

基于分布式光纤传感的架空输电线路舞动与雷击监测技术进展*

唐元春¹, 李 翠¹, 黄 宁², 丁晨阳^{3,4**}, 张益昕^{3,4}

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院,福州 350011;2. 福建永福电力设计股份有限公司,福州 350000;
3. 南京大学 现代工程与应用科学学院,南京 210023;4. 南京大学 智能光传感与调控技术教育部重点实验室,南京 210093)

摘 要: 对比总结了基于拉曼散射、布里渊散射与瑞利散射的三种主要 DOFS 技术的原理及特点,介绍了 DOFS 系统在输电线路舞动及雷击监测领域的国内外研究及应用现状;对基于分布式光纤传感的架空输电线路舞动、雷击监测技术目前存在的不足进行了分析;指出分布式放大、光脉冲编码、多参量融合以及通感一体等关键技术将是该领域下一阶段的发展趋势与研究热点。

关键词: 分布式光纤传感;架空输电线路;舞动监测;雷击监测

中图分类号: TN12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)04-0337-10

Overhead Transmission Line Dancing and Lightning Strike Monitoring Technology Based on Distributed Optical Fiber Sensing

TANG Yuanchun, LI Cui, HUANG Ning, DING Chenyang, ZHANG Yixin

(1. *Economics and Technology Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co.,Ltd, Fuzhou350011, CHN*;2. *Fujian Yongfu Electric Power Design Co., Ltd, Fuzhou350000, CHN*;
3. *School of Modern Engineering and Applied Science, Nanjing University, Nanjing210023, CHN*;
4. *Key Laboratory of Intelligent Light Sensing and Regulation Technology, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing210093, CHN*)

Abstract: The principles and characteristics of the three main DOFS technologies based on Raman scattering, Brillouin scattering and Rayleigh scattering were compared and summarized, and the research and application status of DOFS systems in the fields of transmission line dancing and lightning strike monitoring at home and abroad were introduced. The shortcomings of overhead transmission line dancing and lightning monitoring technology based on distributed optical fiber sensing were analyzed. It was pointed out that key technologies such as distributed amplification, optical pulse coding, multi-parameter fusion and synesthesia integration would be the next stage of development trend

收稿日期:2023-03-13

* 基金项目:国家自然科学基金项目(U2001601, 62175100, 61975076);中央高校基本科研业务费(0213-14380202)

作者简介:唐元春(1973—),男,工程师,研究方向为信息及通信技术;(E-mail:1006479723@qq.com)

李 翠(1994—),男,工程师,研究方向为信息与系统领域;(E-mail:2900090254@qq.com)

黄 宁(1995—),男,工程师,研究方向为电力通信领域。(E-mail:15005516766@163.com)

** 通讯作者:丁晨阳(2000—),男,硕士研究生,研究方向为分布式光纤传感。(E-mail:502022340002@smail.nju.edu.cn)

and research hotspot in this field.

Key words: distributed optical fiber sensing; overhead transmission lines; galloping monitoring; lightning monitoring

引 言

电力资源关系着国家的社会发展以及经济命脉。据国际能源署统计,2021年全球发电总量达28 466.3太瓦时,同比增长5.9%。同年,我国110 kV及以上高压输电线路长度达140万 km以上,电网规模以及电力输送容量已跃居世界首位^[1]。然而输电系统中的架空输电线由于布设范围广、覆盖面积大,会大量经过诸如高海拔、重积雪等环境恶劣地区,容易受到大风、雷暴等极端天气影响。架空线路因此出现舞动引发输电系统的倒塔、跳闸以及线路受到雷击引发的烧伤、断股等事故,严重影响了电网系统的安全稳定运行,带来了难以估量的经济损失^[2]。如2010年1月,胜利油田出现大风雨雪天气,输电线路发生大面积舞动引发跳闸事故。由滨海供电公司管辖的6座变电站失电,影响负荷近五万千瓦,导致附近采油厂减少原油产量2 000吨以上,损失惨重^[3-4]。2018年1月,湖北境内出现大范围雨雪大风天气,鄂西南北部、鄂西北、江汉平原北部遭遇长达72小时的冻雨,导致省内44条超高压、特高压线路发生大面积舞动,造成23条线路设备受损,七条线路故障跳闸。2018年1月24日~27日,受持续冻雨天气影响,安徽安庆、池州地区20多条220 kV及以上输电线路出现大面积舞动现象,舞动时间达40小时以上,舞动振幅达5米,造成220 kV及以上线路跳闸11条,紧急避险拉停2条,此外若干杆塔、导线受损严重^[5-6]。若是能够在灾害发生前预警或在早期对其进行干预,可以在一定程度上减少灾害带来的损失。因此架空输电线路在线监测的实施,对保障输电线路的安全稳定运行具有重要意义。

传统的监测方法主要有人工巡检以及电子式设备在线监测等。其中人工巡检不仅人力资源耗费严重、监测效率低下,且监测范围有限^[7]。而电子传感设备及图像采集设备也存在抗电磁干扰能力差、成本高昂、供电不便等诸多问题^[8],都难以满足现代电网实时准确的监测和及时预警需求。光纤传感技术通过检测光纤中散射光的相位、频率、光强来实现对输电线路的应变^[9]、温度^[10]、相位^[11]等基本参量的在线监测。按照工作原理的不同,光纤传

感器一般分为点式和分布式两种类型。输电线路监测应用中常见的点式光纤传感器主要为光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)传感器。FBG传感器技术已十分成熟,但除了制造的成本较高且布设密度受限之外,其必须在输电线路额外安装传感节点,从而在安装、组网等方面存在限制,并有可能降低输电线路的稳定性^[12-14]。

与点式不同的是,分布式光纤传感器(DOFS)可以沿着传感光纤连续获取待测信号实现长距离测量,测量范围可达数十乃至上百公里。DOFS系统中的光纤不仅作为传输通道,也是传感单元,且对于光纤的规格没有特殊要求,普通的单模或者多模光纤均可实现。由于光纤复合地线(OPGW)在电网系统中的广泛应用,相比于FBG技术,分布式光纤传感系统可以直接利用复合光缆中的光纤,无需额外架设传感元件。与传统的监测方法相比,DOFS技术具有无需供电组网抗、电磁干扰能力强、耐腐蚀、保密性好等优点^[15-16],在架空输电线路的监测领域有着大量的实际应用。

