

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.03

用于加速器准直的球形准直器扫频激光干涉测距技术研究

张露彦^{1,2,3}, 贾琳华¹, 张福民^{1*}, 门玲鸽^{2,3}

(1. 天津大学 福州国际联合学院, 天津 300072; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 河南省科学院高能物理研究中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 目前加速器准直领域应用的多路激光测距技术存在设备成本高昂、系统搭建复杂度高的不足之处, 针对此问题, 提出球形准直器扫频激光干涉测距技术。搭建集成 HCN(即 $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ 的缩写) 气体吸收池、光开关与球形准直器的扫频激光干涉测距系统, 实现大尺度范围内的高精度绝对距离测量; 设计可以和激光跟踪仪角隅反射镜共用靶标座的球形准直器, 在保证测量准确性符合要求的前提下降低设备成本。在模拟加速器准直的实验环境中开展系统性能测试, 结果表明: 在 30 m 测量范围内, 球形准直器扫频激光干涉测距系统的测距误差不超过 30 μm , 满足加速器准直需求。该系统为加速器准直提供了高精度、高适应性的解决方案, 具有重要工程实用意义。

关键词: 精密测量; 粒子加速器; 球形准直器; 扫频激光; 干涉测距; 气体吸收池; 高适应性; 工程化应用

中图分类号: TB921; O43; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 04-0046-08

Research on spherical collimator frequency sweeping laser interferometry for distance measurement in accelerator alignment

ZHANG Luyan^{1,2,3}, JIA Linhua¹, ZHANG Fumin^{1*}, MEN Lingling^{2,3}

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100049, China; 3. Center for High Energy Physics, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Current multi-channel laser ranging technologies applied in accelerator alignment suffer from high equipment costs and complex system deployment. To solve these problems, this paper proposes a frequency-sweeping laser interferometric ranging technique adopting spherical collimators. A frequency sweeping laser interferometric ranging system integrated with HCN ($\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$) gas absorption cells, optical switches and spherical collimators was constructed to realize high-precision absolute distance measurement over a large range. A spherical collimator compatible with the target base of corner reflectors for laser trackers was designed, which reduces equipment costs while ensuring the required measurement accuracy. System performance tests were performed in an experimental environment simulating accelerator alignment. The results show that within the measurement range of 30 m, the ranging error of the proposed system is not more than 30 μm , fully satisfying the requirements of accelerator alignment. This system provides a high-precision and highly

收稿日期: 2025-10-19; 修回日期: 2026-02-10; 录用日期: 2026-02-15; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12075264)

引用格式: 张露彦, 贾琳华, 张福民, 等. 用于加速器准直的球形准直器扫频激光干涉测距技术研究[J]. 计测技术, 2026, 46(4):46-53.

Citation: Zhang Luyan, Jia Linhua, Zhang Fumin, et al. Research on spherical collimator frequency sweeping laser interferometry for distance measurement in accelerator alignment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4):46-53.



adaptable solution for accelerator alignment, and possesses great practical value in engineering applications.

Key words: precision measurement; particle accelerator; spherical collimator; swept laser; interferometric distance measurement; gas absorption tank; high adaptability; engineering application

0 引言

扫频干涉技术(Frequency Sweeping Interferometer, FSI)是一种高精度绝对距离测量方法,其原理有别于传统单波长或多波长干涉测量技术。该技术通过快速扫描线性激光光源的频率,使扫描激光与参考激光产生光频差,进而形成可探测的光拍频信号。通过高灵敏度光电传感器将光拍频转换为电信号后,利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法对频谱进行精确分析,实现绝对距离的高精度测量^[1-3]。该技术不仅保持较高的测距精度,而且突破了传统相位测量技术仅能获得相对距离的局限,可直接输出被测目标的绝对距离值。

