

航天专用测试设备电源干扰抑制技术应用

余莉, 高岩

(航天科工惯性技术有限公司, 北京 100074)

摘要: 航天专用测试设备通常是某航天产品测试需求而专门定制的测试设备, 其功能主要用于检测产品的各项技术指标是否合格; 如果设备对外干扰太强或是抗干扰能力太差, 都会直接影响到产品的测试精度, 严重时也可能给被测产品带来损害, 那么设备承制方必将承受严重的经济损失, 所以电磁兼容性设计在航天专用测试设备中举足轻重; 通过对航天专用测试设备的电源特点分析和 EMI 分析, 从滤波、屏蔽、接地 3 个方面深入探讨了电源干扰抑制技术在航天专用测试设备中应用的具体措施; 这些电磁兼容方法已经成功应用在某测试设备嵌入式供电电源和机箱结构中, 通过了 CE102、RE102 等九项电磁兼容试验。

关键词: 航天专用测试设备; 干扰抑制; 电磁兼容

Application of Space Special Test Equipment Power Interference Suppression Technology

Yu Li, Gao Yan

Aerospace Science and Industry Inertial Technology Co., Ltd, Beijing 100074, China

Abstract: Aerospace special test equipment is usually customized for a specific space product test requirements, its function is mainly used to test whether the technical indicators of the product are qualified or not. If the external interference of the equipment is too strong or the anti-interference ability is too poor, it will directly affect the test accuracy of the product, and when it is serious, it may also bring damage to the product under test, then the equipment contractor will bear serious economic losses, so electromagnetic compatibility design plays an important role in aerospace special test equipment. Based on the analysis of power supply characteristics and EMI analysis of aerospace professional test equipment, the concrete measures for the application of power interference suppression technology in aerospace professional test equipment are discussed from three aspects; filtering, shielding and grounding. These electromagnetic compatibility methods have been successfully applied to the embedded power supply and chassis structure of a test equipment, and have passed nine electromagnetic compatibility tests, such as CE102, RE102 and so on.

Keywords: space special test equipment interference suppression electromagnetic compatibility

0 引言

专用测试设备是指为测量某产品全部的技术指标和性能而专门研制或配置的非通用测试设备, 在国防科技行业中应用居多^[1]。以航天国防科技工业为例, 航天产品在科研和生产阶段, 都需要做长时间的测试和试验, 自动测试产品各项技术指标和详细的数据过程记录在此时显得尤为重要。在这个过程中, 通用测试仪器设备已经满足不了用户在产品验证方面的测量需求, 必须为产品定制满足各种用途的专用测量设备。专用测试设备的测试数据是否准确可靠, 会直接影响到型号产品质量的判定, 从而影响到型号试验的成功。所以, 专用测试设备的质量与控制状态直接关系到军工产品的质量与可靠性, 关系到试验的成败。从设备的电磁兼容角度看, 如果专用测试设备本身对外干扰较强, 有可能会影响到被测产品的正常工作, 严重时可能会损坏被测产品; 如果测试设备本身抗干扰能力差, 那么外界干扰的存在同样会影响设备的测量精度, 严重时可

能导致设备本身工作出现异常。因此, 测试设备自身电磁兼容性设计的优劣已成为衡量一台专用设备质量的重要指标。

航天专用测试设备通常是某航天产品测试需求而专门定制的测试设备, 其功能主要用于检测产品的各项技术指标是否合格。在航天专用测试设备中, 由于被测对象都是航天应用产品, 大多具有较高的经济价值, 如果因为设备的电磁兼容性问题给被测产品带来损害, 设备承制方必将承受严重的经济损失。所以电磁兼容性设计在航天专用测试设备中举足轻重。

1 航天专用测试设备特点及 EMI 分析

航天专用测试设备自身多为室内使用的地面设备, 用于配合产品的测试和实验等, 少量应用于舰载环境, 几乎不存在露天外场这样的应用环境。因此, 来自自然界的如雷电、太阳黑子辐射等自然现象对测试设备的干扰可以忽略不计, 而实验室周边的电气设备所产生的电磁场、电火

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-08-27。

作者简介: 余莉(1981-), 女, 四川江油人, 硕士, 工程师, 主要从事测试设备电路及其相关电力电子等方向的研究。

引用格式: 余莉, 高岩. 航天专用测试设备电源干扰抑制技术应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 176-180.

