

基于光偏振态技术的 GBO 优化控制方法研究

魏 勇¹, 刘文昭¹, 张家驹¹, 余立锴², 李朝峰²

(1. 国网河北省电力有限公司 信息通信分公司, 石家庄 050000;

2. 新能量科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 输电线塔光纤在偏振态色散状态下需要进行光偏振态测量和控制, 但光偏振控制器出现复位重置问题时无法有效控制光偏振态, 为了解决这一问题, 研究基于光偏振态技术的 GBO 优化控制方法; 采用四通道斯托克斯测量技术测量光纤偏振态, 对光波偏振度、偏振角和椭圆率等偏振状态进行了全面测量; 优化设计延迟量可变光偏振态控制器, 调整光偏振方向或延迟, 解决外部压力变化下的复位重置问题; 融合偏振控制器与偏振分束器, 应用 GBO 算法和反馈控制闭环, 实现光纤偏振态优化控制; 测试结果表明, 该方法使用的 GBO 算法在迭代次数达到 400 次即优化成功; 实际应用该方法进行光偏振态优化控制后, BER 迅速降至 1% 左右后维持平稳, 有效减小了输电线塔光纤偏振态的波动。

关键词: 光纤偏振态测量; 偏振控制器; 偏振分束器; GBO 算法; 输电线塔; 光纤通信稳定优化控制

Research on GBO Optimization Control Method Based on Optical Polarization State Technology

WEI Yong¹, LIU Wenzhao¹, ZHANG Jiaju¹, YU Likai², LI Zhaofeng²

(1. Information & Telecommunication Branch, State Grid Hebei Electric Power Company Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

2. New Energy Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: The optical polarization state measurement and control of transmission tower optical fibers are required in the state of polarization dispersion, but an optical polarization controller is prone to ineffective control of optical polarization states during reset. To solve this problem, a GBO optimization control method based on optical polarization state technology is present. Four channel Stokes measurement technology is used to measure the polarization states of optical fibers, comprehensively measure the polarization degree, polarization angle, ellipticity, and other polarization states of light waves, optimize the design of a variable delay optical polarization state controller, adjust the direction or delay of optical polarization, and solve the reset under external pressure changes; Integrating a polarization controller and a polarization beam splitter, applying the GBO algorithm and feedback control loop to achieve fiber polarization state optimization control. The test results show that the GBO algorithm is optimized successfully with the number of iterations reaching up to 400; After applying this method to optimize the control of optical polarization states, the BER rapidly decrease to about 1% and then remains stable, effectively reducing the fluctuations of large polarization states in transmission line towers.

Keywords: fiber polarization state measurement; polarization controller; polarization beam splitter; GBO algorithm; transmission line tower; stable optimization control of fiber optic communication

0 引言

光纤通信技术以其卓越的绝缘性、强大的抗干扰能力和高通信容量, 在输电线塔通信系统中展现出巨大潜

力^[1-3]。然而, 将光纤通信技术应用于输电线塔等复杂环境中, 面临着诸多挑战。输电线塔所处的地理位置多样, 环境恶劣, 如强风、雷电、温度变化等自然因素会使输电线塔光纤在偏振态色散状态下的偏振度波动较

收稿日期:2024-11-18; 修回日期:2024-12-31。

基金项目:国网河北省电力公司科技项目(kj2024-015)。

作者简介:魏 勇(1977-), 男, 硕士, 正高级工程师。

通讯作者:余立锴(1997-), 男, 大学专科。

引用格式:魏 勇, 刘文昭, 张家驹, 等. 基于光偏振态技术的 GBO 优化控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12): 105-110, 160.

