

微波驻波测量及 驻波测量器

范果健編著

科学出版社

73.459
405

微波駐波測量及駐波測量器

范果健編著

2/4500/03

斜 坡 社

1960

內 容 簡 介

駐波測量是微波測量技術中主要項目之一，本書綜合了1946年以來二十余篇有關文獻並結合試製成的10厘米波段波導型駐波測量器對測量原理、測量器的結構和設計以及測試、定標、測量技術、誤差分析等作了比較全面的闡述和詳盡的討論，以實驗實例說明它的应用方法並給出數據。試製成的測量器適合一般用途。

本書適于與微波技術有關的科學研究工作者以及大專學校有關專業學習微波測量時作為參考書，對於研製微波儀器的工作者以及一般從事微波測量的實驗工作者也都可以參考。

微波駐波測量及駐波測量器

范果健編著

*

科學出版社出版（北京朝陽門大街117號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

中國科學院印刷廠印刷 新華書店總經售

1960年4月第一版 書號：2171 字數：56,000

1960年4月第一印刷 開本：737×1092 1/32

（京）0001—8,000 印張：2 18/27 插圖：3

定價：0.42元

目 录

一、引言	1
二、驻波测量的基本原理及驻波测量器的结构	1
2. 1. 基本原理	1
2. 2. 波导型驻波测量器的结构	6
三、波导型驻波测量器的设计要点	8
3. 1. 波导尺寸	9
3. 2. 槽	10
1. 槽对波长的影响	10
(1) 槽对波导波长的影响	
(2) 槽对波导截止波长的影响	
2. 槽对波导特性阻抗的影响	11
3. 槽的位置	11
4. 槽的尺寸	12
(1) 槽宽 W	
(2) 槽深 D	
(3) 槽长 L	
(4) 槽端反射免除法	
3. 3. 舌套及探针座	14
3. 4. 探针检波装置	17
1. 探针	18
2. 检波器	18
3. 调配电路	18
4. 指示部分	19
3. 5. 机械结构	20
四、驻波测量器的测试及定标	23
4. 1. 测试	23
1. 机械稳定度	23
2. 衰减	24

3. 反射	25
4. 探針導納	25
4. 2. 定標	27
1. 標尺位置	27
2. 探針穿伸度	28
3. 晶体二极管檢波律及放大器的指示器	28
4. 开槽影响的修正	35
五、駐波測量技術	38
5. 1. 一般情况	38
5. 2. 駐波图形与檢波律的关系	39
1. 直錢律	39
2. 平方律	40
5. 3. 測量方法	43
1. $S < 1.005$	43
2. $1.005 \leq S \leq 1.5$	43
3. $1.5 \leq S \leq 10$	44
4. $S \geq 10$	45
六、誤差分析	49
6. 1. 訊号发生器	49
6. 2. 晶体二极管檢波器及放大器	50
6. 3. 联接处	50
6. 4. 机械部分	50
6. 5. 开槽波导本身	50
6. 6. 探針	51
七、应用举例	59
7. 1. 膜片電納的測量	59
7. 2. 双 T 型調配器的应用	61
八、結束語	62
附录: 試制駐波測量器用开槽波导的工序	64
参考文献	66

一、引 言

近代無線電电子学的迅速发展使得無論在科学研究中或是通訊工程技术的应用都越来越趋向于超高频方面。以波长來說,在米波之下已开辟了新的領域——分米波、厘米波以至毫米波波段,总起来称作微波。由于随着频率的增高,电子管显示的极間电容、引綫电感和电子过渡時間效应以及元件的物理性質、形状所造成的巨大損失,广泛应用在低频电路的集中常数系統已不能适应新領域的工作。取而代之的是基于新的工作原理的电真空器件和分布常数系統的电路元件。因此在微波范围内应用的测量仪器和测量方法也随之而异,上述各个波段也不尽相同。然而,駐波测量是这些测量中最基本、最重要的項目之一。在这些波段的传输系統內测量阻抗、反射、解决阻抗匹配問題主要依赖于駐波测量。因为駐波就是由传输系統內入射波和反射波中电和磁的分量分別形成位置固定而周期分布的电場和磁場图形,此外,借助駐波测量又可測定传输系統的波导波长 λ_g ,衰减常数 α ,諧振腔的品质因数 Q 以及絕緣材料相对介电常数 ϵ ,等等。一般常見的駐波测量器就是为此目的而設計成的测量場強和場的分布的精密仪器。

