



·粒子束及加速器技术·

粒子加速器丝线位置测量电容传感器标定方法*

闫路平¹, 董 岚^{1,2}, 王 铜^{1,2}, 卢 尚¹, 韩圆颖¹, 刘晓阳¹, 张露彦¹,
闫皓月¹, 马 娜^{1,2}, 何振强^{1,2}, 柯志勇^{1,2}, 门玲鸽^{1,2},
李 波^{1,2}, 王小龙^{1,2}, 梁 静^{1,2}, 罗 涛^{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: 在 高 能 同 步 辐 射 光 源 中, 为 了 提 高 磁 铁 的 准 直 精 度, 采 用 磁 中 心 代 替 机 械 中 心 进 行 磁 铁 标 定, 通 过 振 动 线 或 旋 转 线 等 技 术 获 得 磁 铁 的 磁 中 心 位 置, 以 及 通 过 电 容 式 位 移 传 感 器 测 量 得 到 丝 线 的 位 置, 从 而 实 现 磁 中 心 与 准 直 靶 标 的 关 联。为 了 实 现 丝 线 位 置 的 高 精 度 测 量, 必 须 对 电 容 传 感 器 进 行 精 确 标 定, 因 此 介 绍 了 一 种 电 容 式 位 移 传 感 器, 并 对 其 标 定 方 法 进 行 了 研 究, 提 出 了 网 格 化 的 数 据 采 集 方 式 以 及 高 阶 多 项 式 拟 合 的 数 据 处 理 方 法, 搭 建 了 传 感 器 标 定 平 台 并 开 发 了 相 应 的 标 定 控 制 程 序, 实 现 了 对 传 感 器 的 自 动 控 制、数 据 采 集 和 高 精 度 标 定 过 程。经 过 分 析 与 对 比, 标 定 后 的 电 容 传 感 器 达 到 μm 级 的 位 移 测 量 精 度, 为 磁 铁 的 高 精 度 准 直 提 供 了 基 础。

关键词: 振动线; 电容式位移传感器; 标定; 多项式拟合; 精度分析

中图分类号: TL505

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220447

Calibration method of capacitance sensor for particle accelerator wire position measurement

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

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

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

Abstract: To improve the alignment accuracy of the magnet in high energy synchrotron radiation source, the magnetic center is used instead of the mechanical center to calibrate, the magnetic center position of the magnet is obtained by vibration wire or rotation wire technology, and the position of the wire is measured by capacitive sensor, so as to realize the association between the magnetic center and the collimation target. To achieve high precision measurement of wire position, it is necessary to calibrate capacitance sensor accurately. In this paper, a kind of capacitive sensor is introduced and its calibration method is studied, the data acquisition method of grid and data processing method of high order polynomial fitting are proposed, the sensor calibration platform is built and the corresponding calibration program is developed, and the automatic and high precision calibration of the sensor is realized. Analysis and comparison show that the calibrated capacitance sensor has achieved the displacement measurement accuracy of μm level, which provides a basis for high-precision collimation of magnets.

Key words: vibration wire, capacitive displacement sensor, calibration, polynomial fitting, precision analysis

高能同步辐射光源预准直精度要求为 $30\ \mu\text{m}$, 相比于欧洲 EBS、美国 APSU, 属于同类型装置中精度要求最高的, 具有挑战性, 对磁铁准直各个环节都提出了超高精度的要求, 其中磁铁的标定属于准直的重要环节, 因此, 需要大幅提高磁铁的标定精度。在 高 能 同 步 辐 射 光 源 (HEPS) 工 程 中, 常 采 用 振 动 线 磁 中 心 标 定 代 替 原 来 机 械 中

* 收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12075264, 11605216, 11605215)

联系方式: 闫路平, yanluping@ihep.ac.cn。

通信作者: 董 岚, dongl@ihep.ac.cn。

心标定进行磁铁的磁中心准直^[1]。同时,为了将磁中心引出到磁铁的基准点上,需要对丝线的位置进行测量,由于丝线的不可接触测量特性以及高精度位置测量要求,常采用位移传感器进行无接触测量,从而获得丝线的高精度绝对位置。丝线的位置测量精度决定了磁中心的准直精度,因此,本文介绍一种电容式位移传感器,并对其测量原理、标定方法、测量精度进行了研究。

