

CTFEL 装置磁铁设计和测量

闫陇刚¹ 崔玉柱¹ 张 浩¹ 邓德荣¹ 李 青^{2,3} 朱应顺² 杨兴繁¹ 黎 明¹

1(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 绵阳 621900)

2(中科院高能物理研究所 北京 100049)

3(东莞中子科学中心 东莞 523803)

摘要 中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置CTFEL(China Academy of Engineering Physics Terahertz Free Electron Laser, CAEP THz FEL)是国内首台可为用户提供高功率和宽谱太赫兹波的科学设施,CTFEL作为基于加速器的辐射源,磁铁是电子束团的传输、测量和操纵的重要部件之一。根据CTFEL装置磁铁的指标参数设计了磁铁,针对设计中遇到的问题,阐述了解决思路,测量了磁场分布、积分场分布、横向场分布和磁轴等,测试结果表明:所有磁铁都满足了指标要求。目前磁铁已经全部完成了安装和调试,保障了CTFEL装置的顺利出光。

关键词 CTFEL, 磁铁, 结构设计, 磁场测量

中图分类号 TL503.8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.100203

Design and measurement of CTFEL magnets

YAN Longgang¹ CUI Yuzhu¹ ZHANG Hao¹ DENG Derong¹ LI Qing^{2,3}

ZHU Yingshun² YANG Xingfan¹ LI Ming¹

1(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract [Background] China Academy of Engineering Physics THz Free electron laser (CAEP THz FEL), referred to as CTFEL, is the first scientific facility in China that can provide users with high power and wide-spectrum terahertz waves. As an accelerator-based radiation source, magnet is one of the most important components for the transportation, measurement and manipulation of electron bunch. [Purpose] This study aims at the design and measurement of magnets to satisfy that requirements of CTFEL. [Methods] According to the specifications of CTFEL magnets, the magnet system was designed to consist three solenoids, three 45° dipoles, one 90° dipole, six circular quadrupoles and six square quadrupoles. The problems of design and their solution schemes were described. The magnetic field distribution, integral field distribution, transverse field distribution and magnetic axis were measured. [Results & Conclusion] The test results show that all magnets satisfied the specification requirements. At present, all magnets have been completely installed and commissioned to ensure the laser operation of the CTFEL facility.

国家重大科学仪器设备开发专项(No.2011YQ130018)、国家自然科学基金(No.11505174、No.11505173、No.11605190)资助

第一作者: 闫陇刚, 男, 1986年出生, 2010年于兰州大学获硕士学位, 研究领域为自由电子激光理论与技术

通信作者: 邓德荣, E-mail: lppmcm@163.com

收稿日期: 2018-09-04, 修回日期: 2019-04-28

Supported by National Major Scientific Instruments and Equipment Development Project (No.2011YQ130018), National Natural Science Foundation Project of China (No.11505174, No.11505173, No.11605190)

First author: YAN Longgang, male, born in 1986, graduated from Lanzhou University with a master's degree in 2010, focusing on free electron laser theory and technology

Corresponding author: DENG Derong, E-mail: lppmcm@163.com

Received date: 2018-09-04, revised date: 2019-04-28

Key words CTFEL, Magnet, Structure design, Magnetic field measurement

太赫兹波是一种具有很多独特优点的辐射源,光谱学、医学成像、生化检查、无损检测、通信、雷达等领域都对太赫兹波有巨大潜在需求^[1-2]。自由电子激光由于具有高功率、短脉冲、窄带宽的特点,在目前的太赫兹源技术路线中具有重要地位^[3-4]。中国工程物理研究院在成都建造了一台太赫兹自由电子激光装置,命名为CTFEL(China Academy of Engineering Physics Terahertz Free Electron Laser, CAEP THz FEL),该装置是国内首台工作在太赫兹波段并且具有高重复频率和高占空比的谐振腔型自由电子激光器,2017年3月装置首次观测到自发辐射信号,2017年8月29日太赫兹波输出达到饱和^[5-6]。目前,在2~3 THz频率范围内CTFEL装置宏脉冲平均功率大于10 W,宏脉冲重复频率10 Hz,微脉冲功率0.5 MW,微脉冲重复频率54.167 MHz,CTFEL将以用户装置长期为国内外用户提供实验机时。

