



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 31275—2020/IEC 62493:2015  
代替 GB/T 31275—2014

## 照明设备对人体电磁辐射的评价

Assessment of lighting equipment related to human exposure to  
electromagnetic field

(IEC 62493:2015, IDT)

2020-07-21 发布

2021-02-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
照明设备对人体电磁辐射的评价  
GB/T 31275—2020/IEC 62493:2015

\*

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.org.cn](http://www.spc.org.cn)

服务热线: 400-168-0010

2020年7月第一版

\*

书号: 155066 · 1-65476

版权专有 权必究

## 目 次

前言 .....	V
引言 .....	VI
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语、定义、物理量、单位和缩略语 .....	2
3.1 术语和定义 .....	2
3.2 物理量及单位 .....	4
3.3 缩略语 .....	4
4 限值 .....	5
4.1 总则 .....	5
4.2 照明设备的非有意辐射部分 .....	5
4.3 照明设备的有意辐射部分 .....	6
5 范德霍夫(Van der Hoofden)测试的一般要求 .....	7
5.1 被测物理量 .....	7
5.2 供电电压和频率 .....	7
5.3 测量频率范围 .....	7
5.4 环境温度 .....	7
5.5 测量设备要求 .....	7
5.6 测量设备不确定度 .....	8
5.7 测试报告 .....	8
5.8 结果的评价 .....	8
6 范德霍夫(Van der Hoofden)测试的测量程序 .....	9
6.1 总则 .....	9
6.2 工作条件 .....	9
6.3 测量距离 .....	9
6.4 测量装置 .....	9
6.5 测试头的位置 .....	10
6.6 结果的计算 .....	11
7 有意辐射体评价程序 .....	11
7.1 总则 .....	11
7.2 低功率排除法 .....	11
7.3 EMF 产品标准在贴身设备的应用 .....	11
7.4 EMF 产品标准在基站的应用 .....	12
7.5 其他 EMF 标准的应用 .....	12
附录 A (规范性附录) 测量距离 .....	13
附录 B (资料性附录) 测量测试头的位置 .....	14

附录 C (资料性附录) 暴露限值 .....	19
C.1 总则 .....	19
C.2 国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP) .....	19
C.3 电气和电子工程师协会(IEEE) .....	20
附录 D (资料性附录) 测量和评价方法原理 .....	21
D.1 总则 .....	21
D.2 感应内部电场 .....	21
D.3 100 kHz~300 GHz 的热效应 .....	29
附录 E (规范性附录) 实用的内部电场测量和评价方法 .....	32
E.1 感应内部电场的测量 .....	32
E.2 计算程序 .....	32
E.3 范德霍夫(Van der Hoofden)头部试验合格准则 .....	33
附录 F (规范性附录) 保护网络 .....	34
F.1 保护网络的校准 .....	34
F.2 保护网络理论特性的计算 .....	34
附录 G (资料性附录) 测量设备不确定度 .....	36
附录 H (资料性附录) 视为符合的设备 .....	38
附录 I (资料性附录) 有意辐射体 .....	40
I.1 总则 .....	40
I.2 照明设备中的有意辐射体 .....	40
I.3 照明应用中的天线特性 .....	40
I.4 暴露评估法 .....	44
I.5 灯具中的多个发射体 .....	46
I.6 暴露在多灯具下 .....	46
I.7 附录 I 中的参考文献 .....	46
参考文献 .....	48
图 1 照明设备的合规路线图及合格/不合格标准 .....	6
图 2 范德霍夫(Van der Hoofden)测试头 .....	7
图 3 保护网络示例图 .....	8
图 4 测量装置 .....	10
图 5 照明设备有意辐射部分符合性验证流程 .....	12
图 B.1 照明设备横向测量点的位置图(侧视图) .....	14
图 B.2 照明设备纵向测量点的位置(侧视图) .....	14
图 B.3 照明设备纵向测量点的位置——在照明方向 .....	15
图 B.4 尺寸旋转对称照明设备测量点的位置 .....	15
图 B.5 尺寸旋转对称照明设备测量点的位置——在照明方向 .....	15
图 B.6 $x$ 轴和 $y$ 轴上具有相同尺寸的照明设备测量点的位置 .....	16
图 B.7 带单端灯照明设备测量点的位置(360°照明) .....	16
图 B.8 带远程控制装置照明设备测量点的位置 .....	17
图 B.9 独立电子转换器测量点的位置 .....	17

图 B.10	上照灯测量点位置(落地式/悬挂式)	18
图 D.1	测量和评估方法概述	21
图 D.2	头部、回路和测量装置之间的距离	22
图 D.3	2 m LLA 中的最大电流	23
图 D.4	感应内部电场与相关限值水平	25
图 D.5	使用 LLA 的磁场测试结果示例	26
图 D.6	头部和测量装置之间的距离	27
图 D.7	式(D.20)的曲线	27
图 D.8	用传导发射测试测量 CM 电流的示例	30
图 F.1	网络分析仪初始标准化测试装置	34
图 F.2	利用网络分析仪测量分压因数的测试装置	34
图 F.3	用于校准保护网络的计算理论特性	35
图 H.1	不需测量 $F$ 因子即可视为符合要求的判定流程图	39
图 I.1	房间内有发射天线的灯具	42
图 I.2	导电天花板/平面的影响	42
图 I.3	小电偶极子的电场:解析公式与远场近似值对比	43
图 I.4	电场作为距离、天线增益和输入功率的函数(远场近似)	43
图 I.5	脉冲信号对平均暴露的影响	45
表 1	物理量及单位	4
表 2	接收机或频谱分析仪设置	7
表 A.1	照明设备和测量距离	13
表 C.1	普通公众暴露于 100 kHz~10 GHz 之间频率时变电场和磁场的基本限制	19
表 C.2	普通公众暴露于不大于 10 MHz 频率时变电场和磁场的基本限制	19
表 C.3	IEEE 对普通公众的基本限制(BR)	20
表 C.4	IEEE 在 100 kHz~3 GHz 之间对普通公众的基本限制(BR)	20
表 D.1	感应内部电场的计算	23
表 D.2	电源贡献的计算	28
表 D.3	等于 1.11 倍 $B_0$ 的振幅增加频率阶跃	28
表 D.4	等于 0.833 倍 $B_0$ 的功率增加频率阶跃	29
表 D.5	符合 CISPR 15 的场强限值	30
表 E.1	电导率随频率的变化(见 IEC 62311:2007 的表 C.1)	32
表 G.1	第 5 章和第 6 章所描述测量方法在 20 kHz~10 MHz 频率范围内的不确定度计算	36
表 G.2	表 G.1 的注及资料	36
表 I.1	可能应用在照明系统中的无线电射频技术	41

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 31275—2014《照明设备对人体电磁辐射的评价》，与 GB/T 31275—2014 相比，主要技术变化如下：

——增加了评价程序(见第 7 章)；

——增加了资料性附录 H；

——增加了资料性附录 I。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 62493:2015《照明设备对人体电磁辐射的评价》。

与本标准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 6113.101—2016 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 1-1 部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 测量设备(CISPR 16-1-1:2010, IDT)。

本标准由中国轻工业联合会提出。

本标准由全国照明电器标准化技术委员会(SAC/TC 224)归口。

本标准起草单位：国家电光源质量监督检验中心(北京)、绍兴上虞菁华背光源有限公司、苏州纽克斯电源技术股份有限公司、中国教育装备行业协会。

本标准主要起草人：秦碧芳、张德保、杭军、蔡金标、蒲敏、景维华。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 31275—2014。

## 引 言

本标准对照明设备周边空间电磁场的测量确定了适当的评价方法、标准化工作条件和测量距离。

本标准旨在参照 ICNIRP:1998<sup>[1]</sup>、ICNIRP 2010<sup>[2]</sup>、IEEE C95.1:2005<sup>[3]</sup> 和 IEEE C95.6:2002<sup>[4]</sup> 中给出的普通公众暴露水平,通过测量和/或计算来评价照明设备电磁(EM)场及其对人体潜在的影响。设定的应符合的暴露水平限制是基于 ICNIRP 和 IEEE 的基本限制。

根据照明设备的工作性质,适用基本限制的频率范围可限定如下:

- 内部电场介于 20 kHz~10 MHz 之间;
- 比吸收率(SAR)介于 100 kHz~300 MHz 之间;
- 功率密度则在适用范围外。

注:为避免声频噪声和红外干扰,照明设备的工作频率高于 20 kHz。大于 300 MHz 的频率贡献可以被忽略。

本标准并非用于替代暴露标准中的定义和程序,而是对专为符合暴露要求而规定的补充程序。

# 照明设备对人体电磁辐射的评价

## 1 范围

本标准用于人体暴露于照明设备电磁辐射的评估。评价包括频率介于 20 kHz~10 MHz 之间的感应内部电场和照明设备周围频率介于 100 kHz~300 MHz 的比吸收率(SAR)。

本标准适用于：

- 用于照明,以产生和/或分配光为主要功能,采用低电压供电或电池工作,供室内和/或室外使用的所有照明设备；
- 主要功能之一是照明的多功能设备中的照明设备；
- 专门与照明设备一起使用的独立辅助设备；
- 带有用于无线通信或控制的有意辐射体的照明设备。

本标准不适用于：

- 飞机和机场用照明设备；
- 道路车辆用照明设备；(但用于公共交通中乘客车厢照明的照明设备除外)
- 农业用光照设备；
- 轮船/船舶用照明设备；
- 复印机、幻灯片投影仪；
- 电磁场要求在其他标准中有明确规定的设备。

注：本标准中描述的方法不适用于对比不同照明设备的电磁场。

本标准不适用于灯具的内装式元件,如灯的电子控制装置。

## 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 62209-2:2010 人暴露于手持和穿戴式无线通信设备产生的射频场 人体模型、仪器和规程 第 2 部分:紧贴人体使用的无线通信设备(频率范围 300 MHz 到 6 GHz)的吸收率(SAR)测定规程 [Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices—Human models, instrumentation, and procedures—Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz)]

IEC 62232:2011 人体照射评价用测定无线电通信基站附近的无线电射频场强度和 SAR 的方法 (Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure)

IEC 62311:2007 电子电气设备关于人体暴露于电磁辐射(0 Hz~300 GHz)的评估 [Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz—300 GHz)]

IEC 62479:2010 评估低功率电子和电气设备是否符合与人体接触电磁场有关的基本限制 (10 MHz~300 GHz) [Assessment of the compliance of low-power electronic and electrical equipment



with the basic restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (10 MHz to 300 GHz)]

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)

### 3 术语、定义、物理量、单位和缩略语

#### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1.1

###### 镇流器 ballast

连接在电源和一支或若干支放电灯之间,利用电感、电容或电感与电容的组合将灯的电流限制在额定值的一种装置。

注:镇流器还可以包括电源电压的转换装置,以及有助于提供启动电压和预热电流的装置。

##### 3.1.2

###### 基本限制 basic restriction

###### 基本限值 basic limitations

基于已确认生物影响,并已包括安全系数得出的对暴露于时变电场、磁场和电磁场的限制。

注:基本限制是任何条件下均不可超过的最大水平。

##### 3.1.3

###### 内置式灯的控制装置 built-in lamp controlgear

一般为设计安装在灯具、接线盒、外壳或类似设备之内的灯的控制装置,在未采取特殊的保护措施时,这种装置不可安装在灯具之外。

注:路灯杆基座内安装控制装置的隔间可视为是一外壳。

##### 3.1.4

###### 兼容因子 compliance factor

$F$

采用范德霍夫(Van der Hoofden)头部试验方法所确定的因子,它表示在 20 kHz~10 MHz 频率范围内测得(加权和总和)因感应外部电场而生的内部电场。

注:参见附录 D 和附录 E。

##### 3.1.5

###### 电子控制装置 electronic controlgear

从 a.c./d.c.到 a.c./d.c.的电源逆变器,包括用于一支或多支灯启动和工作的稳定元件,通常是高频的。

注:所有类型的触发器、启动器、开关、调光器(包括相位控制装置,如三端双向可控硅开关元件、GTO)及传感器都不视为电子控制装置。

##### 3.1.6

###### 暴露 exposure

任何时间任何空间人体受到电场、磁场或电磁场影响,或接触到人体生理过程和其他自然现象之外产生的电流。

##### 3.1.7

###### 暴露距离 exposure distance

照明设备与正常使用条件下的人的典型距离。

## 3.1.8

**荧光灯 fluorescent lamp**

主要由放电产生的紫外辐射激发一层或几层荧光粉涂层而发光的低压汞放电灯。

注：这类灯通常是管形的，在英国通称为“荧光灯管”。

## 3.1.9

**高强度放电灯 high-intensity discharge lamp****HID 灯 HID lamp**

能借助玻壳内壁的温度产生稳定的弧光，且电弧管壁负荷超过  $3 \text{ W/cm}^2$  的放电灯。

注：HID 灯包括高压汞灯、金属卤化物灯和高压钠灯。

## 3.1.10

**高压灯 high-pressure lamp**

大部分的光直接或间接地由在相对较高水平分压下工作的汞或钠蒸气辐射产生的高强度放电灯。

## 3.1.11

**独立附件 independent auxiliary**

由一个或若干个部件组成，并能独立安装在灯具外而不带任何附加外壳，又具备符合其标志所示保护功能的附件。

示例：白炽灯或 LED 光源的调光器、变压器、转换器；放电灯（含荧光灯）的镇流器；紧凑型荧光灯、白炽灯或 LED 光源的半灯具。

注：这种附件可以是装在适用外壳内具备符合其标志所示全部必要保护功能的内装式附件。

## 3.1.12

**独立式灯的控制装置 independent lamp controlgear****独立式电子转换器 independent electronic converter**

由一个或若干个部件构成，并能独立安装在灯具之外而不带任何附加外壳，又具备符合其标志所示保护功能的灯的控制装置。

注：这种装置可以是装在适用外壳内具备符合其标志所示全部必要保护功能的内装式灯的控制装置。

## 3.1.13

**整体式灯的控制装置 integral lamp controlgear**

构成灯具的不可替换部件，并且不能从灯具上取下单独进行试验的灯的控制装置。

## 3.1.14

**有意辐射体 intentional radiator**

为提供无线通信、控制、检测等功能而设计的产生电磁场的设备。

## 3.1.15

**灯的控制装置 lamp controlgear**

连接在电源和一支或若干支灯之间用来变换电源电压、限制灯的电流至规定值，提供启动电压和预热电流，防止冷启动，校正功率因数或降低无线电干扰的一个或若干个部件。

## 3.1.16

**发光二极管 light emitting diode; LED**

包含 p-n 结，当受到电流激励时发出光辐射的固态器件。

## 3.1.17

**照明设备 lighting equipment**

主要功能是产生和/或调节和/或分配电光源光辐射的设备。

## 3.1.18

**低压灯 low-pressure lamp**

由钠蒸气或汞辐射产生光的放电灯。

3.1.19

**测量距离 measurement distance**

照明设备与测量测试头外表面之间的距离。

注：参见附录 A。

3.1.20

**测量点 measurement point**

测量测试头相对于照明设备的方位和位置。

3.1.21

**有机发光二极管 organic light emitting diode; OLED**

具有由阴极、阳极和有机电致发光层组成的有机化合物的电致发光区的发光半导体。

3.1.22

**自镇流灯 self-ballasted lamp**

含有灯头、光源以及使光源启动和稳定工作所必需的附加部件的装置,并使之为一体的灯,这种灯在不损坏其结构时是不可拆卸的。

3.2 物理量及单位

表 1 给出的物理量和单位适用于本文件。

表 1 物理量及单位

物理量	符号	单位	量纲
电导率	$\sigma$	西门子每米	S/m
电流密度	$J$	安每平方米	A/m <sup>2</sup>
电场强度	$E$	伏每米	V/m
频率	$f$	赫兹	Hz
磁场强度	$H$	安每米	A/m
磁通密度	$B$	特斯拉	T(Wb/m <sup>2</sup> , Vs/m <sup>2</sup> )
功率	$P$	瓦	W
电流	$I$	安	A

3.3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

a.c.:交流电(alternating current)

BR:基本限制(basic restriction)

CISPR:国际无线电干扰特别委员会(Comité international Spécial des Perturbations Radioélectriques)

d.c.:直流电(direct current)

DUT:被测设备(device under test)

EIRP:等效全向辐射功率(equivalent isotropically radiated power)

EMF:电磁场(electromagnetic field)

EMI:电磁干扰(electromagnetic interference)

ERP:有效辐射功率(effective radiated power)

GTO:门电路关断(gate turn off)

HID:高强度放电(high intensity discharge)

ICNIRP:国际非电离辐射保护委员会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

IEC:国际电工委员会(International Electrotechnical Commission)

IEEE:电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers)

IR:红外线(infrared)

LED:发光二极管(light emitting diode)

LLA:大环天线(large loop antenna)

NWA:网络分析仪(network analyser)

OLED:有机发光二极管(organic light emitting diode)

PRF:脉冲重复频率(pulse repetition frequency)

RF:无线电频率(radio frequency)

r.m.s.:均方根(root mean square)

SAR:比吸收率(specific absorption rate)

UV:紫外线(ultraviolet)

WBA:全身平均(whole-body average)

## 4 限值

### 4.1 总则

本标准采用 IEEE C95.1:2005 或 ICNIRP 1998 和 ICNIRP 2010 规定的针对普通大众的基本限值和参考等级,参见附录 C。

照明设备应符合范德霍夫(Van der Hoofden)测试限值(4.2.3),除非其是内在符合(4.2.2)。如果设备带有有意辐射体也应通过有意辐射体的评估程序(4.3)。图 1 给出了论证符合这些限值的流程示意图。