大, 对光纤通信系统的稳定性产生影响^[4]。电力系统的实时性要求高, 任何通信中断或延迟都可能引发电网故障, 影响供电质量和安全^[5]。因此有必要研究光偏振态测量和控制, 降低光偏振态波动, 提升光纤通信在复杂环境下的可靠性和稳定性。

当前的光偏振态控制研究聚焦于优化光信号源、光纤传输性能以及光信号处理技术等。其中文献 [6] 算法有效规避了局部最优陷阱, 但实际输电线塔周围电磁场干扰较大, 多种策略无法通过单一通道解决相关问题。文献 [7] 从 3 个方面探讨了抑制偏振模色散的多种策略, 并对各策略的实际应用潜力进行了深入的分析。但存在偏振控制器复位重置问题, 导致光通信偏振度数值波动较大。文献 [8] 设计了一种新的偏振控制技术, 能精确校正光信号因光纤链路非理想特性而发生的偏振态偏移。然而在外部压力变化的影响下, 调节偏振控制器的相位延迟参数适应性较差。文献 [9] 提出的硼苯结构动态控制反射光的偏振态的设计, 有助于提高量子通信领域内的通信速度和效率。然而硼苯材料在复杂多变的环境条件下, 稳定性和复杂度存在矛盾。文献 [10] 提出了一种改进抑制偏振模色散的算法, 以提升光纤通信系统的传输速率, 但此算法易被幅度误差影响。文献 [11] 的基于扫频激光干涉原理的分布式光纤偏振测试技术, 能够精确获取保偏光纤, 但会受到光偏振态产生的波动的影响。

故为了加强输电线塔光纤在偏振态色散状态下对光偏振态测量和控制, 提出基于光偏振态技术的 GBO 优化控制方法研究。通过四通道斯托克斯测量技术测量光纤的偏振态, 能够响应多类型外界扰动以补偿色散; 再融合偏振控制器与偏振分束器, 设计延迟量可变偏振控制器, 加强光偏振态技术的 GBO 优化控制。

1 光偏振态 GBO 优化控制方法

本文研究的光偏振态技术包括光偏振态四通道斯托克斯测量技术和光纤偏振态控制技术, 利用光偏振态技术结合 GBO 算法实现电塔光纤通信稳定优化控制。

1.1 光偏振态四通道斯托克斯测量技术

输电线塔光纤偏振态发生色散, 引起严重的信号失真。通过测量光纤的偏振态, 可以补偿色散, 解决信号失真问题。但仅使用常规的单通道测量技术, 无法响应多类型外界扰动, 可能会导致光纤偏振态测量结果偏离真实值。但是通过 4 个通道同时测量, 不同通道可能对这种扰动有不同的响应。因此本文创新性地采用四通道斯托克斯参量测量光纤偏振态技术, 综合分析 4 个通道的斯托克斯参量测量结果, 解决光波偏振度、偏振角和椭圆率等光偏振状态全面测量问题。

光纤偏振态四通道斯托克斯测量技术设计的具体操

作步骤如下:

1) 使用 1×4 光纤耦合器将待测光分为均等的四束。选用 SMF-28 型多模光纤, 对其耦合区段执行一次涂覆层剥离操作, 清洁后轻微扭转无涂覆光纤段, 使用光纤熔融拉锥机制作耦合器。利用 DR-1 型大芯径光纤熔接器与 ZWT-3A 型自动推进微调架对光纤拉制而成的耦合器与另外 4 根光纤实施熔接^[12]。

2) 优化设计四通道探测器。利用 4 个独立的探测器分别实施各光束强度的测量, 其中第一个探测器负责测量总光强, 第二、三、四个探测器负责测量 3 个检偏器的输出, 如图 1 所示^[13]。

