

### 高速公路机电系统智能运维规范

Specification for intelligent operation and maintenance of expressway  
electromechanical systems

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

# 目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 缩略语 ..... 1

5 基本要求 ..... 2

6 运维组织 ..... 3

7 运维功能要求 ..... 3

8 安全与应急 ..... 6

9 评价与改进 ..... 8

附录 A（资料性） 数据采集指标及相关参数 ..... 9

附录 B（资料性） 设备健康状态划分 ..... 13

附录 C（资料性） 智能运维自我评价指标体系 ..... 16

参考文献 ..... 17

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：山东通维信息工程有限公司、山东高速信息集团有限公司、山东高速集团有限公司高速公路运营中心、山东高速建设管理集团有限公司、山东高速基础设施建设有限公司、山东高速股份有限公司、山东省交通运输厅、山东省交通运输厅数据应用和收费结算中心。

本文件主要起草人：姜晓庆、李杰、张文武、张华、杜洪涛、宋晓红、孙兰军、马亚栋、郭庆雷、李卫、夏振宇、张豪、杨功增、范文东、陈雪琿、马晓、霍萍、闫军、宁乾、李强、吴继镇、段平平、张冲、刘方洲、杨玉红、王东晖、樊永申、李文秀、华彩成、赵旭东、孙记兰、范婷、姜晓东、王帅、夏帅、赵博、赵大智、刘珊珊。

# 高速公路机电系统智能运维规范

## 1 范围

本文件规定了高速公路机电系统智能运维基本要求、运维组织、运维功能要求、安全与应急、评价与改进。

本文件适用于高速公路机电系统智能化运维。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 22239—2019 信息安全技术网络安全等级保护基本要求  
GB/T 37048 高速公路机电系统防雷技术规范  
GB/T 40571 智能服务 预测性维护 通用要求  
GB/T 43208.1 信息技术服务 智能运维 第1部分：通用要求  
GB/T 43441.1 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求  
JTG H30 公路养护安全作业规程  
DB37/T 4541—2022 智慧高速公路建设指南

## 3 术语和定义

GB/T 37048、GB/T 40571、GB/T 43208.1、GB/T 43441.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 智能运维 intelligent operation and maintenance

基于物联网、边缘计算、大数据、人工智能等技术，通过状态感知与数据采集、智能监测与告警、故障诊断与智能分析、预测性维护、工单管理与智能派单、智能巡检、可视化运维与数字孪生、知识管理与决策支持、移动运维等活动，对高速公路机电系统开展的具备人工智能特征的运维服务。

[来源：GB/T 43208.1—2023，3.1，有修改]

### 3.2

#### 工单 work order

记录运维任务从触发、派发、执行、反馈到闭环全流程的标准化凭证。

注：包含任务描述、优先级、责任人员、时限要求及处置结果等信息。

### 3.3

#### 健康状态评估 health status assessment

基于设备运行参数、外观状况、故障频次、维修记录等多维度数据，对设备当前运行状态、性能退化趋势及剩余使用寿命进行综合量化评价的过程。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- AR: 增强现实 (Augmented Reality)  
 ETC: 电子不停车收费 (Electronic Toll Collection)  
 MTBF: 平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure)  
 MTTR: 平均故障修复时间 (Mean Time To Recovery)  
 PLC: 可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller)  
 RDP: 远程桌面协议 (Remote Desktop Protocol)  
 RFID: 射频识别 (Radio Frequency Identification)  
 RSU: 路侧单元 (Road Side Unit)  
 RUL: 剩余使用寿命 (Remaining Useful Life)  
 SSH: 安全外壳协议 (Secure Shell)  
 UPS: 不间断电源 (Uninterruptible Power Supply)  
 VNC: 虚拟网络控制台 (Virtual Network Console)  
 VR: 虚拟现实 (Virtual Reality)

## 5 基本要求

### 5.1 覆盖全面

高速公路机电系统智能运维对象应遵循DB37/T 4541—2022中6.3.2.8的规定。

### 5.2 智能协同

5.2.1 应建立统一的智能运维平台和标准化的电子工单流转机制，实现从“告警触发→自动派单→现场处置→结果反馈→闭环评价”的全流程数字化管理。智能运维平台架构由感知交互层、网络传输层、平台计算层、应用决策层构成。平台架构见图1。

