

北京质子直线加速器的 性能改进及其应用

王书鸿 周清一 万恒芳 张华顺 肖连荣 薛景宣
金清寿 张承宪 罗紫华 柯学尧 刘殿奎 何卫宁

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文叙述了北京质子直线加速器(Beijing Proton Linac, 简称 BPL)的主要特点, 近年来的性能改进、现状及其应用。

1985年8月, 北京 35 MeV 质子直线加速器基本建成, 首次出束^[1]。之后的三年中, 对加速器的性能进行了一系列的改进和提高, 并投入了多方面的研究和应用。本文着重描述加速器的主要特点、性能改进及其应用。

一、BPL 的主要特点

BPL 的主要技术参数列于表 1 中。表 2 给出了加速器束流性能指标的设计与实测值比较。可见, 束流性能的实测值全面达到设计指标, 其中束流的动量散度和发射度优于设计值^[2-4]。

表 1 北京质子直线加速器的主要参数

注入/出口能量	0.75/35.5 MeV
加速腔长度	21.83m
加速腔内径	949.4—909.0mm
工作频率	201.25MHz
加速单元数	104
轴上平均电场	1.65—2.60MV/m
同步相位	-40°—-25°
高频脉冲功率(60mA 束)	4.89MW

BPL 的主要特点, 表现在以下三个方面:

1. BPL 的全部能量增益仅在一个加速腔中得到。这是在将原 10MeV 扩建成 35MeV 时, 为充分利用原有 5 MW 高频功率源, 节省投资所决定的^[1]。表 3 给出了 BPL 与国外

表 2 BPL 束流性能的实测与设计值比较

	能量 (MeV)	脉冲流强 (mA)	束流脉宽 (μ s)	动量散度 ($\Delta p/p$)	归一化发射度 (π mm-mrad)
设计值	35.51	60	50~100	$\pm 0.6\%$	6~8
实测值	35.5	60	50~100	$\pm 0.3\%$	≤ 4

表 3 BPL 与国外同类加速器的单腔性能比较

加速器	国 家	单腔能量 增益 (MeV)	单腔脉冲 束流功率 (MW)	单腔平均 束流功率 (kW)	单腔加速 间隙数
BPL	中国	35	2.1	2.6	105
LINAC-2	西欧中心	20	3.0	0.9	44
BNL(H ⁻)	美国	27	0.6	1.8	60
FNAL(H ⁻)	美国	27	0.7	0.6	60
KEK	日本	20	2.6	0.26	80
SACLAY	法国	20	0.34	0.14	80
RHEL	英国	20	1.6	0.8	40
DESY	西德	20	0.4	0.05	44

同类加速器的单腔性能比较。表中可见, BPL 的单腔能量增益、单腔平均束流功率及单腔的加速单元数等指标, 均高于国外同类机器。

2. 扩建后的 BPL 与通常的质子直线加速器不同, 它不用作同步加速器的注入器, 而直接用于基础和应用实验研究。这就要求加速器的平均流强较高, 即要求较高的脉冲流强、较快的重复频率和较长的脉冲宽度。此外, 为满足不同的实验要求, 加速器束流参数的变化范围较大。BPL 的脉冲流强 ≤ 60 mA, 重复频率 1, 2, …, 12.5 Hz 连续可调, 束流脉宽的调节范围为 30—120 μ s。作为驻波加速结构, BPL 的输出能量基本固定在 35.5 MeV 左右, 能量的向下调节可采用铝片或水层吸收法。

