

BEPC II 束流相关本底的蒙特卡罗模拟研究(III)

——Touschek效应*

金大鹏^{1,2;1)} 过雅南¹ 王贻芳¹ 伍灵慧^{1,2} 刘振安¹ 赵棣新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Touschek效应本底研究的意义、Touschek效应的作用原理和建模方法. 使用自主开发及通用的模拟工具, 系统研究了BEPC II 工作条件下BES III 主要探测器的Touschek本底. 模拟和计算束流寿命的比较表明当前的模拟结果是有参考价值的, 建模方法是可行的. 探测器的模拟结果表明Touschek本底不会影响将来BES III 的正常稳定运行, 不会造成探测器的辐照损伤.

关键词 Touschek效应 单丝计数率 辐射剂量 本底

1 引言

为了在短时间内获取更多感兴趣的物理事例, 同时提高数据质量, 我们正在设计建造新一代的高亮度北京正负电子对撞机(BEPC II^[1])和高性能的北京谱仪(BES III^[2]). BEPC II 的亮度比现在的北京正负电子对撞机(BEPC I)提高了100倍. 伴随着亮度的提高, 束流强度、束团内的带电粒子密度也大幅提高. 这就造成了束流的Touschek^[3]效应越来越强. 为了减小Touschek效应对束流寿命的影响, 世界各国的大型粒子对撞机都采取了多束团的设计(例如BEPC II 单束流有93个束团). 虽然如此, Touschek效应仍然是束流寿命的决定因素之一.

对高亮度条件下的Touschek效应做合理的模拟, 正确地理解其对探测器的影响, 并根据实际需要采取必要的优化和防护措施, 对于将来BES III 的高效稳定运行是十分必要的. 本文详细介绍了Touschek效应的作用原理、建模方法, 以及BEPC II 工作条件下BES III 的模拟结果. BES III 的其他本底来源, 束流-气体作用模拟的原理和结果参见文献[4], 同步辐射模拟原理和结果参见文献[5].

作者利用Decay Turtle的框架, 开发了相应的

Touschek效应模拟代码.

2 Touschek效应模拟

储存环丢失电子模拟工具为Decay Turtle^[6], 模拟束团粒子的产生、输运、作用、再输运及丢失. 探测器响应模拟工具为GEANT3^[7], 模拟丢失到对撞点附近的粒子的探测器响应. 由于BEPC II 正负电子束流储存环挡板孔径设置不一致, 在Decay Turtle中对电子环和正电子环分别作了模拟. 在GEANT3中, 定义了BES III 的几个主要探测器主漂移室(MDC)、电磁簇射计数器(EMC)和飞行时间计数器(TOF). 作为参考, 表1中列出了BES III 各子探测器典型的辐射剂量安全上限.

表1 BES III 各子探测器典型的辐射剂量安全上限

子探测器	辐射剂量限制
MDC 电子学	小于1000 rad/year
MDC 丝	小于100 kHz
CsI 晶体	小于500 rad/year

2.1 模拟原理

Touschek效应是指束团内部带电粒子之间的弹性散射. 流强越大, 单束团带电粒子密度越大, Tou-

2005-08-03 收稿, 2005-11-29 收修改稿

* 国家自然科学基金(10491300), 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

schek效应越强.

Touschek效应束流寿命由下式^[3]给出(只考虑单次散射,束流能量高时,单次散射与多次散射束流寿命基本相同,当束流纵向传递能量大于高频腔接收度 ε_{RF} 时,粒子丢失).

