

潘纪顺, 宋朝阳, 冷元宝, 等. 地震波 CT 在混凝土防渗墙质量检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(3): 311-317. doi:10.15953/j.1004-4140. 2016.25.03.07.  
Pan JS, Song CY, Leng YB, et al. The application of seismic wave CT to qualities detection of concrete cut-off walls[J]. CT Theory and Applications, 2016, 25(3): 311-317. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140. 2016.25.03.07.

## 地震波CT在混凝土防渗墙质量检测中的应用

潘纪顺<sup>1✉</sup>, 宋朝阳<sup>1, 2</sup>, 冷元宝<sup>1, 2</sup>, 李延卓<sup>2</sup>, 王新建<sup>1</sup>, 赵祥<sup>1, 2</sup>, 高东攀<sup>1</sup>, 李迪<sup>1</sup>

1. 华北水利水电大学资源与环境学院, 郑州 450045  
2. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003

**摘要:** 本文给出了一个地震波 CT 技术检测混凝土防渗墙质量的实例, 其检测结果和部分墙体的钻孔取芯、土工试验和注水试验进行了对比, 结果表明地震波 CT 技术在检测混凝土防渗墙质量时快速无损, 准确可靠, 在防渗墙质量无损检测中有广阔的应用前景。

**关键词:** 地震波 CT; 混凝土防渗墙; 质量检测; 代数重建法

doi:10.15953/j.1004-4140.2016.25.03.07      中图分类号: P 315      文献标志码: A

防渗墙施工技术引进我国已有近 60 年历史, 被广泛应用于各类蓄水工程、围堰防渗、坝基渗流控制、防冲墙、病险水库加固、堤防整修等工程项目中, 成为防渗技术中的首选方案。但是, 混凝土防渗墙施工过程中较容易出现质量事故, 而且所造成事故处理难度大、代价高, 因而, 对防渗墙的施工质量有效检测尤为重要。防渗墙传统的质量检测方法有钻芯取样、现场开挖及围井等, 尽管这些方法直观、可靠, 但是它们也费时费力, 对墙体本身有损害, 代表性差。相对而言, 地球物理探测技术作为一种新的探测手段, 无损、高效, 呈现出强劲的发展趋势。

自 20 世纪 90 年代以来, 众多学者和单位对地球物理探测技术对防渗墙质量检测进行了有益的探索。杨文采院士<sup>[1]</sup>早在 1993 年就详细论述了地震波 CT 的原理及其在工程勘测中的应用的可能性。王运生等<sup>[2]</sup>于 1992 年成功将弹性波层析成像 (CT) 应用到小浪底水利枢纽防渗墙质量中。肖柏勋等<sup>[3]</sup>于 2000 年开展了堤防截渗墙质量无损检测的有效性试验研究, 提出了一套综合地球物理技术探测防渗墙质量的方法方案。毛星<sup>[4]</sup>于 2012 年用地震波 CT 技术对某大桥下采空区的注浆效果进行了评价, 并和钻孔结果做了对比, 显示地震波 CT 具有一定的效果。孙文怀等<sup>[5]</sup>于 2013 年成功将地震波 CT 技术应用到某水利枢纽工程中的塑性混凝土防渗墙质量检测中, 并显现了一定的检测效果。刘建等<sup>[6]</sup>于 2015 年进行了硐间地震波 CT 探测, 对硐间地质构造和岩体结构特征做出了评价。近 20 年来, 地震波 CT 有着广泛的应用和实质的改进<sup>[7-15]</sup>。

地震波 CT 与电磁波 CT 和电阻率 CT 相比较, 具有独特的优势, 鉴于地震波的波速与介质性质的相关性较为稳定, 而电性则受影响因素较多, 尤其是与介质中的流体关系密切。同时地震波的衰减比电磁波小得多, 地震波在岩石中传播数公里衰减一般不超过

收稿日期: 2016-02-29。

基金项目: 国家自然科学基金 (41174052); 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (112300410252)。

100 dB, 相反, 频率 106~108 Hz 的电磁波在岩石中传播数十米以后就可能衰减 100 dB, 因此, 地震波 CT 较电磁波 CT 和电阻率 CT 有更远的探测距离, 适宜应用于相对较长跨孔距离探测中。