本文对波导型駐波测量器的結構、原理、測試、定标、测量技术、誤差等等加以闡述和分析,并以試制成的10厘米波段波导型駐波测量器为例加以討論。

二、駐波测量的基本原理及駐波测量器的結構

2.1. 基本 原 理^[1-7]

一个微波传输系統,当其中仅有主模传输时,由訊号发生器至

負荷之間任何地方若有任何的阻抗不連續，則在該處將產生與入射波頻率相同而傳播方向相反的反射波，此反射波與入射波的橫向（垂直於傳播方向）電的分量和磁的分量在系統中每一點將分別合成一固定位置的電場和磁場而且是周期分布的圖形，這就是駐波。在匹配良好的傳輸系統中則僅有行波而沒有駐波。由此可見駐波的波幅和相角取決於反射波與入射波各分量的相對關係，而對入射波來說，反射波的波幅和相角則由阻抗不連續的程度而定。假設一理想的無損耗的傳輸系統，其中僅有一處不連續，所以由測量駐波的大小和相角即可間接求出不連續處的阻抗數值及性質。

現在以常用於厘米波波段的波導系統說明其間關係：為簡單起見，設一無損耗的、均勻的波導傳輸系統，它的特性導納 $Y_0 = 1$ ，一端接訊號發生器，一端接匹配負荷，在它的端接地方有一不連續面 M ， L 是距不連續面為 l 的參考面（圖 2.1.1）。

設： E^+ ——由發生器發出的入射波在 L 面的交变电場橫向分量場強。 $E^+ = 1$ 。

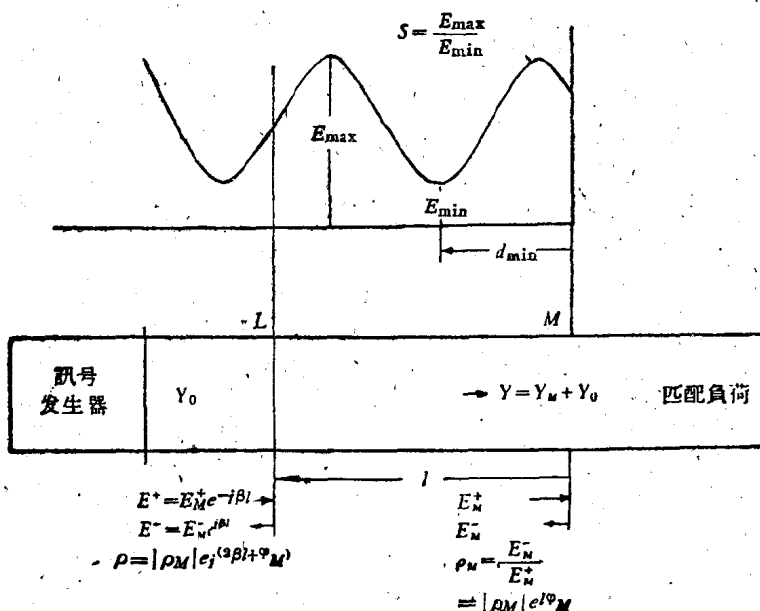


圖 2.1.1 無損耗波導傳輸系統中有一阻抗不連續

E^- ——由不連續面 M 产生的反射波在 L 面的交变电場橫向分量場強。

E —— L 面的橫向交变总電場場強, E^+ 和 E^- 的矢量差。

H^+ 、 H^- 、 H 代表磁場分量, 意义同上。 $H^+ = 1$ 。在時間上 E^+ 、 H^+ 同相, E^- 、 H^- 反相。 E 或 H 附有脚註 M 的表示在不連續面的数值。

