

7671-1
100
1

计 量 培 训 教 材

无线电电子学计量

(上册)

国防科工委科技与质量司组织编写



A1031560

原 子 能 出 版 社

《计量培训教材》总编委会

总编审委员会

顾问：栾恩杰

主任：高志强

副主任：吴伟仁 马恒儒

委员：(按姓氏笔画排列)

白忠泉 朱春元 牟安成 孙忠慧 孙家辉 杨长利
宋森尧 庞海涛 柯 松 柴芙蓉 徐炳仑 韩 俊
傅 宽

总编辑委员会

总主编：马恒儒

副总主编：岳 峰 靳书元 宋素秀

委员：(按姓氏笔画排列)

王广顺 冯永祥 达道安 朱正辉 李淑敏 吴申贤
辛光和 张 辉 张东军 张铎清 陆治平 陈开来
金慧茹 赵守林 赵志祥 胡焕性 俞德飞 贾成武
徐建良 唐亮武 常文君 梁燕熙 童本敏 曾令儒
谢静谦 熊开国 潘陆原

总编委会办公室

主任：岳 峰

成员：(按姓氏笔画排列)

孔 玥 李宗扬 张 立 武晓雪 周 欣 常文君
游志红

第5卷《无线电电子学计量》编委会

编审委员会

主 任：韩 俊

副 主 任：王广顺 王志田 童本敏 韩立忠

委 员：(按姓氏笔画排列)

马蔚宇	邓明纫	杨秀杰	杨春涛	宋振国
沈 涛	张 立	张廷柱	张关汉	张铨清
陈大为	陈云梅	邵秋梅	赵守林	贾耀宗
徐德忠				

编辑委员会

主 编：王志田

副 主 编：韩立忠 张关汉 张廷柱

编 辑：(按姓氏笔画排列)

马蔚宇	邓明纫	叶德培	史晓峰	李效砚
杨秀杰	杨春涛	吴红森	吴远武	吴京燕
沈 涛	宋振国	张永敏	张国华	张素兰
陈大为	陈云梅	陈连启	武卫平	郑刚良
贾耀宗	徐德忠	翟 宏		

责任编辑：刘 朔

责任校对：徐淑惠 冯莲凤

版式设计：崔 彤

封面设计：李松林

总序

计量是关于测量的科学，它涉及测量理论、测量技术和测量实践等多个领域。计量是科学技术的一个重要组成部分，是与人类社会进步和科学技术发展同步发展的。现代计量是国民经济建设和国防建设中一项重要的技术基础，是一个国家、一个地区和一个行业发展的探测器。计量技术是科技创新的基础技术，又是高技术产业化发展的一个重要条件。

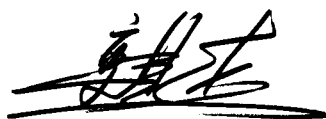
老一辈无产阶级革命家聂荣臻元帅曾经指出“科技要发展，计量须先行”。半个世纪以来，国防科技工业计量工作者同全国计量同行一道，自力更生、艰苦奋斗、勇于创新、拼搏进取，形成了学科门类比较齐全的计量体系，创造了辉煌业绩，积累了宝贵经验，不断丰富和发展着现代计量。进入21世纪，产品测量数据的准确性、可靠性、可追溯性及国际互认性都对计量技术水平提出了更高的要求，我们要加强计量技术研究和计量人才的建设，为加入WTO后我国国家计量体系的建立作出应有的贡献。

当今的时代是竞争的时代，而人才是竞争之本，以信息技术为代表的高新技术迅速发展，对计量人员的整体素质提出了更高的要求。因此，迫切需要培养一大批掌握高新计量技术的人才。《计量培训教材》的编撰和出版，将为培养和造就一支为国民经济和国防现代化建设服务的计量人才队伍作出应有的贡献。

《计量培训教材》是一部12卷共18册1280余万字的大型计量专业技术丛书，是我国第一部学科专业齐全的计量培训教材。前10卷涵盖现代计量学10大专业技术领域，后2卷介绍计量技术和计量管理的基础知识，不仅展现了国内外计量科研的最新成果，而且突出了我国计量工作的特色。它

