

爬圆锥杆轮式机器人的设计及动力学研究

杨 柏¹,王兴东¹,曾 镛¹,袁树伟²

(1.武汉科技大学 冶金装备及控制教育部重点实验室,湖北 武汉 430081;

2.江苏一品环保科技有限公司,江苏 宜兴 214200)

摘 要:为实现目前路灯杆的清洗及喷漆工作,在已有爬等直径杆机器人基础上,基于可在圆锥杆上爬行的轮式机器人结构,进行了理论分析计算;将得到的结果导入 ADAMS 中进行仿真,对上升过程中的侧倾现象进行分析,发现弹簧刚度不够是主要原因;针对弹簧力和杆直径变化关系,重新计算了弹簧刚度,得到了平稳的上升过程;针对弹簧刚度过大出现打滑的现象,最终得到了适合此类结构同样重量机器人的弹簧刚度范围。通过仿真可知,采用上升过程确定的主要参数,机器人下降过程同样稳定。

关键词:圆锥杆;轮式;侧倾;打滑;弹簧刚度范围

中图分类号:TH16;TP242 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3997(2016)11-0237-04

Design and Kinematics Research of Wheel-Based Conical Pole Climbing Robot

YANG Bo¹, WANG Xing-dong¹, ZENG Yong¹, YUAN Shu-wei²

(1.Laboratory of Metallurgical Equipment & Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430081, China 2.Jiangsu Yipin High Technology Company, Jiangsu Yixing 214200, China)

Abstract: In order to achieve the light pole cleaning and painting work, on the basis of existing equal diameter pole climbing robot, based on wheel-based conical pole climbing robot structure, it does some theoretical analysis and calculation; Imports the result to ADAMS to make simulation, analyzes the side sway phenomenon in the process of rising, finds that the spring stiffness not enough is the main reason, in view of the spring force and change of pole diameter, recalculates the spring stiffness, and gets a steady rise process, aiming at that the spring stiffness is too large, and the robot will appear skid phenomenon, finally getting a suitable for this kind of structure of the same weight of robot of the spring stiffness range. According to simulation, adopts the major parameter which confirms in rising process, and the decline process is still steady.

Key Words: Conical Pole; Wheel-Based; Side Sway; Slip; Range of Spring Stiffness

1 引言

爬杆类机器人用于代替人类完成各种危险的工作而成为当今机器人领域的研究热点之一。文献^[1]研制的应用于高速路路灯灯杆检测的磁吸式爬杆机器人,其有六个驱动轮和两个从动轮,通过协调车轮上的磁铁吸力和电机驱动力实现机器爬升。文献^[2]研制的气动蠕动式灯泡维修机器人由三自由度平面并连机构、旋转机构和卡钳三部分组成,通过旋转机构和电缸的准确定位可攀爬固定尺寸的弯管。文献^[3]研制了爬行式仿生机器人,通过曲柄连杆机构实现爬树过程中上臂、下臂交替的加紧及上升过程。

由于机器人需应用于路灯杆的清洗及喷漆,文献^[4]的磁吸式机器人车轮上的磁铁吸力和电机驱动力协同控制复杂,成本高;

文献^[5-7]的爬行式机构虽能满足要求,但其运动过程存在不连续和振动大等缺点。设计目标是进行路灯杆的自动清洗及喷漆等工作,而目前的机器人研究及开发多针对等直径杆,因此设计并确定了一种可爬圆锥杆的机器人的主要参数,完成了动力学仿真工作。

2 总体方案设计及静力学分析

2.1 设计目标

目前大部分的单弯头路灯杆的直杆部分均为圆锥杆,其底部直径为 250mm,顶部直径为 100mm,直杆部分长度为(3~5)m,将其截面部分底面角度设为 θ ,则其 $\tan\theta$ 的变化为(40~66.7)。选择 5m 的路灯杆,加其弯头部分总体长度约为 8m,故将机器人爬杆速度定为 8m/min。

来稿日期:2016-05-20

作者简介:杨 柏,(1991-),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要研究方向:机器人设计方向的研究;

