

新型四臂巡检机器人结构设计及转向越障研究

房立金¹, 祝 帅², 贺长林², 许继谦²

(1. 东北大学 机器人科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对巡检机器人工作任务的需求和高压输电线路障碍物的特点, 提出一种由三轴复合转动关节和双轴复合转动关节串联三个杆件组成的新型四臂巡检机器人, 机器人可以通过各个关节之间的配合来实现转向越障中的重力平衡. 分析了机器人转向越障的重力平衡条件和转向越障的步态, 并利用 Adams 仿真软件对转向越障整体过程进行仿真分析, 最后进行了样机的实验. 通过对仿真结果和样机实验的分析表明, 该巡检机器人具有转向越障的能力, 并能够在转向越障中保证重力平衡.

关 键 词: 巡检机器人; 转向越障; 重力平衡; 仿真; 实验

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)06-0825-06

Research on the Structure Design and Steering and Obstacle-crossing of a Novel Four-Arm Inspection Robot

FANG Li-jin¹, ZHU Shuai², HE Chang-lin², XU Ji-qian²

(1. School of Robot Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: FANG Li-jin, E-mail: ljfang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the working task requirements of an inspection robot and the characteristics of obstacles on high voltage transmission lines, a novel four-arm inspection robot was proposed. The robot was composed of three serial poles which were connected by a three-shaft composite rotary joint and a two-shaft composite rotary joint. The robot can meet the requirements of gravity balance by adjusting its joint angle when it steers and crosses obstacles. The gravity balance condition and the postures of steering and obstacle-crossing were analyzed, and the Adams simulation software was used to simulate the whole process of steering and obstacle-crossing. Finally, an experiment of the robot was carried out. The simulations and experiments showed that the inspection robot is able to steer and cross obstacles, and it can keep gravity balance.

Key words: inspection robot; steering and obstacle-crossing; gravity balance; simulation; experiment

高压输电线路稳定、安全运行与社会发展和人民的日常生活息息相关. 线路的巡检有时在高山、长河地区, 并且会遇到台风、冰雹、大雪等恶劣天气, 这将给人工巡检线路带来困难. 机器人作为一种新的巡检装备, 可以发挥很大作用. 巡检机器人不仅在直线线路行走, 有时也需要进行转向巡检, 但对于现有的大多数巡检机器人来说, 在转向过程中保持重力平衡是巨大的挑战.

国外对高压输电线路的研究始于 20 世纪 80

年代, 日本东京电力公司 1988 年率先研制出光纤复合架空地线(OPGW)巡检移动机器人^[1]. 目前, 对双臂巡检机器人的研究成果较多, 如: 加拿大魁北克水电研究院研制的 LineScout 巡检机器人^[2-3], 日本的 Expliner 巡检机器人^[4]. 中科院沈阳自动化所和武汉大学等单位相继研制出多款双臂结构巡检机器人^[5-8]. 这些双臂结构机器人均有单臂挂线重心不稳的问题, 而且本身不具备转向的能力. 我国也有许多典型的三臂式巡检机器

人,比如:杨德伟等设计的平行四边形桁架构型的机器人样机、王吉岱等设计柔性臂机器人样机以及湖南大学的新型三臂式机器人样机^[9-12]. 陶广宏等也提出一种新型多单元串联机器人^[13],该结构由平行四边形机构串联组成,此结构可以通过直线障碍和转角障碍,但其结构复杂,较难控制.

本文设计出一种新型四臂结构的的巡检机器人. 该巡检机器人采用模块化设计,互换性好,其不仅可以跨越直线杆塔上的防振锤、压接管、悬垂金具等障碍物,还可以稳定跨越转角塔障碍. 对该巡检机器人在转向越障遇到的重力平衡问题进行分析研究,并给出了转向越障过程的步态分析,利用 Adams 软件对转向过程真实环境进行仿真分析. 最后做出样机并实验.

