

用于特高压换流阀在线监测系统的集成波导器件

张俊¹, 韩傲迪², 鲁亚琦², 李潇飞², 李天琦¹, 栾洪洲¹, 袁创²,
李金生², 张锦龙^{2*}

(1. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200; 2. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475001)

摘要：为应对高压直流输电系统中晶闸管热积累引发的失效风险,并解决极端工况下通信链路异常导致的监测中断问题,文章设计了一套基于集成波导芯片的在线监测系统。该系统集成了 4×16 多模干涉耦合器(MMI)以实现16通道高密度集成,采用波导光栅传感器(WBG)完成高精度温度测量,并结合光开关构建多层级冗余链路。实验结果表明,系统对晶闸管温度的测量精度达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$;当主通道发生故障时,可在20 ms内快速切换至备用线路,有效消除了传统方案因关键节点失效引发的系统性监测中断问题,提升了系统的可靠性与容错能力。目前,该系统已在北京特高压实验基地开展工程应用测试。

关键词：高压直流输电; 多模干涉耦合器; 波导光栅; 温度监测; 冗余设计

中图分类号：TN256 **文章编号：**1001-5868(2026)04-0643-08

Integrated Waveguide Devices for Online Monitoring System of UHV Converter Valve

ZHANG Jun¹, HAN Aodi², LU Yaqi², LI Xiaofei², LI Tianqi¹, LUAN Hongzhou¹, YUAN Chuang²,
LI Jinsheng², ZHANG Jinlong²

(1. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, CHN; 2. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, CHN)

Abstract: To address the failure risks induced by thermal accumulation in thyristors, which are core components of High-Voltage Direct Current transmission systems, an online monitoring system was designed. To resolve the issue of system-level monitoring interruptions caused by communication link anomalies under extreme operating conditions, this paper proposes an integrated waveguide chip structure applied to the monitoring system. First, a 4×16 multimode interference (MMI) coupler was designed and fabricated to achieve 16-channel high-density integration. Subsequently, a waveguide Bragg grating (WBG) sensor was developed to achieve high-precision temperature measurement. A multi-level redundant structure was then constructed by incorporating optical switches. The results demonstrate that the proposed scheme achieves real-time temperature monitoring of the thyristors with a measurement accuracy of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$. Furthermore, when the primary channel fails, switching to the backup line can be completed within 20 ms. This effectively resolves the monitoring interruptions in traditional temperature monitoring systems caused by critical node failures, significantly enhancing system reliability and fault tolerance. The system has undergone engineering application testing at the Beijing Ultra-High Voltage Experimental Base.

Key words: high-voltage direct current transmission; multimode interference coupler; waveguide grating; temperature monitoring; redundant design

收稿日期: 2025-11-01.

* 通信作者: 张锦龙

0 引言

随着全球能源结构转型与清洁能源跨区域输送需求的增长,高压直流输电因其远距离、低损耗与强可控性等优势,已成为跨区域电力互联和清洁能源外送的关键技术路径^[1-2],也是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要支撑^[3-4]。换流阀作为交直流能量转换的核心装备,其运行可靠性直接关系到整个输电链路的安全与稳定。然而,换流阀内部晶闸管在长期高电压、大电流工况下运行,易产生大量热积累。若温度监测或散热管理不及时,晶闸管结温骤升,进而加速器件老化、引发绝缘性能退化甚至导致设备烧毁等严重事故^[5-8]。因此,对换流阀核心器件开展多点位、实时、高精度的温度监测,已成为保障高压直流输电工程安全运行的迫切需求。

目前,广泛应用的温度监测技术主要包括热电偶、红外传感两大类。热电偶在常规工况下具有较高的测量精度,但在换流阀强电磁干扰和高压绝缘环境中,其测量精度与抗干扰性能均受到明显制约^[9-10]。李世平等^[11]采用红外传感技术对换流阀进行温度监测,但存在传感器安装条件苛刻、测量精度等不足等问题。高礼玉^[12]采用传统的光纤光栅传感技术,虽然抗干扰性有所改善,但在空间受限的换流阀模块中仍存在布线复杂、扩展性有限等瓶颈。此外,现有监测方法大多缺乏冗余和容错机制,一旦关键监测节点失效,系统整体可靠性将显著降低。随着输电系统规模和复杂度的持续提升,传统方案已难以满足工程对高精度与高可靠性的双重需求^[13-15]。

