

电力铁塔攀爬机器人的步态分析

曹志华, 陆小龙, 赵世平, 王蕾, 梁恩志, 刘晓宇

(四川大学制造科学与工程学院, 610065, 成都)

摘要: 为了提高电力系统的自动化水平,减轻电力工人在检修高压输电系统时的劳动强度,同时保障其人身安全,提出并设计了一种可以攀爬电力铁塔的5自由度关节式机器人,给出了机器人的CAD模型,分析了其在铁塔两种位置攀爬过渡的能力.根据机器人机构特征,提出、分析和比较了蠕虫式和扭转式攀爬步态.蠕虫式攀爬步态即机器人本体的两连杆之间角度周期变化,两爪交替前进;扭转式攀爬步态即机器人本体不动,爪部回转关节旋转 180° 使得机器人整体扭转半周.在机械系统动力学仿真软件ADAMS环境下,对机器人采用这两种步态在铁塔主材表面、横担侧面和上表面3种方位攀爬情况进行了仿真,计算和分析了不同情况下机器人各关节转矩和系统能耗,得出最适合铁塔各种方位的攀爬步态:在横担上攀爬时应采用能耗较小的扭转式步态,但是在主材表面攀爬时两种步态能耗接近,需考虑障碍类型选取合适的步态.仿真结果为机器人的攀爬步态规划及控制策略提供了依据,同时样机试验结果也验证了两种攀爬步态的可行性.

关键词: 攀爬机器人;运动学;步态分析;ADAMS

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0067-06

Gait Analysis for Electricity Pylon Climbing Robot

CAO Zhihua, LU Xiaolong, ZHAO Shiping, WANG Lei, LIANG Enzhi, LIU Xiaoyu

(School of Manufacturing Science and Engineering, University of Sichuan, Chengdu 610065, China)

Abstract: A 5-DOF articulated robot capable of climbing electricity pylons, is proposed to improve the automation capabilities of power system, reduce the labor intensity of workers and guarantee their safety in the maintenance of high-voltage transmission system. The CAD model for this robot is established, and the feasibility transiting between two positions in any orientations is verified. The worm gait and turning gait are analyzed and compared. In the worm gait the angle of the two linkages changes cyclically and two claws go forward alternately, and the body keeps still while the rotary joint rotates 180° to reverse the robot by semicycle in turning gait. The joint torque and energy consumption of the robot when it climbs in various orientations including the main surface, side and upper surface of cross bar are calculated and analysed in the simulation with the software ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) to get the most suitable climbing gait in various orientations of the pylons. The robot climbs on the cross bar in turning gait with the less energy consumption, while climbs on the main surface with the equal energy consumption, an appropriate gait can be chosen according to the obstacle. The simulation is significant for gait planning and control strategy, and the prototype test confirms the feasibility of both climbing gaits.

Keywords: climbing robot; kinematics; gait analysis; ADAMS

随着电力系统的不断扩建,为了提高电力系统自动化综合能力,针对电力系统检测和维持的攀爬和巡线机器人逐渐成为热门的研究之一. 此类特种机器人的出现大大减轻工人劳动强度,降低维护成本,创造了良好的经济效益和社会效益. 电力铁塔攀爬机器人可以在铁塔各个区域攀爬,通过携带的传感器检测塔身及其附件的缺陷,其携带的清扫装置可以清扫绝缘子串,同时有一定负载能力的攀爬机器人可以背负巡线机器人至横担,后者分离至高压输电线进行巡检.

