

CLEI

# 北京 35 MeV 质子直线加速器 的设计、建造和调试

周清一 王书鸿 潘惠宝 罗紫华 肖连荣 张莹祥

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

本文叙述了北京质子直线加速器由 10 MeV 扩建成 35 MeV 的设计特点和技巧, 加速器主要设备的性能和整机调试的结果。

## 一、引 言

北京质子直线加速器, 原计划用于 50 GeV 质子同步加速器的注入器。它的第一加速腔的能量为 10 MeV<sup>[1]</sup>。在 1980 年的国民经济调整中, 质子同步加速器的建造计划下马, 但当时 10 MeV 直线加速器的建造已全面展开, 许多技术难关已逐一攻克, 各系统的设备已投入加工。为使这些即将到手的设备在我国的经济建设中发挥效益, 在计划调整时, 决定将第一加速腔建成后, 随即扩建到 35 MeV, 用于医用短寿命同位素的生产 and 快中子治癌的研究, 填补我国在这两个方面的空白。1982 年底, 10 MeV 加速器调试出来。1984 年 35 MeV 加速器开始总装。1985 年 8 月, 整机调整出来。经过三个月的调试, 加速器的能量和流强等主要技术指标达到设计要求。

## 二、扩建设计的特点和技巧

将 10 MeV 加速器扩建成 35 MeV 的设计工作, 很有一些特殊性。它是在下述特定的背景和要求下进行的:

- 1) 尽可能不修改正在加工中的 10 MeV 设备, 以尽快取得整机建造、安装和调束的经验。
- 2) 充分利用现有设备的潜力, 尽可能减少扩建部分的投资。可以挖潜的主要设备, 是输出脉冲功率为 5 MW 的高频发射机。对能量为 10 MeV, 脉冲流强为 60 mA 的质子直线加速器来说, 所需总高频功率小于 1.5 MW, 因而还有 3.5 MW 的余量。应合理地利用这份余量, 使质子束的能量及流强能基本满足两项应用要求。
- 3) 为有效地克服束流负载效应, 稳定加速腔中的高频电场, 高频功率源须经两路对

本文 1986 年 4 月 29 日收到。

optical poten-  
discussed. The  
s of the elastic  
atterings from

称地向加速腔馈入高频功率。两个馈孔在腔轴上的位置,应分别为 1/4 及 3/4 腔长处,由于 1) 的原因,已加工的 10 MeV 腔体不允许再新开馈孔。

4) 扩建后的加速腔将长达 20 米以上,设计的加速电场沿腔轴的分布,应有利于克服这种长腔在调整时的困难。

为了同时满足以上四个要求,经反复研究,我们选用了这样一条设计路线:

1. 试将原来 10 MeV 加速腔上第二个高频功率馈送孔,用作扩建后加速腔的第一个馈送孔。它离加速腔入口端的轴向距离为  $l_1 = 5.5$  米,由此推断扩建后加速腔的总长约为  $4l_1 = 21$  米。这样的选择,满足了上述 1)、3) 两条要求。

2. 根据扩建后的腔体总长度及避免腔内高频击穿允许的最高加速电场 ( $\sim 2.6$  MV/m),可估算出 5 MW 的高频功率源能使脉冲流强为 60 mA 的质子束加速到 35 MeV 左右的最终能量。这样的能量和流强,能满足生产医用短寿命同位素的要求。如能生产  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{14}\text{C}$  等国内急需且具有重要医用价值的同位素。根据 10 MeV 加速器上已采用的束流脉冲宽度 (100  $\mu\text{s}$ ) 和最高脉冲重复频率 (12.5 Hz), 则可得平均流强为 75  $\mu\text{A}$  的质子束。按每年用于生产同位素的机器运行时间 4000 小时计,这个平均流强可年产几十居里的医用同位素,这是相当可观的。同时,这样的能量和流强,也能基本满足快中子治癌研究的要求: 将这样的质子束打靶,能产生平均能量为 20 MeV 的快中子束,中子束的特性以  $0^\circ$  方向为例,距靶点 1 米处的中子吸收剂量率可达 145 拉德/分钟。

