

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2021.05.020

## 基于 SC200 回旋加速器中超导磁体垂直偏移时的磁场研究

许世文<sup>2</sup>, 李君君<sup>1\*</sup>, 王 重<sup>2</sup>, 周 健<sup>1</sup>, 丁开忠<sup>1</sup>, 陈永华<sup>2</sup>, 杜双松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031; 2. 合肥中科离子医学技术装备有限公司, 合肥, 230088)

**摘要:**回旋加速器中的超导磁体由于加工和安装误差会在垂直方向上存在偏移现象. 该现象导致加速器内磁场偏离设计, 影响束流的有效加速. 目前测量超导磁体的垂直偏移主要依靠机械测量和力学传感器监控, 这些方法只能在工程上确定超导磁体是否对中, 而最后的对中效果仍需要通过磁场测量确认. 基于中俄正在联合研制的 200 MeV 超导质子回旋加速器 SC200, 详细阐述直接利用其中平面平均径向场相对变化计算超导磁体垂直偏移的过程. 对比模拟和实验的数据表明, 该方法能够将主加速区中平面的平均径向场控制在  $\pm 1$  Gs 以内, 即实现了超导磁体在垂直方向上的对中, 为 SC200 的研制奠定了扎实的基础, 也为其他回旋加速器中超导磁体的位置调整提供了参考.

**关键词:**回旋加速器, SC200, 超导磁体, 径向场

**中图分类号:** TL54+2.1

**文献标志码:** A

## Research on magnetic field of SC200 cyclotron under the vertical offset of superconducting magnet

Xu Shiwen<sup>2</sup>, Li Junjun<sup>1\*</sup>, Wang Zhong<sup>2</sup>, Zhou Jian<sup>1</sup>, Ding Kaizhong<sup>1</sup>, Chen Yonghua<sup>2</sup>, Du Shuangsong<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China;

2. Hefei CAS Ion Medical and Technical Devices Co., Ltd, Hefei, 230088, China)

**Abstract:** Due to the machining and installing errors, superconducting magnet in cyclotron will generate the vertical offset, causing that the magnetic field deviates from our designation and influencing the effective acceleration of beam. Currently, the vertical offset of superconducting magnet is usually measured in engineering or monitored by mechanical sensors. These methods can only determine the alignment of superconducting magnet in engineering, and the final alignment effect needs to be confirmed by magnetic field measurements. Based on the SC200, a 200 MeV superconducting proton cyclotron being jointly developed by China and Russia, this paper describes in detail the process of calculating the vertical offset of superconducting magnets by means of directly researching the relative alterations of average radial field in cyclotron. Comparing the simulated and experimental data indicates that this method can control the averaged radial field in the median plane of main accelerated region within  $\pm 1$  Gs, which means that the superconducting magnets can be aligned vertically, laying a solid foundation for the development of the SC200 cyclotron and providing a reference for positional adjustment of superconducting magnets in other cyclotrons.

**Key words:** cyclotron, SC200, superconducting magnet, radial field

超导磁体与传统磁体比较能提供更高的磁场<sup>[1]</sup>, 因而被广泛使用在回旋加速器的设计中以

提高其能量并缩小其尺寸<sup>[2-5]</sup>. 例如国外的 IBA (Ion Beam Applications S. A.)<sup>[6]</sup> 和 VARIAN

基金项目: 中俄超导质子加速器联合设计(1604b0602005)

收稿日期: 2021-01-06

\* 通讯联系人, E-mail: lijunjun73@ipp.ac.cn

(Varian Medical Systems)<sup>[7]</sup>等,国内的中国原子能科学研究院(China Institute of Atomic Energy, CIAE)<sup>[8]</sup>、华中科技大学<sup>[9]</sup>、合肥中科离子医学技术装备有限公司<sup>[10]</sup>等.为了将回旋加速器制作得更紧凑,这些组织无一例外地使用了超导磁体作为设计的核心.在回旋加速器中,超导磁体和常温主磁铁共同决定了其内部的磁场.当上下超导线圈的中心对称面与中轴线分别与常温主磁铁的中心平面(或回旋加速器中平面)和中轴线重合时,称超导磁体处于对中状态.此时,中平面上磁场径向分量的平均值和谐波值最小,最利于束流在该平面附近的运动<sup>[11]</sup>.然而由于加工和安装误差,超导磁体会在垂直方向上偏离中平面,导致中平面磁场的轴向和径向分量不同程度地偏离我们的设计,尤其是额外产生的径向磁场分量会影响粒子的轴向震荡<sup>[12-13]</sup>,继而干扰束流的有效加速,因此超导磁体在垂直方向上必须被修正至对中状态,即超导磁体对称面和回旋加速器中平面重合的状态.

