



中华人民共和国国家标准

GB/T 17626.20—2014/IEC 61000-4-20:2010

电磁兼容 试验和测量技术 横电磁波(TEM) 波导中的发射和抗扰度试验

Electromagnetic compatibility—Testing and
measurement techniques—Emission and immunity
testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguide

杭州高电
(IEC 61000-4-20:2010, ID1)

专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 电力试验工程服务

2014-12-22 发布

2015-06-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布



目 次

前言	III
1 范围和目的	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	2
3.1 术语和定义	2
3.2 缩略语	4
4 概述	5
5 TEM 波导要求	5
5.1 概述	5
5.2 使用 TEM 波导的通用要求	5
5.2.1 TEM 模的验证	5
5.2.2 试验区域和 EUT 最大尺寸	6
5.2.3 可用试验区域的确认	6
5.3 对某些类型 TEM 波导的特定要求和建议	8
5.3.1 开放式 TEM 波导的布置	8
5.3.2 双端口 TEM 波导 TEM 模的替代验证方法	8
6 EUT 类型	9
6.1 概述	9
6.2 小 EUT	9
6.3 大 EUT	9
7 实验室试验环境	9
7.1 概述	9
7.2 气候环境	9
7.3 电磁环境	9
8 试验结果的评价与报告	9
附录 A (规范性附录) TEM 波导中的发射试验	11
附录 B (规范性附录) TEM 波导中的抗扰度试验	26
附录 C (规范性附录) TEM 波导中的 HEMP 瞬态试验	31
附录 D (资料性附录) TEM 波导的特性	36
附录 E (资料性附录) TEM 波导中电场探头的校准方法	42
相关标准和参考文献	51
图 A.1 引出电缆被引至位于试验区域底部和正交角上的角落	19
图 A.2 基本的正交轴定位装置或试验支撑装置	20
图 A.3 辐射发射试验的 3 个正交轴旋转方位	21

图 A.4	典型 EUT 的 12 面/轴试验方位	21
图 A.5	OATS 示意图	22
图 A.6	双端口 TEM 室(对称芯板)	22
图 A.7	单端口 TEM 室(非对称芯板)	23
图 A.8	带状线(双导体)	24
图 A.9	带状线(四导体,平衡馈电)	25
图 B.1	单极化方向的 TEM 波导的试验布置	29
图 B.2	TEM 波导中场均匀区确认的位置点	30
图 C.1	100 kHz 到 300 MHz 的频谱幅值	35
图 D.1	简单波导(不存在 TEM 波)	40
图 D.2	传输 TEM 模的波导示例	40
图 D.3	极化矢量	40
图 D.4	传输 TEM 波的传输线	41
图 D.5	单端口和双端口 TEM 波导	41
图 E.1	校准区域的确认测量点示例	43
图 E.2	探头扰乱确认布置	43
图 E.3	到达场强发射设备的净功率测量布置	46
图 E.4	电场探头校准布置举例	47
图 E.5	另一种电场探头校准方法的校准布置	49
图 E.6	天线和测量仪器的等效电路	49
表 1	正态分布下扩展不确定度的 K 值	8
表 B.1	场均匀区确认的测量位置点	27
表 B.2	试验等级	28
表 C.1	现行标准定义的辐射抗扰度试验等级	35
表 E.1	校准频率点	44
表 E.2	校准场强大小	44

前 言

GB/T 17626《电磁兼容 试验和测量技术》目前包括以下部分：

GB/T 17626.1—2006	电磁兼容	试验和测量技术	抗扰度试验总论
GB/T 17626.2—2006	电磁兼容	试验和测量技术	静电放电抗扰度试验
GB/T 17626.3—2006	电磁兼容	试验和测量技术	射频电磁场辐射抗扰度试验
GB/T 17626.4—2008	电磁兼容	试验和测量技术	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
GB/T 17626.5—2008	电磁兼容	试验和测量技术	浪涌(冲击)抗扰度试验
GB/T 17626.6—2008	电磁兼容	试验和测量技术	射频场感应的传导骚扰抗扰度
GB/T 17626.7—2008	电磁兼容	试验和测量技术	供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量及

测量仪器导则

GB/T 17626.8—2006	电磁兼容	试验和测量技术	工频磁场抗扰度试验
GB/T 17626.9—2011	电磁兼容	试验和测量技术	脉冲磁场抗扰度试验
GB/T 17626.10—1998	电磁兼容	试验和测量技术	阻尼振荡磁场抗扰度试验
GB/T 17626.11—2008	电磁兼容	试验和测量技术	电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度

试验

GB/T 17626.12—2013	电磁兼容	试验和测量技术	振荡波抗扰度试验
GB/T 17626.13—2006	电磁兼容	试验和测量技术	交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的

低频抗扰度试验

GB/T 17626.14—2005	电磁兼容	试验和测量技术	电压波动抗扰度试验
GB/T 17626.15—2011	电磁兼容	试验和测量技术	闪烁仪 功能和设计规范
GB/T 17626.16—2007	电磁兼容	试验和测量技术	0 Hz~150 kHz 共模传导骚扰抗扰度试验
GB/T 17626.17—2005	电磁兼容	试验和测量技术	直流电源输入端口纹波抗扰度试验
GB/T 17626.20—2014	电磁兼容	试验和测量技术	横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度

试验

GB/T 17626.24—2012	电磁兼容	试验和测量技术	HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法
GB/T 17626.27—2006	电磁兼容	试验和测量技术	三相电压不平衡抗扰度试验
GB/T 17626.28—2006	电磁兼容	试验和测量技术	工频频率变化抗扰度试验
GB/T 17626.29—2006	电磁兼容	试验和测量技术	直流电源输入端口电压暂降、短时中断和

电压变化的抗扰度试验

GB/T 17626.30—2012	电磁兼容	试验和测量技术	电能质量测量方法
GB/T 17626.34—2012	电磁兼容	试验和测量技术	主电源每相电流大于 16 A 的设备的电压

暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验

本部分是 GB/T 17626 的第 20 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分等同采用国际标准 IEC 61000-4-20:2010(第 2 版)《电磁兼容(EMC) 第 4-20 部分:试验和测量技术—横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容性[IEC 60050(161):1990,IDT]

——GB/T 6113.101—2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-1 部分:无线电

骚扰和抗扰度测量设备 测量设备(CISPR 16-1-1:2006,IDT)

——GB/T 6113.104—2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第1-4部分:无线电

骚扰和抗扰度测量设备 辅助设备 辐射骚扰(CISPR 16-1-4:2005,IDT)

——GB/T 6113.203—2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第2-3部分:无线电

骚扰和抗扰度测量方法 辐射骚扰测量(CISPR 16-2-3:2003,IDT)

——GB 9254—2008 信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法(CISPR 22:2006,IDT)

本部分做了如下编辑性修改:

——5.2.3.2 步骤d)的公式引用更正为式(3);

——更正了5.3.2中的式(8);

——式(A.12)中 $g_{i,f}$ 的说明更改为“ $g_{i,f}$ ——由TEM波导法测量结果换算得到的OATS等效场强值,单位为伏每米(V/m)”;

——补充了式(1)中量符号的解释;

——原文中“verification”和“validation”的使用前后不一致,本部分统一为“TEM的验证”“场均匀区的确认”;

——对参考文献编号进行了更正,并更改了正文中相应引用处的编号。

本部分由全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246)提出并归口。

本部分起草单位:东南大学、上海出入境检验检疫局、中国电力科学研究院、上海市计量测试技术研究院、中国电子技术标准化研究院、中国计量科学研究院。

本部分主要起草人:周忠元、周香、张娴、景莘慧、蒋全兴、李妮、龚增、陈俐、谢鸣。

电磁兼容 试验和测量技术

横电磁波(TEM)

波导中的发射和抗扰度试验

1 范围和目的

GB/T 17626 的本部分给出了利用各种 TEM 波导进行电子和电气设备发射和抗扰度试验的方法。TEM 波导有开放式(例如,带状线和电磁脉冲(EMP)模拟器)和封闭式(例如,TEM 室),还可以进一步分为单端口、双端口和多端口波导。TEM 波导的适用频率范围取决于具体的试验需求和 TEM 波导的具体类型。

本部分的目的是给出:

- TEM 波导的性能,包括典型的频率范围和对 EUT 尺寸的限制;
- 用于电磁兼容(EMC)试验的 TEM 波导的确认方法;
- EUT(即 EUT 壳体和连接电缆)的定义;
- 在 TEM 波导中进行辐射发射试验的试验布置、步骤和要求;
- 在 TEM 波导中进行辐射抗扰度试验的试验布置、步骤和要求。

注:本部分规定的试验方法用于测量所关心设备的电磁辐射抗扰度和辐射发射。电磁辐射的模拟和测量结果对于定量确定最终安装使用状态下的电磁效应是不够准确的,规定试验方法的主要目的是保证定性分析电磁效应使用的不同试验设备所得试验结果的重复性。

本部分的目的是不是规定适用于任意特定产品或系统的试验方法,而是为所有感兴趣的产品委员会提供通用的基础性参考。对于辐射发射试验,产品委员会应参考国际无线电干扰特别委员会(CISPR)标准¹⁾选择发射限值和试验方法。对于辐射抗扰度试验,由产品委员会负责对其管辖范围内的设备选择合适的试验方法和抗扰度限值。本部分描述的试验方法独立于 GB/T 17626.3²⁾。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

IEC 60050 (161) 国际电工词汇 第 161 章 电磁兼容(International electrotechnical vocabulary—Chapter 161: Electromagnetic compatibility)

IEC 61000-2-11:1999 电磁兼容 第 2-11 部分:环境 HEMP 环境的分类[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-11: Environment—Classification of HEMP environments]

IEC 61000-4-23 电磁兼容 第 4-23 部分:试验和测量技术 HEMP 和其他辐射骚扰防护器件的测量方法[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-23: Testing and measurement techniques—Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances]

IEC/TR 61000-4-32 电磁兼容 第 4-32 部分:试验和测量技术 HEMP 模拟器概况[Electro-

1) 在电磁兼容性国际标准体系中,有关辐射发射试验的标准隶属于 CISPR 标准。

2) 产品委员会在咨询“全国无线电干扰标准化技术委员会”和“全国电磁兼容标准化技术委员会”后,可以规定并使用这些不同的试验方法。

magnetic compatibility (EMC)—Part 4-32: Testing and measurement techniques—High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium]

IEC/TR 61000-5-3 电磁兼容 第 5-3 部分: 安装和防护指南 HEMP 防护概念
[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 5-3: Installation and mitigation guidelines—HEMP protection concepts]

CISPR 16-1-1 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-1 部分: 无线电骚扰和抗扰度测量设备 测量设备 (Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Measuring apparatus)

CISPR 16-1-4 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-4 部分: 无线电骚扰和抗扰度测量设备 辐射骚扰测量天线和试验场地 (Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Antennas and test sites for radiated disturbance measurements)

CISPR 16-2-3:2006 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-3 部分: 无线电骚扰和抗扰度测量方法 辐射骚扰测量 (Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity—Radiated disturbance measurements)

CISPR 22 信息技术设备 无线电骚扰特性 限值和测量方法 (Information technology equipment—Radio disturbance characteristics—Limits and methods of measurement)

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

IEC 60050(161)界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

TEM 模 transverse electromagnetic mode, TEM mode

传输方向上的电场和磁场分量比横截面上的主方向分量少得多的波导模式。

3.1.2

TEM 波导 TEM waveguide

开放或封闭的传输线系统, 电磁波在其中以 TEM 模传输以产生满足试验需要的特定场。

3.1.3

TEM 室 TEM cell

封闭的 TEM 波导, 通常是一个矩形同轴线。电磁波在其中以 TEM 模传输以产生满足试验需要的特定场, 外导体完全包围内导体。

3.1.4

双端口 TEM 波导 two-port TEM waveguide

在两端均有输入/输出端口的 TEM 波导。

3.1.5

单端口 TEM 波导 one-port TEM waveguide

仅有一个输入/输出端口的 TEM 波导。

注: 此类 TEM 波导无端口的一端通常为宽带的传输线终端负载。

3.1.6

带状线 stripline

两个或更多的平行板构成的带终端负载的传输线, 电磁波在平行板之间以 TEM 模传输以产生满

足试验要求的特定场。

注：带状线的侧面通常是开放的，以便 EUT 进出和监视。

3.1.7

内导体或芯板 inner conductor or septum

同轴传输线的内导体，当同轴线横截面为矩形时其内导体通常是平的。内导体相对于外导体可以对称或不对称地布置。

3.1.8

外导体或壳体 outer conductor or chassis

同轴传输线的外导体，其横截面通常是矩形。

3.1.9

特性阻抗 characteristic impedance

对任意的波前等相位面，内导体与外导体之间的电压与内导体或外导体上的电流之比的幅值。特性阻抗与电压/电流的大小无关，仅与传输线的横截面尺寸有关。

注：TEM 波导的特性阻抗一般设计为 $50\ \Omega$ ，特性阻抗为 $100\ \Omega$ 的 TEM 波导通常用于瞬态试验。

3.1.10

吸波材料 anechoic material

具有吸收或者减小由该材料所反射电磁波能量特性的材料。

3.1.11

宽带传输线终端负载 broadband transmission-line termination, broadband line termination

由与 TEM 波导特性阻抗匹配（通常为 $50\ \Omega$ ）的低频分立元件负载和高频吸波材料组合而成的终端负载。

3.1.12

换算算法 correlation method

将 TEM 波导的电压测量结果换算为开阔试验场(OATS)、半电波暗室(SAC)或自由空间场强的数学步骤。

3.1.13

EUT 类型 EUT type

将电磁特性极其相似的 EUT 分为一组，以便采用相同的试验布置和相同的试验方法进行试验。

3.1.14

引出电缆 exit cable

连接 EUT 与 TEM 波导外部设备的电缆或由可用试验区域引出的电缆。

注：试验区域的定义见 5.2.2 节。

3.1.15

互连电缆 interconnecting cable

在试验区域内连接 EUT 各组成部分的电缆，这些电缆并不引出试验区域。

3.1.16

试验布置支撑 test set-up support

无反射、不导电、低介电常数的支撑和定位参考，以便 EUT 按照换算算法或试验方法的要求进行精确旋转。

注：典型材料为发泡聚苯乙烯，不推荐采用木质支撑（见[4]）³⁾。

3) 方括号中的数字指的是参考文献编号。

3.1.17

正交角 **ortho-angle**

正交角是立方体的对角线与任一侧面边界线之间的夹角。假设立方体与 TEM 波导的笛卡儿坐标系相一致,立方体对角线的投影与水平轴和垂直轴的夹角是 45° , 对角线与波导表面边界的夹角为 54.7° 。

注 1: 正交角的示意图见图 A.2a)。

注 2: 当和 EUT 联系在一起时,正交角通常称为正交轴。

3.1.18

主(场)分量 **primary(field) component**

与试验所需极化方向一致的电场分量。

注: 在常规双端口 TEM 室内,芯板与水平面平行,因此在 TEM 室横截面的中心位置,主模电场矢量是垂直的。

3.1.19

次(场)分量 **secondary (field) component**

在笛卡儿坐标系中,与主场分量垂直且相互垂直的两个场分量中的任意一个。

3.1.20

合成场(幅值) **resultant field (amplitude)**

主场分量和两个次场分量的方和根(V/m)。

3.1.21

试验支撑装置 **manipulator**

任何一种手动或自动的类似于转台的非金属的试验布置支撑装置,能够按照换算算法或试验方法的要求在若干位置对 EUT 进行固定和支撑。

注: 图 A.2 给出了试验支撑装置的设计实例。

3.1.22

超旋转 TEM 波导 **hyper-rotated TEM waveguide**

经重定位的 TEM 波导,它的正交轴与地平面是垂直的。

注: 更多细节见[6]。

3.1.23

重力相关/无关 **gravity-dependent/-independent**

地球引力的方向是固定的。EUT 可绕三个轴中的任意一个旋转,EUT 旋转到不同位置时所受到重力的影响方向不同。如果 EUT 在所有位置上均工作正常,即不管重力的相对方向如何,EUT 均工作正常,则 EUT 为重力无关;如果 EUT 在一个或多个位置上工作异常,则为重力相关。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BALUN 平衡-不平衡转换器(balanced-to-unbalanced transformer)

DFT 离散傅立叶变换(discrete Fourier transform)

EUT 受试设备(equipment under test)

FFT 快速傅立叶变换(fast Fourier transform)

GTEM 吉赫兹横电磁波(gigahertz transverse electromagnetic)

HEMP 高空电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse)

OATS 开阔试验场(open-area test site)

PoE 进入点(points of entry)

RF 射频(radio frequency)

SAC 半电波暗室(semi-anechoic chamber)
 SPD 浪涌保护装置(surge protective device)
 TDR 时域反射计(time domain reflectometer)
 TE 横电波(模)(H-模)(transverse electric (mode), (H-mode))
 TEM 横电磁波(transverse electromagnetic)
 TM 横磁波(模)(E-模)(transverse magnetic (mode), (E-mode))
 VSWR 电压驻波比(voltage-standing-wave-ratio)

4 概述

本部分给出了 TEM 波导的基本特性和限制,即:试验区域、场均匀性、TEM 模的纯度和频率范围,TEM 波导的特性介绍见附录 D。

由于 OATS 和 SAC 方法可以测得有效和可重复的设备骚扰场强,TEM 波导的辐射发射试验结果通常要换算为 OATS 和 SAC 的试验结果,此时要用附录 A 规定的换算算法将 TEM 波导中的测量结果换算为 OATS 的等效数据。

TEM 波导也可作为场强发生器对设备进行电磁场的抗扰度试验,具体规定见附录 B。参考文献中列出了采用 TEM 波导进行抗扰度试验的几个标准。将 TEM 波导用作场强发生器还可进行场强测量,见附录 E 和参考资料中列出的其他文献。

TEM 波导不仅限于进行整机的辐射测量,而且可用于零部件、集成电路的测量以及衬垫和电缆的屏蔽效能试验。更进一步的信息见参考文献。

5 TEM 波导要求

5.1 概述

当 TEM 波导符合一定要求时即可用于电磁发射和抗扰度测量。应采用以下方法进行 TEM 波导的符合性验证。

本章的重点是 TEM 主模和场均匀性等通用性的符合性确认,辐射发射、辐射抗扰度和瞬态试验的具体要求分别见附录 A、附录 B 和附录 C。

5.2 使用 TEM 波导的通用要求

5.2.1 TEM 模的验证

当频率高于截止频率时 TEM 波导可能出现谐振,该截止频率由波导的横截面尺寸和/或波导的长度决定。在实际应用中,当满足以下要求时即认为电磁场在波导中以 TEM 模传输。以下 TEM 模的验证对辐射抗扰度以及辐射发射试验用 TEM 波导均适用,TEM 模的特性应定期验证(见 5.2.3)。

注 1: 通常,TEM 波导制造商必须验证和记录在所期望频率范围内 TEM 模的特性,并且在系统文档中要包括验证数据。

采用抗扰度试验的场均匀区确认步骤(按照 5.2.3),在波导横截面上(垂直于传输方向)规定的测量点中,应至少在 75% 的测量点上次场分量(不需要的)小于主场分量 6 dB 以上。这些 75% 的测量点最多允许有 5% 的频率点(至少一个频率点)其主场分量的波动从 $-0\text{ dB} \sim +6\text{ dB}$ 放宽到 $-0\text{ dB} \sim +10\text{ dB}$ 或者次场分量小于主场分量 2 dB,但需要在试验报告中注明实际的波动和对应的频率点。频率范围是从 30 MHz 到 TEM 波导的最高工作频率。第一个频率步长不能超过初始频率的 1%,而后的频率步长在 80 MHz~1 000 MHz 之间取前一频率的 1%,在 80 MHz 以下和 1 GHz 以上取前一频率的

5%。对扫频速度的制约因素之一是场强探头的响应时间。

注2: 由于 TEM 模是主模并且腔体的 Q 值低, 谐振频带不会很窄。因此, 在进行 TEM 模的验证试验时频率可以使用对数坐标。

注3: 瞬态试验的起始频率应是 100 kHz。

注4: 5.2.1 中的 6 dB 准则针对的是 TEM 主模而不是场均匀性, 与 5.2.3 的场均匀性要求不是一回事, 不要将两者相混淆, 有关场均匀性的更多信息见[16]。

5.2.2 试验区域和 EUT 最大尺寸

EUT 的最大尺寸取决于 TEM 波导的“可用试验区域”。TEM 波导的可用试验区域取决于其尺寸、形状以及电磁场的空间分布。

TEM 波导的可用试验区域(见图 A.6~图 A.9)取决于 5.2.3 定义的“场均匀区”。在 TEM 波导中 TEM 波的传输方向(通常是 z 方向)垂直于场均匀区(横截面, 通常是 x - y 平面)。在可用试验区域内所有的 x - y 截面上都必须满足 5.2.3 规定的场均匀区要求。EUT 与内外导体或吸波材料的间距 h_{EUT} (见图 A.6~A.9)的最小值取决于场均匀区的边界(见 5.2.3)和内外导体之间的距离。然而, 为避免 EUT 与波导导体间的紧密耦合可能导致的 EUT 工作状态变化, h_{EUT} 不能是零(建议 h_{EUT} 大于 $0.05h$)。可用试验区域沿 z 轴(传输)方向的限制是 $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ 。试验区域的长度为 $L = z_{\max} - z_{\min}$, 在 $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ 的任一横截面上都必须满足场均匀区的要求。满足以下条件时可认为在 $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ 的区域符合 TEM 模的要求:

