

· 电路与控制 ·

## 电子设备电磁兼容性分析与设计

张秋菊, 杜江

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**介绍了电磁兼容性和电磁兼容控制策略。结合各阶段电磁兼容工作内容,对电磁兼容预计分析的原理、使用时机及使用方法进行了研究。详述了接地、搭接、布局、布线、屏蔽、滤波和静电雷击防护等电磁兼容控制技术,从专业角度提出了切实有效的工程设计方法,并结合应用进行了说明,对设备安装布局、电缆布线给出了基本应用原则,就如何提高设计人员的电磁兼容设计水平提出了具体的建议。

**关键词:**电子设备;电磁干扰;电磁兼容

中图分类号:TN911.4;TM15

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)03-0061-04

## Analysis and Design of EMC for Electronic Equipment

ZHANG Qiu-ju, DU Jiang

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The electromagnetic compatibility (EMC) and the control strategies of EMC are introduced. The principle, occasion and method of the prediction analysis for EMC are introduced, then the technologies of EMC, including grounding, lap joining, arrangement, wiring, shielding, filter, lightning protection are analyzed. The effective engineering design is proposed from the professional point of view, and is described based on the applications. The basic principles of equipment and cable arrangements are introduced. The advices on how to improve the EMC level for designers are proposed.

**Key words:** electronic equipment; electromagnetic interference; electromagnetic compatibility (EMC)

现代信息社会涌现出多种大型电子设备。在有限的平台和空间内,电子设备种类越来越多,密集度逐渐增加,工作频率越来越高且频带错综交叠,设备灵敏度也不断提高,这些因素都造成了电磁环境异常复杂和恶劣,电子设备的电磁兼容性问题因此也显得尤为突出。

电磁干扰虽然不会破坏电子设备本身,但会干扰设备的正常工作,可能引起仪表或控制系统发生瞬间故障,关系到设备性能下降、关系到系统成败和安全。因此,对电子设备电磁兼容的研究越来越重要,电磁兼容问题成为系统设计和使用中必须要面对的问题<sup>[1]</sup>。

### 1 电磁兼容性及控制策略

电磁兼容是设备、分系统、系统在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。包括以下两个方面:一是设备、分系统、系统在预定的电磁环境中运行时,可按规定的裕度实现设计的工作性能,且不因电磁干扰而受损或产生不可接收的降低;二是设备、分系统、系统在预定的电磁环境中正常地工作且不会给环境中其他设备带来不可接收的电磁干扰。

电磁兼容控制是一项系统工程,应在系统设计、研制、生产、使用与维护的各阶段都充分予以考

收稿日期:2011-04-29

作者简介:张秋菊(1974-),女,山东临清人,工程师,主要研究方向为光电工程技术。

虑和实施,科学而先进的电磁兼容工程管理是有效控制技术的重要组成部分。实现电磁兼容的有效手段就是阻隔各种耦合通道。在电磁兼容控制方法设计上,除了采用传输通道抑制技术:如屏蔽、接地、搭接、合理布线等方法,还可以采取回避和疏导技术,包括空间方位分离、时间闭锁分隔、频率划分与回避和电气隔离等措施。在解决电磁干扰问题的时机上,应该由设备研制后期暴露不兼容问题而采取挽救修补措施的被动控制方式,转变成在设备设计初始阶段就开展预测分析和设计,预先检验计算,并全面规划实施细则和步骤,做到防患于未然。把电磁兼容设计和可靠性、维修性设计与产品的基本功能设计和结构设计同步进行,并行开展。

## 2 电磁兼容设计

### 2.1 基本标准要求

我国的电磁兼容标准化在20世纪80年代以后得到了高度重视,各行各业开始编制相关产品的电磁兼容标准,到2000年已经发布了80多项相关的国家标准。电磁兼容标准从内容上分,有基础标准、通用标准和产品类标准和专用产品类标准;从应用范围分,有军用标准和民用标准;从执行角度可分为推荐执行标准和强制执行标准。制定电磁兼容标准可以统一协调电子系统、分系统和设备的各种技术状态。执行标准可以减少设计、试验和管理中的重复工作,收到提高经济效益的效果。电磁兼容标准具有权威性和可裁剪性。