$$E = E^+ - E^-, \quad (2.1.1)$$

$$H = H^+ + H^-. \quad (2.1.2)$$

設 ρ_M ——不連續面的電場反射系数

$$\rho_M = \frac{E_M^-}{E_M^+} = -\frac{H_M^-}{H_M^+}, \quad (2.1.3)$$

$$\rho_M = |\rho_M| e^{j\varphi_M}, \quad (2.1.4)$$

式中 $|\rho_M|$ ——反射系数的模,

φ_M ——反射系数的相角。

$$\rho_M = \frac{Y_0 - Y}{Y_0 + Y}, \quad (2.1.5)$$

式中 Y_0 ——波导的特性導納, 与波导物理尺寸、填充介質以及其中的波长有关。

$$Y_0 = \frac{H^+}{E^+} = -\frac{H^-}{E^-} = 1. \quad (2.1.6)$$

Y ——不連續处总導納即波導納。

$$Y = Y_M + Y_0. \quad (2.1.7)$$

Y_M ——造成不連續的導納。

∴ L 面总電場場強:

1) 由于波导中传递的波有各种不同的模, 因此波导的特性阻抗(或特性導納)不能与传输綫一样有一統一的定义。例如 H_{10} (矩形波导中 H_{10} 模), 它的特性阻抗:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\lambda_g}{\lambda} \frac{b}{a},$$

式中 μ ——波导填充介質的導磁率, ϵ ——波导填充介質的介电常数, λ_g ——波导波长, λ ——自由空間波长, b ——波导窄边长度, a ——波导寬边长度。(2.1.5) 中的

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0}.$$

$$\begin{aligned}
E &= E^+ - E^- \\
&= E^+[1 - |\rho_M| e^{j(2\beta l + \varphi_M)}] \\
&= E^+[1 - |\rho_M| \cos(2\beta l + \varphi_M) - j|\rho_M| \sin(2\beta l + \varphi_M)].
\end{aligned}
\tag{2.1.8}$$

式中 β ——传输系统的相移常数。

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \tag{2.1.9}$$

λ_g ——波导波长。

同理得 L 面总磁场场强：

$$H = H^+[1 + |\rho_M| \cos(2\beta l + \varphi_M) + j|\rho_M| \sin(2\beta l + \varphi_M)]. \tag{2.1.10}$$

(2.1.8), (2.1.10) 分别为 E 和 H 的驻波，都是 $(2\beta l + \varphi_M)$ 的周期函数。

当 $2\beta l + \varphi_M = 0, 2\pi, \dots, 2n\pi$, E 为极小值, H 为极大值:

$$E_{\min} = E^+(1 - |\rho_M|), \tag{2.1.11}$$

$$H_{\max} = H^+(1 + |\rho_M|). \tag{2.1.12}$$

当 $2\beta l + \varphi_M = \pi, 3\pi, \dots, (2n+1)\pi$, E 为极大值, H 为极小值:

$$E_{\max} = E^+(1 + |\rho_M|), \tag{2.1.13}$$

$$H_{\min} = H^+(1 - |\rho_M|). \tag{2.1.14}$$

我们定义 S 为驻波比¹⁾

$$S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}. \tag{2.1.15}$$

则

$$S = \frac{1 + |\rho_M|}{1 - |\rho_M|}, \tag{2.1.16}$$

$$|\rho_M| = \frac{S - 1}{S + 1}. \tag{2.1.17}$$

1) 苏联书籍中称为驻波系数 (KCB), 它的倒数称为行波系数 (KBB). 有些书中定义驻波比为 $S = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$.

L 面的导納应滿足

$$Y = Y_M + Y_0 = \frac{H}{E}. \quad (2.1.18)$$

由 (2.1.8), (2.1.10) 得

$$\frac{Y}{Y_0} = \left[\frac{1 - |\rho_M|^2}{1 - 2|\rho_M| \cos(2\beta l + \varphi_M) + |\rho_M|^2} + j \frac{2|\rho_M| \sin(2\beta l + \varphi_M)}{1 - 2|\rho_M| \cos(2\beta l + \varphi_M) + |\rho_M|^2} \right]. \quad (2.1.19)$$

