

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.024

# 基于故障树分析法的全光纤电流互感器可靠性研究

郭贤珊<sup>1</sup>, 张民<sup>1</sup>, 陈争光<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>, 刘建<sup>2</sup>, 庞福滨<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**全光纤电流互感器(FOCT)具有体积小、绝缘简单、无磁饱和等优点,可以更好地兼容现代数字控制和保护系统,是电流互感器的重要发展方向。目前FOCT长期运行可靠性较低,严重制约了其在数字化变电站中的推广应用。为此,文中从电路和光路两方面开展FOCT的故障树模式分析,建立覆盖FOCT整体结构的故障模式分析体系。首先,分析FOCT的结构及工作原理,并根据其回路组成划分故障;其次,提取FOCT在长期运行过程中出现的主要故障模式,对其进行原因分析和排查;然后,从方案设计、元器件筛选和施工工艺方面提出可靠性提升措施;最后,结合实际案例,利用故障树对某例光源故障开展原因分析,并提出其可靠性提升措施,验证文中所提方法的有效性。研究结果可为FOCT故障分析及运行可靠性提升提供理论依据。

**关键词:**全光纤电流互感器(FOCT);故障树;FOCT回路组成;故障模式分析;可靠性;提升措施

**中图分类号:**TM711

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)06-0201-010

## 0 引言

全光纤电流互感器(fiber optical current transformer, FOCT)采用全光纤光路结构,光纤既作为传感元件也用作传输介质,属于功能型光纤传感器。相比传统电磁式电流互感器,FOCT的优势包括:可测直流;绝缘性能良好,结构简单,安全性高;灵敏度高,抗电磁干扰能力强;频率响应范围宽,线性度好,动态测量范围大;低碳环保,经济性好;数字输出,可直接向二次设备提供数字信息,有助于系统的集成<sup>[1-4]</sup>。因此,FOCT可兼容未来先进的光计算机、光信息系统和光接口等技术设备,更符合电力系统智能化、数字化的发展方向。FOCT已成为换流站中重要的测量设备。

然而,传统电磁式互感器在电网中的运行经验已超过百年,FOCT挂网运行时间较短,现场经验仍有不足,产品成熟度有待提高。例如,光源、保偏光学器件等的性能退化影响其长期稳定性,器件内部缺陷、光路熔点缺陷等降低了系统可靠性,从而导致FOCT在运行过程中出现测量故障<sup>[5-7]</sup>。近年来,已有较多学者针对FOCT的故障机理开展研究,包括其光路告警机理、渐变故障信号特征及非线性误差识别等<sup>[8-11]</sup>,为FOCT的单一故障分析提供了理论依据。但对于覆盖FOCT整体结构的故障树及

其故障机理,尚缺乏系统性分析,导致故障的影响机理不清,缺乏提升可靠性的依据。

为此,文中采用故障树分析(fault tree analysis, FTA)的方法对FOCT进行可靠性研究。首先,全面分析电路故障模式和超辐射发光二极管(super luminescent diode, SLD)光源、耦合器、起偏器、相位调制器、保偏延迟光纤环、光纤传感头及光电探测器等FOCT光电器件的故障模式,构建完整的FOCT故障树,并详细阐述不同故障位置的故障原因。其次,提出方案设计、元器件筛选和施工过程中的可靠性提升措施,并结合案例给出故障排查的具体方法,为FOCT的故障原因分析、定位和FOCT性能提升提供参考。

## 1 FOCT原理及其故障划分

FOCT的结构如图1所示,主要由SLD光源、耦合器、起偏器、相位调制器、保偏延迟光纤环、光学传感头、光电探测器、信号处理单元等组成,共同完成光的发射、起偏、相位调制、光延时、光电探测与放大、被测电流解算等功能。其中,SLD光源发出的光经过耦合器、起偏器形成线偏振光,再由45°熔接点分为2束正交偏振光;在相位调制器施加光程差调制和通过保偏延迟光纤环传输后,2束偏振光经过 $\lambda/4$ 波片进入光学传感头,转变为左旋和右旋的圆偏振光,并在被测一次电流的法拉第磁光效应下产生相位偏移;当2束光到达光纤尾端时,又经反射镜反射后原路返回,两者的偏振态互换,再次经历磁场产生法拉第磁光效应,两圆偏振光产生的相位

收稿日期:2022-05-07;修回日期:2022-08-09

基金项目:国家电网有限公司科技项目“换流站光学直流电流互感器可靠性提升与故障预警技术研究”(5500-2021181-21A-0-0-00)

差加倍,并经过波片后又变为线偏振光,实现偏振方向的互换;最终,携带电流信息的光强经过耦合器输出到光电探测器,由信号处理单元检测 2 束偏振光的干涉相位差来实现电流的测量。

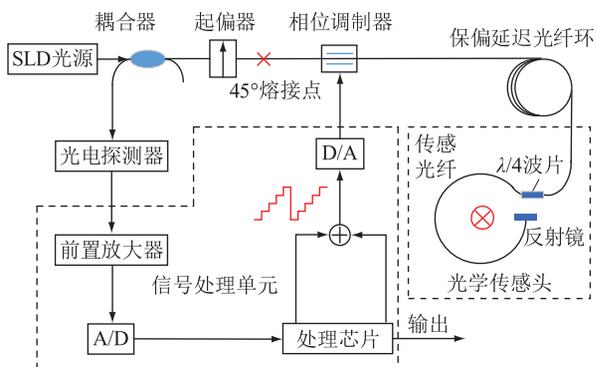


图 1 FOCT 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of FOCT structure

根据 FOCT 的物理回路组成,可将其划分为电路和光路,电路主要由信号处理单元及其接口电路、电压电路组成;光路由 SLD 光源、耦合器、起偏器、相位调制器、保偏延迟光纤环、光学传感头和光电探测器组成。在实际应用中,由于施工工艺、元器件内部缺陷及使用寿命等因素影响,FOCT 会出现测量性能下降甚至无法工作的故障。为系统性

地分析其故障模式,将故障划分为电路故障及光路故障,并根据组成对不同器件的故障现象及故障机理进行深层分析。

## 2 FOCT 故障模式及 FTA

为建立完整的 FOCT 故障模式分析体系,给出了基于电路故障和光路故障的 FOCT 完整故障树,如图 2 所示。

### 2.1 电路故障分析

电路故障包括信号处理电路故障、接口总线电路故障和电源控制电路故障。主要故障模式有:前放滤波电路输出信号失真、功率放大电路不能有效地驱动相位调制器、电源控制电路输出电压超标或不工作、接口电路输出错误或无输出以及 A/D、D/A 故障等。这些故障主要是由电子元器件缺陷、损坏,机械振动和冲击导致器件管脚折断或焊点脱落等原因引起。此外,系统时钟紊乱会导致接口输出异常;参考电压不准、电源电压浪涌或输入信号瞬时过冲会导致 A/D、D/A 故障。

