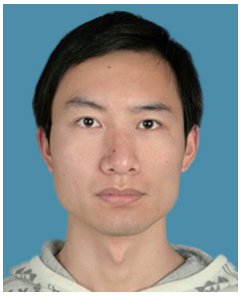
基于浪涌抑制器件的机载电子设备强电磁脉冲防护设计方法

针对机载电子设备的强电磁脉冲防护，介绍了机载电子设备强电磁脉冲防护的指标要求，分析了机载电子设备的强电磁脉冲防护设计方法，提出了浪涌抑制器件关键参数的计算方法，为便于对该方法进行理解和分析，给出了一种典型的强电磁脉冲防护器件的等效电路模型，最后针对负载为AC 115 V/10 A的风挡加热系统对雷电强电磁脉冲间接效应等级4波形4的防护要求，依据该方法对浪涌抑制器件进行指标量化、参数计算和器件选型，并与实际试验数据进行对比验证，证明了该方法的有效性。为机载电子设备的强电磁脉冲防护设计提供技术参考。

张　力[1,2]　张　松[1,2]　段泽民[1,2,3]/1.强电磁环境防护技术航空科技重点实验室　2.安徽省飞机雷电防护省级实验室　3.合肥工业大学电气与自动化工程学院



张　力/工程师

关键词/Keywords

机载电子设备·
强电磁脉冲·
浪涌抑制器件·
等效电路模型·
风挡加热系统·

0　引言

随着电子技术的迅速发展，大规模集成电路等在机载电子设备中获得广泛应用。从整体上看，设备信息化程度越高，在强电磁环境中的防护能力就越脆弱。由于高密度、高强度和多频谱的强电磁脉冲可以对机载电子设备产生严重的干扰和破坏作用，因此加强机载电子设备的强电磁脉冲防护能力显得越来越重要[1]。

典型的强电磁脉冲防护方法主要有两种：①利用屏蔽装置阻止强电磁脉冲的辐射耦合，使其能量无法影响设备内部的敏感组件；②采用特殊的浪涌抑制器件，快速捕获强电磁脉冲冲击，钳制并降低强电磁脉冲能量层级，从而保障设备的正常使用。本文以某型机载电子设备的强电磁脉冲防护设计为引，归纳出基于浪涌抑制器件的机载电子设备强电磁脉冲防护的通用设计方法。

国防基础科研基金（JCKY2016205B007）。

1　损伤效应

强电磁脉冲到达装备时，将通过“前门耦合”和“后门耦合”等耦合途径进入装备内部，使得系统中的电子电气线路突然承受到很大的浪涌电压或电流，从而干扰甚至损坏敏感电子电气设备[2]，其损伤形式主要有以下类型。

（1）高压击穿

强电磁脉冲能量耦合进入系统时，将在电气线路中产生浪涌电流，造成高阻抗节点的电位抬升。当感应电压足够高时，将引起连接点、元器件或线路间的电击穿，造成系统的暂时性失效，甚至损毁。试验表明，常规信息化系统中，微处理器的毁坏电压约为5 V，存储器的毁坏电压为7～15 V，高达千伏量级的强电磁脉冲将很容易造成系统中电子元器件发生高压击穿等物理损伤。

（2）能量冲击

以10万t当量的高空核爆炸为例（HEMP属于NEMP的一种类型），短时间可产生4.2×10^{15} J的能量，其中电磁辐射能量约为10^{11} J。通常情况下，半导体器件的损伤阈值仅为$10^{-5}\sim10^{-2}$ J/cm^2，只要强电磁脉冲在线路中耦合超过1 J的能量，就足以使系统内部的许多电子元器件被烧毁[3]。

（3）微波加热

强电磁脉冲是一种具有波粒二象性

的典型能量形式，穿透性能强，会在传播介质与脉冲电磁场相互耦合的过程中发生功率耗散，导致热效应。由于不同传播介质的损耗因素存在差异，强电磁脉冲下各对象的热特性也各不相同。温升还将导致材料的物理特性、几何形状等发生改变，直接影响装备的整体性能。

