	Allan 方差法	105
5.2.2	基于 Allan 方差的光学电流互感器噪声分析方法	106
5.2.3	噪声的数学模型推导	107
5.2.4	应用光学电流互感器六类噪声模型的最优估计滤波分析	110
5.3	光学电流互感器粒子滤波方法	113
5.3.1	贝叶斯最优估计	113
5.3.2	粒子滤波理论	115
5.3.3	光学电流互感器的粒子滤波方法	120

5.4	光学传感频谱迁移测量法	127
5.4.1	光学传感频谱迁移测量法的基本原理	127
5.4.2	光学传感频谱迁移测量法的实现	129
5.5	光学传感自适应信噪分离滤波方法	132
5.5.1	光学电流互感器的自适应信噪分离的基本原理	132
5.5.2	自适应滤波算法	133
第6章	光学电流互感器的测试方法	135
6.1	光学电流互感器的测试标准及方法	135
6.1.1	误差定义	135
6.1.2	误差测试标准	138
6.2	基于 LabVIEW 的光学电流互感器测试系统	139
6.2.1	光学电流互感器检测系统的构成	139
6.2.2	标准通道组成构件的溯源	141
6.2.3	基于 LabVIEW 的光学电流互感器检测系统	142
6.2.4	OCT 检测系统的 LabVIEW 编程	144
6.3	自适应光学电流互感器的检测	148
6.3.1	线性度及相位检测	148
6.3.2	循环温度下的精度检测	149
6.3.3	暂态非周期分量性能测试	150
6.3.4	暂态测量性能检测	151
6.3.5	AOCT 运行稳定性的试验室检验	152
6.3.6	AOCT 的现场运行检验	153
第7章	光学电流互感器的其他技术	155
7.1	三相光学电流互感器	155
7.1.1	三相光学电流互感器及模型	155
7.1.2	线性双折射效应的神经网络补偿	158
7.2	比较式光学电流互感器	158
7.2.1	比较式光学电流互感器的基本原理	158
7.2.2	比较式光学电流互感器的基本原理	160
7.2.3	比较式光学电流互感器的关键技术	160
7.3	光学传感头柔性组装方法	162
参考文献		164

第 1 章 绪 论

电流互感器(current transformer, CT)是电力系统电能计量和保护控制的重要设备,其测量精度和运行可靠性与电力系统的安全、经济运行密切相关。在电力系统中运行的电流互感器应该满足:①稳态测量精度满足电能计量要求,必须达到 0.2 级及以上;②有良好的动态响应能力,基波、谐波和非周期分量的测量必须满足电力系统保护、控制与动态分析的需要;③具有长期运行的稳定性,其性能不受运行环境、运行时间和运行系统的影响;④具有很高的绝缘性能。

传统的电磁式电流互感器应用于电网的历史已经超过百年,至今仍是电力系统用来测量电流的主要设备。电磁式电流互感器结构类似于变压器,因传感机理的限制,已经暴露出一系列不能满足当前电力系统需要的缺点,如频带窄、绝缘结构复杂、造价高、动态范围小、容易磁饱和,从而造成保护误动或拒动等,难以满足电力系统数字化和智能化的要求^[1-4]。

智能变电站是当前变电站自动化发展的方向,电流互感器是过程层的关键一次设备。选择合适的电流互感器是智能变电站发展中面临的重要问题。

目前人们所研究和开发的新型电流互感器有两个主要类别:基于电磁感应原理(传感器为 Rogowski 线圈和低功耗小电流互感器(LPCT))的有源电子式电流互感器,基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器^[5-7](optical current transducer, OCT)。这两种新型电流互感器统称为电子式电流互感器。

在有源电子式电流互感器中,Rogowski 线圈是密绕于非磁性骨架上的空心螺绕环。Rogowski 线圈直接输出的信号是被测电流的微分信号。由于采用非磁性骨架,Rogowski 线圈电流互感器不存在磁饱和现象,提高了电磁式电流互感器的动态响应范围^[8]。然而,Rogowski 线圈在原理上不能测量重要的电力系统动态量——非周期分量。同时,Rogowski 线圈在测量精度上受环境温度和电磁干扰的影响。此外,无论采取哪种传感器(Rogowski 线圈和 LPCT),有源电子式电流互感器必须为高压传感部件提供电能。供能技术是有源电子式电流互感器的关键技术之一。

