

# 数字射线检测技术专题(二)

## ——辐射探测器介绍

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

**摘要:**简要介绍了数字射线检测技术使用的辐射探测器的基本类型。从射线检测技术应用角度介绍了非晶硅、非晶硒、CCD、CMOS、IP 板、图像增强器等辐射探测器的基本结构与射线探测过程,并简单叙述了模/数(A/D)转换器的基本知识。

**关键词:**探测器;辐射探测;数字技术;射线检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2012)02-0035-06

### Digital Radiography II : An Introduction of Radiation Detectors

ZHENG Shi-Cai

(Xinli Machinery Plant, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The basic detectors of digital radiography were briefly introduced in this paper, and especially the basic structures of amorphous silicone, amorphous selenium, CCD, CMOS, IP, and enhanced image intensifier. The paper also briefly introduced the A/D converters.

**Keywords:** Detector; Radiation detect; Digital method; Radiography test

## 1 辐射探测器概述

在数字射线检测技术中,采用辐射探测器完成射线的探测和转换。它是获得射线检测图像的器件,是影响获得的图像质量的基本因素。用于工业数字射线检测技术的辐射探测器按原理可分为三类:气体辐射探测器、闪烁辐射探测器以及半导体辐射探测器。

### 1.1 气体辐射探测器

气体辐射探测器利用的是辐射可以使气体电离来实现辐射探测。气体探测器的基本结构是,在容器中安装两个同轴电极(由绝缘体分开),充上一定气压的气体,电极之间加上一定的高压。气体是辐射探测器的探测介质,辐射与气体作用,损失的能量使气体电离,电离产生的离子对在电场作用下形成电离电流,测量电离电流实现对辐射的探测。电离产生的离子对数与气体类别、辐射类型和能量相关。

收稿日期:2011-12-08

作者简介:郑世才(1941—),男,研究员,长期从事常规射线、超声、磁粉和渗透检测工作,重点研究了射线检测技术的理论和发展。

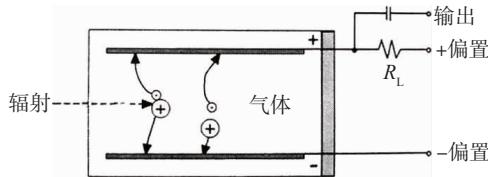


图 1 气体探测器原理示意图

图 1 是其探测原理示意图。气体辐射探测器的主要类型是电离室、正比计数器和 G-M 计数器等。

### 1.2 闪烁辐射探测器

闪烁辐射探测器利用的是闪烁现象实现对辐射的探测。闪烁现象是指高能粒子照射物质时引起瞬时闪光的现象,闪光的持续时间一般不大于  $10^{-6}$  s。可以产生闪烁现象的物质称为闪烁体。闪烁体将射线转换为荧光辐射的过程是一种光致发光过程。

从能带理论对闪烁现象可给出简单说明。在晶体中掺入杂质(即激活剂),改变了纯晶体的能级结构,产生了一些杂质能级。入射到晶体的射线所损失的能量使电子跃迁,可导致激活剂处于激发态。激活剂从激发态跃迁到基态释放能量,形成荧光辐射或磷光辐射。荧光辐射是辐射照射后在很短时间内

发生的辐射,磷光辐射是吸收和发射之间延迟比较长的辐射。将光信号转换为电信号则可实现对辐射的探测。

常用的闪烁晶体是碘化钠、碘化铯、锗酸铋、钨酸钙和钨酸镉等。

### 1.3 半导体辐射探测器

半导体辐射探测器的基本结构是PN结。半导体辐射探测器利用的是内光电效应。即,半导体材料吸收辐射能量后,产生电子-空穴对,由此可引起半导体材料的电导率改变,或引起电流、电压现象,通过外电路测量电流,实现对辐射的探测。图2是半导体探测器的探测原理示意图。

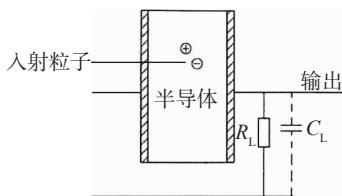


图2 半导体探测器原理示意图

### 1.4 辐射探测器的主要性能

对于辐射探测器,从制造角度应考虑的性能主要包括:量子检出效率、灵敏度、动态范围(线性范围)、信噪比、时间分辨力(率)、能量分辨力(率)、空间分辨力(率)等。

(1) 量子检出效率(DQE) 是探测器将输入辐射信号转换为输出信号的效率。输入信号强度与输出信号强度常用粒子数或光子数表示。量子效率与探测器种类、入射射线类型与能量等相关。它直接影响得到的图像质量。

