

分类号：TP212

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2220320130



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 高温稳定性全光纤电流传感器
的研究

论 文 作 者	赵晓慧
校 内 导 师	朱学华（副教授）
校 外 导 师	柳士江
专业学位类别	电子信息
研究方向（领域）	新一代电子信息技术

论文提交日期：2025 年 5 月 18 日

分类号：TP212

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220320130

题 目 高温稳定性全光纤电流传感器的研究

题 目 RESEARCH ON HIGH TEMPERATURE STABILITY
ALL-FIBER OPTICAL CURRENT SENSOR

学生姓名： 赵晓慧

校内导师： 朱兴华（副教授）

校外导师： 柳士江（工程师）

专业学位类别： 电子信息

研究方向： 新一代电子信息技术

论文答辩日期： 2025 年 5 月 12 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：赵晓慧

日期：2025 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：赵晓慧

指导教师签名：朱学华

日期：2025 年 5 月 18 日

日期：2025 年 5 月 18 日

高温稳定性全光纤电流传感器的研究

摘 要

随着电网转型进程的加快，电流测量在系统扰动分析、故障诊断及控制保护等方面发挥着越来越重要的作用。传统的电磁式电流互感器暴露出瞬态响应差，易饱和、绝缘困难等缺陷，难以满足现代电力系统的需求。在此背景下，全光纤电流传感技术（AFOCS, All fiber optical current sensors）逐步发展成熟，因其优异的绝缘性能、高精度测量特性及强抗电磁干扰能力，逐渐显现出广阔的应用前景。然而，温度敏感特性却成为限制其在电力系统中大规模推广的关键瓶颈。基于此，本课题聚焦 AFOCS 系统中的温致双折射问题，通过结构优化设计提出改良方案，从而提升传感器的温度稳定性与测量精度。本文的研究内容主要包含以下几个方面：

首先，分析了光学电流传感器的国内外研究现状，明晰该领域的研究热点和应用情况，通过对典型光学电流传感方案的优缺点对比，重点论证全光纤型架构作为研究对象的合理性。紧接着对全光纤电流传感器的相关理论进行详细阐述，涵盖了其基本原理及偏振态理论。介绍了几种典型的全光纤电流传感器的工作机制，为后续的研究奠定基础。

其次，提出了一种耦合 FPR（法拉第旋光器）的环形结构 AFOCS，系统探究了该新型结构的工作原理，并结合琼斯矩阵法对

传感系统中信号光的偏振态的演化过程展开分析。通过深入揭示温度对全光纤电流传感器性能影响的机理，为系统温度稳定性研究提供理论依据。与传统 AFOCS 相比，耦合 FPR 的环形结构 AFOCS 的测量误差减小了近 300 倍，证实了该新型结构能够提高系统温度稳定性，且随着双折射的增大，系统误差稳定在-1%附近，满足系统稳定运行的要求。

最后，搭建了耦合 FPR 的新型全光纤电流传感器实验平台，开展了电流测量和温度稳定性实验。160A 的预设电流在常温25℃下测量值为158A，电流测量误差为-1.25%。选取10℃，15℃，20℃，30℃进行对比实验，实验结果表明随着温差的增大，系统双折射对温度越敏感，不同温度下测量的电流值误差最大不超过-2.50%。由于光路系统复杂导致光信号在传输过程中存在一定损耗，实验数据与理论值之间存在一定偏离，但实验结论与仿真结论基本吻合，测量结果线性度良好，充分检验了新型全光纤电流互感器的温度稳定性和方法的实用性。本文研究结果对全光纤电流传感器在智能电网电流高精度测量中的应用具有重要的指导意义。

关键词：全光纤电流传感器，温度稳定性，线性双折射，法拉第效应，温度特性

RESEARCH ON HIGH TEMPERATURE STABILITY ALL-FIBER CURRENT SENSOR

Abstract

With the acceleration of power grid transformation, current measurement plays an increasingly crucial role in system disturbance analysis, fault diagnosis, and control protection. Traditional electromagnetic current transformers reveal defects such as poor transient response, susceptibility to saturation, and insulation difficulties, making them inadequate for modern power systems. In this context, All-Fiber Optical Current Sensing (AFOCS) technology has gradually matured, demonstrating broad application prospects due to its excellent insulation performance, high-precision measurement characteristics, and strong electromagnetic interference resistance. However, temperature sensitivity remains a critical bottleneck limiting its large-scale adoption in power systems. This study focuses on addressing the temperature-induced birefringence issue in AFOCS systems through structural optimization to enhance sensor temperature stability and measurement accuracy. The research encompasses the following aspects:

First, we analyze the global research status of optical current sensors, identify key research focuses and application scenarios in this field, and

justify the rationality of adopting all-fiber architecture through comparative analysis of typical optical current sensing solutions. Subsequently, we elaborate on the fundamental theories of AFOCS, including its basic principles and polarization state theory, followed by an introduction to the operational mechanisms of several typical AFOCS configurations, laying the foundation for subsequent research.

Second, we propose a novel ring-structured AFOCS incorporating coupled FPR (Faraday Phase Retarder) and systematically investigate its working principles. Using Jones matrix method, we analyze the polarization state evolution of signal light in the sensing system. Through in-depth exploration of temperature impact mechanisms on AFOCS performance, theoretical support is established for system temperature stability studies. Compared with conventional AFOCS, the measurement error of the FPR-coupled ring structure is reduced by nearly 300 times, demonstrating enhanced temperature stability. As birefringence increases, system error stabilizes around -1%, meeting operational stability requirements.

Finally, we construct an experimental platform for the novel FPR-coupled AFOCS and conduct current measurement and temperature stability tests. At 25°C ambient temperature, a preset 160A current was measured as 158A, yielding a -1.25% error. Comparative experiments at 10°C, 15°C, 20°C, and 30°C revealed that maximum current measurement

errors across different temperatures did not exceed -2.50%, with system birefringence showing increased temperature sensitivity as thermal gradients expanded. Although optical signal loss during transmission caused deviations between experimental data and theoretical values due to complex optical paths, experimental conclusions align well with simulation results, showing excellent measurement linearity. This effectively validates the improved temperature stability of the novel AFOCS and the practicality of the proposed method. The research outcomes provide significant guidance for implementing high-precision current measurements using AFOCS technology in smart grids.

Zhao Xiaohui (Electronic information)

Supervised by Professor Zhu Xuehua

KEY WORDS: all-fiber current sensor, temperature stability, linear birefringence, Faraday effect, temperature characteristic

目 录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景和意义	1
1.2 光学电流传感器发展和现状	5
1.2.1 光学电流传感器国内外研究现状	5
1.2.2 光学电流传感器的分类	7
1.2.3 目前存在的问题	9
1.3 本文研究主要内容	10
第 2 章 全光纤电流传感器理论研究	12
2.1 全光纤电流传感器的偏振态分析	12
2.1.1 偏振光	12
2.1.2 琼斯矢量	15
2.1.3 斯托克斯矢量	17
2.2 全光纤电流传感器基本原理	18
2.2.1 法拉第效应	18
2.2.2 旋光的互易性和非互易性	20
2.2.3 双折射效应	21
2.3 全光纤电流传感器常见结构	22
2.3.1 基本全光纤电流传感器	22

2.3.2 Sagnac 干涉式全光纤电流传感器	23
2.3.3 反射型全光纤电流传感器	24
2.4 本章小结	25
第 3 章 温度对新型全光纤电流传感器的影响仿真分析	26
3.1 新型传感结构基本原理	26
3.1.1 环形结构	26
3.1.2 FPR 结构	27
3.1.3 基于环形结构的 FPR 全光纤电流传感器	30
3.2 温度影响机理分析	32
3.2.1 Verdet 常数温度模型	32
3.2.2 线性双折射温度模型	33
3.3 新型全光纤电流传感器的温度稳定性分析	34
3.3.1 基本 AFOCS 受双折射影响的误差分析	35
3.3.2 耦合 FRM 的环形结构 AFOCS 受双折射影响的误差分析	35
3.3.3 耦合 FPR 的环形结构 AFOCS 受双折射影响的误差分析	37
3.4 本章小结	39
第 4 章 新型全光纤电流传感器实验研究	40
4.1 实验系统光源设计	40
4.1.1 脉冲激光光源	40
4.1.2 光源的光损补偿设计	42
4.2 全光纤电流传感器实验平台	47
4.3 全光纤电流传感器电流检测实验	48

4.4 全光纤电流传感器温度稳定性实验	49
4.5 本章小结	51
第 5 章 总结与展望	52
5.1 工作总结	52
5.2 展望	53
参考文献	54
攻读硕士学位期间主要研究成果	61
致谢	62

第 1 章 绪论

1.1 课题的研究背景和意义

在人类科技发展进程中，大规模电力网络与电能输送体系被视为具有里程碑意义的突破性成果。该系统基于可再生能源发电技术，通过电力传输与分配网络的协同优化，显著提升了能源转化与供应的整体效率，彻底革新了传统能源利用模式，电力系统的诞生成为了社会生产力持续跃升的重要动力源^[1-2]。随着全球对气候及可持续发展的日益关注，能源转型已成为各国政府和能源行业的核心议题。中国为了可持续绿色发展，已明确设定 2030 年“碳达峰”、2060 年“碳中和”的目标^[3-6]，在此“双碳”战略框架下，现有电力系统难以满足更严格的碳排放标准，因此，构建新型电力系统已成为大势所趋。

电力系统作为电力生产与消费的核心体系，其建设水平和技术实力直接反映国家或地区的经济发展水平^[7]。近年来，我国持续推进西电东送战略和全国联网工程，同时全面实施城乡电网现代化改造工程。然而，随着科技进步的日新月异，社会用电需求持续增长^[8]；经过 75 年的发展，到 2024 年底，全社会用电量 98521 亿 kWh^[9]，是 1949 年的 2847 倍，近十年年均增速超 7%，图 1-1 展示了近年来的社会用电量和发电量。《电力安全生产“十四五”行动计划》明确提到，“十四五”时期我国能源消费需求持续攀升，能源产业进入战略转型期。在能源转型压力显著上升的背景下，电力系统安全发展的深层次矛盾与潜在风险逐渐显现，电力供需平衡面临严峻挑战。受城乡居民生活品质提升、工业生产和外贸进出口的强劲增长带动，以及经济社会活动全面复苏等多重因素影响，预计“十四五”时期全国用电量年均增速将保持在 5%左右的中高速增长区间，至 2025 年全社会用电总量将达到 9.5 至 9.8 万亿千瓦时。为满足不断增长的电力需求^[10]，我国在发电领域投入了巨额资金，新中国成立时，发电设备总装机仅为 185 万千瓦，提出改革开放的那一年已跃升至 5712 万千瓦，2024 年，电力装机容量达到 33.4 亿 kW，是新中国成立之初的 1,805 倍，是改革之初的 58 倍，较 1978 年增长了 32.8 亿 kW，近十年间，我国电力产业保持年

均逾 13% 的快速增长，我国已构建全球规模最大的电力装机体系，图 1-2 展示了近年来的电网装机容量。在人均电网装机容量方面，自 2023 年实现 2 千瓦的突破性发展后，单位人口电力设施配备水平持续提升^[11-14]。

尽管提升电网承载能力和优化输配电层级能有效缓解电力供需矛盾与调配压力，但这也使电力网络运行的安全稳定性面临更严峻挑战。亟需构建智能化监测体系以防范因线路过载或电压异常引发的运行风险^[15]，确保电力传输系统的可靠运转。

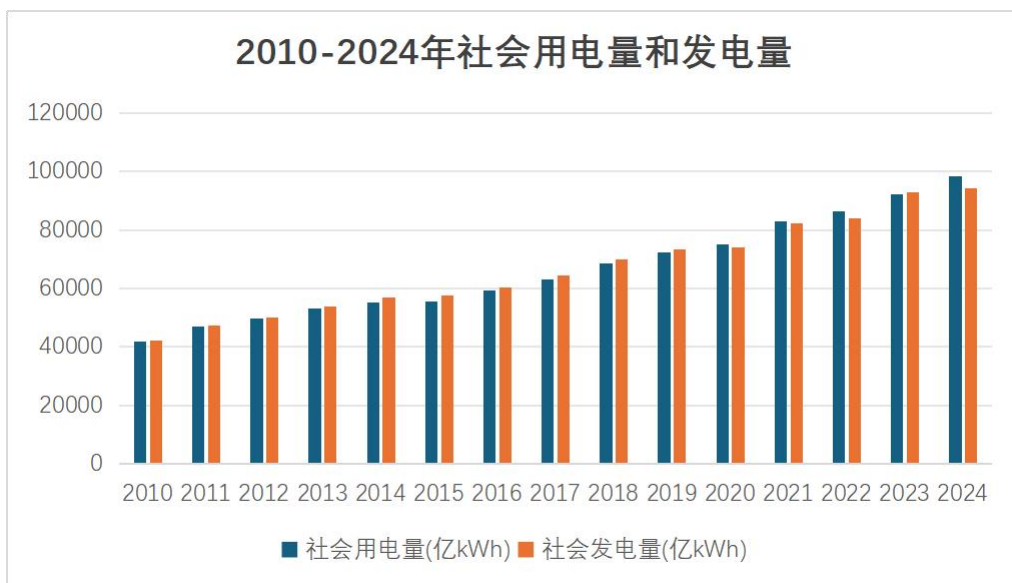


图 1-1 2010 年到 2024 年社会用电量和发电量

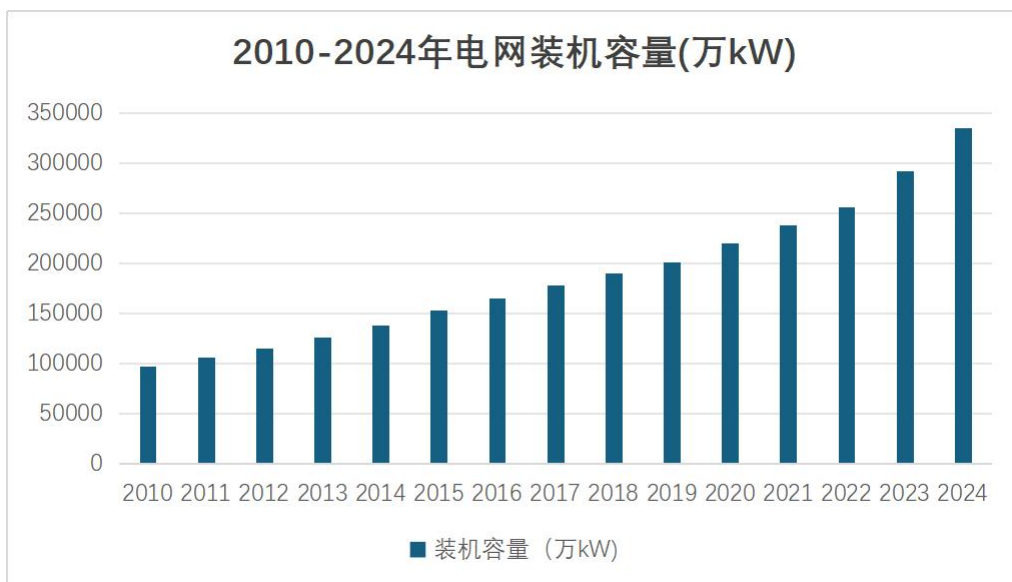


图 1-2 2010 年到 2024 年电网装机容量

对电流的实时监测可以直接反映电力系统是否正常运行和故障情况^[16]。电磁式电流互感器依靠铁芯和线圈构成，利用电磁结构测量二次变流量，目前是

电力系统电流监测主要利用的电流传感器^[17-20]，如图 1-3 所示。



图 1-3 传统电磁式电流互感器

然而作为实现电力低碳转型的关键基础设施，以特高压技术为支撑的智能电网体系建设已成为现代电网发展的战略重点。依据"十四五"能源规划纲要，我国将系统推进“24 交 14 直”特高压骨干网架建设，规划新建线路总里程超 3 万公里，将逐步建成"强交流、强直流"的输电架构。图 1-4 的电压等级发展过程表明，超高压技术演进路径将成为未来电网发展的主要方向^[21-24]。

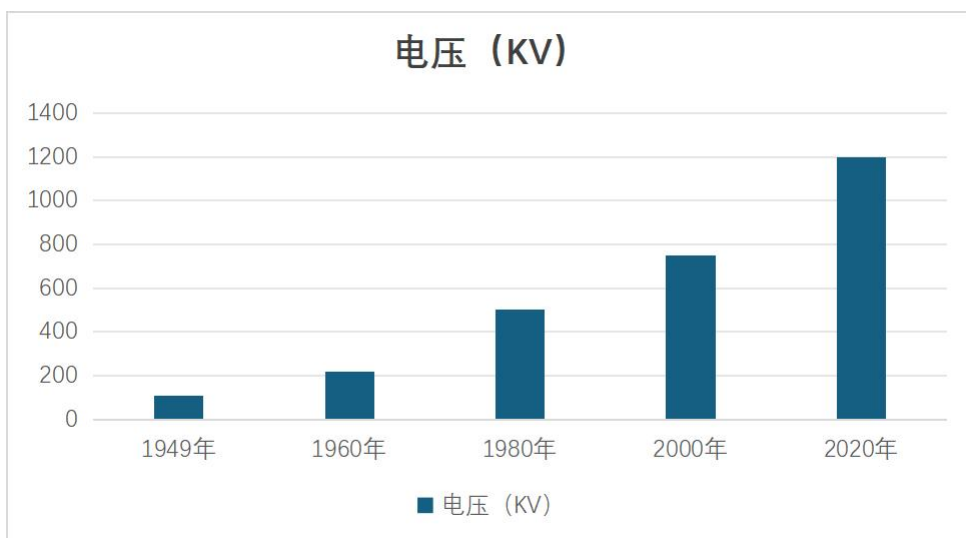


图 1-4 电网电压等级的发展过程

表 1-1 给出了电力系统不同电压等级下对应的传输电流等级，随着电网架构向特高压方向演进，电流等级也持续提升，这对电力监测装置的检测精度与

可靠性提出了更高的技术要求。输变电设备运行参数不断突破传统阈值，使得常规电磁式互感器逐渐显现出技术瓶颈，具体表现在：(1)当被测电流量级达到兆安级时，铁芯磁化特性呈现非线性畸变，导致测量线性度与量程范围受限；(2)在超高压电场环境中，二次回路信号传输易受电磁耦合干扰，造成采样数据失真；(3)特高压工况下绝缘介质承受更高场强梯度，存在局部放电引发绝缘失效的潜在风险；(4)二次侧异常开路工况可能引发数千伏级暂态过电压，危及设备与运维人员安全。

表 1-1 电力系统不同电压等级下对应的传输电流等级

输电电压(KV)	输送容量(MW)	电流强度(A)	输送距离(KM)
110	10~50	100~500	50~150
220	100~500	450~2250	100~300
330	200~800	600~2400	200~600
500	1000~1500	2000~3000	150~850
750	2000~2500	2660~3330	500 以上

电子式电流传感器利用光电子技术测量二次变流量^[25-27]消除了传统电流传感器缺点，提高了电流传感器的性能^[28-29]，其中的光学电流传感器在电力生产传输环节（包括发电机组、输变电枢纽及配网自动化等关键节点），特别是在特高压输变电系统的精确计量与状态监测领域，展现出显著的优势^[30]。光学电流传感装置通过技术创新有效解决了传统电磁式互感器的技术瓶颈，其技术优势主要体现在：(1)介质绝缘强度显著提升，采用熔融石英光纤作为传感介质与信号传输通道，结合全固态结构设计，在降低设备制造成本的同时实现结构简化；(2)无铁磁元件设计从根本上消除磁滞损耗与铁磁共振风险，特别适用于100kA级暂态大电流监测，显著提升系统暂态响应特性；(3)具备本质安全特性，通过光信号传输机制消除二次侧开路风险，杜绝绝缘介质气隙放电引发的燃爆隐患；(4)频域响应特性优异，其0.1Hz-10MHz宽频带测量能力由数字信号处理(DSP)技术实现；(5)电磁兼容性(EMC)指标提升30dB以上，紧凑型拓扑结构使设备体积缩减60%-80%，具备工程实施便捷性；(6)支持IEC 61850通信协议，完美适配智能变电站与泛在电力物联网建设需求。这些技术特性使光学电流传感装置在智能电网状态监测与电能计量领域展现出革命性应用潜力。

