



·粒子束及加速器技术·

振动线测量技术在高能同步辐射光源 增强器预准直单元中的应用*

闫路平¹, 刘晓阳¹, 王小龙^{1,2}, 董 岚^{1,2}, 王 铜^{1,2}, 门玲鸽^{1,2},
卢 尚¹, 韩圆颖¹, 张露彦¹, 闫皓月¹, 马 娜^{1,2},
何振强^{1,2}, 柯志勇^{1,2}, 李 波^{1,2}, 梁 静^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803)

摘 要: 高能同步辐射光源(HEPS)的预准直单元数量庞大,且磁铁准直精度要求极高,为检验 HEPS 增强器预准直单元磁铁准直精度,需要在实验厅按照一定比例对其进行振动线磁中心验证测量。基于预研阶段已研发的振动线系统,详细介绍了振动线磁中心测量原理及扫描方法,研究了 HEPS 增强器两铁单元的磁中心准直精度检测方法并进行了验证实验。设计并搭建了振动线高精度重复定位夹持机构装置,研究了振动线下垂量的修正方法,并对增强器两铁单元的磁中心扫描结果进行拟合分析。实验结果表明,HEPS 增强器两铁单元满足磁铁间相对位置误差优于 50 μm 的预准直精度要求。

关键词: 振动线; 定位机构; 磁中心测量; 下垂量修正; 精度分析

中图分类号: TL505

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230125

Application of vibration wire measurement technology to pre-alignment units of High Energy Photon Source booster

Yan Luping¹, Liu Xiaoyang¹, Wang Xiaolong^{1,2}, Dong Lan^{1,2}, Wang Tong^{1,2}, Men Lingling^{1,2},
Lu Shang¹, Han Yuanying¹, Zhang Luyan¹, Yan Haoyue¹, Ma Na^{1,2},
He Zhenqiang^{1,2}, Ke Zhiyong^{1,2}, Li Bo^{1,2}, Liang Jing^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: The pre-alignment units of the High Energy Photon Source (HEPS) are numerous and require extremely high precision in magnet alignment. To verify the magnetic alignment accuracy of the pre-alignment magnet unit in the HEPS booster, vibration wire magnetic center verification measurements need to be carried out in the experimental hall at a certain ratio. Based on the vibration wire system developed in the pre-research stage, a detailed study is conducted to introduce the measurement principle and scanning method of the vibration wire magnetic center. The research focuses on the magnetic center alignment accuracy detection method of the two magnet units in the HEPS booster and conducts verification experiments. A high-precision repeat positioning clamping mechanism for the vibration wire was designed and constructed, and a method for correcting the sag of the vibration wire was studied. The magnetic center scan results of the two magnet units in the booster were analyzed by fitting. The experimental results show that the pre-alignment accuracy requirement of the HEPS booster for a relative position error between magnets better than 50 μm is satisfied. This study provides a reference for accurate measurement of the vibration wire magnetic center in other accelerator pre-alignment magnet units.

Key words: vibration wire, positioning mechanism, magnetic center measurement, sag correction, precision analysis

* 收稿日期:2023-05-11; 修订日期:2023-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(12075264)

联系方式:闫路平, yanluping@ihep.ac.cn。

通信作者:董 岚, dongl@ihep.ac.cn。

高能同步辐射光源(HEPS)是我国首台高性能第四代同步辐射光源^[1-2],它能够探测微观世界的物质结构,为众多基础科学和工程科学领域提供先进的实验平台。HEPS主要由加速电子的直线加速器和增强器、储存能量的储存环以及满足不同实验用户需求的光束线站^[3-5]等多部分组成。为保证粒子在精确轨道上高速运行,需要在粒子加速器设备隧道安装前,进行一系列的准直工作:包括设备标定、设备单元预准直、预准直单元运输试验、以及预准直单元精度验证等关键步骤。其中,预准直单元精度验证的目的在于检验单元中磁铁的磁中心预准直精度是否达到要求,该项工作对于确保预准直单元隧道安装完成后磁铁间的位置精度满足物理设计要求具有重要意义。目前我国加速器准直领域广泛采用激光跟踪仪、工具经纬仪等光学仪器,通过测量设备外部基准实现加速器单元设备间的准直^[6],这种准直方法引入测量误差,因此准直系统研究了一套高精度^[7]振动线磁中心测量系统用于加速器设备准直,该系统也可用于设备磁中心标定、磁中心引出等准直工作。但振动线系统结构复杂,每次只能扫描单块磁铁,每块磁铁扫描时间较长,此外,HEPS预准直单元数量多,工期紧张,因此振动线磁中心测量技术目前主要应用于光源预准直精度的验证工作。本文主要研究了增强器预准直单元振动线磁中心扫描原理、扫描过程、振动线下垂量修正以及磁中心精度分析,为其他粒子加速器预准直单元振动线扫描提供了相应的参考。

1 振动线测量原理

HEPS增强器是将电子加速到6 GeV的同步加速器,全环周长为454 m,负责为储存环提供高品质的电子束。增强器布局如图1所示,分为聚焦散焦单元(FODO)段和直线段^[8-9],共有132台预准直单元。本论文针对增强器其中一台隧道安装单元进行振动线磁中心验证工作。

