

基于三维数值模拟的地下大型洞室 锚固参数智能优化*

姜谟男¹ 冯夏庭² 刘建² 刘红亮¹

(¹ 东北大学资源与土木工程学院 沈阳 110006)

(² 中科院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 地下大型洞室锚固参数优化具有以下特点: 稳定性目标和经济性目标是矛盾的, 洞室的稳定性分析非常复杂, 评价指标要求全面反映锚固效果, 锚固参数组合的方案数量多, 优化计算量大。针对这些特点, 在采用 FLAC^{3D} 进行较大规模的三维数值模拟的基础上, 综合应用遗传算法、神经网络建立了进化神经网络演化有限差分方法, 确定了约束条件及优化的指标, 给出了优化的方法和步骤。利用该方法, 对水布垭地下厂房 3~6 层施工的上、下部锚索、锚杆、喷层等锚固参数进行了优化。工程实例表明所提方法是可行的。

关键词 数值分析, 大型洞室群, 锚固参数, 智能优化

分类号 TU 457

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)10-1700-06

INTELLIGENT OPTIMIZATION OF ANCHORING PARAMETERS FOR LARGE UNDERGROUND HOUSES BASED ON THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION

Jiang Annan¹, Feng Xiating², Liu Jian², Liu Hongliang¹

(¹ College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006 China)

(² Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

Abstract The optimization of anchoring parameters for large underground houses is of some characteristics. For example, the object of stability is incompatible with the object of economics, so that the stability analysis of large underground houses is very complicated, and the assessment indexes are required to denote anchoring effect roundly. Further more a lot of schemes with different anchoring parameters will occur and a great deal of calculation is needed. Aiming at these characteristics, large scale numerical simulation is made with FLAC^{3D}, combined with genetic algorithm and NN, and a new evolutionary NN limited difference method is proposed to optimize the anchoring parameters for large underground houses. Constrained conditions and optimization goals are constituted, and the optimization process is proposed. Using above method, the anchoring parameters of Shuibuya underground houses between the third and sixth construction step are optimized for the underground houses of Shuibuya Hydro-Power Station, which proves that the proposed method is feasible.

Key words numerical analysis, large underground houses, anchoring parameter, intelligent optimization

2003 年 10 月 3 日收到初稿, 2003 年 11 月 21 日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)与国家自然科学基金重点项目(59939190)资助课题。

作者 姜谟男, 简介: 男, 1971 年生, 1995 年毕业于山东工业大学机电一体化工程专业, 现为东北大学资源与土木学院博士研究生, 主要从事智能岩石力学与大型洞室群智能反馈分析方面的研究工作。E-mail: jiangannan@163.com。

1 前言

地下大型洞室的开挖与施工是个复杂的系统工程。如何准确、高速地计算寻求洞室施工的最合理的设计方案,是有待解决的重要问题,具有重大的经济意义和社会意义。

国内对于地下洞室施工顺序的优化已有较多的研究。文[1]应用动态规划原理对洞室群最佳施工方案进行了研究,采用洞周破损区的面积作为收益函数,给出了平面问题的计算结果。文[2]则根据地下洞室施工开挖程序和锚固施工方法,提出了大型地下洞室施工过程动态模拟的三维有限元数值分析方法。文[3, 4]提出了大型洞室群稳定性与优化的并行进化神经网络有限元方法,并对水布垭水电站地下厂房软岩置换顺序进行了优化。文[5]基于极限平衡分析法,以安全度为约束条件,以工程造价为目标函数提出滑坡加固方案优化的进化神经网络方法,取得了有意义的结果。

洞室锚固参数优化的特点是:

- (1) 稳定性和经济性评价优化指标是矛盾的;
- (2) 洞室群的稳定性分析极其复杂;
- (3) 锚固参数不同组合形成的方案数量多,优化计算量大;
- (4) 对整个洞室群锚固参数的不同组合,应能全面反映对洞室稳定性的不同影响,即不同的锚固效果。

针对上述特点,本文在已有研究基础上^[3~10],提出基于三维数值模拟的大型洞室锚固参数的多目标智能优化方法,确定了约束条件及优化的指标,给出了优化的方法和步骤。运用该方法对水布垭地下厂房 3~6 层的锚固参数进行了优化。工程实例证明本文的方法是可行的。

