

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.047

配电网带电机器人臂架伺服控制系统设计及分析

叶巨伟¹, 傅方茂¹, 朱俊达¹, 叶盛¹, 唐磊¹, 张腾²

(1. 丽水正好电力实业集团有限公司, 浙江 丽水 323020;

2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:设计纯机械式的位移反馈高空带电机器人控制装置,采用气液联合控制的方式将液压控制系统集成布置。基于该方案的特殊环境要求,确定纯机械式的位置反馈控制方法,设计一套控制机构,利用 AMESim 仿真软件,对该控制系统进行建模和仿真验证。研究结果表明:在电压波动过程中,液压缸会发生动作超前现象,使反向动作控制阀开启。阀芯防误触行程越大,系统稳定时间越短;系统波动越小,响应时间越少。当防误触行程变大时,伸缩杆跟随性能降低,产生相位差,动作延时,且动作曲线中心产生偏移,优点是动作平滑稳定。

关键词:配电网;带电机器人;伺服控制;系统设计;性能分析

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0232-03

Design and Analysis of Servo Control System for Live Robot Boom in Distribution Network

YE Juwei¹, FU Fangmao¹, ZHU Junda¹, YE Sheng¹, TANG Lei¹, ZHANG Teng²

(1. Lishui Zhenghao Electric Power Industrial Group Co., Ltd., Lishui 323020, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A pure mechanical displacement feedback high altitude charged robot control device is designed, and the hydraulic control system is integrated by gas-liquid joint control method. Based on the special environmental requirements of this scheme, a purely mechanical position feedback control method is determined, and a set of control mechanism is designed, modeled and verified by AMESim simulation software. The results show that the hydraulic cylinder will act ahead of the phenomenon in the process of voltage fluctuation, which makes the reverse action control valve open. The larger the spool anti-miscontact stroke, the shorter the system stability time, the smaller the system fluctuation, the shorter the response time. When the anti-error contact stroke becomes larger, the telescopic rod following performance is reduced, resulting in phase difference, action delay and the deviation of action curve center, yet the advantage of mooth and stable action.

Keywords: distribution network; electric robot; servo control; system design; performance analysis

0 引言

带电机器人是一款能在高空输电线路带电作业的“特种兵”机器人,其可以在一定程度上代替人工作业。它可通过机械臂抓取、更换完成支线线路引线搭接等多种复杂作业任务,已经成为配电网工程开发等领域的一种重要应用设备^[1-4]。

带电机器人研究吸引了很多的研究学者。胡仕成等^[5]以高空带电机器人的臂架变幅液压系统为研究对象,采用 PID 控制器对臂架液压控制系统进行优化,有效改善臂架系统振动、抖动问题,提高臂架的稳定性。柏光瑞等^[6]针对配网带电作业机器人相机受阳光干扰严重的问题,对图像进

行匹配处理,提供了导线的识别定位精度。徐善军等^[7]设计了一种高压带电机器人关节系统,进行了实验验证,以满足高压带电操作的要求。

目前研究多是立足于控制优化,通过结构改进提高精度的研究不多。本文设计了一种带电机器人臂架系统,构建了一套机械结构的位移反馈控制装置,通过气液联合控制形式集成液压控制系统,并开展仿真优化分析。

1 带电机器人臂架伺服系统设计

配电网带电机器人臂架系统结构设计以及实物图拍照如图 1 所示,机器人主要性能参数如表 1 所示。臂架伺服系统主要由动力元件、执行

基金项目:浙江省科技厅科技攻关项目(212102210163)