3. 原 10 MeV 加速腔中电场的分布,是沿腔轴线性上升的。这样的分布,使腔入口

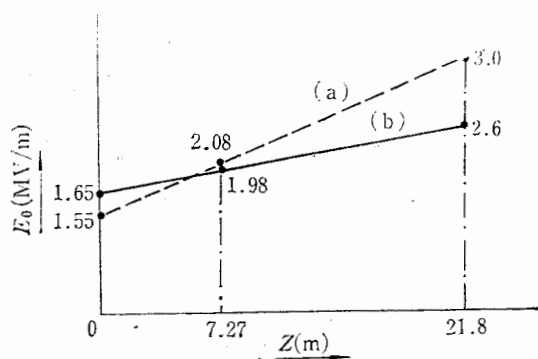


图 1 轴上平均电场沿腔轴的分布

更重要的是,对于长达 21 米的加速腔来说,如此陡的电场上升率 ( $0.075\text{MV/m}^2$ ),在实际调整时是有困难的。原 10 MeV 加速腔中,高频电场幅值由入口端的 1.55 MV/m,沿腔轴线性上升到出口端的 2.08 MV/m; 同步相位由入口端的  $-35^\circ$  沿腔轴线性上升到出口端的  $-30^\circ$ 。这两组参数加上入口质子束能量为 750 keV,就完全决定了腔内各漂移管的长度及其在轴向的安装位置。显然,这些硬件在扩建时不能再变。在这个条件下,为了减小长腔中的电场上升率,我们取加速腔入口电场幅值为 1.65 MV/m,并令其以  $0.044\text{MV/m}^2$  的上升率,使出口电场幅值仅达 2.60 MV/m,如图 1 中曲线 (b) 所示。已知第  $n$  个加速单元中同步粒子的能量增益为

$$\Delta W_n = c E_{0n} T_n \cos \varphi_{in} \quad (1)$$

其中  $E_{0n}$ ,  $\varphi_{in}$  分别为第  $n$  个单元中的电场幅值和同步相位;  $T_n$  为渡越时间因子,它由

第  $n$  个单元  
单元上的能  
-25°。这  
束,仍然是

4. 最  
LAM<sup>11</sup>, 对  
台加速器中  
设计,完满

出口能量  
脉冲流强  
束流脉冲  
脉冲重复  
平均流强  
加速腔长  
轴上平均  
同步相位  
腔内径( $\sigma$ )  
漂移管数  
漂移管外  
漂移管长  
腔激励功  
总高频功  
规一化发  
动量散度

北京  
近百家厂、  
过程中,通  
统的主要

1) 预  
加速管和  
通过控制  
改进的氧  
正常运行  
控制采用

2) 低

及 3/4 腔长处  
应有利于克服  
线:

速腔的第一个  
速腔的总长约

$\bar{v}$  (~2.6 MV/  
| 35 MeV 左右  
口能生产  $^{201}\text{Tl}$ ,  
上已采用的束  
75  $\mu\text{A}$  的质子  
年产几十居里  
快中子治癌研  
中子束的特

布, 使腔入口  
/m), 避免因  
与漂移管之间  
子能量增加,  
速, 加速间隙  
幅值可随着  
度. 但在扩建  
寺原来的电场  
约末端, 电场  
1 曲线 (a) 所  
行是不利的.  
 $\text{m}^2$ ), 在实际  
V/m, 沿腔轴  
上升到出口端  
各漂移管的长  
下, 为了减小  
以 0.044 MV/  
已知第  $n$  个加

(1)

司因子, 它由

第  $n$  个单元的几何尺寸及同步能量决定. 由 (1) 式, 在改变了加速电场的分布后, 为使各单元上的能量增益保持不变, 则在 10 MeV 段,  $\varphi_s$  将自动地由其入口值  $-40^\circ$  逐渐改变到  $-25^\circ$ . 这个同步相位所提供的纵向稳定区宽度, 对于俘获脉冲流强为 100 mA 的质子束, 仍然是没有困难的. 因而在扩建的加速腔内可取  $\varphi_s = -25^\circ$  不变.

