

# 一种模块化、可扩展的 STM32 工程勘测小车系统及其在隧道检测中的应用

徐梓涵 陶梦然 史磊 李广伟\*  
黑龙江工商学院 黑龙江 哈尔滨 150026

**摘要:** 城市地下空间开发与交通基建加速,传统人工隧道勘测难以满足高效、安全、精准的工程需求。本文提出并实现基于STM32微控制器的模块化、可扩展远程隧道探测小车系统。该系统集成高精度定位模块、视觉识别模块、24GHz雷达传感器、麦克纳姆全向移动底盘、多自由度机械臂及ESP8266无线通信模块,构建智能勘测平台,具备自主导航、障碍感知、样本采集和实时数据回传能力。其模块化硬件架构与分层软件设计,实现功能灵活配置与场景快速适配;依托STM32F103C8T6主控芯片,支持多传感器融合与边缘计算。小车在复杂隧道环境稳定运行,定位精度达厘米级,可全方位移动、远程可视化操控,提升隧道监测、异常识别与灾害预警自动化水平,为智能勘测装备发展提供可行路径,具有重要实践意义。

**关键词:** STM32; 工程勘测小车; 隧道检测; 模块化设计; 远程控制; 智能感知

## 引言

隧道是重大基础设施的关键部分,其结构安全关乎公共安全与经济运行。但隧道环境恶劣,传统人工勘测方式效率低、周期长,还面临极大人身安全风险,且易受主观影响,数据一致性差,难以连续高频监测结构状态。近年来,物联网、人工智能与嵌入式系统技术发展迅速,智能移动机器人在多领域潜力巨大,引入隧道勘测有望实现新型作业模式。然而,现有勘测设备功能单一、扩展性差、成本高,难以满足不同隧道类型和多样化检测任务的定制化需求<sup>[1]</sup>。所以,研发低成本、高可靠性、模块化且可扩展的智能勘测小车系统迫在眉睫。本项目以STM32系列微控制器为核心,搭建开放式软硬件平台,致力于解决传统勘测痛点,为隧道等地下工程安全运维提供技术保障。

## 1 系统总体方案设计

### 1.1 系统架构概述

本系统采用“中心主控+分布式感知+无线回传”的三层架构。核心为STM32F103C8T6最小系统板,负责协调各子系统工作;感知层包括定位模块、视觉模块、雷达模块及各类环境传感器;执行层由麦克纳姆轮驱动系统与

多自由度机械臂构成;通信层通过ESP8266实现与上位机的数据交互。系统工作流程始于上位机通过WiFi发送勘测任务指令,如目标坐标或采样点位置。STM32接收指令后启动定位模块获取当前位置,并结合预设地图或SLAM算法规划路径,进而控制麦克纳姆轮底盘移动。在行进过程中,雷达实时避障,摄像头同步识别隧道壁面病害。到达目标点后,机械臂执行样本采集或标记操作。所有数据,包括位置、图像、雷达点云及传感器读数,经打包后通过ESP8266上传至云端或本地监控端,形成完整的数据闭环。

### 1.2 功能模块划分

系统划分为以下六大功能模块:

表1: 功能模块划分

模块	功能描述	关键器件
主控模块	系统调度、数据处理、逻辑控制	STM32F103C8T6
定位模块	实时获取经纬度、海拔、时间	ATK1218-BD (GPS+北斗)
视觉模块	图像采集、目标识别、AR标注	OpenMV4-H7
雷达探测模块	距离测量、障碍物检测	24GHz毫米波雷达
驱动与执行模块	小车移动、机械臂操作	TB6612FNG驱动芯片+直流电机/舵机
通信与显示模块	数据无线传输、本地状态显示	ESP8266+OLED

## 2 硬件系统设计

### 2.1 主控芯片选型

根据工程勘测小车系统功能需求和设计,我们选择

**通讯作者:** 李广伟, 1984年2月, 男, 汉, 辽宁省昌图县, 本科, 电气工程

**项目级别:** 黑龙江工商学院创新创业训练计划国家级一般项目

**项目名称:** 基于STM32的远程隧道小车

**项目编号:** 202513300049

STM32单片机做为系统的主控芯片。系统通过传感器采集数据,选择内部带有ADC电路的芯片有利于节约成本,同时还可以检测设计提高系统可靠性,减少外围电路,STM32的资源更加丰富,运行速度快处理数据能力强,能够提高系统的性能。

## 2.2 定位模块

采用ATK1218-BD定位模块,模块有外接天线,可以在30秒内完成定位,并且可以存储定位数据,通过串口来进行数据的配置,完成后,可通过串口向单片机发送定位信息,传输速度和刷新频率快<sup>[2]</sup>。小车可以进行位置定位,实时位置信息,并通过单片机对位置信息进行处理,再通过WiFi无线模块将位置信息发送到上位机中,因此采用ATK1218-BD定位模块,它和STM32单片机可以直接进行数据交换,且编程也符合单片机的寄存器要求。

