

研究简报

螺旋波导加速腔的不载束大功率试验

梁仲鑫 李纬国 林揆训 韩崇露 钱伟述 陈佳洱

(北京大学)

摘 要

本文简述了一个在 19kW 功率下净电压增益 400kV 以上的螺旋波导加速腔,从实验上研究了该加速腔的静态频移和动态不稳定性等工作特性。这个腔计划用作 400kV 高压倍加器的后加速增能器。

近年来国际上广泛地用常温或超导的螺旋波导加速腔,“盘香”式和“分离环”式螺旋线谐振腔等作直流高压型加速器的后加速增能器,扩大加速粒子的能量和种类,取得了良好的效果。这类结构尺寸小、运用灵活、容易加工。在我国发展这类增能器的技术,将有利于充分发挥现有高压倍加器和静电加速器等设备的效用。

鉴于国内现有高功率源的频率较低(30MHz 以下)和注入器的能量较低,我们选用螺旋线型加速腔作 400kV 高压倍加器的后加速增能器。为取得必要的经验,我们制备了一个初始能量约 0.2MeV/A 的螺旋波导加速腔。加速腔的结构如图 1 所示,主要参数如下:外罩筒内径 240mm、长 650mm,腔内装有两根耦合的半波长螺旋线,螺旋线总长 339mm、螺距 5.65mm、直径 80mm。实验测得加速腔的谐振频率 f_0 为 28.4685MHz,品质因素 Q_0 为 965,净分路阻抗 η_0 为 22M Ω /m,电长度 L 为 383mm。为了能加速低能粒子,设计的相速较低,螺旋线的几何参数只得偏离最佳值,因而 Q_0 和 η_0 均较低。用小球微扰法测得加速腔轴向电场分布见图 2,由于场的边缘效应,两边场分布较低,实际的场分布相当于三个相速分别为 0.0214、0.0309、0.0203 的半波长驻波场。

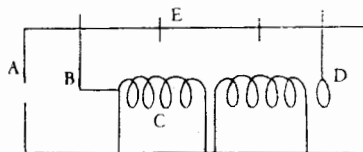


图 1 加速腔结构示意图

A. 外罩筒 B. 馈送头 C. 螺旋线 D. 调谐环 E. 探针

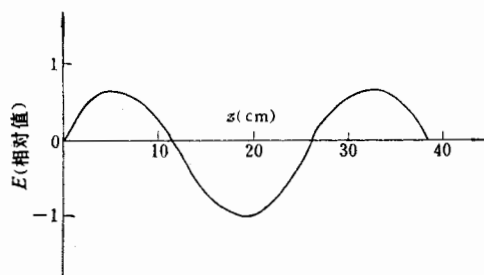


图2 场分布曲线

由净分路阻抗及场分布推算得 19kW 下净电压增益 $V_0 = \int |e_z(z)| dz = 400\text{kV}$, 最大能量增益 $\Delta W_{\max} = 312\text{keV}$.

试验装置见方块图 3. 运行时, 系统的真空度不低于 $2 \times 10^{-5}\text{mmHg}$.

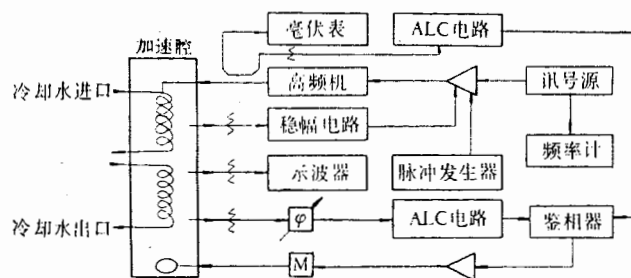


图3 实验装置方块图

在脉冲状态下进行了不载束的高功率试验, 实验表明: 负载周期 $\frac{1}{6}$ 时, 加速腔可在轴上平均加速场强 0.82MV/m 的水平下正常运转, 此时轴上驻波场强峰值达 1.92MV/m , 累积考验时间 700 小时以上, 其中连续运转时间最长为 18 小时, 轴上平均加速场强最高曾加到 0.92MV/m , 此时进腔功率为 25kW , 轴上驻波电场峰值达 2.27MV/m .

在不载束的高功率条件下, 我们研究了螺旋波导加速腔的一些工作特性, 主要结果如下:

一、静态频移和“病态”Q 曲线

螺旋线受到电磁场压力作用而产生压缩形变, 可引起其谐振频率 f_0 向低频方向移动, 称之为静态频移 Δf_s . 它满足关系式^[1] $\Delta f_s/f_0 = -KQP$, 式中 P 为进腔功率, K 为静态电磁、机械耦合常数. 在不同负载周期 D_f 下, 实验测得 $P \sim f$ 曲线见图 4. 结果如下:

D_f	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$
$\Delta f_s/P(\text{kHz/kW})$	-5.55	-3.73	-2.78
$\Delta f_s/\bar{P}(\text{kHz/kW})$	-22.2	-22.4	-22.2

性:
微/法

线如

实验表明：静态频移正比于进腔的平均功率 \bar{P} , $\Delta f_s / \bar{P} = -22.3\text{kHz/kW}$.