基于法拉第磁光效应的光学电流互感器是电子式电流互感器中的一种,长久以来都是新型电流互感器中的研究热点^[9]。与有源电子式电流互感器不同,光学电流互感器是利用法拉第效应和光纤传导技术进行电流的测量。相比于传统的电磁式电流互感器,可以更好地满足电能计量、继电保护、系统监测诊断以及电力系统分析等领域不断发展的要求^[10]。

与传统电磁式电流互感器相比,光学电流互感器具有如下优点。

(1) 造价低、经济性好,体积小、绝缘性能优良。由于不采用导电的金属作为传输介质,所以大大地简化了高压互感器中的内绝缘结构,整个互感器体积小、重量轻、造价低。当电压等级升高时,传统电磁式互感器的制造成本会成倍增加,而光学电流互感器的成本只是稍有增加。光学电流互感器在高电压等级下的低成本正是吸引业内关注的主要原因之一^[11]。

(2) 不含铁心,消除了磁饱和、铁磁谐振等问题。当系统发生短路时,在强大的短路电流作用下,特别是其中的非周期分量尚未衰减时,断路器跳闸,或在大型变压器空载合闸后,电磁式电流互感器的铁心中通常仍保留较大剩磁,铁心严重饱和,互感器暂态性能恶化,导致电磁式电流互感器二次侧输出电流无法正确反映一次电流,从而造成保护装置的误动或拒动。光学电流互感器不含铁心,动态范围大,不会饱和。

(3) 二次侧无开路高压的危险,没有因充油而产生的易燃、易爆等危险。电磁式电流互感器在二次侧开路时,会产生高压。此外,为了解决电磁式电流互感器一次侧与二次侧之间的绝缘问题,在互感器中通常充油或充 SF₆,但这也就会带来易燃、易爆等危险隐患。在光学电流互感器中,通过绝缘性能良好的光纤连接将一次侧信号传输到二次侧,实现了高低压之间的电气隔离^[12-15]。

(4) 频率响应范围宽,动态范围大,对电力系统故障响应快。选择暂态信号作为量测量进行故障判断是微机保护的一个发展方向。当选择暂态信号作为保护判断参量时,要求互感器具有很高的线性度以及动态特性。电磁式电流互感器因存在的磁饱和等问题难以满足新要求。目前光学电流互感器的频率响应可达到 1MHz 以上,具有动态范围大的优点,可以为微机保护提供准确的暂态信号^[16]。

(5) 适应了电力系统数字化、智能化的新发展。光学电流互感器不仅可以输出模拟量,还可以输出数字量,数字接口符合 IEC61850 标准,满足了智能变电站的数字化要求^[17]。

(6) 绿色环保、电磁兼容性好。光学电流互感器采用光纤传输信号,与电磁式电流互感器所采用的铜线相比,光纤重量轻、价格低,减少了有色金属的消耗。同时,在光纤中传输信号具有很强的抗电磁干扰能力,非常适用于变电站复杂的电磁环境。

本书主要以 Faraday 磁光效应的光学电流互感器为研究对象,如果没有特殊说明,本书所述的光学电流互感器就是指基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器。

1.1 光学电流互感器的基本原理

基于法拉第磁光效应的光学电流互感器^[18-23]是通过磁光效应来测量由被测

电流引起的磁场强度的线积分来间接测量电流的。根据法拉第磁光效应,线偏振光在与其传播方向平行的外界磁场的作用下通过磁光材料介质(晶体或光学玻璃)时,其偏振面将发生偏转,如图 1-1 所示,偏转角 ϑ 可以表示为

$$\vartheta = \mu \cdot V \cdot \int_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1)$$

式中, μ 为法拉第磁光材料的磁导率; V 为磁光材料的 Verdet 常数,它与磁光材料介质的特性、光源波长、外界温度等有关; \mathbf{H} 为作用于磁光材料的磁场强度; L 为通过磁光材料的偏振光的光程长度。

