

苏州河河口水闸流体激振模型试验

罗银淼¹, 刘佑清², 吕飞鸣³

(1. 浙江大学应用力学研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市江干区农居建设管理中心, 浙江 杭州 310017;
3. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要 针对水工闸门的流激振动问题普遍存在, 但是振动强度难于预测的特点, 通过双模型试验获得结构振动响应特征, 即通过变态相似的水力学模型试验获得流体激振载荷功率谱密度, 借助严格比例的结构模型试验获得液固耦合下的结构分析点的传递函数, 通过数值计算得到不同工况下闸门过流时的振动随机响应特征。在苏州河河口水闸大型翻板闸门的应用结果表明, 该方法合理有效, 通过模型试验与随机响应计算, 预测实际流激振动的随机响应特征量。门顶过流时该闸门的振动响应集中在低频段, 在安装破水器后, 水流激振载荷大幅度降低, 该闸门对波浪载荷作用将是敏感的, 必须给予充分关注。

关键词 翻板闸门 双模型试验 液固耦合 流体激振 波浪载荷 破水器 苏州河河口水闸

中图分类号 :TV131.3 ;TV66 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)S1-0101-05

水工闸门是水利枢纽的控制结构, 其使用过程中的振动是影响结构稳定性及其强度的主要因素。由于流固耦合的复杂性, 很难通过理论计算获得振动精确解。其复杂性包括: 流固耦合振动时闸门的模态特性变化、流体过流时的流态、流体与闸门间可能出现的负压及其水体空腔破裂等。

苏州河河口水闸采用 100 m 超大跨度水闸翻板门, 具有双向挡水的功能, 遇天文大潮时挡外江 1 000 年一遇设计高潮位, 低潮时抬高内河水位, 通过闸门的后启灵活控制调节内河水位。水闸的挡水结构为 1 扇由底轴驱动的单宽 100 m、高 9.76 m 的翻板闸门, 由设在左右机房内的液压启闭机操作, 液压启闭机液压缸通过固定于底轴端部的拐臂驱动翻板闸门。水闸闸孔净宽 100 m。挡潮水运行时闸门门叶成铅直锁定状态, 挡河水运行时闸门门叶成倾斜锁定状态。

曾经有人对 25 m 宽、1.55 m 高的翻板闸门进行过原型试验^[1], 但是底轴驱动的超大跨度水闸翻板门, 其过流时流体激发振动的安全性缺乏相应的基础研究, 因此通过试验研究的方法预估闸门振动响应显得十分必要。超大跨度的闸门液固耦合振动试验模拟目前有几个技术难点, 主要是模型相似数的不确定性。流激振动水弹性相似律国内外都有研究

和论著, 普遍认为在有自由液面的流场中惯性力和重力起着决定性作用。水弹性相似模型就是在重力相似的水力学模型中必须同时满足结构弹性振动相似的模型, 曾经有报道这方面研究的进展^[2-5], 但是对于跨度高度比很大的模型并不适用。其次大跨度的水力学试验对试验设备、试验精度的要求难以满足。本课题研究的超大跨度水闸翻板门工作时过流流速不大, 在水流自由跌落后进入下游水体消能, 同时可能产生过流水体与闸门形成封闭空腔, 进而造成负压。而在挡水状态, 仅仅受波浪力作用, 因此总体模型的雷诺数不大。因此, 本问题的流激振动又与常规的闸门涡激振动^[6-7]不同, 门后的不稳定流对闸门的影响不大。

为了正确简洁地模拟该闸门过流时的振动响应, 采用了双模型法, 即采用变态相似的水力模型试验与全相似的结构模型试验。水力模型模拟了水力学上的相似, 但是模型宽度尺寸较小, 以保证在一定场地要求、一定流量要求时满足结构高度与厚度的指标, 获得测试点的压力脉动、液压支撑的反力等参数。结构模型试验考虑液固耦合时的模态特性, 以及在过流工况下水力作用与波浪力作用时闸门的动态响应。

