

可用于风塔作业的轮式攀爬机器人

龙政宇,王旭红,樊绍胜

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要: 鉴于传统风机塔筒的清洗、喷漆、维护等作业时,人工高空作业存在较高风险,为了保障作业人员人身安全并提高作业效率,设计了一种基于负载配重调节的轮式攀爬机器人。通过对机器人爬塔时的力学分析,验证了机器人结构可行性和稳定性。设计了一种模糊控制器,用于改善机器人爬塔时的打滑情况。采用STM32作为主控制器,完成了上、下位机配合的控制系统设计。制作了机器人试验样机,通过试验样机测试表明:该机器人可适应风塔锥度完成风塔的攀爬,可有效完成风塔作业。

关键词: 攀爬机器人;力学分析;模糊控制器;STM32控制器;嵌入式系统

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24198

Wheeled Climbing Robot for Wind Tower Operation

LONG Zhengyu, WANG Xuhong, FAN Shaosheng

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In view of the traditional wind tower cleaning, painting, maintenance and other operations, there was a high risk of artificial aerial work. In order to ensure the personal safety of workers and improve work efficiency, a wheeled climbing robot based on load balancing adjustment was designed. By analyzing the force of the robot climbing the wind tower, the feasibility and stability of the robot structure were verified. A fuzzy controller was designed to improve the slipping situation of the robot when climbing the wind tower. STM32 was used as the main controller, and the design of the control system with the upper and lower computers was completed. Then the experimental prototype of the robot was made. The experimental prototype tests demonstrate that the robot can adapt to the taper of the wind tower to complete the climbing of the wind tower, and wind tower operation can be completed effectively.

Key words: climbing robot; mechanical analysis; fuzzy controller; STM32 controller; embedded system

电力行业是关系国计民生的基础性支柱产业。近年来,随着我国电力工业发展规模迈上新台阶,可再生能源替代化石能源的作用日益显著。风能发电具有低成本、低污染等优点,是可再生能源的重要发展方向^[1]。

目前,我国风力发电机场人工作业项目包括对风电塔筒的清扫、喷漆防腐、焊缝探伤等,这些工作主要由人工攀爬塔筒完成作业。但风电塔筒有几十米甚至上百米高,人工攀爬杆塔时存在较高风险且工作效率较低,因此研发智能机器人通过机械臂作业替代人工作业具有重要意义。

对比现有的攀爬机器人种类,爪式攀爬机器

人的末端采用钩爪结构,可适用于不同杆径的杆塔,但是夹爪控制方法比较复杂^[2];吸附式攀爬机器人采用磁吸附装置,吸附能力很强,可实现在曲面上的任意方向运动,但是负载能力较差,不适合机械臂作业^[3];轮式攀爬机器人具有重量轻、安全、响应快速等特点,适用于攀登圆柱形的杆塔,但是对杆径大小有要求,对于有锥度的水泥电杆、风电塔筒并不适用^[4]。

鉴于人工高空作业的缺陷与不足,以及爪式攀爬机器人、吸附式攀爬机器人的控制难度非常大,轮式攀爬机器人高空作业有着更高的实用性,本文设计了一种可用于风塔作业的轮式攀爬

基金项目: 湖南省双一流学科重点项目(19A026)

作者简介: 龙政宇(1996—),男,硕士研究生,Email:293576141@qq.com

机器人,并以近似锥度的水泥电杆模拟风塔进行样机测试试验。测试结果表明:该机器人稳定性好、定位精度高、响应速度快。

1 机器人整体结构设计

机器人的结构设计思路基于脚扣爬杆原理。脚扣登杆作业过程中主要借助人的自身重量,利用杠杆和摩擦力实现上下登杆。同理,机器人可利用负载配重调节来实现攀爬有锥度的风塔。

攀爬机器人主要由作业平台、行走驱动轮机构、控制机箱和作业机械臂组成,如图1所示。图中,行走驱动轮机构包括前驱动轮机构和后驱动轮机构,由承重框架相连接,倾斜倚靠在风电塔筒上。作业平台与前驱动轮机构相连,平台上为可随滑轨移动的控制机箱。通过行走轮电机控制,实现攀爬机器人在风塔塔筒纵向移动;通过步进电机控制作业平台上的丝杆滑轨,实现滑轨上控制机箱水平移动。

