

电磁兼容 设计与测量技术

主 编 李舜阳
副主编 林京平



 中国标准出版社

电磁兼容设计与测量技术

主 编 李舜阳
副主编 林京平

中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容设计与测量技术/李舜阳主编. —北京: 中国
标准出版社, 2009

ISBN 978-7-5066-5354-1

I. 电… II. 李… III. ①电磁兼容性—设计②电磁兼容
性—测试技术 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 150275 号

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街 16 号
邮政编码: 100045

网址 www.spc.net.cn

电话: 68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 403 千字

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月第一次印刷

*

定价 36.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010)68533533

序 言

伴随科学技术的进步,电和电子设备得到了突飞迅猛的发展,同时也带来了电磁干扰的问题。干扰实际是电磁能,其不仅会影响设备或系统的正常运行,而且可能对生物和人的健康造成损害。为此一方面要限制骚扰源的发射电平和切断传播路径,另一方面要提高受害设备的抗扰度电平,以便达到电磁兼容的目的。

电磁兼容性是一门边缘科学,其涉及许多学科,诸如电磁场、电波传播、天线、无线电接收和发射等,但归根结底所要讨论的是骚扰源、传播路径和受害的接收器三个要素。这三个因素设计处理得当,电磁兼容性自然会得到事半功倍的效果。本书正是基于这种观点论述电磁兼容性设计的。

作者从上世纪70年代末开始从事产品电磁兼容研究、设计、电磁兼容标准制定和试验工作,具有扎实的理论基础和丰富的实践经验,是国内知名的电磁兼容专家,创建了民用电子产品最早的EMC试验室,曾多次获国家和部科技进步奖项。为了回馈社会,特写此书以飨读者。

本书面向电和电子产品工程设计人员,是电磁兼容设计的必备工具书。

应当指出电磁兼容性与设备或系统的功能和性能并不矛盾,电磁兼容性好,功能和性能也会好,而且可提高设备的可靠性。那种认为牺牲性能的观点实际是错误的。还应当指出电磁兼容性是设计出来的,而不是产品定型后改进出来的。工程设计人员必须走出这一误区。

本书内容分成两大部分,前14章是电磁兼容性设计,后面各章是试验设备和试验方法。设计和试验方法是密不可分的,产品电磁兼容性限值合格与否,应通过正确试验方法进行论证。

本书从电路印制板一直到设备或系统,系统地论述了电磁兼容设计的理论与方法,同时,强调了接地、滤波和屏蔽的设计。应当指出,印制电路板的设计是十分重要的,因为印制电路板往往是干扰的源头,所以有些产品只要印制电路板EMC设计合理,并不需要加屏蔽(如用塑料外壳)。

本书试验方法的频率范围从 25 Hz 开始一直到 40 GHz,基本覆盖了 EMC 全频率范围。分别精辟地讲述了传导骚扰、辐射骚扰和相对应的传导抗扰度和辐射抗扰度等的测量。

同时本书对试验设备也做了简略描述。

参加本书编著的人员还有曲林、李华、徐志明。同时感谢泰瑞特公司 EMC 试验室的全体同仁的鼎力支持。

本书难免有不当之处,望广大读者朋友批评指正。

编 著 者

2009 年 3 月

目 录

第 1 章 电磁兼容性综述	1
1.1 电磁兼容性(EMC)	1
1.2 电磁兼容性的三个要素	1
1.3 电磁辐射的近场与远场	2
1.4 脉冲信号的频谱	4
1.5 电磁骚扰的主要危害	5
1.6 电磁兼容电平	5
1.7 EMC 设计的重要性	5
1.8 EMC 标准	5
1.9 EMC 研究的频率范围	6
第 2 章 印制电路板(PCB)设计基础	7
2.1 无源元件的高频寄生特性	7
2.2 在 PCB 内为什么和如何产生 RF 能量	8
2.3 磁通及其抵消要求	9
2.4 走线拓扑布置	10
2.5 分层布置	10
2.6 径向转移(排列)	16
2.7 共模和差模电流	16
2.8 RF 电流密度分布	18
2.9 接地方法	19
2.10 地和信号环(不包括涡流)	21
2.11 幅形比——地连接的间距	21
2.12 镜像平面(板)	22
2.13 镜像平面(板)内的槽	23
2.14 功能分区	24
2.15 临界频率	25
2.16 逻辑系列(族)	26
第 3 章 印制板的旁路和去耦	27
3.1 谐振概念	27



