

CT设备关键部件——球管的新技术进展

张海洋, 季智勇, 姜瑞瑶

引用本文:

张海洋, 季智勇, 姜瑞瑶. CT设备关键部件——球管的新技术进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2025, 49(4): 383-388.

ZHANG Haiyang, JI Zhiyong, JIANG Ruiyao. Advances in X-Ray Tube Technology for CT Systems:Key Component Innovation[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2025, 49(4): 383-388.

<https://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240563>

收稿日期: 2024-10-16

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于关键部件的PET/CT使用期限研究

Study on PET/CT Service Life Based on Key Components

中国医疗器械杂志. 2021, 45(3): 256-260 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.03.005>

基于紧急医学救援的车载移动CT的研究与实践

Research and Practice of Vehicle-mounted Mobile CT Based on Emergency Medical Rescue

中国医疗器械杂志. 2023, 47(1): 66-69 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2023.01.011>

人工膝关节关键部件数字化制造技术研究

Research on Digital Manufacturing Technology of Key Components of Artificial Knee Joint

中国医疗器械杂志. 2023, 47(5): 523-527 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2023.05.011>

用于DR系统的高压发生器和球管的性能评估方法及建议

Performance Evaluation Methods and Suggestions for High-Voltage Generator and Tube of DR System

中国医疗器械杂志. 2024, 48(6): 613-617 <http://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240066>

双能X射线骨密度仪技术审评关键问题探讨

Discuss about Key Issues of Dual Energy X-ray Absorptiometry Evaluation

中国医疗器械杂志. 2020, 44(6): 541-544 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2020.06.015>

裸眼三维显示技术在医学领域中的应用

Applications of Naked-Eye 3D Display Technology in Medical Field

中国医疗器械杂志. 2024, 48(1): 38-43, 56 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.230002>



微信公众号



网站二维码

文章编号: 1671-7104(2025)04-0383-06

CT设备关键部件——球管的新技术进展

【作者】 张海洋^{1,2}, 季智勇^{1,2}, 姜瑞瑶²

1 上海海洋大学 工程学院, 上海市, 201306

2 上海市第六人民医院 医学装备处, 上海市, 200233

【摘要】 该文介绍了CT球管的技术基础与最新进展, 重点讨论了材料创新、超导技术、液态金属轴承、低剂量扫描及电子束过滤等方面的技术突破。作为CT设备的核心部件, CT球管的技术革新显著提升了图像质量、降低了辐射剂量、提高了效率, 并延长了球管的使用寿命。国内外厂商在CT球管领域取得了显著进展, 国内如中电科十二所等在CT球管研发方面取得重要进展, 成功实现了高端CT球管的自主研发; 国外如西门子、GE、飞利浦等厂商则在液态金属轴承、超导技术、新型靶材等方面持续创新, 保持技术领先。未来, CT球管将朝着个性化、智能化、长寿命、小型化和便携化方向发展, 为医学影像诊断提供更精准、低风险的技术支持。

【关键词】 计算机断层扫描; 球管; 医学技术

【中图分类号】 R197.39; TH77

【文献标志码】 A

doi: 10.12455/j.issn.1671-7104.240563

Advances in X-Ray Tube Technology for CT Systems: Key Component Innovation

【 Authors 】 ZHANG Haiyang^{1,2}, JI Zhiyong^{1,2}, JIANG Ruiyao²

1 Engineering College, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306

2 Department of Medical Equipment, Shanghai Sixth People's Hospital, Shanghai, 200233

【 Abstract 】 In this paper, the technical basis and latest progress of X-ray tube for CT systems are introduced, with emphasis on material innovation, superconducting technology, liquid metal bearing, low dose scanning and electron beam filtration. As the core component of CT equipment, the technological innovation of CT X-ray tubes significantly improves image quality, reduces radiation dose, improves efficiency, and extends the service life of the X-ray tubes. Domestic and foreign manufacturers have made remarkable progress in the field of CT X-ray tubes. Domestic manufacturers, such as the 12th Institute of CLP, have made important progress in the development of CT X-ray tubes, and successfully achieved independent research and development of high-end CT X-ray tubes. Foreign manufacturers such as Siemens, GE, Philips and other manufacturers continue to innovate in liquid metal bearings, superconducting technology, new targets and other aspects to maintain technology leadership. In the future, CT X-ray tubes will develop in the direction of personalization, intelligence, long life, miniaturization and portability, providing more accurate and low-risk technical support for medical image diagnosis.