迄今为止,大多采用机械测量、力学传感器监测<sup>[14]</sup>等方法来获得超导磁体的垂直偏移状态,例如超导回旋加速器 K-500<sup>[15]</sup>和超导同步回旋加速器 S2C2<sup>[16]</sup>均利用超导磁体周围拉杆上的力学传感器确认其位置状态.然而这些方法只能在机械上确定超导磁体是否对中,最后的对中效果仍需在超导磁体通电状态下通过磁场测量确认<sup>[17]</sup>.一些回旋加速器也利用测量磁场的方法判断超导磁体在垂直方向的偏移工况,如 CIAE 的 CYCIAE-230 超导回旋加速器<sup>[18]</sup>,然而文献<sup>[19]</sup>中并未详细阐述整个调整过程或展示实际调整结果.本文详细阐述了 CIM 研制的超导回旋加速器 SC200<sup>[20]</sup>的磁场垫补工作开展前,直接利用中平面平均径向场的相对变化来计算超导磁体垂直方向偏移的过程.即在前期通过对 SC200 的磁铁设计模型进行有限元分析,模拟了其中超导磁体的不同垂直偏移工况,获得了中平面磁场的轴向和径向分量的变化规律.后期根据这些规律,在实际调整中借助磁场测量手段,经过多次迭代,最终确认该超导磁体已在垂直方向上调整至对中状态.为 SC200 的磁场垫补奠定了扎实的基础,也为其他回旋加速器中超导磁体的位置调整提供了参考.

## 1 模拟分析

**1.1 中平面磁场分布** 本文模拟超导磁体垂直偏移工况所用的 SC200 模型包含了上下铁轭、上下磁极以及超导磁体等部件.该模型的主要参数在表 1 中列出.图 1 则描绘了 SC200 磁体的剖面图(左)及三维图(右).同时,超导磁体不偏移时,相对于中平面分布以及内部磁场分布的简化示意图则描绘于图 2 中.图中代表超导磁体对称面和回旋加速器中平面的两条虚线重叠在一起.超导线圈范围内的磁场方向根据安培定律标识于图中,超导磁体中轴线上的磁场垂直于超导磁体的对称面,而中轴线周围的磁场则在对称面上下两侧向外弯曲.本文设定轴向磁场( $B_z$ )垂直于中平面向上为正,径向磁场( $B_r$ )垂直于中轴线向外为正,如图 2 所示.

表 1 分析模型中的主要参数

Table 1 Main parameters of the analysis model

磁极数量	4
磁极径向范围	3.7~61 cm
超导线圈单匝电流	100 A
超导线圈匝数	5320

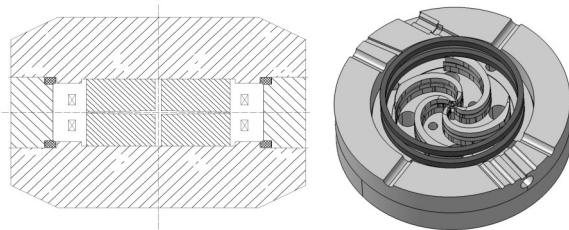


图 1 SC200 磁铁的剖面图(左)和三维图(右)

Fig.1 Profile (left) and 3-D model (right) of SC200 magnet

极坐标下,以角度 0.5 deg、半径 1 mm 的步长模拟得到了加速器机械中平面的轴向磁场和径向磁场.每个半径下的平均场通过在该半径下对角度  $0^\circ \sim 360^\circ$  下的磁场求平均值获得.

