

文章编号 1004-924X(2011)10-2393-09

强力输送带 X 光无损检测仪的研制

荣 锋*, 苗长云, 徐 伟

(天津工业大学 信息与通信工程学院, 天津 300160)

摘要:采用 X 光线阵探测器研制了一种强力输送带无损检测仪。介绍了 X 光无损检测原理,使用准直器解决了 X 光无损检测的散射问题,设计了多路并行数据采集电路实现了数据的高速采集。对线阵探测器像元非均匀性的原因进行了探讨,对校正算法进行了研究,基于响应模型运算量小,校正效果良好提出的三点分段校正法。实验证明,研制的检测仪对宽度为 2 m,运行速度为 3 m/s 的强力输送带在线监测得到的图像空间分辨率为 1.0 mm×1.5 mm,图像非均匀度低于 2.57%,图像灰度对比度良好,0.5 mm 厚度钢板灰度差约为 13。解决了传统的 X 光强力输送带无损检测仪无法实时在线监测的问题,与电磁感应原理设计的检测仪相比,监测结果具有直观、清晰等优点。

关键词:X 光无损检测;非均匀性校正;强力输送带;线阵探测器

中图分类号:TG115.28 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2393

Development of non-destructive tester for steel cord conveyor belts

RONG Feng*, MIAO Chang-yun, XU Wei

(Department of Information and Communication,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

* Corresponding author, E-mail: Shushing 677 @163.com

Abstract: A Non-destructive Test (NDT) for steel cord conveyor belts was developed by using an X ray detector array. The principle of X-ray NDT was introduced and a collimator was used to eliminate the X-ray scattering. An acquisition circuit for multi-channel parallel data was designed to achieve real-time data acquisition. The reason for pixel non-uniformity of the linear array detector was discussed and an algorithm to correct the pixel non-uniformity was established. Then a three-segmented correction algorithm with less computation and better correction effect was proposed based on the response model. Experiments show that the spatial resolution of the image is 1.0 mm×1.5 mm and the non-uniformity of the image is below 2.57% for a steel cord conveyor belt with a width of 2 m and a speed of 3 m. Obtained image shows a good gray contrast, and its gray level difference for a 0.5 mm thick steel is about 13. The new NDT has achieved the real-time online monitoring function, and has advantages of intuitive, clear and so on compared with the tester designed by electromagnetic monitoring principles.

收稿日期:2010-11-03;修订日期:2011-02-15.

基金项目:天津市科技支撑计划重点项目(No. 08ZCKFGX02400)

Key words: X-ray non-destructive testing; non-uniformity correction; strength conveyor belt; linear array detector

1 引言

强力输送带(以下简称输送带)是一种皮带内部嵌入了钢芯的输送带,是煤炭、冶金、码头等领域普遍使用的一种运输工具。由于荷载量增加、障碍物划伤及老化等原因,输送带内部钢芯会发生锈蚀、断裂或接头伸长等故障。一旦发生故障将会造成重大安全事故,严重影响安全生产。强力输送带无损检测仪可以检测输送带内部钢芯状态,对故障及时报警,避免事故的发生。

目前工业应用的输送带无损检测仪分为两类:依据电磁感应原理的检测仪和依据射线成像原理的检测仪。文献[1]介绍了一种采用电磁感应原理研制的输送带检测仪,该检测仪已在多个国家得到了应用,但这种检测仪存在一定的缺点,比如检测结果通过数据与曲线进行表示,不直观;对于输送带内部带有防撕裂保护网的皮带不能检测等。文献[2]介绍了一种采用 X 光无损检测原理设计的输送带检测仪,这种检测仪的检测速度较低,无法实现实时在线监测。限制检测仪检测速度的主要因素有两个,一是探测器像元采集速度不高;二是像元处理算法的运算量大,实时处理比较困难。随着半导体制造工艺的发展以及现场可编程门阵列(FPGA)这类可以并行数据处理的器件的出现,研制一种可以实时在线监测输送带的检测仪已有了可能。

本文对 X 光无损检测原理进行了研究,通过对输送带检测仪结构的设计,消除了 X 光无损检测中散射对图像清晰度的影响。采用线阵探测器,并对线阵探测器进行多路数据并行采样,提高了探测器的数据采集速度,解决了数据采集的实时性问题。对线阵探测器像元的非均一化的成因进行了探讨,对常用的非均一性的处理算法进行了研究,根据本文设计的检测仪的具体情况提出了基于响应模型的三点分段校正算法,并采用 ARM+FPGA 的处理平台实现了所提出的算法。本文设计的检测仪可以实时检测强力输送带,检测的图像清晰度比较高,均一化效果好,有较好的应用前景。

