

中低速磁浮列车传感器防浪涌设计及改进*

翟毅涛¹, 吴峻¹, 曾晓荣^{1,2}

(1. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军73685部队, 江苏南京 210000)

摘要:为提高磁浮列车悬浮传感器的可靠性,分析在雷击、电源干扰等工况条件下的浪涌产生机理,确定浪涌冲击试验的内容,从通流量的角度说明已有防浪涌电路设计的可行性,并指出其在高温环境下在可靠性方面存在的不足。分别从降压和分流的角度进行分析,通过在原有电路中并联大容量电容的方式降低浪涌对敏感器件的冲击,从而提高传感器电源的抗浪涌冲击能力。

关键词:磁浮列车;悬浮传感器;浪涌;可靠性

中图分类号:TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-181-04

Design and amelioration to prevent surge in sensors of the middle-low velocity maglev train

ZHAI Yitao¹, WU Jun¹, ZENG Xiaorong^{1,2}

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 73685, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the reliability of the levitation sensor in maglev train, the mechanism of the surge under the circumstances of thunder strike and power supply interference were analyzed, and the details of the surge experiment were confirmed. In view of current flow capacity, feasibility of the existing circuit design to suppress surge was explained, and the insufficiency of the reliability at high temperature was pointed out. From the analysis in the aspects of voltage reducing and current shunting, the impact of the surge to the sensitive components is reduced by a large-capacity capacitance shunted in front of the original circuit, and the capability of the sensor power to suppress surge is promoted.

Key words: maglev train; levitation sensor; surge; reliability

中低速磁浮列车是近年来发展迅速的一项先进的轨道交通工具。与一般轮轨列车不同,磁浮列车采用电磁力支撑车体,采用直线电机牵引列车运行,车体与轨道无接触。对于磁浮列车来说,稳定悬浮是车辆安全、可靠运行的基础,而悬浮传感器作为获取电磁铁悬浮间隙数据的列车关键设备,其可靠性直接关系到悬浮的稳定乃至列车的安全性。由于线路高架及列车自身供电方式的影响,浪涌冲击成为影响传感器可靠性的重要因素,其作为一种特殊的电磁干扰,持续时间长、能量大,往往会造成元件或设备的损毁。因此,提高传感器的浪涌冲击抗扰度十分必要。

接地、分流和屏蔽是浪涌防护的基本手段^[1]。如避雷针可以通过提供低阻抗路径将雷电能量泄放至大地,避雷网可以形成“法拉第笼”

阻隔闪电的脉冲电磁场从空间入侵的通道。但这些措施一般用于避免建筑物遭受雷击的影响。对于悬浮传感器而言,应采用浪涌防护器件将直接雷或感应雷的能量分流。目前常见的浪涌防护器件包括气体放电管、压敏电阻、瞬态电压抑制器(Transient Voltage Suppressor, TVS)、固体放电管等,各种器件的电流吸收能力、钳位电压、响应速度等性能有较大差异^[2]。考虑到传感器的工作状况,文献[3]中采用了压敏电阻和TVS组合保护的方式,并得到了较为满意的试验结果,但却忽略了传感器的工况环境可能导致的隐患。阐述传感器可能遭受的浪涌产生机理,对原有保护电路在实际高温环境下可能存在的可靠性隐患进行分析,提出在原电路前端并联大容量电容的方式降低浪涌对器件的冲击。分析和试验结果证明了所

* 收稿日期:2015-11-09

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2012BAG07B01)

作者简介:翟毅涛(1985—),男,陕西西安人,博士研究生,E-mail:zyt_maglev@163.com;

