

含有铁氧体圆杆的矩形波导的 散射矩阵及其等效线路^{* 1)}

胡 佩 康

提 要

本文尝试用四端网络法研究非互易微波铁氧体器件。首先,把一节含着一根铁氧体杆的三厘米波段的矩形波导看作四端网络,进行阻抗和散射系数的测量。由测得的散射矩阵求出了T形等效线路,结果表明,小直径铁氧体杆具有并联容性电纳的性质,电纳的数值随外磁场的变化范围很大,与可调螺钉的作用十分相似。其次,把两根铁氧体杆沿波导纵向排列,在实验中考察了这种相继阻碍物的等效线路。结果表示,只要相邻阻碍物的距离足够大,总的等效线路可用“单元”等效线路的串联表示。最后,以分析相移网络为例,说明了等效线路的应用。用这一方法研究波导中的多体散射,具有独特的优点。

一、引 言

从实际应用来说,微波铁氧体器件的研究可分为两类:第一类是研究某一系统的基本性质,以便提出某种可能的应用,为创制新型器件提供依据;第二类是对已有的器件进行更精细的研究,从而提出最佳的设计方案。

研究上述问题也可分成两类:一类是场论分析的方法,这可以解相应的旋磁媒质电动力学的边值问题。但是可以严格求解的问题是极其有限的,而且即使在这些有限问题中,往往还得对所得到的超越方程进行繁复的数值运算。虽然实际上可以采用各种近似方法,如微扰法和变分法。不过,微扰法若用准静态条件,不适用于散射系数的计算。至于变分法,虽可得到较好的结果,但寻找合理而简单的试探场也是一项艰巨的任务。另一方法是用“路”的概念来分析,这时,只需考虑装置对外界的反应,而不顾装置内部电磁场的分布情况,因而使问题大为简化。

本文的目的在于,试图以一个几何结构比较简单的系统作为例子,说明用四端网络法研究非互易器件的可能性。由于界面比较简单,可以进行场论分析。这样便于把场论分析的结果和网络参数测量结果进行比较,从而更好地说明“场”的问题如何化为“路”的问题。但场论分析将在另一篇文章中介绍,本文只讨论实验的研究方法与结果。我们把系统看作四端网络进行网络测量,求出T形等效线路。然后,对多根铁氧体杆的等效线路进行分析。这样便可以依据低频集总常数电路的概念,分析一系列非互易器件。当波导中排有多根铁氧体杆时,这一方法的优点是一目了然的。

* 1965年10月18日收到。

1) 本文曾在第二届全国磁学和磁性材料会议上报告过。

另一方面,研究这一装置本身也是很有意义的。充有铁氧体圆杆的矩形波导在微波技术中具有广泛的实际应用^[1-3]。

用“路”的方法研究器件,有人对环旋器进行过^[4]。最近,Масленикова^[5]研究了同轴线中互易的铁氧体小球,其方法与本文所描述的十分相似。

二、阻 抗 测 量

首先我们对含有单根铁氧体杆的三厘米波段矩形波导的阻抗性质进行实验研究,然后用驻波桥路测出散射矩阵,求出其等效线路。

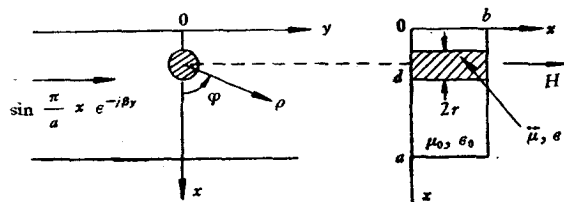


图1 含有横向磁化铁氧体圆杆的矩形波导

被测结构如图1所示,终端接有匹配负载,在不同的外磁场下测量其输入阻抗。对不同铁氧体的杆径以及对于圆杆沿波导横截面的不同位置,阻抗、电压驻波比与电纳的测量和计算结果如图2,3所示。计算是用二级近似式作出的^[6]。为了使图清楚起见,

