

返波型行波电子直线加速结构的理论研究*

陈怀璧 郑曙昕 丁晓东 林郁正

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 比较了行波与驻波两种工作方式以及前向波与返波型行波的不同特点;研究了返波型行波电子直线加速结构的工作特性;并针对返波型行波电子直线加速结构的特点,进行工作模式的选择;对工作频率为 2856MHz, $3\pi/4$ 模的返波加速结构进行了优化设计;研究了带聚束段的返波型行波加速管的纵向与横向粒子动力学问题;为海关大型集装箱在线检测用加速器设计了一根 9MeV 返波型行波加速管,并与采用盘荷波导结构的加速管进行了对比. 研究表明,返波型行波电子直线加速结构具有一定的优势,它把鼻锥型加速结构分流阻抗高及盘荷波导行波工作方式填充时间短,工作稳定性好等优点结合起来,性能明显优越.

关键词 返波型行波 电子直线加速结构 加速管 粒子动力学

1 引言

自 1964 年美国 E. A. Knapp 提出边耦合加速结构以来,随着科学研究、工业应用和放射医学的发展,加速结构的研究有了长足的发展. 各种加速结构不下几十种. 每种结构都有其优点,适合于一定的应用场合,同时又有一定的局限性.

然而,经过三十多年的发展,国际上,在加速电子的加速结构中,逐渐形成两种占主流地位的加速结构,一种是电耦合、单周期、工作于行波方式的盘荷波导结构(含拱型腔结构);一种是磁耦合、双周期、工作于驻波方式的鼻锥形驻波结构(含边耦合、轴耦合、同轴耦合加速结构等). 前者具有结构简单、场的填充时间短、工作稳定性好、在工作脉冲时间内基本不存在输入功率反射的问题等特点,在中、高能电子直线加速器及长度在 2—3m 的低能电子直线加速器中应用广泛;后者具有分流阻抗高等优点,主要应用于对加速管长度有较多限制的场合,如医用和无损检测等.

虽然两种结构在各自的应用场合发挥着巨大的作用,但它们的发展也由于自身的缺陷受到限制:盘荷波导结构存在着提高分流阻抗和保持工作稳定性之间的矛盾,要提高分

1998-04-27收稿

* 国家自然科学基金及北京 τ -c 工厂可行性研究的资助

流阻抗, 就要减小盘荷波导的内径, 这势必导致色散增强, 频率稳定性恶化, 因此根据目前频率自动稳定系统的发展水平及对群速度的要求, 盘荷波导膜片孔径 a 和工作波长 λ 之间的比值, 一般控制在 0.1 左右, 相应的分流阻抗值只能作到 55—57M Ω /m (指 S 波段, $2\pi/3$ 模) 难以再提高; 同样, 鼻锥形驻波结构诚然能提高分流阻抗, 建立很高的加速场强, 但是以较长的建场时间为代价, 所以这种结构的加速管的长度一般短于 1.5m, 此外在每一个馈电微波功率宏脉冲的开始与结束部分, 都有较大的功率反射, 对微波隔离器件的要求较高。

怎样克服两种结构缺点而发扬其优点, 使加速结构得以进一步改善, 已成为国际加速器界不断思考的问题。1986 年美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 直线加速器专家 R. H. Miller 在详细比较了行波和驻波加速结构后, 提出工作于 $3\pi/4$ 模至 $7\pi/8$ 模返波型行波加速结构既具有行波优点又有相当高的分流阻抗。沿着 Miller 的思路及已有的工作基础, 法国 GE CGE-MeV 公司和 LAL 合作, 在为意大利 Sincrotrone Trieste 建造 1.5GeV 电子直线加速器作为 ELECTRA 同步辐射光源电子束注入器时, 正式采用返波加速结构。1.5GeV 的电子直线加速装置总长仅有 60m, 是世界上室温加速梯度最高的电子直线加速器。

国内近二十多年来, 对各种加速结构已进行了不少研究, 取得了丰硕的成果。但针对返波型行波加速结构, 简称 BTW 结构 (Backward Traveling Wave Accelerating Structure) 进行专门细致地研究, 本文在国内尚属首次。

2 BTW 与驻波、前向波(行波)之比较

在行波和驻波工作方式之间的选择, 一个重要因素是为提高功率利用率和加速效率。

在相同的功率损耗下, 结构的加速效率是通过有效分流阻抗 Z_s 值来反映。从有效分流阻抗的观点看, 单周期结构, 除 π 模外, 行波工作状态具有较大的优势, 即当加速管中功率损耗相同时, 行波的加速效率较高, 所以, 一般的单周期结构都是采用行波工作方式, 而驻波结构大都采用双周期的 $\pi/2$ 模 (相当于单周期的 π)。

