

用于粒子加速器位置监测的 线位置探测器静态特性的标定

唐 郑¹, 何晓业^{1,*}, 王 巍¹, 许少峰², 姚秋洋¹

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029; 2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要:本文介绍了一种线位置探测器(WPS)静态特性标定的方法。建立了一套由激光位移传感器、水平与垂直调节平台组成的静态特性标定系统。在垂直和水平两个方向对WPS的测量静态特性进行了研究。在WPS的测量范围内,以步长0.1 mm进行位移量输入,满量程观察了WPS的输出位移量。对输入输出数据进行了拟合,得到WPS灵敏度以及均方根误差。输入步长分别设为5、2和1 μm ,考查输出量变化可得到仪器的分辨率。实验结果表明:垂直方向灵敏度 K_V 不低于-1.005 02,均方根误差为0.002 4 mm,分辨率达2 μm 。水平方向灵敏度 K_H 不低于-1.001 55,均方根误差为0.002 1 mm,分辨率同样达2 μm 。该WPS灵敏度、均方根误差和分辨率均达到了监测所需的精度。

关键词:粒子加速器;线位置探测器;静态特性;精密监测;标定

中图分类号:TL505

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2016)06-1127-05

doi:10.7538/yzk.2016.50.06.1127

Static Characteristic Calibration of Wire Position Sensor for Position Monitoring in Particle Accelerator

TANG Zheng¹, HE Xiao-ye^{1,*}, WANG Wei¹, XU Shao-feng², YAO Qiu-yang¹

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory,

University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Abstract: A method for calibrating the static characteristic of wire position sensor (WPS) was described in this paper. The static characteristic calibration system consisting of laser displacement sensor and adjustment platform in horizontal and vertical directions was constructed, and static characteristic research of WPS could be done in two directions. In measurement range of WPS, continuous displacement of 0.1 mm was done to obtain the output data from WPS. The sensitivity and root mean square error of WPS were obtained through fitting and analyzing input and output data. Changing the displacement into 5, 2 and 1 μm , the resolution could be obtained from the change of output. The results show that in vertical direction, sensitivity K_V is not less than

收稿日期:2015-05-15;修回日期:2015-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11275192);教育部博导基金资助项目(20123402110002)

作者简介:唐 郑(1992—),男,安徽宿州人,硕士研究生,核技术及应用专业

* 通信作者:何晓业, E-mail: xyhe@mail. edu. cn

-1.005 02, root mean square error is 0.002 4 mm, and the resolution reaches $2 \mu\text{m}$; in horizontal direction, sensitivity K_H is not less than -1.001 55, root mean square error is 0.002 1 mm, and the resolution also reaches $2 \mu\text{m}$. For WPS, sensitivity, root mean square error and resolution all reach the requirement of detection accuracy.

Key words: particle accelerator; wire position sensor; static characteristic; precision monitoring; calibration

磁铁等关键元部件的点位精度对粒子加速器的影响很大。以四极磁铁为例,垂直于束流轨道方向的位置公差会引起磁聚焦性能受损,导致束流发散度增大;而绕束流轨道平面的旋转公差会引起束流纵向运动与横向运动的耦合,从而增加束流的不稳定性,缩短束流寿命^[1]。部件位置受诸多因素影响,需采用各种监测系统对部件各方向的位置变化进行实时监测。一旦位置偏差较大,要及时进行调整以使机器的正常运行不会受到影响^[2-5]。

粒子加速器位置监测设备主要有静力水准系统(HLS)和线位置探测器(WPS)等。HLS仅能监测垂直方向的位置变化,而WPS可同时监测水平和垂直两个方向。本文将介绍WPS的结构和原理,并设计实验来标定WPS的静态特性。

