

变电站带电水冲洗机器人开放式控制系统^①

鲁守银¹, 孙丽萍¹, 李健², 苏建军³

¹(山东建筑大学 机器人与智能系统研究院, 济南 250101)

²(山东鲁能智能技术有限公司, 济南 250101)

³(国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: 为了解决人工水冲洗变电站设备的问题, 文中介绍了一种新型的变电站带电水冲洗移动机器人及其开放式控制系统结构体系。首先, 介绍了变电站带电水冲洗移动机器人总体设计, 然后, 给出了该机器人开放式控制系统结构体系。变电站带电水冲洗移动机器人采用基于 PC 机、触摸屏和运动控制器的开放式控制系统, 提高了控制系统的开放性和交互性能; 基于分层递阶控制的思想, 将控制系统划分为组织级、协调级和执行级三个层次, 通过各层的配合保证了运动控制算法的实时性和各子系统的协调工作。

关键词: 变电站带电水冲洗机器人; 开放式控制系统; 分层递阶控制; 运动控制算法

Control System of a Substation Live Water Flushing Working Mobile Robot Based on the Tip-Position Algorithm of Mechanical Arms

LU Shou-Yin¹, SUN Li-Ping¹, LI Jian², SU Jian-Jun³

¹(Robotics and Intelligent Systems Institute of Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

²(Shandong Luneng Intelligent Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

³(State Grid Electric Power Research Institute of Shandong Province, Jinan 250002, China)

Abstract: In order to solve the problem of artificial water flushing equipment of Substation, this paper introduces a new live water flushing working mobile robot of substation and its open control system architecture. Firstly, it introduces the overall design of the live water flushing working mobile robot of substation, and then gives its open control system architecture. The live water flushing working mobile robot of substation uses open control system based on PC, touch screen and motion controller, so it can improve the openness and interaction performance of the control system; And control system based on the idea of hierarchical control is divided into three levels including the organization level, the coordination level and the execution level, so ensures the real-time work of motion control algorithm and the coordination of each subsystem through the cooperation of each layer.

Key words: live water flushing working mobile robot of substation; open control system; hierarchic control; kinematics control algorithms

当今社会对供电的安全需求日益增多, 为及时清扫设备表面污秽、防止设备污闪事故、保证设备安全供电、减轻清扫工作的繁重体力劳动, 带电水冲洗无疑成为清扫工作中最彻底、最有效的一种手段。目前, 国内电网设备的清扫不仅需要耗费巨大的人力物力, 且极易造成污闪事故, 人工水冲洗已经无法满足作业要求。图 1 为人工停电清洗现场。由此研制具有更

强的安全性、适应性和高效率的变电站带电作业水冲洗移动机器人十分必要, 因为其设备比较简单, 工作效率高, 清洗效果好, 可作为电气设备有效防止污闪事故的措施之一被广泛采用^[1]。

本文采用基于 PC 机+触摸屏+运动控制器的开放式控制系统, 具有如下优点: ①具有专注于运动控制的 trio 运动控制器, 提高了速度控制精度; ②采用分层

① 基金项目: 国家“863”计划(2012AA041506)

收稿时间: 2015-01-30; 收到修改稿时间: 2015-03-18

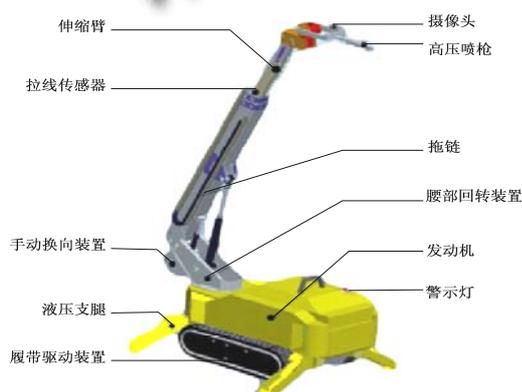
递阶控制,将各种模块安排成若干层次,更有利于其性能的充分发挥;③采用开放式控制容易实现功能扩展,改造为更高性能的运动控制系统。



