

混流式水轮机转轮振动特性

李海亮,王 铭,李国慧

(浙江富春江水电设备有限公司,浙江 杭州 310013)

摘要:为掌握混流式水轮机转轮振动特性以及各部件对转轮固有频率的影响规律,采用有限元法并基于流-固耦合模态分析理论,以某转轮为例,建立分析模型。结果表明,受水体影响转轮各振型的固有频率会不同程度地降低,转轮整体振型如扭转、弯曲和抬升等振型对应的水中频率与空气中频率的比值依次减小,仅叶片振动时对应的水中频率与空气中频率比值随叶片振动形态的增强而增大;叶片振动对应的频率覆盖频域较宽,很难避免共振现象的发生;上冠减薄,转轮固有频率降低,下环减薄,转轮摆动、扭转、弯曲振型对应的固有频率提高,其他振型的固有频率均降低,出水边补强转轮固有频率提高。结合分析结果和影响因素,提出了补气、修整叶片出水边、改善泄水锥形式、加设稳流装置等改善转轮水中振动状态的措施。

关键词:混流式水轮机;转轮;振动特性;固有频率;流-固耦合

中图分类号:TK733⁺.1;TV136⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0075-05

Vibration properties of a Francis turbine runner//LI Hailiang, WANG Ming, LI Guohui(*Zhejiang Fuchunjiang Hydro-Power Equipment Co., Ltd., Hangzhou 310013, China*)

Abstract: In this paper, we apply the finite element method to build a model based on flow-solid coupling modal analysis theory in order to capture the vibration characteristics of operating a Francis turbines and the law of effect of components on natural frequencies of wheels. The overall results show that the natural frequencies of wheels with various vibration modes reduce at different levels under the influence of water. Specifically, the ratios of correspondingly frequencies in water of overall vibration modes such as turning, bending and lifting to those in air are gradually decreased with exception of the ratio of blades. Furthermore, it is difficult to avoid resonance phenomenon for wide corresponding frequency domain of blades vibration, and that natural frequencies of wheels will reduce when thickness of higher canopy reduced, and only natural frequencies of turning, bending and lifting of wheels as well as the waterside reinforcing wheels will increase when the lower canopy reduced. By combining the results of analysis and impact factors, we have proposed measures to improve state of wheels vibrating in water, including compensating air, trimming blades outlet, improving cone-shaped form of drain, and adding stabilizers.

Key words: Francis turbine; runner; vibration property; natural frequency; fluid-structure coupling

近年来我国水电行业蓬勃发展,以长江三峡水电工程单机容量 700 MW 机组的投入运行为标志,表明我国水电设备制造技术已经达到国际领先水平^[1]。水轮机转轮振动问题一直没有得到很好的解决,目前混流式水轮机振动最直接的表现是转轮叶片出现裂纹,如我国已投产运行的枫树坝、黄丹、三峡、漫湾、老江底等大型机组都出现了情况各异的水轮机转轮振动裂纹问题^[2-5],甚至小浪底 3 号机和 4 号机在 72 h 试运行结束后就发生了较为严重的叶片裂纹^[6]。

解决转轮振动问题一般从两个方面考虑:一是外在激励。转轮在运行过程中受到多种因素的影

响^[7],如尾水管压力脉动、卡门涡街、叶道涡甚至轴系的振动等均会作为外在激励源而影响转轮的振动,改善这些外在激励源使之避开转轮固有频率,从而避免转轮发生共振。二是转轮自身振动特性。研究转轮自身振动特性,全面掌握转轮振动规律,在不影响水力特性的前提下改变转轮的固有频率,使之能够避开各种激振频率;然而这种方法的难点在于如何精确得到转轮水中的固有频率。

为得到转轮水中的固有频率,肖若富等^[8]通过振动相似分析物体在空气中和水中的相似关系,提出了一种振动计算的相似分析方法,通过空气中和水中转轮振动十分相似的原理,推导出了转轮水中