1 WPS 结构及测量原理

1.1 WPS 结构

本文研究的对象是由美国 OSI 公司生产的第 2 代 WPS,标称精度为 $5 \mu\text{m}$ ^[6]。WPS 的主要组成部分包括外形结构、安装底板、两个相机、数据采集及处理模块、LED 阵列和陶瓷球等。在进行测量时,一根张紧的 vectran 线(纤维线)通过该结构左侧间隙。

1.2 WPS 测量原理

图 1 为 WPS 测量原理示意图。相机 1 和相机 2 以不同角度朝向 vectran 线,每个相机均有不同的视域范围,两个相机视域交叉处即是 WPS 的测量范围。相机会在设定的测量周期进行拍照,一次拍摄可获得一张包含 vectran 线位置数据的图片,WPS 数据处理模块根据图片会得到一个具体的空间上的平面,称为参考面。2 个参考面相交即可得到一条线,即要测量的 vectran 线中心,称为参考线。WPS 数据处理模块随后将参考线位置数据转换为在局部

坐标系的坐标。局部坐标系的定义如下:利用 3 个陶瓷球建立局部坐标系,圆心分别设为 O 点、 A 点和 B 点。 O 点是局部坐标系的原点; y 轴为 \vec{OA} 和 \vec{OB} 的向量积,即竖直向上; z 轴在 OAB 平面内,方向与 \vec{OA} 和 \vec{OB} 的向量和方向相反,并与 \vec{OA} 的夹角为 $0.279 8 \text{ rad}$ 。 x 轴根据 z 轴和 y 轴的方向构成笛卡尔坐标系。局部坐标系示于图 2。

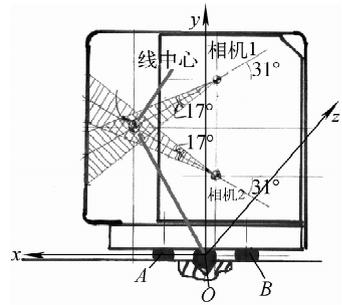


图 1 WPS 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement principle in WPS

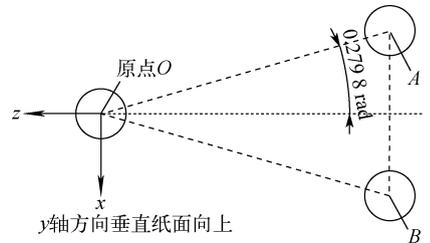


图 2 局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate system

WPS 生产中结构标定的目的是得到相机位置和整个 WPS 结构的位置关系,称为相机标定常数。不同的 WPS 有不同的标定常数,在进行测量时,数据处理模块根据所得到的参考面和相机结构标定常数即可得到参考线在局部坐标系中的坐标。 x 坐标和 y 坐标的变化量就是 WPS

所处位置在 x 方向和 y 方向的变化量。

2 WPS 静态特性标定

根据 WPS 本身的结构特征,设计一套专用的静态特性标定系统,利用更高精度的位移测量设备作为高精度位移量基准,给出一系列数值已知、准确、不随时间变化的输入量,WPS 根据该输入量会得到一系列对应的输出值,分析数据即可得到 WPS 的静态特性^[7]。

2.1 静态特性标定系统

静态特性标定系统主要由 LK-G30 CCD 激光位移传感器、高精度水平、竖直调节平台和 vectran 线固定等装置组成。

LK-G30 是由基恩士公司生产的一种高速、高精度的 CCD 激光位移传感器。根据仪器说明书,其测量原理为三角测量法:反射光在 Li-CCD 上的位置随目标物位置的改变而改变,通过检测变化就可测量物体的位移量。重复精度高达 $0.01 \mu\text{m}$,精确度可达 $\pm 0.02\%$,参考范围为 9 mm ,具有 $0.01 \mu\text{m}$ 的分辨率^[8]。图 3 为 LK-G30 CCD 激光位移传感器三角测量法原理。调节平台是 SIGMA KOKI 公司生产的 TSM-300,这款平台主要用于长行程、重载和快速的高度调节,具有 10 mm 的调节范围和 0.002 mm 的最小分辨率。图 4 为 WPS 静态特性标定系统示意图。

