

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.017

六轮月球探测机器人质心域分析及摇臂优化

赵建伟¹, 高培源¹, 陈占营¹, 翟国栋¹, 张剑铭¹, 谢广明²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院矿山机器人中心实验室, 北京 100083; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 针对月球探测机器人在崎岖不平的月面上行驶时, 其质心位置影响着抗倾翻以及越障等性能, 对六轮月球探测机器人质心域分析及摇臂优化。简要分析探测机器人部件, 运用坐标转换推导出在任意运动位置时质心域的计算公式, 在此基础上对探测机器人进行样例分析, 得到质心矢量的模关于摇臂转角的变化曲线, 获得两侧摇臂转角与质心矢量的模的变化规律, 并对摇臂尺寸进行优化。结果表明: 探测机器人的质心域为一平面区域, 当 l_3+l_4 为定值且 $l_3:l_4=2:1$ 时, 其车体抗干扰性能最强。

关键词: 月球探测机器人; 质心域; 位置矢量; 质心矢量的模; 优化

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Centroid Domain Analysis and Optimization of Rocker Arm for Six-wheeled Lunar Robot

Zhao Jianwei¹, Gao Peiyuan¹, Chen Zhanying¹, Zhai Guodong¹, Zhang Jianming¹, Xie Guangming²

(The Robot Center Laboratory of Mine, School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: When exploration robot driving on the bumpy month lunar, its centroid position affects the Anti-tipping performance as well as obstacle ability and so on. So a centroid domain analysis and an optimization of the rocker arms are put forward. We used coordinate transformation to deduce the calculation formula of the centroid domain in arbitrary motion position by means of detecting robot parts simplified. On this basis, a research on detecting robot was carried out using sample analysis. It gave out the centroid vector model of radial angle change curve, and got the changing rule of both sides of the rocker arm angle and centroid vector mode. Finally we optimized the size of the detection robot arm. The results show that the centroid domain is a flat area, when the value of l_3+l_4 is constant and $l_3:l_4=2:1$, the car body can get the strongest anti-jamming performance.

Keywords: lunar robot; centroid domain; position vector; centroid vector mode; optimization

0 引言

六轮摇臂式月球探测机器人是一种广泛应用于行星登陆探测领域的移动装置。行星表面多起伏不平, 摇臂式结构能够使探测车在遇到障碍时较平稳通过, 并尽可能保持多轮与地面接触, 防止因打滑或车轮悬空而导致探测车无法移动的情况出现^[1]。探测机器人在崎岖不平的月面上行驶时, 其质心位置影响着抗倾翻性能和越障性能, 因此确定探测机器人的质心域^[2]对研究探测机器人性能至关重要。

宋春霞^[3]建立了包括越障爬坡性能在内的月球车的移动性能评价模型。周开波等^[4]完成了行星探测机器人空间姿态数学模型的建立, 给出了空间姿态模型正解与逆解的求解方法。Xiaoliu Yu 等^[5]分析了月球机器人在松软土壤的越障能力。Kanfeng Gu 等^[6]探究了外部干扰对探测机器人质心的影响。李博^[7]利用 Adams 从几何条件和力学条件角度分析了探测机器人越垂直障碍的能力, 并对质心位置变化对越障性能影响进行了仿真分析。张朋等^[8]通过对

变质心月球探测机器人移动性能的分析, 得到了构型参数和地形参数与运动阻力、牵引力等性能参数间的关系曲线。虽然上述学者分析了质心对越障等性能的影响, 但是都没有针对探测机器人质心的变化给出一定的运动学模型。李所军^[9]建立了悬架设计参数优化的数学模型, 利用 Adams 进行了分析优化。笔者基于上述学者的研究, 推导出了月球探测机器人在任意运动位置的质心域的计算公式, 并利用 Matlab 进行了实验验证。

1 月球探测机器人机械系统

如图 1 所示, 文中研究的月球探测机器人由车体和两侧的摇臂悬架 2 大部分组成。它在行驶过程中, 能够很好地适应地形变化, 具有较好的越障性能和机动性能。悬架对称分布在车体两侧, 单侧悬架由固连在车体上的前臂和能够上下摇摆的摇臂组成。此探测机器人采用六轮独立驱动, 通过控制六轮差速实现转向。

收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-04-18

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M510424); 中央高校基金科研业务费专项基金项目(800015FH)

