中国散裂中子源直线输运线束流位置测量系统

孟 鸣^{1,2}, 徐韬光^{1,2}, 李 芳^{1,2}, 徐智虹^{1,2}, 杨 涛^{1,2}, 李 鹏^{1,2}, 孙纪磊^{1,2} (1. 中国科学院高能物理研究所,北京 100049; 2. 东莞中子科学中心,东莞 523803)

摘 要: 介绍了针对中国散裂中子源(CSNS)的直线到环输运线(LRBT)所设计的条带式束流位置测量 (BPM)系统,探头方案以条带式电极为基础进行物理设计及参数优化,并通过机械标定减少机械加工误差,电 子学选用商用数据处理方案。此系统在加速器实际运行中有效提供位置信息,对在线测量数据采用奇异值分 解(SVD)进行分析,根据分析结果,对束流轨道测量的精度达到预期设计目的,满足物理调束需求。

关键词: 中国散裂中子源; 输运线; 束测; 束流位置测量; 条带式; 奇异值分解
 中图分类号: TL506
 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201931.180313

Beam position monitor system in linac to ring beam transport of China Spallation Neutron Source

Meng Ming^{1,2}, Xu Taoguang^{1,2}, Li Fang^{1,2}, Xu Zhihong^{1,2}, Yang Tao^{1,2}, Li Peng^{1,2}, Sun Jilei^{1,2}
(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China;
2. Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: This paper introduces the stripline beam position monitor system we designed for the linac to ring beam transport(LRBT) of China Spallation Neutron Source(CSNS). The system's physical design and parameter optimization of monitor are done based on stripline type, mechanical calibration is done to reduce error caused by machining, and the electronic system is using a commercial data processing system. The system gives effective position data in actual accelerator running, and an analysis of online measurement data is done with SVD method. According to the analysis result, accuracy of beam orbit measurement has reached the intended design goal and can meet physical tuning needs.

Key words: CSNS; LRBT; beam diagnosis; beam position monitor; stripline; SVD method PACS: 29.25. Dz

中国散裂中子源包括一台 80 MeV 的负氢直线加速器、一台 1.6 GeV 快循环质子同步加速器、两条束流 输运线。其中 LRBT 将运输具有 80 MeV 能量的质子束流到环注入点,沿线束测部分需要共 21 处独立的束流 位置测量(BPM)系统,为了减少束流运行时真空管壁上的束流损失,进行束流轨道准直校正,需要进行束流位 置探测,测量精度小于真空管道半径 1%。束流位置探测系统包括探头部分、标定系统、信号处理系统。探头 部分目前加速器常见类型有静电探测式、纽扣式、条带式以及腔式,SNS 等质子加速器直线段普遍采用的是条 带式位置探头,它具有宽带且平坦的频域响应。因为在 CSNS 中束团长度相对较长,为了使得束流位置测量具 有高灵敏度,本文介绍的输运线束流位置探测系统选取了条带型探头方案,以此为基础进行后续的设计、标定, 在线测试分析工作。

1 束流位置探头物理设计

LRBT 输运线段束流宏脉冲频率 25 Hz,脉冲宽度 100~500 μ s,束团微脉冲频率 324 MHz,微脉冲脉宽 500 ns,流强 5~15 mA,沿线有 70,110,220 mm 三种管道结构尺寸,设计要求测量精度小于管道直径 1%。

1.1 探头选型

常规条带型 BPM 内部有四片具有一定宽度的条形电极,上下游都安装有 feedthrough,在 CSNS BPM 探

^{*} 收稿日期:2018-11-10; 修订日期:2019-03-04

基金项目:国家重大科学装置工程-中国散裂中子源项目

作者简介:孟 鸣(1985—),男,硕士,从事高能加速器束流测量相关工作; mengming@mail. ihep. ac. cn。

头设计开始时,确定采用单端 feedthrough 的结构设计^[1],即在束流经过的 BPM 探头电极上游端接 50 Ω 特性 阻抗的 Feedthrough,用于引出束流感应信号,电极下游端通过短路环结构短接到束流管道。这样做的好处是 结构简单,安装方便且提升牢固性,短路环还可以起到加工定位作用,提升条形电极的同轴度。feedthrough 选 用了日立的 SMA型 NL-108-546,条形电极横向半径和束流管道内径相等以实现与真空管道的平滑过渡,整体 结构见图 1。