振动线磁中心测量的原理^[10]是在预准直单元磁铁的大致磁中心位置张紧一根铍铜导线,导线一端固定称为固定端,另一端缠绕在滑轮上,通过砝码自重张紧导线称为自由端,以固定端和自由端导线的连线为基准,在二维平移台和精密电动平移台的驱动下,对磁铁的粗略磁中心附近进行水平和垂直方向上扫描,扫描过程中给导线通入不同频率的交流电,使得导线在空间磁场中受到洛伦兹力而振动^[11],从而探测出磁铁磁感应强度分布情况,并通过数学模型分析计算,确定磁铁磁中心的位置。导线的振动信息通过导线两端安装的光电传感器采集,当导线激励电流频率接近导线的固有频率时,导线的振动幅度因达到共振而更显著,光电传感器的测量灵敏度也大幅提高^[12-13]。

已建成的振动线测量装置全长约7 m,由于实验室空间限制,增强器预准直单元位置靠近振动线固定端放置。为提高预准直单元磁铁磁中心测量精度,调整预准直单元两侧的振动线与预准直单元磁中心等高,固定端与自由端位置的导线不等高。增强器预准直单元振动线扫描系统如图2所示。

1.1 四六极磁铁磁中心测量方法

本次扫描的增强器预准直单元是四极铁BS1QD13和六极铁BS1SD6。BS表示为增强器,QD为四极铁,SD为六极铁。磁铁参数见表1,其中四极磁铁的主场单位为T/m,六极磁铁主场单位为T/m²。

表1 四六极铁设计参数

Table 1 Design parameters of the quadrupole and sextupole magnets

magnet	max. field	min. field	aperture /mm	magnetic length /mm	core length /m	turns per pole	max. of current /A	min. of current /A	good field region /mm	field errors	max. of power loss /kW	water pressure drop /(kg·cm ⁻²)	water flow velocity /(m·s ⁻¹)	temperature rise /°C	weight /kg
BS1QD13	33 T/m	1.5 T/m	40	300	290	13	411	19	±16	5×10 ⁻⁴	3	3	2.45	5.7	345
BS1SD6	1000 T/m ²	30 T/m ²	40	200	194	8	135.3	4.1	±16	1×10 ⁻³	0.33	3	1.89	3	75

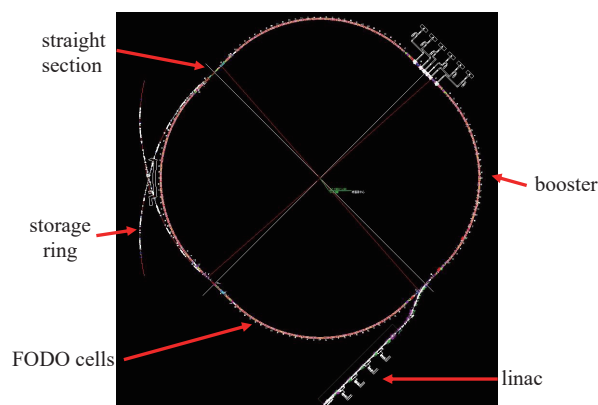


Fig. 1 Layout diagram of HEPS booster

图1 HEPS增强器布局图

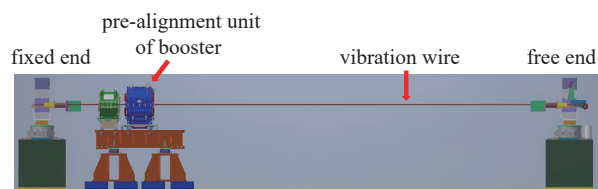


Fig. 2 Vibration wire magnetic center measurement system of pre-alignment unit of booster

图2 增强器预准直单元振动线磁中心测量系统

四极磁铁的磁场是一种均匀梯度场(磁场梯度常数为 G),它能够使粒子聚焦在既定的束流轨道中心上运动^[14]。四极磁铁好场区内某个位置的垂直或水平磁感应强度与水平或垂直偏离磁中心距离满足线性关系式^[15]

$$B_y = G(x - x_0) \quad (1)$$

$$B_x = G(y - y_0) \quad (2)$$

式中: B_x 和 B_y 分别为磁铁好场区内某个位置在水平和垂直方向上的磁感应强度分量, x_0 和 y_0 分别是振动线坐标系下水平方向和垂直方向磁中心位置, x 和 y 分别为磁铁好场区内某一水平方向和垂直方向的位置。

水平扫描是振动线在垂直方向上位于磁铁好场区某一垂直位置不变,沿着水平方向以一定步长测量导线当前位置的振幅信号,垂直扫描与之类似,在一定范围内分别沿水平或垂直方向上以某阶固有频率进行若干位置扫描,得到每个位置上的振幅信号后,对其进行非线性拟合,获得垂直或水平方向各个位置的磁感应强度分量。根据公式(1)、(2),将四极磁铁各个位置的垂直或水平方向的磁感应强度进行线性拟合,拟合曲线上垂直磁场分量为零的横坐标即为水平方向磁中心坐标 x_0 ,如图3(a)所示。同理,拟合曲线上水平磁场分量为零的横坐标即为垂直方向磁中心坐标 y_0 ,如图3(b)所示。

