

# 套管末屏电压传感器响应特性研究

司马文霞, 兰海涛, 杜林, 孙才新, 姚陈果, 杨庆

(重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆市沙坪坝区 400044)

## Study on Response Characteristic of Voltage Sensor Mounted at the Tap of Transformer Bushing

SIMA Wen-xia, LAN Hai-tao, DU Lin, SUN Cai-xin, YAO Chen-guo, YANG Qing

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Study on the response characteristic of the sensor mounted at the tap of transformer bushing is significant to the development of an on-line overvoltage monitoring device for power system, which is based on the tap capacitive divider of transformer's bushing. The structure and parameters of the sensor are introduced. According to the feature of structure of capacitive bushing, the equivalent circuit models of capacitive bushing and other units of the whole capacitive divider system are established and all units' parameters are presented. The square wave response characteristic of the sensor is analyzed by use of the simulation software Saber. The experimental results verify the effectivity of the modeling and the correctness of simulation results.

**KEY WORDS:** capacitive bushing; voltage sensor; overvoltage; response characteristic; online monitoring

**摘要:** 研究套管末屏电压传感器的输出响应特性对研制基于变压器电容式套管分压的电力系统过电压实时在线监测装置具有十分重要的意义。该文首先介绍套管末屏电压传感器的结构和参数, 根据电容式套管的结构特点, 建立电容式套管以及整个分压系统其它元件的等效电路模型, 并详细论述了电路模型中各元件参数的计算方法, 得到整个分压系统等效网络; 运用 Saber 软件对该传感器在方波信号激励下的输出响应特性进行了仿真计算, 得出该传感器的方波响应特性; 最后实测数据验证了模型的有效性和仿真结果的正确性。

**关键词:** 电容式套管; 电压传感器; 过电压; 响应特性; 在线监测

## 0 引言

雷击引起的电网过电压对电网运行安全的影

响越来越受到人们的重视。运行经验表明, 电网中发生的各种事故绝大部分是由于系统中过电压引起的。尽管实际运行系统中安装了大量避雷器等过电压保护装置, 但当系统出现过电压事故时, 往往由于缺乏有效的监测手段, 无法确定事故原因是过电压幅值或陡度超过设备的承受能力, 还是设备的绝缘水平降低所造成, 这些使得分析判断变得十分困难。

电力系统中的过电压类型多种多样, 其产生原因和危害也各不相同。外部过电压主要指大气过电压, 其波头陡、幅值高, 是造成电力系统绝缘事故的主要原因之一。内部过电压虽然幅值不是很高, 但其持续时间较长, 同样对电气设备的绝缘构成严重的威胁。目前对于电力系统运行中出现过电压的机理、幅值和频率已有很多的研究成果, 但大多数是理论研究或实验室仿真结果, 往往缺乏足够的现场数据加以验证。为了正确分析事故原因, 改进电网绝缘配合, 防止内外过电压事故, 运行部门急需一种高性能、自动化的电网过电压实时在线监测系统。

国内对过电压在线监测装置的研究和开发是 20 世纪 90 年代初开始的。目前国内过电压自动记录装置主要针对 35kV 及以下电压等级的配电网设计, 通常过电压在线监测装置采用电阻分压器或电容分压器<sup>[1]</sup>作为电网过电压的采集装置。在电压等级较低的配电网系统中, 实践证明采用分压器是可行的, 但在电压等级较高的系统中, 将分压器长期并联于母线运行将会对系统安全带来潜在的风险。本文提出一种采用专门针对 110kV 电网过电压监测的方法, 通过特殊设计的套管末屏电压传感器来实现过电压信号的采集, 并对整个过电压信号采集系统进行建模, 研究传感器的输出响应特性。

基金项目: 重庆市科委自然科学基金重点项目(2005BA6021).

