EAST上E//B中性粒子分析仪电磁分析单元及探测器屏蔽体的设计

朱建军[1,2] 徐 明[2] 刘 洋[2] 林展宏[2]

1（安徽理工大学 淮南 232001）

2（中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所 合肥 230026）

摘要 为满足先进实验超导托卡马克（Experimental Advanced Superconducting Tokamak，EAST）装置中快离子分布函数的诊断需求，设计了电场-磁场平行构型中性粒子分析仪（E//B NPA）。完成了E//B NPA核心部件的紧凑型设计，包括以下三个部分：1）永磁体结构优化；2）电场位型优化；3）探测单元磁屏蔽设计。通过磁轭等厚设计规避磁通瓶颈与磁饱和风险，改变磁体部件的参数让不同尺寸方案实现相同的磁隙磁感应强度，使得磁体体积和重量均降低12%左右，同时选用折线形平直段更短的磁隙提升离子偏转能力；搭配16 mm间距、12 kV电压以及倾斜7°下极板的静电偏转器，将粒子精准分为上中下三行；探测器单元采用光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）阵列，为PMT探测器创新设计井字形格栅磁屏蔽结构，磁屏蔽能力比国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）方案强37%。该E//B NPA可测量能量范围是H^+（30~440 keV）、D^+（15~220 keV）、T^+（10~143 keV），实现了有质量分辨的快离子能谱诊断。

关键词 中性粒子分析仪，永磁体，PMT探测器，磁屏蔽

中图分类号 TL62+6

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250381

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250381

Design of the electromagnetic analysis unit and detector shielding structure for the EAST E//B neutral particle analyzer

ZHU Jianjun[1,2] XU Ming[2] LIU Yang[2] LIN Zhanhong[2]

1(*Anhui University of Science and Technology*, *Huainan 232001*, *China*)

2(*Institute of Plasma Physics*, *Hefei Institute of Physical Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Hefei 230026*, *China*)

Abstract **[Background]** During operation, the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) device requires precise diagnosis of fast ion distribution functions, which is a critical requirement for conducting plasma physics research and ensuring stable operation of the device. **[Purpose]** This study aims to meet the diagnostic requirements for fast ion distribution functions in the EAST device, and thus designs an electric field-parallel neutral particle analyzer (E//B NPA) to achieve precise diagnostics of fast ions, hence to meet the diagnostic requirements for fast ion distribution functions in the EAST device. **[Methods]** The core work focused on three key areas. Firstly,

国家重点研发(No.2024YFE03170001)、国家自然科学基金面上项目(No.12575216)资助

第一作者：朱建军，男，1999年出生，2022年毕业于安徽理工大学，现为硕士研究生，研究领域为聚变等离子体诊断

通信作者：徐明，E-mail：mxu@ipp.ac.cn

收稿日期：2025-10-10，修回日期：2025-12-11

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2024YFE03170001), General Program of National Natural Science Foundation of China (No.12575216)

First author: ZHU Jianjun, male, born in 1999, graduated from Anhui University of Science and Technology in 2022, master student, focusing on fusion plasma diagnostics

Corresponding author: XU Ming, E-mail: mxu@ipp.ac.cn

Received date: 2025-10-10, revised date: 2025-12-11

permanent magnet structure optimization for a permanent magnet system was constructed using low-carbon steel magnetic yoke, NdFeB permanent magnets, and specially configured magnetic poles. Uniform thickness design was applied to the magnetic yoke to mitigate magnetic flux bottlenecks and saturation risks, while a zigzag-shaped air gap with shorter straight segments was selected to enhance ion deflection capability. Subsequently, the distribution of magnetic induction intensity within the magnetic gap was simulated and calculated using COMSOL software. Then, an electrostatic deflector with 16 mm spacing, 12 kV voltage, and a 7° tilt angle for the lower plate was integrated to optimize the electric field profile. Finally, magnetic shielding for the detection unit: magnetic shielding for the detection unit was implemented through a photomultiplier tube (PMT) array with an innovative grid-pattern magnetic shielding structure. **[Results]** The calculation results show that both the volume and weight of the optimized magnet are reduced, the electrostatic deflector precisely separates particles into upper, middle, and lower rows whilst the magnetic shielding capability of the grid-like magnetic shielding structure exceeds the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) design by 37%. Simulation verification results demonstrate that this designed E//B NPA can measure hydrogen (30~440 keV), deuterium (15~220 keV), and tritium (10~143 keV) across their respective energy ranges through charged particle trajectory. **[Conclusions]** The E//B NPA proposed in this study has successfully achieved mass-resolved fast ion spectrum diagnostics, effectively meeting the diagnostic requirements for fast ion distribution functions in the EAST device.

Key words Neutral particle analyzer, Permanent magnet, PMT detector, Magnetic shielding

托卡马克（Tokamak）是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容器，该装置的设计目标是通过维持稳定的等离子体状态，在可控的环境中实现核聚变反应。快离子用于加热背景等离子体，因此，精确掌握快离子的空间分布、能量分布及其输运行为，对于优化加热效率、抑制由快离子激发的不稳定性，以及保障装置第一壁安全具有至关重要的意义。为深入探究快离子行为，实验上已发展出多种先进的诊断技术，可以通过测量中子产额来反映快离子的分布，及其对等离子体的加热效果等物理参数[1-2]。此外还发展出了快离子损失探测器（Fast Ion Loss Detector system，FILD）[3-4]和中性粒子分析仪（Neutral Particle Analyzer，NPA）等可直接诊断快离子参数的专用技术。中性粒子分析仪作为聚变装置的关键诊断设备之一[5-7]，其核心功能为监测与测量等离子体D/T燃料比、快粒子分布函数等关键物理参数。其中，电场-磁场平行构型中性粒子分析仪（E//B NPA）因集成宽能谱覆盖、高精度质谱分析及高时间分辨率三大优势，已成为当前国际主流聚变装置中不可或缺的诊断系统。该构型的命名“E//B”源于其核心工作机制：对中性粒子经剥离过程形成的离子，通过平行电场（$\boldsymbol{E}$）与磁场（$\boldsymbol{B}$）的协同作用实现质量与能量的双重分离[8]。

