

中华人民共和国国家标准

GB/T 17626.21—2014/IEC 61000-4-21:2011

电磁兼容 试验和测量技术 混波室试验方法

Electromagnetic compatibility—Testing and measurement
techniques—Reverberation chamber test methods

(IEC 61000-4-21: 2011, IDT)

杭州高电
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	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 试验环境及其局限性	5
6 应用	6
6.1 辐射抗扰度试验	6
6.2 辐射发射试验	6
6.3 屏蔽效能试验	6
7 试验设备	6
8 混波室确认	7
9 试验	8
10 试验结果、试验报告及试验条件	8
附录 A (资料性附录) 混波室概述	9
附录 B (规范性附录) 调谐模式混波室确认	28
附录 C (规范性附录) 搅拌模式混波室的确认和试验	35
附录 D (规范性附录) 辐射抗扰度试验	40
附录 E (规范性附录) 辐射发射测量	44
附录 F (资料性附录) 电缆组件、电缆、连接器、波导和无源微波元件的屏蔽效能测量	49
附录 G (资料性附录) 衬垫和材料的屏蔽效能测量	52
附录 H (资料性附录) 箱体的屏蔽效能测量	60
附录 I (资料性附录) 天线效率测量	65
附录 J (资料性附录) 用场各向异性和场不均匀性系数直接评价混波室性能	67
附录 K (资料性附录) 混波室确认的 MU——辐射发射和抗扰度试验	74
参考文献	80
图 A.1 200 个独立调谐步时典型的场均匀性	20
图 A.2 10.8 m×5.2 m×3.9 m 小室的理论模式结构	20
图 A.3 小 Q 值带宽(高 Q 值)的理论模式结构叠加在 60 th 模式上	21
图 A.4 大 Q 值带宽(低 Q 值)的理论模式结构叠加在 60 th 模式上	21

图 A.5	典型混波室	22
图 A.6	95%置信度所需的理论采样数	22
图 A.7	一个样本固定位置测量的电场分量的归一化 PDF	23
图 A.8	N 个独立样本固定位置测量的电场分量的平均值的归一化 PDF	23
图 A.9	N 个独立样本固定位置测量的电场分量的最大值的归一化 PDF	24
图 A.10	混波室工作空间	24
图 A.11	典型探头数据	25
图 A.12	8 个探头的 x 分量均值归一化数据	25
图 A.13	8 个探头的电场分量的标准差	26
图 A.14	加载效应试验吸波材料的分布	26
图 A.15	加载效应试验的加载量	27
图 A.16	加载混波室中 8 个探头电场分量的标准差	27
图 B.1	混波室确认中探头的位置	34
图 C.1	500 MHz 时,接收功率(dBm)与搅拌器转动(s)的关系	39
图 C.2	1 000 MHz 时,接收功率(dBm)与搅拌器转动(s)的关系	39
图 D.1	典型的试验设施示例	43
图 E.1	合适的试验设施示例	48
图 E.2	关于辐射发射的几何因子计算	48
图 F.1	典型的试验布置	51
图 G.1	典型试验布置	58
图 G.2	衬垫和/或材料试验典型试验装置安装	59
图 G.3	确认时的试验装置配置	59
图 H.1	落地式箱体试验的典型试验箱体安装	64
图 H.2	台式箱体试验的典型试验箱体安装	64
图 J.1	搅拌良好的混波室中场各向异性系数的理论与典型测量分布	72
图 J.2	搅拌不好的混波室中场各向异性系数的理论与典型测量分布	72
图 J.3	搅拌良好混波室中场各向异性系数典型测量值与 N 的关系	73
图 K.1	典型无意辐射体平均辐射功率与频率的关系	78
图 K.2	估计的标准不确定	78
图 K.3	基于均值归一化的 $\eta\%$ 置信区间宽度[单位为分贝(dB)]	79
图 K.4	最大电场的各基于均值归一化的区间范围(线性单位)与独立搅拌器位置 N 的关系	79
表 B.1	采样数要求	33
表 B.2	场均匀性限值要求	33
表 J.1	“中等”和“良好”的混波室的总场各向异性系数的典型值	71

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 17626.21—2014	电磁兼容	试验和测量技术	混波室试验方法
——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 21 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 61000-4-21: 2011(第 2 版)《电磁兼容(EMC) 第 21 部分: 试验和测量技术-混波室试验方法》。

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 2421.1—2008 电工电子产品环境试验 概述和指南(IEC 60068-1: 1998, IDT)
- GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容[IEC 60050(161): 1990, IDT]

GB/T 17626.21—2014/IEC 61000-4-21:2011

- GB/T 6113.101—2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备规范 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 6113.203—2008 无线电骚扰和抗扰度测量设备规范 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/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(IEC 61000-4-3:2002,IDT)

本部分做了如下编辑性修改:

- 去除了原标准中的IEC、IEEE、IEV、ISO等缩略语定义;
- 根据标准上下文,附录K中式(K.5)上一行的“(2)和(3)”修改为式“(K.3)和式(K.4)”;附录K中式(K.9)上一行的“(7)”修改为式“(K.7)”;
- IEC 61000-4-21:2003中“calibration”在IEC 61000-4-21:2011中修改为“validation”,但有部分未作修改。在本部分中,根据原标准的上下文关系,将部分“calibration”修改为“validation”,译为“确认”,如C.1.2中注2第2行、C.1.2中注3第1行等;
- 根据公式推导,附录K.2中“ N 和 $N-1$ 分别用 $N \times M$ 和 $(N - (-1)) \times (M - (-1))$ 代替”修改为“ N 和 $N-1$ 分别用 $N \times M$ 和 $(N-1) \times (M-1)$ 代替”。

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:周香、周忠元、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 混波室试验方法

1 范围

GB/T 17626 的本部分考虑在混波室中的电气和/或电子设备的抗扰度试验、有意或无意辐射发射试验和屏蔽效能试验。本部分建立了实施这些试验所需的试验程序。本部分仅考虑辐射现象。

本部分的目的是建立一个使用混波室评估电气和/或电子设备在射频电磁场中的性能和确定电气电子设备的辐射发射等级的通用规范。

注：本部分规定了电磁辐射对设备影响和所关心设备电磁辐射发射的试验方法。电磁辐射的仿真和测量不足以定量确定电磁辐射对设备的影响。规定试验方法的主要目的是使试验结果具有充分的可再现性和可重复性以及

对电磁效应进行定性分析。

本部分的目的是不是规定适用于特定设备或系统的试验方法，而是为所有相关的产品委员会提供通用的参考基准。产品委员会应咨询全国无线电干扰标准化技术委员会或全国电磁兼容标准化技术委员会选择辐射发射限值和试验方法。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，也可以采用诸如 IEC 61000-4-3、CISPR 16-2-3 和 CISPR 16-2-4 等标准中的其他方法¹⁾。

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): 1990 国际电工词汇 第 161 章：电磁兼容性(International electrotechnical vocabulary—Chapter 161: electromagnetic compatibility)

IEC 60050(161): 1990 修正案 1 (1997)

IEC 60050(161): 1990 修正案 2 (1998)

IEC 60068-1 环境试验 第 1 部分：总则和指南(Environmental testing. Part 1: General and guidance)

IEC 61000-4-3: 2006 电磁兼容 第 4-3 部分：试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验 [Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-3: Testing and measurement techniques—Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test]

IEC 61000-4-3: 2006 修正案 1 (2007)

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 16-2-3 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

1) 需了解进一步信息可向全国无线电干扰标准化技术委员会或全国电磁兼容标准化技术委员会咨询。

measurements)

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

IEC 60050(161):1990 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

天线 antenna

能够有效地向空间辐射或从空间接收无线电波的装置,它为发射机或接收机与传播无线电波的媒质之间提供所需要的耦合。

[IEC 60050-712:1992,712-01-01]

注:为应用于本程序,假定天线的效率大于或等于 75%。

3.1.2

电磁波 electromagnetic wave (EM wave)

由时变电磁场的传播表征的波,它是由电荷的加速运动产生的。

[IEC 60050-705:1995,705-01-09,修改采用]

3.1.3

远场区 far field region

天线或无意辐射体的电磁场区域,其中体现能量传播的电磁场分量占支配地位,并且电磁场的角分布基本上与天线的距离无关。

注 1:在远场区,电磁场分量的幅度与天线的距离成反比。

注 2:如边射天线的最大尺寸 D 大于波长 λ ,则通常取在最大辐射方向上离天线的距离大于 $2D^2/\lambda$ 处为远场区。

[IEC 60050-712:1992,712-02-02]

离源或孔径远的区域,该区域辐射(方向)图不随离源的距离变化而变化。

[IEC 60050-731:1991,731-03-92]

3.1.4

场强 field strength

在规定的特征频率上和规定的装备和调制情况下工作的无线电发射系统在一给定点产生的电磁场值。

[IEC 60050-705:1995,705-08-31]

注 1:根据测量的是电场幅值还是磁场幅值,分别采用术语“电场强度”(单位 V/m)或“磁场强度”(单位 A/m)。在近场区,电场和磁场强度与距离的关系取决于相关的特定配置。近场区中场的功率通量密度与场强一样难以确定。

注 2:在远场区,有时认为场强与功率通量密度 P 相对应。对自由空间的平面波, $P = E^2 / \eta_v$, 式中:

E —— 电场强度;

η_v —— 自由空间的波阻抗,近似为 $120 \pi \Omega$ 。

3.1.5

极化 polarization

空间一固定点由电场强度矢量或任何规定的场矢量的方向所确定的正弦电磁波或场矢量的特性;当此方向随时间变化时,该特性可以由所考虑的场矢量端点描绘的轨迹来表征。

[IEC 60050-726:1982,726-04-01]

3.1.6

混波室 reverberation chamber

专门设计的具有相当长混波时间的小室。

[IEC 60050-723:1997,723-03-30]

专门设计成具有较长混波时间,以便让场尽量扩散的(混波室)小室。

注1:该小室一般由安装有机电调谐器/搅拌器的屏蔽室构成,调谐器/搅拌器改变屏蔽室内电磁场的边界条件,进而改变电磁场分布。

[IEC 60050-801:1994,801-31-13]

注2:混波室尤其适用于测量材料的吸波系数及有意和无意辐射源的辐射功率。

注3:机械调谐器/搅拌器“搅拌”混波室中的“模式”,在混波室中的试验可描述为一个随机过程。因此,这样的小室也可称为搅拌模式小室、模式搅拌小室或者模式调谐小室。

3.1.7

(混波室的)品质因数 **quality factor**

Q

(品质因数)对于谐振频率下的谐振电路,最大储存能量与一周期内消耗能量之比的 2π 倍。

[IEC 60050-151:2001,151-15-46]

衡量混波室储能的能力(见附录A的参考文献[2]²⁾)。

注:对于一个给定的混波室, Q 值是频率的函数,按式(1)计算:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{Input}} \right\rangle_n \dots\dots\dots (1)$$

式中:

V ——混波室的体积,单位为立方米(m^3);

λ ——波长,单位为米(m);

P_{AveRec}/P_{Input} ——接收功率与输入功率的比值,其为在整个调谐器/搅拌器序列上的平均值;

$\langle \rangle_n$ ——关于天线位置和方位数 n 平均;

η_{Tx} ——发射天线(T_x)的天线效率(无量纲)。如果厂家未给出相关数据,则对数周期天线的效率可取 0.75,喇叭天线的效率可取 0.9;

η_{Rx} ——接收天线(R_x)的天线效率(无量纲)。如果厂家未给出相关数据,则对数周期天线的效率可取 0.75,喇叭天线的效率可取 0.9;

n ——求 Q 值的天线位置和方位数。所需的最少位置数仅为一个;然而,可在多个位置和方位计算,然后求平均。

3.1.8

(混波室的) Q 值带宽 **Q -bandwidth**

BW_Q

度量混波室内相关的模式的频率范围(见A.2)。

注:混波室的 BW_Q 可由式(2)计算:

$$BW_Q = f/Q \dots\dots\dots (2)$$

式中:

f ——频率,单位为赫兹(Hz);

Q ——3.1.7中定义的品质因数。

3.1.9

故障 malfunction

启动或保持某一要求功能的设备丧失能力,或发生了不希望有的可能导致有害后果的误动作。

注:必须明确规定功能验收准则。

[IEC 60050-393:2003,393-17-79]

2) 方括号内的数字表示各附录中的参考文献。

3.1.10

发射 emission

能量以波或粒子形式从一个源发出的现象。

[IEC 60050-702:1992,702-02-03]

3.1.11

调谐器/搅拌器 tuner/stirrer

用低损耗导电材料制作的机械装置,它能够改变混波室内的电磁场边界条件。

注:一般来说,混波室就是一个屏蔽室,其最小尺寸大于其LUF所对应的波长。混波室通常装有一个机械调谐器/搅拌器,搅拌器占混波室一定比例,调谐器/搅拌器尺寸至少接近LUF对应的波长。当用射频信号激励混波室时,通过调谐器/搅拌器能改变混波室中的合成多模电磁环境。当在足够多的机械调谐器/搅拌器位置上平均时,合成电磁环境是统计上均匀、各向同性的(即能量来自具有所有极化方向的所有方向)。

3.1.12

电磁模式 electromagnetic mode

麦克斯韦方程组的一个解,表示某一给定空间区域的电磁场并属于由特定边界条件确定的独立解族。

[IEC 60050-705:1995,705-01-12]

3.1.13

确认 validation

证明被定型的仪表、控制系统(硬件和软件)和试验设备完全符合其功能、性能和接口要求的过程。

[IEC 60050-394:2007,394-40-42]

3.1.14

混波室确认 chamber validation

证明混波室完全符合其功能、性能和接口要求的过程。

[IEC 60050-394:2007,394-40-42]

3.1.15

固有场不确定度 intrinsic field uncertainty; IFU

混波室内场的随机(统计)特性对合成不确定度预评估的贡献。

注:典型地,在混波室的典型工作状态,IFU远大于测量仪器的不确定度,除非小室的品质因数异常高。因此,通常IFU是试验或测量中计算合成不确定度的唯一或主要考虑因素。

3.1.16

工作空间 working volume

由混波室内距壁面足够远(以避免边缘效应)的8个点界定的区域;对于矩形混波室,通常由距最近的壁面四分之一波长的立方体或平行六面体的8个顶角所界定。

注:频率低于100 MHz时,距离可限制为0.75 m。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AVF 天线确认系数(Antenna Validation Factor)

CVF 混波室确认系数(Chamber Validation Factor)

CDF 累积分布函数(Cumulative Distribution Function)

CLF 混波室加载系数(Chamber Loading Factor)

CW 连续波(Continuous Wave)

EM 电磁(Electromagnetic)

EMC 电磁兼容(Electromagnetic Compatibility)
 EMI 电磁干扰(Electromagnetic Interference)
 EUT 受试设备(Equipment Under Test)
 IF 镜像频率(Image Frequency)
 IFU 固有场不确定度(Intrinsic Field Uncertainty)
 IL 插入损耗(Insertion Loss)
 LUF 最低可用频率(Lowest Usable Frequency)
 MIU 测量仪器不确定度(Measurement Instrumentation Uncertainty)
 MU 测量不确定度(Measurement Uncertainty)
 OATS 开阔试验场(Open Area Test Site)
 PDF 概率密度函数(Probability Density Function)
 RC 混波室(Reverberation Chamber)
 RE 辐射发射(Radiated Emissions)
 RF 射频(Radio Frequency)
 RMS 均方根(Root Mean Square)
 RSS 方和根(Root Sum of the Squares)
 R_x 接收(天线)[Receive(antenna)]
 SE 屏蔽效能(Shielding Effectiveness)
 SW 方波调制(Square Wave modulation)
 TFVF 试验装置确认系数(Test Fixture Validation Factor)
 T_x 发射(天线)[Transmit(antenna)]

4 概述

电磁辐射可以某种方式影响大部分电子设备。辐射源可以是自然的或人为的,可以有意的或无意的。有意辐射包括无线和个人通讯系统等。无意辐射包括焊接机、硅可控整流器、高速数据线、荧光灯和感性负载的切换开关等。

实际的电磁波传播环境常用多次反射和多径效应描述。混波室在某种程度上用极端的方式(最恶劣效应)模拟这一复杂环境,从这方面讲混波室比其他 EMC 试验方法更能代表复杂环境。混波室的优点之一是能通过调谐器/搅拌器的作用产生统计上各向同性、均匀、无极化和不相关的内部场。

采用混波室形成高场强方便、安全。这种小室的高品质因数或“Q”值使得相对不大的输入功率就可产生高场强(谐振场),由于不使用吸波材料,减少了吸波材料着火的风险,使得产生的高场强更加安全。混波室的高屏蔽性将高强场限制在混波室内部。

5 试验环境及其局限性

混波室法适用于从相对低场强到极高场强的试验。因为与周围的环境隔离程度高,所以进行针对大部分商业需求的辐射发射和抗扰度试验是没有限制的。目前,国家标准中将辐射和传导抗扰度的分界频率设定为 80 MHz。

注: IEC 61000-4-6 也定义了电气和电子设备传导抗扰度试验方法,其覆盖 80 MHz 以下的频率。

如附录 A 中所述,试验的频率范围是由混波室的尺寸、结构以及机械调谐器改变空间场模式的效率决定的。对于混波室的形状和大小理论上没有限制,然而,在给定工作频率获得好的混波性能有最小尺寸的要求。房间大小的混波室(例如,体积在 75 m³~100 m³ 之间)工作频率为 200 MHz~18 GHz。

工作频率低于 200 MHz 的混波室比一般的屏蔽室大。

6 应用

6.1 辐射抗扰度试验

使用混波室进行辐射抗扰度试验见附录 D。附录 D 包括了试验布置、混波室确认和试验程序。将预设的射频信号注入到混波室,在其内部产生所需的场强。注入射频信号的电平由附录 B 和附录 C 中描述的混波室确认数据导出。

6.2 辐射发射试验

使用混波室进行辐射发射试验见附录 E。附录 E 给出了在测量带宽内 EUT 辐射的射频功率的测量方法。和抗扰度试验一样,使用附录 B 和附录 C 中的确认数据来确定辐射发射电平。

6.3 屏蔽效能试验

本部分中有 3 个附录与屏蔽效能测量有关。电缆组件、电缆、连接器、波导和无源微波元件的屏蔽效能测量见附录 F。附录 G 涉及衬垫和材料的屏蔽效能测量。附录 G 使用“嵌套混波室”法(即一个混波室置于一个大混波室内)。附录 G 还给出了衬垫和材料的屏蔽效能试验所需的试验装置的确认程序。试验装置设计/结构的微小差别会对试验结果有很大影响。为了得到可重复的试验结果,应控制试验装置的材料、螺栓间距、表面处理、扭矩设置等。用于评估不同衬垫和材料的试验装置的差异较大。附录 G 不包括详细的试验装置设计指导。附录 H 的内容是箱体的屏蔽效能测量。与附录 G 一样,附录 H 也采用“嵌套混波室”法。

7 试验设备

推荐使用以下试验设备:

- 混波室:有足够大的尺寸,以在最低试验频率维持其内部的多模电磁环境。这意味着混波室各方向的尺寸与波长相比应是电大的;
- 机械调谐器/搅拌器(见附录 A):某一维的尺寸至少为最低频率对应波长的 $1/4$ 。每个调谐器/搅拌器的该维尺寸相对于混波室的该维尺寸都应尽量大,且应至少为混波室最小尺寸的 $3/4$ 。此外,每个调谐器/搅拌器应设计为不对称结构,即使得在调谐器/搅拌器转动一圈过程中其场强分布不重复;
- 场激励天线(见附录 B):满足频率和功率要求的对数周期天线或者其他匹配良好的天线,要避免直接照射试验区域;
- 场强参考天线(见附录 B):满足频率要求的对数周期天线或者其他匹配良好的线极化天线系统;
- 各向同性场强监测探头(见附录 B):能够监测 3 个正交方向的场强。所有探头电路和光电组件应对试验场强有足够的抗扰度,其通过光纤与混波室外部监测仪器相连。也可以使用性能足够好的滤波线;

注 1:混波室要求场强探头能够分别测量 3 个正交方向的场强。如果使用一个小的单轴天线,则应变换天线位置以分别测量不同方向的场强分量。

- 场强监测天线:即(校准过的)小偶极子天线(即小于 0.1λ),假定在每个试验位置将其放置在不共面的 3 个方位(优先考虑相互正交的方位)上,则可以用来替代场强探头。应注意保持天线与其馈线的平衡;

- EMI 滤波器:应注意确保滤波器未对连接电缆引入任何额外的谐振效应;
- 射频信号发生器:能够产生覆盖所需的频率范围的信号。如果用于抗扰度试验,可以用 1kHz 的正弦波进行 80% 的调幅。射频信号发生器应具有自动扫频能力,或者对于射频合成信号源,应能对频率步长和驻留时间进行编程控制。这些信号发生器也能手动操作;

注 2: 产品委员会可以选择替代的调制方案。

可能需要使用低通和带通滤波器,以避免谐波对监测信号的接收设备产生影响;

- 功率放大器:放大信号(调制的和非调制的)并提供功率给天线以产生需要的场强。功率放大器产生的谐波和失真应至少比载波电平低 15 dB;

警告:混波室试验中存在强反射,需要对功率放大器进行阻抗不匹配保护。

- 辅助设备:记录确定辐射限值或场强所需的功率电平,控制试验电平。可使用定向耦合器监视前向功率。

注 3: 相关产品委员会应确定所用接收机的类型及参数(如全国无线电干扰标准化技术委员会规定的 EMI 接收机)。

应注意确保辅助设备有足够的抗扰度。

8 混波室确认

混波室新建成或重大改造后,按本部分的附录 B 中场均匀性确认方法进行混波室的性能确认。该确认方法能用于确定所用混波室的 LUF。在混波室的试验/工作空间进行场均匀性确认,该区域包括混波室内试验台和 EUT 所处的位置。附录 B 仅给出了调谐模式(搅拌器步进转动)的混波室确认,而搅拌模式(搅拌器连续转动)的混波室确认另见附录 C。应在所有的辅助设备(包括试验台)都移出混波室的情况下,进行场均匀性测量。确认在距离足够远的 8 个位置上进行,每个位置在 3 个相互正交的方向(x, y, z)进行测量,即每个频点共有 24 个测量值(B.1.2)。当频率高于 400 MHz 时,场的标准差在 3 dB 以内;当频率在 100 MHz~400 MHz 之间时,标准差由 100 MHz 的 4 dB 线性递减为 400 MHz 的 3 dB;当频率低于 100 MHz 时,标准差在 4 dB 以内,则认为混波室内的场是均匀的。

确认要求 EUT 试验时使用线性/无源场监测天线。这些监测天线都使用三维场强探头校准过(在暗室校准过的监测天线,例如,按 IEC 61000-4-3:2006 中的附录 I 进行的校准,对混波室确认才有效)。其目的是为了允许在试验中用天线和快速响应的相关监测设备对场进行连续监测。

注 1: 混波室中所使用场探头的线性响应的动态范围应远大于用于其他试验设施中使用的场探头。这是由于内部场的谐振特性导致工作空间内任意点的场强随搅拌器的转动变化很大,典型值达 30 dB 或更高。

注 2: 在相对于平均电场强度的(-6 dB, +10 dB)范围内,用于混波室确认的探头线性度应在理想线性响应的 ± 0.5 dB 以内。区间不对称是为了与混波室内场强的 PDF 不对称相对应,其偏向较高场强部分。对于抗扰度试验中的场监测,应相对于最大场强的平均值应用这一范围。

警告:使用电场探头时需特别注意的是探头的附属控制电子器件(表头部分)对混波室内局部场强的敏感性。局部高场强可能引起故障或探头测量不准确。这需要在混波室确认和/或试验中将探头的整个表头(不仅是传感器单元)暴露在期望的最大场强中进行探头校准。

此外,检查混波室加载对场均匀性的影响(B.1.6),确定今后试验中混波室允许的最大加载量。

将试验台和 EUT 放置在混波室内进行试验前要进行以下操作:

- 将待测设备和试验台放置在混波室内,对混波室性能进行“快速检查”(B.2)。检查的目的是确定混波室的加载量小于混波室初始确认的加载量。
- 用基于确认测量值的计算确定在给定的混波室中进行脉冲调制试验所接受的最小脉冲宽度(B.3)。

注 3: B.1 中详述的混波室确认仅在混波室新建成或重大变更后才需进行。混波室的最大加载量(A.5.4、B.1.5)确认也只有在混波室新建成或重大变更后才需进行。如果更改调谐器/搅拌器导致 A.3 所述的调谐器效率降

低,则认为更改搅拌器是混波室的一个重大变更。

9 试验

试验布置和程序取决于试验的类型。对于一个具体的试验,参见与所进行试验类型有关的附录确定试验要求。

参见与拟采用试验方案(即调谐模式或搅拌模式)相关的附录。调谐模式和搅拌模式的适用性指南参见附录 A 和附录 C。

10 试验结果、试验报告及试验条件

试验应按试验计划进行,且试验计划应包括在试验报告中。

试验结果和报告要求取决于所进行的试验类型。参见有关试验类型的附录确定试验报告中需包括的内容。

除非试验计划中另有说明,试验应在 IEC 60068-1 的标准气候条件下进行。

注:高场强的产生可能会引起显著的局部加热效应,或在极端情况下发生电弧放电。

附录 A

(资料性附录)

混波室概述

A.1 序言

A.1.1 概述

关于混波室的研究,已有 50 多年的历史[1-5]³⁾(见[6-8]综述),提供了对操作和分析方法较好的理解[8-11]。虽然混波室研究最初关注的是材料电磁吸波性能的测量[1-3],但是后来混波室的应用逐渐扩大到辐射发射试验[4,30]、电子设备的敏感度试验[5,30]、抗扰度试验以及电缆、连接器和机箱的屏蔽效能[31]试验。混波室也可用于某些天线和传播参数的特性描述。

A.1.2 混波室大小、形状、结构和操作

混波室是一个电大、高导电率的腔或小室,配有改变(搅拌)模式的机械装置,可用于电子设备的电磁(包括辐射发射和抗扰度)测量。任何具有这种性质的小室都可被看作混波室(也称为模式搅拌室,或模式调谐/模式搅拌混波室,或搅拌模式室),但是,能在可接受的低不确定度内使用这种设施还需满足其他条件。

一般来说,任何一个混波室是一个最小几何尺寸相对于 LUF(见 A.1.3)波长是电大的屏蔽室。混波室应足够大,以容纳 EUT、搅拌器和测量天线。混波室内一般装有一个机械调谐器/搅拌器,调谐器/搅拌器的尺寸占混波室尺寸和 LUF 对应的波长一定比例。当用射频信号激励混波室时,调谐器/搅拌器能“搅拌”混波室中的合成多模电磁环境。当在足够多的调谐器/搅拌器位置上平均时,合成电磁环境是统计上均匀、各向同性(即能量来于所有方向)和统计随机极化的(即,极化可能是各个方向)。“足够多”是指得到给定的场均匀性所需的调谐器步进数。

规定混波室的最小尺寸是不现实的,提供混波室的详细设计指导也不在本部分范围内。关键的是如果混波室满足确认程序(见 B.1.2),则表明其能在所需的统计置信度水平下提供所需的电磁环境。

一般情况下,所有功率测量都是相对于天线终端的。因此混波室的输入功率(P_{Input})是天线终端的前向功率。某些情况下应考虑天线/感应激励失配引起的反射功率。在这种情况下,输入功率应是净输入功率,其等于(线性单位,即 W):

$$P_{\text{Net}} = P_{\text{Forward}} - P_{\text{Reflected}} \dots\dots\dots (A.1)$$

A.1.3 LUF

混波室的大小、形状、品质因数以及调谐器/搅拌器的效率决定了 LUF。LUF 一般是混波室满足工作要求的最低频率。实际中,按本部分的要求,LUF 为稍高于混波室的第一谐振频率的 3 倍的频率。本部分中,LUF 是由顶角位置的 8 个点界定的混波室的工作空间能够满足规定的场均匀性的最低频率。

A.1.4 混波室品质因数(Q 值)

通常用 Q 值来表征小室或腔相对于耗能的储能能力,混波室的储能能力是由频率、体积(至少是大

3) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

小和形状)和混波室中的电磁损耗决定的。空小室(即没有 EUT)的主要损耗来自小室壁和天线。其他的损耗来自无意的孔缝泄漏或对混波室的加载。小室壁材料的导电率越高,孔缝越小,小室的损耗越小。银板、铜板和铝板等材料导电率最高,其欧姆损耗最小。其他材料如裸钢板、涂漆钢板或镀锌钢板也经常使用。对小型的微波腔,如果需相当高的 Q 值,可考虑用低温超导材料。

然而,由于铜和铝网及火焰熔射涂层表面积大,导致其不能提供高 Q 值环境。其他的损耗,如天线、支撑装置、EUT 也会影响小室的整体 Q 值。

天线的欧姆损耗对 Q 值的影响通常非常小,可忽略不计(见附录 I)。在混波室内产生一定的场所需要的功率可通过附录 B 的空混波室确认程序来确定。然而,由于 EUT、必需的支撑装置及存在的任何吸波材料都可能对混波室加载,导致 Q 值下降,因而引起同样输入功率下试验场强减小。因此,应监测加载混波室中的场,必要时,应增加输入功率以补偿 B.2(7)中描述的加载效应。

A.1.5 调谐器/搅拌器考虑因素

除用机械调谐器/搅拌器外,还可用其他的方法获得统计均匀和统计各向同性的环境,如可变壁面或移动边界、移动发射或接收天线或 EUT、在一定带宽内改变频率[单音频率变化(扫描)或限定带宽内的白噪声源],或综合应用这些方法。这些方法均可提供有效试验,本部分假定混波室至少配置一个转动的调谐器/搅拌器。有些机械搅拌的替代方法不能用于某些 EMC 试验,如频率搅拌不能用于辐射发射试验。对于给定的混波室,综合应用不同的搅拌方法(称之为复合搅拌)有助于获得更低的不确定度,或在一定不确定度下,可用更小的混波室。

调谐器/搅拌器应能提供理想均匀场。搅拌器应避免对称结构和对称放置,以最大化可产生的最大独立位置数。A.3 中给出了评价调谐器/搅拌器性能的方法。

有些混波室,可能需用多个调谐器/搅拌器,以在所需的频率获得理想的场均匀性。

驱动装置推荐使用电脑控制的步进电机或有编码器的伺服电机,也可用皮带传动的速度可变的连续运行电机,但用这一方法的前提是 EUT 的响应速度相对于调谐器/搅拌器速度应足够快,且这种方法桨轮位置定位的准确性和重复性可能较低。在使用混波室时,应检查电机的 EMI。

以前,在所有关心的频率点,用固定采样数或调谐器的步进数(典型为 200)进行试验[5],这导致场的不准确度(即统计不均匀性)是频率的函数,因为随频率增加模式密度增加(见 A.2)。如图 A.1 所示,典型混波室的不准确度随频率显著变化。

本部分的程序优化步进数或采样数,以获得一个随频率变化的指定的不确定度(即场均匀性标准差,在此用测量的最大场描述)。这允许采样数随频率的增加而减小。程序提供了一个准确、经济的混波室确认方法。它允许调整调谐器步进数以获得理想的电平不确定度,也可通过尽可能增加步进数最大化产生更高场强的能力。

A.1.6 混波室确认的一般说明

确认程序对试验区域内产生的时间(总体)平均场[9,10,16]提出了严格的要求,要求在给定不确定度范围内均匀。为确保满足要求,8 个位置的每个位置上都需在 3 个正交的方向上进行测量,每个测量都是独立的,因此,每个频率共 24 个测量数据。通过确认程序的混波室表明其能够在可接受不确定度内产生所需的均匀场。

A.1.7 电缆布局

一般来说,由于是统计均匀场,对于连接到 EUT 的电缆,试验结果对其布局不敏感。必要时,相关附录提供关于电缆布局的详细指导。

A.2 腔体理论

A.2.1 腔体模式、模式密度和 Q 值带宽

腔体模式(也称为本征模或固有模式),如 3.1.12 的定义,是由驻波产生的特殊场分布。腔体中的模式由边界条件(腔体和模式搅拌器的形状和大小)决定。对于一个理想、无耗、长 L 、宽 W 、高 H 的空封闭矩形腔,其模式或谐振频率 $F_{l,m,n}$ 可用式(A.2)表示(单位为 MHz):

$$F_{l,m,n} = 150[(L/\lambda)^2 + (m/W)^2 + (n/H)^2]^{0.5} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

l, m, n ——模式数(至少两个非零);

L, W, H ——混波室的长、宽、高,单位为米(m)。

图 A.2 表示了大小为 $10.8 \text{ m} \times 5.2 \text{ m} \times 3.9 \text{ m}$ ($L \times W \times H$) 的矩形小室的理论模式分布与频率的关系。每种模式代表了唯一的空间场的变化(模式结构),其是小室内空间位置的函数。该小室的第一谐振频率($F_{1,1,0}$)为 32.096 MHz。任何损耗会稍稍降低谐振频率。每一模式有其自己的模式 Q 值, $Q_{l,m,n}$ 。模式 Q 值近似按频率的平均根增加。过模腔的“等效” Q 值可定义为所有激励模式的加权平均值[28]。腔体的品质因数带宽, BW_Q , 定义为二次谐振特性曲线 3 dB 点的 $F_{l,m,n}/Q$ 。图 A.3 给出了 $F_{4,2,2}$ (第 60 个模式)的典型 BW_Q 。在这种模式情况下,当腔体由频率为 $F_{4,2,2}$ 的 CW 源激励时,能激发的模式只有几个。