第一作者简介:叶巨伟(1976—),男,浙江丽水人,高级工程师,本科,研究方向为电力工程,yuca7871110@163.com。

元件、控制调节元件、辅助元件和工作介质组成。

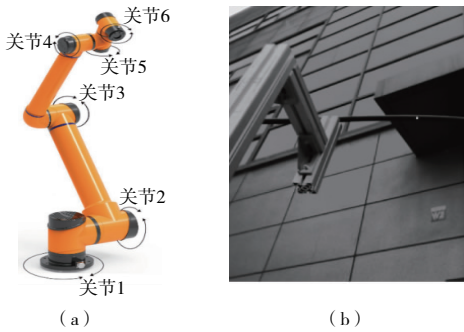


图 1 带电机人臂架结构

表 1 机器人主要性能参数

参数	数值
电源/V	48
负载/kg	12
工作范围/mm	1 250
定位精度/mm	0.02
重复定位精度/mm	0.05

当控制开关接收到动作位移的信号时,调控运动装置动作,使系统构成一个闭合机械反馈控制系统^[8]。气液管路的组成结构如图 2 所示。控制回路包含了气液两级控制部分,由气路输入动作信号并实现位置信号的反馈功能,形成一级控制,当液压回路接收到气缸输出位移信号时,实现液压缸的运动控制,形成二级控制。通过气液增压泵液压对回路进行供能,增压泵输入气压为 0.5 MPa,完成内部增压后输出液压为 6 MPa。

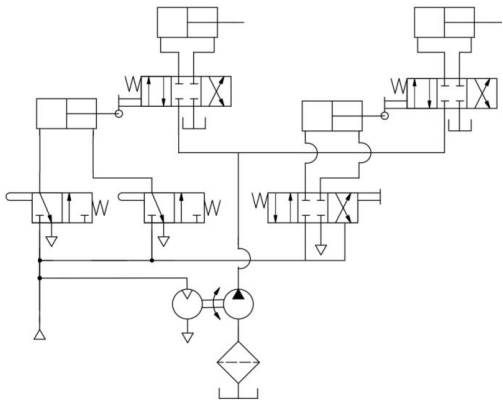


图 2 气液管路图

闭环控制系统逻辑结构如图 3 所示。当检测系统探测到系统动作信号时,将其转化成阀芯位移,实现助力缸的动作控制,再通过助力缸为系统

伸缩杆动作提供推动力,完成跟随过程,之后伸缩杆动作经反馈检测装置,实现阀芯开关的重新调节,由此完成闭环控制。

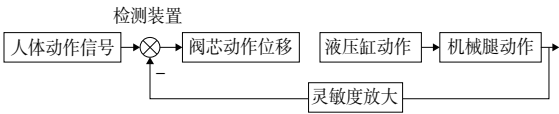


图 3 闭环控制逻辑图

2 仿真分析

2.1 仿真模型建立

为了对控制系统运行性能进行测试,根据配电网带电机人的臂架工作原理以及各液压原件的控制原理,采用 AMESim 平台建立了伺服控制装置的仿真模型,测试了系统响应速度等控制性能。液压缸采用 HCD 库中的元件模块,其余元件选用液压库现有模型。各液压元件参数如表 2 所示。

表 2 液压元件参数

参数	数值
电动机转速/(r · min ⁻¹)	1 440
泵排量/(mL · r ⁻¹)	12.5
工作压力/MPa	8
额定流量/(L · min ⁻¹)	6
液压缸外径和内径/mm	32/16
液压缸行程/m	0.45

图 4 给出了该系统的仿真模型,结合气液元件结构参数,在仿真模型中建立各部位的元件结构,经过核对正确后再进行仿真测试。输入系统动作的模拟信号,当检测装置接收到触发信号后通过控制系统调控助力液压缸,根据液压缸输出情况判断控制系统实际响应性能。

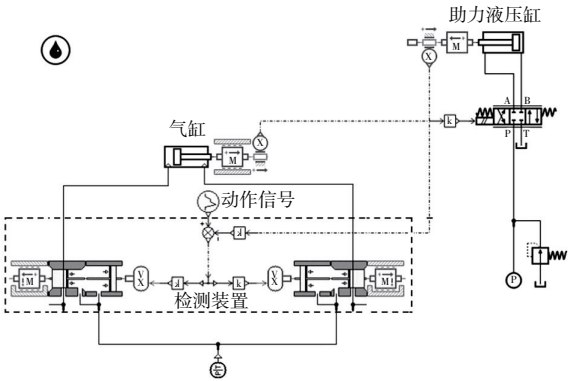


图 4 伺服系统仿真模型

2.2 结果分析

为测试系统响应性能,按照图 5 的形式把输入信号设定成阶跃信号。输入信号在第 5 s 时出现了一个阶跃突变,以此模拟系统形成 4 mm 位移的动作,测试此系统响应变化过程。

