

可靠性与质量管理丛书

电磁兼容的原理、规范和测试

顾希如 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分九章：第一章介绍有关电磁兼容的基本术语和定义；第二章介绍几种主要的电磁干扰源及其基本特性；第三章介绍电磁干扰的两种传播方式；第四章介绍有关接地、电源滤波、电磁屏蔽的基本知识和计算方法；第五章介绍电磁兼容测试中使用的主要设备、装置和设施；第六章介绍有关电磁兼容的国际和国外先进标准；第七、八、九三章分别结合联邦德国 VDE 的电磁兼容规范、美军的基础电磁兼容规范以及 FCC 规程，对测试方法作了较全面而概要的介绍。

本书可供从事电磁兼容工作的技术人员和设计、制造、使用电子设备的技术人员参阅。

可靠性与质量管理丛书 电磁兼容的原理、规范和测试

顾希如 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 $1/32$ 印张 $5\frac{1}{2}$ 140千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数：0,001—1,980册

ISBN 7-118-00055-8/F6 定价：3.35元

目 录

第一章 术语和定义	1
第二章 电磁干扰源	5
2.1 广播、通信、雷达、导航发射设备	5
2.2 工业、科学、医疗 (ISM) 设备	6
2.3 架空电力线及电气牵引系统	10
2.4 汽车、内燃机的点火系统	11
2.5 日光灯照明设备	12
2.6 电磁脉冲 (EMP)	13
2.7 静电放电	14
2.8 公用电源	15
2.9 大气干扰与宇宙噪声	16
第三章 电磁干扰的传播途径及计算	17
3.1 传导干扰的传播	17
3.2 辐射干扰的传播	20
3.3 电场场强与功率密度的关系	24
3.4 系统内干扰的耦合模型	26
第四章 接地、电源滤波和屏蔽	28
4.1 接地	28
4.2 电源滤波	34
4.3 屏蔽	36
第五章 电磁干扰和电磁敏感度的测试设备	48
5.1 电磁干扰测试接收机	48
5.2 天线	54
5.3 电流探头与吸收钳	57
5.4 人工电源网络	61
5.5 屏蔽室、电波暗室和室外试验场	63
5.6 平行板线	69

5.7 横电磁波室	70
第六章 有关电磁兼容的国际标准和国外先进标准	72
6.1 国际无线电干扰专门委员会 (CISPR) 的历史、 组织机构和宗旨	72
6.2 有关电磁兼容的国际标准和国外先进标准的对照	74
6.3 联邦德国电气工程师协会标准 (VDE)	75
6.4 美国军用电磁兼容标准 (MIL-STD-461/462)	77
6.5 电磁兼容国外标准之间的差异和比较	96
第七章 电磁干扰特性的测试方法	101
7.1 传导干扰的测试方法	101
7.2 辐射干扰的测试方法	106
第八章 军用设备电磁兼容特性的测试方法	118
8.1 传导发射的测试	118
8.2 传导敏感度试验方法	127
8.3 辐射发射的测试	142
8.4 辐射敏感度的测试	154
第九章 计算机电磁噪声发射的测量方法	160
9.1 辐射发射的试验条件	160
9.2 电源线的传导发射测量	166
主要参考文献	166

第一章 术语和定义

1.1 电磁噪声(Electromagnetic noise): 与任何信号不相关的一种电磁现象, 它通常是脉冲式的和随机的, 但可以是周期性的。(在有些国家中, 术语“噪声”不包括周期性现象)。

1.2 电磁扰动(Electromagnetic disturbance): 电磁噪声或一种无用信号, 它可以叠加到一个电信号或电量上, 并且可以导致性能的降低。

1.3 无线电噪声(Radio noise): 在射频范围内的一种电磁噪声。

1.4 电磁干扰(Electromagnetic interference): 由一种电磁扰动所引起的, 对装置、设备或系统功能的损害。

1.5 电磁环境(Electromagnetic environment): 在给定场所存在的有意产生或无意产生的电(磁)场强度(或功率密度)、电压与电流的总体。

