

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.006

湿室型泵房整体结构优化设计

蔡新^{1,2}, 崔朕铭¹, 陈卫东³, 黄海田³, 郭兴文²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水利工程质量监督中心站, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对现行规范方法设计的泵房存在“粗、大、笨”的问题,从降低泵房建设成本的角度,构建以泵房结构总造价最低为目标函数,泵房关键结构几何尺寸等参数为设计变量,泵房结构基底应力、地基承载力、抗滑稳定性、结构强度、沉降量及沉降差为约束条件的优化设计数学模型。采用有限元法对泵房结构进行三维有限元数值模拟,同时借助 ANSYS 软件提供的优化平台对其进行优化设计研究。结果表明:与原设计方案相比,优化方案的泵房总造价减少了 9.7%,结构的缝墩厚度达到限定值,既减少了工程总造价,也降低了结构对地基的要求。

关键词: 湿室型泵房;整体结构;优化设计;有限元法;参数化模型;重分析;零阶法;一阶法

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0037-06

The overall optimization for the pumping house of a wet-pit type

CAI Xin^{1,2}, CUI Zhenming¹, CHEN Weidong³, HUANG Haitian³, GUO Xingwen²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Hydraulic Engineering Quality Supervision Station of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: In terms of the excessively designed pumping house by the method in current standard, an optimized model for the pumping house of a wet-pit type was proposed. The main dimensions of the pumping house are selected as design variables, while the minimum construction cost of the pumping house is the objective function. The stress of basement, the bearing capacity of foundation, the stability of sliding, the strength and the settlement of pumping house are the primary and constrained conditions. Then, the parameterization finite element model of the pumping house was established. An optimal scheme of the pumping house was obtained by utilizing the optimization platform of ANSYS. Compared to the original scheme, the optimized design shows a decrease of 9.7% in the cost of the pumping house. Other results including the displacement, stress, and stability were all satisfactory. It indicates that the effect of optimization is noticeable and the economic benefits are also remarkable.

Key words: pumping house of wet-pit type; overall structure; optimization design; finite element method; parametric model; reanalysis; zero-order method; one-order method

泵站在水资源合理调度、防洪排涝、抗旱减灾、工农业用水和城乡居民生活供水等方面起着不可替代的作用,在国民经济发展中发挥着重要作用^[1]。在泵站工程中,泵房为水泵、动力机、电气设备、辅助设备等装置提供工作场所,是泵站的主体工程,其造价在整个工程中占比最大。泵房结构形式复杂多样,根据结构特点可分为分基型、干室型、湿室型和块基型^[2]。在我国排灌体系中,大中型泵站工程起主导作用,而在此类规模的泵站工程中,湿室型泵房是最为常见的泵房结构形式。目前,湿室型泵房的设计主要采用规范规定的

基金项目: 江苏省水利科技项目(2015566369)

作者简介: 蔡新(1964—),男,教授,博士,主要从事工程结构的现代设计理论与方法应用研究。E-mail:xcgai@hhu.edu.cn

引用本文: 蔡新,崔朕铭,陈卫东,等. 湿室型泵房整体结构优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):37-42. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.006.

方法,计算时对泵房各部分结构之间的力系传递作了理想简化,不能反映其复杂空间结构的整体工作效应,设计出的方案往往不是最经济合理的,随着我国泵站工程建设数量的增多,势必造成不必要的浪费,因此针对这种结构的优化设计研究具有重要意义。

近年来,众多学者进行了泵站工程优化设计研究,并取得一定的成果。例如文献[3-7]主要借助数值模拟或物理模型试验的手段,结合现代优化求解技术,对泵站工程结构的进出水流道进行了优化设计研究。陆银军^[8]采用二维数值模拟技术,对采用闸站结合布置的泵站进行优化设计,最优方案既得到了较好的站前水流流态,又提高了泵站工作效率和机组运行的稳定性。文献[9-10]主要利用物理模型试验对泵房前池水力特性进行研究,提出一系列改进措施,较明显地改善了前池内水流的流态。王永桢^[11]进行了电机层楼板错频设计优化,通过不同方案计算结果的对比分析,确定了最优的梁柱布置方案。