1 水力学试验研究

苏州河翻板闸门的特点是宽度远大于高度,其总宽度为 100 m,所以认为在宽度方向的流速基本均匀,在模型试验中可以用较小的宽度来近似。按设计给定的上、下游水位及流量进行试验。试验在宽 1 m、长 30 m 的玻璃水槽内进行,埋设应变片以测试实际底轴的扭矩。测试不同开度下不同流量时的脉动压力与扭矩。力比尺 $\lambda_F = \lambda_L^3$,因此根据模型支撑力计算得到模型的液压启闭力,再换算到原型。在闸门倾斜状态下门顶过流时,水流对闸门形成动荷载作用。具体表现为随机水压力作用,而闸门的振动响应取决于脉动水压力的功率谱频率范围。了解脉动压力的频带以及强度是决定液固耦合作用的基本要素。试验中压力传感器埋设于门顶下 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm, 45 cm, 依次为测点 1 ~ 5,同时为了比较模型宽度方向压力脉动的相关度,在与测点 5 同一高程下距离该点 30 cm 处埋设比较测点。其模型试验特征量见表 1。试验结果表明,门叶结构在过流时存在不同程度的脉动压力,图 1 为门顶高程 1.5 m、上水位 2.5 m 时的脉动压力。

表 1 门顶过流时脉动压力特征值

<i>H</i> /m	<i>H</i> ₀ /m	<i>p</i> /Pa	<i>p</i> _{rms} /Pa	<i>f</i> /Hz
3.0	3.5	5.52	1.68	1.12
2.5	3.0	6.60	2.40	1.40
2.5	3.5	10.32	3.72	1.33
2.0	2.5	4.32	1.32	1.25
2.0	3.0	13.80	5.76	1.88
2.0	3.5	18.88	6.60	1.63

注:*H* 为门顶高程,*H*₀ 为内河水位,*p* 为原型脉动压力幅值,*p*_{rms} 为原型脉动压力均方根值,*f* 为卓越频率。

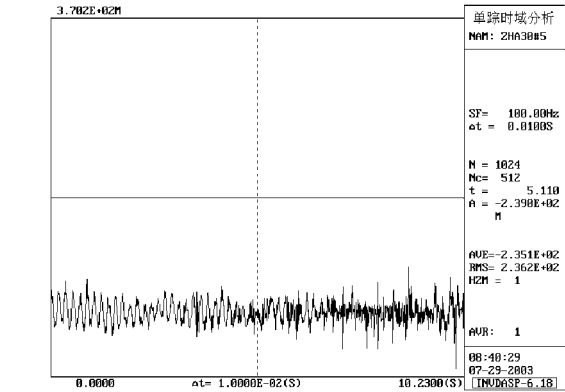


图 1 门顶过流时的脉动压力(屏幕显示)

测试结果表明,模型脉动压力幅值最大达到 4.24 Pa,相当于原型 51 Pa,对应的模型脉动压力均方根值为 1.19 Pa,相当于原型 14.3 Pa,水流脉动的卓越频率在 1.12 ~ 1.88 Hz 的小范围波动。作用范围在门叶的 0.86 ~ 2.06 m 高程。对脉动压力而言,

这一高程恰好在下流水位线附近,由于自由水面与水舌互相作用、翻滚,引起水压力的变化。

从测试数据看到脉动压力变化较大,相对于静水头而言,脉动压力幅度最大达到了上下游水头差的 29.7%,如此大的脉动压力究其原因为封闭气腔的压力变化所致。由于封闭气腔内的压力为负压,造成气腔内的水柱上升,到达一定程度,造成掺气水舌。气泡在上升到面板后不断破灭,压力传感器显示出很大的脉动压力,同时对门叶造成较大的瞬间冲击载荷,可能产生较大的振动响应,也会引起底轴扭矩的较大波动。

为了说明掺气水体的脉动压力是扭矩脉动的起因,可以通过传递函数来分析。图 2 所示的是水压力作为输入参数、扭矩作为输出参数的传递函数分析结果,在卓越频率处相关系数达到 0.996,表明扭矩的变化完全是由于脉动压力所致,排除了振动造成的影响。

