

# 智能铺面的内涵与架构

赵鸿铎<sup>1,2</sup>, 朱兴一<sup>1,2</sup>, 涂辉招<sup>1,2</sup>, 杨轸<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 对智能铺面的内涵与架构进行诠释与定义. 明确未来交通的发展愿景为“零伤害、零延误、零维护、零排放、零失效”. 为适应该愿景, 借鉴智能生物体的基本要素, 将智能铺面定义为由先进的结构材料、感知网络、数据中心、通信网络和能源系统组成, 具有主动感知、自动辨析、自主适应、动态交互、持续供能等智能能力的铺面设施. 在此基础上, 从基本性能、智能能力、网联服务、可持续发展特性等 4 个方面明确了智能铺面的功能特征, 并提出了智能能力的 5 个等级与要求. 从物理要素、信息流向、能量路径、空间位置、P2X (Pavement to X) 服务等 5 个方面构建了智能铺面的架构. 成果对指导智能铺面技术的研究与应用具有参考意义.

**关键词:** 智能铺面; 内涵; 架构

**中图分类号:** U411

**文献标志码:** A

## Concept and Framework of Smart Pavement

ZHAO Hongduo<sup>1,2</sup>, ZHU Xingyi<sup>1,2</sup>, TU Huizhao<sup>1,2</sup>, YANG Zhen<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The concept and framework of smart pavement are interpreted and proposed in this paper. The vision of transportation system is clarified as “zero casualties, zero delay, zero maintenance, zero emission and zero fail”. Towards the vision, the definition of smart pavement is given based on the elements of smart organism. Smart pavement is defined as an infrastructure that composed of advanced structure and material, monitoring network, data center, communication network and energy supply system, which has the ability of self-monitoring, automatic analyzing, self-adaptation, information interacting and continue energy supplying. Based on the definition, the function

characteristics including basic performance, smart ability, information service, sustainability are proposed. Then a 5 levels system is developed for the smart ability of smart pavement. This paper constructs the framework of Smart pavement from five aspects: physical elements, information direction, energy way, spatial location and P2X (pavement to X) service. The concept and framework can be used as the guide for smart pavement research and application.

**Key words:** smart pavement; concept; framework

未来交通运输的发展愿景是“零伤害、零延误、零维护、零排放、零失效”的“五零”理想系统. 在发展进程中, 以智能网联、智慧共享、耐久安全和绿色生态为特征的新一代交通运输系统将成为达成“五零”目标的重要阶段, 其中智能化已成为必然技术趋势. 交通运输系统的智能化需要协同考虑“人-车(交通工具)-路(基础设施)-环境”的各个组成部分. 因此, 除智能网联车、智能交通之外, 智能交通基础设施以及“人-车-路-环境”之间的智能网联交互, 将成为交通运输系统智能化进程中新的增长点和支撑点. 铺面(Pavement)是交通运输系统的重要基础设施, 包括了公路和城市道路路面、机场场道道面、港口码头铺装、以及非机动车和人行路面等. 智能铺面技术的研发与应用, 将成为实现交通基础设施智能化的重点.

国内外对智能铺面的研究源于自动公路、智能监测和功能性铺面. 美国从 1992 年启动研发自动公路系统(automated highway system, AHS), 以适应未来面向全自动驾驶的需求<sup>[1]</sup>, 并提出了独立自动驾驶、网联自动驾驶和设施支持自动驾驶这 3 种模式<sup>[2]</sup>. 在设施支持模式中提出建设专用智能车道为

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1433201, U1633116)

第一作者: 赵鸿铎(1976—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能铺面结构与材料、机场道面结构设计与材料、机场道面养护与管理. E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

通讯作者: 朱兴一(1983—), 女, 工学博士, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为道路材料多尺度性能, 智能铺面结构与材料. E-mail: zhuxingyi66@aliyun.com

车辆运行提供服务<sup>[2]</sup>,但其智能化主要依靠路侧的感知设备,或埋入路面的断面式传感器来实现.在现有的智慧交通和智能网联车系统中,也基本延续了这一做法<sup>[3-4]</sup>.此外,为了延长铺面寿命,保障铺面性能,采用各类传感器的铺面智能监测系统在国内外得到了研究与实践<sup>[5-6]</sup>.同时,国内外研发了具有自愈合<sup>[7]</sup>、能量收集<sup>[8]</sup>、自动融冰雪<sup>[9]</sup>等能力的功能性铺面技术.这些技术从不同的层面体现了智能铺面的特征,但未对智能铺面技术体系进行系统的阐述.2009年欧洲提出了永久开放道路概念(称之为第五代道路),认为新一代道路应该具有自适应、自动和环境影响复原三大特征,较系统地描述了未来道路的特征<sup>[10]</sup>.同济大学在此基础上,进一步提出了智能道路的概念与框架<sup>[11]</sup>,但也未对智能铺面进行明确的描述.

