

# 加速器束流诊断技术的新进展\*

孙葆根<sup>1)</sup> 罗箐 王晓辉

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 介绍了加速器束流诊断技术的新进展,包括束流位置测量技术、束团横向尺寸测量技术和束团长度测量技术.束流位置测量技术主要介绍具有高位置分辨率的腔型束流位置检测器和数字束流位置处理技术.束团尺寸测量技术主要介绍高空间分辨率的激光丝扫描器、光学渡越辐射和光学衍射辐射技术.束团长度测量技术主要介绍高时间分辨率的相干辐射光谱技术、RF 横向偏转腔、RF 零相位技术和电光采样技术.

**关键词** 束流诊断 束流位置 数字信号处理 束团尺寸 束团长度

## 1 引言

近年来,为了满足X射线自由电子激光(X-FEL)和未来直线对撞机(ILC)对束流诊断的需求,国内外加速器实验室不断发展更先进的诊断技术和方法,尤其是束流位置、束团尺寸和束团长度的测量技术,以满足高位置分辨率、高空间分辨率和高时间分辨率的要求.将从这几个方面展示近年来加速器领域束流诊断和测量技术的一些新进展.

除此之外,还有基于束流的准直技术、同步光位置测量技术、数字束团反馈技术等也是近年来加速器领域束流诊断和测量技术的非常重要进展.

## 2 束流位置测量技术的新进展

### 2.1 腔型束流位置检测器

在X-FEL和ILC中,为了实现对电子束团进行精确的测量和控制,要求束流位置测量的分辨率达到 $1\mu\text{m}$ 以下甚至亚微米,而目前普遍使用的束流位置检测器(如条带型或钮扣型BPM)很难达到这样的要求,因此具有高位置分辨率腔型束流位置检测器(BPM)的研究是热点之一<sup>[1-2]</sup>.

腔型BPM是利用谐振腔的偶极模来监测束流的中心偏移量.腔型BPM主要有圆柱盒(Pill-box)式和重入(Reentrant)式两种类型.

圆柱盒式腔型BPM有两种输出信号耦合方式,即天线耦合和波导耦合.最近发展了具有模式选择

的波导耦合方式,它是利用矩形波导仅耦合偶极模 $\text{TM}_{110}$ ,从而很好地解决共模 $\text{TM}_{010}$ 的泄漏,提高位置分辨率.圆柱盒式腔型BPM具有亚微米的位置分辨率(如KEK的ATF采用三组合BPM最好可达 $15.6\text{nm}@\pm 20\mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>),但时间分辨率较低,一般为几百ns.图1(a)给出了圆柱盒式腔型BPM示意图.

重入式腔型BPM由重入式同轴腔和四个 $90^\circ$ 放置的探头(feedthrough)构成.重入式腔型BPM<sup>[2]</sup>具有好于50ns时间分辨率,且位置分辨率预计可达 $0.2\mu\text{m}$ ,从而具有逐束团位置测量能力.图1(b)给出了重入式腔型BPM的示意图.

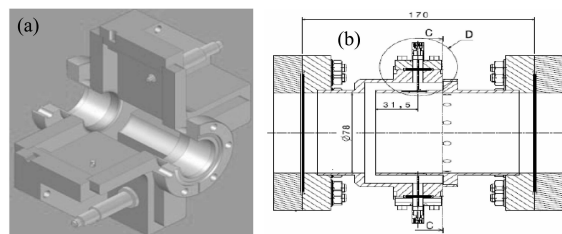


图1 腔型BPM的示意图  
(a) 圆柱盒式腔型BPM; (b) 重入式腔型BPM.

### 2.2 数字束流位置处理技术

数字位置处理技术应用了高速数字化技术和信号处理技术,具有结构简单、系统模块化以及更易于操作和管理等优点,近年来得到广泛应用<sup>[1,3-5]</sup>.

图2为SLS数字束流位置测量系统的方框图<sup>[3]</sup>.从BPM探头来的束流位置信号送到前端电子学模块,

2008-01-07 收稿

\* 国家“985工程”(173123200402002)资助

1) E-mail: bgsun@ustc.edu.cn

将高频信号混频致中频信号后送到数字接收器模块进行采样和数字处理; DSP 模块实现束流位置的计算及反馈算法的实现; 输入输出控制器作为 VME 系统的控制器, 实现和 EPICS 的对接. 最近 Instrumentation Technologies 公司又生产了新一代数字束流位置处理器 Libera<sup>[4]</sup>, 其分辨率可达  $0.3\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>.