- 在 $z_{\max}$ 处符合 TEM 模的要求, 并且波导的几何形状与图 A.6~A.9 中的某一种相似并且 h 与 w 的比值(固有形状)在 $0 < z < z_{\max}$ 之间保持不变;
- 或者, 在 $z_{\min}$ 和 $z_{\max}$ 处符合 TEM 模的要求, 同时波导的横截面保持不变或者在 $z_{\min}$ 和 $z_{\max}$ 之间是渐变的并且 dh/dz 和 dw/dz 在 $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ 之间的变化平缓(导体的几何形状没有扭曲和突变)。

EUT 的最大尺寸与波导的“可用试验区域”有关, EUT 的尺寸不应大于 $0.6w \times 0.6L$ (见图 A.6~图 A.9)。

注1: ISO 11452 系列标准中推荐的 EUT 尺寸是 $0.33w \times 0.6L$, MIL-STD 461F 推荐的 EUT 尺寸是 $0.5w \times 0.5L$ 。

建议可用的 EUT 高度最大值为 $0.33h$, 其中 h 是试验区域内 EUT 中心所处横截面上内外导体之间的距离(例如, TEM 室的芯板与底板间的距离)。对于所有波导, EUT 旋转到任意方位都必须位于可用试验区域内。

注2: 多数标准将 EUT 的尺寸限制为 $0.33h$, 多数 TEM 室供应商提供的资料将 EUT 的尺寸限制为 $0.5h$ 。除了像场探头和传感器的高精度校准外, EUT 的高度可以超过 $0.33h$, 但不能超过厂家的建议值。如果厂家提供了关于较大 EUT 的测量不确定度信息, 最大的可用 EUT 高度可以大于 $0.33h$ 。[24]给出了波导加载效应的更多信息。

5.2.3 可用试验区域的确认

5.2.3.1 通用考虑

本条使用“场均匀区”的概念, 即一个假设的区域, 该区域内场强幅值的变化足够小(见[14])。TEM 波导的尺寸决定场均匀区(横截面)的大小。最大的 EUT 尺寸与可用试验区域有关(见 5.2.2), 除非在小于 EUT 尺寸的面上 EUT 能全部被照射。

注1: 通常场均匀区的确切形式和位置都不固定, 而是采用本部分中的步骤进行确定。

注2: 在没有其他定义的情况下, 场均匀区应是一个与电磁场传播方向正交的垂直面。它应是一个位于 EUT 前方的平面区域。

注3: 垂直面的前提条件是 TEM 模的传播方向近似水平(沿 z 轴方向), 并且是以平面波的形式传播。如果 TEM 模沿其他方向传播, 场均匀区所在平面的方位也要进行相应调整。

采用传输线的结构没有像 SAC 内地面反射场的扰乱。因此,可以在内外导体附近形成均匀场(仅在垂直方向上)。

理论上场均匀区的位置可以离开输入端口任意距离,其位置取决于波导的具体形状。场均匀区仅在确认过的距离上有效。为便于 EUT 旋转,场均匀区与 5.2.2 所定义可用试验区域端点 $z_{\max}$ 之间的距离至少应大于 EUT 外壳的最大尺寸。

在空腔状态下采用非调制信号进行场均匀区的确认,依据 5.2.1 的规定设置频率范围和步长。

根据场均匀区的大小,场均匀区的确认至少要设置 5 个测试点(4 个点位于场均匀区的角上,1 个点位于场均匀区的中心)。两个测试点之间的距离必须小于等于 50 cm。如果场均匀区边长大于 50 cm,由于测试点必须等间距分布,这意味着应至少设置 9 个测试点。

5.2.3.2 场均匀区确认和 TEM 模验证的试验步骤

本方法也叫作“恒定前向功率法”,具体试验步骤如下:

- 将各向同性的三维场强探头放置在其中一个测试点上;
- 在 TEM 波导的输入端口施加一前向功率,按照 5.2.1 的规定设置频率范围和步长,保证电场的主场分量不超出设定的限值 E_{Limit} ,记录所有的前向功率、电场主场和次场分量的读数;
- 保持前向功率不变,测量和记录其他测试点上的电场主场和次场分量;
- 根据公式(3)计算标准差,所有的试验结果都用 dBV/m 的形式表示;
- 测试点上主场分量的幅值变化应在 6 dB 以内,每个测试点上的次场分量幅值至少应比主场分量小 6 dB;
- 使用最小主场分量 E_{ref} 作为参考(这样可以保证满足 0 dB~+6 dB 的要求);
- 已知前向功率 P_{fwd} 和场强 E_{ref} ,可以采用式(1)计算产生一定场强 E_{test} 所需前向功率 P_{test} ,并应记录计算结果。

$$P_{\text{test}} = \frac{E_{\text{test}}^2}{E_{\text{ref}}^2} P_{\text{fwd}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

E_{test} ——试验场强,单位为伏每米(V/m);

E_{ref} ——参考场强,单位为伏每米(V/m);

P_{test} ——试验功率,单位为瓦(W);

P_{fwd} ——前向功率,单位为瓦(W)。

示例:在某个测试点上,81 W 功率产生的场强是 9 V/m,产生 3 V/m 的场强需要的功率是 9 W。

或者,可以采用等效的方法在试验频率范围内保持电场主场分量为 E_{Limit} 不变,记录施加到输入端口的前向功率,然后采用步骤 a)、d)、e)、f) 和 g),此方法被称为“恒定场强法”。

场均匀区的确认结果对各个面(包括线缆)均可以被“场均匀区”包围的所有 EUT 都适用,完整的场均匀区确认需要每年进行一次。当 TEM 波导的结构改变后也需要再次确认(如 TEM 室或放在屏蔽室内的带状线)。

5.2.3.3 场均匀性准则

场均匀性的判定方法如下:

将在测试点 i 测得场强记作 E_i , N 个测试点的平均值和标准差为:

平均值按式(2)计算:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{(N)} E_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

标准差按式(3)计算:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{(N)} (E_i - \bar{E})^2} \dots\dots\dots (3)$$

在统计学意义上 $N=5$ 代表非常小的量,不过可以假设 E_i 的测量结果服从正态分布,则测量结果有 75% 的概率落在如式(4)所示范围之内:

$$\bar{E} - K \cdot \sigma_E \leq E_i \leq \bar{E} + K \cdot \sigma_E \dots\dots\dots (4)$$

因子 K 取 1.15。

表 1 正态分布下扩展不确定度的 K 值

因子 K	1	1.15	1.3	1.5	2	3
概率 %	68.3	75.0	80.6	86.6	95.5	99.7

当测量结果以 dB 表示时,通常已知概率才能确定测量结果 E_i 是否落在式(5)所示范围内。

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + E_{\text{Margin}} \dots\dots\dots (5)$$

将上述范围与式(4)相比较得式(6):

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot \sigma_E \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_E \leq \frac{E_{\text{Margin}}}{2 \cdot K} \dots\dots\dots (7)$$

对于 75% 的概率, $K=1.15$ 和 6 dB 的范围,标准差应是 $\sigma_E \leq \frac{6 \text{ dB}}{2 \times 1.15} = 2.61 \text{ dB}$ 。

探头的最大尺寸需要小于内外导体之间距离的 10%,此时探头对场的扰动可以忽略。更多的详细资料见[17]。

5.3 对某些类型 TEM 波导的特定要求和建议

5.3.1 开放式 TEM 波导的布置

为减小周围环境的影响,开放式 TEM 波导应布置在屏蔽室内。

注 1: 允许的环境信号电平在附录 A、附录 B 和附录 C 中有规定并且与试验目的有很大关系。

建议开放式 TEM 波导与屏蔽室的地板、墙壁和天花板之间的距离不小于开放式 TEM 波导两块板之间的距离 h 。为减小反射可在屏蔽室的适当位置额外放置一些吸波材料。上面给出的距离仅供参考,值得一提的是开放式 TEM 波导可以由屏蔽室的地板和专门安装的芯板组成。

注 2: MIL-STD-461F 要求开放式 TEM 波导必须放置在屏蔽室内。波导与周围墙壁之间的最小距离与波导的尺寸有关。MIL-STD-461F RS105 试验要求波导与最近金属壁面(包括地板、屏蔽室墙壁等)的最小距离是 $2h$, h 是波导两块板之间的最大垂直距离。CISPR 20 要求波导与屏蔽室墙壁、地板和天花板的最小距离为 800 mm (相当于 h)。

5.3.2 双端口 TEM 波导 TEM 模的替代验证方法

作为 5.2.1 的一种替代验证方法,可以采用以下方法验证双端口 TEM 波导的使用频率范围。

在对 EUT 进行试验前,应在布置好试验设备和 EUT 的条件下确定双端口 TEM 波导的谐振频率,此时 EUT 电源断开。在此状态下,TEM 波导在使用频率范围内的传输损耗应满足式(8):

$$A_{\text{tloss}} = \left| 10 \lg \left(\frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{fwd}}} + \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{fwd}}} \right) \right| \leq 1 \text{ dB} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

A_{tloss} ——加载 TEM 波导的传输损耗,单位为分贝(dB);

P_{refl} ——输入端口的反向功率,单位为瓦(W);

P_{fwd} —— 输入端口的前向功率,单位为瓦(W);

P_{output} —— 输出端口的输出功率,单位为瓦(W)。

注 1: 反向功率、前向功率和输出功率的测量与波导的特征阻抗有关。测量时未使用阻抗变换器,是直接测量。因此,式(8)适用于特征阻抗为 $50\ \Omega$ 的波导。

注 2: 这是一种适用于 ISO 11452-3 中所列双端口 TEM 波导的替代验证方法,该方法假定谐振高次模从 TEM 模中消耗部分能量。

6 EUT 类型

6.1 概述

同一类的 EUT 是指电磁特性或机械尺寸非常相似的一组产品,这些产品可以采用相同的试验布置和相同的试验方法进行试验。为便于在试验区域内采用相同的布置,EUT 的分类和布置对抗扰度和发射试验均适用。

6.2 小 EUT

当 EUT 壳体的最大尺寸小于最高试验频率对应的波长(例如, $f=1\ \text{GHz}$ 时 $\lambda=300\ \text{mm}$)并且 EUT 不带连接电缆时,该设备称为小 EUT。

6.3 大 EUT

EUT 具有以下特征之一即为大 EUT:

- 带有一根或多根引出电缆的小 EUT;
- 带有一根或多根非引出连接电缆的小 EUT;
- 有或无连接电缆的 EUT,其尺寸大于最高频率所对应的电磁波波长;
- 由非引出互连电缆连接的一组小 EUT 所构成的试验布置,它们可以有也可以没有引出电缆。

7 实验室试验环境

7.1 概述

为减小环境因素对试验结果的影响,试验应在 7.1 和 7.2 中规定的气候和电磁环境下进行。

7.2 气候环境

除非负责通用或产品标准制定的技术委员会另有规定,实验室的气候环境应在 EUT 和试验设备的制造商规定的可用范围之内。

如果相对湿度过大导致 EUT 或试验设备上出现凝露,则不应进行试验。

注:如果认为有充分的证据表明本部分所覆盖的现象受气候环境的影响,应提请本部分的制定者注意。

7.3 电磁环境

为避免对试验结果的影响,实验室的电磁环境应保证 EUT 能正常工作。

8 试验结果的评价与报告

试验应按照试验计划进行,试验计划应包含在试验报告中。试验结果和报告的要求取决于试验

类型。

试验报告需要包含重复该试验所需的全部信息,特别是以下信息:

- 试验计划规定的项目;
- EUT 和相关设备的标识,例如,商标名、产品类型和序列号;
- 试验时的特定环境条件;
- 进行试验所需的所有特定条件;
- 制造商、客户或购买者规定的性能等级;
- 对于抗扰度试验,通用、产品或产品族标准中规定的性能判据;
- 骚扰施加过程中或结束后所观察到对 EUT 的影响以及这些现象的持续时间;
- 对于抗扰度试验,判定产品合格/不合格的依据(基于通用、产品或产品族标准规定的性能判据,或制造商与购买者之间的约定);
- 满足符合性试验所采用的任何特定试验条件,例如,线缆的长度或类型、屏蔽或者接地状态、EUT 的工作状态;
- 试验布置和 EUT 布局的图片和(或)照片。

附录 A

(规范性附录)

TEM 波导中的发射试验

A.1 概述

本附录描述 TEM 波导中的发射试验。

TEM 波导中的发射试验结果可以与采用以下两种方法得到的限值相比较。

——基于 TEM 波导的限值

如相关参考文献所述,此方法已应用于一些特定类型的产品中(例如,集成电路、军用设备、汽车零部件和模块等产品的试验规范)。此时,TEM 波导的试验结果直接与相应的骚扰限值或要求相比较。该骚扰限值通常是针对特定类型的 TEM 波导规定的,有些情况下是由其他试验方法的限值推导而来(见[35])。

——基于 OATS 的限值

当 EUT 必须符合 OATS 中的场强骚扰限值时,采用该方法。需要采用换算算法将 TEM 波导中的试验结果转换为 OATS 的场强值。

本附录仅对第二种方法进行详细描述。为表征 TEM 波导的适用性,采用 TEM 波导进行发射试验需要对其进行有效性确认。对于各种类型的 EUT,应按照第 5 章进行有效性确认。如果仅进行同类产品间的相对比较,则不需要将试验结果换算到 OATS 或其他试验场地。在这种情况下,产品委员会要提供判定试验数据符合性的具体限值。

A.3 给出了换算算法。换算算法使用 TEM 波导中的测量电压估算等效的 OATS 场强,也可用于估算自由空间的场强。将换算得到的场强连同与 EUT 类型相关的有效性确认结果,与标准要求相比较。

注:试验程序通常要求 EUT 围绕所有的三个轴旋转。如果采用超旋转 TEM 波导(见[6]),即 TEM 波导经重定位,它的正交轴垂直于地面,则 EUT 围绕与垂直轴(正交轴)间夹角是 $\pm 120^\circ$ 的轴线旋转,不必绕水平轴旋转。

A.2 试验设备

试验设备应符合 CISPR 16-1-1 的相关要求。

注:各向同性的场强探头可看作是一个天线(见 CISPR 16-1-4 对天线的要求),探头的校准程序和要求见[23]。

A.3 TEM 波导中的测量电压与电场强度的换算

A.3.1 概述

本方法是 OATS 发射试验的替代法,TEM 波导中得到的试验结果被转换成等效的 OATS 电场数据。本条采用的算法假定通过 TEM 波导测得的辐射功率可由位于理想接地平面上的偶极子天线的辐射等效。

采用换算算法进行计算时用到的参数包括:EUT 和各个导体间的距离 h_{EUT} 、EUT 中心位置处[见图 A.6b)和图 A.7b)]导体之间的距离 h (或金属板间的距离)。EUT 放入 TEM 波导时 TEM 端口上的测量电压是由 EUT 的辐射发射产生。根据换算算法的要求旋转 EUT,每旋转一个位置测量一次电压,直到全部所需位置上的电压测量完毕,然后采用换算算法得到 OATS 的等效结果。

注：有关发射测量换算和换算数据的信息见[5][8][16][21][33][35][39][40]。

下面介绍基于三方位电压测量的换算算法。除此之外还有适用于某些 EUT 的其他换算算法（见[30]和[40]）。

A.3.2 换算算法

A.3.2.1 概述

A.3.2.2 和 A.3.2.3 分别给出了两种换算算法。A.3.2.2 介绍“多极模型”换算算法的基本过程，该方法使用一组 TEM 波导中的测量结果确定等效的多极矩。A.3.2.3 介绍使用三方位电压测量的方法，通常称为“总辐射功率法”。

A.3.2.2 多极模型

任意有限尺寸的辐射源可由在辐射源周围一定区域之外具有相同辐射方向图的等效多极扩展多项式代替。如果辐射源是电小（特征尺寸小于波长的十分之一）的，那么多极扩展多项式的初始项，即有效电偶极子和磁偶极子可以对辐射源进行准确模拟。以上适用于任意的辐射源，如果辐射源本身仅包括类似于电偶极子和磁偶极子的单元，可放松对辐射源尺寸的限制。

TEM 波导与 OATS 或自由空间换算算法的基本思路是由 TEM 波导中的一系列测量数据确定多极矩。通常使用 3 组复数形式的正交偶极矩，即需要 6 次或更多次的测量。由基本的三方位测量法可以得到辐射功率，但得不到各个多极矩。只要求出辐射功率，就可以通过数值模拟得到在自由空间或在无限大接地平面上的辐射。这样就有可能模拟 OATS 试验标准规定的各种辐射源—接收天线布置状态。

对于双端口 TEM 波导，可以通过对两个端口的测量得到幅值和相对相位的信息（见[13][28][29][34][37]）。这样，多极矩的幅值和相位都可以求出，进而可以准确地对辐射方向图进行模拟，包括由于相位抵消可能产生的零点。由于单端口 TEM 波导无法得到相对相位的信息，因此只能得到多极矩的幅值（见[35][39][43]）。由于没有相对相位的信息，单端口 TEM 波导的换算算法假定所有多极矩的辐射同相。因此，只能给出对发射上限的估计（见[10][27][38]），不能模拟具体的辐射方向图。将发射上限估计与标准限值相比较是有效的。[30]和[31]认为在 TEM 波导中确实存在交叉极化耦合，并且给出了交叉极化耦合对发射试验的影响。

A.3.2.3 单端口 TEM 波导的换算算法

A.3.2.3.1 概述

单端口 TEM 波导的换算算法基于 TEM 波导中的三方位电压测量法，进而可以计算出 EUT 的总辐射功率，不能分别得到各个偶极矩。接着采用基于传输相同总功率的平行偶极子（“发射-接收”偶极子）模型，由总辐射功率模拟得到位于接地平面之上 EUT 的辐射场强最大值。

A.3.2.3.2 TEM 波导的电压测量

在 EUT 位于以下三个方位时进行电压测量。为 TEM 室建立 (x, y, z) 坐标系，标准的方式是使 z 轴指向电磁波的传播方向， y 轴平行于电场方向（垂直）， x 轴平行于磁场方向。EUT 的中心为 $(x=0, y, z)$ ， $x=0$ 的点位于芯板的中心。EUT 的局部坐标系 (x', y', z') 见图 A.3，位置 a 中 x' 与 x 、 y' 与 y 、 z' 与 z 相一致；位置 b 中 x' 与 y 、 y' 与 z 、 z' 与 x 相一致，相当于 EUT 旋转了两个 90° ；位置 c 中 x' 与 z 、 y' 与 x 、 z' 与 y 相一致，这相当于将 EUT 再旋转。将 3 个测量电压分别记作 V_{p1} 、 V_{p2} 和 V_{p3} ，可得 EUT 的总辐射功率 P_0 （见[30][40]）：

$$P_0 = \frac{\eta_0}{3\pi} \cdot \frac{k_0^2}{e_{0y}^2 Z_c} \cdot S^2 \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

P_0 ——总辐射功率,单位为瓦(W);

S ——测量电压的方和根,单位为伏(V)。

$$S = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2 + V_{p3}^2} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中: V_{p1} 、 V_{p2} 和 V_{p3} 的单位为伏(V)。

$$S = \sqrt{10^{\frac{(V_{p1dB}-120)}{10}} + 10^{\frac{(V_{p2dB}-120)}{10}} + 10^{\frac{(V_{p3dB}-120)}{10}}} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

V_{p1dB} 、 V_{p2dB} 和 V_{p3dB} 的单位为 dB μ V;

k_0 ——波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$,单位为每米(m^{-1});

η_0 ——自由空间的波阻抗单位为欧(Ω), $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi = 377\Omega$;

Z_c ——TEM波导的特性阻抗,单位为欧(Ω);

e_{0y} ——TEM模的场因子,即EUT所处位置[对式(A.1), $(x=0, y, z)$]归一化的 y 方向电场,单位为 $\sqrt{\Omega}/m$ 。

注:对某些EUT,需要依次从4个起始方位(图A.4中, a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 是起始方位)开始,在三个相互正交的方位上进行测量,共计12个典型方位。然后将最大电压测量值和两组相互正交方位上的电压测量值应用于基于常规三方位电压测量的换算算法[20]。

A.3.2.3.3 场因子的确定

A.3.2.3.3.1 概述

这里给出的算法需要TEM模的主场分量,即 y 分量,高次模场分量并不直接耦合端口电压。场因子 e_{0y} 是给定EUT位置处归一化的 y 方向电场场强,得到场因子 e_{0y} 的方法有以下两种。

制造商应提供每种具体型号和尺寸TEM波导的场因子 e_{0y} 。

A.3.2.3.3.2 试验方法

场因子可通过试验确定,在已知输入功率 P_i [单位为瓦(W)]时,通过测量EUT中心位置处(空的TEM波导)电场的 y 分量 E_y [单位为伏每米(V/m)]即可得出:

$$e_{0y} = E_y(x, y) / \sqrt{P_i} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

