

一个新型电子直线加速器的预制研究*

谢家麟^{1;1)} 王发芽² 杨学平¹ 沈斌³ 顾伟³ 张黎文¹

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230026)

3(中国科学院电子研究所 北京 100080)

摘要 文中给出了对一个新型紧凑的电子直线加速器(linac)证明原理的研究结果. 在该 linac 中, 通过偏转磁场选择特定能量和相位的大功率速调管用毕束流, 然后将它们注入到加速节中, 同时使速调管工作在自激振荡状态, 使传统 linac 上的许多部件都可以省去. 据此建成的 linac 的结构简单、维护容易、性能良好、造价经济. 因此实现这种具有众多优点的新型 linac 将有助于 linac 应用的推广.

要实现这样的 linac 有许多关键的问题需要解决. 电子束团的性能参量, 如能量、电流、发射度, 以及速调管自激振荡的频率稳定度等都必须符合加速的要求. 文中给出的计算机模拟和实验结果都表明了实现这种新型的 linac 的可行性.

关键词 电子束团 高频源 速调管 紧凑的电子直线加速器

1 相关背景

由大功率速调管馈能的十兆伏级的电子直线加速器(下用 linac)是加速器中应用最为广泛的. 但传统的直线加速器结构复杂、造价昂贵, 由此限制了其应用的推广. 而一个科学仪器设计者应该同时考虑性能和造价, 这项研究就是为了证明一种使用速调管用毕束流的造价较低、性能良好、极大简化的直线加速器新方案的可行性.

这种把速调管用毕束流注入到与之连为一体的加速节中的想法在直线加速器发展早期曾被提及过. 有人提出, 让速调管用毕束流通过一限流小孔直接注入到加速节中; 同时通过一分离的波导将高频能量馈入到加速节中^[1]. 还有人提出, 将速调管输出腔中的电子束和场同时引出, 让它们一起通过一段特制的传输波导, 来控制束流和高频的相对相位, 然后注入加速管中被加速^[2]. 然而就作者所知, 还没有见到实现这些方案的文字报道. 最近,

文献中报道了一种新颖的、紧凑的加速/振荡直线加速结构, 该结构是基于高频能量压缩, 同时在加速管中产生自激振荡^[3]. 该作者指出, 要实现这种结构还有许多问题需要解决. 本文提出的新型加速器的特点是: 通过偏转磁铁从用毕束流中筛选能量和相位合适的部分束团作注入之用^[4-6]; 计算机模拟和实验测量的结果表明这种紧凑的直线加速器系统是可以实现的.

众所周知, 速调管的工作过程就是电子群聚的过程. 电子束先被速调管前级各腔群聚, 最后通过输出腔产生高频能量. 大多数电子是在输出腔高频场减速相区通过的, 它们的部分动能转化为场能. 同时, 有少部分电子是在输出腔场加速相区通过的, 它们会被加速到较高的能量. 用毕电子束流的能量和相位是相关的, 所以当用偏转铁来选择特定能量的束流时, 也就选择了它们的相位, 然后可将这部分已形成束团的束流注入到加速节中. 当然, 获得加速的电子只占用毕束流中的极小部分; 但是, 速调管

2003-09-26 收稿

* 国家自然科学基金(10075061)和中国科学院知识创新工程基金(U-518)资助

1) E-mail: xjl@public.bta.net.cn

是低阻抗器件,它的束流流强可达上百安培,而加速器是高阻抗器件,它所能接受的流强在几百毫安,所以用毕束流中的这小部分应可以满足直线加速器的要求.为进一步简化系统,可通过正反馈使速调管工作在振荡器模式.通过在反馈回路中引入高 Q 腔,便可保证振荡输出的频率稳定度满足加速器的要求.本文的物理思想就是基于以上几点的考虑.

以下先给出基于以上讨论构建的新系统的框图;其次给出对电子运动过程的模拟结果;最后给出在改造后的 5MW 速调管上进行相关试验的结果.

