

激光跟踪仪和关节臂在 SSC-Linac RFQ 测量中的组合应用

陈文军^{1,2} 马力祯¹ 蔡国柱¹ 王少明¹ 杨雅清¹ 殷学军¹ 袁建东¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 SSC-Linac RFQ (Separated Sector Cyclotron Linac Radio Frequency Quadrupole)是中国科学院近代物理研究所和北京大学共同研制的国内首台高电荷态强流重离子连续波四杆型加速器,机械加工的高精度是 RFQ 能否顺利出束的关键步骤之一。为了检测其机械形位公差,采用了激光跟踪仪和关节测量臂合理组合应用的测量新方法,使两种高精度的测量仪器能扬长避短,克服了大尺度工件形位公差传统测量方法的不足,使其在测量过程中发挥其最优的使用性和操作性,有效地提高了工作效率,从而保证 RFQ 高精度的测量结果。

关键词 激光跟踪仪, 关节测量臂, RFQ

中图分类号 TL505

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020403

由中国科学院近代物理研究所和北京大学重离子物理研究所共同研制的国内首台高电荷态强流重离子连续波四杆型 RFQ (Radio Frequency Quadrupole)加速器是中国科学院近代物理研究所强流重离子直线加速器的注入器,设计工作频率 53.667 MHz,注入能量 $3.728 \text{ keV} \cdot \text{u}^{-1}$,输出能量 $143 \text{ keV} \cdot \text{u}^{-1}$,质荷比 3-7,长度 2.5 m。其机械制造加工和焊接公差要求极高,其加工精度能否满足要求是 RFQ 能否顺利出束的一项关键指标。机械工件形位误差的测量问题在机械制造业中占有重要地位,尤其是大型工件的形位误差直接决定它的工作性能。传统的零件形位误差检测通常使用卡尺、直角尺、高度尺等测量工具,对大型零件形位误差的现场检测,一直缺乏完备可行的方法和手段。激光跟踪仪和测量臂以其携带性、精确性、可靠及易操作性为应用“测量坐标值原则”实现工件加工误差在线检测提供了可能。在装配位置检测中,为了完成 RFQ 机械形位公差测量,我们采用了激光跟踪仪和关节测量臂两种高精度仪器的组合测量来完成检测任务^[1]。

1 激光跟踪仪及关节测量臂介绍

激光跟踪仪是一台以激光为测距手段配以反射标靶的仪器,它同时配有绕两个轴转动的测角机构,

形成一个完整球坐标测量系统。可以用它来测量静止目标、跟踪和测量移动目标或它们的组合^[1]。激光跟踪仪系统同时也是一种便携式高精度的动态或者静态的三维坐标测量设备,其测量范围达到 70 m,点位精度达到 $5 \times 10^{-6} (2\sigma)$,广泛应用于校准、机器安装、部件检测、工具组装、设置以及逆向工程中^[2]。

关节测量臂参照空间支导线测量原理实现三维坐标测量功能,是便携的接触式测量仪器。和三维坐标测量机比较,关节测量臂的测头安置非常灵活。相对于激光跟踪仪来说,不需要测点的通视条件,因此在一些测点通视条件较差的情况下(隐藏点)非常有效^[3]。验收测量中采用的是 Faro 的 2.4 m 铂金型仪器,主要的技术指标为单点重复性精度, $0.025 \text{ mm}^{[4]}$ 。

2 SA 软件介绍

SA (Spatial Analyzer) 是美国 New River Kinematics 公司开发的一个强大的图形化测量平台软件,通过它可以联接驱动几乎所有的便携式测量设备,包括各种厂家型号的激光跟踪仪、关节测量臂、经纬仪、激光扫描仪、室内 GPS (Global Positioning System)等。图形化的界面可以完成任何复杂的测量分析任务,比如,各种形式的测量方式、

国家自然科学基金(No.11375243、No.10635090)资助

第一作者: 陈文军, 男, 1981 年出生, 2005 年毕业于西南交通大学, 现为在职硕士研究生, 核技术专业, 从事加速器准直测量工作

收稿日期: 2014-10-27, 修回日期: 2014-11-29

形位检测、设备定位安装、变形监测、拟向工程、三维控制网测量等几乎所有测量任务,同时测量数据不确定度分析符合 GUN 标准。它广泛应用于飞机制造、汽车制造、航天、造船、核工程等诸多领域。我们在 RFQ 测量中的激光跟踪仪和测量臂的配套软件均为 SA, 它可将不同种类和型号的测量仪器所获取的数据很好地统一在一起, 为我们的测量工作带来很大的便利。

