

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.006

基于 Vague 集的地下洞室地震安全评价

李文倩,王乾伟,王 飞,王 振,朱晓斌,佟大威

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要: 针对地下洞室群安全评价研究相对匮乏,且研究中大多针对应力或位移等单一指标开展安全评价,其结果具有明显局限性的问题,基于集成强度折减法、粒子群优化算法、投影寻踪法及 Vague 集的集对分析模型等方法,以结构的竖向位移、水平位移、加速度及压应力等多个动态响应参量作为地下洞室地震安全评价的关键指标,提出了适用于大型地下洞室群多指标的地震安全评价方法体系。以某工程为例进行了大型水电工程地下洞室群地震安全评价研究,结果表明所选地下洞室的 3 个断面均处于安全稳定性较好的评价等级,验证了地下洞室群地震安全评价模型的有效性。

关键词: 地下洞室;地震安全评价;Vague 集;粒子群优化算法;投影寻踪法;强度折减法

中图分类号:TV312 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)05-0413-06

Seismic safety evaluation of underground cavern with Vague set

LI Wenqian, WANG Qianwei, WANG Fei, WANG Zhen, ZHU Xiaobin, TONG Dawei

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Up to now, few studies have been performed to evaluate the safety of underground cavern group under earthquake, and most of the researches are limited in a single factor such as stress or displacement. Based on the integrating strength reduction method, particle swarm optimization method, projection pursuit method and set pair analysis model with Vague set, an seismic safety evaluation model with multiple parameters is proposed for huge underground cavern group. In this model, several dynamic response parameters such as vertical displacement, horizontal displacement, acceleration, and compressive stress are taken as the key factors to evaluate the seismic safety of underground caverns. A multi-index seismic safety assessment method system is hence proposed for large underground cavern group in this paper. A case study is performed to evaluate the seismic safety of the underground cavern groups of a huge hydro-power project, the results show that the selected three sections of the underground caverns are all in a safe and steady rating, which in turn demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Key words: underground cavern; seismic safety evaluation; Vague set; particle swarm optimization; projection pursuit; shear strength reduction method

目前基于数值模拟的地下洞室动力分析与评价方法主要有连续数值方法^[1]、非连续数值方法^[2]与耦合数值方法^[3]。水电工程领域的研究中多为基于应力、位移等响应进行结构的静动力^[4] 安全稳定性分析^[5],而少数的安全评价研究中多为针对坝体的安全评价研究^[6-10]。针对地下洞室的安全评价研究相对匮乏,Zhu 等^[11]将弹塑性位移与弹性位移的比值作为评价标准,进行地下洞室围岩的安全评价。李景龙^[12]将弹、塑性位移比作为地下洞室群围岩的稳定分析指标,进行了地下工程围岩的稳定性评价研究。吕涛^[13]从应力角度引入动应力集中因子代表值作为动力响应的关键特征进行地下洞室的地震安全评价。撒文奇^[14]采用

收稿日期: 2016-10-17
基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金(51621092);国家重点研发计划(2016YFC0401806);国家自然科学基金(51679165)
作者简介: 李文倩(1986—),女,天津人,博士研究生,主要从事地下洞室模拟与评价分析研究。E-mail:bxqe@163.com
通信作者: 佟大威,讲师。E-mail:tongdw@tju.edu.cn

多层次模糊综合评价方法,以断面监测点间收敛值、位移及应力作为安全评价指标,研究了地下洞室施工期的静力安全评价。

综上可知,目前少有的地下洞室群安全评价研究中大多针对应力或位移等响应指标的中的单一指标开展安全评价,其结果具有明显的局限性。针对上述不足,深入开展了大型地下洞室群地震安全评价方法体系研究,提出的地震安全评价模型将目前评价方法中单一指标推广到多指标的综合分析范围内,以地下洞室的典型断面为研究对象进行稳定性与安全性评估并建立结构安全等级,实现了大型水电工程地下洞室群地震评价指标的综合安全决策与评价分析,对地下洞室安全评价工作提供必要的理论基础与方法支撑。