2 新型简易直线加速系统的框图

图 1 是倡议的加速系统的主要部件示意图,它说明了本文提出的加速器的工作原理.图中速调管内被群聚的电子束在输出腔产生高频功率,而部分未群聚的电子束将被输出腔中的高频场所加速.部分加速了的用毕束流将通过速调管收集极顶部的小孔进入偏转铁的磁场区域.在偏转铁的出口处有一

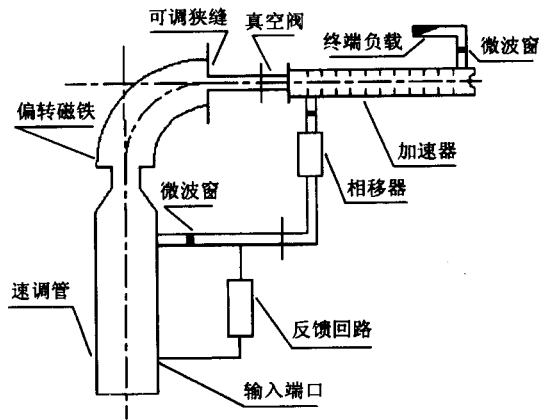


图 1 本文提出的新型 linac 结构示意图

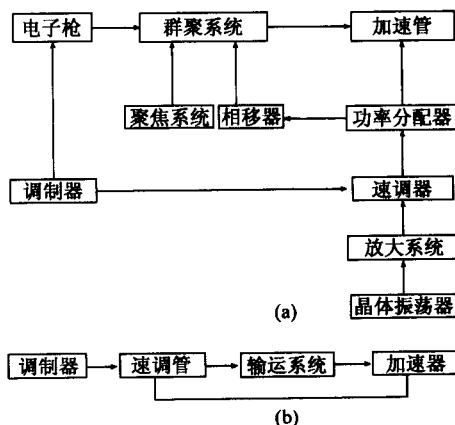


图 2 常规 linac 与本文提出的新型 linac 的主要部件结构方框图对比

可调狭缝,可以根据需要调节以便选择性能合适的束流用以注入到不同的束流输运系统以适应不同的输出方向,直接加速或做他用.真空阀门是保证速调管在烘烤过程中的密封.

从管子的输出波导处将速调管输出功率的一小部分反馈到速调管的输入腔,便实现了管子的自激振荡.反馈回路由衰减器、移相器和谐振腔构成.

图 2 是这种新型 linac 与常规 linac 主要部件结构方框图的对比.

3 模拟结果

为初步检验文中的基本思路,用 Arsenal-MSU 程序对 KS4064 5MW 速调管在正常工作高压 126kV 电流 89A 下的电子运动过程作了模拟.该程序是 2.5 维的,它可以追踪宏粒子在漂移空间中的坐标 r, z 和动量 P_r, P_z, P_\perp .程序从管子的电子枪追踪到管子收集极小孔后的漂移段,该漂移段是作为束流发射度选择器和限流器之用.

图 3 给出了速调管在正常工作条件和额定聚焦磁场下,其中的电子束在漂移空间归一化轴向动量的变化的瞬态情形.(a)为聚焦磁场的分布,(b)为归一化轴向动量 P_z/P_0 .由图可见,有部分被加速的粒子存在,这些粒子的动量比束流的动量 P_0 高,即 $P_z/P_0 > 1$.

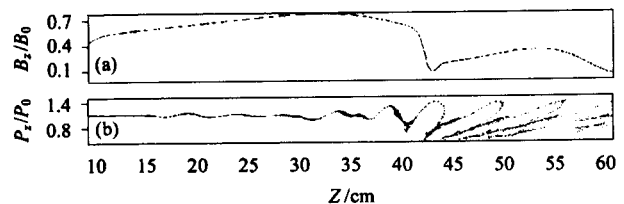


图 3 速调管在正常工作条件和额定聚焦磁场下,其中的电子束在漂移空间归一化轴向动量的变化的瞬态情形 (a) 为聚焦磁场的分布; (b) 为归一化轴向动量 P_z/P_0 .

图 4 和图 5 分别为偏转铁入口处宏粒子的能量和电流随 t/T 变化的曲线,其中 t 和 T 分别为时间和高频周期.图中小正方形所表示的区域是我们感兴趣的束流.从图 4 和图 5 中可以得到用毕束流在偏转铁入口处的能谱即图 6.图中有两个主峰,一个是 70keV 左右的低能峰,这部分束流损失动能用以产生高频能量;另一个是 200keV 左右的高能小峰,这是被输出腔加速的小部分束流.