文章首先简要介绍了分布式光纤传感在架空输电线路监测领域的三种主要技术及原理,对比总结了各自的优缺点。然后分别总结了DOFS技术在输电线路舞动及雷击监测领域的国内外研究及应用现状,指出其各自的优点以及存在的局限性。最后,分析了分布式光纤传感架空线舞动、雷击监测技术目前存在的不足,指出了DOFS系统目前存在空间分辨率和传感距离相互制约、参量间交叉敏感等问题,针对这些问题提出了DOFS技术在架空输电线路舞动、雷击监测领域未来发展的新趋势。

1 分布式光纤传感技术的基本原理

DOFS是一种将整条光纤作为信号传输介质及传感单元的特殊传感器。由于光纤本身折射率具有不均匀性,光纤中的光在传输时会发生散射,光纤中的散射光主要包括拉曼散射、布里渊散射及瑞利散射,三者的散射光强逐次增强,如图1所示。当光纤受到外部环境扰动时,光纤中的散射光会受到调制,从而改变其幅度、频率、相位、偏振等参量^[17]。通过对这些参量的变化加以检测,从而获得外界待

测参量的相关信息,实现对整条光纤状态的连续监测。

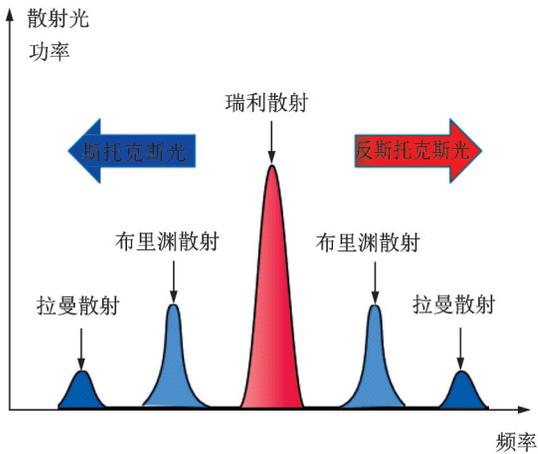


图1 光纤中的散射光分布图
Fig.1 Distribution of scattered light in optical fiber

分布式光纤传感主要通过光时域反射(OTDR)技术实现。1979年,M. K. Barnoski由激光雷达的概念第一次提出OTDR。该技术可以用于包括光纤链路的距离测量、损耗监测等在内的各种光通信网络测试,并将相应事件与空间位置建立对应关系^[18],其原理图如图2所示。

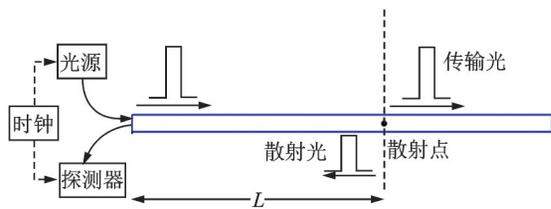


图2 OTDR原理图
Fig.2 Principal schematic of OTDR

图2中,光源发出的激光在距离光源L处产生后向散射光,后向散射光返回起始端的时间为t,带入式(1)即可对光纤扰动位置进行定位,其中c为光速,n为光纤的折射率。

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

因此基于OTDR结构能够实现对光纤的单端监测,结合不同的散射光机理,就可以对整条光纤沿线的多种扰动事件进行连续分布式的识别与定位。

1.1 基于拉曼散射的分布式温度传感技术

光纤的散射光中,拉曼散射光强最弱,仅有瑞利散射的千分之一左右。拉曼光时域反射技术

(ROTDR)利用光纤中的拉曼散射效应进行温度传感。当外界温度发生变化时会导致拉曼后向散射光强度发生变化,而入射光在光纤中的拉曼后向散射会产生斯托克斯光与反斯托克斯光,两者的光强表达式分别为 I_s 和 I_{as} ^[19]:

$$I_s = I_0 \left(\frac{L}{\lambda_s} \right)^4 \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{h\omega_m}{k_B T}\right)} \quad (2)$$

$$I_{as} = I_0 \left(\frac{L}{\lambda_{as}} \right)^4 \frac{1}{\exp\left(\frac{h\omega_m}{k_B T}\right) - 1} \quad (3)$$

上式中, λ_s 为斯托克斯谱线, λ_{as} 为反斯托克斯谱线, I_0 为入射光光强, L 为散射点离光纤始端的距离, h 为普朗克常量, k_B 为玻尔兹曼常量, ω_m 为拉曼频移量, T 为温度。由此可以导出拉曼散射对温度传感的基本公式:

$$\frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp\left(-\frac{h\omega_m}{k_B T}\right) \quad (4)$$

ROTDR系统的基本结构如图3所示,激光器将波长1550 nm的探测脉冲光注入待测光纤中产生后向拉曼散射信号,后返回波分复用器中分为1450 nm的斯托克斯信号以及1650 nm的反斯托克斯信号,由雪崩光电二极管接收转换为电信号,通过信号采集和处理模块,由双路解调的方法得到整条光纤线路的温度分布^[19]。

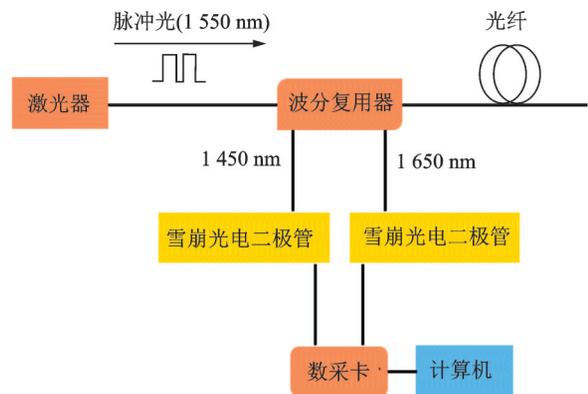


图3 ROTDR系统结构示意图
Fig.3 Schematic of ROTDR system structure

ROTDR对于温度传感具有较高的精度及灵敏度,可以达到1℃以及1 m级别温度分辨率和空间分辨率。在电力监测的实际应用中通常仅用来对绝缘性下降、短路、火灾等隐患进行监测。但由于光纤中的拉曼散射光强度较弱,使得ROTDR系统的监测距离较短,一般在10 km以下^[20]。

