

引张线技术在加速器准直测量中应用概述*

袁建东

(中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要: 为研究引张线技术在加速器准直测量中的应用和发展, 首先简介了引张线技术原理, 然后回顾了引张线准直法在加速器工程中的发展历史, 接着介绍了引张线在加速器准直测量中的最新发展动态。最后讨论了各种引张线准直法的优缺点及其适宜环境, 比较了国内外引张线准直法的发展与区别。指出引张线准直法的发展方向, 给出了加速器准直测量的努力方向。

关键词: 引张线技术; 加速器; 准直测量; 丝线位置监测器; 振动线技术; 本征频率线技术

中图分类号: TL505; P258

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190259

Summary of application of stretched wire technology in accelerator alignment and survey

Yuan Jiandong

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the application and development of stretched wire technology in accelerator alignment and survey, the principle of stretched wire technology is summarized firstly, then the development history of stretched wire alignment method in accelerator is reviewed, and the latest development trend of stretched wire alignment method is introduced. Finally, the advantages and disadvantages of various alignment methods and their suitable environments are discussed, and the development differences between domestic and foreign alignment methods are compared. The development direction of the stretched wire alignment method is pointed out, and the direction of the accelerator alignment and survey is given.

Key words: stretched wire technique; accelerator; alignment and survey; wire position monitor; vibrating wire technique; eigen frequency wire technique

引张线测量属于众多基准线^[1]/方向线^[2](又称准直^[3-7]或微偏距测量^[8])中的一种, 一般用于在实地两个固定位置处通过机械法悬挂一根丝线并施加适当张紧力以保持丝线直线性来布设控制测量基准线, 且用于测量一系列检验点的一维或多维微小偏距^[8](水平偏距和垂距)。虽然引张线应用历史更早可追溯至古埃及的金字塔建设(故又称引张线准直法为古埃及方法)^[9-10]或中国的大禹治水等, 但是其在加速器准直中的应用则是在加速器诞生(20世纪二三十年代)后才产生, 最早的文字记录则起始于20世纪五六十年代^[11]。加速器准直测量是依据加速器物理提出的精度、可靠性、稳定性等要求, 参照加速器的形状(直线或环形)布设合理的控制网或其它参考基准, 在几米至若干公里范围内, 以绝对精度亚毫米级以上, 相对精度 10^{-5} 以上, 标定并安装各类磁电(二、四、六极磁铁、螺线管、漂移管、聚束器、超导腔、射频四极场加速器、束流诊断等)、束流真空管道和其它元件, 并静态或动态地监测以上元件的多自由度参数(至少包括三个平移量 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 和三个旋转量 R_x, R_y, R_z , 其中 x 为横向, y 为竖向, z 为纵向即束流方向)。

由于加速器运行时存在电离辐射、强电磁场、高低温条件和超高真空限制等, 所以引张线测量先后出现了手动式^[11-19]、光学式^[19-22]、光电式^[23-30]、电感式^[31-34]、电容式^[35-42]、激光扫描式^[43-44]、方向耦合式^[45-54]、震荡/振动式^[37-38, 55-71]、特征频率式^[41-42]等。以上机械引张线测量精度已由亚毫米、微米级进入亚微米、纳米级, 应用范围也从偏距测量延伸至磁场测量、元件标定、共架共线准直, 应用温度从常温扩展到各种高、低温条件等。

* 收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11605262)

作者简介: 袁建东(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事加速器准直测量研究; yuanjiandong@impcas.ac.cn。

作为加速器准直测量的特殊代表,引张线准直测量的进步必将促进加速器准直测量的发展。本文目的是总结前人的经验,指引当代的建设,指出未来发展方向。在介绍了引张线悬链线模型和测量原理的基础上,概述了引张线从手动式到自动化式的发展应用历史,接着介绍了方向耦合、震荡振动和特征频率式引张线的最新发展和应用。然后讨论了以上在加速器准直测量应用的引张线技术,并总结其线体和传感器的区别和特点,给出其发展方向。

1 引张线简介

引张线准直法目的是建立一条实际存在的参考基准线,然后测量一系列点位至该基准线偏距。引张线系统一般由两 endpoint (一个固定另一个挂配重或两个都挂配重)、测点箱(包含位移测量装置)、线体和保护筒组成(见图 1)。其中两 endpoint 独立于待测件固定不动,通过挂重提供稳定的测量基准线。测量时,线体保持稳定不变,测点箱(包含位移测量装置)绑定于待测件并随之移动,待测件相对于基准线体的位移偏差通过测量反算得来。

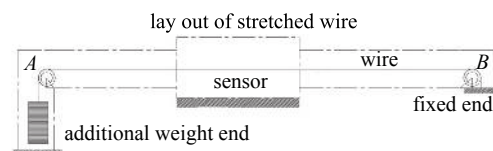


Fig. 1 Layout of stretched wire

图 1 引张线示意

其实建筑泥瓦匠使用的弦绳(准绳)就属于引张线^[11]。引张线由于自重会导致其存在下垂,受到侧面风会导致存在水平偏差,并非理想直线。早在 1638 年,伽利略就采用抛物线来分析引张线^[12-13]。然而在 1690 年代,莱布尼茨、惠更斯等认为引张线任一点的下垂符合双曲余弦悬链线模型,即^[10,14]

$$y(z) = -\frac{M}{q} \left[\cosh\left(\frac{ql}{2M}\right) - \cosh\frac{q}{M}\left(\frac{l}{2} - z\right) \right] \quad (1)$$

式中: y 为垂直偏差即垂径(mm); M 为挂重(kg); q 为线密度即单位长度质量(kg/m); l 为长度(m); z 为任一点至线体端点的长度(m),取值为 $0 \sim l$ 。当两 endpoint 等高时,其中点处下垂量一般为最大值,由式(1)简化可得其最大下垂为

