基于空间多剖面边坡稳定性系数计算方法

陈应昱[1]，杨红霞[1*]，李佳莹[1]，叶永超[1]，周志伟[2]

1. 辽宁工程技术大学矿业学院，辽宁 阜新 123000；
2. 国能宝日希勒能源有限公司，内蒙古 呼伦贝尔 021000

第一作者，E-mail：lntucyx@163.com

* 通信作者，E-mail：3035526032@qq.com

2023-10-31 收稿；2024-01-15 修回；2024-01-18 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(52374123)；辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01；LNTU20TD-07)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)05-0181-10　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230610

摘　要：在边坡稳定性分析中，通常需要对多个剖面的边坡稳定性进行单独计算。为了提高多剖面边坡稳定性系统计算的效率，提出了一种基于空间多剖面边坡稳定性系数计算的方法。首先，将二维剩余推力法扩展至空间剖面，形成空间剖面的剩余推力法；其次，通过在三维边坡工程地质模型上实现剖面图的自动生成和管理，进一步优化了计算流程；最后，为了实现快速高效计算边坡稳定性系数，引入了基于多线程并行计算的方法，并结合空间剖面的剩余推力法，对空间多剖面边坡稳定性系数进行了更为准确和高效的计算。以内蒙古锡林浩特某露天矿为应用实例，建立了内排土场边坡三维边坡工程地质模型，在此基础上，自动生成了 7 个空间剖面图，采用多线程并行计算出 7 个剖面的稳定性系数，通过可视化手段对计算结果进行了直观展示。采用多线程并行计算多剖面边坡稳定性系数能够充分利用计算资源，提高计算效率，同时，在实际工程应用中进一步证实了该方法的可行性和适用性。

关键词：多剖面；空间剖面图；多线程并行计算；剩余推力法；可视化；边坡；稳定性系数

在岩土工程领域，边坡稳定性问题一直都是研究的热点之一，边坡稳定性对建设工程具有非常重要的影响，边坡一旦失稳会对工程建设及人员安全造成极大的损害[1]，及时进行边坡稳定性分析，是预防地质灾害的重要手段[2-3]。在实际边坡稳定性分析中，通常使用二维边坡剖面图计算边坡稳定系数来分析评价边坡的稳定性，但边坡往往都是以三维状态存在，从二维角度分析，会因忽略条块间的作用力导致计算结果偏于保守，与实际情况不符，所以从三维角度对边坡稳定性分析至关重要[4]。目前，常用的边坡稳定系数计算软件都是以二维角度分别计算单个剖面的边坡稳定系数，而在露天矿边坡稳定性分析中，通常需要计算多个剖面的边坡稳定性系数，此时，该方法会极大地增加计算量，耗时耗力。如何将所有参与边坡稳定性计算的剖面图统一组织，实现多剖面自动计算边坡稳定性系数，并将计算结果可视化，是亟待解决的问题，但对于空间多剖面边坡稳定性计算方法，还未查找到相关的文献和专利。

目前大多数边坡稳定性计算软件，如 Slide、Slope/W、Geo-slope 和理正等软件，主要是将三维剖面转换到二维平面上对单一剖面的边坡稳定系数进行计算[5-7]。然而单剖面二维边坡稳定性计算仅是对某一个典型剖面进行稳定性分析，只能代表该剖面不大范围滑体的局部稳定性，而不能代替整个边坡的稳定性，因此多剖面的综合稳定性才可能接近整个边坡的稳定性[8]。对于滑坡与边坡的分析已有许多方法，但从目前边坡稳定性分析的研究、发展及应用来看，剩余推力法称得上是一种快速简易的方法，

著录信息：陈应昱，杨红霞，李佳莹，等. 基于空间多剖面边坡稳定性系数计算方法［J］. 地质科技通报，2025，44(5)：181-190.
CHEN Yingxian，YANG Hongxia，LI Jiaying，et al. Calculation method of slope stability coefficients based on spatial multi-profile slopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(5)：181-190.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

非常适用于边坡稳定性计算中[9-11]。

多线程并行计算方法应用已较为成熟，可以应用到边坡多剖面稳定性计算中。多线程并行计算是并行计算的一种模式，它可以利用计算机中多个 CPU 核心同时进行计算，提高计算的速度和效率[12]。张宏莉等[13]定性定量地分析了多线程对计算性能的影响；王永亮等[14]提出了一种基于 OpenMP 的流体驱动岩体裂缝扩展的多线程并行计算新技术；王文鼐等[15]提出了一种针对分组事件的多线程优化方法；葛梦凡等[16]基于串行的自旋图算法，给出了多线程的三维模型自旋图并行计算方法；ZHANG 等[17]提出了 Drucker-Prager 方程和可压缩流体力学 SPH 模型的混合理论，并利用 OpenMP 框架并行实现了对边坡稳定性的分析。

相较于传统的单剖面稳定性计算，为了提高边坡稳定分析的效率和可靠性，提出基于空间多剖面边坡稳定性系数计算方法，该方法以空间剖面的剩余推力法为基础，通过多线程并行计算，自动计算出边坡多个剖面的稳定性系数。

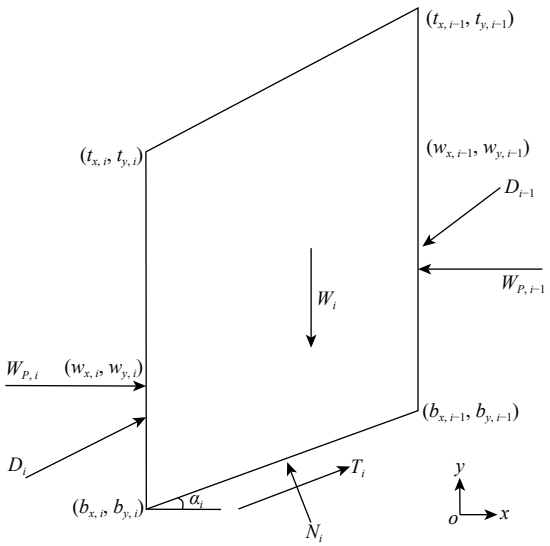
1　基于空间剖面的剩余推力法

剩余推力法又常被称为传递系数法或不平衡推力法，它可适用于复杂荷载作用下任意形状滑动面的滑坡推力的求解，即最后一个条块的剩余下滑力为 0。在二维分析中，取任意一个条块 i，其剩余推力法分条块计算时各分条块的受力状态，如图 1 所示。

空间剖面的剩余推力法继承了二维条分法的思想，并根据力的平衡条件进行分析，假设当前条块在分界面处对下一个条块推力的方向平行于当前条块的底滑面，再根据平行于底滑面和垂直于底滑面 2 个方向的合力为 0，以及最前端一个条块的剩余推力为 0，不断进行迭代得出最优解。空间剖面示意图如图 2a 所示，以剖面 S_2 为例，进行垂直划分条块，S_2 的第 i 个条块受力情况，如图 2b 所示。

