

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

电磁辐射环境影响预测与测量

——理论、技术和方法

邹 澎 等 编著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

电磁辐射环境影响预测与测量

——理论、技术和方法

邹 彭 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍电磁辐射环境影响预测与测量的理论、技术和方法,是作者长期从事电磁环境研究、预测、测量、评价的技术总结,包含了作者近几年承担和完成国家社会公益项目“环境影响评价中电磁环境精确测量技术与精确预测系统的研究”的成果。本书分为两部分:第1篇(第1章至第7章)介绍电磁辐射环境影响预测计算,第2篇(第8章至第13章)介绍电磁辐射环境测量。本书在介绍电磁辐射环境影响预测与测量的理论、技术和方法的同时,重点研究和解决了目前电磁环境影响评价中的一些技术难题。

本书既可以作为从事电磁环境影响研究、评价、管理的科研和工程技术人员的参考书或培训教材,也可以作为高等院校环境类、电子类、电工类、通信、检测技术等相关专业研究生、本科高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁辐射环境影响预测与测量:理论、技术和方法 / 邹澎等编著. —北京:科学出版社,2013. 8

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-038159-0

I. 电… II. 邹… III. ①电磁辐射-环境影响-环境预测②电磁辐射-环境影响-环境测量 IV. ①X591

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 159604 号

责任编辑:孙 芳 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2013年7月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年7月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:389 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》

序言

我国作为一个发展中的人口大国,资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作,提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下,“十一五”环境保护工作成效显著,在经济增长超过预期的情况下,主要污染物减排任务超额完成,环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长,资源环境约束进一步强化,环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减,环境质量改善的压力不断加大,防范环境风险的压力持续增加,确保核与辐射安全的压力继续加大,应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点,解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题,确保环保工作不断上新台阶出亮点,必须充分依靠科技创新和科技进步,构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年,我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》(以下简称《规划纲要》),提出了建设创新型国家战略,科技事业进入了发展的快车道,环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求,原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会,出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》,确立了科技兴环保战略,建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来,在广大环境科技工作者的努力下,水体污染控制与治理科技重大专项启动实施,科技投入持续增加,科技创新能力显著增强;发布了502项新标准,现行国家标准达1263项,环境标准体系建设实现了跨越式发展;完成了100余项环保技术文件的制、修订工作,初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构,支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动,“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题,立足环境管理中的科技需

求,积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间,环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项,涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域,共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与,逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前,专项取得了重要研究成果,提出了一系列控制污染和改善环境质量技术的方案,形成一批环境监测预警和监督管理技术体系,研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术,提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议,为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果,及时总结项目组织管理经验,环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果,具有较强的学术性和实用性,可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版,在科技管理上也是一次很好的尝试,我们希望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长



2011 年 10 月

前 言

随着科学技术的发展,各种频率的电磁辐射设备越来越多地应用于生产和生活的各个领域,使空间各种频率的电磁辐射越来越强,电磁环境日趋恶化。据统计,全世界空间电磁辐射能量平均每年增长7%~14%,每10年空间电磁辐射能量可能将增加3.7倍。大量的实验和调查结果表明,较强的电磁辐射对人体健康有很大的影响,还可能诱发癌症,对各种电子设备的正常工作造成严重干扰。与大气污染、水污染、噪声污染一样,电磁辐射污染已经成为污染环境的第四大公害。

电磁辐射对环境的污染已经越来越引起各级政府部门的重视,我国的《国家环境保护“十一五”规划》已将“提高电磁辐射污染防治水平”作为重点领域,要求“建立和完善防治电磁辐射污染的法规和标准,加强电磁辐射环境影响评价。优化电磁场的空间分布,合理布局场源建设,防止人口稠密区的电磁辐射污染”。电磁辐射对环境的影响也越来越引起广大群众的重视,近年来,公众对电磁辐射影响的投诉增长很快,已经影响到一些工程项目的选址和建设,影响到社会的安定。

对电磁辐射的影响既不能忽视,也不能夸大。建设含有电磁辐射的项目时,如果忽视电磁辐射对环境的影响,可能引起周边群众的投诉,也可能就通不过环评。而过分夸大电磁辐射对环境的影响,不仅可能影响一些正常的利民工程建设(如通信基站、变电站),还可能在群众中制造恐慌情绪,影响社会的安定。判别电磁辐射危害的依据是国家标准,如果辐射场强远远低于国家标准中的限值,就可以相信对人体健康是无害的。