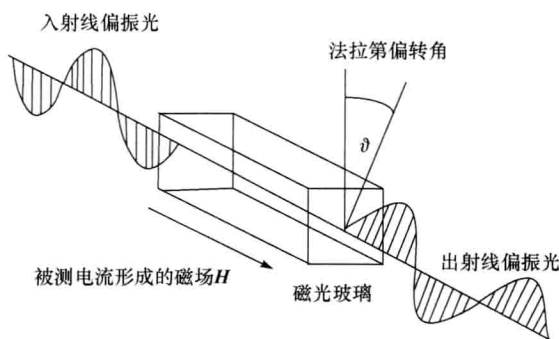


图 1-1 法拉第磁光效应的原理图

事实上,被测电流形成的磁场在空间上任意一段的线积分与被测电流之间存在固定的比例线性关系。因此,只要将磁光传感光路置于被测电流形成的磁场中,磁光传感光路中光的传播方向与磁场矢量方向在同一平面内,磁光传感光路中线偏振光的偏转角 ϑ 就是固定比例系数与被测电流的乘积,即

$$\vartheta = k \cdot V \cdot i \quad (1-2)$$

式中, k 为比例系数,通过整定方法可以获得这个比例系数 k 。

式(1-1)和式(1-2)构成了光学电流互感器的基本实现方法的理论基础。

在此基础上也可以有另一种磁光传感测量的实现方法:采用光学方法使得磁光传感光路中线偏振光围绕被测电流形成回路,应用安培环路定律就可以得到如下关系:

$$\vartheta = V \cdot N \cdot i \quad (1-3)$$

式中, N 为线偏振光围绕电流的环路数; i 为被测电流。

由于偏振光的偏转角是不能够被直接测量的,所以人们利用马吕斯定律将不可测的偏转角信号转换为可测的偏振光的光强信号^[24-27]。马吕斯定律指出,自然光经过第一块偏振器(称为起偏器)时,出射的偏振光的光强为入射自然光强 J_0 的二分之一,再经过第二块偏振器(称为检偏器)后,出射偏振光的电矢量平行于检偏器的透射方向,其光强 J_1 为

$$J_1 = J_0 \cos^2 \theta \quad (1-4)$$

式中, θ 为起偏器出射偏振光与检偏器出射偏振光之间的偏振夹角。

将马吕斯定律应用于光学电流互感器中, 此时式(1-4)中的 θ 就是偏转角 ϑ 以及起偏器和检偏器之间夹角的两者之和。为了使检偏器出射偏振光的光强获得最大, 通常将起偏器和检偏器之间的夹角设定为 $\pi/4$, 当偏转角 ϑ 很小只有几度时, 式(1-4)就变成以下形式:

$$J_1 = J_0 (1 - \sin 2\vartheta) \approx J_0 (1 - 2\vartheta) = J_0 - 2J_0\vartheta \quad (1-5)$$

式中, J_0 和 ϑ 均为未知量。为了从这方程求解两个未知量 J_0 和 ϑ , 采用两种方法: 单光路 AC/DC 法和双光路法。

从式(1-5)可知, J_1 由两个分量组成, 其中第一项 J_0 为直流量, 第二项 $2J_0\vartheta$ 为交流量。单光路 AC/DC 法就是利用 J_0 为直流量而 $2J_0\vartheta$ 为交流量的特点, 将 J_1 通过交直流分离后再进行除法消去公共项 J_0 以得到 ϑ 。

不过, 这种方法不能够用于测量直流电流, 故而又出现了双光路法。在光学电流互感器的结构中, 由偏振分束器来作为检偏器, 既能够实现偏振光的检偏, 又将出射的偏振光分成两束, 这两束偏振光相互正交, 各自的光强分别为

$$\begin{cases} J_{1P} = J_0 (1 - 2\vartheta) \\ J_{1S} = J_0 (1 + 2\vartheta) \end{cases} \quad (1-6)$$

利用方程组(1-6), 可以求解未知量 ϑ :

$$\vartheta = \frac{J_{1S} - J_{1P}}{2(J_{1S} + J_{1P})} \quad (1-7)$$

基于法拉第磁光效应的光学电流互感器在传感光路结构的实现方式上, 人们曾经研究过多种形式, 主要有块状光学电流互感器、集磁环式光学电流互感器和全光纤式光学电流互感器。

