

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.05.007

## 核电厂某电子设备浪涌抗扰度仿真分析及整改研究

夏苗,谢富强\*,刘冲

(南华大学 电气工程学院,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**通过对浪涌抗扰度试验中常出现的问题进行系统分类,提出了浪涌抗扰度试验问题整改的流程方案。应用于解决核电厂某电子设备的端口防护设计问题自查,制定了一系列端口防护电路的整改措施,同时利用 PSPICE 仿真了浪涌抗扰度试验中的发生器、耦合网络及防护器件组成的试验电路,验证了防护电路的可靠性。

**关键词:**核电设备;浪涌防护;整改措施;PSPICE 仿真

**中图分类号:**TM623.7 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0062(2020)05-0044-07

## Simulation Analysis and Improvement of Surge Immunity of an Electronic Device in a NPP

XIA Miao, XIE Fuqiang\*, LIU Chong

(School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** The common problems in the surge immunity test are classified systematically, then a process plan for rectifying the problems in the surge immunity test is proposed, which is applied to solve the design problem of port protection of some electronic equipment in a nuclear power plant(NPP), and a series of improvement measures of port protection circuit are made. At the same time, the test circuit composed of generator, coupling network and protection device in surge immunity test is simulated by PSPICE, so that the reliability of the protection circuit is verified.

**key words:** nuclear power equipment; surge protection; improvement measures; PSPICE simulation

收稿日期:2020-05-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2316)

作者简介:夏苗(1995-),女,硕士研究生,主要从事电磁兼容防护设计方面的研究。E-mail:614966160@qq.com。

通信作者:谢富强(1973-),男,副教授,博士,主要从事智能控制,最优化理论及应用方面的研究。E-mail:80388223@qq.com

## 0 引言

核电厂仪表中,电子设备通过对信号的处理实现核电厂的监测、控制和保护功能。而安全级电子设备肩负着保证民众安全及维持核电厂正常运行的重大责任<sup>[1]</sup>。只有鉴定合格的设备才能用于核电站中,完成合格鉴定是向核电站供货的重要一步,鉴定试验主要包括环境试验、电磁兼容(electro magnetic compatibility, EMC)试验、老化试验及抗震试验等<sup>[2]</sup>。EMC 试验要求验证样机在规定的电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力<sup>[3-4]</sup>。而电磁兼容试验中的浪涌抗扰度试验则是考验的设备抗差模/共模传导抗扰度的能力<sup>[5-7]</sup>。针对浪涌防护设计有学者从端口的特殊性对端口进行防护设计研究,主要包括电源端口和信号端口<sup>[8-10]</sup>。而针对复合型浪涌防护器级间配合使用方法有从器件的选择到级间的能量的配合及使用都进行了相关的阐述<sup>[11-15]</sup>。影响浪涌抗扰度试验的因素较多,但具体设备浪涌防护设计的整改经验较少,浪涌抗扰度试验经常是较难通过的一项,目前尚未有相关设计规程和整改流程。

## 1 核电厂某电子设备浪涌抗扰度分析

本文采用以问题为导向的原则,对浪涌抗扰度试验前问题自查和浪涌抗扰度试验后问题定位作了系统分析。提出了问题自查和问题定位并重的观点,有助于形成更完备的电子设备浪涌抗扰度问题整改流程。

### 1.1 浪涌抗扰度试验常见问题

浪涌抗扰度试验是模拟雷电及负载开关切换的对设备的影响,浪涌冲击的能量大,频率低,主要为传导干扰,试验过程中易损坏设备。造成电磁干扰三要素为电磁干扰源,耦合途径及敏感源,三者同时存在时造成电磁干扰。在浪涌抗扰度试验中,浪涌发生器输出波形为电磁干扰源,输出的波形分为电压波形和电流波形,耦合途径为电缆传导及部分空间耦合,敏感源为接口芯片和敏感信号。

