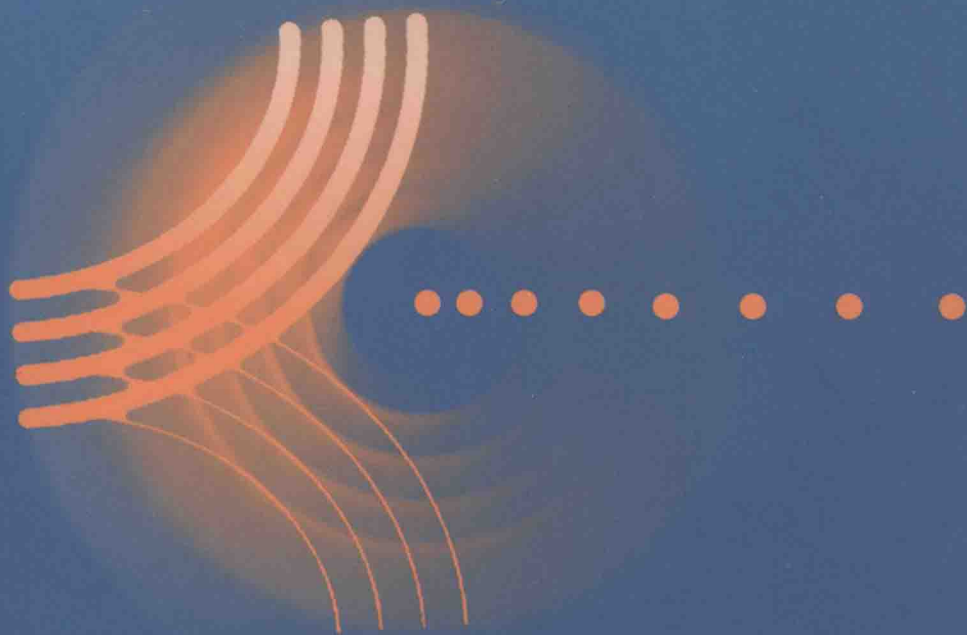


计量检测人员培训教材

无线电计量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

高小珣 主编



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

计量检测人员培训教材

第 7 分 册

无 线 电 计 量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

高小珣 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

无线电计量·第7分册/国家质量监督检验检疫总局计量司组编;高小珣主编. —北京:中国计量出版社, 2008.12

计量检测人员培训教材

ISBN 978-7-5026-2907-6

I. 无… II. ①国…②高… III. 无线电参量计量—技术培训—教材 IV. TB973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 161888 号

内 容 提 要

本书是《计量检测人员培训教材》第七分册, 主要包括高频和微波功率计量、集总参数阻抗计量、电压计量、调制度计量、失真度计量、生理电参数计量和视频参数计量等七章 (项)。各章 (项) 较为系统地阐述了基础知识、测量技术、方法原理、常用测量仪器、计量基标准、检定和校准、误差分析和测量不确定度评定等内容。

本书可作为无线电计量检测人员培训考核教材, 也可供各大专院校相关专业师生以及工程计量技术人员参考使用。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 32.75 字数 788 千字

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1—1 500 定价 (平装): 65.00 元

总 序

计量是关于测量的科学，是实现单位统一、量值准确可靠的活动。通过计量获得的测量结果是人们认识自然、利用自然和改造自然的重要信息工具。实际上，计量已渗透到各行各业，成为支持经济社会有序运行和可持续发展的必要条件，也是推动科技创新、提高综合国力、实现国民经济又好又快发展的重要手段。

21 世纪头 20 年是我国经济社会发展的重要战略机遇期。对计量工作而言，既有难得的发展机遇，也面临着巨大的挑战和考验。科学技术的迅猛发展，对作为技术创新基础的检测技术和计量保证能力产生了巨大的需求；经济结构的战略性调整和技术创新能力的明显增强，对现有的计量基标准和量值传递、量值溯源体系提出了一系列新的要求。目前，计量检测工作的内容和运作方式发生了较大的变化，计量仪器、测量手段、检测技术有了很大进步，出现了很多新型的、多参数的、多功能的测量设备和仪器；国家计量检定规程和国家计量技术规范有许多进行了修订；计量检测人员新老交替，国家对从事计量检定、校准、检验、测试等计量技术工作的专业技术人员已实行注册计量师制度。