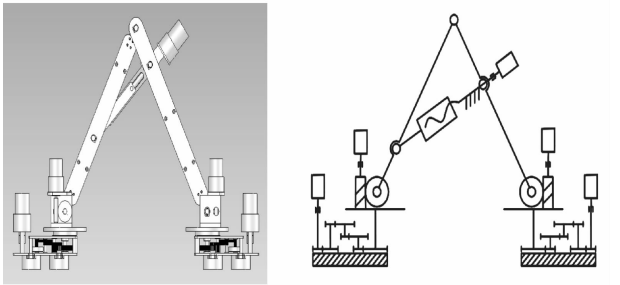
近年来,国内外针对电力铁塔和其他三维桁架攀爬机器人进行了大量的研究. 文献[1]研制的自重构机器人 Shady3D 可以攀爬由细长矩形截面杆构成的空间桁架;文献[2]设计的六自由度两臂关节式机器人 ROMA I,可以攀爬由矩形或工字形截面钢材构成的桁架桥梁;文献[3]提出能在空间桁架内外攀爬、穿行移动的双手抓握双臂移动机器人,通过更换夹具可以实现在空间桁架中移动;文献[4-5]研究的模块化机器人,可以攀爬杆、桁架和树木等多种对象;文献[6]研制了一款 2 自由度电磁吸附式电力铁塔攀爬机器人,可以实现伸缩转向运动,但是不具有越障功能;文献[7]研制了一款 8 自由度微型爬铁塔机器人,小巧灵活,具备越障功能.

文献[1-5]所述机器人均采用串联式关节型机构,具有较好的灵活性,其中华南理工大学提出的攀爬机器人只需 5 个自由度,在合理的路径规划下便可以实现三维空间内自由攀爬. 但是,以上攀爬机器人存在一个共同的特点:攀爬对象多为规则杆件,例如圆柱杆、工字钢及矩形截面杆等,并不能攀爬由非规则形状且参数不一的角钢组成的铁塔. 威尔士班戈大学研制的机器人可以攀爬铁塔,但是受自由度限制只能实现平面内攀爬;以色列艾瑞尔中心大学的机器人属微型机器人,负载能力差. 本文针对目前在输电系统中应用最广泛的由角钢组成的格子形桁架铁塔,提出了一种 5 自由度关节式电力铁塔攀爬机器人,采用电磁吸附,体积小,结构紧凑,具备转向和越障能力,可以实现电力铁塔表面任意位置的攀爬.

文章主要对机器人的机械结构、运动学及攀爬步态进行了分析,通过仿真计算和比较了两种步态攀爬铁塔不同方位下各关节的转矩以及系统的能耗,为机器人的攀爬步态规划提供了依据.

1 机器人机构设计

机构简图. 机器人主体由铰接在一起的两个机械手臂组成,手臂间的角度变化由电动缸的直线伸缩运动实现. 机械手臂下端通过连接轴与爪部俯仰关节连接,手臂可绕俯仰关节轴旋转,实现越障功能. 俯仰关节与爪部电磁铁之间配合带轮和 3 级齿轮传动,可实现机器人的转向功能. 传动主要基于齿轮、蜗轮蜗杆和丝杆等机构,具有很好的自锁性. 爪部下端采用双电磁铁吸附,单个电磁铁的吸附力为 60 kg,吸附力产生的摩擦力既克服了重力的影响,同时也解决了转弯过程中的扭转转矩,确保机器人可靠的吸附于角钢表面.



(a) 机器人的 CAD 模型 (b) 结构简图

图 1 铁塔攀爬机器人的 CAD 模型和结构简图

2 机器人攀爬过渡运动分析

机器人攀爬时,一端爪部的电磁铁吸附角钢以支撑整个系统,另一端爪部运动到目标位置和姿态进行吸附,吸附后松开前一爪部,两个爪部交替吸附,实现攀爬过程. 本文针对机器人左爪吸附、右爪作为操作器寻找目标点的过程进行分析,右爪相对于左爪的位姿可以用一个矩阵来描述,即 $T = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中 (n,o,a) 描述右爪的姿态矢量, p 为右爪的位置矢量^[8].