在浪涌抗扰度试验中,以下三种问题经常会出现(如表 1 所示),其中提到的防护器件有气体放电管(gas discharge tubes, GDT)、压敏电阻(metal oxide varistor, MOV)、固体放电管(thyristor surge suppresser, TSS)及硅瞬态电压抑制二极管(transient voltage suppressor, TVS)。

表 1 电子设备常见浪涌抗扰度问题

Table 1 Common surge immunity problems in electronic devices

浪涌抗扰度常见问题	问题定位	问题原因
敏感器件损坏或信号受影响	开关电源/信号芯片	提供低阻抗泄放电路
防护器件损坏	GDT 开路/TSS 短路/ MOV 短路/TVS 短路	残压过大/通流量过小/防护器件间配合不合理
拉弧	端口/器件冒火花	耐压不足

前两个问题可通过合理的端口防护设计来解决,而拉弧问题则是距离不足导致的耐压不足,整改措施就是增大耐压距离,方式较为明确,但端口防护涉及到了对防护器件的使用,而使用不当仍将导致浪涌抗扰度试验的失败。因此防护器件的设计成为浪涌防护的关键步骤。

### 1.2 浪涌抗扰度试验前问题自查

浪涌抗扰度试验前问题自查主要检查的是端口的防护设计是否符合规范,及端口的 PCB (printed circuit board) 设计是否合理。主要用到的防护器件的参数如表 2 所示。

端口防护电路中的浪涌防护一般由几个器件组合而成来获得最佳的效果,而防护器件搭配不当会导致防护电路失效。以下列出设计中常出现的错误:

1) 应用场景错误:(1) 气体放电管适用于第一级保护,若将其放置于防护电路的后端,由于气体放电管的响应时间慢,还未响应,前级防护器件已经损坏。(2) 由于压敏电阻的寄生影响电容过大,不利于高频信号,引起高频信号传输畸变,从而影响系统正常运行。因此压敏电阻一般不用于高频信号线路。

2) 防护器件选型错误:导致残压过大或通流量太小。应针对浪涌试验的等级,以及防护电路中的工作电压,对防护器件的规格做出正确选择。

3) 两级间无退耦器件:两级防护器件由于响应速度不同,因此中间需要退耦器件进行缓冲,一般为电阻或电感。

防护电路在 PCB 上的布局布线问题可从以下四个方面进行自查:

1) 防护器件应按照信号顺序排布,紧挨着接口处紧密整齐摆放。

表2 浪涌防护器件参数对比表

Table 2 Comparison table of surge protection device parameters

参数	气体放电管(GDT)	压敏电阻(MOV)	硅瞬态电压抑制二极管(TVS)	固体放电管(TSS)
保护方式	负阻特性	电压钳位	电压钳位	负阻特性
响应时间	μs 级	ns 级	ns 级	ns 级
寄生电容	小	大	较大	小
残压	低	较高	中等	较低
通流容量漏电流	大	大	小	中等
应用场景	无	小	小	小
	电源和通信线的初级保护; 多级保护组件中的 第一级保护	多级保护组件中的第一级 保护和第二级保护	多级保护中的最后 一级保护	通信线路中的 初次级保护

2) PCB 走线尽量避免曲折,连线尽量短。

3) PCB 线宽与通电电流相关,输入端的布线一般在表层,同时要配合试验电流规格来布线宽。0.381 mm 线宽可以承受的冲击电流约 1 kA。若受 PCB 布局的限制,可用两层或三层走线来达到走线的宽度。