### 4.2 照明设备的非有意辐射部分

#### 4.2.1 总则

4.2 适用于除有意辐射部分(只要适用)外的照明设备。

#### 4.2.2 无需测试即视为符合范德霍夫(Van der Hoofden)试验的照明设备

满足下列内在条件之一的照明设备可视为符合本标准要求,而无需测试:

- 1) 不带电子控制装置;
- 2) 白炽灯技术,包括卤素灯;
- 3) LED 光源技术;
- 4) OLED 光源技术;
- 5) 高压放电灯技术;
- 6) 基于低压放电灯技术且暴露距离大于或等于 50 cm(根据表 A.1);
- 7) 一个独立附件。

附录 H 给出了这些条件的背景和基本原理。

不满足上述任一条件的照明设备应按照 4.2.3 的要求。

### 4.2.3 限值的应用

范围中描述的照明设备,且不满足 4.2.2 提及的任一内在符合条件,如果兼容因子  $F$ (见 3.1.4)小于或等于 1,则符合本标准。

### 4.3 照明设备的有意辐射部分

如果一个或多个有意辐射体是照明设备的一部分,为符合本标准,应采用第 7 章的方法之一,且满足其条件。详见附录 I。

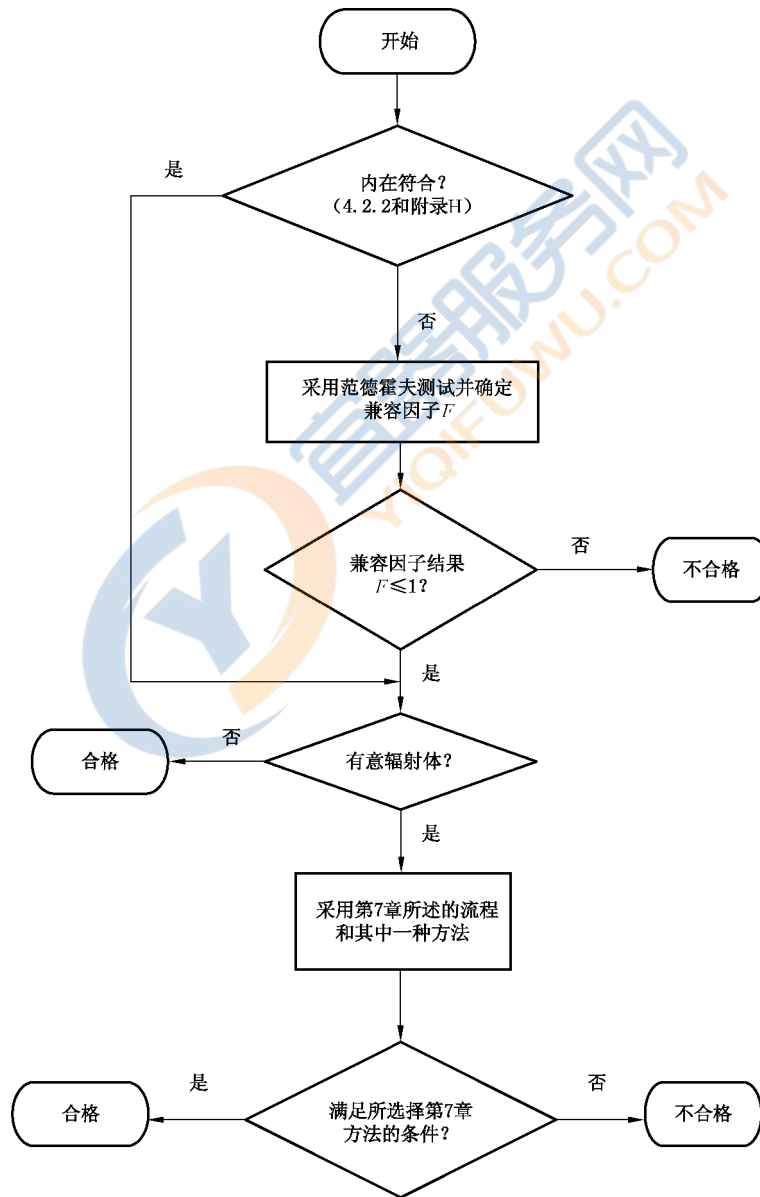


图 1 照明设备的合规路线图及合格/不合格标准

## 5 范德霍夫(Van der Hoofden)测试的一般要求

### 5.1 被测物理量

感应的内部电场水平是通过测量进入标准化的测试头(详见图 4 和附录 E)的电容电流  $I_{\text{cap}}(f_n)$  来确定的。电容电流由频谱分析仪或接收器通过耦合网络测量电压  $V(f_n)$ (见图 3)而测得,此电压是频率的函数。本章详细介绍了测试头、测量仪器和测量条件。

### 5.2 供电电压和频率

对于交流工作的设备,测量应在最大额定供电电压的 $\pm 2\%$ 范围内进行。对于可在不同交流供电电压和不同供电频率下工作的设备,应仅在最大额定供电电压的 $\pm 2\%$ 范围内和一个供电频率(50 Hz 或 60 Hz)下进行一次测量。

### 5.3 测量频率范围

测量频率范围为 20 kHz~10 MHz(参见附录 E)。

### 5.4 环境温度

测量应在 15 °C~25 °C 的环境温度范围内进行。

### 5.5 测量设备要求

需要一台符合 CISPR 16-1-1 的电磁干扰(EMI)接收机或频谱分析仪,设置列于表 2 中。

表 2 接收机或频谱分析仪设置

频率范围	$B_6$	测量时间	步长 $f_{\text{step}}$	检波器
20 kHz~150 kHz	200 Hz	100 ms	220 Hz	波峰
150 kHz~10 MHz	9 kHz	20 ms	10 kHz	波峰

$B_6$  为 CISPR 16-1-1 规定的 6 dB 带宽。

范德霍夫(Van der Hoofden)测试头(如图 2 所示),包括一个外径  $D_{\text{head}} = 210 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  的导电球,安装在绝缘(如:木制、塑料)支架上、通过一根普通导线与保护网络相连。

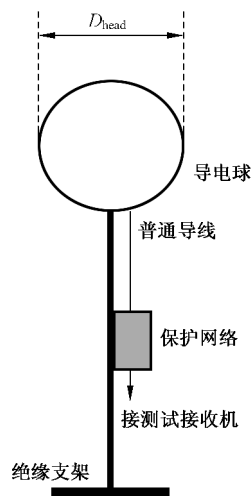
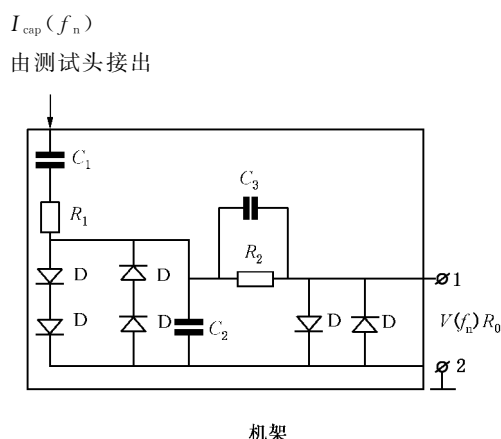


图 2 范德霍夫(Van der Hoofden)测试头

图 3 给出了保护网络的示例。



示例：

$C_1 = 470 \text{ pF}$

$C_2 = 10 \text{ nF}$

$C_3 = \text{可选电容} (\sim 56 \text{ pF})$

旨在满足附录 F 的传递函数要求。

$R_1 = 470 \text{ } \Omega$

$R_2 = 150 \text{ } \Omega$

D = 肖特基二极管

$R_0 = \text{EMI 接收机的 } 50 \text{ } \Omega \text{ 输入阻抗}$

端子 1 和端子 2 应通过同轴电缆与频谱分析仪或 EMI 接收机相连接。

图 3 保护网络示例图

保护网络的传递函数由式(1)确定。

$$g(f_n) = \frac{V(f_n)}{I_{\text{cap}}(f_n)} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + [(R_0 + R_2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_2]^2}} \dots\dots\dots (1)$$

保护网络的传递函数与计算的特征值之间的偏差应不超过  $\pm 1 \text{ dB}$  (计算方法参见附录 F)。保护网络的校准应按照附录 F 详细描述的程序进行。

对测量装置的设定, 6.4 给出了完整概述。

### 5.6 测量设备不确定度

测量设备基本的不确定度 ( $U_{\text{basic}}$ ) 估计为 30%。在实验室内使用的测量方法的实际设备不确定度  $U_{\text{lab}}$  应计算出来。实际不确定度应用于对结果的符合性评估 (见 5.8)。附录 G 给出了  $U_{\text{lab}}$  计算的示例。

注：IEC 61786:1998<sup>[6]</sup> 中给出了评估不确定度的导则。

### 5.7 测试报告

测试报告应至少包括以下内容：

- 照明设备的名称；
- 测量设备的规格；
- 工作模式、测量点和测量距离；
- 额定电压和频率；
- 测量结果；
- 采用的限值。

### 5.8 结果的评价

是否符合限值, 应采用以下方式确定。

如果利用实际测试设备计算出的不确定度 ( $U_{\text{lab}}$ ) 小于或等于 5.6 中给出的不确定度 ( $U_{\text{basic}}$ ), 那么：

- 如果测量结果不超过适用限值, 即视为符合；
- 如果测量结果超过适用限值, 即视为不符合。

如果利用实际测试设备计算出的不确定度 ( $U_{\text{lab}}$ ) 大于 5.6 中给出的不确定度 ( $U_{\text{basic}}$ ), 那么：

- 如果测量结果加上 ( $U_{\text{lab}} - U_{\text{basic}}$ ) 不超过适用限值, 即视为符合；
- 如果测量结果加上 ( $U_{\text{lab}} - U_{\text{basic}}$ ) 超过适用限值, 即视为不符合。

## 6 范德霍夫(Van der Hoofden)测试的测量程序

### 6.1 总则

评估方法基于 ICNIRP 1998 和 ICNIRP 2010 或基于 IEEE C95.1:2005 中给出的基本限制。所采用的测量程序模拟照明设备附近人体内感应的内部电场。测量在本章所述的条件下进行。

### 6.2 工作条件

#### 6.2.1 照明设备的工作条件

照明设备的测量应在制造商规定的工作条件下进行。

对于可以适用不同功率光源的照明设备,该照明设备只需测量与最高灯电压光源的组合即可。

测量之前,灯应工作直至达到稳定状态。除非制造商另有说明,应遵循以下稳定时间:

——15 min,对于低压放电灯;

——30 min,对于其他放电灯。

所有测量均应使用已老炼 100 h 的灯进行。

#### 6.2.2 特定照明设备的工作条件

多光源照明设备:照明设备包含一个以上光源时,所有光源应同时工作。

自容式应急照明设备:如果设备可与电源连接并工作,那么应在此种工作模式下测试。无需在蓄电池工作模式下测试。

具有调光功能的照明设备,应分别在最小和最大光调限值下测量。

#### 6.2.3 带有有意辐射体的照明设备的工作条件

在范德霍夫(Van der Hoofden)测试时 DUT 的有意辐射部分应被禁用,除非这个动作导致 DUT 无法工作。

### 6.3 测量距离

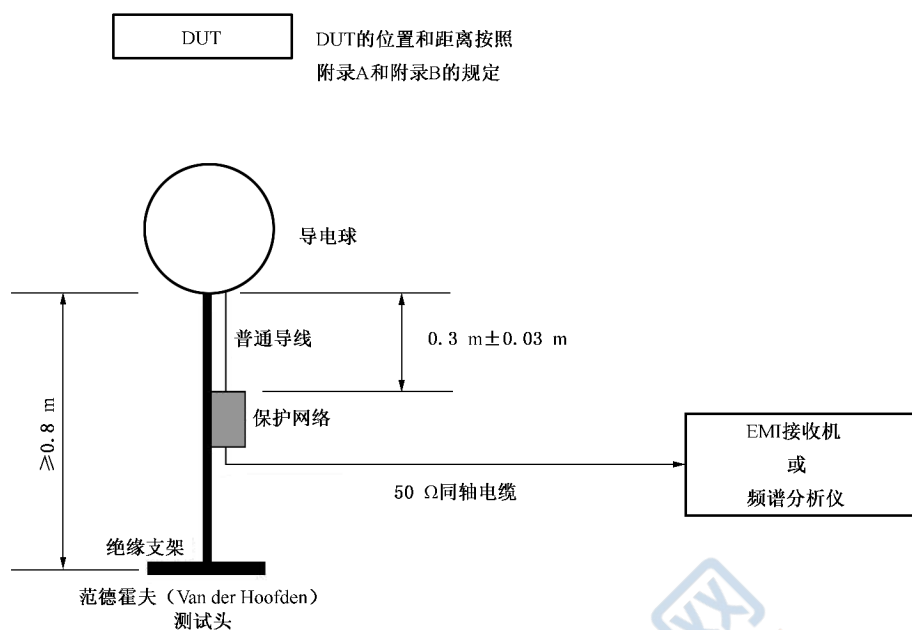
除非制造商在安装说明中指定了使用限制,照明设备应按照附录 A 表 A.1 中给出的测量距离予以评价。确定测量距离时,将测试头的外表面作为参考点。参见附录 B 中的图 B.1~图 B.10。测量距离的允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

### 6.4 测量装置

#### 6.4.1 总则

测量装置如图 4 所示。





说明：  
DUT——被测设备。

图 4 测量装置

如果照明设备配有接地端子,照明设备应通过电源线中包含的接地导线接地。

EMI 接收机或频谱分析仪应由保护接地的电源供电。

测试期间,任何导电平面或物体及人员与照明设备间距离应不小于 0.8 m。

绝缘支架的高度最小为 0.8 m。导电球通过长度为  $30\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$  的普通导线与保护网络相连接。保护网络通过一根  $50\ \Omega$  同轴电缆与 EMI 接收器或频谱分析仪相连接,且该同轴电缆的最大线损为 0.2 dB,直流电阻  $\leq 10\ \Omega$ 。

#### 6.4.2 特定照明设备的测量装置

##### 6.4.2.1 自镇流灯

这些灯应直接插入灯座中,灯座应固定在一块绝缘材料上。按照表 A.1 中规定的测试距离放置测试头,该距离指测试头表面至灯末端的距离。

##### 6.4.2.2 独立式电子控制装置

独立式电子控制装置应固定在一块绝缘材料上,并配装具有最大允许功率的适配光源。控制装置和照明设备之间的负载电缆应为 0.8 m,相对允许偏差应为 20%,除非制造商另有规定。控制装置、照明设备和电缆的配置应符合图 B.9。

#### 6.5 测试头的位置

测试头的测量位置应按照以下准则来选择。

仅在正常使用期间普通公众可能暴露的方向上进行测量。

图 B.1~图 B.3 更详细地概述了测试头导电球体相对于被测设备(DUT)的位置的一般原则。

对于装配超过 30 cm 的双端荧光灯的照明设备,测试头位置如图 B.2 所示。对灯的两端分别进行测量程序,对于装配多只荧光灯的照明设备,应依次对每只灯进行测量。

对于其他灯的照明设备,测试头应位于表 A.1 中规定的适当测量距离处,并处于预期照明点的中心。

对于照明中心点无法确定的,或正常使用时照明方向不朝向普通公众的照明设备,例如上照灯,测量点选在照明设备为中心适当测量距离为半径的圆周上。为完整评估,可选择多个测量点。

图 B.4~图 B.10 给出了典型照明设备测量点的位置示例。

## 6.6 结果的计算

测量结果按照附录 E 计算。

## 7 有意辐射体评价程序

### 7.1 总则

图 5 显示了照明设备的有意辐射部分的符合性论证选项。本章就这些不同的选项给出进一步的指引。

### 7.2 低功率排除法

#### 7.2.1 总则

照明设备的有意辐射部分的符合性论证的第一种选择,是基于有意辐射体的总平均辐射功率的测定结果。这种所谓的低功率排除法是在 IEC 62479:2010 中提出的。在这种方法中,指定了低功率的排除水平。如果有意发射体输入的实际平均(6 min)总功率  $P_{\text{int,rad}}$  低于排除水平  $P_{\text{max}}$ ,即如果满足以下关系[式(2)],则产品设计符合,无需进一步测试。

$$P_{\text{int,rad}} < P_{\text{max}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

有关低功耗排除法的更多信息,参见附录 I 的 I.4。

#### 7.2.2 总辐射功率的确定

一般情况下,总辐射功率  $P_{\text{int,rad}}$  可以根据所使用的有意辐射体的设计规格书确定。当确定  $P_{\text{int,rad}}$  的值时,应注意功率的确定方式。此外,因为需确定 6 min 的平均值,在脉冲功率的情况下,发射信号的占空比应估入。附件 I 给出了如何确定  $P_{\text{int,rad}}$  的进一步指导。

#### 7.2.3 低功率排除水平的确定

EMF 基础标准 IEC 62479:2010 给出了根据适用的各种基本限制和各类暴露人群(一般公众、职业)的低功耗排除水平  $P_{\text{max}}$ 。参见 IEC 62479:2010 的表 A.1。例如,ICNIRP 1998 对于一般公众暴露,最不利情况的低功率排除水平是为对头部和躯干 20 mW。可是在实际应用中,由于某些照明设备的最小暴露距离和由于所用天线的特性,获得了更大的排除水平  $P_{\text{max}}$ 。I.4.3 对低功耗排除水平  $P_{\text{max}}$  的确定给出了更多的指导。