2014年,牛津大学和英国国家物理实验室的Dale J等人介绍了一种基于FSI的多通道绝对距离测量系统^[4]。该系统利用气体吸收池解决了传统FSI需要稳定的参考干涉仪提供长度基准的问题,在简化结构的基础上实现了高精度、大范围的距离测量,在制造、粒子加速器等领域具有重要应用价值。但此时FSI技术尚不成熟,在稳定性和测量精度和测量距离上仍有很大的提升空间。

2019年,欧洲核子中心(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)的研究人员在大型强子对撞机的低温超导腔监测中利用FSI技术实现多达12路的不间断位移变化持续监测^[5],但只能实现短距离内的高精度测量。2021年,Mateusz S等人提出与多路激光设计不同的单光纤多目标测距方案^[6],使用能发散激光的准直器同时测量多个反射镜,实现了最高 $4.9\text{ }\mu\text{m}$ 的测量不确定度,但测量精度受回光强度影响,测量距离越远,精度越低。

国内学者对FSI技术开展了深入研究^[7]。2018年,天津大学史春钊等人提出一种利用幅度信息实现相位补偿的新方法,应用于长距离光纤中的色散补偿^[8]。通过该方法,基于重采样的FSI系统将有效测量范围扩展至65 m,在完成色散校正后,

系统的分辨能力达到 $123\text{ }\mu\text{m}$,逼近理论极限。在最大测量距离下,系统不确定度为 $246\text{ }\mu\text{m}$ 。

激光测距技术的应用亦得到国内加速器准直领域的研究人员的重视。2022年中国科学院高能物理研究所的科研人员在高能同步辐射光源的建设过程中,使用激光跟踪仪的测距模块和目标追踪功能,搭建了4路激光测距系统,利用多边法实现了 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 5\text{ m}$ 空间范围内 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内的空间坐标测量不确定度^[9]。该系统可应用于高能光源储存环准直领域,实现对关键元件空间位置的高精度标定,但由于需要同时部署多台激光跟踪仪进行协同测量,设备成本高昂^[10],系统搭建过程也较为复杂,导致整体工程成本显著上升,限制了其在大科学工程中的广泛应用。

为同时满足大型加速器准直的精度要求和成本控制需求,本研究团队研发了一套集成HCN($\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$)气体吸收池、球形准直器等模块的扫频激光干涉测距系统,采用光开关技术实现多通道测量;球型准直器与角隅反射镜采用可互换设计方案,在保证测量准确性符合要求的前提下降低设备成本。在 3 m (长) $\times 8\text{ m}$ (宽) $\times 3\text{ m}$ (高)的大理石标定场中开展实验,对用于加速器准直的球形准直器扫频激光干涉测距系统的性能进行验证。

1 扫频激光干涉测距原理与系统搭建

1.1 基于HCN精度补偿的扫频激光测距原理

扫频激光干涉测距系统的光源是可调谐激光器,频率调制形式为锯齿波或对称三角波,发射的信号是频率以一定周期性变化的啁啾信号^[11]。光源发射的光束经分束器按特定比例分离为两路:一路进入测量光路,另一路进入参考光路。测量光路中的光信号通过环形器和准直镜片后,投射至目标反射镜,之后沿原路径返回;参考光路中的光则在光纤中传输,最终与测量光路返回的光发生干涉耦合。两束光汇合后由光电探测器接收并转换为拍频信号,随后由数据采集卡进行采集处理。基本光路图如图1所示。

以可调谐激光器发射对称三角波为例,其测量路信号如图2(a)中红色线所示,参考路信号如图2(a)中蓝色线所示,两路信号存在延迟,最终形成的拍频信号如图2(b)所示。