（4）信号干扰

强电磁脉冲耦合进入系统后，将在线路中产生干扰信号（干扰电流或干扰电压），使系统处于信号错乱甚至永久失效的危险状态，如图1所示。

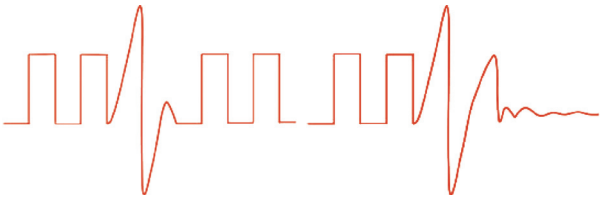


图1　强电磁脉冲导致的暂态信号干扰和永久信号失效

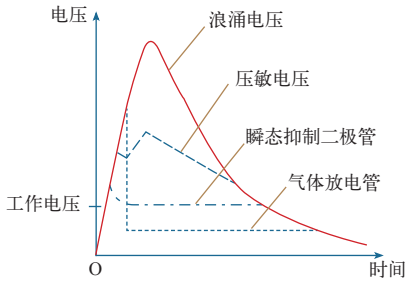
通过对强电磁脉冲损伤效应的分析，可以判断强电磁脉冲主要通过能量耦合，以浪涌电压或浪涌电流的形式对系统产生危害。因此，为保障系统能够在不影响正常工作的前提下防护强电磁脉冲攻击，必须针对性探索基于浪涌抑制器件的强电磁脉冲防护指标量化方法，实现能量泄放和电压钳制的目的。

2　器件特性

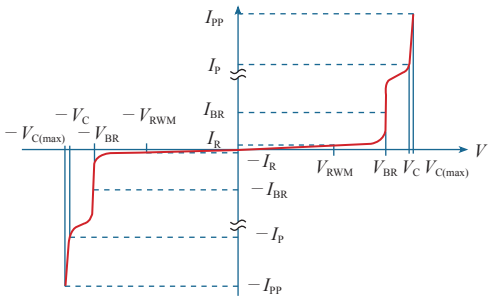
常见的浪涌抑制器件有压敏电阻（MOV）、瞬态抑制二极管（TVS）和气体放电管（GDT）等。使用时将器件与被保护设备并联，当线路电压在门限电压以下时呈高阻抗，当有强电磁脉冲耦合进入系统使其超过门限电压，器件阻抗便急剧下降，为浪涌能量提供转移通道，其物理特性如图2所示[4]。

浪涌抑制器件的实际性能由最小击穿电压V_{BR}、额定反向工作电压V_R、脉冲峰值电流I_{PP}、最大钳位电压V_C、结电容C_J和响应时间T_C等参数决定[5-6]。

由于浪涌抑制器件的导通电流（$I_T \approx 1$ mA）远小于工作电流（I_{PP}），且由V_{BR}变化到V_C的电压值差别较小，实际器件伏安特性可由图2分段进行线



（a）动作响应特性



（b）典型双向器件伏安特性

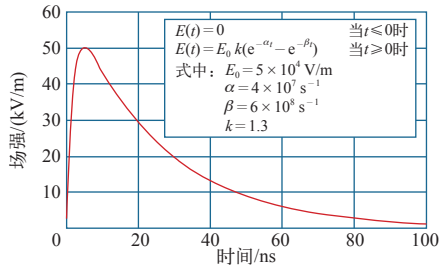
图2　常见浪涌抑制器件动作响应特性和典型双向器件伏安特性

性简化。

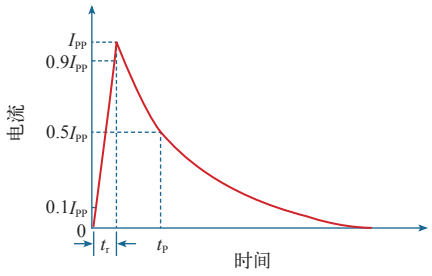
当浪涌抑制器件电压反偏，且位于0～V_{BR}时，器件呈现高阻抗截止状态；当流经器件的电流由原来的I_R上升到I_{BR}时，其两端呈现的电压由额定反向工作电压V_{RWM}上升到击穿电压V_{BR}；当反偏电压超过V_{BR}时，器件被击穿，进入低阻抗导通状态。随着脉冲峰值电流的出现，流过器件的电流达到脉冲峰值电流I_P，在其两端的电压被钳位到预定的钳位电压V_C下。随着脉冲电流按指数衰减，器件两端的电压也不断下降，最后恢复到起始状态[7]。由于各器件的特性不同，其阻态转变的延时存在较大差异。浪涌电压作用后，器件重新恢复高阻抗状态。

3　参数计算

对于装备所应具备的强电磁脉冲防护能力，国家军用标准GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》、GJB 1389A—2005《系统电磁兼容性要求》和美国军用标准MIL－STD－461F等标准中都作了相关的规定，定义了典型脉冲波形如图3所示，明确了关键指标[8]，为防护设计提供数据依据。



