

9 MeV 行波电子直线加速器 加速管微波测试及调整

陈怀璧, 胡少光, 童德春

(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要:介绍了海关大型集装箱在线检测用加速器的核心部件 9 MeV 行波电子直线加速器加速管的微波测试及调整,并详细描述了加速管微波调谐、加速管与矩形波导匹配以及加速管整管场分布及总衰减量的测量,给出了加速管微波测试及调整的结果,结果表明微波调试满足物理设计的要求。

关键词:行波加速管;微波测量与调谐;耦合器匹配;场分布;衰减量

中图分类号: TL505 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)02-0136-06

海关大型集装箱在线检测用 9 MeV 行波电子直线加速器,用 4 MW 速调管作为微波功率源,工作频率 2 856 MHz,工作模式为 $2/3$ 模的盘荷波导,以行波方式加速电子。为使整机有相当高的 X 射线剂量率,加速器的核心部件——9 MeV 行波加速管的物理设计采用了变场强 $E(z)$ 、变相速 $v(z)$ 的聚束器方案^[1]。所设计的加速管总长 220 cm,其中聚束段长 42 cm,由 17 个尺寸渐变的腔体组成。为了保证加速管达到物理设计要求,必须对加速管进行精心的加工与微波调试。

1 加速管微波调谐

电子直线加速器是利用沿盘荷波导传输的 TM_{01} 型波来实现行波同步加速的。行波沿盘荷波导加速管轴向行进,每经过 1 个腔(亦称结构周期)相位差为 2π ,称为行波的工作模式。此次设计选取 $n = 2/3$ 。在加速管的加工过程中,必须进行逐腔调谐,以保证在工作频率时,各腔的相移均为 $2\pi/3$,从而使加速管输出的束流特性达到设计指标。光速段是均匀周期结构,测量与调试方法比较成熟,关键在于非均匀聚束段的调谐。

据微波原理,能在谐振腔中建立某种模式的微波信号,就能在相同结构的波导中激励起相应模式的行波。为此采用图 1 所示谐振法实验线路来测试盘荷波导腔列的色散模式频率。此

收稿日期:1998-05-26;修回日期:1998-07-30

基金项目:国家“八五”科技攻关课题

作者简介:陈怀璧(1964—),男,江苏海安人,助理研究员,加速器物理与技术专业

种激励方式当两活塞面之间为两个半腔夹 N 个整腔时,可激励起 N 个模式,有 N 个谐振频率,分别对应的模式为: $1/(N+1)$ 、 $2/(N+1)$ 、...、 $N/(N+1)$ 。

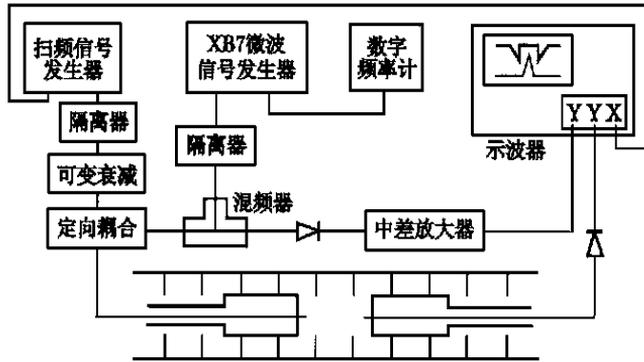


图1 谐振频率测量仪器线路图

Fig. 1 Experimental set-up for measuring resonance frequency

由 $1/2$ 模电场分布可知, $1/2$ 模谐振频率主要由中间腔(整腔)尺寸决定,受半腔尺寸及活塞端面影响较小。为此对工作模式为 $2/3$ 的加速结构,用变分法计算色散关系,并由此确定 $2/3$ 模工作于 2856 MHz 的结构相应的 $1/2$ 模的频率 $f_{1/2}$,从而可以方便地对单腔进行调谐。有鉴于此,首先逐腔按 $1/2$ 模频率调谐一致,然后沿加速腔列轴向移动两活塞探针的位置,形成合适的腔列校核 $2/3$ 模频率。测试仪器读数误差为 $\pm 30\text{ kHz}$,对测试系统的误差进行了下述3个方面的修正:测试环境温度与加速管工作温度造成的频差 f_T ;测试在大气状态与加速管工作真空状态造成的频差 f_p ,活塞探针引入腔室对边界的微扰所造成的频差 f_M 。