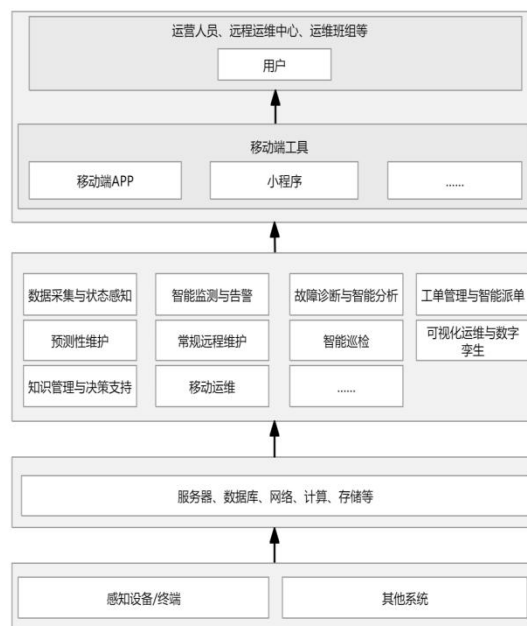


图1 高速公路机电系统智能运维平台架构

5.2.2 应能实时共享设备状态、故障案例、备件库存及维修进度信息，消除信息孤岛。

### 5.3 全生命周期管理

5.3.1 从设备投入运营之日起，应建立包含设备台账、运行记录、维修历史、健康档案的电子履历，直至报废更新，全过程纳入智能运维管理。

5.3.2 应实现故障从发现、诊断、派单、处置到复盘的全流程数据化记录与智能化管控，建立故障案例库，实现故障原因智能分析、处置方案智能匹配、处置效果智能评估，形成故障管理的闭环体系。

### 5.4 环境适应性管理

5.4.1 应建立适应山东省地理与气候特征的差异化运维机制。针对胶东沿海高盐雾环境、鲁中山区潮气凝露与边坡风险、黄河冲积平原（黄泛区/粉土区）软土沉降与重载振动、鲁中南岩溶区溶洞塌陷与高阻接地，以及郯庐地震带（山东段）断裂错动与结构损伤等特殊条件，分别制定相应的设备防护与运维策略。

5.4.2 应重点聚焦以下区域的机电系统环境适应性管理：

- a) 胶东沿海路段的防盐雾腐蚀与箱内除湿；
- b) 鲁中山区及低洼路段的防潮防凝露与边坡落石预警；
- c) 黄河冲积平原及重载交通路段的抗振动冲击与软基沉降监测；
- d) 鲁中南岩溶区的基础瞬态垮塌风险防控与接地增强；
- e) 郯庐地震带（山东段）沿线的设备抗震设防与微震后结构状态快检。

## 6 运维组织

### 6.1 组织架构

应建立适应智能运维模式的“三级联动”组织架构，包括服务台、远程运维中心和现场运维班组，实现“集中监控、远程诊断、现场处置”的高效协同。各级架构应遵循以下定位和职责：

- a) 服务台：作为统一对外接口，负责受理多渠道故障报修与咨询，依托智能手段完成工单记录、分类与派发，实现工单全流程跟踪及用户满意度智能化统计分析；
- b) 远程运维中心：作为智能运维的大脑，负责 7×24 小时集中监测、告警研判、远程修复、健康评估及预测性维护策略制定；
- c) 现场运维班组：作为智能运维执行末端，接收智能派单指令，开展现场巡检、故障抢修、设备更换及预防性维护作业，依托智能工具实现处置过程数据实时反馈、处置结果数字化记录。

### 6.2 人员要求

应接受机电运维、安全应急等专业技术培训，并持证上岗，其中：

- a) 远程运维人员应具备数据分析、系统诊断及网络通信基础知识，具备故障研判和远程处置能力；
- b) 现场运维作业人员应熟练掌握机电系统拆装、调试及应急抢修技能，并具备使用 AR/VR 辅助工具的能力；
- c) 安全管理人员应具备网络安全、数据安全及工程现场作业安全相关专业知知识，具备安全事件应急处置能力，能配合开展安全演练及隐患整改跟踪。

## 7 运维功能要求

## 7.1 数据采集与状态感知

7.1.1 应覆盖监控、收费、通信、供配电、照明、通风、消防、计算和存储系统的关键设备，采集内容应包括设备基础信息、运行状态、环境参数、告警事件、能耗数据、运维操作日志等。采集指标及相关参数见附录 A。

7.1.2 数据格式应遵循统一的数据字典与编码规范，确保时间戳、设备 ID、地理位置等信息的完整性与一致性。

7.1.3 能支持协议转换与适配，实现传感器数据、设备自检数据、视频监控数据、业务系统日志及外部气象、交通流等数据的统一接入。

7.1.4 能在边缘计算节点完成数据清洗、降噪、异常标记、压缩及协议转换，降低网络传输负载与中心平台处理压力。

7.1.5 应具备数据完整性校验、时间同步校准及采集异常自诊断能力，常规状态数据采集周期可设置，一般不大于 30 s。

## 7.2 智能监测与告警

7.2.1 应实现对机电系统在线/离线状态、关键性能指标、通信链路质量及业务运行态势的 7×24h 集中监测。

7.2.2 应支持基于规则引擎与机器学习算法的告警自动触发，对偏离正常运行阈值的参数、异常行为模式及趋势性劣化进行分级告警，附录 B 给出了设备健康状态分级标准。