偏转铁出口处束流的主要性能参数由 Parmela 程

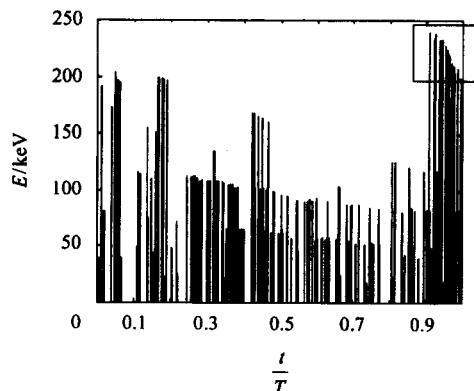


图 4 偏转铁入口处宏粒子的能量随 t/T 变化的曲线
其中 t 和 T 分别为时间和高频周期。

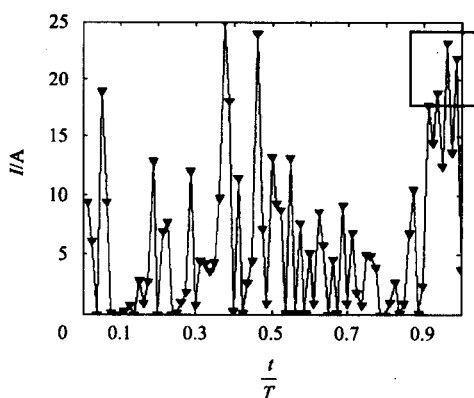


图 5 偏转铁入口处宏粒子的电流随 t/T 变化的曲线
其中 t 和 T 分别为时间和高频周期。

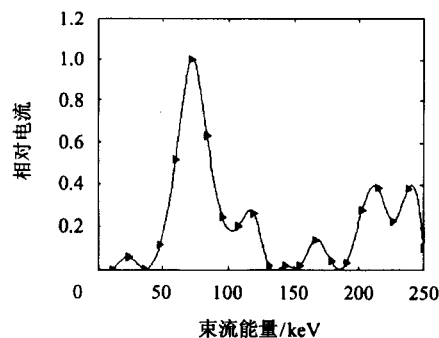


图 6 用毕束流在偏转铁入口处的能谱

序计算给出如图 7 所示。图中给出了束流流强和发射度随狭缝宽度变化的曲线。从图中可见束流的流强可以通过狭缝的宽度来调节,由于束流负载效应直线加速器的输出能量将有相应的变化。同时可以看到束流在狭缝活动方向的归一化发射度($X-X'$)和流强是随狭缝宽度变大而增加的,这和预期的结果相吻合;而磁场方向的归一化发射度($Y-Y'$)则基本保持不变。因此通过调节狭缝的宽度,可使束流的能量、流强、能散、发射度做大幅度的变化。所以本装置可以提供不同性能的电子束团,注入到加速管以

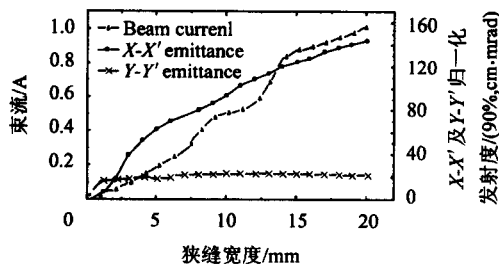


图 7 偏转铁出口处束流流强和发射度随狭缝宽度变化的曲线

4 试验装置及测量原理

为了测量通过偏转铁后用毕束流的物理参数,采用了图 8 所示的试验装置。图 9 是它的实物图。用毕束流经过 90° 的偏转铁后,通过一个狭缝和一段漂移空间,然后再通过高频腔最终到达法拉第筒。这个漂移段是为了模拟以后将要使用的真空阀。高频腔的共振频率是 2856MHz,通过 hp-8990A 峰值功率计测量它的输出功率就可以间接得到束流微脉冲电流 i 。法拉第筒是用来测量束流宏脉冲电流 I ,它的输出端并联一时间常数可调的 RC 回路,这样就可以测量回路输出的峰值电压。将峰值电压除以负载电阻就得到宏脉冲电流值。

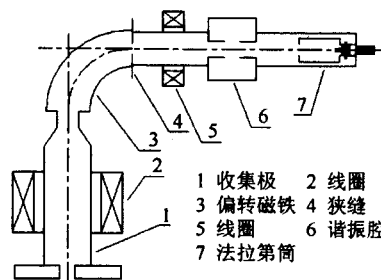


图 8 测量束流参数的试验装置示意图

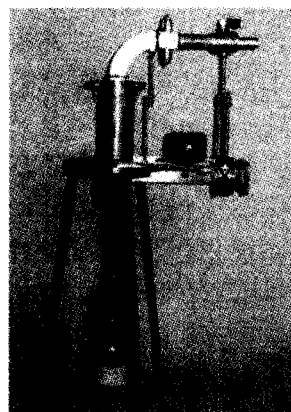


图 9 同时产生功率和电子束的改造后速调管的实物图

为了确保束流能够到达高频腔和法拉第筒,在漂移段增加了一小聚焦线圈.在漂移空间,束流的能散会对测量点束团的相位宽度和高频电流产生影响.由此产生的测量误差可以通过简单地计入相对论性速度,和不同能量的电子到达测量点时间不同而近似地加以修正.试验测得束流脉冲流强比偏转铁出口处的值要低.

