

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.012

基于块体理论的硐室围岩块体稳定性分析程序

周 伟

(四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 618000)

摘 要: 随着经济发展,绿色能源开发利用规模剧增,大型水利水电工程越来越多^[1]。大量地下工程开挖形成高边墙、大跨度超大型地下硐室,复杂地质条件下的硐室安全尤为重要,硐室围岩块体稳定性是硐室安全的重要影响因素^[2-5],研究分析地下硐室块体稳定并将其运用在工程实践中是必要的。文中运用块体理论,考虑结构面空间规模特征,求解硐室结构面切割形成块体边界条件、几何参数及稳定性矢量解析解,结合动态数据库、OPenGL、MFC 图形处理功能,运用 VC++ 语言编制硐室块体搜索及稳定性分析程序,并采用三维可视化操作绘制块体的基本特征。根据算例验算分析,该程序能快速简便分析出拟建工程可能发育的块体基本特征及参数,计算结果精确可靠,工程技术人员可直接运用分析结果,具有较可靠的工程实用性。

关键词: 地下硐室;块体理论;块体稳定性;解析解

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)05—0073—05

Block Stability Analysis Program for Surrounding Rock Mass of Chamber Based on Block Theory

ZHOU Wei

(282 Brigade of Sichuan Nuclear Geology, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: With the development of economy, the utilization of green energy has increased dramatically, large-scale water conservancy and hydropower-engineering have been constructed, which include a large number of underground projects form high side walls and super large underground chambers. It is particularly important to ensure the safety of chambers under complex geological conditions. The stability of rock around chamber is an important factor for security. It is necessary to analyze the block stability of underground chamber and apply it in engineering practice. In this paper, based on block theory and considering spatial characteristics of structural planes, the Conditions for forming block boundary by cutting the structural plane of cavern, analytical geometric parameters and stability vectors was solved by combining with dynamic database, OPenGL and MFC graphics processing functions. VC++ Language is adopted to compile the program for searching and stability analysis of cavern blocks. It could draw basic characteristics of blocks by three-dimensional visualization operation. According to the example checking analysis, the program can quickly and simply analyze the basic characteristics and parameters of blocks that may develop in the proposed project. The calculation results are accurate and reliable. The results can be adopted directly by the engineers and technicians.

Keywords: underground chamber; block theory; block stability; analytic solutions

目前,地下硐室块体稳定性分析软件^[6-8]主要基于将结构面考虑为无限延伸的刚性地质界面的假设条件下进行分析,未考虑其空间发育特征、拟建工

程轴线方位以及延伸规模等,分析结果具有不确定性和随机性,需要工程技术人员对主要结构面数据进行比对分析,工作量大且结果可靠性低。但是,技

术人员往往关心的是拟建洞室可能发育块体的具体位置、规模等,以便于更为精确的设计,以保证工程施工及运行安全^[9-10]。

根据野外搜集调查资料,结合区域地质、工程特性,采用一种简单准确、便于操作,而且能快速分析洞室可能发育的不稳定块体位置、规模、滑动方式、稳定性等相关设计参考参数的洞室块体分析软件是必要的。故本次采用 VC++ 程序编译,结合动态数据库、OPenGL、MFC 图形处理功能,开发了一款能快速准确分析洞室围岩块体基本特征参数、稳定性、三维可视化等功能的地下洞室块体稳定性分析程序,具有较好的工程实践性^[11]。

1 空间块体边界条件及几何参数的解析

洞室确定性块体解析解是基于块体理论,利用空间结构面、临空面交切,运用数学矢量表达式表示各交切面,通过线性方程组求解^[12-16]。块体的几何参数、边界特征,通过矢量计算方程表达,结合结构面物理力学参数计算其稳定性。通过程序语言编辑理论计算公式,利用计算机快速处理数据的计算能力,极大地提高了块体搜索和稳定性分析的效率,且计算结果具有很高的精度。

块体边界条件解析的任务是根据洞室临空面空间方程,结合结构面的空间发育特征,联立求解各方程组唯一实根,该实根即为结构面和洞壁临空面相交形成的顶点。若各方程组均有唯一解,则该组结构面与洞室临空面能形成独立封闭的空间结构体;若方程无解,则该组结构面不能相互交切形成独立块体。