## 2.3 视觉处理模块

本系统采用OpenMV4-H7作为专用视觉处理单元,其内部集成了高性能的STM32H743VI处理器与200万像素OV2640摄像头。OpenMV的最大优势在于其内置的MicroPython解释器和丰富的图像处理算法库,开发者无需从零开始编写复杂的计算机视觉代码,即可通过简洁的脚本实现色块追踪、二维码识别、Haar级联目标检测等功能。在实际应用中,OpenMV被配置为持续分析隧道内壁图像,一旦检测到疑似裂缝或渗水区域,便立即截取图像并计算其在画面中的坐标,再通过UART将结果发送给主控STM32。这种“边缘计算”模式有效减轻了主控芯片的负担,并实现了毫秒级的视觉响应,为后续的精确定位与记录奠定了基础。

## 2.4 雷达探测模块

系统额外集成了24GHzISM频段的毫米波雷达作为补充感知手段。毫米波雷达具有良好的穿透能力,不受光线条件影响,能够在完全黑暗或浓烟环境中稳定工作。雷达模块持续向前方发射电磁波并接收回波,通过计算飞行时间得出与障碍物的距离<sup>[3]</sup>。该距离信息以模拟电压或数字串行信号的形式输出,STM32通过ADC通道或额外的串口进行读取。当检测到前方障碍物距离小于安全阈值时,系统会立即触发紧急制动或路径重规划逻辑,确保小车在复杂未知环境中安全运行。

## 2.5 驱动与执行系统

### 2.5.1 麦克纳姆轮底盘

选用四轮麦克纳姆轮布局(两左旋、两右旋),通过独立控制四个轮子的转速与转向,可实现:前进/后退、左/右平移、原地旋转、斜向移动,极大提升在狭窄、弯曲隧道内的机动性。

### 2.5.2 电机驱动

TB6612FNG是一款双H桥电机驱动芯片,特点包括:最大输出电流3A,支持5-30V电机;逻辑电平兼容3.3V,可直接与STM32GPIO连接;内置过热保护与低电压关断;通过PWM信号精确控制电机转速与方向。STM32输出4路PWM(分别控制4个轮子)及方向信号,实现全向运动控制。

### 2.5.3 机械臂

采用3自由度连杆机构,由3个舵机驱动(肩部俯仰、肘部弯曲、腕部旋转)。STM32通过定时器输出PWM信号控制舵机角度,实现定点抓取、采样或喷标记等操作。

## 2.6 通信模块

采用ESP8266无线模块,内置32位处理器,ESP8266是单核处理器,运行频率为80MHz。WiFi模块都带有GPIO,支持SPI, I2C, UART等各种协议,使用固件进行编程和升级,操作简单。它有三种工作模式,STA模式下,ESP8266无线WiFi模块通过路由器连接互联网,然后在连接终端设备,AP模式下ESP8266无线WiFi模块作为热点,实现手机或电脑直接与模块进行通信,STA+AP模式下ESP8266无线WiFi模块可以同时连接路由器或者手机,再通过手机APP进行控制,因此选用ESP8266无线WiFi模块。

## 2.7 显示与电源模块

为提供直观的本地人机交互,系统配备了一块0.96英寸的OLED显示屏。该屏采用I2C通信协议,仅需两根信号线(SCL、SDA)即可与STM32连接,节省了宝贵的IO资源。OLED自发光特性使其在隧道昏暗环境下依然清晰可读,可用于显示当前IP地址、电池电量、GPS状态、系统运行模式等关键信息,方便现场调试与状态确认。在电源方面,系统采用12V/60F超级电容作为主储能单元,其高功率密度特性能够应对电机启动时的瞬时大电流需求。电源经过LM7805线性稳压器转换为5V,供给电机驱动、雷达等功率器件;再通过AMS1117-3.3低压差稳压器转换为纯净的3.3V,为STM32主控及所有数字逻辑电路供电。各级电源输入输出端均配置了大小电容组合滤波,有效抑制了纹波和高频噪声,确保了整个系统在复杂电磁环境下的长期稳定运行。