假设第 i 个条块剩余推力 D_i 平行于各自的底滑面，根据力的传递原理，自上而下依次计算每一个条块所受的重力、推力等并累计到最后一个条块。取其中的任意一个条块 i，根据力的平衡条件，且条块底滑面的破坏符合摩尔−库伦(Morh-Coulomb)准则，建立第 i 条块的剩余推力为：

$$D_i=(W_i\sin\alpha_i+Q_i\cos\alpha_i)-\left[\frac{c_iL_i}{F_s}+\frac{(W_i\cos\alpha_i-U_i-Q_i\sin\alpha_i)\tan\varphi_i}{F_s}\right]+\psi_iD_{i-1},\tag{1}$$



W_i. 第 i 个条块的重量；D_i. 第 i 个条块的剩余推力；D_{i-1}. 第 i-1 个条块的剩余推力；$W_{p,i}$，$W_{p,i-1}$. 作用于第 i，i−1 个条块的水平压力；α_i. 第 i 个条块的底滑面与水平线的夹角；T_i. 第 i 个条块底面的剪切力；N_i. 第 i 个条块的法向力；$(t_{x,i}, t_{y,i})$，$(t_{x,i-1}, t_{y,i-1})$，$(b_{x,i}, b_{y,i})$和$(b_{x,i-1}, b_{y,i-1})$. 第 i 个条块的 4 个顶点坐标；oy. 高程方向；$ox\perp oy$；$(W_{x,i}, W_{y,i})$，$(W_{x,i-1}, W_{y,i-1})$. 第 i 个条块中间部分的坐标；下同

图 1　第 i 个条块受力状态

Fig. 1　Force state of the i-th block

式中：D_i，D_{i-1} 分别为第 i，i−1 个条块的剩余推力；W_i 为第 i 个条块的重量；α_i 为第 i 个条块的底滑面与水平线的夹角；Q_i 为第 i 个条块的水平作用力；c_i 为第 i 个条块底滑面的黏聚力；L_i 为第 i 个条块底滑面的长度；F_s 为稳定性系数；U_i 为第 i 个条块的静水压力；φ_i 为第 i 个条块底滑面的内摩擦角；ψ_i 为力的传递系数。

公式(1)中，包含如下计算：

$$Q_i=K_tW_i+W_{P,i-1}-W_{P,i},\tag{2}$$

$$\psi_i=\cos\Delta\alpha_i-\cos\Delta\alpha_i\cdot\tan\varphi_i\cdot\frac{1}{F_s},\tag{3}$$

$$\Delta\alpha_i=\Delta\alpha_{i-1}-\alpha_i,\tag{4}$$

$$L_i=\sqrt{(b_{x,i-1}-b_{x,i})^2+(b_{y,i-1}-b_{y,i})^2+(b_{z,i-1}-b_{z,i})^2},\tag{5}$$

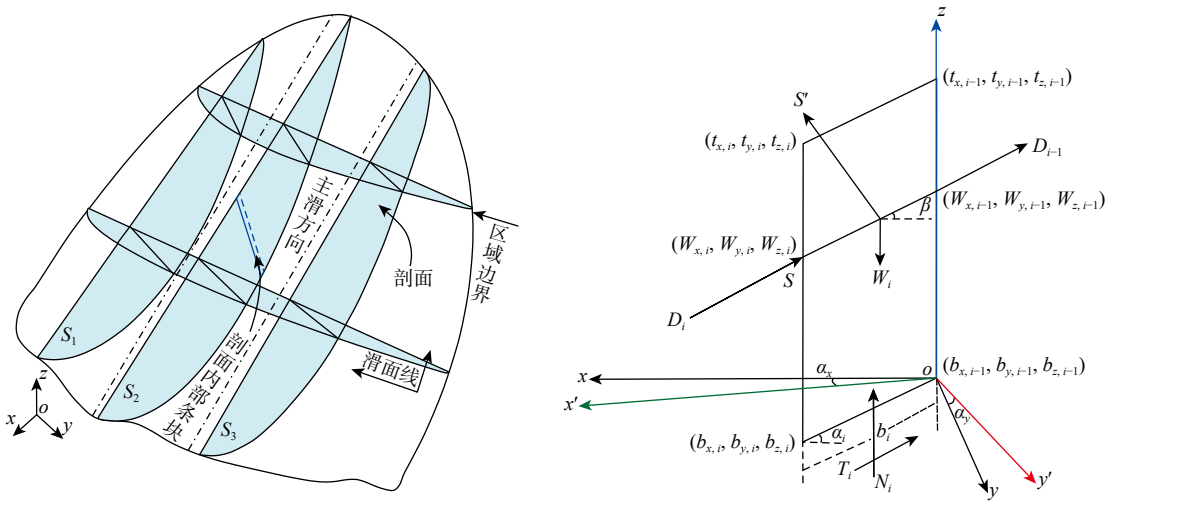
$$\alpha_i=\arctan\theta,\tag{6}$$

$$\theta=\frac{\sqrt{(b_{z,i-1}-b_{z,i})^2}}{\sqrt{(b_{x,i-1}-b_{x,i})^2+(b_{y,i-1}-b_{y,i})^2}},\tag{7}$$

$$W_i=\gamma\cdot S_m,\tag{8}$$

$$S_m=0.5\times\left(\sqrt{(t_{z,i}-b_{x,i})^2}+\sqrt{(t_{z,i-1}-b_{x,i-1})^2}\right)\times\sqrt{(b_{x,i-1}-b_{x,i})^2+(b_{y,i-1}-b_{y,i})^2},\tag{9}$$

式中：K_t 为垂直于重力的反作用力；$W_{P,i}$，$W_{P,i-1}$ 分别



a. 多剖面三维示意图　　b. 剖面S_2第i个条块的受力状态

S_1, S_2 和 S_3. 剖面编号；ox'. 主滑方向；$ox \perp oy$，$ox' \perp oy'$；α_x，α_y. xoy 和 $x'oy'$ 在 x 方向和 y 方向上的夹角；$(t_{x,i}, t_{y,i}, t_{z,i})$，$(t_{x,i-1}, t_{y,i-1}, t_{z,i-1})$，$(b_{x,i}, b_{y,i}, b_{z,i})$，$(b_{x,i-1}, b_{y,i-1}, b_{z,i-1})$.空间中第 i 个条块的 4 个顶点坐标；$(W_{x,i}, W_{y,i}, W_{z,i})$，$(W_{x,i-1}, W_{y,i-1}, W_{z,i-1})$. 空间中第 i 个条块中间部分的坐标；S'. 当前剖面对上一个剖面的作用力；S. 剖面集合；b_i. 剖面第 i 个条块的宽度；β. 剩余推力与水平线的夹角；下同

图 2　剖面受力情况示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the force situation in the profile