(2) 灵敏度 指探测器输出可检测信号时所需要的最少输入信号强度。好的探测器灵敏度可达到一个光子。

(3) 动态范围 即探测器输出信号与输入信号成正比的范围,也称为线性范围。

(4) 噪声 指由非输入信号造成的输出信号。

(5) 时间分辨力 是探测器可分辨的两个相邻入射粒子的最短时间间隔。

(6) 能量分辨力 是探测器分辨不同能量粒子

的能力,通常以某一能量的输出脉冲的半高宽度除以脉冲高度。

(7) 空间分辨力 是探测器分辨最小几何细节的能力,常用(调制传递函数降为0.2的)空间频率或不清晰度表示。应注意,空间分辨力与采用的具体技术相关。

ASTM E2597—2007《数字探测器阵列制造性能》标准规定,评价数字探测器阵列制造性能应包括基本空间分辨力、效率、对比度灵敏度、特定材料厚度范围及有关图像的一些因素。

从使用角度最关心的探测器性能指标常为:像素(元)尺寸、空间分辨力、动态范围、适用能量、使用寿命等。一些辐射探测器性能目前的基本情况见表1。关于空间分辨力应注意的是,表中给出的空间分辨力是探测器可达到的最高空间分辨力。

## 2 直接数字化射线检测技术常用的辐射探测器

在直接数字化射线检测技术中,实际使用的辐射探测器主要有非晶硅辐射探测器、非晶硒辐射探测器、CCD或CMOS辐射探测器等。

### 2.1 非晶硅辐射探测器

非晶硅辐射探测器由闪烁体、非晶硅层(光电二极管阵列)、TFT阵列(大面积薄膜晶体管阵列)构成。图3是非晶硅辐射探测器结构示意图。闪烁体将辐射转换为光,非晶硅层将光转换为电信号,TFT阵列作为开关实现信号的读出,供给后续测量电路。可见,非晶硅辐射探测器对射线探测需要经过两个过程,它是一种间接转换的探测器。图4是

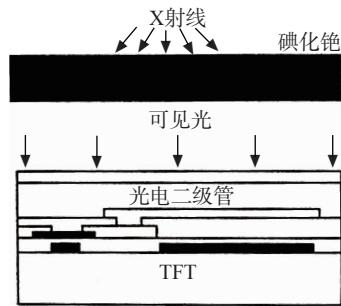


图3 非晶硅探测器结构示意图

表1 部分辐射探测器的主要性能

辐射探测器	适用能量	像素尺寸/ $\mu\text{m}$	空间分辨力/(Lp/mm)	动态范围	使用寿命
非晶硅平板	可达 15 MeV	127	~4	>2 000:1	10 年
CMOS 线阵	20~450 kV	80	~6	>2 000:1	10 年
IP 板	10 kV~32 MeV	50~500	6~10	$10^4:1$ 以上	约 5000 次

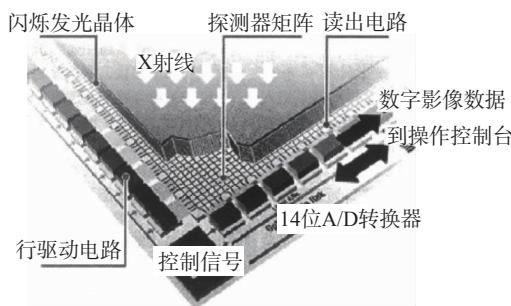


图 4 平板非晶硅探测器的结构示意图



图 5 平板非晶硅探测器外形图

非晶硅辐射探测器的内部结构示意图。图 5 是平板非晶硅辐射探测器的外形图。

光电二极管是一类光探测器件。光电二极管的基本结构是 PN 结, 其基于光伏效应探测光信号。在半导体界面存在空间电荷区, 它建立了很强的自建电场。光照时产生的电子-空穴对在自建电场的作用下运动, 形成光生电流。光生电流大小仅取决于光强。在很宽的光照范围内, 光电二极管可以产生与入射光强度成正比的光生电流。即可以把光信号转变成电信号, 实现对光信号的探测。

