

电场发生器在 EMC 测试中的应用

赵李刚，黄乐

(南京洛仑电磁科技有限公司)

摘要

随着越来越多的人认识到电磁兼容技术的重要性，电磁兼容技术的自主可控已经不可忽视。我国电磁兼容技术从制定标准开始，到系统的搭建、设备的制造甚至零部件的供应，在受到国外技术启发的同时，也受到了国外的制约和封锁。现今我们虽然有着自己的综合电磁兼容技术标准，但不少设备依赖进口，因此设备国产化的需求将越来越迫切。电场发生器作为电磁兼容测试里面的主要设备之一，其自主研发的重要性也逐渐显现。本文还阐述了电场发生器的选型方案并探讨了它的技术发展方向。

1. 引言

电场发生器是电磁兼容（EMC）测试中，为电场辐射抗扰度测试提供实验所需稳定电场环境的主要设备。辐射抗扰度（Radiate Susceptibility，简写 RS），又称为辐射敏感度，是 EMS 测试的最基本项目之一，指各种装置、设备或系统，在存在辐射的环境下，抵抗辐射的一种能力；敏感度越高，抗干扰的能力越低。GJB 151B 和 MIL-STD-461 中，其中项目 RS103 是专门关于电场辐射敏感度的测试；而信号发生器、功率放大器和电场发生器（也叫发射天线），则是该项测试中重要的三种设备。

电磁兼容技术是指在电子设备和系统中，通过设计和控制电磁场的传播和辐射，使其不对其他设备和系统产生干扰，同时也不受其他设备和系统的干扰。20 世纪 50 年代，中国开始研制电子设备和系统，但由于技术水平和设备条件的限制，电磁兼容问题并没有引起足够的重视。到了 60 年代末 70 年代初，随着电子设备和系统的广泛应用，电磁兼容问题开始显现。为了解决这个问题，我国开始引进国外的电磁兼容技术，并在此基础上进行研究和开发，其中有着重要参考意义的是美国的军用电磁兼容标准。

电磁兼容测试的设备在很长的一段时间内都是以进口设备为主，随着近年来世界格局的不断变化，测试设备的国产化要求也越来越迫切。信号发生器和功率放大器的国产化进程在近年来速度较快，涌现了不少国产设备品牌。但是电场发生器，特别是低频段电场发生器的国产化一直没有明显的进展。南京洛仑于 2022 年初率先正式推出了国产商用电场发生器 LRET-10K100M-1、LRET-10K30M-1 以及 LRET-10K30M-F1，填补了这一空白。

2. 美军标的演变过程

MIL-STD-461 是美国最基础的军用电磁兼容（EMC）标准规范，2015 年，美国国防部发布了其最新版本 MIL-STD-461G 《设备和分系统电磁干扰特性控制要求》。至此，MIL-STD-461 自首版颁布以来已经历了 50 多年；其适用于安装在国防部平台上所有军用电子电气设备，适用于地面坦克、舰船、飞机、固定设施等各种平台以及不同应用环境（如舰船甲板上、甲板下）。同时，MIL-STD-461 也在世界范围得到广泛应用，被许多国家采纳作为其 EMC 规范的基础。

实际上，美国电磁兼容方面的军用标准和规范的发展史要追溯到 1945 年，一些文件自 1945 年提出以来得到了不断的充实和修正。在 MIL-STD-461 系列标准颁布以前，美国各军兵种为满足各自的需要，制定了各自的电磁兼容性要求标准；因此该领域的标准非常复杂和多样，相关标准见表 2-1。

表 2-1 MIL-STD-461 之前的标准

标准编号	标准名称	制定单位	发布日期
MIL-I-11748B	电子设备干扰抑制	陆军	1958-11-04
MIL-I-16190C	电磁干扰测量方法和限值	海军	1967-11-06
MIL-I-6181D	机载设备干扰控制要求	空军	1959-11-25
MIL-I-26600	航空设备干扰控制要求	空军	1958-06-02