1 地下洞室地震安全评价流程

地下洞室地震安全评价研究流程如图 1 所示。研究思路:(a) 基于强度折减法得到地下洞室地震评价指标及评价等级。(b) 利用投影寻踪法将数据由高维到低维的投影输出能力与粒子群算法的寻优能力,获得各评价指标的权重值。(c) 基于 Vague 集的集对分析与评价模型构建评价等级的相似度,并得到特征值等级,进行了综合竖向位移、水平位移、加速度及压应力等多指标的地下洞室地震安全评价。

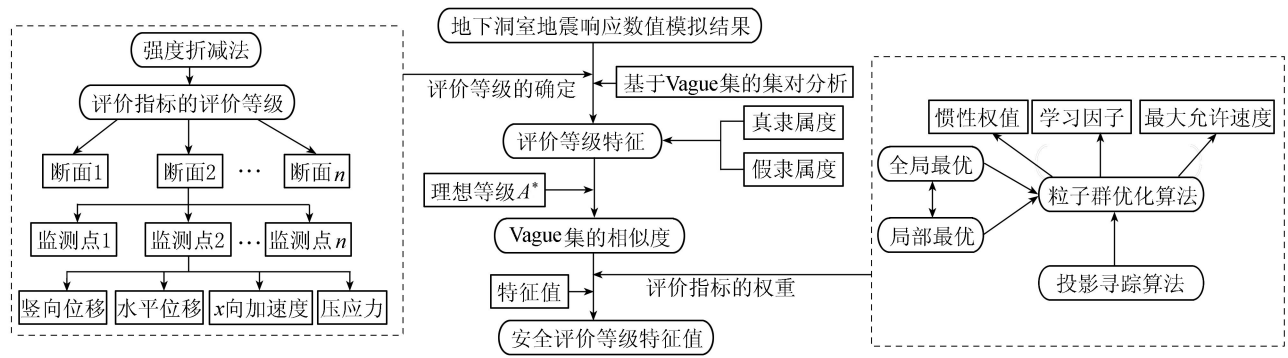


图 1 地下洞室地震安全评价流程

Fig. 1 Flow chart of seismic safety evaluation of underground cavern

2 地下洞室地震安全评价方法体系

2.1 强度折减法

强度折减法基本思路是将所研究地下洞室围岩材料关键参数 c (内聚力)、 φ (内摩擦角) 同时除以折减系数 β , 得到一组新的对应材料的强度参数 c' 、 φ' , 并通过逐渐增加折减系数 β 以减小围岩的材料强度参数, 直至地下洞室在计算过程中达到临界的破坏情况, 则此临界折减系数 β 称为安全系数 F_s 。

2.2 粒子群优化算法

全局最优粒子群优化算法是为了获得地下洞室地震安全评价中各指标对应的权重值, 假设 q 维空间内存在由 b 个粒子组成的群体, 第 i 粒子 ($i=1, 2, \dots, b$) 的位置维度向量为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}\}$, 速度为 $V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iq}\}$ 。全部粒子全局最优值为 $p_g = \{p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gq}\}$, p_g 只有一个或者一组。粒子位置及速度的更新算法公式为^[15]

$$\begin{cases} V_{ij}^{T+1} = kV_{ij}^T + e_1\xi(p_{ij}^T - X_{ij}^T) + e_2\eta(p_{gi}^T - X_{ij}^T) \\ X_{ij}^{T+1} = X_{ij}^T + \gamma V_{ij}^{T+1} \end{cases} \tag{1}$$

式中: j ——粒子的第 j 个维度序号, $j=1, 2, \dots, q$; T ——迭代次数; k ——惯性权重; e_1 ——粒子跟踪自身历史最优值的权重系数; e_2 ——跟踪粒子群体最优值的权重系数; ξ, η ——均匀分布的随机函数; γ ——约束速度的因子。

