

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200881

# 变电站室内柔索驱动巡检机器人系统设计与运动学分析

邬蓉蓉<sup>1</sup>, 黎大健<sup>1</sup>, 覃剑<sup>2</sup>, 兰依<sup>3</sup>

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 广西电网有限责任公司, 广西 南宁 530023;  
3. 广西电网有限责任公司南宁供电局, 广西 南宁 530031)

**摘要:** 针对变电站室内巡检机器人在复杂场景下运动系统误差大导致巡检点位覆盖范围窄的问题, 提出一种柔索驱动巡检机器人系统方案。综合考虑变电站巡检路线特点, 从伺服驱动系统、运动控制系统和机器视觉系统三个方面进行了巡检机器人的系统硬件设计, 并从运动控制软件和视觉系统软件进行了系统软件设计。同时建立柔性承载机构的运动学模型, 采用该模型进行了水平和垂直定点巡检轨迹仿真。经南方电网某 66 kV 变电站示范应用表明, 所设计的柔索驱动巡检机器人水平与垂直运动误差可控制在 0.03 mm 内, 有效提高了运动系统精度, 在变电站室内巡检中应用前景广阔。

**关键词:** 变电站; 巡检机器人; 运动学模型; 机器视觉; 柔索机器人

## System design of an indoor inspection robot driven by a flexible cable in a substation

WU Rongrong<sup>1</sup>, LI Dajian<sup>1</sup>, QIN Jian<sup>2</sup>, LAN Yi<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 3. Nanning Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530031, China)

**Abstract:** There is a problem of large motion system error of an indoor inspection robot in a substation under complex conditions. This results in narrow coverage of inspection points. This paper proposes a scheme for a cable-driven inspection robot system. We consider the characteristics of the inspection route of the substation, and the system hardware of the inspection robot is designed in detail from the three aspects of the servo drive, motion control and machine vision systems. The system software is designed using motion control and visual system software. A kinematics model of the flexible carrying mechanism is established. A horizontal and vertical fixed-point inspection track simulation is carried out. The demonstration application of a 66 kV substation in the China Southern Power Grid shows that the horizontal and vertical motion errors of the flexible cable-driven inspection robot designed in this paper can be controlled within 0.03 mm. This effectively improves the accuracy of the motion system and has broad application prospect in indoor inspection of substations.

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51437003) and the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid (No. GXKJXM20180356).

**Key words:** substation; inspection robot; kinematics model; machine vision; flexible cable robot

## 0 引言

目前, 变电站室内开关柜设备和二次设备主要依靠人工巡视, 存在巡视周期长、效率较低、信号容易漏检等问题。变电站室内巡检机器人是对设备实施正常巡检、全面巡检、熄灯巡检和特殊巡检等

的关键设施<sup>[1]</sup>, 是变电站实现无人值守有效的技术支撑手段。开发和研制变电站巡检机器人, 是时下电力部门和科研院所的研究热点<sup>[2-10]</sup>, 但仍然存在系统功能不完善、运动系统误差大、巡检点位覆盖范围窄、无法长时间悬停实现定点巡检等问题。

近几年针对室内巡检机器人的研究中, 地面式巡检机器人和固定轨道悬挂机器人取得了一定的效果<sup>[11-13]</sup>, 但二者调节垂直高度相对困难, 仍然无法完全替代人工巡检。过往研究表明, 在双臂巡检机

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目资助(51437003); 广西电网科技项目资助(GXKJXM20180356)

机器人关节型手臂机构中,通过增加柔索的方式能够改善双臂式巡检机器人手臂关节的受力状态,提高其承担重力载荷的能力<sup>[14-16]</sup>。在系统设计方面,文献[17]为变电站巡检机器人与带高巡检设备设计了一套变电站 GIS 局部放电智能巡检定位系统。文献[18]针对复杂结构的输电线路,研制了一种采用永磁吸附方式的巡检机器人系统。文献[19]系统研发了巡检机器人综合导航,可见光、红外及音频检测,自动充电以及任务规划的智能巡检系统。文献[20]通过云通信协议,设计了远程人机交互界面,实现了云台的远程控制。

近 30 年来,索牵引并联机器人技术越来越成熟,索牵引摄像系统作为一种高速运动云台悬挂支撑系统,也被广泛应用于电影电视拍摄、体育赛事转播等场合,通过专用控制软件进行手动模式或预编程自动模式远程控制,能实现最大跨度超过 1 000 m,最大稳定运行速度 130 km/h 的拍摄场合,并具有很高的安全等级<sup>[21-26]</sup>。为了提高变电站室内巡检效率,增强设备运行状态识别的精度和准确度,本文提出一种基于柔索驱动的室内巡检机器人系统设计方案,从伺服驱动系统、运动控制系统和机器视觉系统三个方面进行了巡检机器人的系统硬件设计,从运动控制软件和视觉系统软件进行了系统软件设计,同时建立柔性承载机构的运动学模型,实现开关柜红外测温、保护装置信息状态指示灯、空开位置、电流端子状态等巡检任务的全自动识别。

### 1 巡检机器人总体设计

柔索驱动巡检机器人机械结构如图 1 所示,包括柔性绳索、滑轮组件、绳索驱动机构(含驱动电机、减速器、联轴器、滚筒或绞盘等)及云台(动平台,下文均称动平台)。当柔索驱动巡检机器人沿着轨道行走时,动平台随之一起运动。为提高动平台的稳定运动,绳索结构采用空间平行四边形结构的布局