的出版凝聚了国防科技工业众多专家和计量工作者多年的心血，是集体智慧的结晶。希望读者通过阅读这部丛书，能够熟悉计量基础知识，并在实践中掌握运用，在计量工作中取得更大的成绩。

社会在进步，科技在发展。我相信，随着高新技术应用研究的积极开展，新的技术和新的成果将会充实和丰富《计量培训教材》的内容；专家和读者对书中的不足提出的批评指正意见，将会补充和完善这部丛书的内容，使之成为广大计量工作者的良师益友。



2002年8月18日

前言

在计量学领域,无线电电子学(简称无线电)计量是一门新兴的学科。随着科学技术的进步,特别是微波技术、信号处理技术以及通讯技术等迅速发展,对无线电计量测试提出了许多新的要求,从而极大地推动了无线电计量测试技术的发展。目前,无线电计量测试已成为一门发展迅速、应用广泛、与许多行业密切相关、对现代科学技术发展有着巨大推动作用的学科,可以说,无线电计量测试的水平是一个国家现代科学技术与国防现代化水平的重要标志之一。

无线电计量测试,在十大计量专业中,属于参数(参量)最多的专业之一,其基本的和比较重要的参数就有近20个,还有一些与无线电测量设备相应的参量或综合参数。另外,随着电子技术的迅速发展,无线电计量测试的新参数还在不断涌现,原有的参数也在不断增添新的内容,如扩展量程范围,展宽频率覆盖范围等等。目前无线电计量测试的参数大致可分为如下几大类:

- (1) 信号强度的计量测试,如功率、电压、电场强度等;
- (2) 信号特性的计量测试,如波形参数、脉冲参数、调制参数、频谱、噪声、信噪比等;
- (3) 电路参量的计量测试,如阻抗或导纳、电阻或电导、电抗或电纳、电感、电容、品质因数等;
- (4) 网络特性的计量测试,如网络的反射参量(包括:反射系数、驻波比等)和传输参量(包括:衰减或增量、相移、群时延、电延时等);
- (5) 材料特性的计量测试,如介电常数 ϵ_r 、磁导率 μ_r 、损耗角正切 $\tan\delta$ 等,包括电磁性能、屏蔽性能、吸波性能和超导特性;
- (6) 电磁兼容性(EMC)计量测试;
- (7) 超低频参数的计量测试,如高动态测量用多通道记录仪、数字磁带记录仪、热敏记录仪等相关参数。

无线电计量测试除具有参数种类繁多的明显特点之外,还具有量程大、频带宽、影响量多、影响特性复杂以及测量标准投资大、运行周期短、更新换代快等特点。这些特点给无线电计量测试的开展带来了一定的困难,同时也对无线电计量测试技术人员提出了更高的要求。

本教材充分考虑了无线电计量测试技术发展迅速,参数种类繁多,且新的参数不断涌现的特点,结合计量检定员考核专业项目,对高频微波功率、高频微波噪声、衰减、微波阻抗、射频微波相位与群时延、脉冲参数、调制度参数、失真度、电压参数、超低频参数、场强与干扰、电磁兼容、信号发生器、校准接收机、频谱分析仪、集总参数电子元件阻抗、集成电路参数、半导体分立器件等考核专业项目,编写了相应的十八篇培训教材。这些教材是计量测试技术人员几十年计量培训工作的经验总结和技术研究工作的结晶,不仅包括了无线电专业计量检定员应该掌握和了解的基础知识、基本概念、基本测试方法和量传技术等,也包括了一些国内外较新的研究和应用成果。由于本卷教材的主要对象是从事无线电计量检定的人员,对所涉及的内容未作全面、深入地阐述,如果需要对某些内容更深入地了解,可查阅有关参考文献。

本卷编辑委员会的成员分别承担了本卷教材有关章节的编撰任务。在编写过程中得到了冯新善、翁昌瑜、张涛、郁月华、易本健、时万春、徐国英、冯桂山、孙建凤、王珂等同志的支持和帮助,有关单位和出版社给予了大力帮助,在此深表谢意。

