

文章编号: 1007-4627(2010)01-0063-05

多阳极位置灵敏光电倍增管位置读出电路的设计实现^{*}

赵翠兰^{1,2}, 漆玉金^{2, #}, 施亮¹, 金庆², 代秋声²

(1 上海交通大学自动化系, 上海 200030;

2 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 多阳极位置灵敏光电倍增管(PSPMT)被广泛地用来开发高分辨的小型 γ 相机模块。探讨了 PSPMT 的位置读出电路的简化设计研究, 并针对日本滨松的 H8500 型多阳极 PSPMT, 设计和开发了离散位置读出电路(DPC)和均衡电荷分配电路(SCDC)两种简化的位置读出电路, 并在 SCDC 中加入了局域重心(TCOG)的定位方法, 进一步地优化读出电路的简化设计。初步的实验测试结果表明, SCDC 结合 TCOG 定位法, 能显著地改善探测器的定位非线性及压缩效应, 扩展有效的成像视野(FOV), 比 DPC 方法的有效视野增大了约 20%。

关键词: 位置灵敏光电倍增管; 离散位置读出电路; 均衡电荷分配电路; 局域重心法

中图分类号: TN152.2 **文献标识码:** A

1 引言

γ 相机在生物医学、药物开发、放射性环境及安全监测等方面应用广泛。近年来, 随着核医学分子影像的快速发展, 对先进分子影像设备的开发产生了巨大需求, 而这些先进的分子影像系统的研发又离不开高分辨小型模块化 γ 相机的开发^[1-3]。传统的 γ 相机通常是采用连续的 NaI(Tl)闪烁晶体配常规的光电倍增管阵列的探测器技术, 已不能满足发展高分辨率小型 γ 相机的要求, 需要开发新的阵列探测器技术。其中, 阵列闪烁晶体配位置灵敏光电倍增管(PSPMT)是目前较广泛采用的一种开发高分辨率小型 γ 相机的有效途径。

日本滨松(Hamamatsu)公司生产的 H8500 位置灵敏光电倍增管^[4], 由于体积小、性价比高, 比较适合于开发高分辨模块化的成像探测器。它有 64 个分立阳极, 按 8×8 的阵列组成, 每个阳极的尺寸为 $5.6 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm}$; 采用金属通道倍增极结构, 共有 12 级金属通道倍增, 提供电子倍增的增益可达 1.5×10^6 ; 光阴极为双碱材料, 灵敏面积为 $49 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$, 窗体为 2 mm 厚的 Borosilicate 玻璃; 管子的外观尺寸为 $52 \text{ mm} \times 52 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ 。

已有不少研究组选用该款 PSPMT 用于开发高分辨成像探测器模块^[5, 6]。

针对 H8500 的 64 个分立阳极信号, 如果采取逐个阳极信号的读出方法, 读出电路将非常复杂, 后续的信号处理与采集系统也将变得十分庞大且昂贵, 因此, 简化其位置信号读出方法就变得很重要。目前, 多阳极 PSPMT 有两种简化的位置读出方法: 一种是基于电阻链电荷分除方法的无源电阻网络, 被称为离散位置读出电路(DPC, Discretized Positioning Circuit)^[7]; 另一种是将阳极收集来的电荷平均地分配到 X 和 Y 两个电阻网络, 称为均衡电荷分配电路(SCDC, Symmetric Charged Division Circuit)^[8]。本文的研究, 主要是针对 H8500 型的 64 个分立阳极信号, 设计和开发出 DPC 和 SCDC 两种简化的位置读出电路, 并在 SCDC 中加入了局域重心(TCOG, Truncated Center Of Gravity)的定位方法^[9], 进一步简化读出电路。同时对这两种简化读出电路开展对比研究, 其目的是从中选出最好的读出电路来提高定位精度, 增大成像视野, 进而有效提高探测器的使用面积。

* 收稿日期: 2009-03-23; 修改日期: 2009-04-09

* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目(26050601)

