



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104715145 A

(43) 申请公布日 2015.06.17

(21) 申请号 201510095093.5

(22) 申请日 2015.03.04

(71) 申请人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 吴梦喜

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
代理人 胡剑辉

(51) Int. Cl.
G06F 19/00(2011.01)

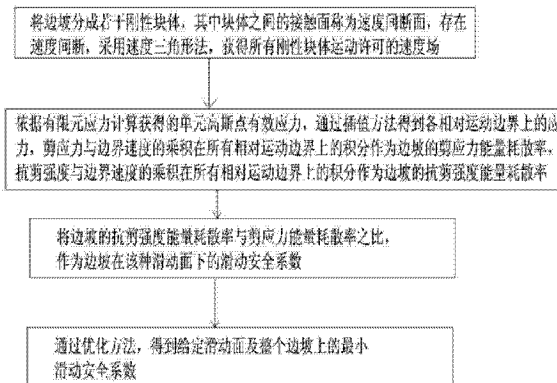
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种边坡的稳定安全性的分析方法

(57) 摘要

本发明公开一种边坡稳定安全性的分析方法,其基于能量耗散率的概念,适用于各种滑动面。其包括步骤:(1)将边坡分成若干刚性块体,采用速度三角形法,获得所有刚性块体边界运动许可的间断速度;(2)依据有限元计算获得的单元高斯点有效应力,插值得到各相对运动边界上的应力,求出剪应力与抗剪强度,分别与间断速度相乘并在所有相对运动边界上积分得到抗剪强度和剪应力能量耗散率;(3)将抗剪强度能量耗散率与剪应力能量耗散率之比,作为边坡在该种滑动形式下的滑动安全系数;(4)通过优化方法,得到给定滑动面和整个边坡上的最小滑动安全系数。



1. 一种边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:包括以下步骤:

(1) 将边坡分成若干刚性块体,采用速度三角形法,获得所有刚性块体运动许可的速度场;

(2) 依据有限元应力计算获得的单元高斯点有效应力,通过插值方法得到各相对运动边界上的应力,剪应力与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的剪应力能量耗散率,抗剪强度与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的抗剪强度能量耗散率;

(3) 将边坡的抗剪强度能量耗散率与剪应力能量耗散率之比,作为边坡在该种滑动面下的滑动安全系数;

(4) 通过优化方法,得到给定滑动面及整个边坡上的最小滑动安全系数。

2. 根据权利要求1所述的边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:在所述步骤(1)中,边坡包括:折线组合滑动面、圆弧折线组合滑动面、对数螺线折线组合滑动面,刚性块体包括:折线滑动面刚性块体、圆弧滑动面刚性块体、对数螺线滑动面刚性块体。

3. 根据权利要求2所述的边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:所述折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

其中 v 为间断面上的速度; τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力,随着位置变化; ϕ 为土的剪胀角,介于0与土的内摩擦角之间; Γ 为所有速度间断面。

4. 根据权利要求3所述的边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:所述步骤(4)的优化方法包括以下分步骤:

(4.1) 对于给定折线组合滑动面 ABCDEF,先优化 B_1 的位置,使求得 AB、 BB_1 、BC 三间断线用抗剪强度计算的总的能量耗散率与用剪切力计算的的能量耗散率之和的比值;然后优化 C_1 的位置,使求得 AB、 BB_1 、BC、 CC_1 、CD 构成的速度间断线上总的能量耗散率之比最小;依次办理,优化出所有块体之间的间断线位置;

(4.2) 计算所有间断线上的能量耗散率,依次优化 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 的位置,继续循环优化直到所有块体间的间断线位置不再移动为止。

5. 根据权利要求2所述的边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:所述圆弧折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

其中 v 为间断面上的速度; τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力,随着位置变化; ϕ 为土的剪胀角,介于0与土的内摩擦角之间,圆弧段块体中及圆弧间断面剪胀角为0; Γ 为所有速度间断面。

6. 根据权利要求2所述的边坡的稳定安全性的分析方法,其特征在于:所述对数螺线折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$F = \frac{\int_{\Gamma} v\tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v\tau \cos \phi d\Gamma}$$

