



中华人民共和国国家标准

GB/T 43262—2023

电磁干扰诊断导则

Guide to the troubleshooting electromagnetic interference

2023-11-27 发布

2024-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义和缩略语..... 1

 3.1 术语和定义 1

 3.2 缩略语 2

4 电磁干扰诊断概述 2

 4.1 电磁干扰诊断基本概念 2

 4.2 电磁干扰诊断过程 7

5 RE 问题诊断 9

 5.1 概述 9

 5.2 RE 检查清单 9

 5.3 不合格的典型原因 10

 5.4 RE 故障诊断 10

 5.5 典型的解决办法 16

6 CE 问题诊断 17

 6.1 概述 17

 6.2 CE 检查清单 18

 6.3 不合格的典型原因 18

 6.4 CE 故障诊断 18

 6.5 特殊情况和问题 21

 6.6 典型的解决办法 22

7 RI 问题诊断 22

 7.1 概述 22

 7.2 RI 检查清单 22

 7.3 典型的失效模式 23

 7.4 RI 故障诊断 23

 7.5 特殊情况和问题 24

 7.6 典型的解决办法 24

8 CI 问题诊断 25

 8.1 概述 25

 8.2 CI 检查清单 25

 8.3 典型的失效模式 25

8.4 CI 故障诊断 26

8.5 特殊情况和问题 27

8.6 典型的解决办法 27

9 EFT/B 问题诊断 27

9.1 概述 27

9.2 EFT/B 抗扰度检查清单 27

9.3 典型的失效模式 28

9.4 EFT/B 故障诊断 28

9.5 特殊情况和问题 30

9.6 典型的解决办法 30

10 浪涌(冲击)问题诊断 31

10.1 概述 31

10.2 浪涌(冲击)抗扰度检查清单 31

10.3 典型的失效模式 32

10.4 浪涌(冲击)故障诊断 32

10.5 特殊情况和问题 34

10.6 典型的解决办法 34

11 ESD 问题诊断 34

11.1 ESD 概述 34

11.2 ESD 抗扰度检查清单 35

11.3 典型的失效模式 35

11.4 ESD 故障诊断 35

11.5 特殊情况和问题 38

11.6 典型的解决办法 38

附录 A (资料性) PCB 级 RE 诊断 40

附录 B (资料性) 电源滤波器的设计与选型 45

附录 C (资料性) 不同端口的浪涌抑制电路示例 49

参考文献 56

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国无线电干扰标准化技术委员会(SAC/TC 79)提出并归口。

本文件起草单位：中国电子技术标准化研究院、深圳市恒创技术有限公司、北京泰派斯特电子有限公司、美的集团股份有限公司、深圳市韬略科技有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、广州致远电子股份有限公司、扬芯科技(深圳)有限公司、中电科思仪科技股份有限公司北京分公司、上海市计量测试技术研究院、四川省药品检验研究院(四川省医疗器械检测中心)、厦门市产品质量监督检验院、上海雷卯电子科技有限公司、航卫通用电气医疗系统有限公司、中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司、江苏省电子信息产品质量监督检验研究院(江苏省信息安全测评中心)、中国汽车工程研究院股份有限公司、广东中认华南检测技术有限公司、健研检测集团有限公司、北京邮电大学、中家院(北京)检测认证有限公司、中科都兴电磁技术(北京)有限公司、河南凯瑞车辆检测认证中心有限公司、北方自动控制技术研究所、联正电子(深圳)有限公司、深圳市亿联无限科技有限公司、苏州铂韬新材料科技有限公司、广东顺德科锐玛电器有限公司、东莞市东电检测技术有限公司、广州市德珑电子器件有限公司、深圳市黑金工业制造有限公司、深圳市佳贤通信科技股份有限公司、广东博纬通信科技有限公司。

本文件主要起草人：崔强、付君、朱文立、李金龙、高新杰、叶畅、陈勇志、杨红波、孙美秋、杨邦、李云鹤、邵鄂、杨志奇、李如宝、胡光亮、夏连生、郭建东、陈政宇、胡建、孙晋栋、康亚强、吕凌、黄雪梅、卢炎汉、林森、石丹、赵熠晨、刘渊正、李腾飞、张振林、何少波、陈政、刘忠庆、谢建萍、余江、汪民、贾涛、任恩贤、吴泽海。

电磁干扰诊断导则

1 范围

本文件给出了电子/电气设备电磁干扰(EMI)诊断技术和基本方法。
本文件适用于电子/电气设备的 EMI 故障诊断,并为电子/电气设备的 EMI 故障的解决提供指导。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容
GB/T 17626.5—2019 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 4365—2003 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

衰减 **attenuation**

信号从一点到另一点的传输过程中,其电压、电流或功率减少的量值。

3.1.2

搭接(接地和直流电阻) **bonded(ground connection and d.c.resistance)**

在两个金属部件间获得尽可能小的阻抗(电阻和电感)。

注:直流电阻一般不超过 10 mΩ。使用低电流(≤100 mA)4 线制毫欧计进行测量。

3.1.3

耦合路径 **coupling path**

能量从噪声源传输到受扰电路或系统所经由的结构或媒介。

3.1.4

串扰 **crosstalk**

一个电路到另外一个电路的电磁耦合。

注:这种现象通常出现在线缆之间或电路印制线之间。

3.1.5

骚扰源 **disturbance source**

噪声源 **noise source**

对其他电路或系统产生电磁干扰或破坏的源。

示例:开关电源、时钟电路(晶振电路)、高速数据总线、感性负载的通断等。

3.1.6

插入损耗 **insertion loss; IL**

由传输线路或系统中插入转换网络所引起的损耗。

注：插入损耗通常为下述 a)、b) 两项的比值，以 dB(分贝)表示：

- a) 在插入转换网络之前，分配给传输线路或系统中待置转换网络后续部分的功率；
- b) 在插入转换网络之后，分配给传输线路或系统中该后续部分的功率。

3.1.7

受扰者 victim

接收电磁骚扰且受到干扰的电子元件、电路、装置或系统。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AC 交流(alternating current)

AMN 人工电源网络(artificial mains network)

ASIC 专用集成电路(application specific integrated circuit)

BCI 大电流注入(bulk current injection)

CAD 计算机辅助设计(computer aided design)

CE 传导发射(conducted emissions)

CI 传导抗扰度(conducted immunity)

DC 直流(direct current)

EFT/B 电快速瞬变脉冲群(electrical fast transient/burst)

EM 电磁(electromagnetic)

EMC 电磁兼容性(electromagnetic compatibility)

EMI 电磁干扰(electromagnetic interference)

ESD 静电放电(electrostatic discharge)

EUT 受试设备(equipment under test)

GDT 气体放电管(gas discharge tube)

IC 集成电路(integrated circuit)

IL 插入损耗(insertion loss)

LCD 液晶显示器(liquid crystal display)

MOV 压敏电阻(metal oxide varistor)

OEM 原始设备制造商(original equipment manufacturer)

PCB 印制电路板(printed circuit board)

PLL 锁相环(phase locked loop)

PPTC 自恢复保险丝(polymer positive temperature coefficient)

RE 辐射发射(radiated emissions)

RI 辐射抗扰度(radiated immunity)

SMT 表面贴装技术(surface mounting technology)

TSS 半导体放电管(thyristor surge suppressor)

TVS 瞬态抑制二极管(transient voltage suppressor)

4 电磁干扰诊断概述

4.1 电磁干扰诊断基本概念

4.1.1 EMI 问题的基本形式

EMI 问题的基本形式由以下 3 个部分组成：

——能量(骚扰)源，即发射器或骚扰源电路或设备；

- 受扰者,即接收器或接收电路或设备;
- 耦合路径。

EMI 的 3 个组成部分及其能量的耦合方式如图 1 所示,能量耦合方式主要有以下 4 种。

- 感性耦合,其产生需要时变的电流源和两个“环路”或两条平行导线(具有返回路径),其主要通过磁场耦合。

注 1: 这种耦合的例子:开关电源中的电源变压器(具有大的 di/dt)与附近电缆的耦合或一条“有噪”电缆走线时位于另一条电缆的附近。

- 容性耦合,其产生需要时变的电压源和两块紧耦合的金属“板”(金属板也可以是两条平行导线)。

注 2: 这种耦合的例子:开关电源(具有大的 dV/dt)的大散热片,其与电缆或附近的 PCB 发生耦合。

- 辐射耦合,其产生需要两副天线,例如发射电路或导线与接收电路或导线。发射天线可以是大的结构,在这种结构中,能量源耦合给金属外壳、设备或电缆,也可以是作为能量源的发射器(即图 1 中的骚扰源电路或设备)。接收器(即图 1 中的接收电路或设备)可以为广播或电视接收机或其他受扰设备。在 EMI 试验中,一副天线是实验室所用的 EMI 天线和接收机系统。能作为天线的常见结构包括输入/输出(I/O)电缆、内部电缆和屏蔽壳体上的开口、槽或缝隙。如果这些结构(电缆或缝隙)的耦合频率接近谐振频率(通常对应于半波长的谐振频率),则这种情况更符合形成天线的条件。这种类型的耦合通常位于 EUT 外部。

- 传导耦合,其产生需要骚扰源与接收器之间具有连接导线,且这种耦合通常与导线的长度无关。骚扰源与接收器之间也同时存在共阻抗(导线或外壳结构)。在大多数情况下,这种耦合为低频效应(小于 50 kHz),通常称为地环路。在音频或声音系统中通常存在这种耦合问题。当两个或多个分系统通过相同的电源供电时经常也出现这种问题。通常的故障诊断是为每个分系统单独供电,看是否解决了耦合问题。这种类型的耦合位于设备的内部或外部。

感性耦合和容性耦合称为近场耦合。这些类型的耦合通常出现在 EUT 内部。对于近场耦合,如果耦合结构之间增加较小的距离,耦合效应将会显著地减小,所以把两个环路或平面相隔开是解决这种干扰故障的方法。

示例:如果怀疑电源变压器可能与某个敏感电路相耦合,则需尽量延长变压器的引线使得变压器和可疑受扰电路之间存在一定的距离。通过改变铁心和绕组的方位,如果观察到耦合发生较大变化,则就可确认其为近场耦合。

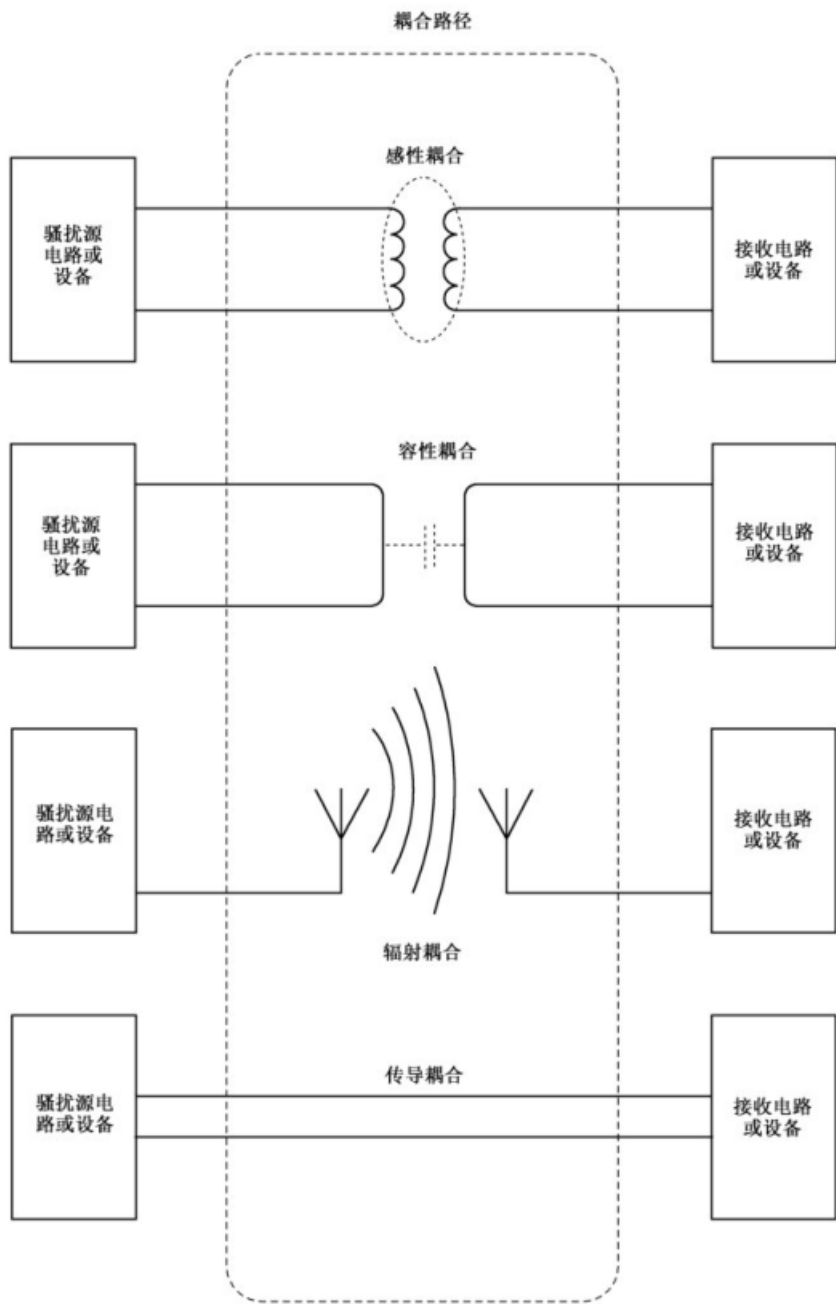


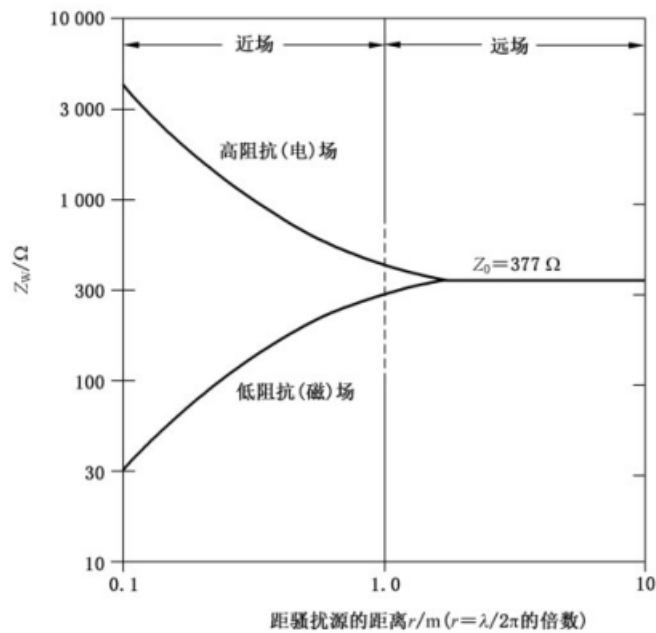
图 1 EMI 的三个组成部分及其能量的耦合方式

4.1.2 近场和远场

由于电磁(EM)能量源为时变的电压源或电流源,因此,当非常接近这些能量源时主要的场分量为电场(E)或磁场(H)。通常,导线或电路印制线中流动的电流产生的主场分量为磁场,而高压产生的主场分量为电场。考虑这种问题的另外一种方式,即电流环路是主要的磁场源,而金属表面(例如散热片)是主要的电场源。电路印制线产生的是电场还是磁场,则取决于其与环路相关的多还是与金属表面相关的多。这些骚扰源可用近场探头确定,近场探头用来测量磁场或者电场。

如图 2 所示,高阻抗电路(通常与高压相关)通常会产生高的电场,而低阻抗电路(通常与大电流环路相关)通常会产生高的磁场。当探头(或接收天线)远离电磁能量源超过大约 $1/6$ 波长(即 $\lambda/2\pi$)时,电场和磁场的阻抗趋于自由空间的波阻抗 Z_0 (约为 $377\ \Omega$),电磁场成为平面波。由于所有天线都

能对电场和磁场产生响应,因此通常都使用天线测量电场或磁场,但当评估 EUT 产生的 RE 时,测量天线主要测量一定距离(通常为 3 m 或 10 m)处的电场。



标引序号说明：
 Z_w ——波阻抗,单位为欧姆(Ω)；
 Z_0 ——自由空间的波阻抗,单位为欧姆(Ω)；
 r ——距骚扰源的距离,单位为米(m)；
 λ ——波长,单位为米(m)。

图 2 近场和远场以及与波阻抗之间的关系

电小环天线结构(例如短的电缆或电路印制线),其与能量的波长相比为电短的,通常为弱的辐射体,其发射的能量随着距离的三次方($1/r^3$)进行衰减。因此,磁场源与接收电路或导线通常应非常接近且位于近场范围内,这为磁场耦合。

导线和金属板为高阻抗的电场源。其发射的能量,不像磁场衰减那样快,而是随着距离的二次方($1/r^2$)进行衰减。其可以与其他高阻抗电路、导线或金属板实现最佳耦合。这些金属结构之间应非常接近且位于近场范围内,这为容性电场耦合。

图 2 给出了近场和远场以及与波阻抗(Z_w)之间的关系示例,其为确定近场和远场的几种模型之一。这些模型和过渡区取决于许多因素,包括发射结构和接收结构的物理尺寸、增益、源阻抗和负载阻抗。当六分之一波长位于过渡区内时,通常认为 3λ 的距离可确保为远场, $\lambda/16$ 可确保为近场。

在远场中,电场和磁场引起噪声问题的潜在几率是相等的。要确定哪种场在实际当中影响最显著,敏感电路是什么。敏感电路具有更多的暴露环路面积,其会对磁场敏感;敏感电路具有更多的暴露表面面积,其会对电场敏感。

4.1.3 接地/搭接

在 EMI 故障诊断领域内,接地(grounding)实际上是指 EUT 内电路或组件的信号或电源的返回路径而不是地或地平面。术语“地(ground)”很容易让人对其产生误解,尤其对于 EMI 分析,其也指用于把 EUT 与大地相连接的黄绿双色线。在工程设计中通常误用术语“地”,由于信号或电源返回路径或参考更能准确表达正确的 EMI 设计概念,因此本文件使用此定义。

金属部件之间的搭接应具有较低的 DC 阻抗(例如小于 10 mΩ)。良好搭接可为电流的流动(包括

高频电流)提供低阻抗回流路径。

4.1.4 壳体上的间隙

壳体上的间隙,当其长度大于 $1/10$ 波长(该波长为 EUT 产生的许多谐波频率中的任何一个所对应的)时,可作为有效的辐射天线。由于天线既能接收又能发射,因此这些间隙能使外部的射频或脉冲能量进入到 EUT 内部,从而使电路受到干扰。此外,任何组件,例如 LCD 显示屏,应与金属壳体在多点进行搭接。当评估屏蔽壳体搭接的完整性时,铜箔或铝箔都是有用的故障诊断工具。

4.1.5 电缆搭接

由于完整的环形(例如 360°)搭接有助于阻止电缆的辐射,所以任何输入/输出(I/O)连接器或电源连接器的导电外壳都应 EUT 的屏蔽壳体进行良好的搭接。

4.1.6 屏蔽

金属屏蔽体可作为高频电磁场的屏障。大多数 EUT 都有完全包围电路的金属壳体或具有金属镀层的塑料壳体。基于此,确保 EUT 壳体的所有部分很好地搭接在一起则是非常的重要。当需要将电缆穿过 EUT 壳体时就需要注意。除非电缆连接器搭接到壳体,否则共模(噪声)电流会沿着电缆导线或电缆屏蔽层的外层进行泄漏。理想情况下连接器应与 EUT 壳体进行 360° 搭接。这意味着涂层(例如油漆、镀层等)都会影响搭接,连接器的一面良好搭接到机壳要比差的高阻抗 360° 搭接更好。

4.1.7 滤波

设计良好的 EUT 中通常都会使用滤波器。安装滤波器的目的是阻止高频电流(其会产生 RE)向后级流动或阻止脉冲能量(例如 ESD、电源线瞬态)或射频干扰进入电路。壳体设计为非屏蔽的 EUT 应依靠滤波和良好的 PCB 设计以符合 EMI 要求。通常使用下述方式:

- 开关电源的输入和输出都宜进行滤波;
- 微控制器 IC 的复位引脚通常安装阻容(RC)滤波器;
- I/O 数据线和电源线使用 RC 滤波器或共模扼流圈;
- I/O 电缆上所夹的铁氧体可作为高频扼流圈。

4.1.8 电缆布线和互连电缆

通常情况下,由于:

- EUT 的外壳为非屏蔽的且电路和 PCB 设计得不好;
- 电缆连接器穿过屏蔽壳体时搭接不正确(如图 3 所示)。

因此,在 EMI 发射中,电缆很可能是首要的发射源。

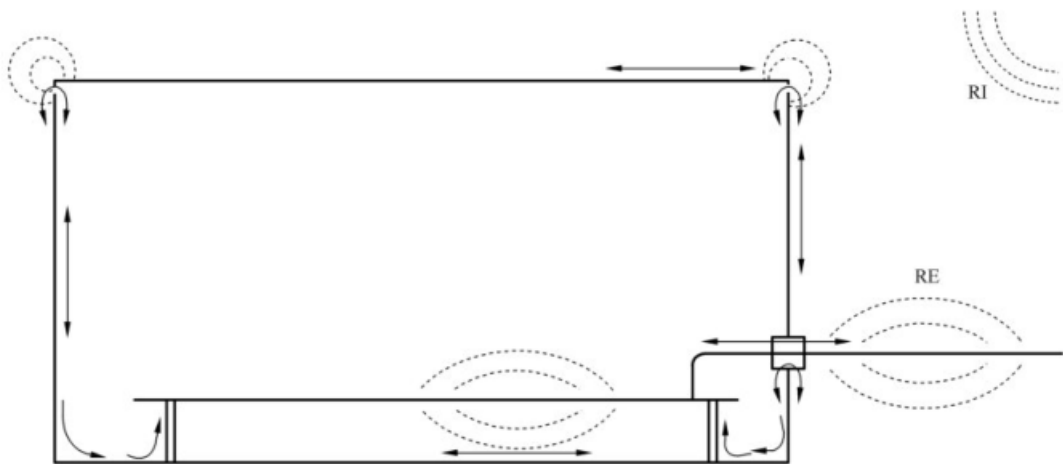


图 3 电缆连接器穿过屏蔽壳体时产生 RE

注：穿过屏蔽壳体的电缆会使屏蔽无效，高频共模电流在屏蔽体的外侧产生辐射。此外，壳体上的间隙或缝隙也能够作为辐射天线（例如产生发射）或接收天线（例如对 ESD 敏感）。

EUT 设计时宜使互连电缆的数量最少。此外，对于每一条信号和电源导线，都应有信号和电源返回导线。

对于排线，应在信号导线和电源导线下面增加信号或壳体返回平面，并确保每个电路的返回导线的每一端与返回平面进行多点连接。

确保互连电缆之间或与另外的能量源不会产生耦合（如图 4 所示）。如果壳体为金属，则电缆最好紧贴金属机壳内侧进行布线以减小电缆周围的电场。

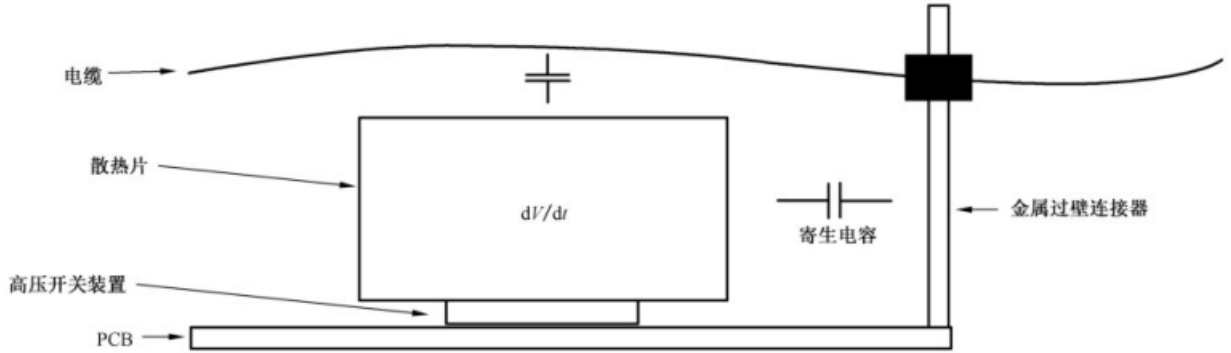


图 4 互连电缆与能量源的耦合

4.1.9 PCB 级的设计及其 RE 诊断

PCB 级的设计考虑和 RE 诊断见附录 A。

4.2 电磁干扰诊断过程

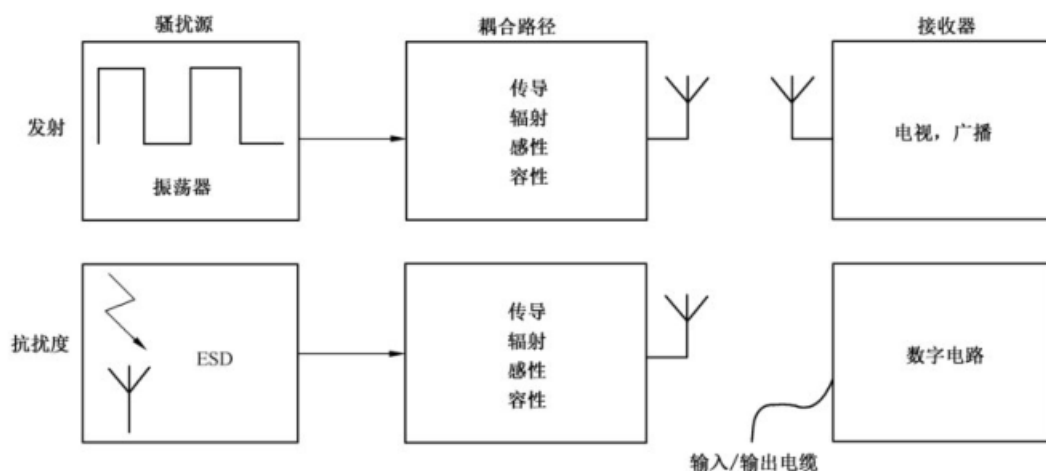
EMI 的故障诊断过程通常由以下三个基本环节组成。

- 去掉元件、分系统或者相关设备，以确认它们是否对 EMI 问题产生影响。例如，对于 RE 问题，宜尝试移走 EUT 的辅助设备以确认问题是出自辅助设备还是 EUT。由于电缆通常为辐射源，因此另一种好的诊断方法是移走所有不必要的电缆。如果 EUT 产生的发射仍超过限值，那么出问题的可能是屏蔽壳体或 PCB。
- 特定频率的谐波发射通常是由多个骚扰源或辐射结构产生，其中某个骚扰源或辐射结构可能