考虑到两机械手臂之间的角度变化与电动缸的状态存在一一对应的关系,在运动学分析过程中,假设机械手臂间直接由转动关节组成. 基于机器人运动学分析的 $D-H$ 方法,建立了如图 2 所示的机器人的初始姿态和坐标系,得到了表 1 所示的机器人各连杆参数. 定义 T_i^{-1} 为将坐标系 $\{i\}$ 中的矢量变换成在坐标系 $\{i-1\}$ 中的描述, T_i^{-1} 的表达式为

$$T_i^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图 1 所示为铁塔攀爬机器人的 CAD 模型和结

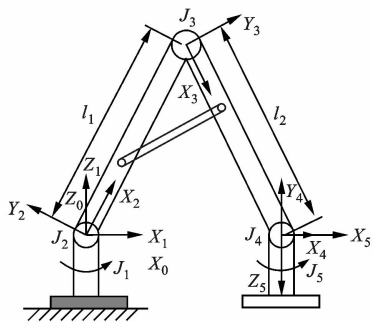


图 2 机器人运动学模型

表 1 机器人连杆 D-H 参数

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}	d_i	θ_i	关节变量	变化范围/ $(^{\circ})$
1	0	0	0	θ_1	θ_1	$-180\sim180$
2	90	0	0	θ_2	θ_2	$20\sim60$
3	0	l_1	0	θ_3	θ_3	$60\sim150$
4	0	l_2	0	θ_4	θ_4	$20\sim60$
5	90	0	0	θ_5	θ_5	$-180\sim180$

右爪坐标系 {5} 相对于参考坐标系的位姿可以表示为

$$\mathbf{T}_5^0 = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{T}_5^4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 c_5 c_{234} + s_1 s_5 & -c_1 s_5 c_{234} + s_1 c_5 & -c_1 s_{234} & c_1 (l_2 c_{23} + l_{c_{21}}) \\ -c_1 s_5 c_{234} - c_1 s_5 & -s_1 s_5 c_{234} - c_1 c_5 & -s_1 c_{234} & s_1 (l_2 c_{23} + l_1 c_2) \\ c_5 s_{234} & -s_5 s_{234} & c_{234} & l_2 s_{23} + l_1 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

等式两边依次左乘矩阵 $(\mathbf{T}_i^{i-1})^{-1}$, 对各个关节变量进行解耦, 分别求出 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 5 个关节变量

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{Atan2}(p_y, p_x); \text{ 或 } \theta_1 = \text{Atan2}(-p_y, -p_x) \\ \theta_3 &= \text{Atan2}(\pm(1-k^2)^{1/2}, k) \\ \theta_{23} &= \text{Atan2}(l_1 c_3 + l_2, -l_1 s_3) \pm \text{Atan2}((l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_3 - p_z^2)^{1/2}, p_z) \\ \theta_2 &= \theta_{23} - \theta_3 \\ \theta_4 &= \text{Atan2}(a, b) \\ \theta_5 &= \text{Atan2}(n_x s_1 - n_y c_1, o_x s_1 - o_y c_1) \end{aligned}$$

或 $\theta_5 = \text{Atan2}(-n_x s_1 + n_y c_1, -o_x s_1 + o_y c_1)$

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos\theta_1; s_1 = \sin\theta_1; c_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ s_{234} &= \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ k &= \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \end{aligned}$$

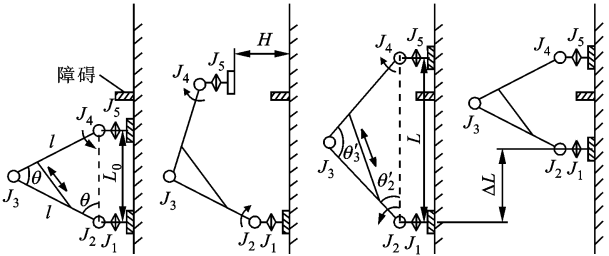
$$\begin{aligned} a &= c_1 c_{23} a_x + s_1 c_{23} a_y + s_{23} a_z \\ b &= c_1 s_{23} a_x + s_1 s_{23} a_y - c_{23} a_z \end{aligned}$$

当解出的 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 的值分别都在各关节的取值范围内时, 机器人可实现右爪对角钢表面的吸附, 从而实现攀爬动作的转换。

