

合肥光源直线加速器 BPM 系统的研制和测量^{*}

李吉浩 孙葆根 何多慧 刘功发 卢平 曹涌

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 合肥光源直线加速器新改造的BPM系统已经安装,并做了在线的束流位置测量实验.本文介绍该BPM系统的结构、作为系统核心部分的信号处理模块以及离线标定的实验结果和在线应用的实验结果,表明该BPM系统具有不小于40dBm的动态范围,不大于100 μm 的束流位置分辨率,水平方向和垂直方向分别具有1.61dB/mm和1.51dB/mm的灵敏度.校正铁强度与BPM读数关系的实验,表明该BPM系统能正确地反映束流的位置变化情况,并且确定了校正铁在水平方向和垂直方向的校正系数分别为0.46mm/A和0.58mm/A,校正铁设置为默认值时该BPM处的束流中心水平位置和垂直位置分别为0.83mm和-0.57mm.

关键词 束流位置探测器(Beam Position Monitor, BPM) 动态范围 标定 分辨率 校正铁

1 引言

为了提高束流位置测量结果的精度,提高注入效率,我们对合肥光源(HLS)直线加速器(LINAC)的束流位置测量系统进行改造,设计并加工了非拦截型、高精度、易于将测量结果数字化的条带电极束流位置测量(Beam Position Monitor, BPM)系统^[1].该条带BPM系统已经完成标定工作,于2006年2月安装并进行了在线测量的实验.本文介绍该BPM系统的结构、作为系统核心部分的信号处理模块以及离线的标定结果和在线应用的实验结果.

2 合肥光源直线加速器BPM系统结构及功能

合肥光源直线加速器BPM系统的结构^[2]如图1所示.从条带电极感应出的射频信号通过中心频率2856MHz、带宽10MHz的带通滤波器,经四通道对数检波模块后得到四路电极感应信号的功率值,再由四通道ADC模块数字化后传输给上位机,完成束流位置的计算及显示工作.

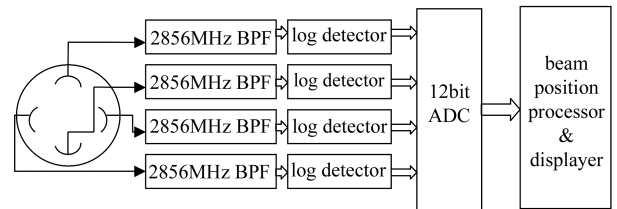


图 1 合肥光源直线加速器 BPM 系统的结构图

3 合肥光源直线加速器BPM系统的信号处理模块

该BPM系统信号处理部分的核心是对数检波模块,该四通道对数检波电路采用 Analog Devices 公司的对数放大器 AD8313 芯片,具有以下特点^[3]:一是其工作带宽高,能够有效检测条带感应高频信号的功率信息;二是其输入电压的动态范围大,能有效满足合肥光源直线加速器的流强范围(50—200mA);三是其反应时间快(40ns),能有效提高系统的实时性.

该四通道对数检波电路的重要参数是动态范围,如图2所示.从图2可以看出,该四通道对数检波电路的动态范围是-45dBm到-5dBm,灵敏度为43.6mV/dBm.由该四通道对数检波电路的结果,可以得出对数比处理^[4]的束流位置结果.

2006-03-20 收稿

^{*} 高水平大学建设重点科研项目资助课题(KY2901)和国家863计划项目基金(863-410-8-2)资助

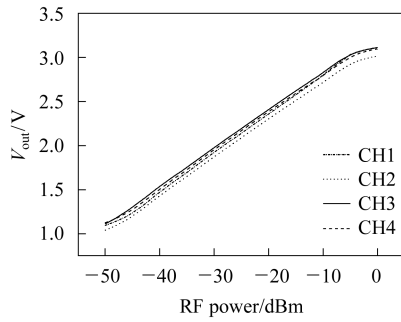


图 2 BPM 信号处理电路动态范围

4 合肥光源直线加速器 BPM 系统的标定

采用天线法, 对合肥光源直线加速器 BPM 系统进行了离线的标定. 标定平台采用圆导轨和滚珠丝杆的技术, 重复定位精度小于 $5\mu\text{m}$, 驱动平移台的步进电机最小步距为 $10\mu\text{m}$ /脉冲, 很好地保证了标定结果的精度和准确性.

