

机载平台电磁兼容性预测与设计^{*}

王胜喜, 曾小东

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 机载平台电磁兼容问题已成为影响平台作战效能发挥的重要制约因素, 分析了机载平台电磁干扰机理, 详细描述了机载设备电磁干扰对敏感设备接收机灵敏度的影响, 构建了一种用于快速进行系统级电磁干扰预测分析的模型。最后针对机载平台存在的电磁兼容问题, 给出了解决机载设备电磁兼容问题的具体思路和方法。在不同型号飞机上开展电磁兼容试验, 测试结果表明应用的预测模型和设计方法, 全机电磁兼容性良好, 机载设备均工作正常。

关键词: 机载; 电磁干扰; 敏感设备; 干扰预测; 兼容设计

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2020.02.015

中图分类号: TN959.73; TN974

文献标志码: A

文章编号: 1009-086X(2020)-02-0089-07

EMC Prediction and Design of Airborne Platform

WANG Sheng-xi, ZENG Xiao-dong

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Sichuan Chengdu 610036, China)

Abstract: Electromagnetic compatibility (EMC) of airborne platform has become an important limiting factor affecting the performance of platform operations. By analyzing the mechanism of electromagnetic interference of airborne platforms, describing in detail the influence of electromagnetic interference of airborne equipment on receiver sensitivity of susceptible equipment, a model for rapid system-level electromagnetic interference prediction was constructed. Finally, the methods to specifically solve the EMC problems of airborne platform were given, which were applied to several different types of aircraft. Practical tests show that the EMC of platform has a good effect and the airborne equipment works well.

Key words: airborne platform; electromagnetic interference; susceptible equipment; interference prediction; compatibility design

0 引言

随着航空电子技术的发展, 机载平台上集成的射频传感器越来越多, 如火控雷达、电子侦察、雷达告警、通信、导航、识别等, 上述设备安装在表面积有限的飞机上, 天线之间的隔离度有限^[1], 工作频段存在交叠, 同时工作时必然会通过天线之间的耦

合产生互扰问题^[2-4]。机载平台传感器间的电磁兼容问题已成为影响飞机作战效能和自身飞行安全的重大问题, 也是目前各国航空电子系统研究关注的热点问题。

本文就机载平台电磁兼容问题进行探讨, 重点关注机载平台设备通过天线耦合产生的电磁干扰问题, 通过理论建模分析了电磁干扰形成机理, 并

* 收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-10-28

第一作者简介: 王胜喜(1988-), 男, 湖南邵阳人。工程师, 硕士, 主要研究方向为航空电子。

通信地址: 610000 四川省成都市金牛区营康西路 85 号 E-mail: shengxiwang1988@126.com

提出了一种用于快速进行机载平台电磁兼容问题预测分析的方法,最后给出了几种解决机载设备电磁兼容问题的思路和方法,为优化和提高机载平台传感器同时工作、协同工作能力,提升机载平台武器作战效能提供参考。

1 干扰机理分析

任何复杂的航空电子系统,从系统电磁干扰机理角度考虑,都可归结为辐射源、耦合路径和接收机 3 个基本要素^[5-6]。辐射源作为干扰源,接收机作为敏感设备,电磁波从辐射源发射后到达接收机的传播路径作为耦合路径。电磁兼容预测分析的基本思想是用数学模型定量描述上述三要素,根据理论推导和工程经验,首先建立基于辐射源、耦合途径和接收机的数学模型,接着通过电磁干扰预测方程以及经验数据的修正,获得各种潜在系统电磁干扰的计算结果^[7],最后定量给出发射—敏感设备组合之间的干扰信号功率,并判断发射机发射的射频信号能否影响接收机,并给出敏感设备工作性能下降情况。