花、电弧焊接、高频加热、可控硅整流等强电系统所造成的干扰则是测试设备需要重点考虑的因数。这类干扰主要是通过供电电源对测量装置和计算机产生影响, 因此测试设备电源的干扰抑制技术成为目前普遍关注的焦点, 同时也是本论文研究的重点。

1.1 设备电源特点

航天专用测试设备电源分为独立供电单元和嵌入式供电电源两种。前者是指内含多种电源转换电路和电源保护电路的独立箱体, 后者是指安装于测试箱本体内部的电源转换电路。两者功能大致相近, 工作方式相同, 但在结构形式、供电输入方式、电路原理、负载特征上迥异, 如表 1 所示。

表 1 航天专用测试设备电源的分类与区别

电源分类	结构形式	供电输入方式	电路原理	负载特征	功能	工作方式
独立供电单元	箱体结构	交流市电输入	AC/DC 转换、DC/DC 转换、关断式过流保护	稍大功率直流 (20 V ~ 34 V) 负载和多电压 (5 V、12 V、24 V) 小功率负载	为测试对象提供供电电源, 同时也为供电单元内部各个功能组件提供供电电源	开关电源
嵌入式供电电源	多印制板组合结构	交流市电输入、直流 (DC18 ~ 36 V) 输入和交直流混合输入	AC/DC 转换、DC/DC 转换、(AC + DC)/DC 转换	中小功率直流 (17 V ~ 37 V) 负载和多电压 (5 V、12 V、24 V) 小功率负载	既为测试对象提供供电电源, 同时也为测试设备内部各个功能组件提供供电电源	开关电源

从电源电路原理上看, (AC+DC)/DC 转换电路是由 AC/DC 转换电路和通道切换电路共同构成, 而 AC/DC 转换电路是由整流电路、DC/DC 转换电路和电压调节电路等共同构成, DC/DC 转换电路则由输入输出滤波电路和 DC/DC 电源转换模块等共同实现。因此, 研究测试设备电源电磁干扰抑制技术的核心应放在 DC/DC 电源转换模块应用的电磁兼容设计上。

1.2 DC/DC 模块电源 EMI 分析

目前航天专用测试设备应用的 DC/DC 模块电源, 输入电压有 DC18~36 V 和 AC220V 两种, 输出功率从几瓦到几百瓦不等。这些 DC/DC 模块电源均为开关式稳压电源, 而开关式稳压电源的控制方式分为调宽式和调频式两种。在航天专用测试设备应用的模块电源, 绝大多数的控制方式为脉宽调制 (PWM) 式, 即控制电路是以功率半导体开关器件为核心的高频功率电子电路, 通过调整高频开关元件的开关时间比例, 以达到稳定输出电压的目的。也就是说模块电源内部会不可避免地产生周期性杂波, 而杂波的频谱分布在开关频率点和其高阶谐波频率点周围。如图 1 所示,

DC/DC 变换器的电磁干扰 (EMI, Electro Magnetic Interference) 存在辐射干扰 (辐射发射 RE、辐射敏感度 RS) 和传导干扰 (传导发射 CE、传导敏感度 CS) 两种。^[2]

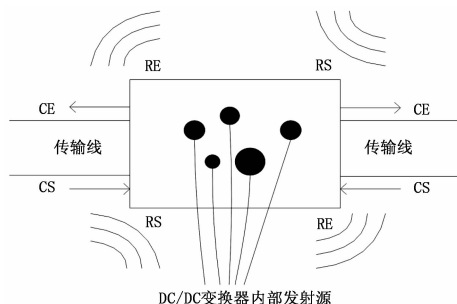


图 1 DC/DC 模块电源的 EMI 分析示意图

辐射干扰是指变换器内部开关管的高速导通和关断所产生的噪声和印制板元器件布局、布线引入的寄生参数带来的干扰信号。此项参数在产品出厂时已经固化, 对于应用者来说是不可控的。同时, 航天专用测试设备采用的 DC/DC 变换器全部为市场货架产品, 通过该类产品相关电磁兼容性试验标准, 所以辐射干扰不是本篇研究的方向, 传导干扰^[5]的抑制才是重点。

