

HLS 新研制的束流位置探测器 定标和误差分析

王筠华 沈连官 王贵诚 刘建宏

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了 NSRL 二期工程中,为存储环上注入段真空盒改造而新研制的 8 组束流位置探测器的定标和数据处理过程及其探头定标电场的拟合和误差计算结果.介绍了专门用于 BPM 信号处理模块的电子学系统以及它的运行性能.

关键词 束流位置探测器 模拟定标 mapping 图 机械定标系数

1 引言

束流位置探测器(BPM)是观察储存环中,运行束流横向位置的探测器.在新增插入设备的联调和为提高束流品质的机器研究中,它是不可缺少的重要探测设备.前阶段机器运行中,HLS 沿环有 27 个 BPM 已投入了正常操作^[1].为了 NSRL 二期工程注入段的改造,需要我们为改造后的注入段真空盒重新研制 8 组新的束流位置探测器.带有新注入系统和各种部件的 HLS 存储环局布分布图如下.

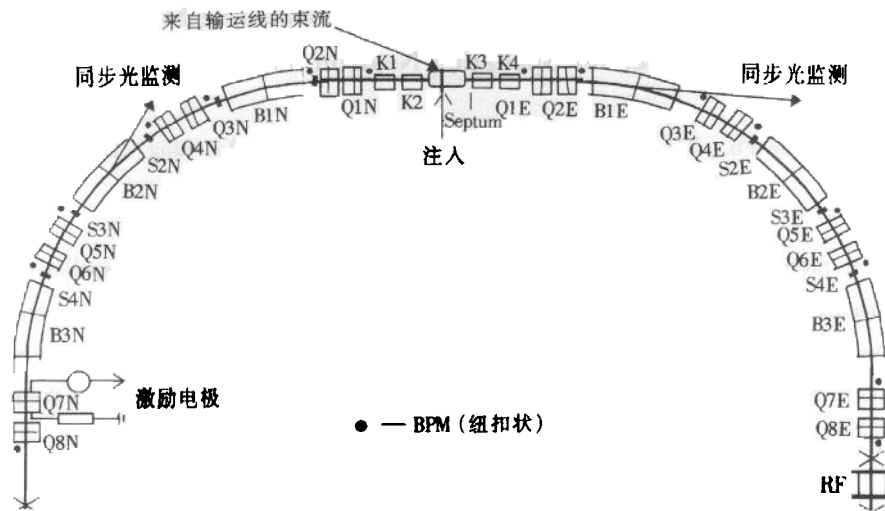


图 1 带有新的注入系统 HLS 存储环局布分布图

2 定标系统

常规在 BPM 安装到存储环上之前,需要进行天线模拟定标.即用天线中的高频信号模拟束流求出空间电场与探头电压的关系,作为以后安装到储存环中由电极上感应电压确定束流位置的依据.新的注入系统带有两段 1210mm 和两段 1840mm 真空管道,每根管道两头各有一组 BPM.由于真空管道长,为了避免水平放置模拟天线有垂度而引起较大的数据测量误差,我们采用了垂直放置模拟天线定标系统^[2].由于模拟天线为每测一根真空管都需要装卸,因此,BPM 系统的标定装置中模拟天线的重复定位精度和其在运动测量过程中,保证该模拟天线与真空管道轴线(垂直方向)平行度是将来 BPM 系统精度和可靠性的决定性因素之一.为此,我们考虑并采用如下措施来保证:1.真空室外的安装基准所在平面与真空室的几何轴心线的平行度由真空室的加工精度保证.2.模拟天线夹紧机构具有高精度的导向支架.并在使用前通过调试获得反复张紧和松弛模拟天线时在测量点处模拟天线在夹紧过程中的位置偏移量,非接触测量仪器的分辨率好于 0.001mm.实验结果表明精密导向机构使模拟天线的测量点在夹紧过程中位置漂移量小于 0.01mm.3.模拟天线支架上还具有微调机构.用于调整模拟天线相对于两个安装基准的平行度(x, y 运动平面),调整模拟天线相对于两个安装基准的平行度好于 0.01mm.4.利用平行机构固定真空室,可使真空室安装基准的连线与驱动模拟天线的工作台的驱动方向的平行度保持在 0.01mm 之内.5.驱动模拟天线的工作台作 xy 平面运动的步进电机步距为 0.001mm.工作台的位置由分辨率为 0.001mm 的长光栅尺读取,读取的任何一点的位置都是相对于光栅尺零点的位置,以保持各真空管上下测量数据的一致性.