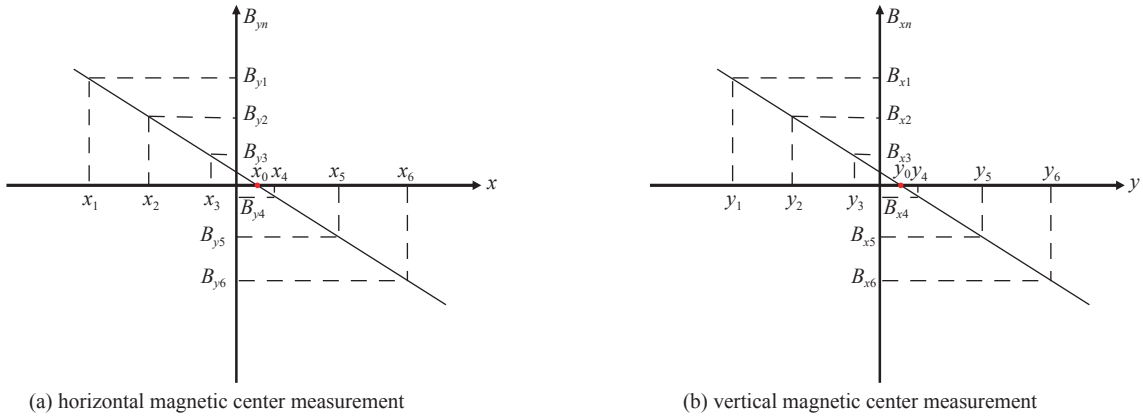


Fig. 3 Schematic diagram of measuring methods for horizontal and vertical magnetic centers of quadrupole magnets

图3 四极磁铁水平和垂直磁中心测量方法示意图

六极磁铁在二阶梯度空间上磁场分布均匀,它的作用是消除粒子运动的色散。六极磁铁的磁感应强度与某个水平或垂直位置偏离磁中心距离满足关系式^[16]

$$B_y = B_3 \left[\frac{(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}{R_{\text{ref}}^2} \right] \quad (3)$$

$$B_x = 2B_3 \left[\frac{(x - x_0)(y - y_0)}{R_{\text{ref}}^2} \right] \quad (4)$$

式中: B_3 是六极磁铁参考半径 R_{ref} 上的磁感应强度。图4六极磁铁水平磁中心测量方法示意图。对于给定 x 值,垂直方向上的磁感应强度 B_y 与垂向某一位置偏离垂向磁中心的距离呈二次曲线关系,水平方向的磁感应强度 B_x 与垂向某一位置偏离垂直方向磁中心的距离呈线性关系,因此可依据式(3),将不同位置的磁场强度进行非线性拟合,得到二次曲线的顶点或二次曲线的一阶导函数为零时的横坐标即为六极磁铁中心位置,如图4(a)所示。也可以依据式(4),将扫描得到的各个位置的磁场强度线性拟合后,获得直线斜率为零的点即为磁中心位置,如图4(b)所示。

1.2 丝线重复定位夹持机构设计

振动线零位即振动线扫描起始位置是磁铁磁中心位置测量的基准,因此预准直单元上不同磁铁磁中心扫描过程中,需要确保待测设备具有统一基准,但扫描过程中,导线难免疲劳断损需要更换丝线,为了保证导线的位置精确不变,需要设计一个丝线高精度重复定位机构。原来V型槽机构定位丝线的方法,导线与V型槽属于线接触,V型槽两端导线易折损,而且V型槽底部受机加工精度限制,对于直径只有0.1 mm的导线来说很难实现导线精密重复定位,因此设计了陶瓷双锥定位机构^[17],并搭建丝线重复定位系统。该系统主要由二维平移台、微米级测量精度电容式位移传感器^[18]、固定陶瓷双锥机构的V型块组成,如图5所示。实验开始时根据传感器采集到的信号

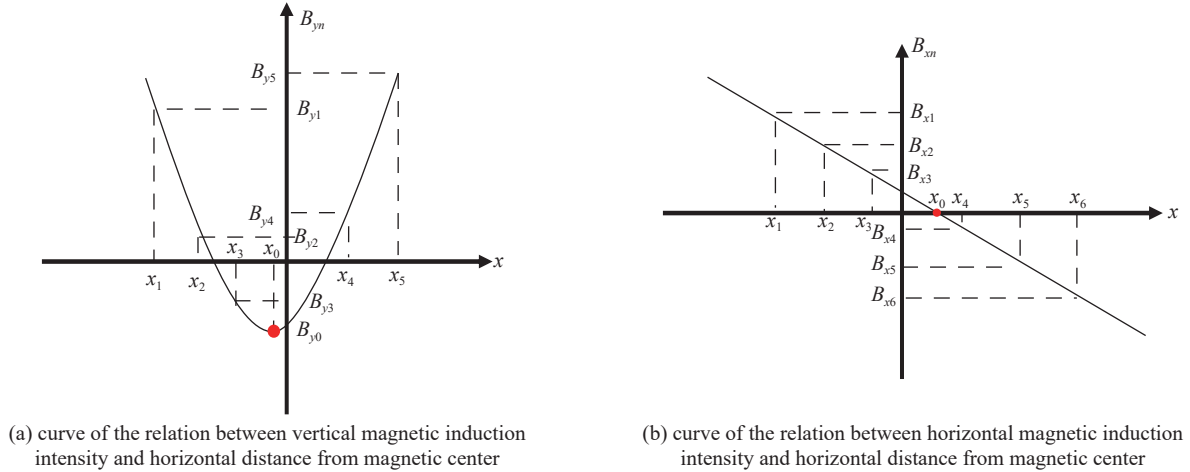


Fig. 4 Schematic diagram of measuring method of horizontal magnetic center of sextupole magnet

图 4 六极磁铁水平磁中心测量方法示意图

调整二维平移台,使丝线位于传感器的零位,即传感器的电中心位置,每次拿起后再将丝线放入两陶瓷锥的锥角位置,待丝线稳定后采集此时丝线相对于传感器零位的信号,锥角位置是指两个陶瓷机构对顶后,由于端部的锥形坡度形成了一个类似“V”形的角度。本次实验分别对锥角位置 70°、90°和 110°三种不同角度的定位机构进行了丝线重复定位测试,以求提高准直精度和准直效率。其中, X 和 Y 分别表示水平方向和垂直方向。