## 1 地震波 CT 原理

地震波 CT 借鉴了医学上 X 射线断面扫描诊断的基本原理, 利用大量激发接收的地震波信息, 反演得到测试区域物体的波速分布规律。通常采用跨孔测量方式, 即使用两个或两个以上的钻孔, 采用一发多收的扇形穿透方式, 在测试区形成密集的射线交叉网络 (图 1), 那么下式

$$T_i = \int_{l_{ij}} \frac{1}{V_j(x, y)} dl = \int_{l_{ij}} S_j(x, y) dl, \quad (1)$$

其中  $i$  为射线数,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为射线的总条数;  
 $j$  为划分成规则的小矩形单元的个数,  $j=1, 2, \dots, m$ ,  
 $m$  为小矩形单元的总个数;  $T_i$  为第  $i$  条射线的接收时间;  
 $V_j(x, y)$  为坐标  $x, y$  的第  $j$  块小矩形单元的速度值;  
 $S_j(x, y)$  为坐标  $x, y$  的第  $j$  块小矩形单元的慢度值;  
 $l_{ij}$  为第  $i$  条射线通过第  $j$  块单元内的长度;  
 $V_j(x, y) = 1/S_j(x, y)$ 。

考虑到单元网格很小, 那么弯曲射线路径在单元格内视为直线,  $S_j(x, y)$  视为常数, 式 (1) 可以表示为

$$T_i \approx \sum_{j=1}^m l_{ij} S_j(x, y) \quad (2)$$

式 (2) 是一个线性方程组, 其矩阵表达式为

$$\mathbf{T} = \mathbf{L} \mathbf{S} \quad (3)$$

此时, 求解该方程组的方法大多采用迭代的方法, 例如代数重建法 (ART), 其基本过程就是先给被重建区域中的  $V$  或  $S$  赋一个初值, 然后将所得到的投影值残差逐个沿其射线方向均匀地反投影过去, 同时, 不断地对重建图像进行校正, 一直到满足精度为止。

## 2 现场测试

某水利枢纽工程位于郑州市郑东新区, 采用塑性混凝土防渗墙。设计厚度为 0.4 m, 墙深 50 m, 墙体密度 2.0~2.3 g/cm<sup>3</sup>, 抗压强度 1.5~5.0 MPa, 弹性模量 500~2 000 MPa, 渗透系数小于  $n \times 10^{-6}$  cm/s, 地震波速大于 1 900 m/s。现场浇筑的墙体内, 每隔 2 m 预埋一个钢管 (见图 2), 在混凝土龄期达到 28 天后, 采用地震波 CT 进行防渗墙完整性检测, 采取一孔激发两孔接收的工作方式, 现场实测地震记录见图 3。测设备主要包括: 井间

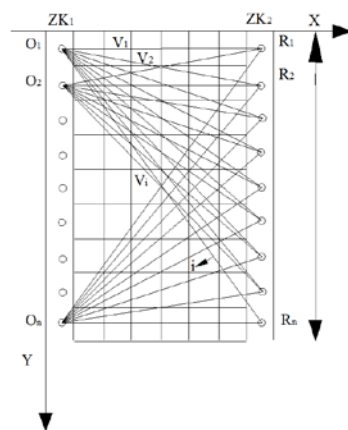


图 1 网格化方法及观测模式

Fig.1 Gridding and observing model

电火花震源<sup>[15]</sup>、地震仪、12 道井中串式检波器（检波器道间距为 1 m，长度为 100 m），测斜仪等。激发和接收间距均为 1 m。以单点激发多点接收的形式布置扇形观测系统。现场测试所用井间电火花震源型号为 XR96-HX-DHH-03J，地震仪为重庆奔腾数控研究所的 WZG-24A/48A 工程地震仪。