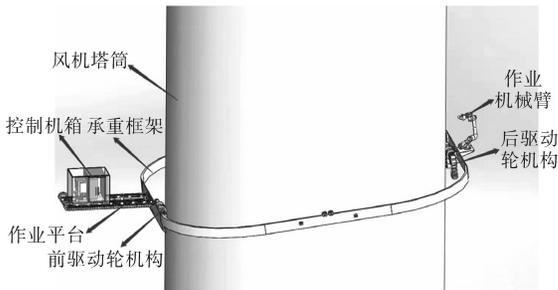


图1 机器人总体结构图

Fig.1 General structure diagram of robot

机器人的承重框架基于铝质材料呈环状,位于行走驱动机构外侧,攀爬作业时作为塔筒上行走轮的径向支撑可减少行走轮磨损,增强机器人负载能力。承重框架上有可环绕移动的三自由度机械臂模块,机械臂作业如图2所示。



图2 机器人机械臂作业图

Fig.2 Working diagram of robot manipulator

通过机器人行走驱动机构在风塔上的高度调整以及机械臂环绕承重框架的精准定位,机器人可在风塔上快速地完成全方位的污秽清扫、喷漆防腐、焊缝探伤等作业。

2 机器人运动控制方法

2.1 机器人静力学分析

2.1.1 自平衡条件

自平衡条件是机器人攀爬锥形塔筒的运动过程中,保持平衡稳定性的必要条件。因此以机器人平衡为基础进行了爬塔力学分析。

图3为攀爬机器人受力分解示意图。建立以作业平台为水平轴、B点为原点的直角受力分析xy坐标系,A点为后驱动轮机构位置,C点为控制机箱位置,杆塔为锥形的风电塔筒。

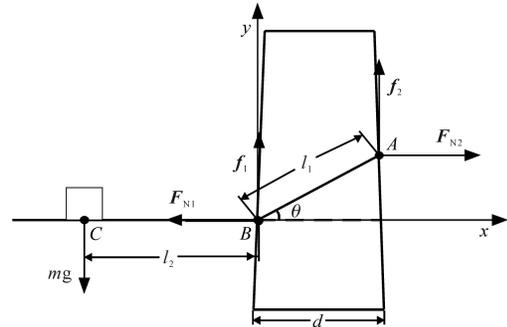


图3 攀爬机器人受力分解

Fig.3 Force decomposition of climbing robot

假设塔筒两侧摩擦程度相同,行走轮与塔筒的接触面始终为正切面,忽略前、后驱动轮的重力影响。驱动轮两侧A,B点所受正压力平衡的情况下,行走轮径向摩擦力 $f_1 = f_2$ 。滑轨的负载主要集中在水平移动的控制机箱上,机箱质量 $m=20\text{ kg}$ 。为保证径向摩擦力有富余^[5],引入安全系数 λ , λ 取1.2保证机器人爬塔作业安全。平衡时近似地认为B点所受的力矩 $\sum M_B$ 为0,即

$$\begin{cases} \sum M_B = 0 \\ mgl_2 + f_2 l_1 \cos\theta = F_{N2} \cdot d \tan\theta \\ f_1 + f_2 = \lambda mg \\ d = l_1 \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为承重框架与水平地面倾角; d 为塔筒直径; l_1 为行走驱动轮间距; l_2 为控制机箱到B点的距离,即负载力臂; F_{N2} 为后行走轮所受正压力。

正压力 F_{N2} 与倾角 θ 和负载力臂 l_2 的关系推导公式如下式:

$$F_{N2} = \frac{mg(l_2 + \lambda d/2)}{d \tan\theta} \quad (2)$$

2.1.2 自锁条件

机器人自锁条件是机器人攀爬作业防滑落的保障,使得机器人在电机失能、通信中断等意外情况发生时也能维持机器人在风塔上的平衡。自锁条件由下式确定:

$$f = \mu F_N \geq mg \quad (3)$$

式中: f 为径向摩擦力 f_1 与 f_2 之和; F_N 为前、后行走轮所受正向压力 F_{N1} 与 F_{N2} 之和; μ 为风电塔筒表面的摩擦因数。

将式(2)代入式(3)可得到 θ 与 l_2 的关系如下式:

$$l_2(\theta) \geq \frac{l_1 \sin \theta}{\mu} - \frac{\lambda l_1 \cos \theta}{2} \quad (4)$$