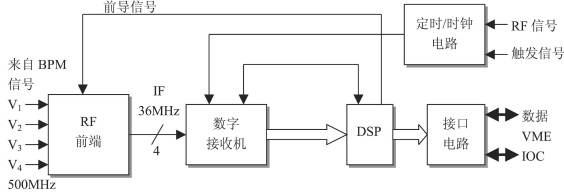


图 2 SLS 的数字束流位置测量系统的方框图

### 3 束团尺寸测量技术的新进展

#### 3.1 光学渡越辐射和衍射辐射束团尺寸测量技术

光学渡越辐射 OTR 作为一种束流诊断工具, 它具有空间分辨率高、时间响应快、装置简单以及多束流参数测量等许多优点, 因此得到了广泛的应用. 图 3 给出了 SLAC 实验室 ATF 上 OTR 装置图和测量结果<sup>[6]</sup>, 分辨率为  $2\mu\text{m}$ , 最小测量尺寸为  $5\mu\text{m}$ .

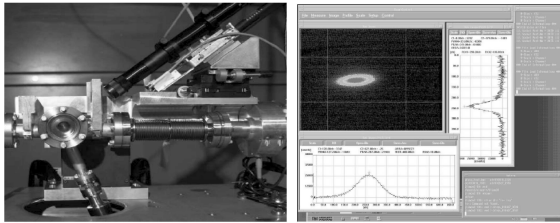


图 3 OTR 测量束流横向截面  
(a) OTR 装置图; (b) 测量结果.

由于 OTR 是拦截测量, 近年人们将目光投向光学衍射辐射 ODR, 通过分析 ODR 的角分布测量结果得到束团尺寸. 最近, G.Naumenko<sup>[7]</sup>提出了采用两个具有夹角为  $\alpha$  的平板构成狭缝, 通过光学透镜后 ODR 会产生干涉条纹, 条纹的可见度与束团尺寸有关, 通过测量可见度得到束团尺寸, 提高了测量能量和分辨率, 其测量结果为  $\sigma = 8.4 \pm 1\mu\text{m} @ 1.28\text{GeV}$ .

#### 3.2 激光丝扫描器束团尺寸测量技术

激光丝扫描器利用束流与激光丝相互作用产生的康普顿散射实现非拦截的束流截面测量. 图 4(a) 给出了激光丝系统的示意图<sup>[8]</sup>, 来自激光器的光被聚焦成小的光点, 其扫描穿过束流, 激光与束流产生的康普顿散射光子在下游端进行检测, 通过测量这些光子的总能量与激光光点位置的关系可以得到束流的横向尺寸. 图 4(b) 给出了利用激光丝系统得到的束流尺寸测量结果<sup>[9]</sup>, 其分辨率为  $120\text{nm}$ .

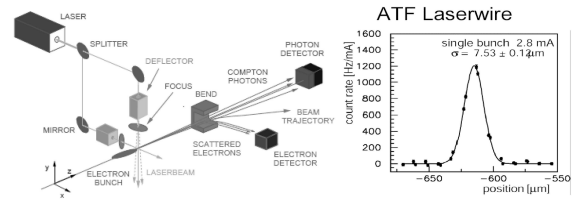


图 4 激光丝系统(a)示意图; (b) 测量结果

## 4 束团长度测量技术的新进展

### 4.1 相干辐射光谱束团长度测量技术

相干辐射光谱束团长度测量技术是利用短束流产生的相干辐射, 对相干辐射进行自相关测量得到束团长度. 相干辐射主要有相干渡越辐射 (CTR)<sup>[10]</sup>、相干衍射辐射 (CDR)<sup>[11]</sup>、相干同步辐射 (CSR)<sup>[12]</sup> 和相干 Smith-Purcell 辐射<sup>[13]</sup>. CTR 的优点是辐射功率高和平坦的非相干发射谱, 缺点是拦截束流, 不适合连续测量. CDR 是非拦截测量, 但 CDR 的测量结果与衍射孔的尺寸有关, 需要修正. CSR 是非拦截测量, 缺点是功率较低, 且非相干发射谱随波长变化而导致测量结果分析困难; Smith-Purcell 辐射是非拦截测量, 且辐射功率较高, 但是其缺点是高的非相干发射谱与波长依赖性以及束流横向位置影响大.

由于超短脉冲的相干辐射位于太赫兹范围, 所以常采用 THz 迈克尔逊干涉仪和高莱 (goley) 探测器进行自相关函数测量. APS 利用自相关法和 CTR/CDR 的束长测量系统<sup>[14]</sup>进行了 400—500fs (FWHM) 的束团长度测量.

### 4.2 横向偏转腔和零 RF 相位束团长度测量技术

横向偏转腔是直接利用束流本身进行束团长度测量. 图 5 给出了横向偏转腔测量束团长度的原理示意图<sup>[15]</sup>. 当具有 RF 偏压的偏转腔工作在 RF 零相位附近时, 束流产生偏转, 则下游端的束斑垂直尺寸反映束团长度的大小. 这样, 利用测量束斑检测器上的束斑尺寸就可以进行束团长度的测量, 可达到 15fs 的分辨率<sup>[16]</sup>. 横向偏转腔法主要缺点是一种破坏性的测量, 且需要大的测量空间, 但是它除可以测量束团长度外, 还可以测量切片参数 (如发射度和能量等), 所以常作为多参数测量手段.

