



高新科技译丛

Electromagnetic Reverberation Chambers

电磁混响室

【法】 Philippe Besnier Bernard Démoulin 著 范丽思 周星 译

WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

电磁混响室

Electromagnetic Reverberation Chambers

[法] Philippe Besnier 著
Bernard Démoulin 译
范丽思 周星



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-018 号

图书在版编目(CIP)数据

电磁混响室 / (法) 菲利普·贝塞纳尔
(Philippe Besnier), (法) 班纳德·戴姆林
(Bernard Démoulin) 著; 范丽思, 周星译. —北京:
国防工业出版社, 2017. 5

(高新科技译丛)

书名原文: Electromagnetic Reverberation Chambers
ISBN 978-7-118-10893-4

I. ①电... II. ①菲... ②班... ③范... ④周...
III. ①混响室—研究 IV. ①O423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 056398 号

Electromagnetic Reverberation Chambers by Philippe Besnier, Bernard Démoulin.

ISBN 978-1-84821-293-0

Copyright©ISTE Ltd 2011. All Rights Reserved. This translation published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 1/4 字数 305 千字

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

电磁混响室是继电波暗室、吉赫兹横电磁波传输 (GTEM) 室、开阔场之后提出的电磁兼容性测试新技术与新平台。混响室测试平台能以较小的输入功率产生较高的场强,产生的电磁环境与电子设备内部真实电磁场分布情况极为接近,是一种理想的电磁环境效应试验平台,非常适合用来开展电子装备的电磁环境效应和电磁防护加固研究。然而,国内混响室研究起步较晚,相关技术、理论还不很成熟,限制了我国混响室技术的应用和发展。为此,我们翻译了法国混响室领域资深专家 Philippe Besnier 教授的 *Electromagnetic Reverberation Chambers* 专著,相信本书的出版将为广大电磁兼容研究人员提供重要参考。

本书从统计理论和实践应用两方面对混响室进行了深入阐释。全书共分为三大部分:第 1~4 章论述混响室工作的物理机制;第 5~7 章讨论混响室的使用问题;第 8 章介绍有关混响室的近期研究工作。本书既可供从事电磁兼容测试的工程技术人员参考,又可作为高等院校研究生教材。

衷心感谢对翻译出版此书做出贡献的所有人。潘晓东博士对全书做了审校,魏光辉教授对本书的翻译工作提出了诸多指导建议,在此对他们的付出表示感谢。

由于译者水平有限,难免存在不妥之处,恭请读者批评指正。

译者

序 言

很荣幸地受作者委托为本书作序。首先做一下自我介绍,我在那不勒斯市海军研究学院从事模式搅拌混响室领域的研究工作。得益于我的年龄优势,使我能够讲述早期混响室还没有被广泛研究时一些鲜为人知的事。令人高兴的是,目前许多国际会议中都已开设了有关混响室主题的分会场。

20 世纪 70 年代初期,微波已经在意大利普遍应用,但人们对其是否安全仍有些担心。在 1974 年和 1975 年,有人咨询我们如何测量电磁辐射,当时我们正在研究如何从噪声中提取有用信号,并研究这种技术在电磁场领域应用的可能性。因此,这种通过晃动墙壁,甚至转动整个金属表面使得电磁辐射不相关的思想便显得顺理成章。

同时,在美国我们正在研究美国军用标准中屏蔽效能评估方法效率低的问题。标准中的方法是采用小型的谐振腔体,改变嵌入金属片置入的深度可以改变腔体内调谐频率。基于同样的方法,使用金属片处于几个不同位置时测得的平均值来评估屏蔽效能便成为自然而然的事情。紧接着不再使用腔体,而是用屏蔽室来代替。这个研究团队由圣路易斯的 McDonnell Douglas 公司、美国 Dahlgren 的海军实验室和美国国家标准局组成。