通过查询资料,风电塔筒表面的摩擦因数 μ 为 0.2~0.5^[6],塔筒直径 d 范围为 2.7~4.2 m,可以得出倾角 θ 的变化范围。通过 Matlab 仿真,得出不同摩擦条件下倾角 θ 与负载力臂 l_2 关系曲线如图 4 所示。

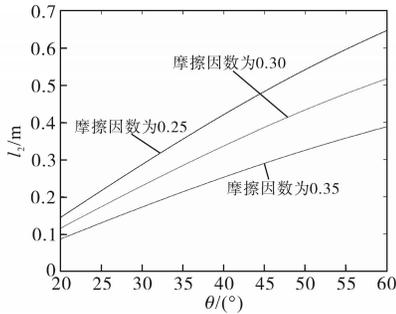


图4 负载力臂随倾角变化曲线

Fig.4 Simulation curves of relationship between load arm and inclination angle

由图 4 可知,负载力臂 l_2 的边界值随倾角 θ 的增大而单调递增。取负载力臂 l_2 增大为滑轨运动正方向,作业平台滑轨的控制策略如下:机器人向上爬塔时,倾角 θ 不断增大,增大负载力臂 l_2 ,作业平台滑轨正向移动;机器人向下爬塔时,倾角 θ 不断减小,减小负载力臂 l_2 ,作业平台滑轨反向移动。

2.2 爬塔动力学分析

对于机器人动力学分析可运用拉格朗日方程求解^[7],拉格朗日方程如下:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

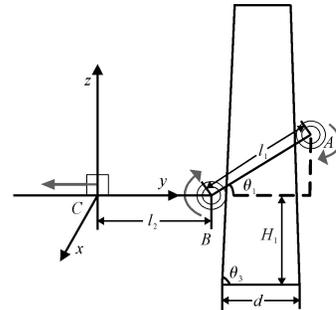
其中

$$L = K - P \quad (6)$$

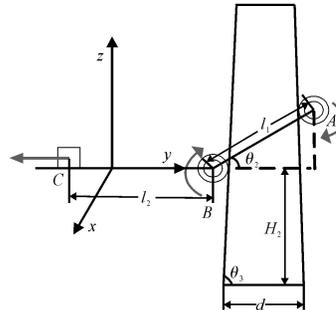
式中: L 为拉格朗日函数系统动能和势能的差; K 为系统动能; P 为系统势能; q_j 为 j 关节的关节转角; Q_j 为系统广义坐标 j 关节的驱动力矩。

假设机器人驱动机构及平台都为刚性且可忽略摩擦,构建机器人风塔作业模型对机器人进行动力学分析。在进行动力学分析时,为分析其适应杆径变化能力,简化分析将机器人整体所受

重力和控制机箱负载视为作用于质心点的集中力,对机器人质心点进行分析,在质心点位置建立笛卡尔坐标系。图 5 为机器人从 H_1 高度攀爬至 H_2 高度的过程。



(a) 机器人 H_1 高度动力学模型



(b) 机器人 H_2 高度动力学模型

图5 机器人动力学模型

Fig.5 Dynamic model of robot

控制机箱质心坐标 (x_1, y_1, z_1) 可表示为

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ y_1 = -l_2 \\ z_1 = H_2 - H_1 \end{cases} \quad (7)$$

忽略行走轮直径, H_1, H_2 可分别表示为

$$\begin{cases} H_1 = 0.5(d - l_1 \cos \theta_1) \tan \theta_3 \\ H_2 = 0.5(d - l_1 \cos \theta_2) \tan \theta_3 \end{cases} \quad (8)$$

平台滑轨移动速度为 v_m , 则质心动能为

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2) \\ &= \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{1}{8} m [\tan \theta_3 l_1 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: v 为质心速度; $\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1$ 分别为各坐标位移的导数。