作为设计人员,首先要弄清设备属于哪类产品,应执行哪个标准。测试前应该了解测试标准的技术内涵和试验项目。GJB151A-1997和GJB152A-1997是通用的电磁兼容标准和测量方法,是从事电磁兼容设计和测量的重要依据。IEC61000系列标准涉及电磁环境、发射、抗扰度、试验程序和测量技术等规范。相关的行业测量标准,如GB4859-84《电气设备的抗干扰特性测量方法》、GB12190-90《高性能屏蔽室屏蔽效能测量方法》也对电磁兼容提出了具体测量方法。

### 2.2 分析和设计

随着大规模集成电路的飞速发展和多功能、高性能、低成本的工业化发展需求,具有微处理器系

统和离散控制系统的电子设备已大量应用。这类电子设备应用的电磁兼容环境越来越复杂,面临着众多的内部和外部干扰,内部干扰包括:电源线引入系统的干扰、共用公共地线形成的干扰、信号通过电源线、地线以及传输导线耦合干扰等。电子设备面临的外部干扰包括:空间电磁波干扰、来自雷电大气层的自然干扰、工业电网供电设备产生干扰、外部大功率设备产生磁场耦合干扰等。这些干扰的存在,势必影响设备的正常功能,因此,必须采取有效的措施,提高抗干扰能力,实现电磁兼容。

一些自动化程度要求较高的设备,许多是由微处理器系统和离散控制系统组成的,包括控制模块、通讯模块、电源模块等多个功能模块。下面以此类设备为例,有针对性地探讨和分析电磁兼容设计方法,并给出具体措施,提高设备的电磁兼容性。

#### 2.2.1 预测分析

电磁兼容预测分析技术是一种通过理论计算对电子设备或系统的电磁兼容性进行分析评估的方法。这项技术通常用于系统或设备研制的方案设计阶段。预测的目的是分析不兼容的薄弱环节,评价系统兼容的安全裕度,并为方案修改、防护设计提供依据。当系统和设备的功能设计方案初步形成后,就可以根据电磁兼容性要求和指标,对方案开展电磁兼容预测和分析,进行电磁耦合仿真计算,分析可能存在的干扰源和敏感设备的电磁敏感度,计算干扰程度,发现不兼容问题并在此基础上进行电磁兼容性检验和防护设计。它具有计算快、成本低、参数修改方便,可以多次反复计算、预测成功率较高等突出优点,因此预测技术受到了高度重视并得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

电磁干扰的仿真计算要建立干扰源模型、传输模型和敏感器模型。建立模型要考虑设备的工作环境、工作体制。干扰源模型的建立重点应以无意辐射干扰模型为主;敏感器模型建立重点应以模拟数字电路敏感模型为主;传输特性模型建立重点考虑3种情况,即导线对导线感应模型、孔缝泄漏场模型和机壳屏蔽效能模型。预测分析的数学方法主要有解析法、近似法和数值法。目前大多通过使用预测分析软件完成预计工作,节省计算的时间和人力。典型预测软件有法国EADS公司开发的专业系统级电磁场分析设计仿真软件EMC2000、IDS公司的ADF-EMS软件、白俄罗斯国立信息与无线电大

学编制的EMC Analyzer软件。

在对2个设备间的电磁干扰分析的过程中,首先要分析2个设备所在空间的电磁环境有无外来的辐射干扰;接着分析2个设备的相互联系有无相互连接电缆,有无共同电源,有无公共接地平面,是否通过设备壳体构成接地环路;再进一步分析设备内部电路辐射源、传导源和敏感电路。系统内预测分析还包括设备壳体泄漏影响。预测分析首先要选择干扰源或敏感器,列举出可能存在的所有的耦合途径,然后对每个耦合途径建立预测分析方程。在此基础上考虑所有干扰源和所有敏感器,完成对整个系统的预测分析。预测分析方程是预测技术的理论基础,用数学方程式描述了单个干扰源作用于单个敏感器的电磁干扰过程。预测分析的基础方程如下

$$M=P(t,f,\theta,r)-S(t,f,\theta,r) \quad (1)$$

$$P(t,f,\theta,r)=G(t,f,\theta)+T(t,f,\theta,r) \quad (2)$$

式中, $M$ 为电磁干扰裕度; $P$ 为电磁干扰传播到 $r$ 处的信号函数; $G$ 为干扰源产生的干扰信号; $T$ 为传输函数; $S$ 为敏感器的敏感度阈值; $t$ 表示时间; $f$ 表示频率; $\theta$ 表示方位; $r$ 表示距离。

