

# 强电磁场对 1 000 kV 等电位在线 验电器的影响和防护措施

张大堃<sup>1</sup> 张文胜<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 乐山 614000)

**摘要:** 等电位在线验电器在运行过程中受强电磁场的干扰。在 1 000 kV 的特高压线路上, 干扰尤为明显。其现象包括 LED 亮起后无法完全关断、闪烁间隔时间不稳定等。从强电磁场对等电位在线验电器的干扰入手, 根据高压试验测量的数据, 分析强电磁场对 LED 元件和控制元件的影响, 并寻求相应的防护措施。试验结果表明, 加装屏蔽防护金属网和采取多芯片堆放再厚膜封装的电路集成, 可有效减少强电场对验电器的干扰。通过优化电路板设计、增加铁磁材料金属箔、前端增加瞬变抑制二极管等辅助措施, 可进一步保证 1 000 kV 等电位在线验电器在强磁场和瞬时过电流的环境下仍能正常、稳定工作。

**关键词:** 等电位在线验电器; 强电磁场; 防护措施; 金属网屏蔽; 瞬时过电流; 厚膜封装

**Abstract:** Equipotential on-line electrocroscope is prone to the interference by high electromagnetic (EM) field during its operation, especially in 1 000 kV UHV transmission line. The interference makes LED cannot be completely switched off and leads to irregular LED flashing. In order to overcome these problems, the influence of high EM field on LED components and control components is analyzed according to the measured data of HV test, and the corresponding protective measures are found out. Test results show that it can effectively reduce the interference to electrocroscope from high EM field by installing metallic mesh as shielding and using the integration of circuits with multi-chip module and thick-film package. Through optimizing the design of circuit board, adding metal foil of ferro-magnetic material and installing transient voltage suppressor, it can ensure the normal and stable operation of 1 000 kV equipotential on-line electrocroscope under the interference of high EM field and transient over-current.

**Key words:** equipotential on-line electrocroscope; high electromagnetic field; protective measure; metal-shielded mesh; transient over-current; thick-film package

中图分类号: TM835.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-38-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.009

## 0 引言

等电位在线验电器作为近年来应用于电网的新装置, 其主要功能是检验验电器所接触的导体是否带电。当导体带电时, 验电器通过闪烁发光警示工作人员该处带电; 当导体不带电时, 验电器则不再闪烁发光。等电位在线验电器与传统抽拉杆式验电器不同点在于, 其等电位的安装在高压带电体上, 即等电位在线验电器长期悬挂于高压带电体上, 与带电体处于同一电位。这样的设计方便了运维人员的验电工作, 既无需随身携带拉杆验电器, 又无需举起绝缘杆验电。而传统抽拉杆式验电器在验电过程中需

要举起绝缘杆验电的操作, 这对于离地距离很高的 330 kV 及以上电压等级设备的验电是非常困难的。根据《国家电网公司电力安全工作规程(变电部分)》(简称《安规》)规定, 330 kV 及以上的电气设备, 可采用间接验电方式进行验电。根据《安规》释义, 该规定是由于这类特高压电气设备的“验电器过于笨重, 操作不便, 有的还没有成熟的产品”<sup>[1]</sup>, 因此, 采用间接验电无疑是退而求其次的选择。1 000 kV 等电位在线验电器的设计, 解决了传统直接验电所用的验电器笨重、雷雨天气无法直接验电等问题, 填补了没有成熟验电产品的空白, 其等电位的设计同时也杜绝了设备由于验电器绝缘表面积污或绝缘老化发生对地闪络或击穿的隐患。

然而, 等电位在线验电器因其工作环境恶劣, 给

设计带来了许多新的难点和挑战。目前,并没有对等电位带电验电器在交流 1 000 kV 电压下工作特性的研究前例,该研究属于首例,并将对在此电压等级下工作的验电器受到的强电磁场环境影响及防护措施作出基于试验数据的分析和建议。由于验电器长期处于高电位,随着电压等级的不断升高,所处的电磁场环境也越来越强烈,电磁干扰对其控制系统的正常工作带来严峻挑战,整体设计必须进行相应的调整。下面将着重对等电位在线验电器在强电磁场环境下的干扰问题和抗干扰设计问题进行研究和讨论。