目前对泵房结构优化设计研究主要集中在进出水流道、进水前池的水力优化,以及结构错频设计优化等,研究目的主要为改善水流流态、降低水头损失、避免泵房与机组出现共振等,在保证结构安全的前提下,从结构造价最省的角度出发,针对泵房整体结构的优化未见报道。本文结合江苏省某湿室型泵房结构工程,为保证优化结果的可靠性,考虑了包含水泵层、电机层及上部厂房在内的泵房整体结构,按照规范^[12]限定的约束条件,基于现代设计理论,对该泵房整体结构进行优化设计,提出该泵房整体结构的最优设计方案。

1 工程背景

某泵站工程位于江苏省南部,地处长江流域,为灌排两用站。该工程等别为Ⅲ等,主要建筑物级别为3级,工程设计流量为 $25.0\text{ m}^3/\text{s}$,设计扬程为 3.75 m ,装机总功率为 $1\,800\text{ kW}$ 。工程所在地区的地震动峰值加速度为 $0.05g$,根据规范^[12]可知,可不进行抗震计算。该泵站采用湿室型泵房结构,共2层,上层为电机层,下层为水泵层,最顶部为厂房,其整体结构如图1所示。泵房为钢筋混凝土结构,混凝土标号C30,垂直水流方向长 39.2 m ,顺水流方向宽 18.05 m ,共10孔,单孔净宽 3.0 m ,采用5孔1联,2块整体式底板,底板间设置永久沉降缝,无须灌浆。泵房底板厚 1.0 m ,中墩厚 0.8 m ,边墩厚 0.8 m ,缝墩厚 0.6 m 。

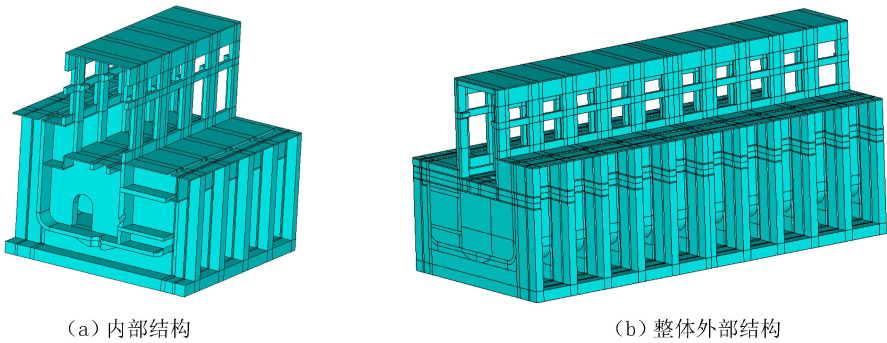


图1 泵房整体结构示意图

Fig. 1 The overall structure of a pumping house

2 整体结构优化设计数学模型

依据规范规程及安全经济的设计要求,结合优化设计理论,对某湿室型泵房的结构特点进行分析,建立该泵房整体结构优化设计数学模型。

2.1 工程结构优化设计的一般表达式

设计变量

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$$

(1)

$$F(\mathbf{X}) \rightarrow \min$$

(2)

约束条件

$$\begin{cases} H_i(\mathbf{X}) = 0 & (i = 1, 2, \dots, k) \\ G_i(\mathbf{X}) \leq 0 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_i \geq 0 & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

(3)

式中: $\boldsymbol{X}$ ——设计变量序列; $F(\boldsymbol{X})$ ——目标函数,如造价最低、质量最轻等; $H_i(\boldsymbol{X})$ 、 $G_i(\boldsymbol{X})$ ——约束函数,如规范规定的结构尺寸约束及性态约束; n ——设计变量个数; k ——等式约束的个数; m ——不等式约束的个数^[13]。

