

天线和馈线 参数的测量

A. 3. 佛拉金 E. B. 雷日柯夫著
陈益邻 来妙林 陈文炳 甘体国译
张 中 清 陈 益 邻 校
人 民 邮 电 出 版 社

天綫和饋綫参数的測量

A. 3. 佛 拉 金 著

E. B. 雷 日 柯 夫

陈益邻 来妙林 譯

陈文炳 甘体国

张中清 陈益邻 校

人 民 郵 電 出 版 社

А. З. Фрадин, Е. В. Рыжков
Измерение параметров
антенн-фидерных устройств
Связьиздат Москва 1962

内 容 提 要

本书是全面而系统地总结和叙述天线——馈线参数测量的一本维护用参考书。书中第一章叙述天线——馈线设备各参数的基本定义。第二、三、四、六章叙述测量输入阻抗的各种方法。第五章介绍各种定向耦合器的原理及性能。第七章叙述馈线参数的测量。第八章叙述无线电信号场强的测量。第九、十章分别叙述方向图和增益的测量。

本书可供从事天线——馈线设备及超高频技术方面工作的工程技术人员参考，并可作为高等院校无线电专业的教学参考书。

天线和馈线参数的测量

著 者：(苏联)А. З. 佛拉金 Е. В. 雷日柯夫

译 者：陈益邻 来妙林 陈文炳 甘体国

校 者：张 中 清 陈 益 邻

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者：北 京 东 单 印 刷 厂

发行者：新 华 书 店 北 京 发 行 所

经售者：各 地 新 华 书 店

开本 787×1092 1/32 1963年8月北京第一版
印张 10 16/32 页数 168 页 1965年8月北京第一次印刷
印刷字数 241,000 字 印数 43,450 册

统一书号：15045·总1491·无429

定价：(科6) 1.40 元

序 言

近年来，天綫技术发展的特点，第一是广泛采用了大量的新型天綫，第二是对原用天綫的结构和綫路作了各种各样的改进。新的研制往往是从理論上开始，并且几乎总是对理想条件来作数学分析，而計算是按近似公式进行的。因此，理論研究的結果必須用实验来验证，而天綫参数的測量正可作为实验验证的基础。在天綫技术中許多理論上还不够成熟的課題，要完全依靠实验来解决。由此可見，在新型天綫的研制中，实验起着最重要的作用，它既是檢驗理論結論的手段，又是独立的研究方法。

天綫参数測量之所以必要，还因为：

1. 在各种无綫电台使用的、从超长波到毫米波所有波段的天綫，在使用中会逐渐变形，从而引起天綫参数发生变化。所以，在使用規程中規定要定期检测天綫的参数，并根据測量結果来調整和調諧天綫；
2. 工厂大量生产天綫时，需要測量天綫的参数；
3. 无綫电台应用自动控制設備时，特別需要安装經常監視和調整天綫参数的仪器。

天綫測量担负着如此广泛的任务，显然需要有一本书来相当全面和系統地闡明这方面的問題。但是，迄今为止，关于天綫測量問題的討論，只散見于个别关于綫路和測量仪器的期刊論文，或者是天綫設備和无綫电測量等普通教程中；而其中天綫測量方面的內容只占一部分，討論是极为有限的。

本书就是为了弥补上述不足的一个嘗試。

本书供在实际工作中需要測量天綫参数的工程师和技术員使用，也可以用作天綫課程的輔助教課书。

本书除叙述在多年使用中受过考驗的、广泛应用的測量方法和測量仪器外，还介紹了可以作为繼續改进天綫測量技术基础的、在期刊中发表过的新設計和新概念。所以，本书对于从事研制測量天綫参数用的新型設備的专家也是有益的。