1.6 辐射(Radiation): 由不同于传导机理所产生的有用信号的发射或电磁扰动的发射。

注: 在ITU中, 辐射的定义为: “以无线电波的形式从任何源向外的能量流动。”

1.7 发射(Emission): 通过辐射或传导从源发射的电磁能。

1.8 辐射发射(Radiated emission): 可借助于辐射(包括感应)耦合到敏感装置的发射。

1.9 传导发射(Conducted emission): 沿导体传播的电磁能。

1.10 无线电干扰(Radio interference): 由一个电磁扰动所引起的, 对接收有用无线电信号的损害。

1.11 系统间干扰(Intersystem interference): 一个系统产生的扰动对另一个系统所造成的电磁干扰。

1.12 系统内干扰(Intrasystem interference): 一个系统内产生的扰动在同一给定系统内引起的电磁干扰。

1.13 自然噪声(Natural noise): 来源于自然现象而不是由机械或其它人造装置产生的噪声。

1.14 人为噪声(Man-Made noise): 由机械或其它人造装置所产生的噪声。

1.15 喀喇声(Click): 持续时间不大于 200ms, 两个扰动之间的间隔至少为 200ms 的扰动。一个喀喇声可以包括几个脉冲。

1.16 宽带发射(Broadband emission): 频谱能量分布相当均匀而且连续, 以致于当测量仪器或接收机在几倍接收机带宽的频率范围内调谐时而无明显变化的一种发射。

1.17 窄带发射(Narrowband emission): 比测量仪器或接收机的带宽窄的一种发射。

1.18 乱真发射(Spurious emission): 在需要的带宽以内或以外, 与被传输信息无关的一个或多个频率上的发射。

1.19 互调(Intermodulation): 一个复杂波形中诸成分的彼此相互调制, 其结果产生了这样的波: 它的频率为原复杂波形中诸成分频率的整倍数的和与差, 即:

$$f = mf_1 \pm nf_2$$

1.20 交调(Crossmodulation): 是一种非线性效应, 由于它, 将临近频率(例如邻道)上不需要信号的调制叠加到一个需要的信号上。

1.21 抗扰度(Immunity): 一个器件、设备或系统抵抗电磁扰动的能力。

1.22 敏感度(Susceptibility): 一个器件、设备或系统对电磁扰动的敏感程度。

注: (1) 敏感度是缺乏抗扰能力的一种度量。

(2) 抗扰电平越高, 抗扰度越高; 反之, 敏感电平越低, 敏感度越高。

1.23 电磁兼容(Electromagnetic compatibility): 一个装置, 在其所处的电磁环境中能满意地工作, 同时又不向该环境或处在该环境中的装置排放超过允许范围的扰动。

1.24 天线有效长度(Antenna effective length): 天线开路感应电压与被测场强分量之比。

1.25 天线系数(Antenna factor): 测量仪器或接收机输入端电压与场强之比; 它包括天线有效长度、失配以及传输损耗等效应。

1.26 远场区(Far field area): 处在远场距离以外的空间。所谓远场距离是指两天线间的距离等于 D^2/λ 或 3λ (取两者中之较大者)。式中, D 为较大天线的最大孔径尺寸, λ 为对应基波的波长。

1.27 电流探头(Current probe): 是一种使用时箝在被测导线上的传感器, 借助于环绕导线的磁场而产生电流。用它可以迅速地对导线中传输的工频或射频电流进行取样, 后者, 通常是对射频干扰进行测量, 此时, 电流探头的输出端接在接收机的输入端。

1.28 电波暗室(Anechoic chamber): 是用来进行辐射试验测量的微波 (通常高于 200MHz) 暗室, 在高于某些规定频率 (例如 1 GHz) 上, 暗室墙壁的电压反射系数通常小于 0.01 (40dB)。

1.29 开放式室外试验场(Open-space site): 用于测量辐射电磁干扰的试验场地。此场地应是敞开的, 平坦的, 并且远离建筑物、电力线、围墙、地下电缆、地下管道。此场地的环境电磁场电平应该相当低, 以便在所选择的任一试验频率上进行辐射发射试验。实际上, 这种要求永远不可能完全实现。

