

文章编号: 2095-4980(2021)06-1041-06

舰载导弹电源线尖峰信号敏感度指标要求与考核

杜哲, 龚琳舒, 汪溢, 黄新华, 冯安安

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 舰载导弹在值班状态时被认为是一种舰上设备, 在飞行状态时被认为是一种飞行器。GJB151B-2013中明确了舰载平台设备需进行CS106项目检测, 而导弹由于并非直接与舰上电网连接, 如若仍按照GJB151B-2013中规定的尖峰信号指标进行考核, 明显存在过试验的情况。针对舰载导弹在电磁兼容CS106指标的裁剪需求, 对其考核要求进行了充分的分析和研究, 并给出了试验的裁剪建议。

关键词: 电磁兼容; CS106项目; 尖峰信号敏感度; 指标考核

中图分类号: TN03; TJ760.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020009

Sensitivity index requirements and assessment of power line spike signal for shipborne missile

DU Zhe, GONG Linshu, WANG Yi, HUANG Xinhua, FENG Anan

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The shipborne missile is considered as an on-board device when it is on duty and an aircraft when it is in flight. GJB151B-2013 specifies that the shipborne platform equipment needs to be tested by the CS106 project. Nevertheless, the missile is not directly connected to the ship's power grid. If the assessment is still based on the spike signal index specified in GJB151B-2013, it is obvious that there exists a case of over testing. In view of the tailoring requirements of the shipborne missiles in the electromagnetic compatibility CS106 index, the evaluation requirements are fully analyzed and studied, and experimental cutting recommendations are derived.

Keywords: electromagnetic compatibility; CS106; spike signal sensitivity; index assessment

舰船上装配有多种大功率电力电子设备, 如电动机、电闸、大功率开关器件等。此类设备进行状态切换的瞬间, 电压电流会突然改变, 从而产生高幅值、窄脉宽的瞬态尖峰电压, 严重影响电子设备性能, 甚至导致设备烧毁^[1-2]。为控制尖峰传导干扰的危害, 各国的电磁兼容军用标准都设置了尖峰传导敏感度测试项目^[3]。我国编制的国家军用电磁兼容性标准发展了多个版本, 从GJB-151-1986到GJB151B-2013^[4], 都对电源线尖峰传导敏感度(CS106)项目做出了明确要求。为了覆盖各种使用环境, 军用标准编制往往比较全面、通用, 适用于一类或各类装备在各种条件下的需求。但特定型号的产品有特定的使用要求和条件, 没有必要执行标准规定的全部内容, 需要对指标进行剪裁。国内外的实践证明, 不经过合理剪裁而盲目使用标准, 是导致研制经费增加、进度拖延的重要因素^[5]。因此, 在实施标准时要具体情况具体分析, 对选用的标准进行剪裁, 编制适用于特定产品的专用文件。

GJB/Z69-94《军用标准的选用和剪裁导则》^[6]中第3.2条给出了剪裁的定义: “对选用标准中的每一项要求进行分析、评估和权衡, 确定其对特定产品的适用程度, 必要时对其进行修改、删减或补充, 并通过有关文件, 提出适合于特定产品最低要求的过程。”然而GJB151B-2013并未给出有价值的指导意见。本文围绕舰载导弹CS106指标的裁剪需求, 结合工程实际, 从指标、剪裁、试验与考核三个部分进行了充分的分析和研究, 并给出了剪裁建议。

收稿日期: 2020-01-05; 修回日期: 2020-05-12

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016212B034)

1 指标分析

1.1 指标简介

CS106 适用于潜艇和水面舰船设备和分系统的交流和直流输入电源线, 不包括地线和回线。CS106 测试原理接线见图 1。尖峰信号是一种差模信号。依据 GJB151B-2013 的要求, 在对舰载型导弹进行试验时, 供电机箱的 CS106 项目应在电源线的相线(即火线)串联注入如图 2 所示的峰值电压为 400 V 的尖峰信号, 重复频率为每秒 5~10 次, 正负两种极性, 每种极性至少持续 5 min。