表 2 统计了三种角度的陶瓷双锥定位机构通过丝线当前位置与前一次位置的偏差、丝线当前位置与初始零位的偏差这两种情况对导线进行约 40 次的重复定位实验结果,在垂直方向剔除粗大误差情况下,90°陶瓷双锥机构两种重复实验结果表明水平方向重复定位标准差分别为 0.9 μm 和 1 μm,垂直方向重复定位标准差分别是 0.3 μm 和 0.6 μm;110°陶瓷双锥机构在两种重复实验情况下水平方向重复定位标准差分别为 1.4 μm 和 1.6 μm,垂直方向分别是 1.4 μm 和 1.9 μm;70°陶瓷双锥机构两种情况下的水平方向重复定位标准差为 2.7 μm 和 6.4 μm,垂直方向为 1.3 μm 和 2.6 μm。从表 2 可知:90°陶瓷双锥机构在垂直方向剔除粗大偏差后具有较好的高精度重复定位性。丝线多次重复定位实验结果中发现,无论哪种角度的陶瓷双锥机构,垂直方向会出现大误差而水平方向没有出现大误差,因此垂直方向出现的大误差原因还有待深入研究,丝线重复定位机构也有待改进。

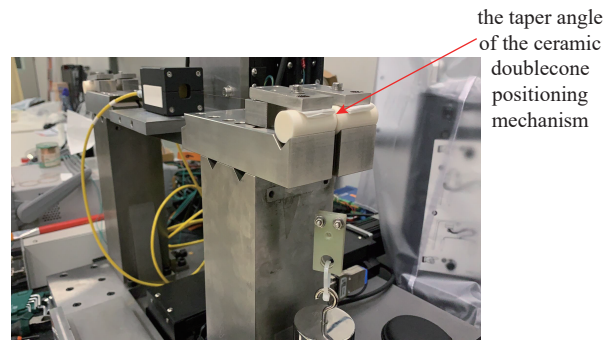


Fig. 5 Ceramic double cone thread repeat positioning device

图 5 陶瓷双锥丝线重复定位装置

表 2 陶瓷双锥重复定位精度

Table 2 Ceramic double cone repeat positioning accuracy

vibrating wire repeated positioning method	cone angle	deviation $X_{max}/\mu m$	deviation $Y_{max}/\mu m$	deviation $X_{min}/\mu m$	deviation $Y_{min}/\mu m$	deviation $X_{sat}/\mu m$	deviation $Y_{sat}/\mu m$
compared with previous time	70°	8.3	4.4	0.1	0.2	2.7	1.3
	90°	4.9	1.1	0.0	0.0	0.9	0.3
	110°	5.9	4.9	0.0	0	1.4	1.4
compared with the initial zero	70°	18.9	3.0	0.0	1.1	6.4	0.6
	90°	5.5	2.4	0.0	0.0	1.0	0.6
	110°	6.0	6.4	0.0	0.1	1.6	1.9

2 预准直单元振动线磁中心验证测量

2.1 振动线与预准直单元磁轴准直调整

预准直单元磁铁通过旋转线进行磁中心引出标定,并通过激光跟踪仪进行准直调整,实现了两块磁铁的磁中心 0.03 mm 的共线精度。跟踪仪将两铁磁中心准直为一条直线,这条直线称之为磁轴。为了确定振动线扫描起始

位置, 保证线与预准直单元磁铁的磁轴重合, 需要将预准直单元磁轴引出, 再将振动线准直到预准直单元磁轴上。准直前需要使用工具水准仪将预准直单元调水平, 即将工具水准仪架设在距离预准直单元 1.5 m 附近, 工具水准仪能够观测到四六极铁之间的丝线为准, 调整预准直单元, 使得四六极铁两侧的机械中心均与丝线重合, 此时预准直单元处于水平状态。

为了将预准直单元磁轴引出, 需要通过激光跟踪仪测量磁铁设备上的 8 个基准点, 通过与设备理论值拟合, 获得水平方向为零的坐标为水平方向磁轴位置, 垂直方向同理, 分别将四六极铁水平方向磁中心引出到振动线固定端和自由端位置, 称之为固定端磁轴点和自由端磁轴点, 两个磁轴的距离大致等于或大于振动线长度, 可提高振动线与磁轴的准直精度, 将四六极铁垂直方向磁中心分别引出到四极铁侧面靠近固定端方向和六极铁侧面靠近自由端方向, 并使用工具经纬仪和工具水准仪, 通过二维平移台调整振动线水平和垂向位置, 使振动线两端分别与四六极铁水平和垂向磁轴重合。

表 3 列出了振动线与预准直单元磁轴的准直数据。为了提高准直调整效率, 修改了平移台配置文件中振动线在水平和垂直方向上的扫描起始位置, 因此表格中振动线扫描起始位置均偏离单元磁中心 1 mm。工具经纬仪和工具水准仪每格代表 0.02 mm, 为了验证测量准确性, 由两个工作人员 (operator1 和 operator2) 分别读取仪器格数值。表格 3 显示, 固定端与自由端水平方向磁轴与振动线偏差最大为 6 μm , 振动线与预准直单元水平方向磁轴重合度好于 10 μm 。表 4 中的数据显示, 垂向磁轴与振动线高差为 1 mm, 准直精度为 20 μm 。

