

基于改进 D* Lite 算法的电缆沟 巡检机器人系统设计

凌志勇¹, 唐名锋¹, 张康^{2,3}, 樊绍胜^{2,3}, 贾智伟^{2,3}

(1. 国网株洲供电公司, 湖南 株洲 412000; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410014;
3. 电力机器人湖南省重点实验室, 长沙 410014)

摘要: 对地下电缆沟运行状态的在线监测问题, 针对电缆沟环境设计了电缆沟巡检机器人系统; 分析了地下电缆沟在线监测的需求以及电缆沟环境带来的约束, 构建了包含图像模块、温湿度检测、可燃气体检测、运动机构、自动导航模块、上位机系统在内的巡检机器人结构; 采用多关节串联结构的履带式底座和双 CPU (central processing unit) 设计来减小机器人整体的体积和重量, 采用烟花算法改进 D* Lite 算法, 加大机器人本体与障碍物距离, 提升规划路径的平滑度, 实现了适用于电缆沟环境的路径规划; 经现场测试, 系统总功耗为 94.3 W, 最小通过宽度为 35 cm, 可穿越坡度不超过 30° 的障碍, 获得满足测量精度要求的多种电缆运行信息, 实现了地下电缆沟的自动巡检, 满足了地下电缆沟在线监测的要求。

关键词: 电缆沟巡检; 巡检机器人; D* Lite 算法; 自动导航

Design of Cable Trench Inspection Robot System Based on Improved D* Lite Algorithm

Ling Zhiyong¹, Tang Mingfeng¹, Zhang Kang^{2,3}, Fan Shaosheng^{2,3}, Jia Zhiwei^{2,3}

(1. State Grid Zhuzhou Power Supply Company, Zhuzhou 412000, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology 410114, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Power Robots, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem of on-line monitoring of the running state of underground cable trench, a cable trench inspection robot system is designed according to the cable trench environment. the requirements of on-line monitoring of underground cable trench, as well as the constraints brought by the underground cable trench environment are analyzed, and an inspection robot, including image module, temperature and humidity detection, combustible gas detection, motion mechanism, automatic navigation module, host system etc., are built. Multi-joint series structure crawler and dual central processing unit (CPU) are used to reduce the whole volume and weight of the robot. D* Lite algorithm is improved by fireworks algorithm. In this way, the distance between robot body and obstacles is increased, the smoothness of planning path is improved, and the path planning for cable trench environment is realized. Experiments of the scene show that, the total power consumption is 94.3 W, the minimum passing width is 35 cm, and could climb over obstacle not high than 30°, meanwhile, it could obtain various cable operation information which are satisfied the demand precision. This robot system realizes the automatic inspection of the underground cable trench, and satisfied the demands of the on-line monitoring of the underground cable trench.

Keywords: cable trench inspection; inspection robot; D* Lite algorithm; automatic navigation

0 引言

地下电缆沟主要用于城市供电, 还发挥着继电保护、通信等方面的重要作用^[1-2]。在输电过程中甲烷、硫化氢气体等有害气体在电缆沟环境中积累, 电缆外绝缘老化容易引起放电, 随着时间的流逝, 使得电缆沟发生爆炸、火灾

的几率随时间逐步升高。尽早发现并排除这些隐患对电力系统的安全运行非常重要。但是, 地下电缆沟内部环境复杂, 地面通常没有硬化, 两侧高压线密布, 空间狭小, 人工巡检非常危险与困难。对必要的电缆绝缘老化破碎预防、电缆沟环境温度与有害气体检测以及积水积潮管理的带来了极大挑战。因此, 采取自动导航的巡检机器人进行电缆沟状态的在线监测, 对提高电力系统运行稳定性和可靠性有着至关重要的作用^[3-4]。

为监测电力接头的温度, 美国东部电力公司于 2004 年研制了名为“PCJMS”的在线监测的电缆沟系统^[5]。针对地下电缆分接头温度, 北京电力公司于 2007 年开发了远程监测系统^[6]。2011 年, 上海交通大学研制了可以检测地下

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-18。

基金项目: 国家自然科学基金(61473049); 湖南省教育厅资助科研项目(19B016)。

作者简介: 凌志勇(1968-), 男, 湖南人, 注册电气工程师, 高级工程师, 主要从事电力生产变电站、输电、配电线路方向的研究。

通讯作者: 贾智伟(1981-), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 主要从事智能图像处理方向的研究。