其中 v 为间断面上的速度； τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力，随着位置变化； ϕ 为土的剪胀角，介于 0 与土的内摩擦角之间； Γ 为所有速度间断面。

7. 根据权利要求 1 所述的边坡的稳定安全性的分析方法，其特征在于：该分析方法还包括步骤 (5)：以滑入点和滑出点位置为优化变量，优化给出整个边坡的最小滑动安全系数。

一种边坡的稳定安全性的分析方法

技术领域

[0001] 本发明属于边坡的技术领域,具体地涉及一种边坡的稳定安全性的分析方法,主要用于土木工程岩土工程、水利水电、交通工程、隧道和地下洞室的稳定性分析中。

背景技术

[0002] 目前,边坡的稳定安全性的分析方法有刚体极限平衡法、有限元强度折减法、基于有限元应力结果的刚体极限平衡法等。有限元强度折减法不需要假定滑动面的形状,能获得边坡稳定的安全系数,但由于有限元强度折减法一方面对材料的强度和变形参数有较高的要求,且边坡稳定的临界状态定义很难统一,且只能了解最危险滑动面位置的安全系数而有其局限性;刚体极限平衡法、尤其是基于有限元应力结果的刚体极限平衡法与优化方法结合对于单一滑动面(圆弧、直线)很有效,但对于组合式滑动面,在安全系数的定义方面,目前的方法无论是基于力的平衡或基于力矩平衡,还存在许多问题。

发明内容

[0003] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种边坡的稳定安全性的分析方法,其适用于包括单一滑动面和组合滑动面的各种滑动面。

[0004] 本发明的技术解决方案是:这种边坡的稳定安全性的分析方法,包括以下步骤:

[0005] (1) 将边坡分成若干刚性块体,采用速度三角形法,获得所有刚性块体运动许可的速度场;

[0006] (2) 依据有限元应力计算获得的单元高斯点有效应力,通过插值方法得到各相对运动边界上的应力,剪应力与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的剪应力能量耗散率,抗剪强度与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的抗剪强度能量耗散率;

[0007] (3) 将边坡的抗剪强度能量耗散率与剪应力能量耗散率之比,作为边坡在该种滑动面下的滑动安全系数;

[0008] (4) 通过优化方法,得到给定滑动面上的最小滑动安全系数。

[0009] 本发明通过将边坡分成若干刚性块体,采用有限元法求出满足静力平衡和材料屈服条件的应力场,然后依据刚性块体的速度场,来计算能量耗散率,将抗剪强度和边坡的剪应力引起的能量耗散率之比作为边坡在该种滑动面下的滑动安全系数,所以适用于包括单一滑动面和组合滑动面的各种滑动面。

附图说明

[0010] 图 1a 示出了根据本发明的折线组合滑动面;图 1b 示出了该折线组合滑动面的速度三角形。

[0011] 图 2 示出了根据本发明的圆弧折线组合滑动面。

[0012] 图 3a 示出了根据本发明的圆弧滑动面的速度三角形;图 3b 示出了图 3a 的速度关

系。

[0013] 图 4 示出了根据本发明的对数螺线折线组合滑动面。

[0014] 图 5a 示出了根据本发明的对数螺线滑动面的速度三角形；图 5b 示出了图 5a 的速度关系。

[0015] 图 6 示出了根据本发明的边坡的稳定安全性的分析方法的流程图。

具体实施方式

[0016] 这种边坡的稳定安全性的分析方法，包括以下步骤：

[0017] (1) 将边坡分成若干刚性块体，其中块体之间的接触面称为速度间断面，存在速度间断，采用速度三角形法，获得所有刚性块体运动许可的速度场；

[0018] (2) 依据有限元应力计算获得的单元高斯点有效应力，通过插值方法得到各相对运动边界上的应力，剪应力与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的剪应力能量耗散率，抗剪强度与边界速度的乘积在所有相对运动边界上的积分作为边坡的抗剪强度能量耗散率；

[0019] (3) 将边坡的抗剪强度能量耗散率与剪应力能量耗散率之比，作为边坡在该种滑动面（滑动面可以是折线滑动面、也可以是折线段与圆弧、折线段与对数螺线任意组合）下的滑动安全系数；