图 A.4 表明了小室 Q 值减小的影响(见 A.1.4 和 A.5.8)。在这种情况下,当腔体工作在第 60 模式的谐振频率时,由于低 Q 值和频率间隔较小导致模式重叠,会激发其他的模式。实际的模式结构是不同幅度的受激发的模式的矢量和,其空间场的变化不同于高 Q 值腔中的场。因此,改变 Q 值,能改变“实际”的模式结构。注意如果频率升高,在给定的 BW_Q 内模式会更多,产生更好的场结构。同样,其实际的模式结构为所有模式的矢量和。

图 A.3 和图 A.4 表明,在频率较低时,小室的模式数稀少且其频率间隔大小不一(谱线不均匀),同时可看出随频率增加,平均来说模式数和模式密度分别按与 f^3 和 f^2 成比例增加。实际模式结构和调谐器改变小室边界的能力共同决定了小室的性能。

注:混波室可以是任意几何形状的。然而,球形和圆柱形等形状一般不用于混波室;因为曲面产生的聚焦(射线聚焦)使得难以获得空间均匀的场,除非小室内装有相对于波长足够大的散射体[12,13]或避免焦点区域。

实际模式结构取决于所关心频率点的模式密度和品质因数带宽。频率为 f 时模式密度为 $m = 8\pi V f^2 / c^3$ 。对于频率的一次项, m 的值与腔体的形状无关[11]。然而,在较低频率,决定于表面曲率及边界和接缝长度的二次校正可能会变得重要[12]。在 BW_Q 内激发的模式数 M 可用式(A.3)估算:

$$M = m \times BW_Q = \frac{8\pi V f^3}{c^3 Q} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

f ——频率,单位为赫兹(Hz);

c ——自由空间的光速,约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$;

V ——腔体的体积,单位为立方米(m^3);

Q ——频率 f 的品质因数,无量纲。

更一般地,对于一个宽带非 CW 波(如脉冲)激励信号,在接收机带宽 Δf 内的模式数可用 $m \Delta f$ 估计,其中 $\Delta f \geq BW_Q$ 。

A.2.2 理想与非理想混波室性能——对场不确定度影响

当混波室内激发了足够多的模式时,理论上认为“过模”条件存在。在理想过模条件下且搅拌效率

足够好时,混波室中任意位置的功率分布服从卡方(χ^2)分布,场强服从瑞利(χ)分布[10,11,23]。这两种分布都相对其均值明显不对称(存在明显的右尾)。在模式密度较低(有限)时,即在较低频率,接收功率的分布不再服从 χ^2 分布,而是服从更加复杂的分布[14,15]。此外,接近导体边界的场分布与理想分布的统计特性也不同,该情况有立式设备或安装于壁面的设备[16-18];调谐器位置数 n (见A.3)相对较小,特别是 $n < 30$ 时的经验样本分布[27]也与理想分布不同。场分布的差异增加了所测场的不确定度和置信区间的宽度,也影响平均最大或最小场强及其置信区间。

A.3 调谐器效率评估

为了对获得的混波室试验数据进行统计计算,应知道独立的采样数。对于一个给定的频率,一个调谐器(或多个调谐器)应能够充分改变边界条件,以对混波室中场的模式产生统计意义的变化。一旦发生这种场结构的变化,任何新的调谐器位置的场的采样都可以认为与前一个调谐器位置的采样是统计独立的。应获得调谐器性能数据,以确定在试验频率所能提供的统计独立的采样数。调谐器转动一圈过程中,通过等间隔监测接收功率获得调谐器性能数据。可通过计算各调谐器位置所测数据之间的相关系数,来估算调谐器的性能[20]。典型的相关系数计算是将每个调谐器位置原数据列 x 与顺序移动一个样本的数据列 y 相乘,假定共有450个样本,计算如下:

$$\begin{aligned} & D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, \dots, D_{450} \\ & D_{450}, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, \dots, D_{449} \\ & D_{449}, D_{450}, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, \dots, D_{448} \\ & D_{448}, D_{449}, D_{450}, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, \dots, D_{447} \end{aligned}$$

可用式(A.4)计算相关系数 r :

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_i (x_i - u_x)(y_i - u_y)}{\sqrt{\left[\frac{\sum_i (x_i - u_x)^2}{n-1} \right] \left[\frac{\sum_i (y_i - u_y)^2}{n-1} \right]}} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$\uparrow$
 σ_x^2

$\uparrow$
 σ_y^2

式中 y_i 与 x_i 服从相同的分布,但每个调谐器步, y_i 都顺序移动一个样本, n 是调谐器转动一圈的总采样数。

注1:

- x_i 与 y_i 是接收功率值。如果用场强或同相或正交场值代替功率,则 r 值相似,但存在微小差异。
- u_x 与 u_y 是原接收功率对调谐器位置数的平均值。

由于 y 分量与 x 分量服从相同的分布,有:

$$u_y = u_x \text{ 和 } \sigma_x = \sigma_y$$

通过用电子制表软件自带的相关函数可算得原数据集和移动后数据集的相关系数 r 。按常规,本部分中,增加移动步数,当相关系数降至小于 $1/e \approx 0.37$ 时,认为数据是不相关的。在其他应用中,有时应用其他标准或门限值。由于相关系数的统计特性,仅当 n 为无穷大时这一门限值才有效。对于给定的有限值 n 和置信水平,限值必须降低[21]。例如,置信度为95%且 n 不小于100,相关系数的门限可用式(A.5)近似:

$$r \approx 0.37 \times \left(1 - \frac{7.22}{n^{0.64}} \right) \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

转动一整周的总采样数(如上面的 450)除以相关系数降到小于 0.37 所需的移动步数(即抽取),得特定频率调谐器能提供的独立采样数的估计值。

例:按上述程序计算下述情况混波室的独立采样数,在 80 MHz、100 MHz、500 MHz 频率点上,机械调谐器转动 360° ,等间隔取 450 个采样点。如果调谐器分别移动 25 步、15 步、5 步后,相关系数小于 $0.37 \times (1 - 7.22/450^{0.61}) = 0.32$,则调谐器在 80 MHz 能提供 18 个独立采样点、100 MHz 时 30 个、500 MHz 时 90 个。如 A.4 所述,所需的采样数可能超过一个调谐器所能提供的独立采样数。在这种情况下,将需要第二个调谐器,但这不一定是充分的。

注 2: 式(A.5)通过对数值进行曲线拟合获得[21]。

注 3: 上述程序隐含用等间隔的调谐器位置。在足够高的频率和一个调谐器时,其很有效。超过一个调谐器时,不能定义等间隔的调谐器位置。接近小室的 LUF 时,调谐器的对称位置可能变得相关。这种情况下,不能保证等间隔调谐器位置是不相关的,就需确定一组调谐器位置,其两两间的相关性小于上述限值。本程序也可用于多于一个调谐器的情况。程序的相关细节正在考虑中。对于低频时的非等间隔调谐器位置,实际的统计独立的位置可能取决于天线的位置和方向,在试验中,与 EUT 的大小和位置相关。

A.4 混波室的统计特性

A.4.1 场波动

以下讨论中,假定腔体的尺寸与激励波长(小室工作在过模条件下)相比是电大的且小室几何形状复杂。在不同的规则腔体中引入天线和有效的调谐器保证复杂性要求。

本部分的确认程序是基于复杂腔体中的场的统计特性的。混波室中的波动场可以通过适当的统计分布进行理论建模,这已得到实验验证,如[9,10,14,15 和 18]中(1)天线的接收功率,其与小室的标量功率密度和电场的平方(场强)相关;(2)最大接收功率或者是最大的电场的平方;(3)电场的直角分量;(4)电场直角分量的最大值。这 4 种分布各不相同但又相关。还可获得样本及独立样本的子集[27]的平均值、标准差和最大值的分布[19]。阻抗不匹配和其他测量相关问题会进一步影响场统计特性[19]。某些分布的一些具体特性将在下面讨论。

混波室的作用是产生具有可接受不确定度和置信水平的统计均匀(即统计上各向同性、均匀和极化均匀的)的试验环境。这是通过机械调谐器实现的,调谐器用于重新分布(散射)场能量。调谐器移动或转动时,改变混波室的边界条件。一旦调谐器移动了足够多的独立位置,由于调谐器转动带来的场变化提供包含多个传播方向和极化方向的一组场值。在调谐器旋转过程中,由于来自不同入射和极化方向的反射波(矢量)的相长或相消干扰电平变化,任意位置的局部场的波动大且无规律。混波室内所有点的场的大小和方向在限定的不确定度范围内平均上相同。术语“各向同性”和“均匀性”通常用来指混波室产生的环境,该术语有可能引起误解,因为环境中同一时刻来自各不同方向和极化的场和能量的大小并不相同,同一时刻所有位置的能量密度也不相等,因此是“统计的”。

此处的讨论范围为混波室工作空间。混波室的工作空间定义为距离混波室的壁、天线、调谐器或者其他物体最低工作频率 $\lambda/4$ 的区域。对于工作于 100 MHz 以上的混波室,取 0.75 m。典型的混波室配置如图 A.5 所示。

A.4.2 需要的独立采样数

给定腔内的场分布,可确定一定不确定度的场所需的采样数。图 A.6 给出了图中所示尺寸的特定腔体在置信度 95% 下获得不确定度为 6 dB 的场所需的独立采样数(边界条件改变次数或者机械调谐器的步进数)的理论预测值。图 A.6 表明在较低模式数 M [式(A.3)所定义的]时,随频率降低所需的采样数急剧增加。此时,场是欠模的,不再服从瑞利分布,而是服从一种更复杂的分布[15,27]。在所选工作频率,这种复杂的场分布由与可获得的最大独立调谐器位置数相关的其他参数决定,这些参数又与小

室的形状和尺寸相关。如果降低置信度水平,获得同样 MU 所需的采样数减少。实际上,机械调谐器不一定能提供在给定腔体内产生理想性能所需的独立采样数。为此,应该按照 A.3 的方法估算调谐器的性能,以确定在给定的频率点上给定的混波室所能提供的的采样数。

A.4.3 调谐器对平均场的影响

对理想的混波室,固定边界条件的场的体(空间)平均值和“总体”均值是相等的[9,10,16]。总体均值是在多种边界条件下的固定位置场的平均值。通常通过转动机械调谐器实现边界条件的改变,然而,混波室中物体外形的任何改变也会改变边界条件,例如,天线、试验设备、支撑装置等。

图 A.7 是理想混波室内某位置场对“真实”体积或总体均值(期望值)归一化的 PDF。如图中所示,混波室内固定边界条件任意位置或固定位置任意边界条件(调谐器位置)($N=1$)的场变化超过 30 dB。

图 A.8 表明,随着独立边界条件数(调谐器步进位置)的增加,混波室内任意给定位置的场的测量均值收敛于“真实的”总体均值,测量均值是多个样本的期望值。曲线的宽度表示了工作空间内任意位置 N 个样本的期望场值的统计离散度(不确定度区间)。平均场的不确定度按 $1/\sqrt{N}$ 减小。图 A.8 同样表明,采样数为 12 时,置信度为 95%、平均场的不确定度为 5 dB;采样数为 100 时,其不确定度为 2.4 dB,与之对应的试验时间增加了 8 倍,而平均场强的不确定度只下降了 2.6 dB。

A.4.4 调谐器对小室最大场强的影响

图 A.7 中 $N=1$ 的分布对平均场和最大场都有效,因为,调谐器在一固定位置时,测量的最大值、最小值和平均值是同一个值。混波室内任意位置的最大场的 PDF 如图 A.9 所示。随着 N 的增加,场强的分布向右移动,曲线变窄(不确定度改善)。最大场值的不确定度先随 N 增加而急剧减小,一定程度后,减小趋势放缓。

图 A.9 表明,置信度为 95%,采样数为 12 时,最大场的不确定度约为 7.2 dB;而采样数为 100 时,不确定度约为 4.8 dB。试验时间增加了 8 倍,而最大场强的不确定度只减少了 2.4 dB。一般来说,对均值归一化的最大值和最小值的不确定度区间的宽度减小的速度慢于 $1/\sqrt{N}$ [19]。此外,采样点数从 12 个增加到 100 个,最大场强的期望值也增加约 3 dB。

与平均场一样,将最大场的 PDF 用于任意位置,PDF 也可度量混波室工作空间内 N 个样本的最大场空间均匀性。利用场统计特性,允许由一个位置的平均场强测量值估计工作空间内任意其他位置的最大场强,但不允许预测调谐器在何位置获得此最大值,每个空间位置获得最大场强的调谐器位置是不同的。

A.5 混波室确认

A.5.1 概述

确认的目的在于证明,在给定的调谐器步进数下,在工作空间内所有位置产生的所有极化和来自所有方向场的幅度在规定的确定度区间内相等。为了满足这一要求,需用各向同性探头(允许读取探头的各个轴)进行确认,也可用校准过的电小偶极子天线代替(见 B.1)。在混波室投入使用时以及在重大改造后都应进行确认。

空腔的确认程序是基于比较电场探头测得的场的峰值和参考天线接收到的平均功率。为了提高准确性,在混波室工作空间内 8 个位置得到参考天线的平均值。尽管如此, N 值较小时,有限的位置数对不确定度的影响仍相当大。[19]中计算了小室的场(仅场的直角分量)均匀性不确定度的估计值。

确认推荐的采样数是基于尺寸约为 $3\text{ m} \times 7\text{ m} \times 15\text{ m}$ 、典型 Q 值的钢焊接结构的“理论”混波室。

考虑到实际情况与“理论”混波室的差异,出于保守所需采样数采用上舍入。对于尺寸比“理论”混波室大或 Q 值低的混波室,用比推荐数少的采样数也可满足确认的要求。

A.5.2 确认程序

确认程序采集电场探头的最大值、混波室的输入功率、位于工作空间的参考天线的最大接收功率和平均接收功率。探头数据用来确定场均匀性。混波室的输入功率和探头数据用来确定 CVF。用参考天线的平均接收功率和混波室的输入功率来计算 AVF。AVF 为确定混波室是否被 EUT 显著“加载”提供参考值。参考天线的最大接收功率用来验证场强探头的读数。探头数据取自 8 个位置,这 8 个位置构成“工作空间”或“均匀场区域”的顶角,如图 A.10 所示。探头移动到一个新的位置,参考天线也在工作空间内移到一个新的位置。在每个位置,参考天线的方向相对于小室坐标轴至少改变 20° ,保证局部场任何极化变化都能检测到。探头和参考天线的位置至少为 8 个。

表 B.1 列出了执行确认的推荐调谐器步进数,可能需减小或增加步进数以优化性能。最少的步进数应至少为 12。

注 1: 在 300 MHz~400 MHz 频率段内,一旦使用最少采样数(即 12)能证明混波室正常工作,探头或天线的位置就可减少为 3 个。本附录中的混波室,在 1 000 MHz 时探头位置减少为 3。

每个小室都有一个截止频率,低于此,小室不再是过模状态[5,10,14],也不能再用作混波室。这一频率很大程度上取决于混波室的尺寸,随频率降低,是渐变截止的而不是突变的。EUT 或导电或有耗的其他物体对混波室的加载也可能降低 LUF(见 A.5.5)。

注 2: 在一些情况下,可采取措施补偿工作频率接近“欠模”条件时模式密度的减小。总的来说,可以通过增加采样数来实现补偿,但需谨慎,其效果可能是有限的且不同结构效果不同。

A.5.3 场均匀性

混波室的目的是在工作空间内的所有位置产生统计均匀的环境。A.5.2 所述程序的目的在于用给定的采样数测量特定的混波室的期望场强和场均匀性。确认所获得的典型探头数据(为清楚起见,仅给出 x -分量数据)如图 A.11 所示。图 A.12 是图 A.11 的数据在每个频率点上探头读数 x 分量的 8 个最大值对平均值的归一化值[见 B.1.2(10)(a)]。数据表明,频率为 100 MHz 时,测量的场均匀性约为 ± 10 dB,且随着频率的增加而减小。此外,在较高频率,即使采样数减少,场均匀性也非常好。

注 1: 相对于表 B.1 中确定的采样数,优先用图 A.12 中采集数据的采样数,其解释了采样数的变化。

目前,对于何种方法是确定可接受的场均匀性的最佳方法,有两种学派的思想。一种是去除 25% 变化最大的数据,其余数据满足给定的限制条件,来确定场均匀性[29]。另一种是计算所有数据的标准差,使标准差满足给定的限制条件,来确定场均匀性[30,31]。第一种方法的主要缺点是,对于那些丢弃的数据没有权重,这可能导致实质上不确定度未知。本部分采用标准差方法,这样考虑到所有数据并加以一定权重。

图 A.12 所示数据的标准差如图 A.13 所示。数据表明,在这种情况下,频率约低于 200 MHz 时,标准差大于 3 dB。作为参考例子,给出了商用航空电子设备标准的限值[30]。

注 2: 如果 3 个场分量(E_x 、 E_y 、 E_z)和总数据集(E_{Total})的标准差都在给定的限值范围内,则混波室符合场均匀性要求。总数据集由 8 个探头位置的 3 个场分量(E_x 、 E_y 、 E_z)共 24 个测量值构成。根据限值要求[30],该混波室不能用于 130 MHz 以下,除非场均匀性得到改善[25]。

注 3: 特别允许较差的场均匀性情况,确切地说,400 MHz 以上,场均匀性为 3 dB,而在 100 MHz~400 MHz 频率范围内最高可达 4 dB(见图 A.13)。该特许是出于本部分与其他标准协调及经济方面考虑。混波室尺寸决定了 LUF。通常,由场地的高度限制了其性能。低于 400 MHz 时,放宽的场均匀性使得可在混波室中测试很大的 EUT(如飞机),而不需非常大的混波室。

注 4: 总数据集通常不采用 E_x 、 E_y 和 E_z 的方和根(RSS)[30]。

A.5.4 混波室中的电场

确认过程中混波室电场幅值的“期望值”就是各搅拌器位置 24 个探头最大读数的算术平均(最大值的平均),“期望值”是确认的混波室的值(见图 A.9)。

也可基于参考天线的测量值估算混波室的电场(E_{Est})。

$$E_{\text{Est}} = \left\langle \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{5 \times \frac{P_{\text{MaxRec}}}{\eta_{\text{Rx}}}} \right\rangle_n \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

式(A.6)用与[11]推导平均场强相似的方法推导出,它给出了基于对位置或方位取平均的参考天线最大读数的混波室电场估算值,式中:

P_{MaxRec} ——在给定采样次数下,某一天线位置或方向的最大接收功率,单位为瓦(W);

η_{Rx} ——接收天线的天线效率,如果未知,对数周期天线取 0.75,喇叭天线取 0.9。该参数可由附录 I 中的信息确定;

n ——天线位置和方位数。

所有测量,假定所有采集数据的前向输入功率相同。若如此,可对探头计数取平均后,再进行归一化;若不相同,探头的读数需要对相应的输入功率归一化。探头读数除以混波室输入功率的平方根,得对混波室输入功率归一化的电场。同样可得基于参考天线估算的电场。

建议通过比较探头测量的电场期望值与基于 8 个位置天线测量的电场期望估算值进行相互校验。应解决两者任何大于 ± 3 dB 的差异(见第 8 章)。注意低频时,由于发射天线和接收天线的加载效应,可预见明显的不一致。为此,在这些频点并不期望两者一致,在这些频点混波室输入功率和参考天线测量的最大接收功率相差达 10 dB。

A.5.5 加载效应

EUT 或其他物体放入混波室时,EUT 可能会“加载”混波室。EUT 或其他物体吸收的能量不能再用于产生理想的环境。因此,需增加混波室的输入功率,以补偿这种加载。由于要求 EUT 和支撑设备占混波室空间不能超过 8%(见 D.1),任何由工作空间减小引起的“加载”(即使 EUT 是非吸收体)是有限的。

注 1: 场源实际上是壁面的射频信号反射。虽然用天线向混波室注入射频信号,但能量不是直接照射 EUT 的。如果 EUT 吸收能量,吸收的这部分能量就不对试验环境的产生作贡献。以下数据将说明这一概念。

在进行任何试验之前,应进行混波室加载效应检查。将 EUT 置于混波室,按与确认中相同的调谐器步进数,测量参考天线的平均接收功率。将测得的数据与混波室确认中 8 个测量值相比较,如果有 EUT 时的平均接收功率不在确认中测量的平均场的可接受范围内(即明显大于或小于确认数据),则认为 EUT 对混波室产生加载效应。此时计算产生理想试验场所需的输入功率时,需要校正因子,这个因子称为 CLF。通过计算有 EUT 时的测量值与确认中(即除无 EUT 外,其他配置相同)8 个测量值的平均值或“期望值”的比值得到 CLF[30]。

为了确定混波室加载的限值,应评估混波室在严重加载条件下(B.1.6)的场均匀性。图 A.14 所示是一个评估例子,混波室的工作空间放置了 27 块高度为 122 cm 的角锥形吸波材料。图 A.15 所示为吸波材料引入混波室的加载量。在 100 MHz~18 GHz 的频率范围内,加载量最大为 23 dB,最小为 10 dB,平均加载量为 14 dB。图 A.16 所示为加载混波室场标准差。加载后混波室的标准差与如图 A.12 和图 A.13 所示的空混波室确认相比略微有些变化,但没有明显恶化。

注 2: 标准差增大(而不是减小)约 0.5 dB,很可能是场强探头距离吸波材料太近,这会引引起场值服从具有更大不确定度的其他分布。

A.5.6 产生试验场——抗扰度

向混波室注入适量的功率,产生所需的试验环境。可用式(A.7)计算产生期望场强所需的输入

功率。

$$P_{\text{Input}} = \left[\frac{E_{\text{Test}}}{\sqrt{E} \sqrt{\text{CLF}}} \right]^2 \dots\dots\dots (\text{A.7})$$

式中:

E_{Test} ——期望场强,单位为伏每米(V/m);

CLF——混波室加载系数[见 B.2(7)](无量纲);

$\sqrt{E}$ ——各探头测量的最大电场的平均值除以确认中输入功率的平方根[见 B.1.2(9)]。单位为 (V/m)/W^{0.5}。

注意用于确定混波室电场的探头测量值是探头的直角分量,而不是方和根(RSS)。

A.5.7 确定辐射功率——辐射发射

可通过测量参考天线的接收功率并进行混波室 IL 修正来确定放置在混波室中的设备的辐射功率[4]。EUT 的辐射功率可用一定调谐器步进和/或调谐器转动数下的平均接收功率或最大接收功率来计算。式(A.8)用于基于平均接收功率的测量,而式(A.9)用于基于最大值接收功率的测量。用基于平均接收功率的测量的优点是 MU 低,其缺点是,为了获得准确的平均测量值,测试系统的灵敏度应比实际的平均功率小 20 dB;且由于采样不足可能导致人为的间歇性信号减小。

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{AveRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{\text{CVF}} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{MaxRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{\text{CLF} \times \text{IL}} \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

式中:

P_{Radiated} ——EUT 在测量带宽内的辐射功率,单位为瓦(W);

CVF——混波室确认系数(无量纲)[B.2(6)];

CLF——混波室加载系数(无量纲)[B.2(7)];

IL——混波室插入损耗(无量纲)(B.1.4);

P_{AveRec} ——参考天线的接收功率对采样数取平均得到的平均接收功率[B.1.2(5)],单位为瓦(W);

P_{MaxRec} ——样本中参考天线的最大接收功率[B.1.2(5)],单位为瓦(W);

η_{Tx} ——混波室确认中使用的发射天线的天线效率(无量纲),对数周期天线,假定为 0.75;喇叭天线,假定为 0.9。

注:应参考 CISPR 16-1-1 选择接收机的检波方式。

A.5.8 CW 和脉冲试验时小室的 Q 值

确认时使用 CW 激励。当使用调制波激励时,应考虑由于混波室品质因数或“Q”值(B.3)引起的波形失真。由式(A.10)计算混波室 Q 值。

$$Q = \left(\frac{16\pi^2 V}{\eta_{\text{Tx}} \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \right) \left\langle \frac{P_{\text{AveRec}}}{P_{\text{Input}}} \right\rangle_n \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

式中:

η_{Tx} ——发射天线的天线效率(无量纲),对于对数周期天线,假定为 0.75,对于喇叭天线,假定为 0.9;

η_{Rx} ——接收天线的天线效率(无量纲),对于对数周期天线,假定为 0.75,对于喇叭天线,假定为 0.9;

V——混波室的体积,单位为立方米(m³);

λ ——特定频率时的自由空间波长,单位为米(m);

P_{AvRec} ——参考天线的平均接收功率,单位为瓦(W);

P_{Input} ——混波室的输入功率[30],单位为瓦(W);

n ——在各评估频率点采集确认数据的天线位置和方位数。

对于脉冲试验,混波室的时间常数 τ 由式(A.11)给出:

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

Q ——小室的品质因数(无量纲),由式(A.10)计算;

f ——试验频率,单位为赫兹(Hz)。

混波室的时间常数应不大于任何试验波形的脉冲带宽的0.4。如果大于0.4,那么应向混波室内加入吸波材料或应增加脉冲宽度。如果加入吸波材料,加入尽可能少的吸波材料直至满足时间常数要求。如果用吸波材料,应重新测量,得一新的CLF。如果吸波材料的加载量大于混波室的加载确认的加载量(B.1.6),则混波室应重新确认。

A.6 参考文献

- [1] BECKER, GE. and AUTLER, SH., Water vapor absorption of electromagnetic radiation in the centimeter wave-length range, Phys. Rev., Sep. 1946, vol. 70 no. 5/6, pp. 300-307.
- [2] LAMB, WE. (Jr.), Theory of a microwave spectroscopy, Phys. Rev., Sep. 1946, vol. 70 nos. 5/6, pp. 308-317.
- [3] MEYER, E., HELBERG, H.-W., and VOGEL, S., Hallraumesstechnik und Bau eines grossen Hallraums für elektromagnetische Wellen, Z. Angew. Physik, Aug. 1960, vol. 12 no. 8, pp. 337-346.
- [4] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. EMC, vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54-59; Comments and corrections, IEEE Trans. EMC, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.
- [5] CRAWFORD, ML. and KOEPKE, GH., Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements, National Bureau of Standards (US) Technical Note 1092, April 1986.
- [6] CORONA, P., LADBURY, J., and LATMIRAL, G., Reverberation-chamber research then and now: a review of early work and comparison with current understanding, IEEE Trans. EMC, Feb 2002, vol. 44 no. 1, pp. 87-94.
- [7] BÄCKSTRÖM, M., LUNDÉN O., and KILDAL, P.-S., Reverberation Chambers for EMC Susceptibility and Emission Analyses, Review of Radio Science 1999-2002, Chapter 18, Wiley-Interscience, Inc., New York, 2002.
- [8] ARNAUT, LR., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781-804.
- [9] KOSTAS, J. G. and BOVERIE, B., Statistical model for a mode-stirred chamber, IEEE Trans. EMC, Nov. 1991, vol. 33 no. 4, pp. 366-370.
- [10] HILL, DA., Electromagnetic theory of reverberation chambers, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1506, Dec. 1998.
- [11] LADBURY, JM., KOEPKE GH., and Camell, DG., Evaluation of the NASA Langley

research center mode-stirred chamber facility, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1508, Jan. 1999.

- [12] ARNAUT, LR., Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies, *IEEE Trans. EMC*, Nov. 2001, vol. 43 no. 4, pp. 637-653.
- [13] MARVIN, AC., ANGUS, JAS., DAWSON, JF., and CLEGG, J., Enhancements to stirred mode chambers by the use of pseudo-random phase reflection gratings, *Proc. EMC'94 Int. Symp. EMC*, Rome, Italy, 1994, pp. 218-221.
- [14] ARNAUT, LR., Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers, *IEEE Trans. EMC*, Aug. 2002, vol. 44 no. 3, pp. 442-457.
- [15] ARNAUT, LR., Limit distribution for imperfect electromagnetic reverberation, *IEEE Trans. EMC*, May 2003, vol. 45 no. 2, pp. 357-379.
- [16] DUNN, JM., Local, high-frequency analysis of the fields in a mode-stirred chamber, *IEEE Trans. EMC*, Feb. 1990, vol. 32 no. 1, pp. 53-58.
- [17] HILL, DA., Boundary fields in reverberation chambers, *IEEE Trans. EMC*, May 2005, vol. 47 no. 2, pp. 281-290.
- [18] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary, *IEEE Trans. EMC*, May 2006, vol. 48 no. 2, pp. 359-371.
- [19] ARNAUT, LR. Measurement uncertainty in reverberation chambers — I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008. [http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf].
- [20] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M. Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers, evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests, *Proc. IEEE Int. Symp. EMC*, Washington, DC, Aug. 2000, pp. 1116.
- [21] KRAUTHÄUSER, H. G., WINZERLING, T., NITSCH, J., EULIG, N., and ENDERS, A., Statistical interpretation of autocorrelation coefficients for fields in mode-stirred chambers, *Proc. IEEE Int. Symp. EMC*, Chicago, IL, Aug. 2005, pp. 550-555.
- [22] LEHMAN, TH., A statistical theory of electromagnetic fields in complex cavities, Note 494, USAF Phillips Laboratory Interaction Note Series, May 1993.
- [23] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Evaluation of the NPL stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques, National Physical Laboratory Report (UK); Report CEM 11, Aug. 1998.
- [24] FREYER, GJ., HATFIELD, MO., JOHNSON, DM., and SLOCUM, MB., Comparison of measured and theoretical statistical properties of complex cavities, *Proc. IEEE Int. Symp. on EMC*, Santa Clara, CA, Aug. 1996, pp. 250-253.
- [25] LADBURY, JM. and GOLDSMITH, K., Reverberation chamber verification procedures, or how to check if your chamber ain't broke and suggestions on how to fix it if it is, *Proc. IEEE Int. Symp. on EMC*, Washington DC, Aug. 2000, pp. 17-22.
- [26] LADBURY, JM., Reverberation chamber relationships: corrections and improvements, or three wrongs can (almost) make a right, *Proc. IEEE Int. Symp. EMC*, Seattle, WA, Aug. 1999, pp. 1-6.
- [27] ARNAUT, LR., Sampling distributions of random electromagnetic fields in mesoscopic or dynamical systems, *Phys. Rev. E*, vol. 80 no. 3, 036601, 2009.
- [28] LIU, B.-H., CHANG, DC., and MA, MT., Eigenmodes and the composite quality factor

of a reverberating chamber, National Bureau of Standards (US), Technical Note 1066, 1983.

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

[30] RTCA/DO-160E, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment (Change Notice to Section 20), Dec. 2004.

[31] MIL-STD-461E, Requirements for the control of electromagnetic interference emissions and susceptibility, Aug. 1999.

[32] MIL-STD-1377, Effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance, Aug. 1977.

