



高等学校教材
GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

电磁兼容测试技术

DIANJIJIANRONGCESHIJISHU

张厚 唐宏 尹应增 编著



西北工业大学出版社

电磁兼容测试技术

编 著 张 厚 唐 宏 尹应增

西北工业大学出版社

【内容简介】 电磁兼容测试技术是一门涉及多种学科的新兴科学领域,特别在电子、电器、航空、航天等领域得到了广泛的应用。本书主要介绍电磁兼容测试技术的原理、方法,测试的理念和数据处理等内容,并给出电磁兼容技术的几种典型的应用。

本书内容丰富,概念清晰,可供高等院校电子类专业研究生和高年级学生使用,亦可作为电子工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁兼容测试技术/张厚,尹应增编著. —西安:西北工业大学出版社,2008.9
ISBN 978-7-5612-2452-6

I. 电… II. ①张…②尹… III. 电磁兼容性—测试技术 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008)第 124677 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:10

字 数:237 千字

版 次:2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

定 价:18.00 元

前 言

随着科学技术的不断发展,电磁兼容这门综合性应用学科的重要性日益突出,并在国防、工业、民用等各个领域得到了广泛的重视和应用。本书首先介绍电磁兼容的基本概念和原理,其次围绕电子系统中的电磁兼容测试的设备、方法,测试的理念,数据处理技术,电磁兼容相关测试及电磁兼容技术应用等几个方面循序渐进地展开讨论,并注意反应电磁兼容测试技术的新成果和新方法,特别是在现代测试方法与技术新理念上进行了详细的阐述,对于锻炼和提高学生的发散思维和创新能力具有积极的意义。

本书主要是为大学电子类专业研究生和本科高年级学生编写的,每章的后面都附有一定量的习题。学习本书之前,学生应该具有电路与系统、电子线路、电磁场理论、微波技术与天线等方面的知识。对于研究生而言,可以把重点放在第3章和第6章上,书中相应的内容留有较大的拓展空间,可以供研究生开展专题讨论。为了便于电子工程技术人员使用,附录中专门增加了电磁兼容相关标准。

本书是在原有讲义的基础上进一步修订而成的,原有的讲义曾经过两届研究生的教学使用,书中的部分内容得益于与研究生的共同讨论,他们开阔的思路与新奇的问题为本书增添了色彩。

本书在编写过程中,得到甄蜀春教授的大力支持,提供了许多参考资料,杨国伟、王剑和麻来宣同志承担了大量校对工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者学识有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008年3月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电磁兼容测试简介	1
1.2 EMC 测试设备	2
1.2.1 电磁干扰测试设备	2
1.2.2 电磁敏感度测试设备	10
1.3 国内外 EMC 测试的现状	15
习题 1	16
第 2 章 电磁兼容基础	18
2.1 电磁兼容基本概念	18
2.2 电磁干扰源	18
2.2.1 自然干扰源	18
2.2.2 人为干扰源	19
2.3 电磁干扰的传输途径	21
2.3.1 传导干扰	21
2.3.2 辐射干扰	25
2.4 电磁敏感性	32
2.4.1 电磁敏感性的有关标准和规范	32
2.4.2 系统和设备的敏感性现象	32
2.4.3 接收机的敏感性	34
2.4.4 电磁敏感性评定标准	36
2.5 电磁干扰的抑制	36
2.5.1 接地与搭接	36
2.5.2 屏蔽	37
2.5.3 滤波	38
习题 2	38
第 3 章 现代测试方法与技术新理念	39
3.1 测试技术新理念	39
3.1.1 一般的测试理念	39
3.1.2 现代测试思想与方法	40
3.2 测试方法的拓展	42
3.3 测试仪器的拓展	43

