

智慧高速安全管控系统工程设计与仿真

袁 兵

华设计集团股份有限公司 江苏 南京 210000

摘要：智慧高速安全管控，核心是行车监测、设施运维、环境研判、车流调度、事件处置这几块，靠感知采集、边缘算力、数据融合这些技术搭了一个五层系统架构。但现有体系毛病不少：感知碎片化，子系统各干各的，干预太被动，硬件适配跟不上，算法也有缺陷。针对这些问题，从五个方面提设计需求：全域数据互通、多工况精准感知、分级智能预警、跨设备联动、动态仿真。

关键词：智慧高速；安全管控；全域管控系统设计；仿真建模

引言：智慧高速安全管控，是保障道路通行安全和运营效率的关键一环。说白了，就是用智能化手段，把行车状态、道路设施、环境风险、车流调度这些事儿全域协同管起来。但现在这套体系毛病不少：感知碎片化，子系统各干各的，干预太被动，硬件适配跟不上，算法精度也不够，管控效能上不去。围绕智慧高速全域安全管控的理论内涵、系统架构、工程设计、仿真优化这些方面做系统研究，对推动安全管控从被动响应转向主动预防，是有现实意义的。

1 智慧高速安全管控基础理论及系统架构要素

1.1 智慧高速安全管控核心内涵与管控范畴

智慧高速安全管控，核心就是搭一个覆盖全域作业环节的智能化管控体系，具体包括五大模块：行车状态监测、道路设施运维、环境风险研判、车流调度干预、异常事件处置。行车状态监测，盯着车辆运行参数实时拿数据；道路设施运维，看基础设施功能完不完整；环境风险研判，分析天气、路况这些自然因素对安全的影响；车流调度干预，调控车流密度和速度分布；异常事件处置，出了突发状况能快速响应。传统人工管控靠分散的经验判断，智能化全域管控靠系统集成来实现精准协同。系统工程设计得满足几个要求：功能性要够，把五大模块的管控需求全盖住；实时性要强，毫秒级响应得跟上；联动性要好，跨模块统一调度能撑起来。

1.2 智慧高速安全管控支撑技术原理

系统设计靠感知采集、边缘算力传输、数据融合处理、联动控制、仿真建模这几项技术原理撑着。感知采集，把路面、附属设施、车辆、路域环境的物理状态变成能处理的信号；边缘算力传输，把数据延迟降下来，也减轻中心负载；数据融合处理，把乱七八糟的异构信息做时空对齐、特征提取；联动控制，给不同终端发协调指令；仿真建模，用虚拟推演来支持策略优化。这几

项技术分别对接接口类管控对象的感知和控制需求。能联动运行，底层靠的是数据在采集、计算、决策、执行各个环节之间闭环流转、反馈调节。

1.3 智慧高速安全管控系统组成与运行逻辑

系统架构分五层：感知采集层、网络传输层、数据处理层、决策管控层、终端执行层。感知采集层在现场拿原始数据；网络传输层在层级之间传数据、发指令；数据处理层做清洗、融合、分析、存储；决策管控层做风险识别、定控制策略；终端执行层收指令、干实际的管控活儿。层级之间的运行流程有两股：数据从下往上汇聚传递，指令从上往下分级下发。系统的基础运行逻辑包括四个环节：风险识别、研判预警、分级干预、闭环复盘，持续评估高速运行状态，再把处置结果完整反馈回来^[1]。

2 现有高速安全管控体系现存短板及系统设计需求

2.1 现有高速安全管控运行现存问题

当前高速安全管控在实际运行中问题不少。路域多维感知点位布设碎了一地，极端路况下的路面状态变化、隐蔽发展的道路结构病害、突发性的车流异常波动，这些关键信息很难及时准确识别出来。感知一滞后，后续管控措施的时效性就跟着受影响。各管控子系统之间各干各的，数据互联互通程度低，系统之间的信息墙太厚，整体协同能力跟不上，跨系统的联动调度和统一指挥根本做不到。管控干预模式整体偏被动，多数管控动作都集中在事故发生后的应急处置上，缺乏对风险演化过程的主动识别和前置干预能力。

2.2 现有管控硬件配套适配性不足问题

现有安全管控硬件配套，适配性上短板很明显。采集终端在复杂环境下抗干扰能力偏弱，一碰上恶劣天气或者夜间低照度，采集数据的精度就掉得厉害，上层决策拿不到稳定可靠的基础信息。管控终端执行响应时延