#### 7.2.4 多发射体的求和

对于具有多个有意辐射体的照明设备,应加入来自各个有意发射体的贡献。求和方式取决于各个发射体的射频信号是否相关。I.5 对求和方法及其符合性标准给出了更多的指导。

## 7.3 EMF 产品标准在贴身设备的应用

如果不符合低功耗排除水平(7.2),且照明设备的有意辐射部分与暴露者之间的暴露距离小于或等

于 0.05 m, 则应依据针对贴身设备的专门 EMF 产品标准 IEC 62209-2:2010 进行符合性验证。

### 7.4 EMF 产品标准在基站的应用

如果不符合低功耗排除水平(7.2), 且照明设备的有意辐射部分是基站, 则应依据针对基站的专门 EMF 产品标准 IEC 62232:2011 使用适用的评估距离和限值进行符合性论证。

### 7.5 其他 EMF 标准的应用

如果不符合低功耗排除水平(7.2), 并且有意辐射部分不能视为贴身设备(7.3)或作为基站(7.4), 则可能可以采用另一种 EMF 产品标准, 或者使用通用的 EMF 标准 IEC 62311:2007 使用适用的评估距离和限值进行符合性验证。

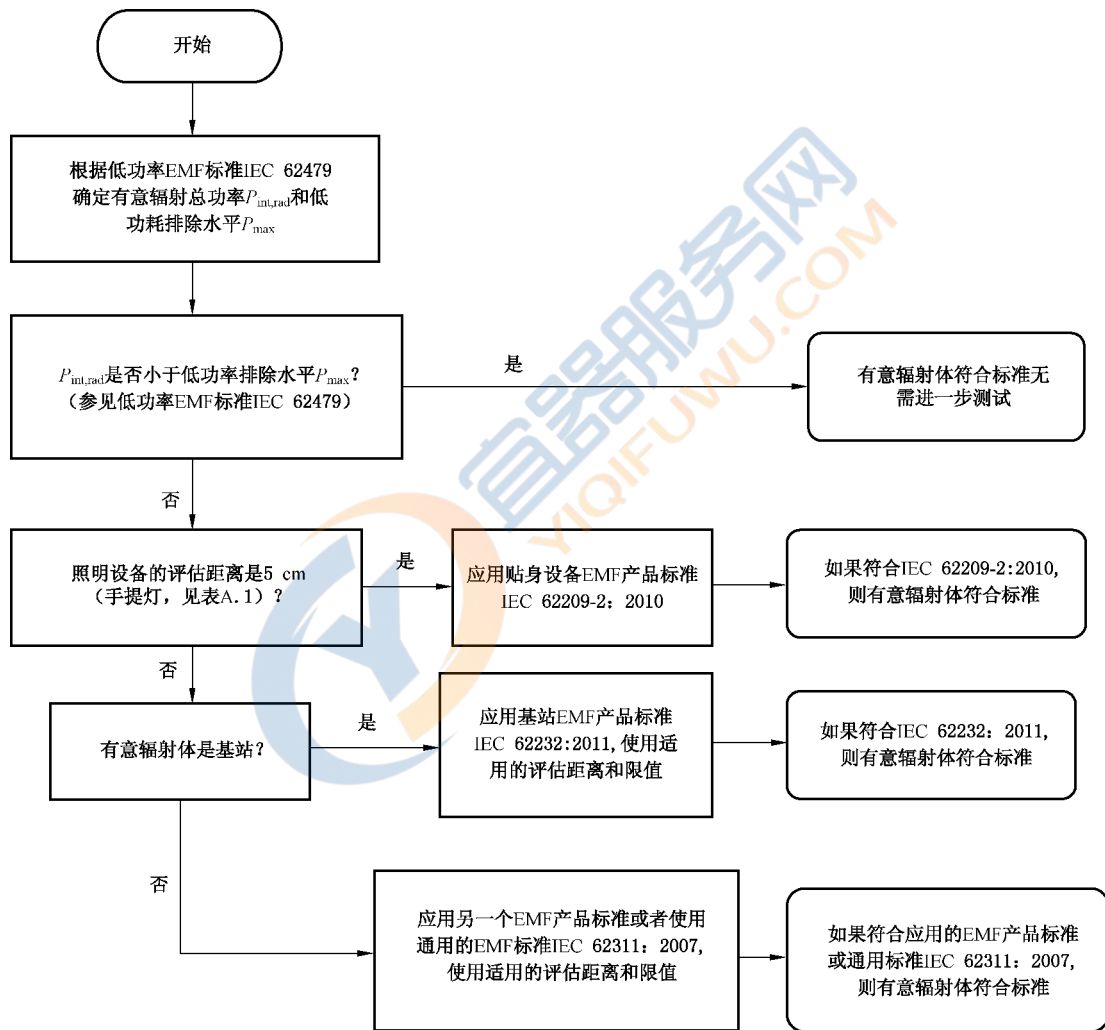


图 5 照明设备有意辐射部分符合性验证流程

附 录 A  
(规范性附录)  
测 量 距 离

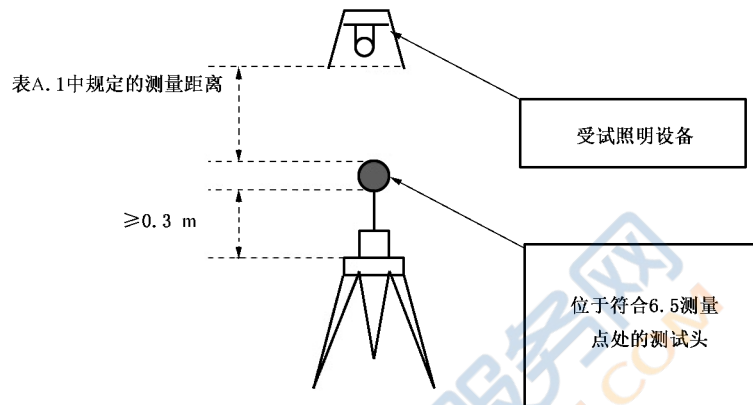
表 A.1 中的测量距离是根据正常工作期间公众的预计位置来定义的。

表 A.1 照明设备和测量距离

照明设备的类型 <sup>c</sup>	测量距离 cm
手提灯 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
台式照明设备	30
壁式照明设备	50
上照灯	50
悬挂式照明设备	50
输入功率 <sup>b</sup> ≤180 W 荧光灯用吸顶式和/或嵌入式照明设备	50
输入功率 <sup>b</sup> >180 W 荧光灯用吸顶式和/或嵌入式照明设备	70
输入功率 <sup>b</sup> ≤180 W 放电灯用吸顶式和/或嵌入式照明设备	70
输入功率 <sup>b</sup> >180 W 放电灯用吸顶式和/或嵌入式照明设备	100
便携式照明设备	50
泛光灯	200
道路和街道照明用照明设备	200
灯串	50
游泳池和类似场合用照明设备	50
舞台照明、电视和电影工作室(室外和室内)用照明设备	100
医院和医护建筑物临床区域用照明设备	50
埋地式照明设备	50
水族馆照明设备	50
插入式夜灯	50
自镇流灯	30
紫外和红外辐射设备	50
运输照明(安装在公共汽车和火车的乘客车厢内)	50
本表中未提及的其他照明设备	50
<sup>a</sup> 测量距离应为 30 cm,但测量结果应换算为 5 cm 的距离(方程:1/r <sup>3</sup> )。 <sup>b</sup> 照明设备的总标称功率。 <sup>c</sup> 如果 LE(照明设备)属于多个类别,则采用测试距离最短的类别。	

附录 B  
(资料性附录)  
测量测试头的位置

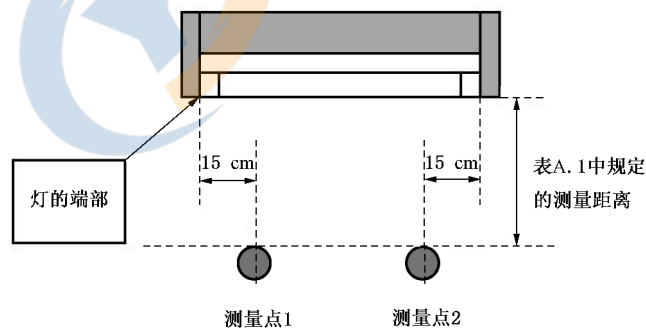
图 B.1~图 B.10 包含了范德霍夫(Van der Hoofden)测试头相对于被测照明设备有关的布局(位置、方向)。另见 6.4 和 6.5 关于测量布局的详细规定。



这适用于嵌入、表面或杆式安装的照明设备。

注：例子包括带有双端荧光灯的灯具。

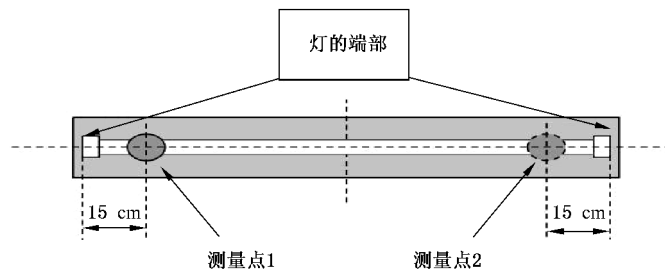
图 B.1 照明设备横向测量点的位置图(侧视图)



这适用于嵌入、表面或灯杆安装的照明设备。

注：例子包括带有双端荧光灯的灯具。

图 B.2 照明设备纵向测量点的位置(侧视图)

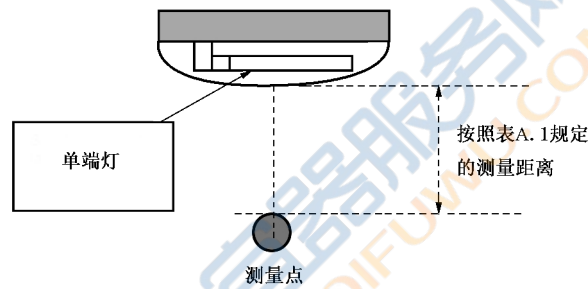


测量距离按表 A.1 中规定

这适用于嵌入、表面或灯杆安装的照明设备。

注：例子包括带有双端荧光灯的灯具。

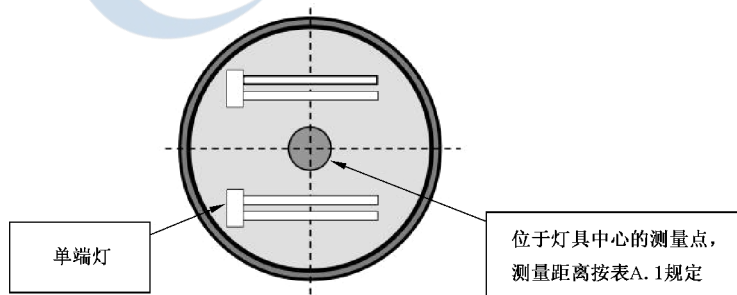
图 B.3 照明设备纵向测量点的位置——在照明方向



这适用于嵌入、表面或灯杆安装的照明设备。

注：例子包括带有单端荧光灯的灯具。

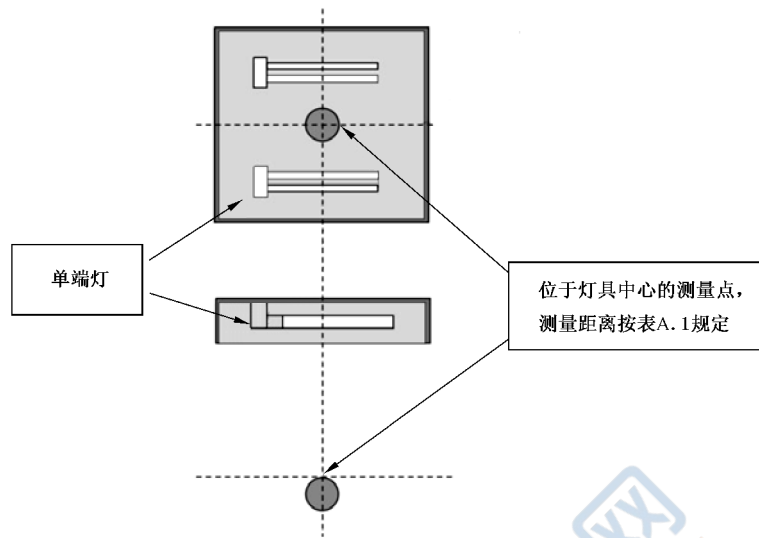
图 B.4 尺寸旋转对称照明设备测量点的位置



这适用于嵌入、表面或灯杆安装的照明设备。

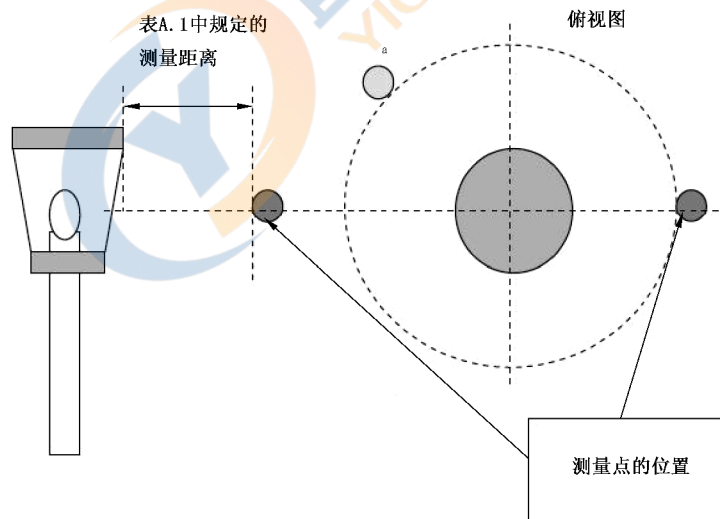
注：例子包括带有单端荧光灯或其他单端灯的灯具。

图 B.5 尺寸旋转对称照明设备测量点的位置——在照明方向



这适用于嵌入、表面或灯杆安装的照明设备。  
注：例子包括带有单端荧光灯或其他单端灯的灯具。

图 B.6  $x$  轴和  $y$  轴上具有相同尺寸的照明设备测量点的位置



<sup>a</sup> 可在照明设备圆周上指定附加的测量点。

图 B.7 带单端灯照明设备测量点的位置(360°照明)

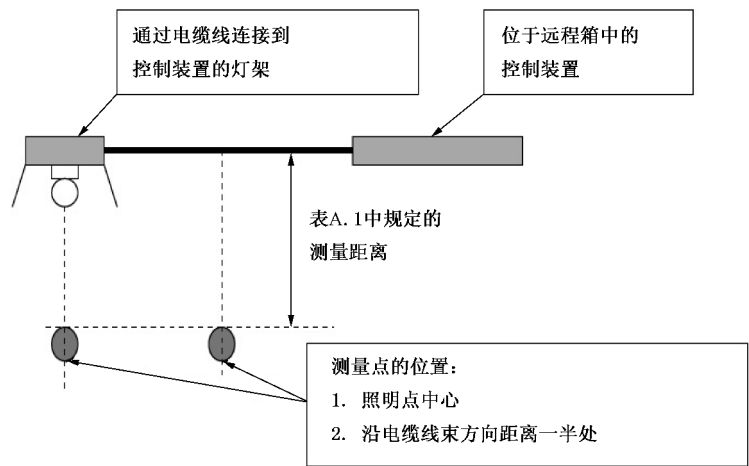
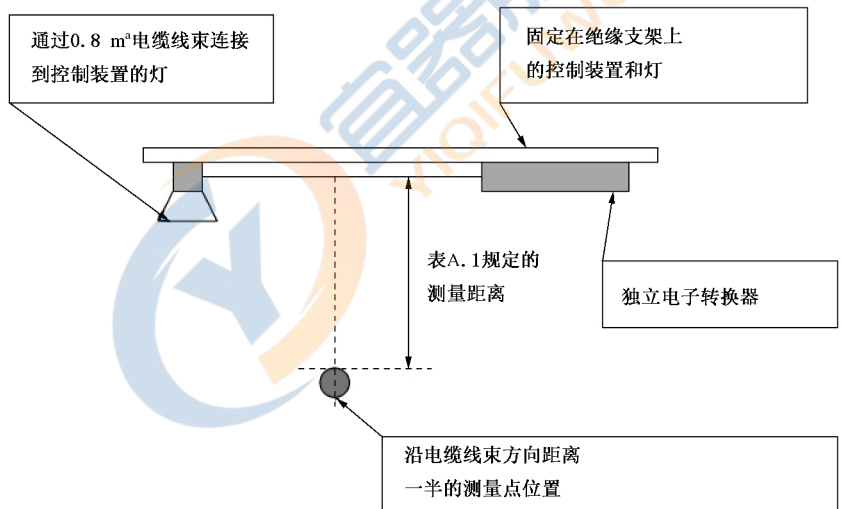


