

文章编号: 2095-4980(2015)04-0670-05

环形电子束位置测量的初步研究

李春霞^{a,b}, 王冬^{a,b}, 王建新^a

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 对比研究了真空管道中环形电子束与位于束团中心的实心束在管道壁上产生的场分布, 证明束流位置探测(BPM)技术可用于电流密度均匀分布的环形电子束位置测量。采用点密度不均匀性模型, 分析了环形电子束角向不均匀性对测量精确度的影响。结果显示, 当环形电子束电流密度不均匀性为 10% 时, 对位置分辨率精确度的影响为 0.1 mm。初步开展了 BPM 系统设计, 并对纽扣电极半径和输出端口半径进行了优化设计。

关键词: 束流位置探测; 环形电子束; 不均匀性

中图分类号: TN702; TL501.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201504.0670

Preliminary investigation of position measurement of annular beams

LI Chunxia^{a,b}, WANG Dong^{a,b}, WANG Jianxin^a

(a.Institute of Applied Electronics; b. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The electric field on the wall of a circular chamber produced by an annular beam is compared with that of a pencil beam located at the same axes. It is proved that Beam Position Monitor (BPM) system can be used for position measurement of annular beams. Taking a single-point non-uniform model, the influence of the azimuthally non-uniformity on measurement accuracy is analyzed. And it is revealed that 10% single-point non-uniformity caused a 0.1 mm measurement deviation. A BPM system is preliminarily designed, and the radius of the button electrode as well as the radius of the output port is optimized.

Key words: beam position monitor; annular beam; non-uniformity

束流测量系统是任何一个加速器系统的重要组成部分, 在加速器的调试和运行过程中发挥着重要作用^[1]。环形电子束是高功率微波(High Power Microwave, HPM)器件研究中常用的电子束, 其束流位置对高功率微波器件工作效率有较大影响^[2-3]。目前对其位置及剖面测量主要采用打靶的方法, 该方法只能进行定性测量, 且不能进行在线测量。

为了对环形电子束位置进行在线定量测量, 本文开展了 BPM 技术用于环形电子束位置测量的初步研究。带电粒子束在加速器真空管道中传输, 会激发电场和磁场。粒子束能量足够高时, 激发的电磁场可以近似地认为是横向场^[4]。如果束流的位置偏离真空管道中心, 束流激发出的电磁场就会产生相应的调制。根据电磁场信号和束流位置的对应关系, 可以得到束流位置的信息。束团位置非阻拦测量即是利用这一原理, 使用束流位置探头耦合出带电粒子束的电磁场来进行束团位置的测量^[5]。

目前, 非阻拦型束流位置测量方法已经在国内外的加速器实验室得到广泛的应用, 比如: 美国 SLAC、德国 DESY、日本 SPring-8^[6]、北京正负电子对撞机 BEPC-2、合肥国家同步辐射实验室 NSRL^[7]、上海光源 SSRF 等。所用无阻拦型束流位置探测器主要分为 3 种: 纽扣型 BPM、条带型 BPM、腔型 BPM。需要测量的束流参数为: 电子能量约 500 keV, 电流约 10 kA, 电子束直径小于 44 mm, 厚度约 3 mm, 脉冲宽度小于 200 ns。根据 3 种 BPM 的特点, 本文选定纽扣型 BPM 开展环形电子束位置测量。

1 BPM 用于环形束的适用性

1.1 环形电子束测量的适用性

本节通过分析环形电子束在真空管道壁上感应电场分布判断 BPM 用于环形电子束位置测量的可行性。图 1 为环形管道中任意实心束的示意图。图 1 中采用极坐标系， \vec{b} 和 \vec{r} 分别为真空管道壁上某一点和实心束所在位置向量， φ 和 θ 分别对应它们的方位角。

为了简化分析，对电子束作如下假定：

1) $(\omega b / \beta \gamma c)^2 \ll 1$ ，其中， ω 是研究的频率， βc 为电子束速度， γ 是能量因子， b 为管道半径。在该假定条件下，电子束在管道内激励电磁场的过程为缓变过程，管道壁附近电场的求解可以相应地简化为二维静电场问题。