1.2 指标简介

由于 2013 年设备级产品的电磁兼容标准进行了更新, GJB151A-97^[7], GJB151B-2013 和行业工程经验对本项目试验要求见表 1。

针对标准提出的裁剪要求, 由于各单位对标准的认识不同, 存在试验考核差异较大的问题, 考核对象和试验限值均不一致。

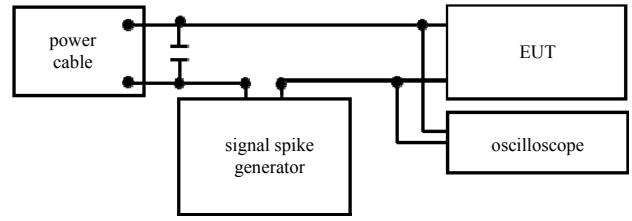


Fig.1 Peak signal conduction sensitivity of CS106 power line(series injection)
图 1 CS106 电源线尖峰信号传导敏感度(串联注入)

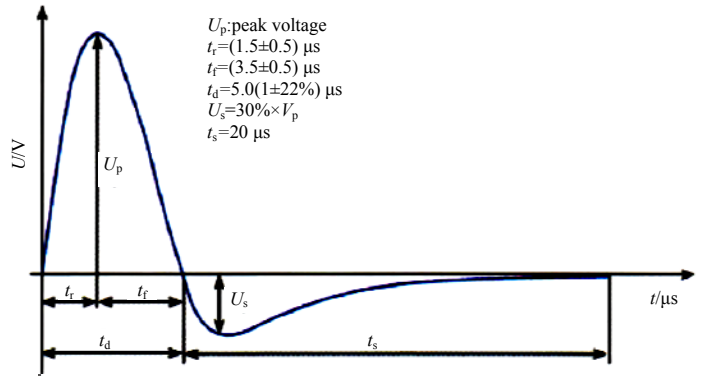


Fig.2 Waveform of CS106 injection spike signal
图 2 CS106 注入尖峰信号波形

表 1 标准与项目要求

Table1 Standards and project requirements

standard name	ship platform(U_p, t)		space system platform(U_p, t)	
	missile	equipment	missile	equipment
GJB151A-97	400 V, 5 μs	same as missile	100 V, 0.15 μs	same as missile
GJB151B-2013	400 V, 5 μs	same as missile	optional(decided by target ordering party)	same as missile
industry engineering experience	3.5 times power supply effective value, 5 μs	/	referring the ship platform	/

2 裁剪分析

CS106 项目对导弹的考核应覆盖舰载值班状态和导弹飞行状态。对于导弹状态, 由于与电网间接相连, 经发射控制设备的复杂网络后到达导弹的响应信号强度实际应小于 GJB151B-2013 中给出的信号强度。按照 GJB151B-2013 第 4.1 节的裁剪要求, 当具体电磁环境和工程分析表明本标准不完全适用时, 应依据其具体情况对本项目要求进行裁剪。裁剪分析按照频域滤波和时域仿真两种方法进行。频域滤波方法首先通过傅里叶变换分析 CS106 试验信号的频谱, 然后分析电源主要模块的滤波特性(波特图), 最后将滤波后的频谱图逆傅里叶变换得到其时域响应。时域方法通过 Multisim 软件直接仿真重要模块的响应特性。

2.1 发控电源设备频域滤波分析

2.1.1 场和路的分析

尖峰信号脉宽 $t=5 \mu s$, 因此其理论传播波长 $\lambda=ct=1500 \text{ m}$, 发射控制设备电网接入端到导弹供电电源线末端最长距离 $L \approx 100 \text{ m}$, 可得: $L < \lambda/10$ 。可见此响应仍为 t 与 U_p 的二维时变信号, 因此可以对信号响应情况采用集总参数进行分析。

对于总能量有限的浪涌、单脉冲等信号, 该信号的脉冲宽度相对于测量时间而言很短, 可以视为能量信号, 具有连续频谱, 因此可以用傅里叶变换法来分析^[8-9], 其 Matlab 仿真时域信号见图 3。经傅里叶分析, 其频谱图见图 4, 可见其频谱范围主要在