1.2 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术

基于自发布里渊散射的特性与 OTDR 技术相结合, Tkach 等人于 1987 年提出了布里渊光时域反射 (BOTDR) 技术^[12]。BOTDR 的基本原理是: 当入射脉冲光的光子与介质作用引起光纤振动时, 由于振动所产生的声波会使得光纤内部介质的密度产生周期性变化, 和光栅所起作用相类似, 光波入射时会被其调制导致散射峰频率的移动, 即布里渊频移^[21]。布里渊频移量对外界应变和温度的变化比较敏感, 频移 $\Delta\nu_B$ 与温度和应变的关系如式(5):

$$\Delta\nu_B = C_{v,\epsilon}\Delta\epsilon + C_{v,T}\Delta T \quad (5)$$

其中, $\Delta\nu_B$ 为布里渊频移, $\Delta\epsilon$ 为应变变化量, ΔT 为温度变化量, $C_{v,\epsilon}$ 和 $C_{v,T}$ 分别为布里渊频移变化的应变系数和温度系数。在通过实验等方法获得应变系数与温度系数的前提下, 测量光纤各点处的布里渊散射信号的频移量, 从而得到整条光纤中应变与温度的变化情况。

BOTDR 的典型结构如图 4 所示。激光器发出的探测光经耦合器分为两束, 一束经过脉冲调制后产生的脉冲光由光放大器放大进入环形器注入到待测光纤中, 另一束经过频移转换模块作为参考光。光纤中产生的自发布里渊后向散射光由环形器返回作为布里渊信号与参考光一起被光电探测器接收, 再通过数采卡和计算机进行信号的检测和处理, 得出布里渊散射信号的频移量。根据其对应关系, 即可恢复光纤沿线各点的温度或应变信息^[22]。

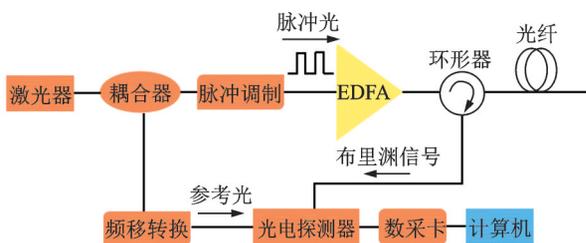


图 4 BOTDR 系统结构示意图

Fig.4 Schematic of the structure of the BOTDR system

相比于 ROTDR 系统, BOTDR 系统结构比前者复杂的多, 对系统中的核心器件的性能要求也更为严苛。BOTDR 的光源采用的是 MHz 级别的窄线宽激光器, 此外采用了外调制模块用来防止啁啾。由于布里渊散射的频移量相比于拉曼散射的频移量要小得多, 所以通常无法通过光学滤波来进行分离, 并且由于需要对整个布里渊散射谱频移进行检测, 探测结构上需要结合参考光的频移量进行光电探测。BOTDR 的优点在于能够实现应变和温度

的同时检测, 且测量精度高、单次测量信息获取效率高。然而目前 BOTDR 存在温度和应变的交叉敏感问题^[23], 仅仅依靠对公式(5)的解调, 精度难以保证, 通常必须采用专用补偿光缆加以解决, 限制了其应用范围^[19]。

1.3 基于瑞利散射的分布式光纤传感技术

瑞利散射是光纤三种散射光中散射光强度最大的散射光。当光纤受到外部干扰以及光纤线路上某位置受到损耗、连接点和断点影响时, 由于弹光效应和热光效应会使得该处传感光纤的折射率和散射单元长度发生变化, 从而引起该位置的背向瑞利散射光的功率和相位发生改变^[24]。通过对背向瑞利散射光功率变化的检测, 可以实现对光纤损耗、断点的测量; 通过对背向瑞利散射光相位变化的检测, 实现对外部扰动事件的定位。

目前, 在 OTDR 技术的基础上衍生出多种利用瑞利散射光进行传感的先进技术。偏振敏感时域光反射 (POTDR) 技术对瑞利散射光偏振态沿光纤沿线的变化进行测量从而获取外界物理量的分布情况, 其系统结构图如图 5 所示, 其中检偏器用于检测脉冲光偏振状态的变化。温度、电磁场、应变等发生变化都可以对光纤中散射光的偏振态进行调制, 所以 POTDR 技术常用于对光纤沿线此类事件的变化情况进行监测。值得一提, 散射光偏振态由于法拉第效应对电磁场变化较为敏感, 在包含雷击、短路、放电等瞬态电磁场变化的事件监测中具有独特价值。但是, 当光纤中某个位置出现扰动时, 该位置之后返回的瑞利散射光均会受到该处扰动影响, 若光纤中存在多个扰动点, 这些扰动点对偏振态造成的影响会发生叠加, 因此如何区分多扰动点是 POTDR 技术的难题之一。

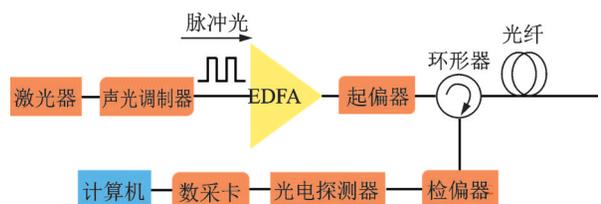


图 5 POTDR 系统结构示意图

Fig.5 Schematic of the structure of the POTDR system

由于瑞利散射光相位变化相比于强度及偏振态变化更为灵敏, 在此基础上发展了相位敏感型光时域反射技术 (Φ -OTDR), 用于极微弱振动的监测。瑞利背向散射光的相位变化受光纤长度、折射率的影响, 其中光纤长度变化量与相位差变化量之

间的关系满足式(6):

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4\pi n} \Delta\varphi \quad (6)$$

