

基于能耗目标优化的多足爬墙机器人足力控制研究

魏 武 蔡钊雄 邓高燕

华南理工大学, 广州, 510640

摘要:针对多足爬墙机器人高空极限作业时需解决的能耗问题,提出了基于能耗性优化的多足爬墙机器人足力控制方法。以八足爬墙机器人为例,从机器人作业的安全性和能耗性角度描述了多足爬墙机器人的足力优化模型,实现了多足机器人的关节驱动力和足底接触力的转换,有效地减少了优化变量的数量,简化了优化的计算。通过分析多足爬墙机器人的关节驱动力约束和动力学约束,建立了机器人总电机功率与机器人运动步态及作业环境(包括攀爬角度与吸附平面的粗糙度)的关系。并综合考虑了爬墙机器人吸附安全等特殊特性,对机器人的足底接触力进行优化,提高机器人对环境变化及支撑腿数量变化的适应能力,降低关节驱动电机的能耗,实现了机器人电机总能耗最小化的目标。实验仿真结果证明了所提出的控制方法简单可行。

关键词:多足爬墙机器人;能耗;足力控制;足底接触力

中图分类号:TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.020

Research on Foot Force Control for Multi-legged Wall-climbing Robot Based on Optimal Target at Energy Consumption

Wei Wu Cai Zhaoxiong Deng Gaoyan

South China University of Technology, Guangzhou, 510640

Abstract: For the energy consumption problem of a multi-legged wall-climbing robot operating at high altitude, a foot force controlling method for multi-legged wall-climbing robot was proposed based on energy consumption optimization. Taking an eight-legged wall-climbing robot for example, a foot force optimization model of the multi-legged wall-climbing robot was described from the view of security and energy consumption while the robot was in operation, and the conversion between the joint driving force and the plantar contact force of the multi-legged robot was implemented, thus reducing the number of the optimal variables effectively and simplifying the optimization calculation. By analyzing the joint driving force constraints and dynamic constraints, a relationship among the total motor power of the robot and the robotic motive gait and the operational environment (including the climbing angle and the roughness of the adsorbed plane) was established. Considering the specificity of the safety of adsorption for the wall-climbing robot, the plantar contact force of the robot was optimized, and the ability of the robot was improved to adapt to the change of environment and the number of supporting legs. Simultaneously, the energy consumption of the joint driving motor is reduced, and the target to minimize the total consumption of the robotic motor is achieved. The experiments and simulation have proved that the proposed control method is simple and feasible.

Key words: multi-legged wall-climbing robot; energy consumption; foot force control; plantar contact force

0 引言

多足机器人是仿多足生物运动的一种特种机器人,是一种足式移动机构。常见的多足步行机器人包括四足步行机器人、六足步行机器人、八足步行机器人等。多足爬墙机器人作为一种特殊的多足步行机器人,是应用于高空极限作业的一种自动机械装置,它既具有吸附支持的特殊性,又具有运动形式的特殊性(除了“直立”行走形式外,还有“倒立”、“侧立”和“混立”等行走形式),更重要

的是还需要满足高空极限作业的安全性要求。多足爬墙机器人可在核工业、建筑、交通、石化、消防等领域完成检测、探伤、清洗、救援等作业,具有广泛的应用前景。

多足机器人足力控制一直是多足机器人领域的研究重点和难点。近年来国内外学者高度关注多足机器人的足力控制问题,并进行了大量研究。足力控制包括关节驱动力控制和足底接触控制。关节驱动力控制研究方面,具有代表性的研究有 Nahon 等^[1]提出的关节驱动力平方规划方法和 Chen 等^[2]提出的关节驱动力二次优化方法。足

底接触力控制研究方面,具有代表性的有:王鹏飞^[3]提出的机器人足底接触力虚拟悬挂模型及足底接触力补偿与阻抗控制方法;Spong 等^[4]提出的被动控制方法;Sangbae 等^[5]提出的在光滑垂直平面上的足部黏性控制方法;Sang-Ho^[6]提出的适应未知外力和粗糙地形的阻抗控制方法;Vidoni 等^[7]提出的用于解决多种吸附情况下的最小力矩分配问题的静态平衡法。