图2中有些半圆的参考面不在铁氧体杆或螺钉的轴线上。若把参考面都移到它们的轴线上,则这些半圆都重合在一起,其倒数恰好落在 $G=1$ 的正半周上。

由这些结果可以看出,大直径铁氧体杆的阻抗近似沿一圆周变化,但由于损耗较大,实验点一般落在圆周内部。有时还会出现一些小的吸收峰,当铁氧体杆不与上下波导壁

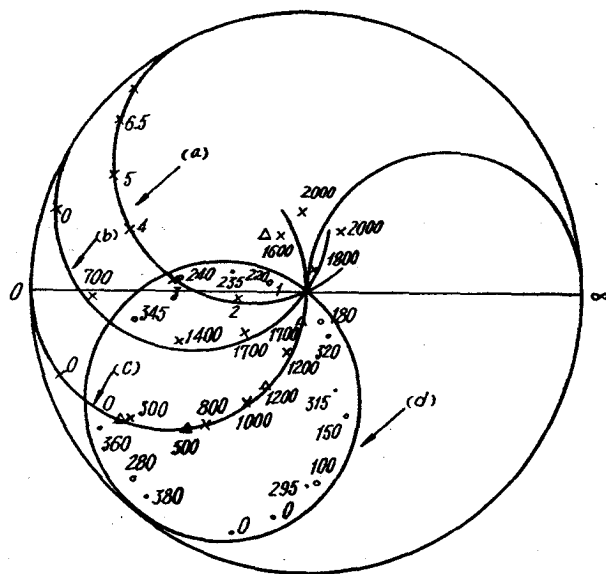


图2 输入阻抗与磁场或穿深度 D 的关系 [$f=9100$ 兆赫, 图中数字为磁场(奥)或穿深度(毫米)]。(a) 螺钉, 参考面不在螺钉轴线上; (b) $2r=3.8$ 毫米, $d=3.5$ 毫米, 参考面不在铁氧体杆轴线上; (c) $2r=4.5$ 毫米, $d=3$ 毫米, 参考面在铁氧体杆轴线上, 其中“ Δ ”为计算值; (d) 参考面在铁氧体杆轴线上, $d=\frac{a}{2}$ 。图中“ $\circ$ ”为计算值 ($2r=10$ 毫米), “ $\bullet$ ”为测量值 ($2r=10.3$ 毫米)。