作者简介:李海亮(1982—),男,江苏丰县人,工程师,硕士,主要从事水轮发电机组零部件力学特性分析研究。E-mail:lianghlq@126.com

频率的估算公式。

随着数值方法的不断发展,当前采用有限元法求解转轮水中的固有频率已成为研究转轮振动特性的主要手段^[9-10]。本文采用大型通用有限元分析软件 ANSYS,基于流-固耦合理论对某混流式水轮机转轮水中振动特性进行研究。

1 流-固耦合振动特性分析理论

振动特性分析也称为模态分析,是对结构固有特性的计算,包括固有频率和振型的计算。有限元法中对振动特性的分析是在对结构质量进行离散化基础上求解结构的动力学方程,得到方程的有解特征值即为结构的固有频率。结构的动力学方程可表示如下:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{M}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$ 、 $\mathbf{K}_s$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{U}}$ 、 $\dot{\mathbf{U}}$ 、 $\mathbf{U}$ 分别为节点的加速度向量、速度向量和位移向量; $\mathbf{F}$ 为激励载荷。

当 $\mathbf{C}_s = \mathbf{0}$ 、 $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ 时,方程简化为

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{0} \tag{2}$$

该方程的有解特征值即为无阻尼状态下结构的固有频率。

水体的连续方程和动量方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \tag{4}$$

式中: u 为速度; p 为压力; ρ 为密度; μ 为黏性系数; f 为体积力;下标 i 和 j 为张量表示,对于三维问题,其取值为 1、2、3,代表 3 个坐标方向,且 i 和 j 不同时取同一个值,并默认使用爱因斯坦求和约定。

假设水体为可压缩、无黏性流体,且平均密度在整个流场中保持不变,则流体作用时的结构动力学方程可表示为

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = -\mathbf{K}_{fs} \mathbf{P} \tag{5}$$

由水体 Navier-Stokes 方程简化得到离散的流场控制方程,写成结构动力学方程形式为

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}_f \mathbf{P} = -\mathbf{M}_{fs} \mathbf{U} \tag{6}$$

将式(5)(6)联立,得到流-固耦合系统的完整控制方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{fs} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_{fs} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \tag{7}$$

式中: $\mathbf{P}$ 、 $\ddot{\mathbf{P}}$ 分别为流固耦合面附加水体质量点的位移和加速度; $\mathbf{M}_f$ 、 $\mathbf{K}_f$ 分别为流体的质量矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{M}_{fs}$ 、 $\mathbf{K}_{fs}$ 分别为流-固耦合系统的质量矩阵和刚度矩阵。

2 转轮振动特性分析

以某混流式水轮机转轮为例,基于流-固耦合模态分析理论对转轮的振动特性进行分析。该水轮机的机组参数如下:额定出力 67.7 MW,最高水头 93.81 m,额定水头 86 m,最小水头 77 m,额定转速 214.3 r/min,飞逸转速 429 r/min,叶片数 13。

采用通用有限元分析软件 ANSYS Mechanical13.0 进行计算。假设水体为可压缩、无黏性流体,采用 FLUID30 单元划分网格,结构部分采用高阶的四面体 SOLID187 单元划分网格。整个计算模型共计网格 290438 个,节点 982340 个,如图 1 所示。结构体约束转轮与主轴把合面;水体出水边为自由面,同时约束其他表面;水体-转轮接触面设置为流-固耦合面。

对整体模型进行有限元求解,限于篇幅,仅取转轮空气中和水中的前 20 阶固有频率进行计算,结果如表 1 所示。

表 1 中两个数值基本相等的相邻两固有频率是同一振型下的两个正交方向对应的频率。第 1、2 阶频率的振型为摆动振型(图 2),第 3 阶频率为扭转振型(图 3),第 4、5 阶频率为弯曲振型(图 4),第 19 阶频率为抬升振型(图 5),其余阶频率均为叶片振型。

