



·粒子束及加速器技术·

CSNS 四极铁标定方案分析*

马 娜^{1,2,3}, 李 波^{1,2}, 董 岚^{1,2}, 王小龙^{1,2}, 门玲鸽^{1,2}, 王 铜^{1,2}, 梁 静^{1,2},
何振强^{1,2}, 柯志勇^{1,2}, 卢 尚¹, 韩圆颖¹, 闫路平¹, 张露彦¹, 闫皓月¹

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 东莞 523803; 3. 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘 要: 围绕 CSNS 四极铁的中心引出标定方案进行研究, 重点分析基于测磁平台获得的四极铁磁中心和旋转中心的偏差标准值; 同时对每块磁铁进行两遍旋转中心和机械中心标定, 比较其中心偏差标准值, 分析结果表明: 基于测磁平台获得的四极铁磁中心和旋转中心的偏差标准值为 0.1 mm; 通过两遍旋转和机械中心标定, 获得的 CSNS 四极铁的标定重复性精度在 0.03 mm 之内; 旋转和机械中心的偏差标准值为 0.1 mm。因此同类型、同准直精度要求的设备准直在无法实施磁中心标定情况下, 不能直接用机械中心代替旋转中心标定, 而采用旋转中心标定, 再叠加旋转和磁中心偏差进行改正的标定方案则能很好地满足当前设备准直的精度要求。

关键词: 四极铁中心标定; 机械中心; 旋转中心; 磁中心

中图分类号: TL99

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210512

Analysis of calibration schemes for CSNS quadrupole

Ma Na^{1,2,3}, Li Bo^{1,2}, Dong Lan^{1,2}, Wang Xiaolong^{1,2}, Men Lingling^{1,2}, Wang Tong^{1,2},
Liang Jing^{1,2}, He Zhenqiang^{1,2}, Ke Zhiyong^{1,2}, Lu Shang¹, Han Yuanying¹,
Yan Luping¹, Zhang Luyan¹, Yan Haoyue¹

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

3. School of Optics Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper focuses on the calibration of the quadrupole of CSNS about determination of the center of the devices, analyzes the standard deviation values of magnetic center and rotation center obtained by the magnetic measuring platform, and the one of rotation center and mechanical center after the calibration of each magnet twice. The results show that the standard deviation of magnetic center and rotation center of the quadrupole obtained by the magnetic measuring platform is 0.1 mm, the repeatability accuracy after the calibration of the rotation center and the mechanical center of the CSNS quadrupole twice is within 0.03 mm, and the standard value of the deviation between the rotation and the mechanical center is 0.1 mm. Therefore, if the magnet center calibration cannot be carried out for similar devices of the same accuracy, the calibration based on rotation center instead of mechanical center, with deviation correction of rotation center and magnetic center, can meet the accuracy requirements of the current equipment alignment. This study provides important reference and guidance for the calibration of similar devices in the future.

Key words: quadrupole center calibration, mechanical center, rotation center, magnetic center

中国散裂中子源(CSNS)是我国首台脉冲型散裂中子源,是由加速器提供高能质子轰击重金属靶而产生中子,利用其产生的中子在原子、分子尺度上研究物质的微观结构和运动规律的大型中子科学试验装置。自建成以来,随着加速器稳定运行和多条谱仪实验的开展,已取得多项重要科研成果。散裂中子源高性能运行离不开设备的精密准直,准直首先就要进行设备中心的精密引出标定^[1]。本文主要分析和研究 CSNS 的核心部件四极铁的标定。磁铁标定目前常用方法主要有机械中心标定(设备实体几何中心位置)和磁中心(磁铁磁场中心)标定。机械中心

* 收稿日期:2021-08-24; 修订日期:2022-04-01
基金项目:国家自然科学基金项目(12075246)
联系方式:马 娜, mana870518@163.com。
通信作者:李 波, libo@ihep.ac.cn。

标定简单,直接测量设备的机械基准面就可以进行中心引出,常用手段有激光跟踪仪、三坐标和摄影测量^[2-3];磁中心标定复杂,需多装置和后处理配合测量,有振动线^[4-6]、旋转线等方法^[7]。加速器物理关注的是磁场分布,磁中心标定较机械中心标定更严密,更符合物理需求。因此,针对四极铁不同的中心标定方法,有必要分析比较标定方法,在满足精度要求的前提下,制定更经济高效的标定方案。本研究基于测磁平台获得四极铁磁中心和旋转中心(测磁线圈的旋转轴)的偏差;同时对每块磁铁进行两遍旋转中心标定和机械中心标定,统计四极铁标定精度、分析了机械和旋转中心偏差,确定同类型、同准直精度要求的设备能否直接用机械中心替代旋转中心,利用旋转中心和磁中心偏差改正对机械中心标定结果修正的方案是否可行。

