

# 三级近似束流光学计算程序\*

吕建钦<sup>1)</sup> 李金海

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

**摘要** 为了精确计算束流在离子光学系统中的传输,用 Visual FORTRAN 6.5 语言编写了一个计算程序,长约 13000 行. 此程序可以计算由三圆筒单透镜、三膜片单透镜、双元筒透镜、均匀场静电加速管、磁四极透镜、六极磁铁、静电四极透镜、偏转磁铁、螺线管透镜、ExB 正交电磁场分析器、静电偏转器、漂浮管、QWR(Quarter Wave Resonators)和 SLR(Split Loop Resonators)射频加速元件等元件任意组成的离子光学系统. 粒子轨迹的计算可精确到三级近似. 粒子的分布类型也可以有多种选择. 程序具有最优化计算功能,即可以自动调整元件的参数,以实现所需要的光学条件. 各元件之后的横向和纵向相图以及系统的束流包络线以图形方式显示在屏幕上.

**关键词** 束流传输 计算程序 三级近似 Lie 代数

## 1 引言

离子光学系统常常由一些静磁与静电的聚焦或偏转元件以及射频加速元件组成. 在有些情况下,需要精确计算粒子的轨迹,如物理实验对束斑的大小有严格的要求,或希望系统有较高的传输效率等. 这时,粒子轨迹的非线性项就必须考虑在内. 我们曾经设计了一级近似轨迹计算程序 LEADS<sup>[1]</sup>. 为了能够做三级轨迹计算,我们首先用 Lie 代数方法分析了粒子在各种元件中的三级轨迹,然后把分析结果写入了该程序.

## 2 理论分析方法——Lie 代数

利用 Lie 代数方法,分析了粒子在各种电磁透镜中的三级近似轨迹. 其基本方法<sup>[2]</sup>是:首先建立粒子运动的 Hamilton 函数 H; 然后将 H 在参考轨道附近展开成幂级数; 建立 H 与相关的 Lie 映射  $\mathcal{M} = -\int_{z_0}^{z_f} H dz$ ; 最后将映射  $\mathcal{M}$  作用到粒子在六维相空间中的初始坐标,就得到粒子的各级近似轨迹.

需要特别说明的是,对于各种静电透镜的计算,程序采用厚透镜处理,即考虑透镜的全部作用区域,而不是薄透镜近似. 方法为:将透镜的整个作用场区

沿轴线划分成若干小段,把每个小区间近似看作匀加速段,每个分点为一个薄透镜. 然后将 Lie 映射作用到每个匀加速段和分点就可以得到粒子在整个透镜中的三级近似轨迹<sup>[3]</sup>.

## 3 最优化计算

最优化计算程序段采用了 Powell 非线性最优化方法<sup>[4]</sup>. 这种方法的优点是,它属于共轭梯度法,故收敛速度较快. 另外它不需要直接计算目标函数的梯度,使编程过程方便. 为实现离子光学系统的最优化计算,许多光学元件的参数是可变的,如:漂浮长度、磁场梯度和静电透镜的聚焦电压等.

在同一个被优化的束流线段中,可以在不同的位置同时提出几个不同光学条件,如:成腰、成像、束斑大小和消色差等.

## 4 周期结构的计算

与其他类型的直线加速器类似,由 QWR 或 SLR 组成的直线加速器结构一般也具有周期性. 为了使粒子的运动处在稳定状态,每个周期的相移  $\mu$  须满足以

\* 国家自然科学基金(1057009)资助

1) E-mail: jqlu@pku.edu.cn

下条件:

$$|\cos \mu| = |0.5\text{Tr}(M)| \leq 1, \quad (1)$$

其中 M 表示以下 Twiss 矩阵:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \mu + \alpha \sin \mu & \beta \sin \mu \\ -\gamma \sin \mu & \cos \mu - \alpha \sin \mu \end{pmatrix}, \quad (2)$$

程序自动调整每个周期中四极透镜的场梯度, 使满足稳定性条件式(1).

### 5 粒子的分布类型

粒子的分布可有 4 种选择: (1) 粒子均匀地分布在相椭圆内部; (2) 粒子均匀地分布在相椭圆的边界上; (3) 粒子均匀地分布在相椭圆的边界上, 而且还带有一个楔型缺口, 以显示相椭圆的方位变化; (4) 粒子在三维脉冲椭球的内部呈高斯分布. 见图 1—4.