从表 1 计算结果可以看出:①受水体的影响,转轮水中的固有频率明显低于空气中的固有频率。②水体对转轮不同振型的固有频率影响系数 f_w/f_a 是不同的,对于转轮整体振型如扭转、弯曲以及抬升振型, f_w/f_a 分别为 0.8648、0.7628 和 0.6045,依次降低。③转轮叶片振型始于第 6 阶,振动形态逐渐增



图 1 转轮流-固耦合系统计算模型

表 1 转轮固有频率求解结果对比

频率序号	空气中频率 f_a/Hz	水中频率 f_w/Hz	f_w/f_a
1	88.54	73.12	0.8259
2	88.67	73.24	0.8259
3	99.25	85.83	0.8648
4	126.98	96.86	0.7628
5	127.09	96.94	0.7628
6	220.58	110.22	0.4997
7	220.62	110.36	0.5002
8	234.49	112.52	0.4799
9	255.63	112.74	0.4410
10	255.98	117.06	0.4573
11	256.59	117.20	0.4568
12	257.02	121.02	0.4709
13	267.73	121.06	0.4522
14	268.28	153.42	0.5719
15	273.91	153.54	0.5605
16	274.34	154.89	0.5646
17	280.37	155.04	0.5530
18	280.61	172.43	0.6145
19	316.68	191.43	0.6045
20	320.68	207.41	0.6468

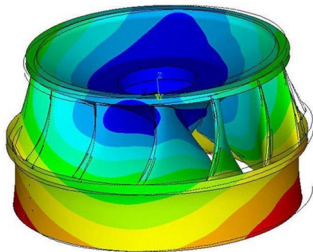


图 2 左右摆动振型

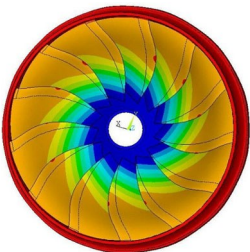


图 3 扭转振型

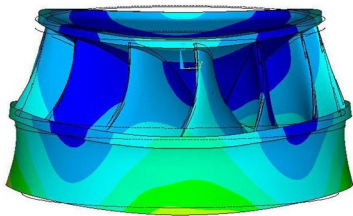


图 4 弯曲振型

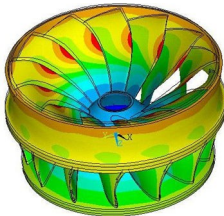


图 5 抬升振型

强。④水体对叶片不同振型下振动强度的降低效果是不同的,在同一阶次振型中,水体对振动较弱的振型对应的频率值降低效果较为明显。水体对转轮叶片振动的影响系数随叶片振动形态的增强而变小。从表 1 可知,水体对叶片一阶各振型对应的固有频率值的影响系数在 0.44 ~ 0.65 之间。⑤转轮叶片振动的固有频率值覆盖的频域范围较宽,很难避开激励源频率或是激励源倍频,且叶片出水边由于刚度较弱,振动强度明显大于进水边,这也是裂纹一般出现在出水边上冠、下环焊接部位的原因。

3 改变转轮固有频率的方法

转轮固有频率是转轮自身的固有特性,要改变其固有频率值,必须改变其自身的刚度及质量。由

于混流式转轮部件较少,改变其固有频率可从以下两方面考虑:

a. 改变上冠、下环厚度。转轮体上冠、下环分别减薄 10 mm 后得到转轮固有频率变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出减薄上冠的厚度可以降低转轮的固有频率,但是减薄下环厚度,摆动、扭转、弯曲振型对应的固有频率是提高了,其他振型固有频率均降低。同时也可以看出叶片振动对下环的敏感度要高于对上冠的敏感度。

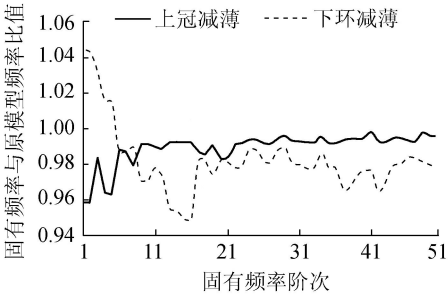


图 6 上冠、下环厚度改变对转轮固有频率的影响

b. 叶片出水边补强。由于叶片出水边比较薄弱,转轮在受到高频激励振动后,最容易在出水边焊接位置产生疲劳裂纹,因此往往在该处采用焊接补强的措施来提高叶片出水边刚度。叶片出水边补强在提高叶片刚度的同时也对转轮固有频率有影响(图 7),从图 7 可以看出,叶片出水边补强能够提高转轮叶片振型的固有频率。