## 1 传感器结构与参数确定

电压传感器的实现是过电压在线监测系统的关键环节。在 110kV 及以上的电网中常采用电容式套管<sup>[2-9]</sup>。本文所述套管末屏电压传感器安装于电容式套管末屏，传感器的安装示意图如图 1 所示。

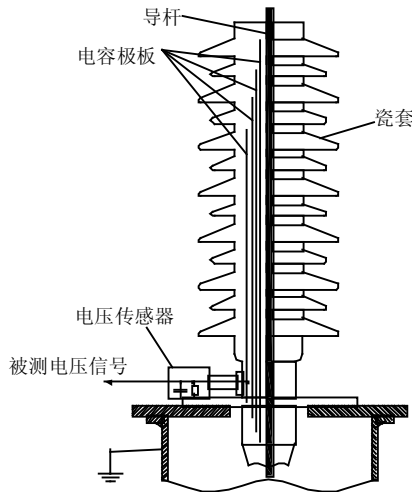


图 1 套管末屏电压传感器安装示意图  
Fig.1 Diagram of installed voltage sensor

从大量现场实验数据得到，110kV 变压器高压套管导杆对地主电容  $C$  通常是 280pF 左右。为了准确可靠获取电网过电压信号，可在套管末屏上串入检测阻抗<sup>[10]</sup>，检测阻抗采用阻容并联形式，其要求是合理选择电容  $C_s$  容量及其它性能指标，保证传感器输出电压信号在一个合理的范围内，这样既可提高信号的信噪比，保证测量准确度，又可保证测量的安全性。为保证电压传感器输出电压信号幅值在 10~65V 的范围内，电容的电容量选为 0.68μF。

## 2 套管电容分压系统建模与仿真

### 2.1 概述

套管末屏电压传感器安装于电容式套管末屏抽头处，与套管共同构成电容分压系统。套管性能的好坏对传感器输出响应特性有重要影响。

电容式套管是一个含有电位悬浮导体的电极系统，其电路模型为一个电阻、电容、电感构成的混合网络<sup>[11]</sup>，而传感器可用一个二端口网络等效。因此，可以通过对电容分压系统中各元件进行建模，同时对整体系统进行系统仿真，从而得到传感器的输出响应特性。本文以某 110kV 变压器油纸电容式套管为基础，建立电容分压系统的电路仿真计算模型。

仿真计算软件运行平台选用美国 Analog 公

司开发的系统仿真软件 Saber。

### 2.2 电容分压系统等效电路模型

过电压在线监测等效电路模型由高压引线、电容式套管、末屏电压传感器、同轴电缆和测量单元组成。每一元件可视为二端口网络，整个系统由各元件依次级连组成。

### 2.3 高压引线模型的建立

高压引线为一分布参数电路，其中  $R_0$  为导线单位长度电阻，单位长度对地电容  $C_0$  和电感  $L_0$  分别为  $C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{r}}$ ， $L_0 = \frac{m_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}$ ， $h$  为导线对地平均高度， $r$  为导线半径。

### 2.4 电容式套管模型的建立

110kV 及以上变压器套管通常采用油纸电容式套管。套管内部结构模型如图 2，套管由瓷套、电容芯子、导电杆、安装法兰等组成。电容式套管具有内绝缘和外绝缘，内绝缘为一圆柱形电容芯子，外绝缘为瓷套。电容极板一般采用铝箔卷制成同心圆柱形结构。电容芯子由 0.08~0.12mm 厚的绝缘纸和 0.01mm 厚的铝箔加压力交替卷在中心铜管上。一般 110kV 电容式套管多采用油纸绝缘( $\epsilon_r = 3.5$ )，极板层数约 30~40 层，绝缘层最小厚度约为 1~1.2mm。极板一般按各层等电容和等台阶设计，本文中所述模型每层电容值为常数，其值为 8nF。

