T/CECS XX-202X

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

内嵌感知系统智慧道路设计标准

Smart Road Design Standard with Embedded Perception System

（征求意见稿）

中国工程建设标准化协会　发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

内嵌感知系统智慧道路设计标准

Smart Road Design Standard with Embedded Perception System

T/CECS G：XXXX-202X

主编单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

西南交通大学

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X 年 XX 月 XX 日

XXX 出版社

前 言

《内嵌感知系统智慧道路设计标准》（以下简称“标准”）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2025 年第二批协会标准制订（修订）计划〉的通知》（建标协字〔2025〕43 号）的要求进行编制。规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本标准共分 7 章，主要内容包括总则、术语和符号、总体设计、设备选型、感知单元布设与防护、系统平台、附属设施。

本标准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。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司、西南交通大学负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送中交第一公路勘察设计研究院有限公司（地址：陕西省西安市高新区科技四路 205 号，邮编：710075）。

主编单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

西南交通大学

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则 1
2 术语和符号 2
3 总体设计 4
3.1 一般规定 4
3.2 设计等级 4
3.3 功能设计 5
3.4 设计流程 6
3.5 系统架构与接口 6
4 设备选型 8
4.1 一般规定 8
4.2 感知设备类型与性能要求 8
4.3 设备选型原则 9
4.4 设备接口与标准化 9
5 感知单元布设与防护 11
5.1 一般规定 11
5.2 场景划分与布设原则 11
5.3 布设技术要求 12
5.4 施工埋设与协同 13
5.5 防护技术要求 14
6 系统平台 15
6.1 一般规定 15
6.2 平台架构 15
6.3 平台功能要求 15
6.4 数据要求 16
6.5 接口与服务 16
7 附属设施 17
7.1 一般规定 17

7.2 供电设施 17
7.3 通信传输设施 18
7.4 管线与保护设施 18
7.5 防雷接地与运维 19
附录 A 内嵌感知系统智慧公路典型设计案例 20
A.1 内嵌感知系统智慧公路典型设计案例概况 20
A.2 总体设计 20
A.3 设备选型 21
A.4 感知单元布设与防护 21
A.5 系统平台 28
A.6 附属设施 28
本标准用词用语说明 31

Contents

1 General Provisions 1
2 Terms and Symbols 2
3 General Design 4
3.1 General Requirements 4
3.2 Design Grade 4
3.3 Functional Design 5
3.4 Design Process 6
3.5 System Architecture and Interfaces 6
4 Equipment Selection 8
4.1 General Requirements 8
4.2 Types and Performance Requirements of Sensing Equipment 8
4.3 Principles for Equipment Selection 9
4.4 Equipment Interfaces and Standardization 9
5 Layout and Protection of Sensing Units 11
5.1 General Requirements 11
5.2 Scene Classification and Layout Principles 11
5.3 Technical Requirements for Layout 12
5.4 Embedding Construction and Coordination 13
5.5 Technical Requirements for Protection 14
6 System Platform 15
6.1 General Requirements 15
6.2 Platform Architecture 15
6.3 Platform Functional Requirements 15
6.4 Data Requirements 16
6.5 Interfaces and Services 16
7 Auxiliary Facilities 17
7.1 General Requirements 17

7.2 Power Supply Facilities 17
7.3 Communication and Transmission Facilities 18
7.4 Pipelines and Protection Facilities 18
7.5 Lightning Protection, Earthing and Operation & Maintenance 19
Appendix A Typical Design Cases of Smart Highway with Embedded Sensing System 20
A.1 Overview of Typical Design Cases of Smart Highway with Embedded Sensing System 20
A.2 General Design 20
A.3 Equipment Selection 21
A.4 Layout and Protection of Sensing Units 21
A.5 System Platform 28
A.6 Auxiliary Facilities 28
Explanation of Terms and Phrases Used in This Standard 31

1 总 则

1.0.1 为统一和规范公路内嵌感知系统设计，提高道路基础设施数字化、智能化水平，支撑道路全生命周期运维、运行安全预警和智慧化管控服务，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于新建及改（扩）建公路工程中内嵌感知系统的设计。

1.0.3 本标准是《智慧道路建设与运维体系架构标准》的配套标准，重点规定内嵌感知系统与道路主体结构融合设计的技术要求。

1.0.4 内嵌感知系统的设计应遵循技术先进、安全可靠、经济合理、绿色低碳的原则，并与主体工程同步设计、同步施工、同步验收。

1.0.5 内嵌感知系统设计应结合公路功能定位、交通量、环境条件、结构类型、运营管理和养护需求，合理确定设计等级、监测指标、设备选型、布设方案、平台功能和附属设施。

1.0.6 内嵌感知系统的设计除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.0.1 智慧公路 Smart Highway

将感知单元内嵌植入公路路面、路基基础设施结构内部，构建公路内嵌感知系统；依托端-边-云协同架构、多源数据融合与信息交互技术，实时感知道路结构性态、交通运行状态，实现道路结构健康监测、交通精准管控、路与车/人/设施信息交互，具备全生命周期智慧化运维能力的公路基础设施。

2.0.2 内嵌感知单元 embedded sensing unit

在公路建设和养护过程中，采用光栅阵列、光纤传感等新一代传感技术，以道路主体结构为载体，在路面、路基、桥梁、隧道等关键结构内部或表面植入的传感元件及其附属组件。内嵌感知单元能够实时感知道路结构性态、交通运行状态与气象环境状态参数。

2.0.3 公路内嵌感知系统 highway embedded sensing system

以公路基础设施结构为载体，由布设于路面、路基、桥梁、隧道等关键结构内部或表面的内嵌感知单元组成，用于实时感知道路结构性态、交通运行状态与气象环境状态参数的系统。

2.0.4 道路对外界的信息交换 road to everything

道路对外界的信息交换是一种以道路基础设施为主体，基于无线通信、多源感知与信息处理等技术，实现道路与车辆、行人及其他交通参与要素之间的信息获取、交互与共享，从而支撑交通系统的协同感知、协同决策与协同管控的技术体系。

条文说明

本规程采用的术语及其定义，是根据以下原则确定的：

（1）凡现行工程建设国家标准已做出规定的，一律加以引用，不再另行给出命名和定义；

（2）凡现行工程建设国家标准尚未规定的，由本规程参照国家标准和国外先进标准给出命名和定义；若国际标准和国外先进标准无这方面术语，则由本规程自行命名和定义；

（3）当现行工程建设国家标准虽已有该术语，但定义不准确或概括的内容不全时，由本规程完善其定义。

本部分术语应与《智慧道路建设与运维体系架构标准标准》保持一致，重点统一“内嵌感知单元”“公路内嵌感知系统”“感知断面”“场景分级”“智慧公路等级”“智慧道路 R2X 管控

系统”等术语的口径。其中，“智慧公路等级”直接引用《智慧道路建设与运维体系架构标准标准》S1～S4 的分级规定，不再另行命名。

本部分符号应与《智慧道路建设与运维体系架构标准标准》保持一致。常用符号包括应变、应力、温度、湿度、位移、沉降、采样频率、精度等。当《智慧道路建设与运维体系架构标准》已经给出符号时，本部分直接引用，避免前后矛盾。