对于  $B_z$ ,超导磁体不偏移时,中平面的平均轴向场( $B_z$ 平均场)沿半径的分布如图 3a 所示.对于  $B_r$ ,当超导磁体处于对中状态时,由于磁铁模型上下几乎完全对称,所以中平面上磁场的径向分量几乎为 0,使得中平面的平均径向场( $B_r$ 平均

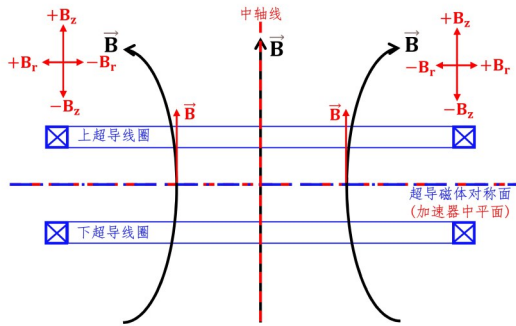
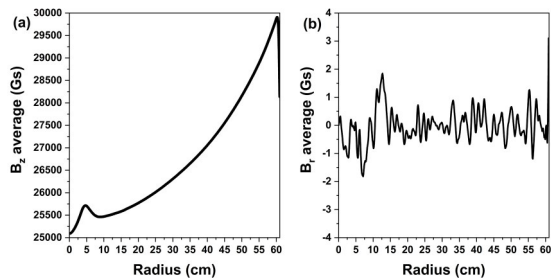


图2 超导磁体不偏移时的简化示意图

Fig. 2 Schematic diagram when superconducting magnet has no offset

场)理论上为0.然而在进行有限元模拟时,由于网格的不对称引入了磁场误差,产生了不可忽略的 $B_r$ 平均场,如图3b所示.故分析超导磁体垂直偏移时,需要将不偏移时的 $B_r$ 平均场作为基准值,垂直偏移时得到的 $B_r$ 平均场需要减去这个基准值再进行各种分析.

图3 超导磁体不偏移时, $B_z$ 平均场(a)和 $B_r$ 平均场(b)沿半径的分布Fig. 3 Distributions of  $B_z$  average (a) and  $B_r$  average (b) along the radius without the offset of superconducting magnet

**1.2 超导磁体垂直偏移模拟** 超导磁体的垂直偏移指上下两个平行的超导线圈在轴向上均朝同一个方向移动,此时两个超导线圈的对称平面仍与回旋加速器的中平面平行,超导磁体的中轴线和回旋加速器的中轴线重合,其简化示意图如图4所示.

垂直偏移的模型设定超导磁体向上偏移0.2, 0.5, 1 mm以及向下偏移0.2 mm(或简称为 $D=0.2, 0.5, 1, -0.2$  mm).对中平面( $Z=0$  mm)的 $B_z$ 和 $B_r$ 进行分析.图5呈现了在超导磁体不偏移时的 $B_z$ 平均值基础上,超导磁体不同垂直

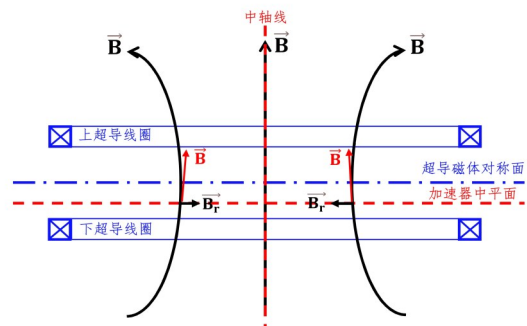
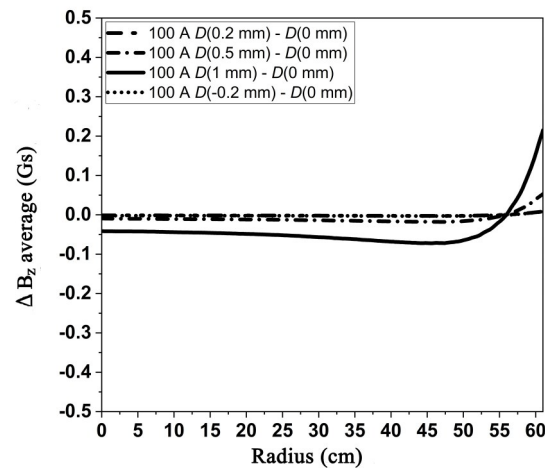


图4 超导磁体垂直向上偏移时的简化示意图

Fig. 4 Schematic diagram when superconducting magnet moves upward vertically

偏移量时的 $B_z$ 平均值变化.可以看出,半径61 cm范围内,这个量小于 $\pm 0.2$  Gs,考虑到实际磁场测量情况,可认为无法识别.