3 机器人攀爬步态分析

根据机器人构型的特点, 在攀爬时可采用两种攀爬步态: 蠕虫式攀爬和扭转式攀爬。第一种为蠕虫式攀爬, 如图 3 所示。攀爬步骤如下。

(1) 机器人位于初始位置, 左爪和右爪都吸附于角钢上, $\theta_1 = \theta_5 = 0^{\circ}$, $2\theta_2 + \theta_3 = 180^{\circ}$, 两爪距离为 L_0 。



(a) 初始状态 (b) 右爪抬起向前 (c) 右爪吸附 (d) 左爪向前

图 3 蠕虫式攀爬步态

(2) 右爪电磁铁断电松开, J_2 保持不变, 电动缸伸长使 J_3 从 θ_3 增大至 θ'_3 , 同时 J_4 旋转, 使得右爪与角钢平行, 跨越如图所示的障碍物。

(3) 电动缸静止保持 θ'_3 不变, J_2 旋至 θ'_2 , J_4 旋转使得 $\theta'_4 = \theta'_2$, 右爪吸附, 在此过程中, $\Delta\theta_3 = 2\Delta\theta_2$ 。

(4) 左爪电磁铁断电松开, J_2 、 J_4 分别旋转至初始角度 (θ_2, θ_4) , 电动缸收缩使 J_3 变为初始角度 θ_3 , 复位后左爪电磁铁吸附, 完成一个攀爬运动周期。

机器人采用蠕虫式攀爬时, 一个运动周期内移动距离为

$$\Delta L = L - L_0 = 2l \left(\sin \frac{\theta'_3}{2} - \cos \frac{\theta_3}{2} \right) \quad (1)$$

J_3 的转动范围为 $30^{\circ} \sim 120^{\circ}$, 即 $\theta_3, \theta'_3 \in (30^{\circ}, 120^{\circ})$, 代入式(1)可得

$$0 < \Delta L < 1.21l$$

采用蠕虫式攀爬时, 机器人具有很好的越障能

力,如图3所示可以轻松跨越一般的障碍,其爪部最大抬起高度为 $H = l \left(\cos \frac{\theta_3}{2} - \cos \left(\theta'_3 - \frac{\theta_3}{2} \right) \right)$,由上述推导可知

$$0 < H < 1.22l$$

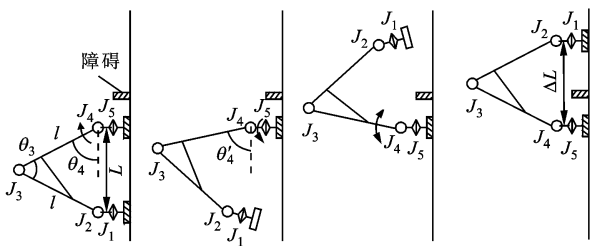
第二种为扭转式攀爬,见图4. 攀爬步骤如下.

(1) 机器人位于初始位置,左爪和右爪都吸附于角钢上, J_3 初始值为 θ_3 ,两爪距离为 L .

(2) 左爪电磁铁断电松开, J_2 、 J_3 保持不变, J_4 旋转至 θ'_4 ,使得左爪抬起离角钢,避免扭转过程中与角钢上的障碍干涉.

(3) J_5 旋转 180° ,机器人整体旋转 180° .

(4) J_4 旋转至初始值 θ_4 ,使得左爪平行接触角钢,接着左爪电磁铁吸附,完成一个攀爬运动周期.



(a)初始状态 (b)左爪抬起 (c)回转关节旋转半周 (d)左爪复位

图4 扭转式攀爬步态

机器人采用扭转式攀爬时,一个运动周期内移动距离为 $\Delta L = L = 2l \sin \frac{\theta_3}{2}$,其中 $\theta_3 \in (30^\circ, 120^\circ)$,可得

$$0.52l < \Delta L < 1.73l$$

爪部最大抬起高度 $H = l \sin(\theta'_4 - \theta_4)$,其中 $\theta_4, \theta'_4 \in (30^\circ, 90^\circ)$,可得

$$0 < H < 0.87l$$

比较上述两种攀爬步态可知:蠕虫式攀爬单个运动周期内活动关节多,对整体的协调运作要求高,爪部抬起高度较大;扭转式攀爬过程简单,移动距离较大,但是爪部旋转关节转动角度大.

