

文章编号: 1007-4627(2016)03-0297-05

## 武威医用重离子加速器同步环的准直安装

陈文军, 马力祯, 蔡国柱, 崔治国, 王少明, 袁建东, 华永平, 柴一亮, 李玉春

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 武威医用重离子加速器是目前世界上最紧凑的重离子加速器治癌装置, 同步环周长小至 56.1 m, 其中很多关键元件的安装定位精度要求达到亚毫米量级, 四极透镜的定位精度要求 0.1 mm。结合激光跟踪仪的特点和测量学知识通过三维控制网及多重坐标系的转换, 探索了一种在元件自身坐标系下调节准直的方法, 提高了准直安装的工作效率, 使得最后所有的元件安装各向误差均控制在 0.1 mm 以内, 其结果优于该装置的精度要求, 使得同步环在短时间内顺利调束成功, 从而验证了同步环准直测量的可靠性与准确性。

**关键词:** 重离子治癌; 同步环; 三维控制网; 激光跟踪仪

**中图分类号:** TL505      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.297

### 1 引言

武威医用重离子加速器是由中国科学院近代物理研究所主导承建, 武威荣华集团和武威肿瘤医院投资约 16 亿元人民币, 共同建设的一项造福民生的重点项目。其重离子治癌技术是由中国科学院近代物理研究所自主研发的重离子医疗技术, 使中国成为了世界上继美国、德国、日本后的第四个拥有重离子治癌技术的国家。武威医用重离子加速器由离子源、小回旋加速器、中能输运线、同步环、高能输运线和各治癌终端组成, 其建成后将是世界上最紧凑的重离子加速器治癌装置<sup>[1]</sup>。其中同步环周长小至 56.1 m, 由成千上万个复杂的元件组成。环形加速器中, 由于粒子在磁场的约束下沿着其轨道前进, 磁铁的安装位置偏差将引起粒子运行轨道和设计轨道的偏离, 所以磁铁等元件必须满足一定的安装定位精度, 才能保证粒子绕轨道旋转几十万圈<sup>[2]</sup>。由于磁铁对粒子束有聚焦或偏转作用, 所以垂直于束流轨道方向(横向)的位置公差要求特别严格, 武威医用重离子加

速器同步环各元件准直安装精度要求如表 1 所列。对安装定位精度要求较高的元件包括二极磁铁、束流位置探测器、高频腔、静电偏转板、剥离膜等定位精度要求均应优于 0.5 mm, 四极透镜精度要求 0.1 mm, 这给我们的安装准直工作带来了挑战, 特别是同步环相互之间有夹角的元件。据了解, 在国内的几个已经建成的加速器中, 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)的二期改造中的准直安装, 国家同步辐射实验室(NSRL)二期改造的准直安装, 均是在全局坐标系下完成磁元件的调节准直工作。在全局坐标系下准直的方法在相邻磁铁无角度的直线段中使用有直观性强、测量元件坐标点容易寻找、准直效率高等优点。但在相邻磁铁互带角度的环形加速器中, 特别是初安装放样测量时, 寻找元件坐标相对来说费时费力。结合激光跟踪仪的特点和测量学的一些知识, 通过三维控制网及多重坐标系的转换, 运用在元件自身坐标下调节的方法, 高效率地完成了武威医用重离子加速器同步环的安装准直工作。

表 1 同步环元件准直安装精度要求

Name	Offset/mm			Rotary volume/mrad		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta\omega_x$	$\Delta\phi_y$	$\Delta\kappa_z$
Dipole	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2
Quadrupole	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5	0.5
Beam monitor	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
RF	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

收稿日期: 2015-12-24; 修改日期: 2016-03-07

基金项目: 武威重离子治癌专用设备基金项目(1HITFiL20120012)

作者简介: 陈文军(1981-), 男, 甘肃民勤人, 工程师, 硕士研究生, 从事加速器准直测量技术研究; E-mail: wenjun8061@163.com。

## 2 控制网布设及坐标系的建立

三维控制网是使用激光跟踪仪来进行各项精密工程测量工作的基础，武威医用重离子加速器的控制网由全局控制网和局部控制网两部分构成。为了控制从离子源到治疗终端各个子系统的理论原点的位置，首先建立了一个全局坐标系。而各个子系统又分别以各自的理论原点为基础建立了局部坐标系，如同步环坐标系。全局控制网用于各子网的衔接，局部网保证了各段装置及治癌终端自身相对位置关系的正确<sup>[3]</sup>。武威医用重离子加速

