

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.008

# 履带式爬壁机器人受力分析与稳定性仿真研究\*

熊 雕, 刘玉良\*

(浙江海洋学院 船舶与海洋工程学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:**针对机器人壁面上运动的稳定性问题,对永磁履带式爬壁机器人的结构特点和壁面受力进行了分析。为了便于受力分析,提出了载荷分布系数的新定义,建立了爬壁机器人的静力学模型、直线运动模型及转弯运动模型。利用 Matlab 软件对永磁铁吸附力、电机所需转矩、壁面倾角、载荷分布系数之间的关系,以及爬壁机器人的壁面受力进行了理论推导和数值仿真。研究结果表明,磁铁的吸附力指标主要决定于履带载荷分布系数和壁面倾角,磁铁的吸附力大小对转弯运动的灵活性有很大的影响,电机转矩要求主要决定于磁铁吸附力和壁面倾角。机器人运动模型的仿真结果与相关文献的实验结果一致,验证了运动模型的有效性,确定了影响稳定性的主要参数,给爬壁机器人的优化设计提供了依据。

**关键词:**爬壁机器人;受力分析;载荷分布系数;设计优化

中图分类号:TH16;TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0929-05

## Force analysis and stability simulation on tracked wall-climbing robot

XIONG Diao, LIU Yu-liang

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

**Abstract:** Aiming at the motion stability for the tracked wall-climbing robot, the characteristics of the robot and the force between the robot and wall were researched. In order to facilitate the force analysis, a new definition of load distribution coefficient of the track was proposed, the static model of linear motion and turning motion were established. The relationship between the magnetic adsorption force, wall inclination angle and the load distribution coefficient of the robot and the force between the robot and wall were simulated with Matlab software in the end. The results indicate that the requirements of adsorption force for single magnet mainly depends on the load distribution coefficient of the track and wall inclination angle, the magnet adsorption force has a great influence on the turning motion flexibility, the requirement of the motor torque mainly depend on magnetic adsorption force and wall inclination angle. The results of simulation are in good agreement with the experimental observation of related literature and the model of turning motion was confirmed, the main parameters that affect motion stability were determined, which provides the reference basis for the optimization design of the wall climbing robot.

**Key words:** wall-climbing robot; force analysis; load distribution coefficient; design optimization

## 0 引 言

爬壁机器人可搭载多种工具在垂直墙壁上移动,能够执行高难度任务,在石化、能源、船舶、建筑等行业应用前景广阔<sup>[1]</sup>。爬壁机器人有滑架式、多足式、轮

式、履带式等结构类型<sup>[2]</sup>,其中履带式应用较为广泛。相对于多足爬壁机器人,履带爬壁机器人的优点在于移动速度更快,但缺点是路面适应性较差。履带机器人与轮式机器人相比,速度虽慢,但可以越过更大的障碍物。总之,履带机器人的主要优势是稳定性好、适应

收稿日期:2014-12-30

基金项目:国家大学生创新资助项目(201410340007);舟山市科技计划资助项目(2013C31046)

作者简介:熊 雕(1991-),男,湖北随州人,主要从事船舶电气机器自动化方面的研究。E-mail:XD55001991@163.com

通信联系人:刘玉良,男,副教授。E-mail:2574951395@qq.com

能力强,可以搭载更多传感器执行更为复杂的任务,因而得到了广泛应用。

关于爬壁机器人的应用研究,国外已有 46 年的历史,特别是日本欧美等国的著名院所,在履带爬壁机器人基础理论和试验方面做了大量研究工作。国内方面,衣正尧等人<sup>[3]</sup>研制了船舶上用于除锈的爬壁机器人,并进行了动力学建模与分析,主要研究了影响电机转矩的因素,但理论研究结果与相关文献的实验结果相差较大,无法为爬壁机器人的优化提供理论依据。文献[4]论述了爬壁机器人的动力学建模、仿真和实验,但没有对磁铁吸附力与运动性能的关系做理论分析。目前已报道的大量文献中,很多仅进行履带爬壁机器人建模和仿真验证,分析和优化方面的文献较少。