这种多标准共存的体制给实际使用带来了许多难以克服的困难。首先，这些标准规定的限值差别很大，当按某一标准设计一个设备时，如要同时满足另一个标准的要求，常常要重新设计和测试；否则，不是达不到要求，就是造成不必要的浪费，很难两全。其次，每个标准规定的频率范围不同，测试方法不同，使用的测试设备也不同，要完成所有的测试，装备起所有的测试设备，费用就相当大。因此给标准制定者和使用者提出了一个非常现实而又迫切的问题，即制定一些新标准来统一现有名目繁多的标准，把标准数目减至最少，以供三军共同使用。

1965 年，美国国防部组织三军的工程技术人员和标准化研究人员制定了一个研究电磁干扰专门术语、测试范围、测试方法及设备要求的计划，于是便产生了 461 系列电磁兼容性标准。这一系列标准包括 MIL-STD-461（设备电磁干扰特性要求）、MIL-STD-462（电磁干扰特性测量）和 MIL-STD-463（电磁干扰技术定义和单位制）。其中 MIL-STD-461、MIL-STD-462 标准于 1967 年 7 月正式发布，MIL-STD-463 标准于 1966 年 6 月正式发布，从而进入了使用 461 标准的时代。该系列标准是三位一体的标准，组合在一起成为基本的电磁干扰规范：MIL-STD-461 规定了要求，MIL-STD-462 叙述了测量技术，MIL-STD-463 解释了定义和单位制。

由于 MIL-STD-461 标准中要求的变化，MIL-STD-462 作为方法标准共发布了两个版本，其中在 MIL-STD-461D 发布之前，主要以通告形式进行了一些更新，随着 MIL-STD-461D 发布，测试限值和测试方法都发生了重大变化，因此与 MIL-STD-461D 一起同期发布了 MIL-

STD-462D。当 MIL-STD-461E 版本发布以后，MIL-STD-462 合并到 MIL-STD-461，要求和方法标准合二为一，至此 MIL-STD-462 废止。20 世纪 90 年代后，MIL-STD-463 标准被废止，技术定义参照美国国家标准协会(ANSI)标准 IEEE C63.14 “电磁兼容(EMC)、电磁脉冲(EMP)和静电放电 (ESD) 技术词典”。

3. 国军标简介

1993 年美军方颁布了 MIL-STD-461D 与 MIL-STD-462D 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求及测试标准。之后，我国经过 4 年多的时间，在理解、吸收、消化、发展的原则下，军标中心在 1997 年颁布了 GJB 151A-1997 《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》和 GJB 152A-1997 《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》，以代替国军标 GJB 151/152-86。该规范根据我国军用设备和分系统研制和生产的现状，在原美军标 17 项的基础上增加了 2 项(而 GJB 151/152-86 是 22 项)，即：CE107 电源线尖峰信号(时域)传导发射测试和 CS106 电源线尖峰信号传导敏感度测试。其余项目没有变化，只是在检测频段上做了相应修改。该规范经过三年的实际运用，为我国军用设备的研制，以及军用设备和分系统在电磁兼容领域的发展与国际接轨起到了推动作用。后来，我国电磁兼容技术再经过 16 年的发展，通过修改、整合 GJB 151A-1997 和 GJB 152A-1997 两个标准，诞生了国内迄今为止最全面、最复杂的电磁兼容标准——GJB 151B-2013。

