

# 绝缘子沿面局部放电的光电探测效率分析研究

朱旭亮<sup>1</sup>, 何金<sup>1,2</sup>, 张黎明<sup>3</sup>, 邢向上<sup>1</sup>, 陈荣<sup>1</sup>

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 天津市电力物联网企业重点实验室, 天津 300384; 3. 国网天津市电力公司, 天津 300232)

**摘要:**为了实现荧光光纤局部放电检测系统的开发,针对绝缘子沿面放电光辐射特性,对荧光光纤光电测量系统关键性能和匹配效率进行了对比分析。通过试验获得了绝缘子沿面放电光谱主要成分、特征谱线和随放电强度变化的光谱统计范围,并结合绝缘子沿面放电发射光谱、荧光光纤激发光谱、光纤的捕获效率,对比分析了两种荧光光纤对局部放电的荧光激发效率,得到了两种典型聚苯乙烯(PS)荧光光纤的激发强度和激发效率。结果表明:激发光谱为299~477 nm的光纤要优于294~410 nm的光纤;R3896型光电倍增器(PMT)与荧光光纤系统结合匹配效率更优,PMT在最优驱动偏压下信噪比(SNR)达到峰值12.45 dB;在最优驱动偏压下自然散热系统的自温漂效应大致为7%,冷却恢复时间大致为40 min。

**关键词:**绝缘子沿面放电;局部放电;荧光光纤;光测法;发射光谱

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)07-0104-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.016

## Study on Photoelectric Detection Efficiency of Insulator Creeping Partial Discharge

ZHU Xuliang<sup>1</sup>, HE Jin<sup>1,2</sup>, ZHANG Liming<sup>3</sup>, XING Xiangshang<sup>1</sup>, CHEN Rong<sup>1</sup>

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Internet of Things in Electricity, Tianjin 300384, China;

3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China)

**Abstract:** To realize the development of fluorescent optical fiber partial discharge detection system, according to the light radiation characteristics of insulator creeping discharge, the key performance and matching efficiency of the fluorescence photoelectric measurement system were compared and analyzed. The main components, characteristic spectral lines, and spectral statistical changing with discharge intensity of the insulator creeping discharge spectrum were obtained through experiments. Combined with the emission spectrum of insulator creeping discharge, excitation spectrum of fluorescent fiber, and capture efficiency of the fiber, the fluorescence excitation efficiency of two fluorescent fibers for partial discharge was compared and analyzed, and the excitation intensity and excitation efficiency of two typical PS fluorescent fibers were obtained. The results show that the fiber with 299–477 nm of excitation spectrum is better than the fiber with 294–410 nm of excitation spectrum. The R3896 PMT and fluorescent fiber system has better matching efficiency, and the SNR of PMT reaches a peak value of 12.45 dB under the optimal driving bias. Under the optimal bias voltage, the self-temperature drift effect of natural cooling system is approximately 7%, and the cooling recovery time is approximately 40 min.

**Key words:** insulator creeping discharge; partial discharge; fluorescent optical fiber; photometry; emission spectrum

## 0 引言

绝缘子是电力设备中起机械支撑和电气隔离作用的关键部位,同时也是绝缘系统中易受威胁的薄弱环节。由制造工艺、运输安装、应力释放及运行过程中造成的绝缘损伤等,都可能引起绝缘子表

收稿日期:2021-06-17 修回日期:2021-08-05

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(kj20-1-17)

作者简介:朱旭亮(1989-),男(汉族),天津人,工程师,主要从事高电压试验技术、带电检测技术方面的研究工作。

面异常放电,导致绝缘失效。近年来,国内外学者对气体-绝缘子界面放电特性开展了多项研究,对绝缘界面放电特性<sup>[1]</sup>、多物理现象<sup>[2]</sup>和影响因素<sup>[3]</sup>有了较为深入的认识,对放电的实验表征方法和工程检测方法也进行了一定的探索,形成了以特高频法为代表的电磁波检测法<sup>[4-6]</sup>,以超声法为代表的声波检测法<sup>[7-9]</sup>,以脉冲电流法和高频电流法为代表的电流耦合检测法<sup>[10-11]</sup>,还有近年来发展出的光测法<sup>[12-14]</sup>。光测法在放电基础特性表征实验中发挥着重要的作用,学者们主要采用增强型耦合光学器件(ICCD)<sup>[15]</sup>和光电倍增管(PMT)<sup>[16]</sup>获得放电形貌和光辐射特性;同时,光测法因具有较好的抗干扰性和较高的检测置信度,在电力设备局部放电检测中凸显出优势,例如荧光光纤法<sup>[17-18]</sup>、多光谱检测法<sup>[19-21]</sup>和紫外脉冲法<sup>[22]</sup>等。其中,荧光光纤法或荧光光导法的原理是利用荧光光纤对放电光辐射的频移特性,并采用光电转换器件进行光脉冲探测。大多数塑料荧光裸光纤本身具有良好的绝缘性能和极长的荧光物质半衰期,因此荧光光纤是作为内置式光学耦合方式的首选。20世纪,荧光光纤最早被用于高能粒子探测,并通过有效掺杂成为效率较高的闪烁体<sup>[23]</sup>,基于相同原理,法国J FARENC等<sup>[17]</sup>和日本K MUTO<sup>[24]</sup>将荧光光纤应用于局部放电光脉冲的耦合和测量,奥地利R SCHWARZ等<sup>[25]</sup>也探索了该方法在变压器油中局部放电检测的有效性。近年来,国内学者们针对荧光光纤的应用对象、放电识别、传感器融合和放电定位方面均开展了一定研究,论证了该方法对于气体或气固界面放电检测的应用潜力。另一方面,荧光光纤法已应用于开关设备的弧光监测与保护中,并将短路故障的光现象作为启动保护的重要判据<sup>[26]</sup>。虽然荧光光纤对气固界面放电或气体放电检测的有效性得到了充分的论证,但其检测系统的对象适用性、参数配合和参数优化方面的系统性研究相对较少,绝缘子表面放电发射光谱的荧光激发效率、光纤光学参数配合以及光电器件的参数优化等影响测量效果的关键因素还需要进一步研究和明确。