机载设备接收机设计是根据信噪比 S/N 要求,确立的信号检测门限^[8],但在实际工作环境中,接收机是按照 $S/(N+I)$ 运行的^[9], $S/(N+I)$ 可表示为

$$\frac{S}{N+I} = \frac{S/N}{1+I/N}, \quad (1)$$

式中: S 为信号功率; N 为接收机噪声功率; I 为干扰源耦合到敏感设备的干扰信号功率。

可以看到式(1)分为 2 部分, S/N 是信噪比,是接收机设计时需考虑的; I/N 是干噪比,是电磁兼容设计需考虑的。

I/N 表示通过接收设备输入端的有效干扰功率与接收机噪声功率比值,可视为相对于接收机噪声的干扰余量为

$$I/N = IM(f) = P_r(f) - N(f), \quad (2)$$

式中: $IM(f)$ 为电磁干扰余量(dB); $P_r(f)$ 为敏感设备处接收到的干扰信号输入功率(dBm); $N(f)$ 为敏感设备的接收机噪声功率(dBm)。当 $IM \leq -6$ dB 时,式(1)为

$$\frac{S}{N+I} = \frac{S/N}{1+I/N} \approx S/N, \text{误差} \leq 1\text{dB}, \quad (3)$$

此时干扰信号远低于接收机噪声,基本不影响接收机检测信噪比。

当 $IM = 0$ dB 时,式(1)可表示为

$$\frac{S}{N+I} = \frac{S/N}{1+I/N} \approx S/N - 3\text{dB}, \quad (4)$$

此时干扰信号使接收机检测信噪比恶化 3 dB。

当 $IM \geq 6$ dB 时,式(1)可表示为

$$\frac{S/N}{1+I/N} \approx S/I, \text{误差} < 1\text{dB}, \quad (5)$$

此时干扰信号远超过接收机噪声,干扰信号起主导作用,使接收机信噪比变成信干比,影响信号。

基于式(2)、(3),电磁干扰余量(IM)与信噪比关系如图 1 所示。

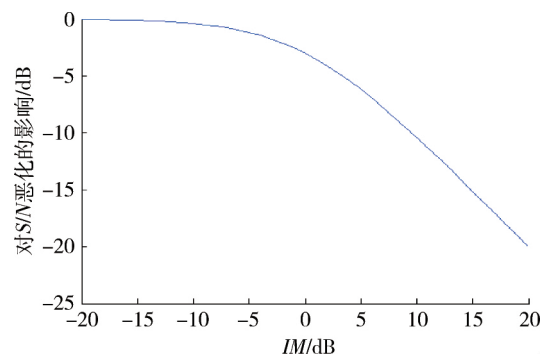


图 1 IM 与 S/N 关系示意图

Fig. 1 Relation between IM and S/N

根据机载设备工作特性,同时考虑系统设计中包含的不确定因素和硬件实现误差等因素,可将 $IM = -6$ dB 定义为干扰安全系数。如图 2 所示,机载平台电磁干扰预测分析时,若 $IM \leq -6$ dB,则干扰信号不会对敏感设备接收性能造成影响;若 $IM > -6$ dB,则需要根据 IM 评估 S/N 恶化情况,分析干扰信号对敏感设备性能的影响。

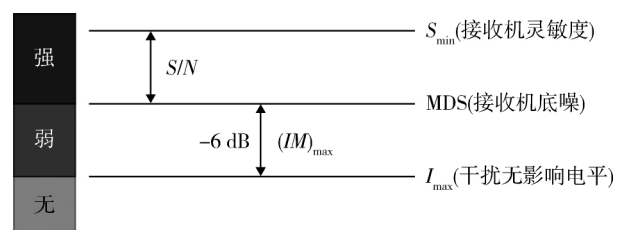


图 2 干扰判别示意图

Fig. 2 Identification of interference

2 机载平台电磁兼容预测分析

电磁兼容预测分析是机载航空电子系统设计的重要环节,它是在飞机设计阶段发现系统存在的电磁兼容问题^[10],并通过进行系统兼容设计解决电磁干扰问题,使得原来在飞行试验过程中或使用过程中才会暴露的系统电磁兼容问题随飞机设计一并考虑,避免研制时间和费用的双重浪费。

航空电子系统集成有雷达、电子战、通信、导航、识别等多个射频收发设备,机载平台电磁兼容预测分析主要集中在上述设备之间的电磁干扰。由于1个辐射源通过天线辐射可能通过天线耦合对多个接收设备产生射频干扰^[11-12],这样就会有十几对甚至几十对发射-敏感设备组合,要采用1个模型去预测整个系统的电磁兼容性,不是精度不够,就是耗费时间过长。针对机载平台设备多、电磁耦合关系复杂特点,提出一种优化的级筛选预测模型,分4个阶段进行筛选,如下图3所示,从而使问题范围和复杂度大为简化。