器同步环全局控制网由 9 个相对稳定性较好的控制网点组成，所有网点地面结构都由钢管内填充混凝土加三维的微调装置组成，其钢管深埋于地下十多米。武威医用重离子加速器同步环布局如图 1 所示，由于同步环的各全局控制网点独立于加速器的基础土建，借助于全局控制网不但可以用来准直加速器的元件，还可以监测装置的起伏沉降等位置变化。为了确保每个元件的精密调节，我们对控制网进行了加密，最终形成了由近百个网点构成的高级加密的全局控制网，武威医用重离子加速器同步环控制网点如图 2 所示。

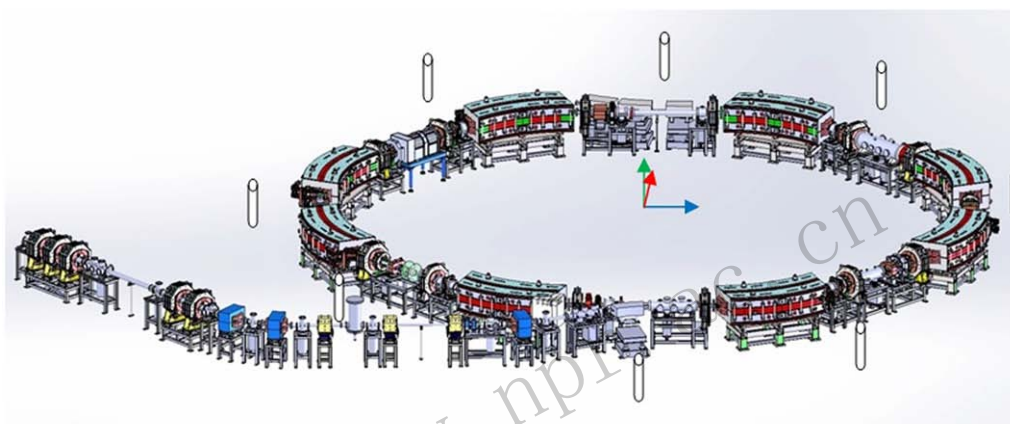


图 1 (在线彩图) 武威医用重离子加速器同步环布局图

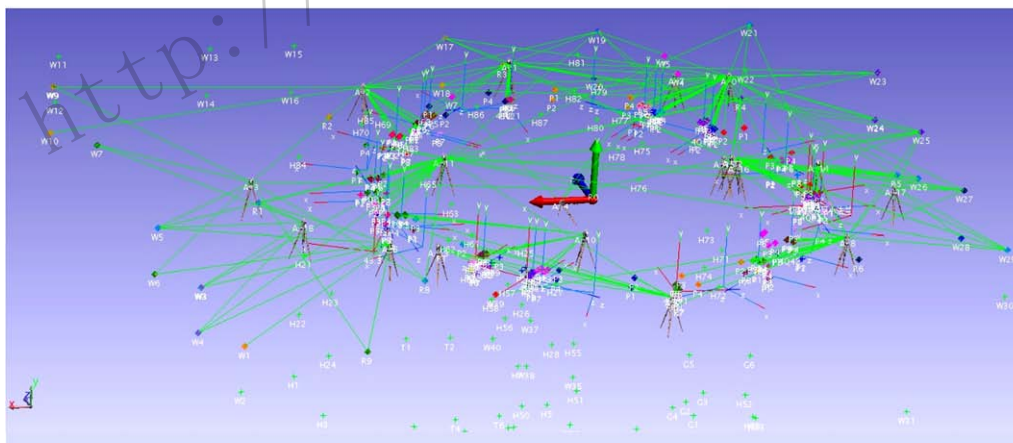


图 2 (在线彩图) 武威医用重离子加速器同步环控制网点图

武威医用重离子加速器局部控制网的建立过程为，首先在一楼地面及周围墙面上以 4 m 为间距均匀地布设网点，用激光跟踪仪恢复全局控制网的数据，然后利用激光跟踪仪的转站功能对局部控制网进行数据采集，从而使全局控制网和局部控制网的数据统一化。利用 Leica 公司生产的 AT402 激光跟踪仪及配套的 SA(Spatial Analyzer) 软件进行数据处理，进行转站联