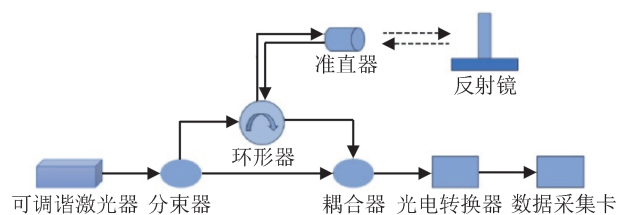


图1 FSI基本光路图

Fig.1 Basic optical path diagram of FSI

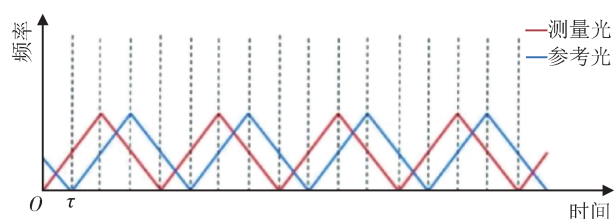
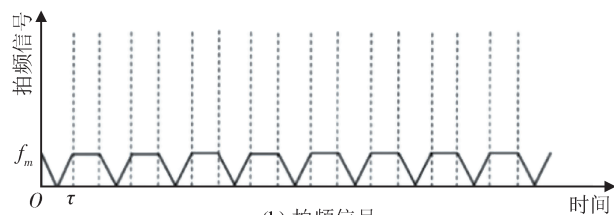
(a) 测量信号与参考信号
(a) Measured signal and reference signal(b) 拍频信号
(b) Beat frequency signal

图2 信号波形示意图

Fig.2 Signal waveform diagram

测量信号和参考信号在光路中传播的路径长度存在差异,导致它们到达光纤耦合器的时间不一致,因此耦合得到的信号为拍频信号。将这两束光抵达耦合器的时间间隔记为 τ ,激光器波长调谐速率为 α 。使用FFT对拍频信号进行解析,幅值最大频值即拍频频率 f_m ,则可求得待测距离 d_m 为

$$d_m = \frac{c\tau}{2n_0} = \frac{cf_m}{2n_0\alpha} \quad (1)$$

式中: c 为光速, n_0 为空气折射率。

在实际测量中,受加工精度限制,长光纤的实际长度往往难以精确控制,因而需要进行额外的长度标定。同时,在具体应用环境下,温度、应力以及色散等因素会引起参考光路光程的变化,导致系统测量精度显著下降。为了保证系统稳定

运行,必须定期开展光纤标定工作,并对长光纤采取色散补偿和温度补偿等措施。基于HCN气体吸收池的扫频激光干涉测距是一种有效的解决方案^[12],其光路图如图3所示。

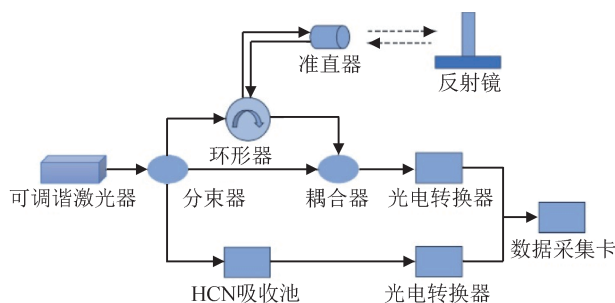


图3 基于HCN气体吸收池的FSI光路图

Fig.3 Optical path diagram of the FSI based on HCN gas absorption cell

HCN气体吸收池可对特定频率的入射激光产生吸收效应,通过识别吸收光谱中的峰值位置,获取相应采样点处测量信号的相位信息。

寻峰算法采用最小二乘法,先对原始信号开展基线校正与噪声平滑预处理,再定位峰值的大致位置并选取其附近小范围数据作为拟合窗口,之后用最小二乘法将窗口内数据进行拟合,得到一元二次函数,通过求解抛物线对称轴得到精确峰值波长,代入函数即可计算出峰强度,如图4所示。

在拟合HCN气体池吸收峰位置的基础上,利用希尔伯特变换,计算与吸收峰相对应的拍频信号相位,并通过线性拟合方法建立相位与频率之间的一次函数关系,进而求得拟合直线的斜率 k 。则待测距离 d_m 为