4 攀爬过程仿真分析

机器人以两种不同的攀爬步态攀爬时,起作用的关节不相同,关节的转矩以及机器人系统的能耗也会有所不同.下面,通过仿真进行比较分析,得到具有实际意义的攀爬步态.

在 ADAMS/View 环境下^[9],对机器人处裹铁塔的不同方位以不同步态攀爬过程进行仿真.按照

铁塔的构型,根据重力加速度相对于机器人的攀爬方向,可以将机器人在铁塔上的攀爬表面分为主材表面、横担侧面以及横担上表面,如图5所示.在主材表面攀爬时,重力加速度方向与攀爬方向重合;在横担侧面攀爬时,重力加速度方向垂直于攀爬方向,并且二者同处于横担侧面内;在横担上表面攀爬时,重力加速度方向垂直于攀爬方向所在的横担上表面.

为了使不同的攀爬步态具有可比性,假设机器人在铁塔不同方位以两种步态在相同的时间内攀爬相同的距离^[5].在仿真中,设定机器人在 20 s 内攀爬 300 mm(图3所示 $l = 300$ mm).在蠕虫式攀爬时, θ_3 从初始值 30° 变到 99° , θ_2 、 θ_4 从初始值 75° 变到 40.5° ;在扭转式攀爬时, θ_3 的初始值为 60° , θ_4 从初始值 60° 变到 75° .图6所示为机器人在主材上攀爬的一个场景.机器人在主材上分别以蠕虫式和扭转式攀爬时各起作用关节的转矩和功率曲线如图7、图8所示.

由图7可知,各关节的转矩曲线都有一定程度的波动.这是因为爪部电磁铁与角钢是刚性接触,各部件运动的过程中会使整个系统产生一定的抖动,导致输出的转矩曲线不平稳,但是对仿真结果并无影响.图7e、图7f和图8a、图8b所示为 J_4 在不同攀爬步态下的转矩和功率曲线,有较大的差别.

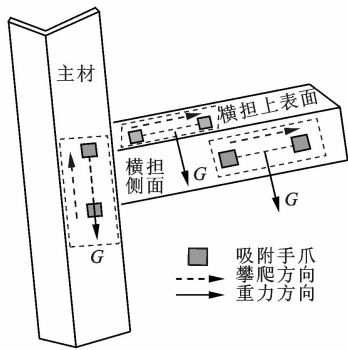


图5 不同攀爬方位的重力分析

机器人在铁塔的不同方位攀爬时,即使是以相同的步态进行攀爬,各关节所需的转矩和系统能耗都会存在很大的区别.下面,对机器人在3种方位下分别以两种步态进行攀爬的过程进行仿真试验,记录了这6组试验中机器人各关节最大转矩、能耗以及系统能耗,如表2和表3所示.

