

X波段盘荷波导加速结构的 模拟计算与实验测试

尹厚东, 裴元吉, 黄贵荣, 贾大春

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要:介绍了 X 波段盘荷波导行波加速结构研究的部分计算结果。给出了 RF 频率为 9.37 GHz 的 X 波段盘荷波导行波加速结构物理设计参数, 研究了 X 波段盘荷波导的特征尺寸的微小变化与加速结构基本物理参数的关系。加工出一些模型腔, 利用网络分析仪对其微波参数和测试条件的影响进行了测量分析。

关键词: X 波段盘荷波导; 特征尺寸; 实验测量

中图分类号: TL53

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2000)06-0507-07

随着高能物理的发展, 建造 TeV 量级的正负电子直线对撞机(LC)已成为不少实验室多年来追求的目标。利用 S 波段建造的电子直线加速器, 由于电场击穿的限制, 纵向加速电场梯度很难达到 50 MV/m 以上。理论与实验表明, 加速结构中的击穿场强 E_b 随频率的提高而提高^[1]。为此, 不少实验室在设计正负电子对撞机时, 选 X 波段加速结构为主选频段, 并为研制大功率 X 波段功率源投入了大量的人力和物力。近几年来, 数十兆瓦的 X 波段的速调管已在 SLAC、KEK、VLEPP 等实验室研制成功^[2~4], 这为设计 X 波段直线加速器奠定了可靠的技术基础。与此同时, 上述各实验室对 X 波段的加速结构开展了研究, 取得了不少研究成果, 并提出了建造 TeV 正负电子对撞机方案。同时, 由于 X 波段的加速结构尺寸小, 场强很高, 使在相同能量下的尺寸体积造价都将下降^[5], 这也将低能电子直线加速器的应用中呈现很强的竞争性。为此, 本工作对 RF 为 9.37 GHz 的 X 波段盘荷波导加速结构进行研究, 给出理论计算和实验测量结果。

1 X波段盘荷波导的基本设计参数

根据慢波结构理论, 利用变分法编制了盘荷波导计算程序 VAMCAD。应用该程序计算的 X 波段加速结构的基本参数列于表 1。

2 X波段盘荷波导特征尺寸与基本物理参数的关系

盘荷波导的特征尺寸示于图 1, 包括周期 D , 束流孔径 $2a$, 盘荷厚度 t , 波导半径 b , 盘片

收稿日期: 1999-07-06; 修回日期: 1999-09-18

作者简介: 尹厚东(1974—), 男, 湖北安陆人, 硕士, 加速器物理及应用专业

表 1 X波段盘荷波导行波加速结构的基本参数

Table 1 Main parameters of accelerating structure of X-band disk loaded waveguide

频率 f /GHz	波长 λ /mm	工作模式	束流孔径 $2a$ /mm	波导半径 $2b$ /mm
9.37	31.995	$2\pi/3$	6	24.895
加速结构类型	盘片厚度 t /mm	品质因数 Q	衰减系数 α /m ⁻¹	分路阻抗 R_M /M Ω m ⁻¹
行波常阻抗	1.5	7 743	1.495	119.153
串联阻抗 R_s /M Ω m ⁻²	群速度 v_g/c	$R_M \cdot Q^{-1}$ /k Ω m ⁻¹		
356.3	0.008 48	15.388		

间隔 d ,盘孔平头 δ ,盘孔边缘半径 ρ 。它们的微小变化对加速结构基本参数的影响对于机加工实用的盘荷波导加速结构很重要,它们决定特征尺寸的加工公差的大小。为此,研究了 X 波段盘荷波导特征尺寸的微小变化对物理参数的影响。利用自编的 VAMCAD 程序得到了各种尺寸的微小变化对性能参数影响的数值计算结果。

RF 频率是加速结构中最重要参数之一,几乎所有其它参数的确定都与它有关,它直接决定加工公差的大小。图 2(a)反映了 X 波段盘荷波导 RF 频率随特征尺寸的微小变化量的变化规律。由图可见,RF 频率随特征尺寸的微小变化量呈线性变化,变化率如下:

$$\begin{aligned}\partial f/\partial(2b) &= -0.387\ 65\ \text{MHz}/\mu\text{m}; \\ \partial f/\partial(2a) &= 0.070\ 15\ \text{MHz}/\mu\text{m}; \\ \partial f/\partial t &= 0.035\ 766\ \text{MHz}/\mu\text{m}; \\ \partial f/\partial d &= -0.016\ \text{MHz}/\mu\text{m}; \\ \partial f/\partial\delta &= -0.038\ \text{MHz}/\mu\text{m}; \\ \partial f/\partial\rho &= -0.03\ \text{MHz}/\mu\text{m}.\end{aligned}$$

