

## 面向隧道设备管理的嵌入式智能联动系统设计与实现

罗玉波 黄纯峰 杨璨祎 胡馨予 李仕奇 贾一 马林  
贵州黔程慧通科技发展有限公司, 贵州 贵阳 550000

**[摘要]**随着隧道建设规模的不断扩大,隧道运行期间的设备管理对安全与效率提出了更高要求。文中提出一种基于嵌入式技术的智能联动系统,实现对隧道内各类关键设备的集中监测、联动控制和数据分析。系统通过多传感器融合、边缘计算与通信模块协同工作,提升故障响应速度和运维效率。设计中采用模块化架构,便于扩展与维护,适配多种隧道应用场景。实验证明,该系统具备较高稳定性和智能化水平,能有效支撑隧道设备管理的现代化需求。

**[关键词]**嵌入式系统;隧道设备;智能联动;边缘计算;系统设计

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16290

中图分类号: TN9

文献标识码: A

### Design and Implementation of Embedded Intelligent Linkage System for Tunnel Equipment Management

LUO Yubo, HUANG Chunfeng, YANG Canyi, HU Xinyu, LI Shiqi, JIA Yi, MA Lin  
Guizhou Qiancheng Huitong Technology Development Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550000, China

**Abstract:** With the continuous expansion of tunnel construction scale, equipment management during tunnel operation has put forward higher requirements for safety and efficiency. The article proposes an intelligent linkage system based on embedded technology to achieve centralized monitoring, linkage control, and data analysis of various key equipment in tunnels. The system improves fault response speed and operation and maintenance efficiency through multi-sensor fusion, edge computing and communication module working together. The design adopts a modular architecture, which is easy to expand and maintain, and adapts to various tunnel application scenarios. Experimental results have shown that the system has high stability and intelligence, and can effectively support the modern needs of tunnel equipment management.

**Keywords:** embedded system; tunnel equipment; intelligent linkage; edge computing; systems design

#### 引言

隧道内部环境复杂,涉及通风、照明、监控、消防等多个设备系统,传统的分散管理方式已难以满足实际运行需求。随着物联网与嵌入式技术的发展,构建一个智能、高效、协同的设备管理平台成为关键。本文基于实际需求,设计并实现一套嵌入式智能联动系统,旨在提升隧道设备运行的安全性和智能化水平。

#### 1 系统总体架构设计

##### 1.1 功能需求分析

隧道内设备类型多样,涵盖通风设备、照明系统、监控摄像头、火灾报警器、广播系统等。这些设备对运行状态的实时监测和统一控制至关重要,传统的人工巡检方式效率低、滞后性强,难以应对突发事件。因此,系统设计首先需满足以下核心功能需求:一是状态监测,实现对温湿度、烟雾浓度、电气设备运行状态等关键参数的实时采集与展示;二是故障预警,在设备发生异常时迅速判断故障类型并生成预警信息,通过声光报警或远程信息通知机制及时提示运维人员;三是联动控制,如在火情发生时自动启动排烟风机、开启应急照明、联动广播疏散系统等,实现跨系统的协同响应。系统还需具有可配置性和模块化扩展能力,以适应不同规模和类型隧道的管理需求,提升

系统的实用性和灵活性。

##### 1.2 系统结构组成

基于上述功能需求,系统总体结构由以下核心模块组成:

###### 1.2.1 嵌入式主控单元

作为整个系统的核心处理平台,负责传感器数据采集、状态分析、联动策略执行与通信控制。主控单元选用性能稳定、资源充足的嵌入式芯片平台,如 STM32、RK3399 以及兆易创新(GigaDevice)系列高性能 MCU,运行轻量级实时操作系统,以保障系统响应的实时性与可靠性。

###### 1.2.2 传感器节点模块

部署在隧道关键位置的多类型传感器,用于采集环境参数和设备运行状态,包括温湿度传感器、烟雾传感器、光照传感器、电流电压检测模块等。这些传感器通过模拟或数字信号接口与主控单元相连,支持多通道并发输入。