图1 人工清洗现场图

1 机器人系统总体设计

变电站带电水冲洗移动机器人的工作环境为220kV变电站,系统由履带式车体移动机构、升降机构和控制系统组成。带电水冲洗机器人三维设计与实物图如图2所示。



(1) 机器人三维设计图



(2) 机器人实物图

图2 机器人三维设计与实物图

车体移动机构采用履带式移动底盘结构,主要由底盘、履带架、左右行走马达、驱动轮、承重轮、履

带、张紧缓冲装置以及两侧四个液压支腿组成;柴油式发动机驱动;升降机构安装在移动机构上,其末端为两自由度喷枪。升降系统包括回转平台、两级伸缩臂、调平机构等部分,能够将喷枪推举到相应作业位置,喷枪作业平台具有自调平功能;回转平台通过回转支承与底盘连接,在回转马达驱动下,实现平台及其附属部件360度连续回转运动;伸缩臂安装于回转平台上,分为大臂、连接臂、前臂,其中大臂铰接到回转平台上,连接臂铰接于大臂上,前臂铰接于连接臂上;调平机构利用调平油缸和随动油缸之间的联动关系进行调平,使操作平台保持水平角度^[2,3,4]。控制系统负责协调各部分的工作,包括机械臂的单轴运动控制、移动车体控制、示教/再现功能、主动视觉定位控制等。

2 机器人控制系统设计

2.1 控制系统结构

控制系统是机器人的重要组成部分,其主要任务是控制机器人的运动位置、姿态和轨迹、操作方式等。变电站带电水冲洗移动机器人系统具有以下功能:

- ①通过履带式车体移动机构自带动力可在变电站室外道路和设备区内无障碍运动到指定工作地点,且速度转换灵活。
- ②通过视频监控远程遥控机器人对绝缘子进行带电冲洗,有效的保护了工作人员的人身安全,同时通过视觉对目标位置的视觉坐标信息进行瞄准定位判别,决策机械臂的移动方位和动作。
- ③通过Trio运动控制器实现对各运动轴、驱动装置、执行结构及传感器模块的协调控制,保证机械臂动作的协调稳定性,并达到一定的控制精度。
- ④建立机器人各状态信息与作业距离、喷水压力的专家系统,通过双闭环控制实现对水冲洗机器人冲洗过程的自动控制。
- ⑤通过逆运动学和插补算法的结合,控制机械臂沿着绝缘子上下清洗和左右圆弧清洗,采用“一冲四回,同步均匀”的冲洗方式。

为更好地协调处理好控制系统各模块的关系和功能,采用了分层递阶控制结构的三级控制策略,即将控制系统分为组织级、协调级和执行级对机器人进行控制^[5,6]。其控制系统结构如图3所示。

组织级监视并指导协调级的所有行为,根据用户对任务的不完全描述与实际过程和环境的有关信息,对机器人自身状态进行判断分析,将机器人系统划分为几个任务,提出适当的控制模式向下层传达,规划

机器人的动作以实现预定控制目标。

协调级协调各控制器的控制作用与各子任务的执行,分为两部分:①结合机器人自身的运动特性、电机特性及码盘信息协调完成组织级下达的任务,并下发控制指令;②保证、维持执行级中各控制器的正常运行,并进行局部参数整定和性能优化。

执行级的主要任务:①根据协调级输出的期望值驱动电机工作,直接产生控制信号,通过执行机构作用于被控对象以完成对机器人的控制;②通过传感器测量环境的有关信息,并传递给上一级控制器,给高层提供相关决策依据。

结合各部分的功能和控制系统的结构可知,组织级、协调级和执行级三者之间的运行机制为:组织级接收传感器的参数信息进行分析处理后,结合用户输入的控制指令,通过分析计算转换成控制指令序列发送至协调级,协调级根据接收的控制指令序列进行运动学分析处理后,产生伺服控制信号,控制执行机构执行相应运动。

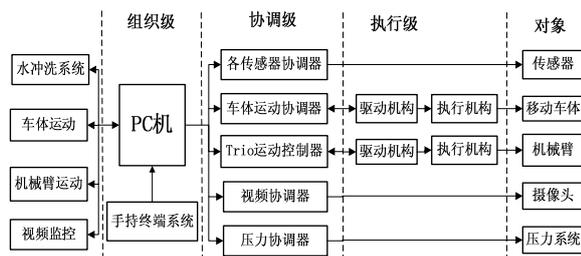


图 3 机器人控制系统结构

2.2 控制系统设计

系统采用 PC 机+触摸屏+运动控制器的开放式控制系统具有可移植性、可互操作性、高可靠性等优点。

2.2.1 组织级结构

组织级由 PC 机、手持终端组成。组织级由 PC 机对各子系统和手持终端进行任务的组织分析运算,将控制命令下发到协调级以完成对执行级的控制。组织级的结构图如图 4 所示。

