

火箭地面测控系统的电磁兼容性设计

王晓晖¹, 陈纲²

(1. 中国航天科技集团公司第四研究院第四十一研究所燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 西安 710025; 2. 陕西电器研究所, 西安 710025)

摘要: 随着电子集成技术的发展及嵌入式系统的普及应用, 地面测控系统的元器件密度越来越高, 数据传输的通信频率也越来越快; 如何使地面测控系统中各电气、电子设备在复杂、多变的电磁环境中协调工作正常, 成为一个突出的问题; 为更好的提高系统性能, 对某型测控系统进行了电磁兼容设计研究, 对系统的敏感部位途径进行了分类的抗干扰设计, 制定了解决措施或改善方法; 经后续实际应用验证, 有效解决了传统电子设备工作过程中容易出现的数据传输误码、系统死机等问题, 满足工程应用; 提出了测控系统解决电磁兼容问题的分析思路, 对充分发挥地面测控系统的性能, 降低电磁干扰, 实现电磁兼容, 有一定的工程实用价值。

关键词: 测控; 电磁兼容; 设计

Electromagnetic Compatibility Design of Rocket Ground Measurement and Control System

Wang Xiaohui¹, Chen Gang²

(1. State Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-structure, 41st Institute of Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710025, China; 2. Shanxi Electrical Equipment Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: With the development of electronic integration technology and the popularization and application of embedded system, the components density of ground measurement and control system is higher and higher, and the communication frequency of data transmission is faster and faster. How to make the electrical and electronic equipment in the ground measurement and control system work well in the complex and changeable electromagnetic environment has become an outstanding problem. In order to improve the system performance, the electromagnetic compatibility design of a certain type of measurement and control system is studied. Through the subsequent practical application verification, the problems such as data transmission error code and system crash that are easy to occur in the working process of traditional electronic equipment are effectively solved, satisfying the engineering application. This paper puts forward the analysis thought of solving the electromagnetic compatibility problem of the measurement and control system, which has certain engineering practical value for giving full play to the performance of the ground measurement and control system, reducing electromagnetic interference and realizing electromagnetic compatibility.

Keywords: measurement and control; electromagnetic compatibility; design

0 引言

地面测控系统是指对火箭箭上控制系统性能进行综合测试, 并能对火箭系统实施点火发射控制的系统, 其在火箭地面设备中的重要地位体现在火箭系统的设计、生产、试验和应用的整个过程中, 是火箭系统发挥技术性能的重要保证, 也是控制系统性能检验与优化设计的重要手段^[1]。

近年来, 随着嵌入式计算机和电子电路集成技术的日渐发展, 测量仪器的复杂程度及安装密度也越来越高, 尤其是高频、高速、高灵敏度和高集成度电路的广泛应用, 使得火箭地面测控系统内部出现了一些新的干扰源, 而且电磁干扰的危害性也逐渐增多。另外, 地面测控系统在使

用期间, 还有可能要经历地面、外部空间恶劣的电磁环境, 人为干扰及自然干扰源(雷电、大气干扰等)有可能使系统或内部设备的性能发生有限度的降级, 甚至可能使系统或设备失灵; 干扰严重时, 会使系统或设备发生故障或事故。

因此, 要求地面测控系统十分可靠且精确地工作, 必须解决的技术问题就是电磁兼容性。亦即要使各电气、电子设备内部, 各设备之间, 并与周围环境之间避免电磁干扰带来的不良影响, 实现整个系统的电磁兼容, 又要使整个系统在一定的干扰环境下, 能正常地工作, 完成既定任务。

为有效提高系统性能, 对某型测控系统进行了电磁兼容设计研究, 对系统的敏感部位或途径进行了分类的抗干扰设计, 并提出一些有效的方法, 以提高系统的抗电磁干扰能力。

收稿日期: 2019-05-04; 修回日期: 2019-06-14。

作者简介: 王晓晖(1978-), 女, 甘肃嘉峪关人, 硕士, 高级工程师, 火控总体副主任设计师, 主要从事火控总体方向的研究。

1 电磁兼容设计内容

1.1 概念

电磁兼容性又称电磁相容性^[2], 是指设备在其所处的电磁环境中, 能够正常工作, 而且对处于该环境中的其余设备的正常工作, 不会造成任何影响的特性。简单的说, 就是指在有限的空间和频谱资源条件下, 处于该环境中的所有用电设备, 可以共同正常工作, 不会互相影响且导致性能下降的能力。对于一个设备来讲, 既要求它具有一定的抗干扰能力, 使得自身在有其余设备发出干扰的电磁环境中也能正常工作, 还要求它不能产生过多的干扰, 影响所处环境中的其它设备正常工作。

