

方舱电磁兼容技术研究与应用

袁企乡, 李国民, 花伟峰, 徐 玮, 向 军, 徐 昕

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 方舱在集成测发控系统时对环境与分系统之间电磁兼容提出了新的要求, 这包含有: 环境测发控场地对于系统之间、分系统之间、分系统对系统之间的影响因素; 而其中环境测发控的场地对于系统的电磁兼容影响较大, 这涉及场地众多设备: 有推进剂加注系统、测量系统、动力系统、指挥监视系统、安全控制系统设备等等, 为此当在系统集成设计阶段就必须进行研究与防范, 把超越系统的电磁兼容影响做深入研究分析, 采取应用多种电磁兼容相关技术与手段, 对主要影响进行有效抑制与降低, 使得方舱结构在集成测发控系统时电磁兼容始终处于有效的抑制与控制; 解决了方舱结构系统集成的测发控系统带来电磁兼容问题, 为新型运载火箭提供了方舱结构测发控系统; 该项技术在长征六号运载火箭首飞过程中得到了成功应用。

关键词: 电磁场干涉; 电磁兼容; 测发控系统; 波导; 方舱结构

Research and Application of Shelter Structure of Electromagnetic Compatibility Technology

Yuan Qixiang, Li Goumin, Hua Weifeng, Xu Wei, Xu Wei, Xiang Jun, Xu Xin

(Shanghai Institute of Aerospace Computer Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Application in integrated measuring control system for the environment and has proposed new requirements on electromagnetic compatibility between subsystem, which include: environmental measuring control between sites for system, subsystem, subsystem of the system between the influencing factors. And send control field for measurement and control system in the the environment influence on electromagnetic compatibility, and the site of many devices involved: a propellant filling system, measuring system, power system, command monitoring system, security control system equipment and so on, therefore when in system integration design phase must be in—depth research and prevention, the impact of beyond the system emc do in—depth research and analysis, adopt various emc application related technologies and means, to effectively restrain and reduce the major effect, makes the square in the integration test of electromagnetic compatibility when they control system has been effectively restrain and control. Solved the square system integration test control system with electromagnetic compatibility problems, provides the new rocket square measuring control system. The technology in the long march rocket 6 first flight has been successfully applied in the process.

Keywords: electromagnetic interference; electromagnetic compatibility; hair control measurement and control system; waveguide; shelter structure

0 引言

随着航天技术的发展, 快速、移动发射运载火箭是未来快速进入空间的首要途径。国防、经济、防灾抗灾、通讯等对快速进入空间能力提出了迫切要求, 地面测试发射控制系统(以下简称测发控系统)是运载火箭的重要部分, 用以实现运载火箭在分系统、全箭综合试验及发射场飞行整体测试, 最终实施点火发射功能, 所以移动方舱地面测发控系统能够实现快速、可移动功能是具有重要意义, 而方舱上电磁兼容技术应用、电磁兼容有效抑制与降低是系统研制的重要方面, 其目的是做到地面测发控系统能够在总装测试地、发射测试地、发射地整个工作过程中对环境干扰源进行屏蔽, 对分系统之间干扰源进行抑制, 以保证系统能够正常工作, 并要在系统电磁兼容性(EMC)指标上达到设计阈值^[1]。

所以, 对方舱结构体进行电磁兼容上研究设计, 对系统供电与分系统之间进行研究设计, 制定出环境对舱体、分系统之间的电磁兼容设计要求, 从而根据要求来进行系统设计。目前

该舱结构体已通过了长征六号运载火箭首次发射应用, 其性能、功能和指标均符合系统要求。

1 舱体结构电磁兼容问题概述

方舱是个结构的箱体式, 它由箱体、门、窗、系统线缆槽、电源、信号孔口板、空调连接风口等部分组成见图 1。

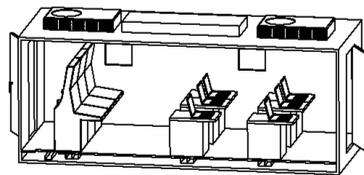


图 1 方舱系统构成图

舱体是由铝型材的方管组成的承重框架体, 其内外表面敷上 1 毫米厚的铝板, 铝板之间充满聚氨酯发泡剂, 以起到固定、隔热的作用。当该舱体不开孔、窗、门时状态, 其方舱结构电磁兼容性指标是处于优良状态 ≥ 45 dB, 该指标参数是对目前普通方舱结构设计及制造工艺后所进行的测试后的数据。但舱体的实际使用是必须开出门、窗、电源、信号孔口、空调孔口等, 这时所开出的孔口区域成了电磁波内、外相互传导、干涉、影响薄弱区域, 以致使经过开孔后的普通方舱结构体设

