

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.013

氨氮水质监测仪步进应力加速退化试验研究^{*}

叶红波¹, 缪建², 沈广月³, 陈文华¹, 潘骏^{1*}

(1. 浙江理工大学 浙江省机电产品可靠性技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310000; 3. 中国计量学院机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对氨氮水质监测仪如何快速评定其可靠性问题,通过分析氨氮水质监测仪的失效机理,建立了以其对标准试样的示值误差为退化量的退化轨迹模型,并利用反应动力学理论建立了其温度应力下的加速退化方程;通过步进应力加速退化试验获取了退化数据,并利用加速退化方程实现了步进应力加速退化数据向恒定应力加速退化数据的折算,利用伪失效寿命评估方法对氨氮水质监测仪进行了可靠性评估。研究表明,利用步进应力加速退化试验可以在较短的试验时间和较少的样本量情况下,实现对氨氮水质监测仪的可靠性评估。

关键词:可靠性评估;氨氮水质监测仪;加速退化试验;伪失效寿命

中图分类号:TH865

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0843-05

Step-up-stress accelerated degradation testing of ammonia-nitrogen water automatic monitor

YE Hong-bo¹, MIAO Jian², SHEN Guang-yue³, CHEN Wen-hua¹, PAN Jun¹

(1. Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang province institute of Metrology, Hangzhou 310000, China; 3. Mechanical and electrical engineering college, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at addressing the problem that how to assess the reliability of ammonia-nitrogen water automatic monitor (ANWAM) in a short period, the failure mechanism of ANWAM was firstly identified, and then a model of degradation path was established based on the degradation values which were the monitor errors of standard specimens, and a accelerated degradation equation under the temperature stress was established based on the theory of reaction kinetics. The testing data were obtained through conducting the step-up-stress accelerated degradation testing (ADT), and were transferred to the data which were equivalent to be obtained through constant stress ADT by using the accelerated degradation equation. The reliability of ANWAM was assessed according to the pseudo failure lifetime. The results indicate that the step-up-stress ADT can be used to assess the reliability of ANWAM under the condition that only a few samples and a short period are allowed to conduct the testing.

Key words: reliability assessment; ammonia-nitrogen water automatic monitor; accelerated degradation testing; pseudo-failure lifetime;

0 引言

氨氮水质监测仪用于环境污染物质氨氮浓度的监测,是环境质量监测与污染源排放监测控制的重要仪器。

其稳定可靠运行直接关系到对环境污染物的控制,但国内水质监测仪在产品设计阶段注重满足其功能需求,缺少可靠性的研究,无法评估其是否达到可靠性指标。通过现场统计数据或实验室模拟正常应力试验对氨氮水

收稿日期:2015-11-11

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ47076511);浙江省质量技术监督局重大专项(20130111)

作者简介:叶红波(1988-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事机电产品的可靠性方面的研究。E-mail:375772879@qq.com

通信联系人:潘骏,男,教授,硕士生导师。E-mail:panjun@zstu.edu.cn

质监测仪进行可靠性评价会花费很长的试验时间,很有可能可靠性试验未完成,新的监测仪又被设计出来,为此必须寻求能快速评定其可靠性的方法。

设备的某些性能指标会随着设备运行时间的增加而产生退化,对这些性能指标进行测量分析,可以推测出产品的可靠性信息^[1]。如肖坤等^[2]对某 O 型密封圈进行恒定应力加速退化试验,以永久压缩变形率为性能退化数据,利用伪失效寿命方法外推了其在正常应力下的寿命。钟强晖等^[3]提出了不假定退化轨道模型的评估方法,利用试验得到产品的退化信息,进而获得产品在各检测时刻的可靠度。Meeker 等^[4]在进行某印制电路板寿命试验时,基于化学反应规律建立了电路板绝缘材料的绝缘性能退化轨迹,并利用似然法对模型参数进行了估计。潘骏等^[5]通过步进应力加速退化试验对电连接器的接触可靠性进行了快速评估。邓爱民等^[6]采用温度作为加速应力,利用 Arrhenius 模型分别基于伪失效寿命分布和性能退化量分布对碳膜电阻器的可靠性进行了评估。汪亚顺等^[7-8]提出了基于蒙特卡洛仿真的退化试验及加速退化试验优化设计方法,将复杂的求目标函数解析式的过程转化为较易的退化数据仿真分析问题,降低了加速退化试验设计的难度,便于工程应用。

