

圆端形桥墩侧向紊流宽度的试验研究

胡旭跃, 祖小勇, 程永舟, 李银发, 王巧洋

(长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 在水槽中进行概化试验, 采用三维声学多普勒测速仪 (ADV) 测量圆端形桥墩周围三维流场及紊动强度分布. 分析有桥墩时的紊流强度垂向分布及有、无桥墩时紊流强度比值的横向分布变化, 分析结果表明, 垂线上紊流强度最大位置在 $0 \sim 0.2h$ 与 $0.8h \sim 1.0h$ 两个区间, 桥墩对紊流强度的变化影响存在极值, 极值大小和出现位置与流速有关, 流速越大, 极值越大, 且极值位置与桥墩的距离也越大. 根据极值出现位置离桥墩距离确定紊流宽度, 给出了桥墩紊流宽度与弗汝德数的关系.

关键词: 紊流强度; 紊流宽度; 圆端形桥墩; 概化水槽试验

中图分类号: U611

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)03-0008-06

建桥后, 桥墩附近会形成强烈的旋涡流场^[1-6], 桥墩周围的旋涡将吸引船(体)尾撞上桥墩^[7-9]. 一些学者以桥墩周围表层水流为研究对象, 借助示踪剂及 PIV 技术来研究紊流宽度^[10-15]; 也有学者以水面以下的水流为研究对象, 使用 ADV 测量瞬时流速, 并对比有墩无墩紊流强度的变化, 确定矩形桥墩的紊流宽度^[16]. 本文在不同断面平均流速下圆端形桥墩周围垂线上紊流强度分布试验的基础上, 对紊流强度的横向分布进行了研究.

1 试验概况

试验水槽长 20.0 m, 宽 1.5 m, 高 0.33 m, 坡度为 2.3‰. 桥墩模型中心线与水槽中心线 (y 轴) 重合, 试验用圆端形桥墩总长 32 cm, 高 32 cm, 截面中间矩形段尺寸为 14 cm × 18 cm (长 × 宽), 选用水泥砂浆制作, 触水面用砂纸打磨光滑. 水槽与测量断面的平面布置见图 1, 图中 S1 ~ S9 断面的 y 向坐标分别为 -5.0, 2.6, 9.0, 12.5, 16.0, 19.5, 23.0, 29.4 和 37.0 cm. 试验采用声学多普勒流速仪 ADV 测量瞬时流速.

试验水深 h 控制为 30 cm, 各组次参数见表 1. 各组次分别测量有墩、无墩时 S1 ~ S9 断面上测点的瞬时流速.

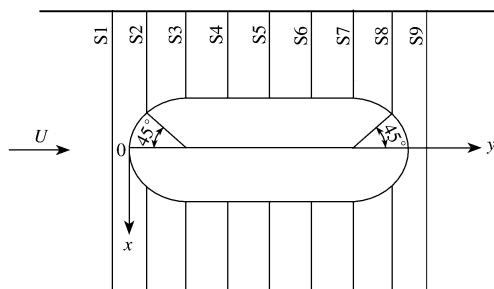


图1 水槽与测量断面的平面布置

Fig. 1 Layout of flume and measuring cross-sections

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 交通部行业联合科技攻关项目 (2003-335-343-42); 湖南省重点学科建设资助项目

作者简介: 胡旭跃 (1962-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 主要从事港航工程及水流泥沙问题的研究.

E-mail: huxuyue62@163.com

表1 各组次参数

Tab. 1 Parameters of each group

试验组次	流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	断面平均流速 $U / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弗汝德数 Fr	雷诺数 Re	水温 / $^{\circ}\text{C}$
1	0.027	0.06	0.034 98	11 648	16.3
2	0.041	0.09	0.058 29	17 561	16.5
3	0.054	0.12	0.069 95	22 530	15.0
4	0.072	0.16	0.093 27	31 219	16.5
5	0.090	0.20	0.116 58	37 551	15.0