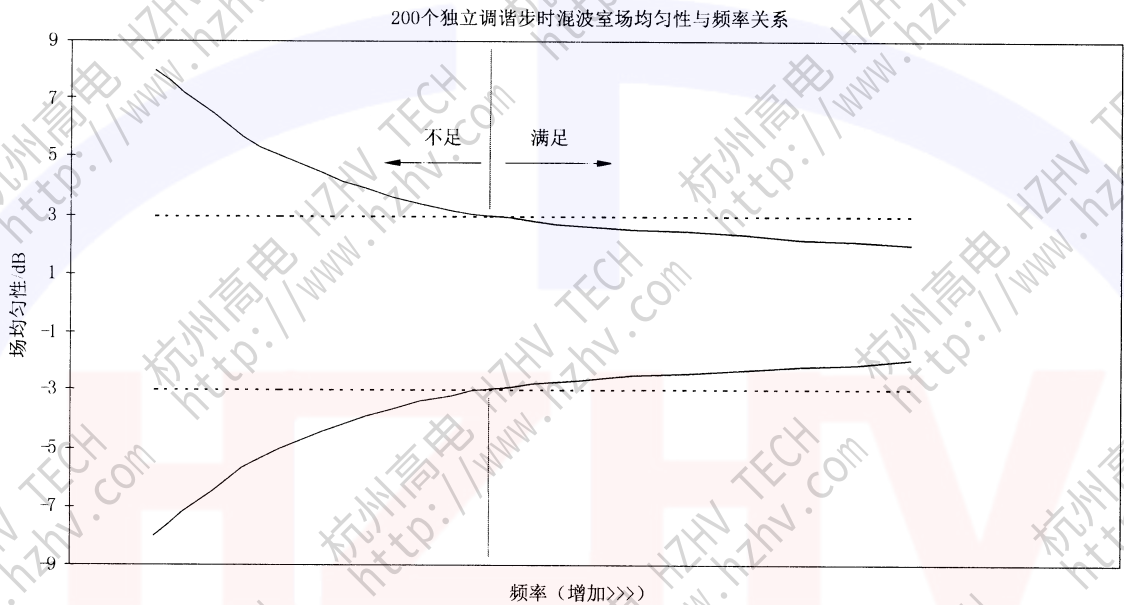
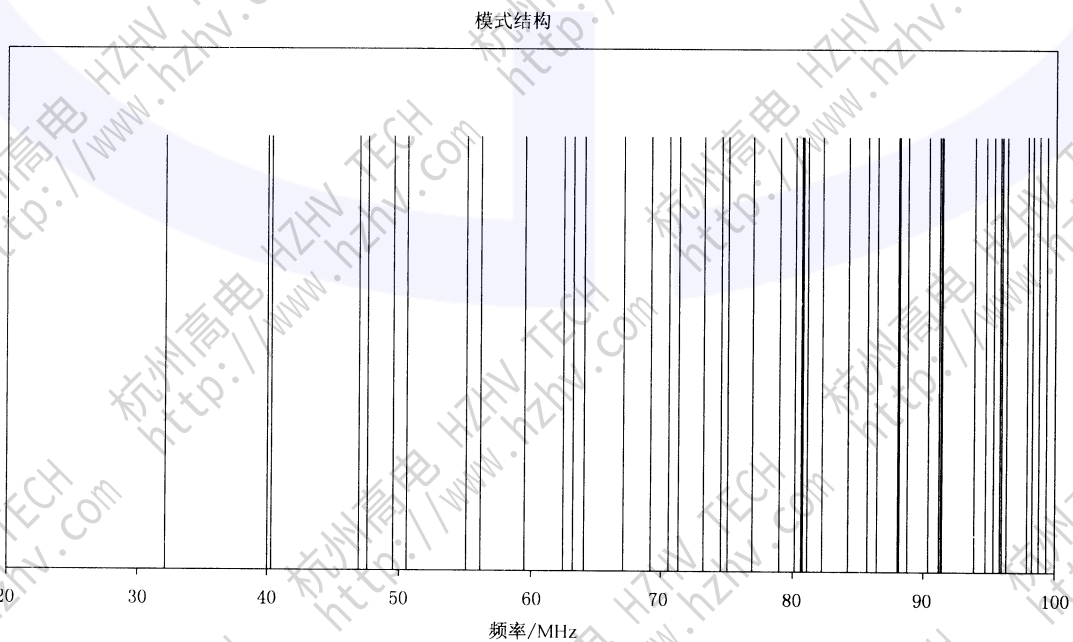
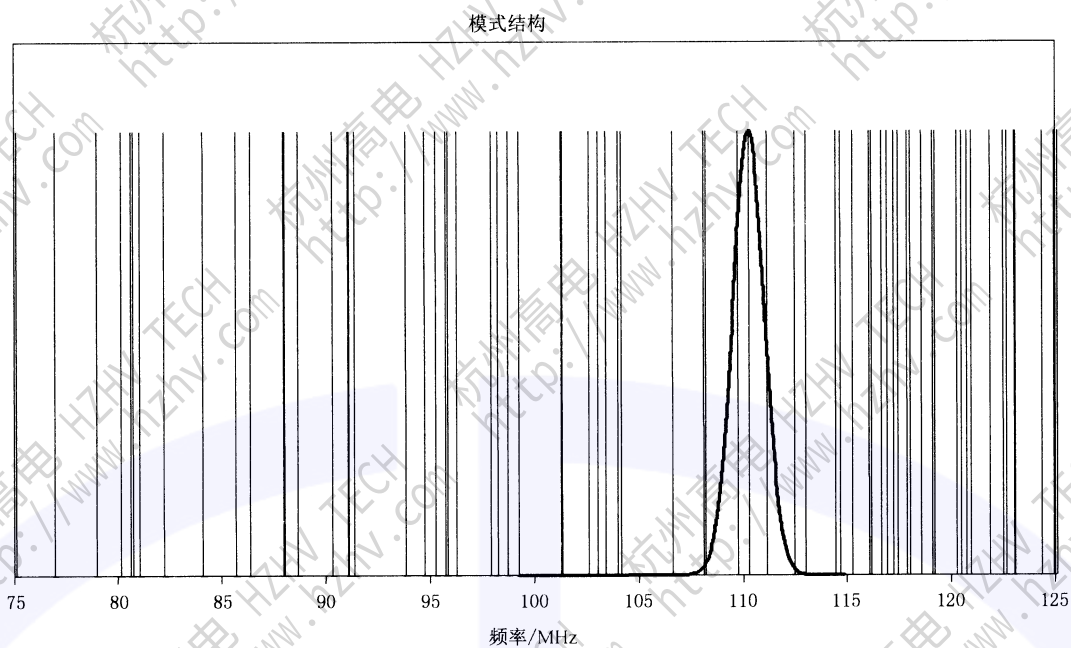
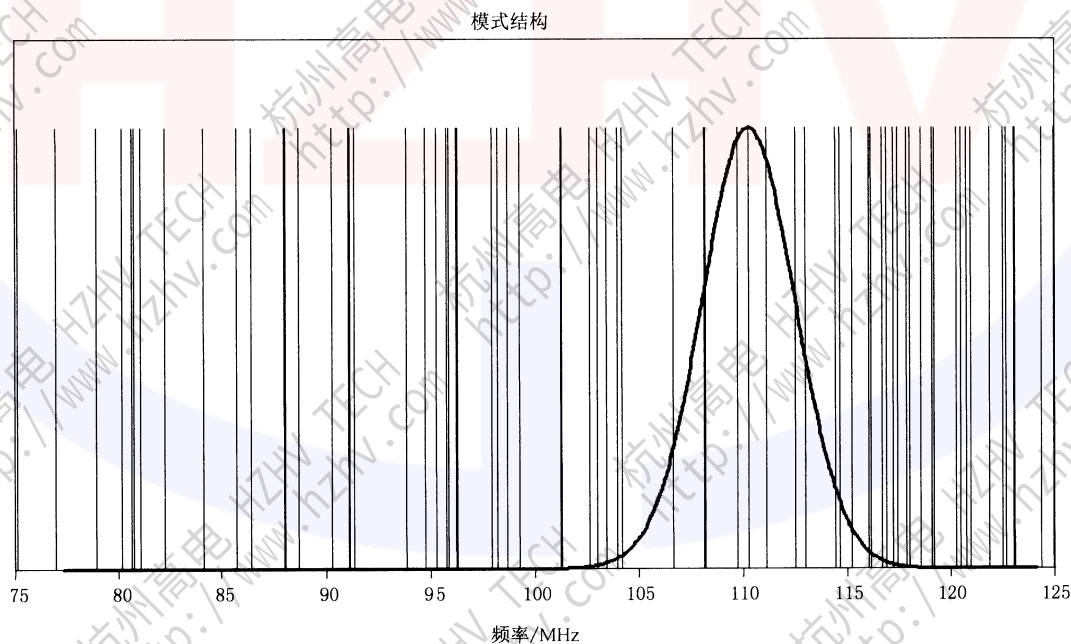


图 A.1 200 个独立调谐步时典型的场均匀性



注：纵坐标仅表示存在模式。

图 A.2 10.8 m×5.2 m×3.9 m 小室的理论模式结构

图 A.3 小 Q 值带宽(高 Q 值)的理论模式结构叠加在 60^{th} 模式上图 A.4 大 Q 值带宽(低 Q 值)的理论模式结构叠加在 60^{th} 模式上

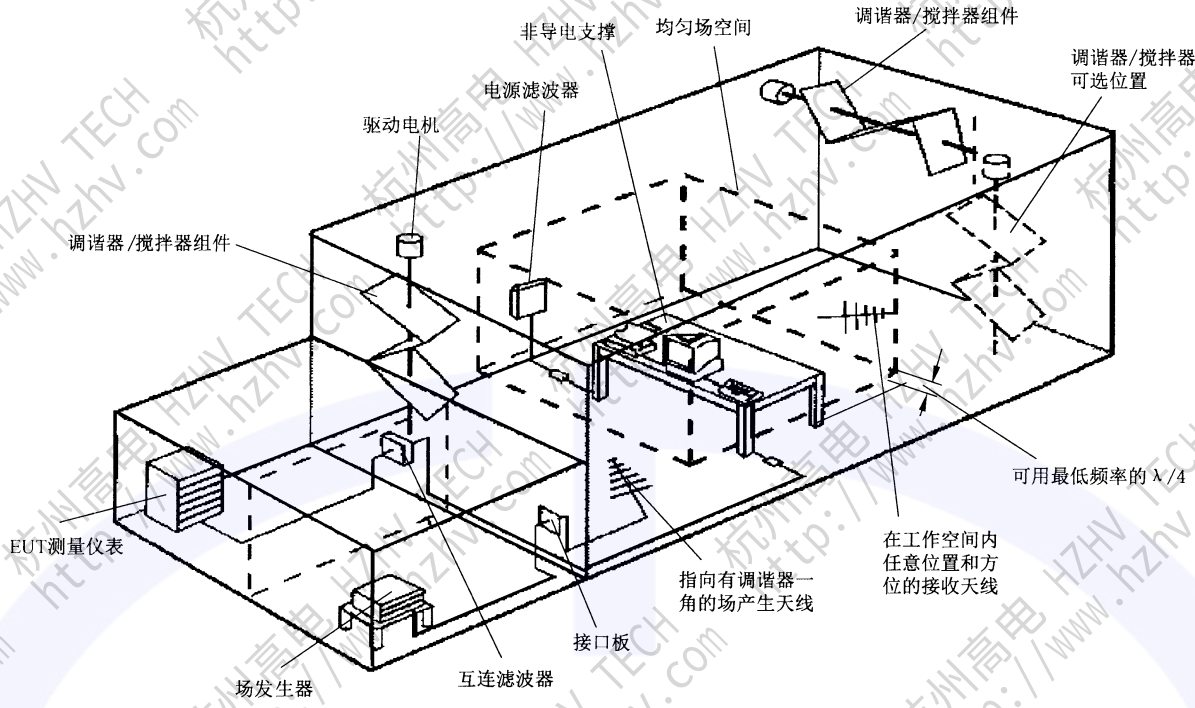
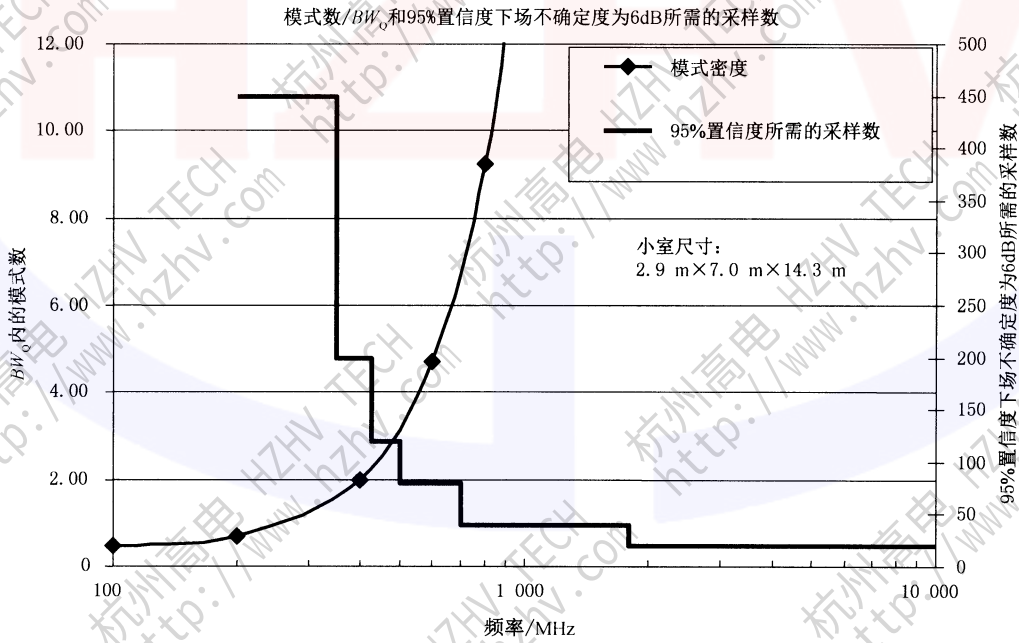
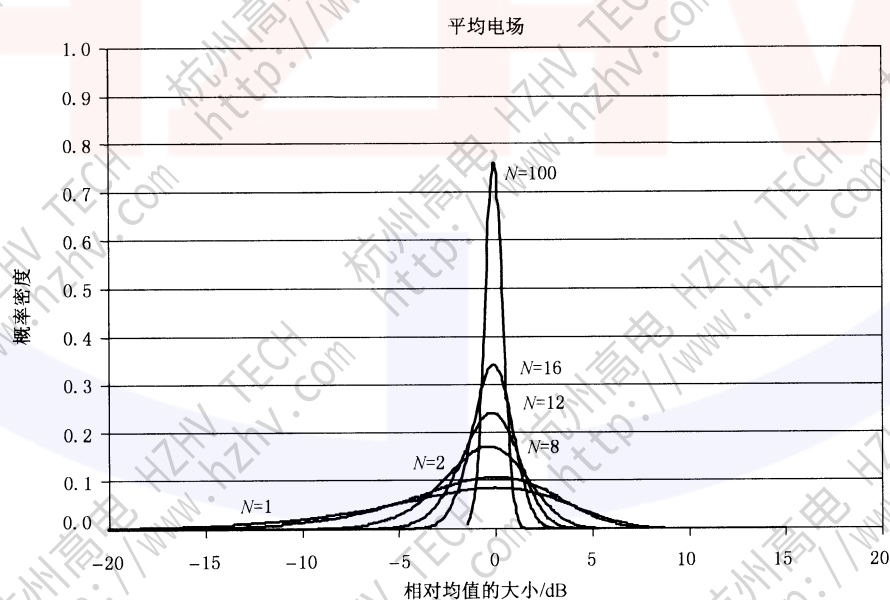
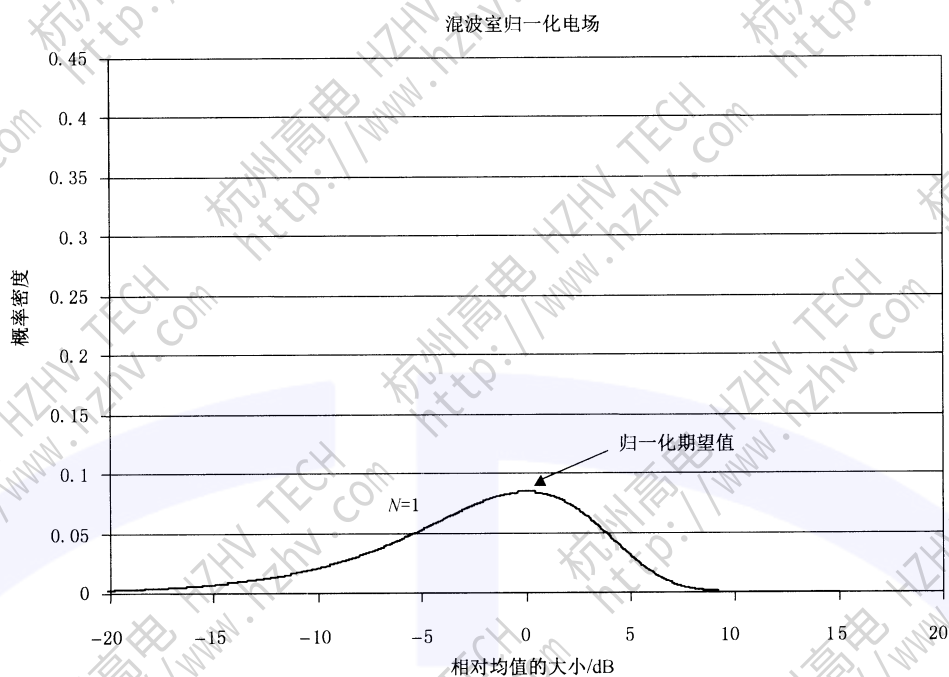


图 A.5 典型混波室



注：M 的计算见式(A.3)。

图 A.6 95%置信度所需的理论采样数



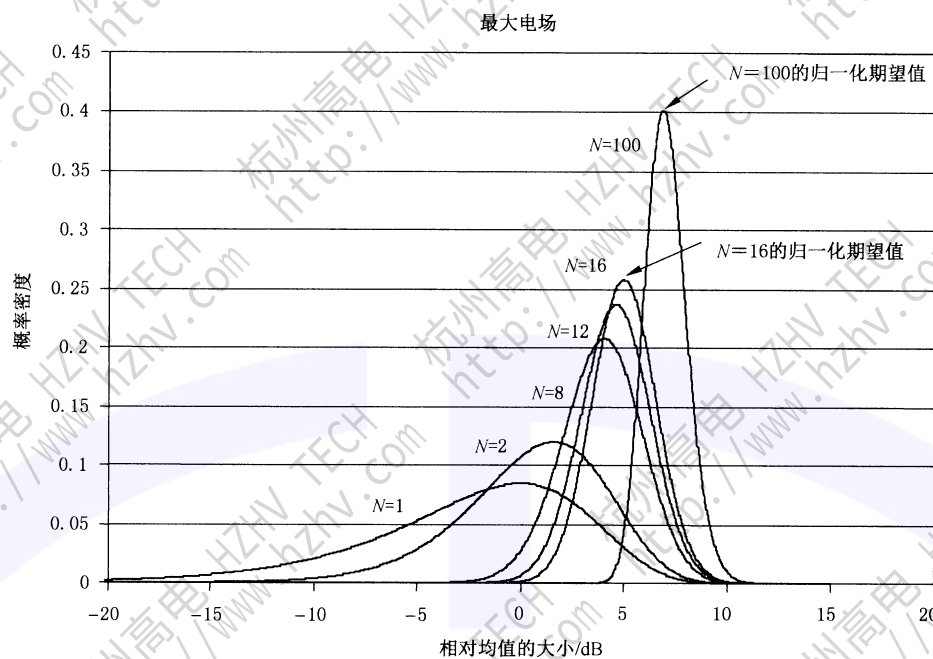
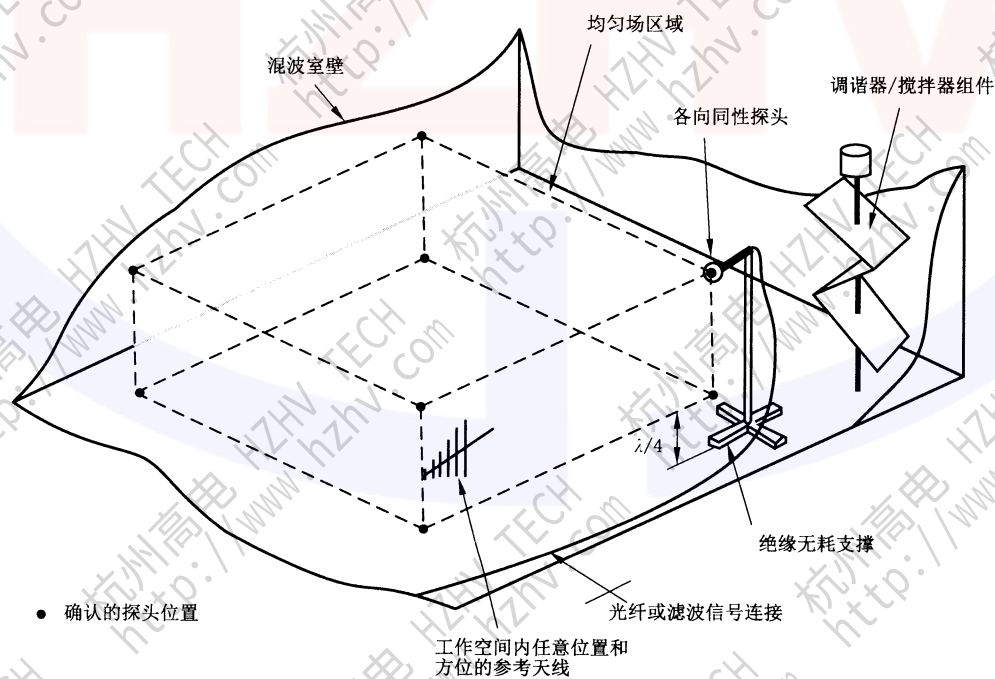
图 A.9 N 个独立样本固定位置测量的电场分量的最大值的归一化 PDF

图 A.10 混波室工作空间

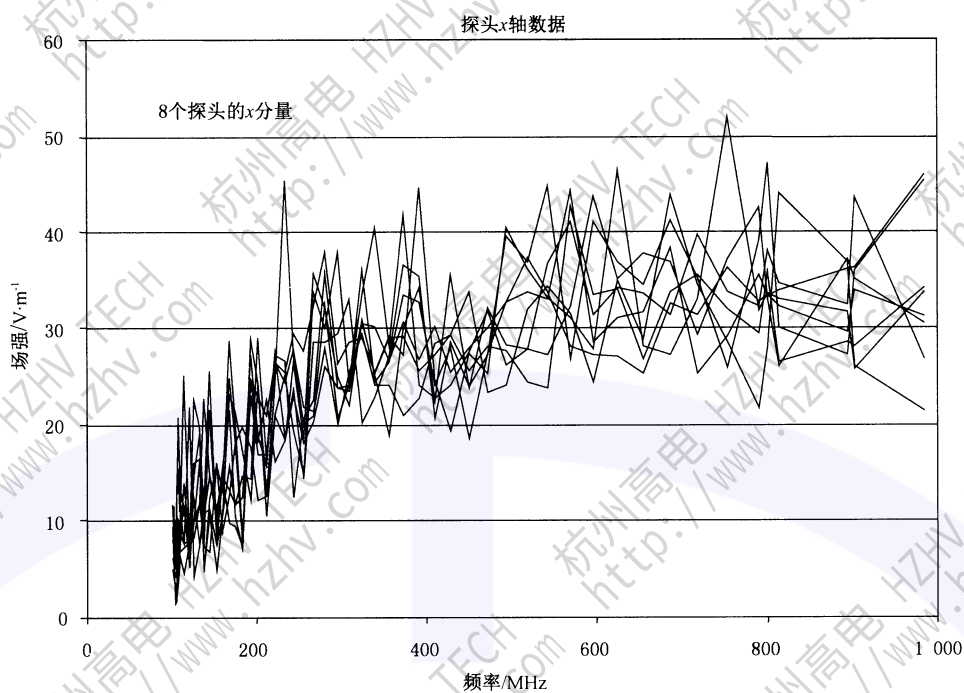


图 A.11 典型探头数据

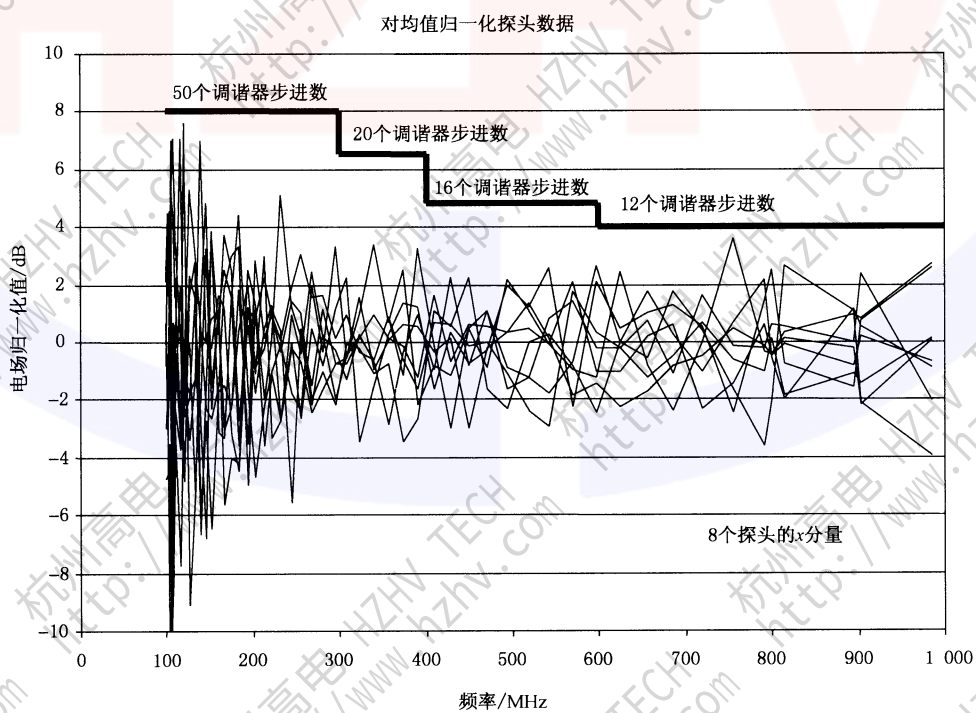


图 A.12 8个探头的x分量均值归一化数据

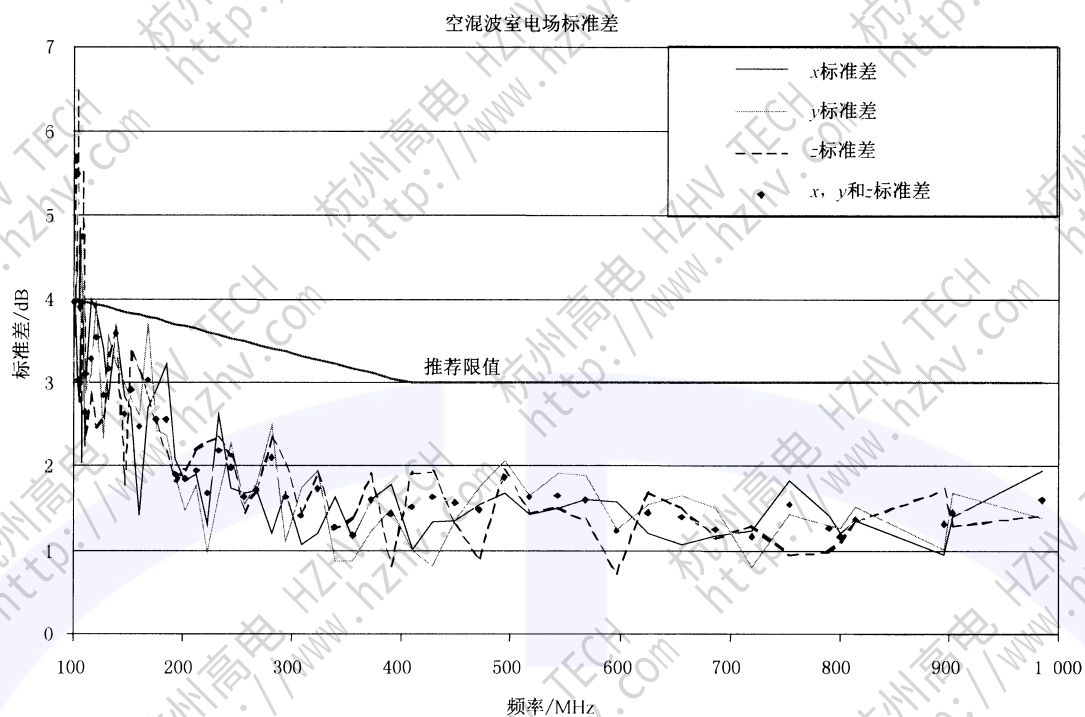


图 A.13 8 个探头的电场分量的标准差

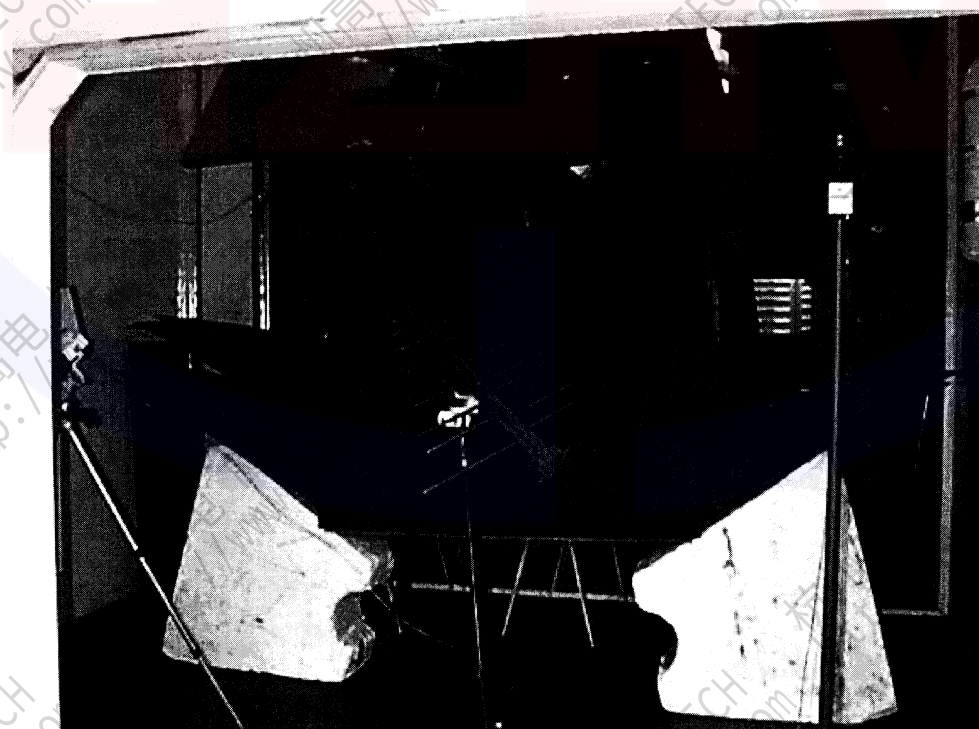


图 A.14 加载效应试验吸波材料的分布

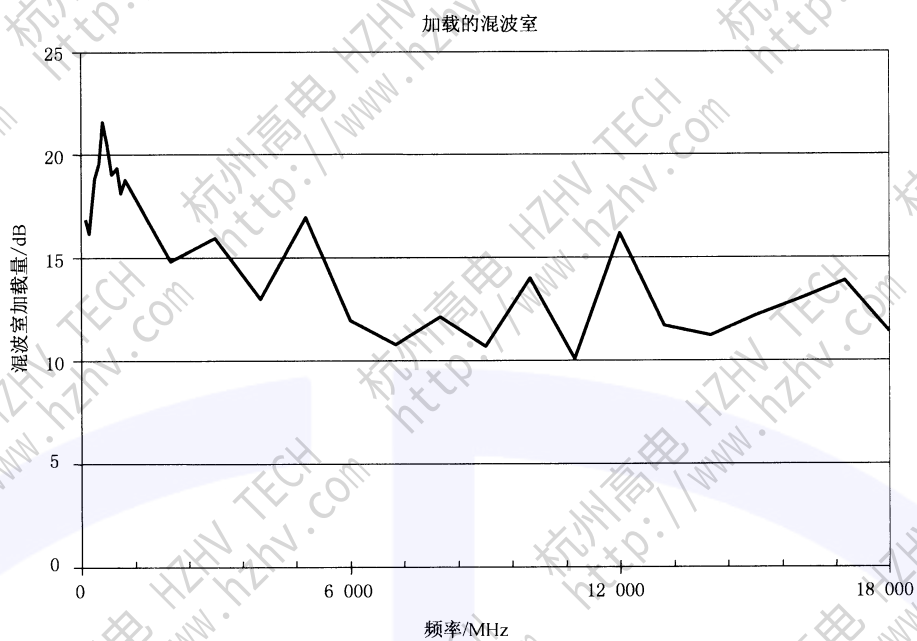


图 A.15 加载效应试验的加载量

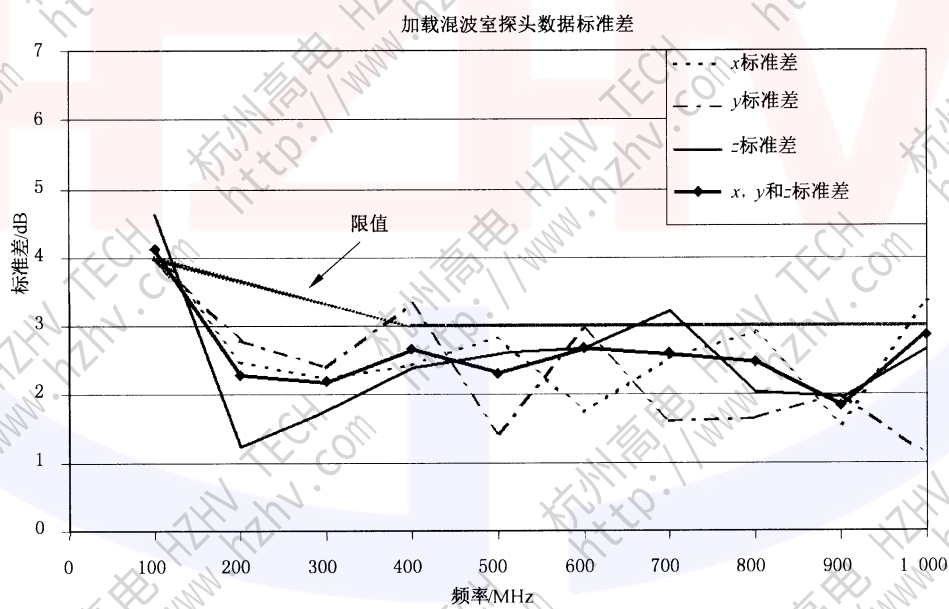


图 A.16 加载混波室中 8 个探头电场分量的标准差

附录 B

(规范性附录)

调谐模式混波室确认

B.1 确认:混波室的场均匀性和加载确认

B.1.1 概述

作为混波室性能和输入功率要求的初步指导,用本章的程序进行一次空载(无 EUT)混波室确认。每次试验前应按 B.2 的程序进行确认。

应在第一个 10 倍频程工作频率范围内进行混波室的场均匀性确认。在满足表 B.2 场均匀性要求的频率及以上的频率范围内,可用混波室进行试验。

B.1.2 场均匀性确认

以下步骤是必要的。

- (1) 清空工作空间(即移走试验台和其他物品,不管它们是否对混波室产生加载),按图 B.1 中注释所述,将接收天线放在混波室工作空间内。设置测量仪器,以在正确的频率范围内读取接收天线信号;
- (2) 如图 B.1 所示,将电场探头放在混波室工作空间的边界上;
- (3) 从最低试验频率(f_s)开始,调整射频信号源,向发射天线注入合适的输入功率,使场强探头获得一个可靠的读数。发射天线不能直接照射工作空间或接收天线和场强探头。发射天线最好的放置方式是朝着混波室的一角。试验频率应在发射天线和接收天线的工作频段范围内,天线应是线极化天线。应注意确保输入到混波室中的射频信号源的谐波至少比基波低 15 dB;