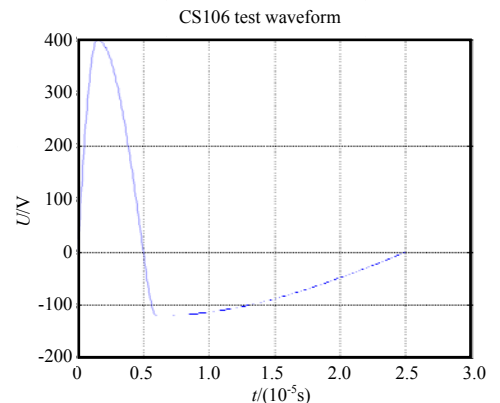


Fig.3 Time domain signal
图 3 时域信号

10 Hz~400 kHz，其能量主要集中在 10 Hz~200 kHz。

2.1.2 场和路的分析

1) 发射控制设备供电机箱整体 EMI 策略

在整套供电机箱中，功率走向如图 5 所示。一般情况下，输入三相电力经三相 EMI 滤波器分别给 3 个 AC-DC 电源模块供电，每个 AC-DC 电源模块的输入均为 2 根相线；AC-DC 电源模块将输入 380 V 交流电转换为 DC 300 V 给后端的 DC-DC 电源模块供电，DC-DC 电源模块按功能不同将 DC 300 V 转换为 DC 29~32 V 的电力给后端负载供电。图 5 中供电机箱总输入端有电磁干扰(Electro Magnetic Interference, EMI)滤波器，EMI 滤波器结构及典型插入损耗(Insertion Loss, IL)见图 6。滤波器对尖峰信号差模滤波作用主要集中在 30 kHz 以上，由于尖峰信号峰值能量(3 dB 带宽)主要分布在 100 Hz~13 kHz，所以滤波器对尖峰信号抑制作用可忽略，在滤波分析中不再考虑。

2) AC-DC 电源模块 EMI 策略

在 AC-DC 电源模块中，交流输入端设计有 EMI 滤波电路，电路见图 7。输入 380 V 经由 Cx1,L6A/L6B,Cx2 及 Cy1,Cy2 组成的 EMI 电路后给后端电路供电。在 Multisim 中可以仿真 AC-DC 电源模块 EMI 滤波电路波特，见图 8。波特图为对数坐标系，由图可见在 100 kHz 附近的抑制比约为-60 dB，在 7 kHz 附近的抑制比约为-10 dB，求斜率可得滤波特性约为-40 dB/10 倍频。

