



T/CECS×××-202×

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道智能控制器技术 规程

Technical Specification for Intelligent Controller of Highway Tunnels

（征求意见稿）

前 言

根据中国工程建设标准化协会下达的《关于印发〈2024 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2024]28 号）的要求，由交通运输部公路科学研究院承担《公路机电设备操作系统技术规程》（以下简称“本规程”）的制定工作。

编制组在深入技术论证、国内外文献调研、工程经验总结和广泛征求意见的基础上，完成了本规程的编制工作。

本规程共分为 8 章，主要内容包括：1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 功能与性能要求、5 安全增强、6 数据接口与入网管理、7 应用部署、8 功能验证和指标测试。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

请各有关单位在执行过程中，将发现的问题和意见，函告本指南日常管理组，联系人：谌仪（地址：北京市海淀区西土城路 8 号，邮编：100088；电话：010-82019616；传真：010-62370567；电子邮箱：chenyi@itsc.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位：交通运输部公路科学研究院

参 编 单 位：湖南开鸿智谷数字产业发展有限公司

华为技术有限公司

北京中字万通科技股份有限公司

主 编：谌 仪

主要参编人员：

主 审：黄晨

参与审查人员：

目次

1 总则 1

2 术语和符号 2

 2.1 术语 2

 2.2 符号 3

3 基本规定 5

 3.1 总体要求 5

 3.2 系统结构 5

4 功能与性能要求 7

 4.1 数据采集与处理 7

 4.2 数据存储 7

 4.3 数据转发 8

5 安全增强 10

 5.1 物理安全 10

 5.2 网络安全 10

 5.3 数据安全与隐私保护 11

 5.4 系统可靠性 11

6 数据接口与入网管理 13

 6.1 公路智能隧道控制器与其他实体接口划分 13

 6.2 接口要求 13

 6.3 入网管理 16

7 应用部署 18

8 功能验证和指标测试 19

 8.1 验证条件与测试指标 19

 8.2 验证测试过程 19

本规程用词用语说明 21

1 总则

1.0.1 为适应公路隧道机电控制智能化需要，规范隧道控制器智能化要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路隧道智能控制器的生产、检验和使用。

1.0.3 公路隧道智能控制器除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 智能控制器 Intelligent Controller

基于机电设备操作系统基础软件实现“感知-分析-决策”等功能的现场控制设备，可替代逻辑控制器等传统现场控制设备，满足数字化、智能化应用的需求。

2.1.2 算力 Computing Power

即数据处理能力，是计算机或系统执行计算任务的速度与效率的统称，核心是“用计算解决问题的能力”。

2.1.3 对象存储 Object Storage

一种海量数据存储方式，核心是把数据、描述数据的“元数据”（如大小、创建时间、标签）打包成一个不可修改的“对象”，再存到扁平的“存储桶”里，通过唯一 ID 快速定位，而非像电脑文件夹那样按层级查找。

2.1.4 块存储 Block Storage

一种将数据切割成固定大小“块”（比如几 KB/MB）来管理和存储的技术，每个块都有唯一标识，方便快速定位和读写。

2.1.5 数据安全 data security

通过采取必要措施，确保数据处于有效保护和合法利用的状态，以及具备保障持续安全状态的能力。

2.1.6 可信执行环境 trusted execution environment

基于硬件级隔离及安全启动机制，为确保安全敏感应用相关数据和代码的机密性、完整性、真实性和不可否认性目标构建的一种软件运行环境。

2.1.7 近场通信 nearby communication

近场通信是指使用蓝牙、Wi-Fi、NFC 等技术，发现附近的设备并与它们通信。

2.1.8 最小必要原则 Minimum Necessary Principle

在系统权限、功能和数据使用中，仅授予完成任务所必需的最小范围，避免过度授权或过度共享。

2.1.9 轻量设备 mini system device

针对微控制器单元(MCU)类处理器的设备，硬件资源极为有限，最小支持内存为 128KiB 的设备。能够提供多种轻量级网络协议、轻量级图形框架，以及丰富的物联网(IOT)总线读写组件等。它们能够支撑的产品包括通讯类模组、传感器设备、采集器等。

