

束流位置探头用于束团电荷量测量的 数值仿真研究

张佰春^{1,2} 冷用斌¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 加速器常用的束流位置探头为电磁耦合型,其输出信号包括束流位置信息和束团电荷量信息。本文采用数值仿真方法研究探头电极和信号与束流位置之间的关系,基于 Matlab 开发一个用于仿真计算探头电荷量标定系数的软件包。对上海光源储存环束流位置探头的仿真结果表明,探头流强标定系数在 2.5 mm 半径内差值小于千分之二,在此精度范围内可认为流强标定系数为常数。

关键词 束流位置探头,上海光源,电荷量测量,有限元法

中图分类号 TL506

束流测量系统是加速器正常运转的关键^[1]。束流的位置、流强的实时检测,须在加速器的相关部位安装束流位置探头。探头电极感应信号包含束团的位置信息和电荷量信息,探测系统用归一化和多项式拟合法从束团信息求出束流的等效位置。束团电荷量和电极输出电压信号的强弱关系密切,若束流位置不变,电极输出信号强就意味着束团电荷量大,反之亦然。这种情况下,一个电极信号就可得到束团电荷量信息,一些精度要求不高的反馈系统通常使用单探头反馈信号反映流强值。然而加速器运行时,单一探头信号大小不能正确反映束流位置的实时变化,须用束流位置探头确定流强值。四电极束流位置探头根据四探头信号归一化及拟合得到等效的位置信息,用信号强度确定流强,这是束流测量系统的一大改进。

1 需求分析

束流位置探头输出信号中提取束团电荷量信息的算法如下:

$$Q = K_Q(x, y) \times V_{\text{SUM}} \quad (1)$$

式中, Q 为束团电荷量, V_{SUM} 为该束团穿过束流位置探头时探头所有电极输出信号之和, $K_Q(x, y)$ 为该探头的电荷量标定系数。 x 为束团运动的法平面内的水平坐标轴, y 为垂直坐标轴。本文研究电荷量标定系数 K_Q 与束团位置 (x, y) 之间的关系。

目前较多使用八边形真空盒四纽扣电极,为开展全信息束流探头诊断技术研究,设计了八电极探头,处理算法须既能计算八边形真空盒的输出信号与束流流强的精确关系,又能对八电极探头的信号具有同样的处理能力。由于装配精度的影响,理论计算出的束团电荷量会和实际有差别,这些因素在信号处理算法中很难考虑,需实验校正。

2 系统设计与实现

2.1 算法简介

高能带电粒子束电场只有横向分量^[1],真空管壁上的感应电荷分布与无限长均匀带电线在束流位置上产生的感应电荷分布一致。自由电荷分布在纵向上的平移对称性^[2],感应电荷分布及全空间电势分布在纵向上也平移不变,因此该问题由二维 Poisson 方程描述:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial^2 y} = -\frac{\rho_f \delta(x_0, y_0)}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\varphi|_{\text{inner wall}} = 0 \quad (3)$$

式中, ρ_f 为束流在该横截面上的电荷密度。用有限元方法^[3,4]求出真空盒壁的感应电荷分布,将壁面分成足够小的线元,线元处的感应电荷可视为点电荷,以每一线元的感应电荷量联立多元方程组,求解各线元上的感应电荷量。电极上感应电荷总量 $q(t)$ 为:

第一作者:张佰春,男,1982年出生,2006年毕业于清华大学工程物理系核工程与核技术专业,现为硕士研究生

收稿日期:2008-12-30,修回日期:2009-02-27

$$q(t) = \int_r \int_{\sqrt{r^2-s^2}}^{\sqrt{r^2-s^2}} f(\theta, x_0, y_0) dl \cdot q(s, t) ds \quad (4)$$

式中, r 为电极半径, ds 为束流运动方向, $dl \perp ds$, $f(\theta, x_0, y_0)$ 是感应电荷相对分布。由于束团长度远大于电极直径, 故可忽略束团经过探头时真空盒不同纵向截面的感应电荷变化。

$$q(t) = 2f(\theta, x_0, y_0) \cdot \int_r \sqrt{r^2 - s^2} \cdot q(s, t) ds \quad (5)$$

