

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

云光二号加速器全系统准直测量与调节

何德雨 呼义翔 杨实 周亚伟 钟爱旭 董敏 尹佳辉 罗维熙 曾江涛 丛培天

Alignment measurement and adjustment for the whole system of Yunguang II accelerator

He Deyu, Hu Yixiang, Yang Shi, Zhou Yawei, Zhong Aixu, Dong Min, Yin Jiahui, Luo Weixi, Zeng Jiangtao, Cong Peitian

引用本文:

何德雨, 呼义翔, 杨实, 周亚伟, 钟爱旭, 董敏, 尹佳辉, 罗维熙, 曾江涛, 丛培天. 云光二号加速器全系统准直测量与调节[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 044001. doi: 10.11884/HPLPB202537.240396

He Deyu, Hu Yixiang, Yang Shi, Zhou Yawei, Zhong Aixu, Dong Min, Yin Jiahui, Luo Weixi, Zeng Jiangtao, Cong Peitian. Alignment measurement and adjustment for the whole system of Yunguang II accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 044001. doi: 10.11884/HPLPB202537.240396

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240396>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

引张线技术在加速器准直测量中应用概述

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

强激光与粒子束. 2020, 32: 045102-1-045102-10 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190259>

中国散裂中子源准直控制网数据处理方法

Adjustment method of control network for alignment in CSNS

强激光与粒子束. 2021, 33: 104002-1-104002-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210096>

一种新型低电感磁绝缘传输线的冷腔特性

Cold cavity characteristics of a new type of low-inductance magnetically insulated transmission line

强激光与粒子束. 2022, 34: 063005-1-063005-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210494>

附有高程约束的三维平差方法研究

Research on three-dimensional adjustment with elevation constraints

强激光与粒子束. 2022, 34: 084001-1-084001-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210561>

4 MV/80 kA IVA型脉冲X射线照相装置研制进展

Status of radiographic X-ray source driven by 4 MV, 80 kA induction voltage adder

强激光与粒子束. 2020, 32: 025013-1-025013-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190331>

一种角向传输线B-dot标定平台的设计

A design of B-dot calibration simulator for azimuthal transmission line

强激光与粒子束. 2024, 36: 055002-1-055002-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230341>



·粒子束及加速器技术·

云光二号加速器全系统准直测量与调节^{*}

何德雨, 呼义翔, 杨 实, 周亚伟, 钟爱旭, 董 敏,
尹佳辉, 罗维熙, 曾江涛, 丛培天

(西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 云光二号加速器采用感应电压叠加技术路线, 全系统包含 12 台 Marx 发生器、24 条水线、12 级感应腔和 1 条长磁绝缘传输线, 由于装置规模大、级数多、结构复杂, 为保证整体装配精度, 尤其是感应腔和磁绝缘传输线的同轴度, 对准直测量技术提出了很高的要求。针对国外同类装置测量系统复杂、过程繁琐的技术缺陷, 提出了以激光跟踪仪为核心测量手段的全系统准直测量技术方案, 分别完成了发生器输出法兰、感应腔导轨、磁绝缘传输线及其导轨的准直测量和调节, 尤其是设计了能够实现双向内孔定心的靶标座测量机构, 高精度、高效率实现了 12 级感应腔同轴串联的准直测量调节, 为更大规模装置建设奠定了良好的技术基础。

关键词: 脉冲功率; 云光二号加速器; 准直测量; 激光跟踪仪; 感应腔; 磁绝缘传输线

中图分类号: TL505

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.240396

Alignment measurement and adjustment for the whole system of Yunguang II accelerator

He Deyu, Hu Yixiang, Yang Shi, Zhou Yawei, Zhong Aixu, Dong Min,
Yin Jiahui, Luo Weixi, Zeng Jiangtao, Cong Peitian