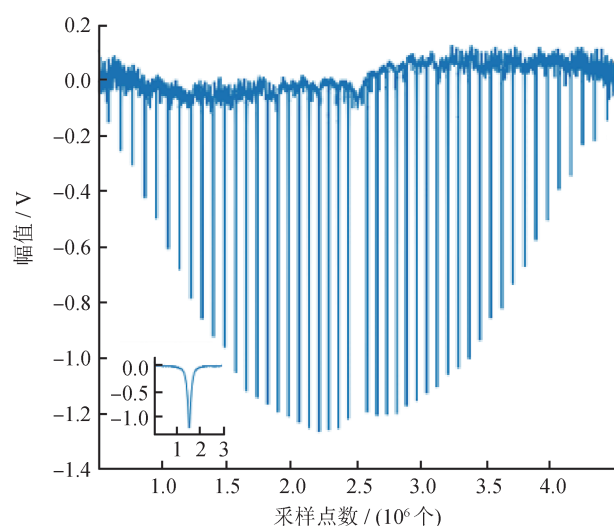
$$d_m = \frac{ck}{2\pi n_0} \quad (2)$$

在测量光路处添加光开关,即可实现多路激光测距^[13],光路如图5所示。

1.2 扫频激光干涉测距系统搭建

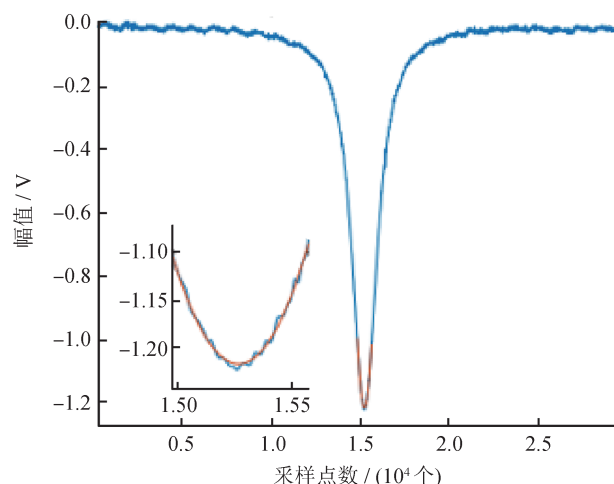
如图6所示,在FSI测距系统的整体结构中,除上位机与光源外,采集系统、光路组件、供电模块以及光电转换模块均被集成于同一机箱内。

本系统采用Teledyne公司生产的ADQ7DC-14高速数据采集卡,其核心模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)具备14位分辨率,支持单



(a) HCN气体吸收池吸收峰信号

(a) HCN gas absorption cel absorption peak signal



(b) 峰值点拟合

(b) Peak point fitting

图4 HCN气体吸收池信号处理示意图

Fig.4 Signal processing schematic of HCN gas absorption cell

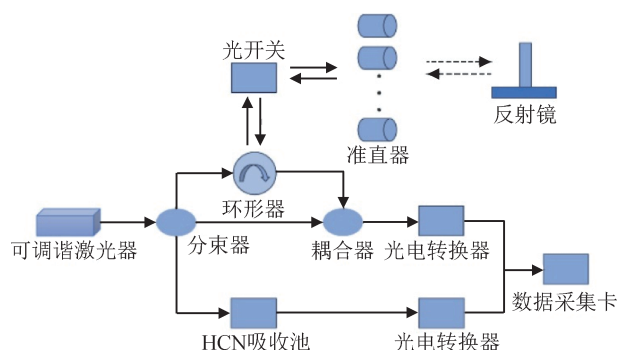


图5 包含光开关的多路激光测距光路图

Fig.5 Optical path diagram of multi-channel laser ranging containing optical switches

