

西安质子应用装置 BPM 设计及测试结果

王敏文^{1,2,3,4}, 郑曙昕^{1,2,3,*}, 关遐令^{1,2,3}, 张化一^{1,2,3}, 王学武^{1,2,3}, 黄文会^{1,2,3}, 王忠明⁴, 邱孟通⁴

(1. 清华大学 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 清华大学 先进辐射源及应用实验室, 北京 100084; 3. 清华大学 工程物理系, 北京 100084;

4. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要:西安质子应用装置(XiPAF)中能传输段设有6个束流位置探测器(BPM)用于测量束流位置及相位,要求位置和相位测量分辨率分别好于0.1 mm和 1° ,绝对位置测量准确度好于 ± 0.5 mm。本文从理论上分析了纽扣型BPM位置测量分辨率与电极长度及电极张角的关系,并结合CST模拟得到最优值,设计分辨率达 $24.5 \mu\text{m}$ 。离线测试结果表明,BPM样机的电极电容、灵敏度及电极间耦合度均与设计值相符。利用旋转法测量得到BPM样机水平和竖直方向电中心与机械中心的偏差分别为 (0.04 ± 0.05) mm和 (-1.53 ± 0.05) mm。样机安装在清华大学微型脉冲强子源(CPHS)高能传输段进行测试,测试结果表明,XiPAF BPM位置测量分辨率好于 $60 \mu\text{m}$,相位测量分辨率好于 0.74° ,绝对位置测量准确度为 ± 0.35 mm。该设计满足西安质子应用装置的要求。

关键词:束流位置探测器;灵敏度;电容耦合;分辨率

中图分类号:TL506

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2018)01-0161-07

doi:10.7538/yzk.2017.youxian.0179

BPM Design and Test Result of Xi'an Proton Application Facility

WANG Minwen^{1,2,3,4}, ZHENG Shuxin^{1,2,3,*}, GUAN Xialing^{1,2,3}, ZHANG Huayi^{1,2,3},
WANG Xuewu^{1,2,3}, HUANG Wenhui^{1,2,3}, WANG Zhongming⁴, QIU Mengtong⁴

(1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging of Ministry of Education,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Laboratory for Advanced

Radiation Sources and Application, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In the design of Xi'an Proton Application Facility (XiPAF), there are 6 beam position monitors (BPMs) installed in medium energy beam transport line to measure beam position and phase. Resolutions of position and phase measurement should be better than 0.1 mm and 1° , respectively, and accuracy of absolute position measurement should be better than ± 0.5 mm. The effects of electrode length and opening angle on BPM resolution were analyzed theoretically. CST simulation was then performed to

收稿日期:2017-03-23;修回日期:2017-06-06

作者简介:王敏文(1991—),男,四川绵阳人,博士研究生,核技术及应用专业

*通信作者:郑曙昕,E-mail:zhengsx@tsinghua.edu.cn

网络出版时间:2017-09-15;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20170915.0844.012.html

obtain the optimum parameters. The design resolution reaches $24.5 \mu\text{m}$ after optimization. The measured electrode capacitance, inter-electrode coupling and sensitivity of the BPM prototype agree with the designed value. Horizontal and vertical offsets between BPM mechanical center and electric center are $(0.04 \pm 0.05) \text{ mm}$ and $(-1.53 \pm 0.05) \text{ mm}$, respectively, measured by a rotation method. The prototype was installed in the high energy beam transport line of Tsinghua University Compact Pulsed Hadron Source (CPHS) to test its performance. The test results show that resolutions of position and phase measured by XiPAF BPM are better than $60 \mu\text{m}$ and 0.74° , respectively, and accuracy of absolute position measurement is $\pm 0.35 \text{ mm}$. The prototype satisfies the requirements of XiPAF.