以蠕虫式步态在铁塔不同方位攀爬时各关节的转矩和系

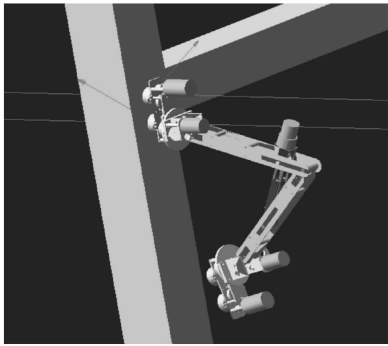


图 6 ADAMS 环境下的攀爬仿真

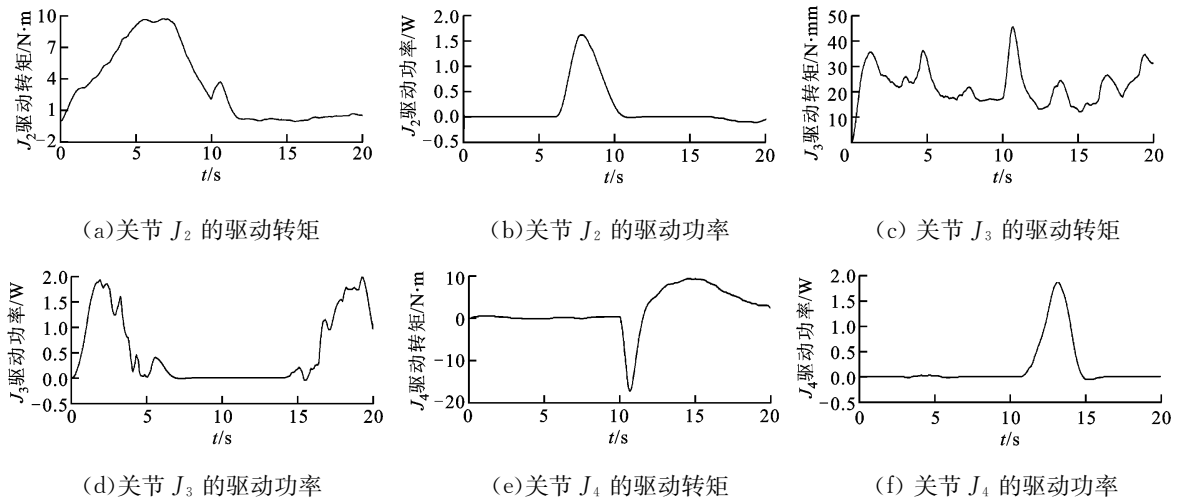


图 7 蠕虫式步态中关节 J_2 、 J_3 、 J_4 的驱动转矩和功率变化

主材		横担侧面		横担上表面	
m	能耗/mJ	最大转矩/N·m	能耗/mJ	最大转矩/N·m	能耗/mJ
3 630		25.03	8 560	16.64	7 889
10 675		0.14	15 446	0.23	19 523
3 564		43.81	8 721	35.09	8 477
17 869			32 727		35 889

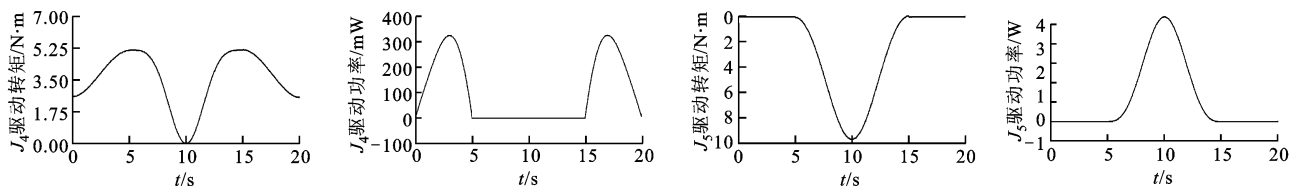
表 3 以扭转式步态在铁塔不同方位攀爬时各关节的转矩和系统能耗

位置	主材		横担侧面		横担上表面	
	最大转矩/N·m	能耗/mJ	最大转矩/N·m	能耗/mJ	最大转矩/N·m	能耗/mJ
关节 J_4	5.18	2 025	2.57	5	10.32	5 162
关节 J_5	9.21	18 424	10.22	18 488	0.08	64
总计		20 469		18 493		5 226

从以上 6 组试验结果可以得出：

(1)采用蠕虫式步态沿铁塔不同方位攀爬时，

J_2 的最大转矩 $T_{2\text{MAX}}=25.03\text{ N}\cdot\text{m}$ ， J_3 的最大转矩 $T_{3\text{MAX}}=0.23\text{ N}\cdot\text{m}$ ， J_4 的最大转矩 $T_{4\text{MAX}}=$

图8 扭转式步态中关节 J_4 、 J_5 的转矩和功率变化

43.81 N·m;

(2)采用扭转式步态沿铁塔不同方位攀爬时, J_4 的最大转矩 $T_{4\text{MAX}}=10.32 \text{ N}\cdot\text{m}$, J_5 的最大转矩 $T_{5\text{MAX}}=10.22 \text{ N}\cdot\text{m}$;