2 大型地下洞室锚固参数多目标智能优化方法

2.1 锚固参数多目标优化数学描述

理论上,锚固参数优化问题可以简单描述为如下有约束的最优化问题,即

$$\left. \begin{array}{l} \min f(x) \\ \text{s.t. } s_i(x) \geq 0, i=1, 2, \dots, m \\ h_j(x) = 0, j=1, 2, \dots, l(l \leq n) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: x 为与锚固参数相关的变量; $f(x)$ 为优化过

程中的目标函数;约束条件 $h_j(x)=0$ 表示需要满足的岩石力学计算原理(本文为有限差分法)及支护费用规律; $s_i(x) \geq 0$ 表示需要满足的围岩安全性判别准则。

锚固参数优化目标是施工后约束条件下地下洞室稳定性与施工的经济性达到综合最佳。由于大型洞室群的复杂性,难以直接找到如式(1)单一的目标函数,故采用加权多目标优化方法对多个目标函数描述如下:

(1) 反映稳定性的属性指标: $Ob_1(x), Ob_2(x), \dots, Ob_m(x)$;

(2) 反映经济性的属性指标: $Ob_{m+1}(x), Ob_{m+2}(x), \dots, Ob_n(x)$ 。

(3) 在方案集的某一目标函数值的评价矩阵中,能表示优化过程中目标函数(皆为有界函数)值优劣的转换函数为

$$m_i(x_s) = \begin{cases} (Ob - Ob_{\min}) / (Ob_{\max} - Ob_{\min}) & \text{对越大越好的目标} \\ 1 - (Ob - Ob_{\min}) / (Ob_{\max} - Ob_{\min}) & \text{对越小越好的目标} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Ob_{\max}$ 为评价矩阵集内目标函数最大值, $Ob_{\min}$ 为评价矩阵集内目标函数最小值, Ob 为评价矩阵集内目标函数实值。

通过式(2)可以计算 $Ob_1(x) \sim Ob_n(x)$ 的归一化值。

将某方案各个目标函数值的归一化值进行综合,得到该方案的综合评判值为

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n l_i m_i(x) \quad (3)$$

式中: l_i 为归一化的方案权系数,由群决策法确定。式(1)中的 $f(x)$ 对应了综合评判值 $Z(x)$ 的某种变换形式。

2.2 锚固参数优化约束条件和评价指标

锚固方案可选的必要条件是洞室必须是稳定的。现行规范给出了洞室周边允许收敛量的围岩稳定性判据。另外,张性破坏是硬岩破坏的主要形式,极限应变可作为判定围岩是否稳定的重要判据^[6, 7]。极限应变由单轴抗压强度 s_c 和初始弹性系数 E_i 来定义:

$$e_0 = \frac{s_c}{E_i} \quad (4)$$

方案的约束条件为:(1) 收敛位移 $d < d_{\max}$; $d_{\max}$ 按《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GBJ 86-85)取

值; (2) 极限应变 $e < e_0$, 其中 e_0 为极限应变, 按照式(4)确定。

将符合上述约束的锚固方案的经济性和洞室群的稳定性综合考虑, 进行优化。在对洞室开挖支护进行三维数值模拟的基础上, 采用了以下几项稳定属性指标, 以对锚固效果进行评价: 顶拱综合位移(取若干洞室关键断面的顶拱沉降位移的平均值), 侧壁综合位移(取若干关键断面的固定测线收敛位移的平均值), 拉损区体积(拉应力与抗拉强度之比大于 0.8 的单元的体积和), 大变形的节点数(变形超过某位移值的节点个数), 塑性区体积。反映经济性的指标采用综合的支护费用(包括支护材料费和人工费)。上述 6 项指标可表示为以锚固参数为自变量的函数, 即目标函数。

2.3 进化神经网络有限差分方法及优化步骤

为了快速全局优化, 本文采用进化神经网络有限差分法, 即将遗传算法、神经网络和有限差分法相结合。根据锚固参数取值进行正交设计, 构造方案样本, 通过 FLAC^{3D} 对样本进行三维数值模拟计算, 用 BP 神经网络学习并建立计算方案与稳定性属性指标(如关键断面综合位移、塑性区体积等)之间的映射关系, 用遗传算法并行搜索预测误差最小的神经网络拓扑结构和最优锚固方案。具体步骤如下:

- (1) 选定方案优化的反映洞室稳定性和施工经济性多个目标函数;
- (2) 根据待优化的锚固参数的多个因素及其可能取值, 正交设计构造方案的样本;
- (3) 正交设计样本进行数值计算, 得到各目标函数值;
- (4) 利用式(2)确定各样本的每个目标函数值的归一化值;
- (5) 利用群决策法(对多个专家评价进行综合)确定各属性(目标函数)的权系数;
- (6) 以支护参数为输入、各属性的归一化值为输出、采用进化神经网络并映射全部的被选方案;
- (7) 加入安全性的约束条件, 在约束条件下, 以式(3)的评判综合值作为遗传算法的适应值, 选出最好的方案。

3 工程实例——水布垭地下厂房施工锚固参数的优化

3.1 地下厂房开挖支护的三维数值模型

水布垭地下厂房大型洞室群所处围岩地层软硬相间, 厂房设计跨度 23 m, 高 68 m, 长 166.5 m。在先对部分软岩进行混凝土置换后, 分 8 层自上而下逐步开挖支护, 施工过程较为复杂。该地下厂房第 2 层已经开挖完成, 需对地下厂房 3~6 层的锚固参数进行优化。采用 FLAC^{3D}, 建立地下厂房洞室群的三维整体数值模型。数值模拟计算域沿 x 轴(洞室上下游方向, 下游为正)、 y 轴(洞室的铅直方向, 向上为正)和 z 轴(洞室的轴线方向, 安装场方向为正)分别为 263 m × 352.4 m × 378 m。岩体采用空间四面体单元, 共有 160 455 个单元, 围岩屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。计算中, 系统锚杆采用锚杆单元模拟, 锚索采用预应力杆单元, 喷层采用壳单元。在 4 个机组断面按不同高程模拟设置了测点及收敛测线(图 1), 便于上述有关稳定属性指标的计算。地下厂房的计算网格见图 2。

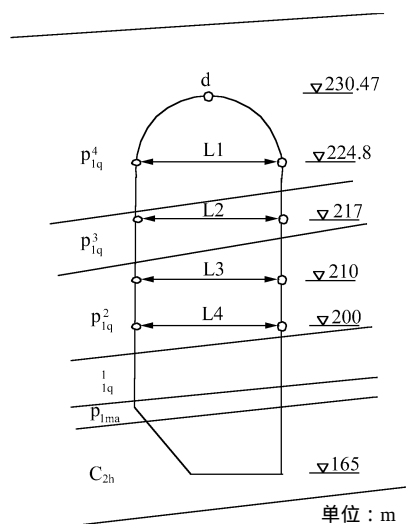


图 1 计算模型地质剖面及测线设置图

Fig.1 Geological cross-section and positions of measuring lines

地下厂房上下游侧壁的锚固布置相似, 上部沿与 p_{1q}^3 软岩层方向上安装 2 排锚索, 下部沿水平方向安装 3 排锚索。从数值模拟结果看, 上游引水洞周围、下游尾水洞周围的拉应力较其他地方集中, 且这些部位塑性区也较多, 所以这些部位的锚杆参数应适当增大。从相对意义上, 将这些部位作为弱区, 其他部位作为强区, 采用不同的锚杆参数, 以此进行锚固参数方案构造。其中, 下游侧壁锚固布置见图 3。