其中, ΔL 为外界应变引起待测光纤两点间的光纤长度变化量, λ 为反射光的波长, n 为光纤纤芯的折射率, $\Delta\varphi$ 为前后光的相位差。

相比于传统的 OTDR 系统, Φ -OTDR 系统的光源采用的是稳定性更好的窄线宽激光器。基于相干探测的 Φ -OTDR 系统结构如图 6 所示。

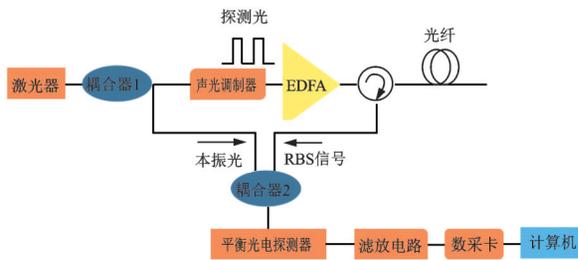


图6 相干探测型 Φ -OTDR 系统结构示意图

Fig.6 Schematic of the structure of the coherent detection type Φ -OTDR system

当光纤某点受到外部干扰时,该处产生的背向瑞利散射信号的多光束干涉光的相位与幅度会因此改变。对此干涉信号进行解调获得整条光纤沿线的背向瑞利散射信号的相位及幅度信息,从而对扰动事件实现定量分析,实现对光纤沿线振动的实时监测。 Φ -OTDR 响应速度快、灵敏度高,但对激光器线宽和频率稳定度的要求都非常高,且对目标事件的识别准确度高度依赖于信号处理算法。

2 舞动监测

2.1 舞动成因分析

根据输电线路产生振动的诱因以及振动形式之间的差异,通常将线路振动分为次档距振动、电晕振动、微风振动以及舞动四种形式^[25]。次档距振动是在风激励条件下发生的分裂导线各间隔棒之间的振动,其振动频率约为几 Hz,振动幅值为子导线直径的数量级;电晕振动是由于线路表面的电场强度较高,线缆上的微小水珠在电场力的作用下有规律的脱离导线时引发的振动;微风振动为在较弱风激励的影响下产生的垂直平面内的高频低幅的周期性振动现象;舞动是输电线路发生非圆截面覆冰后由风激励产生的自激振动现象,具有频率低(0.1 Hz~3 Hz)、振幅大(振幅约为输电线直径的 5~300 倍)的特点。

在上述四种振动形式中,微风振动发生最为频

繁,容易造成输电线路疲劳从而引发断股。次档距振动及电晕振动虽然对线路的威胁不大,但均可能成为线路舞动的诱因。舞动由于具有低频高振幅的特性,对电网系统稳定运行的危害性最高,除了会引起线路跳闸,金具、绝缘子破损,导线烧伤、断线之外,严重的会造成倒塔等事故,带来巨额的经济损失以及安全威胁^[4]。线路舞动引起光纤振动如图 7 所示,由于输电线路的舞动以及其产生诱因皆由线路振动引起,所以对线路的舞动监测主要依靠振动监测来实现。由于舞动的频率范围一般为 0.1 Hz~3 Hz,所以对舞动监测系统的高频响应性能有较高要求,其检测频带通常不能低于 3 Hz^[1]。

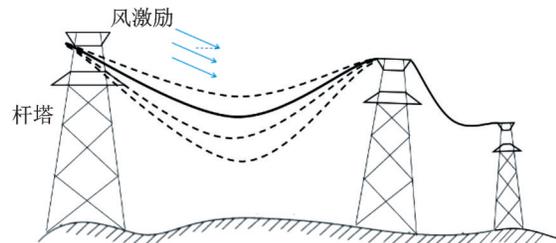


图7 线路舞动引起光纤振动示意图

Fig.7 Schematic of optical fiber vibration caused by line galloping

2.2 DOFS 在架空线舞动监测中的应用

2016 年,中国电子科技大学的 Wu Huijuan 等人^[26]提出了一种基于 POTDR 的输电线路多点干扰检测的新方法。区别于传统 POTDR 技术,该方法在建立二维 SOP 演化图的基础上采用成像处理和统计分类技术来区分光纤外部不同的干扰点并对其进行定位,在 13 km 长的 500 kV 高压输电线路上实现了对线缆 3.06 km, 8.18 km, 10.49 km 处舞动信号的测量。由于文中仅给出了多点定位结果,系统的测量精度及空间分辨率尚未可知,因此系统可靠性有待进一步验证。

2017 年,深圳海油工程水下技术有限公司苗春生^[27]提出了一种基于 Φ -OTDR 技术的新型分布式振动监测系统,通过非平衡干涉仪存在臂长差这一特性实现了相邻后向瑞利散射光之间的干涉,在此空间差分干涉技术的基础上精确测量了 OPGW 上的振动信号。在舞动模拟测试实验中,给出了 0.9 Hz 舞动、2.3 Hz 非舞动判定结果,为实际 OPGW 线缆舞动的实时监测提供了一种可靠直观的手段。由于模拟实验的频率范围较小,在实际应用中的可行性有待进一步分析。

同年,中国南方电网贵州公司陆飙等人^[28]提出

一种基于 POTDR 的分布式在线监测系统以及相关参数的定量检测方法,在 48 km 的实验线路上定量测得线路的舞动位置、振幅及频率,与实际情况基本吻合,证明了 POTDR 系统可用于输电线路舞动的实时监测。由于该技术难以实现多点测量,对不同处的扰动事件难以判定,实际应用中可能引起误判。

2018 年,国网北京市电力公司谭磊等人^[29]提出了一种基于 Φ -OTDR 的分布式光纤测风技术。在监测设备所获得的实时风载荷基础上,结合线路损耗、运行状态、遗留问题三个方面对实时风载荷进行动态修正,借由两者比值对线路运行情况实时预警,具体实施步骤如图 8 所示。该技术实现了台风天气对输电线路运行状态影响的实时监测及预警,一定程度上减轻了灾害损失。但是,该技术在利用 DOFS 技术获取风速信息方面,与实时风速值的重合度仍然存在一定偏差,其测量系统的精度有待进一步提高。