第一篇关于混响室且有国际影响的文章发表于 1976 年,当时吸引了美国和英国的研究者到那不勒斯参观访问,同时也促成了 1977 年一场信息交流会在美国明尼阿波里斯市的 Litton 召开,由 D. Robertson 主持。当时我们对于搅拌器的搅拌模式有两种不同观点,即步进搅拌模式和连续搅拌模式。由于在测量过程中,搅拌器需要满足规定的采样率,这两种争论一直持续到今天。本书对此有详细讨论,在此不再赘述。让我们重新回到混响室发展历程这一主题上来。

1979 年,我通过改装一个旧屏蔽室,组建了美国标准局/美国标准化研究所第一个模式搅拌混响室。但是我们不应忘记,在美国的 McDonnell Douglas 公司、Dahlgren 的美国海军实验室以及其他地方混响室已经开始运行。虽然混响室的基本原理已经确定,但是我们有必要使专家们相信混响室测试方法的优势。为此,在 20 世纪 80 年代初,美国标准局/美国标准化研究所付出了巨大的努力。同时,

M. Crawford 也在宽频带内开展了一系列实验。这些实验结果刊登于美国标准局的技术说明书中,标志着混响室从先期的性能研究走向了实际应用阶段。最初考虑的混响室统计方程得到了进一步完善,混响室的应用领域也得到了进一步拓宽,国际标准也对其进行了考虑。在欧洲,混响室的研究也在同步进行:意大利完成了先期的研究工作之后,法国、英国、荷兰以及德国陆续开始了混响室的研究。这本专著不仅呈现了目前混响室的研究水平,同时也展示了混响室的主要发展方向。

总体来看,混响室的研究主要集中于两方面:一是混响室内电磁场的统计特性,主要用于没有物理建模条件下的分析评估;二是混响室的实际应用。尽管对混响室的研究已经进行了三十多年,但是相关的文献却非常少。这本专著,在理论和实践两方面对我们都有很大的帮助。最重要的是,它致力于从众多的文献中提取出混响室应用的本质原理。本书试图向我们说明,混响室的测试方法是简单的,并且混响室的使用也不难,但它也没有忘记提醒读者混响室最基本的操作机理和使用限制。尽管作者在混响室领域具有很深的造诣,但是为了使读者能够全面地了解混响室的运行机理,他们将自己连同读者一起置于只懂电磁学基础知识的起点。然后,读者被渐渐带入到更高的境界。这是一个非常困难的过程,然而作者却很完美地做到了,感谢他们的知识和他们在此领域的努力。

这本书是完美和完整的,但是我更是从它承担的任务本身来欣赏它。这本书满足了中等知识水平读者的需要,它可以被任何没有机会了解模式搅拌混响室的人使用。这本书将促进混响室测试系统的广泛使用及新的应用领域的开拓,这也是本书要讨论的一个主题。非常感谢作者撰写这样一本能够帮助更好理解和把握电磁混响室主题的书,并且没有炫耀他们的知识和他们的科研成果,而是贯穿于全书中。这对于研究者来说是一种牺牲,尤其是考虑到 Lille 和 Rennes 研究小组对混响室理论和实验研究已取得的突出成果,并且一直为之做出了巨大的贡献。

那不勒斯市 Parthenope 大学

Paolo Corona 教授

2011 年 7 月

前言

写这本书的初衷是源于参加了一次关于混响室的会议。我很喜欢和这个领域的专家们详细地讨论关于混响室的诸多科学问题。我很高兴有机会感谢法国、欧洲乃至全世界为混响室做出突出贡献的工程师和研究者,是他们不断地丰富着关于混响室的理论和知识。

这本书受益于比利时 Ghent 大学 Daniël De Zutter 教授和法国国家科学研究中心 Xlim 实验室主任 Alain Reineix。他们极负责任地仔细校对了本书的初稿,他们的点评帮助我们弄明白了很多问题,这也将有益于所有读者。我们对他们的帮助表示深深的感谢。

我们还要感谢意大利那不勒斯市 Parthenope 大学的 Paolo Corona 教授,很荣幸地邀请到 Paolo 教授为本书作序,并为我们提供了混响室发展历史的一些相关证据。