7.2.3 应具备告警关联分析、聚合抑制及根因定位能力，消除告警风暴，实现告警事件的收敛与精准推送。

7.2.4 应支持告警状态的全生命周期管理，包括产生、确认、派发、处置、销项及复盘，确保告警不遗漏、不重复。

## 7.3 故障诊断与智能分析

7.3.1 能基于多源数据融合与拓扑关联分析，自动定位故障设备、故障部位及影响范围，定位精度应满足现场快速处置需求。

7.3.2 应支持基于数据驱动、机理模型及专家知识库的故障原因分析，给出故障类型、故障机理及处置建议。

7.3.3 应提供远程登录、远程抓包、远程日志分析及远程测试等手段，辅助远程运维中心完成故障的初步诊断。

7.3.4 应支持故障现象、诊断过程、处置措施及效果评估的结构化存储与检索。

## 7.4 工单管理与智能派单

7.4.1 应支持基于告警、巡检异常、预测性维护策略及人工报修等触发条件的工单自动创建。

7.4.2 能综合考虑故障等级、设备位置、人员技能、工作负荷、交通状况及备件可用性等因素，实现工单的智能匹配与自动派发。

7.4.3 应实现工单从生成、派发、接单、处置、反馈、验收至归档的全流程数字化管理，支持进度实时跟踪与超时预警。

7.4.4 应支持工单处置效果的智能化验证与满意度评价，处置结果自动归档至设备电子履历及故障知识库。

## 7.5 预测性维护

7.5.1 能基于设备实时状态数据与历史运行数据,利用机器学习等算法预测设备关键部件的劣化趋势、剩余使用寿命及未来可能发生的故障类型。

7.5.2 应根据预测结果、设备重要性等级、运维资源状况及交通运营需求,自动生成最优维护策略与维护窗口建议。

7.5.3 应支持基于预测性维护策略的年度、月度、周度维护计划自动生成,并与工单系统联动下发。

7.5.4 应支持预测模型的训练、验证、部署、更新及效果评估,确保模型准确率持续满足应用需求。

## 7.6 常规远程维护

7.6.1 应支持 RDP、SSH、VNC 等主流协议,实现远程单点登录与多用户并发访问,连接中断后应支持断点续传与自动重连。

7.6.2 应支持远程修改设备 IP、子网掩码、网关等网络参数,以及应用系统配置文件,配置结果应实时生效。

7.6.3 应支持远程执行 Ping、Traceroute 等网络诊断命令,实时抓取设备运行日志、错误代码及系统资源占用情况。

7.6.4 应支持远程重启、复位工控机、服务器及网络设备,远程控制栏杆机起落、情报板信息发布等外设动作。

7.6.5 能对所有远程操作进行全过程录屏或指令记录,日志应包含操作人、源地址、目标设备、时间戳,且不可篡改。

7.6.6 应支持对沿海路段外场设备(如门架、可变信息标志)防腐加热除湿系统的远程启停控制,以及对设备箱体盐雾浓度传感器的数据采集与告警阈值调整。

7.6.7 应支持对穿越地震带及岩溶发育区路段的机电设施基础沉降监测传感器进行远程校准与数据读取,保持基础数据的实时性与准确性。

## 7.7 智能巡检

7.7.1 应依据设备健康度评估结果及山东省区域环境风险等级(如沿海高腐蚀区、山区、岩溶区、地震带、重载通道区等),动态生成差异化的巡检计划。对于高风险区域,应自动提高巡检频次与精细化程度。