收稿日期: 2016-01-17; 修回日期: 2016-02-18。

作者简介: 袁企乡(1958-), 男, 上海市人, 大学, 工程师, 主要从事机电结构集成技术方向的研究。

计与制造后的电磁兼容指标大幅下降，只达到 28 dB 左右指标，这对于重要的测量、控制系统的电磁兼容性指标来说是不符合的。为此要研制开发出移动方舱式测发控系统，对在舱体上所开出门、窗、电源、信号孔口、空调孔口等区域就要进行专门、特别设计与处理，并采取针对性的措施。该测发控系统则需要在设计中就要对舱体结构的电磁兼容性进行全面、仔细研究与分析，从设计与制造上对结构体上各个部分进行电磁兼容性性能的有效设计^[2]，以保证系统在实际工作全过程中各项性能、指标能够正常、稳定、可靠地工作，进一步提高我们航天运载火箭产品的安全性与可靠性。

2 电磁兼容设计方法

2.1 设计原理

根据 EMC 的原理，要使产品实现电磁兼容，就必须抑制它的无用电磁发射，使它不产生对环境构成干扰；同时能承受的电磁干扰；并且要求产品自身具备一定的抗干扰能力，在规定的电磁环境下能够正常工作。这包括有屏蔽技术、接地、搭接技术、电缆布线、设备布局、滤波技术等是该设计中基本应用技术。在实践中，我们通过状态分析——设计措施——实施效果三个步骤来进行研究设计，分析系统所处的电磁环境，制定电磁兼容性的大约值来确定域度，充分利用有限空间、频谱资源，使得各种用电设备及系统在公共电磁环境中共存^[3]。重点研究分析了使用屏蔽技术、铜材丝网充填弹性材料、系统接地和搭接技术应用方法（趋于零电位、零阻抗结构体），针对舱体上各个门、孔口连接处连接区域的复杂空间进行充分、有效充填，对孔口各处缝隙的电磁泄漏干扰源进行有效抑制、阻挡。以电磁场理论为依据，以试验结果为基础，中间包括涉及电波传播、地磁耦合、信号分析地磁测量、材料学等技术。

2.2 设计技术与方法

2.2.1 电缆布线和集中屏蔽处理

为降低工作场坪环境对舱体设备的电磁场辐射影响，在舱体的线缆布线上采取了强、弱电缆分开且分别走入电缆金属线槽内，且进行有效固定，线槽上方加盖金属槽盖，上、下槽连接并接通舱体地端，这样使整个强、弱电缆索与外部空间起到了良好屏蔽作用，同时有效固定了电缆缆索，见图 2、3。