1 CSNS 环主要四极铁尺寸及精度要求

环形加速器周长约 230 m,由注入区、环加速区和引出区共四个象限的设备构成(如图 1 所示),其注入区剥离膜将负氢粒子剥离电子而获得质子,质子由环上相关设备加速到相应能量,最终由引出区的冲击铁引出到输运线。环加速器区的主要设备分为二极铁、四极铁、六极铁、高频腔和准直器等,其中四极铁主要用于束流的聚焦和散焦。环四极铁根据孔径的不同可分为 272Q、253Q、206Q 和 222Q 共 4 类,主要机械参数如表 1 所示,从中可知,CSNS 四极铁体积较大,宽、高均为 1 m 以上,总数 48 块。

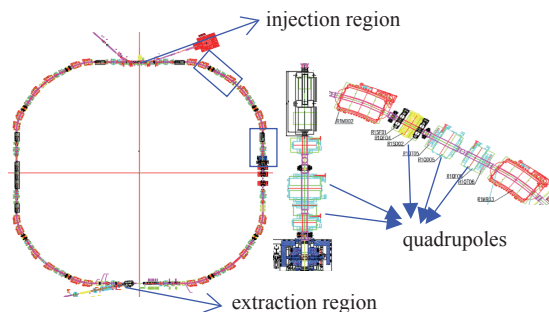


Fig. 1 Main quadrupoles' layout of CSNS's ring

图 1 CSNS 环主要四极铁布局

表 1 CSNS 环四极铁主要机械参数/mm

Table 1 Main mechanical parameters of quadrupole of CSNS's ring

category	aperture/mm	magnetic field length/mm	magnet core length/mm	magnet height/mm	quantity
206Q	206	410	320	1000	16
272Q	272	900	810	1340	16
222Q	222	450	370	1080	8
253Q	253	620	510	1240	8

设备准直的最终精度主要由隧道控制网精度、标定精度和最终的隧道调整精度决定。CSNS 四极铁的准直要求为横向 0.15 mm(水平面内垂直束流的方向),高程向 0.15 mm(垂直于水平面垂直向上),束流向 0.5 mm(束流运动方向),目前基于激光跟踪仪测量的百米级隧道控制网精度能达到 0.08 mm^[7-9],设备的隧道调整精度可控制在 0.05 mm,附加其他不可控因素,因此四极铁的标定精度至少应达到 0.08 mm,才能满足物理要求。设备准直需要设备的中心调整到束流线上,但设备的中心无法直接测量,因此需要通过标定将设备的中心引出到设备的基准点上,才能实现设备隧道准直。

2 机械中心引出标定

磁铁中心轴有机械轴、旋转中心轴和磁中心轴,它们之间均存在着一个微小的偏差。机械中心标定较简单,跟踪仪直接测量设备各基准面(基准面的结构、尺寸和加工精度在设计中均已经确定,标定中基准面需合理、均匀的布设点位,至少两次标定确保标定可靠),实现机械中心引出;磁中心标定复杂,需多装置和后处理配合获得,但标定过程严密,精度高。物理提出的准直要求是基于磁中心,加速器磁铁以磁中心标定为最佳,但由于其标定装置、过程均比较复杂,再能满足准直要求的情况下,实际通常采用机械中心引出标定。

CSNS 四极铁模型图 2 所示,主要部件是 4 块对称的铁芯,铁芯的极头上均设计了测量基准面,跟踪仪对四极铁详细的机械中心标定方法为:(1)测量上下极头基准面获得水平极缝中心面;(2)测量前后极头基准面获得竖直极缝中心面;(3)水平极缝和竖直极缝中心面的交线就是机械中心线,作为标定系的 Z 轴;(4)水平极缝中心面的垂直向上的法线为 Y 轴;(5)机械中心线与磁铁左右端面交点的中点为原点。

