

文章编号:1005-9865(2017)04-0053-06

强潮河口桥墩涌潮压力试验研究

李 颖¹, 潘冬子², 潘存鸿²

(1. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘 要:为明确强潮河口设计条件下涌潮压力特征,以嘉绍大桥工程为背景进行了涌潮压力的动态测试和分析。选取主墩围堰和施工栈桥进行现场观测,分析了涌潮压力分布及其变化的特点。利用经验模态分解法,研究了涌潮压力的时均和脉动特性,建立了涌潮压力及其脉动分量极值与涌潮高度的拟合关系。研究表明:涌潮压力变化脉动性强,经验模态分解法能较好地处理这种非平稳时变信号;时均分量反映了局部水位的平均变化趋势,脉动分量反映了涌潮与结构物相互作用时自由水面的紊动情况;从垂向分布上看,压力极值在潮前低水位附近最大,并随着传感器安装高程的增加而减小;从平面分布上看,主墩围堰的迎潮面压力极值最大,背潮面最小;涌潮压力及其脉动分量的极值与涌潮高度满足指数分布规律。

关键词:强潮河口;涌潮;水压力;经验模态分解;桥墩;信号处理

中图分类号:U446; TV139.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2017.04.007

Experimental study of tidal bore-induced pressures on piers in a macro-tidal estuary

LI Ying¹, PAN Dongzi², PAN Cunhong²

(1. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: To understand the characteristics of tidal bore-induced pressures on design condition in a macro-tidal estuary, the Jiashao Bridge on the Qiantang River was cited as an example and a dynamic test in site during the construction of the bridge was performed. The tidal bore-induced pressures on main pier cofferdam and construction trestle were measured, and the features of distribution and the change of the pressures were analyzed. The time-averaged and fluctuating pressures due to the tidal bore were discussed by the Empirical Mode Decomposition (EMD) method. A fitting relationship between the pressures extremum and the height of the tidal bore was developed. The measured pressures possess the characteristics of strong fluctuation and the EMD method can effectively deal with the non-stationary and time-varying signals. The time-averaged components reflected the mean change trend of the local water level and the fluctuating components reflected the turbulence of the free surface on the interaction between the tidal bore and the structures. For the vertical distribution, the location of the maximum pressure extremum was on the vicinity of the low water level and the values decreased with the increase of the sensor installation level. For the plane distribution, the location of the maximum pressure extremum was on the upstream face of the main pier cofferdam and the minimum value was on the downstream face. The relationship between the total pressure extremum and the height of tidal bore agreed with exponential distribution law and the fluctuating components as well.

Keywords: macro-tidal estuary; tidal bore; water pressure; empirical mode decomposition (EMD); pier; signal processing

钱塘江河口是典型的强潮河口,涌潮是钱塘江河口潮汐的重要特征。外海潮波经杭州湾、钱塘江河口下游段向上游传播过程中,因河宽收缩变窄和河床沙坎抬高而产生剧烈变形,使涨潮波前形成明显的行进锋

收稿日期:2016-11-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51379190,50809062);国家留学基金项目(2011833140)

作者简介:李 颖(1979-),女,浙江金华人,副教授,主要从事水利工程防灾减灾方面的研究。E-mail: liying@zjweu.edu.cn

通信作者:潘冬子,男,教授级高级工程师。E-mail: pandz@zjwater.gov.cn

面^[1]。单向水流、波浪对涉水构筑物的作用力已经有了比较成熟的计算方法和工程设计规程,但由于涌潮现象发生的地域性及其自身的复杂性,在理论上对涌潮作用力研究的深度和广度还比较欠缺。一般为了解决生产实际问题而基于现场观测和室内试验研究得到涌潮作用力的相关成果。杨永楚^[2]在钱江二桥南岸利用施工栈桥和桥墩桩基护筒进行了涌潮压力观测;陈希海等^[3]实测了钱塘江旧仓段海塘织物模袋混凝土护坦涌潮压力过程;郦丽娟等^[4]对海宁八堡 44# 丁坝坝头的环梁和挂桩进行了涌潮作用下的受力观测;林炳尧等^[5]对排桩式丁坝涌潮作用力进行了试验研究;邵卫云等^[6-7]对钱塘江六桥桥墩所受的正面涌潮压力及回头潮压力全过程进行了动态测试;陈海军等^[8]对排桩式丁坝上的涌潮压力进行了现场观测;沈跃军等^[9]研究了钱塘江北岸海宁段鱼鳞石塘在涌潮作用过程中受到的作用力。但由于涉水构筑物的形式各异,现场测试仪器、河床地形和水沙条件各不相同,目前对涌潮压力的理论分析和认识仍存在较大的差异。