4.1 标定数据

控制天线以 0.5mm 的步长进行遍历, 同步采集四通道对数检波电路的输出电压值, 并且根据四通道对数检波电路的灵敏度, 进行归一化的计算, 得到该 BPM 系统的标定结果, 如图 3 所示. 横坐标是水平方向的对数比结果, 纵坐标是垂直方向的对数比结果.

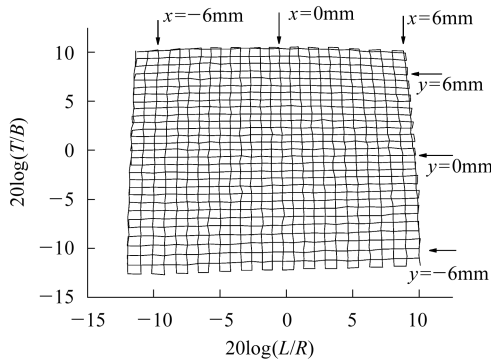


图 3 合肥光源直线加速器 BPM 系统的标定图

4.2 灵敏度分析

根据条带电极束流位置检测器的标定图, 可以得到水平方向电极和垂直方向电极的灵敏度曲线, 如图 4 所示. 图 4(a) 是条带束流位置检测器水平方向的灵敏度曲线, 图 4(b) 是条带束流位置检测器垂直方向的灵敏度曲线. 图 4 中的点是实际测量的值, 直线是线性拟合的结果. 从图 4 可以看出, 在距离机械中心 $\pm 5\text{mm}$ 的范围内, 该条带电极束流位置检测器具有良

好的线性度. 根据图 4(a), 可以得到条带束流位置检测器水平方向的灵敏度为 $1.61\text{dB}/\text{mm}$; 根据图 4(b), 可以得到条带束流位置检测器垂直方向的灵敏度为 $1.51\text{dB}/\text{mm}$.

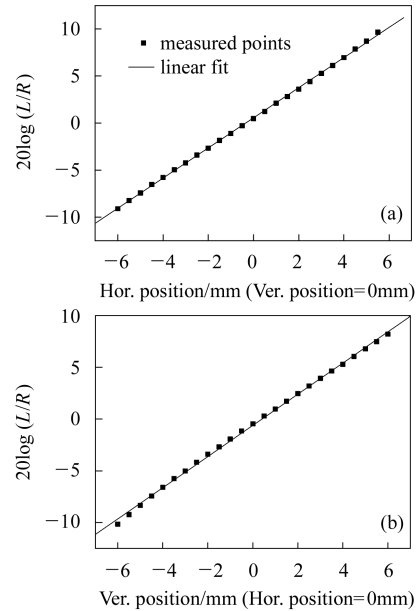


图 4 条带电极 BPM 灵敏度曲线
(a) 水平方向灵敏度曲线; (b) 垂直方向灵敏度曲线.

另一方面, 根据条带束流位置检测器的灵敏度表达式(1)^[5]

$$S = \frac{80}{\ln 10 \cdot b} \frac{\sin(\phi/2)}{\phi/2} \quad (1)$$

以及 BPM 的条带内半径 $b=19\text{mm}$ 和条带张角 $\phi = \pi/3$ ^[1], 可以计算出条带束流位置检测器的灵敏度理论值为 $1.53\text{dB}/\text{mm}$. 可见, 实际测量值与理论值基本一致.