预测分析的最终目的是看敏感器受到干扰后是否影响工作。 $M$ 量值大小能够表明干扰的严重程度,也可以反映兼容程度。当 $M$ 大于0 dB时,表明敏感器与干扰源不能兼容工作; $M$ 小于0 dB时,表示敏感器与干扰源能够兼容工作。通过分析,确认薄弱环节,并在后续设计中给予关注并采取适当的措施。

### 2.2.2 设计采取的技术

在具体设计过程中,重点针对印制板电路设计、器件布局、封装、结构工艺、静电保护、搭接、屏蔽、接地、测试等方面采取了专项设计,力求能够降低设备和传输电缆的电场辐射并提高抗干扰能力。下面就典型技术的应用进行具体分析。

#### (1) 接地、搭接

接地是指在两点之间建立导电通路,对于设备内电路来说,参考点可以是设备机壳的接地板。每个设备外壳、盖板、部件与机身都有搭接地,设备外壳是一个屏蔽罩,通过接地线释放静电荷,防止设备之间的电磁干扰。整个壳体形成一个整体的屏蔽罩,通过搭地线释放静电荷。

搭接技术要求金属间的裸面接触,要去掉金属

上的保护涂层,准备搭接的面积应大于用于搭接的面积,确保有效搭接。要严格保证搭接表面的连续性,搭接前清除2个搭接表面的保护层或氧化层,并保证有足够的光洁度,清除了保护层和氧化层后马上搭接,防止再氧化。

晶振可为数字电路提供一个基准信号,其振荡频率越高,产生的谐波就越丰富。晶振所产生的倍频谐波会产生骚扰,严重时还会干扰敏感电路。采取的抑制方法是在印制板布线留有一块与晶振面积相当且去掉阻焊层的地线,将晶振外壳接地,可有效降低干扰。

将控制模块、通讯模块等功能模块与设备壳体大面积接触,电源模块通过导热冷板与设备壳体连接,增强导电连续性;在设备面板上的电连接器安装时,安装部位处的面板具有良好的导电性,不能有漆膜,在电连接器的法兰盘下面使用电磁密封衬垫等。

#### (2) 布局、布线

设备内各功能模块印制板的器件布局要合理、合理排布电源层和地层在印制板中的位置。印制线粗细适度,阻抗匹配及降低信号幅度以减小印制板电路的辐射和对外部干扰的敏感度;电路板走线不用长的平行线,尽量避免印制板内平行印制线的数量;印制板设计接地栅网;接地面尽量大<sup>[3]</sup>。设备内尽可能地减少内部接线,采用屏蔽电缆进出设备壳体,电缆屏蔽层与设备外壳相连接。

#### (3) 屏蔽

屏蔽的形式多种多样,可以用隔板、盒式封闭体,也可以是电缆或连接器式的屏蔽。屏蔽的效果不仅与屏蔽材料有关,而且与材料的厚度、应用频率、辐射源到屏蔽层的距离以及屏蔽层的形状和数量有关。屏蔽之所以能够防止电磁干扰,是因为首先屏蔽材料的表面可以反射大部分入射能量;未被反射而进入屏蔽层的能量在屏蔽层中会被衰减,经过反射和衰减后剩余的入射能量到达屏蔽层的另一表面时,大部分能量又被反射回屏蔽层内,这样在屏蔽层内经过多次反射而被衰减。屏蔽只是减少设备和电缆电磁干扰的一种方法,它通常都与滤波、接地、搭接等措施一起应用。为了提高屏蔽效果一般选用电导率或磁导率较高的材料,有时甚至采用双层屏蔽,同时对接缝、信号的输入、输出端口等电气不连续部位采取特殊措施,防止屏蔽效果下

降。信号线、电源线都采用屏蔽电缆,并正确接地。

为提高设备抗外界干扰能力,在设备壳体面板上的电连接器采用屏蔽型连接器。设备壳体各结构件间的装配结合处采用电磁密封衬垫、导电胶、导电橡胶条密封,以达到设备壳体的导电连续性,增强设备壳体的屏蔽效果。设备壳体可拆式接缝等配合面用螺钉紧固,增加缝隙深度,减小缝隙长度,在结合面加入导电衬垫,并缩短螺钉间距。设备连接电缆应尽可能的短,对特殊信号线应采取双绞屏蔽线,电缆应有屏蔽护套,电缆的屏蔽接地要保证良好。设备连接电缆两端的电缆头选用的尾夹要具有良好的屏蔽能力,能与电缆外部的屏蔽罩实现360°屏蔽连接。针对功耗较大、辐射较强的显卡模块采取了金属罩将显卡芯片和显存芯片进行密封屏蔽。在易电磁泄露的显示屏前加装一块金属丝网屏蔽显示屏对外的辐射,同时对结构外壳的连接处加装导电橡胶。