系测量，测量数据再经过 USMN 平差处理，这样就使全局控制网和重离子治癌装置局部控制网很好地结合在一起，为同步环建立了一个高精度的三维控制网<sup>[4]</sup>。

武威医用重离子加速器同步环坐标系选用笛卡儿坐标系，其中原点为同步环中心点；X 轴为由原点指向引出点方向的短轴上；Y 轴为高度方向；Z 轴为按右手坐标系规则指向； $\theta$  角为 Z 轴的正向指向为零度，逆时针

递增<sup>[5]</sup>。

### 3 元件标定

元件标定处于准直工艺流程的前端, 只有元件标定结束后, 才能进行预准直、现场安装等, 所以, 当标定方案存在效率或其它问题时, 有可能成为制约整个安装进度的瓶颈<sup>[6]</sup>。元件在标定完成安装上线后不可重新测量, 因此, 元件标定的精度必须严格控制, 要做到几次标定的数据重复性优于 0.05 mm。元件标定的目的是为了建立准直靶标和元件自身几何中心或物理中心的相对位置关系, 从而保证在安装时能利用预留在元件外面的靶标进行元件的准直。需要标定的元件主要包括磁铁、高频腔、静电偏转板、真空室等。工作量非常大, 重复性工作较多。为了提高效率, 在基本标定方案的基础上, 将操作过程程序化, 可以避免大量重复性的计算、分析, 避免了计算可能带来的错误, 降低对操作者的技术要求, 工程质量和进度都得到了有效保证。

#### 3.1 二极磁铁标定

二极铁的大概标定流程为: 先用激光跟踪仪采集二极磁铁径向向两侧的上下预留准直V型槽数据, 借助于SA测量软件分别把磁铁两侧上下准直V型槽所采集的数据构建两平面, 再构建这两平面的中面, 便是二极磁铁的束流水平面。然后测量二极磁铁上表面的弧形预留准直V型槽, 锁定半径  $R = 4000$  mm 拟合圆, 构建圆心, 再测量磁铁束流向出入口端点, 构建直线, 取其中点, 用中心点和圆心构建直线, 再构建出直线和磁铁表面圆弧的交点, 将其投影到束流中心面上。以投影点作原点, 磁铁束流水平面法向为 Y 轴, 束流向为 Z 轴, 根据相互关系, 构建二极磁铁元件坐标系, 求得靶座的坐标数据。用相同的方法重复以上的标定工作, 对比各个靶标点数据, 若偏差不超过 0.05 mm, 取两次标定数据的平均值作为最后的标定数据。武威医用重离子加速器二极铁坐标系及靶标分布如图 3 所示。

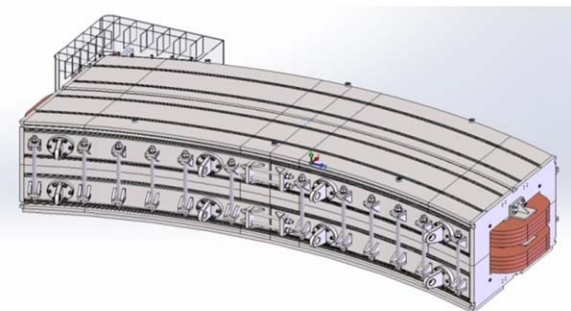


图 3 (在线彩图) 二极铁坐标系及靶标分布图

#### 3.2 四极透镜标定

由于四极透镜在机械加工过程中必然会产生加工误差, 加工误差可能会造成机械中心和磁场中心产生偏差, 所以在四极透镜的标定中要完成磁场中心的标定。过程为, 先把磁场测量装置定位到磁铁中心, 调节好测量装置的水平, 在磁场测量装置的旋转轴两端安装两个预先加工好的靶标。在磁场测量的过程中, 用激光跟踪仪分别测量旋转轴两端靶标旋转一周的数据。用SA测量软件分别用采集好的两组旋转轴靶标数据拟合圆周, 构建圆心, 将两个圆心构建一条直线。然后用适配器测量四极透镜上表面束流向的出入口端点, 用SA测量软件把两端点连线, 取其中点, 然后将中点投影到用两圆心构建的直线上后的点就是磁场中心点。用此点作原点, 束流向为 Z 轴, 高程向为 Y 轴, 建立元件坐标系, 测量焊接在透镜上的靶标点, 用相同的方法重复以上的标定工作, 对比各个靶标点数据, 若偏差不超过 0.05 mm, 则取两次标定数据的平均值作为最后的标定数据。