吴峻(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:wujun@maglev.cn

采用方案的有效性。

1 浪涌的产生机理

磁悬浮列车轨道采取高架方式,整个线路及车辆处于露天环境中,因此列车不可避免地会受到雷击等恶劣天气影响。线路设备遭受雷击频度 N 可表示为^[1,4]

$$N = K \cdot \gamma \cdot b \cdot h \cdot l \times 0.001 \quad (1)$$

其中, K 为一年中雷电日数, b 为架空线两边引雷宽度系数, h 为架空线高度, l 为线路长度。唐山磁悬浮试验线轨道离地高度在 3 ~ 10 m, 因此, 相较于一般轮轨列车, 磁悬浮列车更容易受到雷击影响。一般来说, 雷电直接击中车体的可能性较小。更为普遍的情况是, 雷电击中列车运行线路临近的大地、高大物体以及云间放电等通过电磁感应产生雷电电涌。磁悬浮列车运行时车体与 F 形轨道无直接接触, 因此 F 轨上的感应雷电不会直接作用于车辆悬浮单元及走行单元的器件, 但传感器与 F 轨的位置十分接近, F 轨上的感应雷电仍可能耦合至传感器造成干扰。此外, 车辆由受流轨供电, 受流轨感应到的瞬间过电压会直接对整车的供电产生影响, 进而影响传感器的正常工作。

就列车自身而言, 传感器信号处理电路的电源为 330 V 强电经 DC-DC 后的 24 V 直流供电, 电路内部又经过 DC-DC 转换为 ± 15 V 的间隙传感器供电和 5 V 的处理芯片供电。尽管理论上 330 V 强电与传感器所用 24 V 相隔离, 但 330 V 强电同时供给电磁铁, 尽管电磁铁斩波器自身频率并不高, 但其开关动作仍可能产生高的 di/dt 和 dv/dt 形成干扰源^[5], 通过先辐射再传导的方式将浪涌干扰耦合至传感器所在线路。虽然传感器电源在设计时具有一定的电压容限, 但浪涌过高电压和能量仍可能造成传感器电源波动过大甚至损坏, 导致传感器的失效。

2 传感器的浪涌抗扰度等级

根据 2008 年修订的《GBT17626.5 浪涌(冲击)抗扰度试验》附录中对信号发生器和试验等级的选择的说明^[6], 结合磁悬浮列车的实际工况, 认为传感器的安装类别为 3 类, 即“电源电缆和信号电缆平行敷设的电气环境”。传感器电源为 24 V 直流供电, 没有单独的地线 (Protecting Earthing, PE), 因此对电源线进行幅值为 1.0 kV 的差模浪涌试验。浪涌试验信号发生器选择为 1.2/50 μ s (8/20 μ s) 组合波信号发生器。试验配

置如图 1 所示。

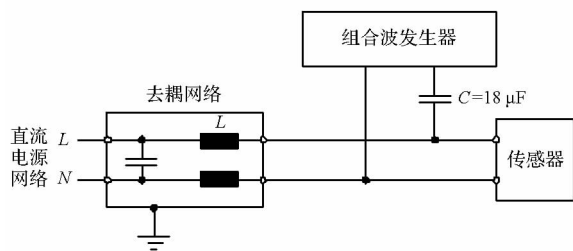


图 1 传感器浪涌试验配置图

Fig. 1 Configure of the surge test for the sensor

对于信号线而言, 标准“不建议对实际长度短于 10 m 的数据电缆进行试验”, 而且由于信号线为平衡驱动差分接收的 485 传输方式, 且采用屏蔽双绞线, 信号通道自身的抗干扰能力较强, 因此在浪涌抗扰度设计中不作专门的考虑。

3 浪涌抑制方案及其可行性分析

对传感器电源线上的浪涌抑制初步采用文献[3]中所述方案。在该方案中, 采用两级防护, 第一级采用 MYG20G10K470 型压敏电阻作粗保护, 第二级采用 SMDJ30CA 型 TVS 作精细保护, 两级之间用电感退耦, 保证压敏电阻比 TVS 先动作, 以使组合保护电路发挥各器件的优点, 提高抗浪涌冲击能力。

