

doi: 10.7690/bgzd.2013.06.014

一种时序控制系统电磁兼容的实现

裴春兰, 潘旭东, 雍松林, 邓浩, 何静

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对时序控制系统在电磁兼容检测实验中出现的电场辐射超标和敏感度不合格问题, 利用电磁屏蔽原理, 解决电磁波泄漏和电磁不兼容的问题。分析不合格测试结果, 给出辐射发射超标的现场诊断方案和屏蔽效能估算设计, 从机箱的材料及涂层、机箱几何结构、接缝处理、电缆出口等方面, 对抑制系统电磁泄漏进行重点分阐述, 并在整改后再次进行电磁兼容鉴定实验测试。实验结果表明: 整改后的系统通过规定的电磁兼容测试。电子学系统设计时, 系统在满足基本功能性能的同时, 又兼顾电磁兼容标准的相关规定, 才能提高设备电磁兼容能力。

关键词: 电磁兼容测试; 屏蔽效能; 结构工艺; 泄漏辐射; 截止波导

中图分类号: TJ03 **文献标志号:** A

Realization of Electromagnetic Compatibility for Time Sequence Control System

Pei Chunlan, Pan Xudong, Yong Songlin, Deng Hao, He Jing

(Institute of Application Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Aimed at electromagnetic radiation over standard and unqualified sensitivity of time sequence system in electromagnetic compatibility experiment, use electromagnetic shielding theory to solve electromagnetic wave leakage and electromagnetic non-compatibility. Analyze unqualified test result, put forward local diagnosis scheme and shielding effectiveness evaluation design of radiation over standard. Emphasis on introducing restriction of system electromagnetic leakage from box material quality, coating, geometric structure, joint, and cable outlet, carryout electromagnetic compatibility verification after improvement. The test results show that the improved system pass the electromagnetic compatibility. The design of electronics system should keep it's original function based on the standard of electromagnetic compatibility well to improve electromagnetic compatibility ability.

Key words: electromagnetic compatibility test; shield effectiveness; processing of structure; compromising emanation; waveguide of impede

0 引言

随着控制系统复杂性和集成度的提高, 控制系统的设计不能只满足于系统的功能和技术指标的要求, 系统的电磁兼容性会影响自身控制系统工作的稳定性, 同时也会影响相邻设备的正常工作。电磁兼容性已经成为评价系统工作稳定的一项不可回避的技术指标。时序控制系统以 CPU 为核心, 由接口电路、现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 等组成, 在进行电磁兼容鉴定和验证试验中, 该控制系统未能通过国军标电磁兼容检测。笔者针对实验中暴露出的辐射超标和敏感度不合格问题进行了电磁兼容分析, 并提出整改方案, 整改后达到了该系统电磁兼容实验的预期要求。

1 测试结果

系统的电磁兼容性测试包括电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 和电磁敏感性 (electromagnetic susceptibility, EMS) 测试 2 部分。EMI 和 EMS 测试必须达到规定的电磁兼容标准, 为避免控

制系统电磁兼容性的欠设计和过设计, 笔者对该控制系统的电磁兼容性进行检验。首次电磁兼容环境测试的测试结论见表 1。

表 1 第 1 次电磁兼容测试内容及结论

电磁兼容项目名称	代号	频率范围	结论
电源线传导发射	CE102	10 kHz~10 MHz	合格
电源线传导敏感度	CS101	25 Hz~50 kHz	合格
电缆束注入传导敏感度	CS114	10 kHz~400 MHz	合格
电场辐射发射	RE102	10 kHz~18 GHz	不合格
电场辐射敏感度	RS103	10 kHz~1 GHz	合格
		20 MHz~140 MHz	不合格