质心势能表示为

$$E_p = mg(H_2 - H_1) \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(6)可得到机器人整体动力学方程如下:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{1}{8} m [\tan \theta_3 l_1 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)]^2 - \\ &\quad \frac{1}{2} m g l_1 \tan \theta_3 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \end{aligned} \quad (11)$$

将攀爬机器人模型导入到 Adams 动力学仿真软件中,摩擦系数设置为 0.45,建立风电塔筒模型模拟攀爬机器人在实际工况下的运动特性。锥形塔柱底端与地面添加固定副,平台与承重框架添加固定副,前、后驱动轮与锥塔添加移动副,丝杆与齿轮箱添加转动副,控制机箱与丝杆添加移动副。约束后模型如图 6 所示。

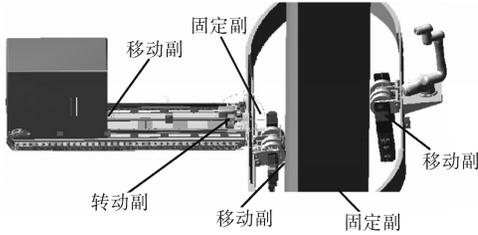


图6 机器人动力学分析约束模型

Fig.6 Constraint model for robot dynamic analysis

对该机器人进行仿真分析,得到了攀爬机器人在变杆径爬升 5 s 内质心 z 方向的加速度信息,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,机器人加速度在短时间内的波动,即机器人适应塔径变化的过程,通过机箱的配重调节可改善打滑情况,总体趋于稳定,从而验证了机器人结构设计的合理性和机器人稳定性。

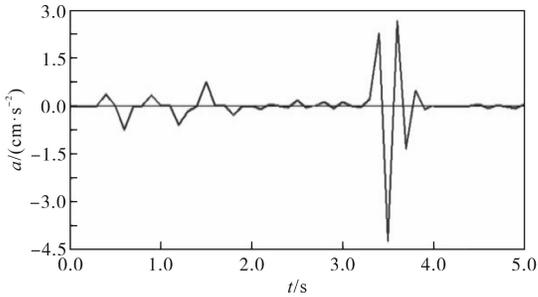


图7 质心 z 向加速度变化曲线

Fig.7 z-acceleration curve of center of mass

2.3 爬塔控制方法

打滑系数 s ^[8] 是行走轮打滑情况的判定依据,可通过行走轮角加速度的偏差值来判断打滑程度, $|s|$ 越大,说明行走轮打滑越严重。 s 计算如下:

$$s = \frac{\omega'_B - \omega'_A}{\omega'_B} \times 100\% \quad (12)$$

式中: ω'_B 为后驱动轮角加速度; ω'_A 为前驱动轮角加速度。

由于实际杆塔摩擦系数、机器人行走轮磨损情况均为爬塔运动控制的不确定因素,对机器人作业平台滑轨位移控制难以建立精确的数学模型。为此构建了输入为打滑系数 s 和倾角传感器测得的平台倾角 θ 、输出为作业平台滑轨目标配重位移 e 的模糊控制器^[9]。

输入量打滑系数 s 的基本域为 $(-\infty, +\infty)$, 但当 $|s| > 0.05$ 时,打滑情况已经超出控制范围。因此, s 的实际模糊论域设置为 $[-0.05, 0.05]$ 。定义打滑系数 s 的模糊子集由负到正分成 7 档,简记为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。根据机器人承重框架的大小,机器人爬塔倾角 θ 的范围不超过 60° ,输入量倾角 θ 模糊论域选择为 $[0, 60]$,范围从小到大分为 7 档: $\{PS1, PS2, PS3, PM, PB1, PB2, PB3\}$ 。作业平台滑轨长度不超过 700 mm,输出量滑轨位移 e 论域设置为 $[0, 700]$,从近到远分为 7 档: $\{PN1, PN2, PN3, PM, PF1, PF2, PF3\}$ 。

