

# 圆形加速器的注入和引出技术\*

唐靖宇<sup>1)</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 圆形加速器中的注入引出通常是关键性的系统, 它们在从一个加速阶段到另一个加速阶段或从加速器到实验系统的束流传输中起到重要作用. 注入引出区通常也是发生较大束流损失的地方. 受制于空间限制和尽可能减小对循环束的干扰的要求, 注入引出的电磁设备设计通常都需要满足不少特殊的要求如: 紧凑性、低杂散场、快上升或下降时间等等. 常用的注入引出元件包括: 切割磁铁、冲击磁铁、静电偏转板、慢凸轨磁铁和剥离膜等. 尽管不同的加速器类型和具体设计对注入引出系统的要求是不一样的, 但很多设计和制造中的技术和工艺是类似的, 可以在不同实验室中共享. 本文给出了国内主要的圆形加速器所采用的注入和引出技术的综述.

**关键词** 注入引出技术 切割磁铁 冲击磁铁 凸轨磁铁 静电偏转板 剥离膜

## 1 引言

圆形加速器中的注入引出通常是关键性的系统, 它们在从一个加速阶段到另一个加速阶段或从加速器到实验系统的束流传输中起到重要作用, 而且注入引出区通常也是发生较大束流损失的地方, 因此较高的传输效率是非常重要的. 受制于空间限制和尽可能减小对循环束的干扰的要求, 注入引出的电磁设备设计通常都需要满足不少特殊的要求如: 紧凑性、低杂散场、快上升或下降时间等等. 在某些情况下, 由于剩余辐射本底较大, 设备的可维护性是个很重要的设计考虑因素. 常用的注入引出元件包括: 切割磁铁、冲击磁铁、静电偏转板、慢凸轨磁铁等. 对于采用剥离注入或引出的加速器, 剥离膜和相应的支撑和驱动也是个重要设备. 在中国, 已建成了多台大型的圆形加速器, 还有几台在设计或建造之中, 包括电子储存环(BEPC, HLS, SSRF-BS增强器, SSRF-SR储存环), 重离子储存环(CSRm and CSRc), 重离子回旋加速器(SFC, SSC, CYCIAE-100), 快循环质子同步加速器(CSNS-RCS)等. 尽管不同的加速器类型和具体设计对注入引出系统的要求是不一样的, 但很多设计和制造中的技术和工艺是类似的, 其中绝大部分是在国内完成加工和制造的. 本文给出了这些加速器所采用的

注入和引出技术的综述.

## 2 切割磁铁

切割磁铁主要用于环形加速器中, 其主要特点是紧凑性和很薄的切割板, 因而可在离循环束流很近的位置偏转束流. 分割循环束流和外部束流的电流切割板通常是个关键性的部分, 因为匝数少, 承载电流通常很大, 消耗功率也大, 水冷设计通常很重要且有时很困难. 主要的切割磁铁类型有: 常规切割磁铁(C型磁轭, 窗型线圈)、Lambertson型磁铁、涡流型切割磁铁.

常规切割磁铁用于HIRFL-CSRm和CSRc的注入和引出<sup>[1]</sup>以及CSNS-RCS的注入系统中. Lambertson型磁铁用于BEPC的注入<sup>[2, 3]</sup>和RCS的引出系统中. 涡流型切割磁铁用于HLS and SSRF-SR的注入和, SSRF-BS的注入及引出系统中, 它们的主要参数见表1. 切割磁铁的主要技术挑战是: 常规切割磁铁线圈中的高电流密度和高速冷却水问题, Lambertson型切割磁铁的杂散磁场问题, 涡流型切割磁铁的机械振动和真空中放气率问题. 线圈的绝缘和固定通常也是主要技术问题.

2008 - 01 - 07 收稿

\* 国家自然科学基金(10775153)和中国科学院知识创新工程重大项目资助

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

表 1 几台切割磁铁的主要参数

	BEPC-I	BEPC-IR	CSRm-E	SSRF-BS-E	CSNS-I	CSNS-E
类型	Lambertson	常规	常规	涡流	常规	Lambertson
有效长度/m	1.6	0.6	1.0	0.6	1.2	2.2
磁场/T	0.815	0.462	0.430	1.000	0.425	0.936
切割板厚/mm	5.5	16.4	10	8	20	15
波形	DC	DC	DC	半正弦	DC	DC
孔径 $H \times V/\text{mm}^2$	25×150	109×84	40×40	26×10	28×60	112×118
重复频率/Hz	DC	DC	DC	2	DC	DC
电流/A	274	1300	2500	10000	1750	1500
电流密度/(A/mm <sup>2</sup> )	2.2	41.3	~10	889.8	40.0	8.9

注: 在多台同类型元件的情况下, 只列其中的一台; CSNS相关的只是设计参数(文中相同).