块状光学电流互感器的光学传感部分采用磁光玻璃作为传感材料, 通过光学加工使得偏振光在磁光材料中围绕通电导体旋转一周或多周, 如图 1-2 所示。这

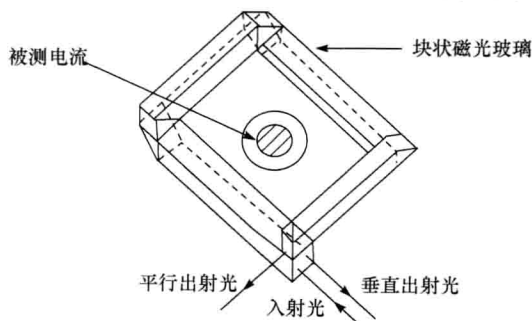


图1-2 块状光学电流互感器的光学传感头的结构示意图

种传感光路就是利用式(1-3)来测量电流的。

在磁环上开一缺口,将磁光材料置于磁环的缺口中,被测线路置于磁环的中央,通过测量磁环缺口中的磁场来间接测量线路中的电流,这种结构被称为集磁环式光学电流互感器,如图 1-3 所示。这种传感光路就是利用式(1-2)来测量电流的。

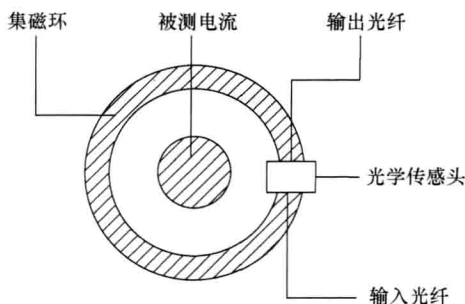


图 1-3 集磁环式光学电流互感器的光学传感头的结构示意图

在基于法拉第磁光效应光学电流互感器的整体结构上,不仅有光学传感部分,还需要具有温度稳定的光源驱动电路和发光光源(通常为激光器或发光二极管)、连接光缆、光接收器和信号处理电路等部分,块状光学电流互感器和集磁环式光学电流互感器除了光学传感部分不一样,其余部分都大同小异。

全光纤光学电流互感器是将传感光纤缠绕在通电导体周围,利用光纤的偏振特性,通过测量光纤中偏振光的旋转角来间接测量电流,如图 1-4 所示。

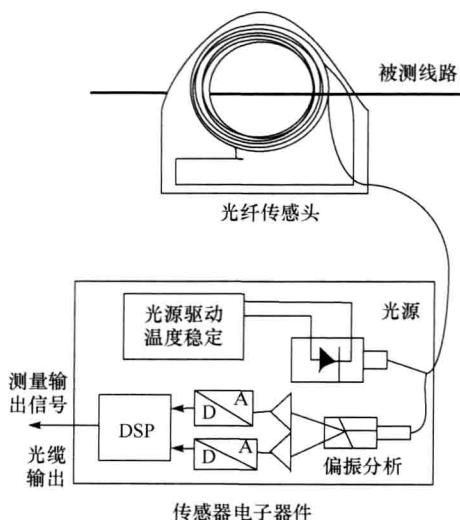


图 1-4 全光纤光学电流互感器的结构示意图

有源电子式电流互感器与以上三种光学电流互感器的结构和传感原理都截然不同,这种互感器采用电磁传感原理在高压端测量电流,将电流信号转换为电压信号后经过模/数转换器转换为数字信号,经过光电转换电路变换为光脉冲信号,通过光纤将信号传输到地面后,再通过光电转换和信号解调电路输出模拟信号,或者通过光电转换后直接进入计算机系统,如图 1-5 所示。这种互感器只是利用了光纤传输信号,测量原理与传统的电磁式电流互感器一样。