3. BPL 属于新一代的质子直线加速器, 其主要特征是采用双周期稳定结构。除了加速周期, 即漂移管结构周期外, 在 BPL 中起稳定作用的耦合周期, 采用较简便的耦合杆结构。由于加速腔的能量增益大 (0.75—35.5 MeV), 腔入口和出口端的质子相对速度的变化显著 ($\beta = 0.04—0.27$), 加速单元的长度变化也大 (6.0—40.0 cm), 因此加速结构只是一个准周期结构。加之 BPL 加速腔较长, 所含加速单元很多, 使轴上平均电场分布的调整和耦合稳定结构的调整相当困难。一方面要保证场的宏观分布, 控制局部场偏离, 又要保证场的稳定性, 而场分布和稳定度的调节又是相互影响的。针对这些困难, 采用了三组不同尺寸的耦合杆, 反复调节耦合杆在腔内的深度及杆端片的方向。每调节一次, 用微机控制的小球微扰法, 测量一次电场分布和稳定度。反复调整上百次, 直到取得较满意的结果, 即所有单元的电场均方根偏离为 3.15%, 最邻近的高次模式与工作模式的间隔由原来的 74 kHz 提高到 179 kHz, 增加到 2.4 倍。整机调束表明, 这样的场分布及稳定性, 能满足实际要求^[7]。在这样的长腔上成功地实现稳定结构的调试, 在国际上还是第一次。

二、BPL 的性能改进

1. 高压倍加器的改进

它是 BPL 的注入器,是我国目前能量最高 (750keV)、流强最大 ($\geq 200\text{mA}$)、稳定度最好 ($<0.1\%$) 的高压倍加器^[6]。采用双隙、三电极的高梯度 (30kV/cm) 加速管,内径 600 mm, 长约 2 m, 外部为大气式结构。离子源采用强流脉冲双等离子体型。离子源参数的读出和调整,采用红外激光通过光纤和微机实现。加速管出口质子束的归一化发射度 (200 mA, 75% 的粒子) 为 $2.4 \pi \text{mm-mrad}$ 。目前,高压倍加器运行稳定可靠,这是在以下改进后达到的:

1) 消除了加速管的外电场放电,如在悬吊加速管的尼龙绳根部套上两个棒式高压绝缘子,并在最下端套上一个 $\phi 25 \text{ cm}$ 的金属圆环,改善了外电场分布,消除了电晕。

2) 将加速管的气压控制在最不易产生内放电的范围 ($6.7 \times 10^{-3} - 4.7 \times 10^{-2} \text{ Pa}$), 并在加速管根部附近设置 X 射线探头,将探测讯号送至主控室,监控和调节高压,以避免打火。

3) 采用氧化物阴极,其寿命达 600 小时以上。采用自制的电解水装置供氢,其氢纯度高达 99.999%,且安全可靠。

4) 改进高压快稳系统,以满足强流运行的需要。实测表明,当加速管输出 200 mA 的质子流时,由于束流负载,使 $100 \mu\text{s}$ 脉宽范围内的高压跌落达 40 kV, 即脉宽尾部的粒子在加速管的出口能量为 710 keV。它们从聚束腔(离直线加速器的第一加速间隙约 1.1 m) 飞行到加速腔入口所需时间比正常能量(750keV)