由于本卷教材涉及的专业参数(参量)较多,加上编写者的经验和能力所限,差错和不妥之处敬请专家和读者批评指正。

第5卷《无线电电子学计量》编委会
2002年6月

第一篇 高频和微波功率计量

第一章 高频和微波功率计量的基础知识	3
第一节 高频和微波功率计量的基本概念	3
第二节 高频和微波功率的计量单位	7
思考题	8
第二章 常用的几种功率计	8
第一节 热敏电阻功率计	8
第二节 热电偶式功率计	11
第三节 半导体薄膜热电偶式功率计	12
第四节 晶体二极管式功率计	13
思考题	14
第三章 高频和微波功率计量标准的建立	15
第一节 量热式小功率标准	15
第二节 微量热式小功率标准	16
第三节 功率传递标准	18
第四节 中功率标准	19
第五节 计量标准的稳定性考核和重复性检验	21
第六节 高频和微波功率的量值传递	22
思考题	25
第四章 功率座的校准方法	26
第一节 交替比较法	26
第二节 传递标准法	29
第三节 六端口法	33
第四节 通过式功率座的校准	35
第五节 不同接头型式的功率座的校准	36
思考题	37
第五章 中、大功率的测量及功率计的校准方法	38
第一节 中、大功率计法	38
第二节 衰减器法	39

第三节	定向耦合器法	40
思考题	.....	42
第六章	射频脉冲峰值功率测量方法	42
第一节	脉冲功率计法	42
第二节	平均功率法	44
第三节	射频替代法	45
第四节	连续波比较法	46
第五节	取样比较法	47
思考题	.....	48
第七章	高频和微波功率测量与校准中应注意的问题	48
第一节	失配误差和失配不确定度	48
第二节	接头连接的重复性	49
第三节	环境温度的影响	50
第四节	功率测量中应注意的问题	50
思考题	.....	52
第八章	测量不确定度分析	52
第一节	功率标准装置的测量不确定度	52
第二节	功率校准结果的测量不确定度分析示例	54
思考题	.....	55
参考文献	.....	55

第二篇 高频微波噪声计量

第一章	高频微波噪声基础知识	59
第一节	基本概念	59
第二节	网络噪声特性表征	62
思考题	.....	67
第二章	噪声测量设备	68
第一节	噪声发生器	68
第二节	衰减器	72
第三节	指示器	73
思考题	.....	75
第三章	噪声测量方法	75
第一节	噪声测量原理	75



第二节	放大器噪声测量	82
思考题	.....	86
第四章	噪声发生器和噪声仪校准	86
第一节	中频衰减器法校准噪声发生器	87
第二节	手动噪声仪的校准	88
第三节	自动噪声仪的校准	89
思考题	.....	92
第五章	噪声计量标准和噪声量值传递	92
第一节	热噪声标准源和噪声比较装置	93
第二节	建标报告	96
第三节	噪声量值传递	97
第四节	国标、军标及检定规程	105
思考题	.....	107
参考文献	.....	108

第三篇 衰减计量

第一章	衰减计量的基础知识	111
第一节	衰减计量的主要参数	111
第二节	常用衰减器简介	116
思考题	.....	117
第二章	常用衰减器	117
第一节	电阻式衰减器	117
第二节	感应分压器式衰减器	120
第三节	截止式衰减器	121
第四节	回转式衰减器	122
第五节	波导吸收式衰减器	123
第六节	PIN 电调衰减器	124
思考题	.....	125
第三章	衰减测量与校准方法	125
第一节	射频替代法	125
第二节	中频替代法和低频替代法	127
第三节	功率比法	132
第四节	扫频法	133