表 3 振动线与预准直单元水平磁轴准直

Table 3 The vibrating wire is aligned on the horizontal magnetic axis of the pre-alignment unit

position	operator	lattice value	horizontal offset/mm
fixed end magnetic axis point	1	-50.0	-1.000
	2	-50.0	-1.000
fixed end vibrating wire	1	-50.2	-1.004
	2	-50.0	-1.000
free end magnetic axis point	1	-50.0	-1.000
	2	-50.0	-1.000
free end vibrating wire	1	-50.2	-1.004
	2	-50.3	-1.006

表 4 振动线与预准直单元垂直磁轴准直

Table 4 The vibrating wire is aligned on the vertical magnetic axis of the pre-alignment unit

position	visual distance of the instrument from each measuring point/mm	lattice value	lattice value deviation	vertical offset/mm		lattice value	lattice value deviation	vertical offset/mm	
				operator 1	vertical offset deviation/mm			operator 2	vertical offset deviation/mm
vibrating wire of the fixed end of the quadrupole magnet magnetic axis point of the fixed end of the quadrupole magnet	2550	-41.0	50.0	-0.820		-41.5		-0.830	
					1.000		51.0		1.020
vibrating wire of the free end of the sextupole magnet magnetic axis point of the free end of the sextupole magnet	2295	9.0	50.0	0.180		9.5		0.190	
					1.000		50.5		1.010
vibrating wire of the free end of the sextupole magnet magnetic axis point of the free end of the sextupole magnet	2550	-43.0	7.0	-0.860		-43.0		-0.860	
					1.000		50.5		1.010
vibrating wire of the free end of the sextupole magnet magnetic axis point of the free end of the sextupole magnet	2305	7.0	7.0	0.140		7.5		0.150	
					1.000		7.5		0.150

2.2 振动线磁中心扫描过程

振动线磁中心扫描的具体过程如下。

步骤 1: 磁铁标准化循环。为了预准直单元上两块磁铁运行时具有统一固定的起始状态, 需要对磁铁进行标准化循环。标准化循环的过程为: 磁铁供电电源的电流从 0 逐渐升至磁铁最大电流的 1.1 倍 (四极铁最大电流为 411 A, 六极铁最大电流为 135.5 A), 等待 30 s, 再将电源电流降为 0 A, 等待 30 s 为一次标准化循环, 往复三次后, 等

待磁铁预热约 40 min 后进行振动线扫描工作。

步骤 2: 获取在线扫描共振频率阶数及交流信号幅值。为了确定振动线扫描的共振频率阶数, 需要先得到振动线的基频

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (5)$$

式中: L 为振动线长度; T 为振动线拉力, 其值可通过悬挂的砝码获得; ρ 为每米导线的质量。

为了保证振动线的振动不受地磁场等局部范围内为常数的磁场干扰, 振动线选取偶数阶共振频率^[10]。最终通过导线和四个传感器的信号波形图, 确定振动线 n 阶共振扫描频率。

为了保证振动线振幅位于传感器采集的线性区, 需要在每个扫描位置上通过信号发生器不断调整导线激励信号大小, 确定导线的交流信号幅值。

步骤 3: 振动线磁中心扫描程序参数设置。振动线磁中心扫描程序是由本课题组老师基于 Labview 开发环境自主研发而成, 编写了手动测量和自动测量两种振动线扫描模式。手动测量用于振动线共振频率选取和导线交流信号幅值的测试, 自动测量是通过设置导线基频、基频共振阶数、交流信号幅值、扫描中心位置和扫描宽度等相关参数直接扫描, 为振动线磁中心扫描提供了可靠的技术支持。如图 6 所示。