本研究针对履带式爬壁机器人的结构特点,分析爬壁机器人壁面运动的受力情况,对载荷分布系数的概念进行修正,然后建立完整的运动模型,并对永磁铁的吸附力、电机所需转矩、壁面倾角和载荷分布系数之间的关系,进行全面分析和仿真,确定载荷分布系数和壁面倾角对所需的电机转矩和永磁铁吸附力的影响。

## 1 壁面静力学分析

下面本研究以大型油罐容器检测为应用背景,分析永磁吸附履带式爬壁机器人的受力情况如图 1 所示。

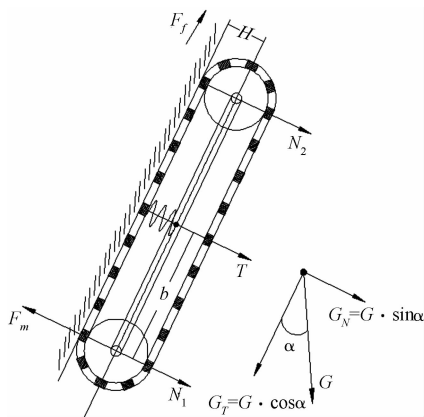


图 1 爬壁机器人壁面受力图

爬壁机器人的履带是通过铰链联接,在垂直于牵引力的方向上没有刚性,所以不能将垂直于履带平面的载荷分布到每个永磁体上,这是爬壁机器人工作稳定性不高的主要原因<sup>[5]</sup>。本研究假设机器人上有分布载荷,并把载荷分散机构等效为一个弹簧,将机器人在  $G_N$  方向上受到的力,分散到吸附在壁面的其他磁铁上,且单条履带上载荷分散机构产生的总拉力为弹簧的弹力  $T$ 。有文献定义载荷分散系数  $u_L = 1 -$

$\Delta W_{\max}/W$ ,其中: $\Delta W_{\max}$ —吸附面上各永磁铁所承受载荷的最大差值, $W$ —总载荷。很明显  $\Delta W_{\max}$  难以测量或计算,导致  $u_L$  难以计算,而  $T$  相对于  $\Delta W_{\max}$  更便于测量或计算,因此为了便于分析  $u_L$  对爬壁机器人稳定性的影响,本研究将载荷分散系数重新定义为  $u_L = 2T/G$ 。

下面研究载荷分散系数对机器人爬壁稳定性的影响。由于弹簧的变形量在机器人运动过程中保持不变,可认为由载荷分散机构产生的拉力始终为  $T$ 。为保证爬壁机器人不会从壁面掉下,作用在其上的外力应满足静力学平衡方程组。

其中,文献[6]中的方程组为:

$$2(N_1 + N_2 + 2T) - G_N = 0$$

$$2F_f - G_T = 0$$

$$2T(a - a) + 2N_2b - 2N_1b - 2F_fH = 0$$

式中: $F_f$ —单条履带受到的摩擦力,其大小与  $1/2G_T$  相等,个人认为这种定义对分析计算无任何帮助。这里笔者将  $F_f$  定义为最大静摩擦力,只要满足  $F_f \geq G_T$ ,机器人就不会沿壁面下滑,可依据此条件计算磁铁所需要的吸附力,并额外引入了载荷分布系数  $u_L$  的概念,将  $u_L$  替换  $T$ ,分析  $u_L$  对  $N_1$ 、 $N_2$  影响,为吸附力优化提供依据。

改进后方程组为:

$$N_2b - N_1b - G_TH = 0 \quad (1)$$

$$2(N_1 + N_2 + T) = G_N \quad (2)$$

由式(1,2)得到:

$$N_1 = \frac{1}{4}G_N - \frac{1}{4}u_LG - \frac{G_TH}{2b} \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}G_N - \frac{1}{4}u_LG + \frac{G_TH}{2b} \quad (4)$$

