

文章编号: 1001-4322(2009)12-1885-04

# 关节测量臂在上海光源元件标定中的应用\*

柯 明, 于成浩

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204)

**摘 要:** 关节测量臂以便携、高精度的小尺寸测量性能在上海光源的元件标定过程中得到了广泛应用。介绍了上海光源元件标定的方案设计, 操作工艺以及质量保证措施等, 着重探讨了关节测量臂的合理使用。在仪器使用过程中, 利用软件的学习功能有效地提高了工作效率; 通过将温度变化控制在  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 并利用标准尺及不同仪器的标定结果相互比较来控制、监测系统误差等, 从而保证高精度的测量结果。

**关键词:** 上海光源; 激光跟踪仪; 关节测量臂; 元件标定

**中图分类号:** TL505 **文献标志码:** A

上海光源(SSRF)是我国迄今为止最大的科学装置, 主体包括 20 m 长的直线加速器、周长 180 m 的增强器、周长 432 m 的储存环以及沿环外侧分布的同步辐射光束线和实验站<sup>[1]</sup>, 由上万个精密元件组成。加速器物理要求各种磁铁、高频腔等关键元件的定位精度均应优于  $\pm 0.2\text{ mm}$ , 其中定位要求最为严格的是储存环四极铁, 其单元之间的横向相对定位精度为  $\pm 0.15\text{ mm}$ , 支架内的横向相对定位精度为  $\pm 0.08\text{ mm}$ , 这对准直测量技术提出了较高挑战。以四极铁为例, 准直测量必须经过元件标定、预安装准直、现场准直及平滑测量等若干步骤, 根据所采用的工艺技术, 各个步骤的限差分别为  $0.05\sim 0.08\text{ mm}$ , 从而实现其在隧道内的精确就位<sup>[2]</sup>。元件标定是其中的关键, 处于准直工艺流程的前端, 当准直方案存在效率低下等问题时, 将严重制约安装进度<sup>[3]</sup>。上海光源需要标定的元件包括真空室、高频腔、加速管, 所有的二极铁、四极铁、六极铁、校正铁等。在上海光源的准直实施过程中, 由于采用了关节测量臂这一新颖的高精度测量仪器, 元件标定的精度得以保证, 效率有明显的改善。

## 1 关节测量臂简介

关节测量臂参照空间支导线测量原理实现 3 维坐标测量功能, 是便携的接触式测量仪器, 和三坐标测量机比较, 关节测量臂的测头安置非常灵活; 相对于激光跟踪仪来说, 它价格较低, 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<sup>[3]</sup>。生产关节测量臂的厂家较多, 主要有 Faro 公司、Garda 公司和 ROMER 公司。上海光源采用的是 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  $0.025\text{ mm}$ , 配套软件是 CAM2<sup>[4]</sup>。

## 2 元件标定方案

元件标定的目的是得到外部准直基准  $F_1\sim F_4$  和元件参考中心  $C_1\sim C_2$  的相对位置关系, 如图 1 所示, 以便在后继的安装过程中利用准直基准对元件进行定位准直。元件标定的结果是安装准直的依据, 其误差对于单个元件来说是系统误差, 对于批量元件来说, 可以看作随机误差。由于元件安装之后不可重新测量, 因此, 元件标定的精度需严格控制, 其影响因素包括基准设置形式、所用仪器和方法及精度控制措施等。

### 2.1 基准形式

元件的各种基准形式见图 2, 包括各种靶座, 基准孔等。靶座适合精度要求高、易于设置的元件, 价格较高; 基准孔实际使用时往往会有偏大或偏小的加工误差, 因此, 仅适合于精度要求较低、不易设置靶标的地方,

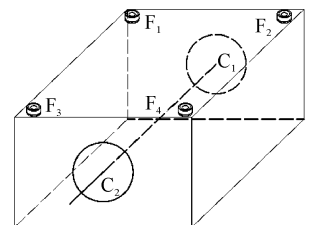


Fig. 1 Sketch map of components' fiducial marks

图 1 元件基准示意图

\* 收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-09-03

基金项目: 上海光源工程资助课题

作者简介: 柯 明(1976—), 女, 硕士, 工程师, 从事加速器精密准直测量研究; keming@sinap.ac.cn.