根据经验和 Mamdani 近似推理^[10]:打滑情况严重,且角度变化很大时,要显著加大对配重位移的调节;打滑情况较轻,角度变化很小时,要显著减少对配重位移的调节。结合实际实验,共设定 49(7×7) 条模糊推理规则,建立了滑轨位移模糊控制规则表,如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table

e	s						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS1	PN2	PN2	PN1	PN1	PN1	PN2	PN2
PS2	PN3	PN2	PN2	PN1	PN2	PN3	PN3
PS3	PM	PN3	PN3	PN2	PN3	PM	PM
θ	PF1	PM	PM	PN2	PN3	PM	PF1
PB1	PF2	PF1	PM	PN3	PM	PF1	PF2
PB2	PF3	PF2	PF1	PM	PM	PF2	PF3
PB3	PF3	PF2	PF1	PM	PF1	PF2	PF3

图 8 为滑轨位移的模糊推理控制曲面,说明了双输入和单输出之间的交互作用。

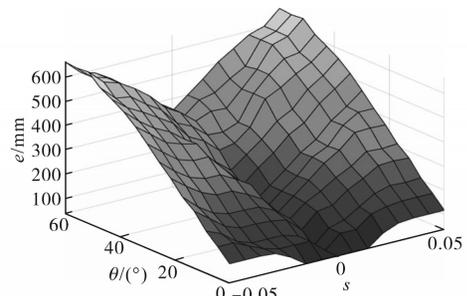


图8 模糊推理控制曲面

Fig.8 Fuzzy inference control surface

由图 8 可知,在输入量 s 接近于 0 时,输出量 e 变化范围低于 400, θ 对于作业滑轨位移 e 的影响最小,说明将滑轨位移初始位置定于 $[400, 600]$ 区间属于安全值;在控制曲面范围内的 $|s|$ 与输出量 e 成正比,反映了机器人前、后轮有打滑趋势时应增大滑轨位移值,决策可靠;对于输出量

$e > 600$ 可能导致行走驱动动力不足,前、后驱动轮停止。

3 控制系统设计

3.1 控制系统总体设计

机器人控制系统包括机器人本体控制系统与上位机系统两部分,两部分之间由以太网实现网络通信。上位机界面发送网络指令控制机器人本体移动,机器人本体将各电机以及传感器的状态反馈给上位机系统,网络摄像头将录下的视频画面通过以太网在上位机界面上显示出来。48 V 锂电池电源经稳压模块输出 12 V 直流给主控制器供电,机器人的电源电量由电量检测模块进行检测并传给主控制器,并由主控制器对电机驱动器电流进行读取。

攀爬机器人的总体架构如图 9 所示。

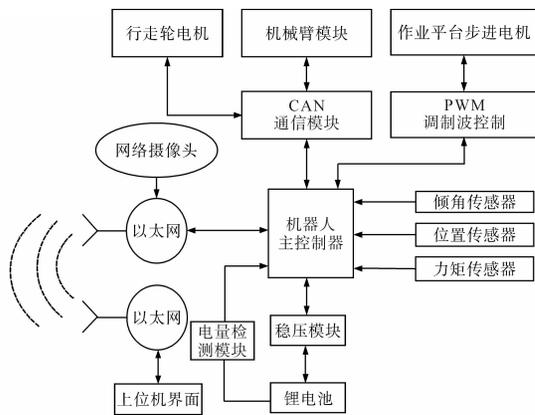


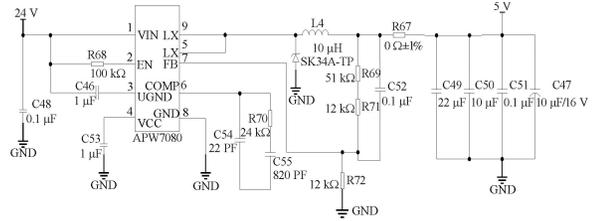
图9 机器人总体框图
Fig.9 Block diagram of robot

3.2 控制系统硬件设计

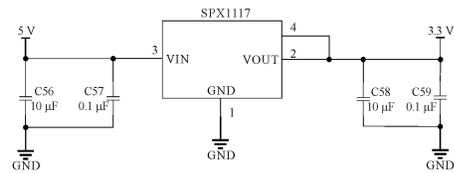
机器人采用 STM32F407ZGT6 芯片作为主控芯片,该芯片采用 ARM Cortex-M4 型处理器内核,兼具功耗小、成本低、性能高等优点^[1]。系统工作时最高频率为 168 MHz,响应迅速,拥有多达 140 个具有中断功能的快速 I/O 端口和 17 个定时器。功能模块主要包括电源模块、CAN 通信模块、AD 采样模块等。传感器模块通过串口传输机器人倾角、位置、力矩数据给主控制器。通过以太网通信芯片 DP83848IVV,实现上位机和下位机的数据传输。