3.2	电容器的物理特性	29
3.3	电容器的并联	31
3.4	电源和地平面(板)构成的电容	31
3.5	布置	33
3.6	电容器的选择	36
第 4 章	时钟电路、轨迹(信号线)和端接	40
4.1	印制板内传输线的形成	40
4.2	微带线和带状线	40
4.3	传播延迟和介电常数	44
4.4	信号轨迹(线)端接容性负载	45
4.5	元件的放置	46
4.6	阻抗匹配——振铃和反射	47
4.7	计算信号线(轨迹)的长度(电长度)	47
4.8	轨迹布线	49
4.9	走线层	51
4.10	串扰	53
4.11	3-W 规则和轨迹隔离	55
4.12	保护/分(旁)路轨迹	55
4.13	轨迹线的端接	56
第 5 章	互连线和 I/O 电路	61
5.1	划分区	61
5.2	隔离和分区(开槽)	62
5.3	I/O 电路的滤波和接地	65
5.4	视频和音频	68
第 6 章	后(背)面板、带状电缆和子卡	71
6.1	基础	71
6.2	连接器输出脚的设定	71
6.3	AC(交流)壳体平面	72
6.4	后面板结构	73
6.5	互连线	77
6.6	机械	77
6.7	信号走线	78
6.8	轨迹长度/信号端接	78
6.9	串扰	78
6.10	地环控制	80



6.11	后面(印制)板中的地槽	81
第 7 章	静电放电保护	82
7.1	概述	82
7.2	摩擦带电	82
7.3	直接放电和间接放电	83
7.4	对 ESD 防护的设计技术	85
7.5	防护带	90
第 8 章	印制板附加设计技术	92
8.1	局部平面(板)	92
8.2	20-H 规则	94
8.3	拐角走线轨迹	98
8.4	铁氧体元件的选择	100
8.5	接地散热器	103
8.6	锂电池电路	105
8.7	BNC 连接器	105
8.8	漏电和爬电距离	106
8.9	铜轨迹载流能力	109
8.10	基板(印制板)	112
第 9 章	电磁屏蔽	115
9.1	金属的阻抗	115
9.2	屏蔽效能	116
9.3	屏蔽效能的恶化	123
9.4	屏蔽材料	124
9.5	屏蔽的完整性	131
9.6	壳体屏蔽	139
第 10 章	滤波	143
10.1	信号电路滤波器	143
10.2	电源线滤波器	151
第 11 章	瞬态干扰的抑制	156
11.1	概述	156
11.2	瞬态电平的波形	156
11.3	瞬态骚扰的传输	158
11.4	瞬态电平的抑制	160



第 12 章	系统间的电磁兼容性	165
12.1	系统间电磁干扰控制技术	165
12.2	基本传播方程	168
12.3	系统间电磁骚扰的预测	169
第 13 章	系统内电磁干扰及对策	174
13.1	公共地阻抗耦合	174
13.2	电磁场耦合到回路中	175
13.3	电缆对电缆的近场耦合	179
第 14 章	电缆布线与捆扎线	182
14.1	电缆布线的分类与扎线	182
14.2	电缆作为辐射的环天线	182
14.3	电缆对辐射发射场的敏感度	187
14.4	电缆与电缆的耦合(串扰)	187
14.5	电缆连接器	193
第 15 章	电磁兼容性试验电平单位	195
15.1	功率单位	195
15.2	传导骚扰和抗扰度电压单位	195
15.3	传导电流单位	196
15.4	辐射骚扰电平单位	196
15.5	天线系数 AF	198
第 16 章	电磁兼容试验设备	200
16.1	测试接收机	200
16.2	音频电压表	204
16.3	人工电源网络(AMN)	205
16.4	电流探头和电压探头	208
16.5	吸收钳	210
16.6	传导电流耦合单元	211
16.7	天线	211
第 17 章	传导骚扰的测量	219
17.1	25 Hz~10 kHz 电源线传导电流骚扰	219
17.2	10 kHz~10 MHz 电源线传导电流骚扰的测量	220