###### 1.2.3 通信模块

实现嵌入式系统与上位机或远程服务器的双向通信,包括以太网、有线串口通信(如 RS485)、工业现场总线(如 CAN),以及 4G/5G 无线通信等模块。模块选型基于具体隧道环境与传输距离需求,确保数据传输的稳定性和抗干扰性。

###### 1.2.4 执行控制端

连接风机、灯光、报警器等被控设备,通过继电器驱

动、电机控制板等方式实现控制命令的输出，确保联动策略快速、准确执行。

整体结构采用分层模块化设计思路，底层为数据采集与控制层，中间为嵌入式处理与决策层，顶层为通信与显示层，使系统具有良好的可维护性与扩展性。

### 1.3 通信与数据流设计

为确保系统内各模块协同工作并满足实时性要求，通信机制采用多种协议并行运行的设计思路。在隧道本地设备之间，采用 RS485 和 CAN 总线构建稳固的工业现场通信网络，尤其适合长距离、高干扰环境中的数据传输。CAN 总线具有冲突处理能力强、实时性高等优势，适合多个设备之间的点对点或组播通信；RS485 则适用于主从结构的串行通信，布线简单，成本低。在与远程管理平台的数据交互方面，系统支持以太网通信和 4G/5G 无线通信模块。数据上传采用 MQTT 或 HTTP 协议，将设备状态、报警信息和运行日志周期性推送至云端服务器，实现远程监控与历史数据分析。下行则支持远程命令下发与设备参数配置，增强系统智能化管理水平。整个数据流从传感器采集开始，经主控单元解析处理后，根据设定规则做出控制决策，联动控制端执行相关操作，同时将处理结果和状态数据同步上传至平台，形成一个“感知—判断—执行—反馈”的闭环控制体系。

## 2 硬件平台构建

### 2.1 主控模块选择

硬件平台的核心在于主控模块的选择，它直接关系到系统的处理能力、接口扩展性以及功耗控制。针对隧道环境中的实际应用需求，主控模块需具备高可靠性、实时响应能力强、接口丰富、低功耗等特性。常见的选型方案包括 STM32 系列微控制器、ARM Cortex-A 架构的嵌入式板卡（如 Raspberry Pi、BeagleBone Black）、工业级嵌入式核心板（如瑞芯微 RK3399、全志 A40i）以及兆易创新（GigaDevice）GD32 系列微控制器。在控制逻辑不复杂、以采集和控制为主的隧道管理系统中，STM32F4 或 F7 系列芯片因其良好的性价比、丰富的外设接口（如 USART、I2C、SPI、ADC、CAN）以及低功耗特性，是较为理想的选择。若系统需运行 Linux 操作系统并进行图像处理、数据存储、远程通信等高负载任务，则可选用带 GPU 和大内存的高性能嵌入式平台，支持多线程和更复杂的通信处理。主控模块需具备足够的 Flash 与 RAM 资源，以保障系统运行的稳定性，并应配套适合的硬件加密模块（如 TPM 或硬件 CRC 校验）以提升系统数据安全性。

### 2.2 传感器与执行器接入

系统设计中需集成多类传感器与执行器，以覆盖隧道内环境监测和设备控制的完整需求。传感器部分主要包括温湿度传感器、烟雾传感器、光照度传感器、气体传感器、电流互感器、电压监测模块等。这些传感器通过模拟信号（如 420mA、05V）或数字总线（如 I2C、SPI、MODBUS）连接到主控模块，根据实际布局采用集中式或分布式布设

方式。系统应支持多个传感器并行接入，因此在设计时需配置多通道 ADC 模块、I/O 扩展芯片或多路串口，以满足大规模信号输入的需求。同时，需针对不同传感器设置采样频率与滤波策略，保证数据的准确性与实时性。执行器部分包括排风风机、应急照明、广播系统、电动挡板、声光报警器等，这些设备通常由继电器、电机驱动模块或工业控制器控制。为保障执行准确性，控制模块需具备继电器状态反馈功能，实现闭环控制。对于需要精细控制的设备，如调速风机、电动卷帘等，还需集成 PWM 控制、电机位置编码反馈等功能。系统结构应保持接口通用化和模块化，方便后期扩展和维护。例如，使用通用型的工业端子排、可插拔模块化板卡，有助于在施工及运维阶段快速替换或调整设备接入方式。