电缆隧道中的温湿度和可燃性气体浓度等的“地下电缆隧道微机综合监测装置”^[7]。美国 Alfredo—Vaccaro 于 2013 年设计了一种智能电网的集成框架,将设备控制和地下电缆在线监测结合,用于电缆隧道状态数据联动控制。这些成果着眼于温度、可燃气体浓度等简单对象的在线监测,难以应对复杂的故障情形。

巡检机器人是更加实时有效地实现地下电缆沟在线监测的可行方式。2005 年,美国华盛顿大学设计了集成多个传感器的“巡游者”地下电缆监测机器人,能够准确采集、识别并上传电缆沟电缆的温度以及介质损耗等信息^[8],但防水性能不佳,通信距离范围很小,持续时长很有限。2009 年,上海交通大学研发了一款电缆隧道状态监测机器人^[9],但是该机器人需人工操控,体积大,不适合狭小的地下电缆沟。浙江大学于 2012 年合作研制了地下电缆隧道状态监测机器人^[10],拥有自主巡检功能,缺陷在于体积过大,只适合在空间比较宽阔的电缆隧道中巡检。

在地下电缆监测方面尽管已有许多卓有成效的成果,但固定监测系统的信息不全面,现有的巡检机器人存在体积过大,不适用于狭小复杂的地下电缆沟,且无法实现自动巡检等问题。本文所设计的电缆沟巡检机器人系统,外形尺寸与运动机构完全针对地下电缆沟的环境设计,具备良好的穿越能力,并且具备自动导航功能,能够实现地下电缆沟的自动巡航监测。

1 系统结构及原理

地下电缆沟内部线路巡查主要包括:地下电缆沟内部是否堆积瓦砾、垃圾;电缆表面是否破损,甚至断裂;是否存在电缆的接头位置或正常位置变形;电缆外部护套的温度是否超过规定;湿度和可燃性气体浓度是否超过标准。

地下电缆沟巡检环境带来的约束主要是地下电缆沟空间狭小,留给机器人运动的空间不超过 500 mm;障碍物较多,部分区域存在上下坡。

上述巡检目标与环境约束对地下电缆沟巡检机器人提出了以下要求:

1) 携带摄像头,能够观察到地下电缆沟内电力电缆的外表面情况,方便工作人员根据视觉信息判断电缆沟内部是否存在异常。

2) 具备检测温湿度以及有害气体的传感器。同时能够实时反应电力电缆外表面和电缆分接头温度的设备,并且实时上传数据进行保存。

3) 在电缆沟这种狭小密闭的空间能够在避开电缆线等障碍物,实现流畅行走并具备一定的爬坡能力。

综合上述的约束条件与实时环境的影响,本文的机器人总体设计布局如图 1 所示。

2 系统硬件设计

为了满足地下电缆沟狭小复杂的内部环境对机器人

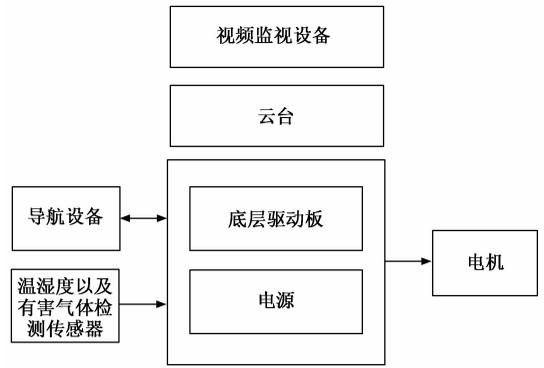


图 1 电缆沟巡检机器人总体结构设计框图

积提出的严格要求,提出了一种多关节串联结构的履带式机器人。在该设计中,驱动电机在各关节的左右两侧不对称布置,机器人的转向通过两侧电机的速度差实现。运动机构舍弃了托带轮、导向轮,只采用承重轮、行走轮和履带的组合来降低机器人高度。线路采用橡胶软管包裹进行保护。

为了排除机器人整体对避障的影响,将激光雷达放置在第一节机器人顶部,让激光雷达不会受到云台或摄像头等器件的遮挡。在第一节机器人的前方以及第三节机器人的后方各放一组高清摄像头,用于对机器人在电缆沟运动过程中观测周围环境,在第二节机器人关节顶部安装搭载摄像头的云台,各监测传感器放置云台周围。工控计算机放置于第一节机器人,STM32 主控板放置于第二节机器人内部,电源模块放置在第三节机器人内部。