上述方法只针对关节驱动力或足底接触力进行优化,没有针对能耗目标进行足力的优化,而多足爬墙机器人的能耗问题是高空极限作业需解决的主要问题。本文提出基于能耗性优化的多足爬墙机器人足力控制方法,以八足爬墙机器人为例(四足及六足爬墙机器人类似),在兼顾安全性的前提下,先对机器人的足力优化模型进行讨论,然后再以总电机功率最小为能耗优化目标,对多足机器人的足底接触力进行优化,并给出了电机控制模型的转换方式,最后,对本文提出的优化方法进行实验仿真,证明了所述方法可行有效。

1 基于安全性与能耗目标的足力优化模型

1.1 足力优化模型的转换与简化

本文研究的八足机器人采用真空吸盘式结构,为了分析方便,以八足类爬行动物运动机构为例进行研究^[8-9]。机器人由八条腿和躯干共 9 个相对独立的模块组成。每条腿具有 6 个自由度,其中髌关节、膝关节、踝关节各有 1 个自由度,足关节处球铰与真空吸盘相连,组成 1 个万向关节,具有 3 个自由度,髌关节、膝关节和踝关节为主动驱动关节,髌关节分别与膝关节和踝关节正交(目前常用的一种方式),髌关节与机体相连接且轴线方向与机体垂直。多足爬墙机器人总体结构如图 1 所示,关节轴线方向与转动方向以及球铰的运动方向如图 1 中箭头所示。

1.1.1 关节驱动力和足底接触力的转换

为了实现关节驱动力和足底接触力的转换,本文进行下述处理:

(1)以支撑腿为研究对象,球铰中心为原点(设球铰位于吸盘上),建立特定的坐标系 Σ_{A_i} (图 1),在该坐标系内,第 i 条腿的连杆平面位于 x^*z^* 平面内,且 z^* 轴垂直于吸附平面。

(2)考虑机器人的准静态运动特性(当多足爬墙机器人处于爬行状态时,由于速度较小,所以可以忽略加速度的影响,同时重力主要集中在机体上,可以忽略关节和连杆重力的影响,此时机器

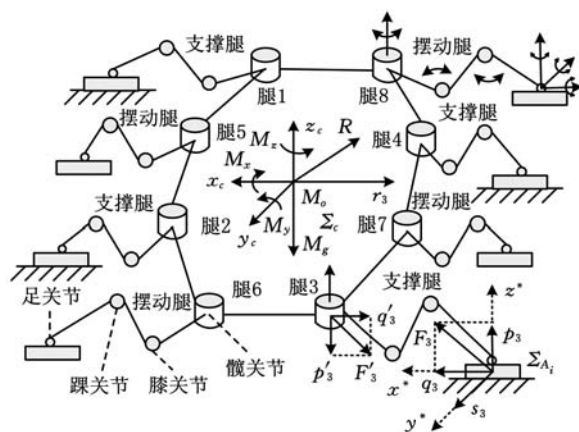


图 1 八足爬墙机器人总体结构图

人的运动可以看成是准静态运动)。

(3)机器人以一种特定步态沿直线方向爬行,髌关节在爬行过程(包括在水平面及倾斜面爬行的过程)中,转动方向既不需要主动驱动,又不被动承受外扭矩作用,因此由力矩平衡和力平衡条件有 $\tau_{ki}=0, s_i=0$,其中, τ_{ki} 为第 i 条支撑腿髌关节驱动扭矩, s_i 为第 i 条支撑腿足底接触力沿 y^* 轴方向的分力。令机体平面与吸附面保持平行,以腿的连杆平面内的力矩平衡条件可建立以下关系:

$$\tau_{qi} + \tau_{hi} = d_i p_i + l_i q_i \quad (1)$$

为了使各关节电机驱动扭矩均衡化,取 $\tau_{qi} = \tau_{hi}$, 则式(1)可化为

$$\tau_{qi} = \tau_{hi} = (d_i p_i + l_i q_i) / 2 \quad (2)$$

式中, τ_{qi}, τ_{hi} 分别为第 i 条支撑腿的膝关节和踝关节驱动扭矩; p_i, q_i 分别为第 i 条支撑腿足底接触力沿 x^*, z^* 轴方向的分力; d_i 为第 i 条支撑腿球铰到髌关节轴线的距离; l_i 为第 i 条支撑腿髌关节与球铰之间的连线在髌关节轴线方向上的投影长度。