3 激光跟踪仪与测量臂的比较及组合应用

激光跟踪仪测量范围大, 通常可以达到几十米的测量范围, 如 API T3 可以测量大到 60 m, Leica AT401 测量范围更大, 能达到 160 m。而测量臂测量范围通常在 2 m 左右^[5-6]。由于激光跟踪仪采用的是球坐标的测量原理, 所以测头与测量目标之间必须有光线连接, 不能被遮挡, 而测量臂采用多关节相联系的测量方式, 只要能被测量触头接触到, 即能够完成测量^[3]。所以, 即使在工件的背面, 只要能够被测量触头接触到, 就能完成测量。这样, 就测量方式而言, 两种仪器是能够互补的^[4]。

由于 RFQ 腔长约 3 m, 超出了测量臂单站的测量工作范围, 要完整测量腔体内部电极, 需要依次分几次测量, 并且要把几次测量的数据统一起来。虽然激光跟踪仪能够测量这个尺度, 但是在测量 RFQ 腔体内部电极的时候, 由于激光跟踪仪的通视要求, 会有很多隐蔽的部位是无法测量的, 而且还有可能会因为通视条件不好而增加测量误差, 所以我们采用了激光跟踪仪和测量臂相结合的方法。

预先在 RFQ 的上盖板面的法兰上粘接 10 个靶标测量点, 并且用激光跟踪仪测量这些靶标点数据, 然后再把测量臂架设在 RFQ 的一端, 测量就近的靶标点, 用 SA 软件将激光跟踪仪的测量数据和测量臂的测量数据作最佳拟合来统一测量数据。激光跟踪仪和测量臂两种仪器所测数据的三维坐标之间满足空间相似变换的公式:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \lambda R(\phi) R(\omega) R(\kappa) \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, λ 为比例因子; Δx 、 Δy 、 Δz 为三个轴线上的偏移; $R(\phi)$ 、 $R(\omega)$ 、 $R(\kappa)$ 分别为绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的旋转矩阵。式(1)中的 7 个参数, 就是第一组数据的坐标系在第二组数据坐标系的位置关系的参量, 当有足够多的测量数据, Bestfit 解算就确定了实测站的位置, 如图 1。

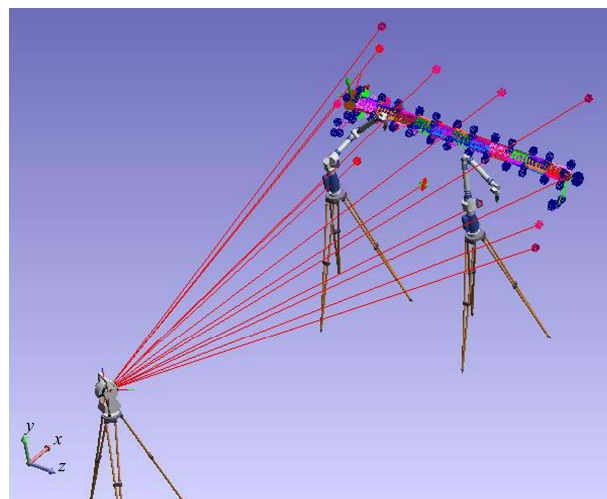


图 1 激光跟踪仪和关节测量臂组合测量 RFQ 腔内电极示意图

Fig.1 Schematic diagram of the combination of laser tracker and articulated arm in the RFQ mechanical survey.

在 RFQ 机械测量的转站过程中激光跟踪仪和测量臂的最佳拟合数据均方根(Root-Mean-Square, RMS)为 0.06 mm, 程序界面如图 2。

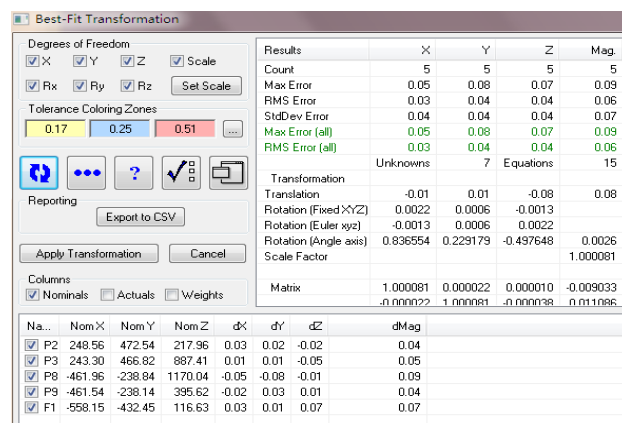


图 2 激光跟踪仪与测量臂测量数据拟合结果

Fig.2 Data fitting measured by laser tracker and articulated arm.