图 1 条带 BPM 机械结构图

1.2 结构设计

条带型 BPM 内部沿圆周方向分布有 4 个长条型电极, 束流通过时因为电极上会产生感应信号, 并通过 feedthrough 传输。BPM 探头的电极与外侧管道形成传输线结构^[2], 设计的关键在于确保传输线阻抗的 50 Ω 匹配, 以避免信号反射以及维持相对电极间信号的平衡。设计参数包括电极的张角、厚度、长度、管道内径。

电极厚度的选择^[3],主要是考虑在电磁场环境中电极的机械强度和形变要满足要求,不宜选得太厚,根据 经验将电极厚度选取为1.5mm。

张角的选择需要综合考虑感应信号的大小以及灵敏度的影响,对于高斯分布的束团,上游端口时域信号表达式^[4]为

$$u(t) = \frac{Z_0}{2} \frac{\varphi}{2\pi} \left[i_{\rm b}(t) - i_{\rm b}(t - \frac{2L}{c}) \right]$$
(1)

式中:Z₀为探头特性阻抗; φ为电极张角; i_b(t)为束团流强; L为电极长度,可以看出, 信号幅度值主要取决于 张角和特性阻抗, 在长度一定的情况下, 特性阻抗一定, 张角越大信号值越大。

灵敏度公式为

$$S_{\Delta-\Sigma} = \frac{80}{b\ln 10} \frac{\sin(\alpha/2)}{\alpha/2} \tag{2}$$

式中: a 为电极张角; b 为电极内径, 为保证管道连续性, 设计为两侧真空管道内径值。实际计算时 b 取电极内 径和管道内径的平均, 计算结果灵敏度随着电极张角的增大而减小。在电极内径以及电极厚度确定时, 横向结 构参数需要确定的是电极张角与管道内径的搭配, 考虑电极阻抗匹配, 引入探头结构的仿真计算。

对于典型 BPM 横向结构,根据电极不同的带电情况,得到四种横向结构^[5],分别为 sum 模式, horizontal dipole, vertical dipole 模式和 quadripole 模式。模式匹配要求模式阻抗 $Z_{sum}Z_{quad} = Z_{horz}Z_{vert}$,由于 BPM 结构对称,最终设计目标是 $Z_{horz} = Z_{vert} = Z_{sum} = Z_{quad} = 50 \Omega_{o}$ 。

横向结构确定时利用 POISSION^[6](二维静电场)计算特性阻抗,核心是通过软件计算电场分布得到电容 并推导出能量,根据以下公式计算阻抗

$$Z_0 = \frac{1}{2vE} \tag{3}$$

式中:v为光在介质中的速度;E为静电能量。计算时采用 1/4 横截面进行阻抗计算,并采用三维建模软件进行 1/4 横截面的束流管道验算,如图 2 所示。

同时设计过程中要考虑所选用的 feedthrough 针脚长度为 9.4 mm,外管道 feedthrough 焊盘处需要 2 mm 厚度保证,剩余 7.4 mm,设计时尽量不考虑对 feedthrough 针脚进行延长,即管道内径实际受到限制,相应的



图 2 条带 BPM 横向阻抗计算

电极张角也就存在限制范围。取典型张角值进行仿真,计算束流位置变化时感应到的信号值,并拟合得到横向 位置的二维分布图 3,相当于进行理论标定。可以看到张角越大,信号分布越平坦,但同时灵敏度也越低,最终 70 mm 管道直径 BPM 张角设为 39°较为合适,110 mm 取为 26.1°,260 mm 管径尺寸过大,只能延长针脚,同 时考虑电极的重量,取张角为 30°。