嘉绍大桥北起海宁,南接上虞,是继杭州湾跨海大桥后,又一座横跨杭州湾的特大型桥梁。嘉绍大桥位于钱塘江尖山河段,受河口下移的影响,这里已成为钱塘江涌潮发展壮大的水域。由于江道宽浅、潮强流急、含沙量大等原因,使得主槽摆动频繁^[10]。因此,嘉绍大桥主航道桥采用的是六塔独柱分幅四索面钢箱梁斜拉桥方案^[11],使主桥长度达 2 680 m,分出 5 个主通航河道,以适应河床主槽摆动。为明确强潮河口设计条件下涌潮压力特征,本文考虑到现场条件,在嘉绍大桥 4# 主墩附近利用当时正在施工的栈桥和桥墩围堰进行了涌潮压力观测。根据涌潮压力测试的结果,采用经验模态分解(EMD)法进行了数据分析,得到涌潮压力分布和变化的特点,可为强涌潮特殊水域同类工程的设计、施工与维护提供理论探索 and 实践经验。

1 现场潮汐特性

依据桥址断面短期实测资料^[12]:现场最高潮位 5.45 m,平均高潮位 4.02 m;最低潮位-3.15 m,平均低潮位-2.41 m;最大潮差 8.59 m,平均潮差 6.44 m。测点最大涨潮流速为 6.65 m/s,垂线平均最大涨潮流速为 5.37 m/s;测点最大落潮流速为 4.40 m/s,垂线平均最大落潮流速为 3.70 m/s。落潮流历时显著地长于涨潮流历时,落潮流历时在 7.5 h 至 8.5 h 之间,涨潮流历时仅在 3.5 h 至 5 h 之间。

涌潮前锋形态受变形程度的影响。当水深变小时,由于河床阻力的影响对不同垂向部位的差异,表面所受的影响较小,因而水质点的运动速度较大,当速度超过行进波速时即发生破碎,目测破碎总在表面首先发生。由于主墩围堰周围冲刷较深,涌潮传播到围堰附近时,水深增大,会导致涌潮的潮头高度减小。

2 试验方案

嘉绍大桥主墩承台为深埋式承台,采用无底钢围堰作为承台止水结构物和模板体系。如图 1 所示,主墩

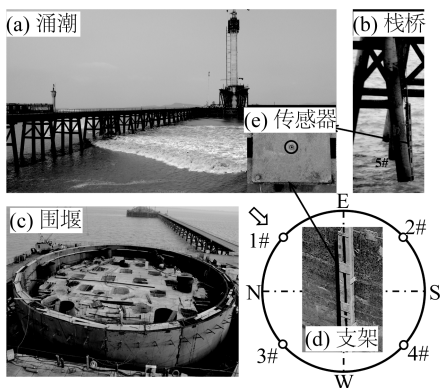


图 1 传感器的布置

Fig. 1 Setup of sensors

围堰内径 40.6 m,外径 43.6 m,整体高度 24.5 m。在围堰上布置有 4 条测线,其中 1#测线与涌潮行进的主方向正交,在围堰附近栈桥钢管桩上布置第 5#测线。每条测线上安装传感器 3 支,传感器间距 0.75 m。

为了保证传感器不受边界绕流的影响,所有的传感器均置于 300 mm×300 mm×15 mm 钢板中心(图 1(e)),传感器中心到钢板边缘的距离大于三倍的传感器直径。为了保证测点相对位置的正确,同一测线各传感器均置于同一型钢上,以便吊装。为了精确地测定局部水域的潮位变化过程,在 5#测线附近设置有临时潮位站。

3 试验结果分析

3.1 涌潮压力作用过程

涌潮水流作用于涉水建筑物基础时,水位和流速都在某一瞬间突然变化,而且水流湍急,流速和压力瞬时变化的脉动性较强。本文采用的压强极值是指涌潮冲击建筑物后 1 分钟内出现的压力最大值。典型的涌