鉴于此,本文设计并验证了一种基于集成波导器件的冗余温度监测系统。该系统采用波导布拉格光栅(WBG)敏感单元,利用温度引起的反射中心波长漂移实现高精度温度感知;并结合 4×16 MMI实现大规模通道复用,从而满足换流阀内部多点温度监测的需求。在系统架构层面,通过在传输链路中引入双光开关构建主备输入冗余与通道级备份机制,当主通道发生故障或信号衰减时,系统能够快速切换至备用路径,确保数据的连续性与可靠性。该研究兼顾高密度测量、低插损和系统容错性,为换流阀温度监测提供了一种兼具扩展性与工程适用性的解决思路,进一步提升换流阀运行的安全性,并改善高压直流输电工程的整体健康管理水平。

1 晶闸管结构分析

晶闸管内部由铜片层、铜片层和硅片层组成,其中硅芯片焊接于铜基板,基板通过导热硅脂与散热器连接。当大功率晶闸管运行时,会在PN结产生显著热损耗,热量主要以热传导形式在器件内部传递。结构示意图如图1所示。

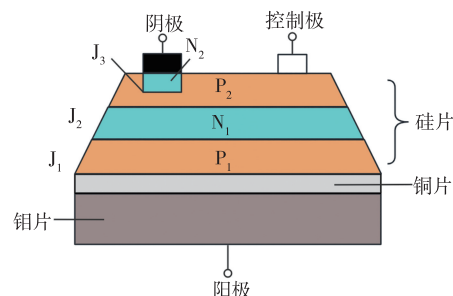


图1 晶闸管结构示意图

为优化散热,工程上常将晶闸管安装于两侧水冷散热器之间,构成夹层结构,如图2所示。晶闸管与散热器通过导热硅胶粘合,芯片产生的热量经内部热传导至基板,大部分热量再由基板传导至散热器,最终由散热器耗散至外部环境。

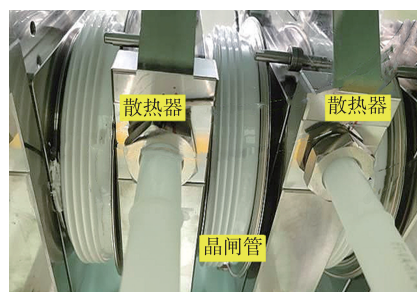


图2 晶闸管及散热系统结构

综上所述,本研究拟在晶闸管铜基板与外壳处分别部署传感器,以开展相关测试和验证实验。

2 集成波导器件

2.1 MMI设计

MMI的基本原理是基于自成像效应^[16-19]。采用导模分析法对MMI进行理论分析,输入波导中的输入光场 $\psi(y, 0)$ 在多模干涉区激励各阶导模 $\varphi_\nu(y)$ 表示为:

$$\psi(y, 0) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu \varphi_\nu(y) \quad (1)$$

式中, m 为激励的导模总阶数, c_ν 为各阶导模的激励系数。

假设第 ν 阶导模的横向波数为 $k_{y\nu}$,传播常数为

β_ν, n_r 为芯层折射率, λ_0 为输入光的中心波长, W 为多模干涉区宽度, 硅基 MMI 波导的色散方程可表示为:

$$k_{y\nu}^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2 \quad (2)$$

其中:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3)$$

$$k_{y\nu} = \frac{(\nu+1)\pi}{W_{ev}} \quad (4)$$

式中, W_{ev} 指考虑了 Goos-Hänchen 位移的有效宽度, 在高折射率差结构中 Goos-Hänchen 位移非常小, 因此可以认为 $W_{ev} \approx W$, 得到传播常数 β_ν 表示为:

$$\beta_\nu \approx k_0 n_r - \frac{(\nu+1)^2 \pi \lambda_0}{4n_r W^2} \quad (5)$$

最低阶的两个模式的拍长 L_π 可定义为:

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \simeq \frac{4n_r W^2}{3\lambda_0} \quad (6)$$

将色散方程进行二项式展开和近似后可得到 ν 阶导模与基阶模传播常数差为:

$$\beta_0 - \beta_\nu = \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi} \quad (7)$$