4) 防护器件之间的线—线与线—地之间的距离应尽量拉开,配合试验电压规格来布间距,在表层 0.508 mm 的线宽约可承受 1 kV 的电压。

### 1.3 浪涌抗扰度试验后问题定位

浪涌抗扰度试验后的问题定位,目标是将浪涌试验中出现问题进行拆解,分析现象产生的根源,为以后的整改做出指导。

浪涌抗扰度问题定位流程如图 1 所示,电子设备浪涌抗扰度常见问题分为设备信号受影响、防护器件烧毁、设备出现拉弧及敏感器件烧毁。对于前两类,问题定位为端口防护电路设计不到位,对端口防护电路进行完善可从规范防护器件规格,规范多级防护电路搭配,规范防护电路 PCB 设计三个方面展开。若三方面完善了设备失效,应再次检查设计中不到位的地方。而拉弧问题为设备中耐压距离不足,此时是通过 PCB 的布线设计来完善。而敏感器件在浪涌的一种大能量的传导信号的抗扰度试验中,此时应提供低阻抗泄放电路进行保护。

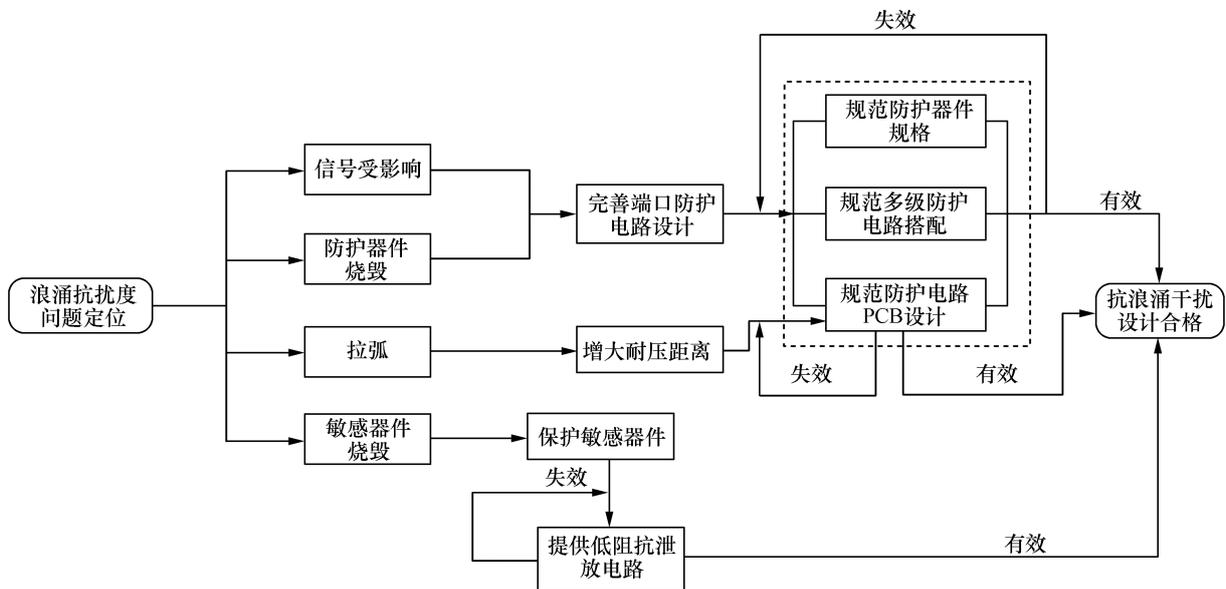


图1 浪涌抗扰度问题定位流程

Fig. 1 Surge immunity problem locating process

对于在浪涌抗扰度试验后损坏的电子设备,除了根据图 1 中进行整体的浪涌抗扰度问题定位,还可通过如图 2 所示的检测步骤进行防护器件的问题定位,找出试验中受损的防护器件及电路,为后期的整改设计提供参考。电子设备基本组成部分有电源板,信号板及液晶屏显示部分。电源板可单独工作,而信号板必须在电源板正常供电的情况下才能正常工作,因此为确保信号板检验过程中无其他影响因素,先检验电源板再检验信号板。而对于在板上易损坏的器件一般分为敏感器件和防护器件。对于损坏的敏感器件,为继续进行检验可直接替换正常器件。而防护器件不动作时为高阻状态,在电路中不起作用。但若防护电路器件损坏,维持的短路或开路状态可能影响设备工作,若损坏可直接将损坏器件直接卸下,直到完成全部检验。

