

连续切换轮及其移动机器人的自锁特性

周卫华, 王 班, 郭吉丰

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 介绍了连续切换轮及其移动机器人的自锁特性. 首先, 分析了连续切换轮的结构. 单独轮子在锁死情况下的摩擦主要分为轮子径向方向的滑动摩擦以及轴向方向的滚动摩擦、轴承摩擦等, 设计了实验来测量这些摩擦力的大小. 然后, 基于测得的摩擦力, 介绍了连续切换轮的自锁特性, 实验可得在白纸和毛毯上分别有 $0 \sim 15^\circ$ 和 $0 \sim 18^\circ$ 的自锁区. 最后, 建立了移动机器人在斜面上自锁时的受力数学模型, 并设计了车体在不同介质(白纸、毛毯)斜面上的自锁特性实验. 实验结果表明: 当车体坐标系与斜面坐标系成 45° 时, 自锁角度最小, 在白纸和毛毯上分别为 19.7° 和 16.4° ; 当车体坐标系与斜面坐标系成 0° 时, 自锁角度最大, 在白纸和毛毯上分别为 30.3° 和 25.5° .

关键词: 摩擦力模型; 自锁特性; 移动机器人

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-04-0449-07

Self-lock Characteristics of the Continuous Alternate Wheel and the Mobile Robot

ZHOU Weihua, WANG Ban, GUO Jifeng

(College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Self-lock characteristics of the continuous alternate wheel and the mobile robot are described. The structure of the continuous alternate wheel is analyzed firstly. The friction of a locked wheel can be divided into sliding friction in radial direction as well as rolling friction and bearing friction in axial direction, which are measured by experiment. Then, self-lock characteristics of the continuous alternate wheel are introduced based on the frictions measured above. The self-lock areas of the wheel on paper and on carpet are $0 \sim 15^\circ$ and $0 \sim 18^\circ$ by experiments. At last, a mathematical force model of a self-locked robot on a slope is developed, and some experiments about the robot self-lock characteristics on the slope of different materials, i.e. paper and carpet, are carried out. The experiment results indicate that the smallest self-lock angles of the robot on paper and on carpet are 19.7° and 16.4° respectively when the angle between the robot coordinate and slope coordinate is 45° . Meanwhile, the biggest self-lock angles of the robot on paper and on carpet are 30.3° and 25.5° respectively when the angle between the robot coordinate and slope coordinate is 0.

Keywords: friction model; self-lock characteristic; mobile robot

1 引言 (Introduction)

基于全向轮的移动机器人具有结构简单、易于实现全向运动的特点. 全向轮按照辊子轴线与轮毂轴线所成的角度主要分为 Mecanum 轮与连续切换轮.

全向轮移动机器人的运动有其特殊性, 由于全向轮具有 2 个自由度, 单独一个轮子时, 即使轮子锁住不动, 由于辊子可滚动, 仍然可以产生运动. 由全向轮构成的移动机器人也有类似的问题, 故需要研究全向轮及其移动机器人的自锁特性. 这是研究全向轮移动机器人运动特性的基础工作.

近年来, 国内外对基于全向轮的移动机器人的

运动特性等展开研究, 提出了一些新的结构. 王卫华等提出了一种轮子打滑的实验校核方法^[1]. Mori 等设计了一种新型的轮子驱动结构来避免打滑, 包含驱动和转弯部分^[2]. Nagatani 给出一种考虑车轮打滑问题的融合测程与可视化位姿的计算算法^[3]. Gracia 等利用对机器人动力学逐次近似的方法推导考虑车轮打滑的运动学模型^[4]. Williams 等对图 1(a) 所示的单排非连续切换轮的摩擦问题进行了讨论^[5], 简单分析了车体在斜面上自锁时的受力情况. 这些研究多从移动机器人的整体性能方面考虑运动性能, 没有从全向轮结构着眼分析打滑的原因, 也没有分析全向轮几种典型的摩擦特征.

本文则针对连续切换轮(图 1(b)所示),探讨连续切换轮及其移动机器人的自锁特性.