4. 最后, 根据上述选用的参数及设计质子直线加速器的三个计算机程序 LAC, LAD, LAM<sup>[4]</sup>, 对扩建的加速腔和漂移管的几何尺寸进行精确计算, 并给出 60 mA 的束流在这台加速器中的动力学性能(包括空间电荷作用). 计算所得主要参数列在表 1 内. 这样的设计, 完满地实现了上述四个要求.

表 1 北京质子直线加速器主要参数

参 数	原 10MeV 段	35MeV 整机
出口能量(MeV)	9.68	35.51
脉冲流强(mA)	60	60
束流脉冲宽度( $\mu\text{s}$ )	50—100	50—100
脉冲重复频率(Hz)	1, 2, 5, 12.5	1, 2, 5, 12.5
平均流强( $\mu\text{A}$ )	75	75
加速腔长度(m)	7.27	21.83
轴上平均电场(MV/m)	1.55—2.08	1.65—2.18
同步相位( $^\circ$ )	-35—-30	-40—-25
腔内径(mm)	949.4	949.4, 909.0
漂移管数	$55 + 2 \times \frac{1}{2}$	$103 + 2 \times \frac{1}{2}$
漂移管外径(mm)	20, 25	20, 25, 30
漂移管长度(mm)	47.98—145.31	47.98—274.35
腔激励功率(MW)	0.60	2.80
总高频功率(60mA束)(MW)	1.13	4.89
规一化发射度( $\pi\text{mm-mrad}$ )	6—8	6—8
动量散度( $\Delta P/P$ )	$\leq \pm 0.6\%$	$\leq \pm 0.6\%$

### 三、加速器主要设备的性能

北京质子直线加速器的建成, 是在国家科委和中国科学院领导下, 由全国许多部门的近百家厂、所大力协同, 奋战攻关的结果. 据建成后的不完全统计, 在建造这台加速器的过程中, 通过攻关而涌现出来的新技术、新工艺、新材料等就有 56 项. 它们使加速器各系统的主要设备, 达到或接近国际先进水平.

1) 预注入器. 它是一台能量为 750 keV 的高压倍加器. 它由高压发生器、高梯度加速管和强流脉冲离子源组成. 借助自稳系统, 可使高压稳定在  $\pm 0.05 \sim \pm 0.1\%$  范围内. 通过控制加速管的充氢量, 能使加速管长期可靠地运行. 离子源为双等离子体型. 采用改进的氧化物阴极, 使它的寿命达 500 小时以上. 加速管出口的束流强度可达 300 mA, 正常运行时为 200 mA, 它的规一化发射度较小, 约为  $1 \pi\text{mm-mrad}$ . 预注入器的本地控制采用红外激光通过光纤和计算机进行控制.

2) 低能束流输运系统. 它是预注入器及直线加速器之间的束流输运通道. 全长约

6.5 米。它由 17 块四极磁铁、两个聚束腔、两对导向线圈及多种束流测量探头组成。能灵活地调节这些设备的参数，使束流在纵向及横向与加速腔入口的接受度匹配，目前只采用一个聚束器，它的工作频率与加速腔相同 (201.25 MHz)。调节馈入聚束腔中的高频功率幅值与相位，可使直线加速器的俘获效率达 65% 左右。

3) 加速腔系统。加速腔由铜钢复合板经卷筒、焊接和精加工后制成。外层为 16 mm 厚的钢，内层为 4 mm 厚的高导无氧铜。腔内壁光洁度可达九级，测量其空腔  $Q$  值达 86000，表明加速腔的制造质量达到国际水平。在腔内安装漂移管、耦合杆、频率调谐器等部件后， $Q$  值达 45000。漂移管的安装公差基本上控制在  $\pm 0.1$  mm 范围内。

4) 高频功率源。它是一台工作频率为 201.25 MHz，最大实测输出功率 (向假负载) 为 5.5 MW 的高频发射机，是我国在这个频段上输出脉冲功率最高的发射机。运行表明，当加速腔出口脉冲流强为 60 mA 时，需向腔内馈入约 5 MW 的高频功率。在这个输出电平下，发射机能长期稳定地工作。它设有频率、幅度和相位三个伺服自控环，能有效地克服加速腔内的束流负载效应。并使腔内加速电场的幅度及相位分别控制在  $\pm 1\%$  及  $\pm 1^\circ$  范围内，达到国际先进水平。

