

基于响应矩阵和SVD算法的输运线束流轨道校正

后接¹⁾ 刘桂民²⁾

(上海应用物理研究所, 上海光源 上海 201800)

摘要 在输运线中, 磁铁的加工及安装误差所产生的二极磁场分量会导致束流运动轨道偏离理想轨道. 采用基于Matlab的AT程序, 利用响应矩阵和SVD算法, 对SSRF高能输运线磁铁布局方案进行了轨道畸变校正, 对不同的校正子和BPM放置方案作了比较研究, 并对SVD算法中截断阈值的选取对输运线束流轨道畸变校正的效果作了比较研究.

关键词 响应矩阵 SVD算法 轨道畸变校正 截断阈值

1 引言

1.1 SSRF高能输运线³⁾

从增强器到储存环的束流输运线定义为高能输运线, 简称BTS. 其作用是把增强器(Booster)中能量为3.5GeV的电子束从增强器的引出点输运到储存环(Storage Ring)的注入点.

SSRF BTS采用了类FODO结构, 总长60.20m, 共有14块四极铁, 5块弯转二极铁, 束流总弯转角为53.43°.

1.2 输运线束流轨道畸变

在输运线中, 由于存在各种非理想因素, 如磁铁的加工或安装误差等, 使得束流的运动轨道偏离理想轨道, 这种轨道的偏移称为束流轨道的畸变. 输运线中的束流轨道畸变会导致束流注入效率降低, 甚至无法正常注入. 因此要求静态束流轨道校正系统来减小输运线中的静态束流轨道畸变.

2 输运线轨道畸变校正原理

轨道校正包括轨道畸变的测量及其校正. 用束流位置探测器(BPM)测量轨道畸变, 根据采用响应矩阵和SVD方法计算所需的校正磁铁强度理论解来设置

校正铁的强度, 反复测量和校正, 尽量将轨道畸变消除掉. 校正时还应对束流在储存环注入点处的轨道进行调整, 利用接近注入点的两块校正铁(每个方向上各两块)使束流经过注入点时满足 (x, x', y, y') 为 $(0, 0, 0, 0)$, 以保证束流的正常注入及束流在储存环中的稳定运行. 校正的一个原则是在轨道畸变较小的情况下, 校正二极铁的数目越少越好.

2.1 响应矩阵^[1]

假设沿输运线有 M 个BPM和 N 个校正二极铁, 定义一个维数为 M , 单位为米的轨道畸变向量 X : $X^T = (\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_M)$, 其中 $\Delta z_i = z_i - z_{i0}$, $z = x, y$ 为横向坐标, T 表示矩阵的转置, 下标为0表示理想轨道位置. 定义一个维数为 N , 单位为弧度的校正铁强度向量: $\theta^T = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$, 则响应矩阵 $A(M \times N)$ 相应地被定义为:

$$X = A\theta, \quad (1)$$

第 i 个BPM处的轨道畸变和第 j 个校正二极铁的强度之间的关系由响应矩阵 A 中的 $A_{i,j}$ 给出. 输运线中束流从增强器引出到储存环注入是一次完成的, 因此上游的校正铁强度变化会对下游的束流运动产生影响, 而下游校正铁强度变化不对上游的束流运动产生影响, 在响应矩阵中直观的表现表现为前端BPM测量的位置改变对方校正铁强度改变的响应为0, 即矩阵对

1) E-mail: houjie@sinap.ac.cn

2) E-mail: liugm@sinap.ac.cn

3) Lattice and Physics Issues for SSRF Booster and Transport Lines, SSRF Accelerator Physics Group, May, 2005

角线的一方全部为0.

2.2 SVD方法¹⁾

由式(1), 若要对轨道畸变进行校正, 校正铁的强度应为: $\theta = -A^{-1}X$, 通常情况下输运线中BPM的数目 M 与校正铁的数目 N 是不相等的, 即使在 M 等于 N 的情况下, 响应矩阵也往往是一个不可求逆的矩阵, 此时可以通过奇值分解的方法求其伪逆矩阵. 根据SVD法, 对于任意一个矩阵 R , 都可以写成:

$$R = UWV, \quad (2)$$

其中 W 为 $m \times n$ 的对角阵, 其对角线的值称为 R 的奇值, 它们都是大于等于0的数. 当其中有等于0的奇值时, 则 R 为奇矩阵. U 为 $m \times m$ 的正交阵, V 为 $n \times n$ 的正交阵. 根据(2)式就可以求出响应矩阵 R 的逆矩阵为: $R^{-1} = V^{-1}W^{-1}U^{-1}$. 这样就可以求出校正铁的强度.

3 高能输运线轨道畸变校正方案

3.1 不同的校正铁放置方案

输运线中校正铁的数目不同, 校正的效果也不一样; 放置相同数目的校正铁时, 若校正铁放置的位置不一样, 校正的效果也不一样. 考虑到高能输运线的 lattice 布局, 分别比较以下方案时的轨道畸变校正结果: 方案9A; 8A—8I; 7A—7F; 6A—6D; 5A—5G; 4A—4G.

以下模拟计算均为利用自编程序基于AT(Matlab)进行的. 模拟中二极铁、四极铁、六极铁的横向位置误差均为0.2mm, 旋转误差均为0.2mrad(均为RMS值). 每个方案均采用20个随机产生的seed进行模拟.

