



·粒子束及加速器技术·

基于动态磁聚焦的 CT 球管飞焦点研究*

付 伟, 王 严 梅, 吕 向 英, 王 鹏

(北京真空电子技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 作为 CT 设备的核心器件, CT 球管采用动态磁聚焦技术以利于大电流输出时小焦点的实现。飞焦点技术可以多角度记录每次扫描的每个投影, 提高采样率, 从而大幅改善图像清晰度, 提高成像质量。当 CT 球管为 1 A 大电流输出时, 采用 CST 软件对双磁四极透镜关键参数进行模拟仿真及优化, 满足焦点目标尺寸为 0.2 mm×0.6 mm 的同时具备飞焦点功能。

关键词: 核心器件; CT 球管; 动态磁聚焦; 双磁四极透镜; 飞焦点

中图分类号: TN14

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210392

Research of flying focal spot of the CT tube based on dynamic magnetic focusing

Fu Wei, Wang Yanmei, Lü Xiangying, Wang Peng

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: CT tube is the core component of CT equipment. CT tube adopts dynamic magnetic focusing technology to facilitate the realization of small focus when there is large current output. Flying focal spot technology can record each projection of each scan from multiple angles, improve the sampling rate, and greatly improve the image definition and quality. CST software is used to simulate the CT tube based on dynamic magnetic focusing. When the CT tube outputs high current of 1 A, the key parameters of the dual magnetic quadrupole lens are optimized to get the target size of focus of 0.2 mm×0.6 mm and the function of flying focus.

Key words: core component; CT tube; dynamic magnetic focusing; dual magnetic quadrupole lens; flying focal spot

X 射线计算机断层扫描成像(简称 CT)可以对人体进行非侵入性高解析度 3D 成像, 从而清晰显示人体内部的病变信息, 可观察到普通 X 射线机难以显示的机体软组织状况(如脑出血)、各种微小肿瘤等, 为疾病的快速诊断和病灶的准确定位提供了最为直接可靠的依据^[1], 因此在临床和科研上应用广泛, 成为诊断过程中不可或缺的重要技术手段^[2]。近几十年来, CT 已经从第一代发展到第五代, 从轴向发展到螺旋扫描方式, 从单层螺旋 CT(SSCT)发展到多层螺旋扫描 CT(MSCT)。其中用于 CT 机中的 X 射线管(简称 CT 球管)是 CT 设备的核心器件^[3]。CT 球管的主要性能指标是热容量和散热率^[4]。具有一定焦斑尺寸且具备飞焦点功能的大功率、高管电流、高散热率球管是其发展方向之一, 电子束在静电场或磁场作用下形成焦斑轰击在阳极靶面上, 且可在不同位置快速变换, 能够在探测器宽度不变的前提下实现在每个投影位置上的多倍采样, 极大地提高分辨率。随着 CT 整机的发展, 对 CT 球管的要求也越来越高, 更大的发射电流、更小的焦点可以提高图像的分辨率^[5], 但同时会导致静电聚焦不易实现。采用双磁四极透镜系统的动态磁聚焦方式因可实现更高的电子束压缩倍率, 而被国外各大 CT 球管厂家研究并应用, 是目前国外高端球管采用的一项电子束控制技术, 国内对双磁四极透镜的研究还处于起步阶段, 未得到实际应用。

本文将重点讨论双磁四极透镜原理、结构, 并采用仿真方法分析双磁四极透镜相应参数对焦斑的影响, 以实现具备飞焦点功能的满足一定焦斑尺寸的电子注。

* 收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-11-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0111500)

联系方式: 付 伟, ee971898508@outlook.com。

1 双磁四极透镜聚焦原理

静电聚焦系统结构如图 1 所示^[6], 两独立控制电极施加不同电位后, 因对电子束作用力大小不同而使电子束发生偏转, 焦点偏移。双磁四极透镜系统结构如图 2 所示, 国外部分机构在动态磁聚焦飞焦点技术的应用状况如表 1 所示^[7]。

