

100MeV 直线加速器束流位置探测器系统设计

殷重先 叶恺容 周伟民

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 200180)

摘要 100MeV 直线加速器束流位置探测器系统包括 BPM (Beam position monitor)、BPM 前端电子学、基于束流的准直模块 (Beam based calibration, BBC)、高频信号切换模块和 AD 模块。本文详细介绍了 BPM 前端电子学和数据采集系统设计。最后给出了在 100MeV 直线加速器中测试的 BPM 系统性能。

关键词 BPM 前端电子学, BPM 系统, 100MeV 直线加速器

中图分类号 TL506

100MeV 直线加速器束流测量系统包括束流位置测量系统、束流流强监测系统、束流截面测量系统和电荷量测量系统。束流位置测量系统, 即 BPM 系统主要包括 BPM、BPM 前端电子学和数据采集系统。BPM 系统的功能是处理 BPM 探头的输出信号, 得到束流经过 BPM 探头的位置。

100MeV 直线加速器有 3 个 BPM 探头。BPM 探头为条形电极型, 条形电极在水平、垂直方向正交。

100MeV 直线加速器的物理设计要求 BPM 系统具有测量每个束团经过 BPM 探头位置的功能; 在此情况下, 测量分辨率 (RMS 值) 为 $100 \mu\text{m}$ ^[1]。

根据 BPM 系统的物理要求, 我们选取商业化的 BPM 前端电子学, 其型号为 Bergoz 公司 LR-BPM。下面详细介绍这种 BPM 前端电子学的工作原理。

1 BPM 前端电子学

BPM 前端电子学 LR-BPM 原理如图 1 所示。A、B、C、D 是 LR-BPM 信号输入端, 分别接 BPM 探头的 4 个电极^[2]。

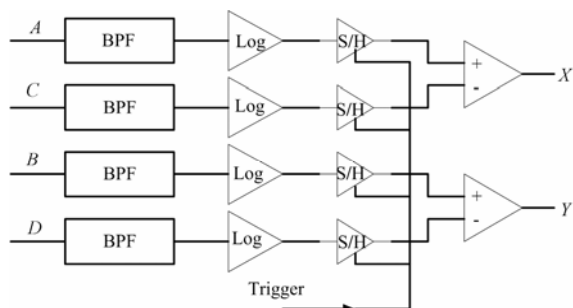


图 1 LR-BPM 原理图
Fig.1 The block diagram of LR-BPM

LR-BPM 每路都有带通滤波器, 其中心频率为 500 MHz, 带宽约为 4 MHz。带通滤波器的作用是将 LR-BPM 输入信号脉冲宽度展宽到 250 ns。

每路带通滤波器输出作为对数放大器的输入。对数放大器具有解调 500 MHz 调幅信号的功能, 因此对数放大器输出为输入信号的包络。每路对数放大器输出信号都与 LR-BPM 输入信号的对数值成正比。

对数放大器输出通过采样保持器输入到模拟减法器中, 采样保持器采用外触发方式。通过模拟减法器运算, LR-BPM 输出信号 X、Y 分别与 $\log(A/C)$ 、 $\log(B/D)$ 成正比。

LR-BPM 输出、输入信号特性分别是:

- (1) A、B、C、D 输入信号功率在 7 dBm 至 -70 dBm, 50 Ω 阻抗匹配;
- (2) 外触发输入信号为 TTL 电平, 50 Ω 匹配阻抗, 上升沿触发;
- (3) X、Y 输出范围为 $\pm 2 \text{ V}$, 100 Ω 匹配阻抗;
- (4) A/D 触发输出, TTL 电平, 上升沿触发, 100 Ω 匹配阻抗。

外触发输入信号、A/D 触发输出信号和 X、Y 输出信号之间的时序关系如图 2 所示。

从图 2 可看出, 从外触发输入信号到有效 X、Y 输出信号的延迟时间大约为 500 ns。

根据 BPM 探头测量原理, 束流位置系统可以通过多项式拟合得到^[3]:

$$\begin{cases} X = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i A_{i-j,j} U^{i-j} V^j \\ Y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i B_{i-j,j} U^{i-j} V^j \end{cases} \quad (1)$$