1 巡检机器人结构设计

1.1 机器人整体机构设计

巡检机器人的结构简图如图 1a 所示. 本文提出一种主体由三轴复合转动关节和双轴复合转动关节串联 3 个杆件组成的新型四臂巡检机器人,机器人四个手臂上均有轮夹复合机构. 双轴复合转动关节位于机器人的两端,它是由端俯仰关节(5)和端偏转关节(6)组成,当两端手臂处于自由状态时,能够实现两端手臂的自转运动和俯仰运动,当两端手臂上轮夹复合机构夹紧线路固定不动时,能够实现相连接杆件的俯仰运动和偏转运动. 三轴复合转动关节位于串联的两个杆件之间,起到连接两个杆件的作用,它是由中偏转关节(8)、中俯仰关节(9)和中手自转关节(10)组成,能够实现两端杆件的俯仰运动和偏转运动以及中间手臂的自转. 每个手臂(4)均与由夹爪机构(2)和行走轮(3)组成的轮夹复合机构连接,夹爪机构可以使手臂固定在线路上. 图中杆件长度 $a_1 = a_2 = a_3 = 600\text{ mm}$,手臂长度为 $h = 400\text{ mm}$. 为方便描述,将机器人主体的四个复合关节从右向左依次命名为关节 1、关节 2、关节 3 和关节 4,行走轮从右向左依次为轮 1、轮 2、轮 3 和轮 4. 最终确定机器人三维实体机构,并运用 SolidWorks 绘制出机器人实体模型如图 1b 所示.

1.2 机器人关键关节设计

机器人主体关键关节包括两个双轴复合转动关节和两个三轴复合转动关节,每个复合关节都能实现机器人的俯仰运动、偏转运动和手臂自转运动.

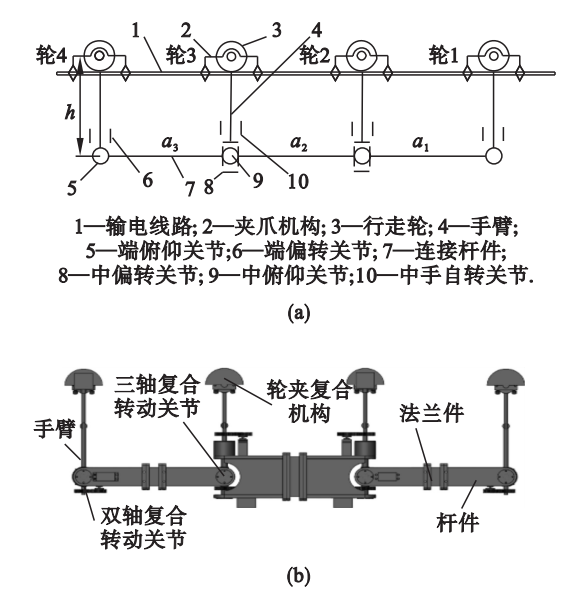


图 1 机器人结构简图及实体模型
Fig. 1 Structure diagram and solid model of the robot
(a)—结构简图; (b)—实体模型.

关节 1 和关节 4 均是双轴复合转动关节,关节 1 如图 2 所示. 俯仰舵机(2)安装在杆件(1)上,当杆件固定不动时,可以通过齿轮啮合的运动来驱动手臂的俯仰运动;当手臂挂在输电线路固定不动时,可以通过齿轮的公转运动带动杆件的俯仰运动. 手臂自转舵机(5)安装在端横轴(4)上,同俯仰运动类似,根据固定端的不同可以实现手臂自转轴(3)的转动或者杆件的偏转运动.

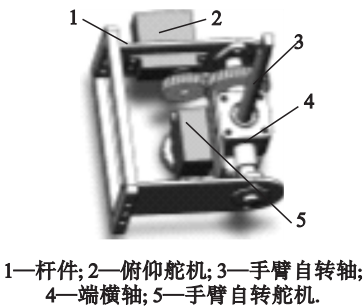
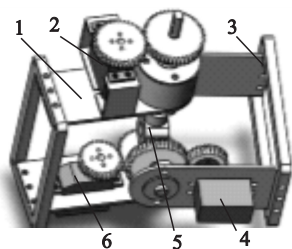


图 2 机器人关节 1
Fig. 2 Joint 1 of the robot

关节 2 和关节 3 均是三轴复合转动关节,以关节 2 为例进行介绍,如图 3 所示. 三轴复合转动关节与双轴复合转动关节实现的运动形式类似. 手臂自转舵机(2)安装在左杆件(1)上实现手臂的自转运动;偏转舵机(6)安装在左杆件(1)上实现左杆件或者右杆件的偏转运动;俯仰舵机(4)安装在右杆件(3)上实现左杆件或者右杆件的俯仰运动.