图5 超导磁体不同垂直偏移量时的 $B_z$ 平均值相对于不偏移时 $B_z$ 平均值的变化Fig. 5 Variation of  $B_z$  average under different vertical offset values of superconducting magnet comparing with  $B_z$  average under no offset

尽管垂直偏移时, $B_z$ 平均场几乎不产生变化,但是 $B_r$ 平均场产生了可识别的变化,如图6a所示.图中, $B_r$ 平均场均随着半径增大,并在半径54 cm处达到最高点后开始下降.图6b则显示,将 $D=0.5$  mm产生的 $B_r$ 平均值除以 $D=0.2$  mm产生的 $B_r$ 平均值,两种半径下结果均为2.5,正好等于垂直偏移量的比值,即 $0.5 \text{ mm} : 0.2 \text{ mm} = 2.5 : 1$ ;同样地,将 $D=1$  mm产生的 $B_r$ 平均值除以 $D=0.2$  mm产生的 $B_r$ 平

均值,两种半径下结果均为 5,正好等于垂直偏移量的比值,即  $1\text{ mm}:0.2\text{ mm}=5:1$ . 这说明各垂直偏移量下,  $B_r$  平均场随半径变化的趋势相同,且各  $B_r$  平均值与超导磁体垂直偏移量成正比关系. 图 6a 也显示出,  $D=0.2$  和  $-0.2\text{ mm}$  时,  $B_r$  平均值在两种半径下大小相同符号相反,超导磁体向下偏移( $D=0.2\text{ mm}$ )时  $B_r$  平均值为正,向上偏移时  $B_r$  平均值为负.

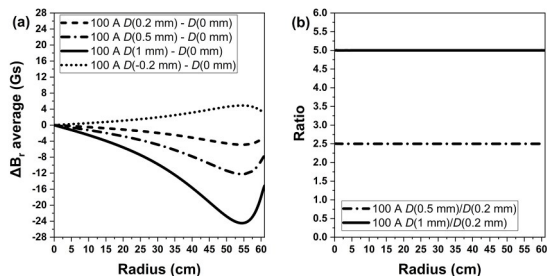


图 6 (a)超导磁体不同垂直偏移量时产生的  $B_r$  平均值;  
(b)超导磁体垂直偏移 1 mm 及 0.5 mm 产生的  $B_r$  平均值与垂直偏移 0.2 mm 产生的  $B_r$  平均值的比值

Fig. 6 (a)  $B_r$  average produced under different vertical offsets of superconducting magnet, (b) ratio of  $B_r$  average under  $D=0.5$  and  $1\text{ mm}$  to that under  $D=0.2\text{ mm}$

这种现象可以用图 4 解释,无论超导磁体上偏还是下偏,由于超导磁体的中轴线和回旋加速器的中轴线重合,因此中平面同一半径下中心对称两点的  $B_r$  大小相同方向相反,  $B_z$  则大小相同方向相同. 当超导磁体向上偏移时,中平面在对称面的下方,因此中平面上中轴线周围的磁场向内弯曲,产生了指向中轴线的  $B_r$  分量,即  $B_r$  为负;当超导磁体向下偏移时,中平面在对称面的上方,因此中平面上中轴线周围的磁场向外弯曲,产生了远离中轴线的  $B_r$  分量,即  $B_r$  为正. 因此实际测量中,超导磁体的垂直偏移量和偏移方向即可用磁场测量时得到的中平面的  $B_r$  平均场的大小和正负初步估算.

