

王书鸿

直线加速器的高频加速结构与被加速粒子的速度有强烈的依赖关系。因此，可将加速结构按被加速粒子的速度范围来分类，如高 β 结构、中 β 结构、低 β 结构等。其中 $\beta = v/c$ ，是以光速为单位的粒子速度。

中 β 结构，是指 $\beta = 0.04 \sim 0.45$ 范围。动能为750 KeV~100 MeV的质子，其速度就在这个范围内。我们熟知的漂移管型加速结构(见图1)，适用于这种速度范围的质子直线加速器。至今认为，在这种速度范围内，它的有效分路阻抗最高。也就是说，在同样的加速电场下，在加速腔内壁上的功率损耗最小。因此，粒子获得单位能量所需的外加高频功率最少。从而使加速器的建造及运行费用最省。由于直线加速器的建造及运行费用，以粒子的单位能量增长计算，几乎是所有加速器中最昂贵的，因此人们总是以有效分路阻抗最高作为选择直线高频加速结构的第一标准。作为选择的第二标准，则是结构中加速电场的稳定性。所谓加速电场的稳定性好，通常表现在两个方面。其一是，加速腔内可能被激励的其他寄生模式，在频率上远离用于加速粒子的模式，以致在某种误差微扰作用下，破坏粒子稳定加速的模式不易激发。其二是，加速腔内高频场能量的传播速度(即群速)较快。使粒子在加速途中所需的高频功率能迅速得到补偿，从而使高频电场在有束流情况下，保持在一个稳定值。对于中 β 范围内的漂移管型加速结构，只要针对每个漂移管中心，加一根金属耦合杆，杆的一端与腔壁接触，另一端与漂移管有一小间隙，相邻两漂移管的耦合杆交替 180° 排列(见图1)就可以达到上述稳定性要求。此外，在每个漂移管内安放一个聚焦磁四极透镜，就可有效地实现对束流的径向聚焦。在中等 β 范围内，从1948年用漂移管结构建成世界上第一台质子直线加速器以来，至今还未发现有比这种结构更为

优越的其它新型加速结构。

这里所要介绍的两种新型加速结构，一种是适用于低 β 范围的高频四极聚焦结构(Radio Frequency Quadrupole, 简称RFQ);另一种是适用于高 β 范围的“圆盘-垫片”结构(Disk-and-Washer, 简称DAW)。这两种新加速结构,近年来引起人们极大的重视,并且在美苏的一些实验室中已用于新直线加速器的设计与研制。

高频四极聚焦结构(RFQ)

漂移管结构只适用于中 β 范围，而在低 β 范围($\beta < 0.04$)无法应用。我们知道，漂移管是用来屏蔽每个高频电场周期内的负半周减速场的。粒子速度越低，则在负半周时间内粒子漂移的距离越短，因此所需漂移管的长度越短。漂移管之间的加速间隙也越短。于是，漂移管在加速腔内排列得很密。这不但使加速器的建造十分困难，而且漂移管之间的高频电场容易击穿。更严重的是，漂移管内的空间太小，无法安放四极磁透镜。实际上，粒子的速度越低，受到的高频电场径向散焦作用越强；粒子间的相互排斥力也越强。因此，对低速粒子的聚焦理应越强。这是一个很大的矛盾。如果只追求在漂移管内能放进聚焦磁四极透镜，则必须采用很低的工作频率，即大幅度地放大加速腔与漂移管的尺寸。但这样的结果，使腔内壁及漂移管表面上的高频功率损耗大幅度地增加，使结构的有效分路阻抗急剧下降，加速器的建造及运行费用几倍地上升。由于这个原因，工作频率为200MHz左右的漂移管结构，通常所能采用的 β 起始值为0.04左右。而在 $\beta < 0.04$ 范围，用高频电场加速质子还是一个空白。

高频四极透镜结构的问世，将填补这个空白。实际上，用高频电四极透镜来聚焦低速粒子流，要比用磁四极透镜高明得多。因为单位电荷(e)的粒子在磁场B中所受的罗伦兹力为 $\frac{e}{c} v \cdot B = e\beta B$ 。它与粒子的速度有关。当 $\beta < 0.04$ ，磁场B对粒子的作用力只用到小于4%。而单位电荷的粒子在电场E中所受的作用力为 eE ，它与粒子的速度无关。基于这个简单的道理，人们自然地设法将电聚焦力应用在低速范围。