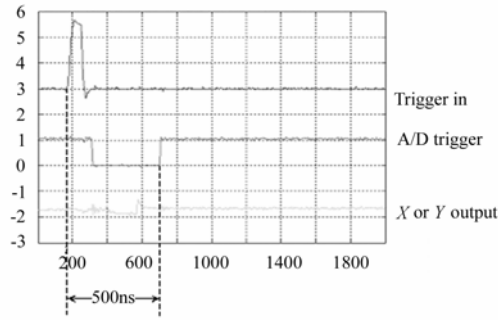


图 2 LR-BPM 时序图
Fig.2 The timing sequence for LR-BPM

$A_{n,m}$, $B_{n,m}$ 分别是多项式拟合系数, U 、 V 分别是归一化信号。对于 100MeV 直线加速器 BPM 探头, 其电极在水平、垂直方向正交。因此, 归一化信号分别为:

$$\begin{cases} U = \frac{A-C}{A+C} = \frac{A/C-1}{A/C+1} \approx \log(A/C) \\ V = \frac{B-D}{B+D} = \frac{B/D-1}{B/D+1} \approx \log(B/D) \end{cases} \quad (2)$$

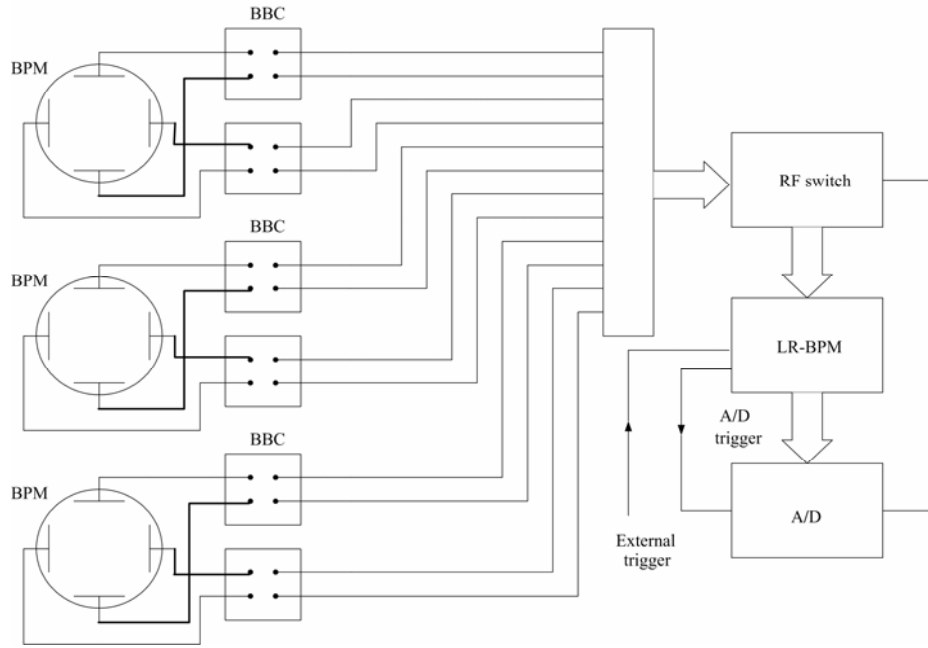


图 3 BPM 系统框图
Fig.3 The block diagram of BPM system

由于我们采用 1 套 LR-BPM 对应 3 个 BPM 探头, 因此需要一个高频切换开关, 用于切换不同的 BPM 探头输出信号输入到 LR-BPM 中。高频切换开关采用四组高频同轴开关, 三路输入、一路输出。控制电路接口为 TTL 电平输入。

AD 模块采用 NI PCI6013 多功能 AD 卡, 为 8 通道、200 kHz、16 位、多路切换工作方式。它可由外部信号触发 AD 采样, 外触发输入信号是 TTL 电平。同时, 通过 NI PCI6013 的数字 I/O 端口控制高频切换开关^[4]。