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of
Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Yunguang II accelerator adopts induction voltage adder technique route. The whole system consists of 12 Marx generators, 24 water lines, 12 induction cavities and a long magnetically insulated transmission line. Because of its large scale, many series and complex structure, the alignment measurement technique is required to ensure the whole assembly precision, especially the coaxiality of the induction cavity and the magnetically insulated transmission line. Aiming at the technical defects of complex and complicated measuring system of similar equipment in foreign countries, an all-system alignment measuring scheme using laser tracker as the core means is put forward. The alignment and adjustment of the generator output flange, induction cavity guide rail, magnetically insulation transmission line and its guide rail are completed respectively, especially a measuring mechanism of target base which can realize double-direction inner hole centering is designed. With high precision and efficiency, the alignment measurement and adjustment of 12-stage induction cavity in series is realized, which lays a good technical foundation for the construction of larger-scale facilities.

Key words: pulsed power, Yunguang II accelerator, alignment measurement, laser tracker, induction cavity, magnetically insulated transmission line

云光二号加速器于 2024 年顺利建成出束, 其峰值电压和峰值电流分别达到 10 MV 和 330 kA, 是目前国内功率最高的感应电压叠加(IVA)^[1-5]装置。该装置的感应腔串联级数达到 12 级, 磁绝缘传输线(MITL)内筒为长达 13 m 的悬臂结构, 二者形成同轴结构(分别对应阳极和阴极), 通过 MITL 实现高功率脉冲的汇聚和传输, 如果同轴度误差过大则会降低耦合传输效率甚至导致磁绝缘传输机制的失效。同类装置研究结果表明^[6], 阴阳极间隙误差超过 5% 时将引起明显的电流损失, 对装置整体电气性能造成不利影响, 因此必须对系统准直精度进行严格控制。

大型加速器的外形尺寸达到几十米甚至上千米, 而关键电气功能部件的准直精度要求可低至毫米以下, 二者

^{*} 收稿日期: 2024-10-30; 修订日期: 2025-03-24
联系方式: 何德雨, hedyu@nint.ac.cn。

尺度跨越4个数量级以上,而相关零部件呈现大径、长轴、薄壁等特征,不利于加工和安装精度的保证。准直测量与调节技术需要兼顾装置性能指标和机械系统的可实现性,贯穿于加速器的设计、加工、建立基准、安装调试和运行维护全过程,属物理学、机械学和测量学等的交叉学科,已成为加速器领域的重要技术分枝。其中,长距离磁绝缘传输中心电极的精准定位问题已成为超高功率脉冲传输的关键问题之一^[7]。对该型加速器的准直测量,美国Hermes III装置采用基于视觉的光学测量方法^[8],该方法需要依托激光器、反射镜、准直望远镜、刻度标尺等一系列硬件,系统组成复杂且操作过程繁琐,不利于准直测量的效率提升和精度保证。本文提出了以激光跟踪仪为核心测量手段的准直测量技术,涵盖发生器输出法兰、感应腔导轨、感应腔、MITL及其导轨等全系统关键组部件。激光跟踪仪已成功应用于国内外多型加速器的准直测量^[9-12],证明了其在测量精度、范围和通用性等方面的显著优势。本文简要介绍云光二号加速器的基本组成结构,通过误差分配明确各项准直测量内容及其精度指标,重点阐述各项准直测量内容的实施过程和调节结果。

1 加速器结构简介

云光二号加速器采用“快Marx发生器+混波网络”^[13-15]新型技术路线,装置规模约长19 m×宽12 m×高5 m,包含数万个机械零部件,组成结构复杂,如图1(a)所示。其12台Marx发生器的24个输出法兰与24条水线输入端连接,水线输出端则分别与12级感应腔的上下馈入端口连接,感应腔放置于支撑横梁上,可沿横梁导轨平移并依靠自身调节机构实现中轴线位置和角度调节;MITL内筒为分段连接的长悬臂结构,采用在段间加装倾斜垫片的方法调节各段整体同轴度^[16-17],如图1(b)所示,悬臂支撑结构可沿地面导轨平移并可调节MITL内筒的位置和角度。理想情况下,12级感应腔串联形成的内孔(阳极)应与MITL内筒(阴极)呈同轴结构,阴阳极(Anode-Cathode, A-K)间隙误差应不超过5%。根据装置建设顺序,依次完成各个组部件的准直测量和调节,最终目标是实现感应腔和MITL之间的同轴度指标达到设计要求。