Key words: beam position monitor; sensitivity; capacity coupling; resolution

西安质子应用装置(XiPAF)是用于空间质子辐照效应研究的装置,由 ECR 负氢源、射频四极加速器(RFQ)、漂移管加速器(DTL)、中能传输段(MEBT)、同步加速器、高能传输段和靶站组成^[1]。其中,MEBT 长 12 m,用于 DTL 到同步环注入点的束流传输和匹配,满足同步环注入束流要求。沿 MEBT 布有 6 个束流位置探测器(BPM)用于测量束流位置、束流相位和输运线物理参数。XiPAF 要求 BPM 位置和相位测量分辨率分别好于 0.1 mm 和 1° ,绝对位置测量准确度好于 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。常用的 BPM 有纽扣型和条带型,纽扣型 BPM 由于结构简单、紧凑,广泛应用于各类加速器中^[2-4],且对于低能束流,纽扣型 BPM 具有更高的传输阻抗^[5],输出信号更大,因此,XiPAF 选用纽扣型 BPM。为满足测量要求,本文对 BPM 几何结构参数与 BPM 分辨率的关系进行研究,并找到最优结构参数。

1 BPM 物理设计

图 1 为 BPM 原理示意图。当粒子束在管道中运动时,管道内壁会产生镜像电流,其密度分布与粒子束密度分布相似。利用与管道绝缘的电极可测量粒子束通过时产生的镜像电流信号。由于趋近效应,束流越靠近电极,产生的镜像电流越大,因此一对电极信号包含了束流在该方向上的位置信息。电流信号经特征阻抗为 Z_c 的同轴线传输到电子学线路进行放大、采集和后处理计算,得到束流位置和相位信息。假设电极与管道间的寄生电容为 C ,在束长远大于电极长度条件下,束流位于中心时 BPM 输出电压信号^[6]为:

$$V(\omega) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{l}{v} \frac{j\omega Z_c}{1 + j\omega Z_c C} I_{\text{im}}(\omega) \quad (1)$$

式中: ϕ 为电极张角; l 为电极长度; v 为粒子速度; ω 为射频角频率; $I_{\text{im}}(\omega)$ 为镜像电流。

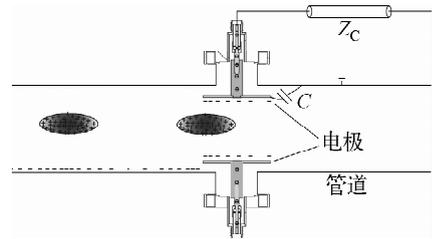


图 1 BPM 原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of BPM

对于偏心束流,BPM 电极输出信号与束流偏离中心距离 x 呈多项式关系,一对电极的信号 V_R 和 V_L ^[7]可表示为:

$$\begin{aligned} V_R &= V(\omega) \left(1 + \frac{4}{\phi} \left(\frac{x \sin(\phi/2)}{r} + O\left(\left(\frac{x}{r}\right)^2\right) \right) \right) \\ V_L &= V(\omega) \left(1 - \frac{4}{\phi} \left(\frac{x \sin(\phi/2)}{r} + O\left(\left(\frac{x}{r}\right)^2\right) \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: r 为 BPM 电极内半径,一般与管道半孔径一致。两信号相减并利用其和进行归一化得到输出信号差和比与束流位置的关系为:

$$\frac{V_R - V_L}{V_R + V_L} = \frac{2}{r} \frac{\sin(\phi/2)}{\phi/2} x + O\left(\left(\frac{x}{r}\right)^2\right) \quad (3)$$

在管道中心附近, $\frac{x}{r}$ 为小值,可忽略二阶及以上项,差和比与束流位置呈线性关系,称 $S = \frac{2 \sin(\phi/2)}{r \phi/2}$ 为灵敏度。由式(3)可推出 BPM 位

置测量分辨率 σ_x 与灵敏度和信号幅度的关系为 $\sigma_x = \sigma_v / (\sqrt{2}V(\omega) \cdot S)$ 。 σ_v 为电子学噪声,由电路设计和工艺决定,电子学 Libera Single Pass H(LSPH)噪声为 0.08 mV^[8]。因此,为实现高测量分辨率,应尽可能提高 BPM 信号幅度及灵敏度。

