

基于电磁超声兰姆波的铝合金板材小缺陷检测技术研究

梁慧敏, 邓超然, 康 磊, 汪开灿, 翟国富

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:电磁超声技术因其无需耦合剂等优点而在无损检测与无损评估领域获得广泛应用。在分析铝合金板材中电磁超声兰姆波激发原理的基础上, 结合兰姆波与缺陷的作用机理, 建立了电磁超声兰姆波三维有限元声场模型, 分析了利用电磁超声换能器检测铝合金板材小缺陷的可行性。针对 GJB3384—98 的检测要求, 设计了可用于检测直径为 1 mm 的小型通孔缺陷的电磁超声兰姆波换能器。在此基础上研制了基于电磁超声兰姆波技术的铝合金板材检测样机。实验表明, 该样机不仅能够有效检测出 GJB3384—98 规定的小型通孔, 也能检测出长度为 4 mm、槽深为 0.4 mm 的槽型缺陷, 为基于电磁超声技术的铝合金板材小缺陷检测的工程应用奠定了基础。

关键词:电磁超声; 电磁超声换能器; 兰姆波; 铝合金板材; 小缺陷检测

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2016)09-0045-05

Research on Detection of Small Defects of Aluminum Plates Based on Electromagnetic Ultrasonic Lamb Wave

LIANG Hui-min, DENG Chao-ran, KANG Lei, WANG Kai-can, ZHAI Guo-fu

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Due to the advantage of being free couplant, electromagnetic ultrasonic technique has been widely utilized in the nondestructive testing and nondestructive evaluation fields. Based on the excitation principle of the lamb-wave electromagnetic acoustic transducers (EMATs), a 3-D finite element model was implemented to study the feasibility of the detection of small defects of aluminum plates by studying the interaction principle of Lamb wave with defects. Lamb-wave EMATs was designed to detect a small through hole with 1mm in diameter, served as a standard defect in GJB3384—98. A detecting device prototype with the transducers mentioned above was developed. Experiments show that the prototype can not only effectively detect the small throughhole, but also be capable of detecting a slot with length of 4mm and depth of 0.4 mm. The research lays a foundation for the industrial applications of the detection of small defects based on electromagnetic ultrasonic technology.

Keywords: electromagnetic ultrasound; electromagnetic acoustic transducer; Lamb wave; aluminum plate; small defects detecting

0 引言

铝合金板材在航空、航天、军事工业中应用广泛^[1]。然而, 由于加工工艺所限, 在铝合金板材的生产过程中不可避免的会出现气泡、裂纹等缺陷^[2]。因此, 采用无损检测技术对铝板进行检测对保证铝板的质量具有重要意义。由于兰姆波具有传播距离远、能量在整个板厚上都有分布等优势, 在板材的检测中得到越来越多的应用。利用传统的压电超声技术进行检测需要在被测板材上涂抹耦合剂, 检测效率低且易造成漏检或误检。电磁超声技术无需涂抹耦合剂, 简化了检测步骤, 可有效提升检测效率, 降低检测成本,

并可将超声检测应用于高温等特殊场合^[3]。

目前, 国内的薄铝板检测标准主要参考 GJB3384—98《金属薄板兰姆波检验方法》(以下简称“方法”)。该方法适用板厚范围为 0.5~6 mm, 规定的缺陷直径为 1 mm 的通孔型缺陷^[4]。对于这种尺寸的缺陷, 应采用波长较小的兰姆波进行检测。由兰姆波的激发曲线可知, 在板厚一定的情况下, 波长越小, 频率越高, 频厚积也越高。因此, 对 GJB3384—98 中所规定的缺陷, 应采用频厚积较高的兰姆波进行检测。但是电磁超声兰姆波换能器存在换能效率低、频率较高时激发难度大等问题, 因此目前国内外的研究主要集中在频率小于 1 MHz, 波长大于 10 mm, 频厚积小于 4 MHz·mm 的低频厚积范围^[5-7]。近年来, 随着电子技术的发展, 国内外学者也开始研究高频厚积时的兰姆

