

线阵探测器 (LDA) 的现状与发展趋势

J. 柯斯克能 原著 蔺春涛 高冬 编译

(北京地太探测器制造有限公司, 北京, 100081)

摘要: 本文概述了当前的线阵探测器(LDA)技术及未来发展, 同时详细说明了 LDA 的重要性能特征, 并对不同应用下不同的阵列设计进行了讨论。目前芬兰探测技术公司已将该项技术成功应用于大型集装箱检测系统, 工业 CT, 医用 CT, L 型双能探测器等工业医学应用中。

关键词: LDA(线阵探测器); X 射线照相机; CT 成像; 光电二极管阵列; 晶体; 探测器; 无损检测 (NDT); X 射线源

ISSN 文章编号:1004-1410(2002)03-0011-04

中图分类号: TP334.4

文献标识码: A

LDA Technology Today and Possibilities in the Future

Jussi Koskinen, LIN Chuntao and GAO Dong
(Detection Technology Inc.Beijing,100081)

Abstract: The purpose of this paper is to outline the technology behind the today's LDAs (Linear Diode Arrays) and review the development possibilities for the future. The paper also specifies the most important performance characteristics of LDA's. In the end there is a brief discussion on the various array designs. Nowadays, Detection Technology Inc. has applied its technological excellence to the needs of industrial and medical customers, like large container inspection system, L shape dual energy detectors, industrial CT and medical CT etc.

Key words: LDA(Linear Diode Arrays), x-ray cameras, Computerized Tomography Imaging, photodiode arrays, scintillators, detectors, NDT, x-ray sources

1 前言

如今, 线阵探测器或 X 射线照相机在各种质量检测和无损检测的应用中是很普遍的, 对工业 CT 的应用拓展了新的领域。它们可以发现食品中的异物、包装中的缺漏、铸件的畸形、包装是否装满及行李中的物品, 是否有凶器或异物。线阵探测器已经应用了 10 年, 在这 10 年中技术方向朝着快速扫描、更好的动态范围和更小的象素尺寸发展。线阵探测器在无损检测中应用越来越广泛。图 1 为典型的线阵探测器。



Figure 1 A Typical LDA

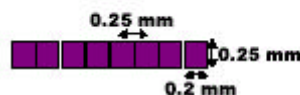


Figure 2 Photodiode pixel geometry

图 1 典型的线阵探测器

图 2 光电二极管象素形状

2 LDA 剖析

LDA(Linear Diode Arrays)包含大量的电子元件和线路, 是一个非常复杂的设计。现在典型的 LDA 可以分成如下几个主要部分: 晶体、光电二极管阵列、探测器前端、数据采集系统、控制单元、机械结构、电源、附件、帧采集卡和软件。下边分别介绍这些部分。

2.1 晶体: 大多数 LDA 都用某种晶体将吸收的射线转换成可见光。这是因为普通的光电二极管对能量超过 30~35keV 的 X 射线的吸收效率不够高。最常用的晶体有基于磷屏的钆 (这和医用 X 射线机中用的晶体相似)、CdWO₄ 和 CsI (Tl)。新的晶体材料包括基于陶瓷晶体的钆, 如用在

高级医用 CT 探测器中的 Gd_2O_2S (GOS) 和 $Y_2O_3Gd_2O_3$ (YGO), 还有玻璃晶体。

晶体有 4 个最重要的特性, 这些特性决定了晶体能否用于某种特定应用。第一是吸收效率或截止功率: 对某一能量的光子, 不同晶体需要的吸收厚度不同。吸收效率依赖于平均原子数和晶体材料的密度; 第二个特性是余辉: 余辉是经过特定时间 (一般是 1~3ms) 后仍留在晶体中的光的百分比; 光输出是第三个重要特性: 这包括两点: 发射光的波长, 吸收 X 射线光子后由晶体发射出的可见光光子数以及光输出的均匀性。只有那些峰值发射波长大于 500nm 的晶体才能和光电二极管一起用。晶体发射的光子数用每 MeV 的可见光光子数来定义, 值在 13, 000 和 54, 000 之间。同一批晶体, 其光输出也有可能相差到 30%。设计 LDA 时必须考虑到这一点。第四是价格: 要适度。表 1 说明了晶体的主要性能。

表 1 几种晶体的主要性能

晶体特性	CsI (Tl)	CdWO ₄	Gd Phosphor screen	Gd based ceramic scintillator	Scintillating glass
吸收效率	-	+	+	++	++
余辉	--	++	++	+~++	?
光输出	++	--	0	+	0
价格	+	0	++	--	?