2.1.10 小型设备 small system device

针对配备 MMU 的应用处理器的设备，最小支持内存为 4MiB 的设备，能够提供更高级的安全性能、标准化的图形框架以及视频编解码的多媒体功能。能够支持的产品包括监控摄像机、路由器以及串口服务器等。

2.1.11 标准设备 standard system device

针对应用处理器的设备，最小支持内存为 128MiB 的设备，可以提供增强的交互能力、GPU 以及硬件合成能力、更多控件以及动效更丰富的图形能力、完整的应用框架。可支撑的产品如区域控制器、车道控制器、边缘物联网网关等。

2.2 符号

SSL/TLS——安全套接层（Secure Sockets Layer）/传输层安全（Transport Layer Security）

DHCP——动态主机配置协议（Dynamic Host Configuration Protocol）

IP——互联网协议（Internet Protocol）

Mbps——兆比特每秒（Megabits per second）

DC——直流电（Direct Current）

AC——交流电（Alternating Current）

ID——标识（Identity）

BLE——低功耗蓝牙（Bluetooth Low Energy）

RH——相对湿度（Relative Humidity）

MTBF——平均故障间隔时间（Mean Time Between Failures）

UDP——用户数据报协议（User Datagram Protocol）

IOPS——每秒输入 / 输出操作数（Input/Output Operations Per Second）

TCP/IP—— 传输控制协议（Transmission Control Protocol） / 互联网协议（Internet Protocol）

TCP/UDP——传输控制协议（Transmission Control Protocol）/用户数据报协议（User Datagram Protocol）

MQTT——消息队列遥测传输（Message Queuing Telemetry Transport）

OPC UA——开放平台通信统一架构（Open Platform Communications Unified Architecture）

3 基本规定

3.1 总体要求

3.1.1 公路智能隧道控制器按照使用地点分为室外(隧道洞身)型和室内(控制室内)型。

3.1.2 安全防护及适用条件

- 1 大气压:86 kPa ~106 kPa。
- 2 相对湿度:30%~90%。
- 3 室外(隧道洞身)型公路隧道本地控制器的使用环境温度及适用等级如下:

适用等级	适用环境温度
S1 级	-5 °C~+70 °C
S2 级	-5 °C~+55 °C
A 级	20 °C~+55 °C
-B 级	-40 °C~+50 °C
C 级	-55 °C~+45 °C
J 级	-55 °C~+85 °C