5) 水冷系统。用于冷却加速腔、漂移管和四极磁铁等发热设备。对加速腔和漂移管，采用了可控的恒温水冷系统。由于扩建后腔长增加了两倍，需增设一套水冷机组，虽用两套机组同时冷却一个腔体，但两套机组的水温能准确地调节到一个相同值上。而且，这样一个大腔的一次冷却水的进口温度，可控制在  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  范围内，达到国际先进水平。

6) 真空系统。整套加速器的真空系统由 8 台 150 l/s 的分子泵，12 台 1000 l/s 的溅射离子泵及若干台小型离子泵组成。直径约 1 米，长达 21.8 米的加速腔，其真空度优于  $3 \times 10^{-7}$  托。

7) 磁铁电源系统。包括近百台四极磁铁电源、导向线圈电源和分析磁铁电源等。四极磁铁电源能提供一个幅值为 200~500 A，平顶宽度大于 500  $\mu\text{s}$  的稳定的电流波形，其平顶的稳定度达  $\pm 0.3\%$ ，满足设计要求。

8) 计算机自控系统。由中央控制台及 CAMAC 接口柜，通过接口系统和各分系统的本地站相联，可对主要设备实行控制和监测。目前已能用这套设备和开发的软件，在中央控制台上调节近百台磁铁电源。并通过它的定时系统，使离子源、高频功率源、磁铁电源和束测电路等同步协调地工作。

9) 束流测量系统。用高导磁率的坡莫合金带为磁芯的束流变压器，测量束流强度。用电控步进的狭缝——多层靶测量束流的发射度。用多丝靶测量束流的横截面分布。用狭缝——分析磁铁——多丝靶测量束流的能量和能散度。这些先进的束测装置，为加速器的调整和运行提供了方便。

## 四、加速腔的调整和整机束流调试

### 1. 场分布的调整

用微扰法对长达 21 米的加速腔的轴上平均电场进行测量。改变粗调块的大小，将腔的谐振频率粗调至设计值附近后，调节腔两端半漂移管的长度，使场倾斜，再细调调谐器

和耦合杆进分布的稳定止。35 MeV 电场的最大均方根偏离与调整前的能满足实际对这样率，控制局音测一次场分调整，这在目

### 2. 聚束

自聚束电场能长期与聚束腔之场。但是，腔内的高频脉冲内激起二次经长期但不能从根处加电子阱法，均未能对称，破坏修改后

组成。能灵  
，目前只采  
中的高频功

层为 16 mm  
腔 Q 值达  
频率调谐器

(向假负载)  
运行表明,  
这个输出电  
能有效地克  
:1%及±1°

速控和漂移  
冷机组,虽  
上。而且,  
进水平。

0001/s 的溅  
真空度优于

电源等。四  
流波形,其

各分系统的  
件,在中央  
、磁铁电源

束流强度。  
面分布。用  
置,为加速

尺寸,将腔  
调调谐器

和耦合杆进入腔内的深度及耦合杆端片的方向,使场分布调至接近设计值,并测定这时场分布的稳定性。反复调节耦合杆的深度及端片方向,直至场的分布及稳定性均满足要求为止。35 MeV 腔的轴上场分布的调整结果见图 2<sup>[2]</sup>,它与理论设计值相比,个别加速单元上电场的最大偏离为 10.5%;而百分之八十以上单元的偏离却小于 3%;所有单元的电场的均方根偏离为 3.15%。调整耦合杆后,工作模式与邻近的高次模式的间隔为 179 kHz,它与调整前的值 74 kHz 相比,提高到 2.4 倍。整机束流调试表明,这样的场分布及稳定性,能满足实际要求。

对这样的长腔进行场分布的调整是非常困难和复杂的。一方面要保证场的宏观倾斜率,控制局部的场偏离,同时又要保证场的稳定性。我们反复调整了上百次,每调整一次,测一次场分布,一直调整到上述值为止。在这样的长腔上成功地实现场分布和稳定性的调整,这在国际上还是第一次。

