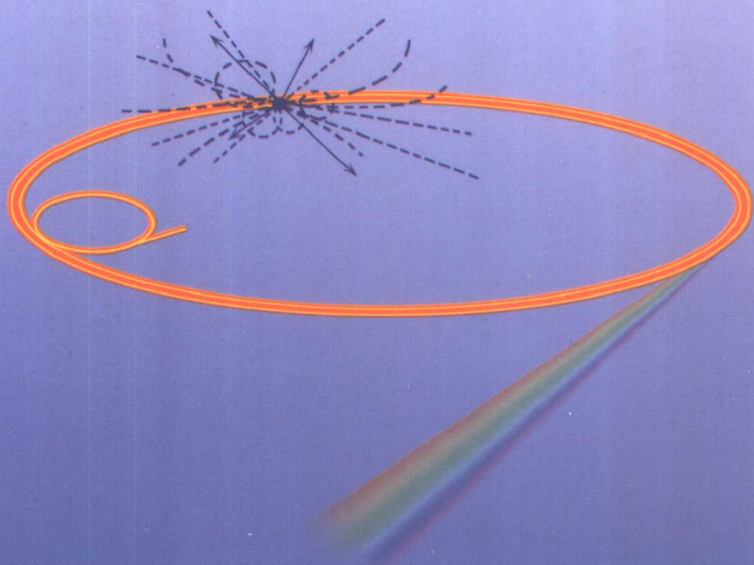


电子储存环物理

(修订版)

金玉明 编著



中国科学技术大学出版社

电子储存环物理

(修订版)

金玉明 编著

中国科学技术大学出版社

2001·合肥

内 容 提 要

本书阐述电子储存环的基本理论,内容包括粒子动力学、辐射阻尼和辐射激发、束团尺寸、束流寿命、磁铁公差及轨道校正、束流发射度及光源亮度、束流不稳定性、同步辐射光源储存环的磁铁聚焦结构、正负电子对撞机。此外,在附录 I 中对同步辐射的光谱、光通量公式作了详细的推导,在附录 II 中给出目前全世界的同步辐射光源表。

本书可作为攻读加速器物理的研究生教材,也可供从事同步辐射光源和正负电子对撞机的设计人员以及使用同步辐射做实验研究和用对撞束流做粒子物理实验研究的研究人员、大学教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子储存环物理/金玉明编著. —1 版(修订版). 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.7

ISBN 7-312-01258-2

I. 电… II. 金… III. 储存环—理论 IV. TL594

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 85806 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168/32 印张:7 字数:182 千

1994 年 3 月第一版

2001 年 4 月第二版(修订版) 2001 年 4 月第一次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7-312-01258-2/O·235 定价:15.00 元

修订版前言

这次再版的“电子储存环物理”，对原版作了较大的修改，比原版约增加了三分之一篇幅。除了第二、第三、第四、第六章外，其余各章都有变动。新版增加了第九、第十两章。它们分别是同步辐射光源储存环的磁铁聚焦结构（第九章）和正负电子对撞机（第十章）。这两章在第一次出版时就构想过，但当时为了赶上九三级研究生使用，匆忙付印，来不及撰写，只好阙如，这次把它补上，也算是还了心愿。第八章束流不稳定性，增加了较多的内容，特别是尾场和阻抗是新添的，因为不知道尾场和阻抗是很难了解束流不稳定性的。新版还对第七章的同步辐射光源亮度的内容作了更新，特别是对同步辐射光谱的公式作了详细推导。因为它涉及的数学公式很多，所以把它放在附录中。

本书虽然是为学习加速器的研究生写的，但是它对于从事同步辐射应用研究和高能物理实验研究的人们也是有用处的。

在本书的修订过程中得到了许多同事和朋友的帮助。美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的赵午先生和中科院高能所国智元先生审阅了第八和第十章，并提出了许多宝贵意见；国家同步辐射实验室张鹏飞博士、李永军

博士对增写的部分手稿作了认真的校核；国家同步辐射实验室刘祖平教授对束流不稳定性的内容提了中肯意见。作者在此一并表示感谢。

作 者

2000年12月

前 言

本书是为中国科学技术大学加速器专业研究生编写的教材。作者曾为中国科学技术大学加速器专业七八级、八一级、八二级、八三级、八五级、八九级研究生讲授过这些内容,本书就是在作者的讲义的基础上修改而成的。

本书着重介绍电子储存环的基本理论,内容包括储存环的粒子动力学、辐射阻尼和激发、束团尺寸、束流寿命、磁铁公差及轨道校正、束流发射度及光源亮度、束流不稳定性。书中的许多公式不仅对储存环的设计是很有用的,而且对利用电子储存环的同步辐射做实验研究也是有参考价值的。

