

## 测量电子直线加速器波导网络相长度的 3 dB 桥法

李广林 颜斌山

(中国科学院高能物理研究所, 北京, 100039)

通常, 利用调制反射法测量高能电子直线加速器波导网络的相长度。文章介绍利用 3 dB 桥特性测量波导系统相对相长度的方法。该方法简便易行, 精度较高, 满足相对测量的要求, 其误差好于  $\pm 4^\circ$ 。

**关键词** 波导网络 相长度 3 dB 桥

在电子直线加速器中, 一般由一个速调管向 2 节或 4 节加速管馈送微波功率。为获取加速粒子流的最大能量和最小能散, 要求加速场微波相位与被加速粒子同步。这就要求自动调整各速调管微波输出的相位以满足同步要求, 同时也要求由速调管馈送微波功率至各加速节的波导支路的相长度相等, 其相对误差不劣于  $\pm 4.5^\circ$  (包括加速管相位误差在内)。因此, 在实际安装中必须对波导系统的相长度加以测量和调节, 以保证所需精度。

美国 SLAC 采用调制反射法辅以传输法测量波导网络的相长度, 精度较高, 但需特为制作调制反射法兰, 稍嫌麻烦。采用高精度高分辨率的网络分析仪也可利用反射法或传输法进行测量, 但高精度网络分析仪比较昂贵, 因而需要一种简便易行且比较精确的方法。利用加速器中构成波导支路的分功器 (3 dB) 桥的特性进行测量的 3 dB 桥法正是这样一种方法。

### 1 测量方法的原理

首先研究一下 3 dB 桥的特性。

3 dB 桥为一个 4 端口线性网络。理想 (对称互易, 无损, 匹配良好) 4 端口网络的矩阵表示式为

$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{13} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

在波导窄壁耦合 3 dB 桥的情况下,  $S_{13} = 1/\sqrt{2}$ ,  $S_{14} = j/\sqrt{2}$ , 于是其散射矩阵成为

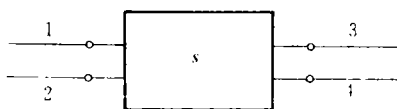


图 1 代表 3 dB 桥的四端口网络

Fig. 1 3 dB coupler represented by a 4-port network

1——输入端口; 2——接负载; 3, 4——输出端口。

$$S = 1/\sqrt{2} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & j \\ 0 & 0 & j & 1 \\ 1 & j & 0 & 0 \\ j & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

设  $a$  为 3 dB 桥的输入波,  $b$  为其输出波。若由 1 个端口输入单位功率而其余 3 个端口接匹配负载时

输入波矩阵

$$a = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

输出波矩阵

$$b = S \times a = 1/\sqrt{2} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ j \end{vmatrix}$$

由输出波矩阵可知, 3, 4 端口的输出波幅度相等但相位相差  $\pi/2$ , 即

$$b_3 = 1/\sqrt{2}$$

$$b_4 = j/\sqrt{2} = (e^{j\pi/2})/\sqrt{2}$$

若输入端口 1 的波为  $a = Ue^{j\Phi_0}$ ,

其中:  $U$  为幅度,  $\Phi_0$  为相位; 则

$$b_3 = (U/\sqrt{2})e^{j\Phi_0}$$

$$b_4 = (U/\sqrt{2})e^{j(\Phi_0+\pi/2)}$$

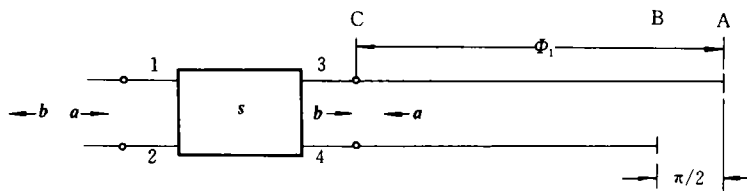


图 2 相长度相对测量原理图

Fig. 2 Principle diagram for relative measurement of phase length

图 2 中 A, B 为二短路平面, C 为输出端口 3 和 4 的参考平面。

如果在 3, 4 端口接以长传输线并在其终端短路, 且 2 条传输线长度相差  $\pi/2$ , 则波在 2 条传输线中传输时将同时到达终端。设 3 端口传输线相长度为  $\Phi_1$ , 而 4 端口传输线相长度为  $(\Phi_1 - \pi/2)$ , 则桥的输出波  $b_3$  和  $b_4$  抵达 A 及 B 平面时其相位的改变将分别为  $\Phi_1$  及  $(\Phi_1 - \pi/2)$ , 即

$$j(\Phi_0 + \Phi_1)$$

A 平面处

$$b_3 = (U/\sqrt{2})e^{j(\Phi_0 + \Phi_1)}$$

B 平面处

$$\begin{aligned} b_4 &= (U/\sqrt{2})e^{j[(\Phi_0 + \pi/2) + (\Phi_1 - \pi/2)]} \\ &= (U/\sqrt{2})e^{j(\Phi_0 + \Phi_1)} \end{aligned}$$