手持终端配有触摸屏、USB 操作手柄、按键信息采集模块等部件,用于控制指令的输入和反馈信息的显示以便于实现对移动底盘和机械臂的远程控制。视频监控负责监控机器人运动、自动识别位姿、取得目标位姿等控制,便于求解关节变量以驱动机械臂自主运动到作业位置。机械臂控制、液压控制和水冲

洗等各子系统系统通过各传感器采集了机械臂的当前状态信息,PC 机进行各种输入设备控制指令的数据读取、传感器等信息的实时显示处理,同时接收并组织分析各传感器信息,经过解析运算后将控制命令下发到协调级以便于控制系统的协调有序控制。

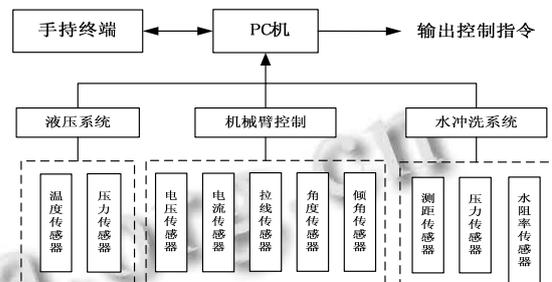


图 4 控制系统组织级结构

2.2.2 协调级结构

协调级的主要工作是协调车体运动、机械臂运动、水冲洗系统、压力系统和视频监控系统的功能。控制系统协调级结构如图 5 所示。

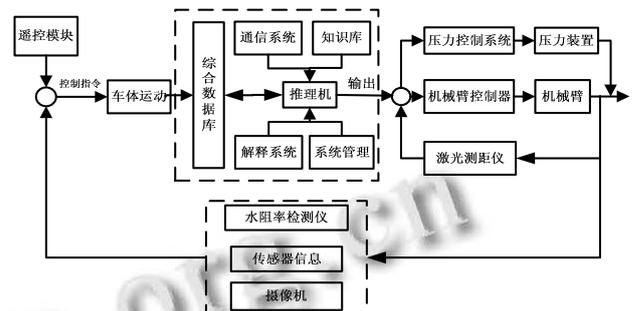


图 5 控制系统协调级结构

协调级在工作过程中,要利用视频监控采集到的图像进行显示监控处理,控制车体和机械臂运动到指定位置,实时检测各检测装置的状态,控制压力装置以利用水冲洗系统完成冲洗过程,它需要控制系统及时做出正确的决策来完成复杂的多任务控制。所以协调级利用分布式专家系统来模拟人类专家的分析、判断和决策的过程,把一个复杂的控制任务分解为多个简单的子任务,分配给各个专家系统协作完成,实现机器人控制系统的功能。协调级通过人机接口,根据知识库、综合数据库及推理机实现专家系统,推理出合适的压力参数和作业距离参数,并把相关的参数通过通讯模块传给机器人,同时协调级采用双闭环控制,由机器人的控制器

进行参数的在线调整,实现将专家系统和双闭环控制的结合,极大地提高控制精度和控制的智能化[7].

协调级的工作流程为控制车体运动到指定区域后,检测装置实时检测水冲洗机器人的状态,当状态异常时,通过事先由实验验证建立好的机器人状态与作业距离、喷水压力的专家系统得到与之对应的理想作业距离和喷水压力信息,并将信息输出到内环系统,通过激光测距仪的实时反馈信息,实现对作业距离的闭环控制,同时通过压力传感器实现对压力装置的输出压力的控制,进而实现对水冲洗机器人冲洗过程的自动控制.

2.2.3 执行级结构

执行级主要由四个油缸和一个马达组成,四个油缸分别控制机械臂的腰部回转、大臂俯仰、小臂伸缩、腕部俯仰、腕部摇摆四个关节,一个液压马达控制腰部回转.同时各关节执行部件分别装有压力传感器和角位移传感器,以方便机械臂各关节同步运行时参数的测量与反馈[8].执行级的结构图如图6所示.

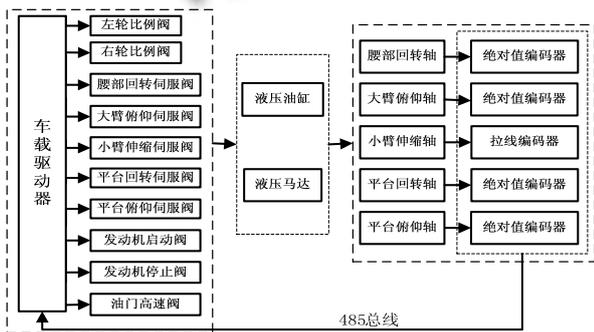


图6 控制系统执行级结构

执行级通过对电压值的调节控制比例阀的开合及流量大小,实现对移动底盘左右轮的控制;通过电压控制开关阀实现油门大小、发动机启停等功能的调节;通过对伺服阀的调节控制液压油缸的流量和压力实现对腰部回转、小臂伸缩、大臂俯仰和腕部俯仰等的控制.机械臂为液压驱动,采用阀控方式,液压油缸和马达根据运动控制系统发送的运动指令实现相应运动,各种传感器实时测量各执行部件参数,并反馈至运动控制系统,实现机械臂各关节同步运动.

