

双轴准直测量调节系统*

李 洪, 刘云龙, 谷占军, 戴文华, 叶 毅, 章文卫, 张开志

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 根据“神龙一号”和“神龙二号”两台直线感应加速器的直线性偏差不超过 ± 0.2 mm、角度误差不超过 $\pm 2''$ 和高程误差不超过 ± 0.2 mm 的总体精度要求,分析了影响准直安装精度的主要因素和误差限定值;确定了采用激光跟踪仪、全站仪和水准仪相结合,建立包括大六边形网和小四边形网两个层次的高精度控制测量网;再通过专门设计的串并联精密调节机构,依据合理的准直安装工艺达到准直安装的精度要求。经过在“神龙一号”直线加速器准直安装的验证,此方法满足精度要求。

关键词: 直线感应加速器; 准直安装; 控制测量网; 调节机构

中图分类号: TL501 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102203.0579

随着加速器对小焦斑的追求,束流传输过程中两种主要的横向运动——Corkscrew 运动和束流崩溃不稳定性(BBU)成为进一步缩小焦斑的主要障碍。通过对其形成机理的分析发现,加速器“三轴”(磁轴、机械轴和束流轴)的失准直和能散是 Corkscrew 运动和 BBU 发生发展的根源。由于直线感应加速器的机械轴和磁场轴是加工时就固化在一起的,彼此互相保证一定的精度,而磁场轴在加速器整体连接后的测量非常困难,只有依靠机械轴来保证,所以机械轴的准直安装是磁轴准直及磁场误差校正的基础,在加速器研制建造中起着重要的作用。“神龙一号”和“神龙二号”直线感应加速器要具有多角度、多时刻闪光 X 射线能力,保证两台加速器的磁轴、电子束流轴和机械轴三轴合一,并且相互间垂直、在一个水平面上是其关键之一。这两台轴线互成一定角度的直线感应加速器分别由注入器、加速段、聚焦段串接而成长达数十 m,要求准直安装的直线性偏差不超过 ± 0.2 mm、准直安装的角度误差不超过 $\pm 2''$ 、准直安装的高程误差不超过 ± 0.2 mm。要达到以上准直安装精度要求,不是一种孤立的测量和单纯的调节问题,不仅需要高精度测量仪器、控制测量网,也需要精密调节机构、准直安装工艺等技术,并将各个领域的技术成就集结起来,才能较好地完成两台直线感应加速器的准直安装。因此,我们开展了双轴准直测量调节系统研究。

1 总体方案设计

1.1 总体技术方案

两台轴线互成一定角度的“神龙一号”和“神龙二号”直线感应加速器,需要准直安装的分别包括注入器、加速段和聚焦段。要使这两台长近 100 m 的直线感应加速器达到准直安装精度要求,应该采用先进的测量仪器,根据建站测网的理论确定足够多、具有足够精度的控制点,建立体现总体安装坐标系的控制测量网;然后通过专门设计的精密调节机构,按照合理的安装工艺,进行整个直线感应加速器的准直安装,其总体方案如图 1 所示。

1.2 准直安装的误差影响因素及限差的确定

通过对高精度准直测量和精密调节技术的深入研究,特别是在“神龙一号”直线感应加速器准直安装中取得的经验,可以得出“神龙一号”和“神龙二号”两台直线感应加速器准直安装角度误差 M_1 ,主要来源是测量仪器的测角误差。根据设计要求和现有的技术水平,测量仪器的测角误差限定值在 $\pm 1.5''$ 以内,其它由于加速器整体安装直线性误差引起的角度误差不大,满足这项就可以达到两台直线感应加速器准直安装角度误差在 $\pm 2''$ 以内。

而影响每一台直线感应加速器整体安装直线性误差 M_2 的因素,主要包括以下 6 项:准直安装控制测量网的点位误差 m_1 ;跟踪仪建站联网的直线性误差 m_2 ;五组元预准直的测量直线性误差 m_3 ;五组元硬连接带来的