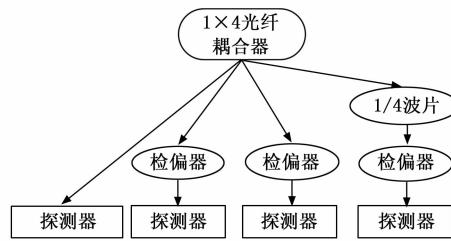


图 1 探测器测量结构

图 1 中, 探测器由光电二极管、前置放大电路、后级放大电路、稳压芯片及电池构成。其中稳压芯片包括 -5 V 稳压芯片 (MAX1735) 与 $+5\text{ V}$ 稳压芯片 (MAX1659), 电源为镍氢充电电池, 电源经由两个稳压芯片输入至前置放大电路^[12]。本文技术对探测器的优化设计在于创新性地通过光电二极管将偏振光光强直接转化为电流, 接着输入至前置放大电路与后级放大电路实施信号放大处理, 解决探测器信号较弱, 影响后续测量的问题。其中前置放大电路中采用的放大器件为集成运算放大器 OPA2686, 后级放大电路采用的放大器件为射频放大器 MAX2611。选用镀金属膜光纤偏振器, 为了让 4 个检偏器都能够检测到不同方向的偏振光信号的同时, 不互相干扰, 本文创新性地优化调整检偏器的方向: 将 3 个检偏器的起偏方向设置在同一平面内, 将第一个检偏器与第三个检偏器设置为相同起偏方向 (垂直方向), 并将第二个检偏器设置为与该设置为成 45° 的起偏方向。在第三个检偏器前设置一个光纤 $1/4$ 波片, 并将其旋转 45° , 使 4 个检偏器都能够探测到圆偏振光。

3) 对 4 个探测器的测量结果实施运算获得待测光的斯托克斯参量。假设 3 个检偏器均为理想状态, 确保检偏器的偏振主轴与测量的参照系重合, 获得第一个检偏器 Q_1 的 Mueller 矩阵:

$$\zeta_{Q_1}(0^\circ) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

第二个检偏器 Q_2 的 Mueller 矩阵如下:

$$\zeta_{Q_1}(45^\circ) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

通过下式计算光纤 1/4 波片在 45° 旋转后的附加矩阵:

$$\zeta(45^\circ) =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2 \times 45^\circ)^2 & \sin(2 \times 45^\circ) & \sin(2 \times 45^\circ) \\ 0 & \sin(2 \times 45^\circ) & \cos(2 \times 45^\circ) & 0 \\ 0 & \cos(2 \times 45^\circ) & \sin(2 \times 45^\circ)^2 & -\cos(2 \times 45^\circ) \\ 0 & -\sin(2 \times 45^\circ) & \cos(2 \times 45^\circ) & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

依据光纤 1/4 波片在 45° 旋转后的附加矩阵计算第三个检偏器 Q_3 的 Mueller 矩阵:

$$\zeta_{Q_3}(45^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \zeta_{Q_1}(0^\circ) \quad (4)$$

设待测光在经过 1×4 光纤耦合器后, 其偏振态的斯托克斯矢量为 $Z_{in} = [Z_0, Z_1, Z_2, Z_3]^t$, 则检偏器 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 输出的偏振态的斯托克斯矢量如下:

$$Z_{out1} = \zeta_{Q_1}(0^\circ)Z_{in} = \frac{1}{2}(Z_0 + Z_1, Z_0 + Z_1, 0, 0)^t \quad (5)$$

$$Z_{out2} = \zeta_{Q_2}(45^\circ)Z_{in} = \frac{1}{2}(Z_0 + Z_2, Z_0 + Z_2, 0, 0)^t \quad (6)$$

$$Z_{out3} = \zeta_{Q_3}(0^\circ)Z_{in} = \frac{1}{2}(Z_0 + Z_3, Z_0 + Z_3, 0, 0)^t \quad (7)$$

式中, Z_{in} 为第一个探测器的输入^[14]。

由于测量只能获得光的功率值, 因此获得的值仅为 Z_{outi} ($i=1, 2, 3$) 的第一项, 也就是光强, 具体如下:

$$J_2 = \frac{Z_0 + Z_1}{2} \quad (8)$$

$$J_3 = \frac{Z_0 + Z_2}{2} \quad (9)$$

$$J_4 = \frac{Z_0 + Z_3}{2} \quad (10)$$

已知第一个探测器测得的光强值为 $J_1 = Z_0$, 将其代入公式 (8) ~ (9) 完成计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_0 = J_1 \\ Z_1 = \frac{J_2 - J_1}{2} \\ Z_2 = \frac{J_3 - J_1}{2} \\ Z_3 = \frac{J_4 - J_1}{2} \end{array} \right. \quad (11)$$