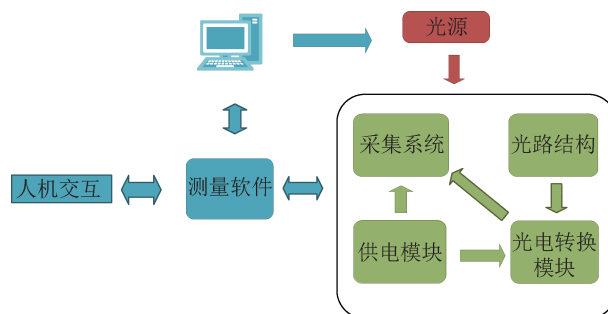


图6 FSI测距系统结构图

Fig.6 Structural diagram of FSI ranging system

通道最高 10 GSPS 的采样速率, 在双通道工作模式下可实现每通道 5 GSPS 的采样能力。输入信号幅值范围为 $0 \sim 1 \text{ V}$, 且可通过软件编程方式进行直流偏置校正, 提升信号采集精度。该采集卡配备最大 4 GB 的板载缓存空间, 为后续的数据处理与算法优化提供了硬件支持。数据传输方面, 支持 USB3.0 和 PCIE 两种接口与上位机通信, 理论传输速率分别为 400 MB/s 和 200 MB/s (USB3.0), 以及 7.0 GB/s 和 5.0 GB/s (PCIE 双通道), 确保高速数据的实时读取。

基于 HCN 气体吸收池构建测距光路, 选用 Thorlabs 公司的 PDA10CS2 型光电探测器集成可调增益放大模块, 可根据信号强度动态调节增益, 防止信号过载超出采集设备的动态范围。HCN 气体吸收池由 Wavelength Reference 公司生产, 配合精确的温控环境, 能够维持吸收谱线的长期稳定性。由 1 台 120 W 双路输出直流电源进行系统供电, 可将交流电压 220 V 转换为 24 V 直流电压, 以满足各模块稳定运行的需求。光源部分采用 Santec TSL-570 可调谐激光器, 中心波长为 1550 nm , 波长调谐范围覆盖 $1515 \sim 1565 \text{ nm}$, 扫描速率为 $1 \sim 1000 \text{ nm/s}$ (连续可调), 输出光功率为 $2 \sim 10 \text{ mW}$ 。此外, 该激光器支持外部触发控制, 便于实现扫频过程的同步化与自动化管理。机箱内实物图如图 7 所示, 机箱外实物图如图 8 所示。

在加速器准直测量中, 为获取各测点的三维空间坐标, 需建立精确的空间参考系。所使用的 FSI 测距系统仅支持两点间距离测量, 故采用多边测量法实现坐标系的构建, 即通过测量 4 个及以上测点之间的互距, 解算得到各点的空间位置。为提升测量效率, 避免单路激光测距时频繁切换测

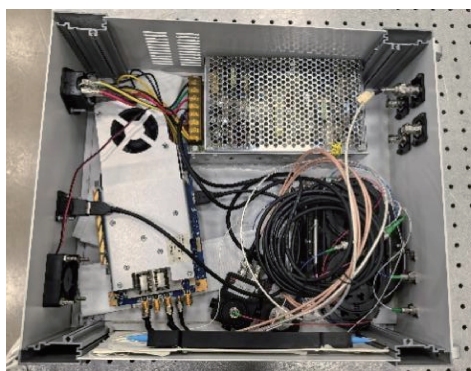


图7 机箱内实物图

Fig.7 Internal image of the computer case



图8 机箱外实物图

Fig.8 Exterior image of the computer case

点与重新对光的问题,在系统中引入光开关模块,该模块将单一激光光路扩展为多个独立光路,各光路末端分别安装球形准直器,并预先布置于不同基准点上,通过互测距离建立全局坐标系。在进行新测点坐标测量时,通过光开关依次切换通道,分别测量各球形准直器与新测点之间的距离,结合已有坐标系参数,即可解算出新测点在全局坐标系下的三维坐标。

2 球形准直器设计与误差分析

2.1 球形准直器设计

球形准直器是专为粒子加速器准直系统设计

的关键设备,其核心作用是解决传统准直器与准直靶标座之间的通用性难题。在加速器工作时,准直过程通常依赖激光跟踪仪对基准点进行精密测量,依据行业标准,采用直径38.1 mm的球形角隅反射镜作为靶球,并配备相应尺寸的靶标座。