4级筛选预测方法进行系统电磁兼容预测分析时,每次选择1对发射-敏感设备组合,预测通常分为4个步骤:频率筛选预测、时间筛选预测、幅度筛

选预测和性能预测。第1步为频率筛选,根据每对发射机-接收机组合的频率区间筛选出基波干扰、谐波干扰和噪声干扰等需要考虑的发射-响应特性,同时对发射设备可能产生的交互调信号频率进行分析,评估是否存在频率冲突;第2步为时间筛选,考虑发射设备与接收机在作战使用阶段工作时间内是否存在冲突,若2个功能频率上存在冲突,但在不同作战任务阶段分时使用,则可任务相互之间不影响。这一步的筛选函数要尽可能地与设备实际作战使用一致,这样有利于快速区分干扰组合,缩短预测时间及后续步骤的复杂度。第3步为幅度筛选,考虑发射及接收机响应的幅度特性,粗略判断分析频率和路径损耗等方面的影响,确定射频干扰能量大小。第4步性能预测主要完成干扰源对接收设备的影响分析,确定发射设备对接收设备的性能影响程度。

性能预测是机载平台电磁兼容预测分析的关键环节,详细分析了干扰信号耦合到敏感接收机的信号功率,给出干扰信号与接收机噪声以及有用信号之间的关系,可以用来评估干扰信号对接收机的影响,是机载设备开展电磁兼容设计的主要依据。干扰信号对接收机影响如表1所示。

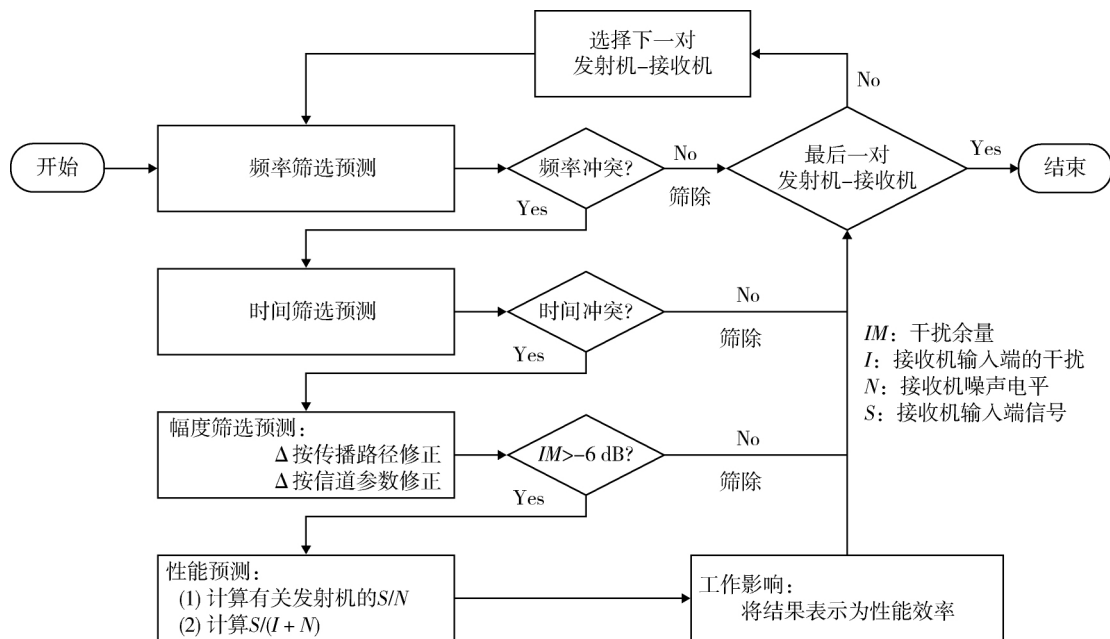


图3 预测筛选流程

Fig.3 Process of prediction selection

表 1 干扰信号对接收机的影响

Table 1 Influence of interference on receiver

干扰信号强度	影响情况
$I \geq PA$	器件损坏
$P_{-1} \leq I < PA$	接收机饱和, 无法正常使用
$Noise \leq I < P_{-1}$	$S \geq I + S_{\min}$ 时, 可正常检测
$-6 \text{ dB} \leq IM \leq 0$	灵敏度附近信号检测受影响
$IM < -6 \text{ dB}$	无影响