3.2 正交设计构造方案

锚固参数向量 X 包含以下 9 个因素: X_1 —上部

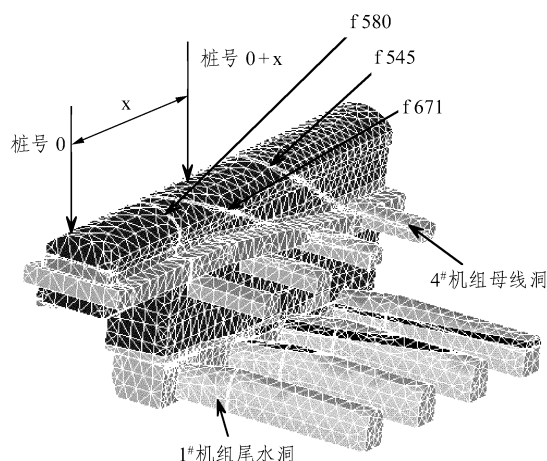


图 2 地下厂房模型的单元网格

Fig.2 Model mesh of underground houses

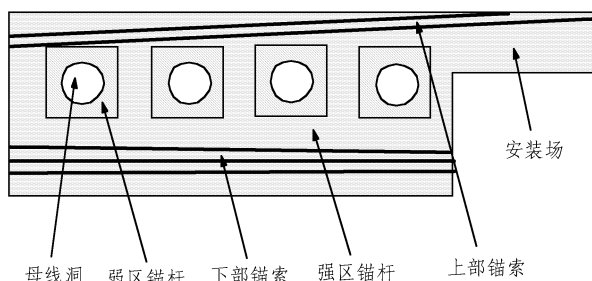


图 3 3~6 层下游侧壁锚固示意简图

Fig.3 Side wall supporting sketch of low reach with the 3rd ~ 6th construction step

锚索的间距(沿洞轴线), X_2 —下部锚索的间距(沿洞轴线), X_3 —弱区锚杆直径, X_4 —弱区锚杆间距, X_5 —强区锚杆直径, X_6 —强区锚杆间距, X_7 —弱区锚杆长度, X_8 —强区锚杆长度, X_9 —喷层厚度。

锚固参数 9 个因素, 每个因素取 4 个水平, 共有 262 144 个方案。根据正交实验的方法, 构造 $L_{32} 4^9$ 型正交表, 形成 32 个具有代表性的方案样本。对样本采用 $FLAC^{3D}$ 三维数值模拟, 计算得到各方案的稳定属性指标。经济性目标函数是根据现场的支护材料费用和人工费用进行回归分析, 得到以支护参数为自变量的支护费用经验公式, 进而算出支护费用属性指标; 由群决策法确定属性权值以及按照式(2)求得其属性指标的值, 见表 1。编码与锚固参数因素各水平的对应关系见表 2。

3.3 进化搜索

以上述 32 个计算方案为学习样本(见表 1 所列), 进行智能优化。搜索到最佳的神经网络拓扑结构 9-25-25-6, 最佳学习步数 3 751。然后采用参数 $N_p = 9$, $N_{bit} = 6$, $P_{size} = 100$, $N_{gen} = 100$, $C_r = 0.15$,

$J_r = 0.15$ 进行搜索, 利用遗传算法产生新的一组方案依次进行评价, 直至搜索到最小的适应值, 则此适应值所对应的方案即为最优方案。最后搜索到的最优方案为 343 434 333。即上层锚索间距为 6 m, 下层锚索间距为 7.5 m, 弱区锚杆直径 $f 32$, 弱区锚杆间距 $3 m \times 3 m$, 强区锚杆直径 $f 32$, 强区锚杆间距 $3 m \times 4.5 m$, 弱区锚杆长度 10 m, 强区锚杆长度 8 m, 喷层厚度 20 mm。

3.4 结果分析

该地下厂房第 2 层已经开挖完成。根据监测结果, 顶拱沉降沿轴向的分布差异较大, 20#~90#桩(靠近安装场)的沉降值较大, 一般为 -3~-4 mm; 最大沉降值出现在 90#桩, 为 -6.83 mm, 下游的沉降一般比上游的大。采用本文的三维数值模型计算的厂房拱顶沉降与侧墙收敛位移分布规律和大小, 与开挖至 2 层的已有监测信息相比, 具有良好的一致性。图 4 表示第 2 层开挖时 4 个机组断面拱肩收敛位移增量的计算值和监测值的比较结果, 其分布趋势和数值大小都比较一致。本文的计算结果符合目前的工程实际情况, 可作为锚固参数优化的数值模型。