式中: $N_1$ 、 $N_2$ —机器人在垂直于履带方向上对吸附在墙壁上的最下面和最上面的电磁铁的拉力; $F_f$ —两条履带与壁面间的最大静摩擦力; $G$ —整个机器人的重力, $G_T = G\cos\alpha$ , $G_N = G\sin\alpha$ ; $b$ —支撑力  $N_1$ 、 $N_2$  相对与机器人重心的力臂; $H$ —摩擦力  $F_f$  相对于机器人重心的力臂。

要保证机器人在壁面上不向下滑动,须有:

$$F_f \geq G_T$$

其中:

$$F_f = (nF_n - G_N)u,$$

式中: $F_n$ —单个磁铁的吸附力, $n$ —永磁铁的个数, $u$ —摩擦系数。

将  $F_f = (nF_n - G_N)u$  代入到  $F_f \geq G_T$  可得到单个电磁铁所需的吸附力:

$$F_n \geq \frac{1}{n} \left( \frac{1}{u} G_T + G_N \right) \quad (5)$$

机器人上爬过程要保证机器人在壁面上不发生翻转,必须使最上面一块磁铁不被掀起,即:

$$F_n \geq N_2$$

将式(4)代入上式有:

$$F_n \geq \frac{1}{4} G_N - \frac{1}{4} u_L G + \frac{G_T H}{2b} \quad (6)$$

## 2 机器人沿壁面运动的受力分析

### 2.1 沿壁面匀速运动的受力分析

机器人如果上爬,单边履带上的电机驱动转矩应克服 $1/2$ 重力转矩和 $M_f$ <sup>[7-8]</sup>。而关于 $M_f$ 的计算,相关文献有所不同,经综合分析多篇文献,重新计算了 $M_f$ ,得到下式:

$$M_Q - M_f - M_G = 0 \quad (7)$$

$$M_G = \frac{1}{2} G_T H \quad (8)$$

式中: $M_Q$ —单侧电机经减速后的输出驱动转矩; $M_f$ —机器人履带上最下面一块电磁铁由于受力产生的阻力矩; $M_G$ — $1/2$ 重力产生的转矩; $F_1$ —履带最下面一块磁铁对壁面的压力,且 $F_1 = F_n - N_1$ 。因此有:

$$M_f = F_1 h = (F_n - N_1) h \quad (9)$$

将式(8,9)代入式(7),可得到单侧电机所需驱动转矩:

$$M_Q \geq (F_n - N_1) h + \frac{HG \cos \alpha}{2} \quad (10)$$

### 2.2 沿壁面转弯运动的受力分析

文献[9]中对转弯运动模型进行分析时,仅考虑总摩擦阻力矩 $M_Z$ 的影响,而 $M_Z$ 推导过程不明确,与文献[10]推导过程不同,在分析时也未考虑 $M_f$ 和重力对电机驱动力矩的影响,且对运动模型的仿真结果与相关文献的实验结果不同。其电机力矩方程为:

$$M_q \geq M_Z$$

履带机器人一般通过两条履带的差速实现转弯,而在实际设计时,都是通过正、反转两条履带实现机器人的转弯功能。假设机器人的重力主要分布在两侧履带上,本研究在分析转弯运动模型时,充分考虑了摩擦阻力矩 $M_Z$ 、 $M_f$ 和 $G_T$ 对电机所需驱动力矩的影响。