光速段是均匀周期结构,采用上述方法是方便的。聚束段是非均匀结构,首先对17个腔分别用变分法计算色散,寻求 $2/3$ 模频率为 2856 MHz 时各腔对应的 $1/2$ 模频率,以此 $f_{1/2}$ 为依据,对每一个非均匀腔,机加工4个与其等腔长 D 、等腔直径 $\phi_2 b$ 、变膜片孔径 $\phi_2 a$ 的模型腔,使得调谐时所处边界状况与加速管中的实际边界相同,逐腔进行调谐^[2]。用腔列色散校核 $2/3$ 模频率,此项工作相当于调谐 $5 \times 17 = 85$ 个腔,机加工及微波调试工作量都很大。图2所示即为按上述方法调谐测得的光速段和聚束段色散曲线。光速段 $2/3$ 模频率为 $f_{2/3} = 2855.85\text{ MHz}$,聚束段 $2/3$ 模频率为 $f_{2/3} = 2856.31\text{ MHz}$ 。两者在 $2/3$ 模处较好地汇合。

根据实验测量所得色散曲线,由群速度的定义: $V_g = d\omega/dk = 2D(df/dk)$,计算得: $v_g = V_g/c = 0.0157$,理论设计值为 $v_g = V_g/c = 0.0160$,两者较好符合。式中: $\omega = 2\pi f$; k 为电磁波相移常数, $k = 2\pi/\lambda_g = \omega/D$ 。同理据实测色散曲线,由相速度的定义 $V_p = \omega/k = 2\pi fD/\omega = 3f_{2/3} D$,计算得 $v_p =$

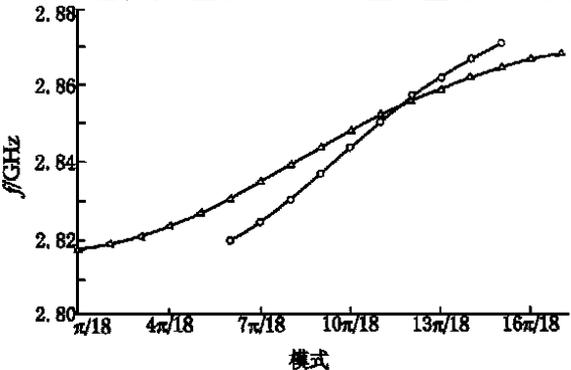


图2 光速段及聚束段色散曲线

Fig. 2 Dispersion curve of the buncher and the uniform cavities

$V_p/c = 1.0$ 。而腔体频差造成的相移偏差可以由下式^[3]估算： $\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\Delta f}{f}$ 。可知：对于光速段， $Q = 2/\beta$ ， $\beta = 1.0$ ， $\Delta f = V_g/c = 0.016$ ， $f_{2/3} = \pm 200$ kHz， $\Delta f/f = 2.62$ (9/MHz)，对应的单腔相移误差为 $\Delta\phi = 0.5^\circ$ ，相对误差为 0.5%；对于由非均匀腔组成的聚束段， β 由 0.42 变化到 0.98， Δf 由 0.017 变化到 0.026，当 $f_{2/3} = \pm 400$ kHz， $\Delta f/f$ 由 2.35 (9/MHz) 变化到 0.89 (9/MHz)，对应的单腔相移误差为 $\Delta\phi = 0.9^\circ$ ，相对误差为 0.9%。由此可见，谐振法调谐聚束段比较精确，但较之相位计法的工作量要大得多。

2 加速管与矩形波导匹配

为了将微波功率有效地馈入加速管中，同时保证速调管安全运行，在目前大功率微波传输系统未采用隔离元件的条件下，对矩形波导与加速管耦合器的匹配要求严格。

对于均匀的周期结构，采用移动负载法^[3]、三频率法^[4]调配耦合器都很方便。为此采用移动负载法和三频率法首先调配了与光速段相连的输出耦合器。实验线路示于图 3。

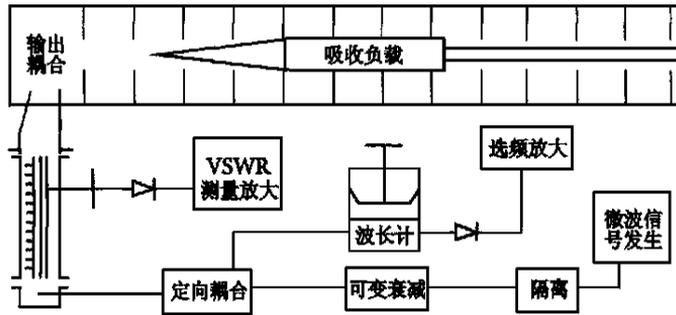


图 3 移动负载法调配耦合器实验线路

Fig. 3 Scheme of matching coupler by shifting load

将吸收负载换成短路活塞，则上述线路可进行三频率法调配耦合器。

但是对于调配与非均匀聚束段相连的输入耦合器，上述两种方法都不适用。因此在整管调谐完成后，将输入、输出耦合器与整管总装，利用变频三点法^[5]调配输入耦合器，因为变频三点法是利用整管色散特性，不受加速结构内部非均匀性的限制。变频三点法实验线路示于图 4。