波的特性。印度的 DhayalanRatnam 等人利用电磁超声兰姆波换能器在 10mm 厚的铝板上激发出频厚积为 10~20 MHz·mm 兰姆波,并分析了将高频厚积兰姆波应用于检测缺陷的可能性^[8]。但目前鲜有相关产品或者样机的报道。因此,研究此类型缺陷的电磁超声兰姆波检测技术对扩展电磁超声兰姆波检测技术的适用范围、提高薄铝合金板材的产品质量具有重要意义。

1 电磁超声兰姆波换能器结构及激发原理

电磁超声兰姆波换能器一般由永磁体、曲折线圈和待测试件组成。其结构如图 1 所示。 L 是曲折线圈的线间距, i 是通入曲折线圈的高频大功率电流。本文所研究的铝合金板材为非铁磁性材料。EMAT 在非铁磁性材料上激发出超声波主要为洛伦兹力机理,因此本文仅对洛伦兹力机理进行分析。

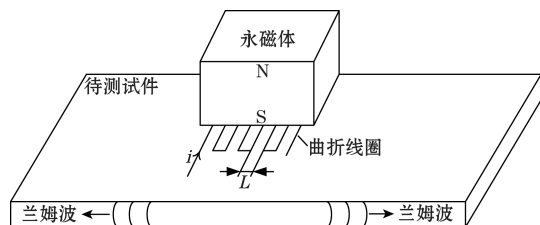


图 1 电磁超声兰姆波换能器结构

基于静磁场洛伦兹力的兰姆波激发原理如图 2 所示。 J 是通入曲折线圈中的激励电流密度, J_e 是试件内部感生的涡流, B_s 是永磁体所提供的静磁场磁通密度,其方向垂直于试件上表面。涡流在 B_s 中会受到周期性的洛伦兹力的作用而引起质点的振动,振动会以声波的形式传播出去,在板材上下表面反射而最终耦合合成兰姆波^[10]。

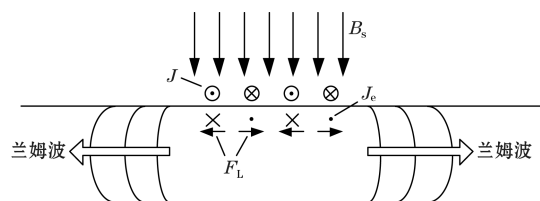


图 2 铝板中电磁超声兰姆波激发原理

铝合金板材中,洛伦兹力的产生可以分为涡流在静磁场受到的洛伦兹力 f_s 以及涡流在线圈产生的交变磁场中受到的洛伦兹力 f_d 。在线圈中通入的电流峰值小于 100 A 时, f_d 通常可以忽略^[9]。本文采用的发射电路最大输出电流为峰峰值 60 A,因此将忽略涡流在交变磁场中受到的洛伦兹力,即涡流在铝板中所受洛伦兹力 F_L 可以近似表示为

$$F_L \approx f_s \quad (1)$$

2 换能器设计

2.1 兰姆波激发曲线

相比于在无限大介质中传播的体波,兰姆波在传播过程中受介质形状的影响较大,但二者均属于机械波,都受到同一组波动方程的控制^[11],仅仅是在求解过程中边界条件有所不同。式(2)为兰姆波的特征方程。

$$\frac{\tan(k_{zs}h)}{\tan(k_{zl}h)} = -\left[\frac{4k^2k_{zs}k_{zl}}{(K^2-k^2)^2}\right]^{\pm 1} \quad (2)$$

$$k_{zs} = \sqrt{k_s^2 - k^2} \quad (3)$$

$$\text{式中 } k_s = \frac{\omega}{c_s}。$$

$$k_{zl} = \sqrt{k_l^2 - k^2} \quad (4)$$

$$\text{式中 } k_l = \frac{\omega}{c_l}。$$

式(2)描述了角频率 ω 、波数 k 和板厚 d 之间的关系方程,由于 ω 和 d 以及 k 和 d 总以乘积形式出现,因此式(2)可以看成是 ωh 和 kh 之间的关系方程。利用式(5)和式(6)可以把式(2)转化成以频厚积 fd 和距厚比 L/d 为自变量的形式^[10]:

$$fd = \frac{\omega h}{\pi} \quad (5)$$

$$\frac{L}{d} = \frac{\pi}{2kh} \quad (6)$$

对式(2)进行数值求解,可以得到图 3 所示的激发曲线。在板厚确定的情况下,给定兰姆波模式及波长,可以确定兰姆波的工作频率。

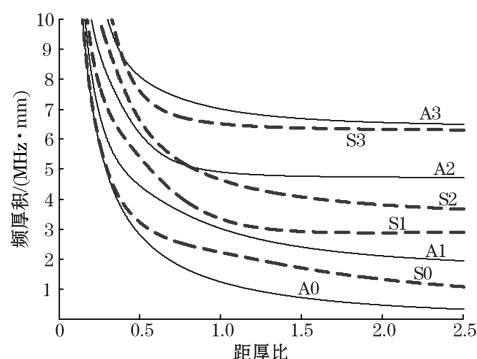


图 3 兰姆波激发曲线

从图 3 可以看出,在板材厚度确定的情况下,随着波长变短,所激发的兰姆波的频率也在迅速升高且兰姆波的模式也越来越难以区分,多模式现象明显,难以激发单一模式的兰姆波。

2.2 三维仿真模型建立

利用 ABAQUS 软件建立三维时域声场仿真模型。ABAQUS 软件是目前适用范围最广的有限元仿真软件之一,目前广泛应用于结构场、流体场等的仿真中。

目前该软件已经应用于电磁超声声场仿真分析中^[12-13]。

兰姆波的波长受到线圈参数的影响,因此在选定仿真的波长范围时,需要考虑线圈参数的限制。由于PCB线圈具有容易加工、批次一致性好以及线长、线宽等参数设置简单等优点,已经广泛应用于电磁超声换能器设计。本文也选用该种线圈。但是,由于PCB加工工艺所限,PCB线圈的最小线宽通常为0.152 4 mm。考虑到线宽不可忽略时可能会使得激发出的兰姆波的多模式特性更明显,因此兰姆波的波长不宜过短^[14]。另一方面,设计换能器的目标为实现对直径为1 mm的通孔型缺陷的检测,为了保证兰姆波对缺陷的敏感性,所激发出的兰姆波的波长不易过长。因此,选择的兰姆波波长范围为2~4 mm,每隔0.5 mm进行一组仿真实验。

所建立三维有限元时域声场有限元仿真模型如图4所示。在板材四周添加了阻尼随距离变化的吸收层,尽可能地衰减边沿反射对仿真结果的影响。仿真实验选择板厚为4 mm,在GJB3384—98所要求的板厚范围内。由于波长的选择范围为2~4 mm,计算可得距厚比为0.25~0.5。考虑到所选择的发射电路的频率大于1.5 MHz时会出现明显的功率衰减,因此,将频厚积范围定为2.8~6 MHz·mm。



图4 三维时域声场有限元仿真模型

由图3所示的兰姆波激发曲线可知,所选择的激发范围将至少存在S0模式和A0模式的兰姆波。考虑到电磁超声兰姆波换能器的实际结构,采用下述激励方法。忽视曲折线圈端部的影响,将曲折线圈简化成一组独立的导线。之后,从被测试件的上表面选取小型区域,在这些区域上加载水平方向的随时间规律变化的力,用以模拟试件中感生出的涡流在静磁场作