潮压力过程线如图 2 所示。

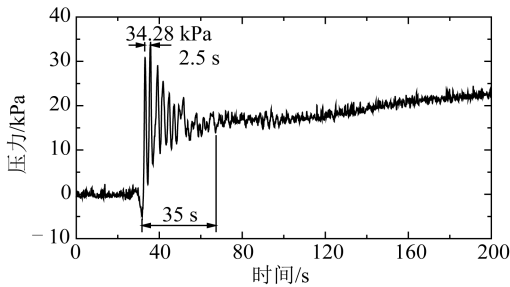


图 2 典型的涌潮压力测试值

Fig. 2 Typical measured tidal bore-induced pressure

从图 2 可以看出,涌潮压力时程曲线实际上是一种典型的时变非平稳载荷信号。最大的涌潮作用力并不出现在涌潮锋面到达的时刻,而是滞后 2.5 s,最大的观测压力 34.28 kPa。涌潮冲击作用面后反射,与正向传播的涨潮流相互作用,形成振荡脉动水流,持续时间约 35 s。

3.2 经验模态分解(EMD)法的应用

经验模态分解法(EMD)是美国华裔科学家黄镌院士提出的一种信号分析方法^[13],其核心思想是任何信号都由一簇固有模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)组成,用 EMD 方法能将这些 IMF 分离出来。近年来,EMD 方法在动力学、生物医学、地震工程学以及经济学等学科已得到了广泛的应用^[14]。

经验模态分解方法本质上是对一个信号进行平稳化处理,其结果是将信号中不同尺度的波动或趋势项逐级分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列 IMF,因而能在时频域内描述非平稳信号的局部特性。原始信号 s_0 经 EMD 分解后,可表述成^[15]

$$s_0(t) = s_1(t) + s_2(t) \tag{1}$$

$$s_1(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \tag{2}$$

$$s_2(t) = r_n(t) \tag{3}$$

式中: $s_1(t)$ 表征信号的脉动分量, $s_2(t)$ 表征信号的时均分量; $c_i(t)$ 是第 i 次分解得到的高频项, $r_n(t)$ 是第 n 次分解后得到的残余项。

对图 2 中涌潮压力信号进行 EMD 分解得到典型压力信号的脉动分量如图 3(a) 所示,脉动压力极大值 21.86 kPa,发生在涌潮冲击作用面的时刻,脉动持续时间大约 35 s,随后趋于稳定;脉动分量反映了涌潮与结构物相互作用时自由水面的紊动情况。典型压力信号的时均分量如图 3(b) 所示,通过与临时潮位站数据的对比,发现时均分量基本反映了局部水位的平均变化趋势。

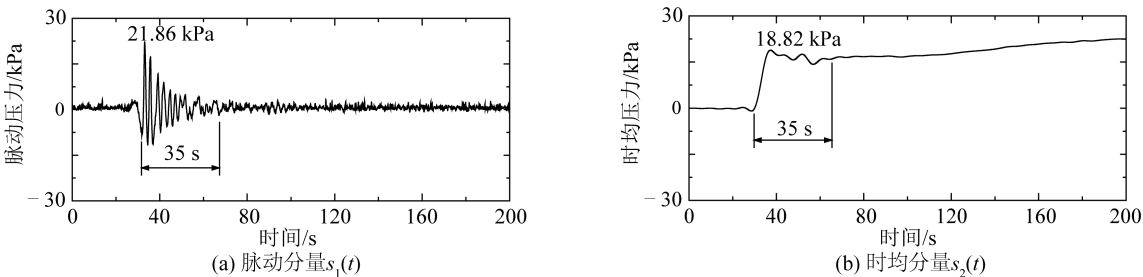


图 3 压力信号 EMD 处理

Fig. 3 Pressure signal processing with EMD

3.3 涌潮压力垂向分布

栈桥钢管桩上的 5#测线,3 个压力传感器由潮前低水位向上等间距 0.75 m 布置。典型的压力过程线及 EMD 分解结果如图 4 所示。

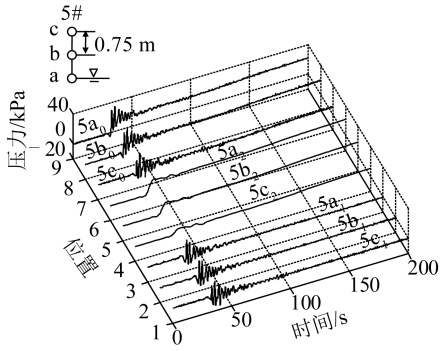


图 4 涌潮压力垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of tidal bore-induced pressures