1 电容式位移传感器介绍

振动线磁中心准直方案如下:在待准直磁铁的大致中心位置拉一根钼铜线^[2],将导线两端分别固定作为准直基准,通过二维平移台结合压电平移台带动丝线在磁铁空间磁场的水平和垂直方向上进行扫描,探测出磁铁的空间磁场分布情况,通过数学模型计算出磁中心位置,并根据测量获得的磁中心与导线位置偏差准直调整磁铁。图1为振动线预准直单元磁中心测量系统。电容式位移传感器(WPS)的精度能够达到 μm 量级,其端面设计有陶瓷外基准面,可以精密测量丝线相对于陶瓷外基准面的距离,实现磁铁精准直。

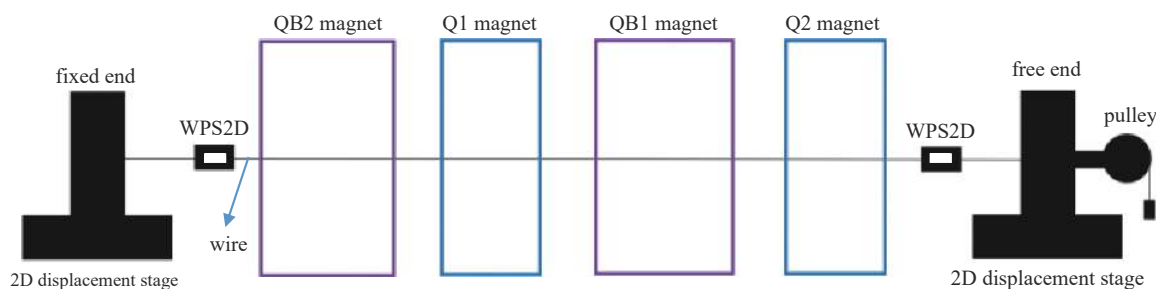


Fig. 1 Vibration wire pre-collimation unit measurement system

图1 振动线预准直单元测量系统

电容式位移传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路3部分组成,它将被测位移量的变化转换为电容量的变化,具有结构简单、成本低、分辨率高、抗干扰能力强、动态响应特性好等诸多优点。

本文采用的是Fogale公司的一款电容式位移传感器,由非接触式传感器^[3]、调理模块、多通道控制机箱三部分组成,与传感器非接触的的金属丝线属于导电或者弱导电类型,在测量丝线绝对位置过程中无需给丝线通入电流信号。传感器可以工作在 $10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境范围,在 10 mm 测量范围内的分辨率为 $0.3\ \mu\text{m}$,在水平和垂直方向的灵敏度为 $1\ \text{V}/\text{mm}$,测量拟合后的线性误差为 $2\ \mu\text{m}$ 。该传感器可以用于辐射环境中,其电子设备可以承受 $1000\ \text{rad}$ 的辐射吸收剂量,一般放置距传感器 $3\ \text{m}$ 的位置,因此该传感器适用于加速器隧道环境准直^[4]。如图2所示。

1.1 电容式位移传感器的测量原理

电容式位移传感器的基本公式如1所示

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / d_0 \quad (1)$$

式中: C_0 为传感器初始极距的电容, d_0 为传感器两电极板间的距离, A 为两极板的正对面积, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为介质的相对介电常数。 d_0 、 A 、 ε_r 三个参数任意一个发生变化,都会引起电容变化。因此,电容式位移传感器可分为3种基本类型^[5]:变极距型、变面积型和变介电常数型传感器。

变面积型传感器主要用于测量线位移和角位移,适用于范围较大的测量情况,但其灵敏度低;变介电常数型传感器大多用于测量电介质厚度、位移和液位^[6],测量位移和液位时在忽略边缘效应下具有很好的线性特征。本文中用来进行丝线绝对位置测量的电容传感器属于变极距型。单个极板的变极距式工作原理及关系曲线如图3所示。图3(a)为单一极板工作原理图,图3(b)为单一极板工作曲线。

上极板固定不动作为定极板,下极板作为动极板,当动极板向上移动 Δd 时,则电容增大,电容的相对变化量为

$$\Delta C = \frac{C_0 \Delta d}{d_0} \left(1 - \frac{\Delta d}{d_0}\right)^{-1} \quad (2)$$