4) 通过上述计算获得待测光的斯托克斯参量。当光纤发生弯曲时, 光的偏振态会发生改变, 这种改变会

体现在斯托克斯参量的各个分量上。通过测量 4 个通道的斯托克斯参量, 可以精确地捕捉到这种偏振态的变化, 从而为光纤通信稳定优化控制提供准确的数据支持。

1.2 融合偏振控制器与偏振分束器的光偏振态控制

输电线塔的环境复杂多变, 存在电磁场干扰、外部施加压力变化等情况, 光偏振态控制器容易出现复位重置问题, 影响光纤偏振态控制效果。为了在这种复杂环境下对上节多通道同时测量的光纤偏振态进行更精准的控制, 本文创新性优化设计偏振控制器与偏振分束器, 并将两者连接融合形成反馈控制闭环, 解决光偏振态控制器的复位重置问题, 确保光信号的偏振态始终保持在最佳状态, 实现输电线塔光纤通信稳定优化控制。

为了在通信控制中, 适应外部施加压力变化, 解决光纤偏振态控制器的复位重置问题, 对偏振控制器进行优化设计, 选用 PTBS200 系列压电陶瓷致动器作为光纤挤压器。其对光通信偏振的响应速度快, 达到微秒量级, 挤压力度大、分辨率高、体积小, 能够解决相位延迟下的偏振态控制问题。应用螺旋测微器按照方位角放置 PTBS200 系列压电陶瓷致动器, 设计基于光纤挤压器的延迟量可变偏振控制器, 具体如图 2 所示。

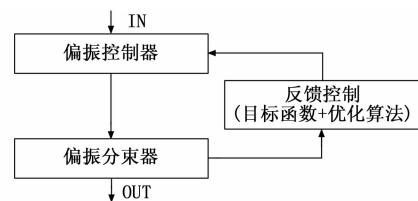


图 2 延迟量可变偏振控制器设计

图 2 中, 使用光纤挤压器挤压光纤, 使光纤的纤芯区域发生形变, 形成椭圆状结构^[15]。沿着椭圆长轴方向挤压, 使光的传播速度受到抑制, 形成“慢轴”; 相反, 沿椭圆短轴方向, 使光传播加速, 形成“快轴”, 通过这种速度差异引发相位延迟, 控制上节测量的偏振态。

为了降低电磁场干扰, 创新性地将相邻光纤挤压器的安装角度分别相错 45°, 以确保相邻光纤挤压器的“快慢轴”分别对准邦加球赤道平面上的两个相互垂直的基准轴, 利用延迟量可变偏振控制器全面控制光的偏振转换:

$$N_{PC} = N_{\vartheta=45^\circ} N_{\vartheta=0^\circ} N_{\vartheta=45^\circ} N_{\vartheta=0^\circ} \quad (12)$$

式中, $N_{\vartheta=45^\circ}$ 为方位角 ϑ 为 45° 时光纤挤压器对光纤的挤压也就是对 X-Y 坐标轴的旋转; $N_{\vartheta=0^\circ}$ 为方位角 ϑ 为 0° 时光纤挤压器对光纤的挤压^[16]。

其中: $N_{\vartheta=45^\circ}$ 与 $N_{\vartheta=0^\circ}$ 通过琼斯矩阵来表示:

$$N_{\vartheta=45^\circ} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) & i\sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \\ i\sin\left(\frac{\omega}{2}\right) & \cos\left(\frac{\omega}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{N}_{\vartheta=0^\circ} = \begin{bmatrix} e^{i\vartheta/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\vartheta/2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, ϑ 为光纤挤压器带来的相位延迟量; i 为虚数单位^[17-18]。

为了进一步解决外部施加压力变化对光纤偏振态控制效果的不利影响, 将延迟量可变偏振控制器围绕两个基准轴动态旋转, 输入光的偏振状态, 实现邦加球表面对偏振信号的全面覆盖, 从任意初始偏振态灵活转换至任意期望的输出偏振态, 从而适应外部压力变化。

应用以上优化设计后的延迟量可变偏振控制器, 调整光纤中光的偏振方向或延迟, 可以动态补偿光纤传输过程中因各种因素(如温度、应力等)引起的偏振态变化。

为了解决输电线塔环境电磁场干扰对通信稳定控制的影响, 将优化设计的延迟量可变偏振控制器连接上偏振分束器。利用偏振分束器将夹杂不同偏振态的光信号分离, 对特定偏振态的精确控制和选择, 实时监测光信号的偏振态, 并根据测量结果自动调整偏振控制器的参数, 控制光通信偏振度数值, 以保持光信号的偏振态稳定。