注 1: 对常规操作,典型的最低的试验频率(f_s)与 80 MHz 同数量级,在工作频率的第一个十倍频程内确认场均匀性。如果试验的起始频率不是 80 MHz,例如用一个小混波室产生高场强,仍应在工作频率的第一个十倍频程内确认混波室的场均匀性。可接受的测量起始频率绝不低于混波室满足表 B.2 场均匀性的频率。

- (4) 调谐器以等步长的离散步进角转动 360° (调谐模式),在转动中接收机和电场探头按照表 B.1 要求的最少采样数进行采样。应注意确保调谐器每转动一步的停留时间足够长,接收机和电场探头有正确响应的的时间;
- (5) 调谐器转动一圈,记录下接收信号的最大功率和平均功率(线性平均,即单位是 W,而不是 dBm)($P_{\text{MaxRec}}, P_{\text{AveRec}}$)、电场探头各分量的最大值($E_{\text{Max } x, y, z}$)和输入功率的平均值(P_{Input});

注 2: 输入功率 P_{Input} 的值就是调谐器转动一圈的平均前向功率,用于确定平均值的采样数应至少与混波室确认中的采样数一样。如果输入功率变化较大(即大于 3 dB),则说明信号源/放大器的性能较差。所有的确认都是对于特定的天线而言的,更换天线可能导致确认无效。所有的功率测量都与天线终端有关。假定天线是高效率的(即效率大于 75%)。

- (6) 按表 B.1 以对数频率间隔重复上述操作直至 $10f_s$;
- (7) 将场强探头放在如图 B.1 所示的 8 个位置上,并将天线放置在 8 个位置(其中一个应是工作空间的中心),重复以上操作直至 $10f_s$;

注 3: 如果有需要,步骤(4)和步骤(6)可以互换,即在每一个调谐器位置增加频率。

注 4: 如果小室和调谐器是几何对称的,且调谐器关于小室的各个壁面对称,则不应如此选择探头位置,以免轴对称。将探头放置在离最近壁面不同距离的位置就可以轻易去除对称性。

- (8) 在 $10f_s$ 以上只需将探头和接收天线放在 3 个位置上进行测量。探头和接收天线与混波室中的其他设备之间应保持所需的距离。应有一个场强探头和天线位置在工作空间的中心。其余频率段的确认应按照 B.1 的要求重复步骤(4)和步骤(5)即可；

注 5：每改变探头的位置，接收天线也应移到混波室工作空间内的一个新位置。每换一个位置，接收天线相对于混波室轴的方向应不同（相对于每个轴至少变化 20° ）。如 x = 混波室的长（最长的边长）， y = 混波室的宽， z = 混波室的高。在确认过程中，探头没有必要与混波室坐标轴方向一致。

应注意确保接收天线与探头之间保持适当的距离。每个天线或探头位置距离上一位置应至少 $\lambda/4$ （如果 $\lambda/4 > 1\text{ m}$ ，最低试验频率时距离为 1 m ）。天线和探头之间也应保持同样的距离。在常规试验中，如果接收天线安装在固定位置，建议测量或试验中接收天线的其中一个位置为其固定安装位置。

- (9) 应用步骤(5)中的数据，将每个最大电场探头测量值（即 $10f_s$ 以下有 $8 \times 3 = 24$ 个直角分量， $10f_s$ 以上有 $3 \times 3 = 9$ 个直角分量）对平均输入功率的平方根归一化）：

$$\ddot{E}_{x,y,z} = \frac{E_{\max x,y,z}}{\sqrt{P_{\text{Input}}}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

式中：

$E_{\max x,y,z}$ ——所有的调谐器位置上，每个探头分量的最大测量值[24 个或 9 个测量值，单位为伏每米(V/m)]；

$\ddot{E}_{x,y,z}$ ——归一化最大电场，单位为(V/m)/W^{0.5}，其定义为每个探头分量的最大测量值除以输入功率的平方根；

P_{Input} ——调谐器转动过程中记录 $E_{\max x,y,z}$ 时的混波室输入功率的平均值，单位为瓦(W)。

- (10) 在每个确认频率点上，对所有探头位置，计算电场探头测量值的每个分量的归一化最大值的平均值 $\langle \ddot{E}_{x,y,z} \rangle$ ；

(a) 频率低于 $10f_s$ ：

$$\langle \ddot{E}_x \rangle_8 = \frac{(\sum \ddot{E}_x)}{8}, \langle \ddot{E}_y \rangle_8 = \frac{(\sum \ddot{E}_y)}{8}, \langle \ddot{E}_z \rangle_8 = \frac{(\sum \ddot{E}_z)}{8} \quad \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

(b) 频率低于 $10f_s$ 时，对每个探头分量（即每个直角分量）给予相同权重，计算所有电场探头测量值的归一化最大值的平均值 $[\ddot{E}]_{24}$ 。24 个场强直角分量归一化的最大值的和除以探头分量数与位置数的乘积，即 $3 \times 8 = 24$ ，得上述归一化最大值的平均值。

$$\langle \ddot{E} \rangle_{24} = \frac{(\sum \ddot{E}_{x,y,z})}{24} \quad \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

注 6： $\langle \rangle$ 表示对探头位置数或探头分量数的算术平均。

(c) 当频率大于 $10f_s$ 时，对所有探头分量（即每个直角分量）给予相同权重，计算所有三个探头位置的归一化最大值的平均值。将 24 换成 9，计算方法与(b)相同。

- (11) 当频率低于 $10f_s$ 时，用如下方法确定混波室的场均匀性是否满足要求：

(a) 用搅拌器旋转一周在八个位置获得的归一化最大值和归一化平均值的标准差描述场均匀性。标准差由各探头分量的数据和总数据计算得到。

标准差的计算如式(B.4)所示：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\ddot{E}_i - \langle \ddot{E} \rangle)^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中：

n ——测量次数；

$\vec{E}_i$ —— 各归一化的电场测量值(对输入功率的平方根归一化);

$\langle \vec{E} \rangle$ —— 归一化最大电场测量值的算术平均。

例如,对于 x 分量:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (\vec{E}_{x,i} - \langle \vec{E}_x \rangle_8)^2}{8-1}} \quad \text{.....(B.5)}$$

式中:

$\vec{E}_{x,i}$ —— x 矢量的各归一化测量值;

$\langle \vec{E}_x \rangle_8$ —— 所有 8 个位置的 $E_{\max,x}$ 归一化值的算术平均值。

对于所有矢量:

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^3 (\vec{E}_{m,n} - \langle \vec{E} \rangle_{24})^2}{24-1}} \quad \text{.....(B.6)}$$

式中:

$\vec{E}_{m,n}$ —— 所有矢量的各测量值(m = 探头位置,从 1~8; n = 各向同性探头轴线,从 1~3,即 x, y, z ;

$\langle \vec{E} \rangle_{24}$ —— 来自所有 24 个测量值的归一化矢量 $E_{\max,x,y,z}$ 的算术平均值;

σ —— 所有矢量(x, y, z)的标准差。

最后,标准差相对于平均值用 dB 表示为:

$$\sigma(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left\{ \frac{\sigma + \langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle}{\langle \vec{E}_{x,y,z} \rangle} \right\} \quad \text{.....(B.7)}$$

(b)如果混波室的各个场强分量的标准差和总标准差在表 B.2 的限值范围内,则混波室满足场均匀性要求。如果混波室的场均匀性不满足要求,混波室则不能在所需的更低频率工作。如果混波室的场均匀性与要求的场均匀性之间相差很小,则可能可以通过以下方法获得所需的场均匀性:

- 1) 增加 10%~50% 的采样数(调谐器转动的步数);
- 2) 对混波室的净输入功率进行归一化($P_{\text{Net}} = P_{\text{Input}} - P_{\text{Reflected}}$);
- 3) 减小工作空间。

如果混波室场均匀性优于所需的场均匀性,则可以减少采样数,但采样数不能小于 12 个。对每个混波室获得优化的最少采样数,从而缩短试验时间。

注 7: 如果混波室不满足场均匀性的要求,则可以通过增加调谐器数量、加大调谐器的尺寸、增加吸波材料降低 Q 值的方法改善混波室的场均匀性。应评估混波室的特性(尺寸、构造方法、材料),确定混波室是否有可能满足要求。最低试验频率时,模式数不超过 60~100 或 Q 值很高(例如,铝板焊接的混波室)的混波室在低频时很可能不满足场均匀性要求。

重要:一旦修改了混波室(例如,加入吸波材料等)或者修改了确认程序(例如,改变了调谐器步进数等),则在试验中应保持相同配置或程序,以保持确认有效。

B.1.3 接收天线确认

确定空载时混波室的接收 AVF,作为加载混波室的比较基准(B.2)。

用式(B.8)计算各频率的 AVF:

$$AVF = \left\langle \frac{P_{AveRec}}{P_{Input}} \right\rangle_{8at. \leq 10f_0 \text{ or } 3at. > 10f_0} \dots\dots\dots (B.8)$$

式中, P_{Input} 与 P_{AveRec} 是 B.1.2(5) 中相应位置的平均输入功率和测量的平均接收功率。AVF 对于修正天线效率等因素对天线测量结果的影响是必需的。

注: $\langle \rangle$ 表示算术平均值, 即如果频率低于 $10f_0$, 8 个探头位置平均, $\langle P_{AveRec} \rangle_8 = (\Sigma P_{AveRec})/8$; 如果频率超过 $10f_0$, 3 个探头位置平均。

B.1.4 混波室 IL

确定空混波室的 IL, 以为其他附录提供计算所需的信息。

用式(B.9)计算混波室各频率的 IL:

$$IL = \left\langle \frac{P_{MaxRec}}{P_{Input}} \right\rangle_{8at. \leq 10f_0 \text{ or } 3at. > 10f_0} \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

P_{Input} —— B.1.2(5) 中测得最大接收功 (P_{MaxRec}) 率相应位置的的平均输入功率。

注: $\langle \rangle$ 表示算术平均值, 即如果频率低于 $10f_0$, 在 8 个探头位置平均, $\langle P_{MaxRec} \rangle_8 = (\Sigma P_{MaxRec})/8$; 如果频率超过 $10f_0$, 在 3 个探头位置平均。

B.1.5 用天线测量值估算混波室的电场

B.1.2 中的空载混波室的确认是基于电场探头读数的。混波室中的电场也可基于天线测量值估算。附录 A 中包含这种估算方法的程序。

注: 在低频段两种方法有较大的不一致性, 这是由于发射天线和接收天线的加载效应引起的。因此, 在低频段不能期望两种方法一致。在这些频段, 混波室输入功率与测量的参考天线的最大接收功率相差 10 dB 或小些。

B.1.6 混波室最大加载能力确认

为了确定“加载”混波室的 EUT 是否对混波室性能产生负面影响, 在模拟加载条件下对混波室的场均匀性进行一次检查。建议在混波室寿命周期内或者重大改造后仅做一次“加载”的混波室确认。在每次试验之前, 应按 B.2 的程序进行确认。

(1) 在混波室工作空间内的任意位置, 放置足够多的吸波材料, 加载混波室, 加载程度至少达到正常试验的加载程度 [AVF 变化 16 倍 (12dB) 应被认为是微小的加载量];

注: 每个混波室都是唯一的, 确定所需吸波材料数量的最简单的方法就是重复试验。

(2) 用电场探头的 8 个位置重复 B.1.2 的确认。应注意确保电场探头和接收天线与吸波材料的距离大于 $\lambda/4$ 。比较加载前后混波室的 AVF (B.1.3), 确定混波室的加载量;

$$Loading = \frac{AVF_{Empty \text{ Chamber}}}{AVF_{Loaded \text{ Chamber}}} \dots\dots\dots (B.10)$$

(3) 用电场探头 8 个位置的数据重新计算场均匀性。

如果混波室加载导致场直角分量超过允许标准差, 或所有矢量的标准差 (即 σ_{21}) 超过允许的标准差 (见表 B.2), 则混波室已加载到场均匀性不可接受的程度。在这种条件下, 应减少混波室的加载量, 重新估算混波室的加载效应。

B.2 确认: 置有 EUT 的混波室性能的确认

装有 EUT 和支撑装置的混波室在每次试验之前, 按照如下程序进行确认:

(1) 与本附录中列出的进行的试验类型一样, 将接收天线放置在混波室的工作空间内, 距离 EUT、

支撑装置等 1 m (或者最低试验频率对应波长的 1/4)。设置接收机,以在正确频率点监测接收天线的输出;

- (2) 从最低试验频率(f_c)开始,调整射频信号源的输出电平,使其输出一个合适的输入功率(P_{Input})至发射天线。应注意保证输入到混波室的射频信号的谐波比基波至少小 15 dB;
- (3) 操作混波室和搅拌器要考虑到 B.1 中规定的满足均匀性标准所需的可能的其他方面。应注意确保足够长的停留时间,以保证接收机有正确响应的的时间;
- (4) 记录最大接收信号(P_{MaxRec})、平均接收信号(P_{AveRec})和平均输入功率(P_{Input})。测量仪器的底噪声应比最大接收功率(P_{MaxRec})低 20 dB,以获得准确的平均值;
- (5) 在试验计划列出的每个频率点上重复以上步骤;
- (6) 用式(B.11)计算每个频点的 CVF;

$$\text{CVF} = \left\langle \frac{P_{\text{AveRec}}}{P_{\text{Input}}} \right\rangle_n \dots\dots\dots (\text{B.11})$$

式中:

- CVF —— 存在 EUT 和支撑装置时搅拌器转动一圈混波室的归一化平均接收功率;
- P_{AveRec} —— 第(4)步中搅拌器转动一圈混波室的平均接收功率;
- P_{Input} —— 第(4)步中搅拌器转动一圈混波室的平均前向功率;
- n —— 测量 CVF 时的天线位置数。仅需一个位置,但通常会评估多个位置,然后对位置数 n 取平均;

- (7) 用式(B.12)计算每个频点的 CLF;

$$\text{CLF} = \frac{\text{CVF}}{\text{AVF}} \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

式中:

- CVF —— 第(6)步获得的平均接收功率与输入功率的比值;
- AVF —— B.1.3 天线确认中的平均接收功率与输入功率的比值,为了得到 AVF 需要使用插值法。

如果 CLF 的倒数超过 B.1.6(2)中测量加载量的量大于预期的仪器因素的影响量,则混波室可能已被加载到场均匀性受到影响的程度。在这种情况下,需要重新进行 B.1.2 中的混波室在有 EUT 或者是等效模拟加载量条件下的场均匀性测量。

注:如果 B.2(4)中测量的 P_{AveRec} 的值在 B.1.2(5)中 8 个位置的记录值范围内(即不大也不小),则不必计算 CLF,可以假定为 1。同时,如果测试系统的动态范围太小,无法测得准确的平均接收功率,则可以使用最大接收功率计算 AVF 和 CVF,然后再计算 CLF。如果使用最大接收功率,则 AVF 和 CVF 均应用最大接收功率重新计算。

注意:上述情况仅适用于 CLF 的计算,不能用基于最大接收功率的 AVF 或 CVF 来确定其他参数。

B.3 Q 值及时间常数确认

为了确保混波室的时间响应足够快,以适应脉冲试验,应通过以下程序确定混波室的时间常数:

- (1) 用源于混波室确认的式(B.11)的 CVF,用式(B.13)计算每个频率的混波室的品质因数 Q :

$$Q = \left(\frac{16\pi^2 V}{\eta_{\text{Tx}} \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \right) (\text{CVF}) \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

式中:

- η_{Tx} —— 发射天线的天线效率。如果未知,对数周期天线取 0.75,喇叭天线取 0.9;
- η_{Rx} —— 接收天线的天线效率。如果未知,对数周期天线取 0.75,喇叭天线取 0.9;
- V —— 混波室的体积,单位为立方米(m^3);

λ ——频率 f 所对应的自由空间的波长,单位为米(m);

CVF ——混波室确认系数。

注:如果 B.2(4)测量的 P_{AveRec} 值在 B.1.2(5)的所有 8 个位置的记录值范围内(即不大也不小),则不必计算 CLF,假定为 1。在这种情况下,计算 Q 值时,应用 B.1.3 中的 AVF 代替 CVF。

(2)用式(B.14)计算每个频率的时间常数 τ (单位:s):

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f} \quad \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

式中:

Q ——第(1)步的计算值;

f ——试验频率,单位为赫兹(Hz)。

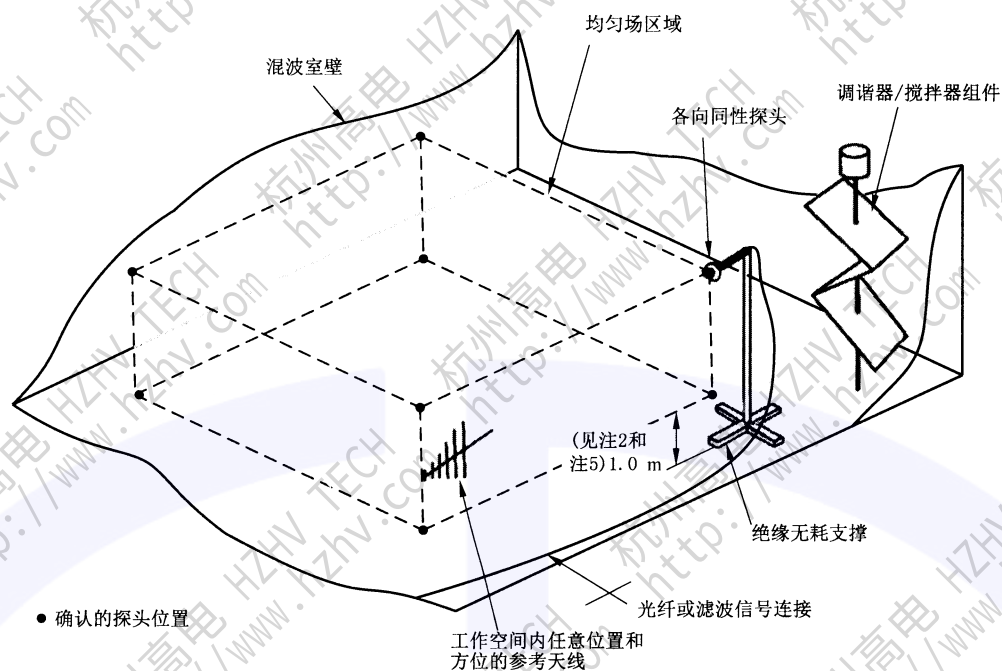
(3)如果超过 10%的试验频率混波室的时间常数大于调制试验脉冲带宽的 0.4 倍,则应在混波室中增加吸波材料或者增大脉冲宽度。如果是增加吸波材料,则需重新测量和计算 Q 值,直至用尽可能少的吸波材料使时间常数满足要求。如果需要使用吸波材料,则应定义新的 CLF。

表 B.1 采样数要求

频率范围	确认和试验 ^d 推荐的 最少采样数 ^a	确认需要的频点数 ^b
$f_s \sim 3f_s$ ^c	12	20
$3f_s \sim 6f_s$	12	15
$6f_s \sim 10f_s$	12	10
$>10f_s$	12	20/十倍频程
^a 所有频率,最少采样数均为 12。对于很多混波室来说,低频时需要增加采样数。最大采样数是给定搅拌器可以提供的独立采样数。该值随频率变化,需在混波室试运行确认。如果混波室不能满足场均匀性要求,可以增加采样数,搅拌器可提供的独立采样数为其可增加的上限。图 A.12 所示就是一个增加采样数的例子。		
^b 对数间隔。		
^c f_s = 起始频率(见 A.1.3 中的 LUF)		
^d 混波室确认过程中搅拌器的转动次序应与后面试验中的相同。		

表 B.2 场均匀性限值要求

频率范围	标准差限值要求
80 MHz~100 MHz	4 dB ^a
100 MHz~400 MHz	100 MHz 时为 4 dB, 线性减小至 400 MHz ^a 时的 3 dB
400 MHz 以上	3 dB ^a
^a 每 8 个频点最多可有 3 个频点超过允许的标准差,但不能超过限值要求 1 dB。	



注 1: 混波室内场均匀性确认应包括 8 个探头位置。

注 2: 探头的位置围成的区域称为混波室的“工作空间”。建议工作空间的边界距离混波室壁、场产生天线或搅拌器不小于 1 m (见注 5)。出于确认和监测的目的,接收天线可在混波室内任意位置。如果可能的话,发射天线应对着混波室的一个角落,对着搅拌器也可接受。发射天线的位置应固定,确认和试验中,发射天线的位置应相同。

注 3: 工作空间的大小以混波室的最大工作空间或者适应受试件来确定。建议工作空间以混波室的最大工作空间确定;否则,如果受试件比较大,则需进行新的确认。工作空间不必为矩形。对于任意形状的混波室,为了正确确定工作空间,可能需要增加确认点。

注 4: 使用各向同性三维探头进行确认。可以使用校准过的电短偶极子天线(即小于 $\lambda/3$)代替,在每个测量位置将偶极子天线放在 3 个相互正交的方向上。应注意确保偶极子天线不能受到其连接电缆的影响。建议使用光隔离测试系统(各向同性探头或偶极子)。

注 5: 如果间距大于最低试验频率对应的 $\lambda/4$,则可以减小最小间距。在任何情况下,不建议间距小于 $\lambda/4$ 。

图 B.1 混波室确认中探头的位置

附录 C

(规范性附录)

搅拌模式混波室的确认和试验

C.1 搅拌模式混波室确认

C.1.1 概述

附录 B 中详述了调谐模式确认,本附录讲述搅拌模式(连续匀速转动)操作方法。搅拌模式时,应注意搅拌速率,保证混波室、传感器和 EUT 对连续变化的场有足够的响应,避免不可接受的影响(包括平均效应)。

搅拌器转速固定时,场的变化率随激励频率而变化。这意味着在最高试验频率搅拌器转动应考虑场的变化,其转动速率也应选择为激励频率的函数。

搅拌器或浆轮应由步进电机驱动(与调谐模式相同),或由连续运行电机驱动,条件是电机的转速是可控的,以适应不同响应时间或周期的设备的试验。如果 EUT 充分暴露在连续变化的场中,搅拌模式可能比调谐模式快。事实上,如果相对于场的变化率来说,EUT 的响应/周期时间短,则搅拌模式更准确,因为其包含了所有的搅拌器状态,同时避免了调谐模式所固有的开始、停止和加速引起的场瞬态变化的影响。

因为模式搅拌器连续转动,混波室的场应在一定的时间间隔内进行采样,应慎重选择时间间隔和采样率。时间间隔太短可能使探头或接收机不能迅速充分响应,捕捉不到混波室内瞬态场,或者由于窗口效应产生副作用。另一方面,时间间隔太长导致场的均值相同或对时间加权,以致与平均值偏差较大的信号检测不到。采样太慢引起测得的搅拌器扫描数据混沌。搅拌模式的数据采集系统应能处理高速率和大容量的数据,其限制了最大采样率和搅拌速度。

附录 B 中调谐模式混波室确认程序可用于搅拌模式混波室的确认。搅拌器以匀速的方式连续转动,探头或者传感器采集转动一圈或一定角度过程中的场。两种模式的主要区别是在混波室的 8 点工作空间确认过程中,三维探头的应用。至少,附录 B 中详述的调谐模式确认方法三维探头可用于提供混波室场均匀性数据和电场确认数据。

C.1.2 用于搅拌模式的场强探头的考虑因素

大多数商用三维电场探头(在自由空间校准)没有足够快的采样率,不能用于连续搅拌模式混波室确认。如果使用这些探头,则搅拌器的转动速率应足够慢,以使校准过的探头对变化的场充分响应。可用其他校准过的快速响应探头。虽然这些探头一般都是单坐标的,但是如果在 8 个位置将探头布置在 3 个正交方向上,这些探头可以用于混波室工作空间的确认。不管使用哪种探头,搅拌器转动一圈,探头的独立采样数(N)应已知。

典型探头关于采样的两个共性问题平滑化和峰值采样,从而导致测量值分别明显偏低或偏高。这两个问题也都导致测得的场均匀性偏好[1]⁴⁾。应通过使用快速响应探头和/或降低转动速率,将这些问题的影响降到最低。

如果多个探头同时布置在混波室内部,它们应使用相同的采样率。否则,设备可能不是暴露在同一个峰值场中。

4) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

搅拌器以足够慢的速度转动,若混波室充分混波,应满足不等式(C.1):

$$T_s \ll \tau_{ch} \ll \tau_p \text{ 和 } T_s \ll \tau_{Rx} \ll \tau_p \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

T_s —— CW 激励波的周期,单位为秒(s),通常是 ns 数量级, $T_s = 1/f_0$;

τ_{ch} —— 未搅拌的混波室的有效(模式平均的)衰减时间[单位为秒(s)],通常是 μs 数量级, $\tau_{ch} = Q(f)/(2\pi f_0)$;

τ_p —— 搅拌过程的时间常数,取决于搅拌器的转动速率 Ω_m 和同一个混波室,相同的搅拌器,在调谐模式可以产生的最大独立采样数,通常是 s 数量级, $\tau_p = 2\pi/(N\Omega_m)$;

τ_{Rx} —— 传感器(探头、天线、接收机)的时间常数,通常是 $\mu s \sim ms$ 数量级的。

注 1: 独立采样数 N 不能超过步进调谐器能够提供的相应量。

注 2: 随着探头技术水平的提高,快速“实时”探头(单坐标或三维)或许会很快应用于混波室连续搅拌模式的工作空间确认。为了获得搅拌器连续转动下的足够密集的样本,可能需取消探头自身软件控制下的默认数据采集(例如,减少或去除单个数据点的重复采样程序)。

注 3: 可以修订附录 B 中的确认程序,以允许在搅拌模式工作空间确认中应用校准过的(在自由空间)探头。

为了保持腔内的场与调谐模式(忽略步进间的过渡)的场处于相同的稳定状态,搅拌器转速上限的量级由式(C.2)确定:

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{8f^2 Q \sqrt{N} V} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$\Omega_m(f)$ —— 频率为 f ,单位为赫兹(Hz)时,机械搅拌器的转动速率,单位为转每秒(r/s);

c —— 自由空间中光速,约为 3×10^8 m/s;

Q —— 频率为 f 时,混波室的品质因数;

N —— 频率为 f 时,最大独立采样数(见 A.3);

V —— 混波室的工作空间的体积,单位为立方米(m^3)。

例如,对于一个混波室, $V = 100 \text{ m}^3$ 、 $f = 1 \text{ GHz}$ 、 $Q = 10^4$ 以及 $N = 1\,000$,要求 $\Omega_m(f) < 0.1 \text{ r/s}$ 。

C.2 搅拌模式抗扰度试验

如果混波室标准差满足均匀性要求,设备试验时可用搅拌模式。试验过程中,用一无源参考天线和一定输入功率就可以在混波室中产生场。在搅拌模式下,采样数(EUT 的响应间隔)会随搅拌器的转速和 EUT 的响应时间变化而急剧增加或减小。如果增加采样数,最大场强期望值(辐射的或接收的)会减小,混波室的场均匀性会提高(见 C.3.3 和 A.4.4)。需仔细考虑的参数是搅拌器的转动时间和非转动时间的比值,以及搅拌器的转动时间和 EUT 的响应/周期时间的比值[2]。如果转动速度相对较高,由于不稳定性效应的出现,会改变试验场的本质和特征[3,4]。

EUT 的响应时间或周期时间常常是未知的,由于缺乏这一信息,应用搅拌模式测量时应仔细考虑设备的最短响应时间和搅拌器的转速。

注 1: 快速响应 EUT、天线或者探头的定义是:在最大场 3 dB 内,场变化 1dB 至少能提供一个采样点。对于响应比较慢的 EUT,每转一步都需有一个预定的停留时间,这种情况下,调谐模式可能比搅拌模式更快更准确。

注 2: 在评价 EUT 的过程中,EUT 的响应时间(已知的或估算的)应与确认过程中使用的探头的响应时间相近,这样总的采样数也相近。

有些设备对平均场或总场比对最大场更敏感(例如,热效应)[1]。EUT 对其所暴露的场有平均或积分作用时,快速转动搅拌器可能是有利的。在这种情况下,试验不再需要最大场而只要平均场。该方法不需确定搅拌器的最大允许转速,而搅拌器的最低转速确定了试验场的不确定度。

确定合适的转速是使用搅拌模式方法的关键。转速取决于频率和小室的 Q 值[2]。搅拌器的转速

应能够为混波室场和测量仪器监测到边界条件的变化提供足够的时间,为 EUT 正确响应和检测所有干扰提供足够的时间。通常,在非破坏性试验中,将一个干扰重复加载到 EUT 上,以确定选择的搅拌器转速是否合适。一旦发生干扰,可调整搅拌器转速,增加或减小,以确定干扰门限是否发生变化。如果设备干扰门限变化很大,则表明原来的搅拌器转速有问题。搅拌模式方法最适合于响应时间非常短的 EUT。

为确保 EUT 能正确响应,搅拌器的转速应足够慢(或快)。搅拌器速度的精确限值 and 详细的试验程序不属于本试验程序范围。作为指导,抗扰度试验的 EUT 充分响应要求搅拌器转速满足:

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{16\pi f^3 \tau_{EUT} \sqrt{N} V} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

τ_{EUT} ——EUT 中任何关键部件的最大时间常数(响应时间),单位为秒(s)。

例如,对于一个混波室, $V = 100 \text{ m}^3$ 、 $f = 1 \text{ GHz}$ 、 $N = 1\,000$ 以及 $\tau_{EUT} = 1 \text{ } \mu\text{s}$, 要求 $\Omega_m(f) < 0.16 \text{ r/s}$ 。

根据试验范围、试验量的性质(平均值或峰值)、平均时间间隔的长度、EUT 的特性,搅拌器转速允许偏离 C.3 中的上限,但应有充分的理由。

如果在试验频率, EUT 的带宽小于混波室的 Q 值带宽,则适用[2]。实际上, EUT 的频率响应和时间常数往往是未知的,很难测量或估算,或者可能存在几个大小在不同数量级上时间常数。如果试验涉及调制激励信号,则信号的周期应不超过相关时间,其要求:

$$\Omega_m < \frac{B}{2\pi N} \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

Ω_m ——在中心(载波)频率 f , 机械搅拌器的转动速率,单位为转每秒(r/s);

B ——激励的带宽 $[f - B/2, f + B/2]$, 单位为赫兹(Hz), 或者是 BW_Q , 取较大值。

应强调试验方法(搅拌模式或调谐模式), 且应与各设备的试验计划相符。使用混波室何种试验方法(搅拌模式或调谐模式)的理由应记录在 EUT 的试验报告中。

产品委员会必须给出相关特定产品兼容性试验的合适搅拌器速度的详细信息。如果产品委员会不能提供相关信息, 则应在调谐模式下进行试验。

C.3 搅拌模式的其他考虑因素

C.3.1 EUT 的响应时间/周期时间

EUT 响应时间/周期时间越短, EUT 越适用于搅拌模式[3]。这是搅拌模式优先用于屏蔽效能试验的原因之一。屏蔽效能试验使用的接收机响应通常很快。对于抗扰度试验, 应考虑 EUT 对所施加的场所需的响应时间和任何检测到的干扰或反常所需的响应时间。对于辐射发射试验, 应考虑设备的周期时间以及监测设备的响应时间。

屏蔽性能很好时, 接收机的分辨率带宽通常设置得很窄以提高测量的动态范围。这可能会降低接收机的响应时间和采样率。这些变化应在试验中考虑到。

C.3.2 搅拌器转速

试验前, 应确定搅拌器的转速。场的变化速度决定了搅拌器的转速。对于抗扰度试验来说, 搅拌器的转速由 EUT 对施加的场和对检测到的干扰或异常的响应时间决定。对于辐射发射试验来说, 搅拌器的转速取决于 EUT 的周期和监控设备的响应时间。图 C.1 和图 C.2 给出了搅拌器以 5.2 r/s 的固定转速转动时, 混波室内 2 个频点的场。混波室中场的变化率与频率相关。频率较高时, 即使中等的搅拌

转速,场的变化速度也会很快,这是因为可获得更多的独立采样点。对于一个特定的混波室,应在关心的频率范围评估场的变化率。可根据最低转动速度确定搅拌器转速,最低转速将给出允许的场的变化率。搅拌器转速也可在试验频率范围内进一步调整。频率低于 1 GHz 时,搅拌器评估的频率间隔不超过 100 MHz;频率大于 1 GHz 时,不超过 1 000 MHz。

C.3.3 搅拌器对电场期望值的影响

如附录 A 所述(见图 A.9),最大电场期望值由搅拌器转动一圈能产生的独立采样数 N (即搅拌器步进数)决定。附录 B 中确认用的调谐器步进数提供的不确定度小于混波室最大可接受值。当采用搅拌模式时,得到的采样数可能小于混波室调谐模式确认中用的采样数。如果获得了更多的采样数,对抗扰度试验的影响是在高于所需电平的电平上进行试验。对于基于最大功率的测量,如果在辐射发射试验中获得了更多的采样数,结果是测量的辐射功率比实际的辐射功率更高。对于基于平均接收功率的测试,由于采样数增加,搅拌模式将更准确。理想情况是试验中获得的样本数与确认中的相同。如果两者不同,则两者的采样数越多越好。因为采样数大(即 $n > 100$)时,电场期望值的变化较小。

注:如附录 A 中所述,搅拌器无法提供无穷多的采样数。影响电场期望值的最大采样数 n 受制于搅拌器所能提供的独立采样数。对于一个给定的混波室,试验频率接近 LUF 时,独立采样数急剧下降。

C.4 用搅拌模式时需说明的问题

使用搅拌模式时,以下几个问题应加以说明:

- (1) EUT 的响应时间/周期;
- (2) 搅拌器的转速(即场变化速度);
- (3) 搅拌对确认精度的影响;
- (4) 由于搅拌器尺寸、混波室尺寸、转动速率以及场的变化率之间的各种相互作用,与场变化率相关的任何敏感度在特性不同的混波室中可能不可复现。

C.5 参考文献

- [1] ARNAUT, L.R., Effect of local stir and spatial averaging on the measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, Aug. 2001, vol. 43 no. 3, pp. 305-325.
- [2] ARNAUT, L.R., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, Nov. 2005, vol. 47 no. 4, pp. 781-804.
- [3] ARNAUT, L.R., Nonstationary effects in mode-stirred reverberation, Proc. 15th Zürich Int. Symp. Techn. Exhib. EMC (18-20 Feb. 2003, Zürich, Switzerland), pp. 245-250.
- [4] ARNAUT, L.R., Angular spectral plane-wave decomposition of nonstationary random fields in mode-stirred reverberation, Phys. Rev. E, vol. 81, 041133, 2010.