2 X 光无损检测原理

X 光在穿透物体过程中与物体相互作用,射线的强度会衰减,衰减公式如式(1)。式中 I_0 为入射的射线强度, I 为穿透物质后的射线强度, T 为物质的厚度, u 为射线衰减系数,即射线通过单位厚度物质时与物质相互作用的几率,与射线能量、物质原子序数、密度相关。因此,通过检测透射的 X 光的强度即可获得射线穿透的物质的厚度与原子序数等信息。

$$I = I_0 e^{-uT}. \quad (1)$$

输送带检测仪的具体检测原理如图(1)所示。入射光的强度为 I_0 ,经过橡胶与钢芯后出射光的强度分别为 I_1, I_2 。具体公式如式(2),(3)所示。式中 u_1 表示橡胶的衰减系数, u_2 表示钢芯的衰减系数, T 为输送带的厚度, T_0 为钢芯的厚度。由式(2),(3)可知,不同的出射光强度,通过输送带下的光电探测单元转化为电信号,经采集电路转化为数字信号,从而得到灰度值不同的图像,通过图像就可以判断钢芯的厚度与通断信息。

$$I_1 = I_0 e^{-u_1 T}, \quad (2)$$

$$I_2 = I_0 e^{-u_1(T-T_0)} + I_0 e^{-u_2 T_0}. \quad (3)$$

不过,以上的情况并没有考虑 X 光的散射问题,事实上,由于存在瑞利效应 X 光会发生散射,散射射线参入成像即会导致图像对比度的降低,影响图像质量[3]。因此,在 X 光无损检测系统中消除散射效应非常重要。

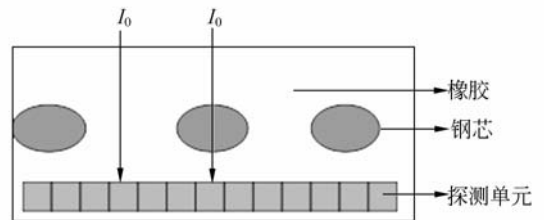


图 1 强力输送带检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel cord conveyor belt testing

3 检测仪的系统设计

图 2 为本文研制的强力输送带无损检测仪的外观结构,其主要分为射线源、上准直器、下准直器、线阵探测器 4 个部分。

输送带在上下准直器之间运行。射线源到输送带与射线源到探测器之间几何比例为 1/1.5,可以使检测成像的横向分辨率提高 1.5 倍。

上下准直器由铅板制作,铅对 X 光的衰减率非常高,主要用于消除 X 光的散射对图像对比度的影响,X 光与物质相互作用中由于瑞利效应产生的散射 X 光被准直器抑制,没有被探测器吸收,故对成像无影响。另外准直器也可以起到 X 射线的防护作用。

线阵探测器扫描速度快,适合应用于流水线检测,本文设计的检测仪采用线阵探测器。线阵探测器的设计如图 3 所示,它主要包含 3 部分,光电转换板(X-CARD)、数据采样板(A/D board)、数据处理与传输板(CU)。X-CARD 主要用于将 X 光信号转变为电压信号,每个 X-CARD 有 64 pixel,多个 X-CARD 可以级联,构成任意长度的

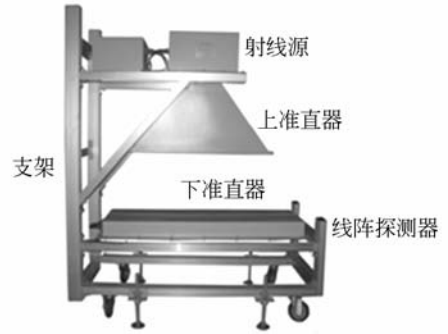


图 2 检测仪外观结构

Fig. 2 Appearance of structure detector

探测单元。A/D board 将电压信号转变为数字信号,包含 4 路 A/D,同时对 4 路级联的 X-CARD 进行并行采样,这种硬件结构解决了数据的高速采样问题,可以提高系统成像的空间分辨率,并实现检测仪的实时在线监测。CU 用于实现数字信号的处理与传输,处理器为 ARM+FPGA,FP-GA 实现对 4 路 A/D 的控制以及信号的滤波、均一化校正等,ARM 将处理完数据通过以太网传输到计算机进行图像显示。