而 LR-BPM 的 X 、 Y 输出信号为:

$$\begin{cases} X = k_X \times \log \frac{A}{C} \\ Y = k_Y \times \log \frac{B}{D} \end{cases} \quad (3)$$

k_X 、 k_Y 分别是 X 、 Y 的增益系数。因此, 通过 LR-BPM 的 X 、 Y 增益系数、BPM 探头的标定数据, 就可以得到束流位置数据。

2 数据采集及辅助系统设计

BPM 数据采集及辅助系统包括 BBC 模块、高频切换开关和 AD 模块。整个 BPM 系统如图 3 所示。

BPM 探头输出信号分别接入 BBC 模块, BPM 探头中对称的两个电极接入到同一个 BBC 模块。

100MeV 直线加速器同步触发信号接入 LR-BPM 触发输入, 其 A/D 触发输出接入 NI PCI6013 外触发输入, 作为 NI PCI6013 的外触发信号。

在 BPM 系统中, 我们设置 NI PCI6013 为 100 kHz 采样率, 外触发工作模式; 两个模拟输入通道分别采集 LR-BPM 的 X 、 Y 输出信号。

LR-BPM 输出的 A/D 触发信号触发 NI PCI6013 开始采样, 连续采集 101 个数据。从 LR-BPM 的时序关系可以看出, 第一个数据为无效数据, 将后面

100 个数做均值处理。然后, 根据 LR-BPM 的 X 、 Y 增益系数及 BPM 标定数据得到束流位置。数据采集及处理时间小于 2 ms, 100MeV 直线加速器注入频率为 2 Hz, 因此满足 BPM 系统测量每个束团经过 BPM 探头位置的物理要求。

BBC 模块的作用是标定 LR-BPM 通道间增益的不一致性, 其工作原理如图 4 所示。当 LR-BPM 的 BBC.ENABLE 闭合, 二极管导通, 使 BBC 模块两个输出信号相同; 当 BBC.ENABLE 打开, 二极管不导通, BBC 模块的输出信号正比与对应的输入信号。

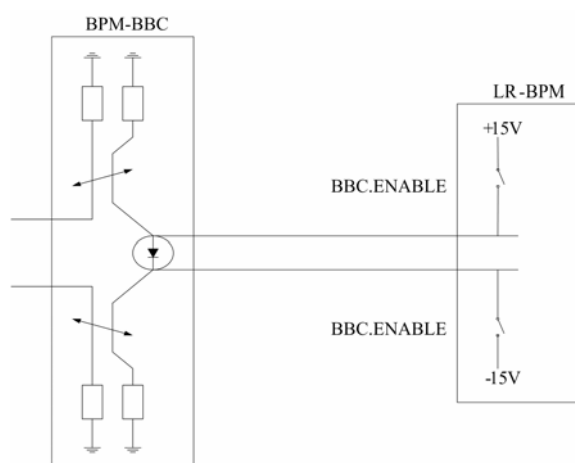


图4 BBC 模块原理图

Fig.4 The block diagram of BBC module

我们假设 BPM 对称的两个电极输出信号分别为 A 、 C ; 同时, 假设 LR-BPM 对应的通道衰减系数分别为 a 、 b 。那么 LR-BPM 输出信号 $X = k_x \lg \frac{A}{C} + k_x \lg \frac{a}{b}$, 其中 $k_x \lg \frac{A}{C}$ 代表真实的束流位置, $k_x \lg \frac{a}{b}$ 是 LR-BPM 通道增益不一致性而引入的束流位置测量误差。

根据上面所述的 BBC 模块工作原理, 在标定 LR-BPM 各个通道增益不一致性时, 闭合 LR-BPM 的 BBC.ENABLE。此时, LR-BPM 的输入信号相同; 输出信号 $X = k_x \lg \frac{a}{b}$, 这样就得到由于通道增益不一致性而产生的 LR-BPM 输出偏置。