2) 电子束单位长度上具有单位电荷且横向电荷密度分布 $\lambda(\vec{r})$ 满足归一化条件，即：

$$\int_{S_b} d\vec{r} \lambda(\vec{r}) = 1 \tag{1}$$

如果已知位于位置 \vec{r} 处的实心束在管道壁上的场强 $e(\vec{r}, \vec{b})$ ，那么具有式(1)所示分布的电子束产生的场强为：

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = \int_{S_b} d\vec{r} \lambda(\vec{r}) e(\vec{r}, \vec{b}) \tag{2}$$

式中 \vec{a} 为电子束中心。

在环形管道中， $e(\vec{r}, \vec{b})$ 表示如下^[8]：

$$e(\vec{r}, \vec{b}) = \frac{1}{2\pi b} \frac{b^2 - r^2}{b^2 - 2br \cos(\varphi - \theta) + r^2} \tag{3}$$

根据式(2)、式(3)可得环形真空管道中环形电子束在管道壁上产生的场分布为：

$$E(0, \vec{b}) = \frac{1}{2\pi b} \tag{4}$$

该分布与位于束团中心的实心束相同，因此电流密度均匀分布的环形束可以用 BPM 开展测量。

1.2 环形电子束角向不均匀性与测量精确度

当电子束角向分布不均匀时，即使束中心与管道轴心重合，BPM 4 个电极输出信号强度也会出现强弱差别，造成测试误差。通过研究单点不均匀的束团分布提出测试系统对电子束角向均匀性的限定条件。研究模型如图 2 所示，为简化计算，进一步假定：a) 忽略电子束径向厚度，电子束半径为 r_b ；b) BPM 输出电极尺寸远小于管道半径；c) 电子束横向电荷密度分布 $\lambda(\vec{r}) = \lambda_1(r) + \kappa \delta(r - r_b) \delta(\theta - 0)$ ，其中 $\lambda_1(r)$ 代表均匀分布的环形电子束，且满足归一化条件， κ 代表不均匀电流分布，满足 $\kappa \ll 1$ 。则该束团在水平方向 2 个电极位置处的感应场强分别由 $\lambda_1(r)$ 和 κ 产生。其中，均匀环形束 $\lambda_1(r)$ 产生的场强分别为：

$$E_1(\lambda_1) = \frac{1}{2\pi b} \tag{5}$$

$$E_2(\lambda_1) = \frac{1}{2\pi b} \tag{6}$$

点电荷 κ 产生的场强分别为：

$$E_1(\kappa) = \frac{\kappa}{2\pi b} \frac{b + r_b}{b - r_b} \tag{7}$$

$$E_2(\kappa) = \frac{\kappa}{2\pi b} \frac{b - r_b}{b + r_b} \tag{8}$$

由于 BPM 输出电极尺寸远小于管道半径，电极输出信号正比于电极位置处场强，由于电荷不均匀性造成的信号偏差表示如下：

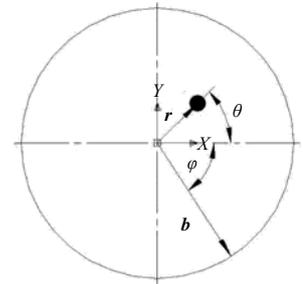


Fig.1 Arbitrary pencil beam in a circular chamber
图 1 环形管道中任意实心束

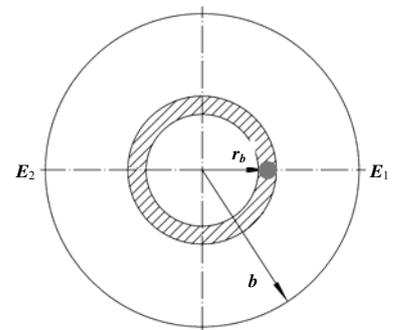


Fig.2 Single-point non-uniform beam model
图 2 单点不均匀的束团模型

$$K = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} = \frac{\left(\frac{b+r_b}{b-r_b} - \frac{b-r_b}{b+r_b}\right)}{\left(\frac{b+r_b}{b-r_b} + \frac{b-r_b}{b+r_b}\right) + \frac{2}{\kappa}} \quad (9)$$