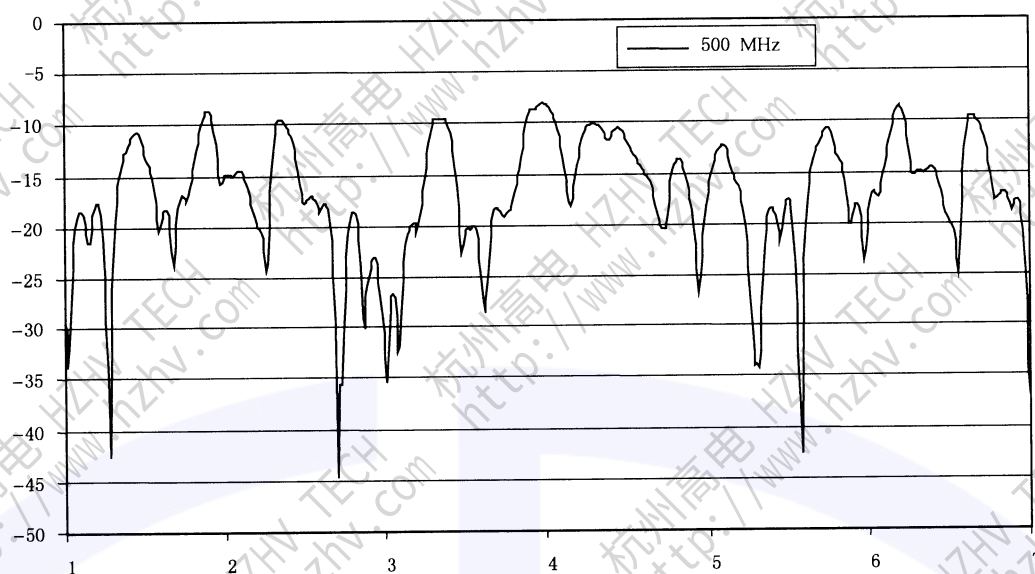


图 C.1 500 MHz 时,接收功率(dBm)与搅拌器转动(s)的关系

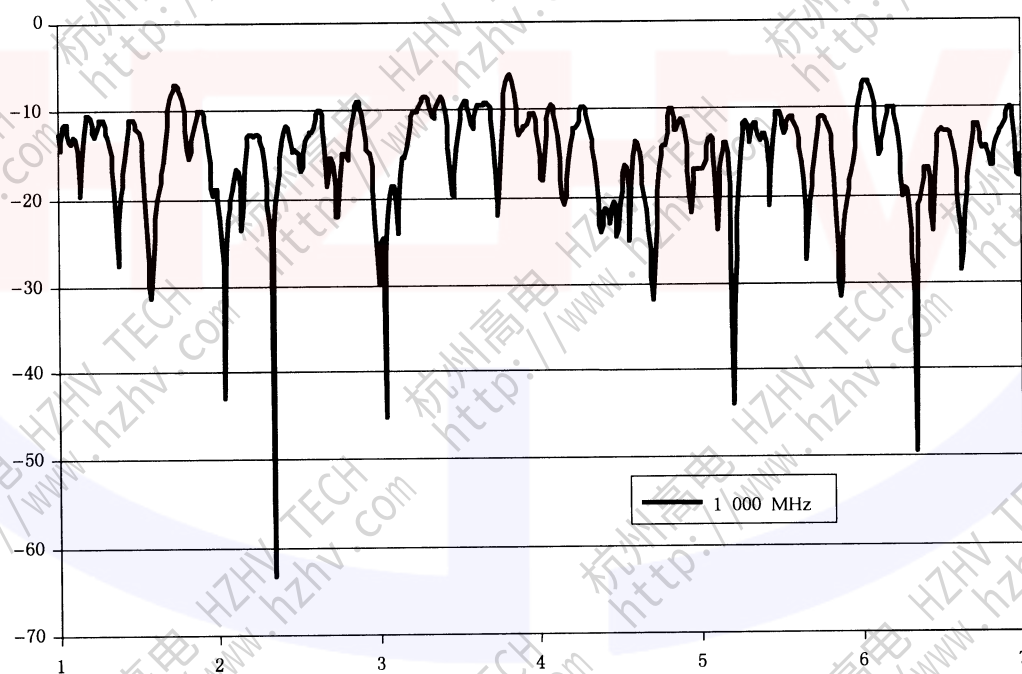


图 C.2 1 000 MHz 时,接收功率(dBm)与搅拌器转动(s)的关系

附录 D

(规范性附录)

辐射抗扰度试验

D.1 试验布置

典型的试验布置应如图 D.1 所示,设备的布局应代表实际安装情况。EUT 距离混波室壁面的距离应至少为小室最低使用频率对应的 $\lambda/4$,台式 EUT 与混波室底板距离应至少为 $\lambda/4$ 。落地式 EUT 应距底板 10 cm,用位于均匀空间下方的低损耗介质架子支撑。试验设备及电缆的布局应在试验报告中给出,以帮助阐明、解释和复现独特的或异常的试验结果。

混波室中应没有任何不必要的吸波材料。不应使用木质桌子、地毯、墙壁和地板的覆盖层及天花板等。外露的灯具也是一种潜在的加载源。对于一个新的混波室,建议在除了门、通风口和电缆接口以外,其他任何辅助设备安装之前,对混波室进行一次评估。支撑装置,例如,桌子等,应是非金属的和低吸收率的。EUT 和所有支撑装置占总工作空间的比例不应超过 8%。

发射天线应与确认时处于相同的位置,发射天线不应直接照射 EUT 或接收天线,建议将发射天线指向混波室的一个壁角。合适的工作模式、EUT 的软件安装和稳定性、试验设备及监视回路和负载等均应确定。

D.2 确认

采集数据前,应检查确定 EUT 和/或其支撑装置是否对混波室产生了不利加载。应按 B.2 进行检查。如果使用搅拌模式,应注意确保充分说明附录 C 中列出的关于搅拌的问题。

D.3 辐射抗扰度试验程序

D.3.1 警告

注意:射频场可能有害,必须遵循相关的国家射频暴露限值。

D.3.2 确定混波室输入功率要求

用式(D.1)确定满足电场密度试验要求所需的混波室的输入功率 P_{Input} :

$$P_{\text{Input}} = \left[\frac{E_{\text{Test}}}{\langle \vec{E} \rangle_{24 \text{ 或 } 9} \times \sqrt{\text{CLF}(f)}} \right]^2 \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

P_{Input} ——为获得抗扰度试验要求的场强,注入混波室的前向功率,单位为瓦(W);

E_{Test} ——抗扰度试验所需的场强,单位为伏每米(V/m);

$\text{CLF}(f)$ ——频率为 f 时的 CLF(无量纲)[B.2(7)];

$\langle \vec{E} \rangle_{24 \text{ 或 } 9}$ ——空载混波室确认获得的归一化场强的均值[见 B.1.2(10)(b)或(c)]。该值需要在确认频率点之间线性插值,也可在更小的间隔上进行确认。

D.3.3 选择频率扫描/步进速度/间隔

D.3.3.1 概述

在选择频率扫描或步进速度时,应考虑 EUT 的响应时间、EUT 的敏感度带宽和监控试验仪器的响应时间。应据此调整选择的扫描速率,并在试验报告中列出。

除非试验计划中特别指定,否则根据以下指导选择试验频率。

D.3.3.2 离散频率试验

对于产生离散频率信号的试验设备,最少的试验频点应为每十倍频程 100 个。试验频点应为对数间隔。举例来说(100 MHz 以上),可用式(D.2)计算按升序排列的频点[4]⁵⁾:

$$f_{n+1} = f_n \times 10^{\frac{1}{N-1}} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

n —— 整数; $n=1 \sim N$, 其中, $N \geq 100$;

f_n —— 第 n 个试验频率(f_1 是起始频率, f_N 是终止频率)。

除试验设备的响应时间和搅拌器转动所需的时间(至完全停止)外,每个试验频率点的停留时间应至少为 0.5 s(见附录 C 关于搅拌的注意事项)。因此,10 倍频程的最少试验时间是每个搅拌器位置应不少于 50 s。调制频率低时,为能在合适的操作模式运行 EUT,每个频率点上需额外的停留时间,至少是两个完整的调制周期。例如,如果应用的调制是 1 Hz 的方波调制,则停留时间应不少于 2 s。应根据 EUT 和试验设备的响应时间及应用的调制调整选择的停留时间,且在试验报告中记录。

D.3.3.3 扫频试验

扫频激励可能会导致混波室场变得不稳定[5,6]。因此,应使用离散频率,除非产品委员会指定了扫描速率。在搅拌模式下,不推荐使用扫频试验。

注:应包含镜像频率(IFs)、时钟频率等已知的设备响应频率。在特定的试验中,制造商或政府/规范要求可能列出优先采用的特殊的扫描速率或频率间隔。

D.4 进行试验

因为混波室不同于其他的大多数 EMC 试验设施,在给定的模式调谐器或搅拌器位置(角度)不存在平面波,其电磁波的传播和 EUT 的激励情况与自由空间环境中的不同。因此,首选的试验电平及相关的置信区间可能与其他试验设施中完全不同。考虑到混波室内的物理统计特性,首选量是最大或平均功率密度,而不是场强。

可选择搅拌模式或调谐模式进行试验。如果选择调谐模式,使用确认确定的最小步进数,搅拌器应在每个频率点等步进角转动一圈。如果选择搅拌模式,应保证试验中的采样次数至少与确认中的一样。不论采用何种模式,EUT 在场中的暴露应有适当的停留时间,这对搅拌模式尤为重要。

注 1:如果数据表明混波室的性能可接受,则确认的采样数可以减少至 12。

用每个频段确认中使用的接收天线测定和记录 P_{MaxRec} 和 P_{AveRec} ,确保产生需要的场强。用 P_{AveRec} 来确保混波室的加载量与 D.2 的确认相比没有变化。应解决 P_{AveRec} 与 D.2 中的数据相差 3 dB 以上的差异。如附录 A 中所述, P_{MaxRec} 也可用于估算产生的峰值电场。

测定和记录 P_{Input} 和 $P_{\text{Reflected}}$ 的平均值。搅拌器转动一圈,若 P_{Input} 变化超过 3 dB,则应在报告指出。

5) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

按试验计划调制载波。如果使用调制,确保其峰值与试验计划的规定一致。

用合适的天线和调制,扫频至上限频率。

注2: 当使用脉冲调制时,确保满足 B.3 中的要求。

注3: 需要在确认频点间线性插值。

D.5 试验报告

试验报告应包括电缆的布局和 EUT 相对于电缆的位置以及试验装置的布置图和/或照片。

此外,除包括与 EUT 相关的要求外,在每个试验频率报告还应包含以下参数:

- a) 用于测定混波室场的接收天线的最大接收功率;
- b) 用于测定混波室场的接收天线的平均接收功率;
- c) 混波室发射天线的前向功率;
- d) 混波室发射天线的反射功率;
- e) 数据采集周期中,前向功率大于 3 dB 的变化;
- f) 不能解决的基于混波室输入功率中的场强与使用 A.5.4 中方法计算的值相差 3 dB 以上的差异。

D.6 参考文献

[1] KOEPKE, G. and HILL, D., Test device directivity for EMC measurements, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 23 Aug. 2000, pp. 535-539.

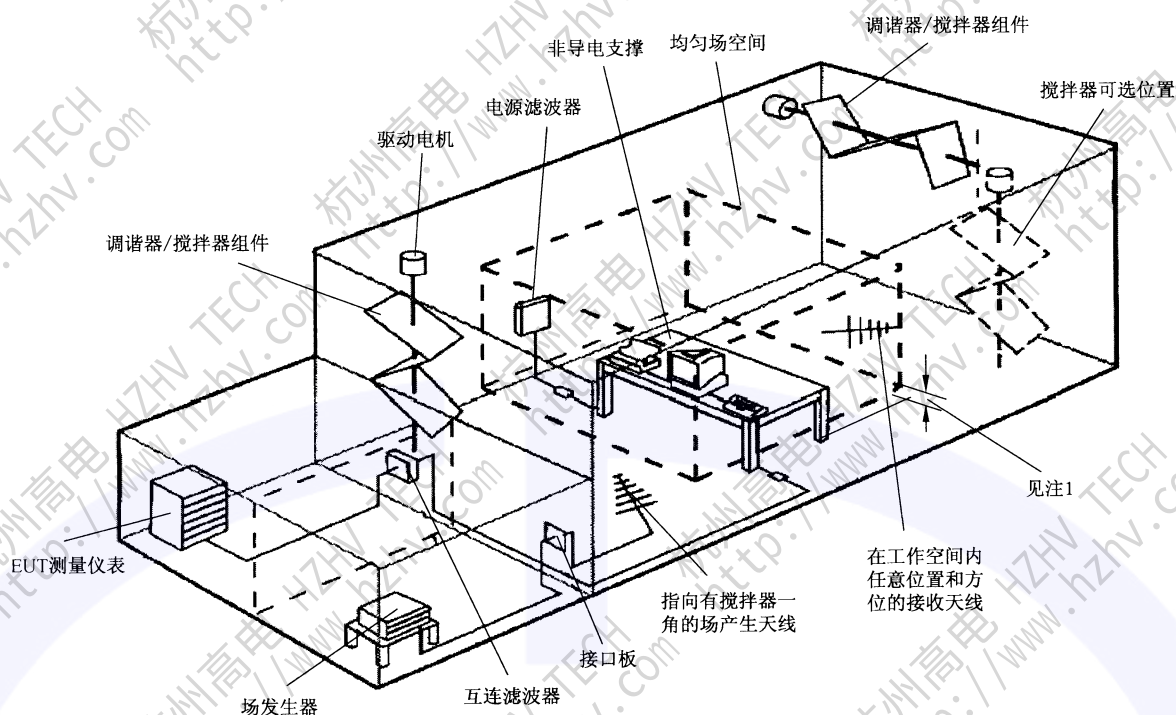
[2] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M., Comparison of anechoic & reverberation chamber transfer function data as a function of directivity magnitude and pattern, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 23 Aug. 2000, pp. 615-620.

[3] FREYER, GJ. and BÄCKSTRÖM, M., Comparison of anechoic and reverberation chamber coupling data as a function of directivity pattern—Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 2001, pp. 286-291.

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

[5] ARNAUT, LR., On the maximum rate of fluctuation in mode-stirred reverberation, IEEE Trans. EMC, vol. 47, no. 4, pp. 781-804, Nov. 2005.

[6] ARNAUT, LR., Maximum rates of frequency scanning and mechanical or electronic stirring for distortionless signal generation inside electromagnetic reverberation chambers, Proc. 2008 EMC Europe Symposium, Hamburg-Harburg, Germany, 8-12 Sep. 2008.



注 1: 试验区域距离混波室任何一个壁面、场产生天线或者搅拌器组件的距离应至少为 LUF 对应的 $\lambda/4$ (见图 B.1 注 5)。

注 2: 如果 EUT 正常工作不需要地平平面, 则可能需用非导电/非吸波支撑。

注 3: 大多数情况下, 聚苯乙烯泡沫是一种合适的支撑。

注意: 如果 EUT 产生大量的热和/或试验时场强会引起弧光, 使用泡沫材料可能存在火灾隐患。

图 D.1 典型的试验设施示例

附录 E (规范性附录) 辐射发射测量

E.1 概述

本附录涉及用混波室进行辐射发射(有意的和无意的)功率测量[1]⁶⁾。本附录没有涵盖所有辐射发射测量的细节。测量设备的相关信息可见 CISPR 16-1-1。一般来说,在使用混波室进行测量时,CISPR 16-1-1 的相关信息可以不经修改地加以采用。

以下两种例外情况需特别注意:

- a) 混波室的品质因数 Q 值太大而导致短脉冲(脉冲宽度小于 $10\ \mu\text{s}$)失真;
- b) 机械搅拌器的运动导致发射信号幅度的明显波动。

合适的小室 Q 值(即时间常数)的确定参见 B.3。在选择停留时间或转速以及选择检波器类型时,应考虑搅拌器的效率。

E.2 试验布置

CISPR 16-2-3 中包含的试验布置的信息同样适用于混波室试验,其仅有的附加要求是:EUT 距离小室壁的距离至少为 $\lambda/4$;落地式 EUT 应距底板 10 cm,用位于均匀空间下方的低损耗介质架子支撑。如果出于 EUT 的正常运转需要,可将其置于地平面上。此外,不必处理接口电缆的位置,且支撑台面应是非吸收且非导电的。典型的测量布置图如图 E.1 所示。

Tx 天线(混波室确认中检查混波室加载量用的)在混波室中应保持与确认中位置相同。Tx 天线不应直接对着 EUT 或 Rx 天线。Rx 天线不应受 EUT 直接照射(即 Rx 天线不应直接对着 EUT)。最好把天线对着混波室的某一个角落。进行软件安装、确定 EUT 的工作模式及稳定性、准备好试验设备和所有监视回路以及匹配负载。

E.3 确认

在采集数据前,应按 B.2 检查确定 EUT 和/或支撑设备对小室是否有不利加载。如果使用搅拌模式,应确保附录 C 中列出的与搅拌相关的问题得到详细描述。一旦加载检查完成后,发射天线应端接与确认中用的信号源输出阻抗相同的负载。

E.4 辐射发射试验程序

注意:射频信号可能有害,遵守适当的国家射频暴露限值。

既可用调谐程序也可用搅拌程序进行试验,无论采用何种程序,确保 EUT 的采样数至少等于确认中确认设备的采样数。对于调谐模式,使用混波室确认中的最少采样点数。调谐器应在每个频率点上等步长步进转动一圈。如果用搅拌模式,应确保 EUT 发射的采样数至少与确认中的采样数一样。与调谐模式一样,搅拌模式的采样点应在搅拌器转动一圈的过程中等间隔采集。

6) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

无论是调谐模式还是搅拌模式,确保在每个采样点监测 EUT 足够长时间以检测到所有的辐射(关于接收机的扫描时间指导见 CISPR 16-2-3)。这对搅拌模式尤为重要。搅拌模式应只适用于用峰值检波器检波的非调制信号。如果用峰值检波器,由于调谐器的运动导致接收信号幅值的变化,试验时间通常会增加。搅拌模式不适用于平均值检波及其他加权检波方式。

对于调制辐射(即非正弦)发射,如果用均方根检波器,可测量在测量带宽内的平均辐射功率(即对整个分辨率带宽平均)。如果辐射频谱宽于测量带宽,可通过对功率谱密度在与调制相关的发射频谱上进行积分获得总的辐射功率。

按照试验计划的规定,用各频段确认中用的 Rx 天线监测和记录 P_{AveRec} 和 P_{MaxRec} 。

注意:为获得 P_{AveRec} 的准确测量值,接收设备的底噪声应至少低于 P_{MaxRec} 20 dB。

用合适的天线和带宽扫描至上限频率。扫描时间应在试验计划中规定。

E.5 确定辐射功率

可用经混波室损耗修正的接收天线的接收功率确定混波室中的设备所辐射的射频功率(在测量带宽内)。本部分中,采用一种替代法确定辐射功率[2],该方法用混波室确认中的数据,增加一个校正系数以考虑辐射的 EUT 对混波室的加载。

可用平均接收功率或最大接收功率计算设备的辐射功率,按式(E.1)和式(E.2)计算。

$$P_{Radiated} = \frac{P_{AveRec} \times \eta_{Tx}}{CVF} \dots\dots\dots (E.1)$$

$$P_{Radiated} = \frac{P_{MaxRec} \times \eta_{Tx}}{CLF \times IL} \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

$P_{Radiated}$ ——设备的辐射功率(测量带宽内);

CVF ——混波室确认系数[B.2(6)];

CLF ——混波室加载系数[B.2(7)];

IL ——混波室插入损耗(B.1.4);

P_{AveRec} ——在 E.4 的搅拌器位置上参考天线的接收功率(测试带宽内)的平均值;

P_{MaxRec} ——在 E.4 的搅拌器位置上参考天线的接收功率(测试带宽内)的最大值;

η_{Tx} ——混波室确认过程中使用的发射天线的天线效率,如果未知,对数周期天线取 0.75,喇叭天线取 0.9。

式(E.1)用于基于平均接收功率的测量,式(E.2)用于基于最大接收功率的测量。基于平均接收功率测量的优点是不确定度较低,缺点是为获得准确的平均值测量,测量系统的灵敏度应低于测得的 P_{MaxRec} 20 dB。

注:为了避免试验前的混波室确认,提出了其他测量辐射发射的方法,但需将 EUT 作为信号源,利用脉冲延迟的时域测量[3]。假定允许由脉冲延迟测量确定的 Q 值[式(A.11)]可偏离由 CW 测量获得的值[式(A.10)],这些方法可获得与式(E.1)得到的估算的总辐射功率可比较的结果。

E.6 估算 EUT 在自由空间中产生的场(远场)

可用式(E.3)估算 EUT 在距离 R[单位为米(m)]处产生的场强:

$$E_{Radiated} = \sqrt{\frac{D \times P_{Radiated} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

E_{Radiated} ——估算的 EUT 产生的场强,单位伏每米(V/m);

P_{Radiated} ——E.5 中的辐射功率,单位为瓦(W);

R ——距 EUT 的距离,单位为米(m),其应足够大以保证处于远场区;

η_0 ——是自由空间的波阻抗,近似等于 377Ω ;

D ——EUT 的最大方向性系数(无量纲)。

注:通常取方向性系数 $D=1.7$,表示假定 EUT 的辐射方向图与长度介于半波长到一个波长之间的偶极子的辐射方向图相同。除非产品委员会能够提供合适的值,一般情况下,建议 D 取 1.7。有关设备的方向性系数的最新研究请参看文献[4,5]。

计算的骚扰场强常与在 OATS 或者是其他类似试验场地测得的数据不一致。如果需要,应通过针对 EUT 类型或产品组的特定程序来证明其一致性。

E.7 估算 EUT 产生的半空间场强(远场)

距离为 R [单位为米(m)],距离理想导电地平面高度为 h 处 EUT 产生的场强可用式(E.4)估算:

$$E_{\text{Radiated}} = g_{\text{max}} \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Radiated}} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad \text{..... (E.4)}$$

上式中的符号与方程(E.3)中的含义相同,

g_{max} ——地面反射引起的无量纲几何因子。

几何因子考虑了典型应用于半空间的高度扫描。可通过式(E.5)计算几何因子:

$$g_{\text{max}} = \begin{cases} \left| \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} - \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{水平极化} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{垂直极化} \end{cases} \quad \text{..... (E.5)}$$

式中:

$r = \sqrt{s^2 + R_h^2}$ ——天线到 EUT 与地面的垂足的距离,单位为米(m);

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_h - h)^2}$ ——天线到 EUT 的直射路径长度,单位为米(m);

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_h + h)^2}$ ——天线到 EUT 的反射路径长度,单位为米(m);

s ——测量距离,单位为米(m);

R_h ——天线高度,单位为米(m);

相关的几何关系见图 E.2。接收天线在高度(参数 R_h)上扫描获得最大值。对于典型的 OATS 测量($s=10\text{ m}$, $h=1\text{ m}$,扫描高度 $1\text{ m} \sim 4\text{ m}$),如果频率大于 200 MHz,水平极化和垂直极化的 g_{max} 都近似等于 2。文献[6,7]分别给出了由电场探头测量值和参照 OATS 测量值估算辐射发射功率的换算程序。

E.8 方向性系数

电偶极子或磁偶极子与波长相比很短,其方向性系数为 1.5。电偶极子和磁偶极子组合的方向性系数为 3。对于一个电大的 EUT,将其假设为类似于偶极子的辐射通常不够准确,会导致方向性系数偏大。除在某些方向上有窄的孤立波束外,假定 EUT 的辐射近似为全方向辐射,无意辐射体的期望的方向性系数 D 可用基于半径为 a 的最小包络球的公式近似:

$$D = \begin{cases} 1.55 & ka \leq 1 \\ 0.5 \left(0.577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) & ka \geq 1 \end{cases} \quad \text{..... (E.6)}$$

除非产品委员会能提供一个更合适的值,否则,对于偶极子辐射,方向性系数推荐取最大值, $D=3$,

或者根据式(E.6)取值。

E.9 MU

辐射发射的 MU 的估算,参见附录 K 和文献[8]。一般来说,MU 取决于 EUT 与接收天线的阻抗匹配情况以及空载混波室的 IL。

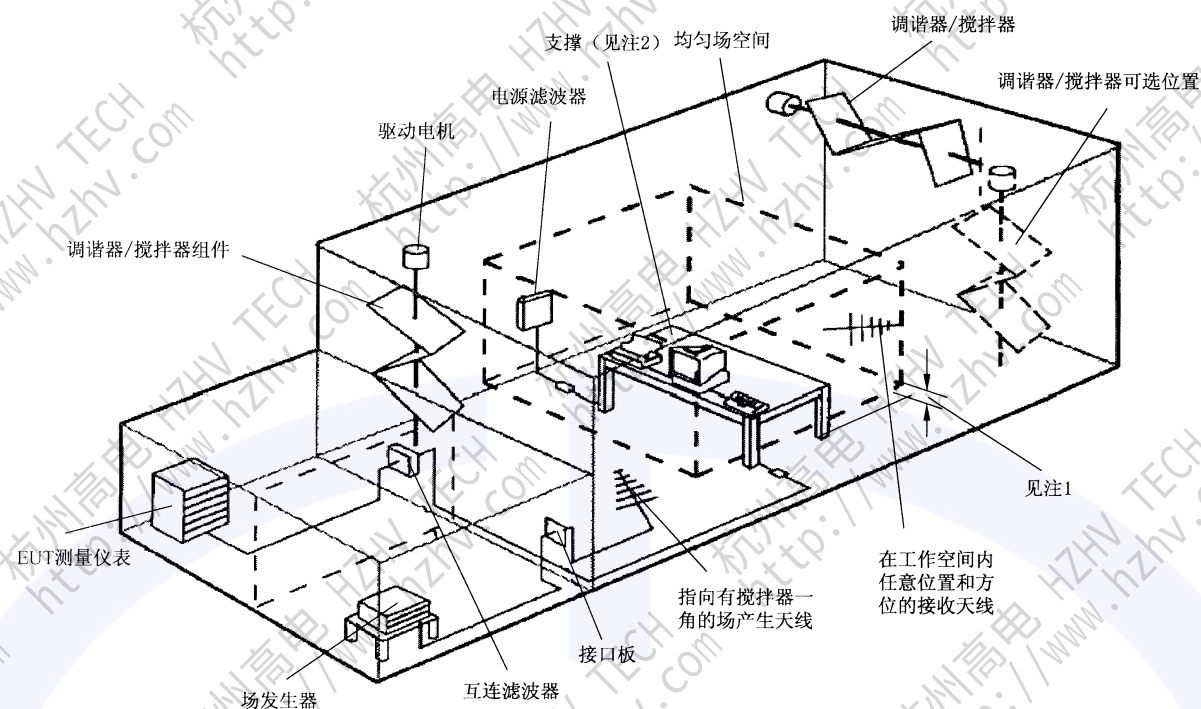
E.10 试验报告

试验报告除了包括 EUT 的相关信息外,在每个试验频率,还应包括以下参数:

- a) 接收天线的最大接收功率(如果有记录);
- b) 接收天线的平均接收功率(如果有记录);
- c) E.5 定义的 EUT 发射功率;
- d) 如果需记录估计的电场,应同时记录计算电场(见式 E.3)的假定的方向性系数;
- e) E.3 要求的加载数据;
- f) 电缆的布局 and EUT 相对于电缆的位置;
- g) 试验布置图(如照片等)。

E.11 参考文献

- [1] HARRINGTON, TE., Total-radiated-power-based OATS-equivalent emissions testing in reverberation chambers and GTEM cells, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, 22 Aug. 2000, pp. 23-28.
- [2] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. EMC., vol. 18 no. 2, May 1976, pp. 54 - 59; Comments and corrections, IEEE Trans. EMC, vol. 18 no. 4, Nov. 1976, p. 205.
- [3] KRAUTHÄUSER, HG., On the measurement of total radiated power in uncalibrated reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, vol. 49 no. 2, pp. 270-279, May 2007.
- [4] BÄCKSTRÖM, M., LORÉN, J., ERIKSSON, G., and ÅSANDER, H-J., Microwave Coupling into a Generic Object. Properties of Measured angular Receiving Pattern and its Significance for Testing, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 13-17, 2001, pp. 1227-1232.
- [5] WILSON, P., KOEPKE, G., LADBURY, J., and HOLLOWAY CL., Emission and Immunity standards: Replacing Field-at-a-Distance Measurements with Total-Radiated Power Measurements, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Montreal, Canada, Aug. 13-17, 2001, pp. 964-969.
- [6] GARBE, H. and BATTERMAN, S., Converting total-radiated-power measurements to equivalent E-field data, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Detroit, MI, August 18-22, 2008.
- [7] VAN DIJK, N., New concepts for EMC standards applicable to multimedia products, Doctoral Thesis, TU Eindhoven University Press, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 2007. [<http://alexandria.tue.nl/extra2/200710787.pdf>]
- [8] ARNAUT, LR., Measurement uncertainty in reverberation chambers—I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008. [http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf]



- 注 1: 试验区域应距离混波室任何一个壁面、场产生天线或者调谐器/搅拌器的距离至少为 LUF 的 $\lambda/4$ (见图 B.1 的注 5)。
- 注 2: 如果 EUT 不需要地平面, 则应使用非导电性/非吸波支架。
- 注 3: 在大多数情况下, 聚苯乙烯泡沫是合适的支撑。如果 EUT 产生大量的热, 使用泡沫材料可能存在火灾隐患。
- 注 4: 混波室中应没有任何不必要的吸波材料。不应使用木质桌子、地毯、墙壁和地板的覆盖层和天花板等。暴露的照明装置也是一种潜在的加载源。对于一个新的混波室, 建议除了门、通风口和电缆接口以外, 其他任何辅助设备安装之前, 对混波室进行一次评估。支撑设备, 如桌子等, 应是非金属的和非吸收性的。

图 E. 1 合适的试验设施示例

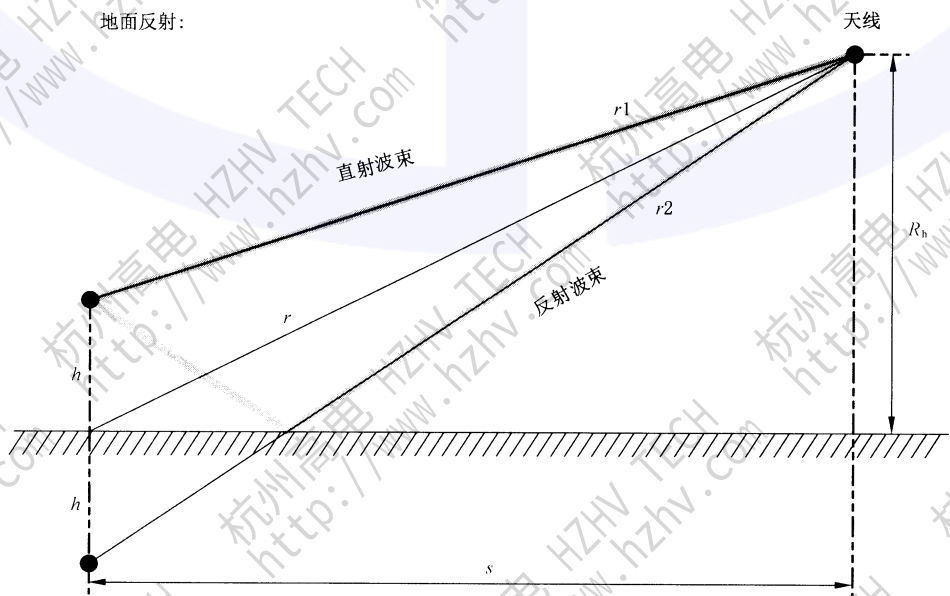


图 E.2 关于辐射发射的几何因子计算

附 录 F

(资料性附录)

电缆组件、电缆、连接器、波导和无源微波元件的屏蔽效能测量

F.1 EUT 屏蔽效能测量

与辐射抗扰度试验一样,有很多试验方法可以用于评价衬垫、窗口材料以及其他用于屏蔽的系统结构的屏蔽效能[1-3]⁷⁾。本附录中屏蔽效能的测量是基于比较 EUT 外部的电磁功率与 EUT 内感应的电磁功率。屏蔽效能定义为:

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

P_{EUT} —— EUT 耦合的功率,单位为瓦(W);

