

新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析

杨德伟^{1,2}, 冯祖仁^{1,2}, 张翔^{1,2}

(1. 西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安;

2. 西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了增强机器人的越障能力, 简化机械结构, 减小越障时的电机负荷, 设计了一种新型结构的三臂巡线机器人. 该机器人采用双平行四边形桁架构型实现三臂的位姿调整运动, 机构重心可调以减小桁架控制电机的负荷, 各臂末端设置夹线轮以增强机器人跨越引流线障碍的能力. 巡线机器人调整形态越障时, 因机构重心偏移会引起机器人整体绕线缆偏转, 属于基座浮动式机器人. 根据机器人重力平衡条件构造优化目标函数, 以基座浮动角度作为搜索变量, 将基座浮动式机器人的运动分析问题转化为一维优化问题进行求解, 仿真实验验证了算法的有效性. 原型样机在实验室环境下完成了线上行走和越障实验, 验证了机构的可行性.

关键词: 巡线机器人; 三臂机器人; 基座浮动式机器人; 机构设计; 运动分析

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0043-06

Mechanism Design and Kinematic Analysis of a Novel Tribrachiation Robot for Transmission Line Inspection

YANG Dewei^{1,2}, FENG Zuren^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}

(1. Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel tribrachiation robot is designed to enhance its cross-obstacle ability, simplify its structure, and reduce the load on motors. A dual-parallelogram frame structure is taken as the main part of the robot to adjust the gesture of each arm, the robot centroid can be adjusted to decrease the load on the motors for frame shape control, and the robot ability to traverse flexible jumper line is enhanced by the gripper at the end of each arm. Line inspection robot, which can be categorized as a floating base robot, will rotate around the line passively due to centroid deviation when it changes configuration to traverse obstacles. The kinematic analysis for floating base robot is converted to one-dimensional optimization, where the gravity balance condition is considered to construct the optimization objective function and the floating base angle is regarded as the optimization parameter. Simulation shows the effectiveness of the proposed method, and the feasibility of the mechanism is verified by the prototype robot traversing obstacles on line in laboratory environment.

Keywords: transmission line inspection robot; tribrachiation robot; floating base robot; mechanism design; kinematic analysis

为了保证高压输电线路安全, 需要定期巡检线路. 现有巡线方法主要有人工巡线、飞行器巡线和机器人巡线等. 人工巡线费时费力, 恶劣的巡线条件对巡线工人具有一定的危险性; 飞行器巡线成本较高,

且由于难以近距离检测线缆,检测精度不高.目前,机器人巡线方法正成为研究的热点,其中机构设计是机器人巡线方法的关键技术^[1].

从 1989 年 Sawada 等人^[2]首次提出一种弧形巡线机器人至今,国内外多家研究机构提出了各自的设计方案.文献[3]对 2009 年以前机器人巡线领域的研究进展做了比较全面的综述.文献[4]利用避雷线刚性好的特点,提出了一种双臂回转越障机器人,可沿避雷线行走.文献[5]提出了另一种可沿输电导线行走的双臂机器人,具有一定的越障能力.双臂型机器人结构简单,质量较小,但越障时只有单臂悬挂,安全系数不高,机构易出现扭摆,对控制系统要求较高.为了增强机构越障时的稳定性,出现了多臂型巡线机器人.与双臂机器人相比,多臂机器人越障时为多点悬挂,机构扭摆幅度较小,运动控制更容易.文献[6]提出的两轮四臂机器人 LineScout 在越障时始终保持两臂悬挂,安全系数较高,但目前还难以跨越柔性引流线.文献[7]提出的多臂多轮巡线机器人 Expliner 悬挂于输电线的两条平行分裂导线上,越障时有 4 个悬挂点,保证机构可平稳越障,但目前还难以跨越坡度大于 30° 的线缆上的障碍物.文献[8]和文献[9]各提出了一种三臂巡线机器人,均采用将 3 个臂分别安装于箱体两侧及顶部的结构;这种结构使机构重心不易调节,越障时电机负荷较大.文献[10]提出了一种三臂机器人,其吊舱位置可小范围改变,以减小越障时的电机负荷,但机构比较复杂.