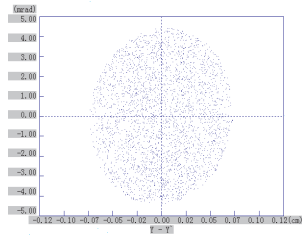


图 1 均匀分布在椭圆内部

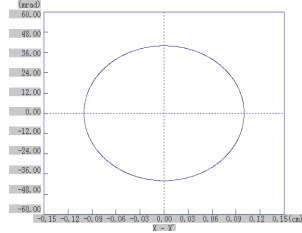


图 2 均匀分布在椭圆边界上

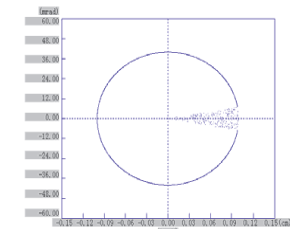


图 3 均匀分布在椭圆边界上且有一个缺口

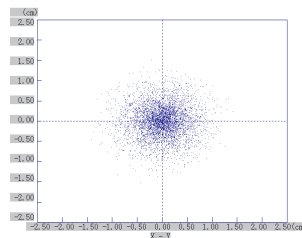


图 4 高斯分布

### 6 图形显示

粒子在  $x-x'$ ,  $y-y'$ ,  $\Delta\phi-\Delta E$  相空间和  $x-y$  横截面中的分布在计算过程中可以直接在计算机屏幕上显示出来, 不必经过后处理. 当所有粒子通过系统以后, 其包络线也显示出来. 见图 5—9.

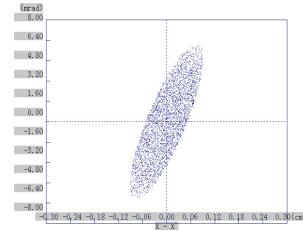


图 5  $x-x'$  相图

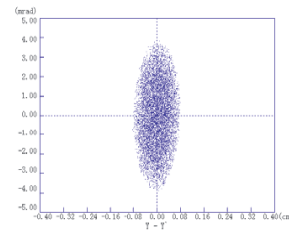


图 6  $y-y'$  相图

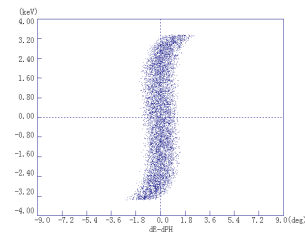


图 7  $\Delta\phi-\Delta E$  相图

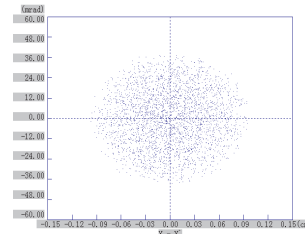


图 8  $x-y$  横截面上的分布

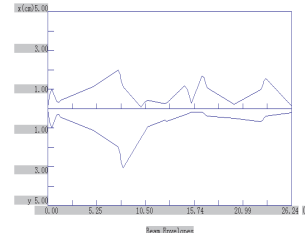


图 9 束流包络线

## 7 程序计算过程

首先, 程序从用户所提供的数据文件中读入数据. 然后检查系统是否包含周期性结构. 如果包含, 程序会自动调整周期性结构中四极透镜的场梯度, 使满足稳定性条件. 接着, 程序还要检查系统或系统中某一部分或几个部分需要被优化. 如果是, 程序将自动调整相关元件的参数, 以达到所给定的光学条件. 以上过程都是线性计算. 在以上计算的基础上, 程序将对系统从头至尾做一次单粒子轨迹的线性传输计算, 并且显示各元件之后的相图和整个包络线. 如果用户还有非线性计算的要求, 程序还会对系统从头至尾做一次单粒子轨迹传输计算. 这时, 轨迹的非线性项就包含在内, 而且还要显示各元件之后的相图和整个包络线.

## 8 计算实例

以北京大学4.5MV静电加速器为例看一下计算结果. 其光路图示于图10. 在一级近似下粒子的横向

相图示于图6. 如果考虑到轨迹的三级近似, 相应的相图示于图11. 比较两个相图可以看出, 非线性项的影响还是比较明显的.

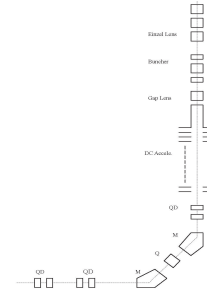


图 10 4.5MV 静电加速器光路图

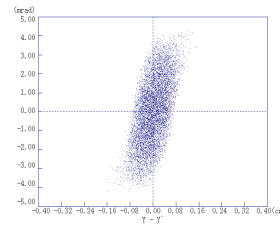


图 11 非线性轨道的相图

### 参考文献(References)

- 1 LÜ Jian-Qin. Nucl. Instr. & Methods, 1995, **A355**: 253
- 2 Dragt A J. AIP Conf. Proc. 87, New York, 1982. 147—313
- 3 LÜ Jian-Qin. Nucl. Instr. & Methods, 1998, **A416**: 229
- 4 Himmelblau D M. Applied Nonlinear Programming. New York: MC Graw-Hill, 1972

## Computer Codes for the Beam Optics Calculations ——Third Order Approximation\*

LÜ Jian-Qin<sup>1)</sup> LI Jin-Hai

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** To calculate the beam transport in the ion optical systems accurately, a beam dynamics computer program of the third order approximation has been developed. Many conventional optical elements have been incorporated in the program. Particle distributions of uniform type or Gaussian type in the 3D dimensional ellipses can be selected by the users. The optimization procedures are provided to make the calculations reasonable and fast. The calculated results can be graphically displayed.

**Key words** beam transport, computer program, third order approximation, Lie algebra

\*Supported by National Natural Science Foundation of China (1057009)

1) E-mail: jqlu@pku.edu.cn