通过上述处理完成了关节驱动力向足底接触力的转换。该转换方法实现的前提条件是机器人沿平面做直线爬行,故本文提出的方法只适用于平面环境,但是可以适应于任何角度的斜坡面,包括垂直的斜坡和倒立攀爬的平面。

转换后的模型还减少了优化变量数量:①无需对膝关节轴线和踝关节轴线平行方向的足底接触力进行优化(因为 $s_i=0$);②无需对髌关节的驱动力变量进行优化($\tau_{ki}=0$);③只需对膝关节或踝关节驱动力进行优化($\tau_{qi} = \tau_{hi}$)。

1.1.2 关节驱动力约束的转换与简化

关节驱动力约束是由电机的电流和电压受限引起的。每条腿的关节驱动力约束,需要比较膝关节和踝关节最小电流受限驱动力、最大电流受限驱动力、最小电压受限驱动力和最大电压受限驱动力来综合确定。由于关节驱动力约束只需要

考虑膝关节或踝关节驱动力约束($\tau_{ki} = 0$)，所以上述方法中每条腿的驱动约束只有 2 个关节驱动力约束(前述现有研究方法中，每条腿需要 6 个关节驱动力约束)。

由于受限驱动力的计算表达式复杂，加上需要比较的次数多，所以确定支撑腿的关节驱动力约束的计算量比较大。为此本文提出一种转换方法来减小确定支撑腿的关节驱动力约束的计算量。即通过比较膝关节与踝关节电机的最大及最小受限力矩，可有效减少确定腿的关节驱动力约束的计算量。具体方法如下：

$$\max(\tau_{\text{ankle min}}, \tau_{\text{knee min}}) \leq \tau_{\text{leg } i} \leq \min(\tau_{\text{ankle max}}, \tau_{\text{knee max}}) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得

$$\left. \begin{aligned} \max(\tau_{\text{ankle min}}, \tau_{\text{knee min}}) &\leq (d_i p_i + l_i q_i) / 2 \\ (d_i p_i + l_i q_i) / 2 &\leq \min(\tau_{\text{ankle max}}, \tau_{\text{knee max}}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中， $\tau_{\text{ankle min}}$ 、 $\tau_{\text{ankle max}}$ 、 $\tau_{\text{knee min}}$ 、 $\tau_{\text{knee max}}$ 分别为踝关节电机和膝关节电机的最小驱动力矩和最大驱动力矩。

式(4)为每条腿的关节驱动力约束，该约束由两个关于 p_i 、 q_i 的线性不等式组成。

1.1.3 动力学约束方程的转换与简化

以机体为研究对象，通过支撑腿建立机体的力和力矩平衡方程，可以建立 6 个平衡方程(力平衡方程 2 个和力矩平衡方程 4 个)，转换过程也实现了约束方程的简化，本文中的 6 个方程只有 $2n$ 个优化变量(n 为支撑腿数量)，而前述现有方法中有 $3n$ 个优化变量。

设机器人所受主矢 $\mathbf{R} = (R_x, R_y, R_z)$ 和主矩 $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$ 的外力作用，各足在机体坐标系 Σ_c 中的位置矢量 $\mathbf{r}_i = (r_{ix}, r_{iy}, r_{iz})$ (i 为腿号)，所受接触面作用反力的合力 $\mathbf{F}_i = (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz})$ 。根据力、力矩平衡关系有下列方程：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i &= m_0(\mathbf{g} + \mathbf{a}_0) + \mathbf{R} \\ \sum_{i=1}^n (\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i) &= \mathbf{M} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， m_0 为机体的质量； \mathbf{a}_0 为平动加速度； \mathbf{g} 为重力加速度矢量。