目前，国际范围内已建成多台E//B NPA，其技术路线与应用场景呈现多样化特征。早在1990年左右，美国普林斯顿等离子体物理实验室（Princeton Plasma Physics Laboratory，PPPL）设计的E//B NPA[9]通过叠加电磁场实现H、D、T三种同位素离子的质量与能量分辨，其对不同质量粒子的能量测量范围满足$0.5<A\cdot E<600$（其中，A为离子质量数，E为离子能量），核心结构包含氦气环境气体剥离室、D形电磁铁及微通道板探测器（Micro-Channel Plate，MCP）。俄罗斯约飞（Ioffe）物理技术研究所研制的同位素分离器（Isotope Separator，ISEP）诊断系统[10]采用串联电磁场构型实现离子的质量与能量分离，可覆盖多同位素的宽能量测量范围：H^+（5~740 keV）、D^+（5~370 keV）及T^+（5~250 keV），该系统的核心部件包括超薄碳膜、分体式电磁铁、静电偏转器及闪烁体耦合光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）探测器。为解决传统NPA体积过大的工程问题，Ioffe研究所进一步研发出紧凑型串联构型NPA（Compact Neutral-Particle Analyzer，CNPA）[11]，其关键改进在于将原电磁铁替换为体积更小巧的永磁铁，并将探测器升级为通道电子倍增器（Channel Electron Multiplier，CEM）；该系统的测量能量范围为H^+（0.8~80 keV）与D^+（0.66~36 keV），目前已搭载于大型螺旋装置（Large Helical Device，LHD）与托卡马克位形可变装置（Tokamak à Configuration Variable，TCV），成功应用于不同能量快中性粒子通量的测量任务[12-13]。在聚变装置的前瞻性应用中，国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）等下一代装置已明确将E//B NPA规划为D/T燃料比的核心测量设备[14-16]。而在联合欧洲环（Joint European Torus，JET）装置的聚变实验中，E//B NPA已实现快离子能量分布的诊断测量[10]，为聚变等离子体物理研究提供了关键数

据支撑。在国内，四川大学和核工业西南物理研究院联合研制出的E//B NPA[17]已经搭载于环流三号（HL-3）装置上，该系统的核心部件包括氢气环境气体剥离室、永磁铁及闪烁体耦合硅光电倍增管探测器；该系统的测量能量范围H^+、D^+均为（10~200 keV）。

本文围绕先进实验超导托卡马克（Experimental Advanced Superconducting Tokamak，EAST）装置上E//B NPA的电磁分析单元及探测器系统展开设计研究。整体工作遵循从核心部件优化到系统集成验证的思路：首先，聚焦于电磁分析单元，通过仿真优化完成了永磁体系统的紧凑化设计、静电偏转器的粒子轨迹控制设计；其次，针对EAST装置的强磁场环境，创新设计了探测器单元的磁屏蔽结构；最后，通过带电粒子轨迹模拟，对整个系统的离子分离与探测性能进行了验证。

1 整体布局

本文研发的串联型E//B NPA，其设计理念基于CNPA的技术框架，且核心参数已匹配EAST装置快离子诊断的特定需求。如图1所示，该系统主要由剥离单元（碳膜）、电磁分析单元（磁场和电场分析单元）及探测器阵列三大核心单元构成。

剥离单元的核心功能是实现快中性粒子的电离，该单元可采用碳膜剥离或气体剥离[17]装置。碳膜剥离方式由于碳膜原子密度高，与中性粒子束相互作用的概率大，因此，通常能获得较高且稳定的电离效率；并且剥离膜可以非常简单地被安装在一个真空室内的支架上，无需额外的复杂子系统，整体装置结构相对简单并且体积小。其缺点是：粒子穿透薄膜时会与薄膜原子发生多次随机的碰撞和散射，使原本单能的粒子束在出射后具有一个微小的能量损失和角度分散，尤其是对能量低于10 keV的粒子，强散射会导致在低能量区间检测效率降低[11]，且其厚度极薄，容易破裂。气体剥离方式由于气体密度远低于固体，粒子与气体分子的碰撞平均自由程长，发生多次随机碰撞的概率显著降低，因此粒子束的能量损失和角度分散非常小，可以最大限度地保持入射粒子的原始能量和方向信息；且其只需要稳定的气体供应就可以持续工作，无需因介质损耗而停机维护，可靠性高。其缺点是：气体密度低，导致电离效率通常较低，且需要一套精密的差分抽气系统，系统设计、制造和控制难度大，成本高；并且还存在体积偏大、重量较高的局限。考虑到在EAST上正在应用的成像中性粒子分析仪（Imaging Neutral Particle Analyzer，INPA）使用碳膜方案电离中性粒子[18]已经经过多轮实验验证，在EAST环境下依然可以保持较高的稳定性，且探测能量范围高于10 keV，避开了碳膜受局限的能量段，因此，本研究最终选用碳膜剥离方案。

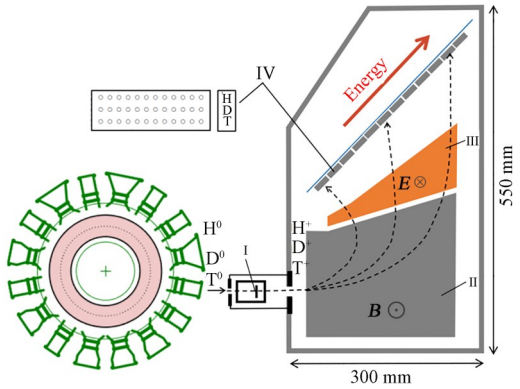


图1 EAST托卡马克上设计的E//B NPA示意图
I-碳膜；II-磁场分析单元；III-电场分析单元；IV-探测器阵列
Fig.1 Schematic diagram of the E//B NPA designed on the EAST Tokamak
I-stripping foil; II-analyzing magnet; III-analyzing electrostatic condenser; IV-detector array

电磁分析单元的具体结构如图2所示。磁轭与磁极都采用了低碳钢材料。其中，磁极采用特殊结构设计，通过几何形状优化实现磁场梯度的精确调控与离子轨迹的聚焦功能；磁轭核心作用是构建低磁阻闭合磁路，利用高磁导率特性对外部磁场形成有效屏蔽，减少环境磁场干扰，并且起到整体支撑作用。钕铁硼磁体板夹置于磁轭与磁极之间，其在磁隙间可以产生0.75 T左右的磁感应强度，为系统提供稳定的磁场源。电场形成部件采用两块经抛光处理的无氧铜电极板，下极板倾斜一定角度，使得所有粒子都可以轰击在探测器上，并且稳定提供离子质量分离能力。