1.2 光学电流传感器发展和现状

1.2.1 光学电流传感器国内外研究现状

20 世纪中叶, 激光技术的突破性发展推动了光学传感技术来测量电流的技术进步。1963 年, Moulton 研究团队创新性地将光纤波导技术应用于高电位电流监测, 研发出基于光脉冲调制的电流传感原型装置, 这是光纤电流传感器的雏形。20 世纪 60 年代, 美国俄勒冈州电网率先开展挂网试验, 同期日本科研机构成功研制磁光晶体型电流传感装置, 完成超高压输电线路的在线监测实验, 验证了光学传感技术的工程可行性, 为全光纤系统结构设计提供了技术储备。需要指出的是, 该阶段光导纤维尚未问世, 光传输主要依赖自由空间光路或石英棒波导, 存在光强波动系数超过 $\pm 30\%$ 的技术缺陷。直至 1976 年, 英国南安普顿大学研究团队首次实现单模光纤全闭合光路设计, 才成功构建出基于法拉第效应的闭环式光纤电流测量系统。1980 年, A.Papp 团队发表了高压电流传感架构的研究^[31-32], 首次系统阐述了基于法拉第效应的光纤传感机理, 通过实验验证了光纤用于电流传感的可行性。20 世纪 80 年代后期, 国际学界开始探索基于 Sagnac 干涉式结构的光纤电流传感器结构, 瑞士洛桑联邦理工学院 P.A.Nicati 团队率先构建基于 Sagnac 干涉仪的光纤电流传感^[33], 其初始设计未配置相位调制单元。随后该团队进行技术迭代, 引入铌酸锂相位调制器实现载波相位生成(CPG)技术^[34], 显著提升了系统灵敏度。1994 年意大利国家研究院 Guido 团队提出反射式互易性干涉结构^[35], 通过建立琼斯矩阵光路模型, 系统分析了偏振态演化规律, 其研究成果推动传感精度达到 0.2 级标准。光纤电流传感技术发展至 1994 年迎来重大理论突破, 英国剑桥大学 J.Blake 团队提出了闭环调制解调检测结构^[36], 创新性地采用自适应调制解调技术, 首次建立了包含温度漂移、光路非互易性等 12 项误差源的综合误差模型^[37]。2002 年, 美国 Photonics Technologies 公司率先实现技术转化, 推出集成 Rogowski 线圈与法拉第晶体复合结构的光电混合式电流传感装置^[38]。2007 年, 德国 Ritz Instrument 公司与慕尼黑工业大学联合攻关, 成功研制出基于全光纤无源传感网络的电子式互感器^[39]。本世纪以来, 一些国际电气公司积极研究光电电流互感器^[40], ALSTOM 公司的 OptiSense 系列光学电流传感装置在 525kV 电压等级实现突

破，于北美-欧洲电网互联工程完成商业化部署，形成 123kV-765kV 全电压等级产品矩阵^[41-42]。日本东芝公司早于 1990 年代即实现 66kV 配网自动化系统光纤传感技术工程应用，目前已成功开发±1100kV 特高压直流传感装置。ABB 公司创新研发的 FIBER OPTIC 系列无源式互感器，在智能电网关键节点如插拔式智能开关设备(PASS)、气体绝缘组合电器(GIS)及±800kV 特高压换流站实现规模化应用^[43]。

我国光学电流传感技术发展史可追溯至 1970 年，沈阳机电研究院成功研制出首台全光纤电流传感实验装置，开创国内本领域研究先河。1982 年上海"激光工业应用技术论证会"正式将光纤电流传感技术纳入国家 863 计划专项规划，此次会议标志着我国系统性开展光纤电流传感技术研究的开端。光纤电流传感技术初期发展阶段受制于材料工艺瓶颈、设备条件限制及环境适应性缺陷，导致研发进程显著滞后于国际先进水平。1985 年，辽宁高压电器厂自主开发的 OGCT-100 型光纤电流传感装置在鞍山变电站成功实现连续稳定运行 3000 小时，其后续改进型产品更在葛洲坝水电站 500kV 输变电工程完成示范应用^[44-48]，是该领域的重大突破标志性事件。1989 年，钱景仁教授率先提出采用扭转高双折射光纤技术以提升电流传感器的整体稳定性^[49]，目标在于实现显著的性能增强。1993 年，华中理工大学携手广东新会供电局，共同推进光纤电流传感器技术的研究^[50]，并于同年 12 月 31 日在广东省新会供电局大泽变电站成功实现了该技术的挂网运行实践，该传感器的技术参数包括额定电压 110kV，额定电流范围在 100 至 300A 之间，且其精度达到了 3%^[51]。1997 年，华中科技大学的易本顺团队研发出了一种针对高压输电线路电流检测的光纤电流传感器^[52]，并创新性地提出了一种温度补偿方案。然而，经过长期的实际运行，该传感器的准确度未能达到电力统计量标准的要求。2005 年燕山大学赵洪霞团队在《光学学报》发表突破性成果^[53]，创新构建光纤布拉格光栅与压电陶瓷的机电耦合结构，通过罗氏线圈电流-电压转换机制实现了 400A 大电流检测。2007 年哈尔滨工业大学王伟教授团队验证 BGO 晶体的磁光增强效应^[54]，构建的 BGO 基传感器动态范围拓展至 60dB。2012 年邱怡申教授团队在提出环形腔增强型传感架构^[55]，实现灵敏度提升 12dB，后续改进方案^[56-57]更将温度稳定性提升至±0.5ppm/℃。2016 年杨玉强团队研发的双 FBG 温度自补偿传感器^[58]，

在宽温域内保持较好的测量精度。2017 年孙滨超提出的衰荡腔时域调制技术^[59]，将光源波动抑制率提升至 98.7%，系统长期漂移率 $<0.01\%/h$ 。2020 年司马文霞教授发表双绕线中点耦合技术^[60-61]，成功将线性双折射系数降低至 $3.2 \times 10^{-5} \text{ rad/m}$ ，频响范围覆盖 0.1Hz-10MHz。2021 年南网科研院梁钰华团队实现 $\pm 500\text{kV}$ 昆柳龙直流工程应用^[62]；同期海军工程大学吴健华团队研发船舶漏电监测系统^[63]，在 1-99mA 弱电流段实现 $\pm 0.05\%$ 测量精度。本世纪以来，我国光纤电流传感技术进入产学研协同创新阶段，国家电网公司联合各大知名高校，在 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电（如昌吉-古泉工程）、海上风电柔直并网（如如东工程）等场景开展多轮次挂网验证。截至 2022 年，我国在光纤电流传感领域累计授权发明专利达 1.2 万件，产品市场渗透率从 2010 年的 5.7% 提升至 2023 年的 34.6%，标志着技术应用进入规模化推广阶段^[64-68]。

光学电流传感技术的跨领域应用价值持续凸显，其创新应用已突破传统电力系统范畴。在航空航天领域，美国国家航空航天局格伦研究中心于 1990 年成功开发飞行器动力监测用全光纤电流传感系统，验证测试中展现出宽温域稳定性与强电磁抗扰性^[69]。德国西门子能源部门创新应用基于光纤布拉格光栅(FBG)传感网络的涡轮发电机绕组温度监测系统^[70]，实现 $20-160^{\circ}\text{C}$ 动态范围 $\pm 0.5\text{K}$ 测温精度。土木工程监测方面，意大利国家研究院 Falciai 团队研发的分布式光纤应变传感阵列，通过嵌入式 FBG 传感器网络实现桥梁结构应力分布三维重构。日本札幌大学将 BGO 晶体传感技术应用于积雪应力分布监测^[71]，测量范围覆盖 $0-500\text{kg/m}^2$ 。我国华中科技大学开发的隧道地质超前预报系统^[72]，将岩体裂隙探测精度提升至 $\pm 5\text{cm}$ 。在船舶安全监测领域，通过光纤电流/温度复合传感器实现船体结构应力与舱室温度的同步监测。石油化工领域，在胜利油田智能井监测及西气东输管道腐蚀监测中实现规模化应用^[73-74]，其本质安全型结构有效规避传统电学传感的火花放电风险。

1.2.2 光学电流传感器的分类

光学电流传感技术自 1960 年代进入工程化探索阶段以来^[75-78]，其技术演进轨迹呈现多元化发展态势，逐步形成基于不同物理效应(法拉第效应、萨格纳克效应等)的传感架构体系。各类光学电流传感装置均采用光纤作为核心信息传输

介质，其特有的低线密度、宽频带及长距传输特性，构成区别于传统电磁式传感的核心技术优势。当前学术界依据传感单元技术架构维度，主要划分为三大技术类型：

混合型光学电流传感装置通过光电复合传感架构实现信号转换，其工作原理如图 1-5 所示。在高压侧，罗氏线圈将导体电流转换为电压信号，经电光调制器实现载波相位调制，通过抗弯光纤实现光信号传输至低压侧；低压侧采用平衡光电探测器完成光-电转换及信号解调。该技术采用传感单元与传输通道解耦设计，通过全介质光路实现 kV 级电气隔离，并且规避了纯光学传感元件的时漂问题。但该电流传感器采用的是电磁感应原理，存在磁滞损耗系数 $>5\%$ 的技术瓶颈，暂态工况下可能引发磁饱和。

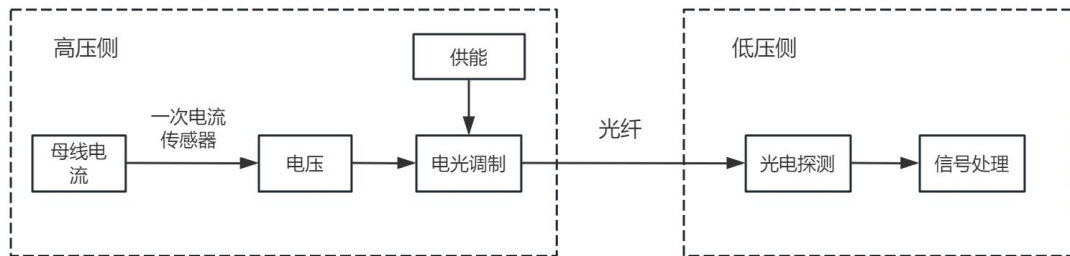


图 1-5 混合型光学电流传感器工作原理

块状磁光玻璃型光纤电流传感装置是基于法拉第磁光效应构建的闭合光路，其传感机理如图 1-6 所示。该技术采用高维尔德系数磁光玻璃作为核心传感介质，温度稳定性优势显著^[79]，但由于偏振光在磁光玻璃内多次反射，使得无法确定线偏振光的偏振态变化，对电流测量造成了困扰^[80]。另外工艺方面也存在诸多限制，玻璃材质导致耐用性差，其发展规模也因此受限^[81]。

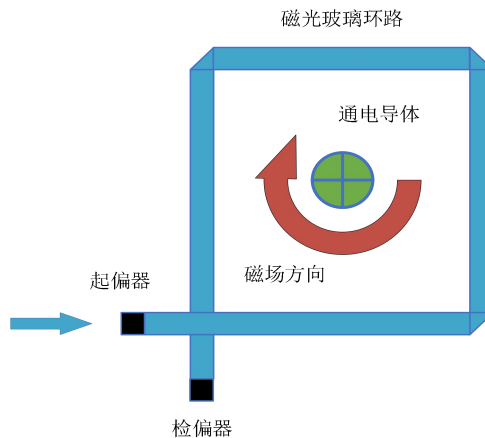


图 1-6 块状玻璃型光学电流传感器结构图

全光纤电流传感器（AFOCS）的传感设计极为简洁，仅需将光纤缠绕在被测导线上，通过调整缠绕圈数即可提升传感器的灵敏度^[82]。相较于其他两种传感器，其结构更为直观明了。此外，光纤因其出色的绝缘性能、无磁饱和特性、强大的抗电磁干扰能力、小巧的体积以及较低的成本，近年来广受研究学者们的喜爱^[83-84]。但由于应力、扭转等引起的线双折射问题依旧难以消除，也成为制约其进一步发展和广泛应用的技术瓶颈。

1.2.3 目前存在的问题

表 1-2 总结了几种电流传感器的特点，从中可以看出，相较于电磁式电流互感器，光学电流传感器在电力系统的测量与保护领域展现出显著优势，更符合电力系统智能化发展的趋势。混合式光学电流传感器由于还保留了传统电流传感器的特点，抗电磁干扰能力差，具有磁饱和现象，且可靠性差；而磁光玻璃式光学电流传感器为增强抗外界电磁干扰性能，通常采用闭合环路结构的传感头，加工难度较大，且光学玻璃材料较为脆弱，可能对传感器的长期运行可靠性造成不利影响。相比之下，全光纤电流传感器各方面性能良好，系统内部连接简便易行，有效提高了测量系统的整体可靠性。综上所述，全光纤电流传感器因其在线性度、动态性能等方面的显著优势，已成为电力系统测量设备研究的热点，展现出广阔的发展潜力和应用前景。

表 1-2 常见电流传感器特点

电流传感器类型	电磁式	混合式	磁光玻璃式	全光纤式
测量原理	电磁感应	光器件传感	法拉第效应	法拉第效应
传感元件	电磁线圈	光纤	光学玻璃	光纤
磁饱和现象	是	是	否	否
抗电磁干扰	差	差	好	好
测量直流	否	否	是	是
安全性能	差	差	好	好
可靠性	差	差	差	好
直接数字输出	是	是	是	是

迄今为止，我国在光学电流传感器领域已历经四十余载的理论探索与三十多年的实际应用尝试，这一过程涵盖了从技术架构设计到生产工艺制定，再到试验方法确立及应用标准制定的全方位初步成型。尽管如此，受限于我国光电产业当前的发展阶段以及国际基础器件市场的垄断态势，国内产品在若干关键技术指标上尚未达到相关标准，阻碍了其实际应用步伐^[85-86]。特别是光纤材料方面，存在电流灵敏度不足及对外部环境温度和振动高度敏感等问题。这些挑战显著延缓了全光纤电流传感器实用化的进程，而光纤材料对温度的敏感性尤为突出，成为亟待解决的核心难题。温度对全光纤电流传感器的输出性能具有深远影响，其导致的温度误差不仅限制了传感器的应用范围，还会引发了一系列异常与故障事件。因此，全光纤电流传感器的温度特性问题受到了业界的广泛关注。

1.3 本文研究主要内容

全光纤电流传感器凭借其简洁的架构设计和宽域测量特性，在电力系统领域展现出显著技术优势。该设备通过集成化功能设计，既可满足高精度电流检测要求，又能适配继电保护系统的快速响应需求。通过对其核心技术的持续优化与性能提升，特别是增强设备运行稳定性和测量灵敏度，将有效推动特高压输电网络与智能电网的协同发展。鉴于此，本文致力于设计一款具备高温度稳定性的全光纤电流传感器，并将研究焦点集中于提升其对温度变化的适应能力，旨在为复杂环境下的电力系统电流精确测量提供有效的解决方案与参考依据。围绕本课题的研究目标，主要从以下几个方面展开系统研究：

（1）设计合理的全光纤电流传感器新型结构

全光纤电流传感器的核心挑战在于传感光纤对温度的极端敏感性，其中，温度诱发的双折射效应成为了阻碍其实现长期稳定运行的关键障碍。当前的研究趋势主要聚焦于通过优化传感结构，以增强其传感性能。基于此背景，本课题创新性将 FPR 结构连接在传感光纤末端。该结构中，法拉第旋光器的核心功能是使流经该器件的偏振光偏振面旋转 90° ，这一过程有效抵消了线性双折射效应。为了进一步提升传感器的性能，本课题在全光纤电流传感器与 FPR 之间巧妙地引入了一个三口环形器，使得偏振光能够在传感光纤环中实现正反向传

输，结合环形腔结构的运用，光信号得以在系统中循环往复，从而抵消了互易圆双折射效应。这一新型全光纤电流传感器系统的构建，有效的抑制了温致双折射效应，构成了本课题研究的核心内容，旨在通过技术创新克服现有难题，推动全光纤电流传感器技术的发展。

（2）建立数学模型进行理论仿真

偏振光在传输过程中，其偏振态与相位变化纷繁复杂，直接分析难度较大，故本课题选用琼斯矩阵法进行理论分析，它能直观地展现偏振光随温度变化的偏振态及相位的变化情况，此方法在计算和操作上均简便易行。因此，本课题首先针对基本全光纤电流传感器和环形结构全光纤电流传感器，对其随温度变化的偏振光进行了琼斯矩阵推导，并根据推导公式绘制了相应的波形图。随后，对基于 FPR 结构的改进型全光纤电流传感器也进行了同样的琼斯矩阵推导，通过比较几种结构在温度变化下的误差波形图，来验证改进型全光纤电流传感器对双折射效应的抑制效果。

（3）实验验证方案可行性

对所设计的新型全光纤电流传感器搭建实验平台，实验前检查光学器件是否存在问题，以及重要器件性能是否稳定。根据设计的光路原理图搭建实验平台，测量一组常温下的电流测量值，以其为基准值，设置几组不同温度进行温度稳定性实验，记录随温度变化获得的电流值，确保每次实验方法和环境一致，采用标准化操作程序以降低外界干扰因素，并对实验结果作出分析，检验该新型系统是否具有温度稳定性效果。

第 2 章 全光纤电流传感器理论研究

全光纤电流传感器依据电流对光信号的作用机制来测定电流强度，其中所涉及的光学原理和运行机制极其复杂。因此，本章节开篇先阐述了光偏振的基本理论，并列举了若干种偏振状态的表述方式。随后重点阐释法拉第旋光效应的非互易传输特性，解析双折射效应对光波传输的影响机制。在理论框架构建基础上，通过 Jones 矩阵法推导光路传输方程，构建传感器光电响应模型，深入分析 AFOCS 的工作原理，同时概述了几种典型的全光纤电流传感器类型。

2.1 全光纤电流传感器的偏振态分析

基于经典电磁场理论，光波本质表现为横波振荡模式，偏振作为横波的独有属性，表现为电磁场振动方向在波前平面内的非对称分布，这是与纵波的本质区别。光源因原子自发辐射的随机相位特性，导致出射光波呈现非相干偏振态分布。在光纤电流传感技术中，偏振态演化过程是磁光效应分析的核心对象，对此完全偏振态通常采用琼斯矩阵法建立偏振态传输模型。而对于包含退偏效应的部分偏振光或非偏振光，则需引入斯托克斯参量法构建四维偏振态进行分析。

2.1.1 偏振光

光波作为横电磁波（TEM 波）的基本属性表现为其振动矢量严格正交于传播方向。横波特性不仅决定了光矢量与传播方向的几何正交关系，更体现在正交平面内光矢量的多样化振动模式，这些模式构成了光波偏振态的基本分类体系^[87]。依据光波振幅和相位分布的规律性差异，可将其偏振特性明确区分为完全偏振和部分偏振两种基本类型。

部分偏振态可分解为完全偏振态与自然光的非相干叠加。自然光具有各向同性的强度分布，其与偏振光叠加后形成的混合态在空间取向维度呈现非均匀强度分布，导致其偏振分量呈现统计随机特性。与之相对，完全偏振态具有确