机器人在壁面向右转弯时,左侧履带所需力矩大于右侧履带力矩<sup>[11-14]</sup>,所以机器人转弯时履带所需的力矩方程为:

$$M_q - M_Z - M_f - \frac{1}{4} G_T L = 0 \quad (11)$$

式中: $M_q$ —履带驱动力矩; $M_Z$ —履带上每块磁铁与壁面的摩擦力合力所产生的摩擦阻力矩; $(1/4)G_T L$ —机器人左侧质量产生的力矩。其中:

$$M_q = \frac{1}{2} F_p L + \frac{1}{2} F_p L = F_p L \quad (12)$$

$$F_p = M_Q / R \quad (13)$$

合并式(12,13)得到:

$$M_q = M_Q \frac{L}{R} \quad (14)$$

履带机器人在转弯时,接触面压力不均匀分布的程度越显著,摩擦阻力反抗履带转弯的阻力越小,所以压力均匀分布时所受转弯阻力矩最大,这里的压力按均匀分布计算,则有:

$$M_Z = \frac{u(nF_n - G_N)L}{4} \quad (15)$$

联立式(9,11,14,15)可得到转弯时电机所需的驱动转矩:

$$M_Q \geq \frac{R}{L} \left[ (F_n - N_1) h + \frac{uL(nF_n - G_N)}{4} + \frac{1}{4} G_T L \right] \quad (16)$$

## 3 实验及结果分析

机器人物理参数设置参照文献[6],即 $G = 700$  N,  $u = 0.5$ ,  $H = 0.112$  m,  $b = 0.3$  m,  $L = 0.6$  m,  $R = 0.08$  m,  $n = 30$ 。

### 3.1 磁铁所需吸附力

首先以机器人在壁面不滑动为约束条件,根据式(5),通过仿真分析可得单个磁铁所需吸附力与壁面倾角的关系如图2所示。为保证机器人不滑动,壁面倾角对单个磁铁所需吸附力有很大影响,本研究对式(5)进行求导,发现壁面倾角为 $26.1^\circ$ 时所需电磁铁吸附力最大,为 $F_N = 52.17$  N;然后以机器人在壁面不翻转为约束条件,利用式(6),通过仿真分析可得单个磁铁所需吸附力与壁面倾角和载荷分布系数的关系如图3所示。

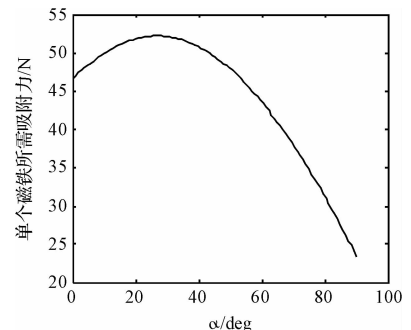


图2 单个磁铁所需吸附力与壁面倾角的关系

壁面倾角和载荷分布系数对单个磁铁所需吸附力都有很大影响,为保证机器人不翻转,单个磁铁所需吸附力随载荷分布系数  $u_L$  增大而减小,对式(6)求导计算得,机器人在  $u_L = 0, \alpha = 53.1^\circ$  时,单个磁铁所需吸附力最大,  $F_n = 218 \text{ N}$ 。在下面的仿真中,为保证机器人稳定运行,将单个磁铁的吸附力设定为  $218 \text{ N}$ 。

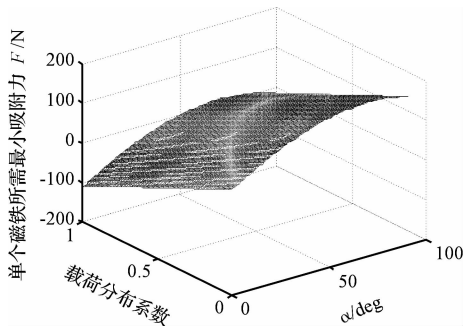


图3 保证机器人不翻转所需的单个磁铁的吸附力

### 3.2 电机所需转矩

下面设定参数  $F_n = 218 \text{ N}$ ,其余物理参数不变,根据式(10),通过仿真分析机器人直线上爬时电机所需转矩与载荷分布系数和壁面倾角的关系如图4所示。可见,直线运动时电机所需驱动转矩随  $\alpha$  角增大而减小,随  $u_L$  增大而增大;在同一  $\alpha$  的前提下,不同  $u_L$  所对应的电机所需最小驱动转矩的变化范围只有  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,因此在磁铁吸附力确定的条件下,直线上爬时电机所需驱动转矩受  $u_L$  影响很小,其大小主要是由  $\alpha$  决定,其最小所需驱动转矩为  $48 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