CTFEL是基于加速器的辐射源,需要磁铁系统对电子束进行传输、测量和操纵,合理的磁铁设计将有利于后期电子束调试^[7]。除此以外,过大的加工误差将导致电子束品质和束流传输效率下降,严重的还会导致无法起振,因此必须对加工工艺进行控制,并在完成加工后对磁铁进行测量^[8]。本文首先介绍了CTFEL装置磁铁的指标参数,然后详述了各类磁铁的设计情况和测试结果,测试结果表明所有磁铁都满足了指标要求。

1 磁铁指标要求

CTFEL装置布局见图1,其束线包括直流高压光阴极注入器、超导加速器、直线束流传输段和波荡器段四大部分。在CTFEL装置S2E束流模拟计算的基础上确定了磁铁的磁铁类型、数量和指标要求^[9],其磁铁包括3台螺线管、3台45°二极铁、1台90°二极铁、6台圆形四极铁和6台方形四极铁。

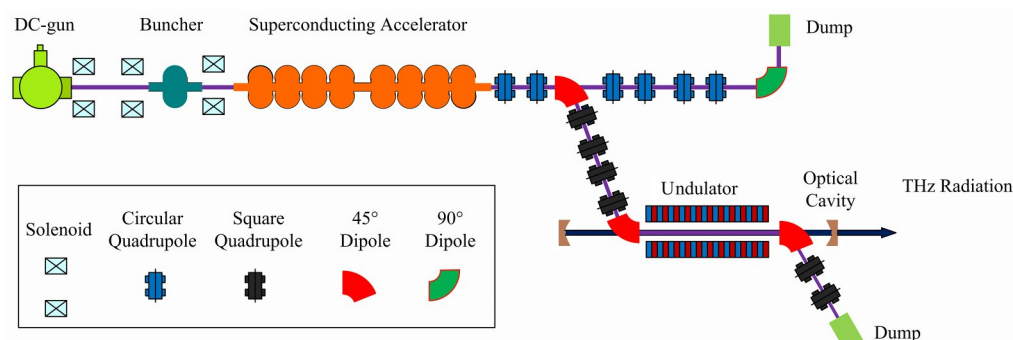


图1 CTFEL装置布局图
Fig.1 Layout of CTFEL facility

CTFEL装置磁铁指标要求见表1。3台螺线管用于直流高压光阴极注入器电子束团的发射度补偿和横向聚焦,最靠近阴极表面的螺线管中心距阴极表面只有约220 mm,阴极表面会有较大漏磁场,会导致电子束发射度快速增长,因此要求距螺线管中心处220 mm的磁场强度小于2 Gs。波荡器段的3台45°二极磁铁组成了dogleg,用于将束团引入和引出波荡器,由于腔镜之间空间狭窄,因此其机械长度需限定在130 mm以下,偏转半径也设定在较小的200 mm。在直线束流传输段的末端有1台90°二极铁,它与其后端狭缝配合用于测量束团能散,为了保证能散测量的准确性,要求其场积分误差小于0.5‰。直线束流传输段还有6台方形四极铁,主要用于束流聚焦和传输。波荡器辐射段共有6台圆形四极铁,波荡器前的4个圆形四极铁主要用于消色

散和束斑形状调节,波荡器后的2个圆形四极铁用于束流聚焦。

2 磁铁设计和测量

CTFEL装置的磁铁使用TOSCA软件进行了模拟和设计,并由北京高能锐新科技有限公司加工。在测量上,从每类磁铁中随机抽取一台用磁场点测台测量了其磁场分布;由于后期准直需要每个磁铁的磁轴信息,因此,用脉冲悬线法测量了所有螺线管磁轴,用旋转线圈测量了所有四极铁磁轴。

2.1 螺线管

根据TOSCA二维计算结果,螺线管由24×30匝实心扁铜线绕制,线圈外围以5 mm的软铁为屏蔽层。为了满足漏磁小于2 Gs的要求,在螺线管靠近

表1 磁铁指标要求
Table 1 Specifications of magnets

	螺线管 Solenoid	45°二极铁 45° dipole	90°二极铁 90° dipole	圆形四极铁 Circular quadrupole	方形四极铁 Square quadrupole
数量 Quantity	3	3	1	6	6
最大场或场梯度 Max. field or gradient / Gs, Gs·cm ⁻¹	300	1 600	1 300	300	400
偏转半径 Deflection radius / mm	—	200	300	—	—
偏转角度 Deflection degree / (°)	—	45	90	—	—
有效长度 Effective length / mm	135	157	471	90	90
间隙或孔径 Gap or aperture / mm	100	43	43	43	43
机械长度 Mechanical length / mm	140	130	—	120	120
好场区 Good field region / mm	—	±17.5	±17.5	±14	±14
场积分误差 Field integral error / ‰	—	5	0.5	—	—
漏场 Leak field / Gs	2	—	—	—	—

