

# “神龙一号”新型束位置探测器研究\*

徐铁铮<sup>1)</sup> 谢宇彤 高峰 戴文华 谷战军 王利鸣 王华岑 李劲

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 介绍了钮扣电极的应用原理,并且在原理上与电阻环探测器作了比较,分析了这两种探测器各自的优缺点.根据原理实验的结果,重新设计了钮扣电极测量装置.对原测量盘结构上不合理的部分进行了改进,并且在新设计中考虑了“神龙一号”加速器的高真空密封.在“神龙一号”的强流束实验中,钮扣电极如实地反映了束流的波形以及束心的偏移量,其束位置曲线与电阻环曲线基本吻合,亦证明了钮扣电极的测量数据是可信的.在实验中钮扣电极的测量不确定度达到0.5mm,满足“神龙一号”强流束实验的测量需要.

**关键词** 直线感应加速器 束位探测 钮扣电极

## 1 引言

束位置监测装置是直线感应加速器的关键设备之一,它担负着监测束心位置,束流强度等很多束流参数.在加速器的调试和运行中,对于诊断加速器的运行情况和束流品质起着重要的作用.现在应用于直线感应加速器的束流位置测量手段仅有电阻环一种,它是通过测量壁电流来监测束位置的,虽然使用效果基本令人满意,但存在一定的问题,比如机械结构较复杂导致加工较困难和加工费用较高;壳体内软磁环存在无法准确定位的问题又使得束管道内部的磁轴发生偏移.磁轴偏移又是导致束流 Corkscrew 运动的重要因素之一<sup>[1]</sup>,而具有 Corkscrew 运动的束流打靶时,不仅使焦斑尺寸增长,而且引起焦斑形状的畸变,所以现在有必要发展一种结构相对简单且无磁芯的束测设备.因此我们想到了这种在世界各国的高能加速器(如储存环)上广泛应用的束测手段——钮扣电极,它具有结构简单、测量精度高、维护方便,对磁场不敏感等优点;对于强流电子直线感应加速器,还有两个突出的优点,一是无磁芯,也就不会产生磁轴的偏移;二是由于直线感应加速器的流强极大(约2kA),很可能在测试中不需要或仅需要简单的信号测量电子学系统,而这在弱流加速器上是必备的.

虽然国内外都有钮扣电极的成功应用案例<sup>[2, 3]</sup>,但它们所应用的环境(储存环)与直线感应加速器有着本质的差别.外形结构上的差别自不用说;束流参数的差别很大,合肥 NSRL 储存环束的束流属于准连续的高能弱流,束能量达到800MeV而流强仅300mA,束团长度在百ps量级;直线感应加速器的束流是强脉冲单次束,流强达到3kA,而能量在数十MeV,脉冲宽度60ns左右.在加速特性上,储存环可以只储存不加速(加速间隙仅是用来补偿辐射损失能量)或是储存到一定电流时再加速;LIA则是使用与电子束流同步的脉冲电压加速电子束流.

## 2 基本原理及模拟实验

4个钮扣电极对称放置于束流周围就可以用来探测束质心的位置.当束团长度远大于钮扣电极几何尺寸的束流从钮扣电极通过时,由于静电感应,在每片电极上会感应出一定的电量,而电量的大小与钮扣电极表面到束流几何中心的距离密切相关.电极上的感应电压可以方便地进行测量、记录分析并能精确地计算出束心位置坐标.图1是模拟实验中所采用的钮扣电极测量盘.在电极上感应的电压见式(1)<sup>[4]</sup>,其中 $d$ 是电极直径, $a$ 是束管道半径, $R$ 是负载电阻, $\bar{I}$ 是平均

2005-11-08 收稿

\* 国防科技基础研究基金资助

1) E-mail: lanceone@gmail.com

流强,  $\sigma_z$  是束团长度,  $f_0$  是束团回旋频率,  $(x, y)$  是束心坐标, 对于  $A, B, C, D$  4 个电极, 式中  $n$  分别为 3, 1, 7, 5, 如图 2.

$$\begin{cases} V_{A,B,C,D} = \frac{d^2}{8a} \frac{R\bar{I}c}{\sqrt{2\pi e\sigma_z f_0}} F(\delta, \theta_{A,B,C,D}) \\ \delta = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta_{A,B,C,D} = n \frac{\pi}{4} - \text{arctg} \left( \frac{x}{y} \right) \\ F(\delta, \theta) = \frac{a^2 - \delta^2}{a^2 + \delta^2 - 2a\delta \cos \theta} \end{cases}, \quad (1)$$