为了将微波功率有效地馈入加速管，同时为了调机方便，本工作已将矩形波导与加速管的耦合器调配到工作点的 $\beta = 1.1$ 、 $\beta = 1.2$ 的频带宽 $\Delta f = 4$ MHz 整管通带特性示于图 5，显然满足设计要求。

3 加速管整管场分布及总衰减量的测量

整管的衰减反映了加速管的功率传输特性，为此用替代法和功率反射法测量了盘荷波导加速管的总衰减。

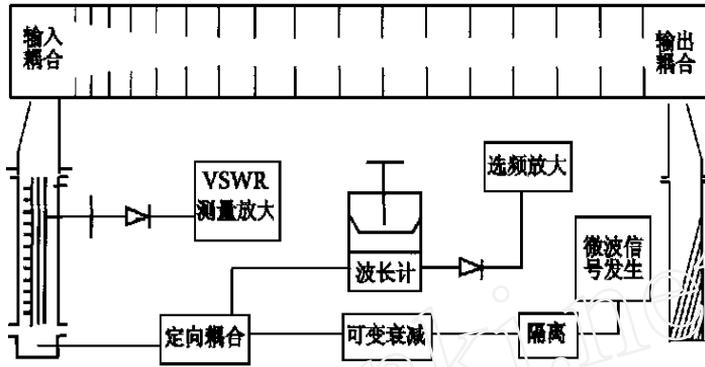


图4 变频三点法实验线路
Fig. 4 Schematic diagram of matching coupler

3.1 替代法测量加速管总衰减量

利用现有 HP8757 标量网络分析仪、HP83620A 合成信号发生器及宽带波导定向耦合器进行替代法^[6]测量。测量时先不接被测加速管,而是将两个波导定向耦合器对接,同时拾取入射信号进行系统校准,然后接入被测加速管测量总衰减。替代法测量结果示于图 6。

由图 6 可见,在工作频率点加速管总衰减量为 $A = 3.00$ dB。

3.2 功率反射法测量加速管总衰减量

功率反射法^[3]测量装置示于图 7,测量过程中逐点移动短路活塞的位置 s ,从输入端测得驻波系数,作出 S - 曲线,确定 S_{max} 、 S_{min} 及相应的 S_{max} 、 S_{min} ,通过实验测量并计算可得加速管总衰减为: $A = 2.99$ dB。

用变分法计算得到的加速管总衰减为 $A = 2.87$ dB。可见上述两种方法实验测量结果与物理设计值接近。

3.3 整管场分布的测量

为了检验整管调谐及耦合器匹配的状态,用非谐振扰动法测量了 9 MeV 行波加速管在工作模式下的场分布^[7]。由于实验仪器条件所限,仅测量了场的幅度分布,示于图 8。

从曲线可以看出,非均匀结构有小反射,但是呈现 3 个腔的周期变化,表明调谐满足物理设计 2 / 3 的要求。

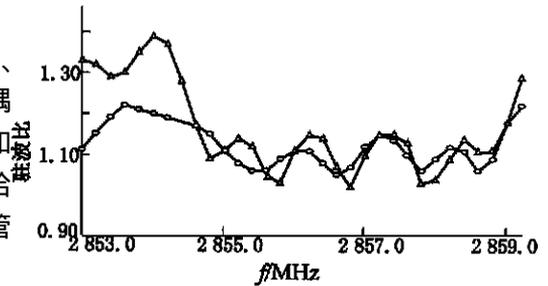


图5 耦合器焊接前及焊接后通带特性
Fig. 5 VSWR character curve of the accelerating tube fore-and aft the coupler brazing
——焊接前; ——焊接后