3.2 不同方案的校正结果比较²⁾

图1给出了不同方案校正后的水平方向和垂直方向的轨道畸变及校正铁强度示意图. 由图可以看出: 校正铁的数目越多, 校正的效果越好; 校正铁数目相

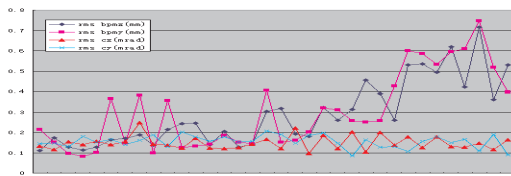


图1 不同方案的校正结果比较

同时, 校正铁放置的位置也对校正的结果有较大的影响. 在满足校正铁尽可能少的要求同时, 考虑到校正的结果, 最终采用方案5B对高能输运线进行轨道校正效果的研究.

3.3 5B方案的校正结果²⁾

5B方案: 在输运线中第1, 2, 3, 8, 11块Q铁后面各放置一组校正二极磁铁.

对5B方案共采用了200个随机seed对高能输运线的轨道校正进行研究, 图2—3给出了校正后的轨道位置分布, 图4给出了一个sample seed校正前后的轨道位置.

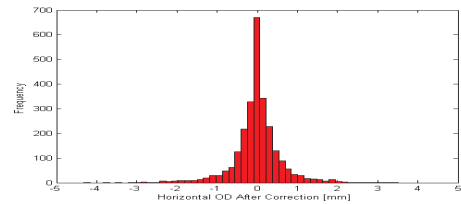


图2 水平方向校正后轨道位置分布

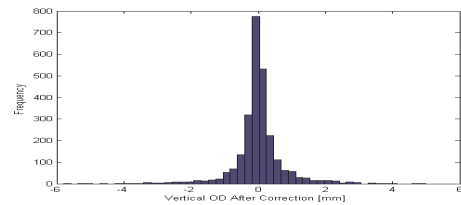


图3 垂直方向校正后轨道位置分布

校正结果表明, 校正后轨道畸变大大减小, 所需的校正铁的强度的RMS值主要为0.1mrad到0.3mrad, 小于校正铁的设计最大强度.

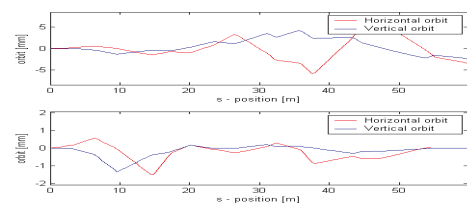


图4 sample seed校正前后的轨道位置

4 截断阈值的影响

4.1 截断阈值

输运线轨道畸变校正原理中提到将轨道畸变尽量减小, 当高能输运线的轨道畸变满足下式

1)HLS束流闭轨校正, 李为民

2)SSRF输运线轨道校正研究, 后接、刘桂民, 上海光源技术报告, SSRF-AP-M005-2005

$$\sum_j \sqrt{(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j})^2} \leq E_{\text{int}}, \quad (3)$$

即认为轨道畸变校正已经满足要求. 其中 i 表示第 i 次的轨道畸变校正, j 表示第 j 个 BPM, 式(3)对所有的 j 求和.

E_{int} 即为截断阈值. E_{int} 不同, 校正所需的次数不同, 校正的结果也略有不同.

4.2 不同截断阈值的结果比较

E_{int} 分别选取不同的值(见表1), 分别采用20个随机seed进行模拟得到结果如下.

E_{int} 值不同时, 主要是校正的平均次数不同, 校正铁的强度和校正的结果略有差异. 根据结果, E_{int} 值在 $4e-3$ — $7e-3$ 时, 平均所需校正次数均已较小, 可以为合适的 E_{int} 值.

表 1 不同的 E_{int} 选取方案

| 方案 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_{int} 值/m | 5e-4 | 1e-3 | 2e-3 | 3e-3 | 4e-3 | 5e-3 | 6e-3 | 7e-3 |
| 平均校正次数 | 6.25 | 5.1 | 4.4 | 3.65 | 3.2 | 3.35 | 2.5 | 2.45 |

5 结论

通过对输运线轨道畸变校正的研究, 得到了较好的校正方案; 模拟的结果表明高能输运线轨道畸变得到了有效地校正, 所需的校正铁的强度小于校正铁的设计最大强度, 符合设计要求; 对截断阈值的影响作了一定的研究, 今后还需进一步研究考虑校正铁的强度误差和 BPM 的读数误差时的轨道畸变校正以及截断阈值 E_{int} 对校正结果的影响.

参考文献(References)

1 LI Yong-Jun et al. HEP & NP, 2003, **27**(8): 722—725 (in

Chinese)

(李永军等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(8): 722—725)

Transport Line Orbit Distortion Correction Based on Response Matrix and SVD Algorithm

HOU Jie¹⁾ LIU Gui-Min²⁾

(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, SSRF, Shanghai 201800, China)

Abstract Dipole field kicks arisen from the construction and alignment of the magnets may cause the particle travels away from the ideal orbit in the transport line. In this paper, orbit distortion corrections of the SSRF BTS lattice are done with the response matrix and SVD algorithm based on AT (matlab) toolbox. Study on the different correctors and BPMs placements are carried out. We also study the orbit distortion correction result which is affected by the interceptive value used in the SVD algorithm.

Key words response matrix, SVD algorithm, orbit distortion correction, interceptive value

1) E-mail: houjie@sinap.ac.cn

2) E-mail: liugm@sinap.ac.cn