7.7.2 宜利用无人机、巡检机器人、视频智能识别等自动化手段,替代高危、重复性人工巡检任务。

7.7.3 应重点对沿海路段的金属构件锈蚀情况、山区隧道口的边坡积水情况进行专项智能识别与隐患排查。

7.7.4 应支持运维人员通过移动 APP 接收巡检任务、查看巡检指引、完成现场签到、采集数据、记录异常及上传多媒体信息。

7.7.5 应支持巡检数据的自动汇总、异常识别与健康分析,形成设备健康报告与隐患清单。

## 7.8 移动运维

7.8.1 应支持运维人员通过移动终端接收工单、查看设备信息、反馈处置过程及上传现场照片/视频。

7.8.2 应支持通过扫描设备二维码或 RFID 标签,快速获取设备台账、历史维修记录及巡检标准。

7.8.3 应支持弱网或无网环境下的离线数据缓存与本地操作,网络恢复后自动同步数据。

7.8.4 应具备运维人员实时定位、作业轨迹记录及电子围栏功能,支持现场作业安全管控。

## 7.9 运维可视化与数字孪生

7.9.1 应基于地理信息系统实现高速公路路网全貌、沿线外场设备分布、桩号信息、实时状态及告警信息的分层展示与快速定位。

7.9.2 应结合三维建模、数字孪生技术，构建设备空间分布图与虚拟映射模型，实现设备状态、运行趋势及故障告警的直观展示。

7.9.3 应实现运维指标、故障统计、巡检结果、工单进度及资源分布等数据的可视化分析与多维度展示。

7.9.4 应支持图层切换、设备钻取、关联视频调阅、历史数据回放及模拟演练等交互功能。

## 7.10 知识管理与决策支持

7.10.1 应建立涵盖设备技术资料、故障案例、维修经验、操作规程及专家知识的运维知识库，支持知识的结构化存储、检索与更新。

7.10.2 能基于故障现象、设备类型及历史案例，自动推荐故障原因、处置方案及所需备件，辅助运维人员快速决策。

7.10.3 应支持设备完好率、系统可用率、平均故障间隔时间（MTBF）、平均故障修复时间（MTTR）等关键指标的自动统计与多维度分析。

7.10.4 应基于数据挖掘与运筹优化技术，为设备更新改造、备件采购调拨、运维资源配置及养护计划制订提供量化决策依据。

## 8 安全与应急

### 8.1 总体要求

智能运维安全与应急工作应遵循预防为主、防救结合、快速响应、闭环处置原则，构建覆盖设备、网络、数据、现场作业的全维度安全防护体系，建立分级分类的应急响应机制，保障高速公路机电系统智能运维工作安全、稳定、有序开展。

### 8.2 安全管理

#### 8.2.1 设备安全

设备安全应满足以下要求：

- a) 对接入外场设备（门架工控机、车辆检测器等）进行数字证书或 MAC 地址白名单认证，防止非法设备接入系统；
- b) 确保机电感知设备（传感器等）固件、APP 具备数字签名校验机制，远程升级应经权限审批，防止篡改或植入恶意代码；
- c) 机电设备箱体（如路边机柜、控制箱等）应具备防撬、防破坏结构，并安装震动报警传感器，发生非法拆卸应立即上传报警至智能运维平台；
- d) 沿海路段的设备箱体应采用不锈钢或覆铝锌板，内部配置自动除湿加热系统；鲁中山区的设备基础应重点关注防雷接地及防水密封等级（至少 IP65）。

#### 8.2.2 网络安全

网络安全应满足以下要求：

- a) 至少符合 GB/T 22239—2019 第三级（等保三级）的安全通用要求；
- b) 采用防火墙、网闸等进行网络隔离，部署入侵检测与防御系统，不得接入互联网；
- c) 定期对系统和网络进行漏洞扫描和评估，及时修复发现的漏洞，降低安全风险。

#### 8.2.3 数据安全

数据安全应满足以下要求：

- a) 对传输和存储的敏感数据进行加密处理，防止数据被窃取或篡改；
- b) 定期对系统中的数据进行备份，建立完善的数据恢复机制，确保数据在发生丢失或损坏时能够及时恢复；
- c) 对系统数据的访问进行严格的控制，根据用户的角色和权限分配不同的访问权限，防止未授权访问；
- d) 重要数据（鉴别数据、业务数据、个人信息）应采用密码技术保证保密性与完整性。

## 8.2.4 现场作业安全

8.2.4.1 现场运维作业应遵循 JTG H30 的规定，制定标准化的现场作业安全规范。鲁中山区路段，应在机电设施基础（门架、摄像机立柱等）旁增设落石预警传感装置，作业前查询边坡稳定性数据，确认安全后方可进入运维/抢修区域。沿海滩涂/软土路基维护作业前应对机柜基础周边地基进行承载力复核。

8.2.4.2 作业人员应配备安全防护用品，开展作业前安全技术交底，高危作业实行作业许可制度。

8.2.4.3 应利用智能运维平台对现场作业人员轨迹、作业过程进行实时监控，对违规作业行为及时告警、制止。

8.2.4.4 胶东沿海大风/团雾天气时，智能运维平台应自动对接省级气象接口，风速超过 8 级或能见度低于 50 m 时，自动推送停工预警，登高检修应立即暂停；地面作业人员应穿戴高可视性反光服，并开启车辆警示灯/尾灯。

## 8.3 应急管理

### 8.3.1 应急体系建设

建立分级响应、上下联动、多方协同的智能运维应急体系，明确应急指挥机构、应急处置队伍的职责与分工，并满足以下要求：

- a) 针对沿海路段设备腐蚀导致大面积通信中断（如盐雾导致门架 PLC 失效）、鲁中山区地质灾害导致光缆断裂、隧道口设备被山洪冲毁等场景，分别制定包含备件代换清单、临时路由恢复方案的专项预案；
- b) 在郯庐地震带（临沂、潍坊段）、鲁中岩溶塌陷区等区域，建立机电基础沉降监测系统。数据传输异常时，自动触发应急预案。优先保障收费站、ETC 门架、关键摄像头的供电与通信；
- c) 储备含防腐涂层的备件、抗震动接线盒，定期开展应急队伍智能化技能培训；
- d) 所有应急资源（备件位置、型号、数量，应急车辆 GPS，人员技能标签等）应在智能运维平台一张图展示，实现资源整合调度。