为了加强计量专业技术人员的培训，提高计量专业技术人员素质，推动注册计量师制度的实施，我们组织有关专家编写了《计量检测人员培训教材》。这套教材涵盖了长度、热工、力学、电磁、电子学、时间频率、光学、电离辐射、声学、化学等十大计量，并介绍了计量管理和计量技术基础知识，内容丰富，知识新颖。我相信，《计量检测人员培训教材》的编撰和出版，对提高计量专业技术人员的素质，推动注册计量师制度的实施，必将起到积极的作用。

国家质量监督检验检疫总局副局长



2007 年 4 月

《计量检测人员培训教材》编审委员会

主 任：宣 湘

副主任：刘新民 宋 伟 马纯良

委 员：（按姓氏笔画排序）

马凤鸣 马肃林 于 靖 王建平 王顺安

邓媛芳 刘国普 艾明泽 邵 力 陈 红

陆志方 陆祖良 张益群 周伦彬 钟新明

郭洪涛 黄 涛 程新选 蔡新泉 薛润秋

第7分册《无线电计量》编委会

主 审：黄 涛

主 编：高小珣

副主编：蔡新泉

委 员：（按姓氏笔画排序）

左玉刚 刘欣萌 陈云梅 陈成仁 张关汉

张廷柱 李志贤 李咏雪 钱从政 贾建革

贾耀宗 甄 真 蔡新泉

计量检测人员培训教材

- | | |
|---------|----------|
| 第 1 分册 | 《计量管理基础》 |
| 第 2 分册 | 《计量技术基础》 |
| 第 3 分册 | 《长度计量》 |
| 第 4 分册 | 《温度计量》 |
| 第 5 分册 | 《力学计量》 |
| 第 6 分册 | 《电磁计量》 |
| 第 7 分册 | 《无线电计量》 |
| 第 8 分册 | 《光学计量》 |
| 第 9 分册 | 《电离辐射计量》 |
| 第 10 分册 | 《声学计量》 |
| 第 11 分册 | 《时间频率计量》 |
| 第 12 分册 | 《化学计量》 |

前 言

无线电计量是随着无线电电子技术，尤其是通讯和雷达技术的发展而迅速发展起来的新兴计量科学。

无线电计量的主要任务是在极宽的电磁频谱范围内，复现相关基标准单位量值，研究检测技术和检测方法，满足量值传递和溯源的需要，以保证无线电计量单位的统一和量值的准确可靠。

目前无线电计量检测的参量大体分为两大类：

一、表征信号特征的参量。

如电压、功率、噪声、场强（电场强度、磁场强度、功率强度、功率通量密度）、频率、脉冲波形参数、失真度、调制度、频谱参数。

二、表征网络特征的参量。

如集总参数电路参量（阻抗或导纳、电阻或电导、电抗或电纳、电感、电容、品质因数等）、反射参量（输入输出阻抗、电压驻波比、反射系数等）、传输参量（衰减或增益、相位、时延等）、电子元器件及设备特征的参量（灵敏度、噪声系数、信噪比、效率等）、材料特性参量（介电常数、损耗角正切、导磁率等）。

本教材以无线电计量的参量为主，多参量计量器具为辅的立项原则进行编写。它由高频和微波功率计量、集总参数阻抗计量、电压参数计量、调制度计量、失真度计量、生理电参数计量及视频参数计量等七章（项）组成。各章（项）较系统地阐述了基础知识，测量技术，方法原理，常用测量仪器，计量基标准，检定和校准，误差分析和测量不确定度评定等内容。

在编写过程中，参考了一些相关的学术专著，如无线电计量测试丛书、手册、相关教材以及国内外科技文献等资料。力争内容全面、通俗易懂，以满足广大无线电计量检测人员培训考核的需要。

