

一种新型高梯度四极磁铁的设计及验证

朱 亚^{1,2,3} 张庆磊^{1,3} 周巧根^{1,3}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

摘要 随着第四代光源衍射极限环的发展,束流发射度越来越小,四极磁铁的磁场梯度要求越来越高。高梯度四极磁铁的研制已成为衍射极限环发展的关键元件之一。四极磁铁的磁场梯度取决于磁铁孔径、安匝数和磁效率。对于高饱和的高梯度四极磁铁,提高磁效率成为一种提高磁场梯度的可靠方案。本文设计了一种新型磁路来提高磁效率,从而提升四极磁铁的磁场梯度。应用该新型磁路设计了一台梯度大于 $100 \text{ T} \cdot \text{m}^{-1}$ 的高梯度四极磁铁,并通过 Poisson 程序和 Opera 软件进行二维和三维模拟计算,验证其可行性和有效性。

关键词 四极磁铁, 高磁场梯度, 永磁铁, 磁场质量

中图分类号 TL503.8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102

Design and verification of a novel high gradient quadrupole magnet

ZHU Ya^{1,2,3} ZHANG Qinglei^{1,3} ZHOU Qiaogen^{1,3}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract [Background] High gradient quadrupole magnet has become a key element with the development of diffraction-limited storage ring for the fourth generation light source. The gradient of magnetic field of a quadrupole magnet depends on the inscribed radius, ampere-turns per pole and magnetic efficiency. However, the radius and ampere-turns per pole cannot be reduced or increased indefinitely. Improving magnetic efficiency has become an effective method to improve the gradient of magnetic field. [Purpose] This study aims to design a novel magnetic circuit to improve magnetic efficiency and verify the effectiveness by simulation. [Methods] Permanent magnets were installed on both sides of the poles face to improve the efficiency of saturated magnets, so as to improve the magnetic field gradient of the quadrupole magnet. A novel high gradient quadrupole magnet, targeted $100 \text{ T} \cdot \text{m}^{-1}$, was designed to verify the theory by simulation calculation using Poisson for 2D analysis and OPERA for 3D analysis. The effect to the magnetic field quality of the novel magnetic circuit was optimized to achieve good field region. [Results] Simulation results show the magnetic field gradient of designed novel high gradient quadrupole magnet reaches to $100 \text{ T} \cdot \text{m}^{-1}$ when the ampere-turns per pole is about 5400AT. The magnetic efficiency is about 91%. All of the multipole components of magnetic field meet the requirements. [Conclusions] The design of the new quadrupole magnet provides a feasible and effective solution for the design of high gradient quadrupole magnet in the future.

中国科学院青年创新促进会(No.2020287)资助

第一作者: 朱亚, 男, 1990年出生, 2015年于中国科学院大学获硕士学位, 研究领域为核技术及应用

通信作者: 周巧根, E-mail: zhouqiaogen@zjlab.org.cn

收稿日期: 2021-12-21, 修回日期: 2022-04-06

Supported by the Youth Innovation Promotion Council of Chinese Academy of Sciences (No.2020287)

First author: ZHU Ya, male, born in 1990, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a master's degree in 2015, focusing on nuclear technology and application

Corresponding author: ZHOU Qiaogen, E-mail: zhouqiaogen@zjlab.org.cn

Received date: 2021-12-21, revised date: 2022-04-06

Key words Quadrupole magnet, High gradient of magnetic field, Permanent magnet, Magnetic field quality

目前,世界上第三代同步辐射光源的束流发射度大多在 $1\sim 5\text{ nm}\cdot\text{rad}$ 范围内^[1-3]。与现有同步辐射光源相比,衍射极限环具有更低的束流发射度、更高的亮度和更好的横向相干性。衍射极限环最重要的特征是束流发射度接近衍射极限^[4-5]。衍射极限环以其优异的性能成为下一代同步辐射光源的发展方向之一。四极磁铁作为加速器中的强聚焦元件,为了实现衍射极限环超低束流发射度的要求,需要大幅度提高其磁场梯度。与上海光源储存环中的四极磁铁相比,衍射极限环的四极磁铁磁场梯度应至少增加 4~5 倍(约 $100\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$)^[6-7]。高梯度四极磁铁的技术研究对于低发射度的衍射极限环的发展有重要意义。

