

# 高速公路机电工程智能巡检系统设计

梁永欣

摘要：基于高速公路机电工程巡检需求复杂、设备分布广的特点，对智能巡检系统的总体架构、机械执行机构、传感器配置及控制反馈单元进行了系统设计与验证。阐述了机电协同控制与多源信号融合的实现机制，结合现场部署与性能测试数据，对系统精度、稳定性及长期运行可靠性进行了分析。

关键词：高速公路机电工程；智能巡检系统

## 0 引言

高速公路机电工程设施数量庞大、环境复杂，传统人工巡检方式存在周期长、精度低与安全性不足等问题。本文构建系统化设计框架，提出机电一体化的协同控制与反馈机制，以提升巡检作业的智能化、标准化水平，为交通基础设施的高效运维提供工程化解决方案。

## 1 系统原理

高速公路机电工程智能巡检系统的工作原理基于“机械执行机构—多源传感单元—控制与反馈模块”三层协同机制。系统通过机械臂或移动底盘完成巡检动作，执行单元在控制指令驱动下沿设定轨迹实现精确定位与多点检测；传感器阵列同步采集机电设备的温度、电流、振动及图像信号，经信号调理与特征提取后送入控制核心进行状态识别与异常判定<sup>[2]</sup>。控制模块依据实时数据反馈，动态修正执行机构运动参数，实现姿态微调与路径自适应。系统通过力学与信号的双闭环控制，实现巡检精度、执行稳定性与响应速度的综合优化。机械结构在此过程中承担主要动力与支撑任务，控制逻辑保证其动作与传感响应的时序一致性，从而构成“检测—决策—执行”的连续反馈回路，形成智能巡检的运行基础。

## 2 系统设计

### 2.1 系统总体架构

系统总体架构采用感知层—执行层—控制层—平台层四级协同设计，以模块化思路实现机电功能的高耦合与解耦控制。感知层集成温度、振动、电流及视觉传感器，负责现场信号采集与预处理；执行层由机械臂与移动底盘构成，承担巡检动作执行与位姿调节；控制层通过实时总线连接多传感节点与伺服驱动单元，实现运动轨迹规划与反馈校正；平台层完成数据融合、状态识别及任务调度。

## 2.2 巡检执行机构设计

巡检执行机构作为系统的核心机械单元,承担设备巡检的运动驱动与作业实现任务。机构整体采用三自由度机械臂+履带式移动底盘的复合结构设计,兼顾路径灵活性与操作稳定性。机械臂由基座、回转关节、伸缩臂和末端检测模组构成,臂长 850 mm,最大回转角度 $\pm 160^\circ$ ,末端负载能力 3 kg,可覆盖 2.1 m $\times$ 1.6 m 的巡检作业空间。驱动系统选用 24 V 直流伺服电机,额定转速 1500 r/min,扭矩 1.8 N $\cdot$ m,通过谐波减速器实现角度放大与低抖动控制,定位精度优于 $\pm 0.3^\circ$ 。底盘采用橡胶履带与差速驱动组合,最大行进速度 0.4 m/s,可跨越 30 mm 高度差,适应收费站及隧道机电管廊复杂地面环境。

## 2.3 传感器配置与采集模块

传感采集模块以分层采集、同步触发、隔离抗扰为设计原则,配备红外温度、三轴加速度、压电振动、超声测距、视觉摄像、激光测距、电压电流共 8 类传感器并布设至机械臂末端、关节与底盘关键位置,温度传感器量程-20 $\sim$ 120 $^\circ$ C、分辨率 0.1 $^\circ$ C用于温升检测,加速度传感器 $\pm 16g$  量程、2kHz 采样监测机体振动,压电振动传感器 10Hz $\sim$ 8kHz 频响排查机件松动失衡,1920 $\times$ 1080@30fps 摄像搭配  $\pm 2$ mm 精度激光测距实现仪表与线路辨识,系统选用 24bit、10kS/s 模数转换芯片搭配 2kHz 截止频率低通滤波器滤除信号杂波,依托 RS-485 与 EtherCAT 总线上传数据,传输时延 $\leq 20$ ms。

