

# X 射线累积剂量实时检测系统的研制

姜先申, 韩 焱

(中北大学 电子信息工程系, 太原 030051)

**摘 要:**介绍一种用于测量 X 射线累积剂量的实时检测系统,该系统采用有限积分法检测 X 射线剂量,并将测量数据快速传输给计算机进行处理。结果表明,该系统可快速准确地测量 X 射线相对剂量,输出信号动态范围较宽,测量相对误差较小,经标定后可测量射线的绝对剂量。

**关键词:**射线剂量;实时检测;探测器;有限积分法

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)02-0068-02

## Development of Real-time X Ray Accumulated Dose Detection System

JIANG Xian-shen, HAN Yan

(Department of Electronic Engineering and Information Science, North China Institute of Technology, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A real-time accumulated X ray dose detection system based on time-limited integral method was described. The X ray dose could be detected quickly and accurately by the system and the data were delivered to a computer. It was showed that relative radiation dose could be measured with small relative error and wider dynamic range and absolute dose could be got after calibration.

**Keywords:** Radiation dose; Real-time detection; Detector; Time-limited integral

精确测量试件前后剂量是工业 X 射线精确测量试件密度和厚度的最关键的环节之一。笔者设计了一种具有计算机通信接口的射线剂量快速实时精密检测系统,该系统采用 DT 公司的 CsI(Tl)闪烁体光电二极管探测阵列,通过限时积分法测量 X 射线剂量,并可将测量数据快速传输给计算机进行数据处理。

## 1 工作原理及结构

### 1.1 探测器

在 X 射线探伤技术研究中,探测器及其技术是最关键的技术之一,它是将包含被测物信息的射线信号转化成易于处理的电信号的一种测量技术。目前探测 X 射线常用的探测器主要有气体探测器、半导体探测器及闪烁体计数器三种。气体探测器的探测效率太低,影响检测效率,半导体探测器需要在低温条件下工作,且单个探测器成本极高。因此,检测系统的探测器采用 DT 公司 ARA25-16 系列 CsI

(Tl)闪烁体光电二极管探测器阵列,由单个闪烁体晶片 CsI(Tl)和光电二极管组成,每个像素间均有隔离器,可有效阻止像素间串绕。该探测器探测效率可达 99%,空间分辨率也很高。

### 1.2 射线剂量检测系统

射线剂量检测系统由闪烁体光电二极管探测器阵列、积分电路、多路选择电路、偏置放大电路、A/D 转换电路、单片机控制系统、接口电路、PC 机控制与数据处理系统等组成。电路原理结构框图见图 1。

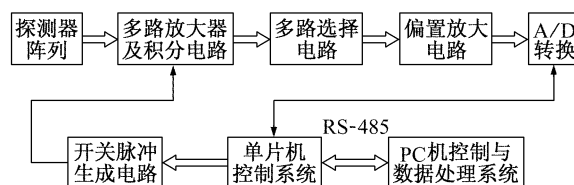


图 1 X 射线累积剂量检测系统工作原理框图

系统将从探测器获得的难以直接测量的微弱电流进行放大处理,转换成容易测量的电压信号,从而获得射线剂量,然后将测量结果通过 RS-485 接口电路传输给 PC 机进行处理。

系统的精度主要取决于积分电路的精度, 积分电路是整个系统的核心部分。笔者采用限时积分测量法, 利用探测器输出一个幅度与射线强度成正比的脉冲电流(图 2), 采用 IVC102 高精度积分器, 在单片机控制下实现射线累积剂量的实时精确测量。

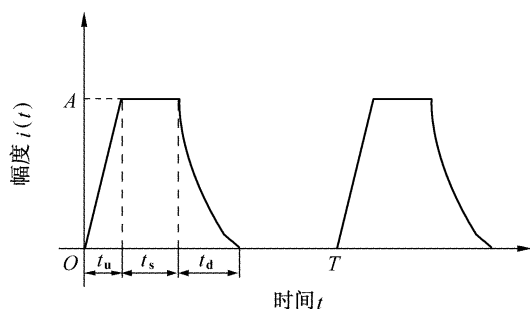


图 2 探测器输出的脉冲电流信号

普通 X 射线机产生的射线照射在闪烁体探测器上, 输出的电流有以下特性:

(1) 探测器输出脉冲的上升沿近似为直线, 且上升时间  $t_u$  为一个常数。 $t_u$  为 X 光子与闪烁体的作用时间, 约为  $10^{-8}$  s, 因而上升沿的指数关系可由泰勒级数近似展开呈线性关系<sup>[1]</sup>(图 2)。对于普通 X 射线机而言, 管电压是直接对交流电整流产生的, 它输出射线的脉宽为几毫秒<sup>[2]</sup>, 因而探测器输出脉冲的持续时间  $t_s$  为几毫秒。相对于脉冲的持续时间, 脉冲的上升时间可忽略不计。

(2) 探测器输出的脉冲幅度与射线强度成正比。

(3) 探测器输出脉冲的衰减时间  $t_d$  为闪烁体的闪烁衰减时间, 并呈指数衰减。对于确定的闪烁体, 闪烁衰减时间是常数。碘化铯(CsI)的闪烁衰减时间为  $1 \mu$ s, 相对于脉冲持续时间可忽略不计。

若初始电压  $U_0 = 0$ , 图 2 所示在一个周期  $T$  内的脉冲信号可表示为

$$i(t) = \begin{cases} \frac{It}{t_u} & 0 \leq t \leq t_u \\ I & t_u \leq t \leq t_u + t_s \\ Ie^{-H(t-t_u-t_s)} & t_u + t_s \leq t \leq t_u + t_s + t_d \\ 0 & t_u + t_s + t_d < t < T \end{cases} \quad (1)$$

式中  $H$  为常数。在  $t=0$  时刻将脉冲信号输入积分器, 经过  $n$  个脉冲周期后, 积分器输出电压可表示为

$$U(nT) = \frac{nI \left( \frac{t_u}{2} + It_s + \frac{1 - e^{-Ht_d}}{H} \right)}{C} = nKI \quad (2)$$

$$K = \frac{\frac{t_u}{2} + It_s + \frac{1 - e^{-Ht_d}}{H}}{C}$$

式中  $C$ ——常数

$K$ ——与脉冲无关的常数

在积分时间为脉冲电流的整数倍的情况下, 积分器的输出信号与所有脉冲幅度之和成正比。也就是说, 积分器输出电压与在时间  $nT$  内的射线剂量成正比。

根据上述理论笔者设计了射线剂量限时积分法测量电路(图 3)。

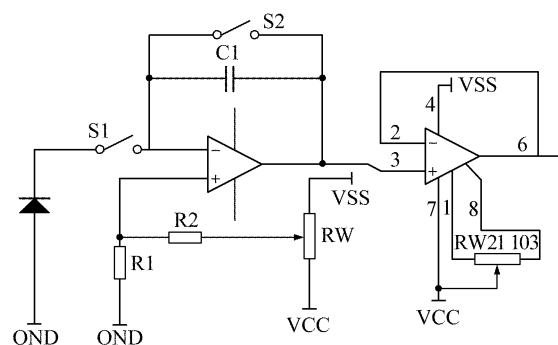


图 3 限时积分测量电路

单片机可输出时钟信号来控制积分器循环工作。首先, 单片机输出复位脉冲, 使  $S1$  断开,  $S2$  闭合, 积分电容  $C1$  放电; 然后, 单片机输出积分脉冲,  $S1$  闭合,  $S2$  断开, 积分器处于积分状态; 一次积分完成后, 单片机输出保持脉冲,  $S1$  和  $S2$  都断开, 积分器的输出电压一直保持到 A/D 转换结束。由于普通 X 射线机的脉冲周期最大为  $20 \text{ ms}$ , 积分脉冲宽度最小可为  $20 \text{ ms}$ 。通常实时测量要求  $25 \text{ 帧/s}$ , 积分时间一般选为  $40 \text{ ms}$ , 大于最小积分脉宽, 可实现射线剂量的实时精密测量。

## 2 累积剂量检测系统传输特性与误差分析

该剂量检测系统最主要的性能指标是传输特性。系统的传输特性是指探测器输出电流信号在积分器上积分结果的量化值与输出电流的关系。在理想情况下, 量化值正比于输入电流信号的幅值, 其系数称为变换增益或灵敏度, 但实际系统中往往有零点存在, 即使输入信号为零, 输出信号也不为零。

习惯上常使用积分非线性来刻画非线性的大小, 将积分非线性定义为<sup>[3]</sup>

$$INL = \frac{\max |y_i - \hat{k}x_i - b_i|}{\max\{y_i\} - \min\{y_i\}} \times 100\%$$

式中  $y_i$ ——探测器输出电流的幅值

$x_i$ ——积分结果的量化值

$b_i$ ——零点

(下转第 80 页)