是主要的发射源,要比其他骚扰源或辐射结构的发射要强。当使用一种或多种解决办法,定位到主要的发射源时才能看到发射的减小。通常最佳的做法是使用所有潜在的解决办法使 EUT 合格,然后再逐一去掉所使用的解决办法,最后识别到底是哪些方法解决了问题。

- c) 先使用一切办法使 EUT 合格,然后再进行简化,以确定成本最低的解决办法。由于有些潜在的 EMI 解决办法成本过高或过于复杂,则不会使用。

解决 EMI 问题的关键是能够识别骚扰源、潜在的耦合路径以及接收器或接收电路。图 5 给出了不同骚扰源和接收器的示例。对于发射和抗扰度,四种耦合路径同样有效。对于 RE,接收器通常为 EMC 试验设施中使用的 EMI 接收机或频谱分析仪。EUT 或系统产生的发射通常具有规定的限值。在实际环境中,接收器是任何通信系统或其他设备。



注：相同的耦合路径可用于发射模型或抗扰度模型。

图 5 用于 EMI 故障诊断的骚扰源—耦合路径—接收器模型

对于发射问题,可使用近场探头(磁场或电场)确定最大能量电平。常见的内部骚扰源有时钟振荡器、大功率缓冲器、模数(A/D)或数模(D/A)转换器、ASIC、电源变压器、开关器件或任何具有快速上升沿的高频数字信号(例如低速存储器或地址总线)。也可以在单个电源和 I/O 信号电缆上使用射频电流探头确定骚扰源。对于 200 MHz 以下的多数 RE 问题,电缆产生的 RE 问题要比设备外壳或内部电路直接产生的多。

当工作频率为几十兆赫或几百兆赫时,如果确定在某个位置使用电容可解决问题,但焊接的电容具有长的(5 cm~8 cm)引线,引线的电感将会影响电容的性能,尤其在较高的频率。在这些频率,宜使用引线长度最短的元件或 SMT 元件。另外一种情况是屏蔽电缆和外壳之间好的射频搭接。电缆屏蔽层或电路板和外壳之间连接的短导线(也称为“软辫线”)在所考虑的谐波频率时很可能不具有足够低的阻抗。为了使搭接更为有效,宜进行多次连接或者如果可能,使用短(例如 0.6 cm)宽的金属条(或多条导线)进行搭接。发射问题的故障诊断见第 5 章~第 6 章。

对于抗扰度问题,骚扰源可为 ESD、附近的射频发射机或电源线瞬态(由雷击或电源线上的大负载产生);也可为产生噪声的设备,例如电源线上连接的电机或滤波不好的开关电源。对 ESD 或电源线瞬态进行监测,可将这些现象与出现的问题相联系并进行识别。抗扰度问题的故障诊断见第 7 章~第 11 章。

识别出了潜在的骚扰源,可用下面这些方式识别耦合路径。

——传导耦合:通常情况下,如果路径为传导耦合路径,处理的是导线或电缆束上的时变(AC 或射频)电流,这些电流可能没进行足够的滤波(或去耦)。一种情况是这种电流先传输到远端的位置或负载,然后通过另外一条导线或电缆束返回到骚扰源。另外一种情况是噪声源和受扰者

之间具有公共的返回路径。骚扰电流与环路长度无关,因此,如果把骚扰源和接收器(或受扰电路)从物理上相隔开,干扰问题仍存在,那么这种问题通常就是传导耦合。然而,辐射耦合也仍是有可能的。

- 感性或容性耦合:如果耦合是感性或容性的,增加骚扰源和接收器之间的物理距离则可显著减小骚扰对电路的影响。例如,骚扰源为电源变压器,宜尝试着把变压器连接在延长的导线上,使其位于不同的方向或距离上。如果骚扰源为开关电源的散热片,把散热片短时间的移走看是否解决了问题(如果移走散热片电源工作不安全,则使用附加的非导电但导热的垫子或隔离物以减小电容)。散热片也会与附近的电缆产生容性耦合,监测干扰时宜尝试移动电缆。感性耦合通常出现在电缆和 PCB 电路之间或者两条电缆之间。使用隔离通常也能表明耦合机理是否为感性的。
- 辐射耦合,主要是由 EUT 电缆或壳体上的缝隙产生的发射通过空间耦合(传播)给 EMI 接收天线。增加 EUT 和 EMI 天线之间的物理间隔通常并不能使谐波的幅值产生大的变化。

5 RE 问题诊断

5.1 概述

通常情况下,RE 试验不合格的原因为电缆辐射或壳体上的缝隙、孔径产生的泄漏。下述检查清单可用于 EUT 试验不合格后的问题诊断。PCB 级 RE 诊断见附录 A。

5.2 RE 检查清单

RE 由射频能量产生,而这种能量可由非常小的电流或电压形成。寄生能量和交叉耦合噪声是常见的问题。任何金属物体都可能成为天线,尤其是电缆,因此考虑以下方面。

- 通常,200 MHz 以下的辐射能量由电缆作为辐射源。在较低频率时,由于波长较长,因此导线或电缆能成为很好的天线。
- 通常,200 MHz 以上的辐射能量由壳体作为辐射源。频率越高,辐射能量的更可能是设备的壳体,或者设备没有金属壳体或为开放式的框架时辐射能量往往来自内部电路板。
- 确保所有屏蔽电缆在其两端实现低阻抗的搭接。通常高频情况下应确保屏蔽层与壳体或连接器 360°环接,应注意低频情况下屏蔽层与壳体或连接器两端搭接可能会形成地环路。除非绝对需要,不应使用“软辫线”进行搭接。
- 如果使用“软辫线”对屏蔽电缆进行搭接,应确保其尽可能短。
- 应确保壳体金属片之间实现低阻抗(搭接电阻为 10 mΩ 或更小)搭接,搭接处应没有能产生电阻的油漆或其他涂层、油脂、污垢、腐蚀或氧化层。
- 进/出设备的每条电缆都宜进行滤波,且滤波器应安装在邻近电缆进/出设备的位置。对于金属外壳设备,滤波器的金属外壳与设备机壳地应有良好的低阻抗搭接;对于非金属外壳设备,滤波器的金属外壳与设备保护地应有良好的电气连接;对于板载滤波电路,滤波电路应布置于靠近 I/O 引线的接口处,若内部连接引线使用非屏蔽线缆,其长度一般不超过 3 cm。
- 如果 80 MHz 以下存在垂直极化的发射,则宜尝试增大电源线与接地平面之间的距离,这将缩短 EUT 通过接地平面到天线的耦合路径。反之,宜尝试缩短电源线与接地平面之间的距离以确认发射是否增大,可确认该垂直极化的发射是否和电源线与接地平面之间的耦合相关。
- 如果有与 EUT 相连的辅助设备,应确认它们不是噪声源。如果可能,关掉辅助设备的电源。如果不能关掉辅助设备的电源,则可以关掉 EUT 的电源,仅留下辅助设备工作。如果发射信号仍存在,则噪声源可能为辅助设备而不是 EUT。

5.3 不合格的典型原因

EUT 未通过 RE 试验的原因通常是由以下方面引起的。

- 电缆：I/O 电缆由于其屏蔽层与机架或壳体搭接不良、缺少足够的滤波或简单地穿过屏蔽壳体，因此其通常会产生高频辐射。通常情况下，200 MHz 以下 RE 试验不合格的原因为电缆辐射，电缆通常为 EUT 的最长部分，电缆的物理长度使其成为有效的发射天线（天线越长，发射效率越高）。
- 金属机壳：高频（通常大于 200 MHz）发射通常由 EUT 的金属机壳产生。高频时，I/O 电缆通常为感性，对于流动的射频电流，其阻抗要比机壳的阻抗大，因此，机壳上的射频电流通常更易产生辐射。一种例外情况是 EUT 为大型设备，例如，一台 2.1 m 高的金属壳体，当其位于接地平面上时，在 30 MHz~40 MHz 可能存在四分之一波长的谐振。
- 机壳缝隙：EUT 内部电路板能在机壳的内表面上产生电流。这些高频电流可从缝隙或间隙泄漏出去，在 EUT 机壳或壳体外部的附近流动，因此，整个壳体变成了发射天线。一种例外情况是电流被耦合到机壳上的点非常接近于骚扰源时，它们中的大部分能返回到骚扰源，这就是在电路板上或电路板的参考返回平面上使用旁路电容抑制 RE 的原因。

当 EUT 壳体的高频电流流经缝隙时，该缝隙会对高频电流呈现阻抗（例如几毫欧），从而在缝隙间产生电势差，该电势差产生电场 RE。水平缝隙从其顶部到底部具有电压梯度或矢量，能产生垂直极化的电场；垂直缝隙主要产生水平极化的电场。一种好的故障诊断技术是通过电场（假设使用的是电场天线）的主极化，然后确定这种电场是否由垂直或水平搭接不良的缝隙产生。

如果 EUT 包括显示屏，则显示屏跟机壳之间的安装缝隙易出现泄漏。其他的泄漏区域包括通风口、插入式板卡或金属连接器（典型个人计算机机壳上所用的）与机箱挡板之间的空隙。

5.4 RE 故障诊断

5.4.1 在实验室进行的 RE 故障诊断

在实验室进行 RE 故障诊断，宜考虑以下三个方面。

- 诊断过程中宜能看到频谱分析仪的显示屏，同时确保观察到的发射不是来自于调频（FM）广播、蜂窝电话等产生的环境信号。可能需要关掉 EUT 电源以确认是否为环境信号。
- 诊断过程中人员进入电波暗室会影响 EUT 的 RE 测量结果。发射电平可能会与进入前不同，同时 EUT 最大发射位置的角度也会发生变化。EUT 及其电缆发生轻微的移动，最大发射位置的角度也可能会发生变化。因此，在诊断过程中，EUT 的 RE 电平若有降低时，要意识到其可能是最大发射的角度或位置发生了移动引起的。
- 避免人员站在测量天线和 EUT 之间（见图 6）。

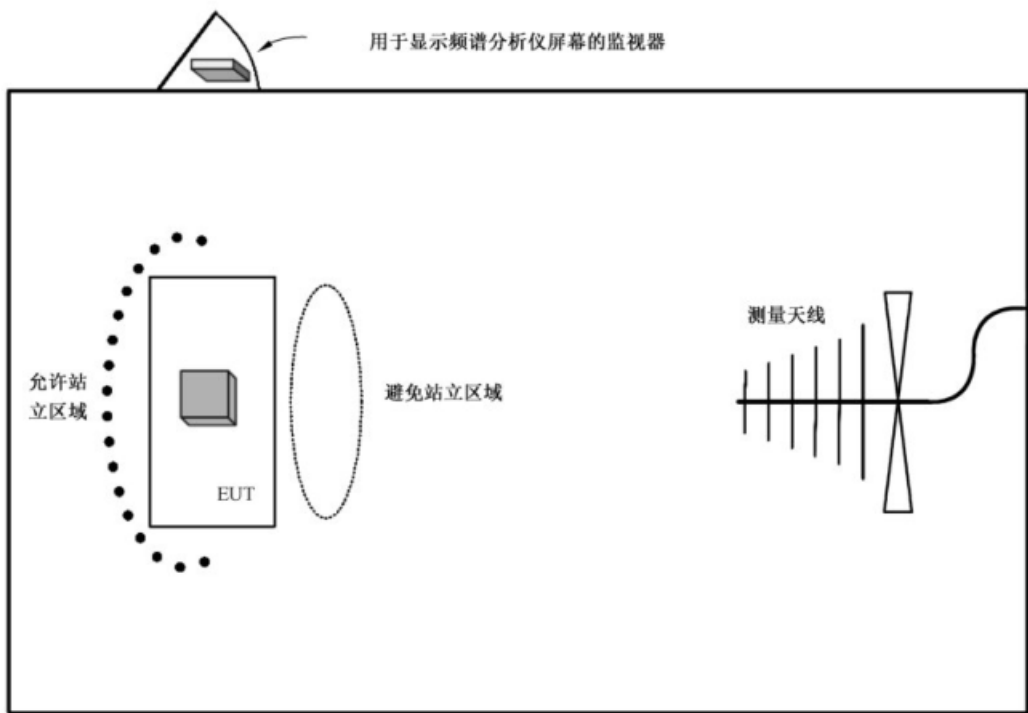


图 6 RE 故障诊断时试验人员站立的位置(俯视图)

注 1: RE 故障诊断过程中通常要移去 EUT 的壳体以及移动内部导线、电缆或其他组件,在移动 EUT 内部组件时注意预防,避免高压触电。

RE 故障诊断程序如下。

a) 电缆排查。

- 通过抓住(如果这样做安全)和松开电缆,能快速识别电缆是否为辐射体。这样做时,宜尽可能减小移动,因为电缆会与电波暗室和人员所站的区域发生谐振或失谐。也可通过使用一根非导电棍挑起电缆,人员站立的位置到 EUT 要有一定的距离,由于不与电缆相接触,因此,减小了人员对电缆辐射场的影响。测量结果的任何变化仅来自于电缆的移动。
- 与 EUT 相连的 I/O 电缆,每次可尝试仅断开这些电缆中的一根,其余电缆仍保持连接,直到所有的电缆都被断开,这有助于识别是哪根电缆产生了辐射。
- 使用非导电的钩针,每次从电缆束中拉出单根导线,可用手指接触这些导线(如果这样做安全),触摸和松开导线以确认它们是否敏感以及 RE 电平是否发生了改变。
- 测量导线或电缆屏蔽层上流动的共模电流,是识别辐射电缆的最佳方法之一。通过用电流探头就近钳住 EUT 的导线,用频谱分析仪测量导线中的射频电流,这种射频电流与 RE 有很强的相关性。实际上,对于电短电缆(小于 $1/4$ 波长),能预测其产生的电场(单位为 V/m),这种电场可与标准限值进行比较。
- 使用近场探头测量导线产生的电场或磁场也是识别辐射电缆的最佳方式之一。通过用近场探头沿着线缆移动,注意变化探头的方向以获得最大测量值,这种电场或磁场与 EUT 的 RE 有很强的相关性。

注 2: 当使用前置放大器时,避免近场探头非绝缘部位与高压部件相接触。

b) 壳体排查。

- 如果认为不是电缆产生的问题,在安全的前提下可将手放置在设备的壳体或外壳上。如果可能,可按压或挤压机箱以确保设备金属壳体之间接触或断开。在这种情况下,RE 电平可能会突然抬高或降低,这表明机箱的某些部位断开了或得到了良好接触。若为这种情况,检查金属表面之间的涂层或喷涂物。

c) 辅助设备排查。

——排查辅助设备是否为辐射源时,在不影响 EUT 主要功能的前提下,可断开辅助设备电源。若无法断开辅助设备电源,则可断开 EUT 电源仅留下辅助设备工作,如果 RE 仍存在,则辅助设备可能是辐射源。辅助设备位于电波暗室外也适用。

——进出电波暗室的电缆可能包含大量的射频能量,这些能量在电波暗室内重新进行传播,应确保这些电缆进行了有效滤波、屏蔽或使用某些方式进行了处理以避免产生辐射问题。有时在较长的辅助电缆上串一些铁氧体磁环能有效减小其对 EUT 的影响。如果 EUT 或辅助设备不能断开电源,可尝试通过改变负载、运行状态、数据率或其他功能,再观察 RE 电平的变化。

d) 整体排查。

——可考虑使用一对长的铝编织针(也可使用万用表的表笔或焊接在导线上的连接器插针),使用绝缘胶带(例如电工胶带)包裹其中一根的绝大部分,通过使用编织针的导电端接触连接器、连接器的插针、电路板、机箱和机壳部件(但一定注意连接器插针的短路等),观察发射电平的增加或减小,可识别出敏感区域,在这些区域应仔细进行排查。当导线连接到敏感区域时,其能与测量天线的极化处于相同的方向,因此这样的方式易于使用。

——对于小型和中型设备,可使用铜箔或铝箔包裹整个设备。由于覆盖的区域很大,不宜使用铜胶带或铝胶带。当用导电胶带一层一层包裹设备时,胶带粘贴部位的阻抗能显著减小屏蔽层的屏蔽效能。铝箔不像导电胶带,其不会受到阻抗的影响,包裹设备时铝箔应叠加,以覆盖铝箔之间的缝隙。如果可能,铝箔应与所有连接器和电缆的屏蔽层进行搭接。为了确保这种搭接,在连接器的周围要使用扎带或束线带。如果设备还继续产生辐射,则可把包裹了铝箔的设备放置在导电接地平面(即地板,如果其作为接地平面)上。如果设备仍继续辐射,则电缆很可能仍还存在问题。如果使用这种方式解决了 RE 问题,则机壳可能是辐射不合格的原因。慢慢地剥离认为很可能没有问题的区域(例如没有显示屏或连接器的实体面板)上的铝箔,最后再移去连接器和显示屏上的铝箔。每剥离一些铝箔,宜进行核查以确认发射电平是否返回到之前的测量值或仍保持低值。进行这种故障诊断时宜同时观察频谱分析仪上频谱曲线的变化。

5.4.2 在自有设施中进行的 RE 故障诊断

5.4.2.1 概述

为了确保较低的电磁环境电平,故障诊断场所宜选择屏蔽室或地下室。

把 EUT 放置在桌子或工作台的一端,另外一端放置测量天线,距离 EUT 1 m 远。为了更清楚地观察谐波发射,可将天线移得更近。测量天线在所关注的频段内宜发生谐振。

把频谱分析仪与测量天线相连,将其调节到所关注的一个谐波或多个谐波频率上。宜在试验布置条件下建立测量结果的基准线,通过对比,可知道是否改善了 RE。如果频谱分析仪有这种基准线,可把显示线设置到最大谐波值上。如果同时评估好几个谐波,也可把基准线都保存在屏幕上,在故障诊断过程中与之比较。这可作为参考以帮助判断使用的解决办法是否有用。

如果测量距离为 1 m,使用调整后的如图 7 所示的 RE 限值,这样可粗略评估发射电平是否符合 3 m 或 10 m 的发射限值要求。

注 1: 由于被测的频率可能位于近场,测量结果仅是粗略估计。经验表明在测量距离 3 m 对应的限值的基础上增加 6 dB 通常更为准确。

注 2: 根据经验,当对特定谐波进行故障诊断时,测量距离 1 m 时发射电平 10 dB 的减小并不意味着测量距离 3 m 或 10 m 时也减小 10 dB。这种现象的主要原因是近场和远场效应。这种效应使得场强与测量距离之间并不是线性的反比关系。其次,认为 2 dB~3 dB 的减小是显著的改善,但此数值可能小于测量误差或者可能小于人员位置或设备和电缆位置的变化引起的测量结果的变化,这些因素都会影响天线或 EUT 的辐射波瓣图。

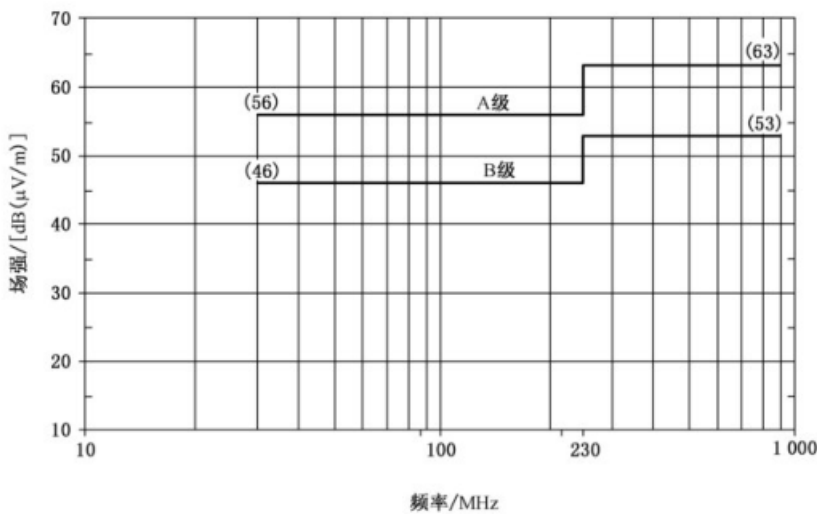


图7 测量距离 3 m 转换为测量距离 1 m 的 RE 限值(即加上 6 dB 的修正因子)

排查由电缆发射还是由外壳发射产生的(或两者的组合),可以使用近场扫描或电流探头。使用电流探头钳住 EUT 电缆,每次钳住一根,沿着电缆向两个方向分别慢慢地滑动探头得到最大读数以识别最强的发射源。通常情况下,电缆上 200 MHz 以下的共模电流与 RE 问题直接相关。

也可使用电场探头在壳体或外壳的缝隙附近探测泄漏。作为通用规则,如果泄漏缝隙被限定在较短的长度,则其可能对总的发射结果影响不大。若泄漏缝隙的长度接近十分之一波长或更长(例如,半波长的泄漏缝隙可作为有效天线),则这种缝隙可用铜胶带进行处理。

宜尝试移走不需要的 I/O 电缆以确认是否是其导致的 RE 超标。宜尝试在电缆上夹套铁氧体磁环。但一定要规定铁氧体磁环的材料,确保其能衰减电缆上的共模电流以减小所产生的磁场。

如果得到所测电缆中的谐波电流值,则可使用此电流值估算某一距离(通常为 3 m 或 10 m)处的电场。使用电流探头测量电流,然后估算符合性试验中所用的典型测量距离处的电场。电流探头的传输阻抗是随频率变化的,应确保在所测频率上使用正确的传输阻抗。

注 3: 当诊断特定的谐波时,根据标准要求周期性地扫描整个频段的频谱。很多情况下,一种潜在的解决办法虽可减小一个频段内的谐波能量,但会将谐波能量移到上一个或下一个不同的频段,这通常称为“气球效应”(一个频点的谐波值减小,而另外一个频点的谐波值增加)。这种现象通常由电缆或其他金属结构中的谐振效应产生。

5.4.2.2 时钟振荡器

产生窄带谐波的骚扰源有晶振或时钟振荡器、内部 PLL 时钟上变频器、快速时钟信号或其他产生快速(ps 或 ns)上升时间的数字电路。对于理想方波的晶振或时钟,其占空比为准确的 50%且没有过冲或失真时只有奇次谐波(例如,3 次、5 次、7 次等)。然而,由于晶振或时钟脉冲的占空比通常都有偏差(即占空比与准确的 50%有偏离),且由于信号的失真、上升和下降时间等,因此会出现偶次谐波。通常情况下,偶次谐波的幅值要小于奇次谐波。与 50%理想占空比的偏差小于 1%时产生的偶次谐波和奇次谐波是相等的。

通常不同时钟源的两个或多个谐波会落在相同的频率上。虽对某一个时钟使用了解决办法,但谐波的幅值可能并没有明显改善。

示例:假设 1# 谐波的值为 50 dBμV/m,2# 谐波的值为 34 dBμV/m(注意这两者都超过了 30 dBμV/m 的 B 级限值)。如果它们同相,两个矢量叠加得到的值为 50.9 dBμV/m。若 2# 谐波得到了抑制(使用一种解决办法),则与之前的谐波值相比并没有太大的变化(最多为 0.9 dBμV/m)。这就是为什么最好留下所有可能的解决办法直到解决了问题或识别出了所有的主要影响。

5.4.2.3 发射的识别

若发现 EUT 的结构(电缆、缝隙或其他孔径)作为辐射天线,则要保持 EUT 正常运行,尽力确定驱

动外部电缆或缝隙产生辐射的发射源和可能的耦合机理。通常情况下,发射源要追溯到特定的电路板或一组电路板上是困难的。对于此问题,在发射电缆上(在噪声源端)夹套铁氧体磁环通常是有用的。同时,寻找与其他电缆捆在一起且相耦合的噪声电缆。例如,宜尝试将噪声电缆重新布置到其他地方。通常情况下,把噪声电缆沿着金属外壳进行布置可减小电缆产生的场强。最坏情况下,可能需要使用附加的滤波对 EUT 的噪声部分进行重新优化设计。

