

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.003

基岩深层多滑面抗滑稳定求解方法对比分析

李建波,常雪,刘苏日

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基岩深层抗滑稳定是重力坝最关注的问题之一,针对其中多滑动面抗滑稳定分析,新版《混凝土重力坝设计规范》(NB/T 35026—2014)中提供了相关的求解方程。对于该方程,目前工程界中普遍采用迭代试算法,该方法计算繁琐、效率低。对该方程进行求解分析时,发现该多滑面求解为一个复杂的局部优化问题。选用枚举法可对局部有效区间进行筛选,并结合二分法能够精确求出有效解。通过对该有效解的特性进行分析发现此有效解是某一特定有效区间内的最大解且唯一。在此结论的基础上,利用遗传算法的特性,在全局范围内求出该有效解,进一步提高了计算效率,并且两种求解方法的准确性得到了有限单元法的验证。

关键词: 重力坝;抗滑稳定;枚举法;二分法;遗传算法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0022—06

Comparative Analysis of the Solution Methods for Anti-sliding Stability of Multi-slide Surface in Deep Bedrock

LI Jianbo, CHANG Xue, LIU Suri

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Deep anti-sliding stability of bedrock is one of the most concerned problems of gravity dams. Aiming at the anti-sliding stability analysis of multiple sliding surfaces, the relevant solving equations are provided in the new design code for concrete gravity dams (NB/T35026—2014). For this equation, iterative trial algorithm has been widely used in engineering field at present, which is complex and inefficient. When the equation is solved and analyzed, it is found that the multi-sliding surface is a complicated local optimization problem. The enumeration method can be used to screen the local effective intervals, and the effective solution can be obtained accurately by combining the dichotomy method. By analyzing the characteristics of the effective solution, it is found that the effective solution is the maximum and unique in a specific effective interval. Based on this conclusion, the effective solution is obtained in the global scope by utilizing the characteristics of genetic algorithm, which further improves the computational efficiency, and the accuracy of these two solutions is verified by the finite element method.

Keywords: gravity dam; anti-slip stability; enumeration method; dichotomy; genetic algorithm

基岩深层抗滑稳定的求解是重力坝设计中的一项重要内容^[1-3]。目前,工程界中所采用的基岩深层多滑动面求解方法多为迭代试算法,该方法效率较低。因此,彭文明^[4]、姜云龙等^[5]提出一种非线性方程组迭代收敛性的求解方法,将该滑动面的求解看成一个全局优化的问题,认为 Q'_{n-1} 与 Q_{n-1} 均是

关于抗力作用比系数 η 的单调函数,两条单调曲线的交点就是方程的解,但均未探讨方程的收敛性。事实上,通过对规范中计算公式分析可知,由于基岩存在较多滑块, Q'_{n-1} 与 Q_{n-1} 在全局上并不是完全关于的 η 单调函数。

通过对新规范中求解方程分析可知该多滑动面

收稿日期:2019-01-25

修稿日期:2019-02-27

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0201000);国家自然科学基金项目(51779222);国家自然科学基金委创新研究群体项目(51421064);中央高校基本科研业务费(DUT17LK16)

作者简介:李建波(1977—),男,河北邢台人,博士,副教授,主要从事结构抗震分析工作。E-mail: jianboli@dlut.edu.cn

抗滑稳定求解为一个复杂的局部优化问题,本文通过枚举法对解得振荡点进行搜索,局部有效区间进行筛选,结合二分法在有效区间内高效求解。在此基础上提出了遗传算法进行求解,并且对比分析二者之间的计算效率。最后利用有限单元法对本文提出了两种求解方法的准确性进行了验证。

1 多滑动面抗滑稳定分析方法

1.1 多滑动面抗滑稳定方程

新版《混凝土重力坝设计规范》^[6](NB/T 35026—2014)中提出了基岩深层滑动面抗滑稳定分析方法。多滑动模式下坝基抗滑稳定计算剖面示意图见图 1,图 2 为其中某一单条块具体受力示意图,多滑动面抗滑稳定分析按以下方法进行计算。

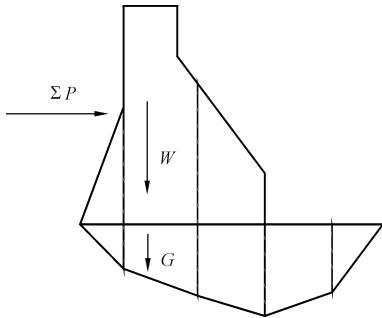


图 1 坝基抗滑稳定计算剖面示意图

取基岩中某一个滑块体进行受力分析:

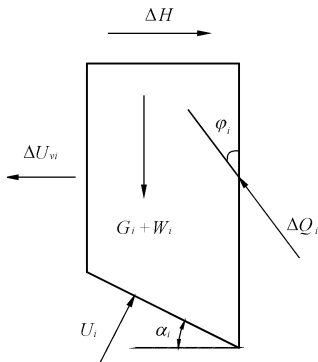


图 2 坝基单条块受力示意图

对每一条块,抗力函数 $R(\cdot)$ 和作用函数 $S(\cdot)$ 可表示为:

$$R_i(\cdot) = f'_{di} [(W_i + G_i)\cos\alpha_i + (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\sin\alpha_i - \Delta Q_i \sin(\varphi_i - \alpha_i) - U_i] + C'_{di} A_i \quad (1)$$

$$S_i(\cdot) = (W_i + G_i)\sin\alpha_i + (\Delta H_i - \Delta U_{vi})\cos\alpha_i - \Delta Q_i \cos(\varphi_i - \alpha_i) \quad (2)$$

定义各条块抗力作用比 η 如式(3)所示,滑动体系各条块具有同等的抗力作用比 η ,此时滑动体系

达到极限平衡,即坝基整体抗力作用比 η ,计算公式及要求如下所示:

$$\frac{R_i}{S_i} = \eta \geq 1 \quad (3)$$

考虑分项系数后抗力作用比 η' 如下:

$$\frac{R_i}{\gamma_0 \gamma_d \psi S_i} = \eta' \geq 1 \quad (4)$$

由式(3)可得到 $n - 1$ 个方程,其中含有 n 个未知数 ΔQ_i ,再由坝基体系内力平衡条件可得:

$$\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0 \quad (5)$$

由式(3)与式(5)联立可以求解得到各滑块侧向接触面间的剪力 ΔQ_i 以及抗力作用比 η ,由式(4)可得 η' ,当 $\eta' \geq 1$ 时,即认为满足抗滑稳定的要求。式中各参数的物理意义见表 1。

表 1 多滑面稳定计算公式中各参数物理意义

参数符号	参数说明	方向性
f'_{di}	滑动块 i 的抗剪断摩擦系数	
C'_{di}	滑动块 i 抗剪断黏聚力	
G_i	该滑块体的重量	竖直向下为正
W_i	该滑块体上覆坝体重量	竖直向下为正
α_i	底滑面倾角	指向下游为正
ΔQ_i	该滑块两侧剪力合力	指向上游为正
φ_i	ΔQ_i 与水平向夹角	工程界中取 $0^{[7]}$
ΔU_{vi}	该滑块底面所受水压力	垂直与滑块底面
U_i	侧面水压力合力	指向上游为正
ΔH_i	滑块所受其它水平荷载	指向上游为正
γ_0, γ_d, ψ	结构重要性系数、结构系数、设计状况系数	

1.2 多滑动面抗滑稳定方程求解

1.2.1 枚举法结合二分法局部优化求解

由上述式(3),令 $\psi = 0$,假定一抗力作用比 η ,将该值带入第 i 个滑块体中可得到该滑块体两侧剪力合 ΔQ_i 即:

$$\Delta Q_i = \frac{-f'_{di} [(W_i + G_i)\cos\alpha_i + (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\sin\alpha_i - U_i] - C'_{di} A_i}{\eta \cos\alpha_i + f'_{di} \sin\alpha_i} + \frac{\eta [(W_i + G_i)\sin\alpha_i - (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\cos\alpha_i]}{\eta \cos\alpha_i + f'_{di} \sin\alpha_i} \quad (6)$$

由式(6)可得 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i$ 是关于 η 的非线性方程。假定基岩有 n 个滑块体,公式(6)的分母将存在 n 次趋于 0^+ 、 0^- 使得 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i \rightarrow -\infty$ 、 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i \rightarrow +\infty$,即 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i$ 方程将会产生 n 次振荡, $n + 1$ 个局部

区间。实际工程中,大坝基岩深层抗滑稳定分析中的某个滑移通道的安全系数是唯一的^[8],所以各区间内 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i$ 应为关于 η 的单调函数。