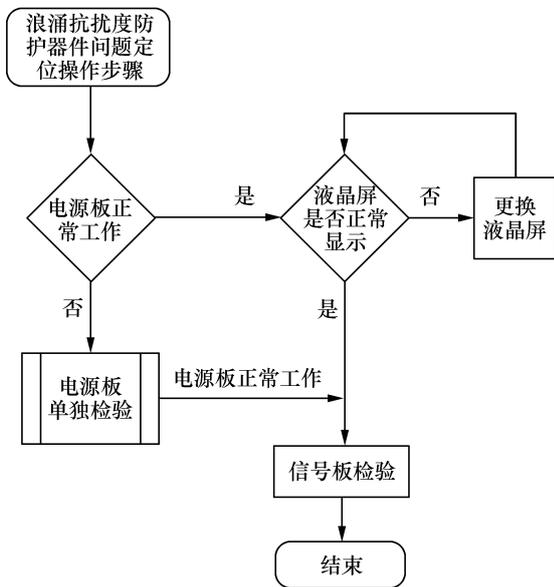


图 2 浪涌抗扰度防护器件问题定位流程

Fig. 2 Surge protective device problem location process

## 2 核电厂某电子设备浪涌抗扰度仿真分析及整改

通过 1.1 中提到的试验常见问题归类可知,一类问题可在浪涌抗扰度鉴定试验前的问题通过自查就能发现。可采用原理图分析和 PCB 布局布线分析以及仿真验证来作出判断和改进,不必等完成浪涌抗扰度试验试验后,专门进行整改,这样可节省项目人力成本和时间成本,结合核电厂某电子设备完成浪涌抗扰度问题自查,并完成防护电路 PSPICE 仿真分析,对于防护器件的模型构建,GDT 及 MOV 遵循 J. G. Zola 相关模型<sup>[16-17]</sup>,TVS 遵循美国半导体相关公司研究<sup>[18]</sup>。有国内学者根据建立的完成了多级 SPD(surge protective device)相关模型仿真<sup>[19]</sup>。以上模型都可根据相关电气属性进行修改,用于电路仿真真实可靠。其中仪表输出端口与热电偶端口原防护电路设计一致,因电路工作电压一致,前者可参考后者的优化防护电路。利用 PSPICE 软件对端口防护电路设计进行仿真,仿真结果表明改进设计具有可靠性,能利用防护器件对浪涌电压/电流在端口完成泄放大电流,钳位电压的功能,有效保护后续电路。并且完成整改设计后工程样机浪涌试验顺利通过。因此 PSPICE 仿真软件可作为工程师们在进行浪涌试验前验证防护电路可靠性的一种有效方式。

### 2.1 核电厂某电子设备浪涌抗扰度试验

电子设备的总体布局如图 3 所示,电路板主要分为电源板和信号板,输入输出端口有电源端口、热电偶端口及仪表信号输出端口。

### 2.2 电源端口

针对核电厂的某电子设备的电磁兼容设计,先进行浪涌试验前问题自查,观察电源端口浪涌防护设计,由图 3 可知,电源端口直接连接滤波器,观察到电源端口未进行端口防护设计,这意味着为浪涌试验时大电压/大电流将侵入内部电路,带来严重后果,因此应增加防护电路,效果图如图 4 所示。

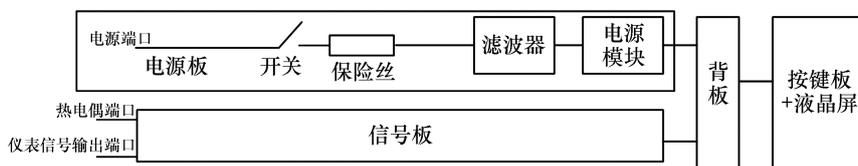


图 3 某电子设备系统总体组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the overall composition of an electronic equipment system

