

文章编号 1004-924X(2013)08-1981-07

层析成像在冰水两相流参数测量中的应用

张建国*, 马福昌, 窦银科

(太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:提出将电阻层析成像(ERT)技术应用于冰水两相流相含率、相分布等特征参数的测量,并设计了 ERT 测量系统,研究了基于图像的相含率计算方法。阐述了 ERT 系统的工作原理,提出了 16 电极 ERT 系统的设计方案。介绍了线性反投影图像重构算法(LBP);并结合数字图像处理技术,提出了截面相含率的计算方法。最后,通过一组实验验证了电阻层析成像技术应用于冰水两相流检测的可行性。实验结果表明:通过 ERT 系统可以获得管道内冰柱在水中的位置以及实时运动结果,直观反映冰水两相介质的相分布;另外,通过 ERT 系统可以近似地真实反映冰柱的相对大小,两次截面相含率测量误差分别为 6%与 2.8%。研究表明,ERT 技术可以实现冰水两相流的实时在线监测,而且具有良好的测量准确度。

关键词:电阻层析成像;两相流;冰水两相;相含率

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.1981

Application of electrical resistance tomography to ice-water two-phase flow parameter measurement

ZHANG Jian-guo*, MA Fu-chang, DOU Yin-ke

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of the Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangjianguo@tyut.edu.cn

Abstract: A method to measure ice-water two-phase flow was proposed by using an Electrical Resistance Tomography(ERT). An ERT system was designed and the calculating method for phase fractions was explored based on imaging technology. Firstly, the principle of ERT system was introduced, and the design scheme for the ERT system with 16 electrodes was proposed, then a Linear Back Projection (LBP) image reconstructed algorithm were given. Furthermore, the analyzing methods for measured data of ERT system were presented and applied them to the identification of phase distribution and the estimation of phase fractions. Finally, several experiments were performed to verify the applied feasibility of the ERT system to ice-water two-phase flow measurement. The experimental results show that the ERT system can be used to obtain the positions of ice column within a tube in water and their movement sates in real time and can reflect the phase distribution of ice-water two-phase media intuitively. The relative sizes of the ice column can be obtained by the ERT system

收稿日期: 2013-02-22; **修订日期:** 2013-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41176080, 51279122); 山西省自然科学基金资助项目(No. 2012021013-2, 2012011013-5)

and the error of phase fractions are 6% and 2.8%, respectively. The research results prove that the ERT system can monitor the transportation process of ice-water two-phase flow on-line with higher measuring accuracy.

Key words: Electrical Resistance Tomography(ERT); two-phase flow; ice-water; phase fraction

1 引 言

自然界中的物质通常可分为三相,即气相、液相和固相。两相流是指同时存在两种相态的物质流动^[1]。冰水两相流是冰与水的混合流体,属于固液两相流,具有温度为 0℃,固相比重接近于 1 等特点^[2],在自然界和工业领域十分常见,例如,初春冰封河流开河时形成的冰凌流,冬季北方输水隧洞中的含冰流以及冰浆制冷设备中的冰浆等都是典型的冰水两相流。在冰水两相流特征参数的检测中,离散相(冰相)和连续相(水相)的相分布与相含率是重要的测量参数^[3]。相含率检测的准确程度直接影响流体流量的测量精度,而且由于冰水两相流是含有黏性颗粒的非沉降性固液两相流,流体内存在冰颗粒间的黏结现象,造成其流动状态复杂多变,使管道输送系统的稳定性与安全性存在极大的不确定性,主要表现为冰塞、堵管现象^[2],相分布、相含率的准确测量是预防冰塞、堵管发生的有效手段^[4]。

目前,可用于冰水两相流参数检测的技术方法有 γ 射线密度计测量法、重量测定法、单管法、搅拌阻力法以及包括电阻、电容测量法在内的电学方法^[5-6]。这些方法虽各具优势,但共同存在的问题是无法对相分布进行检测,而且在具体使用过程中还存在诸多问题如 γ 射线密度计测量法存在放射性问题;重量测定法存在设备庞大的缺陷;单管法只能应用于垂直管道中;搅拌阻力法只有在冰相含率在 6% 范围以内才能准确测量,而且由于设备存在转动环等机械结构,会对管道内流体的原有流动特性造成破坏,因此适用场合受到很大限制;电阻、电容测量法的测量精度依赖于准确的拟合公式,做到较高精度的测量比较困难。