* 收稿日期:2009-11-04; 修订日期:2009-12-03

基金项目:国防科技基础研究基金项目

作者简介:李 洪(1969—),男,副研究员,博士研究生,研究方向为高精度测量、调节及机械设计; caep_lh@163.com。

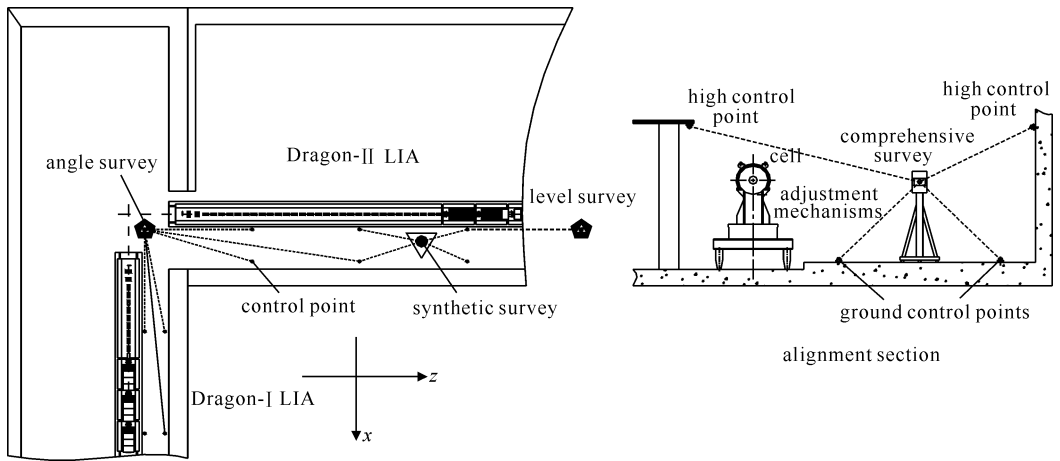


Fig. 1 General scheme of alignment assembly system of two axes

图 1 双轴准直测量调节系统总体方案

形变误差 m_4 ; 跟踪仪测量点位带来的直线性误差 m_5 ; 五组元连接的测量直线性误差 m_6 。

直线感应加速器整体安装直线性误差

$$M_2 = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2} \quad (1)$$

根据直线感应加速器准直安装设计要求、准直安装取得的经验和现有的技术水平,对以上 6 项因素分别提出了限定值: $m_{1\text{level}} = \pm 0.100 \text{ mm}$, $m_{1\text{elevation}} = \pm 0.100 \text{ mm}$; $m_{2\text{level}} = \pm 0.040 \text{ mm}$, $m_{2\text{elevation}} = \pm 0.040 \text{ mm}$; $m_{3\text{level}} = \pm 0.040 \text{ mm}$, $m_{3\text{elevation}} = \pm 0.050 \text{ mm}$; $m_{4\text{level}} = \pm 0.030 \text{ mm}$, $m_{4\text{elevation}} = \pm 0.030 \text{ mm}$; $m_{5\text{level}} = \pm 0.038 \text{ mm}$, $m_{5\text{elevation}} = \pm 0.038 \text{ mm}$; $m_{6\text{level}} = \pm 0.050 \text{ mm}$, $m_{6\text{elevation}} = \pm 0.060 \text{ mm}$ 。把以上 6 项代入公式(1),可以得到直线感应加速器整体安装直线性误差 $M_2 = \pm 0.195 \text{ mm} < \pm 0.200 \text{ mm}$,说明直线感应加速器准直安装的精度分配合理,能实现整体目标。

2 关键技术研究

为了使两台直线感应加速器准直安装过程各项误差的限定值达到设计要求,要解决以下几项关键技术研究:高精度测量仪器选择、精密调节机构设计、直线感应加速器调节控制网设计、法兰-螺栓连接对组元段准直安装直线度的影响研究。通过选择合理的高精度测量仪器,可以提高 M_1 和 M_2 中 m_1, m_2, m_3, m_5, m_6 项的精度;设计适用的精密调节机构,可以提高 m_3, m_4, m_6 项的精度;提高加速器调节控制网的设计精度,可以提高 M_1 和 M_2 中 m_1, m_2 项的精度;法兰-螺栓连接对组元段准直安装直线度的影响研究,可以提高 m_3, m_4, m_6 项的精度。

