

热中子数字成像系统的研制

唐 彬¹, 李西安¹, 张松宝¹, 夏 明¹, 项 东², 魏 彪²,

(1. 中国工程物理研究院, 四川绵阳 621900; 2. 重庆大学光电系, 重庆 400044)

摘要: 成像系统是中子照相装置的关键组件之一。采用 ${}^6\text{LiFZnS}(\text{Ag})$ 材料中子转换屏、长焦距、小视场专用微光镜头等光学组件, 利用科学级 CCD 芯片、两级热电偶制冷技术、14bit 模数转换技术研制了数字 CCD 摄像机, 采用 Visual C++ 和 C++ Builder 为工具, 开发了双字节图像采集处理分析软件包, 并设计了成像系统辐射防护装置, 构成了热中子数字成像系统。实验证明: 所采用的技术路线是合理的, 达到了设计目的, 成像质量可以与国外类似装置相媲美。

关键词: 中子照相; 转换屏; 电荷耦合器件; 数字成像

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

Thermal Neutron Digital Imaging System Based Cooled CCD

TANG Bin¹, Li Xi-an¹, ZANG Song-bao¹, XIA Ming¹

XIANG Dong², WEI Biao²

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, 621900, China;

2. Photo electricity College of Changchun University, 410044, China)

Abstract: The imaging system is one of key assemblies of neutron radiography facility. The collimator neutron flux is drawn from the horizontal channel by the use of SPRR-300 as a neutron resource. The convector made of ${}^6\text{LiFZnS}(\text{Ag})$ and the long focus professional twilight lens with the small field of view are used, and the digitalized CCD (Charge Coupled Device) camera is developed by the use of scientific grade CCD chip, the double thermocouple refrigeration and 14bit A/D convector. The image grabbing, processing and analyzing software of double bytes has been developed by the use of Visual C++ and C++ Builder, and the facility of anti-radiation for CCD is set up. The experiments show that the used technology is reasonable, and the destination of design is arrived at and the image quality can be matched with similar device at abroad.

Key words: neutron radiography ; convector ; CCD ; digital imaging

1 引言

中子对于某些材料比 X 射线、伽马射线具有更强的穿透能力, 由于中子与原子核作用, 而 X 光、伽马等射线与核外电子相互作用, 因此中子照相技术在检测含氢材料、重金属组件结构、原子序数相近的不同元素和同位素、放射性材料等方面是弥补了 X 光等其它无损检测技术的不足, 在国外被广泛应用于重金属组件、火工产品等武器部件的质量检测和库存武器可靠性和有效性评估中。在中子照相技术初期, 多采用胶片为记录介质的静态、非数字化成像技术, 随着 CCD 等数字成像器

件的出现, 中子数字成像技术获得了极大的发展, 它与常规的胶片成像技术相比, 具有动态范围大、线性度好、探测灵敏度高、易于图像后处理分析、时间分辨率好、操作简易等优点, 可用于在线或实时成像, 弥补了胶片成像技术的不足。我们利用 ${}^6\text{LiFZnS}(\text{Ag})$ 为转换屏材料, 采用长焦距小视场微光镜头、科学级 CCD 芯片、两级热电偶制冷等技术研制了中子数字成像系统, 利用 SPRR-300 反应堆为中子源, 设计了准直器等组件, 进行了实验研究, 取得了良好的效果。

2 系统结构及主要技术要求

中子照相系统的主要结构如图 1 所示, 它主要包括以下几部分: 中子源及准直系统、样品台、中子数字成像系统和图像采集处理分析系统。准直系统将中子源产生的中子慢化、伽玛过滤、准直引出, 并通过快门调节成像时间, 样品台用于承载样品、调节样品检测角度和区域, 成像系统将中子束的空间分布转换为图像信号, 传送给图像采集处理分析系统, 然后对采集的图像进行处理分析和判读。中子源及准直系统等其他文献中已有介绍^[1], 本文主要对成像系统进行分析。

中子数字成像系统应满足以下三个基本要求: a) 响应的中子注量率范围较宽。不同样品由于其结构、材质等不同, 对中子束的衰减差异很大, 为达到提高反差灵敏度等目的, 系统应具有较宽的正常成像的中子注量率范围, 以满足系统的通用性。b) CCD 抗辐射性能较好。CCD 在中子伽马混合场中容易出现辐射损伤、暗电流和白噪声上升等现象, 影响 CCD 的使用寿命和成像质量, 不同工艺 CCD 其抗辐射性能不同, 因此, 应从屏蔽和选材两方面提高 CCD 抗辐射性能; c) 较高的量子效率、分辨力和反差灵敏度, 使系统在成像速度和成像质量间达到有机平衡。