1997年3月,国家环保局发布18号令,颁布施行了《电磁辐射环境保护管理办法》。18号令规定:凡建设或者使用《电磁辐射建设项目和设备名录》中所列的电磁辐射建设项目或者设备,必须在建设项目申请立项前或者在购买设备前进行电磁辐射环境影响评价,进行电磁辐射环境影响评价的基础是对电磁环境的预测和测量。

国内目前在电磁环境影响评价中计算、预测大型电磁辐射源附近的电磁环境(包括中波广播、短波广播、电视、调频广播、微波发射、移动通信基站等)都是采用《辐射环境保护管理导则 电磁辐射监测仪器和方法》(HJ/T 10.2—1996)中介绍的理论公式。在这些公式中,一是没有考虑大型辐射源周围地形、地物的影响(如高大建筑物或建筑物群的分布等),都是假定发射天线是架设在平整、开阔的场地上;二是没有区分大型辐射源近区场和远区场计算方法的差别。所以,理论计算的结果和辐射源投入运行后实际场强分布的误差往往很大。例如,在计算、预测某一

中波广播发射塔附近的电磁环境影响时,计算结果和实际数据误差竟高达几百倍。因此,按照目前通用的方法正确预测城市中的电磁环境是很困难的。

本书深入研究了建立大型电磁辐射源周边三维仿真地形、地物模型的通用方法和在电磁环境预测模型中多径反射和多径衍射路径搜索的方法,以及大型电磁辐射源附近室内电磁环境的计算预测,中波广播发射天线周围近区、过渡区、远区的划分及近区和过渡区电磁环境计算预测,特高压输电系统电晕放电对地面工频电场的影响,利用激发函数法计算无线电干扰等,为精确计算预测大型电磁辐射源附近的电磁环境提供了方法和依据。

测量某一大型电磁辐射源附近的电磁环境,在某一频率测量时,背景噪声中的同频信号对测量结果的准确性影响很大,这种干扰与被测设备电磁辐射的频率相同,测量接收机是无法识别和区分的。例如,最近国内许多地方在作高压输电线路电磁辐射环境影响评价时,都发现有由于周边背景电磁噪声的影响,测量结果超过国家标准的现象,在这种情况下,利用现有的测量设备和技术无法确定被测高压输电线路对电磁辐射环境的影响,给电磁辐射环境的影响和管理带来很大的困难。

本书研究和解决了电磁辐射环境测量中的这一技术难题,采用信号处理技术和电磁测量方法去除测量信号中的同频干扰,还研究了射频电磁辐射环境中某一带宽内辐射场强的预测计算,实现电磁辐射环境的精确测量。

随着我国社会经济的发展,公众对电磁辐射环境影响评价的科学性、准确性的要求越来越高,必须通过深入研究对相关标准进行修订、完善,对电磁辐射对环境的影响作精确的预测和测量。

本书涉及一些电磁场的基本理论,限于篇幅,在第1章、第8章中没有介绍的内容,请参阅《电磁场和电磁波》教材。

本书撰写分工如下:第1.4节、第4.3节由周晓平副教授编写,第1.2节、第1.3节、第1.5节、第4.2.3节、第4.4节、第10.1.4节由马力博士编写,第2.2节由赵新灿副教授(博士)编写,第3.1节由黄子璇硕士编写,第10.6节由张延彬博士编写,第12章由李景泰高级工程师编写,其余内容由邹澎教授编写。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》序言
前言

第 1 篇 电磁辐射环境影响预测计算

第 1 章 电磁辐射基础	3
1.1 电磁辐射源	3
1.1.1 移动通信基站	3
1.1.2 高压输电系统	6
1.1.3 广播、电视发射塔	6
1.1.4 雷达	6
1.1.5 ISM 设备	7
1.1.6 电气化铁路	7
1.1.7 手机信号屏蔽器	7
1.1.8 手机	7
1.1.9 电磁辐射防护限值	8
1.2 电磁波的传播特性	9
1.2.1 电磁波的频率和频谱	9
1.2.2 电磁波的幅度	17
1.2.3 电磁波的带宽和波形	17
1.2.4 电磁波的极化特性	18
1.2.5 近区场和远区场	21
1.2.6 电磁波的传播和衰减	23
1.3 电磁辐射的预测计算	26
1.3.1 一些基本参数	26
1.3.2 地面波场强	26
1.3.3 视距传播信号的场强	28
1.3.4 ISM 设备的电磁泄漏场强	30
1.4 射线跟踪算法	31
1.4.1 反射和绕射	31
1.4.2 射线跟踪中的求交算法	32