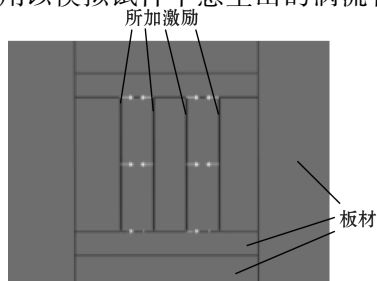


图5 三维时域声场有限元仿真模型的加载方式

用下的受力情况。加载方式如图5所示。

参考GJB3384—98《金属薄板兰姆波检验方法》中对检测距离的要求,将换能器中心与缺陷中心的距离定为100 mm。

2.3 仿真结果及数据分析

提取通过仿真得到的位于换能器与缺陷之间的距换能器中心20 mm处的位移数据进行分析。仿真模型中换能器与缺陷的相对位置如图6所示。

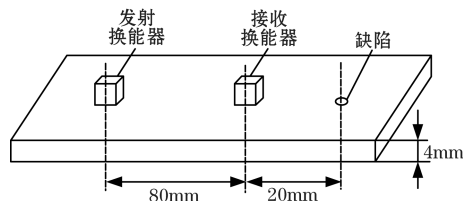


图6 仿真模型系统位置示意图

通过分析接收换能器位置处的信号,进而得到换能器的激发能力以及对缺陷的检测能力。

选取各个波长情况下接收换能器处的声波振动位移作为评价标准。对获得的位移数据进行希尔伯特变换,得到位移的包络,之后选取5组数据的最大值作为基准,对所得数据进行归一化处理,处理结果如图7所示。由各个波长的群速度以及仿真时发射换能器、接收换能器及缺陷的位置可以知道各个波包的含义。由于仿真模型所加载的力大小和相位均相同,因此,可以通过接收换能器位置得到的波形确定换能器的激发能力以及对缺陷的检测能力。

由图7可知,当兰姆波的波长 ≥ 3 mm时,换能器对缺陷的敏感度很低,难以用于缺陷检测。当兰姆波的波长为2.5 mm时,线圈激发能力约为其他线间距的一半,虽然此时换能器对通孔型缺陷敏感度较高,但是激发能力偏弱,并不适用于缺陷检测。而且,波长为2.5 mm的兰姆波具有较为明显的多模式特性,随着检测距离的增加,该模式的兰姆波将产生出两个主要的波包信号,易造成误检和漏检;另一方面,由于波长为2.5 mm时多模式情况明显,会使得缺陷的回波信号能量分散,回波信号幅值下降。波长为2 mm的兰姆波并没有明显的多模式现象,而且对缺陷的敏感度也较好。因此,选择的电磁超声兰姆波换能器激发出的波长为2 mm。

3 电磁超声导波检测装置样机

基于电磁超声导波技术的缺陷检测装置样机整体框图如图8所示。大功率发射模块激励EMAT在被测试件中激发出超声兰姆波,兰姆波在遇到缺陷后,发生反射并被EMAT接收。接收到的信号经过低

