

大型集装箱辐射检测系统

王 经 瑾

(清华大学工程物理研究所 北京 100084)

物理学发现任何一种新的辐射,也就发现了一种新的能量传播方式.信息工程都会设法把它用作新的载体来传输信息,或设法利用这种新辐射来探查物质(物体)内部的新信息.

由于物质的原子间距为零点几纳米(10^{-9}m ,粗略地说,波长大于1纳米的辐射适于以波的发送、接收方式来传递信息.波长小于1纳米的辐射适于以粒子和物质相互作用的形式来探查物体内部信息.这些应用都有赖于物理学和信息工程的结合.1888年赫芝发现了麦克斯韦预言的电磁辐射,通信工程师们在11年后就实现了跨越英吉利海峡的无线电报传输.1895年伦琴宣布发现X射线时,同时就公布了用X射线拍摄的手骨图象.一个世纪以

的,所以造成了观察值小于理论值的结果.

人们在地球上研究 τ 子型中微子的质量问题只有通过 τ 轻子的衰变过程进行.目前,也只有从正负电子对撞机上产生 τ 轻子对才能用之于研究 τ 轻子的衰变.人们再一次提出要提高对撞机的亮度,使得能产生足够多的 τ 轻子,才能更精确地测得中微子质量.目前,已经测得各种中微子的质量上限值分别是:

$m_{\nu_e} < 4.5\text{eV}$, $m_{\nu_\mu} < 160\text{KeV}$, $m_{\nu_\tau} < 24\text{MeV}$. 可以看到, ν_τ 的质量上限值还是比较大的.人们普遍相信, ν_τ 的质量值不应当在 MeV 这么大的量级上.

四、在轻子范围内,是否也存在 CP 破坏效应呢?这也是粒子物理学家思考的问题.在强子范围内,CP 破坏效应已经被发现了,没有理由认为在轻子范围内一定不存在 CP 破坏效应.不少人提出,如果在轻子范围内存在 CP 破坏效应的話,应当从哪些过程的哪些观察量中去寻找,这

来,所有医院的放射科应用的都是同样的X射线,而信息工程的发展使放射图象的处理不断现代化了.70年代发明的X射线层析技术(CT),更是物理学的不朽发现和当时方兴未艾的计算机图象处理技术的光辉结合.X射线也已广泛用于材料分析、天体探测、工业探伤和机场小件物品核查.80年代末,由于集装箱运输的发展,海关极需不开箱就能核查箱中货物的技术.90年代初出现了利用X射线的大型集装箱检测系统.对于宽2.5米、高4米、长近20米的大型集装箱货车,两、三分钟内就可透视完毕,实时显示出箱中几十吨货物和运载车辆的图象.这是物理学和信息工程结合的又一创举.在此之前,人工开箱检查一个大型集装箱,搬出搬进几十吨货物,需半天时间.而一个大点的海关口岸,集装箱流通量每天以万计!

一、大型集装箱检测系统的工作原理

大型集装箱检测系统的工作原理如图1所示,利用电子直线加速器作为辐射源,产生能量高达9MeV的X射线,在距靶1米处可获得每

些过程无一不是 τ 轻子的各种衰变过程.这无疑是一个十分吸引人的课题,它又一次涉及到基本性质,目前还主要是从理论上加以讨论.

仅就以上几项就可以看到, τ 轻子物理中正在探索的这些课题都是带有基本性质的课题.上述各个实验都属于精确实验范围之内.要提高实验结果的准确性和精度,必须大大增加测量事例数.目前,只有从 e^+e^- 对撞机上产生的 τ 轻子对才能用于 τ 轻子物理研究.因此,提高对撞机的亮度成为十分关键的一步.质心能量在 τ 轻子对的产生阈以上的 e^+e^- 对撞机都可以产生 τ 轻子对,它们的研究结果可以相互检验,但是在 τ 轻子对的产生阈附近进行 τ 轻子研究有其独到之处的优点.在这个能量条件下(质心能量: $2m_\tau$ —5GeV), τ 轻子对产生截面最大,本底很小,粒子分辨好.十分有利于 τ 轻子物理实验.正在讨论中的 τ -charm工厂就是为了利用这些优势而提出来的.利用 τ -charm工厂从事 τ 轻子物理研究成为国内外粒子物理学界推崇的项目.