电阻层析成像(Electrical Resistant Tomography, ERT)技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种无损测量方式^[7],其工作原理类似于医学领域的 CT 技术,同时又具备无放射性、结构简单、

成本低、响应速度快等优点。目前,ERT 技术已在环境监测、地质勘探、搅拌反应器、分离器物质浓度测量、流化床反应过程监测、生物化学等诸多领域被广泛研究^[8-12]。近十年来,ERT 在气液、液液两相流领域逐渐成为国内外研究热点^[13-16],但是,到目前为止,针对冰水(固液)两相流的研究还未见文献报道。

本文提出将电阻层析成像技术应用于冰水两相流相含率、相分布的测量。首先通过电阻层析成像技术获取管道某一截面的电导率图像,得到冰水各相的相分布图;然后结合图像处理技术计算图像中冰相与水相的面积与面积比率,得出各相含率值;最后依据冰、水相的相分布情况、相含率参数对封闭管道内冰的流动状态做出判断,从而预防冰塞、冰堵危害的发生,保障管道输送系统的通畅与安全。

2 ERT 系统的工作原理及其构成

2.1 ERT 系统的工作原理

ERT 基于导电物场内介质分布变化引起的边界电压变化,通过测量电压值的变化来重建物场内的介质分布,实现对两相流参数的检测。边界电压的测量通过电极阵列完成,目前的 ERT 系统按电极数目可分为 8 电极、16 电极和 32 电极系统,电极的数目以指数方式影响测量数据量,电极越多,一次测量的数据量越大,图像质量越高,但同时由于计算量的增加,使成像速度变慢,最终影响 ERT 系统的实时性。本文以典型的 16 电极 ERT 系统为研究对象,截面测量示意如图 1 所示,其中圆形管道包围着被测区域,16 个电极沿管道内壁等间距均匀分布,激励电流通过某对电极施加到被测区域内,建立敏感场 Ω ,当场域内相异电导率区块(如 σ_1 、 σ_2)的分布或形状发生变化时,场域内电势场分布随之变化,导致场域边界的测量电压发生变化,将这些电压值作为参数,运用相应的成像算法,便可重建冰水两相流的电导

率分布图像,实现可视化测量。

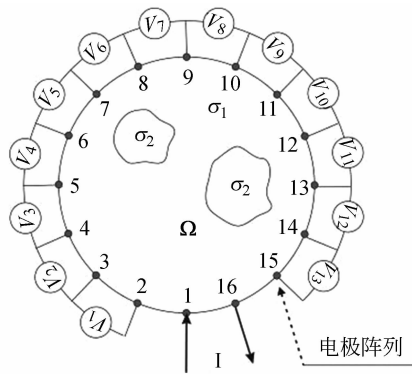


图 1 ERT 截面测量示意图

Fig. 1 Measured cross-section of pipe and operating principle of ERT system

为避免直流极化效应与接触阻抗对准确测量边界电压产生的不利影响,ERT 系统普遍采用交流激励与四电极激励-测量模式(两电极激励,两电极测量),同时为满足“截面成像”的需要,还需顺序变换激励-测量电极对,形成“旋转扫描”工作方式,如图 1 所示,电流依次从电极 1-16、2-1、3-2、……、16-15 这 16 对相邻电极注入(称为 16 个激励方向),在每个激励方向下,从剩余的 14 个相邻电极取出 13 个测量电压值;因此,在一个完整的测量过程中,16 电极 ERT 系统共需测量 16×13 个边界电压值,即每幅 ERT 电导率图像需要 208 点测量。

2.2 ERT 系统的硬件构成

电阻层析成像系统主要由 3 部分构成:电极阵列,数据采集单元和数据处理与成像单元。图 2 所示为 16 电极 ERT 系统的组成框图。

电极阵列由 16 个规格一致的矩形铜片组成(尺寸为 30 mm×15 mm),电极等间距排布于管道内壁,其表面与导电液体相接触,同时每个电极又通过屏蔽电缆与数据采集单元相连接。

数据采集单元采用模块化设计,分为三部分,分别为电流注入模块、电极阵列控制模块和电压测量模块。其中电流注入模块由正弦信号发生器(Agilent E33220A)和电压控制电流源(VCCS)两部分组成。电极阵列控制模块使用多路开关实现激励电极对与测量电极对的自动切换。电压测量模块由滤波电路和采集卡(NI USB-6366)组成,滤波电路滤除高频噪声,防止采样数据发生混叠,而采集卡完成边界电压信号的模数转换与多