各阶导模在多模干涉区传播距离 L 后, 干涉叠加得到输出场, 表示为:

$$\psi(y, L) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu \varphi_\nu(y) \exp[j(\beta_0 - \beta_\nu)L] \quad (8)$$

将式(7)代入得到输出场表达式:

$$\psi(y, L) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu \varphi_\nu(y) \exp\left[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi} L\right] \quad (9)$$

从公式(9)中可以看出, L 处的输出光场是由激励系数 c_ν 及相位因子 $\exp\left[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi} L\right]$ 共同决定的。在传播方向的特定位置处, 干涉叠加的输出场 $\psi(y, L)$ 会出现输入场 $\psi(y, 0)$ 的像, 即为多模干涉耦合器的自成像效应。由上述可知, 多模干涉耦合器的输入/出端口数量与其多模干涉区的宽度 W 和长度 L 呈正相关, 端口数量的增加将直接导致器件物理尺寸的显著增大。由于换流阀内部紧凑空间对器件尺寸的严格限制, 普通的 $N \times N$ 型 MMI 难以满足本温度监测系统的应用需求。

本文设计 4×16 多模干涉耦合器, 在各个输入输出端口处引入并优化了线性 Taper 结构, 以减少因 MMI 干涉区与输入波导的尺寸差异而引起的模式失配损耗, 如图 3 所示。

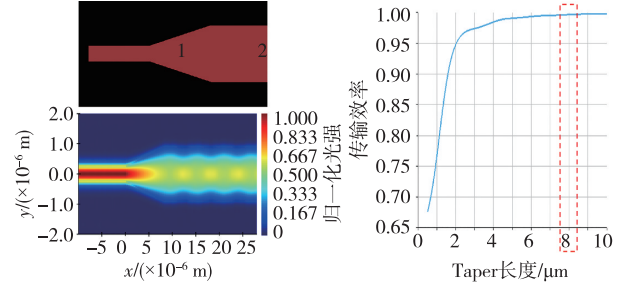


图3 线性 Taper 结构优化图

具体而言, 该线性 Taper 结构的长度为 $8 \mu\text{m}$, 末端宽度为 $2 \mu\text{m}$; 其连接的多模干涉区几何尺寸设计为 $42 \mu\text{m}$ 宽、 $2850 \mu\text{m}$ 长, 输入、输出端口间距分别为 $10.5 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 。

通过电磁仿真软件对器件进行模拟分析, 获得如图 4 所示的输入/输出端口传输光场分布, 结果显示 Taper 结构显著改善了光场过渡的连续性。

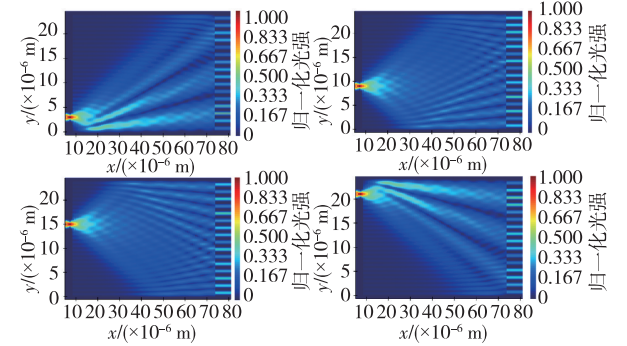


图4 端口传输光场图

芯片由代工厂进行制备, 并进行了标准的光纤阵列端面耦合封装。输入与输出波导通过紫外固化胶与单模光纤阵列粘合, 形成了稳定的测试模块。在实验室对该模块进行了性能表征, 测试装置如图 5 所示。实验采用输出功率为 10 mW 的激光器作为光源, 并将封装模块置于 25°C 的温控平台上以减小热漂移。测试得到的各端口传输光谱如图 6 所示, 结果表明该器件在工作波段内具有良好的功率均匀性。