Y 也是 $(2\beta l + \varphi_M)$ 的周期函数。

当 $2\beta l + \varphi_M = 0, 2\pi, \dots, 2n\pi$, Y 是实数又是极大值:

$$Y_{\max} = Y_0 \left[\frac{1 + |\rho_M|}{1 - |\rho_M|} \right] = Y_0 S. \quad (2.1.20)$$

当 $2\beta l + \varphi_M = \pi, 3\pi, \dots, (2n+1)\pi$, Y 是实数又是极小值:

$$Y_{\min} = Y_0 \left[\frac{1 - |\rho_M|}{1 + |\rho_M|} \right] = \frac{Y_0}{S}. \quad (2.1.21)$$

观察 (2.1.19) 式, 若 $|\rho_M|$ 及 $(2\beta l + \varphi_M)$ 为已知, 即可計算 $\frac{Y}{Y_0}$, $\frac{Y}{Y_0}$ 称为对波导特性导納的标称导納。 $|\rho_M|$ 可由测得的駐波比, 利用 (2.1.17) 式求出。

将参考面 L 移至不連續面 ($l = 0$), 取駐波图形上极小点作参考点, 即令 $2\beta l_{\min} + \varphi_M = 0$, $l_{\min}$ 表示由不連續面至最近一极小点的距离 (图 2.1.1), 可由实验求出。

β 由計算或测出之 λ_r 代入 (2.1.9) 式求得, 因此决定了 φ_M 。

最后将 $|\rho_M|$, φ_M 代入 (2.1.19), 則 $\frac{Y}{Y_0}$ 可完全确定。由

(2.1.18), $\frac{Y_M}{Y_0}$ 也随着求出:

$$\frac{Y_M}{Y_0} = \left[\frac{2|\rho_M|(\cos\varphi_M - |\rho_M|)}{1 - 2|\rho_M| \cos\varphi_M + |\rho_M|^2} + j \frac{2|\rho_M| \sin\varphi_M}{1 - 2|\rho_M| \cos\varphi_M + |\rho_M|^2} \right]. \quad (2.1.22)$$

(2.1.19) 式計算很繁, 通常在測出 S 及 $d_{\min}$ 之后, 利用阻抗圖^[9,10] 進行圖解, 求標稱導納 $\frac{Y}{Y_0}$, 則很簡便。

2.2. 波導型駐波測量器的結構^[1-7]

由上節數學分析可見, 若有一種儀器能測量波導中入射波和反射波合成的總電場或總磁場的極大值和極小值以及測定其位置, 就能達到駐波測量的目的。根據這一原理設計成的駐波測量器^[1] 約可分兩類, 一類測電場, 另一類測磁場^[11], 結構各有不同。直至目前, 廣泛應用的都屬前一類, 後者因不易得到純粹的磁耦合, 很少採用。根據開槽綫的型式又可分為同軸綫型^[18] (平行板型的^[28] 基本上也屬於這一類) 及波導型, 後一型式是本書所要敘述的, 此外還有其他測量設備和測量方法^[1-6,12]。

一截面為矩形的波導, 傳輸 H_{10} 主模, 由麥克斯韋方程解出其中電磁場方程式如下:

$$\left. \begin{aligned} H_z &= H_1 \cos \frac{\pi x}{a}, \\ H_x &= jH_1 \frac{2a}{\lambda_g} \sin \frac{\pi x}{a}, \\ E_y &= -jH_1 \frac{2a}{\lambda_g} Z \sin \frac{\pi x}{a}, \\ H_y &= E_x = E_z = 0, \\ Z &= \frac{E_y}{H_x}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1)$$

波導內 H_{10} 波電磁場及波導壁上電流分布見圖 2.2.1。圖 2.2.2 是波導型駐波測量器示意圖。

WG 是矩形波導, 在它的上面 a 邊正中央平行於波導軸 z 的方向開有一狹槽 S , 並有一金屬探針 P , 經過槽垂直伸入波導內少許。由 (2.2.1) 式及圖 2.2.1 知駐波電場場強在 a 邊正中央最大, 沿軸