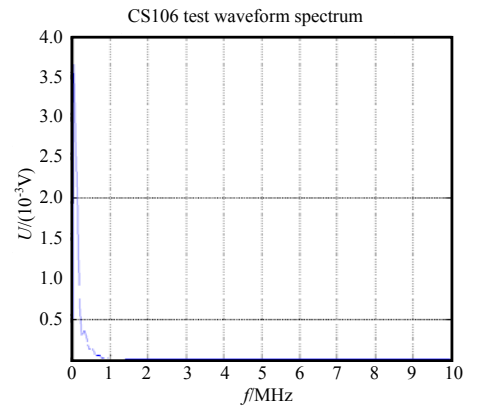


Fig.4 Spike signal spectrum
图 4 尖峰信号频谱图

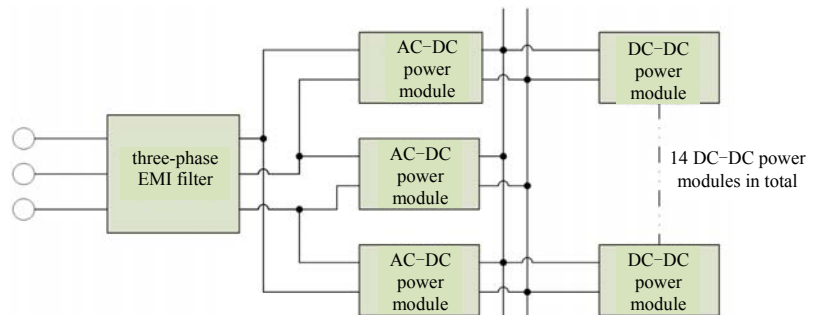


Fig.5 Block diagram of power supply chassis
图 5 供电机箱原理框图

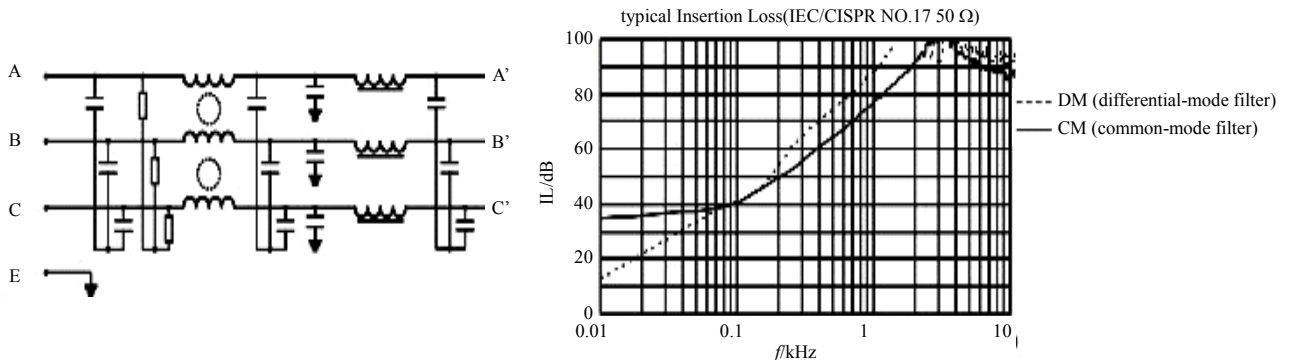


Fig.6 EMI filter structure and insertion loss characteristics
图 6 EMI 滤波器结构及插入损耗特性

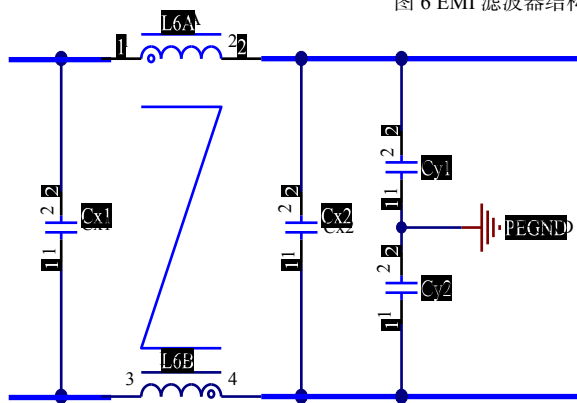


Fig.7 Input EMI filter circuit of AC-DC power module
图 7 AC-DC 电源模块的输入 EMI 滤波电路

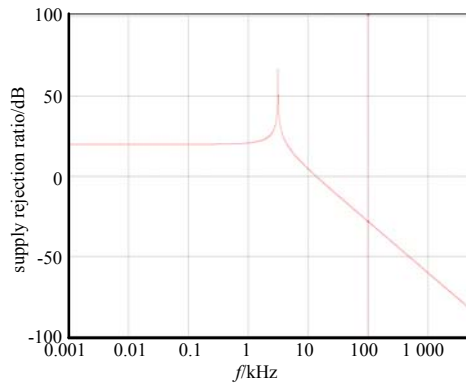


Fig.8 Bode diagram of EMI filter circuit of AC-DC power module
图 8 AC-DC 电源模块 EMI 滤波电路的波特图

3) DC-DC 电源模块 EMI 策略

DC-DC 电源模块的输入端 EMI 电路见图 9。DC-DC 电源模块是 AC-DC 电源模块的后级，在供电机箱中，DC-DC 电源模块的 EMI 处理处于第 3 级的位置，而且 DC-DC 电源模块的输入为直流，AC-DC 电源模块中的滤波电容折算到 DC-DC 电源模块的输入端至少相当于 2 800 μF ，在供电机箱输入端注入的尖峰信号很难影响到后级。在供电机箱的 CS106 测试中，经过供电机箱输入端三相 EMI 滤波器、AC-DC 电源模块的 EMI 电路和隔离变压器及后端整流滤波电路，事实上已影响不到 DC-DC 电源模块及后端负载。DC-DC 电源模块滤波电路的波特图见图 10。由波特图可见，在 100 kHz 附近的抑制比约为 -60 dB，在 7 kHz 附近的抑制比约为 -10 dB，滤波特性约为 -40 dB/10 倍频。