本文从绝缘子表面放电光辐射特性的一般规律出发,对影响荧光光纤测量系统的关键问题进行理论和试验研究。由于荧光激发效率与放电发射光谱分布直接相关,本研究首先针对绝缘子表面放电建立光电联合试验系统,获得相应的光脉冲和积分光谱分布;基于上述试验结果,对荧光光纤的激

发效率进行计算,给出光纤选型的依据。此外,本文还对光电倍增管光谱响应和信噪比影响因素进行试验和分析,以期为荧光光纤局部放电检测系统的开发、参数优化及传感器融合提供参考和依据。

## 1 试验方法

研究使用的光电联合试验系统原理如图1(a)所示。该系统电学部分包括工频交流高压源(100 kV/50 kVA)、限流保护电阻(1 M $\Omega$ )、耦合电容(2 000 pF)、高压探头(P6015A)、高频电流传感器(IPC-500L)及多功能高压试验腔体(150 kV);光学及光电部分包括光纤准直器(25°, 1.491sr)、多模石英光纤(400  $\mu$ m)、光纤光谱仪(USB 2000)、光电倍增管(PMT, Zolix S1-CR131)及荧光光纤测量系统。试验腔体预置有石英光学玻璃观察窗,用于PMT的光子探测和光学形貌的拍摄。其中,高压试验腔体内部放置棒-板结构的绝缘子放电模型,用于模拟典型强垂直分量沿面放电<sup>[1]</sup>,如图1(b)所示,高压棒电极直径为8 mm,接地板电极直径为6 cm,棒电极和板电极的边缘等效半径均为1 mm,绝缘子采用环氧树脂(E51)制作,其厚度为2 mm,直径为8 cm。

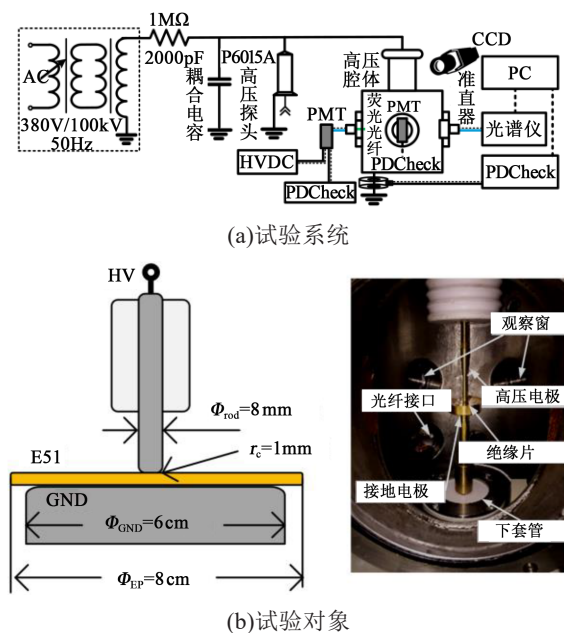


图1 光电试验系统及绝缘子沿面放电模型

Fig.1 Photoelectric test system and insulator surface discharge model

由光纤检测系统的构成原理可知,决定其检测效果的主要因素包括绝缘子放电光辐射对光纤的荧光激发效率、荧光光纤发射光谱与光电器件响应

特性的配置、光电器件的光电转换效率及其信噪比。因此本研究首先对绝缘子表面放电的积分光谱进行测量,通过积分光谱分布来计算荧光光纤激发效率,为光纤选型和光纤荧光物质掺杂提供依据。

试验采用逐级升压法,通过单光子探测确定绝缘子局部放电光学起始电压(PDIV),并分别测量初始放电( $U=1.2$  PDIV)、放电加剧( $U=2.0$  PDIV)和临近击穿( $U=3.0$  PDIV)状态下的光脉冲局部放电相位分解(PRPD, phase resolved partial discharge)图谱和积分光谱分布;试验中,各电压施加阶段下的PRPD图谱累计时间与光谱累计时间保持相同,大约为300个工频周期(约5 s)。试验调整施加电压( $U=1.3$  PDIV),并逐级调整光电倍增管(PMT)驱动偏压( $V_{\text{bias}}=400\sim 1\ 200$  V),分析驱动电压水平和连续工作时长测量系统信噪特性的影响。