目前,国内外已发展了各种类型的高梯度四极磁铁。例如,欧洲同步辐射光源(European Synchrotron Radiation Facility, ESRF)中四极磁铁的最大梯度约为 $90\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$,孔半径为 12.7 mm 。该四极磁铁的磁效率仅为 80% ^[8];德国电子同步加速器(Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY)开发的高梯度四极磁铁,孔半径为 10 mm ,采用不同的铁芯材料,磁场梯度可以达到 $120\sim 150\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ 。当铁芯材料为 HeraSteel 时,该四极磁铁的梯度可达 $150\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$,但其磁效率仅为 54% ^[9];我国北方光源研制的四极磁铁最大梯度约为 $90\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$,孔半径为 12.5 mm ,铁芯材料为钴钕铁^[10];合肥先进光源设计了高梯度四极磁铁,磁场梯度约为 $80\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$,极间距为 10 mm ^[11]。这些国内外研制的高梯度四极磁铁大多采用尽量小的孔径,尽可能大的安匝数(Ampere Turn, AT),以及采用磁导率更高的材料替代纯铁以提高磁效率。本文主要研究和设计了一种采用新型磁路的高梯度四极磁铁,其参数如表 1 所示。

表 1 新型高梯度四极磁铁物理参数
Table 1 Parameters of the high gradient quadrupole magnet

参量 Parameters	数值 Value
孔半径 Inscribed radius / mm	11
磁场梯度 Gradient / $\text{T}\cdot\text{m}^{-1}$	100
好场区半径 Good reference radius / mm	5
高阶场误差 Multipole errors	$< 5\times 10^{-4}$

1 磁路设计

根据安培环路定理,如图 1 所示,推导出四极磁铁的磁场梯度方程(式(1)),其中: G 是磁场梯度; NI/pole 是每极的安匝数; R 是孔半径; μ 是磁导率;

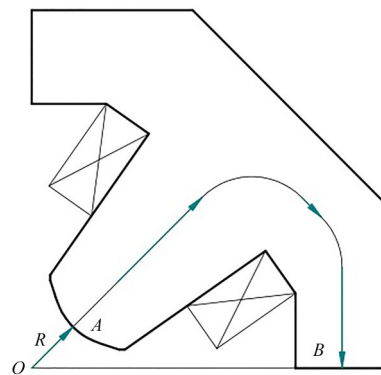


图 1 四极铁中安培环路示意图
Fig.1 Schematic diagram of ampere loop in quadrupole magnets

η 是磁效率^[12]。

$$\int_0^R \frac{G \cdot r}{\mu_0} \cdot dr + \int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{l} = \text{NI/pole} \quad (1)$$

$$G = 2\eta\mu_0 \frac{\text{NI/pole}}{r^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\int_0^R G r dr}{\mu_0 \text{NI/pole}} \quad (3)$$

根据式(2)可以看出,四极磁铁的磁场梯度取决于磁铁的孔径、单极安匝数和磁效率。由于真空室加工工艺、同步辐射光引出的空间需求以及磁铁好场区要求等限制,四极磁铁的孔径不能很小。由于冷却水温度和磁铁安装空间的限制,每极的安匝数也不能无限增加。而且,由于铁芯材料的磁化特性,磁场也不会随安匝数增大无限提高。高梯度四极磁铁的磁极通常处于高磁饱和状态,磁效率通常较低,提高磁效率可以成为提高磁场梯度的有效途径之一。本文研究了一种新型的磁路来提升高梯度高饱和四极磁铁的磁效率,从而进一步提高磁场梯度。

