

灯泡体前置或后置对微水头灯泡贯流式水轮机水力性能的影响

李玲玉, 郑源, 陈洋, 周大庆

(河海大学能源与电气学院, 江苏南京 211100)

摘要: 为了研究灯泡体前置或后置在微水头条件下对灯泡贯流式水轮机水力性能的影响, 利用 CFD 软件对设计水头为 1m 的水轮机进行三维数值模拟计算, 并对最优方案进行模型试验验证。研究表明: 水轮机灯泡体前置时, 进水流道水头损失略大于灯泡体后置的水头损失; 灯泡体后置时, 虽然可以改善出水流道内产生的回流, 但不能完全消除, 所产生的水头损失远大于灯泡体前置的水头损失; 灯泡体前置或后置对转轮流态影响不大, 前置灯泡贯流式水轮机增设导叶可改善转轮叶片进水侧流态, 但导叶段产生的水头损失较大; 无导叶前置型灯泡贯流式水轮机的结构简单、效率较高、成本低、运行稳定, 较适合于微水头特点下水力资源的开发应用; 最优方案水轮机效率的计算值与试验值相比, 误差不超过 3%, 验证了数值模拟计算的准确性。

关键词: 灯泡贯流式水轮机; 前置灯泡体; 后置灯泡体; 微水头; 水力性能; 水头损失; 数值模拟

中图分类号: TV734.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)02-0062-05

The influence of bulb preposed or postposed on hydraulic efficiency of micro-head bulb turbine//LI Lingyu, ZHENG Yuan, CHEN Yang, ZHOU Daqing (College of Energy and Electrical, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To study the influence of bulb preposed or postposed on bulb turbine's hydraulic performance, which is characterized with micro-head, a bulb turbine with design head of approximately one meter has been simulated with three-dimensional numerical simulation using CFD software. In addition, the optimal scheme has been tested by considering a physical model. The results show that the head loss of inlet conduit with preposed bulb is slightly larger than postposed bulb, while the head loss of outlet conduit with postposed bulb is much larger than preposed bulb which is due to the reflow in outlet conduit. The reflow can be improved by optimizing the outlet conduit, but cannot be completely eliminated. Bulb preposed or postposed has little influence on the flow in runner. The additional guide vanes in preposed bulb turbine improve the flow pattern on inlet side of runner blade, but cause much larger head loss. The preposed bulb turbine without guide vanes has a simpler structure, a higher efficiency, lower cost and stable operation, and is suitable to the development of micro head water resources. The errors do not exceed 3% by comparing the efficiency of optimal scheme numerical simulation and model test results, which indicates the accuracy of numerical simulation.

Key words: bulb turbine; preposed bulb; postposed bulb; micro-head; hydraulic performance; water head loss; numerical simulation

微水电因其工程量小、设备简单、投资少等特点, 是一种经济性良好、清洁便捷的水力资源, 而我国平原地区 2.5 m 以下的微水头水力资源非常丰富, 选用适合的机型并适应其微水头的特点十分重要^[1]。目前, 对微水头水轮机的开发研究还很少, 灯泡贯流式机组因流道形式好、运行性能好、能量参数大、适用范围大、机组尺寸小、工程量小、投资省等特点, 是开发低水头水力资源的理想机型^[2-3]。

国内外对灯泡贯流式水轮机的研究较多, 主要

集中在机组选型和安装运行方面, 在数值模拟方面, 李凤超等^[4-6]对灯泡贯流式水轮机进行了计算、优化及分析, 但是针对前置或后置灯泡体对于水轮机性能的影响研究还很少。对于前置或后置灯泡体贯流泵的研究成果较多, 如金燕等^[7]对前置灯泡式贯流泵进行了内部流动数值模拟; 施卫东等^[8-9]对后置灯泡式贯流泵进行了数值模拟优化和试验研究; 陆林广等^[10-11]分别对前置或后置灯泡贯流泵进行了数值模拟和模型试验对比。本文结合设计水头为 1 m