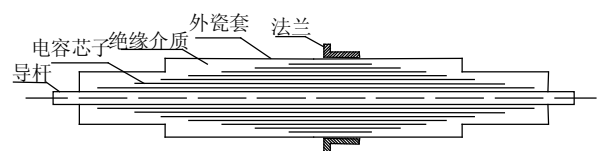


图 2 套管内部结构模型  
Fig.2 Structure of transformer bushing

110kV 及以上的电容式套管，一般在其法兰上有一只测量小套管，测量小套管通过铜导线与电容芯子的末屏相连，此铜导线电感约为 0.2μH。

套管建模是整个仿真过程的关键，只有保证套管模型的准确性才能保证整个仿真的准确。本文提出一种变压器套管电路模型的建模方法，通过仿真计算分析，并对比实验室试验结果，验证了模型的正确性。

110kV 电容式变压器套管计算模型各参数为：电容芯子绝缘层层数为 33，套管上瓷套长度  $L_B = 92\text{cm}$ ，下瓷套长度  $L_H = 54\text{cm}$ 。套管的模型参数如表 1 所示， $x$  为电容屏序数， $r_x$  为极板半径， $l_x$  为极板长度。

表1 套管模型极板尺寸参数表  
Tab.1 The geometric parameter of the model of transformer bushing

参数	x											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r_i/cm$	2.20	2.36	2.52	2.69	2.87	3.05	3.24	3.43	3.64	3.84	4.06	4.28
$l_i/cm$	139.6	136.4	133.2	130.0	126.8	123.6	120.4	117.2	114.0	110.8	107.6	104.4

参数	x											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$r_i/cm$	4.50	4.73	4.96	5.19	5.42	5.66	5.90	6.14	6.38	6.61	6.84	7.08
$l_i/cm$	101.2	98.0	94.8	91.6	88.4	85.2	82.0	78.8	75.6	72.4	69.2	66

参数	x									
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$r_i/cm$	7.30	7.52	7.74	7.95	8.15	8.34	8.52	8.70	8.87	9.00
$l_i/cm$	62.8	59.6	56.4	53.2	50.0	46.8	43.6	40.4	37.2	34.0

电容式套管内部结构为一系列电容极板同轴排列，其内部等效电路模型可视为电容、电感和电阻组成的混合网络，其具体连接形式如图3所示。

求解套管末屏电压传感器输出响应特性的核心是获得由电容、电感、电阻组成的网络中的各参数值，并根据网络的传递函数求出网络阶跃响应特性。

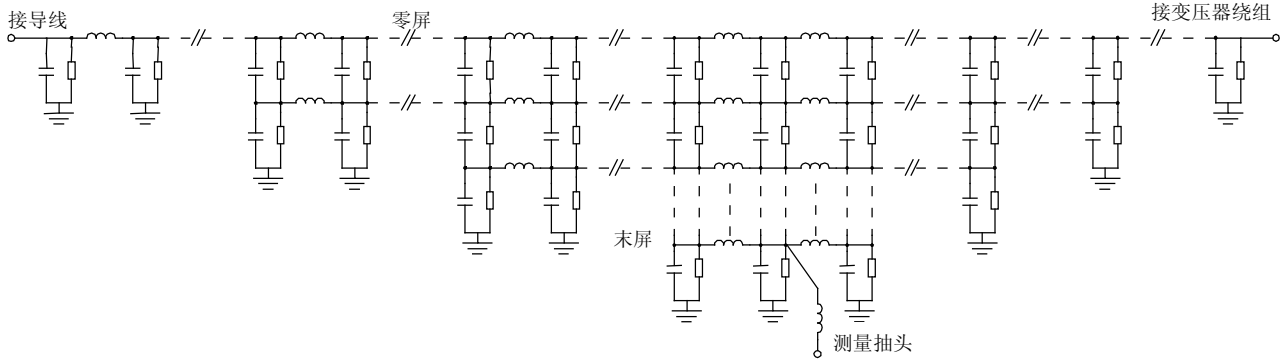


图3 套管内部等效电路模型  
Fig.3 Equivalent circuit of transformer bushing

电路模型中电容采用同轴圆柱电容器模型。对于同轴圆柱电容器， $r_1$ 、 $r_2$  分别为内、外筒半径， $\epsilon_r$  为内外筒间电介质的相对介电常数，其单位长度电容