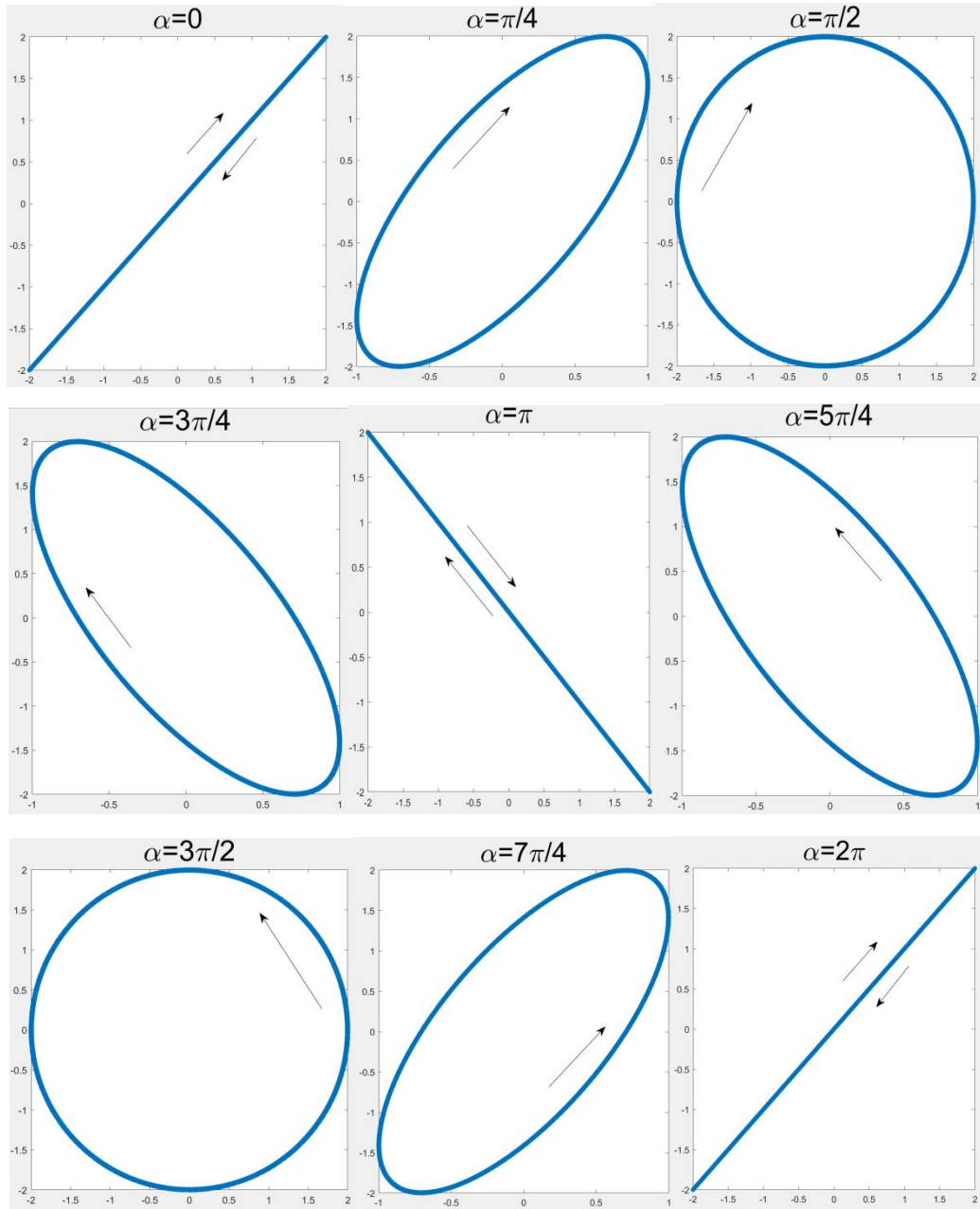
定性的振幅相位关系，按电场矢量的时空演化规律可分为线偏振、圆偏振和椭圆偏振三种基本类型：椭圆偏振态源于两列同频正交线偏振光波的非等幅相干叠加，而圆偏振则对应振幅相等且相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 的特殊椭圆偏振态。由于任意偏振态均可通过正交线偏振分量展开，因此基于线偏振分量的偏振态分解体系在偏振光学理论研究中具有基础性地位，这种分解方法为偏振光学研究提供了有效的理论框架^[88-91]。

为构建偏振光的数学分析框架，通常选取三维直角坐标系统并设定光波沿Z轴方向传输。在此理论模型中，引入单色平面波作为基础研究对象，可将任意偏振光场的波动方程通解分解为X、Y正交振动分量的矢量叠加^[92]。其数学表达式可规范表述为：

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_2) \\ E = iE_x + jE_y \end{cases} \quad (2-1)$$

其中，沿Z轴方向传输的光波可分解为X、Y正交振动分量的简谐波场，两分量的波动方程分别对应这两个独立方向的光振动。 φ_1 和 φ_2 为两正交分量的初始相位参数，定义其相位差 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 作为两平面波相位关系的量化表征。

偏振光分类及其特性可通过相位差与偏振度参数进行系统性表征（图2-1）。当正交振动分量的相位差满足 $\varphi = (2m \pm 1/2)\pi (m \in \mathbb{Z})$ 且振幅相等时，电场矢量端点轨迹形成圆形偏振态；若相位差为 $\varphi = m\pi (m \in \mathbb{Z})$ ，两分量呈现完全同相或反相振动模式，合成典型的线偏振态；对于非特殊相位条件，电场矢量轨迹退化为椭圆偏振态，对应偏振态的非简并形式^[93]。依据偏振度p的量化指标，光波可分为三类理想完全偏振态($p=1$)及两类非理想态：部分偏振态($0 < p < 1$)由偏振分量与非偏振分量混合构成，而自然光因完全缺乏偏振特性表现为 $p=0$ 的极限情形。

图 2-1 φ 为各种值时的偏振椭圆

偏振态的基本形式通常表现为椭圆偏振态，仅在特定约束条件下才转化为线偏振或圆偏振这类特殊态。对于常规椭圆偏振态，其偏振特性本征上由两正交分量的振幅比例关系及相位延迟量共同决定，然而由于实验上无法直接获取这两个原始参量，故需引入等效的几何表征参数——偏振椭圆的长短轴比值（椭率角）与空间取向角（旋转角）作为偏振态的完备描述参量体系。这种几何方法通过定量描述偏振椭圆的空间形貌特征，实现了对光波偏振态的数学表征。

2.1.2 琼斯矢量

为构建简明的偏振态数学表征体系，现代光学分析普遍采用琼斯矩阵法。该方法通过二维复向量空间实现偏振态的数学描述，显著降低计算维度并提升了解析效率。1941 年 Jones 提出的偏振态矩阵理论表明：沿 z 轴传播的任意偏振光(含线偏振、圆偏振及椭圆偏振态)均可分解为 x 轴与 y 轴正交基矢量的线性组合。具体而言，偏振态可表征为具有复振幅比例关系的二维列向量，典型偏振光的琼斯矩阵如表 2-1 所示。

表 2-1 典型偏振光的琼斯矩阵

	偏振态	归一化琼斯矩阵
线性偏振光	沿 x 轴方向	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
	沿 y 轴方向	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
	与 x 轴成 $\pm\theta^\circ$	$\begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix}$
圆偏振光	左旋	$\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
	右旋	$\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$

琼斯矩阵主要用于计算偏振光经过偏振器件后偏振态的改变，这是其最为关键的应用领域。当线偏振光通过线性光学元件时，其出射光的琼斯矢量分量可表示为入射光琼斯矢量分量的线性组合，这种变换关系可通过琼斯矩阵的矩阵乘法形式精确描述，即输出光电场矢量 E' 与输入光电场矢量 E 满足 $E' = J \cdot E$ ，其中 J 为表征器件偏振特性的 2×2 琼斯矩阵，式(2-2)中出射光琼斯矢量的两分量 A_2 和 B_2 用入射光琼斯矢量 E_1 的两分量 A_1 和 B_1 线性表示，即

$$\begin{cases} A_2 = g_{11}A_1 + g_{12}B_1 \\ B_2 = g_{21}A_1 + g_{22}B_1 \end{cases} \quad (2-2)$$

写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

或者写为:

$$E_t = GE_j \quad (2-4)$$

其中, G 为偏振器件的琼斯矩阵。

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

若偏振光连续通过 n 个偏振器件, 设偏振器件的琼斯矩阵分别为 $G_1, G_2, G_3 \dots G_n$, 则出射偏振光的琼斯矢量可以表示为:

$$E_t = G_n \dots G_2 G_1 G_j \quad (2-6)$$

于上述公式之中, G_j 表示了投射至系统内的信号光之初始偏振特性, 而 E_t 则表示着该信号光在经受各种光学器件后的终极偏振形态输出。

偏振元件在偏振态转换的过程中起着线性转换作用, 经过偏振器转换后的两个分量是入射光偏振态两分量的线性组合。利用Jones矩阵可以很直观的推导出偏振光通过偏振光学器件的光路情况。表2-2展示了常见偏振器件的琼斯矩阵。

表 2-2 偏振光学器件的琼斯矩阵

偏振器件		琼斯矩阵
线起偏器	偏振面在x方向	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
	偏振面在y方向	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	偏振面与x方向成 $\pm\theta^\circ$	$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ -\frac{1}{2} \sin 2\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$
1/4波片	快轴在x方向	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$

	快轴在y方向	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$
	快轴与x方向成 $\pm 45^\circ$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$
	快轴在x或y方向	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
	快轴与x方向成 $\pm 45^\circ$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
1/2波片		
旋光元件	顺时针旋转 θ°	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$
	逆时针旋转 θ°	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$

2.1.3 斯托克斯矢量

在穆勒矩阵偏振分析体系中，光束的偏振特性采用四维斯托克斯矢量 S 进行数学描述。该表征方法源于斯托克斯于 1852 年提出的四参数描述体系，其运用四个参量实现对光强和光波偏振特性的全面描述^[94]。尽管四个斯托克斯参量具有相同的物理量纲，但仅存在三个独立变量。实际应用中常选取特定物理量 E_x 参量、 E_y 参量及相位差 δ 作为独立变量，斯托克斯参数与这些变量间的数学联系可表述为：

$$\begin{cases} S_0 = E_x^2 + E_y^2 \\ S_1 = E_x^2 - E_y^2 \\ S_2 = 2E_x E_y \cos \delta \\ S_3 = 2E_x E_y \sin \delta \end{cases} \quad (2-7)$$

其中， E_x 和 E_y 分别表示光信号在 x 轴和 y 轴方向的分量， δ 表示两个方向分量之间的相位差。每个斯托克斯参数与指定的正交偏振态的光强差有关。因此，测量通过六个不同偏振器件的功率 P ，可以很容易地得到斯托克斯矢量：

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0^\circ + P_{90^\circ} \\ P_0^\circ - P_{90^\circ} \\ P_{+45^\circ} - P_{-45^\circ} \\ P_{rcp} - P_{lcp} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

部分偏振态可视为完全非偏振光与完全偏振光的线性叠加，其数学表征可通过斯托克斯矢量分解实现，如下式(2-9)。具体而言，任意部分偏振光的斯托克斯矢量 S 可表达为两个正交分量之和： $S = S_n + S_p$ ，其中 S_n 表示非偏振自然光的斯托克斯矢量分量， S_p 代表完全偏振光分量，这种分解方式严格遵循偏振光叠加的物理原理。

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

偏振度是：

$$P = \frac{S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2-10)$$

2.2 全光纤电流传感器基本原理

2.2.1 法拉第效应

全光纤电流传感器是利用法拉第旋光效应原理来实现电流测量的光学装置。该效应的研究可追溯至 19 世纪初的物理发现：1811 年法国科学家 Arago 观察到线偏振光穿透特定介质后，其偏振方向会发生偏转，这个物理现象就是旋光特性。这类具有天然旋光能力的物质在自然界中相对罕见。1845 年，法拉第首次观测到非旋光性介质在强磁场环境中也可诱导线偏振光发生偏振平面旋转现象。这一发现突破了传统光学材料对偏振光调控的物理限制，揭示了磁场与偏振光场相互作用的量子力学本质，为后续旋光效应理论研究奠定了实验基础。这种非旋光材料在强磁场作用下表现出的磁致旋光现象，被学界正式命名

为法拉第效应。该效应作为首个揭示光与电磁场相互作用的实验证据，不仅构建了电磁学与光学的理论桥梁，更为现代光电传感技术奠定了物理基础。

如图 2-2 所示，当线偏振光在磁场环境中通过磁光介质时，沿光传输方向的磁场分量会引发偏振面旋转现象。其旋转角度与磁场轴向分量强度呈正相关关系，入射与出射偏振态之间的角度偏移量被定义为法拉第旋转角 θ 。

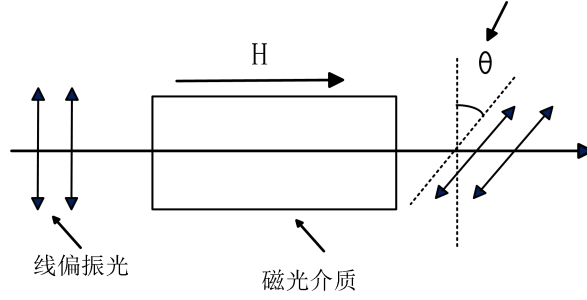


图 2-2 Faraday 效应

θ 偏振旋转角可表示为：

$$\theta = \int_L V \vec{H} d\vec{l} \quad (2-11)$$

Verdet 常数 V (单位: $\text{rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$) 表征磁光晶体的磁光灵敏度，其数值具有波长与温度依存特性； H 表征磁场强度参量，单位为安培每米(A/m)； L 则定义为磁场与光传播方向同轴作用的光程长度，计量单位为米(m)。

在磁光晶体中，沿光轴传输的线偏振光会解耦为左旋与右旋圆偏振分量：

$$E_{in} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

在磁光介质中传输的左旋与右旋圆偏振光经长度 L 的传播路径后因其折射率存在差异，最终在出射端形成与入射状态相比的累积相位延迟，相位差 $\delta = -\frac{2\pi}{\lambda} nL$ 。所以，出射光波可以表示为：

$$E_{out} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} e^{-i2\pi n_l L/\lambda} + \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} e^{-i2\pi n_r L/\lambda} \quad (2-13)$$

其中 n_l, n_r 分别为两束偏振光的折射率。

公式(2-13)可以写为：

$$E_{out} = \frac{E_0}{2} e^{-i2\pi(n_l+n_r)L/2\lambda} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} e^{-i2\pi(n_l-n_r)L/2\lambda} + \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} e^{-i2\pi(n_r-n_l)L/2\lambda} \right\} \quad (2-14)$$

令：

$$\begin{cases} \theta = \frac{\pi(n_l - n_r)l}{\lambda} \\ \phi = \frac{\pi(n_l + n_r)l}{\lambda} \end{cases} \quad (2-15)$$

整理公式(2-14)、(2-15)可得：

$$E_{out} = E_0 e^{-i\phi} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

根据式(2-16)的数学关系推导，输出光相对输入光产生偏振面旋转现象。数学推导表明该旋转角 θ 与激励磁场强度呈函数关系，磁场增强时旋转角幅值随之增大。

2.2.2 旋光的互易性和非互易性

菲涅耳旋光理论为自然旋光与法拉第旋光现象提供了统一的理论框架，但其本质差异体现在可逆性方面：自然旋光过程遵循光路可逆原理，表现出互易特性；而法拉第旋光效应则打破了这种对称性，形成非互易特性^[95-96]。该特性差异成为了区分两类旋光现象的核心判据。

自然旋光介质的偏振面旋转特性分为左旋和右旋，和它自身结构特征有关，与光传播方向无关，具有互易特性。在光波传输过程中，左旋介质会引发偏振面向左旋转，而右旋介质则产生向右旋转，这种旋向特性不因传播方向的改变而改变。以右旋介质为例（图 2-3）：入射光偏振面向右旋转 θ 角后，经反射镜逆向传输时仍维持右旋特性（相对于反射光新传播方向）。此时相对于原始入射坐标系，逆向光的等效旋向转换为左旋，导致往返传输的累积旋转量相互抵消，最终使出射光偏振态与初始入射态完全一致。法拉第旋光旋光效应中偏振面旋向由光波矢量与磁场强度的相对取向共同决定，通过介质后其旋转方向可变，具有非互易特性。在反射式光路构型中，这种非互易特性尤为显著：当线偏振光正向穿过磁光介质时，其偏振面产生 $\theta = +VHL$ 的右旋偏转；经反射镜逆向传输时，由于光波矢方向反转而磁场方向保持恒定，偏振面左旋偏转，

导致偏转角叠加为 $+VHL$ ，形成旋转量的累积效果（图 2-4）。在光纤电流传感器应用层面，该非互易特性可有效补偿光纤固有双折射引起的偏振态漂移，通过构建闭环干涉光路实现 $\Delta\theta=2VHL$ ，旋转量倍增，显著提升电流传感系统的信噪比与温度稳定性。

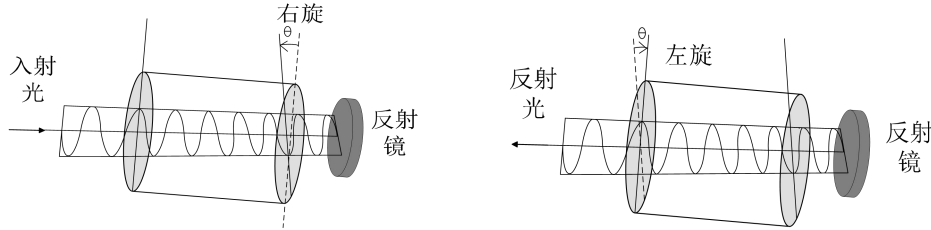


图 2-3 互易旋光

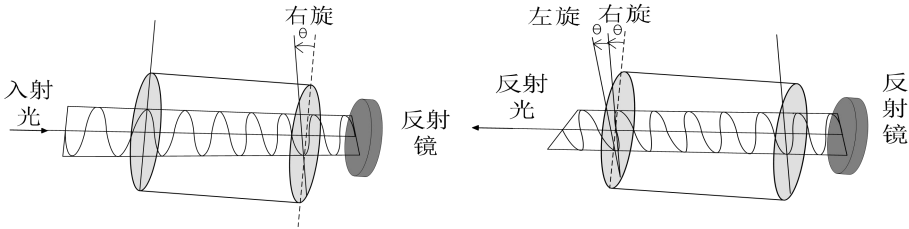


图 2-4 非互易旋光

2.2.3 双折射效应

单模光纤中的双折射效应根据本征偏振模的传输特性可分为三种类型：线性双折射、圆双折射及椭圆双折射。线性双折射表现为正交线偏振模简并态被破坏，导致线偏振、圆偏振与椭圆偏振态间的周期性转换，其成因主要源于光纤变形导致截面的几何非对称性及应力影响；圆双折射由外场扰动破坏左右旋圆偏振模的简并性，引发偏振面绕光轴连续旋转，旋转速率与扰动强度呈正相关；椭圆双折射作为线偏振与圆偏振效应的复合模态，通过同时改变光波的相位延迟与偏振态旋转特性，消除简并态下偏振模式的能量简并特征。其偏振态演化轨迹在邦加球表面呈现螺旋特性，可通过琼斯矩阵分解为线性相位延迟与圆偏振旋转的矢量叠加。

线性双折射：当线偏振光在受激介质中传输时，其偏振态将解耦为两个方向呈正交的线偏振光。这两个正交线偏振光在应力场作用下呈现差异化相速度响应，沿路径 L 的光纤光轴中传输形成累积性相位延迟。线相位延迟角可表示为^[97]:

$$\delta_1 = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_x - n_y) \quad (2-17)$$

圆双折射：存在圆双折射的光纤介质中，这两个正交圆偏振模将经历差异化相速度传播过程。当光波在长度为 L 的圆双折射光纤中完成传输时，其输出端的偏振态将携带与双折射参量及传输距离成正比的累积相位偏移量^[98]，该相位差直接反映了左右旋分量在波导结构中的非互易传播特性。所以，偏振光传输过长度为 L 的光纤后，产生的相位延迟 δ_2 可表示为：

$$\delta_2 = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_r - n_l) \quad (2-18)$$

对于在光纤中传输的平面偏振光而言，光纤出射末端的平面偏振光相较于光纤入射端的平面偏振光转动了 φ ，通过几何关系可以得出 φ 值为 δ_2 值的一半，则 φ 可表示为^[99]：

$$\varphi = \frac{\delta_2}{2} = \frac{\pi L}{\lambda} (n_r - n_l) \quad (2-19)$$