左右的微水头特点,针对灯泡体前置或后置对灯泡贯流式水轮机进行建模、优化及内部流态对比分析;并根据综合性能较好的模型进行试验研究,从而验证数值模拟计算的准确性。

1 数值计算方法

1.1 计算模型

为简化结构,大幅降低造价,采用管道集能方式,无导叶调节结构,后期发电装置采用随机变速非同步永磁发电及变频并网用户侧上网技术。原型灯泡贯流式水轮机主转轮直径为 3.0 m,叶片数为 3,设计水头为 1 m,设计单位流量为 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$,轮毂比为 0.3,流道总长为 5 倍转轮直径。分别对前置和后置灯泡贯流式水轮机进行建模,不同方案的几何参数见表 1。其中,方案 A5 在方案 A4 的基础上增设了活动导叶,由于方案 A4 的灯泡体支撑距离叶片太近,故在方案 A5 中对水轮机增设活动导叶时,对灯泡体及灯泡体的支撑做等比例延伸,以增大空间。除方案 A5 外,其他方案均不配置活动导叶,以增强其过流能力,采用调节叶片安放角及转轮转速来调节工况。代表性的方案 A4、A5、B5 和 B7 的水轮机流道三维示意图如图 1 所示。

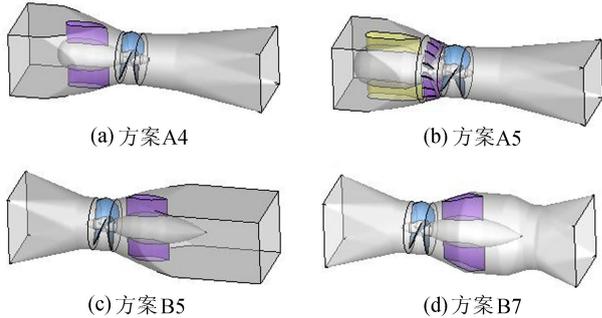


图 1 水轮机流道三维示意图

1.2 计算区域及网格划分

由于流道整体长度较短,流动可能无法达到充分发展的状态^[12],故对进、出水流道的进口、出口分

别等长度延伸。计算区域包括进口延伸段、进水流动、导叶段、转轮、出水流动和出口延伸段。采用 Gambit 软件进行网格划分,延伸段结构简单,采用六面体网格,其他过流部件结构复杂,采用以四面体为主的混合网格划分。在叶片、导叶和灯泡体支撑处,考虑到曲面复杂,进行局部加密。各方案水轮机模型网格总数在 180 万~220 万之间,网格质量满足计算要求。

1.3 湍流模型及边界条件

采用计算流体动力学软件 Fluent 模拟计算灯泡贯流式水轮机。考虑到水轮机内部流动为三维不可压缩黏性流体流动,数值计算采用连续性方程和 N-S 方程为控制方程^[13-14],采用 Spalart-Allmaras 单方程模型^[15]为湍流模型。Spalart-Allmaras 模型对边界层的计算效果较好,在涡轮机械中应用广泛。采用二阶迎风格式,隐式求解,利用 SIMPLEC 算法^[15]实现压力和速度的耦合。

进、出口边界条件均设定为压力边界,进口边界给定不同压力值,出口边界压力值设为零。水轮机的工作水头由进水流动进口断面和出水流动出口断面计算所得的压强之差计算得到。固体壁面采用无滑移边界条件,近壁区域采用标准壁面函数,不考虑壁面粗糙度对流场的影响^[16]。

2 计算结果及分析

2.1 计算结果

不同方案的前置灯泡贯流式水轮机水力参数计算结果见表 2。方案 A1、A2 和 A3 的出水流动尺寸变化对效率的影响较大,出水流动尺寸增大,扭矩略有降低,效率降低幅度较大。方案 A4 在方案 A3 的基础上调整了进、出水流动的长度,计算结果相差很小。方案 A5 在方案 A4 的基础上增加了活动导叶,结果表明,增加活动导叶会减弱水轮机的过流能力,