2.1 准直测量仪器选择

针对两台直线感应加速器准直安装的测量功能有:(1)长距离精密水准测量,用于建立直线感应加速器总体坐标系和控制测量网;(2)长距离精密角度测量,用于建立直线感应加速器总体坐标系和控制测量网;(3)一定距离的点位坐标测量,用于控制测量网的加密;(4)众多部件坐标标定测量,建立部件坐标;(5)各部件准直安装时的建站、联网测量,建立部件坐标和总体坐标系的联系。

长距离精密水准测量可以通过高程测量仪器实现;长距离精密角度测量可以通过角度测量仪器实现;一定距离的点位坐标测量可以通过综合测量仪器实现;众多部件坐标标定测量可以通过综合测量仪器实现;各部件准直安装时的建站、联网测量也可以通过综合测量仪器实现。

现阶段能实现以上功能的精密测量仪器有:光学水准仪、光学经纬仪、电子全站仪、数字水准仪、静力水准测量、高精度 GPS 接收机、激光跟踪仪和数字摄影测量系统,以上这些仪器可以按高程测量、角度测量和综合测量的性能分成 3 类。3 类仪器的选择情况如下:(1)高程测量仪器。静力水准测量价格昂贵及通用性差;光学水准仪测量照准困难、人为因素较多;而电子水准仪 DNA03 在以上几方面有较大的优势,是较适合的仪器。(2)角度测量仪器。光学经纬仪测量照准困难、人为因素较多;电子经纬仪和全站仪同计算机相结合,实现了角度观测过程中观测值的获取、传输、处理的自动化,克服了人为因素的影响,是较适合的仪器。(3)综合测量仪器。高精度 GPS 系统要受大厅顶盖封闭影响;数字摄影测量系统在距离较大时精度不能保证;激光跟踪仪的

测量距离较大、精度高、便于自动化、实时动态测量的特点,非常适合数量、种类多和形状复杂的直线感应加速器部件的标定测量、准直安装碎步测量和安装检修,是首选的仪器。

考虑到满足直线感应加速器测程将近 100 m,准直安装角度误差 $\leq \pm 2''$ 、准直安装高程误差 $\leq \pm 0.200$ mm 的精度要求,安装大厅情况,价格因素和使用方便性、灵活性等方面因素,选择了电子水准仪 DNA03 测量高程、全站仪 TDM5005 测量角度、激光跟踪仪进行标定等综合测量,共同完成直线感应加速器系统准直测量。

2.2 控制测量网研究

由于实验的原因,两台轴线互成角度的直线感应电子加速器分别建在两个大厅。首先,必须要建立体现两台直线感应加速器相对位置的总体坐标系;然后,在“神龙一号”和“神龙二号”直线感应加速器大厅分别建立各自的平面网和高程网,提供各自准直安装达到直线性精度的依据。根据分级布网、逐级控制的布网原则,为了提高控制测量网精度,建立的直线感应加速器控制网如图 2 所示。

总体坐标系以 L101 为坐标原点,L101-L103 方向为 x 轴,L101-L102 方向为 z 轴。平面控制网在“神龙一号”和“神龙二号”实验大厅分别包括大六边形网和小四边形网两个层次,其目的是用大六边形网加强小四边形的精度,由小四边形网加密控制点,保证加速器准直安装到任何位置都有足够的点,反映出整体安装坐标。高程控制网也分成两段,一段由“神龙二号”13 个平面控制点组成,从永久水准点 L101 沿加速器到平面控制点 L102,每两点相距 8 m;另一段由“神龙一号”8 个平面控制点组成,从永久水准点 L101 沿加速器到平面控制点 L103,每两点相距 8 m。

“神龙一号”和“神龙二号”两台直线感应加速器的长度分别约为 60 m 和 90 m,准直安装的角度误差 $\leq \pm 2''$,从测量范围和精度方面考虑,选择 TDM5005 型全站仪进行总体坐标系的建立。平面控制网在其建立测量过程中,使用 TDM5005 型全站仪和跟踪仪;高程控制网使用 DNA03 型数字水准仪进行测量。