表 1 中 PA 为接收机抗烧毁功率, 单位 dBm; P_{-1} 为接收机饱和功率, 单位 dBm; I 为接收机干扰信号功率, 单位 dBm; S_{\min} 为接收机灵敏度, 单位 dBm; S 为有用信号, 单位 dBm; $Noise$ 为接收机噪声功率, 单位 dBm; IM 为电磁干扰余量, 单位 dB。

不同强度干扰信号对接收机的影响存在较大差异, 干扰信号功率与接收机受影响分析结论如下:

(1) 当 $I \geq PA$ 时, 会造成接收机期间损毁, 干扰信号会造成接收机器件损毁, 需要在接收机前端加装限幅器, 提升接收机抗烧毁能力。

(2) 当 $P_{-1} \leq I < PA$ 时, 干扰信号落入接收机会造成射频或数字器件工作在非线性状态, 接收机无法正常工作。

(3) 当 $Noise \leq I < P_{-1}$ 时, 此时干扰信号远大于接收机噪声, 会造成接收机灵敏度大幅下降, 接收机仅能正常检测 $S \geq I + S_{\min}$ 的有用信号。

(4) 当 $-6 \text{ dB} \leq IM \leq 0$ 时, 有用信号在接收机灵敏度附近时, 有用信号检测受干扰, 误码率会增加; 当有用信号高于接收机灵敏度 3 dB 以上时, 干扰信号不会对有用信号的检测产生干扰。

(5) 当 $IM < -6 \text{ dB}$ 时, 干扰信号基本不会对接收机产生干扰。

3 电磁兼容解决措施

机载平台电磁兼容设计是一个综合性较强的工程体系, 必须从飞机设计之初就开始进行, 将全机设备作为一个整体, 统一考虑其电磁兼容设计, 并确定各分系统或设备的电磁兼容技术要求。机载平台设备只有在时、空、频、能同时存在重叠时, 才会产生射频干扰。因此, 针对机载平台设备经天线辐射和接收产生的电磁兼容问题, 可以从时、空、频、能等角度出发, 对机载设备工作频率、工作时间、辐射功率、辐射空域等进行统一规划与管理, 避免机载平台设备时、空、频、能重叠, 消除射频冲突。时域处理有微时序分配, 空域处理有天线合理布

局, 频域处理有频谱规划管理和实时避让, 能量域处理有信号剔除。

3.1 微时序分配

机载平台部分设备发射占空比很小, 且工作频率和空域存在重叠, 无法从频域或空域进行冲突避让, 只能从时域开展兼容设计。微时序工作基本原理是将存在电磁干扰设备的发射时间与接收时间分成多个时间片, 当干扰设备处于发射时间片时, 控制敏感设备不接收, 在干扰设备处于接收状态时, 敏感设备正常接收, 这样就避免了干扰设备发射对敏感设备的影响^[13-15], 而从整体使用效能来看, 干扰设备和接收设备均可正常使用。

3.2 天线合理布局

机载平台天线数量众多, 天线装机空间有限, 在设计天线布局时, 需综合考虑各功能对天线/天线阵的功能、工作方式、工作频率、覆盖空域、极化形式、安装位置等因素的要求, 对全机天线进行一体化布局设计, 最大程度地减少各类天线/天线阵之间的耦合, 减少各设备之间相互干扰, 改善系统电磁兼容性能^[16-17]。在同一机载系统中, 如果 2 种功能工作频段相同或相近(如 TCAS 功能与 ATC 功能), 可结合天线工作方式, 采取收/发天线分开和天线共用的实现方式; 如果 2 种功能工作频段相差较远、工作模式差别较大的情况, 可将 2 种天线在物理上做到一起, 以节省安装空间。

3.3 频谱规划管理

频谱规划管理是根据频率使用的各项规定、机载设备配置情况和频率特性、机载平台电磁兼容性等信息, 对机载设备使用频率进行统一规划和管理, 确保机载设备同时使用不产生射频干扰。如机载平台超短波语音与超短波数据共址兼容工作, 地面任务规划时需根据超短波语音和超短波数据频率间隔使用要求, 规划并加载超短波语音和超短波数据工作波道, 避免两者之间相互干扰^[18]。