## 2.4 控制与机械反馈单元设计

控制与机械反馈单元设计以分布式实时控制与多级反馈融合为核心思路,确保执行机构的动作精度与系统稳定性。控制单元采用 STM32H743 主控芯片与 FPGA 协处理结构,主频 480 MHz,数据刷新周期 2 ms,实现信号采集、指令分配与运动控制的高速同步。系统内置三个控制环节:位置环、速度环与力矩环。位置环通过增量编码器反馈进行角度误差修正;速度环采用霍尔测速传感器数据,实现转速稳定控制;力矩环基于伺服电流反馈进行驱动力动态补偿。控制频率 1 kHz,机械响应时间不超过 35 ms,闭环精度可达 $\pm 0.4$  mm。

信号处理模块采用 1 Mbps CAN 总线与 100 Mbps EtherCAT 并行通信架构,控制指令传输延时小于 20 ms,命令执行延迟不超过 40 ms。各执行节点均具备本地缓冲与异常断线自复位机制,提高抗干扰与容错能力。系统软件采用分时调

度策略，将机械反馈信号与任务指令划分为高优先级线程，确保控制环实时闭环运行。

### 3 系统应用与性能验证

#### 3.1 现场部署

系统现场部署选取 G205 高速公路 A 段机电综合控制区为试点，巡检线路总长约 320 m，包含配电柜、摄像桩、照明箱及通信节点等典型设施。巡检执行机构安装在长 1.1 m、宽 0.6 m 的履带底盘上，底盘两侧设障碍检测模块，最小转弯半径 0.85 m，可适应隧道与设备间狭窄空间。机械臂基座固定于底盘中心，安装高度 0.42 m，末端检测模组距地最大伸展高度 1.8 m，可覆盖全部机电设备表面。

电气与通信部分通过独立供电模块接入 220 V 交流电源，经 DC 24 V 变换后分别供主控单元与伺服驱动模块使用。传感器信号线采用双层屏蔽并以 M12 工业插头连接，通信链路采用 Cat.6 屏蔽网线，节点间距离控制在 15 m 以内。系统调试过程中，控制板采样周期设定为 2 ms，数据缓存时间不超过 50 ms，确保各模块同步响应。部署结束后，通过主控终端完成关节零点校准与路径录入，实现系统在高速公路机电设施区域内的稳定巡检运行准备。

#### 3.2 性能测试

为验证系统运行稳定性与控制精度，对巡检执行机构在 A 段机电通道内进行了 72 h 连续测试，考核项目包括路径精度、姿态重复误差、响应时延及数据丢包率等。系统在多节点并发与复杂路径条件下保持稳定运行。巡检路径平均误差 1.6 mm，较设计目标提高约 46.7%；控制响应时间稳定在 32 ms 内，满足实时控制需求；通信延迟和丢包率均低于设计限值，保证了传感数据与控制指令的同步性。整体性能验证结果表明，系统在高速公路机电设备巡检场景中具有高精度、低时延和优异可靠性。

#### 3.3 长期运行验证

为评估系统的耐久性与可靠性，开展为期 30 d 的连续运行试验，覆盖高湿度、粉尘及昼夜温差等典型高速公路环境。监测内容包括设备可用率、平均无故障时间（MTBF）、能耗稳定性及关键部件温升情况。系统整体运行稳定，可用率达 99.2%，超过设计要求。平均无故障时间 352 h，表明机械执行与控制单元

具备良好的耐久性；功率波动率保持在 1.8%，能源消耗平稳；关键部件温升不超过 15.2 °C，显示热管理设计合理。综合分析表明，系统具备长期连续巡检的机械可靠性与能效稳定性，适应高速公路复杂运行环境。

#### 4 结论

系统以机电协同设计为核心，实现了高速公路机电设备的自主巡检与状态感知一体化，验证了结构轻量化、控制闭环化与数据高同步性的设计可行性。研究成果为智能运维装备在交通基础设施中的标准化应用提供了技术支撑，后续工作将面向多任务调度与机械执行机构自适应控制方向进一步拓展。

#### 参考文献

[1]张伟,乔英春,郭强.基于物联网技术的高速公路机电远程管控系统建设[J].中国交通信息化,2025,(12):133-137.