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{ql^2}{8M} \quad (2)$$

虽然存在下垂,但合理选择挂重,适当限制下垂和侧面风速后引张线是最简单且最具性价比的准直测量手段之一,相对于光学视准线法(包括测小角法、活动觇牌法和准直/自准直法)准直,机械引张线法准直具体实施中不需要考虑大气折光和地球曲率影响。而且与激光法(包括激光干涉法、衍射法和基准线法)准直相比,机械引张线法准直具体实施时不需要具备真空条件。因此机械引张线广泛应用于准直测量。该系统大多用于直线型原件(包含直线加速器、大坝、发电站等)的位移测量与变形监测,少数也用于曲线型原件(包含环形加速器、曲线大坝和发电站等)的位移测量与变形监测。

2 引张线的应用分类

自引张线首次在加速器准直测量中应用(1964 年前在欧洲核子研究中心(CERN)和 1960 年代在斯坦福直线加速器(SLAC))以来^[15],其应用时间已超 50 年。随着望远镜、显微镜、自/准直仪、经纬仪、全站仪、天底/天顶仪和各种位移传感器的出现,偏距测量的数据获取方式也由手动式升级为自动化式^[16]。例如在水利和相关变形监测领域,引张线已由步进式、光电式、光学式、光机式升级为电感式、电容式、电磁式、激光扫描式、磁栅式等^[17]。在加速器中引张线测量的发展和分类也可证实该问题,具体有以下几种分类。

2.1 手动式引张线

手动式引张线(m-WPS)是依靠肉眼观测^[15]、吊线测锤^[1]或直尺比对^[16,18-19],估测点位相对于引张基准线的偏距。该装置由丝线、测量单元、两个连接头(一个固定丝线一个施加重物)等部分组成,其中测量单元和连接头都有强制对中装置。除此之外,还有零点读数校准平台在测前和测后对该装置进行标定。该方法目前在 CERN^[15-16,18]和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)已有大量应用^[19]。该系统适用于离线加速器停机时静态非连续监测二维偏距,优点是观测直观简单,缺点是不能自动化连续监测,更不能在线监测。该系统测量范围可达 1.7 m,测量精度可达 0.05 mm,分辨力可达 0.02 mm。

2.2 光学式引张线

光学式引张线(o-WPS)采用垂直投影仪^[1]、光学显微镜^[1,15]、天底天顶仪^[1]、光学 LED 探测器^[19]或测微准直望

望远镜^[1, 21-22]来测量点位相对引张基准线的偏距(见图2)。该方法目前在苏联谢尔普霍夫加速器(Serpukhov)^[1], LANL^[19], CERN^[20]、德国电子同步加速器(DESY)^[21]和中国科学院高能物理研究所(IHEP)^[22]已广泛应用。例如,前苏联谢尔普霍夫加速器于1968年使用莫斯科测绘学院研制的“OIII”型天顶对中仪来准直,后来德国卡尔蔡司公司研制的“PZL”型望远镜也在准直中得到应用^[1]。其量测系统大多由精密丝杠带动测微鼓轮读数。再如CERN是利用光学投影法内插计算偏距(1964~1971年)进行平滑测量^[15, 20]。随后LANL于1974年曾采用光学LED探测器测量待测件距离引张线的偏距,以用来标定准直磁铁和漂移管^[19]。接着西德于1989年在其加速器HERA中采用泰勒霍布森准直望远镜和水准仪配合精加工直尺进行偏距测量,以实现低温超导磁铁的磁场测量^[21]。1990年,武汉测绘科技大学为IHEP研制了光学式引张线,该引张线的丝线采用尼龙丝,读数装置采用显微镜^[22]。该系统适用于离线或加速器停机时静态非连续监测二维偏距,优点是光学直观、直接测量,缺点是不能在加速器运行时实现在线自动化监测。该方法测量范围可达 ± 1.2 mm,测量精度可达到0.02 mm,重复性0.03 mm。

2.3 光电式引张线

光电式引张线(p-WPS)(见图3)是采用光电探照转换器或CCD测量点位相对于引张线偏距并实时输出数据^[1, 16, 23-30]。其测量原理为:当引张线受到布置在底板上的光源照射时,其阴影通过光电探测器或CCD镜头放大,经光电转换和光电跟踪实现测量。



Fig. 2 Optical-wire position system/sensor

图2 光学式引张线

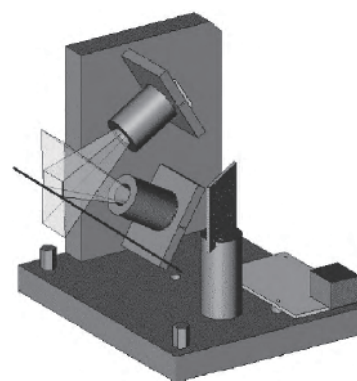


Fig. 3 Photoelectric-wire position system/sensor

图3 光电式引张线

该方法目前在苏联谢尔普霍夫加速器^[1, 16], LANL^[23], CERN^[15, 20, 24-26]、中国国家同步辐射实验室(NSRL)^[27]、美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)^[28]、巴西同步光实验室(LNLS)^[29]和法国同步光实验室(SOLEIL)^[30]已应用。CERN于1974~1976年间研制并成功应用的引张线,就是采用光电二极管自动记录并输出待测点相对于引张线的偏距^[15, 20, 24-26]。其测量范围螺栓型可达0.58 m,线阵CCD型最大测程为1 m,测量精度0.02 mm,分辨率0.01 mm。前苏联谢尔普霍夫加速器也于1972~1974年研制出类似的光电式引张线,其在基准线测量中应用广泛^[1, 16]。LANL也于1990年研制并应用了该类型光电式引张线^[23]。还有种光电式引张线概念设计由CERN于2006年提出^[24],目的是为了在大范围工程中实现高精度准直。美国开源公司于2008年研制生产出第一代产品,于2011年生产出第二代产品^[25]。该系统适用于离线或加速器停机时静态连续自动化监测二维偏距,优点是可实现连续自动化监测,缺点是不能在加速器运行时自动化监测。其第二代产品经校准后在8 mm×12 mm线性区内精度可达0.005 mm,分辨率可达0.001 mm。