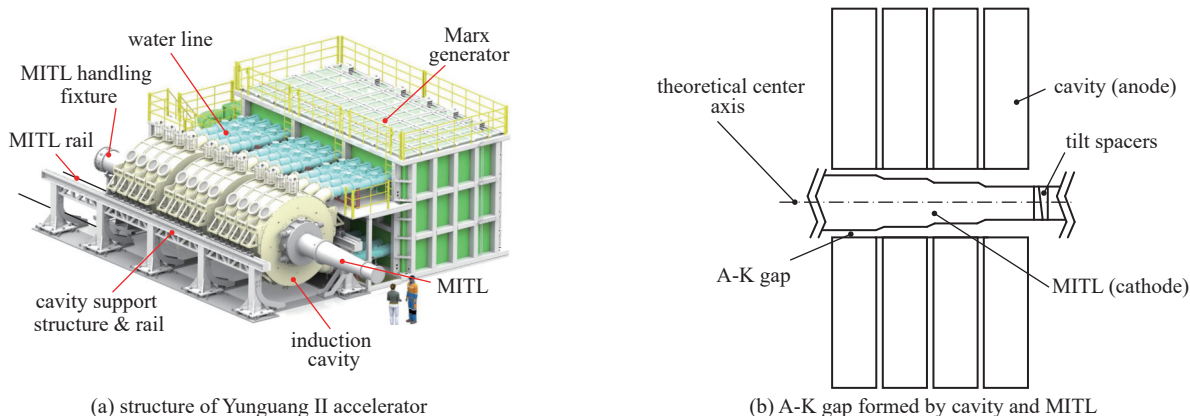


Fig. 1 Structure of Yunguang II accelerator and A-K gap formed by cavity & MITL

图1 云光二号装置结构及阴阳极间隙示意图

2 误差指标分配

2.1 核心误差指标分配

误差分配是复杂精密机械系统安装的重要技术环节,涉及系统整体精度、分系统加工精度、装配调节精度、测量精度、经济性和效率等多个因素,其中系统整体精度是误差分配的实施目标,加工、装配调节及测量精度关乎误差指标的可实现性,而经济性和效率也是工程建设必须着重考虑的现实因素。需要在准确解构分系统精度指标的叠加耦合关系的基础上,统筹考虑上述因素,合理分配各项误差指标,避免过高或过低的问题发生。具体实施时,按“总-分-总”的原则,首先根据电气设计要求确定整体精度指标,进而根据叠加耦合关系对各误差指标进行初步分配,最后根据加工、装配调节和测量精度等因素对各指标进行适当修正,使总误差满足整体精度指标要求,达到整体精度和分项精度要求的协调统一。

影响加速器阴阳极同轴度误差有4项核心因素,12级感应腔各项误差精度指标分配如表1所示。其中:(1)感应腔同轴度,即感应腔中轴线一侧端点相对于装置理论中轴线的位置,兼顾整体精度要求和调节可实现性,该项误差指标取1%间隙和1 mm的较小值;(2)腔体倾斜,即感应腔轴线一端固定后,考虑腔体倾斜,另一侧端点相对于装置理论中轴线的位置,考虑到相邻两级感应腔插接结构径向间隙约0.3~0.4 mm,该项误差指标统一取0.4 mm;

表 1 核心误差指标分配
Table 1 Allocation of core alignment errors

cavity number	cavity coaxiality/mm	cavity tilt/mm	MITL coaxiality/mm	MITL fixture position/mm	total error/mm	criteria/mm	extreme error rate/%
1	0.3	0.4	0.6	0.5	1.8	1.5	6.0
2	0.3	0.4	0.6	0.5	1.8	1.5	6.0
3	0.5	0.4	1.0	0.5	2.4	2.5	4.8
4	0.7	0.4	1.4	0.5	3.0	3.5	4.3
5	0.9	0.4	1.5	0.5	3.3	3.5	3.7
6	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	3.1
7	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	2.8
8	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	2.4
9	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	2.3
10	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	2.1
11	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	1.9
12	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	1.8
extension	1.0	0.4	1.5	0.5	3.4	3.5	1.7