对于条带 BPM 的纵向结构,根据对公式(1)电极上游端电压信号的频域变换可以得到,当 $\beta_p l = \frac{(2n+1)\pi}{4}$,即 $l = \frac{(2n+1)\pi}{4}$,即 $l = \frac{(2n+1)\pi}{4}\lambda(n=0,1,2\cdots)$ 时频率电压最大,其中 β_p 为传播常数,l为条形电极的纵向长度。此时信号达到最大灵敏度,并且基频处响应幅度最大,位置测量电子学的处理频率基于束流基频,对于基频信号的增强可以提升对部分 BPM 探头附近高频场的抗干扰能力。散裂中子源直线段高频 324 MHz,可选长度有231.5,463 mm等,直线部分总体设计预留长度为 300 mm,选取n=0,电极长度 $l = \frac{\lambda}{4} = 231.5$ mm。

至此 BPM 探头关键参数都已确定,电极两侧带法兰真空管与电极外侧真空管采用垂直过渡,电极距离垂 直面的距离经过计算,对输出信号无影响,选取为4 mm,最终完成所有机械设计。根据设定参数建模进行粒 子模拟计算,束团纵向 sigma 取 0.3 ns,流强 15 mA,能量 80 MeV 对应 β 参数 0.388,计算得到 50 Ω 匹配时电 极相应信号最大为 0.264 V,作为后续电子学使用的参考。

2 BPM 标定

条带式 BPM 机械加工的精度误差会造成机械中心与电中心的偏移^[8],需要在标定平台进行机械标定。 标定平台包括标定台主体、经纬仪、位置测量电子学、数据采集和控制系统。

BPM 探头安装就位后,与标定平台主体相连形成连续管道。100 μm 直径钼丝从平台顶部开始沿 BPM 径 向穿过探头内部,固定于底部,并施加了张力绷紧。上端通过 N 型接头施加 324 MHz 高频信号,另一端加以 50 Ω 阻抗匹配,经纬仪用于对丝进行垂直校正。标定时步进电机控制钨丝在 BPM 横向运动模拟束流位置的

变化,丝运动范围为±1/2 管道半径,步长1 mm;采用 bergoz 的 MX-BPM 电子学输出四路电极的电压信号, 并用 NI 数据采集板卡对4 路电极信号进行采集,对相 对电极信号取对数并归一化拟合得到标定位置数据的分 布。标定结果如图4。将测量信号代入拟合公式计算位 置,分析得到误差最大0.24 mm,小于1%半径,满足需 求。

3 位置测量电子学

東流位置测量的精度要求小于1%半径,因此电子 学采用了国际上各大加速器普遍采用的商用电子学。目 前主要有两大类,一类是法国 Bergoz 公司的 LR-BPM



Fig. 4 2-D calibration result of BPM 图 4 BPM 二维标定结果

(对数比位置处理^[9])模拟电子学,一类是 libera 公司的差比和数字电子学,我们采用了两种电子学搭配使用。 Bergoz 电子学是模拟电路电子学^[10],滤波器中心频率为束流高频,带宽 5 MHz,对输入信号进行处理后, 输出正比于 BPM 相对电极信号 lg 比的电压信号,即 v=k lg(A/C),k 为标定系数,A,C 为 BPM 水平方向两个 电极的输出信号,电子学输入信号最大频率 500 MHz,这也决定了 BPM 信号处理只能以基频为主。实际使用 中需要先采用信号源和功分器进行电子学标定,得到输入信号与输出电压的关系,结合机械标定中得到的机械 位置与输入信号的拟合公式进行测量工作。电子学输出电压信号经过 NI 系统(包括 PXIe-8115 控制器和 NI-PXIe-6358 采集卡)采集后,labview 控制软件运用标定公式计算得到位置,包装成 EIPCS PV 量对外报送。

Libera 电子学是数字化测量系统,输入信号经过数字采样、滤波和运算后,采用差比和方法计算得到位置, $x = k \frac{A-C}{A+C}$ 。内部软件包含位置标定系数,可将机械标定公式输入。Libera 电子学自带了 EPICS 套件,处理 完成的位置信息可以 PV 格式直接对外报出。

4 束流实验

在 LRBT 束流实验中,80 MeV 能量,15 mA 流强, 100 μs 脉宽情况下,通过示波器直接观测图 5 中 BPM 电极引出信号,信号幅度与理论计算基本一致,因为 BPM 的频响范围较宽,实验中同时用于测量切束脉冲上 升时间,以及观测控制系统触发信号与实际束流产生时 间之间的间隔。