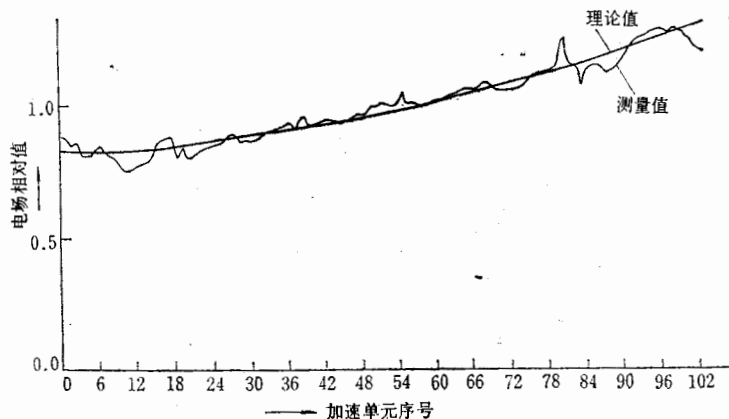


图 2 加速腔中轴上平均电场的分布

## 2. 聚束腔的稳定性试验

自聚束腔投入调试和运行以来,就一直遇到这样一个困难,即如何使聚束腔内的高频电场能长期可靠地建立起来。调试中发现:当加速管出口的真空阀门关闭,或将加速管与聚束腔之间的束流挡板进入束流通道时,聚束腔高频老练后,在腔内能稳定地建立起电场。但是,当加速管加上高压,且加速管附近的 X 射线剂量大于某一值时,就出现聚束腔内的高频脉冲丢失,高频功率向发射机全反射。这是由于来自加速管的 X 射线,在聚束腔内激起二次电子倍增效应 (Multipactor),使负载与高频机失配造成的。

经长期老练加速管,可减少它发射的 X 射线剂量,能部分地抑制二次电子倍增效应,但不能从根本上解决问题。后来又进行了多种改进尝试,如在聚束腔前约 1.5 米的束腰处加电子阱和光栏;在聚束腔入口处加铅板光栏和偏转电极;提高聚束腔的真空度等办法,均未能奏效。最后,决定修改聚束腔结构,设法在腔里加偏压,使高频场的正负半周不对称,破坏二次电子倍增条件,从根本上克服这一效应。

修改后的聚束腔结构及加偏压的示意图见图 3。国外有的实验室,将偏压加在一块

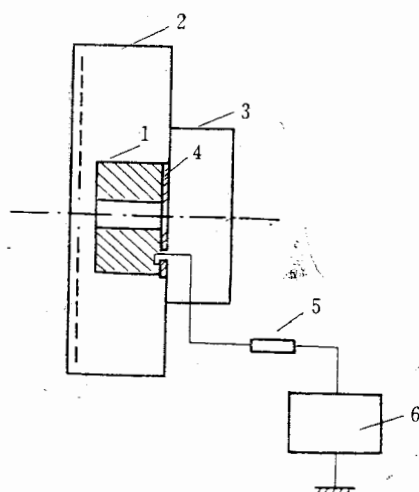


图3 聚束腔结构示意图

1. 漂移管 2. 基频聚束腔 3. 倍频聚束腔壁 4. 电绝缘薄膜 5. 保护电阻 6. 直流偏压电源

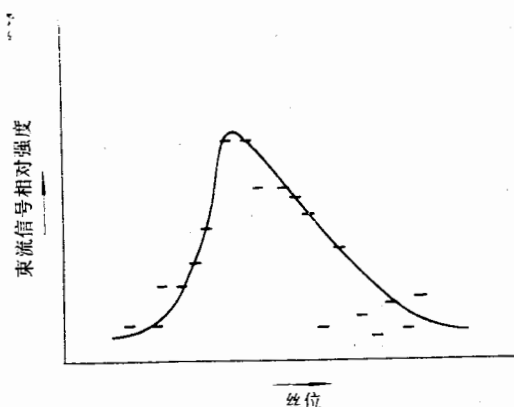


图4 动量散度测量曲线

特制的金属板上,如图3的虚线所示,偏压板与腔壁绝缘。这种结构比较复杂,且对腔体频率的改变较大。我们采用了一种简便而有效的方法。即将聚束腔的漂移管用电绝缘薄膜与腔壁分开,并加上一定的偏压,它可正可负,大小则由实验确定。实验结果表明,这个方法能有效地抑制二次电子倍增效应,使聚束腔内的高频电场能长期稳定地建立起来。聚束腔工作状态的试验结果见表2。