(3)MITL 同轴度,即 MITL 内筒的实际中轴线上各点相对于内筒自身理论中轴线的位置,兼顾整体精度要求和调节可实现性,该项误差指标取 2% 间隙和 1.5 mm 的较小值;(4)MITL 支撑结构位置,即 MITL 内筒与感应腔实施同轴装配时,因支撑结构平面(垂直于 MITL 轴线)位置调节偏差造成的二者同轴度误差。因为空间局限性,采用量块或塞尺测量低压端和高压端两点的同心度,并认为内部其余各级和两端误差等同,该项误差指标统一取 0.5 mm。理论极限总误差与阴阳极间隙的比值见表中最后一列所示,可见除了第 1、2 级略高于 5% 外,其余各级均在 5% 以内,基本满足电气设计需求。

2.2 基础误差指标分配

根据云光二号加速器实际建设流程,首先在实验室现场焊接 Marx 发生器油箱,其中发生器输出法兰端面是装置整体的准直基准;感应腔支撑横梁先于感应腔进场安装,为确保感应腔在轨运行平顺及利于保证感应腔同轴精度,需要对支撑横梁导轨进行准直测量调节;感应腔在轨安装固定时,为确保感应腔与水线对接精度,需要对感应腔轴向位置尺寸进行准直测量调节;MITL 导轨先于 MITL 内筒进场安装,为确保 MITL 支撑结构在轨运行平顺及利于保证位置和角度调节精度,需要对 MITL 导轨进行准直测量调节。综合考虑测量方式和实施难度,上述四项基础误差指标分配如表 2 所示。

表 2 基础误差指标分配
Table 2 Allocation of fundamental alignment errors

No.	measured object	measuring items	criteria
1	generator output flange	verticality	$\pm 0.1^{\circ}$
2	cavity rail	horizontal position	± 1 mm
		height position	± 1 mm
3	cavity	axial position	± 5 mm
4	MITL rail	horizontal position	± 3 mm
		height position	± 1 mm

3 测量过程及结果

3.1 发生器输出法兰

利用激光跟踪仪,在焊接施工现场对 24 个输出法兰端面相对于水平面的垂直度指标进行测量,如图 2(a)所示,根据实时测量结果,对法兰四周箱体钢板进行支撑或侧拉调整,从而逐步消除误差。由于不可避免地存在焊接变形问题,法兰垂直精度时刻发生变化,必须进行实时监测并加以调整。此外,由于调整某个法兰精度时会对其周围法兰精度产生连锁影响,因此测量调节过程需要循环反复进行,直至焊接完成后复测。

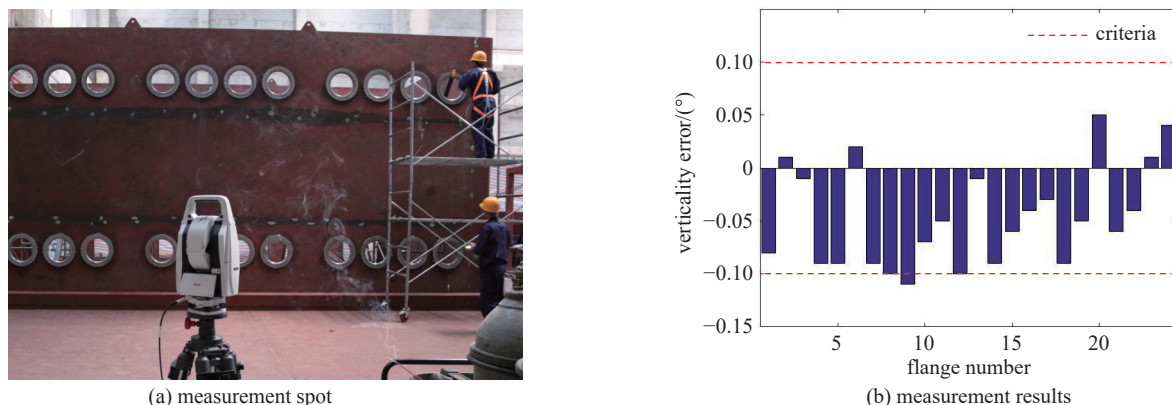


Fig. 2 Alignment measurement spot image and the results of generator output flanges