### 8.3.2 应急处置流程

#### 8.3.2.1 预警监测

依托智能监测技术实时监控设备、网络、数据的运行状态，对潜在安全风险、故障隐患实现智能识别、分级预警，将预警信息智能推送至相关责任人员。

#### 8.3.2.2 应急启动

发生突发事件后，依托智能算法根据事件等级、影响范围自动判定并立即启动相应等级应急预案，由远程运维中心统一开展智能化应急指挥。

#### 8.3.2.3 现场处置

现场运维班组通过智能工具接收应急指令后快速集结，按应急预案开展故障抢修、隐患排查等现场处置工作，依托移动化工具向指挥机构实时反馈处置进展。

#### 8.3.2.4 恢复保障

故障处置完成后，依托技术手段对机电系统、智能运维相关工作的运行状态进行全面智能化核查，确认系统恢复正常运行，做好应急处置记录的数字化归档。

#### 8.3.2.5 事后复盘

突发事件处置结束后，依托数据归集技术开展事件原因智能分析、处置效果量化评估，总结经验教训，实现应急预案和防控措施智能化优化。

### 8.3.3 应急演练与改进

8.3.3.1 每年至少组织一次智能运维应急演练，可采用实战演练、桌面推演等形式，覆盖主要突发场景，检验应急预案的可操作性和应急队伍的处置能力；同时实现应急演练的智能化管理。

8.3.3.2 应建立应急演练智能化复盘机制，对演练过程、演练效果进行全面量化评估，针对发现的问题及时修订应急预案、完善应急体系。

8.3.3.3 应根据行业技术发展、设备更新改造及实际突发事件处置经验，依托故障案例库定期优化应急处置流程和防控措施，持续提升智能应急处置能力。

## 9 评价与改进

### 9.1 自我评价

9.1.1 应建立运维效果评估机制，开展多维度的自我评价，评价指标包括但不限于状态感知、智能监测、故障诊断、预测性维护、工单管理、智能巡检等，评价指标体系见附录 C，表 C.1。

9.1.2 每年至少组织一次全面的智能运维效果自我评价，重点评估智能运维工作的实施绩效、能力达成情况及实际应用效果，为智能运维工作优化提供依据。

### 9.2 持续改进

针对自我评价中发现的问题与短板，应制定详细的整改计划，明确责任人、整改措施及完成时限，并跟踪验证整改效果。

**附录 A**  
(资料性)  
**数据采集指标及相关参数**

## A.1 总则

### A.1.1 采集原则

A.1.1.1 应对设备基础信息、运行状态、环境参数、告警事件、能耗数据、运维操作等数据进行全维度采集。

A.1.1.2 每条数据应携带设备 ID、时间戳、采集点、采集方式、数据来源与质量标识等信息。

### A.1.2 采集方式

数据采集方式包括但不限于：

- a) 主动采集：轮询、周期采样、触发上报；
- b) 被动采集：事件推送、告警主动上送、运维操作日志同步；
- c) 边缘预处理：边缘计算节点完成数据清洗、降噪、异常标记、压缩上送。

## A.2 通信系统数据采集

### A.2.1 采集对象

通信系统数据采集对象包括光纤、程控交换、紧急电话、通信电源、网管系统、防雷接地系统等。

### A.2.2 采集参数及量化指标

通信系统数据采集参数及量化指标见下表A.1。

**表 A.1 通信系统数据采集参数及指标**

设备类别	采集参数	指标/阈值	采集频率	备注
光纤	光功率、收/发功率、衰耗、误码率、链路状态	收光功率：-8 dBm~-24 dBm； 衰耗≤0.25 dB/km； 误码率≤10 <sup>-9</sup> 。	实时	//
程控交换	注册状态、端口占用率、呼通率、掉线次数	呼通率≥99.9%； 端口占用率≤80%。	5 s	/
紧急电话	在线状态、通话质量、线路电压、呼叫成功率	呼叫成功率≥99%； 线路电压：DC12V±10%。	10 s	/
通信电源	输入电压、输出电流、电池电压、负载率、温度	输出稳定率：±1%； 负载率≤70%； 温度：0℃~40℃。	10 s	/
网管系统	CPU/内存/磁盘使用率、进程存活、端口连通性	CPU≤80%； 内存≤85%； 磁盘≤80%。	30 s	/
防雷接地系统	接地电阻	≤4 Ω（普通路段）；	1次/日	针对沿海及山区