当然，本书不可能詳尽无遺地叙述天綫測量方面迄今为止所积累的一切理論和实验材料。为此在书末列有文献索引，借以帮助讀者于必要时对所研究問題，可以找些补充資料。

作者

目 录

序言

第一章 天綫-饋綫設備的参数	1
基本定义	1
§ 1.1 天綫参数的分类	1
§ 1.2 天綫的一次实验参数	2
§ 1.3 饋綫。饋綫的参数和特性	4
§ 1.4 直角坐标阻抗图	8
§ 1.5 极坐标阻抗图	11
§ 1.6 第一組二次参数：頻率特性、諧振頻率、通頻帶	15
§ 1.7 方向图的图示法	17
§ 1.8 与方向图有关的天綫的二次参数：旁瓣最大值的相对电平、主瓣宽度、方向系数	24
§ 1.9 与增益系数有关的天綫的二次参数：效率、有效面积、有效高度	27
§ 1.10 天綫的模型研究	27
§ 1.11 无綫电波接收理論的簡單說明	32
第二章 測量輸入阻抗的諧振法	35
§ 2.1 总則	35
§ 2.2 附加阻抗法	35
§ 2.3 伏特表和安培表法	40
§ 2.4 Q 表法	41
§ 2.5 代替法	46
§ 2.6 天綫和饋綫欧姆表	49
§ 2.7 分流法	55
§ 2.8 自动測量輸入阻抗的方法	58

第三章 用电桥法測量天綫的輸入阻抗	61
§ 3.1 引言	61
§ 3.2 长、中和短波用的对称电桥	61
§ 3.3 不对称电桥	64
§ 3.4 利用电桥測量饋綫的行波系数	65
§ 3.5 同軸电桥和波导电桥	66
§ 3.6 散射矩陣的概念	72
§ 3.7 同軸和波导电桥的工作原理分析	74
§ 3.8 双綫电桥	76
第四章 用測量綫測量天綫的輸入阻抗	78
§ 4.1 引言	78
§ 4.2 饋綫上电压和电流的分布	78
§ 4.3 測量綫的簡图	83
§ 4.4 測量綫装置	84
§ 4.5 用測量綫确定輸入阻抗的方法	104
§ 4.6 自动記錄电压分布曲綫的装置	110
§ 4.7 測量綫方法的測量誤差	112
第五章 反射計	121
§ 5.1 反射計的方框图	121
§ 5.2 定向耦合器的主要特性	123
§ 5.3 双綫定向耦合器	123
§ 5.4 同軸綫定向耦合器	132
§ 5.5 平板綫定向耦合器	139
§ 5.6 波导定向耦合器	142
第六章 求輸入阻抗的混合法	148
§ 6.1 引言	148
§ 6.2 三探針法	149
§ 6.3 巴尔切阻抗仪	154
§ 6.4 旋轉式定向耦合器	156
§ 6.5 T 形接头測量耦合器	160

第七章 饋綫参数的測量	167
§ 7.1 同軸電纜縮波系数的測量	167
§ 7.2 波阻抗的測量	169
§ 7.3 饋綫衰减系数的測量	171
§ 7.4 不对称系数的測量与开式饋綫上波的傾斜	177
§ 7.5 接收机輸入端不对称的測量	183
第八章 場强的測量	187
§ 8.1 引言	187
§ 8.2 无綫電波的到达方向	189
§ 8.3 場的相对振幅測量	194
§ 8.4 場的絕對振幅測量	197
§ 8.5 測量場的絕對振幅的仪器	211
§ 8.6 場的相位的測量	219
§ 8.7 存在涨落(衰落)时, 場强測量数据的統計处理方 法	226
§ 8.8 存在涨落时, 場强測量数据的自动处理仪器	234
§ 8.9 天綫短路电流法	242
§ 8.10 測量場强的校准方法.....	248
§ 8.11 无綫電波的場的极化測量.....	251
第九章 天綫方向图的測繪	258
§ 9.1 待測天綫与輔助天綫之間最小距离的确定	258
§ 9.2 測繪方向图的方法	269
§ 9.3 利用透鏡測繪方向图	271
§ 9.4 在近距离上研究抛物面反射鏡天綫	273
§ 9.5 自动測繪方向图的設備	277
§ 9.6 借助飞机和直升飞机測繪天綫的方向图	280
§ 9.7 关于用宇宙綫測繪天綫方向图的問題	286
§ 9.8 在均匀磁場內測繪鉄氧体天綫的方向图	287
第十章 天綫增益系数的測量	290
§ 10.1 固定天綫的增益系数的測量.....	290

§ 10.2 用比較法(代替法)測量可移动天綫的增益系数	291
§ 10.3 用两个相同天綫法測量增益系数。两个不同天綫 法的綜述.....	294
§ 10.4 用平面屏法測量天綫的增益系数.....	296
§ 10.5 关于地面反射对天綫增益系数測量結果的影响.....	300
附 录.....	302
参考文献.....	326