【Key words】 computed tomography (CT), X-ray tube, medical technology

0 引言

计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 在现代医疗诊断中至关重要, CT球管作为其核心部件, 性能优劣决定CT图像质量与临床诊断的准

确性^[1]。早期球管技术存在功率小、寿命短、X线质量不稳定及焦点大等问题, 科技进步使现代球管技术在管壳材料、阳极接地、液态金属轴承技术等方面取得突破, 球管在功率、焦点、寿命及成像质量上大幅提升。我国重视医疗技术创新与高端医疗设备国产化, 政策支持为CT球管技术发展提供有力保障^[2], 增加资金投入, 鼓励技术创新, 强调质量安全, 推动行业规范发展。本文将详细介绍

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2023YFC2414604)

作者简介: 张海洋, E-mail: 19946220047@163.com

通信作者: 姜瑞瑶, E-mail: 18930177506@126.com

CT球管的技术基础,包括重要技术参数和国内外研究现状,深入探讨其新技术进展,并对未来技术趋势进行展望,为相关领域的研究和实践提供参考。

1 球管的重要技术参数

CT球管技术参数对其性能和应用影响重大,医用球管和工业用球管均依据国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)^[1]标准,但在关键参数和技术特点上有所不同,医用球管及工业用球管的关键参数对比如表1所示。

表1 医用球管及工业用球管的关键核心参数对比
Tab.1 Comparison of the key core parameters of medical X-ray tubes and industrial X-ray tubes

球管类型	技术参数	技术特点
医用球管	额定电压 ^[4]	注重成像质量、低辐射剂量和灵活扫描能力
	热容量	
	功率特性 ^[5]	
	阳极转速	
	焦点标称值 ^[6]	
	灯丝工作范围	
	X线视角 ^[7]	
	定子电阻与驱动电压 ^[8]	
	固有滤过	
	阳极加速时间 ^[9]	
	漏射线 ^[10]	
重量 ^[11]		
工作环境		
工业用球管	高功率 ^[12]	注重穿透能力、长时间稳定工作和高可靠性要求
	大焦点	
	高热容量	
	阳极转速	
	高稳定性与可靠性 ^[13]	

比较两类球管技术特点,医用球管聚焦临床诊断,注重成像质量、低辐射剂量和灵活扫描能力,参数优化围绕人体组织检测。工业用球管侧重工业检测,满足穿透能力、长时间稳定工作和高可靠性要求,参数配置针对大型工件和复杂环境检测。两类球管因应用场景不同,在功率、焦点、转速等参数上各有优化方向,以实现各自高效检测。

2 球管国内外研究现状

2.1 国内研究现状

国内CT球管技术近年来取得显著进步。中国电子科技集团公司第十二研究所(简称中电科

十二所)是国家真空电子器件研制生产的龙头单位,我国第一支X线管便诞生于此^[14]。近年来,该所在医疗装备领域开展CT球管技术攻关与探索,先后承担科技部支撑计划、工信部工业强基工程、国家重点研发计划——数字诊疗装备专项等项目^[15],突破多项关键设计和工艺技术,成功研制出具有自主知识产权的3.5 MHU、5.3 MHU、8 MHU热容量CT球管,实现了高端CT核心部件——大容量CT球管的“中国制造”。2019年,中电科十二所专门成立电科睿视技术(北京)有限公司作为承接其科技成果转化平台,目前已有多款CT球管产品获批上市,部分产品已在东北、华北、华南、西南等多家医院投入临床应用。国内厂商高端CT设备的球管先进技术如表2所示。

表2 国内厂商高端CT设备的球管先进技术
Tab.2 The advanced technologies of the tubes of high-end CT devices from domestic manufacturers