#### (4) 滤波

在电源线的输入端加装专用电源滤波器,采用滤波加固措施,以降低电源线的传导发射,抑制尖峰信号对电路的干扰。低通滤波器是抑制和防止干扰的一项重要措施,可显著地减小传导干扰的电平。对于电源其干扰频谱成分远高于工频频率,因此,低通滤波器对于干扰频谱成分有良好的抑制能力,工频频率可无衰减地通过。信号的干扰频谱成分高于工作频段,采用低通滤波器对干扰频谱也有良好的抑制能力,使工作频段可无衰减地通过<sup>[4]</sup>。

为减少外界输入电源对设备的影响,在电源输入端加电磁兼容滤波器,且安装在电源线入口处,确保滤波器外壳与设备壳体的良好电接触。滤波器接地点通常固定在壳体或电缆出口处的公共接地金属构件上。在设备壳体内部设计上,采用内外隔离舱的设计形式,并在内外隔离舱间设计信号滤波模块,根据其信号特性,采用馈通滤波器对进出设备壳体的信号进行高频抑制,增强其抗干扰能力。

#### (5) 静电和雷击防护

静电是一种瞬态干扰,电压可高达15 kV,静电积累后会产生电磁干扰和放电,易造成电子设备损坏。通过3种途径进入到设备:直接传导、电容耦合和电感耦合。静电对设备中的微功率、低电平、高集成度、高电磁敏感度的电路和元器件危害最为严重,最终通过元器件软件和硬件损伤表现出来。雷

击电流可能高达几十万伏,如果电子线路屏蔽不好,有可能感应出几百伏的电压,对不耐高压的电子线路将造成严重破坏。

为保证大量电荷能通过搭接线快速泄露,防止外表面产生火花放电,重点考虑设备结构壳体与平台要有良好的电搭接,确保内部电路不受到静电放电危害。采用多点接地的屏蔽措施和雷电滤波,并使各个通路的走线不平行,以防止几个通道同时被破坏。

### 2.2.3 设备安装关注点

设备安装位置布局和电缆布线对系统的电磁兼容性十分重要,理想的安装位置对解决电磁兼容性是十分有利的。布局布线不合理会使各系统间产生干扰,而设备的连接导线为便于固定、防振、利于维修检查等一般都采取捆扎成束的方式,势必增加了电缆内部导线间的耦合感应。通过对电磁干扰现象的分析,也可以看出由电缆引入干扰的确占了较大的比例。电缆分类方法建议按以下分类:Ⅰ类电源和控制电路、Ⅱ类高电平信号电路、Ⅲ类低电平信号电路、Ⅳ类电爆装置和Ⅴ类高频交流电路。设备安装布局和布线主要考虑以下几点:大功率无线发射设备应与无线接收设备尽可能远离,提高空间隔离度。敏感设备应与干扰源设备尽可能远离。采取频域隔离,即各设备相同或相近工作频率天线远离,以免相互干扰。线束敷设时,应按导线电平分类布线,并将发射设备和接收设备分开连接在不同线束中,使电磁干扰降到最低程度。

## 3 结论

电磁兼容问题是一个复杂的系统工程。它要求参与设计人员用系统的观点与方法去研究、分析与设计,针对不同的设备或系统进行具体分析,总结出最有效最合适的电磁兼容方案。完全消除电磁干扰是不可能的,但实践表明,根据电磁兼容性的基本原理采取措施,最大限度地减小电磁干扰,并将其控制在容许的范围内,从而保证设备或系统具有良好的电磁兼容性,是可以满足正常使用要求的。

电磁兼容问题关键在于设计。在对设备或系统进行电性能设计的同时要进行电磁兼容设计,电磁兼容问题考虑得越早收效越好。如果等设备研  
(下转第77页)