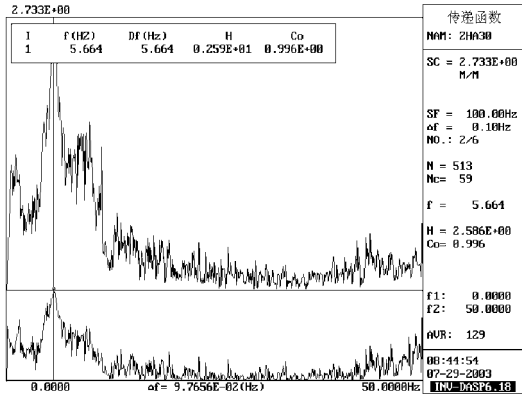


图 2 扭矩对脉动水压力的传递函数与相干系数(屏幕显示)

2 翻板门动力响应结构模型研究

流体激振下结构振动响应的作用机理是结构与流体的互相作用。在本研究对象中,可认为闸门结构是在一个平稳的随机水载荷作用下产生响应,同时假定水脉动载荷是可测量的,把低速流动的水流载荷作用下结构的振动分解为水载荷测试与结构响应测试两个不同的物理模型,获得闸门结构不同开度、不同过流状态时的振动特征。

对于平稳的随机过程,其随机激振下响应的均值为

$$E[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) E[f(t - \tau)] d\tau = E[f(t - \tau)] \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) d\tau = \mu_f H(0) \quad (1)$$

而

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) d\tau \quad (\omega = 0)$$

同时根据自谱密度

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

可得出

$$S_x(\omega) = |H(\omega)|^2 S_f(\omega) \tag{2}$$

而响应的均方值为

$$E[x^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega \tag{3}$$

即响应的自谱密度函数等于激振力的自谱密度函数与系统频响函数模的平方的乘积,而响应的均方值可以从自谱密度得到,从而构建了完整的响应特征的试验与计算方法。根据上面的数学原理,可以设计模型试验中复杂体系的动态响应计算方法,步骤如下:

a. 在水力学模型中确定不同工况时平稳随机过程下的脉动水压力时域信号与频域自谱密度函数,扭矩的时域信号与频域自谱密度函数,这些基本量作为结构振动模型试验时的输入、参数。

b. 建立结构振动模型,采用试验模态技术测试不同液固耦合工况下的模态参数包括模态频率与模态振型。与常规的模态测试不同的是,激振力的选择不能影响水流的附加质量效应^[1,8],试验中选择液压后闭力作用点作为力输入的单输入、多输出方法。

c. 采用在扭矩作用点的冲击激励下的结构动态响应。当冲击激励调节到脉冲宽度能激励出一定带宽时,其测试点输出量对扭矩作用点的输入量的传递函数可以认为系统对输入点的频响函数。

d. 把水力学模型获得的扭矩功率谱密度进行变换,根据式(2)计算获得感兴趣测点物理量的自谱密度函数。

3 流激振动时闸门响应特征

根据上面的分析思路,进行了一系列的试验与计算。本文给出设计常用门顶过流工况时水流载荷作用下的闸门响应。响应点选取在门顶,离导流墙23 m处,编号为8号。这里门顶高程为2.0 m,内河水位3.0 m工况下加速度功率谱图 S_x 与位移 x (顺水流方向)幅值谱图,见图3、图4。

加速度功率谱图有以下特征:

a. 在各模态频率处响应出现不同程度的峰值。由于结构整体响应都很小,闸门结构处于弹性范围,所以任何激励的响应都可以体现为模态叠加,在频域上自然是在各模态频率点的响应出现局部峰值。