## 2 绝缘子沿面放电光脉冲统计特性及积分光谱

放电本身具有较强的随机性,因此本文中放电脉冲测量和光谱测量均采用统计特性进行分析。通过光电测量系统,同步获得不同放电强度下的放电光脉冲PRPD图谱、积分光谱及放电形貌,并再此基础上分析放电光谱的一般性规律,为光电测量系统的参数配合建立基础。

### 2.1 放电统计特性及积分光谱研究

图2为1.2 PDIV、2.0 PDIV和3.0 PDIV下绝缘子沿面放电的光脉冲PRPD图谱、积分光谱分布及放电形貌,其中光脉冲统计周期数为250,光谱积分时长为5 s,CCD曝光时长为50 ms。由图2(a)中PRPD图可知,强垂直电场分量的绝缘子沿面放电极性效应较弱,当电压超过PDIV后,正半周和负半周几乎同时出现光脉冲,并分布于过零点至峰值附近的相位区间内,这与实际中开关柜支撑绝缘子或套管末端放电检测到的放电特征相一致;由图2(a)中放电形貌图可知,放电通道延伸区域半径较小,放电的光辐射强度相对较弱;由图2(a)中积分光谱分布图可知,光谱主要成分为空气中氮气的放电发射光谱,300~450 nm波段内主要为 $N_2$ (C-B)第二正带系分子谱带,600~900 nm波段内主要为 $N_2$ (B-A)第一正带系分子谱带,而在391 nm附近的 $N_2$ (B-X)第一负带系谱线强度相对较低,其他主要为激发态N或 $N^+$ 光谱成分<sup>[27]</sup>,777 nm ( $^5S^0-^5P$ )和844nm

( $^3S^0-^3P$ )谱线主要为空气中氮气和氧气共振谱带OI所引起<sup>[28]</sup>。除此之外,在656 nm附近出现的高强度谱线主要为氢原子激发谱线( $H_\alpha$ ),而该谱线在空气间隙或氮气间隙放电发射谱线中强度相对较弱,因此该谱线的出现与绝缘子有机材料参与沿面放电有关,根据P BRUGGEMAN等<sup>[29]</sup>的研究,656 nm附近 $H_\alpha$ 谱线宽度与 $N^+$ 在此处的谱线宽度相重合, $H_\alpha$ 谱线的实际峰值波长为656.3 nm。

由图2(b)中PRPD图可知,随着施加电压的升高,正、负半周放电光辐射强度、脉冲频次和相位分布范围均有所提高;由图2(b)中放电形貌图可知,此时的放电通道长度进一步延伸,绝缘子上的电晕形貌区域半径也进一步增大,并偶尔伴随一些较明亮的放电树枝;由图2(b)中积分光谱分布图可知,放电发射光谱的主要分布特征保持不变,但490~600 nm波段内光谱强度有所增加,503 nm附近谱线强度上升明显,O I 777 nm和844 nm共振谱带强度也相应增加。上述变化也预示着放电通道温度提高,电子温度和电子密度也相应增加。

由图2(c)中PRPD图可知,随着施加电压进一步升高直至临界击穿前,正、负半周放电光辐射强度、脉冲频次和相位分布范围显著增大;由图2(c)中放电形貌图可知,放电光辐射强度显著提高,绝缘子表面放电区域半径进一步增大,并且放电通道由细密的特征变为明亮较粗的特征;由图2(c)积分光谱分布图可知,放电发射光谱在 $N_2$ (C-B)300~450 nm波段和490~600 nm波段内光谱强度均有所增加,503 nm附近谱线强度进一步提高,O I 777 nm和844 nm共振谱线强度维持不变,但线宽增加,这可能与流注放电向导放电转变造成的通道温度升高有关,属于热的多普勒致宽效应<sup>[30]</sup>。

为了对比分析光电探测系统对绝缘子放电光辐射的检测效率和参数匹配效果,统一绘制试验中不同放电强度下的多组积分光谱,并得到其上下限包络和平均值,如图3所示。下文中对光电测量系统参数配合的计算均采用绝缘子沿面放电发射光谱的强度均值。

### 2.2 荧光光纤激发效率探究

荧光裸光纤激发效率取决于光纤光子捕获效率和激发光谱响应能力。其中,光子捕获效率由荧光光纤包层材质和芯材的光学性质所决定,与荧光材料掺杂的浓度无明显关系;同时,被捕获光子中能够引起荧光激发效应的统计比例由放电发射光