表 3-1 GJB 151B 标准中电磁发射和敏感度测试项目

项目编号	适用频段	名称
CE101	25 Hz ~ 10 kHz	电源线传导发射
CE102	10 kHz ~ 10 MHz	电源线传导发射
CE106	10 kHz ~ 40 GHz	天线端口传导发射
CE107	/	电源线尖峰信号（时域）传导发射
CS101	25 Hz ~ 50 kHz	电源线传导敏感度测试
CS102	10 kHz ~ 10 MHz	地线传导敏感度
CS103	15 kHz ~ 10 GHz	天线端子互调传导敏感度
CS104	25 Hz ~ 20 GHz	天线端子无用信号抑制传导敏感度
CS105	25 Hz ~ 20 GHz	天线端子交调传导敏感度
CS106	/	电源线尖峰信号传导敏感度
CS109	50 Hz ~ 100 kHz	壳体电流传导敏感度
CS112	/	静电放电敏感度
CS114	4 kHz ~ 400 MHz	电缆束注入传导敏感度
CS115	/	电缆束注入脉冲激励传导敏感度
CS116	10 kHz ~ 100 MHz	电缆和电源线阻尼正弦瞬态传导敏感度
RE101	25 Hz ~ 100 kHz	磁场辐射发射
RE102	10 kHz ~ 18 GHz	电场辐射发射
RE103	10 kHz ~ 40 GHz	天线谐波和乱真输出辐射发射
RS101	25 Hz ~ 100 kHz	磁场辐射敏感度
RS103	10 kHz ~ 40 GHz	电场辐射敏感度
RS105	/	瞬态电磁场辐射敏感度

4. GJB 151B 中 RS103 的测试配置

RS103 是电场辐射敏感度测试项目，它需要先按照 GJB 151B 的要求进行配置，图 4-1 为一般测试配置示意图。同时，大功率的电场发生器和功率放大器也必不可少。根据不同军种或测试小项的要求，电场发生器需要输出不同强度的稳定电场。从表 4-1 可以看出，RS103 的测试需要的电场强度限值范围为 5 V/m ~ 200 V/m。

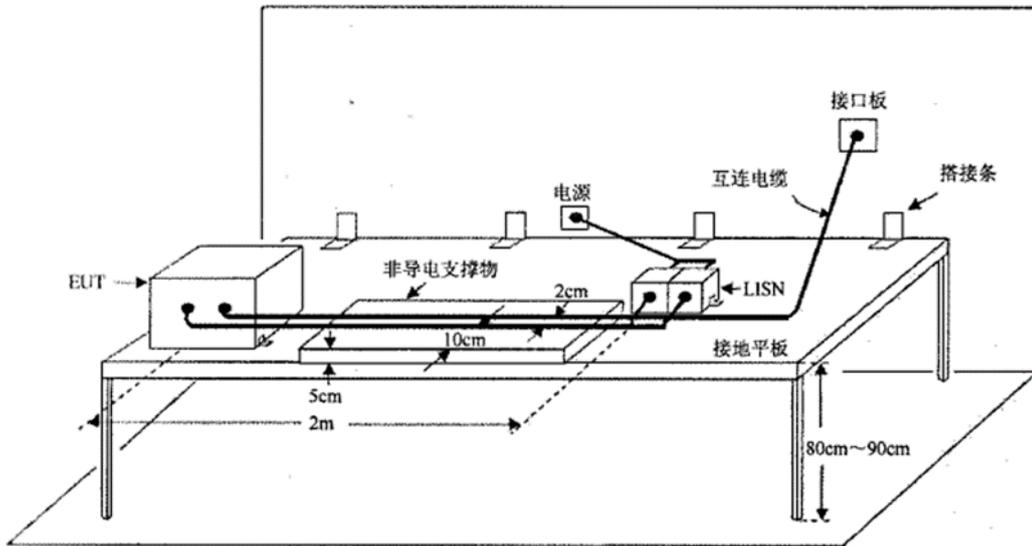


图 4-1 RS103 测试一般测试配置

表 4-1 RS103 限值 (单位: V/m)