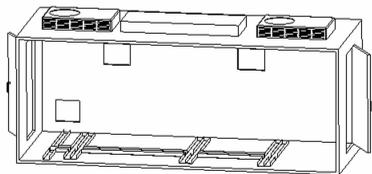


图 2 方舱强、弱电缆槽示意图

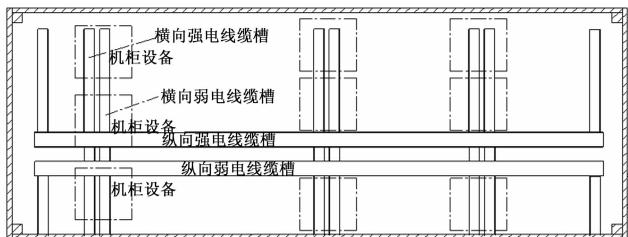


图 3 舱体强、弱电缆槽平面布置图

板同时是系统操作人员的工作平台活动面，使舱体内部设备与下部电缆体之间得到进一步的隔离与电磁屏蔽的功能，见图 4。

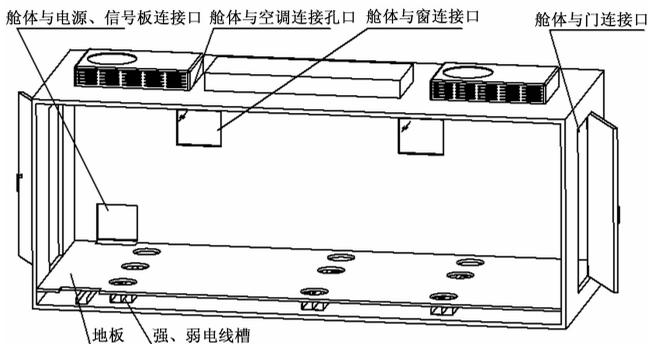


图 4 方舱线槽上的地板示意图

2.2.4 使用铜材丝网弹性材料对孔口、缝隙充填处理

舱体通常是包含连接器孔口板、门窗孔口、空调孔口等，所有孔口的连接区域的连接处是外界电磁场源最容易辐射至舱内设备薄弱环节，以致无法达到电磁兼容的要求，满足不了系统工作的环境条件。为此根据电磁屏蔽原理，重点采取多种电磁屏蔽设计技术，使用铜材丝网弹性材料对门洞、孔口、缝隙进行充填处理，针对连接器孔口板、门、窗孔口使用嵌口结构设计，并使嵌口表面周围进行导通处理，使之与舱体同电位^[4]，见图 5。

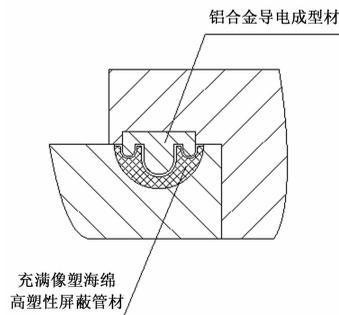


图 5 嵌口结构示意图

2.2.2 舱体上窗玻璃的选用

目前普通窗体玻璃的材料成分是硅酸盐 (SiO₂)，是无色透明，但是该玻璃对电磁场没有抑制、阻挡能力，为此要使方舱体具有电磁屏蔽功能，就要使用具有透明且能电磁屏蔽的材料。我们经过研究比对，选择使用了同样厚度尺寸的铅化玻璃材料来替代普通玻璃，获得近似金属体一样的电磁屏蔽功能，同时又有玻璃本身透光功能。

2.2.3 敷设防静电与屏蔽功能地板

在线缆槽上方敷设有 3 公分厚防静电与屏蔽的地板，该地

2.2.5 对舱体空调口设计专用波导器

针对顶置空调口径大电磁源辐射至舱内设备的问题，我们特别采取专门设计了波导器来对电磁场干扰源进行屏蔽，使得空调与舱体连接口区域的电磁场得到有效抑制，达到预期作用，其结构设计成型见图 6。

2.3 舱体系统设计处理范围

在工程设计的实际中，经过对舱体结构的电磁兼容实验、

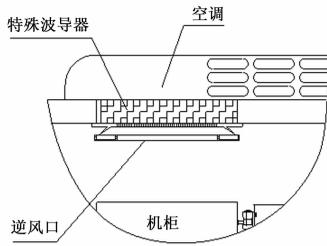


图6 空调孔口波导管示意图

测试后得出,舱体结构中的舱体与门、窗、电源、信号孔口、空调孔口的连接区域是设备、系统电场、磁场内、外影响最大的区域,以致往往造成设备、系统在电磁兼容环境试验中通不过,系统设备工作不稳定、不达标。为此针对该突出情况,我们重点对舱体与门、窗、电源、信号孔口、空调孔口的连接区域进行电磁兼容设计处理,对各个部分的接地连接设计处理,从根本上对辐射源进行充分阻隔与衰减。

2.4 系统设计的技术应用

目前在舱体结构中采取的技术通常有:1.屏蔽技术;2.接地、搭接技术;3.布局、布线技术;4.滤波技术。屏蔽技术就是采用金属板材与金属线材编织网对需要处理的设备体进行封闭,具体设计与选材需依据电场、磁场的波频率、强度进行分析计算;接地、搭接技术就是采用把设备体壳体与舱体用金属导线连接导通,使俩体电平相等,并达到接地电阻 $\leq 5\text{ m}\Omega$;布局、布线技术就是采用把设备体依据电场、磁场的波频率、强度特征进行相应分布,力求相互影响降到最低;滤波技术就是对设备体中的电源与电路加入滤波电路部分,从设备电路内部对电磁场进行抑制与降低;上述不同的设计处理技术依据电磁兼容原理和工程上制造实际条件来综合处理与应用。