从功率利用的角度, 在行波工作方式中, 终端的微波剩余功率消耗在终端负载上。而驻波工作方式的等效输入功率比行波提高了一个因子 $(1 - e^{-4\tau})^{-1}$ 或 $(1 - e^{-2\tau})^{-1}$ ($\tau = \alpha L$), 在有效分流阻抗相同时, 驻波方式的场强及能量增益比行波高, 当 τ 较小时, 即加速结构总衰减较小时, 驻波方式的优越性比较明显; 而当 τ 较大时, 二者基本相当。所以, 驻波方式一般只在短结构加速器中采用。

从建场时间看, 在行波加速结构中, 微波以群速度从输入端传向输出端, 行波场的建立可以看成是空间上建立起来的, 填充时间较短, 约为 0.4—0.6 μ s; 而在驻波工作方式, 加速结构中的场是微波以群速度在结构中来回多次反射, 最后达到平衡才建立起来的, 驻波场的建立可以看成是时间上建立起来的, 而在建场时间内, 场强较低, 不能正常加速电子, 故驻波工作方式所需的微波功率脉冲宽度比较长, 一般为 4 μ s。所以短脉冲功率源不适用于驻波加速器, 特别是新一代的能量倍增器 (如 SLED) 的研制成功, 使人们在高能、短脉冲加速器中对行波工作方式更感兴趣。

此外,对微波系统而言,驻波工作时,加速管可以看成是一个高 Q 腔,在功率刚开始馈入的阶段,其反射极为严重,即使是匹配很好的驻波加速管,当束流负载变化时,也会发生强烈的反射,并且,驻波工作方式的通带窄,对微波控制系统的要求也较高.行波工作时,加速管可等效为一段匹配传输线,功率反射问题并不严重.所以,一般强流、大功率的加速器大多采用行波工作方式.

在单周期结构中,根据基波的相速与能流传输方向的差异,把加速结构分为前向波结构

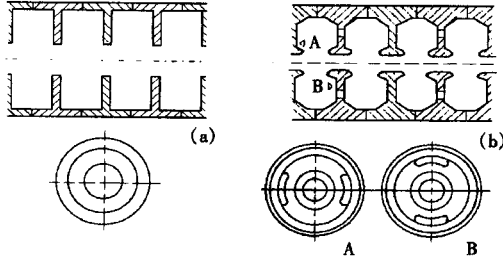


图1 (a)前向波结构示意图;(b)返波结构示意图

和返波结构(反向).而传统的盘荷波导和单周期的鼻锥结构则分别代表上述两种结构,如图1所示.由于加速管在工作时的主加速模式是 TM_{01} 模,该模式场的主要特点是轴对称,在中心轴附近电场较强,磁场较弱;在距中心轴较远的边缘处,电场较弱,磁场较强.所以对图1(a)所示的前向波结构,边缘处没有耦合孔,腔之间的耦合主要通过中心孔处的电场,属于电耦合;而图1(b)所示的返波结构,腔壁上的肾形孔较大而且腔壁较薄,肾形孔处的磁场很强,腔之间的磁耦合非常剧烈,而中心束流孔径较小,导致微波截止,没有电耦合,故属于磁耦合.

由等效回路分析,可以得到前向波结构的色散方程为:

$$\omega^2 = \omega_0^2 [1 - \kappa \cos(\beta d)],$$

弱磁耦合的返波结构的色散方程为:

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{1 - \kappa \cos(\beta d)}.$$

从色散方程可得到群速的信息,对前向波结构,

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{1}{2} d\kappa \sin\theta \frac{\omega_0^2}{\omega},$$

而对返波结构,

$$v_g = -\frac{1}{2} d\kappa \sin\theta \frac{\omega_0^3}{\omega^2}.$$

一般加速结构都是以基波为主加速粒子,前向波群速的值大于0,与基波相速的传播方向一致,所以前向波加速结构的功率流方向与粒子加速方向相同;而返波群速与基波相速的传播方向相反,即功率流方向与粒子加速方向相反.图2形象说明了两种结构功率馈送和粒子传输的特点.