P_{Ref} —— 参考天线耦合的功率,单位为瓦(W)。

F.2 试验布置描述

F.2.1 混波室

混波室应至少留有一个额外的连接端口,用来连接 EUT。一些 EUT 可能需要多个连接端口。

F.2.2 天线

发射天线和参考天线与混波室确认中使用的相同。

F.2.3 试验布置

用于屏蔽效能自动测量的典型试验设备和组件如图 F.1 所示。注意可能需要预放、功放和其他组件以获得理想的动态范围。

F.2.4 EUT

EUT 通过一定长度的合适媒介(即同轴电缆、波导等)连接到测量设备上。为了保证 EUT 处于均匀场中,连接媒介的长度应至少为 LUF 对应波长的 1/3。EUT 的试验端口应与测量设备相连。任何其他端口应接匹配负载,且匹配负载的屏蔽效能至少比 EUT 的屏蔽效能大 5 dB(或至少比所需的屏蔽效能大 10 dB)。

F.2.5 连接件

连接件通常用 50 Ω 同轴电缆,其屏蔽效能至少比 EUT 的屏蔽效能大 10 dB(或至少比所需的屏蔽效能大 10 dB)。

试验前,应知道所有连接件的衰减,这包括 EUT 和参考天线的连接件。见图 F.1。

7) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

F.3 测量程序

F.3.1 概述

可选择搅拌模式或调谐模式进行试验。对调谐模式,采样数至少与确认中相同,以保证测量的不确定度与确认的不确定度相同或更优。搅拌器在每个频率点上应等步进角转动一圈。对于搅拌模式,搅拌器的最大转速应确保 EUT(即监测接收机)的采样数至少与确认中确认设备的一样。不论采用何种模式,确保 EUT 暴露在场中有适当的停留时间,这对于搅拌模式尤其重要。如果用搅拌模式,应注意保证附录 C 中搅拌的相关问题得到充分描述。

注:如果 EUT 和监测设备的响应很快,通常非常适合选用搅拌模式进行屏蔽效能测量,这是这类测量的常见情况。

测量参数可是平均接收功率也可是最大接收功率。平均接收功率的测量准确度更高,然而,为了获得准确的平均数据,平均接收功率的灵敏度比最大接收功率至少低 20 dB。对于基于最大接收功率的测量,测量系统的动态范围应比所需的屏蔽效能至少大 10 dB。

F.3.2 EUT 测量

射频发生器连接到混波室上(如果需要,加上功放),在一固定频率点向混波室输入一恒定功率。搅拌器按所需的方式进行转动。

测量装置连接到 EUT。混波室的参考天线连接至监测设备。

进行合适数量的采样或搅拌器转动一圈后,在每个试验频率记录所需的参考天线和 EUT 的参数(即平均接收功率或最大接收功率)。

考虑 EUT 和参考天线的连接件的衰减,可计算出屏蔽效能。

注:不要混淆参数!天线的最大接收功率与 EUT 的最大接收功率相比,或天线的平均接收功率与 EUT 的平均接收功率相比。

F.3.3 EUT 的替代测量方法

如果没有两套测量装置,则测量设备一次仅与 EUT 和参考天线中的一个连接。

如果用两套连接件,在计算屏蔽效能时,EUT 和参考天线的连接件的损耗均应考虑。

如果仅用一套连接件,则连接件的损耗可以忽略不计,屏蔽效能是两个接收功率的差值(峰值或平均值)。

F.4 试验系统的控制

在任何测量之前,应用与 EUT 中相同的连接件和终端检查试验系统的动态范围,除了用一个良好屏蔽的装置代替 EUT。系统的动态范围应至少比所需的屏蔽效能大 5 dB。

F.5 参考文献

- [1] IEC 61726, Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components—Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method
- [2] IEC 60169-1-3, Radio-frequency connectors—Part 1: General requirements and measuring methods—Section Three: Electrical tests and measuring procedures; Screening effectiveness
- [3] IEC 61000-5-7, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 5-7: Installation and mitigation guidelines—Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)

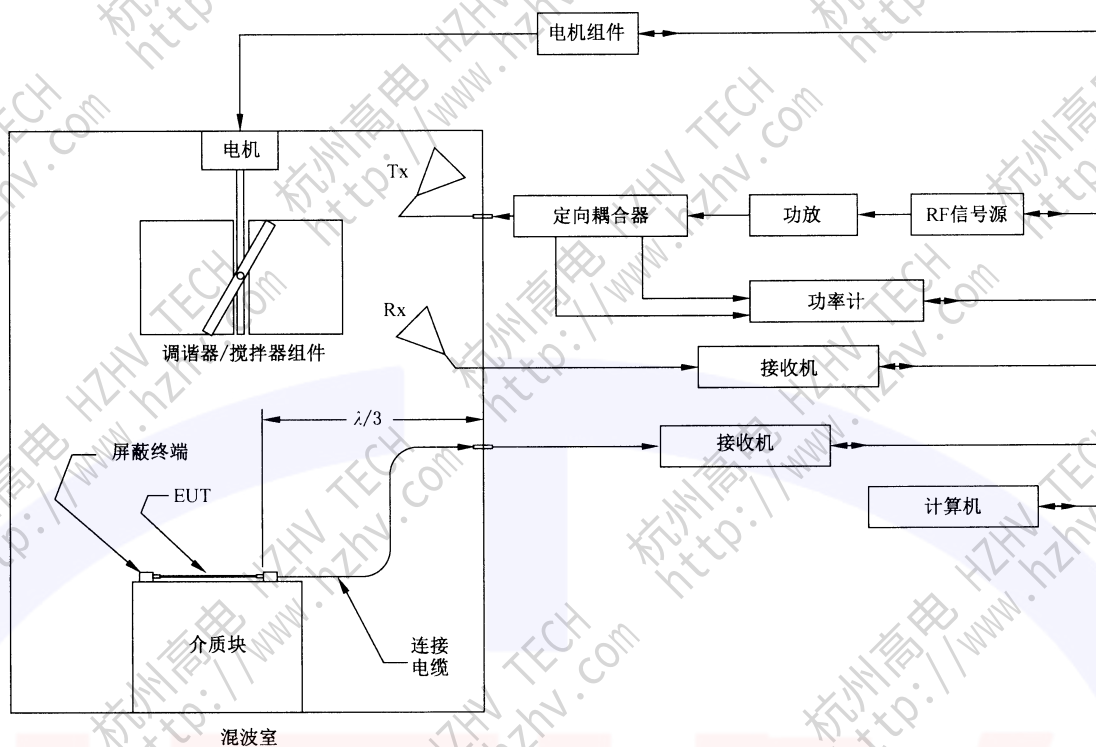


图 F.1 典型的试验布置

附录 G

(资料性附录)

衬垫和材料的屏蔽效能测量

G.1 概述

与辐射抗扰度试验中一样,有很多试验方法适用于评价衬垫、窗口材料,以及其他设计用于提供屏蔽的系统结构的屏蔽性能[1-3]⁸⁾。典型的做法是,屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)测量比较有和无屏蔽材料或衬垫时箱体内部的电磁环境。很多资料都给出了屏蔽效能试验方法,如 MIL-STD-285 [12]。然而,很多屏蔽效能测量的重复性和场地间的可比较性差。有些差异是试验方法的原因,而有些差异是由于试验件本身引起的。很多因素会显著影响 SE 测量的重复性,例如,配合面情况和紧固件的力矩等。

对于很多屏蔽结构(例如,衬垫、窗口等),混波室试验用“嵌套混波室”的方法(即一个混波室置于另一个混波室内)。接收天线和浆轮调谐器安装在试验装置内,检测泄漏到装置内的射频信号。对于混波室法 SE 测量不熟悉的读者应参见一篇或几篇参考资料[4-7]。

为了在 SE 试验中获得重复性,需仔细控制试验装置的很多因素。若这些影响因素可控,混波室内 EM 环境的场均匀性提供各方向的 SE 试验,且场地间的重复性非常好。

注 1: 试验装置设计/结构上的微小差别会对试验结果有很大影响。为了得到可重复的结果,应控制试验装置的材料、螺栓间距、表面光洁度、扭矩设置等。由于为适应多种不同衬垫或材料的评估需变化大量参数,本附录不包括详细的试验装置设计指导。将来版本中正在考虑通用装置的设计。

注 2: 本附录中的试验程序假定屏蔽的名义值由受试的衬垫和材料提供。如果受试材料和/或衬垫提供的屏蔽低于 10 dB,则试验装置的品质因数 Q 值与混波室的 Q 值相关。在这种情况下,TFVF(G.3.8)不再适用,应采用[8]中阐述的方法。

注 3: 本程序假定试验装置孔缝非常大(与试验装置的一边长同数量级)。如果是这种情况,那么用图 G.1 的试验布置且去除盖板,参考 Rx 天线接收的功率应与 Rx 天线的接收功率相似。否则不能用本程序,应采用[8]中的方法。

G.2 屏蔽效能测量

SE 测量是基于比较 EUT 外部的电磁功率与传播到 EUT 内部的电磁功率。屏蔽效能定义如下:

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \dots\dots\dots (G.1)$$

式中:

P_{EUT} —— 耦合到 EUT 内的功率;

P_{Ref} —— 耦合到参考天线上的功率。

G.3 试验布置描述

G.3.1 概述

对于衬垫和材料试验,通常要求构造一个可以安装衬垫和材料的试验装置。有些情况,可用受试材

8) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

料构造整个外壳。在这种情况下,应使用附录 H 中的程序。混波室法使用“嵌套混波室”测量 SE。接收天线和机械调谐器/搅拌器安装在试验装置内部,检测任何“泄漏”到装置内的射频能量。机械调谐器/搅拌器应尽可能大,且与接收天线应该保持 $\lambda/4$ 的距离。图 G.1 是“嵌套混波室”的例子。对于衬垫和窗口材料等试验件,可能需要在盖板上开孔。

注:本附录中的程序并不将孔缝的屏蔽效能与用于孔缝连接的衬垫或材料的屏蔽效能区分开来。如果需区分,应使用文献[8]中的程序。

G.3.2 材料的试验装置

对材料进行试验需要一个试验装置。图 G.2 是试验装置的一个例子。装置应有与所用的衬垫兼容的安装面。试验中,可以使用受试材料替代盖板,或者将受试材料安装到盖板的孔缝处。装置的尺寸决定了可以获得有用数据的最低频率。对于大多数装置,可用装置有约 60 个模式的频率点来估算其 LUF。G.3.8(1)给出了确定此频率的公式。否则,用 B.1.2 中的程序对装置进行确认。

G.3.3 衬垫的试验装置

对衬垫进行试验需要一个试验装置。图 G.2 是试验装置的一个例子,装置的安装面应代表应用情况。装置的尺寸决定了可以获得有用数据的最低频率。对于大多数装置,可用装置有约 60 个模式数的频率点来估算装置的 LUF。G.3.8(1)给出了确定此频率的公式。否则,用 B.1.2 中的程序来确定装置的 LUF。

G.3.4 混波室

混波室上应配备多个输入输出接口,以方便试验装置与测量设备的连接。

G.3.5 天线

所用的 Tx 天线在试验频段内应有效。最重要的是装置中的 Tx 天线的天线效率尽可能高。

确认试验装置性能与采集屏蔽数据的 Rx 天线的效率应相同。建议使用相同的天线。

接收天线效率不是很关键,然而为了保证良好的动态范围,接收天线的效率应尽量高。

G.3.6 试验布置

屏蔽效能自动测量所需的基本试验设备和组件如图 G.1 所示。注意可能还需要前置预放、功放以及其他组件,以获得所需的动态范围。

G.3.7 连接件

连接件通常使用 50 Ω 同轴电缆,且其屏蔽效能至少比所需的屏蔽效能大 10 dB。

在开始试验前,应确定所有连接件的损耗特性,包括 EUT、Rx 天线、Tx 天线以及参考天线等的连接件。

G.3.8 试验装置确认

在任何试验之前,应确认试验装置。确认的目的是为了确定试验装置的品质因数 Q,以便说明腔体“Q”值对接收信号的任何影响。确认程序如下:

(1) 通过计算试验装置至少存在 60 个模式($N=60$)的频率,确定试验装置的 LUF,按式(G.2)计算(仅对矩形小室有效)[4]:

$$N = \frac{8\pi}{3} abd \frac{f^3}{c^3} - (a + b + d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \dots\dots\dots (G.2)$$

式中:

a 、 b 、 d ——装置的尺寸,单位为米(m);

c ——装置内波传播的速度,单位为米每秒(m/s);

f ——频率,单位为赫兹(Hz)。

注1:为了最小化截止效应,装置的缝隙的最小尺寸应至少是LUF的 $\lambda/2$ 。式(G.2)可推广到任何形状(非矩形的)的试验装置,包括曲面边界[8]。

- (2) 如图 G.3 所示,确认时在试验装置内安装一个发射天线。机械调谐器尺寸应尽量大,同时与 Rx 天线保持 $\lambda/4$ 的距离。Rx 天线的理想放置方式为对着混波室的一个角。将 Rx 天线对着调谐器/搅拌器放置也是可接受的。试验装置的 Rx 天线连接件和调谐器/搅拌器动力等的馈入点应有良好屏蔽。馈入点的屏蔽效能应至少比所需的屏蔽效能大 5 dB。

- (3) 安装受试衬垫和/或材料,按试验要求布置试验装置。在每一个试验频率点向试验装置内的 Tx 天线输入已知功率(即,确认应相对于 Tx 天线和 Rx 天线终端)。在最大接收信号的调谐器位置,记录试验装置内调谐器转动一圈试验装置内的 Rx 天线的最大接收功率,记录试验装置内 Tx 天线的前向功率和反射功率。

注2:因为所用的接收仪器一般响应较快,所以 SE 试验非常适于用搅拌模式。如果用搅拌模式,确保描述清楚附录 C 中的问题。如果采用调谐模式,至少用附录 B 中给出的最少采样数,其中 f_c 是试验装置中有 60 个模式的频率。

- (4) 由发射功率与最大接收功率的比值,确定试验装置确认因子(TFVF)。

$$TFVF = \frac{P_{MaxRec}}{P_{Input}} \dots\dots\dots (G.3)$$

式中:

P_{MaxRec} ——安装在试验装置内的调谐器转动一圈,试验装置接收天线终端的最大接收功率,单位为瓦(W);

P_{Input} ——试验装置内发射天线终端的净输入功率,单位为瓦(W)。由步骤(3)的前向功率和反射功率测量值计算输入功率; $P_{Input} = P_{Forward} - P_{Reflected}$ 。

- (5) 如果时间允许,将 Tx 天线和 Rx 天线放在试验装置内的不同位置,重复该程序两次以上。对每一个频率,用最大接收功率的平均值确定 IL(即当用 Tx 天线和 Rx 天线的 3 种组合方式来确认试验装置时,在每一个频率上,使用 3 个最大读数的平均值来计算 TFVF)。每次输入功率应相同。如果每次的输入功率不同,计算每次试验的 TFVF,然后计算装置的平均 TFVF。

G.3.9 确定测量的动态范围

进行任何试验前,应按如下程序确定测量的动态范围:

- (1) 移开试验装置上的屏蔽材料或盖板,确保接收天线已经就位;

注1:本质上,这应等同于移除试验装置的一个面。

- (2) 将发射天线和发射连接件从试验装置上移除,并将一屏蔽终端连接至试验装置的发射天线连接端。屏蔽终端的屏蔽效能应至少比待测材料的屏蔽效能高 10 dB;

- (3) 对于每一个频率,将已知功率的信号输入到混波室的发射天线上(应重新进行相对于天线终端的确认),混波室调谐器转动一圈,记录试验装置接收天线的最大接收功率;

注2:因为所用的接收仪器一般响应较快,所以 SE 试验非常适于用搅拌模式。如果用搅拌模式,确保描述清楚附录 C 中的问题。如果采用调谐模式,至少用与混波室确认中相同的采样数。

- (4) 将试验装置的 Rx 天线用良好屏蔽的终端代替;

- (5) 重复步骤(3);

注3:混波室的输入功率应相同,或者每个接收功率应对混波室的输入功率归一化。

- (6) 换回试验装置的 Rx 天线；
- (7) 由步骤(3)和步骤(5)中记录的读数的比值确定测量系统的动态范围[单位为分贝(dB)]。并用式(G.4)的试验装置 IL 修正,确保动态范围比所需的屏蔽效能值至少大 5 dB。

$$Dynamic\ Range = 10\log_{10}\left(\frac{P_{RxAntenna}}{P_{RxTermination}}\right) + 10\log_{10}(TFVF) \dots\dots\dots (G.4)$$

式中,

$P_{RxAntenna}$ —— 试验装置 Rx 天线的最大接收功率;

$P_{RxTermination}$ —— 将试验装置的 Rx 天线用终端代替,Rx 天线终端的最大接收功率;

TFVF —— G.3.8(4)中的试验装置确认因子。

G.4 测量程序

G.4.1 概述

可以用调谐模式或搅拌模式进行试验。对于调谐模式,混波室调谐器的采样数应至少与混波室确认中的采样数相同。试验装置调谐器的采样数应至少与 G.3.8(3)中的采样数相同。当使用调谐模式时,混波室调谐器每转动一步,试验装置调谐器转动一圈。当使用搅拌模式时,最大搅拌速率应保证 EUT 及相关的测量装置获得的采样数至少为调谐模式中使用的采样数。不论采用哪种模式,要保证采集场强的测量设备有合适的停留时间。这一点对于搅拌模式尤其重要。

注:组合使用搅拌模式与调谐模式往往很方便。混波室的调谐器采用与混波室确认中一样的步进数转动一圈,同时试验装置内搅拌器连续转动。在混波室调谐器的每一个位置(步),试验装置内的调谐器转动一整圈。试验装置内调谐器的转速与 G.3.8(3)相同,这保证测量设备的采样速率,使得试验装置内调谐器每转动一圈获得所需的采样数。最大搅拌速率指导见附录 C。

测量的参数是最大接收功率。对于基于最大接收功率的测量,测量系统的动态范围应至少比所需的屏蔽效能大 5 dB。

G.4.2 EUT 的测量

- (1) 将射频信号源连到混波室(如果需要的话,通过功放连接);
- (2) 将测量设备连接到试验装置的 Rx 天线(如果需要的话,通过一个预放连接);
- (3) 将混波室的参考天线连接到混波室的监测设备(如果需要的话,通过衰减器连接);
- (4) 将受试衬垫和/或材料安装到试验装置上;
- (5) 启动混波室和试验装置的调谐器/搅拌器;
- (6) 以固定输入功率向混波室注入第一个试验频率信号;
- (7) 记录混波室监测设备以及 EUT 监测设备在调谐器/搅拌器转动一圈中的最大读数;
- (8) 对于所有试验频点,重复步骤(7);
- (9) 在疑似泄漏点安装已知的屏蔽材料(铝或铜箔或带)。不要在馈电点或不属评估范围的试验装置的任何其他地方附加屏蔽;
- (10) 重复步骤(5)~(8)进行泄漏试验;

注:数据采集和泄漏试验的混波室输入功率应相同。如果输入功率不同,则在计算 SE 之前,所有数据应对混波室的输入功率归一化。

- (11) 考虑到 EUT 和参考天线的连接件的衰减,可用式(G.5)计算屏蔽效能[单位为分贝(dB)];

$$SE = 10\log_{10}\left(\frac{P_{Ref}}{P_{EUT}}\right) - 10\log_{10}(TFVF) \dots\dots\dots (G.5)$$

式中:

P_{EUT} —— 试验装置 Rx 天线的最大接收功率(修正了连接损耗);

P_{Ref} —— 混波室参考天线的最大接收功率(修正了连接损耗);

TFVF —— 由 G.3.8(4)中式(G.3)获得的试验装置确认因子。

- (12) 步骤(10)中的“泄漏”试验保证泄漏的信号是通过试验装置的待评估区域进入的,而不是由于试验装置的改动,如调谐器动力和接收电缆的馈入点等。通过替换步骤(10)中的接收功率,用式(G.5)确定本试验装置的 SE。如果通过步骤(10)所获得的 SE 不比没经过任何修改的试验装置的屏蔽效能大 5 dB,则认为步骤(10)中的 SE 大于或等于没做任何修改的试验装置的屏蔽效能。如果需要测更高的 SE,则需进一步查验测量系统的馈入点。

G.4.3 EUT 测量的替代方法

如果没有两套测量设备,则测量设备一次仅可连接 EUT 和参考天线中的一个。

如果用两套连接件,则计算屏蔽效能时应考虑连接 EUT 和参考天线的连接件的衰减。

如果只使用一套连接件,则连接件的衰减可不考虑,屏蔽效能就是两个接收功率的差值。

G.5 传输横截面

G.5.1 概述

另外一种估算屏蔽效能的方法是传输横截面(σ_a)。传输横截面[单位为平方米(m^2)]的定义如下:

$$P_{\text{Trans}} = \sigma_a S_{\text{inc}} \quad \text{..... (G.6)}$$

式中:

P_{Trans} —— 通过孔传输的功率,单位为瓦(W);

S_{inc} —— 入射到孔的场的功率流密度[10][11],单位为瓦每平方米(W/m^2);

一般来说,如果入射场是平面波, σ_a 取决于入射角和极化方式。当用混波室测量时,合成的 σ_a 是所有入射角度和所有极化的各向同性的平均值。这是由于混波室内的各向同性的环境特性。

为了获得传输横截面,应改变 G.3.8 中采集的数据。记录 G.3.8(3)中的平均接收功率而不是最大接收功率,计算基于平均功率的 TFVF 的倒数,可用式(G.7)计算传输横截面[单位为平方米(m^2)]。

$$\sigma_a = \frac{\lambda^2 \eta_{\text{Rx}} \eta_{\text{Tx}}}{8\pi} \cdot \frac{P_{\text{Input}}}{P_{\text{AveRec}}} \cdot \frac{\langle P_{\text{TestFixture}} \rangle}{\langle P_{\text{Ref}} \rangle} \quad \text{..... (G.7)}$$

式中:

$\frac{P_{\text{Input}}}{P_{\text{AveRec}}}$ —— G.3.8(4)中获得的 TFVF 的倒数,其是用平均接收功率而不是最大接收功率计算的;

$\langle P_{\text{TestFixture}} \rangle$ —— 试验装置内天线的平均接收功率;

$\langle P_{\text{Ref}} \rangle$ —— 混波室内参考天线的平均接收功率;

η_{Rx} —— 接收(参考)天线的效率(无量纲);

η_{Tx} —— 发射(试验装置)天线的效率(无量纲);

λ —— 激励频率所对应的波长,单位为米(m)。

G.5.2 箱体的屏蔽效能评估

可用式(G.8)评估电大箱体的平均屏蔽效能:

$$\langle \text{SE} \rangle = \frac{2\pi V}{\sigma_a \lambda Q} \quad \text{..... (G.8)}$$

式中:

V ——箱体试验装置的体积,单位为立方米(m^3);

Q ——品质因数;

λ ——激励信号的波长,单位为米(m)。

注: $\langle \rangle$ 表示对箱体内所有点进行空间平均。它是对箱体内场的驻波模式的平均。

G.6 试验布置的控制

在进行任何测量前,应使用与 EUT 的连接件相同的连接件检查试验装置的动态范围。试验装置的动态范围应至少比所需的屏蔽效能大 10 dB。

在进行任何材料的屏蔽效能测量之前,确定 TFVF。建议使用实际试验样本来确定 TFVF。

如果试验装置的 Q 值在受试材料或衬垫引入前后相似,则可省略试验装置的 IL(G.3.8)。此外,如果进行多个材料或衬垫的试验来确定相对 SE,则试验装置校准也可以省略。

可能会采集低于试验装置 LUF 的频点的数据,应慎重对待这些数据,因为频率低于 LUF 时, MU 急剧上升。

注 1: 数据采集程序是采集所需数据的一种可能的程序。所用的接收机的类型、射频信号源以及运动控制不同,可能导致要采集到所需的数据有很多变化。例如,可以使用最大值保持模式的频谱分析仪作为接收机,设置频谱仪在宽频范围内接收信号,同时混波室输入信号的频率在同样的范围内步进。如果每个频点的停留时间是试验装置的调谐器转动一整圈的时间,且每转动一步,混波室内调谐器转动一整圈,那么在每个频率点上采集所需的采样数。

注 2: 除非屏蔽材料是非互易的(例如,磁化铁氧体或半导体),否则向试验装置注入射频信号,测量泄漏出试验装置的射频能量,可获得相同的信息。

注 3: 通过比较试验装置内放置受试材料时的 TFVF 与放置实心铝板时的 TFVF,可以确定受试材料吸收的能量的近似值。

G.7 参考文献

- [1] IEC 61726, Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components—Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method.
- [2] IEC 60169-1-3, Radio-frequency connectors—Part 1: General requirements and measuring methods—Section Three—Electrical tests and measuring procedures: Screening effectiveness.
- [3] IEC 61000-5-7, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 5-7: Installation and mitigation guidelines—Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).
- [4] HATFIELD, MO., Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: A comparison of two approaches, IEEE Trans. EMC, Aug. 1988, vol. 30 no. 3, pp. 229-238.
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements—Part I, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp. 139-141.
- [6] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements—Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp. 142-148.
- [7] HE, Y., MARVIN, AC., and FLINTOFT, ID., A study of the field statistics in nested frequency-stirred reverberation chambers, 29th URSI Gen. Assembly, Chicago, IL, Aug. 2008.

[8] HOLLOWAY, CL., HILL, D., LADBURY, J., KOEPKE, G., and GARZIA, R., Shielding effectiveness measurements of materials in nested reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, vol. 45 no. 1, 2003.

[9] ARNAUT, LR., Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies, IEEE Trans. EMC, Nov. 2001, vol. 43 no. 4, pp. 637-653.

[10] MARTIN, T., BÄCKSTRÖM, M., and LORÉN, J., Transmission cross section of apertures determined by measurements and FDTD simulations, 12th Int. Zurich Symp. Techn. Exhib. EMC, Feb. 18-20, 1997, pp. 245-250.

[11] QUINE, JP., Distortion of radiation pattern for leakage power transmitted through attenuation cover panels and shielding gasket-need for reverberation chamber measurement of total leakage power, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Chicago, Aug. 1994, pp. 285-290.

[12] MIL-STD-285, Attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes.

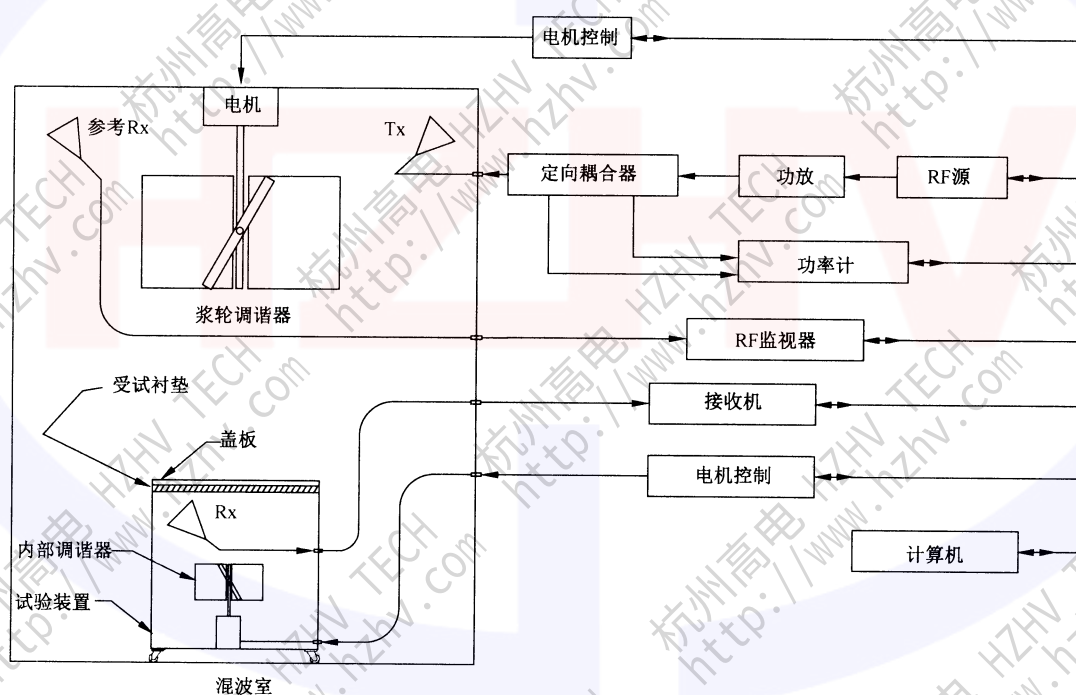


图 G.1 典型试验布置

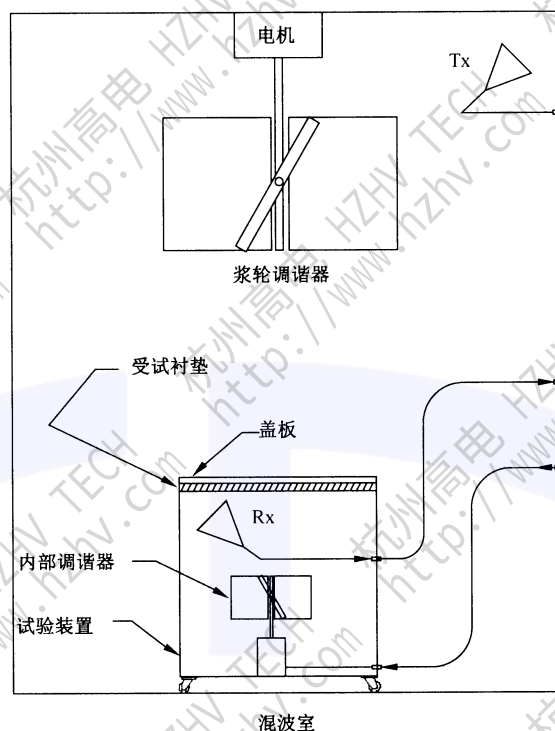


图 G.2 衬垫和/或材料试验典型试验装置安装

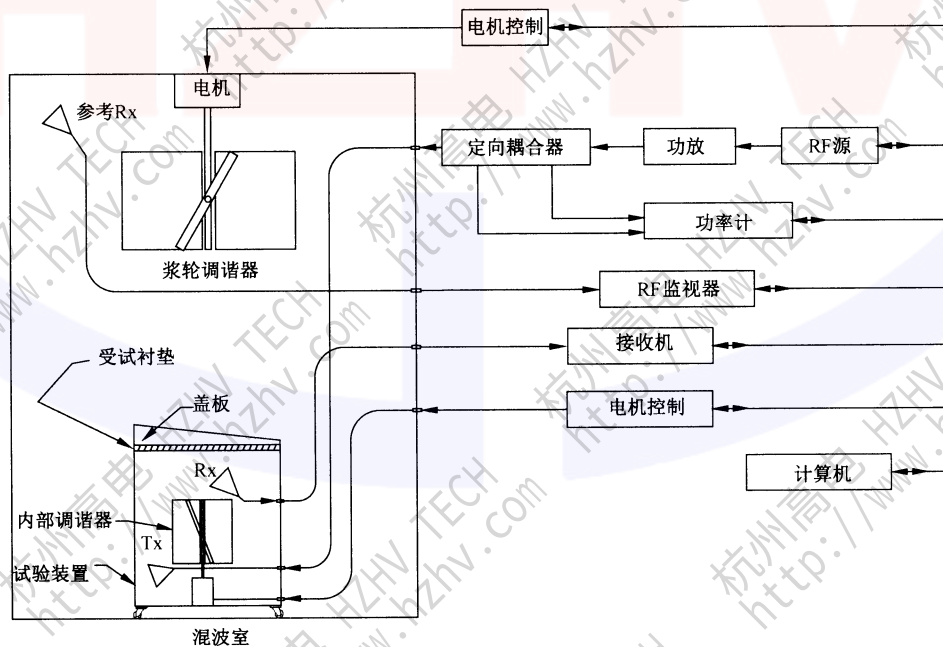


图 G.3 确认时的试验装置配置

附录 H

(资料性附录)

箱体的屏蔽效能测量

H.1 概述

和辐射抗扰度试验一样,有很多试验方法适用于评价衬垫、窗口材料,以及其他设计用于屏蔽的系统结构的屏蔽性能[1-3]⁹⁾。典型的做法是,屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)测量比较有和无屏蔽设计时箱体内部的电磁环境。很多资料都给出了屏蔽效能测量方法,如 MIL-STD-285。然而,很多屏蔽效能测量的重复性和场地间的可比较性差。有些差异是由于试验方法的原因,而有些差异是由于试验件本身引起的。很多因素都会显著影响屏蔽效能测量的重复性,例如配合面情况和紧固件的力矩。

对于很多屏蔽结构(例如,衬垫、窗口材料等),混波室试验用“嵌套混波室”的方法(即一个混波室置于另一个混波室内)。接收天线和浆轮调谐器安装在试验箱体内部,以检测泄漏至箱体内部的射频信号。对于混波室法屏蔽效能测量不熟悉的读者应先参见参考资料[3][4][5]或[6]。

为了在屏蔽效能试验中获得重复性,应仔细控制试验装置的很多因素。若这些影响因素可控制,混波室内电磁场环境的场均匀性可提供所有方向的屏蔽效能试验,且场地间的重复性好。

H.2 EUT 屏蔽效能测量

屏蔽效能测量是基于比较外部的电磁场功率与感应到 EUT 内的电磁场功率。屏蔽效能[单位为分贝(dB)]定义如下:

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \dots\dots\dots (\text{H.1})$$

式中:

P_{EUT} ——耦合到 EUT 内的功率;