[0020] (4) 通过优化方法，得到给定滑动面上的最小滑动安全系数。

[0021] 本发明通过将边坡分成若干刚性块体，采用有限元法求出满足静力平衡和材料屈服条件的应力场，然后依据刚性块体的速度场，来计算能量耗散率，将分别由按照极限剪应力（抗剪强度）和实际剪应力计算的的能量耗散率之比作为边坡在该种滑动面下的滑动安全系数。由于能量耗散率是标量，可以求出所有间断面上剪应力引起的能量耗散率之和，所以适用于包括单一滑动面和组合滑动面的各种滑动面。本发明之中计算的的能量耗散率，是剪应力引起的能量耗散率，而不是总的能量耗散率（总的能量耗散率=速度间断面上的法向应力引起的能量耗散率+剪应力引起的能量耗散率），因此本发明的方法与求极限荷载的极限分析法是不同的。

[0022] 另外，在所述步骤（1）中，边坡包括：折线组合滑动面、圆弧折线组合滑动面、对数螺线折线组合滑动面，刚性块体包括：折线滑动面刚性块体、圆弧滑动面刚性块体、对数螺线滑动面刚性块体。

[0023] 另外，所述折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$[0024] \quad F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

[0025] 其中 v 为间断面上的速度； τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力，随着位置变化； ϕ 为土的剪胀角，介于 0 与土的内摩擦角之间，不同间断面可以不相同； Γ 为所有速度间断面。

[0026] 更进一步地，所述步骤（4）的优化方法包括以下分步骤：

[0027] (4.1) 对于给定折线组合滑动面 ABCDEF（如图 1a、1b 所示），先优化 B_1 的位置，使求得 AB、 BB_1 、BC 三间断线用抗剪强度计算的总的能量耗散率与用剪切力计算的的能量耗散率

之和的比值；然后优化 C_1 的位置，使求得 AB、BB₁、BC、CC₁、CD 构成的速度间断线上总的能量耗散率之比最小；依次办理，优化出所有块体之间的间断线位置；

[0028] (4.2) 计算所有间断线上的能量耗散率，依次优化 B₁、C₁、D₁、E₁ 的位置，继续循环优化直到所有块体间的间断线位置不再移动为止。另外，所述圆弧折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$[0029] \quad F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

[0030] 其中 V 为间断面上的速度； τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力，随着位置变化； ϕ 为土的剪胀角，介于 0 与土的内摩擦角之间，不同断面可以不相同； Γ 为所有速度间断面。

[0031] 另外，所述对数螺线折线组合滑动面的滑动安全系数为

$$[0032] \quad F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

[0033] 其中 V 为间断面上的速度； τ_f 和 τ 分别为速度间断面上的抗剪强度和剪应力，随着位置变化； ϕ 为土的剪胀角，介于 0 与土的内摩擦角之间，不同断面可以不相同； Γ 为所有速度间断面。

[0034] 另外，该分析方法还包括步骤 (5)：以滑入点和滑出点位置为优化变量，优化给出整个边坡的最小滑动安全系数。这样既可以求出给定滑动面上的安全系数，也可以求出整个边坡的安全系数。

[0035] 以下更详细地说明本发明。

[0036] 极限分析法是根据虚功原理，即外力所做的虚功，等于物体内部的需应变能，通过构造速度间断场来分析物体的极限荷载的方法。

[0037] 针对存在的上述问题，将求极限荷载的极限分析方法，引入边坡稳定滑动之中。由于边坡极限状态时，边坡内部的能量耗散与外力所做的功相平衡。通过采用有限元法求出满足静力平衡和材料屈服条件的应力场，然后依据下文刚体的速度场，来计算剪应力能量耗散率。提出了如图 1 所示的折线组合滑动面 ABCDEF、图 2 所示的圆弧折线组合滑动面 ABCDEF、图 4 所示的对数螺线折线组合滑动面 ABCDEF 的刚体组合图。圆弧滑动块体和对数螺线块体都是顶点为转动中心点的刚性三角形，圆弧滑动面刚性块体的速度场计算见图 3，对数螺线滑动面刚性块体的速度场计算见图 5。