1.4.3	射线跟踪中的反射点计算	35
1.4.4	射线跟踪中的绕射点计算	36
1.4.5	混合射线中反射点、绕射点计算	38
1.4.6	射线跟踪基本算法	39
1.4.7	多径射线的跟踪	41
1.5	电磁环境仿真	48
1.5.1	FDTD 基本方程	49
1.5.2	利用 FDTD 算法求解电磁环境的步骤	52
	参考文献	54
第 2 章	电磁辐射源周围地物环境的模拟	55
2.1	建筑物的等效电参数	55
2.1.1	建筑物等效电参数的参考值	55
2.1.2	利用开口同轴探头法测量建筑物的等效电参数	56
2.1.3	利用自由空间法测量建筑物的等效电参数	70
2.1.4	利用透射系数反演建筑物的等效电参数	75
2.2	建立大型电磁辐射源附近三维地形、地物模型的通用方法	76
2.2.1	电磁辐射源虚拟仿真系统基本原理	76
2.2.2	基本模型组件管理	80
2.2.3	母版建筑物模型装配	89
2.2.4	三维场景快速布局	94
	参考文献	107
第 3 章	高压输电线路电磁环境预测计算	109
3.1	高压交流输电线路电磁环境预测计算	109
3.1.1	工频电场预测计算	109
3.1.2	工频磁场预测计算	125
3.1.3	无线电干扰预测计算	129
3.2	高压直流输电系统电磁环境预测计算	137
3.2.1	合成场强	138
3.2.2	离子流密度	141
3.2.3	直流磁感应强度	142
3.2.4	无线电干扰	143
3.2.5	接地极及接地极线路环境影响预测和评价	143
3.3	电气化铁路电磁环境预测计算	144
3.3.1	工频电、磁场的预测计算模型	145
3.3.2	无线电干扰的预测计算模型	145

参考文献	146
第 4 章 通信基站电磁环境预测计算	148
4.1 通信基站的电磁辐射	148
4.1.1 主要的技术参数	148
4.1.2 智能天线的辐射	151
4.2 辐射场强计算	153
4.2.1 普通天线辐射场强的计算	153
4.2.2 智能天线辐射场强的计算	154
4.2.3 通信基站附近的防护距离	155
4.3 建筑物的影响	158
4.3.1 三套坐标系	158
4.3.2 射线基坐标系中的场强	159
4.3.3 不同坐标系统场强的转换	162
4.3.4 场强计算	163
4.4 室内电磁环境的预测计算	164
参考文献	168
第 5 章 中、短波广播发射电磁环境预测计算	169
5.1 中、短波广播发射天线	169
5.1.1 中波广播发射天线的结构	169
5.1.2 中波广播发射天线上的电流分布	169
5.1.3 短波广播发射天线	170
5.2 近区场和远区场	171
5.2.1 近区场的范围	171
5.2.2 远区场的范围	173
5.2.3 中间区分析	174
5.2.4 小结	178
5.3 中、短波广播发射电磁辐射场强	178
5.3.1 中波近区和中间区	178
5.3.2 辐射远区	184
参考文献	186
第 6 章 调频广播、电视广播发射电磁环境预测计算	187
6.1 调频广播、电视广播发射天线	187
6.1.1 蝙蝠翼天线	187
6.1.2 偶极板天线	190
6.1.3 环形反射板天线	193

6.2 广播发射电磁辐射场强	195
参考文献	196
第7章 微波辐射预测计算	197
7.1 雷达天线	197
7.2 计算平均发射功率	199
7.3 计算辐射功率密度	199
7.3.1 抛物面天线的近区、过渡区和远区	199
7.3.2 辐射功率密度	200
7.3.3 任意6分钟内的平均电磁辐射功率密度	201
7.3.4 计算瞬时峰值功率密度及安全防护距离	202
7.4 雷达天线周围建筑物限高	203
参考文献	203