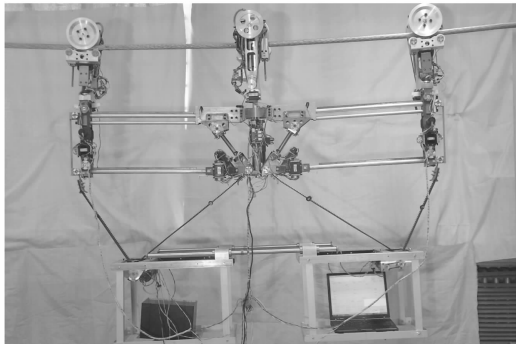
为了增强机器人的越障能力,简化机械结构,减小越障时的电机负荷,本文提出一种新型结构的三臂巡线机器人:机构主体采用双平行四边形桁架结构,利用 5 台电机协调控制,实现 3 个臂的位姿调节运动,机构越障灵活且结构简单;手臂末端设置夹线轮以增加轮线间的正压力,减少轮线打滑,提高机器人跨越引流线障碍的能力;吊舱可以前后移动以便调节机构重心,从而有效降低越障时桁架控制电机的负荷.

三臂巡线机器人越障时,两臂悬挂于线缆,第三臂脱线越障,悬臂的行走轮与线缆之间为近似点接触.脱线臂横摆越障时机构重心偏离线缆正下方,悬臂行走轮与线缆间的摩擦阻力矩远小于机构重心改变所产生的对线缆的转矩,机构整体将绕 2 个悬挂点构成的轴线旋转,直至新的重力平衡状态.因此,以悬挂点连线为基座,忽略悬臂与线缆间的摩擦阻力矩,巡线机器人可看作是一种基座浮动式机器人,

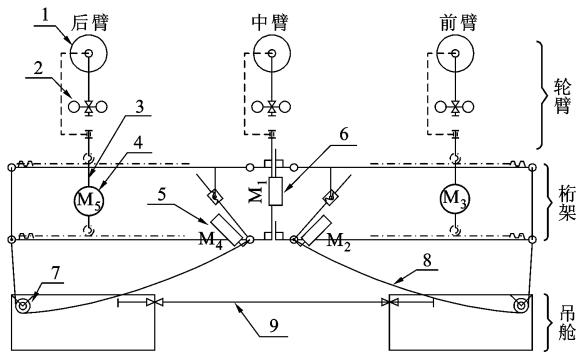
然而基座浮动的特点使适用于分析工业机器人运动学的常规方法难以应用.针对一种三臂巡线机器人,文献[11]采用循环坐标下降法提高了求解运动学逆解的计算速度.该方法以机器人关节角度为优化变量,求解时间会随机器人关节数量增多而急剧增加.本文则根据机器人的重力平衡条件构造优化目标函数,以基座浮动关节角度作为搜索变量,将基座浮动机器人的运动学问题转化为一维优化问题进行求解.此方法搜索空间为一维,不受机器人关节数量的影响,求解速度快,可用于机器人的实时控制.

1 新型三臂机器人机构及其技术指标

本文提出的新型三臂巡线机器人如图 1 所示.该机构由桁架、轮臂和吊舱 3 部分组成:桁架协调控制 5 台电机分时控制 3 个臂的位姿调节运动,辅助实现越障操作;轮臂驱动机器人在线上行走并保证行走轮可靠贴紧线缆;用于承载设备的吊舱采用分体式设计,可以前后移动以调整机构重心,从而减小越障时桁架控制电机的负荷.



(a) 原型样机



(b) 机构简图

- 1: 行走轮; 2: 夹线轮; 3: 滑臂; 4: 滑臂驱动电机; 5: 纵摆驱动电机; 6: 横摆驱动电机; 7: 卷带机构; 8: 同步带; 9: 导轨

图 1 原型样机及其机构简图

1.1 桁架

桁架主要由 2 个共边平行四边形框架以及在框

架上滑动的2个滑臂构成(见图1b),2个框架和2个滑臂均完全同构。

对中臂附近的桁架进行局部放大,如图2所示。桁架可完成5个自由度运动,分别是横摆运动、前、后纵摆运动,以及前、后臂平移运动。横摆运动是指前、后平行四边形框架所在平面之间的夹角变化,即图2中的 J_1 ,该运动由电机1通过齿轮齿条驱动实现。前(后)纵摆运动是指前侧(后侧)平行四边形框架下边与中臂之间的夹角变化,即图2中的 J_2 (J_4),该运动由电机2(电机4)通过斜向设置的丝杠螺母改变平行四边形的形状间接实现。前臂(后臂)平移运动是指前臂(后臂)沿前侧(后侧)平行四边形的上、下水平边的滑动,即图2中的 J_3 (J_5),该运动由电机3(电机5)同步驱动安装在平行四边形上、下水平边上侧的齿轮同向转动实现。因前臂(后臂)的上、下齿轮等速同向转动,故前臂(后臂)和中臂始终保持平行,使桁架保持良好的悬挂受力状态。