2.4 电感式引张线

电感式引张线(i-WPS)是使用电感变换器^[1, 16]或电感测微仪^[31-34]自动化测量并记录点位相对于引张线的偏距。测量时丝线馈入正弦信号,其中的电感变换器或电感测微仪利用法拉第1831年发现的电磁感应原理,将被测位移量转换成线圈自感 L 或互感 M 的变化,再由测量电路转化成电压或电流变化量输出,即

$$V = K_I dI/dt = K_V dV/dt \quad (3)$$

式中: V 为电压; I 为电流; K 为比例系数。该方法目前已被前苏联^[1, 16]、美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)^[31-32]和日本高能加速器研究机构(KEK)采用^[33-34]。其中前苏联研制的电感变换器^[1, 16](1968~1970年)是两个电感线圈,缠绕在安装间隙彼此相等的H型铁氧体磁芯上,当安置在中间点的传感器中心相对引张线位置变化时,电感变换器

内电感也随之发生变化,利用相应的桥式电路便可确定位置变化。其中 SLAC 实验室的 W K H Panofsky 教授于 1965 年就已经使用电感式引张线(互感式或差动变压器式)来标定磁铁^[31],并于 1969 年申请了专利^[32]。KEK^[33-34]于 1993 年研制的电感式引张线用于其直线对撞机项目位置监测(见 图 4)。后两种都由 3 个电感测微计和 2 根丝线组成。该系统适用于在线连续自动化监测二维偏距。电感式引张线测量范围可达±5 mm,测量精度优于 0.04 mm,分辨力为 0.002 5 mm。

2.5 电容式引张线

电容式引张线(c-WPS)基于电容感应原理,使用比率测量技术,即

$$C = \varepsilon S/d \quad (4)$$

式中: ε 为真空介电常量; S 为极板表面积; d 为极板间垂直间距。自动测量并记录绑定数组平行电容电极的待测件与固定了中间极的基准线相对位置变化引起的电容比,最后反算相对位置变化量^[35-42](见 图 5)。

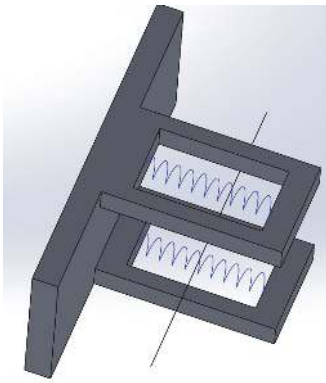


Fig. 4 Inductive-wire position system/sensor
图 4 电感式引张线

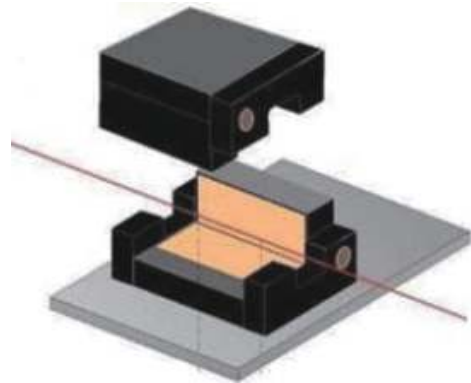


Fig. 5 Capacitive-wire position system/sensor
图 5 电容式引张线

该方法目前已被欧洲同步辐射研究装置(ESRF)^[35], DESY^[36], CERN^[37]、美国布鲁克海文国家实验室(BNL)^[38]、SLAC^[39]、韩国浦项加速器实验室(PLS)^[40]和日本同步辐射研究机构(JASRI)^[41-42]采用。其中 ESRF, CERN 和 FOGALE Nanotech 公司合作^[35, 37]最先于 1995 年左右研制出一维电容式引张线,随后法国 FOGALE Nanotech 公司于 2000 年研制出二维电容式引张线。该系统适用于在线连续自动化监测二维偏距。在 2.5 mm×2.5 mm 线性区内,测量精度在 0.002 mm 左右,分辨率优于 0.000 5 mm^[37]。

2.6 激光扫描式引张线

激光扫描式引张线(ls-WPS)又称激光扫描准直仪,包含激光发射二极管、光电接收二极管、光电转换器和测量主控模块等。其测量原理为:利用激光二极管从狭缝发射激光并扫描引张基准线,光电二极管接收反射光,引张线在标尺上会形成暗影,经过二值化处理并进行光电转换,主控模块非接触测量并自动化输出点位相对丝线的偏距(见 图 6)。SLAC 于 1999 年研制了激光扫描式引张线,用来准直波荡器^[43]。德国卡尔斯鲁厄氦实验室(KATRIN)也于 2008 年研制了该类型引张线^[44]。该系统适用于离线连续自动化监测二维偏距,优点是连续自动化监测,测量纵向长度可达 3 km,缺点是不能在线监测。该引张线测量范围可达 50 mm,测量精度 0.002 mm,重复性 0.001 5 mm。

3 引张线最新发展与应用

3.1 方向耦合式引张线及其应用

方向耦合式引张线(dc-WPS)又称丝线位置监测器(WPM)是基于两固定点间以重锤和滑轮拉紧的丝线作为基准线,借助和待测件绑定的条带型束流位置监测器(见 图 7)测量反算待测件相对于固定基准丝线的位移偏差。