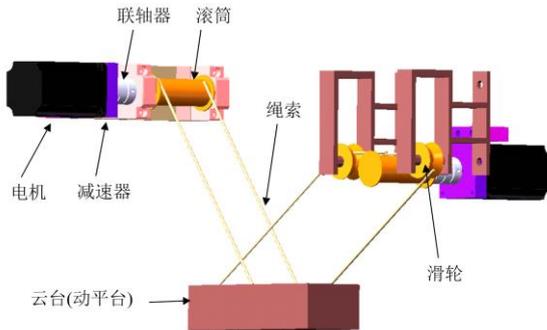


图 1 柔索驱动巡检机器人机械结构

Fig. 1 Mechanical structure of flexible cable-driven inspection robot

形式。其中,柔性绳索由 4 根绳索组成 2 个并联的空间平行四边形结构,设置 2 个减速器、2 个联轴器、2 个滑轮和 2 个滚筒或绞盘,外加 2 个能够驱动滚筒或绞盘的电机(含编码器)。

柔索驱动巡检机器人控制系统总体框图如图 2 所示。这种柔索驱动巡检机器人通过柔性绳索的收放悬吊动平台,并能驱动平台运动,由运动控制系统规划动平台的运动路径进行巡检作业。为保证动平台的位置精度,设置机器视觉系统进行实时跟踪测量。

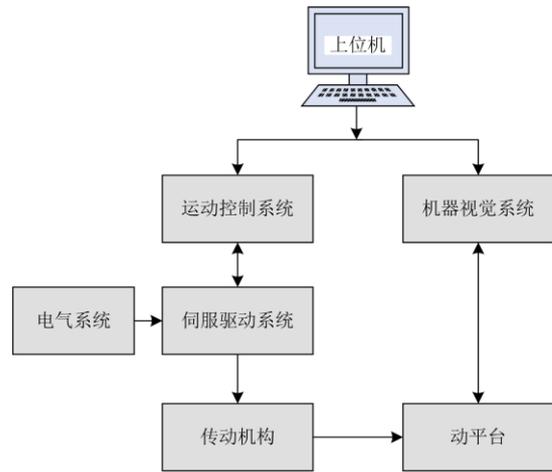


图 2 系统总体结构框图

Fig. 2 Diagram of system construction

上位机分别与运动控制系统和数据采集系统建立通信,通过通信函数,上位机向运动控制系统发送运动指令并接收数据;运动控制系统再向伺服驱动系统发送信号(脉冲或模拟量)控制电机运动,进一步驱动传动系统,电机编码器产生的位置信号通过驱动器反馈到运动控制系统;与此同时,电气系统为伺服系统提供交流电压。机器视觉系统用于巡检过程中动平台位置数据的采集和测量工作。

### 2 系统硬件设计

根据图 2 所示系统总体结构图,本文分别从伺服驱动系统、运动控制系统和机器视觉系统三个方面对柔索驱动巡检机器人的系统硬件进行研究。

#### 2.1 伺服驱动系统设计

##### 1) 伺服电机

为了适应数字控制的发展趋势,运动控制系统中常采用步进电机或交流伺服电机作为执行电动机。与步进电机相比,伺服电机的性能具有控制精度高、过载能力强、运行性能可靠、速度响应性能优良等优点。在直流伺服电机和交流伺服电机选型

上, 由于交流伺服电机本身结构简单、坚固耐用、体积小、质量轻, 无机械换向, 维护少等优点, 选用交流伺服电机作为伺服电机。经负载力矩和负载转动惯量运算, 选用安川 SGM7J-04AFC6S 型伺服电机。

### 2) 伺服驱动器

与伺服电机相匹配的伺服驱动器型号为安川 SGD7S-2R8A00A002, 驱动伺服电动机时可采用三环控制方式, 即电流环、速度环和位置环, 分别为三个 PID 闭环反馈调节系统。控制原理如图 3 所示。当系统需要较高的位置精度时, 采用速度控制模式或位置控制模式, 通过伺服电机的旋转编码器检测速度或位置信号构成位置负反馈, 通过 PID 调节实际转速或实际位置, 减小和指令位置间的误差值。

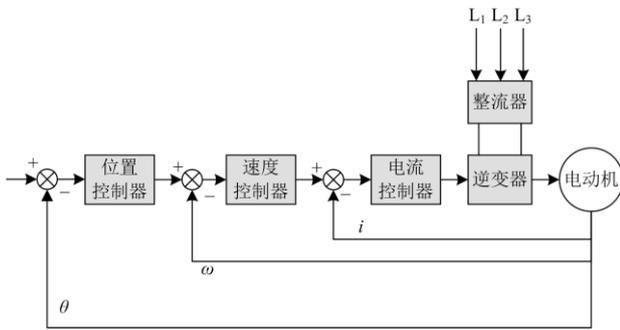


图 3 伺服系统控制原理图

Fig. 3 Control schematic diagram of servo system

### 3) 电气系统

安川 SGD7S-2R8A00A002 型伺服驱动器的工作电压为 220 V 的三相交流电。为使伺服驱动系统正常运行, 需要设计安全可靠稳定的供电系统, 设计的电气系统中, 空气断路器 Q 选用施耐德 C65N 微型断路器, 容量为 32 A, 配备施耐德 Vigi C65 ELE 型漏电保护器。伺服变压器 T 选用 SANO IST-C-050 型三相智能伺服变压器, 容量为 5.0 kW。伺服滤波器 Z 选用 SANO4-030A3803 伺服专用军品滤波器, 容量为 30 A, 该滤波器能够有效地抑制连接线与连接线之间以及连接线与地之间的电磁干扰, 提高伺服驱动系统的工作稳定性。供电系统的电气原理图如图 4 所示。

