



·粒子束及加速器技术·研究快报·

10 lp/mm 空间分辨率高能 CT 系统^{*}

刘清华¹, 李敬¹, 单李军¹, 肖德鑫¹, 潘清¹, 刘宇¹, 王汉斌¹, 胡栋材¹,
张鹏¹, 李寿涛¹, 王建新¹, 张德敏¹, 闫陇刚¹, 张小丽¹, 甘孔银¹, 张成鑫¹,
李鹏¹, 沈旭明¹, 柏伟¹, 陈云斌¹, 李晓辉², 王帅华³, 余勇⁴,
陈皓⁵, 胡秀太⁶, 马国武¹, 周奎¹, 周征¹, 王远¹, 杨兴繁¹,
吴岱¹, 黎明¹, 陈门雪¹, 胡进光¹, 赵剑衡¹, 范国滨⁷

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002; 4. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900; 5. 中国工程物理研究院材料研究所, 四川绵阳 621907; 6. 湖北三江航天江河化工科技有限公司, 湖北宜昌 444200; 7. 中国工程物理研究院, 四川绵阳 621900)

摘要: 报道了基于光阴极 S 波段电子直线加速器建成的 9 MeV 高能微焦点射线成像系统“精卫”, X 射线束横向尺寸小于 100 μm, 7 h 剂量波动低至 1.6%。初步开展成像实验结果表明: 双丝像质计清晰分辨 13D 号丝, 丝直径 0.05 mm, CT 测试卡测得空间分辨率优于 10 lp/mm, 装置同时兼容电子束能量 6~18 MeV 可调。

关键词: 高能微焦点 X 射线源; 高能工业 CT; 直线加速器; 光阴极

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220322

High-energy CT system with 10 lp/mm spatial resolution

Liu Qinghua¹, Li Jing¹, Shan Lijun¹, Xiao Dexin¹, Pan Qing¹, Liu Yu¹, Wang Hanbin¹, Hu Dongcail¹,
Zhang Peng¹, Li Shoutao¹, Wang Jianxin¹, Zhang Demin¹, Yan Longgang¹, Zhang Xiaoli¹, Gan Kongyin¹,
Zhang Chengxin¹, Li Peng¹, Shen Xuming¹, Bo Wei¹, Chen Yunbin¹, Li Xiaohui², Wang Shuaihua³,
Yu Yong⁴, Chen Hao⁵, Hu Xiutai⁶, Ma Guowu¹, Zhou Kui¹, Zhou Zheng¹, Wang Yuan¹, Yang Xingfan¹,
Wu Dai¹, Li Ming¹, Chen Menxue¹, Hu Jinguang¹, Zhao Jianheng¹, Fan Guobin⁷

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China; 4. Institute of Systems Engineering, CAEP,
Mianyang 621900, China; 5. Institute of Materials, CAEP, Jiangyou 621907, China; 6. Jianghe Chemical Technology Co., Ltd. Yichang 444200, China;
7. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the photocathode S-band electron linac, a high-energy (9 MeV) micro-focus CT system named “Jingwei” was built. The focal-point is less than 100 μm, and the 7 h dose fluctuation is as low as 1.6%. An initial imaging experiment was also carried out. The focal spot of the dual-wire image quality meter clearly distinguished the 13D wire with a wire diameter of 0.05 mm, and the CT spatial resolution measured by a test card is better than 10 lp/mm. The electron beam energy of the system is also adjustable from 6 MeV to 18 MeV.

Key words: high-energy micro-focus X-ray source, high-energy industrial CT, linac, photocathode

高能 CT(Computed Tomography)作为最有效的无损检测手段之一, 在国防、航空航天、核能核电、高铁交通等行业的大型构件和大型装备精密检测方面具备重要应用价值。常规高能 CT 系统普遍采用工业电子加速器产生的 mm 量级横向尺寸的电子束打靶产生焦斑尺寸 1~2 mm 的轫致辐射 X 射线源, 空间分辨率限制在 3.5 lp/mm(线阵探测器)和 2 lp/mm(面阵探测器), 阻碍了其在高端装备上的进一步应用。高能 CT 空间分辨率的提升亟需更先进的电子源, 即一定流强下更低发射度、更低能散的高亮度电子束; 辅以强聚焦透镜电子光学系统, 产生高能、微焦点电子束团, 进而打靶产生高能、微焦点 X 射线束。

* 收稿日期: 2022-10-01; 修订日期: 2022-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11975218, 12005211, 11805192, 11905210, 12035012); 中国工程物理研究院创新发展基金项目(CX2019036, CX2019037)

联系方式: 刘清华, wildwest@126.com。

通信作者: 吴岱, wudai04@163.com; 王汉斌, wanghanbin@caep.cn。

基于光阴极直线加速器技术路线^[1-2],中国工程物理研究院应用电子学研究所建造了一台高能微焦点CT系统(取名为“精卫”)。“精卫”采用半导体光阴极和射频直线加速器实现能量9 MeV、均方根能散度优于0.3%、归一化发射度约2 mm·mrad的高品质电子束,平均电流1~120 μA可调,光阴极工作状态寿命大于3个月,剂量率设计指标为1500 rad·min⁻¹·m⁻¹,实际可工作在3000 rad·min⁻¹·m⁻¹。电子束通过磁透镜聚焦至横向尺寸小于100 μm,轰击高速旋转钨靶转化为微焦点X射线,探测器采用自研闪烁体荧光屏和CCD光学探测器^[3-4]。