1.30 人工电源网络(Artificial mains network): 接入受试设备电源线中的网络, 它在射频频段为测量扰动电压提供规定的负载阻抗, 并在射频频段上, 使设备与供电电源隔离。

1.31 V-网络(V-Network): 用于测量的一种人工电源网络, 借助它, 可分别测量每根线对地的干扰电压。

注: V-网络可设计用于任意条线路。

1.32 Δ -网络(Delta network): 用于测量的一种人工电源网络, 借助它, 可分别测量单相电路的对称的和非对称的扰动电压。

第二章 电磁干扰源

构成无线电干扰的条件，首先要有干扰源。干扰源可以从不同的角度加以分类：有来源于自然界的干扰，也有人为的干扰；有有用信号的干扰，也有无用信号的干扰；有瞬态脉冲的宽带干扰，也有大功率单频的窄带干扰；有来自公用电源等通过导线而构成的传导干扰，也有通过空间传播的辐射干扰。下面列举一些有代表性的干扰源。

2.1 广播、通信、雷达、导航发射设备

这是一种人为干扰源。它发射的功率很大，它的基波可以产生有用信号的干扰；它的谐波与乱真发射可以构成无用信号的干扰。它可以进一步分为下列五类：

1. 广播发射设备：包括调幅或调频发射机、VHF 或 UHF 波段的电视发射机，它们的频段覆盖如下：

调幅广播：535~1605kHz

VHF 调频广播：88~108MHz

VHF 电视广播：低段 54~88MHz

高段 174~216MHz

UHF 电视广播：470~890MHz

2. 通信发射设备：这是数量最大，品种最多的发射设备。它包括高频电话电报、移动通信、无线传真、遥控遥测以及各种专用通信和业余通信等。这些设备占用的频谱分布在 20kHz~1 GHz 的宽广频带内。高于 1 GHz 时，点对点的通信通常使用接力的形式。

3. 无线电接力通信发射机：包括微波接力、卫星通信、电离层或对流层散射通信等。它们覆盖的波段如下：

微波接力：分散在 2.1~11.7GHz 频段内

卫星接力：分散在 2.4~16GHz 频段内

电离层散射：400~500MHz

对流层散射：分散在 1.8~5.6GHz 频段内

4. 导航通信发射机：包括飞机导航、信标发射机、仪表着陆系统、罗兰与奥米加导航系统等。它们覆盖的频段如下：

VOR(甚高频全向信标)：108~118MHz

TACAN(塔康无线电信标台)：74.6~75.4MHz

ILS(仪表着陆系统)：

仪表着陆系统无线电信标：108~118MHz

滑道：328.6~355.4MHz

高度表：4.2~4.4GHz

测向仪：405~415kHz

罗兰 C：90~110kHz

A：1.8~2.0MHz

航海：285~325kHz；2.9~3.1GHz、5.47~5.65GHz

陆地：1638~1708kHz

5. 雷达：包括空中交通管制、空中测绘、空中搜索、地面搜索、跟踪与火控雷达、气象雷达等。由于它们的发射功率很大(峰值为 MW 量级)，短脉冲占用的频带很宽，谐波辐射严重，因而雷达是一种比较严重的干扰源。

2.2 工业、科学、医疗 (ISM) 设备

据统计，世界范围内的 ISM 设备的数量目前已达一亿二千万台，并以 5 % 的速度逐年递增。这些设备的输出功率多为 kW 和 MW 量级。国际电热联合会 (UIE) 对目前世界上的 ISM 设备数量近似估计如下：

低于 9kHz 的感应加热设备：250,000 台

高于 9kHz 的感应加热设备：400,000 台

介质加热设备：250,000 台

医疗设备:	500,000台
超声设备:	370,000台
射频电弧焊:	550,000台
家用微波炊具:	40,000,000台
杂类:	80,000,000台