图 2(b)~(f)反映了特征尺寸的微小变化量对加速结构的其它参数,诸如分路阻抗 R_M 、群速度 v_g/c 、衰减系数 α 、 R_M/Q 等的影响。

3 腔体的频率测量

3.1 实验设备和测试方法

利用网络分析仪进行扫频测量,信号的耦合方式采用探针插在两端短路板中间的电耦合激励方式。测量原理方框图示于图 3,图 4 为测量腔组成图。

用 GPIB 卡和电缆把计算机和网络分析仪连接起来,由计算机控制实现自动测量。

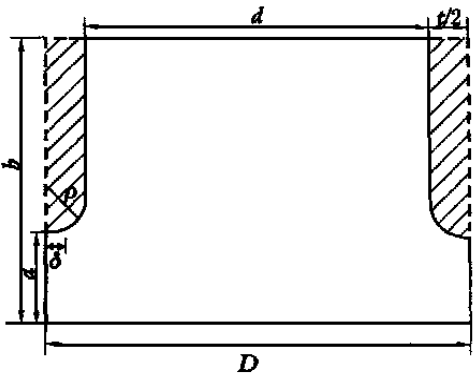


图 1 盘荷波导特征尺寸图
Fig.1 Schematic diagram
of cavity dimension

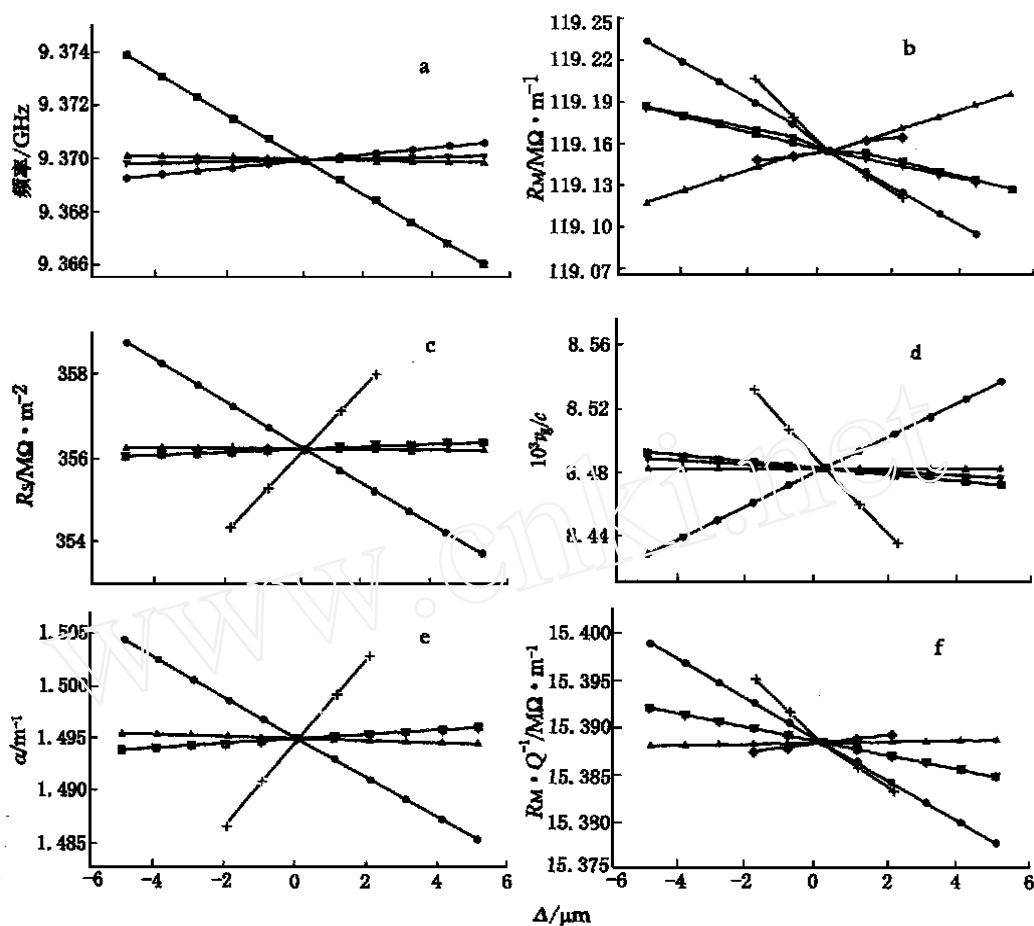


图2 特征尺寸的微小变化与频率(a)、分路阻抗(b)、串联阻抗(c)、群速度(d)、衰减系数(e)、 R_M/Q (f)的关系

Fig. 2 Change of dimensions of cavity vs frequency(a), shunt impedance(b), series impedance(c), group velocity(d), attenuation coefficient(e) and R_M/Q (f)