频率范围		平台							
		飞机 (外部或 SCES)	飞机 (内部)	舰船 (甲板上)和 水下(外部)	金属舰 船 (甲板下)	非金属 舰船 (甲板下)	水下 (内部)	地面	空间 系统
10 kHz ~ 2 MHz	陆军	200	200	10	10	10	5	20	20
	海军	200	20	10	10	10	5	10	20
	空军	200	20	/	/	/	/	10	20
2 MHz ~ 30 MHz	陆军	200	200	200	10	50	5	50	20
	海军	200	200	200	10	50	5	10	20
	空军	200	20	/	/	/	/	10	20
30 MHz ~ 1 GHz	陆军	200	200	200	10	10	10	50	20
	海军	200	200	200	10	10	10	10	20
	空军	200	20	/	/	/	/	10	20
1 GHz ~ 18 GHz	陆军	200	200	200	10	10	10	50	20
	海军	200	200	200	10	10	10	50	20
	空军	200	60	/	/	/	/	50	20
18 GHz ~ 40 GHz	陆军	200	200	200	10	10	10	50	20
	海军	200	200	200	10	10	10	50	20
	空军	200	60	/	/	/	/	50	20

根据表 4-1 的 RS103 限值，我们做出了电场发生器（发射天线）的推荐配置，见下表 4-2。

表 4-2 南京洛仑推荐 RS103 测试发射天线配置（一）

使用频段	天线名称	洛仑产品型号
10 kHz ~ 100 MHz	门框型电场发生器	LRET-10K100M-1
80 MHz ~ 200 MHz	双锥天线	LRET-80M200M-1
200 MHz ~ 1 GHz	对数周期天线	LRET-200M1G-1
1 GHz ~ 6 GHz	双脊喇叭天线	LRET-1G6G-1
6 GHz ~ 18 GHz	双脊喇叭天线	LRET-6G18G-1
18 GHz ~ 26.5 GHz	喇叭天线	LRET-18G26G-1
26.5 GHz ~ 40 GHz	喇叭天线	LRET-26G40G-1

考虑到门框型电场发生器尺寸较大，针对不需要测量大型 EUT 的小型暗室，我们有另外一个推荐配置，见下表 4-3。

表 4-3 南京洛仑推荐 RS103 测试发射天线配置（二）

使用频段	天线名称	洛仑产品型号
10 kHz ~ 30 MHz	平板型电场发生器	LRET-10K30M-1 / LRET-10K30M-F1
30 MHz ~ 100 MHz	双臂式电场发生器	LRET-30M100M-1
80 MHz ~ 200 MHz	双锥天线	LRET-80M200M-1
200 MHz ~ 1 GHz	对数周期天线	LRET-200M1G-1
1 GHz ~ 6 GHz	双脊喇叭天线	LRET-1G6G-1
6 GHz ~ 18 GHz	双脊喇叭天线	LRET-6G18G-1
18 GHz ~ 26.5 GHz	喇叭天线	LRET-18G26G-1
26.5 GHz ~ 40 GHz	喇叭天线	LRET-26G40G-1



LRET-10K100M-1



LRET-10K30M-1



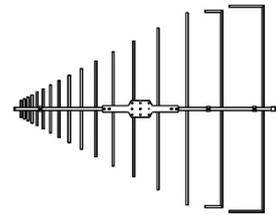
LRET-10K30M-F1



LRET-30M100M-1



LRET-80M200M-1



LRET-200M1G-1



1 ~ 40 GHz 喇叭天线

图 4-1 南京洛仑部分发射天线图片

电场发生器（发射天线）配置到 RS103 项目中时，根据测试桌的高度，一般要求主体安装高度为 1.2 米左右。测试频段在 30 MHz 及其以下，电场发生器应提供相应强度的垂直极化场；测试频段在 30 MHz 以上时，电场发生器应提供相应强度的垂直极化以及水平极化场。

电场发生器的位置根据工作频率不同以及测试边界（D）大小有不同的放置方式：

1) 工作频率 10 kHz ~ 200 MHz

- a) $D \leq 3\text{ m}$ 时，天线放在测试配置边界边缘的中心线上（见图 4-2），该边界包括所有 EUT 壳体及 2m 长暴露的互连线和电源线。
- b) $D > 3\text{ m}$ 时，按图 4-3 所示的间隔使用多个天线位置 N，天线的位置数 N 用边界宽度（单位为米）除以 3 并进位取整。