A.3.2.3.3.3 解析方法

对于[40]中横截面为矩形的TEM室,归一化的TEM模场分量可通过式(A.5)计算:

$$e_{0y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_c} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{\cosh(My)}{\sinh(Mh)} \cdot \cos(Mx) \cdot \sin\left(M \frac{a}{2}\right) \cdot J_0(Mg) \right] \sqrt{\Omega}/m \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

$M = m \frac{\pi}{a}$, $m = 1, 3, 5, \dots, \infty$,单位为每米(m^{-1});

a ——在 z 处的TEM室的宽度,单位为米(m);

h ——在 z 处的TEM室的芯板高度,单位为米(m);

g ——在 z 处的TEM室芯板与外壳间的距离,单位为米(m);

x, y, z —— EUT 中心位置的坐标, 单位为米(m);

J_0 —— 零阶 Bessel 函数, 无量纲。

仅需上述序列中的部分项就可以对 e_{0y} 进行较好的近似, [27] 给出了几种不同尺寸 TEM 室的场因子计算结果。

A.3.2.4 与 OATS 间的换算

假定 TEM 波导法测得的 EUT 总辐射功率与偶极子(代替 EUT)的辐射功率相等, TEM 波导中的测量可用于模拟接地平板上 EUT 的辐射发射。

偶极子辐射场有计算公式。引入假想的镜像偶极子代替接地平面, 可根据 OATS 法对接收天线扫描高度的要求对等效扫描高度内的辐射场进行计算。由两种极化方式下的最大场强信号可以得到可能的最大场强。几何因子 $g_{\max}$ 取决于接收天线的高度扫描范围, OATS 的最大场强 $E_{\max}$ 的计算公式如下:

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \sqrt{3\eta_0 P_0 / 4\pi} \text{ V/m} \quad \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

$$E_{\max} = g_{\max} \cdot \frac{\eta_0 k_0}{2\pi e_{0y}} \cdot \frac{S}{\sqrt{Z_c}} \text{ V/m} \quad \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

式中:

S —— 由式(A.2)、式(A.3)确定, 单位为伏(V);

k_0 —— 波数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, 单位为每米(m^{-1});

η_0 —— 自由空间的波阻抗, $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega$;

Z_c —— 特性阻抗, 单位为欧姆(Ω);

e_{0y} —— TEM 模的场因子, 单位为 $\frac{\sqrt{\Omega}}{\text{m}}$;

$g_{\max}$ —— 几何因子, 单位为每米(m^{-1})。

$$g_{\max} = \begin{cases} \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right|_{\max} = \left| \frac{1}{r_1 r_2} [r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max}, & \text{水平极化} \\ \left| \frac{s^2 e^{-jk_0 r_1}}{r_1^3} + \frac{s^2 e^{-jk_0 r_2}}{r_2^3} \right|_{\max} = \left| \frac{s^2}{r_1^3 r_2^3} [r_1^6 + r_2^6 + 2r_1^3 r_2^3 \cos k_0 (r_2 - r_1)]^{1/2} \right|_{\max}, & \text{垂直极化} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

式中以下参数的定义如图 A.5 所示。

r_1 —— EUT 与接收天线之间的距离, $r_1 = \sqrt{s^2 + (R_H - h_g)^2}$, 单位为米(m);

r_2 —— EUT 的镜像与接收天线之间的距离, $r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$, 单位为米(m);

s —— 规范性标准中规定的接收天线与 EUT 之间的距离, 通常是 30 m、10 m 或 3 m, 单位为米(m);

h_g —— EUT 距离接地平面的高度, 单位为米(m);

R_H —— 接收天线距离接地平面的高度, 通常为 1 m~4 m, 单位为米(m)。

注 1: 自由空间距离发射天线 r 处的远场区电场强度最大值为 $E_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta_0}{4\pi}} D_{\max} P_0$ 。式中: $D_{\max}$ 是天线方向性

系数的最大值。令 $D_{\max} = 3$, 将 EUT 的镜像和距离 r 的影响综合反映在几何因子 $g_{\max}$ 中即得式(A.6)。对电小天线而言, 3 是其方向性系数的上限, 只有当电偶极子和磁偶极子同时存在, 两者增益最大的方位相同并且同相位时才会出现。对于单独的电偶极子或磁偶极子天线, $D_{\max} = 1.5$, 此时较接近无意发射源的实际情况,

因为应以一种源为主。基于此,式(A.6)可以看作是最差情况。

通常, D 取假定值、事先已知或由EUT的方向性测量结果给出。单端口TEM波导的换算算法总是基于以下几点进行“最坏”情况下的估计;a)与OATS扫描区域内的辐射功率相等;b)隐含“最坏”的方向性系数。如果和其他的辐射发射功率试验方法相比较,例如,混波室法,方向性系数 D 可以取1.5或1.7。为了本部分的目的,小EUT的方向性系数采用“最坏”情况下的值,即 $D=3$ 。

注2:换算算法对于6.2所定义的小EUT有效。本部分也给出了适用于大EUT换算和布置方法的资料性导则(A.5.1.2)。

注3:对于具有大致相同尺寸(形状系数)和功能的产品类,利用其中的代表性产品对TEM波导和OATS试验进行全面比较。由于有该比较作为参考,属于此产品类的其他产品仅需进行TEM波导法试验。

注4:另一种换算算法针对自由空间。对于自由空间或等效的全电波暗室,省略由地面带来的反射项[式(A.8)中下标为2的各项]。

或者, $E_{\max}$ 可以表示为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 的形式:

$$E_{\max} |_{\text{dB}} = 20 \lg(g_{\max}) + 10 \lg(P_0) + 139.5 \quad \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

对于标准场地,系数 $20 \lg(g_{\max})$ 可以每次都计算,或用插值法从事先算好的表中查得。

$E_{\max}$ 也可以表示为测量电压的函数。将式(A.1)的 P_0 和式(A.2)、式(A.3)的 S 代入式(A.6),然后转化成 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 的形式,得:

$$E_{\max} |_{\text{dB}} = 20 \lg(g_{\max}) + 20 \lg\left(\left|\frac{\eta_0 k_0}{2\pi e_{0y}}\right|\right) + 10 \lg\left(\frac{S^2}{Z_c}\right) + 120 \quad \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

A.4 发射试验修正因子

A.4.1 参考发射源

利用对OATS试验方法具有良好发射响应特性的一组参考发射源确定修正因子。应根据TEM波导中的EUT选择参考源。推荐以下5种参考源作为一般EMC场合下EUT的代表,它们可代表CISPR 22中的各种台式EUT。

- 由电池供电、带宽带天线的梳状信号发生器,该参考源作为小EUT的代表。梳状信号发生器的最大尺寸应小于 $0.1h$, h 是金属板间的距离。如果市场上没有满足这种尺寸要求的梳状信号发生器,梳状信号发生器的尺寸可放宽至 $0.35h$ 。在这种情况下,应在试验规程中同时注明所用梳状信号发生器的尺寸和类型以及通常允许的尺寸($0.1h$),并加以特殊标记。EUT壳体的尺寸应小于最高试验频率对应的波长(见6.2)。
- 带一根金属线的由电池供电的梳状信号发生器,作为没有引出电缆的大EUT的代表(见6.3),其中的金属线应延伸到可用试验区域边缘但仍在可用试验区域内。
- 带引出电缆的梳状信号发生器,作为带引出电缆的大EUT的代表,其中的金属线应穿过铁氧体吸收钳。
- 至少带两根引出电缆、带内置梳状信号发生器的(480 mm)机箱,作为带引出电缆的大EUT的代表。
- 带宽带噪声源的参考源,其他与a)~d)相同。

对于a)~d),梳状信号发生器在所关心的整个频率范围内的谱线间隔为10 MHz或更小。对于e),宽带噪声源应覆盖所关心的整个频率范围。

参考发射源的频谱应保持稳定,在试验过程中的波动应小于1 dB。

注:如果参考发射源的最大尺寸小于 $0.1h$,可以认为对TEM模的扰乱很小。

对于特定类型和尺寸的TEM波导的制造商,建议在4个或更多的同一型号、同一尺寸的TEM波导和4个或更多的OATS中对作为EUT代表的参考发射源进行发射试验。修正因子结果对所有同一

型号、同一尺寸的 TEM 波导都有效。在所有的频率点上和各个试验场地中, EUT 布置、接收机的检波方式、扫描驻留时间和带宽应保持一致。应采用“三方位法”将 TEM 波导的测量电压转换成 OATS 的场强值。

A.4.2 小 EUT 的布置

在 TEM 波导中对作为 EUT 代表的参考发射源按特定的步骤进行试验。EUT 置于试验区域的中心位置, 比如放在试验布置支撑上, 并且围绕正交轴至少旋转到 3 个正交的方位上(见图 A.2)。有时在已被固定的 EUT 外安装一绝缘的立方体状外壳或利用试验支撑装置实现 EUT 的旋转。

A.4.3 小 EUT 修正因子的计算

对于代表小 EUT 的参考发射源, 采用统计意义上的修正因子可以提高 OATS 和 TEM 波导“三方位法”换算的场强间的一致性。

注 1: 辐射发射测量的 TEM 波导法是基于总辐射功率的方法, 因此考虑了所有可能的方位。当比较 OATS 和 TEM 波导中的测量结果时, 应选择 OATS 中辐射最大的 EUT 方位。

修正因子的计算是基于各个频率点上 TEM 波导法换算得出的场强平均值和标准差与 OATS 测量的场强平均值和标准差的差值。此外, 对于小 EUT, 附加的辐射方向图修正因子也可以提高 OATS 和 TEM 波导测量结果之间的一致性。各频率点上的修正因子 c_f 按式(A.11)计算:

$$c_f = \bar{x}_f - d_{s,f} - t \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

$\bar{x}_f$ —— TEM 波导与 OATS 的场强平均值之差, 单位为伏每米(V/m);

$d_{s,f}$ ——多次 TEM 波导换算结果的标准差与 OATS 测量结果的标准差之差[式(A.13)], 单位为伏每米(V/m);

t ——辐射方向图的不确定度因子[式(A.19)], 单位为伏每米(V/m)。

注 2: 即使小 EUT 的辐射方向图也不是全向的。该差异体现在式(A.11)中的修正因子 t 上。不同 TEM 波导和不同 OATS 测量结果之间也有差异, 该差异体现在式(A.11)的 $d_{s,f}$ 上。 t 和 $d_{s,f}$ 的典型数量级为 1 dB。

各个频率点上场强的平均值之差 $\bar{x}_f$ 由式(A.12)给出:

$$\bar{x}_f = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \right) \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

$g_{i,f}$ ——由 TEM 波导法测量结果换算得到的 OATS 等效场强值, 单位为伏每米(V/m);

$i=1, \dots, n$, n 是 TEM 波导法的测量次数;

$o_{k,f}$ ——OATS 中测得的电场强度, 单位为伏每米(V/m);

$k=1, \dots, m$, m 为 OATS 中的测量次数;

f ——频率, 单位为赫兹(Hz)。

注 3: 由于 $g_{i,f}$ 和 $o_{k,f}$ 的大小符合对数正态分布, 式(A.12)可以采用对数形式。

多次 TEM 波导与多次 OATS 所得数据的标准差的差值由式(A.13)给出:

$$d_{s,f} = s_{\text{TEM},f} - s_{\text{OATS},f} \quad \dots\dots\dots (A.13)$$

式中:

$s_{\text{TEM},f}$ ——TEM 波导中多次测量场强值的标准差, 单位为伏每米(V/m)。即:

$$s_{\text{TEM},f} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (g_{i,f} - \bar{g}_f)^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (A.14)$$

$s_{\text{OATS},f}$ ——开阔场中多次测量值的标准差, 单位为伏每米(V/m)。即:

$$s_{\text{OATS},f} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (o_{k,f} - \bar{o}_f)^2}{m-1}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.15})$$

对于上述标准差计算公式,每个 TEM 波导和 OATS 中测量结果平均值的计算公式如下:

对 TEM 波导:

$$\bar{g}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_{i,f} \quad \dots\dots\dots (\text{A.16})$$

对 OATS:

$$\bar{o}_f = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m o_{k,f} \quad \dots\dots\dots (\text{A.17})$$

注 4: 如果仅有一个 TEM 波导($n=1$),例如,实验室研制的科学研究用 TEM 波导,在确定该波导的修正因子时取 $s_{\text{TEM},f}=0$ 。因此,测量结果不能用于其他 TEM 波导的验证,即使它们的形式和尺寸完全相同。

对于每个特定的 TEM 波导,辐射方向图的不确定度因子 t 从一系列由“三方位法”测量的场强值求出。例如,测量时分别将 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 作为旋转的起始方位。举例来说, EUT 从图 A.4.a1 的位置($xx'yyzz'$)开始,绕 TEM 波导的 y 轴依次旋转到这 8 个角度上,在各个起始位置上,采用“三方位法”进行换算,总共得到 8 个换算场强值($8 \times 3 = 24$ 个电压读数),并用 E_α 表示。 $\bar{E}_\alpha$ 是电场强度的平均值,具体而言, $\bar{E}_{0^\circ} = (E_{0^\circ} + E_{90^\circ})/2, \dots\dots, \bar{E}_{225^\circ} = (E_{225^\circ} + E_{315^\circ})/2$ 。最大场强值 $E_{\alpha,\max}$ 取相隔 90° 的每一对场强的最大值,具体而言, $E_{0^\circ,\max} = \max(E_{0^\circ}, E_{90^\circ}), \dots\dots, E_{225^\circ,\max} = \max(E_{225^\circ}, E_{315^\circ})$ 。采用式(A.18)计算标准差因子:

$$t_{90^\circ,f} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=0^\circ \cap 90^\circ}^{225^\circ \cap 315^\circ} (E_{\alpha,\max} - \bar{E}_\alpha)^2}{l-1}} \text{ V/m} \quad \dots\dots\dots (\text{A.18})$$

式中: l 为起始位置数(在上例中 $l=8$)。

最终的辐射方向图不确定度因子 t 为上述标准差因子的平均值,即:

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{90^\circ,f})_i \text{ V/m} \quad \dots\dots\dots (\text{A.19})$$

注 5: 因子 t (辐射方向图不确定度因子)也可以采用六方位法[27]或十二方位法(“增强的三位置法”)[36],问题的关键是应接收到 EUT 的所有辐射功率,[19]和[20]给出了测量数据的比较结果。

A.5 TEM 波导中的发射测量程序

A.5.1 EUT 类型

A.5.1.1 小 EUT

小 EUT 应在 TEM 波导中选择两个起始位置进行试验。第一个起始位置是任意的,而第二个起始位置是第一个起始位置按图 A.4 所示旋转所得。从每一个起始位置开始,应根据换算算法的要求对 EUT 进行旋转。例如,A.3.2.3.2 中的三方位法要求在 3 个方位上进行测量,因此试验时就要从图 A.4 所示的起始位置 a1 和 a3 或 a2 和 a4 开始旋转(共计 $2 \times 3 = 6$ 个方位)。应记录每个频率点上由这两组数据换算得到的场强最大值。

注: 试验频率范围由所适用的限值或试验目的决定,对于小 EUT 通常是 30 MHz 到 1 GHz。TEM 波导的可用频率范围取决于 TEM 模的验证结果(见 5.2.1 和 5.3.2)。

A.5.1.2 大 EUT

A.5.1.1 的方法可以应用于大 EUT。但是换算算法中的偶极子假设对大 EUT 不一定有效。

以下是指导性信息。

针对在 TEM 波导中对大 EUT 进行的符合性试验给出如下步骤,更多细节见[2]。

- a) 对于特定类型的 EUT,应在特定的符合要求的 OATS 和特定的 TEM 波导中分别进行三次独立的试验。
- b) 在每个频率点上利用式(A.12)和式(A.13)计算 TEM 波导与 OATS 试验结果的平均值之差和标准差之差,此时 $n=m=3$ 。
- c) 对于步骤 b)计算的各个频率点上的平均值和标准差之差,至少应在 10 个频率点上满足以下条件:平均值的差值应大于 0 dB 且小于或等于 3 dB,标准差的差值应不大于 4 dB。
- d) 在确定是否符合骚扰限值时,TEM 波导的试验结果不需要另外附加平均值的差值。如果满足步骤 c)中的条件,可以认为相应的骚扰限值适用于该类型的 EUT。

A.5.2 EUT 的布置

以下是指导性信息。

将 EUT 放置在位于可用试验区域(5.2.2)中心的试验支撑装置[3.1.21 和图 A.1、图 A.2b)及图 A.2c)]或试验布置支撑上(3.1.16)。

不带线缆的 EUT 应固定在试验支撑装置的旋转中心,通过试验支撑装置使 EUT 围绕其电中心(可以假设与 EUT 的几何中心重合)旋转。

对于带线缆的 EUT,按以下要求布置线缆:长线缆应根据 CISPR 16-2-3:2006 中 7.2.5.2 的规则捆扎在一起;互连电缆在离开壳体处应垂直于壳体;为获得可重复的测量结果,在三方位法换算测量过程中,互连电缆之间、互连电缆和 EUT 以及 EUT 之间的相对位置应保持不变;如果互连电缆过长,可以根据 CISPR 16-2-3:2006 中 7.2.5.2 的规定将其捆扎起来。

引出电缆在超出可用试验区域的边界之前应垂直于 EUT 的壳体布置,然后电缆应沿可用试验区域的边缘被引至试验区域底部位于正交角上的角落(图 A.1)。如果采用图 A.2b)所示的定位装置,引出电缆应沿正交轴布置。应对电缆的位置进行控制,例如,采用不导电的夹具。引出电缆从试验区域底部位于正交角上的角落被引至位于波导接地面上的吸收钳。电缆之间的距离应为约 100 mm。在 TEM 波导接地面上,每根电缆终端应分别穿过吸收钳或者套上铁氧体环(见[1])。吸收钳(或铁氧体环)的插入损耗在 30 MHz ~ 1 000 MHz 的频率范围内应大于 15 dB。在电缆终端穿过吸收钳或者铁氧体环之前,连接电缆不应接触 TEM 波导的内外导体。吸收钳之前的电缆部分可达 1.3 m。如果电缆长度不足 1.3 m,则电缆全部放置在吸收钳之前;如果电缆长度大于 1.3 m,则放置在吸收钳之前的电缆长度至少为 1.3 m(见图 A.1)。引出电缆从吸收钳被引至位于侧壁或底板上的电缆连接器,然后连接到位于 TEM 波导外部的辅助设备。

A.6 试验报告

试验报告应包含修正的场强结果(E)和未修正的场强结果 $E_{\max}$ 。

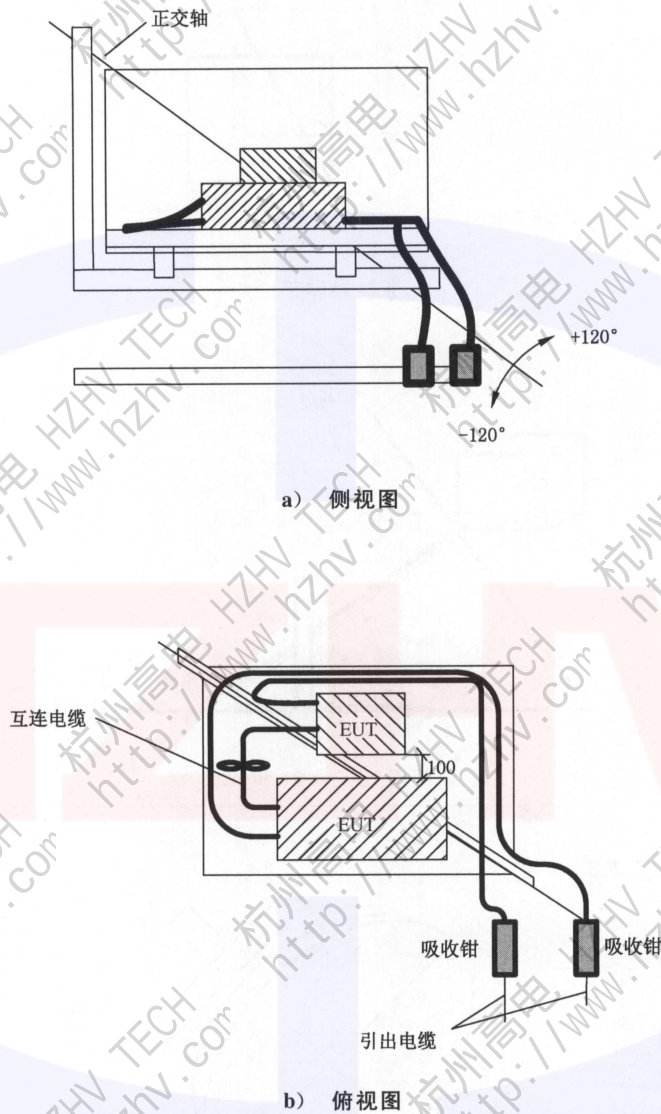
$$E = E_{\max} - c_f \quad \dots\dots\dots (A.20)$$