## 1 等电位在线验电器基本原理

### 1.1 静电感应原理

放入电场中的导体,其中的自由电荷在电场力的作用下发生定向移动使导体两端分别出现等量异性电荷——感应电荷。在工频强电场的作用下,导体会产生大量静电感应电荷。

### 1.2 耦合原理

电容接在交流电路中,当电容器两端的电压逐渐正向升高时,电荷将在电容器的两个极板聚积;当电容器两端的电压逐渐下降并反向升高时,在两个极板上聚积的电荷逐渐减少到零,然后反极性电荷再在电容器的两个极板聚积。电容器的两个极板是绝缘的,整个过程并没有电流通过电容器;但随着两个极板电位差的升高、降低而集聚和释放电荷的现象,看起来则像是有电流通过,因此,它能将直流隔离,而将交流信号以两端电压升高和降低的形式耦合过来,传给下级的电路元件。

### 1.3 1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器能量采集设计

1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器系统中的能量采集,是通过收集环境中产生的高压线路耦合能量,然后将这种能量转换成调节良好的输出,为发光元件提供能量。该能量采集模块使电荷能够在存储电容器上积累,直至降压型转换器可以高效率地将一部分存储的电荷传送给输出为止,在无负载休眠状态时,可调节输出电压,同时连续给存储电容充电。

能量采集系统采用集成芯片,输出电压为可调节的,经过 LDO 可实现具有限流和过热关断功能,可实现恒压恒流充电<sup>[2]</sup>。如图 1 所示,两个迟滞比

较电路分别用于检测能量采集器的工作状态,其输出端作用于集成芯片的充电使能控制端,控制芯片的开断,选通控制电路检测两个迟滞比较器的输出状态,并通过电平控制  $Q_3$ 、 $Q_4$ 、 $Q_5$ 、 $Q_6$  的开断状态,调整切换能量采集器的工作状态。

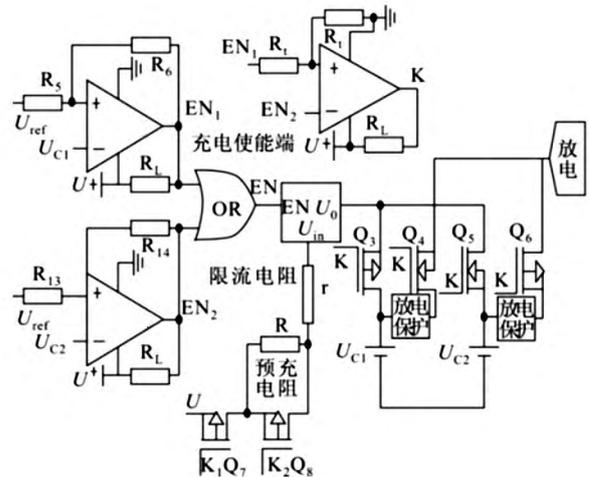


图 1 能量采集电路示意图

K 为充放电选通电平,  $K_1$  为线路电流检测电平,在能量采集装置供能不足时,通过  $K_1$  控制  $Q_8$  关断充电电路,优先保证负载的供电需求;  $K_2$  为预充电控制电平,在储能设备的电压低于安全电压  $U_N$  时,  $Q_8$  截止,充电电流经预充电电阻 R 充电。此外,为了防止能量采集器过度放电造成损坏,增加放电保护电路,当储能设备电压  $< U_N$  时,关断能量采集器对负载的放电。

