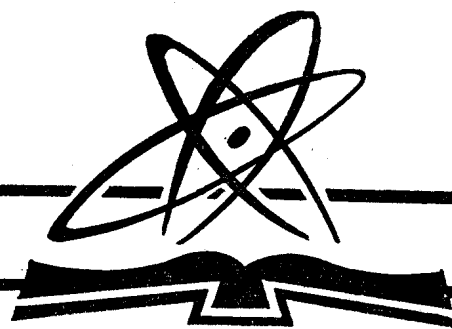


# 天线测量

成都电讯工程学院

林昌禄 编

国防工业出版社



天线测量

成都电讯工程学院

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

解放军第七二二六工厂印刷 内部发行

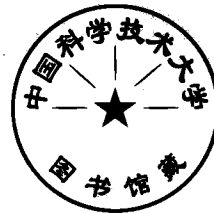
893953 \*

20453270

787 × 1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 9<sup>6</sup>/<sub>8</sub> 229 千字

1981 年 8 月第一版 1981 年 8 月第一次印刷 印数 2,000 册

统一书号: N15034 (四教 73) 定价 1.05 元



## 内 容 简 介

本书系统地讲述了天线各参数的测试原理和方法，对近场测量和天体源测量等新技术也作了较详细的介绍。全书共八章。包括：绪论、阻抗测量、方向图测量、增益测量、极化测量、近场测量技术、天体源测量技术、自动化测量技术。

本书是工科院校电磁场类专业教学参考书，亦可供无线电系统工程师及从事天线方面工作的科研、工程技术人员参考。

# 目 录

## 前 言

|                           |      |
|---------------------------|------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....      | (1)  |
| 1.1 引 言 .....             | (1)  |
| 1.2 天线周围的场区 .....         | (1)  |
| 1.3 发射和接收天线的互易性 .....     | (2)  |
| 1.4 缩尺模型技术 .....          | (3)  |
| 1.5 地面影响考虑 .....          | (4)  |
| <b>第二章 阻抗测量</b> .....     | (7)  |
| 2.1 引 言 .....             | (7)  |
| 2.2 谐振法测量天线输入阻抗 .....     | (7)  |
| 2.3 电桥法测量天线输入阻抗 .....     | (9)  |
| 2.4 测量线法测量天线输入阻抗 .....    | (11) |
| 2.5 图示仪法测量天线输入阻抗 .....    | (17) |
| 2.6 扫频法测量天线输入阻抗 .....     | (18) |
| 2.7 阻抗法测电小天线的效率 .....     | (22) |
| <b>第三章 方向图测量</b> .....    | (26) |
| 3.1 引 言 .....             | (26) |
| 3.2 最小测试距离 .....          | (27) |
| 3.3 最小辅助天线孔径 .....        | (31) |
| 3.4 天线测试场 .....           | (33) |
| 3.5 场强测量 .....            | (37) |
| 3.6 方向图测量 .....           | (44) |
| <b>第四章 增益测量</b> .....     | (48) |
| 4.1 引 言 .....             | (48) |
| 4.2 比较法则天线增益 .....        | (49) |
| 4.3 标准增益天线 .....          | (51) |
| 4.4 弗利斯 (Friis) 传输公式..... | (53) |
| 4.5 两相同天线法测绝对增益 .....     | (55) |
| 4.6 镜像法测绝对增益 .....        | (55) |
| 4.7 两不同天线法测绝对增益 .....     | (56) |
| 4.8 三天线法测量绝对增益 .....      | (57) |
| 4.9 增益测量的误差和修正 .....      | (58) |
| 4.10 反射测试场测绝对增益.....      | (59) |
| 4.11 近距修正.....            | (62) |