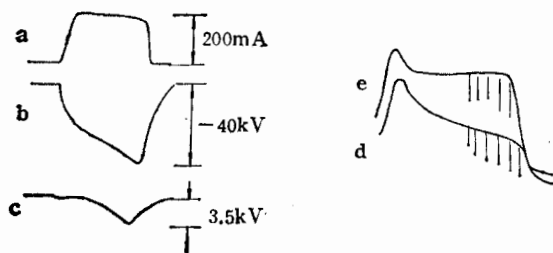


图 1 快稳系统的作用效果

(a) 加速管出口束流波形; (b) 无快稳补偿时的高压跌落; (c) 有快稳补偿时的高压波形; (d、e) 分别为无、有快稳补偿时 35 MeV 束流波形

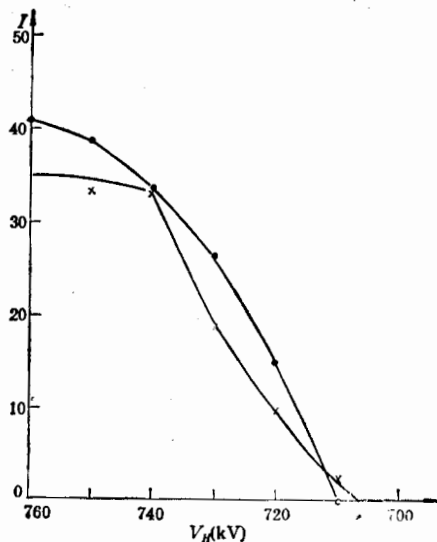


图 2 不同注入能量的加速腔传输效率

● ——理论值; × ——实验值

的粒子晚 2.5 ns , 相当于它们进入加速腔时所处的高频相位比正常粒子落后 180° 左右, 因而落在减速区而被丢失。若以粒子不进入减速相位来判定高压跌落的允许值, 这个值约为 10 kV。为克服束流负载引起高压跌落对加速腔传输效率的影响, 我们研制了适应强流运行的快稳系统。采用该系统后, 高压跌落可补偿到 $\leq 3.5 \text{ kV}$, 如图 1(c) 所示, 从而

使加速腔出口 (35.5 MeV) 的 100 μs 束流脉宽的后部下跌得到了明显的补偿, 如图 1(e) 所示^[7]。

图 2 给出了用多粒子运动计算程序 PARMILA 得到的不同注入能量 (无聚束腔) 下的加速腔传输效率, 并与运行结果作了比较, 两者符合得很好^[8]。

高压倍加器已运行了近八年。初期经受了数千次的放电考验, 目前机器运行稳定可靠。平均放电率 < 1 次/24 小时。为 BPL 提供了良好的质子束。

2. 高频系统功率输出质量的改进

BPL 的高频功率源, 是一台工作频率为 201.25 MHz, 输出脉冲功率约 5 MW 的发射机。末级功放采用进口的 TH 116 三极管, 末级功放的调制采用硬管调制器, 以利在高重复频率和宽脉冲下获得较好的高频波形。高频机由两路对称地向加速腔馈送功率, 耦合环置于陶瓷窗外的大气侧, 便于调节。功率源设有频率、幅度、相位三个伺服控制环, 以稳定腔内的加速电场。

高频机输出功率的大小和质量, 对束流的影响极大。理论计算和实测结果一致表明, 在腔内建立“正常”(或称“设计”) 电场幅度所需高频功率为 2.8 MW; 获得 60 mA 脉冲束流所需高频功率为 4.9 MW。在整机调束时, 先将高频功率保持在某一中间值 (如 3.5 MW), 调节腔前和腔内的磁聚焦光路, 使束流的径向发射度与加速器的接收度匹配, 从而使加速腔输出脉冲流强的峰值最高, 如图 3(a) 所示。然后增加高频机的功率输出, 使脉冲流强的峰值提高, 并使束流波形的上部展宽, 如图 3(b) 所示。这种提高和展宽的程度, 主要取决于馈入加速腔内的高频功率的大小和质量。

事实上, 对驻波谐振加速器 BPL 来说, 只要馈入加速腔内的高频功率 $P \geq P_c$ ($P_c = 2.8 \text{ MW}$), 由于自动稳相原理, 粒子在一个加速单元中所获能量几乎就是设计值:

$$\Delta W_c = e L_c \sqrt{\frac{P}{Z_0}} T_c \cos \varphi_c = \text{const.}$$

其中 L_c 、 Z_0 、 T_c 、 φ_c 分别为加速单元长度、分路阻抗、渡越时间因子、处于间隙中心的加速相位。馈入功率的增加, 只导致同步相位的增大, 即纵向俘获区宽度 $3|\varphi_c|$ 的增大, 从而使更多的粒子能得到足够的功率而稳定加速。图 4 给出了束流与高频功率的关系曲线 (横坐标 K_p 为相对功率因子), 表明实测结果与由 PARMILA 程序所得结果符合得很好^[8]。