智能网联汽车、铺面智能监测系统和功能性铺面的不断发展,使铺面朝着更加智能、集成的趋势发展.智能铺面将在智能化交通运输系统中扮演更加重要的角色.然而,国内外对智能铺面尚未进行明确的界定.因此,本文以路面和道面这两类铺面为主,从智能铺面的内涵和架构等出发,阐述智能铺面的基本概念和功能,为国内外智能铺面技术的研发与应用提供参考.

## 1 智能铺面的内涵

### 1.1 智能铺面的基本要素

智能可理解为物体所具备的智慧程度的能力.为了合理定义智能铺面的概念,拟借鉴智慧生物体的基本特征和要素.在地球上,高等智慧生物体都不可或缺地包括了感官、神经、大脑、肌体组织、心脏及循环系统和交互语言等基本要素.感官和神经系统用于感知生物体内部状态和外部环境;大脑用于处理、记忆神经网络传递过来的各类信息,是神经系统的中枢;肌体是生物体形体的组成部分,具有生长、修复、调节等自主适应能力;语言,包括各类交互方式,是生物体之间进行交流、沟通、互动的必要能力;心脏,包括循环系统,为生物体提供持续能量,从而保障生物体智能能力的发挥.

与智慧生物体的基本要素对应,铺面要具备智能能力,形成智能行为,同样需要具备这 5 大基本要素,在智能铺面中分别定义为感知网络、数据中心、结构材料、通信网络和能源系统.智能铺面的 5 大基本要素及提供的基本能力,如表 1 所示.

表 1 智能铺面的基本要素

Tab.1 Basic elements of smart pavement		
智能铺面基本要素	提供的能力	与智慧生物的对应要素
结构材料	自主适应能力	肌体
感知网络	主动感知能力	神经
数据中心	自动辨析能力	大脑
通信网络	动态交互能力	语言
能源系统	持续供能能力	心脏

### 1.2 智能铺面的定义

在智能铺面 5 大基本要素及其提供的基本能力的基础上,可以将智能铺面定义为:由先进的结构材料、感知网络、数据中心、通信网络和能源系统组成,具有主动感知、自动辨析、自主适应、动态交互、持续供能等智能能力的铺面设施.与传统铺面相比,智能铺面应能有效延长铺面寿命、提高铺面性能、降低安全风险、提升服务品质.

## 2 智能铺面的特征

为了实现智能能力,发挥应有作用,智能铺面应该具备 4 个层次的核心特征,包括:基本性能、智能能力、网联服务和可持续发展.基本性能是铺面满足荷载和环境需求的基本特征;智能能力是智能铺面的核心特征;网联服务是智能铺面在形成智能能力的过程中,成为信息源所带来的延伸特征;此外,在新形势下智能铺面必须符合未来可持续发展的要求.对这 4 个核心特征的诠释如下.

#### (1) 基本性能

智能铺面的基本性能要求与传统铺面类似,包括功能(全天候服务、安全、舒适)、结构(足够的承载力和耐久性)、经济(全寿命成本低)、环境(低噪音、环保和景观等)等 4 个方面<sup>[12]</sup>,以满足作用在铺面上的车辆、飞机、非机动车、行人、货物等的使用需求.

#### (2) 智能能力

与定义相对应,智能铺面所具备的智能能力包括主动感知、自动辨析、自主适应、动态交互、持续供能等 5 大能力,具体内容如表 2 所示.铺面依靠智能材料或传感器来主动感知状态、性能、环境和行为;在感知的基础上,铺面可对信息进行自动的校验、集成、管理、分析、诊断和评估等处理;依托感知的信息和辨析的结果,铺面能够适应温度、湿度、交通等的变化,主动进行调控,并可对损伤进行自我修复;同时,铺面能在感知和辨析的基础上,与外部进行动态的交互;为了实现这些能力,离不开持续不间断的能量供应.