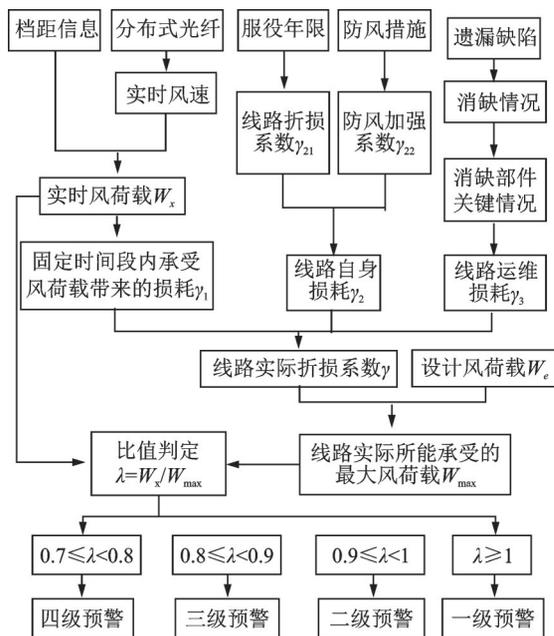


图 8 输电线路状态评判框架图

Fig.8 Framework diagram of status evaluation on transmission line

2019 年,东北林业大学的郝伟博等人^[30]自研了 Φ -OTDR 系统,其空间分辨率达 5 m,频率监测范围达 0.1~50 kHz,验证了 Φ -OTDR 系统用于架空输电线路舞动监测的可行性,并利用激振器对舞动试验机上的光纤复合相线施加不同频率的外部激励,得出了当施加 1 Hz 的固有频率时接收到的信号强度最大的结论。该系统只能对输电线路运行状态定性分析,无法定量得到线缆的舞动频率和摆幅,且频率检测范围较小,监测距离有限。

2021 年南京大学 Ding Zhewen 等人^[31]进行了基于 Φ -OTDR 的导线舞动技术研究。通过搭建基于 Φ -OTDR 的 DAS 系统在实验室进行的模拟实验,建立了输电线路状态的数学模型,从而验证了该系统可以对线路的舞动状态进行定量分析,推测覆冰厚度误差在 10% 以内。为架空线舞动监测,乃至覆冰监测提供了一条切实可行的技术路线。

2022 年,武汉理工大学 Yan Qizhong 等人^[32]为了提高监测系统的频响特性,减小噪声对测量带来的影响,提出了一种基于啁啾光纤光栅阵列的增强 Φ -OTDR 监测系统,通过光栅的反射信号取代光纤中的背向瑞利散射信号,进一步加强了分布式舞动监测系统的灵敏度,弥补了传统 Φ -OTDR 监测系统灵敏度较差、信号强度较弱的缺点。他们在实验室进行了 OPGW 振动监测实验,系统在 10 Hz 处具有较高的信号保真度,与施加在缆线的激励频率相符,验证了监测系统的可靠性。但由于系统的传感距离受到啁啾光纤光栅反射信号的限制,且无法利用既有 OPGW 光缆中的冗余光纤,目前尚不能满足长距离的输电线路的监测需求。

3 雷击监测

3.1 雷击定位原理

对于架空输电线路而言,雷击是常见灾害之一,其中以架空地线受雷击影响最为严重。雷击会击穿缆线的外层保护,使得缆线的强度降低,容易造成接地短路故障,还会造成缆线断股等严重事故,对输电线路的安全稳定运行存在巨大威胁。但由于输电线路跨度大且雷击发生点难以预估,通常只能在雷击事件发生后对雷击点加以定位。近年来,人们对 OPGW 的雷击定位原理及可行性展开了大量研究,其中基于 OPGW 光纤中光偏振态变化的雷击定位法已经被应用于实际监测当中。

根据法拉第磁光效应,当一束平面偏振光在介质中传播时,若在平行于光的传播方向上加上一强磁场,会导致该传输光的偏振方向发生旋转,旋转角度与磁场沿着光传播方向的分量以及光穿越介质的长度之积成正比,比例系数为费尔德常数,大小与光纤本身材质以及传输光波长等有关^[33]。因此,OPGW 光纤中的传输光会受到光纤外部强磁场的调制,当 OPGW 受到雷击时,脉冲电流引发的强磁场会使得光纤中传输光的偏振态产生剧烈变化。所以根据上述原理,对雷击前后 OPGW 光纤中传输光的偏振态进行监测从而实现雷击点的定位,定位原理如图 9 所示。

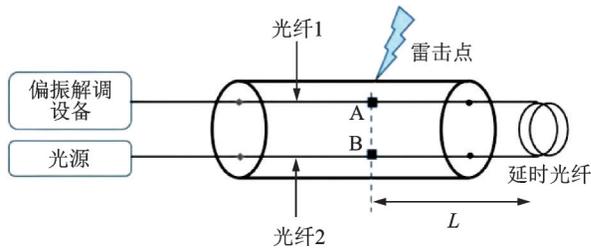


图9 OPGW雷击定位原理图

Fig.9 Schematic of OPGW lightning strike positioning

图中,A、B两点为线缆受到雷击后,OPGW内部两根光纤的偏振态波动点,激光器发出的传输光经过光纤2通过延时光纤进入光纤1中,最后返回始端的偏振解调设备。偏振解调设备解调得到的光偏振态信息由数据处理模块分析得到A、B两点的偏振态发生突变的时间差,从而推算出雷击点距离延时光纤即变电站距离。此外,除了法拉第效应会使得OPGW光纤中传输光偏振态发生变化之外,由于雷击产生的热效应会使得线缆雷击点处的温度瞬时升高,因此对线路沿线的温度进行监测也是OPGW雷击监测的手段之一。由于需要对整条光纤中传输光的偏振态以及光纤沿线温度进行测量,因此DOFS技术是雷击监测的最佳选择。

3.2 DOFS在架空线雷击监测中的应用

2013年,南京大学张旭莘课题组^[34]首次利用自主搭建的BOTDR系统进行了OPGW的雷击点监测试验,定量分析了OPGW线缆在受到雷击后的温度变化,验证了BOTDR系统对OPGW线缆进行雷击监测的可行性。但是当雷击点大小(小于10 cm)与监测系统的空间分辨率(通常大于1 m)之间的差异较大时,系统温度检测的敏感度会降低。此外,由于BOTDR测量时间较长,雷击点在测量过程中已经降温,系统容易分辨不清造成漏报。为解决系统测量精度问题,2014年中国电力研究所Lidong Lu^[35]等人采用全局数据拟合算法提高了SBS频谱提取的精度。此外,对用于扫描布里渊电谱的微波源也进行了校准,使得外部干扰引起的频率偏差限制在小于1 MHz可接受的范围之内。文献[36]强调,进一步提高BOTDR系统的空间分辨率对提高输电线路雷击监测的精度具有重要意义。