3 成像系统设计

本系统(结构见图 2)包括四个部分: 其一, 转换屏; 其二, 反光镜、辐射防护窗、微光镜头等光学组件; 其三, CCD 摄像机和主控计算机; 其四, 光屏蔽盒、CCD 辐射防护等附属组件。转换屏将中子束的空间分布转换为光学图像, 通过微光镜头成像在 CCD 靶面上, CCD 将光学图像转换为数字图像信号, 通过光纤传送到主控计算机, 主控计算机完成。

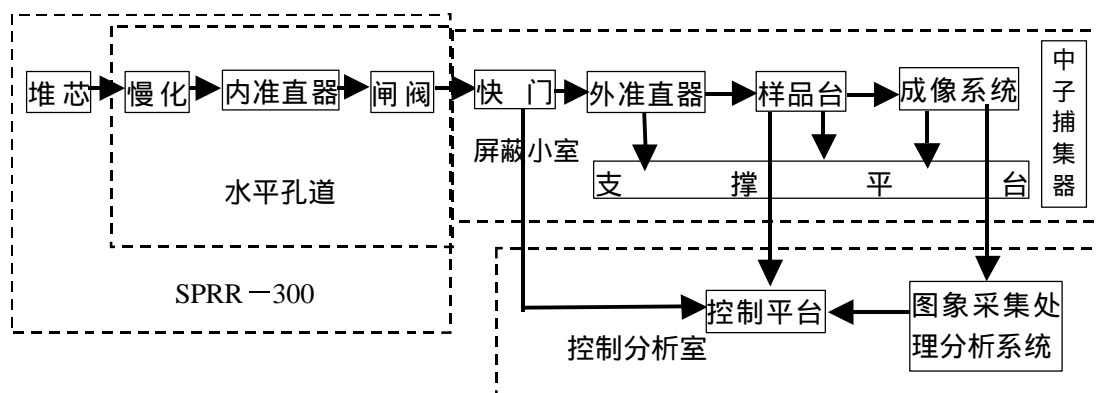
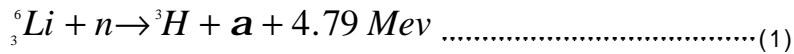


图 1 中子数字照相系统的基本结构

CCD 的控制和图像的采集处理分析, 反光镜、辐射防护窗用于 CCD 的辐射防护, 光屏蔽盒用于屏蔽外来光线。

中子不带电, 不能直接探测, 必须使用转换屏将中子转换为次级粒子进行探测。转换屏采用 ${}^6\text{LiFZnS(Ag)}$ 材料, ${}^6\text{Li}$ 吸收中子产生高能 α 粒子(反应如式(1)所示), α 粒子激发 ZnS(Ag) 发光(发射光光谱见图 3)将中子转换为可见光, 在转换屏表面中子注量率为 $10^6 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 转换屏发光照度为 10^{-4} Lux , 研究表明^[2], 一个中子激发光子数约为 1.7×10^5 个, 热中子探测效率约为 $15\% \sim 30\%$ 。



转换屏的光照度较低, 因此系统属于典型的微光成像。在装置的设计过程中, 充分考虑了微光成像和光谱特性, 进行了色差及像差修正, 保证系统分辨率等指标。系统采用了镀纯铝、前表面、高反射率反光镜和长焦距、大孔径微光镜头等光学组件提高系统对光的收聚能力和加大成像共轭距离, 并有利于辐射防护。摄像机采用制冷型、科学级、宇航用、背照(back-illuminated)CCD 芯片为图像传感器, 在 CCD 芯片的选材上注重了 CCD 的光谱耦合、量子效率、暗电流等技术指标, 以满足使用要求, 表 1 为选用芯片的主要参数, 该芯片的量子效率曲线见图 3 左图, 并设计了立体 CCD 辐射防护装置。

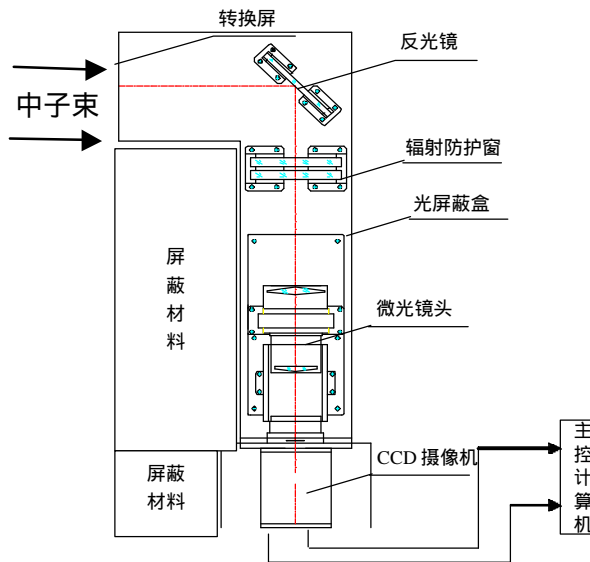


图 2 成像系统结构简图

CCD 采用 14bit 数字信号输出, 以加大动态范围、提高信噪比, 获取高品质图像; 采用两级半导体制冷方式, 可提供 $60^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温差, 确保 CCD 芯片工作于约 -25°C 的条件, 获得了良好的微光