无线电计量的参量（参数）较多，加之新的参量不断出现，传统的计量项目也有扩展量程和频率范围的要求。因此，我们将根据实际需要和可能不断地对教材进行充实。

由于编者的经验和水平有限，差错和不妥之处请专家和读者批评指正。

编者

2010年9月

目 录

第一章 高频和微波功率计量	(1)
第一节 高频和微波功率计量基础知识	(1)
一、高频和微波功率计量的任务	(1)
二、高频和微波功率的计量单位	(1)
三、高频和微波功率计量基本理论	(3)
第二节 常用功率计	(9)
一、热敏电阻功率计	(9)
二、热电偶式功率计	(12)
三、半导体薄膜热电偶式功率计	(13)
四、晶体二极管式功率计	(14)
第三节 高频和微波功率标准	(15)
一、量热计功率标准	(15)
二、微量热计功率标准	(21)
三、中功率标准	(25)
四、功率传递标准	(26)
五、功率计量标准的维护和考核	(27)
六、高频和微波功率的量值传递	(34)
第四节 高频和微波功率座校准方法	(37)
一、交替比较法	(37)
二、传递标准法	(40)
三、六端口法	(43)
四、通过式功率座的校准	(45)
五、不同接头型式的功率座的校准	(46)
第五节 中、大功率的测量及功率计的校准方法	(48)
一、中、大功率法	(48)
二、衰减器法	(49)
三、定向耦合器法	(50)
第六节 射频脉冲峰值功率测量方法	(52)
一、脉冲功率的有关定义	(52)
二、脉冲功率计法	(53)
三、平均功率法	(57)
四、射频替代法	(58)

五、连续波比较法	(59)
六、取样比较法	(60)
第七节 高频和微波功率测量和校准中应注意的问题	(61)
一、失配误差和失配不确定度	(61)
二、接头连接的重复性	(62)
三、环境温度的影响	(62)
四、功率测量中应注意的问题	(63)
第八节 热敏电阻座校准结果不确定度评定实例	(65)
一、不确定度评定	(65)
二、最佳测量能力	(68)
第九节 应用控制图进行计量标准的测量过程统计控制	(71)
一、概述	(71)
二、控制图的分类	(71)
三、建立控制图的步骤	(72)
四、控制图中测量点分布异常的判断准则	(74)
五、异常值检验的格拉布斯准则	(79)

第二章 集总参数阻抗计量

第一节 集总参数阻抗计量基础知识	(81)
一、集总参数阻抗计量检定(测)对象及等效电路	(81)
二、集总参数阻抗计量检定(测)常用术语和定义	(83)
三、集总参数阻抗计量器具的技术特性表述	(88)
第二节 高(射)频集总参数阻抗测量方法	(89)
一、阻抗测量方法简述	(89)
二、常用的阻抗测量方法比较	(92)
第三节 高频 Q 值/损耗标准的建立和不确定度评定	(92)
一、高频 Q 表简介	(92)
二、高频 Q 值/损耗标准装置介绍	(94)
三、 Q 值/损耗标准的测量不确定度评定及验证	(97)
第四节 高频阻抗/材料分析及应用	(99)
一、测量原理和量值给出方法	(99)
二、主要技术指标及应用	(101)
三、自校准方法	(102)
四、测量夹具及修正	(103)
第五节 集总参数阻抗计量器具及检定系统	(107)
一、射(高)频阻抗计量基准器具及量值溯源	(107)

二、高频集总参数阻抗计量标准器具	(108)
三、高频集总参数阻抗计量量具检定系统	(111)
四、集总参数阻抗量具的连接头及转换	(113)
第六节 电子介质材料性能的计量测试	(114)
一、高频介质材料的电性能定义	(114)
二、介质测量仪的原理和技术特性	(114)
三、气隙测量法定标介质材料的电性能参量	(115)
四、标准介质样品	(118)
第七节 电子软磁材料电参数的计量测试	(120)
一、定义与测试条件	(120)
二、高频磁测 Q 表及磁参量定标方法	(121)
三、测量不确定度	(123)

第三章 电压参数计量

(124)

第一节 电压计量基础知识	(124)
一、电压计量测试的意义和特点	(124)
二、电压测量仪表的分类	(125)
三、交流电压的定义及计量单位	(127)
四、交流电压的量值	(131)
五、主要术语	(134)

第二节 检波式电子电压表	(139)
一、电子电压表的检波器	(139)
二、检波放大式电压表(峰值响应)	(144)
三、放大检波式电压表(平均值响应)	(145)
四、有效值电压表(有效值响应)	(146)
五、选频式电子电压表	(147)
六、矢量电压表	(149)
七、数字式电压测量仪表	(151)
附录 1 常用电子电压表主要技术指标	(154)