|            |                         |              |
|------------|-------------------------|--------------|
| 4.12       | 方向性系数的测量                | (66)         |
| <b>第五章</b> | <b>极化测量</b>             | <b>(72)</b>  |
| 5.1        | 引言                      | (72)         |
| 5.2        | 椭圆极化波的合成及其参数            | (72)         |
| 5.3        | 椭圆极化天线参数的测量             | (79)         |
| 5.4        | 图解法测试技术                 | (82)         |
| 5.5        | 复极化比的测量                 | (87)         |
| 5.6        | 椭圆极化天线增益测量              | (89)         |
| 5.7        | 极化传输损失的确定               | (62)         |
| <b>第六章</b> | <b>近场测量技术</b>           | <b>(95)</b>  |
| 6.1        | 引言                      | (95)         |
| 6.2        | 缩距技术                    | (95)         |
| 6.3        | 聚焦技术                    | (98)         |
| 6.4        | 解析技术                    | (103)        |
| 6.5        | 近场数据测取方法                | (107)        |
| 6.6        | 外推技术                    | (112)        |
| <b>第七章</b> | <b>天体源测量技术</b>          | <b>(119)</b> |
| 7.1        | 引言                      | (119)        |
| 7.2        | 天体源                     | (119)        |
| 7.3        | 方向图测量                   | (125)        |
| 7.4        | 增益测量                    | (131)        |
| 7.5        | 噪声温度的测量                 | (132)        |
| 7.6        | 增益——噪声温度比的测量            | (134)        |
| 7.7        | 展源和其他问题                 | (135)        |
| <b>第八章</b> | <b>天线的自动化测量</b>         | <b>(141)</b> |
| 8.1        | 概述                      | (141)        |
| 8.2        | 天线分析仪                   | (141)        |
| <b>附录一</b> | <b>极坐标阻抗圆图</b>          | <b>(146)</b> |
| <b>附录二</b> | <b>分贝换算表</b>            | <b>(147)</b> |
| <b>附录三</b> | <b>SYV型聚乙烯射频电缆参数特性表</b> | <b>(148)</b> |
| <b>附录四</b> | <b>常用国产测试仪表</b>         | <b>(149)</b> |

# 第一章 绪 论

## 1.1 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的。

本章概括介绍天线参数测量中必须具备的一些基本知识，以便于后面几章的阅读。

## 1.2 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  $90^\circ$ ，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)所示电尺寸小的偶极天线，其感应场区的外边界是  $\lambda/2\pi$ 。这里， $\lambda$  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)所示电尺寸大的孔径天线的辐射场区又分为近场区和远场区。

### 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

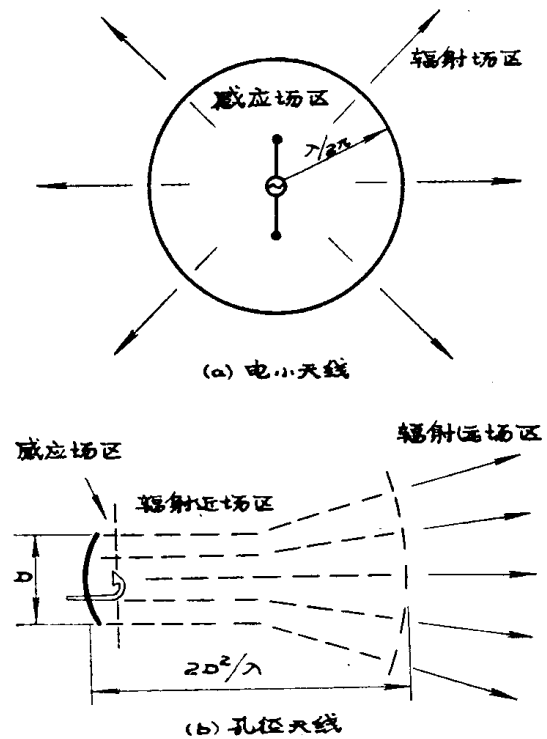


图 1.1 天线周围的场区

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付瓣难分的起伏包络。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付瓣才明显形成，但零点电平和旁瓣电平均较高。辐射近场区的边界按通用标准规定为

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

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、旁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。

### 1.3 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  $U_1$  相等的电势动  $U_2$  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

$$\frac{U_1}{I_{12}} = \frac{U_2}{I_{21}} \quad (1.2)$$

天线的互易性表明：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。

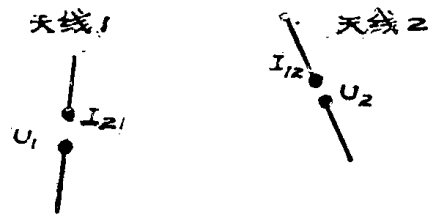


图 1.2 天线的互易定理

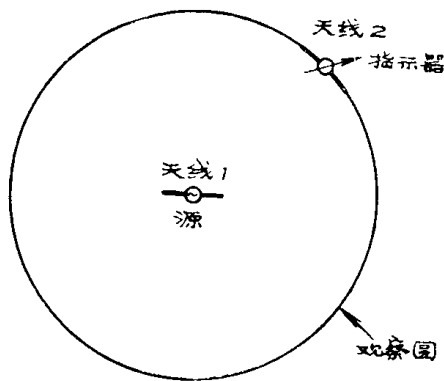


图 1.3 方向图互易性

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。

## 1.4 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  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  座标系统中，介质的介电常数为  $\epsilon$ ，导磁率为  $\mu$ ，导电率为  $\sigma$ ，工作角频率为  $\omega$ ，则天线的电磁场应满足下列方程