每个粒子历史最优值的更新公式为

$$p_{ij}^{T+1} = \begin{cases} X_{ij}^{T+1} & X_{ij}^{T+1} \Rightarrow p_{ij}^T \\ p_{ij}^T & p_{ij}^T \Rightarrow X_{ij}^{T+1} \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中 $\Rightarrow$ 表示符号左边“更优”, 粒子群的全局最优值选取方式如下:

$$p_{g_j}^{T+1} = \text{best} p_{ij}^{T+1} \tag{3}$$

在全局粒子群优化算法中,为防止粒子的更新速度过大或过小,需设定一定的速度范围。

2.3 投影寻踪法

投影寻踪算法首先基于地下洞室结构稳定性评价等级的数据生成用于结构稳定性评价的原始数据,包括地下洞室评价指标 $x_{i'j'}^*$ 及对应的评价等级 $y_{i'}$, 并将 $x_{i'j'}^*$ 按式(4)进行归一化处理。

$$x_{i'j'} = \frac{x_{i'j'}^* - x_{j'\min}}{x_{j'\max} - x_{j'\min}} \quad (i' = 1, 2, \cdots, n; j' = 1, 2, \cdots, m) \tag{4}$$

式中: i' ——洞室中测试样本; j' ——洞室安全稳定性评价所采用的指标; $x_{j'\max}$ 、 $x_{j'\min}$ ——第 j' 个评价指标的最大值、最小值。

将 $x_{i'j'}$ 投影到 $\omega_j = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m)$ 上, ω 即投影寻找评价指标所对应的权重值,并获得投影值:

$$z_{i'} = \sum_{j'=1}^m \omega_j x_{i'j'} \tag{5}$$

为使 $z_{i'}$ 能最大化地提取 $x_{i'j'}$ 中的变异信息,在进行综合投影时需要同时要求 $z_{i'}$ 的标准差 $S(\omega)$ 和其局部密度 $D(\omega)$ 达到最大。投影指标函数为 $Q(\omega)$, $\bar{z}_\omega$ 为 ω 上的平均投影值,则最佳投影方向的满足条件为

$$\begin{cases} \max Q(\omega) = S(\omega) D(\omega) & \text{s. t. } \sum_{j'}^m \omega_j = 1 \\ S(\omega) = \left[\sum_{i'=1}^n \frac{(z_{i'} - \bar{z}_\omega)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \tag{6}$$

2.4 Vague 集的集对分析模型

假设地下洞室地震安全评价指标 L_j 的分界限值分别为 $a_{1j''}, a_{2j''}, \cdots, a_{nj''}$, 当 $a_{1j''} > a_{2j''} > \cdots > a_{nj''}$ 时, 指标实测值 v 在第 i'' 等级 ($a_{i'+1,j''} \leq v \leq a_{i'',j''}$), $t=1, f=0$; 在第 $i''-1, i''+1$ 级时, t, f 的算法如式(7); 其余等级内为完全反对情况, $t=0, f=1$ 。当 $a_{1j''} < a_{2j''} < \cdots < a_{nj''}$ 时, 真假隶属度 t 及 f 的取值与式(7)相反。

$$\begin{cases} t = 1 - \sqrt{\frac{a_{i'',j''} - v}{a_{i'',j''} - a_{i'+1,j''}}} & f = \left| \frac{a_{i'',j''} - v}{a_{i'',j''} - a_{i'+1,j''}} \right| & v \in [a_{i'',j''}, a_{i'+1,j''}] \\ t = 1 - \sqrt{\frac{v - a_{i'+1,j''}}{a_{i'+1,j''} - a_{i'',j''}}} & f = \left| \frac{v - a_{i'+1,j''}}{a_{i'+1,j''} - a_{i'',j''}} \right| & v \in [a_{i'+1,j''}, a_{i'',j''}] \end{cases} \tag{7}$$

假设 2 个 Vague 集分别为 $A_{i''}, A^*$, 其中 A^* 称为理想 Vague 集, A^* 集合内的每个评价指标的实测值都在某等级的范围内, 且 A^* 集合内的所有 Vague 值均是 $[1, 1]$ 。那么 $A_{i''}$ 与 A^* 之间的相似度公式如下:

$$M(A^*, A_{i''}) = \sum_{j''=1}^{m'} W_{kj''} \left(1 - \frac{|1 - t_{i''j''}| + |0 - B_{i''j''}| + |0 - f_{i''j''}|}{2} \right) = \sum_{j''=1}^{m'} W_{kj''} \left(1 - \frac{|1 - t_{i''j''}| + B_{i''j''} + f_{i''j''}}{2} \right) \tag{8}$$

式中: $W_{kj''}$ ——第 k 个实测值对第 j'' 个评价指标的权重, $j''=1, 2, \cdots, m'$; $B_{i''j''}$ ——踌躇度。