#### 3.3 真空泵室及静电偏转板的标定

所有真空泵室及偏转板的尺寸较小, 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<sup>[7]</sup>。首先测量元件束流向出入口两端的法兰圆, 构建圆心, 然后测量其水平或垂直的法兰面, 以入口法兰的圆心为原点, 法兰面的法向为 Y 轴或 X 轴, 束流向为 Z 轴, 建立元件坐标系。然后测量预先焊接在元件上的靶标点, 所采集的数据便是最后的标定数据。图 4 为武威医用重离子加速器真空泵室及诊断元件标定软件截图。

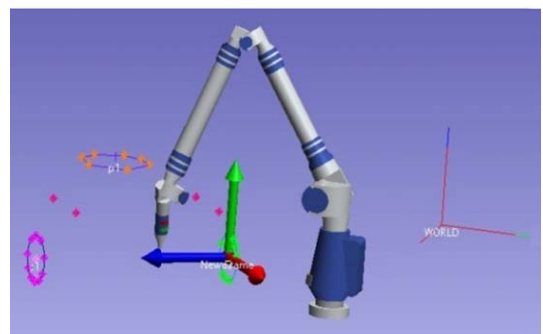


图 4 (在线彩图) 诊断元件标定软件截图

### 4 支架及元件放样

用激光跟踪仪恢复控制网建立设备就位参照基准,

从工程总装图上查找出每个支架地脚及元件中心的坐标数据,恢复元件坐标系后,在地面上标出支架地脚及磁铁入口和出口及二极铁顶点的坐标值放样在地面上。根据磁铁的入、出口参照点和束流参照线在地面对支架底台的地脚螺栓位置放样画线的放样点。按照地面上的放样点在地面打膨胀螺钉孔,固定支撑底座。最后在支撑底座上安装调节机构,各支撑的调节机构应处于中位状态,以不减少支架的有效调节量<sup>[8]</sup>。借助于激光墨线仪、铅垂等工具对准支架中线,利用天车及元件工装使得磁铁预留中心定位槽和支架的中心能大致对齐,确保每个元件的安装精度都在支架可调节的范围内,以方便各元件以后的精确调节。

## 5 元件的精确调节

元件的精确调节需借助于激光跟踪仪和SA测量软件在元件自身的坐标系下完成。元件自身坐标系就是将全局坐标系通过各元件自身在整体坐标系中的位置,通过距离的平移及角度的旋转后,把全局坐标系移动到了安装元件的理论位置上。在武威医用重离子加速器同步环的具体准直安装中,首先在待测元件附近架设激光跟踪仪测量,测量就近的三维控制网点,使用SA软件中的Best-fit功能恢复控制网,使激光跟踪仪定位在同步环坐标系中。在SA软件中将全局坐标系根据待测元件的理论坐标,置入适当的坐标编辑参数,通过平移旋转后即得到调节用的元件自身坐标系。从全局坐标系到元件自身坐标系的转换公式为

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

式中 $\theta$ 表示从主环坐标系转换到元件坐标系的过程中坐标系绕 $Z$ 轴旋转的角度, $\Delta X$ , $\Delta Y$ , $\Delta Z$ 分别表示坐标系转换过程的3个坐标平移的分量<sup>[9]</sup>。

元件坐标系建立后,将SMR放在元件的靶标座上,用SA软件的Watch功能监测,对比理论数据和实际监测数据,反复调节磁铁到误差容限内。最后将各元件的实测数据和理论数据作七参数解算,得出测量元件的中心与理论位置的偏差。同步环所有元件的准直安装都按此操作流程,为元件的精确调节和准直带来了很大的方便,也为安装准直工作节约了大量的时间。用前述方法通过多次调节测量,最后的同步环四极透镜安装准直结果如图5所示。