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -j\omega\mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E}\end{aligned}\quad (1.3)$$

若模型天线  $M$  置于  $X'$ 、 $Y'$ 、 $Z'$  座标系统中，介质的介电常数为  $\epsilon'$ ，导磁率为  $\mu'$ ，导电率为  $\sigma'$ ，工作角频率为  $\omega'$ ，则模型天线的电磁场应满足下面的方程。

$$\begin{aligned}\Delta \times \vec{E}' &= -j\omega' \mu' \vec{H}' \\ \Delta \times \vec{H}' &= (\sigma' + j\omega' \epsilon') \vec{E}'\end{aligned}\quad (1.4)$$

假设模型天线与真实天线各参量之间有如下关系

$$\begin{aligned}\vec{E}' &= m_\epsilon \vec{E} & \vec{H}' &= m_\mu \vec{H} \\ \epsilon' &= m_\epsilon \epsilon & \mu' &= m_\mu \mu \\ \sigma' &= m_\sigma \sigma & \omega' &= m_\omega \omega \\ X' &= m_F X & Y' &= m_F Y \\ Z' &= m_F Z\end{aligned}\quad (1.5)$$

式中， $m_\epsilon$ 、 $m_\mu$ 、 $m_\sigma$ 、 $m_\omega$ 、 $m_F$  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

$$\nabla \times \vec{E} = -j \frac{m_\omega m_\mu m_H m_F}{m_\epsilon} \omega \mu \vec{H}$$



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

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

$$\begin{aligned} \frac{m_\mu m_\omega m_F m_H}{\omega \epsilon} &= 1 \\ \frac{m_\epsilon m_\omega m_F m_E}{m_H} &= 1 \\ \frac{m_\sigma m_F m_E}{m_H} &= 1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

假设模型天线和真实天线都放于自由空间中，即

$$m_\epsilon = 1 \quad m_\mu = 1 \quad (1.8)$$

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

$$m_\epsilon = 1 \quad m_H = 1 \quad (1.9)$$

于是，将式 (1.8) 和式 (1.9) 代入式 (1.7) 得

$$\begin{aligned} m_\omega \omega_F &= 1 \\ m_\sigma \omega_F &= 1 \end{aligned} \quad (1.10)$$

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（即  $m_\epsilon = 1$ ,  $m_\mu = 1$ ），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

$$\begin{aligned} \text{线尺寸} \quad L_M &= L_F / m \\ \text{工作频率} \quad f_M &= m f_F \\ \text{导电率} \quad \sigma_M &= m \sigma_F \\ \text{介电常数} \quad \epsilon_M &= \epsilon_F \\ \text{导磁率} \quad \mu_M &= \mu_F \end{aligned} \quad (1.11)$$

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。

## 1.5 地面影响考虑

测量天线电路特性时，只要天线辐射基本不受阻碍，周围物体反射影响不严重即可。而测试天线辐射特性时，在周围地形地物不存在的自由空间进行是最理想的，但实际上难以办到。测量工作总是要在地面上进行，待测天线又不可能架得任意高，特别是方向性不尖锐的长、中、短波乃至超短波天线，地面影响将不可避免。因此，在进行天线测量前，对地面影响必须有一定了解。

如图 1.4 所示，在平坦地面上相距  $R$  的 A、B 两处架设发射天线和接收天线，它们的高度分别为  $h_T$  和  $h_r$ 。为了分析方便，假设两天线在纸面内的方向图为全向性，于是发射天线在地面反射点 C 方向和直射波方向所发出的电磁波强度相等。设直射波在接收天线处产生的场强为  $E_0$ ，反射波在接收天线处产生的场强为  $E_r$ ，地面反射系数为  $\Gamma$  时， $E_r$  的振幅绝对值将是直射波  $E_0$  的  $|\Gamma|$  倍，但由于传播距离不等，故反射波的相位滞后于直射波的相位。

假设发射天线到反射点 C 之间的距离为  $r_1$ ，反射点 C 到接收天线之间的距离为  $r_2$ ，收、发天线之间直射波距离为  $r$ ，则直射波和反射波的相位差  $\psi$  为

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} [(r_1 + r_2) - r] \quad (1.12)$$