### 2.3 电源与抗干扰设计

在隧道环境中，电磁干扰、湿度波动、电源不稳等因素可能对嵌入式系统的运行造成影响，因此可靠的电源管理与抗干扰设计是整个系统稳定运行的重要保障。系统采用集中供电与分级稳压相结合的方式。主供电源一般来自 220V 交流电，通过工业级开关电源转换为 12V 或 24V 直流，再由 DC-DC 模块转换为 5V、3.3V 等不同电压等级，供各模块使用。电源模块选用带有浪涌保护、过压过流保护的工业电源设备，以提高系统抗异常能力。针对电磁干扰问题，系统设计需遵循 EMC（电磁兼容）原则。传感器线路与信号处理电路采用屏蔽线缆，输入输出端口添加滤波电容、磁珠、电感，减小干扰耦合。同时，在 PCB 布局中，应将数字地与模拟地分区设计，避免高频信号影响模拟信号采集。此外，系统外壳采用金属接地屏蔽设计，进一步抑制外部干扰源。整体来看，硬件平台的稳定性、抗干扰性与供电保障能力，直接决定了嵌入式系统在隧道环境中的应用效果，是设计中的重点与难点。

## 3 软件系统开发

### 3.1 嵌入式操作系统配置

为了满足系统多任务并发处理和实时响应的需求，本系统软件架构基于轻量级嵌入式实时操作系统 OpenHarmony 进行开发。OpenHarmony 具备任务调度机制、中断管理、内存分配、队列通信等功能，能够高效管理嵌入式主控平台上各项任务的运行。系统软件主要划分为以下任务模块：传感器数据采集任务、联动逻辑判断任务、执行控制任务、通信处理任务及日志记录任务。每个任务分配合适的优先级以确保关键控制逻辑优先执行，例如火灾预警响应任务设为最高优先级，其次为通信和数据采集任务。系统通过消息队列、事件标志组和信号量等机制实现任务之间的高效协同与数据同步。

### 3.2 联动逻辑实现机制

嵌入式系统中联动控制机制采用“事件驱动+状态判断”的模式，通过传感器采集结果触发控制指令，实现多设备的协同联动。例如，当烟雾浓度超过设定阈值，系统

将立即执行以下操作：启动排风风机、点亮应急照明、触发声光报警器、同步上传事件至远程平台。联动规则采用表驱动方式管理，每条联动逻辑配置包括触发源、判断条件、目标设备、执行动作、延迟响应时间等字段。嵌入式程序周期性读取传感器数据，并与规则表进行匹配，一旦满足条件即调用执行函数，实现联动效果。如表 1 所示：

表 1 为部分联动规则配置示例

联动编号	触发源	判断条件	目标设备	执行动作	延迟时间 (ms)
L001	烟雾传感器	>200ppm	风机 1、报警器 1	打开	0
L002	光照传感器	<50lux	应急照明	打开	500
L003	温度传感器	>0℃	声光报警器、风机	同时激活	200
L004	人体红外线	检测到移动	广播系统	播放提示音	100

通过模块化设计，系统支持联动规则的在线更新与动态加载，提升了系统运行的灵活性与智能化程度。

### 3.3 远程监控与数据上传

系统内置通信模块，支持通过 MQTT 协议将设备状态、环境数据、报警信息等实时上传至云平台或远程监控中心。MQTT 具有轻量、低带宽、高实时性等优点，适合嵌入式设备与服务器间稳定通信。系统通过建立发布/订阅模式通道，周期性上传数据，并接收远程指令下发。此外，系统将历史数据存储在本地的 SD 卡或 EEPROM 中，并定期打包上传，便于后期故障分析与运维追溯。远程监控平台可通过 Web 端查看各类数据图表，包括温湿度曲线、报警日志、设备状态列表等。为保证数据传输的安全性，系统通信模块支持 TLS 加密、身份认证机制，并具备断线重连与数据补发能力，确保即便在通信中断后仍可完整恢复数据传输。