表2 聚束腔工作状态的试验结果

偏压(V)	加速管X剂量相对值(mV)	聚束腔通束情况	工作状态
0	>50	—	腔内高频丢失
400	>150	不通束	不丢失
500	50	通束100mA	丢失
800	>150	通束100mA	不丢失

### 3. 整机调束试验

35 MeV 加速器于1985年8月开始整机联调,首次试束成功。腔出口流强3.2mA,能量34.5 MeV。同年11月,调得最大流强70 mA,能量35.6 MeV。用分析磁铁和多丝探测器测得束流动量散度 $\leq \pm 0.43\%$ 。这样,加速器的能量、流强和动量散度等均达到设计指标<sup>[3]</sup>。调束所得典型参数见表3。图4是流强为25 mA的动量散度测量结果。图中每

表3 调束所得典型参数表

能量(MeV)		流强(mA)			动量散度(%)	高频功率(MW)	
加速腔入口	加速腔出口	预注入器出口	加速腔入口	加速腔出口	加速腔出口	聚束腔	加速腔
0.75	35.6	160	100	60	$\pm 0.3$	0.01	4.0

相邻两点间 $\pm 0.43\%$ 。

北京质子试,加速器的水平较高,机一步完善,以这台加速究,填补我国整。两个应用我们感诸力。无疑,它

- [1] Wang Shi  
Linac Cor  
[2] 罗紫华等  
[3] Zhou Qin

DESI  
BEL

The spec  
35 MeV are c  
of whole mac

相邻两点间代表的动量分散为 0.0956%；它的半高度的全宽度对应的束流动量分散为  $\pm 0.43\%$ 。

## 五、结 束 语

北京质子直线加速器已走过了它的设计、建造和调整的全过程。通过短期的整机调试,加速器的性能已达到设计要求,说明它的设计和建造都是成功的。各系统设备的技术水平较高,机器运行的稳定性也良好。自控系统、束测系统及预注入器的快稳系统有待进一步完善,以充分发挥现有设备的功能。

这台加速器有很好的应用前景。将用于医用短寿命同位素的生产 and 快中子治癌的研究,填补我国在这两个方面的空白。由加速器到两个应用厅的束流运输系统,即将安装调试。两个应用厅的土建已基本完成,厅内的生产和实验设备正在加工或安装中。

我们感谢多年来全国许多个部门,近百个厂、所为设计和建造这台加速器所作的努力。无疑,它的建成是参加单位的科技人员和工人大力协助,奋战攻关的成果。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Shu-hong, et al., "Design Study of the Beijing 200MeV Proton Linear Accelerator", Proc. of 1979 Linac Conf. Montauk, N. Y. p. 5--7.
- [2] 罗紫华等 "BPL 35 MeV 加速腔场分布调整" 1985 年全国直线加速器及应用会议论文集。
- [3] Zhou Qing-yi, et al., "Status of the Beijing Proton Linac", Proc. of 1984 Linac Conf. p. 142.

# DESIGN, CONSTRUCTION AND BEAM TEST OF THE BEIJING 35MeV PROTON LINEAR ACCELERATOR

ZHOU QING-YI WANG SHU-HONG PAN HUI-BAO LUO ZI-HUA

XIAO LEN-RONG ZHANG YING-XIANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

## ABSTRACT

The special design and the technique of developing the 10 MeV Beijing proton linac to 35 MeV are described. The performance level of major components and the beam test results of whole machine are presented.

复杂,且对腔  
移管用电绝缘  
实验结果表明,  
定地建立起来

---

工作状态

腔内高频丢失  
不丢失  
丢失  
不丢失

---

功率(MW)

加速腔
4.0