由式(4), 将得到的真空盒某一截面的感应电荷分布在电极所处纵向空间内扩展, 得到整个电极圆面上感应电荷总量。

实际束团经束流位置探头时, 电极表面先充电后放电, 电极输出一脉冲信号^[5], 该信号在时域积分值为零, 模拟计算中取脉冲信号的绝对值积分。理想情况下该值两倍于探头表面感应电荷, 但考虑到探头及传输线的效率问题, 具体关系由实验标定。

改变束流位置, 逐一求出各位置的四个探头截面上的感应信号, 用多项式拟合的方法反求出由探头柱面感应电荷量表达的束团位置与束团电荷量的关系, 即探头信号处理算法。

2.2 程序流程及界面介绍

参照上述方法在 Matlab 平台开发一个用于 BPM 探头电荷量标定系数仿真计算的软件包, 它可处理任意尺寸的内壁为八边形的四纽扣电极探头及内壁为四边形的八纽扣电极探头, 其流程图如图 1。

用户输入欲计算探头的形状参数, 根据精度设置有限元长度后即可开始仿真计算。多点模拟计算过程用的时间较长, 使整个软件包完整计算某种探头输出信号与束团电荷量关系的时间较长, 但探头设计定型后, 这一关系也已确定, 探头信号处理部分只需按本程序段的关系式设计软硬件, 因此实际探头信号处理系统算法比本软件包的要简单。

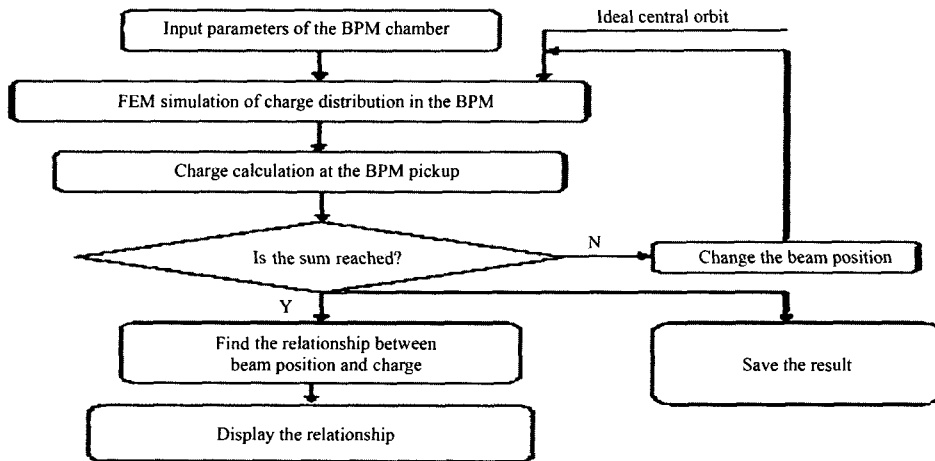


图 1 软件流程图
Fig.1 Diagram of the software.

软件包用户界面如图 2 所示, 用户通过输入界面定义八边形四电极探头的形状参数及有限元长度, 参数设置完成后点“开始计算”按钮, 程序进入模拟计算, 完成后在图形窗口输出束团位置对应的四电极和信号束团电荷量比值。该软件包提供了一种四边形能同时求出束团位置、束团电荷量及横向截面形状因子的八电极真空盒的模拟计算。

2.3 调试及结果分析

有限元分割计算是该软件包的重点, 线元的分

割长度及分割方法都会影响结果的正确性, 调试过程中除对程序语句的检查还要输出壁面感应电荷分布的结果。

以上海光源储存环束流位置探头为例, 图 3 为探头处的八边形真空盒截面形状, 金属边界有限元分割的划分起点从 a 开始, 顺时针方向分割真空室壁。当设置线元长度为 0.05 mm 时结果较理想, 此时划分线元总数为 4066, 壁面上的总感应电荷为 0.9998 (计算时输入的自由电荷量为 1), 理论相对误差为 0.0002。