P_{Ref} ——耦合到参考天线的功率。

H.3 试验装置描述

H.3.1 概述

箱体的屏蔽效能试验不需要构造安装受试件的试验装置。受试件本身就是试验装置。混波室法 SE 试验用“嵌套混波室”法(即一个混波室内放入另一个混波室)。接收天线和调谐器/浆轮搅拌器安装在箱体的内部,以检测泄漏到箱体内部的射频能量。箱体距混波室的壁面应至少为 $\lambda/4$ 。台式箱体应距混波室地板 $\lambda/4$,落地式箱体应用绝缘材料支撑,距混波室地板 10 cm。

H.3.2 箱体试验装置

箱体的尺寸决定了可获得有用数据的最低频率。对于大多数箱体,可用箱体内存在约 60 个模式的频率点估算 LUF,确定此频率的公式见 H.3.7(1)中式(H.2)。如果需要,可用 B.1.2 中的程序对箱体确认。应通过安装接收天线和机械调谐器组件改装箱体。

9) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

H.3.3 混波室

混波室屏蔽体上应配备多种输入输出接口,以方便屏蔽体与测量设备的连接。

H.3.4 天线

所用的 Tx 天线在试验频段内应有效。非常重要的是 Tx 天线的效率应尽量高。

描述试验箱体特性的 Rx 天线的天线效率应与采集屏蔽数据的相同。建议使用相同的天线。Rx 天线效率不是很关键,然而为了保证良好的动态范围,其应尽量大。

H.3.5 试验装置

屏蔽效能自动测量所需的基本的试验设备和组件如图 H.1 和图 H.2 所示。注意可能还需要预放、功放以及其他组件,以获得所需的动态范围。

H.3.6 连接件

连接件通常使用 50 Ω 同轴电缆,且其屏蔽效能应至少大于所需屏蔽效能 10 dB。

在开始试验前,应确定所有连接件的衰减,包括 EUT 的 Rx 天线、Tx 天线以及参考天线的连接件。

H.3.7 箱体的准备

与衬垫和材料的屏蔽效能试验考虑试验装置的损耗的不同,箱体试验不需要对箱体进行确认,这是因为与箱体有关的损耗是箱体预计能提供的屏蔽效能的一部分。但仍应确定能获得准确数据的频率范围。因此,应确定箱体 LUF,即期望得到受试箱体合理准确数据的最低频率。按下述步骤准备受试箱体:

- (1)通过计算至少存在 60 个模式数($N=60$)的频率,确定箱体的 LUF,按式(H.2)计算(对矩形屏蔽室有效[4];对非矩形箱体见 G.3.8 的注 1):

$$N = \frac{8\pi}{3}abd \frac{f^3}{c^3} - (a+b+d) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \dots\dots\dots (H.2)$$

式中:

a, b, d ——箱体的尺寸,单位为米(m);

c ——箱体内波的传播速度,单位为米每秒(m/s);

f ——频率,单位为赫兹(Hz)。

- (2)在箱体内部安装一个 Rx 天线和机械搅拌调谐器。机械调谐器应尽量大,同时距离接收天线 $\lambda/4$ 。Rx 天线的理想放置方式为对着混波室的一个角落。将 Rx 天线对着调谐器/搅拌器放置也是可接受的。箱体的 Rx 天线连接件和调谐器/搅拌器动力等的馈入点应有很好的屏蔽。馈入点的屏蔽效能应至少比所需的屏蔽效能大 5 dB。
- (3)由于所用接收机一般响应较快,SE 试验非常适合用搅拌模式。如果使用搅拌模式,确保充分说明附录 C 中的问题。如果使用调谐模式,采样数至少为附录 B 中给出的最少采样数,其中 f_c 为箱体存在 60 个模式的频率。

H.3.8 确定测量的动态范围

进行任何试验前,应按如下方法确定测量系统的动态范围:

- (1)移除所有的舱盖、门等,暴露受试箱体的内部;

注 1: 如果箱体有一个较大的门或者其他孔洞,当其打开时,箱体的内部能完全暴露,则不必移除接口板等。

- (2)对于每个试验频率,将已知功率输入到混波室的 Tx 天线上(同样,确认应相对于天线终端),混波室调谐器转动一圈,记录试验箱体 Rx 天线的最大接收功率;

注2：因为所用的接收机一般响应较快，所以 SE 试验适于用搅拌模式。如果用搅拌模式，确保充分说明附录 C 中的问题。如果采用调谐模式，采样数至少为混波室确认中的采样数。

(3) 将箱体的 Rx 天线用一良好屏蔽的终端代替；

(4) 重复步骤(2)；

注3：混波室的输入功率应相同，或每个数据点的接收功率应对混波室的输入功率归一化。

(5) 换回试验箱体的 Rx 天线；

(6) 通过计算步骤(2)和步骤(4)中记录的读数的比值，确定测量系统的动态范围，确保动态范围至少大于所需的屏蔽效能值 5 dB。

$$Dynamic\ Range = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{RxAntenna}}{P_{RxTermination}} \right) \dots\dots\dots (H.3)$$

式中：

$P_{RxAntenna}$ ——混波室 Rx 天线的接收功率；

$P_{RxTermination}$ ——将试验箱体的 Rx 天线用终端负载代替，Rx 天线接终端的接收功率。

H.4 测量程序

H.4.1 概述

可以用调谐模式或搅拌模式进行试验。对于调谐模式，混波室的采样数应至少与混波室确认中的采样数相同。箱体调谐器应用与 H.3.8(2) 中的采样数相同的步进数。当使用调谐模式时，混波室调谐器每转动一步，箱体调谐器转动一圈。当使用搅拌模式时，最大搅拌器转速应确保 EUT 及相关的测量设备适当响应，获得的采样数至少为调谐模式中使用的采样数。不论采用哪种模式，要保证采集场强的测量设备有合适的停留时间。这一点对于搅拌模式尤其重要。

注：组合使用搅拌模式与调谐模式常很方便。混波室的调谐器采用与混波室确认中一样的步进数转动一圈，而箱体内部搅拌器连续转动。在每个混波室调谐器位置(步)，试验箱体内的调谐器转动一整圈。箱体内部调谐器的转速与 H.3.8(2) 中的相同，这保证测量设备的采样速率，使得试验箱体内部调谐器每转动一圈获得所需的采样数。最大搅拌速率指导见附录 C。

测量参数是最大接收功率。对于基于最大接收功率的测量，测量系统的动态范围应比所需的屏蔽效能高 5 dB。

H.4.2 EUT 测量

程序如下：

- (1) 将射频源连接到混波室上(如果需要，通过功放连接)；
- (2) 将测量设备连接到试验箱体的 Rx 天线(如果需要，通过预放连接)；
- (3) 将混波室的参考天线连接到混波室的监测设备(如果需要，通过衰减器连接)；
- (4) 配置待测箱体；
- (5) 启动混波室和箱体中的调谐器/搅拌器；
- (6) 以固定输入功率向混波室注入第一个试验频率信号；
- (7) 调谐器/搅拌器转动一圈，记录混波室监测设备以及 EUT 监测设备的最大读数；
- (8) 所有试验频点，重复步骤(7)；
- (9) 在疑似泄漏点安装已知的屏蔽材料(铝或铜箔或带)。不要在馈入点或不是评估范围的箱体的其他地方增加屏蔽材料；
- (10) 重复步骤(5)~(9)进行泄漏试验；

注：数据采集和泄漏试验中，混波室的输入功率应相同。如果输入功率不同，则在计算 SE 之前，所有数据应对混波室的输入功率归一化。

(11) 考虑 EUT 和参考天线的连接件的衰减，可通过式 (H.4) 计算屏蔽效能：

$$SE = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Ref}}}{P_{\text{EUT}}} \right) \quad \dots\dots\dots (H.4)$$

式中：

P_{EUT} ——步骤 (7) 中箱体参考天线的最大接收功率 (修正了连接损耗)；

P_{Ref} ——步骤 (7) 中混波室接收天线的最大接收功率 (修正了连接损耗)；

(12) 步骤 (10) 中的“泄漏”试验保证测量泄漏的信号是通过箱体的待评估区域进入的，而不是由于修改的箱体的调谐器动力和接收电缆馈入点等。通过替换步骤 (10) 中的接收功率，用式 (H.4) 确定装置的 SE。如果由步骤 (10) 所获得的 SE 不大于未经任何修改的箱体的屏蔽效能 5 dB，则认为 SE 大于或等于未经修改的箱体的 SE。如果需要更高的 SE，则需进一步测验测量系统的馈入口。

H.4.3 EUT 测量的替代方法

如果没有两套测量设备，则测量设备一次仅可连接 EUT 和参考天线中的一个。

如果用两套连接件，则计算屏蔽效能时应考虑连接 EUT 和参考天线的连接件的衰减。

如果只使用一套连接件，则连接件的衰减可忽略，屏蔽效能则是两个接收功率的差值。

H.5 试验布置的控制

在进行任何测量之前，应使用与 EUT 的连接件相同的连接件，检查试验装置的动态范围。其动态范围应至少比所需的屏蔽效能大 5 dB。

可以采集低于箱体 LUF 频点的数据，但应慎重对待这些数据，因为在 LUF 以下，MU 急剧上升。

注：数据采集程序是采集所需数据的一种可能的程序。所用的接收机的类型、射频信号源以及运动控制不同，可能导致要采集到所需的数据有很多变化。例如，可以使用最大值保持模式的频谱分析仪作为接收机，设置频谱仪在宽频范围内接收信号，同时混波室输入信号的频率在同样的范围内步进。如果每个频点的停留时间是试验装置的调谐器转动一整圈的时间，且每转动一步，混波室内调谐器转动一整圈，那么在每个频率点上采集所需的采样数。

H.6 参考文献

- [1] IEC 61726, Cable assemblies, cables, connectors and passive microwave components—Screening attenuation measurement by the reverberation chamber method.
- [2] IEC 60169-1-3, Radio-frequency connectors—Part 1: General requirements and measuring methods—Section Three—Electrical tests and measuring procedures; Screening effectiveness.
- [3] IEC 61000-5-7, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 5-7: Installation and mitigation guidelines—Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).
- [4] HATFIELD, MO., Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches, IEEE Trans. EMC, Aug. 1988, vol. 30 no. 3, pp. 229-238.
- [5] FREYER, GJ. and HATFIELD, MO., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements—Part I, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp. 139-141.
- [6] HE, Y., MARVIN, AC., and FLINTOFT, ID., A study of the field statistics in nested

frequency-stirred reverberation chambers, Proc. 29th URSI General Assembly, Chicago, IL, Aug. 2008.

[7] HATFIELD, MO. and FREYER, GJ., Comparison of gasket transfer impedance and shielding effectiveness measurements—Part II, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Anaheim, CA, Aug. 1992, pp.142-148.

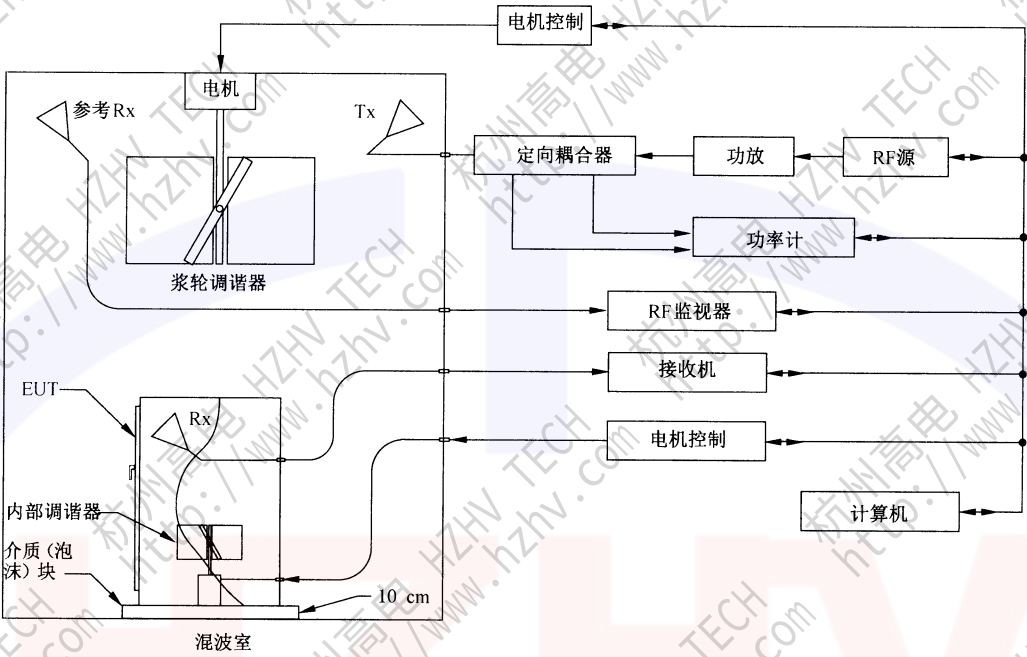


图 H.1 落地式箱体试验的典型试验箱体安装

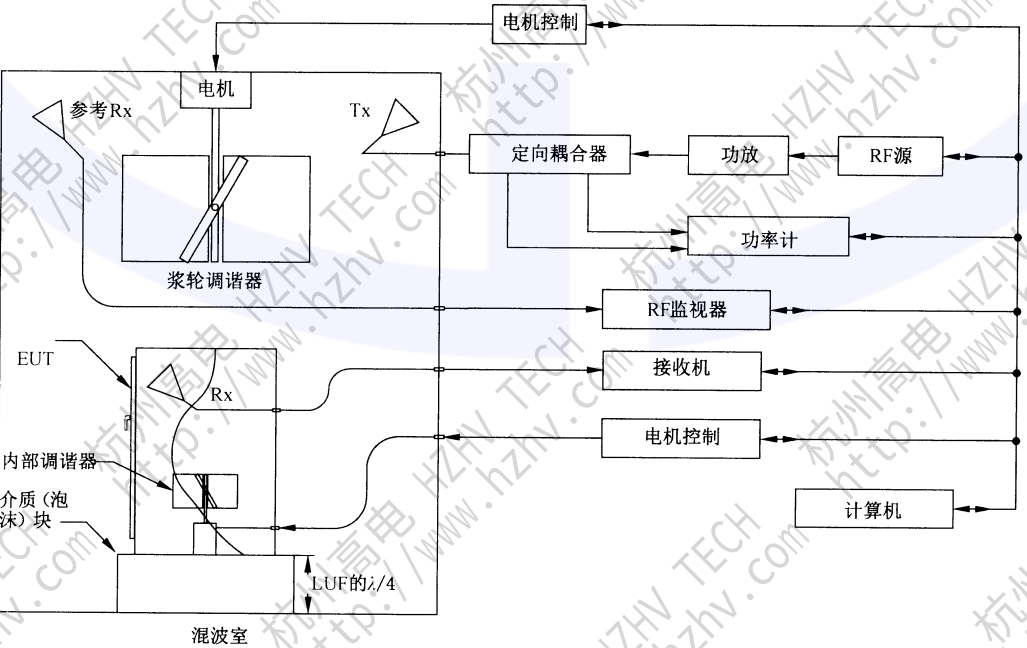


图 H.2 台式箱体试验的典型试验箱体安装

附录 I

(资料性附录)

天线效率测量

I.1 天线效率

天线效率定义为天线辐射的总功率与天线接收的来自发射机的净功率之比 [1]¹⁰⁾。

$$\eta_{\text{Antenna}} = \frac{P_{\text{radiated by antenna}}}{P_{\text{Power accepted by antenna from transmitter}}} \dots\dots\dots (I.1)$$

实际上, 天线效率定义为天线辐射的射频功率与传递到天线终端的射频功率的比值。

$$\eta_{\text{Antenna}} = \frac{P_{\text{radiated by the antenna}}}{P_{\text{Input to the antenna terminals}}} \dots\dots\dots (I.2)$$

根据互换性原理, 天线的接收效率与其辐射效率是相同的。天线效率可用辐射电阻和损耗电阻表示 [2]。

根据以上定义, 我们可以看出没有效率是 100% 的天线。所有的天线都有些损耗。其损耗有欧姆损耗, 即变换损耗 (传导到辐射/辐射到传导)、渡越损耗 (同轴适配器) 等。注意, 阻抗不匹配是天线的一个单独特性, 并不是天线效率的一部分。

虽然天线效率是天线的实特性, 但是在天线常规特性测量中并不包括天线效率。事实上, 虽然可以通过天线电流分布的数值仿真计算天线效率, 但是天线效率不易测量。大多数优良的天线是高效的。例如, 典型的商用双脊喇叭天线可以将输入到天线终端的射频信号的 95% 转换为辐射场, 而对数周期天线可以将输入到其终端的射频信号的 75% 转换为辐射场 [3]。

当使用混波室进行测量时, 必须考虑天线效率, 以准确估算混波室的特性, 如混波室的品质因数 Q 值和混波室的时间常数 τ 等。本部分天线效率用 95% 和 75% 是基于美国国家标准技术研究院 (NIST) 电磁场所的经验, 其位于美国科罗拉多州博尔德市。因为天线厂家不提供天线效率的实际值, 为了提高对混波室特性评估的准确性, 有必要估计天线效率 [3, 4]。上述的天线效率是基于 NIST 用几个双脊喇叭天线和对数周期天线所做的测量, 所有测量结果都一致表明天线效率在所述数值附近。

注: 天线不匹配的因素之一是环境的波阻抗, 这不是天线本身的性质。式 I.2 中不包含不匹配, 其应单独考虑。

I.2 天线效率的测量

混波室也许是用实验获得相对天线效率的最好方法 [5]。用一对特性已知的天线准确描述混波室特性, 然后用一未知天线代替其中一个天线, 就可以确定未知天线的相对天线效率。为了在百分之几的精度解出天线效率, 这种测量需详细的试验程序。为了获得所需的精度, 一般需要进行大量的测量。

I.3 参考文献

- [1] IEEE standard definitions of terms for antennas, IEEE Std. 145-1993, 21 Jun. 1993.
- [2] NEWMAN, E.H., BOHLEY, P., and WALTER, CH., Two methods for the measurement of antenna efficiency, IEEE Trans. Antennas Propag., Jul. 1975, vol. 23 no. 4, pp. 457-461.

10) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

[3] LADBURY, JM., KOEPKE, GH., and CAMELL, DG., Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility, National Institute for Standards and Technology (US), Technical Note 1508, Jan. 1999.

[4] JOHNSON, RH. and McRORY, JG., An improved small antenna radiation-efficiency measurement method IEEE, Antennas Propag. Mag., Oct. 1998, vol. 40 no. 5, pp. 40-48

[5] ROSENGREN, K., KILDAL, P.-S., CARLSSON, C., and CARLSSON J., Characterization of antennas for mobile and wireless terminals in reverberation chambers; improved accuracy by platform stirring, Microw. Opt. Techn. Lett., 2001, vol.130, p.6.

附录 J

(资料性附录)

用场各向异性和场不均匀性系数直接评价混波室性能

J.1 概述

J.1.1 在混波室的实际确认和试验时,一个重要的问题是,在测量频率实际混波室与理想混波室的“接近”程度。为了量化实际的混波室性能,可分析调谐数据,例如,用合适的统计拟合度检验。这种假定检验可在预定的验收标准下评估场或功率密度分布函数的测量值与理论值的差异。对于不同的拟合度检验验收标准的意义不同[1]¹¹⁾[2][3],可能不同的混波室意义也不同。此外,各个场分量的统计数据仅提供关于混波场的实际关心量的间接信息,即极化均匀性(场各向同性)或者空间均匀性(场均匀性)。拟合度检验给出了混波室搅拌性能主要定性指标,其结果往往是混波室性能“好”或“差”的非量化的陈述。

J.1.2 另一种定量地给出搅拌性能的方法是用确定性指标,即用二维场和总场各向异性系数,如下所述,场各向异性系数直接表示了场各向同性和均匀性程度,且不需要用各场直角分量或功率密度的统计分布。这是评价调谐器和混波室性能的一个相对快的方法。

J.2 场各向异性系数

J.2.1 定义

二维场和总场各向异性系数分别为 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} ,其与[4][5][6]中一样都是通过搅拌平均量定义的:

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle = \left\langle \frac{(|E_{\alpha}|^2/P_i) - (|E_{\beta}|^2/P_i)}{(|E_{\alpha}|^2/P_i) + (|E_{\beta}|^2/P_i)} \right\rangle = \left\langle \frac{(P_{\alpha}/P_i) - (P_{\beta}/P_i)}{(P_{\alpha}/P_i) + (P_{\beta}/P_i)} \right\rangle \quad \dots\dots (J.1)$$

$$\langle A_{\text{tot}} \rangle = \langle \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2]/3} \rangle \quad \dots\dots\dots (J.2)$$

式中:

$|E_{\alpha,\beta}|$ —— 给定搅拌器状态(位置) τ 测量的接收场强的直角分量 α 或 $\beta = x, y, z$;

$P_{\alpha,\beta}$ —— 给定搅拌器状态(位置) τ 测量的功率密度的直角分量 α 或 $\beta = x, y, z$;

P_i —— 状态 τ 下测量 α 或 β 分量时注入混波室的净输入功率(即前向功率减反射功率);

$\langle \rangle$ —— 在所有状态 τ 上搅拌(即,总体)平均,如 B.1.2(10)中定义的。

式(J.1)和式(J.2)的定义并不受 P_i 的影响,但是它们却取决于 P_i 随 τ 的变化。本质上, A_{tot} 定义为各 $A_{\alpha\beta}$ 的均方根平均,在 3 个正交平面中观察(投影)该平均方向时,它用一个参数来度量电场的平均极化方向的偏差。

J.2.2 评估程序

J.2.2.1 程序如下:

(1) 首先确定要求的最少不相关搅拌器状态数 N , 见 A.3。这根据用户规定的场各向异性系数的最大可接受不确定度水平来确定。

注 1: 对于“良好”的搅拌质量, $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 和其相关标准差的幅值同数量级。后者对应表 J.1(该表作为混波室和搅

11) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

拌器设计的“良好实践指南”)列出的“良好”的搅拌质量的平均值。评价单一的混波室,建议 N 取 100 或更大(为了获得有意义的结果, N 至少为 30),如果是混波室间的相互比较, $N=300$ 。根据 J.2.4.1 节的程序可由大的样本归纳确定最小 N 值。警告提示:一般来说, N 的值选择得越小, $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 越无意义,特别是当 $N < 30$ 时。

- (2) 测量 N 个搅拌器状态 τ 、选择频率 f 和接收天线位置 r 的场的幅值 $|E_{\alpha}(\tau)|$ 或者功率密度 $P_{\alpha}(\tau)$, $\alpha = x, y, z$ 。

注 2: B.1.2 中步骤(1)~步骤(8)给出了测量程序和标准,除此以外,记录了所有幅值(在每个位置 τ 测量的),不仅是最大值和平均值。对于三维场探头,应使用探头各电极(偶极子) x, y, z 的读数。对于用偶极子、喇叭天线、或波导进行的测量,通过在测量中重新调整、再定位天线或波导产生口径的 3 个正交方向。在每个方向,口径面应有相同的中心点 r 。

- (3) 为了提高精度,应在每个不同的搅拌器状态测量 P_i ; 否则,应至少在 10 个不相关的搅拌器状态上取均值,获得名义均值 $\langle P_i \rangle$ 以代替 P_i 。应在不同频率和不同天线位置重复测量 P_i 。

注 3: 当不测量 $P_i(\tau)$ 时, $\langle P_i \rangle$ 的估算值应与最终的 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 及 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 值列表一起说明。式(J.1)和式(J.2)中 P_i 的重要性随着混波室性能的增加而降低。

- (4) 在每一个状态 τ 、固定的频率点和天线位置,计算相关系数:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{(|E_{\alpha}(\tau)|^2/P_i) - (|E_{\beta}(\tau)|^2/P_i)}{(|E_{\alpha}(\tau)|^2/P_i) + (|E_{\beta}(\tau)|^2/P_i)} \text{ 或 } A_{\alpha\beta} = \frac{(P_{\alpha}(\tau)/P_i) - (P_{\beta}(\tau)/P_i)}{(P_{\alpha}(\tau)/P_i) + (P_{\beta}(\tau)/P_i)} \dots\dots\dots (\text{J.3})$$

$$\text{和} \quad A_{\text{tot}} = \sqrt{[A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2]/3} \dots\dots\dots (\text{J.4})$$

其中,根据步骤(3), P_i 表示 $P_i(\tau)$ 或 $\langle P_i \rangle$ 。

- (5) 可用式(J.1)和式(J.2)计算选定频率点和天线位置的平均搅拌,即在 τ 上取平均二维场和总场的各向异性系数 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 。

- (6) 在关心的每个频率,重复步骤(2)~(5);

- (7) 在关心的每个天线位置,重复步骤(2)~(5)。应从 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的各搅拌平均的算术平均另外说明体平均。根据 B.1.2(10)(b),在每个频率,其算术平均在 3 个或 8 个天线或场探头位置计算。

以上程序用于调谐模式,但如果考虑了附录 C 的问题,也可用于搅拌模式。搅拌平均效应相当大时,应先应用时(搅拌)域的逆局部平均[5][7][8](见 J.2.2.2 和 J.5.2)。

J.2.2.2 如果有可能,应使用电小天线或场探头(典型长度小于三分之一波长)测量,因为与天线或场探头尺寸相关的局部平均效应会影响测量的场的变化(混波性能)。另一种方法就是,应通过重新确定测量值与理想值间的比例,考虑探头的空间平均效应对 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的影响。

J.2.3 分布

J.2.3.1 假设主要进行理想场和实际场的各向同性和场均匀性的定性测量,则 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} 的理论和测量分布间的比较是可选的。 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} (见 J.5.1)的理论和测量分布按与更基本的场幅值或功率密度相应分布相似的方式收敛,但更实用。

J.2.3.2 图 J.1 是搅拌良好的混波室中 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} 的典型 CDF。虽然单个 $A_{\alpha\beta}$ 接近理想的理论特性,但是 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 对混波室的不完善性更敏感。图 J.2 是从搅拌性能相对较差的混波室中获得的搅拌数据的相应分布。

J.2.4 与样本大小的相关性

J.2.4.1 理想的搅拌模式混波室中,当不相关的搅拌器状态为无限大时, $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的值趋向于零。搅拌性能差的混波室中,对于所有的搅拌器状态 τ , $\langle A_{\alpha\beta} \rangle \approx A_{\alpha\beta}$ 、 $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}}$, 意味着, $\text{std}(A_{\alpha\beta}) < \langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 、 $\text{std}(A_{\text{tot}}) < \langle A_{\text{tot}} \rangle$, 其中 $\text{std}(\cdot)$ 表示关于 τ 的标准差。特别是,可能会发生 $A_{\alpha\beta}$ 为虚假的

“0”的异常情况,这是由于 α 和 β 的不当选择,导致对所有的 τ , $|E_\alpha|=|E_\beta|$;或 α 、 β 和 γ 的特定选择,对于所有的 τ , $|E_\alpha|\approx|E_\beta|\approx|E_\gamma|$,甚至会出现 $\langle A_{\text{tot}} \rangle \approx A_{\text{tot}} \approx 0$ 。上述情况与以下异常情况相对应,对所有搅拌器状态场的极化方向固定,且极化方向与 $o\alpha$ 、 $o\beta$ 和 $o\gamma$ 的夹角几乎相同。在这种情况下, $\text{std}(A_{\alpha\beta}) \approx \langle A_{\alpha\beta} \rangle$, $\text{std}(A_{\text{tot}}) \approx \langle A_{\text{tot}} \rangle$,与搅拌性能好的混波室相同。因此,需要额外的信息来检测这一情况。因此,如果 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 或 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 低于 -10 dB,则探头的 α 、 β 和 γ 均取不同方向进行二次测量。通过计算原来搅拌序列样本的大小为 M ($M \leq N$)的不同子样本的 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$,分析 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 是否为 M 的函数,更容易发现虚假“零点”。 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 的虚假“零点”,表现为一个不随 M 的增加而减小的值。在这种情况下,应给 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 重新指定一个值,其对应于一个完全各向异性场的值。

J.2.4.2 图 J.3 给出了 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 与采样数的关系图,同时给出了用自助法和平均值法得到的其标准差的绝对值。从图中可见,平均来说,其值随 M 增大而减小。采样数 $N=300$ 时,大多数应用中 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的值为 -10 dB、 -15 dB和 -20 dB可以分别认为是“一般的”“良好的”和“优秀的”。要获得额外的搅拌效果,可通过增大 N 进一步降低 $\langle A_{\alpha\beta} \rangle$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的值,但是其投入趋于以指数级增长,应慎重考虑。

可以选择一个合适的最小采样数作为 M 的最小值,其使得统计量 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 保持在选定的置信区间内。注意,在图 J.3 中,与高 M 值相比, M 值低时, $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 或 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 比 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 或 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 标准差定义的值偏高更多,这是因为采用了对数坐标。在本例中,当不确定度选择为一标准差时,搅拌器状态至少为 10。

J.2.4.3 为了混波室间或者搅拌方式间的相互比较,给出了 $N=10, 30, 100, 300$ 等个等效的独立采样点的 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的拟合曲线表达式,或 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的包络值。等效的独立采样数 N 可以通过 $\rho^{-1}(e^{-1})$ 的去相关准则来定义,即从 M 个样本中获得 $|\rho(\tau \neq 0)| \leq 1/e$ 的最大的子样本(N), $\rho(\tau)$ 是测量场幅值或功率密度的自相关函数。不去除自相关数据,即允许更密集的子样本,可减小 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 的标准差,但它们的平均值不受影响。

表 J.1 列出了定义“中等的”和“良好的”搅拌性能的 $\langle A_{\text{tot}} \rangle$ 门限值。注意,当 $N \leq 10$ 时,不管 N 较大时搅拌性能如何,场各向异性系数的平均值和标准差总保持相对较大。

J.2.4.4 没有三正交方向值时,可分别评价测得的场强或功率密度。混波室内的某一位置,由接收传感器在两个正交方向获得的测量值,只能估算一个二维的场各向异性系数。应注意避免如 J.2.4.1 所述的虚假“零点”。

J.3 场的不均匀性系数

J.3.1 定义

为场不均匀性定义了相似的系数。这些系数定义了腔体内 r_1 和 r_2 两位置间各极化方向 $\alpha=x, y, z$ 或总场($\alpha=t$)的统计不均匀性,这些系数的一个简便的选择是:

$$\langle I_\alpha(r_1, r_2) \rangle = \left\langle \frac{(|E_\alpha(r_1)|^2/P_i) - (|E_\alpha(r_2)|^2/P_i)}{(|E_\alpha(r_1)|^2/P_i) + (|E_\alpha(r_2)|^2/P_i)} \right\rangle = \left\langle \frac{(P_\alpha(r_1)/P_i) - (P_\alpha(r_2)/P_i)}{(P_\alpha(r_1)/P_i) + (P_\alpha(r_2)/P_i)} \right\rangle \quad \text{.....(J.5)}$$

$$\langle I_{\text{tot}}(r_1, r_2) \rangle = \langle \sqrt{[I_x^2 + I_y^2 + I_z^2]/3} \rangle \quad \text{.....(J.6)}$$

J.3.2 评估程序

一般来说,用与 J.2.2 中同样的程序和注。

给定状态下传感器在两个不同位置的 P_i 的波动与给定位置而搅拌器状态不同的波动相比,前者

的波动通常比较小(见 J.2.2.1)。在有多传感器时, P_i 没有空间波动。

选择位置 r_1 和位置 r_2 应注意避免其之间的距离为 CW 激励信号的半波长的整数倍, 或者距离远小于其波长, 这种情况下场高度相关。建议最小距离为一个波长。在多个位置重复该程序, 从而计算出平均值(见附录 B)。

J.3.3 分布

I_α 和 I_{tot} 的范围和分布与 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} 的范围和分布类似(见 J.2.2)。

J.3.4 与样本大小的相关性

与 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} 考虑的事项相同(见 J.2.4)。

J.4 场各向异性与场不均匀性

因为场各向异性和场不均匀性系数是高度相关的统计特性, 所以通常研究 $A_{\alpha\beta}$ 和 A_{tot} 或 I_α 和 I_{tot} 就足够了[4]。然而, I_α 和 I_{tot} 的分布通常对模式搅拌不足更敏感。统计上各向同性意味着统计上均匀, 但反过来不一定正确。因此, 在场各向异性和场不均匀性两者中, 评估场各向异性更严格。

J.5 附录

J.5.1 $A_{\alpha\beta}$ 的分布

逐点测量的二维场各向异性系数 $A_{\alpha\beta}$ 都是自正则量, 对于每个搅拌器状态, 不管 P_i 为何值, $A_{\alpha\beta}$ 的值在 -1 和 +1 之间。对于理想的混波室条件(即理想的统计场各向同性), 随机变化的 $A_{\alpha\beta}$ 表现为一均匀(矩形)分布, 其理论 CDF 如下:

$$F_{A_{\alpha\beta}}(\alpha_{\alpha\beta}) = \frac{(1 + \alpha_{\alpha\beta})}{2} \quad \dots\dots\dots (J.7)$$

即一条斜度为 1 的直线。如果测量的 CDF 大部分低于或高于理论的 CDF, 则表明统计场极化方向分别偏向 (α, β) 平面的 α 或 β 方向。测量的 CDF 和理论的 CDF 的最大偏差 D_N (K-S 统计量) 用作场各向异性的间接测量[1]。

J.5.2 最少采样数

为了确定获得先验的场各向异性的预定值所需的搅拌器位置的数量(样本大小), 需对不同的搅拌器状态 M (样本大小) 重复以上程序, 作出对应的 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 A_{tot} 与 M 的函数关系图。这可通过选取一个较多搅拌器状态扫描的 M 个数据点的子集来简化操作。由下式确定测量的 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 和 A_{tot} 的包络 X' :

$$X'(\tau_i) = \sqrt{X^2(\tau_i) + [H(X(\tau_i))]^2} \quad \dots\dots\dots (J.8)$$

其中 X 表示 $|\langle A_{\alpha\beta} \rangle|$ 或 A_{tot} ,

$$H(X(\tau_i)) = \pi^{-1} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} \left[\frac{X(\tau_i - \tau_j)}{\tau_j} \right] \Delta\tau \quad \dots\dots\dots (J.9)$$

或者, 对测量样本用更简单的局部移动平均滤波法进行采样, 其中平均的长度不超过所有搅拌序列长度的 3%, 即用下式确定的序列代替原始的序列 $X(\tau_i)$:

$$X'(\tau_i) = L^{-1} \sum_{j=i-L/2}^{i+L/2} [X(\tau_j)] \quad \dots\dots\dots (J.10)$$

其中, $L/M \leq 0.03$ 。

表 J.1 “中等”和“良好”的混波室的总场各向异性系数的典型值

	$N=10$	$N=30$	$N=100$	$N=300$
“中等的”搅拌质量	-2.5 dB	-5 dB	-7.5 dB	-10 dB
“良好的”搅拌质量	-5 dB	-10 dB	-12.5 dB	-15 dB

J.6 参考文献

- [1] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Electric field probe measurements in the NPL untuned stadium reverberation chamber, National Physical Laboratory (UK), Technical Report CETM 13, Sep. 1999, Appendix H.
- [2] ARNAUT, LR., Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers, IEEE Trans. EMC, May 2002, vol. 44 no. 2, pp. 442-457.
- [3] LUNDÉN, O. and BÄCKSTRÖM, M, Stirrer efficiency in FOA reverberation chambers; evaluation of correlation coefficients and chi-squared tests, Proc. IEEE Int. Symp. EMC, Washington, DC, Aug. 21-25, 2000, pp. 11-16.
- [4] ARNAUT, LR. and WEST, PD., Evaluation of the NPL untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques, National Physical Laboratory (UK), Technical Report CEM 11, Aug. 1998.