## 3 软件系统设计

### 3.1 软件架构

采用前后台系统(SuperLoop+中断)模型,主循环调用各功能子程序,关键事件(如串口接收、定时器溢出)通过中断处理。

### 3.2 主程序流程

系统主程序是将各个子程序包含在内,通过调用各个子函数来实现系统的功能,系统主程序流程图如图所示。

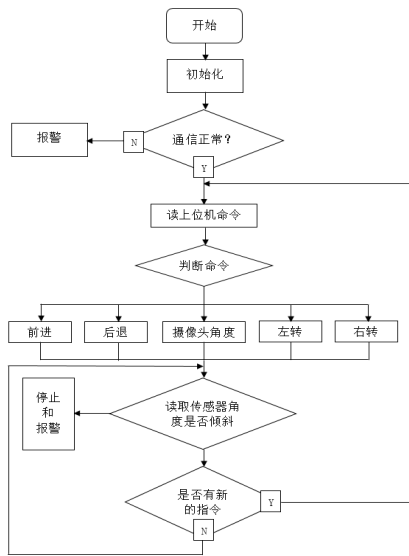


图1: 系统主程序流程图

### 3.3 关键子程序设计

#### 3.3.1 定位数据解析

通过状态机解析NMEA语句，提取\$GNGGA中的纬度、经度、海拔、卫星数等字段，并转换为十进制度。

#### 3.3.2 全向运动控制算法

定义运动矢量 (V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>ω</sub>)，通过以下公式计算四轮速度：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L_x + L_y) \\ 1 & 1 & (L_x + L_y) \\ 1 & 1 & -(L_x + L_y) \\ 1 & -1 & (L_x + L_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_\omega \end{bmatrix}$$

其中 r 为轮半径，L<sub>x</sub>, L<sub>y</sub> 为轮距参数。

#### 3.3.3 无线通信协议

定义自定义数据帧格式：

表2: 定义字段

字段	长度	说明
Header	2B	0xAA55
Type	1B	0x01 = 位置, 0x02 = 图像, 0x03 = 雷达
Len	1B	数据长度
Data	NB	有效载荷
Checksum	1B	XOR校验

STM32在串口中断中接收上位机指令，解析后执行相应动作。

## 4 系统在隧道检测中的应用

### 4.1 应用场景

本系统的设计初衷是服务于多样化的隧道检测需求。在日常运维中，它可以按照预设路线进行自动化巡检，

持续监控隧道衬砌是否存在裂缝、渗漏水、剥落或鼓包等病害，并建立长期的健康档案。在遭遇地震、洪水或爆炸等突发灾害后，人工进入现场风险极高，此时小车可作为“先锋”，快速深入危险区域，评估结构损伤程度，为救援决策提供第一手资料<sup>[4]</sup>。在隧道施工阶段，它还能用于监测掌子面的稳定性，及时发现围岩松动迹象。此外，对于隐蔽工程的验收，如回填土质量、地下管线的实际埋设位置等，通过集成探地雷达等专用模块，小车也能发挥无损检测的优势。

### 4.2 工作流程示例

一次典型的隧道检测任务始于操作员在移动终端上的操作。用户通过专用APP绘制一条巡检路径，或直接输入若干个关键坐标点作为检测目标。指令通过WiFi下发至小车后，小车首先进行自检，确认各模块状态正常，然后启动定位模块获取自身初始位置。接着，系统根据起点和第一个目标点规划出一条初步路径。小车开始沿路径行进，OpenMV摄像头持续对隧道内壁进行扫描分析。一旦算法识别出裂缝特征，系统会立即暂停行进，拍摄高清照片，并将该病害的位置（由GPS和里程计融合得出）与图像一同打包存储。

## 5 结语

本文成功研发基于STM32的模块化远程隧道探测小车系统，借助多传感器融合、全向移动底盘与远程通信技术，实现隧道自主巡检与智能感知，模块化设计便于功能扩展，低成本利于工程推广。展望未来，研究深化空间广阔：一是引入SLAM算法，让小车在无GPS信号的隧道深处自主建图定位；二是丰富感知维度，集成多种传感器构建全面监测体系；三是将病害识别方法升级为基于深度学习的CNN模型，部署于高性能边缘计算单元，提升诊断精度与鲁棒性；四是从单机作业迈向多机协同，设计分布式机制实现并行工作，完成超长超大隧道普查。该系统实施，推动工程勘测转型，为智慧交通与韧性城市建设筑牢技术根基。

### 参考文献

- [1]李龙,邓兆强,龚聪,等.智能探测小车的设计与实现[J].电子制作,2021,(23):80-82.
- [2]赵晨光,魏丽,安久伏.探测小车电控系统的设计[J].计量与测试技术,2025,51(05):47-49+53.
- [3]熊节,巫润方,汪劲杰.融合激光测距和视觉传感器的智能小车避障系统设计[J].萍乡学院学报,2024,41(06):64-69.
- [4]刘学宏.基于智能算法的无人小车轮径规划研究与设计[D].吉林化工学院,2024.