表 2 智能铺面的智能能力

Tab.2 Smart ability of smart pavement

智能能力分类	具体的技术内涵	
主动感知	铺面状态感知	温度、湿度、电阻、冰冻、强度、模量
	铺面性能感知	平整度、摩擦系数、轮辙、损坏状况
	交通流感知	车/机型、速度、轴型、重量、行人、自行车
	外部环境感知	气温、雨、雾、冰、风、雪
	铺面行为感知	应力、应变、位移、冲击、振动
自动辨析	信息集成管理	信号处理、信息集成、数据管理
	信息分析处理	信息过滤、大数据分析、信息建模
	性状评估诊断	性能评估、状态评估、损伤诊断、运行安全评估
自主适应	状态自调控	温度调控、湿度调控
	损伤自修复	裂纹修复、老化恢复
	自动融冰雪	融冰、化雪、除霜
	自清洁	铺面清洁、尾气降解、粉尘抑制
	交通自管控	限速控制、信号自适应、可变车道调整
动态交互	与车辆交互	信息推送、状态预警、位置导引、事件决策
	与飞机交互	信息推送、状态预警、事件决策
	与用户交互	信息推送、状态预警、事件决策
	与管理者交互	信息推送、状态预警、性能预估、事件决策
持续供能	公用电网供电	供能方法、供能线路
	绿色能量收集	路域太阳能、热能、风能、机械能、地热能的收集
	绿色能量利用	传感器、交互终端、传输网络、车辆、功能设施等的供电

在智能铺面中,根据不同的目的和需求,所具备的智能能力并不相同.而且,并无必要对所有的智能铺面都按照同样的智能等级要求进行建设.为了区别不同的智能铺面能力,按照智能能力的高低,将铺面的智能能力分为 I~V 五个不同的层级.各个等级所应具备的基本能力列于表 3.

表 3 铺面智能能力分级

Tab.3 Smart ability levels of smart pavement

智能分级	主动感知	自动辨析	自主适应	动态交互			能量自供
				信息推送	主动预警	自主决策	
I	✓	✓					
II	✓	✓	✓				
III	✓	✓	✓	✓			✓
IV	✓	✓	✓	✓	✓		✓
V	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(3) 网联服务

为了实现智能铺面的智能能力,铺面内部往往装备有可以感知内部状态、外部环境、人车信息、行为信息等的传感器件.这些传感器件的使用,将使铺面成为综合信息源.通过这些信息将可实现对智能车辆、车路协同、智慧城市等的全面支持.同时,面向

铺面的所有者、管养者、使用者等,可形成以铺面为信息源的“铺面对多目标”(P2X, pavement to everything)网联服务体系,并可构筑 P2X 网联服务动态风险评估与预警系统,其中“X”包括了管养部门、车辆、驾驶员、行人、自行车、移动终端、附属设施等.针对典型路面和机场道面,不同铺面的 P2X 基本服务功能列于表 4.

表 4 铺面的 P2X 基本功能

Tab.4 P2X functions of smart pavement

铺面类型	车辆	飞机	非机动车	行人	驾乘人员	管养部门
城市道路、公路路面	互联导引 预警 供能		预警 供能 导引	网络 预警 导引	网络 预警 导引	监测、诊断、 预警
机场跑道道面	警告	导引 预警				监测、诊断、 预警
机场机坪道面	导引	导引				监测、诊断、 预警
非机动车路面	预警		互联 预警 供能	网络 预警		监测、诊断、 预警
人行铺面				网络 预警		监测、诊断、 预警
停车场铺面	导引 供能			预警		监测、诊断、 预警

(4) 可持续发展特性

在新形势下铺面的建设与管养需要符合社会可持续发展的要求.因而,智能铺面除了满足基本性能要求、形成智能能力、提供网联服务外,还应该更耐久、更安全、更节能、更低碳、更生态,并对荷载和环境的外部破坏和干扰具有很强的抵抗能力,在受到破坏后更加容易恢复,以适应可持续发展对未来交通运输系统提出的新要求.

### 3 智能铺面的架构

智能铺面的架构可以分为物理要素、信息流向、能量路径、空间位置、P2X 服务体系等 5 个层面进行设计和构建.由于不同的铺面类型,针对的服务对象不同,其架构也会存在一定的差异性.