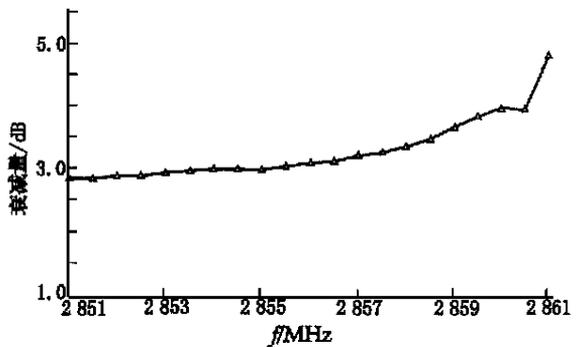


图6 替代法测量加速管衰减
Fig. 6 Attenuation of accelerating tube by substituting

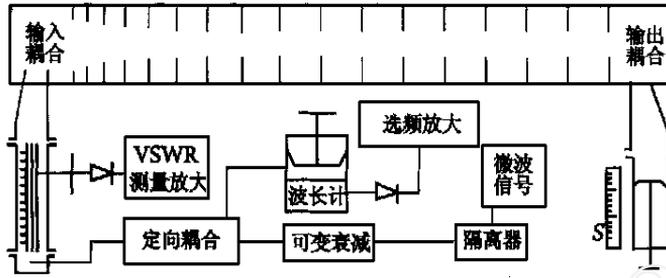


图7 功率反射法测量加速管总衰减量示意图

Fig. 7 Sketch map for measuring attenuation using power reflected

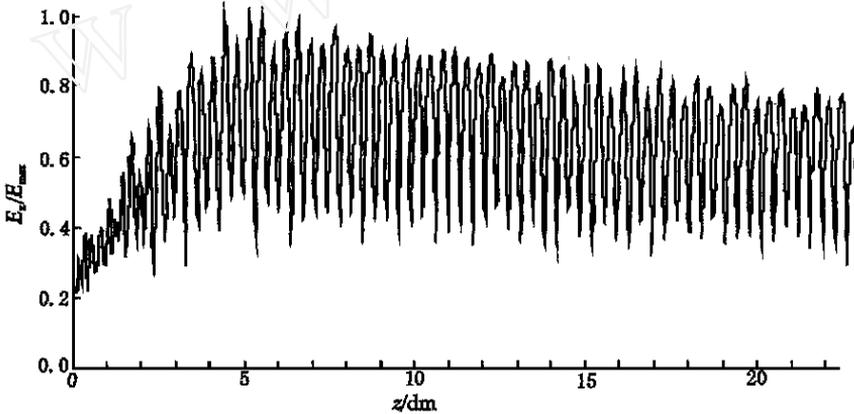


图8 工作模式为2/3行波场幅值分布曲线

Fig. 8 Travelling-wave axial normalized electric field amplitude along z -axis for 2/3 mode

本工作按物理设计要求完成了微波调试工作,热测出束结果表明,加速管达到设计指标,完成了攻关任务。

感谢段修明、黄远忠、肖利苓、佟瑞祥、李云、孙海舟、赵洪、段刚等同志对本工作做出的有益帮助。

参考文献:

- [1] 丁晓东. 集装箱用9 MeV 加速器盘荷波导的物理设计[D]. 北京:清华大学物理系,1992.
- [2] 童德春. BF-5 辐照电子直线加速器非均匀加速管相速的测量及调整[M]. 重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1980.
- [3] 姚充国. 电子直线加速器原理[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [4] Westbrook E. Microwave Impedance Matching of Feed Waveguides to the Disk-loaded Accelerator Structure Operating in the 2/3 Mode: SLAC-TN-63-103[R]. Stanford: SLAC. 1963.
- [5] 蔡鸿程. 耦合器和盘荷波导的匹配及场分布测量的实验研究[D]. 北京:清华大学工程物理系,1982.
- [6] 沈志远. 微波技术[M]. 北京:国防工业出版社,1982.

[7] 段刚. 行波及驻波加速管场分布测量研究[D]. 北京:清华大学物理系, 1994.

Microwave Measurements of 9 MeV Travelling Wave Electron Linac Accelerating Tube

CHEN Huai-bi, HU Shao-guang, TONG Der-chun

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Cold measurements and RF adjusting of 9 MeV travelling wave electron linac accelerating tube is described in this thesis. It is a part of an accelerator used for inspection of vehicle cargoes in rail cars, trucks, shipping containers, or airplanes in customs. Energy of electrons after travelling through the tube can reach 9 MeV (pulse current intensity 170 mA) or 6 MeV (pulse current intensity 300 mA). The tuning and matching process of accelerating tube will be illustrated, including the electrical field distribution on-axis, attenuation coefficient. The cold measurements data are available for the design.

Key words: travelling wave accelerating tube; microwave measurements & tune; coupler match; field distribution; attenuation

L 波段高亮度注入器的专题研究取得了新进展

经中国原子能科学研究院核技术与计算机应用研究所专家们的共同努力,根据分频聚束原理研制成功了 1 台 L 波段高亮度注入器。它可以产生 4.5 TeV 的高品质电子束,经过 4 m 束漂移、3 次束偏转进入扭摆磁铁。目前已测到自发辐射,向出光迈出了一大步。

摘自中国原子能科学研究院《原子能院报》