3 总体设计

3.1 一般规定

3.1.1 内嵌感知系统总体设计应包括系统架构、设计等级、功能目标、监测指标、设备选型、布设防护方案、数据流与接口、供电通信方案、系统平台和附属设施等内容。

3.1.2 总体设计应以道路全生命周期智慧化运维为目标，统筹感知、传输、处理、应用各环节的协调性。

3.1.3 总体设计应结合公路功能定位、交通量、环境条件、结构类型、管养需求和建设条件，并依据标准《智慧道路建设与运维体系架构标准》确定的智慧公路等级（S1～S4），合理确定覆盖范围和技术等级。

3.1.4 内嵌感知单元及不可更换部分的设计使用年限不应低于道路结构设计使用年限；可更换部件应明确更换周期和维护要求。

3.1.5 总体设计应遵循高等级兼容低等级的原则，确保系统架构的向下兼容与向上扩展，并与主体工程、机电系统、通信系统、供配电系统和既有监控系统协调。

条文说明

总体设计应包括系统架构、设计等级、功能目标、监测指标、设备选型、布设防护、数据接口、供电通信、平台和附属设施。设计应结合公路功能定位和智慧公路等级，遵循高等级兼容低等级原则。

3.2 设计等级

3.2.1 内嵌感知系统设计等级应与标准《智慧道路建设与运维体系架构标准》中总体架构确定的智慧公路等级相协调。智慧公路等级由低到高划分为 S1（初级智慧）、S2（中级智慧）、S3（高级智慧）、S4（自主智慧）四个等级。高等级智慧公路应兼容低等级智慧公路的全部功能和性能要求。

3.2.2 内嵌感知系统应根据所属智慧公路等级，确定监测指标、设备选型、布设密度、平台功能和附属设施配置。各等级设计重点应符合下列规定：

a) S1（初级智慧）：重点路段内嵌感知，全路段视频感知，具备预案化信息发布能力。设计应侧重关键节点和重点路段的基础感知设备布设，满足可视化管理和人工为主、智慧为辅的管控需求；

b) S2（中级智慧）：路段内嵌感知连续覆盖，具备重要设施全寿命资产管理和健康监测、动态速度管控、交通运行态势评估能力。设计应实现结构响应传感器在路段内的连续或准连续布设，配置边缘计算节点，支撑数字化管理和人工与智慧相结合的管控；

c) S3（高级智慧）：全天候全要素实时连续感知，具备交通安全风险辨识、分车道交通管控、准全天候通行、车路协同感知和数字孪生能力。设计应采用多源感知融合（如点式传感器+分布式光纤+雷视融合），高密度、网格化布设，配置高算力边缘计算和高可靠低时延通信设施，支撑智慧为主、人工为辅的管控；

d) S4（自主智慧）：全要素全域全时感知，具备车-路-云协同决策、全天候通行、车路云网一体化及基础设施与智能辅助修复决策能力。设计应实现感知全覆盖、无盲区，构建高精度数字底座，配置超高可靠、超低时延的通信与算力设施，支撑智慧高度自主的管控和车路协同自动驾驶服务。

条文说明

与《智慧道路建设与运维体系架构标准》S1~S4 等级衔接。S1 侧重重点路段基础感知；S2 实现路段连续覆盖和健康监测；S3 实现全天候全要素感知、数字孪生和车路协同；S4 实现全域全时感知和车路云协同决策。适用条件按《智慧道路建设与运维体系架构标准》执行。

3.3 功能设计

3.3.1 应根据道路功能定位、运营管理需求和建设要求，结合智慧公路等级，确定内嵌感知系统功能目标。

3.3.2 功能设计应明确监测指标类型，主要包括：

a) 道路结构性态监测：应变、应力、温度、湿度、振动、位移、沉降等；

b) 交通运行状态监测：交通流量、车速、车型、轴载、车辆轨迹等；

c) 气象环境状态监测：路面温度、路面湿度、水膜厚度、结冰状态等；

d) 边坡与特殊结构：坡体位移、土压力、含水量、测斜、GNSS 位移等。

3.3.3 应根据功能目标确定各监测指标的精度、采样频率、覆盖范围和数据质量要求。

条文说明

监测指标包括道路结构性态、交通运行状态、气象环境状态和边坡特殊结构。应根据等级确定精度、采样频率和覆盖范围。

3.4 设计流程

3.4.1 内嵌感知系统的智慧公路设计应按照以下流程进行：

a) 确定设计等级、功能目标和监测指标；

b) 开展场景划分与监测断面选择；

c) 进行设备选型；

d) 开展感知单元布设与防护设计；

e) 设计通信传输与供电方案；

f) 确定系统平台功能、数据与接口要求；

g) 编制设计文件及工程量清单。

3.4.2 设计文件应满足施工图设计深度要求，包括设计说明、平面布置图、断面图、通信传输图、供电路由图、设备材料表等。

条文说明

按确定等级与指标、场景划分、设备选型、布设防护、通信供电、平台接口、设计文件等流程进行。设计文件应满足施工图深度。

3.5 系统架构与接口

3.5.1 内嵌感知系统宜采用“端—边—云”协同架构，由感知端、边缘计算节点、通信网络和云控平台组成。

3.5.2 系统架构设计应与《智慧道路建设与运维体系架构标准》中逻辑架构、物理架构和数据架构协调。S1、S2 可采用“端—云”或简单“端—边—云”架构；S3、S4 应采用完整的“端—边—云”协同架构，并明确边缘计算节点的算力底线及云控平台支撑数字孪生和车路协同的能力要求。