作者简介: 赵建伟(1979—), 男, 内蒙古人, 博士后, 硕士生导师, 从事机器人技术、智能控制、机电一体化控制研究。

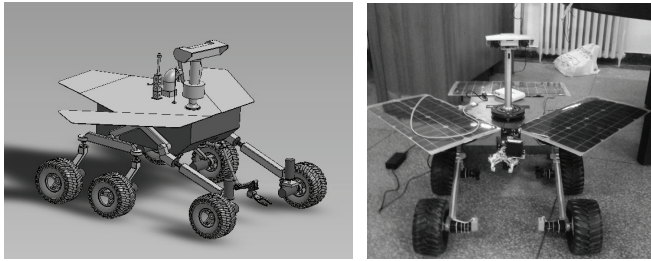


图 1 月球探测机器人 Solidworks 图及测试样机

2 质心域计算

文中所使用的六轮摇臂式月球探测机器人是一个多刚体系统，其质心域是指探测机器人质心相对系统自身坐标系变化的最大区域，用质心域半径来表示。质心域半径是指探测机器人任意位置质心到初始设计质心之间的最大距离。初始设计质心是指车处于水平路面时的质心。

2.1 建立坐标系

由于摇臂悬架为铰接的连杆机构，因此在摇臂悬架各关节处建立坐标系，如图 2 所示，建立固定在车体上的参考坐标系 O_R ，然后在右侧悬架建立固连在车体上的坐标系 D_2 以及固连在摇臂上的坐标系 P_2 ，左侧坐标系与右侧类似^[10]。右侧前轮、中轮、后轮编号分别为 2、4、6；左侧与之对应，编号分别为 1、3、5。 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 为摇臂悬架的各杆长； b 为车体半宽度； β_2 为右摇臂相对车体的转角； r 为车轮半径； α_1 、 α_2 为坐标系 D_2 的 Z 轴与前臂形成的 2 个夹角。

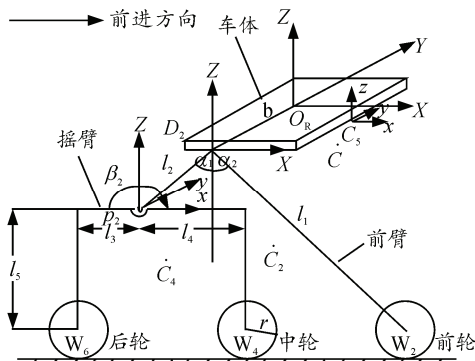


图 2 月球探测机器人结构示意图

在建立质心域模型时，为了计算方便，可以作如下假设^[9]：

- 1) 摇臂悬架、车轮以及月面无变形；
- 2) 摇臂悬架均为均质杆，设杆 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 的质量分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 ，质心在悬架的中面上；
- 3) 各车轮质量均为 m_w ，车轮质心在轮心点处；
- 4) 车体质心在宽度方向对称面上。

对探测机器人而言，由于其部件较多，为了方便分析计算，笔者对其进行分解，分解情况及其质量如表 1 所示。

表 1 探测机器人部件分解情况及质量

序号	部件	质心	质量
1	左前臂、左前轮	C_1	$M_1 = m_1 + m_2 + m_w$
2	右前臂、右前轮	C_2	
3	左摇臂、左中轮、左后轮	C_3	$M_2 = m_3 + m_4 + 2(m_w + m_5)$
4	右摇臂、右中轮、右后轮	C_4	
5	车体	C_5	M_3
6	探测机器人	C	$M = 2M_1 + 2M_2 + M_3$

2.2 各质点在坐标系 O_R 中的位置矢量

由齐次变换矩阵及质心公式的定义可得到：

质点 C_1 在坐标系 O_R 中的位置矢量为

$${}^{O_R}r_{C_1} = \begin{pmatrix} \frac{\frac{1}{2}m_1l_1 \sin \alpha_2 - \frac{1}{2}m_2l_2 \sin \alpha_1 + m_w l_1 \sin \alpha_2}{M_1} \\ b \\ -\frac{\frac{1}{2}m_1l_1 \cos \alpha_2 - \frac{1}{2}m_2l_2 \cos \alpha_1 - m_w l_1 \cos \alpha_2}{M_1} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

质点 C_2 在坐标系 O_R 中的位置矢量为

$${}^{O_R}r_{C_2} = {}^{O_R}T_{D_2} {}^{D_2}r_{C_2} = \begin{pmatrix} \frac{\frac{1}{2}m_1l_1 \sin \alpha_2 - \frac{1}{2}m_2l_2 \sin \alpha_1 + m_w l_1 \sin \alpha_2}{M_1} \\ -b \\ -\frac{\frac{1}{2}m_1l_1 \cos \alpha_2 - \frac{1}{2}m_2l_2 \cos \alpha_1 - m_w l_1 \cos \alpha_2}{M_1} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