第一章 天綫-饋綫設備的參數

基本定義

§ 1.1 天綫參數的分類

天綫是一種能量變換器。發射天綫把發射機輸出迴路的高頻交流能變為輻射電磁能，即變為空間電磁波。相反，接收天綫把到達的空間電磁波變為高頻交流能，傳送到接收機的輸入迴路。

這樣一來，天綫的工作常常與兩種形式的能量相關。由此，我們把天綫的參數分為兩組。第一組參數與高頻交流能相關，它們是：輸入阻抗、諧振頻率、頻率特性和通頻帶等。第二組參數與輻射電磁能相關，構成所謂輻射特性。它們是：方向圖、主瓣寬度、旁瓣最大值的相對電平、增益系數、方向系數、有效面積和有效高度等。

兩組參數同等地表明了發射天綫和接收天綫的工作。按互易定理，天綫的參數有一定的數值，不因它是用作發射或者接收而異。所以，天綫的研究可在發射狀態或在接收狀態進行，視何者方便而定。

實驗中，由直接測量可以確定的某些天綫參數，我們稱之為天綫的一次實驗參數，簡稱為一次參數。其餘的參數為二次實驗參數，簡稱為二次參數，可以根據一次參數借圖解或計算求得。天綫的第一組參數中，輸入阻抗是一次參數。根據頻帶內輸入阻抗的已知值，能夠求得諧振頻率、頻率特性和通頻帶。天綫的第二組參數中，方向圖和增益系數是一次參數。已

知方向图就能求得主瓣宽度、旁瓣最大值的相对电平，以及获得方向系数的概念。已知增益系数就能求得天线的有效面积和有效高度。

§ 1.2 天线的一次实验参数

输入阻抗①

把电动势源接入天线，天线中就会产生电流。电流在天线不同点的幅度和相位是不相同的。电动势源的接入点称为天线的输入端。

天线输入端的电压与电流之比称为天线的输入阻抗，用 Z_A 表示。 Z_A 的有功和无功分量分别用 R_A 和 X_A 表示。

方向图

众所周知[1]，极坐标中天线的辐射场可以表示为：

$$E = 120 \pi H = A \frac{e^{-imr}}{r} F(\vartheta, \varphi), \text{ 伏/米}, \quad (1.1)$$

式中 E ——电场强度；

H ——磁场强度；

r, ϑ, φ ——极坐标，坐标原点放在天线中心；

m ——相位常数，等于 $\frac{2\pi}{\lambda}$ ；

λ ——波长；

A ——与电流幅度（线天线）或口径上的电场强度（绕射天线）成比例的因子，它是天线尺寸的函数；

$F(\vartheta, \varphi)$ ——角坐标 ϑ 和 φ 的归一化函数，即是最大值（与

① 这里把天线看作发射天线。

ϑ_0, φ_0 相应) 等于 1 的函数。

从(1.1)式看出, r 恒定时, E 和 H 的值取决于坐标 ϑ 和 φ 。表示这个关系的函数 $F(\vartheta, \varphi)$ 就是天线的方向图。方向图表明: 天线的辐射强度^①在不同方向 (不同的 ϑ 和 φ) 是不相同的。

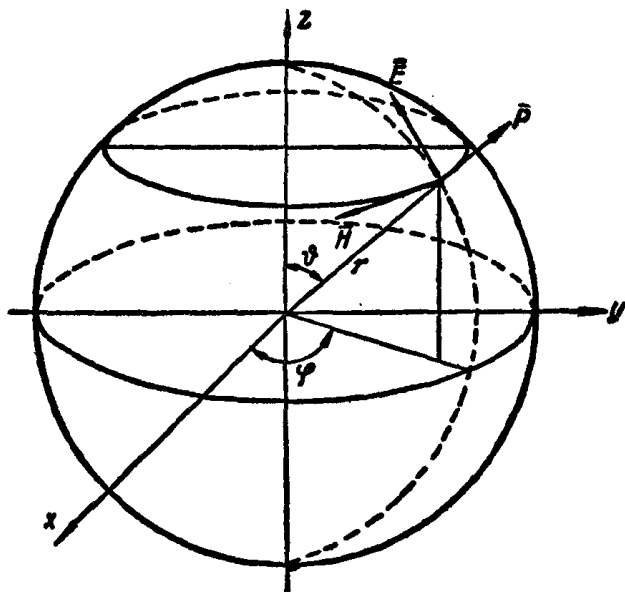


图 1.1 极坐标 r, ϑ, φ 与直角坐标 x, y, z 的关系; 传播向量 $\vec{P}$ 、电场向量 $\vec{E}$ 及磁场向量 $\vec{H}$ 的方向