王兴东,(1970-),男,湖北武汉人,博士研究生,博士生导师,教授,主要研究方向:冶金装备及控制与机器人设计及控制方向的研究

2.2 结构设计方案

基本结构方案,如图 1 所示。从图 1 中可以看出,该结构完全对称分布于杆周围,由弹簧提供夹紧力,使得机器人夹紧电杆,三个下轮由三台电机分别驱动^[6]。使用弹簧作为提供夹紧力的原因在于弹簧的自调节能力,为机器人适应杆径的变化时的自我调整提供了基础。

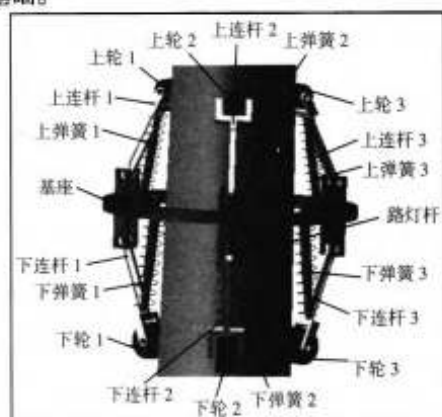


图 1 基本结构方案

Fig.1 The Basic Structure Scheme

2.3 静力学分析

由理论力学分析^[9]可知,为使机器人能够在垂直的路灯杆上保持稳定,则需有足够的摩擦力来平衡机器人的重力,而摩擦力来源于轮子对路灯杆的压力,压力则来源于弹簧拉力。即:

$$f = \mu F_N \quad (1)$$

式中: F_N —车轮对路灯杆的正压力,只有当 $f \geq G$,才会保证机器人不下落。若使其上升,还需使驱动力大于等于行驶阻力,即:

$$T \geq T_f + T_r \quad (2)$$

式中: T_f, T_r —轮子的摩擦反力矩。

同时,由于采用了轮式结构,机器人驱动轮上的电机在轮子上产生驱动转矩,这个转矩引起路灯杆对驱动轮的切向反作用力 F_{t1} 。由于路灯杆的表面能够传递的切向反力是有限的,其极限值被称为附着力 F_ϕ ^[8],当驱动轮的切向反作用力大于附着力时,驱动轮就会打滑(即 $F_{t1} > F_\phi$)。所以要保证:

$$F_{t1} \leq F_\phi (F_\phi = F_{N1} \cdot \Phi) \quad (3)$$

式中: F_ϕ —附着力; Φ —附着系数,是附着力与轮子法向(与接触面垂直的方向)压力的比值。路灯杆材料为钢,车轮材料为橡胶,其附着系数 $\Phi = 0.5$ 。关键姿态运动描述,如图 2 所示。上升过程受力分析,如图 3 所示。

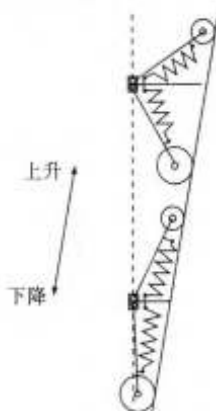


图 2 关键姿态运动描述

Fig.2 Critical Attitude Motion Description

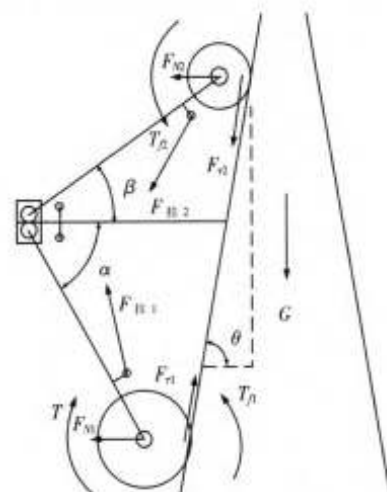


图 3 上升过程受力分析

Fig.3 Rising Force Analysis Process

由机器人爬升速度 8m/min,设定机器人总重约为 15kg(自重+其上安装的清洁设备),由于机器人上部结构只起到上升稳定及过弯导向作用,故设定上、下轮与路灯杆的接触力满足:

$$F_{d1} = 1.5 F_{d1} \quad (4)$$

计算后得到:三台电机功率均为 26W,上轮与路灯杆法向接触力为 80N、下轮与路灯杆法向接触力为 120N,上弹簧初拉力为 389N、下弹簧初拉力为 422N,上弹簧刚度为 9.24N/mm、下弹簧刚度为 7.18N/mm。