17.3	0.15 MHz~30 MHz 注入电源骚扰电压的测量	221
17.4	用电压探头测量不可拆卸电源线的骚扰电压(9 kHz~30 MHz)	222
17.5	用电流探头测量电源线的骚扰电流	222
17.6	射频输入端骚扰电压(或骚扰功率)的测量	223
17.7	电源线瞬态尖峰信号的测量	224
17.8	谐波电流发射测量(设备每相输入电流 ≤ 16 A)	225
17.9	电压波动和闪烁的测量方法	227
第 18 章	辐射骚扰(发射)的测量	229
18.1	25 Hz~100 kHz 磁场辐射的测量	229
18.2	150 kHz~30 MHz 磁辐射的测量	230
18.3	0.15 MHz~30 MHz 电辐射的测量	230
18.4	30 MHz~1 GHz 辐射场强的测量	231
18.5	1 GHz 以上频率范围辐射的测量	232
18.6	用大环(3 m 直径)测量 9 kHz~30 MHz 辐射场强	234
18.7	30 MHz~300 MHz(或 1 GHz)骚扰功率的测量	235
第 19 章	传导抗扰度的测量	237
19.1	概述	237
19.2	25 Hz~50 kHz 电源线传导抗扰度	237
19.3	150 kHz~150 MHz(或 230 MHz)频率范围内的传导抗扰度	238
19.4	接收设备天线端输入(内部)抗扰度的测量	244
第 20 章	辐射抗扰度试验	246
20.1	频段为 25 Hz(50 Hz)~10 kHz(100 kHz)辐射抗扰度的测量方法 (GB/T 19954.2)	246
20.2	10 kHz~80 MHz 电辐射抗扰度的试验方法(见 GJB 152A、GB/T 6833)	248
20.3	80 MHz~1 GHz 辐射抗扰度的试验方法	249
20.4	1 GHz~40 GHz 辐射抗扰度的试验方法(GJB 151)	250
20.5	用横电波(TEM)小室测量辐射抗扰度	252
20.6	工频磁场抗扰度试验	255
20.7	脉冲磁场抗扰度试验	256
20.8	阻尼振荡磁场抗扰度试验	257
	参考文献	258

第 1 章 电磁兼容性综述

1.1 电磁兼容性(EMC)

装置设备或系统在其工作的电磁环境中能不降低性能地正常工作,且对该环境中的任何事物(包括无生命体和有生命体)不构成电磁危害的能力。

电磁兼容含如下内容:

- (1) 电磁环境;
- (2) 电磁骚扰(EMI)电平;
- (3) 抗扰度(Immunity)。

1.1.1 电磁环境

在给定的场所所有电磁现象的总和。其包括全部频谱电平和全部时间。其中包括辐射功率、场强、传导的电压和电流。

按电磁环境可分以下几种区域:

- (1) 居民区(包括乡村和城市);
- (2) 商业区;
- (3) 轻工业区;
- (4) 重工业区、发电厂、变电站;
- (5) 交通区;
- (6) 通信中心;
- (7) 医院等。

1.1.2 电磁骚扰(EMI)电平

装置、设备和系统的骚扰电平。

1.1.3 抗扰度(Immunity)

提高装置、设备和系统的抗干扰能力,保证设备正常工作。

综上所述,使干扰和抗干扰矛盾达到统一,共存于工作的电磁环境中,即

$$EMC = EMI + Immunity(EMS)$$

1.2 电磁兼容性的三个要素

通常把骚扰源、传播路径和接收器(受害者)称为 EMC 三要素。

1.2.1 电磁骚扰源

- (1) 自然骚扰源:

地球上的雷电、静电、噪声等;宇宙噪声、太阳磁爆,射电星等。

- (2) 人工骚扰源:

通信、广播、家用电器、电动工具、交通工具、照明、工科医射频设备等。



1.2.2 电磁骚扰的传播路径

空间传播路径:

- (1) 远场:以平面电磁波传播。
- (2) 近场:电磁耦合,电磁感应,有容性串扰、感性串扰、前向和后向串扰等。

导体传播路径:

- (1) 供电系统电缆,信号线、控制线等。
- (2) 地环路。

1.2.3 电磁骚扰接收器

生物体:动物和植物等。

人造设备:广播接收设备、通讯设备、导航和雷达设备、家用电器等。

由图 1-1 可见抑制电磁骚扰的主要着眼点是减少电磁骚扰源的发射电平,切断传播路径和提高接收器的抗扰度。传统的方法是屏蔽、滤波和合理接地(单点和多点接地)。

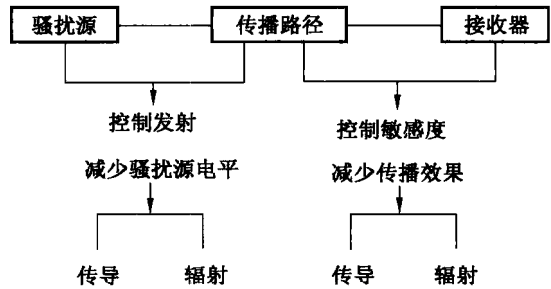


图 1-1 EMI 的耦合路径

1.3 电磁辐射的近场与远场

1.3.1 小偶极子的辐射

讨论电磁骚扰源辐射的近场(电场与磁场)与远场(平面波电磁场),即感应场和自由场对电磁兼容设计是十分重要的。由麦克斯韦(Maxwell)方程分析一个小偶极子(或短天线)的辐射场(见图 1-2)可得以下方程式(条件 $D \ll \lambda$):

$$E_{\theta} = \frac{Z_0 ID \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[- \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^3 \cos \psi - \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \sin \psi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) \cos \psi \right] \quad (1-1)$$

$$E_r = \frac{2Z_0 ID \pi \cos \theta}{\lambda^2} \left[- \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^3 \cos \psi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \sin \psi \right] \quad (1-2)$$

$$H_{\phi} = \frac{ID \pi \sin \theta}{\lambda^2} \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \sin \psi + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) \cos \psi \right] \quad (1-3)$$

式中: Z_0 ——自由空间波阻抗, $Z_0 = \left| \frac{E}{H} \right| = \left| \frac{E_0}{H_0} \right| = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$;

μ_0 ——自由空间导磁率 $= 4\pi \times 10^{-7}$, F/m;

ϵ_0 ——自由空间(空气中)的介电系数 $= 8.84 \times 10^{-12}$, H/m;

I ——短偶极子中的电流, A;

D ——短偶极子的长度, m;

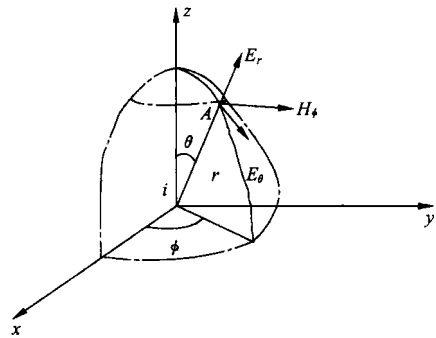


图 1-2 短偶极子辐射场(球坐标)

ϕ ——辐射距离 r 在 xy 面上的投影与 x 轴的夹角；

r ——偶极子与观测点之距离；

λ ——波长, m；

$\psi = \frac{2\pi r}{\lambda} - \omega t$ ；

ω ——角频率。

由式(1-1)、式(1-2)和式(1-3)可以得以下结论：

(1) 当 $\frac{\lambda}{2\pi r} = 1$ 即 $r = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\lambda}{6}$ 时, 该点是近场与远场的分界点。

(2) 当距离 $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ 时, 式(1-1)和式(1-3)的括号中 $\left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) \cos\psi$ 是重要的。

波阻抗 $Z_w = Z_0 = 120\pi\Omega$, E_θ 和 H_ϕ 正交, 称为辐射场(远场)。

(3) 当 $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ 时, 各方程中仅第一项是重要的, 波阻抗 $\left|\frac{E}{H}\right| = \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right) Z_0$, $Z_w \gg Z_0$, 称为高阻抗电场(感应场), E_θ 和 H_ϕ 也是正交的。