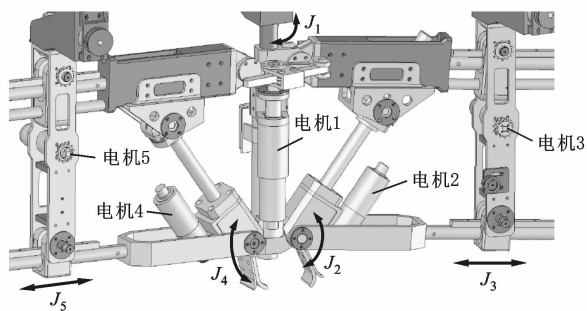


图2 中臂附近的桁架结构

当机器人在无障碍线缆上移动时,电机3、5制动,电机1、2、4处于非使能状态,2个平行四边形框架在重力作用下可顺应线形变化产生被动形变,从而降低桁架调节的能耗。当机器人遇到障碍物时,协调控制桁架的5台电机可分时控制3个臂在三维空间运动,辅助实现机器人越障。详细的越障过程见第2节。

1.2 轮臂

轮臂主要由轮臂支架、行走轮、夹线轮和夹线轮导轨构成,如图3所示。为了显示行走轮后面的机构,图3中的行走轮进行了切割处理。3个轮臂完全同构。行走轮边缘设计为内凹槽,与线缆接触部分为导电橡胶。

如图3所示,轮臂可完成4个自由度运动,分别是轮臂旋转(J_6)、行走轮转动(J_7)、夹线轮上下滑动(J_8)和夹线轮导轨转动(J_9)。 J_6 中的旋转关节为被动式,当轮臂悬挂于线缆时可自由旋转,以顺应线缆方向变化,轮臂脱线时则借助扭簧的弹性回归中位。

J_7 由安装于轮臂支架内部的电机6通过同步带传动实现。 J_8 由安装于夹线轮导轨右侧的电机7经过同步带以及丝杠-螺母机构传动实现。 J_8 向上时,夹线轮将线缆压入行走轮凹形边缘,保证悬挂臂行走轮贴紧线缆,减小行走轮与线缆间的打滑,增强机器人爬陡线的能力; J_8 向下时,行走轮与夹线轮之间的开口增大,便于脱线臂下线和上线。 J_9 具有主动和被动2种工作模式:当 J_8 向上滑动时, J_9 为被动工作模式,此时夹线轮导轨可绕行走轮转轴自由旋转,以适应线缆弧度的变化,保证轮线之间的压力始终与线缆轴线垂直,减小夹线轮对线缆的扭转作用;当 J_8 向下滑动到极限位置时,夹线轮导轨上的离合装置与行走轮靠摩擦力结合,电机6被复用作 J_9 的驱动电机,此时 J_9 为主动工作模式,行走轮和夹线轮之间的开口方向可主动调整,便于机器人跨越斜线障碍时手臂脱线和上线操作。

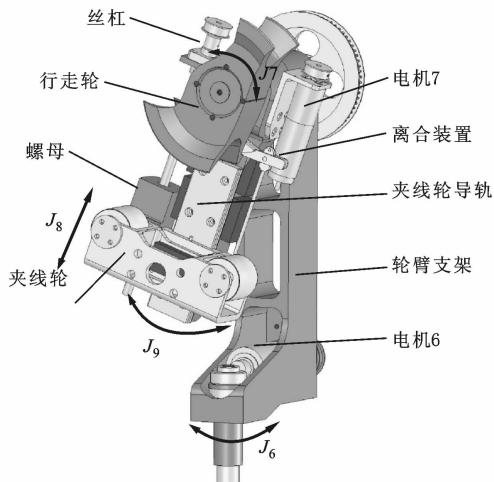


图3 轮臂示意图

1.3 吊舱

吊舱主要由2个沿直线导轨自由滑动的同构子箱体组成(见图1b)。每个箱体顶部设置卷带机构,穿过卷带机构的同步带两端分别悬挂在四边形框架的2个下顶点上。卷带机构卷动同步带可使自身所在的子箱体靠近一侧悬挂点,使该侧悬挂点承载;同时调节2个卷带机构可使2个子箱体靠拢或分开,使吊舱重力分别被前中、后中或前、后臂分担,从而减小桁架控制电机的负荷;当2个卷带驱动电机的输出均处于非使能状态时,吊舱重力被3个臂共同分担。