第五节	信号幅度倍增法	134
第六节	时间间隔比法	135
思考题	.....	136
第四章	衰减测量中应注意的问题	137
第一节	失配误差	137
第二节	混频器非线性	142
第三节	噪声	143
第四节	信号泄漏和窜扰	143
第五节	连接的重复性	144
思考题	.....	144
第五章	衰减计量标准的建立和量值传递	145
第一节	计量标准的建立	145
第二节	量值传递	147
思考题	.....	149
第六章	衰减计量的测量不确定度分析	149
第一节	衰减标准装置的测量不确定度	150
第二节	衰减测量结果的测量不确定度	152
思考题	.....	154
参考文献	.....	154

第四篇 微波阻抗计量

第一章	微波阻抗基本概念	157
第一节	与阻抗计量有关的参数	157
第二节	阻抗与驻波比、反射系数之间的关系	160
第三节	微波网络中的散射参量	161
思考题	.....	162
第二章	微波阻抗标准器	162
第一节	特性阻抗标准器	162
第二节	反射系数标准器	163
思考题	.....	165
第三章	微波阻抗校准装置	165
第一节	开槽测量线	165
第二节	反射计	173



第三节	标量网络分析仪	178
第四节	矢量网络分析仪	186
第五节	六端口技术	193
思考题	.....	197
第四章	微波阻抗计量标准	198
第一节	计量标准的原理及组成	198
第二节	计量标准的重复性验证及稳定性考核	199
第三节	计量标准的不确定度评定	200
第四节	量值传递	201
第五节	国内外微波阻抗计量标准简介	203
思考题	.....	204
参考文献	.....	205

第五篇 射频微波相位与群时延计量

第一章	射频微波相位与群时延计量基础知识	209
第一节	与相移量有关的名词术语	209
第二节	与群时延有关的名词术语	210
第三节	相移和群时延的单位	211
思考题	.....	211
第二章	常用的移相器	211
第一节	伸缩线型移相器	212
第二节	移动介质片型移相器	212
第三节	反射型移相器	213
思考题	.....	214
第三章	相位测量方法	214
第一节	高频替代法	214
第二节	调制副载波法	216
第三节	频率变换法	218
第四节	相位测量的误差	222
思考题	.....	225
第四章	群时延测量方法	226
第一节	静态测量法	226
第二节	动态闭环测量法	228



第三节	群时延测量的误差	229
思考题	.....	232
第五章	相位计量标准	232
第一节	两厘米相位标准装置	233
第二节	中频相位标准装置	234
第三节	计量标准的重复性和稳定性考核	235
第四节	测量不确定度评定实例	236
第五节	量值传递	239
思考题	.....	240
参考文献	.....	240

第六篇 脉冲参数计量

第一章	脉冲参数基础知识	243
第一节	脉冲测量基本概念	243
第二节	脉冲参数表述	245
第三节	脉冲幅度确定方法	249
第四节	脉冲信号的频谱分析	251
第五节	脉冲参数间的转换关系	255
思考题	.....	257
第二章	示波器的基本原理	258
第一节	示波器的发展与分类	258
第二节	示波器计量参数介绍	260
第三节	模拟示波器的组成及工作原理	265
第四节	数字存储示波器	272
思考题	.....	282
第三章	示波器检定	282
第一节	示波器检定装置	282
第二节	模拟示波器的检定	285
第三节	数字存储示波器的计量检定	290
第四节	示波器检定的测量不确定度分析	293
思考题	.....	295
第四章	脉冲信号发生器检定	296
第一节	脉冲发生器的基本组成及工作原理	296



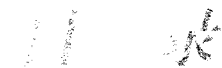
第二节	脉冲发生器的检定	298
第三节	其他类型的脉冲发生器	304
思考题	.....	306
第五章	脉冲参数计量标准	306
第一节	计量标准的组成	306
第二节	计量标准重复性与稳定性考核	308
第三节	测量标准不确定度评定	309
第四节	计量标准量值传递	310
思考题	.....	312
参考文献	.....	312