对于地下洞室地震安全评价等级的确定采用特征值 i''^* 表示, 公式如下:

$$i''^* = \frac{\sum_{i''=1}^{n'} i'' \cdot \bar{M}(A^*, A_{i''})}{\sum_{i''=1}^{n'} \bar{M}(A^*, A_{i''})} \tag{9}$$

其中
$$\bar{M}(A^*, A_{i''}) = \frac{M(A^*, A_{i''}) - M(A^*, A_{i''})_{\min}}{M(A^*, A_{i''})_{\max} - M(A^*, A_{i''})_{\min}}$$

式中: $M(A^*, A_{i''})_{\max}$ 、 $M(A^*, A_{i''})_{\min}$ ——待评价等级与理想等级间的相似度最大值、最小值。

3 地下洞室地震安全评价

3.1 工程概况与模型建立

所选工程位于我国西南地区澜沧江下游, 引水发电系统位于山体左岸, 地下式厂房结构。考虑多条断层

的基础上精细模拟了地质构造,根据实际工程情况建立了精细地质模型,模型尺寸为 837 m×446 m×(299 ~ 551) m,主变室尺寸为 348 m×19 m×(23.6 ~ 38.6) m。模型所需岩体物理力学参数见表 1,有限元网格如图 2 所示。

表 1 岩体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

地层编号	弹性模量/ GPa	密度 / (g · cm ⁻³)	泊松比	c/MPa	φ/(°)	地层编号	弹性模量/ GPa	密度 / (g · cm ⁻³)	泊松比	c/MPa	φ/(°)
花岗岩	16	2.71	0.23	1.6	52	F1	0.7	1.93	0.31	0.1	19
T2m-1	13	2.72	0.26	1.2	46	F3	1.0	2.04	0.32	0.1	20
T2m-2	15	2.75	0.28	1.0	43	F35	0.6	2.13	0.30	0.1	17
T2m-3	11	2.70	0.25	1.4	50	F9、F19、F21	0.5	1.83	0.32	0.1	16
T2m-4	8	2.69	0.28	0.8	42	F22、F23、F37	0.5	1.83	0.32	0.1	16

地震波采用唐山余震天津医院地震波,峰值加速度为 145.8 cm/s²,地震持续时间为 19.20 s,经过调幅、地震波反演、基线校正及滤波等处理,基岩处地震波加速度时程曲线如图 3,并在基岩模型底面施加 *x* 向地震激励。选取地下洞室中的 3 个断面为研究对象,如图 4 所示,每个断面的研究节点如图 5 所示。

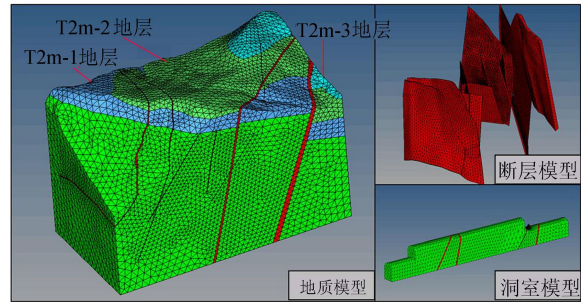


图 2 精细地质模型的有限元网格

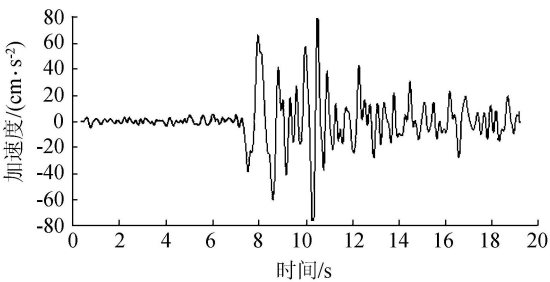


图 3 基岩处地震加速度时程曲线

Fig. 2 Finite element mesh for fine geological model Fig. 3 Time history curve of seismic acceleration of the bedrock