为作用于第 i, i–1 个条块的水平压力；$(b_{x,i}, b_{y,i}, b_{z,i})$，$(b_{x,i-1}, b_{y,i-1}, b_{z,i-1})$分别为空间中条块 i 下方 2 个顶点坐标；$t_{z,i}$, $t_{z,i-1}$ 分别为空间中条块 i 上方 2 个顶点的 z 坐标；θ 为滑动面和水平面的夹角；γ 为容重；S_m 为第 i 个条块的面积。

当剖面最后一个条块的净滑力 D_v=0(v 为条块总数)时，此时边坡处于极限平衡状态，这时的 F_s 值为边坡稳定性系数。然而，稳定性系数 F_s 需要多次试算后才能得到精确值。首先，需要给定 F_s 的初始值，然后，不断根据计算出 D_v 值的符号和绝对值的大小不断调整稳定性系数值，直至使 D_v=0 且满足一定精度为止，此时所求的 F_s 值即为最终边坡的稳定性系数。

2　空间剖面的生成及管理

2.1　自动生成空间剖面

(1)三维边坡工程地质模型

三维边坡工程地质模型由工程地质实体模型和边坡三维表面模型组成，是自动生成空间剖面的基础，如图 3 所示。一个地层模型由若干个地层组成，每个地层又由上地层面、下地层面和边界组成，每一个边界又由不同的边界点组成[18-19]。工程地质实体模型由各岩层界面组合建立封闭的实体模型，并将岩体物理力学参数分别赋值给各地质实体，如图 3a 所示；边坡三维表面模型是对边坡表面点状及线状数据进行三角形剖分生成的三角网表面模型，如图 3b 所示。工程地质实体模型和边坡三维表面模型以点、边、面及体的数据结构存储在空间数据库中，在数据结构中包含了几何信息、拓扑信息和属性信息，分别记录空间位置、拓扑关系和参数。

(2)自动生成空间剖面

根据边坡稳定性分析剖面建立原则，在三维空间设置系列剖面线，并对其进行命名。在剖面线所在位置建立剖切面，自动对三维边坡工程地质模型进行剖切，生成空间剖面图。其原理是剖切面与三维边坡工程地质模型的三角面网格进行求交运算，对所得的离散线段进行追踪连接，生成边坡线及地层的轮廓线[20-21]。

生成空间剖面图的具体方法是：步骤 1，根据边坡稳定性计算需要，按照边坡计算剖面线选取原则，在研究区域设置系列边坡剖面线，并按顺序对其命名，如从 $P_1 \sim P_n$(n 为剖面线总数)，如图 4c 所示；步骤 2，在剖面线所在的位置建立剖切面，利用改进的 Moller 算法[22] 对剖切面与三维模型的三角面网格进行求交运算，形成离散的线段集，如图 4a 所示；步骤 3，对所得的线段集进行追踪连接，自动生成地层轮廓线和边坡线，如图 4b 所示；步骤 4，对生成的地层轮廓线赋值物理力学参数，形成岩层多边形，同时对边坡线赋上时间属性；步骤 5，以剖面名称为关联，将对应的岩层多边形与边坡剖切线添加到对应剖面中，生成多个空间剖面图，并对其进行命名，如 $S_1 \sim S_n$，如图 4c 所示，自动生成空间剖面图的流程，如图 5 所示。

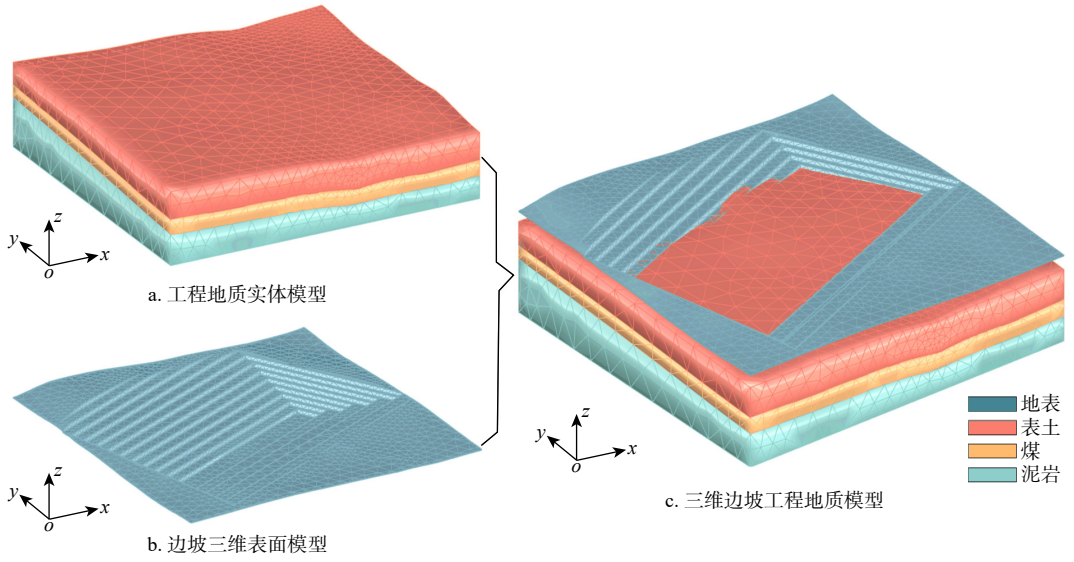
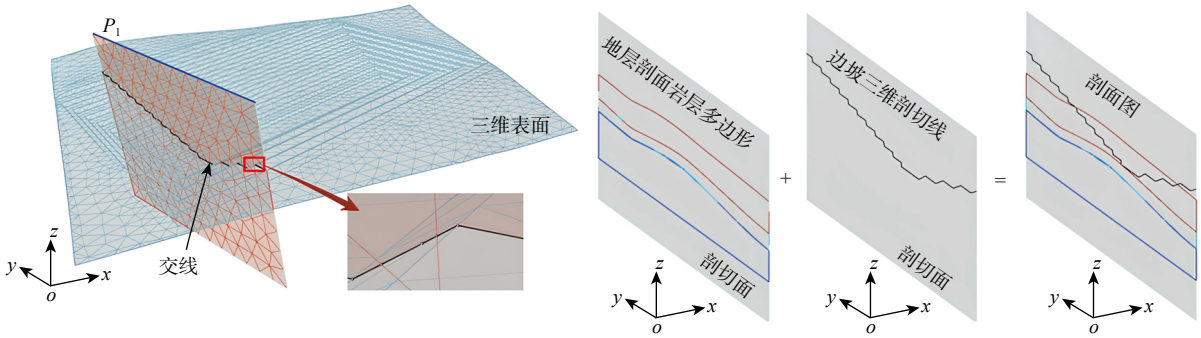
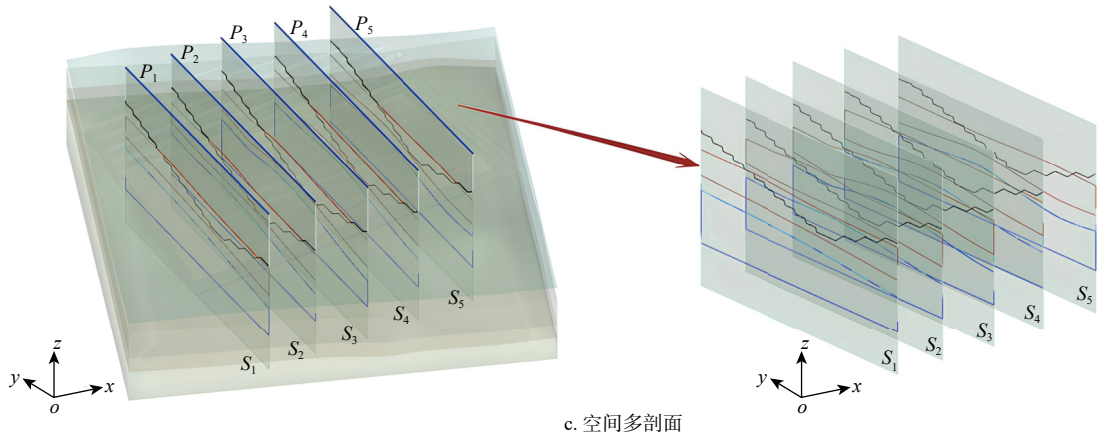