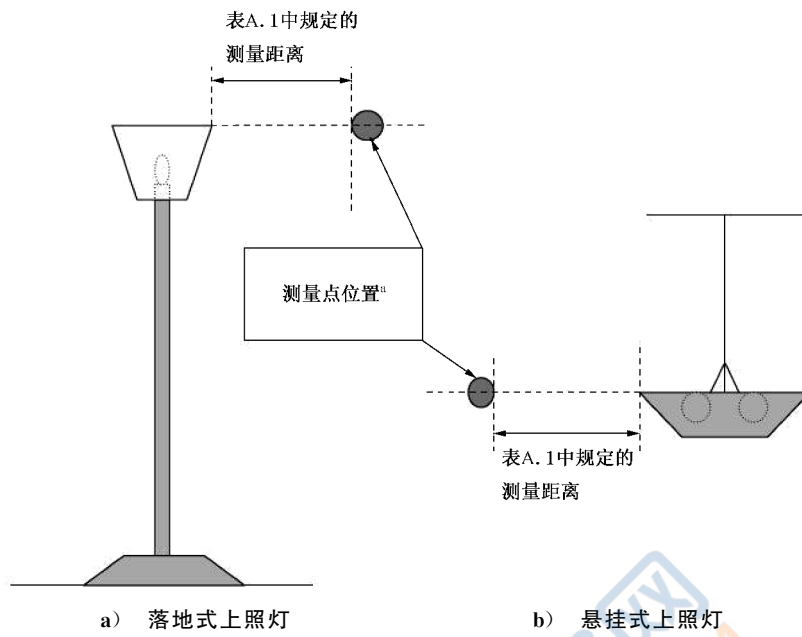
图 B.8 带远程控制装置照明设备测量点的位置



<sup>a</sup> 除非制造商另有说明,电缆长度为 0.8 m。

图 B.9 独立电子转换器测量点的位置





<sup>a</sup> 对于直管荧光灯,测试头垂直于荧光灯,位置如图 B.2 所示距灯端距离 15 cm 处。

图 B.10 上照灯测量点位置(落地式/悬挂式)

附 录 C  
(资料性附录)  
暴 露 限 值

### C.1 总则

本附录给出的暴露限值(参见参考文献[1]、[2]、[3]和[4])仅供参考,它不包括详尽的限值清单和仅在世界某些地区有效的限值。本标准的使用者有责任确保他们使用适用的国家规定的当前版本的限值。

### C.2 国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)

#### C.2.1 ICNIRP 1998

表 C.1 给出了普通公众暴露于 100 kHz~10 GHz 之间频率时变电场和磁场的基本限制(参见参考文献[1])。

表 C.1 普通公众暴露于 100 kHz~10 GHz 之间频率时变电场和磁场的基本限制

频率范围	平均 SAR (全身) W/kg	局部 SAR (头部和躯干) W/kg	局部 SAR (四肢) W/kg
100 kHz~10 GHz	0.08	2	4

#### C.2.2 ICNIRP 2010

表 C.2 给出了普通公众暴露不大于 10 MHz 频率时变电场和磁场的基本限制(参见参考文献[2])。

表 C.2 普通公众暴露于不大于 10 MHz 频率时变电场和磁场的基本限制

暴露特征	频率范围	内部电场 V/m
头部中枢神经系统组织	1 Hz~10 Hz	$0.1/f$
	10 Hz~25 Hz	0.01
	25 Hz~1 000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
	1 000 Hz~3 kHz	0.4
	3 kHz~10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$
头部和身体所有组织	1 Hz~3 kHz	0.4
	3 kHz~10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$
注 1: $f$ 为以 Hz 为单位的频率。		
注 2: 所有值均为均方根值(r.m.s.)。		

C.3 电气电子工程师学会(IEEE)

表 C.3 给出了 IEEE 对普通公众在 0 Hz~3 kHz 的基本限值(BR)(参见参考文献[4]),表 C.4 给出了 IEEE 对普通公众在 100 kHz~3 GHz 的基本限值(BR)(参见参考文献[3])。

表 C.3 IEEE 对普通公众的基本限制(BR)

暴露的组织	$f_e$ (Hz)	反应限值 <sup>a</sup>			受控环境中的人		
		$E_0$	(r.m.s)	(V/m)	$E_0$	(r.m.s)	(V/m)
大脑	20	$5.89 \times 10^{-3}$			$1.77 \times 10^{-2}$		
心脏	167	0.943			0.943		
四肢	3 350	2.10			2.10		
其他组织	3 350	0.701			2.10		

$E_0$  表示基强度原位场。 $f_e$  为频率参数。

<sup>a</sup> 在频率范围内反应限值等同于 IEEE Std C95.6—2002<sup>[13]</sup> 中的公众暴露限值。

注：表 C.3 及本标准其他章条有时给出三位有效数字,仅是为了让读者能够理解本标准中陈述的各种推导及关系,并不意味着数字量达到该精度。

表 C.4 IEEE 在 100 kHz~3 GHz 之间对普通公众的基本限制(BR)

		普通公众 <sup>a</sup> SAR <sup>b</sup> W/kg	受控环境中的人 SAR <sup>c</sup> W/kg
全身暴露	全身平均值(WBA)	0.08	0.4
局部暴露	局部(峰值空间平均值)	2 <sup>c</sup>	10 <sup>c</sup>
局部暴露	四肢 <sup>d</sup> 和耳廓	4 <sup>c</sup>	20 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> 指没有专门辐射保护措施 of 公众。  
<sup>b</sup> SAR 为一定平均时间内的平均值。  
<sup>c</sup> 任意 10 g 组织(定义为立方体形状的组织体积,立方体体积约为 10 cm<sup>3</sup>)的平均值。  
<sup>d</sup> 四肢指分别从肘部和膝部到手臂和腿部末梢的部位。

**附 录 D**  
(资料性附录)  
**测量和评价方法原理**

**D.1 总则**

本附录给出的基于 ICNIRP 和 IEEE 的暴露限制符合性的测量和评价方法(参见图 D.1),包括对内部电场(参见 D.2)和热效应(参见 D.3)的评价。本附录中的评估是基于以下情况:设备不包括有意辐射体,设备的非有意电磁辐射符合适用于照明设备的电磁兼容性(EMC)要求。作为一个典型的例子,本附录采用了照明设备电磁干扰国际 IEC 标准(CISPR 15)。然而,可以使用其他 EMC 辐射标准进行类似的评估。请注意,虽然本附录是基于 CISPR 15 限值进行计算,但即使超出这些限值的幅度很大,也不太可能造成 EMF 安全风险。

如果照明设备包括有意辐射体,则适用附加的合规标准。详情见附录 I 和第 7 章。

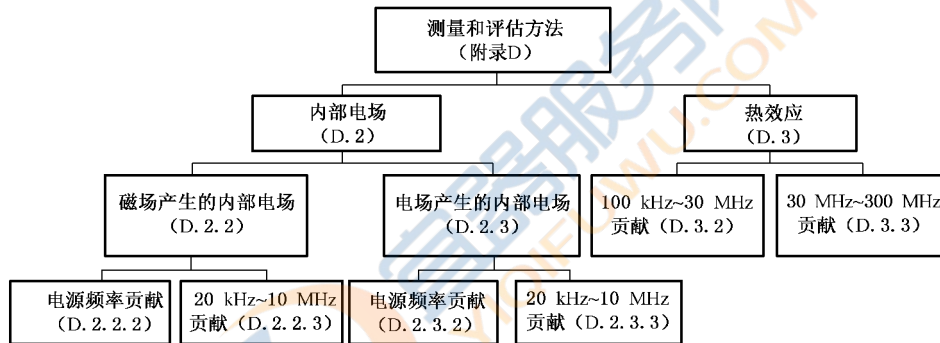


图 D.1 测量和评估方法概述

**D.2 感应内部电场**

**D.2.1 总则**

根据基本限制,人(人体模型)中的感应内部电场应符合式(D.1):

$$\sum_{f_i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

$E(f_i, d)$ ——频率为  $f_i$  和根据附录 A 测量距离  $d$  时测得的感应内部电场;

$E_{\text{Lim}}(f_i)$ ——频率为  $f_i$  时,表 C.2 的内部电场基本限值。

人(人体模型)中的感应内部电场可由以下因素引起:

- 人(人体模型)体中因 D.2.2 所述受试照明设备的磁场产生的涡电流;
- 因 D.2.3 所述电场产生的从受试照明设备到人(人体模型)的电容电流。

那么,式(D.1)可改写为:

$$\sum_{f_i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{eddy}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} + \sum_{f_i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

$E_{\text{eddy}}(f_i, d)$ ——频率为  $f_i$  和根据附录 A 测量距离  $d$  时，因外部磁场产生的感应内部电场；

$E_{\text{cap}}(f_i, d)$ ——频率为  $f_i$  和根据附录 A 测量距离  $d$  时，因外部电场产生的感应内部电场。

为避免噪声和红外干扰，照明设备中功率转换器的频率大于 20 kHz。因此，式(D.2)可改写为：

$$\sum_{f_i=1 \text{ Hz}}^{20 \text{ kHz}} \frac{E_{\text{eddy}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} + \sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{eddy}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} + \sum_{f_i=1 \text{ Hz}}^{20 \text{ kHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} + \sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots (D.3)$$

50 Hz 或 60 Hz 的电源频率，是 1 Hz~20 kHz 频率区域内唯一相关频率。因此，式(D.3)可改写为：

$$\underbrace{\frac{E_{\text{eddy}}(f_{\text{mains}}, d)}{E_{\text{Lim}}(f_{\text{mains}})}}_{(D.4, a)} + \underbrace{\sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{eddy}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)}}_{(D.4, b)} + \underbrace{\frac{E_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d)}{E_{\text{Lim}}(f_{\text{mains}})}}_{(D.4, c)} + \underbrace{\sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)}}_{(D.4, d)} \leq 1 \quad \dots\dots (D.4)$$

D.2.2 和 D.2.3 给出了式(D.4)的每一部分贡献。

### D.2.2 因磁场产生的感应内部电场 $E_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}})$

#### D.2.2.1 总则

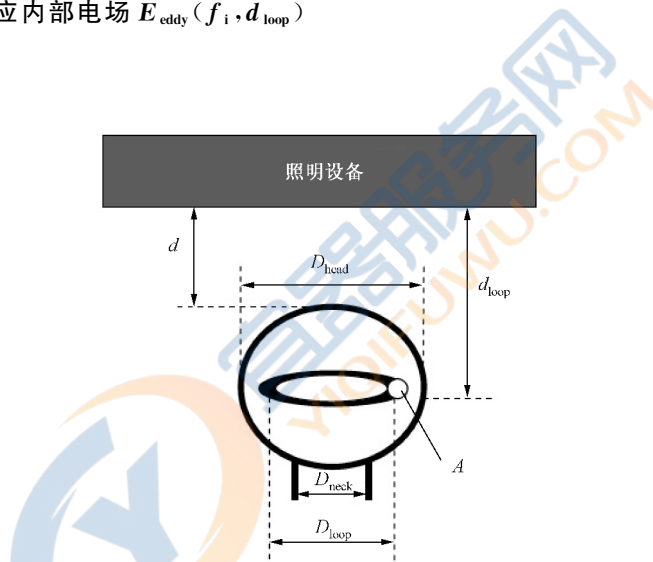


图 D.2 头部、回路和测量装置之间的距离

头部回路中因磁场产生的感应电压(参见图 D.2)可利用式(D.5)计算：

$$V_{\text{ind}}(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{loop}}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot B(f_i, d_{\text{loop}}) \quad \dots\dots (D.5)$$

式中：

$V_{\text{ind}}(f_i, d_{\text{loop}})$ ——频率为  $f_i$ 、距离为  $d_{\text{loop}}$  时头部回路中的感应电压；

$D_{\text{loop}}$ ——头部回路的直径；

$B(f_i, d_{\text{loop}})$ ——频率为  $f_i$ 、距离为  $d_{\text{loop}}$  时的  $B$  场(磁场)。

头部回路中因磁场产生的感应电流可用式(D.6)计算：

$$I_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{V_{\text{ind}}(f_i, d_{\text{loop}})}{\frac{\pi \cdot D_{\text{loop}}}{A \cdot \sigma(f_i)}} \quad \dots\dots (D.6)$$

式中：

$I_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}})$ ——频率为  $f_i$ 、距离为  $d_{\text{loop}}$  时头部回路中因磁场产生的感应电流；

$A$ ——头部回路的“导线”面积；

$\sigma(f_i)$  —— 频率为  $f_i$  时头部回路的电导率。

随后,一定频率  $f_i$  和距离  $d_{loop}$  时头部回路中因磁场产生的电流密度,可用式(D.7)计算:

$$J_{eddy}(f_i, d_{loop}) = \frac{I_{eddy}(f_i, d_{loop})}{A_{loop}} = \frac{D_{loop} \cdot \sigma(f_i) \cdot \pi \cdot f_i \cdot B(f_i, d_{loop})}{2} \dots\dots\dots (D.7)$$

内部感应电场可用下面关系式确定:

$$J_{eddy}(f_i, d_{loop}) = \sigma(f_i) \cdot E(f_i, d_{loop}) \dots\dots\dots (D.8)$$

最后,给出了内部电场的如下表达式:

$$E(f_i, d_{loop}) = \frac{D_{loop} \cdot \pi \cdot f_i \cdot B(f_i, d_{loop})}{2} \dots\dots\dots (D.9)$$

**D.2.2.2 磁场对感应电流密度  $f_{mains}$  的贡献**

在电源频率和距离  $d=0.3$  m 时从照明设备上测得的  $B$  场(磁场)约为 60 nT。利用  $D_{loop} = D_{head} = 0.21$  m,可计算以下数据(参见表 D.1)。

**表 D.1 感应内部电场的计算**

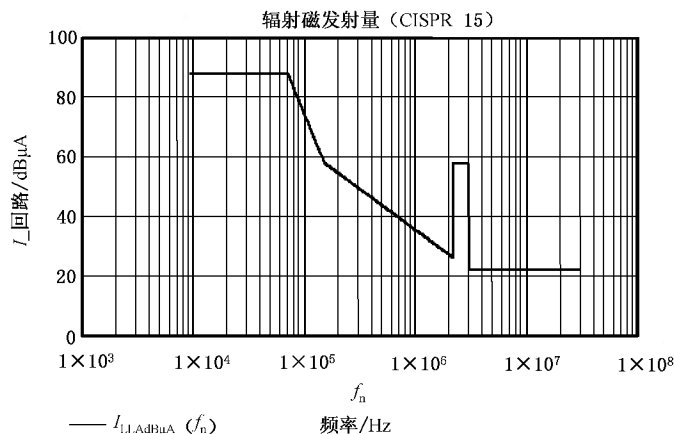
$f_i = f_{mains}$ Hz	$E_{eddy}(f_i, d)$ 在 $f_{mains}$ 和 $d=0.3$ m 下 nA/m <sup>2</sup>	$E_{Lim}(f_i)$ 在 $f_{mains}$ 下 mA/m <sup>2</sup>	$\frac{E_{eddy}(f_{mains}, d)}{E_{Lim}(f_{mains})}$ 在 $f_{mains}$ 和 $d=0.3$ m 下
50	0.99	0.02	$49 \times 10^{-6}$
60	1.2	0.024	$49 \times 10^{-6}$

电场限值和感应电场随频率的增加成正比(在此频率范围内),因此表 D.1 中的关系为常数。

可得出结论,在电源频率和测量距离  $d=0.3$  m 时头部回路中因磁场产生的感应电场的贡献可予以忽略。

**D.2.2.3 磁场对感应电场的 20 kHz~10 MHz 的贡献**

最不利情况下,频率范围为 20 kHz~10 MHz、测量距离为  $d$  时头部回路中因磁场产生的电场贡献,可通过如 CISPR 15<sup>[9]</sup> 等规定的磁辐射发射量最大值来确定。根据 CISPR 15,频率为  $f_i$  时 2 m 大环形天线(LLA)中的最大电流如图 D.3 所示。



**图 D.3 2 m LLA 中的最大电流**

频率为  $f_i$  时图 D.3 的 2 m LLA 中的最大电流可转换为频率  $f_i$  和任意距离  $d$  时的最大  $B$  场(磁场)。转换可解释如下:

2 m LLA 中心面积为  $A_{\text{dipole}}$  的虚拟磁偶极子对 2 m LLA 的互感为:

$$M = \frac{\mu_0 \cdot A_{\text{dipole}}}{D_{\text{LLA}}} \dots\dots\dots (D.10)$$

式中:

$M$  ——虚拟磁偶极子和 2 m LLA 之间的互感;

$A_{\text{dipole}}$  ——虚拟磁偶极子的面积;

$D_{\text{LLA}}$  ——2 m LLA 的直径,等于 2 m。

虚拟磁偶极子动量为  $I_{\text{dipole}}(f_i) \cdot A_{\text{dipole}}$ 。

其中,  $I_{\text{dipole}}(f_i)$  表示频率为  $f_i$  时虚拟磁偶极子中的虚拟电流。

LLA 中的感应电压为:

$$V_{\text{ind}}(f_i) = 2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot M \cdot I_{\text{dipole}}(f_i) \dots\dots\dots (D.11)$$

LLA 中的电流为:

$$I_{\text{LLA}}(f_i) = \frac{V_{\text{ind}}(f_i)}{2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot L_{\text{LLA}}} = \frac{\mu_0 \cdot I_{\text{dipole}}(f_i) \cdot A_{\text{dipole}}}{L_{\text{LLA}} D_{\text{LLA}}} \dots\dots\dots (D.12)$$

式中,  $L_{\text{LLA}}$  表示 2 m LLA 的电感,等于  $9.65 \mu\text{H}$ 。

那么,利用 LLA 中电流的限值,可计算出虚拟磁偶极子动量  $I_{\text{dipole}}(f_i)A_{\text{dipole}}$ 。而利用这一虚拟磁偶极子动量,可计算出最大值所处方向上的  $H$  场强。计算适用于 10 MHz 以下,所以,最小波长为 30 m,近场和远场之间的转变点位于  $30/2\pi=4.8$  m。对于 EMF,要关注的是较近距离处的感应电流密度,所以,所有的计算都是基于  $H \approx 1/d^3$  的近场条件。距离  $d_{\text{loop}}$  处的最大场强可表述为:

$$H(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{I_{\text{dipole}}(f_i) \cdot A_{\text{dipole}}}{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{loop}}^3} \dots\dots\dots (D.13)$$