（a）电压波形



（b）电流波形

图3　典型强电磁脉冲双指数电压波形和电流波形

常见的强电磁脉冲波形可采用下述双指数解析函数表达[9]

$$E(t)=E_0k(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \tag{1}$$

以GJB 151B—2013中的典型强电磁脉冲波形为例，其具体参数如下表所示。

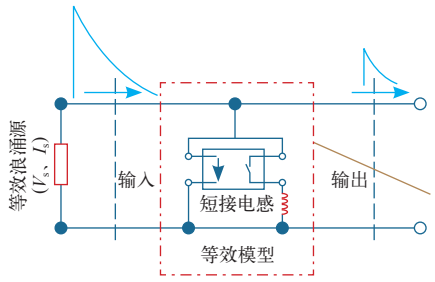
表　典型强电磁脉冲波形参数

项目	k	E_0/(kV/m)	α/s^{-1}	β/s^{-1}	T_r/ns	T_P/ns
参数	1.3	50	4×10^7	6×10^8	2.5	23
说明	修正系数	峰值场强	波前衰减系数	波尾衰减系数	波前时间	半峰值时间

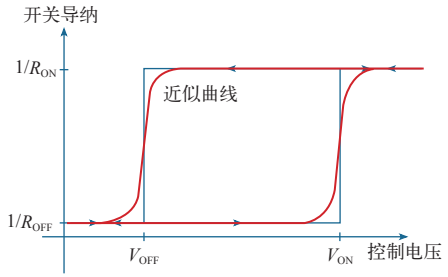
3.1　电路模型

为便于对浪涌抑制器件的关键参数进行计算与分析，建立了基于典型器件的等效电路模型，如图4所示，涉及到的关键参数包括V_{BR}、V_C和I_{PP}等。

在分析浪涌抑制器件的性能参数时，可将器件等效成理想导通器件，其开关导通电压由器件的击穿电压确定，且并非恒定值。同时考虑器件



（a）等效电路模型



（b）理想开关特性

图4　典型浪涌抑制器件等效电路模型和理想开关特性

工作时的泄放路径存在自感，在等效电路模型中加入短接电感L。短接电感L可由测量或估算得到，约10 nH/cm量级，当馈线内的浪涌泄放路径为10 mm长时，其约10 nH，影响很小，实际计算时，取10 nH作为典型值。

实际中浪涌抑制器件的开关状态转变需要过程，具有较复杂的开关特性，不适宜于分析计算。本次研究采用的理想开关特性是器件实际开关特性的简化和精炼，描述了开关的主要特性，适宜于计算分析且不失可靠性。在理想开关特性中，当外加电压小于起动电压（V_{ON}）时，开关处于关断状态，呈现高电阻特性（R_{OFF}）；一旦外加电压大于V_{ON}，开关将“立刻”由关断状态转变为导通状态，呈现低电阻特性（R_{ON}）；导通后，开关电压会迅速降下来，但只要开关电压仍大于关断电压（V_{OFF}），开关将一直维持导通；当开关电压降低至小于V_{OFF}，开关又将“立刻”由导通状态转变为断开状态，浪涌电流泄放路径关闭。

3.2　钳位电压

由于系统供电电压均存在一定的波动范围，器件的最大反向截止电压V_{RWM}必须大于线路正常工作电压V_N，其裕度系数K_1一般取值为1.1（直流）或1.4（交流）。据此，以额定工作电压为24 V的直流线路为例，相关参数计算如下

$$V_{RWM}=K_1V_N=1.1\times24\text{ V}=26.4\text{ V} \tag{2}$$

$$V_{BR}=1.2V_{RWM}=1.2\times26.4\text{ V}=31.7\text{ V} \tag{3}$$

根据被保护电路的耐压水平差异，浪涌抑制器件的钳位系数K_2取值一般在1.2～1.4之间。因此，理论上器件钳位电压V_C的最小值应满足

$$V_C=K_2V_{BR}=1.2\times31.7\text{ V}=38.0\text{ V} \tag{4}$$

由于系统中敏感设备对浪涌电压的安全裕度不同，因此，在工程应用中应以V_C与V_S（电压安全阈值）中的较小值为依据进行器件选型[10]。

3.3 通流容量

浪涌抑制器件的通流容量必须大于强电磁脉冲的峰值能量。同样以额定电压为24 V的直流线路为例，假设负载线路的额定电流I_N=20 A，则负载阻抗Z_S为

$$Z_S=\frac{V_N}{I_N}=\frac{24\ \text{V}}{20\ \text{A}}=1.2\ \Omega \tag{5}$$

以图3典型强电磁脉冲双指数波形为例，假设线路中强电磁脉冲耦合进入的峰值浪涌电压V_P=5 kV，则峰值浪涌电流I_P为

$$I_P@(4.8/23\ \text{ns})=\frac{V_{OC}}{Z_S}=\frac{5\ \text{kV}}{1.2\ \Omega}=4.2\ \text{kA} \tag{6}$$