在高频机额定输出功率以内, 提高输出功率的效率和质量, 以得到最大脉冲和平均流强的措施, 在 BPL 上主要有三条: 一是为克服束流负载引起的腔场幅度下跌 (如图 5(a) 虚线所示), 采用前馈补偿的办法, 如图 5(b) 所示, 使得在 100 μs 脉宽内, 所有粒子受到尽可能相同的电场加速 (如图 5(a) 实线所示); 二是使腔体的反向功率在束流脉冲期间最小, 也就是说, 在强流运行时, 将功率耦合环的位置调到使束流脉冲期间的驻波比最小, 如图 5(d) 所示; 三是加速场的幅度和频率的闭环控制, 使加速电场在长期运行中稳

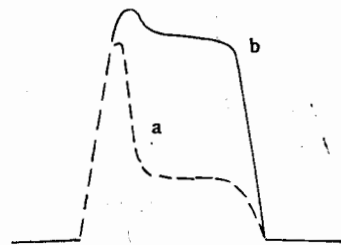


图 3 典型的束流脉冲波形图

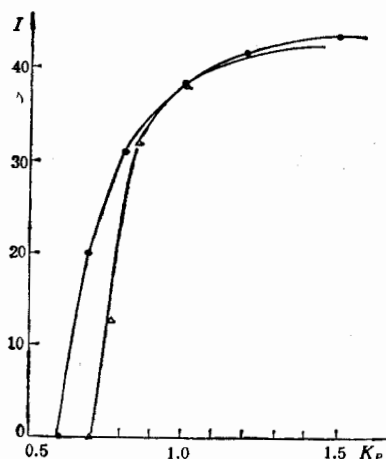


图4 束流强度与高频功率的关系

●——理论值；△——实验值

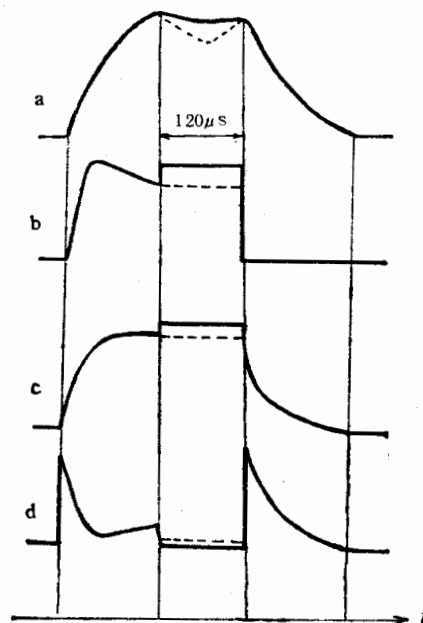


图5 高频系统若干波形图

(a) 加速腔内高频电场波形；(b) 调制器输出波形；
(c) 末级功放正向输出波形；(d) 末级功放反向波形定可靠^[9,10]。

3. 束流测量系统的完善和测量技术的改进

经过不断地改进和完善，BPL 已具有一套完整的束流测量系统^[11]。这套系统测量的品种齐全：用高导磁率的坡莫合金带为磁芯的束流变压器，测量脉冲流强；用束流积分器测量靶上质子束的平均流强；用电控气动多丝靶测量束流的位置和横截面分布；用电控步进狭缝-多层靶测量低能（750 keV）束流的发射度；用三截面法测量中能（35.5 MeV）束流的发射度；用狭缝-分析磁铁-多丝靶测量束流的能量和能散度。这套束测系统，配用微机和开发的软件驱动探头，采集、处理和显示束测数据、图象。整套系统共有各种探头近 30 个，见表 4。它们合理地分布在束流运输线上。除了完善整套束测系统外，重要的测量技术的改进还表现在：用均匀场正确标定实际的能谱测量仪^[7]；用条件数判断和控制三截面法测量发射度的误差^[7]；用句法模式识别分析加速管出口质子束的实际发射度