以航天专用测试设备为单位来看, 传导干扰要么是从电源进线引入的外界干扰, 要么是设备产生并经由电源线传导出去的噪声干扰。这表明了噪声的双向性, 测试设备既是噪声干扰的对象, 又是一个噪声源。

具体到干扰电流的流动途径来看, 传导干扰又分为共模干扰和差模干扰, 如图 2 所示^[4]。共模干扰是两条电源线对大地 (简称线对地) 的噪声, 大小方向一致, 主要由电源线对地的杂散电容 CP 引起; 差模干扰是两条电源线之间 (简称线对线) 的噪声, 大小一致, 方向相反,

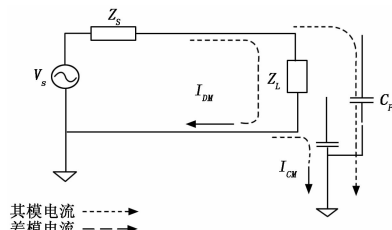


图 2 共模和差模干扰的电流示意图

2 电源干扰抑制技术应用

为了保证测试设备正常工作, 必须在测试设备电源的设计和使用过程中合理应用干扰抑制技术, 才能有效地抑制干扰。屏蔽、接地、滤波是三项最基本的干扰抑制技术^[2], 主要用来切断干扰的传输途径。

2.1 滤波

采用测试设备内部安装输入输出 EMI 电源滤波器和设计电源输入输出滤波电路都是有效减低传导干扰的途径。在设备结构允许的条件下, 理想的滤波方式连接图如图 3 所示, AC220V 或 DC18~36 信号首先经过 EMI 电源输入

滤波器,再经过电源输入输出滤波电路等,得到的一部分直流电压信号直接为设备内部电路和面板仪器仪表供电,另一部分经过 EMI 电源输出滤波器为被测电路供电。

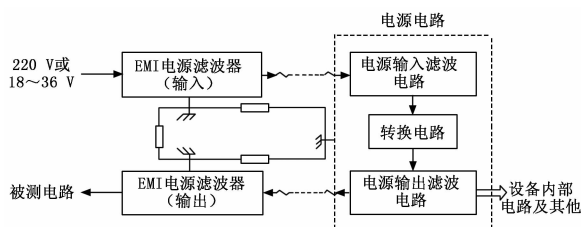


图 3 测试设备电源理想的滤波方式连接图

2.1.1 EMI 电源滤波器的选择

目前市场上流通的滤波器种类繁多,根据航天专用设备电源特点来看,DC/DC 模块电源的主要干扰源是由开关频率产生的高次谐波,而目高频电磁波更容易接收而对设备造成干扰,因此 EMI 滤波器应采用低通滤波方式。在某些直流供电的测试设备中,如果安装有较大差模电感的滤波器,虽然抑制电流突变的作用显著,但会使得部分 DC/DC 变换器在重负载启动时电流输入供给不足,从而引起电源模块在短时间内出现啸叫声,输出异常。所以,在设备电源输入端安装的 EMI 滤波器尽量采用无差模电感或差模电感量较小的滤波方式。如果某些特殊情况必须采用有一定差模电感量的滤波器,那么必须在滤波器后端添加大电容^[7]。

另外,在选用滤波器时主要从如下 4 个方面进行选型。

1) 类型。EMI 电源滤波器通常有直流滤波器和交流滤波器两种。在实际应用中,设备是直流供电时,宜采用直流滤波器;设备是交流供电或者交直流切换供电时,只能选用交流滤波器。直流滤波器不能用在设备是交流供电或者交直流切换供电场合,主要因为直流滤波器中往往会使用容量较大的共模滤波电容器,应用在交流场合可能会产生漏电流超标的问题。而交流滤波器应用于直流场合,安全角度没问题,但是体积会较一般的直流滤波器大,且成本更高。