对浪涌冲击的抑制主要是采用瞬变干扰吸收器件对过电压进行钳位吸收, 通过使浪涌能量回流或泄放至大地, 因此, 浪涌保护器件的通流能力是一个重要指标。对于 1.2/50 μ s 浪涌发生器, 其内阻为 2 Ω , 因此对应于 1 kV 的浪涌峰值电压, 最大浪涌电流为 500 A。MYG20G10K470 型压敏电阻的最大通流容量为 1000 A, 满足前级保护元件的通流容量应大于最大浪涌电流的一般规则。SMDJ30CA 型 TVS 的钳位电压为 48.4 V, 峰值功率为 3000 W。当 TVS 工作于峰值功率状态时, 流经 TVS 的电流大小约为 78.1 A。压敏电阻与 TVS 并联且先后分流, 从而起到保护作用。试验中所观测到的电流峰值 I_p 约为 429 A, 因此, 就通流量而言, 所选器件满足浪涌抑制的要求。

然而仅仅考虑实验室的情况还远远不能满足传感器作为一个产品对抗浪涌冲击干扰的要求。作为新型交通工具上十分重要的部件, 必须考虑其在工作环境下的表现。上述方案还存在以下隐患:

第一, 传感器所在位置十分靠近电磁铁, 由于电磁铁热量的辐射和传导, 传感器所处的温度环境十分恶劣, 唐山中低速磁悬浮试验线现场实测

到的传感器表面温度甚至可达 80°C , 而电路板所在的传感器内部由于密封的缘故可能温度更高。高温情况下保护器件的性能会有所下降, 必须降额使用。

第二, 压敏电阻在暂态过程中吸收脉冲能量过大时, 会造成热量的积累, 最终导致热击穿, 从而造成压敏电阻短路; 当外部施加的瞬态电场强度高或外部绝缘水平较差时, 在强电场作用下, 沿元件侧表会发生放电; 当压敏电阻承受多次浪涌冲击时会出现劣化现象, 其通流能力下降显著^[7-8]。较高的环境温度也将使上述热致失效的状况加剧。

第三, 击穿电压较低的 TVS 在高温反偏条件下易发生表面漏电流较大的现象, 热综合效应将最终导致 TVS 表面短路^[9]。当前一级压敏电阻的保护能力降低或失效时, TVS 将承受原设计之外的更大能量, 导致过电应力损伤甚至烧毁^[10]。

由于传感器壳体内部空间十分有限, 如采用更大通流能力的器件会占用过多的体积, 器件过高过重还会增加振动应力, 导致引线断裂、焊盘脱落等情况。因此, 必须寻找更合适的解决方案。

4 磁浮列车传感器浪涌对策的改进

基于以上考虑, 须对原设计方案加以改进。在原保护电路最前端并接耐压 100 V 的 $220\ \mu\text{F}$ 电解电容可以解决这一问题, 这是因为:

第一, 浪涌电压方面, 从频率响应的角度来看, 不考虑后续电路时, 对浪涌发生器有效输出阻抗 R 、耦合电容 C 与大容量电容 C_1 串联这一回路, 在电容 C_1 上所分得的电压应为:

$$\begin{aligned} U_{C_1} &= U_p \frac{\frac{1}{C_1 s}}{R + \frac{1}{C s} + \frac{1}{C_1 s}} \\ &= U_p \frac{C}{R C C_1 s + C_1 + C} \\ &= U_p \Phi_{C_1}(s) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, U_p 根据试验的等级确定, 而 $\Phi_{C_1}(s)$ 为与电容 C_1 有关的频率的函数。当 $C_1 = 220\ \mu\text{F}$ 时, $\Phi_{C_1}(s)$ 的幅值 - 频率谱如图 2 所示。

由文献[11]的分析可知, 对于 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 浪涌电压波形来说, 频谱的拐点频率约为 $2.3\ \text{kHz}$, 在低于 $2.3\ \text{kHz}$ 的频率范围内包含了浪涌的绝大部分能量。而计算可得 $\Phi_{C_1}(s)$ 拐点的频率约为 $4.7\ \text{kHz}$, 增益至少为 $-22.4\ \text{dB}$, 因此并接 $220\ \mu\text{F}$