由于电缆沟行走环境主要以沙地以及线缆为主,为了克服行走过程中的各种摩擦力和阻力。对应的需求转矩由机器人当前速度以及加速度所需要克服的转矩力 T_1 、 T_2 构成。设 m 为机器人的重量, θ 为机器人车身的整体倾斜度, g 为重力加速度, a 为机器人运动过程中的加速度, r 为机器人驱动轮半径,那么将机器人驱动起来的最大转矩如式(1):

$$T = T_1 + T_2 = mg \sin\theta + mar \quad (1)$$

考虑到状态检测机器人的自身重量大概为 10 kg,机器人驱动轮半径为 0.02 m,根据实际情况探测机器人整体倾斜角度为 $\theta=30^\circ$,由于在电缆沟的环境下电机控制难度较高,状态机器人运动加速度不宜过快,将加速度维持在 0.5 m/s^2 以下。通过上述式(1)可以得到最大转矩为 $49.15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。这些转矩由机器人的三关节六电机提供,因此每个驱动电机的所需输出转矩大约为 $0.164 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。同样机器人最大速度在地下电缆沟环境中运动速度也需要限制防止造成机器人过冲现象,不超过 0.5 m/s ,考虑状态机器人运动速度不宜过快转换为驱动电机的转速最大为 240 r/min 。为降低控制难度,选用加装减速齿轮箱的 ASLONG 直流减速电机作为状态监测机器人的驱动电机,转矩和转速均能达到

设计要求。

如图 2 所示, 地下电缆沟状态监测机器人控制系统总体结构由远程控制界面端、工控机、电源管理系统、传感器模块、在线监测模块、驱动模块和视觉监测系统等组成, 通过以太网实现远程控制界面端与主控板、机载工控机之间的通信。

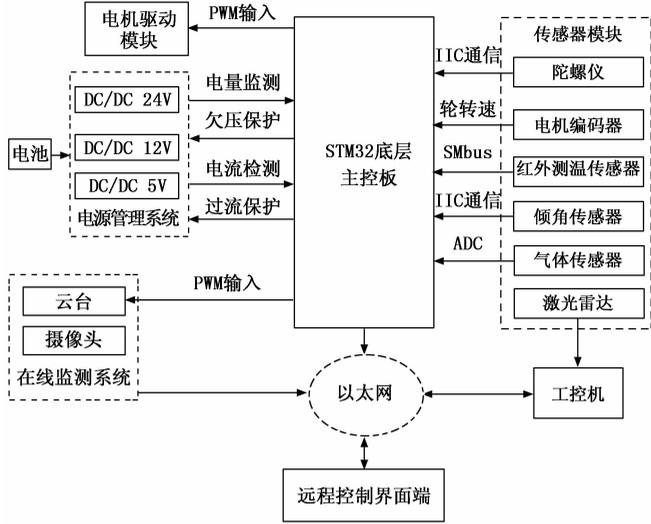


图 2 地下电缆沟状态监测机器人控制系统总体结构

机器人本体控制系统与机载工控机之间的通信通过以太网实现, 远程控制界面端通过无线以太网对机载工控机进行控制与信息传输, 包括自主避障控制指令、手动控制指令、视频图像信息、电缆沟内部环境监测信息和机器人运行状态监测信息等。

为尽量减小机器人整体的体积和重量, 本系统采用 STM32 底层主控板和工控机构成的双 CPU 设计方案。底层主控板 (STM32F103RTC6) 是地下电缆沟状态监测机器人读取传感器数据以及驱动机器人运动硬件的核心, 其主要作用为: 将得到的传感器信息通过以太网的方式传递到工控机, 对远程控制界面端发送的指令进行接收与解析; 发送控制指令, 控制机器人运动; 接收传感器采集的数据, 发送到远程控制界面端界面; 实时获取电源管理系统进行监测, 将电源电量上传至远程控制界面端界面; 通过调整 PWM 波的占空比来控制云台转动, 获取倾角传感器数据等。为了能够实时处理自主导航避障控制状态, 机器人所搭载的工控机处理器采用 Intel/英特尔酷睿 i7-855U 处理器, 将传感器模块的信息采集的信息进行处理, 计算出机器人的位置与姿态以及周围障碍物信息情况, 通过工控机上的算法处理后进行自动导航避障的消息发布, STM32 主控板接收到消息后, 驱动电机使机器人根据导航的路线进行运动。