4 测量数据分析

形位误差检测的被测要素都是一些连续的几何要素, 难于测遍全部的要素来取得无限多的相关数据。因此, 结合设计要求和工艺特点建立不同的测量模型, 以测得的有限数据来表征被测要素的全貌。激光跟踪仪和测量臂的曲面拟合计算的特点为形位误差的检测开辟了方便有效的途径。例如, 在平面测量中, 可以通过点坐标的比较得出平面度误差值及两拟合面的角度值, 用拟合计算所得的平面矢量可以评价与其它要素间的位置误差, 圆柱面上测得的点组坐标拟合计算即可得到圆柱轴线等^[7-9], 以下就 RFQ 机械测量中的各种形位误差作具体分析。

4.1 RFQ 机械测量中的坐标系定义

SA 软件提供了丰富的坐标建立方式，可以使用被测工件上的平面、定位孔、定位点作为创建坐标的基准，也可以针对不同的测量需要创建多个坐标系，以下为 RFQ 的坐标定义：

束轴：RFQ 两端法兰中心点连线所确定的直线。法兰中心点为真空密封刀口圆心。

主坐标系：原点在入口法兰中心点；以束轴为 z 轴，束流传输方向为 z 轴正方向； x 轴为电极水平方向； y 轴为电极竖直方向。

腔内坐标系：将主坐标系绕 z 轴顺时针旋转 45° 所得的坐标系。

束孔：电极极头调制面确定在加速器横向平面内的几何孔径。

电极垂直角度：水平与竖直电极对称面的法线夹角。

束孔中心线：中水平和竖直电极对称面的交线。

4.2 电极分段垂直角度误差分析

沿束轴方向，按电极支撑结构将电极分为 11 段。通过利用 SA 软件的查询分析，图 3 为电极垂直角度数据沿束轴方向的误差分布。根据测量结果，由工件尺寸（电极底面到束轴距离）38 mm 计算得到电极垂直角度最大偏差为 0.12° ，相应最大安装偏差为 0.08 mm，标准差为 0.049 mm。

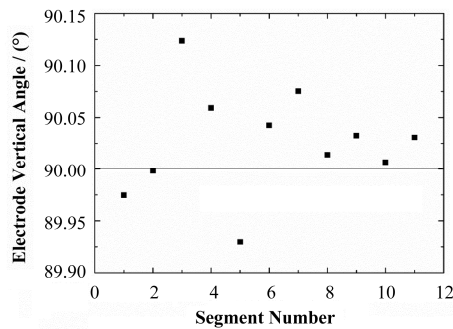


图 3 各段电极垂直角度误差分布图
Fig.3 Each electrode perpendicular angle distributes chart.

4.3 束孔中心误差分布点

根据采样数据，计算在上述 11 个电极分段内各段的束孔中心线，取每段线的中点，得出束孔中心分布点。在主坐标系内，图 4 为各束孔中心点在横向平面内的分布图。

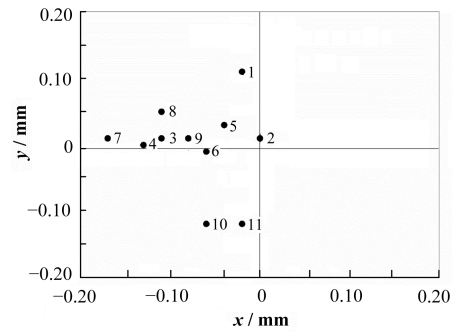


图 4 束孔中心点在横向平面的分布图
Fig.4 Distribution of tie hole central point at traverse planar charts.

4.4 电极束孔中心线相对束轴的同轴度

根据测量数据，束孔相对束轴（主坐标系 z 轴）的同轴度为 0.17 mm。 x 方向平均偏差 -0.06 mm，公差 0.053 mm，夹角 -0.01 mrad； y 方向平均偏差 0.004 mm，公差 0.067 mm，夹角 -0.065 mrad。

4.5 电极安装偏差量

在腔内坐标系内测量四根电极上表面和侧面相对设计位置的偏差量。各电极在 x 和 y 方向的平均偏差量如表 1 所示。

表 1 RFQ 腔内电极的平均偏差量
Table 1 Average deviation of electrode in RFQ chamber.