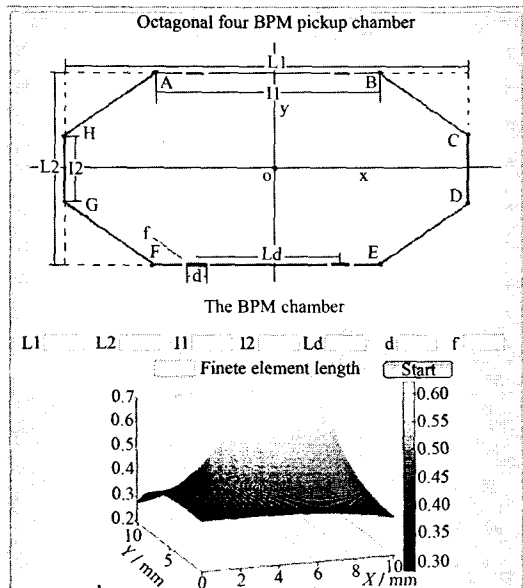


图 2 四电极真空盒计算图形界面
Fig.2 User panel of the software.

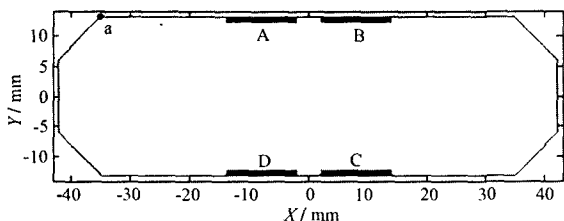


图 3 上海光源储存环束流位置探头真空室截面, A、B、C、D 为电极, 有限元分割从 a 开始顺时针进行
Fig.3 Cross section of a BPM chamber in the SSRF storage ring. A, B, C and D are the electrodes. The FEM simulation begins clockwise from a.

图 4 为束团经过理想中心轨道时真空盒壁面感应电荷的分布图, L 为真空盒壁面从 a 点开始的顺时针周长。

用开发完成的软件包对上述束流探头的电荷量标定系数进行仿真计算, 图 5 以等高线形式显示了真空盒截面第一象限内 K_Q 的计算结果, 其余象限的 K_Q 分布与此对称。图中坐标原点为探头几何中心位置, 各点的 K_Q 值以坐标原点的为参考进行归一化。

图 5 中 K_Q 值的分布表明(记束团中心位置到探头几何中心位置的距离为 R):

- (1) 探头的中心区域($R < 2$ mm) K_Q 的梯度较小, 在电极附近区域 K_Q 的梯度极大;
- (2) 沿 x 或 y 轴线方向 K_Q 值随 R 的增大而增大, 沿真空盒对角方向 (接近 45°) K_Q 值随 R 的增大而减小。

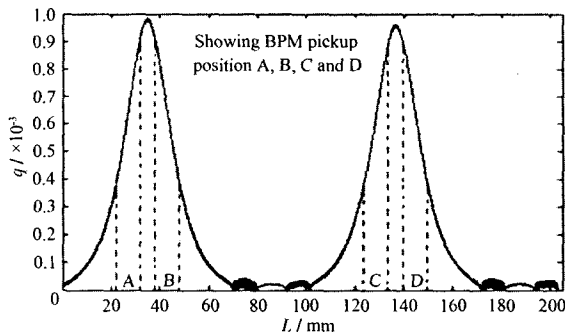


图 4 真空室内壁感应电荷分布图, L 为真空盒壁面从 a 点开始的顺时针周长
Fig.4 Inner wall charge distribution of the BPM chamber. L is the clockwise length from point a in Fig.3.

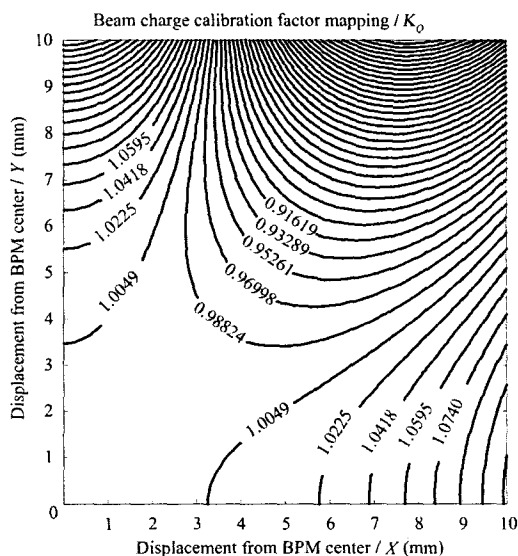


图 5 流强标定系数计算结果
Fig.5 K_Q mapping.