电子储存环作为高能物理和同步辐射研究的工具最近十几年有了蓬勃的发展。我国也在80年代末到90年代初先后建成了三台电子储存环,即北京的正负电子对撞机(BEPC)、合肥的专用同步辐射光源(HLS)和台湾新竹的第三代同步辐射光源(SRRC)。因此,在我国电子储存环将会日益被人们熟悉。希望本书对那些想了解电子储存环的人们也有所裨益。

作者在此对审阅本书全部稿件的徐建铭先生及曾经支持和帮助出版的同事们表示衷心的感谢。

因为本书要赶上九三级研究生使用,时间仓促,错误和不足之处一定不少,衷心希望读者批评指正。

编 者

1993年12月于合肥

目 录

修订版前言	(I)
前 言	(II)
第一章 绪言	(1)
1.1 电子储存环的发展历史和现状	(1)
1.2 粒子物理实验用储存环	(2)
1.3 同步辐射专用储存环	(5)
第二章 电子储存环的粒子动力学	(11)
2.1 粒子的横向运动	(11)
2.2 横向振荡的特性	(18)
2.3 动量分散函数 η	(27)
2.4 粒子的纵向运动——能量振荡	(32)
第三章 辐射阻尼和辐射激发	(48)
3.1 同步辐射的能量损失	(48)
3.2 能量振荡的阻尼	(49)
3.3 横向振荡的阻尼	(56)
3.4 辐射阻尼的时间常数和衰减分配数	(63)
3.5 辐射激发	(64)
第四章 束团尺寸	(71)
4.1 束团宽度	(71)
4.2 束团高度	(77)
4.3 束团长度	(81)
4.4 横向振荡耦合时的束团尺寸	(82)
第五章 束流寿命	(85)
5.1 束流的量子寿命	(85)

5.2	束流的真空寿命(残余气体散射寿命)	(93)
5.3	束流的托歇克(Thouschek)寿命	(96)
第六章	磁铁公差及轨道校正	(103)
6.1	二极场的误差及闭轨畸变	(103)
6.2	梯度误差及工作点和 β 函数的变化	(105)
6.3	轨道校正	(107)
6.4	色品及其校正	(109)
第七章	束流发射度及光源亮度	(112)
7.1	束流发射度	(112)
7.2	同步辐射光源的亮度(Brightness)	(113)
第八章	束流不稳定性	(122)
8.1	束流不稳定性的分类及其产生的机理	(122)
8.2	尾场和阻抗	(123)
8.3	电子储存环中的束流不稳定性	(134)
8.4	克服束流不稳定性的方法	(145)
第九章	同步辐射光源储存环的磁铁聚焦结构	(148)
9.1	同步辐射光源储存环的磁铁聚焦 结构(Lattice)类型	(148)
9.2	最小束流发射度的聚焦结构	(150)
9.3	储存环聚焦结构设计中的比例定律	(158)
9.4	同步辐射积分	(163)
9.5	动力学孔径	(165)
第十章	正负电子对撞机	(167)
10.1	引言	(167)
10.2	对撞机的亮度(Luminosity)	(170)
10.3	主要设计参数的探讨	(172)
10.4	束-束相互作用	(174)
10.5	粒子工厂	(182)
附录	(188)

I	公式(3.131)和公式(3.132)的推导.....	(188)
II	同步辐射的频谱、光通量	(192)
III	全世界正在运行、建造和计划中的储存环 同步辐射光源.....	(208)
IV	常用物理常数表.....	(211)
	参考文献	(212)

第一章 绪 言

1.1 电子储存环的发展历史和现状

电子储存环是储存高速电子束流的设备。在储存环中电子可以长时间地(几个小时甚至几十小时)作回旋运动,也可以把电子加速到更高的能量。所以储存环也是一种加速器,有人称它为储存环加速器。

电子储存环是加速器技术发展史上的一个飞跃,首先是由于粒子物理实验的需要而发展起来的。现在仍在不断的发展中。

用储存环储存的电子、正电子作对撞实验来研究粒子物理的构想是 20 世纪 50 年代提出的,20 世纪 60 年代初建成了最早的几台储存环,它们是意大利弗拉斯卡蒂的 250MeV 储存环 AdA (1962),美国斯坦福的 Princeton-Stanford 500MeV 储存环 CBX (1963),前苏联新西伯利亚的 140MeV 储存环 VEP-1(1963),并在这些储存环上进行了正、负电子对撞实验获得成功。此后,世界上相继出现了更多的正负电子对撞机。迄今世界上有 20 台左右的储存环电子对撞机。另一方面,同步辐射的研究工作也在对撞机储存环上逐步开展起来。同步辐射的研究开始是在那些做高能物理研究的储存环上寄生工作的。1968 年美国威斯康星大学的 240MeV 的电子储存环作为专用的同步辐射光源开始工作以后,20 世纪 70 年代专用于同步辐射的电子储存环陆续建成。目前世界上正在作为同步辐射光源运行的电子储存环有几十台(详见附录 III)。