在测量束流位置时, 打开 LR-BPM 的 BBC.ENABLE。LR-BPM 输出信号减去通过 BBC 模块得到的 LR-BPM 输出偏置, 就可以消除 LR-BPM 通道增益不一致所带来的束流位置测量误差。

同时, 利用 BBC 模块可以测量束流位置扰动的均方差。首先, 闭合 LR-BPM 的 BBC.ENABLE,

得到 BPM 系统的测量分辨率 σ_{BPM} ; 然后再打开 BBC.ENABLE, 得到束流位置的测量均方差 σ_{pos} ; 就可以得到束流扰动的均方差 $\sqrt{\sigma_{\text{pos}}^2 - \sigma_{\text{BPM}}^2}$ 。

3 BPM 电子学系统性能测试

计算束流位置数据需要 LR-BPM 的 X 、 Y 增益系数。因此, 需要在实验室中建立测试平台, 标定 LR-BPM 的 X 、 Y 增益系数。测试平台如图 5 所示。

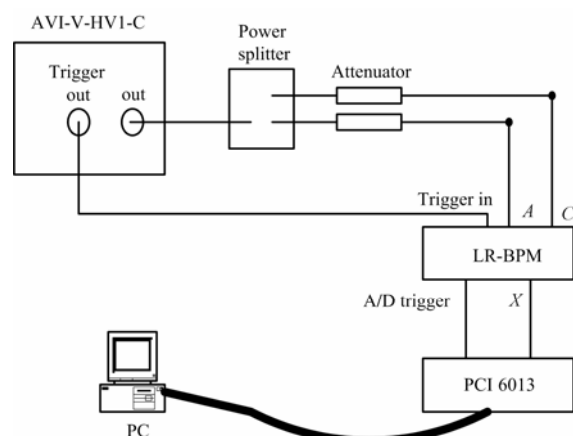


图5 LR-BPM 测试平台

Fig.5 Test bench for LR-BPM

AVI-V-HV1-C 脉冲信号发生器是可输出同步触发、可调延时、可调脉宽的单极性信号发生器。在测试中, 将信号发生器的脉宽设置在 4 ns, 模拟 BPM 探头输出信号。

通过接入不同的衰减器, 可以得到 LR-BPM 两个输入通道的不同比值。

LR-BPM 输入信号 A 、 C 比值与输出信号 X 之间的关系曲线如图 6 所示; LR-BPM 输入信号 B 、 D 比值与输出信号 Y 之间的关系曲线如图 7 所示。

