

合肥 800MeV 电子储存环测量四极铁磁中心的初步研究*

孙葆根 何多慧 徐宏亮 李京祎 金正芳
卢平 王筠华 王琳

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 对四极铁的直流 K 调制进行了理论分析和推导,并采用可开关的电阻分流法构成基于束流准直系统.该技术不仅可以测量束流位置检测器(BPM)相对相邻四极铁磁中心的位置,还可以进行储存环的 β 函数测量.给出了合肥光源基于束流准直系统的一些测量结果.

关键词 基于束流准直 四极铁分流 磁中心 β 函数

1 引言

在电子储存环中,人们往往希望将束流轨道穿过四极铁的磁中心.如果束流偏离四极铁的中心,它将受到一个二极分量的踢力,这样四极铁将对束流轨道产生扰动.当束流轨道穿过四极铁的磁中心时,不仅四极铁不会对轨道产生扰动,而且可以使由于四极铁电源不稳定性引起的轨道扰动最小,从而提高束流的稳定性和束流品质.因此,人们非常希望能够测量四极铁的磁中心,以此作为轨道的参考点,使得轨道校正尽可能地让束流轨道穿过四极铁的磁中心.

在电子储存环中,由于大部分束流位置检测器(BPM)通常安装在四极铁附近,所以可以采用基于束流准直(BBA)技术测量 BPM 相对相邻四极铁磁中心的位置.近年来,国内外许多实验室^[1-6]都非常重视开展这一技术的研究和应用.

在合肥 800MeV 电子储存环,共有 32 块四极铁,有 8 组四极铁电源,每组电源给 4 块四极铁串联供电.为了实现四极铁的 K 值单独可调,我们采用了可开关的电阻分流法构成基于束流准直系统.该系统不仅可以测量 BPM 相对相邻四极铁磁中心的位置,还可以进行储存环的 β 函数测量.

2001-04-06 收稿

* 国家计委重大科研项目“国家同步辐射实验室二期工程”资助

2 理论分析

电子储存环有 N 块四极铁时,记束流轨道中心分别偏离它们的磁中心位置为 u_{q_i} ($i = 1, \dots, N$),则轨道偏差^[7]为

$$u_c(s) = \frac{\sqrt{\beta(s)}}{2\sin\pi\nu} \sum_i K_i l_i u_{q_i} \sqrt{\beta_i} \cos[\phi(s) - \phi_i - \pi\nu]. \quad (1)$$

如果改变第 n 块四极铁聚焦强度,即直流 K 调制,记 $\hat{K}_n = K_n + k_n K_n$,并记直流 K 调制当忽略直流 K 调制引起 ν, β 和 ϕ

$$\Delta u_{q_i} \approx \frac{\sqrt{\beta_i}}{2\sin\pi\nu} \left[K_n l_n k_n u_{q_n} \sqrt{\beta_n} \cos(\phi_i - \phi_n - \pi\nu) + \sum_j K_j l_j \Delta u_{q_j} \sqrt{\beta_j} \cos(\phi_i - \phi_j - \pi\nu) \right].$$

我们将上式用矩阵表示

$$\begin{aligned} \Delta U_q &\approx B_n \cdot k_n u_{q_n} + C \cdot \Delta U_q, \\ \Delta U_q &= (\Delta u_{q_i})_{N \times 1}, \end{aligned} \quad (3)$$

这里,

$$\begin{aligned} B_n &= (b_{in})_{N \times 1}, \quad b_{in} = \frac{\sqrt{\beta_i} \sqrt{\beta_n}}{2\sin\pi\nu} K_n l_n \cos(\phi_i - \phi_n - \pi\nu), \\ C &= (c_{ij})_{N \times N}, \quad c_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2\sin\pi\nu} K_j l_j \cos(\phi_i - \phi_j - \pi\nu), \end{aligned} \quad (4)$$

则

$$\Delta U_q \approx (I - C)^{-1} B_n \cdot k_n u_{q_n}.$$

记
则

$$D_n = (I - C)^{-1} B_n = (d_{in})_{N \times 1},$$

$$\Delta U_q \approx D_n \cdot k_n u_{q_n}. \quad (7)$$

由式(7)可知,直流 K 调制前后的四极铁处轨道偏差 ΔU_q 正比于直流 K 调制的四极铁的磁中心与束流轨道的偏差 u_{q_n} ,其关系由系数矩阵 D_n 决定.