为了识别可能是辐射源的内部电缆,宜使用射频电流探头。把电流探头钳在电缆上有助于对所怀疑的电缆或者甚至单根导线上的辐射源进行定位。这时测得的辐射值与测量整个 EUT 得到的辐射值不同,且测量曲线也可能与测量整个 EUT 得到的测量曲线不完全相同(例如,整个 EUT 的辐射有两个宽带频率峰值,但测量电缆时仅看到一个),但这是一个可能解决问题的着手点。测得的辐射源可能仅是两个或多个骚扰源中的一个,因此,如果整个 EUT 的测量曲线中有两个凸起的峰,但测量一根电缆时仅测到一个,则需要再继续寻找另外一条辐射电缆或其他辐射源。

5.4.2.4 电源线发射

如果 RE 仍存在且怀疑是由电源线产生的,可通过 AMN 测量 100 MHz 以下的 CE 进行某些 RE 故障诊断。

使用 AMN 测量 CE,然后与在实验室测量的 RE 结果进行比较。如果发现两条曲线具有相似性,则可判断电源线是产生 RE 问题的发射源之一。CE 的减小有助于改善 RE。然而,发射源可能多个,电源线仅是其中的一个。只单独使用这种解决办法不能保证解决所有问题。

5.4.2.5 滤波器

随着频率的增加,滤波器周围的耦合噪声也可能随之增加。其安装位置宜尽可能接近 EUT 输入/输出连接器或电缆进出点。滤波器安装位置不当或远离连接器安装,都可能造成大量的射频能量与已滤波的线缆相耦合,从而产生 RE 问题。

滤波器安装时应使滤波器外壳良好接地,滤波器输入/输出线要远离,以避免串扰。

如果设备的外壳为非导电塑料或为开放式的机架,良好的滤波和电路布线则是重要的。电路产生的所有电流应控制在本地且能返回到源。

5.4.2.6 电容器

用于 RE 滤波的所有电容器应为陶瓷电容器或其他高频类型的电容器。电解电容器和钽电容器在 RE 的频率范围内没有足够的工作带宽,其对改善 RE 并没有效果。

5.4.2.7 铁氧体磁环

钳在电缆上的铁氧体称为铁氧体磁环。使用的铁氧体应具有较小的磁导率(μ_r),在较高频率时通常也能起作用。与内径较大的铁氧体相比,内径较小的铁氧体能较好地耦合磁场且具有较高的阻抗,因此,需要使用适合于导线内径最小的铁氧体。同时也应规定铁氧体的阻抗,其在所关注的频率范围内能产生足够的损耗。

对于大多数 RE 问题,铁氧体的磁导率通常应小于 1 000 才有效。和夹式铁氧体相比,闭合的铁氧体磁环能提供较好的抑制效果。

5.4.2.8 屏蔽层

屏蔽层可能为电缆屏蔽层、外壳或者为这两者。对于电缆屏蔽层,应确保使用对称的端接方式与连接器进行搭接(至少在屏蔽层的每一侧使用一条短的“软辫线”与连接器进行搭接)。360°的端接最为理想。许多电缆设计时使用“软辫线”,该“软辫线”在高频时为感性的,因此会产生高阻抗。

图 8 为端接“软辫线”的屏蔽电缆。该“软辫线”会流过大的电流,从而产生磁场,这种磁场又会与连接

器所连接的导线相耦合。其也会耦合产生沿着电缆屏蔽层的外部流动的共模电流,使得电缆产生辐射。

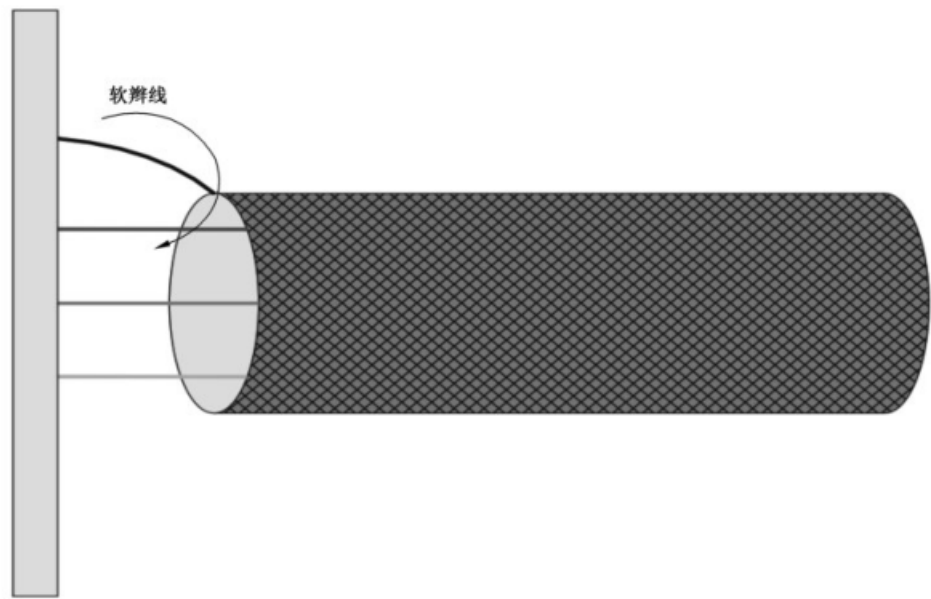


图 8 屏蔽层使用单条“软辫线”的非对称端接

由于传导耦合或辐射耦合,屏蔽层上有流动的大电流,因此外壳上也有流动的电流,其将产生磁场,该磁场会与连接器附近的裸露导线产生耦合。

图 9 中使用分开的端接,减小了每一条“软辫线”上的电流,但此电流也会产生磁场。然而,两条对称的“软辫线”中的电流产生的场为磁场,这两个磁场在连接器中的方向相反。这样虽不是理想的磁场相消,但在某种程度上减小了合成场。因此,由于减小的电流和方向相反的磁场,对称端接的“软辫线”是可以使用的。如果可能,可以使用两条或多条“软辫线”,对称地环绕连接器布置。更好的办法(作为故障诊断试验或临时性的解决办法)是宜使用铝箔包裹屏蔽层的末端、“软辫线”和连接器。这将为所有导线建立一个完整的壳体以及使用非常低阻抗的连接把屏蔽层搭接到外壳。

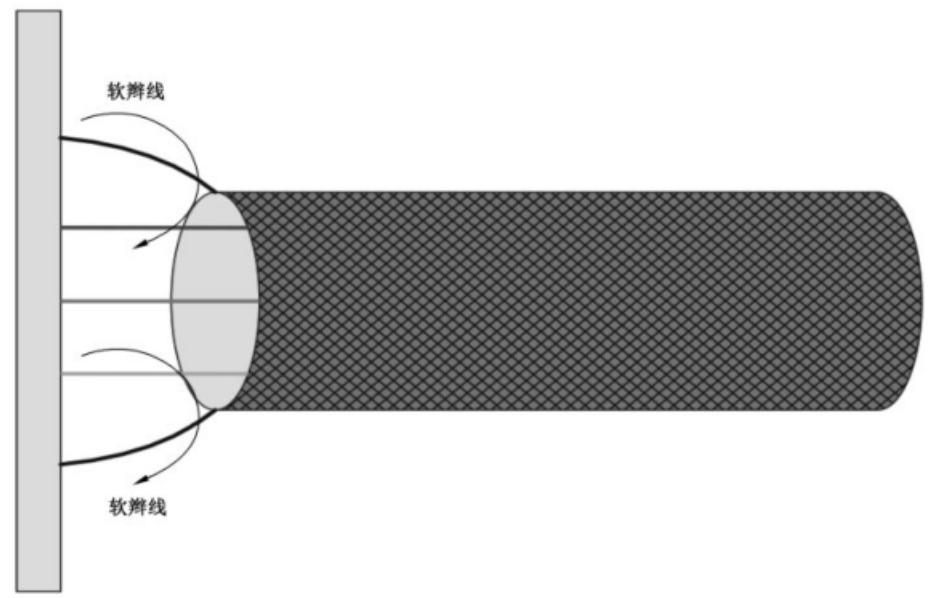


图 9 屏蔽层使用对称端接的“软辫线”

5.4.2.9 80 MHz 以下试验问题

在 80 MHz 以下,大多数 RE 问题出现在垂直极化。如果试验在这些较低的频率没有通过,则问题可能是由放置在接地平面上的且与接地平面相耦合的电源线或其他电缆产生的。宜尝试着抬高电源线使其远离接地平面以确认辐射是否减小。相反地,也宜尝试着将更多的电缆放置在接地平面上以确认辐射是否增加。

根据 RE 标准,测量天线至少要比接地平面高 30 cm。如果测量天线太接近接地平面,如图 10 所示,对数周期复合天线能与接地平面产生容性耦合。如果电源线也与接地平面产生容性耦合,则接地平面将成为导电路径的一部分,测量天线和 EUT 之间形成闭合的辐射环路路径,这将产生错误的不合格的测量结果。因此,在对某些超标频率点进行最终 RE 试验时,宜采用调谐偶极子天线进行测量。

注:进行最终测量的测量天线为调谐偶极子天线,如图 11 所示,在较低频率时垂直极化的偶极子天线要比对数周期复合天线测量得更为准确。这种天线具有很多优点,包括其与接地平面之间最小的容性耦合。由于要进行调谐,其中心最低要位于接地平面上大约 1.25 m 处,这就减小了天线与接地平面之间的电容且天线的位置也高于 EUT。



图 10 对数周期复合天线与接地平面之间的容性耦合(大约 100 MHz 以下)



图 11 在较低频率时使用垂直极化的偶极子天线测量 RE

5.5 典型的解决办法

5.5.1 概述

RE 问题典型的解决办法有以下三种形式:

- 对于进出 EUT 壳体的所有线路都宜进行滤波;
- 当连接器穿过 EUT 壳体时,电缆屏蔽层与 EUT 的外壳或金属壳体应进行正确的屏蔽和搭接;

——外壳的正确屏蔽。

对于进入或穿出外壳的线路,最常见的滤波方式是在外壳的穿透点确保存在 IL 较大的滤波器。通常是使用从信号线或电源线到外壳的电容器,且形成的环路应具有非常短的和阻抗非常低的路径。应注意这种环路包括从滤波器到外壳的路径(通常是通过某些支架返回到连接器)。如果支架与连接器相距较远,若不在连接器处增加一个支架,则要保持这个较短路径是不可能的。

通过安装电容器以试验这种解决办法时,在连接器的后侧从线路到外壳之间加装电容器是最佳的。如果此电容器的安装位置为理想位置,则这种解决办法能起作用。如果这种电容器的安装在生产时是不可能的,则对此问题要增加一些设计裕量。

5.5.2 导线和电缆

为了对导线和电缆进行正确屏蔽,在屏蔽层的两端进行低阻抗的搭接是非常重要的。不宜把屏蔽层连接到远地进行排流,因为电流不会被排放到某些未知的“洞”中,其总是选择较低阻抗的路径返回到源。使用与两个外壳相连的本地返回路径,然后使用导线束进行布线。这样可减小一些发射,但并不是真正的屏蔽解决办法。

一种较好的解决办法是把电缆束包裹在屏蔽层内。屏蔽层应在电缆的源端和负载端进行良好的端接。如果电缆加装编织层,连接器为金属或金属化的,则应使用导线带或扎带将屏蔽层与连接器进行搭接。这将建立低阻抗的路径,且有助于保持包裹电缆束的屏蔽层的对称或完整。除非能确保解决问题,否则对于这种情况宜避免使用“软辫线”进行端接。

对于屏蔽层内线束上的无用共模电流,屏蔽层通常作为电流返回路径,但屏蔽层并不作为有用信号电流的返回路径。屏蔽层内包括有用信号和无用的共模噪声,每种电流都能沿着最小阻抗路径返回到源,则在这种情况下并不存在 RE 问题。同轴电缆的外导体的内表面在高频时作为信号的返回路径,但外表面作为外部高频噪声电流的返回路径。尽管这两种电流在相同的屏蔽层上流动,但它们通过集肤效应相隔开。

5.5.3 壳体屏蔽

如果发现外壳屏蔽体屏蔽效能不够,则可用铝箔或铜箔包裹整个 EUT,尽可能把屏蔽体与所有暴露的金属部件相搭接。通过使用上述导线带或扎带,这种搭接通常最容易实现。把铝箔与每个连接器进行低阻抗的搭接。一旦通过屏蔽解决了问题,则可慢慢去掉铝箔,但宜首先去掉显示屏或视频屏幕的铝箔。既然这些部件最可能是射频骚扰源,在引入其他影响发射的因素之前宜确认是否是它们产生了发射。如果发现显示屏为骚扰源,则宜使用导电涂层玻璃,例如钢锡氧化物(ITO)涂层玻璃,或使用其他透明的屏蔽涂层。

6 CE 问题诊断

6.1 概述

CE 试验不合格通常由开关电源(SMPS)导致。较好的开关电源在其输入/输出端具有滤波器(或滤波电路),滤波器的抑制频率范围一般为 150 kHz~30 MHz,也有专门针对更高(或更低)频率的传导干扰抑制滤波器,如馈通滤波器、谐波抑制器等。随着 SMPS 开关频率的提高,传统滤波器并不能有效解决开关器件(或整流器)开关瞬态产生的低频谐波及 30 MHz 以上干扰问题。此外,目前 EUT 内广泛使用高速数字电路,从而产生更高频率的谐波。

良好的滤波器(或滤波电路)需要兼顾配套电源、模块的干扰类型,实现从低频到高频更宽频段的覆盖,且要注意滤波器的结构、安装、布线和接地等。下述检查清单可用于 EUT 试验不合格后的问题诊断。

6.2 CE 检查清单

EUT 的 CE 问题诊断重点是排查骚扰频率和骚扰源,因此考虑以下方面。

- 测量配置:检查 CE 的测量配置,是否连接有辅助设备,确认该辅助设备的供电情况(单独供电还是通过 AMN 供电)。若 AMN 同时为辅助设备供电,宜排查辅助设备的 CE 特性是否影响 EUT 的 CE 测量结果。
- 测量布局:检查 EUT(包括可能连接的辅助设备)的供电线长度与布置、接地及接地有效性等。
- 特征频率:EUT 是否存在开关电源等可产生较高发射电平的模块(或电路),记录其对应的特征频率,分析特征频率及其谐波是否与 CE 问题频段相关。
- 端口滤波:EUT 是否装有滤波器(或滤波模块),分析其安装位置、布线、接地等是否满足规范要求,分析其在 CE 问题频段 IL 特性是否有效。
- 骚扰源:
 - 通常,10 MHz 以下间隔规律且频域较宽的谐波发射,其发射源为开关电源;
 - 通常,10 MHz 以上单个尖峰频点超标,发射源可能是 EUT 内部的数字时钟或其他高频骚扰源;
 - 通常,宽带发射明显区别于窄带发射,宽带发射主要由开关电源、整流器、电机等产生。
- CE 抑制:超标频段可划分为差模干扰发射频段和共模干扰发射频段,但没有明确的临界频率,以下频率宜作为施加抑制措施的参考:
 - 通常,几兆赫以下的发射为差模干扰发射,抑制措施通常为差模电容和/或差模电感;
 - 通常,几兆赫以上的发射为共模干扰发射,抑制措施为共模电容和/或共模电感。

6.3 不合格的典型原因

EUT 未能通过 CE 试验的原因通常是由开关电源开关频率引起的,受限于滤波器在低频、高频的 IL 特性,EUT 往往在较低或较高的临界频率出现 CE 超标现象。开关频率作为开关电源的工作频率,这里不作为典型原因去分析,其他典型原因如下:

- 滤波器布局不合理,安装位置远离设备的输入/输出端口,或者滤波器的输入/输出导线临近布置或捆扎在一起;
- 接地措施不合理,EUT 壳体接地、电源滤波器(或滤波电路)接地以及 PCB 接地设计不合理;
- 元器件参数不合理,电源滤波器(或滤波电路)中的电容、电感等元器件参数选择与阻抗特性相关,且不同电路 IL 可能存在较大差异;
- 耦合严重,CE 高频超标与寄生效应及耦合相关,宜重点排查滤波器的放置和高频线缆的布局,对于产生磁场的元器件,宜重点排查其在 EUT 中的布置;
- 元器件使用不当,例如错误使用电解质电容器对兆赫兹以上的频率进行滤波、把铁氧体磁芯作为线性电感磁芯使用;
- 磁性材料使用不当,单根电源线(尤其 AC 电源线)上使用铁氧体容易存在饱和现象,会产生显著的阻抗变化,增加了电源线上噪声和发射的产生。

6.4 CE 故障诊断

6.4.1 在实验室进行的 CE 故障诊断

在实验室进行 CE 故障诊断,可考虑以下方面:

- 针对不易拆解的 EUT 可使用外置滤波装置辅助诊断;
- 针对容易拆解的 EUT,可串联附加的滤波器。

图 12 给出了 EUT 的 CE 故障诊断流程图示例。



图 12 在实验室进行 CE 诊断的流程图示例

6.4.2 在自有设施中进行的 CE 故障诊断

- 在自有设施中进行 CE 故障诊断,可考虑以下方面。
- 在实验室使用电流探头进行测量,此测量数据作为参考,并结合电压法测得的结果进行评估。
通过这种方式,当 EUT 返回自有设施后,利用自有设备对 EUT 进行评估。
 - 滤波器的放置位置应非常靠近连接器或 EUT 机壳的穿入点,如果滤波器的放置位置不当(例

如放置位置远离输入电源的连接器,如图 13 所示),空间电磁辐射能量又会耦合到已滤波的线路;

- 使用便于安装的磁夹、磁珠,通过卡扣或者穿线直接对线缆进行滤波。使用内直径最小的铁氧体,使其刚好钳住导线,能较好地耦合磁场且其阻抗要比具有较大开口的磁芯高;
- 对于大多数 10 MHz 以上的传导超标,通常磁导率小于 1 000 的铁氧体更有效。由于钳式铁氧体固有的空气间隙,对于磁场会产生阻抗,从而减小了有效电感,使用闭合的磁芯铁氧体比钳式铁氧体能得到更好的阻抗特性。闭合的磁芯铁氧体能提供较大的阻抗,但易饱和。

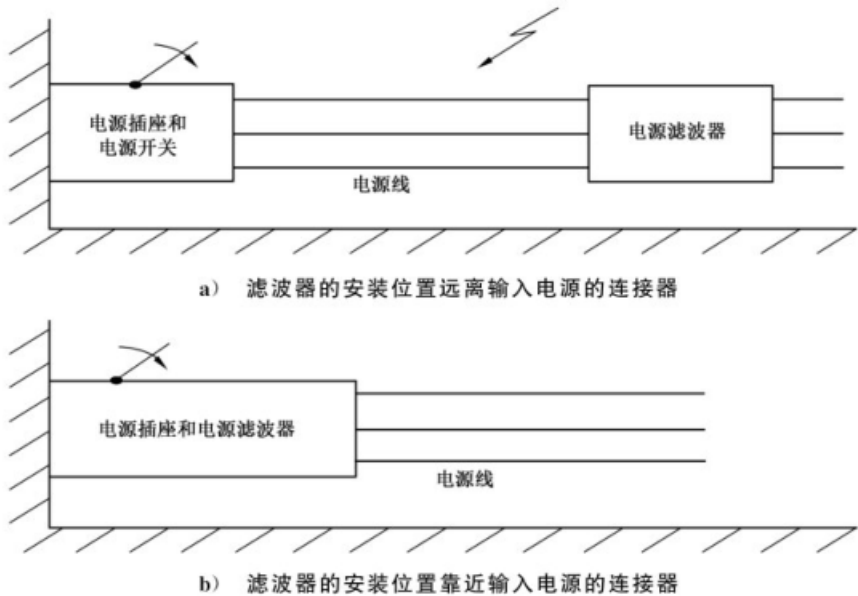


图 13 电源滤波器的安装位置对比

图 14 给出了在自有设施进行 CE 故障诊断的流程图示例。

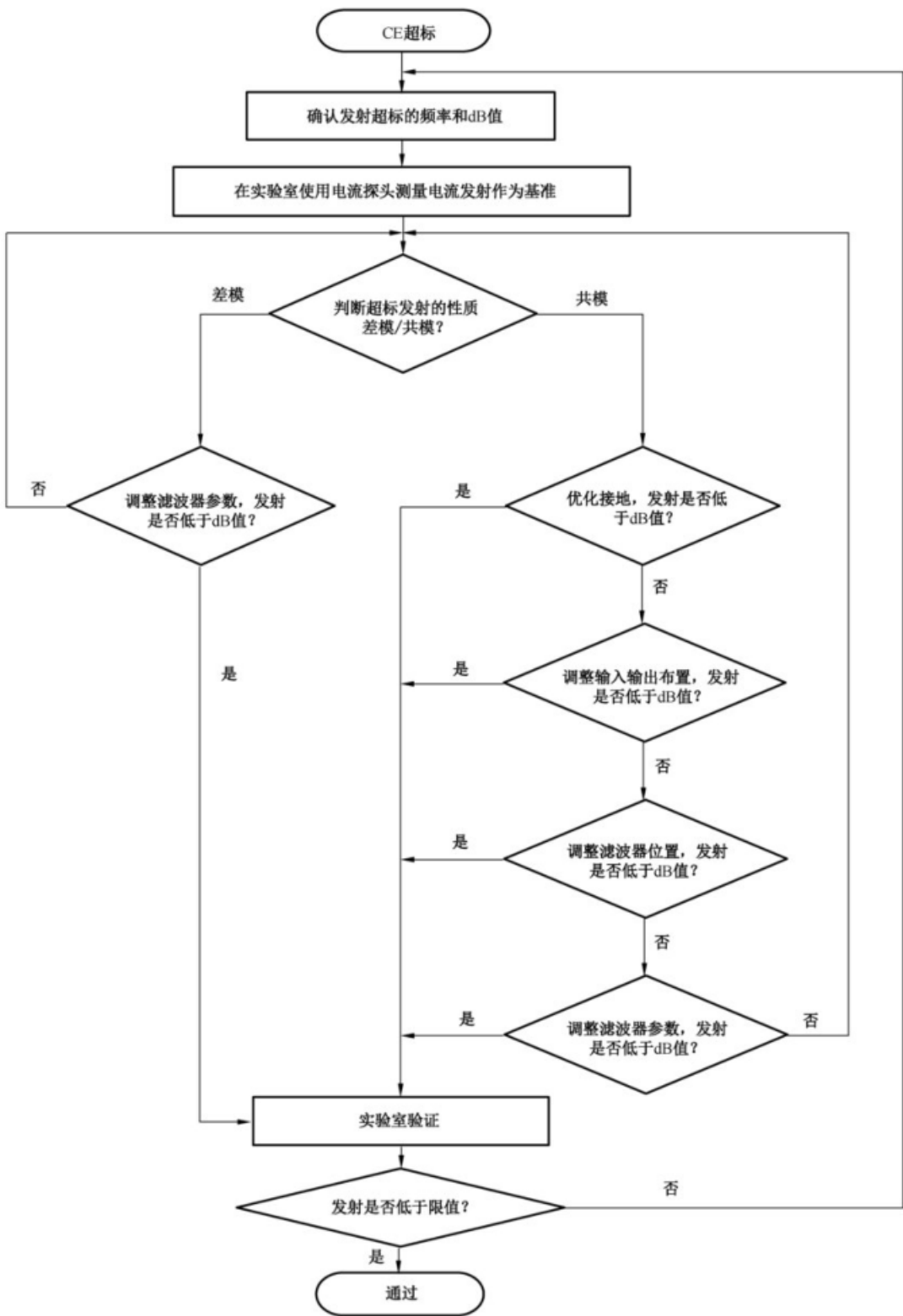


图 14 在自有设施中进行 CE 故障诊断的流程图示例

6.5 特殊情况和问题

对于许多 CE 问题,常用的解决措施的是使用电容器,宜考虑如下问题。

- 带极性的电容器其带宽有限,对于高频能量的抑制并不很有效。陶瓷电容器、薄膜类电容器等,具有很宽的带宽,是常用的滤波电容器。
 - 注意电容器的额定电压值。应确保电容器的额定电压值要大于 AC 电压的峰值,而不仅是大于有效值。
 - 线线之间的电容器对于减小差模能量非常有效。然而,当这种电容器被放置在整流器电路的 AC 侧时将会增加泄漏电流,宜考虑放置在 DC 侧。
 - 用于线电压的所有电容器都应具有电介质击穿的安全评级。
- 为了抑制 CE,可能需要使用电感器增加滤波效果,宜考虑如下问题。
- 电感器的结构类型非常重要。开气隙类型电感器的效果不如环形电感器。这是因为开气隙类型电感器产生的磁场不受控制。当这些磁场不受控制时,其会将能量耦合给周围的电路。通过这种现象干扰信号会注入给电路的无噪部分,这会旁路掉滤波器。
 - 所用材料的类型也非常重要。宜考虑以下方面。
 - 对于差模噪声,使用差模电感器。差模电感器应使用粉末铁芯或其他磁导率低的材料。用于电源的电感器,不宜使用铁氧体作为磁芯。
 - 对于共模噪声,使用共模绕线电感器。与大多数的其他材料相比,使用铁氧体时每匝能提供较高的阻抗。
 - 在所考虑的频率范围内使用正确类型的铁氧体。对于 CE 问题,其考虑的是低频,最佳材料为使用原始磁导率大于 2 000 的锰锌(MnZn)材料。