返波型行波加速结构(BTW),是把带鼻锥的驻波腔型结构用于行波工作方式,其特点

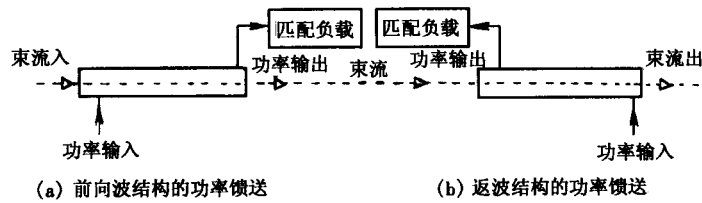


图2 功率馈送方式示意图

是将驻波加速结构的优点和行波工作方式的优点结合起来, 它把束流与场相互作用区域和功率馈送及耦合区域分开, 腔型分流阻抗的优化不受腔间耦合度的限制; 同时腔间是磁耦合, 为返波结构, 能充分利用微波功率, 因为电子刚进入加速管时, 所需场强较低, 功率较小, 而随着电子的加速, 所需的场强越强, 功率亦较大. 诚然, 从俘获角度考虑, 并非场强越低越好.

3 返波型行波加速结构模式的选择

所谓模式是指在一定工作频率下, 结构中每腔的相移. 在腔形设计上体现为尺寸 $D/2$ 的长度, 对于不同的模式 θ , 光速段腔长 D 为 $D = \frac{\lambda\theta}{2\pi}$, 用 SUPERFISH 程序计算不同模式的分流阻抗可得表 1.

表1 不同模式的结构参量(半腔长)与分流阻抗

模 式 θ	$2\pi/3$	$3\pi/4$	$4\pi/5$	$5\pi/6$	π
结构参量 ($D/2$)/mm	17.49	19.68	20.99	21.87	26.24
分流阻抗 Z_s / (M Ω /m)	101.4	103.2	103.3	102.9	94.9

从以上几种模式比较可以看出, 在不考虑耦合孔影响的情况下, $3\pi/4$ 模至 $4\pi/5$ 模之间的分流阻抗最高. 所以一般磁耦合行波结构的工作模式选在这个范围内. 然而越靠近 π 模, 结构的 $D/2$ 值较大, 腔中储能较多, 要保持相同的功率流速度, 肾形耦合孔要开大一些, 而肾形孔的增大会导致腔品质因数 Q 值下降, 而对一定的腔型来说 Z_s/Q 是一个不变量, 所以加速腔的实际分流阻抗要比上表计算值小, 模式越接近 π 模, 分流阻抗下降的越多. 另外模式逼近 π 模, 腔链的调谐和耦合器的调配亦越困难.

故权衡考虑到既有足够高的群速度又有相当高的品质因素和分流阻抗, 以及微波调试的方便, 选择 $3\pi/4$ 模较为理想.

4 返波型行波加速管束流粒子动力学研究

纵向粒子动力学的设计和计算的主要任务就是要设计出既满足性能指标的要求, 又要有尽可能高的俘获系数和尽可能小的能散度. 计算中借助于相运动方程.

横向粒子动力学的设计和计算的主要任务就是要设计出既满足性能指标的要求, 又要有尽可能高的流强和尽可能小的束斑. 计算中借助于束流包络线方程.

行波和驻波是加速系统的两种工作方式. 当它们针对同一种加速结构时, 又是彼此相关联的. 沿相反方向传播振幅相等的两列行波可以叠加成驻波, 而空间相位不同的两列驻波也可以合成行波. 在加速结构的设计中, 对于给定的工作模式, 选定的腔形, 应用 SUPERFISH 和 URMELT 输出的返波结构驻波场分布, 根据行波场与驻波场的关系, 可以得出返波结构整个腔链行波工作状态下的场分布和相位分布. 图 3(a) 是设计中用到的 $3\pi/4$ 模磁耦合结构的驻波电场分布示意图, 图 3(b)、(c) 是经过程序运算后得到的行波场的幅值和相位分布图. 运算结果合理地反映了单周期磁耦合结构中场与相位的关系, 是返波加速器物理设计的理论基础. 而这一点与一般行波加速管给定归一化相速度和轴线上场强后进行物理设计不同.

BTW 加速管的物理设计与一般盘荷波导加速管另一不同之处在于, 对返波加速结构来说, 中心束流孔径对微波截止. 同一个加速腔内的两点电场相位相同; 相邻加速腔的两点相位相差模式所要求的单腔相移. 设计时, 从加速管的最后一个腔算起, 也就是功率入口所在的腔 N 算起, 其入口功率为 P_N , 而微波在腔中的损耗为 $2\alpha_N D_N P_N$, 由这个损耗值通过 SUPERFISH 程序的计算, 可得出腔 N 的平均场强值及场分布情况. 而由功率平衡可得到腔 $(N-1)$ 的入口功率: $P_{N-1} = P_N - (2\alpha_N D_N P_N + I E_N D_N)$ 作为递推公式, 可得出腔链中每一个腔的入口、出口功率以及场分布情况.