对在线测量系统, 希望能找到合适的边界条件用一个常数 K_{Q0} 替代函数 $K_Q(x,y)$, 以简化算法提高实时性能。为此要定量分析, 以 x 轴为 0 度轴, 分别绘出半径 3 mm 内最具代表性的 0° 、 25° 、 45° 、 72° 和 90° 方向的 $K_Q(R)$ 曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 如果以探头几何中心的 K_Q 值作为 K_{Q0} 替代其它位置处的 K_Q 值, 束流在 x, y 轴线 (0° 、 90°) 附近偏离中心会导致电荷量测量值偏低, 而在 25° – 72° 间偏离中心会导致电荷量测量值偏高。但在 2.5 mm 半径范围内 K_Q 值的相对变化小于 $\pm 0.1\%$ 。因此, 如果测量过程中能保证不同束团在法平面内穿越探头的位置不变, 或能保证不同束团都在探头中心区域内穿过, 则可认为流强标定系数为常数; 否则, 根据探头电极和信号计算束团电荷量时必须对位置因子修正。

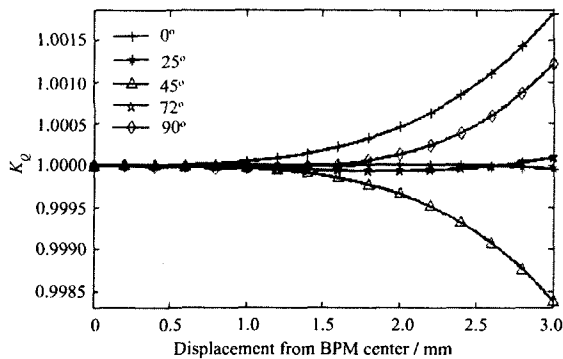


图6 流强标定系数 K_Q 与偏心距离 R 的依赖关系
Fig.6 The relationship between K_Q and R .

3 结束语

本文采用有限元方法对束团电荷量信息提取算法进行数值仿真研究,开发完成了一个通用的计算束流位置探头流强标定系数的软件包。针对上海光源储存环所用真空室截面为八边形的纽扣电极型探头的仿真计算结果表明,当束流从探头几何中心附近穿过时,半径 2.5 mm 范围内流强标定系数变化小于 $\pm 0.1\%$ 。如果能确保测量过程中束流轨道保持在真空室几何中心为圆心 2.5 mm 半径的范围内,流强标定系数在 $\pm 0.1\%$ 精度下可看作常数。这一仿

真结果对将投入调试运行的上海光源储存环逐束团电荷量监测系统具有重要的指导意义。

参考文献

- 1 袁任贤. 束流位置测量的研究及其在 BEPC II 中的应用. 博士论文
YUAN Renxian. Study and Application of Beam Position Measurement in BEPC II
- 2 陈佳洱主编. 加速器物理基础. 北京: 原子能出版社, 1993
CHEN Jiaer. Accelerator physics foundation. Beijing: Atomic Energy Press, 1993
- 3 张国瑞. 有限元法. 北京: 机械工业出版社, 1991
ZHANG Guorui. Finite element method. Beijing: Machinery Industry Press, 1991
- 4 王勳成, 劭敏. 有限单元法基本原理与数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1988
WANG Xucheng, SHAO Min. The basic principles of finite element method and numerical methods. Beijing: Tsinghua University Press, 1988
- 5 Shafer R E. Beam Position Monitoring. Los Alamos National Laboratory

Simulation of beam bunch charge measurement using BPM pickup

ZHANG Baichun^{1,2} LENG Yongbin¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Electromagnetic coupling electrode is the most popular pickup to monitor beam position of an accelerator. The output signals of BPM pickup carry not only beam position information but also beam bunch charge information. Based on a study to have a better knowledge of the relationship between sum signal of electrodes and beam charge using finite element method, we developed a Matlab software package to calculate bunch charge calibration factor for different type of BPM pickup. Simulation for the storage ring BPM pickup of SSRF showed that bunch charge calibration factor variation is less than $\pm 0.1\%$ within 2.5 mm radius of pickup center.

Key words BPM pickup, SSRF, Bunch charge measurement, Finite element method

CLC TL506