$F(\vartheta, \varphi)$ 等于 1 的方向 $\vartheta = \vartheta_0, \varphi = \varphi_0$, 称为方向图的主最大方向。

增益系数

天线增益系数 G 的定义是: 天线在方向图主最大方向

① 辐射强度就是通过波前上单位面积的辐射功率。

($\vartheta = \vartheta_0, \varphi = \varphi_0$) 的輻射强度与平均輻射强度 (設天綫效率 $\eta = 100\%$) 的比值。因此

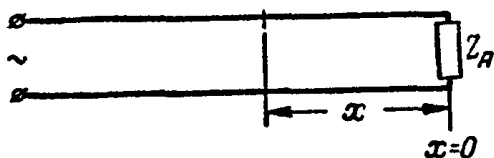
$$G = \frac{\frac{E_{\text{最大}}^2}{120 \pi} \frac{P}{4 \pi r^2}}{\frac{E_{\text{最大}}^2}{30 P}} = \frac{E_{\text{最大}}^2 r^2}{4 \pi r^2} \cdot \frac{30 P}{E_{\text{最大}}^2} \quad (1.2)$$

式中 $E_{\text{最大}}$ ——在 $\vartheta = \vartheta_0, \varphi = \varphi_0$ 方向上, 及在与确定平均場强时相同的距离 r 上的 E 值;

P ——供給天綫的功率。

§ 1.3 饋綫. 饋綫的参数和特性

近代的天綫大多数都用饋綫供电。饋綫就是天綫与发射机



或者天綫与接收机之間的連接綫, 如双綫、同軸電纜、波导等。

图 1.2 饋綫的图示

將饋綫用双綫

表示 (图 1.2), 它的一端与电动势源相接, 另一端与負載相接, 例如与輸入阻抗等于 Z_A 的天綫相接。饋綫的参数有: 波阻抗 ρ 、衰减常数 β ^① 和速度系数 n , n 等于真空中的光速与饋綫中的相速之比^②。这些参数与饋綫的类型 (双綫、同軸綫、波导等)、饋綫的尺寸、波型 (阶数)、振荡频率和制造饋綫的材料有关。

計算某些饋綫参数的公式參見附录 3。

① 苏联国家标准 ГОСТ 1494-61 規定, 从 1962 年 7 月 1 日起, 衰减常数改用 α 标记, 相位常数改用 β 标记, 但本书中尚未改动。

② 在柔性的同軸饋綫中 $n > 1$, n 称为縮波系数, 在波导中 $n < 1$ 。

把电动势接入饋綫时，饋綫上会产生向負載 Z_A 方向运动的电磁波。用 $U_{x\text{入射}}$ 和 $I_{x\text{入射}}$ 表示这电磁波在距負載为 x 的截面上的电压和电流。用 $U_{0\text{入射}}$ 和 $I_{0\text{入射}}$ 表示在 $x=0$ 截面上（接入負載 Z_A 处）的电压和电流。电压和与它相应的电流間有着关系：

$$\left. \begin{aligned} U_{x\text{入射}} &= I_{x\text{入射}} \rho; \\ U_{0\text{入射}} &= I_{0\text{入射}} \rho. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

通常，饋綫的衰减很小，所以我們把它认为是理想的，即是沒有衰减的。如果把 x 当作流动坐标，能够写出：

$$\left. \begin{aligned} U_{x\text{入射}} &= U_{0\text{入射}} e^{imx}; \\ I_{x\text{入射}} &= I_{0\text{入射}} e^{imx} = \frac{U_{0\text{入射}} e^{imx}}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

在 $x=0$ 截面处，入射波的一部分被負載所吸收，另一部分反射回电动势源。我們用 $U_{0\text{反射}}$ 和 $I_{0\text{反射}}$ 表示 $x=0$ 截面处反射波的电压和电流，用 $U_{x\text{反射}}$ 和 $I_{x\text{反射}}$ 表示 x 截面处反射波的电压和电流。