1) 又稱為開槽綫、測量綫、駐波儀、駐波比測量器、駐波指示器。

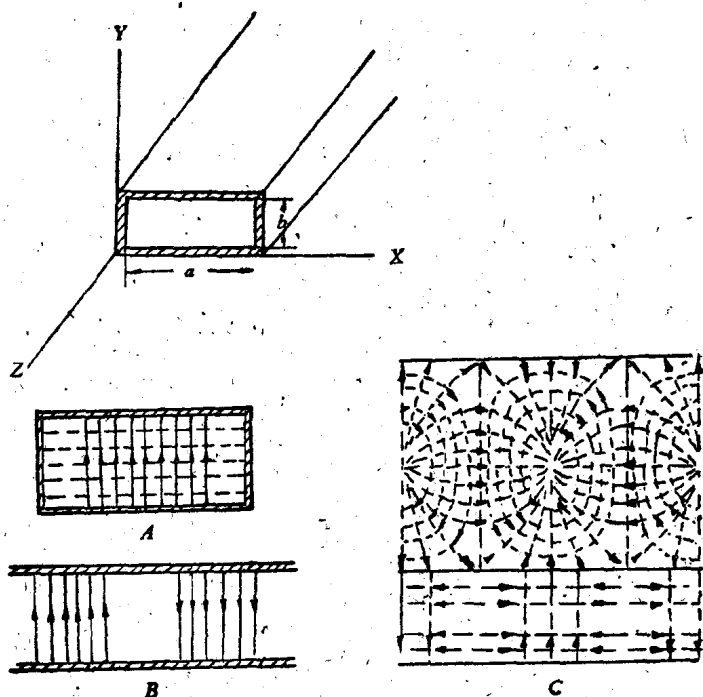


图 2.2.1 矩形波导内 H_{10} 波分布图

- | | |
|---------|-----------|
| A. 横截面图 | —— 电力线 |
| B. 纵截面图 | ----- 磁力线 |
| C. 表面图 | —— 电流线 |

向成周期函数分布(见图 2.2.2)。探针与电力线平行耦合的结果,必然得感应电压,它的大小正比于该处的场强。交变电流在同轴线 CO (或波导)组成的探针电路内,经整流器 D 整流后,经过指示器 I ,回至同轴线外导体(或波导)成一封闭回路。因此,指示器的读数也间接表示出场强的大小。当探针沿槽移动,指示器必然会有极大值和极小值出现。从而求得 $S = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$ 。由标尺 R 指出的探针位置即可测出极小点至不连续面的距离 $d_{\min}$ 。 PL 是可滑动的调谐活塞,在探针电路中起匹配阻抗的作用。 C 是探针座,可沿轴向滑动,它上面装有探针,在滑动时维持它与波导的相对固定位置,

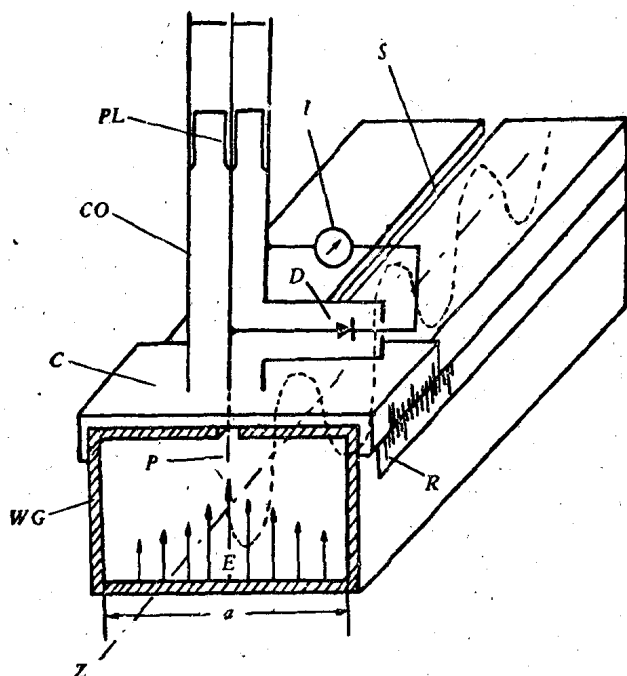


图 2.2.2 波导型驻波测量器示意图

并保持探针电路与波导的接触。检波器通常都用晶体二极管，也有用热电偶或热阻器的，但都不及前者简便。指示器一般多用微安表，或用选频放大器及电子管电压表，依要求的灵敏度不同而定。