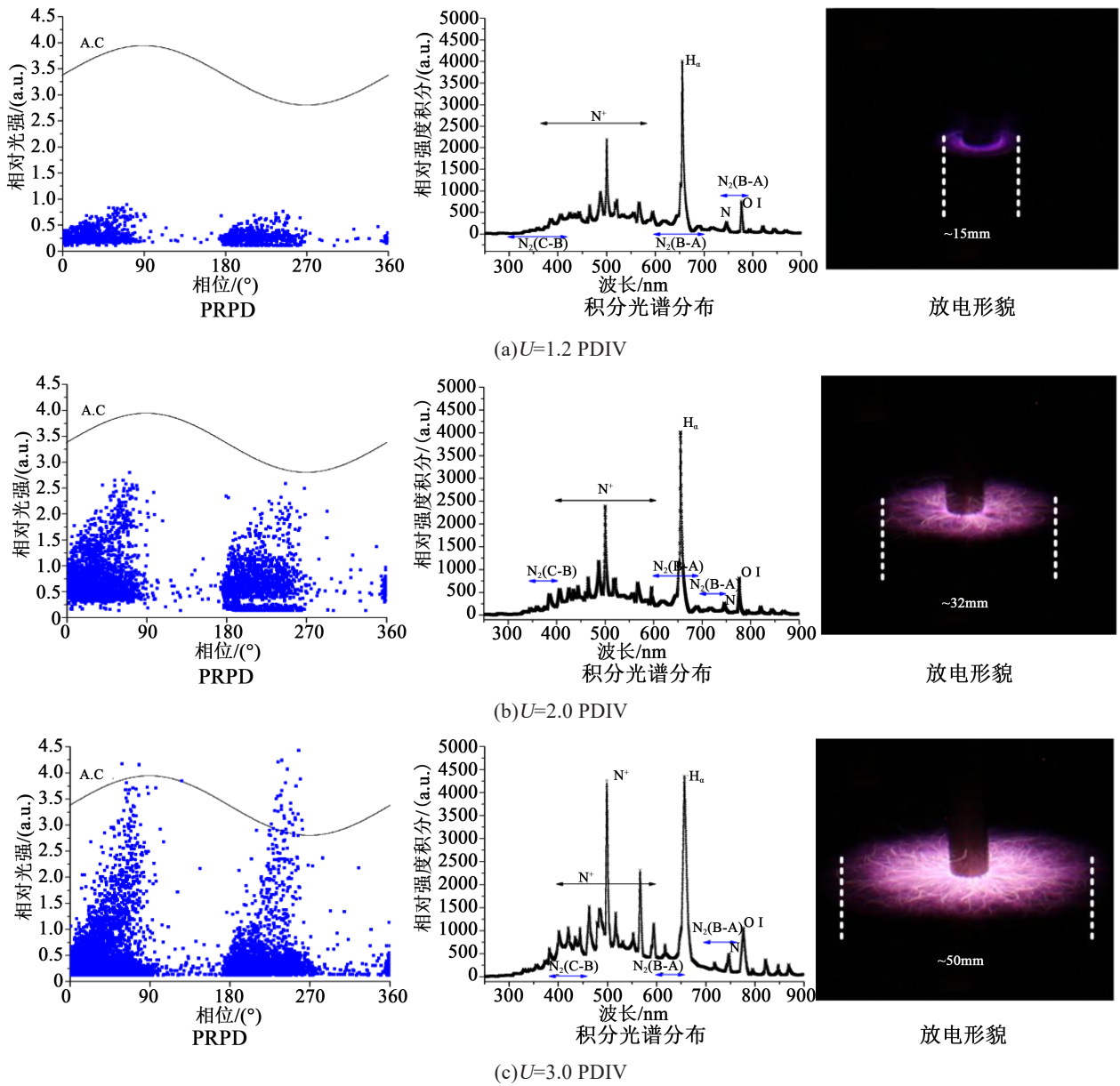


图2 绝缘子不同沿面放电强度下的PRPD图谱、积分光谱分布及放电形貌

Fig.2 PRPD spectra, integral spectra, and discharge morphologies of insulator surface discharge at different levels of voltage

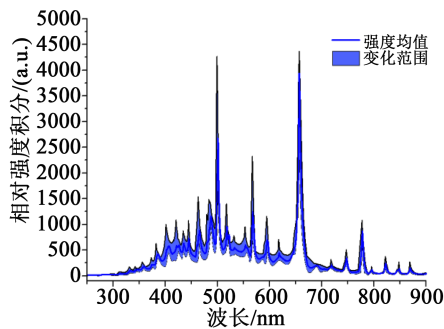


图3 绝缘子沿面放电发射光谱强度均值分布

Fig.3 Average distribution of emission spectra of insulator surface discharge

谱和光纤激发光谱共同决定。因此，荧光裸光纤对放电光辐射的激发效率( $\eta_{ex,\lambda}$ )可由式(1)进行估算。

$$\eta_{ex,\lambda} = TE \cdot r_{ex,\lambda} \quad (1)$$

式(1)中： $TE$ 为光纤对光子的捕获效率； $r_{ex,\lambda}$ 为捕获光子引起的荧光激发强度。根据J D WEISS的研究<sup>[23]</sup>， $TE$ 主要由光纤材料的光学性质决定，其计算如式(2)所示。

$$TE = 1 - \left( n_{cl}/n_{c0} \right)^2 \quad (2)$$

式(2)中， $n_{cl}$ 和 $n_{c0}$ 分别为光纤包层材料和纤芯材料的光折射系数。由于光纤的荧光发射强度与激发

光的光谱和强度均相关,为了反映光纤的荧光发射强度受激发光的光谱和强度的量化关系影响,本文采用光纤入射光强度与荧光激发光强度在波长 $\lambda$ 上的几何均值计算得到 $r_{ex,\lambda}$ ,如式(3)所示。

$$r_{ex,\lambda} = \sqrt{I'_{inc,\lambda} \cdot EX_{\lambda}} \quad (3)$$

式(3)中, $I'_{inc,\lambda}$ 和 $EX_{\lambda}$ 分别为放电发射光谱约化强度和荧光激发光谱约化强度分布。在实际计算时,积分上下限为荧光激发光谱分布范围边界。