假定 BPM 系统精确度为 r_1 ，均匀密度分布的电子束在偏心 r_1 时 2 个电极信号 E'_1 和 E'_2 分别为：

$$E'_1 = \frac{1}{2\pi b} \frac{b+r_1}{b-r_1} \quad (10)$$

$$E'_2 = \frac{1}{2\pi b} \frac{b-r_1}{b+r_1} \quad (11)$$

与此相应的 BPM 电极信号偏差表示如下：

$$K' = \frac{E'_1 - E'_2}{E'_1 + E'_2} = \frac{\left(\frac{b+r_1}{b-r_1} - \frac{b-r_1}{b+r_1}\right)}{\left(\frac{b+r_1}{b-r_1} + \frac{b-r_1}{b+r_1}\right)} \quad (12)$$

若要保证 BPM 测试精确度，则 $K \leq K'$ 。即：

$$\kappa \leq \frac{r_1(b^2 - r_b^2)}{(b^2 - r_1 r_b)(r_b - r_1)} \quad (13)$$

由于 κ 为点电荷，不能直接反映电流密度均匀性。此时，考虑电子束厚度为 $r_{b2} - r_{b1}$ ，则 $\lambda_1(r)$ 的面密度可以表示成：

$$j_1 = \frac{1}{\pi(r_{b2}^2 - r_{b1}^2)} \quad (14)$$

κ 的面密度表示为：

$$j_2 = \frac{4\kappa}{\pi(r_{b2} - r_{b1})^2} \quad (15)$$

电流密度不均匀性为：

$$\delta = \frac{j_2 + j_1}{j_1} = 1 + \frac{4\kappa(r_{b2} + r_{b1})}{(r_{b2} - r_{b1})} \quad (16)$$

根据加速器设计参数，真空管道半径为 24 mm，电子束半径为 17.5 mm~20.5 mm，假定电子束密度不均匀性为 10%，则对 BPM 精确度的影响为 0.1 mm。进一步分析式(13)可以发现， κ 随 b 和 r_b 单调变化，如图 3~图 4 所示。管道半径越大，或者电子束半径越小，电子束不均匀性对测量精确度的影响越小。

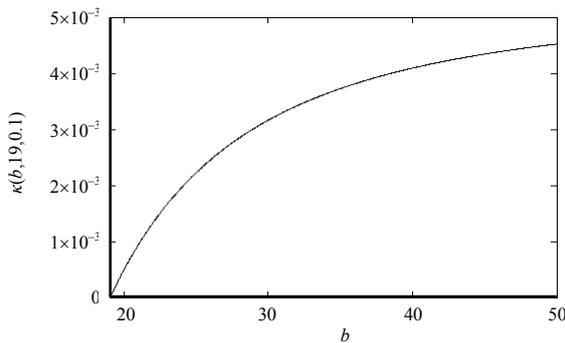


Fig.3 κ versus b
图 3 κ 随 b 变化关系

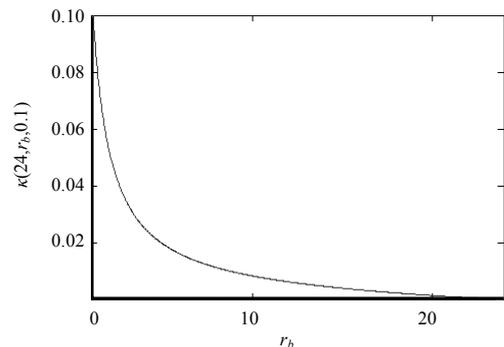


Fig.4 κ versus r_b
图 4 κ 随 r_b 变化关系

2 BPM 初步设计

2.1 基本模型

在真空管道的水平和垂直方向各放置 2 个纽扣电极，呈对称放置。建立纽扣型 BPM 结构如图 5 所示。

采用 magic 软件对 BPM 进行模拟计算，模型如图 6 所示，束流管道内部和纽扣电极的空隙部分设置为真空，管道和电极的金属部分设为理想导体，背景材料设置为真空。束流管道前端设置为阴极发射边界条件，末

端设置为金属壁，4 个纽扣电极的同轴输出端都设为波导端口(port)，分别为 port1,port2,port3, port4。仿真过程中，束压 500 kV，束流 10 kA，上升沿为 40 ns 的电子束以爆炸发射的形式从阴极端面发射出来，在引导磁场的约束下沿束流管道传输，并在输出端口激励起输出信号。