1.1 临空面空间方程数学表达

地下洞室一般为圆拱直墙型,洞室开挖后形成临空面包含两部分(直墙、圆拱),建立洞室临空面空间模型时,首先建立独立局部坐标系,圆拱的圆心为坐标系的原点, x 轴为垂直洞室轴线, y 轴为洞室轴线, z 轴正方向为竖直向上, R 为拱顶圆形半径, l 为洞室轴线的长度, α_0 为正北方向和洞室轴线夹角。则用平面方程和曲面方程表达临空面关系式如下:

$$\begin{cases} x^2 + z^2 = R^2 \\ x = \pm R \\ y = 0 \text{ 或 } l \end{cases} \quad (1)$$

1.2 结构面空间方程的数学表达

空间结构面可通过顶点坐标用直角坐标系平面方程表达,空间方向可用结构面法向线的单位矢量

表示,假设结构面的法向矢量为 \bar{n} ,倾向为 α ,倾向角 β ,则空间方程为:

$$\begin{cases} p_{i1}x + p_{i2}y + p_{i3}z + p_{i4} = 0 \\ \bar{n} = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}) = [\sin(\alpha - \alpha_0) \cdot \sin\beta, \\ \cos(\alpha - \alpha_0) \cdot \sin\beta, \cos\beta] \\ p_{i4} = -[\sin(\alpha - \alpha_0) \cdot \sin\beta \cdot x_0 + \sin\beta \cdot \\ \cos(\alpha - \alpha_0) \cdot y_0 + \cos\beta \cdot z_0] \end{cases} \quad (2)$$

空间假设采用独立局部坐标系,实测结构面坐标为大地坐标系投影,故需对空间坐标进行转换,转换方程如下:

$$\begin{cases} x = X\cos A + Y\sin A \\ y = -X\sin A + Y\cos A \end{cases} \quad (3)$$

式中: X, Y 代表大地坐标; x, y 代表相对局部坐标; A 为旋转的角度。

1.3 块体顶点求解

空间复杂块体均可近似为多个四面体组成,可分解为四面体进行矢量分析,故本次考虑的块体主要为四面体块体,形成块体至少需要四个顶点,其中包括一个围岩内部顶点和三个洞壁临空面顶点,块体顶点三维坐标可通过围岩顶点线性方程组求解得到,从而求得相关数值解析解。

块体空间几何形状可根据形成四面体顶点出露位置分为平面四面体、曲面四面体和复合四面体,结合几何参数数学表达式,求解各类四面体的体积大小、重量以及相应重心,以便后续块体分析代用该类参数数值。

2 块体失稳运动方式及稳定性系数解析

2.1 块体失稳运动方式解析

根据块体约束条件和运动学分析,主要为以下四种运动方式:稳定、塌落、单面滑动、双面滑动,块体失稳运动方式的判别主要通过块体各顶点坐标和块体重心的 Z 值进行对比分析。

设 L_z 为重心坐标的 z 值, T_{nz} 为重力线与结构面的交点 z 坐标,则有:

$$T_{nz} = -(p_{n4} + p_{n1}L_x + p_{n2}L_y)/p_{n3} \quad (4)$$

(1) 稳定块体和塌落块体判别:

稳定块体判别条件: $T_{nz} < L_z (n = i, j, k)$ (5)

塌落块体判别条件: $T_{nz} > L_z (n = i, j, k)$

(2) 单面滑动块体判别解析:

若 $\min(L_z - T_{nz}) = L_z - T_{iz}$,则重力矢量与结构面 i 相交。过 T_i 点作结构面 i 的倾向线,其交线 E_{ij} 、

E_{ik} 的交点 G_i, G_k, z 坐标为 z_{gi}, z_{gk} , 若满足条件 $T_{iz} < z_{gi}; T_{iz} < z_{gk}$, 则该四面块体沿结构面 i 滑动。

(3) 双面滑动块体解析解

同理, 块体沿两组结构面滑动的判别条件为:

① 若 $T_{iz} \geq z_{gi}; T_{iz} \geq z_{gk}$, 则当 $z_{gi} > z_{gk}$, 块体沿交线 E_{ij} 滑动, 即沿结构面 i, j 滑动; 当 $z_{gi} < z_{gk}$, 块体沿交线 E_{ik} 滑动, 即沿结构面 i, k 滑动。

② 若 $T_{iz} \geq z_{gi}; T_{iz} < z_{gk}$ 时, 则块体沿交线 E_{ij} 滑动, 即沿结构面 i, j 滑动;