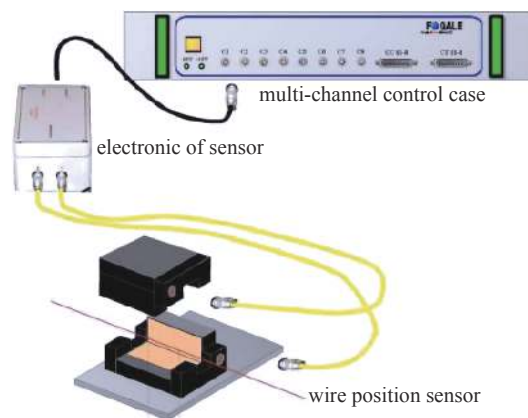


Fig. 2 Capacitive displacement sensor system

图2 电容式位移传感器系统

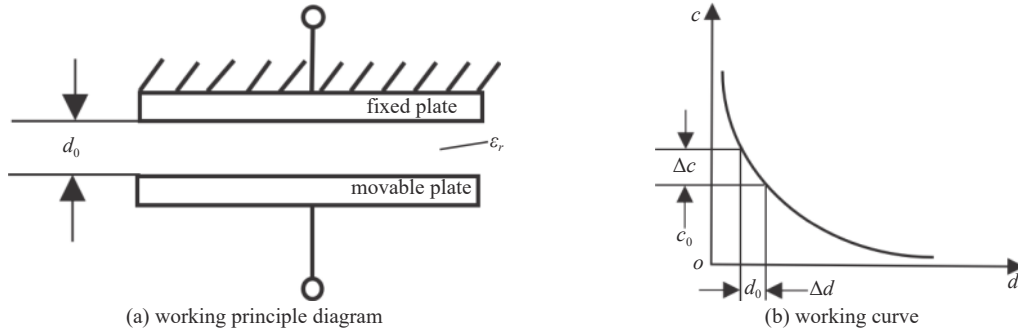


Fig. 3 Working principle diagram and working curve of capacitive displacement sensor

图3 电容式位移传感器工作原理图和工作曲线

由式(2)可知,当 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时,电容变化量按泰勒级数展开

$$\Delta C = \frac{C_0 \Delta d}{d_0} \left[1 + \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (3)$$

略去非线性高次项后,得到近似的线性关系

$$\Delta C = C_0 \Delta d / d_0 \quad (4)$$

则灵敏度 K_g 和非线性误差 δ_L 分别为

$$K_g = \Delta C / \Delta d = C_0 / d_0 \quad (5)$$

$$\delta_L = |\Delta d / d_0| \times 100\% \quad (6)$$

因此,传感器在很小范围内可近似看作线性输出,其灵敏度只与传感器的初始极距有关,初始极距越小,传感器的灵敏度就越高。但是两极板间距过小就容易引起电容器击穿或者短路,因此多采用差动式原理结构来提高传感器的灵敏度。如图4所示。图4(a)为差动式结构原理图, d_1 和 d_2 分别表示差动式结构上下定极板与动极板之间的距离,图4(b)为差动式工作曲线。其中图4(b)中的曲线1和曲线2分别为中间动极板向下运动时,差动式结构上面部分的电容 C_1 的变化情况和下面部分的电容 C_2 的变化情况,图4(b)中的曲线3为中间动极板两边电容的差值。

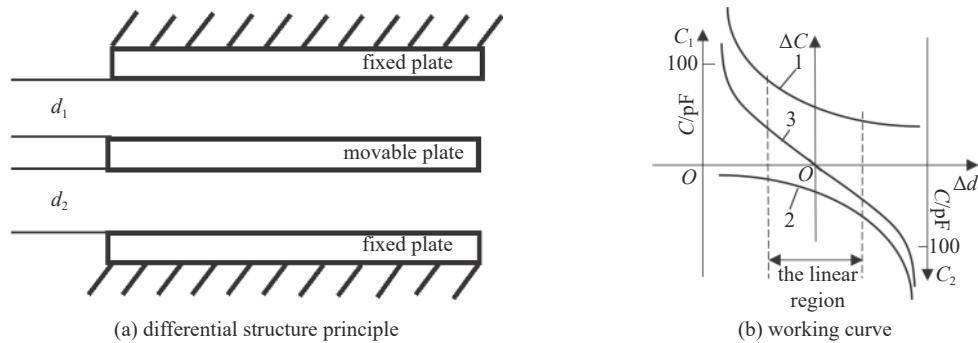


Fig. 4 Differential structure principle and working curve

图4 差动式结构原理和工作曲线

上下两极板固定不动作为定极板,中间为动极板,当动极板向下移动 Δd 时,上下电容串联且一增一减,则电容的变化量为

$$\Delta C = \frac{C_0 \Delta d}{d_0} \left(1 \pm \frac{\Delta d}{d_0} \right)^{-1} \quad (7)$$

同理,当 $\Delta d/d_0 \ll 1$ 时,电容变化量按泰勒级数展开

$$\Delta C = \frac{C_0 \Delta d}{d_0} \left[1 \mp \frac{\Delta d}{d_0} + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 \mp \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (8)$$