结果表明,2个波  $b_3$  和  $b_4$  分别到达 A 及 B 平面时相位相同。当波被短路平面反射回 C 平面时,反射波  $a_3, a_4$  成为

$$\begin{aligned} a_3 &= (U/\sqrt{2})e^{j(\Phi_0 + 2\Phi_1) + j\Psi_0} \\ a_4 &= (U/\sqrt{2})e^{j(\Phi_0 + 2\Phi_1 - \pi/2) + j\Psi_0} \end{aligned}$$

$\Psi_0$ (0 或  $\pi$ )为反射端相位

波  $a_3$  及  $a_4$  为反射回来并进入桥的波。这样,桥有了3个输入波  $a_1, a_3$  及  $a_4$ 。

其中

$$a_1 = Ue^{j\Phi_0}$$

这样,输入波矩阵为

$$a = Ue^{j\Phi_0} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ (1/\sqrt{2})e^{j2\Phi_1 + j\Psi_0} \\ (1/\sqrt{2})e^{j(2\Phi_1 - \pi/2) + j\Psi_0} \end{vmatrix}$$

输出波矩阵为

$$\begin{aligned} b &= S \times a = (U/\sqrt{2})e^{j\Phi_0} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & j \\ 0 & 0 & j & 1 \\ 1 & j & 0 & 0 \\ j & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ (1/\sqrt{2})e^{j2\Phi_1 + j\Psi_0} \\ (1/\sqrt{2})e^{j(2\Phi_1 - \pi/2) + j\Psi_0} \end{vmatrix} \\ &= (U/\sqrt{2})e^{j\Phi_0} \begin{vmatrix} (2/\sqrt{2})e^{j2\Phi_1 + j\Psi_0} \\ 0 \\ 1 \\ j \end{vmatrix} \end{aligned}$$

由上式可见,1 端口输出波此时有最大值,即

$$b_1 = Ue^{j(\Phi_0 + 2\Phi_1) + j\Psi_0}$$

而 2 端口则无输出,即

$$b_2 = 0$$

以上结果正是将加以利用的 3 分贝桥的特性。依此特性,在波导支路间双双比对就可测量和调节各波导支路的相长度。

## 2 测量方法

### 2.1 二波导支路(A, B)情况

先看一下二波导支路相长度的测量与调节。

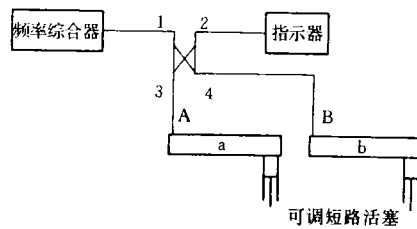


图3 二波导支路测量回路

Fig. 3 Circuit of measurement for two waveguide branches

a, b——2节加速管; A, B——二波导支路。

在每个加速节输出波导处接上可调短路活塞, 端口2则匹配连接至接收机或经检波器后至选频放大器作为指示器。测试时由1端口输入测试信号, 调节二短路活塞之一(二短路活塞处于比较接近的任意起始位置)至指示器输出为零或最小值, 此时二短路活塞的位置差值 $\Delta L$ 即代表二波导支路间的相长度差, 即

$$\Delta\Phi = \Delta L \times 360/\lambda_g$$

将二短路活塞调至同一位置, 利用挤压工具适当挤压波导窄壁可得到 $\Delta\Phi = 0$ , 也就是将A, B二波导支路的相长度调节到相等(设计时已对3分贝桥固有相移 $\pi/2$ 做了补偿情况下)。