束流实验中需要对位置测量系统线测量数据进行分析,以得到位置测量的分辨率,一种方法是进行标准差 (STD)分析,但考虑到束流位置数据包含了束流自身的 不稳定性,对系统的分析需要将这部分剔除,因此采样了



Fig. 5 Signal of BPM electrode 图 5 BPM 电极信号

奇异值分解(SVD)^[11]的方法进行分析,将在线的 18 个 BPM 数据矩阵进行分解,根据分解结果,特征值矩阵从 第 4 个开始数据量级变化明显变缓,因此将特征值矩阵前 3 个值置 0,以去除共有的束流分量影响,图 6 对重 组数据进行分析并与 STD 结果进行对比,发现 SVD 方法相比 STD,可以基本去除束流相关因素的影响;根据 分析结果,在系统分辨率主要由噪声决定的情况下,LRBT 段 BPM 位置测量整体分辨率达到预期设计需求, 满足小于 1%半径即 0.35 mm 要求。

条带 BPM 的四电极和信号可以用以表征流强,因此束流位置偏移很小时可以直接采用 libera 电子学经过 系数标定后的 sum 和 PV 量测量流强,根据实验分析,流强所测数据标准差小于 0.08 mA,图 7 可看出下方 3 个 BPM 所测流强与上部直线流强测量探头(CT)的变动趋势一致。同时 libera 电子学带有相位测量功能,考 虑线缆参数修正后可以用于束流能量测量,作为 FCT 电子学测量能量的辅助参考,实测束流能量均方根偏差 小于 0.002 MeV。





5 结 论

本文中,介绍了中国散裂中子源直线输运线束 流位置探测系统的组成,从前端开始的 BPM 探头 设计,加工标定,电子学构建配置,以及最终束流实 验的检验,束流位置探测系统位置测量精度小于 1%管道半径。并且除了位置测量,此系统还可用于 流强和能量的测量,这需要下一步工作中与流强测 量和能量测量系统对比研究。





参考文献:

[1] Lee S A, Igarashi Z A, Tanaka M B, et al. The beam diag-

nostics system in the J-PARC LINAC[J]. Proceedings of Linac, 2004, 10(1):19-29.

- [2] Evtushenko P, Lehnert U, Michel P, et al. Electron beam diagnostics at the radiation source ELBE[C]//AIP Conference. American Institute of Physics, 2002.
- [3] 赵敬霞. BEPCII 输运线束流能散度探测器研制[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2006;32-35. (Zhao Jingxia. Study on the Beam Energy-spread Monitor in the Transport line of BEPCII. Bejing:Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, 2006;32-35.)
- [4] 李吉浩. 合肥光源直线加速器条带 BPM 系统的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2006:45-48. (Li Jihao. Development of a strip BPM system for Hefei light linear accelerator. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006:45-48)
- [5] Deibele C. Synthesis and considerations for optimally matching to beam position monitor circuit impedance[R]. SNS-NOTE-DIAG-31.4.
- [6] Gaur R, Shrivastava P. Beam dynamics and electromagnetic design studies of 3 MeV RFQ for SNS programme[J]. J Electromagnetic Analysis & Applications, 2010, 2:519-528.
- [7] 孙葆根,罗箐,王晓辉.加速器束流诊断技术的新进展[C]//全国粒子加速器技术学术交流会. 2007. (Sun Baogen, Luo Jing, Wang Xiaohui. New development in accelerator beam diagnostics//National Particle Accelerator Academic Conference. 2007)
- [8] Sato S, Tomisawa T, Ueno A, et al. Beam position monitor and its calibration in J-PARC LINAC[J]. Proceedings of PAC07, 2007, 37(4): 4072-4074.
- [9] Shafer R E. Beam position monitoring[J]. AIP Conf Proc, 1992, 249:601-636.
- [10] Barbero E, Bergoz J, Dehning B, et al. Performance of BPM electronics for the LEP spectrometer[C]//American Institute of Physics, 2000.
- [11] Zhang P, Baboi N, Jones R M. Statistical methods for transverse beam position diagnostics with higher order modes in third harmonic 3.9 GHz superconducting accelerating cavities at FLASH[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 734:84-94.