

高等学校教材

天线测量

林昌禄 编

成都电讯工程学院出版社

57
10

高等学校教材

天线测量

林昌禄 编

成都电讯工程学院出版社

• 1988 •

高等学校教材
天线测量
林昌禄 编

•
成都电讯工程学院出版社出版
四川省青神县印刷厂印刷
四川省新华书店发行

•
开本：787×1092 1/32 印张：7.625 字数：164千字
版次：1988年9月第一版 印次：1988年9月第一次印刷
印数 1—3 000册

中国标准书号：ISBN 7—81016—067—2/TN·21
(15452·47) 定价：1.55元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制定了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1986~1990年编审出版规划，由电磁场与微波技术教材编审委员会天线教材编审小组征稿、评选并推荐出版。责任编辑汪茂光教授。

本教材由成都电讯工程学院林昌禄副教授担任主编，国防科技大学张钧教授担任主审。

本课程的参考学时数为30~40学时。全书共六章。内容包括：绪论；阻抗测量；方向图测量；增益测量；极化测量和天线测试场的设计与鉴定。关于天体源测量技术、近场测量技术、自动化和数字化测量技术等已分散编入各章。通过本课程的教学，应使学生熟悉和掌握天线基本参数的测量原理和方法，对测试数据有一定的分析、处理能力，对天线测试场的设计原则与鉴定方法也有一定的了解。

本课程实践性很强，使用本教材时，讲课中应切实注意理论联系实际，并辅以相当的实验。实验内容应包括天线各基本参数的测量，所用天线可根据各校具体情况选择。

全书均由林昌禄编写，在编写过程中，主审者及天线教材编审组的同志为本书提出了许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中还难免存在一些缺点错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者 1987. 9.

目 录

前 言

第一章 绪 论

- 第一节 引言..... (1)
- 第二节 天线周围的场区..... (1)
- 第三节 发射和接收天线的互易性..... (3)
- 第四节 缩尺模型技术..... (5)

第二章 阻抗测量

- 第一节 引言..... (9)
- 第二节 谐振法测量天线输入阻抗..... (10)
- 第三节 电桥法测量天线输入阻抗..... (13)
- 第四节 测量线法测量天线输入阻抗..... (16)
- 第五节 图示仪法测量天线输入阻抗..... (24)
- 第六节 扫频法测量天线输入阻抗..... (25)
- 第七节 互阻抗测量..... (32)
- 第八节 自动网络分析仪..... (40)
- 第九节 短波发射天线阻抗参数的测量..... (45)

第三章 方向图测量

- 第一节 引言..... (51)
- 第二节 最小测试距离..... (55)
- 第三节 场强测量..... (64)
- 第四节 方向图测量..... (77)

第五节	天线相位中心的测定	(88)
第六节	近场测量技术	(91)

第四章 增益测量

第一节	引言	(103)
第二节	比较法测天线增益	(105)
第三节	标准增益天线	(109)
第四节	绝对法测天线增益	(114)
第五节	增益测量的误差和修正	(120)
第六节	方向性系数的测量	(123)
第七节	天体源测量技术	(132)

第五章 极化测量

第一节	引言	(151)
第二节	椭圆极化波的合成及其参数	(152)
第三节	椭圆极化天线极化参数的测量	(165)
第四节	椭圆极化天线增益的测量	(170)
第五节	极化传输损失的确定	(175)
第六节	极化失配增益测量误差	(180)
第七节	天线分析仪	(185)

第六章 天线测试场的设计与鉴定

第一节	天线测试场	(192)
第二节	天线测试场设计的一般准则	(200)
第三节	微波暗室的设计准则	(212)
第四节	天线测试场的鉴定方法	(225)

第一章 绪 论

第一节 引 言

天线系统一般都有两方面的特性：电路特性（输入阻抗、效率、频带宽度、匹配程度等）和辐射特性（方向图、增益、极化、相位等）天线测量的任务就是用实验方法测定和检验天线的这些参数特性。

天线参数测量的重要性在于：验证理论分析和计算是否正确；已定型天线批量生产中，需要抽样检测天线参数是否合格；已在现场使用已久的天线，需要定期检查其性能是否下降；特别是研制一种新天线时，天线参数的实验测量更是必不可少。

本章概括介绍天线参数测量中必须具备的一些基本知识，以便于后面几章的学习。

第二节 天线周围的场区

天线是一种能量转换装置，发射天线将导行波转换为空间辐射波，接收天线则把空间辐射波转换为导行波。因此，一付发射天线可以视为辐射电磁波的波源，其周围的场强分布一般都是离开天线距离和角坐标的函数。通常，根据离开天线距离的不同，将天线周围的场区划分为感应场区、辐射近场区和辐射远场区。