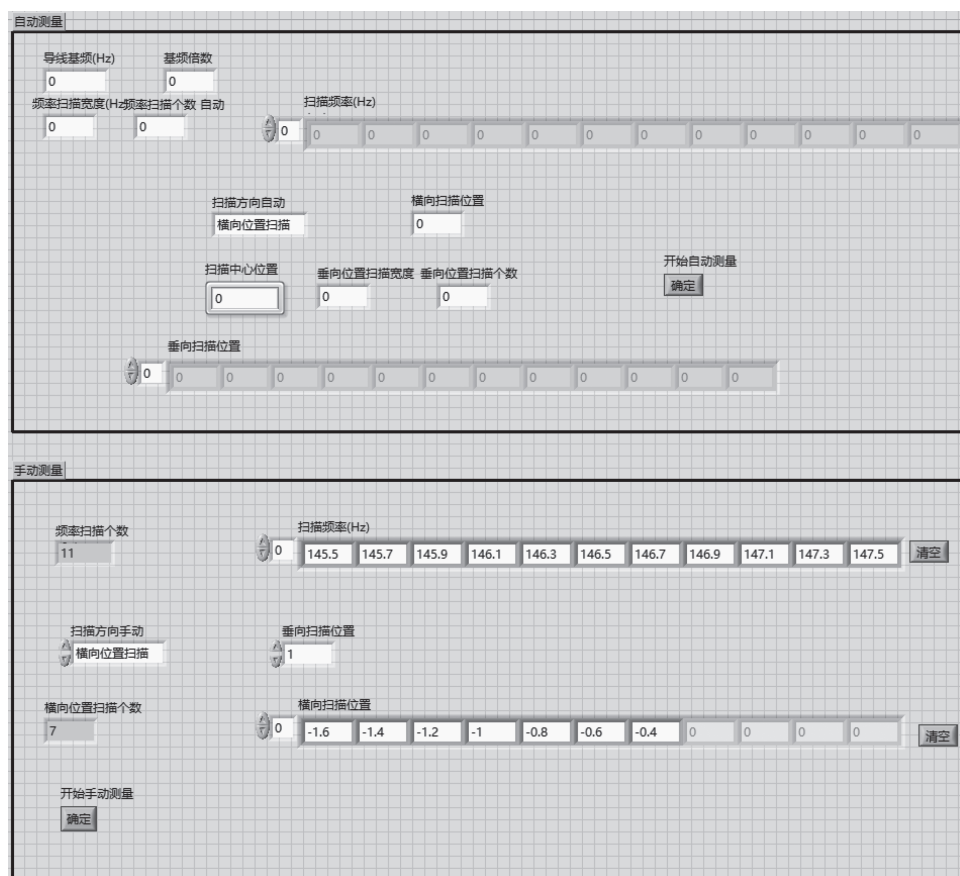


Fig. 6 Vibrating wire measurement program

图 6 振动线测量程序

步骤 4: 磁铁综合场扫描。每次振动线扫描前都优先回到振动线坐标系下的扫描起始位置, 确保振动线磁中心测量具有统一的参考基准^[19-20], 即预准直单元磁中心位置。振动线扫描到每个位置时, 自动调整固定端与自由端的光电传感器, 使其输出电压位于传感器线性电压的中值, 保证传感器采集信号的完整性。在磁铁通电情况下, 固定端和自由端采集到的振动线交流信号和导线振幅信号将自动保存到预先制定好的标准测量模板文件中, 以便进行后续的数据处理和分析。

步骤 5: 磁铁本底场扫描。振动线扫描过程中, 振动线除了受到待测磁铁磁场影响外, 还受到同一支架上其他磁铁的剩磁影响。因此, 为了校正本底磁场, 需要磁铁在通电情况下完成水平和垂直扫描后, 关闭磁铁供电电源,

等待 5 min, 在磁铁未通电情况下进行水平和垂直方向扫描, 得到磁铁本底场^[21]。

步骤 6: 磁铁磁中心坐标获取。将磁铁在通电和不通电情况下得到的扫描文件分别导入到数据处理程序中, 通过频率拟合曲线, 即可得到磁铁剔除本底磁场后的磁中心坐标, 如图 7 所示。

步骤 7: 振动线垂度校正^[22]。根据振动线下垂量公式计算得到四六极铁纵向中心位置的振动线下垂量, 对四六极铁垂向磁中心坐标进行垂度校正, 并对四六极铁磁中心坐标进行线性拟合, 得到预准直单元磁中心验证测量结果。

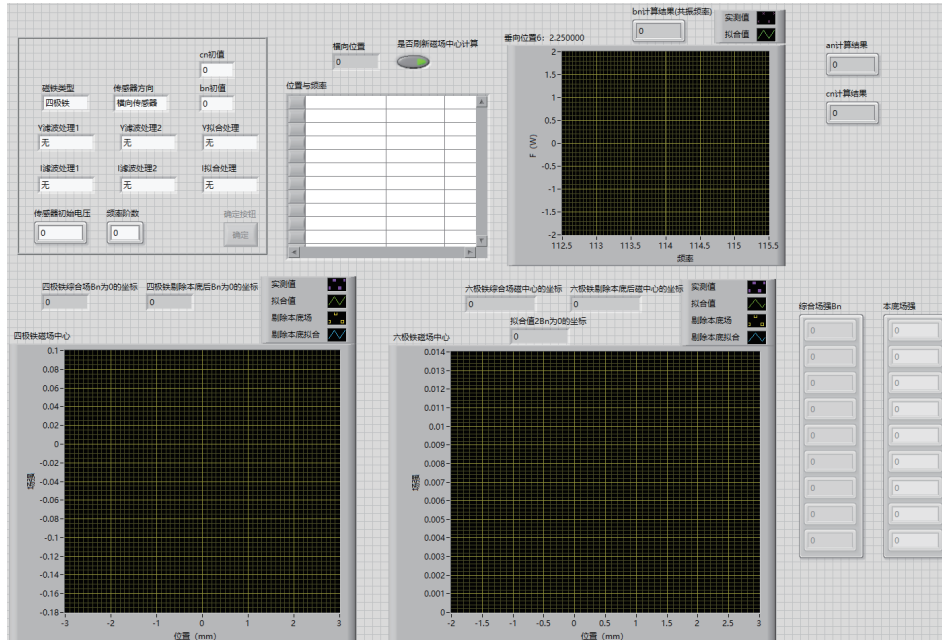


Fig. 7 Vibrating wire data processing program

图 7 振动线数据处理程序

2.3 振动线垂度校正

振动线因自身重力产生的下垂对垂直方向磁中心测量结果产生着重要影响, 因此精确地测量振动线下垂量, 对垂直方向磁中心进行垂度修正至关重要。

振动线两端固定, 由重力作用产生的下垂是一种悬链线模型^[23]。增强器预准直单元磁中心扫描的振动线两端为非对称形态, 如图 8 所示。

振动线两端距离地面高度分别为 h_0 和 h_1 , 垂度为 S , z 表示为振动线某一位置与原点的距离。振动线两端距地面等高, 以最低点为原点^[24-25], 振动线悬链线表达式为

$$S(z) = T/(\rho g) \left[\cosh\left(\frac{z}{T/(\rho g)}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度。泰勒公式近似展开, 得

$$S(z) = \frac{\rho g z^2}{2T} \quad (7)$$

结合公式(5), 推导出振动线两端不等高时丝线下垂量

$$S(z) = h(z) - h_0(z) = \frac{g}{8L^2 f_1^2} z(z-L) \quad (8)$$

振动线磁中心垂直方向扫描过程中, 得到的磁铁垂直方向磁中心坐标与磁铁磁中心位置的关系, 如图 9 所示。

四极铁垂直方向磁中心位置坐标通过四极铁 z_1 至 z_3 磁中心位置与振动线围成的磁场面积积分为零得到, 因此扫描得到的四极铁垂向磁中心坐标, 与四极磁铁磁中心位置高差 δy 可由式(9)求得

$$\int_{z_1}^{z_3} G \left[\delta y + \frac{z}{L} \delta h + S(z) \right] dz = 0 \quad (9)$$