机器人的状态监控模块包括摄像头和多个传感器, 高清摄像头由 owedon 公司生产, 尺寸为 22×22×23 mm, 拥

有四个 LED 灯芯, 视角宽度为 170°, 具备防水、防抖、防尘功能。温、湿度监测采用 AM2302 灵敏电容数字温湿度模块, 可燃气体检测采用 MQ-4 可燃性气体传感器, 并选用红外测温传感器 MLX90614 来监测电力电缆外表面和电缆分接头温度。

机器人的自主导航避障通过采用环境感知传感器与本体运动感知传感器组合的方式实现^[11]。采用思岚 A2 雷达检测电缆沟内机器人周围的环境障碍物, 获取雷达周围 10 米的障碍物反射信号, 实现对机器人的导航定位与电子地图构建。本体运动感知传感器采用整合性六轴运动处理组件 MPU-6050, 包含三轴陀螺仪和三轴加速器, 具有体积小、感应角范围大, 动作追踪准确等特点。

3 系统导航算法设计

系统导航策略由 RBPF (Rao-Blackwellized Particle Filter)-SLAM (Simultaneous localization and mapping) 进行机器人的定位, 之后通过本文所提出的改进的 D* Lite 算法进行路径规划来实现自动导航。状态监测机器人首先通过 RBPF-SLAM 算法构建环境地图, 然后机器人在构建的环境地图自定位, 并通过视觉确定目标点, 然后根据改进的 D* Lite 路径规划算法给出的较优路径进行移动。

D* Lite 算法是 Sven Koenig 和 Maxim Likhachev 在 2002 年基于 LPA* 开发的一种反向搜索算法^[6], 是一种变起点、定目标点的路径算法。它会将地图上计算得到的前一次路径信息保留下来, 当遇到环境改变时, 以较小的计算量更新代价值进行动态规划。机器人行走时算法首先以未知区域里没有障碍为判断条件, 以此为附加条件计算 $r_h(s)$ 值, 得到机器人在当前环境下最优路径规划。在该算法中, $g(s)$ 代表从目标点到当前位置的代价值, $h(s)$ 代表从当前位置到初始点的启发值。在进行导航过程中, 如果 D* Lite 算法未得到最优代价值, 在运动过程中将相邻的 8 个节点做扩展时, $g(s)$ 将会归零重新计算, 当前位置 s 到目标位置的最小代价将会以 $r_h(s)$ 表示。 $r_h(s)$ 计算公式如下:

$$r_h(s) = \begin{cases} 0, & s = s_{goal} \\ \min_{s' \in Pred(s)} (g(s') + c(s', s)), & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

从当前位置到初始点的启发值 $h(s)$ 的计算公式如下:

$$h(s, s_{start}) = \begin{cases} 0, & s = s_{start} \\ c(s', s) + h(s', s_{start}), & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $s' \in Pred(s)$ 表示 s 是 s' 的前置节点, $c(s', s)$ 节点 s' 到 s 的边缘代价, 一般为 1。

$k(s)$ 为评价节点的估价值, $k(s)$ 包含 $k_1(s)$ 和 $k_2(s)$ 两个参数, 机器人在分析四周相邻的八个节点时, 会计算 $k_1(s)$ 和 $k_2(s)$ 两个参数, $k_1(s)$ 值最小的节点选为机器人移动的下一节点。 $k_1(s)$ 和 $k_2(s)$ 可由下式 (4) 和 (5) 计算:

$$k_1(s) = \min(g(s), r_h(s)) + h(s) \quad (4)$$

$$k_2(s) = \min(g(s), r_h(s)) \quad (5)$$

当 $k_1(2)$ 和 $k_2(s)$ 的值相等时, D* Lite 路径规划算法完成。

D* Lite 路径规划算法具有很好的适用性,但在电缆沟中的实际环境中, D* Lite 算法到达了障碍物附近范围后才进行自转调节角度并重新规划路径,导致在环境较为复杂的地下电缆沟环境所规划路径时易发生过冲现象,影响实际通行。因此,本文采用烟花算法对 D* Lite 路径规划算法进行改进,通过烟花算法确保机器人采用的路径与障碍物维持安全距离,并对关键节点之间的路径平滑处理,使机器人能够更好的在电缆沟内部自主导航避障。

与 D* Lite 算法相比,改进的部分如下:

1) 基于烟花算法改进的 D* Lite 路径规划,加入了映射操作,让机器人可以对行走区域的栅格进行安全判定。模运算映射规则见下式:

$$X_i^k = x_{\min}^k + |x_i^k| \% (x_{\max}^k - x_{\min}^k) \quad (6)$$

其中:在第 k 个维度平面上第 i 个超出边界烟花的位置即为 x_i^k ,在 k 维度平面上的上边界值为 x_{\max}^k ,下边界为 x_{\min}^k ,模运算符号为 $\%$ 。

2) 挑选关键转折点。一般 D* Lite 算法在做障碍物的采集和路线规划的算法处理的过程中,从第一个路径点之后,算法将会自行判断当前的点的是否和上一个节点的父节点相同,若得到的位置相同,将判定路径点重复,清除所得到的路径规划点并开始重新在地图上进行新的规划,找寻其它组合。不断重复步骤 2),当计算出所有路径节点,如果只存在起点、转折点和终点的组合,则被称为关键转折点。

3) 计算烟花算法适应度函数。算法的收敛速度会受到适应度函数的选择的影响,同近似最优解的准确率也会受到适应度函数影响。由于机器人路径的长度的将会约束函数值,用式 (7) 来表达路径的代价值:

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (7)$$

个体适用度函数如式 (8):

$$T = \begin{cases} P_{\max} - C, & C < P_{\max} \\ 0, & C \geq P_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

其中: P_{\max} 是一个相对较大的,合适的数。

4) 关键转折点之间的路径平滑。以时序排列的方式将所有关键转折点联系起来,时间靠前的作为路径的起点,时间靠后的作为路径终点,同时将保持栅格化的时效性,更新两点之间的空间。通过爆炸算子将烟花算法以一种近似烟花爆炸的现象获得多条路径线,烟花盛开的时每条弧线可以看作成一条路径线,代表机器人运动的起始地点到结束地点的运动路径,然后使用适应度函数算出所有烟花的适合度,并重复该过程直到找到终点,烟花算法在两个相邻的重要转折点处生成近似最佳解。

如图 3 所示为通过烟花算法改进 D* Lite 算法平滑处理的路线与不加烟花算法路线的对比图,通过对比可见,改进后 D* Lite 算法规划的路径转折点更少,与障碍物保持的距离更远,这样减少了机器人的判断和转向次数,降低了与障碍物发生碰撞的风险,更加适合于地下电缆沟的监测环境。

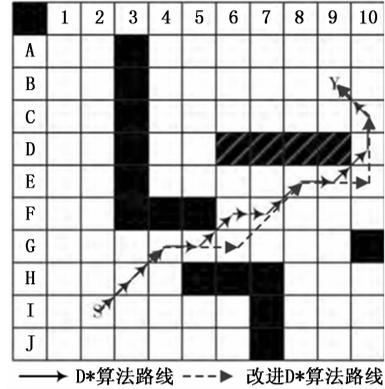
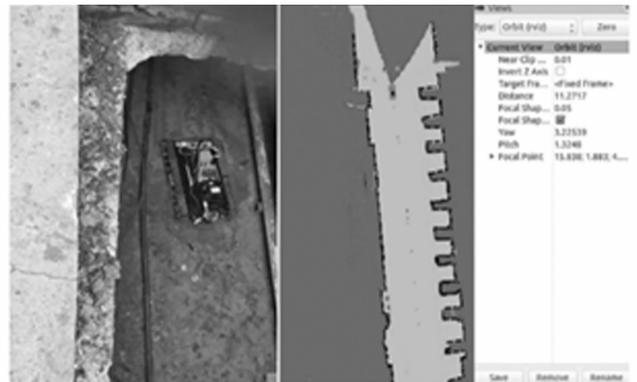


图 3 D* Lite 算法规划路径

4 实验结果与分析

将机器人样机放入国网株洲电力公司电缆沟中进行实验,如图 4 (a) 所示为机器人工作现场。在该现场环境中,地下电缆沟状态监测机器人能构建出如图 4 (b) 所示的环境地图,并依据该环境地图,实现由改进的 D* Lite 算法规划的前进路径。实验表明,本文设计的地下电缆沟状态监测机器人能够有效的在地下电缆沟中进行同时定位与地图构建,并能够在真实的陌生环境中进行实时自主导航避障。



(a) 实验现场 (b) 机器人构建的现场环境地图及路线规划

图 4 现场实验

与此同时,在所设计的人机交互界面中(图 5 所示),能够以视频方式实时监测电缆沟现场情况,状态显示区实时显示了机器人采集到的地下电缆沟内部环境温度、湿度、可燃性气体浓度以及摄像头正对的电力电缆外表温度数据。

(下转第 201 页)