### 2.2 光路故障分析

FOCT 的光路组成较为复杂,包括 SLD 光源、耦合器、起偏器、相位调制器、保偏延迟光纤环和光学

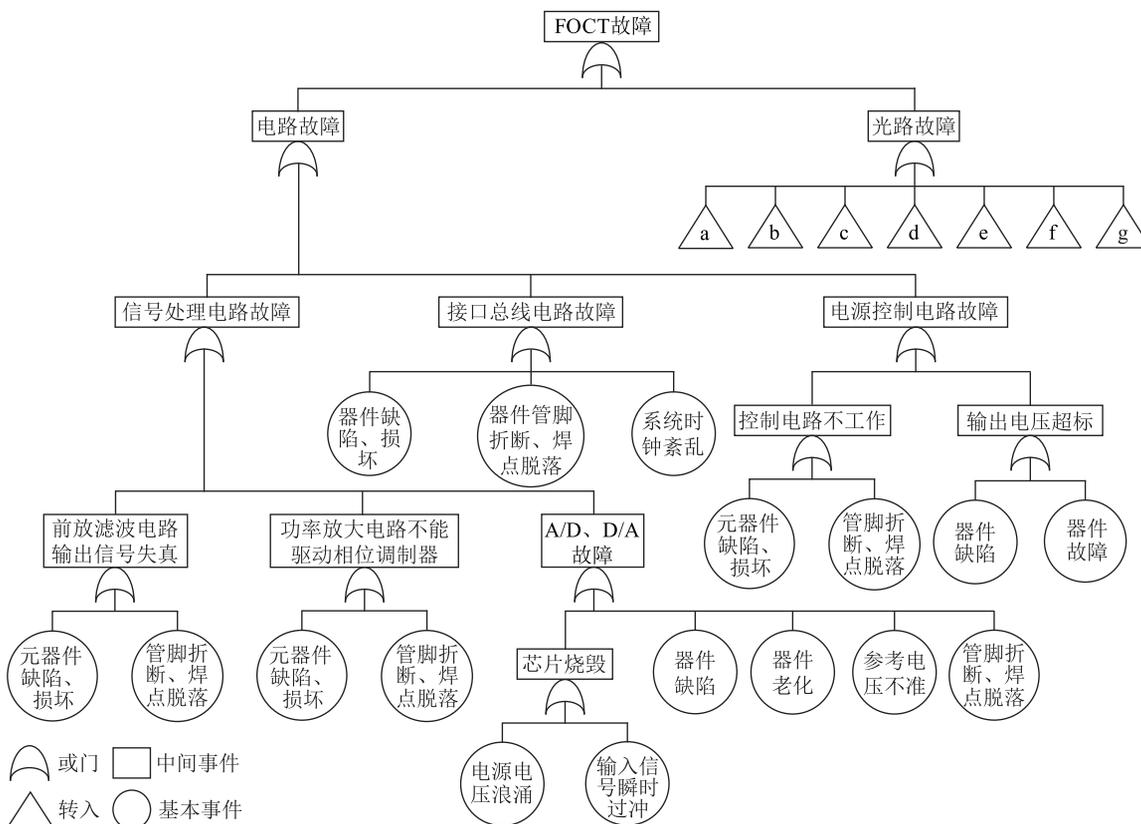


图 2 FOCT 故障树

Fig.2 Fault tree of FOCT

传感单元,且光学器件属精密器件,因此其故障表现形式也更为多样。下面对光路的故障模式及故障树进行详细分析。

### 2.2.1 SLD 光源故障模式分析

光源为 FOCT 提供光信号,光源性能的好坏直接决定了 FOCT 性能的优劣。SLD 光源因具有输出功率高、相干性低和光谱宽等特性,成为 FOCT 的理想光源。SLD 光源主要由管芯、热敏电阻、热沉、半导体制冷器、尾纤和外壳等部分组成,结构复杂,影响因素众多。光源是 FOCT 长期运行过程中的主要故障源之一,现场多次出现光源功率衰减大或光源失效导致的 FOCT 测量故障。总体上,SLD 光源的故障模式主要包括光源功率下降、无光功率输出、光谱偏移及尾纤折断等,其故障树如图 3 所示。各故障模式的具体原因如下。

(1) 光源功率下降作为最常见、诱因最多的光源故障,其主要原因有:机械应力和热应力导致管芯和尾纤之间发生耦合偏移<sup>[12]</sup>,高温环境以及长期工作产生的热效应和光化学反应导致管芯性能退化<sup>[13]</sup>,光源驱动电流下降,半导体制冷器、热敏电阻失效,热沉性能退化,温控电路失效或温控精度不高,散热差等<sup>[14-15]</sup>。

(2) 无光功率输出的原因一般为管芯完全失效、管芯与尾纤耦合断开、电极故障及驱动电流无

法施加等。其中,输入电流引线脱落、管芯内金丝接触不良、恒流源电路故障使得无电流输出等都会导致无法施加驱动电流。

(3) 光源光谱对驱动电流和管芯温度非常敏感,当恒流源不稳定或温控精度不高时,光源光谱将出现偏移。

(4) 尾纤是连接光纤与光源的跳线接头。当出现弯曲半径小、外界应力大等外因或其本身强度差、裂纹生长等内因导致尾纤折断时,也会使光源无法正常工作。

### 2.2.2 耦合器和起偏器故障模式分析

耦合器和起偏器负责光信号的分光和起偏,是重要的光路器件,其故障树分别如图 4、图 5 所示。其中,耦合器的故障模式有光纤断裂、损耗增大及耦合比改变。其中,耦合比改变主要是由温度变化、固化胶老化导致光纤张力变化以及水汽渗透破坏环氧层等原因引起。起偏器故障模式主要有光纤断裂和性能恶化等。光纤断裂主要由光纤强度差、光纤老化、弯曲半径小及振动冲击等因素造成;性能恶化主要由偏振消光比降低、损耗增大等原因引起。

