

一种用于气体绝缘开关设备异物清扫与检测的机器人系统

马飞越¹ 游洪² 佃松宜² 杨家勇¹ 彭新智¹ 王博¹ 丁培¹

(国网宁夏电力公司电力科学研究院 银川 750011)¹ (四川大学电气信息学院 成都 610065)²

摘要 针对现有对GIS管道的检测方法不能同时兼顾异物清理的问题,研制了一种基于Inter Edison平台的用于GIS管道内腔异物清扫与检测的机器人系统。从硬件结构、机器人运动学建模以及人机交互平台3个方面对设计的机器人系统进行了详细的介绍。其中硬件上采用集成化程度高的Inter Edison处理器作为模块化设计的中心;在人机交互平台上,基于Android开发平台,实时实现系统的3D动态显示、运动过程控制、机器人姿态控制等功能。实验表明:该机器人结构独特,能在GIS管道腔内平稳地运行;机器人能实现左右各20°的移位;摄像头拍摄无死角;人机交互中心视频画面清晰;整个机器人系统满足GIS检测清理机器人各项功能的任务要求。

关键词 GIS检测清理机器人,模块化设计,Inter Edison处理器,Android开发平台

中图分类号 TP242 文献标识码 A

Robot System for GIS Foreign Body Clean and Cavity Detection

MA Fei-yue¹ YOU Hong² DIAN Song-yi² YANG Jia-yong¹ PENG Xin-zhi¹ WANG Bo¹ DING Pei¹

(Ningxia Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China, Yinchuan 750011, China)¹

(College of Electrical and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)²

Abstract In view of the problem that the existing GIS pipeline detection method can not take into account the foreign matter cleaning, a robot system based on Edison Inter platform for the detection and cleaning was presented. The design of robot system was introduced in detail from aspects of hardware, kinematic model and human computer interaction platform. On the hardware, a highly integrated processor Edison Inter is used as the center to connect the modularized design during the hardware development. On the human-computer interaction platform, based on the Android development platform, the function of the 3D dynamic display, motion process control, robot attitude control have been implemented in realtime. The test shows that the robot is unique, smooth running in the GIS pipeline. The robot can achieve the displacement of about 20 degrees. The camera has no dead corners. The video pictures of human-computer interaction is clear. The whole system can satisfy the requirement of detection and cleaning.

Keywords GIS detecting and cleaning robot, Modular design, Inter Edison processor, Android platform

1 引言

气体绝缘开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS)是由断路器、母线、隔离开关等元件组合而成,并在壳内充以一定压力的SF₆气体作为灭弧介质的高压配电装置^[1],其因体积小、集成化程度高、安装方便^[2]、稳定性好等优点而被广泛应用于高压、超高压、特高压等领域^[3]。随着电网的发展,电压等级和系统容量不断增加,与此同时,GIS设备内部(尤其是管道腔内)的故障也随之增多^[4],常见的故障主要表现为以下几种形式:1)高压导体上的尖刺形成的金属突出物;2)腔体内部的自由金属微粒;3)局部放电物、金属微粒或绝缘气体中水气引起的绝缘子表面缺陷;4)绝缘子内部气隙和绝缘子与高压导体交界面的气隙缺陷。针对这些故障,现有的检测主要通过局部放电的方式来实现^[4-9]。文献[4]利用长期加压法研究了局部放电类型、放电严重程度以及气体压强对SF₆气体分解产物体积分数的影响,该做法填补了现有对GIS设备局

部放电与SF₆分解产物关系的文献研究空白;文献[5]分析了GIS故障时SF₆的分解机制、分解气体的成分及稳定性,并以此作为判断GIS局部放电故障、状态的依据;文献[6]利用220KV GIS实验段建立的GIS局部放电检测平台,研究了用于检测GIS设备内部局部放电的脉冲电流法、超声波法以及超高频法的优缺点;文献[7]总结了由特高频和超声波检测方法得出的局部放电类型图谱,并将该图谱与GIS具体部位相结合得出了GIS现场局放测试诊断图谱;文献[8]结合GIS设备冲击耐受实验条件,设计了一套用于现场测试用的局部放电检测装置;文献[9]通过评估不同吸附剂对GIS设备局部放电产生的特征气体的吸附性影响,分析了各吸附剂对GIS局部放电特征气体的变化规律。