机载设备频谱规划管理应遵循频段分开、频率错开的原则。频域上可分成许多频段, 规定不同用途的电磁波和在同一空域同时工作的不同设备只能在分配给自己的频段内工作, 这从根本上消除有意发射电磁波的干扰。2 个天线相近的设备, 其工作频段最好是不相同的, 如果频段相同, 则其工作频率应该相互错开, 这样才能避免机载设备之间的电磁互扰。

3.4 频率实时避让

频率实时避让是指 2 个设备工作频率存在重叠

或冲突时, 其中一方主动改变工作频率, 避免频率冲突, 实现 2 个设备的兼容工作。频率实时避让方案多为频率可自主变化的设备, 如机载雷达、电子对抗设备等。频率实时避让工作示意图如图 4 所示。设备 1 工作在频率 f_1 , 其辐射信号经空间耦合到设备 2, 超过设备 2 接收灵敏度, 会对设备 2 产生干扰; 设备 2 主动避开设备 1 工作频率 f_1 , 切换到工作频率 f_2 , 此时设备 1 辐射信号经空间耦合不再对设备 2 产生干扰。

3.5 信号匹配剔除

机载平台大多装有电子侦察设备, 主要用于战场电磁态势感知、辐射源识别、辐射源威胁分析和定位。电子侦察设备在接收战场环境中电磁信号的同时, 会受到同平台雷达等发射设备辐射信号干扰, 造成电子侦察设备对本平台辐射信号产生虚假告警, 影响飞行员正确判断战场威胁。

传统的实现同平台发射设备与电子侦察设备兼容工作方法有射频滤波、时域闭锁等。射频滤波是电子侦察设备对指定频段信号进行滤波处理, 以实现对本平台辐射信号的滤波抑制, 避免干扰; 时域闭锁是在发射设备辐射信号时闭锁电子侦察设备接收, 使发射设备与电子侦察设备分时工作。上述 2 种方法虽然都能解决同平台发射设备与电子侦察设备的射频兼容问题, 但会造成电子侦察设备侦收时间和频域损失, 降低对作战环境电磁信号截获

概率, 给机载平台的生存能力带来威胁^[19-20]。

信号匹配剔除是电子侦察设备根据同平台辐射信号波形特征、辐射时间和频率等参数, 在接收的众多电磁信号中识别出本平台辐射信号, 并将其剔除, 确保不对同平台辐射信号产生告警, 同时对外部战场环境电磁信号正常告警。信号匹配剔除方法能够有效解决同平台发射设备辐射与电子侦察设备电磁兼容问题, 同时避免了由于兼容处理给电子侦察设备带来的侦收性能损失。

3.6 一体化兼容管理

随着机载平台配备的射频传感器越来越多, 射频传感器之间的电磁干扰越来越复杂, 单个设备发射可能对多个设备存在电磁干扰, 传统的电磁兼容设计已不能适应当前复杂的电磁干扰场景, 这就迫切的需要一个统一的电磁兼容管控中心对全机雷达、电子战、通信、导航、识别等设备电磁兼容进行一体化管理。电磁兼容管控中心根据设备当前工作状态、工作频率和覆盖空域等参数, 实时分析设备之间电磁干扰情况, 并统一控制机载设备采取相适应的兼容管控措施, 进行时域、频域、空域或能量域的冲突避让, 改善机载设备间的电磁兼容性, 大幅提升战机的整体作战能力。机载平台一体化兼容管理已成为各国航空电子系统的发展趋势, 目前该技术已在多款先进战机上得到了应用, 并经实际使用证明, 机载平台设备电磁兼容性良好。