2016年,武汉大学龚庆武^[37]等人提出了一种基于OPGW光偏振态的雷击点定位方法。通过对OPGW内部光纤中注入的探测光的偏振态变化进行检测来定位雷击发生位置。多次模拟实验的结果表明:系统的测距误差均小于1%。然而,该系统要求用于替代实际应用中OPGW线路长度的延时

光纤长度不得小于20.43 km,否则散射光偏振态波形的波前与波尾会发生重叠,导致雷击点不能精确定位,该问题有待进一步研究解决。

OPGW受到雷击时,由于其外绞线上的电流行波传播速度要快于光纤光信号的传播速度,因此该现象会导致上述OPGW受雷击产生的光纤内部传输光偏振态信号的波头前被调制,从而形成伪波头,在一定程度上影响了雷击定位的精度^[38]。针对这一问题,2021年国网呼伦贝尔供电公司曹春诚等人^[39]在POTDR技术的基础上提出了一种基于导数极值局部最大值优化算法的雷击点定位方法。对惠州、大连的三条OPGW线缆实际监测的结果表明,根据局部最大导数的极值位置可以对雷击点实现精确定位,且误差在1%以内。此外,在雷击OPGW光偏振态信号特性提取方面,传统方法通常采用时频分析法,如小波变换、改进奇异值分解算法等,但都存在一定局限性。2018年,贵州电网曾宪武等人^[40]提出了一种基于希尔伯特-黄变换(HHT)的雷击定位新方法,利用POTDR系统监测OPGW光纤中散射光的偏振态变化,采用HHT算法来识别伪波头从而实现雷击的精确定位。相比于上述传统的突变信号分析方法,HHT算法处理得到的结果相对误差更小,对雷击点的定位精度更高。该方法目前处于理论仿真阶段,在实际雷击监测应用中的可行性有待进一步研究。

2018年,国网电力科学研究院陈诚^[41]等人从理论上定量给出了短路冲击电流大小和BOTDR布里渊频移量之间的对应关系,此外还给出了不同冲击电流强度下OPGW温升的计算方法。在对60 m长OPGW的模拟实验中,验证了其搭建的BOTDR系统可以监测由于短路冲击电流引起的OPGW的温度变化,且计算结果与热电偶的测量值基本吻合。该方法的优点在于,除了对雷击点的定位之外,通过BOTDR系统获取的线缆温度变化能够反映短路冲击电流的大小,但由于线缆与外界环境存在热交换,其结果的精确程度尚未可知。

2018年,华南理工大学李为^[42]提出了一种基于温度场的OPGW状态监测及雷击定位技术。作者在利用ROTDR技术的基础上,构建了实际应用工程中的雷击点中心范围附近的温度分布模型,该温度分布模型服从高斯函数的形状特征。此外,作者还进行了两次雷击模拟实验,分别对两种不同型号的OPGW光缆某处施加电流大小400 A,持续时间500 ms的连续电流,用以模拟实际应用中的雷击现象。监测结果表明,监测系统的监测位置与雷击点的实际位置完全一致,实测数据生成的温度分布曲

线与构建的理论分布模型基本相符,验证了其定位技术的可行性。该技术由于只需要利用ROTDR技术来对光纤沿线的温度进行监测,避免了BOTDR温度和应变的交叉敏感问题,但也存在响应速度慢,监测距离有限等问题。

4 DOFS 架空线舞动、雷击监测技术发展趋势

与传统的监测方法相比,DOFS技术具有抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、保密性好、监测范围广等优点,目前在输电线路的舞动、雷击监测方面有着大量的应用。然而,基于光纤散射的分布式传感技术在架空输电线路状态监测领域仍存在以下不足:

1)随着电网系统的不断发展,超高压输电线路的服役规模不断扩大,相邻变电站之间的线路跨度将会达到数百千米及以上,而现有的DOFS技术普遍无法做到对单线的全程覆盖。此外,基于分布式光纤传感的架空线舞动、雷击监测对于监测系统的空间分辨率通常有着较高的要求。尤其是对雷击监测而言,由于雷击点的作用范围小,在大空间分辨率下难以被识别。而分布式光纤传感系统的测量范围和空间分辨率之间存在相互制约关系。为了提高光纤传感的测量范围,通常会增大探测光的脉冲宽度,而脉冲宽度过大又会使系统的空间分辨率降低,因此为了实现精确可靠的架空线舞动、雷击监测,必须发展新手段来突破现有的制约关系。

2)现场条件下,输电线路的外部环境往往较为复杂,线路的运行状态通常是由多个外界激励共同影响所形成,如果仅用单一参量进行输电线路监测容易对线路的运行状态产生误判^[43]。此外,交叉敏感问题也是传统分布式光纤传感的缺陷之一。

3)对不同性质的光信号进行同时处理可以利用多子载波调制和波分复用原理,它们在光纤通信网已获得广泛应用。这些事实说明多维感知融合的光纤信号接收和解调是完全可行的,它们为构建光纤通感一体化系统提供了理论基础和具体实施手段。然而,目前现有的电力光纤通信系统和传感系统没有融合,通信和传感有各自的理论模型、性能指标和系统架构等,没有现成理论能够很好分析通感一体化系统及其一体化程度。

针对上述研究问题和不足,文章提出了分布式传感技术在架空输电线路舞动、雷击监测领域未来发展的新趋势:

1)对分布式拉曼放大、光脉冲编码等提高系统

传感精度的方法进行深入研究,提高分布式传感的空间分辨率、传输距离及测量精度,突破测量范围和空间分辨率相互制约关系。2019年,暨南大学马祥杰等人^[44]基于BOTDR技术结合分布式拉曼放大实现了长距离分布式布里渊传感,其搭建的监测系统实现了50 m大小空间分辨率、100 km传感距离的快速温度传感,且在50 km处的温度测量精度达1.2℃。2010年,渥太华大学Hao Liang等人^[45]将RZ脉冲编码应用于BOTDR系统中,在50 km的传感距离上空间分辨率可达0.5 m,显著提高了BOTDR系统的空间分辨率和传感距离。上述增敏方法能够在不降低系统空间分辨率的基础上提高系统的监测距离,对分布式光纤传感输电线路舞动、雷击监测具有重要意义。