其中:  $d_{\text{loop}} = d + (D_{\text{head}}/2)$ 。

由此频率为  $f_i$  和任意距离为  $d_{\text{loop}}$  时的最大  $B$  场(磁场)定义为:

$$B(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{I_{\text{LLA}}(f_i) \cdot L_{\text{LLA}} \cdot D_{\text{LLA}}}{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{loop}}^3} \dots\dots\dots (D.14)$$

在最不利情况下,  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的  $B$  场(磁场)均达到这一最大值。最终的  $B$  场(磁场)可用式(D.15)计算得出:

$$B(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{I_{\text{LLA}}(f_i) \cdot L_{\text{LLA}} \cdot D_{\text{LLA}} \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{loop}}^3} \dots\dots\dots (D.15)$$

式(D.7)则可改写为式(D.16):

$$J_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{D_{\text{loop}} \cdot \sigma(f_i) \cdot \pi \cdot f_i}{2} \cdot \frac{I_{\text{LLA}}(f_i) \cdot L_{\text{LLA}} \cdot D_{\text{LLA}} \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{loop}}^3} \dots\dots\dots (D.16)$$

或者,用内部电场表示:

$$E_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}}) = \frac{D_{\text{loop}} \cdot \pi \cdot f_i}{2} \cdot \frac{I_{\text{LLA}}(f_i) \cdot L_{\text{LLA}} \cdot D_{\text{LLA}} \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot d_{\text{loop}}^3} \dots\dots\dots (D.17)$$

头部回路中因频率介于 20 kHz~10 MHz 之间、距离  $d=0.3$  m 时的磁场对电场的最不利情况贡献可通过将照明设备内干扰源产生的所有谐波之和来计算。

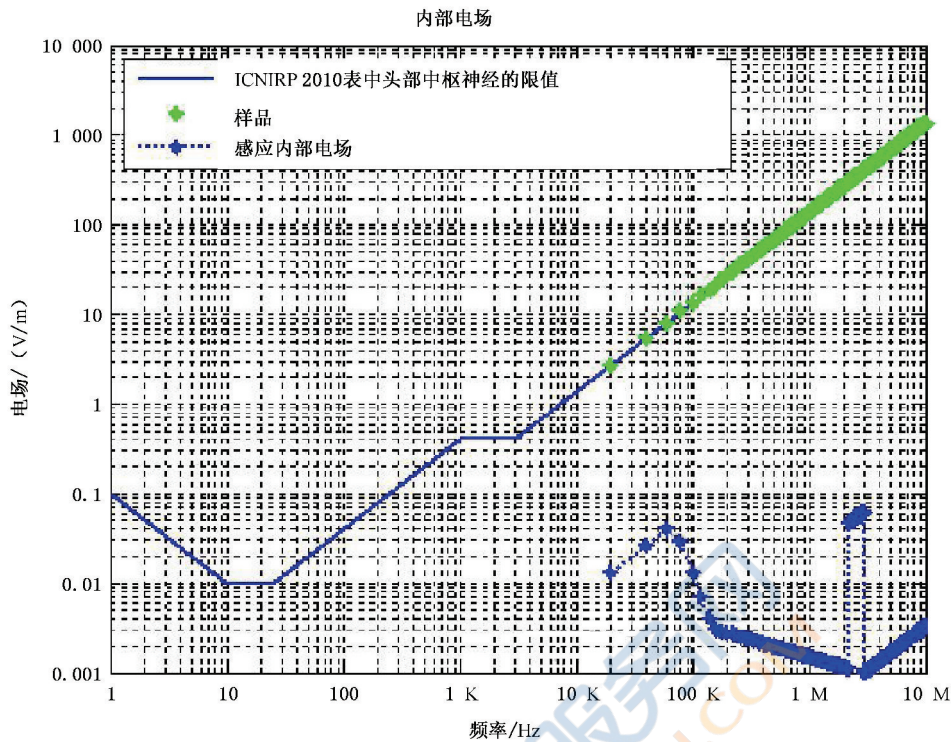


图 D.4 感应内部电场与相关限值水平

图 D.4 描绘了这个特殊情况下的电场极值和感应电场。对于基础开关频率为 20 kHz 的开关型电源,只有奇次谐波贡献。在这种情况下:

$$\sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{eddy}}(f_i, d_{\text{loop}})}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 0.02$$

这一贡献相对较小,如果以其他 EMC 辐射标准(CISPR 15 除外)为参考,也可以期望得到类似的小贡献。此外,在这一评估中,采取了非常保守的方法,即在所考察的整个频率范围内存在非预期的辐射,并且在所有这些频率上辐射水平都是正好等于极限值。这是非常不可能的;实际上,非预期的辐射水平仅在有限的频率范围内,甚至只在少数几个离散的频谱成分处,接近极限。此外,需指出的是,采用了最不利的求和方式,因为在谐波情况下可能存在的相位关系没有被考虑在内。图 D.5 举例说明了使用 LLA 进行磁场测试的结果可能是什么样的。



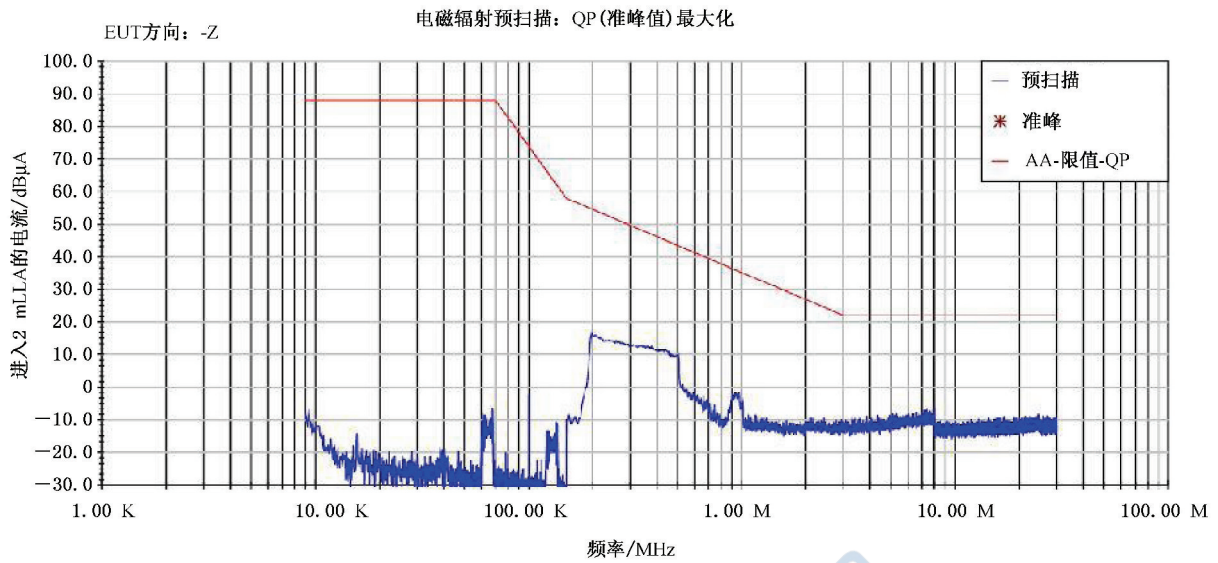


图 D.5 使用 LLA 的磁场测试结果示例

结论:

如果照明设备符合 CISPR 15, 处于 LLA 辐射限值的磁场的贡献可以忽略不计, 那么式 (D.4) 可简化为式 (D.18):

$$\frac{E_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d)}{E_{\text{Lim}}(f_{\text{mains}})} + \sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (D.18)$$

### D.2.3 因电场产生的感应电场; $E_{\text{cap}}(f_i, d)$

#### D.2.3.1 总则

电容电流对感应电流密度的贡献, 是在表 A.1 规定的测量距离  $d$  和附录 B 规定的位置上, 使用位于照明设备附近的人体模型来测量的。所使用的人体模型是 IEC 62311:2007 中图 C.3 描述的均质人体模型。

通常认为人体模型头部离照明设备最近, 而最大电流密度(和如此的电场水平)出现在颈部。因此, 只有头部(外径  $D_{\text{head}} = 210 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  的金属化球)被用作测试电流。而计算内部电场时, 则使用的颈部直径  $D_{\text{neck}} = 110 \text{ mm}$ 。关于被称作“范德霍夫(Van der Hoofden)”的测试头的详细信息, 参见 5.5。

注: 颈部的电流密度是均质的, 因为 10 MHz 以下的趋肤效应可忽略不计。

#### D.2.3.2 电场对感应内部电场的 $f_{\text{mains}}$ 贡献

电源对感应内部电场的贡献, 是基于以下最不利情况的构造来计算: 相对于接地, 照明设备可以看作电压为  $V_{\text{mains}}$  的大平板(参见图 D.6)。

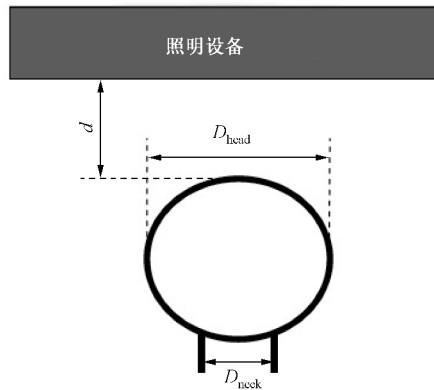


图 D.6 头部和测量装置之间的距离

大平板和金属球之间的寄生电容,可利用以下公式来计算(摘自 W.R.Smythe<sup>[5]</sup>)(设置参见图 D.6):

$$\alpha = \cosh^{-1} \left[ 2 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot d}{D_{\text{head}}} \right)^2 - 1 \right] \dots\dots\dots (D.19)$$

$$C_{\text{球-板}} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{D_{\text{head}}^2}{2 \cdot d + D_{\text{head}}} \sinh(\alpha) \cdot \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sinh(n \cdot \alpha)} \dots\dots\dots (D.20)$$

$N$  取值 50 足以适用大多数的实际情况。

当  $d=0.3 \text{ m}$  时;  $C_{\text{球-板}}=3 \text{ pF}$ (参见图 D.7)。

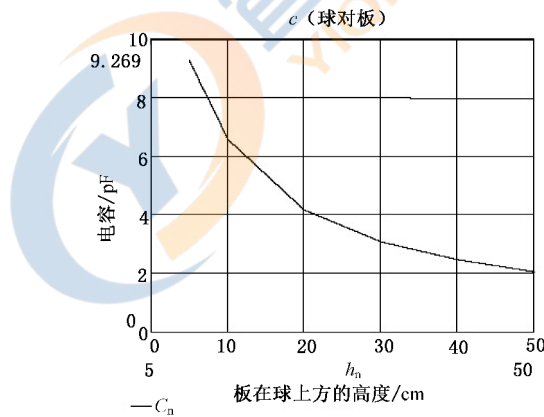


图 D.7 式(D.20)的曲线

因电源造成的颈部中的电流密度可用式(D.21)来计算。

$$J_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d) = \frac{U_{\text{mains}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{mains}} \cdot C}{\frac{\pi}{4} D_{\text{neck}}^2} = 661.10^6 \cdot U_{\text{mains}} \cdot f_{\text{mains}} \cdot C \dots\dots\dots (D.21)$$

在颈部中的内部  $E$  场(电场)的结果可用式(D.8)计算得出式(D.22):

$$E_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d) = 661.10^6 \cdot \sigma(f_{\text{mains}}) \cdot U_{\text{mains}} \cdot f_{\text{mains}} \cdot C \dots\dots\dots (D.22)$$

式(D.22)是用  $\sigma(f_{\text{mains}})=0.09$  和不同的电源频率和电源电压计算的,计算结果见表 D.2。

表 D.2 电源贡献的计算

$U_{\text{mains}}$ V	$f_{\text{mains}}$ Hz	$E_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d)$ 在 $f_{\text{mains}}$ 和 $d=0.3$ m 下 $\mu\text{A}/\text{m}^2$	$E_{\text{Lim}}(f_{\text{mains}})$ $\text{mA}/\text{m}^2$	$\frac{E_{\text{cap}}(f_{\text{mains}}, d)}{E_{\text{Lim}}(f_{\text{mains}})}$ 在 $f_{\text{mains}}$ 和 $d=0.3$ m 下
230	50	0.25	0.02	0.013
120	60	0.16	0.024	0.007
277	60	0.37	0.024	0.015

表 D.2 最后一列的计算结果表明,电源的贡献可忽略不计,因此,式(D.18)可简化为:

$$\sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (D.23)$$

式(D.23)的左项等于兼容因子  $F$ , 见 3.1.4 和式(E.7)。

**D.2.3.3 电场对感应内部电场的 20 kHz~10 MHz 贡献**

20 kHz~10 MHz 频率范围内电场对头部感应内部电场的贡献,需要按照图 3 和式(D.23)利用 EMI 接收器来测量。

总和的频率阶跃是利用 CISPR 16-1-1 来确定的。根据 CISPR 16-1-1,接收器的 IF 过滤器具有式(D.24)的传递函数:

$$H(f) = \left[ \frac{2}{1 + \left(1 + j \cdot \frac{f}{B_6} \cdot 2\sqrt{2}\right)^2} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (D.24)$$

式(D.24)的模数可用式(D.25)来表示:

$$|H(f)| = \frac{1}{1 + \left(\frac{2f}{B_6}\right)^4} \quad \dots\dots\dots (D.25)$$

振幅增加频率阶跃由式(D.26)来定义:

$$f_{\text{step\_ampl}} = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)| \cdot df \quad \dots\dots\dots (D.26)$$

解方程(D.26),得振幅增加频率阶跃等于 1.11 倍  $B_6$ , 参见表 D.3。

表 D.3 等于 1.11 倍  $B_6$  的振幅增加频率阶跃

频率范围	符合 CISPR 16-1-1 的 $B_6$	$f_{\text{step\_ampl}}$
20 kHz~150 kHz	200 Hz	220 Hz
150 kHz~10 MHz	9 kHz	10 kHz

式(D.23)可改写为:

$$\sum_{f_i=20 \text{ kHz}}^{150 \text{ kHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} + \sum_{f_i=150 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_i, d)}{E_{\text{Lim}}(f_i)} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (D.27)$$

步长=220 Hz                      步长=10 kHz

附录 E 给出了一种实用的测量和评估方法来使用式(D.27)进行评价。

**D.3 100 kHz~300 GHz 的热效应**

**D.3.1 总则**

根据 IEC 62479:2010,如果辐射发射功率≤20 mW,热效应即视为符合要求。本条中将证明任何照明设备只要符合国际电磁兼容标准(如 CISPR 15),则其辐射发射功率就远小于 IEC 62479:2010 规定的 20 mW 的低功率限值。作为例子,在本条中,将使用 CISPR 15 计算对热效应的贡献。

证明辐射功率≤20 mW 由式(D.28)开始:

$$P_{\text{rad,max}} = \sum_{100 \text{ kHz}}^{300 \text{ MHz}} P_{\text{rad,max}}(f_i) = \sum_{100 \text{ kHz}}^{300 \text{ MHz}} P_{\text{rad,max}}(f_i) + \sum_{30 \text{ MHz}}^{300 \text{ MHz}} P_{\text{rad,max}}(f_i) \dots\dots\dots (D.28)$$

总和的频率阶跃是利用 D.2.3.3 中解释的 CISPR 16-1-1 来确定的。

功率增加频率阶跃可用式(D.29)来定义:

$$f_{\text{step\_power}} = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 \cdot df \dots\dots\dots (D.29)$$

解方程(D.29),得功率增加频率阶跃等于 0.833 倍  $B_6$ , 参见表 D.4。

**表 D.4 等于 0.833 倍  $B_6$  的功率增加频率阶跃**

频率范围	符合 CISPR 16-1-1 的 $B_6$	$f_{\text{step\_power}}$
100 kHz~150 kHz	200 Hz	167 Hz
150 kHz~30 MHz	9 kHz	7.5 kHz
30 MHz~300 MHz	120 kHz	100 kHz

**D.3.2 对热效应的 100 kHz~30 MHz 贡献**

传导发射的最大端电压(TV)由 CISPR 15 设定。如果这一端电压仅由共模电流产生,且电源线所起的作用是任何频率下的半波长偶极子,那么辐射发射即为最大值。已知对于半波长偶极子,辐射阻抗为 73 Ω。据此,这一频率范围内的最大辐射功率可利用式(D.30)计算得出。

$$P_{\text{rad,max}}(100 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz}) = \sum_{100 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} I_{\text{cm}}^2(f_i) \cdot 73 \dots\dots\dots (D.30)$$

式中:

$P_{\text{rad,max}}(100 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz})$ ——100 kHz~30 MHz 之间的最大辐射功率,单位为瓦(W);

$I_{\text{cm}}(f_i)$  ——频率为  $f_i$  时的共模电流,单位为安(A)。

根据基尔霍夫定律,式(D.30)可改写为:

$$P_{\text{rad,max}}(100 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz}) = \sum_{f_i=100 \text{ kHz}}^{150 \text{ kHz}} \left( \frac{TV_{\text{lim}}(f_i)}{\frac{50}{2}} \right)^2 \cdot 73 + \sum_{f_i=150 \text{ kHz}}^{30 \text{ MHz}} \left( \frac{TV_{\text{lim}}(f_i)}{\frac{50}{2}} \right)^2 \cdot 73 \dots\dots (D.31)$$

其中, $TV_{\text{lim}}(f_i)$ 是频率  $f_i$  时符合 CISPR 15 的端电压。

解方程(D.31),得: $P_{\text{rad,max}}(100 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz}) \leq 5.98 \text{ mW}$ 。