反射波电压和电流之間有与入射波电压和电流之間类似的关系：

$$\left. \begin{aligned} U_{x\text{反射}} &= -I_{x\text{反射}} \rho; \\ U_{0\text{反射}} &= -I_{0\text{反射}} \rho; \\ U_{x\text{反射}} &= U_{0\text{反射}} e^{-imx}; \\ I_{x\text{反射}} &= I_{0\text{反射}} e^{-imx}. \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

比值

$$\text{和} \quad \left. \begin{aligned} \Gamma_{U_0} &= \frac{U_{0\text{反射}}}{U_{0\text{入射}}} \\ \Gamma_{I_0} &= \frac{I_{0\text{反射}}}{I_{0\text{入射}}} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

分別称为电压反射系数和电流反射系数。它們可以由負載阻抗 Z_A 和波阻抗 ρ 来确定：

① 如果饋綫上的电磁波有着明显的衰减，并且相速 $v_{\phi} \neq c$ ，那末(1.4)式和下
列式中的 im 应当用 $\gamma = \beta + im'$ 来代替，式中 β 是衰减常数， $m' = \frac{2\pi n}{\lambda}$ 。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{U0} &= \frac{Z_A - \rho}{Z_A + \rho} = p e^{i\varphi}; \\ \Gamma_{I0} &= -\Gamma_{U0}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

式中 p 和 φ 分别是反射系数的模和相角。

因为 Γ_{U0} 和 Γ_{I0} 仅在相位上相差一恒定值 π ，所以没有必要分析两个系数。以后我们把反射系数理解为 Γ_{U0} 。

线上每一截面处的电压 U_x 和电流 I_x ，等于入射波和反射波相应值的叠加：

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_{x\text{入射}} + U_{x\text{反射}} \\ &= U_0 \text{入射} e^{imx} (1 + p e^{-2imx + i\varphi}); \\ I_x &= I_{x\text{入射}} + I_{x\text{反射}} = \\ &= \frac{U_0 \text{入射}}{\rho} e^{imx} (1 - p e^{-2imx + i\varphi}). \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

按照(1.7)式，用 Z_A 和 ρ 表示 Γ_{U0} ，用

$$U_0 = U_0 \text{入射} + U_0 \text{反射} = U_0 \text{入射} \frac{2Z_A}{Z_A + \rho} \quad (1.9)$$

表示 $U_0 \text{入射}$ ，则得到：

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_0 \left(\cos mx + i \frac{\rho}{Z_A} \sin mx \right); \\ I_x &= \frac{U_0}{\rho} \left(i \sin mx + \frac{\rho}{Z_A} \cos mx \right) \textcircled{1}. \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

电压和电流的最小值 $U_{\text{最小}}$ 和 $I_{\text{最小}}$ 等于：

$$\left. \begin{aligned} |U_{\text{最小}}| &= |U_0 \text{入射}| (1 - p); \\ |I_{\text{最小}}| &= \frac{|U_0 \text{入射}|}{\rho} (1 - p). \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

它们的最大值 $U_{\text{最大}}$ 和 $I_{\text{最大}}$ 等于：

$$\left. \begin{aligned} |U_{\text{最大}}| &= |U_0 \text{入射}| (1 + p); \\ |I_{\text{最大}}| &= \frac{|U_0 \text{入射}|}{\rho} (1 + p). \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

① 考虑线上的衰减时，(1.10)式中的三角函数要用相应的双曲函数来代替。

行波系数 (KBB)① K 等于:

$$K = \left| \frac{U_{\text{最小}}}{U_{\text{最大}}} \right| = \left| \frac{I_{\text{最小}}}{I_{\text{最大}}} \right| = \left| \frac{1-p}{1+p} \right|. \quad (1.13)$$

从(1.8)式容易看出, 所有情况下, 电压最小值的坐标 x_0 与电流最大值的坐标重合, 而电压最大值的坐标 $x_{\text{最大}}$ 与电流最小值的坐标重合, 而且

$$x_0 = \frac{\pi + \varphi}{2m} = \frac{\lambda}{4} + \frac{\varphi}{2m}, \quad (1.14)$$

$$x_{\text{最大}} = \frac{\varphi}{2m}. \quad (1.15)$$

因为电压最小点和最大点相互隔开一恒定值 $\frac{\lambda}{4}$, 所以可以只分析二者之一。我们将分析最小点 x_0 。

比值 $\frac{U_x}{I_x}$ 是 x 截面处馈线的阻抗, 用 Z_x 表示。按(1.7)和(1.8)得到

$$Z_x = R + iX = \rho \frac{1 + \Gamma_{U_0} e^{-2imx}}{1 - \Gamma_{U_0} e^{-2imx}} = \rho \frac{1 + \Gamma_{U_x}}{1 - \Gamma_{U_x}}, \quad (1.16)$$