2.2 实验过程

在实验中,将 vectran 线的位置固定,WPS 所在位置的变化会使测量数据变化。WPS 的量程为 $\pm 5 \text{ mm}$,因此位移距离设定为 10 mm 左右。

在垂直方向上,从测量范围最高处向下以步长 0.1 mm 位移,步长由 LK-G30 确定,读出

相应的 WPS 读数。以 LK-G30 的读数为横轴,以 WPS 的 y 坐标值为纵轴,得到二阶拟合曲线及拟合残差分布(图 5),并得出相应的二阶拟合公式。

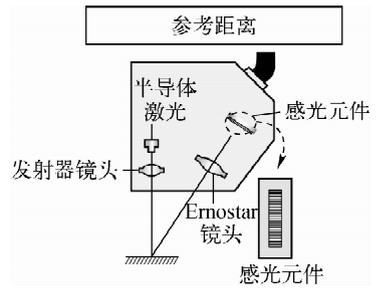


图 3 LK-G30 CCD 激光位移传感器三角测量法原理

Fig. 3 Principle of LK-G30 CCD laser displacement sensor of triangulation

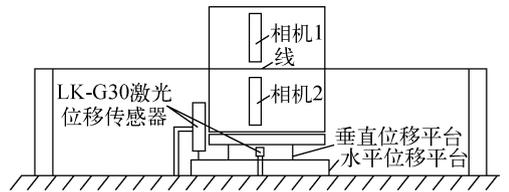


图 4 WPS 标定系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of WPS calibration system

某点的灵敏度是指测量系统在稳定状态下该点的输出增量对输入增量的比值,即拟合方程的切线斜率^[7]。在实验过程中,二阶拟合曲线方程的最小切线斜率为 -1.00502 ,因此,垂直方向灵敏度 K_V 不小于 -1.00502 。在垂直方向位移过程中, x 坐标值标准差 $\sigma_H = 0.0293124$,表示在垂

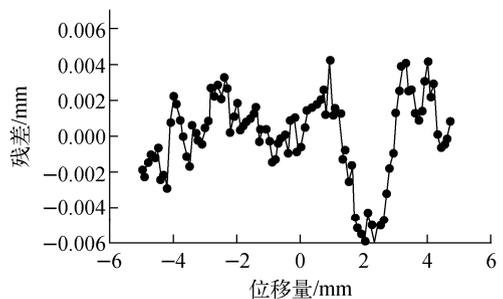
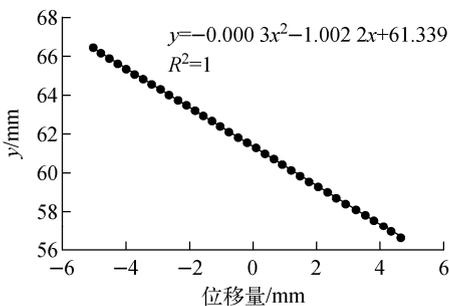


图 5 WPS 垂直方向二阶拟合曲线及残差分布

Fig. 5 Second-order fitting curve and residual distribution in vertical direction of WPS

直位移过程中水平方向位置基本保持不变。

均方根误差(RMSE),亦称为标准误差,用来衡量测量值与真值的接近程度。根据贝塞尔公式, RMSE 为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1)$$

其中: n 为测量次数; v_i 为测量值与基准值的差。经计算可得到,WPS在垂直方向的二阶拟合均方根误差 $RMSE_V = 0.0024$ mm。

在水平方向上,同理可得到如图6所示的二阶拟合曲线和残差分布。水平方向灵敏度 K_H 不小于 -1.00155 。在水平位移过程中, y 坐标值标准差 $\sigma_V = 0.008338819$,表示在水平位移过程中垂直方向位置基本保持不变。经计