式中: E 、 $E_{\max}$ 和 c_f 的单位为 V/m, $E_{\max}$ 和 c_f 分别由式(A.6)和式(A.11)求出。

或

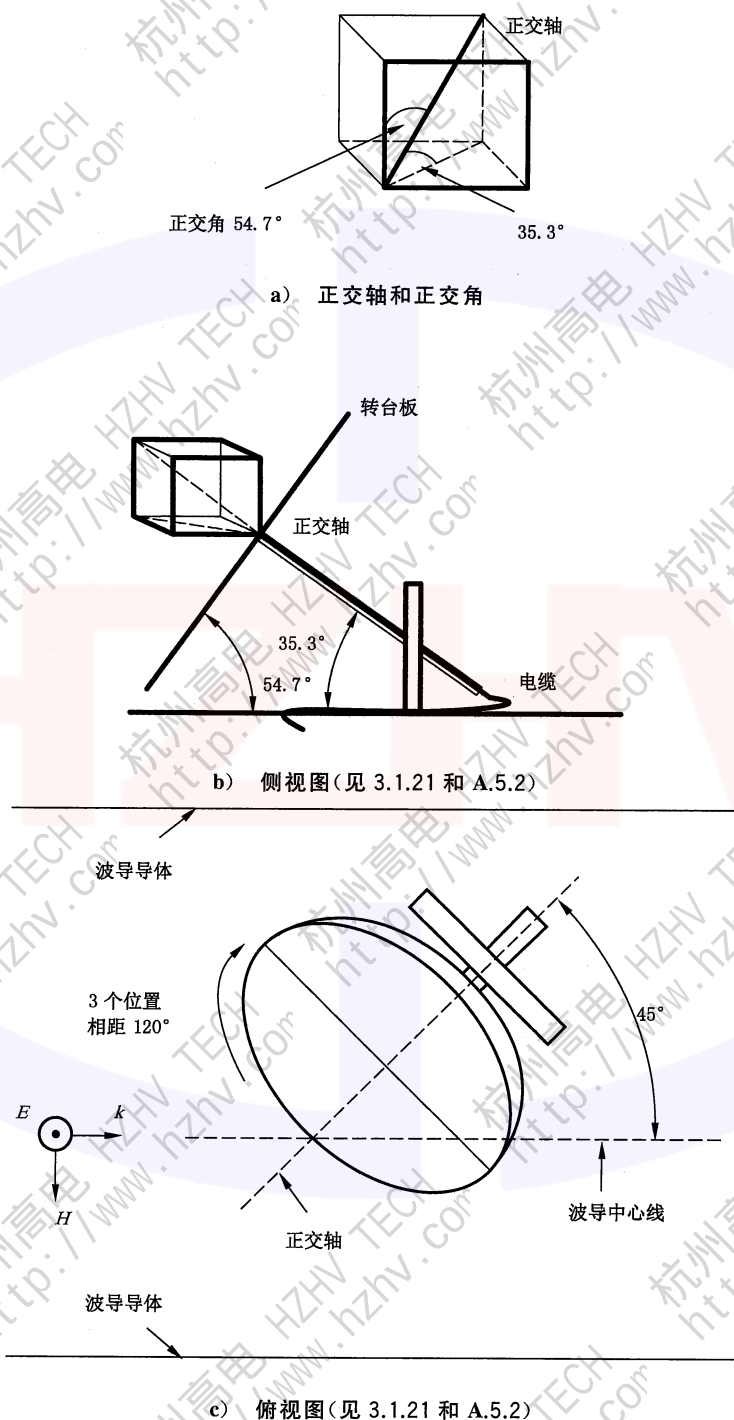
$$E_{\text{dB}} = E_{\max} |_{\text{dB}} - 20 \lg(c_f) - 120 \quad \dots\dots\dots (A.21)$$

式中: E_{dB} 和 $E_{\max} |_{\text{dB}}$ 的单位为分贝微伏每米($\text{dB}\mu\text{V/m}$), c_f 的单位为伏每米(V/m), $E_{\max} |_{\text{dB}}$ 和 c_f 分别由式(A.9)和式(A.11)求出。



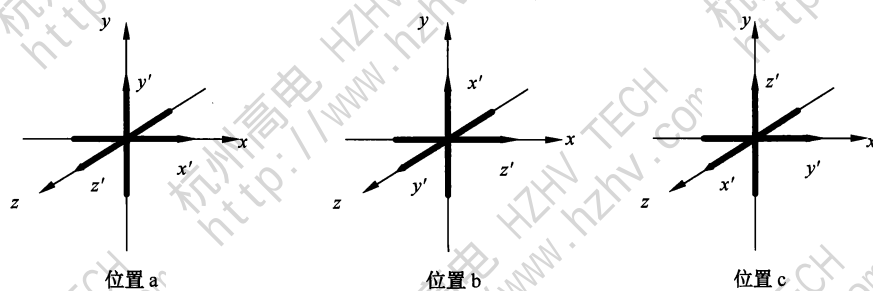
注：EUT 壳体和终端之间连接电缆的长度应为约 1.3 m。

图 A.1 引出电缆被引至位于试验区域底部和正交角上的角落



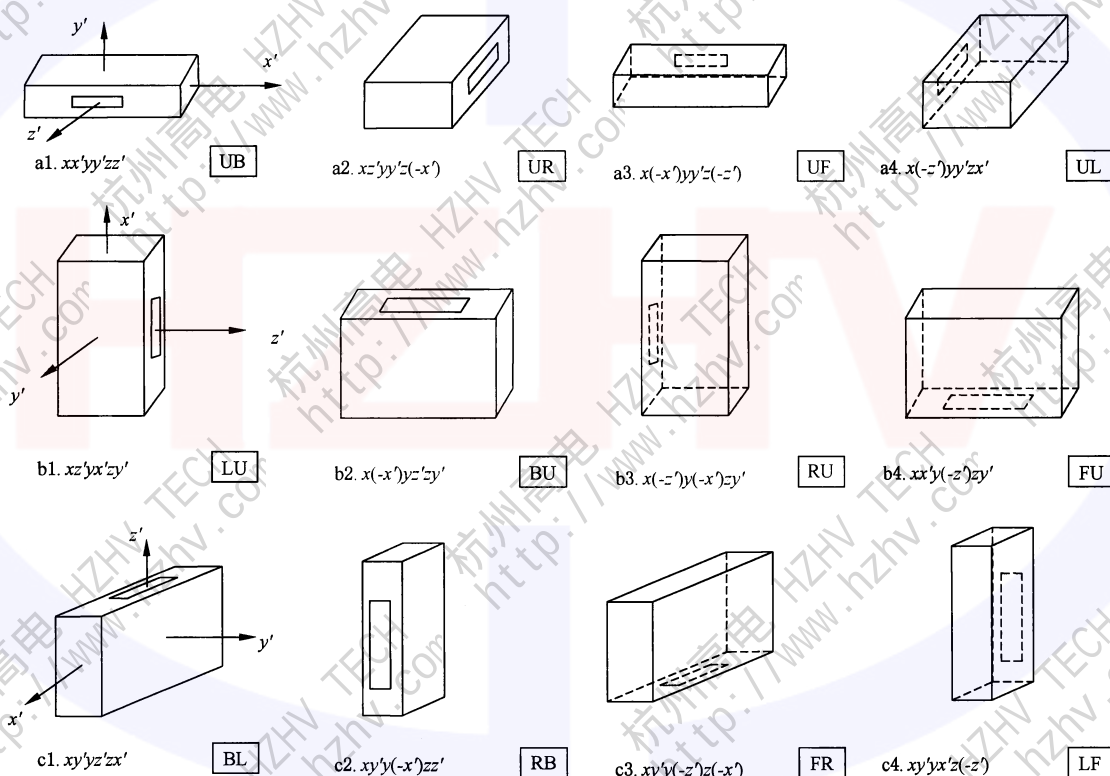
注：类似于图 A.1 试验布置，这个定位装置通过绕正交轴的 3 次 120° 旋转给出 3 个正交的位置。

图 A.2 基本的正交轴定位装置或试验支撑装置



注：这 3 个正交轴旋转方位对应图 A.4 中的方位 a1、b1 和 c1。 x 、 y 、 z 是 TEM 波导坐标轴，而 x' 、 y' 、 z' 是 EUT 的坐标轴。

图 A.3 辐射发射试验的 3 个正交轴旋转方位

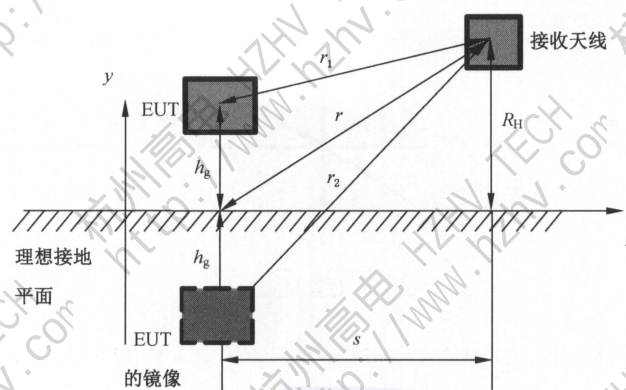


注 1：在这个例子中， x 、 y 、 z 是 TEM 波导坐标轴， x' 、 y' 、 z' 是 EUT 的坐标轴，电磁场极化方向为 y 方向，传播方向为 z 方向。EUT 的虚拟(或几何或相位)中心相对于 TEM 波导导体应保持不变。

注 2：EUT 的各面在方位 a1 且 $x' = x$ 、 $y' = y$ 、 $z' = z$ 时定义如下：左(L)=右(R) $\equiv y'z' = yz$ 平面，后(B)=前(F) $\equiv x'y' = xy$ 平面，顶(T)=底(U) $\equiv x'z' = xz$ 平面。传播方向沿 z 轴。因此，在 a1 中朝向波前的是 EUT 的后面。EUT 的每个方位可以用两个字母描述：第一个字母指的是面向 TEM 波导底板的面，第二个字母指的是朝向波前的面(沿传播方向)。

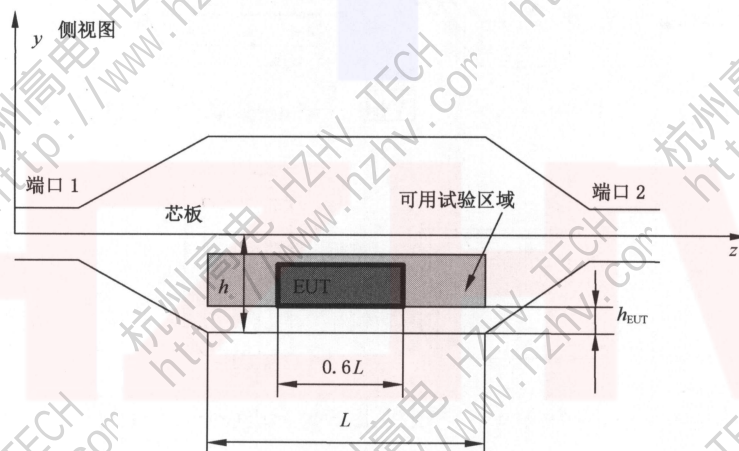
注 3：图中每一列(例如，a3、b3、c3)是可用于三方位换算算法的 3 个一组的正交方位。同样，在抗扰度试验中，最少的 8 个面可采用两组 4 个一组的方位，例如，a1、a2、a3、a4 和 b1、c2、b3、c4。当抗扰度试验需要所有的 12 个方位时，加上 c1、b2、c3 和 b4 4 个方位，其中 c3 和 b4 通常绕 z 轴旋转 180° ，此时 c3 由 $xy'y(-z')z(-x')$ 变成 $x(-y')yz'z(-x')$ ，b4 由 $xx'y(-z')zy'$ 变成 $x(-x')yz'zy'$ 。

图 A.4 典型 EUT 的 12 面/轴试验方位

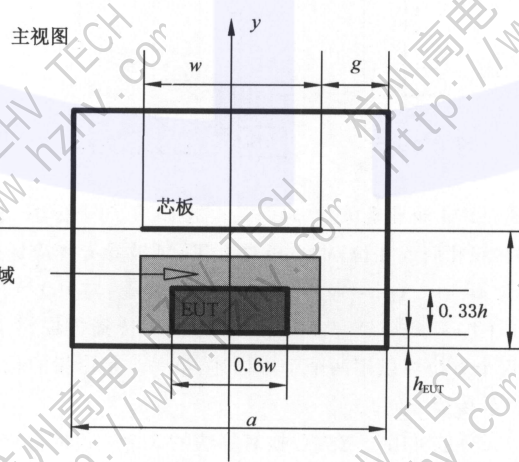


注：z 轴与接地平面一样为水平方向，并与传播方向一致。这与 TEM 波导的坐标系相一致，在 TEM 波导的坐标系中 z 轴也是平行于导体并与传播方向一致。

图 A.5 OATS 示意图



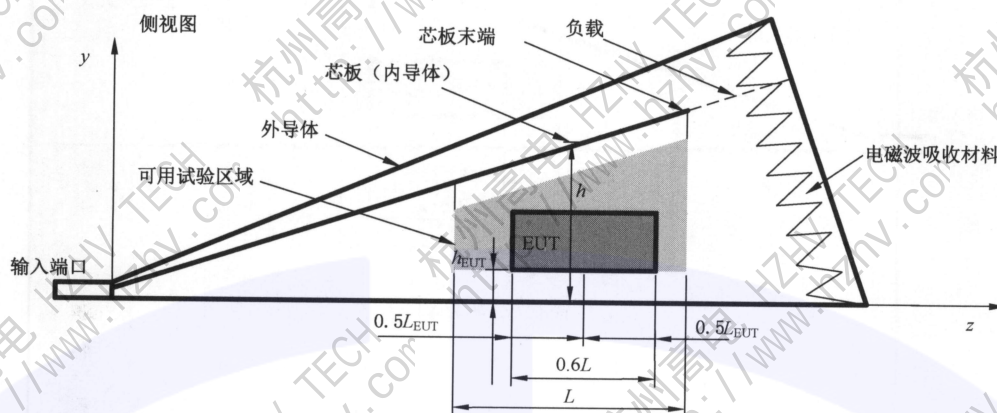
a) 侧视图



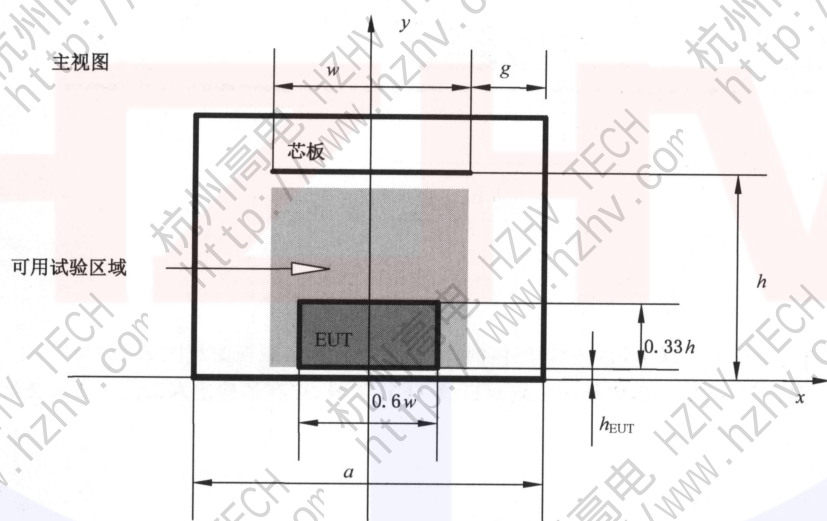
b) 剖视图

注：h_{EUT} 是 EUT 与波导的导体或吸波材料之间的最小距离。

图 A.6 双端口 TEM 室(对称芯板)



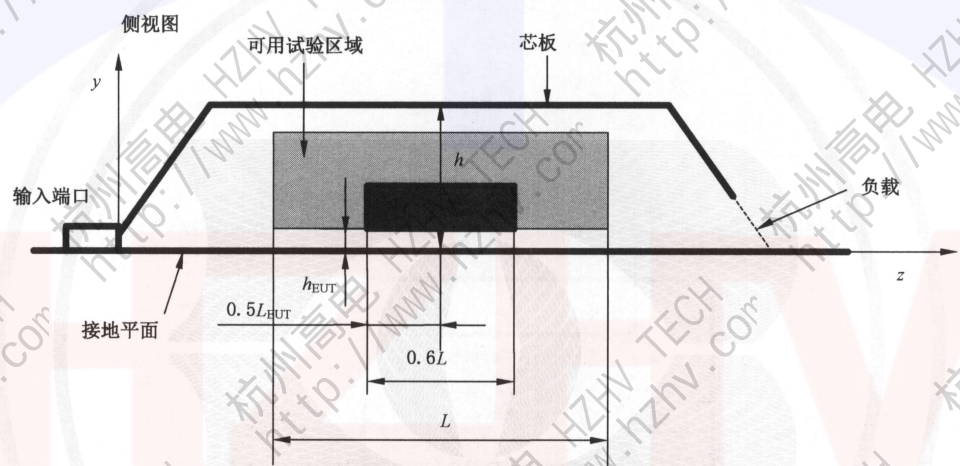
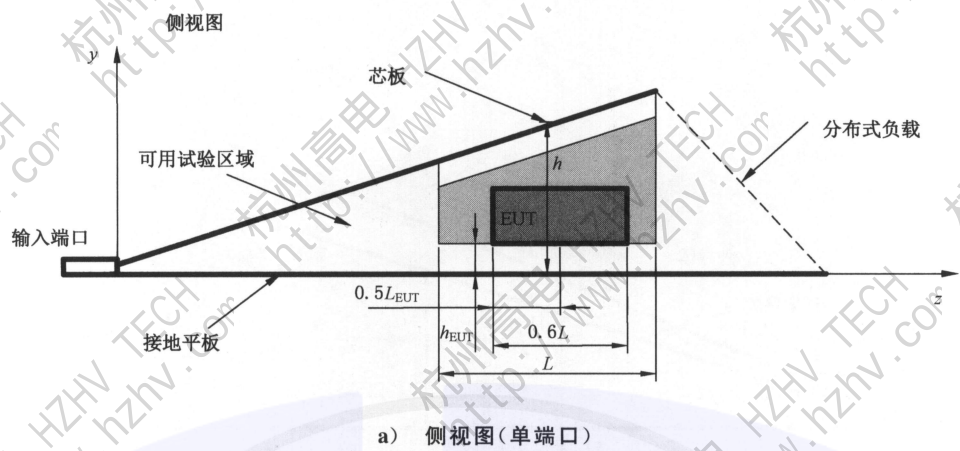
a) 侧视图



b) 剖视图

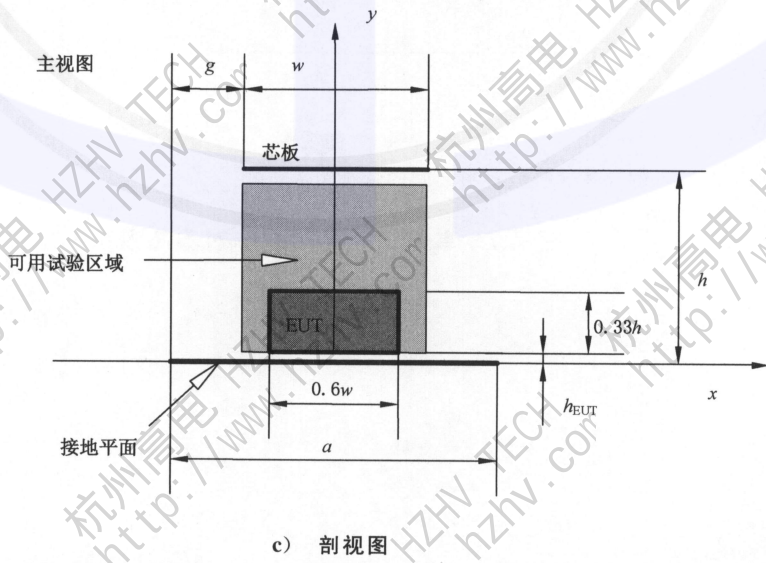
注: h_{EUT} 是 EUT 与波导的导体或吸波材料之间的最小距离。

图 A.7 单端口 TEM 室(非对称芯板)



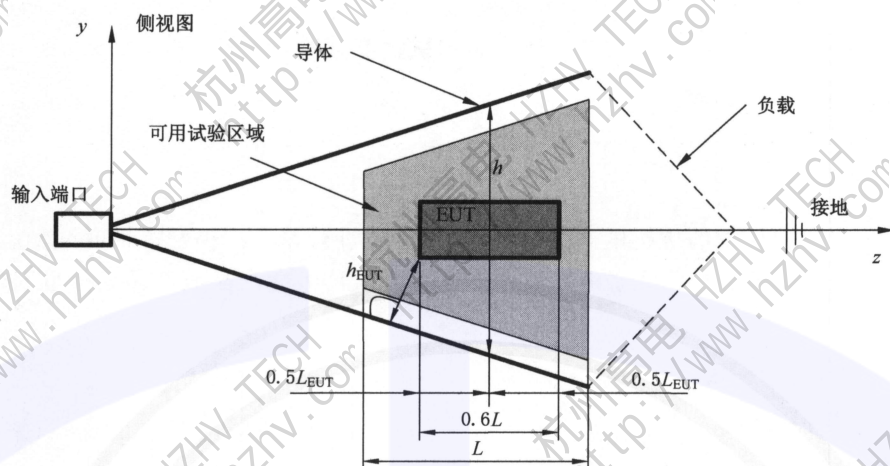
注：根据该形状和镜像理论可以得到有中心导体的三导体带状线，其侧视图与图 A.6a) 相同。

b) 侧视图(基本上类似于一个双端口的 TEM 波导,但有的输出端口为分布式负载)