2.2 设计变量

设计变量是待优化的参数,包括可变设计变量和不变设计变量^[14]。根据湿室型泵房的结构特点及影响泵房结构安全的主要因素,选取泵房地板的厚度(x_1)、中墩厚度(x_2)、边墩厚度(x_3)、缝墩厚度(x_4)等关键几何尺寸为可变设计变量。泵房单孔宽度由水力条件决定,底板长度、厂房梁高、梁宽等由工程布置及结构构造要求决定,因此定为不变设计变量,即按结构原设计值设定。

2.3 目标函数

目标函数是判断结构优化方案优劣的指标^[14],一般为结构质量、造价、体积等,优化的目的是通过寻优搜索获得目标函数的最小值。本文选取泵房结构总造价为目标函数,其主要取决于泵房结构的混凝土方量和钢筋配筋量,同时还与施工环节有关。因此,采用能够反映各材料单价和施工因素的结构综合单价计算结构总造价,其表达式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n p_i V_i$$

(4)

式中: p_i ——泵房各部分结构综合单价; V_i ——泵房各部分结构的体积。

2.4 约束条件

约束条件是结构设计时有关规范规程、结构构造及施工等方面规定的限制条件,一般包括几何约束和性态约束^[13]。

a. 几何约束:该约束是指结构为满足规范及施工要求应满足的尺寸限制。根据《泵站设计规范》的限制^[12],结合工程实际情况及规范限定条件,在优化过程中将各设计变量的搜索范围定为: $0.70\text{ m} \leq x_1 \leq 1.10\text{ m}$, $0.70\text{ m} \leq x_2 \leq 0.90\text{ m}$, $0.70\text{ m} \leq x_3 \leq 0.90\text{ m}$, $0.50\text{ m} \leq x_4 \leq 0.65\text{ m}$ 。

b. 性态约束:该约束是规范对泵房结构强度、刚度及稳定性方面的限定,包括基底应力约束、地基承载力约束、抗滑稳定约束、结构强度约束、泵房沉降约束等。其中基底应力约束指基底应力不均匀系数不大于规范限定值及基底土体不出现竖直方向的拉应力;地基承载力约束指泵房平均基底应力和最大基底应力分别小于地基允许承载力和它的 1.2 倍;抗滑稳定约束指结构抗滑稳定安全系数不低于规范的限定值^[12];依据规范要求^[15],泵房结构最大压应力不超过 20 MPa;考虑截面配筋作用,泵房结构最大拉应力不应超过 4 MPa^[16];泵房结构的最大沉降量和沉降差分别不超过 15 cm 和 5 cm^[12]。

3 结构计算重分析模型

结构分析借助有限元软件 ANSYS,采用 APDL 语言编写了泵房整体结构参数化有限元模型及相关优化设计命令流,实现了泵房整体结构在 5 种工况下的优化设计。各工况水位如表 1 所示。

泵房和地基整体结构有限元网格和泵房结构有限元网格分别如图 2 和图 3 所示。泵房和地基整体结构单元总数为 188908 个,节点总数为 235160 个,其中泵房结构单元数为 47417 个。为消除边界效应,模型应取地基单边尺寸的 1~5 倍^[17]。

模型计算范围:顺河流方向地基分别向上下游延伸 1.5 倍泵房单宽,垂直河流方向的地基分别向左右岸延伸 1.5 倍泵房单宽;在竖直方向,地基深度为 1.5 倍泵房高度。地基地面采用固端约束,上下游及左右岸两侧地基边界采用法向约束,模型顶部不约束。

泵房结构材料采用线弹性模型,密度取 2450 kg/m³,弹性模量取 30.00 GPa,泊松比取 0.167。考虑到地基土体的性质以及泵房底板与表层土体相互作用的力学行为,采用理想弹塑性本构模型(即 D-P 模型)模拟土体材料,其计算参数有黏聚力、内摩擦角和剪胀角,采用非关联流动法则,剪胀角取内摩擦角的 1/2^[18]。