这一贡献相对较小,如果以其他 EMC 发射标准(CISPR 15 除外)为参考,也可能得到类似的小贡献。还需注意的是,这个计算模型非常保守,因为它假定 DUT 和主电缆在 100 kHz~30 MHz 之间的所有频率上都是一个半波偶极天线。实际上,DUT 加上电缆是一种非常低效的天线,其辐射电阻远小于匹配的半波偶极子的辐射电阻(关于小偶极子天线的辐射电阻的例子,见 Balanis<sup>[8]</sup>)。此外,在这一

评估中,采取了非常保守的方法,例如,所考虑的整个频率范围内存在非有意发射,并且在所有这些频率上发射水平都正好等于极限值。这是非常不可能的;实际上,非有意发射水平,仅在有限的频率范围内,甚至只是少数离散的频谱成分处,接近极限值。还需指出的是,采用了最不利的求和方式,因为在谐波情况下可能存在的相位关系没有被考虑在内。图 D.8 作为例子说明了所进行的传导发射测试的结果在实际中可能是怎样的。

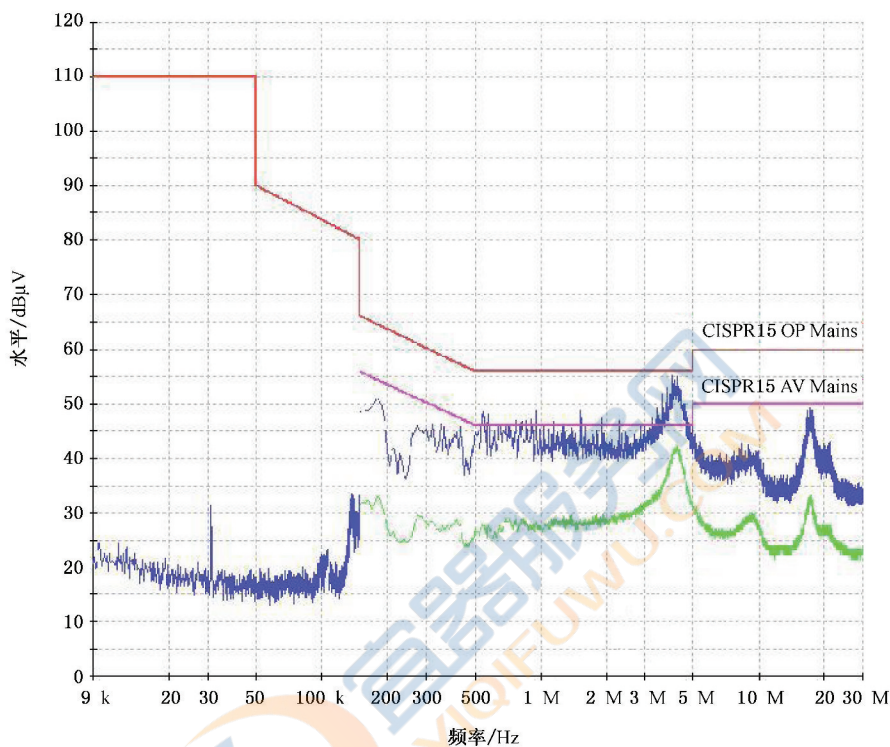


图 D.8 用传导发射测试测量 CM 电流的示例

结论:热贡献  $P_{\text{rad,max}}(100 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz}) \approx 0$ , 因此可以忽略。

### D.3.3 对热效应的 30 MHz~300 MHz 贡献

如果,假设照明设备符合 CISPR 15 的辐射发射要求,那么在最不利情况下,任何频率下,照明设备都是作为半波偶极子辐射的。电场主方向上的最大辐射功率由式(D.32)给出:

$$P_{\text{rad,max}}(30 \text{ MHz} \sim 300 \text{ MHz}) = \sum_{f_i=30 \text{ MHz}}^{300 \text{ MHz}} \left[ \frac{r \cdot E_{\text{Lim}}(f_i, r)}{7} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (D.32)$$

步长 = 100 kHz

式中:

$E_{\text{Lim}}(f_i, r)$ ——频率为  $f_i$  时的  $E$  场(电场)限值,单位为伏每米(V/m)。

根据 CISPR 15,场强限值在表 D.5 中给出:

表 D.5 符合 CISPR 15 的场强限值

频率范围 MHz	$E_{\text{Lim}}$ dBμV/m	$E_{\text{Lim}}$ μV/m	$r$ m
30~230	30	31.6	30
230~300	37	70.8	30

解方程(D.32),得:

$$P_{\text{rad,max}}(30 \text{ MHz} \sim 300 \text{ MHz}) \leq 0.10 \text{ mW}$$

同样,这一贡献很小,如果以其他 EMC 发射标准(CISPR 15 除外)为参考,可以期望得到类似的小贡献。还需注意的是,这个计算中的模型是非常保守的,因为它假设 DUT 和主电缆在这个频率范围内表现为半波偶极子天线。实际上,DUT 加上电缆是一个非常低效的天线,其辐射电阻远小于匹配的半波偶极子的辐射电阻(例如,见 Balanis<sup>[8]</sup>)。此外,在这一评估中,采取了一种非常保守的方法,即在所考虑的整个频率范围内存在非有意的发射,并且在所有这些频率上发射水平都正好等于极限值。同样,这是非常不可能的,实际上,非有意的发射水平仅在有限的频率范围内,甚至只在少数几个离散的频谱成分处,接近极限值。还需指出的是,采用了最不利的求和方式,因为在谐波情况下可能存在的相位关系没有被考虑在内。

结论:在 30 MHz~300 MHz 之间的热贡献  $P_{\text{rad,max}}$  约为 0,因此可以忽略不计。

#### D.3.4 对热效应贡献的总体结论

在 100 kHz~300 MHz 范围内的热贡献可以忽略不计,因此,如果照明设备不包括有意辐射体,则被视为符合 ICNIRP 和 IEEE 的热效应要求。如果照明设备包括有意辐射体,则适用附加的合规标准。详见附录 I、第 4 章和第 7 章。



附录 E  
(规范性附录)

实用的内部电场测量和评价方法

E.1 感应内部电场的测量

内部电场应按照第 5 章在 20 kHz~10 MHz 频率范围内测量。

本附录描述的例子基于一台以矩阵(电子数据表)形式输出数据的 EMI 接收机,其中频率(MHz)存储在 0 列中,测量电压(dBμV)则存储在 1 列中。数据输出需利用 E.2 的计算程序来处理。

E.2 计算程序

测量数据为一个矩阵,其中,频率  $f_n$  (MHz)存储在 0 列中,而测量电压  $V(f_n)$  (dBμV)则存储在 1 列中。

1 列中的测量电压  $V(f_n)$  (dBμV)需要利用式(E.1)转化为  $V(f_n)$  (V)。

$$V(f_n) = 10^{\frac{V(f_n) \text{ [dB}\mu\text{V]}}{20}} \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots (E.1)$$

$V(f_n)$  (V)需要利用传递函数  $g(f_n)$  (V/A)转化为电流  $I_{\text{cap}}(f_n)$  (A),该传递函数由 5.4 的保护网络确定,在式(E.2)中给出:

$$g(f_n) = \frac{V(f_n)}{I_{\text{cap}}(f_n)} = \frac{50}{\sqrt{1 + (4\pi \cdot f_n)^2}} \dots\dots\dots (E.2)$$

电流密度  $J_{\text{cap}}(f_n)$  (A/m<sup>2</sup>)由式(E.3)给出:

$$J_{\text{cap}}(f_n) = \frac{V(f_n)}{g(f_n) \cdot A_{\text{neck}}} \dots\dots\dots (E.3)$$

其中:  $A_{\text{neck}} = \frac{\pi}{4} \cdot 0.11^2$

测量的电流密度  $J_{\text{cap}}(f_n)$ 可以用内部电场来表示:

$$E_{\text{cap}}(f_n) = \frac{V(f_n)}{\sigma(f_n) \cdot g(f_n) \cdot A_{\text{neck}}} \dots\dots\dots (E.4)$$

其中,电导率  $\sigma(f_n)$ 作为频率函数的值可以用式(E.5)来计算:

$$\sigma(f_n) = a \cdot (f_n \cdot 10^6)^b + c \dots\dots\dots (E.5)$$

其中, $a = 3.629 \times 10^{-5}$ , $b = 0.5283$ , $c = 0.1087$ 。

式(E.5)给出了表 E.1 中 10 kHz~10 MHz 之间电导率的近似值。

表 E.1 电导率随频率的变化(见 IEC 62311:2007 的表 C.1)

	电导率 S/m						
频率	10 Hz	100 Hz	1 000 Hz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
大脑(灰质)	0.03	0.09	0.10	0.11	0.13	0.16	0.29

感应电场  $E_{\text{cap}}(f_n)$  需要用极限值  $E_{\text{Lim}}(f_n)$  来除,并要求和来确定式(E.6)给出的因数  $F$ :

$$F = \sum_{f=20 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{\text{cap}}(f_n)}{E_{\text{Lim}}(f_n)} \dots\dots\dots (E.6)$$

式中,  $E_{\text{Lim}}(f_n) = 1.35 \times 10^2 \cdot f_n$ ,  $f_n$  单位为兆赫兹(MHz)。  
步长的规定见表 2。

**E.3 范德霍夫(Van der Hoofden)头部试验合格准则**

根据附录 D 中保守估计的结果,由式(D.4)的四个项得出的相关内部电场可概括如下:

(D.4.a) D.2.2.1 和 D.2.2.2  可以忽略	+	(D.4.b) D.2.2.3  可以忽略	+	(D.4.c) D.2.3.2  可以忽略	+	(D.4.d) D.2.3.3 和附录 E 采用范德霍夫(Van der Hoofden)测试 $F$	≤	(D.4)  1	.....(E.7)
---------------------------------------------	---	--------------------------------	---	--------------------------------	---	--------------------------------------------------------------	---	----------------	------------

当填写范德霍夫(Van der Hoofden)试验的结果  $F$  时,式(E.7)简化为以下合规标准:

在 20 kHz~10 MHz 频率范围内,测得的值,经加权和累加后得出的因感应外部电场而产生的内部电场的兼容因子  $F$  不得超过 1;参见式(E.8):

$$F \leq 1 \dots\dots\dots (E.8)$$

注: 如果设备含有有意辐射体,则可采用额外的合规标准(详见附录 I、第 4 章和第 7 章)。





附录 F  
(规范性附录)  
保护网络

F.1 保护网络的校准

本校准采用的校准方式应与 CISPR 16-1-2<sup>[10]</sup> 中描述人工电源网络(V 型网络)的校准方式相类似。

保护网络的输入端口和输出端口与网络分析仪(NWA)的 50 Ω 特征阻抗不匹配。由于这种性质,校准应采用以下两个步骤进行。

步骤 1:

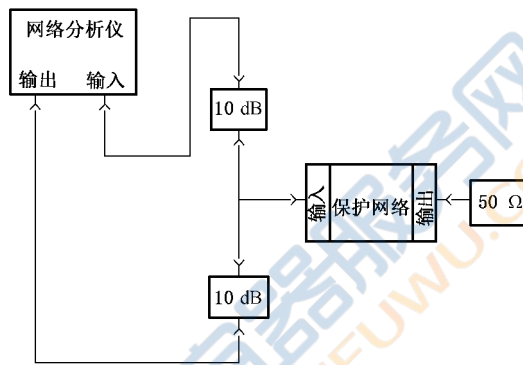


图 F.1 网络分析仪初始标准化测试装置

利用如图 F.1 所示的测试装置校准网络分析仪之后,网络需改为如图 F.2 所示的新配置。

步骤 2:

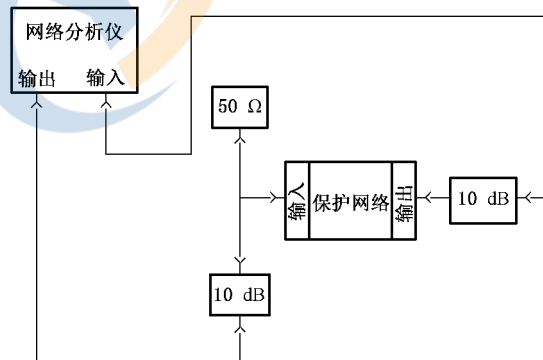


图 F.2 利用网络分析仪测量分压因数的测试装置

利用网络分析仪测量传递函数之后,需要与理论特征值进行比较。

F.2 保护网络理论特性的计算

5.5 中式(1)给出的传递函数不能用于校准。因此,这里给出理论特性的计算方法。

用网络分析仪校准的保护电路的理论传递函数(参见图 F.3)由式(F.1)给出。除  $R_{NWA}$  (网络分析仪

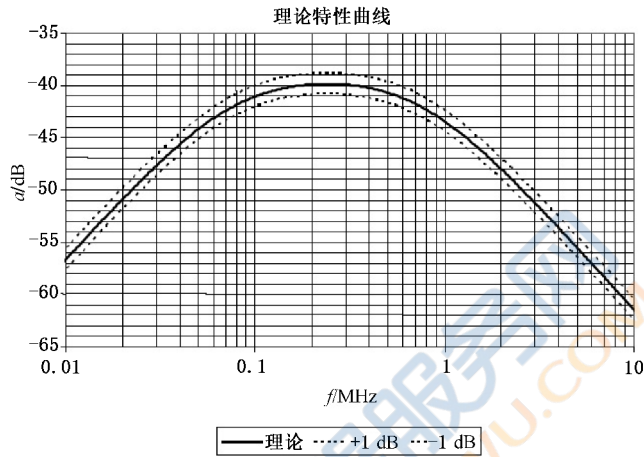
的输入阻抗  $R_{NWA}$  通常为  $50 \Omega$ ) 之外的所有设定值均见图 3。

$$a(f) = 20 \cdot \log \left[ \frac{|V_{out}(f)|}{|V_{in}(f)|} \right] \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

$$R_{2NWA} = R_2 + R_{NWA} \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

$$|V_{out}(f)| = \frac{1}{4} \sqrt{\left\{ \left[ \frac{R_{2NWA}}{1 + (\omega C_2 R_{2NWA})^2} \right]^2 + \left[ \frac{\omega C_2 R_{2NWA}^2}{1 + (\omega C_2 R_{2NWA})^2} \right]^2 \right\}} \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

$$|V_{in}(f)| = \sqrt{\left[ R_1 + \frac{R_{2NWA}}{1 + (\omega C_2 R_{2NWA})^2} \right]^2 + \left[ \frac{\omega C_2 R_{2NWA}^2}{1 + (\omega C_2 R_{2NWA})^2} + \frac{1}{\omega C_1} \right]^2} \quad \dots\dots\dots (F.4)$$



图中的最大允许偏差设定为  $\pm 1$  dB。

图 F.3 用于校准保护网络的计算理论特性

**附录 G**  
(资料性附录)  
**测量设备不确定度**

保护网络输出端测量电压的主要不确定分量都已被识别出和估值。作出的所有假设均记录于表 G.2 中,并在计算实际不确定度的表 G.1 中以注的形式引用。

测量电压  $V$  测量值计算如式(G.1):

$$V = V_r + L_c + \delta V_{sw} + \delta V_{pa} + \delta V_{pr} + \delta V_{nf} + \delta M + \delta g + \delta D + \delta d + \delta l \quad \dots\dots (G.1)$$

**表 G.1 第 5 章和第 6 章所描述测量方法在 20 kHz~10 MHz 频率范围内的不确定度计算**

输入量 <sup>a</sup>	$X_i$	$X_i$ 的不确定度		$u(X_i)$	$c_i$	$c_i u(X_i)$
		dB	概率分布函数	dB		dB
接收机读数(1)	$V_r$	±0.1	$k=1$	0.10	1	0.10
衰减:保护网络—接收机(2)	$L_c$	±0.1	$k=2$	0.05	1	0.05
接收机修正:						
正弦波电压(3)	$\delta V_{sw}$	±1.0	$k=2$	0.50	1	0.50
脉冲振幅响应(4)	$\delta V_{pa}$	±0.0	矩形	0.00	1	0.00
脉冲重复率响应(5)	$\delta V_{pr}$	±0.0	矩形	0.00	1	0.00
噪声本底接近度(6)	$\delta V_{nf}$	±0.0		0.00	1	0.00
不匹配:保护网络—接收机(7)	$\delta M$	±0.085	U形	0.06	1	0.06
保护网络传递函数(8)	$\delta g$	±1.0	矩形	0.50	1	0.58
测试头和 DUT 之间的距离(9)	$\delta D$	-0.367/ +0.352	$k=1$	0.36	1	0.36
测试头直径(10)	$\delta d$	-0.423/ +0.365	$k=1$	0.39	1	0.39
普通电缆长度(11)	$\delta l$	±0.0		0.00		0.00
合成测量不确定度: $u_c =$					0.94 dB	
扩展测量不确定度: $2u_c(V) =$					±1.88 dB	
<sup>a</sup> 括弧中数字指表 G.2 中列明的注。						

**表 G.2 表 G.1 的注及资料**

注	CISPR 16-4-2:2003 <sup>[11]</sup> 附录 A.5 的参照符号	计算/声明所使用的数据
1) 接收机读数的随机波动	注 1	CISPR 16-4-2:2003,表 A.1
2) 线损测量的不确定度	注 2	CISPR 16-4-2:2003,表 A.1

表 G.2 (续)