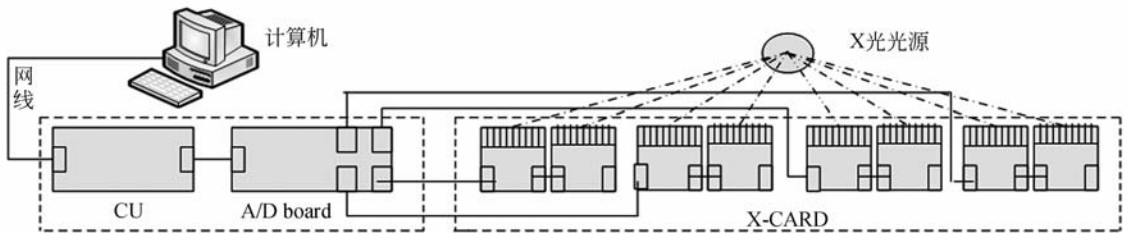


图 3 线阵探测器的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of linear array detector

4 检测仪像元处理算法

4.1 线阵探测器像元非均一性的数学表达与原因分析

在线阵探测器应用中,期望光辐照强度相同的情况下,各个像元的响应或者输出是一致的。但是实际上在同样强度的光的照射下,或者说探测器上方遮挡同样厚度同一种物体的情况下,探测器的各个像元的响应存在差异。这就是所谓的

探测器的非均一性。

线阵探测器的像元响应可以由式(4)来表示, Y_i 表示第 i 个像元的输出, Φ 表示照射到第 i 个像元的光的强度, R_i 表示该像元对光的转换效率, X_{i0} 表示该像元的本底噪声。

$$Y_i = R_i \times \Phi + X_{i0} \tag{4}$$

首先,线阵探测器每个像元的 X_{i0} 是不一样的,主要原因有两个,一是每个二极管的暗电流不同,二是每个二极管后面的运放电路存在差异。

其次,每个像元的 R_i 是不一样的,原因在于

每个像元由于工艺而存在差异,如像元尺寸大小不一致、像元内部参数存在差异等,事实上每个像元的 R_i 本身也不是常数,是随着 Φ 的大小变化的。

最后,在 X 光光源发出同样强度的光的情况下,到达各个像元的光的强度也不一样,因为光源到各个像元的距离是不一致的。文献[4]对这个问题进行了细致的研究,结论为 X 光束流的强度按照 X 光的出射角度进行分布,即出射角度越小,光的强度越大,因此到达线阵探测器中间的像元的光强度要大于到达两边的光强度,这也是引起探测器非均一性的一个因素。

探测器的非均一性使检测得到的图像存在灰度不一的条纹,严重影响了图像的质量。非均一性校正的目的是让探测器在同样光强度辐照下各个像元的响应一致。

4.2 线阵探测器像元非均一性的校正算法

目前,国内外有很多文献对线阵探测器的像元非均一性的校正算法进行了研究。主要可以归结为两种算法。文献[5]介绍的算法为两点校正法,该方法是目前工业应用最广泛的一种校正方法。清华大学在研制集装箱检测系统中应用了线阵探测器,并提出一种一分段插值校正法^[6]。分段插值校正法是两点法的细化与深入,具有更精确的校正效果。本文在分析了以上算法的基础上,同时考虑了本文设计系统的特性,提出了一种基于探测器响应曲线的三点分段校正法。该方法使分段插值校正法进一步细化并缩减了运算量。

4.2.1 两点校正算法

两点校正法的原理如下,对式(4)加入光强度角分布因素,则式(4)可以改写为式(5)。式中 θ 是像元与射线源的夹角, $F(\theta)$ 是根据夹角计算出的系数。

$$Y_i = F(\theta) \times R_i \times \Phi + X_{i0}. \quad (5)$$

两点校正法的前提是假设每个像元的 R_i 与 $F(\theta)$ 是一个常数。即每个像元的响应是一条直线,但各个像元响应直线的斜率与截距是不一样的,校正的方法是时应首先减掉每个像元响应本底噪声,使截距变为 0,然后不同像元乘上不同校正系数,使像元响应的斜率一致。各个像元的校正系数计算公式如式(6),校正后的输出如式(7)。