表 1 计算工况
Table 1 Simulation cases

工况 编号	工况名称	站下水位 高程/m	站上水位 高程/m
1	完建工况	0	0
2	灌溉期设计水位工况	5.17	9.00
3	灌溉期校核水位工况	5.02	9.50
4	排涝期设计水位工况	9.00	11.10
5	排涝期校核水位工况	9.00	12.65

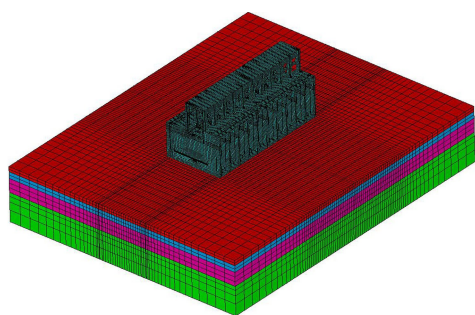


图2 泵房和地基整体结构有限元网格

Fig. 2 FE mesh of the pumping and its house foundation

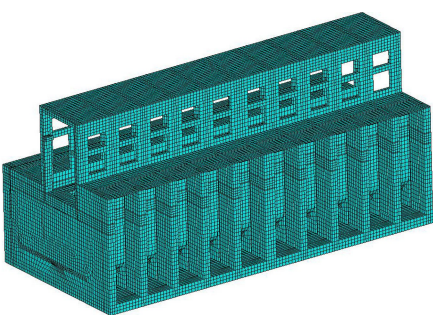


图3 泵房结构有限元网格

Fig. 3 FEM mesh model of the pumping house

同时借助 ANSYS 提供的面-面接触单元模拟底板与土体、缝墩与缝墩间的接触非线性。地基土均分为 4 层, 各层土体材料物理力学性质参数如表 2 所示。

表 2 土体材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

层数	岩土名称	土层厚度/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比
1	重粉质壤土	2.0	1870	16.96	17	26.5	0.32
2	全风化泥质粉砂岩	4.3	1900	26.43	23	31.8	0.30
3	强风化泥质粉砂岩	9.0	1930	67.34	16	53.9	0.32
4	中风化角砾状砂岩	7.0	1880	83.43	24	31.7	0.30

4 优化设计结果及分析

采用 ANSYS 提供的零阶法对所建立的泵房结构参数化模型进行寻优搜索,得到初步的优化方案后,将该优化方案设定为初始值,然后采用一阶法进行二次优化搜索^[19]。部分 APDL 优化命令流如下:

```
/post1
lgwrite,tiji,lgw,,comment
/opt
opanl,tiji,lgw
opvar,x1,dv,0.70,1.10,0.01
opvar,x2,dv,0.70,0.90,0.01
opvar,x3,dv,0.70,0.90,0.01
opvar,x4,dv,0.50,0.65,0.01
opvar,maxstress111,sv,,4000000,
opvar,maxstress113,sv,,20000000,
opvar,maxstress11,sv,,196230,
opvar,maxstress13,sv,,0,
opvar,maxstress12,sv,,1693400,
opvar,maxdisplacement11,sv,,0.15
opvar,chengjiangcha11,sv,,0.05,
opvar,K1,sv,1.25,,
opvar,K3,sv,1.05,,
opvar,u11,sv,,2.0,
opvar,u31,sv,,2.5,
opvar,C,obj,,
opdata,,
opkeep,on
opprnt,on
optype,subp
opsubp,50
opexec
opsave,,
oplist,all
```