假定通过高频腔间隙的电流脉冲为重复的矩形脉冲,其幅度为 i ,宽度为 τ ,则据 Fourier 分析可得

$$i(t) = i\omega\tau/2\pi + (i\omega\tau/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega\pi/2)}{n\omega\pi/2} \cos(n\omega t), \quad (1)$$

设一个高频周期的宏脉冲电流为 I ,高频周期为 T ;则根据电荷守恒可得 $i\tau = IT$,因此高频电流中的基波分量为

$$i_1 = 2I \left[\frac{\sin(\pi\tau/T)}{\pi\tau/T} \right] \cos[\omega t], \quad (2)$$

上述结果表明当电流脉冲持续时间远小于高频周期时,高频电流的基波分量约是平均电流值的两倍.试验的测量结果和该结论非常接近.高频基波电流 i_1 是通过测量高频腔的输出功率间接得到的.众所周知,电子束团通过高频腔间隙产生的感应电压为 $V = MRi_1$,其中 M 是束腔耦合系数^[7], R 是腔的分路阻抗.由此可得高频腔的输出功率为

$$P = (Mi_1)^2 R, \quad (3)$$

知道 M 的值再结合测量得到的 P 和 R ,就可近似得到基波电流 i_1 的值.近似的程度取决于 M 的取值(文中计算假定 $M \sim 1$)以及电缆接头的损耗等.

5 试验结果

经过偏转半径为 10cm 的偏转铁后续狭缝的电子束流的能量可以通过偏转铁的激励电流的大小和偏转铁的磁场与激励电流的定标曲线图 10 而得到,与磁场值相应的束流能量由调制器电压标定.图 11 中的曲线表示通过谐振腔间隙的微脉冲电流随偏转铁激励电流的变化.微脉冲电流的存在表明束流是成束团的或者是高度密度调制的.图 12 给出由法拉第筒测得的束流宏脉冲电流随偏转铁激励电流的变化.可以看到如果在法拉第筒处替换为加速管,那么输入到管中的流强是少于 20mA 的.但是产生这样结果是源于:机械原因使得狭缝的最大可调宽度少于 4mm,没有采用完备的聚焦设施和计算过程中引入的近似成分.从束流能谱图 6 和束流流强随狭缝宽度的变化图 7 中,不难看到当增大狭缝的宽

度时可以得到很高流强的束流.