其中, A、B、C 和 N 分别为三相四线交流 380 V 的三根火线和一根零线, Q 为自动空气断路器, T 为伺服变压器, KM 为交流接触器的线圈或触点, ON 和 OFF 分别为动合开关和动断开关, Z 为伺服滤波器, L1、L2、L3 为三相交流 220 V。

## 2.2 运动控制系统设计

运动控制卡是运动控制系统的控制核心, 运动

控制命令的执行情况, 很大程度上取决于运动控制卡的处理性能和控制卡参数设定的优劣, 它接收上位机发送的运动控制命令, 处理并传递到伺服系统。实时运动控制系统由 NI(National Instruments)公司生产的型号分别为 NI PXIe-1078 的机箱、PXIe-8108 的控制器、PXI-7358 的运动控制卡和 UMI-7774 的运动接口板组成。运动控制系统硬件总体结构如图 5 所示。

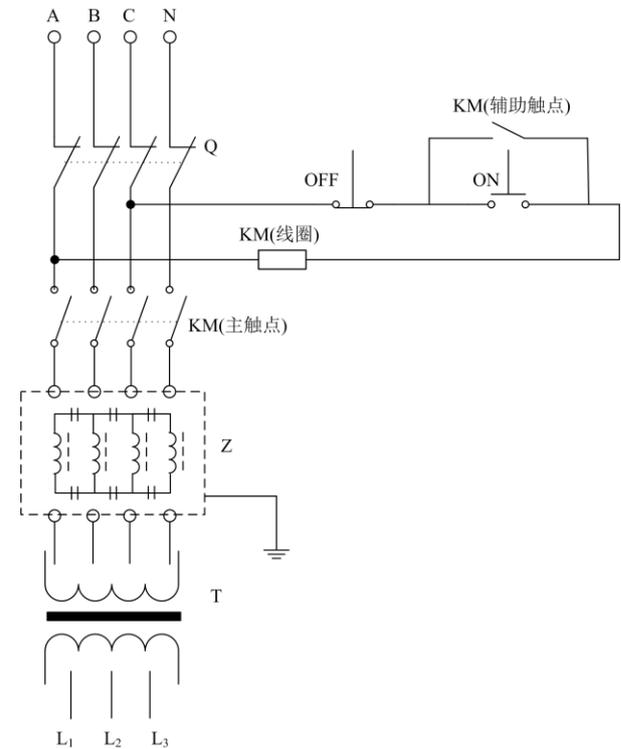


图 4 电气系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of electrical system

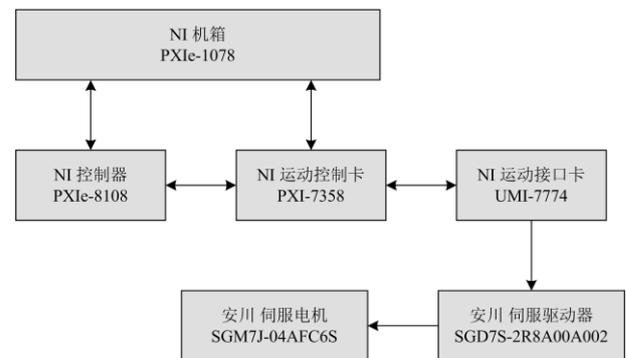


图 5 控制系统硬件结构图

Fig. 5 Structure diagram of control system hardware

PXIe-8108 控制器是一款 PXI Express 嵌入式控制器, 其处理器内核为 2.53 GHz Intel Core 2Duo T9400 双核处理器, 内存容量为 1 GB, 最大配置为

4 GB 单通道 800 MHz DDR2 内存和 6 M 的 L2 超高速缓存。PXI-7358 是一款具备双处理器能实现嵌入式实时控制，并能提供完全可编程运动控制，最多可同时实现 8 轴独立控制的高性能运动控制卡。UMI-7774 为通用运动接口卡，与 PXI-7538 运动控制卡配合使用，可同时实现 4 轴独立控制，满足 4 柔索(实际为 2 套伺服驱动系统)驱动巡检机器人的使用要求。

### 2.3 机器视觉系统设计

机器视觉系统采用双目立体视觉，通过图像处理获取空间场景深度信息，精度较高，可用于动平台位置测量。主要硬件包括工业相机(2448×2048)、红外光源(850 nm)、镜头(8 mm 焦距)、红外滤光片、标定板以及标志点构成。其中，两台相机的性能参数完全一致，软件同步触发，使用 USB 进行数据传输，帧频最高可达 100 fps。

双目立体视觉硬件测量示意图如图 6 所示。红外 LED 光源固定在镜头后端，光线发射角度与镜头主光轴平行。通过安装于相机镜头前部的红外滤光镜，实现红外成像硬件滤波。两相机之间的距离以及相机的角度均可调，以获得最佳的测量角度。