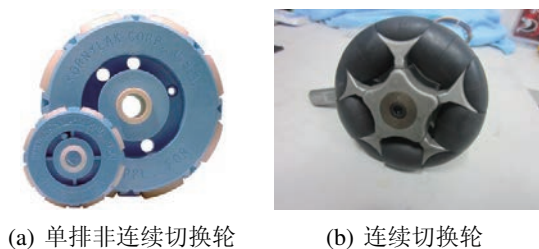


图 1 切换轮
Fig.1 Alternate wheel

2 连续切换轮的自锁特性 (Self-lock characteristic of the continuous alternate wheel)

2.1 连续切换轮的结构

本文采用的连续切换轮采用大小辊子嵌套的方式,结构如图 2 所示^[6].大小辊子具有公共的切面方向,这样保证了轮毂滚动时与地面的接触高度不变.轮缘采用大小辊子间隔分布,小辊子嵌套在大辊子中,大小辊子的轴线是全向轮上的弦.大辊子两端是个内锥面,让出空间给小辊子轴,通过 Y 型支架实现大小辊子的支撑,Y 型支架两端既有安装小辊子的轴孔,也有安装大辊子的轴伸.Y 型支架的中间安装小辊子,同时在两个 Y 型支架之间安装大辊子,大小辊子通过滚动轴承安装在轴孔中间,交替分布在轮子整个轮缘上.

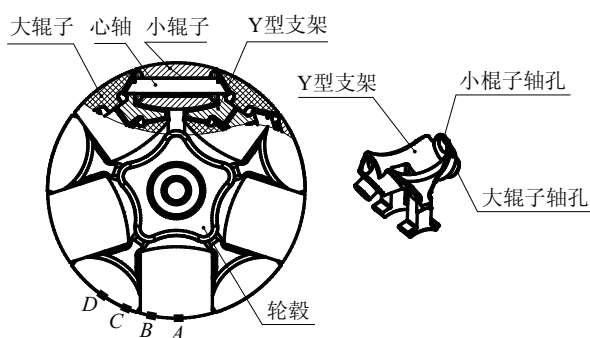


图 2 连续切换全向轮的结构图
Fig.2 Structure of the continuous alternate wheel

2.2 连续切换轮的摩擦类型

由轮子结构可知,在轮子锁死的情况下,此全向轮运动时的摩擦主要分为沿轮子方向的滑动摩擦以及辊子回转的滚动摩擦.滑动摩擦主要是辊子表面的橡胶与地面的滑动产生的,摩擦系数设为 μ_w .滚动摩擦由两部分组成,一是辊子表面与地面的摩擦;二是辊子轴与轴承之间的摩擦,这种摩擦又可分为径向摩擦和轴向摩擦,这与辊子与地面接触时的受力情况有关,移动机器人运动时,由于辊子轴

绝大部分时间在绕全向轮中心旋转,与地面平行的概率很小,因此绝大部分时间内辊子是有轴向力和轴向摩擦的.

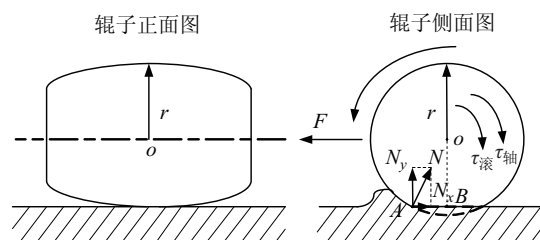


图 3 辊子在平面上的受力分析
Fig.3 Force analysis on the roller on a plane

图 3 是辊子在平面上做纯滚动时的受力图, o 点表示辊子的中心. F 表示辊子向前的牵引力, N 表示地面的支持力, r 表示辊子的半径.

当辊子滚动时,辊子后面的路面因形变略低于前方,辊子前面的支承面形成凸起,形变不再对称,支承面对辊子作用力 N 的作用点向前移动,形成阻碍辊子滚动的力矩,称为滚动摩擦力偶矩,设为 $\tau_{滚}$,如图 3 所示. $\tau_{轴}$ 表示辊子的轴与轴承之间的径向摩擦力矩,以 B 为支撑点,可得力矩平衡方程为

$$F \cdot |oB| = \tau_{滚} + \tau_{轴} = N_y \cdot \delta \quad (1)$$

式 (1) 中,比例系数 δ 为滚动摩擦系数,它具有长度的量纲.由于实际应用中辊子的变形量很小,故 $|OB| \approx r$, $N_y \approx N$,故式 (1) 可简化为

$$F \cdot r = \tau_{滚} + \tau_{轴} = N \cdot \delta \quad (2)$$

根据一般方法^[7],可取滚动阻力系数 μ_T 为

$$\mu_T = \delta / r \quad (3)$$

由于辊子与地面的滚动摩擦以及辊子轴与轴承间的滚动摩擦总是同时存在的,故 μ_T 表示它们的等效滚动阻力系数.由式 (2)、(3) 可得

$$\mu_T = F / N \quad (4)$$

2.3 两类摩擦的摩擦系数测量

计算摩擦系数最简单的实验方式就是测量放在一个斜面上的物体开始滑动时斜面的倾斜角,此方法在实际应用中是可行的.该角度称为摩擦角^[8].