由于四极铁处的束流轨道通常用四极铁相邻的 BPM 进行测量,BPM 的个数为 M (一般 $M \leq N$),记与第 i 块四极铁相邻的 BPM 读数为 u_{BPM_i} ($i = 1, \dots, M$),则 $u_{\text{BPM}_n} = u_{q_i} + u_{\text{qioffset}}$,其中 u_{qioffset} 称为第 i 块四极铁的束基磁中心.

四极铁处的束流轨道通常用四极铁相邻的 BPM 进行测量,记与第 i 块四极铁相邻的 BPM 读数差为 Δu_{BPM_i} ,即 $\Delta u_{q_i} \approx \Delta u_{\text{BPM}_i}$. 而第 n 块四极铁的邻近 BPM 在直流 K 调制前的读数为 u_{BPM_n} ,即 $u_{\text{BPM}_n} = u_{q_n} + u_{\text{qnoffset}}$,其中 u_{qnoffset} 称为该四极铁的束基磁中心. 考虑到 BPM 的个数为 M (一般 $M \leq N$),记 $\Delta U_{\text{BPM}} = (\Delta u_{\text{BPM}_i})_{M \times 1}$, $D_{nM} = (d_{in})_{M \times 1}$,则

$$\Delta U_{\text{BPM}} \approx D_{nM} \cdot k_n (u_{\text{BPM}_n} - u_{\text{qnoffset}}). \quad (8)$$

这里, D_{nM} 是 D_n 的子矩阵.

根据以上分析,四极铁束基磁中心可用以下方法测量:

(1) 单点测量算法:由式(8)可知,一旦确定系数矩阵 D_{nM} ,则可根据测量的轨道偏差 ΔU_{BPM} 和 u_{BPM_n} 计算得到 $u_{q\text{offset}}$. 系数矩阵 D_{nM} 由式(4)和(6)计算,它由储存环的 Lattice 参数(如 ν 值、 β 函数和相位)和四极铁参数决定. 实际上,由于各种磁场误差存在,储存环的 β 函数和相位实际值与理论值并不相等,而且 β 函数和相位也难以准确测量,所以往往不采用该方法;

(2) 多点测量直线拟合法:由式(8)知,当束流通过待测四极铁的束基磁中心时,即 $u_{\text{BPM}_n} = u_{q\text{offset}}$, $\Delta U_{\text{BPM}} \approx 0$. 由系数矩阵 D_{nM} 的计算公式知, d_{in} ($i = 1, \dots, M$) 与轨道参数无关,即闭轨随 $(u_{\text{BPM}_n} - u_{q\text{offset}})$ 线性变化. 所以,可以采用多点测量直线拟合法,通过改变校正铁作局部凸轨调整束流在待测四极铁中位置,并测量 ΔU_{BPM} 和 u_{BPM_n} , 得到 5—7 组数据,然后选择闭轨变化最大的 BPM 数据和 u_{BPM_n} 作直线拟合,则拟合直线的过零点的 u_{BPM_n} 值就是该四极铁的束基磁中心 $u_{q\text{offset}}$;

(3) 多点测量抛物线拟合法:记所有 BPM 测量的轨道变化的均方根值为 f_n ,称之为品质因子,可表示为

$$f_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Delta u_{\text{BPM}_n}^2 \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_{in}^2 k_n^2 (u_{\text{BPM}_n} - u_{q\text{offset}})^2 = F_n (u_{\text{BPM}_n} - u_{q\text{offset}})^2, \quad (9)$$

其中, $F_n = \frac{k_n^2}{M} \sum_{i=1}^M d_{in}^2$, 仅由 Lattice 参数和四极铁参数决定,与轨道无关. 所以, f_n 与 u_{BPM_n} 呈抛物线变化. 这样,如果通过校正铁作局部凸轨来改变束流在待测四极铁中的位置,并测量 5—7 个轨道变化的值,得到 5—7 组 f_n 与 u_{BPM_n} 数据,则可以通过抛物线拟合,由 f_n 的最小值点计算出四极铁束基磁中心 $u_{q\text{offset}}$.