厂家名称	先进技术特点和代表性创新技术
科罗诺司医疗器械(上海)有限公司 ^[16]	拥有CoolGlide液态金属轴承技术,是国内首家完整制造并量产CT球管的生产厂家;拥有大功率(100 kW阳极输入功率等)、大容量(业界最高物理热容量8 MHU)、高承载(机架最高支持每圈0.35 s)、高品质(搭载阳极接地技术)等特点的CT球管
昆山益腾医疗科技有限公司 ^[17]	首款用于32排CT的球管研发基本完成;持续开发液态金属轴承等技术,指向中高端球管市场;布局工业用X线管产品,填补国产产品空白
北京智束科技有限公司 ^[18]	专注液态金属轴承、单极阳极接地等关键技术攻关;建立CT球管设计、加工、制造、测试以及可靠性验证等能力体系
思柯拉特医疗科技(苏州)有限公司 ^[19]	CT球管有三大创新设计:全金属-波纹陶瓷、结构化紧凑设计、智能管电流调制
上海联影医疗科技股份有限公司 ^[20]	国产首款320排超高端CT产品uCT 960+通过应用自主研发的时空探测器,机架旋转每圈可达0.25 s,从而实现单心动周期的任意心率心脏成像、单器官灌注和快速大范围血管成像,同时具备低剂量成像和球管电压切换的能谱成像功能
珠海瑞能真空电子有限公司 ^[21]	平板阴极采用特殊钼基合金材料,灯丝结构采用螺旋缠绕式设计

2.2 国外研究现状

海外CT球管发展较早且在中占据重要地位,技术创新与产业格局不断演进。

1998年, Dunlee率先开拓CT球管替代市场^[22],其生产的替代球管广泛覆盖通用电气(GE)、飞利

浦 (Royal Philips)、西门子 (Siemens AG)、佳能 (Canon) 等各大厂商, 后于2001年被飞利浦收购。飞利浦医疗在X线球管技术方面处于领先地位, 收购Dunlee后, 凭借其技术优势, 每年生产的球管超过12 000支, 进一步巩固了其市场竞争力。

西门子在技术创新方面表现卓越, 宣布利用Straton高能层流技术制造出“无热容量”的电子束控制球管^[23]。该球管应用于世界第一台基于快速40成像技术 (Speed40) 的64层Somatom Sensation 64 CT机上, 使CT系统旋转一周仅需0.37 s, 创造了CT机架转速的新纪录。其球管技术在散热、焦点控制和高速扫描等方面展现出强大实力, 持续推动CT设备性能的提升。

GE推出Performix Plus液体轴承球管应用于Revolution EVO CT^[24], 通过液体轴承技术实现快速转速, 在提供高质量图像的同时延长了球管使用寿命, 为临床诊断提供了更高效、精准的影像支持。

瓦里安于2016年5月剥离影像组件业务, 成立新公司Varex, 专注于制造X线管等成像元件以及成像软件和专用加速器^[25], 在高端CT球管技术领域持续发力, 为行业发展注入新的活力。海外厂商凭借先进技术和积极的市场策略, 在全球CT球管市场中持续引领技术发展潮流, 满足不断增长的医疗需求。表3详细汇总了国外高端CT球管厂商的先进技术。

表3 国外高端CT球管厂商的先进技术
Tab.3 Advanced technologies of high-end CT tube manufacturers abroad

厂家	先进技术
Siemens AG	表面人字形沟槽泵吸作用改善的液态金属轴承技术; 新型钨铍合金靶材; 碳纤维增强PEEK复合材料管壳
GE	特殊钼基合金材料的平板阴极; 螺旋缠绕式灯丝结构
Royal Philips	磁场聚焦技术; 宽体纳米探测器; ASTAR快速成像平台和iFlow智能操作平台

由表3可以看出, 国外在高端CT球管研究方面处于领先地位且呈现多元化发展态势。西门子在球管的关键部件及材料上创新显著^[26], 液态金属轴承技术提升旋转性能与稳定性, 新型钨铍合金靶材改善射线质量与降低辐射剂量, 碳纤维增强复合材料管壳保障高功率运行。通用电气聚焦于阴极与灯丝

结构优化^[27], 特殊钼基合金平板阴极与螺旋缠绕式灯丝设计相结合, 有效降低特定电压下辐射剂量并保证图像质量。飞利浦则从多维度提升球管性能与临床应用适配性^[28], 磁场聚焦技术精准控制电子束, 智能控制技术实现个性化扫描。其不同型号CT如极速之心CT和MX16Evo2CT分别在球管容量、探测器技术、成像平台及工作流程优化等方面各有建树, 全方位提高了球管的临床使用效率、图像质量及操作便利性, 推动高端CT球管技术在临床医疗诊断应用中的深度发展与广度拓展。

3 球管新技术进展

球管是CT核心部件, 其技术革新意义重大, 可满足临床更高通量检查需求, 提升用户体验, 延长设备寿命。其结构虽简单但制造工艺复杂, 长期被少数企业垄断。临床应用中, 球管致力于提高图像质量、降低辐射剂量、提升效率与热容量^[29-30], 近年已取得跨越式进步。