作者简介: 赵翠兰(1978-), 女(汉族), 河北保定人, 在职硕士研究生, 从事核电子学研究。

通讯联系人: 漆玉金, qiyujin@sinap.ac.cn

2 位置读出电路的设计

2.1 DPC 读出方法

DPC 是基于单丝正比计数器的直角位置运算法发展起来的一个网络式电阻串结构^[7]。实际应用中多阳极 PSPMT 的每个阳极都有相应的光电信号输出, 这些光电信号通过 DPC 电桥电阻网络输出 A, B, C 和 D 4 个方向的电流信号(见图 1), 经过放大器放大后进行处理。

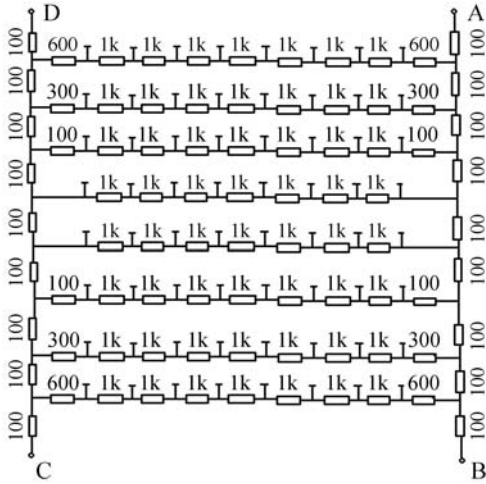


图 1 离散位置读出电路读出法的电阻网络^[7]

入射光子的位置由下式求得:

$$X = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D},$$

$$Y = \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_D + V_C + V_B}.$$

这种方法的优点是: 前端读出电路结构简单, 需要的读出通道少(只有 4 路输出), 使得后端的信号采集与处理比较容易, 整套系统的读出成本比较低。但是这种读出方法存在的问题是: 靠近探测器的边缘区域, 由于重心法定位引起的压缩效应非常明显, 导致探测器的可使用面积极大地减小。

2.2 SCDC 读出方法

与 DPC 电桥读出法不同, SCDC 读出法是将阳极收集来的电荷均衡地分配到 X 和 Y 方向的两个电阻网络上^[8], 称为 X 和 Y 网络(见图 2)。X 和 Y 网络各有 8 个读出通道, 共计 16 个读出通道。

该读出法虽然可把 64 个分立阳极信号简化为

16 路读出, 但 16 路读出仍然较多, 不易处理, 还需进一步的优化与简化。

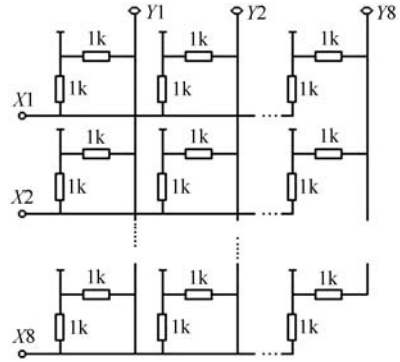


图 2 均衡电荷分配电路读出法电阻网络^[8]

2.3 前置放大电路的设计

前置放大器主要是把前述电阻网络收集的电压信号放大成形。为了提高系统集成度, 我们选用了电压灵敏前置放大器, 其原理见图 3。它采用一级放大, 并在反馈电阻 R_f 上并联一个高通滤波电容 C_f , 以降低高频噪声的影响。我们选用美国 AD 公司生产的 AD8066AR 芯片作为前置放大电路中的集成运算放大器, 这是一种双电源、低功耗、高速双运算放大器, 它的噪声只有 $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $0.6 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($f = 10 \text{ kHz}$), 符合对运放本身低噪声的要求。

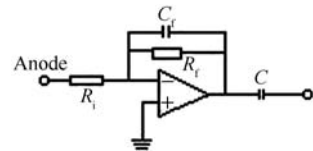


图 3 电压灵敏前置放大电路

2.4 信号处理电路的优化设计

前述 SCDC 网络简化后的 16 路读出, 其进一步简化是通过对后续信号处理电路的优化来实现的。具体设计方法是: 采用我们前期研究的 TCOG 法来对读出电路进行优化。其核心是通过一个减法电路来实现局域区的选择, 去除那些远离 γ 射线入射区域的噪声信号影响, 达到提高定位精度的目的^[9, 10]; 然后再利用阻抗电桥电路, 把 16 路读出简化为 4 路输出。图 4 给出了 X 方向阻抗电桥电路, 8 路读出简化为 X^+ 和 X^- 两路输出; 同理, Y 方向也通过与 X 方向类似的阻抗电桥电路处理, 8