1—左杆件; 2—手臂自转舵机; 3—右杆件;
4—俯仰舵机; 5—十字轴; 6—偏转舵机。

图3 机器人关节2

Fig. 3 Joint 2 of the robot

2 巡检机器人转向越障过程重力平衡及步态分析

2.1 机器人转向越障重力平衡分析

输电线路巡检机器人在线路上行走越障时最重要的是保证重力平衡,不仅要保证纵向重力平衡,而且要满足侧向重力平衡的要求。

纵向重力平衡就是在竖直平面内保证重力平衡,使得巡检机器人在竖直平面内不发生前后倾斜。如果发生前后倾斜,不但影响末端手臂的工作空间,还会增加巡检机器人掉落的可能性。纵向重力平衡问题主要是在单一手臂挂线时才会出现的前后倾斜现象。本文设计的新型四臂巡检机器人,当轮1进行越障时,轮2和轮3挂在线路上;当轮2和轮3越障时,轮1和轮4挂在线路上。无论是在直线越障时还是在转向越障时,不存在单一手臂挂线的情况,完全解决了纵向重力平衡问题。

保证侧向重力平衡是为了使机器人在水平面内不发生侧翻。要保证侧向重力平衡就需要将机器人重心调整到期望的竖直平面内,使得手臂准确无误进行脱线和上线的动作。本文设计的新型四臂巡检机器人无论在直线上越障还是在转角越障均能保证侧向重力平衡,从而使得机器人能够稳定运行。当在直线上越障时,其中两个手臂挂线,另外两个手臂做出镜像的动作以保证重心始终在输电线路所在的竖直平面内;轮1转向越障时,轮4进行配合运动;轮2和轮3转向越障时,通过偏转关节调整机器人的姿态以保证侧向重力平衡;轮4转向越障时,轮1进行配合运动。

本文设计的机器人转向越障过程中不存在纵向重力平衡问题,只需要考虑侧向重力平衡的条件就能使得机器人安全稳定地进行转向越障。保证机器人侧向重力平衡的条件可以表示为

$$M_p = \sum_{j=1}^n \alpha_j m_j g l_j + M = 0. \quad (1)$$

式中: M_p 为机器人每部分重心相对于期望平面 p 的力矩之和; m_j 为机器人各部分的质量; g 为重力加速度; l_j 为各部分重心到期望平面的垂直距离; α_j 为力矩正负系数,用来区分重心在期望平面两侧产生力矩的正负; M 为轮夹复合机构提供的力矩,当行走轮速度方向与平面 p 平行时,此行走轮轮夹复合机构提供力矩 M 为 0。由式(1)可知,当姿态调整有误差或者遇到外界干扰时,可以调节 M 的大小使方程成立(即控制轮夹复合机构夹紧力的大小),保证机器人的侧向重力平衡。

2.2 巡检机器人转向越障的步态分析

当巡检机器人在直线杆塔上行走时,机器人通过俯仰运动和偏转运动跨越直线杆塔上的防振锤、压接管、悬垂金具等障碍物。高压输电线路在水平面内并不一定是一条直线,为了满足各个方向用户的需要,就会利用转角塔来改变输电线路在水平面内的方向,但这却给巡检机器人带来了越障的困难。当巡检机器人遇到有水平偏转角度的障碍环境时,可以采用转向越障的方式通过障碍。转向越障过程的俯视图如图4所示。图4中点划线 P 和阴影部分表示机器人重心所在位置区域。

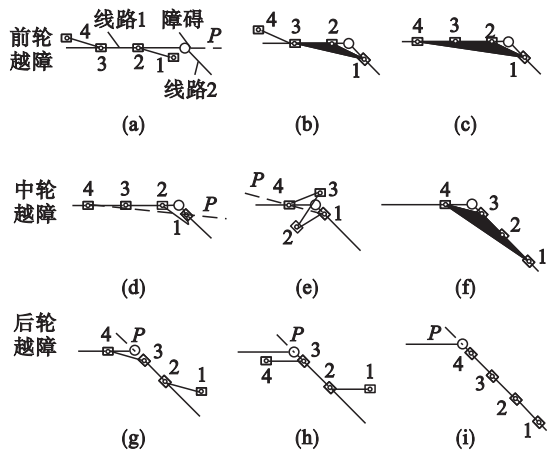


图4 转向越障过程

Fig. 4 Process of steering and obstacle-crossing

- (a) —前轮越障开始; (b) —前轮挂线;
(c) —前轮越障结束; (d) —中轮越障开始;
(e) —中轮脱线; (f) —中轮越障结束;
(g) —后轮越障开始; (h) —后轮脱线;
(i) —转向越障完成。