分钟 30 戈瑞左右的剂量。X 射线通过狭缝准直器形成垂直的扇形射束,透射集装箱的一个横断面。X 射线因部分被此横断面的货物吸收而发生强度变化。透过集装箱的 X 射线具有箱内货物沿各射线方向的累计密度信息,由垂直排列的线阵列探测器接收。它的 1000 多个探测单元分别接收扇形射线束各方向的 X 射线,并变换成 1000 多路电荷信号。各路信号经过前端电路处理后由模数变换电路变换成数码,组成一列包含 1000 多个像素的图象数据。然后由高速总线传输到前端计算机进行各种校正,再输入到图象工作站,在显示器上显示出一个具有 1000 多个像素的纵向列。当集装箱货车被牵引过射线束时,射线束依次扫描集装箱的各个横断面,在显示器上就实时地显示出集装箱所装货物的透视图象。海关检测人员可以据此决定是否放行;有疑问时可在图象上附加标记,打印出来进行开箱检查。

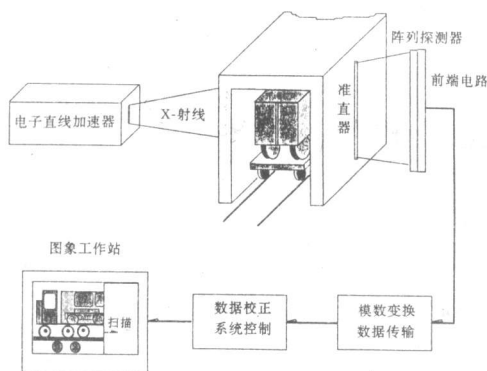


图1 大型集装箱辐射检测系统示意图

二、大型集装箱扫描成象的几何条件

如图2所示,辐射源距离集装箱越近,用于透视集装箱的辐射强度就越高,但太近时要求辐射源提供张角很大的射线。电子直线加速器产生的高能 X 射线张角不大,在张角 $\theta = \pm 15^\circ$ 处,辐射强度只有 $\theta = 0$ 处的 50%。所以加速器需距离集装箱足够远,其射束才能覆盖 4 米高的物体。从成象比例上讲,也是源距大些好。源距小时射线的垂直张角大,使得物体在图象纵坐标上的比例因距源远近而不同。而在图象的横坐标方向,集装箱直线行进时相当平行

束扫描,其横坐标比例与物体距离辐射源的远近无关。如图2所示,左右车轮的扫描图象有显著不同,横轴比例相同而纵轴不同。但是加速器也不能距集装箱太远,因为辐射强度与源距的平方成反比,源距太大对辐射源的强度要求太高。综合成象比例和源强两方面的要求,加速器靶点和集装箱近源面的距离通常为 8 米左右 ($> 2 \text{ 米} \times \text{ctg} 15^\circ$)。这样,探测器阵列的高度就需 6 米左右。如果图象的纵向分辨率要求 1024 像素,则探测器阵列需有 1024 个探测单元;每个单元的间距为 6mm。每个单元接收的是以辐射源为顶点、以探测单元有效面积为底的一小锥束射线;在集装箱中轴线处的投影面积由图2的参数计算约为 $4.6\text{mm} \times 4.6\text{mm}$,这是实物(集装箱)上的平均像素面积。

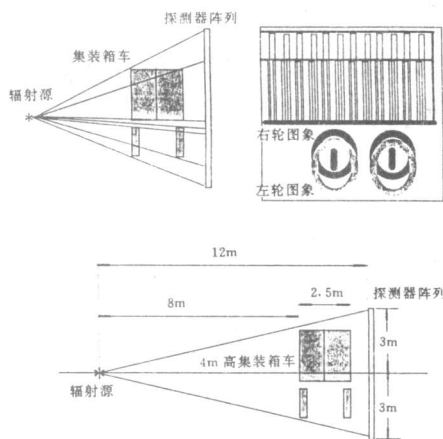


图2 大型集装箱检测系统的几何条件

三、大型集装箱检测技术中的物理问题

采用什么射线来透视集装箱?