若线性双折射和圆双折射共同存在于光纤中时，它们相互作用或者它们的矢量和即为椭圆双折射。在数值上，其大小的平方为线性双折射和圆双折射各自的平方和。

2.3 全光纤电流传感器常见结构

2.3.1 基本全光纤电流传感器

全光纤电流传感器的典型架构如图 2-5 所示。其工作原理基于磁光偏振调制机制：光源产生的脉冲光经起偏器转换为线偏振光后，注入绕制于载流导体的传感光纤环。输出光经与起偏器平行的检偏器，由光电传感器进行光功率检测，当 $i=0$ 时，入射的线偏振光与检偏器透光轴达到完全匹配状态，此时测得的光强最大；当导体通入电流 i 时，基于法拉第旋光效应，偏振面将产生与电流强度成线性关系的法拉第旋转角为：

$$\theta = \int_L V \vec{H} \cdot d\vec{l} = VNI \quad (2-20)$$

式中 V 为费尔德常数, N 为传感光纤圈数, I 为电流大小。

根据马吕斯定律可知光强大小为:

$$J = \frac{A^2}{2}(1 \pm \sin 2\theta) \quad (2-21)$$

光路系统最后输出的光强分成直流和交流两部分, 因此通过检测光强可以算出待测电流大小。为了分离电流中的两路电流信息, 我们采取双路检测法, 通过偏振分束器 (PBS) 将入射光场解耦为具有正交传输矢量的两束独立光分量, 分别对两束光进行信号处理, 测得光强大小。两路偏振光的光强大小和法拉第旋转角之间的关系如下:

$$P = \frac{P_{\perp} - P_{\parallel}}{P_{\perp} + P_{\parallel}} \quad (2-22)$$

$$P = 2\theta = 2VNI \quad (2-23)$$

本文全光纤电流传感器计算电流值的原理就是先通过输出光强计算偏振度 P , 再根据偏振度大小计算电流。

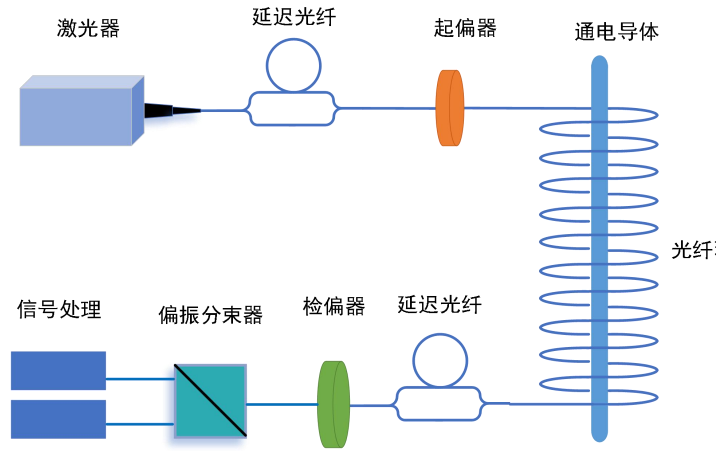


图 2-5 基本 AFOCS 光路图

2.3.2 Sagnac 干涉式全光纤电流传感器

Sagnac 干涉型电流传感器的核心机理基于圆偏振光在磁场中的非互易相位积累效应, 如图 2-6 所示。其光路系统采用闭环差分干涉设计: 两束初始同向圆偏振光沿顺时针/逆时针双向传输路径穿越传感光纤环, 在磁光效应作用下分别产生符号相反的非互易相位偏移。偏振态循环调制单元 (含 $\lambda/4$ 波片) 将输

出光波复转为线偏振态后，通过干涉仪实现相位差解调。该架构通过双向光路叠加效应使有效相位差倍增（ $\Delta\Phi=2VNI$ ），显著提升电流传感灵敏度。然而，开环式偏振调制机制缺乏共模扰动抑制能力，环境振动易通过弹光效应引入附加双折射噪声，导致偏振态在多次循环中产生累积性畸变。此类偏振串扰现象在温度梯度或机械应力冲击下尤为显著，致使系统在户外复杂工况下的长期稳定性难以满足电力设备监测的可靠性要求。

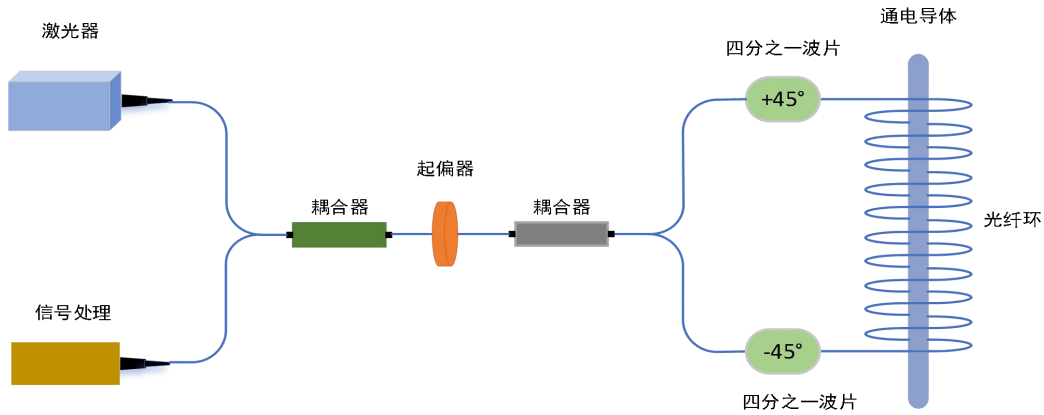


图 2-6 Sagnac 干涉结构型电流传感器光路图

2.3.3 反射型全光纤电流传感器

反射式光纤电流传感器是近年来研究最多的结构，其典型光路配置如图 2-7 所示。激光光源经偏振控制器生成线偏振光，通过 45° 熔接点解耦为两正交线偏振分量。经 $\lambda/4$ 波片转换为左旋/右旋圆偏振态的双光束，在电流产生的磁场环境中会发生法拉第效应；经反射镜逆向传输时，会继续以反射方式在光纤中传播，再次经历同轴向磁场的法拉第旋光作用，由于磁场矢量与光波矢始终保持共线关系，正反向传输过程产生的旋光相位差呈现叠加特性，最终实现非互易相位偏移量的倍增效应。

最终，双光束经再次经过 $\lambda/4$ 波片会转变为两正交线偏振分量，其合成偏振面的旋转角度与导体电流强度及维尔德常数有关。该设计通过往返路径的对称传输特性，可有效抑制温度漂移等共模干扰，特别适用于 500kV 以上特高压输电线路的在线监测；工艺层面，全光路仅集成单一 $\lambda/4$ 波片，从根本上消除多级波片误差引入的系统性偏差。这种高集成度设计使系统稳定性提升，特别适用于智能变电站等强电磁干扰环境下的高精度电流监测。

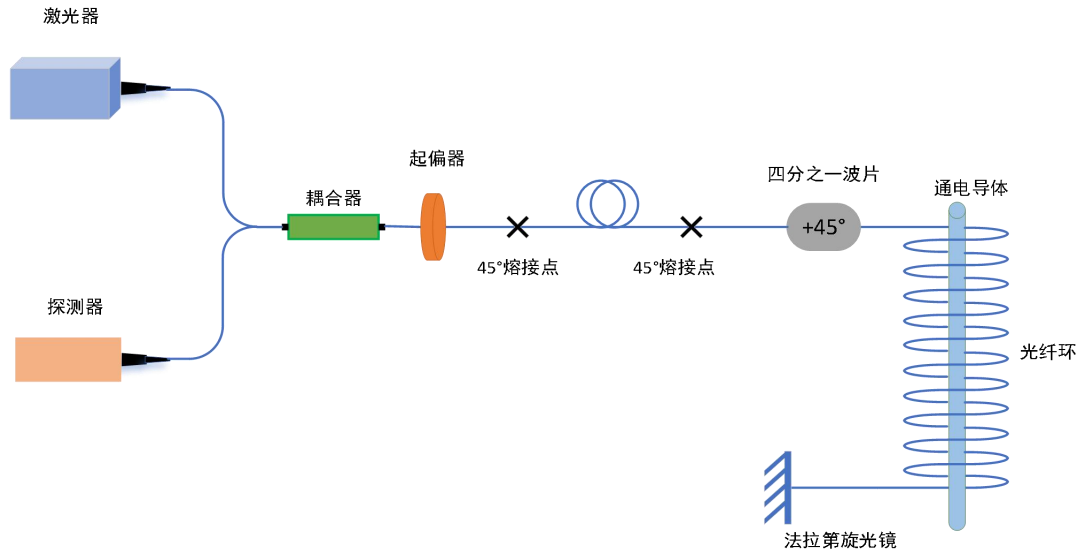


图 2-7 反射型全光纤电流传感器光路图

2.4 本章小结

本章聚焦全光纤电流传感器的理论体系与技术机理，构建如下研究框架：首先系统阐述光波偏振态理论，建立斯托克斯参量法与琼斯矩阵法分析体系，明确两者在偏振态数学描述中的适用场景差异。继而深入解析全光纤电流传感器的基本原理，重点阐明法拉第效应的非互易物理本质及其与自然旋光现象的差异。在光波导特性研究维度，系统介绍光纤双折射的三类典型模态（线性、圆、椭圆双折射），揭示其形成机理。最后对目前全光纤电流传感器常用的种类进行了简要介绍，为接下来的对比对比实验做铺垫。

第3章 温度对新型全光纤电流传感器的影响仿真分析

全光纤电流传感器目前面临最大的问题是光纤材料对温度敏感，该温度敏感性不仅影响测量结果的准确性，更制约了设备在复杂工况下的长期可靠性，因此如何解决这个问题一直是全光纤电流传感器研究的研究热点。鉴于此，开发高效的温度补偿策略已成为提升该技术工程实用性的重点研究方向。本章首先提出一种耦合法拉第旋光器的环形结构 AFOCS，详细阐述了该结构的运行原理；其次搭建温度模型，分析温度影响全光纤电流传感器性能的机理；最后利用琼斯矩阵分析列写系统误差公式，并通过 MATLAB 仿真结果比较该结构的温度补偿效果。

3.1 新型传感结构基本原理

本节首先介绍新型传感结构的两个重要组成部分：环形结构和 FPR 结构。详细阐述环形结构的工作原理和增强系统灵敏度的作用；确定 FPR 的器材选择，具体阐述其抑制双折射的工作原理。其次，协同两个结构进行温度稳定性分析，为系统引进这两个结构提供理论基础。最后，提出耦合 FPR 的环形结构 AFOCS，理论分析其运行机制，用琼斯矩阵表述最终的输出信号。

3.1.1 环形结构

光学灵敏度增强机制研究表明，通过提升光路循环次数可有效放大法拉第旋光效应，其实现路径主要包括传感光纤匝数优化与光路改进。虽然增大光纤线圈匝数 N 能线性增强法拉第旋转角，但是光纤越长，损耗越多，成本随之增加，光路整体结构也更显笨重，因此该方法在工程规模化应用中存在显著限制。为解决全光纤电流传感器的灵敏度瓶颈，本研究创新设计了基于光纤环形腔的电流传感头（图 3-1）。该结构通过环形谐振腔引导信号光进行循环传输，使光场反复通过传感区域实现法拉第效应累积增强。为消除循环过程中的偏振态劣化问题，系统采用脉冲光源配合起偏器生成线偏振光，通过双耦合器构建

闭环光路。在理想传输条件下（忽略残余双折射干扰），每次循环将积累 2θ 的非互易圆双折射相位差，当光信号完成 K 次循环后，其偏振态偏移量可表述为：

$$P = 2K\theta \quad (3-1)$$

全光纤电流传感器的灵敏度增强机制源于环形腔结构的路径复用效应。基于磁光相位调制的路径复用机制，系统电流灵敏度呈现与循环次数严格的正相关特性，由于 $\theta = VNI$ ，表示此时系统的电流灵敏度为 $2KVNI$ ，是基本结构的 K 倍。在 K 次有效循环作用下，累积法拉第效应实现 K 倍线性增益，使系统灵敏度较传统单程架构显著提升。

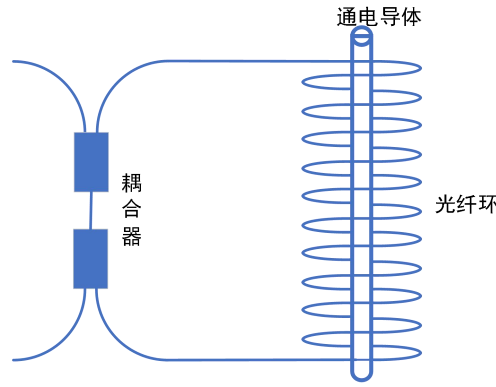


图 3-1 光纤环形腔结构的全光纤电流传感头

3.1.2 FPR 结构

光纤偏振控制器（FPR）的选型需兼顾抗扰性能、插入损耗及系统兼容性等核心指标。通过对比分析市售各类偏振控制器发现：机械式结构存在响应迟滞及机械疲劳失效风险，而基于法拉第效应的磁光型旋转器因无运动部件展现出可靠性优势。本设计采用法拉第旋光器构建新型偏振调控单元（图 3-2），法拉第旋光器上的磁场由强磁性永磁环提供，为了获得更好的轴向磁场，旋光晶体根据两个永磁环的轴向固定在二者之间，法拉第旋光器的作用是将偏振面旋转 90° ，假设入射过程的线性双折射是 $\delta_1 = \delta_x - \delta_y$ ，经过法拉第旋光器后，偏振光的 x, y 轴互换，线性双折射为 $\delta_2 = \delta_y - \delta_x$ 。最终，两个过程的线性双折射相互抵消，达到了提高系统电流测量精确度的效果，且相较市面上广泛运用的法拉第旋光镜，避免了镜面反射相移带来的偏振态改变。

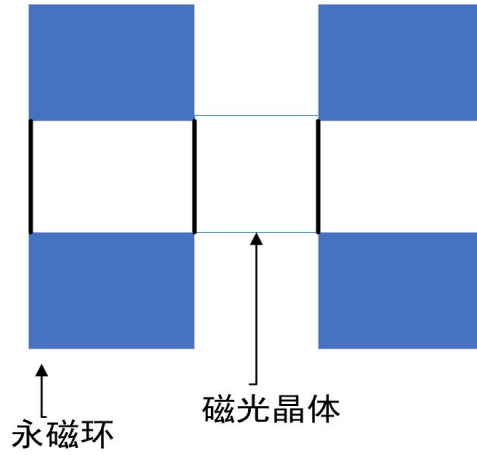


图 3-2 法拉第旋光器结构

在全光纤电流传感系统（AFOCS）中，法拉第旋光器的温度敏感性直接影响光学系统的测量精度。外界温度波动时会导致磁光材料的磁畴结构重组，使得永磁体的磁化强度产生温度依存性变化。目前市场上现有以下几种法拉第晶体有：稀土正铁氧体；钕铁石榴石；铽基石榴石。这些晶体通过离子掺杂和晶格工程实现 Verdet 常数提升与温度补偿优化，展现出工程化应用潜力，其中受温度影响较小的磁光晶体为 $0.02 \text{ deg/}^\circ\text{C}$ 。

由于本文实验涉及温度变化，为了实验结果的准确性，优先考虑 FPR 结构受温度影响产生的系统误差，下式为不考虑双折射作用的 FPR 传感光纤琼斯矩阵：

$$G_{FPR} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

设 FPR 受温度影响的法拉第旋转角度为 θ_T ，无双折射作用的光路输出信号琼斯矩阵为：

$$E_{O(1)} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta (\cos \theta_T + \sin \theta_T) - \sin 2\theta (\cos \theta_T - \sin \theta_T) \\ \cos 2\theta (\cos \theta_T - \sin \theta_T) + \sin 2\theta (\cos \theta_T + \sin \theta_T) \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

输出光强信号的偏振度：

$$P_1 = \frac{|E_x|^2 - |E_y|^2}{|E_x|^2 + |E_y|^2} = \sin(2\theta_T - 4\theta) \quad (3-4)$$

依此类推，无偏振误差影响的偏振度公式：

$$P_0 = \sin 4\theta \quad (3-5)$$

误差公式：

$$\Delta s = \frac{P_1 - P_0}{P_0} = \frac{\sin(2\theta_T - 4K\theta) - \sin 4K\theta}{\sin 4K\theta} \times 100\% \quad (3-6)$$

考虑在 0-60℃， θ_T 受温度影响变化范围在 1.56rad-1.59rad (0.02deg/℃)， θ 设置 0-0.2rad，软件仿真结果如图 3-3, 可以看到 θ 趋近于 0 附近的时候误差达到最大，此时法拉第效应过小，FPR 的温度误差就更明显，因此产生了较大的测量误差，随着法拉第旋转角的增大，测量误差在 $\theta = 0.05\text{rad}$ 附近开始逐渐趋近于 0，因此 FPR 结构在系统正式运行过程中受温度影响产生的误差可以忽略不计。

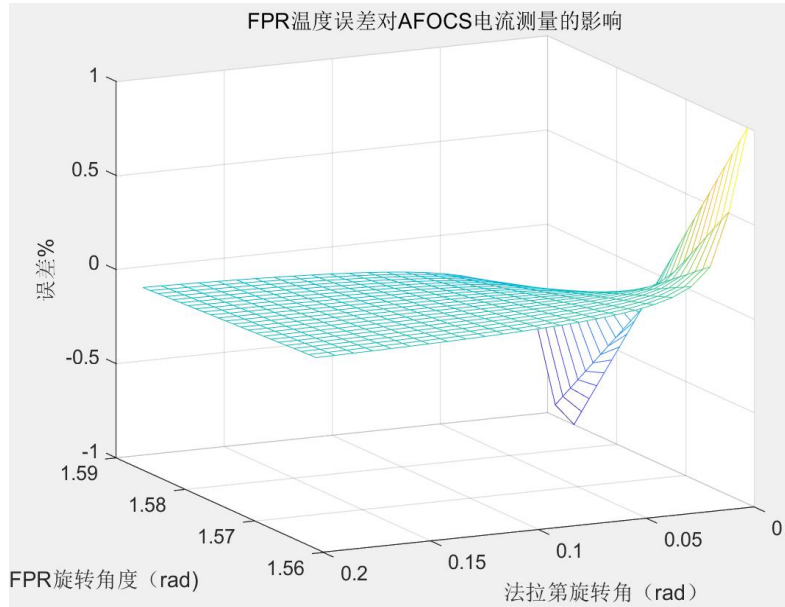


图 3-3 FPR 温度误差对 AFOCS 电流测量的影响

图 3-3 只考虑了 FPR 单次循环对电流传感器的测量误差，图 3-4 为考虑加入环形结构的新型 AFOCS 对 FPR 的测量误差分析，设置 $K=20$ ，对比图 3-3 可以看出相同参数设置下 $\theta = 0.005\text{rad}$ 附近误差为 0，因为环形结构的加入放大了法拉第效应，提高了电路系统的测量精确度，系统更快达到了稳定状态。而系统最终测得的法拉第效应远大于 0.005rad，此时 FPR 对系统的误差为 0，因此该结构和环形结构的协同使用在温度稳定性研究中可以更好地发挥作用。

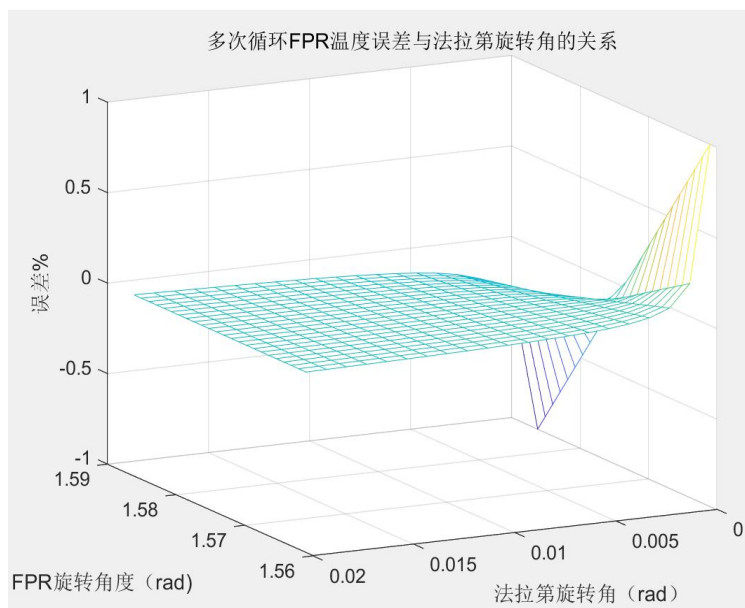


图 3-4 多次循环 FPR 温度误差对 AFOCS 电流测量的影响

3.1.3 基于环形结构的 FPR 全光纤电流传感器

光纤在系统实验过程中需要缠绕以及固定，不可避免地受到光纤绕制封装工艺引发的结构形变影响——包括但不限于弯曲应力诱导的线性双折射、机械扭转导致的圆双折射以及封装残余应力引发的混合双折射。这些双折射所产生的旋转角比法拉第旋转角大得多，严重时甚至会直接覆盖法拉第效应。因此，本节提出一种耦合 FPR 的新型 AFOCS 来削弱这些双折射产生的影响。