巡检机器人转向越障由三个阶段完成,分别为前轮(轮1)越障阶段、中轮(轮2和轮3)越障阶段、后轮(轮4)越障阶段。

前轮越障阶段分为以下三步:

1) 当巡检机器人检测到转向障碍时停止前进,轮2和轮3的夹爪机构夹紧高压线路,轮1和

轮 4 同时抬起并摆出高压线路所在的竖直平面,使得重心位置始终在线路 1 所在的竖直平面内,如图 4a 所示。

2) 轮 2 和轮 3 夹爪松开并行走前进,使轮 2 靠近转向障碍,并调整各个关节角度使轮 1 挂到线路 2 上,如图 4b 所示。

3) 轮 1,2,3 的夹爪机构夹紧线路,使得轮 4 摆回高压线路 1 上,在此过程中重心位置由图 4b 的三角形阴影向图 4c 的三角形阴影过渡,完成前轮的转向越障过程,如图 4c 所示。

中轮越障阶段分为以下三步:

1) 调整轮 1 所在手臂的俯仰角度以及机器人的位置,使得机器人重心位于轮 1 与轮 4 连线的竖直平面内,如图 4d 所示。

2) 轮 1 的夹爪机构夹紧线路 2,抬起轮 2 和轮 3 并摆出高压线路所在的竖直平面,同时改变机器人的姿态为“N”字形,如图 4e 所示。

3) 轮 4 的夹爪机构夹紧线路,轮 1 前进,作尺蠖运动,若一次尺蠖运动轮 2 和轮 3 没能越过转角,则再进行一次尺蠖,直到轮 2 和轮 3 越过转角障碍并挂在线路 2 上为止,此过程中时时调整姿态使得重心始终在轮 1 和轮 4 连线所在的竖直平面内,最后完成中轮越障过程,如图 4f 所示。

后轮越障阶段分为以下三步:

1) 轮 2,3,4 的夹爪机构夹紧线路,抬起轮 1 并摆出一定的角度,使机器人重心位于线路 2 所在竖直平面内,为轮 4 的脱线做准备工作,如图 4g 所示。

2) 轮 4 夹爪机构松开,使得轮 4 脱线并摆出一定角度,此过程轮 1 的动作进行配合轮 4 的脱线过程保持侧向重力平衡,如图 4h 所示。

3) 轮 2 和轮 3 夹爪松开并行走前进,直到轮 4 可以越过转角为止,然后轮 1 和轮 4 同时落线,完成机器人的转向越障过程,如图 4i 所示。

3 巡检机器人转向越障过程仿真分析

根据巡检机器人转向越障过程的实际情况,运用 Adams 对巡检机器人进行仿真分析。首先在 SolidWorks 中建立好简化后的三维模型并保存为 Parasolid 格式,然后将模型导入 Adams 中。经过简化的模型仅保留主要零件,但其几何尺寸和质量分布均与实际机器人相同。将其导入 Adams 之后,利用 Adams 添加各个关节的运动副、驱动、力、力矩等,轮夹复合机构的夹紧力利用添加力的约束进行等效。最后利用 SPLINE 函数将轨迹规

划的各个关节角度导入 Adams 中进行拟合仿真。

巡检机器人仿真过程中,高压输电线路转向的角度为 30° 。仿真时间为 180 s,可分为三个阶段:0~60 s 为轮 1 转向越障阶段,60~120 s 为轮 2 和轮 3 转向越障阶段,120~180 s 为轮 4 转向越障阶段。机器人转向越障仿真过程中各个关节的力矩变化如图 5 所示。侧向摆动角度变化情况如图 6 所示。

