

[机器人]

输电线路双臂带电作业机器人运动特性分析

文/郭凯¹ 何龙飞² 蒋智鹏² 曾令斌²

1. 国网湖南省电力有限公司岳阳供电分公司; 2. 国网湖南省电力有限公司超高压输电公司

提出使用拉格朗日方程对机器人双臂进行运动学建模, 对机器人机械臂的关节运动机械特性进行仿真分析。通过将输电线路双臂带电作业机器人3D模型导入到Adams Dynamics模拟软件, 再对机械臂各个关节同时施加驱动函数, 从而得到机械臂末端在运动过程中的每个关节的运动曲线, 模拟结果表明: 机器人机械臂各关节能够连续稳定运行, 可以满足在输电线路复杂环境中的工作需求。

高压输电线路^[1-2]长期暴露在阳光和风中, 面对诸如暴风雨、雷电等恶劣气候条件, 输电线路或其金具经常发生损坏事件, 因此对输电线路进行定期维护已成为电力系统的一项例行任务。辅助或替代人工进行带电作业的机器人^[3-4]是一种有效的智能维护手段。然而, 自2002年开始研究输电线路带电作业机器人以来的20年里, 已经开发出了多种类型的带电作业机器人, 但尚未真正应用于工程实践。特别是当输电线路的运行环境穿越原始森林和河流时, 在复杂野外环境中操作大型笨重的机器人及其智能行为能力严重限制了机器人的实际应用, 因为机器人的动态是其操作控制智能改进的基础。因此, 研究机器人操作的动力学对于设计驱动机构和开发物理原型测量和控制系统非常重要。基于此, 本文利用拉格朗日法建立了双臂操作的动态理论模型。在此基础上, 利用ADAMS软件对双臂操作的动态特性进行仿真, 以螺栓紧固操作为例, 得到双臂操作过程中的动态特性曲线, 从而获得机器人机构的最佳驱动参数。这项研究为机器人驱动系统的设计奠定坚实的理论基础, 并对推动双臂机器人的实际应用起到重要作用。

动力学坐标系的建立

Lagrange方程是建立机器人动力学模型的最常用方法, 拉格朗日力学建立系统动力学方程时仅需考虑系统能量, 通过推导关节机构运动的动能和势能获取动力学模型, 由模块化双臂带电作业机器人的机械结构分析可知该机器臂为六自由度机械臂, 全部由旋转副组成, 建立如图1所示的动力学坐标系系统。

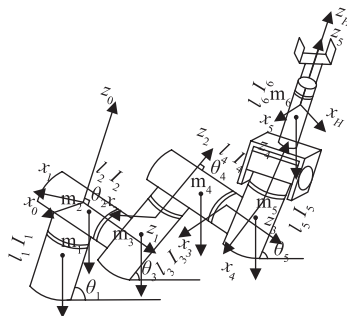


图1 六自由度机械臂动力学坐标系

动力学模型的推导

针对旋转运动的动力学模型可利用拉格朗日函数对机械臂外力矩进行求解, 公式为

$$L = \sum_{i=1}^n K_i - \sum_{j=1}^n P_j \quad (1)$$

$$T_i = \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}_i} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (2)$$

式中, $n=6$; θ_i 为各关节角度数。

假设各机械臂质量分布均匀, 质心均位于各机械臂中心点处, 计算可得质心位置

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{1}{2}l_1c_1 & y_A &= \frac{1}{2}l_1c_1 \\ x_B &= l_1c_1 & y_B &= l_1c_1 \\ x_C &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 & y_C &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 \\ x_D &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 & y_D &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 \\ x_E &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 + \frac{1}{2}l_4c_4 & y_E &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 + \frac{1}{2}l_4c_4 \\ x_F &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 + \frac{1}{2}l_4c_4 + \frac{1}{2}(l_5 + l_6)c_5 & y_F &= l_1c_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 + \frac{1}{2}l_4c_4 + \frac{1}{2}(l_5 + l_6)c_5 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, s_i 、 c_i 为各关节角度的正余弦值; $\theta_2 = \theta_4 = 90^\circ$ 。

对质心位置求导可得各机械臂的速度为

$$\begin{aligned} v_A^2 &= \frac{1}{4}l_1^2\dot{\theta}_1^2 v_B^2 = v_C^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 \\ v_D^2 &= v_E^2 = l_1^2\dot{\theta}_1^2 + l_1l_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3(s_1s_3 + c_1c_3) + \frac{1}{4}l_3^2\dot{\theta}_3^2 \\ v_F^2 &= \left(-l_1\dot{\theta}_1s_1 - \frac{1}{2}l_3\dot{\theta}_3s_3 - \frac{1}{2}(l_5 + l_6)\dot{\theta}_5s_5 \right)^2 \\ &\quad + \left(l_1\dot{\theta}_1c_1 + \frac{1}{2}l_3\dot{\theta}_3c_3 + \frac{1}{2}(l_5 + l_6)\dot{\theta}_5s_5 \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