检测性能。CCD 与主控计算机之间通过光纤和 PCI 数据传输卡连接, 进行 CCD 的控制和图像采集, 摄像机的曝光时间、工作频率、基础偏置、放大器增益及同步等多项工作参数和状态均可通过控制和数据处理终端进行设置、调节和控制。摄像机端的状态信息和图像数据经编码处理后传向计算机控制终端, 控制终端上的 PCI 数据传输卡完成对这些数据的解码恢复, 并在系统软件的支持下实现对数据的记录、显示、分析和处理等操作。

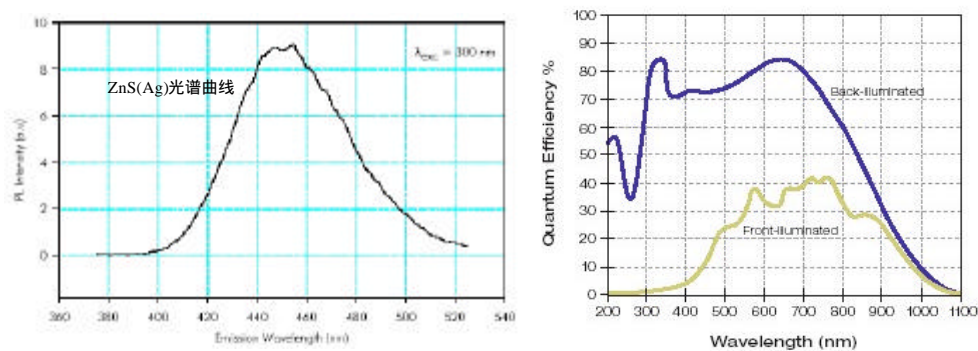


图 3 荧光物质 ZnS(Ag)的发射光光谱(左)和 CCD 芯片量子效率曲线(右)

表 1 图像传感器主要性能参数

参数	最小值	典型值	最大值	单位
Format	—	1024×1024	—	pixels
Pixel size	—	24×24	—	μm
Imaging area	—	24.6×24.6	—	mm
Fill factor	—	100	—	%
Dark current (MPP)	2	10	50	pA/cm ²
Sensitivity	2.1	2.4	2.7	μV/e
Noise	4	7	9	rme/e
well capacity	300,000	35,000	—	e ⁻ (2)
CTE	0.99995	0.99999	—	—

系统软件采用双字节存储、读取、显示、处理、分析技术提取图像信息, 以 Win98/2000 操作系统平台, 利用 Visual C++和 C++ Builder 开发, 软件流程图如图 4 所示。软件具有一定的实时处理分析和测量功能。经实验验证, 成像系统主要参数如下: 响应中子注量率范围: $10^4\sim10^9 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 积分时间: 0.5~2000s 可调; 信噪比: 大于 70db; 系统小孔分辨力: 0.1mm 左右。