3.3.1	虚拟式测试仪器	43
3.3.2	现代网络测试系统	44
3.4	测试参数的拓展	46
	习题 3	48
第 4 章	测试和测量前的准备	50
4.1	测量场地	50
4.2	测量设备及环境的校准	51
4.2.1	对测试设备的要求	51
4.2.2	测试设备及环境的校准	52
4.3	电磁兼容标准	55
4.3.1	标准具体内容	56
4.3.2	国家电磁兼容体系	56
	习题 4	57
第 5 章	电磁兼容测量的一般方法	58
5.1	测试频率的选择原则及注意事项	58
5.1.1	测试频率的选择原则	58
5.1.2	测试应注意事项	59
5.2	干扰发射与干扰敏感度测试	59
5.2.1	传导干扰发射测试	59
5.2.2	辐射干扰发射测试	62
5.2.3	传导干扰敏感度测试	63
5.2.4	辐射干扰敏感度测试	67
5.2.5	静电放电敏感度测试	68
	习题 5	69
第 6 章	测试中的数据处理技术	70
6.1	数据处理中的几个重要原则	70
6.1.1	关于平等性的解说	70
6.1.2	正常性	73
6.1.3	约束性	75
6.1.4	简洁性	76
6.2	数据处理的一般方法	77
6.2.1	组合测量的数据处理	77
6.2.2	线性回归处理	82
6.2.3	基于人工神经网络的非线性回归	86
6.3	误差的处理	88
6.3.1	直接测量实验数据的误差分析处理	88

6.3.2	间接测量实验数据的误差分析处理	91
6.3.3	测量不确定度评定方法	94
6.3.4	测量次数较少情况下测量数据的处理	98
6.4	数据处理的应用	99
6.4.1	切比雪夫多项式回归分析方法在测量数据处理中的应用	99
6.4.2	累积法的基本原理及其在测量数据处理中的应用	100
6.4.3	天线方向图的数据处理	101
6.4.4	测试数据不完整时的处理	102
	习题 6	102
第 7 章	电磁兼容相关测试	104
7.1	EMC 相关测试概述	104
7.2	测试内容及方法	104
7.2.1	频率特性测试	104
7.2.2	屏蔽效能测试	105
7.2.3	天线耦合度测试	108
7.2.4	EMI 滤波器测试	109
7.2.5	互调性能测试	109
7.2.6	交调传导敏感度测试	110
7.2.7	无源互调产物测试	111
7.2.8	空间微放电现象测试	112
	习题 7	113
第 8 章	电磁兼容预测试及系统级测试	114
8.1	电磁兼容的预测试	114
8.2	系统级 EMC 试验	115
8.2.1	基本概念	115
8.2.2	试验内容	116
	习题 8	118
第 9 章	电磁兼容技术的应用	119
9.1	手机的辐射	119
9.2	生物电磁效应与应用	121
9.2.1	生物电和人体电磁兼容	121
9.2.2	电磁波的生物效应	123
9.2.3	电磁辐射危害人体的机理	124
9.3	电磁兼容性设计的要点	124
9.4	计算机电磁兼容性问题	128
9.5	电磁兼容在雷达系统中的实现	129

9.6 小波分析及其在雷达电磁兼容研究中的应用	131
习题 9	136
附录 电磁兼容相关标准	137

第 1 章 概 述

1.1 电磁兼容测试简介

电磁兼容(简称为 EMC)测试是指按照某种标准,对产品、设备、系统内部或之间的电磁兼容性指标的测试。

依据标准的不同,电磁兼容测试可分为传导发射测试、辐射发射测试、传导敏感度测试和辐射敏感度测试等。

传导发射测试主要考察在交、直流电源线上存在的、由被测设备产生的干扰信号,这类测试的频率范围通常在 25 Hz ~ 30 MHz。

辐射发射测试主要考察被测设备经空间发射的信号,这类测试的典型频率范围是 10 kHz ~ 1 GHz,但对于磁场测量要求低至 25 Hz,而对于工作在微波频段的设备,频率高端要测到 40 GHz。

辐射和传导敏感度测试主要是测量一个装置或产品防范干扰的能力。其区别在于前者干扰来源于辐射电磁场;后者干扰来源于电源线或数据线的电磁能量。

测试的基本步骤如下:

(1) 制定试验大纲和测试细则。用户方根据被测件的性质、用途分类提出测试要求,确定实验的等级、测试范围(如频段、场强等)、实用的标准、被测件的数量、工作的状态、敏感性监测的方法等,以指导实验的进行和设计。

(2) 确定所依据的标准。一般可依据产品的分类按照相应的测试标准进行。

(3) 交换试验接口信息。被测件进入实验室时,仪器的布置、监视设备的接入、电源的连接等都要有相应合理的安排。

(4) 检查测量仪器。测试前应对测量系统进行连接及功能性检查,以保证测试的精确。

(5) 分项测试。测试可允许不同被测件和不同测试项目交叉进行,但必须保证同一测试项目的测试条件不变。

(6) 出具报告。测试完毕,应对测试结果分析并形成报告。其中应包含:

- 1) 测试单位与送测单位名称;
- 2) 被测件名称、型号、数量、编号;
- 3) 测量时间、地点;
- 4) 测量项目依据标准;

- 5) 测试系统、仪器、装置名称、型号、检定证书号；
- 6) 测试连接图、测试条件；
- 7) 被测件工作状态,对所施加干扰的反应及敏感的现象；
- 8) 测试频点,所测干扰的幅/频曲线或时域波形图,施加的场强、电压、功率值；
- 9) 测试人员签字、审核、批准、盖章。

1.2 EMC 测试设备

电磁兼容测量领域有很多专用、特殊的设备。大致可分为两类:一类用于接收,使其与适当的传感器连接,可进行电磁干扰(EMI)测量;另一类用于模拟不同干扰源,通过适当的耦合/去耦合网络、传感器或天线,施加到被测设备上,以进行敏感度测量。

1.2.1 电磁干扰测试设备

一、测试接收机

测试接收机是用来测试射频功率的幅度和频率的,它所接收的可能是干扰也可能是信号的载波。其组成可由图 1.1 表示。

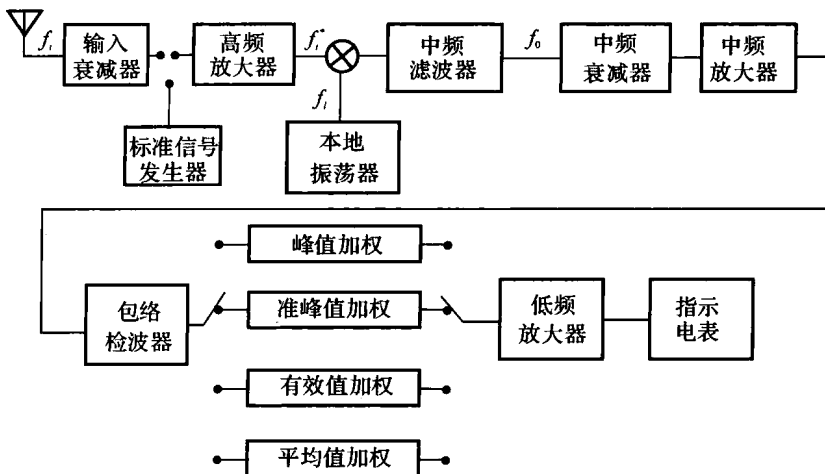


图 1.1 测试接收机的组成图

其工作原理是,接收机测量信号时,先将仪器调谐到某个测量频率 f_i ,该频率经高频衰减器和高频放大器后进入混频器,与本地振荡器的频率 f_i 混频,产生很多混频信号。经中频滤波器后仅得到中频 $f_0 = f_i - f_i$ 。中频信号经中频衰减器、中频放大器后由包络检波器进行包络检波,滤去中频,得到低频信号 $A(t)$ 。 $A(t)$ 再进一步进行加权检波,根据需要选择检波器,得到