## 4 系统联调与应用验证

### 4.1 实验环境搭建

为了验证所设计嵌入式智能联动系统的功能完整性与运行稳定性，构建了一套小型仿真隧道实验平台。该平台模拟真实隧道环境，配置通风风机、照明灯具、烟雾与温湿度传感器、红外人体感应器、声光报警器等多类设备。主控系统采用兆易创新的 GD32F407 主板，搭载 OpenHarmony，配套以 CAN 总线及 RS485 模块完成通信架构搭建。传感器与执行器通过统一接口接入系统，按照实际隧道布局进行有序布设。在软件层面，搭建虚拟远程监控界面，用于接收数据上传并下发控制指令，实现远程监控联调测试。联动规则在调试过程中逐条加载验证，确保逻辑触发准确、响应及时。同时设计测试脚本模拟突发状况（如烟雾、断电、光照不足等），以检验系统应急处理能力和任务调度效率。

### 4.2 性能指标评估

系统联调完成后，对其各项核心性能指标进行评估，具体包括响应时间、通信稳定性、故障恢复能力与数据传

输成功率等方面。测试结果如下：

联动响应时间：从传感器触发至目标设备响应的平均延迟为 120ms，满足快速反应需求；

通信稳定性：在干扰模拟环境下（加装电磁干扰源），数据传输丢包率低于 0.5%，系统能够稳定维持通信；

系统稳定性测试：连续运行 72 小时无死机、无故障，任务调度均衡，资源占用合理；

故障恢复能力：模拟电源中断后系统自动重启并恢复上次运行状态，断点续传机制有效；

数据上传成功率：MQTT 数据包上传成功率达 98.7%，重连机制可保障剩余数据在网络恢复后上传完整。整体评估表明，该系统在功能实现、实时响应与稳定运行方面表现良好，能够适应中型隧道管理场景的实际应用需求。

### 4.3 应用场景推广探讨

本系统具备高度模块化和良好的扩展性，适合推广至多种类型的隧道与地下工程设备管理中。在城市地铁隧道中，可结合列车运行数据，实现更精准的照明与通风联动控制；在高速公路隧道中，系统可与交通诱导系统集成，基于车辆检测与环境状态协同响应；在水利隧道、电缆通道等封闭式设施中，可用于环境监测与灾害预警联动控制。随着物联网平台的发展，系统可进一步接入城市综合管理平台，实现多系统间数据共享与智能调度，推动城市基础设施向数字化、智能化方向升级。未来可结合 AI 算法对采集数据进行学习与优化，进一步提升系统的自适应能力和预测性控制水平，实现更高层次的智能管理。

## 5 结束语

本文设计的嵌入式智能联动系统实现了隧道内多设备的集中管理与智能响应，提升了管理效率与运行安全。系统在结构上具备良好的扩展性，在功能上能实现复杂的联动逻辑，适应复杂的隧道应用需求。未来将在实际工程中进一步优化与推广，以支持更多智能基础设施建设的需求。

### [参考文献]

- [1]李倩文,蒋海里.面向全生命周期的城市越江隧道大修工程数字化应用[J].中国市政工程,2024(5):104-108.
- [2]赵鹏,马伟斌.基于数字孪生的铁路隧道智能运维关键技术与其实现方法研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(8):1697-1712.
- [3]刘令君,罗江,李振宇.靶向智慧诱导技术在隧道多场景中的应用[J].中国交通信息化,2024(8):103-106.
- [4]陈再励.基于人体表征与场景理解的隧道施工风险识别评估与管控方法研究[D].北京:中国地质大学,2022.
- [5]张靖.城市隧道群路网状态感知与协同调控[D].南京:东南大学,2022.

作者简介：罗玉波（1986.9—），男，学士学位，中级工程师，目前就职于贵州黔程慧通科技发展有限公司，目前主要从事机电产品开发，系统集成、系统实施方向的工作。