3.2.1 电源电路

主控制板电源线经 APW7080 芯片将 24 V 转化为 5 V 电压信号,采用 SPX1117M3 芯片将 5 V 转化为 3.3 V 供控制板各个功能模块使用。具体电源电路如图 10 所示。



(a) 24 V 转 5 V 电路



(b) 5 V 转 3.3 V 电路

图 10 电源电路图

Fig.10 Power circuit diagram

3.2.2 CAN 通信电路

CAN 总线是应用最广泛的现场总线之一,与一般通信总线相比,具有突出的可靠性和实时性。如图 11 所示,该电路采用 CTM8251AT 芯片,适用于 +3.3 V 系统的 CAN 控制器,并具有高压隔离、抗电磁干扰的作用。采用 PESD1CAN, PESD5V 瞬态抑制二极管,用于保护 CAN 总线,使 CAN 高、低线路两端免受静电放电和其他瞬变的损坏。

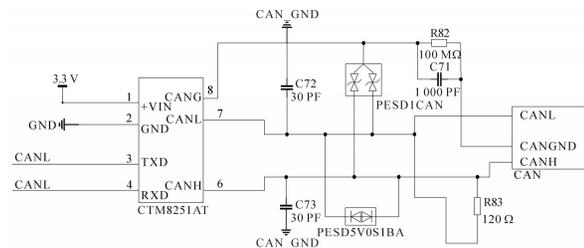


图 11 CAN 通信电路

Fig.11 CAN communication circuit

3.3 控制系统软件设计

3.3.1 下位机控制软件

下位机采用 MDK5.29 软件在 uVision5 环境下运行,并采用 FreeRTOS 实时操作系统进行开发。FreeRTOS 作为一个免费操作系统,可实现多任务管理、内存分配、任务通信等功能,可以方便移植到各种单片机上运行。为保证攀爬机器人高效完成风塔任务,设计了多线程处理各个模块的相关任务。主控制板控制软件包括主线程及各子线程。主线程负责模块初始化以及创建不同任务子线程,子线程分别执行各任务以及将执行结果反馈给上位机。