吊舱子箱体的分开或靠拢操作只需控制卷带机构到达同步带的前侧或后侧极限位置,且卷带驱动电机与其他电机无耦合,控制简单。

1.4 主要技术指标

原型样机的主要技术指标如下:

- 质量 70 kg 电机数量 13
- 爬线坡度 $\leq 60^\circ$ 无障碍移动速度 $\leq 0.2\text{ m/s}$
- 外形尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高) $1.8\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 1.6\text{ m}$

2 机器人越障过程

当机器人检测到障碍物时,前臂、中臂和后臂顺序越过障碍物,各臂的越障动作相似,都通过以下 3 步完成越障.

第 1 步:准备. 调整吊舱位置以完成机构重心调节,同时该臂夹线轮下滑至极限位置,使 J_9 工作在主动模式.

第 2 步:脱线及越障. 协调控制桁架上的 5 台电机,使该臂脱线并横摆至合适角度,然后机器人整体前进使该臂越过障碍物.

第 3 步:上线. 协调控制 5 台电机使脱线臂行走轮到达线缆上方的合适位置后,夹线轮向上滑动使行走轮重新贴紧线缆.

机器人越障过程如图 4 所示,图中省略了夹线轮的动作. 在越障过程中,协调控制桁架上的 5 台电机使脱线臂到达障碍物前方的线缆附近是越障的关键,下面将对此进行详细分析.

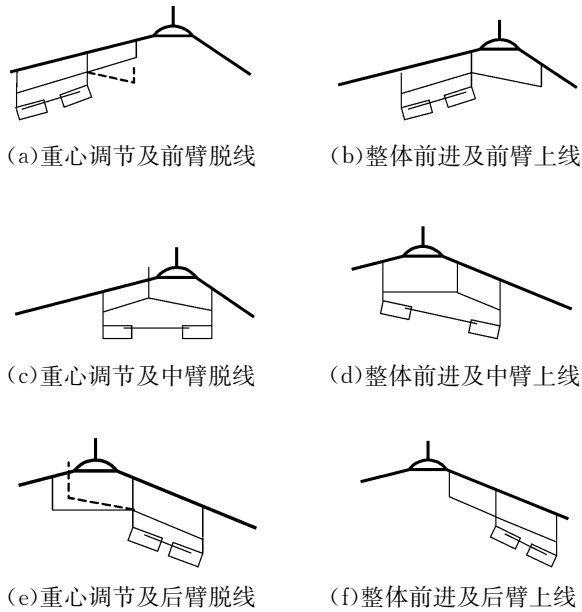


图 4 机器人越障过程示意图

3 运动分析

巡线机器人悬挂于线缆上,线缆属性对机器人在线上行走和越障行为具有重要影响. 根据线缆悬

挂机器人后的变形程度,可将输电线分为引流线和架空线 2 种. 引流线是连接承力杆塔(耐张、转角和终端杆塔)两侧导线的引线,当机器人悬挂于引流线时,引流线受机器人重力作用变形明显. 架空线是指相邻承力杆塔之间的导线,其档距通常为数百米. 架空线在自身重力作用下处于拉紧状态,可承受一定的集中载荷而无明显变形. 考虑到一档架空线的质量远大于机器人的质量,且一档架空线的档距远大于机器人的悬臂间距,可认为悬挂处的局部线缆受机器人重力作用所产生的形变较小. 下面讨论悬挂于架空线的机器人的运动分析问题,并假设机器人悬挂处的局部线缆为刚体.

三臂巡线机器人在脱线臂越障时,机构重心偏离线缆正下方,机构整体将绕线缆转动以达到新的重力平衡状态. 本文忽略悬臂行走轮与线缆间的摩擦阻力矩,以悬臂悬挂点构成的连线为基座,将三臂巡线机器人简化为一种基座浮动式机器人.