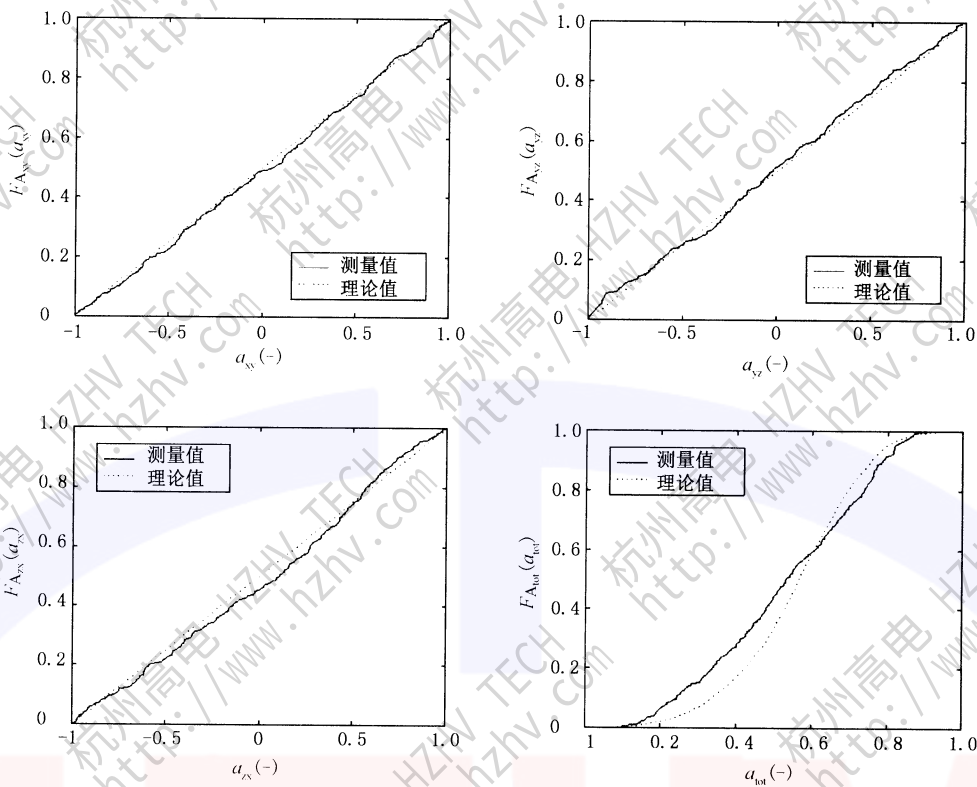


图 J.1 搅拌良好的混波室中场各向异性系数的理论与典型测量分布

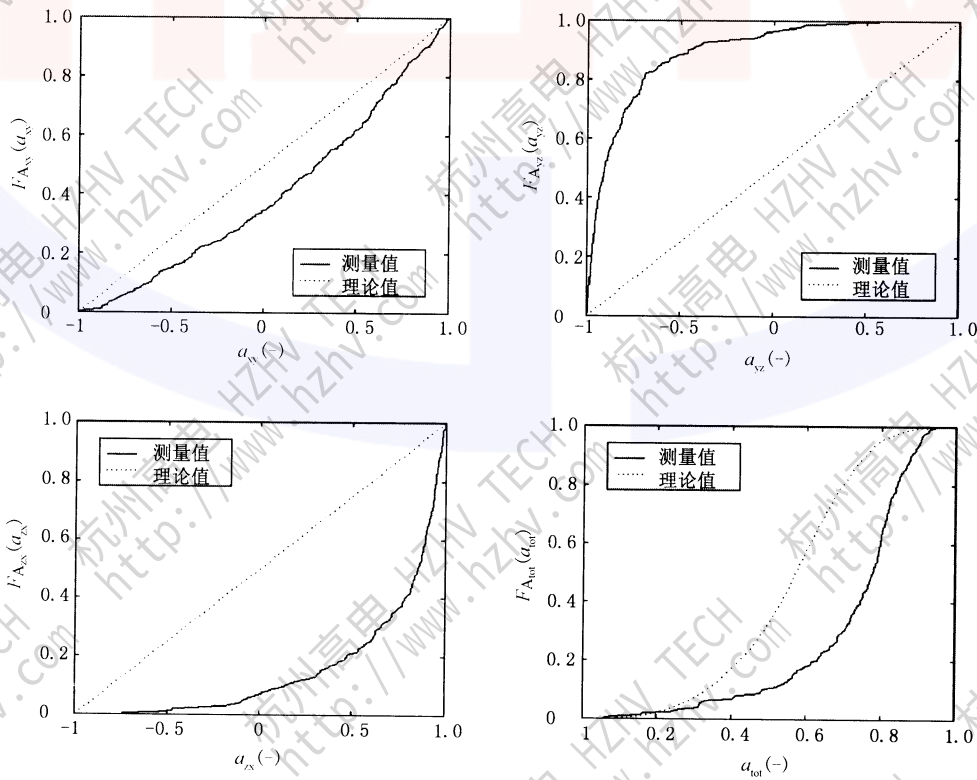
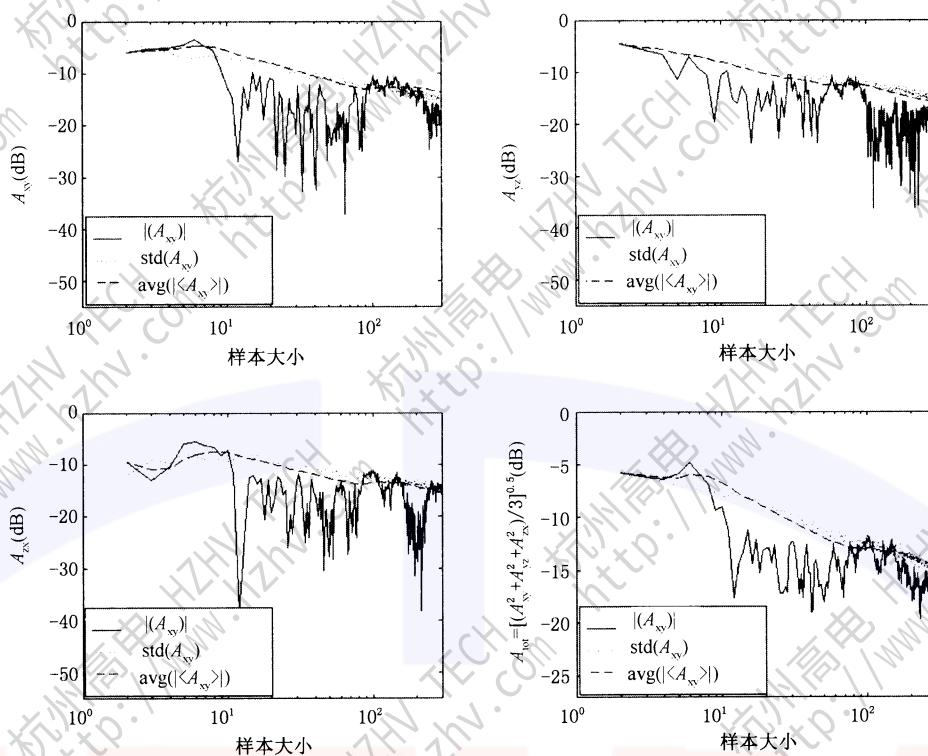


图 J.2 搅拌不好的混波室中场各向异性系数的理论与典型测量分布

图 J.3 搅拌良好混波室中场各向异性系数典型测量值与 N 的关系

附录 K (资料性附录)

混波室确认的 MU——辐射发射和抗扰度试验

K.1 一般说明

K.1.1 标准化中的 MU

文献[1]¹²⁾陈述了通用 MU 表达和评估的标准方法,其不只限于 EMC 领域。文献[2]和[3]给出了 EMC 试验方法中 MU 评估的考虑因素。文献[4]给出了有关混波室的 MU 的更详细的表述。

K.1.2 混波室与其他替代 EMC 试验方法的 MU

与其他可选的平面波 EMC 试验方法的 MU 相比,一些 MU 预评估的影响因素(例如,小室的不足、环境方面、天线效应、仪器等)同样适用于混波室。在混波室中,其他影响因素(例如,电缆布局、EUT 和天线的方向及之间的距离、位置误差等)的意义不大或不值得注意,然而,由混波室电场的固有随机特性引起的不确定度是混波室法独有的合成 MU 的主要外加影响因素。

K.1.3 IFU 与 MIU

完整的 MU 预评估的详细计算[2][3]超出本附录的范围,本附录只涉及混波室特有的 MU 影响因素。本部分仅讨论由于混波室内场的统计特性引起的固有的场不确定度(intrinsic field uncertainty, IFU)对 MU 的附加影响。只有在理想工作条件下(过模状态下),才能进行 MU 的可追溯性评估[4]。本部分的分析限于这种条件。随机场的非理想性对于不确定度和置信区间的影响的讨论见 A.2.2。

因为混波室内的场对边界条件或激励的时空变化高度敏感,所以混波室内场强和功率密度是随机量。在典型工作条件下(具有相当高品质因数的混波室除外,例如,焊接的铝制混波室),场或功率的固有不确定度高于测量仪器的不确定度(MIU)一个或多个数量级。为比较给定频率 f 下 MIU 和 IFU 对合成 MU 的相对贡献,式(K.1)给出因 IFU 而产生的电场的正交分量或同相的直角(单轴)分量的标准差:

$$\sigma(f) = \sqrt{\frac{\eta_{T_x} Q(f)}{12\pi\epsilon_0 f V(f)} \langle P_{T_x} \rangle} \dots\dots\dots (K.1)$$

式中:

ϵ_0 ——自由空间中的介电常数($\approx 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$);

η_{T_x} ——发射天线的效率;

$Q(f)$ ——频率为 f 时混波室的品质因数;

f ——工作频率,单位为赫兹(Hz);

$V(f)$ ——频率为 f 时,混波室的工作空间体积,单位为立方米(m^3);

$\langle P_{T_x} \rangle$ ——所有的调谐器或搅拌器位置的平均发射功率,单位为瓦(W)。

功率密度和场幅值的标准差分别为 $2\sigma^2/\eta_0$ 和 0.655σ ,其中 η_0 是自由空间的波阻抗(377Ω)。IFU 主要取决于混波室确认或 EMC 试验中选择的独立样本数。IFU 与独立样本数的平方根成反比逐渐减少(见 A.4.3 和 A.4.4 的讨论),IFU 也受到混波室中模式搅拌器可产生的最大独立样本数影响。一般

12) 方括号中的数字参见本附录后的参考文献。

来说,最大样本数的有限性导致 MU 减少。本附录中,假定最大样本数为无穷大,表示在任意高频率时发生的最糟糕的情况。

通过增加模式搅拌器或搅拌装置数量,提供额外的扫描或平均,能降低 IFU。文献[4]给出了一些这方面观点和结果。这里仅仅考虑了单个机械模式搅拌器的情况,没有考虑空间或频率扫描。

K.2 辐射发射

对于辐射发射测量来说,关心的主要量是平均辐射发射功率密度,对所有空间方向、传播和极化积分。有时,关心的量是最大功率密度或场强(平均值或最大值),这些量可由测量的发射功率推导出。

用一种替代方法[2],EUT 发射的总功率的平均值可与理想混波室内的平均接收功率 $\langle P_{Rx} \rangle$ 相关,关系如下:

$$\langle P_{Tx} \rangle = CLF \frac{\langle P_{Rx} \rangle}{\langle P_{Rx,ref} \rangle} \langle P_{Tx,ref} \rangle \quad \text{.....(K.2)}$$

式中:

CLF —— 频率为 f 时,EUT 对混波室的加载系数(见附录 B);

$P_{Tx,ref}$ —— 调谐器或搅拌器位置为 N 时空载混波室(即,无 EUT)的发射功率;

$P_{Rx,ref}$ —— 调谐器或搅拌器位置为 N 时空载混波室的接收功率;

P_{Tx} —— 调谐器或搅拌器位置为 N 时放置 EUT 的混波室的接收功率。

注:对于平均功率 $\langle P_{Tx} \rangle$ 的评估,搅拌器位置不需要统计独立。然而,对于评估 $\langle P_{Tx} \rangle$ 的 MU,要求独立的样本。

接收功率 $P_{Rx,1}, \dots, P_{Rx,N}$ 的 N 个样本值的样本均值为:

$$\text{avg}(P_{Rx}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{Rx,i} \quad \text{.....(K.3)}$$

对于 N 个统计上独立的搅拌器位置,平均值的标准差为:

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} = \frac{\sigma_{P_{Rx}}}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \langle P_{Rx} \rangle]^2}}{N} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{avg}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad \text{.....(K.4)}$$

根据式(K.3)和式(K.4),总体估值为:

$$\langle P_{Rx} \rangle \approx \text{avg}(P_{Rx}), \sigma_{P_{Rx}} \approx \sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})} \sqrt{N} \quad \text{.....(K.5)}$$

对于较大的 N 值, $\langle P_{Rx} \rangle$ 近似服从正态分布,其置信度为 95%的置信区间为:

$$[\text{avg}(P_{Rx}) - 1.96\sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})}, \text{avg}(P_{Rx}) + 1.96\sigma_{\text{Avg}(P_{Rx})}] \quad \text{.....(K.6)}$$

当 $N < 30$ 时,置信区间有相当的宽度,但与正态分布近似式(K.6)相比,向上偏移[4]。

在满足场均匀性标准的频率,对应的 $\langle P_{Tx} \rangle$ 的置信区间是:

$$[\text{avg}(P_{Tx}) - 1.96\sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})}, \text{avg}(P_{Tx}) + 1.96\sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})}] \quad \text{.....(K.7)}$$

其中

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{Tx})} \approx \frac{16\pi^2 V(f) f^3}{c^3 \eta_{Rx} Q(f)} \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^N [P_{Rx,i} - \text{avg}(P_{Rx})]^2}{N(N-1)}} \quad \text{.....(K.8)}$$

式中:

c —— 真空中的光速,近似为 3×10^8 m/s;

$Q(f)$ —— 频率为 f 时混波室的品质因数(无量纲);

η_{Rx} —— 发射测量中接收天线的辐射效率(无量纲);

$V(f)$ —— 频率为 f 时混波室的工作空间体积,单位为立方米(m^3)。

式(K.7)的估计中假定基于测量估计的 Q 值的不确定度与 $\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Rx}})}$ 相比可以忽略不计。否则,式(K.8)推广为:

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Tx}})} \approx \sqrt{\left[\frac{16\pi^2 V}{\lambda^3 \eta_{\text{Rx}} \text{avg}(Q)} \sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Rx}})} \right]^2 + \sigma_{\text{Avg}(Q)}^2} \dots\dots\dots (\text{K.9})$$

其中:

$$\text{avg}(Q) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Q_i = \frac{16\pi^2 V}{M \eta_{\text{Rx}} \lambda^3} \sum_{i=1}^M \frac{\langle P_{\text{Rx}} \rangle_i}{\langle P_{\text{Tx}} \rangle_i} \dots\dots\dots (\text{K.10})$$

$$\sigma_{\text{Avg}(Q)} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{M}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M [Q_i - \langle Q \rangle]^2}}{M} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M [Q_i - \text{avg}(Q)]^2}{M(M-1)}} \dots\dots\dots (\text{K.11})$$

由彼此相距至少半波长的接收天线 M 个不同位置的 Q 的估值获得。此处,是基于混波室确认中的 $N \times M$ 个测量值计算 $\text{avg}(P_{\text{Rx}})$ 的,即式(K.3)和式(K.4)中的 N 和 $N-1$ 分别用 $N \times M$ 和 $(N-1) \times (M-1)$ 代替,其中, $N, M > 1$ 。

对于一个混波充分的混波室,假定发射源未加载混波室($\text{CVF}=1$), $\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Tx}})}$ 可通过一对发射—接收天线间的 S_{21} 参数测量值或已知参考输入功率的接收功率测量值来估算,如文献[4]中:

$$\sigma_{\text{Avg}(P_{\text{Tx}})} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[1 + \left(\frac{\text{avg}(P_{\text{Rx}})}{\sigma_{P_{\text{Rx}}}} \right)^2 - 8 \left(\frac{\langle |S_{21}|^2 \rangle}{1 - 2\langle |S_{21}|^2 \rangle} \right) \right]} \text{avg}(P_{\text{Tx}}) \dots\dots\dots (\text{K.12})$$

当 $\langle |S_{21}|^2 \rangle \approx 0.167$ (-7.8 dB) 时,阻抗不匹配的影响变得明显。

图 K.1 所示为 1 个或 3 个 EUT 位置由参考辐射 EUT 测量获得的辐射功率的估算平均值及其 95% 置信区间的宽度,其是频率的函数。图 K.2 比较了发射功率的标准不确定度和 100 个搅拌器位置的平均值的实际值与理想理论值。

对于 M 个 EUT 位置的测量,估算的平均发射功率的 MU 按 $1/\sqrt{M}$ 减小。

K.3 抗扰度

一般来说,在抗扰度测量中,合格/不合格标准是用已知的场强或功率照射 EUT 时,EUT 是否会出现故障现象。下面给出的不确定度水平的估算,不是陈述故障现象过程的不确定度,而只表示建立给定场强的不确定度。

在混波室中进行抗扰度试验,通常就是在模式调谐器转动一圈过程中 EUT 承受最大场强或最大能量或功率密度的能力,而不是平均场强或功率。这些最大值本身是关于空间位置的随机(统计)量。因此,其相关的不确定度显著大于发射的情况。

假定 Q 值、工作空间和发射功率的不确定度均为零,接收的来自无耗的阻抗匹配的发射机的 $\langle |E_r|_{\text{max}} \rangle$ 的 $\eta\%$ 置信区间的范围由下式给出:

$$\xi_{\eta\%}^{\pm} \cong \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \ln \left\{ 1 - \left[\frac{1}{2} (1 \pm \frac{\eta}{100}) \right]^{\frac{1}{N}} \right\}^{-1} \langle P_{\text{Tx}} \rangle} \dots\dots\dots (\text{K.13})$$

式中:

η_v ——自由空间的波阻抗,单位为欧姆(Ω);

V ——混波室的工作空间的体积,单位为立方米(m^3);

Q ——波长为 λ 时混波室的品质因数(无量纲);

N ——波长为 λ 时统计独立的调谐器位置数。

区间的中心位于平均值 $\langle |E_r|_{\text{max}} \rangle$ 附近,其可通过式(K.14)估算:

$$\langle |E_r|_{\text{max}} \rangle \approx \sqrt{\frac{\lambda \eta_v Q}{6\pi V} \left[0.577 \cdot 2 + \ln(N+1) - \frac{1}{2(N+1)} \right] \langle P_{\text{Tx}} \rangle} \dots\dots\dots (\text{K.14})$$

置信区间的宽度由上限与下限的差并对均值归一化定义,为:

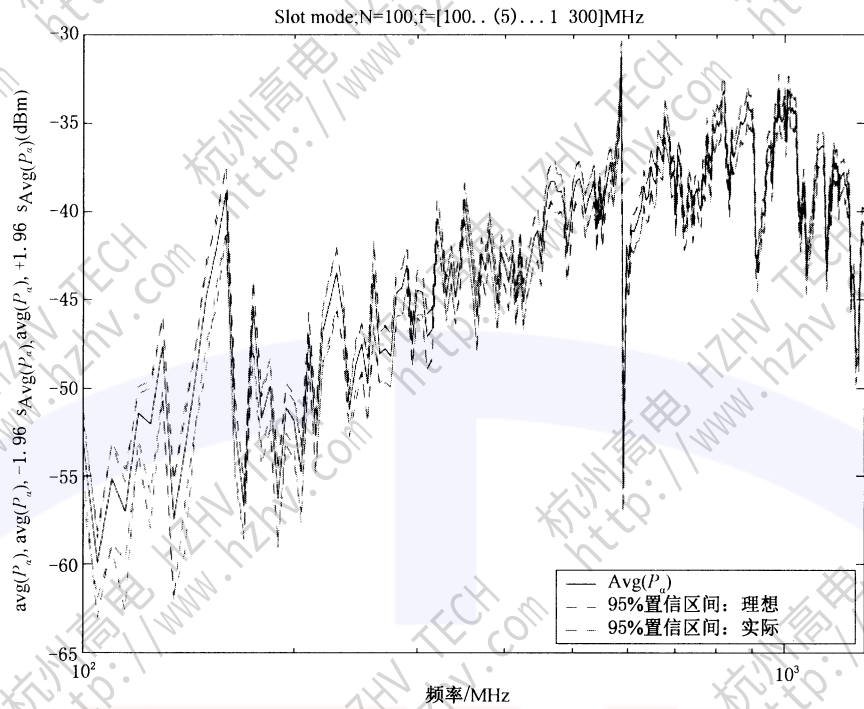
$$\frac{\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-}{\langle |E_x|_{\max} \rangle} = \frac{\sqrt{\ln\left\{1 - \left[\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\eta}{100}\right)\right]^{\frac{1}{N}}\right\}^{-1}} - \sqrt{\ln\left\{1 - \left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{\eta}{100}\right)\right]^{\frac{1}{N}}\right\}^{-1}}}{\sqrt{0.577 + \ln(N+1)} - \frac{1}{2(N+1)}} \dots\dots\dots (K.15)$$

可以推导最大接收功率的类似表示式[4]。 $\langle |E_x|_{\max} \rangle$ 和 $\langle P_{x, \max} \rangle$ 的置信区间的限值和宽度如图K.3和图K.4所示,对选定的 $\eta\%$,其为 N 的函数。如图K.3所示, N 相对小时,区间的不对称性很明显。或者,基于 $\langle |E_x|_{\max} \rangle$ 的标准差的描述,可以用扩展不确定度来表示MU[4][6][7]。

当 $\langle |E_x| \rangle$ 或 P_x 的平均值或标准差不是先知的,而需要通过试验数据本身来估算时,其分布和置信区间更加复杂[4],其不确定度可能非常大,尤其是 N 较小时。这种较小的 N 值可能是有意选择的(以最少化试验时间),也可能是不可避免的(在相对低的频率)。

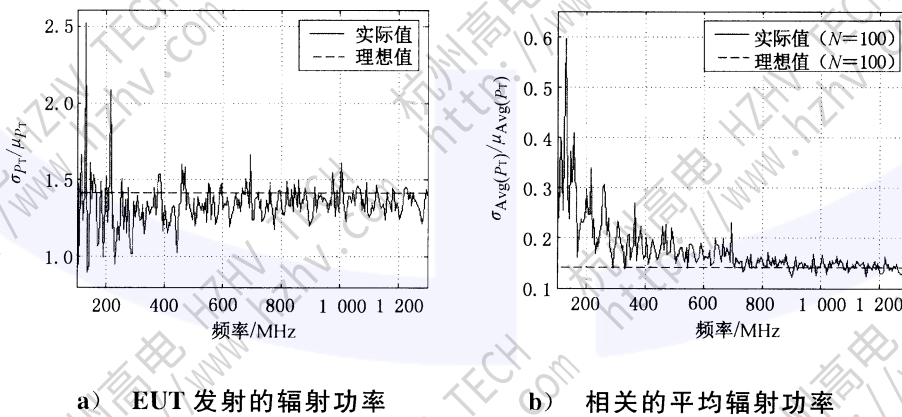
K.4 参考文献

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
- [2] CISPR/TR 16-4-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-1: Uncertainties, statistics and limit modelling—Uncertainty in standardized EMC tests.
- [3] CISPR 16-4-2, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling—Uncertainties in EMC measurements.
- [4] ARNAUT, I.R., Measurement uncertainty in reverberation chambers-I. Sample statistics, National Physical Laboratory (UK), Report TQE 2, Ed. 2.0, Dec. 2008. [http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/TQE2.pdf].
- [5] CORONA, P., LATMIRAL, G., PAOLINI, E., and PICCIOLI, L., Use of a reverberating enclosure for measurements of radiated power in the microwave range, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 18 no. 2, pp. 54-59, May 1976; Comments and corrections, ibid., vol. 18 no. 4, p. 205, Nov. 1976.
- [6] LADBURY, J., KOEPKE, G., and CAMELL, D., Evaluation of the NASA Langley Research Center mode-stirred chamber facility, Nat. Inst. Stand. Technol., Technical Note 1508, pp. 1-282, Jan. 1999.
- [7] ARNAUT, I.R., Estimation of maximum field strength and associated confidence intervals for EMC immunity testing in reverberation chambers, Safety & EMC (Beijing), pp. 16-19, May 2008 (special issue).
- [8] HARRINGTON, T.E., Update on informal interlaboratory comparison of reverb, GTEM, FAR, and OATS sites using RefRad and EU FAR Project Simple EUT, Proc. Reverberation Chamber, Anechoic Chamber and OATS Users Meeting, Austin, TX, 29-30 Apr. 2003.



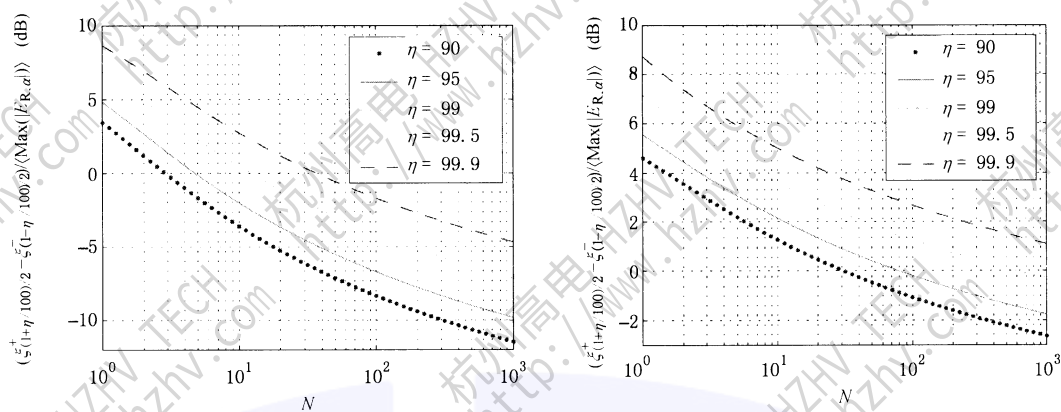
见参考文献[4]和[8]。

图 K.1 典型无意辐射体平均辐射功率与频率的关系



注：关于均值归一化的估计的标准不确定度：(a) EUT 发射的辐射功率[见图 a)], (b) 相关的平均辐射功率[见图 b)], 分别与理想混波室特性的理论不确定度 $\sqrt{2}$ 和 $\sqrt{2/100}$ 相比。考虑了两种情况下测量值、各理想值与 S 参数间的关系。

图 K.2 估计的标准不确定



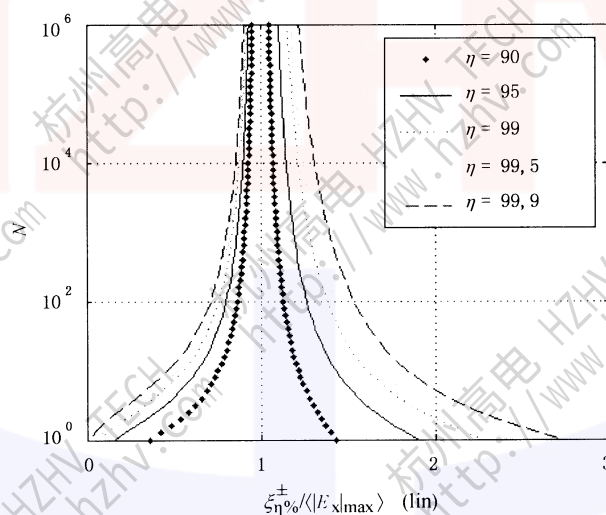
注：最大场强 $|E_x|_{\max}$ 的基于均值的归一化宽度 $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle |E_x|_{\max} \rangle$ 与 $|E_x|_{\max}$ 的置信区间 $\eta\%$ 相关，且是基于特定的独立搅拌器位置数 N 的。

注：最大接收功率 $P_{r,\max}$ 的基于均值的归一化宽度 $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle P_{r,\max} \rangle$ 与 $P_{r,\max}$ 的置信区间 $\eta\%$ 相关，且是基于特定的独立搅拌器位置数 N 的。

a) 最大场强的基于均值归一化的 $\eta\%$ 置信区间宽度

b) 最大接收功率的基于均值归一化的 $\eta\%$ 置信区间宽度

图 K.3 基于均值归一化的 $\eta\%$ 置信区间宽度 [单位为分贝 (dB)]



注：基于均值归一化的上、下区间的边界， $\xi_{\eta\%}^+ / \langle |E_x|_{\max} \rangle$ 和 $\xi_{\eta\%}^- / \langle |E_x|_{\max} \rangle$ 确定了 $|E_x|_{\max}$ 基于均值归一化的 $\eta\%$ 置信区间的宽度为 $(\xi_{\eta\%}^+ - \xi_{\eta\%}^-) / \langle |E_x|_{\max} \rangle$ 。

图 K.4 最大电场的各基于均值归一化的区间范围 (线性单位) 与独立搅拌器位置 N 的关系

参 考 文 献

- [1] IEC 60050-121:1998, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 121: Electromagnetism.
- [2] IEC 60050-151:2001, International Electrotechnical Vocabulary—Part 151: Electrical and magnetic devices.
- [3] IEC 60050-393:2003, International Electrotechnical Vocabulary—Part 393: Nuclear instrumentation—Physical phenomena and basic concepts.
- [4] IEC 60050-394:2007, International Electrotechnical Vocabulary—Part 394: Nuclear instrumentation—Instruments, systems, equipment and detectors.
- [5] IEC 60050-702:1992, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 702: Oscillations, signals and related devices.
- [6] IEC 60050-705:1995, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 705: Radio wave propagation.
- [7] IEC 60050-712:1992, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 712: Antennas
- [8] IEC 60050-723:1997, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 723: Broadcasting: Sound, television, data Amendment 1 (1999).
- [9] IEC 60050-726:1982, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 726: Transmission lines and waveguides.
- [10] IEC 60050-731:1991, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 731: Optical fibre communication.
- [11] IEC 60050-801:1994, International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 801: Acoustics and electroacoustics.
- [12] IEC 61000-4-6, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-6: Testing and measurement techniques—Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.
- [13] CISPR 16-1-2, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Conducted disturbances.
- [14] CISPR 16-1-3, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-3: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Disturbance power.
- [15] CISPR 16-1-4, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Antennas and test sites for radiated disturbance measurements.
- [16] CISPR 16-1-5, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Antenna calibration test sites for 30 MHz to 1 000 MHz.
- [17] CISPR 16-2-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity—Conducted disturbance measurements.
- [18] CISPR 16-2-2, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 2-2: Methods of measurement of disturbances and immunity—Measurement of dis-

turbance power.

[19] CISPR 16-2-4, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 2-4: Methods of measurement of disturbances and immunity—Immunity measurements.

[20] CISPR 22, Information technology equipment—Radio disturbance characteristics—Limits and methods of measurement.



中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电 磁 兼 容 试 验 和 测 量 技 术
混 波 室 试 验 方 法

GB/T 17626.21—2014/IEC 61000-4-21:2011

*

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)64275323 发行中心:(010)51780235

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

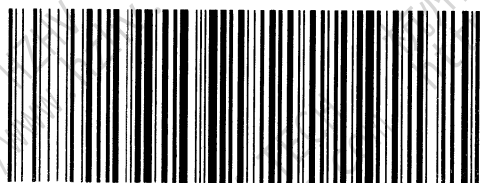
*

开本 880×1230 1/16 印张 5.5 字数 159 千字
2015年3月第一版 2015年3月第一次印刷

*

书号:155066·1-51064 定价 72.00 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 17626.21—2014