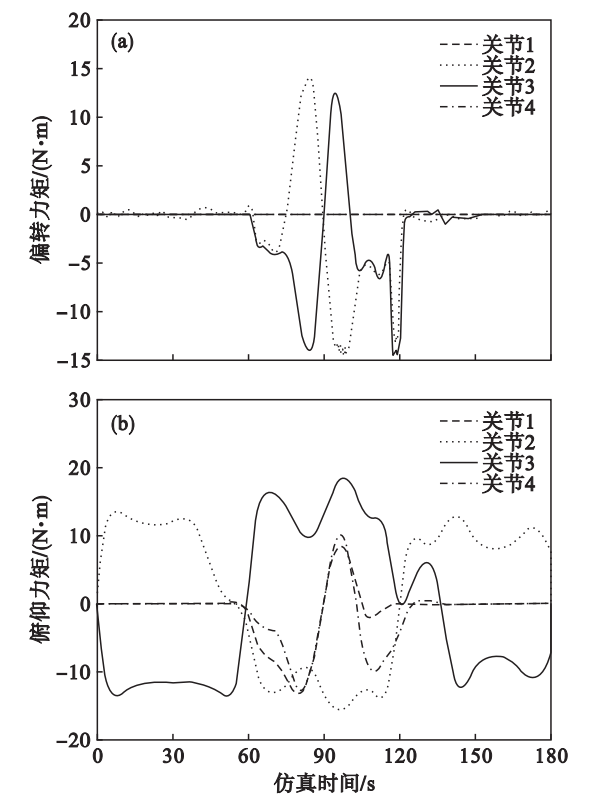


图 5 仿真过程力矩变化
Fig. 5 Torque change of the simulation process
(a)—偏转力矩;(b)—俯仰力矩。

由图 5a 可知各个关节偏转力矩的变化情况,在 0~60 s 和 120~180 s 分别为轮 1 和轮 4 转向阶段,此过程中偏转运动只需克服关节的摩擦力,因此偏转力矩较小;60~120 s 为轮 2 和轮 3 转向阶段,由步态分析可知,转向过程中需要变化机器人姿态为“N”字形,调整姿态过程中需要关节 2 和关节 3 的偏转关节配合轮 1 和轮 4 的运动,关节 2 和关节 3 所需要力矩几乎完全一样,说明伸缩和伸展过程配合恰当。机器人整个仿真过程中偏转力矩最大不超过 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

由图 5b 可知各个关节俯仰力矩变化情况,在 0,60,120 和 180 s 左右时各个关节俯仰力矩基本为 0,说明机器人处于四臂挂线情况。0~60 s 轮 1 转向阶段,主要依靠关节 2 和关节 3 的俯仰关节抬起转向手臂和配合手臂,关节 2 的俯仰力矩在

50 s左右为0,说明轮1 首先挂线,然后轮4 再回转挂线;60~120 s 轮2 和轮3 转向过程,需要机器人整体姿态的调整,俯仰力矩变化较明显,关节2 和关节3 力矩大小几乎相同,方向相反,此过程中关节1 和关节4 的俯仰运动主要是配合运动,两个关节需要力矩有所差异,主要由于尺蠖运动中固定端不同造成的;120~180 s 刚开始阶段为调整轮1 位置配合轮4 转向阶段,这与轮1 转向有所区别,关节1 和关节4 俯仰力矩几乎为0,说明此过程中轮1 和轮4 所在手臂始终处于竖直状态.整个过程中俯仰力矩最大不超过20 N·m.

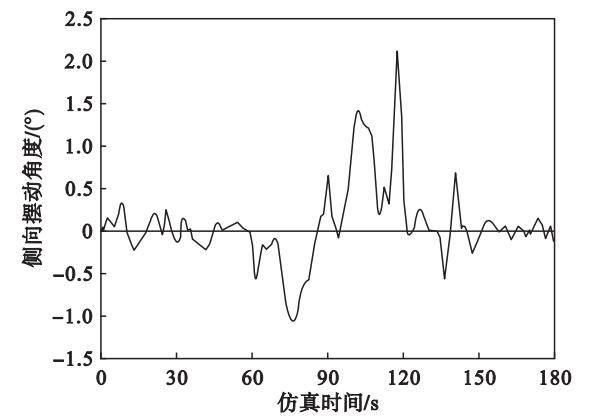


图6 仿真过程摆动角度

由图6可知,0~60 s 和120~180 s 机器人摆动角度较小,60~120 s 摆动角度稍微增大,但总体摆动角度均在-1.25°~2.25°之间,摆动角度属于转向过程中能够接受的范围,说明转向过程中满足侧向重力平衡的要求.