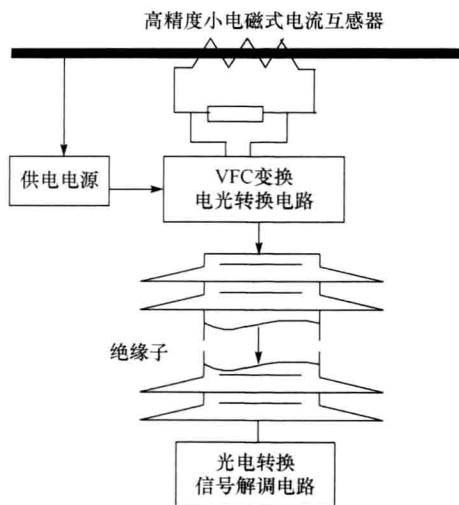


图 1-5 电子式电流互感器的结构示意图

1.2 光学电流互感器的发展历程

光学电流互感器兴起于 20 世纪 60 年代,归功于激光器的研制成功。70 年代初,光纤的问世与实用化进一步促进了光学电流互感器的研究,但由于测量精度低、温度稳定性差等原理性问题^[28-30],未能形成实用的样机。从 1982 年开始,光学电流互感器的研究进入了发展关键和极具成果的时期。1986 年美国的田纳西州流域电力管理局(Tennessee Valley Authority)在其所属的 Chickamauga 水坝电力编组站(161kV)安装了第一台单相高压计量用的光电式电流互感器,该互感器的测量带宽为 10kHz,计量误差为 0.08%^[31]。1987 年美国的田纳西州流域电力管理局和西屋电气公司(Westinghouse Electric Corporation)合作,在光学电流互感器的研究方面取得了很大进展,以 Ulmer、Johnston、Asars 等知名学者为主的课题组针对光学电流互感器的“温度变化—双折射—叠加到法拉第旋转角上的干扰”问题,提出了“线偏振光平行于温度引起的双折射媒介中的特征方向时通过该媒介

仍然保持线偏振态”的理论^[32],并据此提出了独特的十步理论计算方法,这项研究成果在当时被认为是光学电流互感器在基础理论研究方面取得的突破性进展,不过这种方法并没有被应用于实际装置中。1987年田纳西州流域电力管理局在其所属的 Moccasin 变电站(161kV)安装了三相计量的光学电流互感器,另外还试用了光学电压互感器(OPT)测量电压。与传统的油浸式电磁互感器相比,误差在1%左右。在1991年首次报道了光学电流互感器在345kV变电站试运行^[33]。该互感器采用了PWM放大器,二次输出电流为5A,并采用重量较轻的聚合体光纤柱作为光学电流互感器的支撑。日本在光学电流互感器的研究方面也取得了很大的进展,分别于1989年2月和7月推出了磁光式光学电流互感器和组合式OCT/OPT的样机。他们分别使用了能够展示Faraday效用的磁光材料(YIG、铅玻璃)和Pockel与Faraday两种效应的单晶BSO作为传感元件,其中组合式OCT/OPT方案也成为研究方向^[34]。日本爱知县的Clmbu电气电力公司还开发了光学零序电流/电压互感器^[35]。光学电流互感器的研究呈现多类型、多用途的发展趋势。日本相继有带集磁环光学电流互感器研究成功的报道^[36-38]。随着特种光纤技术的发展、光纤传感新结构的研究和抑制双折射的研究取得进展,全光纤式光学电流互感器引起了研究者的关注,并取得了显著的进展。Nxtphase公司研究的全光纤电流互感器已经挂网运行,ABB公司也研制出用于电化学等特殊行业的、测量可达500kA直流大电流的全光纤电流互感器。

我国对光学电流互感器的研究起步较晚,沈阳变压器研究所从1970年开始研究,以后在清华大学、四平电业局的积极协助下于1979年研制出第一台样机,并先后研制出三台样机在四平电业局的220kV线路上试运行,后来于1984年退出运行。国家对光学电流互感器的研究工作非常重视,将其列为“七五”、“八五”重点研究项目。先后有清华大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、华北电力大学和中国电力科学研究院等多家科研院所相继从事光学电流互感器方面的研究。1991年中国电力科学研究院和清华大学共同开发的110kV光学电流互感器通过国家相关部门鉴定并进行了挂网试运行。1993年华北工业大学研制的110kV独立式单相光学电流互感器在广东新会大泽变电站挂网试运行^[39]。2002年和2005年西安同维公司先后将研制的电压等级为330kV和110kV的无源式光学电流互感器挂网投运。2003年华北电力大学与哈尔滨工业大学共同研制的自适应光学电流互感器(AOCT)在河北省保定市沙窝变电站挂网试运行^[1],该项目于2004年通过了中国电机工程学会鉴定。2006年2月,由华北电力大学研制的35kV电压等级的自适应光学电流互感器及其相应的输电线路光纤纵差保护一体化系统在国网保定供电公司的110kV上陈驿变电站至开关站一条35kV并网线上投入运行^[4],该项目于2007年获得中国电力科技二等奖。在全光纤电流互感器方面,南瑞集团和中国电力科学研究院都研制出了全光纤电流互感器。