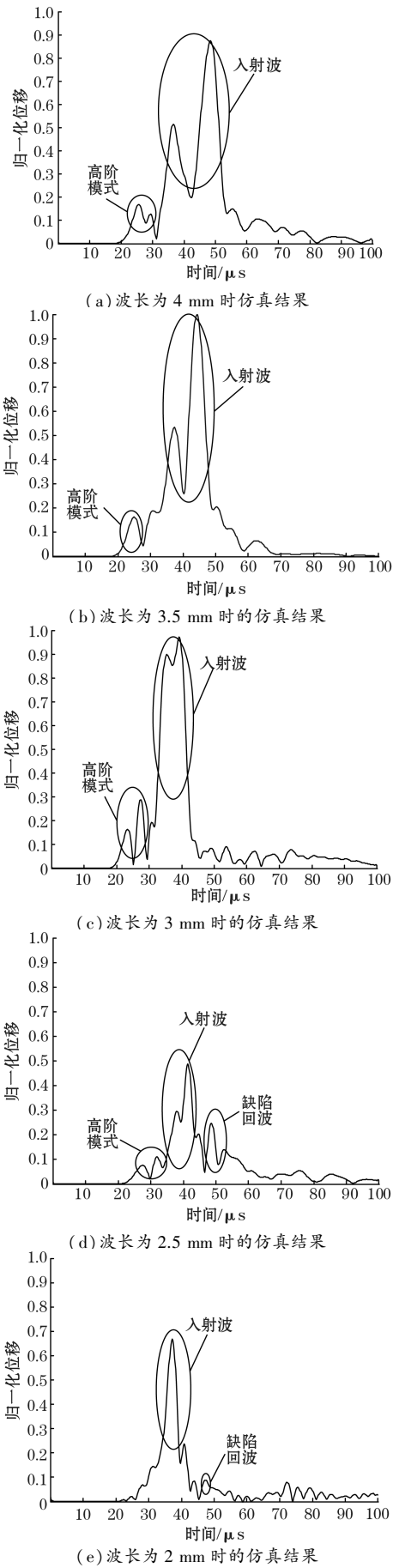


图 8 检测装置样机总体方案框图

噪声接收电路放大后,由高速采集模块转换成数字信号存储起来,经由 USB 接口传输给上位机。由上位机完成数据的处理与图形的显示。

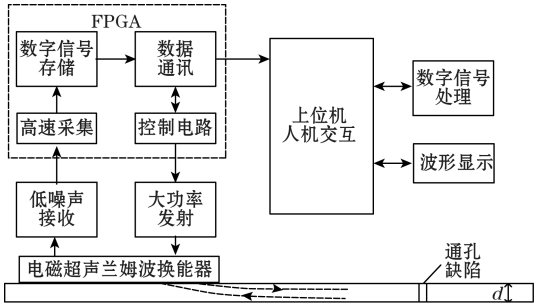


图 8 检测装置样机总体方案框图

3.1 发射接收电路

电磁超声换能器由于换能效率较低,为了提高接收信号的强度,需要使用大功率的发射电路。因此,采用了 D 类功率放大器产生出电磁超声兰姆波换能器所需要的大功率激发信号。

由于电磁超声换能器对环境噪声敏感,接收到的回波信号往往会淹没在背景噪声中,为了将回波信号提取出来,需要对接收信号进行滤波和消噪处理。由于检测信号为周期性的重复信号,因此,采用了累积平均算法与互相关算法对接收到的信号进行处理,提高信噪比并得到包络信号。

3.2 基于 LabWindows/CVI 的上位机软件

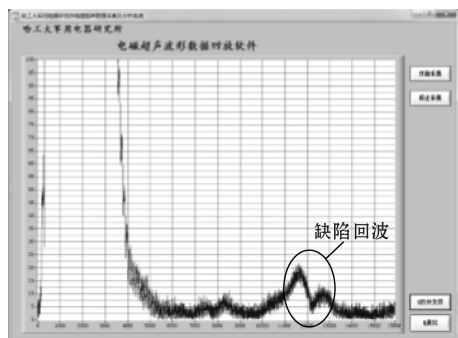
设计了基于 LabWindows/CVI 的上位机软件。该软件完成发射接收电路的控制和接收数据的处理等工作。选择的 LabWindows 编程平台是一种基于 C 语言的开发平台。该平台在数据处理、通信等领域具有很广泛的应用。上位机对 USB 设备请求数据时,会通过 USB 通信模块对采集卡的控制模块发出开始工作的信息,采集卡将该信息传递到发射接收电路的控制模块中,控制发射接收电路进行一轮新的发射接收过程。在该轮发射接收完成之后,采集卡发出复位信号,停止发射接收电路的工作,同时将数据传递给上位机,完成单次检测过程。

4 实验结果及分析

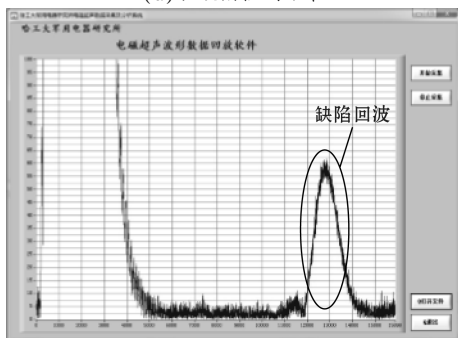
根据 GJB 3384—98《金属薄板兰姆波检验方法》的要求,利用上文设计的电磁超声兰姆波换能器及检测装置样机对厚度为 4 mm 的铝合金薄板上的缺陷进行检测。

电磁超声换能器采用单个线圈,换能器与缺陷距离 100 mm。直径为 1 mm 的通孔型缺陷检测结果如图 9(a)所示。从图中可以看出,缺陷回波较为明显,虽有一定的噪声信号,但噪声信号并不会影响检测,实现了对 GJB3384—98 中规定的通孔型缺陷的检测。