3.1 材料技术创新

材料科学的进展给CT球管带来了新型靶材的研发方向。中国科学技术大学的研究^[31]基于稀土元素掺杂氧化钨薄膜的电致变色和光致发光性能, 使得某些稀土元素掺杂的钨靶材受到了关注。稀土元素的掺杂可以改变钨靶材的电子结构, 优化电子与靶材相互作用时的能量转换效率。这种优化能够使CT球管在较低的电子束能量下产生更高强度和更好的X线, 有助于提高图像的分辨率和对比度, 同时减少患者所接受的辐射剂量。北京化工大学材料学院研究团队^[32]正在将一些具有高导热性和良好机械性能的复合材料用于CT球管外壳的研究。这些复合材料能够更有效地将球管内部产生的热量传导出去, 降低球管的工作温度, 延长球管的使用寿命。

3.2 超导技术创新

超导技术在球管中的应用带来了一系列重大技术突破。西门子等国外企业在超导技术的应用方面有突出表现, 超导技术极大地提高了X线的利用率。文献^[32]研究表明, 采用超导技术的球管能够将X线的产生效率提高数倍甚至更多。其次, 超导技术实现了更快的扫描速度。由于超导材料能够在极低的温度下实现零电阻导电, 因此球管中的电子能够以更快的速度运动, 从而加速了X线的产生过程。超导技术还显著延长了球管的寿命。超导球管在工作时产生的热量非常少, 这使得球管内部的温

度始终保持在较低水平,减少了对球管部件的热损伤。超导材料的稳定性和耐用性也使得球管能够承受更高的工作强度和更长的工作时间。据文献[33]统计,超导球管的使用寿命可以达到传统球管的数倍甚至十几倍。

3.3 液态金属轴承技术

传统的热容量小于3.5 MHU^[34]的CT球管通常采用滚珠轴承,而高热容量球管对轴承的散热和转速要求更高,液态金属轴承技术能够增大转子和定子之间的接触面积。

西门子和飞利浦最早使用该技术^[35],随后Dunlee、GE、联影医疗、瑞能医疗等也相继采用。例如,西门子将液态金属轴承应用于其CT设备中,提高了球管的旋转精度和稳定性;智束科技通过整合多项技术,实现液态金属轴承CT球管关键技术突破,打破了国外厂商的技术垄断^[36]。液态金属轴承技术是采用液态金属作为轴承润滑剂的CT球管技术。液态金属轴承使用液态金属润滑剂取代滚珠轴承,填充厚度约为10~50 μm^[37]。液态金属轴承具有良好的润滑性能和散热性能,可以提高球管的旋转精度和稳定性,延长球管的使用寿命。人字沟槽液态金属轴承结构如图1所示。

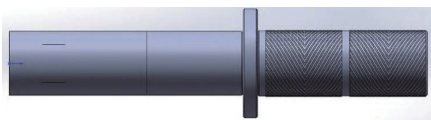


图1 人字沟槽液态金属轴承结构^[38]

Fig.1 Herringbone groove liquid metal bearing structure^[38]

人字沟槽液态金属轴承通过在滑动轴承表面铣一定数量的人字形沟槽,利用沟槽对液态金属特有的泵吸作用,改善轴承的动压效应和摩擦效应。基于离散形式的雷诺方程分析轴承工作状态^[39],沿轴承圆周方向,膜厚呈阶梯状分布,沟槽处的最薄油膜厚度提升,改善了转子——轴承系统的稳定性。轴承归一化压力最大值位于转子的正下方。通过离心力计算公式评估,该结构的轴承能够承受相对离心力,由此产生了当下主流的液态金属轴承^[40]。

液态金属轴承技术的优点是有效提高热容量,实现高散热率,同时可以减少球管的噪声和振动,提高CT图像的质量^[41]。液态金属轴承成为球管技术的里程碑,使球管技术发展势从追求高热容量转变为提升高散热率。