表 1 前置或后置灯泡贯流式水轮机几何参数

方案	灯泡体	进水流动及导叶段尺寸/m			出水流动尺寸/m			叶片安放角/ (°)	设计特色
		长	宽	高	长	宽	高		
A1	前置	4.50	4.40	3.80	7.50	5.00	3.80	22	中尺寸出水流动
A2	前置	4.50	4.40	3.80	9.00	5.60	4.00	22	大尺寸出水流动
A3	前置	4.50	4.40	3.80	9.00	4.00	3.60	22	小尺寸出水流动
A4	前置	6.00	4.40	3.80	7.50	4.00	3.60	22	进水流动加长
A5	前置	6.00	4.40	3.80	7.50	4.00	3.60	32	加导叶(导叶开度 70°)
B1	后置	4.50	3.60	3.40	9.00	4.40	3.80	24	支撑由圆变尖
B2	后置	4.50	3.60	3.40	9.00	4.40	3.80	24	支撑由尖变圆
B3	后置	4.50	3.60	3.40	9.00	4.40	3.80	24	对称支撑,两端尖角
B4	后置	4.50	3.60	3.40	9.00	4.40	3.80	24	灯泡加长
B5	后置	4.50	4.10	4.00	9.00	4.40	3.80	24	进水流动进口增大
B6	后置	4.50	4.10	4.00	9.00	4.40	3.80	24	出水流动中部方形收缩
B7	后置	4.50	4.10	4.00	9.00	4.60	4.60	24	出水流动中部圆锥形收缩

且使得在计算结果接近设计要求的情况下扭矩及效率降低幅度较大。虽然方案 A3 的效率略高于方案 A4,但考虑到进水水道进口离灯泡体太近,在实际运行中进水水流流态不稳对水轮机水力参数产生的影响会比较大,故选用方案 A4 做进一步对比分析。

表2 前置灯泡贯流式水轮机水力参数计算结果

方案	工作水头/m	效率/%	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	单位流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	扭矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
A1	1.00	72.4	26.9	2.99	28.0
A2	1.01	70.8	26.8	2.96	27.8
A3	1.00	77.4	27.2	3.02	30.5
A4	1.00	76.9	27.3	3.03	30.3
A5	1.00	71.3	26.6	2.95	27.3

不同方案的后置灯泡贯流式水轮机水力参数计算结果见表3。方案 B3 中对称、两侧尖角的灯泡体支撑对水流的影响较小,扭矩较大,效率较高。方案 B4 灯泡段及方案 B5 进水水道适当加长均可小幅改善流态、增大扭矩及提高效率。方案 B6 和方案 B7 分别对出水水道进行方形收缩和圆锥形收缩改进,计算结果相差不大,均比方案 B5 提高一定效率,说明适当改善出水水道流态,可以增大转轮扭矩,且提高后置灯泡贯流式水轮机效率。

表3 后置灯泡贯流式水轮机水力参数计算结果

方案	工作水头/m	效率/%	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	单位流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	扭矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
B1	1.00	68.4	28.5	3.17	28.0
B2	1.01	65.2	28.4	3.14	26.9
B3	1.00	70.4	28.6	3.18	29.1
B4	1.02	70.9	28.8	3.16	30.1
B5	1.03	71.5	28.8	3.16	30.5
B6	1.01	73.6	28.9	3.20	30.9
B7	1.00	73.6	28.9	3.21	30.7

取表2和表3中效率值较高且具代表性的方案 A4、A5、B5 和 B7,计算其各过流部件的水头损失,如表4所示。由表4可见,前置灯泡贯流式水轮机的进水水道及导叶段水头损失较大,特别是方案 A5 增加的导叶结构较复杂,所产生的水头损失较大;后置灯泡贯流式水轮机的进水水道结构较简单,进水水道水头损失较小。后置灯泡贯流式水轮机的出水水道水头损失整体大于前置灯泡贯流式水轮机,虽然方案 B7 在 B5 的基础上进行了改进,达到小幅降低出水水道水头损失、提高效率的效果,但是相比前

表4 各过流部件水头损失计算结果

方案	效率/%	水头损失/m		
		进水水道及导叶段	转轮	出水水道
A4	76.9	0.014	0.119	0.099
A5	71.3	0.062	0.092	0.133
B5	71.5	0.009	0.098	0.186
B7	73.6	0.008	0.097	0.159