目 录

绪论	1
第 1 章 混响室在电磁测试中的地位	5
1.1 引言	5
1.2 电磁场与平面波	5
1.2.1 平面波的定义与特性	6
1.2.2 平面波的通用表达式	8
1.2.3 远场的局部平面波近似处理	9
1.2.4 平面波产生的感应现象	10
1.3 有限空间内的电磁测试	12
1.3.1 小矩形环的辐射发射	13
1.3.2 在 TEM 室进行测试	14
1.3.3 在屏蔽暗室进行测量	17
1.3.4 混响室在有限空间测试中的地位	18
1.4 讨论	20
1.4.1 平面波概念的运用	20
1.4.2 混响室测量的不确定度限值	20
1.5 参考文献	21
第 2 章 电磁腔体的主要物理特性	22
2.1 引言	22
2.2 一维腔体内模数的减少	22
2.2.1 一维腔体模型	22
2.2.2 一维波动方程求解	23
2.2.3 本征模计算	24
2.2.4 腔体与 LC 谐振网络比较	26
2.2.5 品质因数对腔体的贡献	27

2.2.6	本征模状态下能量耦合优化	29
2.2.7	障碍物引起的本征模频率偏差	30
2.2.8	模式搅拌的实现方法	31
2.3	空矩形腔体的物理特征	31
2.3.1	混响室的结构描述	31
2.3.2	计算本征模频率	32
2.3.3	第一阶本征模	33
2.3.4	高次模	34
2.3.5	本征模间隔与模密度	36
2.3.6	三维腔体的品质因数	37
2.3.7	腔体的激励条件	40
2.3.8	平面波谱	43
2.3.9	能量损耗对平面波频谱的影响	45
2.4	三维模式搅拌腔体	46
2.4.1	模式搅拌的作用	46
2.4.2	机械搅拌	47
2.4.3	实验验证模偏移	49
2.5	讨论	51
2.5.1	关于混响室几何结构的讨论	51
2.5.2	关于RLC振荡器应用	52
2.5.3	关于模干涉因素的讨论	52
2.6	参考文献	53
第3章	超大尺寸腔体内搅拌波的统计特性	55
3.1	引言	55
3.2	理想随机电磁场的描述	56
3.2.1	电磁场假定为一个随机变量	56
3.2.2	理想随机场假定的基本条件	57
3.2.3	随机变量的通用表达式	58
3.2.4	χ^2 概率分布	59
3.2.5	场振幅绝对值的概率密度函数	59
3.2.6	功率变量的概率密度函数	60
3.3	理想随机场特性的仿真	61
3.3.1	平面波谱的构建	61

3.3.2	随机试验干涉波的构建	63
3.3.3	中心极限定理的运用	65
3.4	统计检验	66
3.4.1	给定条件下统计采样值 N 的取值	67
3.4.2	实验数据的概率分布估计	69
3.4.3	方差与均值的估计	71
3.4.4	柯尔莫哥洛夫 - 斯摩洛夫 (K-S) 检验	73
3.5	混响室内的功率平衡	76
3.5.1	天线主要特性回顾	77
3.5.2	理想随机场中的接收天线	78
3.5.3	混响室中设备辐射功率的测量	81
3.6	讨论	82
3.6.1	关于理想随机场假设	82
3.6.2	关于用平面波实验来模拟无序场	82
3.7	参考文献	83
第 4 章	混响室物理与技术参数的影响	85
4.1	引言	85
4.2	混响室主要设计参数	86
4.2.1	腔室结构参数	86
4.2.2	混响室几何和物理参数的影响	86
4.2.3	混响室品质因数影响因素	88
4.2.4	理想随机场分布的空间相关性	93
4.3	常用模式搅拌技术	95
4.3.1	机械搅拌	95
4.3.2	频率搅拌和电子搅拌	98
4.3.3	切换发射天线搅拌	101
4.3.4	调整腔室尺寸搅拌方法	101
4.4	混响室特性	103
4.4.1	混响室特性描述的目的	103
4.4.2	模式搅拌的效率	103
4.4.3	随机场分布的稳定性测量	106
4.4.4	品质因数测量	111
4.4.5	最低可用频率的局限性	115