(4) 若振荡源不是偶极子, 是小电流环, 则式(1-1)和式(1-2)的第 1、2 项消失, 而括号中相同的第 1 项, 存在于式(1-3)中。 $Z_w = \frac{E}{H} = \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) Z_0$, 因为 $\frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1$, 波阻抗 $Z_w \ll Z_0$, 所以称小电流环的近场为低阻抗磁场。

1.3.2 场强、波阻抗与距离的关系

(1) 小赫兹偶极子(或短导体): $r < \frac{\lambda}{2\pi}$,

$E \propto \frac{1}{r^3}$, $\frac{1}{r^2}$ 为感应场; $r > \frac{\lambda}{2\pi}$, $E \propto \frac{1}{r}$ 为远场。

(2) 小电流环: $r < \frac{\lambda}{2\pi}$, $H \propto \frac{1}{r^3}$, $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ 为

感应场; $r > \frac{\lambda}{2\pi}$ 为远场, $H \propto \frac{1}{r}$ 。

(3) 波阻抗随距离的变化: 从源开始, 由近到远, 波阻随距离的变化, 如图 1-3 示例。

1.3.3 共模发射和差模发射

分析共模发射和差模发射对抑制骚扰电

平是重要的, 通常把馈线与地之间的发射定义为共模发射, 如图 1-4 所示; 把馈线与馈线之间的发射定义为差模发射, 如图 1-5 所示。

$$E = \frac{k \times I \times L \times f}{r} \quad (\text{V/m}) \quad (1-4)$$

式中: k ——发射系数;

I ——共模电流;

L ——线的长度;

f ——发射的频率;

r ——距离。

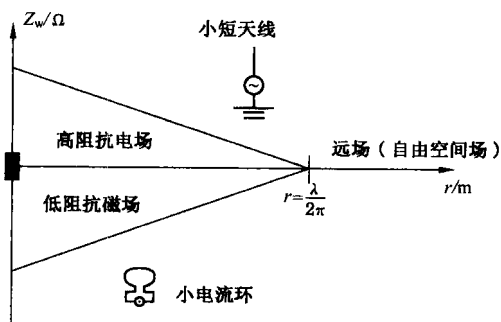


图 1-3 波阻抗随距离的变化

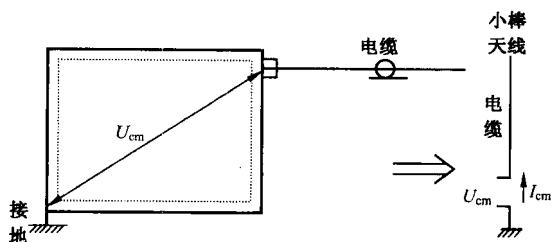


图 1-4 共模发射(电流流经高阻抗路径, 如开路)



从图 1-4 可见,减少共模发射应降低共模电流和减少电缆线的长度。

$$E = \frac{k \cdot A \cdot I \cdot f^2}{r} \quad (\text{V/m}) \quad (1-5)$$

式中: A ——环面积。其他各符号与式(1-4)相同。

由图 1-5 不难看出,场强与回路面积成正比。为减少差模发射电平,除减少源电流外,应该减少环电路的面积,设计电路时应尽量降低频率。

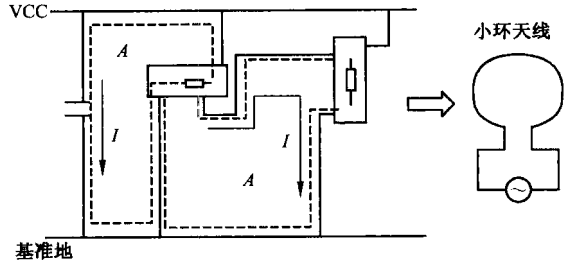


图 1-5 差模发射(从源输出到负载所构成的回路)

1.4 脉冲信号的频谱

数字信号的特点是方波信号,方波信号是由基波和大量谐波正弦(或余弦)信号构成的,这可由傅立叶变换得到其频率或波形,因此,脉冲重复周期越短,其重复频率越高,谐波频率也越高。例如,时钟触发频率为 30 MHz 时,其谐波频率可达 1 GHz。理论上方波的上升时间为零,则谐波含量是无穷的。但实际上是梯形波,有一定的上升沿和下降沿。其方波的带宽为 $BW \approx \frac{1}{\pi t_r}$,例如,上升沿 t_r 为 5 ns 的方波,其带宽将达 60 MHz。