式中所表达的电极感应电压大小不仅是束流位置的函数, 还是束流强度和束团长度的函数, 这是不希望出现的, 因此定义如下的归一化电极信号<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} U = \frac{V_B + V_C - V_A - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \\ V = \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \end{cases}, \quad (2)$$

这样, 钮扣电极测量的束位置可以写成为

$$\begin{cases} x = K_x U \\ y = K_y V \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $K_x, K_y$  与探头几何形状, 安装位置等因素有关, 称之为探头系数, 它们有长度的量纲. 在理想状态下  $K_x = K_y = a/\sqrt{2}$ , 但由于实际值和理论值有一定差别, 因此每套钮扣电极 BPM 都有不同的探头系数, 需要经过标定实验确定. 应该指出探头系数  $K_x$  和  $K_y$  并不是常数, 只有当  $x, y$  较小时即束流偏心较小时,  $K_x$  和  $K_y$  才可以近似为常数. 标定实验的目的就是得到

这两个探头系数的值.

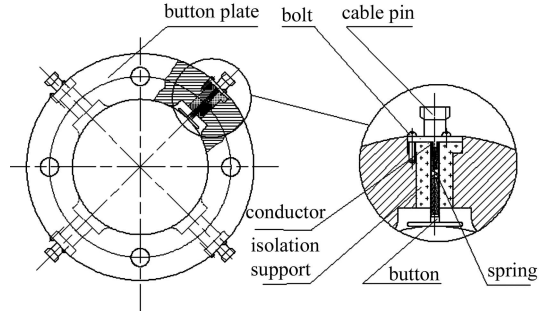


图 1 模拟实验中所采用的钮扣电极测量盘

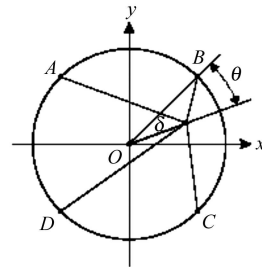


图 2 束流偏心及坐标示意图

模拟实验中采用的实验装置如图 3. 实验脉冲信号源是单线型脉冲形成线<sup>[5]</sup>, 充电电缆电长度为  $\tau$ . 首先由高压脉冲发生器对电缆充电至  $U_0$ , 然后开关  $s$  短路触发, 对负载  $R$  放电, 就可以在负载上形成一个脉宽  $2\tau$ , 幅度  $U_0/2$  的方波脉冲. 实验中利用单线型脉冲形成线形成了脉宽 60ns, 幅度 6.5kV 的方波脉冲. 用于模拟束流的铜棒可以在  $x, y$  方向精确地给予一个偏心率, 偏心率变化范围在 0—5mm, 最小变化量 0.5mm.

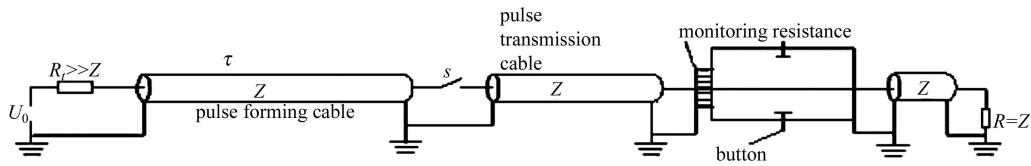


图 3 单线结构实验装置简图

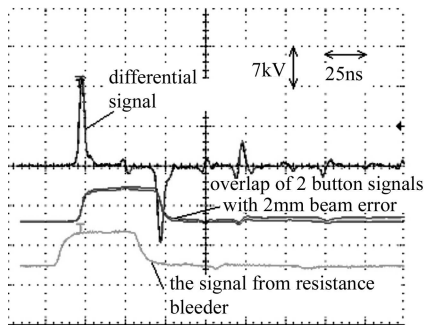


图 4 偏心量为 2mm 时两个正对探头的电压波形

在模拟实验中, 铜棒偏心值在 0—5mm 范围内, 间隔 0.5mm, 共 11 个值, 进行测量, 利用 Tek654c 示波器记录实验波形和数据, 实验波形见图 4, 图 4 中间的方波是当铜棒偏心 2mm 时两个正对探头上测得的波形叠加. 由图 4 可见, 两路积分波形平顶幅度已经有较明显的差距. 在处理数据中, 利用数值计算软件 Matlab 对微分信号进行数值积分, 取积分信号平顶各点值得平均值, 作为有效计算值进行计算. 利用 Matlab 对真实偏心值和归一化电压值进行拟合, 可得到一条曲线; 曲线方程中的一次项系数即为探头系数;  $x$  和  $y$  方向的