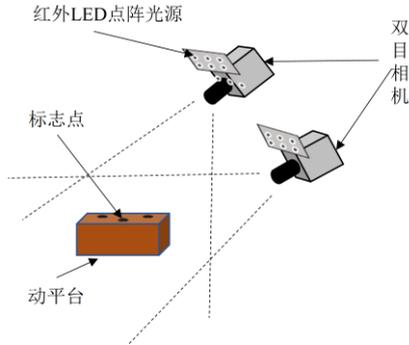


图 6 双目立体视觉位置测量示意图

Fig. 6 Illustration of binocular stereo vision pose measurement

## 3 运动学建模与分析

若要实现自主定位，要对巡检机器人的运动学进行建模，以获得云台位置与绳索长度的数学关系式，为保证其运动和控制稳定性，还要建立其动力学模型，对绳索拉力分布情况进行分析。

### 3.1 逆运动学建模

巡检机器人云台由 4 根柔性绳索悬挂，柔性绳索一端端点  $A_i (i=1,2,3,4)$  固定于坐标系  $OXYZ$  中，另一端端点  $B_i (i=1,2,3,4)$  与云台固连，云台质心坐标为  $C(c_x, c_y, c_z)$ 。设向量  $\mathbf{a}_i = A_i - O$ 、 $\mathbf{b}_i = B_i - C$ 、 $\mathbf{c} = C - O$ ，第  $i$  根绳索的长度可表示为  $L_i = a_i - c - b_i$ 。知道绳索的长度即可求得绳索的方向矢量为

$\mathbf{u}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{c} - \mathbf{b}_i / L_i$ 。巡检机器人云台运动位置的改变需同时控制 4 根柔性绳索改变长度来实现。因此， $\|\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2\| = \|\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2\|$ 、 $\|\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_4\| = \|\mathbf{b}_3 - \mathbf{b}_4\|$ 。

为简化计算，设平面  $A_1A_2A_3A_4$  与  $XY$  平面重合，且  $OX$  轴与线  $A_1A_2$  重合并指向右侧，如图 7 所示，相对于坐标系  $OXYZ$ ， $A_i$  点的位置矢量为： $\mathbf{a}_1 = [l+k \ 0 \ 0]^T$ 、 $\mathbf{a}_2 = [l-k \ 0 \ 0]^T$ 、 $\mathbf{a}_3 = [-l \ -n \ 0]^T$  和  $\mathbf{a}_4 = [-l \ n \ 0]^T$ ，云台质心  $C$  的位置矢量为  $\mathbf{c} = [c_x \ c_y \ c_z]^T$ 。相对于坐标系  $Cxyz$ ， $B_i$  点的位置矢量为： $\mathbf{b}_1 = [k \ 0 \ -h]^T$ 、 $\mathbf{b}_2 = [-k \ 0 \ -h]^T$ 、 $\mathbf{b}_3 = [b_x \ -n \ -h]^T$  和  $\mathbf{b}_4 = [b_x \ n \ -h]^T$ ，其中  $b_x$  为  $B_3$  在  $Cxyz$  坐标系中沿  $x$  方向的给定值。根据上述求得绳索长度矢量为

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{a}_1 - \mathbf{c} - \mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} l+k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k \\ 0 \\ -h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l-c_x \\ -c_y \\ -c_z+h \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{L}_2 = \mathbf{a}_2 - \mathbf{c} - \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} l-k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -k \\ 0 \\ -h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l-c_x \\ -c_y \\ -c_z+h \end{bmatrix} \quad (2)$$

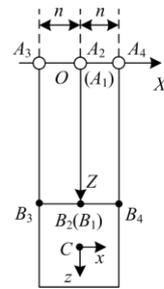
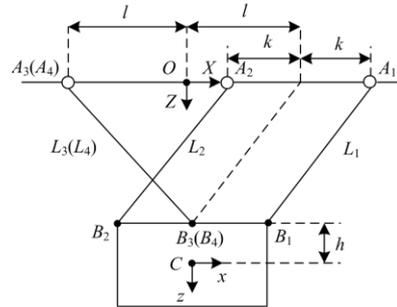


图 7 绳系结构投影示意图

Fig. 7 Illustration of cable system structure projection

$$\mathbf{L}_3 = \mathbf{a}_3 - \mathbf{c} - \mathbf{b}_3 = \begin{bmatrix} -l \\ -n \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_x \\ -n \\ -h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l-c_x-b_x \\ -c_y \\ -c_z+h \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_4 = \mathbf{a}_4 - \mathbf{c} - \mathbf{b}_4 = \begin{bmatrix} -l \\ n \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_x \\ n \\ -h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l - c_x - b_x \\ -c_y \\ -c_z + h \end{bmatrix} \quad (4)$$

再由式(1)一式(4)得到每根绳索的长度, 其中,  $L_1 = L_2 = \|\mathbf{L}_1\|$ 、 $L_3 = L_4 = \|\mathbf{L}_3\|$ 。

### 3.2 定点巡检轨迹规划

室内巡检机器人执行巡检工作时受自然环境影响较小, 通过设定运动路径, 对行走轨迹提前规划, 是控制云台实现精确定位的基础。对于变电站室内水平排列的设备, 巡检机器人进行水平运动, 需按照设备排列间距完成水平方向的定点停车。针对设备高度不同的情况, 巡检机器人还应具备竖直方向定点停车的能力。按照巡检工作内容, 可分为如图 8 所示行走轨迹规划图。