图 3　三维边坡工程地质模型

Fig. 3　Three-dimensional slope engineering geological model





P_1, P_2, P_3, P_4, P_5. 剖面线编号; S_4, S_5. 剖面编号; 下同

图 4　建立空间多剖面

Fig. 4　Establishment of a spatial multi-profile

2.2　空间剖面管理

为了管理和操作方便, 生成的所有空间剖面都保存在同一个图形数据库中, 为了实现多剖面边坡稳定性系数自动计算, 对剖面线和对应剖面图中的图元设置剖面名称, 再用剖面名称将空间剖面与扩展数据进行关联。

将所有剖切面按顺序命名, 每个剖面图有且仅有一个与之对应的剖面名。根据剖面图存储的图元分析, 剖面图数据结构包括边坡剖切线数据结构和岩层多边形数据结构。边坡剖切线的关联数据包括

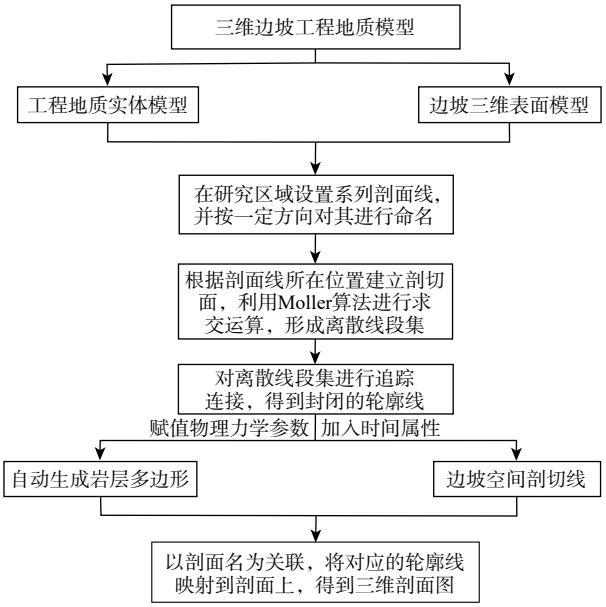


图 5　自动生成空间剖面图的流程图

Fig. 5　Flowchart for automatic generation of spatial profiles

剖面名称、边坡剖切线和剖切线存储的日期，其数据结构如表 1 所示；岩层多边形的关联数据包括剖面名称、岩层多边形、剖面图元属性参数和岩层多边形属性颜色，其数据结构如表 2 所示。利用扩展数据将上述的数据分别存储到边坡剖切线和岩层多边形中，实现对空间剖面的存储和提取管理。

3　多剖面边坡稳定性系数计算

为了实现快速高效计算边坡稳定性系数，提出使用多线程并行计算的方式对多剖面边坡稳定性系数进行计算。多线程并行计算是利用多线程同时执行任务来提高计算机系统并发度和运行效率的计算方式。与单线程计算不同，多线程并行计算可以将计算任务分成多个子任务，由不同的线程同时执行计算任务，加速整个计算过程。在多剖面边坡稳定性计算中，将每个剖面的稳定性系数计算任务分配给不同的线程同时进行计算。每个线程在计算过程中都可以使用单线程的计算方法（如剩余推力法）来计算每个剖面的稳定性系数。计算完成后，将计算结果返回给主线程进行汇总，得到多个剖面的边坡稳定性系数，多线程并行计算边坡稳定性系数流程图如图 6 所示。

表 1　边坡剖切线数据结构

Table 1　Data structure of slope profile lines

字段名	数据类型	说明
SectionName	navrchar	剖面名称
SlopeCuttingtangent	geometry	边坡剖切线
TimeProperty	datatime	边坡剖切线存储的日期

表 2　岩层多边形图元数据结构

Table 2　Rock polygon map metadata structure

字段名	数据类型	说明
SectionName	navrchar	剖面名
Rockpolygon	geometry	岩层多边形
sectionElementPara	navrchar	剖面图元属性参数
ColorProperty	string	岩层多边形属性颜色