能量采集器经 DC/DC 升压后,通过 MOS 管与供电端相联,供电不足或者停电时, MOS 管导通,能量采集器供电电路接入,使电源的输出受电网状态影响较小,保证供电的稳定;由于能量采集器放电电路始终处于准接入状态,短时间内向外输出功率能提升一倍,可适应各种苛刻的能耗环境。

## 2 1 000 kV 强电磁场对等电位在线验电器的影响

### 2.1 强电磁场对控制回路中电子元件的影响

1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器的控制回路包括图 2 中方框内的部分,即功率放大、能量储存和频率控制部分。

#### 1) 工频电磁场

在 1 000 kV 的输电线路周围,电磁场强度非常强。根据国内其他研究仿真计算表明,假设初始条件如下:

运行电压为交流1 000 kV 运行电流为259 0 A 导线采用8分裂500 mm<sup>2</sup>导线,分裂导线间距为0.4 m,线路对地最小距离21 m。水平排列的导线,在导线上方1 m处的电场强度最大值为161.6 kV/m,磁场最大强度达到502 μT;对于三角形排列的导线,在导线上方1 m处的电场强度最大值为149.8 kV/m,磁场最大强度达到484 μT<sup>[3]</sup>。

强电场会产生强感应电压。强大的工频电场,足以使验电器内部电子元件、集成电路中的金属件间产生放电,并最终导致元件损坏、控制失灵。

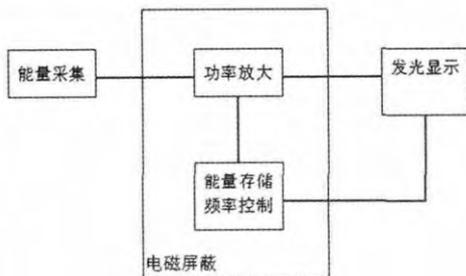


图2 等电位在线验电器控制回路示意图

## 2) 无线电干扰

由于强电场在导线和金具周围产生的电晕放电,以及金具联接接触不良产生的间隙火花放电,会产生频率大于工频的无线电干扰。无线电信号的主要频率范围为5~30 MHz。频率越低,干扰越大<sup>[4]</sup>。等电位在线验电器内部的电子元件并没有使用通信模块或无线电模块,受到无线电干扰的因素较小,再加上该频率段的电磁波干扰功率远远低于工频电磁波的功率,因此将不考虑无线电对验电器的干扰<sup>[5-6]</sup>。

### 2.1.1 强电场对发光元件的影响及防护

在1 000 kV 电场环境下,为防止电路板、电子元件等金属件被高电压击穿,需要使用多种方式对验电器内部电子元件进行整体屏蔽,包括增强电磁屏蔽、减弱干扰耦合、增加电子元件的抗干扰能力等等。用一个法拉第笼将整个控制组件屏蔽起来,作为电场屏蔽,是一种简单有效的方式,但仍有其局限性<sup>[7-8]</sup>。然而,仅仅将控制回路部分用金属包裹起来,当高压试验电压加至对地460 kV左右时,验电器的闪烁频率有明显紊乱,频率控制受到干扰;LED发光元件无法完全断开熄灭。验证试验在中国电科院检测中心高压实验室进行,加压设备及等电位验电器的布置如图3所示,带电显示器在箭头所指处。