表4 BPL 束流测量系统

束流品质	测量装置	数量
脉冲流强	束流变压器	16
束流截面	多丝靶	11
750keV 发射度	狭缝-多层靶	4
35MeV 发射度	三截面靶	1
能量及能散	狭缝-分析铁-多丝靶	1

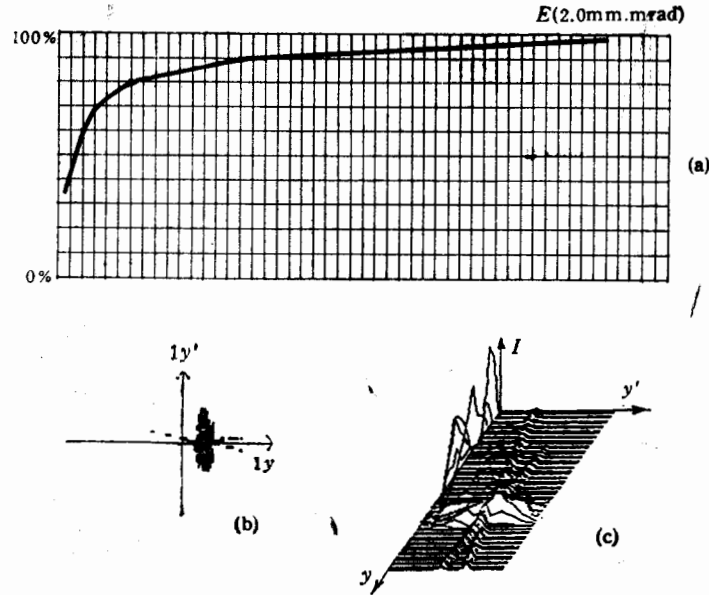


图 6 750keV 束流发射度

(a) 发射度与束流百分比的关系曲线；(b) $y-y'$ 平面上的发射度，75%束流的发射度为 $2.61 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ；(c) 发射度与束流百分比强度的立体显示图

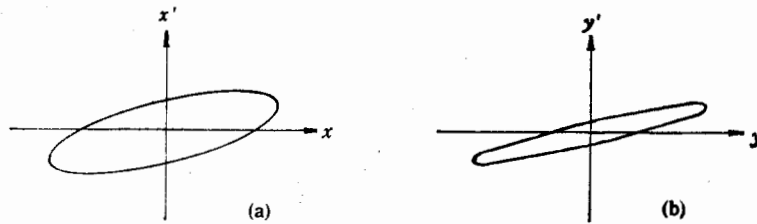


图 7 直线加速器出口归一化发射度(用三截面法测)

(a) $\sigma_x = 3.057002 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, (b) $\sigma_y = 1.861322 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,

$$\alpha_x = -1.794412,$$

$$\alpha_y = -4.996645,$$

$$\beta_x = 1.36054,$$

$$\beta_y = 15.586686,$$

$$\gamma_x = 3.101645$$

$$\gamma_y = 1.665939$$

形状,以删去 H_2^+ 、 H_3^+ 对发射度测量的影响^[12]等。上述束测系统的完善和束测技术的改进,对提高机器的运行质量,发挥了重要的作用。图 6、7、8、9 是用微机在线显示的若干束测结果和图象。

4. 自动控制系统的改进

BPL 的自控系统是由中央控制台通过 CAMAC 接口柜及接口系统和若干分系统的本站相联,对若干主要设备实行调节、监控和联锁保护^[13,14]。通过定时系统,使离子源、高频功率源、磁铁电源和束流电路等同步协调工作。控制系统的改进主要有:

1) 在中控台设三个终端,分别用于调节百余台磁铁电源、监控高频功率源参数和调

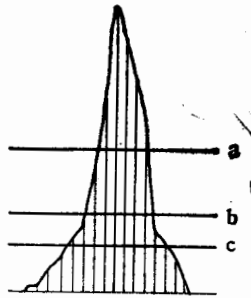


图8 束流截面分布图

(a) 70% FW = 5.0442mm, (b) 80% FW = 6.6718mm, (c) 90% FW = 9.6900mm

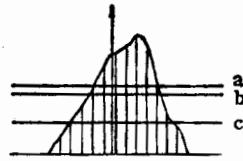


图9 束流能量及能散图

(a) 70% 粒子, $\frac{\Delta E}{E} = \pm 0.36\%$,

(b) 80% 粒子, $\frac{\Delta E}{E} = \pm 0.40\%$,

(c) 90% 粒子, $\frac{\Delta E}{E} = \pm 0.60\%$

节离子源参数。这比用一个触摸按钮翻页,调节和显示各种参数来得迅速、简便。

2) 改进了百余台聚焦磁铁电源和导向线圈电源的调整软件,使各台电源的调整迅速、简便。关机前,将百余台电源值存于计算机数据库内,然后用程序自动退零;下次开机时,用软件设置百余台磁铁电源,除个别外,均能迅速、正确地设置到最佳值,这样大量地节省了重新调整的时间。数据库内可同时储存几套电源参数,分别用于不同的运行状态。并用原有的触摸按钮及彩显屏,循检所有电源的运行值。此外,改进了由中央定时系统送至各电源的定时脉冲,并加上了保护措施,使定时系统万一有误输出(如突然成倍地增加重复频率)时,确保电源的安全可靠。

3) 改进了数据库采集插件,节省了大量进口 NIM 插件,提高了监控效率。

三、BPL 的现状和应用

1989年5月,BPL通过了中国科学院技术鉴定。鉴定认为,BPL已全面达到并部分优于设计指标,并达到同类机器的国际先进水平^[15]。同年8月,BPL及其应用研究建设工程(包括35 MeV加速器、束流输运线、同位素制备实验室和快中子治癌研究实验室等),通过竣工验收。

BPL运行的可靠性和稳定性逐年提高。基本实现了长期、可靠运行。根据需要,其平均流强一般在0.1—40 μA 范围内可调。

为进一步提高机器的运行效率,降低运行成本,BPL将改进离子源的性能,克服宽脉冲(100—150 μs)时束流的振荡现象;试图采取措施,以便减少高频设备的年损耗,并进一步提高机器的可靠性。

BPL主要应用于短寿命同位素药物的制备,快中子治癌研究及其它多方面的基础和应用研究。可利用BPL制备近30种用于诊断显象的放射性药物。已研制成功的有²⁰¹Tl、⁶⁷Ga、¹¹C等。其中²⁰¹Tl、⁶⁷Ga药物的质量达到美国和国内的药典标准^[16,17],并正在进行临床试验,之后可批量制备,逐渐提供国内需要。制成的正电子核素¹¹C,已成功地用于正电子断层照相机(PET)的动物显像试验,取得较满意的结果^[18]。此外,很有用

的正电子核素 ^{18}F 也正在研制中。

在快中子治癌研究方面, 已用 BPL 35 MeV 质子束, 成功地产生中子束(铍靶)。测定中子束的平均能量约为 20 MeV, 在距靶 1.2m 处中子剂量率约为 $1 \text{ rad/min} \cdot \mu\text{A}$, 能满足中子治癌的要求^[19]。已利用 BPL 产生的中子束, 进行了中子放射物理学、中子放射生物学和中子辐照效应方面的研究。对鼻咽癌细胞、黑色素瘤细胞、恶性肉瘤等作了中子和 γ 射线对比照射, 结果显示了中子效应优于 γ 射线, 为快中子治癌临床研究提供了有用的数据^[19]。

在基础和其它应用研究方面, 已经或正在 BPL 上进行的实验研究有: 核物理实验、高 T_c 超导的机理研究、高 T_c 超导材料的辐照改性、质子生物效应、新核素的产生及缺中子奇异核延迟粒子衰变的研究、质子或中子的材料辐照试验等。上述实验, 均得到较满意的结果。如利用 35 MeV 质子束产生的 ^{204}Bi 探针核, 研究了高 T_c 超导体 BiSrCaCuO 在室温下的微分扰动角关联实验, 这对于判定高 T_c 超导机理的模型, 具有重要的意义。特别是高 T_c 超导体的辐照改性研究, 可使 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_7$ 的零电阻温度增加近 10 K, 临界电流密度增大 4 倍^[20]。