3 机器人模型的建立与动力学仿真

3.1 路灯杆爬升仿真

中选择 5m 的圆锥杆,即 $\tan\theta = 66.7$ 进行仿真。将在 SolidWorks 中建立的机器人模型导入到 ADAMS 软件中,在 ADAMS/View 工作界面中的爬杆机器人结构图,如图 1 所示。

将用理论计算参数导入 ADAMS 进行仿真计算,机器人能上升到杆顶部,但其上升姿态很不稳定,具体表现为其中两对上连杆(设为 1、2 连杆)向下偏移,基座开始侧倾,另一对连杆(设为 3 连杆)为阻止这两对连杆继续偏移则出现与它们相反的运动姿态,如图 4 所示。

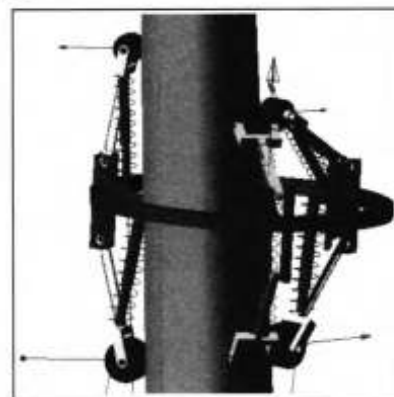


图 4 按照理论计算的弹簧刚度仿真结果

Fig.4 According to the Theoretical Calculation of the Spring Stiffness of the Simulation Results

3.1.1 失稳现象分析

导出其下部弹簧力变化曲线,如图 5、图 6 所示。可以看出,在 (0~15)s 左右,弹簧基本受力均匀,15s 后三个下弹簧受力曲线出

现明显变化,其中两个弹簧(1,2 连杆处)受力由-300N 变为-50N,另一个(3 连杆处)则由-400N 变为-500N,即出现了图 4 现象。图 4 的现象可以理解为上升过程中机器人的 α,β 角度(分别为下、上连杆与水平面的夹角,见图 1)并未按照实际规律变化。具体原因因为在上升过程中,弹簧力提供足够的压力维持机器人重力,路灯杆直径逐渐减小, α,β 角减小,弹簧伸长量减小,由弹簧产生的压力必然减小。如弹簧的刚度不够,机器人必然出现下滑趋势,而下方直径大,阻止了其整体下滑,影响了其稳定性,必然会出现图 4 所示的侧倾现象。提高弹簧刚度,这样 α,β 即可按照实际规律变化,从而能提供足够的压力平衡机器人重力,保证了机器人上升的稳定性。

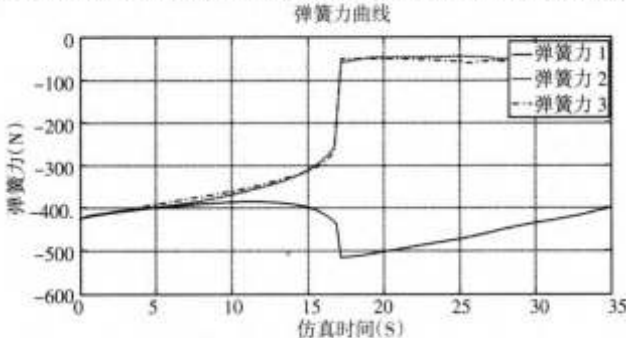


图 5 按照理论计算的弹簧刚度受力曲线
Fig.5 According to the Theoretical Calculation
of the Stiffness of the Spring Force Curve

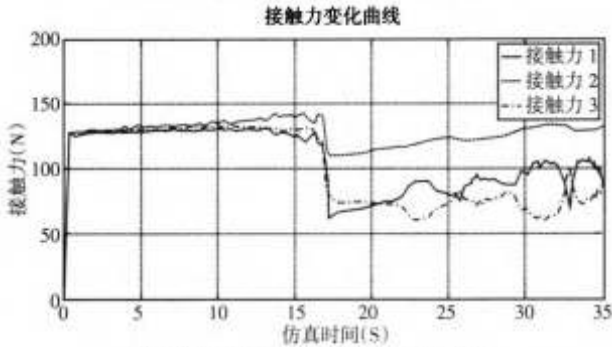


图 6 按照理论计算的接触力变化曲线
Fig.6 According to the Theoretical Calculation
of the Contact Force of Change Curve