通过傅立叶变换,矩形脉冲可分解为各次余弦(或正弦)波,其表达式为:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi) \quad (1-6)$$

式中: A_n ——各次余弦波形的幅度;

n ——谐波次数;

ω ——角频率;

φ ——相位角。

矩形脉冲的频谱及时域/频域变换波形分别见图 1-6 和图 1-7。由图 1-6 和图 1-7 分析可知理想的方波,其频谱是无限宽的。实际上,脉冲均有上升时间和下降时间,频谱越宽,脉冲的上升沿和下降沿则越短。

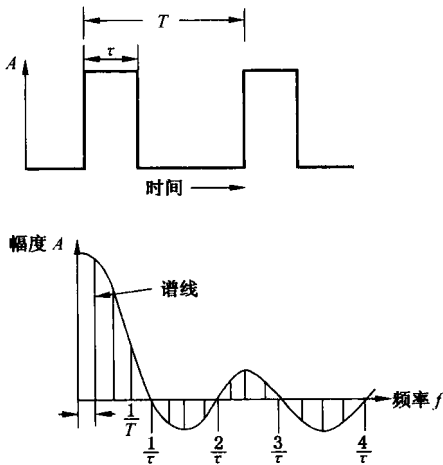


图 1-6 矩形波及其频谱

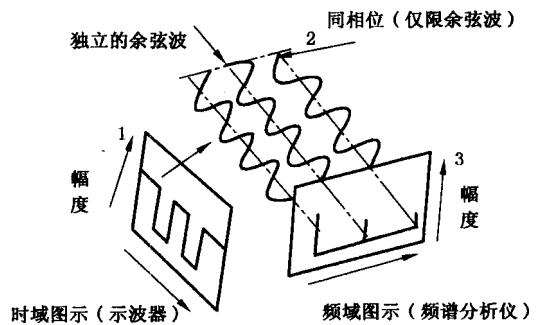


图 1-7 频域和时域波形

1.5 电磁骚扰的主要危害

电磁骚扰的主要危害如下：

- (1) 强电磁脉冲可以危害人和生物以及无生命体。例如雷电可以击毁树木和房屋以及人和其他生物；静电放电可以击穿电子元件。
- (2) 使通信、导航和声音电视广播接收设备性能降低和失常。
- (3) 使医疗设备(如心脏起搏器、监护设备)工作失常。
- (4) 使自动控制设备工作失常。
- (5) 强磁场可引起弹药爆炸。

1.6 电磁兼容电平

电磁兼容电平取决于发射源的发射电平、路程衰减和受害设备的最大允许输入电平(抗扰度电平)。实际在制定干扰和抗扰度限值时,考虑到环境因素(时间、地点等)时均留有一定裕量。骚扰限值电平、抗扰度限值电平、兼容电平等关系如图 1-8 所示。