$$K_i = \frac{Y_h - Y_l}{Y_{hi} - Y_{li}}, \quad (6)$$

$$\bar{Y}_i = K_i(Y_i - Y_{i0}), \quad (7)$$

式(6)中 Y_h 为探测器没有遮挡,开 X 光源情况下采集到的所有像元输出的均值, Y_{hi} 为第 i 个像元的输出值。 Y_l 为关闭光源所有像元输出的平均值, Y_{li} 为第 i 个像元的输出值。 K_i 为第 i 个像元的校正系数。式(7)为第 i 个像元校正后的输出。具体校正过程可由图 4 表示,图 4(a)中表示 3 个点的响应,横坐标为照射到探测器的光强度 Φ (与探测器上方遮挡物体的厚度 d 成线性比例关系),纵坐标为探测器的输出。图 4(b)表示去掉本底噪声之后的响应,图 4(c)表示 3 个点的响应乘上各自校正系数后校正完成。

显然,两点校正法在探测器响应为线性的前

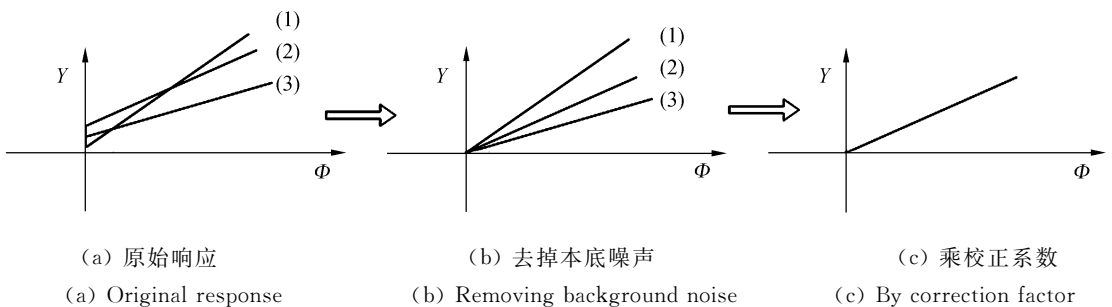


图 4 两点校正法的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-segmented correction methods

提下,无论是由于像元的本身差异引起的图像不一致还是由于光的强度分布引起的图像不一致,都可以得到完全校正。但是探测器的响应一般呈

非线性^[7],即式(4)中的 R_i 与 $F(\theta)$ 都不是一个常数。在考虑到探测器响应为非线性的情况下,提出了一种分段插值校正法。

4.2.2 分段插值校正算法

分段插值校正法是把非线性校正简化为分段线性的一种校正方法,式(8)为校正公式,式中 $X_i(\Phi)$, $X_i(\Phi_k)$, $X_i(\Phi_{k-1})$ 表示第 i 个探测单元在光辐射强度为 Φ , Φ_k , Φ_{k-1} 情况下的输出, $\overline{Y(\Phi_{k-1})}$, $\overline{Y(\Phi_k)}$ 为所有探测单元在光辐照强度为 Φ_{k-1} , Φ_k 情况下输出平均值,也就是在这种情况下的校正输出值, $Y_i(\Phi)$ 为第 i 个探测单元校正后的输出。显然,公式(8)表示的意义是在求取了光辐照强度为 Φ_k 与 Φ_{k-1} 两种情况下第 i 个探测单元的输出值与校正后的输出值进行线性插值来求取光辐照强度在 Φ_k 与 Φ_{k-1} 之间的第 i 个探测单元的输出值。从本质来说,分段插值校正法其实就是分段两点校正法。

$$Y_i(\Phi) = \frac{\overline{Y(\Phi_k)} - \overline{Y(\Phi_{k-1})}}{X_i(\Phi_k) - X_i(\Phi_{k-1})} (X_i(\Phi) - X_i(\Phi_{k-1})) + \overline{Y(\Phi_{k-1})} \quad (8)$$

首先将探测器响应分为若干段,求出每段的两个端点的校正输出值,然后通过线性插值来求该线段内各种输出下的校正输出值。

校正的具体实现分为两步,一是定标,即求取校正公式(8)中的各个校正系数;二是校正,即运用公式(8)对每个像元输出值进行校正。

定标过程如下:假设将探测器响应分为 n 段,则需要制作厚度为 $d(1)$, $d(2)$, $d(3)$ 直到 $d(n-1)$ 的 $n-1$ 块探测器遮挡板,在放置不同厚度遮挡板时使探测器受光的辐照强度不一样。放置厚度为 $d(k-1)$ 的遮挡板,采集 N 次线阵探测器输出,将 i 个像元的输出求和后取均值就可以得到 $X_i(\Phi_{k-1})$,将 N 次线阵探测器输出的所有像元的值求和后取均值,就可以得到 $\overline{Y(\Phi_{k-1})}$,同样方法可以计算 $X_i(\Phi_k)$, $\overline{Y(\Phi_k)}$ 。

