

## 三维正电子发射断层扫描探测器刻度和深度分辨率测量实验装置

邓新汉<sup>1,2</sup>, 傅惠南<sup>1</sup>, 冯凯<sup>1,2</sup>, 李训登<sup>1</sup>, 刘爱民<sup>1</sup>, 王晓辉<sup>2</sup>, 邱忠华<sup>2</sup>, 杨永峰<sup>2</sup>

1. 广东工业大学, 广东 广州 510006; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055

**【摘要】**正电子发射断层扫描(PET)是一种常用的功能分子影像技术,用于多种重大疾病的早期诊断,同时改善PET成像系统的空间分辨率和效率需要使用三维深度测量探测器。本文研制了一台用于该类型探测器刻度和深度分辨率测量的实验装置,以便通过电子符合实现对探测器单一深度的照射。该装置包含一个由可编程逻辑控制器、步进电机以及高精度线性模组构成的移动平台,并采用触摸显示屏实现良好的人机交互。使用一个点放射源,通过一个薄片探测器和将要测量的三维PET探测器之间的符合,实现有选择地对探测器单一深度的照射。对实验装置的定位精度和重复精度进行了测量,结果表明该装置达到0.02 mm的定位和重复精度。最后使用该装置对一个基于LYSO晶体阵列和SiPM光探测器的双端读出PET探测器的深度分辨率进行测量,结果表明该装置完全满足三维PET探测器刻度和深度分辨率测试需要。

**【关键词】**正电子发射断层扫描;探测器;深度分辨率;实验装置

**【中图分类号】**TH13

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)08-0757-05

## An experimental setup for calibration and depth of interaction resolution measurement of three-dimensional positron emission tomography detector

DENG Xinhan<sup>1,2</sup>, FU Huinan<sup>1</sup>, FENG Kai<sup>1,2</sup>, LI Xundeng<sup>1</sup>, LIU Aimin<sup>1</sup>, WANG Xiaohui<sup>2</sup>, KUANG Zhonghua<sup>2</sup>, YANG Yongfeng<sup>2</sup>

1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** Positron emission tomography (PET) is a commonly used functional and molecular imaging technique for the early diagnosis of many major diseases. Three-dimensional depth-encoding detector is required to simultaneously improve the spatial resolution and sensitivity of a PET imaging system. Herein, an experimental setup used for detector calibration and depth of interaction (DOI) resolution measurement is developed so that a specific depth of the detector can be selectively irradiated. The setup consists of a programmable logic controller and a moving platform made of a stepping motor and a high precision linear module. A touch screen is used to realize a good human-computer interaction. A point source and the electric coincidence between a slab detector and the PET detector are used to realize the selectively irradiation of one specific depth of the detector. The positioning and repetition accuracies of the experimental setup are measured and both reach 0.02 mm. Finally, the experimental setup is used to measure the DOI resolution of a three-dimensional PET detector based on dual-ended readout of LYSO crystal array with SiPM photodetectors. The results show that the experimental setup completely fulfills the requirement of detector calibration and DOI resolution measurement for a three-dimensional PET detector.

**Keywords:** positron emission tomography; detector; depth of interaction resolution; experimental setup

### 前言

正电子发射断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)成像是一种重要的核医学分子影像技术,在肿瘤、神经性疾病和心血管疾病等的早期诊断

方面发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。现有PET成像仪器有全身、脑专用、乳腺专用、大动物和小动物PET成像系统,和全身成像系统相比,其它类型的成像系统可以使用小的探测器环直径从而达到更高的效率和空间分辨率,而PET探测器的相互作用深度不确定效应是阻碍这些PET成像系统同时实现高空间分辨率和高效率的最大障碍<sup>[3]</sup>,需要研发具有深度测量能力的三维PET探测器来克服这一障碍,近年来一系列具有深度测量能力的PET探测器技术研发成功<sup>[4-7]</sup>,笔者实验室多年来致力于双端读出深度测量PET探测