该定标系统整体布局图见图 2.考虑闭轨校正的需要,我们在真空管道横截面(19×19)mm² 面积上取(19×19)个测量点,根据测量数据用多项式拟合描述在这范围中天线位置与电场分布的关系.

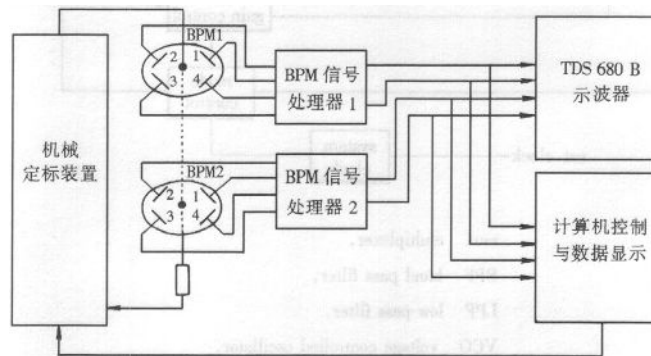
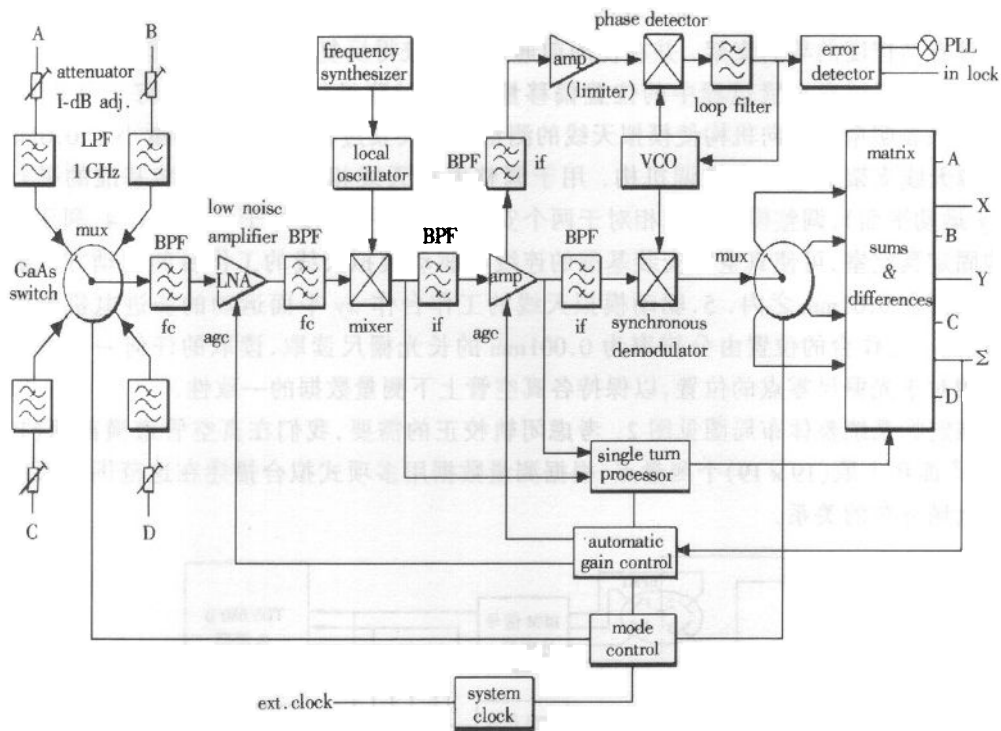


图 2 整体定标系统布局示意图

若设定垂直天线为 z 方向,那么和天线平行放置垂直的真空管道在其截面上左右定为 x ,前后定为 y .为了达到高精度的调整,由于该系统采用移动天线来实现模拟电场在真空管道中分布,它大大地优于移动真空管道的常规调整方法.该模拟天线由一个可调