3.5.3　系统应具备与既有高速公路监控系统、通信系统、收费系统、供配电系统、养护管理系统和路网管理中心对接的能力。

3.5.4　应明确数据流、控制流和接口边界，预留标准化接口和扩展能力。

条文说明

宜采用“端—边—云”协同架构，S1、S2 可简化，S3、S4 应采用完整架构。系统应与既有监控、通信、收费、供配电、养护和路网管理系统对接。

4 设备选型

4.1 一般规定

4.1.1 应根据监测指标、设计等级、服役环境和施工条件选用感知设备。

4.1.2 设备选型应综合考虑技术性能、耐久性、经济性、可维护性和标准化程度。

4.1.3 所选设备应具备在道路全寿命周期内稳定工作的能力，并适应道路施工和运营环境。

4.1.4 设备性能参数可参照现行长期性能监测、传感器、机电工程等相关标准；本标准仅规定设计选型底线要求。

条文说明

根据监测指标、设计等级、服役环境和施工条件选型，综合考虑性能、耐久、经济、可维护和标准化。

4.2 感知设备类型与性能要求

4.2.1 应变感知设备：包括电阻式应变传感器、振弦式应变传感器、光纤光栅式应变传感器、分布式光纤应变传感器等。

4.2.2 位移感知设备：包括振弦式位移传感器、光纤光栅式位移传感器、差异沉降计等。

4.2.3 压力感知设备：包括振弦式压力传感器、光纤光栅式压力传感器、土压力计等。

4.2.4 振动感知设备：包括分布式光纤光栅振动传感器、MEMS 加速度传感器等。

4.2.5 温度、湿度感知设备：包括电阻式温湿度传感器、光纤光栅式温湿度传感器、分布式光纤温湿度传感器等。

4.2.6 交通与荷载感知设备：包括路面内嵌动态称重系统、视频交通检测设备、毫米波雷达等。

4.2.7　分布式光纤感知设备可用于连续应变、温度、振动和声波监测，宜与点式传感器组合使用，尤其在 S3、S4 等级中应优先考虑。

条文说明

包括应变、位移、压力、振动、温湿度、交通荷载及分布式光纤等感知设备。分布式光纤宜与点式传感器组合。

4.3 设备选型原则

4.3.1　设备选型应满足监测指标精度、量程、分辨率和采样频率要求。

a) 应变测量精度不应低于±5με；

b) 温度测量精度不应低于±0.5℃；

c) 位移监测精度不应低于 1.0mm；

d) 交通流量检测率不应低于 95%。

e) 结构响应感知数据的采样频率不宜低于 200Hz；

f) 使用温度范围应覆盖-30℃～+80℃；

g) 年漂移率不宜大于 0.1%F.S。

4.3.2　设备选型应适应高温摊铺、碾压施工、运营荷载、湿度、盐雾、电磁干扰等环境。

4.3.3　设备选型应考虑长期稳定性、抗疲劳性能和耐久性。

4.3.4　设备选型应优先选择接口标准、协议开放、便于维护和更换的产品。

4.3.5　设备选型应结合智慧公路等级和场景分级进行差异化配置。

条文说明

精度、量程、分辨率、采样频率应满足要求。通用底线指标：应变±5με、温度±0.5℃、位移 1.0mm、交通流量检测率 95%、采样频率 200Hz、使用温度-30℃~+80℃、年漂移率≤0.1%F.S。S3、S4 应提高可靠性、环境适应性和数据连续性。

4.4 设备接口与标准化

4.4.1　感知设备宜采用统一供电、通信和数据接口，支持即插即用和远程配置。

4.4.2　设备标识、数据格式、编码规则和时间同步要求应与系统平台协调。

4.4.3　关键设备宜具备自诊断、状态上报和故障定位功能。

条文说明

统一供电、通信和数据接口，支持即插即用、远程配置和自诊断。

5 感知单元布设与防护

5.1 一般规定

5.1.1 感知单元布设设计应明确监测指标、传感器类型、布设位置、间距、数量、走线和防护要求。

5.1.2 布设方案应避免对道路结构性能产生不利影响，并与路面施工工艺协调。

5.1.3 布设设计应遵循“实用性、经济性、低扰动”的原则，在满足监测覆盖率与精度要求的前提下，合理控制布设总量与建设成本。

5.1.4 布设方案应结合智慧公路等级、道路功能、交通荷载、环境条件和管养需求确定。

条文说明

明确监测指标、传感器类型、位置、间距、数量、走线和防护，遵循实用性、经济性、低扰动原则。

5.2 场景划分与布设原则

5.2.1 场景划分宜以力学响应、交通风险、道路线形、结构形式、环境条件和历史病害为依据，划分为一般场景、重点场景和特殊场景。

5.2.2 重点场景宜包括长大纵坡、急弯路段、路桥过渡段、特殊路基、高边坡、隧道洞口等。特殊场景可根据工程需要单独确定。

5.2.3 布设方案宜基于力学仿真模拟确定。力学分析宜考虑路面材料拉压双模量非线性特性，并与解译诊断模型协调。

5.2.4 布设位置确定宜按下列步骤进行：

a) 建立道路结构力学模型，计算目标交通荷载和环境作用下的应力、应变、位移等响应；

b) 分析不同荷载、结构、场景下的动力响应差异；

c) 先确定力学响应最不利位置，再根据响应差异阈值确定其他监测断面和布设密度；

d) 结合施工可行性和经济性优化布设方案。

5.2.5　场景间划分阈值宜取 30%，场景内划分阈值宜取 10%。不同等级公路、不同监测目的和覆盖率要求下，阈值可在合理范围内调整，并应经论证。

5.2.6　感知单元布设应区分智慧公路等级和场景类型：

a) S1、S2 等级可选取关键代表点布设，代表点宜选取力学响应处于中位数水平且与全断面平均响应差异低于误差阈值的位置；

b) S3、S4 等级应分段加密、网格化布设多源感知单元，实现全覆盖；重点场景应依据场景特性采取分段加密布设，网格化布设多源感知单元；普通场景可选取关键代表点进行感知单元布设。

5.2.7　宜采用“点式传感器+分布式光纤”组合布设方式，兼顾局部高精度和连续分布式监测。S3、S4 等级应优先采用该组合方式。

条文说明

划分一般、重点、特殊场景。基于力学仿真确定布设，宜考虑拉压双模量非线性。先确定最不利位置，再按阈值扩展。场景间阈值宜 30%，场景内宜 10%，可经论证调整。S1、S2 可选取代表点，S3、S4 应分段加密、网格化全覆盖。宜采用“点式+分布式”组合。

5.3 布设技术要求

5.3.1　感知单元可按面层、基层、底基层、路基、边坡等层位分层布设。

5.3.2　力学响应传感器布设宜符合下列规定：

a) 力学响应传感器应包括横向、纵向和竖向应力应变传感器；

b) 传感器应在道路各结构层（面层、基层、底基层、路基等）逐层布设，每一层均应设置力学响应传感器；

c) 布设位置宜选择左、右轮迹带。每个轮迹带横向布设 3 个传感器，纵向布设 2 排，形成矩阵式布设；左、右轮迹带对称布置；

d) 应根据智慧公路等级确定布设密度和覆盖范围。

5.3.3　环境信息传感器布设宜符合下列规定：

a) 环境信息传感器应包括温度、湿度、雨量、风速、风向、能见度等传感器；

b) 温度、湿度传感器应在道路各结构层（面层、基层、底基层、路基等）逐层布设，每一层均应设置温度、湿度传感器；

c) 布设位置宜选择车道最外侧，避免与力学响应传感器重叠。每个断面横向布设 2 个传感器，纵向布设 1 排，形成矩阵式布设；

d) 应根据智慧公路等级确定布设密度和覆盖范围。

5.3.4 分布式光纤布设应符合下列规定：

a) 分布式光纤应包括振动光缆、温度传感光缆等；

b) 分布式光纤应沿道路纵向连续布设，覆盖下面层、柔性基层等关键结构层，每一层均应设置相应的传感光缆；

c) 布设位置宜选择左、右轮迹。振动光缆可随下面层施工埋设于下面层底部；温度传感光缆可在柔性基层顶部开浅槽布设并采用相同材料回填。每个轮迹带横向可布设多条光缆，纵向连续布设，形成分布式传感网络；

d) 应根据智慧公路等级确定布设密度和覆盖范围。

5.3.5 横向布设宜在车道分界线处部署多参数复合传感器，同步采集轮迹带荷载与结构响应数据。

5.3.6 动态称重系统宜布设于结构上面层顶部，距离应变传感器测试矩阵 4～5m，垂直于车辆行驶方向单车道布置。

条文说明

力学响应传感器包括横向、纵向、竖向，逐层布设，左右轮迹带对称，横向 3 个、纵向 2 排矩阵式布设。环境传感器逐层布设，布设于车道最外侧，横向 2 个、纵向 1 排。分布式光纤沿道路纵向连续布设，覆盖关键结构层。横向在车道分界线部署多参数复合传感器。动态称重系统布设于上面层顶部，距应变矩阵 4~5m。S1、S2 可重点布设，S3、S4 全面布设。