直流高压电子枪阴极一端额外加装了软铁屏蔽套，图2展示了这台螺线管中心轴上的轴向磁场分布和软铁屏蔽套实物，当电流为4.63 A时中心磁场强度为302 Gs，阴极表面漏磁场约为1.03 Gs。依据图2的磁场分布计算得到螺线管的磁有效长度约为138 mm，大于指标要求的135 mm。从图2还可以看出螺线管磁场分布平顶很小，这主要是由于螺线管的孔径和机械长度的比值较大。

螺线管在铜线绕制过程中，缺乏保证导线形位公差的手段，因此螺线管磁场可能存在误差，特

别是磁轴和束轴之间不可避免的存在偏差，这种偏差会导致电子束在螺线管中产生横向运动，导致束流损失和束流品质下降^[10]。为此利用脉冲悬线法测量了3台螺线管的磁轴和机械轴之间的夹角。首先利用激光跟踪仪使脉冲悬线的金属丝与螺线管机械轴重合，然后在金属丝中通脉冲电流，由于电磁感应原理金属丝在螺线管磁场中振动，位置传感器检测到的金属丝位置变化的信号，最后利用标定好的系数将该信号转换为角度信息。磁轴夹角的测量结果见表2，在安装准直时将对这些夹角进行校正，从而使得束轴和磁轴尽量重合。注入器中电子能量不超过320 keV，地磁场对电子轨迹的影响比较显著，这也会影响束轴和磁轴的重合性，为此在每台螺线管中放置两组校正线圈用于调整束轴。

表2 3台螺线管磁轴夹角
Table 2 The magnetic axis angles of three solenoids

螺线管编号 Solenoid id / (°)	水平方向偏角 Horizontal angle / (°)	竖直方向偏角 Vertical angle / (°)
1#	0.05	0.09
2#	0.15	0.11
3#	0.18	0.11

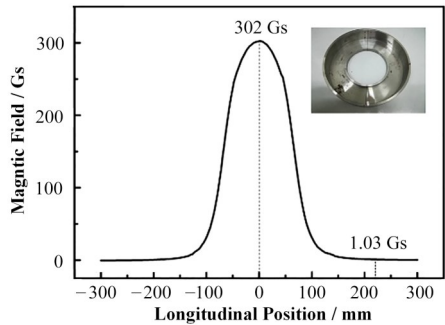


图2 螺线管轴向磁场分布
Fig.2 Distribution of longitudinal field of solenoid

2.2 二极铁

图3显示了45°二极铁在TOSCA中的磁极和磁轭的结构尺寸,其具有典型的C形结构。45°二极铁机械长度被限定在130 mm以下,为此磁极被设计成颈状结构用于安装励磁线圈以节省空间。还由于空间的限制,45°二极铁极面尺寸较小,所以没有采用一般的扇形极面,而是将扇形极面简化为梯形极面,这样既利于扩大好场区,而且更易于机械加工。为了达到要求的好场区和积分场误差,还对梯形极面进行了垫补和切削,优化后的极面结构见图3下部。