受到阶跃输入信号作用后,信号由一、二级控制回路完成传递过程,同时控制助力液压缸完成动作响应,再通过伸缩杆动作把液压缸信号反馈到检测装置中,具体如图 6 所示。可以发现,受到阶跃信号作用时,液压缸快速发生动作,到 5 s 跟随上输入信号,同时液压缸继续动作,此时系统还没有达到稳定状态,持续发生多次波动,并在 7.5 s 达到稳定的系统状态,液压缸不再发生动作。

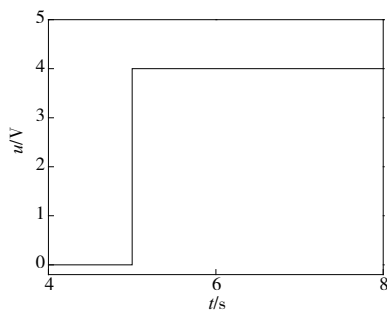


图 5 阶跃输入信号

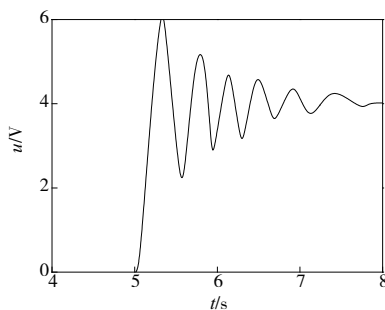


图 6 反馈信号

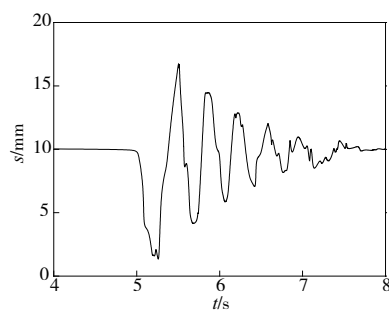


图 7 气缸活塞位置曲线

保持其他各项因素恒定的条件下,单独设置检测装置阀芯防误触功能,得到响应曲线如图 8 所示。结果发现,随着阀芯防误触行程的增加,系统在更短时间内达到稳定状态,波动性降低了,更快完成响应过程。但同时也发现当阀芯防误触行程提高后,发生了跟随精度下降现象,无法准确反馈系统的运动意图,形成了偏移更大的平稳反馈信号。

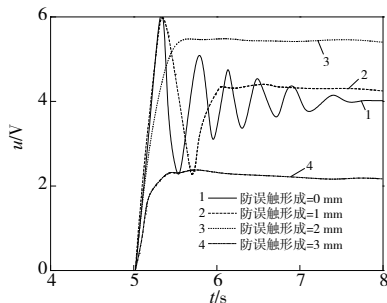


图 8 控制阀防误触行程对反馈信号影响曲线

上述研究都是在系统突然发生剧烈动作时进行信号仿真测试得到的响应结果,测试系统处于连续动作状态下的跟随性能。以正弦信号表示输

为降低响应过程的波动程度,实现响应时间的进一步缩短,对各项作用因素进行研究。从图 7 中可以看到,5 s 时的输入信号为 0,此时检测阀保持关闭状态,形成了气缸活塞杆位移曲线。气缸活塞最初位于 10 mm 处,到 5 s 时达到了最小的活塞位置,之后受到弹簧作用并返回中间位置,这时液压控制阀保持开启状态,液压缸继续伸出,符合图 6 超前现象。液压缸发生超前动作的情况下,检测阀实际输入信号转变成负值,从而开启反向控制阀,气缸反向动作活塞超过中间部位继续变大,液压阀控制阀沿反向开启,使液压缸发生缩回,在这种反复过程中引起波动现象。

入信号,对比了两种不同控制参数的伸缩杆跟随过程仿真结果,如图 9 所示。根据图 9 可以发现,在较小的防误触行程条件下,伸缩杆表现出了优异跟随性能,可以快速完成动作响应,但发生了伸缩杆的大幅波动,引起输出力的明显震颤。随着防误触行程的增加,引起伸缩杆发生跟随性能下降现象,出现了动作延时的情况,并且动作曲线中心也发生了偏移,但可以实现平滑稳定的控制效果,提升了穿戴的稳定性。