设备类别	采集参数	指标/阈值	采集频率	备注
		$\leq 1 \Omega$ （核心机房）		高雷暴区

### A.3 监控系统数据采集

#### A.3.1 采集对象

监控系统数据采集对象包括视频设备、车辆检测器、气象检测器、可变信息标志、中心设备平台以及隧道、边坡、桥梁监测设备等。

#### A.3.2 采集参数与量化指标

监控系统数据采集参数与量化指标见下表A.2。

表 A.2 监控系统数据采集参数与量化指标

设备类别	采集参数	指标 / 阈值	采集频率	备注
视频设备	在线/离线、码率、帧率、丢包率、录像状态、云台状态	帧率 $25\text{fps} \pm 1$ ； 丢包率 $\leq 1\%$ ； 录像完好率 $100\%$ 。	实时	/
车辆检测器	车流量、车速、占有率、车距、车型	车速误差 $\leq \pm 3 \text{ km/h}$ ； 流量统计误差 $\leq 2\%$ 。	5 s	/
气象检测器	温度、湿度、风速、风向、能见度、路面状态	温度误差 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ； 能见度误差 $\leq 5\%$ ； 路面状态识别准确率 $\geq 95\%$ 。	10 s	/
可变信息标志	亮屏状态、亮度、像素完好率、指令响应、显示内容	响应 $\leq 2 \text{ s}$ ； 像素完好率 $\geq 99\%$ ； 亮度均匀度 $\geq 85\%$ 。	10 s	/
中心设备平台	双机热备状态、同步状态、接口吞吐量、告警总数	主备切换时间 $\leq 30 \text{ s}$ ； 吞吐量 $\leq 80\%$ 。	30 s	/
隧道监测设备	隧道收敛变形速率	$< 0.5 \text{ mm/d}$	实时	针对穿越断裂带/软岩隧道
边坡监测设备	岩体深部位移	$\leq 10 \text{ mm}$ （累计）	实时	针对洞口高危边坡
桥梁监测设备	伸缩缝宽度/错位	在设计允许范围内	实时	适应温度变化及地震带影响

### A.4 收费系统数据采集

#### A.4.1 采集对象

收费系统数据采集对象包括ETC/RSU车道、车牌识别、车道控制机、栏杆机、计重设备、收费服务器等。

#### A.4.2 采集参数与量化指标

收费系统数据采集参数与量化指标见下表A.3。

表 A.3 收费系统数据采集参数与量化指标

设备类别	采集参数	指标/阈值	采集频率
ETC/RSU	在线、交易成功率、通信距离、OBU 交互成功率	交易成功率 $\geq 99.5\%$ ; 通信距离: 5 m~10 m。	实时
车牌识别	识别率、准确率、捕获率、成像质量	准确率 $\geq 98\%$ ; 捕获率 $\geq 99\%$ 。	实时
车道控制机	运行状态、IO 状态、网络、进程、日志	无死机; 网络连通率: 100%。	5 s
栏杆机	起落次数、到位状态、电机电流、故障码	动作响应 $\leq 0.5$ s; 电流稳定 $\pm 10\%$ 。	5 s
计重设备	轴重、总重、车速、误差、设备状态	误差 $\leq \pm 2.5\%$ ; 数据上传率 100%。	实时
收费服务器	CPU/内存/磁盘、双机状态、数据库连接、交易延迟	交易延迟 $\leq 200$ ms; 主备一致。	10 s

## A.5 供配电与照明系统数据采集

### A.5.1 采集对象

供配电与照明系统数据采集对象包括变压器、UPS、发电机、配电柜、照明、环境监测等。

### A.5.2 采集参数与量化指标

供配电与照明系统数据采集参数与量化指标见下表A.4。

表 A.4 供配电与照明系统数据采集参数与量化指标

设备类别	采集参数	指标/阈值	采集频率
变压器	三相电压/电流、温度、油位、功率因数	电压稳定误差: $\pm 7\%$ ; 温度 $\leq 85$ °C; 功率因数 $\geq 0.95$ 。	10 s
UPS	输入/输出、电池电压、容量、负载、逆变状态	后备时间 $\geq$ 额定 80%; 负载 $\leq 70\%$ 。	10 s
发电机	油压、水温、转速、电池电压、启动成功率	启动成功率 $\geq 98\%$ ; 电压稳定误差: $\pm 2\%$ 。	10 s
配电柜	开关状态、漏电流、绝缘、谐波、电能	漏电流 $\leq 30$ mA; 绝缘 $\geq 0.5$ M $\Omega$ 。	10 s
照明	开关状态、电流、功率、亮灯率、故障定位	亮灯率 $\geq 98\%$ ; 单灯可控。	1 min
电气连接接线盒	关键接头温度	$\leq 80$ °C (绝对值)	10 s
环境监测设备	温湿度、盐雾浓度、烟感、水浸、门禁、空调	温度: 10 °C~30 °C; 湿度: 30%~70%; 烟雾浓度: $\leq 0.5$ mg/m <sup>3</sup>	10 s

## A.6 隧道机电系统数据采集

### A.6.1 采集对象

隧道机电系统数据采集对象包括通风风机、CO/VI检测器、消防系统、隧道PLC、应急广播等。

#### A.6.2 采集参数与量化指标

隧道机电系统数据采集参数与量化指标见下表A.5。

表 A.5 隧道机电系统数据采集参数与量化指标

设备类别	采集参数	指标/阈值	采集频率
通风风机	启停、转速、电流、振动、运行时长	转速稳定误差：±5%； 电流≤额定 1.1 倍。	10 s
CO/VI 检测器	CO 浓度、能见度、温度、风速	CO≤100 ppm； VI≥100 m.	5 s
消防系统	泵压、水位、阀门状态、火警、故障	压力稳定误差：±5%； 火警响应≤3 s。	实时
隧道 PLC	IO 状态、模块在线、通信、程序运行	模块在线率：100%； 通信无中断。	5 s
应急广播	在线、播放状态、音量、链路	播放成功率：100%； 无杂音。	10 s