因此，接收天线处的场强  $E$  应为直射波场强与考虑了相位差  $\psi$  和地面反射系数  $\Gamma$  后的反射波场强之矢量和。反射系数  $\Gamma$  是个复数，它与电磁波频率、入射角、极化特性及地面土壤特性等均有较复杂的关系，可以从有关书籍中查到。这里，为了分析方便，我们假设收、发天线高度比其间距小得多，即  $(h_T, h_r) \ll (R, r_1, r_2, r)$ ，这样，入射角接近  $90^\circ$ ，故反射系数绝对值接近于 1，相位角也近于  $180^\circ$ ，于是，反射系数  $\Gamma$  可近似取为

$$\Gamma = |1| e^{-j180^\circ} = -1 \quad (1.13)$$

考虑到  $(R, r_1, r_2, r) \gg (h_T, h_r)$ ，故有

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= \sqrt{R^2 + (h_T + h_r)^2} \\ &\approx R \left[ 1 + \frac{(h_T + h_r)^2}{2R^2} \right] \end{aligned} \quad (1.14)$$

以及

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{R^2 + (h_T - h_r)^2} \\ &\approx R \left[ 1 + \frac{(h_T - h_r)^2}{2R^2} \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

将式 (1.14) 和式 (1.15) 代入式 (1.12) 得

$$\psi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{2h_T h_r}{R} \right) \quad \text{度} \quad (1.16)$$

因此，接收点的总场强振幅为

$$|E| = 2E_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{h_T h_r}{R} \right) \quad \text{伏/米} \quad (1.17)$$

例如，当  $R \approx r = 200$  米， $\lambda = 25$  厘米 ( $f = 1200$  兆赫)，将发射天线高度  $h_T$  取为参变量，改变接收天线高度  $h_r$  时，接收点场强  $|E|$  的变化如图 1.5 所示。可以看出，随着接收天线高度的不同， $E$  的变化是很大的。

当地面反射系数  $|\Gamma|$  小于 1 时，如图 1.6 所示，场强  $|E|$  的变化与驻波相似。 $|\Gamma|$  愈接近于零，场强变化就愈缓慢，且愈接近直射波场强  $E_0$ 。

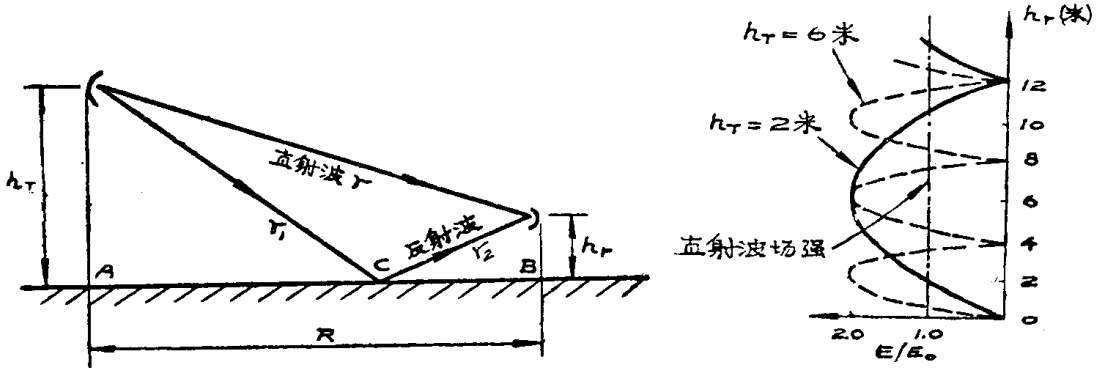


图 1.4 直射波和地面反射波

图 1.5 直射波和地面反射波的合成

上面所讨论的均是指收、发天线在入射面内都是全方向图情况，实际上，收、发天线都有一定的方向性，反射波方向发射和接收的场强均比直射波方向小得多。因此，即使反射系数  $\Gamma$  为 1，由于天线方向特性的效应，接收点场强随接收天线高度的变化也不会像图 1.5 那样显著，而是要平坦得多。在进行通信电路的设计和天线架设时，应该考虑并利用这种地面反射造成的垂直面场强波动的特性，把天线架设到场强最大点的高度上。但在进行天电参数测量时，必须设法减小或消除地面的影响，以保证测试的精确性。减小或消除地面影响的各种方法将在第三章中讲述。

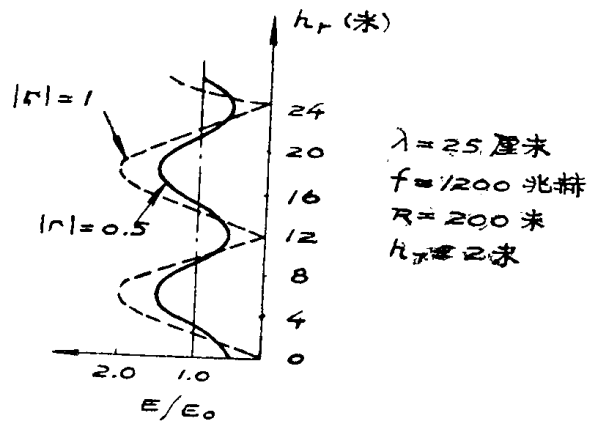


图 1.6 接收点场强随高度和地面反射大小的变化

## 第二章 阻抗测量

### 2.1 引言

阻抗是天线的参数之一。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，特别是形式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。