多线程并行计算边坡稳定性系数的步骤：步骤 1，通过剖面线获取参与边坡稳定性系数计算的空间剖

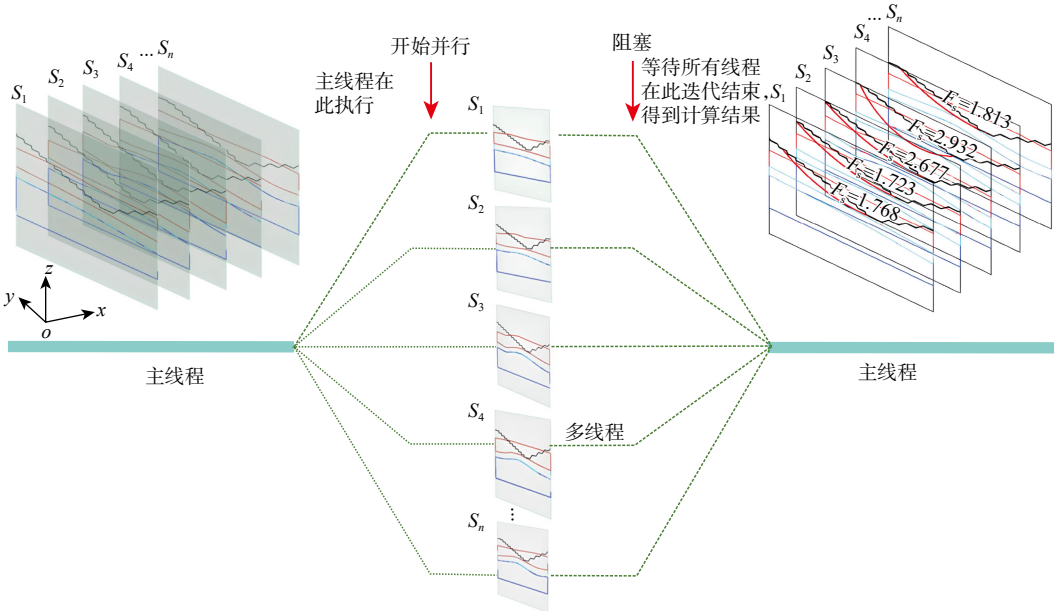


图 6　多线程并行计算边坡稳定性系数流程图（F_s. 边坡稳定系数；S_n. 剖面编号；下同）

Fig. 6　Flowchart for multi-threaded parallel calculation of slope stability coefficients

面集 $S=\{S_1,S_2,\cdots,S_j,\cdots,S_n\}$，其中，$S_j$ 为第 j 条剖面线对应的空间剖面，$j\in[1,n]$，n 为剖面总数；步骤 2，将 n 个剖面分配给 m 个线程，其中 $m\geqslant n$；步骤 3，指定边坡剖切线日期，设定搜索范围和滑面类型；步骤 4，边坡稳定性系数计算，在计算过程中，主线程不直接计算稳定性系数，而是把计算任务分配给各个线程计算，计算完成后把各个线程的计算结果返回给主程序，在每个线程计算过程中，利用剩余推力法搜索出最危险滑面并计算出每个剖面的稳定性系数；步骤 5，返回计算结果，由于每个线程是并行执行计算任务，当所有线程执行完毕后，可将计算结果返回给主线程进行汇总，得到所有剖面的稳定性系数，计算结果集为 $F_s=\{F_{s1},F_{s2},\cdots,F_{sj},\cdots,F_{sn}\}$，再将边坡稳定系数计算结果和临界滑面线显示在剖面图上；步骤 6，稳定性系数可视化，将各剖面的稳定性系数赋值到对应剖面线上，通过离散化和插值的方法实现稳定性系数视化。多剖面边坡稳定性系数多线程并行计算流程如图 7 所示。

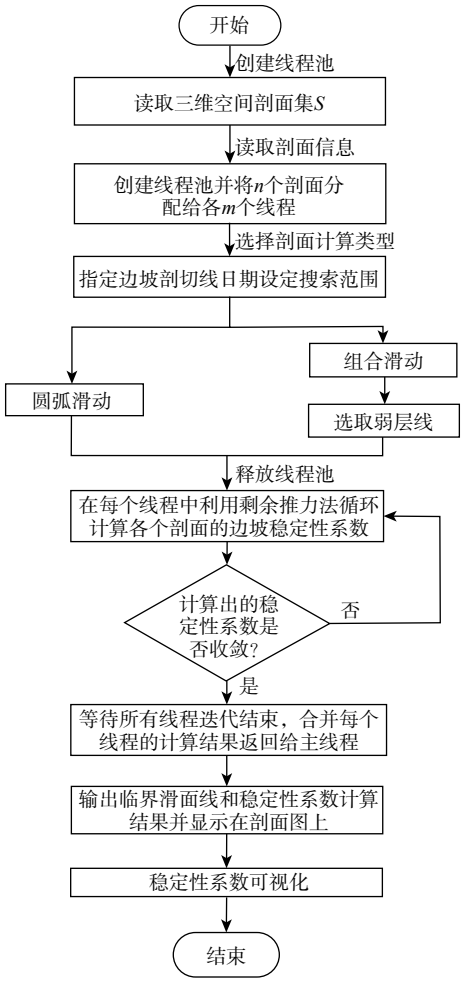


图 7　多剖面多线程并行计算流程图

Fig. 7　Flowchart for multi-profile and multi-threaded parallel computation

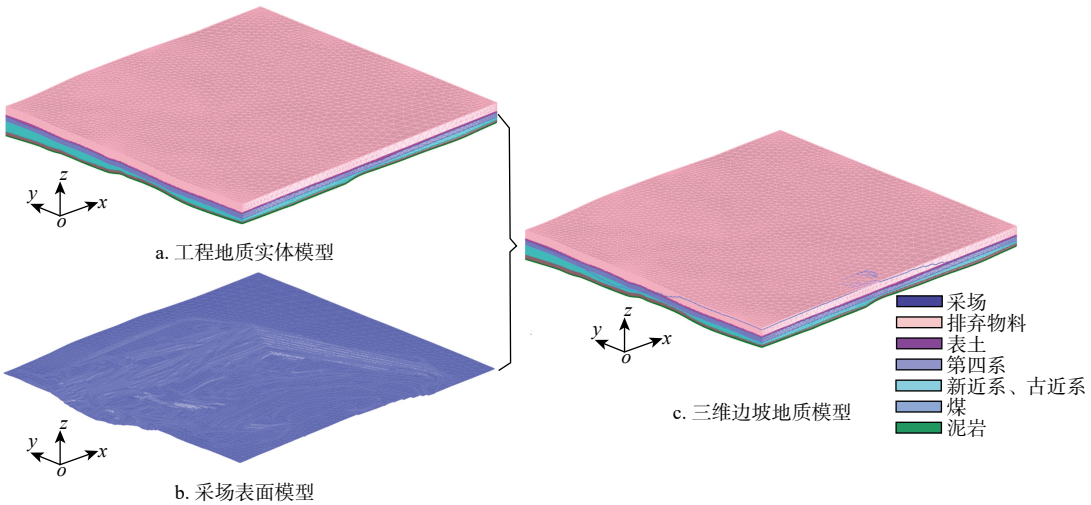
4　应用实例

以内蒙古锡林浩特某露天矿内排土场边坡的稳定性系数计算对方法进行应用。该露天矿地层岩性自上而下分别为排弃物料、表土、第四系、新近系、古近系、煤和泥岩。随着采剥工程推进，排土场排弃物料逐渐堆高，会使其边坡负载过大而造成滑坡危险，需要对该排土场边坡进行稳定性分析。

4.1　自动生成空间剖面

（1）建立三维边坡工程地质模型

该矿三维边坡工程地质模型由工程地质实体模型和边坡表面模型组成，如图 8 所示。用表 3 中岩石物理力学指标对工程地质实体模型进行属性赋值，赋值后的实体模型如图 8a 所示；边坡表面模型由点



a. 工程地质实体模型

b. 采场表面模型

c. 三维边坡地质模型

图 8　露天矿三维边坡工程地质模型

Fig. 8　Three-dimensional engineering geological model of the open-pit mine slope

表 3　岩石物理力学指标

Table 3　Rock physical and mechanical indexes

地层	黏聚力c/MPa	内摩擦角φ/(°)	容重γ/(kN·m^{-3})
排弃物料	0.015 1	14.0	18.0
第四系	0	26.9	20.8
新近系、古近系	0.120	24.0	19.3
煤	0.100	30.0	12.2
泥岩	0.050	25.0	19.6

