

文章编号 1004-924X(2015)增-0447-06

## 车载光电设备电磁兼容的设计

乔 健\*, 施 龙, 张文豹, 薛向尧, 张 磊, 曹立华

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为提高车载光电设备在复杂电磁环境条件下的抗电磁干扰能力,给出了电磁兼容的设计思路及相应的抗电磁干扰的方法,以保证其稳定可靠的工作。介绍了常规车载光电设备的组成。从光电设备的结构和电气方面分别进行了电磁兼容设计,重点对防护厢体和光电设备的抗电磁干扰提出了具体措施及方法。针对以往光电设备导线间存在相互干扰和抗强电磁场干扰能力弱的特点,详细分析了导线选择、敷设及接地模式等对电磁防护的重要作用,并给出了具体的抗电磁干扰的措施。在 RE102(10 kHz~18 GHz 电场辐射)电磁环境下进行了测试,结果表明:采取了电磁兼容设计的车载光电设备能够在要求的电磁环境条件下正常工作,提出的方法可以为类似光电设备的电磁兼容设计提供一定的借鉴和参考。

**关 键 词:**车载光电设备;电磁兼容;厢体;电磁屏蔽

**中图分类号:**TH745 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0447

## Design of electromagnetic compatibility for vehicular optic-electronic equipment

QIAO Jian\*, SHI Long, ZHANG Wen-bao, XUE Xiang-yao, ZHANG Lei, CAO Li-hua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: qiaojj99065@163.com

**Abstract:** The design method of electromagnetic compatibility of the vehicular optic-electronic equipment and corresponding electromagnetic anti-interference measures were proposed to improve its electromagnetic interference ability and operating reliability at the complicated electromagnetic environment. The components were introduced based on the vehicular opto-electronic equipment in this paper. At the same time, the electromagnetic compatibilities of the mechanism and electricity were designed, including opto-electronic equipment and the shielding shelter. To overcome the electromagnetic interference between wires in interconnect cables, the electromagnetic anti-inference measures, such as the cable choice, cable layout and earthing mode were introduced emphatically. According to the characters of weak electromagnetic interference resistance in the poor electromagnetic environment, the specific settlement measures were proposed in detail. Finally, the design method of electromagnetic compatibility was discussed as well. The tests were performed at an electromagnetic environment of

收稿日期:2015-04-05;修订日期:2015-05-10.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

RE102(10 kHz-18 GHz field radiation). Experimental results indicate that the vehicular opto-electronic equipment can work successfully and reliably in this condition above mentioned. It provides important design methods of the electromagnetic compatibility for the kindred opto-electronic equipment and can satisfy the system requirements of strong anti-jamming and stabilization.

**Key words:** vehicle optic-electronic equipment; electromagnetic compatibility; shelter; electromagnetic shielding

## 1 引言

随着电子技术的快速发展及其在光电领域的广泛应用<sup>[1]</sup>,出现了各种多功能的综合光电系统,其中以高精度捕获电视和红外跟踪测量传感器集成为一体的光电设备能够实现对目标的全天候监测,同时具有分辨率高、隐蔽性强,可输出直观、清晰的图像等优点,在跟踪测量领域发挥着重要的作用。然而光电设备内部存在结构精密,电路复杂,强弱信号交叉等特点,容易受到干扰和引起干扰,尤其是在电磁环境日趋恶化的现代战争上,电磁干扰势必成为光电设备的主要干扰形式,为此光电设备抗电磁干扰能力已成为研制过程中不可或缺的重要环节<sup>[2-3]</sup>。

由于车载光电设备具有独特的运输性和机动行驶性能,能够适应多变的战场环境,可随时随地展开工作,在现代战场上具有很强的生存能力,已受到了广泛关注<sup>[4]</sup>。目前国内外有关光电设备电磁兼容的研究基本停留在模块单元上,就整个车载光电设备电磁兼容的系统研究还处于探索阶段<sup>[5-6]</sup>。本文从车载光电设备的组成出发,就车载光电设备的结构、电气及工艺等方面给出了电磁兼容设计的具体措施及相应方法,对车载光电设备在恶劣电磁环境条件下功能实现以及系统效能的充分发挥提供了保障。

## 2 车载光电设备组成

车载光电装备作为一种自动化程度较高的光电一体化设备,主要由载车、防护厢体、光电设备、传输线缆、控制机柜等组成<sup>[7]</sup>,整个车载光电设备上既有电磁干扰源,又存在电磁敏感源,如图 1 所示。