3.2 评价等级的确定

在相同地震动输入及边界条件下,基于强度折减法,研究不同折减系数条件下地下洞室结构数值模拟结果。以断面 1 为例,针对地下洞室群地震安全稳定性分析研究中每个点的响应随折减系数变化的特性,绘制竖向位移~折减系数的关系曲线(图 6)。基于强度折减法,采用撒文奇^[14]提取各警戒值的方法,从图 6 曲线中提取竖向位移的安全评价等级的边界阈值。建立 A~H 点各评价指标的评价等级(表 2)。

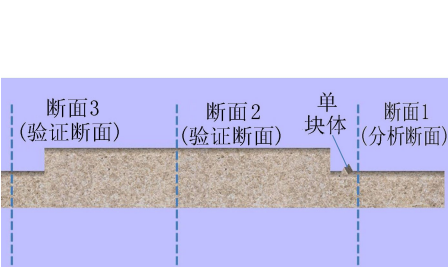


图 4 各典型断面在地下洞室中的位置

Fig. 4 Location of each typical section in the underground cavern

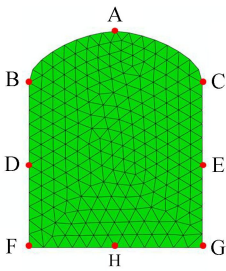


图 5 断面研究点示意图

Fig. 5 Schematics of the studying points in the section

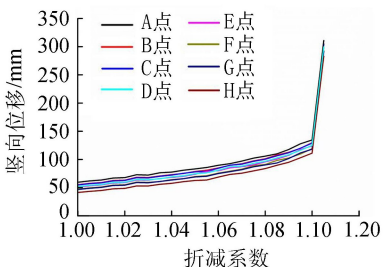


图 6 竖向位移~折减系数关系曲线

Fig. 6 Vertical displacement - reduction factor relationship curve

3.3 评价指标权重的确定

针对断面 1 上的 8 个测点,在表 2 中的各评价等级内分别选取 10 组随机数据,因此每个测点存在 30 组样本指标数据用于投影寻踪与粒子群优化研究。基于 Matlab 软件编写粒子群优化算法与投影寻踪法程序,粒子群初始规模为 30,粒子维数为 4,学习因子为 2,惯性权重系数随迭代次数从 0.95 均匀减至 0.40,迭代次数为 100。在优化过程中,A 点、F 点处权重优化的适应度函数曲线如图 7 所示。适应度函数为粒子群优化算法求解最优解的目标函数,权重值的变化直接影响适应度函数值,当适应度函数值稳定时所对应权重值即为最优解,由此获得各测点评价指标的权重值如表 3 所示。

表 2 各评价指标的评价等级

Table 2 The rating scale of each evaluation index

评价等级	竖向位移/mm							
	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点	G 点	H 点
稳定性较好	≤122.5	≤116.9	≤116.0	≤111.7	≤110.8	≤105.5	≤104.3	≤97.2
稳定性较差	(122.5,310.9)	(116.9,305.2)	(116.0,304.2)	(111.7,299.5)	(110.8,298.5)	(105.5,292.9)	(104.3,291.6)	(97.2,283.1)
不稳定	≥310.9	≥305.2	≥304.2	≥299.5	≥298.5	≥292.9	≥291.6	≥283.1

评价等级	水平位移/mm							
	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点	G 点	H 点
稳定性较好	≤0.45	≤4.45	≤3.86	≤7.85	≤7.15	≤1.85	≤1.78	
稳定性较差	(0.45,0.58)	(4.45,7.06)	(3.86,6.39)	(7.85,11.84)	(7.15,11.02)	(1.85,3.29)	(1.78,3.15)	
不稳定	≥0.58	≥7.06	≥6.39	≥11.84	≥11.02	≥3.29	≥3.15	

评价等级	x 向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)							
	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点	G 点	H 点
稳定性较好	≥0.727	≥0.729	≥0.715	≥0.713	≥0.700	≥0.681	≥0.673	≥0.676
稳定性较差	(0.727,0.648)	(0.729,0.648)	(0.715,0.636)	(0.713,0.635)	(0.700,0.623)	(0.681,0.605)	(0.673,0.598)	(0.676,0.601)
不稳定	≤0.648	≤0.648	≤0.636	≤0.635	≤0.623	≤0.605	≤0.598	≤0.601