2) 额定电压。EMI 电源滤波器的额定电压是指滤波器工作时的最高电压。在航天专用测试设备中,考虑设备器件的降额要求,通常会选择额定电压高于输入电压 30%~50% 的滤波器。

3) 额定电流。EMI 电源滤波器的额定电流是指在额定电压的条件下所能通过的连续最大的电流。选择滤波器的额定电流参数时,要以测试设备的最大工作电流为准,确保滤波器在设备最大工作电流状态下工作正常。在航天专用测试设备中,考虑设备器件的降额要求,滤波器的额定电流值通常取实际电流值的 1.5 倍。

4) 插入损耗^[6]。从抑制干扰的角度,插入损耗是最重要的指标。插入损耗是指在同一负载上滤波器接入前负载所接受到的功率与滤波器接入后负载所接受到的功率的比

值,单位是分贝 (dB),分贝越大说明抗干扰能力越强。但是需要注意的是,滤波器厂家给出的滤波器的插入损耗曲线都是在 $50\ \Omega$ — $50\ \Omega$ 的标准阻抗下测得的,而实际应用中的源阻抗和负载阻抗不会是中规中矩的,所以滤波器的衰减效果会有减弱。因此,对拟抑制的频点至少留出 20 dB 的余量。以 200 kHz 超标 15 dB 为例,应选择插入损耗曲线在 200 kHz 时不低于 35 dB 的滤波器。另外,插入损耗分共模插入损耗和差模插入损耗,一般 10 MHz 以上的干扰,选择共模插入损耗满足以上要求的滤波器,10 MHz 以下的干扰,选择差模插入损耗满足以上要求的滤波器,对上例 200 kHz,应选择差模插入损耗 35 dB 的滤波器。

2.1.2 EMI 电源滤波器的安装

当设备内部选择了合适的 EMI 电源滤波器后,必须要考虑恰当的安装方式。只有安装得当,才能取得预期的效果,否则,就会破坏滤波器的衰减特性,不能对电磁干扰起到很好的抑制作用。滤波器的安装方式需要注意以下 3 个方面。

1) 输入线尽量短。如果测试设备电源入口到 EMI 电源滤波器输入端有很长的引线,测试设备内部产生的电磁干扰就会通过一些分布电容和分布电感重新耦合到电源线上,使得滤波器失效。因此,EMI 电源滤波器应在测试设备电源入口处就近安装,最好的结构安装就是用滤波器的壳体盖住机箱上的电源线入口处最好。

2) 滤波器的输入线和输出线必须分开走线。如果将电源滤波器的输入线和输出线捆扎在一起或平行走线,相当于在电源滤波器的输入线和输出线之间并接了一个电容,干扰信号即可绕过滤波器,从分布电容的路径通过,导致滤波器失效。

3) 滤波器的外壳与设备的金属机壳要有良好搭接。两者搭接良好时,干扰信号可以通过壳体直接接地;两者搭接不良时,相当于滤波器的壳体与机箱之间存在一个分布电容,导致滤波器高频时接地阻抗较大,一部分干扰信号就能通过滤波器,使得滤波器滤波效果下降。所以要注意滤波器的外壳与设备机壳搭接处,不要涂覆绝缘漆,整面接触最为稳妥。

2.1.3 输入输出滤波电路的设计

如图 3 所示,如果设备腔内空间足够,外置滤波器与电路印制板滤波电路配合使用显然是设备电源最优的滤波方式,从而使得传导干扰对设备其它电路、仪表和外界的影响能够大幅降低。但在腔内空间无法安置电源输入输出滤波器时或只能安置其中之一时,滤波电路的作用凸现。因此,在任何情况下,电源输入输出滤波电路都是设备电源密不可分的一部分,需要精心设计^[3]。

测试设备电源中常用的输入、输出滤波电路如图 4 (a) (b) 所示。

图 4 中 C6、C7 和 C11、C12 均为滤除共模干扰用的 Y 电容,分别跨接电源正线与模块金属外壳(或火线与地线)