电磁兼容涉及电磁能量的传递、辐射和接收, 这三部分组成电磁兼容问题的主体。电磁骚扰源产生能量辐射, 耦合途径将能量传递到敏感设备, 即“电磁骚扰源、耦合途径、敏感设备”是构成电磁兼容问题的 3 个因素。只有 3 个因素同时存在, 才会产生电磁兼容问题, 而解决电磁兼容问题的方法, 就是通常使用的滤波、屏蔽、接地。

1.2 设计思想及特点

电磁兼容问题包含电磁骚扰源、耦合途径、敏感设备 3 个因素, 3 个因素缺少一个, 电磁兼容问题就不会存在。因此, 在解决电磁兼容问题时, 要结合产品特性进行深入研究, 从电磁骚扰源、耦合途径和敏感设备着手, 分析如何能够有效抑制骚扰源的能量、削减或者尽量消除骚扰源的耦合途径、降低敏感设备对骚扰的响应能力。具体需要结合所处环境情况, 采取适当措施, 消除 3 个因素中的一项或者多项。

火箭地面测控系统的设备, 其电磁兼容性具有如下特点:

1) 集成度较高。

考虑载体平台安置、便于外场携行、展开撤收便捷等因素, 地面测控系统的设备集成度较高。设备单体内部集成了相关功能的各类电路板, 系统机柜内集成了各功能的单体设备和电源。从设备内部的腔体到设备外部的空间, 结构设计将功能各异的板卡、元件、单体设备逐层有序的组合在紧凑的空间内。系统高集成度的同时, 也使得设备间的电磁干扰问题特别突出。

2) 高低电压信号共存。

地面测控系统包含控制、检测等多种功能, 同时处理多种电信号, 大体上可以分为高电压信号和低电压信号两类。高电压信号容易对外部信号产生干扰, 影响其正常工作, 而低电压信号因其特性, 又对外部干扰极为敏感。所以, 必须有效避免高低电压信号互相影响。

3) 频谱范围广。

地面测控系统的电子设备充分利用频率资源, 占用多个频段。有的设备频率覆盖范围较广, 容易对周边设备造成较强的干扰。

4) 易出现耦合、交叉干扰。

在各种载体平台上, 大量电子设备往往共用电源、备

份电源和地线, 使得通过电源线耦合和地线耦合造成的交叉干扰不能忽视。

5) 结构裕量小。

地面测控系统的电子设备结构紧凑, 内部裕量空间小。如果在设计研制后期才增加电磁兼容设计, 往往会与设备原有的机械结构或电气布局发生冲突, 这时就难以兼顾各方面的技术性能指标。

综上所述, 地面测控系统的电子设备的 EMC 设计必须与方案设计紧密结合, 同步开始, 以便能够保障产品达到预期功能, 缩短设备的调试时间, 确保系统内各设备互不干扰, 满足电磁兼容的要求。

2 地面测控系统的电磁兼容设计

某型火箭地面测控系统包括主控计算机、接口适配器、操作控制台、GPS 时统、电源机箱、检测机箱等设备, 是一个包含强电信号、弱电信号的多处理器的综合计算机系统。在外场应用时, 测控系统与外场外测、遥测设备共用一个发电机组, 地面测控系统与箭上设备要进行实时通讯。不管是从用电回路考虑, 还是从空间辐射考虑, 地面测控系统设备都有容易受到干扰或窜扰的风险, 进而影响工作结果。

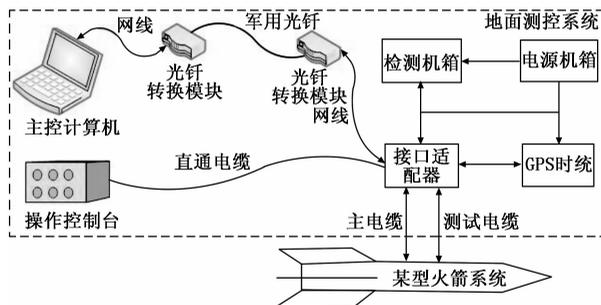


图 1 某型火箭地面测控系统组成示意图

2.1 设计工作目标

- 1) 确保某型地面测控系统达到系统间电磁兼容和系统内电磁兼容;
- 2) 最大限度的减少电磁干扰问题, 减少对维修人力及其它资源的要求, 以降低研制费用和缩短研制周期;
- 3) 提高某型地面测控系统的系统完好性和测控任务的成功性。