三、波导型驻波测量器的设计要点

波导型驻波测量器基本上是由一开槽波导与一可移动的探针检波装置组合而成的。如前所述，驻波测量是依靠伸入槽内少数的探针所检拾的电压的大小以及探针的位置所指示的驻波图形的相角决定的。要准确地测出这些数值，概括地说，有下列六项总的要求：

1. 测量器本身固有的阻抗不连续应尽可能减至最小。



2. 探针与波导的相对位置保持固定,而且必须对称,即只能允许探针沿波导上 a 边中綫移动,它伸入波导槽內的长度——穿伸度,在任何位置必需相同,而且必须与电力綫保持平行(即垂直于 a 边),不能有任何傾斜、偏移。

3. 联系着检波装置(即图 2.2.2 中探针座 C 以上各部分)和波导的探针座 C 在任何位置均应与波导保持同样紧密程度的良好的电接触。

4. 指示器所指示的数据应与驻波电场場強的大小保持一定的关系。

5. 标尺讀数必须能重复、准确而精密地讀出探针的位置。

6. 在滿足以上五个要求的同时,应考虑到仪器部件加工及装配的方便,經濟、实用和美观。

由此可見,驻波測量器的設計包括机械的和电的两方面問題,而在机械的和电的参数之間又要有准确的联系,只有在两方面問題同时获得妥善的解决,才能完全滿足上述要求,本文选择其中要点分別討論于后。

3.1. 波 导 尺 寸

我們所采用的是 10 厘米波段通用标准,即內尺寸是 72 毫米 $\times$ 34 毫米。由于波导尺寸是决定其特性阻抗的因素之一,而測定的阻抗又都是对开槽波导特性阻抗的标称阻抗。因此估計波导二边尺寸的公差对阻抗变化的影响很有意义。

現在以无槽波导計算。

波导的特性阻抗定义为:

$$Z_0 = \eta \frac{\lambda_g}{\lambda} \frac{b}{a}, \quad (3.1.1)$$

式中 $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}},$

μ ——波导填充介质的导磁率;

ϵ ——波导填充介质的介电常数,

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} = \text{波导波长}, \quad (3.1.2)$$

λ ——TEM 波波长,

$\lambda_c = 2a =$ 波导的截止波长.

将此关系代入 (3.1.1) 并取偏微分得

$$\frac{\delta Z_0}{Z_0} = -\frac{\delta a}{a} \left(\frac{\lambda_g}{\lambda}\right)^2 + \frac{\delta b}{b}. \quad (3.1.3)$$

实际应用时, $\left(\frac{\lambda_g}{\lambda}\right)^2$ 約在 1.5—3 范围之間, 而 $\frac{a}{b}$ 通常約等于 2, 所以我們可将 a, b 二边尺寸的公差定作一样, 对特性阻抗的影响相同, 仅有正負之分.

我們試制的开槽, a, b 边的最大公差約为 ± 0.05 毫米 (測量結果), 故 Z_0 的誤差約为 0.15%.

3.2. 槽

波导尺寸对阻抗的影响已見上述, 毫无疑問, 在設計及加工过程中均应尽可能使它接近标准值. 然而基于測电場原理設計的駐波測量器又不可避免地要在波导的一面上开一狹槽, 它不仅对特性阻抗有影响, 而且还有波导波长的变化、槽端引起的阻抗不連續、波导內能量越槽的輻射作用以及槽本身的激励作用等等, 所以波导上开槽的位置与槽的长、寬、深等尺寸在設計时必需妥善选择处理.

1. 槽对波长的影响

(1) 槽对波导波长的影响^[1]:

$$\lambda'_g = \lambda_g \left(1 + \frac{W^2 \lambda_g^2}{8\pi b a^3}\right), \quad (3.2.1)$$

式中 λ'_g ——开槽波导的波导波长,

W ——槽寬.