2) 工作频率不低于 200 MHz（见图 4-4）

- a) 对 200 MHz ~ 1 GHz 的测试，天线的放置位置应足够多，以使每个 EUT 壳体的整个宽度及其端接电线或电缆的首个 35 cm 线段都处于天线的 3 dB 波瓣宽度之内。
- b) 对不低于 1 GHz 的测试，天线的放置位置应该足够多，以使每个 EUT 壳体的整个宽度及其端接电线或电缆的首个 7 cm 线段都处于天线的 3 dB 波瓣宽度之内。

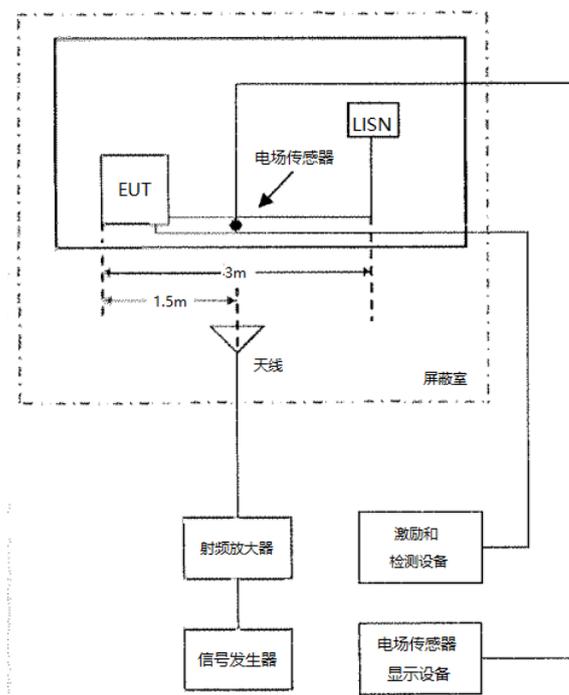


图 4-2 单天线测试配置

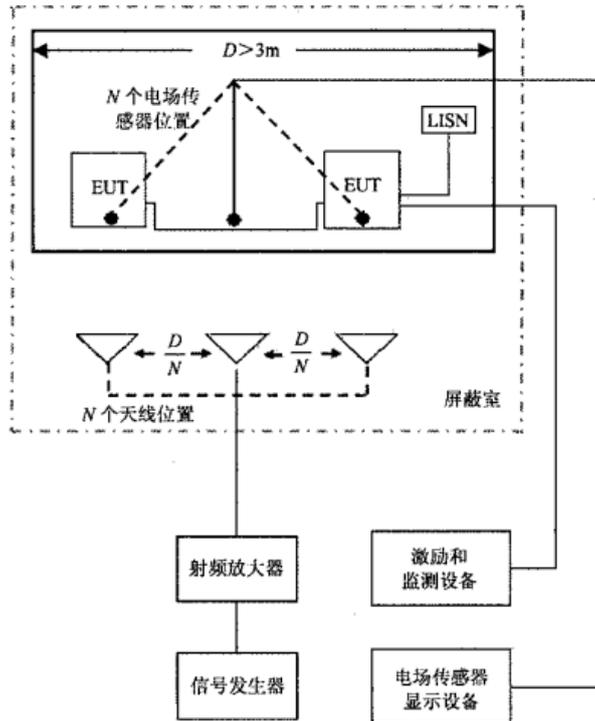


图 4-3 多天线测试配置 (边界 $D > 3\text{ m}$)