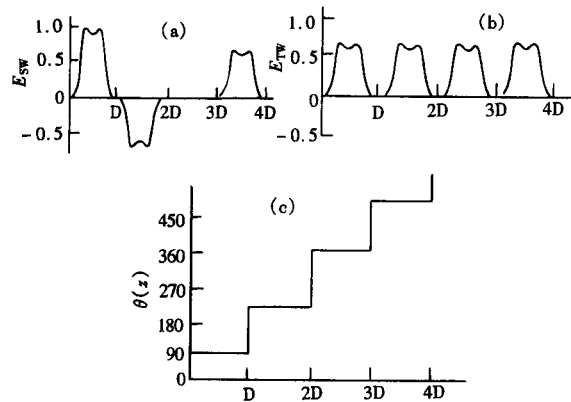


图3 计算所得行波与驻波关系图

(a) 驻波电场分布; (b) 行波场幅值分布; (c) 行波场相位分布.

据以上分析, 针对集装箱检测用 9MeV 行波加速管的实际要求作模拟的计算. 所设计的加速管指标要求为: 能量 9MeV; 束流强度 170mA; 靶点直径 2—3mm; 能散 5%. 初始条件为: 加速管入口功率 3.5MW; 注入束流能量 17KeV; 半散角 -0.094rad ; 束半径 0.86mm; 发射度 $13\text{mm} \cdot \text{mrad}$. 图 4、图 5 分别为相振荡曲线和束包络曲线. 图 6 是计算得出的束流负载特性曲线; 图 7 是加速管的功率特性曲线.

表 2 列出了所设计的 9MeV 返波型行波加速管参数与现有的集装箱检测用的盘荷波

导加速管参数对比情况.

表2 9MeV BTW加速管与盘荷波导加速管的比较

返波型行波加速管		盘荷波导加速管	返波型行波加速管		盘荷波导加速管
工作方式	(返波型)行波	(前向波)行波	加速管总长(m)	1.16	2.21
工作频率(MHz)	2856	2856	聚束段长度(cm)	30.0	42.6
工作模式	$3\pi/4$ 模	$2\pi/3$ 模	聚束段腔数	9	17
分流阻抗(M Ω /m)	85.7	62	俘获系数	30%	80%
耦合系数	1%	2%	最大加速梯度(MV/m)	15.7	6.7
品质因数	13000	14200	平均加速梯度(MV/m)	10	5
群速度	8.2% c	1.6% c	外加聚焦线圈	不使用	4个线圈
衰减系数(dB)	2.37	2.87			

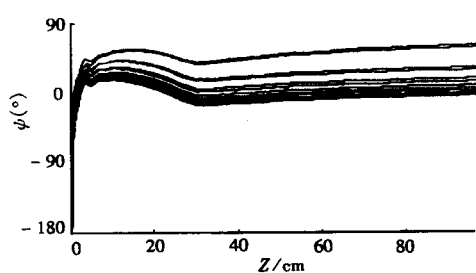


图4 相振荡曲线

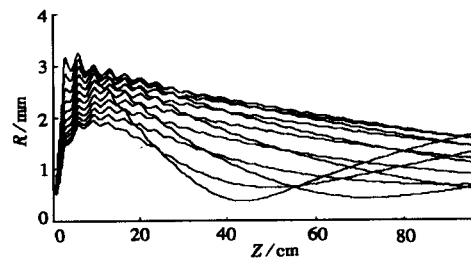


图5 束包络曲线

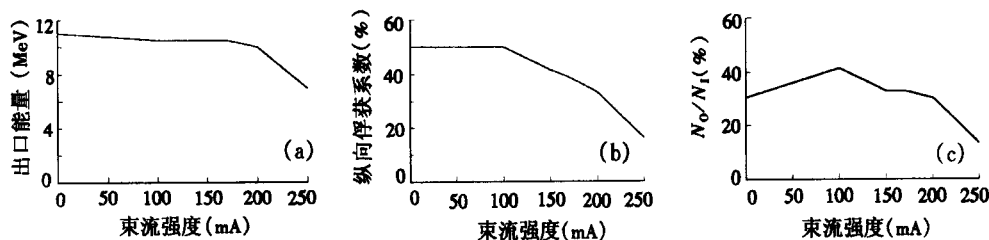


图6 (a)束流强度与电子能量的关系; (b)束流强度与俘获系数的关系;

(c)束流强度与出口电子数的关系

N_0 : 出口电子数, N_1 : 注入电子数.