当多足爬墙机器人以静步态直线行走时，可以忽略加速度的影响，因此 $\mathbf{a}_0 = 0$ 。由 z_c 轴和 x_c 轴方向的力与力矩平衡可以简化得到下面的矩阵方程：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_z \mathbf{P}_n &= \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{A}_x \mathbf{Q}_n &= \mathbf{W}_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_n = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n]^T$$

$$\mathbf{Q}_n = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n]^T$$

$$\mathbf{W}_1 = [m_0 g \cos \alpha \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{W}_2 = [m_0 g \sin \alpha \quad 0 \quad 0]^T$$

式中， x_n 、 y_n 、 z_n 分别为各腿髌关节在坐标系 Σ_c 中的坐标； α 为吸附面法线与重力加速度方向的夹角。

1.1.4 吸盘安全性约束转换与简化

以吸盘为研究对象，建立关于吸盘的力平衡方程^[10]。支撑腿足力的反力(实际上是球铰对吸盘的作用力)沿着吸盘吸附面坐标系方向分解合成，得到沿着吸盘吸附面的切向力和法向力，分别为 q_i 和 p_i ，以吸附力方向为正，由吸盘受力关系可以推导出摩擦力约束条件为

$$|q_i| \leq \mu_{\text{max}i}(\omega_i - p_i) \quad (7)$$

式中， ω_i 为第 i 条支撑腿真空吸盘压差所产生的对吸盘的垂直压力(简称吸附力，已知)； $\mu_{\text{max}i}$ 为最大静摩擦因数(已知)。

法向安全约束确保支撑腿吸盘有足够的吸附力，使吸盘不脱离吸附面。由吸盘受力关系可以推导出法向安全约束条件为

$$\omega_i - p_i \geq 0 \quad (8)$$

本文建立的摩擦力约束为线性不等式约束，优化问题的求解计算量大大减小了。

1.2 基于能耗目标的足力优化

机器人在实际的工作环境中，需要连续长时间运行，其主要的能量均消耗在各个关节的电机之上，其行走方式将成为影响机器人运行能耗的主要因素。为了合理地控制机器人的机械能耗、提高机器人供电电源的续航能力，需要对机器人的能耗目标进行优化。

能耗目标采用使所有关节电机功率总和最小为目标函数，则能耗目标函数可表示如下：

$$\min P = \min \sum_i (a_i \tau_i^2 + b_i \tau_i + c_i) \quad (9)$$

$$a_i = \frac{R_i}{\zeta_i^2 K_{\tau i}^2}$$

$$b_i = \frac{2R_i}{\zeta_i^2 K_{\tau i}^2} (f_i + \xi_i \zeta_i \dot{\theta}_i + J_i \zeta_i \ddot{\theta}_i) + \frac{K_B \dot{\theta}_i}{K_{\tau i}}$$

$$c_i = \frac{R_i}{\zeta_i^2 K_{\tau i}^2} (f_i + \xi_i \zeta_i \dot{\theta}_i + J_i \zeta_i \ddot{\theta}_i)^2 +$$

$$\frac{K_B \zeta_i \dot{\theta}_i}{K_{\tau i}} (f_i + \xi_i \zeta_i \dot{\theta}_i + J_i \zeta_i \ddot{\theta}_i)$$

式中，下标 i 表示机器人的第 i 条腿的膝关节或踝关节驱动电机的编号； K_{τ} 为扭矩参数； K_B 为驱动电机的反电动势常数； R 为扭矩阻抗； ξ 为阻尼； f 为电机和齿轮的综合静摩擦力； ζ 为齿轮减速比； τ_i 、 $\dot{\theta}_i$ 、 $\ddot{\theta}_i$ 分别为第 i 条腿膝关节或踝关节齿轮输出的驱动力矩、速度和加速度； J 为关节驱动电机的转动惯量。

