

文章编号 1004-924X(2015)增-0432-07

波形相关性算法在超声波测厚中的应用

王 晋^{1*}, 郑 凯¹, 王海涛³, 宋 伟², 任 毅¹

- (1. 江苏省特种设备安全监督检测研究院, 南京 江苏 210036;
2. 南通友联数码技术开发有限公司, 南通 江苏 226000;
3. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 江苏 210016)

摘要: 压缩天然气(CNG)地下储气井由于长期受井中的积液和地下水的作用,其管道壁会出现局部变薄,而剩余厚度决定了管道的后续使用年限。本文针对采用传统的超声波检测方法测量管壁厚度,具有数据量大、干扰多、精度较低等缺点,提出一种改进测厚算法。该算法使用特征值查找和波形相关性算法来获取回波时间。描述了检测原理和相关性算法,分析了影响测量精度的因素。以一段标样管为检测对象,进行了检测和结果分析。最后,将提出的算法运用于储气井检测现场。通过对江苏省内 6 个加气站进行实地试验,验证了提出的波形相关性算法的精确性,其测厚精度可达到 0.03 mm。提出的算法解决了目前储气井腐蚀检测数据处理算法易出错,精度不高等问题。

关键词: 储气井;管道;管壁厚度;超声波测厚;波形相关性算法

中图分类号: TB559;TH821.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0432

Application of waveform correlation algorithm in ultrasonic thickness testing

WANG Jin^{1*}, ZHENG Kai¹, WANG Hai-tao³, SONG Wei², REN Yi¹

- (1. *Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China;*
 2. *Nantong Union Digital Technology Development Company, Nantong 226000, China;*
 3. *College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)*
- * *Corresponding author, E-mail:1821238616@qq.com*

Abstract: The pipe wall of Compressed Natural Gas (CNG) storage well will be thinned locally because of the corrosion of drain fluids and underground water in the well for a long time, and the remaining thickness of the pipe wall can decide the service life of pipe. This paper proposes an improved thickness measuring method to overcome the shortcoming of the traditional ultrasonic detection method in larger data mounts, much interference and lower measuring accuracy. In the proposed algorithm, the eigenvalue search and waveform correlation algorithm are exploited for echo time acquisi-

收稿日期: 2015-04-05; **修订日期:** 2015-05-10.

基金项目: 江苏省科技支撑计划(社会发展)项目(No. BE2013727);江苏省重点研发计划(社会发展)项目(No. BE2015727);质检公益性行业科研专项(No. 201410028, 201510068);国家安监局关键技术资助项目(山东, 0143G2014AQ)

tion and theoretical analysis. The detection principle and corresponding algorithm are described, and effect factors on measuring accuracy is analyzed. By taking a sample tube as the testing object, the experiments are carried out. Finally, the algorithm is used in the field detection of the CNG storage well. The CNG storage wells of 6 gas stations in Jiangsu Province is detected, and the feasibility of proposed algorithm based on waveform correlation was verified. The results show that the accuracy of thickness measuring is up to 0.03 mm, which is better than others in pipe erosion thickness testing.

Key words: storage well; pipe ; pipe wall thickness; ultrasonic thickness testing; waveform correlation algorithm

1 引 言

CNG 地下高压储气井是近年来迅速发展起来的一种全新的储气方式,目前,该技术已列入石油天然气行业标准《高压气地下储气井》(SY/T 6535-2002)中。通过对储气井近 10 年来的运行情况分析,CNG 储气井深埋于地下,虽然有固井等措施隔离井管与泥土,但不能保证在其运行期间井管外壁不会产生腐蚀。因此,需要通过检测装置对储气井内壁腐蚀余量作定期测定,以提高管道维护效率,最大限度延长 CNG 储气井的使用寿命^[1-4]。

当前,CNG 储气井内壁腐蚀余量的测定通常是通过测量其壁厚来进行的。如果储气井安置在地面,可以使用测厚仪在其外壁测量其厚度;如果储气井安置在地下,则只能在储气井内壁对其进行测量得到其厚度值。目前,应用于工业中的储气井其外径只有 177.8 mm 和 244.5 mm 规格,其深度从数十米到 300 m 不等,普通设备无法满足其测量要求。