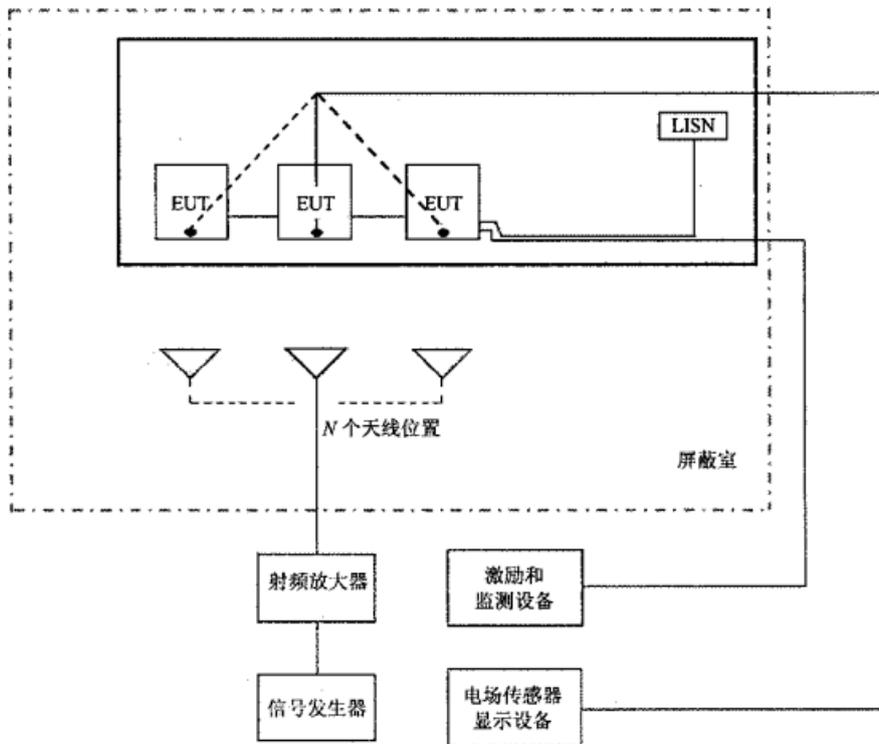


图 4-4 多天线测试配置 (频率 $> 200\text{ MHz}$)

5. 电场发生器的基本要求与其国内外典型产品的电场强度的对比

以南京洛仑 LRET-10K100M-1 带极化旋转支架的国产门框型电场发生器为例，设备需具备以下几点基本要求：

- 1) 具备发射水平和垂直两种极化的电场的能力；
- 2) 耐受大功率输入信号，本型号最大输入功率为 3000 W；
- 3) 驻波较低，防止较大的反向功率威胁到功率放大器的安全；
- 4) 散热良好，保证较长时间内稳定工作。

除此之外，电场强度的表现在具体测试项目中是首要考虑的因素之一。与同类型进口产品的电场强度曲线（见图 5-2）对比，南京洛仑 LRET-10K100M-1 的性能（见图 5-1）处于与其相当的水平，满足国产替代的要求。

在具体的应用场景中，LRET-10K100M-1 已在北京航空航天大学 EMC 实验室、苏试试验、长鹰恒容以及各航天院所等知名实验室安全运行，并将继续经受时间的检验（如果有兴趣，欢迎共同见证）。