2 试验结果与分析

实验过程中 ADV 流速仪采集频率设定为 50 Hz,各测点保持测速 30 s,经 WinADV 软件处理可得到测点三维流速、紊流强度等参数,主要计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 分别为测点纵向(以 y 轴正向为正)、横向(以 x 轴的负向为正)和垂向(以向上为正)的紊流强度; σ 为总紊流强度(无桥墩时记为 σ_0)。

横坐标 x 为离开桥墩模型中心线的距离。根据各试验组次 S1 ~ S9 各断面有墩、无墩各向紊流强度的变化 $\Delta\sigma_u, \Delta\sigma_v, \Delta\sigma_w$ 及有、无桥墩测点总紊流强度比值 σ/σ_0 的横向分布情况,来分析桥墩附近紊流强度的变化。

2.1 垂线上紊流强度分布

选择总长都为 32 cm、截面中间矩形长宽比 b/a 不同的 5 种圆端形桥墩,在不同断面平均流速下,测其周围不同位置垂线上紊流强度的分布情况。本文以 b/a 为最大及最小的 2 种圆端形桥墩与最大、最小断面平均流速的 4 种组合情况为例(见图 2)。

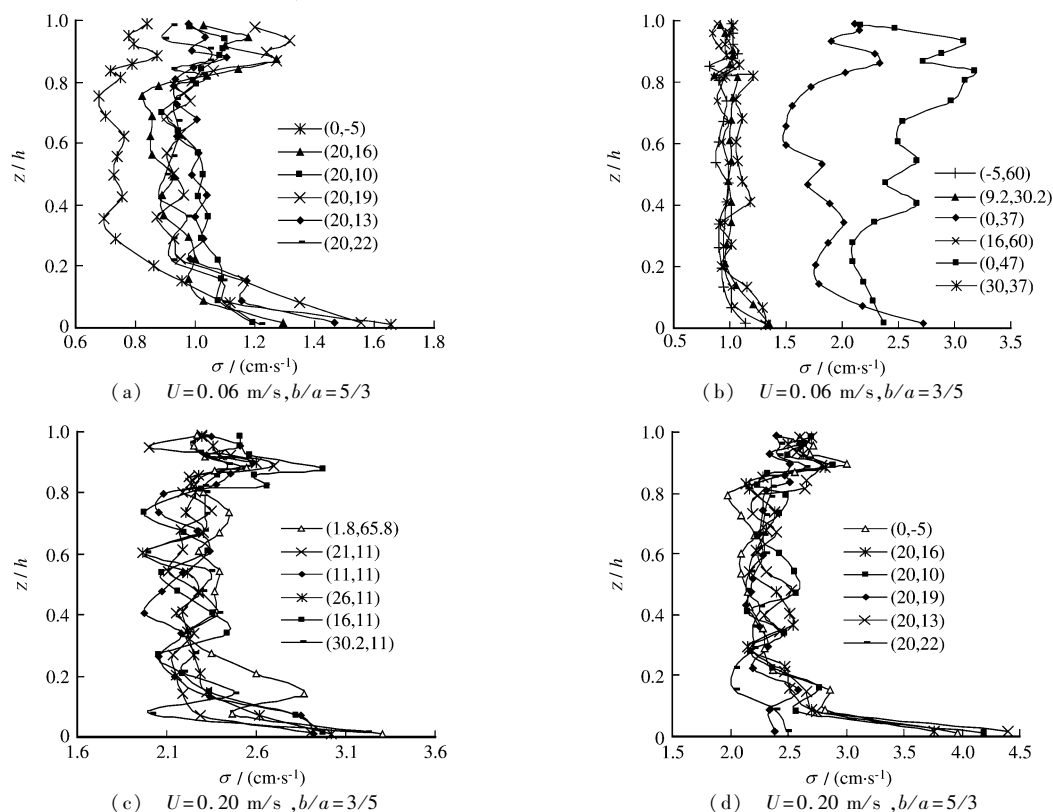


图2 垂线上紊流强度的分布

Fig. 2 Distribution of the turbulence intensity along vertical line

由图 2 可见,水面附近紊动强度相对较小,在 $(0.2 \sim 0.8)h$ 间垂线上紊流强度大小比较均匀,圆端形桥墩周围垂线上紊流强度最大值位于 $0 \sim 0.2h$ 和 $(0.8 \sim 1.0)h$ 两个区间. 在 $(0.2 \sim 1.0)h$ 范围内紊流强度最大值主要集中于 $0.883h$ 附近. 故本文选用 $0.883h$ 处紊流强度横向分布为研究对象.