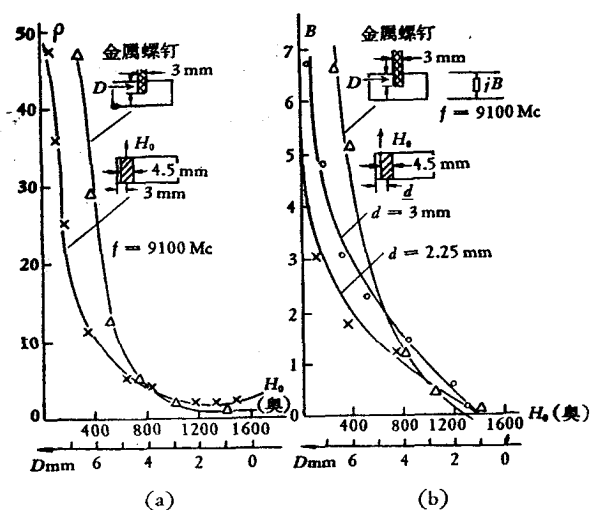


图3 铁氧体杆与螺钉的驻波比及电纳的比较

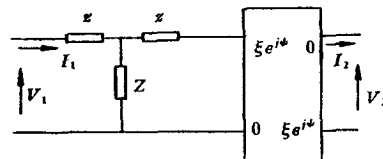
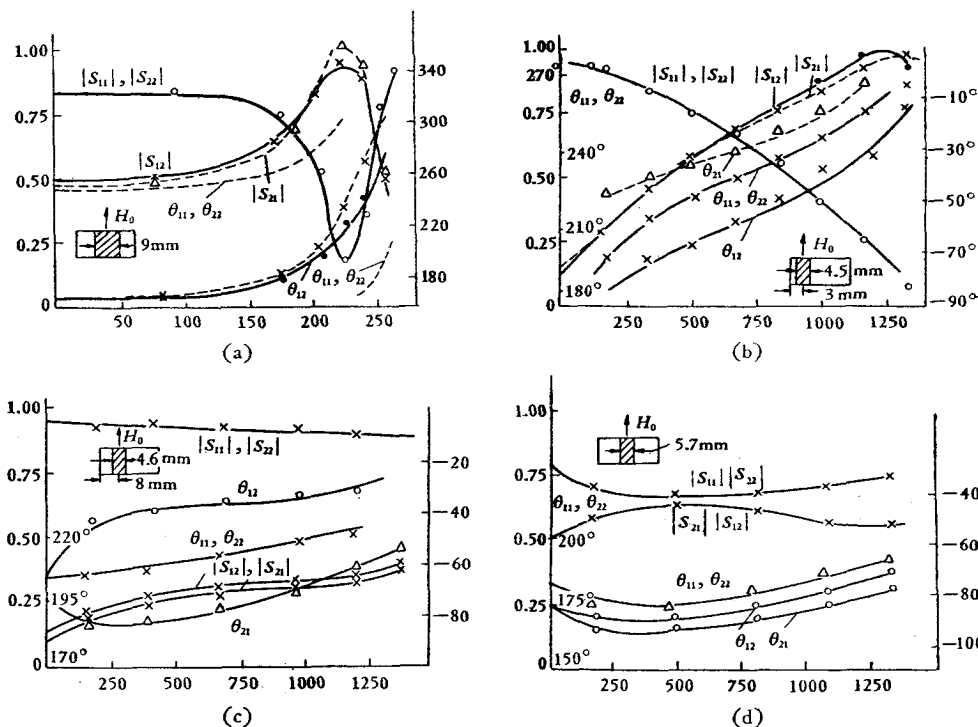


图5 T形等效线路

图4 散射系数与外磁场的关系 ($f = 9100$ 兆赫)

紧密接触时,甚至会出现高达 10 分贝的吸收峰。直径较小的铁氧体杆在波导的中心位置时,阻抗变化并不很大,对于小直径铁氧体杆靠近波导侧壁的情况,阻抗随外磁场的变化范围很大,可以与可调螺钉比拟。我们可以说,就阻抗而言,铁氧体杆呈现并联容性电纳的性质。把直径为 5.5 毫米的铁氧体杆紧靠波导侧壁上,除容性电纳半支外,还可得到感性电纳的另一半支,但损耗较大,而且已涉及共振区。当频率变化时,并联电纳的性质并不改变,只是数值发生变化,相当于图中的那些半圆绕自己的圆心转动。

三、非互易散射系数的测量,单根铁氧体杆的等效线路

为了求出图 1 所示的装置的等效线路,我们用驻波桥路法测量其非互易的散射矩阵. 测量方法在文献中已有描述,我们曾较详细地讨论过这种桥路的调节方法和测量误差^[6]. 这里仅给出其测量结果(图 4). 对于铁氧体杆放波导横截面中心的几种情况, S_{12} 和 S_{21} , θ_{12} 和 θ_{21} 都稍有差别,不过这些差别都在误差范围内,当铁氧体杆不在中心位置时,出现非互易吸收和非互易相移. 当损耗很小时, S_{12} 和 S_{21} 的绝对值近似相等.

H. A. Haus^[7] 曾把一无源非互易网络的通矩阵化为一互易矩阵与一对角矩阵的乘积,并提出了一种非互易结构的等效线路. 利用这种形式的等效线路,对于对称的结构可以把等效线路表示成图 5. $\zeta e^{j\psi}$ 代表一非互易元件,被称为相移一放大器.

根据一般电路理论,可以导出对称 T 形等效线路元件与散射系数的关系:

$$\begin{cases} z = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{12}S_{21} - 2\sqrt{S_{12}S_{21}}}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}S_{21}}, \\ Z = \frac{2\sqrt{S_{12}S_{21}}}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}S_{21}}, \\ \zeta = \sqrt{|S_{12}|/|S_{21}|}, \quad \psi = (\theta_{12} - \theta_{21})/2, \end{cases}$$

其中, $S_{12} = |S_{12}|e^{j\theta_{12}}$, 并已假定 $S_{11} = S_{22}$.

由前面测出的散射矩阵,根据上式可以算出等效线路中各元件的值,结果如图 6 所示. 由图 6(a) 可以看到,串臂的阻抗值比并臂小,并且在外磁场变化时,它的数值近为常数. 改变外磁场所引起的阻抗变化,主要是由并臂产生的,这说明了图 2 中的现象:总的输入阻抗与可调螺钉相似,近似落在一个圆周上;但由于数值近为常数的串臂的存在,使这个圆转了一个角度,圆心不落于实轴上. 图 6(b) 说明,当小直径的铁氧体杆靠近波导侧壁时,其阻抗的实部和串臂值都比并臂电纳要小一个数量级以上. 因此可以略去损耗和串臂,近似地用并联电纳表示.