2.2 设计工作原则

1) 为实现某型地面测控系统在规定的电磁环境条件下达到系统内和系统间电磁兼容的目标, 在设计中坚持以电磁兼容性规范为依据、电磁兼容性设计为重点, 全面进行电磁兼容性试验的工作方针, 开展电磁兼容性设计工作;

2) 综合权衡电磁兼容性与系统功能特性, 以“结构和功能”设计结合电磁兼容性设计的方式, 进行地面测控系统的电磁兼容性设计工作, 把电磁兼容性要求和电磁兼容性设计准则充分落实到产品的设计、研试过程中, 以便提高产品的电磁兼容性。

2.3 电磁兼容性设计分析

电磁兼容性分析工作贯穿于某型地面测控系统的整个研制过程。现对某型地面测控系统的电磁环境进行分析,用以确定电磁环境对系统性能的影响和系统对电磁环境的防护能力。

在进行电磁兼容性分析时,要充分考虑到相互邻近的设备,有信号接口的每一对组合、设备、分系统、系统,乃至整个系统的电气与机械结构、电参数、电磁环境条件等对电磁兼容性产生的影响,为系统性的电磁兼容性设计或措施改进提供依据。

在某型地面测控系统的方案论证阶段,进行了电磁环境剖面、功能特性、敏感性和电参数的分析。为制定电磁兼容性设计方案和协助确定主要技术特性及条件,如信号电平、频率、灵敏度、增益、数据传输速率等,结合某型地面测控系统的技术参数和指标要求,对下列内容进行了电磁兼容性分析:

- 1) 设备、组合、电路间的电磁干扰;
- 2) 系统单元之间的电磁干扰;
- 3) 系统的频率分配、频段分布。

在某型地面测控系统的方案研制阶段,结合系统的技术参数和指标要求,重点对下列内容进行了电磁兼容性分析:

- 1) 电磁环境干扰和设备间电磁干扰;
- 2) 电缆线束的线间干扰耦合;
- 3) 容易受到电磁干扰的敏感部位定位;
- 4) 各功能设备箱的屏蔽效能。

通过对上述不同阶段的电磁兼容问题进行分析,确保所设计的某型地面测控系统的电磁兼容设计方案得以详细、顺利的实施。

2.4 电磁兼容性设计

电磁兼容性设计的目的是控制电磁干扰发射和降低电磁干扰敏感性,使设备和分系统满足电磁兼容性要求。对某型地面测控系统和系统各单元的具体设计方案进行电磁兼容性分析,针对可能存在的电磁干扰问题,提出电磁兼容性设计方案,在系统方案的设计研试过程中,按照要求进行具体实施。

2.4.1 频率分配

1) 在系统设计过程中,按照全国无线电管理委员会颁布的无线电频率划分规定,选择无线电频段和频率;

2) 在谐波、本振、中频、镜象等多种频率中,综合考虑可能造成同频干扰的组合,在设计中进行相应的频率调整,形成频率分配表;

3) 利用试验验证频率分配的合理性,发现可能存在的缺陷,对频率分配表做进一步的调整,从而确保不同信号的频率不重合或不在同一频带内,大功率发射频率和小信号频率之间有足够的间隔;

- 4) 对整个系统中不同信号的频率进行相互隔离。

2.4.2 信号电平的选择

- 1) 在系统设计中,充分考虑信号的电磁特性、传递要

求和电路、设备、电缆干扰发射的极限要求,按照尽量选择低电平的原则,规定每一类信号的电平幅值;

2) 降低可能产生干扰的信号的电平,确保信号在传递和发射过程中对任何端口(电路、组合或设备)产生的干扰比端口的干扰敏感度至少低 6 dB;

3) 若信号电平不能满足电磁兼容性要求或无法调整,在设计时采取屏蔽或隔离措施。

2.4.3 机箱屏蔽设计

1) 为保证屏蔽层的导电连续性,机箱结构的所有外部缝隙都要保证连续且有良好的导电接触。对于直径小于屏蔽机箱厚度的小孔,可以不做处理;

2) 对机箱的各种开口进行妥善处理。机箱的开口主要用来安装开关、按钮、指示灯与显示屏等分组件。对于穿孔安装的器件,要对其采取屏蔽措施,如加装隔离垫等,并对穿过屏蔽层的导线做滤波处理;