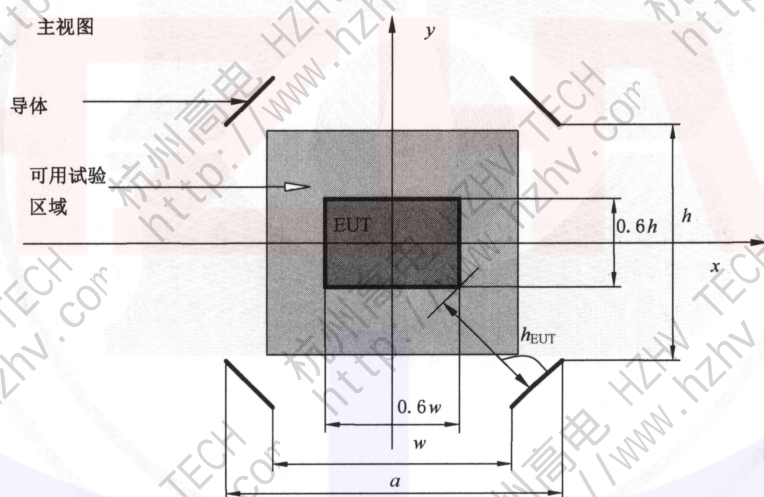


注：h_{EUT} 是 EUT 与波导的导体或吸波材料之间的最小距离。

图 A.8 带状线(双导体)



a) 侧视图



b) 剖视图

注：整个 TEM 波导结构被无反射壳体包围。由于对称的原因，允许的最大 EUT 高度将在 $0.33h \sim 0.6h$ 的范围内（见 5.2.2）。

图 A.9 带状线(四导体,平衡馈电)

附录 B

(规范性附录)

TEM 波导中的抗扰度试验

B.1 概述

本附录介绍 TEM 波导中的抗扰度试验方法,其目的是进行设备的辐射抗扰度试验。

试验要求 EUT 在规定的布置状态进行试验。这就要求具体的产品或产品族标准对试验布置和试验限值加以规定。

B.2 试验设备

B.2.1 概述

推荐的试验设备如下:

- TEM 波导:有足够的尺寸以便形成足以容纳 EUT 的场均匀区。
- EMI 滤波器。
- RF 信号源:在建立一定大小的场强时通常需要监视输入 TEM 波导的前向功率和反向功率。定向耦合器连同 RF 电压表或功率计可用于测量输入 TEM 波导的实际前向功率(相对于 RF 信号源的标称输出功率而言)。RF 信号源和定向耦合器的带宽都必须覆盖预期带宽。
- 功率放大器。
- 场探头,能分别监测 3 个相互正交的电场分量。所有场探头和光电转换电路都必须对试验场强有足够的抗扰度,并通过光纤或滤波性能足够的信号线连接到 TEM 波导外的监视器。TEM 波导需要能够分别测量 3 个相互正交场分量的场探头。如果使用小型单向天线,必须改变天线方向以分别测试各电场分量。
- 记录功率电平的相关设备。

B.2.2 试验设备介绍

注:TEM 室类似于屏蔽室。带状线(开放型)必须放置在较大的屏蔽室内以保证隔离。此屏蔽室可能需要一定数量的吸波材料以使得带状线能满足场均匀性要求。

对于 TEM 波导,TEM 模等效于抗扰度试验中的入射平面波。理想平面波在任意等相位面上都是不变的,而传输线中 TEM 模的场随横截面的变化而变化。在放入 EUT 之前,暗室和 TEM 波导法中都是基于平面波的场分布。TEM 波导中 TEM 模主场与暗室中的垂直极化场较为相似。当暗室中的场为水平极化时,更容易受接地平面的反射影响。

B.2.3 场均匀区确认

根据 5.2.3.1 的注 2 和注 3,在一个矩形截面上进行场均匀区确认,并且在该截面上至少取 5 个测量点(4 个在角上,一个在中心)。如果根据式(5)和式(6)得到的标准差满足以下要求,可以确定场均匀性。

- a) 在规定区域内,试验场 E_i 的主场分量幅值有 75% 的点满足以下公式:

$$E_{\text{Limit}} \leq E_i \leq E_{\text{Limit}} + 2 \cdot K \cdot \sigma_E$$

注 1: E_{Limit} 是标准给出的限值。

注 2: 根据 5.2.3.3 中的表 1, 对应 75%, K 取 1.15。

注 3: 如果 $2 \cdot K \cdot \sigma_E$ 必须要小于等于 6 dB, 根据 5.2.3 中式(6)计算的标准差如下:

$$+6 \Rightarrow \sigma_E \leq \frac{6}{2 \times 1.15} = 2.61 \text{ dB}$$

注 4: 如果 75% 的变化范围设置为 10 dB, 则可接受的标准差为:

$$+6 \Rightarrow \sigma_E \leq \frac{10}{2 \times 1.15} = 4.34 \text{ dB}$$

b) 次场(不必要的)分量的幅值都要至少比主场分量小 6 dB。给定百分比的测量结果必须满足以下公式:

$$\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}}} \leq \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} + K \cdot \sigma_{\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}}} \leq \begin{cases} -6 \text{ dB} \\ -2 \text{ dB} \end{cases}$$

根据 5.2.3.3 中的表 1 选取 K 值。

测量结果 $\frac{E_{\text{sec}_i}}{E_{\text{pri}}}$ 的标准差必须满足如下公式:

$$\sigma_{\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}}} \leq \frac{1}{K} \left(\begin{cases} -6 \text{ dB} \\ -2 \text{ dB} \end{cases} - \left(\frac{E_{\text{sec}}}{E_{\text{pri}}} \right)_{\text{dB}} \right)$$

对于 5.2.1 中规定的最大百分比的频率点, 只要在试验报告中提供实际的变化范围 and 对应频率点, 主场分量的允许变化范围[见 5.2.3 中的式(7)]可由 $-0 \text{ dB} \sim +6 \text{ dB}$ 放宽到 $-0 \text{ dB} \sim +10 \text{ dB}$, 或者次场分量电平小于主场分量 2 dB。

注 5: 根据 5.2.3 中式(7), 标准差计算结果如下:

$$+6 \Rightarrow \sigma_E \leq \frac{6}{2 \times 1.15} = 2.61 \text{ dB} \text{ 和 } +6 \Rightarrow \sigma_E \leq \frac{10}{2 \times 1.15} = 4.34 \text{ dB}$$

对表 B.1 中没有列出的区域进行场均匀区确认时应采用网格间距不超过 0.5 m, 能覆盖整个目标区域的最少网格数, 每条边上的网格间距必须均匀。在进行试验布置时, EUT 的一个面应与该平面相重合(见图 B.2)。

表 B.1 场均匀区确认的测量位置点

尺寸	测量位置点的数量与布局
1.5 m × 1.5 m	4 × 4 = 16
1.0 m × 1.5 m	3 × 4 = 12
1.0 m × 1.0 m	3 × 3 = 9
0.5 m × 1.0 m	2 × 3 = 6
0.5 m × 0.5 m	4 + 1(中心) = 5
0.25 m × 0.25 m	4 + 1(中心) = 5

例 1: 20 cm × 20 cm 的区域采用 4 + 1(中心) = 5 个点, 80 cm × 80 cm 的区域采用 3 × 3 = 9 个点, 1.2 m × 0.6 m 的区域采用 4 × 3 = 12 个点。

例 2: 1.2 m × 0.6 m 的场均匀区应采用 0.4 m × 0.3 m 的基本网格尺寸。

场均匀区的要求基于 5.2.1 中 TEM 模的验证方法。原则上, 场均匀区确认应使用 TEM 模的主场分量。如果换成合成场, 则必须满足以上所有要求, 并且满足 5.2.1 关于次场分量的要求。更多关于场均匀性的信息见[16]。

B.2.4 试验等级

表 B.2 中的试验等级仅作为指导。

表 B.2 试验等级

试验等级	试验场强/(V/m)
1	1
2	3
3	10
X	待定
注：X 是一个开放试验等级，可在产品规范中给出具体场强值。	

B.2.5 谐波

有些 TEM 波导在大于推荐使用频率上限的某些频率点可能会发生谐振。
注：ISO 11452-3 要求安装低通滤波器，滤波器的插入损耗在大于 1.5 倍的 TEM 波导截止频率时至少为 60 dB。

B.3 试验布置

B.3.1 台式设备的布置

对于 TEM 波导，EUT 放置在试验布置支撑（见 3.1.16）或者形状和大小合适、在每个位置都能让 EUT 正面位于场均匀区内的试验支撑装置（见 3.1.21）上，而不使用有些抗扰度试验布置通常采用的高度为 0.8 m 的绝缘桌。典型的 EUT 布置见图 B.1。

B.3.2 落地式设备的布置

对于 TEM 波导，EUT 放置在试验布置支撑上时要使其正面位于场均匀区内。使用不导电的试验布置支撑防止 EUT 意外接地和场的畸变。试验布置支撑应采用绝缘体，不能采用在金属上覆盖绝缘层的结构。

B.3.3 连接线的布置

连接线暴露在电磁场中直至离开 EUT 1 m 处。连接线布置在底板之上，在 EUT 的高度上或者沿 xy 平面的对角线引到位于 TEM 波导外导体（TEM 室的侧壁或者底板）上的引出点。应避免靠近内导体或外导体在 z 轴方向布置电缆，与 TEM 波导的内导体或外导体平行布置的电缆需要与导体之间至少保持 0.1 m 的距离。引出电缆终端需要穿过功率吸收钳（见 A.5.2）。引出电缆的终端布置在场均匀区的边缘。关于吸收钳的特性，见 CISPR 16-1-4 中的描述。

B.4 试验方法

通常 EUT 4 个侧面中的任意一个都应朝向信号源端口进行试验。

对于 TEM 波导，电场的极化方向单一（典型的是垂直极化）。因此，为确保 EUT 能受到完全与水平和垂直两种极化方式相等效的电磁照射，需要旋转 EUT。例如，对于垂直极化的电场，要获得与水平极化相等效的照射，可以首先将 EUT 围绕与场均匀区垂直的轴（即 TEM 模的传播方向）旋转 90°，重新定位 EUT 的第一个面，然后围绕与场均匀区平行的水平轴旋转 3 次，照射 EUT 的其他各面（图 B.1）。由此可能导致无法在 TEM 波导内对与方位相关的 EUT 进行试验。

或者，可以让 TEM 波导围绕 EUT 旋转，或使用具有多个极化方向的 TEM 波导（见图 A.9）获得等

效的极化方式。

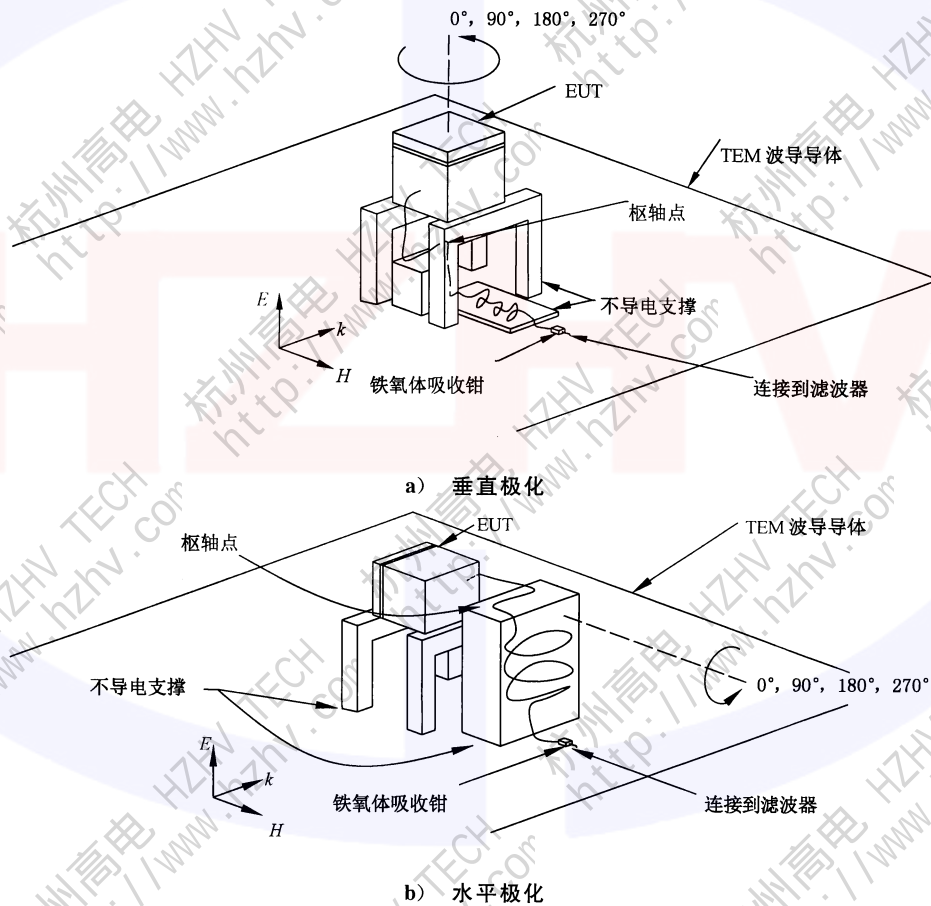
频率步长应是前一频率点的 1%。在每个频率点上的驻留时间不能少于 EUT 运行和响应所需时间,并且在任何情况下都不应少于 0.5 s,建议驻留时间为 1 s。

注:如果 EUT 由几部分组成,旋转时应注意保持各部分的相对位置,这可能需要将 EUT 各部分和电缆仔细地固定在试验布置支撑或试验支撑装置上。

在所需频率范围内按照上述要求设置频率步长,采用 1 kHz 的正弦波进行 80% 的幅度调制,必要时可暂停试验以调整 RF 信号电平或切换振荡源。

B.5 试验结果和试验报告

除了通常的辐射抗扰度试验报告的内容外,TEM 波导的尺寸、型号和验证方法等细节应包含在试验报告中。



说明:

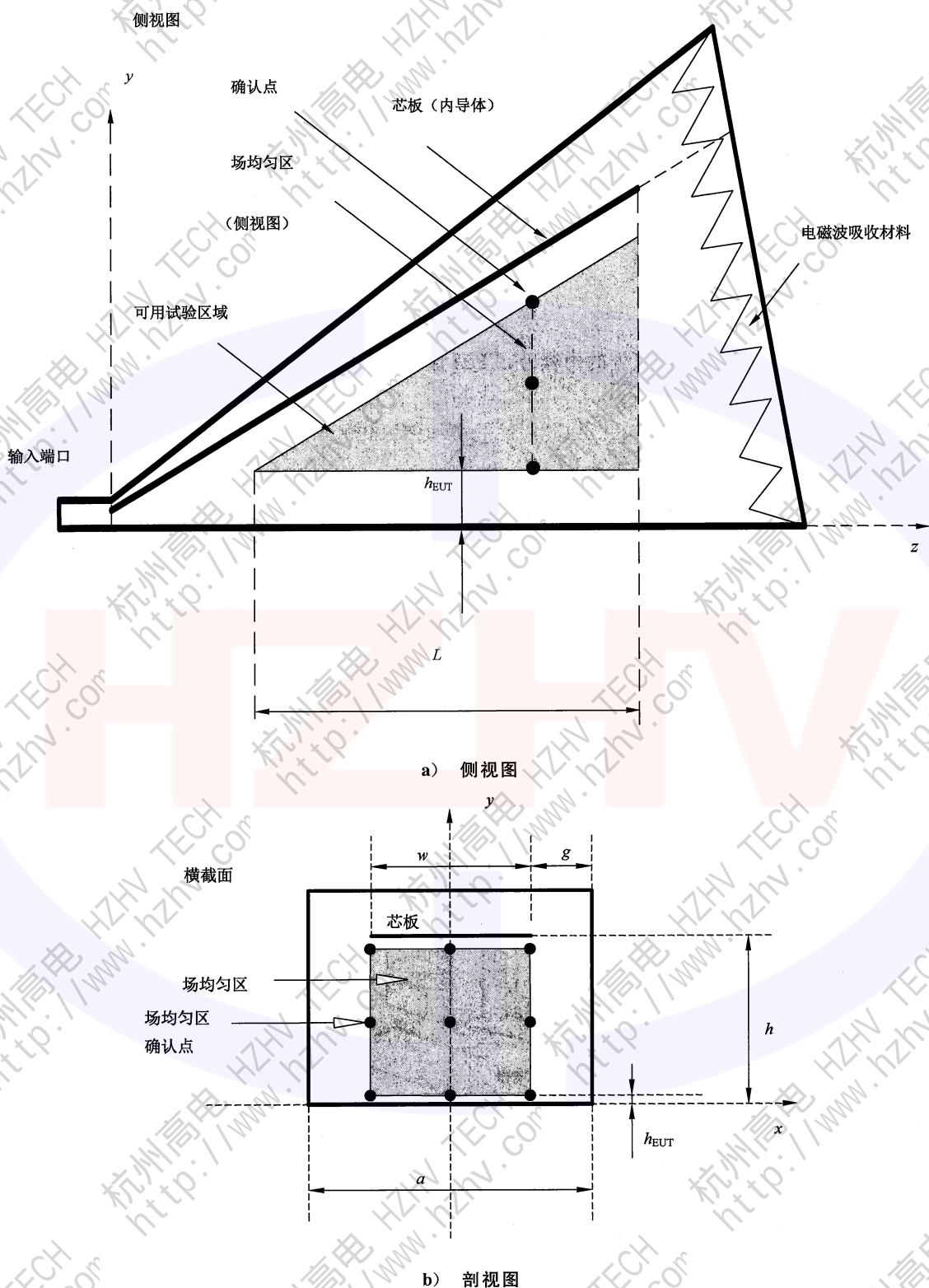
E —— 电场主分量;

H —— 磁场;

k —— 传播方向(波矢量)。

位于中心位置的滤波器旁的电缆布置应保持不动。试验布置支撑(3.1.16)在旋转时可能会根据需要进行重新定位。试验布置支撑的厚度应为 0.1 m,包含多个单元的 EUT 必须固定在试验布置支撑上或者类似的试验台上,并以相同的方式旋转。也可以使用试验支撑装置以及可旋转的 TEM 波导(见[6])或具有多种极化方式的 TEM 波导(图 A.9),以实现 EUT 与入射场极化方式之间的相对方位要求。

图 B.1 单极化方向的 TEM 波导的试验布置



注：本例是 GTEM 室场均匀区内按照 B.2.3 设置的 3×3 个确认点。图 B.2b) 给出场均匀区的最大可能尺寸。场均匀区(平面)的边界由四周的确认点确定。确认点不能超出可用试验区域(见 5.2.2 和图 A.6~图 A.9)。

图 B.2 TEM 波导中场均匀区确认的位置点

附录 C (规范性附录)

TEM 波导中的 HEMP 瞬态试验

C.1 简介

本附录的制定是为了规范电子和电气设备及系统的 HEMP 抗扰度试验。目的是使制造商可以对设备和小的系统进行评价,并可采用许多与 IEC 实验室已有的其他电磁抗扰度试验相同的试验方法,这些试验方法是出于其他电磁兼容性目的而制定的。

需要注意的是,在 HEMP 业界“模拟器”这一术语经常用于描述多种不同类型的、可以形成合适的 HEMP 照射环境的试验设备(见 IEC 61000-4-32)。在本附录中,该术语仅指可以产生 HEMP 波形的 TEM 波导。

尽管本附录拟采用与在 TEM 波导内进行其他类型试验相一致的方式描述 TEM 波导中的 HEMP 试验要求,但由于本附录涉及的瞬态试验与连续波试验在本质上差别很大,当本附录中 HEMP 试验要求与标准主体内容的描述不一致时,HEMP 的要求应取代其他所有要求。

C.2 抗扰度试验

C.2.1 概述

HEMP 抗扰度试验主要包括两种类型:辐射抗扰度试验和传导抗扰度试验。出于本部分的考虑,术语“电子设备”指执行特定功能的装置,它可能是小型计算机或者电话。有的设备(例如,连接到其他外设的计算机、工厂里监视生产流程的控制板)可认为是更大系统的一部分。通常电子设备相对较小,大致为 1 m×1 m×1 m 或者更小。这些小设备的大多数试验最好能在实验室内采用电流注入模拟器和 TEM 波导完成。

当模拟器内没有受试对象时,试验区域内的场近似为平面波,电场可以表示为 2.5 ns/25 ns 的双指数脉冲波形,即 10%~90% 的上升时间为 2.5 ns,脉冲宽度等于 25 ns 的单极性波形。该波形可用式(C.1)表示,单位 V/m。

$$E(t) = E_{\text{peak}} \cdot k(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$$\alpha = 6.0 \times 10^8 \text{ s}^{-1};$$

$$\beta = 4.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1};$$

$$k = 1.3;$$

E —— 电场主场分量,单位为伏每米(V/m);

E_{peak} —— 电场强度的峰值,单位为伏每米(V/m);

t —— 时间,单位为秒(s);