## 2.2 四波导支路(A, B, C, D)情况

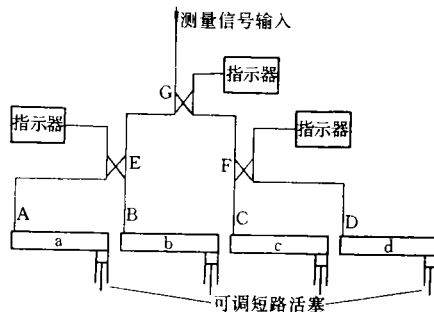


图4 四波导支路测量回路

Fig. 4 Circuit of measurement for four waveguide branches

a, b, c, d为4节加速管; A, B, C, D为4个波导支路; E, F, G为3个3 dB桥。

高能电子直线加速器中一般用1个速调管馈送微波功率至4节加速管。这种情况下可以

用1个波导支路作为参考,分别与其他3个支路进行比较测量。例如,取B支路为参考支路,先与A支路比较测量,然后再取B与C和B与D分别测量调节即可。

### 3 测试条件

1)测试时应使加速节及波导支路处于工作温度(一般加速节温度为 $45 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ,波导支路为 $45 \pm 1^\circ\text{C}$ )以符合实际工作状态。加速系统所在隧道应无风,相对湿度不太高,被测系统所处范围内温度差应小于 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。

2)测试应在系统内部抽真空情况下进行,低真空即可。加速管输出端以陶瓷窗隔离,每个陶瓷窗的相移需事先加以测定以便测试后对数据加以校正。

如果由于设备条件等限制,也可不抽真空,这时将带来一些误差。但若在事先已抽过真空情况下再在大气下测量,则由于波导变形所带来的误差为 $0.1^\circ$ 左右。

3)桥的二端口(连接指示器)波导同轴转换必须匹配良好,电压驻波比应小于1.05。

### 4 误差分析

本测量方法误差主要来源于3 dB桥的不完善性、温度的不稳定性、支路的不同衰减和噪声以及短路活塞的读数精度。

1)3 dB桥若不完善,则由1端口至3,4端口的相长度差将偏离 $\pi/2$ 。当其隔离度为30 dB时,此偏离约为 $0.1^\circ$ 。由于一般波导窄壁耦合3 dB桥的隔离度可做到30—40 dB以上,故在4支路情况下用本方法测量可能造成的相长度误差最大不超过 $\pm 0.2^\circ$ 。

2)温度的影响 温度变化引起系统相位的不稳定。加速系统相长度受温度变化影响较大。不过由于本测量方法是基于二波导支路的相对测量,且所测系统一般采用同一恒温水路,故其影响可基本相互抵消,由于温度差所造成的测试相位误差估计好于 $\pm 0.5^\circ$ 。设计时已尽可能使各波导支路长度相近,其实际长度差一般可小于1 m。由于引起波导相长度的变化为 $0.083^\circ\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ 。 $\pm 1^\circ\text{C}$ 温度变化引起的相位误差最大不超过 $\pm 0.16^\circ$ 。

3)支路衰减不一致和仪器噪声的影响 各个支路的衰减不可能完全一致,它和仪器噪声的影响都是使输出指示得不到零点。这时可以输出指示的最小点代替零点进行判断,由于灵敏度降低,将带来确定活塞位置的读数误差,可用测量最小点附近的2点取平均值确定。这样确定的活塞位置的相位误差可好于 $\pm 0.25^\circ$ 。

4)短路活塞读数误差 短路活塞的读数分辨率一般为0.01 mm。考虑到机械回差等因素,认为短路活塞位置的误差好于 $\pm 0.01$  mm,这相当于 $\pm 0.24^\circ$ 的相位误差。

综合以上各项误差,测量方法本身的误差应好于 $\pm 1.5^\circ$ 。但是由于测量回路包括了加速节在内,故还应将加速节调校后的相位误差 $\pm 2.5^\circ$ 计算在内。因此综合测量误差将好于 $\pm 4^\circ$ 。

利用本方法测得的结果与使用调制反射法测得的结果基本一致。

参加本方法实验的还有王劲、邓燕平等,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Weaver L, Alvarez B. Accurate Phase Length Measurement of Large Microwave Networks. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1966, MTT-14, 623.

### 3 dB COUPLER METHOD FOR MEASURING PHASE LENGTHS OF WAVEGUIDE NETWORK OF ELECTRON LINEAR ACCELERATOR

LI GUANGLIN YAN BINSHAN

(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039*)

#### ABSTRACT

Modulated reflection method is used in general for measuring phase lengths of waveguide network in construction of electron linear accelerators. Another method of utilizing characteristics of 3 dB coupler to measure relative phase lengths of waveguide branches of electron linear accelerator is introduced. The method is feasible to use and is rather accurate. Error of measurement is estimated as less than  $\pm 4^\circ$ .

**Key words** Waveguide network Phase length 3 dB coupler

www.cnki.net