置灯泡贯流式水轮机,出水水道水头损失仍较大,导致效率低于方案 A4。

2.2 转轮叶片表面静压

取转轮叶片 1/3 和 2/3 径向位置截面进行表面静压分析,具体位置如图2所示。图3为相对弦长的示意图,其中 S 为转轮叶片截面上的点与进水侧前缘点之间的距离在弦长方向上的投影长度, L 为叶片截面的弦长。

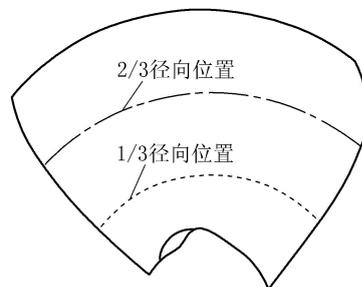


图2 转轮叶片径向位置截面示意图

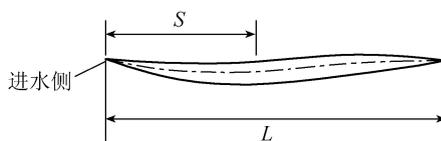
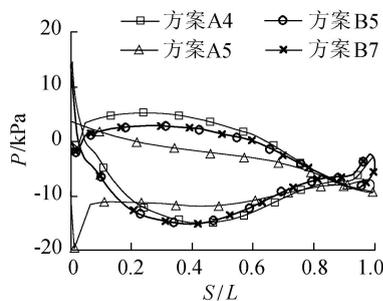
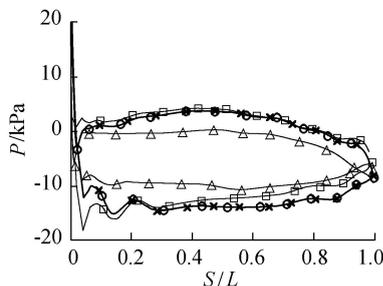


图3 相对弦长示意图

图4为在不同径向位置上转轮叶片表面静压 P 沿弦向的分布图。由图4可见,方案 A5 的表面静压沿弦向变化梯度较小,曲线较为平滑,说明增设导叶可使水流较为平顺地进入转轮,减小了对叶片的撞击。相比而言方案 A4、B5 和 B7 的静压沿弦向变化梯度较大,趋势较为相近,特别是方案 B5 和 B7 几乎重合,说明后置灯泡贯流式水轮机出水水道优



(a) 1/3 径向位置



(b) 2/3 径向位置

图4 转轮叶片表面静压分布

化对转轮流态的影响很小。图4(a)的静压变化梯度比图4(b)大,这与接近轮毂处的叶片表面曲率变化较大有关。另外整体来看,方案A4和方案B7的叶片压力面和吸力面之间的面积较大,比图中其他3个方案的叶片扭矩大,做功能力较强,符合表2和表3中的计算结果。

2.3 流道流态分布

图5为流道水平截面流速和流线分布。由图5可见,这4个方案的最大流速区域均在转轮区,方案A4、A5和B7的流速基本呈对称分布,方案A4和A5、方案B5和B7在转轮前的流速分布基本一致,主要区别出现在出水流道。方案A4的整体流速变化梯度较为平缓,流线分布流畅,方案A5、B5和B7在出水流道流速变化梯度大,均有不同面积的低速区。方案A5的低速区位于出水流道中心的后半部,这与其转轮出口流速较大且在此处产生回流有关;方案B5出水流道灯泡体尾部外缘侧出现大面积低速区,这主要是因为灯泡体断面面积收缩,过流面积大幅增加,从而产生回流;方案B7在出水流道圆锥形收缩段前有小面积的低速区,可见出水流道改进后,可改善其流态分布,但是由于圆锥收缩段处过流面积变化仍较大,故有小范围的回流,后期可据此做进一步优化。