在实际测量作业中,普通准直器因结构设计限制,往往无法直接适配标准化的准直靶标座,导致测量过程需要增加额外的适配环节或定制化工装,不仅提高了操作复杂度,还可能引入额外的误差源。球形准直器通过球面几何结构实现了与激光跟踪仪角隅反射镜靶标座的兼容。这一设计突破使设备能够直接利用现有测量基础设施,快速、精确地测量2个靶标点之间的直线距离,提高测量的效率和准确性。

在此基础上,将球形准直器与FSI测距技术结合,可对空间中分布的多个靶标点之间的距离进行高精度同步测定。随后运用多边法解算数学模型,即可进行三维坐标解算,实现大尺寸空间内的全维度精密测量。这种集成方案不仅适用于设备标定、精密安装对准,还在振动监测、工业检测等多种场景中展现出显著优势。与传统激光跟踪仪相比,该方案在保证高测量精度的同时,大幅降低设备成本,兼具更高的经济性与实用灵活性。

将可与激光跟踪仪靶球替换的直径38.1 mm球体与型号为RC08FC-P01L的L形反射型准直器相结合,组成球形准直器,使球心能够位于激光的照射光路上。球形准直器结构如图9所示。

2.2 球形准直器误差分析

受加工精度和装配误差等因素的影响,同一靶座上的球形准直器球心与被测靶球球心之间出现位置偏移。如图10所示,蓝色点和红色点分别为球形准直器的球体中心和准直器中心,两者未重合。当球形准直器旋转时,准直器中心会随球心旋转,导致测量过程中产生系统性误差。 D_{measure} 为实际测量光轴, D_{true} 为两球心的连线,即理想情况下的测量光轴。 D_{measure} 和 D_{true} 之间的误差可分为2个部分,分别是 x 轴的偏差 x_{Error} 和 y 轴的偏差 y_{Error} ,这两个误差分别称为横向误差和纵向误差。

x_{Error} 可通过光程标定修正^[14],具体方法是:



(a) 球形准直器球体示意图
(a) Schematic diagram of the spherical body of spherical collimator

(b) L形反射型准直器示意图
(b) Structural schematic of L-shaped reflective collimator



(c) 装配示意图
(c) Assembly schematic

图9 球形准直器结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of the spherical collimator structure

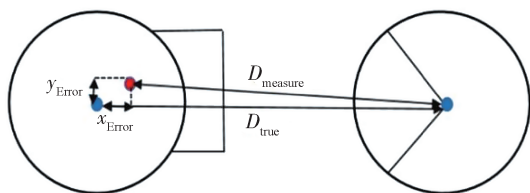


图10 球体误差模型

Fig.10 Sphere error model

在测量前预先对标准长度的光程进行精确标定,并依此进行系统性补偿。在实际应用中,横向偏差对最终测量精度的影响可忽略不计。 y_{Error} 对测量结果的影响随被测长度的不同而有所差异,但随着测量距离的增加,其影响逐渐减弱。以图11为例,当测量距离为1.5 m时,即使装配产生1.7 mm的纵向偏差,长度测量误差仅为1 μm 。在加速器准直使用环境中,测量距离一般为数米甚至数十米,该距离下纵向偏差带来的误差可忽略不计。

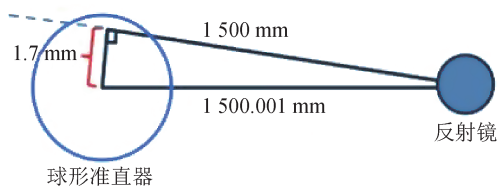


图11 纵向误差分析

Fig.11 Longitudinal error analysis

3 测量实验

搭建带有吸收池与光开关的扫频激光干涉测距系统,其光开关型号为四川梓冠 ZG-MEMS-1 $\times$ 12。采用12路光开关设计方案,满足8个准直器使用需求并提供足够冗余。

在温度严格控制为 $(25 \pm 0.1) ^\circ\text{C}$ 、湿度保持恒定的专业实验室中,构建尺寸为3 m(长) $\times$ 8 m(宽) $\times$ 3 m(高)的大理石标定场,大理石表面经过超平处理并设有预埋式安装螺纹孔。该平台四周布设了控制网,用于模拟粒子加速器设备的标定环境条件,如图12所示。