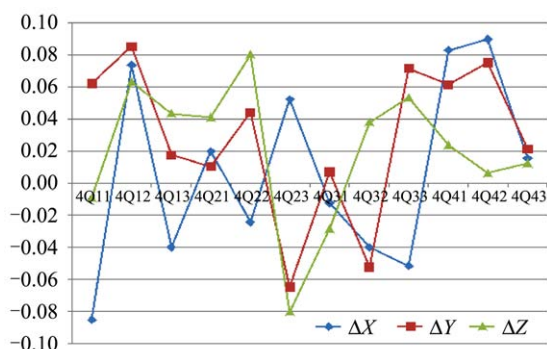


图5 (在线彩图)武威医用重离子加速器四极铁调节结果

## 6 结论

武威医用重离子加速器通过在元件自身坐标系下调节准直的方法,同步环全部元器件在短时间内均准直到位,最后所有的元件各向安装准直误差均控制在0.10 mm以内,其结果均优于设计的准直精度要求使得同步环在短时间内顺利调束成功,从而验证了武威重离子治癌装置同步环准直测量的可靠性与准确性。但同时也伴随着一些问题,加速器安装完成后,在调试及运行过程中,由于四季气温的变化、地面不均匀沉降及变形、支撑系统的应力释放等原因,将导致加速器元件偏离原安装位置以及三维控制网的变化,使得元件位置超出其误差要求,从而影响武威医用重离子加速器运行的稳定性。这种偏离特别是在加速器调试及运行初期比较明显,为了保证加速器的正常运行,必须定期对准直测量网和加速器元件进行准直复测,使加速器元件恢复到理论位置,保证高质量运行。由于安装工期短、时间紧迫,在武威医用重离子加速器准直工作中还有很多不足,如没有安装位置自动监测设备、局部控制网点相对稀疏等问题,希望在今后的运行维护中能逐步完善。

### 参考文献:

- [1] CHEN Wenjun, MA Lizhen, CAI Guozhu, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2015, **27**(8): 33. (in Chinese)  
(陈文军, 马力祯, 蔡国柱, 等, 强激光与离子束, 2015, **27**(8): 33.)
- [2] 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. (in Chinese)  
(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所, 2008: 50)
- [3] CHEN Wenjun, MAN Kaidi, WANG Shaoming. Nuclear Techniques, 2010, **33**(1): 65. (in Chinese)  
(陈文军, 满开第, 王少明. 核技术, 2010, **33**(1): 65.)

- [4] WANG S J, MAN K D, GUO Y Z, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2002, **14**(4): 637. (in Chinese)  
(汪守金, 满开第, 郭艺珍, 等. 强激光与离子束, 2002, **14**(4): 637.)
- [5] CAI Guozhu, MAN Kaidi, CHEN Wenjun. Science of Surveying and Mapping, 2013, **38**(4): 162. (in Chinese)  
(蔡国柱, 满开第, 陈文军. 测绘科学, 2013, **38**(4): 162.)
- [6] CAI Guozhu, MAN Kaidi, CHEN Wenjun, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2014, **26**(1): 275. (in Chinese)  
(蔡国柱, 满开第, 陈文军, 等. 强激光与离子束, 2014, **26**(1): 275.)
- [7] KE Ming. Precise alignment study of SR experimental facility. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)  
(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.)
- [8] CAI Guozhu. Collimation and installation of advanced large ion accelerator[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 35. (in Chinese)  
(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)
- [9] ZHANG Zhenglu, WU Dongcai, YANG Ren. Precise Engineering Survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992. (in Chinese)  
(张正禄, 吴栋材, 杨仁. 精密工程测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.)

## Survey and Alignment of Synchrotron Ring for Wuwei Heavy Ion Medical Machine

CHEN Wenjun, MA Lizhen, CAI Guozhu, CUI Zhiguo, WANG Shaoming,  
YUAN Jiandong, HUA Yongping, LI Yuchun

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

**Abstract:** Wuwei Heavy ion medical machine(HIMM) is the most compact accelerator facility for heavy ion therapy in the world, which has a circumference about 56.1 m. The alignment accuracy of many components of the machine should be submillimeter level. For example, the positioning accuracy of quadrupoles should be within 0.1 mm according to design target. With the combination of laser tracker and surveying knowledge, we develop a method that adjusts and collimates elements under the elements themselves coordinates via three-dimensional control network and the transformation of multiple coordinates to improve the efficiency of installation alignment. By this way, the deviation of each direction from all elements is under 0.1 mm and the result is better than the design target, which leads to the successful commission of Wuwei HIMM. Consequently, the feasibility of this method developed is verified.

**Key words:** heavy ion therapy; synchrotron ring; three dimensional control network; laser tracker

**Received date:** 24 Dec. 2015; **Revised date:** 7 Mar. 2016

**Foundation item:** Equipment Project of Wuwei Heavy Ion Medical Machine(1HITFiL20120012)

1) E-mail: wenjun8061@163.com.