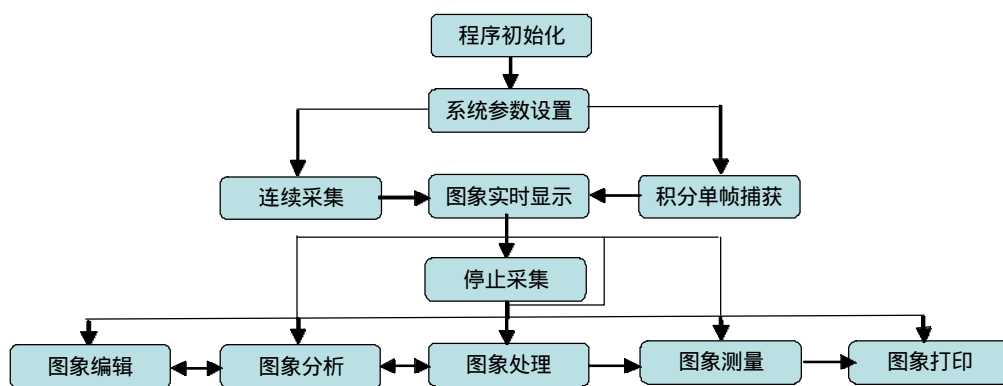
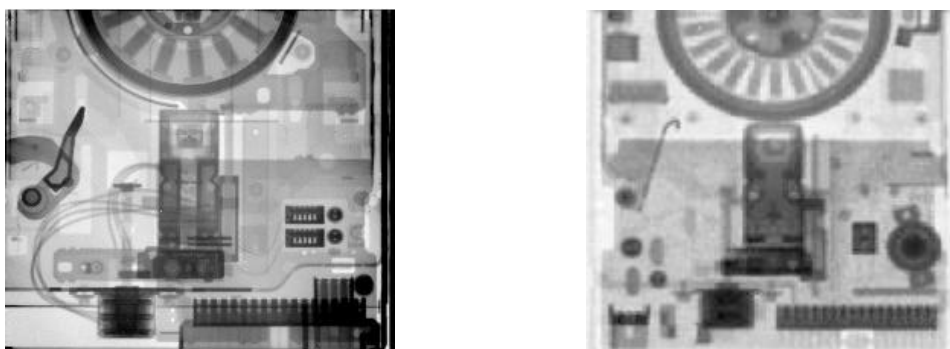
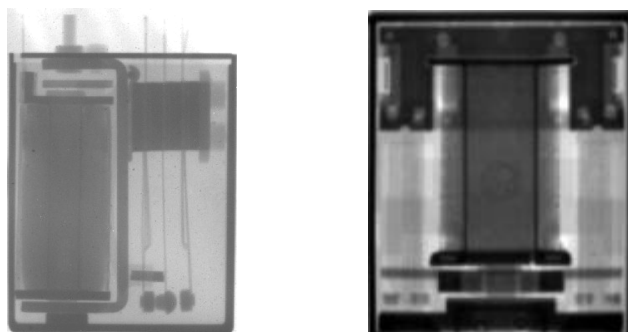


图 4 系统软件流程图

4 实验样图

图 5 计算机软驱中子照相图(部分, 左)、国外某研究所获取的类似图象^[3](右)图 6 继电器中子照相图(左)、国外某研究所获取的类似图象^[2](右)

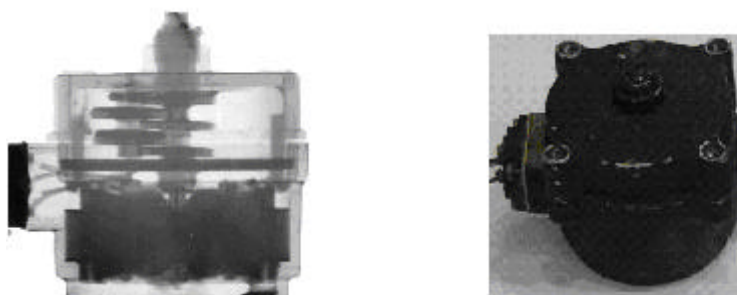


图 7 电机的中子照相图(左)和实物图(右)

实验从 SPRR-300 6# 热柱引出中子束, 经准直、慢化和去 γ 射线等处理, 设置适当的准直比等参数进行了成像实验, 取得了良好的检测效果。检测样图如图 5~图 7 所示。成像质量可以与国外的类似研究相媲美。

5 结 论

实验研究证明: a) 所研制的基于制冷 CCD 的中子照相系统路线是合理的, 具有较宽的正常成像的中子注量率范围, 较高的量子效率; b) 由于采用了多重辐射防护技术手段, CCD 系统具有较高的抗辐照性, 满足中子照相的环境要求。当然, 本装置也有不足, 例如, 由于 SPRR-300 中子注量率不高, 致使在大准直比时(大于 150)成像时间过长, 装置的自动化程度尚待提高等等, 这将在以后的工作中不断改进。与国外相比, 国内中子照相技术有较大差距, 也留给我们广阔的发展空间, 我们愿与国内相关单位协作, 共同推动我国中子照相技术的发展和运用。

据调研, 本装置是目前国内第一套系统齐全的热中子数字成像系统, 并已应用于实际检测。

致谢: 感谢于渝先生 和米德岭老师对本研究的帮助。

参考文献:

- [1] 白大卫, 刘以思, 金光宇等. 中子照相[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [2] S.Baechlor, T.Materna, etc. Set-up of a CCD based detection system at the NCR beamline(PSI) [C]. Germany, STSM Report 15 May-14 June 2001.
- [3] P.Vontobel, E.Lehmann. Neutron Tomography Setup At SINQ: Status And First Results. PSI Scientific Report 2002.

作者简介: 唐 彬(1969-), 男, 高级工程师, 1992 年毕业于四川大学本科, 2000 年 12 月获西安交大核能科学与工程专业硕士学位, 1992 年~1998 年主要从事反应堆控制技术研究, 1998 年至今主要从事反应堆中子照相技术研究, 正在设计建立中子 CT 系统。

本刊编者注: 本项目被评为“2004 年度 C T 和三维成像荣誉奖杯”授予项目之一。