通过在四极磁铁相邻磁极之间安装永磁铁(Permanent Magnets, PM),形成了一种新型磁路。当永磁铁安装在极面附近时,永磁铁的磁场将影响原来的磁路。如图 2 所示,从饱和磁极处逸出的磁力线将通过永磁铁的磁场返回磁极面,从而增加磁极面上的磁场强度。根据式(3),由于磁极表面的磁场强度增加,而每个磁极的安培数保持不变,因此磁效率提高。当磁极饱和时,安装永磁铁相当于提供一个特殊的磁路。当磁极不饱和时,永磁铁基本不起作用。这种新型四极铁磁路可以进一步提高饱和四极磁铁的磁效率和磁场梯度(本文模拟的永磁铁参数均为 $H_c = -11\,700\text{ Gs}$ 和 $B_r = 12\,500\text{ Gs}$)。

采用 Poisson 程序研究在磁极两侧安装了永磁

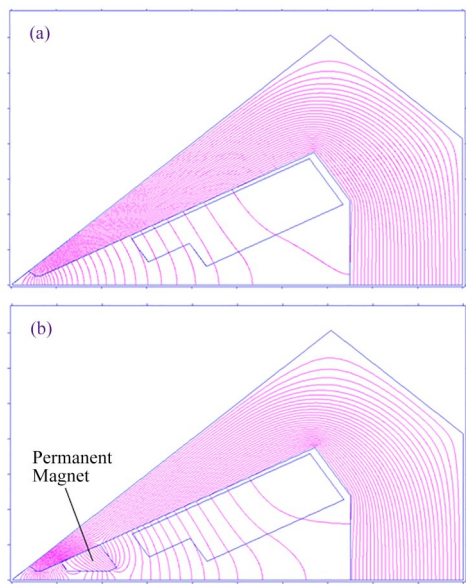


图2 四极铁极头两侧安装永磁块前(a)、后(b)Poisson计算结果图

Fig.2 Poisson calculation results of before (a) and after (b) the permanent magnets installed on both sides of the pole face

铁和没有安装永磁铁的四极磁铁在不同极安匝数下的磁场梯度。两个四极磁铁均为孔半径 11 mm 的同一磁芯，结果如图 3 所示。非饱和状态下的梯度值与安匝数成正比，永磁铁对磁场梯度几乎没有影响。由于材料的磁化特性，当安匝数增加到足够大时，磁极趋于饱和，磁场梯度不再上升，这时在磁极两侧安装永磁铁可以进一步提高磁场梯度。未安装永磁铁的四极磁铁在安匝数达到 8 000 后，其梯度达到 100 T·m⁻¹左右，基本上不再上升，磁效率约为 60%。当安匝数达到 5 300 时，装有永磁铁的四极磁铁的梯度将达到 100 T·m⁻¹左右，磁效率约为 91%。由结果可见，磁场梯度达到 100 T·m⁻¹时，采用新型磁路的四极磁铁磁效率更高，所需的安匝数更小，运行成本更低。

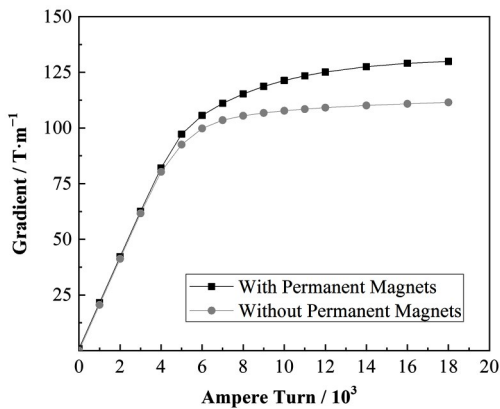


图3 不同安匝数下磁场梯度变化曲线
Fig.3 Curves of magnetic field gradient in different Ampere-turns