第三节 交流标准电压源	(155)
一、几个主要技术特性	(155)
二、工作原理	(156)
三、5700A 标准器简介	(157)
四、交流标准电压源的正确使用	(159)

第四节 二极管补偿式标准电压表	(159)
一、基本工作原理	(159)

二、二极管标准补偿式电压表的特点	(160)
第五节 利用热电元件的电压标准	(160)
一、热电元件	(160)
二、同轴热电转换器	(162)
三、微电位计	(164)
四、A-T 电压表	(165)
五、差动式交/直流转换标准	(166)
六、薄膜热偶电压标准	(167)
第六节 测热电阻式电压标准	(169)
一、测热电阻 (Bolometer)	(169)
二、射频电压国家标准	(171)
三、低频替代法的电压标准	(175)
四、使用直流替代半自动平衡电路的电压标准	(175)
第七节 电压标准的量程扩展	(176)
一、低阻衰减法	(176)
二、前置衰减法	(177)
三、用衰减测量装置扩展量程	(177)
第八节 电压的量值传递与检定测试	(178)
一、高频电压的量值传递	(178)
二、高频电压测量仪表的检测	(182)
三、检定测试中仪器合格的判断	(183)
四、低频标准电压源的检定	(186)
五、电子电压表的检定	(187)
六、选频电压表的检定	(187)
附录 2 电压测量仪表检定规程索引	(189)
第九节 电压计量测试的常见问题	(189)
一、概述	(189)
二、常模与共模干扰及其抑制	(190)
三、波形误差	(197)
四、传输误差	(204)
五、失配误差	(208)
六、加载误差	(209)
七、地电流影响与接地	(210)
八、电磁干扰及屏蔽	(211)
九、热电势与噪声影响	(212)
十、交流测量中的直流分量	(213)

第四章 调制度计量	(214)
第一节 调制度计量的基础知识	(214)
一、调制与解调的基本概念	(214)
二、已调波的基本分析	(217)
三、调制度测量仪器	(228)
第二节 调制度测量仪器的检定	(240)
一、调制度测量仪的检定	(240)
二、调制度分析仪的检定	(245)
三、计量标准的稳定性和重复性考核	(264)
四、调制度计量检定中的量值传递	(267)
第三节 检定和使用中应注意的问题	(269)
一、预加重——去加重技术	(269)
二、检定和使用中应注意的问题	(276)
第五章 失真度计量	(279)
第一节 概述	(279)
一、失真的概念与特点	(279)
二、失真测量的意义及表征	(279)
三、主要技术术语	(281)
第二节 非线性失真的测量方法	(284)
一、信号非线性失真的测量方法	(284)
二、传输网络非线性失真的测量方法	(290)
第三节 失真度测量仪	(295)
一、失真度测量仪的分类	(295)
二、失真度测量仪的工作原理	(296)
三、失真度测量仪的主要技术指标	(298)
四、失真度测量仪的误差	(299)
五、失真度测量仪的应用及注意事项	(300)
第四节 标准失真源	(301)
一、标准失真源的用途及设计原则	(301)
二、标准失真源的几种组成方案	(302)
三、标准失真源的主要技术指标	(307)
四、标准失真源的主要误差	(308)
五、标准失真源的应用及注意事项	(309)
第五节 非线性失真系数的量值传递	(310)

一、量值传递的方式及意义	(310)
二、失真度测量仪的检定	(312)
三、失真仪检定装置的检定	(316)

第六章 生理电参数计量

第一节 心电图机	(322)
一、心电图机的基本知识	(322)
二、心电图机的分类及工作原理	(326)
三、模拟心电图机的检定	(329)
四、数字心电图机的检定	(340)
第二节 动态(可移动)心电图机	(346)
一、动态(可移动)心电图机简介	(346)
二、动态(可移动)心电图机的检定	(350)
第三节 脑电图机	(357)
一、脑电图及脑电图导联	(358)
二、脑电图机的结构和分类	(361)
三、模拟脑电图机的检定	(363)
第四节 数字脑电图仪及脑电地形图仪的检定	(371)
一、数字脑电图仪和脑电地形图仪	(371)
二、数字脑电图仪及脑电地形图仪的检定	(373)
第五节 心电监护仪	(378)
一、监护仪器	(378)
二、心电信号的监测	(380)
三、心电监护仪的检定	(382)
第六节 心脏除颤器和心脏除颤监护仪	(387)
一、心律失常	(387)
二、心脏除颤器	(391)
三、心脏除颤器的校准	(396)