BPL 将为我国的加速器技术及其应用事业的发展, 继续作出贡献。

参 考 文 献

- [1] 周清一、王书鸿、潘惠宝、罗紫华、肖连荣、张莹祥, 高能物理与核物理, **11**(1987), 85.
- [2] 高能所质子直线加速器研究室, 王书鸿执笔: 北京 35 MeV 质子直线加速器总论. 鉴定会材料之一, 1989.5.
- [3] 高能所质子直线加速器调束组, 张华顺执笔: 北京 35 MeV 质子直线加速器联调总结. 鉴定会材料之二, 1989.5.
- [4] 北京质子直线加速器鉴定委员会测试组: 鉴定测试报告. 鉴定会材料之五, 1989.5.
- [5] 罗紫华、王书鸿: BPL 35 MeV 加速腔场分布调整. 1987 年全国直线加速器及应用学术会议论文集.
- [6] 高能所质子直线加速器注入器组, 肖连荣等执笔: 750 keV 高压倍加器的设计、建造和调试. 鉴定会材料之三, 1989.5.
- [7] Zhang Huashun, et al: Tuning and Measurement of 35 MeV Beijing Proton Linac. The Fourth China-Japan Accelerator and Its Application Conference, 1990.10. Beijing.
- [8] 罗紫华等: 用 PARMILA 程序计算 BPL 的束流运动. 内部报告. 1990.10.
- [9] 沙寒英、舒耀德、乔际民等: 北京质子直线加速器的高频功率源系统. 内部报告. 1990.3.
- [10] 赖德清、丁义、王黎明等: BPL 高频控制系统. 全国直线加速器及应用学术会议论文集. 1985.10.
- [11] 高能所质子直线加速器研究室束测组, 张承宪等执笔: 北京质子直线加速器束流测量系统. 鉴定会材料之四. 1989.5.
- [12] 何卫宁, 高能物理与核物理, **14**(1990), 393.
- [13] 金清寿、柯松柏、陈刚, 原子能科学技术, **20**(1986), 32.
- [14] Xue Jingxuan, Jin Qingshou, et al: The PDP-CAMAC Monitoring and Controlling System of 35.5 MeV Beijing Proton Linac, China CAMAC'89 International Symposium.
- [15] 北京 35 MeV 质子直线加速器鉴定委员会的鉴定意见. 1989.5.
- [16] 方奕兵、伏永抗、赵永俊等: 溶剂萃取法生产 ^{201}Tl 注射液和 ^{203}Pb . 第三届全国核化学放射化学学术交流会, 1990.4. 上海.
- [17] 刘鹏、李柏、方奕兵: 乙酸丁脂萃取法制备柠檬酸 ^{67}Ga 注射液. 第三届全国核化学放射化学学术交流会, 1990.4. 上海.
- [18] 潘中允、赵永界等: 正电子发射断层照相机 (PET) 初试. 北京医科大学学报, 1989.2.
- [19] 唐锦华、常崴克等: 内部报告.
- [20] Yu Jinnan, et al., Radiation effect on Bi-Sr-Ca-Cu-O by 35 MeV Proton Irradiation, *Chinese Physics Letters*, **7**(1990), No. 12.

The Performance Improvement and Its Application of Beijing Proton Linac

WANG SHUHONG ZHOU QINGYI WAN HENGFANG ZHANG HUASHUN
XIAO LIANRONG XUE JINGXUAN JIN QINGSHOU ZHANG CHENGXIAN
LUO ZIHUA KE XUEYAO LIU DIANKUI HE WEINING

(The Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

The main characteristics, performance improvement, status, and its application of Beijing Proton Linac are described in this paper.