其中基准丝线输入信号源产生的正弦信号,内置的四个条带由于镜像电流原理产生反转电流-电压。而且其中条带电压与其中心距成近似但非严格线性关系,与基准丝线的位置偏差通过差比和方法计算,即

$$D_x = k_x \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D}, D_y = k_y \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C} \quad (5)$$

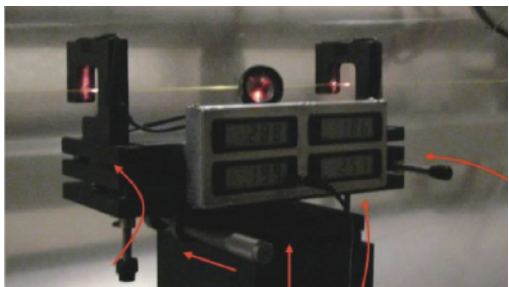


Fig. 6 Laser scan-wire position system/sensor

图6 激光扫描式引张线

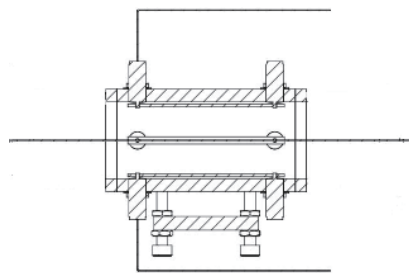


Fig. 7 Directional coupled-wire position system/sensor

图7 方向耦合式引张线

式中： k_x 和 k_y 为比例系数为使用前通过标定获得； V_A , V_B , V_C 和 V_D 为四个对称条带测得的电压。该方法起源于美国费米国家加速器实验室（简称 FNAL），由 R. E. Shafer 于 1933 年提出（方向耦合型束流位置监测器）^[45]。然后由 DESY 于 1990 年为 SLAC 设计研制^[34]的，用以动态监测磁铁位移并自动复位磁铁。随后美国麻省理工学院（MIT）也于 1993 年设计研制了该型引张线^[46]。接着意大利同步辐射光源（ELETTRA）于 1994 年也研制了 dc-WPS^[47]，后被用来动态（在线或离线）监测意大利国家核物理研究院（INFN）低温恒温器内部的冷质量元件^[48]。该方法目前在 SLAC^[34]，MIT^[46]，ELETTRA^[47]，INFN^[48]、加拿大粒子与核物理国家实验室（TRIUMF）^[49]，DESY^[50]，FNAL^[51]，KEK^[52]，IHEP^[53] 和美国密歇根州立大学（MSU）^[54] 等实验室被采用。该系统适用于在线连续自动化监测二维偏距，优点是可以在线自动化监测，缺点是不能监测三维偏距。方向耦合式引张线准直监测系统的测量范围可达 ± 8 mm，测量精度 0.007 mm，分辨力可达 0.001 mm。

3.2 震荡/振动式引张线及其应用

震荡振动式引张线（v-WPS）技术是通过给一根两端张紧的导线通过一定频率的电流，当导线位于磁场中时就会受到变化的洛伦兹力作用而产生振动，然后根据导线的振动振幅、交流电流幅值、频率信息和导线固有频率信息就可以计算出导线所处位置的磁场分量信息实现磁场测量（见图 8）。

其基准导线振幅测量原理为

$$y(z, t) = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-I_0 B_{zn} \sin(n\pi z/L) e^{i\omega t}}{\mu(\omega^2 - \omega_n^2 - i\omega\alpha)} \quad (6)$$

其中： $y(z, t)$ 为导线上任意 z 点在任意时间 t 的振幅； $I_0 \times e^{i\omega t}$ 为驱动电流强度； y 代表导线振动方向； z 代表导线长度方向； I_0 为交流电流幅值； B_{zn} 为磁感应强度分量； μ 为导线线密度； ω 为交流电流频率； ω_n 为导线第 n 阶固有频率； α 为阻尼系数； L 为导线长度； Re 为方程根的实部。

v-WPS 最早由美国劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）于 1972 年用来标定测量漂移管内部磁铁磁场^[55]，随后被 LANL 于 1986 年用来标定永磁四极铁^[56]（当时名称叫做脉冲线 Pulsed Wire），接着被 INFN 也用来标定磁铁^[57]（当时名称叫做 Stretched Wire）。而最早使用振动线名称并应用在加速器工程则是由美国康奈尔（Cornell）大学的 Temnykh^[58]，于 1997 年用来标定准直波荡器和封闭低温恒温器内超导四极铁。该方法适合于短距离内共架共线元件的高精度准直安装和磁场标定，目前已被日本理化研究所（RIKEN）^[41]，JASRI^[42]，LBNL^[55]，LANL^[56]，ELETTRA^[57]，Cornell^[58]，DESY^[59]、阿贡（ANL）^[60]，BNL^[61]，SLAC^[62]、瑞士保罗谢研究所（PSI）^[63]，ESRF^[64]、美国杰佛逊国家实验室（JLAB）^[65]，FNAL^[66]，CERN^[67]，IHEP^[68]、俄罗斯科学院新西伯利亚核物理研究所（BINP）^[69]、台湾国家同步辐射研究中心（NSRRC）^[70]、印度束流物理和电子激光实验室（BPFEL）^[71] 和巴西同步光实验室（LNLS）^[72] 采用。不同的是 BINP 通入丝线中的是直流电而非交流电。该系统适用于离线连续自动化监测二维偏距，优点是可用于磁中心测量，进而用于基于磁中心的准直，缺点是不能实现在线监测。该方法测量精度可达 0.04 mm，分辨力 0.001 mm。

3.3 特征频率式引张线及其应用

特征频率式引张线系统（e-WPS）由四个内嵌在陶瓷球的 cWPS（外围两个作为固定参考，内部两个用来动态连续测量）、丝线及其振动测量设备（激光位移传感器和示波器）组成（见图 9）。