[0038] 安全系数的定义用刚性块体速度间断面上基于抗剪强度计算和基于剪切力计算的总的能量耗散率之比。直线速度间断面上的能量耗损率，设速度间断面上任意点的法向应力为 σ_n ，切向应力为 τ ，速度为 V ，则线段上的能量耗损率为 $\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma$ 。基于有限元应力结果用插值方法对所有速度间断面求剪应力和抗剪强度，基于剪应力和抗剪强度，采用数值积分方法求能量耗散率，并按下式求出安全系数

$$[0039] \quad F = \frac{\int_{\Gamma} v \tau_f \cos \phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v \tau \cos \phi d\Gamma}$$

[0040] 折线滑动面和圆弧滑动面间断线上依据速度三角形求速度场,图中已标示很清楚。对数螺线区,较复杂,下面阐述。

[0041] 如图 5 所示,对数螺线的方程为

$$[0042] \quad r(\theta) = r_0 \exp(\theta \tan \phi)$$

[0043] 其中, r 为螺线的射线长度,螺线区和圆弧区一样,由刚体三角形组成,螺线的速度

$$[0044] \quad V_n = V_0 (1 + \Delta \theta \tan \phi)^n$$

[0045] 当三角形足够多时

$$[0046] \quad V_n = V_0 (1 + \Delta \theta \tan \phi)^n = V_0 \exp(\theta \tan \phi)$$

[0047] 三角形之间的间断速度(射线),如图 5 中 OB,其速度 V_{12} 与 OB 线的夹角为 ϕ ,根据速度三角形,可以得到

$$[0048] \quad V_{12} = V_1 \sin(\Delta \theta) / \cos(\phi + \Delta \theta / 2)$$

[0049] 能量耗散是沿着被坡面切割留在边坡内的射线段的积分,依此办理可以求出所有射线上的能量耗散。

[0050] 在螺线面 AB 上剪应力引起的能量耗散为

[0051]

$$\int_{\Gamma} r v \cos \phi \tau d\Gamma = \int_{\Gamma} r_0 \exp(\theta \tan \phi) v_0 \exp(\theta \tan \phi) \cos \phi \tau d\Gamma = \int_{\Gamma} r_0 v_0 [\exp(\theta \tan \phi)]^2 \cos \phi \tau d\Gamma$$

[0052] 数值积分可以求出上式的值,获得所有间断面上剪应力引起的能量耗散的总和。同样可以求出按抗剪强度计算的能量耗散之和。

[0053] 依据安全系数的定义,可以求出总的的天系数。

[0054] 优化方法如下:

[0055] 对于给定折线滑动面 ABCDEF,第一个循环,可以先优化 B_1 的位置,使求得 AB、 BB_1 、BC 三间断线用抗剪强度计算的总的能量耗散率与用剪切力计算的的能量耗散率之和的比值;然后优化 C_1 的位置,使求得 AB、 BB_1 、BC、 CC_1 、CD 构成的速度间断线上总的能量耗散率之比最小;依次办理,优化出所有块体之间的间断线位置。第二个循环,计算所有间断线上的能量耗散率,依次优化 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 的位置。继续循环优化直到所有块体间的间断线位置不再移动为止。

[0056] 而对于圆弧或对数螺线与折线段组合式滑动面,折线段与弧线段相接的刚体接触面,间断线的位置位于过转动中心的射线上,不需要优化,其他同折线滑动面。

[0057] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例,并非对本发明作任何形式上的限制,凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属本发明技术方案的保护范围。