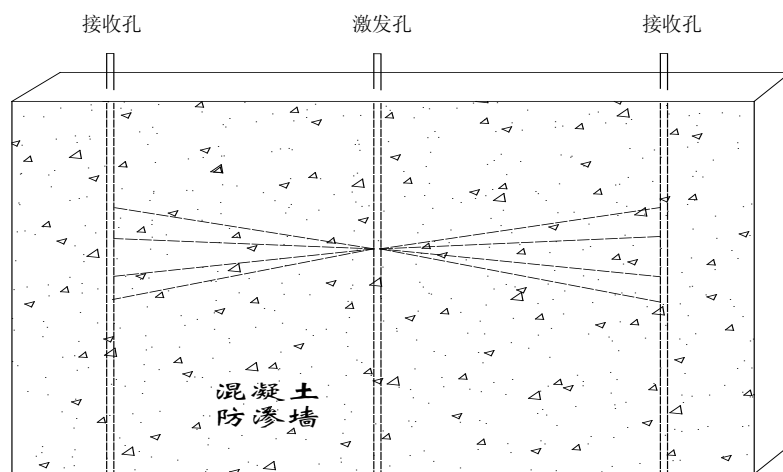


图 2 预埋钢管布置示意图

Fig.2 Diagram of embed pipe layout

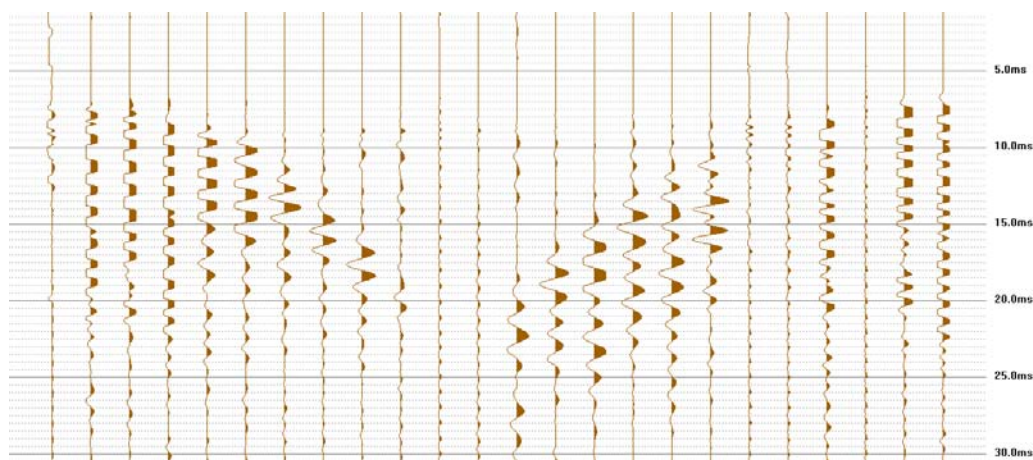


图 3 地震波记录

Fig.3 Seismic wave record

### 3 数据处理与资料解释

在读取地震波初至后，使用 WYS2003 工程物探信息系统对数据进行处理。主要过程为创建项目、编辑数据、执行观测系统和成像反演。

#### 3.1 检测成果 1

剖面 89.48~110.08 的地震波波速色谱如图 4 (a) 所示。此剖面孔间距 20.60 m，防渗

墙地震波速度值分布在 1 900~2 900 m/s 的范围内,表明墙体混凝土地震波速正常,从而判定该剖面防渗墙完整,混凝土均匀且连续性好。

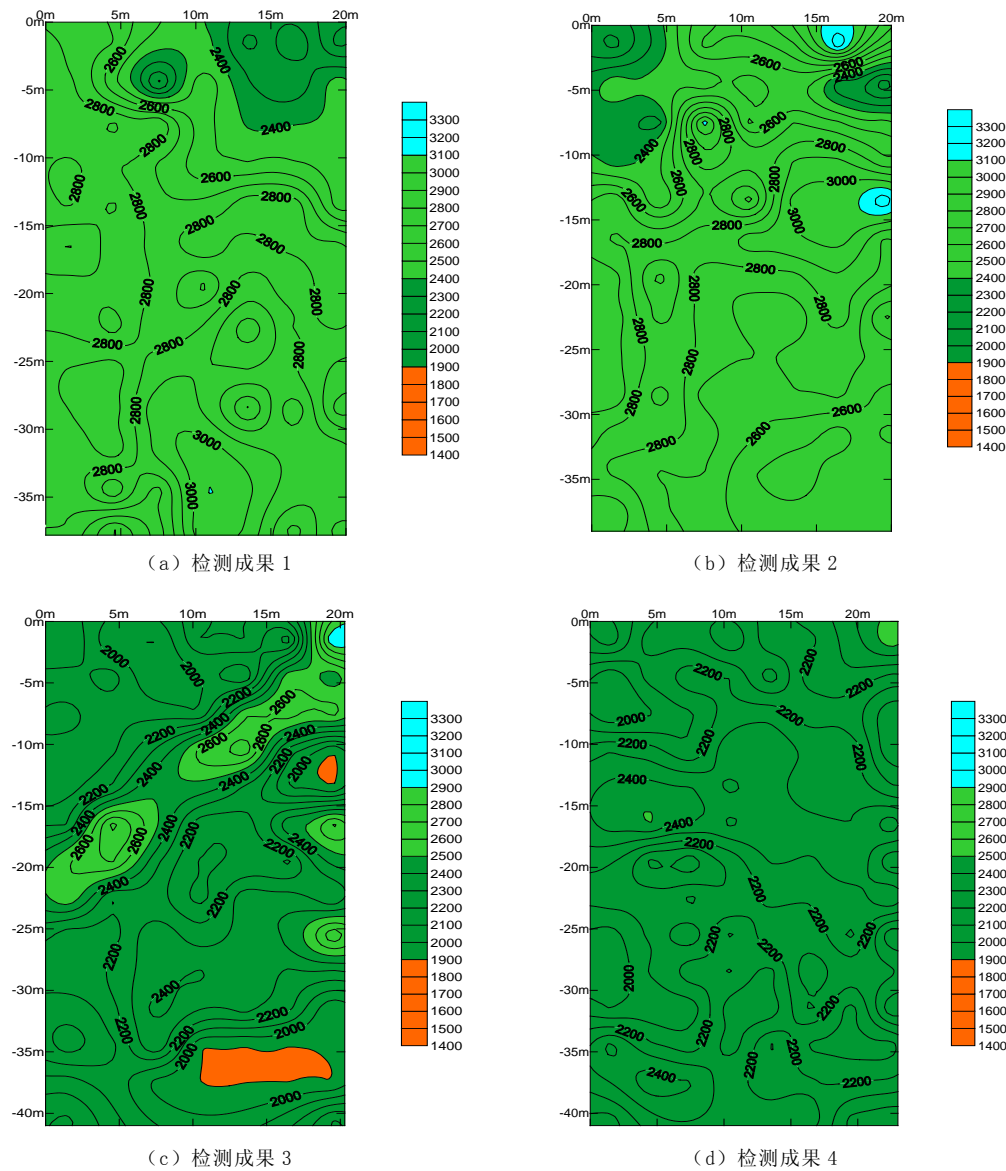


图 4 波速色谱图

Fig.4 Wave velocity chromatograms

3.2 检测成果 2

剖面 687.94~708.8 的地震波波速色谱图如图 4 (b) 所示。此剖面孔间距 20.86 m, 防渗墙弹性波速度范围为 1 900~2 900 m/s, 表明墙体混凝土地震波速正常, 从而判定该剖面防渗墙完整, 混凝土均匀且连续性好。