量精度高、容易实现、不受测量场地限制、排除了人工读取误差等优点,最后实弹实验验证了系统的可靠性。本方案同样可用于检测烟囱高度、烟花高度、高压线悬弧高度以及低空可见目标的高度(小于1 000 m)的测量,对现实中各种低空可见目标的高度测试具有普遍的意义。

#### 参考文献

- [1] 陈宇虹. 国产信号弹[J]. 轻兵器, 2009(12):22-23.
- [2] 张伟. 烟花高度的测量方法[J]. 测绘通报, 2004(5): 65-66.
- [3] 周承仙, 王高, 李仰军, 等. 基于非对称双CCD交汇的信号弹高度测量方法[J]. 测试技术学报, 2009, 23(5):

(上接第64页)

制出来,主要性能指标达到任务书要求,等到进行规范的电磁兼容测试才发现问题,再采取措施就会事倍功半,若等到整个系统组装好进行联试才发现问题,那就更为时已晚。

电磁兼容设计是实践性非常强的工作,要求设计人员要全面地掌握电磁兼容理论知识,对周围复杂电磁环境要有一个全面地了解,从设计、试验、改进过程中不断丰富自己的实践经验。从系统分析、元器件选用到专业设计,从设备试制、试验到验收、测试以及安装调试工作中,都要切实可行地采取电磁兼容控制措施。同时,要重视原始试验数据的积

(上接第73页)

## 4 结 论

利用SPR实现瓦斯浓度检测技术是一项近几年发展起来的新兴技术。SPR技术以其突出的优越性,为气体的检测提供了一种崭新的检测手段,具有广阔的应用前景。

文中选择合适的硬件电路元器件组建了FO-SPR分布式传感网络,对系统报警功能进行了编程,并用Labview件对系统进行了仿真,仿真结果与程序有很好的吻合。

#### 参考文献

- [1] 郭文婷, 李秀丽, 韦天新. 表面等离子体波共振技术应用于气体检测[J]. 化学进展, 2008, 20(1): 155-162.

240-243.

- [4] 钟堰利, 贾福娟, 丁凌. 双CCD交汇测量系统的设计方法[J]. 光学技术, 2002, 28(6): 481-484.
- [5] 高昕, 苏建刚, 张光明. CCD摄像机交汇测量目标脱靶量布站分析[J]. 应用光学, 2000, 21(5): 40-43.
- [6] 李开端, 赵育良, 李英杰, 等. 面阵CCD航空相机的自动对焦技术研究[J]. 光电工程, 2002, 29(5): 22-24.
- [7] Fairweather M, Hargrave G K, Ibrahim S S, et al. Studies of Premixed Flame Propagation in Explosion Tubes [J]. Combustion and Flame, 1999(4).
- [8] Ibrahim S S, Masri A R. The Effects of Obstructions on Overpressure Resulting from Premixed Flame Deflagration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001(3).

累,对材料选择、电路、结构和工艺设计等方面逐步实行规范化管理,以不断提高设备电磁兼容性。

#### 参考文献

- [1] 苏东林, 雷军, 王冰切. 系统电磁兼容技术综述与展望 [J]. 宇航计测技术, 2007(S1): 34-38.
- [2] 陈淑凤. 航天器电磁兼容技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [3] 蔡仁钢. 电磁兼容原理、设计和预测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- [4] 陈楚, 张雅虹, 黄春晖. 高速差分光电检测电路的设计 [J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 45-48.

- [2] 毛良明, 孟爱东, 骆飞, 等. 光纤分布式传感器[J]. 传感器世界[J], 1999(2):5-8.

- [3] 赵冬娥, 赵豫姝. 表面等离子体共振传感理论仿真研究 [J]. 测试技术学报, 2008, 22(3): 265-268.

- [4] 霍志广. 分布式光纤传感器的机理和研究现状分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006.

- [5] 江福椿, 朱昌平, 林善明, 等. 气体浓度检测技术的现状和应用[J]. 河海大学常州分校学报, 2004, 18(1): 15-18.

- [6] 郑龙江, 李鹏, 秦瑞峰, 等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 24-32.

- [7] 吴英才, 袁一方, 徐艳平. 表面等离子共振传感器的研究进展[J]. 传感器技术, 2004, 23(5): 1-5.

- [8] 王幸之, 钟爱琴, 王雷, 等. AT89系列单片机原理与接口技术 [J]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 101-102.