图 2 发生器输出法兰准直测量现场照片及结果

24 个输出法兰垂直度测量最终结果如图 2(b) 所示, 除 9 号法兰误差 -0.11° 略高之外, 其余 23 个法兰垂直度误差全部满足不超过 $\pm 0.1^\circ$ 的准直测量精度指标。考虑该误差影响较小, 为保证施工进度及避免无谓反复, 不再对 9 号法兰进行调整。基于完成准直测量的发生器输出法兰端面, 建立了加速器整体准直测量控制网, 得到装置安装坐标系, 确定感应腔及 MITL 的共同理论中轴线位置。

3.2 感应腔横梁导轨

利用直角转接靶标座测量感应腔导轨的内侧棱边, 如图 3(a) 所示, 沿整个导轨长度方向测量 9 个等距位置, 得到各测点坐标。根据测量值与理论值的偏差, 调节横梁立柱底座下方的可调垫铁、侧向顶丝调节各测点坐标, 从横梁一端依次调节, 直至 9 个测点坐标均处于允许误差范围内。在调节过程中, 由于后续的调节操作可能对前面已经调好的坐标产生影响, 且螺栓紧固时会产生协调变形, 因此测量过程需要多次循环反复, 最终确保在完成横梁紧固的情况下, 所有 9 个测点坐标符合精度要求。

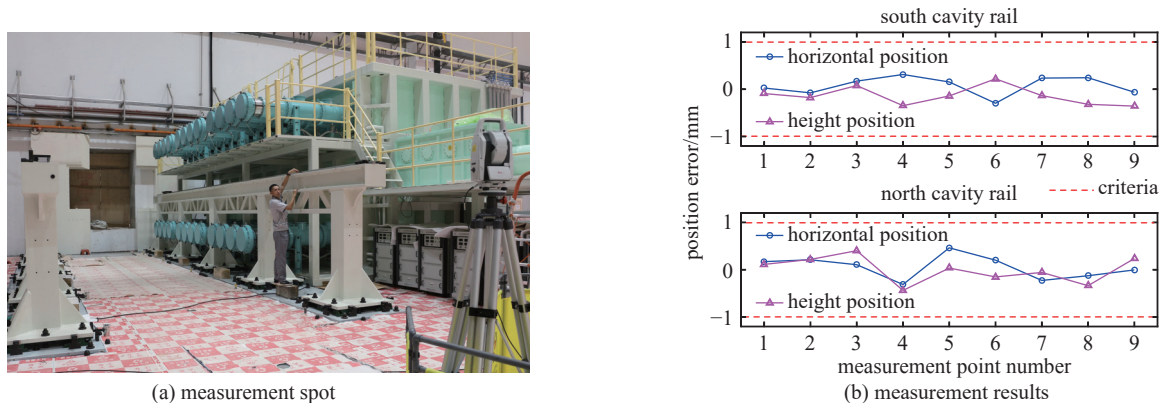


Fig. 3 Alignment measurement spot image and the results of cavity rails

图 3 感应腔导轨准直测量现场照片及结果

两条感应腔导轨的位置误差如图 3(b) 所示, 其中蓝色为水平尺寸误差, 红色为高度尺寸误差, 均相对于导轨的理论设计位置。根据测量结果, 南北两侧导轨的水平位置尺寸和高度位置尺寸的准直误差均小于 ± 1 mm, 达到了设计的精度指标要求, 为感应腔运行平顺和同轴度的保证打下良好基础。