5.4 施工埋设与协同

5.4.1 感知单元应与道路结构同步施工。埋设前应确定设计点位、走线路径和引线槽。

5.4.2 信号引线应置入耐高温、抗压的金属或波纹管套管中，统一引至路侧防水接线箱或数据采集柜，并进行清晰、牢固的编号标记。

5.4.3 感知单元周围及顶部宜由人工预填热拌沥青混合料并初步捣实，确保与周围材料紧密结合。

5.4.4　摊铺机应匀速越过感知单元区域，压路机初压时宜采用错轮碾压，避免直接在感知单元正上方静压或强振。

5.4.5　改扩建项目应规定既有结构内感知单元的加装、替换和接口兼容要求。

条文说明

与道路结构同步施工，引线穿耐高温抗压套管引至路侧，人工预填捣实，摊铺匀速，压路机错轮碾压。

5.5 防护技术要求

5.5.1　应针对施工碾压、高温摊铺、运营荷载和环境侵蚀等工况，提出感知单元的防护措施。

5.5.2　感知单元防护可按下列规定执行：

a) 裸置埋植法：在传感器下方洒布承载层材料，将传感器固定于预定位置；

b) 混合料预掩埋法：在正式摊铺前利用摊铺混合料对传感器进行预埋保护；

c) 刚性护罩埋设法：采用刚性护罩对传感器进行覆盖防护，摊铺完成后及时移除。

5.5.3　感知单元二次封装应符合下列规定：

a) 封装体宜采用与路面材料力学特性相近的材料；

b) 封装体应具备足够的整体刚度与抗压、抗剪能力；

c) 封装体与外部路面结构之间应保持界面相容性。

5.5.4　应规定感知单元的耐久性测试方法和合格标准，确保其服役寿命不低于道路设计使用年限。

5.5.5　布设方案应考虑维修更换可行性，预留更换通道、接线空间和冗余接口。

5.5.6　关键监测断面宜设置冗余传感器或备用通道，提高数据连续性。

5.5.7　应明确感知单元成活率、数据有效率和故障响应要求。

条文说明

可采用裸置埋植、混合料预掩埋、刚性护罩、预制块等方法。二次封装材料宜与路面力学特性相近，具备刚度、抗压抗剪和界面相容性。应进行耐久性测试，预留更换通道和冗余接口。