### 2.2.3 相位调制器故障模式分析

相位调制器是 FOCT 实现光路信号相位变化的重要光学器件,主要故障模式可分为性能参数退化

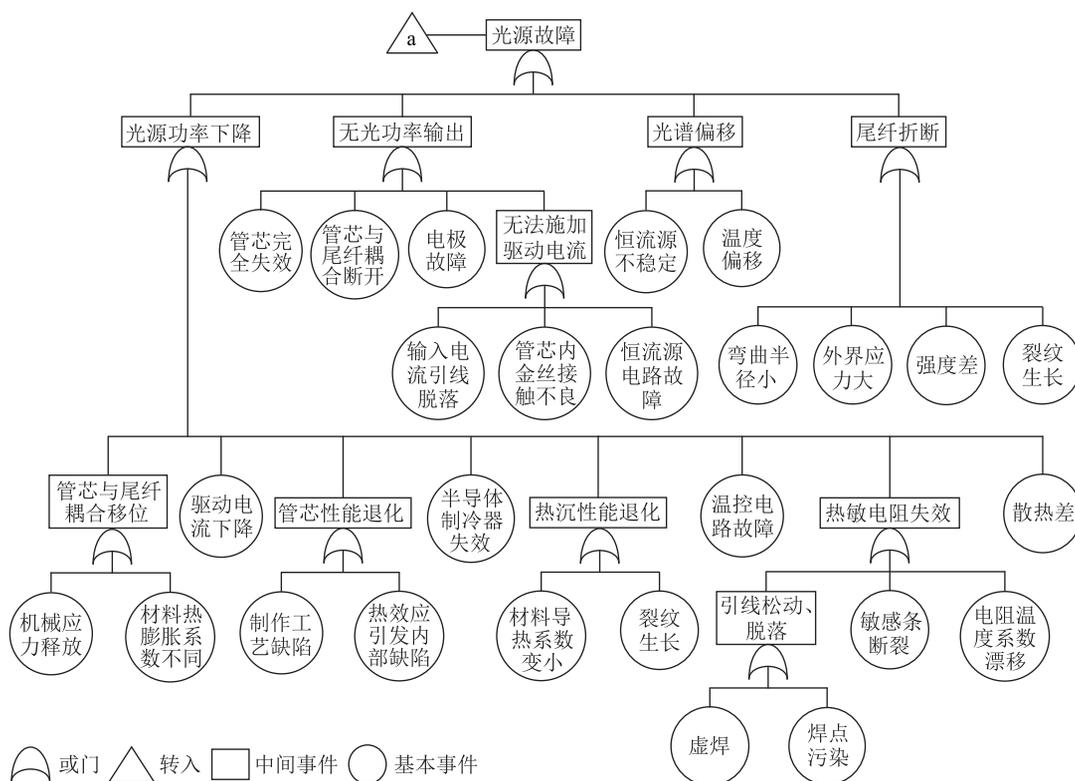


图 3 光源故障树

Fig.3 Fault tree of light source

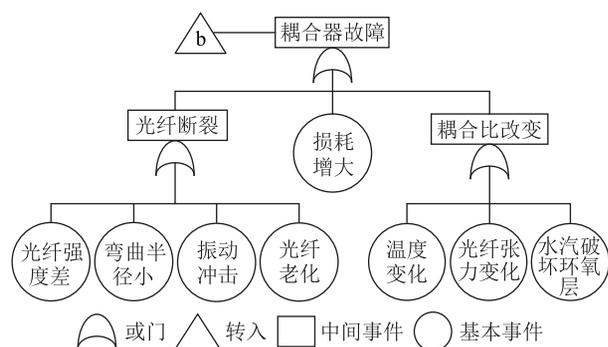


图4 耦合器故障树  
Fig.4 Fault tree of coupler

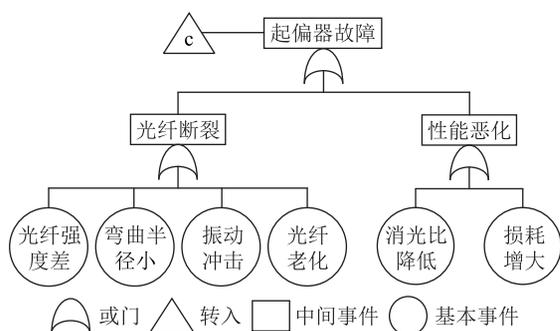


图5 起偏器故障树  
Fig.5 Fault tree of polarizer

及部件失效两大类,其故障树如图6所示。

性能参数退化故障模式主要包括光电调制系

数变化、偏振串音随温度变化及插入损耗增大,具体原因如下。

(1) 光电调制系数通常由半波电压表示,主要受环境温度以及波导上机械应力和外加电场的影响,但半波电压对环境温度更加敏感<sup>[16]</sup>。

(2) 波导芯片与尾纤耦合通常采用直接粘接的方式,由于耦合点处各种材料(LiNbO<sub>3</sub>晶体、尾纤固定陪片、保偏尾纤及耦合胶)的比热容、弹性模量以及热膨胀系数等参数不同,环境温度变化时,耦合点处会受到很大的应力作用,从而导致相位调制器的偏振串音随尾纤应力变化而变化<sup>[17-18]</sup>。

(3) 插入损耗增大的原因包括材料自身缺陷造成的波导材料及电极损耗、波导折射率分布改变导致的尾纤与波导模式失配、光纤与波导错位导致的光纤与波导耦合损耗<sup>[19-20]</sup>。