6.6 典型的解决办法

CE 问题通常与开关电源、其在 EUT 里的位置以及电源连接器和 EUT 之间的连接电缆有关,典型的解决办法如下:

- 对骚扰源进行滤波处理,安装性能较好的电源滤波器以及一些抑制高频干扰的滤波器;
- 合理安装滤波器,安装位置应靠近电源线进入设备的连接口处,保证良好接地和布线;
- 调整滤波元件的参数和选型,提高滤波器的滤波效果;
- 改变 EUT 的布局或布线,减少耦合效应的产生;
- 对于可开启展频功能的开关电源(或 IC),宜开启展频功能,降低 CE 噪声;
- 更换电磁发射较低的部件,例如开关电源。

7 RI 问题诊断

7.1 概述

RI 试验主要用于评估 EUT 抵抗射频电磁场辐射的符合性。试验的频率范围通常为 80 MHz~18 GHz,施加的场强范围通常为 3 V/m~200 V/m,具体取决于 EUT 所处的环境或其实际使用的环境。

7.2 RI 检查清单

在大多数情况下,用于 RE 的检查清单也适用于 RI,因为 EUT 向外产生辐射的天线振子(电缆以及外壳上的缝隙)也能作为接收天线,把射频电磁场能量传输至 EUT 内部,引起 EUT 功能丧失或性能降级,甚至出现 EUT 的硬件损坏或软件异常。RI 问题诊断的检查清单如下:

- 电缆的屏蔽层与 EUT 的屏蔽壳体或 PCB 参考接地点的搭接不良;
- 使用“软辫线”端接电缆屏蔽层;
- 屏蔽面板与 EUT 外壳或壳体的搭接不良;
- 屏蔽壳体散热孔的孔径过大;

- 视频/LCD 显示屏的孔缝过大；
- I/O 或电源的电缆端口滤波不好；
- 接地点的高阻抗接地；
- 关键电路处[例如中央处理器(CPU)复位线或模拟输入或传感器输入]的射频旁路不够充分。

7.3 典型的失效模式

EUT 的典型失效模式如下：

- 重新启动；
- 硬件电路受到破坏；
- 显示屏上出现错误读数；
- 显示屏出现白屏、黑屏、乱码、水波纹、卡顿、死机等显示异常；
- 声音出现干扰杂音、无声、卡顿、音频或音高失真等异常；
- 数据丢失；
- 数据传输停止、变慢、丢帧或者中断；
- 高误码率(BER)；
- 工作状态发生改变(例如,模式、时序等)；
- EUT 响应灵敏度的丧失。

7.4 RI 故障诊断

7.4.1 在实验室进行 RI 故障诊断

在大多数情况下,RI 的故障诊断与 RE 的相似。首先,应确定耦合路径,即确定射频电磁场干扰能量是否可能由电缆作为天线或者是由外壳或壳体上的孔缝泄漏引入。然后,确定受扰电路,即确定 EUT 内部受扰的功能模块或 PCB 上的芯片。

RI 故障诊断程序如下。

- 电缆最小化。在 EUT 端断开无关故障功能的电缆,并把剩余的所有电缆捆起来形成最小长度电缆。由于电缆可能会成为拾取射频能量的天线,减小其物理尺寸,则能够有效地减少其接收的射频能量。如果有效,则拾取射频能量的天线可能为电缆,然后再去寻找接收射频能量的特定电缆。当电缆较多时,可将不同类型或功能的电缆相互分开,且尽量间距 10 cm 以上,以避免电缆间串扰引起的交叉耦合。
- 电缆去耦。宜在所有的电缆上分别加装铁氧体扼流圈,且在所关注的频率范围内至少能提供 200 Ω 的阻抗。如果有效,则每次移走其中的一个,直到识别出作为接收天线的接收电缆。应注意的是,如果电缆阻抗(不加装铁氧体时)在 100 Ω ~200 Ω 之间,铁氧体通常不起作用。
- 屏蔽 EUT。用金属箔或金属网包裹整个 EUT,确保 EUT 外壳上的缝隙被覆盖严实并电连接良好,但允许电缆进出壳体。如果电缆具有屏蔽层,宜包裹至电缆的屏蔽层。如果有效,则极大可能为 EUT 本身拾取能量。如果 EUT 为屏蔽外壳,则再去寻找引起能量泄漏的孔缝位置;如果 EUT 为非屏蔽外壳,则需要进一步定位 EUT 内部拾取能量的互连线(或 PCB 功能模块)。对于具有屏蔽外壳的 EUT,定位泄漏孔缝位置和定位 EUT 内部拾取能量的互连线(或 PCB 功能模块)的操作可同步开展,以实现较佳的整改效果。
- 屏蔽电缆环接。通常应检查电缆屏蔽层与 EUT 外壳或壳体是否搭接良好,在理想情况下电缆的屏蔽层应与屏蔽壳体进行 360°环接。如果屏蔽层使用“软辫线”与外壳进行端接,应使用金属箔围绕连接器和屏蔽层把“软辫线”区域包裹,实现屏蔽层与屏蔽壳体 360°环搭接,如果有效,则拾取能量的天线可能为该屏蔽电缆。

7.4.2 在自有设施中进行 RI 故障诊断

在实验室进行 RI 试验,如果 EUT 出现 RI 故障且试验现场不具备故障诊断的条件,宜利用自有设

施进行故障诊断,可按以下方法进行。

- 对于 EUT 本身问题的确认,如果 EUT 为屏蔽外壳,主要是定位屏蔽外壳泄漏孔缝的位置;如果 EUT 为非屏蔽外壳,则主要是定位 EUT 内部拾取能量的互连线(或 PCB 功能模块),以及定位 EUT 内部 PCB 上引起故障的芯片或印制线。通常更快速的做法是针对 EUT 上的可疑位置,使用电平可控的射频源进行射频能量注入以识别敏感点。当在工作台上不能实现所要求的试验场强时,可通过在射频发生器上连接一个小环天线,然后在电缆或电路附近进行辐射,以寻找敏感互连线或电路上的敏感部分。如果需要,可选用多匝的小环天线以提高其产生辐射场的能力;
- 对于电缆问题的确认,可通过射频发生器连接 BCI 探头(设计用来把功率注入给端口的电流探头),将注入探头钳在可疑电缆上,在敏感频率范围内沿电缆感应出射频电磁能量传输至 EUT。选择注入探头时应关注其工作频率范围,通常由电缆作为接收天线的敏感频率范围主要在 400 MHz 以下(也可至 1 GHz),因此,应结合在实验室的试验中已获得的敏感频率范围来选择合适的注入探头。

注:射频发生器能产生至少 +15 dBm~+20 dBm 的电平输出,否则需要增加一台 10 W 或更大功率的宽带放大器。如果使用商用探头,确保其能承受大功率的电平。

7.5 特殊情况和问题

理想情况下,所有的 I/O 端口和电源端口都应进行适当的滤波。否则,I/O 电缆或电源电缆能将射频能量几乎完全传输进 EUT 内部电路。对于 I/O 端口,通常应使用为这些端口设计的共模扼流圈或滤波器。具有灵敏模拟前端或其他低电平模拟电路的设备对外部的射频电磁场尤为敏感。如果模拟信号为低频(小于 1 MHz),则宜尝试在输入(或灵敏放大器的节点)和信号返回路径之间连接适当大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF)。应注意的是,对于非常高阻抗的输入,这种做法不起作用。在某些情况下,宜把电容值大幅减小,使其小于 100 pF。对于运算放大器,可在正输入端和负输入端之间连接适当大小的电容器(推荐值 100 pF)。

尤其要检查与任何系统线或 CPU 复位线相关的电路。这些线通常应使用合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF 或更小)对噪声源进行滤波并将其旁路到信号返回路径。有时在并联电容器的前端串联相应的电阻器(推荐值 100 Ω ~1 000 Ω 或更小)作为低通滤波器的一部分。

7.6 典型的解决办法

典型的解决办法如下。

- 在可疑电缆上加装铁氧体是便捷快速的,对于宽频带信号干扰可加两个或多个磁环来抑制干扰,但宜考虑加装铁氧体的工程应用可行性。宜确保这些铁氧体的放置位置尽可能靠近 EUT 的 I/O 连接器或电源连接器。
- 对于 I/O 线,宜使用表面贴装的数据线铁氧体共模扼流圈。
- 应确保外壳或壳体不产生泄漏。可能需要增加紧固件的数量,壳体也可能需要附加的射频衬垫。
- 在 I/O 端口使用 RC 低通滤波器。在信号线上串联典型值为 47 Ω ~100 Ω 的电阻器,同时在信号线与信号返回线或电源返回线之间使用合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF),滤波器应使用短的引线。如果滤波器被直接安装在 PCB 上,高频时宜使用表面贴装元件,应确保这种串联阻抗不会影响信号完整性。
- 在对外部射频电磁场敏感的内部电路节点(典型情况为 CPU 的复位线)上跨接合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF 或更小),但应验证所加的电容器不会影响信号质量。
- 应确保电缆屏蔽层的正确端接,尤其是对于 400 MHz 以下的问题,应确保电缆屏蔽层与连接器或 EUT 金属壳体 360°环接。
- 如果出现问题频率较高(例如 500 MHz 及以上),则这可能是由 EUT 本身引起的。应确保

EUT 壳体之间的连接处是电连续的,特别是要清除掉连接处的油漆或者涂层。作为临时措施,可采用金属箔覆盖缝隙。

- 对于非屏蔽外壳的 EUT,宜在 PCB 上使用磁珠或共模扼流圈。
- 沿着 EUT 外壳并远离 EUT 端口布置电缆。为防止射频电磁场能量的交叉耦合,应把滤波器的输入线和输出线相隔离,并把敏感电路与发射能量的电缆相隔离。
- 减小环路面积,并避免长导线互连。为避免潜在的接收天线效应,应合理布局 EUT 内部和 PCB 上的各功能模块,避免导线无滤波的长距离连接;对敏感信号线宜设置伴随地线,减小环路面积;对差分信号线应采用双绞线,以增加互连线的抗共模干扰能力;对高频信号线走线进行包地处理等。
- EUT 具有图文显示或光学窗口时,宜采用透明导电材料进行电磁屏蔽并与屏蔽壳体良好搭接。
- EUT 具有通风散热窗时,宜采用小孔径的六边形阵列面板散热,单个小孔的最大尺寸应小于敏感频率对应波长的 $1/20$;必要时可用通风波导并与屏蔽壳体良好搭接。

8 CI 问题诊断

8.1 概述

CI 试验主要用来评估 EUT 对由电磁辐射感应的沿 I/O 电缆或电源电缆传导干扰信号的符合性。试验频率范围通常为 $150\text{ kHz}\sim 80\text{ MHz}$ (也可扩展到 230 MHz),施加的电压有效值通常为 $1\text{ V}\sim 10\text{ V}$,具体取决于 EUT 所处的环境或其实际使用的环境。

在车辆等领域,规定的试验频率范围上限通常为 400 MHz (也可扩展到 1 GHz)。试验方法采用感应电流注入方式,要求施加的电流电平通常为 $60\text{ mA}\sim 300\text{ mA}$ 。

8.2 CI 检查清单

在大多数情况下,用于 RI 和 CE 的检查清单也适用于 CI,因为接收外部射频电磁能量的耦合振子(电缆和外壳缝隙)通过交叉耦合或在抑制感应能量的滤波器失效时能将这些射频电磁场能量传导进 EUT。CI 问题诊断的检查清单如下:

- I/O 或电源的电缆端口滤波不好;
- 电缆的屏蔽层与 EUT 的屏蔽壳体或 PCB 参考接地点的搭接不良;
- 屏蔽壳体之间的高阻抗搭接;
- 视频/LCD 显示屏的孔缝过大;
- 接地点高阻抗接地;
- 关键电路处(例如 CPU 复位线或模拟输入或传感器输入)的射频旁路不够充分。

8.3 典型的失效模式

EUT 的典型失效模式如下:

- 重新启动;
- 硬件电路受到破坏;
- 显示屏上出现错误读数;
- 显示屏出现白屏、黑屏、乱码、水波纹、卡顿、死机等显示异常;
- 声音出现干扰杂音、无声、卡顿、音频或音高失真等异常;
- 数据丢失;
- 数据传输停止、变慢、丢帧或者中断;
- 高误码率(BER);
- 工作状态发生改变(例如,模式、时序等);

——EUT 响应灵敏度的丧失。

8.4 CI 故障诊断

8.4.1 在实验室进行 CI 故障诊断

CI 试验的射频电磁干扰注入方法主要有耦合/去耦装置(CDN)注入、电磁钳注入和电流钳注入,其中 CDN 和电磁钳注入法主要依据 GB/T 17626.6 按电缆逐根进行试验;对于电流钳注入法,依据 GB/T 17626.6 按电缆逐根进行试验,在车辆相关标准中,通常按照线束进行试验,一个线束可能包含多根导线,例如同时包含电源线和 I/O 线等。此外,CDN 注入法可将射频电磁干扰信号耦合给连接 EUT 的各种受试电缆,并防止干扰信号影响 EUT 以外的辅助设备或系统;而电磁钳注入法和电流钳注入法施加给受试电缆两端的干扰电流是相同的,此时需要辅助设备有足够的抗扰能力以不受干扰信号电平的影响。

CI 故障诊断程序如下。

- 确认是否为 EUT 故障。对于工作状态可观察的 EUT 或没有辅助设备而独立运行的 EUT,可依据 EUT 的功能特性和故障现象来确认为 EUT 本身故障。否则,需要排除故障来源于受影响的辅助设备和/或供电系统。例如,可采用电压表监视供电电压,采用经过光电隔离的示波器监视输入信号是否正常;可采用能表征辅助设备负载特性的无源负载来代替端接的辅助设备;还可在辅助设备端电缆上加装铁氧体扼流圈或插入去耦网络以隔离可能影响辅助设备的干扰信号。此外,还应注意施加干扰信号的受试电缆对外辐射电磁场的影响。
- 确定引起故障的干扰信号回路。在 EUT 端断开无关故障功能的电缆,并把剩余的电缆分别加装铁氧体扼流圈,如果有效,则逐个去掉铁氧体扼流圈直到故障现象复现以确定干扰信号回路;如果电缆加装铁氧体扼流圈无效,则可能是 EUT 本身对地寄生电容形成干扰信号回路引起的故障。
- 识别引起故障的干扰信号输入端口。如果分电缆逐根进行试验,则易识别所施加干扰信号的电缆端口即为引起故障的输入端口。如果按照线束进行试验,则需按照功能端口对受试线束中的导线进行分类,每次移开其中一个功能端口的导线;如有必要,也可每次移开受试线束中的一根导线,直到识别出引起故障的干扰信号输入端口。在移开导线的过程中,宜使被移开导线与剩余的受试导线之间距离 10 cm 以上,以减小导线间串扰引起的交叉耦合。
- 确认屏蔽电缆是否良好环接。通常应检查电缆屏蔽层与外壳或壳体是否进行良好的搭接,在理想情况下电缆的屏蔽层应与屏蔽壳体进行 360°环接。如果屏蔽层使用“软辫线”与外壳进行端接,应使用金属箔围绕连接器和屏蔽层把“软辫线”区域包裹,实现屏蔽层与屏蔽壳体 360°环接。
- 确定辐射耦合的影响。CI 试验的干扰信号能量可直接耦合给 EUT 电缆或者通过受试电缆交叉耦合给相邻的电缆。对于这两种情况中的任何一种,首先应确定 EUT 出现的故障是否是由电缆作为天线或屏蔽壳体上的孔缝泄漏产生。

8.4.2 在自有设施中进行 CI 故障诊断

在实验室进行 CI 试验,如果 EUT 出现 CI 故障且试验现场不具备故障诊断的条件,宜利用自有设施进行故障诊断。可通过射频发生器连接 BCI 探头,将注入探头钳在可疑电缆上,在敏感频率范围内沿电缆感应的射频电磁能量可传输给 EUT。

注:射频发生器能产生至少+15 dBm~+20 dBm 的电平输出,否则需要增加一台 10 W 或更大功率的宽带放大器。

如果使用商用探头,确保其能承受大功率的电平。

在实验室试验后进行故障诊断时,应已知道 EUT 在哪些频率出现故障,在自有设施中仅在这些频率进行试验以更快地复现故障问题。当对 EUT 进行整改并解决问题后,还应在整个试验频率范围内重新进行试验,以确保在其他频率上无新的故障问题出现。

由于 EUT 最终结构配置中的寄生电感和寄生电容对电路的射频特性有着显著影响,因此宜尽可能地复现符合性试验时的试验布置和 EUT 最终结构配置(例如,屏蔽、接地、靠近金属物体或结构等)。

8.5 特殊情况和问题

具有灵敏模拟前端或其他低电平模拟电路的设备对射频电磁干扰能量尤为敏感。如果模拟信号为低频(小于 1MHz),则宜尝试着在输入(或灵敏放大器的节点)和信号返回路径之间连接合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF)。应注意的是,对于非常高阻抗的输入,这种做法不起作用。在某些情况下,宜把电容值大幅减小,使其小于 100 pF。对于运算放大器,可在正输入端和负输入端之间连接合适大小的电容器(推荐值 100 pF)。

尤其要检查与任何系统线或 CPU 复位线相关的电路。这些线通常应使用合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF 或更小)对噪声源进行滤波并将其旁路到信号返回路径。

8.6 典型的解决办法

用于 CE 和 RI 问题的解决办法也适用于 CI 问题。由于 CI 的射频干扰信号通常注入给特定的电缆,因此可能的的问题是受试电缆的端口滤波器不能有效滤波。对相应滤波器的分析、放置位置以及元件选择等滤波性能改善应是解决问题的第一步。有关滤波器更详细的信息见附录 B。典型的解决办法如下:

- 如果电源线的滤波设计得不好,则电源线能把射频干扰传导给 EUT。对于这种情况,宜在 EUT 的电源线端口加装电源线滤波器模块。
- 对于 I/O 线,宜在尽可能靠近连接器的位置放置表面贴装的数据线铁氧体共模扼流圈。
- 可能需要在 I/O 端口使用 RC 低通滤波器。在信号线上串联 $47\ \Omega\sim 100\ \Omega$ 的电阻器,同时在信号线与信号返回线或电源返回线之间使用合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF),滤波器应使用短的引线。如果滤波器被直接安装在 PCB 上,高频时宜使用表面贴装元件,应确保这种串联阻抗不会影响信号完整性。
- 可能需要在敏感的内部电路节点(典型情况为 CPU 的复位线)上跨接合适大小的电容器(推荐值 1 nF~10 nF 或更小),但应验证所加的电容器不会影响信号质量。
- 应确保滤波器位于线缆进出 EUT 外壳的进出点。距 EUT 连接器具有一定距离的任何滤波器元件,均可能与敏感电路产生交叉耦合,从而引起抗扰度问题。
- 对于屏蔽线,应确保电缆屏蔽层与 EUT 金属壳体进行 360°环接。
- 对差分信号线应采用双绞线,以减小对共模干扰信号的耦合接收;对敏感信号线宜设置伴随地线。
- PCB 工作地与 EUT 外壳地根据应用场景在靠近连接器处选择低阻抗连接或静电泄放连接,以避免潜在的干扰电流路径经过敏感电路。

9 EFT/B 问题诊断

9.1 概述

EFT/B 抗扰度试验主要用来评估 EUT 对诸如启停电动机、感性负载通断等瞬态过程脉冲群干扰的符合性。EFT/B 具有瞬变的高幅值、短上升时间、高重复率、低能量和较宽的干扰频谱(主瓣在 100 MHz 以内)等特点。

9.2 EFT/B 抗扰度检查清单

大多数情况下,EFT/B 抗扰度试验时的 EUT 故障主要是由于滤波的不充分导致的。适用于较低频率问题(例如浪涌和 CE)的滤波器,即使具有很强的滤波作用,但由于其布局问题和附近的交叉能量

耦合,也可能在 EFT/B 产生的骚扰频率范围内不起作用。OEM 的一些电源也会存在滤波不充分的问题。I/O 信号线和数据线 EFT/B 试验的不合格通常是由于连接器端口缺少滤波或缺少瞬态抑制而导致的。

EFT/B 问题诊断的清单如下:

- I/O 连接器金属外壳和金属壳体之间的搭接阻抗;
- 电缆屏蔽层与金属外壳或屏蔽壳体的搭接方式及搭接阻抗;
- 电源、信号和控制端口的滤波措施、瞬态防护装置;
- 电磁干扰敏感电路(例如 CPU 的复位线)的滤波措施;
- 金属外壳的开孔、缝隙和屏蔽;
- 受试电缆与其他电缆的交叉耦合情况。

9.3 典型的失效模式

EUT 的典型失效模式如下:

- 重新启动;
- 硬件电路受到破坏;
- 显示屏上出现错误读数;
- 显示屏出现白屏、黑屏、乱码、水波纹、卡顿、死机等显示异常;
- 声音出现干扰杂音、无声、卡顿、音频或音高失真等异常;
- 数据丢失;
- 数据传输停止、变慢、丢帧或者中断;
- 高误码率(BER);
- 工作状态发生改变(例如,模式、时序等);
- EUT 响应灵敏度的丧失。

9.4 EFT/B 故障诊断

9.4.1 在实验室进行 EFT/B 抗扰度故障诊断

EFT/B 抗扰度试验的 EFT/B 干扰注入方法主要有耦合/去耦装置(CDN)注入、电容耦合夹注入两种,主要依据 GB/T 17626.4 对电源端口、信号端口、控制端口和接地端口进行试验。此外,CDN 注入法可将 EFT/B 干扰信号耦合给连接 EUT 的各种受试线缆,经由线缆传导进入 EUT 内部,并防止干扰信号影响 EUT 以外的辅助设备或系统;而电容耦合夹注入法施加给受试线缆两端(EUT 和辅助设备)的干扰电流是相同的,此时应确保辅助设备有足够的抗干扰能力。

在大多数情况下,EFT/B 抗扰度故障诊断和 CI 故障诊断程序相同,具体可按 8.4.1,此外,宜关注如下方面。

- 根据 EUT 故障现象,结合 EUT 结构及电路分析,初步判断是 EUT 哪些部件或信号电路受到了 EFT/B 干扰的影响;如果 EUT 复位,则分析是何种原因导致的,包括上电复位、掉电复位、看门狗复位、有效复位信号导致的复位等,有可能是 EFT/B 干扰触发了其中一种或多种复位源。
- 确认 EFT/B 干扰主要是从哪个端口(电源、信号、控制和接地)耦合进入 EUT,检查该端口电路是否有共模滤波措施,该滤波措施(包括参数选择及滤波位置)是否合理。
- 确认 EUT 是否有接地措施,比如供电是否有保护接地(PE)端子,金属外壳(如果是)上是否有接地装置,检查 EFT/B 抗扰度试验时是否按 EUT 要求进行低阻抗的接地。
- 除了 EFT/B 干扰耦合注入的端口,EUT 上是否还有其他端口连接了较长的电缆(包括电源线、I/O 信号线等);如果有,宜尝试将这些较长电缆更换为双绞线或屏蔽线,如果有效,说明是 EFT/B 干扰通过辐射耦合给其他端口上这些较长电缆而导致故障,此时每次仅将其他端口中

的一个端口的双绞或屏蔽电缆换为原来的电缆,直至故障复现,即可定位对 EFT/B 干扰敏感的 EUT 端口。

- 通过去除或更换 EUT 的部分部件、局部屏蔽、PCB 割线、修改固件软件、关闭或调整某些参数/功能、调整搭接地、使用示波器及电流探头进行测量等方式,确认 EFT/B 干扰的传输耦合路径,并进一步定位 EUT 的敏感部件或敏感信号。