- 4 室内(控制室内)型公路隧道本地控制器的使用环境温度为+15 °C ~+35 °C。

- 5 室外(隧道洞身)型公路隧道智能控制器安全防护等级不低于 IP65，室内(控制室内)型公路隧道智能控制器安全防护等级不低于 IP20。

3.1.3 设备分类

为适配公路隧道不同的应用场景，公路隧道智能控制器应分为轻量设备、小型设备和标准设备。

3.2 系统结构

公路智能隧道控制器应用系统包括感知与控制层、平台层和应用层，具体

架构如图 3.2.1 所示。

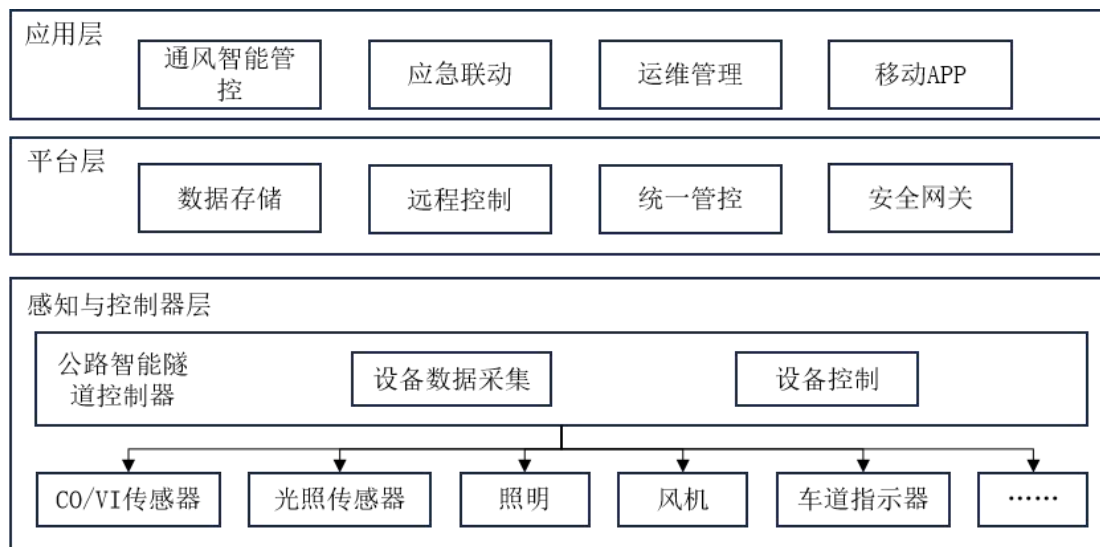


图 1 公路智能隧道控制器应用架构

3.2.2 应用层应具备通风智能管控、应急联动、运维管理、移动 APP 等功能，应用层与平台层采用 API 接口对接，支持第三方应用扩展（如对接消防报警系统、视频监控系统）。

3.2.3 平台层应具备数据存储、统一管控、支持“云平台远程控制、现场本地控制”二级控制模式，控制指令优先级：本地控制＞远程控制（紧急场景可强制切换优先级）等功能。

3.2.4 感知与控制层应具备隧道机电设备数据采集和设备控制功能。

条文说明

感知与控制层分为感知域与控制域，感知域主要由隧道内各类传感器（CO/VI 传感器、光照传感器、毫米波雷达）、执行设备（照明灯具、风机、车道指示器）等组成，公路隧道智能控制器通过 RJ45 接口与平台连接，主要用于采集隧道环境、交通、设备状态数据、执行本地控制指令（如照明调光、风机启停），接收平台层下发的执行指令。

控制域具备一定边缘计算能力，为数据处理和分析提供算力的同时汇聚所接入区域数据，执行区域联动控制（如火灾时风机 + 照明 + 交通指示协同）。

4 功能与性能要求

4.1 数据采集与处理

4.1.1 公路隧道智能控制器数据采集与处理功能应支持对隧道内多种传感器数据进行实时采集和分析，实时数据采集和分析应符合以下要求：

- 1 数据采集频率应在 10Hz 内可配置。
- 2 可清洗采集到的原始数据。
- 3 宜具备时序顺延预测、空间顺延预测分析功能。
- 4 同时采集和处理的传感器数量不宜少于 100 路。

条文说明

数据采集频率最高采集频率不低于 10Hz，公路隧道智能控制器具备传感器接入的标准化接口，可兼容不同厂商、不同类型的传感器。

数据清洗应具备去除异常值（如超出合理范围的数据）、填补缺失值功能，保证数据的准确性和完整性，且要求数据处理延迟不超过 50ms，确保对隧道内突发状况（如 CO 浓度突然升高）能及时响应。

时序顺延预测指基于时间维度的趋势分析（判断某一参数在不同时段的变化规律）。空间顺延预测指基于空间维度的对比分析（隧道不同区域同参数的差异对比），以及多参数的关联分析（如 CO 浓度与车辆流量的关联关系），支持同时采集和处理的传感器数量不少于 100 路，满足长隧道多传感器部署的场景。

4.2 数据存储

4.2.1 公路隧道智能控制器应具备数据存储功能，数据存储应符合以下要求：

- 1 支持文件存储。
- 2 提供对象存储能力。

3 支持块存储。

4 具备数据备份功能。

条文说明

可将数据采集与处理过程中生成的各类文件（如传感器配置文件、数据分析报告文档等）进行分类存储，对于 100MB 以内的文件，读取延迟不超过 20ms，写入延迟不超过 50ms；对于更大文件，读写速度不低于 100MB/s，具备文件的创建、读取、更新、删除功能，且能按照文件类型、创建时间等属性进行检索。

将隧道内的关键数据（如重要时刻的视频片段、高精度的传感器历史数据等）以对象形式存储，对象存储的访问延迟不超过 10ms，便于通过唯一标识符快速访问，支持对象的版本管理，可保留不同版本的对象数据。