本文中采用的测厚技术是超声检测技术,是管道腐蚀检测重要的方法之一,具有速度快、灵敏度高等优点^[5-6]。利用超声检测技术可以实现对储气井内壁腐蚀余量的测量,其检测原理是将储气井内外壁对超声波信号反射的时间间隔与超声波信号在井壁材料中传播的声速相乘,得到储气井内壁的厚度,从而可以确定内壁腐蚀情况。

在利用超声波检测过程中,当探头检测到由储气井内外壁反射回来的超声回波后,这些超声回波信号不可避免的都会含有各种噪声等干扰信号。因此,通过一系列方法准确的实现回波信号

的检测、识别和提取显得非常重要^[7]。通常情况下先采用采样、滤波、隔离、放大等方法来抑制干扰信号,得到测厚的超声回波信号^[8],再通过测厚算法对得到的超声回波信号进行分析,得到所需要的厚度值。

对储气井进行检测实验过程中,利用传统的测厚算法所获得的数据存在误差大、效率低等问题。因此,需要寻求更为简便、准确的测厚算法来对采集到的回波信号进行处理分析,进一步提高检测系统的效率和测量精度^[9-13]。

2 检测原理及基本算法

2.1 检测原理

储气井超声波检测系统的检测原理是:超声纵波直探头发射超声波,经过摆放倾斜 45° 的反射镜, 45° 的反射结构会将超声波反射成沿储气井径向入射的波束如图 1(b)所示。超声波信号到达储气井内壁表面反射一个回波 S,超声波在井壁材料内继续传播,直至碰到储气井壁的外壁表面又反射一个回波 B,如图 1(a)所示。当检测探头检测到回波 S 和回波 B 后,将数据经过复合光

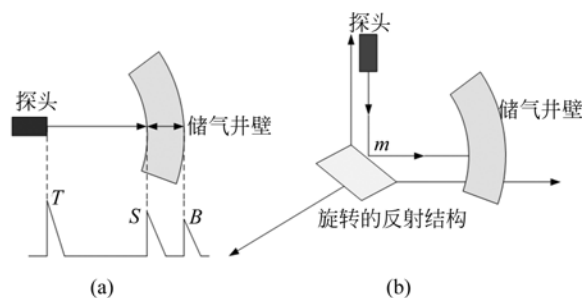


图 1 检测系统工作原理示意图

Fig. 1 Working principle schematic diagram of detection system

缆传输到 PC 机中的上位机进行处理分析。通过观察和计算回波 S 与回波 B 的时间差和幅值,可以得到储气井的内径、外径和壁厚等信息,实现了储气井壁厚的测量。

2.2 基本测厚算法

常用的超声测厚算法有始波回波法和回波回波法,如图 2 所示。这两种方法都是预先设定一个阈值,在设定范围内找到 1 个或 2 个高于阈值的回波。始波回波法的测量原理是根据第一个回波与始波的传输时间差来计算出厚度;而回波回波法的测量原理则是根据储气井井壁的一次回波与二次回波的传输时间差来计算出厚度。通常回波回波法测得的结果比始波回波法更精确。

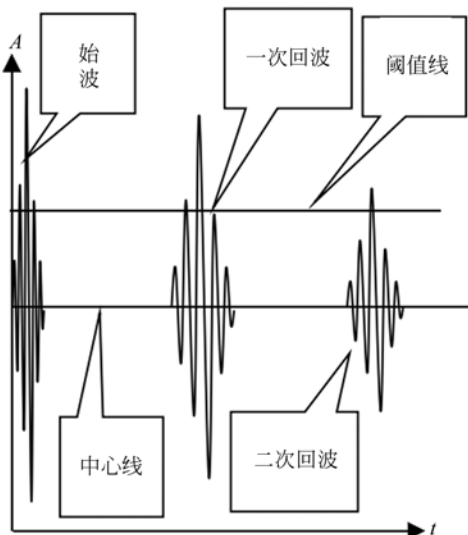


图 2 基本测厚算法示意图

Fig. 2 Thickness measurement algorithm schematic

始波回波法计算厚度值:

$$TH_1 = (T_{F1} - t_0) \times v, \quad (1)$$

回波回波法计算厚度值:

$$TH_2 = (T_{F2} - T_{F1}) \times v, \quad (2)$$

其中: TH_1 、 TH_2 为计算的壁厚; T_{F1} 为内壁表面一次回波时间; T_{F2} 为外壁表面二次回波时间; t_0 为检测仪器零点; v 为井壁材料中的超声声速。