4.5	讨论	117
4.5.1	关于大数法则	117
4.5.2	大体积被测物的影响	118
4.6	参考文献	119
第5章	混响室抗扰度测试	120
5.1	引言	120
5.2	校准过程	120
5.2.1	场分布统计均匀性测量方法	121
5.3	校准结果实例	128
5.4	混响室内设备辐射抗扰度实施方法	131
5.4.1	受试设备的加载效应	131
5.4.2	EUT 对场统计均匀性的影响	133
5.4.3	EUT 误动作观测	134
5.4.4	抗扰度测试实例	134
5.5	混响室与电波暗室抗扰度实验比较	137
5.5.1	电波暗室辐射抗扰度辐照方法	137
5.5.2	混响室辐射抗扰度辐照方法	139
5.6	混响室内电场正交分量和总电场	141
5.7	讨论	142
5.7.1	不同标准的统计均匀性限值	142
5.7.2	不同标准搅拌器步数的选择	143
5.7.3	混响室内抗扰度测试的特性	143
5.8	参考文献	143
第6章	混响室辐射发射测试	145
6.1	引言	145
6.2	几个电磁辐射和天线的概念	145
6.2.1	电磁辐射源	145
6.2.2	电磁场与辐射源距离之间的关系	146
6.2.3	电磁辐射强度和方向性	147
6.2.4	极化和局部方向性	148
6.2.5	天线的效率和增益	149
6.2.6	天线有效面积	150

6.2.7	两个天线之间的能量传递平衡——弗利斯表达式	151
6.2.8	球坐标系辐射公式和特性	151
6.3	测量自由空间总辐射功率	154
6.3.1	定义	154
6.3.2	总辐射功率传统测试方法	155
6.4	受试设备无意发射测量	156
6.4.1	混响室校准与总辐射功率测量	159
6.5	总辐射发射功率测量实例	163
6.5.1	校准过程	163
6.5.2	EUT 辐射发射测量	165
6.6	辐射发射和总辐射发射功率	167
6.7	天线效率和分集增益测量	169
6.7.1	天线效率测量	169
6.7.2	天线分集增益测量	170
6.8	讨论	171
6.8.1	关于混响室内辐射发射测量	171
6.8.2	关于混响室内射频设备测量	171
6.9	参考文献	171
第7章	混响室屏蔽效能测量	173
7.1	引言	173
7.2	屏蔽效能的定义	174
7.2.1	电缆及连接器的屏蔽效能	174
7.2.2	屏蔽箱体屏蔽效能	176
7.2.3	屏蔽材料屏蔽效能	176
7.3	混响室内屏蔽电缆连接器屏蔽效能测量	178
7.3.1	混响室内电缆电磁耦合	178
7.3.2	电缆和屏蔽连接器的有效面积	180
7.3.3	参考功率与被测电缆感应电流之间的关系	183
7.3.4	屏蔽衰减与转移阻抗之间的转换	184
7.3.5	电缆连接器屏蔽效能测量实例	185
7.4	屏蔽腔体屏蔽效能测量	187
7.4.1	屏蔽腔体电磁耦合	187
7.4.2	屏蔽腔体衰减测量实例	188

7.5	屏蔽材料屏蔽效能测量	191
7.5.1	被测材料尺寸与波长比较	191
7.5.2	屏蔽材料衰减测量实例	193
7.6	讨论	197
7.6.1	屏蔽材料屏蔽衰减测量精确度	197
7.6.2	屏蔽衰减记录曲线	198
7.7	参考文献	198
第8章	模式搅拌混响室:研究工具	201
8.1	引言	201
8.2	非理想随机电磁场	202
8.2.1	混响室内电场正交分量的统计估计	203
8.2.2	替代分布函数:韦布尔函数	207
8.3	测量结果相关性研究	210
8.3.1	相关性和统计不确定度	210
8.3.2	相关性测量	210
8.3.3	线性相关实验估计研究	211
8.3.4	线性相关系数的统计分布	212
8.3.5	相关函数的正态分布近似估计	213
8.3.6	残余相关及其对混响室测量复现性的影响	215
8.4	混响室内反射场和相干场的量化	217
8.4.1	混响室内相干场与莱斯统计	218
8.4.2	混响室内莱斯分布的拟合优度检验	219
8.4.3	混响室内莱斯信道评估实例	220
8.5	讨论	222
8.6	参考文献	223
附录1	概率论概念	226
A1.1	随机变量	226
A1.2	概率的直观理解	226
A1.3	概率密度函数	226
A1.4	统计矩	227
A1.4.1	计算随机变量 x 的矩	227
A1.4.2	计算随机变量 x 二阶矩	227