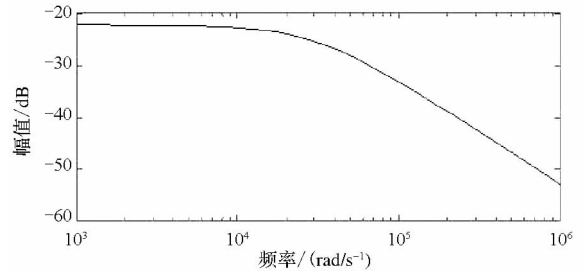


图2 $\Phi_{C_1}(s)$ 的幅值 - 频率谱

Fig. 2 Bode diagram of $\Phi_{C_1}(s)$

大电容可以使浪涌电压幅值衰减至少 $-22.4\ \text{dB}$ 。

对电容上的浪涌残压进行仿真。根据国际电工技术委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 标准, 对于 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 浪涌电压波形可描述为:

$$V(t) = k U_p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

其中: k 为补偿系数, 取 1.037 ; τ_1 为波前系数, 取 $0.4047\ \mu\text{s}$, τ_2 为波长系数, 取 $68.22\ \mu\text{s}$; U_p 为开路浪涌电压峰值, 根据试验的等级确定。

以标准规定的 $+1000\ \text{V}$ 浪涌波形作为输入, 仿真得到电容 C_1 两端的电压波形如图 3 所示, 可以看到浪涌残压已经降至 $40\ \text{V}$ 左右。

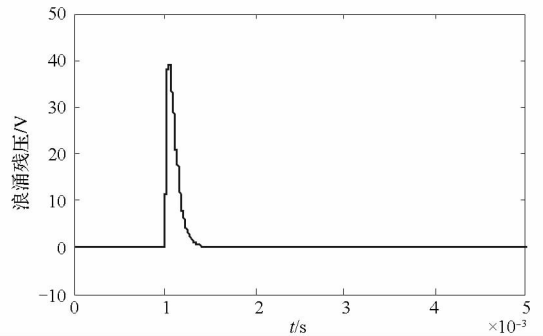


图3 仿真得到的浪涌残压波形

Fig. 3 Residual voltage of surge in simulation

第二, 浪涌电流方面, 由于大电容相对于高频信号的阻抗十分小, 当其与压敏电阻、TVS 等并联时可以分担很大一部分电流, 从而大大减小了压敏电阻和 TVS 所承受的冲击。

对流经 C_1 的电流进行仿真。同样, 考虑 IEC 标准规定的 $8/20\ \mu\text{s}$ 浪涌电流波形:

$$I(t) = k I_p t^3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (4)$$

其中, 补偿系数 k 取值为 0.01243 , 波前系数 τ_3 取值 $3.911\ \mu\text{s}$, I_p 为短路浪涌电流峰值, 根据试验等级取幅值为 $500\ \text{A}$ 。

根据之前未并联大电容时的试验情况, 可以估算出承受浪涌时压敏电阻和 TVS 的等效电阻约为 $0.33\ \Omega$ 。当并联 $220\ \mu\text{F}$ 电容后, 仿真得到

流经电容支路的电流如图 4 所示。由图可见,近 200 A 的电流流经了 C_1 支路,从而缓解了其他保护器件受到的冲击。

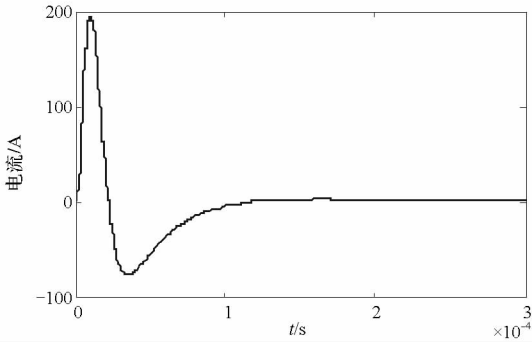


图 4 仿真中 C_1 支路的浪涌电流

Fig. 4 Current in C_1 branch in simulation

从能量角度来看,电容本身可以存储能量,浪涌到来时电容会有一个充放电的过程,所能存储的能量大小与电容容值成正比,与施加在电容两端的电压大小的二次方成正比。因此,大电容可以暂时存储很大一部分浪涌能量,之后缓慢释放,从而保护后续电路。

考虑到电容可能被击穿,在电容所在支路串联贴片式微型保险丝,保险丝的熔断电流小于传感器的最大供电电流。当电容受浪涌影响被击穿时,所在支路相当于短路,保险丝在秒级时间内即可熔断,避免由于电容短路造成传感器供电电源的损毁。