(2) 槽对波导截止波长的影响:

由 (3.1.2)

$$\lambda'_c = 2a \left(1 - \frac{W^2}{2\pi b} \right), \quad (3.2.2)$$

式中 λ'_c ——开槽波导的截止波长。

2. 槽对波导特性阻抗的影响

由 (3.1.1), (3.2.1) 知, 槽对波导特性阻抗的影响与对波导波长的影响相同。

$$Z'_0 = Z_0 \left(1 + \frac{W^2 \lambda_g^2}{8\pi b a^3} \right), \quad (3.2.3)$$

式中 Z'_0 ——开槽波导的特性阻抗。

3. 槽的位置

首先, 由图 2.2.1 直觉观察知, 以沿 a 边中綫开一狭槽最为相宜, 因为只有如此, 所测的电場为最强而且割断波导壁上的电流綫为最少, 因此也減小了能量越槽的輻射。槽不在波导正中央, 会引起槽波的激发, 由于輻射而产生损失, 而且对波导中的主模产生干扰作用, 若槽的长度正是主模的半波导波长的整数倍, 則对主模产生显著的諧振作用。当探針經過槽伸入波导, 在槽隙中将槽分为两部分而且随探針的移动而改变它的长度, 如此, 在槽的两端至探針之間易引起某些槽波的激励, 耦合至探針电路, 則指示器指出的讀数将不能代表真实駐波的数值。对諧振槽来說, 若槽的中綫平行于波导 a 边中綫移动, 則槽对主模形成一电导 G , 它的值随槽的中綫与波导 a 边中綫的偏移 x 的正弦函数的平方而变化 $\left(G \propto \sin^2 \frac{\pi x}{a} \right)$ 。若槽中綫与波导中綫偏一角度, 則形成一电阻, 若角度很小, 它的值近似地随角度的平方而減小^[5]。

槽波的截止波长 λ_c 可用下式表示^[1]:

$$\cot\left(\frac{\pi a}{\lambda_c}\right) = \frac{2b}{\lambda_c} \left[2\ln\left(\frac{0.372b\lambda_c}{W^2}\right) + \frac{2}{\sqrt{1 - \left(\frac{2b}{\lambda_c}\right)^2}} + \frac{2\pi t}{W} \right]. \quad (3.2.4)$$

式中 a, b ——各为矩形波导的宽、窄边尺寸,

W ——槽宽,

t ——槽壁厚(槽深).

将标准波导尺寸代入上式求出 λ_c 较波导的截止波长 $2a$ 大很多,因此,槽波的波导波长小于 $H_{10}^{\square}$ 波的波导波长.

为避免槽波和它的干扰,首先要将槽开在波导正中央,使它的对称度(槽轴与波导轴重合的程度)不大于 $0.001a$, 其次参阅 3.3 节在探针之外加装舌套.

4. 槽的尺寸

(1) 槽宽 W . 由上列各式可见槽越窄越好,但实际装置上除去探针经过槽伸入波导之外,还有舌套套在探针外面(见 3.3 节),为加工、制作方便起见,槽不能过分狭窄,实用上在 10 厘米波段一般为 1.5—3 毫米,这时对特性阻抗及波导中波长的影响可忽略. 我们选择的槽宽 $W = 2.5$ 毫米.

$$\frac{\delta Z_0}{Z_0} \doteq 4 \times 10^{-4},$$

$$\lambda'_g - \lambda_g \doteq 4 \times 10^{-4}.$$

(2) 槽深 D . 为使槽的辐射作用减至可以忽略的程度,经验指出: $D \geq 2W$. 我们选择 $D = 5$ 毫米,即波导壁厚.

(3) 槽长 L . 槽的有效长度由探针指示出的极大值、极小值的个数决定. 为测驻波比至少应指出一极大值、一极小值,所以探针的最小动程应为 $\frac{1}{4} \lambda_g$. 实用上若探针指示出较多的极大值及极小值,可供测量比较或校核之用,而且在测波长方面亦较准确. 槽过长,加工不易,仪器变得笨重,也没有必要. 因此常将槽的有效长