状数据(测绘点)和线状数据(地形等高线和台阶线等)经三角剖分生成，如图 8b 所示；由所建的地质模型可得出边坡地质剖面，如图 9 所示。

(2) 自动建立空间剖面

露天矿边坡空间剖面自动生成过程如下：步骤 1，根据剖面线选取原则，在建模区域自动绘制 7 条剖面线，其剖面线集 $P=\{P_1,P_2,P_3,P_4,P_5,P_6,P_7\}$，如图 9 所示；步骤 2，在剖面线所在的位置建立剖切面，用剖切面分别与地层实体模型和边坡表面模型的三角面网格进行求交；步骤 3，对求交所得的离散线段集各自进行追踪连接，得到地层轮廓线和边坡剖面线，其中对地层轮廓线赋值物理力学参数，对边坡剖面线中加入时间属性(边坡的形状随工程推进是动态变化的，加入时间属性有利于后期边坡剖面的更新)，且每条剖面图与剖面线对应且仅有唯一的一个剖面名；步骤 4，以剖面名为关联，将岩层多边形和边坡剖面线分别添加到对应剖面图中，该研究区域生成的空间剖面图集 $S=\{S_1,S_2,S_3,S_4,S_5,S_6,S_7\}$，如图 10 所示；最后，将生成的所有空间剖面都保存在同一个图形数据库中进行管理，以便实现多剖面边坡稳定性系数自动计算。

4.2　多剖面边坡稳定性系数计算

在边坡稳定性分析中，使用多线程并行计算对生成的 7 个剖面进行边坡稳定性计算，具体的计算步骤：步骤 1，通过剖面线获取参与计算的 7 个剖面集；步骤 2，创建线程池将 7 个剖面分配给各个线程；步骤 3，指定边坡剖面线日期，根据工程地质信息该区域地层不含弱层，故剖面类型选择圆弧滑动；步骤 4，在每个线程中，利用剩余推力法搜索各个剖面图稳定性系数最小的滑面，计算出各个剖面的边坡稳定性系数；步骤 5，所有线程迭代结束，将每个线程的计算结果返回给主线程，得到 7 个剖面的边坡稳定性系数计算结果，并将临界滑面线和稳定性系数输出显示在剖面图上，稳定性系数集合为 $F_s=\{F_{s1}=1.354, F_{s2}=1.448, F_{s3}=2.342, F_{s4}=1.635, F_{s5}=1.175, F_{s6}=1.530, F_{s7}=2.014\}$，计算结果如图 11 所示。

4.3　计算结果可视化

将各剖面的稳定性系数赋值给对应剖面线，得到赋值后的剖面线集 $P=\{P_1,P_2,P_3,P_4,P_5,P_6,P_7\}$；根据滑面线范围，将滑面线与边坡三维表面进行组合生成一个封闭的滑面，再按 10 m 间距对滑面进行离散化，以得到的所有离散点为样体进行插值；