第七章 视频参数计量

第一节 概述	(400)
第二节 视频信号的基本特性	(400)
一、视频信号的组成	(400)
二、视频信号的形成过程	(402)
三、我国电视广播制式及其技术特性	(404)
第三节 视频线性失真和视频非线性失真的定义及分类	(412)

一、视频线性失真和视频非线性失真的定义及其差别	(412)
二、视频线性失真和视频非线性失真的分类	(415)
第四节 视频线性失真	(418)
一、短时间波形失真	(418)
二、行时间波形失真	(429)
三、场时间波形失真	(432)
四、长时间波形失真	(436)
五、色度-亮度增益差和色度-亮度时延差	(439)
六、幅频特性失真和群时延特性失真	(446)
第五节 视频非线性失真	(452)
一、亮度非线性失真	(452)
二、微分增益 (DG) 失真	(455)
三、微分相位 (DP) 失真	(458)
四、色度信号对亮度信号的交调失真	(460)
第六节 视频噪声测量	(462)
一、连续随机杂波	(463)
二、对各种干扰的测量	(469)
三、色度调幅 (AM)、调频 (PM) 信噪比	(470)
第七节 主要电视测量仪器	(473)
一、电视视频信号发生器	(473)
二、电视波形监视器	(484)
三、电视矢量示波器	(485)
四、视频自动测量仪	(486)
五、电视机测量用仪器	(500)
六、视频测量的基础参数和溯源	(503)
参考文献	(506)

第一章

高频和微波功率计量

第一节 高频和微波功率计量基础知识

一、高频和微波功率计量的任务

高频或微波功率是描述信号大小和信号通过电子系统或传输线时能量传输特性的量，它是无线电计量中最重要的基本参量之一。在无线电电子技术中常常需要计量发送设备的输出功率和接收设备的灵敏度，这就需要计量各种电平的功率。

高频和微波功率计量的主要任务是建立高频和微波功率标准，进行功率量值传递。高频和微波功率量值的传递方法有交替比较法、传递标准法和六端口法等。

通常，功率计是由功率座（或称敏感器、传感器等）和功率指示器组成。它的主要技术指标包括：功率量程、频率范围、功率座的电压驻波比、有效效率 η_e 和校准因子 K_b 的测量不确定度等。

二、高频和微波功率的计量单位

功率是具有专门名称和符号量纲的 SI 导出单位，功率单位为瓦特（W），也可表示用焦耳每秒（J/s）表示，即单位时间所做的功称为功率；也可以用伏安（VA）表示。它们之间的关系分别为 $1\text{ W}=1\text{ J/s}$ ， $1\text{ V}=1\text{ W/A}$ ， $1\text{ A}=1\text{ W/V}$ 。

微波和高频功率的计量单位是瓦 (W)。其十进制倍数：皮瓦 (pW=10⁻¹² W)、纳瓦 (nW=10⁻⁹ W)、微瓦 (μW=10⁻⁶ W)、毫瓦 (mW=10⁻³ W)、千瓦 (kW=10³ W)、兆瓦 (MW=10⁶ W)、吉瓦 (GW=10⁹ W)。工程应用中常用对数单位分贝瓦 (dBW) 和分贝毫瓦 (dBmW) 表示。dBW 是用 1 W 为参考功率电平来表示功率量值大小的以 10 为底的对数制单位；dBmW 是用 1 mW 为参考功率电平来表示功率量值大小的以 10 为底的对数制单位。例如 1 W 等于 0dBW。1 kW 等于 30 dBW 或等于 60 dBmW；100 μW 等于 -10 dBmW 或等于 -40 dBW。