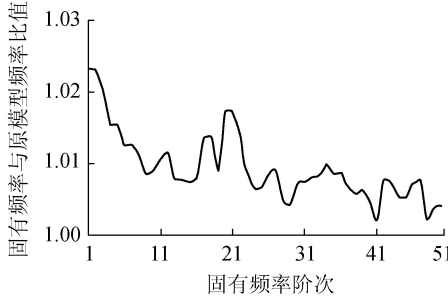


图 7 叶片出水边补强对转轮固有频率的影响

4 转轮稳定运行的影响因素及改善措施

4.1 影响因素

对于水轮机转轮稳定运行的影响因素,根据激励种类可分为水力因素与非水力因素。非水力因素主要是指机械不平衡力造成的机组转动部件发生各种形式的振动,该振动频率一旦与转轮固有频率接近就会激发转轮的振动。这种振动的一个共同特点是振动频率多为转频或转频的倍频。水力因素主要是指由水力激振引起的转轮振动,具体有以下几种:

a. 卡门涡街压力脉动。卡门涡街频率一般采用下式计算:

$$f = Srv/t \quad (8)$$

式中: Sr 为斯特劳哈尔数,一般取 0.18 ~ 0.22; t 为水流分离处叶片出水边厚度; v 为水流速度。卡门涡街的产生将使流道中出现有规律的交变水力脉动,这种脉动频率如果接近转轮固有频率则会引起转轮共振。实际生产过程中,卡门涡街一旦产生会伴随出现刺耳的金属共鸣声^[11],因此卡门涡街对叶片的破坏是非常严重的。

b. 尾水管涡带压力脉动。尾水管涡带一般为螺旋状,与转轮转向一致,会在水轮机其他部位产生较大的水力脉动,产生交变的轴向推力,从而引起转轮的疲劳破坏。涡带频率一般在转轮转动频率的 0.26 ~ 0.39 倍之间。当机组在满负荷和超负荷工况下运行时,涡带形态一般转化为管状,其频率一般是转轮转动频率的 1 ~ 5 倍,甚至可达到 6 倍的转动频率。

c. 叶道涡压力脉动。叶道涡发生在靠近上冠的叶片进口,在叶片流道上形成类似瓣状的流迹,直至转轮出口处逐渐消失。叶道涡发生在小流量时,其强度随着流量的减小或水头的提高而增加。这种不稳定现象导致叶道内部产生压力脉动,从而对转轮叶片产生疲劳破坏。

4.2 改善措施

要改善转轮水中振动状态,可从改变转轮自身固有频率方面考虑,使之避开各种激励频率。由于激励源频域较宽,很难做到完全避开,需要采用其他方法改变主要激励源频域,以达到改善转轮振动状态的目的。具体方法主要有以下几种:

a. 补气。补气一般在两处位置进行:一种是通过大轴轴心经尾水管补气,以改变尾水管涡带的形态,可使涡带突然扩张而稳定。补气应适量,最佳补气量为水轮机额定流量的 1.5% ~ 2.5%。另一种是在蜗壳进入端补充少量气体,这种方式主要是减弱叶道涡引起的水力脉动对转轮叶片的破坏。

b. 修整叶片出水边。该方法可以改变水流边界层在叶片上分离的位置,以及发生脱流漩涡的门槛频率和强度,从而改变卡门涡街的频率,使之避开转轮的共振频域。另外,在转轮叶片出水边补强既可改变转轮的固有频率,也能提高转轮的承载性能。

c. 改善泄水锥形式。泄水锥的长度及形状会影响尾水管涡带的形态,加长型泄水锥和圆头型泄水锥能够降低尾水涡带振动能量^[12]。

d. 加设稳流装置。在尾水管内安装一些稳流装置,如壁上加装翼板、尾水管喉部加导流板和同轴圆管等,这些装置可以改变水流运动的状态,引起涡带形态的变化,从而改善转轮的振动状态。