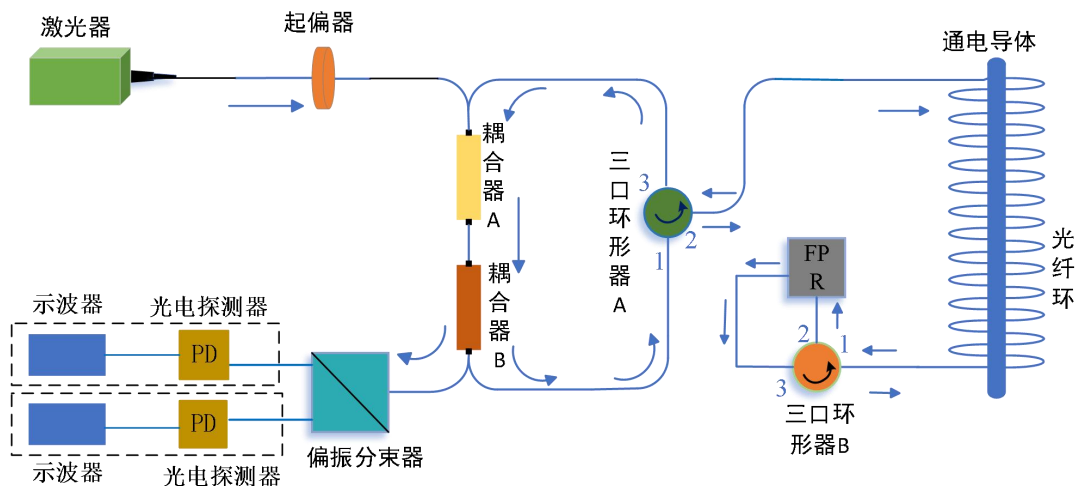


图 3-5 耦合 FPR 的新型 AFOCS

如图 3-5 所示新型全光纤电流传感器的光路图，脉冲光经起偏器形成线偏振光，过耦合器 A 到达耦合器 B 进行第一次分光，少部分光流入偏振分束器作

为检测信号，偏振分束器将偏振光分成两路正交的偏振光，两路偏振光均由光电探测器将光信号转化为电信号，并通过示波器检测两路垂直的光强进而得出偏振度；大部分偏振光被耦合器 B 分光从三口环形器 A 的 1 端口→2 端口，偏振光经通电导体时因磁场作用会发生偏振面旋转，接着偏振光从三口环形器 B 的 1 端口→2 端口进入 FPR 结构，实现偏振光的 90 度旋转，此时偏振光已完成第一次传输，从 FPR 流出后的光过三口环形器 B 的 1 端口→2 端口，又流回通电导体中，接着从三口环形器 A 的 3 端口→1 端口进入耦合器 A 到耦合器 B 后再次进行分光，重复上述操作，整体结构实现了光在其中的多次循环，循环次数越大，所测得的结果也就越精确。偏振光的两路信号经 FPR 结构后互换，抵消掉了线性双折射；由于互易圆双折射的互易性，偏振光正反向传输过程抵消了该双折射。

根据偏振光在光路中的运行过程，最终输出光信号用琼斯矩阵表示如下：

$$E_o = G_r \cdot G_{FPR} \cdot G_f \cdot E_i = \begin{bmatrix} \cos k \frac{\varphi'}{2} - i \frac{\delta}{\varphi'} \sin k \frac{\varphi'}{2} & -2 \sin \chi' \sin k \frac{\varphi'}{2} \\ 2 \sin \chi' \sin k \frac{\varphi'}{2} & \cos k \frac{\varphi'}{2} + i \frac{\delta}{\varphi'} \sin k \frac{\varphi'}{2} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos k \frac{\varphi}{2} - i \frac{\delta}{\varphi} \sin k \frac{\varphi}{2} & -2 \sin \chi \sin k \frac{\varphi}{2} \\ 2 \sin \chi \sin k \frac{\varphi}{2} & \cos k \frac{\varphi}{2} + i \frac{\delta}{\varphi} \sin k \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

E_x 和 E_y 表示光信号在两个方向上的分量， G_r 和 G_f 分别表示偏振光在光纤中正反向传输， G_{FPR} 表示 FPR 的琼斯矩阵， E_i 表示输入光，其余元器件对偏振态影响较小不做考虑， δ 表示线性双折射， ρ 表示互易圆双折射， φ 表示光信号正向传输总相位差，是电流测量产生误差的主要原因， $\varphi = \sqrt{\delta^2 + 4(\theta + \rho)^2}$ ，

$\sin \chi = \frac{2(\theta + \rho)}{\varphi}$ ，互易圆双折射在光信号反向传输时方向发生改变，双折射大小不发生变化，故 $\varphi' = \sqrt{\delta^2 + 4(\theta - \rho)^2}$ ， $\sin \chi' = \frac{2(\theta - \rho)}{\varphi'}$ ，K 表示循环次数。经

化简可得：

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta^2 - 4(\theta^2 - \rho^2) - 4i\delta\theta}{\delta^2} \sin^2 k \frac{\varphi}{2} + \cos^2 k \frac{\varphi}{2} + \frac{2\theta}{\varphi} \sin k\varphi \\ \frac{4(\theta^2 - \rho^2) - \delta^2 + 4i\delta\theta}{\delta^2} \sin^2 k \frac{\varphi}{2} - \cos^2 k \frac{\varphi}{2} + \frac{2\theta}{\varphi} \sin k\varphi \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

偏振度公式：

$$P = \frac{|E_x|^2 - |E_y|^2}{|E_x|^2 + |E_y|^2} = \frac{4\theta \sin k\varphi}{\varphi} \quad (3-9)$$

3.2 温度影响机理分析

全光纤电流传感器通常在室外工作，昼夜温差和四季变化产生的温度变化会改变它的响应度，造成温漂问题。Verdet 常数和线性双折射是全光纤电流传感器中最重要的参数，贯穿运行过程始终，都会因为温度产生一定的波动，因此，建立这两个参量的温度函数方程可以更好的了解温度变化对系统产生的影响程度，也为接下来的系统温度稳定性研究提供理论支撑。

3.2.1 Verdet 常数温度模型

Verdet 常数作为全光纤电流传感器的重要参数，其数值直接影响了实际输出的法拉第旋转角。该参数具有显著的光谱依赖特性，在特定光纤材料体系中主要受工作波长、介质折射率和温度三者协同调制。在普通单模光纤中，Verdet 常数的数学模型如下：

$$\frac{\partial V}{\partial T} = 0.7 \times 10^{-4} V_0 \quad (3-10)$$

当研究温度变化时，将其转换为下式：

$$V = V_0 \left[1 + 0.7 \times 10^{-4} (T - T_0) \right] \quad (3-11)$$

T_0 为稳定的参考温度， T 为实际工作的环境温度， V_0 为温度 T_0 下的 Verdet 常数， V 为实际温度 T 下的 Verdet 常数。

温度波动引起的误差（%）：

$$\varepsilon_1 = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (3-12)$$

设置实际温度变化范围 -40°C - 60°C ，初始温度 $T_0=25^{\circ}\text{C}$ ，如图 3-6 所示，误差在 -0.455% - 0.245% 之间，由于 Verdet 常数数值量级很小，所以受温度影响对于系统误差的影响也较小。

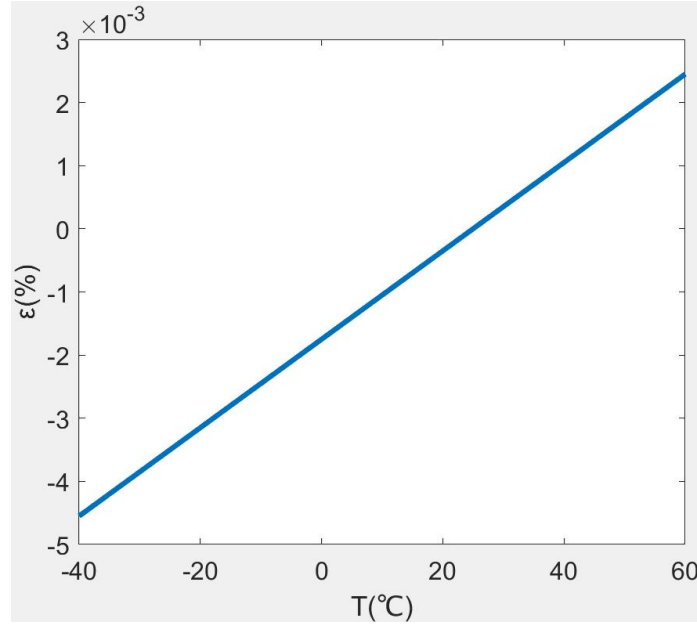


图 3-6 Verdet 常数受温度影响产生的误差

3.2.2 线性双折射温度模型

文献研究表明^[100]，全光纤电流传感器的响应特性与线性双折射（LB）效应呈现显著负相关性。实验数据显示，当光纤中的线性双折射值超过 0.05rad/m 阈值时，系统响应度将出现逾 50% 的显著衰减。值得注意的是，过量的残余线性双折射会严重干扰法拉第旋转角信号的准确捕获，进而引发显著的系统测量偏差。针对温度梯度引发的线性双折射现象，其单位长度下的数学表达式可表述为：

$$\rho = \frac{\pi n^3 (1 + \nu) (p_{12} - p_{11}) \Delta \alpha}{6 \lambda (1 - 2\nu)} (T - T_0) \quad (3-13)$$

本研究采用常规单模光纤作为传感介质，其材料基础为二氧化硅（ SiO_2 ）基质材料构成的光导纤维，经查阅文献可知： $n=1.456$ ， $\lambda=1.55\times 10^{-6}\text{m}$ ， $p_{12}=0.27$ ， $p_{11}=0.121$ ， $\nu=0.17$ 。热膨胀系数差 $\Delta\alpha$ 设置为 $10^{-9}/^\circ\text{C}$ ，初始温度 $T_0=25^\circ\text{C}$ ，实际温度设置 -40°C - 60°C 。

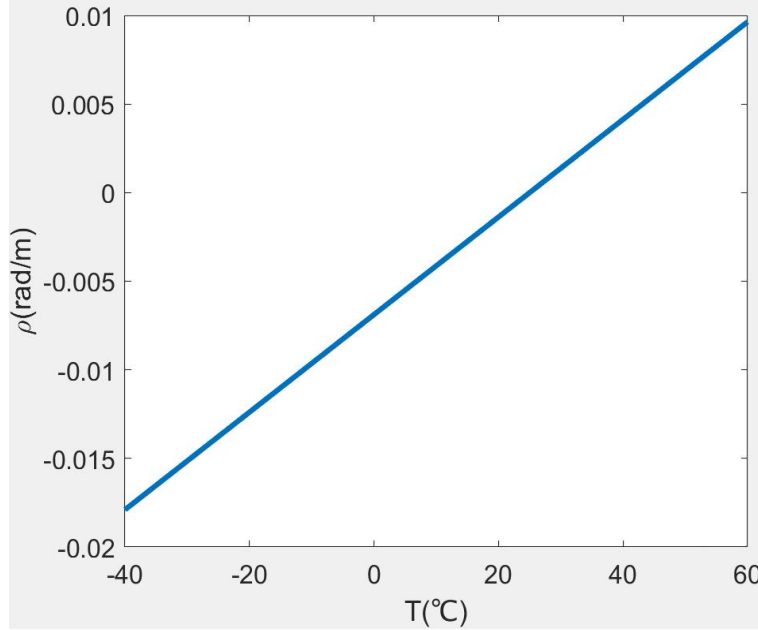


图 3-7 线性双折射受温度影响产生的误差

由图 3-7 可见，温致线性双折射的演化规律分析表明，单位长度线性双折射随温度变化而变化，温差越大，产生的线性双折射越大，实际应用中光路系统的绕制光纤往往达数百米，产生的线性双折射更是一个不容小觑的干扰因素，因此温度稳定性研究对系统正常运行非常有必要。

3.3 新型全光纤电流传感器的温度稳定性分析

因为法拉第旋转角和互易圆双折射以及线性双折射二者呈耦合关系，而这两种双折射效应都随着温度波动而波动，影响法拉第旋转角的获取，所以本研究提出一种新型 AFOCS，通过抑制这两种温致双折射效应来进行温度补偿。接下来将分析基本结构 AFOCS，环形结构 AFOCS 以及 FPR 的环形结构 AFOCS 受双折射影响产生的误差，通过仿真结果比较新型结构是否具有提高系统温度稳定性的效果。

3.3.1 基本 AFOCS 受双折射影响的误差分析

基本 AFOCS 信号光起偏后进入传感光纤，通过光电探测器检测光强即可测得电流。AFOCS 琼斯矩阵：

$$E_1 = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} - i \frac{\delta}{\varphi} \sin \frac{\varphi}{2} - 2 \sin \chi \sin \frac{\varphi}{2} \\ 2 \sin \chi \sin \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{\varphi}{2} + i \frac{\delta}{\varphi} \sin \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

受双折射影响产生的误差：

$$\Delta s_1 = \frac{\frac{-2 \sin \varphi(\theta + \rho)}{\varphi} - \sin 4\theta}{\sin 4\theta} \times 100\% \quad (3-15)$$

设置互易圆双折射和线性双折射均在 0-1.569rad 变化，观察两种双折射作用下电流测量误差大小，仿真结果如图 3-8 所示，可以看出基本结构的测量误差随双折射变化非常大，最大误差达-300%，且互易圆双折射相较线性双折射带来的误差波动范围更大，因此该结构性能稳定性差。

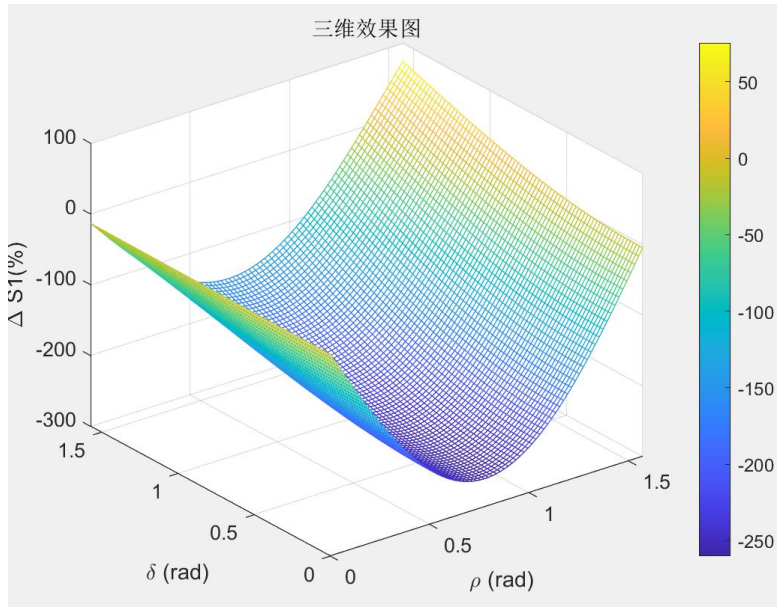


图 3-8 基本 AFOCS 受双折射影响产生的误差

3.3.2 耦合 FRM 的环形结构 AFOCS 受双折射影响的误差分析

环形结构 AFOCS 如图 3-9 所示，它的环形腔与光纤末端的反射镜相结合可

以实现光信号在光纤环中的多次循环，直到光信号全部消耗，提高了电流测量灵敏度。

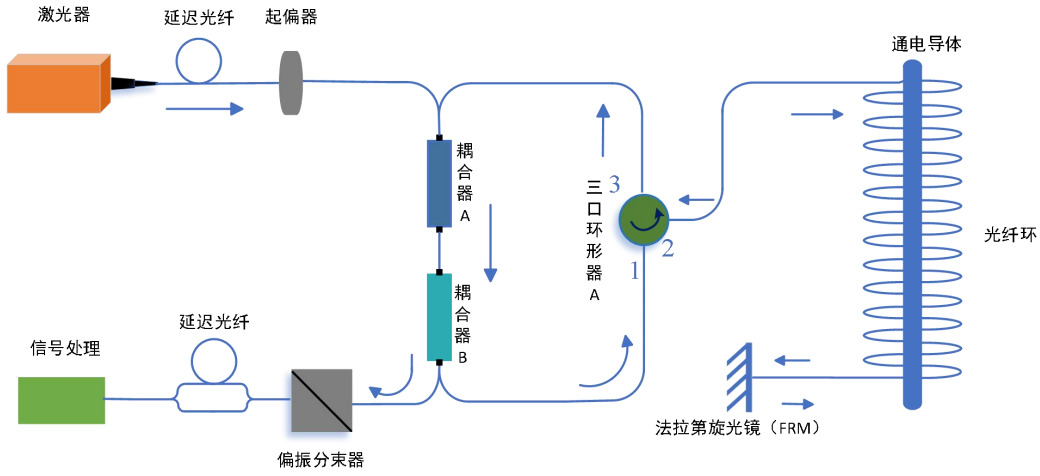


图 3-9 环形结构 AFOCS 基本结构

环形结构 AFOCS 琼斯矩阵：

$$E_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 k \frac{\varphi}{2} + \frac{4i\delta\rho - \delta^2 - 4(\theta^2 - \rho^2)}{\varphi^2} \sin^2 k \frac{\varphi}{2} + \frac{2\theta + \rho + i\delta}{\varphi} \sin k\varphi \\ \cos^2 k \frac{\varphi}{2} - \frac{2\rho + i\delta}{\varphi} \sin k\varphi + \frac{4i\delta\rho - \delta^2 - 4(\theta^2 - \rho^2)}{\varphi^2} \sin^2 k \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$$\Delta S_2 = \frac{\frac{2(\theta + \rho) \sin k\varphi}{\varphi} - \frac{4\delta^2(\theta + \rho)}{\delta^3} \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin \varphi - \sin 4k\theta}{\sin 4k\theta} \times 100\% \quad (3-17)$$

K=5 时，仿真结果如图 3-10 所示，环形结构 AFOCS 最大误差不超过-6%；k=20 时，仿真结果如图 3-11 所示，最大误差不超过-3%，相较基本 AFOCS，该环形结构产生的误差大大减小，且循环次数越大，AFOCS 灵敏度越高。然而，该环形结构 AFOCS 随双折射变化产生的误差波动巨大，稳定性较差，且环形结构的设计虽然弱化了互易圆双折射对误差的影响，但温致线性双折射带来的影响尚未消除，因此在温度变化时，线性双折射增大仍会使该结构产生不容忽视的测量误差。

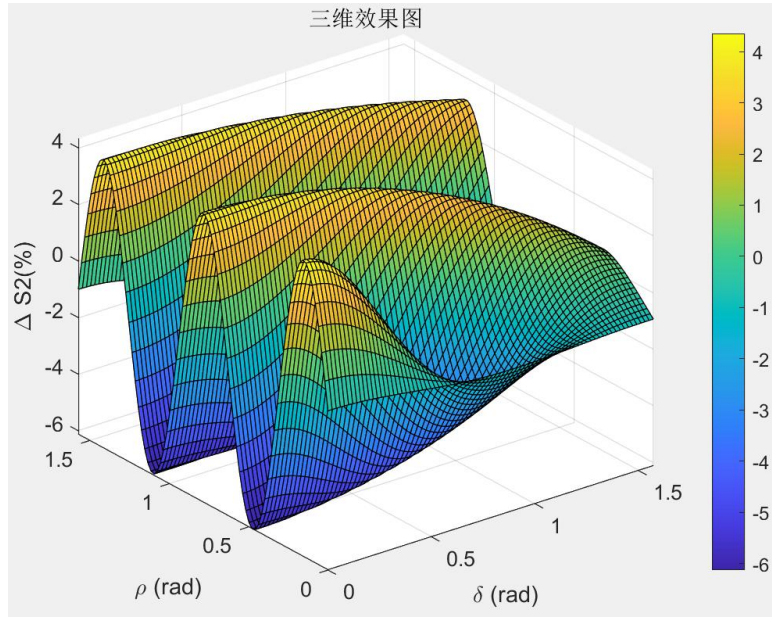


图 3-10 环形结构 AFOCS 受双折射影响产生的误差 (k=5)