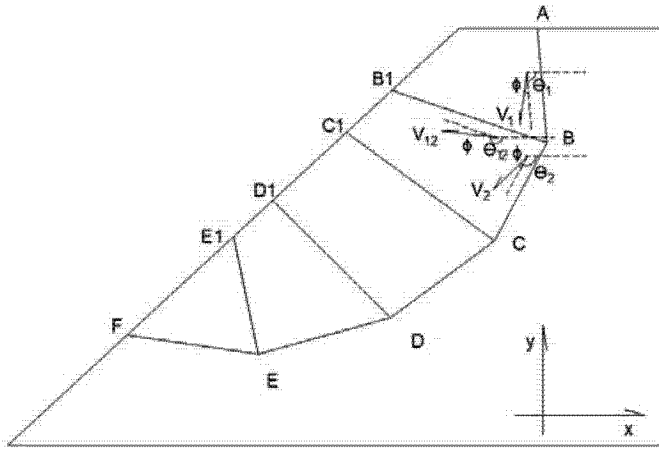


图 1a

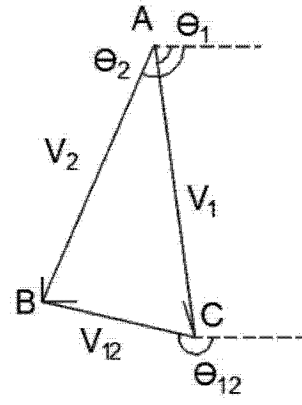


图 1b

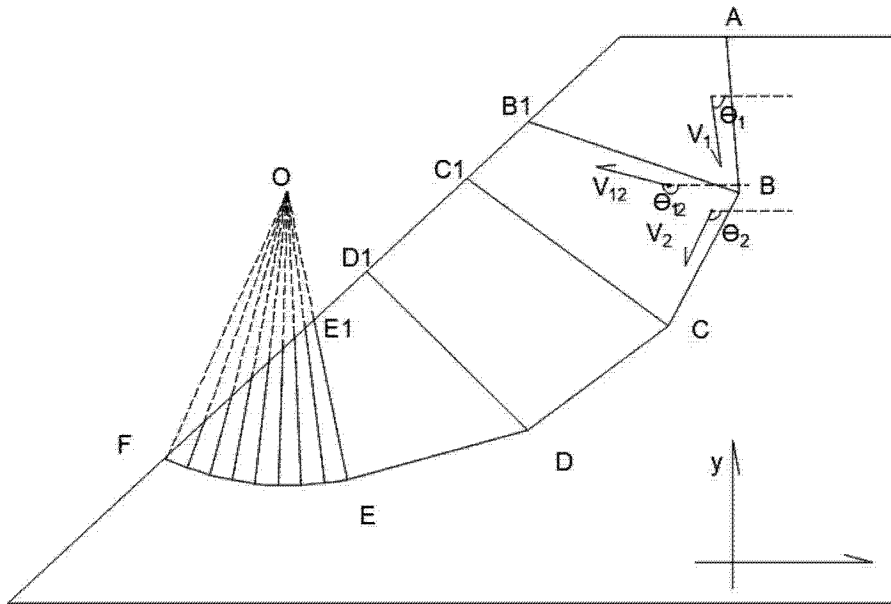


图 2

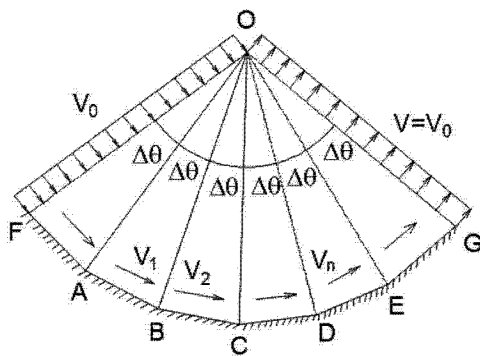


图 3a

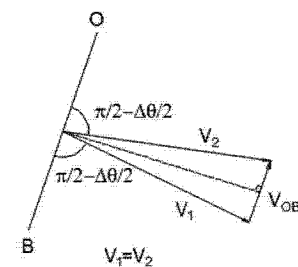