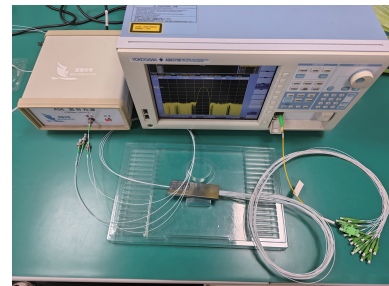


图5 MMI 耦合器测试

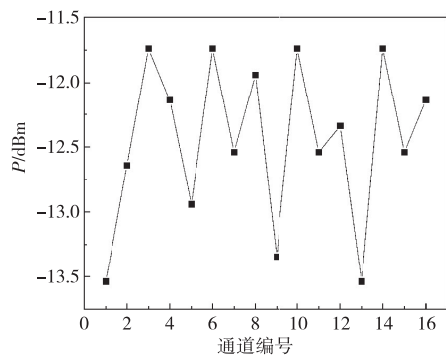


图6 不同输出端口功率曲线

2.2 波导光栅传感器

采用波导布拉格光栅作为冗余温度监测系统的传感器,其基本结构通过在硅基波导中引入周期性折射率变化形成光栅,当入射光波长满足布拉格条件时,光被选择性反射。当环境温度变化时,材料的热光效应和热膨胀效应会引起有效折射率 n_{eff} 和光栅周期的变化,导致布拉格波长发生漂移,从而实现高精度温度感知^[20-22]。波导布拉格光栅器件具有体积小、稳定性高、可实现小型化与多功能集成、利用成熟CMOS工艺大规模低成本生产等优势。相较于传统光纤光栅,其结构形状稳定,不易受自身重力或其他外部机械应力的影响,更适合部署在换流阀晶闸管的紧凑结构中。

所设计的硅基波导光栅结构芯层与包层折射率差为2%,具体参数信息如表1所示。

表1 波导光栅具体参数

参数类型	具体数值
中心波长/nm	1 542.413
芯层折射率	1.474 1
包层折射率	1.444 7
宽/高度	4 μm
光栅周期	523.3 nm
占空比	0.5

采用双边刻蚀的光栅结构,利用本征模展开法进行模拟仿真,并得到光栅反射谱,结构模型构建及反射光谱图如图7所示,光栅最大反射率达95%,3 dB带宽为0.15 nm。

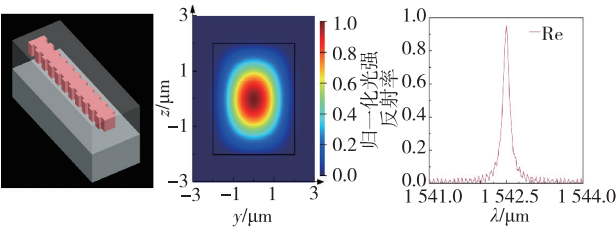


图7 波导光栅建模及反射光谱图

为验证波导光栅温度传感特性,分析了在25℃~85℃范围内的反射光谱漂移曲线,如图8所示。随着温度升高,反射波长发生红移,结果与理论预期一致,传感器温度灵敏度达12.1 pm/℃。最后依托芯片厂商进行工艺流片,完成波导光栅传感器的封装制备,其实物照片如图9所示。该传感器结构紧凑、体积小且灵敏度较高,满足温度监测系统的严苛要求。

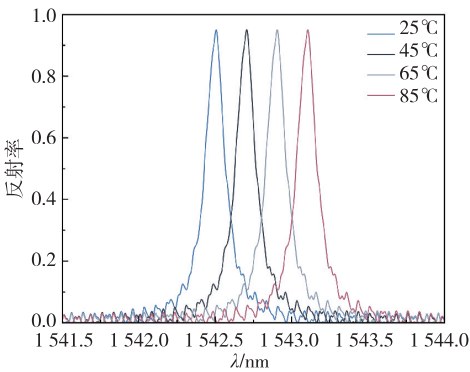


图8 传感器温度漂移特性

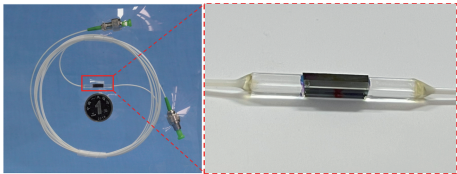


图9 传感器封装实物图

2.3 光开关

基于系统冗余结构设计,选用深圳欧亿光电技术有限公司的MEMS型1×2光开关作为冗余通道控制单元,其工作波长为1 550±30 nm,切换响应时间不超过20 ms。