太长,预警信息发布、动态限流调节、隧道照明调光、临时围挡布设这些联动动作,执行效率上不去,高速场景下要的毫秒级响应根本达不到。还有大量老旧的管控硬件,对外通信接口和数据协议兼容性差,直接连不上一体化智慧管控平台的统一接入标准。

2.3 系统管控算法及研判模型存在缺陷

现有管控系统用的算法和研判模型,毛病不少。研判算法数据来源太单一,主要靠车流数据来判风险,路况状态、气象环境、设施健康这些多维数据没融进来,风险识别的全面性和准确性都不够。风险分级研判精度低,同一类型的安全风险缺少差异化的处置方案,风险等级、影响范围、演化趋势都不一样,但匹配不上相应的干预强度和策略。动态车流调度模型和风险扩散预判模型的拟合度偏低,模型算出来的结果跟真实路况偏差不小^[2]。基于这种模型做的管控决策,科学支撑不够,实际应用中很难精准预测风险、合理调度指挥,整体管控效能自然受影响。

2.4 全域智慧安全管控系统设计核心需求

针对现有体系的短板,全域智慧安全管控系统设计得满足五大核心需求。全域一体化数据互通,把各子系统之间的数据墙推倒,跨层级、跨区域、跨设备的信息共享和业务协同要能跑通。多工况精准感知,采集终端在全天候、多气象、多光照条件下,感知精度和可靠性要稳得住。分级智能预警,系统能根据风险等级自动生成不同的预警策略,风险信号输出要准。跨设备联动执行,管控指令在不同品牌、不同年代、不同类型的终端设备上,都能统一响应、协同动作。动态仿真推演,系统能基于实时数据,对交通流怎么演化、风险怎么扩散做模拟预判。系统设计还得兼顾三类作业场景的不同需求:常态化通行管控、突发异常应急管控、道路设施长效运维,每个场景都要适配好。

3 智慧高速全域安全管控系统专项工程设计

3.1 系统总体架构模块化工程设计

系统总体架构用模块化工程设计的思路,基于分层架构把整体方案搭起来。先把感知采集层、网络传输层、数据处理层、决策管控层、终端执行层这五级之间的接口协议统一规范好,层级之间数据传输的标准格式和交互流程定清楚,把协议不一致带来的对接障碍清掉。在这个基础上,把系统整体拆成四个独立功能模块:交通运行管控、路域环境管控、道路结构管控、应急联动管控,每个模块管自己那一摊。同时把模块之间互通权限的边界定好,哪些数据可以跨模块共享、哪些指令需要多模块协同执行,都规定清楚,再制定统一的

数据共享规则。

3.2 前端感知传输硬件工程设计

前端感知传输硬件工程设计,主要从点位布局、设备选型、传输组网三个方向往下推。路面、边坡、沿线附属设施这些关键部位,感知点位的空间布局要优化好,得保证感知覆盖连续、有空间冗余,别留监测盲区。设备选型上,得扛得住雨雪天气和低能见度工况,选那些有抗环境干扰能力的采集设备,复杂气象条件下数据可用性和精度才能有保障。传输链路设计上,用有线和无线融合的组网方式,关键节点加装边缘节点算力装置,让数据在靠近采集源的地方先把初步处理做了^[3]。

3.3 后台管控决策软件功能设计

后台管控决策软件功能设计,主要围绕数据融合、风险识别、等级划分、方案生成、状态自检这五个核心功能来。多维数据融合处理,把来自不同感知源的路况数据、环境数据、设施数据做时空对齐和关联整合,形成一个统一的态势认知。路况风险智能识别,基于融合后的数据自动去捞异常态势和潜在安全隐患。风险等级自动划分,按预设的风险评估规则对识别出来的风险做量化判定,归到对应的严重程度等级里。管控方案自主生成,根据风险等级和现场条件自动输出相应的调控策略和执行指令。

3.4 系统安全防护与容错架构设计

系统安全防护与容错架构设计,主要围绕数据安全、访问控制、故障应对三个方向来。数据加密机制,把系统里存储和传输的各类数据都加密保护起来,别让人偷走或者乱改。访问权限分级机制,根据用户角色和作业职责设置不同的系统操作权限,越权访问要拦住,确保各级人员只能动自己授权范围内的功能和数据。故障自主容错架构,部分设备或模块出异常的时候,系统能自动识别故障范围并做隔离,别让故障蔓延到整个系统。针对外部数据干扰、设备突然停机、指令错乱这三类常见异常场景,分别设计好检测和处置规则^[4]。再增设一个离线应急管控子程序,这个子程序不靠中心服务器和主干网,通信断了或者中心系统瘫了的时候它能自己跑起来,极端工况下管控系统还能保持基础运行能力。