### 2.2 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。

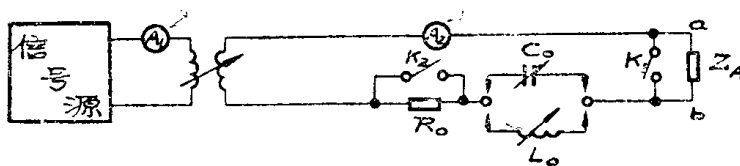


图 2.1 比较法测量电路

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  $X_1$  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;
8. 调整标准电阻  $R_0$ , 使  $I_2$  仍保持先前的数值;
9. 记下此时的标准电抗值  $X_2$  及标准电阻值  $R_2$ 。

根据测得的数据, 用下式计算获得天线的输入阻抗值:

$$R_A = R_2 \quad (\text{欧姆}) \quad (2.1)$$

$$X_A = \Delta X = X_2 - X_1 \quad (\text{欧姆}) \quad (2.2)$$

测试过程中必须注意保持信号源输出恒定 (可以用电流表  $A_1$  进行监视), 以免影响测试精度。

## 二、Q 表法

Q 表法测量天线输入阻抗是基于电容  $C$  和电感  $L$  所组成的串联谐振回路中, 电容上的电压比加到回路两端的电压大  $Q$  倍的原理。这里,  $Q$  是谐振回路的品质因素, 其值为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (2.3)$$

式中,  $\omega_0$  是谐振角频率,  $R$  是电感线圈及回路连接导线的损耗电阻 (电容  $C$  损耗电阻极微, 故不计入)。

当知道电容器  $C$  及谐振角频率  $\omega_0$ , 并测得回路品质因素  $Q$  后, 用下式便可以求得待测天线阻抗值

$$R_A = \frac{1}{Q \omega_0 C} \quad (2.4)$$

$$X_A = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (2.5)$$

一般中、长波段电小天线输入阻抗的电抗分量均呈容性, 故具体测量电路如图 2.2 所示。它由信号源、Q 表、标准电感  $L_0$  等组成。

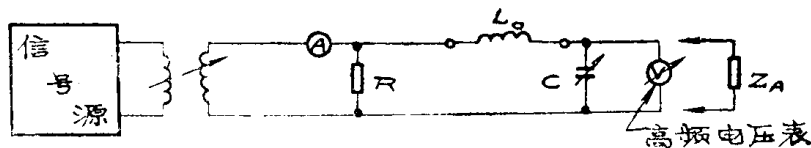


图 2.2 Q 表法测量电路

测试步骤如下:

1. 在 Q 表的 1、2 端接入标准电感  $L_0$ ; ①
2. 调节 Q 表的电容  $C$ , 使回路谐振, 记下此时的电容量  $C_1$  和回路品质因素  $Q_1$ ;
3. 将待测天线阻抗  $Z_A$  与  $C$  相并联接入电路;
4. 在相同频率下, 将回路再次调到谐振;
5. 记下此时的电容量  $C_2$  和品质因素  $Q_2$ 。

① 电感量大小的选择原则如下: 在所要求的频率上, 接入和不接入待测阻抗  $Z_A$  时, 调节 Q 表的电容  $C$  都能找到回路的谐振点。

根据测得的数据，用下式可以算出待测天线的输入阻抗

$$X_A = \frac{1}{\omega_0(C_2 - C_1)} \quad (2.6)$$

$$R_A = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 - Q_2} \cdot \frac{1}{\omega_0 C_1} \quad (2.7)$$

### 三、综合法

综合法是将比较法和 Q 表法相结合进行的一种方法，测试电路如图 2.3 所示。

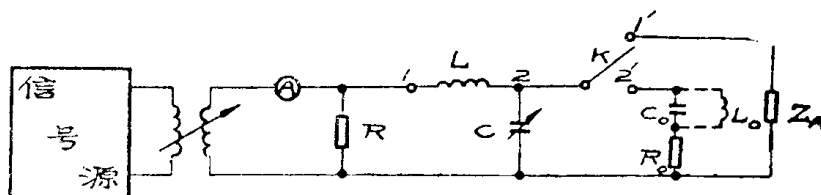


图 2.3 综合法测试电路

测试步骤如下：

1. 将开关 K 置于 1' 位置，使待测天线阻抗  $Z_A$  接入电路；
2. 调节 Q 表的电容 C，使回路在测试频率上谐振；
3. 记下此时的回路品质因素  $Q_1$ ；
4. 将开关位置转到 2'，从而断开待测天线阻抗  $Z_A$ ，接入标准阻抗 ( $R_0, C_0$  或  $L_0$ )；
5. 调节标准阻抗，使回路重新谐振，并得到与先前相同的品质因素  $Q_1$ 。