3 实验验证与分析

3.1 整体方案

基于上述研究,设计了基于集成波导器件的高压换流阀冗余温度监测系统,如图10为所设计的系统示意图。系统中,主控板引出双传输链路的光信号首先经由1×2光开关实现主备通道的冗余切换,以确保在任一通道异常时仍可维持信号的连续传输。后续由4×16 MMI进行通道复用与分配,再依次传输至布置在阀段晶闸管不同位置的WBG传感器。各WBG传感器会根据所在位置的温度变化产生中心波长的漂移,将反射信号返回至光路中,并导入解调模块,通过精确检测波长漂移来反推出温度变化。最终由上位机进行数据处理与可视化显示,从而实现晶闸管温度的实时、可靠监测。

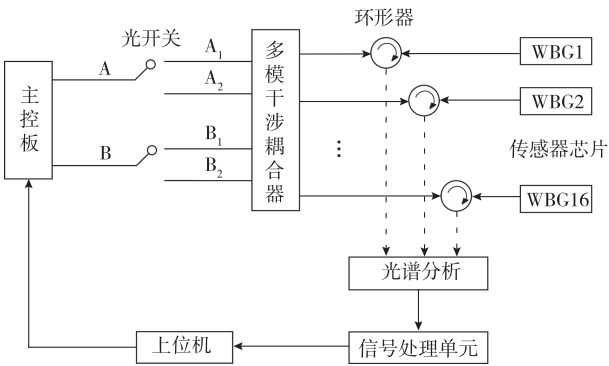


图 10 冗余温度监测系统

3.2 WBG 传感器温度校准

将封装完成的 WBG 传感器置于同一恒温箱，自 20℃起以 5℃为步进升温，记录每个温度点的反射波长。对温度-波长数据进行线性拟合得到灵敏度系数 K 和截距 B ，并结合前文晶闸管结构分析确定传感器安装位置，相关信息见表 2。

表 2 WBG 传感器相关信息

编号	K	B	R^2	安装位置
WBG1	0.012 12	1 540.45	0.999 409	第 2 晶闸管基板
WBG2	0.012 34	1 541.42	0.999 555	第 2 晶闸管外壳
WBG3	0.012 07	1 542.39	0.999 490	第 4 晶闸管基板
WBG4	0.012 23	1 543.67	0.999 700	第 4 晶闸管外壳
WBG5	0.012 19	1 544.93	0.999 563	第 6 晶闸管基板
WBG6	0.012 05	1 546.28	0.999 602	第 6 晶闸管外壳
WBG7	0.012 28	1 547.56	0.999 157	第 8 晶闸管基板
WBG8	0.012 15	1 549.14	0.999 400	第 8 晶闸管外壳

3.3 WBG 温度传感器可靠性验证

为验证 WBG 传感器的可靠性，将封装完成的 WBG 传感器置于 25℃恒温箱内进行测试。通过上位机软件采集连续 24 h 的温度监测数据，以 WBG1-4 为例，温度-时间曲线如图 11 所示。结果表明，温度最大偏差在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内，测试所用的 8 个 WBG 传感器均具有优异的测量精度和稳定性。

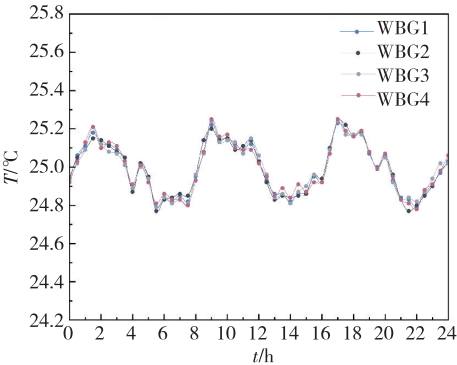


图 11 恒温箱 24 h 监测曲线

为了验证器件的测量可靠性，对传感器进行了升降温循环测试，结果如图 12 所示。结果显示，各次测量的波长-温度拟合曲线高度重合，相同温度点下的最大波长波动仅为 8.3 pm。该结果证实了传感器在长期热循环工况下具有优异的重复性与稳定性。