第七篇 调制度计量

第一章	调制度计量的基本知识	315
第一节	调制与解调的基本概念	315
第二节	已调波的基本分析	318
第三节	调制度测量仪器	330
思考题	.....	339
第二章	调制度测量仪器的检定	340
第一节	调制度测量仪的检定	340
第二节	调制度分析仪的检定	346
第三节	计量标准的稳定性和重复性考核	365
第四节	调制度计量检定中的量值传递	367
思考题	.....	369
第三章	检定和使用中应注意的问题	369
第一节	网络的选用	369
第二节	检定和使用中应注意的问题	377
思考题	.....	379
参考文献	.....	379

第八篇 失真度计量

第一章	失真度计量基础知识	383
第一节	失真度定义	384



第二节	失真度的测量方法	385
第三节	失真测量仪中的电压测量	387
思考题		396
第二章	失真度测量仪	397
第一节	失真度测量仪的组成及工作原理	397
第二节	失真度测量仪的基波抑制电路	399
第三节	失真度测量仪的主要技术指标	401
第四节	失真度测量仪的误差分析	403
思考题		407
第三章	标准失真源	407
第一节	标准失真源的工作原理	407
第二节	标准失真源的主要技术指标	414
思考题		415
第四章	失真度测量仪计量标准建立	416
第一节	失真度测量仪检定装置的组成	416
第二节	失真度测量仪检定装置的重复性	416
第三节	失真度测量仪检定装置的稳定性	417
第四节	失真度测量仪检定装置的不确定度分析	418
第五节	失真度测量仪检定装置的不确定度验证	419
思考题		420
第五章	失真度的量值传递	420
第一节	失真度测量仪的检定	421
第二节	失真度测量仪检定装置的检定	425
思考题		428
参考文献		429

第九篇 电压参数计量

第一章	电压参数基础知识	433
第一节	电压参数基本概念	433
第二节	电压测量的量值	435
第三节	有关分贝的概念	438
思考题		439
第二章	电压测量仪器	440



第一节	检波式电压表	440
第二节	选频电压表	441
第三节	取样电压表	441
思考题		443
第三章	电压计量标准	443
第一节	低频电压标准源	444
第二节	宽频带电压标准	445
第三节	高频大电压标准	449
思考题		456
第四章	电压计量标准的建立	456
第一节	电压标准的组成及原理	457
第二节	电压标准的不确定度分析	457
第三节	电压标准的重复性测量	458
第四节	电压标准的稳定性测量	459
第五节	电压标准的不确定度验证	460
思考题		461
第五章	电压测量中应注意的问题	461
第一节	波形误差	462
第二节	其他测量误差	465
思考题		466
第六章	电压计量器具的检定	466
第一节	电压测量仪器的检定	466
第二节	标准电压源的检定	468
第三节	精密交流校准源的检定	470
第四节	精密电压表的检定	473
第五节	热电转换器的检定	474
思考题		475
参考文献		475

第十篇 超低频参数计量

第一章	超低频测量方法	479
第一节	超低频测量特点	479
第二节	频率（周期）测量	480

第三节	电压测量	486
第四节	失真测量	488
第五节	相位测量	491
思考题	.....	493
第二章	超低频信号测量仪器	494
第一节	超低频信号源	494
第二节	电压表	499
第三节	记录器	501
第四节	移相器	506
思考题	.....	507
第三章	超低频参数计量标准	508
第一节	计量标准的原理及组成	508
第二节	计量标准的重复性	509
第三节	计量标准的稳定性	510
第四节	测量标准不确定度的验证	511
思考题	.....	511
第四章	超低频计量不确定度分析	512
第一节	标准装置的不确定度分析	512
第二节	信号源输出电压值测量结果的不确定度分析	516
第三节	真有效值电压表测量结果的不确定度分析	518
第四节	记录器的衰减器测量结果的不确定度分析	521
第五节	频响分析仪点到点相位测量结果的不确定度分析	524
第六节	低频相位计测量结果的不确定度分析	527
思考题	.....	529
第五章	超低频参数的量值传递	530
第一节	检定规程和国军标	530
第二节	检定条件	532
思考题	.....	534
参考文献	.....	534

第十一篇 场强与干扰计量

第一章	场强与干扰计量概述	537
第一节	电磁场场强计量的概念	537