3.3 感应腔

设计了一种能够实现感应腔内孔定心的激光跟踪仪靶标座机构, 其结构和实物如图 4(a) 所示。通过调节该机构四个方向的侧面顶丝, 使连接在旋转杆上的百分表周读数偏差小于设定阈值 (如 0.1 mm), 则此时所测坐标为感应腔中轴线的一侧端点。靶标座的中心设计了穿孔结构, 跟踪仪的光路可沿穿孔通过, 因此感应腔中轴线两端点测量可并行开展, 提高了测量作业效率。利用所设计的内孔定心靶标座机构及位于感应腔两侧的三维可调支撑机构, 对各级感应腔串联过程进行准直测量和调节, 在重点关注感应腔同轴度指标的同时, 兼顾轴向尺寸偏差情况并进行适当校正, 完成串联装配的 12 级感应腔如图 4(b) 所示。

最终准直测量结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 所示的是感应腔同轴度测量结果, 典型误差小于 0.1 mm, 最大误差

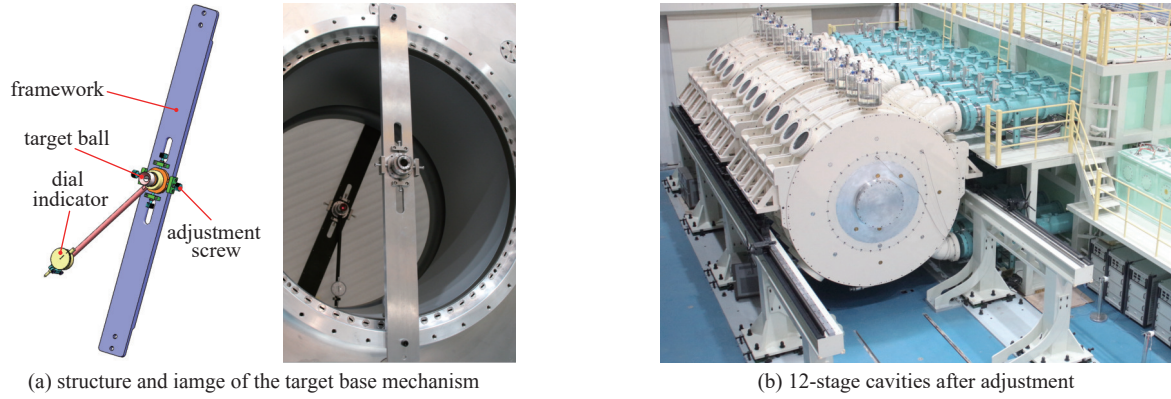


Fig. 4 Target base mechanism and 12-stage cavities after adjustment

图4 靶标座机构及利用其完成准直调节的12级串联感应腔

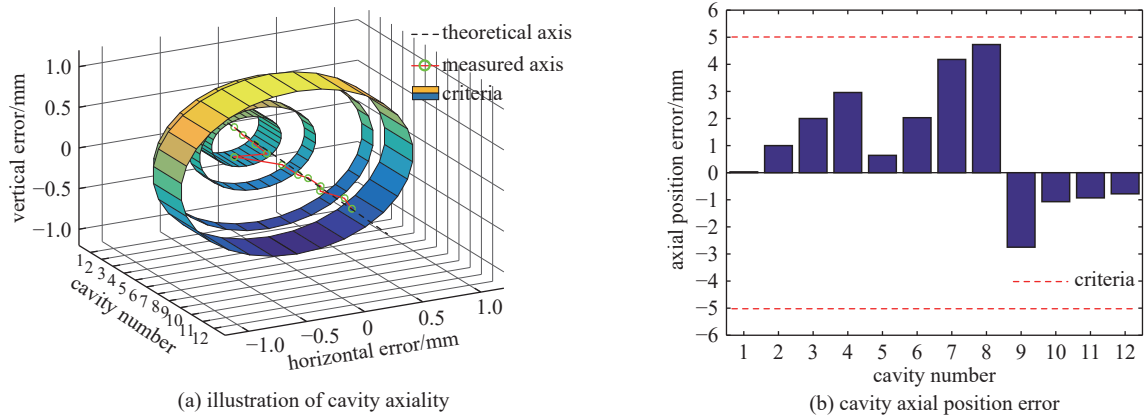


Fig. 5 Alignment measurement results of cavity coaxiality and axial position

图5 感应腔同轴度和轴向位置准直测量结果

小于 0.4 mm, 显著低于设计要求; 图 5(b) 所示的是感应腔轴向位置尺寸测量结果, 最大误差约 4.7 mm, 小于表 2 规定的误差准则, 满足设计要求, 测量效率大幅提升的同时有效保证了测量精度。

3.4 MITL 导轨