2.2 相同断面平均流速下紊流强度变化

本文以 $U=0.12 \text{ m/s}$ 时的情况为例,分析各向紊流强度沿横向的分布. 各断面 $\Delta\sigma_u, \Delta\sigma_v, \Delta\sigma_w$ 分布见图 3. 可见,设置桥墩前后的各向紊流强度的横向分布都发生了显著变化,其中纵向紊流强度变幅较大而变化范围较小,垂向紊流强度变幅较小而变化范围较大;设置桥墩后,垂向紊流强度极大值出现的位置离桥墩较近,而横向紊流强度极大值出现位置则离桥墩较远.

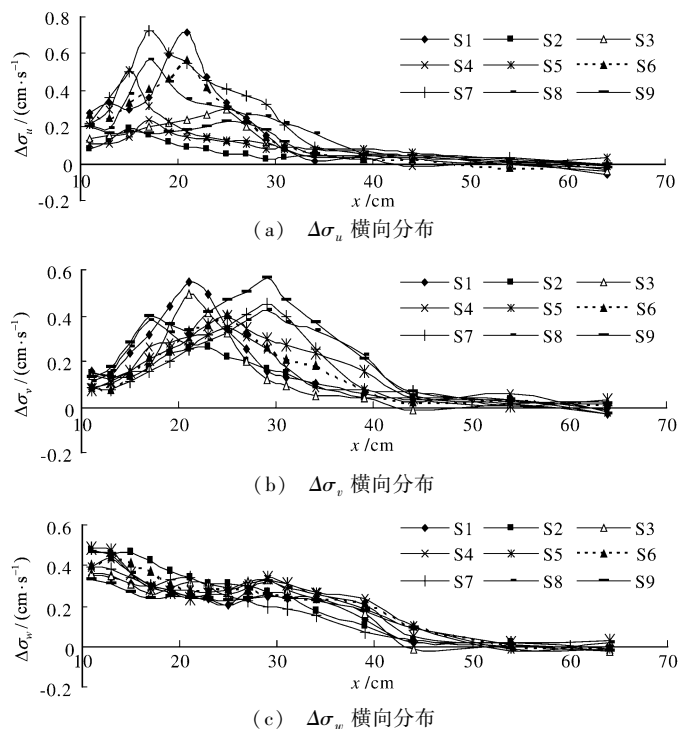
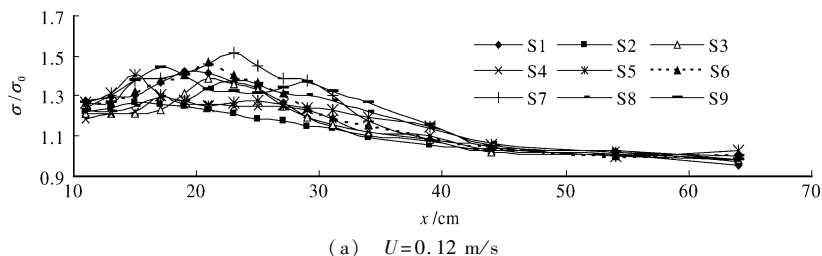