将式(2)代入式(9)，以所有支撑腿关节电机

功率总和最小为优化目标, 优化目标函数可表示为

$$\min P = \min \sum_i^n \left[\frac{1}{4} a_i (d_i p_i + l_i q_i)^2 + \frac{1}{2} b_i (d_i p_i + l_i q_i) + c_i \right] \quad (10)$$

上述优化目标函数具有以下特点: ① 优化目标函数是关于足底接触力 p_i 、 q_i 的二次函数, 保障了优化模型解的连续性; ② 可以实现足底接触力的优化, 结合式(2) 可计算出所有关节的驱动力, 因此可同步实现关节驱动力优化。

2 足力控制模型与电流控制模型的转换

建立基于足底接触力和驱动力的足力控制模型, 实现对足力和足底接触力的同步控制。支撑腿通过髌关节在机体上的作用力可分解成大小和方向与 p_i 、 q_i 相同的两个力, p_i 、 q_i 作用力的方向分别为髌关节轴线方向和法线方向, 可在髌关节上安装传感器测量 p_i 和 q_i 。根据电机电流与关节力矩关系式, 建立膝关节驱动力控制模型:

(1) 输出测量值。通过 p_i 和 q_i 测量值可以计算出 τ_{hi} 的输出值。

(2) 输入参考值。通过优化模型可以求解出 p_i 和 q_i , 代入 $\tau_{hi} = (d_i p_i + l_i q_i) / 2$ 可计算出 τ_{hi} , 作为控制系统的输入参考值。

(3) 控制模型。采用电机电流控制模型来实现关节驱动力控制, 其模型为

$$I_{IT} = \frac{1}{K_r} \left(\frac{\tau_{hi}}{\xi} + f + \xi \dot{\theta}_i \right) \quad (11)$$

利用式(11) 所得电流控制变量 I_{IT} , 采用三段回路 PID 控制器就可以获得非常好的电机关节驱动力控制效果。其控制框图如图 2 所示, 实现方法如下: ① 以 I_{IT} 为控制变量, 电机测量得到的电流、速度和位置作为反馈量, 四者的差值作为电流环回路 PID 控制器的输入量; ② 以电流环 PID 控制器的输出量为速度环的输入量; ③ 以速度环 PID 控制器的输出量为位置环的输入量, 位置环的输出量即为满足关节驱动力的实际位置量。

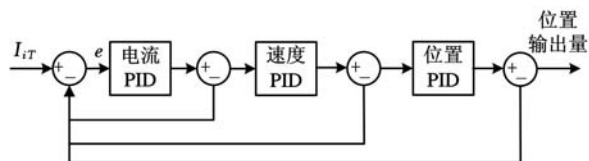


图 2 三段回路 PID 控制规律

3 实验与仿真

为了研究八足爬墙机器人在不同的环境下攀爬所需的最小功率以及所对应的控制规律, 使用

MATLAB 对攀爬不同倾斜平面时机器人的足力控制进行优化。将八足机器人的八条腿分为两组, 腿 1、2、3、4 为一组, 腿 5、6、7、8 为另一组。当其中一组腿的吸盘吸附在攀爬面上时, 该组的腿为支撑腿, 另一组的吸盘松开, 可自由摆动, 该组的腿为摆动腿。两组交替摆动运行, 完成机器人沿平面直线爬行的步态, 如图 3 所示。图 3 中, α 为吸附平面的倾斜角度, 显然, 该角即为吸附面法线与重力加速度方向的夹角。