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau} = \frac{Nr_e^2 c}{8\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \cdot \frac{\lambda^3}{\gamma^2} \cdot D(\xi), \quad (1)$$

其中 N 为单束团内的带电粒子数; τ 为Touschek束流寿命; c 为光速; r_e 为电子的经典半径; σ_x , σ_y 和 σ_z 分别为水平,垂直和纵向的rms束流尺寸; σ_p 为束团的能散度; $\lambda^{-1} = (\Delta E/E)_{\text{RF}} = \varepsilon_{\text{RF}}/(\gamma m_e c)$; ε_{RF} 为高频腔的接收度,即偏离束流中心能量小于 ε_{RF} 的粒子可以被高频腔约束,继续运动,偏离能量大的不能被约束,从而丢失(对于BEPC II, ε_{RF} 约为 6.9×10^{-3}); $\xi = (\varepsilon_{\text{RF}}/\gamma\sigma_p)^2$,描述高频腔对特定能散度束流的约束能力; $D(\xi)$ 为通用函数(随 ξ 缓慢变化):

$$D(\xi) = \sqrt{\xi} \cdot \left\{ -\frac{3}{2}e^{-\xi} + \frac{\xi}{2} \int_{\xi}^{\infty} \frac{\ln ue^{-u}}{u} du + \frac{1}{2}(3\xi - \xi \ln \xi + 2) \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \right\}, \quad (2)$$

考虑全环,平均束流寿命为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{C} \int \frac{1}{\tau(s)} ds = \left\langle \frac{1}{\tau(s)} \right\rangle, \quad (3)$$

其中 C 为储存环周长.

以上各式描述了传递能量大于 ε_{RF} 时的Touschek寿命.类似地,Touschek效应中传递能量大于 ΔP 的粒子数为

$$\Delta N = N \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{\tau} = N \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{C} \int \frac{1}{\tau(s)} ds, \quad (4)$$

在能量传递范围 $[\varepsilon_{\text{min}}, \varepsilon_{\text{max}}]$ 内,因为 $D(\xi)$ 随 ξ 变化比较平缓,可以把 ΔN 分解成与束流能量相关的因子和与束流尺寸相关的因子,分别沿轨道积分.

$$\Delta N \propto \int \frac{1}{\sigma_x\sigma_y\sigma_z} ds \cdot \delta, \quad (5)$$

其中

$$\delta = \int \frac{D(\xi)}{\varepsilon_{\text{min}}^3} ds - \int \frac{D(\xi)}{\varepsilon_{\text{max}}^3} ds, \quad (6)$$

在储存环上的一个确定位置,Touschek作用粒子数反比于该处的束流尺寸.

计算得到几十组 $(\Delta P, \delta(\Delta P))$,可以用线性内插进行能量传递抽样.根据BEPC II设计的Lattice,计算几十至几百组 $\left(\int_s^C V_{\text{inv}} ds, s \right)$,可以用线性内插进行作用位置抽样.

$$\Delta N \propto \frac{1}{\sigma_x\sigma_y\sigma_z} = V_{\text{inv}}, \quad (7)$$

归一化因子可由下式求得

$$nmf = \frac{Nr_e^2 c}{8\pi N_s C} \cdot \frac{P_{\text{beam}}^3}{\gamma^2} \cdot \int \frac{1}{\sigma_x\sigma_y\sigma_z} ds \cdot \left(\int \frac{D(\xi)}{\varepsilon_{\text{min}}^3} ds - \int \frac{D(\xi)}{\varepsilon_{\text{max}}^3} ds \right), \quad (8)$$

其中 P_{beam} 为束流能量. N_s 为模拟的总粒子数.上式由Touschek效应束流寿命变换得到,已经考虑了所有的作用粒子(得到能量的粒子和损失能量的粒子).模拟中,对得到能量的粒子和损失能量的粒子作等概率随机抽样.

建模的关键点在于,我们根据 $D(\xi)$ 随 ξ 变化平缓(如图1)的特点,把Touschek效应分成位置相关部分 V_{inv} 和能量相关部分 δ 并分别进行处理.BEPC II工作在1.89GeV时, ξ 约为 1.3×10^{-5} .丢失到对撞区的粒子传递能量主要为束流能量的[0.69%, 5.0%](如图4),因此,对于不同的传递能量 ΔP , ξ 的差别不超过 $(5.0/0.69)^2=53$ 倍.对应 $D(\xi)$ 约相差4倍.