反射波会出现多次叠加的现象。主墩围堰上典型的压力过程线及 EMD 分解结果如图 5 所示。从图 5 可以看出迎潮面(1#)涌潮压力及其脉冲分量最大,背潮面(4#)最小。

围堰四周压力极值分布及其与潮向的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,正对潮向处(1#),压强极值最大;随着偏离潮向角度的增加,压强逐渐减小,背潮面(4#)压力最小。

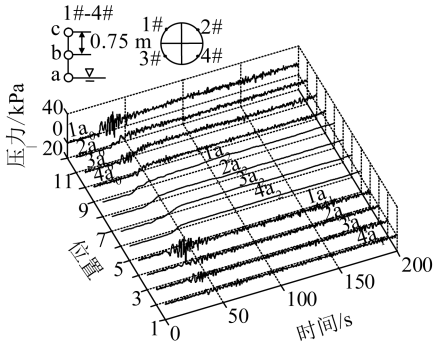


图 5 围堰四周压力分布

Fig. 5 Pressures distribution around cofferdam

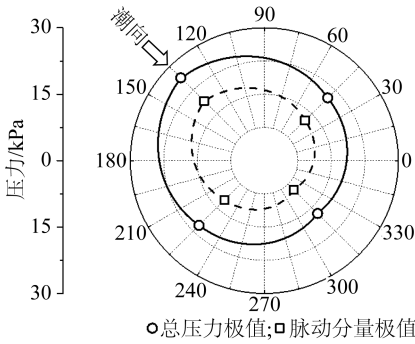


图 6 围堰四周压力极值分布

Fig. 6 Pressure extremums distribution around cofferdam

3.5 涌潮压力和涌潮高度的关系

涉水建筑物在涌潮作用下所承受的压力与涌潮的高度直接相关。但是由于涌潮变化的复杂性和随机性,加之涌潮在传递过程中由于涌波破碎能量损失而使涌潮高度减小,另一方面又由于承受不同部分反射潮波的叠加而有所增加。因此,即使在同一河床断面不同测线上的涌潮高度及其产生的压力也是不尽相同的。但通过实测资料表明,涌潮高度和压力之间具有一定的函数关系。

如图 7 所示,根据实测的涌潮总压力极值和涌潮高度可建立如下关系

$$H = 0.12p^{0.74} \tag{4}$$

$$p = 17.55H^{1.35} \tag{5}$$

其中, H 为涌潮高度, p 为涌潮压力极值。

考虑到涌潮压力极值有较大的随机性和脉动性,图 7 中涌潮高度取外包络线如下

$$H_{\text{上}} = 0.17p^{0.74} \tag{6}$$

$$H_{\text{下}} = 0.08p^{0.74} \tag{7}$$

对应的涌潮压力极值外包络线为

$$p_{\text{上}} = 30.26H^{1.35} \tag{8}$$

$$p_{\text{下}} = 10.96H^{1.35} \tag{9}$$

如图 8 所示,根据实测信号的压力脉动分量极值和涌潮高度可建立如下关系

$$H = 0.5p^{0.34} \tag{10}$$

$$p = 7.67H^{2.94}$$

(11)

同样,考虑到压力脉动分量极值的随机性,图 8 中取涌潮高度的外包络线如下

$$H_{\text{上}} = 0.59p^{0.34}$$

(12)

$$H_{\text{下}} = 0.43p^{0.34}$$

(13)

对应的压力脉动分量极值外包络线为

$$p_{\text{上}} = 11.97H^{2.94}$$

(14)

$$p_{\text{下}} = 4.72H^{2.94}$$

(15)