■—b; ●—a; ▲—d; ▼—e; ◆—δ; +—ρ

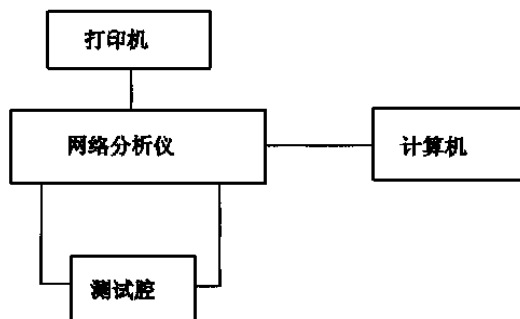


图3 测量原理方框图

Fig. 3 Schematic diagram of measure method

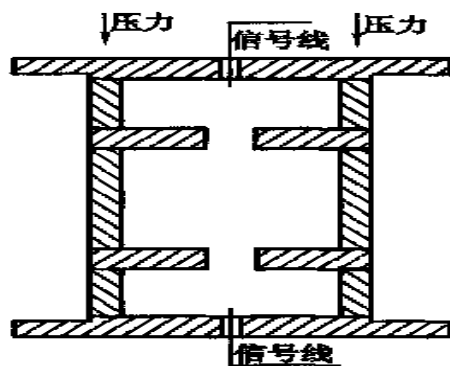


图4 测量腔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measure cavities

3.2 测量方法的实验确定

用扫频短路板法测量频率时,必须考虑短路板两端所加压力的大小、耦合探针的长短、耦合孔的大小对频率测量的影响,以及温度变化对频率的影响。这些影响用实验来测定。

实验测试在恒温室采用一整腔两半腔,在温度 25 °C、湿度 30 % 的条件下进行。当压力大于 7 kg/cm² 时,腔盘片间接触良好,谐振频率基本不变;温度每上升 1 °C,频率 f 约下降 150 kHz,即 $\partial f / \partial t = -150 \text{ kHz} / ^\circ\text{C}$;探针长度为 3~4 mm 对测量频率不太敏感,较适宜测量。