质点 C_3 在坐标系 O_R 中的位置矢量为

$${}^{O_R}r_{C_3} = \begin{pmatrix} \frac{\left[\frac{1}{2}(m_4l_4 - m_3l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] \cos \beta_1 - (m_5 + 2m_w)l_3 \sin \beta_1 - M_2l_2 \sin \alpha_1}{M_2} \\ b \\ \left[\frac{1}{2}(m_4l_4 - m_3l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (-\sin \beta_1) - (m_5 + 2m_w)l_3 \cos \beta_1 - M_2l_2 \cos \alpha_1}{M_2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

质点 C_4 在坐标系 O_R 中的位置矢量为

$${}^{O_R}r_{C_4} = {}^{O_R}T_{D_2} {}^{D_2}T_{P_2} {}^{P_2}r_{C_4} = \begin{pmatrix} \left[\frac{1}{2}(m_4l_4 - m_3l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] \cos \beta_2 - (m_5 + 2m_w)l_3 \sin \beta_2 - M_2l_2 \sin \alpha_1}{M_2} \\ -b \\ \left[\frac{1}{2}(m_4l_4 - m_3l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (-\sin \beta_2) - (m_5 + 2m_w)l_3 \cos \beta_2 - M_2l_2 \cos \alpha_1}{M_2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

设 e_1 、 e_2 是质心 C_5 在 O_R 中的坐标分量，则质点 C_5 在坐标系 O_R 中的位置矢量为

$${}^{O_R}r_{C_5} = \begin{pmatrix} e_1 \\ 0 \\ -e_2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

再次利用质心公式，可以得到任意运动位置时探测机器人的质心位置矢量为

$$r_c = \frac{M_1({}^{O_R}r_{C_1} + {}^{O_R}r_{C_2}) + M_2({}^{O_R}r_{C_3} + {}^{O_R}r_{C_4}) + M_3 {}^{O_R}r_{C_5}}{M} = \begin{pmatrix} m_1 l_1 \sin \alpha_2 - m_2 l_2 \sin \alpha_1 + 2m_w l_1 \sin \alpha_2 + \left[\frac{1}{2}(m_4 l_4 - m_3 l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - (m_5 + 2m_w) l_5 (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) - 2M_2 l_2 \sin \alpha_1 + M_3 e_1 \\ 0 \\ -m_1 l_1 \cos \alpha_2 - m_2 l_2 \cos \alpha_1 - 2m_w l_1 \cos \alpha_2 + \left[\frac{1}{2}(m_4 l_4 - m_3 l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (-\sin \beta_1 - \sin \beta_2) - (m_5 + 2m_w) l_5 (\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - 2M_2 l_2 \cos \alpha_1 - M_3 e_2 \\ M \end{pmatrix} \quad (6)$$

取 β_1 、 β_2 为 0，代入式 (6)，可得探测机器人初始质心位置矢量为

$$r_c = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} m_1 l_1 \sin \alpha_2 - m_2 l_2 \sin \alpha_1 + 2m_w l_1 \sin \alpha_2 + (m_4 l_4 - m_3 l_3) + 2(m_5 + m_w)(l_4 - l_3) - 2M_2 l_2 \sin \alpha_1 + M_3 e_1 \\ 0 \\ -m_1 l_1 \cos \alpha_2 - m_2 l_2 \cos \alpha_1 - 2m_w l_1 \cos \alpha_2 - 2(m_5 + 2m_w) l_5 - 2M_2 l_2 \cos \alpha_1 - M_3 e_2 \\ M \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.3 探测机器人质心域

由式 (6) 可以看出：由于探测机器人结构沿车体坐标系所在的 $X_R O_R Z_R$ 平面对称，所以探测机器人质心的 Y_C 坐标为 0。由此可见，探测机器人在行进过程中，其质心始终在左右对称平面内变换，因此探测机器人的质心域为一平面区域。令

$$\Delta X = m_1 l_1 \sin \alpha_2 - m_2 l_2 \sin \alpha_1 + 2m_w l_1 \sin \alpha_2 + \left[\frac{1}{2}(m_4 l_4 - m_3 l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - (m_5 + 2m_w) l_5 (\sin \beta_1 + \sin \beta_2) - 2M_2 l_2 \sin \alpha_1 + M_3 e_1 \quad (8)$$

$$\Delta Z = -m_1 l_1 \cos \alpha_2 - m_2 l_2 \cos \alpha_1 - 2m_w l_1 \cos \alpha_2 + \left[\frac{1}{2}(m_4 l_4 - m_3 l_3) + (m_5 + m_w)(l_4 - l_3) \right] (-\sin \beta_1 - \sin \beta_2) - (m_5 + 2m_w) l_5 (\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - 2M_2 l_2 \cos \alpha_1 - M_3 e_2 \quad (9)$$