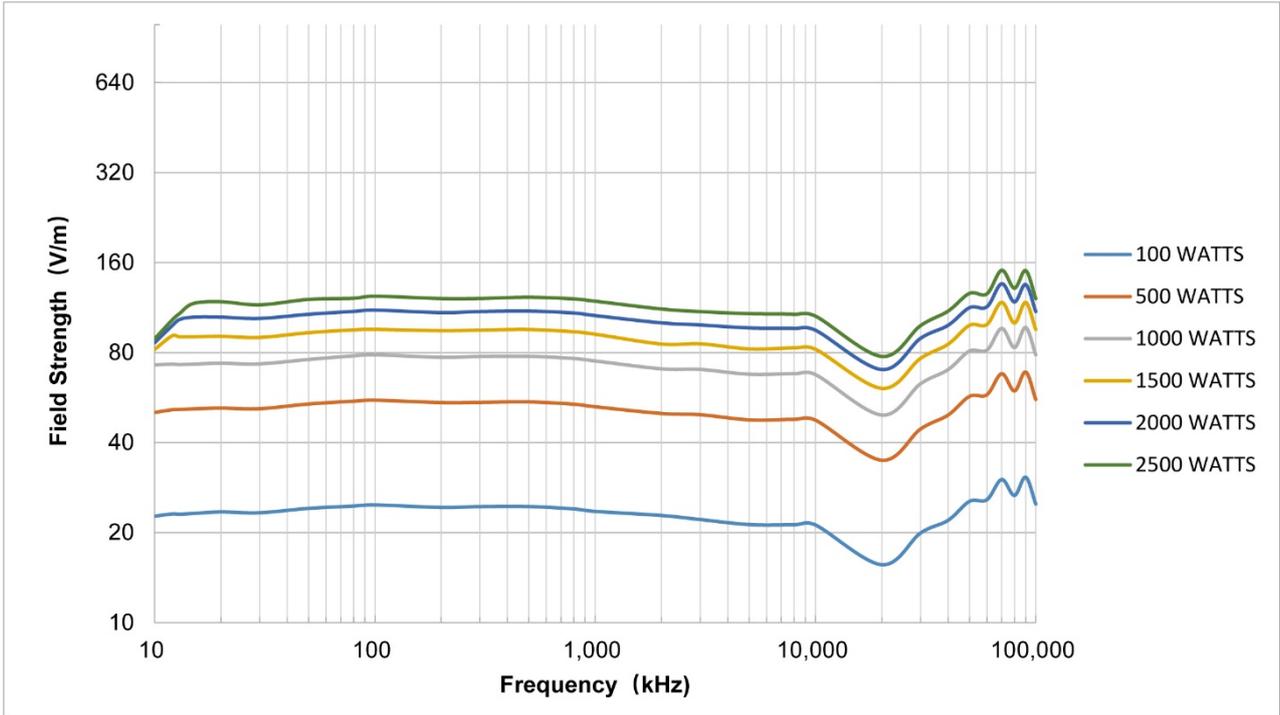


图 5-1 南京洛仑 LRET-10K100M-1 电场强度曲线（测试距离：1 米）

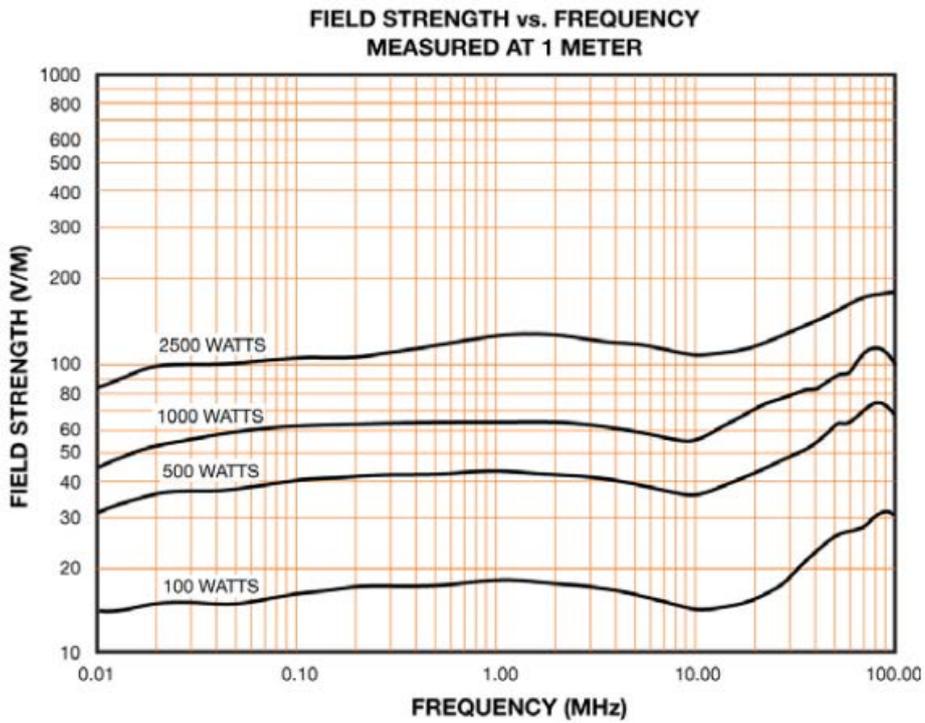


图 5-2 同类型进口电场发生器电场强度曲线（测试距离：1 米）

6. 国产电场发生器的技术方向

国产电场发生器相对于进口产品来说有着交期短、售后维护保障高、成本相对较低等优势，并且国家层面也在倡议和推动电磁兼容测试系统全面国产化，确保试验数据安全有效，因此市场前景非常广阔。但同时国产产品也面临着一些挑战，本节简单地探讨一下他的技术发展方向。

- 1) 频率高于 1 GHz 的电场发生器可以使用喇叭天线，这是国内比较成熟的技术。但是 1 GHz 以下的电场发生器的选型目前主要参考了国外系统商的方案，同时国产产品缺乏某些频段的特定产品来满足国内系统搭建的需要。所以第一个要解决的问题是把产品的频率覆盖补全。
- 2) 某些特定频段的电场发生器即便是采用了国外的选型方案，比如进口的双锥天线，也会在 80 MHz 以下存在电压驻波比过高的问题。当采用进口功率放大器时，由于进口放大器能承受非常高的反向功率，所以这个问题在国外系统中并没有凸显出来。但如果采用了国产功率放大器，由于国产放大器有着相对严格的反向功率保护，导致电场发生器的电压驻波比过高时触发系统保护，测试工作无法正常进行。因此在某些特定频段上，国产电场发生器需要具备更低的电压驻波比。
- 3) 电场发生器经常会在大功率下持续工作，导致元器件温度过高容易有损坏风险或者产品使用寿命不长。因此某些电场发生器会限制连续工作的时间来规避上述情况，同时也影响了测试效率。比如进口的平板型电场发生器工作在 3000 W 时，就要求连续工作时间不得超过 5 分钟。大功率下工作的电场发生器需要更加强大的散热系统保证其能长时间稳定运行。