子线程包括系统通信子线程、系统模块检测子线程及运动控制子线程。机器人主程序流程如图 12 所示。

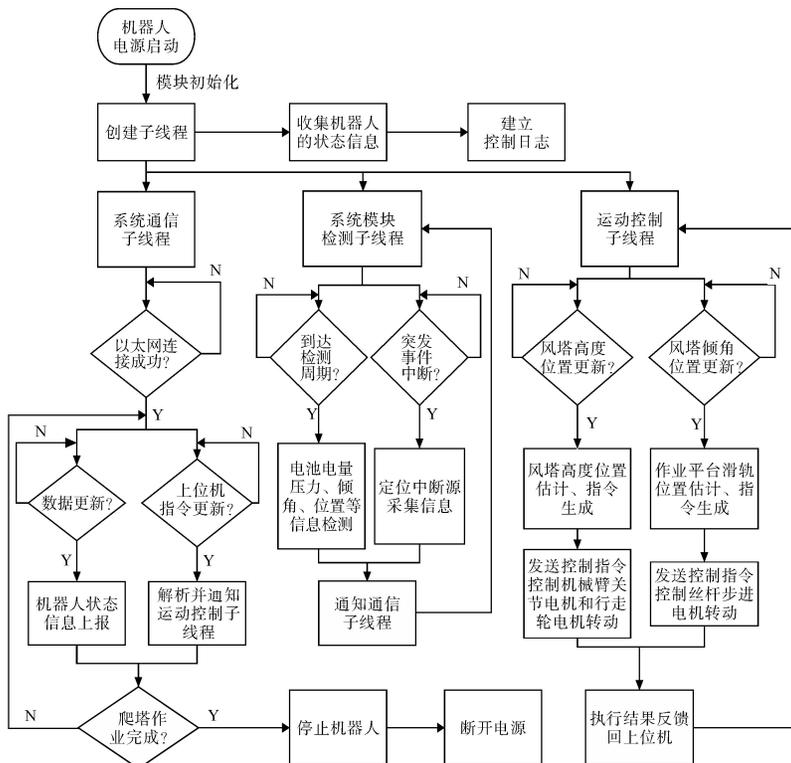


图12 机器人主程序流程图

Fig.12 Robot main program flow chart

3.3.2 上位机控制软件

该攀爬机器人上位机软件使用QT框架开发,根据爬塔要求制作了上位机软件界面。上位机软件界面主要可分为以下几个部分:图像显示区、系统功能区、电机控制区以及日志区。在图像显示区中,通过图像和状态显示及时反馈机器人的攀爬作业情况。系统功能区包括开关机、拍照录像等功能。电机控制区主要作用包括电机初始化以及控制平台滑轨、驱动轮及机械臂的电机启停。日志区用来检测网络连接状态以及接收下位机传来的指令。

4 机器人样机测试及分析

以锥度近似的10 kV配电网水泥电杆模拟风塔进行样机测试。杆柱底部直径0.32 m,高度15 m。机器人的爬杆现场高度测试如图13所示。可见,爬杆机器人可适应水泥电杆的杆径变化,能够接近杆柱无障碍环境下的顶部,大约10 m高。通过重复爬杆试验,记录多次机器人从杆柱底部到10 m高时间内上位机读取的数据,打滑系数s随实验时间变化曲线如图14所示。试验结果如表2所示。表2中,从杆塔高度和运动时间4组数据可以看出:爬杆高度每升高1 m,运动时间约为5.2 s,爬杆速度约为0.192 m/s,机器人运行较平



图13 机器人爬杆高度测试

Fig.13 Height test of robot climbing pole

稳;随着机器人爬杆高度的增加,倾角值由30.93°增加至34.92°,相应的滑轨实际位移由0.21 m增加至0.36 m,误差范围在±0.01 m,说明平台滑轨的定位精度非常高。由图14可知打滑系数s不超过0.01且接近于0,无打滑现象发生。

经多次现场爬杆试验,结果表明:使用本控制系统的攀爬机器人,通过控制机箱的配重调

表2 机器人爬杆试验结果

Tab.2 Experimental results of robot climbing pole

杆塔高度/m	运动时间/s	机器人倾角/(°)	滑轨估计位移/m	滑轨实际位移/m	打滑系数s	误差/m
2.5	13.2	30.93	0.22	0.21	0.000 8	-0.01
5.0	26.3	32.39	0.25	0.24	0.002 1	-0.01
7.5	39.3	33.68	0.29	0.29	0.003 0	0
10.0	52.3	34.92	0.35	0.36	0.003 2	0.01

节,可实现杆塔上的平稳上、下攀爬控制,并且机器人结构可行速度稳定,可满足配电网攀爬电杆的作业要求,对于高度不同、锥度近似的风塔同样适用。

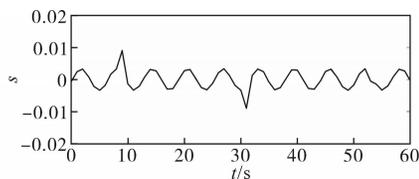


图14 打滑系数随实验时间变化曲线

Fig.14 Variation curve of slip coefficient with experimental time

5 结论

为了弥补风塔作业的人工缺陷,本文设计了一种可用于风塔作业的轮式攀爬机器人。提出一种攀爬控制方法,设计了机器人控制系统,制作了样机,对其进行了现场测试,得出以下结论:

1)根据实际风塔塔径变化,设计了一种基于负载配重调节的轮式攀爬机器人。对机器人进行了力学分析,仿真结果证明机器人稳定性较好,可适应锥度进行爬塔;设计了一种模糊控制器提高机器人平台滑轨定位精度,可有效改善机器人爬塔打滑情况。