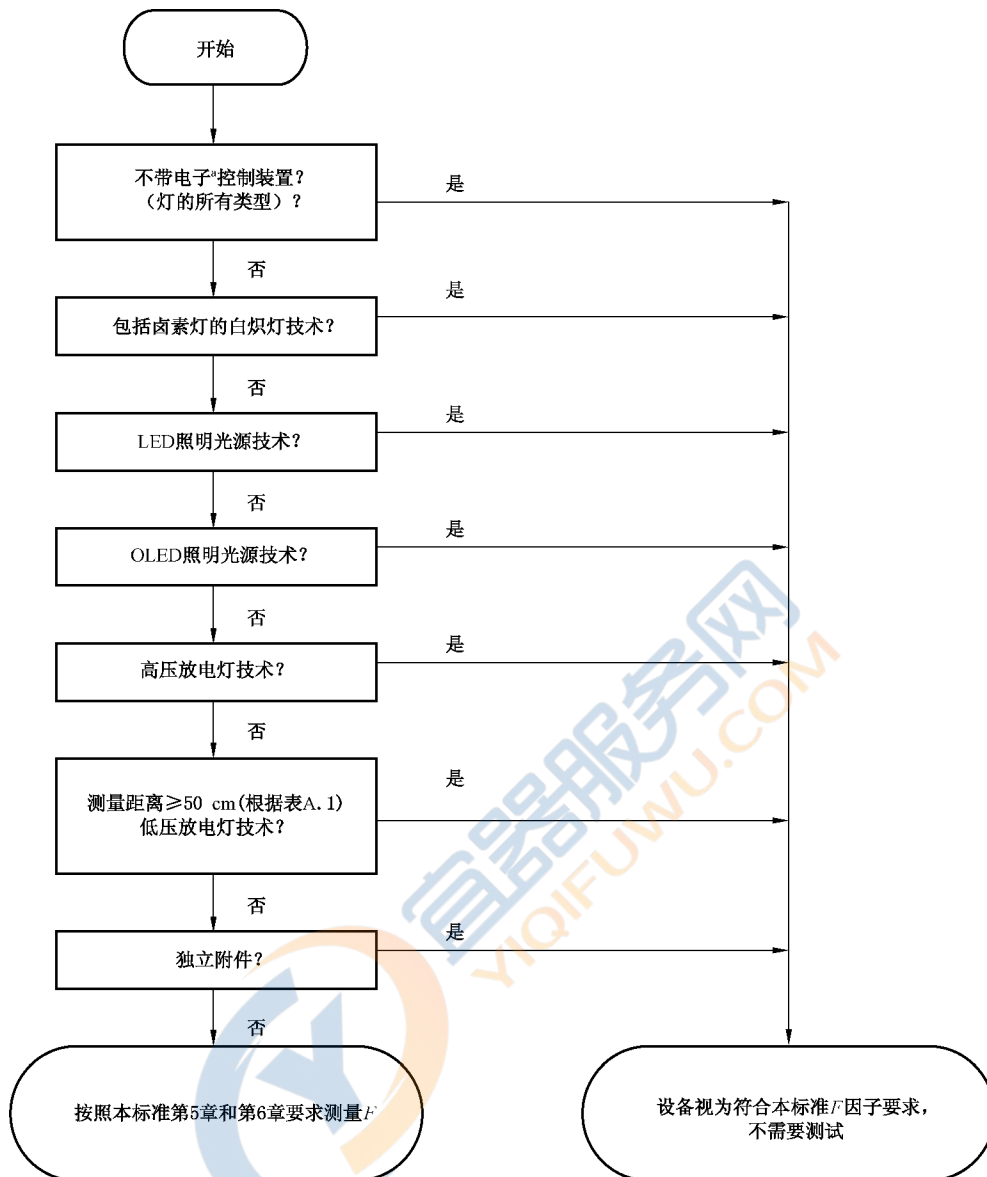
注	CISPR 16-4-2:2003 <sup>[11]</sup> 附录 A.5 的参照符号	计算/声明所使用的数据
3) 接收机正弦波修正的不确定度	注 4	CISPR 16-4-2:2003, 表 A.1
4) 接收机脉冲振幅响应修正的不确定度	—	由于仅存在正弦波信号及其谐波, 脉冲振幅响应可忽略不计
5) 接收机脉冲重复率响应修正的不确定度	—	由于仅存在正弦波信号及其谐波, 脉冲重复率响应可忽略不计
6) 接收机噪声本底影响的不确定度	注 6	CISPR 16-4-2:2003, 表 A.1
7) 接收机与保护网络之间失配的不确定度	注 7	CISPR 16-4-2:2003, 表 A.1
8) 保护网络传递函数公差。规定为理论曲线的 $\pm 1$ dB	—	—
9) 因测试头与受试设备(DUT)间距离公差产生的不确定度	—	6.3 测量距离
10) 测试头生产公差的不确定度	—	5.5 测量设备要求
11) 电缆长度的不确定度可忽略不计	—	实验表明, 0.2 m 和 2.5 m 之间的误差小于 0.8%。根据 6.4(测量装置), 电缆长度(0.3 m)可相差 $\pm 0.03$ m。鉴于这一规格, 误差小于 0.2%

附录 H  
(资料性附录)  
视为符合的设备

在德国,用范德霍夫(Van der Hoofden)头部试验对照明设备进行了一次大样本量的 EMF 测试。 $F$  因子是根据本标准的上一版本进行测量的。结果已在 IEC/TR 62493-1<sup>[7]</sup> 中报道。结果表明,在 161 台具有不同技术光源的被测灯具中,没有一台灯具超过限值。而且,对于大多数照明设备,测得的  $F$  因子仅为限值的几个百分点。从 IEC/TR 62493-1<sup>[7]</sup> 的回顾性分析可知,从设备的物理特性和技术可以很好地预测  $F$  值的低值。

对兼容因子  $F$  的结果只有一个主要影响,即在音频范围内驱动的灯与范德霍夫(Van der Hoofden)头之间的电容耦合。对于在测量装置中给定的距离和几何构造,信号与灯电压成正比,并随灯的尺寸而增大。当一个带有大灯的灯具以距离限值有相当大的余量通过时,那么任何一个较小的或有较低的工作电压灯将离限值有更大的余量。所有类似的结构都会显示出相似的结果,所有使用 LED、OLED、卤素或 HID 等小灯的照明应用都已证明是远远低于限值的。因此,只要事先知道设备的某些物理或工艺特性,就可以避免对照明设备进行不必要的测试。图 H.1 中的流程图可用于确定某些类别的照明设备是否不用测试就被视为符合要求。

对于图 H.1 中未提及的工艺或应用,宜确定兼容因子  $F$ 。



<sup>a</sup> 所有类型的触发器、启动器、开关、调光器(包括相位控制装置,如三端双向可控硅开关元件、GTO)及传感器都不视为电子控制装置。

图 H.1 不需测量  $F$  因子即可视为符合要求的判定流程图

**附录 I**  
(资料性附录)  
**有意辐射体**

**I.1 总则**

由于越来越多的照明设备可能配备有意的射频辐射体,EMF 暴露评估也可考虑到有意的射频源(参见 4.3 和第 7 章)。本附录涉及与对照明设备中有意辐射体的 EMF 评估有关的备选方案和问题。

**I.2 照明设备中的有意辐射体**

用于照明设备的有意辐射源可能用于控制和/或传感目的。这些无线源应用的频率范围一般在 30 MHz 以上,低于 3 GHz。表 I.1 概述了可应用于照明系统的无线技术,并给出了频率范围、最大辐射功率和占空比等基本特性。

示例: ZigBee 和几个专有无线系统被用于 ISM 频段 433 MHz、2.4 GHz(世界范围)、915 MHz(美洲和澳大利亚)和 868 MHz(欧洲)频段。

从表 I.1 中可以看出,可以使用不同的方法来表示总辐射功率。EIRP 是等效全向辐射功率,它是天线输入功率  $P$  和最大天线增益  $G$  的乘积,而 ERP 是有效辐射功率,它是 EIRP 除以各向同性天线的增益。

最大辐射 RF 功率是暴露评价的一个重要参数。

**I.3 照明应用中的天线特性**

安装在照明应用中的天线通常是低增益天线,它通常是一种偶极子型天线,集成在天花板附近的灯具中[图 I.1a)], 可视为靠近导电地面的天线[图 I.1b)]或地面上的单极子。因此,实际上,天线的行为近似为偶极子天线。偶极子天线具有环状的全方位辐射方向图,最大增益  $G$  为 1.64[图 I.2a)和 b)]。由于地面效应,增益可能增加到一个大约  $G$  等于 4 的值。图 I.2 给出了自由空间中的偶极子和离天花板一定距离的偶极子的场分布的例子,天花板被建模为一个完全导电的地面平面。该模型应用了偶极子及其镜像的解析公式(I.5)。结果表明,取决于偶极子的取向,某些方向上的场强和叶的出现都有增加。

不同类型灯具的暴露距离从 0.05 m~2 m(表 A.1)。应用于照明设备的无线电技术的频率范围为 300 MHz~3 GHz。因此波长  $\lambda$  从 1 m~0.1 m。

对于非定向(偶极子型)天线,当与天线的距离  $d$  满足如下条件时,就是远场区域,场随着  $1/d$  衰减:

$$d > d_{\text{eff}} = \lambda / 2\pi \quad \dots\dots\dots ( I.1 )$$

表 I.1 可能应用在照明系统中的无线电射频技术

无线电技术名称 (标准)	标准	频段	最大功率 dBm	最大功率 <sup>a</sup> mW	占空比 <sup>b</sup>	
ISM 频段 2.4 GHz	无线电管制 ITU-R	2.4 GHz~2.5 GHz	30 dBm(美国) 20 dBm(欧洲)	1 W(美国) 100 mW(欧洲)	n.a	
W-PAN Zigbee	IEEE 802.15.4— 2006 应用 RF4CE	2 402 MHz~2 480 MHz	0 dBm~20 dBm	1 mW~100 mW	不同类型 1%~5%	
W-PAN 蓝牙 4.0 (802.15.1)	Class I	2 402 MHz~2 480 MHz	20 dBm	100 mW 76 mW 平均	76% <sup>c</sup>	
	Class II	2 402 MHz~2 480 MHz	4 dBm~10 dBm	2.5 mW~10 mW 1.9 mW 平均	76%	
	Class III	2 402 MHz~2 480 MHz	0 dBm	1 mW 0.76 mW 平均	76%	
	BTLE(低能量)	2 402 MHz~2 480 MHz	10 dBm	10 mW	76%	
W-LAN	IEEE 802.11	2.4 GHz ISM 2 400 MHz~2 483.5 MHz	20 dBm(EIRP)	10 mW(EIRP)	100%	
	IEEE 802.11b (室内/室外)	2.4 GHz ISM 2 400 MHz~2 483.5 MHz	20 dBm(EIRP)	10 mW(EIRP)	100%	
	IEEE 802.11a	5 150 MHz~5 725 MHz (欧洲)	16 dBm, 23 dBm, 29 dBm 和 6 dBi			
		5 150 MHz~5 825 MHz (美国)				
		室内 5.25 GHz	23 dBm	200 mW(EIRP)	100%	
		室内/室外 5.6 GHz	30 dBm(EIRP)	1 000 mW(EIRP)	100%	
	IEEE 802.11g	2.45 GHz 2 400 MHz~2 483.5 MHz	20 dBm(EIRP)	100 mW(EIRP)	100%	
IEEE 802.11n	2.45 GHz	20 dBm(EIRP)	100 mW(EIRP)	100%		
KNX-RF	EN 50090-5-3	868.0 MHz~870.0 MHz	10 dBm 14 dBm 最大	10 mW 25 mW 最大	1%	
<sup>a</sup> 最大功率是 ETSI EN 300 328:2006 <sup>[1.3]</sup> 5.7.3 中规定的平均值;这个 ETSI 标准要求假设占空比为 100% 确定 EIRP。 <sup>b</sup> 实际占空比可能更小。 <sup>c</sup> 实际传输时间平均功率与最大功率之比最大为 0.76 <sup>[1.4]</sup> 。						

因此,在上述频率范围内,近场到远场的过渡距离约为 1/6 m~1/60 m。

在远场区域,电场  $E$  可用下面公式计算:

$$E(d) = \frac{\sqrt{30PG}}{d} \dots\dots\dots (I.2)$$

式中,  $P$  是输入天线的功率,  $G$  是天线的增益。

图 I.3 给出了自由空间偶极子解析式(I.5)得出的场,与式(I.2)的远场近似比较的例子。将其引入式(I.1)的远场条件,本例给出  $d_{\text{nf-ff}}(433 \text{ MHz})=0.11 \text{ m}$ 。



图 I.4 显示了辐射天线在三种输入功率下产生的电场,以及两个典型的增益值,结果表明距离、功率和天线增益是决定暴露水平的重要参数。图 I.4 也给出了在最低频率时的近场远场边界。结果表明,对于考虑的频率范围(300 MHz~3 GHz)的有意辐射体,对于大多数感兴趣的暴露距离(0.3 m~2 m),都可以采用远场公式。对于 0.05 m(手提灯)的暴露距离,需考虑近场效应(图 I.3)。当观察不同功率水平的影响时,可以看到输入功率为 20 mW 时,场水平总是远低于 ICNIRP 1998 最不利情况下的参考值 28 V/m。对于 200 mW 的输入功率,如果暴露距离大于 0.2 m 左右,也不会超过一般公众的参考水平。

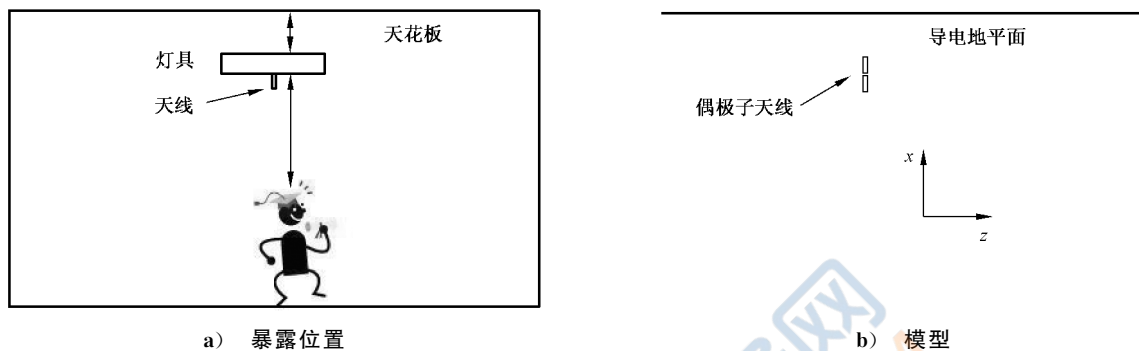


图 I.1 房间内有发射天线的灯具

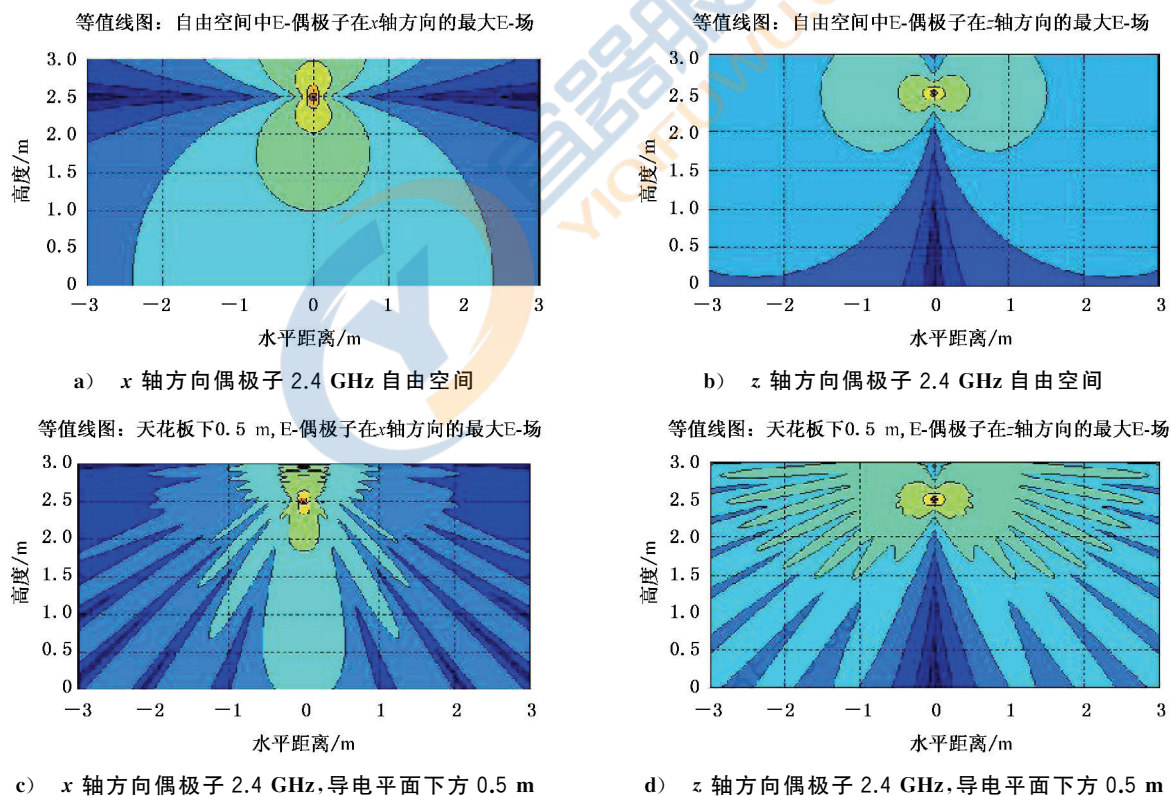


图 I.2 导电天花板/平面的影响

因此,对于表 I.1 中提到的带有有意辐射体的无线技术类型,根据使用最不利情况的 ICNIRP 参考水平的评估,可以得出结论,如果输入天线的总的最大功率小于 200 mW,则照明应用中的有意辐射体符合暴露要求(参考水平)。需指出的是,这些考虑是基于参考水平的应用,而参考水平通常比基本限制<sup>[1.6],[1.7]</sup>更为保守。