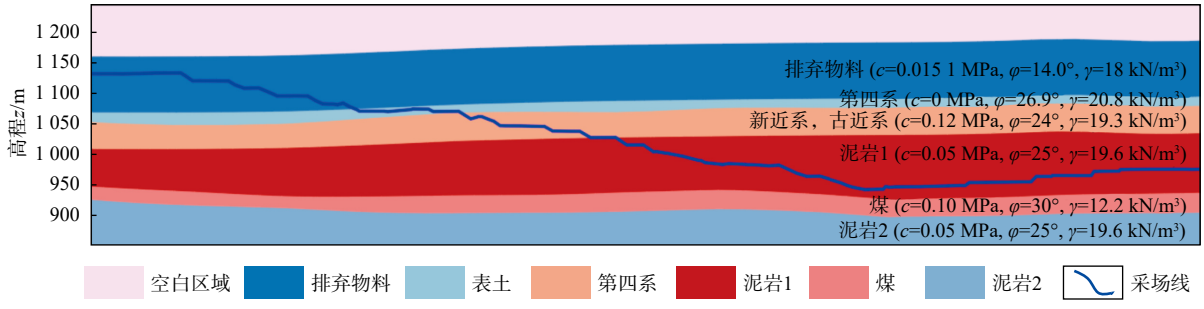


图 9　边坡工程地质剖面（c. 黏聚力；φ 内摩擦角；γ. 容重）

Fig. 9　Engineering geological profile of the slope

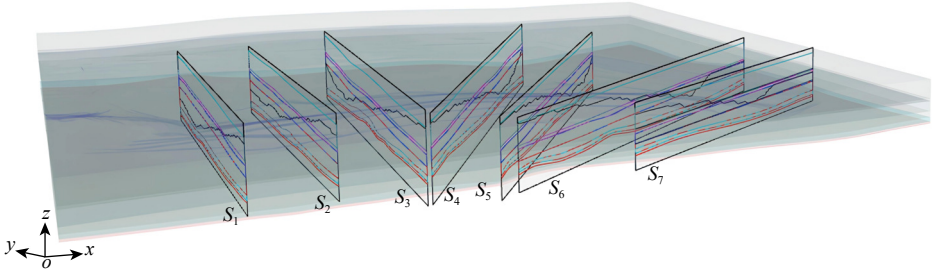


图 10　研究区域空间剖面图的建立（S_6，S_7. 剖面编号，下同）

Fig. 10　Establishment of spatial profile of the study area

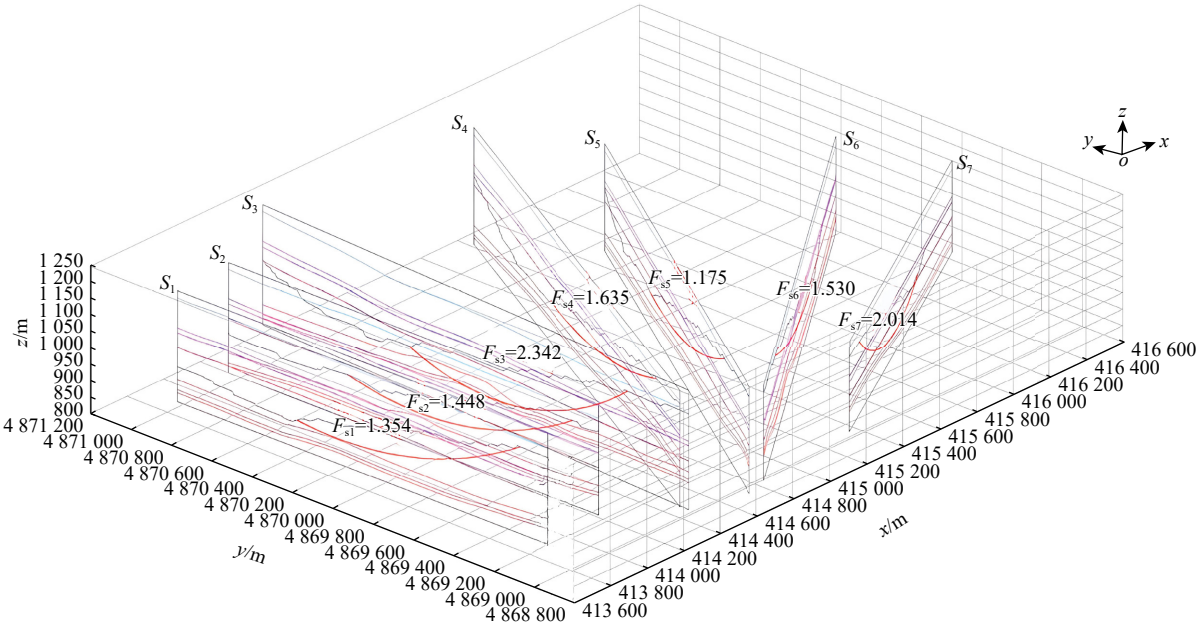


图 11　多剖面稳定性系数 F_s 计算结果图

Fig. 11　Calculation results of stability coefficients for multiple profiles

在剖面线范围内生成稳定性系数，并对滑面进行区域颜色充填，得到稳定性系数可视化图，如图 12 所示，图中稳定性系数范围为 [1.13, 2.50]，等值线间距为 0.2。

5　结　论

（1）用二维单一剖面计算边坡稳定性，需要将三维剖面转换到二维平面进行计算，其计算量大且结果偏于保守。为了提高多剖面边坡稳定性计算效率，提出了基于空间多剖面边坡稳定性计算方法，并将二维剩余推力法扩展至三维，提出了基于空间剖面的剩余推力法。

（2）根据地质数据资料，构建出了三维工程地质实体模型和边坡三维表面模型，在其基础上实现了空间剖面图的自动生成及其管理。

（3）为了实现快速高效地计算稳定性系数，提出了基于多线程并行计算的方法，并结合空间剖面的剩余推力法，实现了多剖面同时并行计算出边坡稳定性系数；

（4）以内蒙古某露天矿内排土场为实例进行应用，基于研究区域的边坡工程地质模型自动生成 7 个

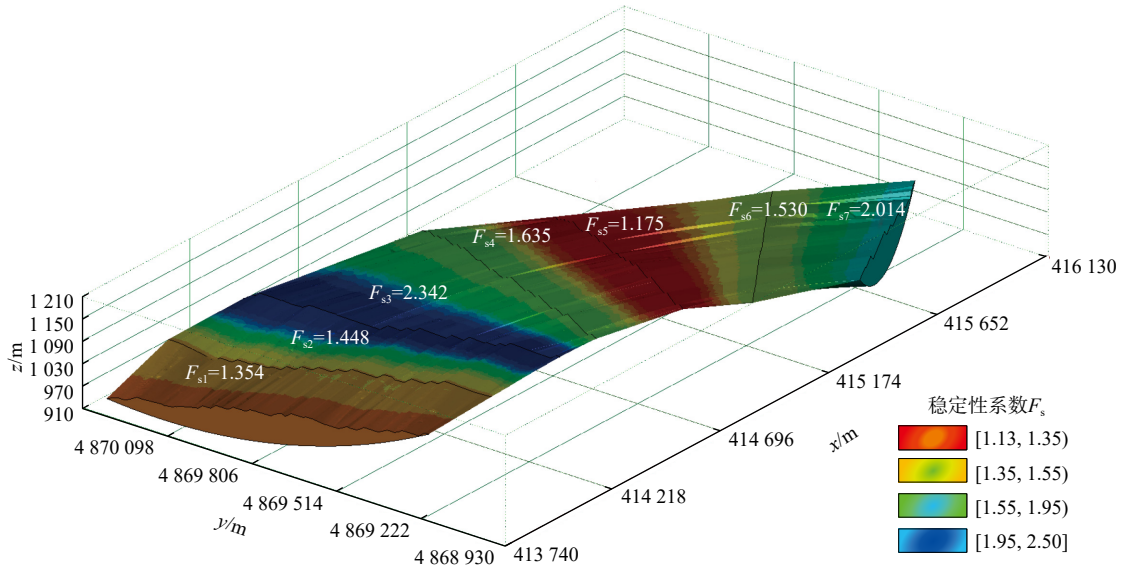


图 12　多剖面稳定性可视化

Fig. 12　Visualization of multi-profile stability

空间剖面图，使用该方法实现了这些剖面的稳定性系数计算。

参考文献：

[1] 瞿婧晶，陆燕，吴曙亮，等. 基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2021，32(1)：35-42.
QU J J, LU Y, WU S L, et al. Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 35-42. (in Chinese with English abstract)

[2] 林姗，郭昱葵，孙冠华，等. 边坡稳定性分析的虚单元强度折减法 [J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增刊 2)：3429-3438.
LIN S, GUO Y K, SUN G H, et al. Virtual element strength reduction method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3429-3438. (in Chinese with English abstract)

[3] 尉迟衍春. 复杂边坡多失效模式的确定方法及其工程应用 [D]. 山东青岛：青岛理工大学，2018.
YUCHI Y C. Method fordetermining multiple failure modes of complexslope andits engineering application[D]. Qingdao Shandong: Qingdao University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)

[4] 陈亚烽，陈国庆，严明，等. 基于一阶线性应变软化理论的边坡稳定性研究 [J]. 地质科技通报，2022，41(6)：180-188.
CHEN Y F, CHEN G Q, YAN M, et al. Study on slope stability considering first-order linear strain-softening theory[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 180-188. (in Chinese with English abstract)

[5] 易富，孟兴涛，赵文华，等. 基于因素空间的露天采坑边坡稳定性评价 [J]. 地质科技通报，2023，42(5)：1-9.
YI F, MENG X T, ZHAO W H, et al. Evaluation of slope stability of open pit based on factor space[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[6] 王伟，邹艺璇，李尧，等. 基于 GIS 与 Scoops 3D 的水动力型滑坡区域稳定性分析 [J]. 防灾减灾工程学报，2024，44(1)：79-89.
WANG W, ZOU Y X, LI Y, et al. Stability analysis of hydrodynamic landslides in the reservoir area based on GIS and Scoops 3D[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 79-89. (in Chinese with English abstract)

[7] 魏婷婷，范文，于宁宇. 基于典型剖面分析的区域斜坡稳定性分区方法 [J]. 工程地质学报，2017，25(6)：1518-1526.
WEI T T, FAN W, YU N Y. Method of zoning of regional slope stability based on typical profiles analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1518-1526. (in Chinese with English abstract)

[8] 张年学，李晓，盛祝平，等. 多剖面合力法分析滑坡稳定性 [J]. 工程地质学报，2017，25(5)：1190-1204.
ZHANG N X, LI X, SHENG Z P, et al. Stability analysis of landslide using joint forces method on multiple profiles[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1190-1204. (in Chinese with English abstract)

[9] 陈应显，王鹏飞. 露天矿含弱层边坡三维危险滑面构建及稳定性计算 [J]. 安全与环境学报，2024，24(3)：986-992.
CHEN Y X, WANG P F. Three-dimensional dangerous sliding surface of slopes with a weak layer in open pit construction and stability calculation[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 986-992. (in Chinese with English abstract)

[10] LIU X, LI D Q, CAO Z J, et al. Adaptive Monte Carlo simulation method for system reliability analysis of slope stability based on limit equilibrium methods[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105384.