1.1 电极长度的影响

由式(1)可知,在束长远大于电极长度的情况下,信号幅度与电极长度呈正比。但对于 XiPAF MEBT,束流长度为 5~11 cm,而电极长度为 5 cm 左右,不满足近似条件。此时 BPM 等效电路如图 2 所示, $I_{im}(t)$ 为束流进入 BPM 时产生的感应电流, $I_{im}(t-l/v)$ 为束流离开时产生的感应电流,因此束流位于中心时 BPM 输出电压信号为 $V(\omega) = \frac{\phi}{\pi} Z_C I_{im}(\omega) \cdot \sin(\frac{\omega l}{2v}) / \sqrt{1 + \omega^2 Z_C^2 C^2}$, 信号幅度与 $\phi \sin(\frac{\omega l}{2v}) / \sqrt{1 + \omega^2 Z_C^2 C^2}$ 呈正比。将电极与外壳近似看成同轴电容器得 $C = \frac{\phi \epsilon_0 l}{\ln(1+d/a)}$, 其中 d 为电极与外壳间距, a 为电极外半径, ϵ_0 为真空介电常数。为得到较大信号幅度, ϕ 尽量取大, 取为 80°, d 取 5 mm。利用公式计算与 CST 模拟的 BPM 信号幅度与电极长度的关系示于图 3, 两者趋势相符, 最优点略有差异主要是由于公式计算未考虑电极的边缘效应。因此

取电极长度为 40 mm。

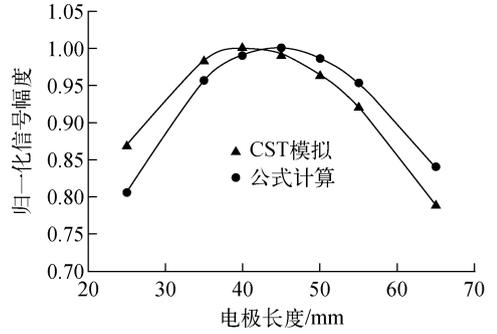


图 3 BPM 信号幅度与电极长度的关系
Fig. 3 Relation between BPM signal amplitude and electrode length

1.2 电极张角的影响

由于 $\sigma_x \propto 1/(SV(\omega)) \propto \sin(\phi/2)$, 因此电极张角应尽可能大以实现高测量分辨率, 但此式未考虑电极间的耦合作用, 该作用会使 BPM 的灵敏度减小。电极张角越大, 该耦合作用越强, 因此存在最优张角使得分辨率最高。通过在电极间添加隔离环亦可减弱耦合作用, 提高灵敏度。对不同张角, 有、无隔离环结构(图 4)的 BPM 进行 CST 模拟, 结果列于表 1。无隔离环时最优张角为 80°, 电极张角继续增大时,

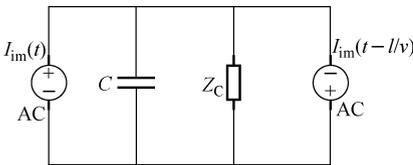


图 2 BPM 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of BPM

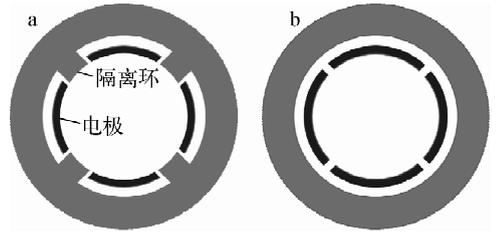


图 4 有(a)、无(b)隔离环 BPM 结构

Fig. 4 BPM structure with (a) and without (b) separating ring

表 1 隔离环及电极张角对 BPM 分辨率的影响

Table 1 Effect of separating ring and opening angle on BPM resolution

电极张角/(°)	隔离环/(°)	耦合电容/pF	对地电容/pF	灵敏度/mm	信号幅度/mV	理论分辨率/ μ m
70	10	0.102	11.26	0.049 5	41.7	27.4
70		0.194	10.58	0.047 7	45.9	25.8
80		0.396	11.33	0.046 9	49.3	24.5
84		0.642	11.58	0.044 6	49.7	25.5
88		1.468	11.63	0.039 7	49.9	28.6

灵敏度降低而信号幅度几乎不变,测量分辨率降低。信号幅度不继续随张角增加而线性增加的原因是两电极相距较近时,电场分布的边缘效应变弱。添加隔离环能有效减少电极间的耦合电容,增加灵敏度,但添加隔离环会使 BPM 电极张角变小,信号变小。为实现高测量分辨率及便于加工,选用无隔离环 80° 张角结构。最终确定的 BPM 几何尺寸列于表 2。