路开关的控制。数据采集单元每秒可完成 35 次、每次 208 点的边界电压测量。

数据处理与成像单元由一台运行图像重构算法的计算机组成,该单元接收来自数据采集单元的边界电压测量数据,并通过图像重构算法将这些数据转换为管道内冰水两相流的截面电导率图像,完成数据的可视化,目前已实现 35 frame/s 的图像重构速率。

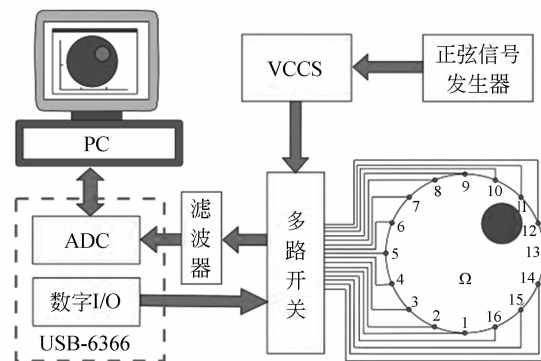


图 2 电阻层析成像系统框图

Fig. 2 Block diagram of ERT measuring system

2.3 图像重构算法及相含率计算方法

2.3.1 图像的重构算法

图像重构算法是以边界电压数据为参数求解场域内电导率分布函数。精确、快速的图像重构算法是 ERT 系统进行冰水两相流动态测量的关键,其大致可分为迭代算法和非迭代算法两类。相比迭代算法,非迭代算法有计算量小、重建图像速度快等特点,其常见算法有线性反投影算法(LBP)、基于奇异值分解的直接求解法(SVD)和 Tikhonov 正则化算法等^[17-19]。

本文采用线性反投影算法,在该算法中,电导率分布向量(也称为电导率图像) σ 可用以下公式来计算:

$$\sigma = S^T V_m, \quad (1)$$

其中, S^T 是灵敏度矩阵 S 的转置矩阵, V_m 是边界电压测量数据。而 S 为 $m \times n$ 阶矩阵, V_m 为 m 阶向量(m 是生成一幅图像所需测量的边界电压个数,16 电极时为 208), σ 是 n 阶图像向量(n 为图像的像素个数)。

式(1)中, S 矩阵反映场域内电压的变化受介质分布的影响程度,称为灵敏度矩阵,其计算公式为:

$$S_{i,j} = - \int \frac{\nabla \phi_i}{I_i} \cdot \frac{\nabla \psi_j}{I_j} d\Omega, \quad (2)$$

其中, $S_{i,j}$ 为第 j 个电极对对应第 i 个电极对的灵敏度系数, ϕ_i, ψ_j 分别为第 i 个电极对和第 j 个电极对分别在激励电流为 I_i, I_j 时的场域电势分布。

2.3.2 相含率计算方法

相含率是指两相流中冰相和水相各自占流体总量的份额。本文提出一种冰相截面相含率计算方法:

$$\alpha = \sum_{j=1}^n f_j \frac{A_j}{A}, \quad (3)$$

其中, n 为图像的像素个数, f_j 为第 j 个像素的灰度值, A_j 为第 j 个像素的面积, A 为管道截面积。

在使用式(3)计算之前,首先需要对电导率图像进行二值化处理。通过观察发现,图像中冰相的整体色值较高(5左右),而水相的色值几乎为0;因此,可以设定一个阈值 T ,将色值大于此阈值的像素灰度值设定为1,即全白色;将色值小于此阈值的像素灰度值设定为背景色,即全黑色。采用计算公式如下:

$$f_j = \begin{cases} 1 & f_j \geq T \\ 0 & f_j < T \end{cases}. \quad (4)$$

经过二值化处理后,冰相与水相的灰度值差异明显,可使用式(3)对冰相含率进行计算。需要注意的是在电导率图像的二值化过程中,阈值的选取直接影响截面相含率计算结果,如过小,则在二值化处理后会保留过多噪声信号,使截面相含率计算值偏大;如过大,则会丢失掉一些有用信号,使截面相含率计算值偏小。