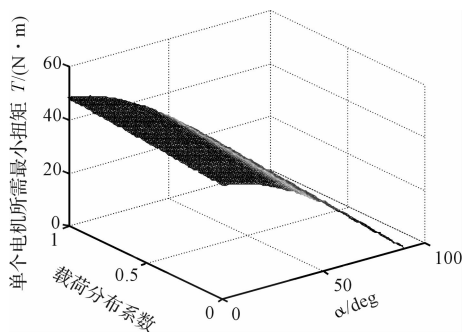


图4 上爬时电机所需转矩与  $u_L$  和  $\alpha$  的关系

本研究设定参数  $F_n = 218 \text{ N}$ ,其余物理参数不变,根据式(16),通过仿真分析零转弯半径时电机所需转矩与载荷分布系数和壁面倾角的关系如图5所示。转弯时电机所需最小驱动转矩为  $72 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,大于  $48 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,主要是因为电机还要额外克服转动摩擦阻力矩,其值

比直线上爬所需转矩要大,且其转矩也是随  $\alpha$  的增大而减小,随  $u_L$  的增大而增大,但对于不同  $u_L$  所对应的电机所需最大驱动转矩最大差值只有  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,因此在磁铁吸附力确定的条件下,转弯时电机所需驱动转矩主要受  $\alpha$  影响,  $u_L$  对其产生的影响可以忽略。

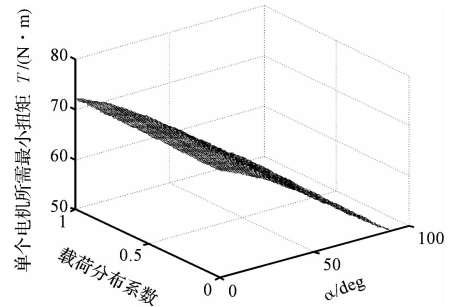


图5 转弯时电机所需转矩与  $u_L$  和  $\alpha$  的关系

由于参数过多,图4和图5都未分析磁铁吸附力对电机转矩的影响,在此本研究设定参数  $u_L = 0.5, \alpha = 30^\circ$ ,对式(10,16)进行仿真,分析磁铁吸附力对电机转矩的影响。磁铁吸附力与电机所需驱动转矩的关系如图6所示。由图6可以看出,机器人作直线运动时电机所需转矩受磁铁吸附力的影响不大,而转弯运动时电机所需转矩受磁铁吸附力的影响很大,仿真结果与文献[5]的实验结果相同。

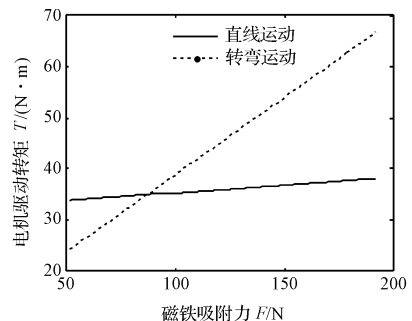


图6 磁铁吸附力与电机所需驱动转矩的关系

## 4 结束语

本研究对永磁吸附履带式爬壁机器人进行了受力分析。首先根据履带式爬壁机器人特点,重新定义了载荷分布系数,然后对爬壁机器人进行静力学分析,建立了数学模型,并根据现有爬壁机器人硬件参数进行仿真,确定了机器人在不同的壁面倾角和载荷分布系数下,单个磁铁所需要的最小吸附力和单个电机所需

(下转第937页)

### 本文引用格式:

熊 雕,刘玉良.履带式爬壁机器人受力分析与稳定性仿真研究[J].机电工程,2015,32(7):929-932,937.

XIONG Diao, LIU Yu-liang. Force analysis and stability simulation on tracked wall-climbing robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(7):929-932,937.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>