高频和微波功率的对数单位表达式为

$$P_{\text{dBW/dBmW}} = 10 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

式中，P 是以 W 或 mW 为单位的功率值；P₀ 是参考功率，单位为 W 或 mW。

表 1-1 给出了功率单位的表示方法和换算关系。

一个微波信号的基本特征是频率及其大小（幅度或电平）。在直流和低频电路中，信号的大小通常用电压或电流来表述，有时也用功率这个概念。在射频和微波频段的分布参数电路中，在 TEM 波传输线中，在行波条件下，由于各点阻抗均为实数特性阻抗 Z₀，电压 U、电流 I 与功率 P 三者之间仍然具有与低频电路中类似的确切关系：

$$P = |U|^2 / Z_0$$

或

$$P = |I|^2 Z_0$$

但是，在 TEM 波传输线中通常都存在驻波，使沿均匀传输线沿线各点的电压或电流并不相等，而沿均匀传输线传输的功率则有确定的数值。特别是在微波频段所采用的单导体传输线（波导）中，电压和电流的定义失去了惟一性，不宜于用电压和电流，只能用功率来表述信号的大小。近年来，由于微带电路的出现和 TEM 波传输线向小型化和精密化发展，TEM 波传输线的工作频率已扩展到 100 GHz 的微波频段，为在微波频段测量电压或电流创造了条件。但是，这并不影响功率测量在微波应用中的地位，如发射机的发射功率、微波接收机的灵敏度、放大器的增益等都以功率电平来表述，以功率测量来定标。

表 1-1 功率单位的表示方法和换算关系

单位名称	符 号	SI 词头	倍数单位	对数单位 dBW	对数单位 dBmW
兆瓦	MW	10 ⁶	10 ⁶ W	60	90
千瓦	kW	10 ³	10 ³ W	30	60
瓦	W	10 ⁰	1 W	0	30
毫瓦	mW	10 ⁻³	10 ⁻³ W	-30	0
微瓦	μW	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ W	-60	-30
纳瓦	nW	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ W	-90	-60
皮瓦	pW	10 ⁻¹²	10 ⁻¹² W	-120	-90

三、高频和微波功率计量基本理论

(一) 高频和微波功率的术语和表达式

1. 信号源传输到无反射负载上的净功率 P_0

P_0 亦称为发生器功率。在传输线的特性阻抗为 Z_0 的测量系统中, 将一个无反射负载与一个信号源直接连接时, 如图 1-1 所示。图中 b_G 是信号源入射到无反射负载上的电压波幅; Γ_G 和 Γ_L 分别为信号源的输出反射系数和负载的输入反射系数。应用波叠加原理, 信号源入射到负载上的波幅 a_1 和传输到该无反射负载 ($\Gamma_L=0$) 上的净功率 P_0 可表示为

$$P_0 = \frac{|b_G|^2}{Z_0} \quad (1-1)$$

$$a_1 = b_G + b_1 \Gamma_G \quad (1-2)$$

式中, b_1 为负载反射的波幅。

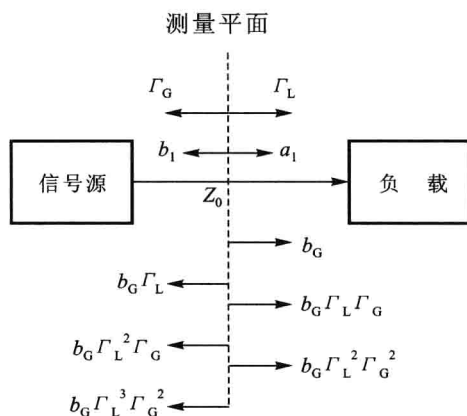


图 1-1 信号源和负载之间的功率传输

2. 信号源入射到任意负载上的功率 P_i

P_i 又称入射功率, 其表示式为

$$P_i = \frac{P_0}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \quad (1-3)$$

3. 负载反射的功率 P_r

P_r 又称反射功率, 其表示式为

$$P_r = P_i |\Gamma_L|^2 \quad (1-4)$$

4. 信号源传输到任意负载上的净功率 P_L

P_L 又称为负载的净功率或吸收功率, 定义为负载的入射功率减反射功率, 其表示式为

$$P_L = P_i - P_r = P_0 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2} \quad (1-5)$$

考察式 (1-5) 可知, 一个负载所吸收的功率不仅与信号源的输出功率大小有关, 而且与信号源和负载的复数反射系数密切相关。无线电计量工作者的一项重要任务是, 致力于准确测量复数反射系数, 或者致力于使信号源和负载的阻抗与测量系统传输线的特性阻抗 Z_0 。