当考虑 ν , β 和 ϕ 的变化时,式(8)需要修正为^[8]

$$\Delta U_{\text{BPM}} \approx D_{nM} \cdot k_n (u_{\text{BPM}_n} - u_{q\text{offset}}) + E_M \cdot U_q, \quad (10)$$

这里, E_M 是 E 的子矩阵, $E = (I - C)^{-1} A = (e_{ij})_{N \times N}$, $U_q = (u_{qi})_{N \times 1}$,

$$A = (a_{ij})_{N \times N}, a_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin \pi \nu} K_j l_j \cos(\varphi_i - \varphi_j - \pi \nu) \left[\frac{\Delta \beta_i}{2 \beta_i} + \frac{\Delta \beta_j}{2 \beta_j} - \frac{\pi \Delta \nu}{\tan \pi \nu} - (\Delta \phi_i - \Delta \phi_j - \pi \Delta \nu) \tan(\phi_i - \phi_j - \pi \nu) \right].$$

这时,为了提高测量精度,必须减小所有四极铁的磁中心与其束流轨道的偏差 u_{qi} ($i = 1, \dots, N$),并用多点测量抛物线拟合法进行数据处理.

在考虑 ν , β 和 ϕ 的变化情况下,式(9)的品质因子可以写成

$$f_n = f_{n0} + F_n (u_{\text{BPM}_n} - u_{q\text{offset}} + u_{\text{error}})^2. \quad (11)$$

这里, $f_{n0} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\sum_{j=1}^N e_{ij} u_{qj} \right)^2 - \frac{1}{M} \left[\sum_{j=1}^M d_{in} \left(\sum_{j=1}^N e_{ij} u_{qj} \right) \right]^2 / \sum_{i=1}^M d_{in}^2$, 是由所有四极铁的磁中心与其束流轨道的偏差决定.

$u_{\text{error}} = \frac{1}{k_n} \sum_{i=1}^M d_{in} \left(\sum_{j=1}^N e_{ij} u_{qj} \right) / \sum_{i=1}^M d_{in}^2$, 是由所有四极铁的磁中心与其束流轨道的偏差决定.

由式(11)知,在考虑 ν , β 和 ϕ 的变化且所有四极铁的磁中心与其束流轨道存在偏差情况下, u_{error} 项将影响测量精度, f_{n0} 项表示品质因子的最小值不为零.

3 硬件组成

通过以上理论分析可知,基于束流准直技术的核心是单个四极铁的 K 值可调.在合肥800MeV电子储存环,由于四极铁不能单独供电,所以必须增加相应 K 调制电路来实现四极铁的 K 值单独可调.四极铁的 K 调制可以有两种方式,即直流 K 调制和交流 K 调制,我们选用电阻分流法实现四极铁的直流 K 调制.该基于束流准直系统由可开关的电阻分流系统、闭轨测量系统和闭轨校正系统组成.

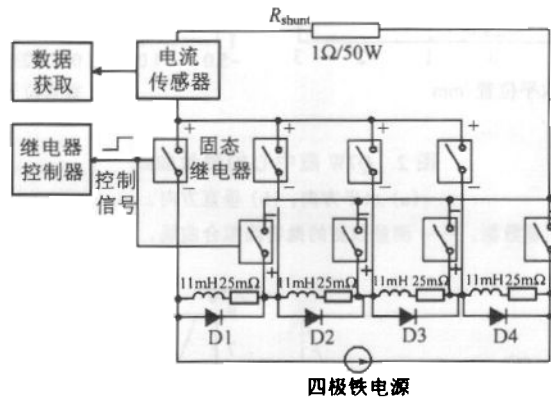


图1 可开关的电阻分流系统的方框图

可开关的电阻分流系统的方框图如图1所示,图中仅给出的是一组四极铁的情况.这里,采用直流固态继电器组成一个开关阵列实现对每块四极铁的分流切换,继电器控制器实现继电器开关阵列的控制,保证分流电阻对单个四极铁进行分流,电流传感器实现分流电流的测量,并用数据获取系统实现数据采集.

在合肥800MeV电子储存环,四极铁绕组电阻约为25mΩ,我们选择分流电阻为1或2Ω,功率为50W,对应调制率约为1%—2.5%.

4 初步实验研究

我们对合肥光源光学速调管(TOK)两端的四极铁Q7W和Q8N的磁中心和 β 函数进行了测量.

4.1 四极铁磁中心的测量结果

在测量Q7W的磁中心时,选用分流电阻为1Ω,Q7W的分流为1.756A,对应调制率约为2.186%.

为了让束流在Q7W中位置变化,我们采用了局部凸轨法^[9],且采用三个校正铁作凸轨.

Q7W 水平和垂直磁中心的测量曲线如图 2(a)和(b)所示. 这里,我们根据式(11)用抛物线对图 2 中的测量数据进行拟合. 由此可得, Q7W 的水平和垂直束基磁中心分别为 $x_{Q7W\text{offset}} = 0.05\text{mm}$ 和 $y_{Q7W\text{offset}} = -1.813\text{mm}$, 其拟合均方根误差分别为 $\pm 0.043\text{mm}$ 和 $\pm 0.039\text{mm}$.