差动式电容传感器总电容为 $C = C_1 - C_2$,则传感器输出的电容量变化为

$$\Delta C = \frac{2C_0 \Delta d}{d_0} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_0} \right)^4 + \dots \right] \quad (9)$$

略去非线性高次项后,得到的近似线性关系

$$\Delta C = 2C_0 \Delta d / d_0 \quad (10)$$

灵敏度 K_g 和非线性误差 δ_L 分别为

$$K_g = \Delta C / \Delta d = 2C_0 / d_0 \quad (11)$$

$$\delta_L = (\Delta d / d_0)^2 \times 100\% \quad (12)$$

因此,差动式传感器比单一极板的灵敏度提高了1倍,相对非线性误差也减小了1个数量级,同时,改善了传感器零点附近工作的线性度。本文介绍的电容式位移传感器就是差动式结构工作原理,在标定过程中,当丝线在垂向相对于传感器自上而下移动时,采集到的电信号呈逐渐增大趋势。

1.2 电容传感器的转换电路

为了能直观分析传感器性能特性,得到所需的测量结果,还需要将电容量的变化通过测量电路转换为电压式电信号输出。在实际测量电路中,必须考虑电缆的电感和电阻值、电容器的电阻等因子,因此,电路中LRC测容值的主要电路组成如图5所示。其中,C表示电容,L表示电感,R表示电阻,U表示输出的电压信号。

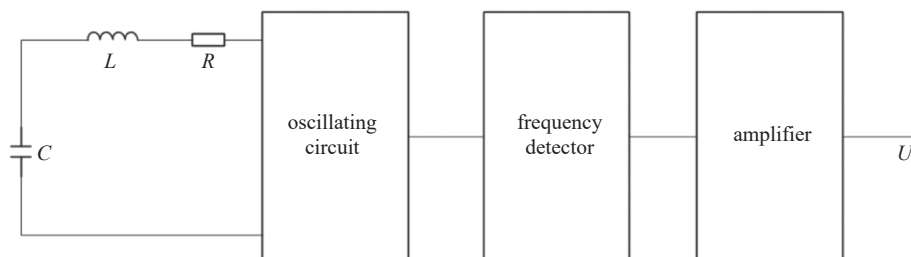


Fig. 5 Circuit principle of the capacitance sensor

图5 电容传感器的电路原理

当电容量发生变化时,在LC振荡电路中,调制信号经过调频、滤波和稳幅后输出相应的频率

$$f = 1/2\pi \sqrt{LC} \quad (13)$$

然后通过鉴频器和放大器将频率信号转换为电压信号并线性放大输出,即输出电压与输入信号的瞬时频率偏移成正比,最终将丝线的微小位移量的变化转换为电信号输出。如图6所示。横坐标 f_0 表示被测量信号为零时,振荡器的固有频率,纵坐标 U_{00} 则表示振荡器在固有频率位置输出的电压信号。当被测量的信号非零时,振荡器的频率发生变化, f_L 则表示振荡器频率低于固有频率, f_H 表示振荡器频率高于固有频率, U_{0L} 表示振荡器频率为 f_L 时产生的电压信号, U_{0H} 表示振荡器频率为 f_H 时产生的电压信号。

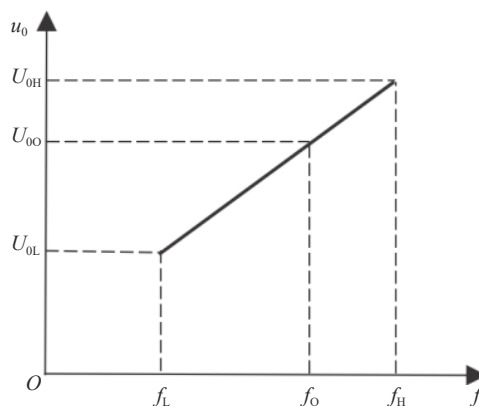


Fig. 6 Input and output of the frequency discriminator

图6 鉴频器的输入输出

2 电容传感器标定系统

为了建立位移与电压的相互关系,传感器使用前必须进行标定^[7]。同时,因为传感器长时间使用后,其放大器的放大信号发生变化,传感器需要重新标定。因此,需要搭建一套专门的线位置传感器(WPS)标定系统,重新获取WPS的静态特性。本文搭建的线位仪系统主要包含电容传感器及其多通道控制机箱、数字采集卡(该采集卡中多路复用器34901A是数据传输的核心模块)和二维精密位移台,如图7所示。丝线通过两端砝码固定作为参考基准,采用超高精度位移台搭载传感器作水平和垂直方向的运动,传感器系统将非接触的位移量信号转换为电信号经过采集卡采集上传至上位机,最终以位移台的位移量作为外部基准对传感器进行标定。