仪器零点 t_0 需要预先使用试块进行校准,超声声速 v 可以使用试块(与井壁相同材质)进行校准或者直接输入已知量。

2.3 影响测量精度的因素

2.3.1 检测仪灵敏度

回波时间是取回波与阈值线的第一个交点处的时间,由图 2 可见,由于回波均有多个峰值,如果检测仪器灵敏度提高,该交点就会前移,导致回波时间发生改变,这就导致测量的厚度出现了变化,使得测量精度会改变。

2.3.2 检测设备晃动

从基本测厚算法的原理可知,在声速确定的情况下,测厚精度取决于获取到回波对应时间的精度,而基本测厚算法中用于获取回波时间的算法存在不足,在稳定测量情况下,其精度仅能达到 0.1 mm,这也是工业中常用超声测厚仪的测量精度。而对于 CNG 储气井检测系统,其检测深度可达 300 m。系统选用的耦合剂是清水,检测方向由下而上,检测时使用电机拉动设备上升。在设备上升过程中,不可避免的会出现晃动,随之回波高度会不断的发生变化。如果采用基本测厚算法进行壁厚测量,实验证明其精度会进一步降低到 0.5 mm,有时甚至更低。

2.3.3 检测偏心

从图 2 可以看出,若回波时间取该回波最高峰值所对应的的时间,在仪器检测的动态范围内,如果能准确的获取回波的最高值,那么回波高度变化就不会影响回波时间,其测量精度就能得到保证。

在利用检测设备进行检测时,不可避免的存在偏心现象,检测井壁一周范围内,一端回波高度较高时,另一端回波高度就会较低,如图 3、图 4 所示。为了有效检测回波较低一端,就需要提高检测仪器的灵敏度。但是在仪器灵敏度提高到一定程度后,回波高度较高一边就会达到饱和状态,如图 3 所示,此时将不能准确的获取回波最高峰值所对应的的时间。



图 3 回波高度最高达到饱和

Fig. 3 Echo height up to saturation

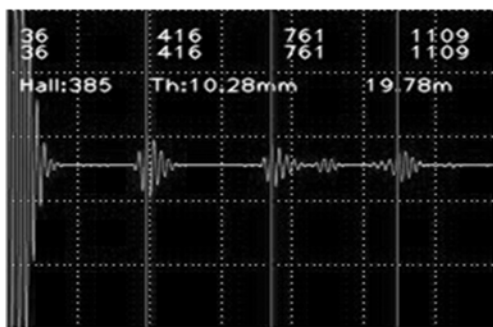


图 4 另一端回波高度较低
Fig. 4 The other end of echo height lower

3 改进型测厚算法

3.1 跟踪测厚算法及其改进

跟踪测厚算法是通过计算超声波由井壁反射回来的一次回波和二次回波中最高波峰之间的时间间隔。在经过大量的现场实验和计算测取储气井的壁厚,对跟踪算法作了进一步的改进,由跟踪最高波峰改为跟踪第二个正半波峰,如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在回波最高波峰达到饱和状态时,第二个峰值波还未达到饱和,采用这种改进后的测厚算法可以提高测量精度。但是,如果仪器灵敏度再进一步提高,第二个峰值波也可能会达到饱和,这样就不能准确获得回波峰值的时间,这又成为误差的一个来源。

经过反复试验与数据分析,提出了利用回波中心线取代回波峰值来进行数据测量。当灵敏度

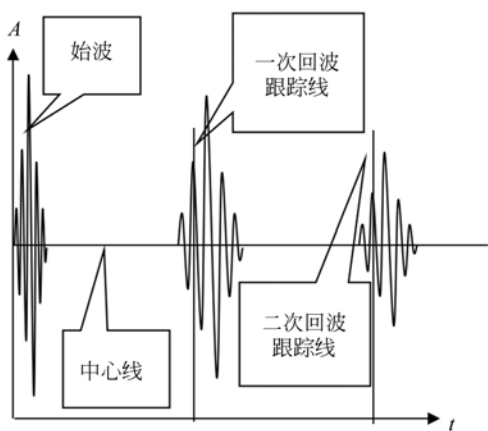


图 5 跟踪测厚算法改进示意
Fig. 5 Tracking thickness measurements indicate improved algorithm