**【收稿日期】**2017-04-22

**【基金项目】**国家自然科学基金(81527804, 11575285);深圳市基础研究项目(JCYJ-20160608153434110)

**【作者简介】**邓新汉,硕士研究生,研究方向:核医学仪器, E-mail: xh\_deng65147@163.com

器的研究工作<sup>[8-9]</sup>。对于这些深度测量探测器,在刻度和性能测量过程需要实现对探测器单一深度有选择地照射,就需要研发一个高定位精度、高重复精度和容易使用的实验装置。本文将研发一种基于可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)用于深度测量PET探测器的刻度和深度分辨率测量的实验装置。该实验装置采用PLC作为控制模块,触摸显示屏作为人机交互界面,执行模块由步进电机、KM线性模组、高精度手动滑台及电子准直探测器等部件组成,根据PET探测器测量实验需求,拟研发的实验装置的定位和重复性精度要求是0.1 mm以下。

## 1 实验装置和方法

### 1.1 PLC控制系统

本实验装置由触摸显示屏作为人机交互界面,PLC为核心控制器件,步进电机、KM线性模组和手动滑台为执行元件。由于PET探测器通常在测量过程中需要放置于一个避光的盒子中,本装置的执行元件均置于暗盒中,而将PLC控制部分和触摸显示屏通过电缆连接放置在暗盒外。实验装置的控制系

统结构图如图1a所示。

由触摸屏作为人机界面,发送指令给PLC控制核心,PLC作为控制器,产生脉冲信号和方向控制信号发送至步进电机驱动器,再由驱动器驱动步进电机正反转和转动步数,步进电机通过联轴器连接KM线性模组中滚珠丝杆带动滑台的精确移动。限位传感器检测滑台的极限位置,当线性模组滑台移动到左右限位传感器的相应位置时,PLC控制步进电机停止运行。同时PLC控制器发送信号给显示屏,实时显示滑台当前位置,如图1b所示。滑动平台位移与脉冲数关系公式如下:

$$S = \frac{P\theta_b}{360^\circ} n \quad (1)$$

其中 $S$ 为滑动平台位移, $n$ 为PLC控制器发送的脉冲数, $P$ 为滚珠丝杆导程, $\theta_b$ 为步进电机步距角, $m$ 为步进电机驱动器细分数。所以通过程序设定脉冲数 $n$ 与位移 $S$ 之间的关系,即可在控制显示屏上输入需要位移大小进而控制PLC脉冲数驱动步进电机,使滑动平台移动相应的距离,并且在显示屏上显示当前位置,不需要操作者记录位移状况,可从触摸显示屏直观得到,为实验人员带来极大便利。

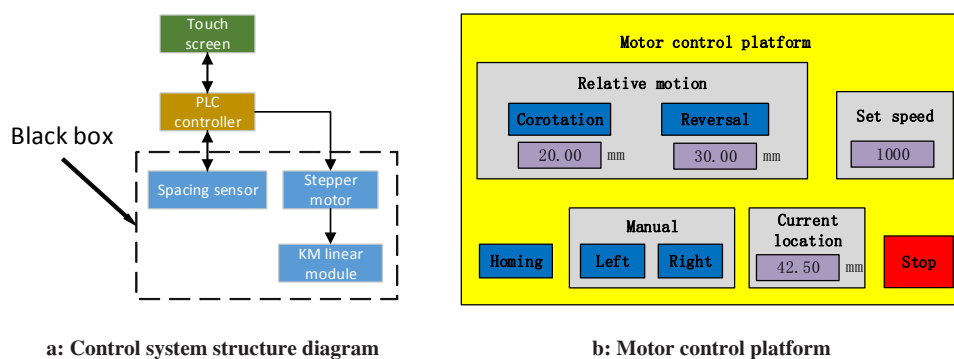


图1 实验装置控制系统

Fig.1 Control system of experimental setup

### 1.2 执行模块

执行模块主要由步进电机、KM线性模组、高精度手动滑台等部件组成。步进电机是现代数字控制系统中最主要的执行元件,它可将前端控制器发送的电脉冲信号精确的转换为角位移或线位移。因步进电机控制简单、价格便宜及精确度高等优点,被广泛的应用于计算机外围设备,数控机床等工业自动化控制系统领域<sup>[10]</sup>。步进电机同时也配备相应的驱动模块,为防止步进电机产生丢步现象,通过控制脉冲频率的线性变化对步进电机的启停、速度进行控制。如图2所示,PLC作为微型工业控制计算机,具