## 2 模拟与实验对比

2019 年,在 SC200 的磁场垫补工程开展之前,我们借助本公司自主研发的圆柱面  $B_r$  磁测系统<sup>[21]</sup>对回旋加速器中平面的磁场展开测量,在超导线圈单匝电流 100 A 下获得了中平面各个半径下的  $B_r$  平均值. 参照超导磁体垂直偏移时得到的

中平面  $B_r$  平均场的线性模拟结果,初步确定了超导磁体的垂直偏移量. 之后通过调整超导磁体上下的八根拉杆,如图 7 所示,确定了一个略大于判断量的调整量进行实际调整. 调整后再通过磁场测量确定中平面各半径下的  $B_r$  平均值. 迭代上述过程,直至主加速区范围内(径向 10~55 cm)中平面各半径下的  $B_r$  平均值均在  $\pm 1\text{ Gs}$  以内.

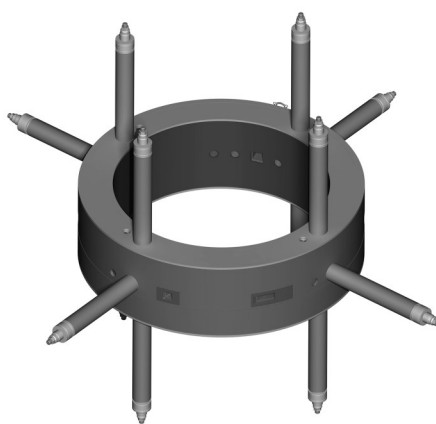


图 7 超导磁体四周拉杆模型图

Fig. 7 Model graph of support links around the superconducting magnet

实际操作只迭代两次,就完成了超导磁体垂直偏移的调整. 第一次调整超导磁体前和最后一次调整超导磁体后测得的  $B_r$  平均值沿半径的分布分别如图 8a 中的实线和虚线所示,可以看出通

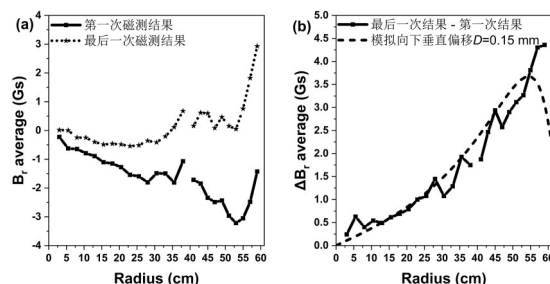


图 8 (a)第一次调整超导磁体前和最后一次调整超导磁体后分别测得的各半径  $B_r$  平均值;(b)在同样的垂直偏移量下,实际测量的  $B_r$  平均值变化与模拟所得  $B_r$  平均值的对比

Fig. 8 (a)  $B_r$  average at each radius respectively measured before the first adjustment and after the last adjustment of superconducting magnet, (b) under the same vertical offset values, actual measured change of  $B_r$  average vs. change of simulated  $B_r$  average



过该方法调整超导磁体,可以使主加速区范围内中平面的 $B_z$ 平均值调整至 $\pm 1$  Gs以内.另外,从第一次调整到最后一次调整,机械测量确认超导磁体在垂直方向被下移0.12 mm.此过程中,实际测量所得的 $B_z$ 平均值变化如图8b中的实线所示,而模拟超导磁体垂直向下移动0.15 mm产生的 $B_z$ 平均值则如图8b中的虚线所示.可以看出在主加速区,模拟值和实测值产生的误差为0.03 mm,控制在0.1 mm以内,同时也证明了该方法判断出的超导磁体垂直偏移方向正确.

### 3 结 论

本文基于SC200研究了回旋加速器中超导磁体在垂直偏移工况下中平面磁场的变化.研究得出垂直偏移的大小可通过 $B_z$ 平均值的改变量来估测,为正则超导磁体向上偏移,反之向下偏移.实际情况中可利用磁场测量系统测量出中平面的 $B_z$ 分量,再经过以上分析即可初步快速判断超导磁体在垂直方向上的偏移.然而由于超导磁体还存在偏离加速器中轴线的水平偏移以及围绕加速器中心旋转的倾斜等其他复杂情况,磁场测量数据也存在一定误差,因此在条件允许的情况下,实际使用该方法时最好配合超导磁体受力情况综合判断磁体的偏移.