根据标准阻抗数值，便可确定待测天线的输入阻抗值，即

$$X_A = \frac{1}{\omega_0 C_0} \quad \text{或} \quad X_A = \omega_0 L_0 \quad (2.8)$$

$$R_A = R_0 \quad (2.9)$$

除上述三种方法外，还有代替法、伏安法、分流法等，它们均属于谐振法范畴，这些方法不难从一般测量书籍中找到，这里不再赘述。谐振法特别适用于中、长波范围的电小天线输入阻抗的测量，诸如移动电台和广播接收机所使用的鞭天线、环天线、磁棒天线等。

## 2.3 电桥法测量天线输入阻抗

测量阻抗的专用仪器——阻抗电桥可以用来进行天线输入阻抗的测量。其基本原理是将信号源、指示器、可变标准阻抗和待测阻抗组成四臂桥式电路，将其调至平衡，用比较的办法求得待测阻抗值。

### 一、低频电桥

频率在 30 兆赫以下时，一般可以采用图 2.4(a) 所示阻抗电桥或图 2.4(b) 所示导纳电桥测量天线的输入阻抗。电桥平衡后的阻抗（或导纳）方程为

阻抗电桥

$$R_x = R_B \frac{(C_{B_2} - C_{B_1})}{C_N} \quad (2.10)$$

$$X_x = \frac{1}{\omega_0} \left( \frac{1}{C_{P_2}} - \frac{1}{C_{P_1}} \right) \quad (2.11)$$

导纳电桥

$$G_x = \omega_0^2 M \Delta C_G \quad (\text{欧姆}) \quad (2.12)$$

$$B_x = \omega_0^2 \Delta C_B \quad (\text{欧姆}) \quad (2.13)$$

式中

$$M = \frac{C' C'' R}{C'''}$$

其余各参量符号见图 2.4。

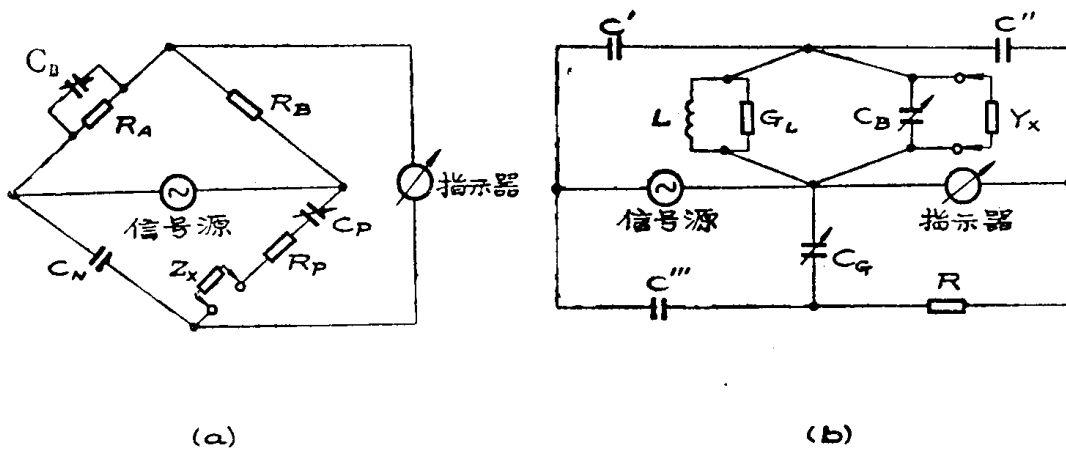


图 2.4 低频电桥电路

(a) 阻抗电桥

(b) 导纳电桥

## 二、同轴和波导电桥

同轴和波导电桥与低频电桥原理相似，其使用频率可以从超短波直到微波波段。图 2.5 所示为同轴阻抗电桥，待测天线阻抗值可以直接读出。波导电桥的主要部件是如图 2.6 所示的双 T 接头。