1963 年, Dymnikov 提出了“俄罗斯四极组合 (Russian quadruplet)”的聚焦透镜组结构, 为磁四极透镜聚焦系统奠定了理论基础^[8]。磁四极透镜由平行于 Oz 轴的 4 根柱形磁极所组成, 磁极间交替排列, 相同磁极对称放置^[9]。

透镜的孔径定义为与各电极内切的圆半径 a 。四极磁透镜理想的纯垂直和斜四极场极面形状满足双曲线方程^[10]

$$\begin{cases} xy = \frac{a^2}{2} \\ x^2 - y^2 = a^2 \end{cases} \quad (1)$$

即 4 个极面对称排列, 且轴线上磁场等于 0^[11], 这种结构的孔径内磁场呈线性分布。即

$$\begin{cases} \frac{dB_x}{dy} = G \\ \frac{dB_y}{dx} = G \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 为磁场梯度, 即

$$\begin{cases} B_x = Gy \\ B_y = Gx \end{cases} \quad (3)$$

磁场梯度为

$$G = \frac{B_\rho}{a} = \mu_0 \frac{2IN}{a^2} \quad (4)$$

荷电粒子在四极磁透镜场中受力分析, 对于正粒子有

$$F_x = qv_z Gx, F_y = -qv_z Gy \quad (5)$$

式中: q/m 为粒子荷质比; I 为励磁电流强度; N 为线圈匝数; μ_0 为真空中磁导率; v 为电子运动速度; F_x, F_y 为荷电粒子沿 x, y 轴方向受力大小。由式(5)可知, 粒子在一个方向受到会聚力作用, 而在正交方向上会受到发散力作用^[12]。通过设置 2 个或多个正交四极透镜, 可实现矩形电子注的双向压缩。磁四极透镜的聚焦特性取决于磁场梯度 (G) 和磁刚度 (B_ρ)^[13]。

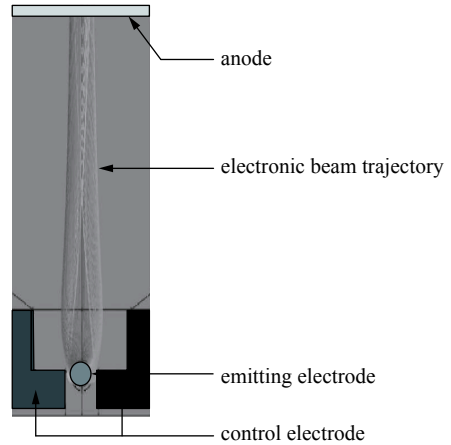


Fig. 1 Structural diagram of the electrostatic focusing system

图 1 静电聚焦系统结构图

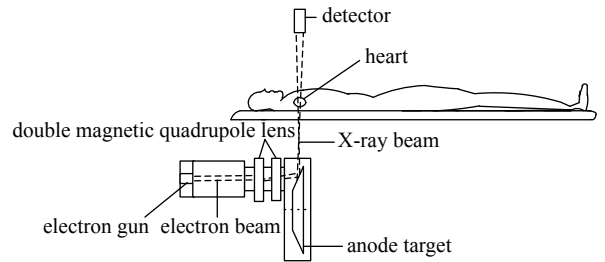


Fig. 2 Dynamic magnetic focusing flying focus scanning structure of double magnetic quadrupole lens CT tube

图 2 CT 球管双磁四极透镜动态磁聚焦飞焦点扫描结构

表 1 国外部分机构在动态磁聚焦飞焦点技术的应用

Table 1 Application of foreign institutions in dynamic magnetic focusing flying focus technology

number	institution	CT tube	flying focal spot technology	image resolution improvement
1	Siemens ^[7]	Straton	z -Sharp technology(z -axis double sampling)	each probe unit yields two alternately overlapping X-line projections without a dose increase, substantially improving the spatial resolution and imaging quality
2	Philips	iMRC	precise flying focal spot (SFS, the x -axial and z -axial flying focal spot technology)	double sampling rate is obtained in plane and longitudinal direction, which is equivalent to 4 times of detector, and high spatial resolution is obtained in axial position and spiral scanning
3	Dunlee	CT5000	xDFS(the x -axial flying focal spot),zDFS(the z -axial flying focal spot)	improve imaging quality, provide sharp and clear images, zDFS double the number of slices, and there is no need for detectors with higher spatial resolution

