

行波管支撑杆型衰减器匹配性能 的微波检测方法*

张秀芬

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文介绍一种简便、快速、直观的检验支撑杆型衰减器匹配性能的方法。它的基本原理是在微波频率上测绘被测衰减器的相对衰减量分布曲线，再用相移法测量反映衰减器渐变段匹配程度的电压驻波比 S ，对比分析所得曲线和 S 值，确定对曲线的形状及其起始段斜率的要求。此要求确定后，在检验衰减器时，只需测绘它的微波相对衰减量分布曲线看是否符合要求即可。采用这种方法大大提高了测试速度。实践证明，这种方法不仅在研制行波管中起了一定作用，还可以作为小批量生产工艺流程中检验衰减器的有用手段。

集中衰减器是行波管中的重要组成部件。为了保证管子工作稳定可靠，并达到某些电气指标，对衰减器提出两项主要要求：

(1) 要具有足够的衰减量。(在高增益金属陶瓷封接的行波管中，多采用在衰减器中部切断慢波线的方法来获得足够的衰减量。)

(2) 衰减器与慢波线的匹配要好，使衰减器端部引起的反射很小(以下简称尖部反射)。(通常使衰减器上的衰减物质的密度呈楔形渐变形状，来满足这项要求。)

本文将讨论支撑杆型衰减器匹配性能的微波检测方法。

一、衰减器的相对衰减量分布曲线检测方法

因为衰减器起始段的衰减物质的密度是渐变的，使得这段衰减器对微波功率的吸收也是渐变的(以下把这一段称作渐变段)。我们通过微波测试可以用曲线直观地把这种对微波的吸收作用表示出来。

插入微波系统中的衰减器将会对系统中传输的微波功率有吸收作用，使由 P_1 降至 P_2 。因此，我们只要观察被测衰减器逐点通过系统时， P_1 与 P_2 的相对变化关系，即在 P_1 一定条件下观察 P_2 的变化规律，便可得知被测衰减器上相对衰减量的分布情况。

根据矩形波导中 TE_{10} 波电场和电流分布的特点，把被测衰减器插入波导宽边的 $a/2$ 处时，将对微波功率吸收最多，并且不会影响波导中波的传播，如图 1 所示。但为了能测出被测衰减器上逐点的衰减量分布情况，要求把波导窄边 b 做得相当窄，这可以采用波导阶梯阻抗过渡器，把间隙 d 做得很小，一般取 $d = 1 \text{ mm}$ 或更小些，如图 2 所示。

把波导阶梯阻抗过渡器接入波导系统中，如图 3 所示。当被测衰减器插入波导间隙

* 1979年2月2日收到

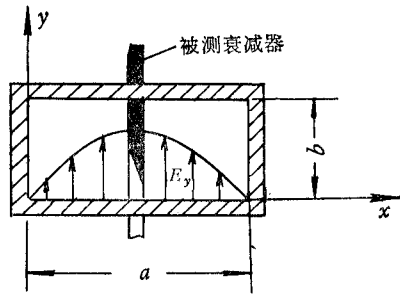


图 1 TE_{10} 波在矩形波导横截面上的场分布

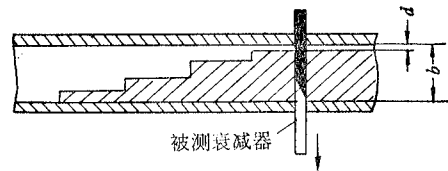


图 2 被测衰减器穿过波导阶梯阻抗过渡器

d 时, 将使系统中所传输的微波功率发生变化。如果使被测衰减器由它的始端开始沿自身轴向移动, 逐点通过波导间隙 d , 则由于其上各点衰减量不同, 对微波功率吸收量也不同, 从而系统的指示器也产生相应的指示。若把被测衰减器的位移标在 x 轴上、把它对功率吸收量的相对变化标在 y 轴上, 逐点记录下来, 就形成衰减器的相对衰减量分布曲线。