为了检验进化神经网络学习和预测的效果, 将得到的最优方案进行数值计算, 并与神经网络的预测结果进行比较, 见表 3。从两者比较可见, 神经网络预测结果与 $FLAC^{3D}$ 计算的结果是相当吻合的, 最大相对误差为 6.35%, 平均相对误差为 1.76%。这说明, 进化神经网络已正确地建立起了支护方案与各属性指标(综合位移、破损区体积大小等)之间的映射关系。用 $FLAC^{3D}$ 对最优方案正演计算表明: 洞室收敛位移较小; 地下厂房围岩的拉应力均小于岩石的抗拉强度, 无拉裂区; 顶拱几乎没有塑性区, 侧墙的塑性区增加不大, 地下厂房总体上是稳定的。说明上述设计的优化方案是合理的。

4 结束语

(1) 针对地下洞室锚固参数优化的特点, 提出了基于三维数值模拟的多目标智能优化方法。该方法解决了大规模的锚固参数定量优化问题, 提高了计算速度、规模和精度, 并有快速收敛到全局最优解的优势。

(2) 地下大型洞室群信息化施工要求反馈分析既具有高精度, 又具有快速性。本文的多目标智能优化方法, 是达到这一要求的有效途径。如果地质

表 1 计算得到正交设计样本的各属性指标值
Table1 Calculated attribute values of each orthogonal sample

方案	拉损体积 权值 0.149	较大变形节点数 权值 0.147	塑性区 权值 0.209	支护费用 权值 0.208	顶拱综合位移 权值 0.144	侧壁综合位移 权值 0.143
111111111	0.533 679	0.433 333	0.802 395	0.664 524	0.000 000	0.195 946
122222222	0.674 870	0.566 667	0.529 940	0.426 090	0.318 841	0.108 108
133333333	0.886 010	0.466 667	0.464 072	0.188 881	0.623 188	0.641 892
144444444	0.712 435	0.500 000	0.476 048	0.075 266	1.000 000	0.885 135
211223344	0.474 093	0.366 667	0.368 263	0.391 417	0.927 536	0.432 432
222114433	0.520 725	0.533 333	0.323 353	0.632 674	0.724 638	0.371 622
233441122	0.000 000	0.500 000	0.443 114	0.412 921	0.260 870	0.459 459
244332211	0.862 694	0.766 667	0.161 677	0.217 949	0.550 725	0.743 243
312341234	0.647 668	0.166 667	0.290 419	0.580 569	0.608 696	0.263 514
321432143	0.569 948	0.466 667	0.248 503	0.233 843	0.710 145	0.486 486
334123412	0.147 668	0.500 000	0.760 479	0.585 778	0.231 884	0.540 541
343214321	0.735 751	0.733 333	0.305 389	0.289 376	0.478 261	0.689 189
412433421	0.743 523	0.733 333	0.664 671	0.074 316	0.434 783	0.371 622
421344312	0.183 938	0.466 667	0.784 431	0.100 025	0.144 928	0.195 946
434211243	0.458 549	0.566 667	0.302 395	0.779 471	0.840 580	0.831 081
443122134	0.774 611	0.166 667	0.029 940	0.520 286	0.652 174	0.641 892
114142323	0.943 005	0.333 333	0.655 689	0.696 237	0.420 290	0.135 135
123231414	0.569 948	0.000 000	0.781 437	0.681 519	0.275 362	0.000 000
132324141	0.204 663	0.766 667	0.209 581	0.107 167	0.637 681	0.695 946
141413232	0.777 202	0.633 333	0.125 749	0.073 906	0.608 696	0.662 162
214234132	0.318 653	0.600 000	0.000 000	0.255 034	0.463 768	0.195 946
223143241	0.733 161	0.833 333	0.263 473	0.517 661	0.768 116	0.425 676
232412314	0.002 591	0.000 000	0.826 347	0.140 748	0.289 855	0.290 541
241321423	1.000 000	0.366 667	0.392 216	0.516 214	0.565 217	0.554 054
313312442	0.834 197	1.000 000	0.305 389	0.372 740	0.884 058	0.648 649
324421331	0.704 663	0.766 667	0.332 335	0.485 149	0.637 681	0.418 919
331134224	0.152 850	0.100 000	0.461 078	0.402 604	0.449 275	0.412 162
342243113	0.955 959	0.166 667	0.359 281	0.219 510	0.188 406	0.452 703
413424213	0.362 694	0.166 667	1.000 000	0.000 000	0.159 420	0.168 919
424313124	0.577 720	0.200 000	0.332 335	0.114 790	0.391 304	0.094 595
431242431	0.867 876	0.800 000	0.275 449	0.528 909	0.710 145	0.831 081
442131342	0.800 518	0.866 667	0.305 389	1.000 000	0.971 014	1.000 000