一、感应场区

感应场区是指很靠近天线的区域。在这个场区里，占优势的感应场之电场和磁场的时间相位相差 90° ，波印亭矢量为纯虚数，因此不辐射功率，电场能量和磁场能量相互交替地贮存于天线附近的空间内。图 1.1 (a) 所示为电尺寸小的偶极天线，其感应场区的外边界是 $\lambda/2\pi$ ，这里， λ 是工作波长。感应场随离开天线距离的增加而极快衰减，超过感应场区后，就是辐射场占优势的辐射场区了。图 1.1 (b) 所示为电尺寸大的孔径天线的辐射场区又分为近场区和远场区。

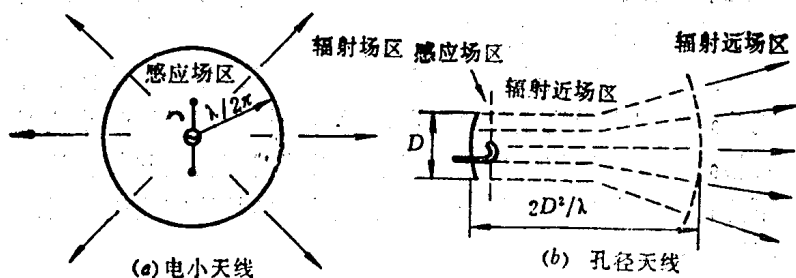


图 1.1 天线周围场区划分

二、辐射近场区

辐射近场区里电场的相对角分布（即方向图）与离开天线的距离有关。即在不同距离处的天线方向图是不同的。这是因为：（1）由天线各辐射元所建立的场之相对相位关系是随距离而变的；（2）这些场的相对振幅也随距离而改变。在辐射近场区的内边界处（即感应场区的外边界处），天线方向图是一个主瓣和副瓣难分的起伏包络。随着离开天线距离的增加，直到靠近远场辐射区时，天线方向图的主瓣和副瓣才明显形成，但零点电平和副瓣电平均较高。辐射近场区的

外边界按通用标准规定为

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1 \cdot 1)$$

式中 r 是观察点到天线的距离

D 是天线孔径的最大线尺寸

三、辐射远场区

辐射近场区的外边就是辐射远场区。这个区域里的特点是：① 场的大小与离开天线的距离成反比；② 场的相对角分布与离开天线的距离无关；③ 方向图主瓣、副瓣和零值点已全部形成。辐射远场区是进行天线测试的重要场区，天线辐射特性所包括各参数的测量均需在辐射远场区内进行。

第三节 发射和接收天线的互易性

如图1·2所示，任意放置于线性、无源、均匀媒质中的两付天线，若在天线1中加上电动势 U_1 ，则在天线1的影响下，天线2中将产生电流 I_{12} ；若将一个与 U_1 相等的电动势 U_2 加到天线2中，则由于天线2对天线1的影响，天线1中将产生电流 I_{21} ，而且， I_{21} 必定全等于 I_{12} ，这就是用于天线的互易定理，可写为

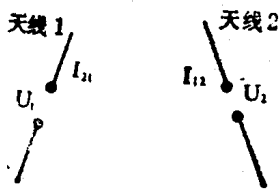


图1·2 天线的互易定理

$$\frac{U_1}{I_{12}} = \frac{U_2}{I_{21}} \quad (1 \cdot 2)$$

“天线原理”课程中已证明：在一定条件下，收、发天线的辐射特性和阻抗特性是互易的。这就是说，一付无源天线作发射时的方向图和作接收时的方向图是相同的。如图1·3所示，为了测定作发射用的天线1的方向图，我们用一付接收天线2沿以天线1为中心的圆周移动，测定各点场强（或功率），从而得到其方向图。自然，圆的半径应满足式(1·1)的远场条件。如果将信号源和接收指示器相互交换位置，即天线2作发射，天线1作接收，以同样方法移动天线2，测定天线1的方向图。两种情况下所测得天线1的方向图完全一样。因此，一付天线的方向特性与它作接收或作发射的工作方式是无关的。

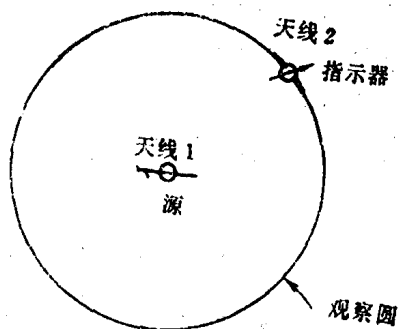


图1·3 方向图互易性

另外，当一付天线作发射时，可以认为只从一点上激励，而当它用作接收时，是由所接收的电磁波对整个天线进行激励的。因此，天线用作发射和用作接收时，其上的电流分布一般并非相同。但是，从电路效应角度来看，不论激励方式如何，天线总可以用相似的等值电路来表示。即是说，如果天线作发射时的阻抗是 Z_A ，则它作接收时，接收天线传送最大功率的条件是其负载阻抗（接收系统等效阻抗）应等于 Z_A 的共轭值。所以，天线的阻抗也不因它作接收或发射工作方式而改变。