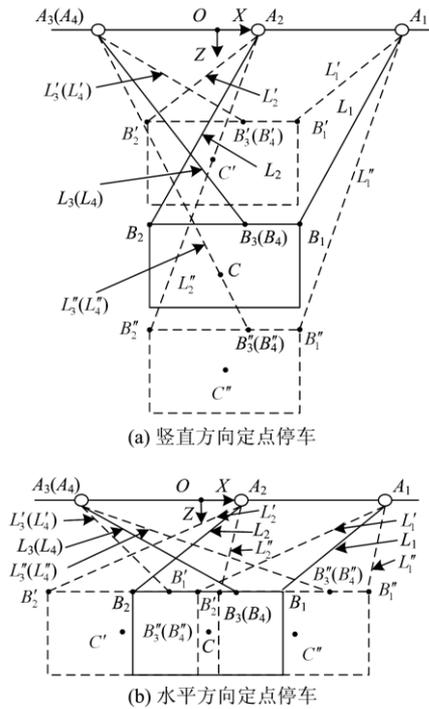


图 8 运动轨迹规划示意图  
Fig. 8 Planning diagram of walking trajectory

行走轨迹规划时, 要实时调节 4 根绳索的长度。在图 8(a)中, 云台沿竖直向上方向定点停车, 即云台由初始位置  $C$  向上运动到位置  $C'$ , 相应绳长由  $L_i$  变为  $L_i'$ ; 云台沿竖直向下方向定点停车, 即云台由初始位置  $C$  向下运动到位置  $C''$ , 相应绳长由  $L_i$  变为  $L_i''$ 。云台完成水平方向定点停车, 可分为水平向左和水平向右两个方向的定点运动。在图 8(b)中, 云台沿水平向左方向定点停车, 即云台由初始位置

$C$  向左运动到位置  $C'$ , 相应绳长由  $L_i$  变为  $L_i'$ ; 云台沿水平向右方向定点停车, 即云台由初始位置  $C$  向右运动到位置  $C''$ , 相应绳长由  $L_i$  变为  $L_i''$ 。

### 3.3 定点巡检仿真分析

#### 1) 垂直定点运动

云台竖直向上运动, 即云台由位置  $C$  运动到位置  $C'$  时, 绳长变化如图 9 所示。该过程中, 绳索 1 和绳索 2、绳索 3 和绳索 4 的长度变化趋势保持一致, 均逐渐变短, 但绳索 1 和绳索 2 的长度始终小于绳索 3 和绳索 4 的长度。

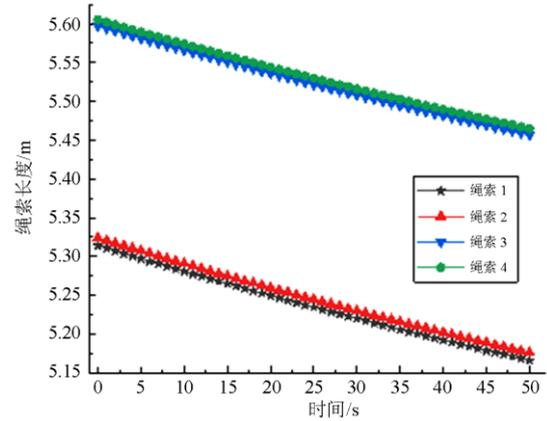


图 9 由位置  $C$  到位置  $C'$  运动时绳索长度变化  
Fig. 9 Change of cable length from  $C$  to  $C'$

#### 2) 水平定点运动

云台水平向左运动, 即云台由位置  $C$  运动到位置  $C'$  时, 可得绳长变化如图 10 所示。该过程中, 绳索 1 和绳索 2、绳索 3 和绳索 4 的长度变化趋势相反, 绳索 1 和绳索 2 的长度变长, 绳索 3 和绳索 4 的长度变短。

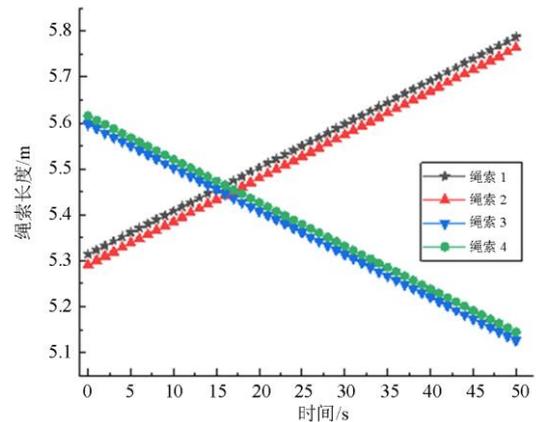


图 10 由位置  $C$  向位置  $C'$  运动时绳索长度变化  
Fig. 10 Change of cable length from  $C$  to  $C'$

### 4 系统软件设计

#### 4.1 运动控制软件设计

##### 1) 运动控制软件

考虑到运动控制硬件系统以 NI 公司的产品为主, NI 公司旗下图形化编程语言 LabVIEW, 与硬件系统交互性好, 通信 I/O 口丰富, 还能提供直接调用的封装式函数, 所以, 控制程序开发时采用了 LabVIEW 提供的开发环境。程序功能模块包括建立通信、执行控制指令、监控运动状态、退出程序等, 程序设计流程如图 11 所示, 运动控制软件如图 12 所示。