A1.5	中心化变量和归一化变量	227
A1.5.1	中心化变量	227
A1.5.2	归一化变量	228
A1.6	方差和标准偏差	228
A1.6.1	方差的定义	228
A1.6.2	标准偏差的定义	228
A1.7	概率分布	228
A1.7.1	均匀概率分布	228
A1.7.2	正态分布	229
A1.8	累计概率分布	229
A1.9	各态遍历性	229
A1.9.1	各态遍历性定义	229
A1.9.2	用遍历性计算自相关函数	230
A1.10	随机稳态特性	231
A1.11	特征函数	231
A1.12	几种典型概率分布	232
A1.12.1	均匀分布	232
A1.12.2	正态分布	233
A1.12.3	χ^2 分布	233
A1.12.4	韦布尔分布	233
A1.12.5	指数分布	233
A1.12.6	瑞利分布	234
A1.13	正态分布积分表	234
A1.13.1	计算积分	234
A1.13.2	积分方程的解	235
A1.14	参考文献	235
附录 2	矩形腔体品质因数公式	236
A2.1	TM_{mnp} 模品质因数	236
A2.2	计算平均品质因数 $\tilde{Q}$	236
A2.3	参考文献	238
附录 3	总场和总功率变量	239
A3.1	总场变量	239

A3.2	总场的 χ^2 分布	239
A3.3	总场的概率密度函数	240
A3.3.1	归一化总场变量 e_i 的概率密度函数	240
A3.3.2	总场强绝对幅值 E_i 的概率密度函数	240
A3.4	计算总场的平均值	240
A3.4.1	归一化总场强 e_i 的平均估计	240
A3.4.2	总场强 E_i 绝对值的平均估计	240
A3.5	总功率的概率密度函数	241
A3.5.1	总功率 p_i 变量	241
A3.5.2	计算总功率的概率密度函数	241
A3.5.3	归一化总功率变量 p_{ir}	241
A3.5.4	计算归一化总功率的概率密度函数	241
A3.6	计算总功率平均值	242
A3.6.1	归一化总功率 p_{ir} 的平均值	242
A3.6.2	总功率的平均值	242
附录 4	计算变量 v_φ 、 v_η 和 v_θ 的方差	243
A4.1	变量 v_φ 和 v_η 的方差	243
A4.2	变量 v_θ 的方差	243
附录 5	电偶极子完整公式	245
A5.1	电偶极子公式	245
A5.2	电偶极子近场公式	246
A5.3	电偶极子的远场公式	246
A5.4	参考文献	246

绪 论

在介绍本书的内容和动机之前,我们先对混响室在电磁学领域的问世过程做一个简要的回顾。

第一次将电磁波限制在一个混响室内的实验大约在 1976 年,我们可以从意大利那不勒斯海军研究学院的 Paolo Corona 教授出版的论文里面找到有关实验的细节。这些先驱工作的首要目的是测量射频源的辐射发射,后来证明这种方法测量的是物体发射的总辐射功率。这个时期有两种有争议的理论:一种认为混响室里电磁功率主要取决于机械装置的谐振;另一种认为发射可视为黑体的辐射,黑体是从统计热力学引入的概念[*COR 76a, COR 76b, COR 02*]。

在美国,将先期研究与 Paolo Corona 教授的实验相结合,混响室的研究取得了进展。1980 年左右,美国国家标准与技术研究院建造了混响室,借鉴统计分析学,建立了模式搅拌理论。我们可以在很多出版物中找到这种方法,比较著名的有 M. Crawford, G. Koepke, T. Lehman 等发表的论文。这种物理统计分析方法在接下来的 20 年里被 D. A. Hill, J. Ladbury, L. Arnaut, L. Jansson, M. Bäckström 以及其他科研工作者不断完善,并发表了多篇论文[*ARN 02, CRA 74, CRA 86, HIL 94, JAN 99, LEH 91, LEH 97*]。