表 2 BPM 几何尺寸

Table 2 Geometric parameter of BPM

参数	量值
电极长度,mm	40
电极张角, ($^\circ$)	80
电极厚度,mm	2
电极内孔径,mm	72
电极与外壳间距,mm	5

2 离线标定

BPM 样机如图 5 所示,电极、引出极及外壳材料均为不锈钢,真空信号引出采用 MDC 单端 SMA 型 feedthrough,电极和 feedthrough 通过柱形引出极实现电连接。电极通过中心方孔与引出极的滑配合实现定位,并用螺栓进行固定,引出极另一端与 feedthrough 内芯焊接固定。引出极内径与引出极外径比取 2.3,形成 $50\ \Omega$ 同轴传输,减少信号传输过程中的反射损失。

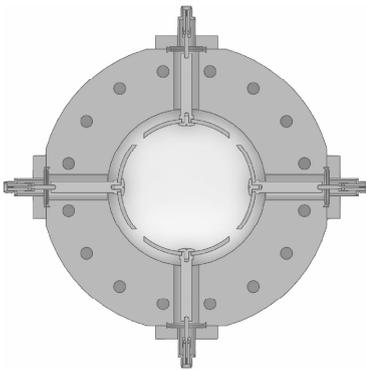


图 5 BPM 样机

Fig. 5 Mechanical drawing of BPM prototype

2.1 电容测量

电极电容会影响 BPM 的响应特性,为保持好的一致性,4 个电极的电容应尽量一致。利用网络分析仪测量电极的 S_{11} 和 S_{21} 参数,推

算出的各电极电容和电极间耦合度列于表 3。可看出,测量值较模拟值大,主要原因是模拟中未考虑 feedthrough 的电容。由于加工和装配误差,BPM 各电极电容稍有不同,右、上、左电极一致性较好,下电极电容偏大,原因是下电极焊接时定位不准,导致安装后电极与外壳的间距较设计值小 $0.7\ \text{mm}$ 。测量和模拟的电极间耦合度基本相符,说明 BPM 响应基本与设计一致。

表 3 测量与模拟的电极电容及电极间耦合度

Table 3 Measured and simulated capacitances of electrode and coupling factor between electrodes

电容/ μF		耦合度/ dB	
模拟	测量	模拟	测量
11.33(右)	14.0(右)	-37.1(右下)	-35.9(右下)
11.33(上)	14.1(上)	-37.1(右上)	-35.2(右上)
11.33(左)	14.1(左)	-37.1(左下)	-35.5(左下)
11.33(下)	15.4(下)	-52.1(上下)	-51.7(上下)
		-52.1(左右)	-51.5(左右)

2.2 灵敏度及 Mapping 图测量

为测量 BPM 的灵敏度,本工作基于拉丝法^[9]搭建了一套离线标定平台。直径 $0.2\ \text{mm}$ 的铜丝馈入 $325\ \text{MHz}$ 射频信号模拟束流,二维电动平移台移动丝模拟不同位置束流。BPM 4 路输出信号输入电子学 LSPH,经过滤波、放大和数字 IQ 分解,得到输出信号幅度。标定时先移动丝到竖直方向中心处,然后以 $1\ \text{mm}$ 步距沿水平方向移动丝并记录 BPM 输出信号幅度,差和比与位置线性拟合曲线的斜率即为 BPM x 方向灵敏度,同理可得到 y 方向灵敏度。图 6 为模拟与测量的 BPM 灵敏度比较,可看出,测量得到的 x 、 y 方向灵敏度与模拟值匹配较好,相对误差在 $\pm 0.43\%$ 范围内。为测

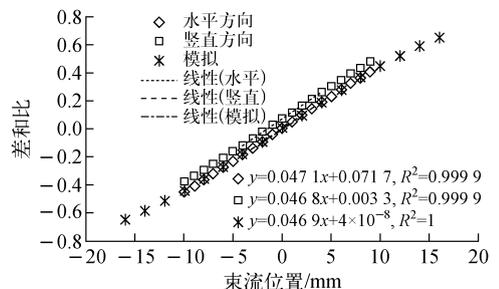


图 6 模拟与测量的 BPM 灵敏度比较

Fig. 6 Comparison of measured and simulated BPM sensitivities

量 BPM 在 xy 平面内的线性度,以 2 mm 步距在 xy 平面内从 $(-10 \text{ mm}, -14 \text{ mm})$ 移动至 $(14 \text{ mm}, 14 \text{ mm})$ 处,得到图 7 所示的 Mapping 图。在 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 范围内,水平和竖直方