值得注意的是:并不是所有的 ISM 设备都工作在指定的频段上,仍有相当数量的 ISM 设备工作在国际电信联盟 (ITU) 指配的频段以外;除此之外,统计数字表明:ISM 设备符合指配频率和满足 CISPR 极限值的百分比是很低的,详见:表2-1所示。

表2-1 ISM设备的实际工作情况

国 别	ISM 设备工作在指配频率上的百分比 (%)	ISM设备满足CISPR 限值的百分比 (%)	备 注
荷兰	大多数		
瑞典	50	100	医用ISM满足,工业ISM很少满足
丹麦	30	10	
英国	18	3	
日本	99.5	99 60	场强极限值 端子电压极限值
全世界	30	32	

国际电热联合会 (UIE) 根据10个不同国家的30个ISM 设备制造厂商提供的资料,汇总的 ISM 设备辐射场强如表 2-2 所示。

表 2-3 是英国对工业区中 ISM 设备的辐射场进行测量的结果。

国际无线电干扰专门委员会 (CISPR) 在 CISPR11 号出版物中对 ISM 设备所规定的辐射干扰极限值 (自由辐射频率例外) 如表 2-4 所示。

由表 2-2 至表 2-4 可以看出,当前,ISM 设备满足 CISPR 极限值的百分比是很低的。

表2-2 ISM设备的辐射场强

设 备	频 段	场强 (dB μ V/m)	距离 (m)	备 注
感应加热设备	9~150kHz	55~80	100	
	150~285kHz	42~54	100	
	350~475kHz	50~65 48	100	基波 谐波
	0.7~5MHz	100	100	使用此频道者甚多
介质加热设备	3~10MHz	100	100	基波
	27.12MHz	50	30	塑料薄膜焊接 设备的谐波电平
	912MHz 2450MHz			
医疗设备	27.12MHz	48	30	谐波
	2450MHz	<10mW/cm ²		
射频电弧焊		40~50	30	在 2~800MHz 上测得

表2-3 英国工业区ISM设备的辐射场强

设备类别	额定基频 (MHz)	谐波次数	距ISM设备 d 处的中值场强 (dB μ V/m)	
			$d = 30\text{m}$	$d = 100\text{m}$
感应加热	0.150MHz	1	96	66
	0.35MHz	1	98	70
	0.640MHz	1	90	60
塑料焊接	27	2	58	25
		3	53	22
		4	45	26
		5	50	26
		9	50	20
粮食干燥	27	2	73	45
		3	84	52
		4	79	50
		5	86	58
		9	73	49
胶合板干燥	27	2	53	33
		3	56	33
		4	72	49
		5	78	65
		9	57	34

表2-4 CISPR对ISM设备规定的辐射干扰值

频段 (MHz)	到受试ISM设备的距离	
	30 m	100 m
0.15~0.285		50(34)
0.285~0.49		250(48)
0.49~1.605		50(34)
1.605~3.95		250(48)
3.95~30		50(34)
30~470	30(30) 在电视频带内 500(54) 在电视频带外	
470~1000	100(40) 在电视频带内 500(54) 在电视频带以外	

注：表中数值的单位为 $\mu\text{V}/\text{m}$ ，括弧中数值的单位为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。

分析表明，ISM 设备所造成的干扰有如下几个原因：

第一，是它的功率太大屏蔽也不够好，功率泄漏大。例如，1000W 的设备如有 0.3% 的功率泄漏，则辐射功率便为 3W，而一个功率为 3W 的各向同性辐射源，在自由空间中 30m 和 100m 处的场强分别为 110 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 和 100 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ (假定符合远场条件)。

第二，ISM 设备的高次谐波，例如 9 次谐波仍然很强，因此，工作频率为 2450MHz 的微波烘箱的 5 次谐波可能对 12GHz 的广播卫星业务构成干扰；工作在 27MHz 的 ISM 设备的高次谐波会对航空业务造成干扰。

第三，CISPR 限值对经典的广播频段的保护是足够的，但对于移动无线电业务和卫星广播业务则保护不够。例如使用低场强的陆地移动无线业务，在规定的通信质量要求 (例如 4 级) 下，接收设备处所允许的最大不需要信号要小于 30 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。