#### A.7 数据采集质量

数据采集质量应满足以下要求：

- a) 完整性：必填字段缺失率不大于 0.1%；
- b) 准确性：关键参数误差不大于±2%；
- c) 一致性：时间戳统一 UTC+8，精度到毫秒。

## 附录 B (资料性) 设备健康状态划分

### B.1 划分原则

B.1.1 设备健康状态按“优、良、中、差”四级划分，用于量化表征机电系统当前运行状态、性能退化趋势及剩余使用寿命。

B.1.2 等级划分应综合设备运行参数、外观状况、功能完整性、故障频次及维修记录等因素，与附录 A 采集指标直接对应。

B.1.3 健康状态与设备完好率、技术状况评分的对应关系宜符合表B.1的规定。

**表 B.1 健康状态等级与完好率对应关系**

健康状态	等级描述
优	运行参数全部正常，外观良好，功能完整，无故障隐患
良	主要参数正常，个别次要参数轻微偏离，功能正常，近期无故障
中	部分参数偏离正常范围，外观有轻微损伤，功能基本正常但存在隐患
差	主要参数明显偏离，外观有明显损伤或老化，功能下降，故障频发

### B.2 通信系统设备健康状态等级划分

通信系统设备健康状态等级划分应符合表B.2的规定。

**表 B.2 通信系统设备健康状态等级划分**

健康状态	判定依据
优	收光功率、衰耗、误码率均满足附录A表A.1阈值要求；程控交换呼通率 $\geq 99.9\%$ ，端口占用率 $\leq 80\%$ ；紧急电话呼叫成功率 $\geq 99\%$ ，线路电压 $DC12V \pm 10\%$ ；通信电源输出稳定率 $\pm 1\%$ ，负载率 $\leq 70\%$ ，温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；网管系统 CPU $\leq 80\%$ ，内存 $\leq 85\%$ ，磁盘 $\leq 80\%$ 。设备外观完好，无告警。
良	主要运行参数在正常范围内，个别次要参数（如端口占用率、温度）偶发轻微偏离阈值，无持续性告警，外观基本完好。
中	部分参数接近阈值上限/下限，或出现偶发性告警（如误码率偶发升高、呼叫成功率 $95\% \sim 99\%$ ），外观有轻微损伤，功能基本正常。
差	多项参数超出阈值（如收光功率超出 $-8\text{ dBm} \sim -24\text{ dBm}$ 范围、误码率 $> 10^{-9}$ 、呼通率 $< 95\%$ ），外观有明显损伤或老化，故障频发。

### B.3 监控系统设备健康状态等级划分

监控系统设备健康状态等级划分应符合表B.3的规定。

**表 B.3 监控系统设备健康状态等级划分**

健康状态	判定依据
优	视频设备帧率 $25\text{ fps} \pm 1\text{ fps}$ ，丢包率 $\leq 1\%$ ，录像完好率100%；车辆检测器车速误差 $\leq \pm 3\text{ km/h}$ ，流量统计误差 $\leq 2\%$ ；气象检测器温度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能见度误差 $\leq 5\%$ ，路面状态识别准确率 $\geq 95\%$ ；可变信息标志

健康状态	判定依据
	响应 $\leq 2$ s, 像素完好率 $\geq 99\%$ , 亮度均匀度 $\geq 85\%$ ; 中心设备主备切换时间 $\leq 30$ s, 吞吐量 $\leq 80\%$ 。图像清晰, 功能完整。
良	主要参数正常, 个别参数(如丢包率、像素完好率)偶发轻微偏离, 图像质量基本满足要求, 无持续性故障。
中	部分参数偏离(如丢包率 $1\% \sim 3\%$ 、像素完好率 $95\% \sim 99\%$ 、能见度误差 $5\% \sim 10\%$ ), 图像质量下降或检测精度降低, 外观有轻微损伤。
差	多项参数超标(如丢包率 $> 3\%$ 、像素完好率 $< 95\%$ 、主备切换时间 $> 30$ s), 设备运行不稳定, 图像质量差, 故障频发。