2.1 数字采集卡

采集卡选用美国是德科技公司的数据采集设备 Keysight 34972A,如图8所示。该采集卡可以进行电压测量,

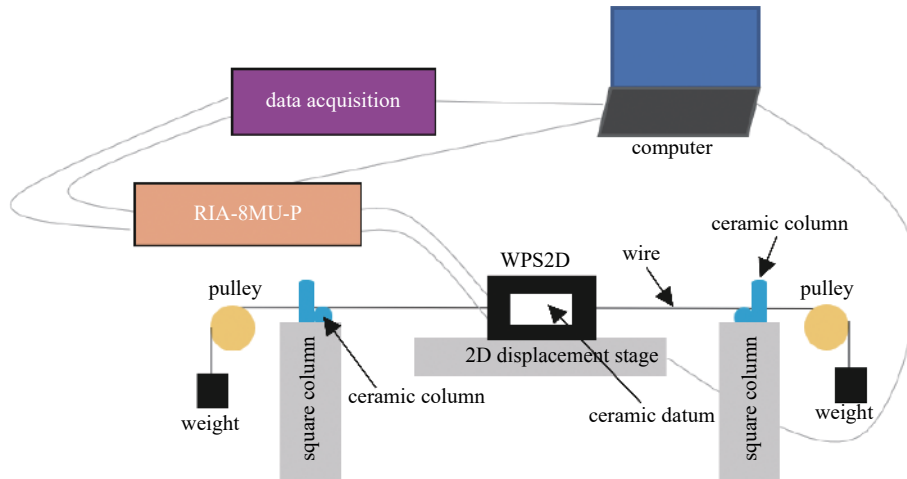


Fig. 7 Wire position calibration system

图7 线位仪标定系统

温度测量,电阻测量和频率测量等,同时具有 $4^{1/2}$ 、 $5^{1/2}$ 、 $6^{1/2}$ 位万用表精度、稳定性和噪声抑制,可根据不同测量条件进行灵活切换。其中,多路复用器 34901A 是采集卡的主要通信模块,最多可提供 20 个通信通道,单通道的读取速率高达 500 读数/s,扫描速率可达 250 通道/s,本实验中同时设置 4 个通道,分别是 112 和 114、113 和 115 通道,同时给上位机传输两个传感器横向和垂向上的电压信号。

在采集卡控制程序中,主要采用了虚拟仪器系统 I/O 接口软件——VISA,该规范是实现计算机系统与仪器之间通信的桥梁和纽带。它的主要特点是为用户提供简单易用的控制函数集和强大的仪器控制、资源管理功能,独立于硬件设备、接口、操作系统和编程语言。

2.2 二维运动台

运动平台采用美国 Aerotech 行程为 150 mm 的二维精密定位台,出厂时 X 和 Z 轴绝对定位精度为 $\pm 1.5 \mu\text{m}$, X 轴双向重复性 $\pm 1.5 \mu\text{m}$, Z 轴双向重复性 $\pm 0.75 \mu\text{m}$,双轴垂直度达到 $5''$ 。使用回馈干涉仪和雷尼绍激光干涉仪同时对平移台的绝对定位精度进行测试,其双向重复性仍能达到约 $1 \mu\text{m}$,精度较高,因此,可以对传感器进行标定实验。

2.3 电容式位移传感器

Fogale 电容式位移传感器^[8]的测量范围为 $\pm 5 \text{ mm}$,水平和垂直方向的灵敏度为 1 V/mm ,当丝线在传感器中心时,其输出电压为 $V_x=V_y=5 \text{ V}$ 。在出厂时,厂家提供了一套丝线距传感器中心的位置与输出电压的拟合标称系数,拟合后的线性误差为 $2 \mu\text{m}$,产品说明书中给出的传感器(以 011 传感器为例)在量程范围内,丝线横向位置 X 与横向输出电压 V_x 关系特性如图 9(a) 所示,丝线垂向位置 Y 与垂向输出电压 V_y 关系特性如图 9(b) 所示。

3 电容传感器标定方法

3.1 标定具体过程

标定具体步骤如下。

步骤 1: 使用塑料螺栓将传感器固定在二维平移台的台面上,然后利用砝码重力将线紧贴在陶瓷双锥机构的顶面凹槽内,通过千分表测头接触传感器外侧的陶瓷面,左右缓慢移动传感器使得传感器与丝线水平;