2.3 协调级运动控制与试验结果

2.3.1 协调级运动控制算法

协调级运动控制直接关系到水冲洗移动机器人能否顺利完成冲洗工作,通常对工作机械臂通过正逆解进行运动学分析,本文对机械臂末端位置的求取分析,

代替 D-H 建模算法,主要通过简单的三角函数关系和迭加计算,得到各关节的实时位置的方法控制机械臂实现特定的位姿,为实现水冲洗准确的瞄准定位提供技术支持.

协调级运动控制算法主要分为两部分:一是结合 MEMS 惯性传感器、无线传感器网络,通过四元数算法精确获得各关节三维空间角度,得到三维空间角度的四元数向量表示[9],将所得四元数转换成欧拉角;二是通过已求出的欧拉角结合各关节臂长,在各关节建立相应的坐标系,坐标系示意图如图7所示,通过求取各个关节在坐标系中的位置,通过简单的三角函数关系和迭加计算,即可灵活、快速地得到各关节的实时位置,确保作业工程中机械臂的安全可靠运行.将各个关节的位置累加得到机械臂的末端位置如式(1)所示.

$$\begin{cases} x = a_0 \cos \alpha_0 + a_1 \cos \alpha_0 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_0 \cos \alpha_1 + a_3 \cos \alpha_0 \cos \alpha_1 \\ \quad + a_4 \cos \alpha_0 \cos (\alpha_2 + \alpha_1) + a_5 \cos (\alpha_0 + \alpha_3) \cos (\alpha_2 + \alpha_1) \\ y = a_0 \sin \alpha_0 + a_1 \sin \alpha_0 \cos \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_0 \cos \alpha_1 + a_3 \sin \alpha_0 \cos \alpha_1 \\ \quad + a_4 \sin \alpha_0 \cos (\alpha_2 + \alpha_1) + a_5 \sin (\alpha_0 + \alpha_3) \cos (\alpha_2 + \alpha_1) \\ z = a_0 + a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_1 + a_3 \sin \alpha_1 + a_4 \sin (\alpha_2 + \alpha_1) + a_5 \sin (\alpha_2 + \alpha_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 分别为相邻两关节间的臂长. $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为腰部回转旋转角、大臂俯仰旋转角、平台俯仰旋转角、平台回转旋转角.

机械臂的末端姿态可根据安装在机械臂末端的姿态检测模块得到,其中角位移传感器测得的末端执行机构绕 x、y、z 三轴的旋转角度分别为 $\varphi_7, \psi_7, \eta_7$.

机械臂的末端位姿如式(2)所示.

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi_7 \cos \psi_7 & \cos \varphi_7 \sin \psi_7 \sin \eta_7 - \sin \varphi_7 \cos \eta_7 & \cos \varphi_7 \sin \psi_7 \cos \eta_7 + \sin \varphi_7 \sin \eta_7 & x \\ \sin \varphi_7 \cos \psi_7 & \sin \varphi_7 \sin \psi_7 \sin \eta_7 + \cos \varphi_7 \cos \eta_7 & \sin \varphi_7 \sin \psi_7 \cos \eta_7 - \cos \varphi_7 \sin \eta_7 & y \\ -\sin \varphi_7 & \cos \varphi_7 \sin \eta_7 & \cos \varphi_7 \cos \eta_7 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