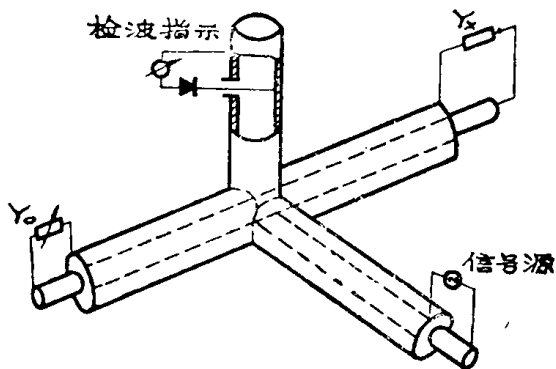


图 2.5 同轴电桥

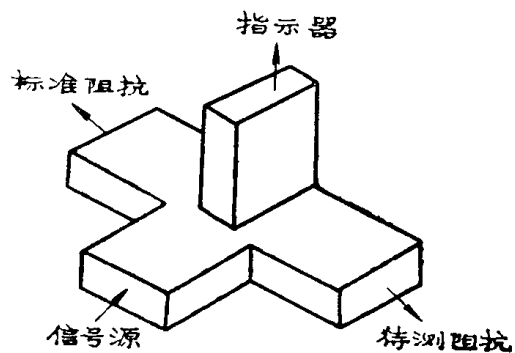


图 2.6 波导电桥的双 T 接头

波导电桥由在双 T 接头的四个端口上分别接可调标准阻抗、待测天线阻抗、信号源和指示器组成。根据双 T 接头的性质，当调节 1 端的标准阻抗使其与接于 2 端的待测阻抗相等时，则 3 端进入的功率在 4 端就没有输出，即接于 4 端的指示器指示为零，也就是电桥平

衡。此时，标准阻抗的数值就是待测阻抗值。

电桥法测阻抗简单、迅速，其精度主要取决于标准阻抗和电桥结构。在微波波段，一方面高准确度可变标准阻抗制作十分困难，另一方面微波孔径天线的反射系数比输入阻抗更为重要和更有意义。因此，实际工作中往往把波导电桥作为反射计，用以测量天馈系统的反射系数模值。

## 2.4 测量线法测量天线输入阻抗

### 一、测量线

测量线（或称驻波测量线、开槽线）是用来测量传输线驻波分布的专用仪器，它由开槽传输线、测试探头（包括探针、调谐回路和检波器）和机械传动装置组成。从原理上讲，每种传输线都有与其对应的测量线。但最常用的有三种：(1)同轴测量线；(2)平板测量线；(3)波导测量线。图 2.7 所示为同轴测量线示意图。探针经狭槽垂直插入同轴线内，线内电场将在探针上感应电压，其大小与探针所在位置的电场强度成比例，感应电压经二极管检波后由外接指示器直接指示。因此，指示器读数就间接反映了同轴线内电场强度的相对大小。当探针沿线移动时，指示器指示必然随线上驻波分布而出现最大电场（或电压）值和最小电场（或电压）值，从而求出驻波系数及工作波长（两最小值间距之二倍）等参数。

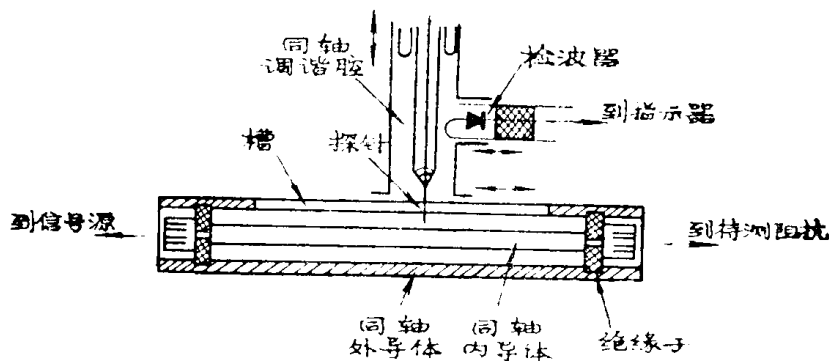


图 2.7 同轴测量线示意图

### 二、基本原理

当传输线终端接上不等于其特性阻抗的负载时，沿传输线将形成驻波分布，其大小及分布规律取决于终端负载阻抗的性质。各不同负载阻抗情况下，沿线电流（或电压）分布如图 2.8 所示。因此，如果将天线作为负载接入传输线，则可根据沿传输线驻波分布特性求出天线的输入阻抗。

假设传输线终端负载（即天线输入阻抗）为  $Z_A$ ，沿线离终端距离为  $l$  处的输入阻抗为  $Z_{in}(l)$ ，则两阻抗间有如下关系

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_A + jZ_0 \operatorname{tg} kl}{Z_0 + jZ_A \operatorname{tg} kl} \text{ (欧姆)} \quad (2.14)$$

式中， $Z_0$  是传输线的特性阻抗（欧姆）， $k = 2\pi/\lambda_g$  是相位常数或波数（弧度/米）， $\lambda_g$  是波导波长（米）， $l$  是离开终端的距离（米）。