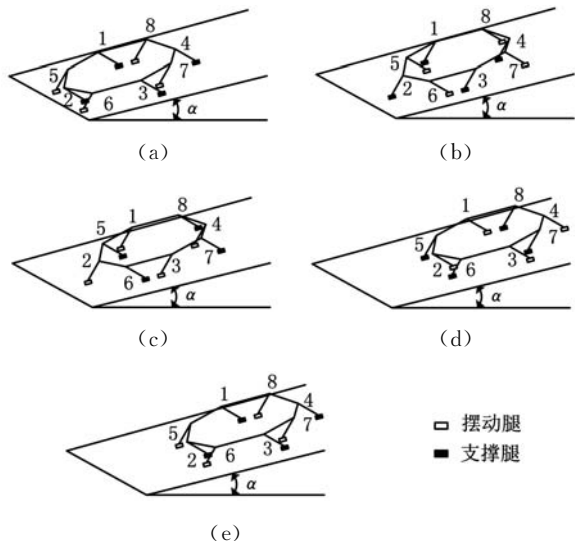


图 3 直线爬行步态图

令机器人支撑腿与髌关节轴线的夹角为 β , 为了既使相邻的两条腿在摆动过程中不出现相互干涉的现象, 又使腿有足够的摆动角度, 增大支撑腿摆动后机器人本体移动的距离, 提高机器人的运动效率, 将 β 的取值范围设定为 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 。

在图 4 所示的吸盘吸附平面中, 机器人支撑腿摆动角度为 $2\beta = 90^\circ$, 机器人本体从位置 1 移动至位置 2, 设膝关节到球铰的距离 (即摆动腿的长度) 为 S , 则有

$$\left. \begin{aligned} l_i &= S | \cos \beta | \\ d_i &= S | \sin \beta | \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

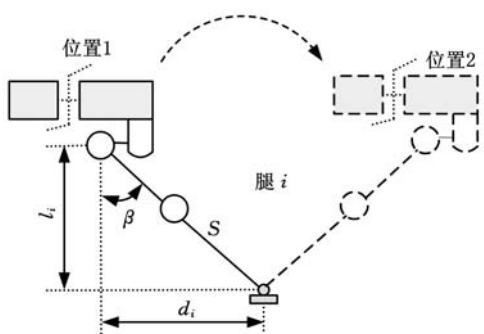


图 4 机器人本体前行过程

已知电机功率与扭矩的关系为 $P_i = a_i \tau_i^2 + b_i \tau_i + c_i$, 采用实验的方法, 对额定功率为 200W,

使用 GP 62C 减速箱的 Maxon RE50 直流伺服电机进行恒定转速的实验,得出表 1 所示的多组功率与扭矩的数据,对所得数据进行拟合,可得 $a_i = 0.023, b_i = 0.897, c_i = 4.456$ 。

表 1 电机功率与扭矩实验数据

	驱动扭矩(N·m)	功率(W)
1	0	3.36
2	7.552	12.18
3	14.868	23.95
4	22.184	36.57
5	29.972	52.36
6	37.524	70.02
7	44.840	91.56
8	54.752	115.39
9	59.944	140.97
10	67.732	170.12
11	75.048	200.03

对吸盘进行吸附实验,可得最大吸附力 w_i 和最大静摩擦因数 μ_{maxi} 。膝关节与踝关节采用同一型号电机,则有 $\tau_{ankle\ min} = \tau_{knee\ min}$ 及 $\tau_{ankle\ max} = \tau_{knee\ max}$ 。各仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数表

$m_0g(N)$	480
$S(m)$	0.314
a_i	0.023
b_i	0.897
c_i	4.456
$w_i(N)$	875
μ_{maxi}	0.6
$\tau_{ankle\ min} = \tau_{knee\ min}$	0
$\tau_{ankle\ max} = \tau_{knee\ max}(N \cdot m)$	35

根据式(10),取 $n = 4$,以式(4)、式(6)~式(8)为约束条件,使用简面体爬山算法(SM)进行优化计算,可得最小总功率 $\min P$ 关于 α, β 的曲面,如图 5 所示。

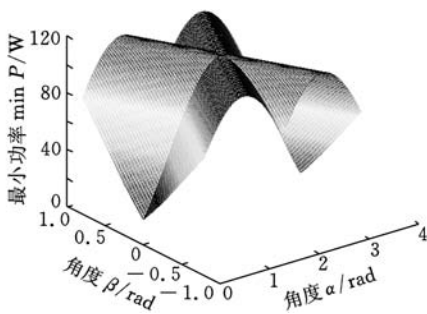


图 5 最小总功率 $\min P$ 与 α, β 的关系

从图 5 可以看出,由 $w_i = 875N$ 和 $\mu_{maxi} = 0.6$ 所确定的吸盘安全性约束可满足机器人吸附攀爬的需求,其消耗的最小功率与其运动的状况满足直观的规律,具体表现为:当 $\alpha = 0$ (机器人正立爬行)及 $\alpha = \pi$ (机器人倒立爬行)时,机器人支撑腿摆动到 $\beta = 0$ 时所需总功率最小,往两边摆动,即 $|\beta|$ 增大时所需总功率 P 随之增加;相反,当 $\alpha =$