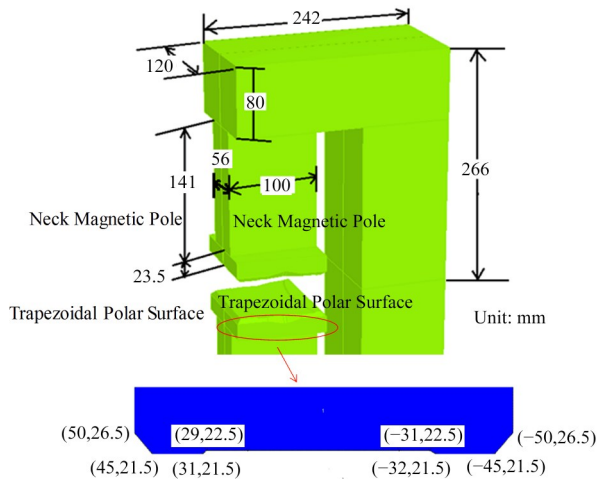


图3 45°二极铁磁极和磁轭的结构尺寸

Fig.3 Structure and dimension of 45° dipole's pole and yoke

图4显示了45°二极铁磁场纵向分布的测量结果,由于45°二极铁极面长度很短,磁场分布平顶很窄,最大磁场为1602 Gs。图5显示了45°二极铁好场区内不同横向位置上的磁场积分和中心磁场,磁场积分曲线两端低于中间,这是有限磁极宽度的必然结果,最大场积分误差出现在好场区最边缘,为2.7‰,满足5‰的指标要求。图5还显示了45°二极铁不同横向位置的中心磁场,好场区内中心磁场均大于

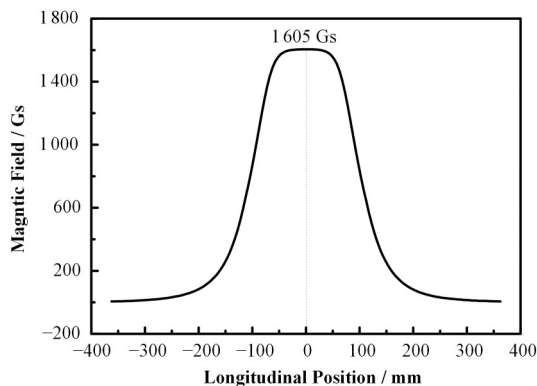


图4 45°二极铁磁场纵向分布

Fig. 4 Longitudinal distribution of field of 45° dipole

1 600 Gs,并且随横向位置增加而增加,这主要是C型磁轭结构造成的,但是整体增幅限制在5 Gs以内。利用图5中的场积分和中心磁场计算了有效长度,在所有横向位置上有效长度均大于157 mm。

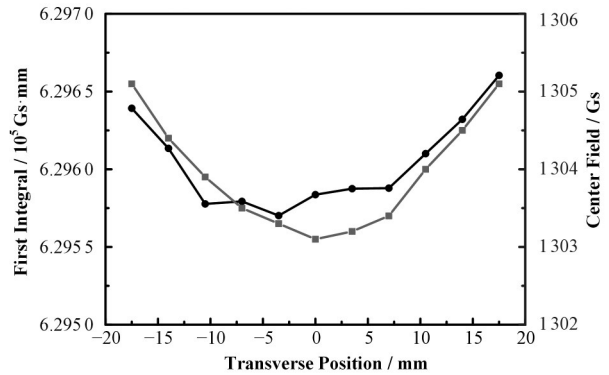


图5 45°二极铁不同横向位置的磁场场积分和中心磁场
Fig.5 Integration of magnetic field and central magnetic field of 45° dipole at different transverse positions