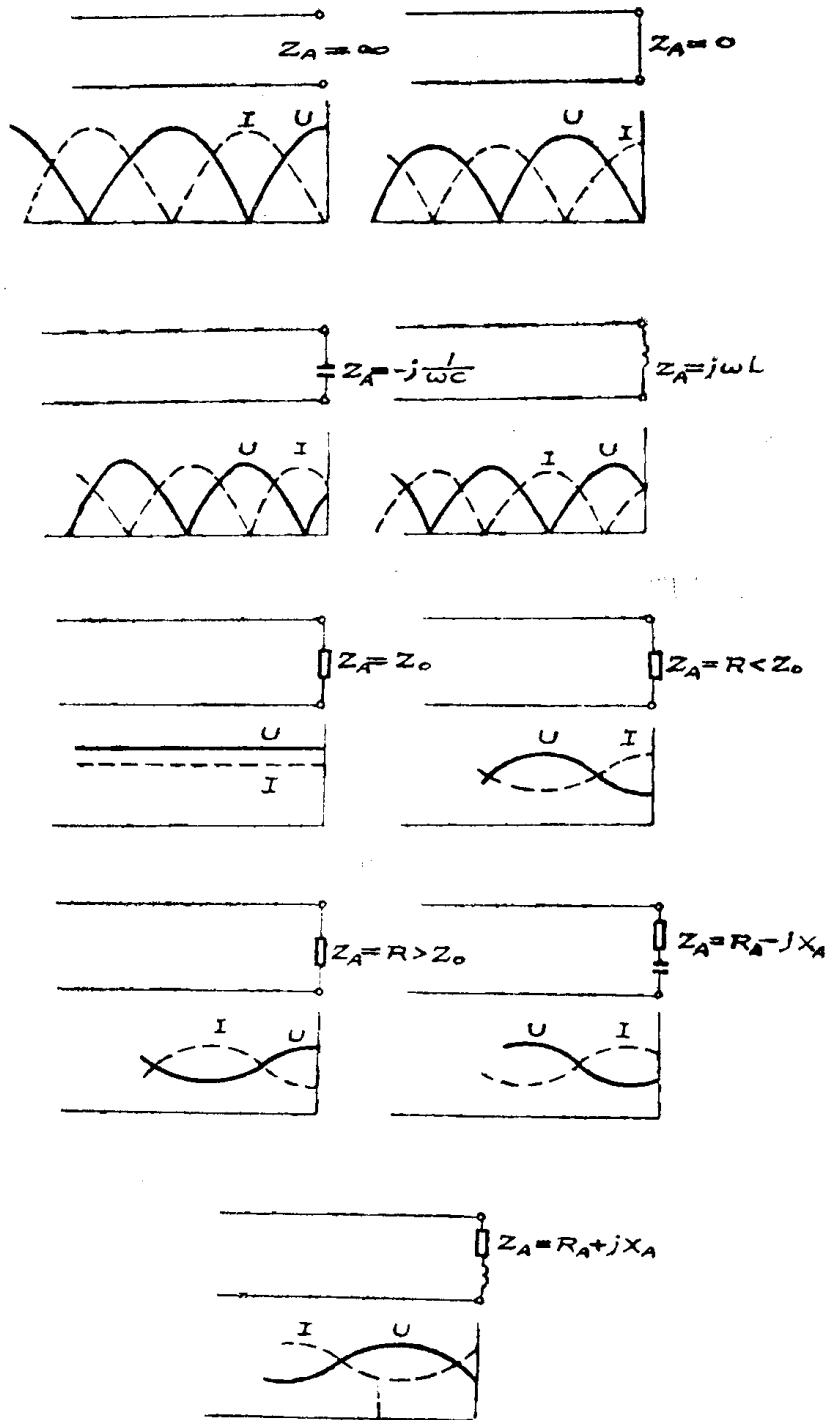


图 2.8 不同负载时，沿传输线的电压、电流分布

另一方面，传输线上驻波波节点处的输入阻抗  $Z_{\min}$  与驻波系数  $\rho$  有如下关系

$$Z_{\min} = Z_0 / \rho \tag{2.15}$$

式中， $\rho$  是驻波系数。

如果我们用  $l_{\min}$  表示某一驻波波节点到终端的距离，则把  $l = l_{\min}$  代入式 (2.14)，于是，驻波波节点处的输入阻抗值为

$$Z_{\min} = \frac{Z_0}{\rho} = Z_0 \frac{Z_A + jZ_0 \operatorname{tg} kl_{\min}}{Z_0 + jZ_A \operatorname{tg} kl_{\min}} \tag{2.16}$$