通过 Poisson 计算并比较了三种四极磁铁(孔半径分别为 10 mm、12.5 mm 和 15 mm)在相同安匝数(5 300)下的磁场梯度和磁效率,如表 2 所示。由仿真结果可见,在磁极两侧安装永磁铁可以提高磁效率。磁场饱和程度越高,磁效率的提高越明显。以上研究结果表明:这种新型磁路能明显提升高梯度高磁饱和四极磁铁的磁效率和磁场梯度。

表2 不同孔径下磁场梯度和磁效率对比 Table 2 Gradient and efficiency of three radiuses with/without installing permanent magnets			
孔半径 Inscribed radius / mm	有无永磁块 With/without PM	梯度 Gradient / T·m ⁻¹	磁效率 Efficiency / %
10	无 Without PM	106.2	79.7
	有 With PM	121.4	91.1
12.5	无 Without PM	74.9	87.8
	有 With PM	80.5	94.4
15	无 Without PM	54.9	92.7
	有 With PM	56.1	94.8

2 场误差模拟计算

磁铁的磁场质量主要由设计、加工和装配误差等决定。磁场的高阶分量是衡量磁铁磁场质量的关键指标。磁场的高阶分量系数分为两部分:系统误差和非系统误差^[13]。系统误差是由理想磁铁的对称性决定。对于四极磁铁,系统误差对应的磁场高阶分量为 B_6 、 B_{10} 、 B_{14} 等。通过合理的设计,可以有效降低好场区范围内的系统误差。极面优化和端部削斜是磁场质量优化的两种常规方法。非系统误差主要是加工误差和装配误差产生的磁场高阶分量。

虽然永磁铁的安装可以有效提高四极铁的磁效率及磁场梯度,但它们也可能会对磁场的质量产生影响。需要对永磁铁的安装对四极铁磁场质量的影响进行研究。根据该新型高梯度四极磁铁的要求,其磁极间隙为 10 mm,好场区半径为 5 mm,磁场高阶分量小于 5×10^{-4} 。

2.1 二维磁场优化

在四极铁的二维横截面中,初始状态下磁极面形状是标准双曲线的一部分。孔半径为 11 mm,相邻磁极间的间隙为 10 mm。在磁极面两侧添加永磁铁降低了磁极处磁场的饱和程度,对磁场质量会有一些影响。通过 Poisson 程序计算出半径为 5 mm 时磁场高阶分量,如表 3 所示。可以看出,最大高阶分量约为 -2×10^{-3} ,不能满足要求。安装永磁铁后,高阶分量与未安装永磁铁状态下的高阶分量相比变化不大。

表3 初始状态下未安装和安装永磁块的四极铁高阶分量系数

Table 3 Multipole components of primary condition with and without installing permanent magnets

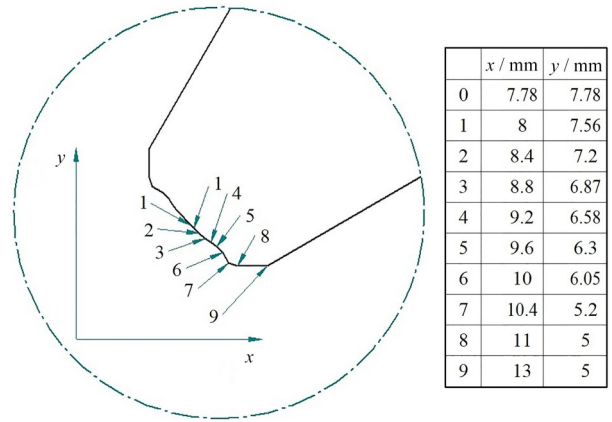
高阶分量系数 Multipole components	未安装永磁块 Without PM	安装永磁块 With PM
B_6/B_2	-2×10^{-3}	-2.5×10^{-3}
B_{10}/B_2	-5.5×10^{-5}	-6.6×10^{-5}
B_{14}/B_2	-6×10^{-9}	-3.6×10^{-9}