探测系统由光电倍增管与微米级厚度闪烁体层耦合组成，选用的光电倍增管响应速度快并且典型

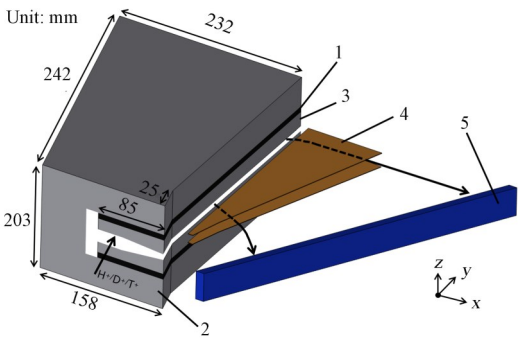


图2 电磁分析单元的整体布局图
1–钕铁硼永磁铁；2–磁轭；3–磁极；4–静电偏转器；5–探测器面
Fig.2 Overall layout diagram of electromagnetic analysis unit
1-Permanent magnet; 2-Magnet yoke; 3-Magnet pole; 4-Electrostatic deflector; 5-detectors

增益可以达到150万倍，足以将单个光子撞击光电阴极后产生的微弱光电子信号放大到足以被常规电子电路轻松识别和处理的水平。其拥有的卓越的弱光探测能力，能够确保闪烁体的微弱亮度也可以转化为信号强度。该结构具备低中子-伽马灵敏度与高中性粒子探测效率的双重特性，可满足EAST装置复杂辐射环境下的测量需求。

2 电磁分析单元研究

2.1 磁轭部件结构设计

在E//B NPA的分析磁体的结构设计中，磁轭作为闭合磁路和屏蔽外部干扰的关键组件，其厚度参数优化直接关系到设备性能与工程可行性。磁轭需同时满足三重矛盾需求：1）磁屏蔽效能，需有效衰减聚变装置本体及周边设备产生的外部杂散磁场，防止离子轨迹畸变；2）磁饱和极限，需承载高磁通密度，避免软磁材料进入饱和区，导致磁路磁阻急剧增大，进而影响分析精度；3）轻量化约束，在紧凑型NPA中，磁轭重量占比超60%，过厚结构将增加聚变装置狭小安装空间内的装配难度。

针对上述磁轭设计中的三重矛盾，对磁轭厚度展开专项优化分析。为规避低碳钢等软磁材料进入磁饱和区，工程设计中常通过增加磁轭厚度以提升磁通承载能力，但该措施可能对磁隙的磁感应强度分布产生影响。该设计使用了COMSOL软件对磁隙内的磁感应强度分布进行了模拟计算。这是一个同时支持多物理场耦合与单物理场模拟的仿真平台，其模型开发器完整覆盖从几何定义、材料属性设置、物理场描述，到数值计算与结果分析的全生命周期。基于仿真，将磁轭划分为如图3所示的a、b三个区域。通过控制变量实验：固定左侧磁轭a的厚度参数，逐步增加上下侧磁轭b厚度，监测磁隙处磁感应强度的变化规律。模拟结果显示，磁隙处的磁感应强度未随b区域厚度的增加呈现显著变化，如图4所示。上述现象的核心机理在于：当磁轭存在局部薄区（如固定厚度的a区域）时，该区域成为磁路中的“磁通瓶颈”，即便增加b区域的厚度，整体磁路的磁通密度仍受限于薄区的承载能力，导致磁隙磁场无法有效提升。由此可得出设计优化结论：在磁轭结构设计中，应优先采用等厚构型，通过消除局部薄区打破磁通瓶颈，既能保障磁路内磁场分布的均匀性，又能降低局部区域因磁通集中引发的磁饱和风险，满足紧凑型NPA的轻量化工程需求。

图5呈现了磁隙磁感应强度、磁轭总重量及磁轭内部磁通密度最大值随磁轭厚度变化的定量关系。在磁轭整体等厚的控制条件下，通过改变磁轭厚度参数，监测磁隙磁感应强度与磁轭总重量的动态变化规律。由图中数据可知：磁隙磁感应强度峰值随磁轭厚度增加呈现“阶段性变化”特征，即初期随厚度增大呈显著上升趋势，当厚度超过特定阈值后，增长幅度逐渐趋于平缓；而磁轭总重量则随厚度增加呈现近似线性增长特征。

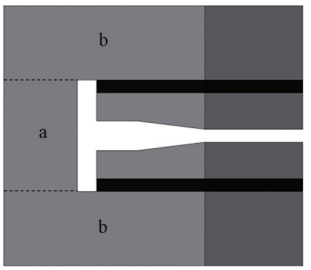


图3 磁体示意图
Fig.3 Schematic diagram of magnet

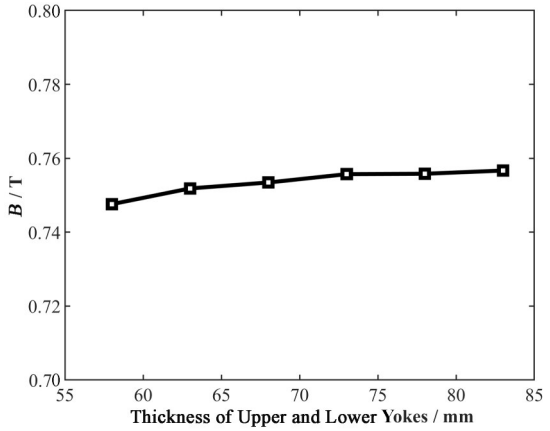


图4 左边磁轭不变时，磁感应强度随上下磁轭厚度的变化关系
Fig.4 Variartion of magnetic induction intensity with the thickness of the upper and lower magnetic yokes when the left yoke remains unchanged

需注意的是，磁轭所用低碳钢属于非线性铁磁材料，具备高初始磁导率特性，其导磁能力随磁场强度（$\boldsymbol{H}$）的变化严格遵循材料固有 B-H 曲线规律[19]。当材料内部磁感应强度达到饱和值后，磁导率会急剧下降，导磁性能显著劣化，进而导致磁路磁通传输效率降低。由图5进一步可知，磁轭内部磁通密度最大值随厚度增加呈递减趋势；当磁轭厚度处于40~50 mm时，低碳钢材料因磁通密度集中，进入磁饱和区的风险显著升高。综合权衡磁隙磁感应强度的工程需求、磁轭轻量化的装配约束，以及材料磁饱和风险的规避目标，最终确定本研究中磁轭的最优厚度约为60 mm。