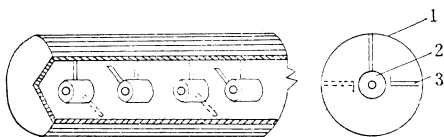


图1 漂移管加速结构示意图
1.加速腔体 2.漂移管 3.耦合杆

图 2 是一个最简单的高频电四极聚焦结构。在接地的圆柱腔内激励横电场 TE_{210} 模式。在腔内中心部位对称地安放四根直径相等，而且沿轴线不变的金属圆棒电极。它们将在 TE_{210} 场中被激励。相对两电极

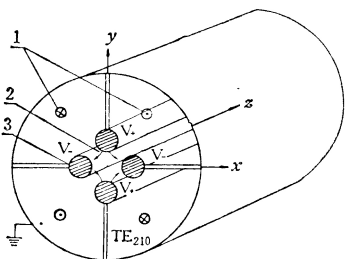


图 2 对称均匀电极的 RFQ 示意图
1. 四极高频磁场 2. 四极高频电场
3. 均匀圆棒电极

的极性相同，相邻两电极的极性相反。在四个电极的中心区域内，产生了电四极场。由于高频电四极场随时间交替，如果高频正半周产生在 x 方向聚焦，在 y 方向散焦的电四极场；则在负半周将产生在 x 方向散焦而 y 方向聚焦的电四极场。当束流沿轴向 z 通过该中心区域时，沿途在 x 、 y 两方向上的聚焦、散焦作用交替出现。于是构成了电四极的交替梯度强聚焦周期结构。若四根电极的直径及极间的间隙沿 z 轴不变，则在电极间只有 E_x 、 E_y 分量而无 E_z 分量。显然，这种结构只能聚焦束流，但不能加速粒子。

要想使这种结构既能聚焦，又能加速，只要使相对两电极间的间隙随 z 轴周期性地变化，且使两组相对电极的最大、最小间隙交替排列，如图 3 所示。图中 a 表示两相对电极间隙的最小值， ma 为最大值。在四个电极间，除了产生 E_x 、 E_y 分量用于聚焦束流；同时产生 E_z 分量，并利用正向的 E_z 分量加速粒子。显然，极间间隙随 z 的变化越大(即图 3 中 m 值越大)，则 E_z 分量越大而 E_x 、 E_y 分量越小。也就是说， m 值越大，加速度越强而聚焦力越弱。反之亦然。因此，极间间隙的变化程度(即 m 值的大小)应该折中地选择(如取 $m = 1 \sim 2$ 范围内)，以兼顾加速和聚焦两个方面。

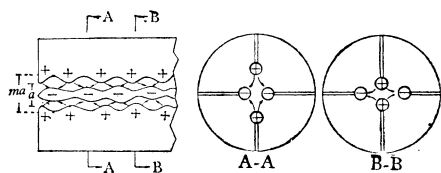


图 3 极间间隙周期变化的 RFQ 示意图

RFQ 还有一个很重要的特性，就是它具有极高的俘获效率(大约 90%)。也就是说，在加速过程中，粒子的丢失很少。在如此低速的范围内，有这样高的俘获效率，这是其他任何中低速高频加速器(或聚束器)所望尘莫及的(通常在 50% 左右)。如果刚进入 RFQ 的束流是连续束流，我们可以使 RFQ 入口端在某一短距离内，四个电极完全均匀对称分布(即 $m=1$)。则在这一短距离内先将束流实行径向强聚焦。然后，沿 z

轴缓慢地让 m 值大于 1，也就是让起加速作用的 E_z 分量由零值缓慢地逐渐增大，使粒子的加速过程完全处在一个绝热过程中。同时，由于 E_z 分量又使连续束流在轴向产生群聚作用，也就是说，将连续束流聚成分裂的束团，因而使粒子的聚束过程也完全处在一个绝热过程中。绝热地聚束与绝热地加速，正是加速器设计者们所追求的。因为它可以确保束流的聚束及加速非常稳妥，从而有极高的聚束效率和俘获效率。此外，RFQ 提供了一个空间均匀分布的聚焦场。这种聚焦场一直连续地作用在粒子上。显然，从径向聚焦的角度看，在空间是间断分布的磁四极透镜，与 RFQ 相比，也是望洋兴叹的。