精度达 $10\mu\text{m}$ 机床控制, 该机床既能由计算机控制也能由人工操作. 每组 BPM 有 4 个与 x, y 成 45° 分布拾取信号的 pick-up 电极. 两组 BPM 共 8 个电极, 接收来自天线感应的信号, 该感应信号直接送到两个 BPM 信号处理器并行处理. 信号不经过任何中间开关过程, 这将大大提高系统的可靠性, 避免信号处理过程的复杂性. 该信号处理器是法国 Bergoz 公司生产的专门服务于 BPM 系统的称之为 BPM Module¹⁾. 该 Module 的动态范围 $> 75\text{db}$, 分辨率高达 $1\mu\text{m}$ 外差式接收处理器. 因为我们的射频频率为 204MHz , 所以该处理器带有中心频率 204MHz 、带宽为 $\pm 200\text{kHz}$ 的第一级滤波, 频域处理来自 pick-up 的电极信号, 并且在 Module 内完成和差计算, 输出近似于直流的表征 x, y 位置的模拟信号 V_x, V_y 值. 它可送示波器直接观察, 同时也送到计算机进行模数转换并记录形成文件, 以备数据处理所用. 它避免了以前定标时采用 5MHz 低频 CW, 而使用是在高频状态下, 从而提高了测试数据的可靠性. 该 Module 工作原理图见图 3.



- mux multiplexer,
- BPF band pass filter,
- LPF low pass filter,
- VCO voltage controlled oscillator,
- fc receiver centre frequency,
- if intermediate frequency (21.4MHz).

图 3 BPM 信号处理示意框图

1) Bergoz BPM module user manual 法国 Bergoz 公司 BPM 模块使用手册

3 信号处理和数据的计算

3.1 BPM 系统灵敏度

在圆形真空管道中心点, 解析法定义 BPM 机械定标系数为

$$K_x = K_y = \frac{R \sin \alpha}{\sqrt{2} \alpha} / (\text{mm}/\%), \quad (1)$$

R 为电流管道半径, α 为钮扣电极半直张角.

对于机器真空管道内直径: $\Phi_1 = 86.2\text{mm}$; Pick up 电极: $\Phi = 24.5\text{mm}$ 并且与水平成 45° 分布. K_x, K_y 为 x, y 方向机械定标系数, 而 $S_x = (1/K_x) / (\%/ \text{mm})$, $S_y = (1/K_y) / (\%/ \text{mm})$ 称为其机械灵敏度.

在定标测试中, 其各点的感应电压与束流在真空室的位置的关系为

$$X = K_x \cdot U, \quad Y = K_y \cdot V,$$

而 U, V 分别为

$$U = \frac{(V_1 + V_4) - (V_2 + V_3)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}, \quad V = \frac{(V_1 + V_2) - (V_3 + V_4)}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4},$$

V_1, V_2, V_3, V_4 分别是 4 个 pick-up 电极拾取的信号.

我们的 BPM Module 灵敏度(即电子学增益)标称值为 $G_{ex} = G_{ey} = 0.22 / (\text{V}/\%)$. BPM 系统总的增益(即总的灵敏度)为

$$G_x / (\text{V}/\text{mm}) = G_y / (\text{V}/\text{mm}) = \text{真空管道机械灵敏度} (\%/ \text{mm}) \times \text{Module } G_i / (\text{V}/\%).$$

因为在试验中发现, Module 电子学灵敏度 G_{ex}, G_{ey} 对于不同模块以及同一模块都有微量差别. 为了得到精确的测量值, 分别定标了它们.

3.2 Module 输出电压 V_x, V_y 与增益和位置偏移量 (x, y) 以及 U, V 的关系

因为

$$\begin{aligned} x/\text{mm} &= \frac{V_x}{G_x} = K_x \cdot U = \frac{U}{S_x} = \frac{V_x}{S_x \cdot G_{ex}}, \\ y/\text{mm} &= \frac{V_y}{G_y} = K_y \cdot V = \frac{V}{S_y} = \frac{V_y}{S_y \cdot G_{ey}}, \end{aligned}$$

而 $G_x = S_x \cdot G_{ex}, X = K_x \cdot U, Y = K_y \cdot V$, 所以

$$V_x/V = U(\%) \cdot G_{ex}(\text{V}/\%),$$

$$V_y/V = V(\%) \cdot G_{ey}(\text{V}/\%),$$

如此, 从 Module 输出电压, V_x, V_y 和已知 Module 灵敏度, 可以计算出管道中各点的 U, V 值.