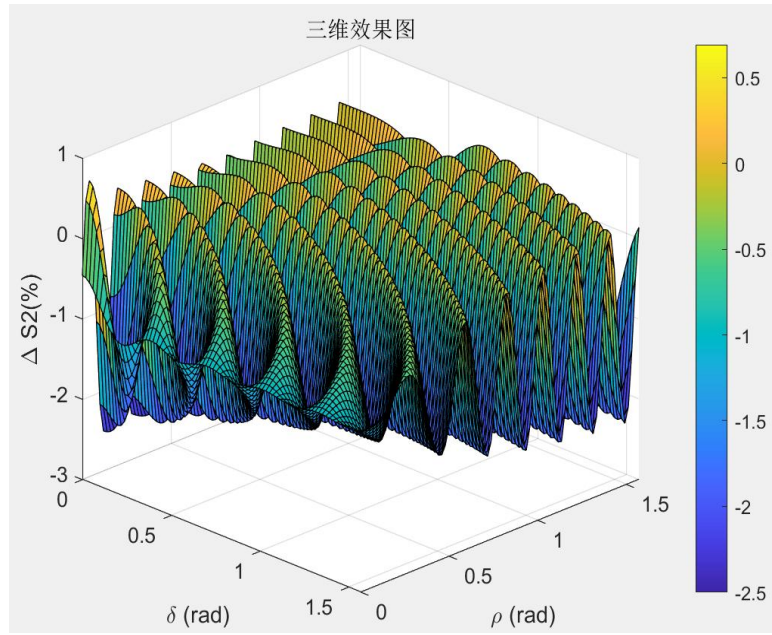


图 3-11 环形结构 AFOCS 受双折射影响产生的误差 (k=20)

3.3.3 耦合 FPR 的环形结构 AFOCS 受双折射影响的误差分析

为抑制温致线性双折射带来的影响，本文提出了耦合 FPR 的环形结构 AFOCS，FPR 结构可以有效抑制温致线性双折射，该结构的误差公式为：

$$\Delta S_3 = \frac{\frac{4\theta \sin k\varphi}{\varphi} - \sin 4k\theta}{\sin 4k\theta} \times 100\% \quad (3-18)$$

仿真结果如图 3-12，误差最大不超过-1.4%，在互易圆双折射和线性双折射均为 0 的时候误差最小，-0.08%附近，且随着两种双折射带来的误差稳定在-1%附近。因为光路器件众多，误差无法完全消除，但相较上面两种 AFOCS，误差已经降到了最低，温度变化时，AFOCS 性能总体稳定。

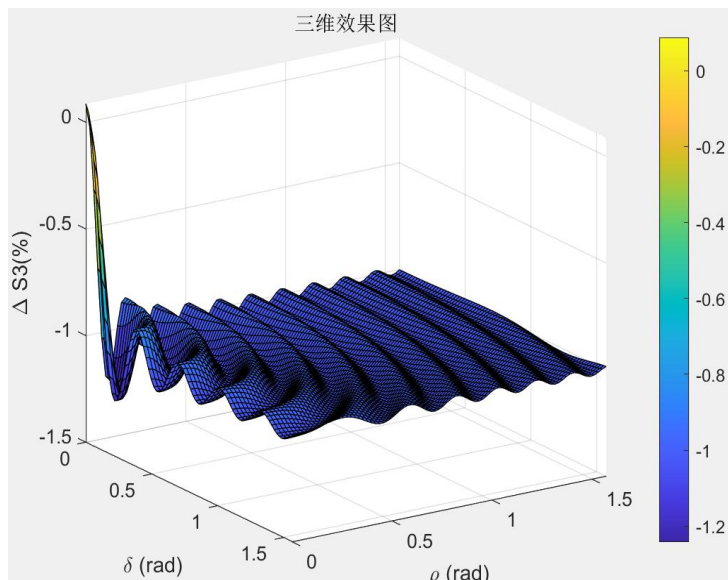


图 3-12 耦合 FPR 的环形结构 AFOCS 受双折射影响产生的误差

图 3-12 绘制的误差仿真图设置的循环次数 $K=20$ ，现考虑 $K=0-30$ 对误差的影响， $\delta=\rho=\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}$ ，结果如图 3-13 所示，随着光信号通过光纤螺线管的循环次数增加，灵敏度呈振荡非线性增长，四种双折射带来的误差最终都趋近于 0，因此 K 越大，系统稳定性越好。

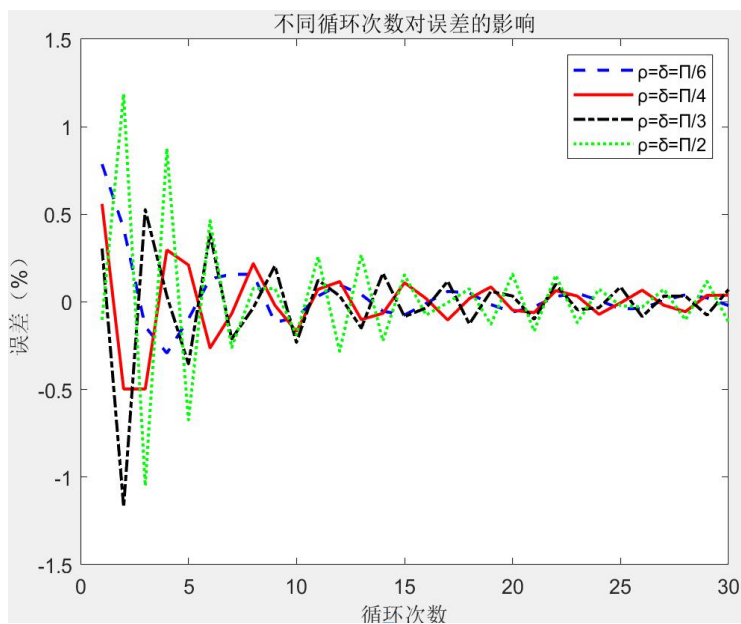


图 3-13 不同循环次数对误差的影响

3.4 本章小结

为提高 AFOCS 的温度稳定性，本章提出一种耦合 FPR 的环形结构 AFOCS，从理论上分析了该结构的工作原理，并用琼斯矩阵推导出最终输出光强信号，对 AFOCS 的温度稳定性主要针对抑制双折射的效果进行仿真分析。在对比了几种 AFOCS 后，基本 AFOCS 的温度稳定性最差，受外界环境干扰大；环形结构有效提高了测量精确度，但是误差超-6%，测量精度不高，不便于应用在电力测量领域，且反射镜往往会带来反射相移造成额外的偏振态改变；本章提出的新型结构有效的抑制了双折射，提高了系统温度稳定性，三口环形器的设计既避免了镜面反射带来的误差也实现了偏振光在光纤环中的正反向传输。

第4章 新型全光纤电流传感器实验研究

经过第一章和第二章提出了全光纤电流传感器目前面临的温度稳定性问题之后，第三章提出了具有温度补偿效果的新型全光纤电流传感器，对其进行了仿真模拟，理论验证了温度稳定性效果。本章将继续围绕新型全光纤电流传感器的温度稳定性进行验证，通过搭建实验平台，考虑不同环境温度对该系统的测量精确度，验证该新型结构的合理性。

4.1 实验系统光源设计

4.1.1 脉冲激光光源

光源的特性在光纤电流传感系统中具有决定性作用，其主要承担电光转换功能，实现电信号至光信号的转化。鉴于全光纤电流传感器的工作环境限制，所选光源需满足体积小，适应光纤耦合需求，同时光源波长要降低传输损耗，并具备足够的光强输出能力。本研究构建的脉冲激光发生装置由 1550nm 半导体激光器（峰值功率 10mW）与自主研制的脉冲驱动模块组成，其中 FPGA 开发板作为核心控制器，通过动态调节电压参数（在激光器安全阈值内），实现输出电流大小的可控。驱动电路通过精密温控与精确调控输入电流，有效保障了激光器工作参数的稳定性，从而确保光信号输出的长期可靠性（详见图 4-1）。



图 4-1 激光器驱动电路

图 4-2 显示了脉冲激光器的输出波形，鉴于实验过程需满足长时间稳定运行与高精度测量要求，本研究选取连续 120 分钟运行时段的峰值功率（ V_{pp} ）及脉冲宽度数据作为分析对象（图 4-3），实验数据显示：峰值功率围绕 0.532V 上下波动，脉冲宽度参数则集中分布于 17ns 附近。全程监测时段内未出现功率骤变或脉宽失谐现象，充分证明该激光系统在长时间连续工作状态下具备优异的输出稳定性，满足高精度光电检测实验对光源一致性的严苛要求。

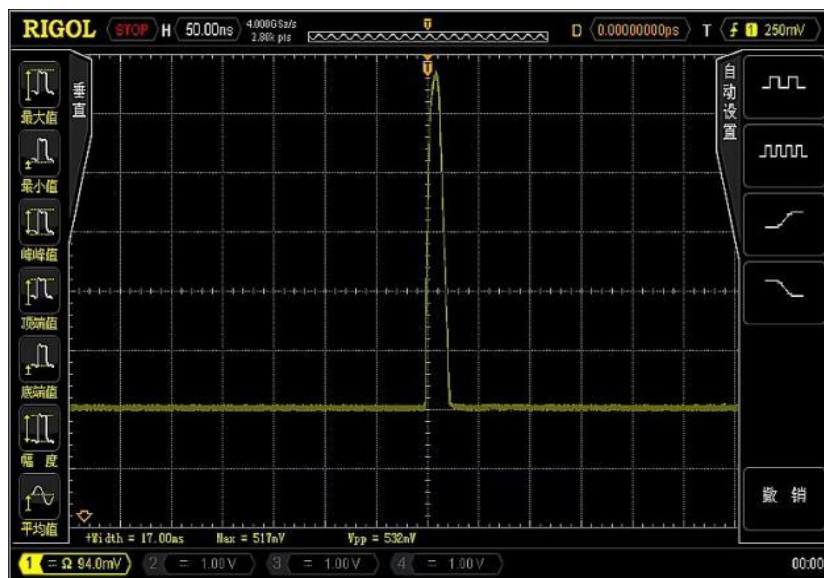


图 4-2 脉冲激光器输出波形

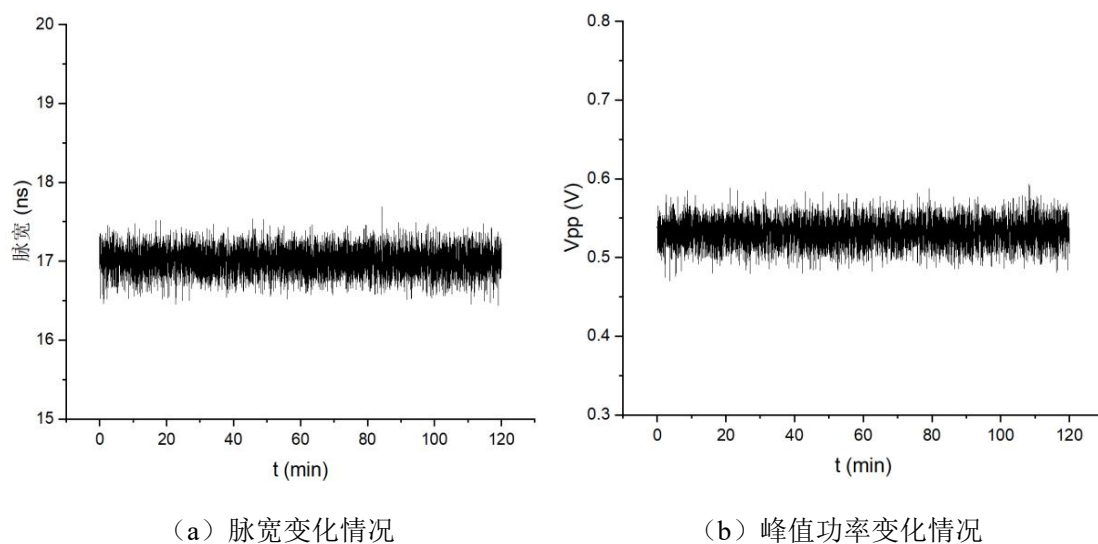


图 4-3 120min 内脉宽和峰值功率变化情况

但是本系统设计中，光源作为全光纤电流传感系统的核心部件，其性能直接决定电光转换效能。在系统实验之前，我们对激光器的输出光信号进行了测试，因为光路系统较为复杂，脉冲光每经过一个器件都会有不同程度的损耗，

而光纤环形腔中由于耦合器分光的原因，导致每次循环输出的偏振光功率呈指数级衰减，循环后的残余光功率已低于光电探测器灵敏度阈值，这严重影响了实验的测量精度和对环形腔结构设置的初衷，因此为了解决这一关键问题，需要对脉冲激光光源进行光损补偿设计。

4.1.2 光源的光损补偿设计

在长距离光纤通信网络中，掺铒光纤放大器（EDFA）作为典型光中继器件发挥着关键作用。该器件凭借优异的增益特性、低噪声系数及高稳定性等优势，有效克服了光纤传输损耗对通信距离的制约，因此本研究在脉冲激光器原有基础上设计了一种掺铒光纤放大器放大光信号。

（一）掺铒光纤放大器工作原理

掺铒光纤放大器的核心工作机制涉及粒子数反转与多光子放大两个物理过程。如图 4-4 所示的三能级模型，铒离子吸收泵浦能量后产生能级跃迁。当前主流泵浦波长为 980nm 与 1480nm，分别对应不同能级跃迁路径：当采用 1480nm 泵浦时，铒离子直接从基态跃迁至亚稳态（能级寿命 10-12ms），该单步跃迁模式具有较高能量转换效率，但存在泵浦波长受激辐射现象，导致激发态粒子数减少。相比之下，980nm 泵浦通过双能级跃迁机制实现更优性能：铒离子首先跃迁至寿命仅 1 μ s 的激发态，随即通过非辐射跃迁快速转移至亚稳态。由于该过程速率显著高于其他衰变路径，可有效抑制泵浦波长处的受激辐射，维持系统能量稳定性。这种工作机制使 980nm 泵浦 EDFA 在泵浦效率与噪声特性方面更具技术优势。

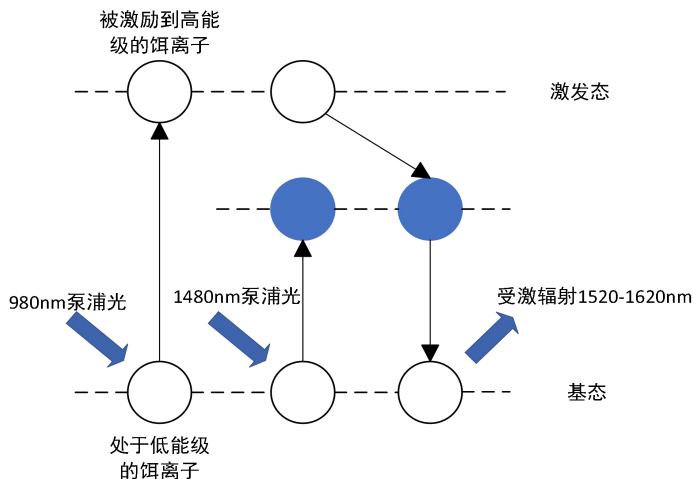


图 4-4 铒离子三能级工作原理图

为精确表征 EDFA 的动态特性，可采用粒子数速率方程与光功率传输方程构建理论模型进行数值仿真。铒离子的吸收截面 σ_a 与发射截面 σ_e 特性（如图 4-5 所示）作为关键物理参量，为 EDFA 结构优化及理论研究提供重要基础。图示数据表明，在常规放大区域内，吸收截面（主导信号吸收过程）和发射截面（决定信号放大能力）均呈现波长依赖性：短波长区吸收截面占据主导，导致信号衰减；长波长区发射截面显著增强，实现有效信号放大。掺铒光纤的宽谱吸收与发射特性（覆盖多个特征波长），使其具备兼容多波长泵浦源的显著优势。不过值得注意的是，不同型号掺铒光纤的截面特性存在显著差异。

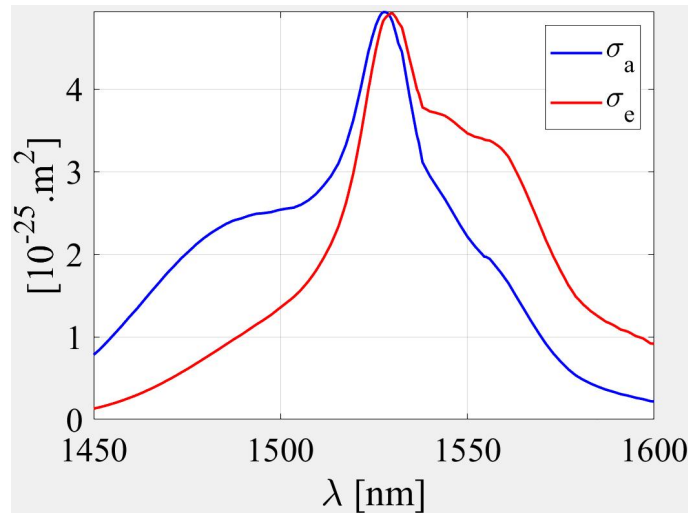


图 4-5 掺铒光纤吸收与发射谱线

（二）掺铒光纤增益特性分析

增益特性作为掺铒光纤放大器（EDFA）的核心性能指标，直接反映其信号放大效能，指输出信号功率与输入信号功率的比值，通常用 G 表示，表达式为：

$$G(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4-1)$$

EDFA 工程实践中普遍采用分贝（dB）量化增益指标，该参数与泵浦光强度、光纤长度等变量密切相关。本研究所提出的掺铒光纤放大器最核心的目的是为了放大光信号，因此如何获取最大增益非常重要。Optisystem 能够支持用户模拟各种层面上的光学系统，通过该软件模拟确定最佳增益可以有效降低成本，提高效率。

考虑泵浦功率对增益的影响，光源峰值功率 7mW，掺铒光纤的纤芯半径和掺杂半径均为 $2.7\mu\text{m}$ 、数值孔径 0.23、铒离子掺杂浓度 $10^{24}/\text{m}^3$ 、长度为 7m，泵浦源波长为 980nm，设置泵浦功率 0-1000mw 变化，步进设置 15mW，每 15mW 计算一次增益曲线。通过仿真运行后得到增益与泵浦功率改变关系图如图 4-6 所示，实验数据显示，固定掺铒光纤长度下的低泵浦功率阶段增益随泵浦功率提升呈快速增长，此时泵浦能量不足导致粒子数反转度受限；泵浦功率 100mW 左右时，增益增长速度放缓，且增长斜率越来越小，当泵浦功率突破阈值后，铒离子抽运效率就会趋于饱和，超过该阈值后继续增强的泵浦能量无法显著提升放大效能，系统会逐渐进入泵浦效率极限状态，该特性为 EDFA 工程化参数优化提供了重要理论依据。设置泵浦功率为 800mW，放大器增益为 29dB。