拟合方程分别为

$$\begin{aligned} x &= 57.65U - 0.031, \\ y &= 53.73V - 0.042. \end{aligned} \quad (4)$$

为了验证实验所得探头系数的真实性, 再重新测量一组数据, 算出  $U$  和  $V$ , 从而得到测量值  $x_m$  和  $y_m$ , 并得到相对误差. 验证数据见表1.

表1 验证数据

(a) $y$ 坐标				
number	$y$	$V$	$y_m$	relative error(%)
1	-0.5	0.009	-0.54	8
2	-1	0.018	-1.03	3
3	-1.5	0.028	-1.55	3.3
4	-2	0.038	-2.1	5
5	-2.5	0.047	-2.57	2.8
6	-3	0.058	-3.2	6.7
7	-3.5	0.062	-3.41	2.6
8	-4	0.075	-4.1	2.5
9	-4.5	0.082	-4.68	4
10	-5	0.095	-5.19	3.8
(b) $x$ 坐标				
number	$x$	$U$	$x_m$	relative error(%)
1	-0.5	0.009	-0.53	6
2	-1	0.018	-1.04	4
3	-1.5	0.026	-1.55	3.3
4	-2	0.036	-2.08	4
5	-2.5	0.043	-2.52	0.8
6	-3	0.054	-3.11	4
7	-3.5	0.056	-3.24	7
8	-4	0.070	-4.05	1.3
9	-4.5	0.078	-4.51	0.22
10	-5	0.087	-5.06	1.2

从拟合方程和验证数据看出, 束流偏心与归一化电压值基本上成线性关系, 也就是说, 探头系数  $k_x$ ,  $k_y$  是常数. 实验数据和验证数据吻合得很好, 各点的相对误差大多在5%以下, 个别点误差稍大是在实验中随机产生的.

### 3 结构设计改进

随着对钮扣电极探测器的深入研究, 发现在模拟实验中采用的测量盘在结构上存在很多不合理的地方, 见图1局部放大图<sup>[6]</sup>: 1) 钮扣电极片背面与测量盘盘体有部分面积正对且距离很近, 这里就使得钮扣电极与地形成了一个较大的杂散电容; 2) 测量盘上安装钮扣电极探头的通孔部分并未与钮扣电极的电极杆设计为与传输电缆插头及电缆阻抗匹配 ( $75\Omega$ ); 3) 电缆插头与电极之间存在一过渡弹簧, 此弹簧又在信号传输过程中形成了较大的杂散电感; 4) 铜质电极杆与

有机玻璃配合容易导致有机玻璃磨损, 从而影响四探头的对中精度. 针对以上几点, 对钮扣电极在设计上作了一些改动, 图5是改进后盘体上钮扣电极安装通孔处的局部放大图, 新的设计采用了阻抗匹配设计, 导体内置弹簧, 金属螺纹连接等结构, 基本解决了旧设计中不合理的地方. 另外为了适应“神龙一号”直线感应加速器的高真空环境 (约  $5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ), 在连接部位增加了安放密封用O型橡皮圈的槽, 这样的设计既可以实现密封高真空, 还可避免购买昂贵的高真空电缆插座.

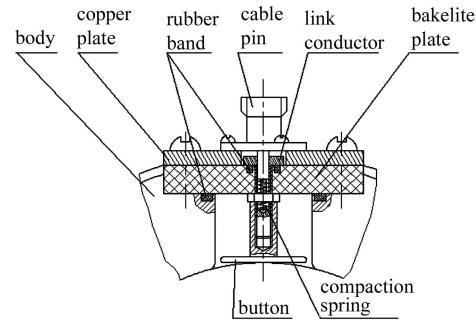


图5 改进设计

### 4 对“神龙一号”真实束流实验

现阶段, 由于对新型束位置探测器对强流直线感应加速器真实束流的探测能力还不了解, 因此在实验中需要有参考比对的波形和数据, 就是说需要把现在应用的在直线感应加速器的电阻环探测器作为参照系统, 将钮扣电极的测试结果和电阻环的测试结果进行比较. 当这两者的测试结果吻合才能证明钮扣电极对强脉冲束流的测量是可信的.