90°二极铁极面为扇形结构,扇角约为83°,由于具有对称结构,因此图6只展示了其磁极和磁轭的二维结构尺寸。图7显示了90°二极铁磁场的纵向

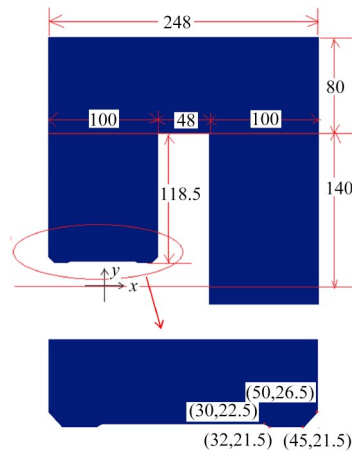


图6 90°二极铁磁极和磁轭的结构尺寸

Fig.6 Structure and dimension of 90° dipole's pole and yoke

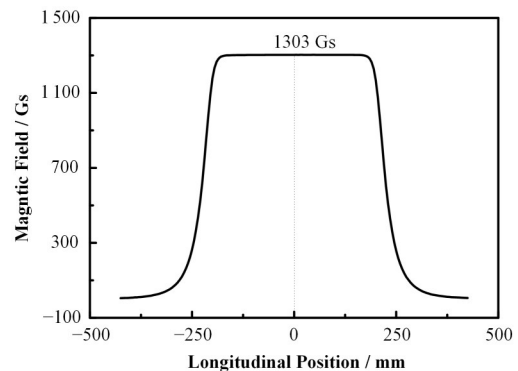


图7 90°二极铁磁场纵向分布

Fig.7 Longitudinal distribution of magnetic field of 90° dipole

分布,磁场分布有较宽的平顶,中心最大磁场约为1 303 Gs。为了达到要求的好场区和积分场误差,同样对扇形极面进行了垫补和切削,见图6下部。图8显示了90°二极铁不同横向位置的磁场积分和中心磁场,图中数据已经扣除扇形磁铁中经常出现的四极分量。不像45°二极铁,积分场曲线两端高于中间,并且积分场曲线在中间有比较宽的平顶,最大场积分误差为0.2 ‰,小于指标要求的0.5 ‰。同样利用图8的场积分和中心磁场计算了有效长度,有效长度均大于指标要求的471 mm。

2.3 四极铁

圆形四极铁磁极结构和关键点坐标见图9。图中AA’是标准双曲线,四极铁内径R为43 mm,因此曲线方程为 $xy=R^2/2=231.125$ 。为了在好场区内达到所需磁场梯度,磁极两边进行了切削,其坐标可见图

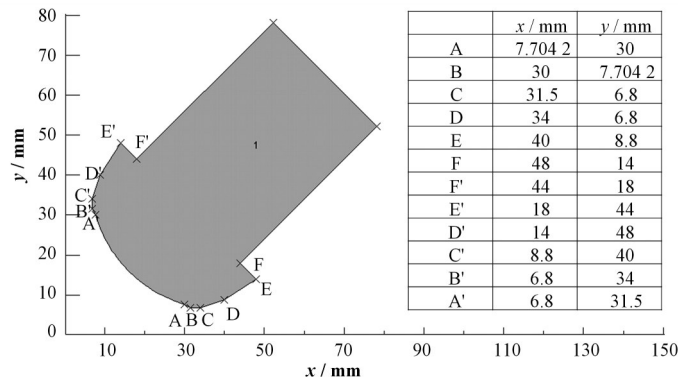


图9 圆形四极铁磁极结构和关键点坐标
Fig.9 Structure and key coordinates of circle quadrupole's pole and yoke

在两类四极铁之间,最大的差别在于磁轭的设计。圆形四极铁主要用于波荡器段消色散,这一段对磁铁误差要求较高,为了减小加工误差,磁轭为整体机加成型。方形四极铁主要用于直线束流传输段束团聚焦,磁轭设计为可拆解的四合一结构,虽然加工误差相对变大,但是这种结构便于安装。

四极铁磁轴和束轴如果不重合,会导致束流偏离^[11],利用旋转线圈测量了四极铁磁轴相对机械轴的偏移,图10显示了最大电流下6台圆形四极铁(CQ)和6台方形四极铁(SQ)磁轴与机械轴在X(水平)和Y(竖直)方向的偏差,可以看出所有的偏差都在0.1 mm的范围内,但是方形四极铁偏差的离散性要明显大于圆形四极铁,这与它们磁轭不同的加工方法有关。在标定和安装四极铁时,根据图10的测量结果修正了磁轴偏移量,使得磁轴和束轴重合。

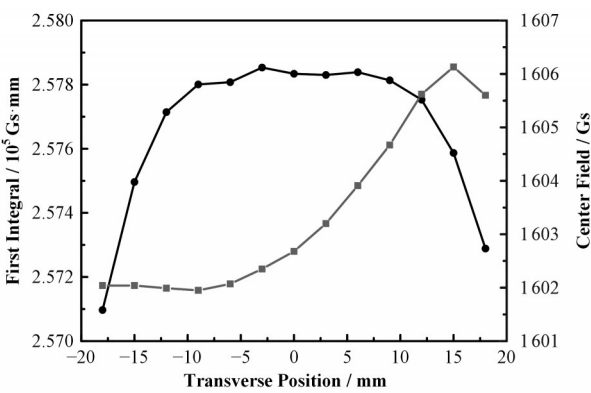


图8 90°二极铁不同横向位置的磁场场积分和中心磁场
Fig.8 Integration of magnetic field and central magnetic field of 90° dipole at different transverse positions