3) 正确选择机箱接插件的类型和安装方式,首推选择屏蔽型连接器。机箱上安装插座的接触面不能有漆膜或涂塑层等任何绝缘材料,设备外部的连接电缆选择带屏蔽层的电缆,并且其屏蔽层要和机箱的屏蔽层保持导电连续性;

4) 机箱散热采用自然风冷的方式,设备内部器件尽量布局在风道上。如果空间允许,可安装散热风扇,但要在风扇外侧安装屏蔽通风板。

2.4.4 布线设计

1) 根据布线原则和要求,系统中不同类型的电缆芯线捆扎成一束,不论是否相互邻近,都需采取屏蔽措施;

2) 根据对信号类型的分析,在设计中详细规定了每一根电缆线的规格、位置、走向、传递的信号、两端无屏蔽层的长度、与其它电缆线的间距和耦合度等,以及电缆线的接地和屏蔽要求,从而确保系统内电缆线间的干扰耦合不会对易受干扰电缆的输入及输出电路,或设备产生任何干扰;

- 3) 低频信号传输线缆采用双绞线或屏蔽线。

2.4.5 电路设计

系统设计中为控制电磁干扰发射和降低电磁干扰敏感度,在电路设计中采取以下措施和方法:

1) 在某型地面测控系统的定制板卡的设计中,按照电子线路的布局规范要求,合理规划布置电子线路的走线;应用具有电源层和地线层的 4 层及以上的多层印制电路板,选用表面贴装元器件(其等效电磁辐射面积可明显小于插装式元器件),该类型电路板的电磁兼容特性较好;

2) 根据元器件选择原则或要求,电路中选用高浪涌电压电容器、低电流和电压噪声的电阻器、低带内敏感度的模拟器件和数字器件、可对前后级信号可靠隔离的光电隔离器、有效抑制电路瞬态干扰的容性滤波电路、可靠降低数传误码的隔离通讯芯片、抑制反向电动势的释放器件。

2.4.6 滤波设计

根据电磁兼容性要求和可能遭遇到的最大电磁干扰辐射,考虑安装、接地、体积、重量等相关要求,系统各单

元的设计中都增加相应的滤波设计, 加入滤波电容器, 或者信号输入、输出滤波电路。

2.4.7 接地设计

接地质量首先体现在要正确接地, 即选择正确的接地点和接地方式; 其次是要可靠接地, 接地面积要大、接地线要粗而短、接地螺栓要安装紧固, 以减小接地电阻。基于以上考虑因素, 对系统的接地采取如下措施:

- 1) 系统各设备均备有接地线及相关组件, 以确保能够可靠连接至接地桩;
- 2) 采用短、粗、直型的接地线束, 有效增加导电、干扰泄放的导体截面积;
- 3) 系统采取单点接地, 有效消除地环路;
- 4) 采用树型地线连接方案, 避免产生交叉干扰。

2.4.8 电源设计

从信号隔离、防止电源前后级窜扰, 保证系统各设备用电安全性的角度出发, 对系统的工作激励信号进行如下处理:

- 1) 电源信号进入设备机箱后, 直接连接至电源滤波器上, 要选择输出线和输入线分布于两侧电源滤波器, 其金属外壳要大面积接地, 或者挂壁安装于机箱侧板, 通过机箱侧板与接地设施连接;
- 2) 对于交流电源模块, 最好使用隔离变压器, 以便能够起到安全防护、变压、隔离地线环流、提高共模干扰抑制能力等多种作用, 且其滤波特性和电源滤波器互补;
- 3) 对二次电源模块进行合理选择, 因为开关电源模块对外界的干扰有一定的抑制能力, 但对外界的辐射发射和传导发射过大, 故在低功耗电路中, 尽量选用线性电源模块;
- 4) 电源模块的输入端和集成电路的供电端, 增加滤波电路和防反向击穿电路, 减少电源的谐波干扰。

3 电磁兼容设计应用实施例

3.1 检测机箱显示控制终端重启

3.1.1 现象

在地面测控系统的台面联试过程中, 执行“地面供电”控制后, 检测机箱的显示控制终端出现黑屏并重启。

3.1.2 原因分析

对地面测控系统的供电电路进行梳理, 整理出供电原理示意图如下图 2 所示。地面测控系统的前端设备经由不同的供电电源进行配电, 不同的电源均从实验室的一处墙电插排进行取电。V1、V1GND 为电源 1 的输出, 用于为显示控制终端供电。V2、V2GND 为电源 2 的输出, 用于为箭上设备提供工作激励信号。当地面测控系统执行“地面供电”控制后, 箭上设备供电电路中的瞬态工作电流较大, 有可能产生窜扰信号, 从该电路通过墙电插排 220 V 的前级, 耦合窜扰至显示控制终端的供电电路。