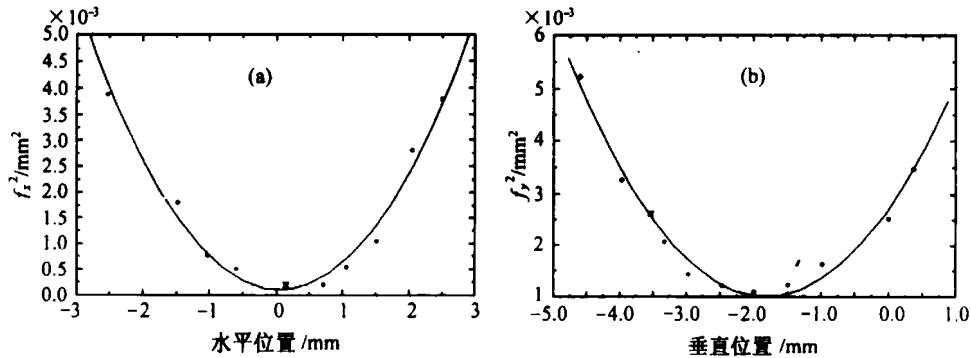


图 2 Q7W 磁中心的测量曲线

(a) 水平方向; (b) 垂直方向.

• 测量数据, — 测量数据的抛物线拟合曲线, x 当前束流位置.

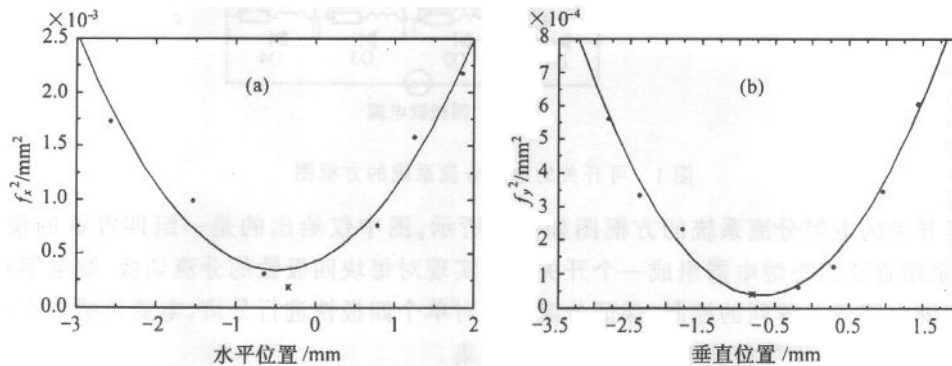


图 3 Q8N 磁中心的测量曲线

(a) 水平方向; (b) 垂直方向.

• 测量数据, — 测量数据的抛物线拟合曲线, x 当前束流位置.

在测量 Q8N 的磁中心时,选用分流电阻为 2Ω , Q8N 的分流为 1.47A , 对应调制率约为 1.19% . Q8N 水平和垂直磁中心的测量曲线如图 3(a)和(b)所示. 由此可得, Q8N 的水平和垂直束基磁中心分别为 $x_{Q8N\text{offset}} = -0.486\text{mm}$ 和 $y_{Q8N\text{offset}} = -0.697\text{mm}$, 其拟合均方根误差分别为 $\pm 0.079\text{mm}$ 和 $\pm 0.036\text{mm}$.

4.2 β 函数的测量结果

我们在测量 Q7W 和 Q8N 的磁中心的同时,还测量了这两块四极铁处的 β 函数. 当四极铁聚焦强度变化 ΔK 时,将引起工作点变化,则可用下式计算对应四极铁的 β 函数^[2]:

$$\beta_{x,y} \approx \pm 4\pi \frac{\Delta v_{x,y}}{\Delta Kl}, \quad (12)$$

这里, $\Delta v_{x,y}$ 是工作点的变化, l 是四极铁的长度, \pm 分别对应水平和垂直方向.

Q7W 和 Q8N 处 β 函数测量值与理论值比较如表 1 所示. 由此可知, 测量值与理论值相当吻合.