2.2 光电二极管阵列: 光电二极管阵列用来测量晶体产生的可见光。晶体安装在光电二极管表面。光电二极管阵列几乎可以做成任何形状。在 LDA 应用中光电二极管的最重要特性有形状、对晶体发射波长的响应、暗电流和电容。光电二极管类型应根据晶体和 X 射线源来选择。

光电二极管阵列的像素一般并不是严格的正方形。在设计中一般使像素高度和像素间距相同。在各像素间总会有一些“死区”, 即实际的像素宽度是稍微小于像素间距, 见图 2 说明。

在某些情况下一个普通的光电二极管也用来检测射线。当 X 射线能量低于 30~35keV 时, 光电二极管能吸收足够的 X 射线产生一个高质量的图像。直接检测可以大大减少相邻像素间的串扰、信号更强 (在低能 X 射线下) 和避免余辉。图 3 说明了这两种检测方法。



Figure 3 Two possible detection methods: scintillation detection and direct detection

图 3 两种探测方式: 晶体检测和直接检测

图 4 探测器机械结构示例

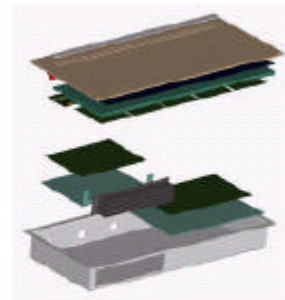


Figure 4 Example of detector mechanics

2.3 探测器前端: 前端部分包括前放和多路电器元件和线路。前放用来集成和放大光电二极管阵列极低的电流输出 (十几个微安)。在高分辨率的 LDA 中常把 CMOS 集成电路或 CCD 用作前放。当像素间距大于 1 mm 时 (常用于行李检测) 也可用分立的电子器件作前放。如果使用集成电路或 CCD 电路, 信号的多路化在集成电路中完成。在这种情况下前端输出的是连续的模拟数据。

2.4 数据采集系统: 经过前放和多路电子电路后是数据采集系统 (DAS)。DAS 一般包括另外一些

放大步骤将信号进一步放大到可以进行模数转换, 如可调增益放大器和缓冲放大器。DAS 的主要功能是完成信号的模数转换。DAS 可以和前放及多路电子电路在同一单元中。通常在一个前放—多路—DAS 单元中有一定数量的探测器通道。这些单元可以链接形成一个更长的阵列。探测器阵列的总的灵敏长度可以通过改变探测器中的单元数来改变。

2.5 控制单元: 控制单元包括控制信号、数字信号处理电路和图像采集接口电路。控制单元根据从计算机接收到的数据控制探测器。来自计算机的数据包括校准、采集和设置不同的积分时间, 还可能包括校准数据或其他设置数据。从计算机到探测器的数据一般都是通过 RS232 接口来传送。控制电路的主要功能之一是为 DAS 和采集卡提供定时信号。

数字信号处理电路处理不同信号的多路化、标准化、修正和逻辑功能。现代快速的数字信号处理使得在数字信号部分完成一些更复杂的任务成为可能。如信号的平均化。构成一幅图像的每条线上的信号经过均匀化后得到一个新的图象线, 这样能取得更好的信噪比。

帧采集接口电子学负责探测器和 PC 机之间的通信。为了使帧采集板能够读取数据, 要通过该接口对数据进行转换和缓存。通常选择 RS-422 作为标准接口。

2.6 机械结构: 机械结构包括金属封装 (也是电磁学的屏蔽)、X 射线准直器、X 射线入射窗口和为电子器件所做的 X 射线屏蔽。该封装可以是密封的或是装一个冷却压缩空气的风扇。电源和探测器有各自的封装, 甚至控制单元也可以独立封装。图 4 所示是探测器机械结构一个例子。

2.7 电源: 基本上有两种类型的电源供电方式, 开关型和线型。线型供电方式提供更稳定的输出可使阵列达到的可能的最佳的性能。但是, 大多数探测器阵列都有内部电压调节器电路, 这样可以使用开关型供电方式而不影响其性能。所以用户可以使用系统提供的电源而不必为探测器另外准备一个电源。

2.8 附件: 一般探测器制造商都会提供电源和数据线。但探测器电缆要根据使用的图像采集板的不同而有所改变。

大多数 LDA 都有速度编码信号输入和帧触发器信号输入, 可以接受光触发开始信号。LDA 厂商会提供这些附件。

2.9 图像采集卡: 图像采集卡安装在计算机中, 将探测器数据转换成图像。图像采集卡有多种, 厂商会提供随采集卡一起使用的成像软件。

2.10 软件: 基本上需要两种软件。控制软件通过数据总线发送命令来控制探测器。这些命令包括校准、采集图像和改变探测器的设置。

另一个是成像软件。该软件的功能是从采集卡得到图像、在计算机上显示图像, 在更多的情况下需要分析图像。这部分软件一般由用户完成, 尽管一些探测器厂商会提供一个用于测试和演示目的的简单的成像软件。

3 性能特点

3.1 空间分辨率: 空间分辨率主要由象素形状来决定。象素尺寸越小, 分辨率越高。被检测材料自然也会影响空间分辨率。目前在 LDA 中用的最小的象素尺寸是 0.25mm。问题不是说象素尺寸不能做得更小, 而是当象素尺寸减小的时候接收到的 X 射线的量变得更小。如果象素的宽度和高度都减少一半, 产生相同的信号则需要多于 4 倍的 X 射线能量。