### 3.3 检测成果 3

剖面 492.30~514.94 的地震波波速色谱图如图 4(c) 所示。此剖面孔间距 12.6 m, 由图可以看出, 35 m 深度以上部位波速较高 ( $>1900$  m/s), 防渗墙弹性波速度范围为  $1900\sim2900$  m/s, 墙体塑性混凝土地震波速正常。但在此断面底部, 35 m 深度以下部位出现一低地震波速带 ( $1500$  m/s 左右), 推断该区域底部混凝土存在质量缺陷, 后来钻孔资料显示, 此处混凝土含沙。

### 3.4 检测成果 4

断面 660.87~680.03 的地震波波速色谱图如图 4(d) 所示。此剖面孔间距 19.96 m, 防渗墙弹性波速度范围为  $1900\sim3000$  m/s, 表明墙体混凝土地震波速正常, 从而判定该剖面防渗墙完整, 混凝土均匀且连续性好。

### 3.5 结果验证

通过对地震波低速区进行取芯及进行钻孔注水试验表明: 在断面 492.30~514.94 的剖面地震波低速区所取岩心的平均波速低至  $1500$  m/s, 抗压强度降低到  $0.6$  MPa, 钻孔注水试验渗透系数  $89\times10^{-6}$ , 不满足设计要求。取样结果表明, 底部岩芯较为破碎, 见图 5。而其他剖面所取岩芯比较完整, 其平均波速达到  $2400$  m/s, 抗压强度在  $4$  MPa 左右, 注水试验渗透系数在  $2\times10^{-6}$  左右, 满足设计要求。钻芯取样和注水试验结果与 CT 检测结果吻合, 验证了地震波 CT 在混凝土防渗墙质量检测中的有效性。