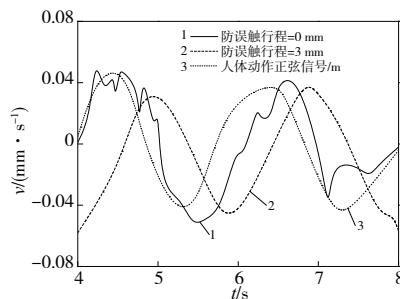


图 9 伸缩杆跟随曲线

根据以上研究可知,可以通过增加检测装置阀芯防误触行程的方式来减小系统的响应波动,

(下转第 250 页)

够有效地解决机器人行走姿态稳定控制问题。

参考文献:

- [1] 范振,陈乃建,董春超,等. 基于深度强化学习的单臂机器人末端姿态控制[J]. 济南大学学报(自然科学版),2022,36(5):616-625,634.
- [2] 秦建军,孟圆,曹钰,等. 基于强化学习的四足机器人牵引运动控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(12):80-90.
- [3] 王鸿儒,刘云平,马金虎,等. 基于奇异摄动法的水下机器人串-并联PID控制[J]. 空间控制技术与应用,2021,47(3):40-48.
- [4] 梁启星,李彬,李志,等. 基于模型预测控制的四足机器人斜坡自适应调整算法与实现[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(3):37-44,51.

- [5] 马飞越,刘佳豪,赵涛,等. 电力巡检机器人运行姿态的终端滑模控制[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(12):172-179.
- [6] 廖发康,周亚丽,张奇志. 考虑摆动腿动态的变长度柔性双足机器人步态切换控制研究[J]. 力学与实践,2022,44(3):605-617.
- [7] 李昂,杨泓渊,雷小萌,等. 基于等效连杆模型的六足机器人行进姿态闭环控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(7):1696-1708.
- [8] 付苗苗,沈红伟. 基于激光与视觉感知的机器人姿态自动控制研究[J]. 激光杂志,2021,42(5):138-142.

收稿日期:2023-10-17

(上接第234页)

从而达到更稳定的控制性能,但无法获得理想的跟随精度。需结合实际控制需求进行调整,在保证稳定性的前提下实现检测精度与响应速度的相互平衡。

3 应用

本研究成功后在很多配电输电线上进行了应用,可以在1 m左右保证 ± 5 mm以内的定位精度,取得很好的效果。可以实现综合1 cm以内的作业精度,对导线定位提供很好的工作环境,实验照片如图10所示。



图10 应用照片

4 结语

本文设计出一套纯机械式的位移反馈高空带电机器人控制装置,并对该系统响应性能进行仿真测试。取得如下有益结果:

- 1) 阀芯防误触行程越大,系统稳定时间越短,系统波动越小,响应时间越少;
- 2) 当防误触行程变大时,伸缩杆跟随性能降低,产生相位差,优点是动作平滑稳定。

该研究对优化配电网人工难作业监测环境控制提供了理论参考,但面对恶劣环境时尤其是雾霾天气作业下存在视觉定位的不足,后续需要加入双目视觉效果来进行加强。

参考文献:

- [1] 朱凯,姜文东,方玉群,等. 基于改进Hough变换的输电线路带电作业机器人检测方法[J]. 制造业自动化,2022,44(6):186-189,203.
- [2] 胡子琦,苑晶,公岩松,等. 面向配网带电作业机器人的输电线引线重建[J]. 控制工程,2021,28(11):2123-2130.
- [3] 高晓科,孙亮,张伟军. 高压带电引流作业机器人系统的设计与开发[J]. 机械设计与研究,2021,37(5):10-14,20.
- [4] 姜鹏,吴功平,杨松,等. 220 kV 带电线路树枝修剪机器人结构设计及实现[J]. 机械设计与制造,2021,366(8):152-156.
- [5] 胡仕成,陈志高,黎新齐. 高空带电机器人臂架稳定性优化控制仿真研究[J]. 机床与液压,2021,49(23):7-12.
- [6] 柏光瑞,郑育祥,吴凯,等. 面向配网带电作业机器人的导线识别定位方法[J]. 电网技术,2023,47(6):2604-2611.
- [7] 徐善军,任书楠,杜婧,等. 协作机器人在高压带电作业中的应用研究[J]. 制造业自动化,2021,43(9):106-110.
- [8] 王林,王洪光,景凤仁,等. 一种悬垂绝缘子带电清扫机器人机构设计[J]. 机械设计与制造,2019(1):232-235.

收稿日期:2023-05-09