本研究通过对氨氮水质监测仪进行失效机理分析,建立以其对标准试样的示值误差为退化量的退化轨迹模型和温度应力下的加速退化方程,利用伪失效寿命评估方法对氨氮水质监测进行可靠性评估。

1 氨氮水质监测仪失效机理

氨氮水质监测仪由试剂贮存单元、采样计单元、反应检测单元、数据处理与显示单元和通讯单元组成,其中反应检测单元为核心组成部分。反应检测单元利用纳试剂分光光度法测量水质中的氨氮含量^[9],其工作原理如图 1 所示。

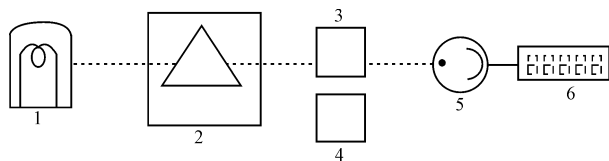


图 1 分光光度法工作原理

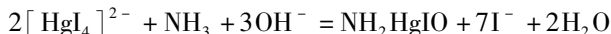
1—光源;2—单色器;3—吸收池;4—比色皿;

5—调制器;6—读数指示器

由光源经过单色器得到所需的波长 λ 的单色光,单色光通过吸收池,透射过的光信号通过调制器转化成电信号,最后经读数指示器显示被测水质的氨氮溶液的浓度。

在吸收池中氨氮溶液的游离氨 (NH_3) 和离子氨 (NH_4^+) 均会与纳氏试剂发生化学反应,生成棕红色

的络合物,其化学反应式为:



棕红色的络合物 NH_2HgIO 在波长 400 nm ~ 425 nm 下会被强烈地吸收,称为吸光物质,由上述的化学方程式可知,氨氮溶液的浓度 C_1 与反应生成的吸光物质的浓度 C 是成正比的,即 $C = lC_1$, l 为常数。

根据朗伯 (Lambert) - 比尔 (Beer) 定律可得溶液的吸光度 A 与吸光系数 ξ 、溶液层的厚度 L 及吸光物质的浓度 C 关系满足以下关系式:

$$A = \xi LC \quad (1)$$

由钠试剂分光光度法,可建立吸光度与对应的氨氮溶液浓度的显示值 $\overline{C}_2$ 之间的关系式为^[10]:

$$A = \varepsilon \overline{C}_2 \quad (2)$$

式中: ε —常数。

由此可知:

$$\overline{C}_2 = \frac{LC_1 l}{\varepsilon} \xi \quad (3)$$

则氨氮溶液浓度的显示值与吸光物质的吸光系数有关。

氨氮水质监测仪设计时为了减小监测误差,采用的是吸光物质的最大吸光波长 λ ,最大吸光波长 λ 与吸光系数 ξ 之间近似满足以下关系式^[11-12]:

$$\xi = \psi \lambda \quad (4)$$

光波的波长与单色器的色散元器件光栅有关,光栅是一块刻有大量平行等宽等距狭缝 (刻线) 的平面工程塑料,平行光通过光栅每个狭缝的衍射和各缝间的干涉形成不同波长的光谱,光栅方程为:

$$d(\sin \phi + \sin \varphi) = m \lambda \quad (5)$$

式中: d —光栅两狭缝的间距; ϕ —衍射角; φ —入射角,通常入射光为正射入 φ 为 0; m —光谱级数; λ —光波波长。

2 氨氮水质监测仪的退化模型

由氨氮水质监测仪的示值误差不得大于 10%^[13-14] 可知,

$$\Delta C_r = \frac{\overline{C}_2 - C_1}{C_1} \leq 10\% \quad (6)$$

式中: C_1 —标准试样氨氮溶液的浓度。

由式 (3 ~ 6) 可得:

$$\Delta C_r = \frac{Ll\psi(\sin \phi + \sin \varphi)}{\varepsilon m} d - 1 \quad (7)$$