通过以上方案建立磁铁标定坐标系如下:机械中心线为 Z 轴(束流方向),磁铁水平面内垂直向上为 Y 轴(高程方向),水平面内垂直于 Z 轴的为 X 轴(横向)的右手坐标系,实现磁铁机械中心引出到磁铁顶部的基准点上(如图 2 所示)。但该方案建立的机械中心与磁中心无关,仅依靠机械中心标定是否能够满足物理需求无从得知,因此

下面介绍基于磁铁测磁平台的旋转中心引出标定。

3 旋转中心的标定方案

测磁线圈安装在磁铁孔径中,利用一系列装置实现测磁线圈以恒定的角速度切割磁力线旋转,从而获得磁场参数以及测磁线圈的旋转中心和磁中心的偏差^[10]。若能对旋转中心引出标定,再对旋转中心和磁中心的偏差进行改正,就相当于间接地进行磁中心标定,实现了低成本的精密标定,具体标定方案如下。

3.1 测磁平台及准直

磁铁测磁平台如图3所示,主要由安装测磁线圈的前后基台、磁铁安装基台、测磁线圈和数据采集端组成。测磁平台的准直主要分两步:

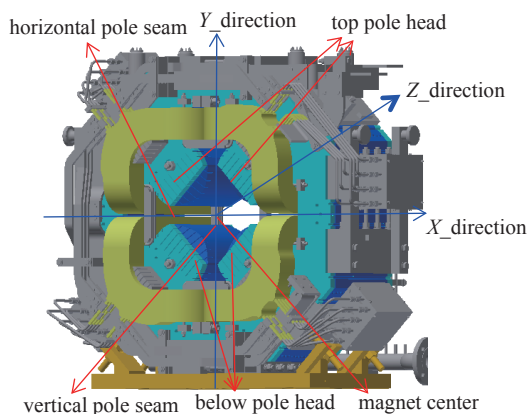


Fig. 2 Diagram of the quadrupole model and device coordinate

图2 四极铁模型和设备坐标系示意

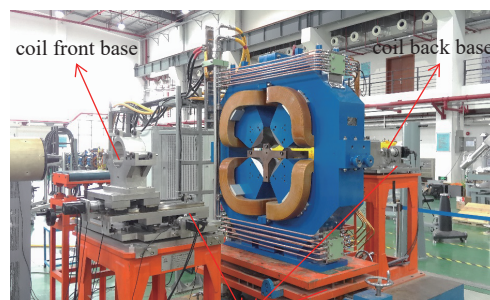


Fig. 3 Magnetic measuring platform

图3 磁铁测磁平台

(1)测磁线圈前后基台的同轴调整。水准仪将测磁线圈的前后基台高度精密调整到同一高度,确定测磁线圈的高度位置;经纬仪将安装测磁线圈的前后基台精密调整到一条直线,横向确定测磁线圈位置;测磁线圈前后基台定位后,前后基台和工具经纬仪横向一致,前后基台和水准仪同高,此时仪器位置不再移动。

(2)磁铁和测磁线圈的同轴调整。磁铁的调整通过极头上安置磁铁准直基准件实现,不同类型磁铁准直基准件尺寸不同,但结构类似。如图4所示基准件为十字架结构,水平向安置两个、垂直向安置一个观测目标。调整时基准件下端安置于磁铁下极头上,下端侧面部分与磁铁下极头的侧面相贴合,水平向两个观测目标位于磁铁的水平中心面上,垂直向观测目标位于磁铁的垂直中心面上。通过已经定位水准仪和两个水平观测目标,利用磁铁基准调整工装实现磁铁中心与测磁线圈的等高,高程最终调整精度 0.05 mm;通过经纬仪和垂向基准点实现磁铁中心和测磁线圈的横向一致,横向最终调整精度 0.05 mm。

3.2 旋转中心引出标定

利用测磁线圈中心进行标定,就需对测磁线圈的旋转中心进行引出(图5)。旋转中心引出方案是在测磁结束后,在测磁线圈两端端面上分别固定两个激光跟踪仪靶球,设置测磁线圈按照一定的角度旋转,每旋转一个角度,就采用激光跟踪仪对靶球进行测量,直至完成一圈旋转,以测磁线圈两端的测量值分别拟合圆,这两个圆的圆心连线就是旋转中心线,作为旋转中心引出标定坐标系的Z轴,X和Y轴的建立方案与机械中心标定坐标轴建立方案一致,最终建立旋转中心和磁铁基准点之间的关系。