3.3 腔体测量结果

理论计算腔体的尺寸示于图 5。分别加工出 6 个环和盘片,利用上述装置和方法对频率等参数进行测量。图 6 示出了测量结果。

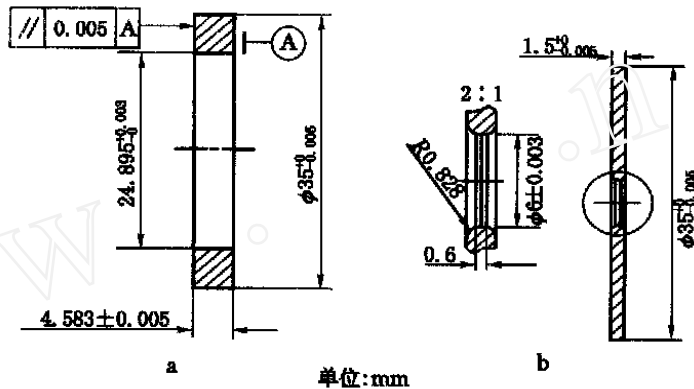


图 5 模型腔加工尺寸图

Fig. 5 Drawing of disk-loaded waveguide

a ——模型腔的环;b ——模型腔的盘片

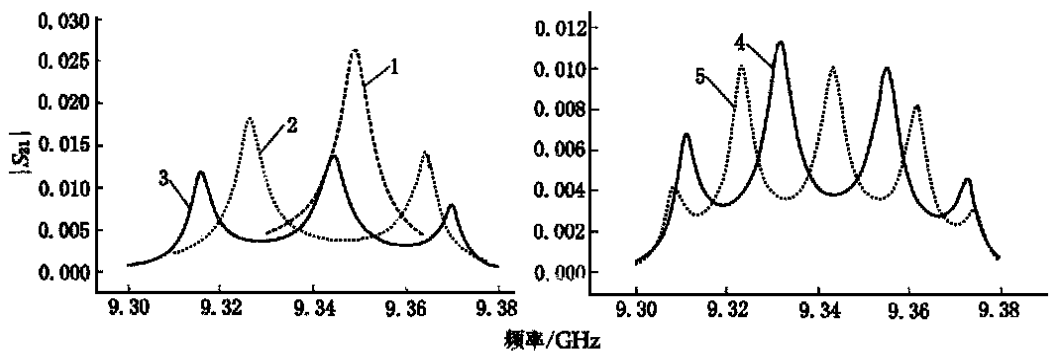


图 6 腔体测量结果

Fig. 6 Testing result of cavities

1 ——两半腔一整腔;2 ——两半腔二整腔;3 ——两半腔三整腔;

4 ——两半腔四整腔;5 ——两半腔五整腔

测量是用网络分析仪测腔体的通带特性 $S_{21}-f$ 曲线,当输入信号频率与腔体固有频率一致时,腔体谐振,此时 S_{21} 最大,出现一个尖峰。由于天线探针的短路作用,被测腔中不存在 0

模和 π 模。对于一整腔加两半腔,只存在 $\pi/2$ 模;两整腔加两半腔测得的模式为 $\pi/3$ 模和 $2\pi/3$ 模;三整腔加两半腔测得的模式为 $\pi/4$ 模、 $2\pi/4$ 模、 $3\pi/4$ 模;四整腔加两半腔测得的模式为 $\pi/5$ 模、 $2\pi/5$ 模、 $3\pi/5$ 模、 $4\pi/5$ 模;五整腔加两半腔测得的模式为 $\pi/6$ 模、 $2\pi/6$ 模、 $3\pi/6$ 模、 $4\pi/6$ 模、 $5\pi/6$ 模。

4 误差分析和结果分析

4.1 频率修正

- (1) 温度偏差 实际加工时温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量时温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以, $\Delta f_t = -1.5\text{ MHz}$ 。
- (2) 介质的影响 测量在大气中进行,与真空状态下的频率差值 $\Delta f_p = -2.79\text{ MHz}$ 。
- (3) 湿度的影响 由于实验中湿度保持在 30% 左右,变化很小,它对频率的影响已包含在介质影响中,这里不需再做修正。

4.2 误差分析

(1) 偶然误差

- 1) 温度波动引起的频率偏差 实验用温度计为半导体点温计,温度读数可精确到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,由温度校正造成的频率误差 $\delta f_1 = \pm 15\text{ kHz}$ 。
- 2) 腔体组装定位引起的频率偏差 由于加工出的腔体是盘片结构,单腔测量时,组装定位依靠外圆,其加工精度为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$,用“V”型槽组装定位,它的垂直度和平行度均为 $10\text{ }\mu\text{m}$,腔体定位造成腔体同心度偏差较大,使得测量偶然误差偏大。经多次测量,确定此项误差 $\delta f_2 = \pm 0.455\text{ kHz}$ 。

总的偶然误差 $\delta f_a = \sqrt{\delta f_1^2 + \delta f_2^2} = \sqrt{0.015^2 + 0.455^2} = 0.455\text{ MHz}$ 。

(2) 系统误差

- 1) 网络分析仪的分辨误差 稳定测量时,网络分析仪的频率跨度为 20 MHz ,所用的扫频点数为 $1\ 601$,故网络分析仪的分辨力 $\delta f_3 = \pm 12.5\text{ kHz}$ 。
- 2) 测量装置的扰动 天线探针和耦合孔引入被测腔会对谐振腔起扰动作用,造成测量误差。为了确定这种偏差,可用微扰理论的Slater公式,通过微扰法分别测得对 $\pi/2$ 和 $2\pi/3$ 模的扰动 $\Delta f_M^{\pi/2} = 6.46\text{ MHz}$, $\Delta f_M^{2\pi/3} = 3.7\text{ MHz}$ 。

由以上误差分析知:前三项总的测量误差较大,为 $\sqrt{15^2 + 455^2 + 12.5^2} = 455.5\text{ kHz}$ 。这主要是由于腔体外圆加工精度不够高引起盘片同心度不够好造成了偶然误差大,要减小它,必须提高外圆的加工精度。