1.2 粒子物理实验用储存环

由于粒子物理发展的需要,要求加速器提供的粒子的能量越来越高,因而加速器的规模和尺寸越来越大,建造费用也越来越高。现代的高能加速器,其规模是很大的,周长以公里计,所用的钢铁以万吨计,投资以亿元计。以目前正在运行的世界上能量最高的两台质子加速器为例:一台是美国费米国家实验室(NAL)的500GeV的质子同步加速器;另一台是西欧核子研究中心(CERN)的400GeV的质子同步加速器。这两台加速器都是20世纪70年代建成的,其规模如表1.1:

表 1.1 目前正在运行世界上能量最高的两台加速器规模

实验室	加速器名称	能量 (GeV)	平均直径 (km)	铁重 (t)	铜重 (t)	投资 (US\$)	建成时间
费米国家实验室	NAL	500	2.0	9000	850	2.3 亿	1972 年
西欧核子中心	SPS	400	2.2	13500	1400	5.3 亿	1976 年

虽然高能加速器仍在不断的发展中,如采用超导技术可以在相同的尺寸下把能量大大提高。像上面提到的NAL,在原加速器上加了一个超导磁体环已经把能量提高到1000GeV。但是应该看到高能加速器的发展将会受到规模和投资上越来越大的限制。对撞机的出现打破了同步加速器的能量限制,可以使加速器往超高能发展。

1.2.1 有效作用能

两个粒子之间的有效作用能,等于该两粒子在它们的质心系统中的动能之和。一个在实验室坐标系中以速度 v 运动的粒子去

轰击在实验室坐标系中静止的同种粒子,则两粒子间的有效作用能比运动粒子的动能(在实验室坐标系中的动能)要小得多,因为有一部分要转化为质心系统中的动能。

设运动粒子的动能为 W , 静止靶粒子的能量为 E_0 , 当 $W \gg E_0$ 时, 有效作用能为^[1]

$$T_E \approx \sqrt{2E_0W} \quad (1.1)$$

有效作用能 T_E 与动能的平方根成正比。而两个以同样速度作相对运动的同类粒子相对撞时, 由于这两个粒子的质心系中心对实验室系统是静止的, 因而这两个粒子间的有效作用能为两者在实验室坐标系中动能之和, 即

$$T_E = 2W \quad (1.2)$$

例如两束 30GeV 的质子对撞, 其有效作用能相当于 2000GeV 的质子去轰击静止的质子。2.5GeV 的正负电子对撞机相当于 25000GeV 的正电子去打静止的电子。因为电子的静止质量小, 所以对撞作用对电子特别有利。这就是为什么目前世界上的对撞机大多数都是电子对撞机的缘故。建造一台 25000GeV 的电子同步加速器几乎是不可能的事, 而 2.5GeV 的正负电子对撞机则已成为成熟的技术了。这也就是为什么 20 世纪 70 年代正负电子对撞机得以迅速发展的原因。

1.2.2 对撞机的亮度(Luminosity)

对撞机的亮度被定义为^[2]

$$\mathcal{L} = f \frac{N_1 N_2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_z^*} \quad (1.3)$$

式中的 f 是粒子的回转频率, N_1 和 N_2 是两个对撞束团的粒子的数目, σ_x^* , σ_z^* 分别为对撞点处束团的半宽度和半高度。如果两束团的粒子数相同, 即 $N_1 = N_2$, 则

$$\mathcal{L} = f \frac{N^2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_z^*} \quad (1.4)$$

亮度是表征在对撞机里发生对撞的几率的一个量。它是单位时间单位反应截面内所产生的反应事例数,单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从式(1.3)可以看出,亮度是与两束团的粒子数成正比,而与对撞点的束团截面尺寸成反比的。为了提高亮度,必须积累较多的粒子数,或减小对撞点的束团的截面尺寸。但是无论提高流强(即增加粒子数),或者减小束团的截面尺寸,都会受到各种限制。如流强的提高受到束流不稳定性的限制,而束团截面尺寸的减小则又受到对撞区的 β 函数值的限制。