部件失效故障模式主要包括电极失效、波导失效、尾纤失效和封装失效等。

(1) 电极失效的主要原因有电极短路、被打断、被击穿、移动、脱层以及表面残存杂质或电极电迁移等。

(2) 波导失效的主要原因包括波导开路 and 波导性质改变。波导开路是由晶片表面微小裂纹生长扩张或背面应力过大导致;波导性质改变是由于质

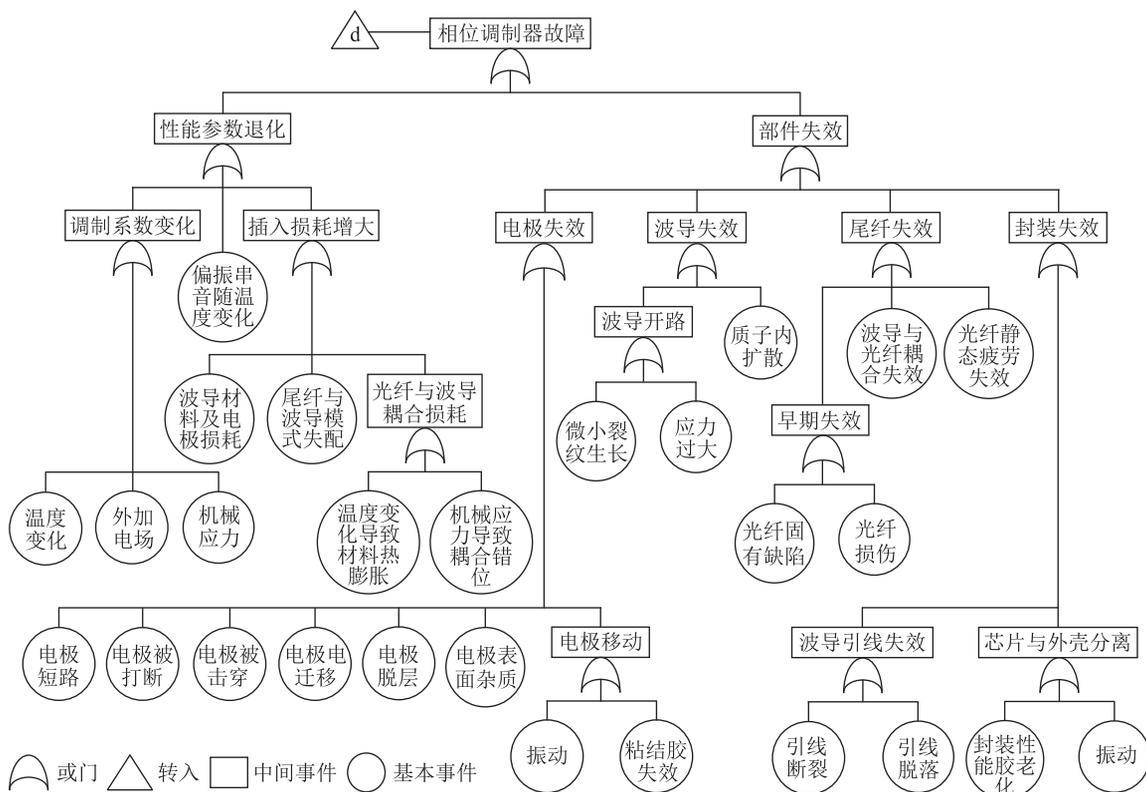


图6 相位调制器故障树  
Fig.6 Fault tree of phase modulator

子向内继续扩散,破坏波导结构。

(3) 尾纤失效的主要原因包括由光纤固有缺陷或在装配过程中受到微损伤造成的早期失效、由环氧胶失效导致的波导与光纤耦合失效和光纤静态疲劳失效。

(4) 封装失效的主要原因包括由引线本身缺陷、外界振动导致的引线断裂或引线脱落,封装胶老化或外界振动造成的芯片与外壳分离。

#### 2.2.4 保偏延迟光纤环故障模式分析

保偏延迟光纤环在 FOCT 中的作用是保证光沿着正交偏振模式传输,并起到施加延时保证调制效果的作用,主要故障模式有光纤断裂、光纤线圈松动、光纤损耗增大以及偏振串音增大等,其故障树如图 7 所示。

(1) 光纤断裂主要由光纤老化、自身强度差,以及受轴向拉力、径向扭力及弯曲半径小等外界应力大等原因引起。

(2) 光纤线圈松动主要由振动、温度过高致使固化胶松软以及固化胶老化等原因引起。

(3) 光纤损耗包括吸收损耗、散射损耗和弯曲损耗等。其中,吸收损耗是光波被材料固有吸收面和杂质转变为其他能量而造成的损耗;散射损耗则是由于材料微观密度不均匀,光纤受到照射时发生散射而产生的损耗<sup>[21]</sup>;弯曲损耗是因光纤弯曲导致受力,改变折射率而造成的损耗,该损耗会随着光纤弯曲半径的增大而减小,随着光波长的增大而增大<sup>[22]</sup>。

(4) 偏振串音增大的主要原因包括光纤绕环过程中张力大、温变使光纤与固化胶间产生应力作用、排纤混乱造成光纤相互挤压形成了明显的干扰双折射。由于光纤骨架、光纤和固化胶的热膨胀系

数不匹配,温度变化对光纤产生附加应力,形成随温度变化的干扰双折射<sup>[23-24]</sup>。另外,当排纤不够严密时,上下层会出现排列混乱,最终导致光纤屈曲失控<sup>[25]</sup>。

#### 2.2.5 光学传感头故障模式分析

光学传感头由  $\lambda/4$  波片、传感光纤和反射镜组成,用于感应被测电流,其主要故障模式为无光信号输出和性能下降两方面,故障树如图 8 所示。

(1) 无光信号输出一般由光纤断裂、光纤熔点断开、反射镜与传感光纤分离等原因引起,其中光纤断裂又由外界应力作用或光纤老化、强度差等内因引起。

(2) 性能下降的原因有传感光纤线性双折射大<sup>[26]</sup>、反射镜反射率降低、光损耗大、排纤混乱导致光纤相互挤压、传感单元首尾未闭合、光纤线圈松动、 $\lambda/4$  波片相位延迟大等。其中光损耗大是因为光纤自身缺陷、传感光纤与反射镜移位、光纤表面污损、光纤弯曲损耗和反射镜破损等均会产生光损耗;光纤线圈松动则由振动、高温导致固化胶松软、固化胶老化等原因引起。

#### 2.2.6 光电探测器故障模式分析

光电探测器由半导体光电二极管和跨阻抗前置放大器组成,负责将返回的光信号转化为电信号,供给后级的信号处理单元,其主要的故障模式为性能参数退化、输出异常和无电信号输出等,故障树如图 9 所示。

性能参数退化主要包括光电二极管响应度降低和噪声电压变大两方面。其中,温度变化、纤芯受损、光窗裂纹、尾纤移位或光敏面沾污均会导致探测器中噪声增大<sup>[27]</sup>,降低其响应度。探测器输出异常是由光路偏移或放大电路故障引起的。无电信