4 智慧高速安全管控系统工况仿真与性能优化

4.1 管控仿真平台选取与仿真参数设定

管控仿真平台的选取,得跟高速通行状态、路域环境特征、道路设施运行特性对得上。选定仿真工具之后,划出四类典型仿真工况:常态化通行、低能见度天气、高峰车流、道路局部病害。每类工况的运行条件和安全风险特征都不一样。然后统一设定基础仿真变量,

包括车流速度与密度分布、能见度与降水强度这些气象参数,还有各类感知与控制设备的响应延时特性。变量统一设好,不同工况下的仿真结果才有可比性。变量定完之后,搭好仿真基础环境,配好计算资源和数据接口,让仿真平台能真实反映系统在各类工况下的运行状态和性能表现,给后续仿真实验提供一个标准化的平台支撑。

4.2 多工况系统运行仿真实验开展

在多工况条件下分别跑系统运行仿真实验。常态通行管控仿真,看系统在常规车流和正常环境下的运行稳不稳,各模块协同工作顺不顺畅。恶劣环境风险预警仿真,模拟低能见度、雨雪这些不利天气,看感知系统对环境变化敏不敏感、预警信息发得及不及时。突发车流扰动调度仿真,针对车流密度突然增大或者车辆突然减速这类扰动场景,检验车流调度干预模块反应快不快。道路设施病害监测仿真,模拟路面结构或者附属设施出异常,看监测系统能不能识别出隐蔽性病害。各类仿真实验里,系统要采集关键运行数据,包括风险识别用了多久、管控指令从发出去到终端响应有多快、风险处置全过程花了多少时间,还有多类设备联动执行时配合得怎么样。

4.3 仿真运行数据结果对比分析

把仿真运行数据系统化地对比分析一下。一方面,把优化后的智慧管控系统和传统管控模式在几项性能指标上比一比:风险识别时延谁长谁短、预警信息准确率谁高谁低、异常事件处置全过程谁快谁慢、车流疏导作业谁更高效。通过这些指标对比,量化看看智慧化改造到底提升了多少。另一方面,用仿真数据反过来找找当前系统设计里还有哪些短板。重点看看:硬件布设有没有感知盲区或者冗余不够的地方;算法模型在风险识别和等级划分上有没有偏差;联动逻辑在不同工况下有没有

有响应不匹配或者协同失效的问题^[5]。

4.4 基于仿真结果的系统迭代优化

根据仿真分析找出来的系统短板,一项一项迭代优化。风险研判算法的权重参数要调一调,根据不同工况下各类风险因子的实际影响程度,调整算法对各个输入数据的敏感度分配,把风险识别和等级划分的准确性往上提。局部感知点位的布设密度也要调,仿真发现哪里有盲区或者数据质量偏低,就在那里加设备或者重新配置,把感知覆盖的窟窿补上。终端联动执行的时序参数要修正,保证跨设备协同动作的时间配合能到最优,别因为响应顺序不对把执行效率给浪费了。

结束语

智慧高速全域安全管控,靠着五层系统架构和四大功能模块的协同设计,把感知碎片化、子系统各干各的、干预太被动这些老毛病给破了。多工况仿真实验跑下来,系统在风险识别时效、预警准确率、联动执行效率上都有明显提升。再拿仿真结果去做迭代优化,系统对特殊工况的适配能力又往上走了一步。这一套下来,给安全管控从被动响应转向主动预防,提供了完整的理论支撑和工程路径。

参考文献

- [1]陈荣洲,贾彦党,宿增强.智慧供电系统在甘肃省高速公路中的设计与应用[J].运输经理世界,2026(8):157-159.
- [2]王慧,夏友军.新港高速公路智慧高速系统设计与应用研究[J].机电信息,2025(21):42-46.
- [3]王家伟.交通工程建设项目智慧安全管理系统设计与应用[J].科技视界,2025,15(22):64-67.
- [4]张姝娴,牛彦峰,田保珍.高速公路安全应急管理系统界面设计与评价[J].包装工程,2024,45(10):262-269.
- [5]李勇.高速公路终端安全管控平台的设计应用[J].网络安全技术与应用,2025(3):138-141.