式中 Γ_{U_x} ——在 x 截面处的反射系数, 等于 $\frac{U_{x\text{反射}}}{U_{x\text{入射}}}$ 。

如果把坐标原点到 $x = x_0$ 处, 也可以用行波系数 κ 来表示阻抗 Z_{x_0} 。我们实际引进一新坐标

$$x' = x - x_0. \quad (1.17)$$

把(1.17)式中的 x 代入(1.8)式, 进行适当的变换后得到

$$Z_x = \rho \frac{1 + p e^{-2imx'} + i\pi}{1 - p e^{-2imx'} + i\pi} = \rho \frac{1 - p e^{-2imx'}}{1 + p e^{-2imx'}}. \quad (1.18)$$

将(1.18)式有理化, 按(1.13)式用 κ 来表示 p 之后得到

$$Z_x = \rho \frac{\kappa + 0.5i(1 - \kappa^2)\sin 2mx'}{\cos^2 mx' + \kappa^2 \sin^2 mx'}. \quad (1.19)$$

这样一来, 馈线任意截面处的阻抗与馈线的波阻抗 ρ 成比

① 文献中常常采用驻波系数的概念, 它等于行波系数的倒数 $\frac{1}{K}$ 。

例，并且是一个二元函数：是复反射系数 Γ_{V_x} [参看(1.16)] 的函数，也就是 Γ_{V_x} 的模 ρ 和相角 φ 的函数，或者是行波系数 κ 和坐标 x' 的函数 [参看(1.19)]。 x' 是从饋線上电压最小值位置向发射机方向度量。

§ 1.4 直角坐标阻抗图

通常，不止在一个频率，而是在频带内的几个频率测量天线的输入阻抗。根据测量数据可作出输入阻抗与频率的关系曲线。因为输入阻抗是复数，一般來說要求作两种曲线：其一是阻抗的实部与频率的关系，其二是虚部与频率的关系。

如果采用了图 1.3 所示的图示法，那末用一条曲线就能够表示输入阻抗与频率的关系。这个方法的实质如下：

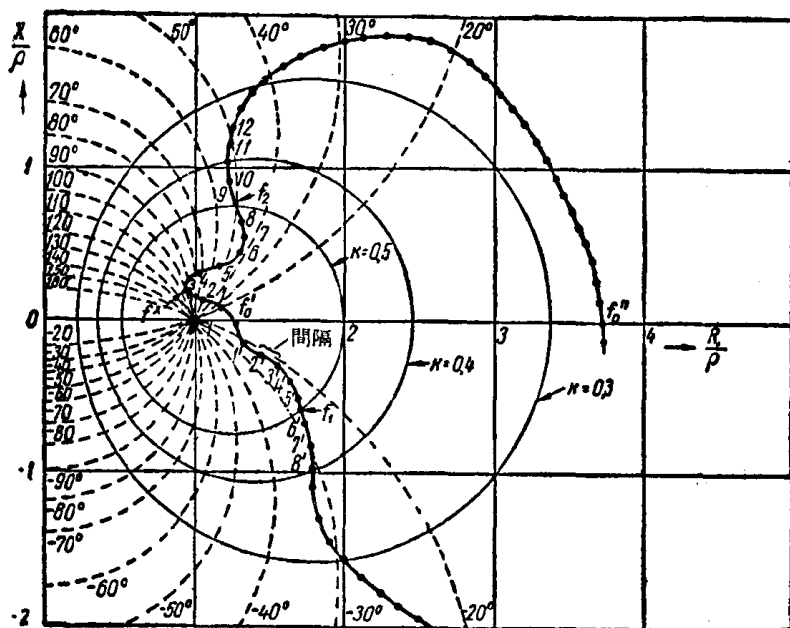


图 1.3 直角坐标阻抗图中，以曲线形式表示的输入阻抗与频率的关系