5 试验结果

湖南省计量院电磁兼容实验室对传感器的浪涌试验进行了验证。试验中观测到浪涌残压波形如图 5 所示。

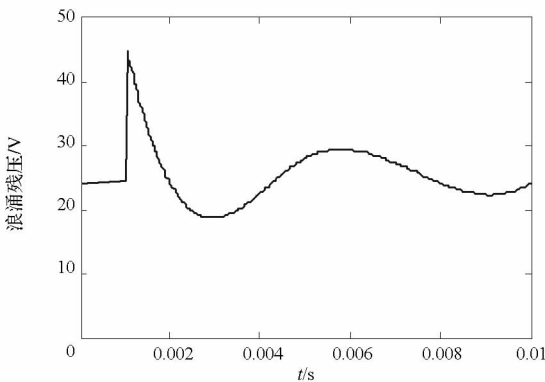


图 5 +1000 V 浪涌残压波形

Fig. 5 Residual voltage of +1000 V surge

由图 5 可以看出经过浪涌残压出现明显的减幅振荡的趋势,电压峰值在 45 V 左右,略高于仿

真得到的电压峰值,而检测到该支路的电流峰值大小约 179 A,略小于仿真结果。这是由于大电容所在支路串联的微型保险丝增加了该支路的电阻所致。试验结果说明了大电容的降压和分流确实能够减小浪涌对压敏电阻和 TVS 的冲击,从而使保护电路的整体抗浪涌冲击能力得到了提高。

6 结论

中低速磁浮列车作为一种交通工具,安全可靠是需要优先考虑的要素。分析雷击、电源干扰等工况下传感器的浪涌冲击产生机理,根据国家标准确定传感器的浪涌试验的实施方式。对原有的传感器电源端口的浪涌保护设计从通流能力角度分析其可行性,同时指出在实际工况下由于环境温度的影响可能存在器件可靠性降低的隐患。在原保护电路基础上并接大容量电容,从降低浪涌残压和分流的角度分析大电容对浪涌的缓冲作用。仿真和试验验证了改进后的浪涌保护措施可以大大减小浪涌冲击对原有保护器件的冲击,从而提高传感器电源的抗浪涌冲击能力,使传感器更加适应磁浮环境下的工程需求。

参考文献 (References)

- [1] 白同云. 电磁兼容设计实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
BAI Tongyun. Electromagnetic compatibility design and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 钱振宇, 史建华. 电气、电子产品的电磁兼容技术及设计实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
QIAN Zhenyu, SHI Jianhua. Electromagnetic compatibility techniques and design examples for electric products[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [3] 翟毅涛, 吴峻, 曾晓荣. 中低速磁浮列车间隙传感器的电磁兼容设计[J]. 安全与电磁兼容, 2011(6): 59-61.
ZHAI Yitao, WU Jun, ZENG Xiaorong. The EMC design of the gap sensor beneath middle/low-velocity maglev train[J]. Safety & EMC, 2011(6): 59-61. (in Chinese)
- [4] 韩劭. 雷击与过电压对信号设备的危害及防护[J]. 中国铁路, 2002(2): 64-66.
HAN Shao. Hazard of thunder and over-voltage to and protection of signal equipment [J]. Chinese Railways, 2002(2): 64-66. (in Chinese)
- [5] 王凡, 王志强. 开关电源电磁干扰分析及抑制[J]. 电源技术应用, 2005(4): 26-30.
WANG Fan, WANG Zhiqiang. Analysis and suppression of EMI for SMPS [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2005(4): 26-30. (in Chinese)