鉴于当时世界各国对光学电流互感器的研究已经取得了相当的成果,IEEE Emerging Technologies Working Group 和 IEEE Fiber Optics Sensors Working Group 于 1994 年对当时光学电流互感器的研究成果进行了总结并发表论文^[40],在该文献中详细讨论了有源式光学电流互感器、集磁环式光学电流互感器、块状光学电流互感器和全光纤式光学电流互感器等类型的光学电流互感器的原理和结构以及不同的信号处理技术,指出在磁光玻璃中的双折射起源于永久内应力和短暂内应力,而永久内应力取决于磁光玻璃的热过程历史,短暂内应力是由周围温度改变所引起的热暂态过程。与其他光学电流互感器相比,块状光学电流互感器具有稳定性好等独特优势,一直是国内外实用化研究重点。

从 20 世纪 90 年代后期至今,光学电流互感器的研究主要集中于如何消除双折射、温度和振动等对光学电流互感器测量精度的影响。双折射主要有固有双折射、应力双折射和温度引起的双折射等,温度除了产生双折射,还影响介质的 Verdet 常数、折射率等,它们相互影响,关系随机而且复杂。

对于双折射问题,固有双折射可以在测量系统中加以消除,双折射问题的主要困难是其影响的大小会随外界条件的变化而变化。实验表明,温度单调变化大于 $7\sim 8^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,对应于环境变化引起的暂态双折射的光强值及其变化就很大,严重影响光学电流互感器的精度及稳定性,暂态双折射是磁光电流互感器(MOCT)运行过程中不可避免的现象。传感头的组装也会引起应力双折射。采用黏接固定磁光玻璃的方法不可避免地存在应力,从而引起双折射,而此部分双折射的影响在很大程度上与温度的高低有关。为了消除温度引起双折射的影响,人们提出了许多补偿的方法。一种是基于温度测量的补偿方法^[41]:首先离线记录光学电流互感器在某一特定温度下,当温度存在扰动时的测量精度与温度的关系曲线,并存储于存储器中,在线通过热电偶直接测量环境温度,然后与存储的曲线相对比来构成温度补偿。另一种方法是设计了一种独特的光学结构^[36]:充分利用晶体的左右自然旋光效应,将分别具有左旋光效应和右旋光效应的晶体或者平行叠放,或者串行叠放,适当分配分别进入左、右旋光效应晶体的光强,以达到消除温度影响的目的。此外,还有人提出了一种基于偏振光干涉原理的温度补偿技术^[42],它是将入射到磁光材料的偏振光一分为二,其中一束光入射到被温度和磁场作用的磁光材料中,另一束经过线性旋光器,两束光相互干涉,被测磁场从干涉仪的边缘可见性变化中得以恢复。

对于组装应力双折射的影响问题,有人专门设计了一种无组装应力传感头组装方法^[43]来解决传感头组装引起的应力双折射问题,使传感头抗热冲击能力变强,并具有自恢复能力。有人提出了一种解决办法是开发一系列减少光学玻璃残余双折射的退火工艺方法,使得在应力作用下没有双折射,从材料上来解决问题^[42]。由振动引起的双折射也是阻碍块状式光学电流互感器实用化的难题之一。

人们利用法拉第磁光效应的非互易性原理和双折射的互易性来消除双折射的影响,也就是同一线偏振光沿着同一光路正反传播时双折射被消除而磁光效应被加强两倍^[37]。或者是,在传统的光学传感器系统(发射器—光纤—传感头—光纤—检测器)基础上,增设第二路发射器和检测器^[44],使得光路能以两个相反的方向传输,再将这两束双向透射光透射到同一个传感头中,并分别被两个光检测器接收,然后应用简单的信号处理方法来消除振动的影响。