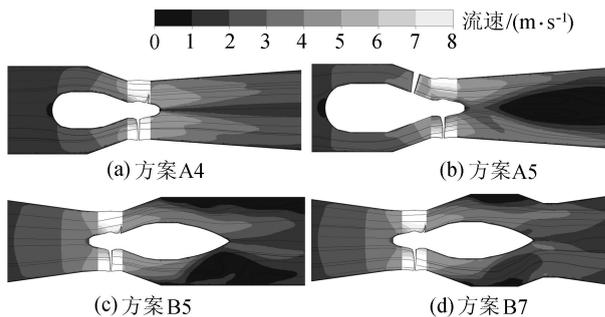


图5 水平截面流速和流线分布

3 模型试验

根据数值模拟计算结果,选取最优方案A4,按比例缩小成转轮直径为0.3m的GD-WP-30型水轮机模型,研究其水力性能。保持GD-WP-30型水轮机的转速为649.7 r/min,在设计水头为1m,叶片安放角为22°时,模型流量为0.252 m³/s,出力为1.739 kW,效率为70.0%。按原、模型转换规律转换的相应原型水轮机流量为25.2 m³/s,出力为185.11 kW,效率为74.50%。由此可见,在设计水头下水轮机流量和效率的试验转换值均略低于数值模拟计算值。

表5为方案A4水轮机在叶片安放角为22°时水力参数的计算值和试验值对比。由表5可见,流量、效率的计算值和试验值变化趋势一致,在水头较

低时,效率的计算值高于试验值;在水头大于设计工况点后,二者效率值较为接近,但整体误差不超过3%。流量的试验值整体略小于计算值,这主要是因为模型试验中灯泡体直径太小,仅为0.18m,无法正常安装发电装置,只能将转轴从灯泡体中穿出直接伸至试验台水箱外,使得进水流道过流面积减小,导致流量试验值小于计算值。

表5 方案A4水轮机水力参数计算值和试验值对比

工作水头/m	流量/(m³·s⁻¹)		效率/%		
	计算值	试验值	计算值	试验值	误差
0.65	25.3	23.6	70.1	68.2	1.9
0.82	26.3	24.3	75.1	72.1	3.0
1.00	27.3	25.2	76.9	74.5	2.4
1.35	29.0	26.8	77.2	77.0	0.2
1.61	30.3	27.9	76.3	77.0	-0.7
1.88	31.5	29.0	74.8	75.4	-0.6

4 结论

a. 灯泡体前置或后置对水轮机转轮流态影响不大,增设导叶可使水流较为平顺地进入转轮,减少撞击,但增设导叶使转轮前流道所产生的水头损失大于其他方案,导致效率降低。

b. 灯泡体前置时,出水流道尺寸变化及增设导叶对出水流道的流态影响均较大,但经过优化,可使得出水流道流态较为顺畅;而灯泡体后置时,出水流道由于灯泡体及支撑的存在产生回流,经过对支撑改型、灯泡体加长及出水流道外壳收缩,可改善回流情况,但是仍有小范围的回流存在。

c. 在微水头条件下,无导叶前置型灯泡贯流式水轮机结构简单,效率高,过流量大,性能较好。模型试验验证了数值模拟计算的准确性。

参考文献:

[1] 范小付,周凌九,张昕. 户用微型轴伸贯流式水轮机优化[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 260-265. (FAN Xiaofu, ZHOU Lingjiu, ZHANG Xin. Optimization of household mini tubular turbines of shaft extension [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 260-265. (in Chinese))

[2] 马彦龙. 灯泡贯流式机组发展前景展望[J]. 电站系统工程, 2010, 26(4): 68-69. (MA Yanlong. Prospect of development of bulb tubular turbine [J]. Power System Engineering, 2010, 26(4): 68-69. (in Chinese))

[3] 杨春霞,郑源,李玲玉,等. 超低水头竖井贯流式水轮机模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 87-90. (YANG Chunxia, ZHENG Yuan, LI Lingyu, et al. Model test of tubular turbine under extremely low head [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(6): 87-90. (in Chinese))