由此, 通过 LR-BPM 两个输入通道的比值与 LR-BPM 输出之间的关系曲线, 可以得到 X 、 Y 的增益系数均为 0.98 V。

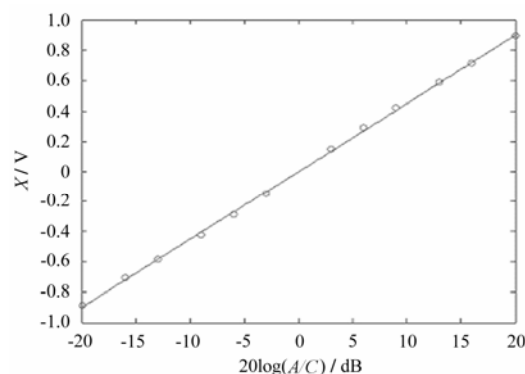


图6 输入信号比值 $20\log(A/C)$ 与输出信号 X
Fig.6 Input $20\log(A/C)$ vs. output X

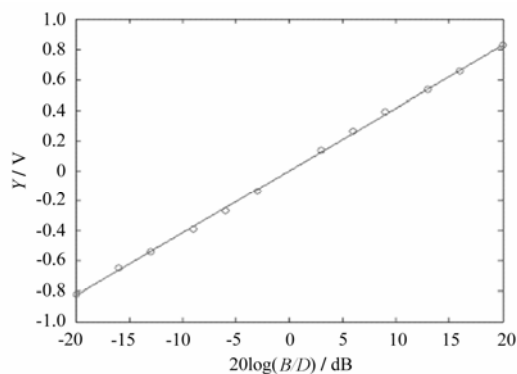


图 7 输入信号比值 $20\log(B/D)$ 与输出信号 Y
Fig.7 Input $20\log(B/D)$ vs. output Y

在 100MeV 直线加速器运行时, 利用真实的束流信号测量 BPM 系统的测量分辨率。闭合 LR-BPM 的 BBC.ENABLE, 采集 500 次 LR-BPM 输出信号 X 、 Y 。通过 BPM 标定数据和 LR-BPM 增益系数, 得到 BPM 系统测量分辨率的数据, 如图 8 所示。

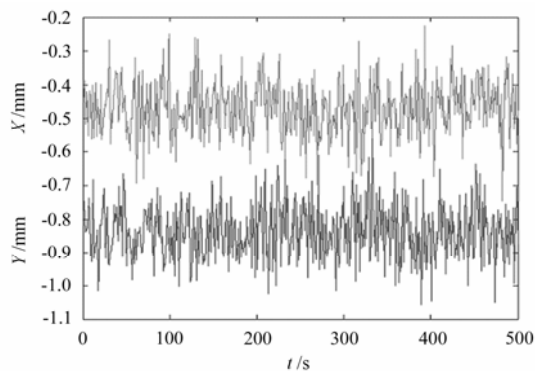


图 8 BPM 系统测量分辨率
Fig.8 Measurement resolution for BPM system

从图 8 可以看出, BPM 系统在 X 、 Y 方向的测量分辨率 (RMS 值) 均在 $81\ \mu\text{m}$ 左右。在线测试表明 BPM 系统的测量分辨率满足束流位置测量的物

理要求。

然后, 打开 LR-BPM 的 BBC.ENABLE, BPM 系统正常测量束流位置。连续测量 500 次束流通过 BPM 的位置数据如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 通过 BPM 系统得到的束流位置在 X 、 Y 方向的均方差均为 $88\ \mu\text{m}$ 左右。因此, 可以得到束流通过 BPM 探头时位置扰动的均方差在 $32\ \mu\text{m}$ 左右。

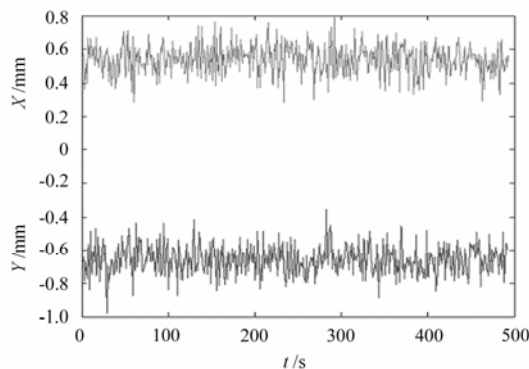


图 9 束流位置测量数据
Fig.9 Data of the beam position measurement

参考文献

- 1 叶愷容. 100MeV 直线加速器束流测量系统, 内部报告, 2002. 5—15
YE Kairong. Beam measurement system design for 100MeV linac, Internal Report, 2002. 5—15
- 2 LR-BPM user manual, Bergoz Company, June 2001. 3—32
- 3 马力. 加速器束流测量, 内部报告, 2001. 35—58
MA Li. Beam measurement in accelerator, Internal Report, 2002. 35—58
- 4 NI PCI6013/6014 user manual, National Instruments Corporation, Oct 2002. 3—95

Beam position monitor system design in 100MeV linac

YIN Chongxian YE Kairong ZHOU Weimin

(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The BPM system in 100MeV linac includes BPM (Beam position monitor), BPM front-end electronics, BBC module, RF switch module and AD module. The BPM front-end electronics and the detailed design of the data acquisition system are presented in this paper. Then, the testing results for BPM system's performance in linac operation are introduced.

Key words BPM electronics, BPM system, 100MeV linac

CLC TL506