2)进一步发展多参量分布式光纤传感融合系统,结合缆线的多个参量分布对其运行状态进行综合评估,降低监测系统的误报率,提高监测精度。2017年,南京大学张旭苹课题组^[7]提出了一种多参量光时域反射传感系统(MOTDR),对布里渊背向散射光信号和瑞利背向散射光信号进行同步监测,通过对二者的并行解调实现对光纤的温度、应变和振动变化的同步监测。在内蒙古的外场实验中,也验证了该融合系统的可行性和可靠性。2019年,该课题组^[46]还提出了一种基于BOTDR的多参数输电线路覆冰预警技术,结合输电线路覆冰时的温度、积温时间和温度日较差等温度相关参数的特性,提出综合各温度相关参数判断输电线路覆冰的条件。通过对起始于武川变一条500 kV的输电线路长达一年的状态监测,验证了该技术的可靠性。2022年,广东电网有限责任公司清远供电局杨芳等人^[47]也独立搭建了一种基于BOTDR及Φ-OTDR的多参量分布式光纤传感装置。通过对风振实验的可行性分析及OPGW舞动监测实验的模拟,验证了该设备应用的可行性。当监测范围处于60 km以内,设备对线缆舞动的定位精度在±50 m以内,对线缆舞动频率监测误差小于0.06 Hz,微风振动频率监测误差小于0.01 Hz。未来多参量分布式光纤传感融合系统会成为架空输电线路监测的主流,在输电线路监测领域有广阔的发展前景。

3)围绕通信与传感协同传输的通感融合关键技术开展研究,主要包含电力光纤网络的通感融合体系架构、面向长距离电力骨干通信系统的通感融合关键技术,从融合信道、一体化波形、共存网络体系三方面开展通信和传感协同传输的关键理论及技术研究,并提出面向长距离光传输网络架构下的通感融合功率补偿控制方案。2021年,南京大学张

旭莘课题组^[48]提出了一种基于增强COTDR的具有同时测量损耗和振动监测能力的海底电缆监测系统。通过两台增强COTDR设备的双端合作,在实现单端74 km振动监测的基础上,单跨度距离为121 km的海底电缆系统可以完全覆盖1 000 km的通信距离,实现了通信与传感的协同传输,为架空水电路领域的通感融合技术研究提供了借鉴。

5 结 论

文章介绍了分布式光纤传感在架空输电线路监测领域的三种主要技术及原理,总结了DOFS系统在输电线路舞动及雷击监测领域的应用现状,指出其优点以及局限性,分析了分布式光纤传感架空线舞动、雷击监测技术目前存在的不足,提出了未来发展的新趋势。

参 考 文 献

- [1] 马国明,王思涵,秦炜淇,等.输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J].高电压技术,2022,48(8):3032-3047.
- [2] 郭应龙.输电线路舞动[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 刘纯,陆佳政,陈红冬.湖南500 kV输电线路覆冰倒塔原因分析[J].湖南电力,2005,25(5):1-3.
- [4] 葛磊.输电线路导线舞动机理及防范措施[D].济南:山东大学,2013.
- [5] 李晓辉.2018年湖北电网输电线路设备冰冻灾害受损情况分析[J].湖北电力,2018,42(3):1-4.
- [6] 夏令志,程洋,严波,等.2018年1月安徽电网输电线路覆冰舞动故障规律分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2019,24(1):73-77.
- [7] 张旭莘,武剑灵,单媛媛,等.基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J].光电子技术,2017,37(4):221-229.
- [8] 王健健,李永倩.分布式光纤传感技术在OPGW监测中的应用现状[J].光通信研究,2018,3:25-27.
- [9] 范鹏,王海涛,张雪峰,等.基于BOTDR的OPGW应变实验研究[J].光通信技术,2015,39(4):60-62.
- [10] 余雷,向文祥,胡振,等.OPGW光缆内部光纤分布式温度测量[J].光通信研究,2014,6:45-47.
- [11] Lu Lidong, Liang Yun, Li Binglin, et al. Maintenance of the OPGW using a distributed optical fiber sensor[C].2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Chengdu, China:1251-1256.
- [12] 张旭莘.全分布式光纤传感技术[M].北京:科学出版社,2013.
- [13] Ma G M, Li C R, Quan J T, et al. A fiber bragg grating tension and tilt sensor applied to icing monitoring on overhead transmission lines[J]. IEEE Trans. Power Deliv., 2011, 26(4): 2163-2170.
- [14] 丁哲文.基于Φ-OTDR的电力设施在线状态监测关键技术研究[D].南京:南京大学,2022.
- [15] 方祖捷,秦关根,翟荣辉.光纤传感器基础[M].北京:科学出版社.
- [16] Luo J, Hao Y, Ye Q, et al. Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1559-1565.
- [17] 耿军平,许家栋,韦高.基于布里渊散射的分布式光纤传感器的进展[J].测试技术学报,2002,16(2):87-91.
- [18] Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. Optical Fiber Technology, 1996, 2(3): 291-317.
- [19] 张园.基于拉曼及瑞利散射的分布式光纤温度应变传感系统[D].北京:北京交通大学,2020.
- [20] 李琨华,李成贵,陈娟丽,等.基于拉曼散射的分布式光纤传感系统真空低温热沉环境温度梯度测量[J].真空与低温,2023,29(2):171-179.
- [21] Bao X, Dhliwayo J, Heron N D, et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7):1340-1348.
- [22] 李振.光纤中高相干脉冲激光的受激布里渊散射效应[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [23] 董玉明,张旭莘,路元刚,等.布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J].光学学报,2007,27(2):197-201.
- [24] 尚盈,王昌.分布式光纤传感技术综述[J].应用科学学报,2021,39(5):843-857.
- [25] 蒋兴良,周仿荣,王少华,等.输电导线覆冰舞动机理及防治措施[J].电力建设,2008,336(9):14-18.
- [26] Wu H, Luo J, Wu J, et al. Multi-point detection for polarization-sensitive optical time domain reflectometry and its applications in electric power industry[C].Progress in Electromagnetic Research Symposium, Shanghai, China, 2016: 4912-4918.
- [27] 苗春生.应用于光纤复合架空地线的光纤分布式振动的测量[J].激光与光电子学进展,2018,55(4):80-84.
- [28] 陆飙,陈利民,刘晓波,等.一种新型输电线路风舞在线监测系统及其舞动参数测量方法[J].电力学报,2017,32(1):49-56.
- [29] 谭磊,赵永强,赵留学,等.基于分布式光纤的电网台风灾害预警方法研究[J].电测与仪表,2018,55(15):20-24.
- [30] 郝伟博,赵衍双,李卓枢,等.基于相位敏感光时域反射技术的导线舞动状态监测[J].应用科学学报,2019,37(4):437-446.
- [31] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5163-5169.
- [32] Yan Q Z, Zhou C M, Feng X B, et al. Galloping vibration monitoring of overhead transmission lines by chirped FBG array[J]. Photonic Sensors, 2022, 12(3): 220310.
- [33] Kurono M, Kuribara M, Isawa K. Field measurements and a study of transient state of polarization produced in OPGW by lightning[J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 128(4): 55-64.
- [34] 董嘉滢,王峰,吕立冬,等. BOTDR在OPGW雷击监测中的应用[C].长三角地区研究生学术论坛暨“Light up the World”光通信与光电子学术论坛,上海,2013.
- [35] Lu L, Liang Y, Li B, et al. Location of lightning stroke on OPGW by use of distributed optical fiber sensor[C]. SPIE International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, Beijing, 2014: 9297.