其显著特征为：丝线下垂由丝线特征频率的测量计算得来（见式（7）），进而对丝线下垂进行补偿，cWPS 内嵌在直径固定且精加工的陶瓷球，借助跟踪仪可实现真正的绝对三维位置测量。其丝线下垂计算可用式（2）推导

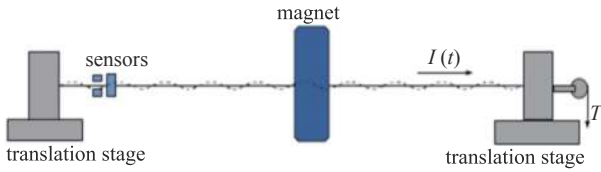


Fig. 8 Vibrating-wire position system/sensor

图8 震荡振动式引张线

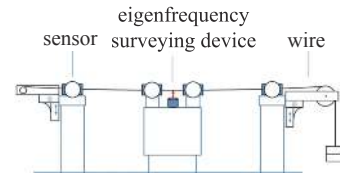


Fig. 9 Eigen/Natural frequency-wire position system/sensor

图9 特征/固有频率式引张线

得来

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{n^2 g}{32 f_n^2} \quad (7)$$

式中: n 为高阶振动阶数; g 为重力加速度; f_n 为丝线驻波振动频率; l 为长度(单位: m)。其丝线驻波振动频率与下列因素有关

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\omega}} \quad (8)$$

式中: T 为拉力(单位: N); ω 为线密度(单位: kg/m)。

该系统适用于离线连续自动化监测二维或三维偏距, 优点是在磁体磁场标定时所有点位可一次同步测量, 在位置监测时可动态连续测量, 缺点是系统高度集成化, 仍需大量测试工作。目前该系统已于 2016 年在 RIKEN^[41] 和 JASRI^[42] 完成稳定性和重复性测试, 仍需要进行直线度测试。

4 讨论

在引张线的发展过程中, 为了提高其精度、稳定性和可靠性, 其测量装置必然向在线自动化、实时非接触方向发展^[1, 16]。从最初的手工读数到光学式的半自动读数, 再到各种传感器(电感式、电容式、光电式、方向耦合式)的自动化读数就说明了这一特点。例如手动式引张线其优点是测量简单直观, 不需要额外附加测量仪器, 缺点是效率低、精度差^[16, 18-19]。光学式引张线虽可达到读数半自动化, 缺点是测量中仪器和丝线固定点都需要强制对中, 需要反复调焦, 非全自动化, 另外由于丝线暴露于空气中, 未加屏蔽筒, 测量容易受气流和震动影响^[19-22]。光电式引张线优点是线性区范围大, 精度高, 缺点是不具备抗电磁辐射, 且容易受潮, 不能在加速器在线运行时使用^[23-29]。电感式引张线精度高, 适宜监测低频(低于 3 Hz)变形^[31-34]。电容式引张线得益于其电子学未暴露于电磁辐射区, 不含光学器件, 具备抗电磁辐射(测头受辐射造成其介电常量被降低, 导致其测量数据变化量在 0.004 mm 以内^[73-74]), 缺点是线性区小^[35-42], 容易受湿度和灰尘影响。激光扫描式同样由于丝线未加屏蔽筒, 测量易受气流和震动影响^[43-44]。方向耦合式引张线优点是具备抗电磁辐射, 适宜在常温和超低温区使用^[45-54], 缺点是不能进行三维测量。震荡/振动式引张线同样具备抗电磁辐射, 适宜工作在常温和超低温环境, 并且可以进行磁场测量与共架共线元件准直^[65-71]。特征频率式引张线可以测量丝线下垂, 并且可以进行磁场测量^[41-42]。为保证足够的测量精度、稳定性和可靠性, 引张线线体的材料、长度和直径都需要事先经过拉力测试, 既确保使用时有最小偏差, 又要保证长期使用不发生折断。其中丝线需要馈入电流信号的有方向耦合式、电感式和震荡振动式引张线, 其它类型引张线则不需要。为了保证信号馈入, 以上三种引张线线体需要为导电材料, 其它则不需要。

在各种自动化读数的传感器式引张线中, 适宜在抗电磁辐射、抗强磁场环境的是电容式、方向耦合式引张线, 也因此其在加速器中应用最为广泛。而电容式测量线性区范围仅为 ± 2.5 mm^[24-25], 光电式引张线正是想弥补这一缺憾而被发明出来(线性区 ± 10 mm), 但其自身不具备抗电磁辐射、抗强磁场特点。为了实现测量范围广且测量精度高的目的, 方向耦合式和振动线式引张线才被设计研制出来。其中方向耦合式引张线又将引张线适宜范围从抗电磁辐射、抗强磁场提高到抗超低温(2~4 K)环境^[48-49, 51, 53-54]。振动线式引张线又将其服务范围扩展到磁场标定、测量和共架共线元件的准直中^[55-71]。而为了实现引张线绝对测量, 特征频率式引张线又被设计并研制出来, 为此不惜集成了电容式传感器、激光位移传感器和陶瓷球等^[41-42]。相比于振动线式引张线, 特征频率式引张线其丝线振动激励方式非为通电式而是手动式, 也因此其工作频率是在特征频率而非振动线式引张线的一阶或高阶共振频率^[41]。而且特征频率式引张线其丝线下垂量(测线位置)是通过激光位移传感器和频率测量计算而来, 其磁场和磁中心测量依然是旋转积分线圈而非振动线式引张线的丝线扫描法。相对于振动线, 其区别是特征频率式引张

线丝线不需要通电使之振动,而是采用手动牵拉然后释放使之振动^[42],且特征频率式引张线丝线振动的目的是为测定丝线位置,而振动式引张线丝线振动的目的是为测定磁中心和磁场。

