

BEPC II 束流相关本底的蒙特卡罗模拟研究(II)*

——束流 - 气体相互作用

金大鹏^{1,2;1)} 吕 峰¹ 过雅南¹ 王贻芳¹
伍灵慧^{1,2} 刘振安¹ 郁忠强¹

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 介绍了用蒙特卡罗方法研究正常对撞模式下束流本底中的束流 - 气体相互作用的原理与效果. 使用通用的模拟工具, 研究了 BEPC II 的束流 - 气体本底对设计中的 BES III 的影响. 结果显示, 在储存环上设置挡板后, 探测器的本底在允许的范围之内. 模拟结果对 BEPC II - BES III 的设计建造具有指导意义.

关键词 束流 - 气体相互作用 韧致辐射 库伦散射 辐射剂量 对撞机 本底 蒙特卡罗模拟

1 引言

正在设计中的新一代北京正负电子对撞机 (BEPC II)^[1] 及北京谱仪 (BES III)^[2] 同任何高光度的对撞机及其探测器一样, 面临束流本底这样一个非常重要的难题. 本底问题有两个含义: 一是过高的本底, 会使探测器因辐照损伤而永久损坏; 二是本底过高, 会造成系统性能变坏或不能正常工作, 如数据获取系统的死时间可能会变差, 甚至无法取数, 量能器和飞行时间计数器的分辨率可能会变坏等. 因此必须模拟在 BEPC II 工作条件下, BES III 探测器的本底情况, 并设置合理的挡板以最大限度地阻挡能击中探测器的丢失粒子. 这对于 BES III 的设计建造, 以及将来的正常安全、高质量运行具有非常重要的意义.

束流相关本底, 主要包括同步辐射^[3], 束流 - 气体相互作用以及 Touschek 效应造成的粒子丢失. 本文仅讨论束流 - 气体作用的本底, 主要包括非弹性的韧致辐射 (bremsstrahlung) 和弹性的库伦散射

(Coulomb scattering).

2 束流 - 气体作用模拟

束流本底一般通过蒙特卡罗方法跟踪粒子轨迹而得到. 在储存环中, 通用的丢失电子模拟工具为 Decay Turtle^[4], 探测器响应模拟工具为 GEANT3^[5]. 文献[6]报告了用此模拟工具对目前正在运行的 BEPC/BES II 的研究, 结果显示实验与计算在四倍之内是符合的.

在 BES III 束流 - 气体本底模拟中, 考虑了整个电子环, 并在 GEANT3 中模拟了主漂移室 (MDC), 电磁簇射计数器 (EMC) 和飞行时间计数器 (TOF) 对丢失粒子的响应.

2.1 模拟原理

在 Decay Turtle 中, 对电子的韧致辐射和库伦散射是分别模拟的, 发生束流 - 气体作用的粒子在储存环上沿束流运动中心轨道随机产生. 高能电子发生韧致辐射时, 有很大的几率辐射出一个光子, 而且

2004 - 05 - 13 收稿

* 国家自然科学基金 (19991480), 国家杰出青年科学基金 (10225524) 和中国科学院重大项目基金 (KJ95T - 03) 资助

1) E-mail: jindp@mail.ihep.ac.cn

非常接近原电子的运动方向. 为此, 在模拟计算中, 韧致辐射的末态设为一个电子和一个光子, 并且, 它们均沿母粒子运动方向, 其能量和等于母粒子能量; 其中, 光子携带能量 (相对于母粒子的分数能量) $\epsilon \in [\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]$ 的韧致辐射截面, 由下式给出

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left\{ \left[1 + (1 - \epsilon)^2 - \frac{2}{3}(1 - \epsilon) \right] + \frac{(1 - \epsilon)}{9 \ln\left(\frac{183}{\sqrt{Z}}\right)} \right\}.$$