3.4 低剂量扫描新技术

2013年,球管管电流首次被提高到1300 mA,实现了在低电压(kV)、更高电流(mA)、更长

时间条件下的大范围连续扫描,成功实现了低剂量、低造影剂用量的双低扫描。由此,70 kV低剂量扫描成了行业标准^[42]。

随着低剂量CT(low-dose computed tomography, LDCT)常规应用于临床胸部检查,超低剂量CT成为新的研究热点^[43]。依据利用空间的差异,新型迭代重建技术可分为在两个空间(投影数据空间和图像数据空间)都迭代重建和仅在投影数据空间迭代重建^[44]。像西门子公司正弦波图形法迭代重建(SAFIRE)技术^[45]、GE公司的自适应统计迭代重建(ASiR)技术^[46]、飞利浦公司的混合迭代算法(iDose)技术^[47]以及东芝公司的自适应迭代剂量降低重建(AIDR)技术^[48]都属于仅在投影数据空间迭代的类型。随着迭代重建技术日益成熟,其不再局限于胸部应用,头部、腹部、四肢、心脏、血管等多个领域均开展了大量临床应用研究。同时,高浓度对比剂因不良反应以及对肾脏的损伤受到关注,在超低剂量辐射条件下应用超低浓度对比剂的“双低”研究成为新的热点。

3.5 电子束过滤技术

电子束控球管给医学影像设备球管技术带来了新的突破。电子束过滤技术能够有效过滤对CT成像不起作用的低能量电子束。在传统的CT球管中,部分低能量电子束在撞击阳极靶材时,不仅不会产生有效的X线,还会增加患者所接受的辐射剂量^[49]。而电子束控球管通过加入电子束过滤技术,将这些低能量电子束过滤掉,从而降低了射线的辐射剂量。据文献[50]统计,采用电子束过滤技术的球管可以将辐射剂量降低约20%。这对于患者,尤其是需要多次进行CT检查的患者来说,具有重要的意义。它可以减少患者因辐射造成的潜在健康风险,提高检查的安全性。

电子束过滤技术对提高CT成像质量也有着显著的贡献。过滤低能量电子束,减少了无效电子对阳极靶面的冲击和冲击产生的热量^[51],延长了球管的寿命。同时,减少了干扰因素,提高了X线质量。更高质量的X线能够提供更清晰、更准确的图像,有助于医师更准确地诊断疾病。文献[52]提到,在一些细微病变的检测中,高成像质量可以更加清晰地显示病变情况,提高诊断的准确性。此外,电子束过滤技术还可以减少图像中的噪声^[53],进一步提升成像质量。通过提高图像的清晰度和准确性,电子束过滤技术为医疗诊断提供了更可靠的依据。

3.6 冷阴极球管技术

现阶段,热阴极球管因电子发射率高、稳定性强等优势被各大厂商广泛制备^[54],但随着对便携式及高分辨率的需求日益提升,冷阴极球管亦被广泛研究和制备。冷阴极球管的结构相对简单,没有复杂的灯丝加热系统,因此球管体积更小,重量更轻^[55]。其工作原理基于场致发射效应^[56],即通过在阴极表面施加足够强的电场,使电子克服表面势垒而发射出来。这种发射方式不需要像热阴极球管那样通过加热灯丝来提供电子,在启动速度方面具有明显优势。由于不需要预热灯丝,它可以在瞬间启动并达到工作状态且功耗更低,这对于需要快速响应的CT扫描应用(如急诊检查)非常有利^[57]。在使用寿命方面,冷阴极球管由于没有灯丝的烧蚀问题,理论上具有更长的使用寿命。其阴极材料的稳定性使得电子发射性能在长时间内能够保持相对稳定,减少了因阴极老化而导致的性能下降和更换频率,因此冷阴极球管作为一种新兴技术在CT领域受到广泛的研究和关注。

4 总结与展望

CT球管技术在提升图像质量、降低辐射剂量、延长使用寿命等方面取得了显著进展。国内外研究在液态金属轴承、高功率CT球管、冷阴极技术及超导技术等方面取得了创新突破,推动了CT设备性能的提升。CT球管将朝着智能化、个性化的方向发展,结合人工智能和大数据技术,实现更加精准和高效地扫描。新型高性能材料的应用将进一步提升球管的热容量、散热能力和使用寿命,为高负荷运行提供保障。随着便携化需求的增长,CT球管将更加小型化,适应急诊和远程医疗的需求。低剂量技术和精准辐射控制将继续优化,以降低患者的辐射风险,同时提高成像质量和诊断准确性。未来CT球管技术的创新将给医疗影像诊断带来更精准、高效和安全的解决方案,推动医疗技术的不断进步。