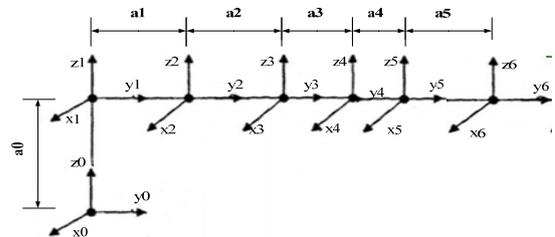


图7 坐标系示意图

2.3.2 试验及仿真分析

结合协调级运动控制算法,利用 MATLAB 进行机器人姿态仿真实验,仿真结果如图8所示.从图中看出

各关节在旋转角度不同的三种情况下,机械臂的姿态不同,其中由红色到绿色线末端位置坐标分别为(910.5243,910.5243,1421.5)(902.4638,877.5910,1451.0)(764.7397,587.8235,1672.1)。下图 9 是三角函数方式算法与 DH 建模算法的仿真时间比较曲线图。该曲线数据是结合 SQL server 数据库通过 c#编程调试运行两种算法得到的仿真时间。从图中可以看出,本文采用的算法计算时间短,效率高,更符合机械臂控制高效率的要求。

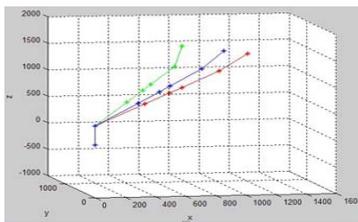


图 8 各关节旋转角度不同情况下机械臂仿真图

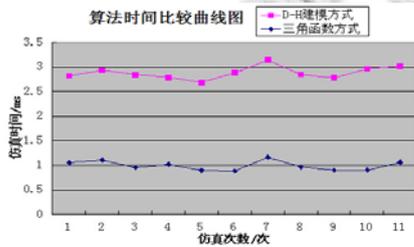


图 9 时间比较图

为了验证变电站水冲洗机器人系统的可行性和可靠性,根据电业安全工作规程^[10]有关绝缘工具电气试验项目和标准的规定,对机器人进行了模拟冲洗试验如图 10 所示。



图 10 模拟冲洗试验图

试验主要是对变电站水冲洗机器人的运动控制,分为手动控制和上位机控制两种方式进行。手动控制即通过推拉遥控手柄和按下按钮的方式验证机器人机械臂是否按相应控制命令运行,试验证明,机器人的机械臂能正确地完成复位、急停、开始示教、左右轮的移动、小臂伸缩、大臂平移、大臂升降、平台升降

和平台旋转等动作。上位机试验在用户界面上下发上述命令,同时进行喷水设备的控制。试验表明,该控制系统能满足变电站带电水冲洗机器人的控制需求。

3 结语

变电站带电水冲洗移动机器人能够借助移动伸缩平台将高压喷水装置运送到高空作业位置,安装低阻率高纯水制水设备和电导率实时在线检测系统,实现对变电站绝缘子和绝缘套管等设备污秽进行机器人带电水冲洗作业。本文基于分层递阶控制的策略,设计并实现了变电站带电水冲洗移动机器人的开放式控制系统,该系统高效地使用了系统资源,实现了对机械臂的准确快速的运动控制。同时采用基于 PC 机+触摸屏+运动控制器的开放式控制系统,将控制系统模块化处理,结合组织级强大的处理能力,协调级可靠的控制能力和执行级高精度的动作,使系统具有更高的通用性、准确性和实时性。协调级采用专家系统和双闭环控制结合并通过协调级运动控制算法,实现将水冲洗机器人复杂的控制任务分解为多个简单的子任务协作控制冲洗过程,多种控制方式结合实现对机器人的精确控制。

参考文献

- 1 庄伟.浅谈变电设备带电水冲洗.全国发电厂电气专业技术交流研讨会论文集.2009.
- 2 顾毅,翁新华,杨汝清,宋涛.关节式超高压带电清扫机器人 HVCR-II.上海交通大学学报,2006,40(12):2173-2177.
- 3 叶敬安.超高压带电作业机器人清扫装置优化设计与研究[学位论文].上海:上海交通大学,2008.
- 4 孔祚.超高压带电清扫机器人控制系统设计与研究[学位论文].上海:上海交通大学,2008.
- 5 张云洲,吴成东,薛定宇,王斐.自主移动机器人嵌入式控制系统研究.东北大学学报(自然科学版),2008,29(1):29-32.
- 6 孙斌,杨汝清.开放式机器人控制器综述.机器人,2001,23(4):374-378.
- 7 姚河清,王运东.熔化焊机器人焊接专家系统.机器人,2002,24(5):456-458.
- 8 鲁守银,傅孟潮,厉秉强,马培荪.DWR-I 遥操作高压带电作业机器人.上海交通大学学报,2005,39(6):910-913,918.
- 9 Tian Y, Wei HX, Tan JD. An adaptive-gain complementary filter for real-time human motion tracking with MARG sensors in free-living environments. IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2011.
- 10 DL408-91.电业安全工作规程(发电厂和变电所电气部分).1991.