采用局部放电虽然能检测GIS腔体内的缺陷,但也能进一步引起绝缘的劣化,从而降低GIS的电气绝缘性能。另一方面,现有对局部放电的研究很少了解其放电的严重程度^[4]。基于此,文献[10]通过X射线数字成像技术对GIS腔体中的

马飞越(1986—),男,硕士,主要研究方向为高电压绝缘, E-mail: fy.ma.1986@163.com;游洪(1990—),男,硕士生,主要研究方向为智能机器人的研究与开发, E-mail: 707304975@qq.com;佃松宜(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为特种机器人的研究与开发, E-mail: scudiandsy@scu.edu.cn(通信作者)。

异物、装配类以及材料类缺陷进行了可视化检测;文献[11]通过 X 射线数字成像技术直观、定性地研究了 GIS 腔体内部的裂纹和装配类缺陷。然而采用 X 射线数字成像法对 GIS 腔体的缺陷及异物存在体积大小的要求,且只能检测一部分缺陷。针对上述问题,可利用管道机器人来得到很好的解决^[12-14]。

本文针对目前 GIS 腔体的检测研究不能同时兼顾异物清扫的情况,设计了一种能对 GIS 腔体进行可视化检测及清扫底部粉尘杂质的 GIS 检测清理机器人,其实物如图 1 所示。

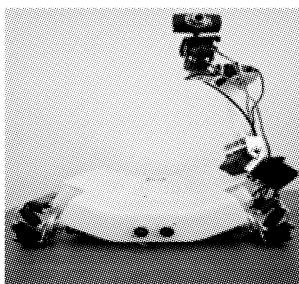


图 1 GIS 检测清理机器人实物图

本文详细介绍了 GIS 检测清理机器人系统的结构组成,分析了其硬件结构及人机交互平台,并对设计的机器人进行了实物测试。

2 机器人硬件系统设计

GIS 检测清理机器人的硬件系统是以 Inter Edison 平台为核心的处理器,其中 Inter Edison 平台运行在 Yocto Project Linux 系统中,支持 Arduino, Eclipse 开发。机器人硬件系统的框图如图 2 所示,主要由处理器、电源、运动控制、传感器以及六自由度机械臂等组成。

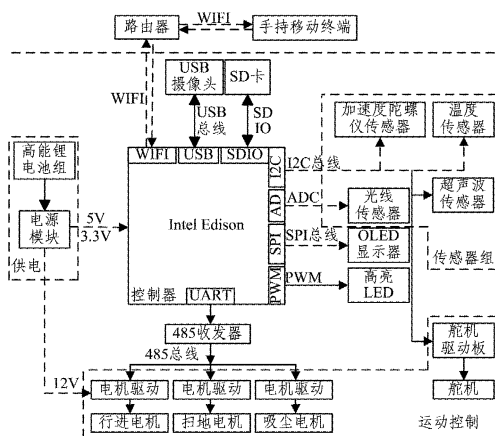


图 2 硬件系统结构框图

GIS 检测清理机器人的处理器模块以 Inter Edison 为核心,支持 Arduino, Eclipse 开发,同时以集成的 WIFI、蓝牙、存储器等模块作为辅助,以实现 GIS 腔体视频图像的实时采集、数据的网络传输、机器人的运动控制等功能。

机器人的运动控制模块主要是实现对各直流电机、舵机的控制,机器人的运动控制指令来源于人机监控终端。鉴于现有的集成芯片驱动能力较差且发热较大的特点,同时为更好地实现直流电机的驱动性能,在 GIS 机器人的电机驱动中,采用 MOS 管搭建 H 桥,如图 3 所示。

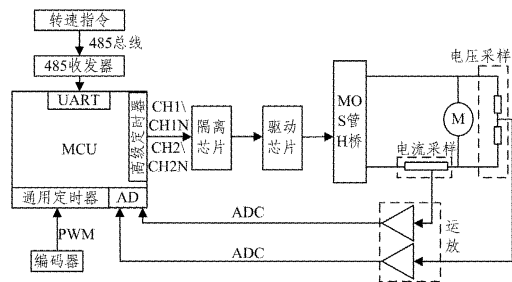


图 3 电机驱动框图

其驱动能力强,发热小,通过 UART 接收 485 总线的转速指令,然后经 MCU 处理后形成不同脉宽的 PWM 信号用以驱动电机,驱动器还具有电流、电压反馈,可实现电机过流保护,在隔离芯片的帮助下驱动信号与驱动芯片能有效地隔离功率级和控制级。