图3 实验现场布置

实验中,验电器搭载德州仪器(Texas Instrument)的电压测量模块ADS1015对单个LED灯芯两侧电压进行在线测量,如图4所示。

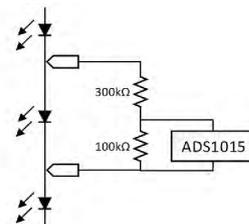


图4 LED电压测量回路

经换算后测量的LED两端实际电压如图5。

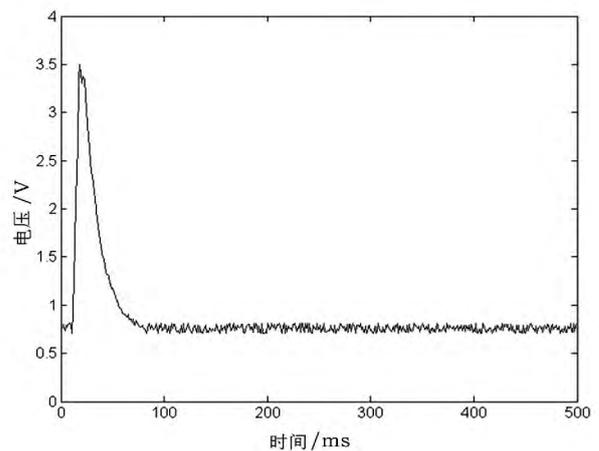


图5 LED两端电压采样示意图

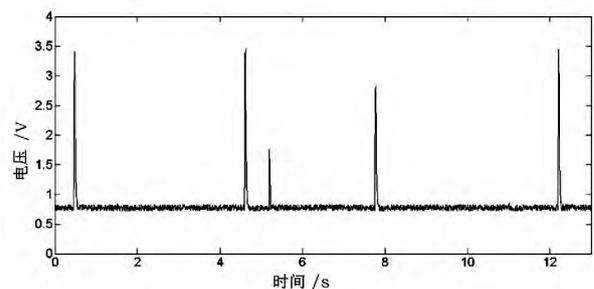


图6 测量的LED脉冲示意图

由图6可见,闪烁频率不规律,且两次闪烁间的半导体结电压仍保持在0.7 V左右,并有大量干扰信号出现。在5 s位置,二极管PN结有提前打开的现象,但因储能不够,未能达到LED正常工作的2~4 V电压(根据颜色不同,LED工作电压不同,实验中使用的绿色LED,额定电压3.4 V,额定电流250 mA)。

上述测试结果说明,电场产生的感应电压足以使发光二极管导通,并阻碍了LED的正常关断。这就是为什么发光元件在控制器断开供电电源后,在闪烁间隙仍微弱发光,无法完全熄灭的原因。

要解决发光二极管的屏蔽问题,不能简单地使用金属箔包裹LED,否则LED的光线将无法透出。既能对LED进行屏蔽,又不会遮挡LED发出的光线,采用了在LED灯板面上放置一层金属网格,金属网格的边缘进行倒角圆滑处理。金属网格的电场屏蔽效果虽然没有使用铜箔进行屏蔽的效果好,但由于需要有孔洞透出LED灯光,这是一个折衷的办法。由于金属网的屏蔽效果与电磁场频率成正比,对于30 MHz的电磁波,16目筛孔为1.180 mm的不锈钢金属网屏蔽效能可达88.6 dB<sup>[9]</sup>。不锈钢金属网从对电磁场屏蔽效果和性价比来讲,不锈钢网是最优选择<sup>[10]</sup>。

采用金属网格对LED灯板进行屏蔽后,再次实验测量得到的结果是:在控制器切断电源供应的时间段,LED两端的电压基本为0,不再有强电场在LED芯片两端产生感应电压的情况,且发光元件可以可靠关断,但频率仍然不稳定。

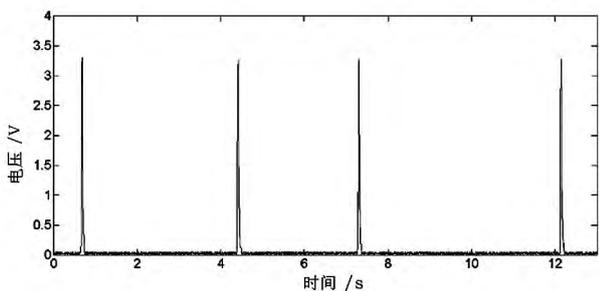


图7 采用金属网格屏蔽后的LED脉冲示意图

### 2.1.2 强电场对控制元件的影响及防护

发光元件闪烁频率无规律的直接原因,在于外界电场产生的感应电压大于控制储能电容充放电的三极管门极开断电压(一般为0.7 V),使三极管受干扰打开。由于感应电压有很大的不确定性,开断频率并非是由频率控制部分来主动控制,而是由感