E_{peak} 是从表 C.1 中选取的严酷等级试验电平。

式(C.2)给出了式(C.1)所描述波形的频谱幅值,单位是 V/(m·Hz⁻¹)。

$$|E(f)| = \frac{E_{\text{peak}} k (\alpha - \beta)}{\sqrt{[(2\pi f)^2 + \alpha^2][(2\pi f)^2 + \beta^2]}} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

f 是频率，单位为赫兹(Hz)。

对应上述波形参数，式(C.2)的频谱幅值见图 C.1。

注：更多信息见[22]。

C.2.2 辐射试验装置

因为小试验装置的参数变化容差较小，它比大模拟器更容易满足场规范要求。这些小试验装置主要用于测试相对小的设备。对于早期 HEMP 脉冲波形，小试验装置在整个试验区域内的容差如下：

- 电场峰值与磁场峰值的比值应等于 $\eta_0 = 377 \Omega \pm 50 \Omega$ ；
- 从 10%~90% 峰值电压的上升时间应为 $2.25 \text{ ns} \pm 0.25 \text{ ns}$ ；
- 在 10%~90% 的上升时间内电场应连续增加；
- 脉冲宽度(脉冲上升沿和下降沿上等于 E_{peak} 的 50% 的两点之间的时间间隔)应为 $2.25 \text{ ns} \pm 0.25 \text{ ns}$ ；
- 电场的预脉冲幅值应小于等于电场峰值的 7%；
- 模拟器终端反射的电场应小于电场峰值的 10%；
- 与 100 kHz~300 MHz 带宽内的理论频谱相比，试验区域中心处经平滑处理的电场频谱的波动不应超过 $\pm 3 \text{ dB}$ ；
- 当电场主场分量达到峰值时，其他次场分量(见 3.1.19)应小于主场分量峰值的 10%，这比 5.2.1 的要求更加苛刻；
- 在试验区域内，电场峰值的均匀性应满足如下标准：试验区域内的电场峰值在时域应位于 $E_{\text{peak}} \sim 2E_{\text{peak}}$ 范围之内；
- 为评估场的容差，应在未放入 EUT 时对试验区域中心和 8 个角上的电磁场进行测量。

C.2.3 频谱要求

除了瞬态场的要求外，模拟器内电磁场的频谱还应满足如下要求：

- a) 在起始时间 $0 \mu\text{s}$ 到终止时间 $2 \mu\text{s}$ 的时间段内对瞬态波形进行等间隔采样计算其频谱，采样点数为 4 096。采用 FFT 或 DFT 计算 4 096 个点的复数域频谱，计算频率间隔为 0.5 MHz，最高频率为 1 GHz；
- b) 频谱应采用包含 5 个点的窗口平均值进行平滑(即在 2 MHz 的窗口上对频谱进行平均)；
- c) 经平滑处理的频谱幅值与式(C.2)和图 C.1 的对应波形频谱幅值之差应在规定的范围(dB)之内。

注：大多数情况下测得的频谱有偶然空值，但这并不足以改变瞬态波形的整体情况。考虑该实际状况，对大模拟器和小模拟器内经平滑处理的频谱要求分别是 $\pm 10 \text{ dB}$ 和 $\pm 3 \text{ dB}$ 之内，以允许频谱中偶然出现空值。之所以采用 $\pm 3 \text{ dB}$ 和 $\pm 10 \text{ dB}$ 的不同频谱限值，是由于小模拟器内模拟场的容差较小、准确度较高。

C.3 试验设备

测量应采用光纤传输通道，以便在测量信号和信号传输到数据处理系统的过程中不扰乱周围的电磁场。试验系统本身应对模拟器产生的电磁辐射不敏感。试验系统的作用是：

- 进行参考场测量；
- 根据用户要求使模拟 HEMP 与 EUT 的运行模式相同步；
- 根据用户要求进行 EUT 的电流和电压测量。

在 50 kHz~500 MHz 频率范围内，试验系统的整体准确度应在 $\pm 3 \text{ dB}$ 之内，整体实时动态范围应至少为 40 dB。

建议测量系统具备如下特性：

- 数据传输系统的 3 dB 带宽至少覆盖 50 kHz~1 GHz；
- 数字化仪器或示波器的带宽至少为 500 MHz，采样速率至少为每秒 2 G 次，数字分辨率至少为 8 位；
- 电场探头和磁场探头的 3 dB 带宽至少覆盖 50 kHz~1 GHz。相关探头设计的更多信息见 IEC 61000-4-23。

参考场的测量结果应包含 3 个相互正交的电场分量和 3 个相互正交的磁场分量，以便对电场与磁场的比值和次场分量进行评估。用户也可以规定进行试验区域内其他场的测量。

C.4 试验布置

TEM 波导模拟器内的试验区域取决于它的物理尺寸和结构特性。此区域的定义如下：在该区域内产生的电磁场应达到或高于模拟 HEMP 试验规定的场强和场均匀性要求。如果 EUT 相对试验区域而言过大，EUT 的响应会偏离平面波照射时的响应，试验结果不可信。

为保证模拟试验的准确性，需要将 EUT 放置在距离模拟器的辐射或导波部分足够远的位置，以减小 EUT 和模拟器之间的相互作用。EUT 与 TEM 波导导体之间的距离不得小于其总体横向尺寸的 0.3 倍。如果将 EUT 放置在接地平面上进行试验，则它与芯板之间的距离不得小于其总体横向尺寸的 0.6 倍。

通常 EUT 的体积有限，其尺寸由高度、宽度和长度等几个相互正交的最大尺寸决定。EUT 应按照上述规定放置在模拟器试验区域内。如果与 EUT 相连的外部“短”电缆按实际情况布置在模拟器内可以被照射，确定 EUT 的体积时也应考虑这些电缆。如果 EUT 在自由空间模式下进行试验，即不放置在接地平面上，则应将其放置在模拟器内的绝缘介质支撑上。

C.5 试验程序

C.5.1 概述

传导和辐射抗扰度试验可以分开进行，不要求对 EUT 同时进行传导和辐射抗扰度试验。

在辐射抗扰度试验中，如果包括所有外部“短”电缆在内的整个系统按照实际情况布置时可以被照射，则不需要对这些电缆进行前期的传导抗扰度试验。此外，如果在天线最大响应的方位可以测试天线承受模拟 HEMP 的能力，则也不需要进行天线端口的传导抗扰度试验。不过，所有连接到电源端口、通信端口的电缆和其他长电缆都应进行传导抗扰度试验。

HEMP 抗扰度试验应依据试验计划进行，试验计划对 EUT、试验严酷等级和波形、气候条件、主要运行模式和符合抗扰度要求的准则进行阐述。实验室或者 HEMP 试验设施的环境（气候环境和电磁环境）不应影响试验结果。试验期间对 EUT 进行监测并依据规定对其分类是非常重要的。如果 EUT 接收并发送数据到系统内的其他设备，则应采取措施使 EUT 发送和接收同样的数据或模拟数据，这样可以在试验过程中对 EUT 的性能进行评估。

如果 EUT 不符合试验要求且对设备或系统进行了诊断测试，则应撤掉诊断测试用探头和电缆，然后再次进行试验以保证这些外加装置不是试验不通过的原因。试验报告应明确说明所有与 EUT 相连的外部电缆的状态，无论它们是 EUT 的一部分还是试验系统的一部分。

EUT 应在试验计划规定的所有主要运行模式下进行试验。对于传导抗扰度试验，正波形和负波形都要采用。对于辐射抗扰度试验，只要求单个极性的波形。

实验室内的试验应在符合 7.2 规定的环境条件下进行。现场试验不能作为抗扰度符合性试验，但可用于验证所安装设备和系统的抗扰度。对于现场试验，希望周围环境如 7.2 所述，但不是强制要求。

C.5.2 严酷等级和试验暴露

因为可能导致系统损坏,在进行辐照试验时必须保证辐照强度位于 SPD 的电压保护等级之内,并且要足够低以避免击穿试验系统。因此,每个严酷等级实际上应包含 3 个试验幅值,开始的两个幅值低于规定的严酷等级,并且假定该幅值低于 SPD 的电压保护等级和击穿阈值。每个试验脉冲都应规定严酷等级的脉冲波形相同。

对于辐射抗扰度试验,需要规定严酷等级。在 EUT 的各个主要运行模式、各个方位(见 B.4)、3 个试验幅值各需进行至少两次试验。如果有具备超旋转功能的试验装置(见[6]),该装置可用于 HEMP 试验。

C.5.3 试验步骤

C.5.3.1 试验参数测量

试验人员应测量并记录 7.2 规定的气候参数。试验人员应掌握试验装置的特性,包括在试验区域未放入 EUT 时进行一系列的电磁场波形测量,还包括对测量结果的评估,以表明满足 C2.2 和 C2.3 的场均匀性和波形特性要求。应记录每个辐照场脉冲的参考电场测量结果。

C.5.3.2 辐射试验步骤

小的辐射试验装置可用于 EUT 的辐射试验,不过所有的电缆端口都需要进行传导抗扰度试验。小的系统可以在大的 HEMP 模拟器内进行试验,并且可能满足很多电缆端口的传导抗扰度要求。然而,像交流电源线和通信线缆等长线缆在任何 HEMP 模拟器内的试验都不充分,因此总是需要对这些端口进行传导抗扰度试验。

研究表明,大的 HEMP 模拟器更适用于多个设备一起工作的系统级试验,但本部分不强制要求在此模拟器内进行系统级试验。

每个规定等级的辐照试验包括 3 个辐照幅值:规定等级和两个更低等级的幅值。对于本部分只有一个更低等级的,则只需进行一个更低等级的试验;对于本部分的最低等级,则只需进行该最低等级的辐照试验。对于每个辐照幅值,至少进行两次脉冲场辐照试验。

C.5.3.3 小的辐射试验装置

本试验步骤中的基本方法是采用 TEM 波导等实验室内的试验装置对设备和小系统进行试验。EUT 应放置在试验区域内接地平面之上高度为 $0.1\text{ m} \pm 0.01\text{ m}$ 的介质支撑上,所有的 EUT 电缆应按与 EUT 正常运行状态相一致的方式布置。应根据制造厂商规定的接地方式将 EUT 和接地平面相连接。需要控制并记录与 EUT 有关的电缆的长度和位置。对电缆布置的方位进行调整,以使试验装置内电缆耦合的电磁场达到最小。为对电缆的耦合进行考核,应另外单独进行传导抗扰度试验。

尽管实际情况可能会限制旋转的次数,应旋转 EUT 以使所有面(通常 6 个)都暴露在辐射脉冲场中。另外,应进行两种极化方向的试验。

如果采用在 EUT 内测量的方法进行监测,放置探头和电缆时应注意减小对试验结果的不良影响。对于此类试验,特别推荐使用没有金属材料的光缆。

C.5.4 试验实施

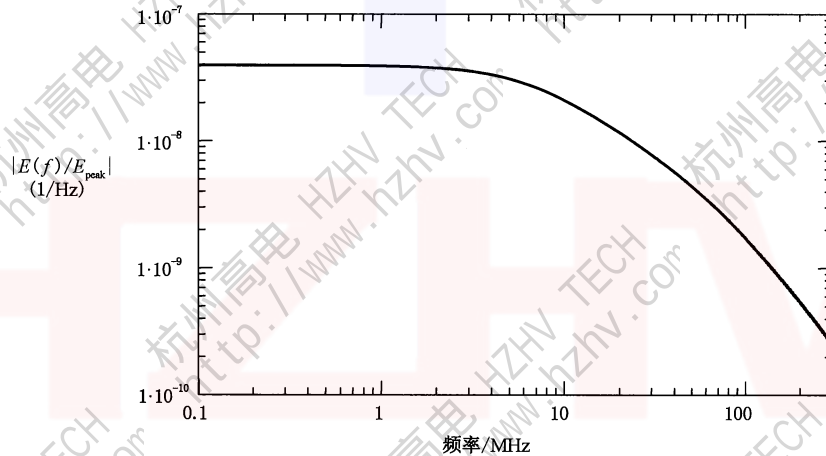
试验应根据试验计划实施。按照试验计划的规定,应在 EUT 正常工作的各个主要运行模式下进行辐照试验。对于每个辐照等级,脉冲之间的时间间隔应足以检查系统的性能恶化或损坏。在每个辐照等级试验后,都应检查 EUT 的工作性能。

C.5.5 辐射抗扰度试验的实施

辐射抗扰度应依据试验计划实施,包括依据产品标准或技术规范的规定验证 EUT 性能。

EUT 应处于正常工作状态。应设计包括 EUT 运行配置、主要功能状态、相对电磁波传播方向的方位的试验配置矩阵。对于每个试验,试验计划应规定:

- 试验辐照等级;所选的严酷等级加上两个更低等级;
- 每个幅值的照射次数(至少需要两次);
- 试验的引入点或端口;
- 对电缆位置和所采取措施的描述;
- 所需辅助设备;
- 模拟辐射场的极化方式和入射角度;
- 与本部分 C.4 规定不一致的所有试验布置细节;
- 通过/不通过的准则。



注: 频谱幅值由式(C.1)下方和式(C.2)列出的参数决定。

图 C.1 100 kHz 到 300 MHz 的频谱幅值

表 C.1 现行标准定义的辐射抗扰度试验等级

试验等级	设备及系统具有的防护等级 ^a	电场峰值 E_{peak}^b kV/m
R1	等级 4	0.5
R2	中间值	1
R3	中间值	2
R4	等级 2A、2B、3	5
R5	中间值	10
R6	中间值	20
R7	等级 1A、1B	50
RX	特殊场合	X

^a IEC 61000-5-3 给出了防护概念和等级。
^b 依据 IEC 61000-2-11 中的表 2。

附录 D

(资料性附录)

TEM 波导的特性

D.1 简介

本附录介绍 TEM 波的基本特性,包括传播和极化,同时介绍不同类型的 TEM 波导、试验区域以及使用频率限制。

D.2 波阻抗和特性阻抗的区别

TEM 波导是传输线。[32]定义的无耗传输线的波阻抗和特性阻抗如下:

波阻抗 η 定义为横向电场分量与横向磁场分量之比,假设与 $e^{-j\beta z}$ 有关,可以通过式 (D.1) 计算求得:

$$\eta = \frac{E_{\rho}}{H_{\phi}} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

η ——波阻抗;

E_{ρ} ——横向电场分量;

H_{ϕ} ——横向磁场分量;

μ ——传输线介质(通常为空气)的磁导率;

ϵ ——传输线介质(通常为空气)的介电常数;

β ——传播常数(实部);

ω ——角频率。

上述波阻抗和媒质的固有阻抗相同,对 TEM 传输线通用。

圆形同轴线的特性阻抗定义为:

$$Z_c = \frac{V_0}{I_0} = \frac{E_{\rho} \ln \frac{2h}{a}}{2\pi H_{\phi}} = \eta \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\ln \frac{2h}{a}}{2\pi} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

Z_c ——同轴线的特性阻抗;

V_0 ——同轴线上的电压;

I_0 ——同轴线上的电流;

E_{ρ} ——横向电场分量;

H_{ϕ} ——横向磁场分量;

h —— $2h = r_i$, r_i 是内导体的半径;

a —— $a = r_a$, r_a 是外导体的半径。

其中使用[7]中 E_{ρ} 和 H_{ϕ} 的表达式。特性阻抗取决于传输线的几何尺寸,不同结构形式传输线的特性阻抗计算公式是不同的。

式(D.1)和式(D.2)表明,通常波阻抗和特性阻抗是不相等的。因为 TEM 室、GTEM 室以及双平板和三平板带状线基本上都是双导体的 TEM 模传输线,通常情况下这些装置的波阻抗和特性阻抗也

是不相等的。

D.3 TEM 波

D.3.1 概述

描述自由空间 TEM 波的性质非常容易。以下两条给出自由空间和波导中的一些公式和准则。

D.3.2 自由空间的 TEM 波

对于 TEM 波,电场和磁场矢量相对于能量(波印廷矢量 $\vec{S}$)的传播方向全部在横向上,在传播方向上没有 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 分量。

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

对于自由空间, $|\vec{E}|$ 和 $|\vec{H}|$ 之比为:

$$\eta_0 = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \Omega \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

TEM 波的基本性质有:

- 在传播方向上没有场分量;
- $|\vec{E}|$ 和 $|\vec{H}|$ 之比接近 $120 \pi \Omega$ 。

注:在远离发射天线处,可以观察到以上结果,因此 TEM 波通常也被称为天线的“远场情况”。

D.3.3 波导

RF 领域的传统波导仅由一个封闭的导体表面构成。可以证明 TEM 波不能在这样的波导里传输,可能传输的是 TE 波和/或 TM 波。因为 TE 波和 TM 波具有确定的截止频率,只有高于该频率的电磁波才可以传播。横截面内具有两个或者多个导体的波导才能传播 TEM 波(多导体传输线,像 TEM 室、带状线或开放式 TEM 波导)。每对导体都形成一个 TEM 波传输系统。对于图 D.2 所示结构,可以传输两个独立的 TEM 波,每个 TEM 波都与自由空间 TEM 波的特性相同。

注:每对导体形成一个 TEM 波传输系统。在同轴线中信号能量以 TEM 波的形式传输。

D.4 波的传播

D.4.1 概述

波的传播给出电磁场的等相位线和等相位面的形状。

D.4.2 球面波传播

这种传播形式是自由空间远场的最普遍形式。通常它是由像单个天线的点源产生,电磁场的幅值随着离开源的距离的增加而减小。

D.4.3 自由空间的平面波传播

当离开天线很远时,波前可视为平面。在平行板波导内可以观察到这一传播形式,电磁场的幅值保持不变,与离开源的距离无关。

D.4.4 传播速度

在自由空间和 TEM 波导中,TEM 模传播的相速度总是等于光速 c_0 。传播速度只与空间媒质的介

电常数 ϵ 和磁导率 μ 有关。

D.5 极化

D.5.1 极化矢量

电场矢量的方向代表极化矢量的方向。

D.5.2 线极化和椭圆极化

通常,极化矢量的方向随时间而变化。如图 D.3 所示,极化矢量末端的运动轨迹决定极化的类型。根据[7],可以通过以下步骤计算极化矢量运动轨迹的形状,横向电场矢量为:

$$\vec{E}_{tr}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \underline{V}_i \cdot \vec{e}_{tr_i} \cdot e^{j\omega t} \right\} \quad \text{..... (D.5)}$$

该序列的第一项表示 TEM 模,因此,该矢量可写作:

$$\vec{A}_{\text{TEM}} = \underline{V}_1 \cdot \vec{e}_{tr_1} = \underline{V}_{\text{TEM}} \cdot \vec{e}_{tr_{\text{TEM}}} \quad \text{..... (D.6)}$$

该矢量可以分解为实部和虚部:

$$\vec{A}_{\text{TEM}} = \vec{a}_r + j\vec{a}_i \quad \text{..... (D.7)}$$

矢量 $\vec{a}_r$ 和 $\vec{a}_i$ 确定一个固定的平面,通常矢量 $\vec{E}$ 的末端轨迹是椭圆。如果 $\vec{a}_r$ 和 $\vec{a}_i$ 平行(同相或反相), $\vec{E}$ 沿着固定的直线运动,这种情况叫做线极化。所有的单个 TEM 波本质上都是线极化,只有与其他 TEM 波叠加才形成圆极化。TEM 波导内用于试验的 TEM 波通常都是线极化。

D.6 TEM 波导类型

D.6.1 概述

最简单的 TEM 波导是一个双导体传输线,如图 D.5 所示。

整个传输线可分为以下 3 部分:

a) 馈电部分

这是信号源或接收机连接到 TEM 波导的端口。

b) TEM 波导部分

通常包括试验区域在内。

c) 终端部分

终端通常表现为实际的或等效的电阻,其阻值等于传输线(即 TEM 波导)的特性阻抗。

对于绝大多数双端口波导,馈电部分和终端部分的几何尺寸完全相同,因此可以互换。两个端口都采用同轴连接器。有些 TEM 波导基于平衡传输线系统,在这种情况下需要 BALUN。

首先,TEM 波导的结构可分为封闭式和开放式。当一个导体完全包围另一个导体时称为封闭式 TEM 波导。在这种情况下,外导体还起到电磁屏蔽作用。

其次,TEM 波导可分为单端口和双端口波导,该分类依据 TEM 波导的终端。通常 TEM 波导工作在终端匹配状态,匹配双端口 TEM 波导的最简单方法就是在端口安装阻值等于 TEM 波导特性阻抗的集总参数终端负载。此时,假设 TEM 波导靠近端口的部分(渐变段)设计良好(见图 D.4),以实现宽频带的阻抗匹配。

对于单端口波导,终端负载是分布式的电阻和/或吸波材料的组合。这种终端负载形式对有些几何形状可以用到几个吉赫兹。双端口 TEM 波导可在任一端口测量反射和传输功率,但使用频带不宽。

芯板导体可以是单根导线、并排连接在一起的多根导线、单块平板或并排连接在一起的多块平板。

对于多导体系统,可以人为改变激励信号的幅度和相位,以调整试验区域内主场的极化方式。

芯板可以相对于外导体以对称或者不对称的形式安装,不对称 TEM 波导的优势是试验区域较大。

D.6.2 开放式 TEM 波导(带状线等)