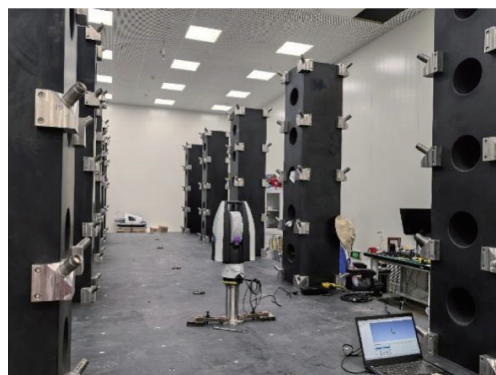


图12 大理石标定场

Fig.12 Marble calibration field

实验前,使用激光跟踪仪对控制网进行多站全面测量。激光跟踪仪测量误差为 $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$,相邻测站测量结果拟合误差不高于 $20 \mu\text{m}$,多站平差后,控制网整体误差不高于 $20 \mu\text{m}$ 。实验过程中,8个球形准直器被安置在大理石柱的靶标座上,1个高精度球形角隅反射镜被固定在平台中心的靶标座上,通过光开关控制各通道测量的方式,依次完成8个不同方位激光测距光路的距离测量,多次测量过程中转动准直器球体以不同角度重新对光。8路激光测距的误差分布如图13所示。

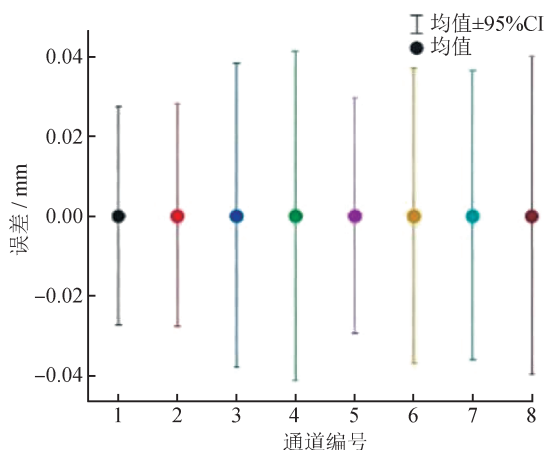


图13 实验结果

Fig.13 Experimental results

实验中, 设定激光器调谐范围为 1 545 ~ 1 565 nm, 调频速率为 100 nm/s。所有光路的光程均超过 40 m, 部分超过 50 m。使用光开关控制测量通道, 每路激光均测量 20 遍, 每测量一遍, 旋转球形准直器改变姿态并重新对准, 以提高测量结果准确性。测量过程中曾出现因对光失败导致的厘米级误差, 在重新精确对光后消除。将每个通道 20 次测量结果的平均值和激光跟踪仪的测量结果对比, 误差小于 5 μm 。对每个通道测量结果的自身重复性分析, 其标准差均优于 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ 的要求, 在 30 m 测量范围内, 测距误差优于 30 μm 。

4 结论

针对目前加速器准直领域应用的多路激光测距设备成本高昂、系统搭建复杂度高的问题, 本研究团队开展扫频激光干涉测距系统的研发与验证工作, 主要研究结论如下:

1) 成功构建了集成 HCN 气体吸收池、光开关与球形准直器的扫频激光干涉测距系统, 实现了大尺度范围内高精度绝对距离测量与多路测距功能。

2) 球形准直器采用直径 38.1 mm 球体与 L 形反射结构结合的设计方案, 可与激光跟踪仪角隅反射镜共用靶标座, 支持大角度旋转调节以适应对光需求。误差分析表明: 其纵向偏差在加速器典型测量距离(数米至数十米)下对测量结果的影响可忽略, 横向偏差则可通过光程标定消除, 确保了系统在实际准直场景中的可靠性。