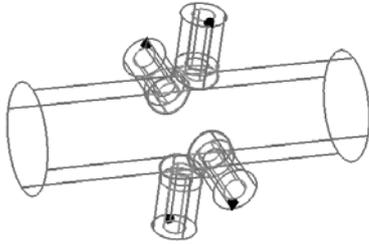


Fig.5 Button BPM model
图 5 纽扣型 BPM 模型

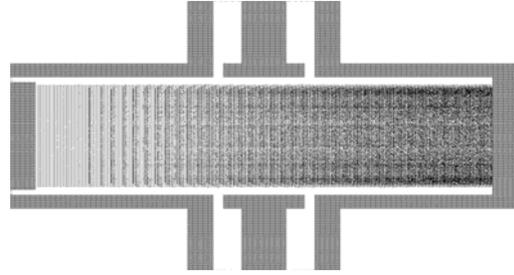


Fig.6 Magic model of BPM
图 6 BPM 的 magic 仿真模型

为了简化计算，缩短计算时间，本文定义电流前沿 40 ns，平顶 40 ns，后沿 60 ns。图 7 为电子束的位置在管道中心时 4 个电极的输出电压信号。图 7 中，4 个电极电压信号强度相等，幅度约为 124 V，大小适中。

图 8(a)为电子束偏离管道中心示意图，图 8(b)为图(a)对应的 4 个电极电压信号。由图中可以看出，当束团位置靠近电极时，对应电极感应的电压信号越强，这是由于电子束团激发的电磁场强度和距离平方成反比，距离束团越近，电磁场强度越高，感应出的信号就越强。纽扣型 BPM 就是利用这样的关系，通过信号的强弱对比来确定束团在真空管道中的位置。

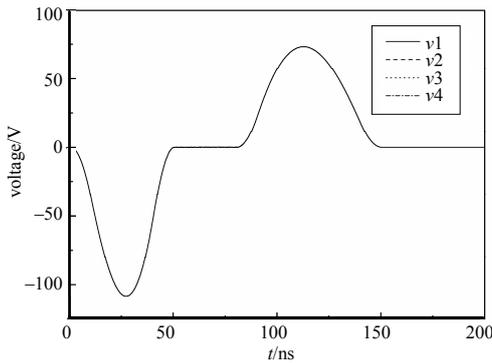
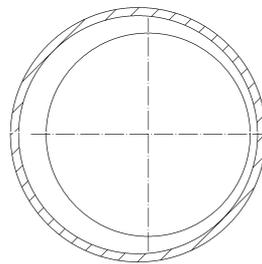
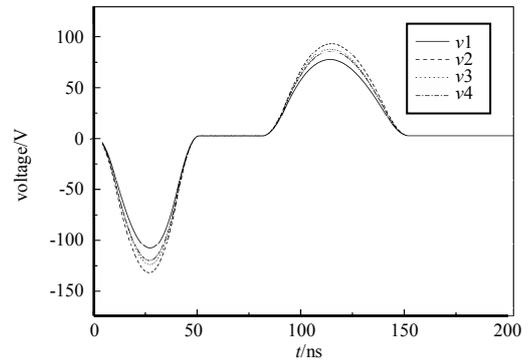


Fig.7 Output voltage waveforms of four ports when the beam center located in the center of the chamber

图 7 电子束中心点位于管道中心时 4 个电极输出波形



(a)



(b)

Fig.8 A chamber with off-center distributed beam and the corresponding output voltages
图 8 束流偏离管道中心示意图及束流偏离管道中心时电压信号

2.2 灵敏度分析

在 BPM 设计中，将电压随位置的敏感度信息定义为 BPM 的位置灵敏度。由 BPM 工作原理可知，X/Y 方向之间的位置探测是相关的，所以 X/Y 方向的位置灵敏度也相互关联，这就给位置灵敏度的设计带来了一定的困难。然而，实际应用过程中，束流中心点在 X/Y 方向都不会偏离管道中心过多，因此设计时可以单独考察 X/Y 方向的位置灵敏度。以 X 方向为例，当电子束中心点在 Y 方向偏移量为 0 时，束流位置在 X 方向扫描所获得的 X 方向 2 个电极电压分别为 U_1 和 U_3 ，对应位置偏移量为 δX ，则位置灵敏度定义如下：

$$K = 20 \log \left(\frac{U_1}{U_3} \right) / \delta X \quad (17)$$

2.3 纽扣电极半径及输出端口半径优化

根据 BPM 工作原理，端口输出电压信号大小与纽扣电极尺寸和输出端口尺寸相关。对这 2 个参数进行优化设计，首先选定输出端口半径 10 mm，优化纽扣电极半径，扫描得到端口电压及灵敏度数据如表 1 所示。