传感器模块主要用于实现 GIS 检测清理机器人工作时对现场环境的监测,包括机器人行进、扫地、吸尘的快慢,同时还兼具对机器人前进过程中的障碍以及现场光照强度的判断,并通过 I2C 总线将模数转换后的数据传输给控制器。

六自由度机械臂模块由 4 自由度的升降杆和 2 自由度的旋转云台组成。其运动控制指令来源于人机交互中心,当输入相应的指令后,通过升降臂和旋转台的配合,合理地调整摄像头的拍摄角度,以便采集腔体内的信息。

电源模块由 12.6v 大容量锂电池构成,通过稳压模块处理后,转换成 12v, 5v 和 3.3v 电源供系统各模块使用。

3 机器人人机交互平台

鉴于机器人系统在 GIS 腔体内巡检清扫的任务要求, GIS 检测清理机器人系统的人机交互平台采用如图 4 所示的结构。

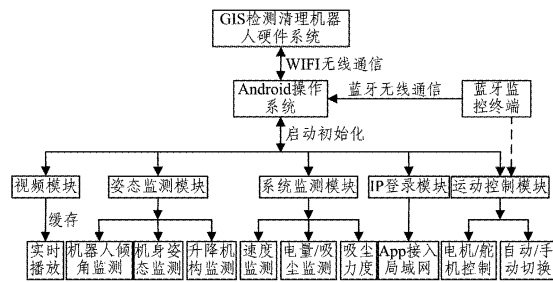


图 4 人机交互平台的结构

其中,机器人通过 WIFI 的方式实现与人机交互平台的信息交互,而机器人的运动控制指令来源于蓝牙监控终端。

机器人系统的人机交互平台包含用于实现显示机器人运动的视频模块、机器人状态的姿态监测模块、机器人行进以及扫地力度的系统监测模块、IP 登录模块以及控制机器人运动的控制模块。

机器人系统的人机交互界面如图 5 所示。



图 5 人机交互界面

通过人机交互平台,运维人员可以设置并优化行驶速度、吸尘扫地力度和摄像头的拍摄角度。

4 机器人系统运动学模型分析

为实现 GIS 检测清理机器人自主对 GIS 腔体进行可视化检测以及异物清理,在设计的机器人系统硬件及人机交互平台的架构下,分析了 GIS 检测清理机器人的运动学模型,根据该模型可以解算出机器人升降臂各关节的运动位置、偏移角度。

4.1 机器人坐标系组的建立

选取的 GIS 检测清理机器人的坐标系的初始位置如图 6 所示。在本文中,为了更直观地将机器人的坐标表示出来,在不改变其初始位置的情况下,将机器人的坐标系表示成如图 7 所示的位置。

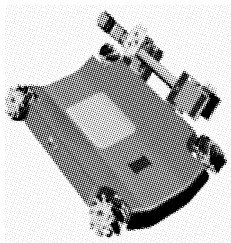


图 6 机器人坐标系的初始位置

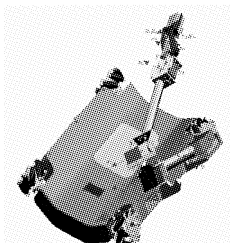


图 7 机器人的坐标系

4.2 机器人的运动学模型

根据 Denavit 和 Hattenberg 提出的机器人机械臂位姿矩阵的描述方法,机器人相邻坐标系之间的齐次变换矩阵如式(1)所示:

$${}^{i-1}T = Rot(Z, \theta_i) Trans(0, 0, d_i) Trans(a_i, 0, 0) Rot(X_i, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, α_i 表示第 i 个关节的扭转角, θ_i, α_i, d_i 分别为与之对应的关节角、连杆长度以及连杆的偏移量。

根据建立的机器人的坐标系组以及式(1)的描述方法,机器人对应的参数及关节变量如表 1 所列。

表 1 机器人的 D-H 参数

连杆	关节 θ_i	扭转角 α_i	连杆长度 a_i	连杆偏移量 d_i
1	θ_1	-90°	150mm	0
2	$\theta_2 - 180^\circ$	90°	0	0
3	$\theta_3 + 90^\circ$	-90°	0	0
4	$\theta_4 + 90^\circ$	90°	0	0
5	$\theta_5 - 90^\circ$	90°	50mm	0
6	θ_6	0	0	0

式(2)给出了机器人任意坐标系与基坐标系之间的位姿关系:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 \cdots {}^{i-1}T_i T \quad (2)$$