除了以上用于消除双折射、温度、振动等方法,人们还研究进一步提高光学电流互感器的灵敏度,利用多片光学玻璃以构成传感器^[41],该传感器使得光路多次环绕载流导体,大大地提高了传感器的灵敏度,而且通过调节光的入射点位置,可以改变闭合光路的圈数,有较大的灵活性。通过改变入射光处的小玻璃棱镜,即可得到不同的光路圈数,从而提高整个传感器的灵敏度。然而,通过增加光路长度可以提高传感器的灵敏度,但同时双折射的影响也相应地增加了,这反过来又使得传感器的灵敏度下降;同时,增加光路圈数也使得光路对准的难度和光强的衰减性增大。另外,针对光学电流互感器信号处理的 AC/DC 法不能用于测量直流的缺陷,有人提出了一种叠加交流分量的调制方法^[45],将偏振光依次通过直流电源和交流电源分别作用的磁光材料中,其中直流是被测量,而交流电源是已知的,通过求解简单的线性方程来求出被测的直流,这种方法也可以用于光学电压互感器中。

1.3 光学电流互感器存在的主要问题

经过几十年的发展,基于法拉第磁光效应的光学电流互感器的研究已经取得了许多可喜的成果,但由于还存在着一些难题始终没有彻底解决,如温度和双折射引起的精度问题等,光学电流互感器至今仍难以大规模实用化。从光学电流互感器的运行特性来看,主要有以下两个关键问题有待解决和完善。

1. 测量精度受到运行环境温度的影响,达不到计量的要求

在现场运行中,光学电流互感器受外界因素的影响使得其测量精度始终达不到电力系统计量要求,现在已经知道这主要是环境温度的变化作用于光学电流互感器所造成的。温度变化在光学电流互感器的 Faraday 磁光材料中引起了双折射现象,双折射对输出光强产生了影响,从而使得测量结果产生了误差,达不到电力系统计量的要求。这是光学电流互感器面临的最大的难题之一,即测量精度温漂问题。

许多研究者希望通过 Faraday 磁光材料性能的改善达到减小温漂影响的目的^[46]。很多年过去了,仍没有取得期望的突破性进展。人们虽然也设计了巧妙的光学结构^[36,42,43],提出了温度补偿方法^[41],但是,由于光学传感材料和光学加工不

够理想,这些措施不仅没有从根本上解决温漂问题,反而引发了光学电流互感器的运行稳定性问题。

作者研究表明,基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器是一种开环的测量结构,光路的任何环节出现的误差,都会直接影响最终的测量结果,而温漂是开环误差中最严重的一个。为了解决光学电流互感器的温漂问题,与其等待遥遥无期的小温漂 Faraday 磁光材料的诞生,不如寻求一种可以自动剔除干扰,特别是温漂干扰的光学电流测量新原理。

2. 运行稳定性差,无法在现场长期使用

过去,基于 Faraday 磁光效应的块状玻璃光学电流互感器,趋向采用双层光路的传感结构^[41,45],目的是实现完全抗电磁干扰。但研究表明,双层光路结构并不具有完全的抗电磁干扰能力,还会带来传感头运行稳定性降低的新问题。具体表现为:互感器经过较长时间的运行之后,输出光强明显减弱,最终导致光学电流互感器失去了测量电流的功能。研究表明,光学电流互感器出现运行稳定性问题的原因是光路长、环节多,仅反射面就至少有 6 个以上。光学电流互感器的长期运行稳定性成为了阻碍光学电流互感器实用化的主要原因之一,提高 Faraday 磁光效应光学电流互感器的运行稳定性的关键就是简化光路结构。

除了以上两个关键问题,光学电流互感器在应用方面还存在其他一些问题有待改进,如测量小电流时信噪比低而导致的测量精度不满足要求,光学电流互感器传感单元的优化设计和光学电流互感器检测系统的实现等。

本书的研究工作主要是围绕上述光学电流互感器存在的问题展开的。通过对光学电流互感器的传感机理建模、多物理场分析、提高信噪比的信号处理以及 AOCT 的技术理论体系等多方面进行研究和实践,为光学电流互感器所面临的两个难题提供了较为完整的解决方案。这些研究内容不仅可以应用于光学电流互感器,还可以应用于其他类型的电子式互感器以及其他形式的光学传感中。