6 系统平台

6.1 一般规定

6.1.1 系统平台设计应包括平台架构、功能要求、数据要求、接口要求、安全要求和运维要求。

6.1.2 系统平台应采用“端-边-云”协同架构。

6.1.3 系统平台应具备与既有高速公路机电系统、路网管理中心、养护管理系统和 R2X 管控系统的无缝对接能力。

6.1.4 系统平台设计应与智慧公路等级协调：

a) S1、S2 平台应满足可视化、数字化管理和健康监测需求；

b) S3 平台应支持数字孪生、风险辨识和车路协同感知；

c) S4 平台应支持车路云一体化协同决策和自动驾驶服务。

6.2 平台架构

6.2.1 平台宜由感知端、数据采集层、边缘计算层、通信网络层、云控平台层和应用服务层组成。

6.2.2 边缘计算节点宜具备实时数据清洗、时空对齐、特征提取、局部预警和低时延服务能力。

6.2.3 云控平台宜具备海量数据存储、融合分析、模型计算、服务发布和统一管理能力。

6.3 平台功能要求

6.3.1 数据采集功能：应支持多种类型内嵌感知设备的数据接入。

6.3.2 数据处理功能：应支持多源感知数据的时空对齐、特征提取和融合处理。

6.3.3 数据存储功能：应具备感知数据的存储、管理和备份能力。

6.3.4 数据展示功能：应具备感知数据的可视化展示能力，包括路网态势图、结构健康监测面板等。

6.3.5 预警功能：应具备基于监测数据的自动预警和分级报警功能。

6.3.6　服务接口：应支持数据标准化封装和服务化接口，向第三方应用提供标准化数据服务。

6.3.7　运维管理：宜具备设备状态监测、远程配置、故障诊断和日志管理功能。

6.4 数据要求

6.4.1　应明确感知系统产生的数据类型，包括结构性态数据、交通运行数据、气象环境数据等。

6.4.2　应规定数据的存储格式和编码规则。

6.4.3　应规定数据的存储期限：结构性态监测原始数据存储期限不应少于 3 年，交通运行原始数据存储期限不应少于 2 年。

6.4.4　应规定数据的安全保护要求，符合国家信息安全等级保护相关规定。

6.5 接口与服务

6.5.1　平台应提供标准化数据接口，支持与养护、运营、管控和车路协同系统交互。

6.5.2　平台宜支持 R2X 管控服务，面向车辆端、司乘端和管理端提供信息发布、风险预警和出行诱导服务。

6.5.3　平台应具备网络安全、数据安全、访问控制和备份能力。

6.5.4　平台应支持远程运维、软件升级、模型更新和备品备件管理。

7 附属设施

7.1 一般规定

7.1.1 附属设施设计应包括供电设施、通信传输设施、管线与保护设施、防雷与接地设施等。

7.1.2 附属设施设计应与主体工程同步设计、同步施工、同步验收。

7.1.3 附属设施应满足道路限界、交通安全、防水、防尘、防腐蚀和防盗要求。

条文说明

包括供电、通信传输、管线保护、防雷接地等。与主体工程同步设计、施工、验收，满足道路限界、交通安全、防水、防尘、防腐蚀和防盗要求。

7.2 供电设施

7.2.1 供电方式可采用市电供电、太阳能供电、风能供电或混合供电，并应结合现场条件确定。

7.2.2 供电设施布设位置、容量、余量和保护要求应符合下列规定：

a) 供电机箱、配电箱、控制箱、逆变器箱、蓄电池箱等宜布设在路侧，优先利用硬路肩外侧、护栏外、边坡平台等位置；

b) 路侧机箱不应侵入公路建筑限界，不得影响行车视距、排水、路基稳定和养护作业；

c) 机箱基础应稳固、高出地面，并采取防水、防尘、防盗、防破坏、防雷接地等措施；

d) 供电容量和余量应满足设备要求。

7.2.3 供电设施应具备冗余和可靠性保障，关键节点应配置不间断电源或备用电源，确保全天候连续供电。

条文说明

可采用市电、太阳能、风能或混合供电。供电机箱、配电箱等宜布设在路侧，不侵入建筑限界，不影响视距、排水和养护。S3、S4 关键节点应配置不间断电源或备用电源。

7.3 通信传输设施

7.3.1 感知数据传输宜采用有线通信为主、无线通信为辅的方式。有线通信宜以光纤通信为主，无线通信可采用 4G/5G 等。

7.3.2 交换机、路由器、数据采集柜、通信机箱、边缘计算机柜等通信设施的布设位置和防护要求应符合下列规定：

a) 通信机箱、数据采集柜等宜布设在路侧，优先利用硬路肩外侧、护栏外、边坡平台等位置；

b) 路侧机箱不应侵入公路建筑限界，不得影响行车视距、排水和养护作业；

c) 宜与供电机箱同址或邻近设置，减少管线长度，但强电与弱电应分区隔离；

d) 应采取防水、防尘、防盗、防破坏、防雷接地和散热等措施；

d) 通信接口和传输带宽应满足设备要求。

7.3.3 主干通信网络带宽不应低于 10Gbps，路段级接入网带宽不应低于 1Gbps。

7.3.4 关键通信设备和传输链路应冗余配置。

条文说明

有线为主、无线为辅，光纤优先。通信机箱、数据采集柜等宜布设在路侧，与供电机箱同址或邻近，强弱电分区隔离。S1、S2 接入网带宽不宜低于 1Gbps；S3、S4 主干带宽不宜低于 10Gbps，关键链路冗余。

7.4 管线与保护设施

7.4.1 应明确感知单元信号引线的走线路由和保护方式。

7.4.2 防水接线箱、数据采集柜等设施应布设在便于维护且不影响交通安全的位置。

7.4.3 管线设施应考虑施工期和运营期防护需求，避免机械损伤、水浸和腐蚀。

条文说明

明确信号引线路由和保护方式。防水接线箱、数据采集柜等宜布设在路侧。管线应避免机械损伤、水浸和腐蚀，宜采用耐高温抗压套管或线槽保护。

7.5 防雷接地与运维

7.5.1 附属设施应设置防雷与接地系统，满足设备和人身安全要求。

7.5.2 金属机柜、套管、桥架等宜进行等电位连接

7.5.3 附属设施宜具备状态监测和远程运维能力。

7.5.4 应明确备品备件、巡检周期和故障响应要求。

条文说明

设置防雷与接地系统，金属机柜、套管、桥架等宜等电位连接。附属设施宜具备状态监测和远程运维能力，明确备品备件、巡检周期和故障响应要求。

附录 A　内嵌感知系统智慧公路典型设计案例

A.1　内嵌感知系统智慧公路典型设计案例概况

A.1.1　本案例以某高速改扩建智慧交通工程为例，内嵌感知系统智慧公路设计范围为全长约 15km。

A.1.2　本案例主要设计内容包括总体设计、设备选型、感知单元布设与防护、系统平台与附属设施。

A.2　总体设计

A.2.1　设计目标

实时感知道路路基、路面、边坡及交通环境多物理场服役状态，支撑道路结构养护决策、运行安全预警和智慧化管控服务。

A.2.2　功能设计

内嵌感知系统应具备自主感知、解译决策和管控服务功能。监测指标包括：

a）环境信息：温度、湿度、降雨量、风速、风向、能见度、路面状态；

b）荷载信息：断面日交通量、交通组成、车辆轴载、车速、车型；

c）路表信息：裂缝、车辙、国际平整度指数 IRI、横向力系数 SFC、构造深度 MPD 等；

d）结构响应信息：应力、应变、位移、沉降、振动。

A.2.3　系统架构

采用“端—边—云”协同架构，由内嵌感知单元、数据采集设备、边缘计算服务器、通信网络、云控平台及 R2X 管控服务系统组成。

A.2.4　设计流程

本案例按下列流程开展设计：

a）确定功能目标和监测指标；

b）开展设备选型；

c）进行关键场景划分与断面选择；

d）开展感知单元布设与防护设计；

e）设计通信传输与供电方案；

f）确定系统平台功能要求；

g）编制设计文件及工程量清单。

A.3 设备选型

本案例主要选用下列感知设备：

a）应变感知设备：电阻式应变传感器、光纤光栅式应变传感器、分布式光纤应变传感器；

b）位移感知设备：差异沉降计；

c）压力感知设备：土压力计；

d）振动感知设备：MEMS 加速度传感器；

e）温度、湿度感知设备：电阻式温度传感器、光纤光栅式温度传感器、湿度传感器；

f）动态称重设备：路面内嵌动态称重系统；

g）边坡监测设备：高精度 GNSS 一体机、拉线位移计、雨量计数据采集仪、智能摄像机。

A.4 感知单元布设与防护

A.4.1 关键场景划分与断面选择

以力学模拟、行车安全风险及多维数据融合为核心依据。通过有限元力学模型模拟道路在不同荷载与环境条件下的应力分布，结合交通事故数据、道路线形特征及历史病害信息，将道路划分为以下关键场景。