3) 在 30 m 测量范围内, 系统测距误差稳定控

制在 30 μm 以内, 完全满足加速器设备精密标定与安装对准的严苛精度指标^[15]。

4) 相较传统依赖激光跟踪仪的多路测距方案, 本系统在保持同等高精度的前提下, 显著降低了硬件成本, 且具备更强的可扩展性, 可根据加速器规模灵活增减测量通道, 为准直测量工程提供一种更为经济、便捷、高效的实现路径, 适用于大范围、多测点、高精度粒子加速器设备的标定、安装、准时任务。

参考文献

- [1] Schneider R. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 33-37.
- [2] Campbell M A, Hughes B, Veal D. A novel co-ordinate measurement system based on frequency scanning interferometry [J]. The Journal of the CMSC, 2016, 9(1).
- [3] Liu Guodong, Xu Xinke, LIU Bingguo, et al. Dispersion compensation method based on focus definition evaluation functions for high-resolution laser frequency scanning interference measurement [J]. Optics Communications, 2017, 386: 57-64.
- [4] Dale J, Hughes B, Lancaster A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub PPM-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24869.
- [5] Sosin M, Mainaud-durand H, Rude V, et al. Frequency sweeping interferometry for robust and reliable distance measurements in harsh accelerator environment [C]// Proceedings of Applied Optical Metrology III, San Diego, USA. SPIE, 2019: 20.
- [6] Mateusz S, Durand H, Micolon F, et al. Robust optical instrumentation for accelerator alignment using frequency scanning interferometry [C]// Proceedings of IPAC 2021, 2021: 2203-2206.
- [7] Gan Yu, Duan Changhao, LIU Guodong, et al. Dynamic frequency scanning interferometry measurement based on optical frequency synchronous motion measurement and error compensation [J]. Optics Communications, 2021, 488: 126753.
- [8] 史春钊, 张福民, 潘浩, 等. 基于相位补偿的调频连续波大长度测距中的色散校正 [J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 642.

- Shi Chunzhao, Zhang Fumin, Pan Hao, et al. Dispersion correction in large - length range finding of Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) based on phase compensation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(5): 642.
- [9] Lu Shang, Liang Jing, Men Lingling, et al. A laser tracker-based multilateration method for pre-alignment of high energy photon source storage ring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1045: 167533.
- [10] Martin J. Leica absolute tracker AT401_factsheet [EB/OL]. (2012-04-09). <https://www.doc88.com/p-706555442511.html>.
- [11] Iiyama K. Extended-range high-resolution FMCW reflectometry by means of electronically frequency - multiplied sampling signal generated from auxiliary interferometer [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2006, E89 - C (6): 823-829.
- [12] Siuzdak J. Optical fiber impulse propagation: an interaction between the third-order dispersion and nonlinear chirp [J]. Fiber & Integrated Optics, 2003, 22(5): 323-331.
- [13] 孙宇蒙. 基于调频连续波的测距系统设计及多边测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- Sun Yumeng. Research on the design of ranging system and multilateral method based on frequency modulation continuous wave[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [14] 胡申博. 调频连续波激光多线程绝对距离及振动测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- Hu Shenbo. Research on multi-thread absolute distance and vibration measurement technology using frequency modulated continuous wave laser [D]. Tianjin: Tianjin University, 2023.
- [15] Pan Hao, Zhang Fumin, Shi Chunzhao, et al. High-precision frequency estimation for frequency modulated continuous wave laser ranging using the multiple signal classification method[J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6956-6961.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 张露彦(1994—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为精密测量、加速器准直等。



通信作者: 张福民(1982—), 男, 教授, 博士, 长期从事精密测量、跨尺度微纳米测量、三维光学测量及激光干涉测距等领域研究。入选天津大学北洋青年学者, 主持国家自然科学基金、航空科学基金等多项国家级、省部级科研项目与校企合作课题, 参与国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划等项目。科研成果先后荣获四川省科技进步奖二等奖、中国计量测试学会科技进步奖二等奖、江西省技术发明奖二等奖。