式中: γ —常数, $\gamma = Ll\psi(\sin \phi + \sin \varphi)/\varepsilon m$ 。

因此,氨氮水质分析仪的示值误差取决于光栅两狭缝的间距 d 。

氨氮水质监测仪在工作时,由于单色器光栅是由工程塑料制成,在热和氧的作用下会发生化学反应,造成光栅两狭缝的间距 d 随时间变化,其规律满足函数关系式:

$$d = d_0 + \rho t \quad (8)$$

式中: d_0 —初始时刻狭缝间距; ρ —与温度有关的化学反应速率,满足阿伦尼斯方程:

$$\rho = M \exp(-\Delta E/(kT)) \quad (9)$$

式中: ΔE 中为激活能,eV; k —波尔兹曼常数; T —绝对温度,K; M —常数。

将式(8)代入式(7)整理得:

$$\Delta C_r = \rho \gamma t + (\gamma d_0 - 1) \quad (10)$$

令 $y = \Delta C_r$, $a = \rho \gamma$, $b = \gamma d_0 - 1$, 可得氨氮水质监测仪示值误差的退化模型为:

$$y = at + b \quad (11)$$

氨氮水质监测仪的加速退化方程为:

$$a = M \gamma \exp(-\Delta E/(kT)) \quad (12)$$

3 氨氮水质监测仪步进应力加速退化试验可靠性评估

3.1 氨氮水质监测仪步进应力加速退化试验

本研究将4台氨氮水质监测仪在 $T_1 = 50^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 60^\circ\text{C}$ 、 $T_3 = 70^\circ\text{C}$ 、 $T_4 = 80^\circ\text{C}$ 4个温度应力下进行步进应力加速退化试验,各应力试验截尾时间分别为 $\tau_1 = 350\text{ h}$ 、 $\tau_2 = 320\text{ h}$ 、 $\tau_3 = 315\text{ h}$ 、 $\tau_4 = 350\text{ h}$,各应力水平等间隔检测次数分别为 $n_1 = 7$ 、 $n_2 = 8$ 、 $n_3 = 11$ 、 $n_4 = 14$ 次。为了减少温度本身对监测的影响,本研究在最初监测时进行温度补偿,对氨氮水质监测仪进行校准,最后得到不同应力水平 T_i 下,每个检测时刻 $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}$ 时,第 k 台试样的性能退化量,记作 (t_{ij}, y_{ijk}) ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, 3, 4$)。

3.2 氨氮水质监测仪步进应力退化数据折算方法

氨氮水质监测仪在进行步进应力加速退化试验时,性能退化过程具有单调性。步进应力加速退化试验在各应力水平下不改变试验仪器的失效机理,因而加速退化数据在不同的应力下具有相同的分布形式。试验仪器的剩余寿命仅依赖于累计失效部分和当时的应力水平,与累计方式无关,为了便于试验数据的统计分析,将步进应力退化数据向恒定应力退化数据折算。

在每个测试点对试验仪器进行性能退化测试,得到每台仪器在不同应力、不同时刻的退化量 (t_{ij}, y_{ijk}) 。在 i 应力水平下,第 k 台仪器在 t_{ij} 时刻的退化数据观测值为 y_{ijk} ,此时,第 k 台仪器已经试验了 $\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{i-1} + t_{ij}$ 时间。令 $g = 1, 2, \dots, i-1$,第 k 台仪器分别在 T_g 应力下试验时间为 τ_g ,在应力水平 T_i 下试验时间为 t_{ij} 。由于各应力水平下仪器的性能退化轨迹仅依赖于当前应力水平与之前的退化量有关,与以往的退化轨迹无关。由退化模型可知,退化模型经适当变换可转变为一元线性形式。假设仪器在 g 应力水平中的退化斜

率为 θ_g ,在 i 应力水平中的退化斜率为 θ_i ,则在 g 应力水平下的性能退化增量为 $\tau_g \theta_g$,在 i 应力水平下的性能退化增量为 $t_{ij} \theta_i$ 。第 k 台仪器的初始性能退化量为 w_k ,可得到退化数据为 y_{ijk} :

$$y_{ijk} = w_k + \sum_{g=1}^{i-1} \tau_g \theta_g + t_{ij} \theta_i \quad (13)$$