其优点是价格较低。

以磁铁为例,在制造时将 4 个基准靶标焊接于上表面,沿磁铁中心线对称分布,以抵消温度因素对测量结果的影响;相互之间的位置需尽可能远,以削弱测量误差的影响。

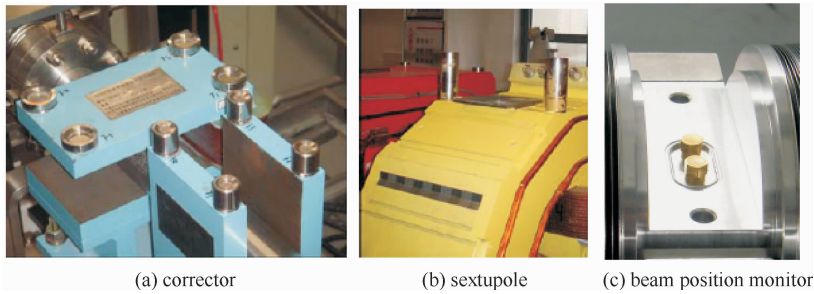


Fig. 2 Three types of alignment fiducial marks

图 2 准直基准形式

## 2.2 标定方案

标定的基本流程是:测量元件的几何中心、V 型槽或若干几何面,根据相互关系,建立元件坐标系,求得靶标在该坐标系下的坐标,作为标定值。

对于数量较少的元件,可采用直接标定的方法,根据其几何尺寸,设计测量元素和步骤,比较重复性。对于数量较多、具有相同或类似几何结构的元件,如四极铁、六极铁,应在上述标定方案的基础上将操作过程程序化。

## 2.3 标定仪器

用于标定的仪器主要是关节测量臂和激光跟踪仪。尽管上海光源整体的尺寸很大,但是单个元件的尺寸大都小于 2 m,用关节测量臂比较适合。虽然激光跟踪仪也可以完成标定,但是相对而言,关节测量臂的效率更高,而且其它环节也需要激光跟踪仪,往往会造成仪器的冲突,所以元件标定主要由关节测量臂完成。

## 3 利用关节测量臂进行元件标定

由于准直测量总误差的限制,元件标定步骤的限差为 0.05 mm。由于关节臂的技术精度指标较高,因此该仪器可以用于上海光源的元件标定。

由于利用关节测量臂进行元件标定具有快速高效、高精度的优点,所以上海光源约 90% 的元件都是由关节测量臂完成标定的,在准直队伍中有一个小组专门负责关节测量臂相关的标定工作,完成了直线加速器、增强器及储存环多种元件的标定工作。图 3 所示分别为关节测量臂标定增强器的二极铁和储存环的六极铁。

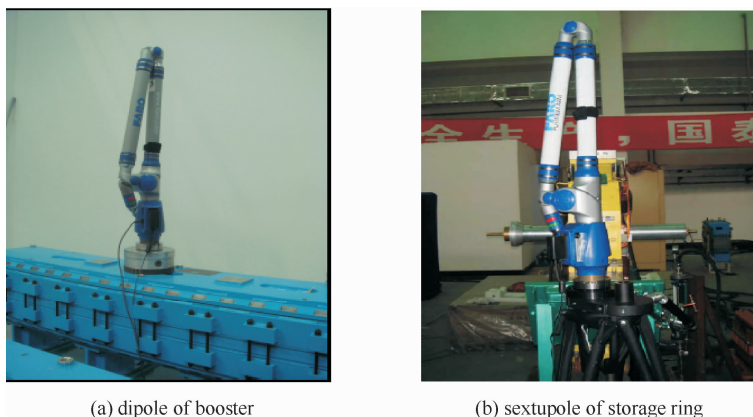


Fig. 3 Magnet fiducialization by articulated arm

图 3 关节测量臂进行磁铁标定

## 3.1 仪器性能的确证

关节测量臂尽管使用非常方便,但是,因为仪器由测量臂、关节、码盘、测头等组成,仪器的频繁使用会造成关节的严重磨损,对测量精度造成不利影响。为了进行质量控制,每天工作前对标准尺进行测量,比较实测值和标准值的偏差,以确认仪器的性能指标。当仪器使用一段时间后,将仪器送回厂家,进行参数修正等维护,以

保证测量的质量。上海光源在加速器安装的 1 年多中,共返回厂家维护了 4 次。

### 3.2 标定过程

由于上海光源结构类似的元件非常多,必须避免大量重复性的计算、分析操作,提高工作效率,程序化是非常有效的措施。

关节测量臂配套软件 CAM2 提供了学习功能,可实现程序化。首先选择一个元件,将测量、分析、计算过程全部记录下来,并保存为学习文件;在后继的同类元件测量过程中,调用学习文件,重复执行。这样使得操作者可以将精力集中在数据采集上,避免了计算可能带来的错误,降低对操作者的技术要求。

### 3.3 标定质量判断

元件标定的精度控制指标为靶标的重复性,根据元件的具体情况,要求 2 次测量的重复性优于 0.05 mm 或 0.10 mm。对于绝大部分元件标定来说,关节测量臂可以顺利实现上述指标要求,从而确认标定结果的质量。

影响标定精度的因素之一是温度变化,有可能对标定结果造成不利影响。以储存环四极铁来说,标定工作原本由北京高能物理研究所承担,但是,标定现场和安装现场有 10~20 °C 的温差,造成标定结果较大的差异<sup>[5]</sup>。由于磁铁靶座并非是根据其结构进行对称布设的(特别是在高度方向),所以温度变化引起的磁铁膨胀或收缩将造成标定值的变化,最大变化量可达 0.05 mm。显然,若利用这种带有偏差的标定值进行元件的组装,将造成磁铁和真空室等元件存在系统偏差。这种情形是不能容忍的,解决措施是所有元件的标定都在温差较小的环境下进行。上海光源的实验大厅提供温差变化小于 2 °C 的恒温环境,因此,所有标定工作都在大厅内进行。