图 3 同一流速 ($U=0.12 \text{ m/s}$) 下各向紊流强度沿横向分布

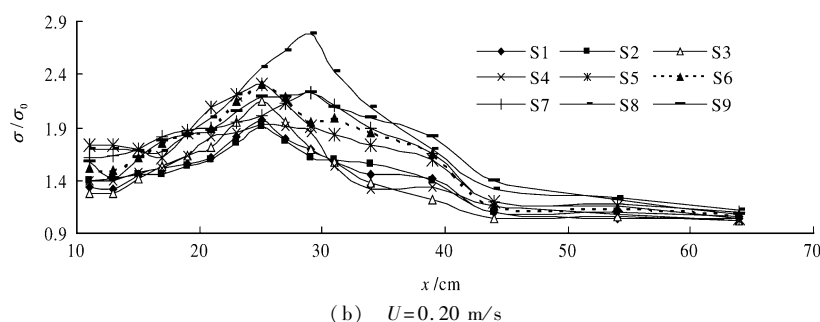
Fig. 3 Lateral distribution of $\Delta\sigma_u$, $\Delta\sigma_v$ and $\Delta\sigma_w$ at each section with the same velocity

2.3 不同断面平均流速下紊流强度变化

不同流速时, σ/σ_0 的横向分布见图 4. 由图 4 可见,同一断面平均流速下,桥墩对各断面紊流强度的影响各不相同;不同断面平均流速情况下, σ/σ_0 极大值出现断面的位置也不同,随着流速的增大,极大值出现的位置离桥墩的距离也增大. 当 U 从 0.12 m/s 增加至 0.20 m/s 时,各断面中 σ/σ_0 最大值由 1.51 增加至 2.86,各断面极值出现位置都在离桥墩 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 之间,即 $0.556D \sim 1.111D$ (D 为桥墩宽度) 之间.



(a) $U=0.12 \text{ m/s}$

图4 不同流速下各断面 σ/σ_0 横向分布Fig.4 Lateral distribution of σ/σ_0 at each section with different velocities

2.4 紊流宽度变化

本文以 σ/σ_0 极大值出现位置离桥墩的距离,即 $(X-D/2)$ 作为紊流宽度 B ,把紊流宽度 B 与桥墩宽度 D 的比值作为相对紊流宽度 B/D .图5为相对宽度 (B/D) 与弗汝德数 $Fr = v/gb$ 的关系曲线.可见, B/D 随弗汝德数的增大而增大,两者的关系可近似表示为 $(B/D) = 3.9977Fr^{0.6}$ (相关系数为0.9797).

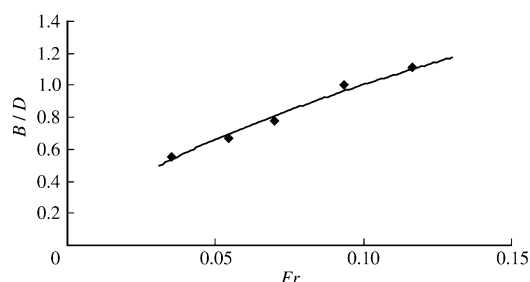
2.5 分析与讨论

由于靠近槽底及桥墩周围表面处的流速梯度和切应力都比较大,加之靠近槽壁及桥墩周围受表面粗糙干扰的影响也比较大,因此,靠近槽壁及桥墩周围最容易形成涡体,使得该处的紊流强度增大^[17].桥墩周围许许多多大小不等的涡体相互掺混,它们的位置、形态、流速都处于不断变化之中,这便是桥墩周围形成紊流的根本原因.

涡体形成以后,涡体旋转方向与水流流速方向一致的一边流速变大,相反一边流速变小,流速大的一边压强小,流速小的一边压强大,涡体上下两边产生的压差,形成作用于涡体的升力,这种升力就有可能推动涡体脱离原流层而掺入流速较高的邻层,从而扰动邻层进一步产生新的涡体;圆端形桥墩迎水圆弧分流增加了墩周背离桥墩一侧的流速,桥墩则限制了涡体的扩散空间,使得靠近槽底及桥墩周围表面形成的涡体横向上往背离桥墩一侧扩散,垂向上往表层扩散,从而使桥墩周围表层水体集聚大量的涡体,桥墩一侧离墩一定距离处出现涡体密集区.当一系列参差不齐的涡体连续通过紊流中某一定点时,必然反映出流速的脉动^[17],涡体密集点流速的脉动更为显著,从而产生更大的紊流强度.