通过对各级控制网的精度进行了计算,可以得到方向观测中误差可达到 $0.28''$,准直安装控制测量网高程方向精度为 ± 0.076 mm 和 ± 0.094 mm,水平方向精度为 ± 0.091 mm 和 ± 0.11 mm。基本上能够满足根据直线感应加速器准直安装总体要求,确定的测量仪器测角误差限定值为 $\leq \pm 1.5''$;准直安装控制测量网的点位误差 m_1 限定值为 $m_{1level} = \pm 0.100$ mm, $m_{1elevation} = \pm 0.100$ mm 的指标。

2.3 精密调节机构研究

由于两台直线感应加速器注入器、加速段和聚焦段的结构、数量、大小和组成形式各不相同,提出采用预准

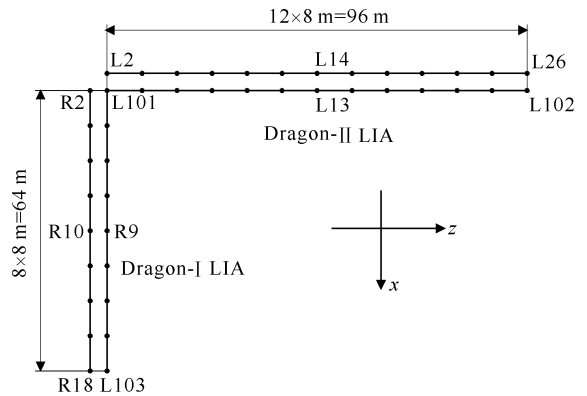


Fig. 2 Alignment control network of LIA

图 2 直线感应加速器控制测量网

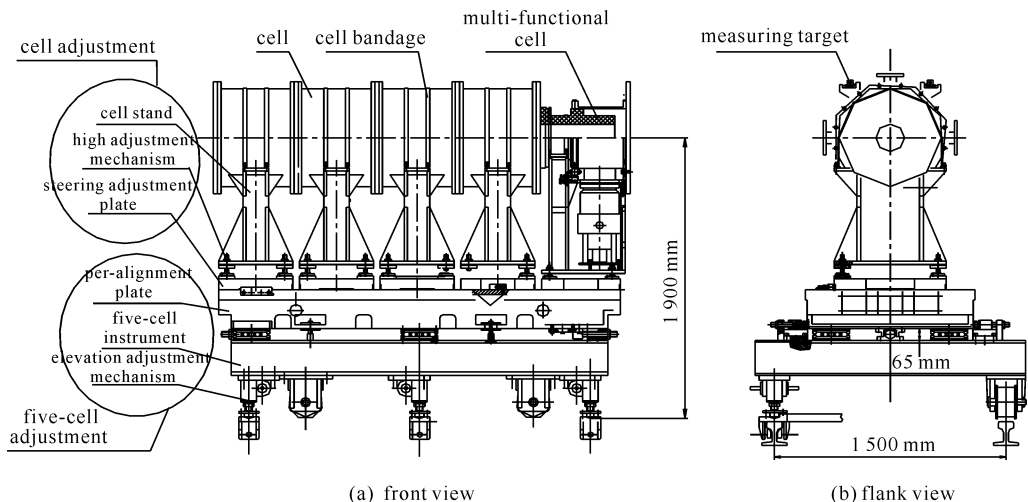


Fig. 3 Precision adjustment mechanisms of LIA

图 3 直线感应加速器精密调节机构

法和直接法分别实现各部分准直安装的结构方案;确定了串并联相结合调节机构类型,并分别对各类调节机构的结构进行了设计和分析;设计了可拆卸式导轨等结构形式,解决了直线感应加速器组元批量大、准直安装精度高的矛盾。设计的其中一种直线感应加速器调节机构如图 3 所示,由组元调节部分和五组元段调节部分组成。设计的各种精密调节机构,经过在“神龙一号”直线加速器准直安装中的应用,完全满足调节精度、调节量和调节自由度的要求。