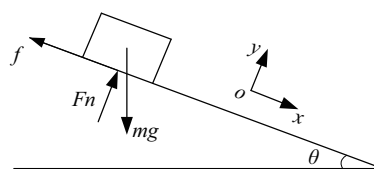


图 4 斜面上的物体受力分析图
Fig.4 Force analysis on the object on a slope

如图 4 所示, 在临界状态下, 力的平衡为

$$mg \sin \theta = mg \mu \cos \theta \tag{5}$$

可得

$$\mu = \tan \theta \tag{6}$$

这种方法常用于测量滑动摩擦系数, 根据式 (4), 由于轮毂与辊子是通过轴承连接的, 轮子重力的分力下滑力通过轴承作用于辊子, 故辊子的滚动阻力系数 μ_T 也可以用这种方法测量.

由于单个轮子很难安装固定, 为了测量单个轮子在锁死情况下的滑动摩擦系数 μ_W 和滚动阻力系数 μ_T , 让 4 个轮子都朝着同一个方向运动, 采用如图 5 所示的方案, X_0OY_0 为固定在斜面上的坐标系, 其中 Y_0 平行于斜面向上, X_0 垂直于斜面, 与斜面的底边平行. X_MOY_M 为固定于车体上的坐标系, 两个坐标系之间的夹角为 ϕ . 4 个轮均匀分布在车体四周, 组成一个正方形.

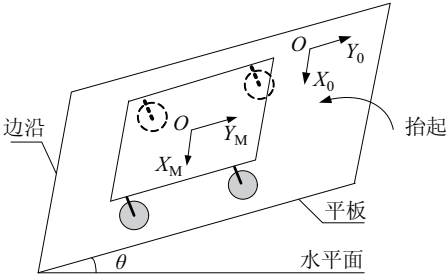


图 5 摩擦系数测量方案
Fig.5 Program of friction coefficient measurement

把车体放在斜面上, 平板上表面采用白纸和毛毯两种介质材料与全向轮接触, 轮子的轴和平板的边沿平行, 此时车体坐标系与斜面坐标系的夹角 ϕ 为 0, 与图 5 所示的状态一样. 同时, 考虑全向轮大小辊子的直径不同, 接触效果可能不同, 采用图 2 所示 A,B,C 和 D 四个不同的接触点, A,B,C 和 D 分别表示大辊子的轮缘中心点、大辊子的轮缘端点、小辊子的轮缘端点和小辊子的轮缘中心点, 首先让 4 个轮子的 A 点接触地面. 缓慢地抬起平板, 当车体开始运动时, 记下斜面的倾斜角度 θ . 为了减小测量误差, 重复多次实验, 车体开始运动时斜面的倾斜角度为 31.8° , 计算可得 μ_W 的值为 0.62. 然后, 让轮子的 B,C,D 点分别接触地面, 测量可得 μ_W 的值都为 0.62, 可见由于滑动摩擦力的大小只和接触物体的材料有关^[8], 所以大小辊子中间以及边沿测得的滑动摩擦系数的大小都是相同的. 同理, 可测得在毛毯上车体开始运动时斜面的倾斜角度为 26.6° , μ_W 为 0.50.

为了测量轮子的滚动摩擦系数, 旋转车体 90° , 此时车体坐标系与斜面坐标系的夹角 ϕ 为 90° , 轮子的轴垂直于平板的边沿, 此时滚动摩擦由两部分组成: 辊子与地面之间的摩擦以及辊子轴与轴承之间的径向摩擦. 缓慢地抬起平板, 当车体开始运动时, 记下斜面的倾斜角度, 可测得辊子的滚动阻力系数 μ_T . 由于轮子是大小辊子交替排列的, 当轮子 A,B,C,D 四点分别接触地面时, 测得 μ_T 的值并不相同, 如表 1 所示.