经过磁极面优化^[14]后,最终获得优化后磁极面坐标,如图4所示。优化后的计算结果如表4所示,在5 mm半径处高阶分量小于 2×10^{-4} ,满足设计要求。极面优化后,安装永磁铁的四极磁铁的高阶分量略小于未安装永磁铁的四极磁铁。如果安装在磁极两侧的永磁铁的性能基本相同,则安装永磁铁后的磁场质量基本相同或更好。通过对永磁块进行排序优化,可以保证安装在磁极两侧的永磁铁的总体性能基本相同。所以通常对于高饱和和高梯度四极磁铁,永磁铁的安装对二维横截面上系统性磁场高阶误差影响很小。

2.2 永磁块剩磁误差和安装误差对磁场质量的影响

利用 Poisson 软件模拟研究永磁块的剩磁误差和安装误差对四极磁铁的磁场高阶分量的影响。理想情况下,4个磁极两侧永磁块的总磁矩以及位置具有对称性。如果其中一组永磁块的剩磁或位置发生变化,将产生磁场的非系统误差。

假设其中一组永磁块的剩磁减小了5%,计算得到永磁块剩磁的不一致导致各个高阶分量系数的变化如图5所示。结果表明:永磁块剩磁的误差在5%时, $n=3$ 阶及以上 b_n 的最大变化量为 0.2×10^{-5} , a_n 的最

图4 优化后磁极面坐标
Fig.4 Coordinates of pole face after optimization表4 优化后未安装和安装永磁块的四极铁高阶分量系数
Table 4 Multipole components with and without installing permanent magnets after pole face optimization

高阶分量系数 Multipole components	未安装永磁块 Without PM	安装永磁块 With PM
B_6/B_2	7.68×10^{-5}	1.54×10^{-5}
B_{10}/B_2	-1.85×10^{-4}	-1.84×10^{-4}
B_{14}/B_2	-9.7×10^{-7}	-9.7×10^{-7}

大变化量约为 2×10^{-5} ,比磁场高阶分量要求小一个量级。 $n=1$ 阶的变化较大,会导致磁中心偏移约 $1.36 \mu\text{m}$ 。

假设其中一组永磁块的位置改变了0.1 mm,模拟计算得到永磁块安装误差导致各个高阶分量系数的变化如图5所示。结果显示:永磁块的位置误差为0.1 mm时, $n=3$ 阶及以上 b_n 的最大变化量为 4×10^{-5} , a_n 的最大变化量约为 3×10^{-5} ,远小于磁场高阶分量要求,磁中心偏移约 $2.21 \mu\text{m}$ 。

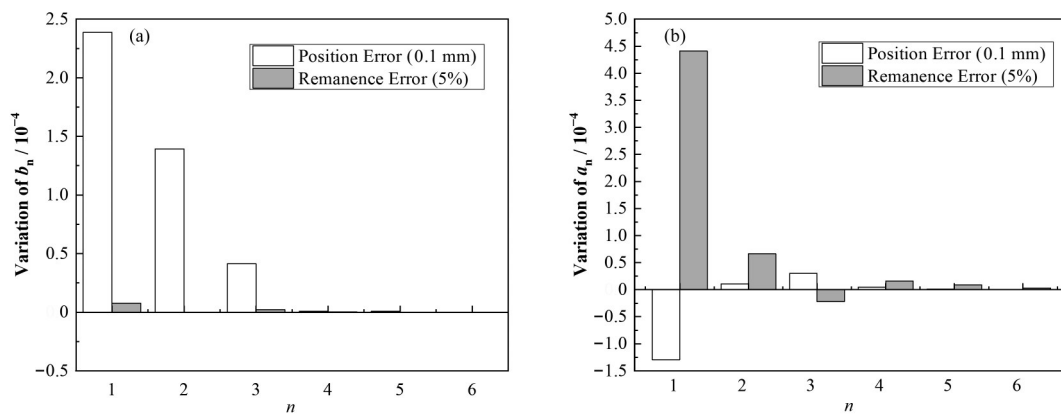


图5 永磁块剩磁误差和安装误差导致高阶分量系数的变化量

Fig.5 Changes of high-order component coefficient of multipole components caused by remanence error and installation error of the permanent magnets