通流容量的裕度系数K_3，其取值一般在1.6～2.0之间。因此，实际采用的浪涌抑制器件脉冲峰值电流I_{PP}的最小值应满足

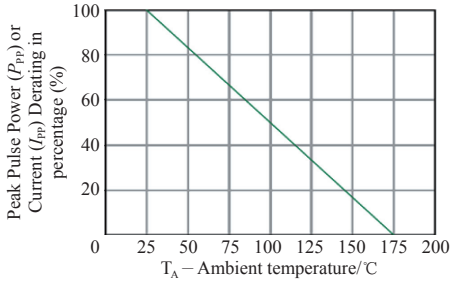
$$\begin{aligned}I_{PP}@(4.8/23\ \text{ns})&=K_3I_{PP}@(4.8/23\ \text{ns})\\&=1.6\times4.2\ \text{kA}=6.7\ \text{kA}\end{aligned} \tag{7}$$

当脉冲时间T_P一定时，浪涌抑制器件上可承受的脉冲峰值功率

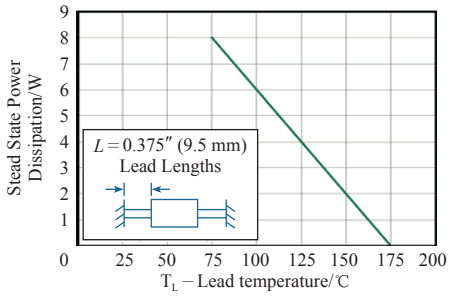
$$P_{PP}=K_4K_5V_CI_{PP} \tag{8}$$

式中，K_4为强电磁脉冲的功率系数，与实际发生的脉冲波形有关，在图3定义的标准强电磁脉冲波形下取值为1；K_5为浪涌抑制器件的温度系数，在0～25 ℃时取值为1，其后随着环境温度的升高，而线性降低，如图5所示。

浪涌抑制器件的通流容量数据通常基于10/1 000 μs电磁脉冲波形进行测试，如图6所示。为评估器件的等价通流容量性能，参考典型器件数

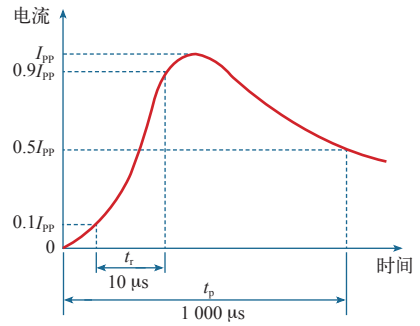


（a）环境温度

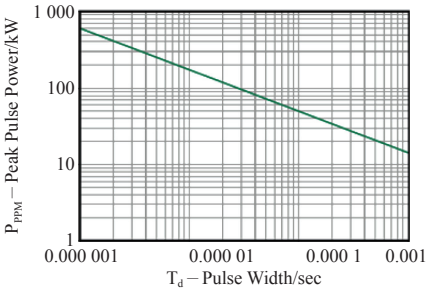


（b）引线温度

图5 典型浪涌抑制器件的温度特性



（a）脉冲测试波形



（b）峰值功率与脉冲宽度的关系

图6 典型浪涌抑制器件的脉冲测试波形及其峰值功率与脉冲宽度关系

据手册中的峰值功率与脉冲时间关系，如图6所示，采用以下方式进行计算

$$\begin{aligned}I_{PP}@(10/1\,000\ \mu\text{s})&=\frac{P_P@\left(\dfrac{10}{1\,000\ \mu\text{s}}\right)}{P_P@\left(\dfrac{4.8}{23\ \text{ns}}\right)}\times I_{PP}@\left(\frac{4.8}{23\ \text{ns}}\right)\\&=\frac{15\ \text{kW}}{600\ \text{kW}}\times6.7\ \text{kA}=167.5\ \text{A}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}P_{PP}@(10/1\,000\ \mu\text{s})&=K_4\times K_5\times V_C\times I_{PP}@\left(\frac{10}{1\,000\ \mu\text{s}}\right)\\&=38.0\ \text{V}\times167.5\ \text{A}=6.4\ \text{kW}\end{aligned} \tag{10}$$