当前，对于 ISM 设备来说，一方面是 CISPR 的限值并不能对无线导航、航空业务以及移动通信提供足够的保护；另一方面，对于 ISM 设备的生产厂来说，在 30~470MHz 频段，30m

处, 30dB μ V/m的限值是很难达到的。

2.3 架空电力线及电气牵引系统

电力线造成干扰主要有两个原因: 一是导线的电晕; 二是由于绝缘子断裂、绑扎松脱等偶然发生的接触不良所产生的微弧以及受污染的导线表面上的火花。

电晕是由导线表面的电场梯度而引起的空气电离, 它只出现在电压高于 100kV 的线路上, 通常不会影响调频和电视的接收, 只对中、长波的接收有影响; 但在某些情况下, 当电力线工作在例如大于 21kV/cm 的电压梯度下, 而天气又非常恶劣时, 也会对电视的接收构成干扰, 这仅限于 I 频道 (40~60MHz)。

电晕效应所产生的干扰噪声电平, 有如下几个特性:

1. 频率特性

$$N(f) = N_0 + 5[1 - 2(\lg f)^2] \quad (2-1)$$

式中 N_0 —— $f = 0.5\text{MHz}$ 时的噪声电平;

f ——以 MHz 为单位表示的频率;

N 、 N_0 ——噪声电平, 单位为 dB。

2. 横向距离特性

噪声电平随距离电力线的横向距离的相对变化可用下式来表征:

$$N(\text{dB}) = N_0 + 20k \lg \frac{d_0}{d} \quad (2-2)$$

式中 N_0 ——距最近导线的距离 $d_0 = 20\text{m}$ 时的噪声电平;

k ——系数, 介于 1 与 2 之间, 它与导线的种类和频率范围有关。

3. 噪声电平的离散性

定义: N_{FW} 为干燥气候时的最大可能的噪声电平; N_R 为降雨天气时的最大可能的噪声电平。

则, N_{FW} 统计曲线的 $\sigma = 6\text{dB}$,

N_R 统计曲线的 $\sigma = 3\text{dB}$,

而 N_R 与 N_{FW} 之差为 17~22dB。

表 2-5 指出 $f = 0.5\text{MHz}$ 时在不同高压范围下的干扰区间和噪声电平；对于其它频率和距离时的干扰电平可利用式 (2-1) 与式 (2-2) 进行计算。

表2-5 不同高压范围下的电力线干扰区间和噪声电平

电压 (kV)	干燥天气时的噪声电平 (dB $\mu\text{V}/\text{m}$)	干扰区间 (m)
220	40~48	40~50
420	50~58	60~80
750	50~64	100~120

与电晕效应相反，由于偶然发生的接触不良所产生的微弧会对调频和电视的接收造成干扰。这种接触不良往往是由于使用了有缺陷的绝缘子、减震器或绝缘衬垫（如绝缘子断裂、绑扎松脱等）所致，尤其是在大风天气下或电力塔受振动时，接触不良现象更加明显。

电气火车和电车，由于供电母线与导电弓架的偶而接触不良，会不时地产生火花放电，从而辐射电磁噪声。此火花脉冲的宽度等于或小于微秒量级，其重复频率约为几个脉冲每秒，因而，噪声的发射频谱通常小于30MHz，但对于高速电气火车而言，其辐射频谱可达到 VHF 频段。

2.4 汽车、内燃机的点火系统

汽车、内燃机的干扰主要来自点火系统、发电机、风扇、马达等。单个车辆可以辐射周期性的窄脉冲串，它的持续时间约为几个毫微秒，因而由汽车点火系统所产生的干扰频带很宽，从几百千赫到几百兆赫干扰强度几乎不变。观察表明，小轿车的电磁噪声比卡车约低 10dB，而摩托车则和卡车差不多。由实验数据可知：在距离小轿车十几米远处的辐射干扰场强约为 $10\mu\text{V}/\text{m}$ 。