向线性很好,且无耦合;但当丝偏离中心较远时,非线性开始凸显,采用三阶多项式拟合修正后,在 $28 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ 范围内均能实现精确测量,最大误差在 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 内。

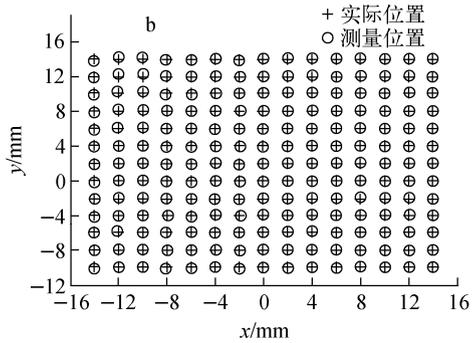
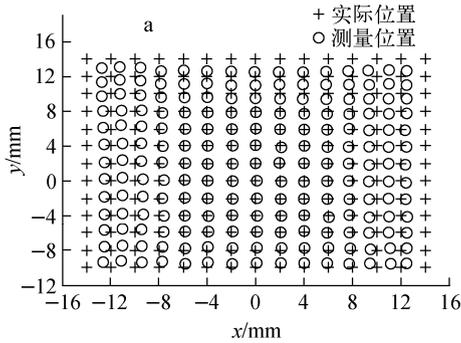


图 7 线性拟合(a)与三阶多项式拟合(b)的 Mapping 图

Fig. 7 BPM Mapping of linear fitting (a) and 3-order polynomial fitting (b)

2.3 电中心与机械中心偏差

由于加工、装配误差,BPM 的电中心与机械中心通常并不重合,为实现束流绝对位置的精确测量,需标定出其差值。由于丝与 BPM 机械中心的相对位置难以确定,本文采用类似旋转测量磁中心^[10]的方法标定电中心与机械中心偏差。具体方法为:先移动丝到电中心位置,然后绕机械中心转动 BPM θ 角度,再移动丝到电中心,则丝移动距离 $s = -(D + D \cdot \cos(180^\circ - \theta))$,其中 D 为电中心与机械中心的偏差,当 θ 取 180° 时, $D = -s/2$ 。此方法的优点是对丝无任何定位要求,测量过程简单,测量误差主要由 BPM 中心定位误差($20 \mu\text{m}$)、电子学噪声($6 \mu\text{m}$)、电机移动误差($10 \mu\text{m}$)、电缆弯折误差($5 \mu\text{m}$)和铜丝圆柱度误差($10 \mu\text{m}$)决定。测量得到的 BPM 机械中心与电中心偏差为:水平, 0.05 mm (第 1 次测量)和 0.02 mm (第 2 次测量);竖直, -1.51 mm (第 1 次测量)和 -1.55 mm (第 2 次测量)。可知,竖直方向偏差远大于水平方向,这主要是下电极电容较大所致。

2.4 和信号

由式(2)可知,一阶近似下一对电极信号的和与束流位置无关,而与束流流强呈线性关系。因此经过标定后,BPM 和信号可作为束流流强测量手段。利用离线测试平台测量得到 BPM 和信号与束流位置的关系如图 8 所示,在中心

位置 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 平面内,由于束流位置变化引起的和信号变化在 $\pm 1.5\%$ 范围内。

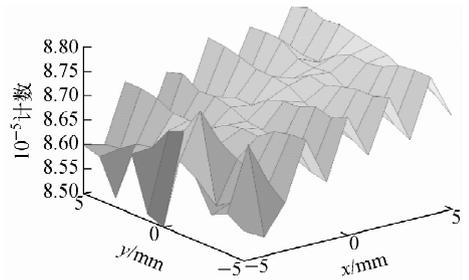


图 8 BPM 和信号与束流位置的关系

Fig. 8 Relation between sum signal of BPM and beam position

3 在线实验

样机安装在清华大学微型脉冲强子源(CPHS)进行测试,CPHS 与 XiPAF MEBT 束流参数列于表 4。

表 4 CPHS 及 XiPAF MEBT 束流参数

Table 4 Beam parameters of CPHS and XiPAF MEBT

加速器	粒子种类	束流能量/ MeV	束流强度/ mA	均方根长度 (模拟)/ns
CPHS	质子	3	37	0.5
XiPAF	负氢	7	6	0.3~0.6

利用示波器可直接观察 BPM 的输出信号(图 9a),BPM 和信号与束流变压器(ACCT)测量的流强信号形状基本一致,验证了 BPM 和信号与束流强度的正比关系,说明利用 BPM 和信号进行流强测量是可行的。图 9b 为 BPM 信号的频谱,由于低 β 效应^[11],BPM 信号主要为 325 MHz 基频信号,高阶量基本为零。BPM 测量信号幅值为 84 mV,较 CST 模拟值小 10 mV,可能是束流均方根长度估计不准所致,当取均方根长度为 0.6 ns 时,模拟值与测量值一致。