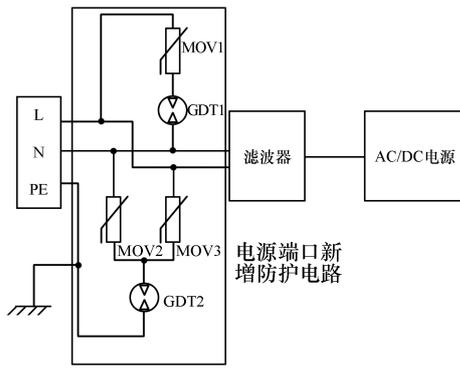


图4 电源端口防护原理图

Fig. 4 Schematic diagram of power port protection

L-N 之间为差模防护, L/N-E 之间为共模防护, 都采用压敏电阻加气体放电管, 气体放电管主要功能为泄流, 压敏电阻主要功能为限制电压在一个较低的水平, 两者的联用可有效的减小压敏电阻的寄生电容, 同时器件的配合使用也提高了使用寿命。对于交流 220 V 供电设备, GDT 直流击穿电压取值约为交流电源的 2.5 倍, 选取为 600 V, 型号为 BF601M。与 GDT 串联的压敏电阻的压敏电压可取得小一些, 使得回路中的残压更小, 后面的回路获得更好的保护。本电路中串联压敏电阻选 B32K150/EPC, 压敏电压为 200 V。

利用 PSPICE 软件对浪涌抗扰度试验状态下电源端口防护电路进行仿真来验证设计的可靠性。如图 5 所示, 回路由复合波形发生器、耦合网络、测试设备 (equipment under test, EUT) 构成。耦合网络中线—地耦合为 10 Ω 电阻及 9 μF 电容, 线—线耦合为 18 μF 电阻, 而 EUT 本次由电源端口防护电路代替。如图 6 所示, 在 1 kV 冲击电压下, 线—线及线—地残压都能控制在 400 V 左右, 能够很好保护后端电路。

2.3 热电偶端口

查看热电偶端口共模回路防护设计如图 7 所示, 参考 1.1 中防护器件的常见问题分析, 发现错误如下:

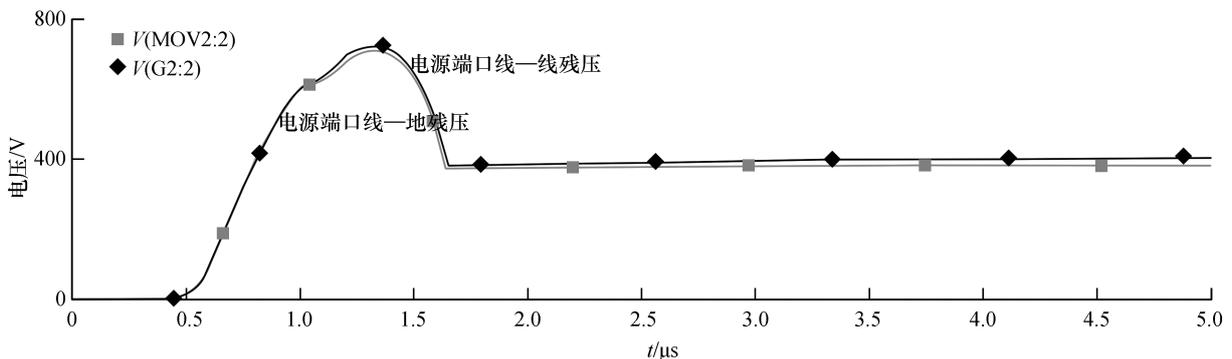
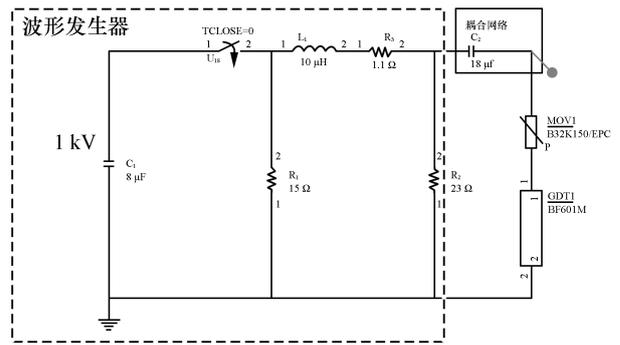
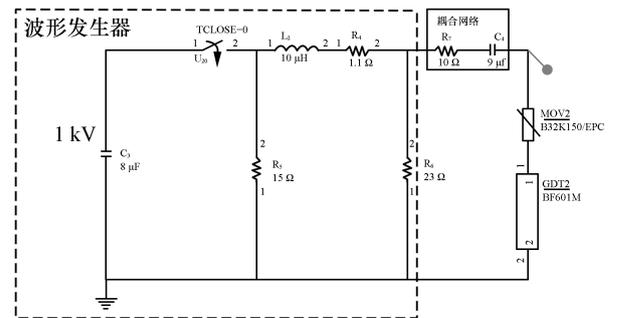