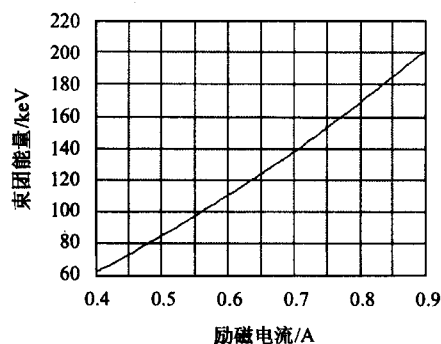


图 10 偏转铁的磁场(束团能量)与激励电流的定标曲线

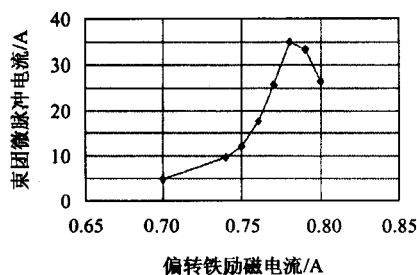


图 11 通过谐振腔间隙的微脉冲电流随偏转铁激励电流的变化曲线

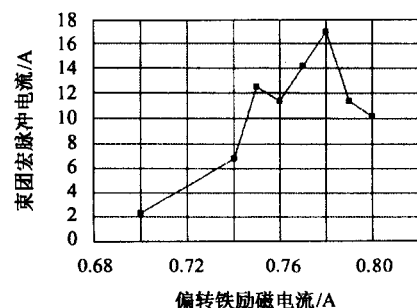


图 12 由法拉第筒测得的束流宏脉冲电流随偏转铁激励电流的变化曲线

为了进一步简化系统,可以通过正反馈使速调管工作在自激振荡模式^[8].这样就可以把高频激励源、前级放大器等部件省去了.反馈回路是由相移器、衰

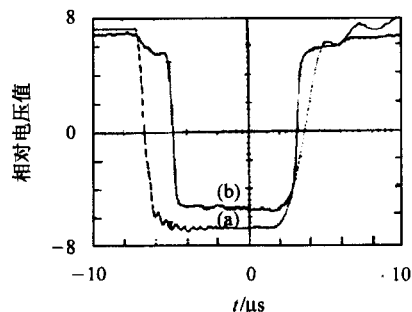


图 13 (a) 脉冲调制器高压的相对值随时间的变化和(b) 速调管自激输出的脉冲功率的相对值随时间的变化

减器、高频腔构成的。试验表明在相同的脉冲高压下管子是自激和它激状态下输出的功率没有明显的不同,但是由于高频腔的建立时间使得自激输出的脉冲较高压脉冲有一定的延迟。图 13 给出了 5MW 速调管的自激输出的脉冲功率和调制器的脉冲高压曲线。为了提高自激输出的频率稳定度以满足加速器的要求,反馈回路必须采用高 Q 腔,由此输出脉冲功率将有一定的时延。在实际情况,时延约为 1—2 μs 。

6 结论

以上给出了本文提出的新型 linac 的工作原理

的模拟和实验检验结果。它说明了将速调管用毕束流经过能量和相位的筛选后注入到加速节构成新型 linac 的可行性:即电子能量较原束压得到提高;连续束流成为束团;微脉冲、宏脉冲及发射度适用,并可针对 linac 在科研、教学、生产中的不同应用而大范围变化。结果说明此新型 linac 的设想不存在工作原理上的问题,可进行下一步,即整个加速器原型的研制,以便全面检验其结构简单、维护容易、性能良好、造价经济的优点,利于各方面应用的推广。

参考文献 (References)

- 1 Nygard J C. US Patent, 1960, 2922921
- 2 Post R R. US Patent, 1960, 2940001
- 3 Smirnov A V, Smirnov V N. Rev. Sci. Instrum., 1995, **66**(3):2552
- 4 XIE Jia-Lin. Chinese Patent ZL98207144.2, 1998 (in Chinese)
(谢家麟. 中国专利 ZL98207144.2, 1998)
- 5 XIE Jia-Lin. A Novel Compact and High Performance Electron Linac, Proceedings of the China Particle Accelerator Conference, Yangzhou, 2000. 215 (in Chinese)
(谢家麟. 粒子加速器学会学术报告会论文集. 扬州, 2000)
- 6 XIE J. L., WANG F. Y., YANG X. P. et al., Rev. Sci. Instrum., (TO BE PUBLISHED)
- 7 Marvin Chodorow, Charles Susskind. Fundamentals of Microwave Electronics, McGraw-Hill Book Co. 1964, 196
- 8 WANG Yan-Shan et al. HEP & NP, 2001, **25**:571 (in Chinese)
(王言山等. 高能物理核物理, 2001, **25**:571)

Proof-of-Principle Research on a Novel Compact Linac*

XIE Jia-Lin^{1,1)} WANG Fa-Ya² YANG Xue-Ping¹ SHEN Bin³ GU Wei³ ZHANG Li-Wen¹

1(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

2(National Synchrotron Radiation Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3(Institute of Electronics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract This paper gives the result of proof-of-principle study of a novel compact electron linac. In this linac, the spent beam of a high power klystron, after energy and phase selection by a magnetic field, is used for injection into an accelerator section and the klystron works in self-excited mode-of-operation. According to this proposal, many components of conventional linacs can be omitted to simplify the construction, maintenance and reduce the cost. The realization of this scheme with better affordability should promote the applications of linac.

There are several key problems that should be resolved to realize such a novel linac. The electron bunch properties, such as energy, current, emittance, etc., and the frequency stability of the klystron oscillator have to be appropriate for accelerator application. In this report, computer simulation and experimental measurements are carried out which results confirm the feasibility of the realization of this novel linac.

Key words electron bunch, RF source, klystron, compact electron linac

Received 26 September 2003

* Supported by NSFC (10075061), Knowledge Innovation Project of CAS (U-518)

1)E-mail: xjl@public.bta.net.cn