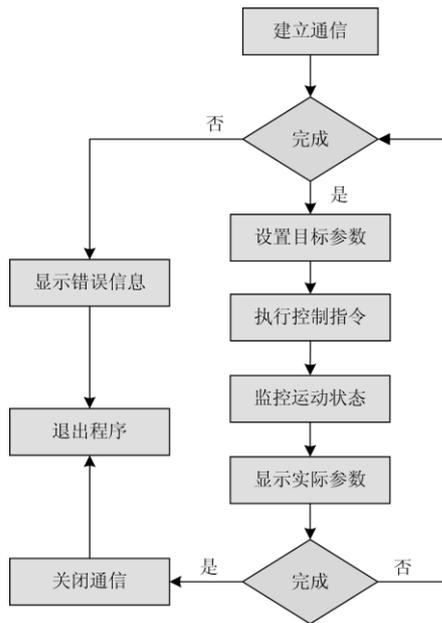


图 11 程序设计流程图

Fig. 11 Flow chart of program design

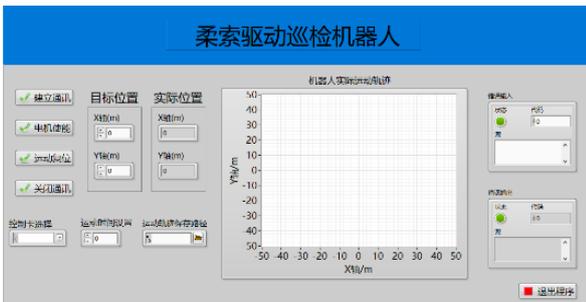


图 12 LabVIEW 开发的运动控制软件

Fig. 12 Motion control software developed by LabVIEW

##### 2) 运动控制算法

在机器人运动控制领域, 滑模控制以较好的鲁棒性而被广泛应用。滑模控制的基本问题, 是对于

任意控制系统:  $\dot{x} = f(x, u, t)$ ,  $x \in R^n, u \in R^m, t \in R$ , 通过确定滑模函数  $s(x)$ , 求解控制输入函数, 如式 (5) 所示。

$$u = \begin{cases} u^+(x) & s(x) > 0 \\ u^-(x) & s(x) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

滑模运动为切换面为零, 即  $s = 0$  时系统的运动, 此刻所有运动点称作终止点。滑模控制要求切换面上的运动点须为终止点, 则有

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \text{ 及 } \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \geq 0, \text{ 即 } \lim_{s \rightarrow 0} \dot{s} \leq 0 \quad (6)$$

在一定的时间限制内, 通过滑模控制能够使跟踪误差收敛于 0, 经设计控制律后, 可使跟踪误差趋近于稳定, 使得动平台到达目标位置。

#### 4.2 视觉系统软件设计

##### 1) 相机标定软件

双目视觉测量系统相机内、外参数标定以及立体校正的旋转参数, 都使用 Halcon 机器视觉软件编程实现, 如图 13 所示。选择正确的标定板描述文件与相机成像模型; 输入正确的相机内参初始值; 导入拍摄的标定图像(约 20 张), 即可进行内参标定。

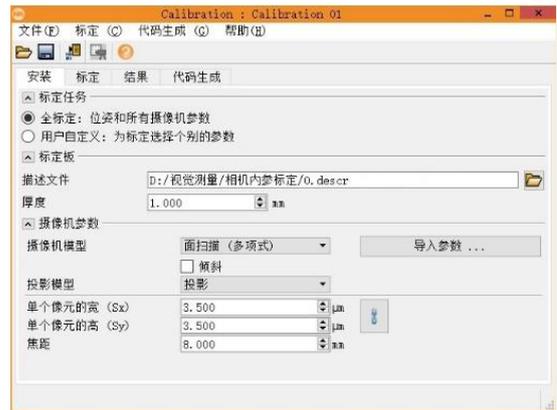


图 13 Halcon 开发的相机标定软件

Fig. 13 Camera calibration software developed by Halcon

##### 2) 位置解算软件

位置解算软件是基于 Visual Studio(2015)软件中 MFC 窗体开发的可视化界面程序, 如图 14 所示, 利用 Halcon、Eigen、OpenCV、G2O 以及相机的 SDK 等多种库的组合编程, 实现位姿的动态解算。在该软件中, 六个按钮按照功能有步骤进行, 若前续按钮点击后没有完成相应指令, 则后续按钮会被禁止使用。软件右下角是信息提示框, 对按钮功能完成状况或出错指令信息进行相关提示, 以便调试。

##### 3) 图像处理算法设计

双目视觉实施位置测量时, 首先要在动平台表

面粘贴编码标志点, 通过测量其位置信息实现动平台位置的解算。图像处理算法的目的是精确获取编码标志点中心在相机投影图像的二维像素坐标, 再将像素坐标与编码标志点的三维坐标正确匹配, 此时提取的二维像素坐标点的精确程度与位置解算精度正相关。图像处理算法的流程如图 15 所示, 通过多线程编程实现双目图像的处理。