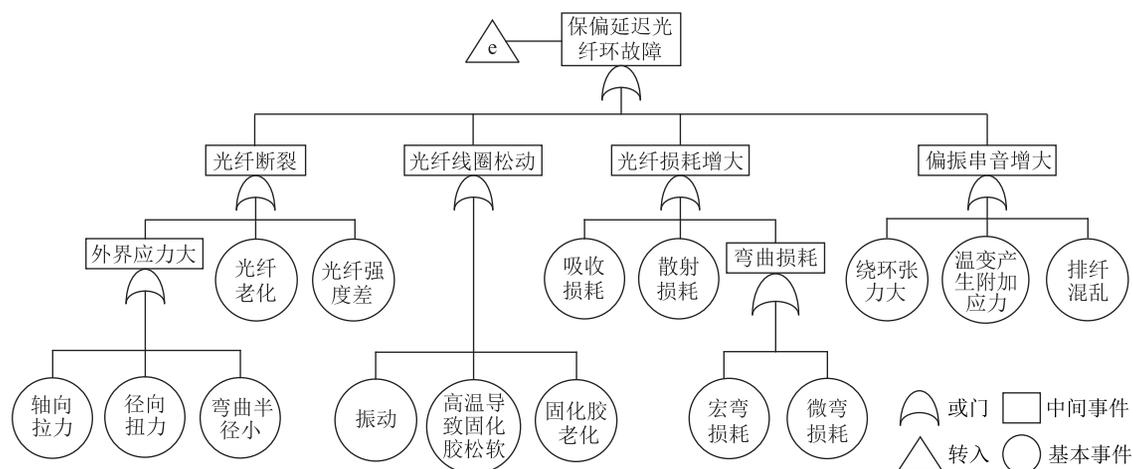


图 7 保偏延迟光纤环故障树

Fig.7 Fault tree of polarization maintaining delay fiber loop

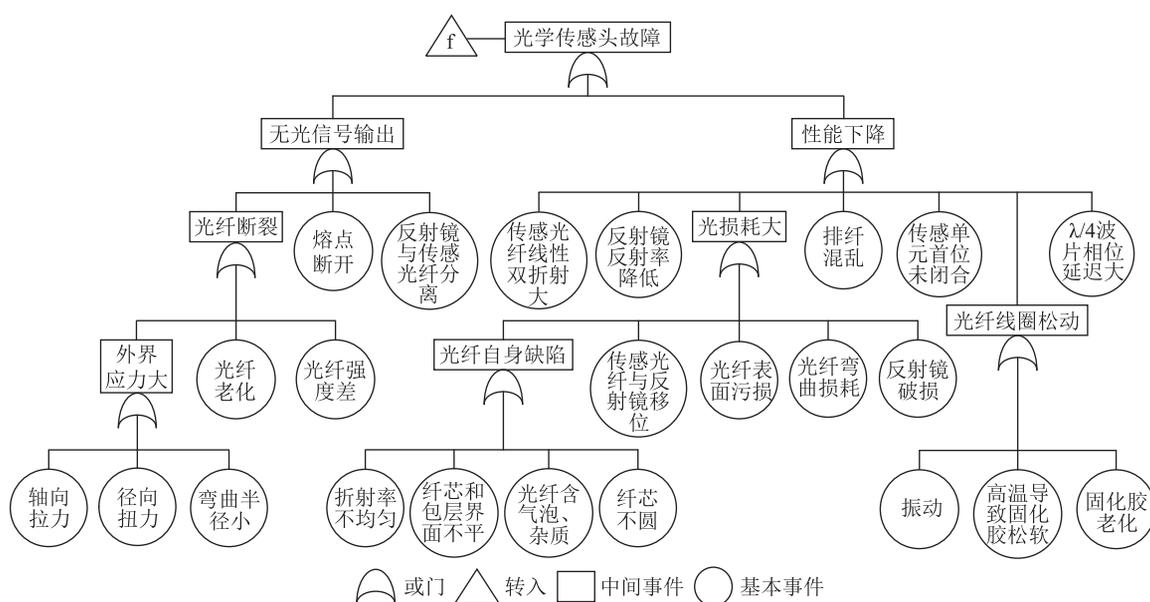


图 8 光学传感头故障树

Fig.8 Fault tree of optical sensor head

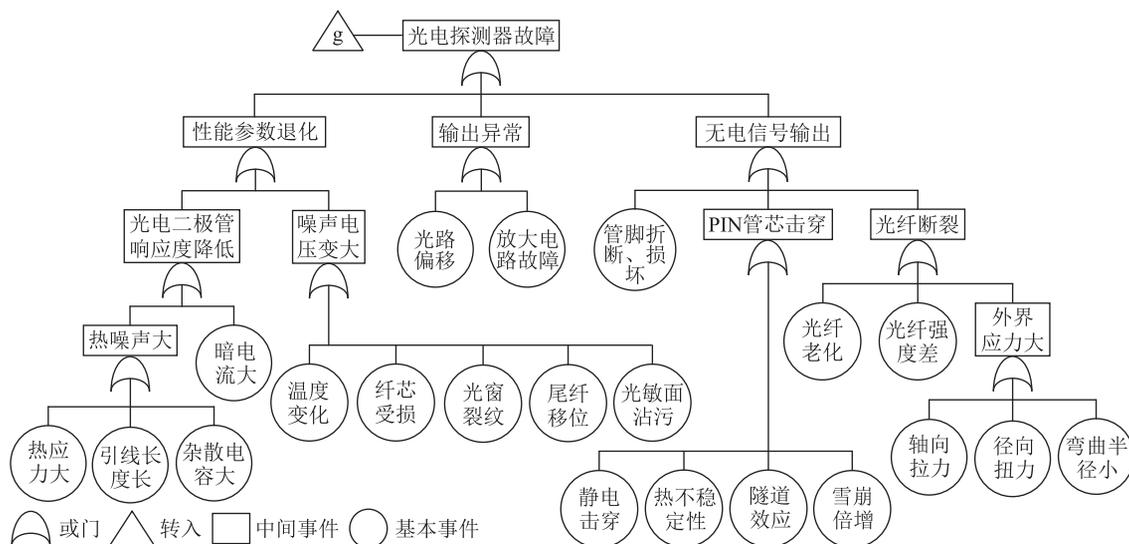


图 9 光电探测器故障树

Fig.9 Fault tree of photodetector

号输出主要由管脚折断、损坏, PIN 管芯击穿或光纤断裂所致。

### 3 FOCT 可靠性提升措施

由第 2 章分析可知, FOCT 组成元器件较多、故障模式复杂、影响因素众多, 但结合其故障树可以发现, 一些故障可以通过前期优化设计方案、加强元器件筛选、提升施工工艺等手段避免, 从而提升 FOCT 的可靠性。

#### 3.1 优化设计方案

在 FOCT 早期设计阶段, 对选用的光电元器件、电路结构布局进行优化设计, 可以有效避免因设计

不当造成的故障, 降低 FOCT 故障率。

(1) 针对 FOCT 的光路结构和光学器件的故障模式, 设计阶段选用性能稳定、可靠性较高的 SLD 光源和相位调制器等光学器件, 避免由元器件本身指标不足造成的性能下降或功能失效问题。