图 5 断面为 492.30~514.94 的断面低速区取芯

Fig.5 The core of low speed area section 492.30~492.30

## 4 结论

通过地震波 CT 对混凝土防渗墙的检测的实例, 可以得到如下结论:

(1) 地震波 CT 检测塑性混凝土防渗墙质量, 其成像结果与地震波低速区钻孔取芯、钻孔注水试验结果一致, 表明地震波 CT 技术对塑性混凝土防渗墙进行质量无损检测有效可行。

(2) 与常规的钻孔取芯、钻孔注水试验相比, 地震波 CT 技术方便快捷, 省时省力,

对防渗墙没有破坏,体现出了传统检测方法所不具备的优势。

(3) 防渗墙施工工艺复杂,技术指标要求较多,但地震波 CT 技术的成像结果分辨率高、可视性好、信息量大,通过成像结果,完全可以判定防渗墙质量完整性。

对现场操作和数据处理过程提出以下建议:

(1) 现场使用电火花震源,虽然可调电压幅度较大,但是它给现场工作人员带来一定的危险。而用声学编码信号来做激发震源,可以在相对较低的电压下增加地震波 CT 的检测距离并提高其检测精度。研制声学编码震源对操作者而言更加安全,携带方便,同时达到电火花震源的检测目标。

(2) 极个别钻孔岩芯较破碎,但反演成像结果并没有很好地体现出来。这是由于成像剖面上各点的波速并不相等,特别是当各点之间波速(即异常体界面波阻抗)变化差异较大时,首波传播路径会发生明显的弯曲。因此,把波传播路径近似为直线会产生误差,利用弯曲射线快速追踪,是提高 CT 成像精度的关键技术之一。

## 参考文献

- [1] 杨文采. 地震层析成像在工程勘测中的应用[J]. 物探与化探, 1993, 17(3): 182-192.  
Yang WC. The application of seismic tomographic imagery to engineering survey[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1993, 17(3): 182-192. (in Chinese).
- [2] 王运生, 冷元宝. 地震透射层析成像在水库工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 1992, (1): 55-58.  
Wang YS, Leng YB. The application of seismic tomographic imagery to reservoir engineering[J]. Site Investigation Science and Technology, 1992, (1): 55-58. (in Chinese).
- [3] 肖柏勋, 杜凯, 刘春生. 一种新型的井间声波 CT 震源[J]. 水利水电快报, 2000, 21(17): 21-22.
- [4] 毛星. 地震波 CT 在注浆效果评价中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S): 154-157.  
Mao X. The application of seismic wave CT to grouting detection[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(Supp.): 154-157. (in Chinese).
- [5] 孙文怀, 刘伟, 李长征, 等. 地震波 CT 在塑性混凝土防渗墙检测中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(1): 83-89.  
Sun WH, Liu W, Li CZ, et al. The application of seismic wave CT to quality testing on plastic concrete cut-off walls[J]. Journal of North China institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34(1): 83-89. (in Chinese).
- [6] 刘建, 杨建明, 沙椿. 平硐间地震波 CT 在某水电站坝址勘探中的应用[J]. 勘察科学技术, 2015, (1): 62-64.  
Liu J, Yang JM, Sha C. Application of seismic wave CT between adits in a Hydropower station site investigation[J]. Site Investigation Science and Technology, 2015, (1): 62-64. (in Chinese).
- [7] Williamson PR, Worthington MH. Resolution limits in ray tomography due to wave behavior: Numerical experiments[J]. Geophysics, 1993, 58(5): 727-735.
- [8] Quan YL, Harris JM. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method, Geophysics, 1997, 66(3): 895-905.
- [9] Kak A C, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1988.
- [10] 杜剑渊, 杨文采. 跨孔地震层析成像的级联方法[J]. 地球物理学报, 1991, 34(6): 771-780.  
Du JY, Yang WC. Cascade approach for cross-hole seismic tomography[J]. Acta Geophysica Sinica, 1991, 34(6): 771-780. (in Chinese).
- [11] 王运生. 弯曲射线地震波透射层析成像的一种实现方法[J]. 河海大学学报, 1993, 21(4): 21-28.  
Wang YS. A method of computing tomography using crooked seismic rays[J]. Journal of Hehai University, 1993, 21(4): 21-28. (in Chinese).