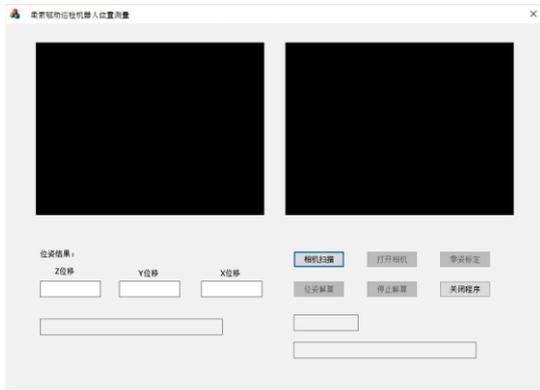


图 14 基于 Visual Studio 开发的位置解算软件

Fig. 14 Position solution software developed by Visual Studio

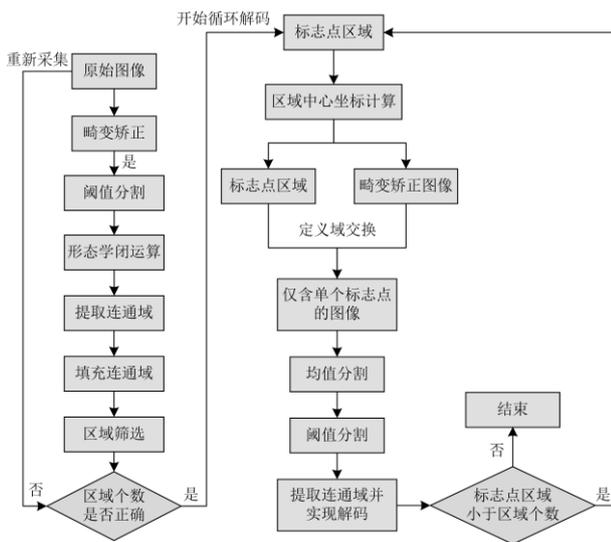


图 15 图像处理算法流程图

Fig. 15 Flow chart of image processing algorithm

## 5 实验与结论

以某 66 kV 变电站为应用对象, 根据上述研究方案构建柔索驱动巡检机器人系统并对其进行实验分析, 如图 16 所示。通过控制系统设置目标参数, 改变绳长即可驱动平台沿着水平运动方向(即, X 方向)或垂直运动方向(即, Y 方向)按规划的路径运动。

为验证柔性驱动巡检机器人的运动精度, 将动

平台沿 X、Y 方向同时位移 5 mm, 运用仪器进行位置测量, 重复实验 100 次, 误差结果如图 17 所示。从图 17 可以看出, X 方向误差值在区间[0.015, 0.025]内, Y 方向误差在区间[0.01, 0.03]内, 二者均能满足变电站室内巡检的工作精度要求。

本文根据变电站室内巡检工作特点, 利用柔索机器人的优点, 确定了柔索驱动巡检机器人系统的整体设计方案, 针对系统的硬件和软件分别进行了设计和开发, 并以某 66 kV 变电站为应用环境, 实验验证了室内柔索驱动巡检机器人系统运动控制效果。实验结果表明, 该巡检机器人定位精度高, 在变电站室内智能巡检中具有较好的推广和应用前景。

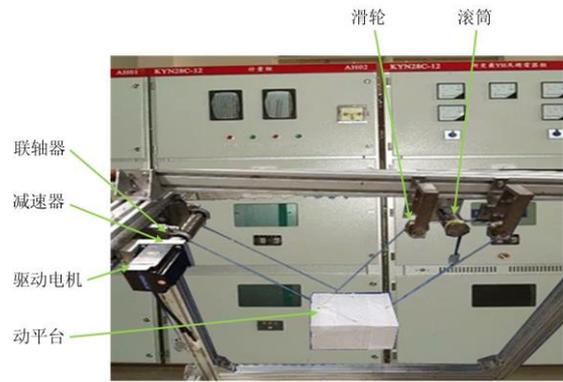
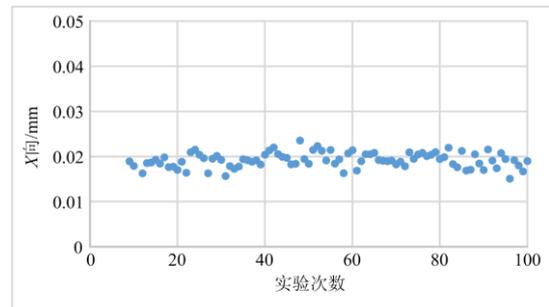
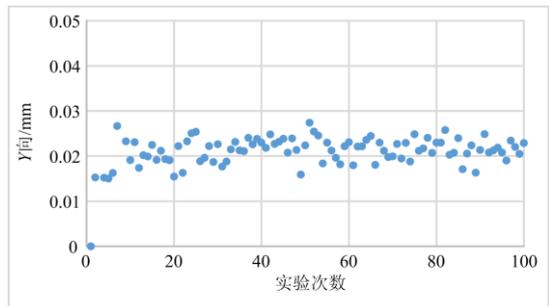