根据模拟结果可以认为永磁块剩磁误差在5%以内、安装误差小于0.1 mm时,永磁块的剩磁误差

和安装误差对磁场质量基本没有影响。按照目前的加工和安装工艺水平,永磁块的剩磁误差一般远小

于5%,磁块的安装可以通过安装定位板等机械结构设计以保证安装精度在0.1 mm以下。

2.3 三维场端部效应及其补偿

通过 OPERA 进行了三维模型的计算和研究。该新型四极磁铁的铁芯长度为200 mm。根据优化后的二维坐标,建立了该四极磁铁的1/8模型,如图6所示。计算模型的单极安匝数为5 300,利用三维模型计算磁场积分场的高阶分量,计算在半径5 mm处,长度为400 mm的磁场积分结果。通过傅里叶变换可以得到磁场的高阶分量,如表4所示。磁场高阶场误差均小于要求(5×10^{-4}),但由于端部磁场的影响,高阶分量 B_6L/B_2L 的值相对于二维平面模拟的 B_6/B_2 的值增大了。

对于三维模型,系统性高阶误差还可以通过端部削斜^[15]来优化。通过优化计算,对于该四极磁铁,当角度约为30°、倒角深度约为6 mm时,磁场高阶分量最小。优化后磁场高阶分量如表5所示。结果表

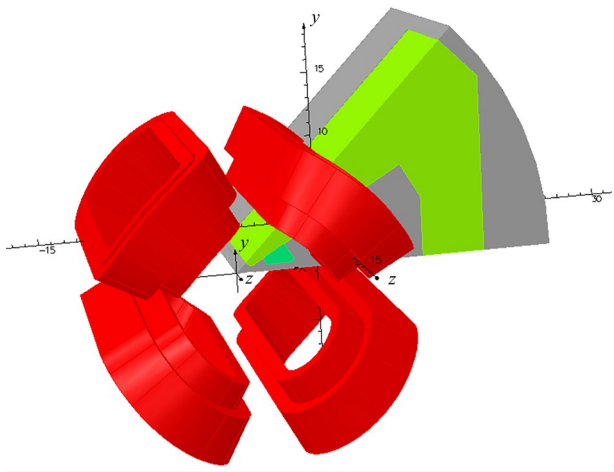


图6 四极磁铁的OPERA计算三维模型
Fig.6 Computational model of quadrupole magnet in OPERA

明:永磁铁的安装对三维磁场高阶分量的影响不大,并且通过削斜依然可以有效降低系统性高阶分量。

表5 三维模型计算的高阶分量系数
Table 5 Multipole components in 3D

	高阶分量系数 Multipole components	未安装永磁铁 Without PM	安装永磁铁 With PM
削斜前 Before chamfering	B_6L/B_2L	-2.11×10^{-4}	-1.75×10^{-4}
	$B_{10}L/B_2L$	-1.25×10^{-4}	-1.73×10^{-4}
削斜后 End chamfering	B_6L/B_2L	-0.57×10^{-4}	-0.24×10^{-4}
	$B_{10}L/B_2L$	-1.73×10^{-4}	-1.75×10^{-4}

3 结语

本文设计了一种新型高梯度四极磁铁,采用新型磁路,即在四极磁铁磁极两侧安装永磁铁,增大了磁场的最大梯度。该高梯度四极磁铁孔径为22 mm,相邻磁极间的间隙为10 mm。当单极安匝数约为5 300时,梯度可达 $100\text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$,磁效率约达到91%;永磁铁的安装合理利用了铁芯中心的空间,不会影响真空室的安装;以现有的工艺水平,永磁块的剩磁误差和安装误差都在可控的范围内,通过优化排序安装在磁极两侧的永磁铁的性能将基本相同,永磁铁的安装对磁场质量几乎没有影响,对磁铁的好场区大小也几乎没有影响。综上所述,该新型四极磁铁的设计为今后高梯度四极磁铁的设计提供了一个可行且有效的解决方案。