在对撞机中,亮度只能优化在某一设计能量 E_T 上。大于或小于这个设计能量,亮度都会迅速下降。当高于设计能 E_T 时,流强主要受到高频功率的限制。假设高频腔对每个束流提供的功率为 P_H ,每个粒子每回转一圈所辐射的能量为 U_0 ,则该束流中可能的最大粒子数为

$$N_{\max} = P_H / fU_0 \quad (1.5)$$

式中的 f 为电子的回转频率。由于 U_0 是正比于能量的四次方的,所以 $N_{\max} \propto E^{-4}$;同时因为 $\sigma_x^* \sigma_z^* \propto E^2$,所以在高于 E_T 的能区, $\mathcal{L} \propto E^{-10}$ 。但是在低于 E_T 的能区,主要是由于束束相互作用,亮度也会迅速下降。在两个束团对撞时,一个束团中的粒子将会受到另一个束团中的粒子所产生的电磁场的作用而产生频移的现象。当频移超过某一值后,将会导致束流的大量损失。所产生的线性频移值为

$$\Delta\nu_x = \frac{Nr_e\beta_z^*}{2\pi\gamma\sigma_z^*(\sigma_x^* + \sigma_z^*)} \quad (1.6)$$

$$\Delta\nu_z = \frac{Nr_e\beta_x^*}{2\pi\gamma\sigma_x^*(\sigma_x^* + \sigma_z^*)} \quad (1.7)$$

从上面两式不难导出 $N_{\max} \propto E^2$,所以 $\mathcal{L} \propto E^4$ 。因此在低于 E_T 的能区,亮度是随能量的四次方下降的(见图 1.1)。

1.3 同步辐射专用储存环

电子储存环不但是粒子物理研究的重要工具,也是同步辐射研究的重要设备。目前不仅绝大多数电子对撞机都兼做同步辐射的研究工作,而且专用于同步辐射的电子储存环从 20 世纪 70 年代后也陆续开始建造。目前世界上正在运行、建造和计划中的储存环同步辐射光源有 70 余台(见附录 III)。其中 20 世纪 80 年代初建

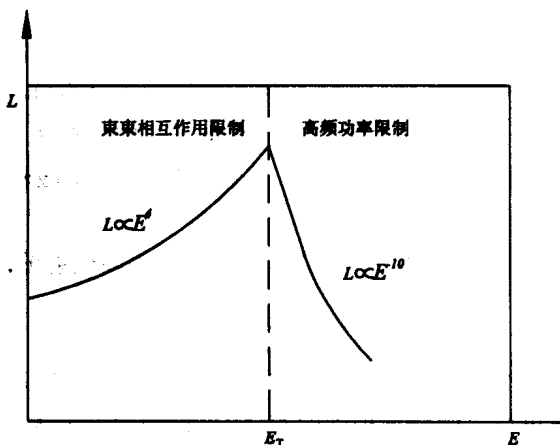


图 1.1 亮度与能量的关系曲线示意图

成的几台专用同步辐射光源能量在 0.7MeV 到 2.5GeV 之间,特征波长在几埃到几十埃之间(1 埃=0.1 纳米,即 $1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$),流强在几百毫安到 1 安之间。这就是所谓的第二代同步辐射光源。有的还安装了超导扭摆磁体(Wiggler)以获得更短波长的辐射,或安装波荡器(Undulator)以获得更强的辐射光。20 世纪 80 年代末到 20 世纪 90 年代初又建成了三台 6GeV~8GeV 高能区的储存环同步辐射光源,这就是所谓的第三代同步辐射光源了。第三代同

步辐射光源大多数还是能量在 2.5GeV 以下的低能区,如美国贝克莱实验室的 ALS。第三代同步辐射光源的特点是束流发射度低,并且主要的同步光来自插入元件(Undulator, Wiggler)。目前又在计划建造中等能区 3GeV~4GeV 的第三代同步辐射光源了,如中国上海的 SSRF 和英国达累斯堡的 DIMOND。

1.3.1 同步辐射原理

大家知道,带电粒子在作加速运动时会辐射电磁波,并损失其能量。高能电子在磁场中作圆周运动时,由于是在作向心加速运动,所以会以光的形式辐射能量。因为这种辐射是首先在电子同步加速器中观察到的,所以人们称它为“同步加速器辐射”,简称为“同步辐射”,或“同步光”。而专门以生产这种辐射为目的的电子储存环叫做“光子工厂”。又因为辐射是电子与同步加速器或储存环的磁场相互作用产生的,所以有人也称它为“同步磁辐射”,或者“磁致辐射”。