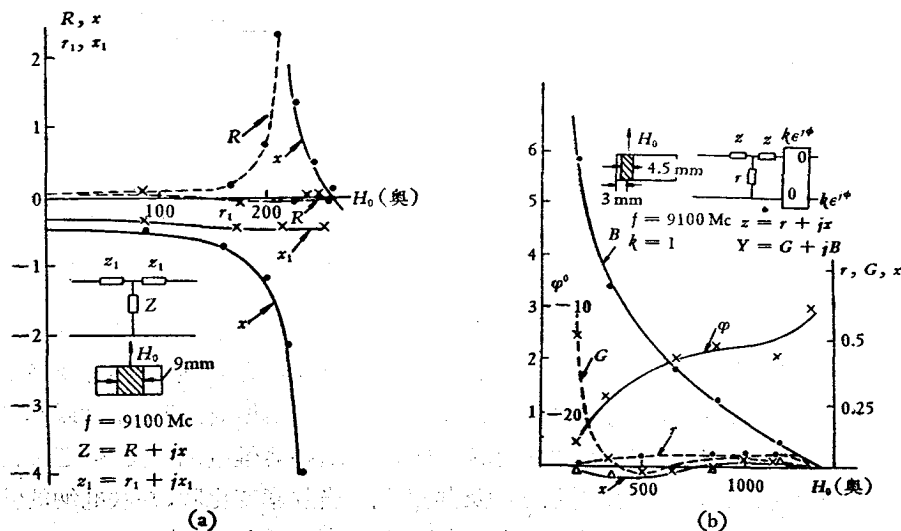


图 6 等效线路元件与外磁场的关系

四、含有两根铁氧体杆的矩形波导的等效线路

以上我们已经将单根铁氧体杆的电磁场问题,用低频的集总常数的电路表示出来了。因此,我们便可以用电路分析的办法,去处理波导中多根铁氧体杆的散射问题。但是在进行这一工作之前,我们还必须研究一下含有两根铁氧体杆的矩形波导的等效线路,是否正好是单根铁氧体杆等效线路的串联。为了分析简便起见,选取具有并联电抗性质的情况。

具体装置如图 7 所示,两根铁氧体杆沿矩形波导的同一窄壁排列,加上同样的外磁场。各根铁氧体杆的电纳 B_1, B_2 , 非互易相移差 $2\phi_1, 2\phi_2$ 分别由实验测出。

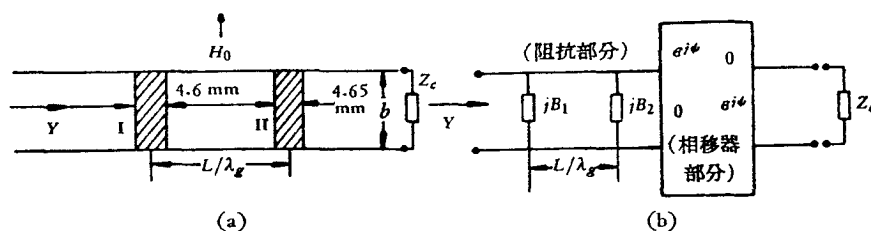


图 7 靠同一侧壁的两根铁氧体杆及等效线路

我们的问题在于,当距离 L 不同时,测量非互易相移差 $2\phi_m$ 和输入导纳 Y_m ,并由已知的 $B_1, B_2, L/\lambda_g$, 用传输线公式计算输入导纳 Y_a ,然后再对结果进行分析。

对于相移器部分来说,如果总的相移器是铁氧体杆 I 和铁氧体杆 II 两相移器的串联,则由于相移器在等效线路中的位置可以前后调置,两相移器可以放在一起由一个总的相移器表示, $2\phi_m$ 应等于 $2\phi_1$ 与 $2\phi_2$ 之和并和距离 L 无关。图 8 的实验结果证明了这一点:在距离足够大时, $2\phi_m$ 近似为一条水平线(各测量点对水平线的偏离在误差范围内)。