适于透视集装箱的射线应满足下述条件:

- 1) 能穿透装满货物、厚达 2.5 米的集装箱;
- 2) 检测所得图象有足够好的对比度,例如能分辨出 0.5% 的密度变化;
- 3) 所用的射线容易获得和控制;
- 4) 所用的射线不使货物变质或产生残留放射性;
- 5) 所用的射线不难探测。

在目前的技术水平上,质子束、中子束、电子束(β 射线)、光子束(X 射线或 γ 射线)

都不难获得.但质子穿过物质时开始几乎直线行进而不衰减,待到能量降低到一定程度时又很快衰减,不易携带出货物厚密分布的信息;而且几十兆电子伏的质子在铁中的射程也只有几毫米.电子在物体中路径曲折(失去位置信息),而且十兆电子伏的电子在中等密度材料中的射程也只有1厘米.中子的自由程比较长,可用于中子照相,对探测塑料爆炸物和毒品有特殊的灵敏度;但中子会使物质活化而产生残留放射性,中子源和中子的探测与防护也较复杂.在一般货物查核中目前首选的还是X射线.

采用什么能量的X射线?

由于货物的厚密程度不定,我们以其平均质量厚度估算:一个大型集装箱(40英尺货柜)装满货物毛重30吨,侧面的长度和高度乘积约为 $1200 \times 250 = 300000 \text{cm}^2$,平均质量厚度为 100g/cm^2 ;等效于平均厚度为12.7cm的铁质材料.所以适度的要求是:所使用的射线应在透视厚达10cm左右的铁质材料时有足够好的对比度,对厚达30cm的铁质材料也能穿透并被检测到.

X射线是光子流,透射物体时发生下述三种效应(图3)的光子都会消失,使射线强度发生衰减:

1. 光电效应:入射光子把能量转移给接近原子核的内层电子而自行消失,获得能量而发射出去的内层电子穿不过集装箱这样的厚重物体.外层电子向内层空位跃迁时虽可产生次级光子,但能量较低,只为两壳层电子结合能之差;而且次级光子四向发射,大部分偏离入射光子方向.所以入射集装箱的光子如产生光电效应,实际上就探测不到了.产生光电效应要有原子核参与,原子序数大的(原子核中质子多,外层电子也多),发生光电效应的概率大,所以光子穿过密度大的物质时衰减得多.产生光电效应的概率还随入射光子能量的增高而降低,能量大于几兆电子伏的入射光子,发生光电效应而被物体吸收的概率不大.

2. 康普顿效应:入射光子与原子的外层电子发生碰撞而散射(改变了方向和能量);同时

把被碰撞的电子反冲出去.散射的光子偏离入射光子方向,不能被对应入射光子的方向的探测器测到;但可能进入探测器阵列中的其他探测器,造成散射干扰,使图象模糊.入射光子在能量大于1MeV时,发生康普顿散射的概率大致和物质的原子序数成正比,和入射光子的能量成反比.

以上两种效应都使X射线在穿过密度大的物体时衰减多.入射光子能量则要足够高,才能降低产生光电效应和康普顿效应的概率而穿过比较厚密的物体.

3. 电子对效应:入射光子能量大于1.02MeV并从原子核旁经过时,在核的库仑场作用下转化为一个正电子和一个负电子(称为电子对).入射光子消失.产生电子对效应的概率既随物质原子序数的增大而增大,也随入射光子能量的增高而增大.这后一因素和前述两种效应不同,使得能量高的入射光子在物体中的衰减反而增大.所以,并不是X射线能量越高穿透能力就一定越大.

在入射射线能量和物体材料一定时,射线的衰减和物体厚度成指数关系:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

式中 I_0 为入射射线强度, I 为穿过厚度为 x 的物体后的射线强度, μ 为线性衰减系数,是上述三种效应的总效果(图3左),单位为 cm^{-1} .

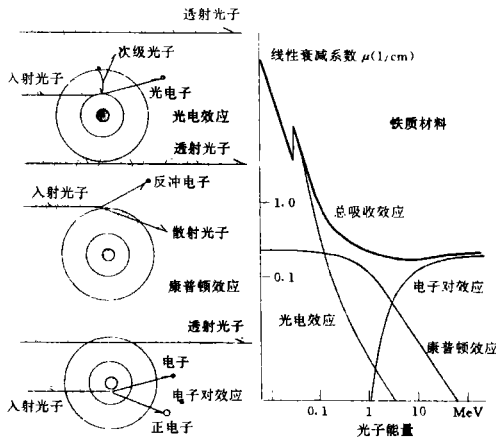


图3 光子束和物质相互作用时的衰减效应
不同能量的光子在不同材料中的线性衰减

表1 窄束光子的线性衰减系数 μ (1/cm)

光子能量	材 料			
MeV	铅	铁	铝	水泥
1	0.79	0.47	0.166	0.141
2	0.51	0.33	0.117	0.100
3	0.46	0.28	0.094	0.080
4	0.47	0.26	0.084	0.071
6	0.51	0.24	0.072	0.061
9	0.58	0.25	0.063	0.054

系数如表1所示.表1中的数据是在射线被理想准直(窄束)而不考虑散射的条件下测定的.