4.3 分辨率分析

为了分析该 BPM 系统在不同束流位置下的分辨率, 将天线分别置于 0mm , $\pm 2.5\text{mm}$, $\pm 5\text{mm}$ 的位置, 以 1Hz 的频率 (合肥光源直线加速器的束流宏脉冲频率) 连续 100 次采集该 BPM 系统的结果, 然后对此结果作统计分析, 得到均方差, 来仿真该 BPM 系统在不同束流位置下的分辨率, 如表 1 所示.

表 1 合肥光源直线加速器 BPM 系统的分辨率

BPM resolution/ μm	Antenna Position/ mm				
	-5	-2.5	0	2.5	5
Horizontal	85	24	46	61	98
Vertical	74	60	31	44	61

5 合肥光源直线加速器BPM系统的在线应用

合肥光源直线加速器BPM系统于2006年2月安装后,进行了BPM电极感应信号的观测实验、BPM系统在线读数的误差分析实验,以及校正铁强度与BPM读数关系的实验.

5.1 BPM电极感应信号的观测

对合肥光源直线加速器BPM的电极感应信号作了直观的观察和测量,结果如图5所示.图5(a)是BPM电极感应信号的宏脉冲结构,脉宽为 $1.1\mu\text{s}$,即合肥光源直线加速器电子枪的脉宽.图5(b)是BPM电极感应信号的微脉冲结构,脉冲频率为 2856MHz ,即合肥光源直线加速器的微波频率.图5表明,该BPM能够很好地感应出束流的电磁场信号.

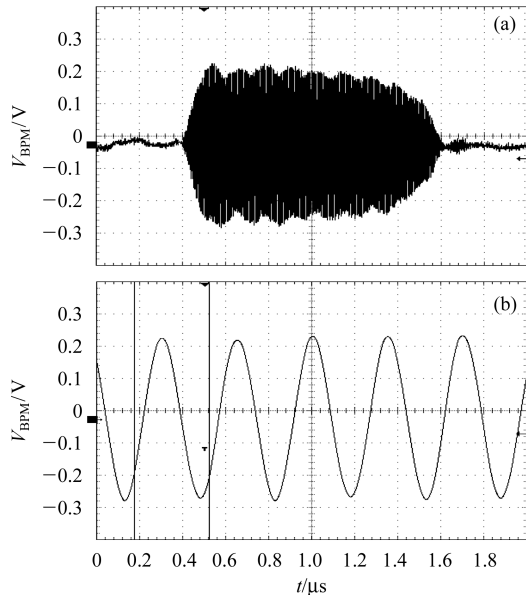


图 5 BPM 电极感应信号的宏脉冲结构(a)和微脉冲结构(b)

5.2 BPM系统在线读数的误差分析

以 1Hz 的频率(合肥光源直线加速器电子枪脉冲的频率)对束流位置进行连续的测量,束流位置的记录如图6所示,图6(a)是束流水平位置的记录,图6(b)是束流垂直位置的记录.将图6的束流位置记录作误差分布分析,结果如图7所示.从图7(a)和(b)可知,BPM的束流水平位置均方差为 $58\mu\text{m}$,束流垂直位置均方差为 $33\mu\text{m}$.与表1的离线分辨率相对比,结果基本一致.