评价等级	压应力/MPa							
	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点	F 点	G 点	H 点
稳定性较好	≤4.312	≤14.591	≤14.765	≥7.712	≥7.853	≤18.019	≤15.532	≤2.281
稳定性较差	(4.312,6.111)	(14.59,15.086)	(14.76,15.076)	(7.713,7.326)	(7.853,7.501)	(18.02,19.216)	(15.53,16.829)	(2.281,3.213)
不稳定	≥6.111	≥15.086	≥15.076	≤7.326	≤7.501	≥19.216	≥16.839	≥3.213

3.4 地震安全评价结果

断面 1 的数值模拟结果如表 4 所示,并以 A 点为例对地震安全评价结果进行详细计算说明。竖向位移的数值模拟结果为 45.18 mm,则在稳定性较好、稳定性较差及极不稳定 3 个评价等级内的特征分别为 [1,1]、[0.206,0.369]和[0,0]。同理,A 点的水平位移、 x 向加速度及压应力的数值模拟结果均位于稳定性较好等级范围内,其相邻稳定性较差等级内的特征分别为:[0.432,0.678]、[0.404,0.646]、[0.251,0.438]。其中断面 1 中 A 点的竖向位移、水平位移、 x 向加速度及压应力的评价指标权重分别为[0.497 8,0.082 4,0.163 7,0.256 1],基于 Vague 集理论可获得稳定性较好评价等级与理想等级的相似度为[1,0.271,0],由此可得 A 点评价等级的特征值为 1.21,最终判定为稳定性较好的评价等级。由此可以得到 B~H 各点安全评价等级的特征值分别为:[1.28,1.25,1.29,1.27,1.25,1.26,1.18],断面 2 各点的特征值为:[1.12,1.15,1.15,1.13,1.17,1.16,1.15,1.16],断面 3 各点的特征值为:[1.15,1.18,1.19,1.17,1.18,1.13,1.18,1.15]。由此可知,断面 1、2、3 经安全评价后的等级均为稳定性较好,从而可以进一步判断所研究断面在地震过程中具有很好的安全稳定性。

4 结 语

联合强度折减法、粒子群优化算法、投影寻踪法及 Vague 集的集对分析模型等关键方法,构建并提出了适用于大型地下洞室群地震安全评价的方法体系。同时将目前评价方法中单一指标的安全评价研究推广到多指标的综合分析范围内,并以某实际水电工程的大型地下洞室群为研究对象,建立了考虑多条断层的复杂地质构造模型及地下洞室群结构模型,进行了地下洞室群的地震安全评价研究,评价结果说明所选取的研究对象在地震作用下具有很好的安全稳定性。实现了大型水电工程

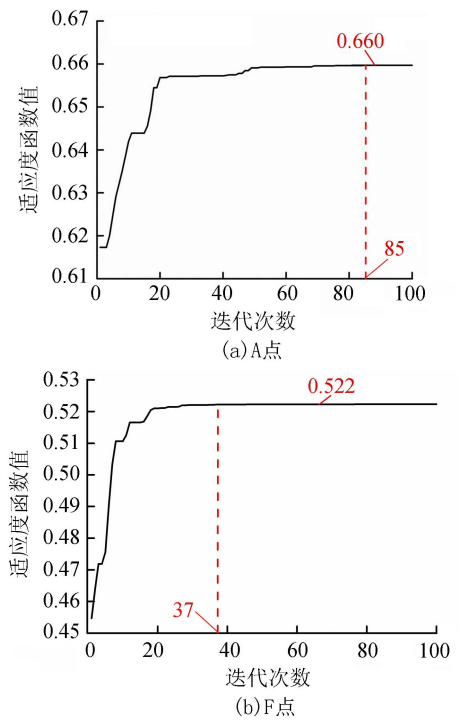


图 7 粒子群优化算法适应度函数曲线

Fig. 7 Fitness function curve using Particle swarm optimization method

地下洞室群地震评价指标的综合安全决策与评价分析,为地下洞室群地震安全评价在实际工程中的应用提供强有力的理论依据。

表3 各测点处评价指标计算权重

Table 3 Weight values of evaluation indicators at each point

测点	权重			
	竖向位移	水平位移	x向加速度	压应力
A	0.4978	0.0824	0.1637	0.2561
B	0.5242	0.1975	0.0946	0.1837
C	0.4605	0.2325	0.1126	0.1944
D	0.3352	0.1564	0.1835	0.3249
E	0.3154	0.2177	0.1063	0.3606
F	0.2233	0.3063	0.3517	0.1187
G	0.1031	0.3115	0.3545	0.2309
H	0.6342		0.1062	0.2596