仪器的系统误差也可能影响标定精度,由于现代精密测量仪器越来越复杂,尽管通过精密补偿可以实现对系统误差的修正,但是测量结果依然会受到系统误差的影响。特别对于不同原理的测量仪器来说,相互之间很容易存在系统误差。关节测量臂采用支导线的测量原理,和激光跟踪仪、三坐标测量机(CMM)的原理都有很大区别。因此,应采取一定措施避免系统误差。

避免系统误差的措施有两种,一是前面提到的和标准尺的长度进行比对,二是对不同仪器标定结果进行比较。以储存环 C20 单元的 10 块四极铁为例,在上海光源现场,分别用关节测量臂和激光跟踪仪进行标定,偏差情况见图 4。

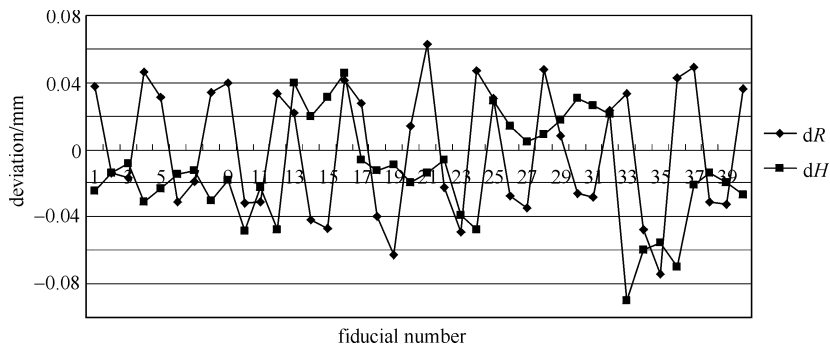


Fig. 4 Fiducialization result contrast of quadrupole between laser tracker and articulated arm

图 4 激光跟踪仪和关节测量臂对四极铁标定结果比较

图 4 中横轴为磁铁靶点编号,纵轴为偏差,可以看出:偏差量级较小,大部分小于 0.05 mm,由于 2 种仪器标定的重复性要求均为 0.05 mm,可认为 2 种仪器标定的精度相当。高度偏差(dH)呈随机分布特征,而径向偏差(dR)随磁铁靶标的编号顺序呈规律性的变动,说明 2 种仪器之间有一定的尺度偏差。

由于激光跟踪仪自身采用作为尺度基准的干涉原理进行测距,并且可以通过自我校准实现精度补偿<sup>[6]</sup>,可以认为尺度误差来自关节测量臂。以激光跟踪仪的数据为准,由于数据偏差小于限差,关节测量臂的标定结果得到了确认。

为了避免系统误差对标定和准直的影响,同类元件采用同种仪器标定,而不是 2 种仪器混合使用。

## 4 结 语

相对于激光跟踪仪而言,关节测量臂测量范围小,无需通视性,在上海光源的元件标定中发挥了重要作用。

根据元件标定的结果进行后继的预准直和现场准直,都取得了较好的效果。加速器的调束非常顺利,从准直数据及实际闭轨情况均反映出较高的准直精度,这与高质量的元件标定是密不可分的。另外,本文所述的关节测量臂的应用及精度比较等,可以为仪器在精密机械、汽车等行业的应用提供一定的参考。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Zhentang, Xu Hongjie, Ding Hao. Construction of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[C]//Proceedings of 2007 Asian Particle Accelerator Conference. 2007.
- [2] 于成浩,殷立新,杜涵文,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 Hanwen, et al. Survey and alignment design of Shanghai Synchrotron Radiation Facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1167-1172)
- [3] Yu Chenghao, Du Hanwen, Yin Lixin, et al. Survey and alignment of the SSRF complex[C]//Proceedings of 10th International Workshop on Accelerator Alignment. 2008.
- [4] Faro Technologies. Product sample of Faro Technologies[EB/OL]. [2005-08-20]. <http://www.faro.com>.
- [5] 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. (Yu Chenghao. The application research of 3D survey and alignment techniques in SSRF. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008)
- [6] 柯明. 同步辐射实验装置精密准直技术研究[D]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2006. (Ke Ming. Precise alignment study of SR experimental facility. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006)

## Application of articulated arm to components' fiducialization in Shanghai Synchrotron Radiation Facility

Ke Ming, Yu Chenghao

*(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)*

**Abstract:** Articulated arm is widely used in Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF) for components' fiducialization with its portability and high accuracy. The design, actual technical method and quality assurance measures of fiducialization are addressed, while how to operate articulated arm correctly is stressed. When utilizing the arm, working efficiency is highly improved using its software's study function. And measurement results with high accuracy are achieved through controlling temperature variation within 2 °C and comparing results between different apparatuses to monitor and amend systematic error.

**Key words:** Shanghai Synchrotron Radiation Facility; laser tracker; articulated arm; components' fiducialization