表 2 支护的编码与锚固参数
Table 2 Coding and parameters of supporting

编码	上层锚索 间距/m	下层锚索 间距/m	弱区锚杆 直径/mm	弱区锚杆 间距/m	强区锚杆 直径/mm	强区锚杆 间距/m	弱区锚杆 长度/m	强区锚杆 长度/m	喷层厚 度/mm
1	4.0	4.0	25	1 × 1.5	25	1.5 × 1.5	6	4	12
2	4.5	4.5	28	1.5 × 1.5	28	1.5 × 3	8	6	15
3	6.0	6.0	32	1.5 × 3	32	3 × 3	10	8	20
4	7.5	7.5	40	3 × 3	40	3 × 4.5	12	10	25

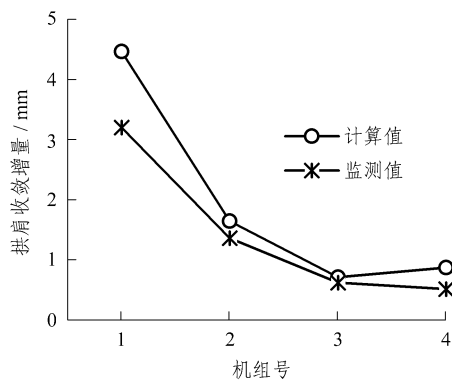


图 4 二层开挖拱肩收敛增量 FLAC 计算值与监测值

Fig.4 Comparison between FLAC calculation value and monitoring increment of convergent displacements at the arch shoulder of the 2nd construction step

表 3 BP 网络预测与 FLAC3D 计算对比

Table 3 Comparison between the NN prediction and calculation by FLAC3D

方法	拉损体 积/m ³	较大变形 节点数	塑性区 /m ³	顶拱综合 位移/mm	侧壁综合 位移/mm
BP 网络预测	106.01	604	10 330.17	3.300	7.975
FLAC3D 计算	109.20	607	10 355.20	3.326	8.052
相对误差%	6.35	0.49	0.24	0.780	0.956

和施工情况发生变化, 根据监测数据, 反演岩石力学参数, 只需修改三维数值模型, 重新计算正交样本方案, 再按照本文方法优化, 就可进行动态反馈优化和动态设计。

(3) 工程实例表明, 本文提出的地下厂房的锚固参数定量优化方法是可行的。由于目标权系数反映了各目标的协调和制衡, 对优化结果有重要影响, 这还需要在本文研究基础上, 结合设计方、施工方和业主各方面专家的意见, 进一步综合修正各目标

权系数取值, 以得到更为合理的解。另外, 神经网络的训练时间及遗传算法的方案搜索时间比较长, 有必要与并行算法和其他学习算法相结合, 进一步提高优化的效率。这些都是今后需要进一步要研究的内容。

参 考 文 献

1 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995

2 肖 明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 421~425

3 安红刚,冯夏庭,李邵军,大型洞室群稳定性与优化的并行进化神经网络有限元方法研究——第一部分:理论模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 706~710

4 安红刚,冯夏庭. 大型洞室群稳定性与优化的并行进化神经网络有限元方法研究——第二部分:实例研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 640~1 645

5 尹顺德,冯夏庭,张友良等. 滑坡加固方案优化的并行遗传神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 待刊

6 孙 钧. 地下工程设计理论与实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995

7 蒋宇静,肖 俊,棚桥由彦等. 三维数值模拟技术在深部大型发电厂房信息化施工中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 957~964

8 陈帅宇,周维垣,杨 强等. 三维块速拉格朗日法进行水布垭地下厂房的稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 047~1 053

9 朱维申,李术才,白世伟等. 施工过程力学原理的若干发展和工程实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 586~1 591

10 陈卫忠,朱维申,李术才等. 水布垭大型地下厂房施工顺序和锚固参数优化分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 623~1 628