表 1 不同接触点的 μ_T

Tab.1 μ_T at different contact points				
	μ_{TA}	μ_{TB}	μ_{TC}	μ_{TD}
白纸	0.11	0.13	0.14	0.09
毛毯	0.12	0.15	0.15	0.11

从表 1 的实验结果可知, 由于移动机器人在运动过程中, 其全向轮的接触点不断变化, 在不同点接触时, 其滚动摩擦系数是不同的, 是在一定范围内变化的. 还可预见, 滚动摩擦系数与接触方向有关. 比较各点的滚动摩擦系数, 显见:

(1) μ_T 的值在毛毯上比在白纸上要大, 这是由于毛毯表面要比白纸表面粗糙和柔软 (有一定厚度), 接触变形大造成的.

(2) A 点的阻力系数要比 D 点大, 这是由于滚动摩擦的大小与接触面上的黏着区域有关^[8], 大辊子中心接触时的黏着区域大于小辊子的黏着区域, 所以 μ_T 的值在 A 点大于在 D 点.

(3) 辊子两端的阻力系数大于辊子中心的阻力系数. 一是因为辊子两端轴径减小, 而径向力产生的摩擦力矩基本不变; 二是 B,C 两点接触时, 辊子不与水平面平行, 因此产生了轴向力, 而轴向力产生了附加摩擦力矩, 使得滚动摩擦增加.

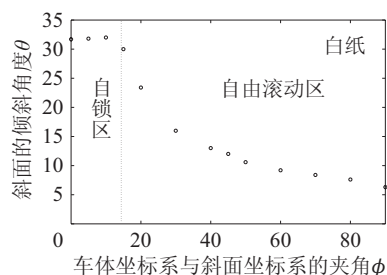
考虑全向轮各接触点的滚动摩擦系数不同, 为后面的机器人整体实验方便起见, 全向轮与地面的接触点都选取 A 点, 即大辊子的轮缘中心与地面接触.

2.4 切换轮的自锁特性

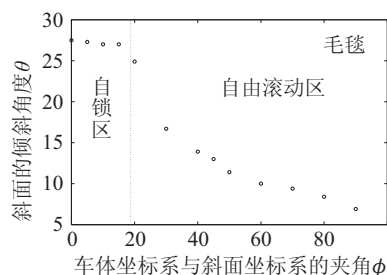
前面是两种特殊方向的摩擦情况, 其他方向的摩擦情况, 可通过改变车体坐标系与斜面坐标系之间的夹角 ϕ 测量, 测得车体发生移动时斜面的角度 θ 与 ϕ 之间的关系如图 6 所示.

实验中发现随着角度 ϕ 的增加, 机器人在斜面上会发生侧向运动, 即机器人不是沿着斜面负 Y_0 方向运动, 而是沿着辊子的滚动方向向下运动, 此时车体运动时斜面的倾斜角度急剧减小, 如图 6 所

示. 在倾斜角度急剧减小之前, 全向轮基本处于滑动摩擦, 可定义此区域为全向轮的自锁区, 其他区域则为自由滚动区. 实验中, 全向轮在白纸材料上开始发生侧向运动时 ϕ 为 15° , 在毛毯材料上时 ϕ 为 18° .



(a) 白纸上 θ 与 ϕ 的关系图



(b) 毛毯上 θ 与 ϕ 的关系图

图 6 θ 与 ϕ 的关系图

Fig.6 Relationship diagram of θ and ϕ

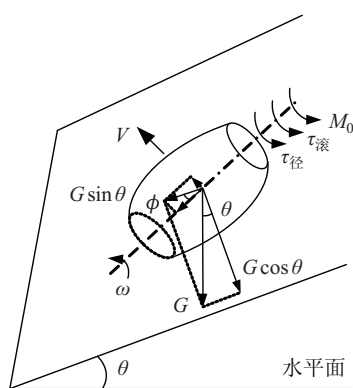


图 7 辊子受力图

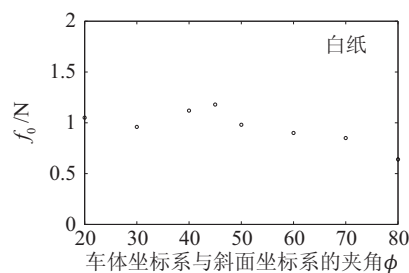
Fig.7 Force diagram of roller

图 7 中 G 表示轮子受到的重力, 由于辊子与轮毂通过轴承连接, 故辊子中心受到的下滑力也为 $G \sin \theta$. 由辊子的受力可知, 当车体发生侧向运动时, 下滑力沿辊子径向的分力矩大于等于辊子的滚动摩擦力矩, 且下滑力沿辊子轴线方向的分力小于辊子的滑动阻力. 由于辊子受到轴向力的作用, 故存在附加的摩擦力矩 M_0 , 如式 (7) 所示.