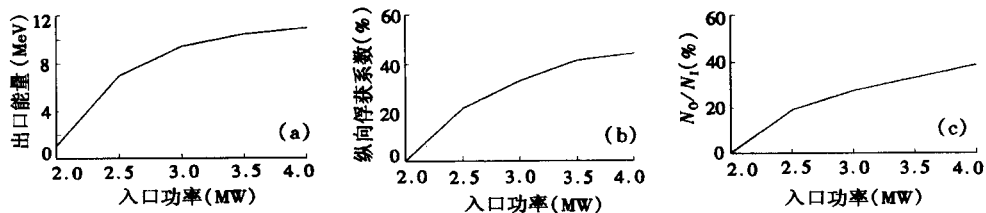


图7 (a)功率与电子能量的关系; (b)功率与纵向俘获系数的关系; (c)功率和出口电子数的关系

N_0 : 出口电子数, N_1 : 注入电子数.

由物理设计和工作特性分析计算可知,返波型行波加速结构有如下特点:

(1) 返波结构的加速梯度高,在 3.5MW 的输入功率、170mA 流强的条件下,最大加速梯度为 15.7MV/m,平均加速梯度也有 10MV/m 左右;而对于盘荷波导结构,在同样的输入功率和流强下,最大加速梯度约为 6.7MV/m,平均加速梯度仅有 5MV/m 左右。因此,在同样的输入功率和流强下,要达到相同的出口能量,比如 9MeV,返波加速管的总长度约为 0.97m,而盘荷波导加速管的总长度为 2.21m。返波加速管中的聚束段长 30.0cm 由 9 个聚束腔构成,而盘荷波导加速管的聚束段长 42.6cm 由 17 个聚束腔构成。

(2) 返波结构的场分布与鼻锥型驻波加速结构在加速腔中的场分布类似,而这种场分布在合适相位下对粒子具有横向聚焦作用,可以在不使用外加聚焦线圈的情况下,获得较小的靶点。

(3) 返波加速结构的俘获系数约为 30%,低于盘荷波导加速管俘获系数一般能达到的 60%—80%。与一般驻波加速结构的俘获系数($\sim 30\%$)相当。

(4) 返波加速结构束流负载对电子在聚束段的运动影响非常剧烈,这主要是因为返波结构的微波功率由束流出口处馈入,当束流负载不同时,加速结构入口处的场强也不同,束流负载越重,加速结构入口处的场强越低,这种效应会一定程度地影响聚束过程。

5 结论

研究表明,返波型行波电子直线加速结构具有一定的优势,它把鼻锥型加速结构分流阻抗高及盘荷波导行波工作方式填充时间短,工作稳定性好等优点结合起来,性能明显优越,会有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Miller R H. SLAC-303, 1986, 200
- 2 Girault P, Tronc D. EPAC 88, 1988, 1114
- 3 Tronc D, Tran D T, Bourat C et al. IEEE PAC 1991, 1991, 3180
- 4 Girault P. IEEE PAC 1991, 1991, 3005
- 5 Nagle D E, Knapp E A, Knapp B C. Rev. Scien. Instr., 1967, **38**:1583
- 6 Lapostolle P, Helm R H, Nishikawa T. Linear Accelerators, Amsterdam, North-holland publ., 1970, 805
- 7 Lin Yuzheng. Principle of Low Energy Electron Linear Accelerators (in Chinese). Teaching Materials, Tsinghua University, 1990
(林郁正. 低能电子直线加速器原理. 清华大学讲义, 1990)
- 8 Ding Xiaodong. Master Thesis (in Chinese), Tsinghua University, 1995
(丁晓东. 清华大学硕士论文, 1995)
- 9 Chen Huaibi, Lin Yuzheng, Tong Dechun et al. IEEE PAC 1997, 1997

Research on Backward Traveling Wave Electron Linac*

Chen Huaibi Zheng Shuxin Ding Xiaodong Lin Yuzheng

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

Abstract Future electron linacs require high gradient acceleration. In this paper, the studies on the high shunt impedance backward traveling wave electron linac accelerating structure (BTW) are presented. At first, the characteristics of BTW are researched. The option of mode and optimal design methods of accelerating cavity for BTW are studied. A physical design method for BTW accelerators, including longitudinal and transversal particle dynamics, is given. Based on above studies, a 9MeV BTW accelerating tube at $3\pi/4$ mode with frequency 2856MHz for inspecting large container as radiation source at customs is designed, and a comparison with disk-loaded waveguide accelerating tube is made. The result of research leads to the conclusion that backward traveling wave accelerating structure is preferable. Because BTW has higher effective shunt impedance, shorter filling time and more stable operation.

Key words backward traveling wave(BTW), electron linac accelerating structure, accelerating tube, particle dynamics

Received 27 April 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China and the Feasibility Research of Beijing τ -c Factory