混响室在这种背景下设计出来,主要用于电磁兼容测量。事实上,在这期间,混响室首先在连接器的衰减和电缆的屏蔽效能测量方面得到了初步应用,其涉及的频率从几百兆赫兹延伸到几十吉赫兹。众所周知,随着波长的减小,发射和接收天线尺寸的减小,这使得某些受限技术更适合在混响室内应用。我们可以设计相对于波长为电大尺寸的腔体来提高混响室的性能,通过控制一个模搅拌器产生随机大小和方向的场。与自由空间测量不同,这种方法为被试物体提供了随机的电磁场环境。除了随机因素外,由于谐振作用还能够产生高场强环境,使得混响室立即被抗扰度和敏感度测试采用[*WAR 96*]。

同时,在美国海军水面作战中心 M. Hatfield 的努力下,混响室测试方法进入了国际标准,也就是当前公认的国际电工委员会(IEC)标准和航空标准[*HAT 00*]。

现在,混响室在法国和其他欧洲国家得到了广泛应用,且在很多重要的科学研

究中不断扩大应用领域。在法国,有数个混响室分布在一些大学;另外,在军事领域、汽车工业、航空领域也建立了混响室,同时应用于一些对射频生物效应感兴趣的研究。混响室的应用除了电磁兼容领域外,还为现代电信技术所用,因为它可以模拟产生多反射的环境[LIE 04]。

本书内容共分8章,从模式搅拌分析、场分布特性,到不同装置的测量实例的运用,进行循序渐进的描述。

本书由三大部分组成:

第1~4章论述混响室工作的物理机制。与其他测试方法一样,混响室测试也有测量误差,我们要力求量化场的幅度和随机特性。采取一维模型,我们比较容易理解本征模的产生机理,矩形混响室的本征模特性将在后面详细地说明,并运用模单元或模胞(modal cell)概念以及平面波的波谱概念来说明模式搅拌的原理,间接地建立不规则的场分布与平均误差容限幅度之间的关系。这部分内容较多地运用了D. A. Hill论文中的结论和示例。第3章总结统计检验方法,分别介绍了瑞利分布或指数分布概率密度函数,为分析理想场或功率分布提供了分析工具。第4章主要论述混响室的特性、模式搅拌过程,以及几个有关统计理论应用的实例,为场幅度校准做准备。

第5~7章讨论混响室的使用问题。其主要目的是与前面章节中论述的理论分析联系起来,并对在法国建立的几个混响室里进行的电子设备或部件的实验结果和现象进行深入的阐释。第5章主要论述汽车板级电子设备的抗扰度和敏感度实验。第6章主要介绍发射测量,将举例说明一个频谱分布在1GHz以上的辐射发射实验,主要分析在不同空间体积混响室内的测试结果。第7章专门介绍屏蔽效能测试,讨论了屏蔽电缆或连接器、屏蔽体、电磁屏蔽材料的衰减评估问题,并以一个同轴管的屏蔽效能测试为例进行详细说明。

第8章介绍有关混响室的近期研究工作。这部分主要讨论前面章节所述方法的一些物理局限性,而这些局限性经常被视为理想状态,比如说场分布,它的真实情况是处于完全的驻波周期模式分布和基于最大熵假设的完全无序分布状态之间。在该章中,测量结果证实了混响室并不是严格遵循随机场的模式,特别是接近混响室最低使用频率下限的时候,这个分析过程需要使用韦布尔(Weibull)概率密度函数。本书这部分的主题是如何获得统计独立的场或功率的数据,以期能够被混响室的相关研究采纳并改进。

本书中,作者在一些实例中反复强调他们认为重要的一些公式或其他情况。在第3章结尾部分,从计算混响室内一个受试物发射的总功率计算实例中我们可