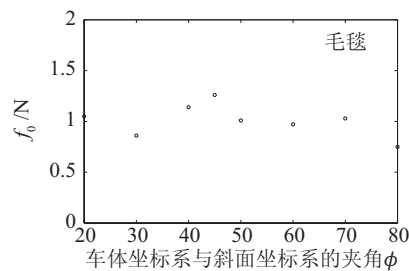
$$\begin{aligned} G \sin \theta \sin \phi \cdot r &\geq \tau_{\text{滚}} + \tau_{\text{径}} + M_0 \\ G \sin \theta \cos \phi &< G \cos \theta \cdot \mu_w \end{aligned} \quad (7)$$

设 $f_0 = M_0/r$ 表示轴向力产生的附加摩擦力.

根据式 (7)、图 6 的实验结果, 当机器人临界滚动时可得 f_0 的大小如图 8 所示.



(a) 白纸上 f_0 的值



(b) 毛毯上 f_0 的值

图 8 f_0 的值

Fig.8 Values of f_0

按照轴承摩擦学理论, f_0 的值是一个非线性的量, 上述试验结果也证明了这一结论. 由于 f_0 的值在波动, 故在后续的计算中, 把 f_0 的值看成一系列随角度 ϕ 波动的离散点. 同时, 通过实验验证, 当接触点在 B 点 (大辊子的边缘) 时 f_0 的值也符合相同的规律.

3 机器人的受力模型 (Force model of the mobile robot)

文中移动机器人由 4 轮组成, 为了消除 XY 方向运动的差异性, 4 轮均匀分布在车架四周组成一个正方形, 4 轮采用正交排布的方式, 实物图如图 9 所示.

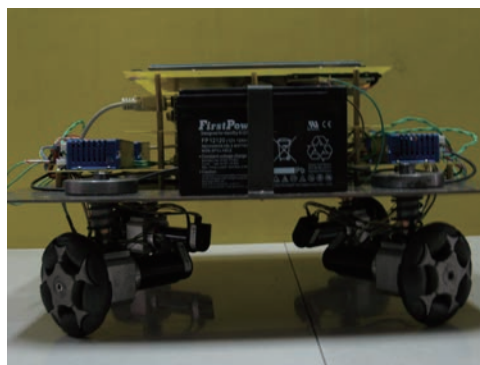


图 9 移动机器人样机

Fig.9 Prototype of the mobile robot

考虑到四轮移动机器人在斜面上受力模型的通用性, 假设机器人 4 轮排布的结构中长和宽是不相等的, 组成一个长方形, 设轮 1 的中心与 X_M 所成的角度为 ϕ , 轮 1 中心到车体中心的距离为 l , 如图 10 所示. 文中图 9 所示 4 个轮子组成一个正方形, 是长方形的一种特例.

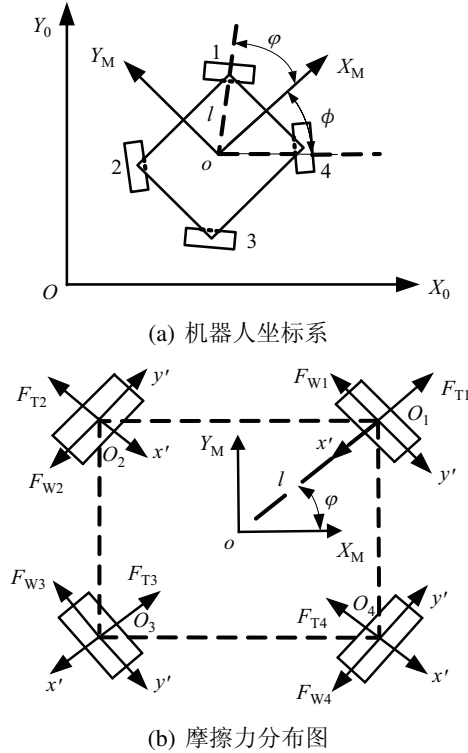


图 10 机器人车体坐标系及摩擦力分布图

Fig.10 Coordinate system of the robot and distribution diagram of friction forces

车体坐标系中的矢量可以用转换矩阵 R 转换到斜面的坐标系中, R 为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在车体坐标系中车体的受力图如图 10(b) 所示, 当缓慢地抬起平板的时候, 车体沿斜面 Y_0 的负方向运动.