### 3 冲击磁铁

冲击磁铁用于环形加速器的单圈注入和单圈引出, 是安装在环内部的设备. 对于单圈注入方式, 冲击磁铁的作用是将经过切割磁铁偏转的注入束流移到循环束流轨道上, 而对单圈引出束流则采用相反的过程. 注入冲击磁铁的下降沿和引出冲击磁铁的上升沿很小以避免对循环束流产生影响. 主要的冲击磁铁类型有: 空芯电流板型、传输线型和集中参数型. 对于相应的电源则可以采用不同的脉冲高压系统(通常称为PFN).

空芯冲击磁铁用于 BEPC 的注入, 集中参数型用

于 SSRF-SR 的注入、HIRFL-CSR<sup>[4]</sup> 和 CSNS-RCS 的引出、SSRF-BS 的注入和引出. 通常采用的 PFN 有: PFL 型(基于传输电缆), 用于 HIRFL-CSR 和 SSRF-BS; 集中参数 PFN 计划用于 CSNS. 对于采用半正弦波的 BEPC 和 SSRF-RF, 采用比较简单的 LC 充放电回路就可以满足要求了. 这些冲击磁铁的主要参数见表 2. 传输线型的冲击磁铁尽管在国际上也得到广泛应用, 相对地技术上更为复杂, 在国内尚没有采用. 冲击磁铁的主要技术挑战有: 很高的电压、陶瓷真空盒的金属镀膜、减小束流阻抗、镀 TiN 膜以降低二次电子发射、很短的上升或下降时间、脉冲的平顶度、高重复频率情况的可靠性等.

表 2 几台主要冲击磁铁的参数

	BEPC	CSRm	SSRF-BS	SSRF-SR	CSNS
磁铁类型	空芯	铁氧体, 集中参数	铁氧体, 集中参数	铁氧体, 集中参数	铁氧体, 集中参数
有效长度/m	1.45	0.295	0.80	0.60	0.30
磁场/G	140	380	240	940	580
上升/底宽时间/ns	600	200	250	3800	250
PFN	LC	PFL, Rayleigh	PFL, Rayleigh	Simple LC	集中, Blumlein
工作电流/A	2100	2700	500	3150	2900
充电电压e/kV	30	80	15	7.5	40

### 4 静电偏转板(ESD)

如果注入或引出过程是近似连续的, ESD 通常是一个重要设备, 如在回旋加速器中或强子同步加速器不采用剥离方法的多圈注入和慢引出中. 其特点是切割板可以非常的薄且不承载大的电流, 这对减小注入或引出过程中的束流损失是非常重要的. 对于回旋加速器中的轴向注入系统, 通常还采用螺旋型的 ESD 以应对在两个相互垂直平面上的偏转. HIRFL-SSC 的注入和引出、HIRFL-SFC 的引出采用普通的 ESD, 而 SFC 和 CYCIAE-100 的注入则采用螺旋型的 ESD. HIRFL-CSRm 和 CSR<sub>e</sub> 采用普通型 ESD 用于多圈注入和慢引出. 这些 ESD 的主要参数见表 3.

ESD 的主要技术挑战有: 复杂的三维电极面的加工、高电压的支撑和绝缘、抗击穿设计、较高精度和高可靠性的驱动和定位等. 如在磁场中, 垂直电场分

量一般不能超过 25kV/cm, 而一般的偏转电场则控制在 100kV/cm 以内.

表 3 几台静电偏转板的主要参数

	HIRFL-SFC	HIRFL-SSC	HIRFL-CSRm	CYCIAE-100
类型	弧形	直线	直线	螺旋
功能	引出	引出	引出	注入
电极长度/m	~1.0	1.4	1.2	6.3
最高电压/kV	75	120	160	±4
间隙/mm	5—15	15	10—40	7—8
电场/(kV/cm)	75	80	80	11

### 5 慢凸轨磁铁

注入和引出系统有时也采用慢凸轨磁铁, 在某些实验室也统称为冲击磁铁, 这里将其定义为影响循环束流多圈运行的磁铁. 它提供一个随时间变化的局部凸轨以将循环束流轨道移至剥离膜或切割板(切割磁铁或 ESD), 从而使注入束流与循环束流可以融合在一起或起到降低冲击磁铁强度的作用. 局部凸轨会在

注入结束后衰退或在引出之前才激发. 在 CSNS-RCS 中采用可编程的变化凸轨以将束流均匀地注入到相空间中, HLS<sup>[5, 6]</sup> 和 HIRFL-CSRm<sup>[7]</sup> 也采用凸轨的下降沿进行多圈注入, SSRF-BS 则采用慢凸轨降低对引出冲击磁铁的要求, HIRFL-CSRm 利用主二极铁上的辅助线圈进行慢凸轨操作进行快引出. 几台慢凸轨磁铁的主要参数见表 4.