(2) 针对检测电路的设计, 首先要保证设计电路功能正确。在进行结构设计时, 兼顾各组件的模块化, 合理布局印刷电路板 (printed circuit board, PCB), 保证元器件所受机械应力、电冲击小于额定承受能力, 从而降低电路板的噪声干扰、提高运行稳定性。

(3) 充分考虑热设计。热设计的输入条件主要

考察 FOCT 运行情况下工作环境温度、电子器件功耗、电路板的结构和位置等因素;对于光源、光电探测器、高功耗电子器件等对温度敏感的器件,进行针对性的温控或散热设计,同时保证设备的密封性良好,避免外界运行环境对设备性能造成影响。

### 3.2 加强元器件筛选

为避免因元器件本身缺陷导致 FOCT 在运行中发生故障,在保证所有器件性能满足设计要求的前提下,应优选使用成熟、可靠性高、长时间内不存在停产危机的光电子器件。在此基础上,开展二次筛选,淘汰在生产过程中存在缺陷的元器件。

(1) 光学器件筛选。首先检查器件外观上是否完好、封装是否严密、引脚焊接是否牢靠,在此基础上通过测试检验其性能参数是否能满足使用要求。

SLD 光源作为 FOCT 中唯一的有源器件,其性能好坏对 FOCT 的影响很大。前期 SLD 的筛选过程主要针对其出光功率、光波长、驱动电流、温控电流以及内部温度等参数<sup>[28]</sup>。对光源施加不同的驱动电流测量其输出功率范围,并长时间施加恒定的驱动电流监测其出光功率的大小和稳定性,进而挑选出光功率和光谱稳定的光源。针对近期现场多次出现的 SLD 光功率快速衰减的问题,可采用老化试验检测其功率衰减曲线,剔除指定老化时间内光功率衰减过大的不合格光源。

(2) 电子元器件筛选。电子元器件筛选可淘汰早期失效的产品,降低失效率,提升元器件长期工作的可靠性。筛选总原则为根据元器件的特性、参数和生产工艺选择合适的方法对其可能存在的故障进行筛选。电子元器件表面或内部发生各种化学或物理反应是导致其失效的主要原因,而高温可以加快器件失效过程,因此对器件进行高温贮存,使有缺陷的器件能及时暴露并将其排除。此外,当 FOCT 在户外恶劣环境中工作且长期运行时,温度变化较大,一些热匹配性能差的元器件会因热胀冷缩的应力作用失效,因此须对元器件进行温度循环实验,剔除热性能差的器件<sup>[29]</sup>。

### 3.3 提升施工工艺

在元器件组装过程中,需要加强工艺管控,避免因施工不当引起器件损坏。

(1) 光纤耦合点的熔接工艺。FOCT 光路中存在多个光纤熔接点,光纤熔接质量直接影响光传输过程中的损耗,提高光纤熔接工艺有助于提高 FOCT 的性能。在光纤熔接前要做好光纤端面处理,保持光纤的清洁、光纤端面切割得平整和无损伤;熔接时要保证光纤端面对准,若熔接错位、出现

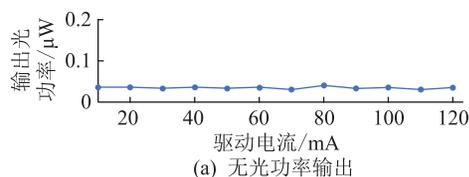
气泡或细径等须重新熔接,可通过热缩管或涂覆等方法加强光纤熔接点的保护;熔接后测量熔接点损耗,对损耗较大的熔接点重新熔接,确保熔接质量满足要求。

(2) 光学传感头制作工艺。制作光学传感头时,首先保证波片、传感光纤和反射镜完好且相互间连接可靠,对熔接好的传感光纤进行损耗检测,并对损耗超标的传感头进行故障排查。其次,光纤盘绕前,应静置光纤释放应力;盘绕时,既要保证排纤紧密,又要合理选择光纤弯曲半径,避免光纤间相互挤压。在封装传感光纤时,传感头外壳要保证密封性,防止在户外恶劣环境中因水汽或化学气体入侵而加快传感头老化。最后,对传感头进行损耗检测,排查制作过程中引入的光路损耗。

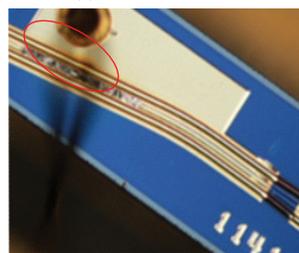
(3) 保偏延迟光纤环绕制作工艺。在绕制过程中,应控制绕环张力、确保排纤紧密,并使用固化胶固定密封光纤环;在绕制结束后,对光纤环的损耗和偏振串音进行测量。待 FOCT 整体装配完成之后,还须对整机进行高温贮存、温度循环实验以及性能测试。在后期使用和调试过程中注意静电防护,防止因静电引起器件失效。

### 3.4 实际案例分析

以 2021 年 10 月某换流站运行的一台 FOCT 为例进行分析。该 FOCT 出现了光功率降至 0 左右的现象(正常为 1 000  $\mu\text{W}$  左右),在施加不同驱动电流的情况下输出光功率如图 10(a)所示。根据图 3 光源 FTA 模型,对无光功率输出现象开展故障原因排查,发现其原因为管芯完全失效。进一步对光源管芯进行解体,发现流经管芯的驱动电流过大导致管芯击穿,造成光源失效,如图 10(b)所示。



(a) 无光功率输出



(b) 管芯击穿

图 10 光源的故障现象及原因

Fig.10 Fault phenomenon and the cause of light source

原光源驱动电路设计如图 11(a)所示,其中  $V_1$

为控制电压;  $R_s$  为采样电阻;  $V_f$  为采样电压。根据运算放大器“虚短”特性可计算得到流经 SLD 光源管芯的电流为  $V_f/(GR_s)$ , 其中  $G$  为运算放大器  $U_1$  的增益。当控制电压  $V_i$  不稳定或过大时, 会导致驱动电流过大, 超出 SLD 光源管芯可承受的最大电流时, 管芯损坏。