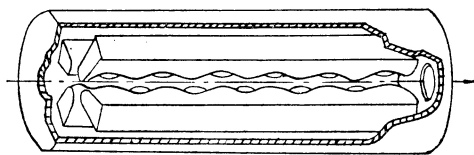


图 4 四叶共振器 RFQ 示意图

早在 1970 年，卡帕钦斯基(苏，Капаченский)就提出了 RFQ 的聚焦和加速原理。但在以后的几年中，并没有找到一种比较现实的具体结构形式。直到 1979 年，美国劳洛阿拉莫斯实验室(LASL)提出一种比较现实的 RFQ 形式——四叶共振器结构(见图 4)，并成功地进行了模型的理论设计、机械加工、高功率试验调试出来等几个重要步骤，才使 RFQ 正式问世。并现实地占领低 β 范围高频直线加速器的空白。这对于直线加速器，是一个重大的创造。LASL 用计算机程序设计了频率为 425 MHz 的 RFQ 模型加速腔(包括四个电极的极面参数及粒子动力学参数)；用数控车床成功地加工了这种复杂的极头形状；在高功率的试验中表明，在打火极限范围内，这种结构中的平均加速电场可达 10MV/m 以上(腔内真空度 6×10^{-7} 托)。设计和研究表明，直径约 30 厘米(频率为 425MHz)，长约 1.5 米的 RFQ，可将 100 KeV 的质子($\beta = 0.014$)稳定地加速到约 1MeV ($\beta = 0.045$)。从而有可能代替结构庞大的高压倍加器及复杂的低能束流输运系统，而将 RFQ 输出的质子流，直接送到中 β 范围的漂移管加速结构进一步加速。

目前，LASL 除了进一步对 RFQ 进行加速束流的试验外，正在设计将氦核由 100KeV 加速到 2MeV 的 RFQ (频率为 80 MHz)，后接中 β 范围的漂移管加速腔，将氦核加速到 35MeV，然后打液锂靶，产生 14MeV 的中子，作为对聚变反应堆内壁材料辐照试验的强中子源。整套装置，计划在 1982 年完成。并正在设计将质子由 250 KeV 加速到 1 MeV 以上的 RFQ，后接中 β (高频，450 MHz)、高 β (高频，1350 MHz) 的加速腔，将质子束最终加速到 600 MeV，作为 π 介子源，用于治癌。

圆盘-垫片结构 (DAW)

在高 β 范围 ($\beta > 0.45$), 漂移管加速结构同样变得逊色了。因为在高 β 范围内, 其有效分路阻抗急剧地下降到中 β 值时的一半。使结构的功率损耗很大, 加速效率很低。但在高 β 范围内, 由于高频电场对粒子的散焦作用及粒子间的相互排斥作用变得很弱, 可以大量地省掉在腔内的聚焦四极透镜, 可使腔体的体积大大缩小, 也就是加速电场的工作效率可大大提高。因此, 在高 β 范围, 可通过几倍地提高工作频率 (如 $800 \sim 3000 \text{MHz}$), 以提高结构的有效分路阻抗, 使加速结构赢得很好的经济性能。

我们熟知的高 β 加速结构有盘荷波导及边耦合腔两种。盘荷波导是一种用行波电场 (TM_{01}) 加速电子的加速结构, 在一圆柱形波导管内周期性地安上一系列圆盘, 作为慢波结构的负载, 使波导内行波电场的相速小于(或等于)光速, 并与被加速粒子的速度相同, 以

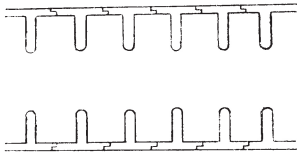


图5 盘荷波导加速结构示意图

实现同步加速。这种结构比较简单, 加工方便, 有较高的有效分路阻抗 (见图5)。世界上最高能量的电子直线加速器 (美国 SLAC, 能量 22GeV , 长约 3 公里) 就是采用这种结构。

边耦合腔是一种用驻波电场 (TM_{010}) 加速质子或电子的高频结构。一系列的加速单元腔靠一系列置于边上的小腔耦合在一起 (见图6)。这种结构不但有较高的分路阻抗, 较高的加速频率, 而且有较高的稳定性。这种高稳定性是通过加速腔列与耦合腔列的双周期耦合共振获得的。世界上最大的质子直线加速器 (美国 LANS, 能量 800MeV , 长约 800 米, 建于 1972 年) 的高 β 范围, 就用这种结构。但这种结构相当复杂, 加工昂贵, 安装与调整也不方便。以致还没有第二个实验室再用这种结构建造高能质子直线加速器的。