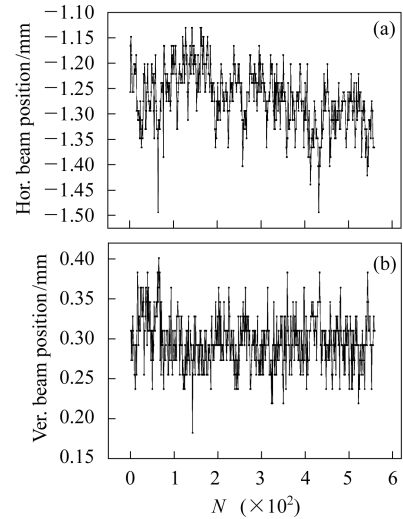


图 6 BPM 的束流位置在线测量记录

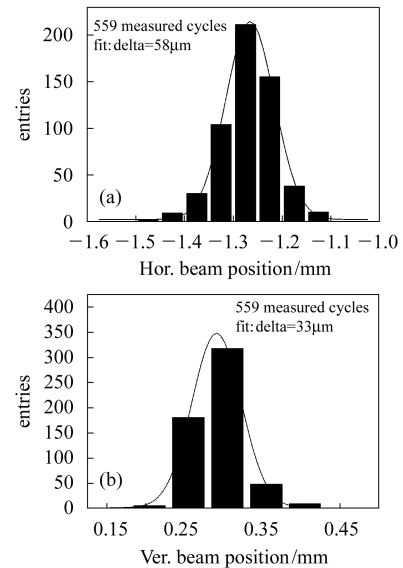


图 7 BPM 测量结果的误差分布图

5.3 校正铁强度与BPM读数关系的实验

为了检验新改造的合肥光源直线加速器BPM系统,做了校正铁强度与束流位置关系的实验,结果如图8所示.图8(a)和(b)可以看出,在校正铁强度小范围变化($\pm 1\text{A}$ 以内)时,束流位置与校正铁强度近似线性变化.当校正铁强度变化到较大的程度(水平校正铁电流 $>1\text{A}$,垂直校正铁电流 $<-1\text{A}$),束流位置随校正铁强度的变化率突然变大.

图8的曲线变化规律可以用均匀磁场中的电子运动规律来解释.如图9所示,在校正铁宽度 L 一定的情况下,电子在校正铁的均匀磁场中从 A 点运动到 B 点,所发生的偏移 ΔX 正比于 $\text{tg} \frac{\Delta\theta}{2}$,而 $\Delta\theta$ 正比于校正铁磁场强度即电流强度^[6].当校正铁电流较小($\pm 1\text{A}$ 以内)时, $\Delta\theta$ 较小,束流位置的偏移 ΔX 近似正比于校

正铁电流. 当校正铁电流较大(水平校正铁电流 > 1A, 垂直校正铁电流 < -1A) 时, $\Delta\theta$ 较大, 束流位置的偏移 ΔX 与校正铁电流的近似正比函数关系不再成立, 而呈正切函数关系. 所以, 束流位置随校正铁强度的变化率突然变大.

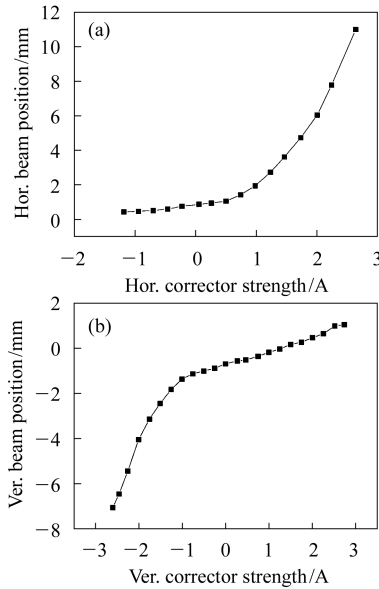


图 8 BPM 测量结果与校正铁强度的关系图

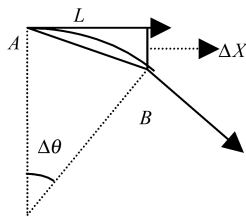


图 9 均匀磁场中的电子运动

将图 8 中校正铁强度小范围变化时的数据作线性拟合, 得到图 10. 图 10(a) 和 (b) 的拟合结果, 表明校正铁在水平方向上的校正系数为 0.46mm/A, 在垂直方

向上的校正系数为 0.58mm/A. 并且当校正铁处于默认值(水平校正铁 0A, 垂直校正铁 0.28A) 时, BPM 处的束流水平位置为 0.83mm, 垂直位置 -0.57mm.