其中载车主要是为光电设备提供灵活机动的运输平台;防护厢体主要是为光电设备起相应的

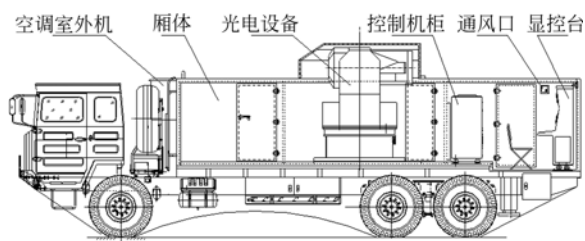


图 1 车载光电设备组成示意图

Fig. 1 Composition of vehicular optic-electronic equipment

防护作用并提高操作人员的舒适度;光电设备工作时露出舱外,实现对目标的清晰成像;显示控制机柜安装在厢体内,是光电装备的运动控制、状态调整、信息传输与处理、信息显示以及与其他相关设备通讯的处理中心。

车载光电设备按照模块化理念设计,为此电磁兼容性设计从各模块分别进行,基本从结构、电气、工艺及装配等方面展开相应的电磁兼容设计<sup>[8]</sup>。

## 3 结构电磁兼容设计

车载光电设备在结构方面的电磁兼容设计分别从厢体、光电设备和显控机柜等方面进行。

### 3.1 厢体

厢体作为移动厢式工作间,不仅要具有一定的强度和刚度,同时要求有良好的防护能力、密封性能和运输灵活性能等<sup>[9]</sup>。

厢体结构的电磁兼容设计主要考虑减小接缝,各壁板按照整张蒙皮的形式进行设计,同时要防止内外蒙皮的导通。为此厢体的电磁兼容设计主要考虑厢体的材料,连接形式、舱门和相应门、孔口的设计。

#### 3.1.1 材料选择

对于电磁环境在 0.15 MHz~10 GHz 之间屏蔽 60 dB 要求时厢体内、外蒙皮材料通常选用

铝板;在 10 KHz~20 GHz 屏蔽 60 dB 要求时厢体内、外蒙皮选用冷轧钢板。

### 3.1.2 孔口屏蔽设计

在厢体的门、窗及孔口布置上,尽可能减小门、窗和孔口数量。其中电源孔口和信号孔口应分开布置在不同壁板上,两孔口的距离应尽可能延长;对应通风口通常与工作门也分别布置在不同的壁板上,与电源孔口保持最大距离;同时所有孔口应尽可能远离厢体的棱边和拐角接缝。

基于厢体门与门框的缝隙是电磁泄露的重要通道,在门框和门体边框的型材必须进行相应表面处理,通常防护 40 dB 屏蔽要求的型材只需在表面进行导电氧化处理;当屏蔽性能要求更苛刻时型材必须进行镀镍磷合金处理,以保证接触面有较好的导电性和耐磨性。在闭合状态下门与门框之间通过金属丝网导电衬垫紧密接触,厢体蒙皮与门框及门体边框则通过加屏蔽衬垫或直接焊接的方式连接。

厢体上采光窗与厢体之间通常采用压接拉铆的连接形式。在外层安装钢化玻璃,内层为屏蔽玻璃,装配时只需把玻璃周围的铜网与厢体内壁进行导通处理即可。

对于厢体壁板上的通风口通常采用安装波导通风窗的方式进行屏蔽。屏蔽效果主要取决于波导窗几何参数的优化设计以及波导窗与厢体内蒙皮之间所加衬垫或焊接方式的处理工艺来决定。

波导通风窗的设计主要按照电磁波频率低于波导的截止频率实施。通过电磁波在通过截止波导通风口传输时产生很大衰减而将截止频率以下的电磁干扰抑制。通常采用六边形蜂窝状波导窗。

对应波导窗截止频率为:

$$f_c = 15 \times 10^9 / W, \quad (1)$$

式中:W 为截止波导管内壁外接圆直径(cm); $f_c$  为波导管的截止频率(Hz)。

对于低于截止频率的电磁波在波导中传播时,波导管的衰减损耗  $S_A$  为:

$$S_A = 1.873 f_c \cdot l \times 10^{-9} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad (2)$$