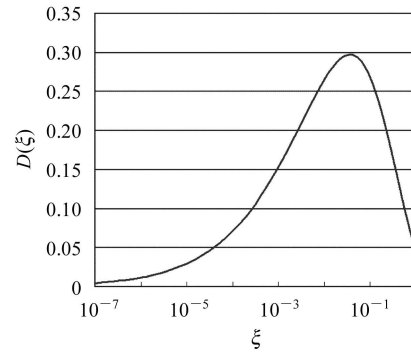


图1 $D(\xi)$ 随 ξ 变化曲线

2.2 BESIII Touschek本底模拟结果

表2为模拟中使用的加速器参数.储存环总长237.531m,由于储存环是闭合的,定义沿粒子运动方向为正方向,对撞点为原点,则224.111m等价于-13.42m.

表2 模拟中使用的加速器参数(单束流)

束流能量/ GeV	束团 个数	流强/ mA	发射度eX/ (mm·mrad)	发射度耦合 (eY/eX)	能散度 (σ_e)
1.89	93	900	0.144	1.5%	5.16×10^{-4}

BESIII束流-气体本底为探测器主要本底来源.根据BESIII束流-气体本底模拟结果,在储存环上设置了10个挡板,见表3.图2为所有模拟粒子在储存环上发生Touschek作用的位置分布图.由图中可见,束流尺寸小的地方,发生Touschek作用的粒子多,尤其是对撞点处,束流尺寸最小,发生Touschek作用粒

子最多. 图3为 Touschek 作用丢失在对撞区 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 的电子的典型运动轨迹. 图4为丢失在对撞区 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 的电子的能量-来源图; 横坐标为丢失电子发生 Touschek 作用相对于对撞点的位置, 纵坐标为丢失电子的能量(以束流能量为单位); 由图中可见, 丢失在对撞区的电子主要来自储存环上色散大的地方; 能量大于束流能量的粒子较多, 这可能是因为能量大的粒子能够在储存环里运输更远的距离.