校正过程如下:探测像元输出值根据 $X_i(1)$, $X_i(\Phi_{k-1})$, $X_i(\Phi_k)$ 等值分为 n 段,在探测器正常工作时根据 i 个探测像元的输出值确定分布在哪一段,将该段校正系数代入式(8)对该像元输出值进行校正。

分段插值校正法考虑了探测器的响应非线性,校正精度较高。但是存在如下问题:一是分多少段合适,分段多,校正精细,运算量大;分段少,校正效果不好。二是如何选择分段点,是在光强度范围均分,还是其他分段方法。基于以上考虑,本文提出了基于响应曲线的三点分段校正法。

4.2.3 基于响应曲线的三点分段校正算法

研究表明探测器的响应一般呈 S 曲线^[7],如图 5 所示,即探测器的响应曲线可以分为 3 段,光强度比较弱或光强度比较强时,探测器响应接近饱和,探测器响应曲线的斜率较小;光强为中间值时,探测器响应基本为线性。基于以上研究,本文提出一种基于“S”型响应模型的三点分段校正法,即对探测器响应曲线分为三段进行逼近校正,具体的校正公式为式(8)。分段的位置为 S 曲线的两个拐点(图 5 中 Φ_1 , Φ_2 两个点),具体数值通过探测器响应曲线的标定实验来确定。

校正过程同样分为两步,标定与校正。与分段插值校正法不同之处是本方法在标定过程中首先确定两个响应曲线的拐点。具体过程如下:将探测器的遮挡物的厚度逐步增加,使探测器接收到的光强逐步减弱,得到图 5 中的 Φ 值,同时对探测器所有像元的输出值进行均值计算,计算的值作为图 5 中的 Y 值,这样就可以得到探测器的响应曲线。根据曲线确定 Y_1 , Y_2 的值,同时求取在 Y_1 , Y_2 两种情况下每个像元的均值 $X_i(1)$, $X_i(2)$,并由 $X_i(1)$, $X_i(2)$ 来确定每个像元的分段点。其余的校正实现与分段插值校正法一样。

这种校正算法按照探测器的响应将响应曲线分为三段,一是非常好地逼近了探测器的响应曲线,精度比较高;二是计算量也比较小,适合实时性要求比较高的工业现场应用。

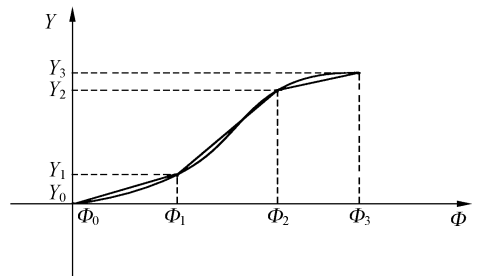


图 5 基于探测器响应曲线的三点分段校正算法示意图

Fig. 5 Diagram of interpolation correction method

4.3 基于响应曲线的三点分段校正算法的 FPGA 实现

线阵探测器像元数据采集与处理的平台结构为 ARM+FPGA,ARM 采用三星公司 ARM9 系

列的 S3C2440A, FPGA 采用 Xilinx 公司 spartan3e 系列 FPGA。ARM 与 FPGA 之间通过总线进行通信^[8], FPGA 实现数据采集与校正, 校正完成的数据存储到 FPGA 内部一块双口 RAM 里, ARM 读取 FPGA 内部数据, 通过网络传输给计算机, 计算机通过软件将数据显示为图像。具体算法实现如图 6 所示, 系统是四路 A/D 并行采样、处理, 图 6 中画出了一路信号的采集与处理情况, 其他三路算法的实现方式与此完全相同。首

先是用一个状态机实现 A/D 的控制与数据的采样, ROM(1) 内部存储各个像元的分段值, 通过分支判断模块来判定本次采集的数据应该用哪一段的校正公式进行校正, 减法器是实现式(8)中减去 $X_i(\Phi_{k-1})$ 的运算, ROM(2), ROM(3), ROM(4) 内部存储 3 个分段的乘法系数, 即式(8)中的比值部分的数值, 加法器是实现式(8)加 $Y(\Phi_{k-1})$ 的运算, 最后的数据写入双口 RAM, 由 ARM 通过总线读取。