发生变化时,回波高度会发生变化,而回波过中心线的位置却几乎不会发生变化。因此,测厚算法由取回波峰值所对应的时间改为取回波过中心线所对应的时间,这样可以得到更稳定的精度。

3.2 波形相关性算法

由于储气井井壁反射面可能附着油污或者检测设备摆放引起的角度变化等,都会使波形出现畸变。在对储气井进行井壁测厚过程中,仪器探头接收到超声回波信号的形状并不是理想的振荡波形。前面所述改进的算法将不能保证获取到准确值,所以要进一步优化算法。

3.2.1 解决方法

为了改进波形畸变可能引起的误差,提出了以下解决方法:一是采用宽频窄脉冲探头,回波的周期数由 4 或 5 个减少到 1 个半或者 2 个,这样可以更好的查找到有效回波,从而得到准确的回波时间值。二是采用波形相关性算法,先找到井壁反射回的一次回波和二次回波的位置,然后进行相关计算,找到一次回波与二次回波相关性最高的位置值,两处所对应的时间差即为所需要的回波时间差。

3.2.2 相关性算法原理

相关性^[14-15]可以简单描述为 2 组信号的相似程度,假定有 2 组信号,分别用 $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示,存在一个系数 ρ_{xy} 。

$$\rho_{xy} = \frac{(\sum x(t)y(t+\tau))^2}{\sum (x(t))^2 \sum (y(t+\tau))^2} (|\rho_{xy}| \leq 1), \tag{3}$$

当 $|\rho_{xy}| = 1$ 两信号完全相关 ($|\rho_{xy}|$ 越大表示相关程度越好);

当 $|\rho_{xy}| = 0$ 两信号完全不相关;

当 $0 < |\rho_{xy}| < 1$ 两信号不完全相关。

超声波测厚原理为井内壁表面反射的一次回波和外壁表面反射的二次回波都是超声波从内井壁表面入射到外井壁表面再反射。理论上,二次回波比一次回波多了一倍的声程,不考虑井壁内材质的衰减,接收到的两组波形仅高度不同,其他应该完全一致,即其是线性相关,可以通过相关性算法来解决测量结果精度不高问题。

波形相关性算法流程图,如图 6 所示。设定一次回波信号为 $x(t)$ 、二次回波信号为 $y(t)$,其长度均为 len ,一次回波信号的起点从 t_1 开始,即