图 15 给出了 EUT 的 EFT/B 抗扰度故障诊断流程图示例。

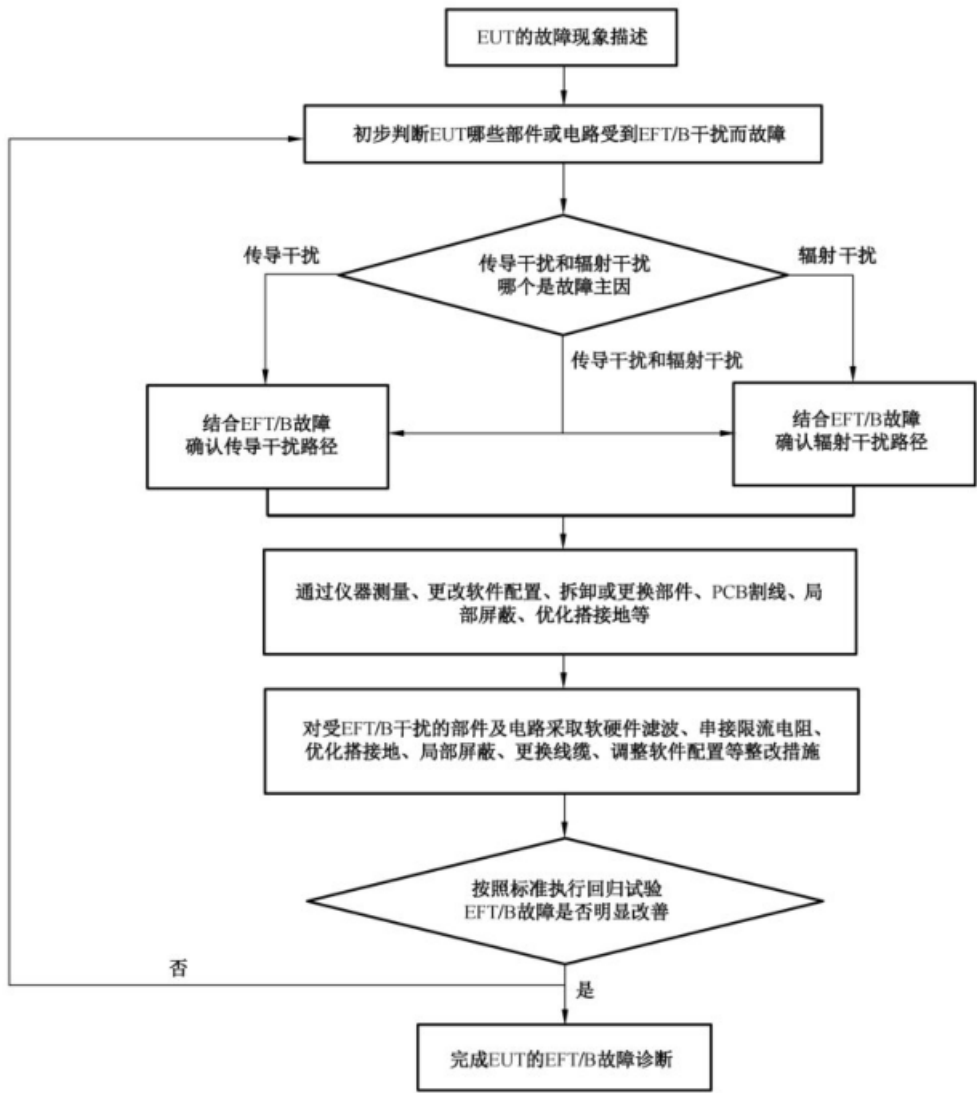


图 15 在实验室进行 EFT/B 抗扰度故障诊断流程图示例

9.4.2 利用自有设施进行 EFT/B 抗扰度故障诊断

在实验室进行 EFT/B 抗扰度试验后,如果试验不合格(即 EUT 出现故障),可利用自有设施进行故障诊断,按以下方法进行:

- 如果有一台 ESD 模拟器,某种程度上可模拟 EFT/B 干扰;
- 通过控制 AC 接触器进行不断的电机开关动作,某种程度上可模拟连续的 EFT/B 干扰。

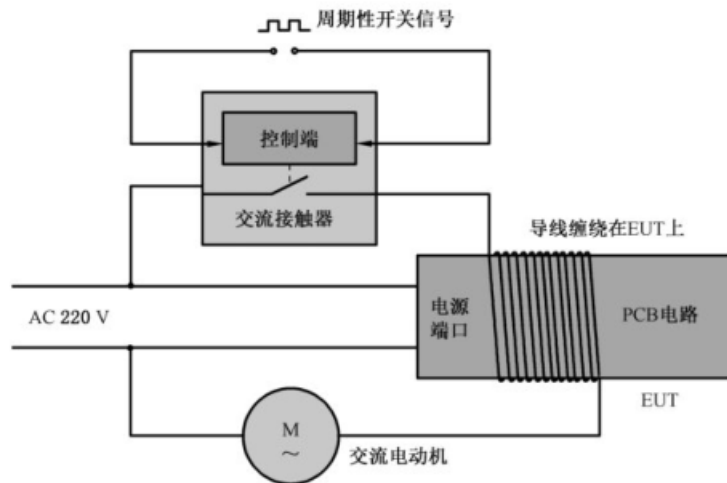


图 16 使用 AC 接触器模拟施加 EFT/B 干扰

如图 16 所示,将 AC 接触器并联在 EUT 的 AC 供电端口,同时使用 AC 接触器的开关回路导线在 EUT 上疑似 EFT/B 干扰敏感部位或区域进行缠绕(缠绕圈数越多,耦合的干扰越强),通过给控制端施加周期信号,使得 AC 接触器不断地进行开关动作,从而在 EUT 的 AC 供电端口和疑似敏感部位或区域施加 EFT/B 干扰,可单独或同时施加干扰。通过观察 EUT 在试验期间的表现,可诊断定位 EUT 上对 EFT/B 干扰较为敏感的端口或电路区域,并验证对策措施的效果。

9.5 特殊情况和问题

对于没有金属壳体或没有接地措施的 EUT, EFT/B 抗扰度的设计更加困难。EFT/B 抗扰度设计的基本原则是阻止或转移(或者两种方式都使用)任何 EFT 电流,以避免干扰或破坏电磁敏感电路。由于 EFT/B 在某种程度上也具有辐射效应,因此 RI 的以下解决办法也适用。

- 宜在所有 I/O 连接器上加装瞬态抑制器,将电流脉冲转移到 PCB 的信号参考平面。应确保 PCB 的信号参考平面与金属外壳或金属平板进行了很好的搭接。
- I/O 信号线宜加装共模扼流圈,如果共模扼流圈位于 EUT 内部,宜将其放置在靠近 I/O 信号线进入 EUT 的地方。
- 在电缆上非常靠近 I/O 连接器处加装铁氧体扼流圈能减少一部分电流脉冲。
- I/O 信号线到 PCB 参考平面,或者 I/O 信号线到金属外壳之间并联电容器(推荐值 1 nF 或更小)有助于转移 EFT 共模干扰电流。该电容器宜尽可能地靠近 I/O 连接器,并确保其不会滤掉这些 I/O 信号线上的有用信号或数据。
- 对于非屏蔽的 EUT,在 PCB 下面增加金属平板(例如铝箔、薄的金属片)可对 PCB 上的 EFT 共模干扰电流进行转移。这种金属平板应与所有 I/O 连接器的金属外壳进行连接,通过位移电流把 EFT 干扰电流转移到大地。

通过软件也可能使 EUT 对 EFT/B 干扰产生固有的抗扰度:

- 不宜使用无限的“等待”状态,可采用错误超时的响应机制;
- 可使用硬件或软件“看门狗”,不宜让 EUT 进入宕机状态;
- 可使用校验位、校验和/或纠错码,以防止存储坏数据;
- 应确保所有的输入为锁存的和选通的,且不是浮点的。

9.6 典型的解决办法

EFT/B 问题的典型解决办法如下:

- a) 合理规划其传输耦合路径,有效抑制 EFT/B 干扰能量。

- 宜采用单点接地,避免或减少 EFT/B 共模干扰电流流过 EUT 的内部电路。
- 如果 EUT 不可避免有多个接地点,可通过低阻抗搭接(例如金属片搭接)、PCB 上设置完整的地平面、避免地平面上并列放置多个过孔(可能造成 PCB 的缝隙或开槽)等方式减少各接地点之间的高频阻抗,从而使得 EFT/B 共模干扰电流流过时产生的压降较小,降低干扰影响。
- 在 EUT 的合适位置(比如 EFT/B 干扰注入位置附近、光电隔离的模拟地和数字地之间、高频电源变压器的初次级之间等)增加旁路电容器(推荐值 $1\text{ nF} \sim 10\text{ nF}$),从而改变 EFT/B 干扰的传输耦合途径,使共模干扰电流(或共模干扰电流的大部分)不经过 EUT 的敏感零部件或敏感电路。
- 通过在电路中插入电阻器、磁珠,增加共模电感/共模扼流圈、TVS 二极管、ESD 保护器件,或是线缆上套装磁环等方式,在 EFT/B 干扰电流还未到达敏感电路之前进行抑制或吸收。
- 对于 I/O 信号线或电源线,使用低通滤波器。比如在信号线上串联小的电阻器(推荐值 $47\ \Omega \sim 100\ \Omega$),同时在信号线与信号返回线或电源返回线之间并联电容器(推荐值 $1\text{ nF} \sim 10\text{ nF}$)。如果可能,滤波器宜使用最短的线缆。如果滤波器安装在 PCB 上,高频时宜使用表面贴装元件,且靠近连接器安装。
- 对于以太网接口,可使用集成有共模电感的网络变压器,或集成了滤波器的 RJ45 插座;如果问题出现在屏蔽线,则应确保屏蔽层在电缆两端与屏蔽壳体进行高质量的 360° 低阻抗搭接。
- b) 合理布局电磁敏感部件或电路,并增强其抗干扰能力。
 - 在进行 EUT 整机架构设计时,可兼顾电磁兼容性(EMC)、环境适应性和安全性等需求,合理规划布局 EUT 上各个单板、端口、开孔、缝隙和整机接地装置(如果有)的位置。
 - 调整 EUT 中电磁敏感部件或信号电路的布局,宜尽量远离 EFT/B 干扰的传输耦合路径。例如在 EUT 输入端口附近不宜布置任何互联线缆,以避免来自输入端口干扰能量的交叉耦合。
 - 如果暂时无法调整电磁敏感部件的布局,宜尝试更换抗 EFT/B 干扰能力更好的部件。
 - 软件设计也是推荐的办法,可在不增加额外成本的情况下提高 EUT 抵抗 EFT/B 干扰的能力。例如对 EUT 的输入信号或敏感信号进行软件消抖或软件滤波,或是使系统工作频率避开 EFT/B 干扰频谱。此外,对于 CPU 不使用的 I/O 口,通常宜配置 I/O 口寄存器为输出状态。

10 浪涌(冲击)问题诊断

10.1 概述

按照 GB/T 17626.5—2019 的规定,对 EUT 进行浪涌(冲击)抗扰度试验。该试验考核设备对由开关和雷电瞬变过电压引起的单极性浪涌(冲击)脉冲的抵抗能力。

10.2 浪涌(冲击)抗扰度检查清单

浪涌(冲击)问题诊断的清单如下。

- 所用试验电平和波形。施加方式是共模(纵向)还是差模(横向)方式以及各自相应的电压和电流等级。
- 脉冲的能量。通常,该参数可由 EUT 预期使用环境可能承受的最大浪涌强度,或 EUT 需通过浪涌测试的试验标准所规定的最大试验等级计算获得,该参数有助于设计人员选择合适的瞬态抑制器件。

- 瞬态抑制器件未必是第一级部件,但应确保其靠近被测端口连接器放置。使得浪涌能量到达敏感元件之前受到控制。
- 瞬态抑制器件的特性参数是否与浪涌施加的等级相匹配。确保所施加的抑制器件能承受所施加的浪涌能量,且吸收后的残压和残余能量不超过后续电路所能承受的等级。
- 瞬态抑制器件的施加的方式是否与浪涌施加的方式相匹配。通常,差模浪涌抑制器件是必加的;当 EUT 设计保证共模浪涌电压不足以击穿接口对保护地的绝缘时,可不加共模瞬态抑制器件。
- 对于浪涌瞬态,其返回路径非常重要。把能量从受试线缆转移至某些返回路径,转移路径应具有低阻抗,且应能承受其产生的大电流。PCB 上单个过孔作为返回电流的路径不合适,在试验过程中可能会失效。同时,应确保为能量返回设置的路径是浪涌脉冲的实际返回路径。如果瞬态抑制器件放置在电源和不接地的孤立外壳之间,则浪涌脉冲将难以从孤立的外壳返回施加端口。

10.3 典型的失效模式

EUT 的典型失效模式如下:

- 重新启动;
- 硬件电路受到破坏;
- 显示屏上出现错误读数;
- 显示屏出现白屏、黑屏、乱码、水波纹、卡顿、死机等显示异常;
- 声音出现干扰杂音、无声、卡顿、音频或音高失真等异常;
- 数据丢失;
- 数据传输停止、变慢、丢帧或者中断;
- 高误码率(BER);
- 工作状态发生改变(例如,模式、时序等);
- EUT 响应灵敏度的丧失。

瞬态抑制器件损坏的原因包括以下几方面。

- 瞬态抑制器的额定电压不合适或者其安装位置不当。设计时,应已知试验脉冲的总能量,然后选择合适参数的元件与之相匹配。
- 类似 GDT 和 MOV 对浪涌抑制的次数是非常有限的,GDT 在额定浪涌脉冲测试条件下寿命约 50 次,MOV 在额定浪涌脉冲测试条件下寿命约 200~300 次,这些器件在实际应用中很容易到达其设计寿命而失效损坏。因此,在实际应用中,对类似 GDT、MOV 等瞬态抑制器件,可通过增加其额定电流容量以延长其使用寿命;同时,由于其浪涌抑制次数非常有限,是 EUT 中的易损件,在设计时应使其失效时能及时发现(选择短路失效模式),且便于更换。

10.4 浪涌(冲击)故障诊断

10.4.1 在实验室进行浪涌(冲击)故障诊断

在实验室进行浪涌试验和浪涌故障诊断和问题排除时,可按照以下步骤进行。

- a) 确认 EUT 适用的浪涌试验标准,根据试验标准确认试验的端口和试验端口对应的浪涌脉冲参数和试验等级。
- b) 选择一个待试验端口,按照要求开展试验。
- c) 可行时,核查 EUT 被测端口是否施加了与被测浪涌等级相适应的浪涌抑制器件,若是,执行步骤 d);若核查无法实施,或 EUT 端口没有施加浪涌抑制器件,或所施加的浪涌抑制器件不足以吸收浪涌试验规定等级的浪涌能量时,执行步骤 e)。
- d) 按照标准规定程序对相应端口进行浪涌试验,若试验通过,进入步骤 g),若试验不通过,执行

- 步骤 e)。
- e) 除试验电压等级外,其他按照试验标准的规定配置,从最低试验等级开始试验,当低等级试验通过后,调高试验等级,再次进行试验;直到完成标准规定的试验等级,所有等级的试验均通过,进入步骤 g);若试验过程中出现了试验异常,停止试验,进入步骤 f)。
 - f) 在 EUT 被测接口处加装与浪涌等级相适应的浪涌保护器件;若原有浪涌保护器件,可换装保护等级更高的浪涌保护器件;当被测端口施加的浪涌等级较高时,可能单级的浪涌保护不足以有效吸收浪涌脉冲能量,此时,可采用多级浪涌防护电路;可参见附录 C 针对不同端口的浪涌抑制电路示例,选择合适的浪涌防护电路。防护电路安装完成后,返回步骤 c)。
 - g) 确认是否所有需试验端口均已通过测试;若没有,选择下一个被测端口,返回步骤 c);若所有端口均已通过试验,试验结束。
- 整个试验及故障诊断和问题排除流程图见图 17 所示。

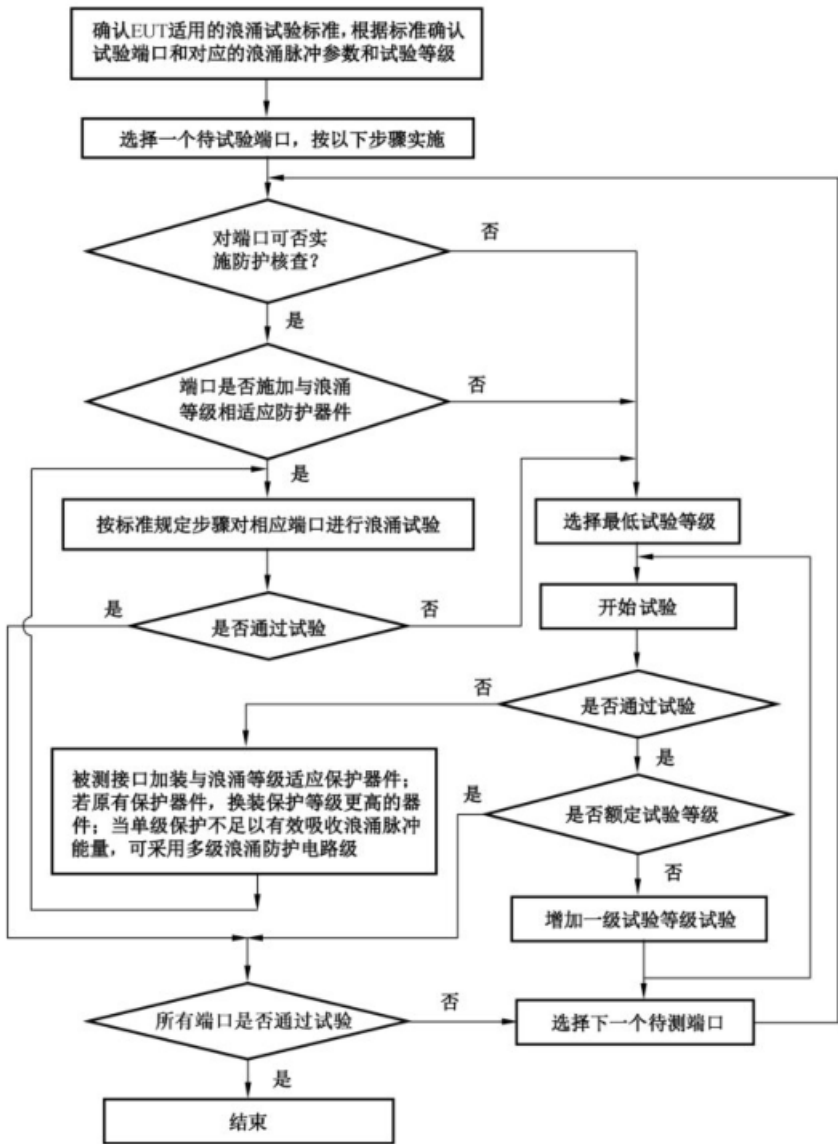


图 17 浪涌试验及故障诊断和问题排除流程图示例

10.4.2 在自有设施中进行浪涌(冲击)故障诊断

在实验室进行浪涌(冲击)抗扰度试验后,如果试验不合格(即 EUT 出现故障),可利用自有设施进

行故障诊断,按照以下方法进行:

- a) 检查浪涌(冲击)抗扰度试验不合格端口,若没有用于浪涌抑制的保护器件,可在该端口处加装与浪涌等级相适应的浪涌保护器件;若已有浪涌保护器件,可换装保护等级更高的浪涌保护器件;当被测端口施加的浪涌等级较高时,可能单级的浪涌保护不足以有效吸收浪涌脉冲能量,此时,可采用多级浪涌防护电路;参见附录 C 针对不同端口的浪涌抑制电路示例,选择合适的浪涌防护电路;
- b) 若具备安规耐压试验用的 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 和 $10/700\ \mu\text{s}$ 的脉冲试验发生器,可按照浪涌抗扰度标准电压等级,使用该脉冲发生器对改进后的 EUT 端口进行试验,若试验不合格,可进一步调整或提高被测端口浪涌保护器件的规格,直到试验合格为止;试验合格后,可再一次送到实验室进行试验;
- c) 若不具备安规耐压试验用的 $1.2/50\ \mu\text{s}$ 和 $10/700\ \mu\text{s}$ 的脉冲发生器,可对按照步骤 a) 实施改进后的 EUT 送到实验室进行试验;
- d) 若再次试验依然存在不合格,可进一步调整或提高被测端口浪涌保护器件的规格,必要时,选择多级浪涌防护电路,直到试验合格为止。

10.5 特殊情况和问题

对于没有金属壳体的 EUT,浪涌抗扰度的设计要求更高。

对电源端口,应在连接电源线接口处安装瞬态抑制器件,如果没有安全地线(PE),则应在相线和中线之间安装瞬态抑制器件。

若存在需试验的通信端口,则在该通信端口接口处安装瞬态抑制器件。

10.6 典型的解决办法

通过使用瞬态抑制装置可解决典型的浪涌(冲击)问题,宜根据需评估的接口类型选择开关型,限压型或者组合型保护器件,一些常见的瞬态抑制装置如下:

- GDT,其为开关型保护器件;
- TVS,其为限压型保护器件;
- MOV,其为限压型保护器件;
- TSS,其为开关型保护器件。

对端口并联保护的瞬态抑制器件,宜选择失效模式为短路模式的器件。若选择失效模式为开路的器件,由于用于浪涌抑制的瞬态抑制器件与接口电路并联连接,瞬态抑制器件失效时,设计人员无从知晓该保护器件已失效,使得相应端口处于没有浪涌防护状态,下一次浪涌能直接进入 EUT 端口内部电路,会对 EUT 内部没有浪涌防护能力的电路造成大规模破坏。因此,对端口并联保护的瞬态抑制器件,短路失效模式才是安全失效模式;开路失效模式对被保护的端口而言是不安全的失效模式,不宜选择。

对 EUT 需承受浪涌抗扰度试验的不同端口,需根据试验标准的要求及端口的特点设计相应的浪涌(冲击)防护电路。EUT 不同端口浪涌(冲击)防护设计示例见附录 C。

11 ESD 问题诊断

11.1 ESD 概述

ESD 抗扰度试验主要用来评估 EUT 遭受直接来自操作者及其操作者对邻近物体的 ESD 干扰的符合性。试验放电部位包括正常使用时人员可接触到的 EUT 上的点和面等。根据 EUT 的实际使用环境,放电电压为 $\pm 2\ \text{kV}$ 、 $\pm 4\ \text{kV}$ 、 $\pm 6\ \text{kV}$ 、 $\pm 8\ \text{kV}$ 、 $\pm 15\ \text{kV}$ 或特定值。

11.2 ESD 抗扰度检查清单

在大多数情况下,RE 和 EFT 的核查清单也适用于 ESD,因为从 EUT 向外辐射的天线振子(电缆和外壳缝隙)也能作为接收天线,将 ESD 产生的电磁场耦合进 EUT,潜在的引起干扰、系统重启,甚至不可逆的损坏。此外,当 I/O 连接器没有与金属壳体进行良好搭接,当对连接器进行放电时,由于放电电流没有低阻抗的返回路径,ESD 电流能直接进入 EUT,使电路受到干扰或损坏,ESD 问题诊断的清单如下:

- I/O 连接器金属外壳和金属壳体之间的搭接不良;
- 电缆屏蔽层和外壳或屏蔽壳体的搭接不良;
- 屏蔽面板与外壳或壳体之间的搭接不良;
- 视频/LCD 显示屏存在大的孔缝;
- 键盘下面没有接地网;
- I/O 电缆或电源电缆上的滤波不充分或瞬态防护装置使用不当;
- 关键电路处的射频旁路设计不足,例如 CPU 的复位线;
- 关键电源或信号接口处未设计 ESD 保护器件。

11.3 典型的失效模式

ESD 的失效现象有着独特的组合。一些失效与脉冲的射频效应有关,而其他失效则是由脉冲电流产生。EUT 的典型失效模式如下:

- 重新启动;
- 硬件电路受到破坏;
- 显示屏上出现错误读数;
- 显示屏出现白屏、黑屏、乱码、水波纹、卡顿、死机等显示异常;
- 声音出现干扰杂音、无声、卡顿、音频或音高失真等异常;
- 数据丢失;
- 数据传输停止、变慢、丢帧或者中断;
- 高误码率(BER);
- 工作状态发生改变(例如,模式、时序等);
- EUT 响应灵敏度的丧失。

11.4 ESD 故障诊断

11.4.1 ESD 故障诊断分析

从失效机理的角度分析,ESD 导致故障的原因是敏感电路通过空间耦合或者直接注入的方式接收到了 ESD 干扰信号,这种 ESD 干扰通常以电压、电流或者干扰场的方式作用到敏感电路。当 ESD 干扰没有得到良好的隔离、屏蔽或者泄放,作用到敏感电路上形成超过 EUT 承受能力的瞬态干扰电流,就会产生故障现象。

分析故障现象发生的机理,首先应确定敏感电路。一般情况下,通过故障现象可大致推测出敏感电路位置,可参考 EFT 故障诊断中的方法进一步定位敏感电路。当 EUT 故障比较复杂,可通过小范围近场耦合干扰的方式识别敏感电路,见 11.4.4。

其次是判断干扰路径。干扰信号传输路径通常有两种,一种是通过传导耦合,ESD 电流传导至敏感电路,使其故障甚至损坏;另一种是通过空间耦合,ESD 形成干扰场耦合到敏感电路,导致故障,实际情况两种途径可能同时叠加存在。

ESD 故障诊断流程图示例如图 18 所示。

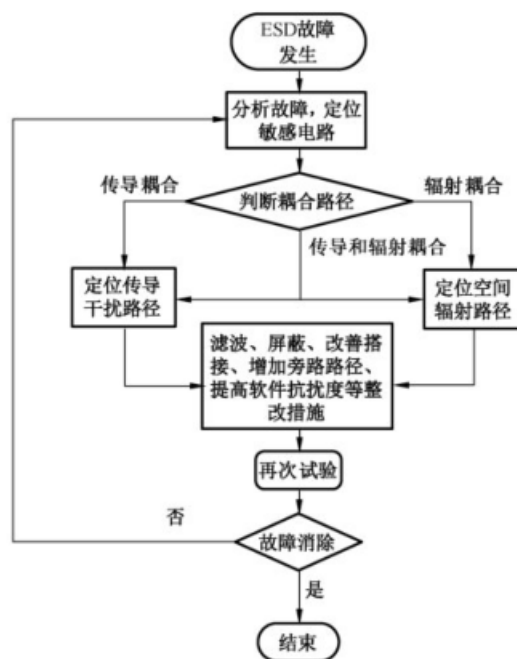


图 18 ESD 故障诊断流程图示例

11.4.2 在实验室进行 ESD 故障诊断

在大多数情况下, RI 和 EFT/B 的故障诊断程序也可用于 ESD 问题的故障诊断。考虑如下方面:

- 检查电缆的屏蔽层与外壳或壳体是否搭接良好, 理想情况下, 其应与壳体的屏蔽层进行 360° 搭接;
- 应确保所有 I/O 连接器的金属外壳与 EUT 的金属壳体进行 360° 搭接;
- 应确保机箱上搭接处的金属涂层导电良好, 避免引起射频能量的交叉耦合和泄漏;
- 应确保不能与外壳进行良好搭接的连接器具有泄放路径, 能使射频能量远离敏感电路;
- 与电路有连接的电缆连接器屏蔽层可能成为放电路径。这能将 ESD 电荷引至电路板的信号返回平面, 如果这种电荷不受控制, 则会产生显著的问题, 在 PCB 上设置一个独立的机壳地或者静电泄放地将改善这一问题;
- 孔缝、指示器以及在外壳上会形成开口和可能暴露电子器件的任何部件, 都应具有能对 ESD 进行泄放和转移的导电路径。

11.4.3 在自有设施中进行 ESD 故障诊断

如果在实验室进行故障诊断后还存在问题, 则最有效的方式是在自有设施中进行故障诊断。对于 GB/T 17626.2 的典型试验布置, 需要在试验桌上放置一块薄的金属板, 然后在金属板与地之间的电缆上加装 2 个 470kΩ 的放电耗散电阻, 为了故障诊断的目的, 可对这种试验布置进行某种程度的简化。由于实际 ESD 是非预期产生的, 因此, 如果没有某些形式的模拟器要进行故障诊断则是困难的。通常更快速的做法是在 EUT 上选择某些位置注入可控的 ESD 电压以识别敏感点。当施加 ESD 时, 需要对所产生的电流进行阻止或者转移(或者两种方式都有)。电感器或铁氧体扼流圈可阻止 ESD 电流, 电容器或瞬态防护器可对 ESD 电流进行转移。理想情况下, ESD 电流能直接返回到 EUT 外壳从而旁路掉任何敏感电路。转移或阻止电流的最佳位置为 I/O 端口或电源端口处, 可防止 ESD 电流进入 EUT 内部而使 EUT 受到干扰或破坏。

理想情况下, 所有的 I/O 端口以及 DC 电源或 AC 电源都应进行合适的滤波, 滤波器的位置宜尽可能接近连接器。对于 I/O 端口, 通常应使用为其设计的共模扼流圈、瞬态防护装置或滤波器, 可解决多

数故障问题。

当使用滤波器滤除这种电流时,引线的长度将增加电感,从而会降低滤波效果。从滤波器的电容器到外壳的泄放电流路径宜尽可能接近电容器,泄放电流路径宜尽可能短且宽以减小电感。

当 ESD 电流在 PCB 印制线上流动时,会产生显著的电场和磁场,这些场可能耦合进敏感电路,使其受到干扰。同时,由于导体的阻性和感性,这些电流能在平面上或印制线上建立电压梯度。如果电路或元件以此平面作为参考且承受着从平面的一端到另外一端的电压梯度,则其会受到干扰。这种效应有时也称为地弹。

ESD 一旦进入电路板,再要对其进行控制是困难的。最佳的方法是确保所有元件和电路的电位能随着电压脉冲同时上升和下降。然而,由于这些脉冲具有非常高速的性质,因此在不同电路的印制线和平面上脉冲的时序可能不同。除了此问题,印制线和导体既是感性的又是阻性的,这将增加阻抗,在此阻抗上也会产生电压降,因此,让所有元件具有相同电压上升是无法实现的。

通常情况下,ESD 产生的总功率和持续电流相当小。滤波器通常可使用额定电压为 100 V 的标准陶瓷电容器。TVS 二极管可用于限制电路或平面之间产生的电压。

当开始进行故障诊断时,先使用低的 ESD 电压,例如 500 V 或 1 000 V。施加脉冲给任何孔缝或操作人员可能触摸到的裸露金属部位,这包括所有屏蔽的 I/O 连接器的导电外壳。当 EUT 肯定不出现问题时,可以以 500 V 的步进增加 ESD 模拟器的电压直到规定等级。通常是让试验电压超过规定等级以确定裕量。应识别所有施加 ESD 时 EUT 受到干扰的点。

如果敏感点为连接器的外壳,考虑如下方面。

- 确保其与金属壳体进行了好的搭接。
- 检查可能会在连接器外壳和 EUT 外壳之间产生阻抗的涂层或喷涂的油漆。
- 确保连接器的外壳件都是良好搭接的,每个外壳组件、盖子和部件之间具有低阻抗的路径。
- 确保连接器外壳与保护地或 ESD 发生器的返回路径进行了正确的连接。对于较小的外壳,如果没有与大地进行正确连接,则金属结构可能无法完全地消除电荷。

如果怀疑是电缆把 ESD 电流耦合给了 EUT,考虑如下方面。

- 宜在接近 EUT 连接器的电缆上加装共模铁氧体扼流圈。
- 宜在 I/O 端口使用 RC 低通滤波器。在信号线上串联 $47\ \Omega \sim 100\ \Omega$ 的小电阻器,同时在信号线与信号返回线或电源返回线之间使用合适大小的电容器(推荐值 $1\ \text{nF} \sim 10\ \text{nF}$)。
- I/O 线宜加装共模扼流圈。
- 数据线宜加装 TVS。如果仅用于 ESD,这些 TVS 的额定功率可以非常小,但应能非常快速地响应。许多 TVS 是专门为 ESD 设计。

如果不是电缆产生的问题但可能是外壳或壳体泄漏,会在 EUT 内部产生二次放电或高能量的场,则宜尝试以下办法:

- 确保所有的壳体紧固件都是紧密连接固定的;
- 使用铜带密封可疑的缝隙;
- 在泄漏缝隙和内部电路之间增加附加的隔离;
- 在泄漏缝隙和内部电路之间增加内部屏蔽体并将其与外壳地进行直接连接。

如果 ESD 通过键盘进入,宜考虑如下方法:

- 在按键和键盘的 PCB 之间增加内部屏蔽体并将其与外壳地进行直接连接;
- 在按键的附近和下面安装金属丝网、屏蔽体或导线网,当放电出现在这些地方时将被转移。

如果 ESD 是通过金属散热器进入,宜考虑如下方法:

- 可通过去除 IC 芯片金属散热器,使用陶瓷散热器可判断是否为散热器导致的干扰。

11.4.4 小范围近场耦合干扰的方式识别敏感源

在实验室和自有的设施中进行 ESD 故障诊断,ESD 发生瞬间,干扰的敏感源和干扰机理是难以确

定的。比如,对带有金属外壳的 EUT 进行接触放电时,放电瞬间会有大部分的能量通过金属外壳的接地而泄放,而如果接地不良,则会有一部分能量通过场的方式或者电容放电的方式耦合到金属外壳内部的电路板或者电路板上的走线或器件,从而导致故障。这种情况下,既无法确定耦合的机理,又无法定位真正的敏感源。

可采用一种小范围近场耦合干扰的方式来模拟失效机理且精准地识别敏感源。采用一个特别设计的近场耦合探头,当 ESD 的干扰注入到探头时,可在探头前端产生一个瞬态的静电场,静电场干扰的范围足够小,且其场的变化和标准的 ESD 波形产生的静电场特性是完全一致的。用探头在可能敏感的电路区域进行 ESD 扫描干扰,当干扰作用在某个局部的电路或者器件,则可模拟出真实的故障现象。此时,受干扰的电路或器件可认为是测试区域内的敏感源。从耦合机理来说,此处的电路最易接受到 ESD 的干扰,从解决问题的角度,提升其对 ESD 干扰的敏感度就可提升 EUT 的 ESD 等级。

采用近场探头进行 ESD 扫描干扰,EUT 上的电路或者器件耦合到干扰的大小取决于三个因素:电路自身的敏感性,这是电路的固有特性;探头与电路或者器件的距离,距离越大则 ESD 场干扰到达敏感源时作用力越小;ESD 的等级,放电等级越高产生的 ESD 场越强。所以,通过在相同距离下扫描 EUT 的不同区域,发生故障时放电等级越小则说明此处电路对 ESD 越敏感。同样,通过在同样的放电等级下扫描 EUT 的不同区域,发生故障时距离越大,则说明此处电路对 ESD 越敏感。通过调整 ESD 电压和测量的距离,就可找到电路上最敏感的区域,这样对于故障问题的分析会变得更加精确。

对定位出来的敏感源进行措施优化后,可采用与优化前相同的试验流程和设置来验证措施的效果。如果措施是有效的,则在相同的试验条件下,敏感源区域不会再出现故障问题。下一步,可通过提升 ESD 干扰等级或者减少干扰距离,继续判定 EUT 上的次敏感源。如此循环,则可将整个 EUT 上的 ESD 抗扰度等级提升。每解决一个敏感源的问题,可在实验室进行标准试验方法的验证,直到试验结果符合试验的要求。

11.5 特殊情况和问题

对于没有金属壳体的 EUT,ESD 抗扰度的设计较为复杂。ESD 抗扰度的设计概念是在会导致元件或电路受到 ESD 干扰的电流路径上增加串联阻抗,以及在想让 ESD 电流离开 EUT 的位置处增加低阻抗的转移路径。以下解决办法适用:

- 应在所有 I/O 连接器上加装瞬态抑制器;
- 宜在 I/O 线缆上加装共模扼流圈;
- 在电缆上靠近连接器处加装铁氧体扼流圈能减少一部分电流脉冲;
- 使用信号线到 PCB 外壳平面或者优先使用信号线到安全地导线之间的并联电容器(推荐值 1 nF 或 10 nF)有助于转移 ESD 电流;
- 确保 PCB 周围的 ESD 电流能被转移的一种非常好的方式是增加金属平板(铝箔、薄的金属片等)。这种金属平板应与所有 I/O 连接器的导电外壳进行连接。ESD 电流将从金属平板返回到大地。

通过软件也可能降低 EUT 对 ESD 的敏感度,例如:

- 不使用无限的“等待”状态;
- 可使用“看门狗”程序让 EUT 重启;
- 可使用校验位,纠错码以防止存储错误数据;
- 应确保所有的输入为锁存的和选通的,不能为浮点的。

11.6 典型的解决办法

很多方法都能阻止 ESD 电流脉冲或使其通过 EUT 安全的返回路径将其转移到大地上。串联装置,例如铁氧体磁珠、共模扼流圈和小阻值的串联电阻器,可用于阻止或减小电流脉冲。并联装置,例如电容器、反偏(取决于实际使用,或者为背对背)二极管、火花隙或气体放电装置,当跨接在数据线上

时,可将大部分的 ESD 电流转移至外壳平面或安全地。如果使用了上述装置还有问题,则主因是元件存在的寄生参数,这些寄生参数应在电路中予以考虑。

对于外壳平面,并不需要其是一个完整的平面,也不需要其位于 PCB 底层或中间层上。使用外壳平面最有效的方法之一是在所考虑的连接器的任一侧的两个电路板安装点之间布置一条宽的印制线,这条印制线应搭接到这些安装点上。印制线应位于平面的顶层表面上且使其与连接器的插针保持安全距离。对于所考虑的每个插针和每条印制线,应安装合适的瞬态抑制装置,其与 PCB 上的外壳印制线之间的距离宜非常短。这将会形成一条安全的低阻抗路径以泄放掉电荷。

一些商用的小电容并联装置,可将大部分的 ESD 电流转移至大地,且不会影响数据线路的信号完整性。

典型的解决办法如下。

- 在可疑电缆上加装铁氧体磁环(在 50 MHz~1 000 MHz 的频率范围内阻抗至少为 200 Ω)。可能需要在所有电缆上都加装铁氧体磁环直到能确认是哪条或哪组电缆产生了问题。确保这些铁氧体磁环的安装位置尽可能靠近 EUT 的 I/O 或电源连接器。
- 确保外壳或壳体没有产生泄漏。可能需要增加紧固件的数量。壳体也可能需要使用附加的射频衬垫。
- I/O 线、信号线和电源线使用低通滤波器。可在信号线上串联小电阻(推荐值 47 Ω ~100 Ω),同时在信号线与信号返回线或电源返回线之间使用电容器(推荐值 1 nF~10 nF)。如果可能,滤波器使用最短的线缆。如果滤波器直接安装在 PCB 上,高频时使用表面贴装元件。
- 在敏感的内部电路节点上跨接电容器(推荐值 1 nF~10 nF)或 RC 滤波器,例如处理器的复位输入。
- 对于与内部 PCB 相连的所有 I/O 线和电源线,加装 TVS。PCB 尽可能在接近 I/O 连接器处与外壳进行良好的射频搭接。
- 对于非屏蔽壳体,增加一个金属平板,所有 I/O 和电源连接器的外壳与它的一面进行连接。

附 录 A
(资料性)
PCB 级 RE 诊断

A.1 概述

通常情况下,RE 试验不合格的原因为 EUT 输入/输出电缆或壳体上的缝隙、孔径产生的电磁泄漏。从辐射源及耦合路径来讲,外接电缆、壳体上的缝隙、孔径等都可看作是耦合路径。真正的辐射源来自于 PCB 级的 RE。对于非金属壳体和无外接线缆的 EUT 来说,整机的 RE 试验类似于 PCB 级的 RE 试验。A.3 中的检查清单,可作为 EUT 在 PCB 投板加工或改板之前进行的预先检查或 EUT 符合性试验不合格后针对 PCB 级的检查。

PCB 级的 RE 诊断不仅是为了解决 EUT 在符合性 RE 试验中不通过的问题,也可用来分析 EUT 内部各小系统或功能单元之间的辐射干扰导致的功能性能降级问题。此外,带有无线发射功能的 EUT 在内部产生射频干扰或射频灵敏度的问题,也可采用 PCB 级 RE 诊断的方法进行分析。

A.2 PCB 级的设计考虑

设计人员通常都非常注意 PCB 上信号的布线,但往往忽略它们的返回路径。理解和解决 EMI 问题的关键是理解电流的流动。忽略了所有的电源和信号返回路径,这些信号的布线都是电路板布线人员和 CAD 程序的一时疏忽。通常重要的是理解返回电流是如何返回到它们的源以及确保返回路径为低阻抗。

首先,考虑高频电流是怎样流动的。在低频时,返回电流通常沿着电阻最小的路径流动,在大约 50 kHz 以下时,返回电流通常沿着电阻最小的路径流动,通常为源和负载电路之间最直接的路径。在高频时,返回电流通常沿着阻抗最小的路径流动。出现这种现象的原因是,在较高频率时,当信号(或电源)导线或印制线以及与之相关的返回路径(另外一条导线或返回平面)的物理尺寸最小时其路径的自感最小。由于这种现象,产生的结果是信号或电源导线中的电流和返回电流通常会使流出电流和输入电流之间的物理空间最小。如果迫使返回路径形成了较大的环路面积,这种环路的作用类似环天线,会产生 RE。

当频率大于大约 50 kHz 时,返回电流通常在信号印制线下方(或者上方,取决于信号印制线板的层结构)的信号返回平面上直接流动。如果迫使返回路径距信号印制线的下面有较长的路径,则环路的物理尺寸将变得非常大,通常会产生辐射(作为环天线),也将产生共模电压源。这些电压源会在 PCB 的周围且通常沿着 I/O 电缆或电源电缆产生共模电流,这些电缆然后会像单极天线或偶极子天线一样产生辐射。

EUT 设计的 PCB 的信号和电源返回平面上不能存在疏忽的间隙。强行改变电流路径会产生环绕 PCB 的磁场。

当进行 PCB 布线时,产生 EMI 的另外一个常见问题是改变参考平面层,没有为返回电流的信号印制线规定闭合的物理路径。例如,如果信号印制线在参考返回平面的顶部开始布线,穿过过孔,继续以这个相同的返回平面作为参考,这是没有任何问题的。然而,经常存在这样的情况,一条印制线从 PCB 板上的一层(参考到信号返回平面)开始,穿过过孔后到达另外一层(其使用不同的参考平面)。如果这两个参考平面(即信号返回路径)的电位相同,且两层通过过孔多次连接在一起,则规定的返回路径将具有小的环路面积(希望如此)。数字信号参考到相同的参考平面。返回电流具有规定的和物理上小的闭合环路面积,其将产生低的发射。当数字信号参考到两个不同的平面时,在信号印制线的穿过点,两层之间宜使用一个或多个过孔(如果两个平面的电位相同)。如果两个平面的电位不同(例如信号返回平面和电源平面),则宜使用两个或多个缝合电容在信号的穿过点将这两个平面相连接,优先采用

对称的方式。

然而,如果两个参考平面具有不同的电位(例如信号返回平面和电源平面),则返回路径可能会规定得不好,从而形成具有较大环路面积的绕行路线,这将有效地复现上述提到的间隙问题。为了更好地规定信号电流的返回路径,在信号印制线最初穿过第二个参考平面的地方需要放置附加的过孔。

如果电路足够的复杂以至于可能有太多的参考平面变化,则可能性价比更高的是使用附加层(通常推荐至少为6层~8层)以增加附加的信号或电源的返回层。为了实现最佳的高频噪声抑制,电源、信号、返回的层间距要小。

通常情况下,电源和电源返回平面之间0.08 mm~0.1 mm的间距能提供好的高频旁路,因此,去耦电容要均匀的放置在基板面的周围。然而,如果使用更传统的0.25 mm间距,则去耦电容宜在物理上尽可能近地放置在每一个IC的 V_{CC} 引脚。

另外一种常见错误是把数字(或大功率的模拟)信号布线时穿过电路中敏感的模拟电路部分。当定义模拟返回平面时也经常犯这种错误。这种错误也会出现在任何孤立平面,例如电源平面。一种常见的错误是数字印制线布线时穿过无噪声的模拟返回平面。数字开关噪声通常会干扰低电平的模拟信号。当改变参考平面两次,这就迫使返回电流远离阻抗最小的路径,这是产生共模电流的常见原因。

A.3 PCB级RE检查清单

PCB级RE的能量可由非常小的电流或电压形成。PCB上走线、器件、芯片之间的寄生能量和交叉耦合噪声是常见的问题。任何一段处理不当的走线,器件、芯片的引脚都有可能成为发射天线。宜考虑以下方面的检查:

- 开关电源的开关回路,一般会产生几十千赫到几百千赫,其高次谐波可到几百兆赫。RE试验结果会表现为间隔相同频率的梳齿状频谱曲线或者其包络曲线;
- 电动设备电机的噪声,DC电机电刷的频率可到数百兆赫,AC电机运行时的噪声及高次谐波可到数十MHz,噪声频谱表现为比较杂乱的“毛刺”;
- 变频、调速电路的开关调速回路,RE的噪声可到数十兆赫;
- PCB上的数字切换开关,一般是切换开关的频率以及其高次谐波,可达到数百兆赫;
- PCB上的晶振及数字电路走线,会产生等同于晶振频率或其各次谐波的噪声,可达到数百兆赫;
- PCB上自身辐射能量比较大,可通过引脚、走线及芯片封装内部的引线直接发射的芯片;
- PCB的布局不合理,会导致板内噪声严重的串扰、耦合,PCB需要有相对完整的地平面、电源平面、信号平面,敏感元器件需要有防止串扰、耦合的设计;
- PCB的布线,是PCB级产生RE的主要原因之一,对于时钟信号线、高速信号线、敏感的控制信号线等,需要有特殊的布线走线处理,比如:包地、阻抗匹配、差分走线等。

A.4 PCB级RE导致EUTRE不合格的初步判定

大多数EUT不能通过RE试验的原因是电缆的辐射或壳体的泄漏,在分析PCB级RE问题时,可从电缆或壳体入手,找到板上的以下辐射源头。

- 通过电缆发射:提高电缆与壳体搭接和屏蔽效能的同时,需要分析电缆上的噪声信号是由PCB上哪部分电路工作产生的,到对应的区域做PCB级RE分析。由多块PCB通过连接器或者线缆组成复杂系统的EUT,从外接线缆排查到PCB模块后,还需要进一步排查是否由其他PCB通过连接器或内部线缆耦合、串扰。
- 通过金属机壳孔缝:较高频率(通常大于200 MHz)的辐射通常可由PCB直接发射,金属机壳的孔缝尺寸设计不当则不会起到屏蔽的效果,可直接在PCB级分析原因。
- 没有金属壳体的EUT:没有金属机壳的EUT,在排除了外接线缆的RE因素后,则可认为是PCB级的RE问题。

——辐射源来自于板内串扰、耦合：一种表现为 EUT 外接线缆的辐射源，从线缆传输的信号类型、对应电路的频率特性去分析，无法将辐射与线缆相关联，则可能在板内造成了串扰或耦合。

大多数的 RE 问题是可以优化外接线缆的搭接、屏蔽和加强机壳的屏蔽效果来解决，线缆和机壳的改善只是从传播路径上去解决，从 PCB 级进行分析和改善，解决方案往往更加稳定可靠，且成本更低。

A.5 PCB 级 RE 故障诊断

PCB 级 RE 故障诊断的目的是在 PCB 上排查辐射源或者分析耦合路径，采用近场测量方法在 PCB 板上手动或者自动扫描测量。

一般来说，近场探头的接收效率比天线要低很多，除非在近场探头附近存在强的干扰噪声，否则，环境中的电磁辐射一般不会高于 PCB 上产生的噪声。在做 PCB 级 RE 故障诊断时，具有无线发射功能（2G/3G/4G/5G，Wi-Fi 等）的设备或其他强干扰源不能放置在其附近，较好的工作区域为没有其他干扰信号的屏蔽室。

将受试 PCB 的相关线缆、辅助设备都连接起来，PCB 处于正常工作状态，把频谱分析仪与近场探头相连（需要时可连接前置放大器），用近场探头在 PCB 各区域进行扫描探测，将频谱分析仪设置到所关注的频率上，则可实时观察相应区域的 RE 测量结果。

采用手持式近场探头做 PCB 级 RE 故障诊断的典型布置如图 A.1 所示。

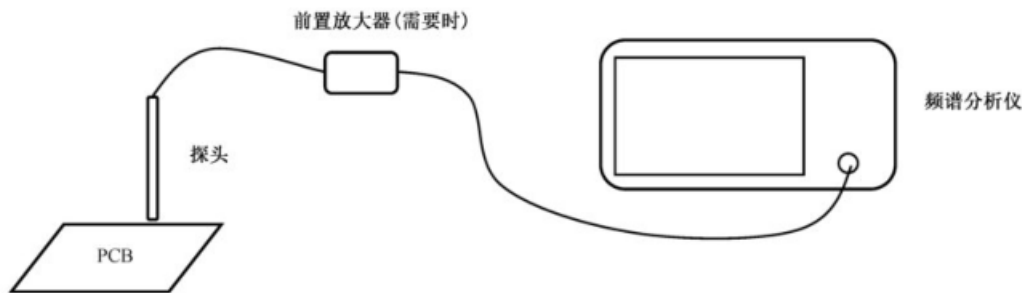


图 A.1 PCB 级 RE 故障诊断的典型布置（采用手持式近场探头）

PCB 级 RE 诊断是在近场测量 PCB 上各芯片、器件、走线的 RE，由于近场辐射与测量距离、方向有很大的关系，测量距离和角度的轻微变化可能会导致测量结果的巨大差异，因此在 PCB 级 RE 诊断中要实现精确一致的测量，宜能高精度地控制测量距离、方向，且做到比较好的可重复精度，这样每次测量的结果才有可比性。参考 IC RE 测量的表面扫描法（见 IEC TS 61967-3），用自动化测量工具可以有效避免测量导致的误诊断。

采用表面扫描法做 PCB 级 RE 故障诊断的典型布置如图 A.2 所示。

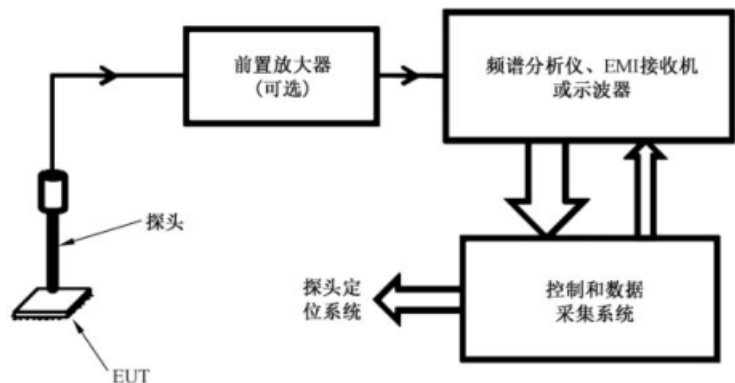


图 A.2 PCB 级 RE 故障诊断的典型布置（表面扫描法）

PCB 级 RE 故障诊断的最大优势在于能精准地判定 EUT 上辐射源的位置和在 PCB 上的耦合路径。图 A.3~图 A.6 和图 A.7 是对 PCB 上芯片、模组、走线、器件等进行诊断分析的一些实际案例。