路读出简化为 Y^+ 和 Y^- 两路输出。

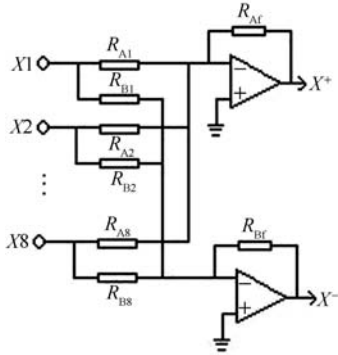


图 4 X 方向阻抗电桥读出电路

在阻抗电桥读出电路中，每一路通道经一对定位电阻与后端相应的放大器和反馈电阻构成两个反向放大回路，信号按照通道所对应的位置以相应的放大倍数分送到 X^+ 和 X^- 输出。定位电阻 R_{An} 和 R_{Bn} 需要满足总的电压放大倍数为恒定值，设 R 为所有通道中阻值最大的电阻（即 R_{A1} ）， N 为总的读出通道数， n 为通道号， G 为期望的最大电阻与最小电阻的比值；定位电阻的计算公式如下：

$$R_{An} = \frac{R}{(n+1) \frac{G-1}{N-1} + 1},$$

$$R_{Bn} = \frac{R}{(N-n) \frac{G-1}{N-1} + 1}.$$

最后，定位测量由以下公式算出：

$$X = \frac{X^+ - X^-}{X^+ + X^-}, \quad Y = \frac{Y^+ - Y^-}{Y^+ + Y^-}.$$

3 读出电路的制作与性能测试

3.1 读出电路的制作

根据前述的设计方案，我们制作了两种读出电路板，电路 PCB 板的制作采用双层板，接地处理为大面积覆铜，最后制作完成的电路板见图 5。其中，图 5(a) 基于 DPC 网络的位置读出电路板，图 5(b) 是基于 SCDC 网络的位置读出电路板。对 SCDC 读出电路板分别进行了脉冲发生器以及系统联机的初步测试，对 DPC 读出电路板进行了系统的联机初步测试。

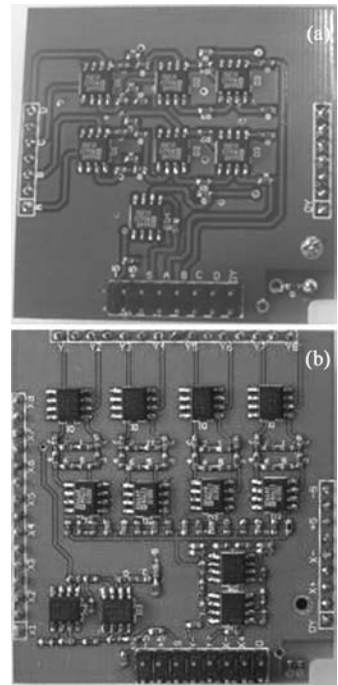


图 5 DPC(a)与 SCDC(b)两种读出法的电路板

3.2 脉冲发生器测试

利用脉冲发生器对 SCDC 读出电路板进行了单独测试。将脉冲发生器的信号依次输入到每一个通道，检测每一路通道与所对应位置的线性度，以及各通道能量的放大幅度的偏差。图 6 给出了测得的读出通道位置，将相邻两通道的间距归一化为 1，位置偏差为 $K(X^+ - X^-)/(X^+ + X^-)$ ，其中 K 为归一化系数；计算出读出位置的最大偏差为一个通道间距的 6.49%，最小偏差为 1.5%。通道与对应的位置有很好的线性关系。