#### 参考文献

- [1] Blosser H. 30 years of superconducting cyclotron technology//Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, Saitama: Saitama University, 2005: 531—536.
- [2] Karamysheva O, Karamysheva G A, Gurskiy S, et al. Conceptual design of the SC230 superconducting cyclotron for proton therapy//Proceedings of 10<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference. Melbourne, Australia, Geneva, Switzerland: JACoW, 2019: 2058—2060.
- [3] Yamamoto A. The future of superconducting technology for accelerators//Proceedings of 8<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference. Copenhagen, Denmark, Geneva, Switzerland: JACoW, 2017: 19—23.
- [4] Geisler A, Baumgarten C, Hobl A, et al. Status report of the accel 250 mev medical cyclotron//Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, Saitama: Saitama University, 2005: 178—182.
- [5] Krischel D, Baumgarten C, Geisler A, et al. Design aspects and operation experience with a novel superconducting cyclotron for cancer treatment. IEEE transactions on applied superconductivity, 2007, 17(2): 2307—2310.
- [6] Karamysheva G, Kostromin S. Beam dynamics study in the C235 cyclotron for proton therapy. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2009, 6(1): 84—90.
- [7] Röcken H, Abdel - Bary M, Akcöltekin E, et al. Progress at VARIAN's superconducting cyclotrons: A base for the probeamTM platform//Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications. Vancouver, Canada, Geneva, Switzerland: JACoW, 2013: 55—57.
- [8] Zhang T, Wang C, Li M, et al. Developments for 230 MeV superconducting cyclotrons for proton therapy and proton irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2017, 406 (A): 244—249.
- [9] Hu S, Fan K, Zhang L, et al. Beam loss issue study on the extraction system of a superconducting cyclotron at HUST. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2018(911): 87—93.
- [10] Ding K, Bi Y, Chen G, et al. Study of the beam extraction from superconducting cyclotron SC200//Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications. Zurich, Switzerland, Geneva, Switzerland: JACoW, 2016: 87—90.
- [11] Kim J W. Effects of vertical misalignment of superconducting coils in cyclotrons//Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications. East Lansing, MI, USA, New York: AIP, 2001: 405—407.
- [12] Samsonov E, Kostromin S, Morozov N, et al. Beam dynamics simulations in cyclotron C230 considering imperfections of magnetic field radial component//Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Particle

- Accelerator Conference. Dresden, Germany, Geneva, Switzerland; JACoW, 2014: 3038—3040.
- [13] Zhang T, Lu Y, Zhong J, et al. Design, construction, insrtallati, mapping, and shimming for a 416 - ton compact cyclotron magnet. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1—5.
- [14] Artoos K, Gerardin A, Guinchard M, et al. New techniques for mechanical measurements in the superconducting magnet models//Proceedings of 1<sup>st</sup> International Particle Accelerator Conference. Kyoto, Japan, Geneva, Switzerland: JACoW, 2010: 370—372.
- [15] Bhandari K R, Sinha B, Commissioning of the main magnet of kolkata K-500 superconducting cyclotron//Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville, TN, USA, Geneva, Switzerland: JACoW, 2005: 2765—2767.
- [16] Kleeven W, Abs M, Forton E, et al. The IBA superconducting synchrocyclotron project S2C2//Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications. Vancouver, Canada, Geneva, Switzerland: JACoW, 2013: 115—119.
- [17] Dey M K, Dutta Gupta A, Debnath J, et al. Coil centering of the kolkata superconducting cyclotron magnet//Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Giardini Naxos, Italy, Geneva, Switzerland: JACoW, 2007: 438—440.
- [18] Zhang T, Wang C, Cui T, et al. Design and construction of the main magnet for a 230 MeV superconducting cyclotron. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1—5.
- [19] Kleeven W. Methods for adjusting the position of a main coil in a cyclotron. European Patent 2811813B 1, 2016-01-06.
- [20] Karamysheva G, Karamyshev O, Morozov N, et al. Computer modeling of magnet for SC200 superconducting cyclotron//Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference. Busan, Korea, Geneva, Switzerland: JACoW, 2016: 1265—1267.
- [21] Xu M, Song Y, Chen G, et al. Design and commissioning of Brav measurement system for SC200 superconducting cyclotron. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(6): 93.

(责任编辑 杨 贞)