#### B.4 收费系统设备健康状态等级划分

收费系统设备健康状态等级划分应符合表B.4的规定。

表 B.4 收费系统设备健康状态等级划分

健康状态	判定依据
优	ETC/RSU交易成功率 $\geq 99.5\%$ , 通信距离 $5$ m $\sim 10$ m; 车牌识别准确率 $\geq 98\%$ , 捕获率 $\geq 99\%$ ; 车道控制机无死机, 网络连通率 $100\%$ ; 栏杆机动作响应 $\leq 0.5$ s, 电流稳定 $\pm 10\%$ ; 计重设备误差 $\leq \pm 2.5\%$ , 数据上传率 $100\%$ ; 收费服务器交易延迟 $\leq 200$ ms, 主备一致。车道通行顺畅。
良	主要参数正常, 个别参数(如交易成功率、识别准确率)轻微下降(交易成功率 $99\% \sim 99.5\%$ , 识别准确率 $95\% \sim 98\%$ ), 偶发卡滞。
中	部分参数偏离(如交易成功率 $95\% \sim 99\%$ , 识别准确率 $90\% \sim 95\%$ , 计重误差 $2.5\% \sim 5\%$ ), 通行效率下降, 故障偶发。
差	多项参数超标(如交易成功率 $< 95\%$ , 识别准确率 $< 90\%$ , 计重误差 $> 5\%$ ), 设备频繁故障, 严重影响通行。

#### B.5 供配电与照明系统设备健康状态等级划分

供配电与照明系统设备健康状态等级划分应符合表B.5的规定。

表 B.5 供配电与照明系统设备健康状态等级划分

健康状态	判定依据
优	变压器电压稳定误差 $\pm 7\%$ , 温度 $\leq 85^\circ\text{C}$ , 功率因数 $\geq 0.95$ ; UPS 后备时间 $\geq$ 额定 $80\%$ , 负载 $\leq 70\%$ ; 发电机启动成功率 $\geq 98\%$ , 电压稳定误差 $\pm 2\%$ ; 配电柜漏电流 $\leq 30$ mA, 绝缘 $\geq 0.5$ M $\Omega$ ; 照明亮灯率 $\geq 98\%$ , 单灯可控; 环境温度 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ , 湿度 $30\% \sim 70\%$ 。供电稳定, 无异常。
良	主要参数正常, 个别参数轻微偏离(如UPS后备时间 $70\% \sim 80\%$ , 亮灯率 $95\% \sim 98\%$ ), 无持续性故障。
中	部分参数偏离(如UPS后备时间 $60\% \sim 70\%$ , 亮灯率 $90\% \sim 95\%$ , 绝缘 $0.3$ M $\Omega \sim 0.5$ M $\Omega$ ), 设备存在老化迹象, 偶发故障。
差	多项参数超标(如UPS后备时间 $< 60\%$ , 亮灯率 $< 90\%$ , 绝缘 $< 0.3$ M $\Omega$ ), 设备老化严重, 绝缘下降, 故障频发, 存在安全隐患。

#### B.6 隧道机电系统设备健康状态等级划分

隧道机电系统设备健康状态等级划分应符合表B.6的规定。

表 B.6 隧道机电系统设备健康状态等级划分

健康状态	判定依据
优	通风风机转速稳定误差±5%，电流≤额定1.1倍，运转无异响；CO≤100 ppm，VI≥100 m；消防系统压力稳定误差±5%，火警响应≤3 s；隧道PLC模块在线率100%，通信无中断；应急广播播放成功率100%，无杂音。安全功能完整，运行稳定。
良	主要参数正常，个别参数轻微偏离（如风机电流波动±15%，CO浓度偶发 100 ppm~150 ppm），无持续性告警，安全功能正常。
中	部分参数偏离（如风机振动明显、电流波动±20%，CO浓度150 ppm~200 ppm，VI80 m~100 m），设备存在隐患，偶发故障。
差	多项参数超标（如风机电流>额定 1.2倍或异响严重，CO>200 ppm，VI<80 m，PLC模块在线率<95%），设备运行不稳定，安全功能下降，故障频发。

## 附录 C

(资料性)

## 智能运维自我评价指标体系

智能运维自我评价指标体系见下表C.1。

表 C.1 智能运维自我评价指标体系

指标类别	指标名称	计算/评价方法
状态感知	数据采集完整率	$(\text{完整采集数据条数}/\text{应采集总条数}) \times 100\%$
	数据准确率	$(\text{校验合格数据条数}/\text{总采集条数}) \times 100\%$
智能监测	告警准确率	$(\text{有效告警数}/\text{总告警数}) \times 100\%$
	紧急告警推送及时率	$(\text{1 min内推送告警数}/\text{紧急告警总数}) \times 100\%$
故障诊断	故障定位准确率	$(\text{准确定位故障次数}/\text{总故障次数}) \times 100\%$
预测性维护	预测准确率	$(\text{准确预测故障次数}/\text{总预测次数}) \times 100\%$
工单管理	工单按时闭环率	$(\text{按时闭环工单数}/\text{总工单数}) \times 100\%$
智能巡检	巡检任务完成率	$(\text{已完成巡检任务数}/\text{计划巡检任务数}) \times 100\%$
综合效果	系统可用率	$(\text{系统正常运行时长}/\text{总时长}) \times 100\%$
	MTBF	统计周期内总运行时长/故障次数
	MTTR	统计周期内总修复时长/故障次数

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 40571—2021 智能服务 预测性维护 通用要求
  - [2] DB37/T 4541—2022 智慧高速公路建设指南
-