a）一般场景：一般路段

b）重点场景：弯道路段、桥头过渡段、长大纵坡、填方路段、挖方路段

A.4.2 关键场景检测指标体系

依据设备选型以及场景特点，构建关键场景下监测指标体系如下。

关键场景	传感器监测指标	传感器布设类型
一般路段	结构内部温湿度 应力、应变、位移、交通荷	**应变传感器：** 电阻式应变传感器

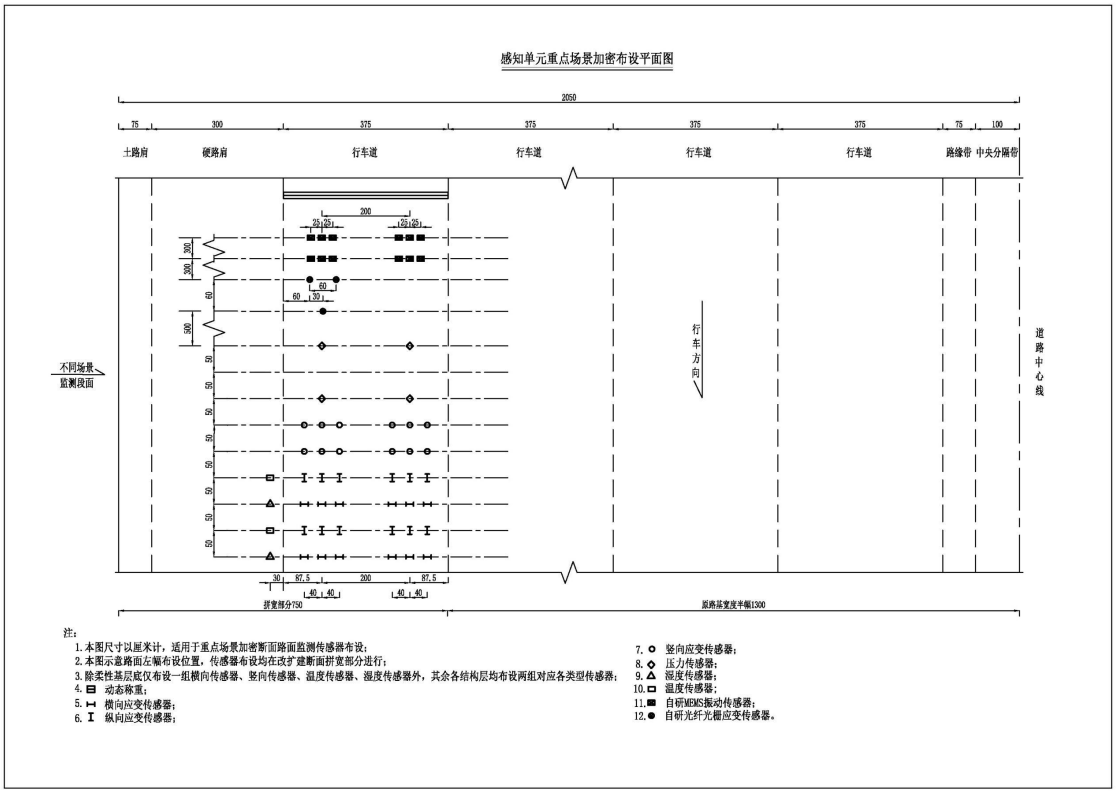
	载（流量）	光纤光栅式应变传感器 分布式光纤应变传感器 **位移传感器：** 差异沉降计 **压力传感器：** 土压力计 **振动传感器：** MEMS 加速度传感器 **温度传感器：** 电阻式温度传感器 光纤光栅式温度传感器 **湿度传感器：** 电阻式湿度传感器 **动态称重设备** 路面内嵌动态称重系统;
长大纵坡	结构内部温湿度 应力、应变、位移、交通荷载（流量）	
弯道路段	结构内部温湿度 应力、应变、位移、交通荷载（流量）	
填方路段	结构内部温湿度 应力、应变、位移、交通荷载（流量）、路基土压力、路基含水量	
挖方路段	结构内部温湿度 应力、应变、位移、交通荷载（流量）、坡体位移、测斜仪、路基含水量	
桥头过渡段	结构内部温湿度 应力、应变、位移	

A.4.3 感知单元布设方案

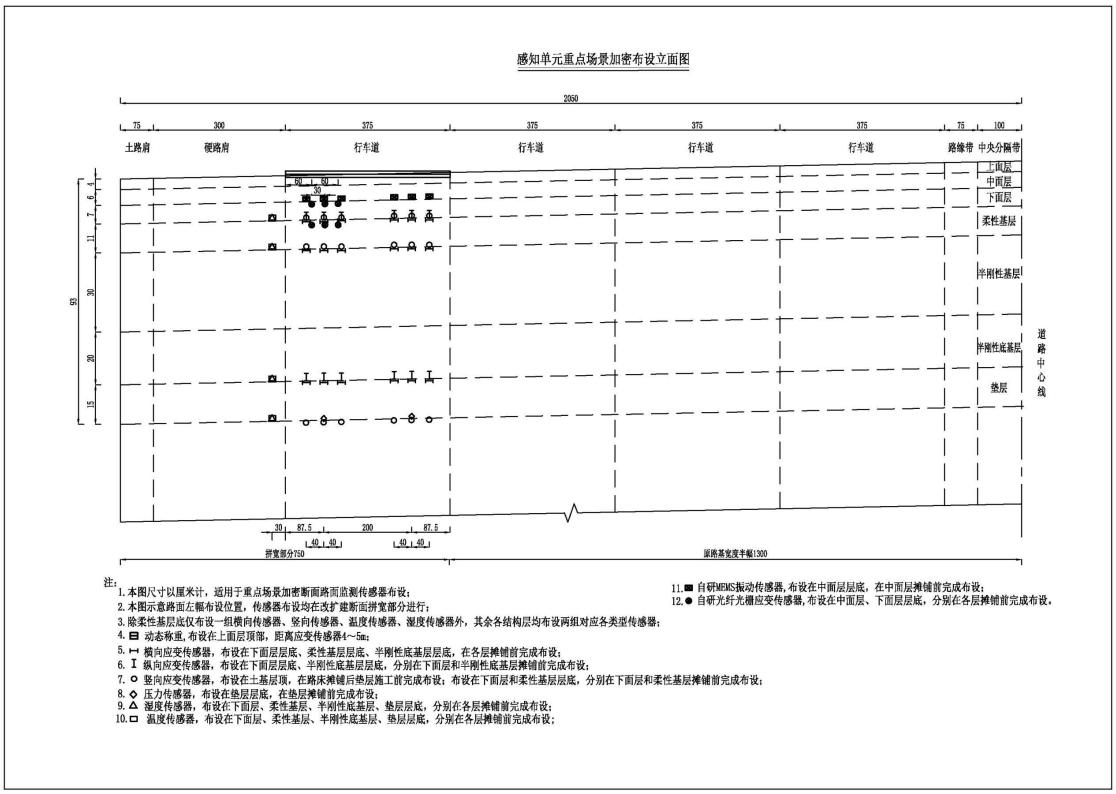
平段面布设方案采用差异化密度策略，关键场景（高风险区域）依据场景特性采取分段加密，网格化布设多源感知单元，同时构建“骨干节点+边缘节点”的混合拓扑网络以优化数据传输效率。断面布设聚焦纵向分层监测，表层埋设温度与应变传感器监测沥青疲劳损伤，基层布设土压力盒评估承载状态，路基深部安装位移计监控沉降风险；横向布局则在车道分界线处部署多参数复合传感器，同步采集轮迹带荷载与结构响应数据。一般场景选取关键代表点进行感知单元布设。最终通过在各关键场景重点加密布设感知单元，在普通路段选取代表点布设感知单元，来综合全面的监测道路基础设施结构性态，实现布设方案的“低成本，高覆盖率”。

按照典型的半刚性基层沥青路面结构，将传感器布设方式分为重点场景断面加密布设、一般场景断面正常布设，以及分布式光纤布设，考虑传感器的成活率，检测精度，分别构建布设方案，布设案例如下。