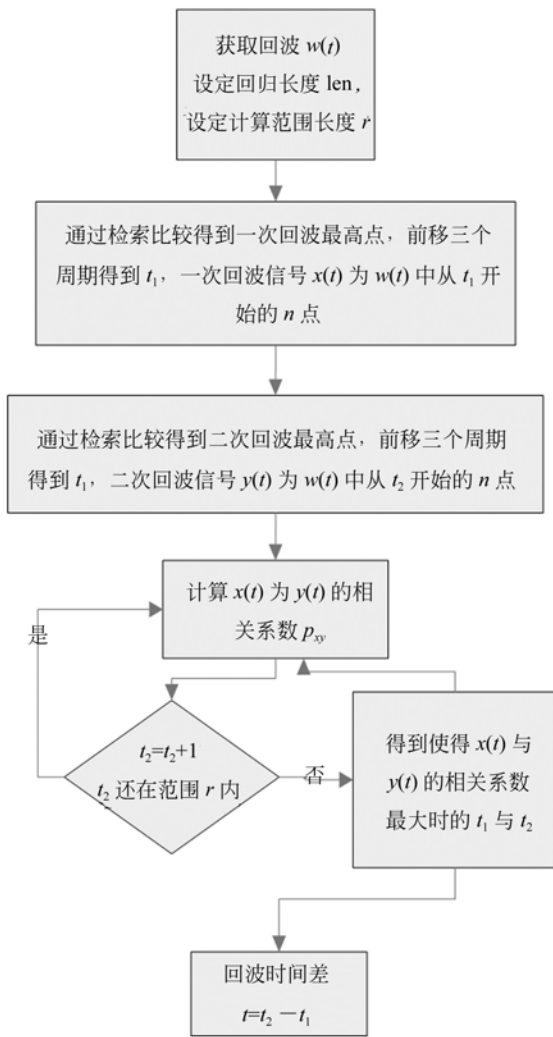


图 6 波形相关性算法流程图

Fig. 6 Waveform correlation algorithm flowchart

$x(t_1)$, 二次回波信号的起点从 t_2 开始, 即 $y(t_2)$ 。通过计算 $x(t)$ 和 $y(t)$ 两组信号之间的相关系数, 当两组信号相关程度最好时, 此时 t_1 、 t_2 的差值即为两回波的时间差, 就得到了超声波在管壁内的行进时长, 通过计算即可得到管壁的厚度值。

经过现场实际测量储气井的井壁厚度, 利用上面所述的几种算法对数据进行处理, 通过比较最后得到的厚度值和测量的实际壁厚值, 可以发现, 波形相关性算法处理数据后得到的结果较其他几种算法更加准确。在 3.2.3 节的检测结果分析中, 采用的算法是波形相关性算法。

3.2.3 检测结果分析

利用储气井检测系统对标样管进行检测, 将

采集到的数据通过复合光缆传到井上, 采用上述相关性算法进行数据处理, 得到了标样管的井壁厚度云图, 如图 7 所示, 从储气井井壁厚度云图中可明确的看到标样管井壁厚度的改变。

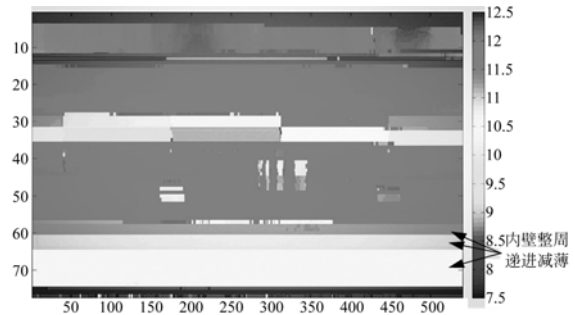


图 7 标样管管壁厚度云图

Fig. 7 Standard pipe wall thickness cloud

由于标样管上缺陷种类和数据较多, 选用已设定的标样管内壁整周递进减薄处的缺陷来作分析, 考察该算法所能达到的精度。

根据厚度计算公式:

$$d = \frac{\Phi_{标准} - \Phi_{检测}}{2} \quad (4)$$

标样管内壁整周递进减薄处直径分别为: $\Phi 221.50$, $\Phi 222.5$ 和 $\Phi 223.50$ 。

内壁整周递进减薄处壁厚分别为: $(244.5 - 221.47)/2 = 11.515 \text{ mm}$; $(244.5 - 222.59)/2 = 10.985 \text{ mm}$; $(244.5 - 223.51)/2 = 10.495 \text{ mm}$ 。

利用储气井检测系统对该标样管整周递进减薄处进行检测, 通过探头接收到超声回波信息, 利用文中提出的波形相关性算法进行数据处理, 计算得到厚度值分别为 11.54 mm, 11.06 mm, 10.56 mm; 与真实值偏差分别为 +0.03 mm, +0.08 mm, +0.07 mm。

4 结 论

本文提出了储气井井壁测厚数据处理所采用的一些改进算法和波形相关性算法, 并将其运用到储气井检测现场, 经过标样管的测厚精度校准, 以及在江苏省内 6 个加气站的实地大量的试验, 波形相关性算法精确性得到了验证, 测厚精度可达到 0.03 mm。解决了目前储气井腐蚀检测数据处理算法精度不高等问题。

参考文献:

- [1] 黄明珠,程宗明. 储存车用 CGN 的最佳选择—地下储气井[J]. 中国能源,2002,(4):34-35.
HUANG M ZH, CHENG Z M. Storage cart choice CGN with an underground gas storage wells [J]. *China Energy*, 2002,(4):34-35. (in Chinese)
- [2] 韩占群. CNG 加气站地下储气井安全分析与评价[D]. 成都:西华大学,2008.
HAN Z Q. Analysis and evaluation of station gas storage well [D]. *Chengdu: Xihua University*, 2008. (in Chinese)
- [3] 王珩,苏真伟,卫攸宁,等. CNG 储气井井壁腐蚀检测系统[J]. 四川大学学报(工程科学版),2011,43(6): 243-247.
WANG Y, SU ZH W, WEI Y N, *et al.*. CNG storage wells wall corrosion detection system [J]. *Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011,43(6): 243-247. (in Chinese)
- [4] 马宁,张帆. CNG 地下储气井腐蚀与防护措施[J]. 化工时刊,2011,25(6): 56-59.
MA N, ZHANG F. CNG underground storage wells corrosion and protection measures [J]. *Chemical Industry Times*, 2011,25(6): 56-59. (in Chinese)
- [5] SHUFEN Q, LIU J, JIA G F. Study of submarine pipeline corrosion based on ultrasonic detection and wavelet[C]. *Analysis/Proceeding of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling Taiyuan*, 2010: 440-444.
- [6] LI CH G. *Synthetical NDT and image processing for weld joint of pipeline* [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [7] GIUNTA G. Fast Estimators of Time Delay and Doppler Stretch Based On Discrete-time Methods [J]. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 1998, 46(7): 1785-1797.
- [8] 普罗奇斯 JG. 数字信号处理:原理、算法与应用[M]. 张晓林译. 北京:电子工业出版社,2004: 326-406.
General Bridges, JG. *Digital Signal Processing: Theory, Algorithms and Applications* [M]. Zhang X L translation. Beijing:Electronic Industry Press, 2004,326-406. (in Chinese)
- [9] 葛新成,罗大成,曹勇. 相关函数在数字信号处理中的应用[J]. 电光与控制,2006,(6):78-80,85.
GE X C, LUO D C, CAO Y, *et al.*. Related functions in digital signal processing [J]. *Electro-optical and Control*, 2006, (6):78-80,85. (in Chinese)
- [10] 于文斌,郭志忠. 相关函数在误差测量中的应用分析[J]. 电测与仪表,2004,141(458):11-13.
YU W B, GUO ZH ZH. Analysis of correlation function used in error measurement [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2004, 141(458):11-13. (in Chinese)
- [11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2003: 34-37.
HU G SH. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2003: 34-37 (in Chinese)
- [12] 宗孔德,胡广书. 数字信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
ZONG K D, HU G S, LIU Q K. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 李娅,陈飞,陈宏. 时间序列自相关函数的局部影响分析[J]. 云南大学学报,2002,124(6): 409-413.
LI Y, CHEN F, CHEN H. Since local influence time series analysis [J]. *Yunnan University*, 2002, 124(6): 409-413. (in Chinese)
- [14] 胡永峰,石景波. 一种应用于超声波检测中的自相关算法[J]. 现代电子技术,2005,(8):70-72.
ZHANG Y F, SHI J B. One kind of application of ultrasonic testing of the self-correlation algorithm [J]. *Modern Electronic Technology*, 2005, (8) : 70-72. (in Chinese)
- [15] 孙秋菊,韩焱. 信号相关性分析及其在超声检测中的应用[J]. 计量与测试技术,2005,(12):28-29.
SUN Q J, HAN Y, CHEN H. Correlation analysis signal and its application in ultrasonic testing [J]. *Measurement and Testing Technology*, 2005, (12): 28-29. (in Chinese)

作者简介:



王 晋(1968—),男,江苏溧阳人,1990年于镇江船舶学院,获学士学位,高级工程师。江苏省特种设备安全监督检验研究院直属分院技术负责人。现从事特种设备检验检测及鉴定评审工作。Email: 1821238616@qq.com



王海涛(1968—),江苏溧阳人,博士,南京航空航天大学航天学院副院长,教授,2002年6月在中科院获得博士学位,主要从事电磁、超声、激光超声检测技术、无损检测技术的研究。Email: htwang2002@126.com



郑 凯(1967—),男,江苏南京人,博士,研究员,1989年南京化工学院化工机械专业获学士学位,2006年南京大学声学所博士毕业,获理学博士学位。现在江苏省特种设备安全监督检验研究院从事超声、射线、光热等方面无损检测新技术研究与应用。Email: kai.zheng@163.com