可以通过在导电接地平面上方安装一块平板构成简单的开放式 TEM 波导。信号源或者接收机(通常阻抗为 $50\ \Omega$)连接到一个端口,另一个端口与传输线的特性阻抗相匹配。当阻抗匹配较好时,波导内的电压/电流分布保持不变。这种几何结构即称为开放式双端口 TEM 波导。

开放式 TEM 波导的主要缺点是辐射造成能量损失,这种不必要的辐射也会对试验系统造成干扰。特别是对于连续波抗扰度试验,必须为开放式 TEM 波导建造屏蔽室。

D.6.3 封闭式 TEM 波导

封闭式 TEM 波导结构的最大优点就是带有固有的屏蔽,可以进行所有的抗扰度试验且对环境不产生任何干扰;另一优点是 TEM 室是不平衡系统,所以不需要 BALUN;最后,通常 TEM 波导没有最低频率限制。因此,可以在封闭式 TEM 波导内进行瞬态试验。

注:对于对称馈电的 TEM 波导,最低频率的限制取决于 BALUN。

D.7 频率限制

使用 TEM 波导的前提是假设在其横截面的部分区域,TEM 模的场结构和自由空间中的平面波相同。因此,使用 TEM 波导进行辐射发射或抗扰度试验时,要求在可用频率范围内传播 TEM 模。

在可用频率范围内的某一频率点上,空波导某个横截面的尺寸允许存在除 TEM 模以外的其他模式。对于非 TEM 模,在沿波导长度方向上能传播该模式的具体位置取决于频率,并且该位置随着频率的增加而向馈电点方向移动。当波导的横截面尺寸超出某一频率在自由空间的半波长时,即可以传播最低阶的非 TEM 模(通常是 TE_{10} 模)。所产生高次模的能量最初是由 TEM 模转换而来,两种模式之间的能量转换是由能同时耦合它们的波导结构的不规则所致。

实际上,许多开放式和封闭式 TEM 波导内安装有泡沫或铁氧体吸波材料,以减小或消除高次模和谐振场的存在。如果吸波材料相对场分布的安装位置合理,基本上可以保持 TEM 模的特性。一般情况下,采用合适的吸波材料负载和输入/输出部分的渐变,许多 TEM 波导可以在直到几个吉赫兹或更高频率上保持为 TEM 模。合适的吸波材料布置取决于输入/输出渐变部分和试验区域部分的形状。大多数在试验区域部分安装吸波材料的 TEM 波导都有一个缺点,即用于辐射发射换算算法的场因子 e_{0y} (见 A.3.2.3.3)不能再通过解析计算得到,这可能导致更大的测量不确定度。

对于任何安装或者不安装吸波材料的 TEM 波导,都应按照本部分描述的方法(见 5.2.1 和 5.3.2)确定有效频率范围。

更多关于场均匀性和谐振频率的信息见[16]和[18]。对于没有安装吸波材料的 TEM 波导,谐振频率取决于 TEM 波导的几何形状。在双端口 TEM 室内,谐振发生在输入部分和终端部分之间的某个确定的横截面处,该位置称为截止位置 Z_c 。各阶高次模的截止位置不同,具体位置取决于其模式。在端口和截止位置之间该模式不能传播。如果两个截止位置间的距离是半波长的整数倍就会产生谐振。由于结构对称,谐振场在 TEM 室 $z = z_{\text{sym}}$ 的中间位置为最大或者零。某个模式的谐振频率可以通过解析计算得到:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left[\frac{n+1}{2} \cdot \pi - \arctan\left(\frac{K_3}{K_4}\right) \right]^2 + k_c^2(z_{\text{sym}})} \quad \dots\dots\dots (D.8)$$

式中:

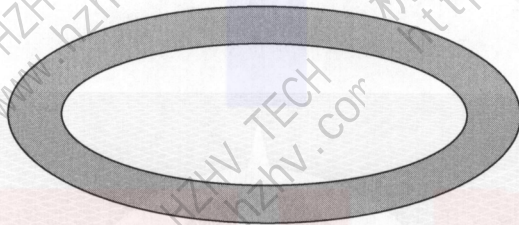
$$n=0,1,2,3,\cdots; K_3, K_4=f(z,a,k,k_c,J_v);$$

$$k_c=f(z_c,a,\text{mode}).$$

常数 $K_1 \sim K_4$ 可以解析求出。 K_1 取 1, 因此 K_2 是 0。 K_3, K_4 如式(D.9):

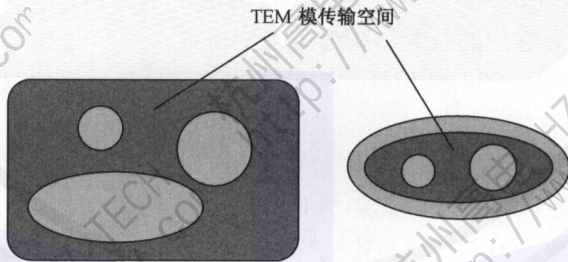
$$\begin{bmatrix} K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & -\sin(\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) \\ -\frac{\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}}{1} \sin(z_k \sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & \cos(\sqrt{k^2 - k_c^2(z_k)}) & \cdots \end{bmatrix} \quad (\text{D.9})$$
$$\begin{bmatrix} \sqrt{a' z_k} \cdot J_v(k z_k) \\ \frac{a' - 2va'}{2\sqrt{a' z_k}} \cdot J_v(k z_k) + \sqrt{a' z_k} \cdot J_v(k z_k) \end{bmatrix}$$

更多信息见[18]。



单导体的波导截面

图 D.1 简单波导(不存在 TEM 波)



三导体波导横截面

图 D.2 传输 TEM 模的波导示例

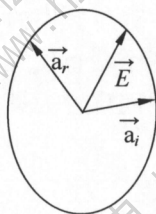


图 D.3 极化矢量

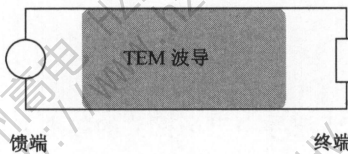


图 D.4 传输 TEM 波的传输线



图 D.5 单端口和双端口 TEM 波导

附录 E (资料性附录)

TEM 波导中电场探头的校准方法

E.1 概述

宽频带、大动态范围的电场探头广泛应用于依据本部分进行的场均匀区确认试验。除了其他因素，电场探头校准的质量直接影响辐射抗扰度试验的不确定度估算。

在依据本部分进行场均匀区确认时，通常探头可能需要承受 200 V/m 或者更高的场强，这取决于所进行的辐射抗扰度试验。因此在校准本部分使用的电场探头时应考虑预期频率和动态范围。

现有的探头校准结果表明，不同实验室校准的探头结果不同。因此，场探头的校准环境和方法需要规范。本附录给出 TEM 波导中校准探头的步骤，同时给出依据本部分进行场均匀区确认所用探头校准的有关信息，以限制场均匀区确认结果的差异。

E.2 探头校准要求

E.2.1 概述

本部分的场均匀区是场强校准的假想垂直平面，在此区域内场强的变化足够小。场均匀区确认所用电场探头的校准应满足以下要求。

E.2.2 校准频率范围

频率范围通常应覆盖 TEM 波导的最高频率，该频率取决于 TEM 波导的尺寸和结构。电场探头头部的最大尺寸 l_{pmax} 应小于最高校准频率 f_{cmax} 所对应波长的四分之一，以免出现谐振。因此，探头头部的尺寸决定校准的最高频率：

$$f_{\text{cmax}} \leq \frac{c_0}{4l_{\text{pmax}}} \quad \dots\dots\dots (\text{E.1})$$

式中， c_0 为光速。

例如，当电场探头头部的最大尺寸 l_{pmax} 为 2.5 cm 时，由式 (E.1) 给出的最高频率为 3 GHz。如果该频率高于 5.2.1 中 TEM 模验证所确定的最高频率，则校准频率上限为 TEM 模验证所确定的最高频率。

E.2.3 校准区域

校准区域应尽可能规则，例如立方体或者平行六面体，同时应小于内外导体间距离（芯板高度）的 20%。校准区域的中心即电场探头的位置应位于芯板高度的二分之一处。

应在立方体的网格点上校准区域的确认。两个网格点的间隔约为芯板高度的 10%。校准区域确认所用探头或传感器应尽可能小，该探头或传感器不需要校准。

注 1：如果校准区域的尺寸为边长 20 cm 的立方体，坐标间隔为 10 cm，测试的点数为 27，如图 E.1 所示。

校准区域的确认步骤如下：

- 采用 5.2.3 提到的恒定输入功率法测量所有网格点上的电场强度，依据 E.2.6 选择频率点；
- 计算电场测量结果的标准差；
- 单端口 TEM 波导的标准差应小于 1 dB，双端口 TEM 波导的标准差应小于 0.6 dB。

注 2：标准差的基本信息见[50]。

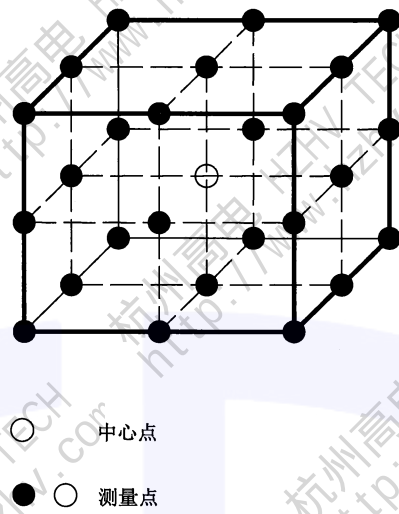


图 E.1 校准区域的确认测量点示例

E.2.4 探头尺寸

探头尺寸应小于内外导体间距离(芯板高度) h (见 5.2.2)的 10%，同时要小于校准区域(见 E.2.3)。

E.2.5 探头对 TEM 波导的扰乱

需要在放入和没有探头(含测量装置)对 TEM 波导的扰乱。

注：扰乱程度不仅取决于测量装置带来的扰乱，而且与 TEM 波导的线性度有关。

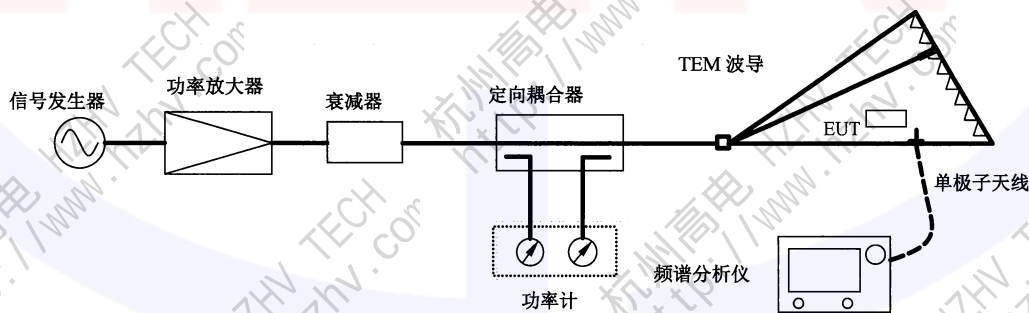


图 E.2 探头扰乱确认布置

探头扰乱确认的布置如图 E.2 所示。与探头校准时相同，连接信号发生器、功率放大器、衰减器、定向耦合器和功率计到 TEM 波导。采用单极子天线探测电场时，在 TEM 波导底板上开一个小孔，以便将单极子天线连接到底板上。也可以采用干扰较小的电场传感器，如采用 LiNbO_3 光电转换芯片的光电传感器替代单极子天线。当采用光电传感器时，底板上不必开小孔。天线/传感器无需校准。单极子天线连接频谱分析仪以便测量天线的输出。可以采用和校准区域尺寸相同的金属立方体代替探头。

确认探头扰乱的步骤如下：

- a) 在未放入探头时设定一个频率点，向 TEM 波导输入功率；
- b) 测量功率的大小，记录频谱分析仪的读数；
- c) 增加功率，重复步骤 b)；
- d) 改变频率(见 E.2.6)，重复步骤 a)～c)；

- e) 在完成所有频率点的测量后,放入探头,重复步骤 a)~d);
f) 检查探头对应各输入功率读数的扰乱。

探头带来的扰乱应小于功率计和频谱分析仪的测量不确定度。

注:参考[51]和[52]以确定不确定度。一些测量设备的制造商给出了设备的不确定度。

E.2.6 频率步长

为比较不同校准实验室的试验结果,校准时需采用表 E.1 确定的频率点。

表 E.1 校准频率点

频率范围	典型校准频率点 MHz
f_0 到 1 GHz	f_0 , 50, 100, 150, 200, ..., 950, 1 000
1 GHz 以上	1 000, 1 200, 1 400, ...

注: f_0 是待校准探头的最低频率。

E.2.7 场强

校准探头的电场强度应基于抗扰度试验要求的场强。首选的场均匀区确认方法采用的电场强度至少是 EUT 试验场强的 1.8 倍,因此建议采用试验场强两倍的电场强度进行探头校准,如表 E.2 所示。

注:这也包括对功率放大器的 1 dB 压缩点要求。

表 E.2 校准场强大小

校准等级	校准场强/(V/m)
1	2
2	6
3	20
4	60
X	Y

注: X, Y 是开放的校准等级,这一等级可以由产品规范或实验室给出。

E.3 校准仪器要求

E.3.1 TEM 波导的技术性能

TEM 波导可以为场探头校准建立一个标准场。TEM 室芯板与底板或顶板之间中心处的场强可由以下公式计算:

$$E_{\text{approx}} = \frac{\sqrt{Z_0 P_{\text{net}}}}{h} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

Z_0 —— TEM 室的特性阻抗,单位为欧(Ω)(通常为 50 Ω);

P_{net} —— 净输入功率,单位为瓦(W),依据 E.3.4 确定;

h ——芯板与顶板或底板之间的距离,单位为米(m)。

注 1: 两导体之间中心处的场强由公式(E.2)计算得出。

注 2: 式(E.2)仅适用于 TEM 模。

TEM 室的 VSWR 应较小,如小于 1.3,以减小测量不确定度。

另一种测量 P_{net} 的替代方法是:将经校准的、VSWR 较小的衰减器和功率探头连接到 TEM 波导的输出端口(仅适用于双端口 TEM 波导)。

E.3.2 谐波和杂散信号

从功率放大器出来的任何谐波和杂散信号应至少比基波信号电平低 20 dB。此要求适用于探头校准和线性度检查的所有电场强度等级。由于功率放大器在高功率输出时的谐波分量较大,所以仅在最高校准场强下进行谐波分量测量即可。将校准过的频谱分析仪通过衰减器或者定向耦合器与放大器相连可以进行谐波测量。

校准实验室应通过测量,确认功率放大器的谐波或者杂散信号满足所有的测量布置要求。这可以通过将频谱分析仪连接到定向耦合器的端口 3 上(见图 E.3,用频谱分析仪输入端口替换功率计探头)完成。

注:应确保功率电平未超出频谱分析仪的最大允许输入功率,必要时可以使用衰减器。

频率范围应至少覆盖预期频率的 3 次谐波,仅在产生最高预期场强的功率电平进行确认即可。可以使用一个谐波抑制滤波器提高功率放大器的频谱纯度。

注:预期频率指校准的最高频率。

E.3.3 探头支架

探头支架可能在探头校准时造成电磁场的反射。应采用相对介电常数小于 1.2、介质损耗角正切小于 0.005 的材料制作支架。

E.3.4 用定向耦合器测量到达场强形成设备的净功率

采用四端口的双定向耦合器或者两个背对背连接的三端口单定向耦合器(构成所谓的双定向耦合器)可以测量到达场强形成设备的净功率。图 E.3 给出了用双定向耦合器测量到达场强形成设备净功率的通用布置。在每个端口都连接匹配负载或信号源时,前向耦合系数和反向耦合系数的定义如下:

$$C_{\text{fwd}} = \frac{P_3}{P_1} \dots\dots\dots (\text{E.3})$$

$$C_{\text{rev}} = \frac{P_4}{P_2} \dots\dots\dots (\text{E.4})$$

式中, P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 是定向耦合器各端口的功率。

到达场强形成设备的净功率为:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1}{C_{\text{fwd}}} - \frac{PM_2}{C_{\text{rev}}} \dots\dots\dots (\text{E.5})$$

式中, PM_1 和 PM_2 是采用线性单位的功率计读数。

如果 TEM 波导的 VSWR 已知,则可以使用单个三端口的定向耦合器。例如,TEM 波导的 VSWR 为 1.5,相当于电压反射系数(VRC)为 0.2。

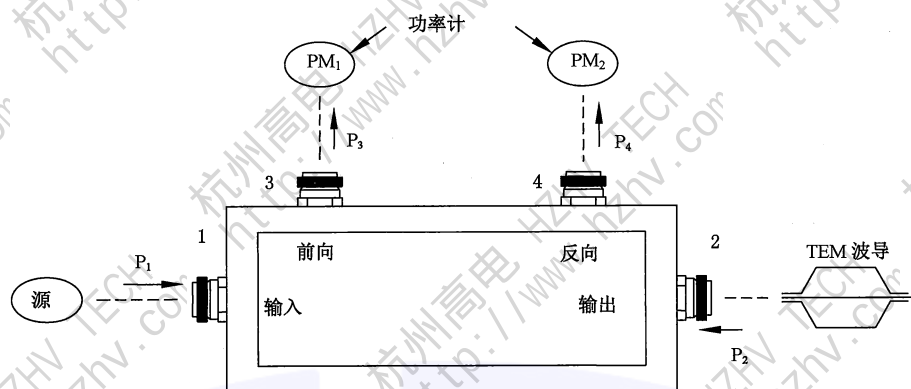


图 E.3 到达场强发射设备的净功率测量布置

定向耦合器的方向性影响测量准确度。方向性是衡量定向耦合器隔离前向信号和反向信号能力的参数。对于匹配良好的传输装置,反向功率远小于前向功率。因此,方向性不如在反射测量时重要。例如,当 TEM 波导的 VSWR 为 1.5,定向耦合器的方向性为 20 dB,方向性有限造成的净功率测量绝对最大不确定度为 $0.22\text{ dB} - 0.18\text{ dB} = 0.04\text{ dB}$,呈 U 形分布(其中 0.18 dB 是 1.5 的 VSWR 造成的入射功率损耗)。

则到达场强形成装置的净功率为:

$$P_{\text{net}} = \frac{PM_1(1 - VCR^2)}{C_{\text{fwd}}} \dots\dots\dots (\text{E.6})$$

E.4 场探头校准

E.4.1 校准方法

尽管[52]提供了 3 种校准方法,但一般只采用其中两种方法。采用计算场强值的标准场法适用于双端口 TEM 波导(见 E.4.2)。采用标准传递(即与待校准探头相近的场强探头或传感器)的校准方法适用于单端口 TEM 波导。

E.4.2 双端口 TEM 波导的校准步骤

标准场法适用于此类型波导的探头校准。图 E.4 给出了电场探头校准布置的实例。如果电场大小、前向和反向功率手动读数,则不需要使用计算机。应根据 TEM 波导的类型选取校准步骤。在双端口 TEM 波导中的校准步骤如下:

- 将待校准的各向同性电场探头放置在芯板高度的二分之一处;
- 在 E.2.2 规定的频率范围内按照 E.2.6 规定的频率步长设置频率点,在 TEM 波导的输入端口施加一前向功率,电场主场分量应在 $6\text{ V/m} \sim 20\text{ V/m}$ 的范围之内。记录所有的前向功率和反向功率、主场分量和次场分量的读数;
- 利用式(E.5)或式(E.6)以及测得的功率计算净功率 P_{net} ;
- 利用式(E.2)计算标称电场主场分量 E_{approx} 。

注:校准因子可能因探头的安装方式而改变。还有一种方法就是在 TEM 波导的上部仅插入探头的头部,以消除探头头部以外部分的影响。

探头校准因子 F_p 可通过式(E.7)求出:

$$F_p = \frac{E_m}{E_{\text{approx}}} \text{ 或者 } F_p = E_m - E_{\text{approx}}, \text{ 单位为分贝 (dB) } \dots\dots\dots (\text{E.7})$$

式中:

E_m ——待校准探头测得的主场分量。

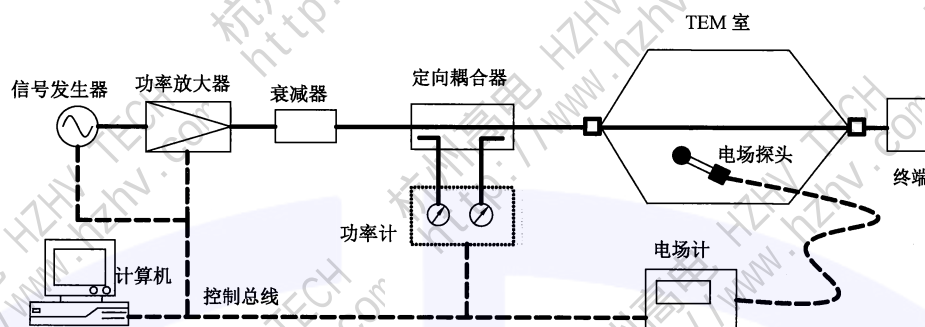


图 E.4 电场探头校准布置举例

E.4.3 单端口 TEM 波导的校准步骤

E.4.3.1 标准传递法

通常,对于双端口 TEM 波导,在所有频率点上测得的电场强度与由式(E.2)计算的电场强度之差异在 ± 0.5 dB 之内;然而,对于单端口 TEM 波导,其差异可能有 ± 3 dB 或 ± 4 dB。因此,单端口 TEM 波导不能采用 E.4.2 中的校准方法,应采用标准传递法进行校准。