步骤 2: 根据传感器的输入输出特性曲线,将传感器横向电压 $V_x=5 \text{ V}$ 、垂向电压 $V_y=5 \text{ V}$ 作为传感器的中心位置,根据传感器电压反馈,利用平移台控制程序自动调整传感器横向和垂向位置直到电压均达到 5 V ,此时丝线穿过传感器中心,并将平移台该位置设为初始零位;

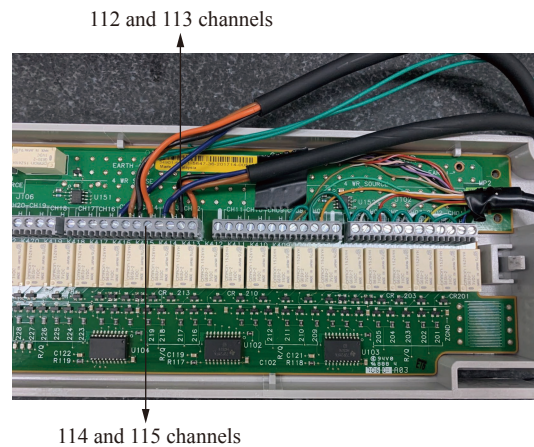


Fig. 8 34901A multiplexer

图8 34901A 多路复用器

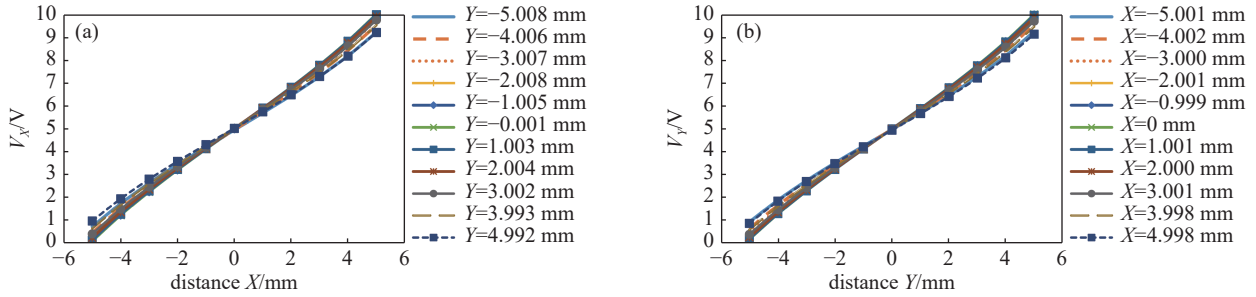


Fig. 9 The relation between voltage and position of wire in horizontal and vertical directions

图 9 水平和垂直方向上丝线位置与电压的关系

步骤 3: 控制平移台, 将传感器平移到相对初始零点 $X=5\text{ mm}$, $Y=5\text{ mm}$ 位置, 以 0.4 mm 步长, “之”字形路线进行标定, 连续标定 3 次取平均电压, 标定的网格化位置如图 10 所示, 红色箭头方向为标定的路径;

步骤 4: 标定完成后, 利用实测数据和理论位置, 重新计算传感器的标称系数, 修正电压与位置的换算公式;

步骤 5: 电压与位置关系采用拉格朗日插值法^[9], 进行高阶多项式拟合

$$\begin{cases} D_X(V_X, V_Y) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 a^{ij} V_X^i V_Y^j \\ D_Y(V_X, V_Y) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 b^{ij} V_X^i V_Y^j \end{cases} \quad (14)$$

式中: D_X 和 D_Y 分别是丝线在横向和垂直方向上距离传感器中心的位移量; 自变量 V_X 和 V_Y 分别表示传感器横向的电压信号和垂向的电压信号; a 和 b 分别为 X 、 Y 方向的标称系数。

3.2 标定处理程序开发及标定过程

厂家的 WPS 测量软件不具备 WPS 系统的标定功能, 因此基于实际需求, 开发了一套基于 C++ 语言的 WPS 系统标定拟合程序, 该程序集采集卡、传感器、平移台于一体, 实现了设备控制、数据采集和拟合处理的完整标定过程。如图 11 所示。