3.2 动态范围: 动态范围指探测器能分辨的 X 射线不同水平 (灰度), 一般用位来衡量。在多数情况下动态范围和探测器的 A/D 转换器分辨率 (输出位数) 相同。然而, 实际的动态范围一般是小于 A/D 转换器分辨率的, 因为动态范围 (RMS) 一般被定义为最大信号和 RMS 噪声之比。而且校准也会使动态范围减小。大多数商用 LDA 提供的 ADC 在 8 到 14 位之间。然而, 如前所

述,实际的动态范围往往是小于 ADC 分辨率的。

降低灵敏度可以提高 LDA 的动态范围。比较而言,最先进的医用 CT 扫描仪提供 20 位的动态范围,积分时间稍稍大于 100ms。一般在医用 CT 机中 X 射线源的电流是相当高的,像素尺寸也比 LDA 中的大。

3.3 标准化: 标准化、或校准对二极管阵列的性能有相当大的影响。在模拟或数字部分进行校准,或在两部分都进行校准。最基本的校准包括偏置和增益。各个像素分别进行校准。探测器漏电流和放大器偏置水平的不同会引起通道间的偏置差异。增益差异由闪烁材料的不均匀性,闪烁体-光电二极管的耦合或光电二极管本身引起。在有些阵列里利用一个公用的模拟增益放大器来调整所有的增益水平。

温度变化时也必须再校准探测器。晶体的光输出,光电二极管的漏电流及电子学的性能随温度而变化。当 X 射线产生器 kV 或 mA 的设置被改变时, LDA 也必须重新校准。

3.4 扫描速度: 扫描速度取决于探测器一帧的积分时间。最新的探测器使用并行输出的探测器卡,这样可以建立更长的阵列而其扫描速度不会降低。然而,最小的积分时间不仅依赖于电路,还与 X 射线源产生的 X 射线流量有关。没有足够强的 X 射线流量, X 射线光子的统计错误将很高,信号也将变得很乱。

一帧范围内的积分时间从几百微秒到几十毫秒。最大扫描速度为 2m/s,一般依赖于在扫描方向所要求的分辨率。通过电路优化,使一帧范围内的积分时间达到 100 微秒内成为可能。然而,必须有足够的 X 射线流量以得到足够的信号。

3.5 效率: 探测器的效率依赖于晶体的类型和厚度、晶体-光电二极管的耦合以及电路的优化。为取得最好的结果, LDA 应该在某个能量范围内被优化。

4 不同射线源探测器设计不同

大多数 LDA 的应用中使用电压低于 160kV 的 X 射线发生器产生连续的扇形射线束。然而高能应用不断增加。高压 X 射线产生器产生的电压高达 450kV。线性加速器能提供几 MeV 的能量。某些应用中也会用到放射性同位素源。

对于不同的射线源阵列的设计主要有几点差异。闪烁晶体必须在要求的能量被优化;通过选择合适的晶体类型和厚度可以使 X 射线的吸收效率达到预期水平。X 射线的屏蔽和准直也必须适合选定的能量。X 射线能增加电路噪声,甚至损坏电路,这也是要求正确屏蔽的原因。

X 射线源有几种不同的操作方式。X 射线发生器在一个较宽频谱范围内产生连续流量,而线性加速器是脉冲式的,在一秒内产生几十或几百个宽度为几微秒的脉冲。同位素源则依赖于自然的放射性衰变并产生单频 X 射线。由于不同源产生的 X 射线的性质不同,对于其模拟电路的设计也不同的。区别不同材料物品(最典型的有有机物和金属)的应用中使用了双能探测器。与用两个单独的 X 射线源和两个单独的探测器不同,双能的信息是从一个探测器取得,该探测器由两个二极管阵列组成,其中一个阵列在经很大程度地过滤后吸收较低能量的光子。这两个阵列可以被上下组合在一起,这样靠近 X 射线的那个阵列作为滤波器。

4.1 阵列形状: 由于系统前端部分做成模块单元,探测器阵列就比较容易按用户要求定制。二极管阵列可以安排成不同的形状,除了直线型的,还能做成 L 型、U 型或弧形。一般行李检测用 L 型,而工业 CT 使用直线型或弧形。

5 结论

在过去的几年里, LDA 已经朝着快速扫描发展,并已达到一定水平。而且低价位可编程 FPGA, DSP 和逻辑电路使建立高性能易定制的探测器成为可能。为某种特殊应用对探测器阵列进行优化变得更容易。由于更强的适应性和多样化的应用要求,在将来对探测器阵列的选择性也会更多。

作者简介: Jussi Koskinen, 芬兰籍, 现任北京地太探测器制造有限公司的销售总监。芬兰公司的网址: WWW.deetee.com; 电子信箱: jussi.koskinen@deetee.com