- 4) 电场强度是电场发生器最重要的性能之一，虽然国产产品部分型号在此项性能上已经可以作为进口产品替代，但是市场所需求的电场强度远不止于此。因此在电场强度的升级优化上，我们还要继续攻关。

7. 结语

随着人们对电磁兼容的不断认知，对电磁兼容的重视程度也逐渐增加。科学技术的不断发展使电磁兼容所涉及到的领域日益扩大，而今电磁兼容所产生的影响已不仅仅只是电子产品设备本身，由于电子产品自身内部结构发展得愈加袖珍与复杂，电磁兼容问题也就愈加重要，例如受电磁干扰，收音机无法收听广播、某些电子设备的数据在传输过程中发生丢失、一些医用电子设备工作失常、引发起爆装置使之发生爆炸、工业过程的某项控制功能完全失效等，电磁干扰或其产生的辐射还可以使生物体自身发生某些微妙的变化而产生一定的影响。而电磁兼容问题对于国防来说就更加有特殊意义了。

我国的电磁兼容技术虽然起步较晚，但经过数十年的发展我们也逐渐拉进了和国外的差距。电磁兼容技术的自主可控，不仅仅是指系统要自己搭建，而且基建、设备都需要自己技术和研发能力。电场发生器的国产化，可能只是我国电磁兼容技术自主的微不足道的一小步，但是我们相信就这样一小步、一小步的向前走，最终一定可以到达目标的彼岸。

参考文献

- [1] GJB 151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量 [S]
- [2] 吴彦灵, 孟莹. 美国军用电磁兼容性测试标准的新变化 [C]. 全国电磁兼容学术交流大会, 苏州
- [3] MIL-STD-461E-1999, Department of Defense interface Standard [S]
- [4] MIL-STD-461D-1993, Department of Defense interface Standard [S]