式中: $f$  为电磁波频率(Hz); $l$  为波导管长度(cm)。

波导管的截面尺寸决定着截止频率,波导管长度又能增加额外损耗,提高屏蔽效能。因此在

设计时必须先确定截止波导和频率,计算出要求的截止波导管长度。通常在屏蔽低频磁场时波导管宜选用钢质材质,在实际使用中以选用铝合金材质的波导管居多。

### 3.1.3 空调屏蔽措施

车载光电设备的环控措施主要通过分体式空调来实现,为此空调的气管、液管、排水管、室内机与室外机的电源线和信号线为电磁屏蔽设计的重点。

一般车载空调的气、液管材质均采用屏蔽性能良好的铜管,在铜管穿舱时加装特制的簧片使铜管紧贴舱壁,实现可靠的电连接。

排水管采用波导形式,但必须考虑排水管与厢体内外蒙皮之间的电气导通。

对于信号线与电源线采用穿墙式的安装形式,连接时先经滤波器再引入连接。

## 3.2 光电设备

由于光电设备上对应很多的电子元器件分别布置在控制柜和电控箱内,同时光电设备与控制柜及电控箱分别安装在不同的厢体内,彼此之间通过大量的电器连接线和信号线实现相互传递,为此控制柜和电控箱上需开设有相应的孔口或缝隙来满足内部电器件通风散热以及线缆的传输,但孔口和缝隙的开设同样会带来相应的电磁泄露,为此机箱及机柜上进排风孔口及缝隙的合理设计是电磁兼容设计的重点。

对于控制柜和电控箱的电磁兼容设计需要综合考虑所选材料的强度、防腐能力以及产品重量和体积等要求。在相应控制柜及电控箱的排风孔口添加铝材质的蜂巢式屏蔽通风板来隔离电磁泄露,电控箱采用铝合金材质作为屏蔽材料,并且壁厚在满足散热导槽效率及重量要求的前提下尽可能增加厚度;尤其是电源机箱的壁厚应适当比控制机箱的壁厚大,而对于屏蔽薄弱的部位可通过添加钢质材料来提高电控箱的屏蔽性能。

由于控制柜及电控箱上的孔洞缝隙、电缆的穿线孔洞和缝隙在屏蔽体上容易形成导电不连续,产生电磁泄漏,因此孔口、缝隙的结构尺寸也电磁兼容设计的重点,通常缝隙泄露的电磁场强度计算公式为:

$$H_g = H_0 e^{-\pi \frac{t}{g}}, \quad (3)$$

式中: $H_g$  为缝隙中泄露的磁场强度; $H_0$  为缝隙处被屏蔽的磁场强度; $t$  为缝隙深度; $g$  为缝隙

宽度。

电磁泄漏随着缝隙深度增大或者宽度减小而降低。一般控制柜及电控箱上金属板之间尽可能采取闭合缝隙,以保持电气连续性,对于不拆卸的配合面通常采取整体铸造或者焊接的加工方式使结合面导通;但对于要经常拆卸的连接接缝,如盖板结合面则通常采用螺钉紧固连接方式,同时连接面的不平整或紧固导致盖板的翘曲变形等也容易在配合面产生缝隙,需要通过减小连接螺钉间距及在周围加高导电率和弹性好的衬垫来保持电磁场连续性,对于电缆连接器与金属板结合处以及按键开关、操纵杆等电气件与机柜的结合面,均通过加装导电橡胶、导电密封条提高屏蔽性能;对于活动式接触则采用铍青铜压簧片代替导电衬垫,并且压簧片的长宽比不大于 5,同时在装配时对压簧片应施加有足够的压力,使其在传递至结合面时依然能够保持有足够的接触强度,保持结合面的电气连续性。

对于光电设备结构在电磁兼容设计时整个外壳采用整体铸造或分体焊接后组装成一体,在材质上外壳大多以金属材料铝、铁为主,此时整个外壳相对封闭具有较好的抗电磁干扰能力;对于外露的模块单元在结构上同样采用相对封闭的金属外壳,相应的电气和信号走线隐藏在壳体内部,因此壳体内部电器和信号走线及形式成为电磁干扰及耦合控制的关键。

## 4 电气电磁兼容设计

光电设备的电气信号主要通过线缆来实现跟踪设备与指控设备之间互传,同时在设备内部预留有相应走线槽或走线带来隔离不同信号骚扰,以避免线间串扰、地回路干扰和辐射干扰的出现,因此在导线选择和相应的敷设方式以及合理接地是电气电磁兼容设计的重点<sup>[10]</sup>。