③ 若 $T_{iz} \geq z_{gk}; T_{iz} < z_{gi}$ 时, 则块体沿交线 E_{ik} 滑动, 即沿结构面 i, k 滑动。

2.2 块体稳定性系数解析

单面滑动、双面滑动块体稳定性系数的解析解线性表达式如下式:

$$\begin{cases} \text{单面滑动} \begin{cases} \eta = \frac{Q \cos \beta_i \tan \varphi_i + C_i S_i}{Q \sin \beta_i} \\ F = Q \sin \beta_i - (Q \cos \alpha_i \tan \varphi_i + C_i S_i) \end{cases} \\ \text{双面滑动} \begin{cases} \eta = \frac{P_i \tan \varphi_i + P_j \tan \varphi_j + C_i S_i + C_j S_j}{Q \sin \theta} \\ F = Q \sin \theta - (N_i \tan \varphi_i + N_j \tan \varphi_j + C_i S_i + C_j S_j) \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中: η 为稳定性系数; F 为下滑力, i, j 为结构面编号; Q 为块体的重量; β 为倾角; C 为黏聚力; φ 为内摩擦角; S 为滑动面面积; P_i 为结构面 i 上的正应力; P_j 为结构面 j 上的正应力; θ 为重力与正应力 N 的夹角。

3 地下硐室块体稳定性分析程序实现

根据软件需求分析, 程序设计主要目标, ① 程序设计, 利用 MFC 模块设计程序界面, 实现软件的数据输入、计算机结果输出和三维可视化功能。② 功能计算分析, 根据结构面的组合关系, 分析搜索块体并解析块体的几何参数、稳定性等相关参数等。

③ 利用 OpenGL 图形显示功能实现硐室区块体的三维可视化图形输出, 具体程序流程如下:

(1) 程序介绍及界面展示。程序主要功能模块为: 基本参数数据输入、结构面数据输入、块体搜索及稳定性计算、计算结果输出、空间三维图形显示等。

程序主界面菜单栏包括文件栏、计算栏、视图和帮助, 其中文件栏包括新建计算文件、打开计算文件、文件保存和另存储、退出等功能; 计算栏包括基本参数输入、结构面数据输入和块体计算指令; 视图栏包括块体模型及三维可视化、计算结果的输出。

(2) 基本参数数据设置。地下硐室空间几何特征是确定的, 将硐室空间参数作为定值, 将其设置为基本输入参数, 可简便数据输入步骤, 避免重复输入。基本输入参数界面详见图 1。

(3) 结构面数据输入。作为块体搜索的重要参数, 结构面空间参数包括圆心坐标、产状、延伸规模、物理力学参数等, 输入界面格式见图 2。本次程序采用动态数据库连接, 可直接通过录入好的数据格式直接导入程序, 也可在程序界面对其数据进行更改, 极大地提高了工作效率和数据录入的准确性。

(4) 块体搜索及稳定性分析。根据块体理论对结构面采用数学矢量化方程表示, 并可快速计算块体的顶点坐标, 由顶点坐标分析求解块体空间几何特征, 判断块体可动性、滑动方式、滑面编号、稳定性系数、下滑力等。

(5) 计算结果输出。本程序计算输出结果格式详见图 3—图 5, 输出结果包括两种格式, 一是数据表格格式, 二是可视化三维模型格式, 其输出结果能直接了解块体空间位置、规模、稳定与否等特征, 为工程分析人员提供最直接简单数据支持, 且计算结果可通过导出 Excel 格式的数据表, 便于数据处理。



图 1 基本参数数据设置



图 2 结构面数据输入界面

块体编号	结构面 i	结构面 j	结构面 k	顶点 x0	顶点 y0	顶点 z0	顶点 x1	顶点 y1	顶点 z1	顶点 x2	顶点 y2	顶点 z2
1	1	2	3	-9.07	12.77	29.68	4.18	8.06	9.08	-3.44	14.58	9.39
2	4	5	6	57.28	46.83	38.50	9.70	50.25	2.44	6.32	55.74	7.75
3	7	8	9	0.42	84.28	16.84	0.53	82.18	9.99	5.11	89.04	8.60
4	10	13	15	-21.14	222.75	-8.52	-10.00	191.10	-13.08	-10.00	204.64	-26.04
5	12	13	15	36.33	204.24	13.49	10.00	187.23	-4.61	10.00	196.01	-21.67
6	13	14	15	63.71	195.42	23.97	10.00	198.29	-1.13	9.47	212.89	3.20
7	14	16	17	15.08	217.79	-20.90	10.00	223.16	-28.98	10.00	216.57	-21.61
8	16	17	18	11.39	244.08	-5.73	10.00	254.00	0.00	10.00	245.06	-8.40