通过连杆绕定轴转动与绕质心转动的动能计算公式可计算出各机械臂的动能, 系统的总动能是各机械臂动能的总和, 由质心位置可计算出各机械臂的势能, 系统总势能为各机械臂势能的总和, 系统的动能和势能为

$$\sum_{i=1}^6 K_i = \frac{1}{2}\dot{\theta}_1^2(I_1 + I_2) + \frac{1}{2}\dot{\theta}_3^2(I_3 + I_4) + \frac{1}{2}\dot{\theta}_5^2(I_5 + I_6) + \frac{1}{2}(m_2v_B^2 + m_3v_C^2 + m_4v_D^2 + m_5v_E^2 + m_6v_F^2) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 P_j &= \frac{1}{2}m_2gl_1s_1 + m_2gl_1s_1 + \frac{1}{2}m_3g\left(l_1s_1 + \frac{1}{2}l_2c_2\right) \\ &\quad + \frac{1}{2}m_4g\left(l_1s_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3\right) \\ &\quad + \frac{1}{2}m_5g\left(l_1s_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3c_3 + \frac{1}{2}l_4c_4\right) \\ &\quad + \frac{1}{2}m_6g\left(l_1s_1 + \frac{1}{2}l_2c_2 + \frac{1}{2}l_3s_3 + \frac{1}{2}l_4c_4 + \frac{1}{2}(l_5 + l_6)s_5\right) \end{aligned} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)的结果代入式(2)可解出整个系统的外力矩之和, 即可得到机器人的动力学模型。

ADAMS中的动力学特性仿真

1. 动力学仿真环境的搭建

将Inventor中的模块化双臂带电作业机器人模型以STEP格式导入到ADAMS中, 导入完成后给机械臂, 箱体和套筒等物体添加材料, 选择钢铁材料, 之后将其中不产生运动的物体用布尔操作合并为一个整体, 方便之后添加固定副与大地固定, 随后选择紧邻的两个关节以其中一个关节的中心线为旋转轴为各个关节添加转动副, 并且为左套筒单独添加一个转动副, 完成转动副的添加之后为各转动副添加驱动, 利用Step函数设置各关节转动角度与运动时间的关系如图2所示。

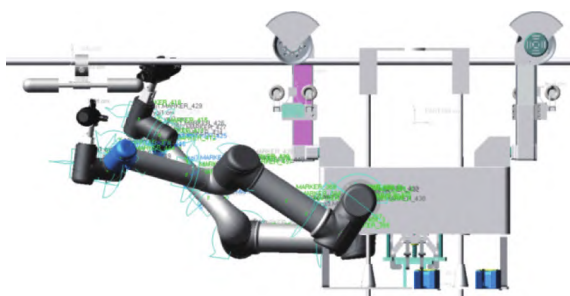


图2 双臂机器人动力学仿真环境

2. 更换防震锤轨迹规划仿真

根据搭建的动力学仿真系统中设置的Step函数, 机械臂将按照既定时间运动, 在0~3 s内会从初始状态调节至与防震锤齐平, 在此状态静置1 s, 4~8 s内左边套筒靠近螺母完成对接, 随后同样在此状态下静置1 s, 在9~12 s内右边套筒靠近螺栓完成对接, 在12~15 s左套筒取下螺母, 完成仿真。仿真初始界面如图3a所示; 仿真开始后, 首先在双臂机器人各个关节的共同作用下, 机械臂缓慢移动至与防震锤同一水平高度为止, 如图3b所示; 随后对左机械臂关节进行微调, 使得左边套筒对齐防震锤上方螺母, 套入螺母并与套筒内部螺纹贴合, 如图3c所示; 随后保持左臂不动, 对右臂各关节进行微调使得右边套筒与螺栓紧固, 如图3d所示; 随后保持右端套筒紧固螺栓使其固定不动, 左端套筒转动取下防震锤上的螺母, 如图3e所示。