图6 电源端口 PSPICE 仿真波形图

Fig. 6 Power port PSPICE simulation waveform



(a) 电源端口线-线防护



(b) 电源端口线-地防护波形

图5 电源端口 PSPICE 仿真原理图

Fig. 5 PSPICE simulation schematic diagram of power port

应用场景错误: 气体放电管应位于第 1 级防护。

防护器件选型错误: 回路中工作电压为 24 V, TVS 为 SMAJ48CA, 击穿电压为 48 V, 钳位电压为 77.4 V。TVS 的钳位电路远大于工作电压, 设计不合理。

两级间无退耦器件: 将 TVS 换成 SMAJ24CA, 退耦电阻由公式(1)求取。

$$R \geq \frac{U_1 - U_2}{I_{PP}} \quad (1)$$

其中  $U_1$  为 90 V,  $U_2$  为 38.9 V, 器件手册得到 TVS 管最大通流量  $I_{PP}$  为 15.5 A, 得到  $R$  最小值约为 3.29 Ω, 因此选用退耦电阻  $R_1$  为 3.3 Ω。

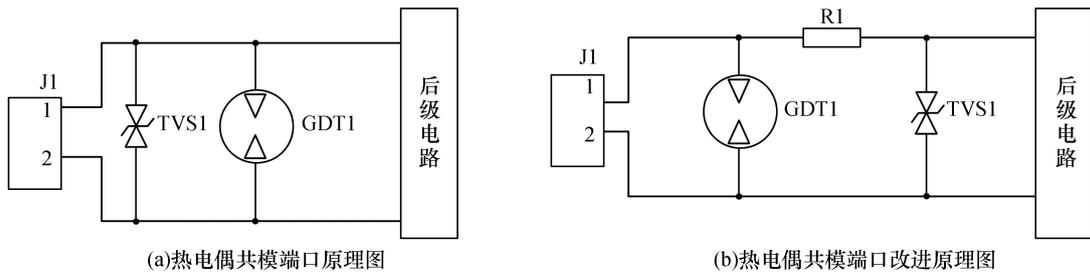


图7 热电偶端口防护设计

Fig.7 Thermocouple port protection design

热电偶端口 PSPICE 仿真图如图8所示。

浪涌抗扰度试验中信号线上施加 2 kV 的电压波形,为适应产品的后期发展,将对电路进行最严格的非屏蔽不对称互连线的试验配置,耦合 40 Ω 电阻及 0.5 μF 电容。对热电偶端口设计改进电路进行仿真,观察防护器件上的残压值,由波形图图9可知 GDT 与 TVS 一起对电压进行抑制,最终防护电路的钳位电压为 37 V,对后级电路进行精细保护。