2 双磁四极透镜结构及磁场分布

双磁四极透镜是由 2 组含 4 个电磁线圈和铁心组成的磁透镜, 增加偏转线圈可实现飞焦点功能。双磁四极透

镜安装在电子束漂移路径上,与电子束处在同一轴线。双磁四极透镜采用扁平结构,可以产生相对集中的磁场。对四极透镜的每一极电磁线圈通电后,其内部会产生强磁场,通过改变线圈内直流电的方向可以改变磁极极性。磁场呈较为规则的正方形分布,并沿中心轴的直线线性降为接近0。磁四极透镜磁场分布图如图3所示。

电子束进入第一级四极磁透镜后,磁场电子束在一个方向上线性压缩聚焦,而在与之垂直方向发散。由于双磁透镜具有扁平结构,可以在较短时间使得电子速度发生改变,在之后电子漂移过程逐步会聚(或发散);当电子束进入第二级四极透镜时,因第二级四极透镜相比第一级四极透镜旋转了 90° ,在电子束发散方向聚焦,电子轨迹首先扩大然后集中,且由于中心区域磁场沿径向线性增大,因而发散电子受到的会聚作用会很大,从而被强力压缩,同时在电子束聚焦的方向上发散,但由于其靠近中心轴线,而在中心轴线磁场强度线性降为0,故其发散效果远远低于第一级磁透镜的聚焦效果,但总的效果仍然是聚焦的。

3 具备飞焦点的动态磁聚焦设计

设计一动态磁聚焦结构,阴极大小为 $6\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,输出电流 1 A ,工作电压 140 kV ,目标为在距阴极 190 mm 的阳极靶面上形成 $0.2\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$ 的有效焦斑。

动态磁聚焦的基本结构包括阴极、聚焦极、阳极头、第一级和第二级四极透镜铁心、第一级和第二级四极透镜聚焦线圈、偏转线圈和阳极靶,其中聚焦透镜组系统为CT球管聚焦,偏转的核心部件^[14]。

仿真软件采用CST粒子工作室,双磁四极透镜系统CST仿真结构如图4所示。阴极采用平面阴极,聚焦极与阴极同电位,仿真时设为 -140 kV ,阳极头、外壳及阳极靶同电位,设置为 0 V 。在第二级四极透镜轭部放置偏转线圈来对电子束进行 x 轴、 y 轴方向偏转。

电子束焦斑的尺寸和压缩倍率受多个参数影响,包括聚焦极形状及尺寸、第一级与第二级四极透镜间距、铁心尺寸及形状、线圈的匝数和电流(安匝数)、四极透镜内切口大小等。本文重点讨论在发射电流及其他参数经过仿真相对不变的前提下,磁场变化对有效焦斑大小的影响及偏转功能的实现,以获得能够满足目标焦斑的磁场值。

经仿真第一级四极透镜最大磁场 B_{m1} 、第二级四极透镜最大磁场 B_{m2} 与 x 、 y 轴方向有效焦斑尺寸大小关系如图5所示。

从图5可以看出,在第二级磁场不变的前提下,第一级四极透镜磁场增大时对电子柱的作用是 y 轴方向压缩, x 轴方向发散,但发散作用较小。同理,在第一级磁场不变的前提下,第二级四极透镜磁场增大时对电子柱的作用是 x 轴方向压缩, y 轴方向发散,但发散作用较小。