我们的方案是将钮扣电极和电阻环同时安装在同一个位置紧贴在一起, 探头位置相距约40mm, 这样在测量中可以近似地认为它们是对相同品质和参数的束流进行测量. 对比波形见图6和图7. 由波形可见钮扣电极与电阻环波形基本相似, 并且能将前后沿的细节较好地反映出来, 并且由于束位置偏心的存在, 波形幅度有明显的差距. 电阻环波形的幅度在25—28V之间, 钮扣电极波形幅度在40V左右, 钮扣电极的信噪比是优于电阻环的. 利用示波器数据可以得到束流偏心的  $x$ ,  $y$  坐标曲线, 如图8. 图中曲线反映的是在80—130ns这段时间内的束心偏移量, 这段时间正是束流平顶的时间范围. 由曲线可以看出束流越接近平顶中间部分越稳定, 而靠近前后沿则偏心量变化较大. 与电阻环  $x$ ,  $y$  坐标曲线对比见图9, 从曲线对比可以看出: 钮扣电极和电阻环的束位置曲线基本是可以重

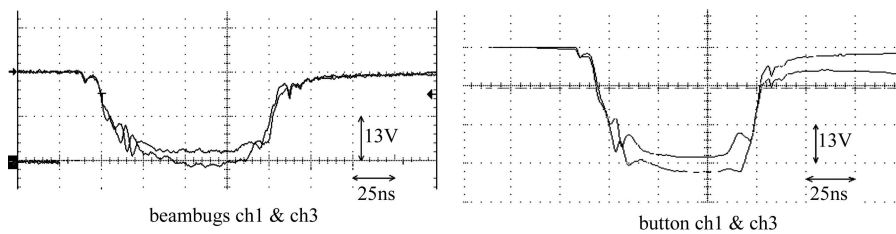


图6 电阻环和钮扣电极一、三路波形对比

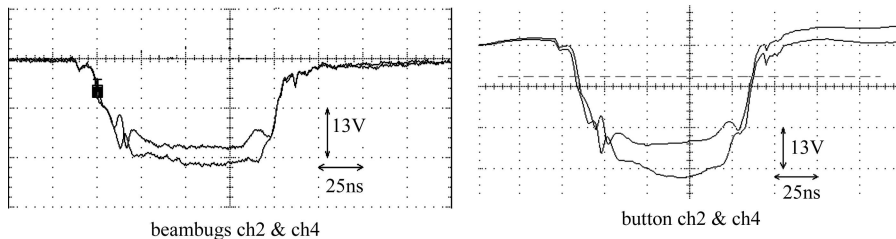


图7 电阻环和钮扣电极二、四路波形对比

合的,这也证明了钮扣电极的测量数据是可信的;钮扣电极曲线更为光滑。

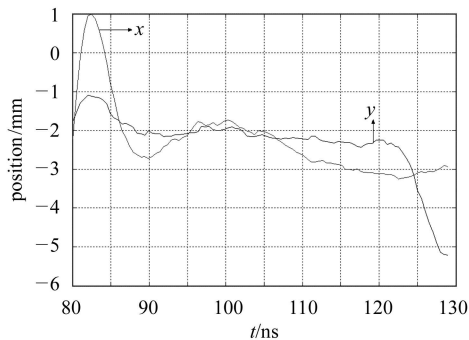
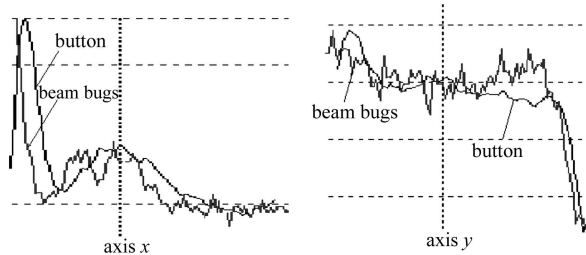
图8  $x, y$ 方向束心偏心量曲线