偏振分束器的具体操作步骤如下: 首先, 利用偏振分束器将偏振控制器的输出分为偏振态正交的两束光, 分别为垂直线偏光与水平线偏光, 使用垂直线偏光为最终输出光。水平线偏光经过光电转换后作为反馈控制的反馈信号, 可反映出此刻输入光的偏振态信息。其次, 利用光电转换电路获取电压控制值, 通过驱动电路输入至偏振控制器。光电转换电路的设计如下: 由 I/V 转换电路与光电探测器构成, 选用的光电探测器为 InGaAs PIN 型光电探测器, 选用的 I/V 转换电路为 AD8304 对数检波器。驱动电路的设计如下: 选择低噪声、高稳定性的运算放大器-OPA2277 实现信号放大, 驱动器件选用数字-模拟转换器。最后, 为了避免偏振控制器复位重置, 引入最后一个光纤挤压器, 仅需控制前 3 个光纤挤压器的电压即可实现光偏振态稳定输出。由此完成光纤偏振态控制器与偏振分束器优化融合的硬件设计, 在此基础上, 实现电塔光纤通信稳定优化控制。

1.3 反馈闭环下 GBO 优化控制

基于上节优化设计的偏振控制器与偏振分束器连接硬件组, 形成反馈控制闭环, 应用 GBO 算法优化求解偏振态目标函数, 确保光信号的偏振态始终保持在最佳状态, 解决偏振度波动问题。

构建输电线塔光纤通信偏振态稳定优化目标函数:

$$L = \underset{U_{1A}, U_{1C}, U_{2A}, U_{2C}, U_{3A}, U_{3C}}{\text{MAX}} [(Z_1^* - Z_1)^2, (Z_2^* - Z_2)^2, (Z_3^* - Z_3)^2] \quad (15)$$

式中, L 为构建的偏振态稳定输出目标函数; $U_{1A}, U_{1C}, U_{2A}, U_{2C}, U_{3A}, U_{3C}$ 为前 3 个光纤挤压器的反馈电压; (Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*) 为理想偏振态^[19-21]。

利用 GBO 算法实施目标函数的优化求解, 实现输电线塔光纤通信稳定优化, 具体流程如下:

1) 首先以向量为搜索代理, 生成偏振态稳定输出目标函数 L 求解的初始向量, 具体如下式:

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{Y}_{\min} + \text{rand}(0,1) \times (\mathbf{Y}_{\max} - \mathbf{Y}_{\min}) \quad (16)$$

式中, \mathbf{Y}_{\min} 为目标函数求解时搜索范围的下边界; \mathbf{Y}_n 为搜索空间 L 中随机产生的初始向量; \mathbf{Y}_{\max} 为目标函数求解时搜索范围的上边界; $\text{rand}(0, 1)$ 为 0~1 范围内的随机数。

2) 设置算法参数, 将向量更新值作为目标函数 L 求解的种群适应度值, 种群适应度值直接反映了该个体在解决偏振态稳定输出问题时的性能:

$$\mathbf{Y}_n^m = \mathbf{Y}_n^m - \text{GSR} + \text{DM} \quad (17)$$

式中, \mathbf{Y}_n^m 为第 m 次迭代后的向量; GSR 为算法的主要搜索机制—梯度搜索规则; DM 为局部搜索, 能够提升 GBO 算法的收敛精度。

其中每一个搜索向量均依据梯度搜索规则实施搜索:

$$\text{GSR} = \text{randn} \times \zeta_1 \times \frac{2\Delta y \times Y_n}{\beta P_n - \beta Q_n + \psi} \quad (18)$$

式中, randn 是指一个服从正太分布的随机数; ζ_1 为勘探和开发过程的平衡参数; ψ 为 [0, 0.1] 范围内一个很小的常数; Δy 为随机性加强参数; P_n, Q_n 为梯度方向构造参数; β 为自适应系数^[22]。