b. 在超低频范围(第一阶模态频率以下)也有一定的振动响应存在。测试结果体现了结构的柔度很大,其准静态响应随着下游水位的波动而改

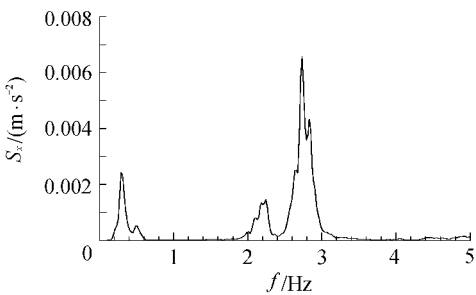


图3 门顶振动加速度功率谱

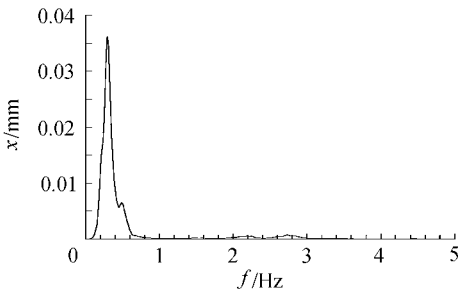


图4 门顶摆位移谱

变。该低频响应是准静态在频域反映,其变化量在位移量上的体现更加直接。

c. 在较高频率处非模态频率点偶尔出现较大的加速度响应。研究表明,该非模态频率是背水面钢板的自振及水流噪声。由于背水面水流气泡的破裂诱发声波冲击,其局部的振动会反映在附近测点的振动量上,而对整体影响极小。

对于闸门振动分析而言,研究位移量能直接和变形联系起来。门顶位移幅值谱图有以下特征:

a. 仅在在低频处出现不同程度的响应。翻板门振动的特点是低频端的响应更加值得重视。本工程采用底轴驱动,其大跨度决定了振动响应也集中在低频。因此总体趋势是符合翻板门的特点的。

b. 在超低频范围(第一阶模态频率以下)也有较大的振动响应存在。根据测试分析结果,给出了门顶振动位移响应的均方根值、第一阶模态频率处振动位移幅值及超低频摆动的位移幅值。就水流激振频率范围而言,已经涵盖了闸门的模态频率,理论上可以认为有激发共振的可能性。试验结果表明,模态频率处的振动很小,原因如下:①水流激振是随机载荷,其相位也是随机的,因此随机激励下的能量积聚没有确定性振动中的共振那样强烈。②水体与闸门传动机构的阻尼是另一个重要因素,它是第一阶模态频率附近能量耗散的主要途径。所以在位移响应幅值图上,第一阶模态频率附近的响应频谱并不尖锐。③水流激励的强度不大。水力学试验发现常规闸门过流时门后负压严重,因此改进设计安装了破水器,从根本上消除了容易出现的负压现象,极大地降低了水力脉动的强度。

由于门叶抗扭刚度很低,所以它的变形对上下游水头差很敏感,在试验过程中发现,过流后尾水造成下游水面的波浪对门叶的变形有较大的影响,即超低频摆动现象,它有别于振动,是一种准静态的力产生的准静态位移。如果下游的风致浪及涌浪,特别是该工程所处位置附近的钱塘江及长江口涌浪具有独特的规律性^[9],作用频率也接近结构模态频率,值得进一步分析研究。

c. 在较高频率处尽管加速度响应比较大,其位移值均很小。

4 流体激振的根源

为了探究流体激振载荷的规律,进行了水力学流态实验。试验在宽 1 m、长 30 m 的玻璃水槽内进行,为增加模型的刚度,在模型两侧附设撑杆,并埋设应变片以测试实际底轴的扭矩。试验结果表明,没有安装破水器的门叶结构在过流时存在不同程度的脉动压力,其典型的脉动压力时程曲线示于图 5。

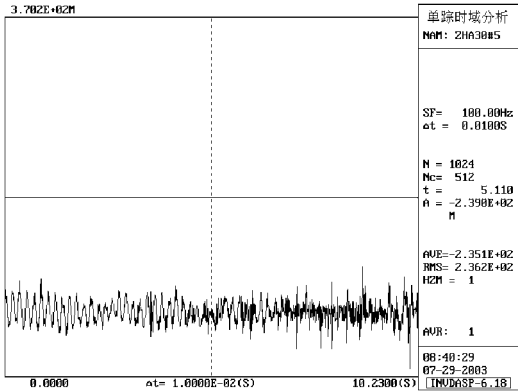


图 5 上游水位 2.5 m、下游水位 0.24 m 时的脉动压力(屏幕显示)