结合表 1、式(1)以及式(2)可以得出, GIS 检测清理机器人各关节坐标与基坐标之间的齐次变换矩阵如式(3)所示:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 T$$

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 T$$

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 T \quad (3)$$

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 T$$

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 T$$

为进一步求出机器人在不同姿态及运动状态下的运动学模型,通过 Matlab 可将 D-H 参数分别带入齐次变换矩阵中,从而解算出各机械臂对应的位姿。

5 嵌入式系统整体测试

在实验室及现场环境下,对设计的机器人系统的性能进行了验证,如图 8、图 9 所示(3 根母线与 1 根母线的情况类似,此处以 3 根母线为例)。

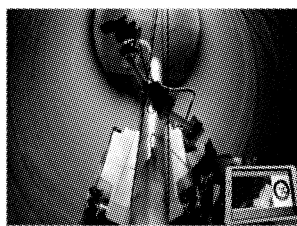


图 8 系统测试过程(实验室)

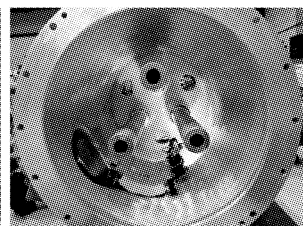


图 9 系统测试过程(现场)

在测试过程中,机器人的行进速度维持在 5m/s,各电机的转速为 10rad/s。测试内容及测试结果如下。

5.1 机器人在 GIS 腔体内偏移角度的测试

在对 GIS 机器人的设计中,为实现对腔体检测及彻底的清理, GIS 机器人在腔体中可实现左右各 20° 偏移。为验证这一角度,进行了机器人偏移角度的测试,其测试结果与软件测试结果一致。具体的软件测试结果如图 10 所示(以机器人左移位姿态为例)。

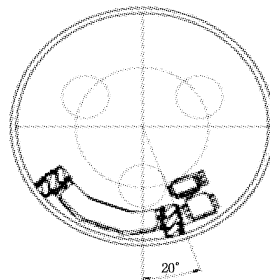


图 10 机器人左移位姿态

5.2 机器人摄像头拍摄角度的测试

实现对 GIS 腔体的无死角检测,需要摄像头能在 GIS 腔体内进行 360° 无死角的监测,因此在实验室的环境中对摄像头的拍摄角度进行了测试,通过测试发现, GIS 检测清理机器人的拍摄角度与软件模拟现场环境的测试结果是一致的,能达到预期的效果。具体的软件测试结果如图 11 所示。

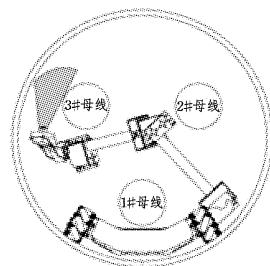


图 11 3# 母线的监控姿态

结束语 本文针对现有对 GIS 管道的检测方法不能同时兼顾异物清理的问题,设计并实现了一种基于 Inter Edison 平台的机器人系统。利用 Inter Edison 平台下的 Yocto Project Linux 系统,实现了 GIS 腔体信息的实时采集、处理以及外部设备的快速有效驱动。测试结果表明,设计的机器人系统在实现对 GIS 腔体可视化检测的同时还能清除腔体底部的异物杂质,提高了 GIS 设备运行的安全可靠。但该系统仍存在需要改进的地方,这主要表现在机器人机械臂轨迹的自主规划、人机监控画面信息的实时传输等方面。

参 考 文 献

- [1] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术,2014,40(10):3243-3251.
- [2] 孙曙光,陆俭国,俞慧忠,等. 基于超高频法的典型 GIS 局部放电检测[J]. 高压电器,2012,48(4):7-12.
- [3] 齐波,李成榕,耿弼博,等. GIS 设备绝缘子高压电机故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]. 高电压技术,2011,37(7):1719-1727.
- [4] 齐波,李成榕,骆立实,等. GIS 中局部放电与气体分解产物关系

的试验[J]. 高电压技术,2010,36(4):957-963.