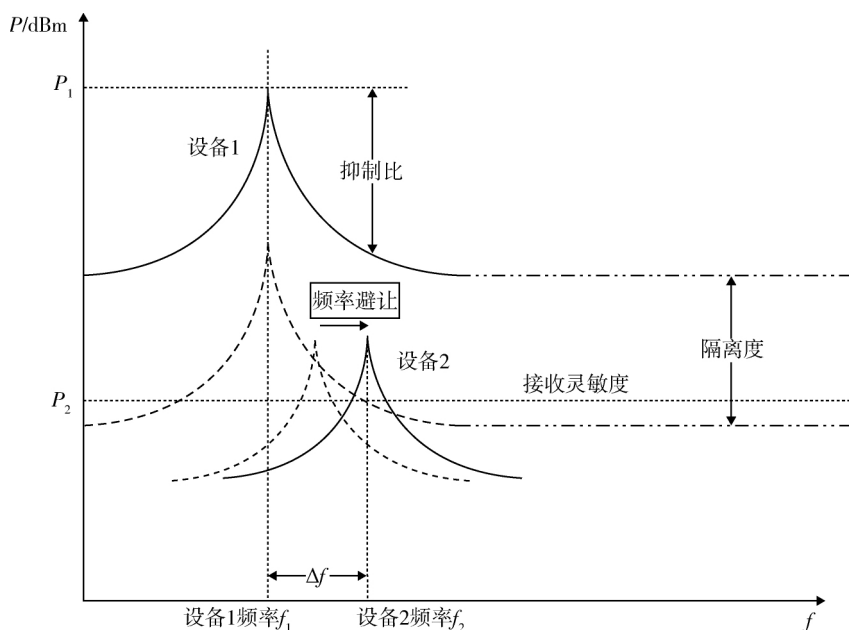


图 4 频率实时避让图

Fig. 4 Real-time avoidance of frequency

4 结束语

机载平台电磁兼容设计是复杂的系统工程,本文讨论了机载平台电磁兼容预测分析基本原理和方法,并针对当前工程型号研制过程中出现的电磁兼容问题提出了具体解决方法,目前频谱规划管理、频率实时避让、信号剔除、一体化兼容管理等电磁兼容解决措施已应用到电子侦察飞机、战斗机、直升机等平台,解决了上述机载平台设备同时使用存在的雷达探测性能下降、雷达告警产生虚假告警、通信距离下降等电磁兼容问题。本文中涉及的电磁兼容解决措施可为机载平台航空电子系统电磁兼容设计提供参考,同时对解决其他平台电磁兼容问题具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] TTAINTOTTI V. Electromagnetic Compatibility (EMC) Antenna Gain and Factor [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2017, 59(4): 1006–1015.
- [2] 方小星,朱志宇,张冰,等.基于探测性能的舰载雷达电磁兼容分析[J].现代雷达 2016, 38(2): 6–10.
FANG Xiao-xing ZHU Zhi-yu ZHANG Bing et al. Electromagnetic Compatibility Analysis of Ship-Borne Radar based on Radar Detection Performance [J]. Modern Radar 2016, 38(2): 6–10.
- [3] GULATI M, SINGH V K, AGARWAL S K et al. Application Activity Recognition Using Radio Frequency Interference Emissions [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(16): 6197–6204.
- [4] SUN Y, XUE R, ZHAO D et al. Radio Frequency Compatibility Evaluation of S Band Navigation Signals for Future BeiDou [J]. Sensors 2017, 17(5): 1039.
- [5] 陈晋吉.飞机电磁兼容预测仿真研究[D].西安:西安电子科技大学 2013.
CHEN Jin-ji. Simulation Study on Electromagnetic Compatibility Prediction of Aircraft [D]. Xi'an: Xidian University 2013.
- [6] LI W, WEI G, PAN X et al. Electromagnetic Compatibility Prediction Method Under the Multifrequency in-Band Interference Environment [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2017, 60(2): 1–9.
- [7] FANG X, ZHU Z, CAO Q. Analysis of Radar Electromagnetic Compatibility by Multi-Coupling Paths and Assessment Methodology [J]. International Journal of Electronics 2017, 105(2): 1–14.
- [8] 王涛,白天明,李威,等.机载射频收发系统电磁兼容性预测分析方法研究[J].火控雷达技术, 2013, 42(1): 116–120.
WANG Tao, BAI Tian-ming, LI Wei et al. Research on EMC Prediction and Analysis Approach for Airborne RF Transceiver system [J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(1): 116–120.
- [9] 刘鹏,王建明.雷达谐波谱分析在电磁兼容中的应用[J].计算机仿真 2015, 32(2): 19–23.
LIU Peng, WANG Jian-ming. Application of Radar Harmonic Wave Analysis in EMC [J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 19–23.
- [10] LITRAN S P, SALMERON P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a control strategy for a Hybrid Active Filter [J]. Electric Power Systems Research 2017, 144: 81–88.
- [11] 缪星星.机舱内电子设备与通信导航系统间的电磁兼容性研究[D].南京:南京航空航天大学 2011.
MIAO Xing-Xing. Investigation of Electromagnetic Compatibility between PEDs and Navigation and Communication Systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics 2011.
- [12] HUANG C Y, CHEN C H. Improve Electromagnetic Compatibility of Electronic Products with Multivariate Parametric Design [J]. Microelectronics International, 2017, 34(1): 45–55.
- [13] AZPURUA M A, POUS M, SILVA F. On the Statistical Properties of the Peak Detection for Time-Domain EMI Measurements [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2015, 57(6): 1374–1381.
- [14] AZPURUA M A, POUS M, SILVA F. Decomposition of Electromagnetic Interferences in the Time-Domain [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(2): 385–392.
- [15] WU J, BO Z, HE J et al. A Comprehensive Approach for Transient Performance of Grounding System in the Time Domain [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2015, 57(2): 250–256.
- [16] HARIRI A O, YOUSSEF T, ELSAYED A et al. A Computational Approach for a Wireless Power Transfer Link Design Optimization Considering Electromagnetic Compatibility [J]. IEEE Transactions on Magnetics 2016, 52(3): 1–4.
- [17] LAMBRECHT N, PUES H, ZUTTER D D et al. Modeling of Contact Bounce in a Transient Electromagnetic Compatibility Test for the Analysis and Optimization of Nonlinear Devices [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2017, 59(2): 541–544.
- [18] FLINTOFT I D, DAWSON J F, DAWSON L et al. A