测试结果表明,门顶过流时封闭气腔的负压和脉动压力的强度有很大关系。模型脉动压力幅值最大达到 424 Pa,相当于原型 5 100 Pa,对应的模型脉动压力均方根值为 119 Pa,相当于原型 1 430 Pa,水流脉动的卓越频率在 1.12 ~ 1.88 Hz 的小范围内波动。作用范围在 6 号、7 号测点,即门叶的 2.06 m 高程至 0.86 m 高程之间。对脉动压力而言,这一高程恰好位于下游水位线附近,由于自由水面与水舌互相作用、翻滚,引起水压力的变化。

从测试数据看到脉动压力变化较大,相对于静水头而言,最大达到了上下游水头差的 29.7%,如此大的脉动压力是不多见的,甚至于在高速水流引发的脉动压力也没有到达这个程度,究其原因因为封闭气腔的压力变化所致。由于封闭气腔内的压力为负压,造成气腔内的水柱上升之,到达一定程度,造成掺气水舌。气泡在上升到面板后不断破灭,压力

传感器显示出很大的脉动压力,同时对门叶造成较大的瞬间冲击载荷,可能产生较大的振动响应,也会引起底轴扭矩的较大波动。

为了说明掺气水体的脉动压力是扭矩脉动的起因,可以通过传递函数来分析。图 6 所示的是水压力作为输入参数、扭矩作为输出参数的传递函数分析,在模型上 $f = 5.66 \text{ Hz}$ 的卓越频率处相关系数达到 0.996,表明扭矩的变化完全是由于脉动压力所致,排除了振动应力的影响。

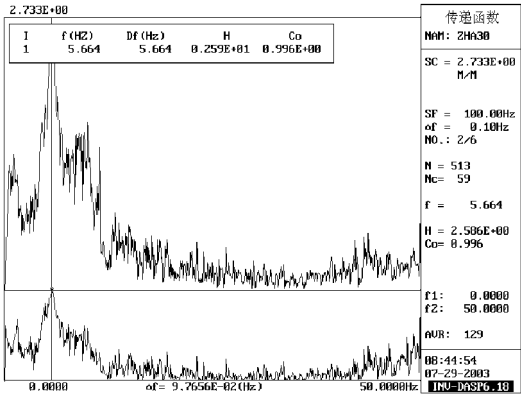


图 6 扭矩对水压力的传递函数,相干系数达到 0.996(屏幕显示)

在门叶顶部安装破水器后,从脉动压力谱分析图发现,脉动压力的优势频率已不十分明显,各频率段的激励强度比较均匀而且很小。从水力学角度理解为首破水器破坏了门后的封闭气腔,极大地削弱了压力波动范围 其次是扰动了门顶水流,使得较均匀的流场变得紊乱,脉动压力的能量不至于集中在某个频率段,从而不易诱发闸门振动。

5 结 语

通过试验研究与分析,可以看出双模型方法能方便地解决闸门流激振动模拟。通过变态相似水力学获得水流激振功率谱,通过结构模型试验获得液固耦合结构的传递函数,进而获得流激振动响应。研究结果表明,该方法是切实可行的。

超大跨度闸门在门顶过流时,在安装破水器之后,水流激振降低了门后负压,极大地削弱了压力的波动范围,没有引发闸门的大幅度振动,而下游的波浪作用有可能引发闸门的有害晃动,需要结合波浪谱做进一步的研究。

参考文献:

[1] ISHU N,KNISLEY C W. Field study of long-span shell-type undergoing flow-induced vibrations [J]. J of Flows and Structures,1995(9) :19-41.
[2] 孙小鹏,宁勇. 钢闸门流激振动的模拟试验技术 [J]. 河海大学学报,1998,26(2) 8-12.

[3] 吴杰芳,张林让,陈敏中,等.三峡大坝导流底孔闸门流激振动水弹性模型试验研究[J].长江科学院院报,2001,18(5):76-79.