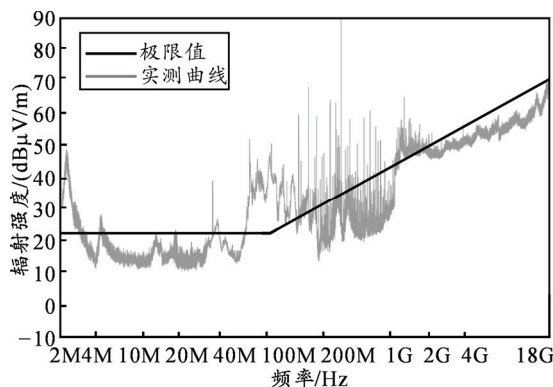


图 1 第 1 次水平极化条件下的测试曲线

收稿日期: 2012-12-16; 修回日期: 2013-01-07

作者简介: 裴春兰(1965—), 女, 四川人, 本科, 工程师, 从事电子学硬件设计和测试研究。

图 1 和图 2 分别是第 1 次水平和第 1 次垂直极化条件下的测试曲线。

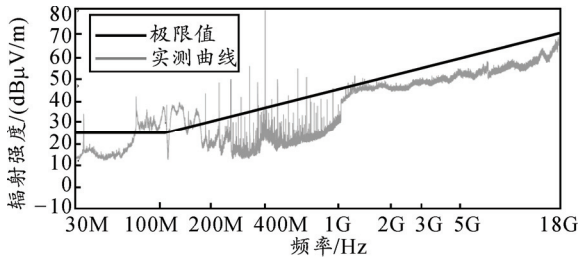


图 2 第 1 次垂直极化条件下的测试曲线

1.1 试验现象

从实验结果可以看出: 不合格测试项主要是电场辐射的发射和敏感度 2 项指标。在电场辐射发射测试项目中, 对辐射发射超标的频率点进行统计出水平和垂直极化条件下电场辐射发射超标的频率点对应的超标的分贝数, 见表 2。

表 2 水平和垂直极化条件下电场辐射发射超标统计

频率点/ MHz	超标分 贝数/dB	干扰源频 率特性	频率点/ MHz	超标分贝 数/dB	干扰源频 率特性
2	16	HF	200	12	VHF
70	18	VHF	280	26	VHF
100	22	VHF	285	32	VHF
120	9	VHF	320	38	SHF
180	10	VHF	400	36	SHF

从表 2 可以看出, 超标的频点在 400 MHz 对应的分贝数最大值为 38 dB 和 36 dB。根据实测的电场辐射数据, 结合时序控制系统的设计, 该系统属于高电压小电流(CMOS 和 TTL 电路)的源近场辐射源, 主要属于电场辐射。送检设备机箱的不利因素主要包括:

- 1) 机箱的电缆孔未完全堵上;
- 2) 机箱面板的螺钉未紧固;
- 3) 机箱面板之间的缝隙过大;
- 4) 部分电缆线未做屏蔽;
- 5) 机箱内部个别电缆连线过长;
- 6) 机箱内敏感部件 CPU 未做相应的屏蔽处理;(120~140 MHz 频段 CAN 总线数据传输受阻)。

1.2 现象分析

由于辐射源分为近场的电场源、磁场源和远场的平面波, 屏蔽体的性能依据辐射源的不同, 场域的不同, 在材料、结构和对孔缝泄漏控制等方式有所不同。电场分近场和远场 2 种情况, 2 种场的分界点是 $\lambda/2\pi$, 一个屏蔽体离中心辐射源距离是 d 。场域粗略划分: $d < \lambda/2\pi$ 的区域为近场区。 $d > \lambda/2\pi$ 的区域为远场区^[1]。

辐射源的干扰电平最高处 320 MHz、400 MHz 的波长为

$$\lambda = C/f \quad (1)$$

式中: λ 为辐射电磁波的波长, m; C 为光传播的速度, m/s; f 为辐射电磁波的频率, Hz。

则 $\lambda_{\text{水平}} = 3 \times 10^8 / 320 \times 10^6 = 0.9375 \text{ m}$, $\lambda_{\text{垂直}} = 3 \times 10^8 / 400 \times 10^6 = 0.75 \text{ m}$;

$\lambda_{\text{水平}} / 2\pi = 0.9375 \text{ m} / 2\pi = 14.93 \text{ cm}$, $\lambda_{\text{垂直}} / 2\pi = 0.75 \text{ m} / 2\pi = 11.95 \text{ cm}$

中心辐射源不在机箱的几何中心, 机箱离中心辐射源距离 d 实测为 12.5~22.5 cm, 则 $d = 12.5 \text{ cm} < 14.93 \text{ cm}$, 故场域为近场; $d = 22.5 \text{ cm} > 14.93 \text{ cm}$, 故场域为远场。电场辐射不仅涉及到远场和近场区, 还有远场和近场之间的过渡区。这样增加了屏蔽设计的难度。该系统高电压小电流(CMOS 和 TTL 电路)的源近场辐射源主要属于电场辐射。