为了比较荧光光纤的激发效率,选取两种用于放电测量的典型PS芯材荧光光纤进行计算和比较。表1为两种荧光光纤的基本参数、荧光激发强度( $r_{ex,\lambda}$ ,  $\lambda=250\sim 900$  nm)以及激发效率( $\eta_{ex,\lambda}$ ,  $\lambda=250\sim 900$  nm)。

图4为两种PS荧光光纤对绝缘子沿面放电发射光谱的荧光激发光谱约化强度分布( $EX_{\lambda}$ )、荧光发射强度分布( $r_{ex,\lambda}$ )和 $r_{ex,\lambda}$ 的积分强度。

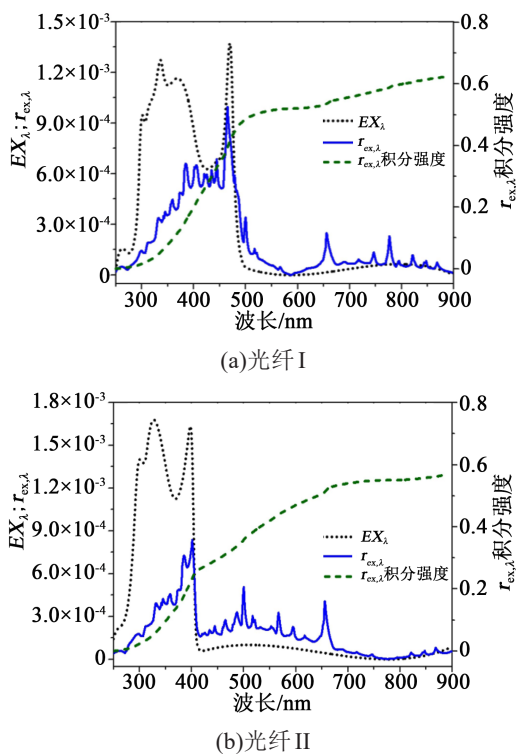


图4 两种PS荧光光纤的 $EX_{\lambda}$ 、 $r_{ex,\lambda}$ 及 $r_{ex,\lambda}$ 积分强度

Fig.4  $EX_{\lambda}$ ,  $r_{ex,\lambda}$  and integral intensity of  $r_{ex,\lambda}$  of two PS fluorescent optical fibers

由图4可知,在绝缘子沿面放电发射光谱范围内,光纤I相比光纤II能够在更大的光谱范围内被激发。采用式(4)对 $r_{ex,\lambda}$ 在整个放电发射光谱范围内的积分进行计算可知,光纤I的整体激发效率高于光纤II,两者的比较如表1所示。

$$r_{ex,tot} = \int_{\lambda} r_{ex,\lambda} d\lambda \quad (4)$$

需要指出的是,光纤对放电光子的耦合并不完全由荧光光纤的激发效率决定,对于入射光谱不在荧光激发光谱范围内的光子仍然能够按照式(2)的比例被捕获,并由光纤传导至光电转换器件。

表1 两种典型的PS荧光光纤基本参数

Tab.1 Basic parameters of two PS fluorescent optical fibers

基本参数	光纤I(黄)	光纤II(绿)
光纤芯材	PS+荧光剂	PS+荧光剂
光纤皮层材料	PMMA	PMMA
激发光谱波带/nm	299~477	294~410
荧光光谱波带/nm	471~511	406~453
$n_{co}/n_{cl}$	1.59/1.42	1.59/1.42
TE/%	20.2	20.2
$r_{ex,\lambda}$ , $\lambda=250\sim 900$ nm	0.618	0.570
$\eta_{ex,\lambda}$ , $\lambda=250\sim 900$ nm	0.125	0.115

### 3 荧光光纤检测系统综合效率对比及影响因素分析

绝缘子沿面放电的光辐射强度较低,放电的持续时间较短,经荧光光纤耦合得到的光信号需要通过高灵敏的光电器件来进行光电转换。PMT作为一种量子效率高、光电增益大且响应速度快的单光子探测器件,是放电光辐射检测的首选<sup>[9]</sup>,因此其光谱响应特性与放电发射光谱和荧光光纤发射光谱的配合,决定了最终光电转换的效率;同时,PMT是利用外光电效应进行光电子放大,因此阴极施加电压的大小不但会影响其增益,还会影响其噪声水平。下面针对上述问题对光电探测装置的参数配合和优化进行讨论。

#### 3.1 光电倍增器的参数匹配

通过荧光光纤进入光电倍增器的光子主要由两部分构成,一部分为经荧光激发效应转置为发射光谱范围内的光子,另一部分为未经荧光激发而经由光纤直接传输的光子。因此光电倍增器的光谱响应特性对光电转换效率的影响较为显著。为了描述光电倍增器与耦合光子的光谱匹配程度(或光电转换效率),本研究引入光电转换光谱匹配效率