对需要频繁读写的结构化数据（如实时车辆流量数据的时序数据库），以块为单位进行高效存储，块存储的 IOPS（每秒输入 / 输出操作数）不低于 10000，吞吐量不低于 1GB/s，保证数据读写的效率，数据存储容量可扩展，单控制器支持的最大存储容量不低于 16GB。

可定期（如每天、每周）对存储的数据进行备份，备份策略可配置，且能在数据损坏或丢失时快速恢复。

4.3 数据转发

4.3.1 公路隧道智能控制器应具备数据转发功能，数据转发应符合以下要求：

1 所有类型公路隧道智能控制器需支持多种转发方式，包括基于 TCP/IP 的可靠转发、基于 UDP 的高速转发，在局域网环境下，延迟不超过 10ms，并可根据数据的类型和传输要求（可靠性优先或速度优先）选择合适的转发方式。

2 支持对转发的数据进行封装，同时要求数据转发的吞吐量不低于 100Mbps，丢包率不高于 0.1%，支持同时进行的并发转发连接数不少于 100 条。

3 支持信令交互，信令交互的响应时间不超过 20ms。

条文说明

数据封装需支持预定的协议格式（如自定义的隧道数据传输协议或标准的网络协议）添加头部、尾部等信息，保证数据在传输过程中的标识和解析正确性，且满足隧道内多数据流向、多设备交互的需求。

能与隧道监控中心、其他控制器或外部系统进行信令通信，实现数据传输的控制（如建立连接、断开连接、请求数据、确认接收等），保证数据转发过程的有序性和可靠性。

5 安全增强

5.1 物理安全

5.1.1 工作温度：一般区域工作温度： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；寒区： $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

5.1.2 存储温度： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

5.1.3 在每小时温度变化 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下能正常工作；

5.1.4 工作湿度：5%~95%，无冷凝；

5.1.5 外壳防护符合 GB/T 4208 的要求，直接外挂部分不低于 IP65 防尘和防水等级，若安装在具有防尘防水设计的设备箱中，则防护等级不低于 IP40，设备箱防尘和防水等级不低于 IP55；

5.1.6 整机静电放电抗扰度符合 GB/T 17626.2 的相关要求；

5.1.7 整机电快速瞬变脉冲群抗扰度符合 GB/T 17626.4—2018 中规定的第 3 级要求；

5.1.8 整机浪涌（冲击）抗扰度应符合 GB/T 17626.5—2019 中规定的第 1 类要求；

5.1.9 整机电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度符合 GB/T 17626.11—2023 中规定的第 2 类要求；