(3) J_3 的转矩相对于其他关节较小,原因是采用了电动缸结构,丝杆螺母传动可大大减小对驱动电机的转矩要求,但是由于丝杆螺母传动效率低,导致 J_3 关节消耗的能量较多;

(4)机器人系统能耗方面,在主材上两种步态攀爬消耗的能量接近,但是在横担侧面和横担上表面攀爬时,采用扭转式步态所消耗的能量明显小于蠕虫式步态.在以上6组试验中,蠕虫式步态攀爬横担上表面消耗能量最多($W_{\text{MAX}}=35\,889 \text{ mJ}$),而扭转式步态攀爬横担上表面消耗能量则最少($W_{\text{MIN}}=5\,226 \text{ mJ}$).

根据上述分析,机器人在铁塔上攀爬时主要分3种情况:①在主材表面,此时两种步态均可,系统能耗差异不大,蠕虫式步态攀爬时越障高度较高,而扭转式步态的步距较大、速度快;②在横担侧面,扭转式步态攀爬的电机转矩以及系统能耗都明显小于蠕虫式步态;③在横担上表面,类似于在横担侧面,以扭转式攀爬为优.图9为机器人样机试验图.

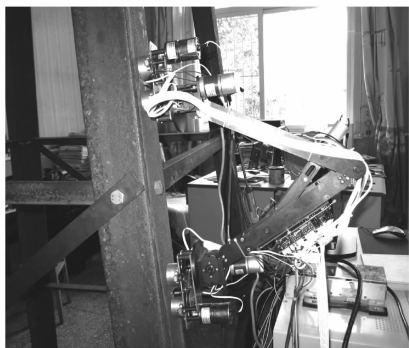


图9 机器人样机试验图

5 结论

面向高压输电系统的检测及日常维护,本文提出了一种基于电磁吸附的关节式电力铁塔攀爬机器

人,分析了蠕虫式和扭转式两种攀爬步态,通过动力学仿真分析得到机器人各关节转矩及功率参数.仿真结果表明,在铁塔的不同方位攀爬时应考虑系统能耗和攀爬环境采取合适的步态,为机器人的路径规划和精确控制提供了理论依据.以上述理论为依据设计了一款攀爬机器人样机,分别对机器人采用两种步态在铁塔各方位攀爬进行试验,取得了良好的效果,验证了机器人设计中各参数的合理性及两种攀爬步态的可行性.

参考文献:

- [1] YOON Y, RUS D. Shady 3D: a robot that climbs 3D trusses [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4071-4076.
- [2] BALAGUER C, GIMENEZ A, JARDON A. Climbing robot's mobility for inspection and maintenance of 3D complex environment [J]. Autonomous Robot, 2005,18(2):157-169.
- [3] 吴伟国,徐峰琳. 空间桁架用双臂手移动机器人设计与仿真分析[J]. 机械设计与制造,2007(3): 110-112.
WU Weiguo, XU Fenglin. Design and simulation analysis of a dual arm & hands mobile robot used in space truss[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(3): 110-112.
- [4] GUAN Yisheng, JIANG Li. Mechanical design and basic analysis of a modular robot with special climbing and manipulation function [C] // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:502-507.
- [5] 江励,管贻生,蔡传武,等. 仿生攀爬机器人的步态分析 [J]. 机械工程学报,2010,46(15):17-22.
JIANG Li, GUAN Yisheng, CAI Chuanwu, et al. Gait analysis of a novel biomimetic climbing robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(15):17-22.
- [6] OWEN R P. A climbing robot for inspection of electricity pylons [D]. Bangor, UK: The University of Wales, 2003.

[7] MEDINA O. Climbing robot [EB/OL]. [2011-02-10].
[http://ariel.ac.il/sites/KCG/index.php/climbing-ro-
bot](http://ariel.ac.il/sites/KCG/index.php/climbing-robot).

[8] CRAIG J J. Introduction to robotics: mechanics and
control[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson
Education International, 2005:62-93.

[9] 陈立平,张云清,任卫群,等. 机械系统动力学分析及
ADAMS 应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005:
112-175.

(编辑 杜秀杰)