$A(t)$ 的峰值、有效值、平均值或准峰值。这些数值经过低频放大后可推动电表指示或在数码管屏幕显示出来。

测试接收机技术要求如下：

- (1) 幅度精度 ± 2 dB。
- (2) 6 dB 带宽。

	频率范围	带宽
国际 EMI 测试：	9 ~ 150 kHz	200 Hz
	150 kHz ~ 30 MHz	9 kHz
	30 ~ 1 000 MHz	120 kHz
国军标 EMI 测试：	25 Hz ~ 1 kHz	10 Hz
	1 ~ 10 kHz	100 Hz
	10 ~ 250 kHz	1 kHz
	250 kHz ~ 30 MHz	10 kHz
	30 MHz ~ 1 GHz	100 kHz
	> 1 GHz	1 MHz

(3) 检波器：峰值、准峰值、有效值和平均值检波器。

(4) 输入阻抗 50 Ω 。

(5) 灵敏度。优于 -30 dB μ V(典型值)。

为满足脉冲测量的需要，接收机还应具有预选器，即输入滤波器，对接收信号频率进行调谐跟踪，以避免前端混频器上的宽带噪声过载。检波主要分以下几种：

(1) 峰值检波。是检测干扰信号包络的最大值，而忽略干扰信号的频率，它只和干扰信号的幅度有关，与时间、频率无关。

(2) 准峰值检波。同时反映干扰信号的幅度和时间分布，是国际无线电干扰特别委员会 CISPR 的电磁兼容性规范采用的检波方式。

(3) 平均值检波。测试干扰信号包络的平均值，主要用于测量窄带的连续波。

(4) 有效值检波。这种又称均方根检波，是测量干扰信号包络有效值，主要用于测量电磁干扰对通信的影响。

具体如何选择检波方式应根据被测干扰源的性质、所需保护对象以及相应的测试规范来确定选用哪种检波器。

二、频谱分析仪

频谱分析仪是显示被测信号能量与频率间函数关系的测量仪器。通常根据测试信号频带的宽度，分为宽带频谱分析仪和全景频谱分析仪。

三、电磁干扰测试附件

1. 电流探头

电流探头是测量线上非对称干扰电流的卡式电流传感器,测量时不需与被测的电源导线导电接触,也不用改变电路结构,对复杂的导线系统、电子线路等的干扰进行测量。电流探头为圆环形卡式结构,如图 1.2 所示。

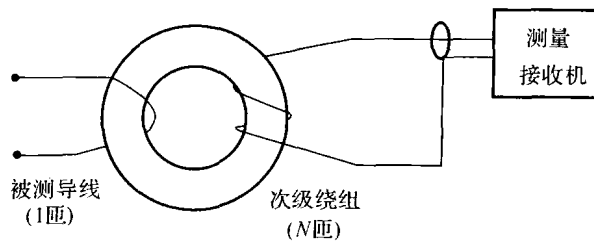


图 1.2 圆环形卡式电流探头

电流探头使用时,需先测出其传输阻抗,然后才能用于传导干扰测量。

其技术指标如下:

测量频段:20 Hz ~ 30 MHz;

输出阻抗:50 Ω ;

内环尺寸:32 ~ 67 mm。

2. 电源阻抗稳定网络

电源阻抗稳定网络的作用是,在射频范围内向被测设备提供一个稳定的阻抗,并将被测设备与电网上的高频干扰隔离开,然后将干扰电压耦合到接收机上。

其对每根电源线提供三个端口,分别为供电电源输入端、到被测设备的电源输出端、连接测量设备的干扰输出端。电源阻抗稳定网络结构如图 1.3 所示。

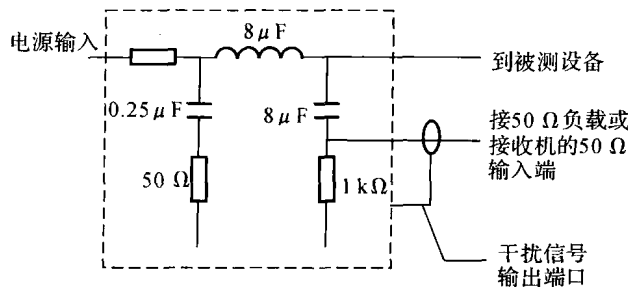


图 1.3 电源阻抗稳定网络结构图

电源阻抗稳定网络的阻抗是指干扰信号输出端接 $50\ \Omega$ 负载阻抗时,在设备端测得的相对于参考地的阻抗的模。当干扰输出端没有与测量接收机相连接时,该输出端应接 $50\ \Omega$ 负载阻抗。除阻抗参数外,电容修正系数也是其重要参数,用于将接收机测量的端口电压,转换成被测电源线上的干扰电压。