综合以上分析可知,通过2个四极透镜组合作用可实现对焦点大小的控制,图5(a)是在第二级四极透镜最大磁场为 $B_{m2} = 0.393\text{ T}$ 时,通过调节第一级四极透镜磁场值来调节焦点大小,当第一级四极透镜最大磁场 $B_{m1} = 0.208\text{ T}$ 时, y 轴向焦斑尺寸为 0.6 mm 。图5(b)是在第一级四极透镜最大磁场为 $B_{m1} = 0.208\text{ T}$ 时,通过调节第二级四极透镜磁场值来调节焦点大小,当第二级四极透镜最大磁场 $B_{m2} = 0.393\text{ T}$ 时, x 轴向焦斑尺寸为 0.2 mm 。图5除了表示单级磁场变化对 x 、 y 向焦点大小的影响之外,也是一个互相验证。

仿真时磁场对应参数为每极安匝数,对应上述两级四极透镜最大磁场的每极安匝数分别为 2562 安匝(第一级)和 4899 安匝(第二级),第二级四极透镜因距阳极靶的距离更近,需要更强的磁场压缩电子束。图6(a)和图6(b)分别为两级磁场由四极透镜原点中心沿 x - y 方向即束流管道内^[15]的磁场分布,在距离 28 mm 四极透镜极端处达到

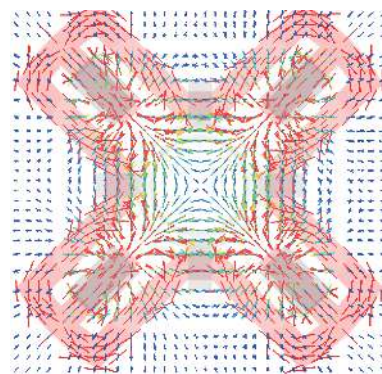
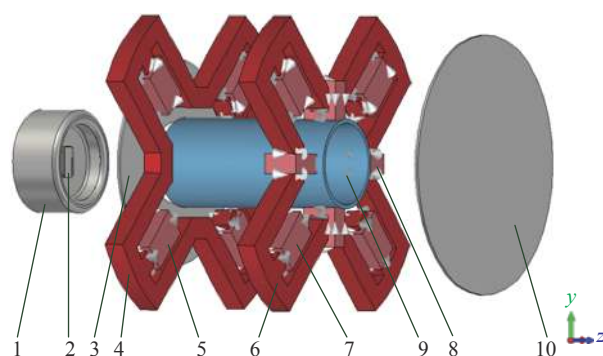


Fig. 3 Magnetic field distribution of magnetic quadrupole lens

图3 磁四极透镜磁场分布图



1—focusing electrode; 2—cathode; 3—anode head; 4—first stage quadrupole lens core; 5—first stage quadrupole lens coil; 6—second stage quadrupole lens core; 7—second stage quadrupole lens coil; 8—deflection coil; 9—enclosure; 10—anode target.