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

电路中电感参数与回路的尺寸、几何形状及媒质的分布有关，与流过回路的电流及磁链的具体量值无关。在导体内部，仅与部分电流相交链的磁通称为内磁通，相应的磁链为内磁链，用 $y_i$ 表示，则内自感

$$L_i = y_i / I \quad (2)$$

同样，定义外自感

$$L_o = y_o / I \quad (3)$$

导体自感为内自感与外自感之和，即

$$L = L_i + L_o \quad (4)$$

当忽略同轴圆柱电容器的极板厚度时，内自感

为

$$L_i = \frac{y_i}{I} = \frac{m_0 l}{8\pi} \quad (5)$$

外自感为

$$L_o = \frac{y_o}{I} = \frac{m_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (6)$$

故自感  $L$  为

$$L = L_i + L_o = \frac{m_0 l}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (7)$$

由于电容极板很薄，且当系统出现瞬变过电压时，过电压中高频成分可能高达数 MHz<sup>[12]</sup>。因此，一般认为极板导体内磁通可以忽略不计，内自感等于零。故极板导体自感为

$$L = \frac{m_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (8)$$

电容式套管内部结构为一系列电容极板同轴排列，其分布电感很小，故可忽略屏间互感效应的影响。为简化计算，本模型中忽略互感的影响，认

为互感为零。

套管末屏电压传感器的二端口网络模型如图 4 所示。图中  $R_s$ 、 $C_s$  分别为电压传感器的等效电阻、电容， $L_d$  为传感器等效杂散电感， $R_p$  为匹配电阻。传感器简化电路模型如图 5 所示。由于传感器等效电容较大，故忽略传感器保护单元中保护间隙和继电器结点的电容效应。同时保护单元中非线性电阻正常工作时成高阻状态，漏电流很小，通常为微安级，相当于开路，故在传感器建模中忽略其影响不会对仿真计算结果带来较大的误差。

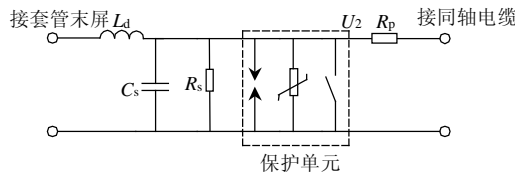


图 4 套管末屏电压传感器电路模型

Fig.4 Simulation model of voltage sensor that mounted at the tap of transformer bushing

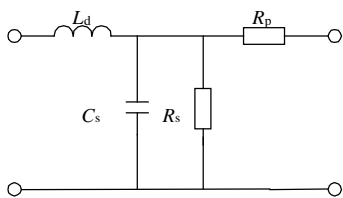


图 5 套管末屏电压传感器简化电路模型

Fig.5 Brief model of voltage sensor that mounted at the tap of transformer bushing

### 3 仿真及试验结果分析

仿真计算过程是基于整个套管电容分压系统进行，综合考虑了现场实际条件和各种影响因素，使仿真结果接近真实情况。

图 6 为 Saber 仿真计算得到的套管末屏电压传感器方波响应特性<sup>[13-18]</sup>。响应时间  $T$ 、部分响应时间  $T_1$ 、过冲  $b$  分别为 43ns、32ns、14.6%。当改变传感器的杂散电感  $L_d$  的值时，计算结果表明，杂散电感的增大将导致  $T$ 、 $T_1$ 、 $b$  的增大，并且方波响应

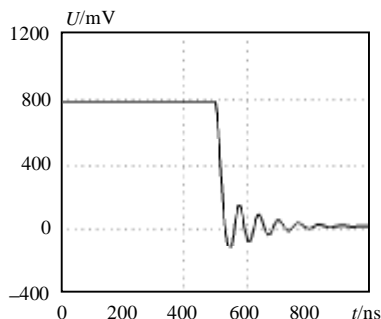


图 6 套管末屏电压传感器仿真方波响应特性

Fig.6 Simulation square wave response of voltage sensor that mounted at the tap of transformer bushing