$\pi/2$ (机器人在侧立面爬行)时,机器人支撑腿摆动到 $\beta = 0$ 时所需总功率最大,往两边摆动,即 $|\beta|$ 增大时所需总功率 P 随之减少。

由最优算法计算出当 $q_1 = q_2 = q_3 = q_4, p_1 = p_2 = p_3 = p_4$ 时,总功率 P 最小。以 q_1 和 p_1 为例, α 与 q_1, p_1 的关系曲线如图 6 所示。

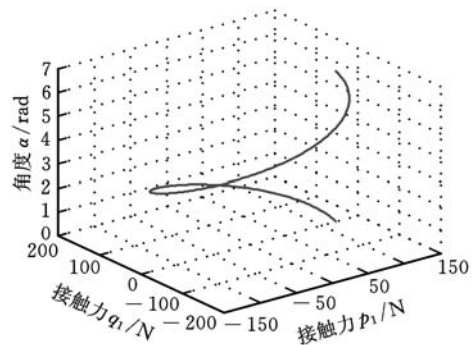


图 6 α 与 q_1, p_1 的关系

图 6 说明了多足爬墙机器人在攀爬不同倾斜角度的平面时都有且仅有一组确定的足底接触力 q_i 和 p_i ,使机器人的能耗最小。

根据式(2),将足力控制分量转换为电机的控制扭矩 τ_i ,那么 α, β 与 τ_i 的关系曲面如图 7 所示。

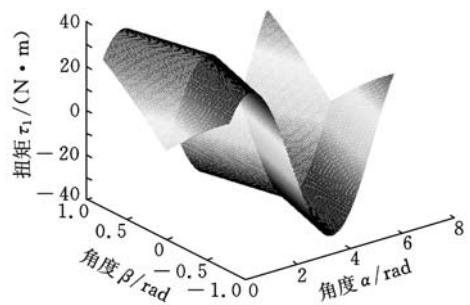


图 7 电机控制扭矩 τ_i 与 α, β 的关系

与图 5 类似,当 $\alpha = 0$ 及 $\alpha = \pi$ 时,机器人支撑腿摆动到 $\beta = 0$ 时关节驱动力矩 τ_i 最小,往两边摆动时,即 $|\beta|$ 增大时 τ_i 随之增大;相反,当 $\alpha = \pi/2$ 时,机器人支撑腿摆动到 $\beta = 0$ 时关节驱动力矩 τ_i 最大,往两边摆动时,即 $|\beta|$ 增大时 τ_i 随之减少。这是由于式(2)确定了足底接触力与电机扭矩的关系,而足底接触力与最小总功率之间又有唯一确定的关系,故电机控制扭矩与电机最小总功率之间有相似的变化规律。

根据式(11)所述的电机电流控制模型,即可将仿真所得的电机控制扭矩转换为电机的控制电流。

4 结语

本文以八足爬墙机器人为例,描述了多足爬墙机器人的足力优化模型,实现了多足机器人的

关节驱动力和足底接触力的转换。建立了多足爬墙机器人总电机功率与机器人的运动步态及作业环境(包括攀爬角度与吸附平面的粗糙度)的关系。在满足爬墙机器人吸附安全性和足力负载均衡的条件下,对机器人的足底接触力进行优化,提高了机器人对环境变化及支撑腿数量变化的适应能力,并降低了关节驱动电机的能耗,实现了机器人电机总能耗最小化的目标。实验仿真结果表明,本文所提出的足力控制方法减少了优化的计算量,实现了关节驱动力和足底接触力的同步控制,优化所得的扭矩控制模型简单直观,便于转换为机器人驱动电机的电流控制模型。