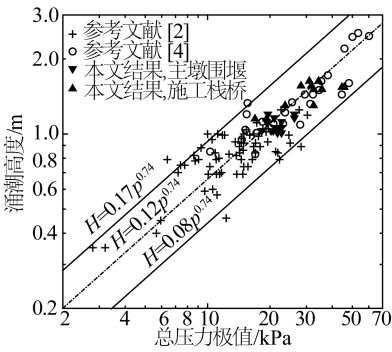


图 7 涌潮高度~涌潮总压力极值的关系

Fig. 7 Relationship between total pressure extremum and height of tidal bore

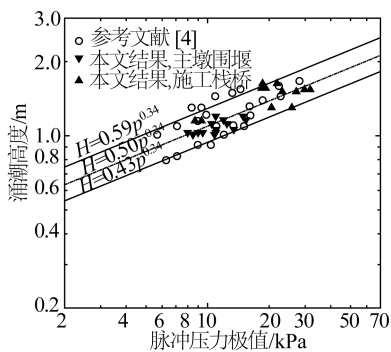


图 8 涌潮高度~压力脉动分量极值的关系

Fig. 8 Relationship between fluctuating pressure components extremum and height of tidal bore

4 设计条件下的涌潮压力分析

嘉绍大桥工程区域属于涌潮发展壮大的区域,涌潮高度自桥位一带向上游不断增大。根据桥址附近的数次涌潮观测成果和北岸上游侧的尖山、大缺口临时观测站以及南岸曹娥江口的涌潮观测资料,经相关分析得到桥位附近涌潮高度与潮差经验关系:

$$H = 0.48\Delta h - 1.58$$

(16)

其中, Δh 为潮差; H 为涌潮高度。

桥位的潮差可通过与激浦相应潮差建立相关关系获得,结果如下:

$$\Delta h = 0.99\Delta h_g + 0.32$$

(17)

其中, Δh_g 为激浦潮差。

根据上述关系,参考激浦重现期的潮差,可以得到桥位附近 100 年一遇、20 年一遇和 5 年一遇的涌潮高度分别为 3.0 m、2.75m 和 2.5 m。由式(5),对应的涌潮压力特征值分别为 77 kPa、68 kPa 和 60 kPa,与实际采用的设计参数基本一致^[16]。

5 结 语

涌潮水动力对结构物的作用是强涌潮水域涉水建筑物设计的主要问题之一。利用嘉绍大桥主墩围堰和施工栈桥进行了现场涌潮观测,得到压力分布和变化的特点,可为类似桥梁工程的设计提供借鉴。主要结论如下:

- 1) 涌潮水流作用于涉水建筑物基础时,压力瞬时变化的脉动性很强。最大的涌潮作用力较涌潮锋面到达的时刻滞后,是涌潮冲击作用面后与正向传播的涨潮流相互作用的结果。
- 2) 采用经验模态分解法对涌潮压力测试结果进行了信号处理。试验得到的脉动分量反映了涌潮与结构物相互作用时自由水面的紊动情况,时均分量反映了局部水位的平均变化趋势。
- 3) 涌潮压力极值在潮前低水位附近最大,并随着传感器安装高程的增加而减小,但是其脉冲分量极值的变化并不显著,即在一定范围内涌潮脉动压力近似满足矩形分布。主墩围堰的迎潮面涌潮压力最大,背潮面最小。

4) 涌潮总压力及其脉动分量的极值与涌潮高度满足指数分布规律。采用本文得到的拟合关系式,对设计条件下的涌潮压力进行了分析,与实际采用的设计参数基本一致。

参考文献:

- [1] 谢东风, 潘存鸿, 鲁海燕, 等. 钱塘江河口涌潮传播速度研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(6): 1128-1134. (XIE Dongfeng, PAN Cunhong, LU Haiyan, et al. Study on propagation speed of tidal bore on Qiantang River [J]. Journal of Zhejiang University, Engineering Science, 2012, 46(6): 1128-1134. (in Chinese))
- [2] 杨永楚. 第二条钱塘江大桥涌潮压力观测研究报告[R]. 杭州: 浙江省河口海岸研究所, 1989. (YANG Yongchu. Field observation research report of the tidal bore pressure on the No. 2 Qiantang River Bridge [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 1989. (in Chinese))
- [3] 陈希海, 庄娟芳. 钱塘江海塘织物模袋混凝土护坦涌潮压力测试与分析[J]. 浙江水利科技, 1989(4): 33-38. (CHEN Xihai, ZHUANG Juanfang. Measurement and analysis of tidal bore forces on membrane bag concrete apron [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 1989(4): 33-38. (in Chinese))
- [4] 酆丽娟, 周建炯, 金振国. 海宁八堡 44 号丁坝及涌潮压力特性现场观测研究报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 1996. (LI Lijuan, ZHOU Jianjiong, JIN Zhenguo. Field observation research report of the tidal bore pressure on the No. 44 groin [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 1996. (in Chinese))
- [5] 林炳尧, 杨火其. 排桩式丁坝局部冲刷及涌潮作用力试验研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2000. (LIN Bingyao, YANG Huoqi. Test study of local scour and tidal bore pressure on pile groin [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 2000. (in Chinese))
- [6] 邵卫云, 毛根海. 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(3): 247-251. (SHAO Weiyun, MAO Genhai. Dynamic measurement and analysis of the bore pressure in the Qiantang River [J]. Journal of Zhejiang University, Engineering Science, 2002(3): 247-251. (in Chinese))
- [7] 邵卫云, 毛根海, 刘国华. 钱塘江涌潮压力的分析与研究[J]. 水动力学研究与进展, 2002, 17(5): 604-610. (SHAO Weiyun, MAO Genhai, LIU Guohua. Analysis of pressure in Qiantangjiang tidal bores [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(5): 604-610. (in Chinese))
- [8] 陈海军, 严盛, 徐长节, 等. 直立方桩上涌潮压力动态测试及分析研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006(3): 411-417. (CHEN Haijun, YAN Shen, XU Changjie, et al. Dynamic measurement and study of the bore pressure on a vertical square cylinder in Qiantang River [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2006(3): 411-417. (in Chinese))
- [9] 沈跃军, 陈振华, 张开伟, 等. 钱塘江鱼鳞石塘涌潮作用力动态测试与分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 81-87. (SHEN Yuejun, CHEN Zhenhua, ZHANG Kaiwei, et al. Dynamic measurement and analysis of bore pressure on the ancient seawall in Qiantang River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 81-87. (in Chinese))
- [10] 鲁海燕, 潘存鸿, 卢祥兴. 钱塘江嘉绍大桥设计涨潮流速计算[J]. 浙江水利科技, 2008(4): 1-4. (LU Haiyan, PAN Cunhong, LU Xiangxing. Computation of designed flood tide current velocity for Jiashao Bridge over the Qiantang River [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2008(4): 1-4. (in Chinese))
- [11] 谭立心, 王中文, 钟建锋, 等. 强涌潮水域埋置式承台双壁钢围堰的下放精度控制[J]. 桥梁建设, 2012(4): 93-99. (TAN Lixin, WANG Zhongwen, ZHONG Jianfeng, et al. Accuracy control of lowering of double-wall steel cofferdams for embedded pile caps in strong tidal bore water area [J]. Bridge Construction, 2012(4): 93-99. (in Chinese))
- [12] 韩海骞, 鲁海燕, 潘冬子, 等. 嘉绍跨江大桥涌潮水域特殊水动力技术研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2011. (HAN Haiqian, LU Haiyan, PAN Dongzi, et al. Study on the special hydrodynamic characteristics of the Jiashao Bridge over the tidal bore water area [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, 1996. (in Chinese))
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [14] 裴强, 胡波. Hilbert-Huang 变换方法研究进展[J]. 世界地震工程, 2011(2): 21-29. (PEI Qiang, HU Bo. Progress of study on Hilbert-Huang transform [J]. World Earth Quake Engineering, 2011(2): 21-29. (in Chinese))
- [15] BOUDRAA A O, CEXUS J C. EMD-based signal filtering [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007(6): 2196-2202.
- [16] 罗超云, 谭立心, 文洁平, 等. 强涌潮水域大型水上钻孔平台的设计[J]. 公路, 2012(8): 89-93. (LUO Chaoyun, TAN Lixing, WEN Jieping, et al. Design of large scale water drilling platform in strong tidal bore water area [J]. Highway, 2012(8): 89-93. (in Chinese))