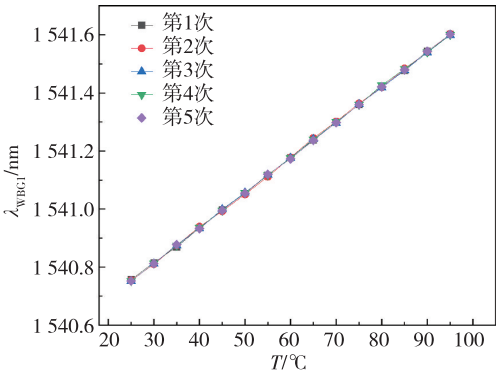


图 12 WBG 传感器重复性测试

此外，为了评估封装结构的长期稳定性，对传感器进行了 85℃、持续 100 h 的高温加速老化测试，如图 13 所示。测试期间，传感器解调温度始终稳定在设定值附近，全程最大波动幅度不超过 0.4℃，且未出现明显的单向漂移，充分验证了器件在长期高温工况下的耐热性与可靠性。

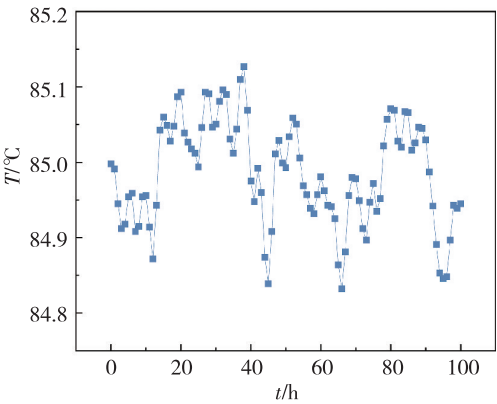


图 13 高温老化测试

3.4 冗余切换测试

基于 MEMS 的 1×2 光开关冗余实验，通过模拟主通道故障，并以 MMI 耦合器的输出端口功率为判据，评估极端工况下的链路切换性能，端口功率响应曲线如图 14 所示。结果显示，在模拟故障点 $t=0.5\text{ s}$ 左右，输出功率瞬时下降至约 -40 dBm ，并在 20 ms 内恢复至稳定状态，证明了系统在极端工况下具备可靠快速的冗余切换能力。

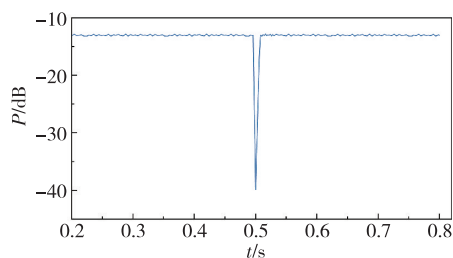


图14 模拟故障的功率响应曲线

4 工况测试与分析

为了验证冗余温度监测系统在晶闸管换流阀模块测量中的可靠性与精度,在北京特高压实验基地搭建换流阀子模块并开展相关实验。传感器现场安装示意图如图15所示。



图15 传感器现场安装

采用8个已标定的波导光栅传感器开展稳态测试,测试内容涵盖设备的运行、停机及冷却过程。具体步骤为:首先启动水冷散热系统并设定基准水温为52℃;随后开启晶闸管设备并将电流调整至250 A;系统在设定电流下运行100 min后,切断设备电源,并在延迟一段时间后关闭水冷散热系统。在此过程中,每隔1 s记录一组温度与时间数据,最终绘制出晶闸管稳态工况下的温度-时间变化曲线如图16、图17所示。