图9(b)为系统样机对深0.4 mm、长4 mm的槽型缺陷进行检测的结果。从图中可以看出,槽型缺陷的回波信号远大于通孔型缺陷的回波信号,信噪比较高,实现了对 GJB3384—98 中规定的槽型缺陷的检测。因此,所设计的电磁超声兰姆波检测装置实现了 GJB3384—98 中所规定缺陷的检测。



(a) 孔缺陷检测结果



(b) 槽缺陷检测结果

图9 检测系统实际工作结果

5 结束语

采用了 ABAQUS 软件对高频厚积情况下的兰姆波进行仿真,分析了不同波长的兰姆波对直径为 1 mm 的通孔型缺陷的敏感程度。基于上述结果,设计了可用于检测直径为 1 mm 通孔的电磁超声兰姆波换能器。在此基础上,研制了基于电磁超声兰姆波换能器的铝合金板材检测装置。实验表明,该装置不仅可以对板厚 4 mm 的铝合金薄板上直径为 1 mm 的通孔缺陷进行有效检测,而且也可有效检测出深度为 0.4 mm、长度为 4 mm 的槽型缺陷,实现了对 GJB3384—98 中规定两种标准缺陷的检测,为基于电磁超声兰姆波的小型缺陷检测技术的工程应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王祝堂,张新华.汽车用铝合金[J].铝合金加工技术,2011,39(2):1-14.
- [2] 杨理践,梁震,高松巍.电磁超声兰姆波的无损探伤技术[J].仪表技术与传感器,2012(12):76-83.
- [3] 黄松岭,王坤,赵伟.电磁超声导波理论与研究[M].北京:清华大学出版社,2013.

- [4] 金属薄板兰姆波检验方法:GJB3384—98[S].
- [5] LEI Q, SHEN F Y, WEI B Y. On research of time reversal imaging method and structural health monitoring system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 46(4): 927-941.
- [6] MOREAU L, CALEAP L, VELICHKO A, et al. Scattering of guided waves by through-thickness cavities with irregular shapes[J]. Wave Motion, 2011, 48(7): 586-602.
- [7] MATTHEW B O, CARLOS E S. Guided wave interaction with hole damage using the local interaction simulation approach[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 1-14.
- [8] RATNAM D, BALASUBRAMANIAMK, MAXFIELD B. Generation and detection of high-order mode clusters of guided waves (HOMC-GW) using meander-coil EMATs[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(4): 727-737.
- [9] WANG S J, KANG L, LI Z C, et al. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 653-660.
- [10] ZHAI G F, JIANG T, KANG L, et al. Minimizing influence of multi-modes and dispersion of electromagnetic ultrasonic lamb waves. [J] IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(12): 2725-2733.
- [11] 杨理践,邹金津,邢燕好.电磁超声兰姆波在铝板传播中的模式识别[J].仪器仪表学报,2014,35(4):909-916.
- [12] DHAYALANR, BALASUBRAMANIAMK. A two-stage finite element model of a meander coil electromagnetic acoustic transducer transmitter[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(2): 101-118.
- [13] 赵继辰,吴斌,何存富.螺旋波纹管导波检测技术的数值仿真和试验研究[J].机械工程学报,2012,24(48):8-13.
- [14] 蒋韬.电磁超声换能器在板中激励导波的波长特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

作者简介:梁慧敏(1972—),教授,博士生导师,主要从事永磁电器基础理论的研究。E-mail:hitra@hit.edu.cn
邓超然(1993—),硕士研究生,主要从事电磁超声无损检测技术研究。E-mail:hit_deng@163.com

《管道技术与设备》杂志 控制与测量专栏征稿

征稿范围:

有关管道系统及储存设施的自动控制(压力、流量、温度等),测量技术,腐蚀寻线,检测探伤等仪器设备的新成果、新工艺及应用实例等。包括故障诊断及其分析,检测仪器,检测方法和检测装置的研究;计算机辅助设计、辅助试验和辅助制造的研究和应用;在线监测的研究和应用;执行机构、调节阀等的设计和研究。

网址: <http://www.52gdw.com>

电话: 024-88718169