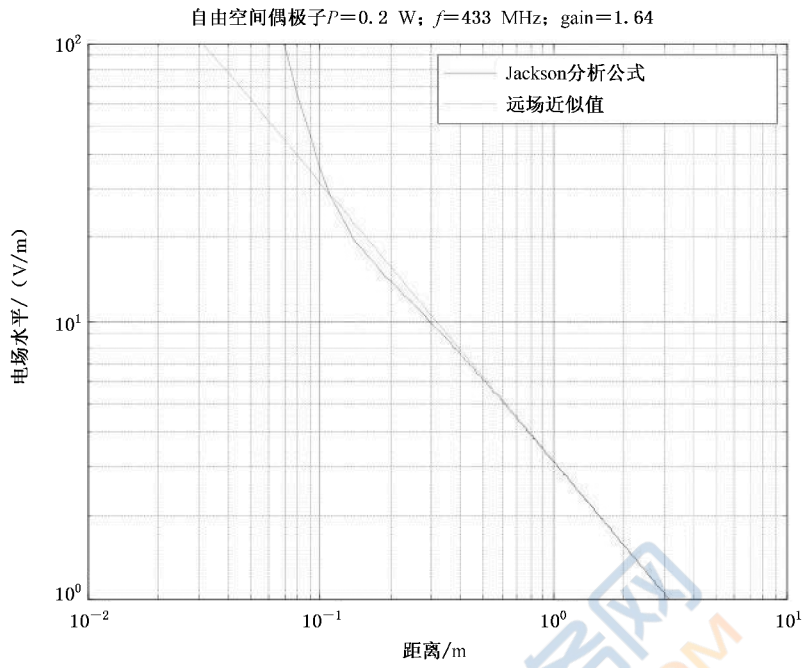
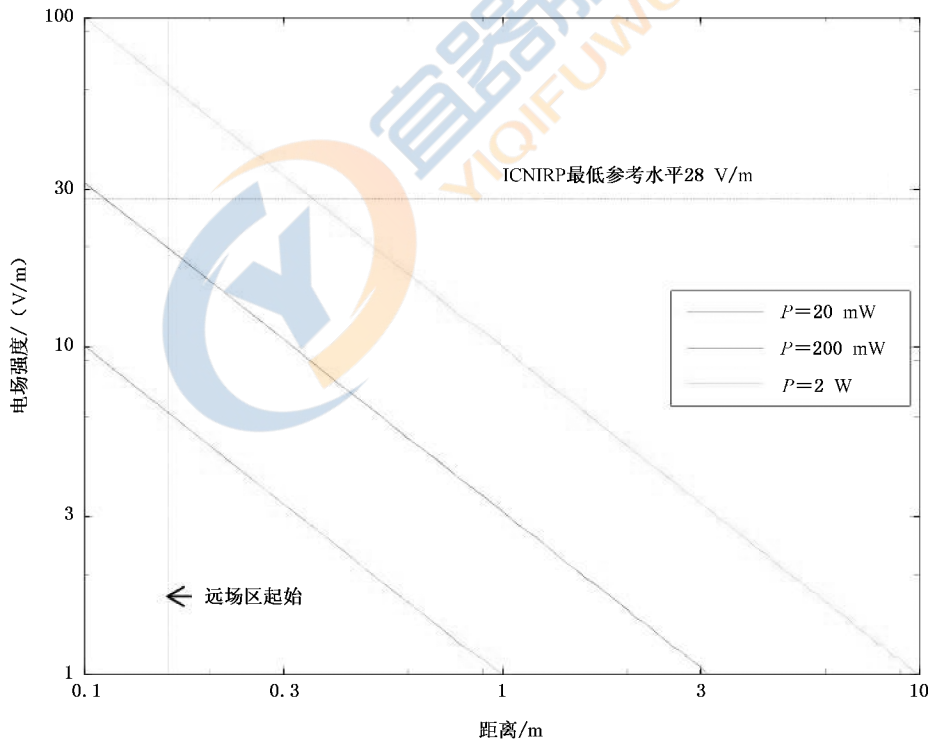
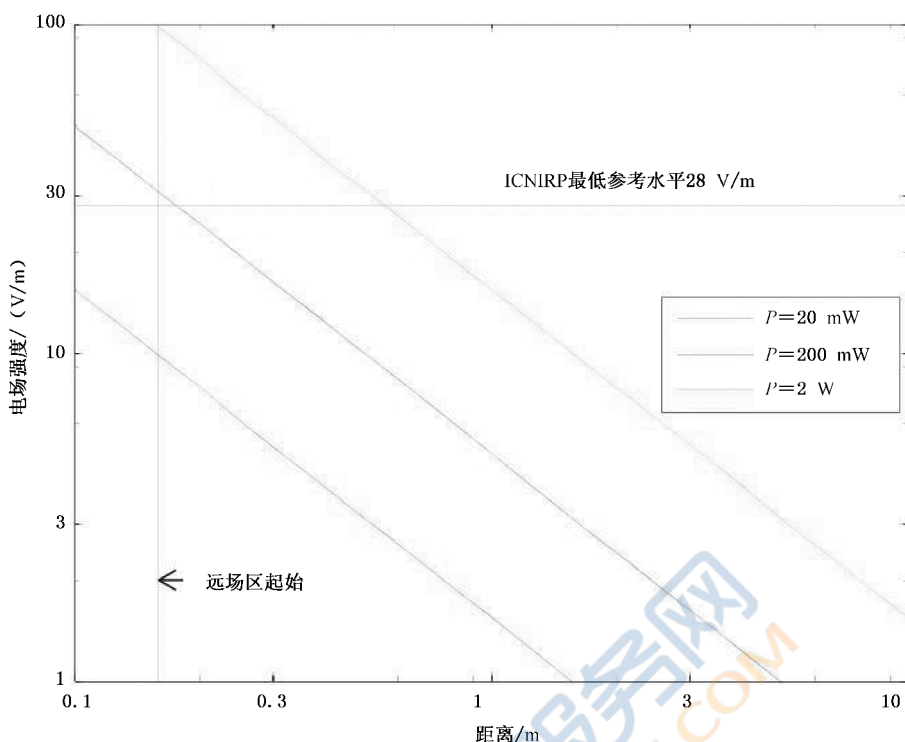


图 I.3 小电偶极子的电场:解析公式与远场近似值对比



a) 天线增益 = 1.64

图 I.4 电场作为距离、天线增益和输入功率的函数(远场近似)



b) 天线增益=4

图 I.4 (续)

## 1.4 暴露评估法

### 1.4.1 总则

一般来说,EMF 评估可以通过使用基本限制(BRs)或参考水平/干预水平来完成。在 I.3 中对参考水平进行了总体评价。另一种方便的评估方法是基于对有意辐射体的总平均辐射功率的确定。这种所谓的“低功率排除法”是在 IEC 62479:2010 中指定的。在这种方法中,规定了低功率排除水平。如果有意发射体输入端实际平均(6 min)总功率  $P_{int,rad}$  低于排除电平  $P_{max}$ ,则产品设计符合要求,无需进一步测试。

$$P_{int,rad} < P_{max} \dots\dots\dots ( I.3 )$$

例如,它可以很容易地从 ICNIRP 1998 和 IEEE C95.1:2005 中的 2 W/kg 的 SAR 基本限制中,导出适用于头部 10 g 三维像素(体积像素)组织的限值。由此可以直接推导出,一个 20 mW 的射频源,如果其功率全部耗散在这个三维像素——而这是非常不可能的,那么正好符合这个 BR(基本限制)。因此,20 mW 低功率法是一种方便(但非常保守)的方法,因为只要简单地检查发射源的总辐射输出功率。

### 1.4.2 平均总辐射功率 $P_{int,rad}$ 的确定

从表 I.1 可以看出,一些无线发射体的辐射功率远远低于 20 mW,而更多的辐射体的功率是高于 20 mW。对于低功率排除法,我们现在应计算由有意辐射体发射的 6 min 平均功率。而其他辐射体的功率高于 20 mW。

在计算平均总辐射功率  $P_{int,rad}$  时,应考虑有意发射信号的最大占空比。SAR 限值和相关的低功率排除水平是基于 6 min 时间平均的。如果有意发射的信号是有限时间的,例如连续脉冲,那么在信号的

on time 期间的功率可以更高得多。

平均功率可计算如下：

$$P_{\text{int,rad}} = P_{\text{pulse}} \cdot D_C \quad \dots\dots\dots (I.4)$$

式中：

$P_{\text{int,rad}}$  —— 有意发射体的平均发射功率；

$P_{\text{pulse}}$  —— 有意发射体在脉冲时间(on time)的发射功率；

$D_C$  —— 来自有意发射体的信号的占空比，它是脉冲宽度  $T_{\text{pulse}}$  和脉冲重复频率  $PRF$  的乘积，  
即： $D_C = PRF \cdot T_{\text{pulse}} = T_{\text{pulse}} / T_{\text{rep}}$ 。参见图 I.5。

在应用这个公式时，需确定无线技术的发射功率是如何定义的。

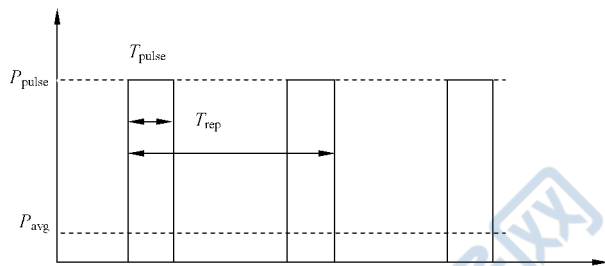


图 I.5 脉冲信号对平均暴露的影响

示例 1: 假设 Zigbee 信号的最大发射功率为 5 mW, 占空比为 5% (见表 1.1), 按照 ETSI EN 300-328, 最大发射功率对应于 100% 占空比的情形, 根据式 (I.4), 平均发射功率则为 0.25 mW。

示例 2: WiFi 的理论占空比为 100%, 但是 WiFi 的实际占空比取决于许多因素, 而 100% 水平是真正的例外<sup>[1.8]</sup>。因此, 实际暴露水平大约为基于 100% 占空比的建模结果的 1/1 000。参见参考文献 [1.8] 的表 2。

### 1.4.3 低功率排除水平 $P_{\text{max}}$ 的确定

基本 EMF 标准 IEC 62479:2010 提供了适用不同类别的暴露人群 (一般公众, 职业) 的各种基本限值的低功率排除水平  $P_{\text{max}}$ 。参见 IEC 62479:2010 中的表 A.1。例如, 在 ICNIRP 1998, 一般公众暴露, 最不利的情况下, 低功率排除水平对于头部和躯干是 20 mW。与无线源辐射的可能功率水平 (表 I.1) 相比, 乍一看似乎公式 (I.3) 的 20 mW 的排除水平似乎是很低的值。例如, 在 WiFi 源的情况下, 应用这种低功率排除水平无法证明其符合性, 因为 WiFi 源的辐射功率可能在 100 mW ~ 1 000 mW 之间, 这比 20 mW 的排除水平要大得多。然而, 也有一些方法可以显著提高低功率排除水平, 在基本的 EMF 标准 IEC 62479 中给出了替代的 (较高的) 低功率排除电平的方法。

从图 I.3 所示的场计算可以很容易地看出, 场强以  $1/d$  衰减, 对于较大的暴露距离, 发射器的 20 mW 功率被 10 g 的单个体素捕获的可能性极小, 而且在基本的 EMF 标准 IEC 62479 中, 替代的低功率排除水平已被导出为暴露距离的函数, 并且是天线类型和无线技术的函数。

通过应用参考文献 [1.10] 中的 SAR 估计公式, 可以得到更精确/更具体的宽松公式。在这篇文章中以天线特性、距离和频率为参数, 推导了 SAR 估计公式。EMF 基础标准 IEC 62479:2010 的附录 B 给出了替代的低功率排除水平的计算方法, 对于暴露距离 0.05 m ~ 0.25 m 之间它是距离和天线类型函数。这些替代值是基于 Ali 等人的研究参考文献 [1.9], 参考文献 [1.9] 的图 3 和图 4 给出了频率和不同类型天线的函数一些结果。例如, 在 900 MHz 时, 对于不同类型的天线, 在 0.25 m 的距离可以安全地应用的 150 mW 的低功率排除水平, 这是一个因子 7.5 的宽松。

示例: 对于 WiFi 技术, IEC 62479:2010 的表 B.1 对平均质量为 10 g 给出了下列替代排除水平:

距离 0.05 m:  $P_{\text{alt}} = 32 \text{ mW}$ 。

距离 0.25 m:  $P_{\text{alt}} = 328 \text{ mW}$ 。

### 1.5 灯具中的多个发射体

增加功率的方式取决于源的类型。IEC/TR 62630 是一个技术报告,它为如何评估来自多个来源的暴露提供了指导。在  $k$  个相关源情况下,SAR 的上限由下式确定(参见 IEC/TR 62630:2010-03<sup>[1.11]</sup> 中的 6.5.2.22):

$$SAR_{tot} \leq \left( \sum_{k=1}^N \sqrt{SAR_k} \right)^2 \dots\dots\dots ( I.5 )$$

对于具有多个有意辐射体的照明设备,各个有意发射体的贡献一般不相关,因此,如 IEC/TR 62630:2010-03<sup>[1.11]</sup> 中的 6.4 所解释的那样, $k$  个源的 SAR 或功率密度是以线性方式累加的:

$$SAR_{tot} = \sum_{k=1}^N SAR_k \dots\dots\dots ( I.6 )$$

由于 SAR 与低功率排除水平直接相关,线性求和也适用于  $k$  个不相关源的总功率。因此,所有有意辐射源的总辐射功率应相对于适用于该无线技术(频率、天线)的每一个低功率排除水平以线性方式累加。然后,式(I.3)的低功率排除符合性准则变成了  $N$  个不相关发射体的总计:

$$\sum_{k=1}^N \frac{P_{rad}^k}{P_{max}^k} < 1 \dots\dots\dots ( I.7 )$$

附录 D 显示,在 100 kHz~300 MHz 的频率范围内,非有意辐射发射的总功率可忽略不计,因此,在式(I.7)中可以忽略非有意辐射的贡献。

### 1.6 暴露在多灯具下

EMF 暴露评估仅限于一个灯具,不适用于多个灯具。原因如下:

- EMF 产品标准总是适用于单个产品,而不是装置;
- 靠近某个灯具(例如,0.3 m),这个灯具的贡献占主导地位;这可以通过建模来证明;
- 需指出的是,安装单一灯具所带来的额外增益已被考虑在内。

### 1.7 附录 I 中的参考文献

[I.1] KNX Association;www.knx.org.  
 [I.2] ZigBee Alliance;www.zigbee.org.  
 [I.3] ETSI EN 300-328:2006-10,V1.7.1,Wideband transmission systems;Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive  
 [I.4] ITIS Report,Development of procedures for the assessment of human exposure to EMF from wireless devices in home and office environments,2005-01-29.  
 [I.5] J.D.Jackson,Classical electrodynamics,3<sup>rd</sup> edition,ISBN 0-471-30932-x.  
 [I.6] E.Piuzzi et al,Analysis of adult and child exposure to uniform plane waves at mobile communication systems frequencies (900 MHz-3 GHz), IEEE Transactions on EMC, vol. 53, no. 1, FEB.2011.  
 [I.7] E.Conil,Variability analysis of SAR from 20 MHz to 2.4 GHz for different adult and child models using finite-difference time domain, Physics in Medicine and Biology, vol 53 (2008), pp. 1511-1525.

[I.8] K.R.Foster, Radiofrequency exposure from wireless LANS utilizing WiFi technology, Health Physics, 2007, pp.280.

[I.9] M.Ail et al, Threshold power of canonical antennas for inducing SAR at compliance limits in the 300-3 000 MHz frequency range, IEEE Transaction on EMC, vol.49, no.1, Feb.2007.

[I.10] M.Gosselin et al, Estimation formulas for the specific absorption rate in humans exposed to 300-3 000 MHz frequency range, IEEE Transactions on EMC, vol.49, no.1, Feb.2007.

[I.11] IEC/TR 62630:2010-03, Guidance for evaluating exposure from multiple electromagnetic sources.



参 考 文 献

- [1] ICNIRP 1998 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics, 1998, vol.41, no.4, pp 449\_522.
- [2] ICNIRP 2010 Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (1 Hz to 100 GHz), Health Physics, December 2010, volume 99.no.6, pp 818.
- [3] IEEE C95.1:2005 IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz
- [4] IEEE C95.6:2002 IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to Electromagnetic fields, 0 to 3 kHz
- [5] SMYTHE, W.R. Static and Dynamic Electricity. McGraw-Hill, 1950.
- [6] IEC 61786:1998 Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings—Special requirements for instruments and guidance for measurements
- [7] IEC/TR 62493-1 Assessment of lighting equipment rated to human exposure to electromagnetic fields—Part 1: Results of the EMF measurement campaign from the VDE Test and Certification Institute and ZVEI, the GERMAN Electrical and Electronic Manufacturers' Association
- [8] C.A Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd Edition
- [9] CISPR 15:2013 Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment
- [10] 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
- [11] CISPR 16-4-2:2003 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modeling—Uncertainty in EMC measurements
- [12] IEC 62226-2-1:2004 Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range—Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body—Part 2-1: Exposure to magnetic fields -2D models
- [13] IEEE Std C95.6—2002 Safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0—3 kHz
- 