TFT 即大面积薄膜晶体管。其基本结构是在玻璃基板上制做半导体膜层, 然后对膜层加工制成大规模半导体集成电路。TFT 的单元实际是一个由源极、漏极、栅极组成的三端器件, 利用栅极电压控制源极与漏极间的电流。在非晶硅辐射探测器中, TFT 单元与一个电容器组成探测单元, 贮存电荷与入射辐射对应。读出时, 作为开关控制电信号传送。

## 2.2 非晶硒辐射探测器

非晶硒辐射探测器是一种直接转换的探测器, 其基本组成部分是非晶硒(作为光电材料)和薄膜晶体管阵列(TFT)。图 6 是非晶硒辐射探测器的结构示意图。

当射线照射到非晶硒时, 将产生电子-空穴对, 在外加偏压作用下, 产生的电子-空穴对向相反方向移动, 形成电流。电流在 TFT 电容上积聚, 形成贮存电荷。每个 TFT 上的贮存电荷正比于射线的照

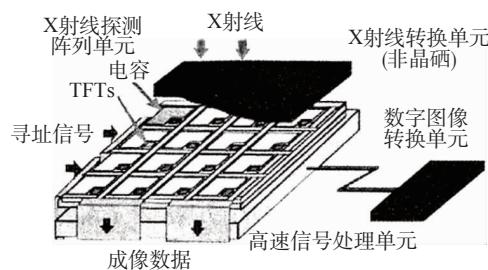


图 6 非晶硒探测器的结构示意图

射量。TFT 实际起到像元开关的作用。读出时, 施加电压信号, 开关打开, 从辐射转换出的贮存电荷沿数据线流出, 经放大、数字化, 完成数字图像信息贮存与处理。即每个 TFT 单元成为采集信息的最小单元, 也即像素。

## 2.3 CCD 或 CMOS 辐射探测器

CCD(电荷耦合器件)或 CMOS(互补金属氧化物半导体)辐射探测器的基本结构为三部分。第一部分为闪烁体, 用于将辐射转换为光信号; 第二部分为 CCD 或 CMOS 感光成像器件, 将光信号转换为电信号; 第三部分为后续电路, 测量电信号, 实现对辐射的探测。可见, 实现辐射探测转换的是闪烁体, CCD 或 CMOS 实现的是对光信号的转换和探测。

CCD 是将可见光转换为数字信号的器件。CCD 的基本结构是密排的 MOS(金属氧化物半导体)二极管阵列, 即金属-氧化物-半导体构成的电容, MOS 电容的基本结构见图 7。在光照条件下, MOS 电容衬底发生电子跃迁, 形成电子-空穴对。在外电场作用下, 电子和空穴分别向两极运动, 形成电子电荷, 即光生电荷。光生电荷存储在 MOS 电容的每个单元中。光生电荷的多少决定于射线能量和光子的数量, 即每个 MOS 电容单元的电荷与图像的亮度对应。按一定相位顺序加上时钟脉冲时, 在序列脉冲驱动下, 光生电荷(信息电荷)将按规定方向沿衬底表面转移, 形成图像视频信号。