### 4.1 导线选择

导线选择是按照各自的用途选用相应电缆线。对于外接电源通常选择橡胶套软电缆;射频、脉冲及其它高频信号一般选用同轴电缆传输;相应数字信号则根据信号特征及阻抗匹配特性确定相应传输形式,其中优先选择同轴电缆、双绞线或带线;针对单点接地音频线路的特点可采用双绞线,

而多点接地的线路以及音频和电源线路则采用屏蔽导线;针对电磁隔离度要求较高的导线则采用屏蔽双绞线形式。

### 4.2 导线敷设

导线敷设是将电源线和信号线分开布设,同时将输入、输出线也分别隔离;对于敏感的电纜在布设时要远离电源变压器和其它高功率原件;同时根据传输信号的电平、敏感性及干扰特性等因素对电缆进行分类搭配,有效减少电磁干扰和电磁耦合;对于平行放置的相邻扭绞线,可根据不同的节距进行设计,并且彼此的节距差按偶数倍节距选取,以抵消相互的感应电流,减少电磁干扰及耦合。

在导线敷设时还要尽量避免不同环路面积的重合度,尤其是受扰电路与回线要尽量靠近,同时要结合大地的屏蔽作用,将信号线贴“地”布设。对于视频传输线缆在制作时要安装屏蔽环,保证图像的传输质量。

在强电磁场环境条件下,将设备导线铺设在圆筒型金属管道中来避免强电磁场的干扰。圆筒型金属管道的屏蔽衰减为<sup>[11]</sup>:

$$SE = 20\lg(ch\gamma t) + 20\lg\left[1 + \frac{1}{2}\left(N + \frac{1}{N}\right)th\gamma t\right], \quad (4)$$

式中:  $N = Z_d / Z_m$ , 其中  $Z_m$  为金属屏蔽体的波阻抗,对于钢来说,  $Z_m = 0.483 \times 10^{-9} \sqrt{f}$ ;  $Z_d$  为空气波阻抗,在近场条件下按照  $Z_d = 7.9 \times 10^{-9} fr$ ,  $t$  为金属层的厚度。

### 4.3 接地设计

车载光电设备的驻车工作位置不固定,具有较高的机动性能,同时光电装备各分系统间的接口复杂,涉及频域较宽,接地连接不当很容易出现彼此干扰,为此接地形式设计是设备能否稳定工作的关键。

在接地设计时尽要可能避免地回路、共阻抗耦合和低频地环路的存在,一般通过并联接地的方法将各分系统的地线接到公共单点地,有效避免单点接地引起的共阻抗耦合,保证高频电路(视频图像处理)有良好的局部接地,如图 2 所示。

对控制机柜的接地设计通常是将各机箱电源地、信号地与机壳地相连,并就近搭接到各机箱后部接地线条上,通过机柜侧面安装搭接的机壳接

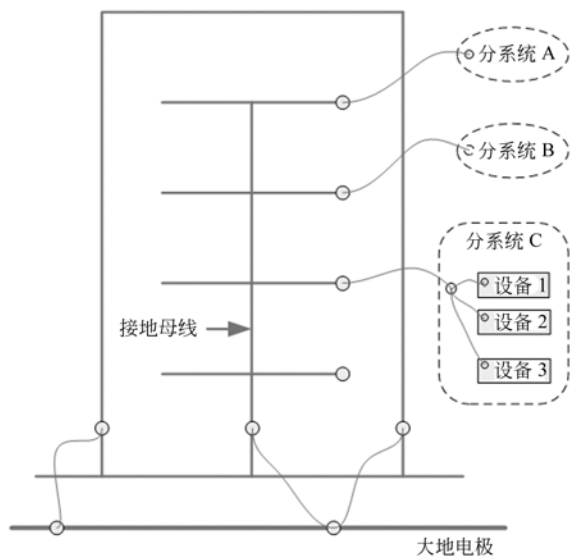


图 2 并联单点接地示意图

Fig. 2 Schematic diagram of earthing on the parallel single point

地母线,安全汇入大地电极。尤其是机箱外壳应采取良好的接地措施,屏蔽高频的电磁场。

屏蔽电缆的接地方式由其传输信号的频率决

定。低频信号的屏蔽层通常在靠近公共参考端单点接地;传输中、高频信号的屏蔽电缆,多采用屏蔽层两端接地方式。同时当电缆长度大于工作信号波长 0.15 倍时,采用工作信号波长 0.15 倍间隔的多点接地形式,并且该屏蔽层应固定,避免由振动或摩擦产生静电干扰。