第2篇 电磁辐射环境测量

第8章 天线基础	207
8.1 天线的辐射特性和主要参数	207
8.1.1 辐射方向性	207
8.1.2 天线的带宽	209
8.1.3 有效接收面积	210
8.1.4 天线的阻抗	210
8.1.5 天线系统的校准系数	210
8.2 接收天线	212
8.3 几种常用的天线	213
8.3.1 环形天线	213
8.3.2 对称振子天线	213
8.3.3 双锥天线	214
8.3.4 对数周期天线	214
8.3.5 三维正交偶极子天线	216
8.4 天线阵简介	216
参考文献	218
第9章 高压输变电系统电磁环境的测量	219
9.1 高压交流输变电系统电磁环境的测量	219
9.1.1 工频电场的测量	219
9.1.2 工频磁场的测量	225
9.1.3 无线电干扰的测量	225

9.2 高压直流输变电系统电磁环境的测量	226
9.2.1 地面合成场强的测量	226
9.2.2 地面离子流密度的测量	229
9.2.3 恒定磁场的测量	230
9.2.4 无线电干扰的测量	230
9.3 电气化铁路电磁环境的测量	230
9.3.1 工频电场、磁场的测量	230
9.3.2 GSM-R 通信基站电磁辐射的测量	231
9.3.3 无线电干扰的测量	231
参考文献	232
第 10 章 射频电磁辐射环境的测量	233
10.1 测量仪器和测量方法	233
10.1.1 测量仪器	233
10.1.2 连续波测量	238
10.1.3 脉冲信号测量	239
10.1.4 单频场强测量和某一带宽内综合场强的测量	240
10.2 中、短波广播发射电磁环境测量	244
10.2.1 地波测量	244
10.2.2 天波测量	244
10.3 调频广播、电视广播发射电磁环境测量	245
10.4 通信基站电磁环境测量	246
10.4.1 通信基站电磁环境测量	246
10.4.2 手机信号屏蔽器电磁辐射环境测量	247
10.5 微波辐射测量	247
10.6 去除电磁辐射环境测量中的背景噪声	247
10.6.1 电磁辐射环境测量中的背景噪声问题	247
10.6.2 自适应噪声抵消系统原理	248
10.6.3 自适应噪声抵消测量系统设计	252
10.6.4 自适应噪声抵消测量算法	253
10.6.5 利用电磁测量的方法去除背景噪声	254
参考文献	256
第 11 章 静态电、磁场的测量	257
11.1 静电场的测量	257
11.1.1 静电电位测量仪器	257
11.1.2 静电电位的测量	261

11.2 恒定磁场的测量·····	263
11.2.1 霍尔效应法·····	263
11.2.2 电磁感应法·····	266
参考文献·····	268
第12章 城市电磁环境监测网络 ·····	269
12.1 建立城市电磁环境监测网络的意义·····	269
12.2 监测系统设计·····	271
12.2.1 监测布点原则·····	271
12.2.2 监测网络的硬件设备·····	275
12.2.3 监测网络的软件功能·····	281
12.2.4 系统的运行及维护·····	285
12.3 城市电磁环境监测网络监测结果实例·····	288
12.3.1 城市电磁环境空间分布·····	288
12.3.2 城市电磁环境时间变化·····	289
参考文献·····	291
第13章 测量误差分析和数据处理 ·····	293
13.1 测量误差分析·····	293
13.1.1 测量误差的分类·····	293
13.1.2 误差的表示方法·····	301
13.1.3 误差的传递·····	303
13.2 数据处理·····	304
13.2.1 有效数字·····	304
13.2.2 有效数字的运算规则·····	305
13.2.3 测量结果的数据处理·····	305
参考文献·····	308
附录 电磁辐射建设项目和设备名录 ·····	309

第 1 篇 电磁辐射环境影响预测计算

第 1 章 电磁辐射基础

1.1 电磁辐射源

凡是产生电磁辐射或电磁泄漏的设备都是电磁辐射源。电磁辐射源的种类很多,根据国家环保部《电磁辐射建设项目和设备名录》(见附录),对环境影响比较大的电磁辐射源包括通信基站、高压输电线路、广播、电视发射塔、雷达、ISM 设备、电气化铁路等。