最终得到的泵房最优设计方案及优化前后结构的各项安全技术指标如表 3 所示。优化前后泵房结构竖向位移如图 4 所示。

由表 3 可知:与原设计方案相比,优化方案的设计变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 均有所减小,泵房整体结构总造价减小了约 9.7%,泵房结构的缝墩厚度达到限定值,优化效果显著。经过优化设计后,泵房应力虽有较大幅度增大,但均在结构强度界限内,结构材料抗力得到更充分利用。同时,泵房受力和变形状态得到改善,基底应力和沉降有所减小,因此对地基土的要求也相应降低。此外,优化后的泵房各项稳定性指标均符合相关规范要求,表明优化方案是安全可靠的。相比于传统设计方法,采用三维有限元方法结合现代优化设计技术对泵

房整体结构进行优化设计,能更真实地反映泵房结构的整体工作性态,充分利用泵房结构材料强度,得到更经济合理的设计方案,可为今后泵房结构设计提供依据。

表 3 泵房整体结构优化设计结果

方案	工程总 造价/万元	泵房最大 拉应力/MPa	泵房最大 压应力/MPa	闸室最大 沉降/cm	闸室沉 降差/cm	最大基底 应力/kPa	基底应力 不均匀系数	抗滑稳定 安全系数	设计变量/m			
									x_1	x_2	x_3	x_4
原设计	463.23	1.70	1.06	6.32	3.56	152.69	1.87	1.78	1.00	0.80	0.80	0.60
优化设计	418.20	2.63	2.42	5.16	2.78	123.43	1.72	1.65	0.85	0.72	0.71	0.50

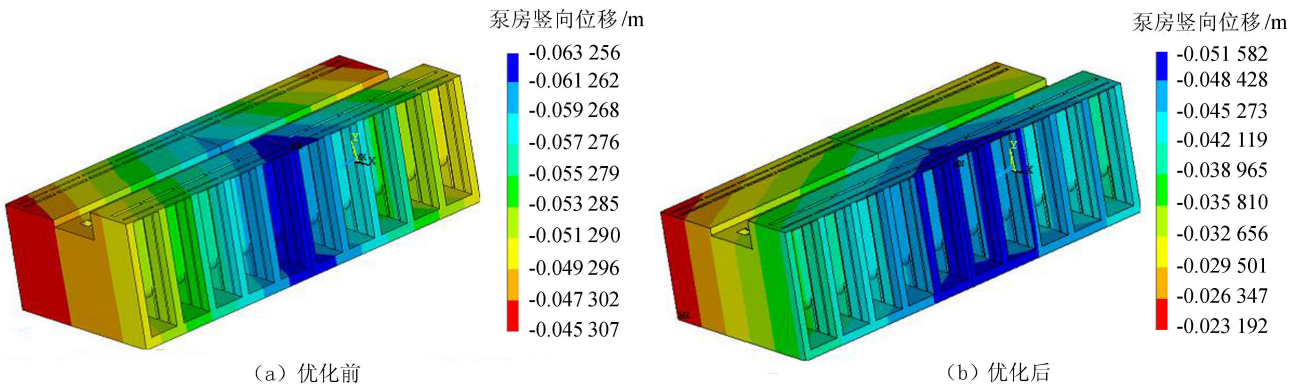


图 4 泵房竖向位移
Fig. 4 Maximum displacement of the pumping house

5 结 论

- a. 运用三维有限元法结合现代优化设计技术,在满足泵房结构几何约束和性态约束的前提下,对复杂泵房整体结构进行优化设计是可行、有效的。
- b. 优化后泵房结构总造价比原设计方案有较大幅度的减小,结构抗力得到更充分的利用,沉降及沉降差减小,对地基土体强度的要求降低,强度、刚度和稳定性均满足规范要求,表明优化设计方案不仅经济合理,而且安全可靠性能进一步增加。
- c. 优化设计时,将泵房作为整体考虑,更真实地反映了泵房各部分结构的相互作用及整体工作性态,从而得到更为经济合理的结构设计方案,可为今后泵房结构设计提供有益参考。
- d. 考虑到计算结果的精确性,本文计算土基采用弹塑性模型,但目前规范中土基主要采用线弹性模型,未来随着结构设计计算方法的进一步发展,考虑土体材料弹塑性计算方法规范的制定,采用针对考虑土体材料非线性的安全限定指标对结构进行优化设计,优化结果更加合理。

参考文献:

[1] 张旭. 中国泵站工程的现状与发展[J]. 科技情报开发与经济,2002,12(4): 210-211. (ZHANG Xu. The current situation and development of pumping station in China[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2002,12(4): 210-211. (in Chinese))

[2] 丘传忻. 泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.