- [12] 杨文采. 层析成像新算法及其在工程检测上的应用[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 239-244.  
Yang WC. A new algorithm of seismic tomography with application to engineering detections[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(2): 239-244. (in Chinese).
- [13] 牛彦良, 杨文采, 吴永刚. 跨孔地震 CT 中的逐次线性化方法[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 378-386.  
Niu YL, Yang WC, Wu YG. Successive linearization method in cross-hole tomography[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3): 378-386. (in Chinese).
- [14] 宋先海, 黄荣荣. 弹性波 CT 在大体积混凝土无损检测中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(11): 23-25.
- [15] 王运生, 王家映, 顾汉明. 弹性波 CT 关键技术与应用实例[J]. 工程勘察, 2005, (3): 66-68.

## The Application of Seismic Wave CT to Qualities Detection of Concrete Cut-off Walls

PAN Ji-shun<sup>1✉</sup>, SONG Chao-yang<sup>1,2</sup>, LENG Yuan-bao<sup>1,2</sup>, LI Yan-zhuo<sup>2</sup>,  
WANG Xin-jian<sup>1</sup>, ZHAO Xiang<sup>1,2</sup>, GAO Dong-pan<sup>1</sup>, LI Di<sup>1</sup>

1.School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China

2.The Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China

**Abstract:** Plastic concrete cut-off walls are underground concealed work, playing a decisive role in seepage control, and the quality of cut-off walls directly affects the anti-seepage effect. The seismic wave CT may be an effective way to detect the quality of cut-off walls. We applied the seismic wave CT technology to detect concrete cut-off walls. We also compared the seismic CT results with the borehole core, geotechnical test and water injection test. All show that the seismic wave CT is a fast, accurate and reliable method to detect the quality of concrete cut-off walls. Seismic wave CT has a broad prospect in the nondestructive quality testing of concrete cut-off walls.

**Keywords:** seismic wave CT; concrete cut-off walls; qualities detection; ART



**作者简介:** 潘纪顺<sup>✉</sup> (1968—), 华北水利水电大学资源与环境学院教授, 博士, 主要从事工程地球物理勘探、地震数据处理及地球物理反演等的教学与研究, Tel: 13838111626, E-mail: jspan123@126.com。

## 欢迎订阅《中国体视学与图像分析》

《中国体视学与图像分析》是经国家出版署批准,中国科学技术协会主管、国家一级学会——中国体视学学会主办,全面反映中国体视学理论和图像应用技术研究的学术性和技术性综合刊物。主要报道国内外有关三维结构与图像的定量分析和表征的最新理论与方法,内容涉及体视学、图像分析、三维视觉、三维建模、三维成像与可视化、相关图像的获取(如各种显微镜、CT、物种摄影技术)和处理技术,相关数学原理的研究(如几何概率、分形理论、数学形态学),计算机仿真与信号处理,三维图像技术和定量显微镜技术及其在各专业领域(如生物学、医学、材料科学、地学、矿物学、农学、遥感、计算机、航空等)中的应用。面向广大从事图像技术及体视学研究的高中级科技工作者和高校师生。

本刊为季刊,每季末出版,国内统一刊号:CN 11-3739/R;国际标准刊号 ISSN 1007-1482,国际标准 16 开,是国家科技部中国科技论文统计源期刊(科技核心期刊)、《中国学术期刊综合评价数据库》全文收录期刊、中国期刊网中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊、《中国学术期刊文摘》收录期刊、《中国生物医学文献数据库》收录期刊、《中文生物医学期刊文献数据库》收录期刊、《中国生物医学科学引文数据库》收录期刊和《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊。

欢迎单位和个人直接向本刊编辑部订阅。每期定价 15 元,全年定价 70 元(含邮寄包装费及邮费)。另外,编辑部尚存有部分过刊出售,欲购者请直接与编辑部联系。

邮局汇款:《中国体视学与图像分析》编辑部

地 址:北京清华大学工物系刘聊楼 211 室《中国体视学与图像分析》编辑部

邮 编:100084

电 话:010-62776336

传 真:010-62776336

E-mail: tscss@mail.tsinghua.edu.cn

Web: www.tscss.org

银行汇款:

开户行:北京工商银行中关村支行成府路分理处

账 号:0200095709200034877

收款单位:中国体视学学会