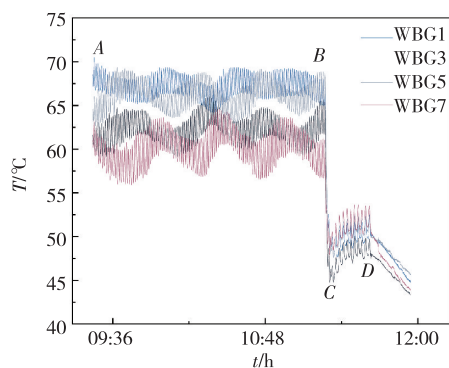


图16 晶闸管基板处温度-时间曲线图

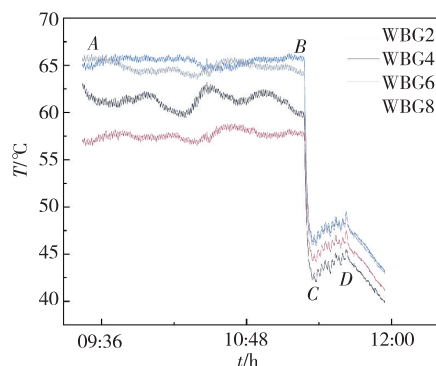


图17 晶闸管外壳处温度-时间曲线图

由图可知,被监测晶闸管在稳态测试过程中大致可分为三个阶段:冗余温度监测系统在A点开始记录,换流阀阀段在A-B段稳定运行;在B点切断设备电源后,晶闸管停止运行,所有的晶闸管底板以及外壳处的温度快速下降;在一段时间后达到最低点C,C-D段在散热器影响下温度略微有所回升,在D点关闭水冷散热器之后晶闸管温度迅速下降,实验测试结果符合预期。

同时,将WBG传感器与红外测温仪进行同工况对比测试,如图18所示。结果表明,WBG传感器在快速升温阶段能够同步跟随温度变化,无明显热滞后;在稳态区间内,两者数据的平均绝对误差仅为0.55℃。相比于受环境影响而存在显著噪声波动的红外测温数据,WBG传感器输出曲线极为平滑,展现出更优异的测量稳定性。

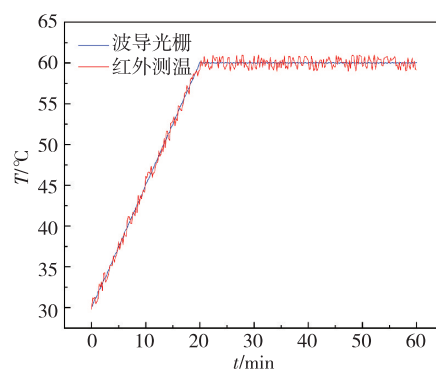


图18 波导光栅-红外测温工况对比图

5 结论

综上所述,本文设计并验证了一种基于集成波导器件的高压换流阀冗余监测系统。首先,设计并制备了基于自成像效应的MMI耦合器,实现16通道高密度集成,有效满足换流阀晶闸管模块并行监测需求;然后,完成硅基波导光栅的理论仿真及器件制备,验证WBG传感器芯片的高精度性

能与温度传感特性。同时,MMI多输入端口结合MEMS光开关及双传输链路构建主备链路多层级冗余结构,解决单一链路温度监测中断隐患。实验结果表明,系统能精准捕捉晶闸管工作全流程的温度变化规律,测量精度可达 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,系统故障响应切换时间小于20 ms,充分适配工程应用场景。该系统极大地提高了高压直流输电系统的可靠性和容错性,已实现从原理验证到工程测试,为高压直流输电系统安全稳定运行提供了可靠的冗余监测方案。

参考文献:

- [1] 郭贤珊,厉璇,王庆,等.特高压直流输电技术发展现状与思考[J].新型电力系统,2024,2(3):237-250.
Guo Xianshan, Li Xuan, Wang Qing, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology [J]. New Type Power Systems, 2024, 2(3): 237-250.
- [2] 梁旭明,张平,常勇.高压直流输电技术现状及发展前景[J].电网技术,2012,36(4):1-9.
Liang Xuming, Zhang Ping, Chang Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential [J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 马志豪,宋晓昭.我国电力行业碳达峰碳中和路径研究[J].电子元器件与信息技术,2021,5(10):71-72,77.
- [4] Muniappan M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [5] 李凯,韩坤,黄永瑞,等.高压直流换流阀模块散热及温度分布研究[J].电工技术,2020(9):126-129.
Li Kai, Han Kun, Huang Yongrui, et al. Research on heat dissipation and temperature distribution of HVDC converter valve module [J]. Electric Engineering, 2020(9): 126-129.
- [6] 刘隆晨,张康,喻悦箫,等.模拟换流阀长期运行工况的高压大功率晶闸管电热联合老化系统研制[J].电工电能新技术,2024,43(2):20-28.
Liu Longchen, Zhang Kang, Yu Yuexiao, et al. Development of high voltage and high power thyristor electrothermal combined aging system simulating the operation condition of converter valve [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(2): 20-28.
- [7] 任保栋,任国勇,侯典立.基于晶闸管的HVDC系统仿真研究[J].中国新技术新产品,2025(7):15-17.
Ren Baodong, Ren Guoyong, Hou Dianli. Simulation research on HVDC system based on thyristors [J]. New Technology & New Products of China, 2025(7): 15-17.
- [8] 陈意,於扬.换流阀故障监测和准确定位系统研究[J].仪器仪表与分析监测,2024(3):15-18.
Chen Yi, Yu Yang. Research on fault monitoring and accurate positioning system for converter valve fault [J]. Instrumentation·Analysis·Monitoring, 2024(3): 15-18.
- [9] 夏大伟,杜君莉,何晓宇,等.晶闸管功率器件的可靠性研究进展[J].自动化与仪器仪表,2024(7):16-21.
Xia Dawei, Du Junli, He Xiaoyu, et al. Summary of reliability research and evaluation of thyristor power devices [J]. Automation & Instrumentation, 2024(7): 16-21.
- [10] 杨家豪,刘文泽,张俊杰,等.换流阀整体免解线的直流输电晶闸管级元件参数测量方法[J].电测与仪表,2025,62(8):160-169.
Yang Jiahao, Liu Wenzhe, Zhang Junjie, et al. Parameter measurement method for DC transmission thyristor-level components without removing connection wires for the entire converter valve [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 160-169.
- [11] 李世平,吕海东,李煜鹏,等.红外测温技术在换流阀温度监测中的应用[J].现代制造技术与装备,2024,60(1):63-66.
Li Shiping, Lü Haidong, Li Yupeng, et al. Application of infrared temperature measurement technology in temperature monitoring of converter valves [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(1): 63-66.
- [12] 高礼玉.基于阵列波导光栅解调的换流阀温度监测研究[D].开封:河南大学,2024.
Gao Liyu. Research on converter valve temperature monitoring based on arrayed waveguide grating demodulation [D]. Kaifeng: Henan University, 2024.
- [13] Faisal M. Fiber Bragg grating temperature sensor and its interrogation techniques [J]. Brilliant Engineering, 2023, 4(3): 1-11.
- [14] 覃立华.10 kV高压软起晶闸管故障及处理方法[J].装备制造技术,2024(12):162-165.
Qin Lihua. Fault and treatment of 10 kV high voltage soft start thyristor [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2024(12): 162-165.
- [15] 刘云鹏,杨瑞,郑林,等.特高压换流站阀厅状态监测与智能运维研究综述[J].高电压技术,2025,51(8):4285-4299.
Liu Yunpeng, Yang Rui, Zheng Lin, et al. Review of ultra-high voltage converter station valve hall status monitoring and intelligent operation and maintenance [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4285-4299.
- [16] Sahu P P. Multimode interference coupler based on general interference for integrated optical and quantum optic devices: a review [J]. Physica Scripta, 2024, 99(8): 085106.
- [17] 王曼卓,姚振涛,孙朝阳,等.基于级联多模干涉耦合器的模式选择开关[J].光子学报,2025,54(3):154-166.
Wang Manzhuo, Yao Zhentao, Sun Chaoyang, et al. Mode selecting switch based on cascaded MMI couplers [J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(3): 154-166.

- [18] Liu S, Liu B, Lü H, et al. Design of a 1×3 power splitter based on multimode interference in a parabolic-type slot-waveguide structure[J]. Applied Sciences, 2024, 14(13): 5829.
- [19] 余鑫, 周舟. 基于MMI的聚合物 1×16 光功分器的设计及飞秒激光制备[J]. 长江信息通信, 2021, 34(6): 18-21.
Yu Xin, Zhou Zhou. Design and fabrication of femtosecond laser for polymer 1×16 optical splitter based on MMI[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(6): 18-21.
- [20] 杜吉林. 硅基波导布拉格光栅光子器件设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
Du Jilin. Design of silicon-based waveguide Bragg grating photonic device[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2021.
- [21] 蔡和意. 基于二氧化硅基波导光栅芯片的传感器设计与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
Cai Heyi. Sensor design and application based on silicon dioxide waveguide grating chip [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [22] Dhavamani V, Chakraborty S, Ramya S, et al. Design and simulation of waveguide Bragg grating based temperature sensor in COMSOL [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2161(1): 012047.

作者简介:

张俊(1982—),男,北京市人,高级工程师,主要研究光传感技术在高压直流输电上的应用;

张锦龙(1977—),男,河南省人,教授,博士生导师,主要研究方向为光芯片与光传感技术。