## 5 结 论

车载光电设备电磁兼容性能是光电设备稳定发挥出自身效能的关键。本文按照车载光电设备的组成,就其在结构方面最为迫切需提高抗电磁干扰的防护厢体和光电设备分别给出了具体的电磁兼容设计思路及对应的解决措施;对电气上相应导线选择、敷设及接地方面提出了具体抗电磁干扰方法,有效弥补了以往车载光电设备容易出现导线间彼此的电磁干扰和抵御外界强电磁干扰源能力差的劣势,在采取具体电磁防护措施后车载光电设备能够稳定工作,同时在 RE102(10 kHz~18 GHz 电场辐射发射)电磁环境下进行测试时,光电设备性能良好、满足使用要求,为类似光电设备电磁兼容设计提供一定的借鉴和参考。

## 参考文献:

- [1] 张春荣. 电子设备电磁兼容设计研究[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(2): 10-15.  
ZHANG CH R. Study on EMC design of electronic equipment[J]. *Fire Control Radar*, 2007, 36(2): 10-15. (in Chinese)
- [2] 韩红霞, 司国良, 曹立华. 光电跟踪设备数字视频图像信息光纤传输系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1219-1225.  
HAN H X, SI G L, CAO L H, *et al.*. Design and digital video signal fibre transmission system in optic-electronic tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1219-1225. (in Chinese)
- [3] 许中胜, 耿海鹏, 段育红, 等. 军用光电设备电磁兼容性研究[J]. 光学与光电子技术, 2007, 5(3): 72-75.  
XU ZH SH, GENG H P, DU Y H, *et al.*. Study on Electromagnetic Compatibility of Military Optoelectronic Equipment[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(3): 72-75. (in Chinese)
- [4] 高云国, 王超, 江展洪, 等. 光电跟踪设备载车平台重复定位精度[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1322-1330.  
GAO Y G, WANG CH, JIANG ZH H, *et al.*. Re-orientation accuracy for vehicle-born photoelectric tracking equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1322-1330. (in Chinese)
- [5] 孟范江, 郭立红, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光系统的电磁兼容设计[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 236-241.  
MENG F J, GUO L H, YANG G L, *et al.*. EMC design of high-power TEA CO<sub>2</sub> laser system[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 236-241. (in Chinese)
- [6] 雷翔飞, 张新朝, 李志攀. 某红外跟踪装置的电磁兼容设计及改进[J]. 红外技术, 2009, 31(10): 607-609.  
LEI X F, ZHANG X CH, LI ZH P. The EMC Design and Amelioration of One Infrared Tracking Equipment[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 607-609. (in Chinese)

- [7] 姜伟伟,高云国,冯栋彦,等. 大型光电设备基准平面自动调平系统[J]. 光学精密工程, 2015, 17(5): 1039-1045.  
JIANG W W,GAO Y G, FENG D Y, *et al.*. Automatic-leveling system for base-plane of large-size photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1039-1045. (in Chinese)
- [8] HCINZ-DIETRICH B,CHRISTIAN S. Numerical electromagnetic field analysis for EMC problems [J]. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 2007, 49(2): 253-262.
- [9] 朱静,尹妍. 电磁兼容设计在机动式指控系统方舱中的应用[J]. 电子机械工程, 2010:26(2) :5-8.  
ZHU J,YIN Y. Application of EMC design in mobile C<sup>3</sup>I system shelter [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2010:26(2):5-8. (in Chinese)
- [10] 何宏,张宝峰,张大建,等. 电磁兼容和电磁干扰[M]. 北京:国防工业出版社,2007,1-23.  
HE H, ZHANG B F, ZHANG D J, *et al.*. *EMC and EMI*[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2007,1-23. (in Chinese)
- [11] 高攸纲. 屏蔽与接地[M]. 北京:北京邮电大学出版社. 2004. 21-23.  
GAO Y G. *Shield and earthing* [M]. Bei jing: Bei jing University of Posts and Telecommunications Press. 2004. 21-23. (in Chinese)

#### 作者简介:



乔 健(1980—),男,山西忻州人,副研究员,2008 年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电仪器设备的结构设计与研究。E-mail: qiaojj99065@163.com