图 3b

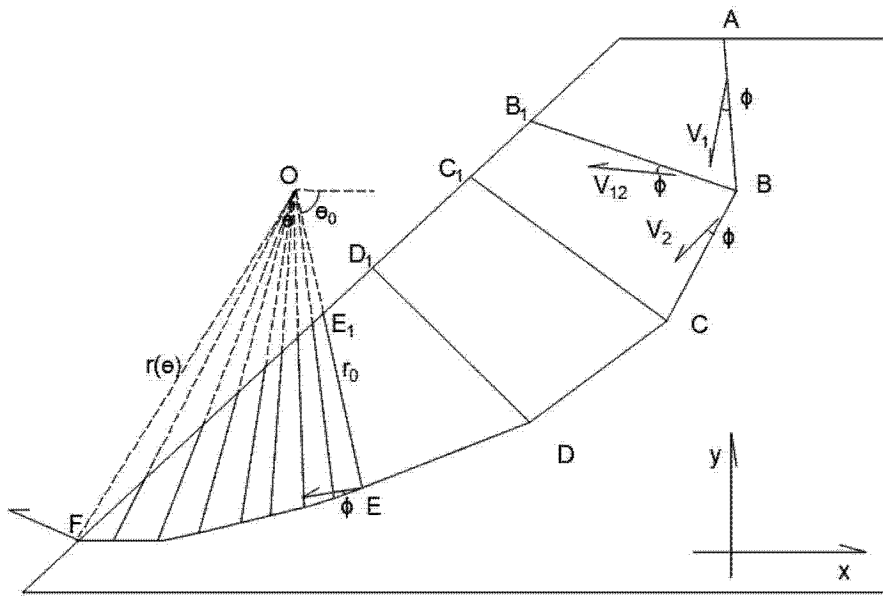


图 4

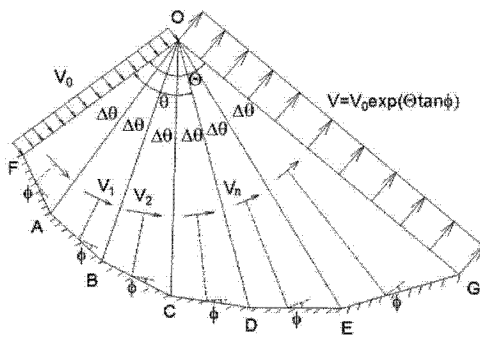


图 5a

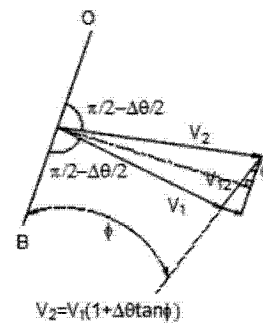


图 5b

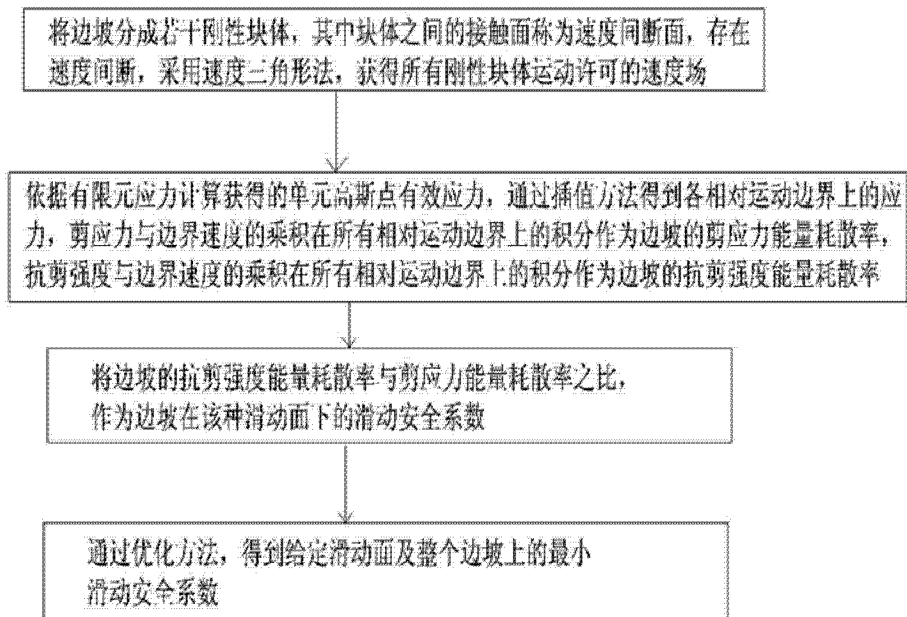


图 6