图 16 运动误差实验

Fig. 16 Motion error experiment



(a) 水平运动方向



(b) 垂直运动方向

图 17 水平和垂直运动误差

Fig. 17 Horizontal and vertical motion error

## 参考文献

- [1] 彭志强, 周航, 韩禹. 智能变电站自动化设备透明运维系统构建与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 156-163.  
PENG Zhiqiang, ZHOU Hang, HAN Yu. Construction and application of transparent operation and maintenance system for smart substation automation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 156-163.
- [2] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.  
HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. Review of electric power intelligent inspection robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 26-38.
- [3] 杨旭东, 黄玉柱, 李继刚, 等. 变电站巡检机器人研究现状综述[J]. 山东电力技术, 2015, 42(1): 30-34.  
YANG Xudong, HUANG Yuzhu, LI Jigang, et al. Research status review of robots applied in substations for equipment inspection[J]. Shandong Electric Power, 2015, 42(1): 30-34.
- [4] 马承志, 王宇雷, 杨玺, 等. 用于变电站自主巡视机器人的图像传输系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 105-109.  
MA Chengzhi, WANG Yulei, YANG Xi, et al. Research on image transmission system for substation autonomous patrol robot[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 105-109.
- [5] 林孝斌, 江浩侠, 胡金磊, 等. 面向变电站安全监控的视频智能终端布点优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 142-152.  
LIN Xiaobin, JIANG Haoxia, HU Jinlei, et al. Layout optimization of video intelligent terminal for substation safety monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 142-152.
- [6] 周展帆, 严宇, 邹德华, 等. 高压输电线路带电更换防振锤机器人的研制[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 178-183.  
ZHOU Zhanfan, YAN Yu, ZOU Dehua, et al. Development of stockbridge damper live replacing robot for high voltage transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 178-183.
- [7] 吴迪, 汤小兵, 李鹏, 等. 基于深度神经网络的变电站继电保护装置状态监测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 81-85.  
WU Di, TANG Xiaobing, LI Peng, et al. State monitoring technology of substation relay protection device based on deep neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 81-85.
- [8] 张岩, 沙立成, 陈茜, 等. 基于变电站巡检机器人的视频监控系統平台开发及应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(9): 84-86.  
ZHANG Yan, SHA Licheng, CHEN Qian, et al. Development and application research of video surveillance system platform based on substation inspection robot[J]. Automation & Instrumentation, 2019(9): 84-86.
- [9] LU Shouyin, ZHANG Ying, SU Jianjun. Mobile robot for power substation inspection: a survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 99: 1-18.
- [10] 鲁守银, 钱庆林, 张斌, 等. 变电站设备巡检机器人的研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 94-98.  
LU Shouyin, QIAN Qinglin, ZHANG Bin, et al. Development of a mobile robot for substation equipment inspection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 94-98.
- [11] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [12] 吕小文. 悬挂轨道式智能巡检机器人研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Lǚ Xiaowen. Research on intelligent inspection robot moving along suspended track[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [13] 刘庆宇. 室内电力巡检机器人系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
LIU Qingyu. Design and implementation of indoor power inspection robot system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [14] 魏永乐, 房立金. 带柔索双臂巡检机器人运动学建模与仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2018, 37(2): 389-395.  
WEI Yongle, FANG Lijin. Kinematical modeling and simulation of dual-arms inspection robot with flexible-cable[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2018, 37(2): 389-395.
- [15] 魏永乐. 带柔索双臂巡检机器人机构结构研究与设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.  
WEI Yongle. Research and design on dual-arms inspection robot structure with flexible cable[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [16] 房立金, 魏永乐, 陶广宏. 一种新型带柔索双臂式巡检机器人设计[J]. 机器人, 2013, 35(3): 319-325.  
FANG Lijin, WEI Yongle, TAO Guanghong. Design of a

- novel dual-arm inspection robot with flexible cable[J]. Robot, 2013, 35(3): 319-325.
- [17] 牛勃, 马飞越, 丁培, 等. GIS 局部放电智能巡检定位技术及应用[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 188-196.  
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Intelligent inspection and location technology of GIS partial discharge and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 188-196.
- [18] 卫晓东, 李易, 李祺, 等. 输电线路杆塔攀爬巡视机器人研制[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 162-167.  
WEI Xiaodong, LI Yi, LI Qi, et al. Development of climbing inspection robot for power towers[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 162-167.
- [19] 彭向阳, 金亮, 王锐, 等. 变电站机器人智能巡检技术及应用效果[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 223-232.  
PENG Xiangyang, JIN Liang, WANG Rui, et al. Substation robot intelligent inspection technology and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 223-232.
- [20] 彭道刚, 关欣蕾, 威尔江, 等. 巡检机器人云台远程控制系统的的设计[J]. 电气传动, 2018, 48(11): 45-49.  
PENG Daogang, GUAN Xinlei, QI Erjiang, et al. Design of remote PTZ control system for patrol robot[J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 45-49.
- [21] NAN R, LI D, JIN C, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013, 44(1).
- [22] WEI Huiling, QIU Yuanying, SU Yu. Motion control strategy and stability analysis for high-speed cable-driven camera robots with cable inertia effects[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(5): 13-15.
- [23] 胡余健. 一种索并联摄像机器人设计与建模分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
HU Yujian. Design and model analysis of a kind of cable driven parallel camera robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [24] WEI Huiling, QIU Yuanying, YANG Jian. An approach to evaluate stability for cable-based parallel camera robots with hybrid tension-stiffness properties[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12: 1-9.
- [25] 刘斌. 中央电视台二维有线传输索道摄像系统介绍[J]. 现代电视技术, 2016(7): 96-101.  
LIU Bin. An introduction to CCTV 2-dimensional wired transmission cable camera system[J]. Advanced Television Engineering, 2016(7): 96-101.
- [26] 訾斌, 段宝岩, 杜敬利. 柔索驱动并联机器人动力学建模与数值仿真[J]. 机械工程学报, 2007(11): 82-88.  
ZI Bin, DUAN Baoyan, DU Jingli. Dynamic modeling and numerical simulation of cable-driven parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007(11): 82-88.

收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-11-02

作者简介:

邬蓉蓉(1984—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备监测评估及智能化技术研究; E-mail: wurongrong\_neep@163.com

黎大健(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高电压技术研究; E-mail: li\_dj.sy@gx.csg.cn

覃剑(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 从事高压电气设备管理。E-mail: qin\_jian@gx.csg.cn

(编辑 周金梅)