涡体在靠近槽壁处及接近水面处的大量富集是圆端形桥墩周围垂线上紊流强度最大点在 $0 \sim 0.2h$, $0.8h \sim 1.0h$ 两个区间非均匀分布的重要原因.断面横向上涡体密集点以外位置,涡体富集程度随着距离桥墩位置的增加而降低,流速的脉动也逐渐减弱,紊流强度相应减小.随着断面平均流速的增大,靠近槽壁及桥墩周围表面形成的涡体大量增加,涡体间相互掺混也更为剧烈,桥墩迎水圆弧分流等进一步增加了墩周背离桥墩一侧的流速,使得墩周断面涡体密集点外移且流速的脉动更为剧烈.因此,随着断面平均流速的增大,桥墩对水流紊流强度极值的影响变大,且出现位置离桥墩距离更远.

极值点范围内的水流,一方面属于复杂三维下降水流,另一方面因边界分离产生回流并伴随着旋涡,对周围水体产生较大的吸附作用,从船舶和桥梁的安全考虑,桥渡航道的边线宜布置在该紊流宽度以外.本文根据试验结果,得出了直道单墩情况下圆端型桥墩紊流宽度与 Fr 数的关系.实际上,影响紊流宽度的因素还包括墩形、来流角度等,今后还需作进一步深入研究.

图5 B/D 与弗汝德数 Fr 的关系曲线Fig.5 Relationship between B/D and Fr

3 结 语

(1) 桥墩周围复杂的三维水流和桥墩前部及两侧的各种旋涡,是导致墩周水流紊流强度加剧并产生极大值的主要原因,也是导致墩周表层水体产生较大吸附作用危及行船安全的重要原因;

(2) 设置桥墩后,在紊流核心区离桥墩一定距离处出现紊流强度极大值,随着断面平均流速的增大,极值变大且出现位置离桥墩距离更远;

(3) 试验中, Fr 数取值范围为 $0.035 \sim 0.1166$,此范围内紊流宽度随 Fr 数的增大而增加。

参 考 文 献:

- [1] SUBRATA K CHAKRABARTI, MARK MCBRIDE. Model tests on current forces on a large bridge pier near an existing pier [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(3): 212-219.
- [2] SUBHASISH DEY, RAJKUMAR V RAIKAR. Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(4): 399-412.
- [3] GOKHAN KIRKIL, GEORGE CONSTANTINESCU, ROBERT ETTEMA. The horseshoe vortex system around a circular bridge pier on equilibrium scoured bed[C]//World Water and Environmental Resources Congress, Alaska: EWRI, 2005.
- [4] MICHAEL A STEVENS, MOHAMED M GASSER, MOHAMED B A M SAAD. Wake vortex scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(7): 891-904.
- [5] JENNIFER G DUAN. Two-dimensional model simulation of flow field around bridge piers[C]//World Water and Environmental Resources Congress, Alaska: EWRI, 2005.
- [6] 英爱文, 陈松生, 原金勇. 桥上测流的技术方法和精度研究[J]. 水文, 1997(4): 32-35. (YING Ai-wen, CHEN Song-sheng, YUAN Jin-yong. Approaches and accuracy of discharge measurement on bridge[J]. Hydrology, 1997(4): 32-35. (in Chinese))
- [7] 沈小雄, 程永舟, 胡旭跃, 等. 航道边线与桥墩之间安全距离的研究[J]. 水运工程, 2004(11): 85-88. (SHEN Xiao-xiong, CHENG Yong-zhou, HU Xu-yue, et al. Safe distance between channel sideline and bridge pier[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(11): 85-88. (in Chinese))
- [8] 钟敏雄, 谢永彰. 通航桥孔跨度的计算方法探讨[J]. 中南公路工程, 2005, 30(1): 185-187. (ZHONG Min-xiong, XIE Yong-zhang. Approach to calculation of navigable bridge span[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(1): 185-187. (in Chinese))
- [9] GB50139-2004, 内河通航标准[S]. (GB50139-2004, Standard for Inland River Navigation[S]. (in Chinese))
- [10] 胡旭跃, 沈小雄, 程永舟, 等. 墩柱周围水流表层涡旋区宽度的试验研究[J]. 长沙理工大学学报, 2004, 1(1): 39-42. (HU Xu-yue, SHEN Xiao-xiong, CHENG Yong-zhou, et al. Experimental investigation on width of superficial eddy area around cylindrical pier[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2004, 1(1): 39-42. (in Chinese))
- [11] 薛小华, 刘怀汉, 茆长胜. 桥墩扰流对通航净宽尺度影响的试验研究[J]. 水运工程, 2008(1): 78-81, 86. (XUE Xiao-hua, LIU Huai-han, MAO Chang-sheng. Experimental research on influence of disturbed flow at bridge pier on navigation clearance[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(1): 78-81, 86. (in Chinese))
- [12] 刘怀汉, 茆长胜, 袁达全. 跨河建筑物通航净宽、净高专题研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2006. (LIU Huai-han, MAO Chang-sheng, YUAN Da-quan. Monographic study report on the navigation net width and net height of the structure crossing over river[R]. Wuhan: Yangtze River Channel Planning and Design Institute, 2006. (in Chinese))
- [13] 庄元, 刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 中国航海, 2007(3): 5-9. (ZHUANG Yuan, LIU Zu-yuan. Experimental investigation on turbulent flow width around bridge pier[J]. Navigation of China, 2007(3): 5-9. (in Chinese))
- [14] ZHUANG Yuan, LIU Zu-yuan. Experimental study on the width of the turbulent area around bridge pier[J]. Journal of Marine Science and Application, 2007, 6(1): 53-57.