图 3 块体搜索及稳定性求解结果输出界面 1

顶点 x3	顶点 y3	顶点 z3	重心 Lx	重心 Ly	重心 Lz	块体类型	块体体积...	块体重量...	滑动方式	下滑力F(kN)	稳定性系...
-9.08	4.92	4.19	-4.51	10.20	13.66	曲面块体	372.55	1005.88	单面滑动...	1968.22	0.80
10.00	81.13	-19.18	21.51	59.80	6.21	复合块体	2681.73	7240.68	双面滑动...	11427.37	0.78
-5.16	89.05	8.57	0.24	86.03	11.27	曲面块体	73.92	199.58	直接掉落	1955.90	0.00
-10.00	219.16	-4.26	-12.78	209.41	-12.97	平面块体	896.63	2420.91	双面滑动...	-18216.46	2.18
9.47	212.89	3.20	16.58	200.06	-2.35	复合块体	2218.92	5991.09	双面滑动...	12686.27	0.73
10.00	204.82	-8.45	23.40	202.83	4.44	复合块体	1211.57	3271.24	双面滑动...	-3361.51	1.20
10.00	254.00	0.00	11.27	227.88	-17.87	平面块体	354.20	956.34	双面滑动...	2371.53	0.66
10.00	244.08	-5.73	10.35	246.81	-4.96	平面块体	7.45	20.12	双面滑动...	-201.94	2.19

图 4 块体搜索及稳定性求解结果输出界面 2

4 程序计算结果验证

程序的实用性是决定程序生存的关键所在,为了验证程序实用性,选用已有算例解析解数据对该分析程序进行对比验证。选择验证数据如下:硐室

圆拱半径为 10 m,硐室跨度为 20 m,硐室直墙高度为 30 m,硐室长度为 260 m,硐室轴线方向与指北经线夹角为 180° ,岩体密度为 2.7 t/m^3 。算例结构面数据见表 1,测试算例结果见表 2。

表 1 验证程序测试结构面数据

结构面编号	X/m	Y/m	Z/m	$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$	f	C/KPa
1	10	6	0	221	76	0.6	50
2	20	7	0	353	73	0.6	50
3	0	17	0	305	80	0.6	50
4	-10	60	0	30	60	0.4	5
5	10	54	0	135	45	0.5	10
6	10	64	0	160	50	0.3	5
7	0	78	0	302	80	0.6	10
8	0	80	0	52	80	0.4	5
9	0	94	0	180	60	0.3	2
10	10	112	0	253	73	0.5	5
11	-10	106	0	221	76	0.5	5
12	10	190	-10	135	70	31.0	10
13	10	186	-5	57	30	0.6	0
14	-10	190	0	160	50	0.3	3
15	-10	222	0	30	60	0.5	5
16	10	254	0	70	70	0.3	10
17	10	254	0	0	30	0.5	20
18	10	242	0	180	70	0.7	50

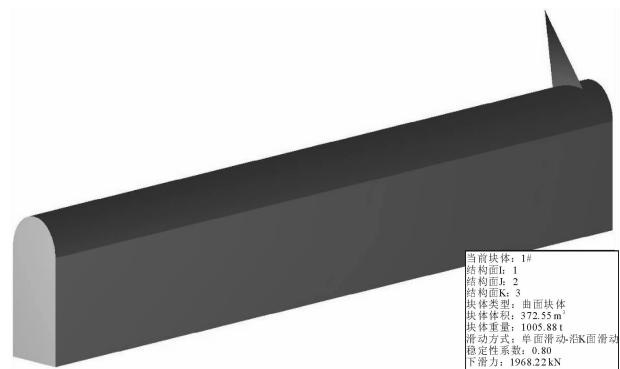


图 5 测试算例 1#块体三维空间特征示意图

由表 2 可知,程序验算结果与算例计算各计算结果高度拟合,计算结果误差统计比均小于 2.5%,块体顶点坐标及发育方位基本相同,说明程序计算结果可靠。

程序设计考虑了动态数据库连接和界面输出可视化,总体来说,程序数据录入方便,通过已编辑好数据资料直接导入计算,极大的简化了输入数据的繁琐步骤,并降低了数据输入人为错误,程序总体运行效率非常快。得出结论:该分析程序界面友好,程序操作简单,运行效率高,计算结果安全可靠,可直接运用于工程实践过程。