第 k 台仪器在前 g 应力下的退化数据为:

$$y_{gk} = w_k + \sum_{g=1}^{k-1} \tau_g \theta_g \quad (14)$$

由此可以进一步将步进应力退化数据折算成恒定应力退化数据 (D_{ijk}) ,其折算公式为:

$$D_{ijk} = w_k + y_{ijk} - y_{gk} = w_i + t_{ij} \theta_i \quad (15)$$

3.3 基于伪失效寿命的氨氮水质监测仪可靠性评估

本研究将4个样本放入步入式高低温试验箱,现场图如图2所示。



图2 氨氮水质监测仪试验现场图

经步进加速退化试验得到4个样品示值误差的退化轨迹,求值误差随时间变化曲线图如图3所示。

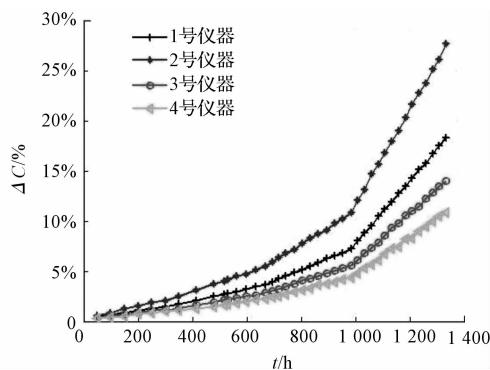


图3 示值误差随时间变化曲线

本研究对氨氮水质监测仪每个温度下的退化数据进行最小二乘法拟合,并对退化模型参数进行估计,各样本退化轨迹参数估计值如表1所示。通过查相关系数临界值表^[15]可知 $R_{0.1}^2 = 0.80538$,因为表1中的每个相关系数的绝对值均大于0.80538,氨氮水质监测仪退化轨迹方程的线性回归效果都是显著的,从而验证了通过失效机理推导的退化轨迹模型服从一次线性模型。

表 1 各样本退化轨迹参数估计值

编号	$S_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$			$S_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$			$S_3 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$			$S_4 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	0.004 0	0.248 8	0.997 8	0.006 2	0.259 2	0.998 3	0.011 3	0.268 4	0.999 3	0.031 4	0.289 8	0.999 5
2	0.006 4	0.231 5	0.994 8	0.009 1	0.265 0	0.996 9	0.016 9	0.315 9	0.998 5	0.047 4	0.394 5	0.999 2
3	0.003 2	0.204 7	0.985 0	0.004 7	0.183 5	0.994 8	0.008 8	0.195 6	0.998 9	0.024 3	0.138 9	0.998 6
4	0.002 6	0.170 5	0.981 5	0.003 8	0.099 9	0.993 0	0.006 8	0.079 8	0.995 5	0.018 8	0.031 9	0.996 7

本研究按照 3.2 节中介绍的数据折算方法对步进加速退化试验数据进行折算,将氨氮监测仪正常工作的失效阈值 $D_f = 10\%$ 代入退化模型,可得各样本在各温度应力水平下的伪失效寿命估计值 t_i ,结果如表 2 所示。

表 2 各样本在各应力下的伪失效寿命

温度 / $^{\circ}\text{C}$	1 号仪器	2 号仪器	3 号仪器	4 号仪器
	伪寿命 /h	伪寿命 /h	伪寿命 /h	伪寿命 /h
50	2 437.800	1 526.328	3 061.031	3 780.577
60	1 571.097	1 069.780	2 088.617	2 605.289
70	861.203 5	573.023 7	1 114.136	1 458.853
80	309.242 0	202.647 7	405.806 6	530.218 1

本研究通过对个应力水平下的伪失效寿命数据进行分布假设检验,验证其伪失效寿命是否满足两参数 Weibull 分布,同时利用最小二乘法对正常应力条件下的分布参数进行估计。

本研究对表 2 中的寿命数据进行分布假设检验,以 $\ln t_i$ 为横坐标,以 $\ln[-\ln(1-F(t_i))]$ 为纵坐标,检验结果如图 4 所示。