通过以上测磁平台测磁获得的磁场中心测量重复性误差 0.03 mm^[10],获得CSNS主要48块四极铁旋转中心和磁中心的偏差如图6、7所示。从图6、7可知,四极铁的旋转中心和磁中心在X和Y两个方向的偏差均在0.1 mm左右,个别铁的偏差达到0.2 mm。可见若采用旋转中心标定,标定完成后进行旋转中心和磁中心的偏差改正可间接的获得设备基准点和磁中心的精密关系,确保设备精密定位。

4 旋转中心和机械中心偏差分析

从测磁的准直可知,旋转中心和磁铁的相互定位也是依靠磁铁的机械实体,本质也是一种机械中心定位方法。综上所述,机械中心是利用四极铁全部极头的对称面采用激光跟踪仪测量获得;测磁线圈旋转中心和磁铁的相互准直是根据两个下极头和一个上极头的侧基准面通过光学仪器实现,这两个方法采用的基准面、测量仪器均

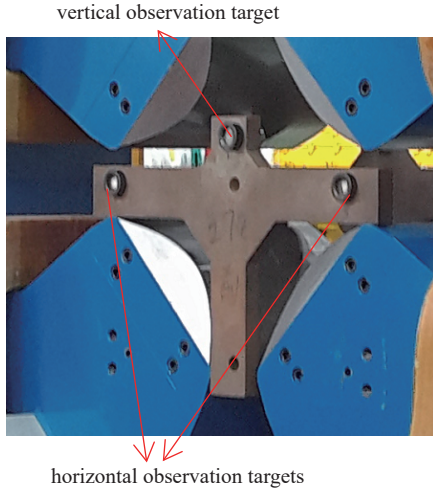


Fig. 4 Magnet collimation reference parts
图 4 磁铁准直基准件

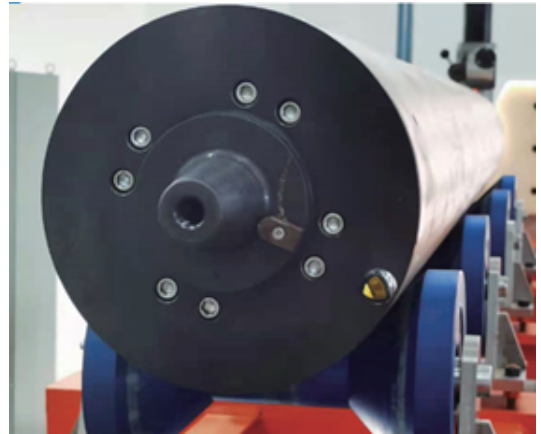


Fig. 5 Calibration of the rotation center
图 5 旋转中心引出标定

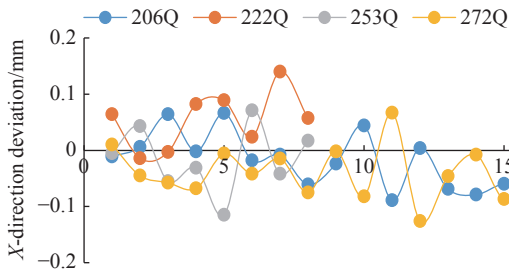


Fig. 6 X-direction deviation between rotation center and magnetic field center
图 6 旋转中心和磁中心 X 向偏差

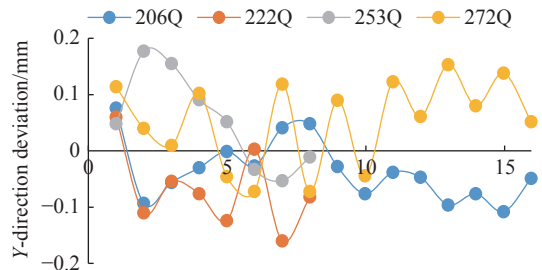


Fig. 7 Y-direction deviation between rotation center and magnetic field center
图 7 旋转中心和磁中心 Y 向偏差

有不同,同时也受机械加工精度的影响,因此机械中心和旋转中心之间会存在一个偏差。旋转中心引出标定是基于测磁平台的在线标定,需要测磁设备和人员相互配合,比直接的机械中心标定费时、费力。若机械中心标定和旋转中心标定分别确定的中心的偏差在限差范围内,可认为机械中心可以代替旋转中心,就无需在测磁平台上进行旋转中心标定,可直接线下机械中心标定,再进行旋转中心和磁中心偏差改正获得最终标定值。为分析这两者中心偏差的大小,对 48 块四极铁在旋转中心标定的基础上又进行了线下机械中心标定。