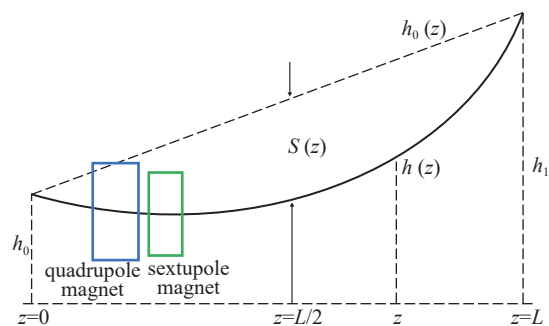


Fig. 8 Simplified schematic of magnetic center scan of vibrating wire

图 8 振动线磁中心扫描简意图

六极铁垂直方向磁场分布是抛物线形状,垂直方向向磁中心坐标通过六极铁 z_1 至 z_3 磁中心位置与振动线围成的磁场面积积分为抛物线顶点处的磁场强度,因此扫描得到的六极铁垂直方向磁中心坐标与六极铁磁中心位置关系可表示为

$$\int_{z_1}^{z_3} \frac{B_3}{R_{ref}^2} \left[(x-x_0)^2 - \left(\delta y + \frac{z}{L} \delta h + S(z) \right)^2 \right] dz = B_{y_0} \quad (10)$$

固定端纵向位置为零, z_1 和 z_3 分别是磁铁左端面和右端面纵向位置与固定端的距离,可通过卷尺测量得到,卷尺测量误差为1 mm,对下垂量精度的影响小于 $1 \mu\text{m}$ 。 δh 是工具水准仪测量的固定端与自由丝线的高差, B_{y_0} 是六极铁垂向磁中心位置的磁场强度, dz 是振动线纵向距离的微分。

四六极铁纵向中心位置的振动线下垂量如表5所示。四极磁铁纵向中心位置的振动线下垂量为0.218 mm,六极磁铁纵向中心位置的振动线下垂量为0.236 mm。

表 5 预准直单元四六极磁铁位置的振动线下垂量

Table 5 Sag of vibration wire at the position of pre-alignment unit quadrupole and sextupole magnets

type of magnet	L/mm	$\delta h/\text{mm}$	f_1/Hz	z_1/mm	z_3/mm	$S(z)/\text{mm}$
quadrupole magnet	7453.0	1.8	18.36	1272.0	1592.0	-0.218
sextupole magnet			18.30	1713.0	1931.0	-0.236

2.4 预准直单元磁中心扫描结果

为了进一步掌握振动线磁中心测量的重复性,本文对增强器预准直单元四、六极磁铁连续扫描两遍,结果如表6所示。由表中数据可知,四极铁两遍重复性最大为 $3 \mu\text{m}$ 。六极铁两遍重复性最大为 $6 \mu\text{m}$ 。

表 6 预准直单元振动线磁中心扫描重复性

Table 6 Repeatability of vibrating-wire magnetic center scanning in pre-alignment unit

type of magnet	times	X/mm	X deviation/mm	Y/mm	Y deviation/mm	X/mm	X deviation/mm	Y/mm	Y deviation/mm
		magnetic center of fixed end				magnetic center of free end			
quadrupole magnet	the first time	-1.002		0.997		-1.002		0.997	
	the second time	-1.000	0.002	0.995	-0.002	-1.001	0.001	0.994	-0.003
sextupole magnet	the first time	-0.959		0.989		-0.965		0.989	
	the second time	-0.963	-0.004	0.995	0.006	-0.969	-0.004	0.990	0.001

增强器预准直单元磁铁垂直方向下垂量修正后,使用专业的Insight数据处理软件对固定端和自由端扫描得到的四六极铁磁中心进行线性拟合,以固定端扫描得到的磁中心为进口,自由端扫描得到的磁中心为出口,得到高能光源增强器预准直单元振动线扫描三维磁中心坐标拟合偏差如表7所示。四六极铁磁中心坐标线性拟合后,水平方向磁中心偏差最大为 $17 \mu\text{m}$,垂直方向磁中心偏差最大为 $10 \mu\text{m}$,满足高能光源预准直 $30 \mu\text{m}$ 的精度要求。

表 7 高能光源增强器预准直单元振动线扫描三维磁中心拟合偏差

Table 7 Fit deviation of vibration line scanning of 3D magnetic center of the pre-alignment unit of the High Energy Photon Source booster

vibration wire fixation mode	magnet inlet and outlet	X/mm	Y/mm	Z/mm
fixed end	BS1QD13EN	0.003	-0.003	0.000
free end	BS1QD13EX	-0.017	0.010	320.000
fixed end	BS1SD6EN	0.017	-0.007	441.000
free end	BS1SD6EX	-0.003	0.000	661.000