3.1.2 重新计算弹簧刚度

根据已有的弹簧上升数据,在 ADAMS 中导出表格数据,选择下部弹簧平稳段(即弹簧 1、弹簧 2、弹簧 3 受力没有大幅改变的部分)的弹簧拉力和同一时刻变形量重新计算刚度^[9],如表 1 所示。

表 1 不同时段弹簧拉力数据

Tab.1 Spring Tension Data in the Different Periods

时间(s)	弹簧 1 受力(N)	弹簧 2 受力(N)	弹簧 3 受力(N)
16.3412	-419.0834	-279.6914	-281.5508
16.4	-420.7295	-273.0215	-291.0171
16.7259	-430.4145	-257.2884	-263.5893
16.8	-432.966	-252.7348	-259.2988
17.0437	-489.1359	-139.699	-149.9077
17.2	-515.256	-58.7877	-49.7285

可以看出在(16.8~17.0437)s 弹簧力发生了大幅变化(图 5 中弹簧力出现相反方向处),在 16.8s 之前,弹簧受力曲线并未发生大幅变化,证明此弹簧刚度适合爬到 16.8s 处高度及以下的直径变化量,但过了此处,此弹簧刚度不适用,为提高上升稳定性,故选择弹簧 2 受力来重新计算弹簧刚度。

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta h} = \frac{F_0 - F_1}{h_0 - h_1} \tag{5}$$

设定车轮与路灯杆保持接触则弹簧位移的改变量在模型中可测量得出。

由(5)式则确定出下部弹簧刚度:

$$k_r = \frac{422 - 252.7}{17.2} = 9.8 \text{ N/mm}$$

同样的方法可以重新计算出上部弹簧刚度,最终计算出上部弹簧刚度 $k=13.3 \text{ N/mm}$,下部 $k=9.8 \text{ N/mm}$ 。改变弹簧刚度后的上升情况,如图 7 所示。

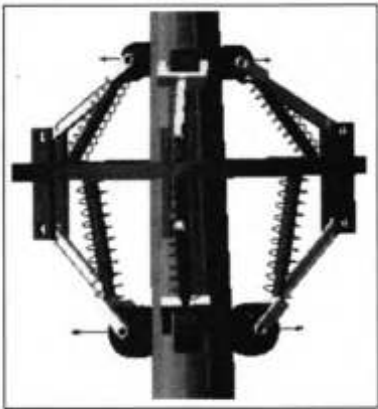


图 7 改变弹簧刚度后的上升情况
Fig.7 Change the Rise After Spring Stiffness

改变弹簧刚度后下弹簧受力曲线,如图 8 所示。在图 8 中可以看出,在 15s 后,三个下弹簧出现分叉,其中一条处于令两条中间位置,可见在上升过程中为保证上升的平稳性弹簧做出的自调整过程,在分叉后又逐渐汇聚,说明在弹簧刚度的作用下弹簧的势能的变化最终被抵消,继而保证了机器人上升的稳定性。

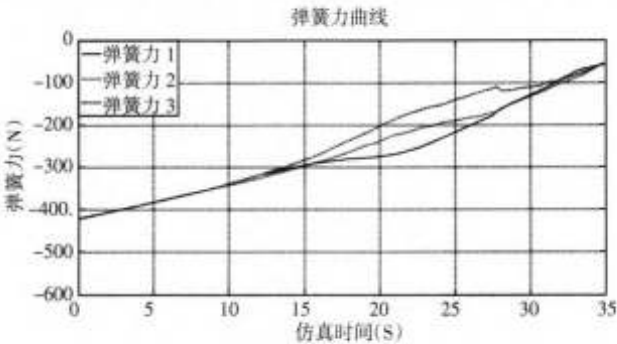


图 8 改变弹簧刚度后下弹簧受力曲线
Fig.8 Change the Spring Stiffness After the Spring Force A Curve