图 9 是对阻抗部分的测量结果。应该指出,由于 B_1 与 B_2 稍有差别,图 7 的阻抗是非对称的,即两个方向的输入导纳不等,但外磁场方向对输入导纳仍然没有影响。图 9 中的实线以传输线公式算出,叉点是测量值。

因此,可以作出如下的结论:只要两根铁氧体杆的距离足够大,总的等效线路可由单根铁氧体杆等效线路串联表示,如图 7(b)。

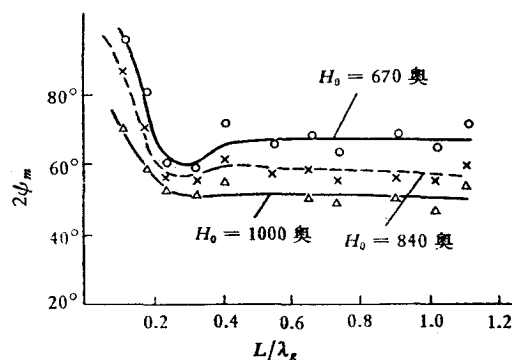
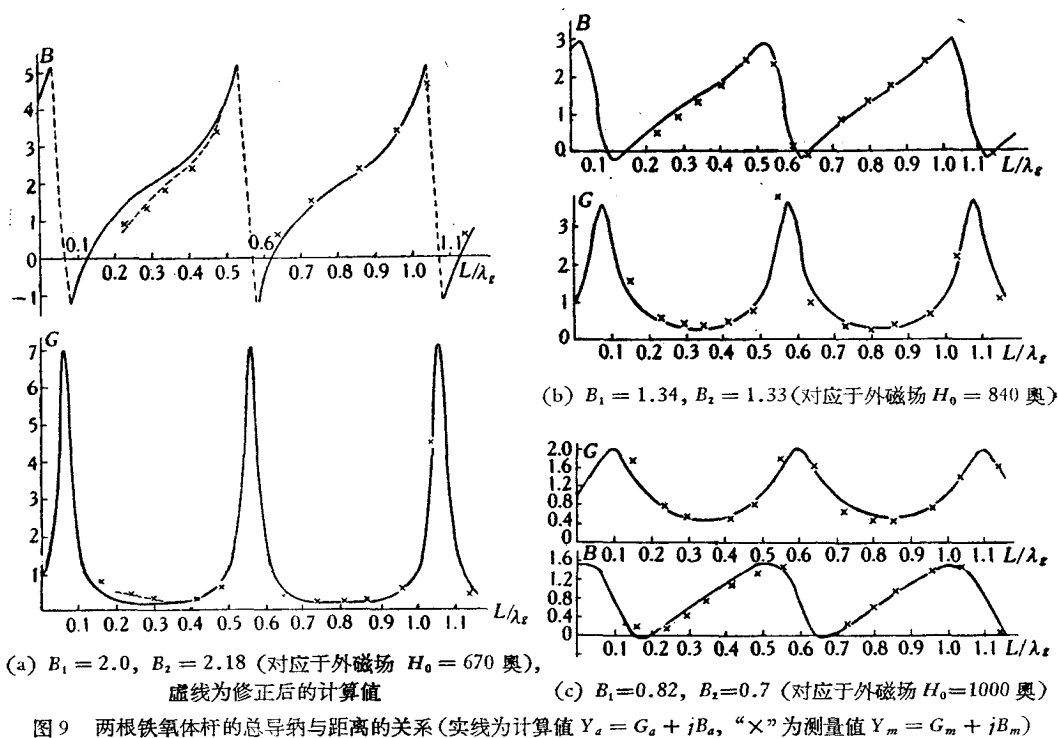


图 8 两根铁氧体杆非互易相移差与距离的关系

由图 8, 9 可以看到,当 $L/\lambda_g < \frac{1}{2}$ 时, $2\phi_m$ 偏离水平线,而 Y_m 偏离计算值;距离愈小,偏离愈大。这说明以上的等效线路不再适用。我们定性地讨论一下这一现象。显然可以认为,引起这种偏离的原因在于高次波的耦合作用。在距离足够大时,由第一阻碍物散射产生的高次模在到达第二阻碍物时几乎完全消失了,因而对于高次模来说是自动匹配的。但在距离较近时, H_{02} 波(指 z 方向无变化之磁波或横电波)尚未充分衰减便又碰到了第二阻碍物。这 H_{02} 波又将被散射,因而在这散射波中既有 H_{01} 波,也有 H_{02} 波,但后