( $\eta_{oc}$ )来对其进行估算,并忽略光纤内部瑞利散射和光谱吸收效应,如式(5)所示。

$$\eta_{oc,\lambda} = QE_{\lambda} \cdot I'_{em,\lambda} \quad (5)$$

式(5)中, $I'_{em,\lambda}$ 为荧光发射光谱约化强度,其值由未引起荧光效应的入射光强度和荧光激发强度两部分组成,其值可由式(6)计算; $QE_{\lambda}$ 为光电转换器件约化光量子效率。

$$I'_{em,\lambda} = \frac{I_{em,\lambda} + I_{inc,\lambda}(1 - EX_{\lambda})}{\max [I_{em,\lambda} + I_{inc,\lambda}(1 - EX_{\lambda})]} \quad (6)$$

滨松公司的端窗型R3896和微型R12900U是两个最具代表性的高效率单光子探测器,被广泛应用于光子计数、弱光探测以及放电光辐射表征中,其光量子效率曲线如图5所示。本研究以上述两种典型光电倍增器为例,对荧光光纤局部放电检测系统的综合效率进行对比分析,计算得到的光电转换光谱匹配效率( $\eta_{oc,\lambda}$ )光谱分布如图6所示。虽然绝缘子沿面放电发射光谱具有一定的随机性,但仍然可认为在多个工频周期下放电积分光谱成分被均匀地转置为荧光发射光谱,此时荧光光纤局部放电检测系统光电单元的综合效率( $p$ )可由式(7)进行计算。

$$p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k_{s,\lambda} \cdot \eta_{ex,\lambda} \cdot \eta_{oc,\lambda} \cdot d\lambda \quad (7)$$

式(7)中, $k_{s,\lambda}$ 为荧光光纤对激发波长 $\lambda$ 的移相系数,在未经测定的情况下,对于实际光学参数优化可将其设置为1; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为荧光激发光谱分布范围的上、下界。由图6中R3896和R12900U两种PMT的匹配效率波长分布计算结果可知,R3896在250~900 nm内的光谱匹配效率高于R12900U。

### 3.2 驱动电压和工作时长对信噪比的影响

对于真空外场光电效应的光电倍增管,其原理决定了其必然会受到杂散光干扰、电磁场偏置和热

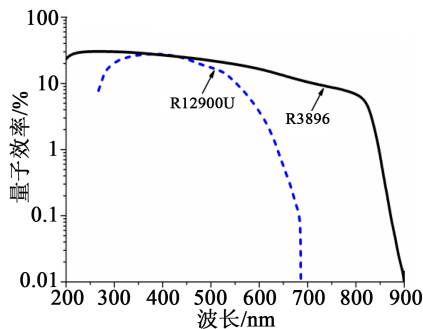


图5 不同波长下光量子效率曲线图

Fig.5 Light quantum efficiency curve at different wavelengths

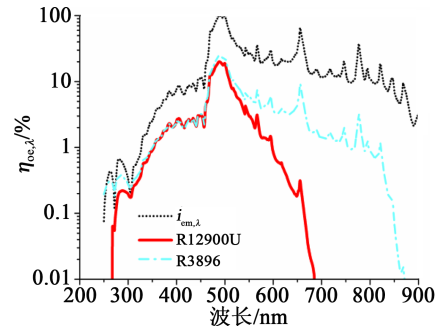


图6 不同波长下 $\eta_{oc,\lambda}$ 分布图

Fig.6 The  $\eta_{oc,\lambda}$  at different wavelengths

电子发射的影响,最终体现在PMT的信噪比上。因此在构建光纤局部放电在线监测系统时,需要考虑实际运行工况的影响。理论上,影响光纤测量系统的内在因素主要是光电转换器件的工作性能。一般而言,光电器件的信噪比( $SNR$ )由式(8)决定。

$$SNR = \frac{(S \cdot p) \cdot A}{N_g \cdot A + N_{dark}} \quad (8)$$

式(8)中: $S$ 为光信号强度; $p$ 为光电单元的综合效率; $A$ 为光电增益; $N_g$ 为杂散光干扰; $N_{dark}$ 为暗电流干扰(器件热噪声)。因此PMT一般采用外壳内壁黑化处理降低杂散光干扰( $N_g$ ),采用铝箔屏蔽、坡莫合金屏蔽等措施降低电磁干扰。其中, $N_{dark}$ 为光纤测量系统的主要噪声来源,一般可采用强化散热结构等方式降低热累积,但其降低效果有限。为了验证荧光光纤光电测量系统对绝缘子沿面放电监测的信噪特性和连续工作的稳定性,本研究特别对驱动电压水平和工作时长的影响进行了试验分析。

试验采用线形高压源(0~1 500 V)进行驱动,并采用低强度绝缘沿面放电作为试验对象,以平均放电量作为基准,比较不同驱动电压水平和连续工作条件下的测量系统信噪比变化。试验中,环境温度维持为23℃,驱动电压纹波水平小于0.5%。图7为不同驱动电压下测量系统的信噪比变化。由图7可知,驱动偏压由500 V提高至1 000 V时, $SNR$ 由7.6 dB逐渐上升至12.45 dB,当驱动偏压超过1 000 V时,此时 $SNR$ 不再提高反而具有明显下降的趋势,原因在于当驱动偏压在一定范围变化时,光电增益 $A$ 逐渐增加,其增加程度大于 $N_g$ 和 $N_{dark}$ 的增加程度,而当驱动偏压超过一定值时, $N_{dark}$ 也会明显提高,从而成为噪声主要来源。因此,在实际测量系统中可设置驱动偏压大致为1 000 V为最优。