参考文献

- 王欣,陈刘成,沈龙山,等. CT能谱成像基本原理及其临床应用进展[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2021, 19(2): 197-200.
- 刘克存. 医疗器械电气安全标准下的漏电流检测分析[J]. 大众标准化, 2024(14): 178-180.
- 黄东. 从阴极射线到电子[J]. 物理通报, 2021, 40(8): 156-157, 161.
- 罗维涛. 医用X线高压发生器系统的研究与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- 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.
- 左超,陈钱. 计算光学成像: 何来,何处,何去,何从?[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 150-330.
- 邵军,陈熙仁,王嫚,等. 红外调制光致发光光谱技术: 从宽波段覆盖到微区高通量测量[J]. 物理学报, 2025, 74(1): 255-269.
- 李先会,马连杰,龙真生,等. 西门子变频器在木片配比螺旋设备上的应用[J]. 装备制造技术, 2022(8): 171-175.
- 梅莞翠,李铨铨,汤倩,等. 结合监测点优化的能谱扫描在双低剂量下肢动脉血管CT成像中的应用价值[J]. 放射学实践, 2024, 39(9): 1221-1227.
- 严波. 发射机电子管的维护与保养[J]. 科技传播, 2015, 7(8): 95-96.
- 葛俊芳,汤振华. 无线电遥控装置在C臂机中的应用——评《放射科管理规范与操作常规》[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(21): 168.
- 王珏,陈教泽,谭辉,等. 工业CT光电二极管探测器灵敏度[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 210-214.
- 唐腾飞,刘海浪,岳高,等. 高能电子束电磁透镜的研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(10): 719-725.
- 冯靖祎,张倩,吕颖莹,等. 国产创新医疗设备应用示范助推国产医疗器械行业发展[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(1): 1-4, 17.
- 任大鹏,李兴辉,韩攀阳,等. 碳化硅真空纳米电子器件技术分析[J]. 真空电子技术, 2024(3): 63-75.
- 周峰,殷小东,葛得辉,等. 电力量子计量技术的进展与趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 618-635.
- 史戈锋. 东软医疗公司售后服务战略研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- 李三虎. 微电子技术的社会建构[D]. 北京: 中国人民大学, 1995.
- 赵振全,商春航,张乐,等. 高性能碳纳米管复合纤维的研究进展[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 163-182.
- CHEN H D, ZHANG J, CHENG X, et al. Direct observations of tether-cutting reconnection during a major solar event from 2014 February 24 to 25[J]. *Astrophys J*, 2014, 797(2): L15.
- PRINTEMPS T, DABERTRAND K, VIVES J, et al. Application of a novel local and automatic PCA algorithm for diffraction pattern denoising in TEM-ASTAR analysis in microelectronics[J]. *Ultramicroscopy*, 2024, 267: 114059.
- WANG J H, TROVATI S, BORCHARD P M, et al. Thermal limits on MV X-ray production by bremsstrahlung targets in the context of novel linear accelerators[J]. *Med Phys*, 2017, 44(12): 6610-6620.
- TANG M, ZENG F Y, CHANG X D, et al. Feasibility study of Syngo iFlow in predicting hemodynamic improvement post-endovascular procedure in peripheral artery disease[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2024, 24(1): 99.