算可得到 WPS 在水平方向的二阶拟合均方根误差 $RMSE_H = 0.0021$ mm。

分辨率为传感器可准确输出的最小测量值,因此,传感器分辨率必须大于测量中可能输出的最小测量值。在粒子加速器的监测中,对分辨率的要求为 $5 \mu\text{m}$ 。激光位移传感器的分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ 。为考查 WPS 的分辨率,在标定范围中分别进行 $5, 2, 1 \mu\text{m}$ 步长下的 WPS 测量。考查 WPS 的读数能否达到最小读数及能否真实反映位移量。图7、8分别为 WPS 垂直方向及水平方向分辨率。可看出,在步长为 $5 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的情况下,WPS在垂直和水平方向均能很好地输出,得到的数据线性度较好。但步长为 $1 \mu\text{m}$ 时,出现输出不稳定及不准确的情况,线性度和相关性均不能满足要求。因

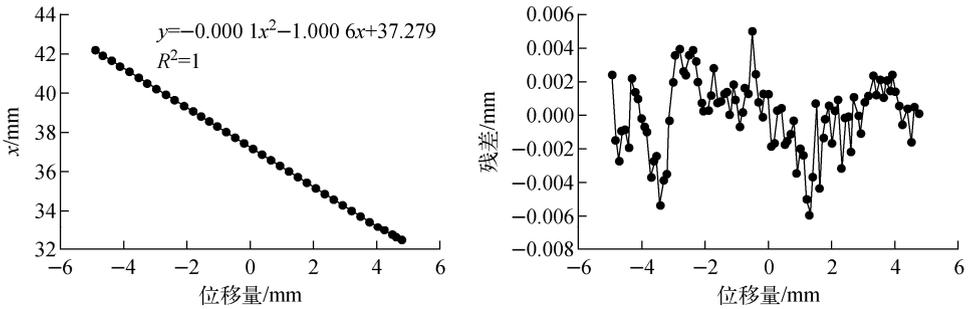


图6 WPS水平方向二阶拟合曲线及残差分布

Fig. 6 Second-order fitting curve and residual distribution in horizontal direction of WPS