由于热噪声与器件温升有关,系统连续工作时长也会影响信噪比。本研究在环境温度为25℃、相

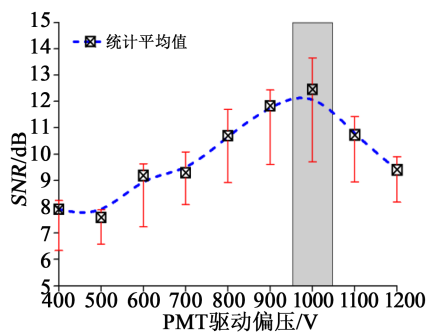


图7 不同PMT驱动偏压下测量系统的信噪比(SNR)变化

Fig.7 Variation of SNR of system with bias voltage of PMT

对湿度为52%的自然散热条件下进行了连续的信噪比监测。图8为连续测量时间内,不同时刻采集到的光纤局部放电信号在一个工频周期内的结果。由图8可知,随着时间的递增,热噪声水平逐渐提高,由最初的0.9 a.u.提高至2.8 a.u.,并在此水平下逐渐保持不变。图9为不同连续工作时长下测量系统信噪比变化。

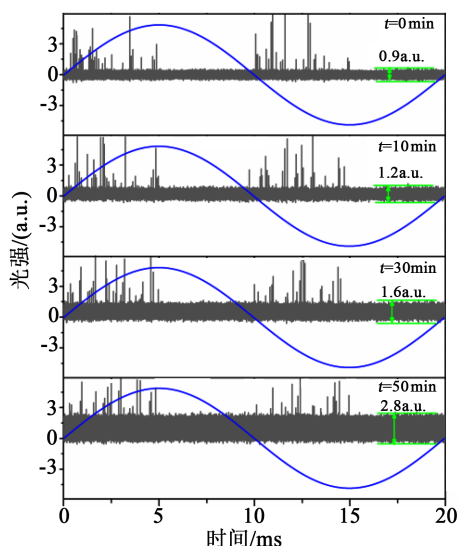


图8 绝缘子沿面放电的光纤信号随系统连续运行时间的变化

Fig.8 Variation of surface discharge optical fiber signals with operation time of system

由图9可知,荧光光纤光电测量系统在实际测量绝缘子沿面放电时的信噪比随着连续工作时长的递增而有所下降,在0~80 min内大致下降约0.9 dB后维持不变,这是因为当器件热量在连续工作下不断累积,最终达到80 min左右时与环境达到热平衡,此时热噪声水平不再继续变化。当不断提高系统的休眠间隔时间至40 min左右时,其初始信

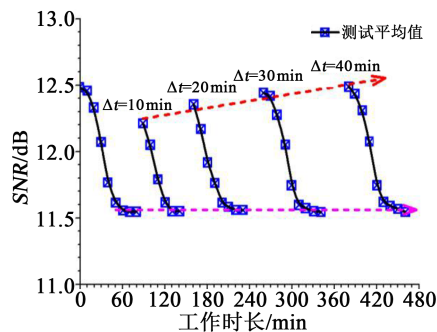


图9 不同连续工作时长下测量系统信噪比变化

Fig.9 Variation of SNR of system with operation time

噪比可恢复至最佳状态(12.45 dB)。因此,在自然散热条件和标准环境条件下,该系统的自温漂效应大致为7%,冷却恢复时间大致为40 min。

需要说明的是,光纤连接器和准直透镜的透过特性、PMT的端窗尺寸以及光电增益也会一定程度上影响荧光光纤局部放电检测的最终效果,在系统设计中应予以考虑,本文不再赘述。

#### 4 结论

针对开关设备内部绝缘子沿面放电光辐射特性,对基于荧光光纤的光电检测法的光谱响应特性、基本参数和工作特性进行了系统性研究,掌握了影响测量系统的关键性能参数,得出如下结论:

(1)通过试验获得不同电压条件下的绝缘子沿面放电光脉冲PRPD谱图、积分光谱图以及光学形貌,可得绝缘子积分光谱图主要成分为300~450 nm的 $N_2$ (C-B)第二正带系、600~900 nm的 $N_2$ (B-A)第一正带系、391 nm附近的 $N_2$ (B-X)第一负带系、777 nm O I共振谱带及656 nm附近的氢原子激发谱线( $H_\alpha$ ),并同时获得了随放电强度变化的光谱统计范围。

(2)结合绝缘子沿面放电发射光谱、荧光光纤激发光谱、光纤的捕获效率,得到了两种典型PS荧光光纤的激发强度( $r_{ex,\lambda}$ )和激发效率( $\eta_{ex,\lambda}$ ),其中激发光谱为299~477 nm的光纤较294~410 nm的光纤更优, $r_{ex,\lambda}$ 和 $\eta_{ex,\lambda}$ 分别为0.618和0.125。

(3)根据两种典型光电探测器件响应特性,对比分析了荧光光纤局部放电检测系统光电单元的综合效率( $p$ ),其中R3896型PMT与荧光光纤系统结合匹配效率更优。