3. 测量天线

对 EMC 测试天线来说,接收指的是测量不希望有的辐射发射、而“发射”指的产生用于敏感度试验的电磁场。严格地讲,任何发射天线都可以用于接收,但是,在很多接收场合中,有源天线额外的灵敏度几乎将所有的电子电路都转变成了开路电路。

一个很重要的问题是频率范围,在大多数的 EMC 测量中,所要求的频率范围远大于某一个天线的频率范围,实际上,由于带宽和天线尺寸的限制,在一次测试中使用 5 副天线来覆盖整个测试频段也并不少见。在很多情况下,频率低端足以低到需要两副天线:一副用来测量电场分量;另一副用来测量磁场分量。这种用法可以这样来解释,当测量距离采用绝对单位并且由测量标准规定了的时候,电磁场的分布就是源阻抗(可能未知)和以波长来表示的距离的函数。在“远场”区电磁场可认为具有平面波的特性,E 场分量和 H 场分量可由自由空间的波阻抗 $377\ \Omega$ 联系起来。由此,可由场功率,E 场和 H 场三个变量中已知任两个求得第三个变量。在“近场”区中就没有这种固定关系存在,近场区中任一点的波阻抗介于未知的源阻抗和已知的自由空间波阻抗之间,由于波阻抗未知,因此就需要分别测量 E 场和 H 场,然后计算功率(还可以计算出这一点的波阻抗并推出源阻抗,这种计算对诊断出有害辐射的实际源很有用处)。

选择 EMC 测试天线,首先必须明确以下问题:对发射天线和接收天线的要求是什么?频率范围是多少?最小可接受的增益是多少?可接受的天线的最大尺寸是多少?还要使用几副天线?每副天线的频率范围和增益是多大?每副天线是否都分别进行了校准?获得的数据是否满足测试者的需要?结果以哪种形式表示最合适?是否可从厂家获得必要的帮助?测试配置的总花费是多少?是否在预算范围之内?等等诸多问题。

下面对各种不同测量天线作一详细介绍:

(1) 磁场天线。磁场天线用于接收被测设备工作时泄漏的磁场、空间电磁环境的磁场及测量屏蔽室的磁场屏蔽效能。测量频段为 $25\ \text{Hz} \sim 30\ \text{MHz}$ 。

根据用途的不同,天线类型分为有源环天线和无源环天线。通常有源环天线适合于测量空间的弱小磁场;而用于近距离测量设备工作时泄漏的磁场通常用无源环天线,与有源环天线相比,无源环天线的尺寸较小。

一般环天线的参数如下:

1) 有源环天线。

测量频段: $10\ \text{kHz} \sim 30\ \text{MHz}$;

增益: $85 \sim 125\ \text{dB}$;

灵敏度: $-1\ \text{dB}(\mu\text{A}/\text{m}), 10\ \text{kHz}$;

— 42dB($\mu\text{A}/\text{m}$), 1MHz;

阻抗: 50 Ω ;

环直径: 60 cm。

2) 无源环天线。

测量频段: 10 Hz ~ 100 kHz;

匝数: 36 匝;

环直径: 13.3 cm;

导线规格: $7 \times \varphi 0.07$ mm

屏蔽: 静电。

(2) 电场天线。电场天线用于接收被测设备工作时泄漏的电场、环境电磁场及测量屏蔽室(体)的电场屏蔽效能, 测量频段为 10 kHz ~ 40 GHz。天线分为有源和无源天线。

下面介绍几种常见的电场天线:

1) 杆天线。天线杆长 1 m, 用于测量 10 kHz ~ 30 MHz 频段的电磁场, 形状为垂直的单极子天线, 由对称振子中间插入地网演变而来, 所以测试时一定要按天线的使用要求安装接地网。