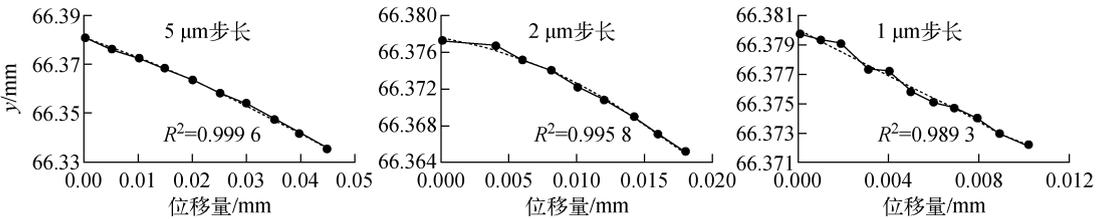


图7 WPS垂直方向分辨率

Fig. 7 Resolution in vertical direction of WPS

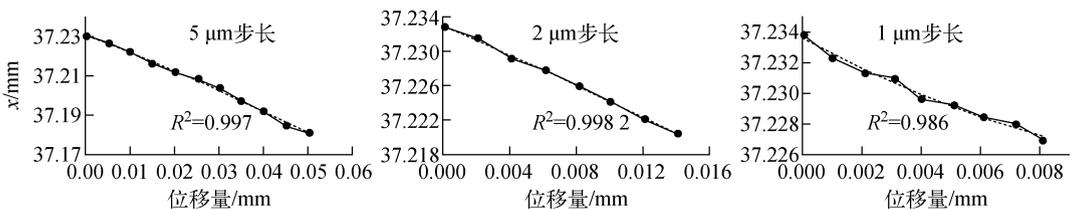


图8 WPS水平方向分辨率

Fig. 8 Resolution in horizontal direction of WPS

此,WPS在垂直和水平方向的分辨率为 $2\ \mu\text{m}$,满足了粒子加速器监测所需的分辨率。

2.3 实验结果分析

对于WPS系统,稳定的测量环境对监测过程的等精度测量很重要,环境因素主要影响vectran线下垂量的一致性。以下分析各环境因素对WPS监测的影响。

张紧的vectran线由于自身重力作用存在微量下垂,在垂直方向的模型^[6,9-10]如图9所示。在该模型中,线的下垂量决定因素是线单位质量与线张力的比例,而此比例与环境湿度梯度线性相关^[11]。由于实验在短期内进行,湿度基本不变,因此该参数可忽略不计。但在长期监测时,不同时间内若湿度发生变化,监测位置线下垂量的变化会被WPS采集到,得到的数据不是该位置的实际变化,必需考虑湿度变化以进行补偿。因此在长期监测中,湿度是WPS的主要影响因素。

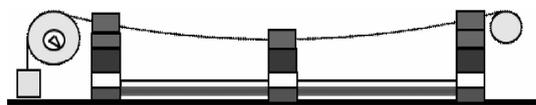


图9 张紧线垂直方向的模型

Fig. 9 Vertical model of stretch wire

此外,人员走动造成的地面振动会对线的稳定造成影响。因此,在监测中,人员尽量仅在不采集数据时靠近,可将此影响降到最低。

3 结论

在大型粒子加速器中,关键部件的位置监测越来越重要,本文对WPS的静态特性进行了实验研究。根据实验数据的分析处理结果,WPS的灵敏度、RMSE及分辨率均达到了加速器部件监测精度的要求。环境因素由于短期影响不大而忽略不计,但对于湿度等环境因素的影响,需进一步进行深入研究。

参考文献:

[1] 于成浩,殷立新,杜涵,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 Han, et al. Survey

and alignment design of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1167-1172(in Chinese).

- [2] 何晓业. 静力水准系统在大科学工程中的应用及发展趋势[J]. 核科学与工程,2006,26(4): 332-336.
HE Xiaoye. Application of hydrostatic leveling system in key scientific engineering and its developing tendency[J]. Chinese Journal of Nuclear and Engineering, 2006, 26(4): 332-336(in Chinese).
- [3] 许少峰. 粒子加速器中复杂静力水准系统的精度理论与验证研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.
- [4] 何晓业,黄开席,陈森玉,等. CCD静力水准系统的标定方法和拟合[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(3):113-117.
HE Xiaoye, HUANG Kaixi, CHEN Senyu, et al. Calibrating method and fitting of CCD HLS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(3): 113-117(in Chinese).
- [5] 何晓业,黄开席,陈森玉,等. 一种用于高能加速器高程监测的静力水准系统[J]. 核技术,2007,30(6):486-490.
HE Xiaoye, HUANG Kaixi, CHEN Senyu, et al. A hydrostatic leveling system for position monitoring of high energy accelerator[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(6): 486-490(in Chinese).
- [6] TOUZÉ T. Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC: Des réseaux de géodésie au pré-alignement actif[D]. France: Université de Paris-Est, 2011.
- [7] 刘红丽,张菊秀. 传感与检测技术[M]. 1版. 北京:国防工业出版社,2007.
- [8] 汪鹏. 电容式非接触静力水准传感器的研制[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.
- [9] DURAND H M, BESTMANN P, HERTY A, et al. oWPS versus cWPS[C]// Proceedings of the 12th International Workshops on Accelerator Alignment. Fermilab: [s. n.], 2012.
- [10] DURAND H M. CLIC active pre-alignment system: Proposal for CDR and program for TDR[C]// Proceedings of the 11th International Workshops on Accelerator Alignment. DESY: [s. n.], 2010.
- [11] TOUZÉ T. Feasibility of the CLIC metrological reference network[C]// Proceedings of the 11th International Workshops on Accelerator Alignment. DESY: [s. n.], 2010.