有可靠性高、抗干扰能力强、使用方便等优点,目前成为控制步进电机的较好选择。

步进电机选用的是山社42 mm二相步进电机,型号是SS1704A20A,电机静力矩可达0.54 N·m,具

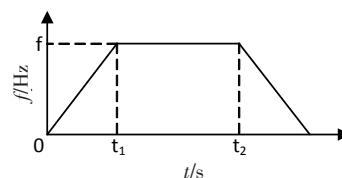


图2 驱动器脉冲频率随时间变化示意图

Fig.2 Drive pulse frequency varying with time

有定位精度高,输出力矩高,响应频率高,运行噪音低,动态特性好等优点。选择通用型两相直流步进驱动器 SR2-Plus,为提高步进电机的精确率,驱动器设置 800 细分。

线性模组选用台湾银泰公司生产的 KM 系列线性模组,该模组系列采用的是滚珠丝杆传动方式,具有高精度、高刚性、省空间等特点。其中 KM3305A-200H 是属于 KM 系列中高级线性模组,它定位精度为 0.06 mm,反复定位精度可达  $\pm 0.005$  mm,滑轨长度 200 mm,有效行程可达 104.5 mm。

手动滑台选用 MiSUMi 高精度燕尾槽型滑台,齿轮齿条式传动方式。型号为 XDTS90 和 ZDTS90,其移动精度均为 30 mm,耐负载接近 20 N。

### 1.3 PET 探测器模块

将用于本实验装置测试的探测器模块由一个  $11 \times 11$  的 LYSO 晶体阵列和放置于其两端的硅光电倍增管 (Silicon Photomultiplier, SiPM) 阵列组成。每一个晶条单元尺寸为  $(1 \times 1 \times 20)$  mm<sup>3</sup>,晶体阵列两端抛光,其它晶体表面都不抛光,晶体间反射膜为美国 3M 公司的厚度为 65 mm 的镜反射膜 ESR, SiPM 阵列为本日本 Hamamatsu 公司的  $4 \times 4$  阵列,每个 SiPM 单元面积为  $(3 \times 3)$  mm<sup>2</sup>,间距为 0.2 mm, SiPM 和 LYSO 阵列通过 1 mm 厚的透明有机玻璃光导和硅油耦合,双端读出探测器模块的示意图如图 3 所示。



图3 双端读出PET探测器模块示意图

Fig.3 Double-ended readout positron emission tomography (PET) detector module

### 1.4 电子准直装置

电子准直装置的示意图如图4所示,一个尺寸为  $(40 \times 20 \times 1)$  mm<sup>3</sup> 的 LYSO 晶体薄片与 Hamamatsu 公司的 R9800 的单通道光电倍增管耦合作为符合探测器,该探测器和直径为 0.3 mm 的 <sup>22</sup>Na 点放射源固定在前面介绍的移动平台之上,并且二者放置于同一条直线上。由于正电子衰变发出的两条伽玛射线朝相反方向飞行,通过平台的移动,以及薄片探测器和 LYSO 晶体阵列探测器的符合,可以实现对 LYSO 晶体阵列任一深度有选择地照射。

### 1.5 移动平台精度测量

定位精度是指运动部件在程序控制下,运动的

实际位置与目标位置的接近程度。重复定位精度是指运动部件往复运动多次,每一次实际到达位置的一致程度<sup>[11]</sup>。一般机床或实验平台的定位精度与重复定位精度检测工具较多,可使用步距规、精密线纹尺和激光干涉仪等<sup>[12-15]</sup>,本文根据经济性考虑和该实验装置精度需求,测量工具选择日本三丰 ABSOLUTE 500-155-20 游标卡尺。测量精度之前将 PLC 控制的 KM 线性模组固定在铝合金底板上,用量块作为挡板,并用夹具把量块固定在底板上。在线性模组和挡板的一侧,同样用夹具将游标卡尺固定且水平校准。

为使测量精度值更加具有说服力,选取 5 个目标位置作为测量点。首先控制线性模组滑块从原点位置向目标位置 1 运动,测量实际到达位置和原点距离,然后回原点,再使滑块从原点位置向目标位置 2 运动,测量到达位置和原点距离,依次类推,最后完成对 5 个目标位置的测量。然后重复上面实验 7 次,对每一个目标位置,7 次测量位置和目标位置的最大差值被定义该位置的定位精度,7 次测量位置之间的最大差值被定义为该位置的重复精度。取 5 个点定位精度和重复精度的最大值作为该实验装置的定位精度和重复精度(图4)。