3.3 数据处理

由于管道中离开中心点电场分布的非线性, 所以要精确地计算出管道中各点的灵敏度,

方能定出束流正确的位置. 我们对每个 BPM 作(19 × 19)共 361 点的电场分布测量, 通过测量出天线通过管道中各定点时电极的感应电压, 再由(2)式计算出 U, V 值, 利用测量数据, 用最小二乘法逼近, 多项式拟合, 可解出两组系数. 3 次拟合为各 10 个系数, 4 次拟合为各 15 个系数, 5 次拟合 21 个系数. 以 $N = 3$ 为例, 可以写出它的拟合多项式.

$$\begin{aligned}
 X &= a_{00} + a_{10}(U - U_0) + a_{01}(V - V_0) + a_{20}(U - U_0)^2 + \\
 &\quad a_{11}(U - U_0)(V - V_0) + a_{02}(V - V_0)^2 + a_{30}(U - U_0)^3 + a_{21}(U - U_0)^2(V - V_0) + \\
 &\quad a_{12}(U - U_0)(V - V_0)^2 + a_{03}(V - V_0)^3, \\
 Y &= b_{00} + b_{10}(U - U_0) + b_{01}(V - V_0) + b_{20}(U - U_0)^2 + \\
 &\quad b_{11}(U - U_0)(V - V_0) + b_{02}(V - V_0)^2 + b_{30}(U - U_0)^3 + b_{21}(U - U_0)^2(V - V_0) + \\
 &\quad b_{12}(U - U_0)(V - V_0)^2 + b_{03}(V - V_0)^3,
 \end{aligned} \tag{5}$$

这里 U_0, V_0 是机械中心的 U, V 值. (5) 式即为待求解的, 确定 $A_{00}, A_{10}, \dots, A_{03}$ 的方程组. 用矩阵消元法解它, 即可求得最小二乘法逼近的各项系数值.

4 结果和分析^[3]

对每个 BPM, 在真空管道横截面(19 × 19) mm² 面积上, 作(19 × 19)共 361 点的电场分布测量, 我们用多项式拟合计算出描述天线位置与电场分布的关系, 做了以下几个工作: 1. 通过测量数据估算整个系统的测量精度; 2. 确定拟合精度; 3. 绘制了 BPM mapping 图, 并同时确定其电中心相对于机械中心偏移量; 4. 计算出多项式各项系数; 5. 确切计算出由测量误差引进的拟合误差.

4.1 整个系统的测量精度的估算

为了估算系统的测量精度, 从 1 号管子机械中心点重复测量数据出发. 因为机械中心点附近的灵敏度呈线性, 所以可以利用解析法计算它的机械灵敏度, 再利用公式(3)估算整个系统的测量误差大约为 ± 15 μm. 详见下面数据表 1.

测量时间: 00 - 3 - 17 19:59:50

表 1 真空管(001)运行在不同时刻的机械中心处 ($x = 0, y = 0$) Module 输出重复性估算

V_{x0}/V	V_{y0}/V	$ \Delta V_{x0} /V$	$ \Delta V_{y0} /V$	$G_{ex}/(V/mm)$	$G_{ey}/(V/mm)$	$\Delta x/\mu m$	$\Delta y/\mu m$
-0.6743	0.6623						
-0.6669	0.6438	0.0099	0.0228	0.7155	0.7234	12.6	30.5
-0.6664	0.6443						
-0.6763	0.6666						

以上误差主要由约 10 μm 机械系统定位误差和约 10 μm Module 输出误差以及其他误差组成. 其他误差包括机械加工和外界干扰等因素带来的误差. 它们对应 Module 输出约 15—20 mV.