- [4] 李凤超,樊红刚,王正伟,等. 贯流式机组浆叶与导叶全三维联合设计[J]. 水力发电学报,2012,31(2):206-209. (LI Fengchao, FAN Honggang, WANG Zhengwei. Three-dimensional coupled design for runner blades and guide vanes of tubular turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 206-209. (in Chinese))
- [5] YANG Wei, WU Yulin, LIU Shuhong. An optimization method on runner blades in bulb turbine based on CFD analysis [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(2): 338-344.
- [6] 刘树红,杨魏,吴玉林,等. 贯流式水轮机三维定常湍流计算及改型设计[J]. 水力发电学报,2007,26(1):110-113. (LIU Shuhong, YANG Wei, WU Yulin, et al. 3-D steady turbulent simulation and modification of the tubular turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 110-113. (in Chinese))
- [7] 金燕,梁豪杰,刘超,等. 前置灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2013,16(1):71-74. (JIN Yan, LIANG Haojie, LIU Chao, et al. Numerical simulation of the internal flow of prepositive bulb tubular pumping system [J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2013, 16(1): 71-74. (in Chinese))
- [8] 施卫东,张德胜,关醒凡,等. 后置灯泡式贯流泵装置模型的优化与试验研究[J]. 水利学报,2010,41(10):1248-1253. (SHI Weidong, ZHANG Desheng, GUAN Xinfan, et al. Optimization and experimental investigation on post bulb type tubular pump device model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1248-1253. (in Chinese))
- [9] 关醒凡,商明华,谢卫东,等. 后置灯泡式贯流泵装置水力模型[J]. 排灌机械,2008,26(1):25-28. (GUAN Xingfan, SHANG Minghua, XIE Weidong, et al. Hydraulic model and its pilot-plant unit for rear bulb-type cross-flow pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1): 25-28. (in Chinese))
- [10] 陆林广,陈坚,陈阿萍,等. 灯泡贯流泵装置的基本流态分析[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(3):30-32. (LU Linguang, CHEN Jian, CHEN Aping. Analysis of basic flow pattern in bulb tubular pump system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(3): 30-32. (in Chinese))
- [11] 郑源,张德虎,刘益民,等. 贯流泵装置能量特性试验研究[J]. 流体机械,2003,31(2):1-4. (ZHENG Yuan, ZHANG Dehu, LIU Yimin, et al. Experimental study on equipment energy characteristic of tubular pump [J]. Fluid Machinery, 2003, 31(2): 1-4. (in Chinese))
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [13] SAEED R A, GALYBIN A N. Simplified model of the turbine runner blade [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2473-2484
- [14] 郑源,杨春霞,周大庆,等. 卧轴双转轮混流式水轮机的优化设计 [J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):341-345. (ZHENG Yuan, YANG Chunxia, ZHOU Daqing, et al. Optimization design of horizontal Francis turbine with two runners [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 341-345. (in Chinese))
- [15] 周大庆,张蓝国,郑源,等. 基于脱体涡模型的竖井贯流式水轮机组压力脉动数值分析 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 29-33. (ZHOU Daqing, ZHANG Languo, ZHENG Yuan, et al. Numerical analysis of pressure pulsation of pit water turbines based on detached-eddy model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 29-33. (in Chinese))
- [16] BOGEY C, BAILLY C. Large eddy simulations of round free jets using explicit filtering with/without dynamic Smagorinsky model [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(4): 603-610.
- (收稿日期:2013-11-27 编辑:周红梅)
-
- (上接第 36 页)
- [13] AU S K, BECK J L. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16(4): 263-277.
- [14] AU S K, BECK J L. Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(8): 901-917.
- [15] AU S K, CAO Z J, WANG Y. Implementing advanced monte carlo simulation under spreadsheet environment [J]. Structural Safety, 2010, 32(5): 281-292.
- [16] 宋述芳,吕震宙. 基于马尔可夫蒙特卡罗子集模拟的可靠性灵敏度分析方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 33-38. (SONG Shufang, LV Zhenzhou. Structural reliability sensitivity analysis method based on Markov Chain Monte Carlo Subset simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 33-38. (in Chinese))
- [17] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-10.
- [18] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [19] 李亮,褚雪松. 边坡临界滑动面与临界可靠度滑动面对比分析 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2012, 40(9): 81-85. (LI Liang, CHU Xuesong. Comparative analysis between critical slip surface and critical reliability slip surface of slopes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(9): 81-85. (in Chinese))
- [20] 李亮,褚雪松,郑榕明. Rosenblueth 法在边坡可靠度分析中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 53-56. (LI Liang, CHU Xuesong, CHENG Yungming. Application of Rosenblueth method in reliability analysis of soil slopes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 53-56. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-11-05 编辑:周红梅)