综合利用激光跟踪仪和绿线水平仪, 以感应腔横梁地底板为基准, 对 MITL 导轨的水平和高度位置进行了准直测量和调节, 测量结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 所示的是水平位置尺寸, 最大误差约 2 mm, 图 6(b) 所示的是高度位置尺寸, 最大误差小于 -1 mm, 均小于表 2 规定的误差准则。MITL 支撑结构在导轨上实际运行平顺, 未出现明显卡顿或偏移现象, 满足装置建设技术要求。

此外, 经倾斜垫片准直调节后, MITL 内筒整体挠度均未超过表 1 所规定的误差分配指标, 最大误差小于 ± 1.5 mm,

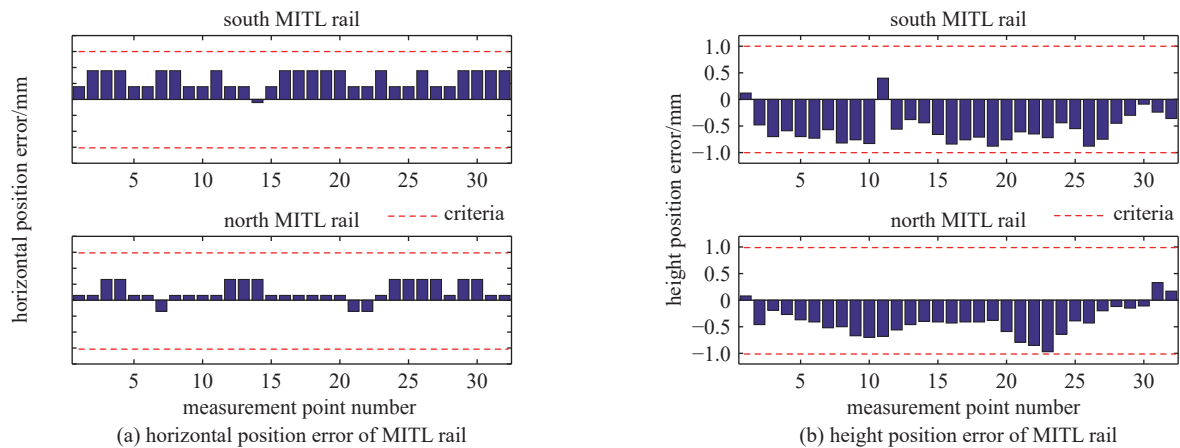


Fig. 6 Alignment measurement results of MITL rails

图6 MITL 导轨准直测量结果

因篇幅限制此处对具体数值结果不再赘述。至此完成了云光二号加速器各关键子系统的准直测量与调节,各项准直结果满足表1及表2制定的误差分配指标,达到了设计标准。装置目前已稳定运行数十发次实验,未出现明显的电流损失,验证了全系统准直测量与调节工作的有效性。

4 结 论

云光二号加速器从进场安装至联调出束,前后历时仅一年多时间,展现出了较高的工程实施效率。本文提出了以激光跟踪仪为核心测量手段的全系统准直测量方法,根据装置组成结构和可实现性进行了合理的误差分配,依次对包括发生器、感应腔及其导轨、MITL及其导轨在内的核心组部件进行了精确的准直测量和调节,各项精度指标达到或优于设计标准,有效保证了装置整体的安装精度和电气性能的可靠实现,为后续更大规模加速器建设奠定了良好的技术基础。下一步,应将准直测量和调节工作在装置设计阶段作为重点内容进行统筹考虑,针对性地优化零部件的机械设计和加工。