拟合精度的确定

我们还对所测(19 × 19)点数据, 分别计算了 3 次、4 次、5 次拟合相对于测量值均方误差

见表 2. 从表 2 可以看出,三阶拟合已基本满足 $10\mu\text{m}$ 精度的要求.

表 2

拟合阶数	x/mm	y/mm
3	0.0093635	0.0135776
4	0.0084817	0.0132687
5	0.0072179	0.0124277

(真空管代号 003 - UP)

4.3 电场的 Mapping 图和拟合误差分布图

为了确保测试数据的可信性,比较了 3 号和 4 号真空管道上部 BPM 的 mapping 和 3 次拟合的误差分布如图 4. 除了机械加工和安装条件外,它们是在完全相同的测试条件下得到的.

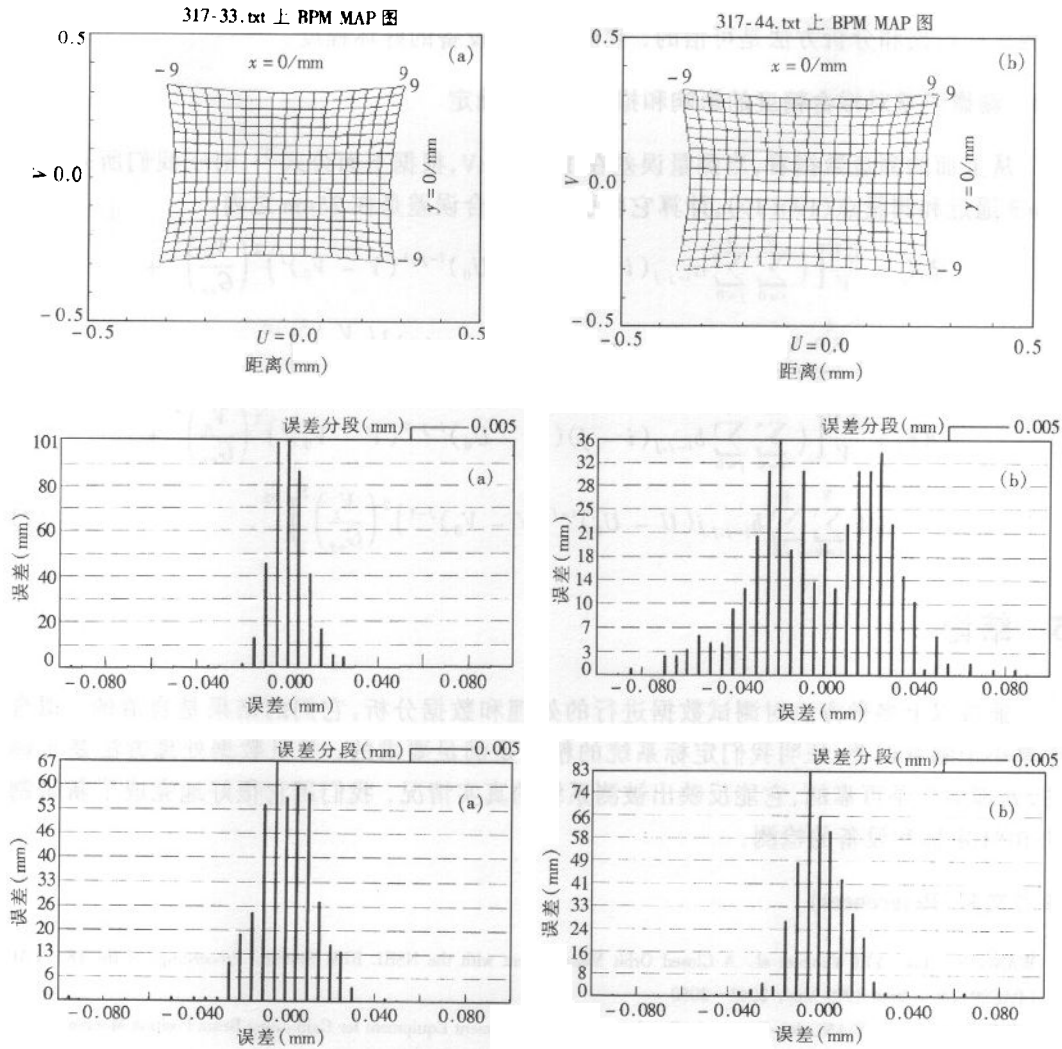


图 4 管道上部 BPM mapping 图和 x, y 误差分布图

(a)图表示 3 号;(b)图表示 4 号.