2.2 钕铁硼永磁铁部件单元

作为永磁系统的核心组件，钕铁硼磁铁板（剩磁 B_r=1.2 T）与磁轭、磁极协同构成完整永磁系统。其产生的强磁场为离子轨迹的偏转与聚焦提供关键物

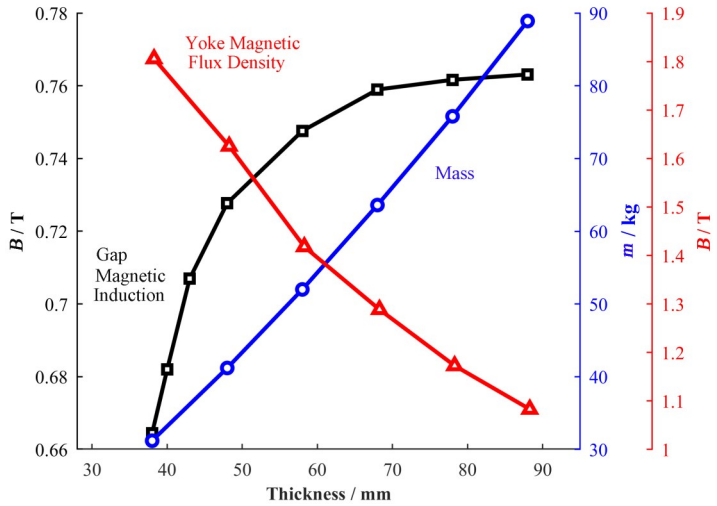


图5 磁隙磁感应强度、磁轭重量和磁轭中磁通密度最大值随磁轭整体厚度变化关系(彩图见网络版)

Fig.5 Relationship between the magnetic induction intensity in the air gap, the weight of the magnetic yoke, and the maximum magnetic flux density in the magnetic yoke as a function of the overall thickness of the magnetic yoke (color online)

理支撑,直接决定分析单元对离子质量与能量的分辨能力;同时,钕铁硼材料的高磁能积特性,可使分析单元在满足宽能量范围测量需求的前提下,实现结构紧凑化设计。

从磁场调控机理来看,磁隙间的磁感应强度随钕铁硼永磁铁厚度而升高,但该增长过程存在双重制约:一方面,磁感应强度s的上限受限于钕铁硼材料的固有剩磁B_r(即材料可提供的最大磁通密度);另一方面,其增长还受限于磁轭厚度,当磁轭内部磁通密度超过材料饱和磁通密度时,磁导率μ急剧下降,导磁性能显著劣化,导致磁路磁阻大幅增大,进而抑制磁隙磁感应强度的进一步提升。如图6所示,磁隙磁感应强度随钕铁硼永磁铁厚度增加呈上升趋势,但增长速率随厚度增大逐渐减缓,体现了上述双重制约的综合作用。

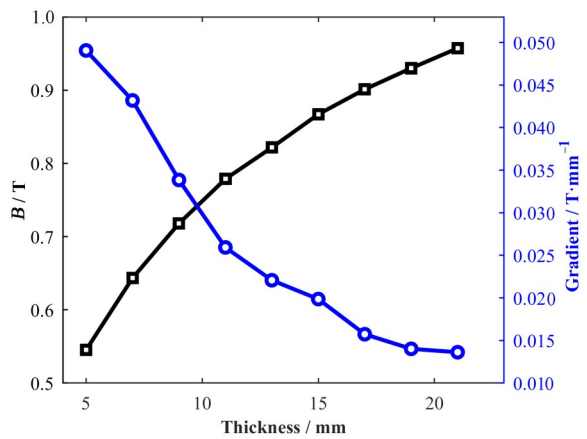


图6 磁隙磁感应强度及磁感应强度梯度随钕铁硼永磁铁厚度变化关系(彩图见网络版)

Fig.6 Relationship between the magnetic induction intensity and the magnetic induction intensity gradient with changes of the magnet thickness (color online)

2.3 磁极结构设计

磁极与磁轭协同构成闭合磁路,其中磁极采用特殊几何构型设计,可通过调控磁场梯度产生非均匀磁场,实现对离子束垂直方向的聚焦约束[15],进而提升离子探测效率。需注意的是,磁隙的几何形状由磁极轮廓直接决定,而磁隙形状是影响磁隙内磁感应强度分布均匀性的关键因素。

如图7所示,本研究设计了三种不同构型的磁隙(记为a、b、c),其对应的磁感应强度分布存在显著差异:磁隙a为折线构型且平直段长度较长,磁隙b为弧线构型,磁隙c为折线构型但平直段长度较短。从图7所示的磁感应强度分布特征来看,在达到磁感应强度峰值前,三种磁隙的磁感应强度大小关系为c>b>a;而在磁感应强度峰值处,该关系则相反,呈现为a>b>c。在整个磁路中,磁极材料的磁阻要远小于磁隙的真空环境的磁阻,而磁通倾向于选择磁阻最小的路径,所以磁通会聚集在较窄的磁隙处,因为这样真空环境的空间最小,磁阻也会更小。磁隙a为折线构型且平直段更长,且变窄的距离最短,这种结构使得在平直段磁隙的空间变得更大,磁通会更多流向更窄的磁隙处,且磁隙从宽到窄变化速度快,导致峰值处磁感应强度陡然达到最大。而磁隙c为折线构型且平直段更短,磁隙空间是逐渐变小的,磁通会更加均匀分布在磁隙中,集中在更窄地磁隙处的磁通会相对较少,不会出现剧烈变化的情况,所以在峰值处磁感应强度最小。而b在a和c的中间,所以在磁感应强度增大过程中和峰值处都处于中间。

图8为三种磁隙构型下,D^+在磁场与电场协同作用下运动至探测器的轨迹模拟结果。从图7可

知，构型a在峰值点的磁场强度最高，但其峰值磁场区域过于狭窄，离子穿越磁场的时间极短，所累积的偏转角度反而有限。相反，构型c提供了空间上分布更均匀的磁场，虽然其峰值较低，但离子在穿越磁隙的整个路径上都受到有效且持续的洛伦兹力作用，致其整体偏转角度最大。这在图8中表现为，相同能量的离子在c构型中的运动轨迹弯曲程度更显著，最终落点在探测器上X方向更靠左位置。这就可以使更大的能量的离子依然可以打在探测器面上，实现更宽能量范围的覆盖。基于上述磁场分布特性与离子轨迹模拟结果，在E//B NPA的磁隙设计中，应优先选用磁隙c的构型。