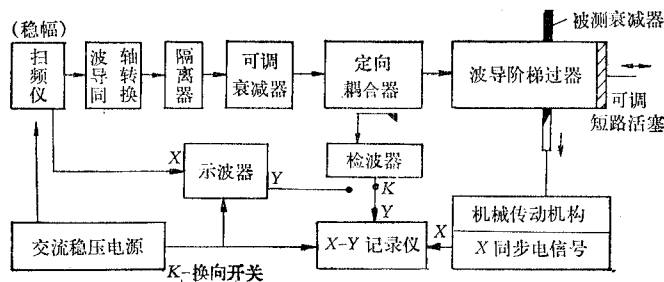


图 3 采用波导阶梯阻抗过渡器的方案

从上述基本原理出发, 可根据实验室条件灵活地建立多种不同的方案。在这里介绍两种方案, 如图 3、图 4 所示。

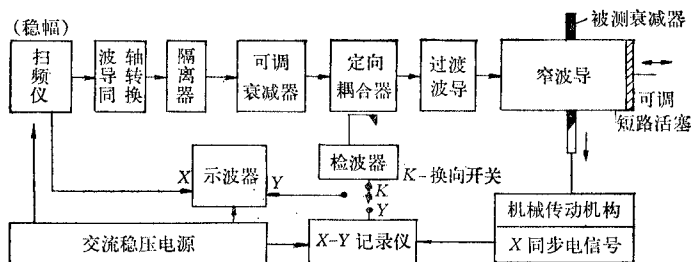


图 4 采用窄波导加辅助块的方案

图3、图 4 所示方案的共同点是波导系统的终端都被可调短路活塞所短路。假设短路活塞能完全短路, 并且系统本身无损耗, 则微波功率经过被测衰减器衰减 A 倍 ($A=P_1/P_2$) 后, 到达系统终端被短路活塞全反射, 并再次通过衰减器又被衰减 A 倍。所以系统中经过衰减器之后的反射功率 P_3 已较原入射功率 P_1 下降了 A^2 倍 (见图 5)。反射功率 P_3 经过定向耦合器分支后, 被传送给检波器和指示系统。由此可见, 这两种方案都是利用反射功

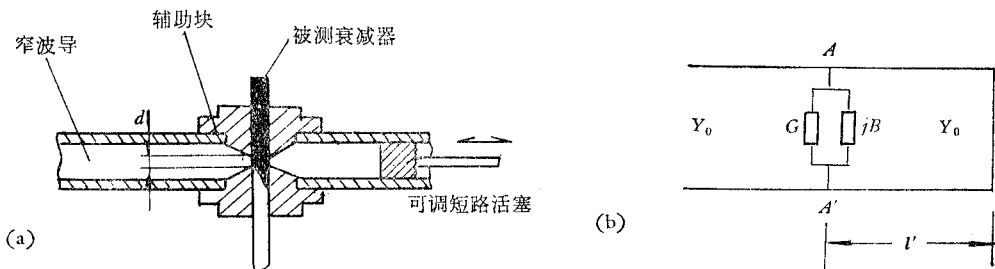
率 P_3 来相应标示被测衰减器衰减量的变化的。 P_3 与 A^2 有关 (衰减量 $L = 10 \lg A$)，当 A 沿衰减器各点有微小变化时，指示器能以 A^2 倍显示出来，所以能比较灵敏地反映出衰减器渐变段上相对衰减量分布的变化。

上述两种方案的不同点在于：图 3 所示系统是采用波导阶梯阻抗过渡器；图 4 所示系统是采用窄波导加辅助块。在图 3 所示的方案中，由于波导阶梯阻抗过渡器在工作频带内能与波导系统有较好的匹配，所以可在工作频带内任意选定的频率上进行测试。短路活塞到被测衰减器的距离 $l' = \frac{\lambda_g}{4}$ (λ_g ——对应于选定频率的波导波长)。这个距离可在扫频工作状态下利用示波器所示匹配曲线来调节。