DM 是局部搜索, 其表达式如下:

$$\text{DM} = \text{randn} \times \zeta_2 \times Y_n \quad (19)$$

式中, ζ_2 为向量搜索范围的调节因子。

依据适应度排序寻找最优向量(向量更新值最大), 最优向量即为当前找到的最佳电压组合。

通过迭代上述算法求解过程实现对入射光偏振态的优化控制, 获得的最终偏振分束器输出光纤稳态结果:

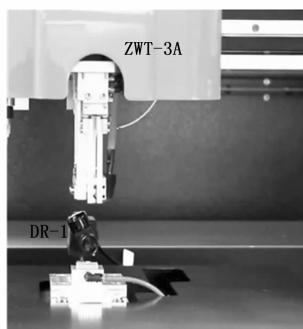
$$\begin{cases} W_x = \frac{1}{2} DMW (1 + \cos 2\kappa \cos 2\vartheta) \\ W_y = \frac{1}{2} Y_n DMW (1 - \cos 2\kappa \cos 2\vartheta) \end{cases} \quad (20)$$

式中, W_x 为水平线偏光; W_y 为垂直线偏光; κ 为光的椭圆度。

由此应用延迟量可变偏振控制器, 调整光纤外力变化下的偏振态变化; 同时使用偏振分束器, 将磁场干扰下的偏振态光信号分离, 实时监测光信号的关键偏振态, 并根据测量结果自动调整偏振控制器的参数; 最后, 通过算法优化求解控制光通信偏振度数值, 以保持输电线塔通信光信号的偏振态稳定输出。

2 实验

以某输电线塔为实验对象, 其 1×4 光纤耦合器的熔接过程如图 3 所示。

图 3 1×4 光纤耦合器的熔接过程

2.1 光偏振态四通道斯托克斯测量结果

四通道检测到的光偏振态的相对值如表 1 所示。

表 1 不同通道检测到的光强的相对值

通道	检测值/mV	通道	检测值/mV
第一个通道(J_1)	2.8×20	第三个通道(J_3)	1.5×20
第二个通道(J_2)	4.1×20	第四个通道(J_4)	1.2×20

将表 1 数据代入式(11)并实施归一化处理, 获得下式:

$$\begin{cases} Z_0 = 1.00 \\ Z_1 = 0.96 \\ Z_2 = 0.04 \\ Z_3 = -0.04 \end{cases} \quad (21)$$

由表 1 可知, 本文方法可以有效地进行光波偏振度、偏振角、椭圆率及总光强等偏振状态的全面测量。

2.2 偏振控制器与偏振分束器的设计结果

在光纤偏振态测量方案的基础上, 设计偏振控制器与偏振分束器, 并连接偏振控制器与偏振分束器, 形成反馈控制闭环, 实现输电线塔光纤通信稳定优化控制。

设计的偏振控制器中相邻的光纤挤压器没有在同一水平线上复位, 光辐射度没有出现复位问题。偏振控制器设计的逻辑如图 4 所示。

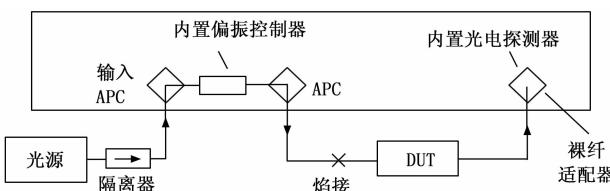


图 4 偏振控制器设计逻辑图

设计的偏振分束器效果如图 5 所示。

由图 5 可知, 本文设计的偏振分束器射出的水平和竖直两束光未出现复位, 说明其有效解决了复位重置问题。

2.3 GBO 算法优化效果测试

构建偏振态稳定输出目标函数后, 通过 GBO 算法实施目标函数的求解, 实现输电线塔光纤通信偏振稳定优化控制。在该步骤中, 参数设置情况如下: Y_{\min} 为 0 V; Y_{\max} 为 230 V; 初始种群大小为 100; 步长为 1; ζ_1