表4 各评价指标的数值模拟结果

Table 4 Numerical simulation results of evaluating indicators at each point

测点	竖向位移/ mm	水平位移/ mm	x向加速度/ (m·s ⁻²)	压应力/ MPa
A	45.18	0.305	0.856	1.89
B	43.78	2.86	0.782	13.91
C	38.65	1.78	0.891	14.03
D	39.83	4.26	0.762	8.49
E	31.95	4.31	0.887	8.56
F	38.93	0.46	0.783	15.90
G	29.23	0.68	0.836	13.88
H	32.70		0.812	1.05

参考文献:

[1] 钟登华,鲁文妍,刘杰,等. 复杂地质条件下地下洞室曲面块体地震响应分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(6):471-478. (ZHONG Denghua, LU Wenyan, LIU Jie, et al. Surface-block identification and seismic response analysis of underground structures under complicated geological conditions[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2014,47(6):471-478. (in Chinese))

[2] BEYABANAKI S A R, MIKOLA R G, HATAMI K. Three-dimensional discontinuous deformation analysis (3-D DDA) using a new contact resolution algorithm[J]. Computers & Geotechnics,2008,35(3):346-356.

[3] KAIDI S, ROUAINIA M, OUAHSINE A. Stability of breakwaters under hydrodynamic loading using a coupled DDA/FEM approach[J]. Ocean Engineering,2012,55(15):62-70.

[4] 李新平,陈俊桦,李友华,等. 溪洛渡电站地下洞室群爆破地震效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):493-501. (LI Xinping, CHEN Junhua, LI Youhua, et al. Study of blasting seismic effects of underground chamber group in Xiluodu hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(3):493-501. (in Chinese))

[5] ARDESHIRI-LAJIMI S, YAZDANI M, LANGROUDI A A. Control of fault layout on seismic design of large underground caverns [J]. Tunnelling & Underground Space Technology,2015,50:305-316.

[6] FENG J, WEI H, PAN J, et al. Comparative study procedure for the safety evaluation of high arch dams[J]. Computers & Geotechnics,2011,38(3):306-317.

[7] HARIRI-ARDEBILI M A, KIANOUSH M R. Integrative seismic safety evaluation of a high concrete arch dam[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering,2014,67:85-101.

[8] DU R Q, ZHANG Q, CHEN S H, et al. Safety evaluation of Dagangshan arch dam resisting strong earthquakes with a rate-dependency anisotropic damage model[J]. Science China Technological Sciences,2011,54(3):531-540.

[9] 甘磊,沈振中,凌春海,等. 马堵山重力坝动力响应分析及安全评价[J]. 水电能源科学,2010,28(7):78-81. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, LING Chunmei, et al. Dynamic response analysis and safety evaluation of Madushan gravity dam [J]. Water Rsources and Power,2010,28(7):78-81. (in Chinese))

[10] 赵剑明,刘小生,陈宁,等. 强震区高面板堆石坝抗震安全性评价[J]. 地震工程学报,2011,33(3):233-238. (ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, CHEN Ning, et al. Study on seismic safety valuation of high concrete faced Rockfill dam(CFRD) [J]. China Earthquake Engineering Journal,2011,33(3):233-238. (in Chinese))

[11] ZHU W S, LI X J, ZHANG Q B, et al. A study on sidewall displacement prediction and stability evaluations for large underground power station caverns[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2010,47(7):1055-1062.

[12] 李景龙. 大型地下洞室群工程稳定性风险评估系统及其应用研究[D]. 济南:山东大学,2008.

[13] 吕涛. 地震作用下岩体地下洞室响应及安全评价方法研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.

[14] 撒文奇. 基于物联网的地下洞室群施工专家信息系统研究与开发[D]. 天津:天津大学,2013.

[15] 潘峰,李位星,高琪. 粒子群优化算法与多目标优化[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.