显示控制终端为包含显示和屏边控制功能一体的综合终端, 内部包含了主控板、电源板、显示板等多块板卡, 其主控板的重启信号的幅值约为 0.5 V。当地面测控系统执

行“地面供电”控制后, 有可能产生窜扰信号, 通过耦合的方式, 经由 220 V 的前级, 窜入显示控制终端的供电电路, 对主控板相关电路进行作用, 使其误以为收到了重启信号, 进而执行显示控制终端的重启操作。

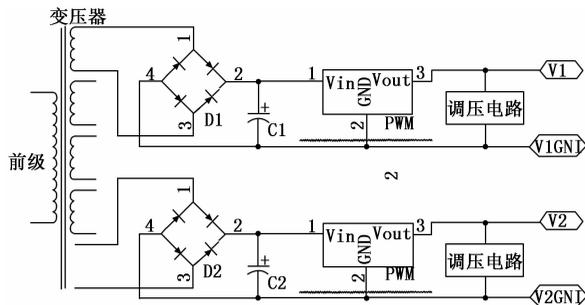


图 2 地面测控系统的供电电路原理示意图

3.1.3 电磁兼容改进设计

在进行详尽分析后, 对显示控制终端的后续产品增加电磁兼容设计, 具体如下所示。

措施 1: 在显示控制终端的后背板设置“机壳地”和“信号地”两个端子, 两个端子通过地线与实验室接地铜排进行连接。机壳地用于将显示控制终端机壳上的窜扰信号进行实时泄放, 信号地与内部电路的 VGA 信号地、控制信号地、通讯信号地、二次电源地等信号地进行连接, 用于将地信号上的窜扰进行实时泄放。考虑接地效果, 在端子上设置搭接片, 可以通过搭接片将两端子连通, 如图 3 所示, 连通后通过地线与接地铜排连接; 也可以在接地铜排处连接在一起, 如图 4 所示。如何选择主要视实际接地效果处理 (因实验室空间较大, 不同试验, 各设备的摆放位置不同, 两端子与接地铜排的距离就不同, 首选就近接地, 泄放效果更好)。

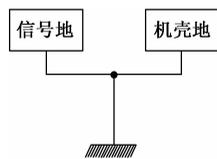


图 3 地信号搭接接地示意图

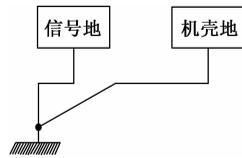


图 4 地信号远端接地示意图

措施 2: 在显示控制终端内部增加隔离电源模块, 及相关 RC 滤波电路, 如图 5 所示, 将地面测控系统为显示控制终端供电的 V1、V1GND 信号调理成二次供电信号 V1'、V1GND' 后, 再为内部电路各器件提供工作用电。这样可以有效滤除毛刺干扰, 避免电源模块的前级供电电路中产生或者窜入的干扰对后级电路的用电设备造成不良影响。

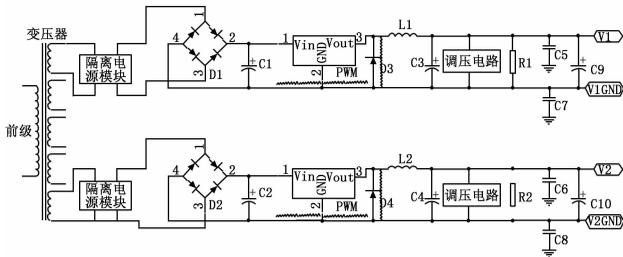


图 5 地面测控系统的供电电路原理示意图
(电磁兼容改进设计后)