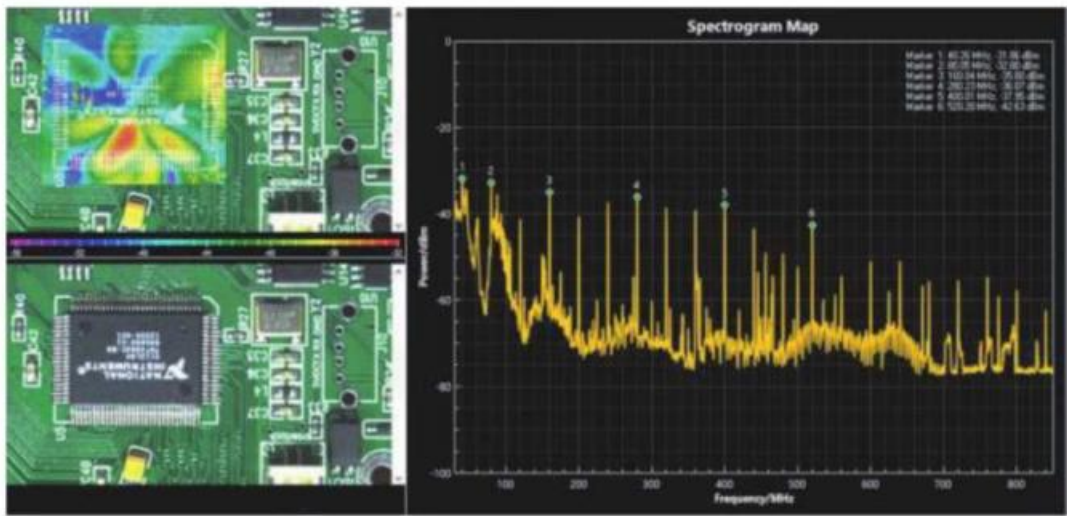


图 A.3 芯片内核到封装管脚引线上的 RE

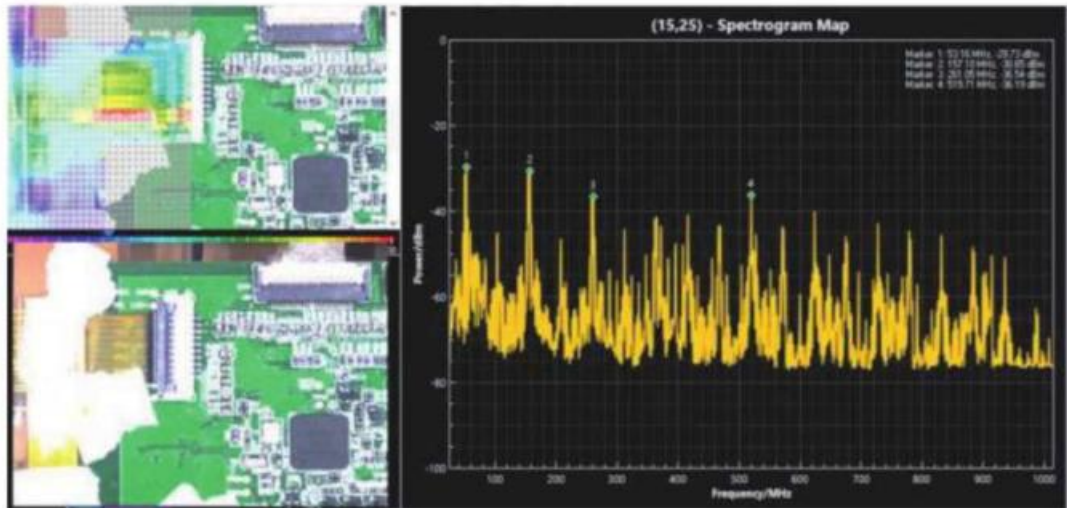


图 A.4 显示屏连接线高速时钟走线的辐射

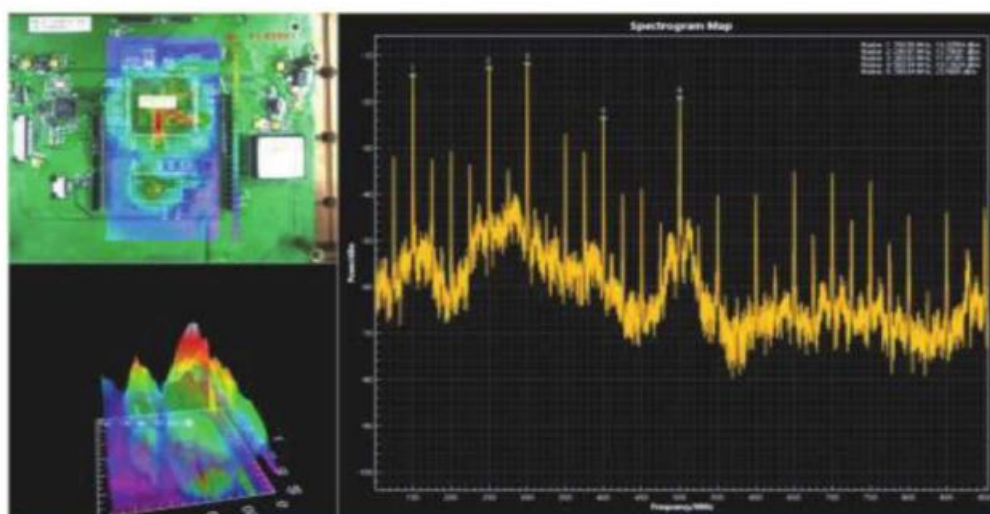


图 A.5 无线模块内高速时钟走线的 RE

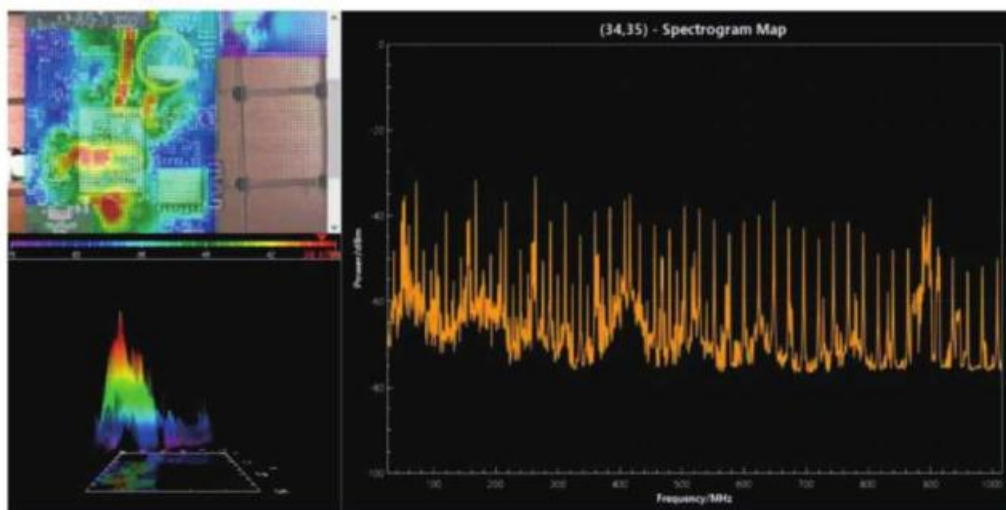


图 A.6 PCB 表面芯片和走线的 RE

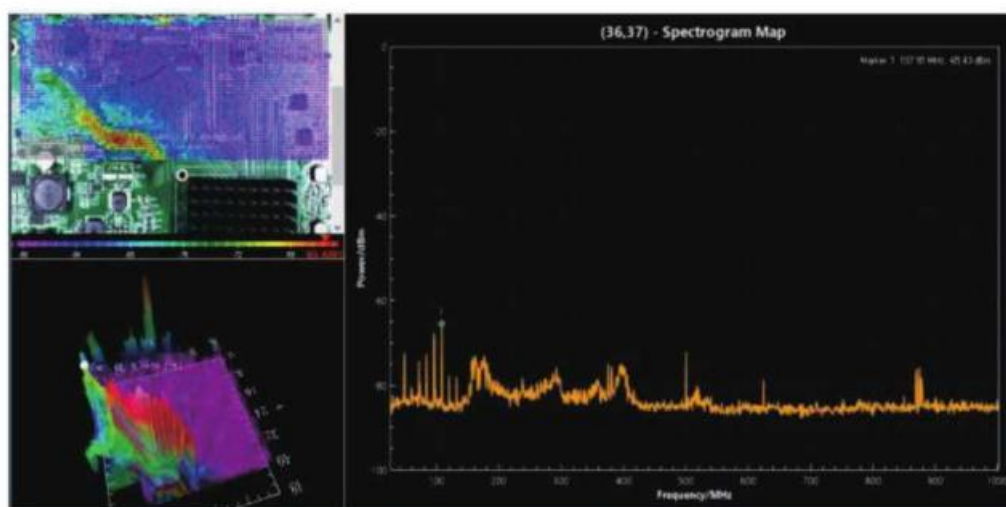


图 A.7 PCB 上电源走线的 RE

附 录 B
(资料性)
电源滤波器的设计与选型

B.1 概述

电源滤波器(特指 EMC 无源滤波器)是一种让 DC 和 AC 电流传输,骚扰信号不能通过或者得到很大抑制的电路结构或装置,通常是指由电感(L)、电容(C)中的一种或几种器件构成的低通滤波器。电感和电容的不同组合会形成不同抑制特性的滤波器(见 B.3),需要了解 EUT 的特性、应用场景、认证要求后才能进行正确的滤波器选型或设计。

B.2 滤波器及滤波器件的参数指标

滤波器的选型和设计,如果不遵循参数选择原则会达不到预定效果甚至带来新的问题,滤波器的主要参数如下:

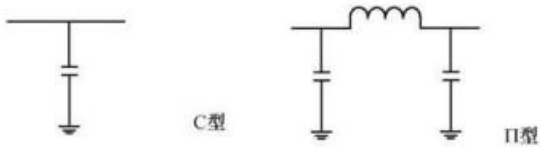
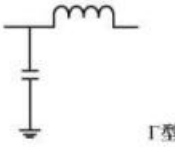
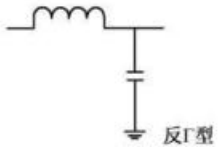
- 额定电压和频率:滤波器标称的额定工作电压和频率范围,接入超出标称范围的电网将会造成滤波器损坏或失效;
- 额定电流:滤波器标称的额定工作电流范围,负载电流超出标称范围将会造成损坏滤波器损坏或失效;
- 安规要求:滤波器影响安规三个重要指标分别为绝缘耐压、漏电流、剩余电压残留能量,需根据不同 EUT 类型的安规要求进行选型;
- IL:衡量滤波器或滤波电路结构对骚扰信号产生抑制的能力,IL 分为差模 IL 和共模 IL,是最重要的特性参数,IL 测量见 GB/T 7343—2017 的第 5 章。通常滤波器说明书中给出的 IL 曲线是在 50 Ω 系统中测量得出,实际应用中需根据 EUT 的阻抗特征进行评估;
- 阻抗:滤波电路中的骚扰信号抑制特性是由滤波器件和原始电路的阻抗特性来共同决定的,阻抗测量见 GB/T 7343—2017 的附录 F。滤波器件的阻抗及其产生的抑制特性会随不同频率、偏置条件等变化而变化,阻抗特性的频率相关性用于滤波器的设计;
- S(散射)参数:滤波电路的 EMC 特性由滤波器件和原电路的 S 参数来决定,S 参数测量见 GB/T 7343—2017 的 4.4。S 参数及其产生的抑制特性会随不同频率、偏置条件等变化而变化,S 参数的频率相关性用于滤波器的设计。

B.3 滤波器匹配原则

不同结构的滤波电路适用于不同的源阻抗和负载阻抗,它们的关系需遵循阻抗最大不匹配原则,另外增加滤波器阶数能提高滤波器的 IL。

滤波器的源阻抗和与之端接的负载阻抗不相等时,该端口会产生反射。当滤波器的两端都处于失配状态时,骚扰信号会在滤波器两端都产生很强的反射损耗。滤波器对骚扰信号的抑制等于吸收损耗加反射损耗,滤波器电路设计时可利用这些失配原则来提升抑制能力。其设计原则为电容对应高阻抗,电感对应低阻抗。阻抗搭配方法如表 B.1 所示。

表 B.1 阻抗搭配方法

源阻抗特征	采用滤波电路	负载阻抗特征
高阻抗		高阻抗
高阻抗		低阻抗
低阻抗		高阻抗
低阻抗		低阻抗

根据需要抑制的骚扰信号频段来选择或计算截止频率(F_c),再评估阶数对应的 IL 能否满足要求。如果滤波器有一个电容和一个电感,则 $n=2$,如此类推。对于一阶滤波器,标准斜率是 20 dB/10 oct 或 6 dB/oct,对于 n 阶的滤波器,它将具有 $20n$ dB/10oct 或 $6n$ dB/oct 的后续频率斜率。电路中的滤波阶数越多,则频率斜率越陡,滤波器 IL 越大,低通滤波器的 IL 与阶数的关系如图 B.1 所示。

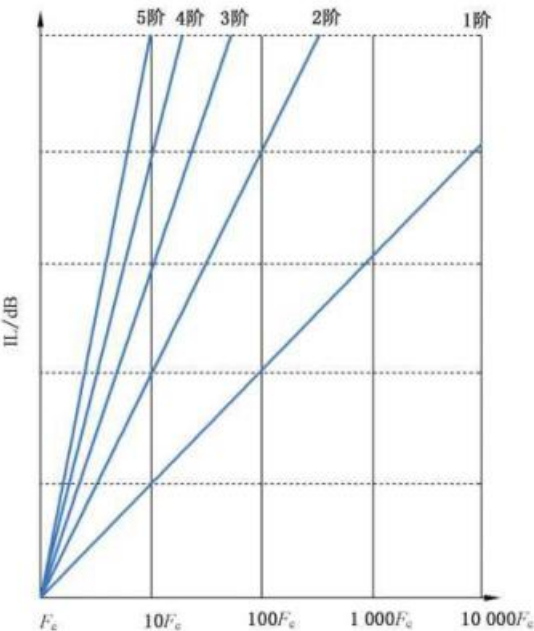


图 B.1 低通滤波器的 IL 与阶数的关系

B.4 滤波器设计和安装要点

B.4.1 滤波器安装要点

滤波器的安装要点如下：

- 整理线缆时不能把滤波器输入端和输出端线缆捆扎在一起，防止骚扰信号不经过滤波器造成的失效；
- 如果允许，滤波器的输入/输出连线采用双绞线的方式，可以减少干扰的耦合；
- 滤波器如采用屏蔽线作为输入/输出连接线，其屏蔽层需可靠接地，且引出线需尽量短，宜采用360°环接；
- 对于安装在金属箱体上的滤波器，其输出线在机箱内的长度需尽可能短，以减小输出线的耦合干扰。采用接地线连接时其长度宜足够短，以减小接地线上的电感和电阻，提高共模抑制的能力；
- 不带屏蔽壳体的滤波器或滤波电路，信号线和电路板上的电感、变压器、开关管等敏感器件布局设计宜远离滤波电路，防止骚扰信号近场耦合；
- 滤波器屏蔽外壳或滤波器的共模电容宜与系统“地”之间有良好的电气连接；
- DC滤波器不宜用于AC场景。DC滤波器通常使用DC电容，在AC条件下很可能造成过热损坏。

B.4.2 器件选型要点

滤波器的器件选型要点如下：

- 根据EUT应用环境选择X电容，X电容的容值越大，对干扰的抑制效果越好。一般情况下，限于成本及组装空间的考量，会根据EUT的架构与电磁骚扰幅值的不同，有不同的推荐值，在该推荐值的基础上，功率越大，所需的容值越大。需注意安规相关标准的剩余电压残留能量要求；
- 根据Y电容应用在EUT上的位置不同，常用的为Y1和Y2电容，应用在EMI滤波器上的Y电容主要为Y2电容。由于漏电流的问题，Y电容的取值不允许过大。一般情况下Y电容的取值在1 000 pF~47 nF的范围内。需注意安规相关标准的漏电流要求；
- 电容的频率特性与电容的取值有关，取值越小，频率特性越好。因此，X电容和Y电容一般都是通过较小的电容并联来满足容量的要求，这样滤波器的高频特性就越好；
- 通常电感材料的选取有以下考虑：磁芯材料的频率范围要宽，在很宽的频率范围内有比较稳定的高磁导率。一般磁芯材料是铁氧体，分别有Mn-Zn铁氧体，Ni-Zn铁氧体。根据两种铁氧体材料的特性不同，通常的应用区间为：Mn-Zn共模电感应用在150 kHz~3 MHz的范围内，Ni-Zn共模电感应用在5 MHz~30 MHz或更高的频段内；
- 考虑到阻抗和频率，估算电感量的取值如下：共模电感取值1.5 mH~5 mH，差模电感取值为10 μ H~50 μ H。由于共模电感漏感的存在，且共模电感的漏感典型值为 $\pm 1\%$ 左右，通常从成本的考虑，会采用共模电感的漏感来取代差模电感，通常的EMI滤波器中也不会有独立的差模电感存在；
- 电感线径需足够满足额定电流的要求，以免电感过发热影响性能和造成危险。共模电感选型除电感量外，还需注意安装尺寸、绕线类型、线间爬电距离、阻抗特性、漏感大小。不同绕线方式但电感量相同的共模电感，两者之间共模和差模IL差异很大，因此在使用前宜对其IL进行测量。

B.4.3 滤波器PCB设计要点

滤波器PCB设计要点如下：

- 滤波器输入/输出线路在 PCB 布局上尽量远离,以免信号耦合、串扰而降低滤波器的抑制能力;
- 滤波器器件在 PCB 上的安装引线宜短,走线设计时不要绕过引脚位置,否则容易达不到预期效果;
- 滤波器 PCB 下方不能走其他线;
- 滤波器旁不能布置高干扰的线路;
- 为克服差模干扰,X 电容布局宜尽量靠近输入端口,但需考虑浪涌对 X 电容的影响;
- 输入 L 走线和 N 走线需相互靠近,与地线分层走线;
- 输入/输出滤波器的 Y 电容需分开独立接地;
- 为了提高 IL 或解决超过 30 MHz 的骚扰信号,有必要设计多级滤波器以便达到覆盖更高频率的抑制能力要求。

B.5 滤波器选型规则

滤波器的选用,可参考以下方面:

- 确定滤波电路的电气参数;
 - 电源相数:需要明确滤波电路是属于单相电源电路还是三相电源电路;
 - 工作电压:需要确定滤波电路的最大工作电压;
 - 工作电流:需要明确滤波电路的最大工作电流;
 - 漏电流:需要确定滤波电路的漏电流是否满足 EUT 的安规要求。
- 确定滤波器的接线安装方式;
 - 选择哪一种接线安装方式取决于 EUT 的实际安装需要,常见的滤波器安装方式有:IEC 插座式、焊片端接式、引线端接式、螺栓接线式、PCB 插装式安装。
- 确定滤波器 IL;
 - 在成本范围内,原则上选取 IL 越大的滤波器,滤波效果则越好;
 - 对于传导骚扰超标严重的 EUT,宜选择包含两级及其以上共模电感的滤波电路。
- 滤波器的高频特性。
 - 在满足自身传导骚扰通过的情况下,需注意滤波器的高频特性。高频特性不好可能会造成辐射骚扰超标或者降低对脉冲干扰信号的抑制能力。

附录 C

(资料性)

不同端口的浪涌抑制电路示例

C.1 概述

由室外进入室内的电源线、通信线、较长的信号线等容易感应到雷电冲击；这些线缆在室内较长距离传输时，也极易感应到雷电及开关冲击。因此，对这些引线进入设备的端口需有一定的抗浪涌（冲击）的能力，EMC 标准对这些 EUT 的相应端口也有对应的浪涌抗扰度测试要求。为保护这些设备的端口免于遭受浪涌（冲击）的损毁并符合相应的浪涌（冲击）抗扰度要求，需在 EUT 端口处设置相应的浪涌防护电路。传统的电感及阻容滤波等措施对较高等级的浪涌冲击防护通常是无效的，一般需要 GDT、MOV、TVS、TSS 等专用的脉冲吸收防护器件构成的防护电路才能提供有效的浪涌冲击防护。下面针对 EUT 不同类型的端口及不同的防护等级提供一些浪涌防护电路示例，供实际电路设计和试验诊断时参考使用。

C.2 II 类电气 EUT 单相 AC 电源端口的浪涌防护电路

II 类电气 EUT 单相 AC 电源端口没有保护地（PE），端口的浪涌测试通常只需进行相线（L）与中线（N）之间的差模浪涌测试（1.2/50 μ s 组合波，内阻 2 Ω ），相应地，对该端口只需进行差模浪涌防护即可，相应的浪涌防护电路示例如图 C.1 所示。

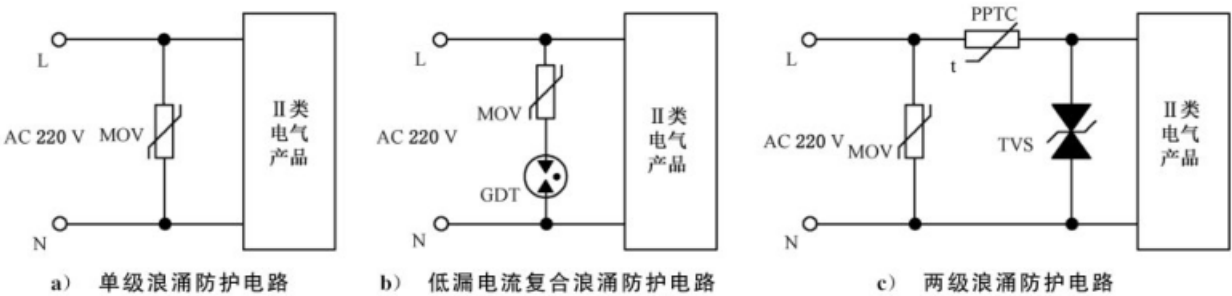


图 C.1 常用的 II 类电气 EUT 单相 AC 电源端口的浪涌防护电路示例

对浪涌电压测试等级不高，且电路没有太高的可靠性要求的情况下，可采用图 C.1a)所示的防护电路，该防护电路的特点是电路简单，成本低廉。

当有较高的可靠性要求时，可在该防护电路的 MOV 回路串联 GDT，这样，在防护回路未导通时，可利用 GDT 的低漏电流克服 MOV 的高漏电流；在防护回路动作时，可利用 MOV 无续流的特点，有效抑制了 GDT 导通后的续流问题，从而可大幅度增加器件的寿命，提高防护电路的可靠性，如图 C.1b)所示。

当对 EUT 有较高的浪涌测试等级要求，或该端口需同时满足浪涌和 EFT/B 测试时，拟采用两级浪涌防护电路，如图 C.1c)所示。该电路中，第一级防护电路宜选择通流量比较大的 MOV；第二级宜选择残压较低且响应速度快得多的 TVS；两级之间宜使用 PPTC 进行隔离，这样能对 EUT 提供良好的浪涌及快速瞬变脉冲防护。电路中，PPTC 可用电感代替；若后接 EUTAC 输入端口有滤波电路时，可将 TVS 后移到滤波电路之后，用 EUT 的滤波电路代替 PPTC 进行级间隔离。

对于额定电压为 220 V 的 AC 供电电源，MOV 宜选择标称电压为 470 V 的规格，MOV 额定电流宜根据测试的最高浪涌等级对应的浪涌电流来确定，并建议至少比所需吸收的浪涌电流大 50%。TVS 宜选择标称电压为 420 V~440 V 的规格，TVS 的额定电流宜根据前级防护电路的残余电压的高低来选择，以能充分吸收前级防护电路的残余电压为宜，并预留适当的裕量。PPTC 宜根据器件手册选

择合适的电压和电流规格(如 130 °C/10 A/250 V AC),若级间隔离为电感或滤波器,其等效电感量不宜小于 20 μ H。

C.3 I 类电气 EUT AC 电源端口的浪涌防护电路

I 类电气 EUT 单相 AC 电源端口有保护地(PE),端口浪涌测试包括 L-N 间的差模浪涌冲击测试及 L-PE 与 N-PE 之间的共模浪涌冲击测试(1.2/50 μ s 组合波,内阻 12 Ω),因此,浪涌防护电路需能同时防护线间的差模浪涌及线与保护地之间的共模浪涌,相应的浪涌防护电路示例如图 C.2 所示。

图 C.2a)为 I 类电气 EUT AC 电源端口通用的浪涌防护电路。其特点为电路简单,采用复合对称电路,共模、差模全保护,L、N 交换不影响浪涌防护的有效性。