以坝基体系内力平衡条件 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0$ 为目标函数,在 $(-10, 10)$ 之间以 0.01 的步长对 η 进行枚举搜索,找出方程产生振荡之处以及各个局部区间,对各局部区间的振荡点加以分析筛选出有效区间,在有效区间内进行二分法^[9] 搜索,找出符合实际工程的抗力作用比真解 η 。

1.2.2 遗传算法求解

与枚举法相比较,遗传算法具有较好的收敛性,计算精度较高,计算时间较短^[10-11]。因此本文在枚举法得出结论的基础上同时采用遗传算法进行全局范围内求取最优解的探讨。

遗传算法进行基岩深层多面求解步骤如下:

(1) 种群初始化,在求解区间内生成一维随机数组 $\text{pop}(\eta)$ 。其中:

$$\eta_i = \eta_{\min} + \text{rand}^*(\eta_{\max} - \eta_{\min})$$

(2) 初始种群的适应度评价。定义目标函数:

$$\text{Cost}(\eta) = g(\eta) \frac{1}{\left| \sum_{i=1}^n \Delta Q_i(\eta) + \delta \right|} \quad (7)$$

对 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i(\eta)$ 做适当变形处理,可将求解零点转化为求解最大值的问题。多极值函数求解最大值恰是遗传法的经典应用^[12]。取 δ 为小于 1 的正值,避免

$\sum_{i=1}^n \Delta Q_i(\eta) = 0$ 时求解出现错误,且加快全局最优解的收敛。其中 $g(\eta)$ 为放大因子。对种群内所有个体进行适应度评价,为其赋目标函数值。合理的目标函数构造为算法的快速收敛提供可能,并且避免陷入局部最优解。找出种群中适应度最大的个体,作为当前最优解 solu 。

(3) 种群变异。直接对种群进行交叉变异,定义变异概率 $\text{pc} = 0.25$,交叉因子 $\text{scalf} = 0.5$ 。生成随机数,若 $\text{rand} < \text{pc}$,则生成随机整数 r_1, r_2, r_3 。

$$\text{tmp}\eta_i = \text{pop}(r_1) + \text{scalf} * (\text{pop}(r_2) - \text{pop}(r_3))$$

如果 $\text{tmp}\eta_i$ 不在搜索范围内,则变异无效,重新生成随机数 r_1, r_2, r_3 ,进行交叉变异,直至得到的值在搜索区间内。

(4) 对新生成的个体进行适应度评价,若适应度大于原来的个体,则更新种群,令新生成的个体取代原来的个体,并将该个体与当前最优解比较,若适应性超过最优解,则更新当前最优解。在每一代进化中,对种群中所有个体依次进行变异以及种群更新操作。