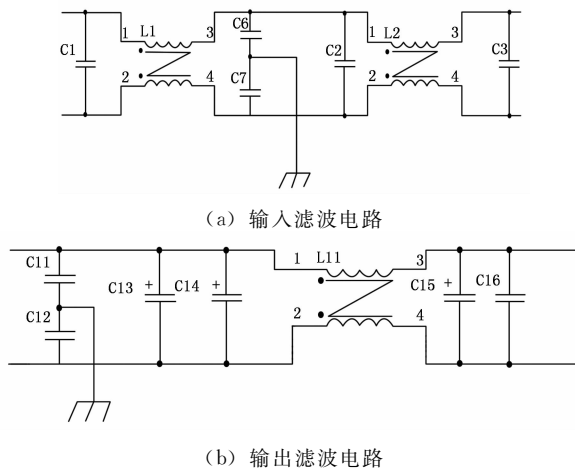


图4 滤波电路

间和回线与模块金属外壳(或零线与地线)间,对共模电流起旁路作用。该电容一般选取耐压1 000 V以上,容值在10 000 pF以下的高压瓷片电容。C1、C2、C3用于吸收输入纹波噪声,C15、C16用于吸收输出纹波噪声,C13、C14是储能电容,保障负载瞬时电流突变时,电源电路仍稳定工作。为了获得良好的滤波效果,所有电容的引线必须尽可能短。同时,共模电感L1、L2、L11的应用都能起到有效抑制共模噪声的作用。根据测试设备电源特点,共模扼流圈在150 k~30 MHz之间必须提供足够高的阻抗来抑制噪声,所以首选环形铁氧体作为磁芯材料,电感量绕置在1~2 mH为宜。

2.2 屏蔽

屏蔽就是利用导体或磁体制成的容器,将干扰源或信号电路包围起来。屏蔽主要用于切断通过空间辐射之干扰的传输途径^[10]。根据航天专用测试设备电源特点,嵌入式供电电源因为采用印制板支架堆放式结构,与设备其他电路没有明显的空间界限,屏蔽处理只能局限于传输的导线;而供电单元因为有独立的箱体结构,除了传输线的屏蔽,箱体机壳的屏蔽也是关注的重点。

2.2.1 屏蔽线的使用

无论是嵌入式供电电源还是独立的供电单元,线缆都是屏蔽的重要因素,一般使用原则如下:

1) AC220V电源线应采用三色纤维聚氯乙烯绝缘安装线,三绞后套屏蔽套。该线缆的截面积参数根据传输电流适当选取。

2) 电源正、回线传输电流1.5 A以下,直接采用氟塑料绝缘双绞屏蔽线AFP(2×0.15 mm²);1.5~3 A以内传输电流,应采用挤压式绝缘层屏蔽线AFP-200(1×0.35 mm²)双绞;3 A以上传输电流选用原则与1)相同;

3) 敏感、易受干扰、关键信号线同样需要加屏蔽措施,原则与2)相同。

4) 以上线缆焊接端部分均应采用屏蔽胶带对线缆进行EMI屏蔽,在缠绕时可以有一些重叠。屏蔽胶带是一种带

高导电背胶的导电箔带,其背胶和导电箔带组成完整的导电体,可以与任何金属表面以粘接方式完整电搭接和缝隙电封闭。对重量和柔软性有要求的场合可以使用导电布胶带。

2.2.2 实用的机箱屏蔽措施

供电单元结构体的电磁泄露点主要有:轴流风机和缝隙。其中缝隙有包括机箱缝隙、连接器缝隙以及其它空洞缝隙等。一些实用的屏蔽措施如下:

1) 轴流风机安装蜂巢屏蔽通风窗。通风口是电磁干扰主要泄露部分之一,在GJB151A严格要求下,采用机箱板上开小孔或金属网的常规方法,其屏蔽性能已达不到期望水准。蜂巢式屏蔽通风窗利用截至波导原理解决通风和屏蔽这对矛盾。该产品的特点是具有极好的通风性能和极高屏蔽性能,通风面积可达到95%;采用带导电衬垫的一体化端接方式,只需拧紧螺钉,就可安装到位,操作极为方便。