3 设计试验结果与分析

方舱结构经过上述系统设计与工程制造处理以后,整个舱体内结构的电磁兼容环境经试验测试,其EMC均达到 $\geq 45\text{ dB}$ 指标,满足整个测发控系统设备在集成之后的环境工作要求,确保了航天测控系统始终处于正常工作环境中,系统的可靠性与性能指标有很大提高。

计算仿真分析如下:

(上接第260页)

- [5] 刘荣,王立平,陈杨. GPS接收机抗干扰性能仿真研究[J]. 无线电通信技术, 2014, 01: 58-60, 64.
- [6] 穆旭成,张鹏,李焯. 卫星干扰定位技术的最新发展动态[J]. 中国无线电, 2014, 12: 58-59, 64.
- [7] Kaplan E D. GPS原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [8] 李建文,赵勃,张宗麟. 基于软件GPS平台的高动态数字中频信号模拟与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 03: 308-312.
- [9] 蔡艳辉,胡锐,程鹏飞,等. 一种基于FPGA+DSP的北斗兼容型高精度接收机系统设计[J]. 导航定位学报, 2013, 02: 1-6.
- [10] 喻红婕,潘成胜. GPS阻塞式压制干扰技术的分析与实现[J]. 沈阳理工大学学报, 2006, 01: 65-67.
- [11] 黄宇达,王俊,找红专,等. 一种基于宽带噪声干扰的GPS信

$$R_t = 20\lg \frac{|(1+K)^2|}{4|K|}$$

R_t : 缝口反射损耗; k : 波阻抗与孔口入射波阻抗比; $K = \frac{g}{\pi \cdot r}$; r : 屏蔽体与场源的距离 (cm); g : 孔口缝隙的长度 (cm)

得出: $K = \frac{g}{\pi \cdot r} = 5800 / (3.14 \times 11) = 167.9$ 代入; 代

$$\text{入 } R_t = 20\lg \frac{|(1+K)^2|}{4|K|} = 44.6\text{ dB}$$

系统二级环境电磁屏蔽指标: 衰减 $\geq 40\text{ dB}$, 即在150 K~10 GHz频段下, 衰减 $\geq 40\text{ dB}$ 。

4 结论

航天器设备系统构造复杂、设备密集,信号、供电系统要求特殊,电路、设备之间、电缆与设备等各种干扰源随处出现。地面设备、支持设备以及航天器研制、发射、运行的地面与空间电磁环境十分复杂。为使设备系统能在工作期间确保正常工作,就必须实施电磁兼容设计与控制的工作。深入研究电磁兼容的技术,以实现机、电、热、电磁兼容一体化设计^[5],并做好电磁兼容性测试,达到系统环境的电磁兼容性要求,保证设备系统的安全与可靠,所以电磁兼容设计与应用是航天领域中的重要技术。

通过运载火箭地面测发控系统方舱结构中的电磁兼容技术设计与应用的实现过程,为今后该方面设备系统的研究与设计积累了宝贵经验与案例,同时也为航天产品研制工作的同行在方舱结构电磁屏蔽设计中提供了借鉴与帮助。从中可以看到,今后方舱电磁兼容性技术研究与应用的需求是系统设计工作中的重要部分,必须会从系统中得到进一步重视与加强,应用前景会更加深入和向前发展。

参考文献:

- [1] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [2] 白同云. 电磁兼容设计实践[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [3] 毛勤俭. 方舱设计手册[M]. 河海大学出版社, 2012.
- [4] 赵阳. 电磁兼容工程入门教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [5] 刘兴俊. 电子设备结构设计中的电磁兼容[J]. 中国新技术新产品, 2015, 6: 12-16.
- 号检测干扰方案设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(18): 4409-4412.
- [12] Napolitano A, Perna I. Cyclic spectral analysis of the GPS signal[J]. Digital Signal Processing, 2014, 33: 13-33.
- [13] 张丹,谭惠轩. 一种自适应GPS位同步方式[J]. 电子技术与软件工程, 2014, 05: 54-55.
- [14] Qian Z H, Liu D. Survey on data transmission in bluetooth technology[J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 143-151.
- [15] Wang R, Yao M, Cheng Z, et al. Interference cancellation in GPS receiver using noise subspace tracking algorithm[J]. Signal Processing, 2011, 2(91): 338-343.
- [16] 张瑞,孙希延,纪元法,等. 基于FPGA的三模卫星信号模拟器硬件平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 12: 3371-3373.