在模拟库伦散射时, 只考虑弹性散射. 所以, 库伦散射末态为一个电子, 其能量与母粒子一致. 散射角度 $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 的库伦散射截面, 由下式给出

$$\frac{1}{\theta} \cdot \frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{1}{(\theta^2 + \chi^2)^2},$$

其中, Z 为靶物质的原子序数, $\chi = \alpha \sqrt{Z} m_e / E_{\text{beam}}$ 为修正因子 - 修正电子在原子核上的镜像效应. 在模拟过程中, 强迫每次都发生作用. 所以, 最后要乘上一个几率因子 η , 对韧致辐射为

$$\eta = \frac{P}{760} \cdot \frac{C}{L_{\text{rad}}} \cdot \left\{ \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{9 \ln\left(\frac{183}{\sqrt{Z}}\right)} \right) \right\}.$$

$$\left\{ \ln\left(\frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}}\right) - (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) + \frac{\epsilon_{\max}^2 - \epsilon_{\min}^2}{2} \right\}.$$

对库伦散射为

$$\eta = \frac{P}{760} \cdot C \cdot \frac{8\pi N_A}{224} \cdot \left(\frac{Z m_e r_e}{E_{\text{beam}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\theta_{\min}^2 + \chi^2} - \frac{1}{\theta_{\max}^2 + \chi^2} \right),$$

其中, N_A 为阿弗加德罗常数; C 为储存环环长; Z , P 和 L_{rad} 分别为残余气体的原子序数, 压力 (单位: Torr) 和一个大气压下的辐射长度 (单位: cm). 如残余气体为双原子分子, 库伦散射归一化因子需乘以 2.

2.2 BES III 束流 - 气体本底模拟结果

表 1 为模拟中使用的加速器参数和储存环不同区域真空度. 储存环总长 237.531m, 由于储存环是闭合的, 定义对撞点为原点, 沿粒子运动方向为正方向, 反方向为负值, 例如 224.111m 等价于 -13.42m. 模拟距离比储存环长 5m, 这是考虑到探测器关于对撞点对称, 粒子可能发生束流 - 气体作用后, 马上丢失; 也可能发生作用后, 运动一圈后才丢失.

表 1 模拟中使用的加速器参数和储存环不同区域真空度 (单束流)

模拟中使用的加速器参数				
束流能量/GeV	流强/mA	发射度 eX/(mm·mrad)	发射度耦合 eY/eX	能散度 σ_e
1.89	900	0.144	1.5%	5.16×10^{-4}
真空度 (nTorr of 20% CO + 80% H ₂)				
[0.0, 224.111]m	[-13.42, -5.0]m	[-5.0, -2.0]m	[-2.0, +2.0]m	[+2.0, +5.0]m
5.00	0.79	4.20	17.0	4.20