2)该机器人控制系统采用 STM32F407ZGT6 作为微处理器,内嵌 FreeRTOS 操作系统;采用上、下位机结构并经 CAN 总线实现远程以太网通信,控制系统可行。

3)因试验条件有限,以近似锥度水泥杆塔模拟风塔,样机测试结果表明,在所提方法控制下,机器人可适应有锥度的风塔完成爬塔作业,结构可行,速度较平稳。但该机器人为测试样机,对于攀爬实际风塔仍有很多问题,与实际风塔作业还有一定差距,还有很大改进空间。

参考文献

- [1] 宫飞翔,李德智,田世明,等.综合能源系统关键技术综述与展望[J].可再生能源,2019,37(8):1229-1235.
GONG Feixiang, LI Dezhi, TIAN Shiming, et al. Review and prospect of key technologies of integrated energy system[J]. Renewable Energy, 2019, 37(8): 1229-1235.
- [2] 卢蒙,侯宇,杨书建,等.仿生四爪式爬管机器人的运动学分析与仿真[J].机械设计与制造,2019(8):230-234.
LU Meng, HOU Yu, YANG Shujian, et al. Kinematics analysis and simulation of a bionic four-claw tube-climbing robot[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2019(8): 230-234.
- [3] 邱仕诚,伍剑波,赵恒忠,等.一种基于磁力吸附的储罐爬壁机器人本体设计[J].中国机械工程,2022,33(3):270-278.
QIU Shicheng, WU Jianbo, ZHAO Hengzhong, et al. Ontology design of a tank wall-climbing robot based on magnetic adsorption[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(3): 270-278.
- [4] 郑勇峰,刘昊学.自适应轮足式爬壁机器人设计与分析[J].机械设计,2021,38(9):105-112.
ZHENG Yongfeng, LIU Haoxue. Design and analysis of an adaptive wheel-footed wall-climbing robot[J]. Mechanical Design, 2021, 38(9): 105-112.
- [5] LIU J H, PADRIGALAN K. Design and development of a climbing robot for wind turbine maintenance[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2328.
- [6] 韩强.风电塔筒爬升装置及叶片与塔筒检测管理系统的开发[D].保定:华北电力大学,2017.
HAN Qiang. Development of wind power tower climbing device and blade and tower inspection management system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 吕志忠,汪维杰,陈金鹏,等.四足磁吸附爬壁机器人稳定性与动力学分析[J].哈尔滨工程大学学报,43(3):429-435.
LÜ Zhizhong, WANG Weijie, CHEN Jinpeng, et al. Stability and dynamic analysis of quadruped magnetic adsorption wall climbing robot[J]. Journal of Harbin Engineering University, 43(3): 429-435.
- [8] 王立玲,董力元,马东,等.滑动与打滑条件下的轮式移动机器人自抗扰跟踪控制[J].控制理论与应用,2020,37(2):431-438.
WANG Liling, DONG Liyuan, MA Dong, et al. Active disturbance rejection tracking control of wheeled mobile robot under slip and slip conditions[J]. Control Theory and Application, 2020, 37(2): 431-438.
- [9] 夏华凤,许胜,付焕森.极大似然模糊控制器在光伏 MPPT 中的应用[J].电气传动,2018,48(9):56-61.
XIA Huafeng, XU Sheng, FU Huansen. Application of maximum likelihood fuzzy controller in photovoltaic MPPT[J]. Electric Drive, 2018, 48(9): 56-61.
- [10] 吴梦成,孙燕,刘倩.基于熵值修正 G2 赋权-Mamdani 模糊推理的风电场选址研究[J].可再生能源,2021,39(10):1347-1353.
WU Mengcheng, SUN Yan, LIU Qian. Research on wind farm site selection based on entropy correction G2 weighting-Mamdani fuzzy reasoning[J]. Renewable Energy, 2021, 39(10): 1347-1353.
- [11] 欧阳森,张真.基于树莓派的预防性轻型除冰机器人行走控制系统设计[J].电气传动,2021,51(8):71-76.
OUYANG Sen, ZHANG Zhen. Design of a preventive light-duty deicing robot walking control system based on Raspberry Pi[J]. Electric Drive, 2021, 51(8): 71-76.

收稿日期:2022-02-19

修改稿日期:2022-03-18