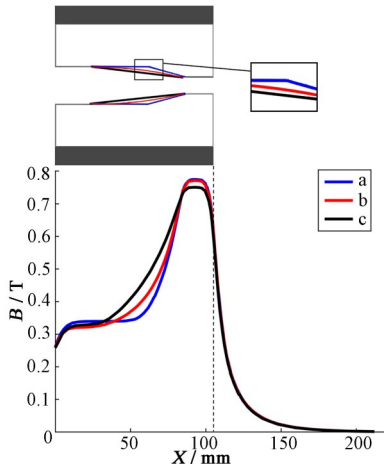


图7 不同磁隙形状及对应的磁感应强度分布图（彩图见网络版）

Fig.7 Different magnetic gap shapes and corresponding magnetic induction intensity distribution (color online)

在完成磁隙构型优化的基础上，进一步开展磁体尺寸参数的优化设计，发现磁体关键尺寸（如磁轭厚度大小、钕铁硼永磁体高度及厚度）的组合调整，可在不同尺寸方案下实现相同的磁隙磁感应强度。当单一尺寸参数减小时，可通过补偿其他参数，使磁路总磁通保持稳定，进而维持磁隙处的磁感应强度

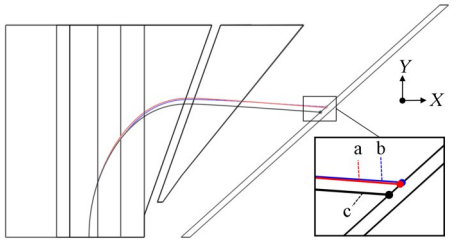


图8 不同磁隙形状下的粒子轨迹模拟结果

Fig.8 Simulation results of particle trajectories under different gap shapes

不变。图9通过两组尺寸参数组合的仿真数据，直观呈现了这一关联特性。

基于上述特性对磁体进行优化处理，在确保磁隙磁感应强度满足设计目标的前提下，减小磁体体积和重量。表1给出了优化前后磁体的核心指标对比：优化后磁体体积较初始方案缩减11.8%，重量降低11.7%，而磁隙磁感应强度仍稳定维持在目标值。表明了该优化方案在降本减重与性能不变之间的有效性，为后续E//B NPA与EAST装置的空间适配提供了工程可行性。

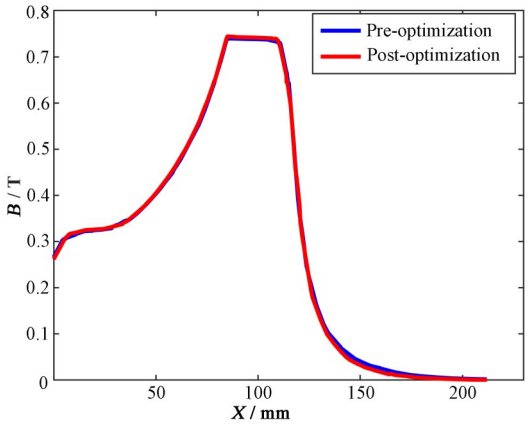


图9 优化前后的磁隙磁场大小（彩图见网络版）

Fig.9 Magnetic field strength before and after optimization in the gap (color online)

表1 优化前后参数

Table 1 Parameters before and after optimization

参数 Parameter	优化前 Pre-optimization	优化后 Post-optimization
磁体整体尺寸 Overall dimensions of the magnet	225 mm×232 mm×242 mm	203 mm×232 mm×242 mm
NdFeB永磁铁尺寸 NdFeB permanent magnet dimensions	11 mm×162 mm×242 mm	10 mm×162 mm×242 mm
重量 Weight / kg	77	68
磁极体积 Magnetic pole volume / cm³	2 043	1 464
磁轭体积 Magnetic yoke volume / cm³	7 130	6 626

2.4 静电偏转器结构设计

静电偏转器作为E//B NPA的质量分离核心单元，其功能是通过电场力对带电粒子进行精确分离，为离子能量与质量的同步诊断提供关键支撑，该组件由上下两块平行电极板构成。粒子经磁分析单元完成初步筛选后，进入静电偏转器的电场区域，在电场力作用下沿竖直方向向下偏转；由于H^+、D^+、T^+的质量存在差异，其偏转距离呈现显著区别，其中，D^+与T^+因质量较大，易在未完全穿出静电偏转器有效作用区域时即轰击下极板，导致探测信号丢失，影响

诊断准确性。

为规避该粒子传输失效问题，保障三种同位素离子均能顺利传输至后续探测器单元，可采用两种优化路径：一是调整上下极板的间距，通过改变极板间距，但是保持场强不变，给离子更多在电场中的飞行空间来避免打击下极板；二是通过下极板倾斜设计改变电场分布以优化粒子运动轨迹。如图10所示，仿真数据表明，随着下极板倾斜角度的增大，粒子成功传输至探测器有效区域的比例呈单调上升趋势，且极板间距与所需倾斜角度呈负相关关系，即极板间距越大，实现全部粒子有效传输所需的倾斜角度越小。

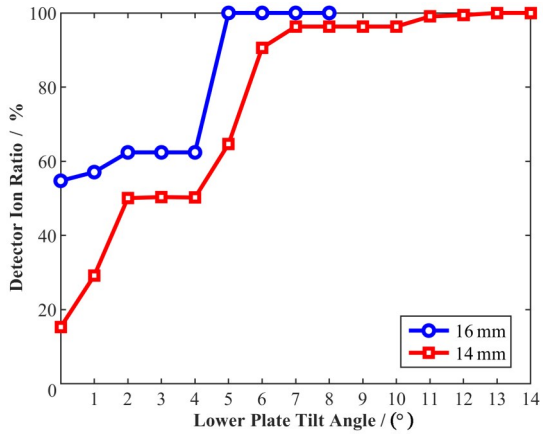


图10 D^+和T^+随下电极板倾斜角度变化打击在探测器上的比例

Fig.10 Proportion of $D^+$and T^+ striking the detector varies with the tilt angle of the lower electrode plate

在多轮离子轨迹仿真与参数迭代验证的基础上，最终确定当上下极板间距设定为16 mm，两极板间施加12 kV直流电压，同时使下极板倾斜5°时，可恰好满足H^+、D^+、T^+三种同位素离子均能无碰撞穿越偏转器，顺利轰击探测器的有效信号采集区域，还能使三种离子的落点清晰分离为上、中、下三行均匀分布，其中H^+因质量最小打击在探测器上行，T^+因质量最大，偏转最大打击在探测器下行，D^+居中打击在探测器中行。如图11所示，随着下极板倾斜角度偏离5°的幅度增大，D^+的z向坐标与5°工况下的差值呈扩大趋势；且该差值的增幅随粒子能量升高而显著提升，即高能D^+的z向坐标上移幅度明显大于低能D^+。其物理机理可从电场分布差异与粒子偏转规律两方面阐释：下极板倾斜角度增大时，静电偏转器因其形状为前小后大的形状，导致其倾斜时低能段区域与高能段区域的极板间距差异逐步扩大，高能段区域因极板间距更大，电场强度显著低于低能段区域。而带电粒子的偏转加速度由电场力决定，高能D^+在低场强区域所受电场力更小、偏转加速度更低，导致其向下偏转量大幅减小，最终表现为探测器上z向