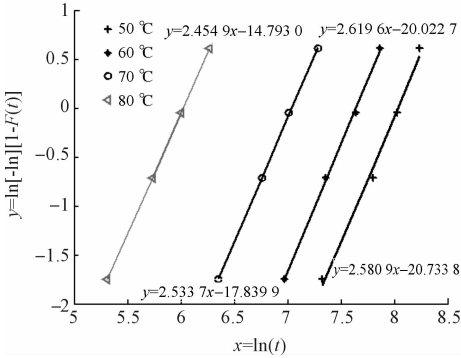


图 4 不同应力水平下伪失效寿命数据分布拟合优度检验

由图 4 可知,各应力水平下的伪寿命基本分布在一条直线上,可认为伪失效寿命基本服从两参数 Weibull 分布。利用最小二乘法估计得 Weibull 分布的形状参数 β_i 与特征寿命估计值 η_i 。其寿命分布参数估计值如表 3 所示。

表 3 寿命分布参数估计值

参数	$T_1 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_3 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_4 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
β_i	2.580 9	2.619 6	2.533 7	2.444 9
η_i	3 082.679	2 086.866	1 142.583	424.348 1

氨氮监测仪的寿命服从两参数 Weibull 分布,利用各应力下的估计参数外推正常应力 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的

寿命分布参数估计值为 $\beta_0 = 2.544\ 8, \eta_0 = 25\ 018.87\ \text{h}$,氨氮监测仪的寿命分布函数的参数估计值确定其可靠度函数 $R(t)$:

$$R(t) = \exp[-(t/\eta_0)^{\beta_0}] = e^{-(t/25\ 018.87)^{2.544\ 8}}$$

正常应力下氨氮水质监测仪的可靠度如图 5 所示。

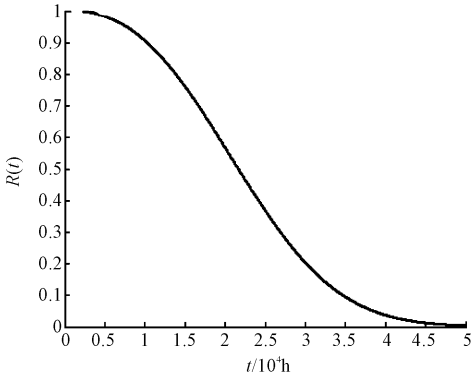


图 5 正常温度应力下氨氮监测仪的可靠度曲线

4 结束语

(1)本研究通过分析氨氮水质监测仪失效机理上,建立了以其对标准试样的示值误差为退化量的退化轨迹模型,并利用反应动力学理论建立了其温度应力下的加速退化方程;

(2)针对氨氮水质监测仪步进应力加速退化试验方法,本研究利用伪失效寿命评估方法对氨氮水质监测仪示值误差退化试验数据进行统计分析。

(3)本研究通过对氨氮水质监测仪实施步进加速退化试验,得到了其正常温度应力下的随时间变化的可靠度预测曲线。

(4)与传统加速寿命试验相比,本研究的试验时间大为缩短,为企业快速评估氨氮水质监测仪可靠性提供了一种可行的评估方法。

参考文献(References):

[1] 刘 彤,李华府.加速退化试验技术及其在加速计中的应用[J].兵工自动化,2015,34(12):9-12.
[2] 肖 坤,顾晓辉,彭 琛.基于恒定应力加速退化试验的某引信用 O 型橡胶密封圈可靠性评估[J].机械工程学报,2014,50(16):62-69.
[3] 钟强晖,张志华,吴和声.基于退化数据的可靠性评估方法探讨[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):2280-

2284.

[4] MEEKER W Q, LU V W J. An accelerated life test model based on reliability kinetics [J]. **Technometrics**. 1995, 37 (2):133-146.

[5] 潘 骏,刘红杰,陈文华,等. 基于步进加速退化试验的航天电连接器接触可靠性评估[J]. 中国机械工程,2011,22 (10):1197-1200.

[6] 邓爱民,陈 循,张春华,汪亚顺. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报,2006,27(3):546-552.

[7] 汪亚顺,张春华,陈 循. 仿真基退化试验优化设计方法研究[J]. 宇航学报. 2008,29(1):380-384.