5 结 论

通过以上对各种引张线技术在加速器准直测量中介绍对比,可看出未来该技术在加速器准直测量中的发展方向。

5.1 精度进入亚微米甚至纳米时代

从1989年起加速器准直测量进入亚毫米甚至微米量级,到现在准直精度面向亚微米甚至纳米量级^[26,63],这都源自众多加速器对准直测量的精度需求^[75],另外从1989年起^[76]到最近^[77],加速器磁铁磁场测量、标定和准直都有使用高精度三坐标测量机,也可验证。

5.2 传感器的广泛高度集成化

各种成熟传感器的高度集成,可以充分发挥各自优点,抑制其缺点。例如CERN就于2012年起集成了电容式、光电式^[37]和震荡/振动式引张线^[63,78-79],最近还使用三坐标测量机^[77]或摄影测量^[78]来计算引张线位置。再如JASRI于2014年起就集成了电容式引张线和激光位移传感器^[41-42]。

5.3 在线实时动态自动化监测

由于在加速器现场都存在电磁辐射和强磁场环境,所以适用于加速器在线自动化监测的引张线就必须使用各类自动化传感器使其具备远程遥测,且其待测信号不受电磁辐射和强磁场等干扰。因此就只有电容式^[37]、方向耦合式^[45-54]引张线才适合在线使用。

5.4 抗电磁辐射、抗强磁场

在线自动化监测的引张线必然要承受电磁辐射、强磁场甚至是中子活化等影响。但是一旦实现,可带来全天候、远程动态、实时的监测效果。

5.5 应用范围扩大化

从当初单纯的偏距测量、安装准直到束流轨道平滑准直^[35]、常温与超导磁铁磁场磁中心测量^[23,30,32,55-56,59-62,67,71]、波荡器^[60]、漂移管^[53-54]等的标定^[76-77]、束流位置监测器电中心标定^[80,81]和控制网测量^[82]等。再结合基于束流准直方法,可有效发现加速器隧道的地面和建筑变形。

致 谢 感谢中科院高能物理研究所董岚和王小龙、日本理化研究所张超以及国家同步辐射实验室何晓业的指导和帮助!

参考文献:

- [1] 亚姆巴耶夫. 精密基准线测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1981: 140-146. (Ambayev X K. Precision baseline survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1981: 140-146)
- [2] 鲍利沙科夫. 精密工程测量的方法和仪器[M]. 北京: 测绘出版社, 1981: 202-209. (Paulishakov V D. Methods and instruments for precision engineering surveying[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1981: 202-209)
- [3] GB/T 15314-1994, 精密工程测量规范[S]. (National Standards of the People's Republic of China. GB/T_15314-1994 Specification for precision engineering surveying[S].)
- [4] 张正禄, 吴栋材, 杨仁. 精密工程测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1992: 129-133, 174-177. (Zhang Zhenglu, Wu Dongcai, Yang Ren. Precision engineering survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1992: 129-133, 174-177)
- [5] 吴翼麟, 孔祥元. 特种精密工程测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1993: 25-26, 210-221. (Wu Yilin, Kong Xiangyuan. Special precision engineering survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1993. 11: 25-26, 210-221)
- [6] 华锡生, 黄腾. 精密工程测量技术及应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2008: 57-62, 94-95. (Hua Xisheng, Huang Teng. Precision engineering survey technology and application[M]. Nanjing: Hehai University Press, 2008: 57-62, 94-95)
- [7] 李广云, 范百兴. 精密工程测量技术及其发展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1742-1751. (Li Guangyun, Fan Baixing. The development of precise engineering surveying technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1742-1751)
- [8] 赵吉先, 刘荣, 郑加柱, 等. 精密工程测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 106-112. (Zhao Jixian, Liu Rong, Zheng Jiashu, et al. Precision engineering survey[M]. Beijing: Science Press, 2010: 106-112)
- [9] Fischer G E. Alignment and vibration issues in tev linear collider design[C]//Proceedings of the 1st International Workshops on Accelerator Alignment. 1989: 12-19.
- [10] Gordon B. Stretched wire mechanics[C]//Proceedings of the 8th International Workshops on Accelerator Alignment. 2004: 24-27.
- [11] Touzé T. Effects of the Earth inertial forces on the Wire Positioning System[R]. TS-Note-2007-002.