一般技术指标如下:

频率范围: 10 kHz ~ 30 MHz;

天线输入端阻抗: 等效于 10 pF 容抗;

天线有效高度: 0.5 m;

输出端阻抗: 50 Ω 。

2) 双锥天线。双锥天线的形状与偶极子天线十分接近, 测量频段比偶极子天线宽, 且无需调谐, 适合与接收机配合组成自动测试、系统扫频测量; 可用于电磁发射测量和辐射敏感度测量。

典型技术指标:

频率范围: 30 ~ 300 MHz;

驻波比: ≤ 2.0 ;

最大连续波功率: 50 W;

输出端阻抗: 50 Ω ;

峰值功率: 200 W。

3) 半波振子天线。半波振子主要由一对天线振子、平衡 / 不平衡变换器及输出端口组成。可将振子长度调到适当的半波长, 同时调节平衡 / 不平衡变换器使天线的输出端具有小的电压驻波比。

半波振子技术指标:

增益: 2.15 dB;

阻抗: $73 + j42.5 \Omega$;

有效高度： $h_e = \lambda/\pi$, λ 为中心波长；

波瓣宽度： 78° 。

4) 对数周期天线。结构类似八木天线，上下两组振子，从长到短交错排列。对数周期性天线方向性较强，具有高增益、低驻波、宽频带的特点。对数周期天线适用于电磁干扰和电磁敏感度测量。

典型技术指标：

频率范围： $80 \sim 1\,000$ MHz；

驻波比： ≤ 1.5 ；

最大连续波功率： 50 W；

输出端阻抗： 50Ω 。

5) 双脊喇叭天线。双脊喇叭天线的上下两块喇叭板为铝板，铝板中间位置是扩展频段用的弧形凸状条，两侧为环氧玻璃纤维的覆铜板，并蚀刻成细条状，连接上下铝板。其为线极化天线，测量时通过调整托架改变极化方向；一般可用于 $0.5 \sim 18$ GHz 辐射发射和辐射敏感度测试。

典型技术指标：

频率范围： $0.5 \sim 1$ GHz 或 $1 \sim 18$ GHz；

驻波比： ≤ 1.5 ；

最大连续波功率： 50 W；

输出端阻抗： 50Ω 。

6) 喇叭天线。较为常见的是角锥喇叭，其使用频段通常由馈电口的波导尺寸决定，带宽比双脊喇叭窄，但方向性、驻波比及增益均优于双脊喇叭，在 1 GHz 以上高场强的辐射敏感度测量中使用高增益天线容易达到所需高场强值。

典型技术指标：

频率范围： $1 \sim 40$ GHz；(由多个天线覆盖)

驻波比： 1.5 左右；

最大连续波功率： $50 \sim 800$ W；

方向性： $10^\circ \sim 60^\circ$ 。

4. 功率吸收钳

它适用于吸收 $30 \sim 1\,000$ MHz 频段传导发射功率的测量。功率吸收钳由宽带射频电流变换器、宽带射频功率吸收体、被测设备引线的阻抗稳定器和吸收套筒组成。电流变换器与电流探头的作用相同；功率吸收体用于隔离电源与被测设备之间的功率传递；吸收套筒则防止被测设备与接收设备之间发生能量传递。测量时，功率吸收钳与辅助吸收钳配合使用。其组成如图 1.4 所示。