从以上两组图,我们可看出由于 4 号上部 BPM 机械中心偏离电子学中心(在 x 方向)较大(见表 3),因此在 x 方向误差分布很不理想. 而 3 号上部 BPM 较为理想, x 和 y 方向的拟合误差点 95% 是落在 $\pm 15\mu\text{m}$ 之内.

表 3 其电中心相对于机械中心偏移量

管道编号		x/mm	y/mm
3 号	上	0.193096	-0.475767
	下	-0.478395	-0.310661
4 号	上	1.578221	-0.280645
	下	0.150767	-0.495090

4 号上部 x 方向误差分布大的主要原因是来源于直接焊接在管道上的 BPM pick-up 电极偏斜和整体加工粗糙所致. 因此我们不准采用它,需要重新制作它. 这也证实我们测量的数据和分析方法是可信的. 它能反映出设备的好坏程度.

4.4 测量误差对拟合精度的影响和拟合精度的确定

从上面的测量数据看,当测量误差在 15—20mV,根据下面公式^[3],对于我们所采用的 $N=3$ 逼近和测量点(19×19),计算它将引入的拟合误差是在 $25\mu\text{m}$ 之内.

$$\begin{aligned} \delta X_p &= \frac{\delta V}{V} \left[\left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i-j,j} (i-j) (U-U_0)^{i-j-1} (V-V_0)^j \right)^2 \left(\frac{V_x}{G_{ex}} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i a_{i-j,j} j (U-U_0)^{i-j} (V-V_0)^{j-1} \right)^2 \left(\frac{V_y}{G_{ey}} \right)^2 \right]^{1/2}, \\ \delta Y_p &= \frac{\delta V}{V} \left[\left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i b_{i-j,j} (i-j) (U-U_0)^{i-j-1} (V-V_0)^j \right)^2 \left(\frac{V_x}{G_{ex}} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i b_{i-j,j} j (U-U_0)^{i-j} (V-V_0)^{j-1} \right)^2 \left(\frac{V_y}{G_{ey}} \right)^2 \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

5 结论

通过以上多种方法对测试数据进行的处理和数据分析,它们的结果是自洽的. 拟合误差小于测量误差,证明我们定标系统的精度是满足要求的. 并且数据处理方法是正确的,处理结果是可靠的,它能反映出被测系统的真实情况. 我们用它很好地完成了新研制的 BPM 定标和设备的检测.

参考文献 (References)

- 1 WANG Jun-Hua, YIN Yang et al. A Closed Orbit Measurement with the NSRI. BPM System. Proceedings of the 18th PAC (PAC99), New York 1999 May, 2048—2050
- 2 SHENG Lian-Guan, WANG Jun-Hua et al. Development of Measurement Equipment for Calibrating Beam Position Monitor in HIS Storage Ring. Proceedings of the 19th PAC (PAC2001), Chicago USA 2001 July
- 3 WANG Jun-Hua, LIU Jian-Hong et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 6:560—564 (in Chinese)
(王筠华, 刘建宏等, 强激光与粒子束, 2001, 6:560—564)

Calibration and Error Calculation for the Newly BPM System in HLS

WANG Jun-Hua SHEN Lian-Guan WANG Gui-Cheng LIU Jian-Hong

(National Synchrotron Radiation Laboratory,

University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract A vertical calibration system with the error of about $\pm 15\mu\text{m}$ for the newly eight BPMs is described here, which has been developed for the upgrade of the injection system in NSRL phase II project. A data procession to calibrate the BPM and the error calculation methods for fitting of the electric field as well as the calculating result are also presented. A commercial available Bergoz BPM Module, which works on heterodyne receiving with up to 75dB dynamic range and $1\mu\text{m}$ resolution, is introduced. With the calibration system and the data procession methods, we have completed the calibration and the inspection of the quality for newly developing eight BPMs.

Key words beam position monitor, simulating calibration, mapping, calibration coefficient of the machine