2) 机箱缝隙用导电橡胶屏蔽。导电橡胶是通过在硅橡胶中添加导电微粒制成的一种新型高分子材料,它既保持了橡胶原有的水、汽密封特性,同时具有稳定的电磁屏蔽性能。凡水密封胶均可用导电橡胶替代,同时完成环境密封和电磁密封。在实际应用中,导电箱体是由机盖和机架构成的,这两者通常是平而硬的表面。当它们结合在一起时,微小的不规则的表面阻止了它们在任何点的良好密封,这些不规则在一定压力存在下就是高频电磁波能力泄露的途径。即使用很大的压力问题依然存在。然而,将导电橡胶等屏蔽材料安装在接触表面,即使在很小的压力下,柔韧性很好的屏蔽衬垫能够很好的依存不规则的表面。这样由于表面不规则及通过接触面潜在的泄漏途径弯曲的密封了,可以使高频电磁辐射能力的渗透削弱,也可以防止环境中湿气及气体渗透。

3) 连接器缝隙用法兰接口密封衬垫屏蔽。该衬垫由各种导电橡胶制成,主要使用在连接器法兰和安装隔板之间,可以提供良好的屏蔽性能、水汽密封和压力密封,可以与非导电密封垫互换。

4) 其他孔洞缝隙屏蔽。由于面板显示仪表、指示灯和操作开关等需求会导致结构件上开各种孔洞,建议选用屏蔽的元器件。否则需要注意安装缝隙的屏蔽效果。导电接口衬垫采用导电布衬垫或金属复合衬垫模切而成,能够对器件接口有很好的屏蔽作用。它具有高弹性和阻燃行,同时还具有体积小、重量轻的特点,是目前应用最广泛的屏蔽材料。

2.3 接地

在航天专用测试设备中,接地不仅是抑制干扰的重要手段之一,更是一项重要的安全保护措施。实践证明,良好的接地不仅能够防止外部干扰的入侵,抑制测试设备内部噪声对外耦合,而且能够保护设备和人身安全;反之,如果接地处理不好,可能会将外部干扰引入设备内部,设

备内部噪声也会对外耦合,产生干扰,甚至引起触电事故发生,危害个人的生命安全^[8]。

良好的接地设计可以让测试设备以最小的硬件成本解决许多电磁干扰问题^[9]。具体注意事项如下:

1) 设备金属机壳应与大地可靠接触。如果设备是 AC220V 输入,机壳地与 AC220V 地应采用线径较粗的屏蔽线短距离多处相接(具体问题具体分析);如果设备是直流输入,机箱外壳应设有“地柱”,操作者在操作前需要通过“地柱”将测试设备与大地相连。设备机壳接大地不仅可以大大提高设备的抗干扰能力,而且也是出于对操作者人生安全角度的重要考虑。

2) 滤波器外壳应与设备金属机壳可靠接触。接触电阻(如图 3)增大会使滤波器抗共模干扰的特性变坏,甚至失效;而且滤波器外壳接地也能够防止滤波器的泄漏电流对人身体的危害。

3) 屏蔽线金属外层应与设备金属机壳可靠接触。屏蔽线的金属外层应紧贴机箱,面一面接触的方式优于多点接触方式。

4) 电源模块金属外壳应与设备金属机壳可靠接触。如果机箱底板为金属接触面,只需要将电源模块的接线柱与印制板安装支架相连就能实现模块金属外壳与设备金属机壳可靠接触;如果机箱底板为非金属接触面,需要增加电源模块接线柱与印制板连接器相连的印制线,同时在该印制板的对外接口处增加与机箱金属侧板上、下盖板的连接,以保证模块金属外壳与设备金属机壳可靠接触。

5) 供电单元机箱连接器或金属开关等应与设备金属机壳可靠接触。除了用户的特别申明(绝缘接触要求)外,面板上安装金属连接器或金属操作开关时,必须保证接触面平滑,如果有必要在它们之间安装屏蔽材料,材料也必须是导电的。