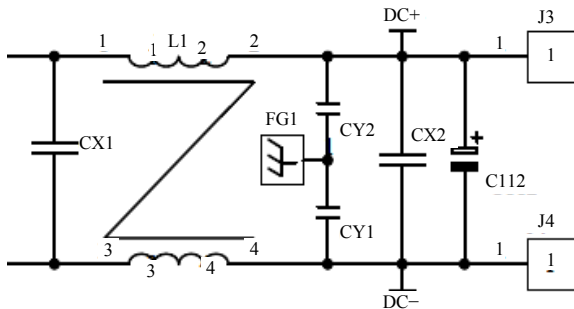


Fig.9 Input EMI filter circuit of DC-DC power module
图 9 DC-DC 电源模块的输入 EMI 滤波电路

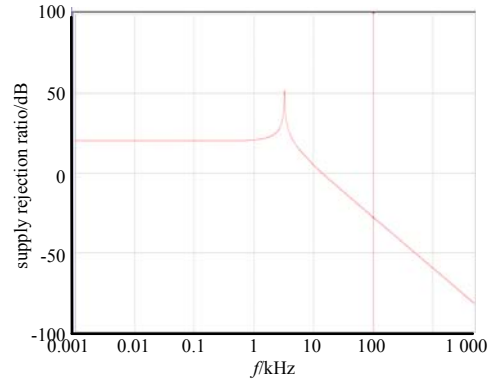


Fig.10 Bode plot of EMI filter circuit of DC-DC power module
图 10 DC-DC 电源模块 EMI 滤波电路的波特图

2.1.3 发控电源设备频域滤波分析结论

供电机箱中总计有 3 段 EMI 滤波电路：输入总 EMI 滤波器、AC-DC 电源模块的 EMI 滤波器及隔离变压器、DC-DC 电源模块的 EMI 滤波器及隔离变压器，在逆傅里叶变换中主要考虑后两级模块的滤波作用。两级滤波的传递系数、经两级滤波后其频谱信号、经傅里叶逆变换后其信号形式见图 11，由图可见，经 AC-DC 和 DC-DC 两级滤波后其信号电压强度已经小于相电压的 3%，下降至 10 V 左右的纹波水平。