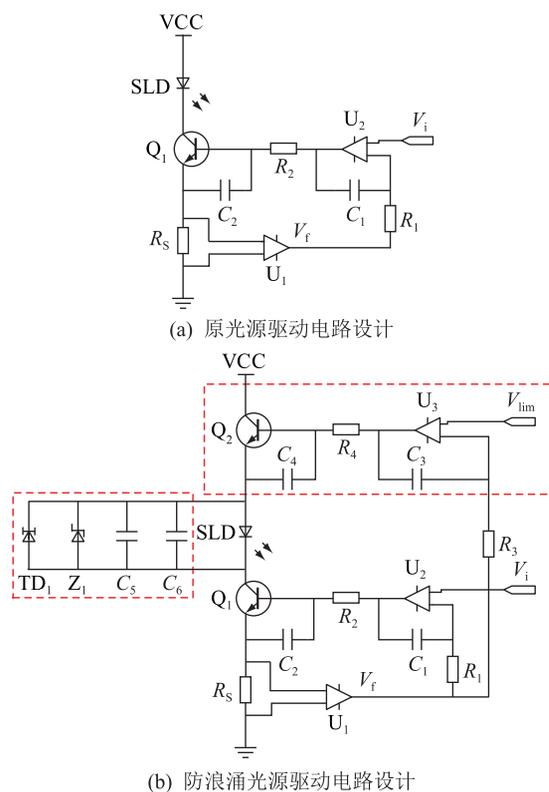


图 11 光源电路优化设计

Fig.11 Optimization design of light source circuit

为提升光源工作可靠性, 对光源的电路结构进行优化设计, 如图 11(b) 所示。红框部分为驱动电路新增的防浪涌保护设计, 包括两部分, 一部分为稳定电压  $V_{lim}$  (一般大于控制电压  $V_i$ ) 控制的恒流驱动电路, 当  $V_i$  出现波动时, 通过反馈电路将流经 SLD 光源的电流调节为  $V_{lim}/(GR_s)$ , 从而控制光源驱动电流在合理范围; 另一部分为二极管  $TD_1$ 、单向瞬态抑制二极管  $Z_1$  和电容组成的并联电路, 起到吸收反向电流和反向电压的作用, 保证光源电路两端电压小于额定承受能力。

#### 4 结语

文中针对 FOCT 运行故障率较高的问题, 从电路和光路两方面分析了 FOCT 出现的故障模式, 建立了不同元器件的故障树, 并给出其故障模式具体现象及故障原因, 主要表现为外界环境或元器件本身缺陷所导致的性能下降、功能失效。在此基础上, 提出了优化设计方案、加强元器件筛选和提升

施工工艺的 FOCT 可靠性提升措施。在 FOCT 设计和生产阶段通过合理设计电路及光路布局, 检测筛选不合格的光电元器件, 并加强光纤熔接点、光学传感头及保偏延迟光纤环等重点部位的熔接和绕制工艺, 以提升 FOCT 入网前的产品质量和环境适应能力, 降低其运行故障率。研究结果可为 FOCT 的故障分析和可靠性提升提供理论参考。

#### 参考文献:

[1] 樊占峰, 白申义, 杨智德, 等. 光学电流互感器关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 67-74.  
 FAN Zhanfeng, BAI Shenyi, YANG Zhide, et al. Research on key technology of optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 67-74.

[2] 刘闯闯, 朱学华, 苏浩. 高灵敏度全光纤电流传感器研究进展[J]. 激光技术, 2022, 46(2): 175-181.  
 LIU Chuangchuang, ZHU Xuehua, SU Hao. Research progress of high sensitivity all fiber optic current sensor[J]. Laser Technology, 2022, 46(2): 175-181.

[3] 阮思焯, 王德林, 徐凯, 等. 直流输电系统电子式电流互感器故障统计分析[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3170-3175.  
 RUAN Siye, WANG Delin, XU Kai, et al. ECT fault statistical analysis of DC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3170-3175.

[4] 商和龙, 李洪全, 周康, 等. 全光纤电流互感器关键器件故障模式分析[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12): 251-256.  
 SHANG Helong, LI Hongquan, ZHOU Kang, et al. Analysis on critical component failure mode of fiber optical current transformer[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(12): 251-256.

[5] 胡浩亮, 黄俊昌, 夏历, 等. 全光纤电流互感器长期温度稳定性研究[J]. 电工电气, 2019(1): 5-9.  
 HU Haoliang, HUANG Junchang, XIA Li, et al. Study on long-term temperature stability characteristics of fiber optical current transformer[J]. Electrotechnics Electric, 2019(1): 5-9.

[6] LI Y S, ZHANG W W, LIU X Y, et al. Characteristic analysis and experiment of adaptive fiber optic current sensor technology[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 333.

[7] 邓凯, 冯轩, 何茂慧, 等. 全光纤电流互感器在直流输电工程中的运行维护[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 16-20.  
 DENG Kai, FENG Xuan, HE Maohui, et al. Operation and maintenance of FOCT in DC transmission project[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 16-20.

[8] 郭金刚, 司磊, 袁志军, 等. 光纤电流互感器光路故障自诊断告警算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 172-177.  
 GUO Jingang, SI Lei, YUAN Zhijun, et al. Self-diagnosing alarm algorithm for optical path fault of fiber optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 172-177.

[9] 王立辉, 罗拓, 宋亮亮, 等. 光纤电流互感器渐变故障时频特征辨识[J]. 电力工程技术, 2022(5): 227-232.  
 WANG Lihui, LUO Tuo, SONG Liangliang, et al. Identification