参考文献:

- [1] Nahon M A, Angeles J. Optimization of Dynamic Forces in Mechanical Hands[J]. Trans. of the ASME: J. of Mechanical Design, 1991, 113: 167-173.
- [2] Chen Xuedong, Watanabe K, Kiguchi K. Force Distribution of a Quadruped Robot[C]//Proc. of 2000 JSME Conf. on Robotics and Mechatronics. Kumamoto, Japan, 2000: 2P2-43-056.
- [3] 王鹏飞. 四足机器人稳定行走规划及控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] Spong M W, Holm J K, Lee Dongjun. Passivity-based Control of Bipedal Locomotion[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007, 14(30): 30-40.
- [5] Sangbae Kim, Spenko M, Trujillo S, et al. Smooth Vertical Surface Climbing with Directional Adhesion[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2008, 24(65): 65-74.
- [6] Sang-Ho Hyon. Compliant Terrain Adaptation for Biped Humanoids without Measuring Ground Surface and Contact Forces[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2009, 25(1): 171-178.
- [7] Vidoni R, Gasparetto A. Efficient Force Distribution and Leg Posture for a Bio-inspired Spider Robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(2): 142-150.
- [8] Villard C, Gorce P, Fontaine J G. Study of a Distributed Control Architecture for a Quadruped Robot[J]. J. of Intelligent and Robotic Systems, 1995, 11(3): 269-291.
- [9] Liu H Y, Wen Bangchun. Force Distribution for the Legs of a Quadruped Walking Vehicle[J]. J. of Intelligent and Robotic Systems, 1997, 14(1): 1-8.
- [10] Garder J F, Srinivasan K, Waldron K J. A Solution for the Force Distribution Problem in Redundantly

Actuated Closed Kinematic Chains[J]. Trans. of the ASME: J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112: 523-526.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 魏 武, 男, 1970 年生。华南理工大学自动化科学与工程学院教授、博士。研究方向为模式识别与人工智能、仿生机器人等。发表论文 50 余篇。蔡利雄, 男, 1987 年生。华南理工大学自动化科学与工程学院硕士研究生。邓高燕, 女, 1986 年生。华南理工大学自动化科学与工程学院硕士研究生。

中国机械工程学会第十届理事会编辑出版工作委员会第一次工作会议召开

2012 年 4 月 16 日下午, 中国机械工程学会第十届理事会编辑出版工作委员会第一次会议在中国机械工程学会工作总部召开。中国机械工程学会副理事长、编辑出版工作委员会主任谭建荣, 副主任黎明, 副主任陈超志, 委员王田苗、王淑芹、尤政、李明哲、张柏春、陆辛、周佑启以及工作委员会委员秘书出席会议。学会副理事长兼秘书长张彦敏出席本次会议。

编辑出版工作委员会主任谭建荣主持会议。张彦敏秘书长介绍了制定学会 2012~2016 年工作要点的背景及学会各工作委员会的基本工作情况。随后, 出席会议的委员们就《中国机械工程学会编辑出版工作委员会工作条例(讨论稿)》和《中国机械工程学会第十届理事会编辑出版工作委员会(2012~2016)工作要点(讨论稿)》进行了深入的讨论, 并提出许多重要的建议和意见。

会上通过了《中国机械工程学会编辑出版工作委员会工作条例(讨论稿)》。对今后五年编辑出版工作委员会的工作要点, 全体到会委员一致认为: 要以打造学会品牌、整合期刊资源、提供定制服务作为工作方向, 充分发挥并联合学会期刊资源, 充分利用网络信息平台, 为政府、行业、高校以及广大科技工作者提供有特色的、个性化的定制服务。要以提升学会的学术影响力和社会影响力为目标, 着重提高编辑出版水平, 加强学会期刊建设和科技图书策划组织能力, 进一步提升学会竞争力和社会服务能力。

会上委员们也表示, 编辑出版工作是学会工作的重要组成部分, 是学会活力的体现, 也是学会形象的外化。新的五年里, 大家共同努力, 使编辑出版工作更上一层楼。

(工作总部)