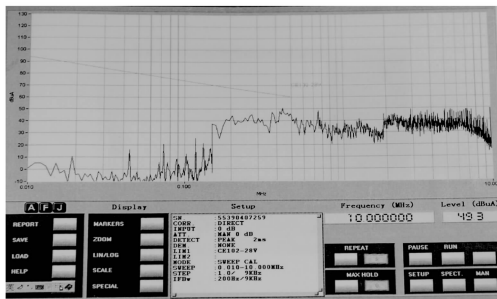
3 实际应用效果和结论

在实际应用中,作者选取了某嵌入式供电电源作为试验对象,测试设备外部结构借鉴供电单元机箱的具体屏蔽措施实施方法,通过了 CE101、CE102、CS101、CS114、CS116、RE101、RE102、RS101、RS103 等九项电磁兼容试验。其中 CE102 10 kHz~10 MHz 和 RE102 10 kHz~10 MHz 的试验结果截图如图 5 (a)、(b) 所示。

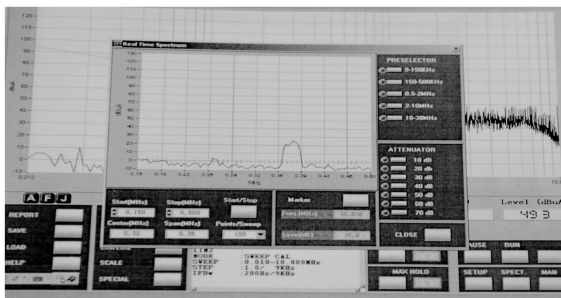
由图 5 可见,在整个试验检测频段范围内,输入电源线的传导发射和设备自身及其电缆的电场发射均在规定的极限值以下,而且在 DC/DC 变换器的开关频率 350 kHz 附近,电场辐射发射较其它频段稍高。同时也验证了试验测试结果与实际情况相符,滤波、屏蔽、接地等干扰抑制具体措施是可靠而行之有效的。

4 结束语

本文通过对航天专用测试设备的电源特点分析和 EMI 分析,从滤波、屏蔽、接地 3 个方面深入探讨了电源干扰



(a) CE102 10 kHz~10 MHz 试验结果截图



(b) RE102 10 kHz~10 MHz 试验结果截图

图 5 试验结果截图

抑制技术在航天专用测试设备中应用的具体措施。这些电磁兼容方法已经成功应用在某测试设备嵌入式供电电源和机箱结构中,通过了 CE102、RE102 等九项电磁兼容试验。

从测试设备发展角度看,设备电源干扰抑制的具体方法对今后航天专用测试设备的电磁兼容性 EMC (Electro Magnetic Compatibility) 发展具有积极的指导和借鉴作用,意义深远。

参考文献:

- [1] 何 为, 杨 帆, 姚德贵, 等. 电磁兼容原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] 邵小桃, 等. 电磁兼容与 pcb 设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [3] 胡智评. DC-DC 开关电源中的电磁兼容分析与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [4] 王少宁, 张俊峰. 航天器 DC-DC 模块电源电磁兼容设计 [J]. 安全与电磁兼容, 2007 (4): 62-63.
- [5] 鲍敬源, 崔 杨, 等. 开关电源传导干扰建模与仿真分析 [J]. 舰船电子工程, 2014 (2): 82-85.
- [6] 黄品芳. EMI 电源滤波器接地方法对共模插入损耗的影响 [J]. 宇航计测技术, 2009 (1): 51-53.
- [7] 陈 锋, 曾岳南, 等. EMI 电源滤波器在开关变换电路中的应用 [J]. 电气开关, 2006 (6): 31-32.
- [8] 崔 智. 电子电气设备的接地分析与处理 [J]. 现代制造技术与装备, 2018 (12): 154.
- [9] 方 楷. EMC 中“设备机壳接地”的研究 [J]. 安全与电磁兼容, 2018 (1): 20-24.
- [10] 黄辉霞. 浅析电子设备的电磁屏蔽设计 [J]. 电子测试, 2018, 23: 100-101.