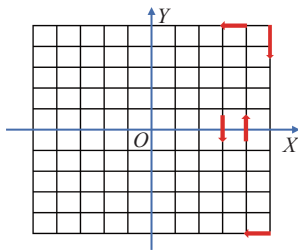


Fig. 10 WPS calibration route

图 10 WPS 标定路线

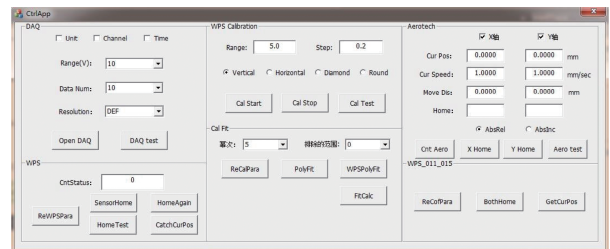


Fig. 11 WPS calibration processing program

图 11 WPS 标定处理程序

其中 DAQ 部分为采集卡参数设置和通信接口控制程序, 实现传感器底层电信号的提取; WPS 部分实现了丝线在传感器中心初始零位的设置, 以及标定完成后重新回到初始位置的功能; WPS Calibration 部分是传感器标定前的参数设置和自动标定过程; Cal Fit 实现了传感器高阶多项式拟合计算, 获取丝线的绝对位置测量; Aerotech 为二维平移台相对运动和绝对运动的控制程序; WPS_011_015 实现了两个传感器同时静态采集丝线绝对位置和数据处理过程。标定过程中程序实现如下:

(1) 通过采集卡设置好传感器测量电压范围、分辨率和采样数后, 添加扫描通道, 触发模式等, 由此打开采集卡的数据通信功能;

(2) 读取已修正好的标称系数, 通过传感器反馈的丝线位置, 平移台自动控制传感器使丝线回到传感器中心位置, 即控制传感器回到初始零位;

(3) 在实验室正常工作环境中, 通过已修正的系数, 以 0.2 mm 步长, 对 WPS 进行测试和验证, 测量过程中根据测量电压直接计算丝线的位置。

4 电容传感器标定结果

4.1 标定结果分析

对两种型号传感器进行多次标定,在剔除粗大误差后计算得到的测量电压重复性约 2 mV,转换为丝线拟合位置的重复性约 2 μm ,表明传感器多次标定的重复性较好。由此通过非线性方程组求解获得了两种型号传感器各 36 组的标定系数,分别与出厂的标称系数进行比对发现,重新标定的 36 组系数与出厂的系数最大偏差为 0.1,且该偏差出现在多项式拟合展开式中为零次幂的常数项,其它标称系数结果基本一致。通过传感器搭载精密平移台上,对传感器进行标定,测量的传感器灵敏度由出厂时的 1 V/mm 降低为 0.89 V/mm。使用该标定系数对 015 型号的 WPS 进行测试,标定后的拟合位移与理论位移的最大偏差为 3.14 μm ,最小偏差为 -3.07 μm ,标准差为 0.72 μm ,对 011 型号的 WPS 进行测试,标定后的拟合位移与理论位移的最大偏差为 5.39 μm ,最小偏差为 -1.19 μm ,标准差为 1.39 μm 。由此可知,本文的标定结果与厂家的标定结果吻合。

4.2 传感器稳定性测试

为了进一步掌握传感器的特性,需了解传感器在长期使用过程中的测量稳定性,以便制定传感器的标定时间和修改标定系数。对两种型号的 WPS 进行连续约 3 个月、共 3 个阶段、每个阶段至少 2 周、每天 3 遍的稳定性测试。

采用两两循环法和平均值法两种数据处理方法进行比对^[10],平均值法是计算两种型号传感器每个阶段共 14 遍丝线拟合位置的平均值与每遍拟合位置的偏差,统计拟合位置与平均拟合位置偏差的最大值,最小值和标准差,两两循环法是整理每个阶段标定的前后相邻两遍丝线拟合位置的偏差,同时也包含该阶段第一次与最后一次传感器标定的拟合位置偏差,统计每相邻两边拟合位置偏差的最大值,最小值和标准差,并对这两种计算方法的结果进行对比验证。

三个阶段的详细数据见如表 1~表 3。

对于 011 型号的传感器,在平均值法数据处理情况下,3 个阶段的丝线拟合位置偏差的最大值为 6.9 μm ,最小值为 -4.4 μm ,标准差为 1.6 μm ,两两循环法数据处理的位置偏差最大值为 10.6 μm ,最小值为 -12.3 μm ,标准差为 2.2 μm ;015 型号的传感器,平均值法的丝线位置偏差最大值为 5.7 μm ,最小值为 -5.8 μm ,标准差为 1.9 μm ,两两循环法的最大值为 10.7 μm ,最小值为 -7.3 μm ,标准差为 2.9 μm 。

表 1 第一阶段长期稳定性测试
Table 1 Phase I long term stability test

		$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$	$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$
		average method		pairwise cycle method	
sensor 011	maximum deviation	1.6	6.2	3.8	7.3
	minimum deviation	-2.5	-3.5	-2.9	-7.6
	standard deviation	0.8	1.7	1.0	2.2
sensor 015	maximum deviation	3.6	5.7	4.4	10.7
	minimum deviation	-3.2	-5.8	-4.1	-7.0
	standard deviation	1.5	1.9	1.9	2.9