另外,合理选型和提高装机空化系数会降低叶

道涡发生的流量门槛;避开危险工况下运行也是改善转轮水中振动状态的有效措施。

5 结 论

a. 转轮各振型下固有频率在水中会不同程度地降低。对于非叶片振型如扭转、弯曲以及抬升振型的频率降低系数分别为 0.8648、0.7628 和 0.6045;水体对不同叶片振型的影响随振动的增强而减弱。水体对叶片振型的固有频率的影响系数为 0.44 ~ 0.65,且叶片振型覆盖的频域范围较宽。

b. 减薄上冠的厚度可以降低转轮的固有频率,但是减薄下环厚度,摆动、扭转、弯曲振型的频率是提高的,而其他振型频率则会不同程度地降低。叶片出水边补强能够提高叶片振型的固有频率。

c. 转轮振动状态的影响因素有机机械因素,但更重要的是水力因素,主要有卡门涡街、尾水管涡带、叶道涡等。改善转轮振动特性可以考虑改变自振频率,也可从改变激励源频率方面采取一些有效措施,如补气、修整叶片出水边、改善泄水锥形式、加设稳流装置等。

参考文献:

- [1] 陶星明. 大型水轮发电机组关键核心技术新发展[J]. 电力设备, 2006, 7(7): 17-21. (TAO Xingming. New development of crucial technology for large hydropower generator unit[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(7): 17-21. (in Chinese))
- [2] 徐广文, 张海丽. 枫树坝水电站转轮裂纹原因及处理措施[J]. 水力发电, 2011, 37(9): 71-73. (XU Guangwen, ZHANG Haili. Runner crack analysis and treatment for Fengshuba Hydropower Station[J]. Water Power, 2011, 37(9): 71-73. (in Chinese))
- [3] 段利英, 吴江. 三峡水轮机组转轮裂纹产生原因及其预防措施[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(5): 31-33. (DUAN Liying, WU Jiang. Three-Gorge turbine runner crack cause and preventive measure [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(5): 31-33. (in Chinese))
- [4] 杨宏. 浅析漫湾水电站水轮机转轮裂纹形成原因及预防措施[J]. 水力发电, 2009, 35(4): 62-64. (YANG Hong. The causes of runner crack of turbine for the manwan hydropower station and prevention measures[J]. Water Power, 2009, 35(4): 62-64. (in Chinese))
- [5] 任启森, 郭建伟, 刘光宁. 老江底水电站水轮机水力稳定性分析[J]. 水力发电, 2011, 37(10): 1-3. (REN Qimiao, GUO Jianwei, LIU Guangning. Hydraulic stability analysis for the turbines in Laojiangdi Hydropower Station [J]. Water Power, 2011, 37(10): 1-3. (in Chinese))