- Journal (Natural Science Edition), 2014, 30(4): 368 - 373. (in Chinese)
- [7] Xu Z P, Chang S Q. Prototype testing and analysis of anovel internal combustion linear generator integrated power system[J]. Applied Energy, 2010, 87(4):1342 - 1348.
- [8] 夏孝朗. 新型二冲程柴油机性能研发关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2013.
- XIA Xiaolang. Study on the key technologies of the opposed piston opposed cylinder two stroke diesel engine [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [9] 张正洲. 新概念球形发动机的机构设计与分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013: 32 - 46.
- ZHANG Zhengzhou. Structural design and analysis of the novel spherical engine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 32 - 46. (in Chinese)
- [10] Dev S P. Diesel-hybrid-electric portable power Systems[EB/OL]. [2015 - 02 - 01]. <http://www.DStarEngineering.com>.
- [11] Wikipedia. Axial engine[EB/OL]. (2013 - 06 - 12) [2015 - 02 - 01]. http://en.wikipedia.org/wiki/Axial_engine.
- [12] Zhang L, Xu H J, Pan C Y, et al. Combustion simulation and key parameter optimization for opposite axial piston engine in small scale[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(9):3397 - 3408.
- [13] Richard V B, Fred S. Internal combustion engine handbook[M]. Warrendale, USA:SAE International, 2004: 432 - 543.
- [14] Rodríguez-Sánchez M R, Marugan-Cruz C, Acosta-Iborra A, et al. Comparison of simplified heat transfer models and CFD simulations for molten salt external receiver [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1):993 - 1005.
- [15] 周松, 王银燕, 明平剑, 等. 内燃机工作过程仿真技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012.
- ZHOU Song, WANG Yinyan, MING Pingjian, et al. Simulation technology of internal combustion engine [M]. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [16] Müller I, Müller W H. Fundamentals of thermodynamics and applications[M]. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2008.
- [17] 许峰. 内燃机原理教程[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2011:156 - 383.
- XU Feng. Working principle of internal combustion engine[M]. Dalian:Dalian University of Technology press, 2011:156 - 383. (in Chinese)
- [18] Capek V, Sheehan D. Challenges to the second law of thermodynamics[M]. Netherlands: Springer, 2005.
- [19] 邹腾安, 潘存云, 徐小军, 等. 双转子活塞发动机工作过程的数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(1): 110 - 115.
- ZOU Tengan, PAN Cunyun, XU Xiaojun, et al. Numerical simulation for performance of a new type dual-rotor piston engine [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(1): 110 - 115. (in Chinese)
- [20] Oppenheim A K. Dynamics of combustion systems [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007.

(上接第 184 页)

- [6] 全国电磁兼容标准化技术委员会. GB/T 17626. 5 - 2008 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China/Technical Committee 246. GB/T 17626. 5 - 2008 Electromagnetic compatibility - testing and measurement techniques - surge immunity test [S]. Beijing: China Standards Press, 2008. (in Chinese)
- [7] 杨天琦, 王振会, 朱传林, 等. MOV 型 SPD 在交直流电压下的热量累积对比分析[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 81 - 84.
- YANG Tianqi, WANG Zhenhui, ZHU Chuanlin, et al. Comparative analysis of thermal accumulation of MOV-type SPD under AC and DC voltage [J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(5):81 - 84. (in Chinese)
- [8] Shrakawa S, Ejiri I, Watahiki S, et al. Application of high voltage gradient zinc oxide elements to SF₆ gas insulated surge arresters for 22 kV - 765 kV power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):419 - 424.
- [9] 黎明秀, 贾颖. 瞬变电压抑制器失效模式和失效机理研究[J]. 半导体技术, 2008, 33(11):1024 - 1027.
- LI Mingxiu, JIA Ying. Study on failure modes and failure mechanisms of transient voltage suppressor [J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(11):1024 - 1027. (in Chinese)
- [10] 黎明秀, 贾颖, 陈凯. TVS 短路失效机理分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(1):32 - 36.
- LI Mingxiu, JIA Ying, CHEN Kai. Analysis on short-circuit failure mechanisms of transient voltage suppressor [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(1):32 - 36. (in Chinese)
- [11] 莫付江, 阮江军, 陈允平. 浪涌抑制与电磁兼容[J]. 电网技术, 2004, 28(5):69 - 72.
- MO Fujiang, RUAN Jiangjun, CHEN Yunping. Surge suppression and electromagnetic compatibility [J]. Power System Technology, 2004, 28(5):69 - 72. (in Chinese)