[3] 陈守河,程璐,赵建钧. 海水循环水泵房流道模型试验及优化设计研究[J]. 工业用水与废水, 2012,43(4): 44-47. (CHEN Shouhe, CHENG Lu, ZHAO Jianjun. Model test on intake channel of seawater circulating pumping house and its optimization design[J]. Industrial Water & Wastewater, 2012,43(4): 44-47. (in Chinese))

[4] 付强,袁寿其,朱荣生. 大型给水泵站进、出水流道数值模拟及优化设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1): 48-51. (FU Qiang, YUAN Shousheng, ZHU Rongsheng. Numerical simulation and optimal design of inflow and outflow conduits of large pump station[J]. China Water & Wastewater,2012, 28(1): 48-51. (in Chinese))

[5] 王刚. 泵站进、出水流道优化水力设计方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2012.

[6] 付强,朱荣生,王秀礼,等. 防洪排涝泵站出水流道 CFD 优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2010(5): 142-144. (FU

- Qiang, ZHU Rongsheng, WANG Xiuli, et al. Outlet conduits CFD optimum design of flood control pumping stations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(5): 142-144. (in Chinese))
- [7] 陆林广, 臧东彦, 祝婕. 大型泵站虹吸式出水流道优化水力设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 60-63. (LU Linguang, GAO Dongyan, ZHU Jie. Optimum hydraulic design of siphon outlet in large pumping stations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(4): 60-63. (in Chinese))
- [8] 陆银军. 基于数值模拟的闸站结合布置优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 963-967. (LU Yinjun. Layout design optimization of integrated pumping station and sluice with numerical stream simulation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(11): 963-967. (in Chinese))
- [9] 王广聚, 周静, 纪平. 泵房进水前池优化试验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(2): 123-125. (WANG Guangju, ZHOU Jing, JI Ping. Experimental study on optimization of forebay for pumping house[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(2): 123-125. (in Chinese))
- [10] 李敏. 循环水泵房正向进水前池水力性能探究及结构优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [11] 王永祯. 大型泵房结构的动力特性分析及优化设计[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [12] 中华人民共和国水利部. 泵站设计规范: GB 50265—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [13] 蔡新, 严伟, 朱杰, 等. 充填管袋堤坝结构断面优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 1-5. (CAI Xin, YAN Wei, ZHU Jie, et al. Optimal design of structural section of geotextile tube dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 1-5. (in Chinese))
- [14] 崔朕铭, 蔡新, 黄海田, 等. 软土地基上水闸整体结构优化设计[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 86-89. (CUI Zheming, CAI Xin, HUANG Haitian, et al. The optimization design of overall structure of sluice on soft foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016(1), 36: 86-89. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [16] 蔡新, 李洪煊, 武颖利, 等. 水下隧道结构优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 665-668. (CAI Xin, LI Hongxuan, WU Yingli, et al. Optimal design of structure of underwater tunnels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(6): 665-668. (in Chinese))
- [17] SABNIS G M. Structural modeling and experimental techniques[M]. Englewood Cliffs: N J. Prentice-Hall, 1999.
- [18] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3282. (KONG Weixue, RUI Yongqin, DONG Baodi. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3278-3282. (in Chinese))
- [19] 李芬花, 马慧, 卢东海, 等. ANSYS 零阶方法和一阶方法的重力坝断面优化研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 69-72. (LI Fenhua, MA Hui, LU Donghai, et al. Research on section optimization of gravity dam with ANSYS based zero-order and first-order methods[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(1): 69-72. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-02-20 编辑: 高建群)