出现较强烈的振荡，其仿真结果如图 7 所示。

为了验证仿真结果的正确性，在实验室中对传感器的性能进行了测试，所用设备型号如下：套管为 110kV 电容式，额定电流为 600A，主电容为 294pF，方波源选用低压下降式方波源，输出电压幅值为 330V，下降时间小于 5ns；测试用传感器电容量为 0.13μF，电阻值 10kΩ测试回路采用首端匹配，匹配电阻等于同轴电缆波阻抗。用方波发生器产生 330V 方波信号加到电路，在传感器的输出端用示波器测试输出方波响应。

为对比测试杂散电感对传感器响应特性的影响，分别进行了两组测试，测试 1 为正常情况下套管末屏电压传感器方波响应的测试，测试 2 为增加传感器剩余电感情况下的测试。图 8 为测试 1 得到的方波响应波形，响应时间  $T$  小于 60ns、部分响应时间  $T_1$  小于 45ns、过冲  $b$  小于 10%；测试 2 增加了元件引线，改变了各元件的空间排列结构，以增加传感器的剩余电感，保持其它测试条件不变，测试波形如图 9 所示。

响应时间  $T$  小于 120ns、部分响应时间  $T_1$  小于 50ns、过冲  $b$  大于 25%。从图中可以看出输出波形波头处存在较严重的振荡，并随着时间的推移逐渐衰减，与仿真结果基本一致。

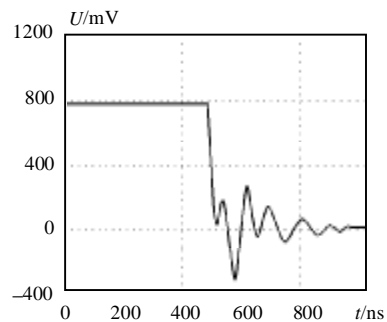


图 7 增大杂散电情况下套管末屏电压传感器仿真方波响应特性

Fig.7 Simulation square wave response of voltage sensor that mounted at the tap of transformer bushing with the increase of stray inductance

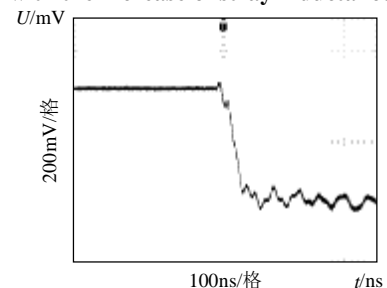


图 8 测试 1 的方波响应波形

Fig.8 Square wave response of system in test 1



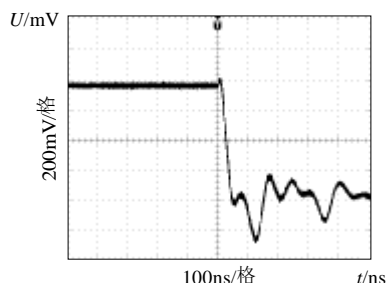


图9 测试2的方波响应波形

Fig.9 Square wave respond of system in test 2

## 4 结论

本文介绍了套管末屏电压传感器的结构和参数,建立电容式套管的电路仿真模型,并对电容式套管分压系统进行建模和仿真,得到套管末屏电压传感器在方波信号激励下的输出响应特性,用实验室实测的方法对仿真结果进行了验证。

仿真和实测结果验证了元件杂散电感对传感器的输出方波响应特性有较大的影响,因此在传感器的结构设计中采取一系列措施,最大限度地减小元件的杂散电感,同时保证检测电路及信号传输电缆的可靠屏蔽。结果验证了利用套管电容分压实现电网过电压在线监测的可行性。运用该原理设计的套管末屏电压传感器具有很好的稳态和暂态响应特性,体积小,绝缘水平高,能满足在线运行的要求。