标准传递探头可用于在场形成装置(工作标准装置)内建立标准试验场。标准传递探头的响应可以通过理论计算(如偶极子探头)或者根据一些方法校准(如在电波暗室内采用三天线法)得到。还有一种方法就是使用一个小的(保证较高的使用频率)双端口 TEM 室,这就要求标准传递探头要足够小。一旦工作标准装置的传递函数已知,只要工作标准装置是线性的,就可以在其他功率电平进行探头校准。应注意由于校准环境(如校准场地、尺寸和方位)不同以及标准传递探头和被校准探头之间的形状差别可能带来的额外误差。

注 1: 通常,参考校准环境与校准实验室校准环境之间的任何差别都会引入系统误差。另外,在校准实验室中使用的标准传递探头与实际校准探头的形状和结构理论上应完全相同,如果实际情况与此不同就必须对其引入的额外系统误差进行定量分析。

采用标准传递探头的校准步骤如下:

- 将标准传递探头放置在芯板高度的二分之一处;
- 在 E.2.2 规定的频率范围内按照 E.2.6 规定的频率步长设置频率点,在 TEM 波导的输入端口施加一前向功率,记录所有频点上的前向功率和反向功率、主场分量读数 E_T (或者标准传递探头的输出电压);

注 2: 如果测量的是输出电压,则应转化为电场强度。

- 利用式(E.5)或式(E.6)和测得的功率计算净功率 P_{net} ;
- 用待校准的各向同性电场探头替换标准传递探头;
- 施加一前向功率到 TEM 波导的输入端口,保持净功率与步骤 b) 相同,记录电场主场分量的读数 E_m 。

$$F_p = \frac{E_m}{E_T} \text{ 或者 } F_p = E_m - E_T, \text{ 单位为分贝 (dB) } \dots\dots\dots (\text{E.8})$$

式中:

E_T ——标准传递探头测得的电场主场分量。

如果满足下列条件,则标准传递法是准确的:

- 标准传递探头测量和被校准探头测量时的试验布置保持不变;
- 测量过程中探头的位置可以复现;
- 施加的功率保持不变;
- 被校准探头和标准传递探头的结构(大小、振子设计)相似;
- 连接探头头部和读数部分的电缆没有扰乱或耦合电磁场;
- 工作标准装置基本无反射。

更多关于本方法的信息见[53]和[54]。

E.4.3.2 校准位置处电场的估算方法

如果没有标准传递探头,可以通过其他方法校准探头,即采用 E.2.5 提到的单极子天线(见图 E.5)。

校准步骤如下:

- a) 将单极子天线放置在 TEM 波导底板上;
- b) 在 E.2.2 规定的频率范围内按照 E.2.6 规定的频率步长设置频率点,在 TEM 波导的输入端口施加一前向功率,记录所有频点上的前向功率和反向功率、频谱分析仪读数 P_{mono} ;
- c) 根据天线系数计算单极子天线所在位置处的电场强度 E_{mono} ;
- d) 利用式(E.5)或式(E.6)和测得的功率计算净功率 P_{net} ;
- e) 取出单极子天线,在同样位置处放置一个小的电场传感器(如光电场强传感器);
- f) 施加一前向功率到 TEM 波导的输入端口,保持净功率与步骤 b) 相同,记录电场主场分量或者探头所连接频谱分析仪的读数(E_M 或 P_M);

注:小的电场传感器不需要校准。尽管可以使用电场探头,但不应使用待校准的探头。

- g) 将小的电场传感器放在场探头的校准位置(通常为芯板高度的二分之一处);
- h) 施加前向功率到 TEM 波导的输入端口,保持净功率与步骤 b) 相同,记录电场主场分量或者探头所连接频谱分析仪的读数(E_C 或 P_C)。

参考电场的大小通过式(E.9)计算:

$$E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} \sqrt{P_C}}{\sqrt{P_M}} \text{ 或 } E_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{mono}} E_C}{E_M} \dots\dots\dots (E.9)$$

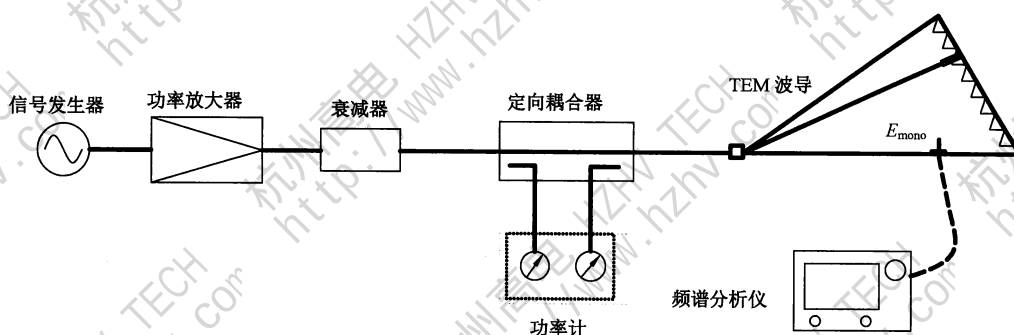
校准因子 F_P 通过式(E.10)计算:

$$F_P = \frac{E_m}{E_{\text{ref}}} \text{ 或者以 dB 的形式表示 } F_P = E_m - E_{\text{ref}} \dots\dots\dots (E.10)$$

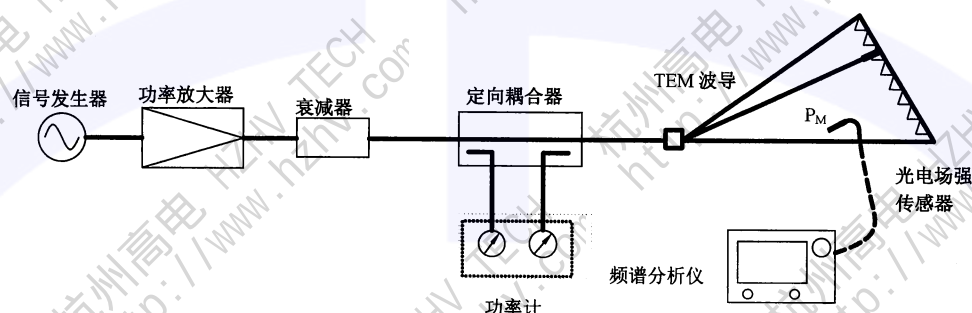
式中:

E_m ——由被校准探头测得的电场主场分量。

单极子天线的天线系数计算步骤见 E.4.3.3。



a) 单极子天线的使用



b) 小型电场传感器的使用

图 E.5 另一种电场探头校准方法的校准布置

E.4.3.3 采用有效长度法根据天线的阻抗计算天线系数

天线的阻抗可以利用网络分析仪测量天线的反射系数获得,或者通过莱布斯方程[55]或矩量法等其他数值算法计算获得。

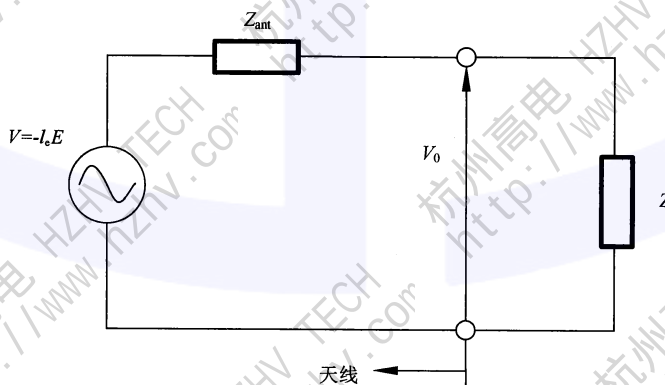


图 E.6 天线和测量仪器的等效电路

图 E.6 为接收天线和测量仪器的等效电路图。天线的终端电压 V_0 可由式(E.11)求出:

$$V_0 = \frac{Z_0 V}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} = -\frac{Z_0 I_e E}{Z_0 + Z_{\text{ant}}} \quad \dots\dots\dots (\text{E.11})$$

式中:

Z_0 ——测量仪器的特性阻抗;

Z_{ant} ——天线的阻抗;

E ——天线振子所处位置的场强；

l_e ——天线的有效长度。

可以通过式(E.12)、式(E.13)计算 l_e ：

$$l_e = \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \int_0^l \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda}{2\pi \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \left(l \leq \frac{\lambda}{4} \right) \quad \text{.....(E.12)}$$

$$l_e = \frac{\lambda}{2\pi} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \left(\frac{\lambda}{4} \leq l \leq \frac{\lambda}{2} \right) \quad \text{.....(E.13)}$$

式中：

l ——天线振子的长度；

λ ——波长。

天线系数 AF 与场强和终端电压的关系如下：

$$AF = \frac{E}{V_0} \quad \text{.....(E.14)}$$

天线系数可以通过式(E.11)和式(E.14)求出，即：

$$AF = \frac{Z_0 + Z_{ant}}{Z_0 l_e} \quad \text{.....(E.15)}$$

相关标准和参考文献

相关标准

ANSI C63.4 Methods of measurement of radio-noise emissions from low-voltage electrical and electronic equipment in the range of 9 kHz to 40 GHz

ANSI C63.19:2007 Methods of measurement of compatibility between wireless communication devices and hearing aids

CISPR 20 Sound and television broadcast receivers and associated equipment—Immunity characteristics—Limits and methods of measurement

CISPR 25 Vehicles, boats and internal combustion engines—Radio disturbance characteristics—Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers

EIA/TIA-631 Telecommunications telephone terminal equipment—Radio frequency immunity requirements for equipment having an acoustic output

ETSI TR 102 273-5 Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); Improvement on radiated methods of measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties—Part 5: Striplines

IEC 60068-1 Environmental testing—Part 1: General and guidance

IEC 60118-13 Electroacoustics—Hearing aids—Part 13: Electromagnetic compatibility (EMC)

IEC 60489-1 Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services—Part 1: General definitions and standard conditions of measurement

IEC 60489-3 Methods of measurement for radio equipment used in the mobile services—Part 3: Receivers for A3E or F3E emissions

IEC 61967-2 Integrated circuits—Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz—Part 2: Measurement of radiated emission, TEM cell and wideband TEM cell method

IEC 62132-2 Integrated circuits—Measurement of electromagnetic immunity—Part 2: Measurement of radiated immunity—TEM-cell and wideband TEM-cell method

IEEE Std C95.3 IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields—RF and microwave

IEEE Std 1309:2005 IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz

IEEE Std 145:1993 IEEE standard definitions of terms for antennas

IEEE Std 211:1997 IEEE standard definitions of terms for radio wave propagation

ISO 11452(all parts) Road vehicles—Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy

ISO 11452-3 Road vehicles—Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy—Part 3: Transverse electromagnetic mode(TEM) cell

MIL-STD-461F Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment

参考文献

[1] M. Alexander, A. Nothofer, R.C. Dixon, “The use of ferrite clamps and clip-on ferrites,” CISPR/A-TC77 (JTF-TEM-Alexander-Nothofer-Dixon) 01-01, June 2001

- [2] ANSI C63.4:2008 American national standard for methods of measurement of radio-noise emissions from low-voltage electrical and electronic equipment in the range of 9 kHz to 40 GHz, The institute of electrical and electronics engineers, Inc., New York, Dec. 2000
- [3] T.M. Babij, "Evaluation of errors in the calibration of TEM cells," IEEE Miami Technicon '87, Miami, FL, pp. 199-201, 1987
- [4] A. Beggio, G. Borio, and R.E. Zich, "On the unwanted effects on the radiated emission and susceptibility measurements due to the introduction of a wooden table," International symposium on electromagnetic compatibility, Tokyo, Japan, pp.252-255, May 1999
- [5] S. Bentz, "Use of the TEM cell for compliance testing of emission and immunity, an IEC perspective," IEEE International symposium on electromagnetic compatibility, Santa Clara, CA, pp. 43-47, 1996
- [6] H.S. Berger, and A. Tsaliovich, "Unlicensed PCS product EMC compliance measurement rational and alternatives," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Santa Clara, CA, pp. 396-401, 1996
- [7] J. van Bladel, Electromagnetic fields, Hemisphere Publishing Corporation, 1985
- [8] Ch. Braun, W. Graf, P. Guidi, H.U. Schmidt "Beeinflussung der Stromverteilung auf Testobjekten in TEM-Wellenleitern bei Variation des Füllfaktors," (translation: "Influence of current distribution on test objects in TEM waveguides for variable object size"), Kleinheubach Symposium of URSI German NC and ITG, Kleinheubacher Berichte, Deutsche Telekom, Darmstadt, Germany, vol. 39, 1996
- [9] E.L. Bronaugh, "Simplifying EMI immunity (susceptibility) tests in TEM cells," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Washington, D. C., pp. 488-491, August 1990
- [10] E. Bronaugh, and J. Osburn, "Radiated emissions test performance of the GHz TEM cell," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Cherry Hill, NJ, pp. 1-7, Aug. 1991
- [11] CISPR 14 (all parts) Electromagnetic compatibility—Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus
- [12] R. E. Collin, Field theory of guided waves, 2nd ed., IEEE Press, Piscataway, NJ, 1991
- [13] M. Crawford, and J. Workman, "Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field site measurements," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Baltimore, MD, pp. 80-85, 1980
- [14] H. Garbe, H. Haase, M. Koch, "Specification of alternative test sites with respect to given EMC field standards," International Zurich symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 459-464, Feb. 1997
- [15] J. Glimm, K. Münter, M. Spitzer, Th. Dötzer, Th. Schrader, "Influence of calibration and measurement techniques on the inhomogeneity of electromagnetic fields for immunity tests," International symposium on electromagnetic compatibility, Tokyo, Japan, pp. 600-603, May 1999
- [16] C. Groh, J.P. Kaerst, M. Koch, and H. Garbe, "TEM waveguides for EMC measurements," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 41, no. 4, pp. 440-445, Nov. 1999
- [17] C. Groh, J.P. Kaerst, and H. Garbe, "Einfluss der Beladung auf die Feldmoden in TEM Wellenleitern," (translation: "Influence of load on field modes in TEM waveguides"), Elektromagnetische erträglichkeit EMV 2000 (8. Intl. Symp. and Exhb. on EMC), VDE Verlag, Berlin,

Germany, pp. 287-294, Feb. 2000, ISBN 3-8007-2522-3

[18] C. Groh, TEM Zellen zur Kalibration von elektromagnetischen Feldsensoren, (translation: TEM cells for calibration of electromagnetic field probes), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002

[19] T.E. Harrington, Z. Chen, and M. D. Foegelle, "GTEM radiated emissions testing and FDTD modeling," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Seattle, WA, pp. 770-775, 1999

[20] T.E. Harrington, "Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Washington, DC, pp. 23-28, 2000

[21] T.E. Harrington, and E.L. Bronaugh, "EUT directivity and other uncertainty considerations for GHz-range use of TEM waveguides," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Montreal, QC, Canada, pp. 117-122, 2001

[22] IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP environment—Radiated disturbance

[23] IEEE Std 1309:2005 IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz, The institute of electrical and electronics engineers, Inc., New York, 1996

[24] J.P. Kaerst, C. Groh, and H. Garbe, "Field mode properties of loaded waveguides," International Zurich symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 481-486, Feb. 2001

[25] J.P. Kaerst, Qualifikation beladener TEM Wellenleiter, (translation: Validation of loaded TEM waveguides), PhD-thesis, University of Hannover, Germany, VDE Verlag, 2002

[26] M. Klingler, J. Rioult, J.-P. Ghys, and S. Fichoux, "Wideband total radiated power measurements of electronic equipment in TEM and GTEM cells," International Zurich symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 665-670, 1999

[27] M. Koch, Analytische Feldberechnung in TEM Zellen, (translation: "Analytical field calculation in TEM cells"), PhD-thesis, University of Hannover, Shaker-Verlag, Aachen, Germany, 1999, ISBN 3-8265-6017-5

[28] G. Koepke, and M. Ma, "A new method to quantify the radiation characteristics of an unknown interference source," International Zurich symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 35-40, March 1983

[29] M. Ma, and G. Koepke, Uncertainties in extracting radiation parameters for an unknown interference source based on power and phase measurements, National institute of standards and technology (NIST, formerly NBS), Technical Note 1064, June 1983

[30] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, "Uncertainties due to cross-polar coupling in GTEM cell emission measurement," International symposium on electromagnetic compatibility, Rome, Italy, pp. 590-595, 1998

[31] A. Nothofer, A.C. Marvin, and J.F. Dawson, "Indirect measurements of field uniformity in TEM cells Including cross-polar field components," International Zurich symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 659-664, March, 1999

[32] D.M. Pozar, Microwave engineering, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1998

[33] T. Schrader, Vergleich von Feldgeneratoren für EMV-Prüfungen, (translation: Compari-

son of field generators for EMC tests), PhD-thesis, University of Braunschweig, Germany, 1997

[34] I. Sreenivasiah, D. Chang, and M. Ma, "Emission characteristics of electrically small radiating sources from tests inside a TEM cell," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 23, no. 3, pp. 113-121, Aug. 1981

[35] E. Steinke, P. Wilson, and H. Garbe, "An equivalent radiated emission voltage measurement standard for TEM cells," International Wroclaw symposium on electromagnetic compatibility, Wroclaw, Poland, pp. 301-304, Sept. 1992

[36] M.J. Thelberg, E.L. Bronaugh, and J.D.M. Osburn, "GTEM to OATS radiated emissions correlation from 1-5 GHz," IEEE international symposium on electromagnetic compatibility, Chicago, IL, pp. 387-392, 1994

[37] J. Tippet, and D. Chang, "Radiation characteristics of electrically small devices in a TEM transmission cell," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 18, no. 4, pp. 134-140, Nov. 1976

[38] L. Turnbull, and A. Marvin, "A treatment of the phase properties of GTEM to open-area test-site correlation techniques," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 40, no. 1, pp. 62-69, Feb. 1998

[39] P. Wilson, D. Hansen, and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," IEEE national symposium on electromagnetic compatibility, Denver, CO, pp. 171-177, May 1989

[40] P. Wilson, "On correlating TEM cell and OATS emission measurements," IEEE transactions on electromagnetic compatibility, vol. 37, no. 1, pp. 1-16, Feb. 1995

[41] IEC 61000-4-3 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-3: Testing and measurement techniques—Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test

[42] CISPR/TR 16-4-1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling—Uncertainties in standardized EMC tests

[43] CISPR 16-4-2 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling—Uncertainty in EMC measurements

[44] CISPR/TR 16-4-3 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-3: Uncertainties, statistics and limit modelling—Statistical considerations in the determination of EMC compliance of mass-produced products

[45] CISPR/TR 16-4-4 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling—Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services

[46] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, "The New national standard of EM field strength; Realisation and dissemination", 12th Int. symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613

[47] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, "Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing", Frequenz 53 (1999) 9-10, Page 190-194

[48] IEEE Std 1309:2005 IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz, 2005

[49] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)

[50] S. Ishigami and M. Hirata, "A new calibration method for an e-field probe using TEM-waveguides", The 20th international Zurich symposium on electromagnetic compatibility (EMC Zurich 2009), January 2009

[51] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International organization for standardization, Geneva, Switzerland, ISBN 92-67-10188-9, First Edition, 1993

[52] UKAS M3003 The expression of uncertainty and confidence in measurement, Ed.2, 2007

[53] J. Glimm, K. Münter, R. Pape, T. Schrader, and M. Spitzer, "The new national standard of EM field strength; realisation and dissemination", 12th Int. symposium on EMC, February 18-20, 1997, Zurich, Switzerland, ISBN 3-9521199-1-1, Page 611-613

[54] H. Garn, M. Buchmayr, and W. Mullner, "Precise calibration of electric field sensors for radiated susceptibility testing", Frequenz 53 (1999) 9-10, Page 190-194.

[55] J. Labus, "Rechnerische Ermittlung der Impedanz von Antennen. (Mathematical calculation of the impedance of antennas) Hochfrequenz und Elektroakustik, vol. 41, pp.17-23; January, 1933

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电 磁 兼 容 试 验 和 测 量 技 术
横 电 磁 波 (TEM)

波 导 中 的 发 射 和 抗 扰 度 试 验

GB/T 17626.20—2014/IEC 61000-4-20:2010

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

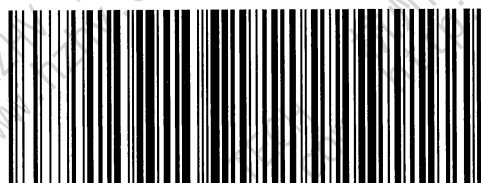
*

开本 880×1230 1/16 印张 4 字数 110 千字
2015年3月第一版 2015年3月第一次印刷

*

书号: 155066·1-51063 定价 54.00 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)68510107



GB/T 17626.20-2014