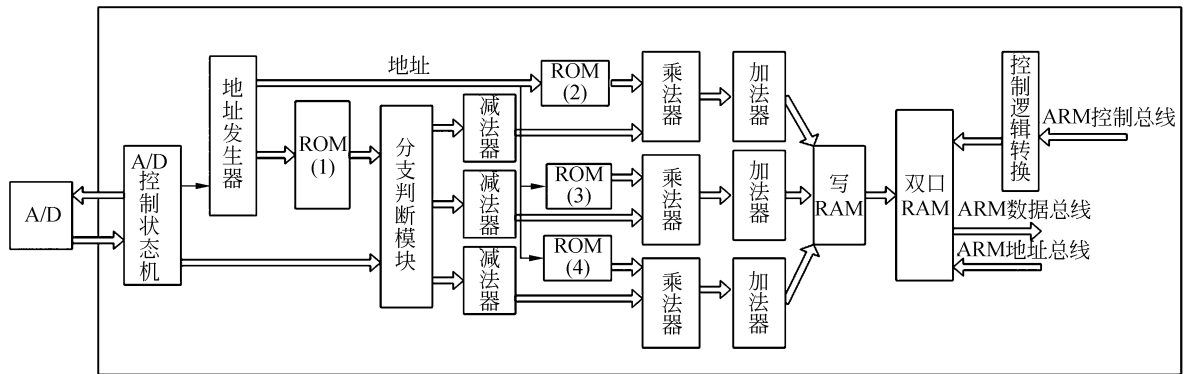


图 6 一路数据校正算法的 FPGA 实现

Fig. 6 FPGA implementation for single way correction algorithm

5 实验测试与工业应用

5.1 实验测试及结论

检测仪的检测性能指标主要有三项, 一是图像灰度对比度, 二是图像空间分辨率, 三是图像清晰度。

图像灰度对比度是指由于被测物体存在厚度差, 使射线的衰减存在差异, 进而使图像的灰度值产生差异。输送带内部钢芯由于长久使用造成的拉伸, 钢芯变细的程度是检测仪检测的一个重要指标, 良好的图像对比度可以分辨钢芯变细的具体程度。影响图像对比度的因素有两点, 被测物体的射线衰减系数和射线散射。被测物体的射线衰减系数是固定的, 因此射线散射成为影响图像对比度的主要因素, 射线散射参与成像越少, 图像对比度就会越高。本文设计的检测仪采用准直器消除散射影响, 提高图像对比度。通过比较检测仪测量不同厚度的钢板得到的灰度值来检测系统图像对比度的优劣, 测量结果如表 1 所示, 可见, 检测仪对被测物体的厚度比较灵敏, 0.5 mm 厚

差异的钢板, 灰度值差约为 13, 因此系统的图像对比度效果达到了国家标准 GB/T 9770-2001 对输送带检测的要求。

表 1 图像对比度实验的测量数据

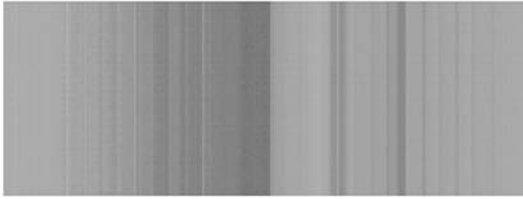
Tab. 1 Data from image contrast experiment

被测钢板厚度/mm	测得的灰度值
0.5	4
1	18
1.5	31
2	44

空间分辨率反映了系统对被测物体缺陷的最小识别能力, 空间分辨率与探测器像元的尺寸以及像元采集速度有关。本文采用的探测器像元尺寸为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。采用图 2 所示的结构设计, 成像横向分辨率提高了 1.5 倍。采用图 3 所示硬件结构设计, 成像的纵向分辨率在输送带 3 m/s 运行状态下可以达到探测器固有分辨率的极限值 1.5 mm。因此系统成像空间分辨率为 $1.0 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 。在对输送带实时在线监测情况下得到的图像分辨率符合国家标准 GB/T 9770-

2001 中对输送带检测分辨率的要求。

射线成像系统的图像清晰度受很多因素影响^[9-10],但主要因素是像元非均一性的校正效果。考察非均一性的校正效果有两种方式,一是直观法,通过校正前与校正后图像的对比来检测校正的效果,图 7(a)是未进行校正的图像,图 7(b)是校正后的图像,通过对比可以看出,图像的非均匀