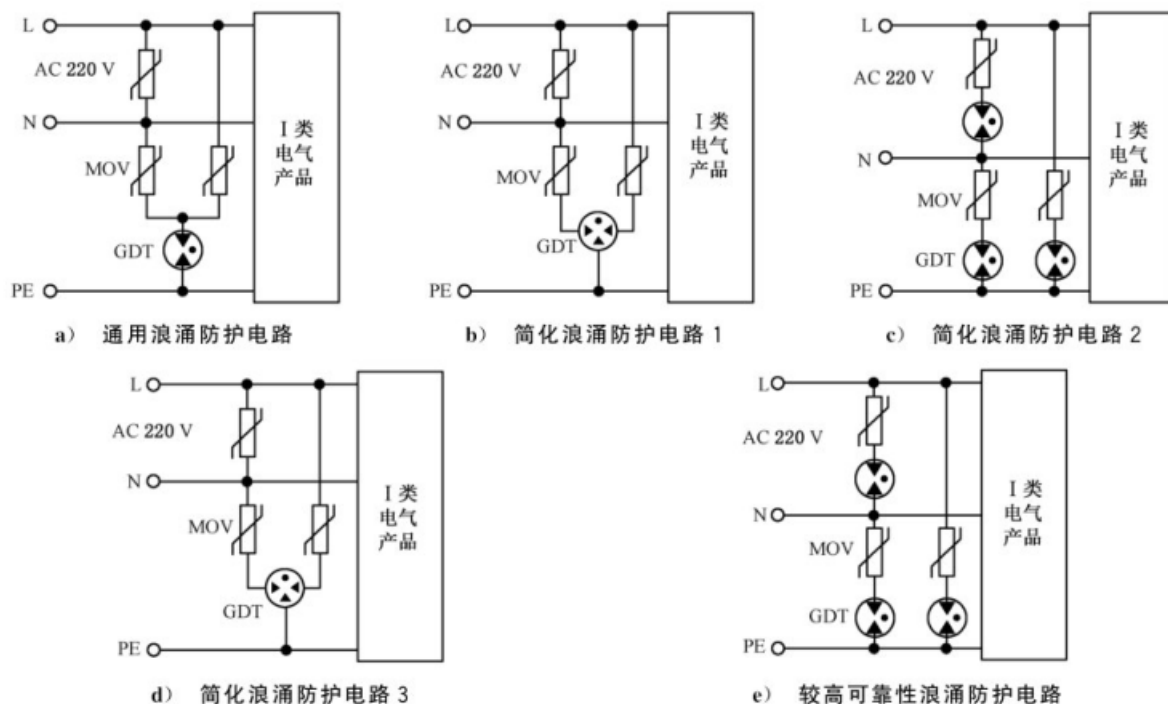


图 C.2 常用的 I 类电气 EUT AC 电源端口的浪涌防护电路示例

当 AC 电源端口中 L 与 N 在实际使用中不可能反接时,可省略两个 MOV,并将 GDT 减少为一个,得到最简化浪涌防护电路,如图 C.2b)所示。该电路的特点是在保证 EUT 抗浪涌冲击的能力的同时,可以最大限度降低防护电路的成本。

当 AC 电源端口中 L 与 N 在实际使用中可能反接时,为降低通用防护电路的成本,可将 L-PE 及 N-PE 防护通道的 GDT 合二为一,如图 C.2c)所示;也可将 L-PE 及 N-PE 防护通道的两个独立的 GDT,用一个三端 GDT 代替,如图 C.2d)所示。

当有较高的可靠性要求时,可在该防护电路的每个 MOV 回路串联一个 GDT,如图 C.2e)所示。

对于额定电压为 220 V 的 AC 供电电源,图 C.2 中的 MOV 选择原则与图 C.1 类似。需注意的是,按照 GB/T 17626.5 的测试要求,使用 1.2/50 μ s 的组合波发生器测试时,L-N 之间测试时发生器内阻为 2 Ω ,L-PE 及 N-PE 之间测试时发生器内阻为 12 Ω ,因此,L-PE 及 N-PE 所需吸收的最大浪涌电流远小于 L-N 之间最大吸收浪涌电流,因此,L-PE 及 N-PE 之间可以使用较低电流规格的 MOV 器件。GDT 宜选择标称电压为 470 V~600 V 的规格。

当对 EUT 有较高的浪涌测试等级要求,或该端口需同时满足浪涌和 EFT/B 测试时,拟采用两级浪涌防护电路,如图 C.3 所示。

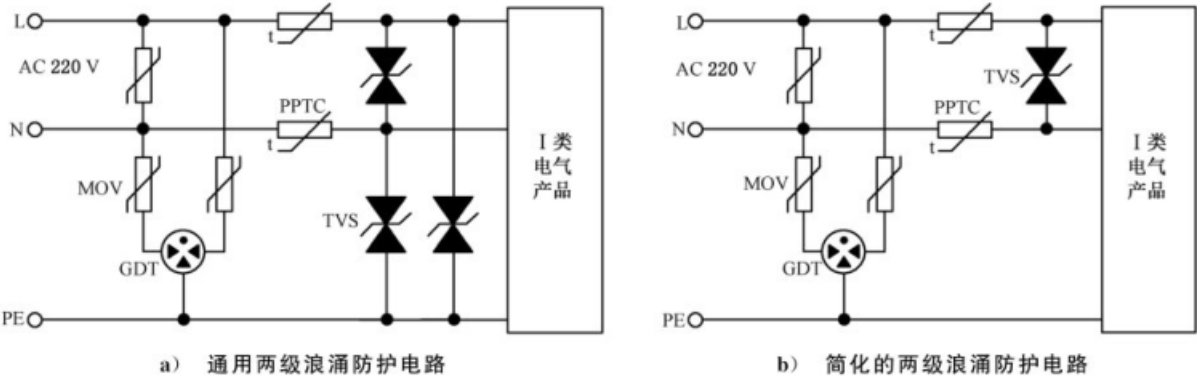


图 C.3 I 类电气 EUT AC 电源端口的两级浪涌防护电路示例

通用两级浪涌防护电路如图 C.3a) 所示。第一级防护电路宜选择通流量比较大的 MOV+GDT；第二级宜选择残压较低且响应速度快得多的 TVS；两级之间宜使用 PPTC 或电感进行隔离，这样能对 EUT 提供良好的浪涌及快速瞬变脉冲防护。若后接 EUT AC 输入端口有滤波电路时，可将 TVS 后移到滤波电路之后，用 EUT 的滤波电路代替 PPTC 进行级间隔离。

通常情况下，EUT AC 电源端口本身抗共模电压的能力普遍大于抗差模电压的能力，因此，对两级浪涌防护电路，为节省成本，简化电路，有些 EUT 可能对第二级的 TVS 防护电路，只保留 L-N 之间的差模防护 TVS，省去 L-PE、N-PE 之间的共模防护 TVS，简化后的电路如图 C.3b) 所示。对于第一级 MOV+GDT 防护电路，可根据 EUT 自身的特点，选择图 C.2 的其他形式的防护电路结构。

对于额定电压为 220V 的 AC 供电电源，图 C.3 中的 MOV 和 GDT 规格的选择原则与图 C.3 一致，PPTC(或代替 PPTC 的隔离电感、滤波电路)及 TVS 的选择原则与图 C.1 一致。

C.4 三相 AC 供电的电气 EUT AC 电源端口的浪涌防护电路

三相 AC 供电的电气 EUT 有几种供电方式：一种是三相五线式供电方式(L1+L2+L3+N+PE)，其防护电路如图 C.4a) 及图 C.4b) 所示；无中线的三相四线式供电方式(△连接，L1+L2+L3+PE)，其防护电路如图 C.4c) 所示及图 C.4d) 所示；无保护地线的三相四线式供电方式(星形连接，L1+L2+L3+N)，其防护电路如图 C.4e) 所示；三相三线式供电方式(△连接，L1+L2+L3)，其防护电路如图 C.4f) 所示。

对三相五线式 AC 供电的电气 EUT，其 AC 电源端口相线间，以及相线与中线间需承受差模浪涌脉冲测试(1.2/50 μ s 组合波，内阻 2 Ω)，相应的端子之间使用 MOV 进行浪涌防护；相线、中线与保护地之间需承受共模浪涌脉冲测试(1.2/50 μ s 组合波，内阻 12 Ω)，相应的端子之间使用 GDT(或 MOV+GDT)进行浪涌防护，通用浪涌防护电路如图 C.4a) 所示。相线间的差模工作电压(线电压：380 VAC)与相线-中线之间的工作电压(相电压：220 VAC)相比较，因此相线间的防护电路的标称电压等级也较高，此时可以取消相线间的浪涌防护器件，利用两相分别与中线之间的防护器件串联进行浪涌防护(例如，对 L1-L2 之间的差模浪涌电流，可通过 MOV5 与 MOV6 串联进行吸收)。因此，可以省略图 C.4a) 所示的通用浪涌防护电路中相线之间的浪涌防护 MOV，简化电路如图 C.4b) 所示。

对无中线的三相四线式供电方式(△连接)供电的电气 EUT AC 电源端口，其相线之间采用 MOV 进行浪涌防护；相线与地线之间采用 MOV+GDT 的方式进行浪涌防护，用 GDT 来抑制 MOV 正常工作期间的漏电流，其通用浪涌防护电路如图 C.4c) 所示。相线与地线之间防护电路中的 GDT 可以共用，则简化电路如图 C.4d) 所示。

对无地线的三相四线式供电方式(星形连接)供电的电气 EUT AC 电源端口，其相线之间以及相线与中线之间均采用 MOV 进行浪涌防护；其通用浪涌防护电路如图 C.4e) 所示。

对无中线和地线的三相三线式供电方式(△连接)供电的电气 EUT AC 电源端口，其相线之间采用 MOV 进行浪涌防护；其通用浪涌防护电路如图 C.4f) 所示。

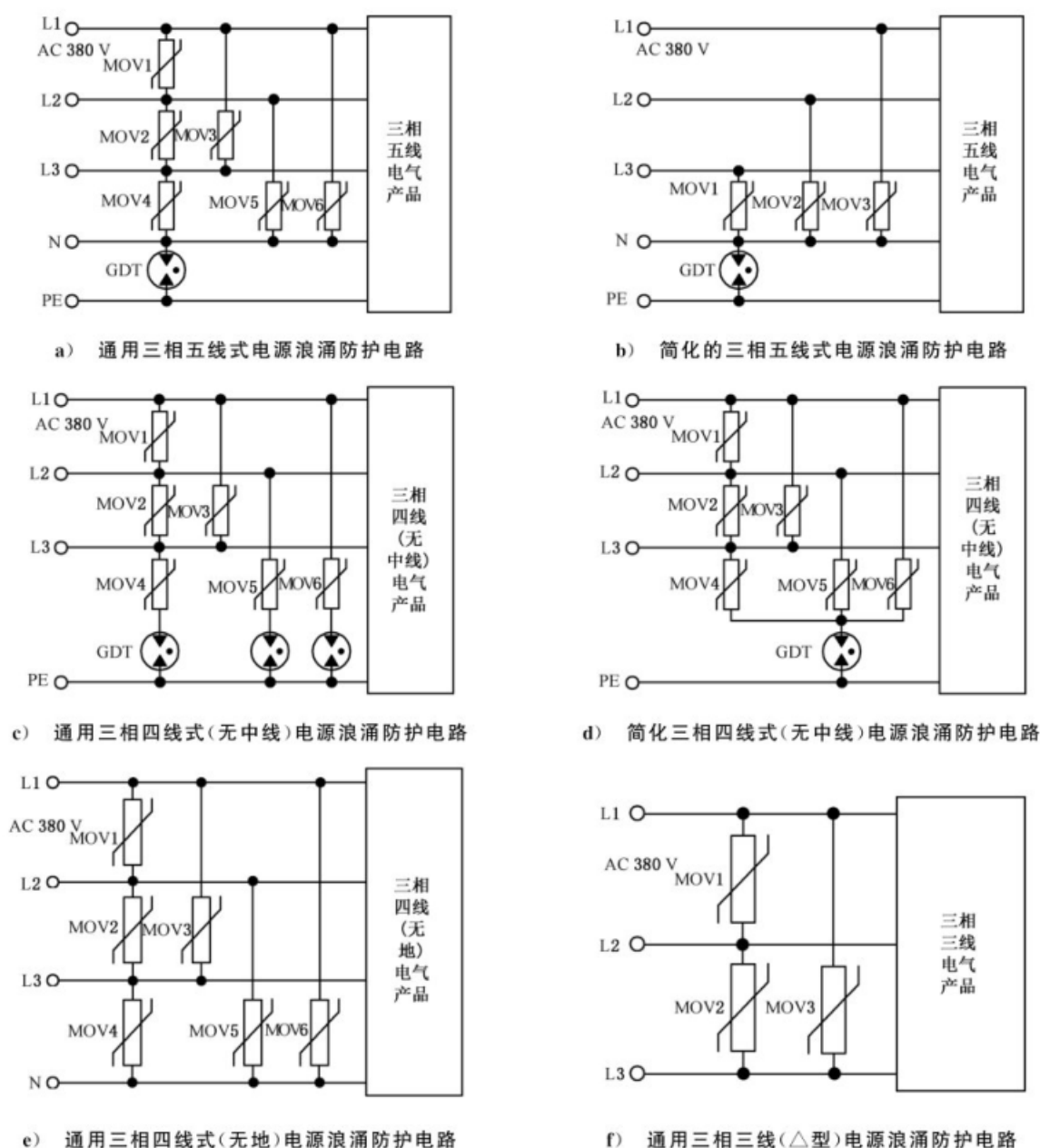


图 C.4 三相供电的电气 EUT AC 电源端口浪涌防护电路示例

对 380 V 额定电压 AC 供电的电气 EUT,使用图 C.4 所示的防护电路示例时,相线间 MOV 选择 820 V 的标称电压规格;相线与中线以及相线与地线之间 MOV 选择 470 V 的标称电压规格;所有的 GDT 一律选择 470 V~600 V 的标称电压规格。

为增加防护电路的可靠性,图 C.4 中,所有相线之间以及相线与中线之间单独的 MOV 构成的浪涌防护宜串联 GDT 使用,相应 GDT 的标称电压/额定吸收电流规格不低于所串 MOV 的标称电压/额定吸收电流的规格。

C.5 DC 电源端口的浪涌防护电路

由远距离 DC 供电的 EUT,其 DC 电源端口也会遭受到感应的雷电及开关冲击,因此,该端口也可能需要接受浪涌抗扰度测试,相应地,EUT 该 DC 电源端口也应有浪涌防护电路保护。

对只由本地电池供电的 DC 电源端口,无需进行浪涌抗扰度测试;只由本地外接 AC/DC 适配器供

电的 DC 电源端口,需进行浪涌抗扰度测试,但测试在外接 AC/DC 适配器的状态下进行,且浪涌抗扰度测试在 AC/DC 适配器的 AC 端口进行,相应的浪涌防护电路也按照前述的 AC 电源端口浪涌防护的方式进行设计。

图 C.5 为 DC 远供的 EUT DC 电源端口浪涌防护电路示例。图 C.5a)为浮地 DC 电源浪涌防护电路示例;图 C.5b)为接地 DC 电源浪涌防护电路示例;图 C.5c)为接地 DC 电源两级浪涌防护电路示例,当该端口需承受较高等级浪涌抗扰度测试,或 EUT 对端口的浪涌脉冲较为敏感,或该端口也需同时进行 EFT 测试时,宜使用该两级防护电路,两级防护电路之间采用 PPTC 隔离,该 PPTC 可以被电感或滤波器代替。

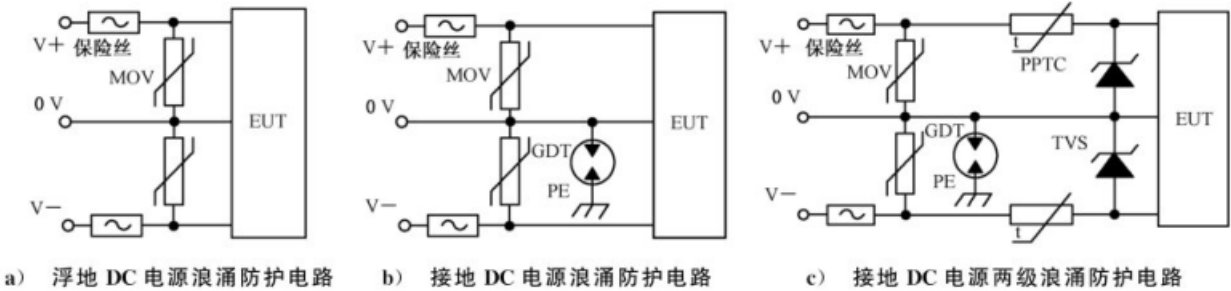


图 C.5 DC 远供的电气 EUT DC 电源端口浪涌防护电路示例

三个示例的防护电路中:前级防护电路所用保护器件为 MOV,其标称电压规格通常为 DC 供电电压额定值的 1.5 倍,其额定电流规格为所施加的最高浪涌等级对应浪涌电流的 1.5 倍以上;防护电路所使用的 GDT 的标称电压规格为 DC 供电电压额定值的 2.5 倍,其额定电流规格为所施加的最高浪涌等级对应浪涌电流的 2 倍以上;二级防护电路中的 TVS 选择单向 TVS,其标称电压规格通常为 DC 供电电压额定值的 1.3 倍,TVS 的额定电流需根据前级防护电路的残余电压的高低来选择,以能充分吸收前级防护电路的残余电压为宜,并预留适当的裕量;PPTC 需根据器件手册选择合适的电压和电流规格,若级间隔离为电感或滤波器,其等效电感量不宜小于 20 μH 。

三个示例中包括正负对称供电,实际应用中较多采用的是单一的 DC 正或负电源供电,此时可仅使用该防护电路的上或下半部分防护电路。

C.6 外接天线端口的浪涌防护电路

大量通信 EUT 存在外接天线端口,将室外高处天线接收到的无线信号通过同轴电缆接口引入 EUT 内部,该接口极易受到户外天线感应的雷电冲击,因此,该端口需进行浪涌防护。

若对应的检测标准使用的测试信号为 10/700 μs 的通信端口组合脉冲波形,可采用图 C.6 所示的浪涌防护电路。



图 C.6 天线端口单级浪涌防护电路示例

若对应的检测标准要求同时通过测试信号为 10/700 μs 的通信端口组合脉冲波形及 1.2/50 μs 组合脉冲波形的测试,则宜采用图 C.7 所示的浪涌防护电路。

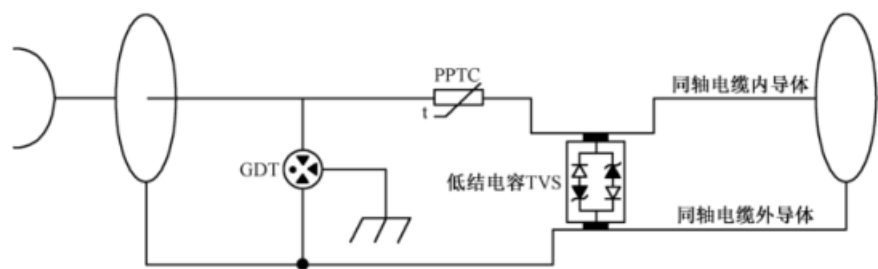


图 C.7 天线端口两级组合式浪涌防护电路示例

C.7 高速以太网端口的浪涌防护电路

以太网端口一般传输距离较长,比较容易感应到雷击或开关冲击,因此是需进行浪涌防护的端口。
现在大多数电子 EUT 的以太网端口均为高速以太网端口,由于 MOV 或普通 TVS 相对较高的极间电容存在,不能直接使用进行端口的浪涌防护,一般宜用 GDT 与低容值 TVS 进行浪涌防护,如图 C.8和图 C.9 所示。

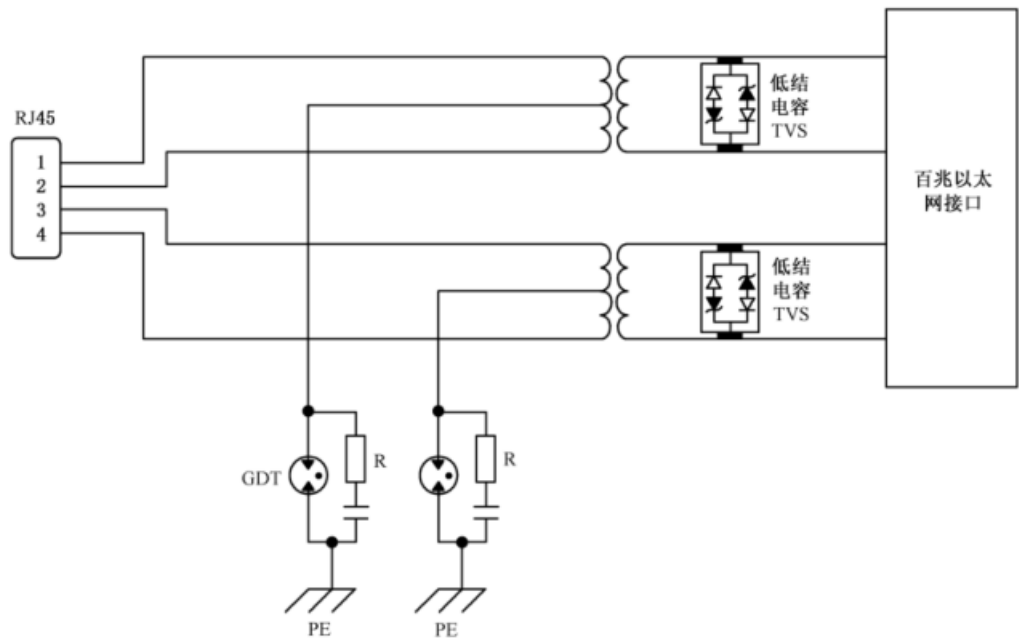


图 C.8 百兆以太网端口的浪涌防护电路示例

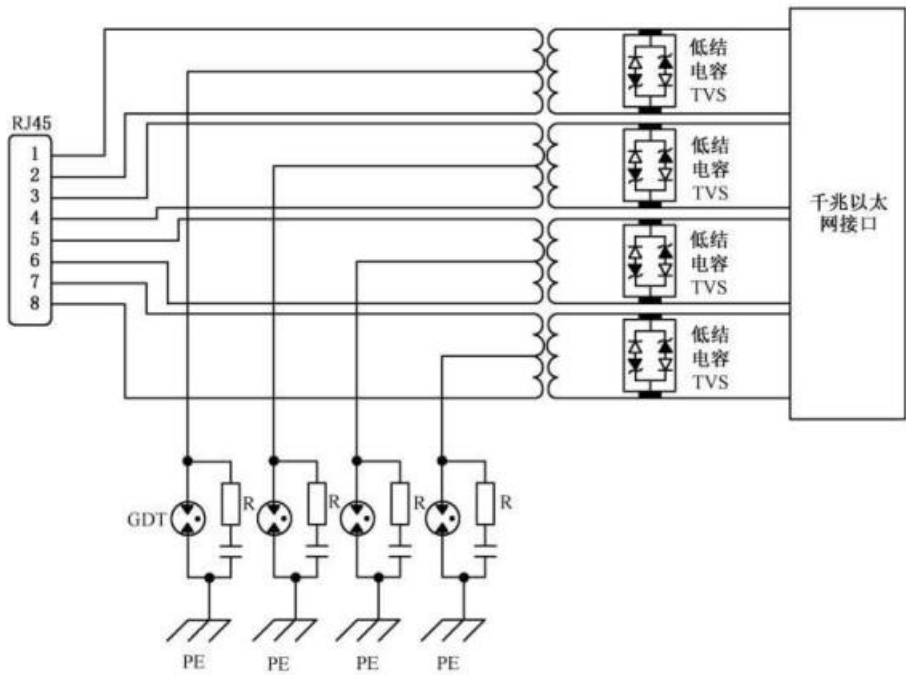


图 C.9 千兆以太网端口的浪涌防护电路示例

C.8 RS485 接口的浪涌防护电路

RS485 接口可实现较长距离的有线通信,因此,该接口也极易感应到浪涌冲击。采用 TVS 或 TSS 对 RS485 进行浪涌防护,可获得较高的浪涌防护等级,如图 C.10 所示。

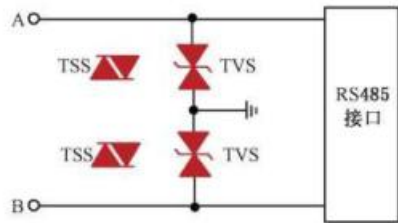


图 C.10 RS485 接口单级浪涌防护电路示例

RS485 接口若使用两级组合式防护电路,第一级采用 GDT 进行防护,第二级采用 TVS 进行防护,在获得较高浪涌防护等级的同时,可获得较低的钳位电压,如图 C.11 所示。

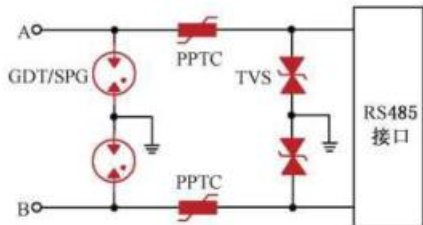


图 C.11 RS485 接口两级浪涌防护电路示例

参 考 文 献

- [1] GB/T 7343—2017 无源 EMC 滤波器件抑制特性的测量方法
 - [2] GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
 - [3] GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
 - [4] GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度
 - [5] IEC TS 61967-3 Integrated circuits—Measurement of electromagnetic emissions—Part 3:
Measurement of radiated emissions—Surface scan method
-