3.1 位置分辨率

将 4 路 BPM 信号接入电子学 LSPH,LSPH

每 μs 可计算 1 次位置信号,因此可用于研究 30 μs 宏脉冲内的束流位置抖动情况。图 10a 为单个宏脉冲内不同微脉冲的位置,水平和垂直方向束流位置抖动均方根分别为 46 μm 和 43 μm 。连续监测 4 min 束流位置信号,取微脉冲位置的平均值作为宏脉冲束流位置(图 10b),水平和垂直方向位置抖动均方根分别为 36 μm 和 23 μm 。离线测试表明,LSPH 在 84 mV 输入时位置测量分辨率为 10 μm ,因此,可判定该抖动是束流自身抖动。宏脉冲位置抖动小于微脉冲,说明 CPHS 运行稳定性较好。

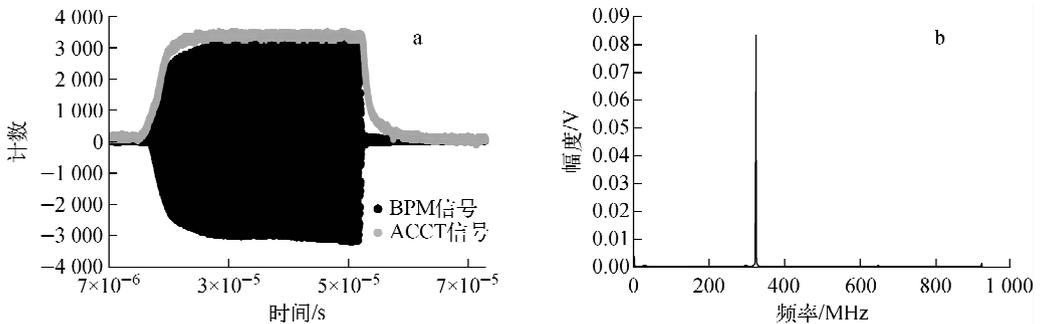


图 9 BPM 与 ACCT 信号比较(a)及 BPM 信号谱(b)

Fig. 9 Comparison of BPM signal and ACCT signal (a) and spectrum of BPM signal (b)

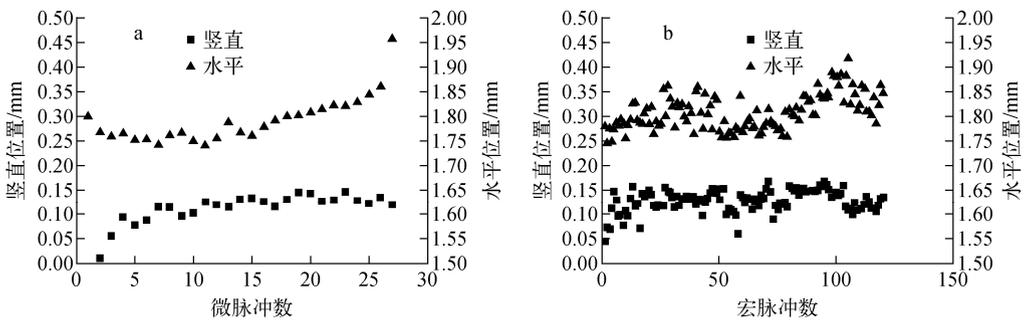


图 10 微脉冲(a)和宏脉冲(b)束流位置稳定性

Fig. 10 Beam position stability of micro pulse (a) and macro pulse (b)

3.2 相位测量

通过与给定参考信号比较,LSPH 可计算束流相位。测量得到微脉冲相位抖动均方根为 0.67° ,因此相位测量分辨率必好于 0.67° 。图 11 为微脉冲束流相位稳定性情况。