[11] 范军富，刘志斌. 露天煤矿边坡稳定性(剩余推力法)计算机辅助设计 [J]. 露天采矿技术，2005，20(2)：21-23.
FAN J F, LIU Z B. Computer aided design of slope stability in open-pit coal mine[J]. Opencast Coal Mining Technology, 2005, 20(2): 21-23. (in Chinese with English abstract)

[12] 韩彦峰，王家序，周广武，等. 滑动轴承混合润滑多线程并行计算数值方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2016，44(6)：7-12.
HAN Y F, WANG J X, ZHOU G W, et al. Mixed lubrication study of multi-thread parallel computing algorithm for journal bearings[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 7-12. (in Chinese with English abstract)

[13] 张宏莉，田耕，胡铭曾. 多线程技术与并行计算 [J]. 计算机科学，1999，26(9)：48-50.
ZHANG H L, TIAN G, HU M Z. Multi-thread and parallel computing[J]. Computer Science, 1999, 26(9): 48-50. (in Chinese with English abstract)

[14] 王永亮，王娟. 流体驱动岩体裂缝扩展计算新技术：多线程并行计算 [C]//北京力学会. 北京力学会第二十八届学术年会论文集(上). [S. l.]: [S. n.], 2022.
WANG Y L, WANG J. New technology of fluid-driven rock fracture extension calculation: Multithreaded parallel computation[C]//Beijing Mechanics Society. Proceedings of the Twenty-eighth Annual Academic Conference of the Beijing Mechanics Society (Above). [S. l.]: [S. n.], 2022. (in Chinese)

[15] 王文鼎，陈邦文，韩鹏，等. 采用多线程并行调度的网络仿真加速 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版)，2015，35(1)：33-37.
WANG W N, CHEN B W, HAN P, et al. Network simulation speedup by multi-thread and parallel scheduling[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 33-37. (in Chinese with English abstract)

[16] 葛梦凡，李志，徐南，等. 三维模型自旋图的多线程并行算法 [J]. 小型微型计算机系统，2017，38(10)：2369-2373.
GE M F, LI Z, XU N, et al. Multithreaded parallel algorithm of 3D model spin image[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2017, 38(10): 2369-2373. (in Chinese with English abstract)

[17] ZHANG W J, ZHENG H, JIANG F Y, et al. Stability analysis of soil slope based on a water-soil-coupled and parallelized Smoothed Particle Hydrodynamics model[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 108: 212-225.

[18] 赵宏坚，周翠英. 基于实体建模的三维地层构造 [J]. 岩土力学，2010，31(4)：1257-1263.
ZHAO H J, ZHOU C Y. Solid-oriented 3D-stratum construction[J].

Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1257-1263. (in Chinese with English abstract)

[19] 田宜平, 刘维安, 张夏林. 基于等角度变比例投影的矿体轮廓线自动匹配方法研究 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 175-180.
TIAN Y P, LIU W A, ZHANG X L. Automatic matching of ore body contour line based on equal-angle and variable proportion projection[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 175-180. (in Chinese with English abstract)

[20] 梁师俊. 基于虚拟钻孔的工程地质三维剖切的实现 [J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 11-14.
LIANG S J. 3D sectioning realization of engineering geology based on virtual borehole[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(1): 11-14. (in Chinese with English abstract)

[21] 李楠, 曾俊钢, 肖克炎, 等. 一种线框矢量模型表示的地质体折面剖切方法 [J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 28-31.
LI N, ZENG J G, XIAO K Y, et al. Cutting and splitting on geological body with wire frame model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 28-31. (in Chinese with English abstract)

[22] 杨凯祥, 陈鸿, 谢明师. STL 模型相交性检测及交线追踪算法 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(1): 255-259.
YANG K X, CHEN H, XIE M S. Intersection test and cross line tracking algorithms of the STL models[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 255-259. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于空间多剖面边坡稳定性系数计算方法”

Calculation method of slope stability coefficients based on spatial multi-profile slopes

CHEN Yingxian[1], YANG Hongxia[1*], LI Jiaying[1], YE Yongchao[1], ZHOU Zhiwei[2]

1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;
2. Guoneng Baori Hiller Energy Co., Ltd., Hulunbuir Inner Mongolia 021000, China

First author, E-mail: lntucyx@163.com

* Corresponding author, E-mail: 3035526032@qq.com

Abstract: In conventional slope stability analysis, the slope stabilities for various cross-sections are calculated independently. [**Objective**] To improve the calculation efficiency of slope stabilities for multiple profiles, this study prop oses a method based on spatial slope stability coefficient calculations. [**Methods**] The two-dimensional residual thrust method is incorporated with spatial profiles, which forms a residual thrust method for spatial profiles. [**Methods**] The calculation process of the residual thrust method for spatial profiles is optimized by the automatic generation and management of profiles within a three-dimensional engineering geological mode of a slope. In order to achieve rapid and efficient calculation of slope stability coefficients, a method based on multi-threaded parallel computation is introduced. Combining this approach with the residual thrust method for spatial profiles allows for more accurate and efficient computation of stability coefficients for multiple spatial profiles. [**Results**] Using an open-pit mine in Xilinhot, Inner Mongolia, as a case study, we establish a three-dimensional slope engineering geological model for the internal dump site slope. On this basis, seven spatial profiles are automatically generated, and stability coefficients are calculated using multi-threaded parallel computation. Finally, the results are presented visually. [**Conclusion**] The research findings indicate that adopting multi-threaded parallel computation for calculating slope stability coefficients for multiple profiles can fully utilize computing resources and significantly improve computational efficiency. Furthermore, application in engineering projects confirms the feasibility and applicability of the proposed method.

Key words: multi-profile; spatial profile map; multi-threaded parallel computing; residual thrust method; visualization; slope; stability coefficient

Received: 2023-10-31; Revised: 2024-01-15; Accepted: 2024-01-18

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230610