- [12] Goldstine H H. A history of the calculus of variations from the 17th through the 19th Century (Studies in the history of mathematics and physical Sciences[M]. Berlin: Springer, 1980: 35-39.
- [13] Behroozi F, Mohazzabi P, McCrickard J P. Remarkable shapes of a catenary under the effect of gravity and surface tension[J]. *Am J Phys*, 1994, 62(12): 1121-1128.
- [14] Mareno A, English L Q. The stability of the catenary shapes for a hanging cable of unspecified length[J]. *European Journal of Physics*, 2009(30): 97-108.
- [15] Jean P Q, Hélène M D, Thomas T. Stretched wire offset measurements: 40 years of practice of this technique at CERN[C]//Proceedings of the 11th International Workshops on Accelerator Alignment. 2010, 11(2): 23-29.
- [16] Захаринный. Automation of precision engineering surveying[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1981: 108-119.
- [17] GB/T 22543.1-2008, 大坝监测仪器引张线仪[S]. (GB/T 22543.1-2008, Dam monitoring instrument extension line instrument[S])
- [18] Fuchs J F, Rude V, Duquenne M, et al. Validation of wire measurements in the LHC tunnel[C]//Proceedings of the 15th International Workshops on Accelerator Alignment. 2018, 15(2): 24-29.
- [19] Liska D, Dauelsberg L B, Spalek G, et al. Precision alignment of permanent magnet drift tubes[C]//Proceedings of the 1986 International Linac Conference. 1986, 12(2): 17-28.
- [20] Gervaise J, Wilson E J. High precision geodesy applied CERN accelerators[C]//Cern Accelerator School, Applied Geodesy for Particles Accelerators. 1986: 161-162.
- [21] Löffler F. Referencing the magnetic axis for HERA's superconducting magnets[C]//Proceedings of the 1st International Workshops on Accelerator Alignment. 1989, 1(3): 13-19.
- [22] 潘正风. 北京正负电子对撞机直线加速器安装的精密测量[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 16(1): 13-18. (Pan Zhengfeng. Precision measurement of the linac installation of Beijing Positron-Negative Collider[J]. *Journal of Wuhan University of Surveying and Mapping Science and Technology*, 1991, 16(1): 13-18)
- [23] Lee V G, Fred J D. Progress in ETA-II magnetic field alignment using stretched wire and low energy electron beam techniques[C]//Proceedings of the Linear Accelerator Conference. 1990, 22(3): 21-29.
- [24] Kevan H. Technical proposal for wire position sensor[EB/OL]. <http://www.opensourceinstruments.com/WPS/WPS0/>.
- [25] Kevan H. WPS2 manual[EB/OL]. <http://www.opensourceinstruments.com/WPS/WPS2/index.html>.
- [26] Hélène M D. PACMAN project: A new solution for the high-accuracy alignment of accelerator components[C]//Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. 2016, 7(3): 31-39.
- [27] Wang Wei, Tang Zheng, He Xiaoye, et al. Design and construction of a multi-sensor position monitoring system applied to key components of synchrotron sources[J]. *Nucl Sci Tech*, 2016, 27: 134.
- [28] Richard S, Erlan B, Lee G. Precision alignment capabilities at LLNL[R]. GEMTN93-339, 1992.
- [29] Rodrigo J L, Christian R B, Maria L C R, et al. Precision engineering-Magnet alignment on a common girder development of a length[J]. *Precision Engineering*, 2017(50): 53-62.
- [30] Alain L. Principles & status of SOLEIL alignment system[C]//Proceeding of the 8th International Workshops on Accelerator Alignment. 2004, 8(2): 13-19.
- [31] Panofsky W K H. The use of a magnetic pickup as an alignment indicator with a stretched wire technique[R]. Tech Note TN-65-74, 1965.
- [32] Panofsky W K H. Stretched reference wire magnetic pickup alignment system[P]. US Patent 3, 470, 460, 1969.
- [33] Mimashi T, Kuroda S, Nakayama H, et al. The position monitor using stretched wire technique[C]//Proceedings of the 3th International Workshops on Accelerator Alignment. 1993, 3(1): 17-19.
- [34] Robert E R. Some alignment considerations for the next linear collider[C]//Proceedings of the 4th International Workshops on Accelerator Alignment. 1995, 4(3): 11-19.
- [35] Daniel R. Status of ESRF alignment facilities WPS ready for an automatic 2D smoothing of a storage ring[C]//Proceedings of the 4th International Workshops on Accelerator Alignment. 1995, 4(3): 21-29.
- [36] Schwalm. C. Straight line reference system-status report on Poisson system calibration[C]//Proceedings of the 12th International Workshops on Accelerator Alignment. 2012, 12(11): 51-59.
- [37] Hélène M D, Bestmann P, Herty A, et al. oWPS versus cWPS[C]//Proceedings of the 12th International Workshops on Accelerator Alignment. 2012, 12(11): 71-79.
- [38] Yu C, Karl F, Ilardo M, et al. Smoothing of NSLS-II storage ring by girder survey[C]//Proceedings of the 14th International Workshops on Accelerator Alignment. 2016, 14(2): 21-29.
- [39] Georg G. Proposal for the alignment of the "Loose End" [C]//Proceedings of the X-Ray FEL Theory and Simulation Codes Workshop. 2006, 1(2): 6-11.
- [40] Hyojin C, Sangbong L, Hong-Gi Lee, et al. 2D WPS system for measuring the location changes in real time of PAL-XFEL devices[J]. *Journal of the Korean physical society*, 2018, 73(8): 1034-1041.
- [41] Hiroaki K, Yuichi O, Mориhiro K, et al. Construction and alignment of test half-cell of SPring-8-II[C]//Proceedings of the 15th International Workshops on Accelerator Alignment. 2018, 15(4): 12-26.
- [42] Zhang C, Mitsuda C, Kajimoto K. Eigenfrequency wire alignment system for magnet fiducialization[C]//Proceedings of the 14th International Workshops on Accelerator Alignment. 2016, 14(2): 13-26.