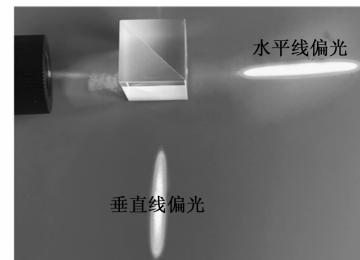


图 5 偏振分束器效果

为 0.5; ϕ 为 1×10^{-6} ; Δy 为 1.0; ζ_2 为 0.95。

Huber 损失与求解误差直接相关, 求解误差越大, Huber 损失越大, 优化效果越差。在该项测试中, 将另外 3 种元启发式算法—SCA、WOA、DE 作为对比方法, 固定波长为 1550 nm, 长度为 10 km 的单模光纤作为传输介质, 采样频率设置为 10 kHz, 控制 SCA、WOA、DE 方法应用过程的波片角度为 30°、75° 和 120°, 根据应力大小与偏振态参数变化之间的关系, 动态调整斯托克斯参数, 输出功率设置为 5 mW。

针对 Huber 损失测试不同算法的优化效果, 测试结果如表 2 所示。

表 2 算法优化 Huber 损失测试结果

迭代次数	GBO 算法 Huber 损失	SCA 算法 Huber 损失	WOA 算法 Huber 损失	DE 算法 Huber 损失
100	0.052 3	0.068 9	0.071 2	0.065 4
200	0.031 4	0.045 6	0.050 1	0.042 3
300	0.020 1	0.032 1	0.038 7	0.031 2
400	0.012 3	0.025 4	0.031 2	0.024 5
500	0.015 6	0.021 0	0.027 8	0.020 1

由表 2 可知, 相比 3 种对比方法 SCA、WOA、DE, 迭代次数达到 400 次即达到最佳的 Huber 损失, 其运行效率也高于 3 种对比方法 SCA、WOA、DE, 且利用 GBO 算法求解目标函数 L 的 Huber 损失明显更低, 说明 GBO 算法的优化效果较优。这是由于 GBO 算法实现了全局搜索与局部搜索的平衡。梯度搜索规则中的勘探和开发过程平衡参数允许算法在探索新解和开发已知好解之间灵活切换; 所设置的自适应系数和随机性加强参数使得算法在搜索过程中具有一定的自适应性和随机性, 这有助于算法跳出局部最优解, 从而找到全局最优解。

2.4 光偏振态优化控制效果

分析输电线塔光偏振态优化控制效果, 具体测试项目为偏振度(用于描述光波中偏振光成分所占的比例), 测试结果如图 6 所示。

由图 6 数据可知, 光通信的偏振度数值较低且其波动变得平稳, 说明通过设计方法能够实现光纤通信稳定优化控制, 这是由于设计方法设计了多通道斯托克斯参数测量方案, 一个通道可以采用特殊的电磁屏蔽技术来减少电磁场干扰对测量的影响, 另一个通道可以采用外

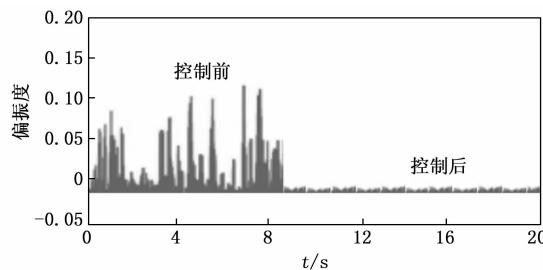


图 6 偏振态稳定优化控制效果

部施加压力控制算法来降低外部施加压力变化对测量结果的影响，通过综合 4 个通道的测量结果，可以在复杂环境下实现稳定的光纤偏振态测量，全面且精确地获取光信号的偏振态信息。

分析输电线塔光纤通信的误码率 (BER, bit error rate)。在不同迭代次数下开展测试，在测试中，将在光纤通信中的偏振稳定系统、偏振复用系统中解复用端的偏振控制算法以及通过硼苯结构动态控制反射光偏振态的方法作为对比测试方法，分别用方法①、方法②、方法③来表示，获取的对比测试效果如图 7 所示。