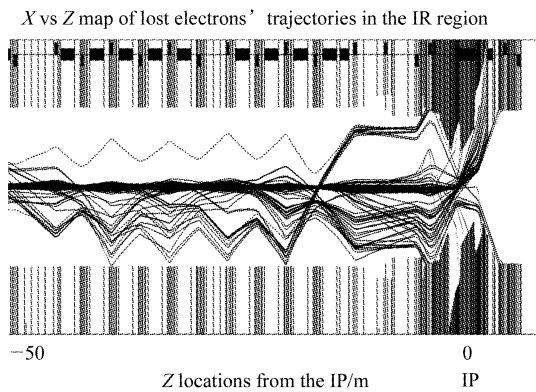


图 1 无挡板时韧致辐射丢失电子的典型运动轨迹

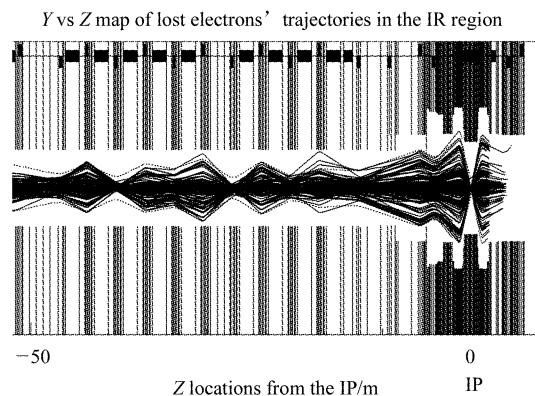


图 2 无挡板时库伦散射丢失电子的典型运动轨迹

图 1 为无挡板情况下丢失在 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围韧致辐射电子的典型运动轨迹, 图 2 为无挡板情况下丢失在 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围库伦散射电子的典型运动轨迹. 其中, X 沿水平方向, 指向环外为正; Y 沿垂直方向; Z 沿粒子运动方向; 对撞点为坐标原点; X, Y, Z 构成右手螺旋坐标系. 由图 1 可以看出, 丢失在对撞点上游的韧致辐射电子, 储存环内侧多于外侧, 丢失在对撞点下游的韧致辐射电子, 储存环外侧多于内侧.

根据模拟, 在储存环上设置了 10 个挡板. 为了保证注入效率, 水平方向远离对撞点的阻挡水平方向丢失粒子的挡板半孔径对正电子束流设置成 12.5 倍的 σ_X , 对负电子束流设置成 12.0 倍的 σ_X , 靠近对撞点的水平挡板设成 13.0 倍的 σ_X , 能散度 (Energy Spread) 取 0.5%, 闭轨取 0mm; 垂直方向设成 10 倍的 σ_Y , 闭轨取 0mm. 表 2 列出了挡板的详细情况. 图 3 为储存环上挡板位置示意图, 正负电子环挡板位置基本对称.

表 2 储存环上 10 个挡板的详细情况 (正电子环)

名称	挡板类型	特点	对撞点上 游到对撞 点距离/m	水平半孔径/mm	垂直半孔径/mm
befor_R20Q04	阻挡水平库伦散射	低 dispersion 高 beta X	108.21	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 24.20$	vacuum chamber
middle_R20Q14	阻挡托歇克丢失粒子	高 beta X	73.97	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 22.60$	vacuum chamber
befor_R20Q16	阻挡垂直库伦散射	低 dispersion 高 beta Y	64.72	vacuum chamber	$10.0 \sqrt{\beta Y \times eY} = 13.70$
middle_R30Q14	阻挡水平库伦散射	低 dispersion 高 beta X	46.68	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 22.60$	vacuum chamber
middle_R30Q08	阻挡水平丢失粒子	低 dispersion 高 beta X	27.13	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.45\% \times 1000 = 29.20$	vacuum chamber
after_R30Q04_h	阻挡水平丢失粒子	低 dispersion 高 beta X	11.67	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 35.40$	vacuum chamber
after_R30Q04_v	阻挡垂直丢失粒子		10.97	vacuum chamber	$10.0 \sqrt{\beta Y \times eY} = 10.50$
after_R30Q03_h	阻挡水平丢失粒子	低 dispersion 高 beta X	8.20	$12.5 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 33.80$	vacuum chamber
after_R30Q03_v	阻挡垂直丢失粒子		7.50	vacuum chamber	$10.0 \sqrt{\beta Y \times eY} = 17.60$
after_R30Q02	阻挡水平丢失粒子	低 dispersion 高 beta X	4.98	$13.0 \sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 41.1$	vacuum chamber

注: 对于电子束流, 水平挡板除 after_R30Q02 外, 全部设成 12 倍的 σ_X ; 其余挡板孔径同正电子束流.