图9 钮扣电极与电阻环束位置曲线对比

## 5 探头布局与坐标设置

在实验中,钮扣电极的摆放位置受加速器结构限制,并非理想的 $45^\circ$ 对称放置,因此在处理数据中需要进行必要的坐标变换,探头布局和坐标设置见图10,其中 $(x_1, y_1)$ 称为计算坐标系,利用上文中式(3)计算得到的即是在此坐标系下的束位置坐标;我们所需要

的是在目标坐标系 $(x, y)$ 下的坐标值,因此需要将 $(x_1, y_1)$ 进行如下的坐标变换:

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha - y_1 \sin \alpha \\ y = y_1 \cos \alpha + x_1 \sin \alpha \end{cases}, \quad (5)$$

在实验号为6327的实验中与钮扣电极放在同一位置的20号电阻环测得的束位置偏差为

$$x = -2.1\text{mm} \quad y = -2.75\text{mm}$$

钮扣电极测得的束位置偏差为

$$x = -2.02\text{mm} \quad y = -2.70\text{mm}$$

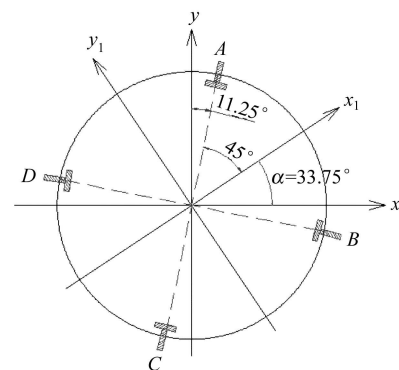


图10 探头布局和坐标设置

## 6 结论

钮扣电极对“神龙一号”真实束流的探测实验取得成功,并且经过与电阻环测试数据和曲线的比较,说明钮扣电极的测试数据是有效的,测量结果是可信的。实验波形和数据都证明钮扣电极完全可以应用于

强流直线感应加速器的束位置探测,并且在无磁芯不影响磁轴对中的条件下保证测量的精度;且钮扣电极对束位置偏差的分辨力、抗干扰能力及信噪比皆优于

电阻环.从现在的实验结果看,此探测器还有很大的改进空间,比如四探头的定位方法和信号接收处理的电子学.

### 参考文献(References)

- 1 SHI Jin-Shui. Corkscrew Motion and Its Prevention in Linear Induction Electron Accelerator. Engineering Doctor paper of Tsinghua University, 2002 (in Chinese)  
(石金水. 直线感应电子加速器中的Corkscrew运动及抑制. 清华大学工学博士学位论文, 2002)
- 2 MA Li, SHI Ping. Upgrade of the BPM System for the BEPC Storage Ring. Proceeding of 1998. IEEE, **80**(4): 2075—2077
- 3 Hinode F. A Conventional Read-Out Electronics for the Button-Type BPM in the ATF Damping Ring. Proceeding of 1998. IEEE, **80**(2): 578—580
- 4 Tsumoru Shintake, Masaki Tejima. Sensitive Calculation of Beam Positon Monitor Using Boundary Element Method. Nuclear Instruments and Methods, 1987, **A254**: 146—150
- 5 Pai S T, ZHANG Qi. Introduction to High Power Pulse Technology. Singapore: World Scientific, 1998. 102—103
- 6 XU Tie-Zheng, WANG Hua-Cen, XIE Yu-Tong et al. High Powar Laser and Paticle Beams, 2004, **16**(1): 91(in Chinese)  
(徐铁铮, 王华岑, 谢宇彤等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 91)

## Research on New BPM Used to “Dragon I”<sup>\*</sup>

XU Tie-Zheng<sup>1)</sup> XIE Yu-Tong GAO Feng DAI Wen-Hua GU Zhan-Jun  
WANG Li-Ming WANG Hua-Cen LI Jing

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The principle of beam position monitoring of button was introduced briefly. It was compared with beam bugs in principle. Based on the result in simulation experiment, a new structure of button was design, and some mistakes in the primary design was correctted. In the realy beam experiment of “Dragon I”, the beam waveform and position were monitored. Compared the position curve between button and beam bugs, that indicated the data that got form button is credible. In the experiment, the button have an accuracy of 0.5mm, which is adequate for beam position measurement of “Dragon I”.

**Key words** linear induction accelerator, BPM, button

Received 8 November 2005

<sup>\*</sup> Supported by National Defence Science Foundation of China

1) E-mail: lanceone@gmail.com