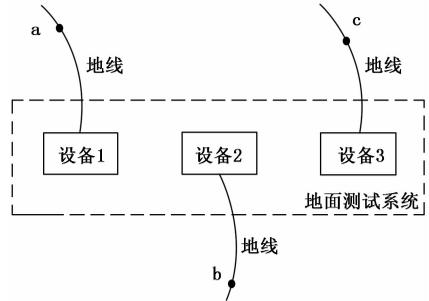


图 6 地信号电压波动原理示意图

3.2 数据采集曲线的毛刺问题

3.2.1 现象

在进行箭架联合匹配试验时，地面测控系统的脱落插头脱落后，进行箭上数据下载，发现下载的数据文件有时无法打开，而能够打开的数据文件中，曲线毛刺很多。

3.2.2 原因分析

在箭架联合匹配试验前的电气综合联试中，多次完成了地面测控系统的真实脱落试验。在真实脱落试验中，采集下载的箭上数据全部正常，并未出现毛刺问题。而箭架联合匹配试验与电气综合联试的区别就在于被测箭体放置在发射架上进行试验，其它试验设备组成及条件基本相同。

对发射架的供电及接地情况检测后发现，整个试验厂房的交流零线与交流保护地相通，而发射架架体与交流保护地也相通，由于箭体通过金属滑块放置在发射架上，因此箭体与交流保护地也相通。当试验厂房的接地系统中存在较强的干扰时，干扰信号就会沿着这一通路影响箭上设备的工作状态，所以在采集数据中会出现毛刺。经检查，发射架与交流保护地相通的原因是试验厂房中设置了多根导轨，这些导轨与交流保护地相通，发射架放置在地上，与导轨接触，导致了与交流保护地的接通。

3.2.3 电磁兼容改进设计

为了避免试验厂房接地系统中的干扰信号对地面测控系统的采集测量工作造成不良影响，对试验厂房供电系统的接地、发射架的接地进行了改进，在发射架的固定支撑与导轨之间垫上绝缘胶板，使发射架体与导轨隔离，即与交流保护地隔离；另外，在试验厂房外面埋设独立的交流保护接地桩，作为地面测控系统的交流供电的保护接地，确保交流保护地与交流零线隔离，减少交流干扰。

如图 6 所示，当一组接地线路上存在较大干扰的时候，就会通过接地桩上的共地点对其余的接地线路产生窜扰。即当 a 点的电位因干扰而造成波动时，就会因为接地桩的共地点，影响 b、c 点的电压信号，引起其地电位的变化，造成电压波动，进而对其余设备产生影响。如下图 7 所示，将地面测控系统和发射架的接地线分别连接至试验厂房的两个独立的接地桩后，两系统不再有可通过地线干扰的途径，有效避免干扰信号通过接地点对其余设备产生影响。改进后再次进行箭架联合匹配试验，试验结果正常，采集文件可正常打开，数据曲线只有少量毛刺。

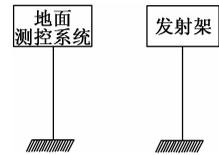


图 7 两系统单独接地示意图

4 结束语

电磁兼容性设计与产品的功能设计是同等重要的设计内容，在产品的方案设计初期，应进行充分的调研，根据电磁兼容要求，落实相应的技术措施。只有这样，设计生产出的产品才是技术指标过硬的产品。本文通过运用电磁兼容的基本理论和技术，对某型地面测控系统进行电磁兼容性设计分析，归纳总结出系统中存在的主要敏感部位，并针对存在的电磁干扰隐患，提出了相应的解决措施。本文所述的某型地面测控系统，应用了所设计的各项电磁兼容性措施后，在后续的实体研试、联合试验中，进行了充分的验证与考核。试验结果表明，某型地面测控系统工作正常，抗干扰效果良好，可供后续设计参考借鉴。

参考文献：

- [1] 沈秀存, 等. 导弹测控系统 [M]. 北京: 宇航出版社, 2000.
- [2] 李一鸣. 航天系统电磁兼容性论文集 [C]. 北京: 宇航出版社, 1989.
- [3] 凯瑟. 航空航天系统的电磁干扰控制 [M]. 喻显荣, 李玉兰译. 北京: 宇航出版社, 1989.
- [4] 白同云, 吕宵德. 电磁兼容设计 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.
- [5] 陈莉, 王跃科等. 高速高精度数字系统的电磁兼容性设计 [J]. 计算机测量与控制. 2008, 16 (4): 544-545.
- [6] 李柯, 商书元, 冯振生. VXI 测试总线系统的电磁兼容分析 [J]. 计算机测量与控制. 2000, 8 (5): 8-10.
- [7] 陈淑凤, 马蔚宇, 马晓庆. 电磁兼容试验技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [8] 苏东林, 戴飞, 谢树果. 系统级电磁兼容量化设计理论与方法 [M]. 北京: 国防出版社, 2015.
- [9] 王幸之. 单片机应用系统抗干扰技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [10] 路宏敏. 电磁兼容性预测研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2000.