### 1.6 PET 探测器深度分辨率测量

使用图4所示的实验装置,通过平台的移动和电子准直,实现有选择地对双端读出 PET 探测器模块 2, 6, 10, 14 和 18 mm 深度的照射,探测器根据两个 SiPM 测量到的能量比计算伽玛射线作用深度 (Depth of Interaction, DOI):

$$DOI = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \quad (2)$$

得到每个深度的能量比分布曲线后,通过高斯拟合得到该曲线的峰值和半高宽,然后通过 2 mm 和 18 mm 深度的峰值和已知的深度信息,使用线性拟合将每个深度的半高宽转换为单位为 mm 的深度分辨率。

## 2 实验结果

### 2.1 移动平台精度测量

表1显示实验中移动平台的目标值以及实际测量值,目标值的范围从 2.30 mm 到 75.80 mm,平台的有效行程可达 104.5 mm,而 PET 探测器的长度一般小于 30 mm,所以移动平台的移动范围远远能满足 PET 探测器深度分辨率测量和刻度需求,表2显示移动平台的定位精度和重复精度,5 个位置的定位精度和重复精度都为 0.01~0.02 mm,该移动平台达到 0.02 mm 的定位精度和重复精度。

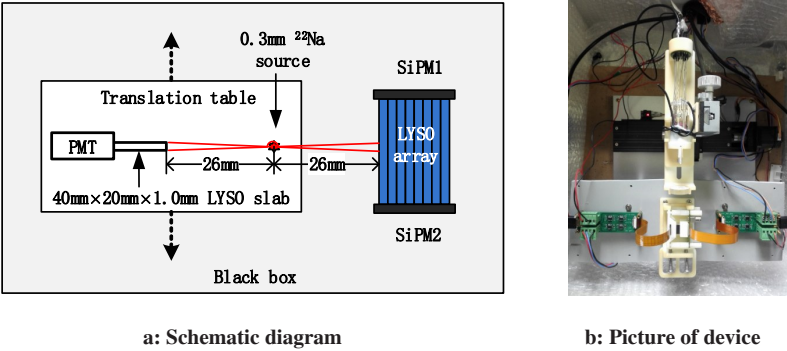


图 4 PET 探测器电子准直装置

Fig.4 Electronic collimation device of PET detector

表 1 移动平台精度测量(mm)

Tab.1 Precision measurement of moving platform (mm)

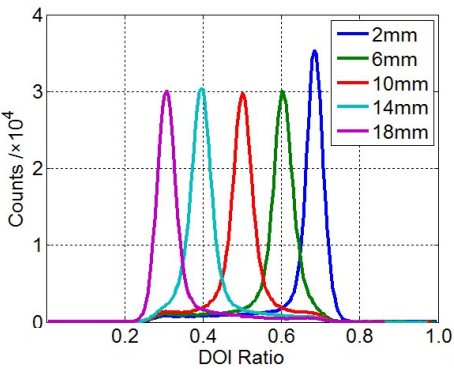
Item		Number				
		1	2	3	4	5
Position		2.30	19.60	37.40	56.10	75.80
Measured value	$j=1$	2.30	19.59	37.40	56.09	75.78
	$j=2$	2.30	19.59	37.41	56.09	75.78
	$j=3$	2.30	19.59	37.40	56.10	75.78
	$j=4$	2.31	19.59	37.39	56.10	75.78
	$j=5$	2.30	19.59	37.41	56.09	75.79
	$j=6$	2.29	19.58	37.40	56.09	75.79
	$j=7$	2.29	19.58	37.41	56.09	75.78

$j$  is the measurement number.

表 2 移动平台定位精度和重复精度(mm)

Tab.2 Positioning accuracy and repetition accuracy (mm)

Item	Number				
	1	2	3	4	5
Position	2.30	19.60	37.40	56.10	75.80
Positioning accuracy	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Repetition accuracy	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01



DOI: Depth of interaction.

图 5 DOI 响应曲线

Fig.5 Depth of interaction response curve

2.2 PET 探测器深度分辨率

图 5 显示 PET 探测器 5 个深度的 DOI 响应曲线,得到的平均深度分辨率为 2.4 mm。除了得到该探测器的深度分辨率性能,使用该探测器搭建 PET 成像系统时,测量得到的探测器的能量比曲线峰位和实际深度之间的关系曲线还可以用于对探测器进行刻度,将测量到的能量比转换为深度信息,用于 PET 图像重建。