得探测机器人质心域半径为

$$R(\beta_1, \beta_2) = \frac{1}{M} \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (10)$$

3 探测机器人实体分析

月球探测机器人的参数： $l_1=0.480$ m， $l_2=0.130$ m， $l_3=0.125$ m， $l_4=0.180$ m， $l_5=0.145$ m， $m_1=0.39$ kg， $m_2=0.11$ kg， $m_3=0.10$ kg， $m_4=0.14$ kg， $m_5=0.12$ kg， $m_w=0.30$ kg， $M_3=10$ kg， $\alpha_1=\alpha_2=50^\circ$ ， $e_1=0.030$ m， $e_2=0.040$ m。

将以上数据带入式 (7) 中，得出探测机器人在

月球水平面上的初始质心为 $r_c = \begin{pmatrix} 0.0360 \\ 0 \\ -0.0802 \\ 1 \end{pmatrix}$ ，即初始

质心在坐标系 O_R 中的坐标为 $x_0=0.0360$ m， $z_0=-0.0802$ m，初始质心矢径的模 $r_c=0.0879$ m。

将探测机器人参数带入式 (6) 中，得出探测机器人在任意运动位置时的质心为

$$r_c = \begin{pmatrix} 0.0318 + 0.0022(\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - 0.0076(\sin \beta_1 + \sin \beta_2) \\ 0 \\ -0.0651 - 0.0076(\cos \beta_1 + \cos \beta_2) - 0.0022(\sin \beta_1 + \sin \beta_2) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

由摇臂悬架的几何关系能够得到 β_1 和 β_2 的取值范围： $-0.233\pi \leq \beta_1 \leq 0.154\pi$ ， $-0.233\pi \leq \beta_2 \leq 0.154\pi$ 。当探测机器人在任意运动位置时，由 Matlab 绘制出探测机器人质心矢量的模 R 关于 β_1 、 β_2 的变化曲线如图 3。

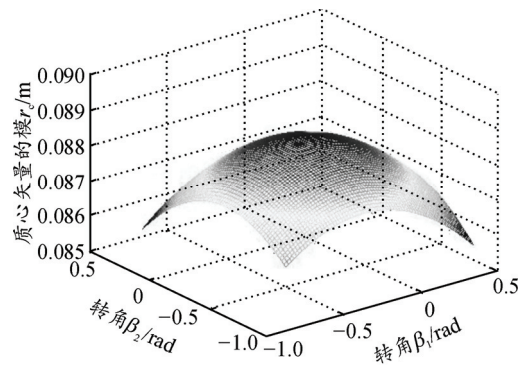


图 3 R 关于 β_1 、 β_2 的变化曲线

由图 3 知：当 β_1 或者 β_2 逐渐增大时， R 先增大后减小。

由式 (11) 可知：该探测机器人的质心矢量模 R 是关于 β_1 和 β_2 的函数，因此可以求得 R 的最大值，即求 $-R$ 的最小值。

设计变量 $x=(x_1 \ x_2)^T=(\beta_1 \ \beta_2)^T$ 。

目标函数 $f(x)=-R$ 。

约束条件：

$$\begin{cases} g_1(x) = x_1 - 0.154\pi \leq 0 \\ g_2(x) = -0.233\pi - x_1 \leq 0 \\ g_3(x) = x_2 - 0.154\pi \leq 0 \\ g_4(x) = -0.233\pi - x_2 \leq 0 \end{cases}$$

因此, 优化数学模型如下式:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{s.t. } g_i \leq 0 \quad (i=1,2,3,4) \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)属于不等式约束的线性优化问题, 可以用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数求解。求得的设计变量最优解为 $x=(-0.172\ 6 \quad -0.172\ 6)^T$, 这时探测机器人的质心矢量模最大值 $R=0.088\ 3\ \text{m}$ 。

4 探测机器人实体优化设计

由上文所知, 探测机器人在行进过程中, 其质心始终在左右对称平面内变换, 质心域为一平面区域。当探测机器人在崎岖月面上行驶时, 质心越低, 车的移动平稳性能越好, 车体抗干扰性能越强。因此, 优化探测机器人摇臂尺寸, 以此减小质心域半径、降低质心位置, 变得尤为重要。