1.3 屏蔽效能分析

屏蔽体的有效性用屏蔽效能 S_E 表示, 这时屏蔽效能的定义公式^[2]为

$$S_E = 20 \lg(E_1/E_2) \text{ dB} \quad (2)$$

S_E 表征了屏蔽体对电磁波的衰减程度, 通常用分贝来表述屏蔽效能。根据算法, 结合国军标对地面设备的要求, 有 6 dB 的设计融差。从表 2 可以得到: $f_{\text{水平}} = 320 \text{ MHz}$, 辐射衰减 $S_{E\text{水平}} = 38 \text{ dB}$; $f_{\text{垂直}} = 400 \text{ MHz}$, 辐射衰减 $S_{E\text{垂直}} = 36 \text{ dB}$; 实际系统的屏蔽效能达到 38 dB 即满足实际需要屏蔽的效能, 军用设备的机箱要求一般需要 60 dB, 设计系统的屏蔽效能为 60 dB 就可满足需求, 即衰减为原来的 0.1%, 衰减量为 99.9%。

2 屏蔽设计分析

2.1 现场屏蔽诊断方案

系统在实验现场测试时, 就出现了电场辐射超标和电场敏感度超标的情况, 在测试现场, 因陋就简利用现场的测试设备对参试设备控制系统进行了现场故障排查。辐射发射超标的现场诊断方案见图 3。

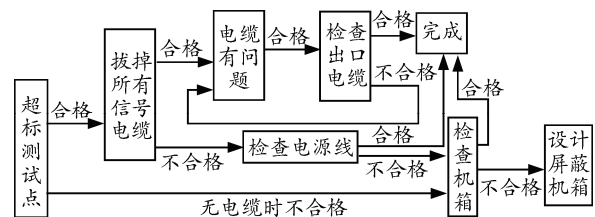


图 3 辐射发射超标的现场诊断方案

1) 时序控制机箱在测试现场时,将外部信号电缆临时进行了屏蔽处理,重新进行辐射发射测试。

2) 测试结果:经过屏蔽信号电缆的改进,电场辐射敏感度达到了检测标准,而电场辐射超标情况有所改进,但效果不明显。结论“否”可能存在以下 2 种情况之一:辐射源是电源线或设备机壳存在辐射。

2.2 机箱屏蔽方案设计

任何电磁兼容性问题都包含 3 个要素,即干扰源、传播途径和屏蔽体。在解决电磁兼容问题时,相

应的抑制方法为:抑制干扰源、切断削弱耦合途径、提高屏蔽体的屏蔽效能。在该系统干扰源、传播途径不可能做任何修改的情况下,本来用机箱防止辐射发射是屏蔽的最终屏障,成了唯一屏蔽整改措施。

根据 1.3 节的分析,辐射衰减 S_E 水平为 38 dB,即已知所需屏蔽效能的情况下,适当的增加设计裕量,考虑到军用设备的使用环境,将 S_E 调整到 60 dB,即按 60 dB 屏蔽效能设计屏蔽机箱。对系统做出了屏蔽效能估算设计,如表 3。

表 3 屏蔽效能估算设计

频率点/ MHz	超标实测 值/dB	加上 6 dB 裕量/ S_E	SE 整体目 标值/dB	机箱涂层设 计 S_E /dB	接缝处理设 计 S_E /dB	屏蔽电缆设 计 S_E /dB	连接器设计 S_E /dB	穿心电容设 计 S_E /dB
2	16	6	60	55	46	60	64	0
60	10	6	60	56	46	61	63	0
70	18	6	60	57	46	62	63	0
100	22	6	60	59	46	63	64	0
120	9	6	60	61	46	64	65	60
180	10	6	60	63	46	64	67	60
200	12	6	60	64	46	63	66	60
280	26	6	60	65	46	62	65	62
285	32	6	60	68	46	61	65	63
320	38	6	60	70	46	62	66	64
400	36	6	60	75	46	61	64	65

3 机箱电磁屏蔽系统 S_E 设计

屏蔽效果的衡量一般可采取屏蔽措施后场强的被衰减的程度来表示,而实际屏蔽效果随着干扰源的频率、屏蔽体的几何形状、屏蔽体在干扰场所处的位置及采用的屏蔽方法不同而取得不同的评比效果。实际屏蔽效能由公式 (3) 对整体评比效能进行评估^[3]:

$$S_E = -20 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{-\frac{S_{E_i}}{20}} \right) \quad (3)$$