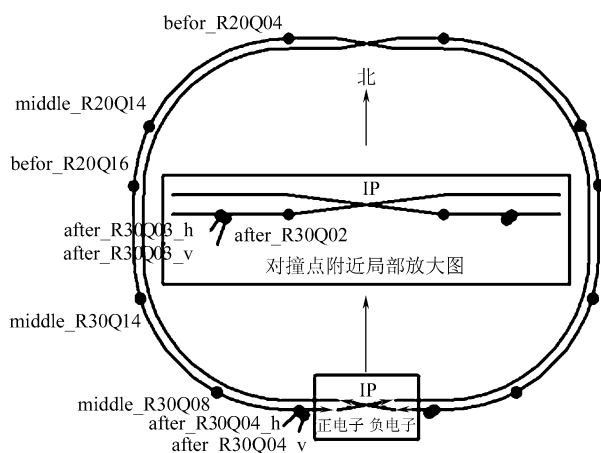


图 3 储存环上挡板位置示意图

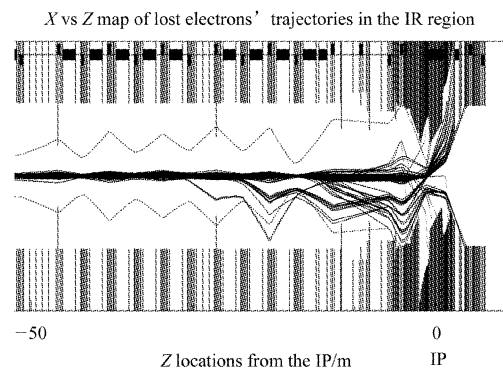


图 4 加挡板后韧致辐射丢失电子的典型运动轨迹

图 4 为加挡板后丢失在 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围韧致辐射电子的典型运动轨迹, 图 5 为加挡板后丢

失在 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围库伦散射电子的典型运动轨迹. 与图 1 相比, 图 4 中从远处来的丢失到对撞区的韧致辐射电子明显减少. 与图 2 相比, 图 5 中丢失到对撞区的库伦散射电子的振荡幅度明显变小.

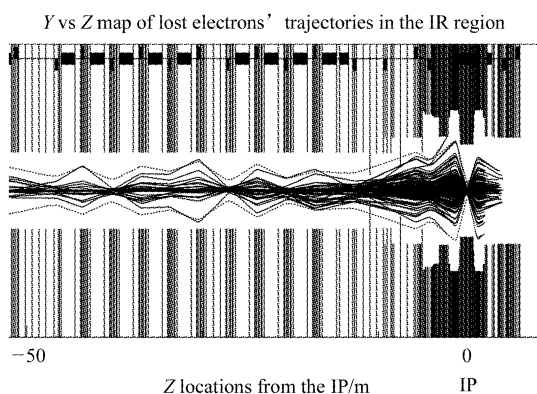


图 5 加挡板后库伦散射丢失电子的典型运动轨迹

这些挡板可以有效地阻挡丢失粒子到达对撞

表 3 加挡板前后电子束流丢失在对撞点附近不同区域的能量率 ($\text{MeV}/\mu\text{s}$)

区域	$[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$		$[-1.93\text{m}, +1.93\text{m}]$		$[-0.8\text{m}, +0.8\text{m}]$	
	无挡板	有挡板	无挡板	有挡板	无挡板	有挡板
brem	2124	1664	576.0	432.9	310.0	310.0
brem $[-13.42\text{m}, +2.0\text{m}]$		1163		367.2		307.0
coul	3127	860.9	803.9	247.5	42.57	42.57
coul $[-13.42\text{m}, +2.0\text{m}]$		510.8		195.5		41.27
total	5251	2525	1380	680.4	352.6	352.6