上升过程中接触力曲线,可以看出接触力与实际上升规律类似,随着直径的减小其接触力呈现下降的趋势,如图 9 所示。

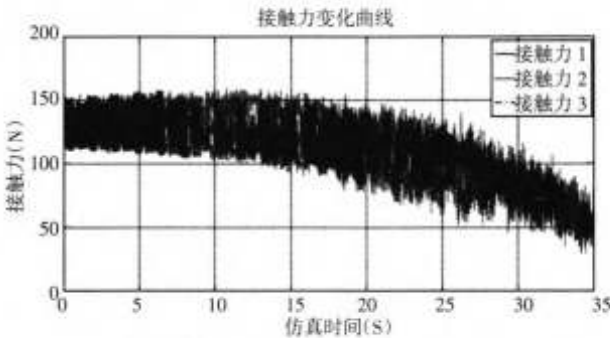


图 9 改变弹簧刚度下接触力变化曲线
Fig.9 Change the Spring Stiffness Under Contact Force Change Curves

3.2 上升过程的打滑

弹簧刚度过小则会出现上升过程中姿态发生改变,重新计算并加大弹簧刚度后上升稳定效果明显改善,为提高上升稳定性,可进一步加大弹簧刚度。

但若弹簧刚度过大,在上升到某一直径处时,此时会出现路灯杆对驱动轮的切向接触力 F_{t1} 大于附着力 F_{ϕ} ,从而驱动轮出现打滑现象。此时机器人受力平衡被打破,可能会出现下落的情况,机器人基座质心相对于路灯杆底面的垂直方向距离,如图 10 所示。当下降到 $F_{t1}=F_{\phi}$ 这一临界点的直径位置时停止,从此反复这一过程。

对于此爬杆机器人,由于在上升过程中,接触力逐渐减小如图 9,由于 $\phi=0.5$,故由初始设定的法向接触力得到附着力最大为 $0.5 \times 80 = 40\text{N}$,故当切向接触力小于 40N 时即会打滑,如式(3)、式(4)所示。法向接触力的减小量与弹簧刚度密切相关,计算其临界弹簧刚度进行仿真,如图 11 所示。此过程弹簧刚度为上弹簧 $k=25\text{N/mm}$,下弹簧 $k=15\text{N/mm}$ 。

根据机器人重量的差异,弹簧刚度的取值会相应改变,但对类似结构相同重量的机器人,其弹簧刚度取值范围应为:上弹簧 $k \in [14, 25]$,下弹簧 $k \in [10, 15]$ 。

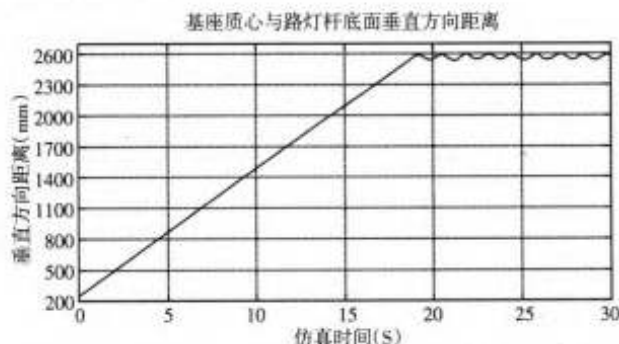


图 10 出现打滑时基座质心与路灯杆底部垂直距离
Fig.10 When a Skid Base at the Bottom of the Center of Mass and Lamp Posts Vertical Distance