表 2 第二阶段长期稳定性测试
Table 2 Phase II long term stability test

		$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$	$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$
		average method		pairwise cycle method	
sensor 011	maximum deviation	5.6	6.9	10.6	7.4
	minimum deviation	-2.2	-3.5	-12.3	-6.9
	standard deviation	1.0	1.3	1.5	1.9
sensor 015	maximum deviation	1.7	5.7	2.2	7.5
	minimum deviation	-1.5	-2.5	-2.0	-7.3
	standard deviation	0.7	1.7	0.9	2.4

表 3 第三阶段长期稳定性测试
Table 3 Phase III long term stability test

		$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$	$X/\mu\text{m}$	$Y/\mu\text{m}$
		average method		pairwise cycle method	
sensor 011	maximum deviation	5.9	6.1	4.5	6.5
	minimum deviation	-3.6	-4.4	-4.7	-5.6
	standard deviation	1.0	1.6	1.0	1.9
sensor 015	maximum deviation	-2.6	4.7	2.9	6.8
	minimum deviation	-2.7	-3.5	-3.5	-6.5
	standard deviation	0.7	1.4	0.9	1.9

由以上测量结果可知: (1)在实验室正常工作期间,标定的传感器稳定性可以持续至少2周以上;(2)预热时间不足(小于1 h)会对WPS标定结果影响较大,偏差 $1\sim 2\ \mu\text{m}$;(3)结合实际振动线测量情况,传感器在第2天标定前更换丝线比不更换丝线时会产生 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的偏差;(4)两种型号传感器至少两周内的稳定性约为 $3\ \mu\text{m}$,可以满足预准直实验精度要求;(5)同时也验证了该测量方案和处理方法以及程序实现所获得的标定系数是正确的。

5 结 论

在磁中心准直中需充分了解电容传感器在实际工作环境中的性能特性,才能精确可靠地实现丝线位置的测量。WPS系统是非接触测量微小位移的高精度传感器仪器,随着设备使用时间越长,其内部放大增益发生变化,因此实际环境中的标定系数与出厂系数有所不同,因此有必要对传感器进行重新标定,以保证传感器良好的测量性能。采用本文搭建的标定平台、编写的标定程序进行了2个传感器的标定,通过与厂家的标定系数对比,仅在多项式拟合展开式的常系数中,拟合的标定系数与厂家标称系数相差最大为0.1,其余系数基本一致,与平移台的位移值对比,反映了本文所标定的结果的正确性。同时,本文还对传感器的稳定性进行了长时间测试,至少2周内传感器能够保持在 $3\ \mu\text{m}$,为后续传感器的正确使用提供了指导。在传感器标定完成之后,后续将开展传感器中心基准化的研究,即将传感器的电中心引出到陶瓷面,以供激光跟踪仪或三坐标机等精密仪器接触测量。初步方法为:测量传感器外陶瓷基准面的坐标位置,然后将传感器翻转 180° 后,测出另外一个陶瓷面的坐标位置,进而计算出传感器电中心到其陶瓷面的距离,从而实现丝线绝对定位测量。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 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: University of Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [3] 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. (Wang Peng. Development of capacitive non-contact static leveling sensor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013)
- [4] Herty A. Micron precision calibration methods for alignment sensors in particle accelerators[D]. Nottingham Trent University, 2009.
- [5] 刘红丽, 张菊秀. 传感与检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Liu Hongli, Zhang Juxiu. Sensor and detection technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007)
- [6] 孙建民, 杨清梅. 传感器技术[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2005. (Sun Jianmin, Yang Qingmei. Sensor technology[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2005)
- [7] 阮玉芳. 中国散裂中子源直线束测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010. (Ruan Yufang. The study of the beam instruments for CSNS linac[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010)
- [8] 唐郑, 何晓业, 王巍, 等. 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[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(6): 1127-1131. (Tang Zheng, He Xiaoye, Wang Wei, et al. Static characteristic calibration of wire position sensor for position monitoring in particle accelerator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(6): 1127-1131)
- [9] 王兵团, 张作泉, 赵平福. 数值分析简明教程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1984. (Wang Bingtuan, Zhang Zuoquan, Zhao Pingfu. Concise tutorial on numerical analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1984)
- [10] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7版. 北京: 机械工业出版社, 2015. (Fei Yetai. Error theory and data processing[M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2015)