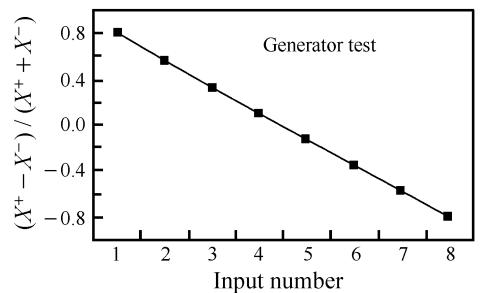


图 6 X 方向测得的通道与位置的线性关系

图 7 给出了与图 6 同一组数据测得的每个通道的 $(X^+ + X^-)$ 的偏离度。因为在实际应用时，输入的信号有很多个，而且应用的计算方法是 TCOG 法，所以各通道能量放大幅度的平均偏差对读出电

路的精确度起决定性的作用。图中给出的是每一个通道能量与平均能量相比的偏差，最大偏差为 2.33%，平均偏差为 1.03%。

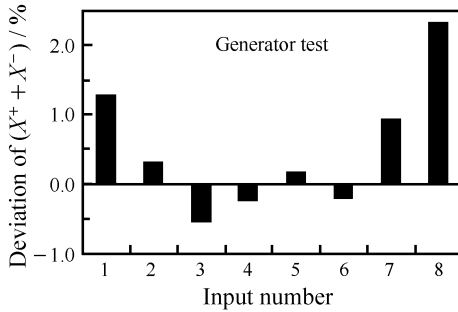


图 7 X 方向各个通道的能量偏差率

3.3 实验测试

前述两个读出电路板，与探测器结合，用一个 ^{137}Cs γ 放射源进行了初步测试。探测器为 Saint-Gobain 公司生产的 NaI(Tl) 阵列晶体配滨松 H8500 多阳极 PSPMT，NaI(Tl) 晶体的阵列单元是 $1.2\text{ mm} \times 1.2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ，晶体单元之间的间隔为 0.2 mm 。采用一个强度约 $70\ \mu\text{Ci}$ 的 ^{137}Cs 点源对探测器进行均匀照射，放射源与探测器的距离约 80 cm ，H8500 的工作电压设为 -670 V 。测得的探测器整体响应图像见图 8。

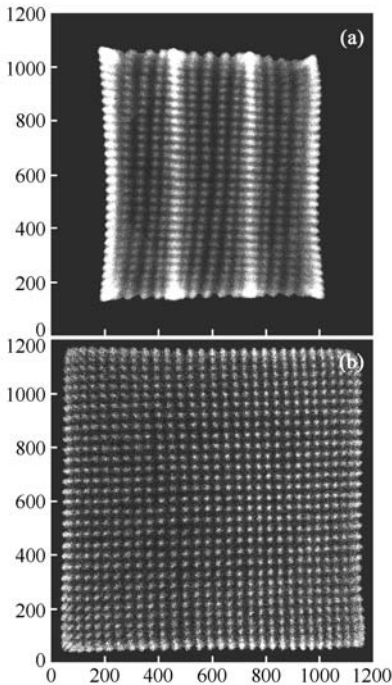


图 8 ^{137}Cs 点源均匀照射探测器的响应图像

(a)DPC 读出法测量结果, (b)SCDC 读出法测量结果。

从图中可以看出，探测器配备 DPC 读出电路板，其定位有显著的非线性和压缩效应；而配备 SCDC 读出电路板，其定位的非线性和压缩效应得到明显改善，更加接近阵列晶体真实的几何排列。在探测器中心区域(图 8 中 X 方向 550—650 道)，对比 DPC 与 SCDC 两种读出电路，获得的 Y 方向投影曲线见图 9。从图中可以看出，DPC 读出电路相对于 SCDC 读出电路的定位压缩接近 20%，SCDC 读出结合 TCOG 法能显著改善探测器的位置分辨和成像性能。图 8(a)中 DPC 读出的测试结果，是利用图 1 电阻网络的阻值分配得到的。但是，该阻值的分配方案对该阵列晶体及 H8500 管子是否是最佳的，还有待进一步的研究。