5.1.10 符合 GB/T 2423.10、GB/T 2423.5 中对振动和冲击的要求；

5.1.11 符合 GB/T 10125、GB/T 2423.18、GB/T 6461 中对盐雾的要求；

5.1.12 存储介质、密码模块、控制芯片等关键部件应具备防拆卸检测机制，在遭遇非法拆解时应自动触发数据擦除或锁定；

5.2 网络安全

5.2.1 控制器应具备访问控制列表，对不同用户、不同协议、不同端口实施精细化的访问权限控制；

5.2.2 控制器应具备网络状态检测、防火墙策略控制、入侵防御、分布式拒绝服务攻击防护和恶意流量等检测及防护能力；

5.2.3 对控制器的管理和访问应采用符合商用密码标准的数字证书对接入用户进行身份认证，不得仅依赖单一口令；

5.2.4 控制器应具备独立的设备证书，用于标识设备的合法身份，且设备证书应包含设备关键信息项（如：设备唯一标识、设备类型、设备物理位置、设备管理单位等）。

5.3 数据安全与隐私保护

5.3.1 控制器应对传输的数据进行完整性及防篡改保护；

5.3.2 控制器传输的敏感数据应采用国产密码算法进行端到端加密传输；

5.3.3 控制器应记录所有访问与操作日志，日志应具备防篡改机制；

5.3.4 系统应支持审计功能，能够对访问行为、配置修改、权限变更等进行追溯；

5.3.5 控制器对外共享或调用的数据应符合最小必要原则，对涉及隐私和敏感信息的数据应进行脱敏处理；

5.3.6 控制器应具备数据完整性保护及校验机制，对重要配置文件、程序文件、补丁文件及日志文件等，应采用国产密码算法进行保护及校验。

5.4 系统可靠性

5.4.1 控制器应支持双机热备、集群冗余等架构，用于保证在单机故障时业务不中断；

5.4.2 控制器应具备多级数据备份能力，支持本地、异地和云端备份；

5.4.3 控制器应具备自诊断能力，能够对 CPU、内存、网络接口、存储介质等进行监测，并在发现异常时自动告警；

5.4.4 控制器应具备安全沙箱和故障隔离机制，防止单点故障扩散影响整体系统；

5.4.5 控制器应具备远程固件升级功能，用于对设备进行定期更新补丁与固件；

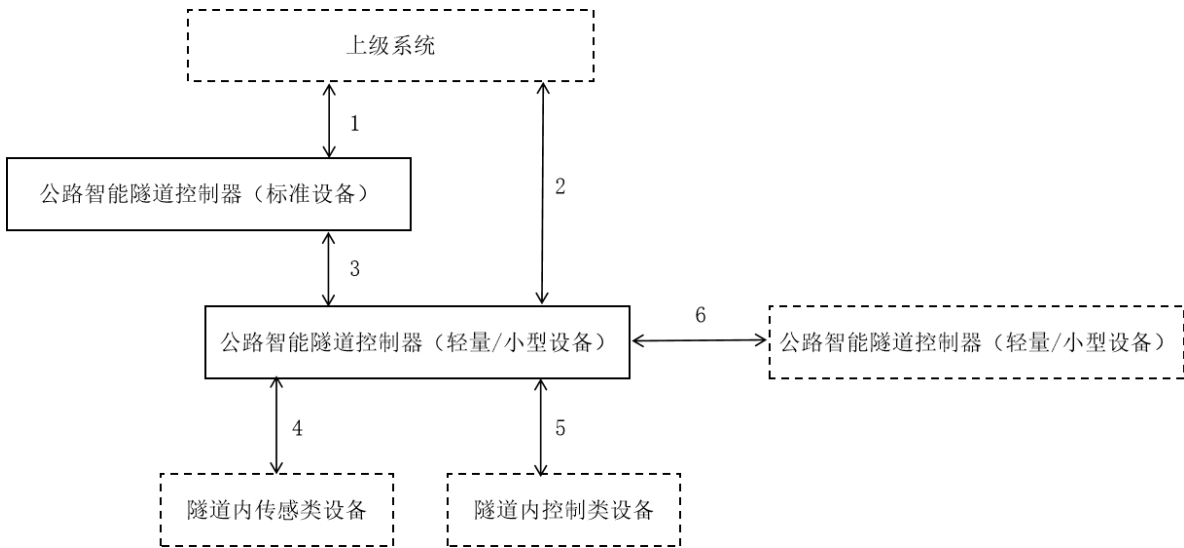
5.4.6 控制器 MTBF 不小于 50000 h；

5.4.7 控制器应支持 7×24 h 不间断工作。

6 数据接口与入网管理

6.1 公路智能隧道控制器与其他实体接口划分

公路智能隧道控制器应具备图 3 所示与其他实体间接口。



标引序号说明：

- 1——公路智能隧道控制器（标准设备）与上级系统间接口；
- 2——公路智能隧道控制器（轻量/小型设备）与上级系统间接口；
- 3——与公路智能隧道控制器（标准设备）通信接口；
- 4——与隧道内传感类设备通信接口；
- 5——与隧道内控制类设备通信接口；
- 6——与公路智能隧道控制器（轻量/小型设备）通信接口；

6.2 接口要求

6.2.1 为满足隧道机电设备接入，公路智能隧道控制器小型设备与轻量设备需具备 DI、DO、RS485、AI 和 AO 等接口，具体要求如下：

- 1 支持至少 16 路数字量输入（DI）接口，且支持可扩展；
- 2 支持至少 16 路数字量输出（DO）接口，且支持可扩展；
- 3 支持至少 8 路模拟量输入（AI）接口，且支持可扩展；
- 4 支持至少 8 路模拟量输出（AO）接口，且支持可扩展；
- 5 支持至少 2 路串口通信（RS485）接口，且支持可扩展；
- 6 支持至少 2 路以太网（RJ45）接口。