(a)校正前图像

(a) Image before correction



(b)校正后图像

(b) Image after correction

图 7 校正效果对比图

Fig. 7 Comparison chart of correction effect

性得到了较好的校正。二是通过对图像的标准差与非均匀度计算来定量的考察校正的效果,式(9)是计算图像标准差的公式,式中 m, n 为图像的行数与列数, $x(i, j)$ 为第 i 行 j 列的点的像素值,式(10)中 \bar{X} 为图像所有点的灰度均值,式(11)为图像非均匀度的计算公式。图像的标准差与非均匀度是说明图像数据分散程度的一个数据,它越大说明图像灰度越不均匀。表 3 是对遮挡 3 种不同厚度的钢板采集到的数据进行计算得到的校正前后的图像的标准差与非均匀度,通过对比可以发现图像的非均匀性得到了有效校正,由未校正前的 13% 降低到低于 2.57%。在同样的测试条件下采用二点法得到的非均匀度约为 6.3%。采用分段插值校正法,按照光照强度均分得到分段点,在分段高于 7 段的情况下,响应曲线拐点处的非均匀度与本文所用方法相当。分段低于 7 段情况下,拐点处的校正非均匀度高于 3%,其他段校正

效果基本相当。因此本文所用方法在缩减了一半以上运算量,节约一半以上内存的情况下可以达到与分段插值校正法同样的校正效果,有助于系统检测实时性的实现。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X(i, j) - \bar{X})^2}, \quad (9)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X(i, j), \quad (10)$$

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%. \quad (11)$$

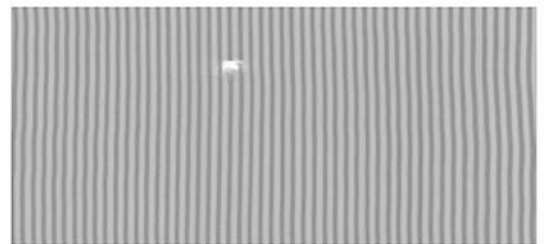
表 2 图像非均匀性测量数据

Tab. 2 Experimental data from image non-uniformity

遮挡钢板厚度		标准差		非均匀度
a	校正前	1 532.76	校正前	13.07%
	校正后	332.14	校正后	2.43%
b	校正前	1 564.14	校正前	11.97%
	校正后	314.47	校正后	2.41%
c	校正前	1 549.78	校正前	12.11%
	校正后	324.39	校正后	2.57%

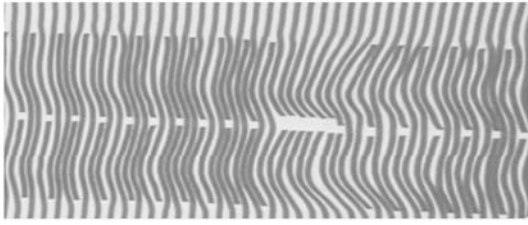
5.2 工业现场的实际应用

输送带无损检测仪后在山西、内蒙、辽宁等多个地区的煤矿进行了应用,工业现场的应用表明系统运行稳定、可靠;同时也证明检测仪可以对安全隐患进行预警。图 8(a)是在山西某煤矿采集到的图像,输送带的运行速度为 2.6 m/s,宽度为 1.2 m。图像内部亮点处显示的是输送带内部数根钢芯由于划伤造成了断裂,输送带无损检测仪及时发现了问题,消除了潜在的安全隐患。图 8(b)是内蒙某煤矿采集到的图像,输送带的速度为 3 m/s,宽度为 1.6 m。图像显示的是皮带钢芯



(a) 输送带内部钢芯断裂图片

(a) Picture of internal steel cord fracture



(b) 输送带接头搭接不规范图片

(b) Picture for non-standard connector

图 8 现场采集到的输送带的图像

Fig. 8 Conveyor belt image collected in industrial site

接头部分,接头中间部分数根钢芯的搭接不符合规范,钢芯没有交叉,强度不足,存在潜在风险。

参考文献:

- [1] CHENG H, GAO Y L, XHAO SH J. A X-ray non-destructive testing system for mine conveyer belt [J]. *High Technology Letters*, 1997, 3(1): 26-28.
- [2] PANG Y, LODEWIJKS G. A novel conductive detection system for intelligent conveyor belt monitoring[C]. *IEEE International Conference on Service Operation and Log-Istics*, 2006(2): 803-808.
- [3] 孔凡琴, 路宏年. 数字 X 射线图像的自适应抑制算法[J]. *光电工程*, 2006, 32(6): 86-89.
KONG F Q, LIU H N. Adaptive restraint algorithm to the scattered radiation of digital X-ray image[J]. *Opto-electronic Engine-ring*, 2006, 32(6): 86-89. (in Chinese)
- [4] 周日峰, 高富强, 张平. 高能工业 CT 探测器能谱响应影响校正研究 [J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(1): 83-86.
ZHOU R F, GAO F Q, ZHANG P. Research on influence energy spectrum of ICT detector arrays [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(1): 83-86. (in Chinese)
- [5] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1420-1428.
WANG W H, HE B, HAN SH L, et al.. Real-time correction non-uniformity in CCD image for remote sense[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1420-1428. (in Chinese)
- [6] 康克军, 刘胤兵, 陈志强. 集装箱检查系统中的阵列探测器校正[J]. *清华大学学报*, 2002, 42(5): 574-579.
KANG K J, LIU Y B, CHEN ZH Q. Detector correction in large container in inspection systems[J]. *J Tsing Univ.*, 2002, 42(5): 574-579. (in Chinese)
- [7] SUI J, DONG L Q, QI W, et al.. A new adaptive non-uniformity correction algorithm for infrared line scanner based on neural-networks [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(2): 74-76.
- [8] 王珏, 谭辉, 黄亮, 等. 工业 CT 用数据采集与传输系统设计及实现[J]. *仪器仪表学报*. 2009, 30(4): 722-727.
WANG J, TAN H, HUANG L, et al.. Design and implementation of data acquisition and transmission system for industrial CT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(4): 722-727. (in Chinese)
- [9] 田丽珍, 李庆辉, 刘上乾. 一种非均匀校正的新算法 [J]. *运用光学*, 2000, 21(2): 4-6.
TIAN L ZH, LI Q H, LIU SH Q. A new non-uniformity correction algorithm [J]. *J. Applied Opt.*, 2000, 21(2): 4-6. (in Chinese)
- [10] TORRES S N, HAYAT M M. Kalman filtering for adaptive non-uniformity corrective in infrared focal plane array [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, 20(3): 470-480.

6 结 论

本文研制了一种新型的输送带无损检测仪,使用准直器解决了 X 光无损检测的散射问题,多路并行数据采集硬件结构设计解决了数据高速采集问题。用提出的基于探测器响应模型的三点分段校正算法对图像进行了有效校正。结果表明,输送带无损检测仪可以对高速运行的输送带进行实时在线监测,监测结果准确、直观。工业现场应用也表明研制的检测仪具备对输送带安全隐患提前预警功能。

作者简介:



荣 锋(1979—),男,山东日照人,博士,讲师,主要研究方向为无损检测技术、嵌入式系统设计等。E-mail: Shushing 677@163.com



徐 伟(1984—),男,安徽芜湖人,硕士,讲师,主要研究方向为光电子技术、嵌入式系统设计。E-mail: xuwei@tjpu.edu.cn.



苗长云(1962—),男,辽宁人,教授,博士生导师,主要研究方向为无损检测技术、现代通信网与现代通信技术的应用。E-mail: miaochangyun@tjpu.edu.cn.

(本栏目编辑:李自乐)

● 下期预告

微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的实验研究

周建忠,卫登辉,黄舒,朱伟,樊玉杰

(江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

微尺度激光喷丸强化是在宏观激光喷丸强化的基础上发展而来的一种主要应用于金属微构件表面处理的新技术,其采用的激光光斑尺寸在微米量级,脉冲激光能量在微焦到毫焦范围。为了进一步提高 TiN 涂层的表面性能,对 TiN 涂层表面进行了微尺度激光喷丸强化处理。利用光学轮廓仪和纳米力学测试系统测量了不同激光工艺参数作用下,TiN 涂层喷丸区域的表面形貌、纳米硬度及弹性模量分布。结果表明,喷丸区域形成了最大深度约 $1.2 \mu\text{m}$ 的圆锥形凹坑;纳米硬度和弹性模量在喷丸中心处变化最大并在一定范围内随着激光能量的增大而增大,当激光能量为 250 mJ 时,两者最大分别达到 50.21 GPa 和 402.8 GPa,与初始状态相比分别提高了 140% 和 43.9%。