者又一次地受到了阻尼,可以不再考虑,其中的 H_{01} 波与原来的反射波和透射波迭加,使第二阻碍物的阻抗和相位发生变化。同样,可以解释第一阻碍物由于近距耦合作用产生的变化。

要严格地分析这种效应,应该用波导激发公式研究 H_{02} 波的激发强度。这里我们只提出一个经验公式对等效线路的阻抗部分进行修正,设由于近距耦合作用并联电纳减小了一个量,即

$$B_{1,2c} = B_{1,2} - \delta e^{-\alpha_2 \frac{L}{a}},$$

其中 α_2/a 是 H_{02} 波的衰减常数, δ 是经验因子, B_1, B_2 为原来的电纳数值, B_{1c}, B_{2c} 是修正后的数值。对于图 9(a) 的情况,取 δ 为 5, 把 B_{1c}, B_{2c} 用传输线公式进行计算, 结果如图 9(a) 中的虚线所示。经过这样修正后的计算值与实验值大大接近了,但在距离很近时 ($L/\lambda_g < 0.2$), 还需进一步修正。在等效线路上,相当于在原来容性电纳上并联一感性电纳,这一电纳随距离按指数律减小。修正后的等效线路的阻抗部分如图 10 所示。

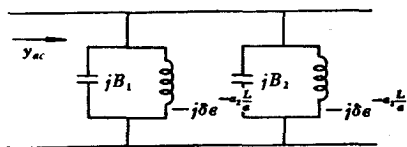


图 10 考虑近距作用的等效线路的一种修正形式

五、等效线路应用举例

前面我们已经利用散射矩阵导出了等效线路,并用一些实验事实作了证明。这样,我们就可以利用熟知的集总电路的知识,分析一些复杂的结构。反之,我们也可以先在理论

上分析一些网络的特性,例如分析相移网络、滤波网络及阻抗变换网络等,然后在实验中看一看能否实现这些理论上所预期的结果。或者,我们可以根据某一器件的特性,去寻找一种最合适的网络。总之,可以利用网络分析的办法,研究一系列实际器件——如相移器、可调滤波器、反射式开关、截止式衰减器、磁匹配器以及“电抗性”隔离器,等等。

若把许多根同样的铁氧体杆等距离地排列起来,不考虑相移器部分(这也可把相邻铁氧体杆反向磁化加以消除),则等效线路如图 11 所示。由电路分析可以得到加载线的传播常数 β 和 π -形链形网络的特性阻抗是

$$\begin{cases} \cos \beta l = \cos \beta_0 l - \frac{B}{2} \sin \beta_0 l, \\ Z_{\pi} = \sqrt{\frac{1}{1 + B \cot \beta_0 l - B^2/4}}, \end{cases}$$

其中 β_0 是空波导 ($B = 0$) 的传播常数。由上式可以看到,在通带内,调节 B (即调节外磁场) 可以使传播常数改变。数字计算结果指出,当 B 在 0—1 范围内改变时,每波长的相移可达 120 度,而特性阻抗在 1—1.25 范围内变化,而且有 10% 的频宽。要得到 B 这样变化的铁氧杆是容易的,若使 B 向负值作同样的变化,相移可增大一倍。我们也可以象脉冲技术中设计延迟线时所作的那样,用 m -型导出网络使阻抗在较大范围内匹配,从而提高相移值,缩小相移器体积。

图 12 是初步的实验结果,用相邻铁氧体杆反射相互抵销的办法达到基本匹配 ($\rho < 2$)。由于距离较近,互耦作用比较严重,实验值不能与理论值进行比较。但这一较粗糙的结果也定性地说明,