## 参考文献

- [1] 蔡光显,王建兴,吴世林,等. 电力系统过电压在线监测装置[J]. 电网技术, 1995, 19(1): 9-12.  
Cai Guangxian, Wang Jianxing, Wu Shilin, et al. An on-line device for monitoring overvoltage in power system[J]. Power System Technology, 1995, 19(1): 9-12(in Chinese).
- [2] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 朱德恒,严璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [5] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [6] 王楠,陈志业,律方成. 电容型设备绝缘在线监测与诊断技术综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 72-76.  
Wang Nan, Chen Zhiye, Lü Fangcheng. A survey of on-line monitoring and diagnosis for capacitive equipment[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 72-76(in Chinese).
- [7] 史保壮,李志敏,张文元,等. 超高压 GIS 中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.  
Shi Baozhuang, Li Zhimin, Zhang Wenyuan, et al. Analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3(in Chinese).
- [8] 刘晓亮,任捷,陈树. 带电抽头油纸电容式变压器套管[J]. 电瓷避雷器, 2003, 11(6): 9-13.  
Liu Xiaoliang, Ren Jie, Chen Shu. The oilpaper capacitive transformer bushing with electrified tap[J]. Insulators and Surge Arresters, 2003, 11(6): 9-13(in Chinese).
- [9] 刘晓亮. 132kV/630A 油纸电容式变压器套管的开发[J]. 电瓷避雷器, 1995, 3(1): 22-25.  
Liu Xiaoliang. Development of 132kV/630 A oil-impregnated paper condenser bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 1995, 3(1): 22-25(in Chinese).
- [10] 刘云鹏,律方成. 基于电容分压的电力变压器套管绝缘在线检测的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 121-123.  
Liu Yunpeng, Lu Fangcheng. On-line monitoring transformer's bushing insulation based on its tap capacitive divider[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 121-123(in Chinese).
- [11] 韩社教,谷山强,何金良,等. 冲击电压下±500kV 直流线路分压器电位分布数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 139-143.  
Han Shejiao, Gu Shanqiang, He Jinliang, et al. Numerical simulation of voltage distribution of a ±500kV DC power transmission line divider subjected to an impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 139-143(in Chinese).
- [12] 董万胜,刘欣生,张义军,等. 25~100MHz 频段闪电脉冲辐射能量频谱特征[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 104-107.  
Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Zhang Yijun, et al. Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 25 to 100MHz[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 104-107(in Chinese).
- [13] Seljeseth H, Saethre E A, Ohnstad T, et al. Voltage transformer frequency response. Measuring harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV power systems[J]. Proceedings. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998, 2(14-18): 820-824.
- [14] Hong Tang, Bergman A. Uncertainty calculation for an impulse voltage divider characterised by step response[J]. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, 467(1): 62-65.
- [15] Iravani M R, Chaudhary A K S, Giesbrecht W J. Modeling and analysis guidelines for slow transients. III. The study of ferroresonance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 255-265.
- [16] A study on-line and measuring system for electric equipment insulation in HV substation[C]. Proceeding of 1994 International Joint Conference, Japan, 1994.
- [17] Xu J S, X. Cross J. D. High divider ratio fast response capacitive dividers for high voltage pulse measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 920-922.
- [18] Chatrefou D, Pristchepa M, Uhde D. Application of optical sensors for measurement of high frequency overvoltages in power transformers [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, IEEE, 2000: 2257-2268.

收稿日期: 2006-05-26.

作者简介:

司马文霞(1965—),女,教授,博士生导师,长期从事高电压绝缘和电力系统过电压的研究, [cqsmwx@cqu.edu.cn](mailto:cqsmwx@cqu.edu.cn);

兰海涛(1977—),男,硕士,现从事电力系统过电压监测技术的研究。

(责任编辑 韩 蕾)