由式(6)和式(9)可得, 探测机器人质心越低, 即 $|\Delta Z|/M$ 值越大。由上文可知, $-0.233\pi \leq \beta_1 \leq 0.154\pi$, $-0.233\pi \leq \beta_2 \leq 0.154\pi$ 。设 l_3 、 l_4 的范围分别为 $0.10\ \text{cm} \leq l_3 \leq 0.20\ \text{cm}$, $0.10\ \text{cm} \leq l_4 \leq 0.20\ \text{cm}$, $l_3+l_4=0.30\ \text{cm}$ 。

设计变量 $x=(x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4)^T=(\beta_1 \quad \beta_2 \quad l_3 \quad l_4)^T$

$$\text{目标函数} \begin{cases} f_1(x) = R \\ f_2(x) = \frac{-|\Delta Z|}{M} \end{cases}$$

约束条件:

$$\begin{cases} g_1(x) = x_1 - 0.154\pi \leq 0 \\ g_2(x) = -0.233\pi - x_1 \leq 0 \\ g_3(x) = x_2 - 0.154\pi \leq 0 \\ g_4(x) = -0.233\pi - x_2 \leq 0 \\ g_5(x) = x_3 - 0.20 \leq 0 \\ g_6(x) = -x_3 + 0.10 \leq 0 \\ g_7(x) = x_4 - 0.20 \leq 0 \\ g_8(x) = -x_4 + 0.10 \leq 0 \\ g_9(x) = x_3 + x_4 - 0.30 \leq 0 \\ g_{10}(x) = -x_3 - x_4 + 0.30 \leq 0 \end{cases}$$

因此, 优化数学模型如下式

$$\begin{aligned} & \min f_1(x), f_2(x) \\ & \text{s.t. } g_i \leq 0 \quad (i=1,2,\dots,10) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)属于一个多目标优化问题, 可以用 Matlab 优化工具箱中的 fgoalattain 函数求解。求得的最优值为 $x=(0.483\ 8 \quad 0.483\ 8 \quad 0.200\ 0 \quad 0.100\ 0)^T$,

$fval=(0.076\ 9 \quad -0.074\ 8)$, 即当 $\beta_1=\beta_2=0.483\ 8\ \text{rad}$, $l_3=0.20\ \text{m}$, $l_4=0.10\ \text{m}$ 时, 得探测机器人质心域半径 $R=0.076\ 9\ \text{m}$, 质心在坐标系 O_R 中的 Z 轴坐标为 $-0.074\ 8\ \text{m}$ 。优化结果表明: 当 l_3+l_4 为定值且 $l_3:l_4=2:1$ 时, 探测机器人质心域半径最小, 同时质心位置最低, 车体抗干扰性能最强。

5 结论

1) 笔者给出了月球探测机器人在任意运动位置的质心域的计算公式。

2) 探测机器人在行进过程中, 其质心始终在左右对称平面内变换, 探测机器人的质心域为一平面区域。

3) 当两侧摇臂转角逐渐增大时, 质心矢量的模先增大后减小。

4) 当 l_3+l_4 为定值且 $l_3:l_4=2:1$ 时, 探测机器人车体抗干扰性能最强。

参考文献:

- [1] Siegwart R, Lamon P, Estier T, et al. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 40(2-3): 151-162.
- [2] 董玉红, 邓宗全, 高海波. 低重力补偿下六轮独立驱动月球车的运动分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(1): 67-72.
- [3] 宋春霞. 基于虚拟样机的月球车移动性能仿真分析研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2005: 9-17.
- [4] 周开波, 王旭永, 罗小桃, 等. 摇臂式六轮探测机器人空间姿态建模与求解[J]. *上海交通大学报*, 2013, 47(7): 1093-1098.
- [5] Yu Xiaoliu, Wang Yongming, Wang Meiling, et al. Obstacle-Climbing Capability Analysis of Six-Wheeled Rocker-Bogie Lunar Rover on Loose Soil[C]//*Intelligent Robotics and Applications. Proceedings Second International Conference*, Berlin: Springer Verlag, 2009: 1183-1189.
- [6] Gu Kanfeng, Wang Hongguang, Zhao Mingyang. The analyse of the influence of external disturbance on the motion of a six-wheeled lunar rover[C]//*Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, New Jersey: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 2007: 393-398.
- [7] 李博. 六轮摇臂式探测机器人单驱动可折展悬架设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 38-50.
- [8] 张朋, 邓宗全, 胡明, 等. 基于地面力学的变质心月球探测机器人移动性能[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2009, 39(6): 1573-1578.
- [9] 李所军. 月球探测机器人摇臂悬架设计参数优化与折展实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 22-26.
- [10] 王佐伟, 梁斌, 吴宏鑫. 六轮月球探测车运动学建模与分析[J]. *宇航学报*, 2003, 24(5): 456-462.