- of gradual failure time-frequency feature in fiber optical current transformer [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022 (5): 227-232.
- [10] 庞福滨,李鹏,魏旭,等. 正弦波调制的全光纤电流互感器故障机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(17): 153-160.  
PANG Fubin, LI Peng, WEI Xu, et al. Analysis on fault mechanism of fiber-optical current transformers with sine wave modulation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(17): 153-160.
- [11] 王立辉,张文鹏,安义岩. 基于 CEEMDAN-ZCR 的光纤电流互感器非线性误差识别[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4): 199-204.  
WANG Lihui, ZHANG Wenpeng, AN Yiyang. Nonlinear error recognition of FOCT based on CEEMDAN-ZCR [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 199-204.
- [12] 王夏霄,冯志芳,于佳,等. 光源功率对光纤电流互感器的性能影响研究[J]. *半导体光电*, 2016, 37(3): 445-448, 454.  
WANG Xiaoxiao, FENG Zhifang, YU Jia, et al. Influence of SLD's power on performance of fiber optical current transformer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(3): 445-448, 454.
- [13] 晁代宏,马静,张春熹. 基于性能退化数据的超辐射发光二极管可靠性评估研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3044-3048.  
CHAO Daihong, MA Jing, ZHANG Chunxi. Reliability assessment of superluminescent diodes from performance degradation data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3044-3048.
- [14] 王龙. 1.3  $\mu\text{m}$  波段超辐射发光二极管的制备和关键性能研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.  
WANG Long. Fabrication and key properties study of 1.3  $\mu\text{m}$  band superluminescent diodes [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [15] 许宜民,闫浩,何世安. 一种三级半导体制冷器失效分析研究[J]. *低温与超导*, 2014, 42(4): 53-56.  
XU Yimin, YAN Hao, HE Shian. Study on the failure of a three-stage cascade semiconductor refrigerator [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2014, 42(4): 53-56.
- [16] 翁苍杰,杨德伟,郑远生,等. Y 波导调制器半波电压及调制相位漂移研究[J]. *半导体光电*, 2017, 38(2): 161-163, 168.  
WENG Gangjie, YANG Dewei, ZHENG Yuansheng, et al. Research on half-wave voltage and phase drift of Y-waveguide modulator [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(2): 161-163, 168.
- [17] 田自君,蔡文峰,吴昊,等. 保偏光纤环与 Y 波导芯片直接耦合技术研究[J]. *半导体光电*, 2017, 38(1): 57-60.  
TIAN Zijun, CAI Wenfeng, WU Hao, et al. Research on direct coupling of PM fiber coil and Y-branch  $\text{LiNbO}_3$  waveguide chip [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, 38(1): 57-60.
- [18] 刘福民,黄韬,李瑞龙,等. 外应力对 Y 波导器件尾纤消光比的影响[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1636-1640.  
LIU Fumin, HUANG Tao, LI Ruilong, et al. Effects of external stress applied to PM fiber-pigtail on extinction ratio of a Y-branch multi-functional integrated optical device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1636-1640.
- [19] 邹欢欢,姚晓天,于超,等. 基于偏振串扰分析仪的  $\text{LiNbO}_3$  集成 Y 波导的测试方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 95-100.  
ZOU Huanhuan, YAO Xiaotian, YU Chao, et al. Test method for  $\text{LiNbO}_3$  integrated Y-waveguide based on polarization crosstalk analyzer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 95-100.
- [20] HIRAI A, MATSUMOTO Y, SATO T, et al. Optical multimode interference couplers of  $\text{Ti:LiNbO}_3$  [J]. *Optics Communications*, 2021, 501: 127325.
- [21] 刘诗明. 光纤弯曲损耗的影响因素及其对策[J]. *无线互联科技*, 2012(10): 139.  
LIU Shiming. Influencing factors and countermeasures of optical fiber bending loss [J]. *Wireless Internet Technology*, 2012(10): 139.
- [22] 白若兰. 应力型保偏光纤及其偏振分束研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.  
BAI Ruolan. Research on stress-type polarization-maintaining fiber and its polarization beam splitter [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [23] 李绪友,张琛,何周,等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1053-1057.  
LI Xuyou, ZHANG Chen, HE Zhou, et al. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1053-1057.
- [24] 于强,张琛,何周,等. 固胶对光纤线圈热应力干扰双折射的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 176-180.  
YU Qiang, ZHANG Chen, HE Zhou, et al. Influence of coating adhesive on thermal stress interference birefringence of optical fiber coil [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 176-180.
- [25] 孟照魁,张春熹,杨远洪,等. 光纤环绕制过程中的张力分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(3): 307-310.  
MENG Zhaokui, ZHANG Chunxi, YANG Yuanhong, et al. Analysis of stress in winding fiber-optic ring [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(3): 307-310.
- [26] 郝兆荣,王强,达建朴,等. 基于光学互易回路的全光纤电流互感器的研究与应用[J]. *光电工程*, 2020, 47(4): 26-33.  
HAO Zhaorong, WANG Qiang, DA Jianpu, et al. Research and application of all-fiber optic current transformer based on optical reciprocity loop [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 26-33.
- [27] 陈浩敏,王军龙,李俊一,等. 基于故障模式与影响分析法和故障树的全光纤电流互感器故障诊断专家系统[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(2): 1-8.  
CHEN Haomin, WANG Junlong, LI Junyi, et al. Fault diagnosis

expert system for fiber optical current transducer based on failure mode and effect analysis and fault tree[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(2):1-8.

- [28] 殷建玲,李莉,毛少娟,等. 光纤陀螺光源筛选与评价方法研究[J]. 半导体光电,2014,35(4):581-584.

YIN Jianling,LI Li,MAO Shaojuan, et al. Study on screening and evaluation methods of superluminescent diode in I-FOG[J]. Semiconductor Optoelectronics,2014,35(4):581-584.

- [29] 周冬娣. 电子元器件可靠性与二次筛选[J]. 电子技术与软件工程,2019(14):100-101.

ZHOU Dongdi. Electronic component reliability and secondary screening[J]. Electronic Technology & Software Engineering,

2019(14):100-101.

作者简介:



郭贤珊

郭贤珊(1972),男,硕士,研究员级高级工程师,从事特高压直流输电技术及设备管理工作(E-mail:xianshanguo@sgcc.com.cn);

张民(1974),男,博士,研究员级高级工程师,从事变电站运维管理工作;

陈争光(1988),男,博士,高级工程师,从事直流测量设备管理、电力系统继电保护工作。

### Reliability research of fiber optical current transformer based on fault tree analysis

GUO Xianshan<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, CHEN Zhengguang<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, PANG Fubin<sup>2</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The fiber optical current transformer (FOCT) has distinguishing advantages of small size, simple insulation, no magnetic saturation. It can be better compatible with modern digital control and protection systems, which has become an important development direction of current transformer. However, the reliability of FOCT in long-term operation is low at present, so its popularization and application in digital substations is seriously restricted. In this paper, the fault tree analysis of FOCT is comprehensively carried out from both the circuit and the optical path, and a fault mode analysis system covering the overall structure of FOCT is established. Firstly, the structure and operating principle of FOCT are analyzed, and the fault is divided according to its circuit composition. Secondly, the main fault modes occurring in the long-term operation of FOCT are extracted, and the listed fault modes are investigated one by one. Then, the reliability improvement measures are proposed from the aspects of scheme design, component selection and construction technology. Finally, the fault tree is used to analyze the cause of a light source fault combining with an actual case, and the reliability improvement measures are proposed to verify the effectiveness of the proposed method. The research can provide a theoretical basis for FOCT fault analysis and operation reliability.

**Keywords:** fiber optical current transformer (FOCT); fault tree; loop composition of FOCT; failure mode analysis; reliability; improvement measures

(编辑 陆海霞)