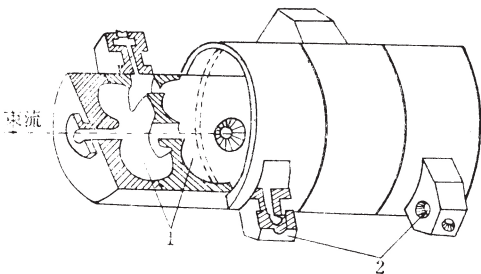


图6 边耦合腔结构示意图
1. 加速单元腔 2. 边耦合腔

有没有比边耦合腔性能更好, 而且在结构上简单得多的新加速结构呢? 近年来, LANS 对圆盘-垫片结

构 (DAW) 的进一步研究, 肯定地回答了这个问题。这一重大的成果表明, DAW 不但比边耦合腔筒便得多, 而且在高频性能上, 又比边耦合腔更上一层楼。

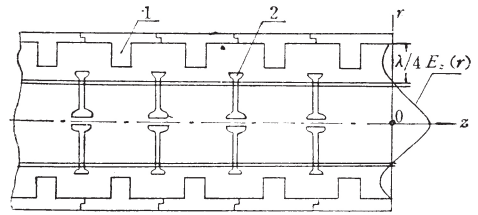


图7 圆盘-垫片结构示意图
1. 圆盘 2. 垫片

DAW 结构如图7所示。在中空圆盘负载的圆柱腔内, 激励 TM_{020} 模式。这种模式, 在离腔壁 $1/4$ 波长的圆周上电场为 0, 因此在这个圆周上允许安放三根或四根轴向金属杆, 而不扰乱 TM_{020} 加速电场。在这些杆上, 可串上一系列金属圆垫片。每一垫片处在两金属圆盘的中间。在相邻两垫片之间建立加速电场以加速粒子。垫片中心开孔, 用以通过束流。将每个垫片的中心孔部位做成鼻状, 使加速电场更多地集中在圆柱腔的轴线上, 以提高加速效率。与边耦合腔结构相比, 由于垫片与圆盘之间有较大的空间, 以致相邻两加速间隙之间的场有很强的耦合, 从而得到更高的加速电场的稳定性 (这种结构的通带比任何别的稳定结构宽很多)。两垫片之间相当于一个加速单元腔。但由于这个单元腔的外部 (即垫片与圆盘之间) 是无金属的空间, 因此与边耦合腔相比, 其功率损耗更小, 结构的有效分路阻抗更高。LANS 对三种高 β 结构 (DAW、边耦合腔、盘荷波导) 进行了具体的研究比较, 其结果列于下表中。为了突出比较结构形状的特性, 取这三种腔的频率相同 (1350MHz), 轴上平均电场相同 (1MV/m), 对应的粒子速度相同 ($\beta = 1.0$)。

结构类型	圆盘-垫片	边耦合腔	盘荷波导
分路阻抗 ($\text{M}\Omega/\text{m}$)	137.1	106.7	38.8
有效分路阻抗 ($\text{M}\Omega/\text{m}$)	90.6	69.3	26.4
群速 (v_g/c)	0.5	0.05	0.0122
品质因子	63671	25754	20124
腔直径 (cm)	33.68	16.686	17.470
金属表面最大电场 (MV/m)	4.0	4.1	2.8
填充时间 (μs)	16.9	6.8	0.3

表中可见, 用腔结构选择的第一标准 (有效分路阻抗高)、第二标准 (稳定性好, 即群速大) 比较, DAW 结构完全战胜了边耦合腔结构。加上 DAW 的结构简单、加工方便的优越性, 用 DAW 取代边耦合腔用以建造高 β 直线加速器是大势所趋。这种 DAW 结构, 最先

是由苏联 V. G. Andreev 等人在七十年代初期提出的,并在七十年代中期作了一些实验研究;近年来,经美国 LASL 的进一步改进及结构的最优化选择,使 DAW 具备更明显,更完整的优越性。

目前,在苏联,人们正在用 DAW 设计一台能量为 1GeV 左右的质子直线加速器(工作频率为 991MHz),用作介子物理工厂。美国 LASL 正在用这种结构设计并建造一台能量为 600MeV 的质子直线加速器,用作医用治癌的 π 介子源。值得指出,由于这种结构比通常的盘荷波导具有更明显的优越性,而且这种优越性在 β 值越接近于 1 时越明显,因此,用 DAW 加速电子也同样是很意义的。

(题头: 牛枢学)