Fig. 4 CST simulation structure of dual magnetic quadrupole lens system

图4 双磁四极透镜系统CST仿真结构

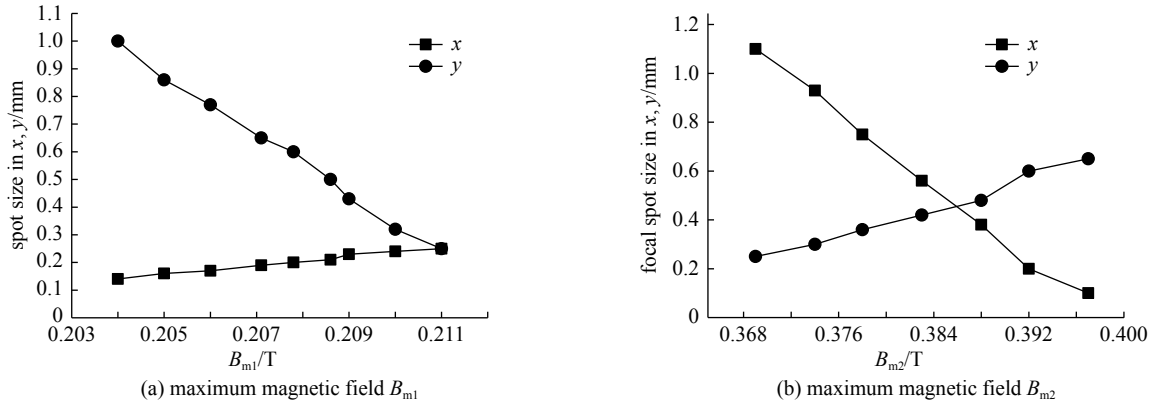


Fig. 5 Maximum magnetic field vs focal spot size in x and y axes

图 5 最大磁场变化与 x, y 轴方向焦斑尺寸大小关系图

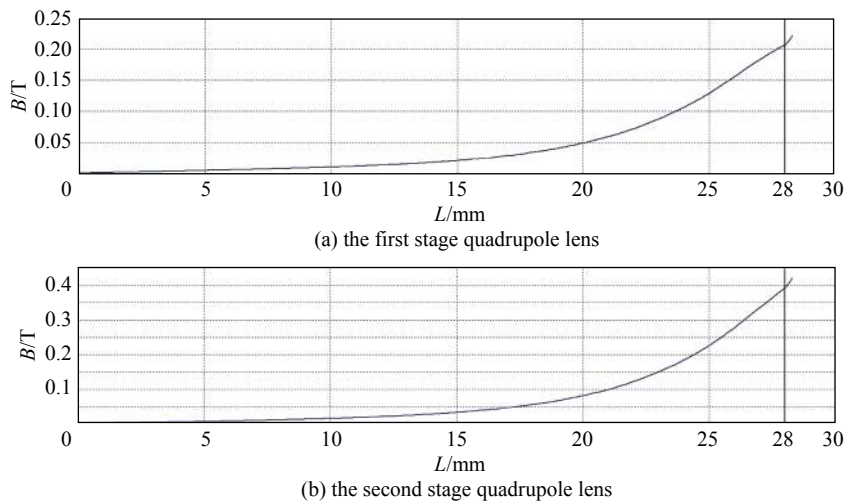


Fig. 6 Distribution of the magnetic field of quadrupole lens along the x-y axis

图 6 四极透镜磁场沿 x-y 轴方向的分布

磁场线性区域的最大值。

最终仿真结果显示,电子束经过双磁四极透镜后有效焦点大小为 $0.22\text{ mm}\times 0.61\text{ mm}$,输出电流为 1 A ,电流仿真轨迹如图 7 所示。焦点大小基本符合目标焦点尺寸要求,不加偏转电流时焦斑形貌如图 8 所示。