a）重点场景断面加密布设案例



附图 A.1 重点场景加密布设案例平面布设图



附图 A.2 重点场景加密布设案例立面布设图

动态称重系统的布设方案：在结构上面层顶部，距离应变传感器测试矩阵 4～5m，垂直于车辆行驶方向单车道布置，用于车辆轴重、轴型及车速的测量。

压力传感器的布置方案为：在路基顶，在轮迹带位置处，各层底纵向间隔 1m 布置 2 个压力传感器，用于路面各层层底压力测量，每个断面共布设 4 个压力传感器。

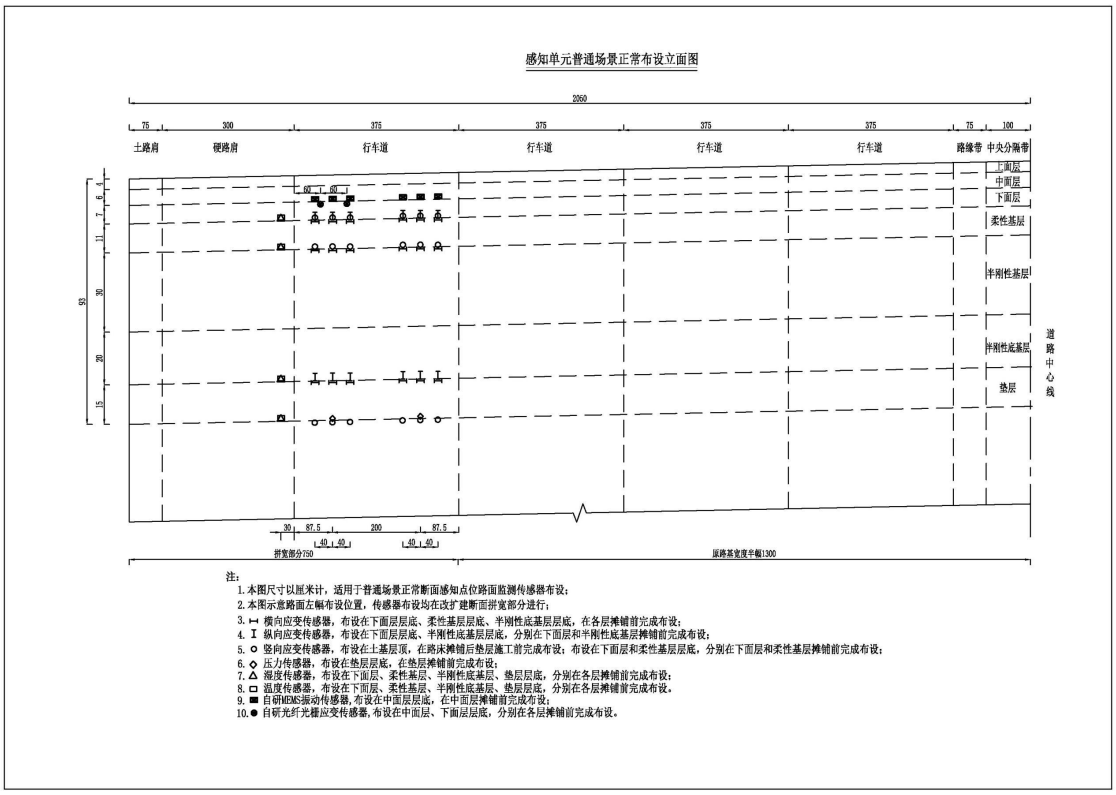
水平应变传感器的布置方案为：在下面层底，布置 6 个纵向水平应变传感器和 6 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 4 排，依次为纵向、横向、纵向和横向；每排布置 3 个：传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m；形成水平向应变测试矩阵，用于路面纵向、横向应变测量。在柔性基层底，在下面层底，布置 3 个纵向水平应变传感器和 3 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 2 排，依次为纵向、横向；每排布置 3 个，传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m；用于路面纵向应变测量和行车荷载横向偏移判定。在半刚性底基层底，布置 6 个纵向水平应变传感器和 6 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 4 排，依次为纵向、横向、纵向和横向；每排布置 3 个，传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m。每个断面共布设 30 个横向应变传感器和 30 个纵向应变传感器。

竖向应变传感器的布置方案为:在下面层层底,布置 6 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 2 排，每排布置 3 个，传感器横向中心间隔 0.4m，纵向间隔 0.5m。在柔性基层底，布置 3 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 1 排，传感器横向中心间隔 0.4m。在路基顶，布置 6 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 2 排，每排布置 3 个，传感器横向中心间隔 0.4m，纵向间隔 0.5m。每个断面共布设 30 个竖向应变传感器。

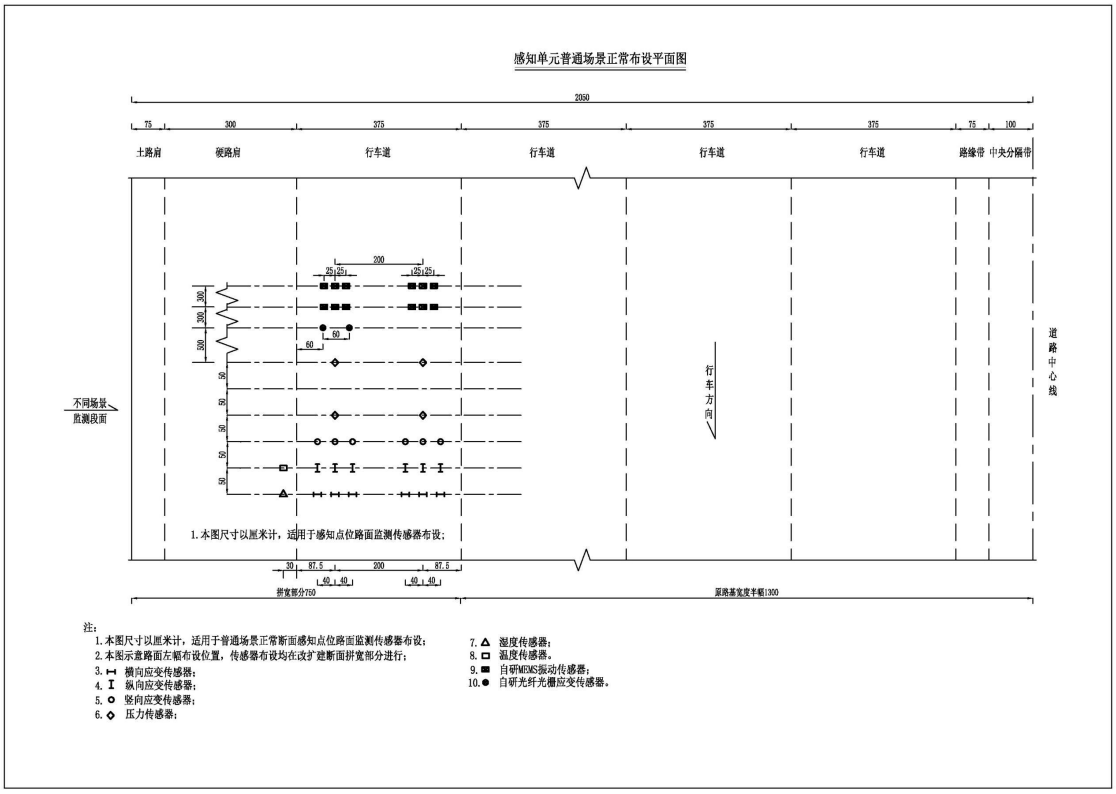
温度传感器的布置方案为:下面层底、柔性基层底、半刚性底基层底、路基顶纵向间隔 1m 布置 2 个温度传感器，布置于距离行车道外边缘 0.3m 的硬路肩位置处。每个断面共布设 8 个温度传感器。