需要注意的是，浪涌抑制器件的温度特性各不相同。以某型号TVS管温度特性为例（见图5a），其通流容量能力在0～25 ℃的环境内可以

100%应用；当环境温度为85 ℃时I_{PP}下降为50%；当环境温度达到125 ℃时，I_{PP}下降为35%。因此，在工程应用中，器件应根据装备所处的环境和可靠性要求采用降额设计，确保严酷环境下的性能参数仍能满足系统要求[11]。

3.4 工作频率

如其他半导体元器件一样，浪涌抑制器件存在结电容C_J，其阻抗为

$$R_C=\frac{1}{\omega c}=\frac{1}{2\pi fC_J} \tag{11}$$

对于确定的器件结电容C_J，随着信号频率f的增加，器件阻抗逐渐减小。因此，并联与负载线路的浪涌抑制器件，其对高频信号相当于短路，对低频信号相当于开路。当器件的阻抗大小降低到无法吸收或只能吸收微量的信号能量时，器件达到其最大的工作频率——截止频率f_c。

以图7为例，U_S为信号源输入电压，R_S为信号源的内阻，则被保护电路两端信号电压U_L与其浪涌抑制器件结电容C_J和信号频率f间的关系推导如下

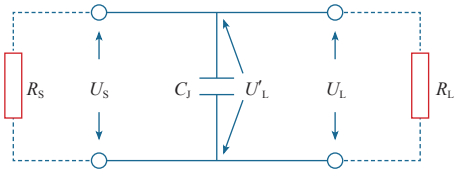


图7　基于器件结电容的简化电路模型

$$R'_L=R_L//R_C=\frac{R_LR_C}{R_L+R_C} \tag{12}$$

$$\frac{U'_L}{U_S}=\frac{R'_L}{R_S+R'_L}=\frac{R_LR_C}{R_S(R_L+R_C)+R_LR_C}$$
$$=\frac{R_LR_C}{R_SR_L+R_SR_C+R_LR_C} \tag{13}$$

假设系统要求的信号插入损耗$I_L\leqslant 0.3$ dB，则

$$I_L=20\lg\frac{U'_L}{U_S}=20\lg\frac{R_LR_C}{R_SR_L+R_SR_C+R_LR_C}\leqslant 0.3 \tag{14}$$

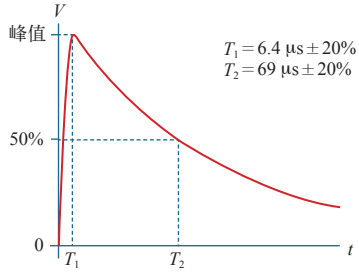
将$R_C=1/2\pi fC_J$带入上式，并化简，可得出器件的截止频率

$$f\leqslant\frac{0.07(R_S+R_L)}{2\pi R_SR_L} \tag{15}$$

需要注意的是，随着信号频率f的升高，由于绝缘介质介电系数减小，信号损耗将会增大，并将会影响器件结电容C_J的分布参数[12]。为了保证系统工作的稳定性，器件的正常工作频率应选择在其截止频率f_c的1/3～1/2处。

3.5 方法验证

电磁兼容试验和测量技术浪涌（冲击）抗扰度试验[13]是电子设备强电磁脉冲环境适应性测试中最重要的试验内容之一，主要模拟强电磁脉冲在电子设备外部端口中的干扰情况。以某机载电子设备的雷电强电磁脉冲防护为例，根据RTCA－DO－160F《机载设备的环境条件和测试程序》第22节中对于雷电感应效应的指标规定[14]，如图8所示，针对负载为AC 115 V/10 A的风挡加热系统对雷电强电磁脉冲间接效应等级4波形4的防护要求[15]，依据本方法对浪涌抑制器件进行指标量化、参数计算和器件选型，并与实际试验数据进行对比验证，如图9所示。结果表明，本方法合理有效，指标量化准确，可满足工程应用的需要。