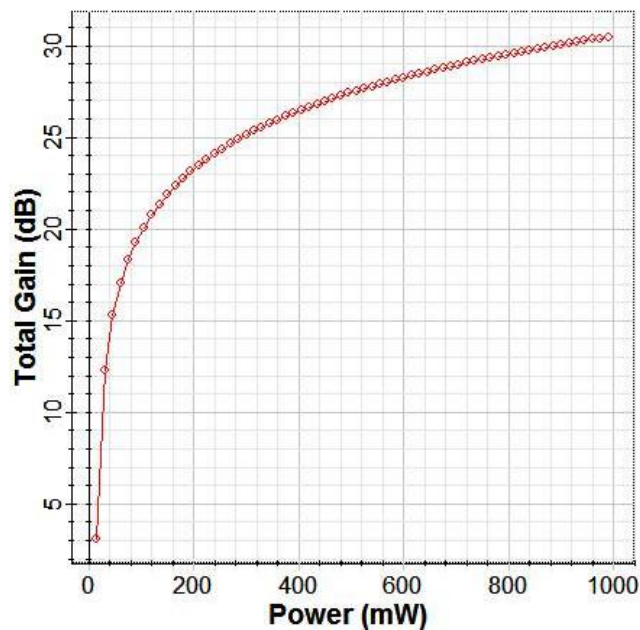


图 4-6 泵浦功率与增益之间的关系

考虑掺铒光纤长度对系统增益的影响，设置泵浦功率 800mW，铒纤长度范围 0-40m，步进设置 1m，每 1 米计算一次增益曲线。通过仿真运行后得到增益与铒纤长度改变关系图，如图 4-7 所示。0-3 米时增益增长速度最快，4-5m 增长速度放缓，掺铒光纤长度为 6m 时增益达到最大，之后掺铒光纤长度增加会导致增益衰减，因此并不是说掺铒光纤长度越长增益效果越好。

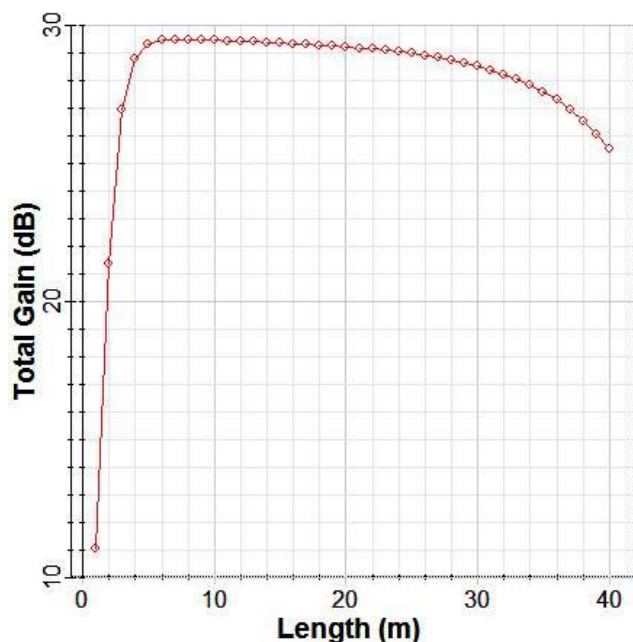


图 4-7 掺铒光纤长度与增益之间的关系

（三）掺铒光纤放大器实验

经过仿真模拟确定了重要参数的选取后，本文根据本次实验需求和课题组现有器材搭建了如下结构，如图 4-8 所示：

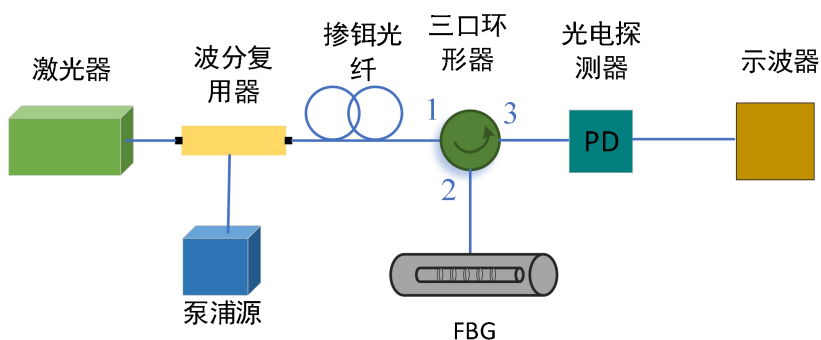


图 4-8 EDFA 实验结构图

实验系统配置如下：波分复用器实现信号光与泵浦光的高效耦合（耦合效率 $>90\%$ ）；泵浦系统采用 980nm 半导体激光器，功率设定为 800mW；选用 EDF/13/6/125-23 型掺铒光纤（长飞公司）作为增益介质，长度设置为 6m。光信号经放大后，通过三口环形器进入 1550nm 光纤布拉格光栅（反射率 95%）完成带外噪声滤除与信号反射，最终由光电探测器（DETO8CFC 系列）将光信号转换为电信号并接入示波器记录。该架构有效抑制了 ASE 噪声对检测精度的影响，确保了实验数据的可靠性。

在无损耗条件下对掺铒光纤放大电路的放大效果进行检测，测得放大器增益为 28.14dB。通过构建掺铒光纤放大电路对系统光源进行放大处理，实时监测 120min 连续时段内输入信号的变化，图 4-9 是信号光放大后的波形图。基于 Origin 散点分布统计显示：图 4-10（b）中放大后输出信号光峰值稳定在 1.17V 水平，较 4-3（b）放大前峰值功率增益效果显著且全程无异常波动；同时根据图 4-10（a）和 4-3（a）观测到脉冲宽度放大前后保持良好稳定性，始终维持在 17ns 附近。由此可以看出掺铒光纤放大器光损补偿效果明显，且输出光源稳定可靠。

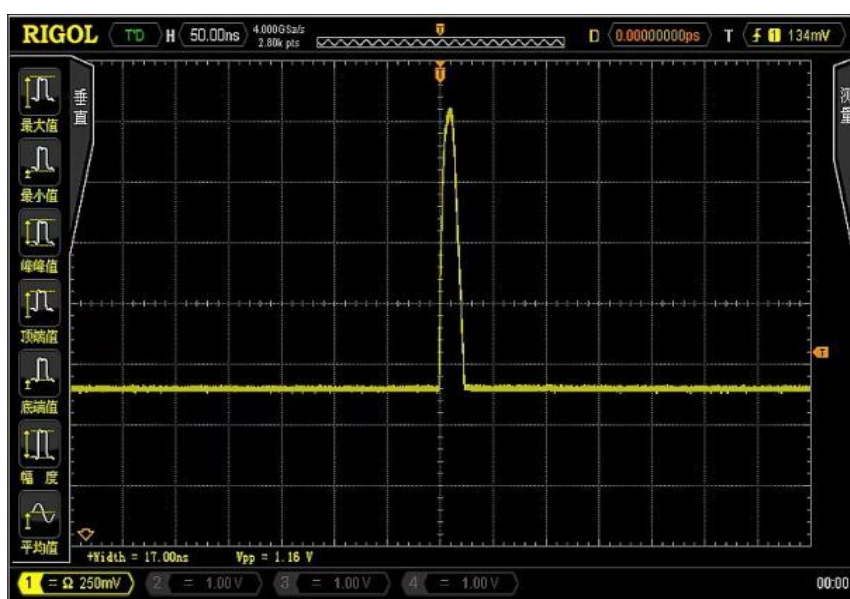


图 4-9 放大后波形

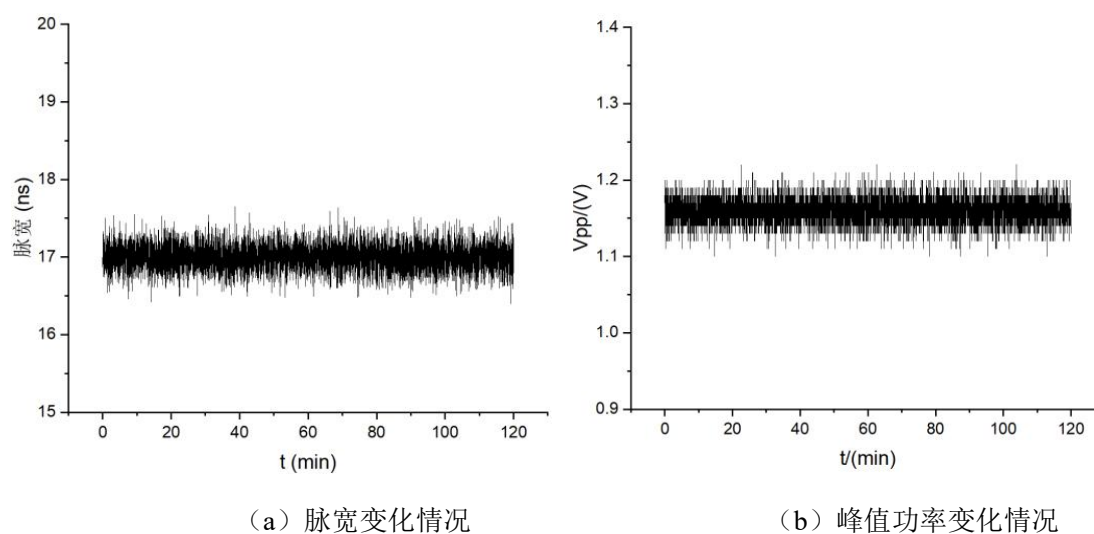


图 4-10 放大后 120min 内脉宽和峰值功率变化情况

4.2 全光纤电流传感器实验平台

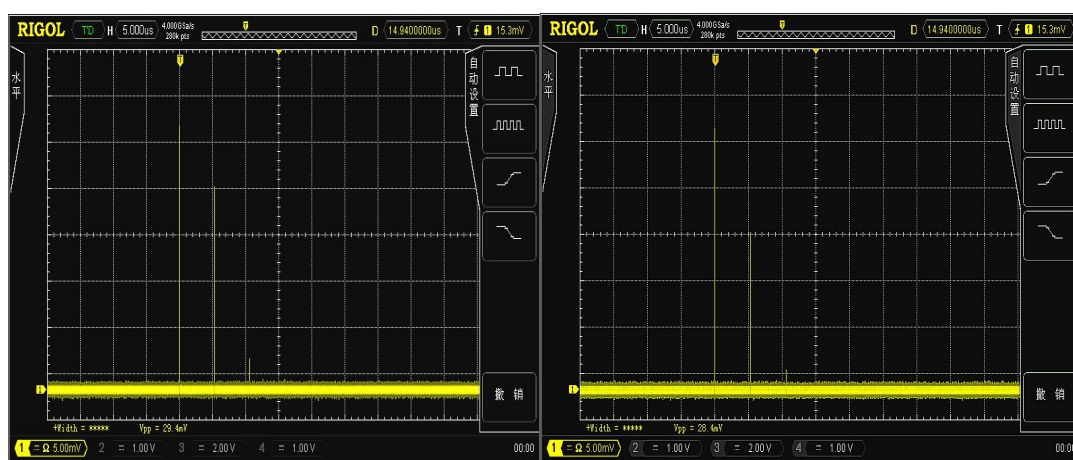
实验平台根据图 3-5 绘制的原理图搭建，如图 4-11 所示，主要有掺铒光纤放大器、示波器、起偏器、两个 2×1 耦合器（耦合比率分别为 30%：70%和 2%：98%）、一个法拉第旋光器（FPR）、两个三口环形器，一个偏振分束器（PBS-1550-900-1-FA）、一个电流源以及普通单模光纤。通电导线从光纤盘中间穿过进行缠绕，确保通电时产生均匀的磁场，匝数 N 绕制为 16 匝，考虑实验室安全问题，不宜设置太大的电流，故电流源设置电流 10A，通电之后产生的均匀磁场等效为 160A 所形成的磁场环境。系统运行后，经掺铒光纤放大器放大的脉冲光被起偏，在光纤环形腔与 FPR 和三口环形器 B 的结合下实现多次循环，每循环一次就会有一部分光信号输出，输出信号光再由偏振分束器分成两束正交光强信号，我们对两路正交偏振光分别用光电探测器光电转换，最后通过示波器读取输出光强信息。



图 4-11 基于环形结构 FPR 全光纤电流传感器实验光路搭建

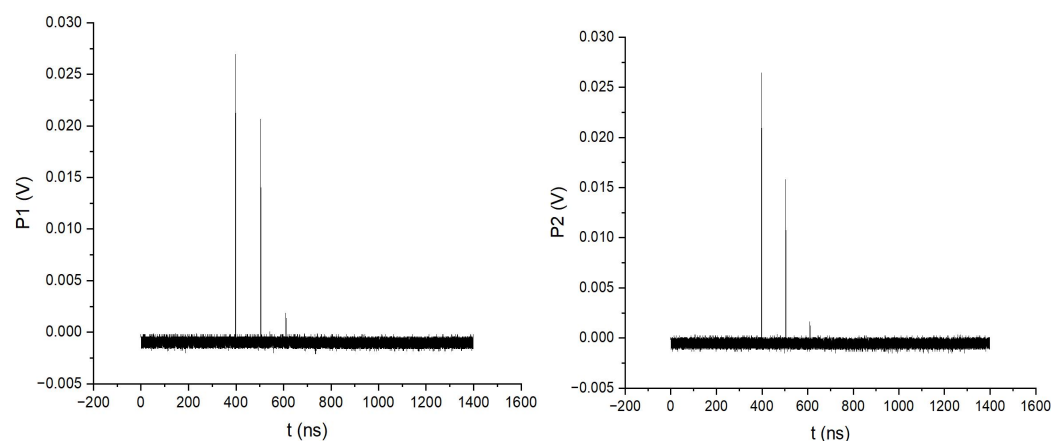
4.3 全光纤电流传感器电流检测实验

电流测量误差可以通过系统对待测电流检测的精确度大小来检验^[101-102]。实验光路搭建好之后打开电流源，发射脉冲光，分别对两路光强检测，观察示波器波形，考虑到实验室实验的安全性，电流源大小设置和输入光功率都设置较小，因此系统最终的循环次数只有三次，图 4-12 显示了偏振分束器两端口输出的偏振光光强，为了便于计算和更直观的观察光强大小，本文将示波器中的图像导入 Origin 中，4-12 (a) 和 (c) 对应偏振分束器 1 端口输出光强，4-12 (b) 和 (d) 对应偏振分束器 2 端口输出光强。



(a) 偏振分束器 1 端输出实验图

(b) 偏振分束器 2 端输出实验图



(c) 偏振分束器 1 端输出 Origin 图

(d) 偏振分束器 2 端输出 Origin 图

图 4-12 偏振分束器输出光强信号

根据环形衰荡腔的原理可知，循环次数越多，信号光上叠加的法拉第效应越多，测量精度越高，因此我们选取最后一次循环的光强为例，计算偏振度 P ，根据式 (2-22) 可得：

$$P = \frac{P_{\perp} - P_{\parallel}}{P_{\perp} + P_{\parallel}} = \frac{0.00184 - 0.00161}{0.00184 + 0.00161} = 0.066 \quad (4-2)$$

根据式（3-5）可以算出等效电流约为 158A，测量误差为-1.25%，很明显和理想值 160A 存在一定差距，主要因为实验器材传输过程中存在损耗，而且磁场环境和传感光纤所处的相对位置并不是很理想，故计算的结果和理论值并不完全相等。

4.4 全光纤电流传感器温度稳定性实验

在对常温（25℃）下的全光纤电流传感器电流检测之后，我们继续考虑不同温度下该系统的温度适应能力。我们选择根据环境温度进行实验，选取了 10℃，15℃，20℃，30℃ 四种温度的测量结果与常温 25℃ 进行比对。考虑到实验结果易受外部因素影响，且每次线路连接不够紧密也会造成结果有误，为了最大限度避免其他引入干扰造成的误差，确保实验结果的精确度和可靠性，我们分别对每种温度进行多次实验，计算偏振度和电流大小。最后将每组数据采用切尾均值法进行处理，去除极端数值，对剩余结果取平均值，这种方法作为一种改进的平均计算方式，在处理数据时更加注重数据的集中趋势，能提供更均衡和稳定的参考值。

在整理实验数据过程中，由于波形数据展现的规律不够明显，且五组波形占据篇幅太多，内容重复冗余。根据偏振度的定义可知，可以通过它获得电流灵敏度，查看法拉第旋光器使用说明书发现它只有在 25℃ 时可以精准实现偏振光的 90° 旋转，其余温度会存在 ±0.1° 的误差，因此本实验以 25℃ 的偏振度为基点，计算与每个温度的偏振度绝对值 $|\Delta P|$ ，从而得出系统电流测量误差随温度变化的规律。如图 4-13 所示，整体线性度较好，说明系统运行稳定性良好，并且随着与常温的温度差增大，偏振度增加量也越大，偏振度最小偏离 1.26%，最大偏离不超过 2.56%；图 4-14 展示了不同温度下测量的电流值，常温 25℃ 时测量误差为-1.25%，此时误差最小，10℃-30℃ 之间误差最大不超过-2.5%。很明显 $|\Delta P|$ 和电流测量值都受温度影响产生波动，我们对多组数据求均值所呈现的误差棒呈上下较大波动，并且系统误差明显大于仿真时的-1%。之

所以会出现这样的情况，主要因为有：（1）由于课题组没有恒温装置，我们选用的环境温度进行实验，实验时间较长，因此实验过程中可能会出现温度变化，造成测量结果不准。（2）实验器材众多，部分光学器材可能也随温度变化产生损耗，我们没有对此单独进行分析。（3）光路器材自身很容易因为磕碰或者误触接口导致输出光功率下降，实验前未对实验器材端口逐个检查，容易造成最后的输出结果偏小。但是经过实验验证，本章提出的结构确实可以提高全光纤电流传感器的灵敏度，不过精确度还需要进一步优化，针对实验所遇到的各项问题，课题组已计划在后续科研进程中实施针对性的优化与改良措施。

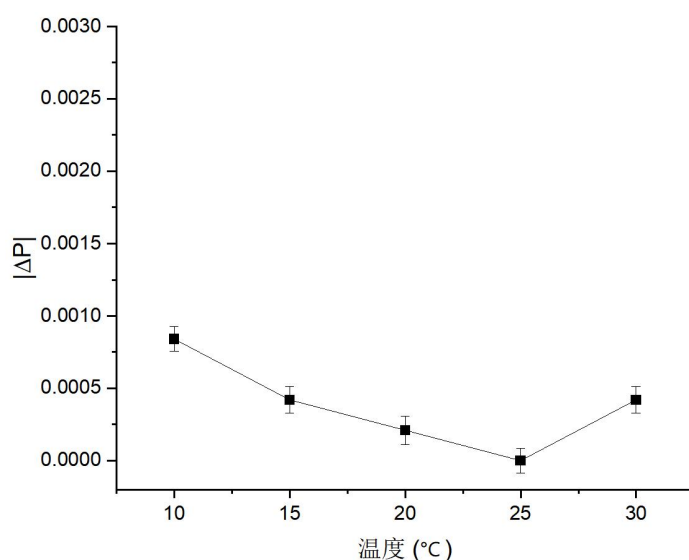


图 4-13 偏振度该变量 $|\Delta P|$ 与温度的关系

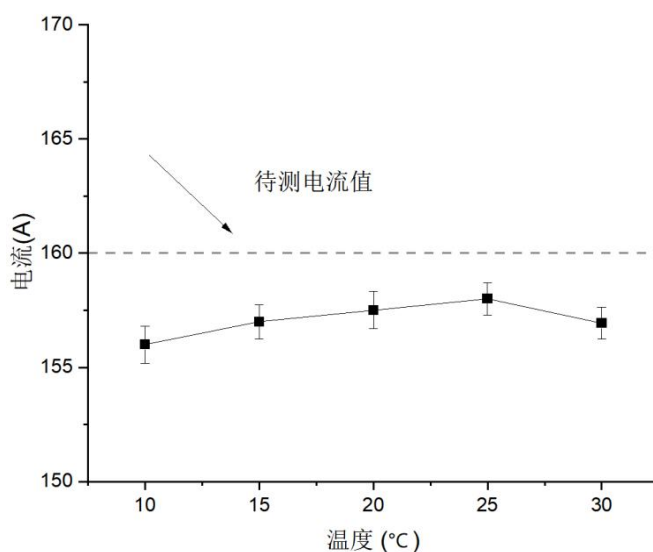


图 4-14 电流测量值随温度变化关系

4.5 本章小结

本章根据第三章提出的基于环形结构的 FPR 全光纤电流传感器搭建实验平台。并针对系统光功率损耗严重，脉冲激光器供能不足的情况，设计了掺铒光纤放大器对光源功率损耗进行预补偿，补偿后光脉冲峰值功率获得了 28.14dB 的放大，且输出信号稳定。AFOCS 温度稳定性实验过程中，我们以常温为对照组，设置了几组不同温度测量偏振度和电流值，根据实验数据分析可知，虽然电流测量精度依旧随温度产生一定误差，但误差范围较小，系统整体温度稳定性效果较好。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