1.1.1 移动通信基站

移动通信基站是公众最关注的电磁辐射源,在城市中一般架设在楼顶,高度为十几米至几十米,发射功率一般是 20W(农村一般是 40W)。不同制式的通信基站的工作频段不同,如图 1.1 所示。各地运营商使用频段也略有不同,表 1.1 是某地移动通信运营商使用频段示例。

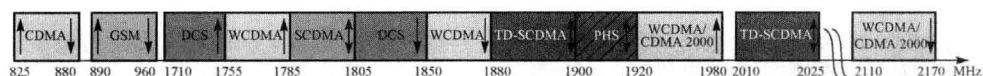


图 1.1 不同制式的通信基站的工作频段

表 1.1 不同制式通信基站的工作频段示例

类别	移动		联通	
	上行 (移动台发,基站收)	下行 (移动台收,基站发)	上行	下行
GSM900	890~908.8MHz	935~953.8MHz	909~915MHz	954~960MHz
GSM1800			1745~1755MHz	1840~1850MHz
WCDMA			1940~1950MHz	2130~2145MHz
TD-SCDMA	1880~1900MHz	2010~2025MHz		
类别	电信			
	上行	下行		
CDMA	825~835MHz	870~880MHz		

移动通信基站天线的架设方式有楼顶支撑杆(抱杆)、增高架、屋顶塔、落地杆塔、落地铁塔、美化天线及其他方式(如直接悬挂在建筑物外),如图 1.2~图 1.9

所示。城市中移动通信基站的密度比较大,一般 300~400m 之间就有一个。

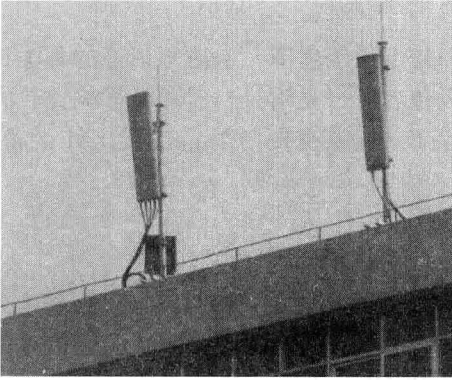


图 1.2 支撑杆

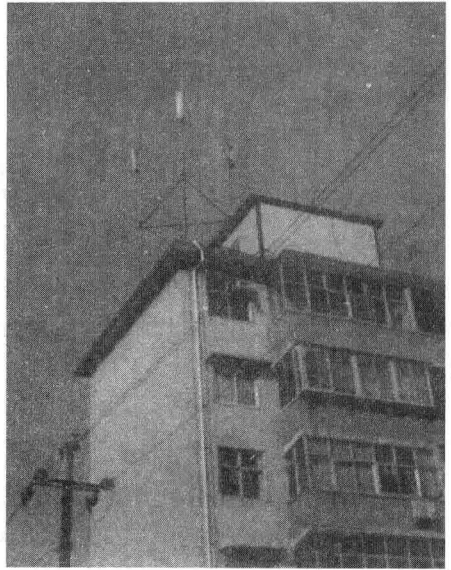


图 1.3 增高架

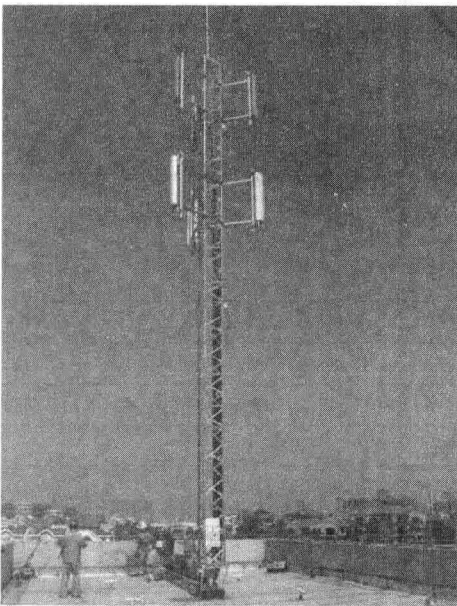


图 1.4 楼顶拉线塔



图 1.5 楼顶铁塔