4 巡检机器人样机实验

为了验证本文所设计巡检机器人机构的可行性,研制了原理样机.机器人样机具体参数如表1所示,机器人样机和实验环境如图7所示.考虑经济性问题,机器人样机加工长度尺寸为实际设计长度尺寸的三分之一.机器人样机机构以及各个零件质心相对整个机器人的位置与实际设计机器人基本相同,此样机可以验证转向越障过程中重力平衡问题.

在图7的实验环境中,采用外置直流电源,高压输电线直径为12 mm,防振锤和悬垂线夹为线路上的典型障碍物,上位机起到了人机交互的作用,角度传感器主要用于测量巡检机器人运动中的侧向摆动角度,驱动器用于驱动行走轮伺服电机,控制器采用单片机STM32.

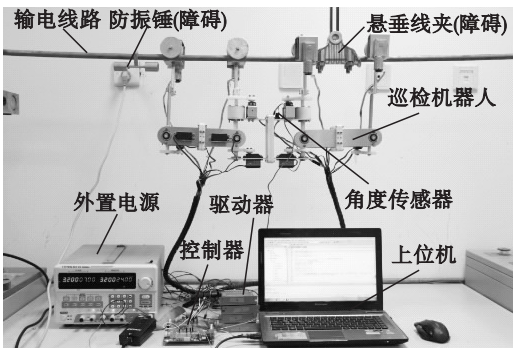


图7 机器人样机实验平台

Fig. 7 Experimental platform of the robot

表1 实验样机参数

Table 1 Parameters of the experimental prototype

质量 kg	最大行走速度 m·min ⁻¹	整体尺寸/cm			电机 数目
		长	宽	高	
4.2	3.3	60	13	40	14

为了验证巡检机器人的转向越障能力,在实验室搭建的模拟环境中进行直线上行走和转向越障的实验.巡检机器人转向越障过程实验如图8所示,转向实验过程中机器人侧向摆动的角度变化如图9所示.实验中转向的角度与仿真时转向

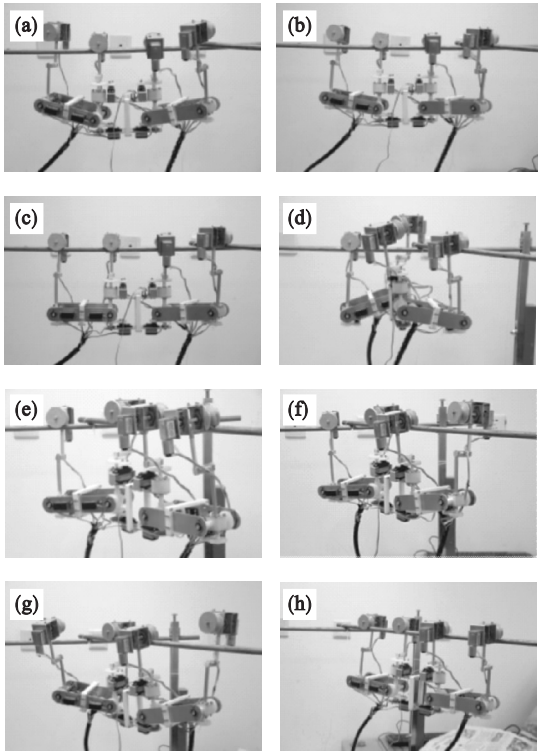


图8 转向越障实验

Fig. 8 Experiment of steering and obstacle-crossing

(a)~(c)—轮1 转向越障以及轮4 配合转向的过程;
(d)和(e)—轮2 和轮3 转向越障时N 字型姿态及挂线过程;
(f)~(h)—轮4 转向越障的过程及机器人调整到转向越障之前初始姿态的过程.