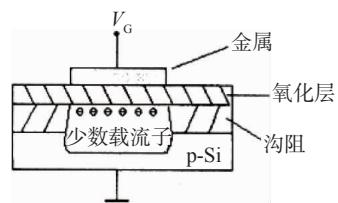


图 7 MOS 电容基本结构示意图

CMOS 的感光元可为光电二极管或 MOS 单元。在光电信号产生上与 CCD 相同, 但在构造和信号读取上不同于 CCD。基本的不同是, CMOS 的各

像素单元本身具有放大功能电路,产生的信号电荷在经过放大后传输到输出电路,使信号在传输路径中不易受到噪声影响。

### 3 间接数字化射线检测技术常用的辐射探测器

在间接数字化射线检测技术中,实际使用的辐射探测器主要是成像板(IP板)、图像增强器等。

#### 3.1 IP板

IP板(成像板)主要由保护层、荧光层、支持层、背衬层构成,基本结构如图8所示。

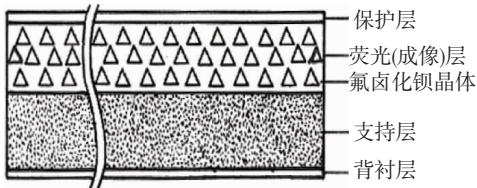


图8 IP板的结构示意图

保护层为非常薄的聚酯树脂类纤维,保护荧光层不受外界的影响。荧光层采用特殊的荧光物质,即光激发射荧光物质构成。荧光物质目前主要采用的是氟卤化钡(二价铕激活)。支持层常用聚酯树脂类纤维胶制做。它具有良好的机械强度,保护荧光层免受外力损伤。背衬层制成黑色,防止激光在荧光层和支持层的界面反射。

IP板探测辐射所基于的原理是,某些荧光发射物质受到射线照射时,在较高能带俘获的电子形成光激发射荧光中心(PLC),它们能够以准稳态贮存吸收的辐射能量。采用激光激发时,光激发射荧光中心的电子将返回它们初始能级,并以发射可见光的形式输出能量。这种光发射与原来接收的辐射剂量成比例。即,这些特殊荧光发射物质具有保留潜在图像信息的能力。

从一般的理论考虑,IP板的主要特性可分为下列方面:分辨力(空间分辨力)、动态范围、谱特性(吸收谱、激发谱、发射谱)、时间响应特性、衰退特性。分辨力由荧光层的特性决定,与测定时的射线能量相关。IP板的动态范围(输出信号对输入信号的线性响应范围)一般可达到 $10^4:1$ 以上,比胶片的动态范围宽很多。激发谱特性是不同波长激光激发IP板时,IP板发光的相对强度分布情况。发射谱特性是IP板受到激光激发时,IP板发射的不同波长荧光的相对强度分布情况。图9给出的是IP板的发射谱特性和激发谱特性。图10是IP板的衰退特

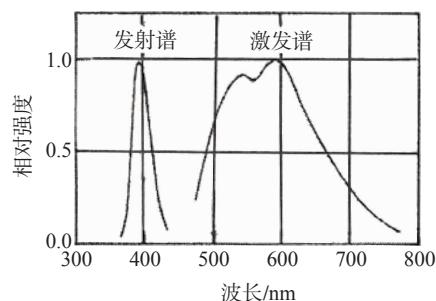


图9 IP板的谱特性

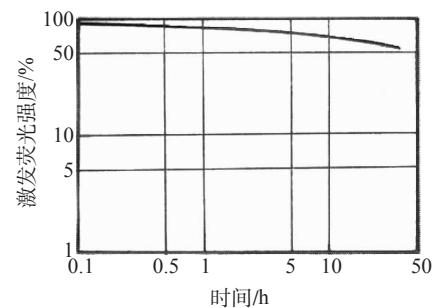


图10 IP板的衰退特性

性,它给出了IP板上形成的潜在射线照相图像随贮存时间增加而减弱的情况。IP板可以重复使用。IP板上的图像扫描读取完后,可以采用光照擦除。一般说可以重复使用5 000次左右。

#### 3.2 图像增强器

图像增强器的基本结构包括外壳、射线窗口、输入屏、聚焦电极、输出屏。图11是图像增强器的主要结构示意图。

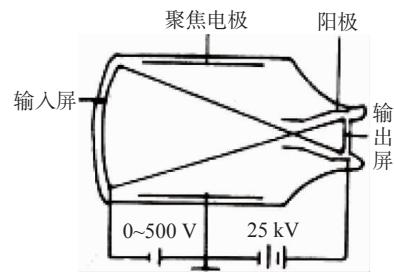


图11 图像增强管结构示意图

窗口由铝板或钛板制做,铝板的厚度一般为0.7~1.2 mm,既具有一定的强度,又可以减少对射线的吸收。输入屏主要由基板、闪烁体(荧光体)和光电(阴极)层构成,其结构见图12。输入屏基板为铝板,厚度一般约为0.5 mm。闪烁体主要采用CsI晶体制做,其主要特性分子式CsI(Tl),密度4.51 g/cm<sup>3</sup>,最大发射波长420~570 nm,转换效率45%[以碘化钠转换X射线的效率为100%(约为15%)],衰减常数1.0 μs(信号衰减到最大强度的