汽车的电磁噪声为垂直极化（特别是在 100MHz 以下），并就整体而言，噪声幅值具有正态分布形式。每个汽车所产生的电

磁噪声幅值与点火系统的类型、老化、磨损情况以及车速、负载情况有关。经验表明，若车辆密度每增加一倍，干扰噪声功率谱密度便增加 3~6dB。

在观察统计基础上，国外科学家得出了预测汽车噪声对通信设备影响的数学模型（在 100~1000MHz 范围内）如下：

$$E = -34 + 10\lg B_R + 17\lg C - 20\lg R - 10\lg f \quad (2-3)$$

式中 E ——中值（50% 概率）场强，单位为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ；

B_R ——接收机带宽，单位为 kHz ；

C ——车辆频度，以辆/分表示；

R ——接收机到交通马路的距离，单位为 m ；

f ——接收机工作频率，单位为 MHz 。

〈例〉 某汽车调度站距马路 30m，所用接收机工作在 450 MHz 上，带宽为 50kHz，如果车辆频度为 15 辆/分，求由于汽车点火系统在接收机处所产生的噪声的中值场强。

〈解〉 将例中数值代入式（2-3）得：

$$\begin{aligned} E &= -34 + 10\lg 50 + 17\lg 15 - 20\lg 30 - 10\lg 450 \\ &= 14.9\text{dB}\mu\text{V}/\text{m} = 5.6\mu\text{V}/\text{m} \end{aligned}$$

为了保证 10dB 的信噪比，则有用信号强度应为：

$$14.9 + 10 \approx 25\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

2.5 日光灯照明设备

日光灯工作时，将产生电击穿脉冲，从而造成射频干扰。此干扰可以通过灯管本身，尤其是通过它的供电电源线产生辐射发射；也可以通过电源线注入到公用电源，从而构成传导干扰。D. B. Clark 曾对日光灯的辐射噪声做过研究，图 2-1 是他对两个冷阴极和一个热阴极日光灯的辐射发射所作的实测曲线，接收天线置于距灯源 1m 的位置。由图可见，热阴极灯管在 VHF 与 UHF 频段的高频辐射是很明显的。

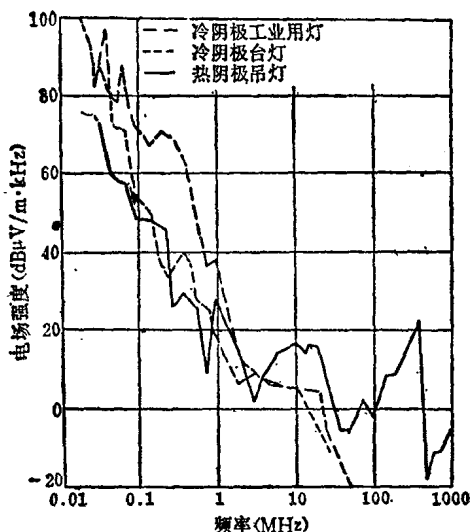


图2-1 日光灯辐射发射的实测曲线

2.6 电磁脉冲 (EMP)

核弹爆炸会产生电磁脉冲，它的强度约为 10^5 V/m ，伴生的磁场约为 260 A/m 。EMP 的脉宽约为 20 ns ，归一化的 EMP 频谱图如图 2-2 所示。

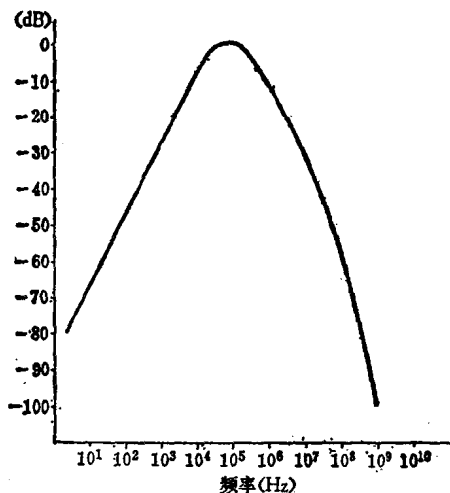


图2-2 归一化电磁脉冲频谱图