4.1 磁铁标定精度分析

为确保标定可靠,每块磁铁均进行两遍独立标定,因此每块铁可获得两个机械中心与旋转中心的偏差,其 2 次中心偏差的偏差(即 2 次标定的一致性)可评估 CSNS 四极铁的标定精度。表 2 示出了 CSNS 的 4 类四极铁两遍标定下机械中心与旋转中心偏差的偏差,可知,4 类共 48 块 CSNS 四极铁机械中心与旋转中心偏差的偏差横向最大值 0.06 mm,高程方向最大值 0.08 mm,且偏差标准值均在 0.03 mm 之内,可见机械中心和旋转中心的标定均是可靠的,且 CSNS 四极铁的标定重复性精度达到 0.03 mm。

4.2 旋转中心和机械中心偏差

CSNS 四极铁要求 0.08 mm 的标定精度,4.1 节获得标定重复性精度 0.03 mm,可知机械中心和旋转中心偏差在

表 2 两次标定下机械中心与旋转中心偏差的偏差

Table 2 Deviation of deviation between mechanical center and rotation center under two calibrations

magnet type	maximum deviation/mm	minimum deviation/mm	deviation standard deviation/mm	maximum deviation/mm	minimum deviation/mm	deviation standard deviation/mm
	X-direction			Y-direction		
206Q	0.04	-0.06	0.02	0.02	-0.04	0.01
222Q	0.03	-0.06	0.03	0.05	-0.03	0.03
253Q	0.04	-0.03	0.02	0.02	-0.05	0.02
272Q	0.03	-0.04	0.02	0.05	-0.08	0.03

0.07 mm 之内就能满足标定需求。图 8、图 9 分别示出 4 类四极铁线下机械中心和旋转中心在 X 和 Y 向的偏差,表 3 对偏差进行了统计。其中有 5 块磁铁的横向 X 方向的偏差达到 0.2 mm,有 3 块磁铁在高程 Y 方向的偏差也达到 0.2 mm,48 块四极铁机械中心和旋转中心的偏差的标准值在 0.1 mm 之内,即这两类方案确定的中心有 0.1 mm 的偏差,该偏差是由于包含磁铁的加工精度、测磁线圈的准直等多因素引起的。可见直接利用机械中心标定代替旋转中心标定,再进行旋转中心和磁中心的偏差改正无法满足精度需求。因此,必须采用旋转中心标定方法,在旋转中心的标定结果基础上再进行旋转和磁中心改正,从而获得更高的标定精度,实验表明该方法严密、可靠,可为后期同类、同准直精度要求的设备标定提供借鉴。

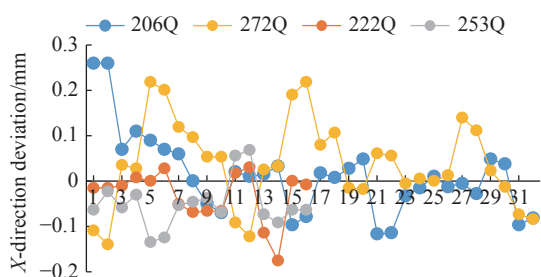


Fig. 8 X-direction deviation between rotation center and mechanical center

图 8 旋转中心和机械中心 X 向偏差

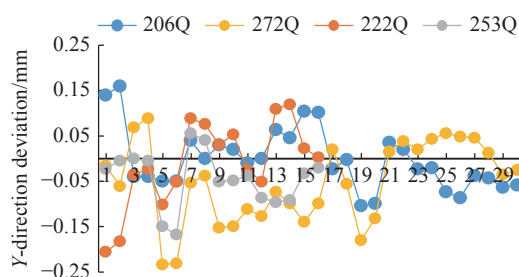


Fig. 9 Y-direction deviation between rotation center and mechanical center

图 9 旋转中心和机械中心 Y 向偏差

表 3 机械中心和旋转中心偏差统计

Table 3 Deviation statistics of mechanical center and rotation center

magnet type	maximum deviation/mm	minimum deviation/mm	deviation standard deviation/mm	maximum deviation/mm	minimum deviation/mm	deviation standard deviation/mm
	X-direction			Y-direction		
206Q	0.26	-0.12	0.09	0.16	-0.10	0.06
222Q	0.03	-0.18	0.06	0.12	-0.21	0.09
253Q	0.07	-0.13	0.07	0.06	-0.17	0.07
272Q	0.22	-0.14	0.10	0.09	-0.23	0.10