表 1 Q7W 和 Q8N 处 β 函数测量值与理论值比较

	K/m^{-2}	β_x/m		β_y/m	
		理论值	测量值	理论值	测量值
Q7W	0.98961	9.69	9.88	7.91	7.55
Q8N	1.57728	20.75	22.09	3.24	3.57

5 讨论

通过对 Q7W 和 Q8N 磁中心的测量, 我们得到以下结论:

(1) 该基于束流准直系统可以准确测量四极铁的磁中心, 拟合均方根误差在 $80\mu\text{m}$ 内. 此外, 该系统可以进行 β 函数测量;

(2) 测量误差的来源有四极铁的磁中心与其束流轨道的偏差和 BPM 系统的噪声, 由于我们采用新的 BPM 测量系统, 其测量误差在 $10\mu\text{m}$ 内, 所以测量误差主要是由四极铁的磁中心与其束流轨道的偏差引起的, 在对所有四极铁进行重新准直后再用基于束流准直系统进行四极铁磁中心测量, 可以进一步减小测量误差, 提高测量精度;

为了在线测量四极铁磁中心, 我们将研制采用交流 K 调制的基于束流准直系统.

感谢李为民、刘祖平、金玉明研究员对本文工作有益讨论和大力支持.

参考文献 (References)

- 1 Rötjseel P. A Beam Position Measurement System Using Quadrupole Magnets Magnetic Centra as the Position Reference. Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res., 1994, A343:374—382
- 2 Corbett W J, Hettel R O et al. Quadrupole Shunt Experiments at SPEAR. AIP Conference Proceedings 390, Argonn, IL, May 1996, 350—358
- 3 Jankowiak A, Stenger C et al. The DELTA Beam-Based BPM Calibration System. AIP Conference Proceedings 451, BIW'98, Stanford, CA, May 1998, 348—355
- 4 Portmann G, Robin D et al. Automated Beam Based Alignment of the ALS Quadrupoles. Proceedings of 1995 IEEE Particle Accelerator Conference, Dallas, Texas, May 1995, 2693—2695
- 5 Arnaudon L, Beuret A et al. A New Technique to Center the LEP Beam in a Quadrupole. Proceedings of 1st European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, Montreux, Switzerland, May 1993, 120—125
- 6 MA Li, CAO Jian-She et al. HEP & NP, 2000, 24(11):1039—1042(in Chinese)
(马力, 曹建设等. 高能物理与核物理, 2000, 24(11):1039—1042)
- 7 JIN Yu-Ming. The Physics of Electron Storage Rings. Hefei: Published by University of Science and Technology of China, 1994 (in Chinese)
(金玉明. 电子储存环物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994)

- 8 SUN Bao-Gen. Thesis for Ph. D Degree. Hefei: Published by University of Science and Technology of China, 2000 (in Chinese)
(孙葆根, 博士论文. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000)
- 9 LI Jing-Yi, LIU Zu-Ping et al. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(2): 291—295 (in Chinese)
(李京伟, 刘祖平等. 强激光与粒子束, 1998, 10(2): 291—295)

Preliminary Study on Measurement of Magnetic Center of Quadrupoles Using Quadrupole Shunt for Hefei Storage Ring

SUN Bao-Gen HE Duo-Hui XU Hong-Liang LI Jing-Yi
JIN Zheng-Fang LU Ping WANG Jun-Hua WANG Lin
(University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract The theoretical analysis of the DC K-modulation of quadrupole for the beam-based alignment method is presented. It is shown that the shift of the orbit, when the focussing strength of one quadrupole magnet is changed, can be described by the perturbed or unperturbed linear lattice parameters. The beam-based alignment system is constructed using DC K-modulation of quadrupole. In order to use the beam-based alignment method one must be able to individually adjust the strength of the quadrupole magnet. So, a switchable shunt resistor is installed on quadrupole to bypass 1%—2.5% magnet current and some solid-state relays are used to switch the shunt resistor in this beam-based alignment system. To improve the measurement accuracy, two methods are used. First method is that beam positions in measured quadrupole magnet are moved by local bump of beam closed orbit using the corrector magnets. Second method is that the root-mean-square of difference in closed orbit is fitted by a parabola function. The system can be not only used to position the beam in the magnetic center of quadrupoles, but also to measure the β function in quadrupole magnets. Some preliminary measurement results are given for Hefei 800MeV electron storage ring. These experimental results show that this system is valid to position the beam to the center of the quadrupole magnets and measure the β function at Hefei Light Source.

Key words beam-based alignment, quadrupole shunt, magnetic center, β function

Received 6 April 2001

* Supported by National Important Project on Science-Phase II of National Synchrotron Radiation Laboratory