为实现飞焦点功能,可在第二级四极透镜轭部放置偏转线圈来对电子束进行 x 轴、y 轴方向偏转,磁场偏转方

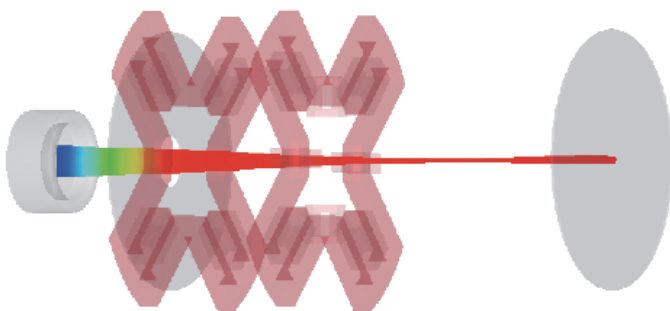


Fig. 7 Current simulation trajectory

图 7 电流仿真轨迹

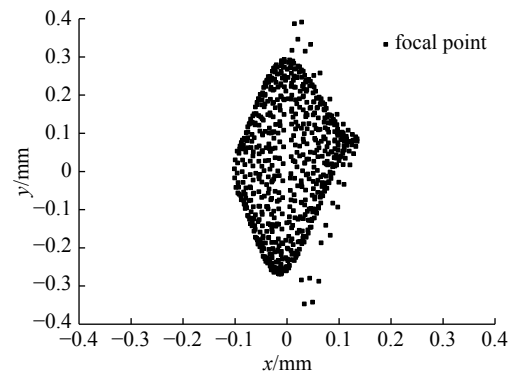


Fig. 8 Morphology of focal spot without axial deflection current

图 8 不加轴偏转电流焦斑形貌图

式具有电子束能量越高,偏转像差越小,偏转灵敏度越高的优点^[16],在匝数一定时(仿真选取匝数为 10),通过改变偏转磁场电流可以均匀控制偏转磁场磁感应强度。焦斑 x, y 向偏移量随 x, y 向偏转电流关系如图 9 所示。

由图9可知,偏移量与偏转磁场电流基本成线性变化,当 x 向偏转电流为3.7 A时,可 x 向偏转0.15 mm,偏转后焦斑形貌如图10(a)所示; y 向偏转电流为7 A时,可 y 向偏转0.5 mm,偏转后焦斑形貌如图10(b)所示。

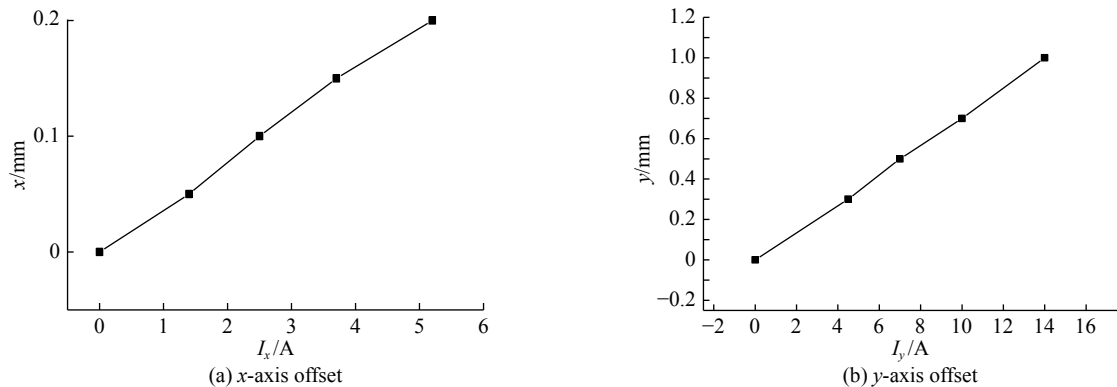


Fig. 9 Relationship between x, y -axis of fset of focal spot and x, y -axis deflection current