- [5] 骆立实,姚文军,王军,等. 用于 GIS 局部放电诊断的 SF₆ 分解气体研究[J]. 电网技术,2010,34(5):225-230.
- [6] 王卫东,赵现平,王达达,等. GIS 局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器,2012,48(8):13-17.
- [7] 曾雄杰,刘旭明. GIS 设备局放类型图谱以及现场局放测试诊断图谱的应用[J]. 高压电器,2013,49(11):31-36.
- [8] 孙强,董明,任重,等. 现场用 GIS 冲击耐压试验及局部放电检测装置设计[J]. 高电压技术,2012,38(3):639-644.
- [9] 乔胜亚,周文俊,唐念,等. 不同吸附剂对 GIS 局部放电特征气体变化规律的影响[J]. 电工技术学报,2016,31(3):113-120.
- [10] 闫斌,何喜梅,吴童生,等. GIS 设备 X 射线可视化检测技术[J]. 中国电力,2010,43(7):44-47.
- [11] 吴章勤,魏杰,况华,等. GIS 的 X 射线数字成像检测[J]. 无损检测,2013,35(1):11-12.
- [12] 姜芸,付庄. 一种小型电缆隧道检测机器人设计[J]. 华东电力,2009,37(1):95-97.
- [13] 曹建树,林立,李杨,等. 油气管道机器人技术研发进展[J]. 油气储运,2013,32(1):1-7.

(上接第 591 页)

通过实验对比可以得出以下结论:本文的算法解决 Petri 网的并行化是可行的且在运行效率上明显优于其他编程模式。对于判定过程复杂的 Petri 网,在做并行处理时,要处理好程序的通信问题,尽量减少进程的多线程。对于网规模越大的 Petri 网实施并行计算的效果越显著。

结束语 本文提出了基于三层混合编程模型的 Petri 网并行算法,并对 Petri 网并行划分分子网的过程进行了实例分析,最后对算法的可行性进行了实验验证,采用多个 Petri 网和多组实验,进行了纵向和横向的双向比较。在已验证本文算法的有效性和高效性的前提下验证了不同网结构情况下算法的性能特征,为今后该算法的研究提供了研究方向。

参 考 文 献

- [1] 李文敬,王汝凉,廖伟志. 基于 P-不变量的 Petri 网并行化方法的研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(16):3758-3770.
- [2] SHARMA R, KANUNGO P. Performance evaluation of MPI and hybrid MPI+OpenMP programming paradigms on multi-core processors cluster[C]//International Conference on Recent Trends in Information Systems. 2011:137-140.
- [3] RABENSEIFNER R, HAGER G, JOST G. Hybrid MPI/OpenMP Parallel Programming on Clusters of Multi-Core SMP Nodes [C]//Euromicro International Conference on Parallel. 2009:427-436.
- [4] 赵永华,迟学斌. 基于 SMP 集群的 MPI+OpenMP 混合编程模型及有效实现[J]. 微电子学与计算机,2005,22(10):7-11.
- [5] 潘卫,陈燎原,张锦华,等. 基于 SMP 集群的 MPI+OpenMP 混合编程模型研究[J]. 计算机应用研究,2009,26(12):4592-4594.
- [6] 陈辉,孙雷鸣,李录明,等. 基于 MPI+OpenMP 的多层次并行偏

移算法研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(5):528-534.

- [7] 吴长莉. 基于 MPI 和 OpenMP 的三维 FDTD 并行算法的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009:10-12.
- [8] 李文敬,廖伟志,王汝凉. Petri 网系统的功能划分及其并行算法[J]. 计算机工程,2009,35(21):48-50,53.
- [9] 李文敬,廖伟志,元昌安,等. 高级 Petri 网并行化预处理方法的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2013(5):1100-1107.
- [10] 柯琦,钟诚,陈清媛,等. 多核机群上通信高效的整数序列并行排序方法[J]. 计算机应用,2013,33(3):821-824.
- [11] LIN C, SNYDER L. Principles of Parallel Programming[M]. Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. 2009:180-220.
- [12] LI W J, LI S, YUAN C A, et al. Research on Software Transactional Memory Parallel Programming Model Based on Multi-core Cluster[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(8):1732-1737.
- [13] Gilbert Fridgen, Christian Stepanek, Thomas Wolf. Investigation of exogenous shocks in complex supply networks-a modular Petri Net approach[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(5):1387-1408.
- [14] SOURAVLAS S I, ROUMELIOTIS M. Petri net modeling and simulation of pipelined redistributions for a deadlock-free system[J]. Cogent Engineering, 2015, 2(1):1057427.
- [15] WANG R Z, AGARWAL S, DAGLI C H. Executable System of Systems Architecture Using OPM in Conjunction with Colored Petri Net: A Module for Flexible Intelligent and Learning Architectures for System of systems[J]. Incose International symposium, 2014, 24(s1):581-596.