2.4 准直安装工艺研究

针对两台直线感应加速器准直安装的高精度要求,采用有限元法分析,考虑法兰、螺栓和密封垫片的相互作用及加速器的安装工艺,建立加速器对中装配法兰-螺栓连接的分析模型如图 4 所示。通过对计算结果的分析,得到了保证真空密封、硬连接的精密准直安装应遵循的准则,建立了既能保证真空密封又能达到准直安装精度的直线感应加速器准直安装工艺。

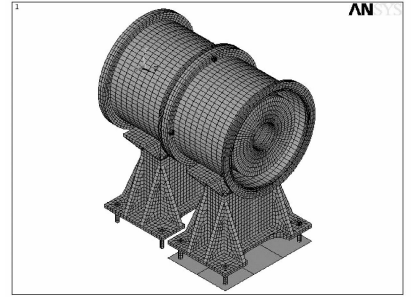


Fig. 4 Finite element model of centered assembling of accelerator component

图 4 加速器组元对中装配有限元模型

3 结 论

开展的双轴准直测量调节系统研究,在“神龙一号”直线加速器准直安装中进行了应用,通过检测、分析,整台直线感应加速器准直安装直线性误差小于 ± 0.2 mm,达到设计要求。结合磁场偏差校正技术,使“神龙一号”直线感应加速器的磁场轴位于以束流管道机械轴为中心半径 0.25 mm 圆柱的范围内,倾斜的绝对值小于 0.15 mrad,达到国外同类实验室技术水平。

参考文献:

- [1] 张正禄,邓勇,罗长林,等.论精密工程测量及其应用[J].测绘通报,2006,(5):17-20.(Zhang Zhenglu, Den Yong, Luo Changlin, et al. On precise engineering surveying and its application. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2006, (5):17-20)
- [2] 严伯铎.中国工程测量技术的发展与展望[J].地矿测绘,2005,21(4):39-42.(Yan Boduo. Development and prospect of engineering measuring technique in China. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2005, 21(4):39-42)
- [3] 于成浩.几种水准测量方法在电子直线加速器测量中的应用[J].北京测绘,2005,(2):22-25.(Yu Chenghao. Application of some level methods in LINAC measurement. *Beijing Surveying and Mapping*, 2005, (2):22-25)
- [4] 汪守金,满开弟.CSR的准直安装[J].强激光与粒子束,2002,14(4):637-640.(Wang Shoujin, Man Kaidi. Alignment for CSR. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4):637-640)
- [5] 李洪,刘云龙,章林文,等.直线感应加速器机械轴精密对中方法[J].强激光与粒子束,2004,16(10):1349-1352.(Li Hong, Liu Yunlong, Zhang Linwen, et al. Method for the mechanical axis alignment of the linear induction accelerator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(10):1349-1352)
- [6] 李洪,黄建峰,张清泉,等.法兰-螺栓连接对加速器队中装配同轴度影响的研究[J].四川大学学报,2007,39(3):61-64.(Li Hong, Huang Jianfeng, Zhang Qingquan, et al. The influence of Bolted-flange connection on the coaxial tolerance in accelerator centering assembling. *Journal of Sichuan University*, 2007, 39(3):61-64)

Alignment assembly system of two axes

Li Hong, Liu Yunlong, Gu Zhanjun, Dai Wenhua, Ye Yi, Zhang Wenwei, Zhang Kaizhi
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: The mechanical axis alignment of Dragon-I and -II linear induction accelerators(LIAs) requires the error of linearity and level no more than 0.2 mm and the error of angle no more than $2''$. This paper analyzes the error limit of the major specifications that influence the LIAs' alignment. The total station, level, theodolite and laser tracker are selected for measurement. An alignment control network including large hexagonal network and small quadrilateral network covering the whole LIA area has been built. Components for precise mechanical adjustment and alignment are designed, and the alignment process and technique of the LIA system are presented. This method has been verified in "Dragon-I" LIA.

Key words: linear induction accelerator; alignment assembly; alignment control network; adjustment mechanisms