从测量值中可消除后一项系统误差的影响,从而减小测量误差。连同前面的频率修正,可用下式进行总修正,从而使测量接近真实值,即:

$$f = f_{\text{测量值}} - (\Delta f_t + \Delta f_p + \Delta f_M)$$

4.3 测量结果分析

由加工出的尺寸计算的频率值与测得频率值(修正后)的对比列于表2。

表 2 计算值与测量值的比较

Table 2 Calculated and measured values

模式	计算值 f_1 / GHz	测量值 f_2 / GHz	$(f_1 - f_2)$ / MHz	相对偏差/ %
$\pi/2$ 模	9.349 816 5	9.345 15	4.666 5	0.05
$2\pi/3$ 模	9.368 549 3	9.364 09	4.540 3	0.048 5

由上表可见:在测量误差内,理论计算的 $2\pi/3$ 模的频率比测量值大 0.048 5 %, $\pi/2$ 模的计算值比测量值大 0.05 %。偏差主要是由变分法计算的方法等造成的,这可通过适当调整 $2b$ 尺寸($\sim 6\text{ }\mu\text{m}$)以及通过微挤压腔体的办法,使之达到设计要求。

表 3 列出了在空气中参数的测量值与理论计算值。可以看到:在空气中的测量值与理论计算值有一定的差值,这主要是由于加工工艺、加工偏差、大气介质、腔体表面部分氧化和测量方法造成的。

表 3 物理参数对照

Table 3 List of physical parameters

v_g/c		Q		α/m^{-1}	
计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值
0.008 48	0.007 09	7 743	6 903	1.5	1.9

5 结束语

本工作给出了 X 波段盘荷波导加速结构研究的部分理论计算结果。实验测量结果表明:计算结果对实际加工 X 波段盘荷波导加速结构尺寸及加工公差的要求具有指导意义。对于 X 波段盘荷波导盘片结构,除了腔体内部尺寸要求精度达到 μm 量级外,外圆尺寸精度也要达到 μm 量级,这样才能减小因腔体组装定位带来的性能差异。利用短路板中间插入适当长度(3~4 mm)的探针天线对 X 波段盘荷波导进行单腔测量是有效的,利用网络分析仪测量比用传统方法快速准确,简单有效。测试表明,计算程序的计算结果和测量结果吻合较好。

参考文献:

[1] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京:科学出版社,1986. 42.

[2] Cargotakis G. The X-band Klystron Program at SLAC[A]. Proc of Workshop an Pulsed RF Sources for Lirnear Colliders[C]. Japan ,kanagawa: KEK,1996. 72.

[3] Mizano H. X-band RF System for SLC[A]. Proceedings of Workshop an Pulsed RF Sources for Linear Col-liders[C]. Japan ,kanagawa: KEK,1996. 19.

[4] Dolbido GV, Azorsky NI, Balakin VE, et al. Achievement of 100 MW Output Power in a Wide Aperture VLEP Klystron With Distributied Supperession of Parasitic Modes[A]. Proceedings of Workshop an Pulsed RF Sources for Linear Colliders[C]. Japan , Kanagawa: KEK,1996. 100.

[5] Loew GA. Linear Collider Systems and Costs[A]. Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference [C]. USA , Washington :IEEE Service Center ,1993. 644~645.

Numerical Calculation and Experimental Investigation on X-band Disk-loaded Waveguide Accelerating Structure

YIN Hou-dong, PEI Yuan-ji, HUANG Gui-rong, JIA Da-chun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
Hefei 230029, China)

Abstract : Some numerical research results for X-band disk-loaded waveguide accelerating structure at National Synchrotron Radiation Laboratory are described. A 9.37 GHz X-band travelling wave accelerating structures is designed, and dependent relationship between geometrical factors of the structure and RF parameters are studied. Some model cavities are made, and experimental studies are carried out by network analyzer HP8722D. These results provide a beneficial data for design and manufacture of X-band travelling wave accelerating structure.

Key words : X-band disk-loaded waveguide; geometrical dimensions; experimental studies

“超级细菌”可救核污染

一种名叫异常球菌的细菌以其超强的抗辐射能力而被微生物专家誉为“世界上最坚韧的生物体”,据说即使是原子弹爆炸也奈何不了这种细菌。目前,美国马里兰州贝塞斯达的军事保健理工大学的科学家实施了一项生物基因工程,将异常球菌培养成“超级细菌”,这样,它们就可以吞噬和消化核原料留下的有毒物质。

摘自《中国核工业》2000年第1期