电极 Electrode	Δx / mm	Δy / mm
上电极 Up	-0.07	0.03
左电极 Left	-0.11	0.05
下电极 Down	-0.06	0.04
右电极 Right	-0.09	0.03

5 结语

传统的形位误差测量方法中，在提取被测要素拟合建立基准和测量工件型面被测要素点的过程中，工装、量具的累计误差在所难免，而且形成误差的原因众多和分析困难，尤以大型工件为甚。激光跟踪仪和测量臂组合后直接在被测要素上采点测量，减少了模拟环节带来的不确定误差。测量时，样本点精度的控制使量化最小条件成为可能，矢量图形给形状误差的测量分析带来了空间趋势的直观感受，空间坐标曲面拟合计算建立的点、线、面不再是基准与被测要素的简单关系，而是可以对其形状和位置进行相互综合评价的空间几何要素组合。随着激光跟踪仪和测量臂在工件形位误差测量组合应用的进一步开发，相信其一定会在形位误差检测领域大放异彩。SSC-Linac 小直线 RFQ 于 2014 年 4 月 4 日顺利出束，输出能量为 $141.9 \text{ keV} \cdot \text{u}^{-1}$ ，流强

达到 149.5 μA , 传输效率好于 80%。通过使用激光跟踪仪和测量臂的组合应用测量, 在 SSC-Linac 小直线的 RFQ 的机械测量中发挥了重要作用。根据元件精确的机械加工尺寸的控制与标定结果, 和后续的预准直和现场准直与 RFQ 的顺利出束密不可分。另外, 本文所述的激光跟踪仪和关节测量臂的组合应用及精度比较等方法可以为仪器在精密机械等行业的应用提供一定的参考。

参考文献

- 1 于成浩. 三维准直测量技术在上海光源中的应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2008: 50-51
YU Chenghao. Study on application of three dimensional alignment measurement technology in Shanghai light source[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008: 50-51
- 2 陈文军, 满开第, 王少明. 兰州重离子治癌研究装置的准直测量技术[J]. 核技术, 2010, 33(1): 65-68
CHEN Wenjun, MAN Kaidi, WANG Shaoming. Survey and alignment technology of Lanzhou heavy ion research facility[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(1): 65-68
- 3 柯明, 于成浩. 关节测量臂在上海光源元件标定中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1884-1885
KE Ming, YU Chenghao. Application of the measuring arm element joint calibration in Shanghai light source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1884-1885
- 4 蔡国柱. 大型离子加速器先进准直安装方法研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2014: 35
CAI Guozhu. Collimation and installation of advanced large ion accelerator[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 35
- 5 Spatialanalyzer user's manual[OL]. <http://www.kinematics.com/spatialanalyzer/index.php>, 2013
- 6 Wessin K. Component measurements for aerospace suppliers with the API laser tracker[R]. Neu Kaliss, Germany: AMAS-Engineering GmbH, 2013
- 7 张刚, 张睿栋. 激光跟踪仪(API)大工件位置误差检测[J]. 甘肃科技, 2011, 25(6): 55-56
ZHANG Gang, ZHANG Ruidong. Laser tracker (API) large workpiece position error detection[J]. Gansu Science and Technology, 2011, 25(6): 55-56
- 8 蔡国柱, 满开第, 陈文军. 激光跟踪仪与 SA 软件在大型粒子加速器准直测量中的应用[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 162-164
CAI Guozhu, MAN Kaidi, CHEN Wenjun. Application of laser tracker and SA software in large particle accelerators in collimating measurement[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(4): 162-164
- 9 GB/T 1958-2004, 产品几何量技术规范(GPS)形状和位置公差检测规定[S]. 2004
GB/T 1958-2004, Geometrical product specifications (GPS) the shape and location of industry difference detection rules[S]. 2004

Combination application of laser tracker and articulated arm in survey of SSC-Linac RFQ

CHEN Wenjun^{1,2} Ma Lizhen¹ CAI Guozhu¹ WANG Shaoming¹
YANG Yaqing¹ YIN Xuejun¹ YUAN Jiandong¹

¹(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

²(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Background: Separated Sector Cyclotron Linac Radio Frequency Quadrupole (SSC-Linac RFQ) is the first domestic high charge state accelerator developed together by Institute of Modern Physical, Chinese Academy of Sciences and Peking University. High precision mechanical control is one of the key indicators for RFQ to obtain needful beam. **Purpose:** The aim is to detect the mechanical tolerances of form and position of large scale workpiece shape. **Methods:** The new survey method that combining laser tracker and articulated arm are adopted to overcome the shortcomings of measuring the shape and position tolerances of large-scale workpiece. **Results:** The measuring efficiency was effectively improved, which ensured the high precision RFQ measurement results. **Conclusion:** SSC-Linac RFQ beam was successfully obtained on April 4, 2014, with the output energy of 141.9 keV·u⁻¹, current 149.5 μA , and the transmission efficiency higher than 80%. The combined application of measurement using laser tracker and a measuring arm ensures the accuracy of mechanical measurement of SSC-Linac small line in RFQ.

Key words Laser tracker, Articulated arm, Radio Frequency Quadrupole (RFQ)

CLC TL505