表 2 程序验证计算结果表

块体编号	计算方法	结构面编号			顶点 A_0	顶点 A_1	顶点 A_2	顶点 A_3	重心坐标	
		i	j	k	(x_0, y_0, z_0)	(x_1, y_1, z_1)	(x_2, y_2, z_2)	(x_3, y_3, z_3)	(L_x, L_y, L_z)	
1	本次开发程序	1	2	3	(-9.07, 12.77, 29.68)	(4.18, 8.06, 9.08)	(-3.44, 14.58, 9.39)	(-9.08, 4.92, 4.19)	(-4.51, 10.20, 13.66)	
	案例解析解	1	2	3	(-9.10, 12.70, 29.50)	(-4.00, 8.10, 9.20)	(-3.50, 14.50, 9.40)	(-9.10, 4.90, 4.20)	(-4.70, 10.30, 14.00)	
2	本次开发程序	4	5	6	(57.28, 46.83, 38.50)	(9.70, 50.25, 2.44)	(6.32, 55.74, 7.75)	(10.00, 81.13, -19.18)	(21.51, 59.80, 6.21)	
	案例解析解	4	5	6	(57.20, 46.80, 38.50)	(9.70, 50.30, 2.40)	(6.30, 55.70, 7.70)	(10.00, 81.00, -19.20)	(21.60, 58.30, 6.90)	
3	本次开发程序	7	8	9	(0.42, 84.28, 16.84)	(0.53, 82.18, 9.99)	(5.11, 89.04, 8.60)	(-5.16, 89.05, 8.57)	(0.24, 86.03, 11.27)	
	案例解析解	7	8	9	(1.10, 85.00, 15.60)	(1.20, 83.30, 9.90)	(5.10, 89.00, 8.60)	(4.90, 88.50, 9.60)	(1.10, 86.30, 10.90)	
4	本次开发程序	12	13	15	(36.33, 204.24, 13.49)	(10.00, 187.23, -4.61)	(10.00, 196.01, -21.67)	(9.47, 212.89, 3.20)	(16.58, 200.06, -2.35)	
	案例解析解	12	13	15	(36.30, 204.20, 13.50)	(10.00, 187.20, -4.60)	(10.00, 196.00, -21.70)	(9.50, 212.90, 3.20)	(16.60, 200.00, -2.30)	
5	本次开发程序	13	14	15	(63.71, 195.42, 23.97)	(10.00, 198.29, -1.13)	(9.47, 212.89, 3.20)	(10.00, 204.82, -8.45)	(23.40, 202.83, 4.44)	
	案例解析解	13	14	15	(63.70, 195.40, 24.00)	(10.00, 198.10, -1.10)	(9.50, 212.90, 3.20)	(10.00, 204.80, -8.50)	(23.40, 202.80, 4.40)	
6	本次开发程序	16	17	18	(11.39, 244.08, -5.73)	(10.00, 254.00, 0.00)	(10.00, 245.06, -8.40)	(10.00, 244.08, -5.73)	(10.35, 246.81, -4.96)	
	案例解析解	16	17	18	(11.40, 244.10, -5.80)	(10.00, 254.00, 0.00)	(10.00, 244.50, -8.40)	(10.00, 244.00, -5.00)	(10.40, 246.80, -4.90)	