静态频移引起 Q 曲线向低频方向歪斜——“病态” Q 曲线。我们在负载周期为 $\frac{1}{8}$ 、进腔功率 15.7kW 条件下，测量了“病态” Q 曲线见图 5。曲线表明：“病态” Q 曲线的实验值和理论值基本相符。

随着螺旋线温度的升高，加速腔的谐振频率要向低频方向移动。实验测得 $\Delta f_s / \Delta T = -1.2\text{kHz}/^\circ\text{C}$ 。

电磁压力和温升引起的频移，由一个调谐能力为 220kHz 的调谐环来补偿。

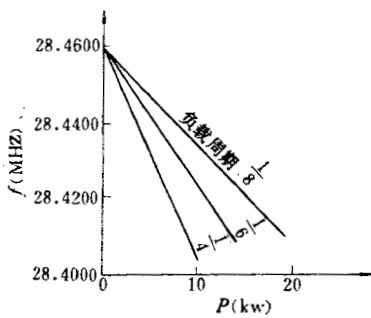


图 4 静态频移曲线

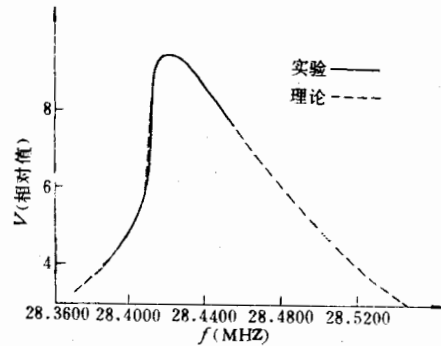


图 5 “病态” Q 曲线

实验——理论-----

二、动态不稳定阈功率

当外界存在电磁、机械或其他扰动时，易在螺旋线谐振频率的高侧引起动态不稳定性，对于一定结构的加速腔，存在着一个动态不稳定阈功率 $P_d^{(2)}$ 。进腔功率高于此阈时，微小扰动引起的振动将自动地连续增强，直至发生大幅度的电磁、机械耦合振动，使腔无法正常工作。

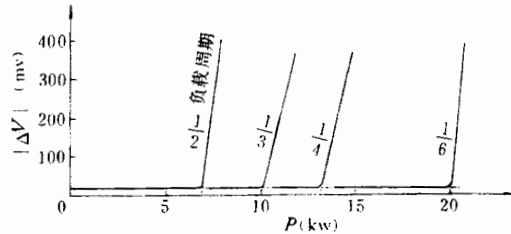


图 6 相误差电压与进腔功率关系曲线

实验时改变进腔功率 P ，测量由鉴相器输出的相误差电压 $|\Delta V|$ ，可画出 $P \sim |\Delta V|$ 曲线如图 6，曲线的转折点 A 所对应的功率定义为动态不稳定阈功率。测量的结果如下：

D_i	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$
$P(\text{kW})$	7.0	10.2	13.3	20.2

在
m,
高

是如

动,
态电

\bar{P} (kW) 3.5 3.4 3.4 3.4

由此可见: 动态不稳定阈功率 P_{th}^d 系由平均功率所决定的。对于本试验的加速腔, 动态不稳定阈功率 $P_{th}^d = 3.4\text{kW}$ 。

三、“有害”调制频率

利用功率调制的方法可使脉冲功率高出平均阈功率好几倍, 所以功率调制是保证腔稳定运行的有效措施。但是调制本身是一种周期性的扰动, 当调制频率为螺旋线的机械振动基频及其倍频时, 同样将使螺旋线的机械振动的振幅越来越大, 造成腔的场强发生严重的不稳定。我们称这种调制频率为“有害”调制频率。工作时必须避开它!

实验时固定进腔功率, 改变调制频率, 在 200Hz 以内, 我们测到的“有害”调制频率有 19.6、40.0、59.5、79.5 和 99.5Hz。

实验还观察到: 当进腔功率为 10—20W 时, 有二次电子共振现象, 此时真空度下降, 测不到加速腔的 Q 值。当进腔功率为 18kW 时, 在加速腔外罩筒表面可测到很强的 X 射线, 局部表面竟达 800 毫伦/小时。用 3mm 厚的铅板阻挡后, 离腔 1 米以外的地方可达安全剂量。

高功率运行中最大的困难是来自电磁、机械耦合振动, 为此, 应提高螺旋线的机械强度, 改善电场稳幅控制。

在试验中, 高频相控组的同志曾参加了部分实验工作, 并对试验提过很多宝贵意见, 特此感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈佳洱, 螺旋线波导馈电问题, 内部资料, 1976, 3.
 [2] A. Schempp, W. Rohrbach and H. Klein, *Nuclear Instruments and Methods*, January 1. No. 1. Vol. 140 (1977).

HIGH POWER TESTS ON A HELIX RESONATOR WITHOUT BEAM

LIANG ZHONG-XIN, LI WEI-GUO, LIN KUI-XUN,
 HAN CHONG-ZHAN, QIAN WEI-SHU, CHENG JIA-ER
 (Peking University)

ABSTRACT

A helix resonator providing a net voltage gain of more than 400 kV at power levels of 19 kW is described. Some characteristics of the resonator at high power levels, such as static frequency shift and dynamic instability are studied experimentally. This helix resonator will be used as a booster for a 400 kV Cockcroft-Walton generator.