图1为“精卫”系统初步实验结果。使用双丝像质计开展DR成像测试(放大比约1.9),表明系统可清晰分辨13D号丝(丝直径0.05 mm)。采用经过第三方标定的自研分辨率测试卡开展CT成像测试(放大比约1.9),表明系统可清晰分辨10 lp/mm(50 μm调制度≥12.5%)。由于荧光屏探测效率与数据读取时间限制,CT成像时间约7 h,系统长时剂量稳定性1.6%(标准差/平均值);测试前后焦斑尺寸和位置未见显著改变,至今“精卫”已稳定工作超300 h。

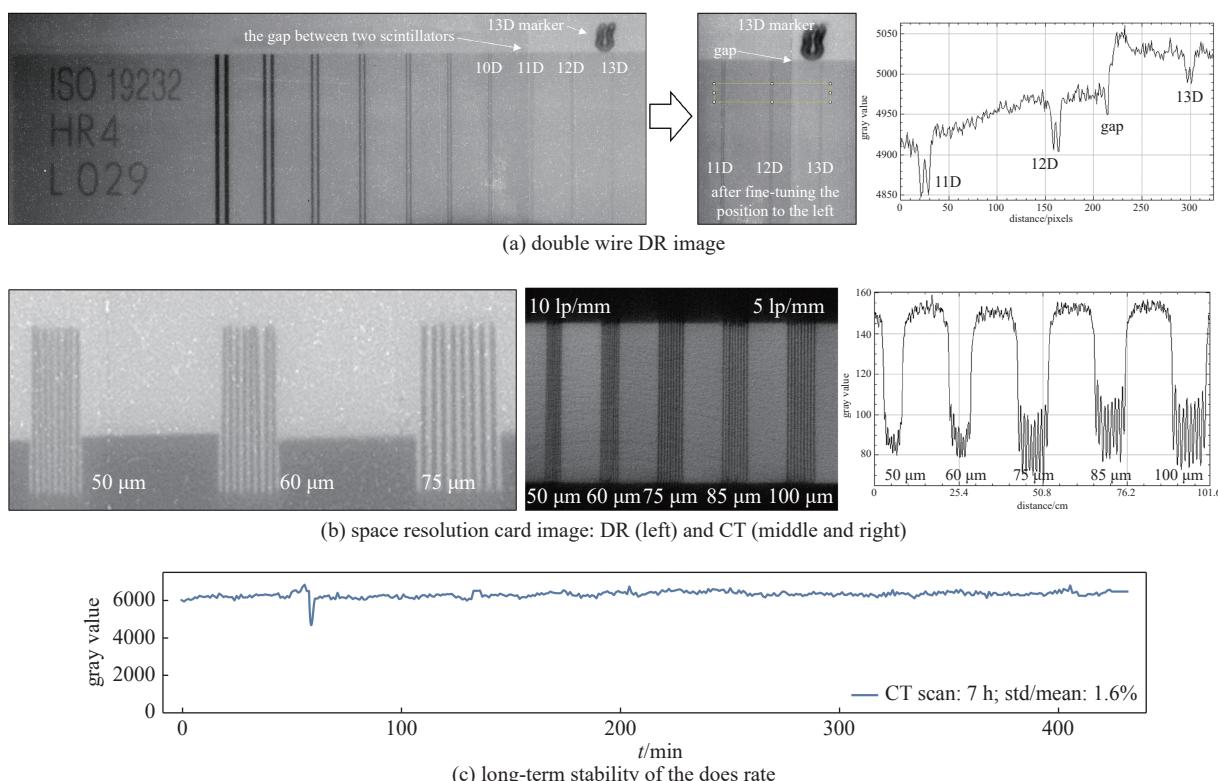


Fig. 1 Preliminary experimental results of the “Jingwei” CT system

图1 “精卫”CT系统初步实验结果

采用国产平板探测器时,“精卫”系统的采样时间可缩短至15~30 min,相比于公开报道的世界最高空间分辨率的CoLoSSIS系统,“精卫”将9 MeV射线CT成像空间分辨率提高了2~3倍,最短扫描时间缩短至1/5~1/10。由于直线加速器可通过调节微波功率来调节电子束能量,目前“精卫”系统能量可在6~18 MeV之间快速调节切换。能量越高时电子束的几何发射度越低,更高能量的焦斑将更小。下一步,“精卫”将尝试线阵探测器配合15 MeV电子束输出,以实现15 lp/mm以上的超高分辨率,并进一步针对系统小型化优化开展研究。

参考文献:

- [1] 李鹏,王建新,肖德鑫,等.9 MeV, 小于0.1 mm微焦点X射线源验证实验[J].*强激光与粒子束*,2020,32:054001.(Li Peng, Wang Jianxing, Xiao Dexin, et al. Verification experiment of micro focus X-ray source with energy 9 MeV and beam size less than 0.1 mm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 054001)
- [2] Hu Dongcai, Zhou Zheng, Wang Jianxin, et al. High-energy high-dose microfocus X-ray computed tomography driven by high-average-current photoinjector[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2022, 30(1): 1-12.
- [3] 谭龙升,李晓辉,魏存峰,等.闪烁体特性对X射线探测器成像质量影响研究[J].*中国体视学与图像分析*,2022,27(2):89-95.(Tan Longsheng, Li Xiaohui, Wei Cunfeng, et al. Effects of scintillation characteristics on the imaging quality of X-ray detectors[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2022, 27(2): 89-95)
- [4] Xu Xieming, Wu Yiheng, Zhang Yi, et al. Two-dimensional perovskite single crystals for high-performance X-ray imaging and exploring MeV X-ray detection[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2022: e12487.