图 10(b) 中轮子 x 方向上受到的摩擦力为 F_T , 包括轱辘与地面、轴承的滚动摩擦. 轮子 y 方向上受到的摩擦力为 F_W , 表示轮子受到的滑动摩擦力. 当车体静止在斜面上时, F_T 与 F_W 都小于等于最大静摩擦力. 计算 Y_M 方向上受到的合力为

$$F_{Y_M} = F_{W1} \cos \phi - F_{W2} \cos \phi + F_{W3} \cos \phi - F_{W4} \cos \phi + F_{T1} \sin \phi + F_{T2} \sin \phi + F_{T3} \sin \phi + F_{T4} \sin \phi \quad (8)$$

同理可得 X_M 受到的合力, 以及车体的合转矩 T_M 为

$$F_{X_M} = -F_{W1} \sin \phi - F_{W2} \sin \phi - F_{W3} \sin \phi - F_{W4} \sin \phi + F_{T1} \cos \phi - F_{T2} \cos \phi + F_{T3} \cos \phi - F_{T4} \cos \phi \quad (9)$$

$$T_M = -l \cdot F_{W1} - l \cdot F_{W2} + l \cdot F_{W3} + l \cdot F_{W4} \quad (10)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} F_{X_M} \\ F_{Y_M} \\ T_M \end{bmatrix} = A \cdot F \quad (11)$$

其中:

$$A = [A_1 \quad A_2]$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\sin \phi & -\sin \phi & -\sin \phi & -\sin \phi \\ \cos \phi & -\cos \phi & \cos \phi & -\cos \phi \\ -l & -l & l & l \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\cos \phi & \cos \phi & -\cos \phi \\ \sin \phi & \sin \phi & \sin \phi & \sin \phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F = [F_{W1} \quad F_{W2} \quad F_{W3} \quad F_{W4} \quad F_{T1} \quad F_{T2} \quad F_{T3} \quad F_{T4}]^T$$

转化到斜面坐标系中:

$$\begin{bmatrix} F_{X_0} \\ F_{Y_0} \\ T \end{bmatrix} = R \cdot A \cdot F \quad (12)$$

由于车体采用正交的排布方式, 1、3 轮和 2、4 轮的侧向运动会相互抵消, 同时实验中也没有发现车体发生侧向运动的情况, 故可认为车体在斜面 X_0 方向上受到的合力为 0, 以及车体不发生旋转, 可得

$$\begin{cases} F_{X_0} = 0 \\ T = 0 \end{cases} \quad (13)$$

车体在斜面 Y_0 方向上的最大力就是车体在斜面上开始运动时的下滑力, 因此求车体在不同的角度 ϕ 下在斜面上静止时斜面的最大角度 θ , 也就转化为求 F_{Y_0} 最大值的问题.

为了确定机器人 F_{Y_0} 的值, 除了式 (13) 的约束条件, 还要确定 F_W, F_T 的取值范围, 之后才能求解 F_{Y_0} 的最大值.

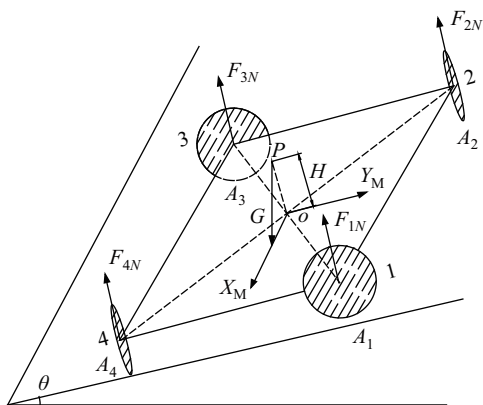


图 11 4 轮受力图

Fig.11 Force diagram of four wheels

图 11 中, P 点表示车体的重心, H 表示重心离各轮中心组成的平面的距离, A_1, A_2, A_3, A_4 表示各个轮子与斜面的接触点.