同理，天线的其他辐射特性（如方向性系数、增益、极化等）也与天线的收、发工作方式无关。

收、发天线的互易性在天线参数测量中是十分有用的。我们可以视测试的方便而将待测天线作为发射或接收，都不会影响测试结果的正确性。

第四节 缩尺模型技术

缩尺模型技术是指在满足一定条件下，将真实天线按一定的缩尺比例缩小（或放大）成便于测试的模型天线，通过对模型天线的测量便可得到真实天线的各参数特性。然后，再据此制作出实际使用的真实全尺寸天线。采用缩尺模型技术的优点是：（1）模型天线用料少，制作简便；（2）研制新天线时，在模型上易于修改天线几何参数和结构，且用费省；（3）便于在不太大的测试场地上进行天线多种性能的测试；（4）有些真实天线特性现场测试困难（如机载、星载天线，船舶天线等）通过缩尺模型技术有利于了解天线特性；（5）可以根据手边现有材料和仪器设备情况，选择合适的缩尺比例开展测试工作，不会因缺乏测试真实天线的仪器及所用材料而影响工作的进行。

缩尺模型技术必须满足的条件不难从麦克斯韦方程的线性关系得到。

若真实天线 F 置于 x 、 y 、 z 坐标系中，介质的介电常数为 ϵ ，导磁率为 μ ，导电率为 σ ，工作角频率为 ω ，则天线的电磁场应满足下列方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.3a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (1.3b)$$

若模型天线 M 置于 x' 、 y' 、 z' 座标系统中，介质的介电常数为 ϵ' ，导磁率为 μ' ，导电率为 σ' ，工作角频率为 ω' ，则模型天线的电磁场应满足下面的方程。

$$\nabla \times \mathbf{E}' = -j\omega' \mu' \mathbf{H}' \quad (1.4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}' = (\sigma' + j\omega' \epsilon') \mathbf{E}' \quad (1.4b)$$

假设模型天线与真实天线各参量之间有如下关系

$$\mathbf{E}' = m_E \mathbf{E} \quad \mathbf{H}' = m_H \mathbf{H} \quad (1.5a)$$

$$\epsilon' = m_\epsilon \epsilon \quad \mu' = m_\mu \mu \quad (1.5b)$$

$$\sigma' = m_\sigma \sigma \quad \omega' = m_\omega \omega \quad (1.5c)$$

$$x' = m_F x \quad y' = m_F y \quad (1.5d)$$

$$z' = m_F z$$

式中， m_E 、 m_H 、 m_ϵ 、 m_μ 、 m_σ 、 m_ω 、 m_F 分别是相应各参量的缩尺换算因子。

将式 (1.5) 代入式 (1.4)，则模型天线应满足的场方程变为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j \frac{m_\omega m_\mu m_H m_F}{m_E} \omega \mu \mathbf{H} \quad (1.6a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left(\frac{m_\sigma m_E m_F}{m_H} \sigma + j \frac{m_\omega m_\epsilon m_E m_F}{m_H} \omega \epsilon \right) \mathbf{E} \quad (1.6b)$$

如果模型天线与真实天线具有相同的电磁场特性。则式 (1.6) 与式 (1.3) 应相同，故有

$$\frac{m_\mu m_\omega m_F m_H}{m_E} = 1 \quad (1.7a)$$

$$\frac{m_\epsilon m_\omega m_F m_E}{m_H} = 1 \quad (1.7b)$$

$$\frac{m_\sigma m_F m_E}{m_H} = 1 \quad (1.7c)$$

假设模型天线和真实天线都放于自由空间中，即

$$m_s = 1 \quad m_\mu = 1 \quad (1 \cdot 8)$$

我们要求模型天线与真实天线的电磁场应相同，即 $\mathbf{E} = \mathbf{E}'$ ， $\mathbf{H} = \mathbf{H}'$

故有

$$m_E = 1 \quad m_H = 1 \quad (1 \cdot 9)$$

于是，将式(1·8)和式(1·9)代入式(1·7)得

$$m_\sigma m_F = 1 \quad m_\epsilon m_F = 1 \quad (1 \cdot 10)$$

式(1·10)就是使用模型技术所必须满足的条件。其物理意义是：真实天线的几何尺寸缩小(或放大) m 倍而做成的模型天线，其相应的导电率和测试频率均应增加(或减小) m 倍，这样才能保持模型天线与真实天线有相同的电磁场。另外，真实天线和模型天线所处媒质中的介电常数和导磁率亦相同($m_s = 1$, $m_\mu = 1$)，且天线系统中不能包含铁氧体等非线性材料。