作者贡献声明 朱亚:负责仿真模拟和数据分析整理,起草论文并完成后续修订;张庆磊:负责获取研究资金,指导论文写作;周巧根:指导仿真与实验,指导并协助论文写作与修改。

参考文献

1 Zhao Z T. Storage ring light sources[J]. Reviews of Accelerator Science and Technology, 2010, 3(1): 57 - 76. DOI: 10.1142/s1793626810000361.

2 Xu H J, Zhao Z T. Current status and progresses of SSRF project[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, 19(1): 1 - 6. DOI: 10.1016/S1001-8042(08)60013-5.

3 Han Y A, Liu G M, Li D M. Magnet lattice design of the SSRF electron-beam transfer lines[J]. Nuclear Science and Techniques, 2006, 17(4): 193 - 197. DOI: 10.1016/S1001-8042(06)60036-5.

4 焦毅, 徐刚, 陈森玉, 等. 衍射极限储存环物理设计研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 045108. DOI: 10.11884/HPLPB201527.045108.

JIAO Yi, XU Gang, CHEN Senyu, et al. Advances in physical design of diffraction-limited storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 045108. DOI: 10.11884/HPLPB201527.045108.

5 Hettel R, Borland M. Perspectives and challenges for diffraction-limited storage ring light sources[J].

- Pasadena, CA USA: Proceedings of the North American Particle Accelerator Conference (PAC2013), 2013: 19 - 23.
- 6 Zhao Y, Jiao Y, Wang S. Design study of APS-U-type hybrid-MBA lattice for mid-energy DLSR[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(7): 71. DOI: 10.1007/s41365-021-00902-1.
 - 7 赵瑀, 李志平, 刘伟航, 等. 衍射极限储存环光源相关物理问题[J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2587 - 2600. DOI: 10.1360/TB-2020-0165.
ZHAO Yu, LI Zhiping, LIU Weihang, *et al.* Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(24): 2587 - 2600. DOI: 10.1360/TB-2020-0165.
 - 8 Le Bec G, Chavanne J, Benabderrahmane C, *et al.* High gradient quadrupoles for low emittance storage rings[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2016, **19**(5): 052401. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.19.052401.
 - 9 Wanzenberg R, Agapov I, Brefeld W, *et al.* Design status of the ultra-low emittance synchrotron facility PETRA IV [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, **2054**(1): 030002. DOI: 10.1063/1.5084565.
 - 10 Zhu Y S, Chen F S, Yang M, *et al.* Development of prototype high gradient small aperture quadrupole magnets for HEPS-TF[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, **28**(3): 1 - 5. DOI: 10.1109/TASC.2017.2772860.
 - 11 Zhang B, Ren Z L, Xu H L, *et al.* Preliminary Design of the Magnets of HALS[C]. Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI2018), JACoW Publishing, 2018: 129 - 132.
 - 12 Tanabe J. Iron dominated electromagnets: design, fabrication, assembly and measurements[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2005. DOI: 10.2172/878409.
 - 13 李波, 刘华昌, 巩克云, 等. 散裂中子源 Quadrupole-D 漂移管磁铁的研制[J]. 核技术, 2019, **42**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050201.
LI Bo, LIU Huachang, GONG Keyun, *et al.* The development of Quadrupole-D magnet for CSNS drift tube[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050201.
 - 14 Bec G L, Chavanne J. Shape optimization for the ESRF II magnets[C]. Dresden, Germany: TUPRO082, International Particle Accelerator Conference (IPAC14), 2014.
 - 15 Hassenzahl W V. An Algorithm for Eliminating the Duodecapole Component in Quadrupole Magnets[C]. Proceeding 4th International Conference on Magnet Technology, 1972: 469.