- [43] Wolf Z, Ruland R, Dix B, et al. Alignment tools used to locate a wire and a laser beam in the VISA[C]//Proceedings of the 6th International Workshops on Accelerator Alignment. 1999, 6(3): 14-25.
- [44] Prall M, Johren R, Hannen V, et al. Contactless 2-dim laser sensor for 3-dim wire position and tension measurements[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference. 2008.
- [45] Robert E S. Characteristics of directional coupler beam position monitors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1985, 32(5): 1933-1937.
- [46] Andrey K. Multi-point wide-range precision alignment based on a stretched wire technique[C]//Proceedings of the 3th International Workshops on Accelerator Alignment. 1993, 3(2): 21-29.
- [47] De M, Dena J C, Ferianis M, et al. Elettra BPM system (hardware and software): First results[C]//Proceeding of the European Particle Accelerator Conference. 1994.
- [48] Eddy N, Fellenz B, Prieto P, et al. A wire position monitor system for the 1.3 GHz Tesla-style cryomodule at the Fermilab new-muon-lab accelerator[C]//15th International Conference on RF Superconductivity(SRF2011). 2011: 25-29.
- [49] Rawnsley W R, Bylinski Y, Fong K, et al. Alignment of the ISAC-II medium beta cryostat with a wire monitoring system[C]//The Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference(ICEC20). 2005: 931-934.
- [50] Bertolini A. Vibration diagnostics instrumentation for ILC[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 8(18): 2293-2298.
- [51] Zhang D, Eddy N, Fellenz B, et al. A wire position monitor system for superconducting cryostat at Fermilab[C]//The 2010 Beam Instrumentation Workshop. 2010, 2(3): 2-6.
- [52] Hitoshi H. Superconducting accelerator development at STF for ILC[C]//Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. 2015.
- [53] Zhu H, Dong L, Li B. Design and simulation of a wire position monitor for cryogenic systems in an ADS linac[J]. *Chinese Physics C*, 2014, 38(3): 808-901.
- [54] Xu T, Ao H, Bird B, et al. FRIB cryomodule design and production[C]//Proceedings of LINAC, East Lansing. 2016.
- [55] Robert M M. Alignment of drift tube quadrupole lenses using a pulsed wire[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Magnet Technology. 1972.
- [56] Warren R W. Limitations on the use of the pulsed-wire field measuring technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1988, 23(272): 257-263.
- [57] Dino Z, Richard P, Walker A. A stretched wire system for accurate integrated magnetic field measurements in insertion devices[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1996, 24(376): 275-282.
- [58] Alexander T. Vibrating wire field-measuring technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1997, 43(399): 185-194.
- [59] Arutunian S G, Bakshetyan K G, Dobrovolsky N M, et al. Petra proton beam profiling by vibrating wire scanner[C]//Proceedings of DIPAC.2005.
- [60] Arutunian S G, Davtyan M A, Vasiniuk I E, et al. Impact of environmental variability on vibrating wire monitor operation[C]//Proceedings of DIPAC09. 2009.
- [61] Jain A, Anerella M, Ganetis G, et al. Vibrating wire R&D for alignment of multipole magnets in NSLS-II[C]//Proceedings of the 10th International Workshop on Accelerator Alignment. 2008.
- [62] Alexander T, Yuri L, Wolf Z. A study of undulator magnets characterization using the vibrating wire technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2010, 622(3): 650-656.
- [63] Wouters C. Vibrating wire technique and phase lock loop for finding the magnetic axis of quadrupoles[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity: A Publication of the IEEE Superconductivity Committee*, 2012, 3(3): 1-4.
- [64] Bec G L, Chavanne J, Penel C. Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2012, 15: 022401.
- [65] Caughan M M, Tiefenback M, Turner D. Improvements to existing Jefferson LAB wire scanners[C]//Proceedings of IPAC.2013.
- [66] Arutunian S G, Avetisyan A E, Davtyan M M, et al. Large aperture vibrating wire monitor with two mechanically coupled wires for beam halo measurements[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2014, 17: 032802.
- [67] Caiazza D, Lasheras N C, Hélène M D, et al. New solution for the high accuracy alignment of accelerator components[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 083501.
- [68] 吴蕾. 振动线测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. (Wu Lei. Research of vibrating wire measurement technique[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [69] Mezentsev N, Tsukanov V, Zorin A. Magnetic measurements of superconducting insertion devices by stretched wire with direct current[C]//International Conference on Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application. 2016: 4-8.
- [70] Tsechuan T. Vibrating wire method and related positioning study at NSRRC[C]//Proceedings of the 15th International Workshops on Accelerator Alignment. 2018.
- [71] Vinit K, Ganeshwar M. Analysis of pulsed wire method for field integral measurements in undulators[J]. *PRAMANA Journal of Physics*, 2010, 74(5): 743-753.
- [72] Renan G, Rodrigo J L, Geraldo C, et al. New sensor and non-contact geometrical survey for the vibrating wire technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2016, 811: 115-123.
- [73] Coosemans W, Dehning B, Hildreth M, et al. Performance of wire position sensors in a radiation environment[C]//Proceedings of the 6th International Workshops on Accelerator Alignment.1999.
- [74] Prochnow J, Coosemans W, Dehning B, et al. Determination of the accuracy of wire position sensor[C]//Proceedings of EPAC. 2000.

- [75] Rodrigo J L, Christian R B, Maria L C, et al. Engineering survey planning for the alignment of a particle accelerator: part I. Proposition of an assessment method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29: 034006.
- [76] Friedsam H, Oren W, Pietryka M. Magnet fiducialization with coordinate measuring machines[C]//Proceedings of the 1th International Workshops on Accelerator Alignment. 1989, 21(2): 22-34.
- [77] Claude S. A rotary mount for submicrometric positioning of a stretched wire axis within a coordinate measuring machine[C]//Proceedings of the 14th International Workshops on Accelerator Alignment. 2016.
- [78] Dirk M, Dominique M, Camille V. Recent developments for a photogrammetric system to measure offsets w.r.t. stretched wires[C]//Proceedings of the 15th International Workshops on Accelerator Alignment. 2018.
- [79] Pasquale A, Domenico C, Carlo P, et al. Performance of the stretched- and vibrating-wire techniques and correction of background fields in locating quadruple magnetic axes[C]//XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”. 2015.
- [80] Arpaia P, Artoos K, Buzio M, et al. Sensors applications within the research framework of the PACMAN Project on metrology for particle accelerators at CERN[C]//IEEE 2016 Sensors Application Symposium. 2016.
- [81] Nosych A A, Iriso U, Olmos A, et al. Measurements and calibration of the stripline bpm for the ELI-NP facility with the stretched wire method[C]//Proceedings of IBIC. 2015.
- [82] Durand S, Touzé T, Rude V, et al. Improving the geometry of a 3d longitudinal network using a stretched wire[C]//Proceedings of the 15th International Workshops on Accelerator Alignment. 2018: 34-39.