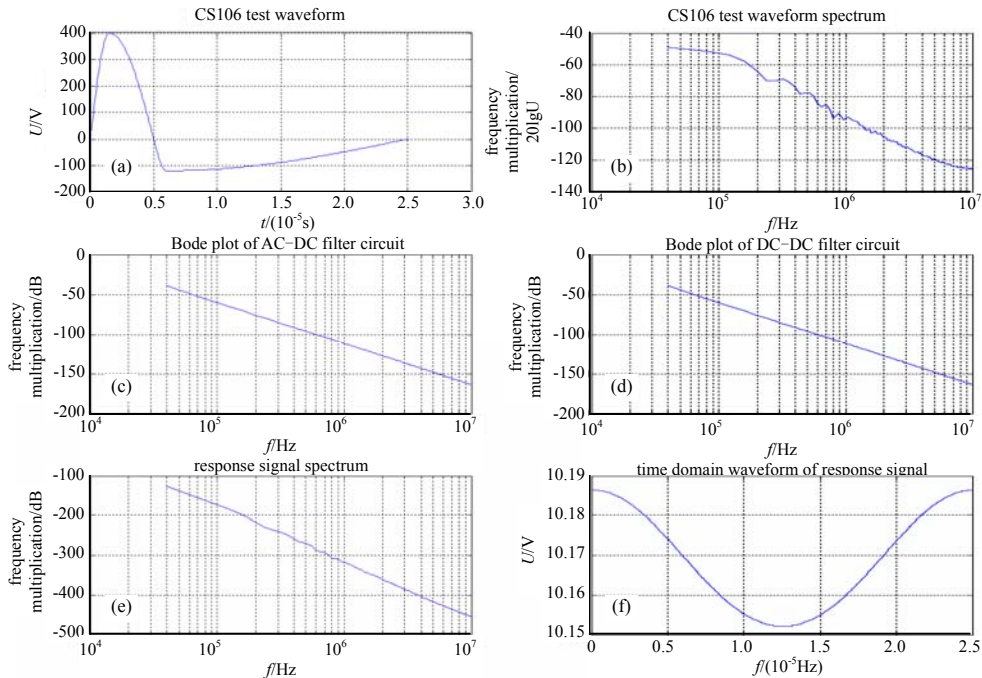


Fig.11 Filtering process
图 11 滤波过程图

2.2 发控电源设备时域滤波分析

对 AC-DC 模块进行时域仿真分析，在 Multisim 仿真电路中输入串联注入尖峰信号后，EMI 电路输入输出波

形见图 12。由图可见，输入的尖峰信号在经过 EMI 滤波器后已下降至纹波水平。单独通过 AC-DC 模块的转换过程，其滤波效果已经十分明显。

2.3 分析结论

采用频域分析方法分析了两级滤波后的形式，采用时域分析方法分析了 AC-DC 单级滤波后的形式，通过上述分析可见，采用时域和频域两种分析方法得到的分析结果基本一致。由于发射控制设备电源模块对尖峰信号的抑制作用，经其复杂网络后到达导弹的响应信号强度实际远小于 GJB151B-2013 中给出的信号强度，其电压强度下降至可忽略水平。

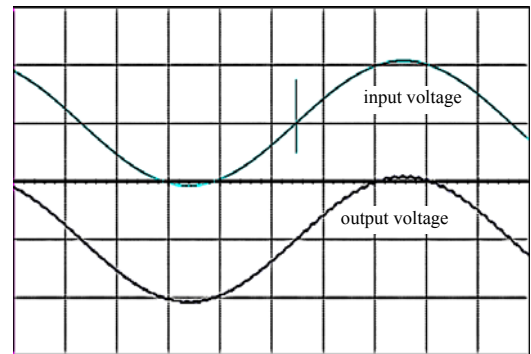


Fig.12 Simulation analysis of time domain filtering
图 12 时域滤波仿真分析图

3 试验与考核

经试验验证，尖峰信号经过发射控制设备电源模块后，由于发射控制设备电源模块对尖峰信号的抑制作用，实际响应信号对导弹的影响可忽略不计。通过理论分析和试验表明，对于舰载导弹状态，无进行此试验项目的必要。导弹飞行状态重点考核弹上设备，参照 GJB151A-97 对空间系统的要求进行考核，详细试验要求见表 2。

表 2 CS106 试验要求

Table2 CS106 test requirements		
	missile	devices on the missile
testing program	/	$U_p=100\text{ V}, T_d=0.15\ \mu\text{s}$

4 结论

进行舰载导弹电源线尖峰传导敏感度测试的首要任务是通过指标剪裁，编制满足型号要求的指标文件。本文围绕舰载导弹 CS106 指标的剪裁需求，分析了该指标的测试原理，结合具体应用情况从频率滤波和时域仿真两个角度进行了分析和仿真。结果表明，由于舰载导弹发射控制设备电源模块对尖峰信号的抑制作用明显，无进行此试验项目的必要。最后给出了裁剪后的舰载导弹 CS106 试验要求。