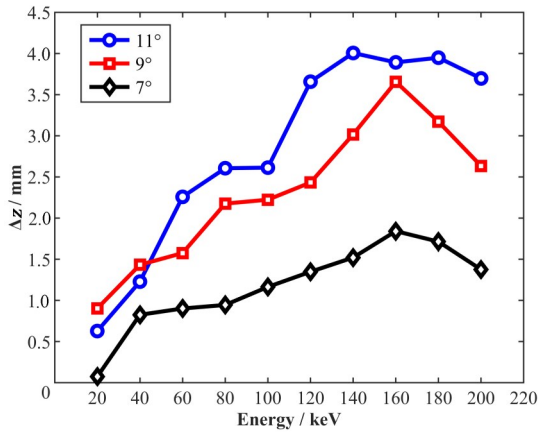


图11 不同倾斜角度与倾斜5° D^+的z坐标差值

Fig.11 z-coordinate difference of deuterium ions at different tilt angles *vs*. a 5° tilt

坐标的明显上移，且能量越高，该上移效应越显著。

3 探测器单元研究

NPA的粒子能量检测技术依赖于光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）阵列[20]，并通过闪烁体技术将入射粒子的动能信号转化为荧光信号，再由PMT放大输出信号。目前，我们认为，带有闪烁体的PMT H14220系列阵列是实现这一目的的最佳选择，PMT H14220的有效区域前视图如图12所示，它展示了8×8个独立阳极的矩阵，有效区域尺寸为48.5 mm×48.5 mm，探测器阵列预计由7~8个PMT H14220组成。然而，PMT内部的光电子倍增过程极易受外部磁场干扰，工作阈值要求≤25 Gs，磁场大于25 Gs时，二次电子发射被显著抑制，信号增益下降。然而，托卡马克固有的杂散磁场及中性粒子分析仪诊断自身磁信号分析单元的杂散磁场均会干扰PMT信号，导致中性粒子分析仪诊断性能的下降。

针对EAST环境下中性粒子分析仪PMT探测器的磁屏蔽不足的问题，设计了用于托卡马克装置的中性粒子分析仪中探测器的磁屏蔽结构，包含一个公共磁屏蔽罩体、若干个独立磁屏蔽罩体（其数量与探测器数量对应），以及设置在独立磁屏蔽罩体开放面上的井字形格栅，如图13所示。相较于传统的公共磁屏蔽罩体加上独立磁屏蔽罩体的设计，该设计在独立磁屏蔽框的探测器开放面加装井字形格栅骨架，采用低碳钢材料，格栅基于探测器的特性，在不影响探测器功能的情况下，将开放区域分割为9个独立磁补偿区，并且可以将磁场下降到PMT探测器能够正常工作的25 Gs以下。此设计解决了强磁场干扰会导致PMT信号失真的问题，是一种稳定高效的磁屏蔽方式。

如图14所示，未屏蔽和使用ITER屏蔽体方

案[21]后的磁场高于PMT探测要求的小于25 Gs，在EAST装置环境下无法正常工作。该磁屏蔽结构使用后，探测器区域杂散磁场小于25 Gs，PMT探测器可以正常工作。

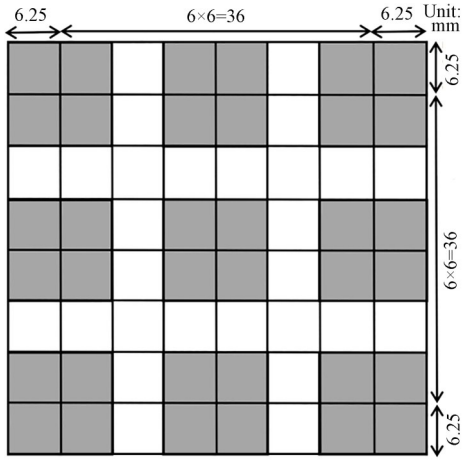


图12 PMT探测器有效区域结构尺寸图
Fig.12 Structural dimension diagram of the effective area of the PMT detector

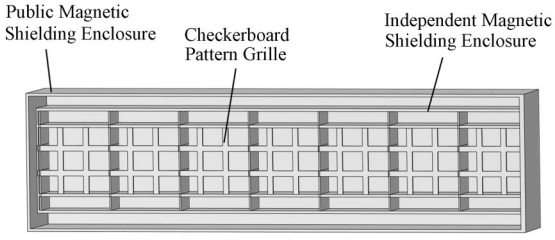


图13 磁屏蔽结构图
Fig.13 Structural diagram of Magnetic shielding

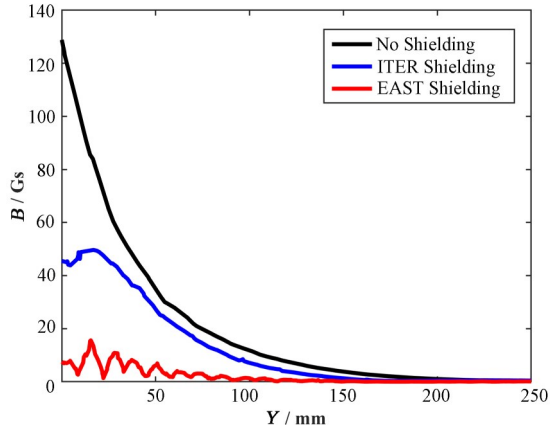


图14 使用不同屏蔽方案后的屏蔽效果比较（彩图见网络版）
Fig.14 Comparison of shielding effects after using different shielding schemes (color online)

4 系统整体效果

粒子聚焦的目的是使粒子束在探测器上形成最小聚焦斑点，这一技术带来多重核心好处：首先，它能显著提高检测效率，减少粒子在传输过程中的散射；其次，聚焦优化了能量和质量分辨率，使不同能量的H^+、D^+、T^+信号在探测器阵列上清晰分离，避免信号重叠；此外，最小化斑点能降低背景噪声干扰，增强信噪比；最后，聚焦支持紧凑型多探测器设计，实现同时多种类离子分析，满足高约束装置（如ITER）的实时诊断需求，从而提升等离子体参数测量的可靠性和准确性。