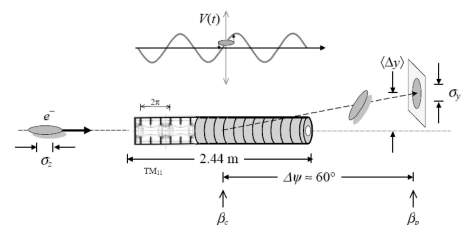


图 5 横向偏转腔测量束团长度的原理示意图

零RF相位技术<sup>[17]</sup>与横向偏转腔类似,它是利用直线加速器中的加速腔作为零相位腔进行束团长度测量,其最小束团长度测量值为84fs(rms)<sup>[17]</sup>.

### 4.3 电光采样束团长度测量技术

电光采样是利用电光晶体的线性电光效应,使用超短光脉冲作为采样脉冲(脉宽可达几飞秒),实现对快速电信号的测量.电光采样法是一种非拦截式的时域测量,主要有四种方式<sup>[16]</sup>,即延迟扫描法、空间解码法、光谱解码法和时间解码法,前者为多次平均测量,后三种为单次发射测量,如图6所示.

延迟扫描法是对不同的时间延迟逐点测量,测量结果是多次平均效果.空间解码法是将采样光脉冲斜入射到电光晶体,通过空时映射实现采样脉冲的延时,最小束团长度(FWHM)为270fs<sup>[18]</sup>.光谱解码法是将采样光脉冲展开成线性啁啾脉冲,其瞬时波长与

时间成正比,束团时间波形就被线性编码到探测光脉冲的波长谱上,通过光谱解码得到束团时间分布,但存在时间分辨率的限制,最小束团长度(FWHM)测量值为1.7ps<sup>[19]</sup>.时间解码法可以克服光谱解码法的缺点,采样光脉冲被分成两束,一束展成啁啾脉冲,在倍频晶体BBO进行非共线互相关获得具有束团时间分布的二次谐波信号,且利用光束的倾斜入射进行时空映射,对其进行时间解码得到束团长度,最小束团长度(FWHM)测量值为110fs<sup>[20]</sup>.

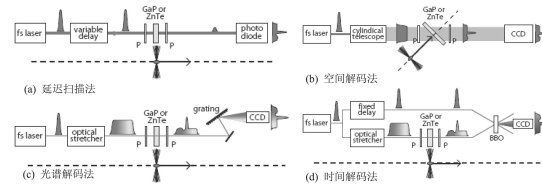


图6 四种电光采样技术示意图

### 参考文献(References)

- Walston S et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2007, **578**: 1
- Simon C et al. AIP Conference Proceedings, 2006, **868**: 488
- Dehler M et al. AIP Conference Proceedings, 2000, **546**: 572
- Kosicek A Proceedings of PAC2005. Knoxville: 2005. 4284
- Denard J C et al. Proceedings of DIPAC2005. Lyon: 2005. 39
- Ross M et al. AIP Conference Proceedings, 2002, **648**: 237
- Naumenko G et al. Proceedings of PAC2005. Knoxville: 2005. 404
- Blair G A et al. Proceedings of EPAC 2002. Paris: 2002. 1912
- Sakai H et al. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2002, **5**: 122801
- Bolotovskii B M, Serov A V. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **B201**: 49
- Settakorn C. Proceedings of APAC 2001. Beijing: 2001. 514
- Carra G L et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2001, **463**: 387
- Korbly S E et al. Phys. Rev. ST Accel. Beams, **9**: 022802
- Lumpkin A H et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2001, **475**: 470
- Akre R et al. Proceedings of EPAC 2002. Paris: 2002. 1882
- Jamison S P et al. Proceedings of EPAC2006. Edinburgh: 2006. 915
- WANG D X, Krafft G A et al. Physical Review E, 1998, **57**: 2283
- Cavalieri A L et al. Phys. Rev. Lett., 2005, **94**: 114801
- Berden G et al. Proceedings of PAC2003. Portland: 2003. 519
- Berden G et al. Proceedings of EPAC2006. Edinburgh: 2006. 1055

## Recent Developments of Beam Diagnostics\*

SUN Bao-Gen<sup>1)</sup> LUO Qing WANG Xiao-Hui

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** The paper introduces some of the recent developments in beam diagnostics, which include the beam position measurement techniques with sub-micrometer resolution, the beam size measurement techniques with sub-micrometer resolution, and the bunch length measurement techniques with sub-picosecond resolution. The cavity beam position monitor and the digital BPM signal processing technique are introduced for the beam position measurement techniques. The laser wire beam profile monitor, and the optical transition radiation/optical diffraction radiation beam size monitor are introduced for the beam size measurement techniques. The spectral techniques of coherent radiation, the transverse deflecting cavity, the rf zero-phasing technique, and the electro-optic techniques are introduced for the bunch length measurement techniques.

**Key words** beam diagnostics, beam position, digital signal processing, beam size, bunch length

Received 7 January 2008

\* Supported by National "985 Project" (173123200402002)

1) E-mail: bgsun@ustc.edu.cn