- [36] Lu L, Liang Y, Li B, et al. Experimental study on location of lightning stroke on OPGW by means of a distributed optical fiber temperature sensor[J]. Optics Laser Technology, 2015, 48(9): 79-82.
- [37] 龚庆武,冯瑞发,李伟,等.基于OPGW光偏振态的输电线路雷击点定位方法[J].高电压技术,2016,42(2):612-618.
- [38] 魏 韬,沈 平,杨 渊,等.雷击条件下OPGW内光偏振态信号的形成和传播特性[J].高电压技术,2019,45(6):2003-2009.
- [39] 曹春诚,马超,张哲民,等.基于OPGW的雷击点精确定位研究[J].电瓷避雷器,2021,1:111-116.
- [40] 曾宪武,李生福,李伟.基于HHT的输电线路雷击点定位研究[J].功能材料与器件学报,2018,24(3):174-178.
- [41] 陈 诚,李 涛,陈 文,等.基于BOTDR分布式光纤传感器的架空线路雷击定位系统技术研究[J].高电压技术,2015,41(增刊):121-124.
- [42] 李 为.基于温度场的OPGW光缆状态监测及雷击定位技术研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [43] 张旭苹,丁哲文,洪 瑞,等.相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J].光学学报,2021,41(1):100-114.
- [44] 马祥杰,周黎明,程凌浩,等.基于拉曼放大的长距离快速布里渊光时域反射仪[J].激光与光电子学进展,2019,56(17):253-260.
- [45] Liang Hao, Li Wenhai, Linze N, et al. High-resolution DPP-BOTDA over 50km LEAF using return-to-zero coded pulses [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1503-1505.
- [46] 熊 菲,丁文红,张益昕,等.基于布里渊光时域反射技术的多参数输电线路覆冰预警[J].电力科学与工程,2019,35(1):36-44.
- [47] 杨 芳,唐小亮,尹文阔,等.基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):169-177.
- [48] Chen Xiaohong, Zou Ningmu, Liang Lei, et al. Submarine cable monitoring system based on enhanced COTDR with simultaneous loss measurement and vibration monitoring ability [J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13115-13128.

(上接第 326 页)

表 3 三种电容触摸屏的性能对比

Tab.3 Performance comparison of three capacitive touch screens

指标	OGS	On-cell	In-cell
集成度	较高	高	更高
透光率	较高	高	更高
重量和厚度	轻薄	轻薄	轻薄
反射率和眩光	很高	低	低
技术和工艺实现难度	较高	高	高
成本	较高	高	高
良品率	较低	低	低
现存问题	加工过程削弱盖板玻璃强度	触控时存在颜色不均问题	存在触控灵敏度较差问题

容触摸屏在机载显示中的应用现状,以及 OGS、On-cell 和 In-cell 电容触摸屏在机载显示中的应用前景。前两种电容触摸屏已在机载显示中开始使用,后三种电容触摸屏集成度和透光率更高,可以进一步降低机载显示模块的重量、厚度和背光功耗,当解决现存的技术难点和工艺问题之后,应用前景可观。

未来,电容触摸屏在机载显示中形成规模化的应用后,将会对军用战机的作战性能形成强有力的提升。

参 考 文 献

- [1] 赵小珍.机载显示系统中触摸屏的设计与研究[J].电子设计工程,2021,29(23):46-50.
- [2] 丁君军,徐国祥,陈玉华,等.电容式触摸屏专利技术概况[J].中国科技信息,2014,10:172-200.
- [3] 尹志乐,盛 陈,章 鹏,等.加固电容触摸屏的关键技术研究[J].光电子技术,2020,40(2):89-93.
- [4] 马群刚.触控显示技术[M].北京:电子工业出版社,2022.
- [5] 周志敏,纪爱华.触摸屏实用技术与工程应用[M].北京:人民邮电出版社,2011:76-99.
- [6] 沈 奕.新型投射式电容触摸屏关键问题的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [7] Apple Inc. Touch screen stack-ups [P]. US: 20080165158, 2007-6-13.
- [8] Apple Inc. PET-based touchpad [P]. US:7948477, 2011-5-24.
- [9] 汕头超声显示器有限公司.一种电容式触摸板[P].CN:200920050852,2009-11-4.
- [10] 汕头超声显示器有限公司.一种单片式电容触摸感应装置[P].CN:201020503943.3,2010-8-20.
- [11] 赵海增,刘腾飞.电容式触摸屏技术综述[J].河南科技,2018,645(7):10-12.
- [12] 国防科工委军标出版发行部.GJB 5435-2005机载有源矩阵液晶显示器光度和色度测量方法[S].北京:国防科工委军标出版发行部,2006.