5 结 论

CSNS 核心设备四极铁的标定精度是加速器高效稳定运行的前提。本文重点研究机械中心和旋转中心的引出标定方案,并对两种方案的精度误差进行分析比较,结果表明:基于测磁平台获得的四极铁磁场和旋转中心的偏差标准值为 0.1 mm;通过两遍旋转和机械中心标定,获得的 CSNS 四极铁的标定重复性精度在 0.03 mm 之内;旋转和机械中心标定获得的中心偏差标准值为 0.1 mm。因此同类型、同准直精度要求的设备在无法实施磁中心引出标定的情况下,不能直接用机械中心代替旋转中心进行标定,可采用基于测磁线圈的旋转中心标定,最后对标定值进行旋转中心和磁中心偏差改正,该方案间接的、严密的将磁中心引出到基准点上,满足设备准直精度要求。

参考文献:

- [1] 王铜, 梁静, 董岚, 等. 粒子加速器设备标定中基准面引出研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(8): 1524-1527. (Wang Tong, Liang Jing, Dong Lan, et al. Research on layout of datum plane in equipment fiducialisation of particle accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(8): 1524-1527)
- [2] 梁静, 罗明成, 王铜, 等. 粒子加速器中高精度丝线绝对位置测量技术研究[J]. 测绘通报, 2019(9): 44-50. (Liang Jing, Luo Mingcheng, Wang Tong, et al. Research on the wire absolute position measurement technology of high accuracy in particle accelerator[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(9): 44-50)
- [3] 梁静, 董岚, 王铜, 等. 激光跟踪仪在CSNS高频腔预准直中的应用[J]. 地理空间信息, 2017, 15(3): 12-13,19. (Liang Jing, Dong Lan, Wang Tong, et al. Application of laser tracker in the pre-alignment of RF cavity for CSNS[J]. Geospatial Information, 2017, 15(3): 12-13,19)
- [4] 吴蕾, 王小龙, 李春华, 等. 高能同步辐射光源验证装置振动线准直系统结构设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 095102. (Wu Lei, Wang Xiaolong, Li Chunhua, et al. Design of vibrating wire alignment system for HEPS-TF[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 095102)
- [5] 王小龙, 吴蕾, 陈素颖, 等. 振动线数据采集和数据处理方案设计与验证[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 125106. (Wang Xiaolong, Wu Lei, Chen Suying, et al. Design and experiment of vibrating wire data acquisition and processing system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 125106)
- [6] 吴蕾, 王小龙, 李春华, 等. 振动线准直技术的原理和研究概述[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2479-2486. (Wu Lei, Wang Xiaolong, Li Chunhua, et al.

- Theory and research overview of vibrating wire technique[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(10): 2479-2486)
- [7] Penicka J M, Collins J, Doose C, et al. Alignment strategy for APS upgrade[C]//Proceedings of the 14th International Workshop on Accelerator Alignment. Grenoble: ESRF, 2016.
- [8] 马娜, 董岚, 梁静, 等. 中国散裂中子源隧道控制网测量方法及精度探讨[J]. [核科学与工程](#), 2018, 38(3): 411-416. (Ma Na, Dong Lan, Liang Jing, et al. Measurement of the tunnel control network of CSNS and accuracy research[J]. [Nuclear Science and Engineering](#), 2018, 38(3): 411-416)
- [9] 陈文军, 马力楨, 蔡国柱, 等. 武威重离子治癌装置高能束线的准直安装[J]. [强激光与粒子束](#), 2015, 27: 085102. (Chen Wenjun, Ma Lizhen, Cai Guozhu, et al. Alignment of high energy line for Wuwei heavy ion medical machine[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2015, 27: 085102)
- [10] 周建新, 康文, 李帅, 等. 中国散裂中子源旋转线圈测量系统研制[J]. [强激光与粒子束](#), 2018, 30: 105101. (Zhou Jianxin, Kang Wen, Li Shuai, et al. Development of rotating coil measurement system for China Spallation Neutron Source[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2018, 30: 105101)