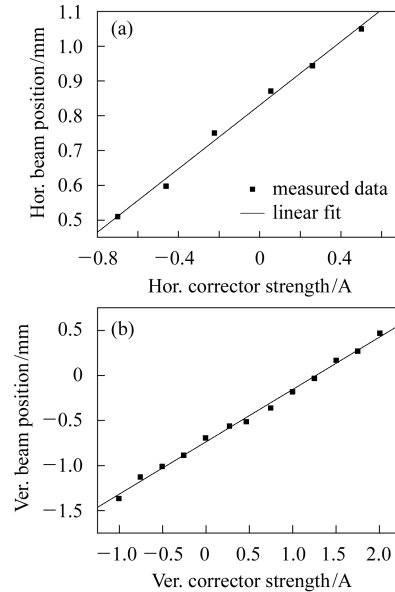


图 10 BPM 与校正铁强度小范围变化关系的拟合

6 结论

对合肥光源直线加速器新改造完成的 BPM 系统进行的离线标定实验, 分析了该 BPM 系统的分辨率和灵敏度. 基于束流的 BPM 读数实验, 确认了该 BPM 系统在线测量结果的误差小于 100 μ m. 校正铁强度与 BPM 读数关系的实验, 表明该 BPM 系统能正确地反应束流的位置变化情况. 结果表明, 合肥光源直线加速器新改造的 BPM 系统, 能够可靠而精确地测量直线加速器段的束流位置, 有效地应用于日常的调机工作, 提高直线加速器注入的效率.

参考文献(References)

- 1 LI Ji-Hao, SUN Bao-Gen, HE Duo-Hui et al. Nuclear Science and Techniques, 2005, **16**(5): 257—259
- 2 LI Ji-Hao, SUN Bao-Gen, HE Duo-Hui et al. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(9): 1434—1436(in Chinese)
(李吉浩, 孙葆根, 何多慧等. 强激光与粒子束, 2005, **17**(9): 1434—1436)
- 3 Data Sheet of AD8313. ANALOG DEVICES. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/53930877693590AD8313_d.pdf: 1—5
- 4 LI J H, SUN B G, HE D H et al. Signal Processing Technique in BPM System. The Second Discussion Forum on

- Nuclear Science and Technology in Anhui Province. University of Science and Technology of China, 2003. 10(in Chinese)
(李吉浩, 孙葆根, 何多慧等. 加速器束流位置监测系统信号处理技术. 安徽省第二届核科学技术发展研讨会. 中国科学技术大学, 2003. 10)
- 5 ZHENG P, SUN B G, LU P et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(8): 821—824(in Chinese)
(郑普, 孙葆根, 卢平等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(8): 821—824)
- 6 Wangsness R K. Electromagnetic Fields. CHEN Ju-Hua et al. Beijing: Science Press, 1987. 474—475(in Chinese)
(旺斯纳斯 R K 著. 电磁场. 陈菊华等译. 北京: 科学出版社, 1987. 474—475)

Research and Measurement of BPM System at HLS LINAC^{*}

LI Ji-Hao SUN Bao-Gen HE Duo-Hui LIU Gong-Fa LU Ping CAO Yong

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract BPM system newly designed at HLS Linac has been installed and applied in beam based experiments. This paper introduces the structure of BPM system, signal processing module, mapping results and measurement results of beam based experiment. The BPM system has a dynamic range of not less than 40dBm, beam position resolution of less than 100 μ m, horizontal sensitivity of 1.61dB/mm and vertical sensitivity of 1.51dB/mm. The results of experiment between corrector strength and BPM shows that the newly designed BPM system can acquire the beam positions information correctly, and the horizontal and vertical correction coefficients of the correctors are 0.46mm/A and 0.58mm/A respectively, and the horizontal and vertical beam positions at BPM are 0.83mm and -0.57 mm respectively with the default value of correctors.

Key words beam position monitor, dynamic range, mapping, resolution, corrector

Received 20 March 2006

^{*} Supported by Project of Building a High-Level University Well-Known both in China and in the World (KY2901), and Project of Hi-tech Research and Development Program of China (863-410-8-2)