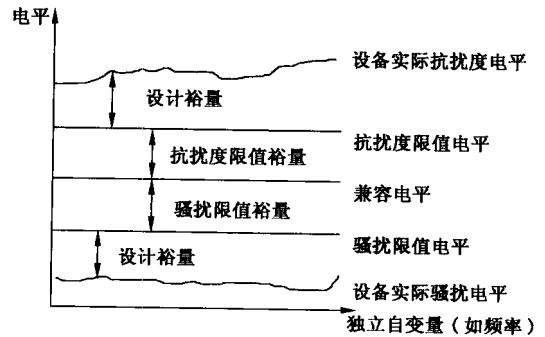


图 1-8 兼容电平与限值的关系

1.7 EMC 设计的重要性

EMC 设计有如下几个阶段：

- (1) 根据相关标准了解 EMC 限值及其试验方法；

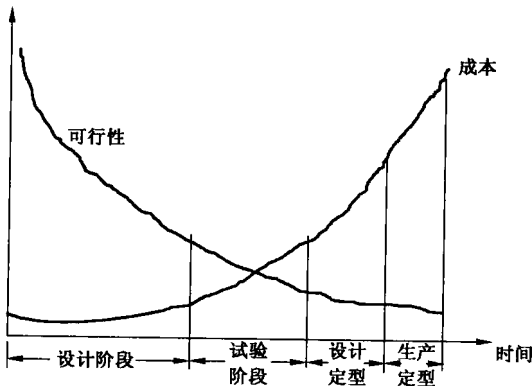


图 1-9 各阶段 EMC 的可行性与成本示意图

- (2) 提出 EMC 的可行设计方案；
- (3) 确定电路结构的布置；
- (4) 对初样产品进行 EMC 试验,满足 EMC 要求否；
- (5) 改进设计,达到 EMC 要求；
- (6) 生产定型。

达到 EMC 要求是 EMC 工程师精心设计的结果,不是定型后改进的结果。

如果到生产阶段进行整改,不仅费时而且成本(EMC 件)成倍增加,也增加抑制措施的难度,限制了改进的自由度。可行性、成本和时间关系如图 1-9 所示。

1.8 EMC 标准

1.8.1 国际标准

- (1) IEC/CISPR 国际电工委员会/国际无线电干扰特别委员 CISPR 系列标准；
- (2) IEC/TC-77 国际电工委员会/电磁兼容技术委员会 61000 系列标准出版物。

1.8.2 地区标准

欧共体 EN 系列标准。



1.8.3 国家标准

- (1) 中国 GB 系列；
- (2) 美国 FCC, ANSI 系列；
- (3) 日本 VCCI 系列；
- (4) 德国 VDE 系列, 等等。

1.9 EMC 研究的频率范围

就目前而言, EMC 研究的频率范围十分宽广, 已从 0 Hz(直流)到 400 GHz, 波长从无穷大到 0.75 mm。波长和频率有如下公式:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-7)$$

式中: λ ——波长, m ;

f ——频率, Hz ;

c ——光速, 等于 3×10^8 m/s。

第 2 章 印制电路板 (PCB) 设计基础

任何电子和电设备,都离不开印制电路板(PCB),PCB 由有源和无源元件及基板组成,是 EMI 产生的源头,因此印制电路板设计的合理与否不仅关系到设备性能优劣,也直接关系到 EMI 和 EMS 的电平合格与否。

在这一章中所研究的内容如下:

- (1) 无源元件的寄生特性;
- (2) 在印制电路中为什么会产生射频(RF)能量;
- (3) 磁通及其抵消要求;
- (4) 走线的拓扑布置;
- (5) 叠层设定;
- (6) 径向排列;
- (7) 共模和差模电流;
- (8) 接地方法;
- (9) 高频电流的最佳返回路径;
- (10) 幅形比(宽高比);
- (11) 镜像平面及其用途;
- (12) 分区。

通常设计者希望对 PCB 内部的 RF 能量进行抑制,通过合理布局,减少 RF 能量,并用金属壳体进行屏蔽,以达到 EMC 的要求。

2.1 无源元件的高频寄生特性

由于无源部件引线的存在,在高频时存在引线电感和分布电容,使阻抗发生变化,这是产生 EMC 的原因,无源元件低、高频的特性如图 2-1 所示。

习惯上 EMC 被认为是“黑盒子艺术”,实际上 EMC 由复杂的数学关系来解释。为了消除神秘的数学分析,如图 2-1 所示,我们可采用图示的方法来分析元件的高频属性。

一根导线,在低频时可认为是根短路线,但是在高频时除了自身直流电阻外,还有串联电感存在。电阻由于有引线存在,故除电阻外还有引线电感和分布电容存在。对于分立的电容器,在高频下不只是一只电容,而且有引线电阻和电感存在。同样对一些电感器而言,也存在引线电感和并联的分布电容存在。由于分立元件存在分布电容和引线电感,所以在高频时,阻抗发生了很大的变化,出现了谐振情况。所以随频率的增高,在某一频率点阻抗会变小,出现短路或阻抗变到最大,近于开路的情况。由于产生反射,使发射大大增加,在设计多层板时,均采用贴片元件,不仅大大缩小了体积,也减少了分布电容和引线电感,减少了电磁发射。