应电压升高随机性导致了发光元件的不稳定闪烁和频率紊乱。

深入研究三极管受外间电场影响打开的问题,发现强电场对所有电子元件的影响都是类似的。在强电场环境中工作的电子元件,由于在接线脚间产生感应干扰信号远强于电子元件本身的动作信号,导致电子元件无法正常工作。

通过在控制用电子元件周围采用金属屏蔽的方式,很大程度上可以缓解这样的干扰问题;然而在实际实验中发现,当线路的工作电压上升到对地450 kV时,验电器便开始发生不稳定的闪烁现象。增加金属屏蔽层厚度的效果并不明显,解决这一问题必须采用电磁屏蔽、电路设计和芯片设计多重组合方式才能实现。

在实际设计中,因为使用有包括不可控整流电路、输出滤波器、串联谐振电路等电路组成的频率控制系统,其中微电子集成电路(integrated circuit)占较大比例,由于本身尺寸很小(微米级),根据电压的定义:

$$\Delta V_{BA} = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

尺寸的缩小,直接减小了在电场中的感应电压。再由于将电路封装在接于同一电位的厚金属膜中,所受到的干扰比独立电子元件(discrete component)要小得多,从而减少电位差。比如说,在同样的1 000 kV电场下,一个微米级的二极管在完全未屏蔽的环境中感应电压仅为毫伏级,远小于半导体开断电压的0.4~0.8 V。对于没有集成的电子元件,将采用多芯片堆放(MCM)的方式,将电子元件的微米级芯片直接集成到同一个半导体基板上后,并进行统一的厚金属膜的封装,以达到相同的效果。如图8所示。

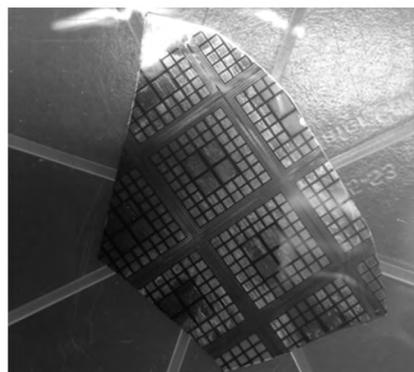


图8 成型后的MCM裸芯切片

### 2.1.3 强磁场对验电器的影响及防护

在交流 1 000 kV 导线周围的磁场强度超过 500  $\mu\text{T}$  ,基于楞次定律,高压输电线路负载电流在导线周围产生的工频磁场,将在控制电路中的闭合回路里产生感应电流,而在非闭合回路的开口两端产生感应电压。若不对由该工频磁场引起的感应电流和感应电压进行限制,将造成控制电路工作不稳定,或对电子元件烧坏<sup>[11]</sup>。因此在电路板设计时,不应采用在一般情况下用于电路板屏蔽的地线非闭环绕电路板的方式,或进行电路板接地敷铜箔的方式,以免引起环流发热或非闭环回路开口处电压烧损。由于工频磁场频率低(仅 50 Hz),为了有效屏蔽强磁场,除采取上述电路设计措施外,在验电器外壳内,还敷设了一层由高导磁材料做成的金属箔作为磁场屏蔽层。将铁磁材料金属箔做成非封闭环,边沿作圆滑处理,且非封闭环平面不与磁通垂直,以减小感应电压<sup>[12]</sup>。

由于验电器控制回路中的电流最高仅为毫安级,因此不考虑由安培定律引起的在强磁场下的电动力效应。

### 2.2 瞬时过电流引起的强磁场干扰

强磁场对等电位在线验电器的干扰有一种特殊的情况,即在发生雷击或线路出现短路大电流的瞬间。虽然这类事件发生的概率小,但对验电器的长期、稳定、可靠工作,有着非常重要的影响。这里进行简短说明此类干扰的影响及防护措施。