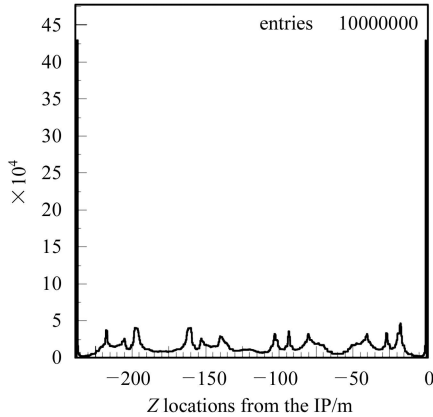


图 2 所有模拟粒子在储存环上发生 Touschek 作用位置分布图

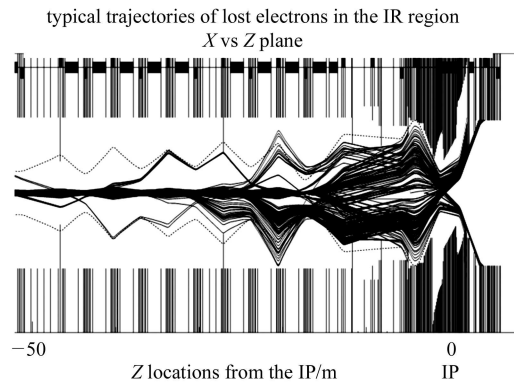


图 3 Touschek 丢失电子的典型运动轨迹

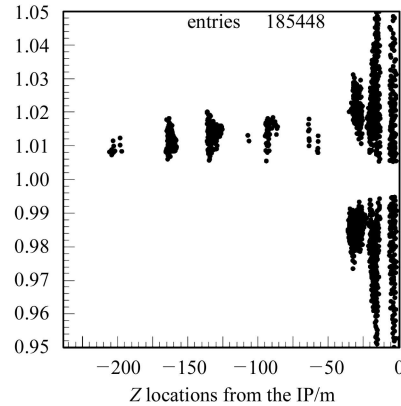


图 4 Touschek 丢失粒子的能量-来源图

表 3 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_R2OQ04	阻挡水平库仑散射	低dispersion 高betaX	108.21	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 24.20$	vacuum chamber
Middle_R2OQ14	阻挡托歇克丢失粒子	高betaX	73.97	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 22.60$	vacuum chamber
Befor_R2OQ16	阻挡垂直库仑散射	低dispersion 高betaY	64.72	vacuum chamber	$10.0\sqrt{\beta X \times eY} = 13.70$
Middle_R3OQ14	阻挡水平库仑散射	低dispersion 高betaX	46.68	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 22.60$	vacuum chamber
Middle_R3OQ08	阻挡水平丢失粒子	高dispersion 高betaX	27.13	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.45\% \times 1000 = 29.20$	vacuum chamber
after_R3OQ04_h	阻挡水平丢失粒子	低dispersion 高betaX	11.67	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 35.40$	vacuum chamber
after_R3OQ04_v	阻挡垂直丢失粒子		10.97	vacuum chamber	$10.0\sqrt{\beta X \times eY} = 10.50$
after_R3OQ03_h	阻挡水平丢失粒子	低dispersion 高betaX	8.20	$12.5\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.45\% \times 1000 = 33.80$	vacuum chamber
after_R3OQ03_v	阻挡垂直丢失粒子		7.50	vacuum chamber	$10.0\sqrt{\beta X \times eY} = 17.60$
after_R3OQ02	阻挡水平丢失粒子	低dispersion 高betaX	4.98	$13.0\sqrt{\beta X \times eX} + DX 0.5\% \times 1000 = 41.1$	vacuum chamber

注: 表中 DX 为色散函数(dispersion). 对于电子束流, 水平挡板除 after_R3OQ02 外, 全部设成 12 倍的 σ_X ; 其余挡板孔径同正电子束流.

Decay Turtle 模拟得到的束流寿命约为 4.2h, 高能所加速器中心理论组利用 MAD8 计算得到的 Touschek 寿命约为 7.1h. 束流寿命差异的主要原因为

Decay Turtle 中为简化模拟, 只考虑了单次的 Touschek 作用, 若考虑多次 Touschek 作用, 束流寿命约为 6.4h, 与 7.1h 相差不多. 所以, 从束流寿命的角度看,

模拟是可信的.

总的丢失到对撞区 $[-5.0\text{m}, +5.0\text{m}]$ 范围内的电子和正电子速率约为 12MHz . 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, 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, 轭铁, 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的探测器. 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设置任何阈值.

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		EMC 辐射		TOF 单元	
	单丝计数率/kHz		剂量/(rad/a)		计数率/kHz	
	层1	层2	桶部	端盖	桶部	端盖
最大值	2.83	2.08	2.99	4.38	3.43	1.78
平均值	1.50	1.23	0.14	1.06	2.17	1.17

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		EMC 辐射		TOF 单元	
	单丝计数率/kHz		剂量/(rad/a)		计数率/kHz	
	层1	层2	桶部	端盖	桶部	端盖
最大值	2.54	2.00	2.34	4.28	3.02	1.85
平均值	1.54	1.30	0.12	1.02	1.68	1.02

由表中结果可见, 探测器本底都远小于安全剂量 (见表 1). TOF 最大单丝计数率约为 3kHz (500keV 阈值时).

2.3 Touschek 本底的主要来源

Touschek 本底主要来自对撞点上游 17m 左右-Q5 磁铁附近区域. 在当前的加速器 Lattice 设计中, 该区域 dispersion 较大, 而水平 β 函数偏小. 图 5 为丢失到对撞点上游 5m 到对撞点之间区域的 Touschek 粒子的典型运动轨迹.

由图 5 可以看出, 丢失在对撞点上游 5m 到对撞点之间区域的粒子主要来自对撞点上游 17m 左右区域. 在 BEPC II 以前一个 Lattice 的本底模拟中, 由于对撞

点上游 17m 左右区域的水平 β 函数较小, 其 Touschek 本底约为当前模拟结果的 50 倍, 超出了 MDC 和 TOF 的承受范围. 因此, 为了降低探测器的 Touschek 本底, 在下一步的加速器 Lattice 优化设计中, 应当尽可能地增大对撞点上游 17m 左右区域的水平 β 函数, 以减小 Touschek 作用的概率, 降低探测器的 Touschek 本底.