参考文献：

- [1] 杨志丹,王岩,贺永喜. 电源线尖峰信号传导敏感度问题分析及解决[J]. 电子器件, 2014,37(3):556-559. (YANG Zhidan,WANG Yan,HE Yongxi. Analysis and resolving of problem about power supply cable spike conducted susceptibility [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014,37(3):556-559.)
- [2] 卫宁. 基于复杂系统的电磁兼容设计方法可行性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):653-656. (WEI Ning. Feasibility analysis of EMC design method based on complex system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):653-656.)
- [3] 吴文力,江忠英,孟繁巍,等. GJB151 系列标准中电源线尖峰传导敏感度测试变化分析[J]. 装备环境工程, 2018,15(2): 98-101. (WU Wenli,JIANG Zhongying, MENG Fanwei,et al. Change of susceptibility tests for power line peak conducted in GJB151 series standards[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018,15(2):98-101.)
- [4] 中国电子技术标准化研究院,海军装备研究院标准规范研究所,总装备部技术基础管理中心,等. GJB151B-2013. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2013. (China Electronics Standardization Institute,Naval Academy of Armament Institute of Specifications and Standards,The Department of Equipment Technical Management Center,etc. GJB151B-2013. Electromagnetic emission and sensitivity requirements and measurements for military equipment and subsystems[S]. Beijing:Armament Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defence, 2013.)
- [5] 霍玉倩,魏永刚. 关于航天产品研制与生产中标准剪裁的几点思考[J]. 航天标准化, 2013(1):9-11. (HUO Yuqian, WEI Yonggang. Thoughts on standard cutting in the development and production of aerospace products[J]. Aerospace Standardization, 2013(1):9-11.)
- [6] 国防科工委军用标准化中心,航空航天工业部三〇一研究所,空军第八研究所,等. GJB/Z69-94. 军用标准的选用和剪裁导则[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1994. (Commission of Science Technology and Industry for National Defence Military Standardization Center,301 Research Institute Ministry of Aerospace Industry,The Airforce 8th Research Institute, etc. GJB/Z69-94. Guidelines for the selection and cutting of military standards[S]. Beijing:Armament

Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defence, 1994.)

- [7] 中国电子技术标准化研究院,中国舰船研究设计中心. GJB151A-97. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1997. (China Electronics Standardization Institute,China Ship Development and Design Center. GJB151A-97. Electromagnetic emission and sensitivity requirements for military equipment and subsystems[S]. Beijing:Armament Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defence, 1997.)
- [8] 丁美新,李慧峰,朱子述,等. 雷电流波形的数学模型及频谱仿真[J]. 高电压技术, 2002,28(6):8-10. (DING Meixin,LI Huiheng,ZHU Zishu,et al. The mathematical model and frequency spectrum simulation of lightning current[J]. High Voltage Engineering, 2002,28(6):8-10.)
- [9] 邵志江,孙全,郭金雷,等. 弹上电缆抗干扰仿真分析[J]. 空天防御, 2019,2(1):59-63. (SHAO Zhijiang,SUN Quan,GUO Jinlei,et al. Simulation analysis of anti-interference of cables on missile[J]. AIR&SPACE DEFENSE, 2019,2(1):59-63.)

作者简介:

杜 哲(1987-), 男, 山东省泰安市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁兼容与效应.email:dudo1987@163.com.

龚琳舒(1993-), 女, 哈尔滨市人, 工程师, 主要研究方向为电磁兼容.

汪 溢(1984-), 男, 江西省上饶市人, 高工, 主要研究方向为电波传播.

黄新华(1991-), 男, 安徽省亳州市人, 工程师, 主要研究方向为电波传播.

冯安安(1993-), 男, 河南省邓州市人, 工程师, 主要研究方向为电波传播.

(上接第 1036 页)

- [2] 张魏,邢锋,雷雪,等. 基于 NURBS 建模的椭圆波束赋形天线设计[J]. 现代雷达, 2016,38(4):64-67,72. (ZHANG Wei, XING Feng,LEI Xue,et al. Design of shaped elliptical beam antenna based on NURBS[J]. Modern Radar, 2016,38(4): 64-67,72.) doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.015.
- [3] THOMAS A Milligan. Modern antenna design[M]. 2nd Edition. New York:John Wiley & Sons Inc,2005.
- [4] TOHID Salimi,AMIR Maghoul,ALI A Abbasid. Design of a compact Gaussian profiled corrugated horn antenna for low sidelobe-level applications[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2013,5(2):223-226.
- [5] 黎佳,周海京. 不同参数超宽带反射面天线系统辐射特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(2):60-63,67. (LI Jia,ZHOU Haijing. The radiated characteristics of UWB reflector antenna with different parameters[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(2):60-63,67.) doi:10.3969/j.issn.1672-2892.2012.01.013.

作者简介:

张 军(1980-), 男, 河北省唐山市人, 高级工程师, 主要从事通信工程研究.email:JSURS@sina.com.

李 杼(1989-), 男, 陕西省宝鸡市人, 工程师, 主要从事通信工程研究.

苏 萌(1990-), 女, 河北省秦皇岛市人, 助理工程师, 主要从事网路工程研究.