湿度传感器的布置方案为: 下面层底、柔性基层底、半刚性底基层底、路基顶纵向间隔 1m 布置 2 个温度传感器，布置于距离行车道外边缘 0.3m 的硬路肩位置处。每个断面共布设 8 个湿度传感器。

b）普通场景断面加密布设案例



附图 A.3 普通场景正常布设案例平面布设图



附图 A.4 普通场景正常布设案例立面布设图

压力传感器的布置方案为：在路基顶，在轮迹带位置处，各层底纵向间隔 1m 布置 2 个压力传感器，用于路面各层层底压力测量，每个断面共布设 4 个压力传感器。

水平应变传感器的布置方案为：在下面层底，布置 3 个纵向水平应变传感器和 3 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 2 排，依次为纵向、横向；每排布置 3 个：传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m；形成水平向应变测试矩阵，用于路面纵向、横向应变测量。在柔性基层底，在下面层底，布置 3 个纵向水平应变传感器和 3 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 2 排，依次为纵向、横向；每排布置 3 个，传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m；用于路面纵向应变测量和行车荷载横向偏移判定。在半刚性底基层底，布置 3 个纵向水平应变传感器和 3 个横向水平应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置。布置 2 排，依次为纵向、横向；每排布置 3 个，传感器横向间隔 0.4m、纵向间隔 0.5m。每个断面共布设 18 个横向应变传感器和 18 个纵向应变传感器。

竖向应变传感器的布置方案为:在下面层层底,布置 3 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 1 排，每排布置 3 个，传感器横向中心间隔 0.4m，纵向间隔 0.5m。在柔性基层底，布置 3 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 1 排，传感器横向中心间隔 0.4m。在路基顶，布置 3 个竖向应变传感器。传感器在轮迹带位置左右对称布置，布置 1 排，每排布置 3 个，传感器横向中心间隔 0.4m，纵向间隔 0.5m。每个断面共布设 18 个竖向应变传感器。

温度传感器的布置方案为:下面层底、柔性基层底、半刚性底基层底、路基顶纵向间隔 1m 布置 1 个温度传感器，布置于距离行车道外边缘 0.3m 的硬路肩位置处。每个断面共布设 4 个温度传感器。

湿度传感器的布置方案为: 下面层底、柔性基层底、半刚性底基层底、路基顶纵向间隔 1m 布置 1 个温度传感器，布置于距离行车道外边缘 0.3m 的硬路肩位置处。每个断面共布设 4 个湿度传感器。

c）分布式光纤光栅布设案例

分布式光纤光栅的布置方案为：在下面层底，在轮迹带位置处，分别布设光栅阵列振动耐高温光缆与光栅阵列温度传感光缆各一条，用于沥青面层层底振动与温度测量。

监测路段内除一般路基路面段包含多座桥梁。由于路桥过渡段及桥梁伸缩缝的存在，光缆不能全路段通长布设。传感光缆在道路段和桥梁段分别施工埋设。道路段光缆在路桥过渡段前 1 米位置将光缆引至路侧，桥梁段光缆按联埋设，埋设于桥梁调平层钢筋网片下方，桥梁段光缆在伸缩缝前 1 米位置引出至路侧。引至路侧的传感光缆预留足够余长用于光缆熔接组网。

引至路侧的道路段和桥梁段传感光缆直接串接熔接。光缆首尾熔接完成后形成完整传感链路，传感链路通过主通信光缆将信号传输至监控中心机房连接解调仪表。解调仪表及服务器等设备布置在监控中心机房。

振动光缆选用耐高温高压振动传感光缆随道路下面层施工直接埋设于下面层底部。温度传感光缆需在柔性基层顶部开浅槽（5cmx5cm）布设并采用相同材料回填。

A.4.4　感知单元防护方案

a）采用聚氨酯高模量功能层、GFRP 基板封装、MEMS 柔性封装等措施，提高感知单元与道路本体的协调变形能力。

b）信号引线应穿耐高温、抗压金属或波纹管套管，统一引至路侧防水接线箱或数据采集柜。

c）施工过程中采用混合料预掩埋法、刚性护罩埋设法、预制块埋设法同步施工方案，并在路面压实阶段采用错轮碾压，避免直接强振，降低施工过程中对传感器的损伤。

A.5 系统平台

A.5.1 平台架构

系统平台应采用“端—边—云”协同架构，由内嵌感知单元、数据采集设备、边缘计算服务器、通信网络、云控平台及 R2X 管控服务系统组成，并具备与既有高速公路监控系统、通信系统、收费系统和供电系统的对接能力。

A.5.2 平台功能设计

a）数据采集：支持多种类型内嵌感知设备的数据接入；

b）数据处理：支持多源感知数据的时空对齐、特征提取和融合处理；

c）数据存储：具备感知数据的存储、管理和备份能力；

d）数据展示：具备路网态势图、结构健康监测面板等可视化展示能力；

e）预警功能：具备基于监测数据的自动预警和分级报警功能；

f）服务接口：支持数据标准化封装和服务化接口，向第三方应用提供标准化数据服务。

A.5.3 管控服务

系统平台应面向车辆端、司乘端和管理端，支撑设施运行状态在线更新、结构性能演化与预测、极端环境设施服役状态更新、突发事件风险预警与安全管控、基于设施利用率的出行诱导等应用。

A.6 附属设施

A.6.1 供电设施

供电设施方案采用就近引电和远端增压改造供电两种方式。

a）就近引电

本模式适用于路侧现有电力设施（如交通监控设备、龙门架照明供电线路）有足够冗余功率，且内嵌感知设备总功耗较低的场景。

通过现场勘测与负荷核算，精确测量引电点的空余功率。详细统计所有内嵌感知单元、数据采集仪等设备的额定功率和峰值功率，计算总功耗。设备总功耗必须小于引电点空余功率的 70%，以满足安全余量和冲击电流要求。从引电点敷设电力电缆至设备安装位置（路侧机箱或手井内）。安装本地配电单元（PDU），完成接线，并做好防水密封处理。

2）远端增压改造供电

本模式适用于就近引电点功率无法满足设备运行要求，或计划部署高功耗设备的场景。

通过现场勘测与负荷核算，精确计算所有设备的总功耗、峰值电流和供电距离。根据总电流和传输距离，计算线径规格，确保在升压后，电压在局端经变换后仍稳定在设备允许范围内。在远端供电点安装合适功率的升压稳压电源发生器。沿管道或线槽敷设长途电力电缆。在路侧设备箱内安装局端隔离变换器（降压配电柜）。

A.6.2　通信传输设施

通信传输方案采用有线光纤为主、无线通信为辅的方式。

a）有限光纤直传数据中心模式

由内嵌感知单元、路侧数据采集仪、光纤传输网络和数据中心/云平台组成。感知单元采集数据后经数据采集仪初步处理，通过光纤传输网络上传至数据中心/云平台，完成存储、分析与应用。

b）边缘计算+协同分发模式

由内嵌感知单元、路侧数据采集仪、边缘计算服务器、工业交换机、5G CPE、路边单元（RSU）、车载终端（OBU）及光纤传输网络组成。感知单元数据经数据采集仪初步处理后送入边缘计算服务器进行融合分析与决策，生成结构化结果；结

果可通过 RSU 直发 OBU 实现低时延车路通信，也可经光纤回传数据中心/云平台，或通过 5G CPE 无线上传作为备份补充。

本标准用词用语说明

1 本标准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做的用词，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，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、行业和中国工程建设标准化协会标准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“应按第×.×.×条的有关规定执行”。