(5) 重复(2)、(3)、(4),不断更新种群和最优解,直至满足停机条件。

(6) 得到满足精度要求的最优解

本文结合遗传算法采用 MATLAB 进行编程,具体的计算流程见图 3。

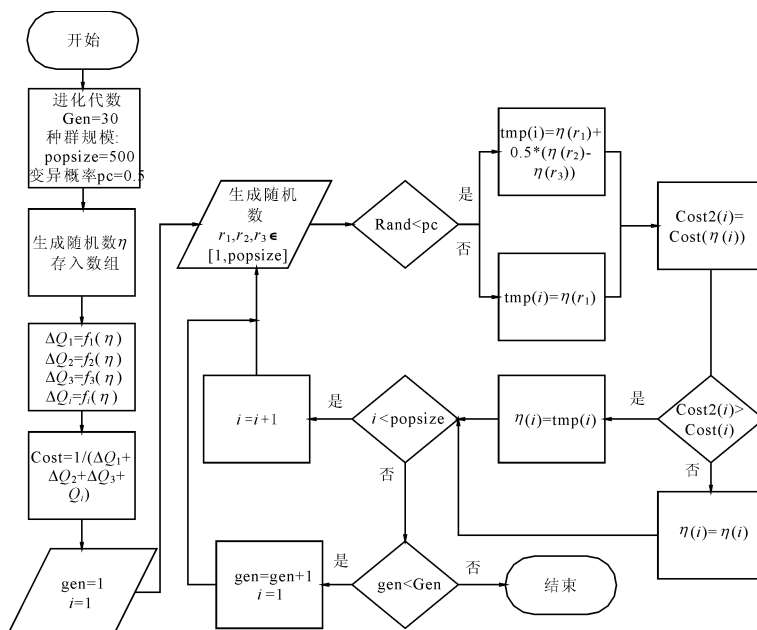


图 3 多滑动面抗滑稳定遗传算法求解流程图

2 算例求解

取某一坝体,大坝模型尺寸图见图 4,坝体密度 $2\ 400\text{ kg/m}^3$ 、坝基密度为 $2\ 700\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $2 \times 10^{10}\text{ Pa}$ 、帷幕距坝踵 10 m 、抗剪断摩擦系数 1.1 、对应的分项系数为 1.7 、抗剪断黏聚力为 1.2 MPa 、对应的分项系数为 2 。将坝基滑动面模拟成 3 、 4 个,坝基滑动面参数图分别见图 5、图 6。将水位设置为满库与半库,在此四种工况下分别用枚举法及遗传算法进行求解。局部枚举法能求出解的振荡点、函数的局部单调区间、有效区间以及方程真解;在此基础上采用遗传算法直接捕捉该多滑动面的有效解。

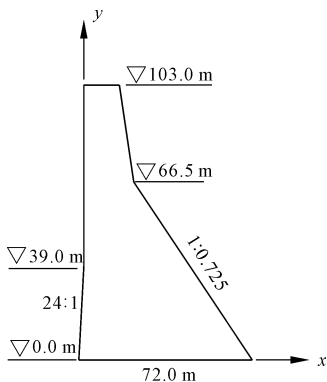


图 4 大坝模型尺寸图

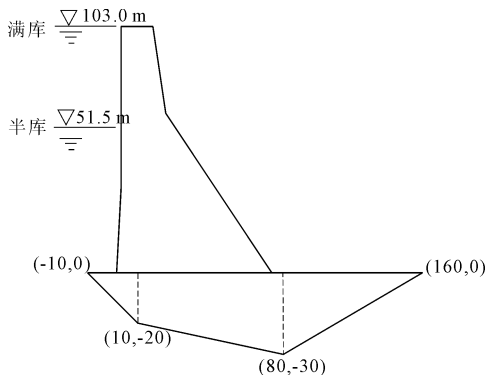


图 5 坝基 3 个滑块

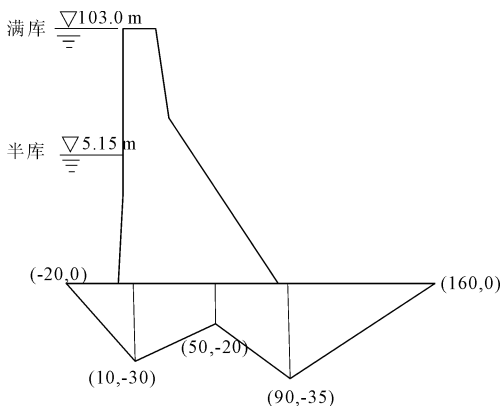


图 6 坝基 4 个滑块

对上述两个滑动面,两种荷载信息定义四种工况见表 2。

表 2 工况信息

滑裂面数/个	水位信息	工况
3	满库	工况 1
	半库	工况 2
4	满库	工况 3
	半库	工况 4

2.1 枚举法、二分法进行局部优化求解

采用枚举法分别求得的 3 、 4 个滑动面下解得局部区间以及振荡点见表 3。

表 3 局部区间及振荡点

滑裂面数/个	局部区间	振荡点
3	1(-9.99, -0.65)	1(-0.65, -0.64)
	2(-0.64, -0.10)	2(-0.10, -0.09)
	3(-0.09, 0.24)	3(0.24, 0.25)
	4(0.25, 0.99)	
4	1(-9.99, -0.65)	1(-0.65, -0.64)
	2(-0.64, -0.25)	2(-0.25, -0.24)
	3(-0.24, 0.16)	3(0.16, 0.17)
	4(0.17, 0.32)	4(0.32, 0.33)
	5(0.33, 9.99)	