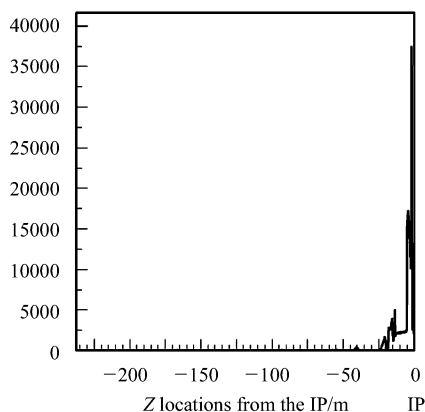


图 6 束流-气体作用造成的丢失在对撞点正负 1.93m 范围内的能量来源相对示意图

区, 表 3 为丢失在对撞点附近不同区域的能量率. 表中, $[-13.42\text{m}, +2.0\text{m}]$ 表示电子在对撞点上游 13.42m (弱偏转磁铁边沿到对撞点距离) 到对撞点下游 2m 区域内发生束流-气体作用, 其余表示在全环发生束流-气体作用. 从表中可以看出, 挡板可以有效地减少库伦散射丢失在对撞点附近的本底; 对于韧致辐射本底, 丢失在 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围的粒子主要来自对撞点上游 40m 以内区域, 丢失在 $[-1.93\text{m}, +1.93\text{m}]$ 范围内的粒子主要来自对撞点上游 13.42m 以内区域. 丢失在对撞点附近 $\pm 0.8\text{m}$ 内的能量率约为 $353 \text{ MeV}/\mu\text{s}$. 加挡板后, 丢失在对撞区的能量主要来自对撞点上游 13.42m 到对撞点之间区域, 如图 6 所示, 图中横坐标为丢失到对撞点正负 1.93m 范围的粒子发生作用的位置, 纵坐标为丢失粒子沉积到对撞点正负 1.93m 范围的相对能量. 因此, 对撞点上游 13.42m 到对撞点之间区域的真空度对于探测器本底至关重要.

Decay Turtle 输出的丢失粒子, 输入到 GEANT3 中, 模拟丢失粒子的探测器响应. 在 GEANT3 中, 我们定义了主漂移室 (MDC), 电磁簇射计数器 (EMC), 飞行时间计数器 (TOF), 谱仪磁铁, 靶铁, 以及距对撞点正负 5m 内的加速器磁铁和真空盒等. 其中, 主漂移室是最靠近束流管的探测器. 图 7 为一个丢失电子在探测器中的簇射例子. 图 8 为对撞点附近探测器放大图, 图中所有标注均相对于对撞点或探测器轴向中心线, 单位 mm ; 为了降低加速器超导四级磁铁附近区域丢失粒子造成的探测器本底, 考虑在该区域安装两个钨挡板, 如图 8 中黑色部分, 共两个, 关于对撞点对称, 图中只画出了一个. 用钨做挡板是因为钨的熔点比较高, 在高辐射环境下不易升华, 以及钨的密度比较大, 对粒子的阻挡效果

好,不会占掉本来就紧张的碰撞区很多空间.表 4 为没有钨挡板时各探测器的本底模拟结果,表 5 为有钨挡板时各探测器的本底模拟结果.其中,TOF 的

击中信号加了 500KeV 的阈值,即只有沉积能量大于 500KeV 的信号才被统计.其他探测器信号均没有任何阈值.

表 4 无钨挡板时双束流不同探测器的本底模拟结果

	主漂移室单丝计数率/kHz		EMC 辐射剂量/(rad/a)		TOF 单单元计数率 /kHz	
	层 1	层 2	桶 部	端 盖	桶 部	端 盖
最大值	32.20	19.44	1.39	8.32	6.51	6.67
平均值	9.25	6.75	0.25	1.35	4.62	4.38

表 5 有钨挡板时双束流不同探测器的本底模拟结果

	主漂移室单丝计数率/kHz		EMC 辐射剂量(rad/a)		TOF 单单元计数率/kHz	
	层 1	层 2	桶 部	端 盖	层 1	层 2
最大值	31.60	18.40	0.77	5.27	3.93	3.14
平均值	9.06	6.53	0.14	0.93	2.88	2.23