3 结 论

在增强器预准直单元振动线扫描实验中,振动线与预准直单元首次通过两磁铁磁中心引出准直,也是首次对

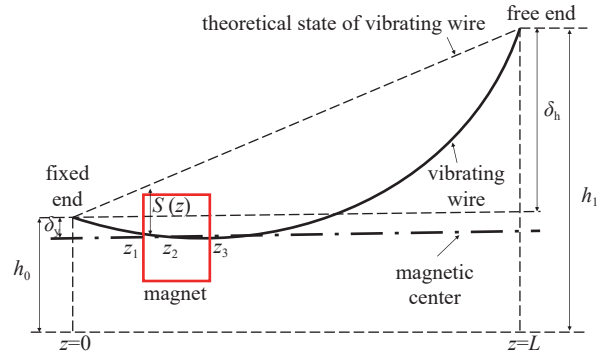


Fig. 9 Schematic diagram of vibrating wire sag

图 9 振动线垂度示意图

实际工程中使用的预准直单元作振动线扫描。为了验证增强器预准直两铁单元的准直精度,采用本文介绍的振动线系统、设计的丝线重复定位机构和振动线磁中心扫描程序对单元四六极铁的磁中心进行扫描,通过对两铁磁中心坐标进行拟合,得到最大 17 μm 的磁中心偏差,验证了预准直精度的正确性和可靠性。同时本文对振动线垂度校正进行了深入分析和研究,并对预准直单元磁铁进行丝线下垂修正,获得了与单元磁铁水平方向磁中心拟合偏差较为一致的拟合结果,实验结果表明振动线垂度校正取得了一定的进展,这一研究成果为后续高能光源储存环预准直单元振动线磁中心扫描中丝线垂度校正提供了一定的参考价值。

致 谢 感谢中国科学院高能物理研究所机械准直系统、电源组、磁铁组和物理组同事给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 焦毅, 潘卫民. 高能同步辐射光源[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104002. (Jiao Yi, Pan Weimin. High energy photon source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104002)
- [2] Jiao Yi, Xu Gang, Cui Xiaohao, et al. The HEPS project[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2018, 25(6): 1611-1618.
- [3] Jiao Yi, Chen Fusan, He Ping, et al. Modification and optimization of the storage ring lattice of the High Energy Photon Source[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 415-424.
- [4] Meng Cai, He Xiang, Jiao Yi, et al. Physics design of the HEPS LINAC[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 497-506.
- [5] Guo Yuanyuan, Wei Yuanyuan, Peng Yuemei, et al. The transfer line design for the HEPS project[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 440-447.
- [6] 于成浩, 殷立新, 杜涵文, 等. 上海光源准直测量方案设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1167-1172. (Yu Chenghao, Yin Lixin, Du Hanwen, et al. Survey and alignment design of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1167-1172)
- [7] Temnykh A, Levashov Y, Wolf Z. A study of undulator magnets characterization using the vibrating wire technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 622(3): 650-656.
- [8] Kang Wen, Liu Lei, Yu Yongji, et al. Design of the magnets for the HEPS injector[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2022, 6(2): 143-149.
- [9] Peng Yuemei, Duan Zhe, Guo Yuanyuan, et al. Design of the HEPS booster lattice[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 425-432.
- [10] 吴蕾. 振动线测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2016. (Wu Lei. Research of vibrating wire measurement technique[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [11] Arpaia P, Buzio M, Perez J J G, et al. Magnetic field measurements on small magnets by vibrating wire systems[C]//2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2011: 1-4.
- [12] Wolf Z. A vibrating wire system for quadrupole fiducialization[R]. Menlo Park: SLAC National Accelerator Laboratory, 2010.
- [13] Wu Lei, Li Chunhua, Wang Xiaolong, et al. Research development of high precision installation and alignment system for HEPS[C]//6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 2924-2926.
- [14] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006)
- [15] Fukami K, Azumi N, Inoue S, et al. Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 054703.
- [16] Jain A, Anerella M, Ganetis G, et al. Vibrating wire R&D for alignment of multipole magnets in NSLS-II[C]//10th International Workshop on Accelerator Alignment. 2008.
- [17] 闫路平, 董岚, 王铜, 等. 一种关于线的重复定位装置: 214843081U[P]. 2021-11-23. (Yan Luping, Dong Lan, Wang Tong, et al. A device for repeated positioning of wires: 214843081U[P]. 2021-11-23)
- [18] 闫路平, 董岚, 王铜, 等. 粒子加速器丝线位置测量电容传感器标定方法[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 114002. (Yan Luping, Dong Lan, Wang Tong, et al. Calibration method of capacitance sensor for particle accelerator wire position measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 114002)
- [19] Jain A. High precision alignment of multipoles[C]//Low Emittance Rings 2010 Workshop. 2010.
- [20] Jain A. Precision alignment of multipoles on a girder for NSLS-II[C]//17th International Magnetic Measurement Workshop. 2011.
- [21] 吴蕾, 王小龙, 李春华, 等. 振动线准直技术的原理和研究概述[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2479-2486. (Wu Lei, Wang Xiaolong, Li Chunhua, et al. Theory and research overview of vibrating wire technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2479-2486)
- [22] Jain A, He Ping, Ganetis G. Measurement of wire sag in a vibrating wire setup[C]//15th International Magnet Measurement Workshop. 2007.
- [23] 王科, 杨治勇, 廖树清, 等. 脉冲紧线磁轴测量方法中金属丝下垂的影响分析[J]. *核技术*, 2015, 38: 080201. (Wang Ke, Yang Zhiyong, Liao Shuqing, et al. Analysis of the wire sag in the pulsed taut-wire technique[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, 38: 080201)
- [24] Zhang C, Mitsuda C, Kajimoto K. Eigenfrequency wire alignment system for magnet fiducialization[C]//14th International Workshop on Accelerator Alignment. 2016.
- [25] Zhang C, Azumi N, Fukami K, et al. Magnet alignment monitoring system with eigenfrequency-based wire sag correction[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32: 075009.