[8] 石朝骥,李自立. 基于最小割集的系统可靠性评论方法研究[J]. 机械,2014,41(17):55-59.

[9] 国家环境保护部. HJ 535-2009 水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法[S]. 北京:中国环境科学出版社,2009.

[10] 崔家荣. 水中氨氮纳氏试剂分光光度法测定[J]. 现代农业科技,2008(8):208-209.

[11] 雷中达,赵保丹,周 进. 水溶液中染料吸光度与浓度的非关系性关系[J]. 实验室研究与探索,2014,33(2):22-27.

[12] 夏 焱,张 烨,汪 峰. 溶液调湿空调系统浓度差的变化规律研究[J]. 流体机械,2015,43(11):78-81.

[13] 国家质量监督检验检疫总局,JJF 1424-2013《氨氮自动监测仪型式评价大纲》[S]. 北京:中国标准出版社,2013.

[14] 国家质量监督检验检疫总局,JJG 631-2013《氨氮自动监测仪》[S]. 北京:中国标准出版社,2013.

[15] 陈彦光. 地理数学方法[M]. 北京:科学出版社. 2011.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

叶红波,缪 建,沈广月,等. 氨氮水质监测仪步进应力加速退化试验研究[J]. 机电工程,2016,33(7):843-847.
YE Hong-bo, MIAO Jian, Chen Wen-hua, et al. Step-up-stress accelerated degradation testing of ammonia-nitrogen water automatic monitor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):843-847.
《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 826 页)

4 结束语

(1)针对电阻点焊超声图像在表征远、近场时灰度值不同,以及特征目标图像的边界不清晰,本研究提出一种基于小波变换的不同子带信号的差异性补偿方法,提高了电阻点焊超声成像的对比度分辨率。

(2)在超声 C 扫描成像方法的基础上,本研究提出了一种准三维电阻点焊超声成像技术,对电阻点焊相关参数定量化检测技术进行了研究,与实验结果对比、验证,证明本研​​究所述方法可行、有效。

(3)本研究提出的基于小波变换的超声成像对比度分辨率提高技术,目前仍然是对一维的 A 扫描信号进行处理,该方法效率较低。由于小波变换已可应用于二维图像的处理,若后续将该方法拓展至二维图像处理,将提高超声回波的信号处理效率、改善实时性。

参考文献(References):

[1] 杨立军. 材料连接设备及工艺[M]. 北京:机械工业出版社,2008

[2] 王志华,杜双明. 焊接工艺[M]. 北京:北京师范大学出版社,2011

[3] FENG A, BABU S, RIEMER B W. Modeling of resisittance spot welds – process and performance [J]. **Welding Research Abroad**,2003,49(2):29-35

[4] 陈振华,史耀武,赵海燕. 薄镀锌钢板点焊超声成像分析[J]. 机械工程学报,2009,45(12):274-278.

[5] 曾学花,徐志农. 碳纤维复合材料构件超声自动检测系统[J]. 组合机床与自动化加工技术,2007(8):47-50.

[6] 赵玉莹,孙伟. 复合材料夹层件超声波检测技术研究[C]//第十四届全国疲劳与断裂学术会议. 中国山东:(出版者不详),2008.

[7] 穆洪彬,齐世海,孟晓梅,等. 复杂电磁环境下的超声探伤研究[J]. 兵工自动化,2014,33(1):68-71.

[8] JHANG K, JANG H, PARK B, et al. Wavelet analysis based deconvolution to improve the resolution of scanning a-coustic microscope images for the inspection of thin die layer in semiconductor [J]. **NDT & E International**, 2002, 35 (8):549-557.

[9] 仇 傲,周山宏,刘春梅. 数字化 B 超中的频率补偿滤波[J]. 电子科技大学学报,2007,36(4):798-800.

[10] 张 庆,李卓凡,王小怀. 声速测定中声强的综合衰减系数的测定[J]. 大学物理实验. 2005,18(1):25-27.

[11] 赵新玉,刚 铁,袁 媛. 薄钢板点焊接头超声信号分析[J]. 焊接学报,2005,26(11):101-105.

[编辑:李 辉]