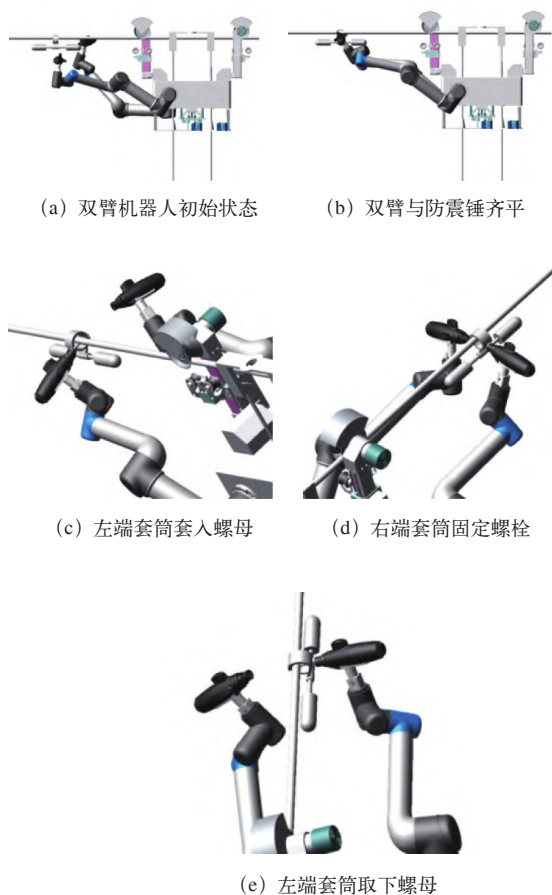


图3 双臂机器人作业仿真

3. 机器人关节运动特性仿真

选取后处理中机械臂末端套筒的速度与位移对机器人的作业过程中的动力学进行分析,如图4所示分别为右端套筒位移变化与速度变化曲线。由图3可知,右套筒在 x - y - z 轴方向均会产生位移量,整个仿真运动过程在空间内完成,仿真开始后,在 $0\sim 3$ s内,右端套筒在右机械臂各关节的作用下移至与防震锤同一水平高度,在此过程中,右端套筒的位移主要体现在 x 轴方向,由 0.25 m变化到 -0.02 m,在 y 轴与 z 轴方向的位移变化不明显,在 $3\sim 9$ s内,右臂无明显位移,在 $9\sim 12$ s内,右套筒缓慢靠近防震锤螺栓, z 轴方向位移发生显著变化,从 -0.35 m改变至 -0.19 m,在 $12\sim 15$ s内,静置等待左套筒取下螺母完成仿真。由图5可知,在 $0\sim 3$ s内时间速度曲线变化较快,在 x 轴方向最快达到了 -0.195 m/s的速度,这是为了使机械臂能快速达到与防震锤同一水平高度,而在 $9\sim 12$ s速度曲线变化较为平缓,最大速度仅为 0.753 m/s,不及之前的速度,保证了右端

套筒在对接螺栓时的精准定位。

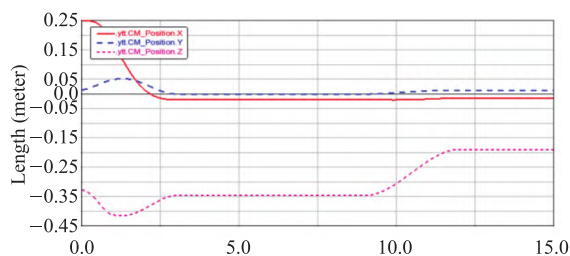


图4 右端套筒位移-时间曲线图

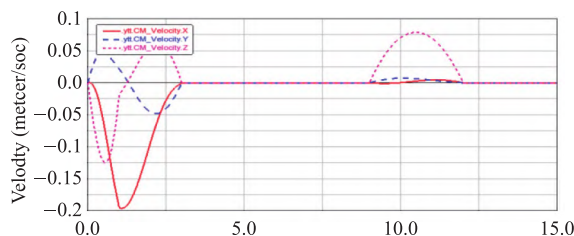


图5 右端套筒速度-时间曲线图

如图6、7所示分别为左端套筒位移变化与速度变化曲线,图6中左套筒在 z 轴方向位移变化较大,在 $0\sim 3$ s内,左端套筒在各关节的作用下移至与防震锤同一水平高度,此过程在 z 轴方向从 0.45 m变化至 0.3 m,停止 1 s之后,在 $4\sim 8$ s内,为使左套筒与螺母对齐,控制左边机械臂关节转动使得末端缓慢靠近螺母,此时在 z 轴方向由 0.3 m变化至 0.16 m,在 $8\sim 12$ s内,保持此状态固定不动,待右套筒固定螺栓,在 $12\sim 15$ s内,左套筒取下螺母后在 z 轴方向位移至 0.3 m重新回到之前位置;与右端套筒相似,左端套筒的最大速度也体现在 $0\sim 3$ s,在 y 轴与 z 轴方向均能达到 $0.08\sim 0.09$ m/s的速度; $4\sim 8$ s为接近螺母的过程,速度曲线变得平缓,最大速度也仅仅达到 0.05 m/s,保证了左套筒与螺母的紧密贴合,将防震锤螺母取下之后,在 $12\sim 15$ s内,左套筒回到之前与输电线水平位置,此时 z 轴方向速度为 0.071 m/s,取下螺母后仿真结束。