公路智能隧道控制器标准设备需具备 HDMI、USB、RJ45 等接口，具体要求如下：

- 1 支持至少 2 路以太网（RJ45）接口。
- 2 支持至少 1 路 HDMI 接口。
- 3 支持至少 4 路 USB 接口。

条文说明

数字量输入（DI）接口采用标准的工业级接口形式，可直接连接各类开关量设备。例如可接入车道指示牌的状态反馈信号，用于实时监测车道指示牌的工作状态。接口电气特性满足工业环境要求，输入电压范围为 DC18V – DC30V，具备过压、过流保护功能，以适应隧道内复杂的电气环境。

数字量输出（DO）接口同样为工业级标准接口，能够可靠地控制各类执行机构，如照明设备的开关控制、风机的启停控制等。以照明设备控制为例，DO 接口可直接驱动继电器，实现对照明灯的精准控制。输出负载能力为 AC250V/2A 或 DC30V/5A，满足常见隧道机电设备的控制需求。

模拟量输入（AI）和模拟量输出（AO）需支持 4 – 20mA、0 – 10V 等常见模拟量输入/输出信号。可连接如一氧化碳浓度传感器、能见度传感器等模拟量输出的环境监测设备。对于 4 – 20mA 输入/输出信号，精度可达 $\pm 0.1\%$ FS，分辨率为 16 位，确保对环境参数的精确采集。

配备至少两路 RS - 485 接口。RS - 485 接口适用于多节点、远距离通信场景，支持半双工通信，通信距离可达 1000m 以上，可连接多个环境检测设备、智能仪表等，如风向风速仪、液位检测器等，允许多达 32 个节点在同一总线上进行通信。

配备至少 2 个 10/100Mbps 自适应的 RJ45 以太网接口，用于高速数据传输和与上层管理系统的通信。可实现与隧道监控中心的稳定连接，实时上传大量的隧道设备运行数据、环境数据等，同时接收监控中心下达的控制指令。支持 TCP/IP、UDP/IP 等网络协议，满足不同应用场景的数据传输需求。

6.1.2 为满足公路隧道设备间稳定通讯，公路智能隧道控制器需满足以下通信协议和数据格式：

- 1 全面支持 Modbus RTU 和 Modbus TCP 协议；
- 2 满足标准数字量、模拟量、串口通信数据格式。

条文说明

在与采用 RS - 485 接口的设备通信时，使用 Modbus RTU 协议，确保数据传输的可靠性和兼容性。对于通过以太网接口连接的设备或系统，采用 Modbus TCP 协议进行通信。协议解析速度快，能够在 100ms 内完成一次完整的 Modbus 数据帧的解析与响应，保证数据交互的及时性。

数字量数据格式中数字量输入和输出数据采用 1 位二进制数表示，0 代表关或低电平状态，1 代表开或高电平状态。数据传输时，按字节进行打包，每个字节的 8 位分别对应 8 个数字量通道的状态。

模拟量数据格式中模拟量数据以 16 位或 32 位二进制补码形式表示，根据传感器的量程和精度进行转换。例如，对于 0 - 10V 的模拟量输入，将其转换为对应的二进制数值进行传输，接收端再根据量程和分辨率将二进制数转换为实际的物理量值。数据传输时，采用 IEEE 754 标准的浮点数格式进行打包，确保数据的准确性和一致性。

通信数据帧格式中无论是采用 Modbus 协议还是自定义协议,通信数据帧都包含帧头、地址码、功能码、数据区、校验码和帧尾等部分。帧头和帧尾用于标识数据帧的开始和结束,地址码用于指定通信对象,功能码表示操作类型(如读数据、写数据等),数据区包含具体的传输数据,校验码采用 CRC-16 或 CRC-32 算法,用于检测数据传输过程中的错误,确保数据的完整性和准确性。

6.3 入网管理

6.3.1 为满足公路隧道网络稳定接入、设备稳定通信与控制要求,所有类型公路智能隧道控制器在网络接入和配置方面,需满足以下要求:

- 1 支持自动入网发现和手动配置网络;
- 2 支持静态 IP 配置和动态 IP 获取(DHCP);
- 3 支持网络断线重连、加密传输;
- 4 支持通过移动 APP 近场连接设备,了解设备状态、接入设备数据。

条文说明

自动发现机制为智能控制器支持通过 UDP 广播和组播方式进行自动入网发现。控制器启动后,会周期性地(默认周期为 5 秒)向网络中发送包含自身设备信息(如设备型号、唯一 ID、支持的通信协议等)的广播数据包。同时,监听网络中其他设备发送的入网发现请求,当接收到合法的请求时,会及时响应并建立连接。

手动添加方式主要对于一些特殊情况或无法通过自动发现机制入网的设备,可通过本地操作界面或远程管理平台进行手动添加。操作人员需输入设备的 IP 地址、子网掩码、网关等网络参数,以及设备的相关识别信息(如设备 ID),控制器在接收到这些信息后,会尝试与目标设备建立连接,并将其纳入管理网络。

静态 IP 配置包括支持通过本地操作界面或远程管理平台进行静态 IP 地址配置。操作人员可根据隧道监控网络的规划,为控制器设置固定的 IP 地址、

子网掩码、网关和 DNS 服务器地址等参数。配置完成后，控制器会自动应用新的网络配置，并尝试连接到指定的网络。

动态 IP 获取 (DHCP) 包括控制器具备 DHCP 客户端功能，在接入支持 DHCP 服务的网络时，可自动向 DHCP 服务器发送请求，获取动态分配的 IP 地址及相关网络参数。获取 IP 地址的时间不超过 10 秒，确保控制器能够快速接入网络并正常工作。

网络掉线重连指在网络出现短暂中断 (如网络抖动) 时，控制器能够在 2 秒内自动检测到连接异常，并尝试重新建立连接，重连成功时间不超过 5 秒。通过设置心跳检测机制，每隔 10 秒向连接的设备发送心跳数据包，以监测连接状态，若连续 3 次未收到对方的心跳响应，则判定连接中断并进行重连操作。

加密通信包括支持多种安全连接方式，如 SSL/TLS 加密连接，对传输的数据进行加密处理，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。同时，控制器具备用户认证功能，可设置用户名和密码，只有通过认证的设备或用户才能与控制器建立连接并进行数据交互，保障网络安全。

设备状态查询包括可通过本地操作界面、远程管理平台或网络中的其他授权设备，查询控制器自身的运行状态，包括 CPU 使用率、内存占用率、网络连接状态、各接口工作状态等。查询响应时间不超过 3 秒，确保管理人员能够及时获取控制器的实时状态信息。

数据查询包括支持对采集到的隧道环境数据 (如温度、湿度、有害气体浓度等)、设备运行数据 (如风机转速、照明亮度等) 进行查询。可根据时间范围、数据类型等条件进行筛选查询，查询结果以表格或图表形式展示，方便管理人员直观了解隧道内的实时情况和历史数据变化趋势。数据查询响应时间根据查询条件和数据量的不同，一般在 5 秒内完成。

7 应用部署

7.0.1 用于智能通风的公路隧道智能控制器应具备以下功能：

- 1 实时采集 CO 浓度、能见度、车流量数据，采集频率不低于 0.1Hz。
- 2 内置算法或设备对接的云平台 AI 模型，可实时输出风机转速动态调节、启动和停止控制指令。

7.0.2 用于照明控制的公路隧道智能控制器应满足以下要求：

- 1 照明控制，公路隧道智能控制器接入光照传感器与车辆检测设备（毫米波雷达、视频相机），实现“随车调光”——车辆接近时提前提亮亮灯，无车时段自动降亮度；同时支持按时段、天气（阴天 / 雨天）预设策略。

7.0.3 设备运维与能效管理应符合以下规定：

- 1 状态监测，公路隧道智能控制器对风机、水泵的电流、振动、温度实时采集，数据实时上传至云平台，提前生成维护工单。
- 2 能效优化，云平台基于多隧道历史能耗与实时车流量，向公路隧道智能控制器下发节能策略，由公路隧道智能控制器执行照明、通风设备的精细化控制，实现区域间能效协同。