- [15] ZHUANG Yuan. Experimental study on turbulent width around bridge piers[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English Edition), 2007, 15 (1): 45-48.
- [16] 何小花, 陈立, 王鑫, 等. 桥墩紊流宽度的实验研究[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 49-53. (HE Xiao-hua, CHEN Li, WANG Xin, et al. Experimental study of turbulent width at pier[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(3): 49-53. (in Chinese))
- [17] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2004. (WU Chi-gong. Hydraulics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))

Experimental study of lateral turbulent flow width at round-ended pier

HU Xu-yue, ZU Xiao-yong, CHENG Yong-zhou, LI Ying-fa, WANG Qiao-yang

(School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: The conceptual experiment has been done in a flume, and the three-dimensional ultrasonic Doppler speedometer ADV is used to measure the 3-D flow field and the turbulence intensity field around a round-ended pier. The vertical distribution of the turbulence intensity with the pier and the traverse distribution of the turbulence intensity ratio in the flume with or without the pier have been analyzed. The results show that the location of the maximum of the turbulence intensity on the perpendicular line is to present an inhomogeneous distribution from 0 to 0.2 h and from 0.8 h to 1 h; the influence of the pier on the turbulence intensity can come to a maximum; and the value of the maximum and the distance from the location where the maximum occurs to the pier both increase along with the increase of the flow velocity. Based on the distance, the relationships between the width of the turbulence with the pier and the Froude number have been presented.

Key words: turbulence intensity; width of turbulent flow; round-ended pier; conceptual flume experiment

欢迎征订《水利科技与经济》

《水利科技与经济》是中国核心期刊(遴选)数据库刊源,中国期刊网收录期刊,中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊,美国《剑桥科学文摘》CSA数据库刊源,俄罗斯《文摘杂志》AJ数据库刊源,被美国《气象学与地球天体物理学文摘》网络数据库收录。

《水利科技与经济》是国家新闻出版署、国家科委批准的正式科技期刊,是哈尔滨市水务科学研究院主办的综合性技术期刊,国内外公开发行,具有权威性高、信息量大、可读性强的特点,受到广大读者及水利经济界专家的欢迎。

《水利科技与经济》的对象主要是从事水利水电建设的规划、勘测、设计、施工、科研、监理、生产运行和管理等方面人员,以及大专院校师生。

《水利科技与经济》为月刊,月末(30日)出版,邮发代号14-316;国内定价:每期10元,全年120元(含邮费),读者可通过邮局或本刊发行部订阅。联系电话:(0451)2711207-8205/8206;联系人:杨文。