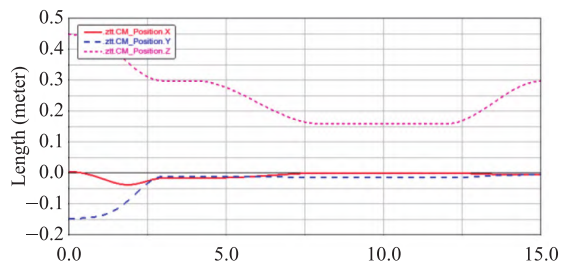


图6 左端套筒位移-时间曲线图

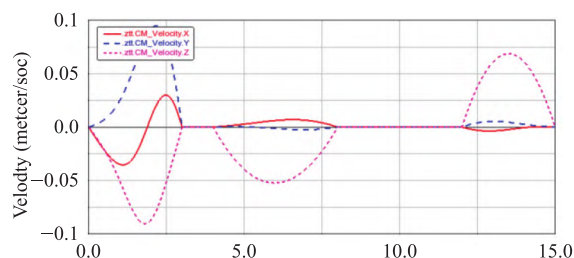


图7 左端套筒速度-时间曲线图

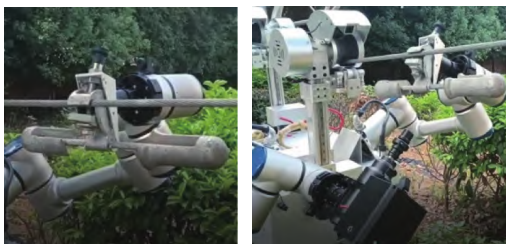
双臂带电作业机器人现场测试

完成输电线路双臂带电作业机器人防震锤轨迹规划仿真和机器人关节运动特性仿真后,对机器人进行样机加工及调试,并在模拟线路上进行防震锤安装测试,测试结果如图8所示。



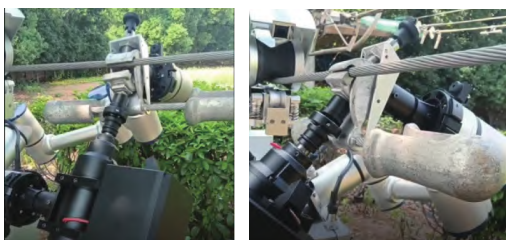
(a) 抓取防震锤

(b) 靠近架空导线



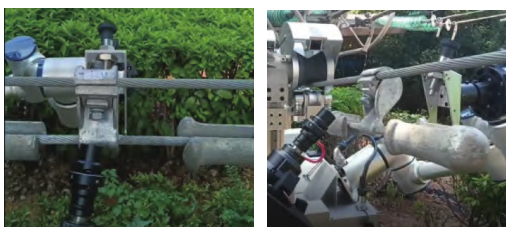
(c) 防震锤放置到位

(d) 紧固套筒移位



(e) 完成套筒对接

(f) 紧固螺栓



(g) 紧固作业完成

(h) 防震锤安装完成

图8 防震锤安装作业模拟现场测试

经现场测试,论文相关仿真分析结果应用在输电线路双臂带电作业机器人上时,能够正常完成防震锤拆除、安装作业,不与架空导线、其他金具发生碰撞。

结束语

在本文中, Lagrange方法用于建立模块化双臂实时工作机器人的动态模型,该模型的计算为选择机器人关节驱动机制的理论基础奠定了基础。同时,在Adams软件中进行了双臂操作过程中每个接头的动力学模拟,并获得了端动力学曲线。通过分析,验证了双臂实时工作机器人的动态模型的正确性,开发输电线路双臂带电作业机器人物理样机,结合论仿真结果,能够准确完成防震锤拆除、安装作业。下一步重点研究作为开发机器人其他作业末端,以开展不同作业任务,提高机器人的应用面。EA

(收稿日期: 2024-12-09)

参考文献

- [1] 郑心仪,唐波,张嵩阳,等. 交直流并行输电线路无线电干扰的预测算法[J]. 南方电网技术, 2021, 15 (10): 72-79.
- [2] Lima E J, Bomfim M H S, Mourão M A M. POLIBOT-Power Lines Inspection Robot [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2018, 45(1): 98-109.
- [3] 严宇,刘夏清,邹德华,等. 输电线路带电巡检作业单臂机器人行走姿态控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016(02).
- [4] 余晓鑫,田联房,王孝洪,等. 基于SolidWorks的巡线机器人机械本体设计及越障运动仿真[J]. 机械设计与制造, 2010(8): 180-182.
- [5] Wright C, Johnson A, Peck A, et al. Design of a modular snake robot[C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007: 2609-2614.
- [6] 邓鹏鹏,张春燕,高兆楼,等. 2P3R型机器人运动学及工作空间分析[J]. 机械传动, 2022, 46(1): 98-103.