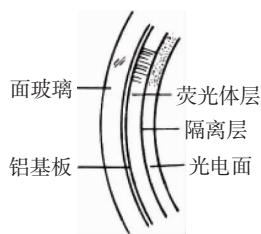


图 12 输入屏结构示意图

37%所需要的时间),余辉  $0.5\sim 5\% / 3\text{ ms}$ ,其中铊(Tl)为激活剂。CsI 晶体具有类似光纤的针状结构,它可以限制光的漫散射。光电层是一种基于外光电效应的光电发射材料,在图像增强器的输入屏,光电层为多碱金属(铯与多碱金属的化合物),厚度很小(仅为 20 nm)。聚焦电极加有 25~30 kV 的高压。输出屏的直径一般在 15~35 mm 之间,多采用 ZnCdS(Ag) 荧光材料(P20)沉积在很薄的铝膜上(200~300 nm),荧光物质层厚度一般为 4~8  $\mu\text{m}$ ,发射光的峰值波长为 520~540 nm。

图像增强器工作的基本过程如下。射线透过工件,穿过图像增强器的窗口入射到输入转换屏上,输入转换屏闪烁体(CsI)吸收射线的部分能量,将其能量转换为荧光发射。发射的荧光被光电(阴极)层接收,并将荧光能量转换为电子发射。发射的电子在聚焦电极的高压作用下被加速和聚焦,高速撞击到输出屏上。输出屏荧光物质将电子能量转换为荧光发射,形成检测图像。在图像增强器中完成的转换过程可概括为:射线→可见光→电子→可见光。图像增强器输出屏上的图像,采用与其耦合的光学系统和摄像系统拾取。

一方面光电(阴极)层的灵敏度会随使用时间增加而降低,另一方面,由于增强管内真空度随着时间的降低,也将影响光电(阴极)层的灵敏度。因此,无论使用与否,光电(阴极)层的灵敏度都会随着时间的增加而降低。这限制了图像增强器的寿命。

#### 4 A/D 转换器

为获取数字射线检测图像,需要采用 A/D(模/数)转换器将模拟信号转换为数字信号。在直接数字化射线检测技术中,辐射探测器包含了 A/D 转换器,除了完成射线信号的探测、转换外,同时完成图像数字化。在间接数字化射线检测技术中, A/D 转换器在单独的图像数字化单元中,完成图像数字化过程。

信号可以分为模拟信号、脉冲信号、数字信号。

在时间上和幅值上连续变化的信号是模拟信号,在时间上和幅值上不连续变化的信号是脉冲信号,数字信号常是由二进制数字 0,1 组成的信号。图 13 显示了同一信号的三类信号的对应关系。

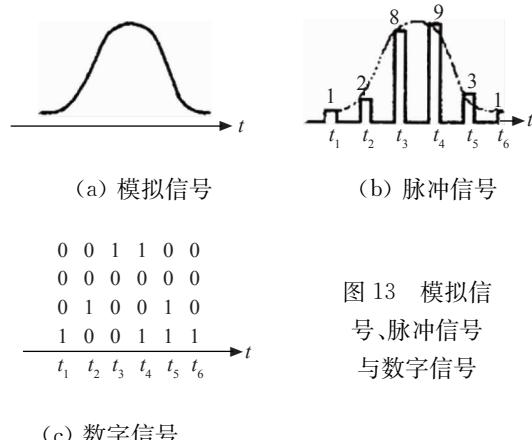


图 13 模拟信号、脉冲信号与数字信号

A/D 转换,即模/数转换,是将模拟量(通常是电压量)转换为数字量(或说将模拟信号转换为数字信号)。A/D 转换过程包括取样、保持、量化、编码四个步骤,图 14 显示了 A/D 转换的基本过程。

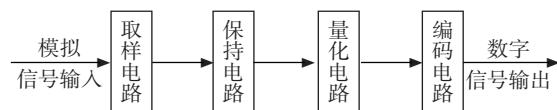


图 14 A/D 转换的基本过程

由于模拟信号是随时间连续变化的量,因此在进行 A/D 转换时,需要对模拟信号周期性地连续取样,在 A/D 转换器内将其量化、编码成为数字信号。取样后保持中的信号值仍是连续的模拟信号值,为了用数字量表示,须将其转化成某个数量单位的整数倍,这个过程就是量化。量化后的数字可用不同方式表示,一般采用二进制数表示。即编码就是采用二进制数表示量化后数字的过程。