(4)对比分析驱动偏压和连续工作时长对系统信噪比的影响,当驱动偏压为1 000 V时,SNR最高(12.45 dB);在最大初始SNR条件下,自然散热系统

的自温漂效应大致为7%,冷却恢复时间大致为40 min。

### 参考文献:

- [1] 万航,周凯,刘力,等.老化中压电缆复合界面的放电特性研究[J].电测与仪表,2020,57(15):14-18.
- [2] 任重,吴海涛,肖利龙,等.绝缘子表面放电的多物理信号比值演化特征及其诊断方法研究[J].绝缘材料,2020,57(15):14-18.
- [3] 徐洋,周电波,丁登伟,等.GIS盆式绝缘子表面缺陷的局部放电检测[J].高压电器,2020,56(5):107-112.
- [4] 丁登伟,高文胜,刘卫东.采用特高频法的GIS典型缺陷特性分析[J].高电压技术,2011,37(3):706-710.
- [5] 牛博,张欣宜,李亚峰,等.基于特高频法识别配电站房开关柜的局部放电类型研究[J].电测与仪表,2019,56(23):43-47,69.
- [6] 丁登伟,高文胜,刘卫东.GIS局部放电特高频检测灵敏度的检验方案细化研究[J].高压电器,2014,50(8):14-18.
- [7] 李德军,沈威,郭志强.GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J].高压电器,2009,45(3):99-103.
- [8] 马国明,周宏扬,刘云鹏,等.变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J].高电压技术,2020,46(5):1768-1780.
- [9] 白鹭,李小婧,董理科,等.基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J].电测与仪表,2020,57(11):42-48.
- [10] 于泊宁,任明,张志斌,等.配电设备分布式局部放电感知技术的实现方法[J].高电压技术,2020,46(6):82-91.
- [11] 许渊,刘卫东,陈维江,等.基于高灵敏测量的GIS绝缘子表面金属颗粒局部放电特性[J].高电压技术,2019,45(9):2707-2714.
- [12] REN Ming, ZHOU Jierui, YANG Shujing, et al. Optical partial discharge diagnosis in SF<sub>6</sub> gas-insulated system with SiPM-based sensor array[J]. IEEE Sensors Journal,2018,18(13):5532-5540.
- [13] 唐炬,范敏,裘吟君,等.SF<sub>6</sub>局部放电分解组分光声光谱检测的温度特性[J].高电压技术,2012,38(11):2919-2926.
- [14] 司文荣,李军浩,袁鹏,等.超声-光法在高压电器设备局部放电检测中的应用[J].高压电器,2008(1):59-63,72.
- [15] 赵娜,吴凯玥,王树民,等.利用高速摄像研究沿面放电斑图的时空演化[J].光学技术,2020,46(6):671-676.
- [16] 王胜辉,谢志新,刘鹏,等.基于日盲PMT的绝缘子表面放电光电信号检测系统[J].电测与仪表,2016,53(4):39-45.
- [17] FARENC J, MANGERET R, BOULANGER A, et al. A fluorescent plastic optical fiber sensor for the detection of corona discharges in high voltage electrical equipment[J]. Review of Scientific Instruments,1994,65(1):155-160.
- [18] 唐炬,欧阳有鹏,范敏,等.用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统研制[J].高电压技术,2011,37(5):1129-1135.
- [19] REN Ming, SONG Bo, ZHUANG Tianxin, et al. Optical partial discharge diagnosis in SF<sub>6</sub> gas insulated system via multi-spectral detection[J]. ISA Transactions,2018,75:247-257.
- [20] 彭兆裕,岳丹,颜冰,等.开关柜内沿面放电及电弧放电多光谱特征分析[J].绝缘材料,2021,54(1):84-90.
- [21] 刘嘉林,董明,李阳,等.SF<sub>6</sub>气体中电晕放电的多光谱脉冲特性研究[J].绝缘材料,2017,50(2):69-75.
- [22] 程川.基于紫外脉冲检测的绝缘子状态评估研究[D].成都:西南交通大学.
- [23] WEISS J D. Trapping efficiency of fluorescent optical fibers[J]. Optical Engineering,2015,54(2):027101.
- [24] MUTO K. Electric-discharge sensor utilizing fluorescent optical fiber[J]. Lightwave Technology Journal of,1989,7(7):1029-1032.
- [25] SCHWARZ R, MUHR M, PACK S. Partial discharge detection in oil with optical methods[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra, Portugal: IEEE,2005.
- [26] 蓝会立,张认成.开关柜内部故障电弧探测法的研究现状及趋势[J].高电压技术,2008(3):496-499.
- [27] Van der HORST R M, VERREYCKEN T, Van VELDHUIZEN E M, et al. Time-resolved optical emission spectroscopy of nanosecond pulsed discharges in atmospheric-pressure N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2012,45(34):345201.
- [28] 谢维杰.光谱解析低温等离子体中O<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>的活性中间体及其环境化学行为[D].上海:上海交通大学,2008.
- [29] BRUGGEMAN P, SCHRAM D, GONZÁLEZ M Á, et al. Characterization of a direct DC-excited discharge in water by optical emission spectroscopy[J]. Plasma Sources Science and Technology,2009,18(2):025017.
- [30] 刘绍璞,胡小莉,刘忠芳.刚果红-阿米卡星体系的共振Rayleigh散射和共振非线性散射光谱及其分析应用[J].中国科学,2006,36(4):317-325.