μ 值太大射线穿不透厚密的被测物体; μ 值太小射线几乎不被物体衰减,携带不出物体结构和密度信息.由(1)式不难推导, $\mu x=1$ 时(射线穿过物体衰减到 $1/e$ 时),有最好的对比度灵敏度(对 μx 的相对微小变化最灵敏).对于10cm厚的铁质材料,希望 μ 为 $0.1/\text{cm}$ 左右.但是由图3和表1可知,对于铁,射线能量在3到9MeV间 μ 值最小,也有 $0.25/\text{cm}$ 左右.射线能量再高, μ 值反而增大.所以,透视集装箱的光子能量取3到9MeV是合适的.

另外,国际上规定食品的辐照能量不高于10MeV.所以集装箱检测系统所用的X射线最高能量多选取9MeV.由电子直线加速器产生的X射线能谱是连续谱,电子能量加速到9MeV时,打靶后所产生的X射线,平均能量在3MeV左右,最大能量为9MeV.

采用同位素辐射源产生的 γ 射线,也能检测集装箱,但目前的小体积同位素源的辐射强度远不如加速器产生的强.同位素源不用时或发生事故时,也不能像加速器那样关掉电源就消除放射性.所以集装箱检测系统还是采用昂贵的加速器作为辐射源.

射线的强度要多强?

在辐射成象过程中,每个探测器单元所能探测到的光子数 n 要足够大.我们知道,光子计数具有统计性.各像素平均探测到 n 个光子时,单个像素探测到的光子数实际上存在统计涨落;其相对均方根偏差为 $\pm 1/\sqrt{n}$.

在图象上这就是灰度的统计噪声.为增大 n ,需采用大功率加速器,高效率探测器,否则就只有增加每个像素接收射线的时间而放慢检测速度.

大型集装箱检测系统要求透视10公分铁板后能看到0.5毫米厚的铁片.按(1)式铁片区(通常取100个像素)每个像素的平均光子数将比铁片区外的小1.25%,这100个像素的总计数涨落 $1/\sqrt{(nS)}$ 应小于1.24%的 $1/5$ 才能看出铁片的存在.即 n 应大于1630.在图2所给的几何条件下,每个像素接受8ms时间的照射时,可以算出,在离加速器靶点1米处的剂量率约需每分钟20戈瑞.

集装箱上的平均像素面积为 $4.6\text{mm} \times 4.6\text{mm}$,每个像素照射8ms,车速可达到 $4.6\text{mm} / 8\text{ms} = 0.58\text{m/s}$.20米长的车辆35秒钟即可扫描完毕.实际上,由于集装箱车进出检测通道和开关防护门需要时间,检测速度实际为每两三分种一辆.

采用什么样的探测器?

从探测光子的效率、输出信号幅度、耐辐照和价格等因素考虑,目前的产品主要采用固体闪烁探测器和气体电离室.其原理图如图4所示.

电离室是早在30年代就发明的辐射探测器.室壁和输出电极间加有高电压,内充气体.利用入射光子和室壁、气体作用产生电子,电子由电极收集输出.输出的电荷量与入射光子的数量和电离室的光子探测效率成正比.电离室结构简单,耐辐照;但探测效率低.为了获得足够的光子探测效率,电离室要充入几十大气压的气体.闪烁探测器是利用X射线和闪烁晶体作用产生荧光来探测的.所产生的荧光由硅光电二极管转换成电荷输出.输出电荷的数量与入射光子数量和闪烁晶体的光子探测效率成正比.闪烁晶体密度大,光子探测效率高,可提高检测速度或降低对加速器剂量的要求.但硅光电二极管不耐辐照.两种探测器各有优缺点,如表2所示:

表 2 探测器性能比较

性能	固体闪烁探测器	气体电离室
光子探测效率 η	50%	25%
体积、重量	小	大
供电电源	低压	高压
耐辐照能力	光电二极管需妥善屏蔽, 避免辐照损伤.	好
价格	较高	较低

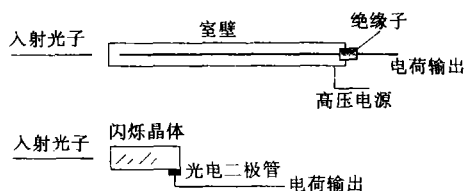


图 4 集装箱检测系统阵列探测器的探测单元

上: 气体电离室, 下: 闪烁探测器

四、大型集装箱检测系统的辐射信号处理

加速器通常每秒钟发射 200 到 300 个光子脉冲, 光子脉冲的持续时间为几微秒。阵列探测器的各个探测单元每接收到一个光子脉冲, 就输出一定的电荷信号。如图 5 所示, 这些电荷输入到各个探测单元后面的低噪声电荷灵敏前置放大器(一种低噪声有源积分器), 其等效噪声应不大于 1mV。前置放大器的输出信号(幅度等于输入电荷量除以积分电容)由各个主放大器放大, 同时进行滤波以获得最佳信噪比。接着由和加速器光子脉冲同步产生的采样脉冲进行采样保持。上述过程大约在 10 微秒内完成, 也就是说, 在加速器每发射一个光子脉冲之后十几微秒, 1024 路采样保持电路的保持电容上已储存了穿过集装箱的光子模拟信号。接着 64 个多路模拟开关同时启动, 每个模拟开关顺序将 16 个采样保持电路输出的模拟信号送入模数变换器。每个模数变换器以每 40 微秒变换一个信号的速度将 16 个模拟信号变换成数码; 0.64 毫秒变换完毕。所以, 在加速器每发射一个光子脉冲之后的 0.8 毫秒内, 1024 路探测单元的光子信号已变换成了 1024 个数码, 并暂存于缓冲存储器内。随后将这 1024 个数码转换成串行码

传输到前端计算机, 进行各种数据校正后, 作为灰度数据传输到图象工作站, 纵向排列成 1024 个象素的图象列。这一数据传输和处理过程大约在 2 毫秒中完成。随着集装箱车的移动和加

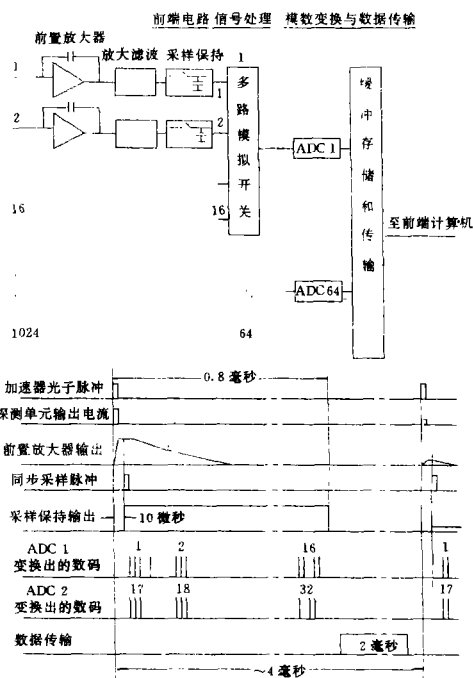


图 5 大型集装箱检测系统的辐射信号处理和变换

速器脉冲的一个个发射, 箱中货物就被一列列扫描, 货物图象就被实时显示出来。

必要时也可将多个加速器脉冲获得的数据叠加在一起形成一列象素, 借以提高信噪比; 代价是降低扫描速度。

利用 X 射线对大型集装箱进行辐射扫描, 我们在“八五”科技攻关中已完成了研究开发, 使我国成为世界上第四个可以生产这种产品的国家。但是这种设备造价很高, 需数千万元一套。有待研究新技术、新设计来降低造价。另外, 目前的扫描成象获得的是透视图, 对复杂、重叠货物识别比较困难。如做成三维 CT 成象, 造价更高, 检测速度更慢, 尚难实用。X 射线成象只对物体密度灵敏, 不能核查其他物理、化学性质。对毒品和塑料爆炸物, 只能从包装和夹层形态上来核查。所以, 从利用什么辐射到如何进行图象处理, 都有许多问题有待继续研究。