3 实验装置与过程

为了验证 ERT 系统应用于冰水两相流参数测量的可行性,以冰水两相介质为对象,采用 16 电极系统进行了实验,实验装置如图 3 所示,使用圆柱型有机玻璃容器来模拟实际管道,容器内径为 380 mm,高度为 700 mm。实验装置共设 4 层电极阵列,每层 16 个电极,本实验中只使用了第 1 层电极阵列,该层电极距离容器底部约为 60 mm。

实验中,首先在容器中放入浓度为 0.9% 的 NaCl 溶液,再将装有冰块的塑料瓶(直径为 60



图 3 两相流 ERT 静态实验系统

Fig. 3 Two-phase flow test system

mm)放入 NaCl 溶液中。ERT 用于两相流测量的物理基础是两种介质具有不同的电导率,因此,对 NaCl 溶液和纯冰的电导率值进行了测量,测量值见表 1。

表 1 冰、水相电导率值

Tab. 1 Physical properties of two phases

物质	相	电导率($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	导电性
0.9% 的 NaCl 溶液	液相	300	导电
冰	固相	10	非导电

由表 1 可见,构成冰水两相流的冰、水两种介质电导率差异极大,这对于利用电导率图像来区分二者十分有利。

实验中,ERT 的电极激励与测量方式采用相邻激励相邻测量模式,正弦激励电流的频率为 40 kHz 幅值为 5 mA。在完成一帧图像数据测量后,将获得 208 个边界电压数据作为参数代入到线性反投影算法中,对被测容器截面进行成像,线性反投影算法由 Matlab 语言编写。

图 4 为部分实验结果。图 4(a)、(c)、(e)分别为冰柱在位置 I 处(3 号电极附近)的实景图、重构电导率图像和二值化图像,图 4(b)、(d)、(f)分别为冰柱在位置 II 处(5 号电极附近)的实景图、重构电导率图像和二值化图像。图 4(c)、(d)中蓝色区域代表高电导率(低色值)区域,对应于容器中的 NaCl 溶液区域,而红色区域代表低电导率(高色值)区域,对应于容器中冰柱所在区域。图 4(e)、(f)为二值化后的图像(彩图见期刊电子版)。

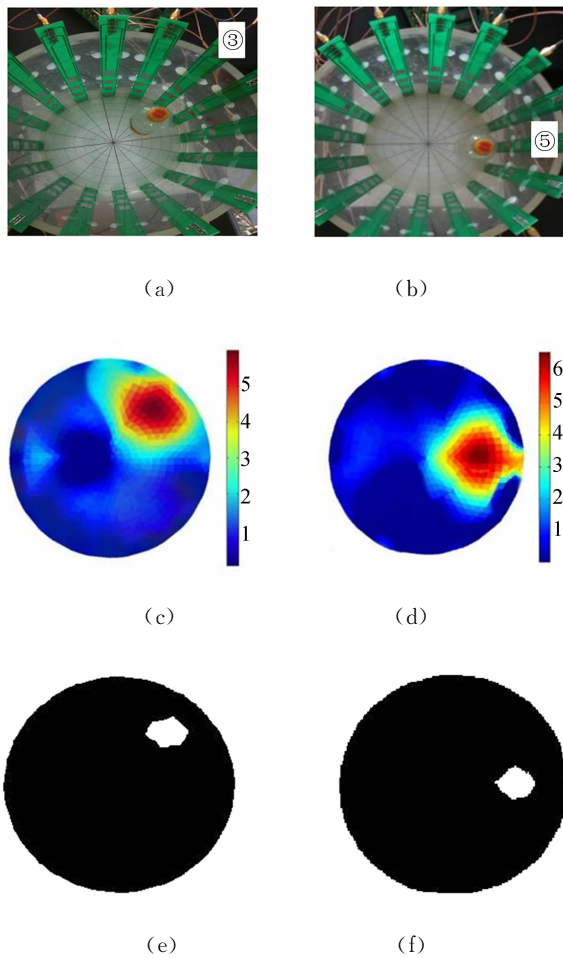


图 4 ERT 重构图像

Fig. 4 Reconsturition imgaes

4 实验结果与讨论

静态实验结果表明:通过 ERT 测量系统可以直观地获取管道内冰水分界面以及冰在水中的

参考文献:

- [1] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
GUO L J. *Two-Phase and Multiphase Flow Mechanics* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University press, 2002. (in Chinese).
- [2] 刘双科, 高桥弘. 水平管内伴有悬浮床的冰水两相流动特性 [J]. 泥沙研究, 2003(4): 24-28.
LIU SH K, TAKAHASHI H. Flow characteristic of ice-water two phase flow with suspended bed in horizontal pipes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(4): 24-28. (in Chinese)

实时运动结果。冰柱在水中的位置及冰柱的相对大小等可以通过 ERT 系统得到近似真实的反映。根据图 4(e)、(f), 利用式(3)计算出的冰相含率值分别为 0.026 5 和 0.025 6, 比对误差约为 6% 和 2.8%。

误差产生的原因是一些因素制约了重构图像的精度与分辨率, 包括电极的一致性、边界电压测量数量和重构算法等; 因此, 系统的进一步改进可以从以下 3 方面进行: (1) 改进电极的材料, 降低由电极腐蚀引起的电极一致性变差问题; (2) 将电极的个数从 16 增加到 32, 有效增加边界电压测量数量; (3) 改进成像算法, LBP 算法虽然具有计算量小、重建图像速度快等优点, 但也同时存在成像质量差、分辨率低等问题, 尤其是用于定量分析时。今后将引入迭代算法对 LBP 算法加以改进, 以提高重构图像质量和分辨率。

5 结 论

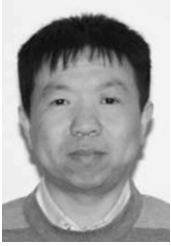
本文所设计的 ERT 系统其图像获取速度达 35 frame/s(40 kHz, 208 point/frame) 可以满足管道冰水两相流参数测量的实时性要求。实验测试表明, 该系统能直观地显示和测量冰水两相流中冰相的位置和面积, 在两幅图像中, 冰相的截面相含率测量值分别为 0.026 5 和 0.025 6, 比对误差约为 6% 和 2.8%, 显示出良好的测量精度。

将电阻层析成像技术应用于冰水两相流的实时在线监测尚属一种崭新的尝试, 研究结果显示, 在冰水两相流相分布与相含率特征参数测量中, ERT 技术可作为一种有效的测量手段。

- [3] 沈小顶. 过冷水冰浆连续制取装置研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
SHEN X D. *The Research on Continuous Ice Slurry Generative Device Using Supercooled Water* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [4] 高需生, 靳国厚. 中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(2): 159-164.
GAO P SH, JIN G H. Investigation and analysis of river ice disaster in cold regions of North China [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2003, 1(2): 159-164.

- (in Chinese)
- [5] 北原拓夫. 冰蓄冷系统的测量 [J]. 中国建设信息供热制冷专刊, 2004(3):49-53.
- KITAHARA T. Instrumentation for ice heat storage system [J]. *China Construction Heating & Refrigeration*, 2004(3):49-53. (in Chinese)
- [6] 石文星, 赵庆珠, 李立一, 等. 基于 RC 振荡电路的冰层厚度测量装置 [J]. 暖通空调, 2005, 35 (6): 64-69.
- SHI W X, ZHAO Q ZH, LI L Y, *et al.*. Ice layer thickness measurement device based on an RC resonator [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2005, 35(6): 64-69. (in Chinese)
- [7] BARBER C C, BROWN B H, FREESTON I L. Imaging spatial distributions of resistivity using applied potential tomography [J]. *Electronics Letters*, 1983, 19(22): 933-935.
- [8] ANDRADE R. Intervention of Electrical Resistance Tomography (ERT) in resolving hydrological problems of a semi arid granite terrain of Southern India [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2011, 78(4): 337-344.
- [9] CLIFFORD J, BINLEY A. Geophysical characterisation of riverbed hydrostratigraphy using electrical resistance tomography [J]. *Near Surface Geophysics*, 2010, 8(6): 493-501.
- [10] KARHUNEN K, SEPPANEN A, LEHIKONEN A, *et al.*. Electrical resistance tomography imaging of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(1):137-145.
- [11] HARRISON S, STEVENSON R, CILLIERS J J. Assessing solids concentration homogeneity in Rushton-agitated slurry reactors using electrical resistance tomography (ERT) [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 71: 392-399.
- [12] BODENSTEIN M, DAVID M, MARKSTALLER K. Principles of electrical impedance tomography and its clinical application [J]. *Critical care medicine*, 2009, 37(2): 713-724.
- [13] 许燕斌, 王化祥, 崔自强. 基于独立成分分析的水平管气液两相流分相信息提取 [J]. 化工学报, 2009, 60(12): 3012-3018.
- XU Y B, WANG H X, CUI Z Q. Phase information extraction of gas/liquid two-phase flow in horizontal pipe based on independent component analysis [J]. *The Chemical Industry and Engineering Society of China Journal*, 2009, 60(12): 3012-3018. (in Chinese)
- [14] DICKIN F, WANG M. Electrical resistance tomography for process applications [J]. *Measurement Science & Technology*, 1996, 7(3): 247-260.
- [15] MENG Z Z, HUANG Z Y, WANG B L, *et al.*. Air - water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21(3): 268-276.
- [16] RICARD F, BRECHTELSBAUER C, XU X Y, *et al.*. Monitoring of multiphase pharmaceutical processes using electrical resistance tomography [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2005, 83(7): 794-805.
- [17] 陈宇, 高宝庆, 张立新, 等. 基于加权奇异值分解截断共轭梯度的电容层析图像重建 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 701-707.
- CHEN Y, GAO B Q, ZHANG L X, *et al.*. Image reconstruction based on weighted SVD truncation conjugate gradient algorithm for electrical capacitance tomography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 701-707. (in Chinese)
- [18] 吴新杰, 黄国兴, 王静文. 粒子滤波算法在 ECT 图像重建中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1824-1830.
- WU X J, HUANG G X, WANG J W. Application of particle filtering algorithm to image reconstruction of ECT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1824-1830. (in Chinese)
- [19] 覃凤清, 何小海, 陈为龙, 等. 一种图像配准的超分辨率重建 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 409-416.
- QIN F Q, HE X H, CHEN W L, *et al.*. Super-resolution reconstruction method of image registration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 409-416. (in Chinese)