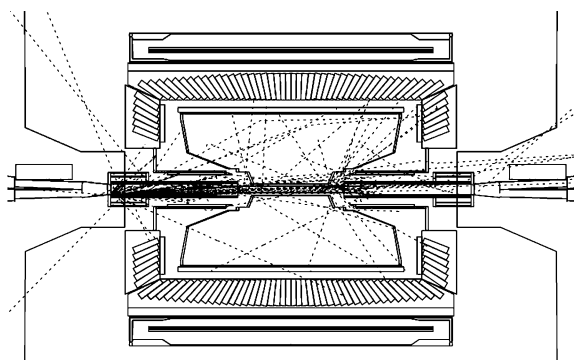


图 7 一个丢失粒子簇射例子

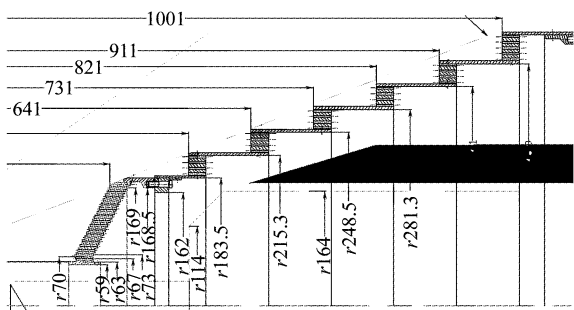


图 8 考虑中的探测器钨挡板

由表 4,5 结果可见,加钨挡板可以降低 EMC 和 TOF 的探测器的本底.主漂移室最大单丝计数率约为 32kHz,小于安全值 - 100kHz.考虑模拟与实验的差别^[6],主漂移室最大单丝计数率比较临界,对撞点上游 13.42m 到对撞点之间区域好的真空度对于有效降低本底至关重要.

3 总结

本文以 BES III 为例,利用通用的模拟工具,对 BES III 束流-气体本底做了比较细致的模拟,在储存环上设置了 10 个挡板以减少探测器本底.模拟结果显示,探测器本底在容许的范围内,不会影响到将来 BES III 的正常运行.加钨挡板可以降低 EMC 的本底辐射剂量和 TOF 的单单元计数率,但会大大增加机械设计的难度.对撞点上游 13.42m 到对撞点之间区域的真空度对于探测器本底至关重要.

感谢 Kozanecki W. 教授和高能物理所加速器中心及实验物理中心徐刚、秦庆、董海义、黄楠、于程辉、何康林、傅成栋、彭海平等的无私帮助,感谢张德红以前做的优秀工作.

参考文献 (Reference)

- 1 Design Report of BEPC II. Beijing: Institute of High Energy Physics, 2003. http://acc-center.ihep.ac.cn/download/pdr_download.htm
- 2 The BES III Detector. Beijing: Institute of High Energy Physics, 2004. <http://epc.ihep.ac.cn/epc/design/design1.htm>
- 3 ZHOU Neng-Feng et al. HEP & NP, 2004, **28**(3): 227—231 (in Chinese)
- 4 Carey D C, Brown K L, Iselin F C. Decay TURTLE (Trace Unlimited Rays Through Lumped Elements), SLAC-246, 1980. A Modified Version Taking Into Account the Beam-gas Bremsstrahlung and Coulomb Scattering was Provided by Kozanecki W
- 5 GEANT Detector Description Tool, Version 3.21. CERN Program Library W5103, CERN, 1994
- 6 JIN Da-Peng et al. HEP & NP, 2003, **27**(10): 846—851 (in Chinese) (金大鹏等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(10): 846—851)

Monte Carlo Simulation of the BEPC II / BES III Backgrounds —— Beam – Gas Interactions

JIN Da-Peng^{1,2;1)} LÜ Feng¹ GUO Ya-Nan¹ WANG Yi-Fang¹

WU Ling-Hui^{1,2} LIU Zhen-An¹ YU Zhong-Qiang¹

1(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2(Graduate School, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The beam-gas backgrounds simulation of the BES III, including the theory and the results is introduced. The results show that, after masking on the storage ring, the detector backgrounds are in safe level. The results can guide the design and construction of the BEPC II -BES III.

Key words beam-gas interactions, bremsstrahlung, Coulomb scattering, radiation dose, colliding machine, backgrounds, Monte Carlo simulation

Received 13 May 2004

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480), National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10225524) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)

1) E-mail: jindp@mail.ihep.ac.cn