- [24] GE revolution EVO and optima CT systems[J]. *Biomed Safety Standards*, 2021, 51(16): 124.
- [25] BRANCH K R H. Evolution or revolution? AI in coronary CT evaluation[J]. *JACC Adv*, 2024, 3(9): 100860.
- [26] EL-ALI A M, STRUBEL N, PINKNEY L, et al. Pediatric contrast-enhanced chest CT on a photon-counting detector CT: radiation dose and image quality compared to energy-integrated detector CT[J]. *Pediatr Radiol*, 2024; 54(12): 1984-1995.
- [27] IHSAN A, HEO S H, CHO S O. A microfocus X-ray tube based on a microstructured X-ray target[J]. *Nucl Instrum Meth B*, 2009, 267(21-22): 3566-3573.
- [28] 李富坤. 碳纳米管冷阴极微焦X射线管外温度场和高压电场分析及封装构件研制[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [29] 国际电工委员会(IEC)标准题录(上)(2005年版)[J]. *世界标准信息*, 2005(7): 196-240.
- [30] 周涛. P公司医疗集团CT产品营销策略研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2023.
- [31] 沈璐颖. 基于稀土元素掺杂氧化钨薄膜的电致变色和光致发光性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [32] 孙朝. 相变材料微胶囊的多层级结构设计、制备及其多样化应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [33] 刘玉清, 戴建平. 实用放射学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- [34] 王培军, 王滨, 徐海波, 等. 中华影像医学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.
- [35] 韩翠柳. CT机X线管阳极靶的制备与性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [36] 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所. 中国医疗装备及关键零部件技术发展报告[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [37] WEI C J, CHEN Q, XU J M, et al. Experimental study on operating characteristics of rotor-bearing system lubricated by gallium-based liquid metal[J]. *Ind Lubr Tribol*, 2024, 76(5): 649-657.
- [38] 王瑞海, 龚海华, 吕向英, 等. 5 MHU热容量CT球管的研究[J]. *真空电子技术*, 2021(2): 73-77.
- [39] 李旭, 胡银富. 7 MHU热容量液态金属轴承CT球管的研制[J]. *真空电子技术*, 2023(6): 34-39.
- [40] 刘大鹏. 球面气体轴承特性分析与优化设计[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
- [41] 苗志奇. 高端轴承钢中大尺寸夹杂物形成机理与关键冶金工艺[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [42] 刘毅, 卓越. CT机低微参数扫描高性能成像的研究[J]. *中国医疗设备*, 2013, 28(3): 37-40.
- [43] 赵明增. 多排CT低剂量不同扫描方法在新生儿颅脑检查中应用[J]. *环球中医药*, 2013, 6(Z2): 11-13.
- [44] 范非凡. 基于迭代算法的数字全息成像方法研究[D]. 赣州: 赣南师范大学, 2023.
- [45] BIEHN S E, GONCALVES L M, LEHMANN J, et al. BioPrint meets the AI age: development of artificial intelligence-based ADMET models for the drug-discovery platform SAFIRE[J]. *Fut Med Chem*, 2024, 16(7): 587-599.
- [46] UPL Corp Publishes 2023-24 Africa Sustainability Impact Report (ASIR)[J]. *M2 Presswire*, 2024: 1360.
- [47] SZEKELY G, KATZ L J, VOSKANYAN L A, et al. Travoprost intraocular implant (iDose® TR) delivers therapeutically relevant and durable aqueous humor drug concentrations at 24 months and demonstrates safety of repeat implant administration[J]. *Investigat Ophthalmol Vis Sci*, 2024, 65(7): 19131913.
- [48] LEON S, OLGUIN E, SCHAEFFER C, et al. Comparison of CT image quality between the AIDR 3D and FIRST iterative reconstruction algorithms: an assessment based on phantom measurements and clinical images[J]. *Phys Med Biol*, 2021, 66(12): 125002.
- [49] 盛轲焱. 电子束辐射提升氧化锌复合绝缘子性能机理研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [50] 胡强, 王鹏, 吕向英. X射线球管电子束聚焦系统设计[J]. *中国新技术新产品*, 2020(8): 26-28.
- [51] 张子恒. 基于隐式密度模型的不完全投影CT图像重建方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [52] 王军. 探讨16排螺旋高分辨CT在肺部细微病变的诊断分析[J]. *智慧健康*, 2022, 8(20): 16-19.
- [53] THEMBA N, SIBALI L L, CHOKWE T B. A review on the formation and remediations of polychlorinated dibenzo p-dioxins and dibenzo-furans (PCDD/Fs) during thermal processes with a focus on MSW process[J]. *Air Qual Atmos Health*, 2023, 16(10): 2115-2132.
- [54] INSLEY B, BARTKOSKI D, BALTER P, et al. Proof-of-concept for a thin conical X-ray target optimized for intensity and directionality for use in a carbon nanotube-based compact X-ray tube[J]. *Med Phys*, 2024, 51(1): 447-463.
- [55] 唐利华, 张国光, 张健, 等. 静态CT行包安检系统关键技术研究[J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(5): 933-938.
- [56] MALTZ J S, SPRENGER F, FUERST J, et al. Fixed gantry tomotherapy system for radiation therapy image guidance based on a multiple source x-ray tube with carbon nanotube cathodes[J]. *Med Phys*, 2009, 36(5): 1624-1636.
- [57] WANG M R. Application value of SOMATOM Force computed tomography in assisting the preoperative localization of colorectal cancer resection surgery[J]. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2024, 33(6): 365-372.