式中: S_{E_i} 为单一屏蔽措施的屏蔽效能, dB; S_E 为综合屏蔽措施的屏蔽效能, dB。

由式 (3) 可以看出,影响 S_E 的各个因素都要考虑到,特别是薄弱环节。诸如机箱的材料及涂层、机箱结构工艺、接缝处理,电缆出口等都是需要在设计中重点考虑的。

3.1 机箱的材料设计

屏蔽机箱材料的效能与所选材料的电导率 σ_r 、磁导率 μ_r 、材料的厚度 t 有密切的关系,在选择材料时更应考虑辐射频率 f 。不同材料趋肤深度不同,一个趋肤深度场强将衰减 8.7 dB (或幅值 63%), 查阅吸收损耗和材料的对应关系,再考虑材料成本和屏蔽效能的需求值,决定采用厚度为 1.5 mm 镀锌冷扎钢板,下面将其理想镀锌冷扎钢板屏蔽材料的吸收损耗计算如下:

$$AdB = 331t (f\mu_r\sigma_r)^{1/2} \text{ (dB)} \quad (4)$$

式中: σ_r 为屏蔽体的电导率; μ_r 为屏蔽体的导磁率; f 为辐射源的电磁波频率, Hz; t 为屏蔽体的厚度, mm; AdB 为屏蔽体的吸收损耗, dB。

设计时选定 $t=1.5 \text{ mm}$, $\mu_r=200$, $\sigma_r=0.16$, $f_{\text{最大}}=400 \text{ MHz}$, 则 $AdB=331 \times 1.5 \times (400 \times 200 \times 0.16)^{1/2} \geq 78.3 \text{ dB}$ 。

以上的计算表明,吸收损耗达到了设计要求。

机箱采用白色镀锌热喷,使其能达到 55~65 dB 的屏蔽效能,这样就保证了机箱材料的屏蔽效能达到 60 dB,满足由公式 (3) 的设计要求。

3.2 机箱结构工艺的屏蔽设计

理想的屏蔽罩很容易就能达到 60 dB 的屏蔽效能,但实际的屏蔽体并不理想,往往都有缝隙和孔洞或结构并不完整的因素,电磁波通过薄壁孔和缝隙的衰减由公式 (4)^[4]可得:

$$L_s = 20 \lg \frac{\lambda}{2d} \text{ (dB)} \quad (5)$$

式中: d 为屏蔽体为孔或缝隙的最大尺寸, m; λ 为辐射电磁波的波长, m。

由式 (5) 可知,当 $d \geq \lambda/2$ 时,电磁波会自由穿过孔洞而未衰减,其辐射效率最高,可将信号的大部份能量辐射出去。

笔者通过重新设计如下的结构工艺,来减小机箱侧板间、上盖板和侧板间的缝隙,避免 $d \geq \lambda/2$ 尺寸的缝隙产生。图 4 为原机箱结构设计和改进后的结构

设计图。

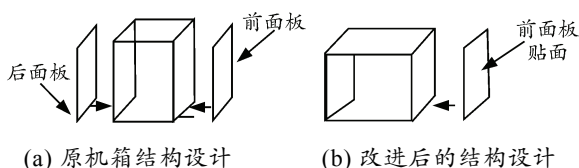


图 4 原机箱结构设计和改进后的结构设计

式 (3) 中计算出了辐射源的波长 $\lambda_{\text{水平}}=0.9375 \text{ m}$, $\lambda_{\text{垂直}}=0.75 \text{ m}$, $\lambda/2$ 分别为 0.325 m 和 0.48 m , 0.48 m 正好是原来机箱上盖板和侧板间的缝隙和侧板间的缝隙尺寸。经过改进后, 机箱的前后面板同机箱主体一体化, 从机箱侧板的结构上减少了 4 条缝隙, 机箱前面板采用铝材加工完成后再表贴上; 上盖板和侧板间的缝隙处理时, 每 3 cm 处采用螺钉紧固, 使缝隙远远小于 $\lambda/2$ 。这样就从结构上避免了电磁泄漏的传播途径, 满足了公式 (3) 的设计要求。