存在,随循环次数增加,磁场强度略有上升变化。

## 2.4 比较分析

(1) 图 3~5 在 0 次循环从左到右的磁场变化是由于新绳的残余应力分布在地磁场中散射磁场的表现,反映了实际的应力情况。磁记忆信号的过零点要根据实际的工作受力情况分析,过零点和磁场异常一般在残余应力和工作应力集中点或区域,靠近应力集中位置的磁场强度变化反映了应力水平,随着循环次数的增加,磁场强度发生变化,呈上升趋势,达到疲劳时磁场强度会有较大突变现象。

(2) 图 3a、图 4b 和图 5f 区的电压值受张力作用后都发生了大小和方向的变化,说明应力集中在应力场的作用下磁弹性性能增加,磁记忆的漏磁场改变了原来的磁场强度,先减小后逐渐增大,而弯曲产生的应力集中的漏磁场是逐渐增大的。

(3) C 段磁场强度变化比 B 段更明显,疲劳速度更快,这是因为 C 段经过小滑轮,弯曲半径小,承受的弯曲应力大,而且小滑轮轴承的结构使小滑轮处的钢丝绳既有静摩擦又有动摩擦存在,故磨损很

严重,磨损加弯曲疲劳产生疲劳断裂,因此滑轮直径对疲劳寿命的影响比弯曲次数更大。

(4) 从三段的分析可见,钢丝绳疲劳的磁记忆检测和初始被测构件的残余应力、工作载荷大小、工作时间及损伤状态有关系。残余应力大或工作载荷大,则磁场强度大;工作时间长,应力集中处的磁场强度大;有断丝缺陷时的磁场强度要比应力集中时的更大些。

(5) 受张力时磁导率沿钢丝绳轴向分布较均匀,张力和弯曲力共同作用时磁导率沿钢丝绳轴向分布不均匀,弯曲疲劳和断丝等导致磁场局部畸变。

## 3 结论

试验结果分析表明,① 受载钢丝绳在地磁场中存在磁记忆现象,磁场的过零点和异常处记忆着应力集中区域,说明金属磁记忆技术运用在钢丝绳检测上是可行的。它可作为钢丝绳疲劳试验的先导检测方法,确定应力集中部位,为疲劳试验中准确确定

(下转第 83 页)

(上接第 69 页)

即使数据是完全线性的,只有随机误差,积分非线性也不为零。因为积分非线性包含了非线性和随机误差两方面的影响,是衡量系统误差性能的综合指标。笔者使用 EE1641B 型函数信号发生器输出矩形脉冲信号,脉冲周期为 20 ms,脉宽 5 ms,获取不同脉冲幅度下积分器输出信号的量化值,测量了 10 组数据,对数据进行多次线性拟合,可计算出测量的最大标准差  $\sigma_{\max} = 7.839\ 0\%$ ,脉冲幅度与积分输出电压量化值的对应关系见图 4,其标准差曲线见图 5。

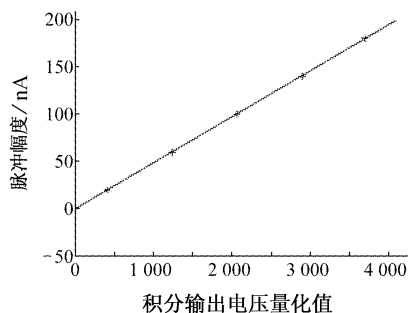


图 4 脉冲幅度与测量值的对应关系

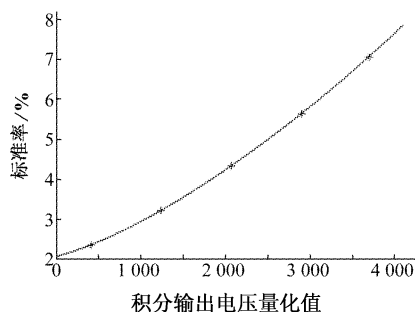


图 5 测量结果的标准差曲线

线源作用下效果良好,测量相对误差可控制在 0.6% 之内,动态范围较宽,智能接口可将测量数据快速传输给计算机进行处理,经过标定可以测量 X 射线的绝对剂量。

## 参考文献:

- [1] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- [2] 詹福如, 袁宏永, 苏国锋. 光电探测器微变信号放大电路的设计与分析[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 54—55.
- [3] 刘天宽. IOF 实验中软 X 射线能量的限时积分测量方法研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 1998.

## 3 结论

该系统经过调试校正,在 50~320 kV 的 X 射