当发生雷击或线路出现短路大电流的瞬间,输电线路周围的磁场突然变强,能量采集系统会感应出一个很高的冲击电压,这对后端电路的安全工作极为不利。为了保护后端线路,在能量采集系统两端接一个瞬变抑制二极管(transient voltage suppressor, TVS),以限制能量采集系统输出的冲击电压。TVS 具有响应速度快、瞬态功率大、漏电流小的特点,它能够以高达  $10^{-12}$  s 量级的速度将两极的高阻抗转变为低阻抗,使两极电压钳位在选择值上。TVS 对浪涌功率的吸收有特别好的作用,可避免因过电压冲击造成控制电路损坏<sup>[13-14]</sup>。

### 2.3 抗电磁干扰的元件设计

对现有多种电力电子方案进行综合参数和实验对比后,采用定制高压低漏电率的半导体材料,结合合适的成品封装工艺,直接在低漏电率的半导体基体上堆放的各元件的裸芯,通过多芯片组装(MCM),

将各芯片连接后,再统一进行厚金属膜封装。将多个独立的电子元件,集成到一块更小的区域,并封装成型,可更好地屏蔽强电场干扰,降低局部放电和感应电流的概率,降低对信号处理芯片的输入信号质量的干扰,最终达到提升控制电路主体的抗干扰能力。此外,这样的结构还能提高芯片的散热效率、减少体积,并极大地增强系统的防潮、防震等特性,这使得验电器具备了长时间在户外恶劣环境下工作的可能。

在完成上述对元件的集成后,验电器在对地 577 kV(相当于相间 1 000 kV)的环境下,闪烁频率稳定。整个验电器的回路示意图如图 9 所示。

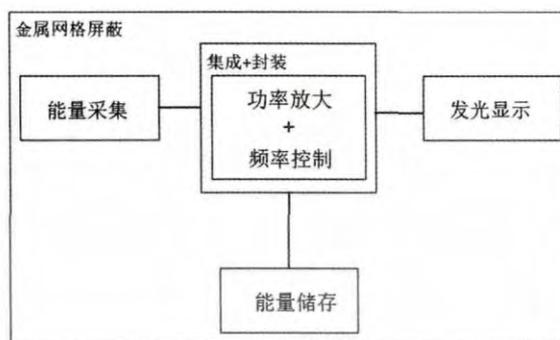


图9 验电器回路示意图

## 3 结 论

在交流 1 000 kV 强电磁场环境中,为保证等电位在线验电器的正常工作,对其内部电子元件选择和整体结构的设计都提出了更为苛刻的要求。前面论述了在交流 1 000 kV 强电磁场环境下,造成等电位在线验电器异常工作的原因,以及减少电磁场对在线验电器干扰的防护措施。通过理论分析和实验表明,强电磁干扰必须从金属屏蔽、电路设计、电子元件选择、集成电路结构布置、外部均压和整体设计等方面来综合解决,从而使等电位在线验电器可以长期、稳定、可靠地应用于交流 1 000 kV 的设备和线路上。通过实验,可以得出以下结论:

1) 在强电场作用下,电子元件和发光二极管的引脚间产生的感应电压将超过元件的关断电压,导致控制系统的电子元件和发光二极管无法正常开断,最终造成在线验电器闪烁频率紊乱、发光二极管无法完全关断等现象;

2) 加装屏蔽防护金属网,可以有效降低强电场

(下转第 50 页)