图9 焦斑 x, y 轴向偏移量随 x, y 轴向偏转电流关系

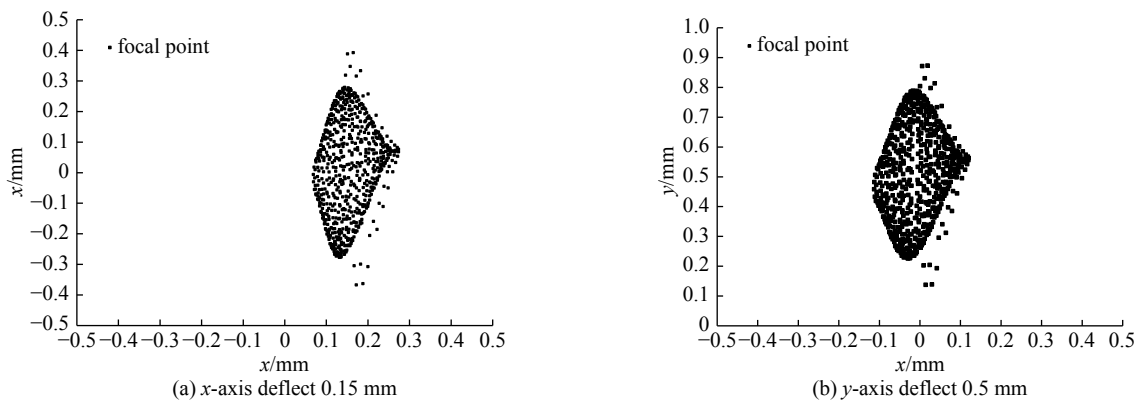


Fig. 10 Add the x, y -axis deflection current deflection

图10 加 x, y 轴偏转电流偏转量

从仿真结果来看,通过调整偏转线圈电流可以控制在一定范围内电子束的线性偏转,有利于实现焦点的动态扫描。

4 结 论

本文设计了一款双磁四极透镜结构,在前期仿真的基础上,根据焦斑尺寸随参数变化规律,确定了最优组合结构及参数,焦斑符合设计目标要求。通过调整不同方向偏转线圈电流可对电子束进行 x, y 向偏转且偏移量随偏转线圈电流呈线性变化规律,实现了飞焦点功能,为大功率CT球管的设计积累了经验。

参考文献:

- [1] 逯乐慧,王颖,刘艳岚. CT成像纳米探针的设计及应用[C]//中国化学会第30届学术年会摘要集-第三十八分会:纳米生物效应与纳米药物化学. 2016: 188. (Lu Lehui, Wang Ying, Liu Yanlan. Nanoprobe for CT imaging[C]//Summary of the 30th Annual Conference of the Chinese Chemical Society—Chapter 38: Nanobiological Effects and Nanomedicinal Chemistry. 2016: 188.)
- [2] 石灵,张富治,王瑞海,等. 医用CT球管国内外现状及发展趋势[J]. 真空电子技术, 2018(2): 61-64,68. (Shi Ling, Zhang Fuzhi, Wang Ruihai, et al. Domestic and foreign situation and development trend of medical CT X-ray tubes[J]. Vacuum Electronics, 2018(2): 61-64,68)
- [3] 余晓镔,龚剑. CT原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 16. (Yu Xiao'e, Gong Jian. CT philosophy and technique[M]. Beijing: Science Press, 2014: 16)
- [4] 张富治,盛兴,王瑞海,等. X射线CT球管的研制进展[J]. 真空电子技术, 2016(1): 7-10. (Zhang Fuzhi, Sheng Xing, Wang Ruihai, et al. Research development of the X-ray tubes for CT[J]. Vacuum Electronics, 2016(1): 7-10)
- [5] Braun M. Physics of X-ray tubes for CT scanners[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1979, 26(2): 2840-2844.
- [6] Behling R. Modern diagnostic X-ray sources: technology manufacturing, reliability[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015: 216.
- [7] Kachelriess M, Knaup M, Penssel C, et al. Flying focal spot (FFS) in cone-beam CT[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(3): 1238-1247.
- [8] Legge G J F. A history of ion microbeams[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1997, 130(1/4): 9-19.

- [9] Gestrin G N, Kuleshov A N, Yefimov B P. Magnetic focusing system for hybrid FEL-based on quadrupole lenses[C]//2004 14th International Crimean Conference "Microwave and Telecommunication Technology". 2004: 237-238.
- [10] 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: 184. (Li Quanfeng. Numerical calculation of electro-magnetic field and electromagnet design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 184)
- [11] 陈连运. 单粒子束装置束线传输系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002: 21. (Chen Lianyun. Study on beam transport of the single-ion microbeam facility[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002: 21)
- [12] 杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 305. (Du Bingchu, Wang Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 305)
- [13] Chichkine V, Winkler A, Behr K H, et al. Strong pulsed magnetic quadrupole lens[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2002, 12(1): 699-702.
- [14] 窦彦昕. 聚焦型高能离子微束技术的模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 29. (Dou Yanxin. Simulation research on the focused high energy ion microbeam technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 29)
- [15] 钱文枢. 大功率辐照加速器X射线转换靶研究[D]. 北京: 清华大学, 2008: 19. (Qian Wenshu. Research of the bremsstrahlung converter for high-power irradiation linacs[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008: 19)
- [16] 赵国骏, 凌宝京, 薛坤兴. 电子离子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 135-146. (Zhao Guojun, Ling Baojing, Xue Kunxing. Electronic ion optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994: 135-146)