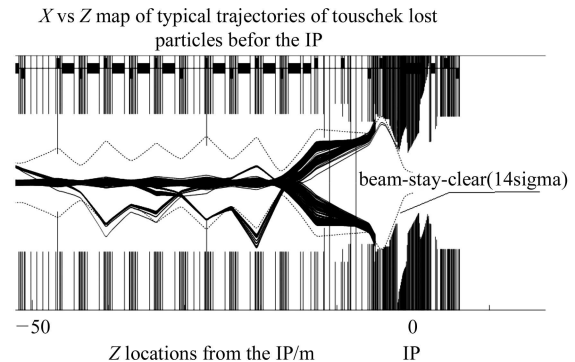


图 5 丢失到对撞点上游 5m 到对撞点之间区域的 Touschek 粒子的典型运动轨迹

3 总结

本文介绍了 Touschek 效应的作用原理和建模方法, 并以 BEPC II / BESIII 为例, 利用通用的模拟工具, 对 BESIII Touschek 本底做了比较细致的模拟. 模拟和计算的束流寿命比较表明模拟是基本合理的, 模拟结果是有参考价值的. 探测器响应的模拟结果表明 Touschek 本底不会影响将来 BESIII 的正常稳定运行, 不会造成探测器的辐照损伤. 安装探测器钨挡板对降低 Touschek 本底有一定的好处. 在下一步的加速器 Lattice 优化设计中, 应尽可能增大对撞点上游 17m 附近的束团尺寸, 以尽可能降低 Touschek 本底, 减小其对探测器的影响.

感谢高能物理所加速器中心和实验物理中心秦庆、徐刚、黄楠、于程辉、吕峰、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 (References)

- 1 Preliminary Design Report of BEPC II. Linac: IHEP-BEPC II-SB-03-2; Storage Ring: IHEP-BEPC II-SB-03-3. 2003 (in Chinese)
(北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPC II 初步设计. 直线加速器: IHEP-BEPC II-SB-03-2; 储存环: IHEP-BEPC II-SB-03-3). 2003
- 2 Preliminary Design Report of the BESIII Detector: IHEP-BEPC II-SB-13. 2004
- 3 Le Duff J. Single and Multiple Touschek Effects. CERN, 1995. 573—586
- 4 JIN Da-Peng et al. HEP & NP, 2004, **28**(11): 1197—1202 (in Chinese)
(金大鹏等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(11): 1197—1202)

- 5 ZHOU Neng-Feng et al. HEP & NP, 2004, **28**(3): 227—231
(in Chinese)
(周能峰等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(3): 227—231)
- 6 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
- 7 GEANT Detector Description Tool(Version 3.21). CERN Program Library W5103, CERN, 1994

Monte Carlo Simulation of the BEPC II /BESIII Backgrounds ——Touschek Effect^{*}

JIN Da-Peng^{1,2;1)} GUO Ya-Nan¹ WANG Yi-Fang¹ WU Ling-Hui^{1,2}
LIU Zhen-An¹ ZHAO Di-Xin¹ YU Zhong-Qiang¹

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

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

Abstract Motivation of the Touschek backgrounds study is introduced. Also introduced are the theory and modeling methods of the Touschek effect. The Touschek backgrounds of the main detectors of the BESIII are studied in detail using the self-reprogrammed general simulation tools. Comparison of the beam lifetime between the simulated and calculated ones shows that the simulations are reasonable and the results are meaningful. Results of the detectors' backgrounds show that the Touschek backgrounds won't affect the normal run of the future BESIII and won't damage the main detectors.

Key words Touschek effect, single wire counting rate, radiation dose, background

Received 3 August 2005, Revised 29 November 2005

^{*}Supported by National Natural Science Foundation of China (10491300), 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