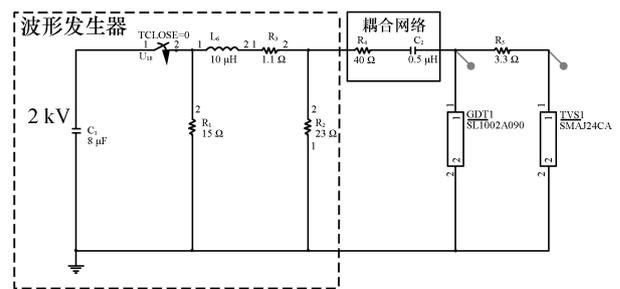


图8 热电偶端口 PSPICE 仿真原理图

Fig.8 PSPICE simulation schematic of thermocouple port

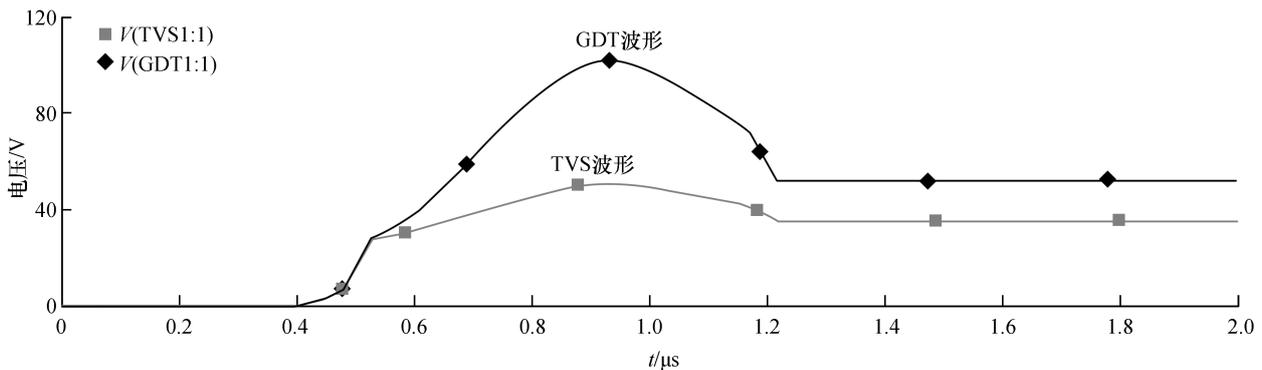


图9 热电偶端口 PSPICE 仿真波形图

Fig.9 PSPICE simulation waveform of thermocouple port

### 3 结 论

本文以问题为导向,对电子设备的浪涌抗扰度试验前问题自查及浪涌抗扰度试验后问题定位作了系统分析,并在端口防护设计阶段,采用 PSPICE 对浪涌抗扰度试验中的发生器、耦合网络及防护器件组成的试验电路进行了仿真验证。通过仿真检验了防护电路设计的可靠性,基于本文所提出的整改流程,针对核电厂某电子设备浪涌抗扰度问题整改,完成了对核电厂某电子设备的整改优化及端口防护电路可靠性的仿真验证,最

后顺利通过了浪涌抗扰度试验。

#### 参考文献:

- [1] 能源行业核电标准化技术委员会. 核电厂安全级电子设备鉴定规程:NB/T 20344-2015[S]. 北京:国家能源局,2015:9-11.
- [2] 范遂. 核电站安全级仪控设备寿命内的质量鉴定[J]. 产业与科技论坛,2019,18(10):62-63.
- [3] 孟令志,王彦,李海峰. 电磁兼容的分析与设计[J]. 机电元件,2019,39(5):8-13.
- [4] 徐煦,黄小凯,陈浪. 电子产品电磁兼容的重要性与检测技术分析[J]. 中国管理信息化,2018,21(22):