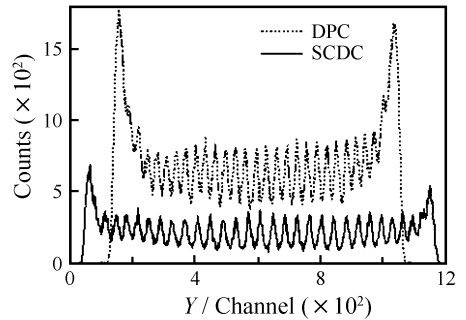


图 9 探测器中心区域(550—650 道)DPC 与 SCDC 读出在 Y 方向投影曲线对比

4 结论

本文研究了多阳极 PSPMT 位置读出的简化设计研究，针对日本滨松的 H8500 型多阳极 PSPMT，成功地设计和开发出了 DPC 和 SCDC 两种简化的位置读出电路，并在 SCDC 读出电路中加入了 TCOG 的定位方法，取得良好的成像效果。初步的实验测试结果表明：常规 DPC 网络 TCOG 法定位的读出电路，虽然电路简单易实现，但在用于高分辨成像探测器的读出时，会出现显著的定位非线性及压缩效应，影响探测器的定位分辨及成像视野；而采用 SCDC 网络结合 TCOG 法定位的读出电路，既可以保留 DPC 最简化的四路读出优点，还能显著地改善探测器的定位非线性及压缩效应，比较适合用于高分辨成像探测器的读出，可以推广应用于其它类似多阳极 PSPMT 的位置读出。

参考文献 (References):

- [1] Blankenberg F G. IEEE Eng Med & Biol Mag, 2004, **23**(4): 51.
- [2] Cherry S R. Phys Med Biol, 2004, **49**: R13.
- [3] Meikle S R, Kench P, Kassiou M, *et al.* Phys Med Biol, 2005, **50**(22): R45.
- [4] Datasheet: Hamamatsu Tube Assembly H8500. <http://www.hamamatsu.com>.
- [5] Peter D O, Jonathon A T, Frezghi H, *et al.* IEEE Nucl Sci, 2005, **51**(1): 21.
- [6] Qi Huirong, Wang Jinchuan, Xiao Guoqing, *et al.* Nuclear Electronics and Detection Technology, 2006, **26**(4): 451 (in Chinese).
(祁辉荣, 王金川, 肖国青等. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(4): 451.)
- [7] Siegel S, Cherry S R, Shao Y. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, **43**(3): 1634.
- [8] Popov V, Majewski S, Weisenberger A G. IEEE Nucl Sci Symp Conf Rec, 2003, **3**: 2156.
- [9] Zhang Mengjiao, Qi Yujin. Nuclear Science and Techniques, 2007, **30**(7): 629 (in Chinese).
(张猛蛟, 漆玉金. 核技术, 2007, **30**(7): 629.)
- [10] Qi Y J, Zhang M J, Zhao C L, *et al.* IEEE Nucl Sci Symp Conf Rec, 2007, **M19—67**, 3725.

Design and Implementation of Simplified Readout Circuits for Multi-anode Position-sensitive Photomultiplier Tubes^{*}

ZHAO Cui-lan^{1, 2}, QI Yu-jin^{2, #}, SHI Liang¹, JIN Qing², DAI Qiu-sheng²

(1 *Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;*

2 *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract: The multi-anode position sensitive photomultiplier tube (PSPMT) has been used for the development of high-resolution γ camera module. This study is aimed to investigate the simplified readout design for the multi-anode flat panel PSPMT. Based on the Hamamatsu H8500 PSPMT with 64 multi-anodes, we designed and developed two simplified readout circuits, discretized positioning circuit (DPC) and symmetric charge division circuit (SCDC). The truncated center-of-gravity (TCOG) positioning method was used to optimize the readout signal processing and then further reduce the readout channels by a resistor chain. The preliminary results show that the SCDC readout with the TCOG could significantly reduce the non-linearity of positioning and improve the effective field-of-view of the detector by about 20% as compared to the DPC readout.

Key words: multi-anode position sensitive photomultiplier tube; discretized positioning circuit; symmetric charge division circuit; truncated-center-of-gravity positioning method

* **Received date:** 23 Mar. 2009; **Revised date:** 9 Apr. 2009

* **Foundation item:** Hundred Talent Program of Chinese Academy of Sciences (26050601)

Corresponding author: Qi Yu-jin, E-mail: qiyujin@sinap.ac.cn