以 A_2 点为支撑点, 可得力矩平衡方程为

$$F_{4N} \cdot 2l = F_{3N} \cdot l + F_{1N} \cdot l \quad (14)$$

以 A_4 为支撑点, 可得力矩平衡方程为

$$F_{4N} \cdot 2l = F_{3N} \cdot l + F_{1N} \cdot l \quad (15)$$

式 (14)、(15) 两式相加可得:

$$F_{2N} + F_{4N} = F_{1N} + F_{3N} \quad (16)$$

故由式 (16) 可得轮 1 和轮 3 受到的重力沿垂直于斜面方向上的合力为 $0.5G \cos \theta$, 轮 2 和轮 4 受到的重力沿垂直于斜面上的合力也为 $0.5G \cos \theta$.

现分析轮 1 和轮 3 的情况, 以 A_3 作为支撑点, 在垂直于斜面的平面上的力矩平衡方程为

$$2F_{1N}l + \frac{1}{2}G \sin \theta \sin(\varphi + \phi)(H + R) = \frac{1}{2}Gl \cos \theta \quad (17)$$

R 表示轮子的半径, 由式 (17) 可得

$$F_{1N} = \frac{Gl \cos \theta - G \sin \theta \sin(\varphi + \phi)(H + R)}{4l} \quad (18)$$

以 A_1 作为支撑点, 在垂直于斜面的平面上的力矩平衡方程为

$$2F_{3N}l - \frac{1}{2}G \sin \theta \sin(\varphi + \phi)(H + R) = \frac{1}{2}Gl \cos \theta \quad (19)$$

由式 (19) 可得

$$F_{3N} = \frac{Gl \cos \theta + G \sin \theta \sin(\varphi + \phi)(H + R)}{4l} \quad (20)$$

同理可得, F_{2N}, F_{4N} 的取值如下:

$$F_{2N} = \frac{Gl \cos \theta - G \sin \theta \sin(\varphi - \phi)(H + R)}{4l} \quad (21)$$

$$F_{4N} = \frac{Gl \cos \theta + G \sin \theta \sin(\varphi - \phi)(H + R)}{4l} \quad (22)$$

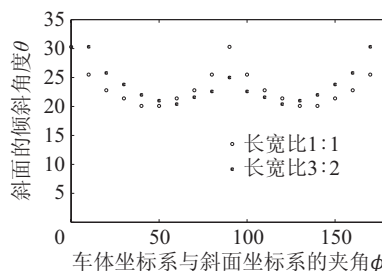
由于 F_{Wi} 的取值范围为

$$-F_{iN}\mu_W \leq F_{Wi} \leq F_{iN}\mu_W, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (23)$$

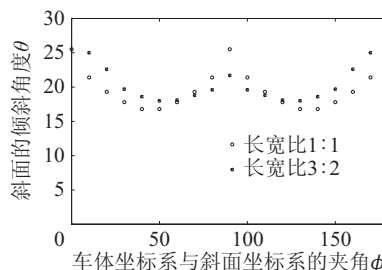
F_{Ti} 的取值范围为

$$-F_{iN}\mu_T - f_0 \leq F_{Ti} \leq F_{iN}\mu_T + f_0, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (24)$$

综上所述, 相当于已知式 (13)、(18)、(20) ~ (24), 求 F_{Y_0} 的最大值. 这是一个线性规划问题, 现在已经有多种方法求解这类问题^[9]. 文中采用 Matlab 软件计算, 分别对长宽比为 1:1 和 3:2 两种情况进行了计算, 由于 f_0 的值是一系列离散的数值, 故计算结果也是一系列离散的数值, 如图 12 所示.



(a) 两种构形的机器人在白纸上的自锁特性



(b) 两种构形的机器人在毛毯上的自锁特性

图 12 两种构形的机器人的自锁特性

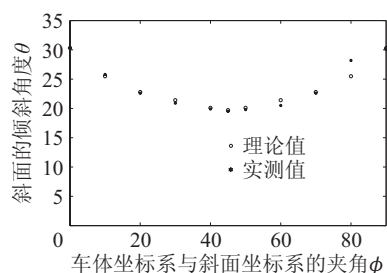
Fig.12 Self-lock characteristics of two configurations of the robot

由图 12 的结果可知, 相对于长比宽为 1:1 的构形来说, 长宽比为 3:2 的构形各向差异性大.