参考文献:

- [1] Ramirez J J, Prestwich K R, Johnson D L, et al. Performance of the Hermes-III gamma ray simulator[C]//7th Pulsed Power Conference. 1989: 26-31.
- [2] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. Physical Review Special Topic—Accelerators and Beams, 2004, 7: 064801.
- [3] 丛培天, 张国伟, 吴撼宇, 等. 3 MV 感应电压叠加器的磁感应腔研制[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 563-568. (Cong Peitian, Zhang Guowei, Wu Hanyu, et al. Design of inductive cavity for 3 MV induction voltage adder[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 563-568)
- [4] Hu Yixiang, Zeng Jiangtao, Sun Fengju, et al. Mathematical derivation of cell-driving-jitter effects on the risetime of IVA-output voltages[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 2040-2044.
- [5] Hu Yixiang, Sun Fengju, Zeng Jiangtao, et al. Influences of cell-driving sequences on performances of magnetically insulated induction voltage adders[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 1984-1988.
- [6] Ramirez J J, Hasti D E, Corley J P, et al. The four stage Helia experiment[C]//5th IEEE Pulsed Power Conference. 1985: 143-146.
- [7] 邓建军, 王劭, 谢卫平, 等. 面向 Z 箍缩驱动聚变能源需求的超高功率重复频率驱动器技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 100201. (Deng Jianjun, Wang Meng, Xie Weiping, et al. Super-power repetitive Z-pinch driver for fusion-fission reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 100201)
- [8] Burgess E L, Crowder G W, Dowdican M C, et al. Alignment of the HERMES-III magnetically insulated transmission line[C]//6th IEEE Pulsed Power Conference. 1987: 506-509.
- [9] 王铜, 董岚, 梁静, 等. 中国散裂中子源准直控制网数据处理方法[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 104002. (Wang Tong, Dong Lan, Liang Jing, et al. Adjustment method of control network for alignment in CSNS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 104002)
- [10] Vikas, Sahu R K. A review on application of laser tracker in precision positioning metrology of particle accelerators[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 232-249.
- [11] 吕伟, 闫逸花, 董岚, 等. 西安 200 MeV 质子应用装置准直测量与数据处理[J]. 现代应用物理, 2021, 12: 030410. (Lv Wei, Yan Yihua, Dong Lan, et al. Alignment measurement and data processing for Xi'an 200 MeV proton application facility[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12: 030410)
- [12] Manwiller P E. Three-dimensional network adjustment of laser tracker measurements for large-scale metrology applications[J]. Journal of Surveying Engineering, 2021, 147: 05020009.
- [13] 呼义翔, 曾江涛, 丛培天, 等. 一种快 Marx 发生器型感应电压叠加器: CN113162584A[P]. 2021-07-23. (Hu Yixiang, Zeng Jiangtao, Cong Peitian, et al. Fast Marx generator type induced voltage adder: CN113162584A[P]. 2021-07-23)
- [14] Hu Yixiang, Zeng Jiangtao, Sun Fengju, et al. Development of a Marx-coupled trigger generator with high voltages and low time delay[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87: 104708.
- [15] Holt T A, Lara M B, Nunnally C, et al. Compact Marx generators modified for fast risetime[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 1197-1200.
- [16] 何德雨, 呼义翔, 曾江涛, 等. 磁绝缘传输线阴极准直建模与仿真[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 66-72. (He Deyu, Hu Yixiang, Zeng Jiangtao, et al. Alignment modeling and simulation of magnetically insulated transmission line cathode[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 66-72)
- [17] Zou Wenkang, Chen Lin, Wang Meng, et al. Design of the magnetically insulated inductive adder for 50-stage LTD module[R]. 7th Euro-Asian Pulsed Power Conference, China.