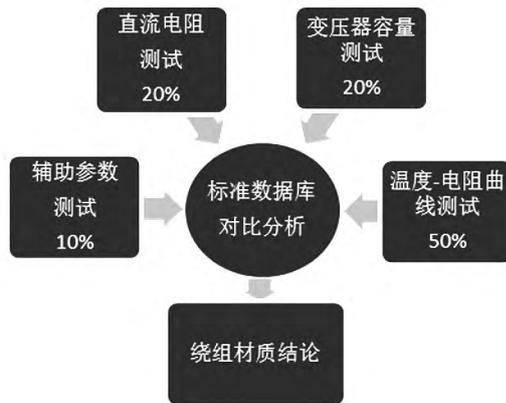


图4 绕组参数权重因子设定

基于上述方法,测试了S9-200与S11-400两台典型配电变压器,发现其绕组材质为铜的概率分别为82%和76%。随后通过金属化学成分分析,发现两台配电变压器的绕组材质确实为铜,这表明所提方法能准确有效地诊断出配电变压器的绕组材质。

### 3 结 论

基于变压器绕组体积、质量、容量、直流电阻及其温升曲线等绕组参数,将实验配电变压器绕组参数数值与其标准数据库进行比对,并根据不同绕组参数的影响因子,建立分析模型计算了绕组材质为铜的概率,判定了变压器绕组的材质。通过实际测试S9-200与S11-400两类典型的铜绕组配电变压器,发现该方法能够准确诊断出配电变压器的绕组材质。

#### 参考文献

[1] 陈民铀,李霞,王平,等. 配电变压器短路和开路损耗在线测量系统[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 36-41.

[2] 张仁奇,李小军,蒋欣,等. 配电变压器线圈用材的X射线鉴别方法[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 49-55.

(收稿日期: 2015-08-10)

(上接第42页)

在LED芯片两端产生的感应电压,且发光元件可以可靠关断,但闪烁频率仍不稳定;

3) 采取电路集成化、多芯片堆放(MCM)再厚膜封装等措施,可显著提升控制元件的抗干扰能力,控制电路可以稳定工作,闪烁频率得到有效控制;

4) 通过增加铁磁材料的金属箔、前端增加瞬变抑制二极管(TVS)的措施,可进一步减小强磁场和瞬时过电流对验电器的影响;

5) 电磁干扰必须从金属屏蔽、电子元件集成和封装、电路设计等各方面整体设计来综合解决。

#### 参考文献

[1] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程(变电部分) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 王凤歌. 一种LDO线性稳压器的研究与设计[D]. 西安: 西北大学, 2010.

[3] 沈建,刘伟东,刘鸿斌,等. 直升机巡视1000kV交流特高压线路的安全作业距离[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 41-45.

[4] 万保权,鄢雄,张广洲,等. 特高压变电站的电磁环境影响[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会2009年学术年会, 2009.

[5] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.

[6] 万保权,路遥,鄢雄,等. 500kV同塔4回线路无线电干扰和工频电场[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 113-116.

[7] 王洪泽,杨丹. 论法拉第笼的防雷作用及其局限性[J]. 广西电力建设科技信息, 2006, 29(2): 13-16.

[8] 袁宝生,杨柳湖. 漫谈电磁屏蔽方舱[J]. 方舱与地面设备, 2004(3): 1-10.

[9] 蔡建爽. 高压变电站无线测温装置的电磁兼容性和有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.

[10] 程丽丽,江玲,黄铜和,不锈钢丝网电磁屏蔽效能的研究[J]. 电子质量, 2006(9): 72-74.

[11] 张国宾. 强磁场对典型电子器件影响机理的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.

[12] Azizi H, Belkacem F, Tahar, Moussaoui D. Electromagnetic Interference from Shielding Effectiveness of a Rectangular Enclosure With Apertures - circuital Approach, FDTD and FIT Modeling[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(3): 494-514.

[13] 沈雪梅,姜宁浩,肖保明. 变电站中通信设备的电磁兼容问题研究[J]. 电工电气, 2013(12): 10-12.

[14] 黎明秀,贾颖,陈凯. 瞬变电压抑制器的发展与应用[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(4): 77-80.

#### 作者简介:

张大堃(1991), 硕士, 从事高电压设备传感器和智能电网研究;

张文胜(1969), 高级工程师, 从事高压电技术研究。

(收稿日期: 2015-09-22)