- Modular Test-Suite for the Validation and Verification of Electromagnetic Solvers in Electromagnetic Compatibility Applications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2016 59(1) : 111-118.
- [19] 方小星 朱志宇 张冰 等. 基于电磁兼容分析的舰载雷达优化部署方法[J]. 现代防御技术 2016 44(2) : 37-42.
- FANG Xiao-xing ZHU Zhi-yu ZHANG Bing et al. Ship-borne Radar Optimal Deployment Method Based on EMC Analysis [J]. Modern Defence Technology ,2016 ,44 (2) : 37-42.
- [20] LARBI M ,BESNIER P ,PECQUEUX B. Probability of EMC Failure and Sensitivity Analysis with Regard to Uncertain Variables by Reliability Methods [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2015 57 (2) : 274-282.
-
- (上接第 73 页)
- [12] 张立恒 王少龙 颜澎 等. 爆炸冲击波测试数据处理方法研究[J]. 弹箭与制导学报 ,2010 ,30(3) : 107-110.
- ZHANG Li-heng ,WANG Shao-long ,YAN Peng ,et al. Study on Blast Wave Test Data Processing Methods [J]. Journal of Projectiles ,Rockets ,Missiles And Guidance , 2010 30(3) : 107-110.
- [13] 张文伟 庞家志 杨仕超 等. 低失真爆炸冲击信号零漂分析和处理方法[J]. 爆炸与冲击 ,2018 ,39(3) : 509-516.
- ZHANG Wen-wei ,PANG Jia-zhi ,YANG Shi-chao et al. Zero-Drift Analysis and Processing of Explosion Shock with Low Distortion [J]. Explosion and Shock Waves , 2018 39(3) : 509-516.
- [14] 夏伟强 马铁华 范锦彪 等. 压电式加速度传感器在高冲击环境下的零漂分析[J]. 传感技术学报 2007 , 20(7) : 1522-1527.
- XIA Wei-qiang ,MA Tie-hua ,FAN Jin-biao et al. Analysis of Zero-Drift of the Piezoelectric Acceleration Sensor in High-Impact Testing [J]. Chinese Journal of Sensors And Actuators 2007 20(7) : 1522-1527.
- [15] 杨鑫 石少卿 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破 2008 25(1) : 15-18 31.
- YANG Xin ,SHI Shao-qing ,CHENG Peng-fei. Forecast and Simulation of Peak Overpressure of TNT Explosion Shock Wave in the Air [J]. Blasting 2008 25(1) : 15-18 31.