架空线中段障碍物两侧的线缆在机器人的臂展范围内近似成一条直线. 基座浮动式机器人在跨越该类障碍(其特征是目标位置在基座所在的轴线上)时,虽然机构整体将绕基座转动,但障碍物前方的目标位置相对于机器人末端保持恒定,此时只需要控制机器人 3 个臂的末端处于一条直线,即可保证脱线臂到达线缆附近.

在架空线两端的障碍物(如耐张线夹、垂直线夹等)两侧,线缆的方向差异较大. 基座浮动式机器人跨越该类障碍(其特征是目标位置不在基座所在的轴线上)时,机构绕基座的偏转将大大改变目标位置与机器人末端的相对位置. 此时的运动分析需要考虑机构关节变化对基座角度的影响,否则无法确切得到目标位置相对于机器人末端的运动规律. 本节将重点讨论三臂巡线机器人跨越架空线两端障碍时的运动分析. 三臂机器人越障涉及前臂、中臂和后臂越障,下面详细讨论前臂越障时的运动分析,所采用的分析方法同样适用于中臂越障和后臂越障.

前臂越障时的运动分析问题描述如下:在基座上建立参考坐标系,已知参考坐标系下的目标位置,求机器人各关节的参数值,使机器人达到重力平衡后前臂末端到达目标位置. 在前臂运动时,机器人的简化示意图如图 5 所示.

在图 5 中, E_0H_0 、 E_1H_1 和 E_2H_2 分别表示中臂、后臂和前臂, A_2H_2 和 A_1H_1 分别表示前、后四边形框架的下边,吊舱部分未画出. q_1 为横摆角, q_2 、 q_4 分别为前、后框架纵摆角, q_3 、 q_5 分别为前、后臂

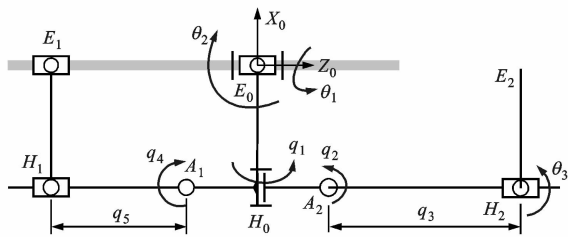


图 5 前臂运动时的机器人简化示意图

展长度, $q_i (i=1,2,\dots,5)$ 与图 2 中的 J_i 一一对应。 θ_1 为基座关节角, 表示中臂和后臂构成的悬挂平面与通过线缆的竖直面的夹角, θ_2 为后框架平面内中臂轴线与线缆法线的夹角, θ_3 为前臂与前框架下边法线的夹角。

取中臂、前框架下边及前臂构成串联机器人, 在基座上建立坐标系 $X_0-Y_0-Z_0$, 如图 5 所示。前臂末端在参考坐标系下的位置由 $\theta_1, \theta_2, q_1, q_2, q_3, \theta_3$ 决定, 其中, 因 3 个臂始终平行, 故 $\theta_3 = -q_2$ 。由 q_4, q_5 决定, 根据后框架的几何关系, 可得

$$\theta_2 = \arctan \frac{q_5 \sin q_4}{q_5 \cos q_4 + |A_1 H_0|} \quad (1)$$

前臂运动时可保持后框架形状不变, 由初始状态的关节参数 q_4, q_5 , 根据式(1)即可求得 θ_2 。

由前述分析可知, 进行前臂运动分析时需要求解 θ_1, q_1, q_2, q_3 , 方能使前臂末端到达参考坐标系下的目标位置。其中, q_1, q_2, q_3 为主动关节参数; θ_1 为被动关节参数, 由机器人的重力平衡条件决定。

当桁架主动关节 q_{1-5} 确定时, 机器人的重力平衡条件可表示为

$$M_1(\theta_1, q_{1-5}) + M_2(\theta_1, q_{1-5}) = 0 \quad (2)$$

式中: M_1, M_2 分别表示机构主体(包括桁架和轮臂)的重力和吊舱重力对基座的转矩, 均为 θ_1, q_{1-5} 的函数。由式(2)求 θ_1 的解析解比较困难, 可转化为

$$\arg \min_{\theta_1} [M_1(\theta_1, q_{1-5}) + M_2(\theta_1, q_{1-5})]^2 \quad (3)$$