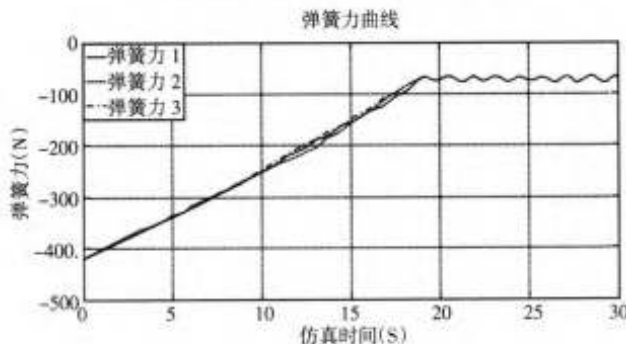


图 11 出现打滑时弹簧受力情况
Fig.11 The Spring Force When a Skid

3.3 下降过程仿真

爬杆机器人在路灯杆的直杆部分完整行程为:从底部上升到顶部从顶部下降到底部。之前的仿真工作描述了爬杆机器人上升的过程,爬杆机器人在同样的参数条件下由顶部下降的过程,如图 12 所示。

从图 12 中可见其下降过程中弹簧力变化曲线变化趋势很平稳,证明之前计算的各类参数对于机器人的下降过程同样适宜。

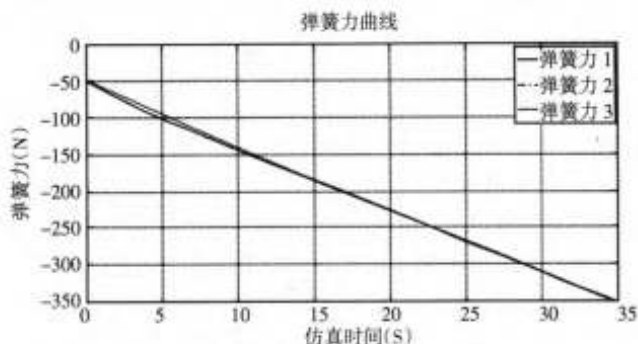


图 12 下降过程弹簧受力曲线[a]
Fig.12 Spring Force Curve Down Process

4 结论

以攀爬圆锥杆为设计目标,选择了轮式结构,并由弹簧力提供压力夹紧路灯杆平衡其重力。进行了理论分析计算,将得到的结果导入 ADAMS 中进行仿真,对上升过程中的侧倾现象进行分析,发现弹簧刚度不够是主要原因;针对弹簧力和杆直径变化关系,重新计算了弹簧刚度,得到了平稳的上升过程;针对弹簧刚度过大出现打滑的现象,最终得到了适合此类结构同样重量的机器人的弹簧刚度范围。通过仿真可知,采用上升过程确定的主要参数,下降过程同样稳定。应进一步应用仿真结果开发相应的机器人实物。

参考文献

- [1] Pradip N.Sheth.The Use of Robotics for Nondestructive Inspection of Steel Highway Pradip N.Sheth.The use of robotics for nondestructive inspection of steel highway bridges and structure[J].VTRC 05-CR8 Virginia Transportation Research Council, January, 2005.
- [2] M Tavakoli, M R Zakerzadeh, G R Vossoughi, S Bagheri.A hybrid pole climbing and manipulating robot with minimum DOFs for construct and service applications [J].The Industrial Robot, 2005, 32 (2) ABI/INFORM Globalpg 171-178.
- [3] 陈明森, 王晓光.爬杆机器人运动原理及动力学研究[D].武汉: 武汉理工大学, 2009.
(Chen Ming-sen, Wang Xiao-guang.Climbing pole robot movement principle and dynamics research[D].Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.)
- [4] Ali Baghani, Majid Nili Ahmadabadi, Ahad Harati. Kinematics modeling of a wheel-based pole climbing robot (UT-PCR)[J].Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April 2005.
- [5] 李卓球.理论力学[M].武汉: 武汉理工大学出版社, 2010: 81-85.
(Li Zhuo-qiu.Theoretical Mechanics[M]Wuhan: Wuhan University of Technology Press 2010: 81-85.)
- [6] 余卓平, 左建令, 张立军.路面附着系数估算技术发展现状综述[J].汽车工程, 2006.
(Yu Zhuo-ping, Zuo Jian-ling, Zhang Li-jun.Current situation of the development of tire-road friction coefficient estimation techniques were reviewed [J].Automotive Engineering, 2006.)
- [7] 陈锋华.ADAMS2012从入门到精通[M].北京: 清华大学出版社, 2013: 135-146.
(Chen Feng-hua.Compiled ADAMS2012 from Entry to the Master [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 135-146.)