在图 4 所示方案中，为了减小隙缝 d ，所以在窄波导中加入了辅助块。(见图 6(a))，这辅助块在波导内形成截面的突变将引起不连续性反射(等效电路见图 6(b))。此外，由于衰减器本身以及介质杆、小孔辐射等影响，在图 6(b) AA' 参考面上的等效导纳为： $Y = G + jB$ ，其中，电导分量 G 主要决定于衰减器本身的高频损耗，其它因素的影响与之相比可以忽略。而等效电纳分量 jB 主要取决于辅助块引入的等效容性电纳分量。为了消除这个分量带来的影响，可调节短路活塞的位置 l' ，因为由 AA' 向右看 λ 的等效输入导纳 $Y_s = -jY_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda} l'$ ，当 l' 为某一值时，可使得 $Y_s = -jB$ ，



图 5 系统终端完全短路的情况



(a) 被测衰减器插入带辅助块的窄波导。

(b) 等效电路

图 6 用窄波导代替波导阶梯阻抗过渡器的情况

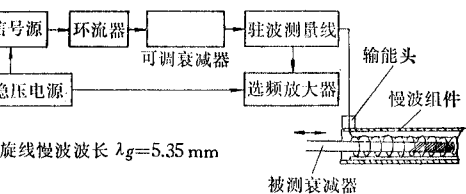
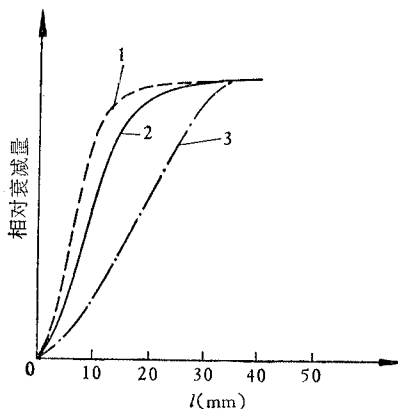


图 8 衰减器尖部反射测试系统

← 图 7 几种管子的衰减器的相对衰减量分布曲线

- 1——1kW 连续波行波管
- 2——中功率通信行波管
- 3——高增益脉冲行波管

(以上各管种都把慢波线和衰减器切断，故图中所示曲线都是对应于一阶段衰减器的曲线)

从而抵消了 jB 分量的影响。这时在 AA' 截面上的等效导纳表现为纯电导分量 G ，这就消除了系统本身反射引入的误差。这种方案的测试频率与系统有关，不能任意取定。测试时，先将被测衰减器的均匀段置于波导间隙 d 处，在扫频状态下，用示波器观察电压驻波比对频率的曲线（即 s - f 曲线），调节短路活塞位置 l' ，再从 s - f 曲线找出匹配频率点，然后在此频率上进行单频测试。测得曲线如图 7 所示。

二、衰减器的相对衰减量分布曲线与尖部反射的对应关系

衰减器的匹配情况、可以用相移法检测。测试方案如图 8 所示。假定构成慢波组件的螺旋线均匀、无损耗，并且被测衰减器的衰减量足够大，使得足以忽略终端反射的影响*。一般情况下，对于切断的均匀慢波线来说，由驻波测量线测得的外观电压驻波比 S 应是两部分的矢量和，即(1)输能头反射引起的 $S_{\text{头}}$ 。(2)衰减器尖部反射引起的 $S_{\text{尖}}$ 。当插在慢波线内孔中的衰减器沿轴向移动时，上述二者之间的等效电长度和相位都发生变化，因此引起总的电压驻波比 S 也会随之周期性地变化，将出现 $|S_{\text{max}}|$ 和 $|S_{\text{min}}|$ 值。由此可确定衰减器的电压驻波比值和衰减器的尖部反射值分别为：

$$|S_{\text{尖}}| = \sqrt{\frac{|S_{\text{max}}|}{|S_{\text{min}}|}}, \text{ 和 } |\rho_{\text{尖}}| = \frac{|S_{\text{尖}}| - 1}{|S_{\text{尖}}| + 1}$$