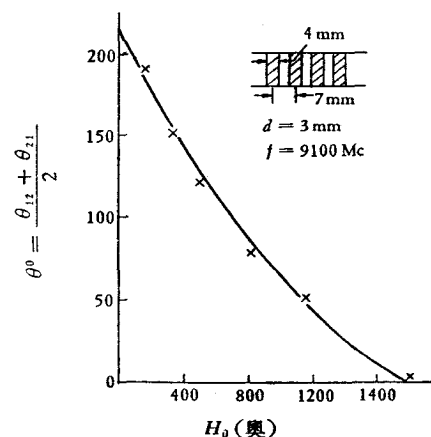


图 12 相移与外磁场的关系

这种结构的相移是很大的。主要工作在于寻求一种特性阻抗随外磁场变化较小的网络。

六、结 束 语

要研究含有多根铁氧体杆的矩形波导,直接用实验的方法或是用场论分析的方法都是非常困难的,因为可变的参数很多——各根铁氧体杆的直径、外磁场、在波导横截面中的位置以及相邻铁氧体杆的距离都可以不同。在这种场合下,先用电路分析的方法得到轮廓的概念,便成为非常必要。首先,我们只需研究“单元”的情况,这总是比较简单的。例如在理论上计算出“单元”的散射矩阵,当无法计算时,总可以在实验中测出其散射矩阵。然后,由散射矩阵作出“单元”的等效线路。实验表明,只要相邻“单元”的距离足够大,总的等效线路可由“单元”等效线路串联而成。于是,“场”的问题便化成了“路”的问题。我们可以依据集总常数的电路,用习常的低频电路分析的办法,研究其散射特性和频散特性。对某些网络例如滤波网络、相移网络和阻抗变换网络等进行分析,即可指导一系列实

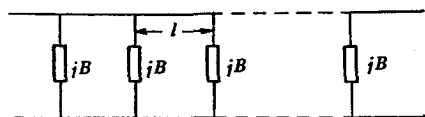


图 11 无限长的铁氧体杆加载线

际器件的设计。

实验的结果表明,小直径铁氧体杆具有并联容性电纳的性质,电纳的数值可用外磁场在很大的范围内加以调节。利用这种性质可以设计出一种网络型相移器。根据等效线路,阻抗变换器与磁场方向无关,可用一般螺钉匹配器的理论设计出一种磁匹配器。

本文使用的铁氧体的介电常数为 10,饱和磁化强度 $4\pi M_s$ 为 2000 高斯。

本文的一切工作,无论是主题思想方面或是具体方法方面都是在鲍家善老师的指导下完成的。工作过程中,张善杰、吴培亨、韩世莹、王定章、高瑞章等同志曾给予重要的帮助。还应特别指出姚以慈、王鸿章两同学做了部分计算和测量工作。作者谨向他们致谢。

参 考 文 献

- [1] 鲍家善、王相元,南京大学学报(自然科学), No. 10 (1959).
- [2] Berk, A. D., Ferrite Directional Couplers, *PIRE*, (1956), 1439—1446.
- [3] Palais, J. C., Radiation from ferrite cylinder, *JAP*, (1964), 779—781.
- [4] 林周一、村上纯造,“サーキュレータ”,日本电气通信学会杂志, 3 (1962).
- [5] Масленикова, В. В., Расчет волноводов, содержащих ферритовые среды, методами теории цепей, *Р. Э. Т.*, 9 (1964), 805—813.
- [6] 鲍家善、胡佩康,胡佩康研究生毕业论文。
- [7] Haus, H. A., Equivalent circuit for a passive nonreciprocal network, *JAP*, 25 (1954), 1500—1503.

SCATTERING MATRIX AND EQUIVALENT CIRCUIT OF AN X-BAND RECTANGULAR WAVEGUIDE CONTAINING FERRITE POSTS

HU PEI-KAUNG

ABSTRACT

This paper is intended to describe the properties of nonreciprocal microwave ferrite devices from the four-terminal network analysis. First, the impedance and the scattering matrix of an X-band rectangular waveguide containing a transversely magnetized ferrite post are measured as a function of the (1) diameter of the post, (2) position of the post in the waveguide, and (3) applied d. c. magnetic field. Then, the T-equivalent circuits are obtained from the scattering matrix measurements. Results prove that when a thin ferrite post is placed near a side wall of the guide, it acts essentially as a shunting capacitance. The susceptance decreases with d. c. magnetic field. As far as the impedance is concerned, the post itself behaves like a tuning screw. Finally, the equivalent circuit of a waveguide containing two or more ferrite posts is studied. It is found that when the distance between the two nearest posts is greater than $\lambda/2$, the equivalent circuit is simply the “single post” circuits connected in cascade. A phase shift network is used to illustrate the application of the principle of the circuit analysis.