- [6] 郑民生,马新红,李文长. 小浪底电站转轮裂纹原因及处理措施[J]. 水电能源科学,2008,26(5):153-155. (ZHENG Minsheng, MA Xinhong, LI Wenchang. Cause and treatment of at Xiaolangdi Hydropower Plant runner crack[J]. Water Resources and Power, 2008,26(5):153-155. (in Chinese))
- [7] 覃大青,刘光宁,陶星明. 混流式水轮机转轮叶片裂纹问题[J]. 大电机技术,2005(4):39-44. (QIN Daqing, LIU Guangning, TAO Xingming. The crack problem of the runner blade for francis turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2005(4):39-44. (in Chinese))
- [8] 肖若富,韦彩新,韩风琴,等. 混流式水轮机转轮的流体力学研究[J]. 大电机技术,2001(7):41-43. (XIAO Ruofu, WIE Caixin, HAN Fengqin, et al. Study on dynamic analysis of the francis turbine runner[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(7):41-43. (in Chinese))
- [9] 付磊,黄彦华,朱培模. 水轮机转轮叶片流固耦合水力振动分析[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1),24-26. (FU Lei, HUANG Yanhua, ZHU Peimo. Fluid-structure coupling hydraulic vibration of runner blades of hydraulic turbines [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010,30(1),24-26. (in Chinese))
- [10] 张洪渠,余波,陈柱. 小型混流式水轮机转轮优化设计及数值模拟[J]. 水力发电,2010,36(8):65-67. (ZHANG Hongqu, YU Bo, CHEN Zhu. Optimization design and numerical simulation of small francis turbine runner [J]. Water Power, 2010,36(8):65-67. (in Chinese))
- [11] 庞立军,吕桂萍,钟苏,等. 水轮机固定导叶的涡街模拟与振动分析[J]. 机械工程学报,2011,47(22):159-165. (PANG Lijun, LÜ Guiping, ZHONG Su, et al. Vortex shedding simulation and vibration analysis of stay vanes of hydraulic turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(22):159-165. (in Chinese))
- [12] 钱忠东,李万. 泄水锥形式对混流式水轮机压力脉动的影响分析[J]. 水力发电学报. 2012,31(5):278-285. (QIAN Zhongdong, LI Wan. Analysis of pressure oscillation characteristics in Francis hydraulic turbine with different runner cones [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(5):278-285. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-22 编辑:熊水斌)

(上接第 60 页)

- [5] 刘微,罗林开,王华珍. 基于随机森林的基金重仓股预测[J]. 福州大学学报:自然科学版,2008,36(增刊1):134-139. (LIU Wei, LUO Linkai, WANG Huazhen. A forecast of bulk-holding stock based on the random forest [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2008,36(Sup1):134-139. (in Chinese))
- [6] 邹亮,黄琼,王明会,等. 基于随机森林和富集分析的阿尔茨海默症 GWA 研究[J]. 中国科学:生命科学,2012,42(8):639-647. (ZOU Liang, HUANG Qiong, WANG Minghui, et al. Research on Alzheimer's disease GWA random forest and enrichment analysis [J]. Scientia Sinica Vitae, 2012,42(8):639-647. (in Chinese))
- [7] 李建更,高志坤. 随机森林:一种重要的肿瘤特征基因选择法[J]. 生物物理学报,2009,25(1):51-56. (LI Jiangeng, GAO Zhikun. Random forests: an important feature genes selection method of tumof [J]. Acta Biophysica Sinica, 2009,25(1):51-56. (in Chinese))
- [8] 林成德,彭国兰. 随机森林在企业信用评估指标体系确定中的应用[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2007,46(2):199-203. (LIN Chengde, PENG Guolan. Application of random forests on selecting evaluation index system for enterprise credit assessment [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2007,46(2):199-203. (in Chinese))
- [9] 方匡南,朱建平,谢邦昌. 基于随机森林的基金超额收益方向预测与交易策略研究[J]. 经济经纬,2010(2):61-65. (FANG Kuangnan, ZHU Jianping, XIE Bangchang. A research into the forecasting of fund return rate direction and trading strategies based on the random forest method [J]. Economic Survey, 2010(2):61-65. (in Chinese))
- [10] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护,2013,29(4):1-4. (TANG Kewang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013,29(4):1-4. (in Chinese))
- [11] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [12] 方匡南. 随机森林组合预测理论及其在金融中的应用[M]. 厦门:厦门大学出版社,2012.
- [13] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [14] 左其亭. 水生态文明建设的几个关键问题探讨[J]. 中国水利,2013(4):1-3. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. China Water Resources, 2013(4):1-3. (in Chinese))
- [15] 马建华. 推进水生态文明建设的对策与思考[J]. 中国水利,2013(10):1-4. (MA Jianhua. Measures for implementing water ecological civilization[J]. China Water Resources, 2013(10):1-4. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-28 编辑:熊水斌)