4 结果讨论

BPM 信号幅度为 84 mV 时,BPM 位置测

量分辨率为 10 μm ,相位测量分辨率好于 0.67° 。利用表 6 参数计算得到 XiPAF BPM 最小信号幅度为 15 mV,由于位置测量分辨率与 BPM 信号幅度呈反比,因此 XiPAF BPM 位置测量分辨率好于 60 μm 。当信号幅度为 15 mV 时,LSPH 相位测量分辨率为 0.3° ^[8],因此 XiPAF BPM 相位测量分辨率好于 0.74° 。

XiPAF BPM 绝对位置测量准确度为准直

误差(± 0.2 mm)、拟合误差(± 0.1 mm)和 BPM 电中心与机械中心偏差的测量误差(± 0.05 mm)的总和,为 ± 0.35 mm。

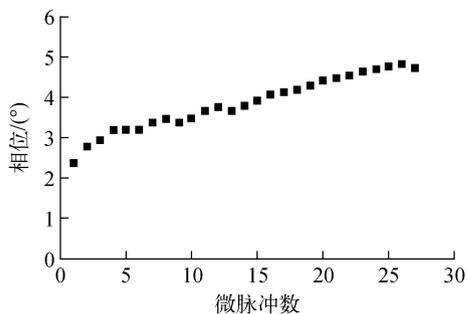


图 11 微脉冲束流相位稳定性

Fig. 11 Beam phase stability of micro pulse

5 结论

本文分析了 BPM 位置测量分辨率与电极长度及电极张角的关系方程式,并结合 CST 模拟得到 XiPAF BPM 最优几何结构参数,样机离线测试结果与设计结果相符。利用三阶多项式拟合后,在中心 $28\text{ mm} \times 28\text{ mm}$ 内测量误差在 ± 0.1 mm 范围内。利用旋转法测量 BPM 电中心与机械中心偏差的精度达 ± 0.05 mm, XiPAF BPM 绝对位置测量准确度为 ± 0.35 mm。在线测试结果表明, XiPAF BPM 位置测量分辨率好于 $60\ \mu\text{m}$, 相位测量分辨率好于 0.74° 。该设计满足 XiPAF 束流位置和相位测量分辨率分别好于 0.1 mm 和 1° 、绝对位置测量准确度好于 ± 0.5 mm 的要求,将为未来 XiPAF 调束提供有利条件。

参考文献:

- [1] ZHENG S X, XING Q Z, GUAN X L, et al. Design of the 230 MeV proton accelerator for Xi'an Proton Application Facility[C]// Proceedings of HB16. Malmö: [s. n.], 2016: 55-57.
- [2] LUNIN A, EDDY N, KHABIBOULLINE T, et al. Development of a low-beta button BPM for PXIE project[C]// Proceedings of IBIC2013. Oxford: [s. n.], 2013: 392-395.
- [3] SIMON C, SENÉE F, CLEMENTE G, et al. Design status of the beam position monitors for the FAIR proton linac[C]// Proceedings of DIPAC11. Hamburg: [s. n.], 2011: 356-358.
- [4] HASSANZADEGAN H, JANSSON A, JOHANSSON A J. Beam position monitor system of the ESS linac[C]// Proceedings of HB2012. Beijing: [s. n.], 2012: 133-135.
- [5] ZHANG Y, WU J X, ZHU G Y, et al. Capacitive beam position monitors for the low- β beam of the Chinese ADS proton linac[J]. Chinese Physics C, 2016, 40(2): 89-95.
- [6] COHEN-SOLAL M. Design, test, and calibration of an electrostatic beam position monitor[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2010, 13(3): 032801.
- [7] SHAFER R E. Beam position monitoring[C]// AIP Conference Proceedings. United States: American Institute of Physics, 1989, 212: 26-58.
- [8] Libera single pass H specification of Tsinghua [R]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [9] PODADERA I, CARMONA J M, GAMA J, et al. Developments for IFMIF/EVEDA LIPAc beam position monitors: The sensors at the MEBT and the wire test bench[C]// Proceedings of DIPAC11. Hamburg: [s. n.], 2011: 320-322.
- [10] WANG B, ZHENG S, WU L, et al. Fiducialization of the small-aperture quadrupoles based on the vibrating wire method[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 812: 37-42.
- [11] SHAFER R E. Beam position monitor sensitivity for low-beta beams[C]// AIP Conference Proceedings. United States: American Institute of Physics, 1994, 319(1): 303-308.