作者简介:



张建国(1979—),男,山西太原人,博士研究生,讲师,2003年、2005年于太原理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事电学层析成像技术与宽带探地雷达技术方面的研究。E-mail: zhangjianguo@tyut.edu.cn



窦银科(1973—),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,1996年、2005年、2009年于太原理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事冰层厚度自动化检测技术及自动化仪器仪表技术方面的研究。E-mail: douyinke@tyut.edu.cn

导师简介:



马福昌(1953—),男,山西保德人,教授,博士生导师,2005年于西安理工大学获得博士学位,主要从事水信息自动化检测技术及新型传感器技术方面的研究。E-mail: MFC520@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)

2013年大气光学及自适应光学技术发展研讨会征文通知

会议网站: www.cnoenet.com/2013atmospheric-optics/

投稿网站: www.manuscript-cnoenet.com 截止时间: 2013年9月30日

为了深入探索大气光学特性及光传输物理在激光技术、大气探测和光学遥感等领域中的应用、探讨现代自适应光学技术的发展及其在空间探测和天文观测中的应用,“2013年大气光学及自适应光学技术发展研讨会”将于2013年11月上旬在合肥市举办。会议由中科院大气成分与光学重点实验室和中科院自适应光学重点实验室联合主办,由中国宇航学会光电专委会承办。届时本领域知名院士将与大会作报告,同时组委会还将邀请国内从事大气光学及自适应光学技术研究及应用的单位的20余位学术带头人、领军专家作专题技术报告。

诚挚欢迎本领域科研人员积极投稿参加会议交流!投稿经专家审查后,择优推荐到《光学精密工程》(Ei),《红外与激光工程》(Ei),《大气与环境光学学报》,《中国光学》等正规学术期刊发表。

大会主席:

姜文汉院士(中科院光电所)

龚知本院士(中科院安徽光机所)

潘德炉院士(国家海洋局海洋二所)

征文方向:

- ◆ 大气光学特性
- ◆ 激光与红外大气传输
- ◆ 混浊和湍流大气中的成像
- ◆ 自适应光学技术与系统
- ◆ 大气传输与成像的自适应光学校正
- ◆ 天文观测与选址
- ◆ 激光雷达大气探测技术、大气环境监测新技术等
- ◆ 光学遥感及其大气校正
- ◆ 自由空间光通信大气校正技术,等

会议秘书处联系方式:

联系人: 李瑾, 邓伟 电话: 022-58168516

投稿技术咨询: 常磊 电话: 022-58168515

电子邮箱: lijin@cnoenet.com