离子斑点的均方根（Root Mean Square，RMS）参数是表征探测器平面内粒子束空间分布离散度的核心指标，如式（1）所示，其本质是统计学标准差在粒子束诊断中的物理应用，用于量化聚焦后离子斑点尺寸的均匀性与精度，可有效表征经电磁分析单元偏转后粒子束在探测器上的斑点大小。使用COMSOL模拟了不同能量、质量离子在探测器上的落点，图15呈现H^+、D^+、T^+特定能量范围的RMS值，可见，三种粒子的RMS值随能量提升总体呈上升趋势，能量越高离子斑点越大。

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\bar{x}\right)^2+\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(y_i-\bar{y}\right)^2} \tag{1}$$

式中：N为粒子数量；x_i、y_i为每个粒子在探测器面的横坐标和纵坐标；$\bar{x}$、$\bar{y}$为粒子束所有粒子x_i和y_i的平均数。

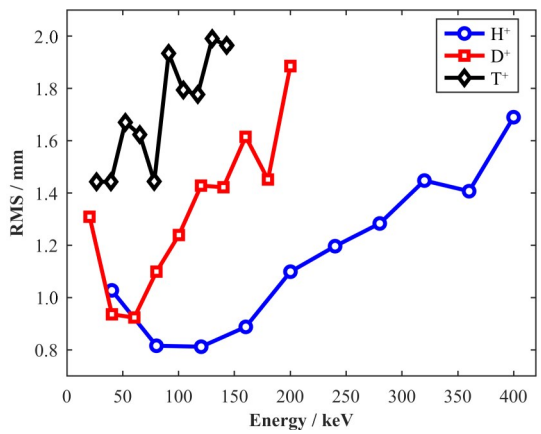


图15 H^+、D^+、T^+离子束随能量变化的RMS值
Fig.15 Variations of RMS values of H^+, D^+, and T^+ ion beams vary with energy

进一步地，为了观察离子从入口到探测器上的圆斑的变化情况，从直径5 mm的圆形入口按高斯分布发射能量分别为150 keV的H^+、75 keV的D^+与50 keV的T^+，每种离子各5 000个。对探测器上离子打击点按横坐标分箱后，以纵坐标表征各区间离子计数；其中，理论半高全宽（Full Width at Half Maximum，FWHM）由2.355×σ（σ为粒子横坐标理论分布标准差）计算得到，实际FWHM则通过分箱数据拟合高斯分布求解。结果如图16所示，理论和实

际FWHM差距较小，基本遵循高斯分布，且探测器上离子打击形成的圆斑横向坐标宽度在4~6 mm，与入口处的5 mm较为吻合，没有明显的扩散。根据离子在磁场中回旋半径公式可知，该能量下三种离子在探测面应呈现相同横向坐标，纵向则按H^+、D^+、T^+顺序自上而下分离，但实际上三种离子的横向坐标存在误差，并不完全重合。

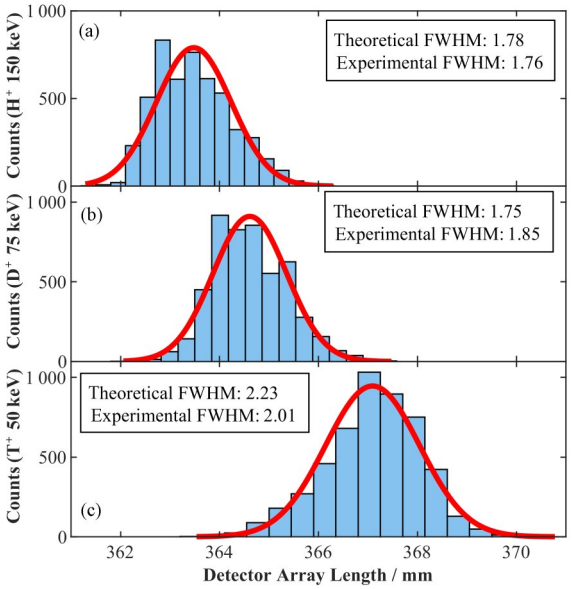


图16 理论和实际FWHM比较 (a) 150 keV的H^+斑束分布，(b) 750 keV的D^+斑束分布，(c) 50 keV的T^+斑束分布

Fig.16 Comparison of theoretical and actual FWHM (a) 150 keV H^+ beam spot distribution, (b) 750 keV D^+ beam spot distribution, (c) 50 keV T^+ beam spot distribution

图17是不同能量的H^+、D^+、T^+轰击在探测器阵列平面上，能量范围分别是30~440 keV、15~220 keV和10~143 keV，上中下三行代表了图12中的PMT探测器组成的探测器阵列有效区域，由模拟结果可见，H^+、D^+、T^+三类离子分别集中分布于各自对应的探测区域内，空间分离边界清晰，无不同种类离子的混合或信号重叠现象，呈现了E//B NPA电磁分析单元的质量分离能力。模拟结果不仅直观验证了前文所述永磁体结构优化与电场位型优化的有效性，还展示了H^+、D^+、T^+因能量差异在探测器阵列不同通道上的落点分布和因质量差异形成的纵向分离间距与纵向定位特征，为后续探测器阵列的通道划分、信号归属校准及质量分辨率验证提供了关键的理论建模支撑。

5 结语

本文完成了将应用于EAST托卡马克装置的E//B NPA电磁分析单元和探测器单元的设计工作。电磁分析单元的磁体的磁极经过特殊设计和选择，

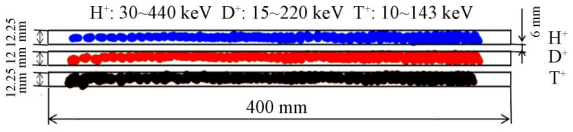


图17 探测器阵列上离子质量分离的轨迹模拟结果（彩图见网络版）

Fig.17 Simulation results of ion mass separation trajectory on the detector array (color online)

因此磁场可使离子轨迹集中在中平面上，并且提供最大的偏转能力，结合倾斜电极板，解决离子撞击下极板问题，探测器捕获率提升至100%。探测器单元创新使用了井字形格栅磁屏蔽，将杂散磁场抑制至小于25 Gs，保障PMT探测器在EAST强场环境中稳定工作。分析单元的设计和模拟结果表明，本文设计的E//B NPA可实现在EAST装置上H（30~440 keV）、D（15~220 keV）、T（10~143 keV）快离子的质量和能量分辨。

致谢 感谢屈玉凡博士对本工作初期的帮助和意见。

作者贡献声明 本文大部分工作由朱建军独立完成；徐明对本文文字以及分析过程提供了宝贵的修改意见；刘洋和林展宏对工作细节提供了指导意见。

参考文献

1 杨冠铭, 郝广周, 卢凌峰, 等. HL-3装置上离子回旋波加热对中子产额的影响[J]. 核技术, 2024, **47**(5): 050001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050001.
YANG Guanming, HAO Guangzhou, LU Lingfeng, *et al*. Influence of ion cyclotron range of frequencies heating on neutron emission rate in HL-3 tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(5): 050001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050001.