- 89-91.
- [5] 全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC246). 电磁兼容试验和测量技术浪涌(冲击)抗扰度试验:GB/T 17626.5-2019[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2019:1-22.
- [6] 陈贺,辛中华,刘涛,等. 煤矿安全监控系统CAN总线浪涌抗扰度测试方法[J]. 电子质量,2019(1):78-81.
- [7] 许斌,汤伟,田宏强,等. 基于差模共模保护模式下的交流电源端口浪涌防护对比分析[J]. 电瓷避雷器,2018(2):83-87.
- [8] 赖淋香. 通信端口的浪涌(冲击)防护[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2016,34(2):46-51.
- [9] 王肃. 信号线路浪涌保护器防雷设计[J]. 现代制造,2017(9):75-77.
- [10] LI D, DANG W, SUN L, et al. Reliability analysis of rectification on electromagnetic compatibility test[C]//2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore:IEEE,2017:939-943.
- [11] VRIGNON B, CAUNEGRE P, SHEPHERD J, et al. Automatic verification of EMC immunity by simulation[C]//2013 9th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). Nara, Japan:IEEE,2013:202-207.
- [12] 张秦国,曾诚. 不同退耦电阻对信号SPD级间能量配合的影响[J]. 通讯世界,2017(15):134-136.
- [13] LUO G, ZHANG W, HUANG S, et al. Equivalent circuit modeling of electro-magnetic pulse generator for typical immunity simulation[C]//2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. Angers, France:IEEE,2017:1-5.
- [14] 李祥超,周中山,陈则煌,等. 气体放电管与压敏电阻能量配合的分析[J]. 电器与能效管理技术,2014(21):26-31.
- [15] 姜琦松. 三级复合型电涌保护器的设计与研究[C]//雷电委员会,中国气象科学研究院. 第31届中国气象学会年会S9第十二届防雷减灾论坛:雷电物理防雷新技术. 雷电委员会,中国气象科学研究院:中国气象学会,2014:662-674.
- [16] ZOLA J G. Gas discharge tube modeling with PSpice[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2008,50(4):1022-1025.
- [17] ZOLA J G. Simple model of metal oxide varistor for pspice simulation[J]. IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems,2004,23(10):1491-1494.
- [18] JIM L, WILLIAM L. 采用SPICE评估TVS保护电路[J]. 电子设计应用,2006(3):133-135.
- [19] 陈超,周先春. 基于PSPICE软件的多级SPD仿真与实际冲击实验对比分析[J]. 电瓷避雷器,2017(1):60-63;71.
- [34] SCUDIERO R, CRETÌ P, TRINCHELLA F, et al. Evaluation of cadmium, lead and metallothionein contents in the tissues of mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from the Campania coast (Italy): Levels and seasonal trends [J]. *Comptes rendus biologiques*, 2014, 337 (7/8): 451-458.
- [35] LIU J, QU R, YAN L, et al. Evaluation of single and joint toxicity of perfluorooctane sulfonate and zinc to *Limnodrilus hoffmeisteri*: Acute toxicity bioaccumulation and oxidative stress [J]. *Journal of hazardous materials*, 2015, 301:342-349.
- [36] GOKEL G W, BARBOUR L J, WALL S L D, et al. ChemInform abstract: Macrocyclic polyethers as probes to assess and understand alkali metal cation- $\pi$  interactions [J]. *Coordination chemistry reviews*, 2001, 222 (1):127-154.
- [37] ZHANG W H, ZHUANG L W, YUAN Y, et al. Enhancement of phenanthrene adsorption on a clayey soil and clay minerals by coexisting lead or cadmium [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(3):302-310.
- [38] SPURGEON D J, JONES O A H, DORNE J L C M, et al. Systems toxicology approaches for understanding the joint effects of environmental chemical mixtures [J]. *Science of the total environment*, 2010, 408(18):3725-3734.
- [39] SILINS I, HÖGBERG J. Combined toxic exposures and human health: Biomarkers of exposure and effect [J]. *International journal of environmental research and public health*, 2011, 8(3):629-647.

(上接第22页)