块体编号	计算方法	块体体积 V/m^3	块体重量 W/t	块体类型	滑动方式	滑面	下滑力 F/kN	稳定性系数 F_s	体积比/%	F_s 比/%
1	本次开发程序	372.6	1005.9	曲面	单面	k	1968.2	0.80	1.36	2.50
	案例解析解	377.6	1019.4	曲面	单面	k	1991.2	0.78		
2	本次开发程序	2681.7	7240.7	复合	双面	j,k	10894.6	0.78	0.03	1.28
	案例解析解	2680.8	7238.1	复合	双面	j,k	11002.0	0.77		
3	本次开发程序	73.9	199.6	曲面	直接掉落	—	1955.9	0.00	0.51	
	案例解析解	74.3	200.6	曲面	直接掉落	—	1966.0	0.00		
4	本次开发程序	2218.9	5991.1	复合	双面	i,k	12320.8	0.73	0.02	1.37
	案例解析解	2219.3	5992.0	复合	双面	i,k	1311.3	0.72		
5	本次开发程序	1211.6	3271.2	复合	双面	j,k	—	1.20	0.07	2.50
	案例解析解	1210.7	3269.0	复合	双面	j,k	—	1.23		
6	本次开发程序	7.5	20.1	平面	双面	i,k	—	2.19	0.67	1.83
	案例解析解	7.5	20.2	平面	双面	i,k	—	2.15		

参考文献:

[1] 中国水利发电工程 - 水工卷[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
 [2] 巨能攀. 大跨度高边墙地下硐室群围岩稳定性及支护方案的系统工程地质研究[D]. 成都:成都理工大学, 2005.

[3] 张 斌. 大型地下硐室块体稳定性确定性研究及软件实现[D]. 成都:成都理工大学,2004.
 [4] 李攀峰. 大型地下洞室群围岩稳定性工程地质研究[D]. 成都:成都理工大学,2004:10-11.

- 2017, 48(12):1438-1446.
- [8] 窦铁生, 程冰清, 胡 赫, 等. 预应力钢筒混凝土管结构变形规律的原型试验研究 II: 外压[J]. 水利学报, 2018, 49(2):207-215.
- [9] 窦铁生, 胡 赫, 杨进新, 等. PCCP 断丝数量对内压承载力的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(7):35-37.
- [10] Hu S W, Sun Y Y, Xue X, et al. Calculation model for bar-wrapping during prestressing of an embedded bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe [J]. Thin-walled Structures, 2019, 139:39-45.
- [11] 胡少伟, 孙岳阳, 薛 翔, 等. 预应力损失对 BCCP 管道安全性影响研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2):197-201.
- [12] 胡少伟, 薛翔, 孙岳阳, 等. 地基沉降对 BCCP 接口力学性能影响的试验研究[J]. 人民长江, 2018, 49(11):91-96.
- [13] 孙珊珊, 赵均海, 付 国. 钢管混凝土柱的爆炸响应数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3):149-154.
- [14] 预应力钢筒混凝土管:GB/T 19685—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 陈兰响, 关 萍, 刘晴晴. 基于 ABAQUS 分析型钢-圆钢管混凝土的力学性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2):15-19.
- [16] AWWA standard for design of prestressed concrete cylinder pipe: C304—07[S]. AWWA Standards, 2007.
- [17] 徐 祥, 戴自航. 岩土预应力锚固作用三维数值模拟的等效力法[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(1):20-25.
- [18] 胡少伟. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构承载安全评价理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [19] 预应力钢筒混凝土管道技术规范:SL 702—2015[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2015.

(上接第 77 页)

- [5] 谢 晔, 刘 军, 等. 在大型地下开挖中围岩块体稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2):308-310.
- [6] 许 强, 黄润秋, 巨能攀, 等. 边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4):408-413.
- [7] 李建勇, 肖 俊, 王 颖. 岩体稳定性分析的块体理论方法研究[J]. 计算机工程应用, 2010, 46(21):4-8.
- [8] 崔银祥, 聂德新, 陈 强. 某电站大型地下洞室群主变洞确定性块体稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2):212-217.
- [9] 陈 强. 地下洞室围岩岩体结构量化研究及块体稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [10] 王思敬, 杨志法, 刘竹华, 等. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984(4):38-44.
- [11] 吴旭东. 基于块体理论的岩体稳定性可视化分析软件开发[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [12] 刘锦华, 吕祖暾. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [13] 杨 庆, 杨 钢, 王忠昶. 块体理论在荒沟抽水蓄能电站地下厂房系统洞室群围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8):1618-1624.
- [14] 朱 华, 汪 飞, 刘 阳, 等. 块体理论在地下水封石洞油库围岩稳定性的分析与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1):151-154.
- [15] 张子新, 廖一蕾. 基于块体理论赤平解析法的地下水封油库围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7):1339-1347.
- [16] 罗光财, 齐 龙, 王 震, 等. 基于块体理论的岩质高边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(5):178-182.