角度相同,均为 30° 。

图 9 是由角度传感器获得角度数据并导入 Matlab 中获得。由图可知 $0 \sim 60$ s 轮 1 转向和 $120 \sim 180$ s 轮 4 转向时摆动角度较小, $60 \sim 120$ s 轮 2 和轮 3 转向时摆动稍微增大,摆动角度均在 $-2.5^\circ \sim 3.5^\circ$ 之间,实验时的摆动角度比仿真时摆动角度略有增大,但整体趋势基本相同。整个实验过程摆动角度在转向越障允许的范围之内。

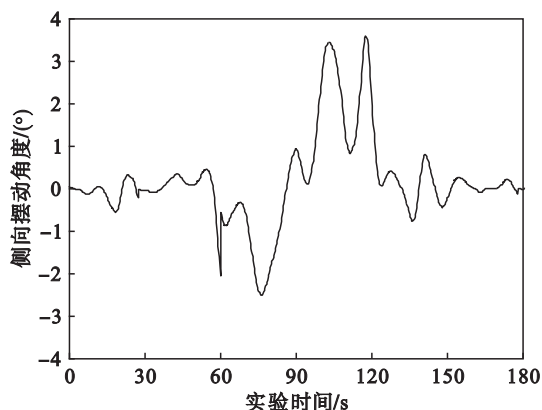


图 9 实验过程摆动角度

Fig. 9 Swing angle of the experiment process

5 结 论

1) 提出了一款四臂式巡检机器人机构,可以跨越直线段障碍,而且具有转向越障能力。

2) 给出了保证转向越障过程的重力平衡的条件,并规划出转向越障中运动步态,充分证明了该机构具有转向越障中保证重力平衡的能力。

3) 仿真和样机实验结果表明,该机器人在越障过程中平稳,没有发生明显的侧偏现象,满足重力平衡的要求,机器人具有转向越障的能力。

未来将对巡检机器人结构尺寸以及零件材料选择进行优化,并对机器人控制系统进行集成化设计。

参考文献:

[1] Sawada J, Kusumoto K, Maikawa Y, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, 6(1): 309–315.

[2] Mostashfi A, Fakhari A, Badri M A. A novel design of inspection robot for high-voltage power lines[J]. *Industrial Robot*, 2014, 41(2): 166–175.

[3] Pouliot N, Montambault S. Field-oriented developments for LineScout technology and its deployment on large water crossing transmission lines[J]. *Journal of Field Robotics*, 2012, 29(1): 25–46.

[4] Debenest P, Guarnieri M. Expliner—From prototype towards a practical robot for inspection of high-voltage lines[C]// The 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI). Montreal, 2010: 1–6.

[5] Fang L J, Wang H G. Research on the motion system of the inspection robot for 500 kV power transmission lines[C]// The 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI). Montreal, 2010: 1–4.

[6] 郭伟斌, 王洪光, 姜勇, 等. 一种输电线路巡检机器人越障规划方法[J]. *机器人*, 2012, 34(4): 505–512.
(Guo Wei-bin, Wang Hong-guang, Jiang Yong, et al. Obstacle navigation planning for a power transmission line inspection robot[J]. *Robot*, 2012, 34(4): 505–512.)

[7] Wang H G, Jiang Y, Liu A H, et al. Research of power transmission line maintenance robots in SIACAS [C]// International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, 2010: 1–7.

[8] Wu G P, Xiao H, Xiao X H, et al. Transmission line inspection robot and deicing robot: key technologies, prototypes and applications[C]// International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, 2010: 1–6.

[9] Wang J D, Sun A Q, Su W, et al. Development of an expert control strategy for controlling obstacle crossing of a high-voltage transmission line inspection robot [C]//The 18th International Conference on Automation & Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 285–289.

[10] Yang D W, Feng Z R, Ren X D, et al. A novel power line inspection robot with dual-parallelogram architecture and its vibration suppression control[J]. *Advanced Robotics*, 2014, 28(12): 807–819.

[11] 杨德伟, 冯祖仁, 张翔. 新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(9): 43–48.
(Yang De-wei, Feng Zu-ren, Zhang Xiang. Mechanism design and kinematic analysis of a novel tribrachiation robot for transmission line inspection[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(9): 43–48.)

[12] Liang Q K, Wang Y N, Zhang D, et al. Multifunctional robotic system for live power transmission lines [J]. *International Journal of Robotics & Automation*, 2014, 29(2): 175–183.

[13] 陶广宏, 房立金. 三臂式巡检机器人重力平衡及其转向越障方法[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(9): 1150–1157.
(Tao Guang-hong, Fang Li-jin. Gravity balance and steering and obstacle-crossing of three-arm inspection robots [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 27(9): 1150–1157.)