7.0.4 近场运维应通过 BLE 无线连接公路隧道智能控制器的 Web 服务，并可实现设备参数远程配置、故障点定位、固件在线升级，无需开箱接线。

8 功能验证和指标测试

8.1 验证条件与测试指标

8.1.1 测试条件

除特殊规定外，一般测试应满足以下条件：

- 电源条件：AC 220V±10% 50Hz，支持 DC 12V/24V 备用电源切换；
- 环境条件：温度 0~45℃，湿度 10%~90% RH；
- 电磁环境：符合 EN 61000-6-2 工业环境抗扰度要求；
- 气压环境：86kPa~106kPa；
- 测试设备校准：所有仪器仪表需经计量认证，精度等级不低于 0.5 级。

如果有关条文中没有说明，则各项试验数据允差范围为±5%。

8.1.2 测试项目与指标

针对公路隧道智能控制器整体接口功能、网络通信和互操作功能，基于上述实验条件下，公司隧道智能控制的测试项目和指标应按照表 1 要求进行。

表 1 测试项目和指标

序号	测试项目	测试指标
1	数字量接口测试	DI 接口状态识别准确率 100%，响应延迟≤100ms；DO 接口输出通断状态正确，过流保护在负载超过 5A 时可靠动作。
2	模拟量接口测试	测量误差≤±0.1%FS，16 位分辨率有效位数≥15 位；同一信号多次测量的重复性误差≤0.05%FS。
3	通信接口测试	RS485 通信丢包率≤0.1%，最远 1000m 传输正常；以太网接口支持 10/100Mbps 自适应，连接建立时间≤3 秒。
4	Modbus 协议一致性测试	协议解析响应时间≤100ms，功能码支持完整度 100%；自定义协议数据加密传输时解密成功率 100%。
5	互操作性测试	跨厂商设备通信成功率≥99.9%，无死锁现象；异常数据帧识别率 100%，不影响正常通信。
6	入网发现测试	设备发现耗时≤30 秒，识别信息准确率 100%；静态 IP 配置生效时间≤10 秒，无 IP 冲突告警。

8.2 测试方法

为完成公路隧道智能控制器接口、网络通信和互操作的功能验证，公司隧道智能控制需按照表 2 要求完成测试。

表 2 测试目的和测试方法

序号	测试目的	测试方法
1	验证 DI/DO 接口的连接可靠性和控制有效性	连接 8 路 DI 接口至信号发生器，依次输入 DC18V-30V 电平信号，记录控制器状态反馈；将 DO 接口连接额定负载（AC250V/2A 阻性负载），通过上位机发送开关指令，测量输出响应。
2	验证 AI 接口的信号采集精度和线性度	采用标准信号源输出 4-20mA 电流信号（对应 0-100%量程），设置 10 个测试点；对 0-10V 电压信号进行同样测试，记录控制器采集值。
3	验证 RS-485 和以太网接口的基本通信功能	RS-485 接口：连接 32 个模拟节点，采用 1200-115200bps 不同波特率，传输 1000 帧数据；以太网接口：通过网络抓包工具抓包分析，验证 TCP/UDP 协议连接建立和数据传输。
4	验证 ModbusRTU/TCP 协议的实现正确性	使用 Modbus 测试工具发送功能码 01（读线圈）、03（读寄存器）、05（写单线圈）、06（写寄存器）等指令；对自定义协议进行帧格式、校验方式、数据加密的合规性验证。
5	验证与其他设备的协同工作能力	接入 3 家不同厂商的隧道环境检测器（温湿度、CO 浓度传感器）；连续 24 小时循环发送查询指令，记录响应情况。
6	验证自动发现和手动配置功能	接入含 20 台设备的局域网，观察控制器 UDP 广播（5 秒周期）和发现响应；手动输入 3 组不同网段 IP 地址，验证配置有效性。

本规程用词用语说明

1 本规程执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本标准的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”。

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《×××》（×××）的有关规定”。

3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应按本标准第×.×.×条的有关规定执行”。