利用数值方法求解。

由于机器人基座浮动的特点, 通过前臂运动分析求解关节参数 q_1, q_2, q_3 时, 需要考虑它们的变化对基座关节角 θ_1 的影响。这里根据机器人的重力平衡条件构造优化目标函数, 以基座关节角作为搜索变量, 将浮动基座机器人的运动分析问题转化为一维优化问题进行求解。前臂运动分析算法的步骤如下:

- 第 1 步, 根据机构初始状态, 由式(1)求得 θ_2 ;
- 第 2 步, 给定基座关节角 θ_1 的初值;

第 3 步, 保持 θ_1, θ_2 恒定, 根据图 5 由几何关系求得关节 q_{1-3} , 使前臂末端 E_2 到达参考坐标系下的目标位置;

第 4 步, 判断式(3)的优化目标函数值是否小于设定阈值 ϵ (即判断机器人是否满足重力平衡条件), 如果是则结束迭代, 否则改变 θ_1 , 重新执行第 3 步到第 4 步。

算法迭代完成后, 取最后一次迭代过程的 q_{1-3} 及初始时刻的 q_4, q_5 为前臂运动分析的计算结果。

中臂和后臂的运动分析求解思路与前臂的运动分析算法流程相似, 限于篇幅这里不再赘述。

4 仿真与样机实验

为了验证前述运动分析算法的有效性, 从算法的求解精度和求解时间两方面进行分析。仍以前臂运动为例, 令线缆水平, 保持后纵摆角 $q_4 = 0^\circ$ 和后臂展长度 $q_5 = 755 \text{ mm}$ 不变, 取前臂展长度 q_3 为最大值 756 mm (此时前臂的横摆和纵摆运动引起机构重心偏移最多, 最有利于误差分析), 改变横摆角 q_1 和前纵摆角 q_2 使前臂到达不同位置。在不同位置处, 根据第 3 节提出的运动分析算法求解机器人的关节参数 q'_1, q'_2, q'_3 , 并将计算值与该位置处的实际关节参数 q_1, q_2, q_3 的值进行对比, 结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 算法的计算结果与实际值基本一致, 横摆角和纵摆角的误差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 前臂展长度的误差在 $\pm 1 \text{ mm}$ 以内。引起误差的原因主要包括机器人各部分的质心位置误差, 以及未考虑行走轮与线缆间的摩擦力矩。关节误差折算到前臂末端位置误差的区域为 $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的立方体。考虑到手臂末端夹线轮开口以及行走轮边缘较宽的凹槽降低了对末端位置控制精度的要求, 现有算法的求解精度可以满足机器人越障控制的需要。

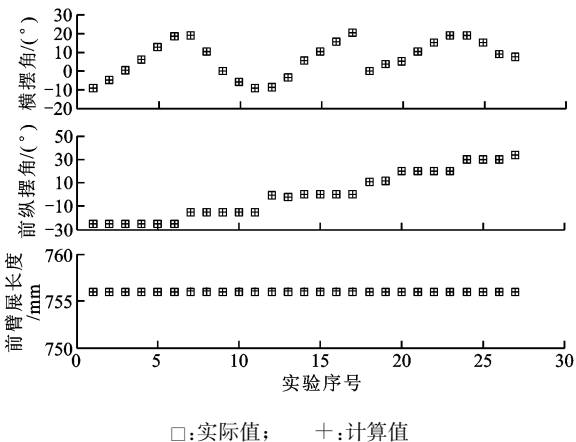
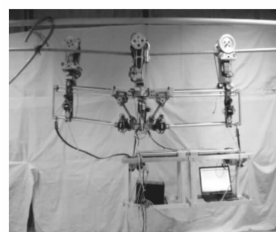


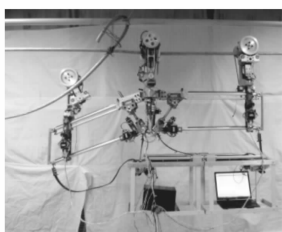
图 6 关节参数实际值与算法计算值对比图

为了分析本文提出的运动分析算法的计算时间,在计算机(CPU为Intel Core i5 3.2 GHz, RAM为2 GB)上使用 Matlab 编程进行了仿真实验. 算法对 θ_1 的迭代过程采用 Matlab 函数 `fminsearch` 实现, θ_1 的初值取 0° . 在前臂末端的运动空间内随机选择 50 组目标位置, 算法的平均计算时间为 0.01 s, 方差为 0.002 s, 表明本文算法求解速度较快, 可以用于机器人的实时控制.