3.3 通风口设计

实际的 EMI 屏蔽中, 机箱上的通风口都是电磁波的泄漏源。在考虑通风和散热时, 当通风口的开口的最大尺寸满足 $d \geq \lambda/2$ 时, 电磁泄漏最为严重。在通风满足要求时, 尽量采用小孔, 以小孔代替大的尺寸。采用截止波导管通风孔, 它起高通滤波器的作用, 图 5 为改进前后的通风口设计对比。



图 5 改进前后的通风口设计对比

图 5 改进前后的通风口设计对比

原机箱通风口的最大缝隙长度为 30 cm 左右, 接近 $\lambda/2$ 波长, 最易产生电磁泄漏。

截止波导管的屏蔽效能 S_E 表示为

$$S_E = 27.35 \frac{L}{W} \quad (6)$$

式中: L 为波导管的长度, m ; W 为波导管的内壁的外接圆的直径, m 。

为了 S_E 达到 60 dB , 设计 $L/W \geq 3$ 即可, 取 $L=2.5 \text{ mm}$, $W \leq 0.75 \text{ mm}$ 改进后的通风口设计为多孔六角形蜂窝装通风截止波导管, 这样就保证了通风口的屏蔽效能达到 60 dB , 满足了式 (3) 的设计要求。

3.4 电缆出口屏蔽设计

电磁场传播经过的介质还有电源线、信号线。当机箱外部线缆长度超出了机箱的最大尺寸, 将可能成为最大的辐射源和敏感器件。电源和信号线缆长度为

95 cm 大于机箱的最大尺寸。笔者在整改电缆出口时, 做了以下修改。

3.4.1 双层屏蔽线设计

评价屏蔽线质量用传输阻抗 Z_t 来表征, Z_t 将屏蔽表面上流动的电流除以在该表面的另一侧产生的电压, 屏蔽越好, Z_t 就越小。表 4 是几种线缆传输阻抗 Z_t 的对比。

表 4 几种线缆传输阻抗 Z_t 的对比

性能指标	非屏蔽电缆	单层屏蔽电缆	双层屏蔽电缆
传输阻抗/ $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	50	0.001 2	0.000 5
屏蔽效能/ dB	0	20	85

从表 4 中可看出, 编织网采用 90% 覆盖率的铜芯双层网时, 其传输阻抗 Z_t 在 300 MHz 为 $0.000 5 \Omega/\text{m}$, 采用达到国军标双层屏蔽电缆替代非屏蔽线缆和电源线, 以减小电磁波的辐射。

3.4.2 罗纹结构的接插件的设计

电缆连接器的低阻抗终端与良好屏蔽的低 Z_t 一样重要。电缆连接阻抗 Z_{ct} 直接加入信号电流往返回路, Z_{ct} 可以严重的影响电磁辐射的程度。表 5 是几种电缆连接阻抗 Z_{ct} 的对比。

表 5 几种电缆连接阻抗 Z_{ct} 的对比

性能指标	BNC 连接器	普通卡式航空连接器	360° 环形航空连接器
连接阻抗/ $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	40	10	0.1
屏蔽效能/ dB	10	20	65

从表 3 中可以看出, 不同的连接器的连接阻抗不同, 360° 环形航空连接器的连接阻抗 Z_{ct} 为 $0.1 \text{ m}\Omega$ 是最小的; 因此, 采用罗纹结构接插件确保电缆连接器的 S_E 设计达到 60 dB 。

3.4.3 穿心电容的设计

普通电容不能有效地滤除高频噪声, 每一个电缆输出端口, 安装对高频信号是理想的旁路滤波器。在图 1 的测试可以得到: $f_{\text{水平}}=320 \text{ MHz}$, 辐射超标 $S_{E\text{水平}}=38 \text{ dB}$; $f_{\text{垂直}}=400 \text{ MHz}$, 辐射超标 $S_{E\text{垂直}}=36 \text{ dB}$; 由以上数据分析主要需要抑制的是 320 MHz 和 400 MHz 的高频噪声信号。

滤波电容的设计, 时序控制机箱里时钟频率为 25 MHz , 信号传输频率也为 $f=25 \text{ MHz}$ 。截止频率 f_c 由公式 (7) 计算:

$$F_c = (5 \sim 10)f \quad (7)$$

式中: f 为信号传输频率, Hz ; F_c 为屏蔽体的截止频率, Hz 。

(下转第 65 页)