2 张明强, 钟国强, 黄娟, 等. 基于4H-SiC探测器多球谱仪的聚变中子能谱测量研究[J]. 核技术, 2024, **47**(9): 090402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090402.
ZHANG Mingqiang, ZHONG Guoqiang, HUANG Juan, *et al*. Research on fusion neutron energy spectrum measurement using a Bonner sphere spectrometer based on a 4H-SiC detector[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(9): 090402. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2024. hjs. 47. 090402.

3 王书松, 黄娟, 常加峰, 等. ICRF加热下EAST快离子损失速度空间分布初步研究[J]. 核技术, 2023, **46**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120601.
WANG Shusong, HUANG Juan, CHANG Jiafeng, *et al*. Preliminary study of velocity-space distribution of fast-ion loss under ion cyclotron resonance heating in the

EAST[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(12): 120601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120601.

4 王克文, 黄娟, 常加峰, 等. ZnS(Ag)闪烁体对EAST中快电子响应的模拟分析[J]. 核技术, 2024, **47**(5): 050003. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050003.
WANG Kewen, HUANG Juan, CHANG Jiafeng, *et al*. Simulation analysis of fast electron response of ZnS(Ag) scintillator in EAST[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(5): 050003. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050003.

5 Polosatkin S, Belykh V, Davydenko V, *et al*. Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, **720**: 42 – 44. DOI: 10.1016/j.nima.2012.12.039.

6 Kislyakov A I, Khudoleev A V, Kozlovskij S S, *et al*. High energy neutral particle analyzer[J]. Fusion Engineering and Design, 1997, **34 – 35**: 107 – 113. DOI: 10.1016/s0920-3796(96)00668-0.

7 Armentrout C J, Bramson G, Evanko R. E parallel B canted detector neutral-particle spectrometer[J]. Review of Scientific Instruments, 1985, **56**(11): 2101 – 2110. DOI: 10.1063/1.1138428.

8 Zang L, Qu Y, Lin W, *et al*. Design of the electromagnetic field for an E//B neutral particle analyzer[J]. Plasma and Fusion Research, 2020, **15**: 2402036. DOI: 10.1585/pfr.15.2402036.

9 Medley S S, Roquemore A L. Construction and operation of parallel electric and magnetic field spectrometers for mass/energy resolved multi-ion charge exchange diagnostics on the Tokamak Fusion Test Reactor[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, **69**(7): 2651 – 2662. DOI: 10.1063/1.1148994.

10 Afanasyev V I, Gondhalekar A, Babenko P Y, *et al*. Neutral particle analyzer/isotope separator for measurement of hydrogen isotope composition of JET plasmas[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, **74**(4): 2338 – 2352. DOI: 10.1063/1.1542664.

11 Chernyshev F V, Afanasyev V I, DECH A V, *et al*. A compact neutral-particle analyzer for plasma diagnostics [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2004, **47**(2): 214 – 220. DOI: 10.1023/B:INET.0000025204.01783.1a.

12 Goncharov P R, Ozaki T, Sudo S, *et al*. Active neutral particle diagnostics on LHD by locally enhanced charge exchange on an impurity pellet ablation cloud[J]. Fusion Science and Technology, 2006, **50**(2): 222 – 228. DOI: 10.13182/fst06-a1239.

13 Karpushov A N, Duval B P, Schlatter C, *et al*. Neutral particle analyzer diagnostics on the TCV tokamak[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, **77**(3): 033504. DOI: 10.1063/1.2185151.

14 Afanasiev V I, Kislyakov A I, Kozlovski S S, *et al*. Engineering design of the neutral particle analyser system on ITER[J]. Plasma Devices and Operations, 2004, **12**(3): 209 – 215. DOI: 10.1080/1051999042000237960.

15 Afanasyev V I, Chernyshev F V, Kislyakov A I, *et al*. Neutral particle analysis on ITER: present status and prospects[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, **621**(1 – 3): 456 – 467. DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.201.

16 Afanasyev V I, Mironov M I, Konovalov S V, *et al*. Neutral particle analysis on ITER and requirements for DEMO[C/OL]//AIP Conference Proceedings. Melville: AIP Publishing, 2008, **988**: 177 – 184. https://pubs.aip.org/aip/acp/article/988/1/177-184/604699.

17 Zang L G, Qu Y F, Luo Y, *et al*. Design of the stripping unit and the electromagnetic analysis unit for the E//B NPA on HL-2A/2M tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2022, **24**(6): 064002. DOI: 10.1088/2058-6272/ac6090.

18 Liu Y, Xu M, Cai H S, *et al*. Experimental validation of an imaging neutral particle analyzer in the EAST[J]. Review of Scientific Instruments, 2025, **96**(2): 023504. DOI: 10.1063/5.0241347.

19 屈玉凡, 臧临阁, 林炜平, 等. 电场磁场平行型中性粒子分析器剥离单元和分析单元的设计与模拟[J]. 核聚变与等离子体物理, 2023, **43**(1): 75 – 81. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202301013.
QU Yufan, ZANG Lin'ge, LIN Weiping, *et al*. Design and simulation of the stripping unit and the analysis unit of a parallel electric and magnetic field NPA[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2023, **43**(1): 75 – 81. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202301013.

20 Melnik A D, Afanasyev V I, Kozlovsky S S, *et al*. Development of a manufacturing technology for detectors of the neutral particle diagnostic system on the tokamak [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2020, **63**(2): 205 – 208. DOI: 10.1134/s0020441220020025.

21 Petrov S Y, Afanasyev V I, Melnik A D, *et al*. Design features of the neutral particle diagnostic system for the ITER tokamak[J]. Physics of Atomic Nuclei, 2017, **80**(7): 1268 – 1278. DOI: 10.1134/S1063778817070109.