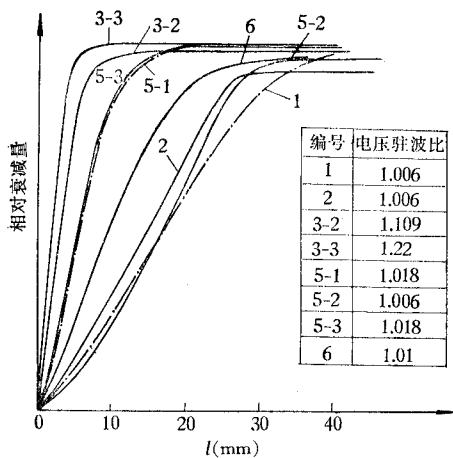


图 9 一组衰减器的渐变段的相对衰减量分布曲线

图 9、图 10 给出了各种不同斜率的衰减器相对衰减量分布曲线和用相移法测得的对应的尖部反射值。表中所给的值是考虑 3 根等长度衰减器的尖部反射迭加的结果。在有些管子中 3 根支撑杆上的衰减器长度不同，有可能使合成的反射减小。

分析图 9、图 10 可以得出：

(1) 衰减器渐变段尖部反射值的大小和它的相对衰减量分布曲线上升段的斜率有密切关系。曲线斜率越大，则反射越大、匹配越差。尤其是曲线起始端的斜率以小些为好。

(2) 要获得匹配性能较好的衰减器并不很困难，只要它的渐变段对应的曲线的斜率

不超出某一定范围即可。各管种可根据指标要求规定此范围。

(3) 当衰减器渐变段的相对衰减量分布曲线有波动时，会对其匹配有影响。波动越大，影响也越大。尤其是靠近起始点的波动对匹配的影响最为显著。

所以在检验衰减器时，应察看曲线上升部分是否连续、平滑、曲线斜率是否符合要求，并且对应于衰减器均匀段部分的曲线幅度是否稳定等。此外，从图 7 所示的几条曲线可

* 衰减器的尖部反射应包含两部分：(1)因衰减器渐变段不理想造成的反射。(2)衰减器的衰减量不足以把微波功率全部吸收掉，当波行进到慢波线切断处时，未被衰减掉的部分就几乎全部被反射回来。它在衰减器渐变段端部参考面上的等效反射系数 $|\rho_{\text{尖}}| \approx 10^{-\frac{L}{10}}$ ， L 即该段衰减器的衰减量。由此可见，只有当衰减量不小于 30dB 时，才可忽略终端反射的影响。

以看出,当测试系统校准之后,由曲线可以直接查出衰减器对微波作用段的有效长度. 并可根据曲线所包络的面积粗略地估计衰减器的衰减量是否满足要求*. 根据上述这些条件可确定衰减器的优劣.