将公式(6)对 η 求导可得:

$$\Delta Q'_i = \frac{(W_i + G_i)\sin\alpha_i - (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\cos\alpha_i}{\eta\cos\alpha_i + f'_d\sin\alpha_i} - \frac{\eta[(W_i + G_i)\sin\alpha_i - (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\cos\alpha_i]}{(\eta\cos\alpha_i + f'_d\sin\alpha_i)^2} - \cos\alpha_i \left\{ -C'_d A_i - f'_d [(W_i + G_i)\cos\alpha_i + (\Delta U_{vi} - \Delta H_i)\sin\alpha_i - U_i] \right\} / (\eta\cos\alpha_i + f'_d\sin\alpha_i)^2 \quad (8)$$

结合公式(8)利用 Mathematic 程序分别求得 3 、 4 个滑动面下各局部区间内 $\sum \Delta Q'_i$ 均为正值,因此 $\sum \Delta Q_i$ 在各局部区间内均单调递增。

由 $\sum \Delta Q_i$ 与 η 的关系曲线可得 $\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = 0$ 的 η 值,分析可知四种工况下的有效区间均为跳过各振荡点后的最大区间,该有效区间内的解为实际工程中多滑动面抗滑稳定解析解,方程的最大解即为有效解。该解与式(4)结合将得到各滑裂面下抗力作用比系数的真解,见表 4。

2.2 遗传算法求解

通过枚举法求解分析,得知实际工程中解为跳跃各振荡点后区间连续函数的解,即为实际工程解为方程解的最大值,因此可将上述局部优化问题转

换为遗传算法全局求取最大值的优化问题。因此,为快速得到有效解可令遗传算法求解步骤(2)中的放大因子 $g(\eta) = \lg(\eta + 1.05)$,通过放大因子直接筛选出符合实际工程的最优解。

由 $\text{Cost}(\eta) - \eta$ 图像得 $\sum \Delta Q_i = 0$ 的解较明显突出,遗传算法可很快收敛得到最优解。与式(3)结合将得到各工况的解见表 5。

表 4 基于局部优化算法的多滑动面解

工况	有效区间	有效解 η	η' (η /分项系数)
工况 1	(0.25, 9.99)	2.470	1.496
工况 2	(0.25, 9.99)	5.778	3.502
工况 3	(0.33, 9.99)	3.069	1.860
工况 4	(0.33, 9.99)	8.551	5.182

表 5 基于遗传算法的多滑动面解

工况	η	η' (η /分项系数)
工况 1	2.365	1.433
工况 2	5.557	3.368
工况 3	2.920	1.770
工况 4	8.389	5.084

2.3 求解效率对比分析

分别对两种求解方法的运算次数进行对比分析,结果见表 6,其中各参数的物理意义见表 7。

表 6 局部优化求解与遗传算法求解计算次数对比

计算类型	参数类别	计算次数		*()
		加减运算	乘除运算	
枚举法结合二分法求解	搜索	$6 * (n - 1) + 4$	$10 * (n - 1)$	$*(A/a - 1)$
	二分法	$6 * (n - 1) + 4$	$1 + 10 * (n - 1)$	$* b$
	初始化	3	1	$* \text{popsize}$
	适应度评价	6	10	$* n * \text{popsize}$
遗传算法	目标函数变形	$n + 1$	2	$* \text{popsize}$
	b 变异	8	8	$* \text{popsize} * \text{gen}$
	对比	6	10	$* \text{popsize} * \text{gen} * n$
	变形	$n + 1$	2	$* \text{popsize} * \text{gen}$

表 7 表 6 中各参数的物理意义

种群数量 popsize	20
滑动面个数 n	3, 4
进化代数 gen	20
搜索区间 $[0, A]A$	10
搜索步长 a	0.01
二分次数 b	10

由表 6、表 7 可求得该多滑动面求解中两种算法的计算次数见表 8。

表 8 两算法计算次数结果对比

滑动面个数	求解方法	计算次数	
		加减运算	乘除运算
3	枚举法结合	12112	20010
	二分法求解		
	遗传算法	9375	12495
4	枚举法结合	18166	30010
	二分法求解		
	遗传算法	11580	15645

由表 8 可得遗传算法的计算次数较少,当基沿存在较多动裂面时,采用遗传算法计算求解效率明显高于枚举法的局部优化求解。

3 有限单元法验证

采用 ANASY 分别对上述两种滑块体进行建模如图 7 所示,施加荷载进行有限元分析^[13],利用有限元求解公式(9)进行各工况下的多滑动面抗滑稳定求解^[14-17],对上述两种方法求解的准确性进行验证。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \sigma_{ni} + c_i) l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_m l_i} \quad (9)$$