[4] ZHANG M M, CHENG L, ZHOU Y. Closed-loop control of fluid-structure interactions on a flexibly supported cylinder[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004,23:189-197.

[5] 吴一红,谢省宗.水工结构流固耦合动力特性分析[J].水利学报,1995(1):27-34.

[6] 练继建,彭新民,崔广涛.水工闸门振动稳定性研究[J].天津大学学报,1999,32(2):171-176.

[7] SARPKEYA T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations[J]. J of Flows and Structures, 2004, 19:384-447.

[8] DANIELL W E, TAYLOR C A. Full-scale dynamic testing and analysis of a reservoir intake tower[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994,23(11):1219-1237.

[9] 邵卫云,毛根海,刘国华.钱塘江涌浪压力动态测试与分析研究[J].浙江大学学报:工学版,2002,36(3):247-251.

(收稿日期:2007-01-15 编辑:高建群)

(上接第 76 页)

b. 铝系可以通过添加稀土元素提高涂层和基体的结合力,涂层与基体结合力从优到劣排序为 $RmAl > AcAl > Al_0$.

c. 铝系可通过添加其他合金元素改善涂层的电化学性能,提高涂层对基体的电化学保护作用,铝系涂层电化学保护作用排序为 $RmAl > AcAl > Al_0$.

4 结 语

苏州河河口水闸金属结构水下部分要求 30 a 免维护,目前国内没有现成的防护方案可以借鉴。通过广泛技术征询、专家论证,特别是专项试验,对最终确定河口水闸金属结构水下防护方案起到了决定性的作用。河口水闸金属结构水下部分已于 2004 年 10 月下水,2005 年进行单机、联合调试,并于 2005 年底完成工程初步验收。经过近两年半的水下运行,金属结构水下防护体系目前情况良好。河口水闸金属结构水下部分采用的热喷涂 $RmAl$ 合金复合涂层技术加电化学阴极保护技术的“双重防护”体系有望完成 30 a 的水下防护使命,可以为将来的类似工程提供借鉴。

参考文献:

[1] 罗启全.铝合金的熔炼与铸造[M].广州:广东科技出版社,2002:33-35.

[2] 于兴文,曹楚南,林海潮,等.铝合金表面稀土转化膜的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2000,20(5):299-307.

[3] MANSFELD F, BRESLIN C B, PARDO A, etc. Surface modification of stainless steel: green technology for corrosion protection[J]. Surface and Coatings Technology, 1997,90(3):224-228.

[4] 胡正前,张文华.稀土对复合表面处理 H13 钢耐磨性和高温抗氧化性的影响[J].中国稀土学报,1999,17(3):280-283.

[5] HINTON B R W, AMOTT D R, RYAN N E. The inhibition of aluminum corrosion by cerium cations[J]. Metal Forum, 1984, 7(4):211-217.

(收稿日期:2007-01-15 编辑:骆超)

(上接第 100 页)

[7] 严根华,阎诗武.水工弧形闸门的水弹性耦合自振特性研究[J].水利学报,1990(7):49-55.

[8] WESTEGAARD H M. Water pressure on dams during earthquakes[J]. Trans Amer Soc Civ Engng, 1933,98:418-472.

[9] 邵卫云,毛根海,刘国华.钱塘江涌潮压力的动态测试与分析研究[J].浙江大学学报:工学版,2002,36(3):247-251.

[10] WEN Sheng-chang. Effect of water depth on wind-wave frequency spectrum I: spectral form[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1996,14(2):97-105.

[11] 孔亚珍,丁平兴.长江口附近海域台风浪特征分析[J].华东师范大学学报:自然科学版,2001,9(3):85-90.

(收稿日期:2007-01-15 编辑:熊水斌)

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊 《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号:28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文,设有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号:28-244,2007 年每期定价 8 元,全年 6 期共计 48 元。读者亦可直接向编辑部订阅。欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单。编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部。联系电话:025-83786335, E-mail: jz@hhu.edu.cn, http://kbb.hhu.edu.cn. 汇款时务请注明“订水利水电科技进展”。