3 结 论

本文采用触摸显示屏作为人机交互界面, PLC 为核心控制器件,步进电机、KM 线性模组和手动滑



台为执行元件,研制了一台用于三维深度测量PET探测器刻度和深度分辨率测量的高精度移动平台实验装置。对该移动平台的精度从实验上进行了测量,实验结果表明该装置的定位精度和重复精度都达到0.02 mm,该移动平台的有效移动范围可达104.5 mm,完全满足PET探测器刻度和深度分辨率测量需要。使用该装置对一个基于SiPM的双端读出PET探测器模块的深度分辨率进行了测量,得到2.4 mm深度分辨率。本文研发的实验装置具有系统精度高、结构简单、操作方便和人机互动性强等特点。目前,本文所述实验装置已经投入到笔者实验室多项PET探测器测量实验中,今后将要在现有基础上改进,将移动控制部分集成到PET探测器数据采集程序中,实现对探测器多个深度自动测量。

### 【参考文献】

- [1] CHERRY S R. *In vivo* molecular and genomic imaging: new challenges for imaging physics [J]. *Phys Med Biol*, 2004, 49(3): R13-R48.
- [2] MUEHLEHNER G, KARP J S. Positron emission tomography [J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(13): R117-R137.
- [3] LEWELLEN T K. Recent developments in PET detector technology [J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(17): 287-317.
- [4] ERIKSSON L, WIENHARD K, ERIKSSON M, et al. The ECAT HRRT: NEMA NEC evaluation of the HRRT system, the new high-resolution research tomograph [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2002, 49(5): 2085-2088.
- [5] BURR K C, IVAN A, LEBLANC J, et al. Evaluation of a position sensitive avalanche photodiode for PET [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2003, 50(4): 792-796.
- [6] LEBLANC J W, THOMPSON R A. A novel PET detector block with three-dimensional hit position encoding [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(3): 746-751.
- [7] ORITA N, MURAYAMA H, KAWAI H, et al. Three-dimensional array of scintillation crystals with proper reflector arrangement for a depth of interaction detector [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2005, 52(1): 8-14.
- [8] YANG Y F, DOKHALE P A, SILVERMAN R W, et al. Depth of interaction resolution measurements for a high resolution PET detector using position sensitive avalanche photodiodes [J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(9): 2131-2142.
- [9] YANG Y F, BEC J, ZHOU J, et al. A prototype high-resolution small-animal PET scanner dedicated to mouse brain imaging [J]. *J Nucl Med*, 2016, 57(7): 1130-1135.
- [10] 王先遼, 陈定积, 吴丹. 机床进给系统用直线电动机综述 [J]. *制造技术与机床*, 2001, 8: 18-20.
- WANG X K, CHEN D J, WU D. Overview of linear motor used in machine tool feeding system [J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2001, 8: 18-20.
- [11] 冷涵涛. 数控机床定位精度和重复定位精度的检验 [J]. *机床与液压*, 2008, 36(8): 191-193.
- LENG X T. Verification of positioning accuracy and repeated positioning accuracy of CNC machine tools [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(8): 191-193.
- [12] 郑鹏, 张颀. A/C 轴双摆角铣头定位精度与重复定位精度检测 [J]. *工具技术*, 2015, 48(8): 95-97.
- ZHENG P, ZHANG D. Positioning accuracy and repeatability positioning accuracy of A/C axis double pendulum angle milling head [J]. *Tool Technology*, 2015, 48(8): 95-97.
- [13] 涂雪飞, 易传云, 钟瑞龄, 等. 基于光栅尺的数控机床定位精度和重复定位精度检测 [J]. *机械与电子*, 2012(4): 32-34.
- TU X F, YI C Y, ZHONG R L, et al. Positioning accuracy and repeatability positioning accuracy of CNC machine tools based on grating scale [J]. *Mechanical and Electronics*, 2012(4): 32-34.
- [14] 林敏. 数控机床线性轴线的定位精度和重复定位精度测量技术 [J]. *机电工程技术*, 2006, 35(5): 50-76.
- LIN M. Positioning accuracy and repeated positioning accuracy measuring technology of linear axis of NC machine tools [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2006, 35(5): 50-76.
- [15] 迟关心, 郝昕宇, 张昆. 数控机床定位精度的检测及补偿 [J]. *航天制造技术*, 2010, 3: 51-54.
- CHI G X, HAO X Y, ZHANG K. Measurement and compensation for orientation accuracy of NC machine [J]. *Space Manufacturing Technology*, 2010, 3: 51-54.

(编辑:薛泽玲)