作为现代工业社会的能源命脉，电力传输网络的安全运行关乎国计民生全局。在电网安全保障体系中，输电线路实时电流监测具有基础性支撑作用。自“十二五”规划至“十四五”规划期间，我国始终将智能电网建设列为关键发展目标。值得注意的是，电网智能化在提升系统效能的同时，也对电流监测等核心测量技术提出了更高要求。在此背景下，全光纤电流传感器凭借其性能安全、抗电磁干扰等先天优势，在发电机的故障检测和保护、高压输电网络故障检测、风力或太阳能发电网络计量和检测等方面有重要的应用价值，然而温度敏感性限制了全光纤电流传感器广泛应用。因此，本文对全光纤电流传感器的温度补偿方法进行了研究，主要工作具体分为以下几点

（1）考虑到光纤中费尔德常数较小，在测量电流过程中会出现法拉第效应太小不易被检测的情况，本文引进一种环形结构，利用耦合器和三口环形器与传感头组成环形腔，通过调节耦合比实现脉冲光信号在腔体内的定向循环传输。在光信号周期性往返过程中，传感光纤单元产生的法拉第效应会进行累积，这种增强机制成功弥补了光纤材料本征费尔德常数小的物理限制，架构简洁仅需常规器件组合，通过优化循环次数可线性提升电流检测灵敏度，并且实际工作中，偏振光循环往复的过程中抵消掉了温致互易圆双折射，减小了对测量法拉第效应的干扰。

（2）为了继续提高全光纤电流传感器的温度稳定性，本文引入一种 FPR 结构，系统的温度敏感性主要是因为温致双折射，根据全光纤电流传感器系统建立的线性双折射温度模型可知，温度变化越大，线性双折射产生的越多，严重时覆盖法拉第效应，影响电流灵敏度，而 FPR 结构可以使经过它的偏振光旋转 90 度，经研究分析这个过程可以抵消掉线性双折射，进而极大的提高系统的温度稳定性。另外本文对 FPR 结构分析过程中，发现该结构内部材料会受到一定的温度影响，因此建立了琼斯矩阵数学模型进行误差分析，最终结果显示

对系统误差影响可以忽略不计，也为后续该结构接入系统进行温度稳定性分析提供更有力的理论基础。

(3) 最后为了进一步验证系统温度稳定性，我们根据设计的光路搭建实验平台，并着重对光源输出这个环节进行优化：课题组设计了相应的驱动电路提高脉冲光源输出光信号的稳定性，同时设计了掺铒光纤放大器进行光损补偿，确保光信号能在环形腔中尽可能的循环多次。根据不同温度设置分组，对最后的数据采取截尾均值法处理，确保实验数据的可靠性。实验结果分析时，以常温 25℃为基准，计算偏振度和测量电流的误差，根据偏离值可以看出虽然新型全光纤电流传感器依然会产生误差，但是考虑到外部因素和光路实际损耗等问题，本文设计的全光纤电流传感器具有较好的温度稳定性。

5.2 展望

(1) 本研究着重探讨温度梯度引发的双折射效应对全光纤电流传感系统测量精度的影响机理。实际应用中，除本征双折射效应外，机械振动和光纤应变等环境因素会导致波导参数畸变，而信号处理算法的非最优化设计则会引入额外的非互易性相位漂移。上述误差的产生机理主要源于两个方面：光纤材料本征特性波动引起的结构失稳，以及外部环境参数扰动导致的传感链路敏感性偏移。若能针对上述误差机制实施系统性优化策略，电流测量灵敏度将会得到进一步提高。

(2) 温度实验过程中，设置的温度实验组较少，温度间隔较大，因此系统电流灵敏度受温度影响的连续稳定性没有很好的进行验证。另外由于实验过程没有恒温装置，我们虽然根据环境温度进行了测量，但是外部环境存在不稳定性，测量结果会有所偏离。因此，考虑在恒温条件下进行温度稳定性实验这一点将会在我们以后的研究中进一步改进和完善。

(3) 实验采用的是单模光纤虽然温度稳定性较好，但是光信号传输过程中偏振态易发生变化，实验时如果对单模光纤产生扰动，示波器波形会产生明显波动，这对实验获取准确数据增加了一定难度，因此，后续我们考虑选用保偏光纤连接光路，减小偏振态影响产生的误差。

参考文献

- [1]Wang R, Xu S, Li W, et al. Optical fiber current sensor research: review and outlook[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48: 1-22.
- [2]蒋俊贞.基于循环结构和偏振检测的光纤电流传感器研究[D].福建师范大学, 2018.
- [3]舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
- [4]徐三敏,张云飞,赵添辰,等.“双碳”目标下新型电力系统发展综述[J].水电与抽水蓄能,2022,8(6):21-25.
- [5]张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
- [6]华志刚,侯勇,吴水木,等.我国电力行业碳达峰实施路径研究[J].能源,2022(4):44-49.
- [7]刘闯闯. 基于环形衰荡腔的全光纤电流传感器研究[D].安徽工程大学, 2023.
- [8]白玫.新中国电力工业70年发展成就[J].电器工业, 2019,(12):11-19.
- [9]张勉荣.非凡十年:我国电力高质量发展成就及展望[J]. 中国电力企业管理, 2024,(16):78-81.
- [10]鲍红焉,卢运媛,刘吉成. 双碳背景下中国电力系统储能发展路径研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (06): 129-134.
- [11]张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 贺之渊. 先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7.
- [12]张栋,冯凯辉,时智勇,等.中国新能源并网发展现状与建议[J].太阳能,2024,(07):89-97.
- [13]李刚,方鸿,刘云鹏,等.新型电力系统中的大模型驱动技术:现状、机遇与挑战[J].高电压技术,2024,50(07):2864-2878.
- [14]徐敏杰,胡兆光,谭显东,等.中国中长期能源和电力需求及碳排放情景分析[J].中国电力, 2012, 45(4):7.
- [15]国家能源局电力安全监管司.全国电力事故和电力安全事件汇编(2021年)[M].

北京:中国电力出版社, 2021:57-74.

- [16]肖迁.基于分流式电流传感器的三相智能电能表设计[D].湖南大学,2011.
- [17]郭书友,李夏青.工业电流互感器频率特性分析[J].电气应用,2006,(11):29-31.
- [18]刘发胜.电流互感器的发展状况[J].电气时代,2003,(08):84-85.
- [19]李杨,余鹏,王健,等.35kV电容式电压互感器的故障分析及改进[J].电力学报,2003,(01):51-52.
- [20]刘志忠,郑雅轩.电流互感器饱和对主变限时速断的影响及处理办法[J].电力学报,2007,(01):84-86.
- [21]G.H.Moulton. Light Pulse System Shrinks High-voltage Protection Device [J].Electronics,1965,38(5):71-75.
- [22]Erickson D C. The use of fiber optics for communications, measurement and control within high voltage substations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980 (3): 1057-1065.
- [23]Malewski R. High-voltage current transformers with optical signal transmission[J]. Optical Engineering, 1981, 20(1): 54-57.
- [24]Saito S, Hamasaki J, Fujii Y, et al. Developments of the laser current transformer for extra-high voltage power transmission lines[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1967, 3(6): 266-266.
- [25]王彦文,白树斌,郑淳,等.电子式与电磁式电流互感器的差异及其应用[J].电气应用,2012,31(11):58-61.
- [26]孙振权,张文元.电子式电流互感器研发现状与应用前景[J].高压电器,2004,(05):376-378.
- [27]王少奎.电子式电流互感器的发展现状及研制难点[J].变压器,2003,(05):20-25.
- [28]赵有余.电子式电流互感器的关键技术分析[J].集成电路应用,2021, 38(11):132-133.
- [29]娄凤伟.光学电流传感器的现状与发展[J].四川水力发电, 2004(S1):90-93.
- [30]Miranda K M, Espey M G, Wink D A. A rapid, simple spectrophotometric method for simultaneous detection of nitrate and nitrite [J]. Nitric oxide, 2001, 5(1): 62-71.
- [31]Aulich H, Beck W, Douklias N, et al. Magneto-optical current transformer. 2: Components[J]. Applied Optics, 1980, 19(22): 3735-3740.
- [32]Harms H, Papp A. Magneto-optical current transformer. 3: Measurements[J]. Appl

- Opt, 1980,19(22):3741-3745.
- [33]Nicati P A, Robert P. Stabilised current sensor using Sagnac interferometer[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(8): 791.
- [34]Nicati P A, Robert P. Stabilized Sagnac Optical Fiber Current Sensor Using One Phase And Two Amplitude Modulations[C]. Optical Fiber Sensors Conference,1992.IEEE,1992:402-405.
- [35]Frosio G, Dändliker R. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor[J]. Applied Optics, 1994, 33(25): 6111-6122.
- [36]Blake J N, Tantaswadi P, Carvalho R TD. In-line Sagnac interferometer for magnetic field sensing[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,1994,2360:419-422.
- [37]Blake J, Tantaswadi P, De Carvalho R T.In-line Sagnac interferometer current sensor[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(1):116-121.
- [38]王刚.光纤电流传感器性能分析与研究[D].哈尔滨工程大学,2010:4-6.
- [39]张荣芝.基于偏振态检测的全光纤电流传感器的研制[D].北京:北京交通大学,2013.
- [40]钟小江.基于磁致伸缩效应的光纤光栅电流传感器的研究[D].北京:华北电力大学,2007:2-3.
- [41]王来龙. 新型光纤电流传感器及其应用[D].河北大学,2019.
- [42]赵玉富. 用 Rogowski 线圈测量 mA 级小电流的研究[D].华中科技大学,2005.
- [43]罗苏南,叶妙元.电子式互感器的研究进展[J].江苏电机工程,2003(03):51-54.
- [44]杨雪郁,陈国霖,吴庚生,等.光纤电流传感系统中渥拉斯顿棱镜的调整方法分析[J].光通信技术,1986,(02):28-30.
- [45]杨雪郁,廖延彪,吴庚生,等.光纤电流传感器检测系统的分析[J].中国激光,1987(05):58-62.
- [46]廖延彪,陈国霖.光纤电流传感器传感头的结构与理论[J].中国激光,1989(03):12-14.
- [47]廖延彪,陈国霖,吴庚生,等.光纤电流传感器的系统设计及试验结果[J].清华大学学报:自然科学版,1989,29(1):7.
- [48]吴庚生,钱晓刚,廖延彪,等.全光纤型光纤电流传感器长期稳定性的实验研究

- [J].压电与声光,1991,13(5):50-53.
- [49]钱景仁,李陆燊.用于电流传感器的高线性双折射高扭转光纤[J].中国科学,1989,(06):637-643.
- [50]杨汉瑞,杨燕,尚思飞,周沫.全光纤电流互感器的研究现状[J].东北电力大学学报,2017,37(03):90-96.
- [51]韦静,张浩.LTC1923在DWDM激光器温控电路中的应用[J].现代电子技术,2003,(7):75-77.
- [52]易本顺,刘延冰,阮芳,等.光学电流传感器现场运行性能分析[J].中国电机工程学报,1997,17(2):138-140.
- [53]赵洪霞,鲍吉龙.一种新颖的光纤光栅电流传感器[J].量子电子学报,2005,(06):951-954.
- [54]Wang M, Zhou W, Zhang P, et al. Optical fiber current sensor based on Bi4Ge3O12 crystal with enhanced Faraday rotation by critical angle reflections[C]//27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. SPIE, 2007, 6279: 469-477.
- [55]Zhang Hao, Qiu Yishen, Li Hui, etc. High-Current-Sensitivity All-Fiber Current Sensor Based on Fiber Loop Architecture[J]. Optics Express 2012,20(17):18591-18599.
- [56]张昊.环形结构全光纤电流传感器研究[D].福建:福建师范大学,2014.
- [57]Zhang Hao. High Temperature and Vibration Robustness All-Fiber Current Sensor with A Fiber-Loop Architecture and Reflection Scheme[J].IEEE Photonics Journal,2017,9(3):1-8.
- [58]杨玉强,杨群,葛伟,等.温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J].光学精密工程,2016,24(10):2377-2383.
- [59]孙滨超,沈涛.光纤电流传感器性能分析及环形衰荡结构设计[J].激光与光电子学进展,2017,54(01):71-81.
- [60]司马文霞,王洋,杨鸣,等.一种耦合法拉第旋光器的全光纤电流传感器[J].中国电机工程学报,2020,40(08):2670-2680.
- [61]王洋.宽频带物理补偿型全光纤电流传感器设计与性能研究[D].重庆大学,2020.
- [62]梁钰华,孙豪,朱盛强,等. $\pm 500\text{kV}$ 超高压云贵互联工程直流测量系统全光

- 纤电流互感器分析[J]. 电工技术, 2021(20): 38-40.
- [63]Wu J H, Zhang X F, Chen L, et al. Research on Measurement Technology of Ship Leakage Current by All Fiber Optic Current Sensor[J]. IEEE Access,2021,9: 160268-160276.
- [64]Lin W, Zhang C, Li L, et al. Review on Development and Applications of Fiber-Optic Sensors[J]. Fiber Optic Sensors & Systems, 2012, 16(Suppl 11):1-4.
- [65]WANG Zh,CHU F H,WU J P. Progress in all-fiber current sensor temperature compensation[J].Laser & Optoelectronics Progress, 2014,51(12) : 120005 (in Chinese) .
- [66]王红星,关远鹏,胡春潮,等.全光纤电流互感器温度误差研究[J].电力自动化设备, 2017,37(12): 200-204.
- [67]李慧,张春熹,李立京等.光纤电流互感器系统的稳定控制器设计[J].高压电器,2009,45(6):28-30.
- [68]Liu Y P, Ma L, He Z Y. Birefringence Variation Independent Fiber _Optic Curent Sensor Using Real- Time SOP Measurement[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5).
- [69]Patterson R L, Rose A H, Tang D. A fiber-optic current sensor for aerospace applications[J].Aeroapace and Electric System Magazine, IEEE. 1990, 5(12): 10-14.
- [70]Ryojiro Minato. Alcohol and alkane fuel performance for Gas Generator cycle Air Turbo Ramjet Engine[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 337-356.
- [71]贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(12): 1806-1812.
- [72]高昕星, 赵斌. 基于旋转半波片和交替电流测量的隧道超前探测光纤电流传感器灵敏度漂移补偿方法[J]. 仪表技术与传感器, 2019(11): 1-6+11.
- [73]王谦, 陆宇航, 刘勇, 等. 光学互感器在智能变电站的应用现状与发展前景[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(12): 89-95.
- [74]贺柏达, 王璇, 赵聪. 石油化工设备健康监测技术研究和发状况[J]. 化工自动化及仪表,2019, 46(08): 597-602.
- [75]Rashleigh S C, Ulrich R. Magneto-optic current sensing with birefringent fibers[J]. Applied Physics Letters, 1979, 34(11): 768-768.
- [76]Zhou D, Dong Y. Anti-interference of current sensing fiber in all-fiber current

- sensors[J]. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006002.
- [77]Rogers A J. Optical measurement of current and voltage on power systems[J]. *IEE Journal on Electric Power Applications*, 1979, 2(4): 120-124.
- [78]Saito S, Fujii Y, Yokoyama K, et al. 8C1-The laser current transformer for ehv power transmission lines[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1966, 2(8): 255-259.
- [79]娄凤伟,郑绳檀.块状光学玻璃型电流传感器的研究现状[J].*传感器技术*,2002,21 (8): 126-134.
- [80]王平,陈宇.偏振光经1/4波片后偏振态变化理论分析[J].*中国科技信息*, 2007,(22):323-325.
- [81]张荣香.基于磁敏材料的光学电流互感器的理论与应用研究[D].天津:天津大学,2015.
- [82]王英利,康梦华,任立勇,等.用于全光纤电流传感器的扭转高双折射光纤设计[J]. *红外与激光工程*,2015,44(1):170-175.
- [83]Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W, et al. Recent progress in optical current sensing techniques[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(5): 3097-3111.
- [84]Papp A, Harms H. Magneto-optical current transformer. 1: Principles[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(22): 3729-3734.
- [85]Lenner M, Frank A, Yang L, et al. Long-term reliability of fiber-optic current sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(2): 823-832.
- [86]黄瑞涛,段艳涛,石立华,等.用于测量雷电流的全光纤电流传感器[J].*光电工程*,2019,46(05): 47-53.
- [87]Morshnev S K, Gubin V P, Starostin N I, et al. Temperature evolution of interferometer visibility in a small radius fibre coil current sensor[J]. *Quantum Electronics*, 2018, 48 (3): 275-282.
- [88]王姣.大气湍流中部分相干涡旋光束的传输及衍射特性研究[D].西安理工大学.
- [89]丛薇,隋清江.光的偏振态描述及转换计算[J].*哈尔滨师范大学自然科学学报*,2007,23(2):76-77
- [90]苏景顺,马丽红.自然光反射折射偏振态的光矢量分析[J].*河北建筑工程学院学报*,2014(3):6.
- [91]Kim J, Choudhury S, DeVault C, et al. Controlling the polarization state of light with plasmonic metal oxide metasurface[J]. *ACS nano*, 2016, 10(10): 9326-9333.

- [92]廖延彪.偏振光学[M].北京:科学出版社,2003:163-268.
- [93]赵凯华. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社. 2004.
- [94]林森.基于法拉第磁光效应的光学电流传感器特性研究[D].重庆大学,2010.
- [95]Silva R M, Martins H, Nascimento I, et al. Optical current sensors for high power systems: a review[J]. Applied sciences, 2012, 2(3): 602-628.
- [96]Foschini G J, Poole C D. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 9(11): 1439-1456.
- [97]母国光,战元龄,光学[M],北京:高等教育出版社,2009,347-3507.
- [98]Kim B Y, Sang S C. Backscattering measurement of bending-induced birefringence in single mode fibres[J]. Electronics Letters, 2007, 17 (5): 193-194.
- [99]尚玉峰,师钦贤,杨一粟,等.基于光纤马赫-曾德尔任意偏振高斯光束干涉研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(21):217-226.
- [100]樊博,张明虎,黄吉涛,周媛奉,胡婷婷. 环境温度和线性双折射对光纤电流互感器的性能分析[J]. 科技通报, 2019, 35 (03): 109-112.
- [101]阎永志.光纤耦合器的开发现状[J].压电与声光,1995,(03): 12-16.
- [102]孙圣和,王廷云.光纤测量与传感技术[M].哈尔滨工业大学出版社,2000.

攻读硕士学位期间主要研究成果

- [1] Zhu X, Zhao X, Liu X, et al. Temperature stability analysis of the all-fiber current sensor with a loop structure[J]. Laser Physics, 2024, 34(12): 125103.

致 谢

白驹过隙间，研究生求学历程已至终章。这段交织着挑战与成长的学术征程中，无数温暖援手为我托起前行的风帆。在此，谨以赤诚之心向所有施以援手的师友致以崇高敬意。

承蒙朱学华副教授倾囊相授，老师以深厚的学术造诣与缜密的科研思维，从课题甄选、范式构建到实验论证、成果凝练，始终以明灯之姿指引方向。尤难忘怀攻坚时刻，您以庖丁解牛般的学术洞察助我破局重生，这份臻于至善的治学精神已镌刻为毕生治研的圭臬。

同门手足的戮力同心更显弥足珍贵。实践探索中共享的宝贵经验，思维激荡时迸发的智慧星火，使我在协同攻关中深谙团队真义。那些数据海里共搏风浪的晨昏，终将凝成学术生涯最晶莹的浪花。

至亲挚友的包容与勉励，始终是支撑我披荆斩棘的底气。困顿时注入信心的温情守候，迷途时校正航向的睿智箴言，令这段焚膏继晷的科研岁月始终浸润着人间暖意。

最后感恩母校构筑的优质学术平台与完备资源体系，专业淬炼与人文涵养并重的育人沃土，不仅铸就了扎实的学术根基，更孕育出受益终身的思维品格。这段知行并进的求学岁月，必将成为生命长卷中最浓墨重彩的篇章。

谨以此致谢，献给所有关心、帮助过我的人，未来的路上，我将继续努力不负众望。

尚德敏学 唯实惟新