9中其它点间。经过测量,在好场区内磁场梯度均达到了要求的300 Gs·cm⁻¹。方形四极铁与圆形四极铁磁极只有很小的改动,这里不做展示。

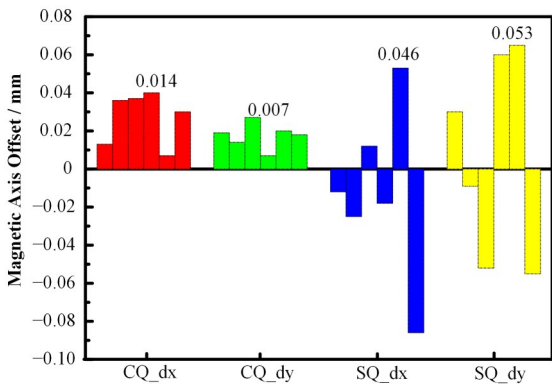


图10 6台圆形四极铁(CQ)和6台方形四极铁(SQ)磁轴偏移
Fig.10 Magnetic axis deviation of six circle quadrupoles (CQ) and six square quadrupoles

3 结语

本文中,我们设计和测量了CTFEL装置的磁铁,其中包括3台螺线管、3台45°二极铁、1台90°二极铁、6台圆形四极铁和6台方形四极铁。螺线管通过外加屏蔽套抑制了漏场对阴极表面电子发射度的影响;45°二极铁机械长度限定在130 mm以下,以节省波荡器段空间;45°二极铁和90°二极铁中心最大磁场分别约为302 Gs和1 602 Gs,经过极面优化好场区内积分场误差分别为2.7‰和0.2‰;分别测量了螺线管和四极铁磁轴,并在安装标定时进行了校正,避免了磁轴和束轴不重合导致的束流偏离。所有磁铁性能都达到了设计指标要求,有力保障了CTFEL装置调束实验和稳定运行。

参考文献

- 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, **38**(05): 481–486.
LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, **38**(05): 481–486.
- 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(II)[J]. 微波学报, 2011, **27**(01): 1–5.
ZHENG Xin, LIU Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system[J]. Journal of Microwaves, 2011, **27**(1): 1–5.
- 蔡根旺, 张腊梅, 樊志琴. 太赫兹自由电子激光器研究进展[J]. 科技信息, 2009, **29**(1): 25–26.
CAI Genwang, ZHANG Lamei, FAN Zhiqin. Research progress in THz free electron laser[J]. Science & Technology Information. 2009, **29**(1): 25–26.
- Neil G R. Accelerator sources for THz science: a review[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, **35**(1): 5–16.
- 许州, 杨兴繁, 黎明, 等. 高平均功率太赫兹自由电子激光装置设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, **11**(1): 1–6.
XU Zhou, YANG Xingfan, LI Ming, *et al.* Design of a high average power terahertz-FEL facility[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, **11**(1): 1–6.
- 黎明, 杨兴繁, 许州, 等. CAEP太赫兹自由电子激光首次饱和出光[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(10): 29100101.
LI Ming, YANG Xingfan, XU Zhou, *et al.* First lasing of CAEP THz free electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(10): 29100101.
- 韦隽昊, 罗焕丽, 陈曲珊, 等. 紧凑型自由电子激光THz源上四极磁铁的设计及测量[J]. 强激光与粒子束, 2016, **28**(11): 28115101. DOI: 10.11884/HPLPB201628.160009.
WEI Junhao, LUO Huanli, CHEN Qushan, *et al.* Quadrupoles design and measurement for a compact THz FEL[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, **28**(11): 28115101. DOI: 10.11884/HPLPB201628.160009.
- 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
LI Quanfeng. Numerical calculation of electromagnetic fields and design of electromagnetics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- 李鹏, 焦毅, 柏伟, 等. 中国工程物理研究院FEL-THz束线从头至尾模拟设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**(8): 213–217.
LI Peng, JIAO Yi, BAI Wei, *et al.* Start-to-end simulation of CAEP FEL-THz beamline[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, **26**(8): 213–217.
- 杨晓东, 何源, 赵红卫, 等. HIRFL-CSR电子冷却装置高精度螺线管线圈制作及磁场测量[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(5): 649–653.
YANG Xiaodong, HE Yuan, ZHAO Hongwei, *et al.* Manufacture and magnetic field measurement of high precision solenoid Coils for HIRFL-CSR electron cooling device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(5): 649–653.
- Wang B, Zheng S, Wu L, *et al.* Fiducialization of the small-aperture quadrupoles based on the vibrating wire method[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016, **812**(1): 37 – 42. DOI: 10.1016/j.nima.2015.12.025.