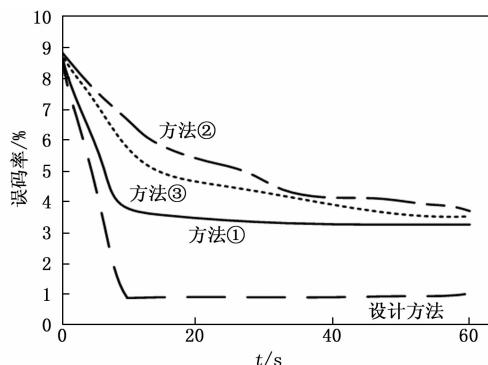


图 7 对比测试效果

由图 7 数据可知，设计方法的误码率迅速降至 1% 左右后维持平稳，而方法①的误码率迅速降低至 3.5% 左右后维持平稳，方法②、方法③的误码率降低速度则较慢。整体来说，设计方法的误码率最低，这是由于设计方法采用了四通道斯托克斯参量测量方案，这种多通道并行测量的方式能够更全面地捕获光纤中偏振态的动态变化情况。结合偏振控制器与偏振分束器，并通过控制算法形成反馈控制闭环，迅速响应光纤中偏振态的波动，不仅提高了控制器的适应性和稳定性，还简化了控制器的复杂度。

3 结束语

本研究提出了一种基于光偏振态技术的 GBO 优化控制方法。通过多通道测量、GBO 优化控制等手段，快速调整偏振控制器的参数，实现了对光偏振态输出的稳定优化控制，显著提高了光通信的偏振态稳定性和可靠性，不仅增强了光纤通信在复杂环境下的抗干扰能力，还结合偏振控制器的精确调控，显著降低了误码

率，能够在复杂多变的光纤通信环境中，为光纤通信系统的稳定运行提供强有力的支持。

未来，随着算法与硬件技术的不断进步，这一控制方法有望进一步被提升性能，为构建更加高效、稳定的电力与通信基础设施奠定坚实基础。所取得的研究成果不仅是对当前技术挑战的积极响应，也是对未来智能化通信网络发展的一次有益探索。

参考文献：

- [1] LI L M, HE L, WU X, et al. Wideband cryogenic amplifier for a superconducting nanowire single-photon detector [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 22 (12): 1666–1676.
- [2] SONG J W, JIANG Y, SONG X Y, et al. User-transformer relation identification based on power balance model and adaptive AFSA [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2195 (1): 1–8.
- [3] ZHANG D W, LI M, CHEN C F. Axially chiral materials exhibiting blue-emissive ultralong organic phosphorescence and intense circularly polarized luminescence [J]. Science China Materials, 2023, 66 (10): 4030–4036.
- [4] WEI Y N, JIANG Y, SONG J W, et al. Load forecasting of battery electric vehicle charging station based on GA-Prophet-LSTM [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2592 (1): 1–10.
- [5] YUAN S, FENG Z, QIU B C, et al. Silicon carbide nanowire-based multifunctional and efficient visual synaptic devices for wireless transmission and neural network computing [J]. Science China Materials, 2023, 66 (8): 3238–3250.
- [6] 王思尧, 张阳安, 袁学光, 等. 一种在光纤通信中的偏振稳定系统设计与实现 [J]. 通信技术, 2020, 53 (4): 843–847.
- [7] 安亚飞, 叶会英. 抑制光纤通信系统偏振模色散的措施 [J]. 光学与光电技术, 2004, 2 (4): 8–10.
- [8] 王铁城, 刘铁根, 万木森, 等. 偏振复用系统中解复用端的偏振控制算法 [J]. 光学与光电技术, 2008, 6 (6): 9–12.
- [9] WANG X Y, LIN Q, WANG L L, et al. Dynamic control of polarization conversion based on borophene nanostructures in optical communication bands [M]. IOP Publishing Ltd., 2024.
- [10] 钟昆, 李丹, 王宝江, 等. 基于提升光纤通信系统速率边界的恒模算法 [J]. 光通信技术, 2022, 46 (5): 55–58.
- [11] 喻张俊, 杨军, 邹晨, 等. 光频域分布式光学偏振测试技术及应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (1): 123–136.

(下转第 160 页)