当一个相对论性电子作圆周运动时,它每圈辐射的能量为

$$U_0 = 8.85 \times 10^{-32} \frac{E^4}{R} \quad (1.8)$$

式中 E 是电子的能量,用电子伏作单位; R 是电子轨道的曲率半径,用米作单位。所计算得到的 U_0 的单位仍为电子伏。从上式可看出当电子轨道的曲率半径不变时,电子每圈辐射的能量是随电子的能量的四次方增加的。例如在一个能量为 400MeV,曲率半径为 1.33m 的电子储存环中,一个电子在其中每回旋一圈所辐射的能量为 1.7keV。而在一个能量为 4GeV,电子轨道的曲率半径为 12.7m 的电子储存环中,一个电子每回旋一圈所辐射的能量达 1.785MeV!

如果有 N_0 个电子在储存环中作回旋运动,回旋频率为 f_c ,则总的辐射功率为

$$P_r = f_c N_0 U_0 \quad (1.9)$$

同步辐射的光谱是连续谱,它的强度是波长 λ 的函数,可用下式计算^[3]:

$$N(\lambda) = 7.86 \times 10^{11} J(\text{mA}) \frac{[E(\text{GeV})]^7}{[\rho(\text{m})]^2} \lambda(\text{\AA}) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3 \cdot \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta \quad (1.10)$$

式中的 $N(\lambda)$ 为光通量,它是沿电子轨道的切线方向 1 毫弧度的水平角中在 1 埃 ($1 \text{\AA} = 0.1 \text{nm}$) 的范围内每秒发射的波长为 λ 的光子数; J 为储存环中的循环电流; E 为电子的总能量; ρ 为发射点的电子轨道的曲率半径; λ_c 为特征波长; $K_{5/3}(\eta)$ 为第二类分数阶的修正贝塞耳函数。

特征波长是由电子的能量和电子轨道的曲率半径决定的。它被定义为

$$\lambda_c = \frac{4\pi}{3} \rho \gamma^{-3} \quad (1.11)$$

式中的 γ 为电子的相对能量, $\gamma = E/m_0c^2$, E 为总能量, m_0c^2 为电子的静止能量。

1.3.2 同步辐射的特性

同步辐射具有以下特性:

1. 辐射光强度大

能量为几个 GeV 的电子储存环(储存电流为几百毫安)的平均辐射功率可达 100kW 的数量级,而最大的旋转靶 X 光机的平均辐射功率仅 10W 左右。因此,同步辐射的功率是人们熟知的 X 光机的 10000 倍左右。同步辐射是一种极强的光源。

2. 光谱连续而且范围宽

同步辐射是非束缚态电子的辐射,所以它的光谱是连续的,并且非常宽广,从红外、可见光、紫外、真空紫外、软 X 射线,直到硬 X 射线。利用各种单色仪,它可以成为波长连续可调的光源。这是

激光光源和 X 光机光源做不到的。

3. 方向性好

当电子的速度接近光速时,辐射是一个沿着电子运动的切线方向的光锥。光锥的半张角为

$$\begin{aligned}\psi_{1/2} &= \frac{m_0 c^2}{E} \\ &= \frac{1}{\gamma}\end{aligned}\quad (1.12)$$

一个能量为 500MeV 的电子储存环, $\psi_{1/2} \approx 1\text{mrad}$ 已接近平行束, 可与激光的方向性相比拟了。当能量更高时, 方向性更好。

4. 高度偏振

同步辐射在电子轨道平面内是完全偏振的光, 偏振度达到 100%; 离开轨道平面, 则偏振度迅速下降。

5. 脉冲的时间结构

由于在同步加速器和储存环中自动稳相的结果, 电子都聚焦在平衡相角附近, 成为一团一团的。束团的个数, 就是高频的谐波数。这些一团团的电子束在发光时就得到一个一个一个的光脉冲。束团很短, 因而辐射的脉冲宽度很小, 短的可达 0.1 纳秒(ns), 甚至更短的可达几十皮秒(ps), 而脉冲的时间间隔则为几十纳秒(ns), 或更长。

6. 真空清洁

由于同步辐射是在超高真空(储存环的真空度为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 托, 1 托 = 1 Torr = 133.3224 Pa) 或高真空(同步加速器的真空度为 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 托) 的条件下获得的, 又没有普通光源中的电极溅射问题, 所以同步辐射是一种十分洁净的光源。

7. 波谱可以准确计算

同步辐射的波谱可根据储存环的参数按照式(1.10)准确计算, 这是别的光源很难做到的。因此它可以作为一种标准光源来校准光学仪器或定标别的光源。