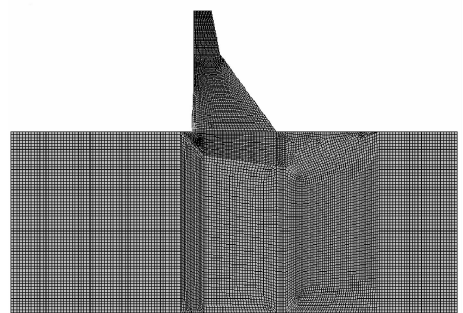


图 7 坝基三个滑动面

有限元进行分析分别求出各滑动面下每个滑移通道的正应力与剪应力后代入公式(9)求得各工况下基岩深层抗滑稳定的抗力作用比系数且与前两种方法对比见表 9。

通过有限元法的计算结果与枚举法、遗传算法对比分析,验证了本文中枚举法求解与遗传算法求解的准确性。

表9 三种算法计算结果对比

工况	抗力作用比系数		
	枚举法	遗传算法	有限元法
工况1	1.496	1.433	1.484
工况2	3.502	3.368	3.642
工况3	1.860	1.770	1.921
工况4	5.182	5.084	5.441

4 结论

(1) 以枚举法与二分法相结合局部优化求解方法对《混凝土重力坝设计规范》中基岩深层多滑动面进行计算求解,可得当基岩存在 n 个滑裂面,非线性方程的解会产生 n 次震荡, $n+1$ 个局部区间,且在每个区间内, $\sum \Delta Q'_i$ 均为正值, $\sum \Delta Q_i$ 均是关于 η 的单调函数。跳跃各振荡点后的第 $n+1$ 个区间为解得有效区间,方程的最大解即为符合实际工程的有效解。

(2) 由枚举法结合二分法分析的结论可将该局部优化求解转换成遗传算法全局求取最大值的优化求解,进而提高求解效率。

(3) 通过有限元法验证了本文两种求解方法的准确性。

参考文献:

- [1] 刘咏梅.水位下降对复杂地基重力坝深层抗滑稳定分析——以武都水库重力坝19#坝段为例[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):123-126,146.
- [2] 闫涵,张大鹏,于月鹏,等.重力坝深层抗滑稳定计算分析[J].东北水利水电,2018,36(2):1-2,5,71.
- [3] 王子健,陈志扬.某重力坝复杂基础深层抗滑稳定分析

[J].科技创新导报,2017,14(14):45-48,50.

- [4] 彭文明.多滑动面深层抗滑稳定求解方法探讨[J].水电站设计,2009,25(1):1-3.
- [5] 姜云龙,张立勇,丁哲,等.混凝土重力坝深层抗滑稳定分析[J].水电与新能源,2015(3):1-3.
- [6] 混凝土重力坝设计规范:NB/T 35026—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2015:89-93.
- [7] 杨志勇,陈建康,吴震宇,等.重力坝深层抗滑稳定多滑动面计算方法探讨[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(S1):31-35.
- [8] 安普太.混凝土重力坝抗滑稳定分析探讨[J].山西水利科技,2016(1):51-54.
- [9] 鲍克元.基于MATLAB中随机函数的求方程实根的方法探析[J].数学之友,2016(6):69-71.
- [10] 余胜威.MATLAB优化算法案例分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2015:477-478.
- [11] 张国民.遗传算法的综述[J].科技视界,2013(9):37,36.
- [12] 曾嘉彦,蒙春年.使用遗传算法求解最大值的研究[J].信息与电脑(理论版),2013(7):57-58.
- [13] 李围.Ansys土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2007:369-372.
- [14] 黄灵武,王衍,杨宗宇.复杂岩基上重力坝抗滑稳定计算方法研究[J].山西建筑,2016,42(23):72-73.
- [15] 容晓.刚体极限平衡法与有限元法在重力坝岸坡坝段抗滑稳定计算中的对比分析[J].企业科技与发展,2017(5):125-128,132.
- [16] 来志强,常晓林,程勇刚,等.基于分项系数有限元法的观音岩大坝深层抗滑稳定分析[J].水力发电,2017,43(1):30-34.
- [17] 张彬洪,姚激,李泽,等.基于有限元法的混凝土重力坝抗滑稳定分析方法[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):62-64.