A/D 转换可分为不同方法,A/D 转换器可分为不同类型,类型不同结构组成不同、工作原理不同。A/D 转换器的主要性能指标包括:分辨率、量化误差、输入模拟电压范围、转换速度、工作温度系数等。

分辨率表示的是 A/D 转换器能够区分的最小输入模拟电压,因此它限定了 A/D 转换器分解输入模拟电压的能力。它由 A/D 转换器输入的模拟电压满量程值和可转换为二进制数的位数(比特,bit)决定。例如,A/D 转换器输入的模拟电压满量程值为 5V,当其输出二进制数的位数为 8 位(8bit)时,其可分辨的最小输入模拟电压为:

$$5 \times 1000 \div 2^8 = 19.53 \text{ mV}$$

如果其输出二进制数的位数为 12 位(12 bit)时,其可分辨的最小输入模拟电压为:

$$5 \times 1000 \div 2^{12} = 1.22 \text{ mV}$$

量化误差是 A/D 转换器对连续的输入模拟电压用有限的数字进行离散赋值时出现的误差。它是 A/D 转换过程固有的误差。显然，转换的二进制数的位数越高，量化误差会越小。

输入模拟电压范围是 A/D 转换器可以正常工作的范围。

转换速度用 A/D 转换器完成一次 A/D 转换时间表示。

### 参考文献

- [1] 宋丰华. 现代光电器件技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
  - [2] 汪贵华. 光电子器件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
  - [3] 邹异松. 电真空成像器件及理论分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

- [4] (德)Gerhard Lutz著. 半导体辐射探测器[M]. 刘忠立,译. 北京:国防工业出版社,2004.
  - [5] 曾树荣. 半导体器件物理基础(第2版)[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
  - [6] 安毓英. 光电子技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
  - [7] 王庆有. 光电技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
  - [8] 曾光宇. 光电检测技术[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
  - [9] 杨永才. 光电信息技术[M]. 上海:东华大学出版社,2002.
  - [10] 曹建中. 半导体材料辐射效应[M]. 北京:科学出版社,1993.
  - [11] 丁富荣. 辐射物理[M]. 北京:北京大学出版社,2004.
  - [12] 王瑞玉. 医用移动式数字X射线机原理构造和维修[M]. 北京:中国医药科技出版社,2004.
  - [13] 王学民,沈克涵. 医学成像系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
  - [14] 高上凯. 医学成像系统(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
  - [15] 黄力宇. 医学成像的基本原理[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
  - [16] Company Agfa. Radiographic Systems Radview Digital Systems[Z].

# 《无损检测仪器 多频涡流检测仪》等多项国家及行业标准 正式颁布

2011年12月20日,中华人民共和国工业和信息化部发布了2011年第43号标准发布公告。由爱德森(厦门)电子有限公司主持或参与制定的《JB/T 11259—2011 无损检测仪器 多频涡流检测仪》等多项行业标准正式发布。

2011 年发布的由爱德森公司主持或参与制定的国家及行业标准目录有：

- (1) GB/T 12604. 10—2011 《无损检测 术语 磁记忆检测》(第一起草单位)
  - (2) GB/T 26641—2011 《无损检测 磁记忆检测 总则》
  - (3) GB/T 26644—2011 《无损检测 声发射检测 总则》
  - (4) GB/T 26646—2011 《无损检测 小型部件声发射检测方法》
  - (5) JB/T 11259—2011 《无损检测仪器 多频涡流检测仪》(第一起草单位)
  - (6) JB/T 11260—2011 《无损检测仪器 声

脉冲检测仪》(第一起草单位)

(7) JB/T 5525—2011 《无损检测仪器 单通道涡流检测仪性能测试方法》

(8) JB/T 5754—2011 《无损检测仪器 单通道声发射检测仪 技术条件》

(9) YB/T 4082—2011 《钢管自动超声探伤系统综合性能测试方法》

(10) YB/T 4083—2011 《钢管自动涡流探伤系统综合性能测试方法》

标准发布公告见中华人民共和国工业和信息化部网站或标准网：

<http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12845605/n13916898/14410381.html>

<http://www.bzw.com.cn/article/show.asp?id=43110>

view.asp? id=4572

(赵诚 报道)