表 4 几台慢凸轨磁铁的主要参数

	HLS	CSRm-I	CSNS-I
磁铁类型	铁氧体	铁氧体	矽钢片
有效长度/m	0.27	0.5	0.3
磁场/T	0.128	0.078	0.231
波形	半正弦	梯形	编程
下降沿/ $\mu\text{s}$	1.8	30	150—400
孔径 $H \times V/\text{mm}^2$	32 $\times$ 36	150 $\times$ 80	140 $\times$ 170
重复频率/Hz	0.5	35	25
电流/A	3500	3000	18000

慢凸轨磁铁的上升或下降沿通常为  $\mu\text{s}$  级, 比冲击磁铁长的多, 但是磁场变化率还是太快而不能采用金属真空盒. 如果磁场在 0.25T 以下, 磁轭采用薄矽钢片或铁氧体材料均可以, 如果磁场更高, 一般情况下采用前者. 陶瓷真空盒有时还需要镀金属膜以解决阻抗

问题. 主要的技术挑战有: 大尺寸陶瓷真空盒的制造和焊接、控制磁场质量和束流阻抗的金属镀膜、矽钢片中的涡流效应、快脉冲引起的机械振动、上下沿可编程的大电流电源等.

## 6 剥离膜

剥离膜广泛用于重离子和 H- 离子加速器中, 束流通过膜后改变电荷态从而也改变运动方向, 因而可以避免在注入或引出过程中采用 ESD 类的设备并进一步减小束流损失. 在强流质子加速器中, 这也是目前唯一的可在环中累积高粒子数的方法. 根据不同的用途、离子种类和束流特征, 剥离膜的选择也是不同的, HIRFL-CSRm, CYCIAE-100 和 CSNS-RCS 均采用碳剥离膜, 但尺寸大小、厚度均不相同, 支撑和驱动机构的设计也不相同. 主要的技术挑战是: 高质量膜的生产、膜的在线驱动和更换等.

作者特别感谢国内兄弟单位的同事提供相应的设计参数和图片, 尤其是高能所的庞家标和康文, 合肥光源的王相綦, 上海光源的李浩虎、谷鸣和刘波, 近物所的马力楨、满开弟和高大庆, 原子能院的安世忠等.

## 参考文献(References)

- 1 MA Li-Zhen et al. IEEE Transaction, 2006, **16**(2): 1271
- 2 PANG J B. 15th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Hamburg, July 1992, Int. J. Mo. Phys. A, 1993, **28**(Proc. Suppl.): 620—622
- 3 PANG J B. Proc. of 4th China Particle Accelerator Symposium, 1998.12, Beijing. 285 (in Chinese)  
(庞家标. 第四次全国粒子加速器学术年会论文集, 1998.12, 北京. 285)
- 4 MA Li-Zhen et al. High Power Laser and Particle Beam, 2006, **18**(2): 147 (in Chinese)  
(马力楨等. 强激光与离子束, 2006, **18**(2): 147)
- 5 WANG Xiang-Qi et al. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, **37**(4): 350 (in Chinese)  
(王相綦等. 中国科学技术大学学报, 2007, **37**(4): 350)
- 6 WANG Lin et al. PAC 2001. Chicago, 3600—3602
- 7 MA Li-Zhen et al. IEEE Transaction, 2006, **16**(2): 1269

# Injection and Extraction Techniques in Circular Accelerators<sup>\*</sup>

TANG Jin-Yu<sup>1)</sup>

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

**Abstract** Injection and extraction are usually the key systems in circular accelerators. They play important roles in transferring the beam from one stage acceleration to the other or to experimental stations. It is also in the injection and extraction regions where beam losses happen mostly. Due to the tight space and to reduce the perturbation to the circulating orbit, the devices are usually designed to meet special requirements such as compactness, small stray field, fast rise time or fall time, etc. Usual injection and extraction devices include septum magnets, kicker magnets, electrostatic deflectors, slow bump magnets and strippers. In spite of different accelerators and specification for the injection and extraction devices, many techniques are shared in the design and manufacturing. This paper gives a general review on the techniques employed in the major circular accelerators in China.

**Key words** injection extraction technique, septum, kicker, slow bump, electrostatic deflector, stripper

Received 7 January 2008

<sup>\*</sup> Supported by NSFC (10775153) and Knowledge Innovation Project of CAS

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