5. 天线塔与转台

辐射发射测试中，部分测量要求测量天线在离地面 $1 \sim 4$ m 的高度内可调节，以便在每一

个测量频点获得最大的场强值。同时测量过程中还需要转动被测设备,以便对最大的辐射面进行测量。所以,实验时,将被测设备置于一个转台上。

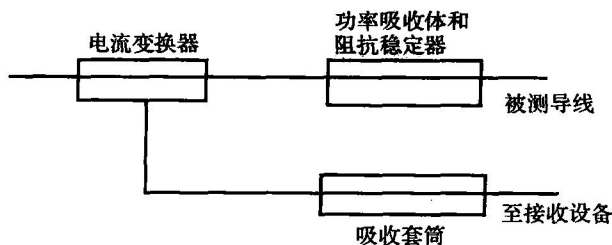


图 1.4 功率吸收钳使用原理图

天线塔由天线杆、升降装置、控制器组成,应具有自动化操作功能,控制简便,升降、定位精度高,其控制器可与转台共用,具有 GPIB 接口(GPIB 标准即 IEEE488 标准,是专为可编程仪器仪表设计的,通过该标准总线接口,不同厂家生产的各种不同仪器设备可以方便地组合成为一个完整统一的测试系统),可方便地加入各种测试系统中。

转台由台板、传动装置与控制器组成,直径一般为 1.2 m。转台表面可以是金属,也可以是非金属的。其控制电路部分要求有良好的屏蔽,以降低不必要的电磁泄漏,使实验不受环境电平的影响。

下面以中国航天 203 所生产的 BIRMM 型天线塔和转台为例,介绍天线塔及转台基本参数。

BIRMM 天线塔: BIRMM 天线塔的外观如图 1.5 所示。

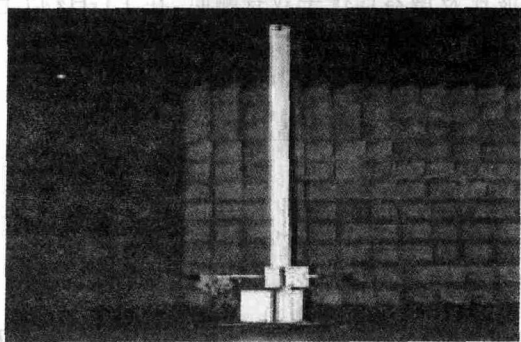


图 1.5 BIRMM 天线塔

BIRMM 天线塔可用于电磁兼容性测量、天线方向图测量等。该装置具有操作灵活简便,移动精度高,可通过 IEEE488 接口进行程控等特点,可以很方便地加入各种自动测试系统。由于控制器与天线塔之间的控制线缆采用光纤,而且采取了其他一些技术措施,使得天线塔的电磁发射大为减少,也不会因线缆穿过屏蔽室的屏蔽墙,破坏屏蔽室的屏蔽效能。

(1) 天线塔主要技术指标如下:

塔杆高度:6 m;

天线杆承重:15 kg;

控制线缆:光纤;

定位精度: $1\text{ cm} \pm 0.5\%$;

转速: $5\text{ m/min} \pm 10\%$;

电源电压:210 ~ 230 V, 50 Hz。

(2) 天线杆控制器主要技术指标如下:

显示:4 位 LED, 1 位状态位, 3 位数据位;

位移分辨率:1 cm;

信号通道:2 路光缆输入端, 4 路光缆输出端。

控制方式:手动方式, 前面板按键操作。

BIRMM 转台的外观如图 1.6 所示。

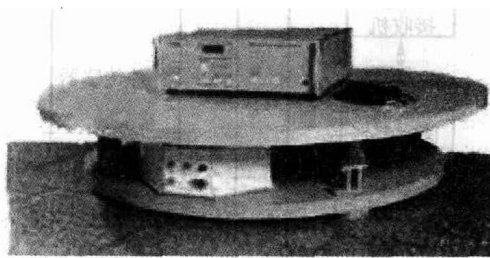


图 1.6 BIRMM 转台

(3) 转台主要指标:

台面直径:1.2 m

转台承重:250 kg;

转台精度: $\pm 1^\circ/\text{圈}$;

转速: $355^\circ \sim 365^\circ/\text{min}$;

控制线缆:光纤;

电源电压:210 ~ 230 V;

功率:250 W。

(4) 转台控制器主要指标:

4 位 LED 指示:1 位状态位, 3 位数据位;

转角分辨率: 1° ;

信号通道:2 路光缆输入, 4 路光缆输出;

控制方式:手动方式;

通过面板操作程控方式;程控方式 GPIB 接口。