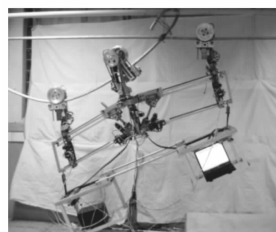
为了验证本文机构的可行性, 研制了原型样机, 并在实验室搭建的模拟环境中进行了线上行走和越障实验, 如图 7 所示. 机器人实现了从右往左自水平线缆越过障碍物到达引流线、然后再重新回到水平线缆的运动, 整个过程机器人运行平稳.



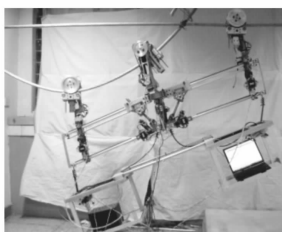
(a) 重心调节及前臂脱线



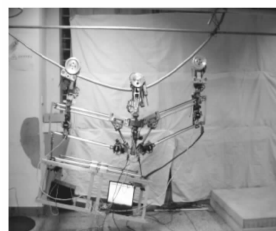
(b) 前臂越障后上线



(c) 重心调节及中臂越障



(d) 中臂上线



(e) 重心调节及后臂越障



(f) 后臂上线

图7 原型样机越障示意图

5 结 论

本文提出了一种新型三臂悬挂机器人, 该机构结构新颖, 具有较强的越障能力, 机构重心可调, 越障时电机负荷小. 研制的原型样机在实验室环境下完成了线上行走和越障实验, 验证了机构的可行性. 提出了一种适用于基座浮动机器人的运动分析算法, 仿真实验验证了算法的有效性.

致谢 本文在机构设计和实验样机研制过程中, 得到了梁恺、杨青两位老师以及宋亮、刘振、程欣等同学的大力协助, 在此表示真诚感谢.

参考文献:

- [1] KATRASNIK J, PERNUS F, LIKAR B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 485-493.
- [2] SAWADA J, KUSUMOTO K, MUNAKATA T, et al. A mobile robot for inspection of power transmission-lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 309-315.
- [3] TOUSSAINT K, POULIOT N, MONTAMBAULT S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: state-of-the-art review and challenges ahead [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(5): 477-499.
- [4] ZHU Xinglong, WANG Hongguang, FANG Lijin, et al. A novel running and gripping mechanism design based on centroid adjustment [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1471-1476.
- [5] 吴功平, 肖晓晖, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90-93, 107.
WU Gongping, XIAO Xiaohui, XIAO Hua, et al. Development of a mobile inspection robot for high voltage power transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 90-93, 107.
- [6] MONTAMBAULT S, POULIOT N. LineScout technology: development of an inspection robot capable of clearing obstacles while operating on a live line [C]//Proceedings of IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 73-81, 229.
- [7] DEBENEST P, GUARNIERI M, TAKITA K, et al. Expliner-Robot for inspection of transmission lines [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3978-3984, 4085.
- [8] ZHOU F Y, WANG J D, LI Y B, et al. Control of an inspection robot for 110 kV power transmission lines based on expert system design methods [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1563-1568, 1708.

[9] TANG Li, FANG Lijin, WANG Hongguang. Development of an inspection robot control system for 500 kV extra-high voltage power transmission lines [C]// Proceedings of SICE 2004 Annual Conference; Vol. 2. Tokyo, Japan; SICE, 2004; 1819-1824, 2848.

[10] WANG Jidai, SUN Aiqin, ZHENG Candong, et al. Research on a new crawler type inspection robot for power transmission lines [C]// Proceedings of 2010 First International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2010: 1-5.

[11] 李恩,梁自泽,谭民. 约束条件下的巡线机器人逆运动学求解[J]. 控制理论与应用, 2006(1): 43-48.

LI En, LIANG Zize, TAN Min. Analysis of solution to the inverse kinematics of inspection robot for power transmission lines with constraints [J]. Control Theory & Applications, 2006(1): 43-48.

(编辑 葛赵青 赵大良)