根据表 1 结果, 选择纽扣半径 8 mm 作为最佳值, 进一步对输出端口半径进行扫描, 得到端口电压及灵敏度数据表 2。

由表 2、表 3 对比可见, 纽扣电极半径和输出端口半径大小变化时, 灵敏度变化并不大, 但对信号强度的影响还是比较大的, 电极半径变大, 输出端口变大, 信号强度增强。根据灵敏度的对比和所选用同轴真空连接件的结构参数, 选择纽扣电极结构参数为: 电极半径为 8 mm, 厚度为 3 mm, 输出半径 10 mm。

3 结论

为了对环形电子束位置开展在线定量测量, 本文开展了 BPM 技术用于环形电子束位置测量的初步研究。理论分析结果显示, 环形真空管道中环形电子束在管道壁上产生的场分布与位于束团中心的实心束相同, 证明电流密度均匀分布的环形束可以用 BPM 开展测量。环形电子束角向不均匀性与测量精确度初步研究结果显示, 当环形电子束电流密度不均匀性为 10% 时, 对位置分辨率精确度的影响为 0.1 mm。本文初步开展了 BPM 系统设计, 对纽扣电极半径和输出端口半径进行了优化。

参考文献:

- [1] 冷用斌. 加速器束流诊断技术[C]// 第六届世界华人物理学会加速器学校. 北京:世界华人物理学会, 2010. (LENG Yongbin. Beam diagnostics[C]// Sixth OCPA Accelerator School. Beijing:Overseas Chinese Physics Association, 2010.)
- [2] 甘延青,黄华,雷禄容,等. S 波段相对论速调管振荡器的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(5):815-818. (GAN Yanqing,HUANG Hua,LEI Lurong,et al. Experimental investigation on an S-band relativistic Klystron oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(5):815-818.)
- [3] 向飞,李春霞,谭杰. 长脉冲高功率无箔二极管动力学模拟[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(3):831-835. (XIANG Fei,LI Chunxia,TAN Jie. Dynamics simulation on long pulse high power foilless diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(3):831-835.)
- [4] Stephen R Smith. Beam position monitor engineering[C]// AIP Conf. Proc. Argonne,Illinois,USA:American Institute of Physics, 1996:1-17.
- [5] 王建新. 基于 BPM 的束团长度测量研究[D]. 北京:中国工程物理研究院, 2012. (WANG Jianxin. Bunch length measurement based on beam position monitor[D]. Beijing:China Academy of Engineering Physics, 2012.)
- [6] Maesaka H,Inoue S,Ohshima T. Beam diagnostic system of XFEL/SPring-8[C]// Proceedings of DIPAC09. Basel, Switzerland:Paul Scherrer Institute(PSI), 2009:1-3.
- [7] 李吉浩. 合肥光源直线加速器条带 BPM 系统的研制[D]. 合肥:中国科技大学, 2006. (LI Jihao. Research of strip line BPM system at HLS LINAC[D]. Hefei,China:University of Science and Technology of China, 2006.)
- [8] Sergey S Kurennoy. Effects of transverse beam size in beam position monitors[C]// Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago,IL:IEEE, 2001:1372-1374.

作者简介:



李春霞(1983-), 女, 成都人, 学士, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率测量技术。
email:lichunxia@tsinghua.org.cn.

王冬(1981-), 男, 四川省崇州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波器件。

王建新(1984-), 男, 湖北人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为 BPM 技术。

表 1 不同纽扣半径条件下输出端口数据

electrode radius/mm	port voltage U_1/V	port voltage U_2/V	sensitivity/(dB·mm ⁻¹)
6.0	86.7	102.5	1.45
6.5	82.6	100.7	1.72
7.0	99.3	113.0	1.12
7.5	99.4	120.3	1.66
8.0	108.8	132.7	1.72
8.5	112.1	135.4	1.64

表 2 不同端口半径条件下输出端口数据

output port radius/mm	port voltage U_1/V	port voltage U_2/V	sensitivity/(dB·mm ⁻¹)
10	108.8	132.7	1.72
11	125.9	143.3	1.12
12	128.4	151.0	1.41
13	142.3	171.2	1.61