（a）雷电感应效应脉冲波形

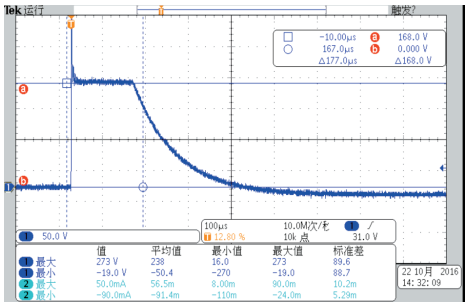
Part Number (Uni)	Part Number (Bi)	Reverse Stand off Voltage V_R (Volts)	Breakdown Voltage V_{BR} (Volts) @ I_T		Test Current I_T (mA)	Maximum Peak Pulse Current I_{PP} (A)	Maximum Reverse Leakage I_R @ V_R (μA)	Maximum Clamping Voltage V_C @ I_{PP} (V)
			MIN	MAX				
15KPA75A	15KPA75CA	75	83.8	91.7	5	123.8	2	122.0
15KPA78A	15KPA78CA	78	87.1	95.4	5	119.7	2	126.1
15KPA85A	15KPA85CA	85	94.9	104.0	5	109.7	2	137.6
15KPA90A	15KPA90CA	90	100.5	110.1	5	103.7	2	145.6
15KPA100A	15KPA100CA	100	111.7	122.3	5	93.6	2	161.3
15KPA110A	15KPA110CA	110	122.9	134.5	5	84.5	2	178.6
15KPA120A	15KPA120CA	120	134.0	146.8	5	78.5	2	192.3
15KPA130A	15KPA130CA	130	145.2	159.0	5	72.5	2	208.3
15KPA150A	15KPA150CA	150	167.6	183.5	5	62.4	2	241.9
15KPA160A	15KPA160CA	160	178.7	195.7	5	58.4	2	258.6
15KPA170A	15KPA170CA	170	189.9	207.9	5	55.4	2	272.7
15KPA180A	15KPA180CA	180	201.1	220.1	5	52.3	2	288.5
15KPA200A	15KPA200CA	200	223.4	244.6	5	47.3	2	319.1

（b）浪涌抑制器件选型

图8　机载电子设备的雷电感应效应脉冲波形及其浪涌抑制器件选型

4 结束语

本文通过对强电磁脉冲效应和浪涌抑制器件



（a）钳位性能

（b）插入损耗试验

图9 浪涌抑制器件的钳位性能与插入损耗试验

特性的分析，研究了基于浪涌抑制器件的强电磁脉冲防护指标量化和参数计算方法，为了便于对浪涌抑制器件防护指标量化和关键参数计算方法的理解与分析，建立了基于典型器件的等效电路模型。最后针对负载为AC 115 V/10 A的风挡加热系统对雷电强电磁脉冲间接效应等级4波形4的防护要求，依据本方法对浪涌抑制器件进行指标量化、参数计算和器件选型，并与实际试验数据进行对比验证，证明了该方法的有效性。为机载电子设备的强电磁脉冲防护设计提供了理论计算和技术指标参考。

参考文献

[1] 惠晓强，等．机载计算机雷电防护研究 [J]．航空计算技术，2011 (1)：1-5.

[2] 周璧华，陈彬，石立华．电磁脉冲及其防护 [M]．北京：国防工业出版社，2003.

[3] 谢彦召，王赞基，王群书，等．高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析 [J]．强激光与粒子束，2003，15 (8)：781-787.

[4] 罗广孝，崔翔，张卫东，等．TVS静电抑制器等效电路参数估算及应用 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (16)：204-211.

[5] 王宁．瞬态电压抑制器的应用 [J]．电源技术应用，2001 (5)：227-229.

[6] 孙丹峰，幼章．电路浪涌保护器件 [J]．电源世界，2014 (2)：45-49.

[7] 李岚．TVS二极管在电路设计中的应用 [J]．制造业自动化，2012，34 (2)：129-134.

[8] GJB 151B—2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量 [S].

[9] GJB 1389A—2005 系统电磁兼容性要求 [S].

[10] 刘洋，王建国，宋志国，等．瞬态电压抑制器的雷电通流与箝压特性测试 [J]．高电压技术，2007，33 (1)：83-85.

[11] 席利君，阎乐，殷晓晨．基于TVS管的机载电子设备数据接口雷电防护设计 [J]．航空电子技术，2014，45 (4)：10-14.

[12] 何宏明．防雷元件的特性参数与其电容对通信信号的影响 [J]．高电压技术，2004，30 (3)：37-38.

[13] 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].

[14] RTCA－DO－160F 机载设备的环境条件和测试程序 [S].

[15] 莫付江，阮江军，陈允平．电涌防护技术研究 [J]．高电压技术，2003，29 (4)：51-52.

（收稿日期：2017－03－18）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告