综上所述，模型天线与真实天线各参量之间应满足以下关系：

$$\text{线尺寸} \quad L_M = L_F/m \quad (1 \cdot 11a)$$

$$\text{工作频率} \quad f_M = m f_F \quad (1 \cdot 11b)$$

$$\text{导电率} \quad \sigma_M = m \sigma_F \quad (1 \cdot 11c)$$

$$\text{介电常数} \quad \epsilon_M = \epsilon_F \quad (1 \cdot 11d)$$

$$\text{导磁率} \quad \mu_M = \mu_F \quad (1 \cdot 11e)$$

式中，足标 M 代表模型天线，足标 F 代表真实天线， m 是缩尺因子。

可见， m 大于1，则将真实天线缩小； m 小于1，则将

真实天线放大。上述条件中线尺寸按比例缩小（或放大）及工作频率按比例提高（或降低）是特别重要的，也是必须严格遵循的。由于一般天线所用材料导电率已较大，故导电率增加 m 倍的条件实际上不可能满足。但因导电率仅决定损耗电阻，当模型天线和真实天线的辐射电阻比损耗电阻大很多时，导电率按缩尺比变化的条件是不关重要的。不过，一般还是尽量考虑用导电率高的铜或镀银材料来作缩小的模型天线为宜。

另外，当缩尺因子 m 很大时，在研究天线输入阻抗时必须十分重视天线线尺寸粗细、馈电点间距与馈电电缆的比例关系，实际经验指出，考虑到趋表效应，线天线的直径以按 $1/\sqrt{m}$ 倍缩小为宜。

第二章 阻抗测量

第一节 引言

阻抗是天线的重要参数之一。天线的输入阻抗是指天线输入端电压与电流的比值，它与天线类型、电尺寸大小、材料性质、馈电位置及周围环境均有关系。天线输入阻抗的计算是十分繁杂的，特别是形状复杂的天线或组合天线，往往不易得到精确的理论数值结果。因此，通过实验测定天线的输入阻抗具有重要的意义。测得天线输入阻抗后，便可据此设计合适的匹配装置以提高传输效率和降低损耗和噪声。

天线阻抗受周围环境影响很大，因此，在缩尺模型上进行输入阻抗测量时，应对周围环境也尽可能作缩尺模拟，特别是对全方向性及宽波瓣天线的模型测量更应考虑这一点。

有时，为了提高天线增益而采用两个或多个受激单元组成天线阵。各阵元之间一般相互都有作用，从而明显影响天线系统工作性能，体现这种相互作用的量就是互阻抗。因此，有时还需要进行互阻抗的测量。

阻抗测量的方法有三大类：（1）谐振法（主要用于低、中频）；（2）电桥法（主要用于高频和超高频）；（3）测量线法（主要用于微波）。当然，这些方法的使用波段并不是截然分开的。例如，电桥法可使用到微波波段，而测量线法在米波波段亦有应用。

由于“无线电测量”、“微波测量”等书籍中，已对阻抗测量问题讲述得十分详细，故本章对各种测量阻抗的方法

只作了简要介绍。另外，对扫频法测阻抗以及互阻抗的测量也作了必要的讲述。

第二节 谐振法测量天线输入阻抗

一、比较法

待测天线输入阻抗可以等效为电路中的负载阻抗，将它与可变标准阻抗相比较，从而求得天线的输入阻抗。实施办法之一如图2·1所示。信号源产生的信号经变压器送到测量电路，测量电路由标准电阻 R_0 ，电容 C_0 和电感 L_0 组成。

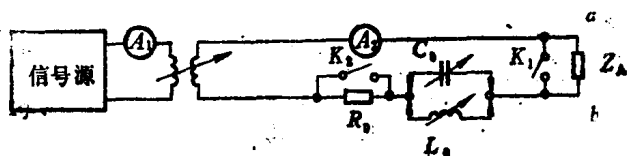


图2·1 比较法测量电路

测量步骤如下：

1. 待测天线阻抗 Z_A 接入 ab 点；
2. 将信号源调到测试频率；
3. 闭合开关 K_2 ；
4. 调节标准电感 L_0 或标准电容 C_0 ，使电路谐振，此时电流指示 I_2 最大。
5. 记下标准电抗数值 X ，及电流值 I_2 ；
6. 断开 K_2 ，闭合 K_1 ，此时电路失谐；
7. 重调标准电容 C_0 或标准电感 L_0 ，使电路再次谐振；