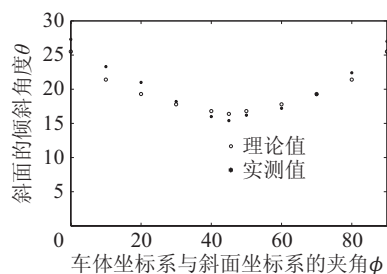
4 实验结果与分析 (Experimental results and analysis)

文中使用的图 9 中移动机器人的参数如下: 移动机器人的质量 M 为 12 kg, 轮子中心距重心的距离 l 为 26.5 cm, 车体重心离轮子中心的垂直距离 H 为 9 cm, 轮子的半径 R 为 5 cm, 由于 4 个轮子采取的是正方形的排布方式, 故 φ 等于 45° .

为了测量移动机器人在斜面上的自锁特性, 改变车体坐标系与斜面坐标系之间的夹角 ϕ , 角度从 0 到 90° 变化, 每次重复多次测量取平均值, 最后的结果如图 13 所示.



(a) 机器人在白纸上的自锁特性



(b) 机器人在毛毯上的自锁特性

图 13 机器人的自锁特性

Fig.13 Self-lock characteristics of mobile robots

由试验结果可知,理论计算值与实测值还是有一定的偏差,这主要是机械加工误差以及测量误差引起的,虽然每个结果都是多次测量取的平均值,但是误差还是存在的.同时,文中采用了摩擦力简化模型,理论计算值和实际值也存在偏差.

5 结论 (Conclusion)

文中建立了车体在斜面上的自锁特性的数学模型,并通过实验验证了该模型.平面是斜面的一个特例,文中建立的模型同样适用于车体在平面的情况,已通过实验验证.由计算及实验结果可知,由连续切换轮构成的四轮移动机器人长宽比为 1:1 时,在 ϕ 为 0 的时候自锁能力最强,在 ϕ 为 45° 的时候自锁能力最差.相对于正方形的构形,长方形构形的机器人自锁特性各向差异性大.本文工作为研究基于此类全向轮的移动机器人(如轮椅、叉车等)在斜面上的驻停性能提供了理论依据与数据支撑,对于掌握该类移动机器人的可控性、灵活性等奠定了基础.同时,为基于 Mecanum 轮的移动机器人自锁特性的研究提供了依据.

参考文献 (References)

- [1] 王卫华,熊有伦,孙荣磊.一种移动机器人轮子打滑的实验校核方法[J].机器人,2005,27(3):197-202.
Wang W H, Xiong Y L, Sun R L. An experimental calibration method for wheel-slippage in mobile robots[J]. Robot, 2005, 27(3): 197-202.
- [2] Mori Y, Nakano E, Takahashi T, et al. Mechanism and running modes of new omni-directional vehicle ODV9[J]. JSME International Journal: Series C, 1999, 42(1): 210-217.
- [3] Nagatani K, Tachibana S, Sofue M, et al. Improvement of odometry for omnidirectional vehicle using optical flow information[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 468-473.
- [4] Gracia L, Tornero J. Kinematic modeling of wheeled mobile robots with slip[J]. Advanced Robotics, 2007, 21(11): 1253-1279.
- [5] Williams II R L, Carter B E, Gallina P, et al. Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(3): 285-293.
- [6] 黄善均,林光.一种新型的万向车轮:中国,1435330[P]. 2003-08-13.
Huang S J, Lin G. A new type omnidirectional wheel: China, 1435330[P]. 2003-08-13.
- [7] 漆安慎,杜婵英.力学[M].北京:高等教育出版社,1996.
Qi A S, Du C Y. Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- [8] 瓦伦丁 L P. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M].李强, 雒建斌,译.北京:清华大学出版社,2008.
Valentin L. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. Li Q, Luo J B, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] Hwang Y S, Lee J, Hsia T C. A recursive dimension-growing method for computing robotic manipulability polytope[C]//IEEE International Conference on Robotic and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 2569-2574.

作者简介:

- 周卫华(1985-),男,博士生.研究领域:机器人技术,电机控制技术等.
- 王 班(1988-),男,硕士生.研究领域:机电一体化,机械设计.
- 郭吉丰(1964-),男,教授,博士生导师.研究领域:生产线自动化,电机及其控制,机器人技术,压电驱动,高端音频技术等.