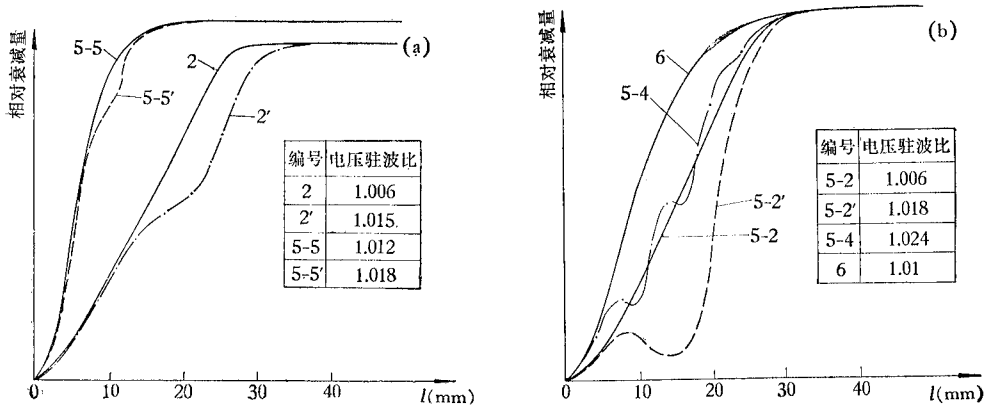


图 10 衰减器渐变段局部变化的实验对比

(为了解衰减器渐变段局部变化对匹配的影响,特意制作了渐变段有起伏波动的衰减器 5-4. 另外还将 2, 5-2 和 5-5 衰减器在测试后局部破坏,使成为 2', 5-2' 和 5-5' 衰减器.)

三、衰减器相对衰减量分布曲线测试方法的特点

(1) 可由曲线直观地知道沿衰减器各段相对衰减量的分布情况,可直接由曲线查出衰减器渐变段上的缺陷及位置所在.

(2) 比测量直流电阻率沿衰减器分布的方法要灵敏的多,能发现衰减器上的微小缺陷.

(3) 在掌握了衰减器匹配及其相对衰减量分布曲线的对应关系之后,用测绘衰减器的相对衰减量分布曲线的办法代替其它直接测试衰减器尖部反射的方法,在测试速度上可以提高几十倍. 因而这种方法不仅可以在研制新管型或分析解剖行波管时,用来研究管内衰减器,还可以成为小批量生产中对衰减器进行质量检验的有用手段,以保证制管质量.

(4) 因为从曲线上可以直观地看到衰减器上缺陷的位置所在,所以这种方法可以直接为衰减器的制备工艺和工艺改进提供依据.

本文给出的各组曲线的 y 坐标均表示相对衰减量. 这是因为实验结果是在波导系统中测得的,具体条件与实际管内的情况有所不同,两种不同情况下的衰减量数值当然是不相同的,所以本文用相对衰减量来表示.

这种方法只适用于测试支撑杆型衰减器. 根据行波管一般结构尺寸的特点,支撑杆直径较小,所以这种方法只适用于 5 cm、3 cm 波导系统.

* 理论上,当波导间隙 $d \rightarrow 0$ 时, $L = \int_0^l f(l)dl$, L ——衰减器的衰减量.

在此,对任裕安同志的指导,王健生、李淑琴同志的支持与协助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] X. И. 斯彼科托尔著,《国外电子器件》编辑组译,“慢波系统参量的测量方法” 1963 年, p. 47.
- [2] J. F. Gittns, “*Power Travelling-wave Tubes*”, The English Universities Press Ltd, London, 1965, p. 175.
- [3] 郭开周, 电子管技术, 1978, 第 1 期, 第 14 页.

A MICROWAVE METHOD FOR MEASURING THE MATCHING PROPERTY OF THE ATTENUATORS ON THE SUPPORTING RODS IN TWT

Zhang Xiu-fen

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

A simple, rapid, directly observable method for examining the supporting rod type attenuator's matching property is discussed. The fundamental principle employed is to measure and work out the relative attenuation distribution curve of the attenuator at microwave frequencies, and then by phase shift method to measure the VSWR'S, value as an indication of matching quality of the attenuator in its region of slow variation in attenuation, compare and analyse the obtained curve and the S value in order to determine required form of the curve and slope of the starting section. When these are established, in further examination work on attenuators all one needs to do is just to measure and work out an attenuator's microwave relative attenuation distribution curve to see if it meets the requirement established. By adopting this method, one increases greatly the rapidity of measurement. From experience, we can say that this method is not only useful in the development research work on TMT, but is useful on a small scale manufacturing of TMT's.