(1) 物理要素

智能铺面由结构材料、感知网络、数据中心、通信网络、能源系统等 5 大基本要素组成,因此在智能铺面中必须包括铺面结构与材料本身、铺面内部性能状态和外部环境的感知系统、处理各类感知信息的中央信息集成处理系统(云系统)、为智能铺面提供持续能源的供电系统、保障智能铺面与外部交互

的通讯系统、为铺面实现特定智能能力的特殊附属设施及系统等物理要素(图 1)。

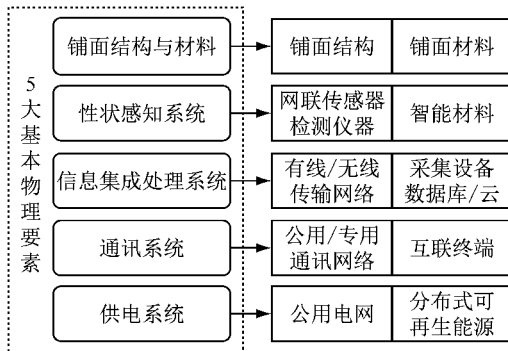


图 1 智能铺面的物理要素  
Fig.1 Physical elements of smart pavement

(2) 信息流向

信息在铺面中的获取、流动和应用是智能铺面的重要特征。各类铺面信息被主动感知、传输、集成、分析和发布,从铺面内部流向管理者、车辆、公众等各类用户。智能铺面的主要信息流向如图 2 所示。

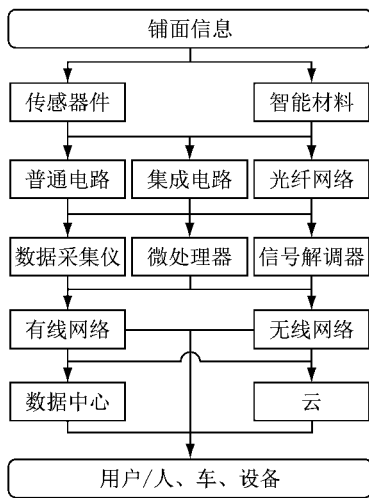


图 2 智能铺面的信息流向  
Fig.2 Information direction of smart pavement

(3) 能量路径

智能铺面在运行过程中需要大量能量以保障智能行为。为了使智能铺面符合可持续发展的要求,其所需要的能量应该是绿色能量,即从路域范围或临近区域采集的太阳能、热能、风能、机械能等。能量通过铺设在铺面表面、埋在铺面内部、架设于道路两侧等的能量收集装置获得,在铺面设施的旁侧设置能量存储系统,再通过各类线路给各类传感器件、采集仪、路侧设施、终端和车辆供电(图 3)。

(4) 空间分布

为了使铺面具有智能能力,需要各类传感器件

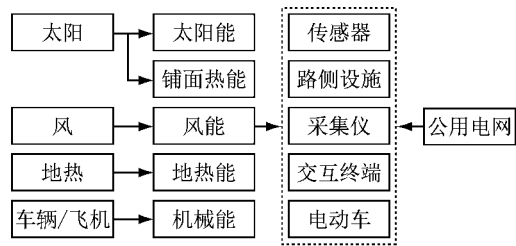


图 3 智能铺面的能量路径  
Fig.3 Energy way of smart pavement

和附属设施,并处于不同的空间(表 5)。各类材料铺筑于地表形成铺面结构;各类传感、供能等器件铺设于铺面的内部或表面;信息采集和传输设施、能源装置、气象站、充电桩等各类附属设施设置在道路的内部、两侧或上方;用于存储、管理、处理和发布信息的中央数据中心(云平台),位于靠近或远离铺面设施的专门部门;为实现智能铺面中的定位、无线通信等功能还需借助远端的基站或空中的卫星。

表 5 不同空间位置的智能铺面要素

空间位置	智能要素
铺面内部	自适应结构材料、内部状态传感器件、信息和能量传输网络、无线充电系统、电子标签、能量收集系统等
铺面表面	智能标线、灯光系统、尾气降解、粉尘抑制、能量收集系统等
铺面旁侧或上方	智能标志、标牌、信息板、信息采集仪、通信设施、非接触传感器件、电子标签读写器、能量收集系统等
远端或云端	数据中心、云数据库、云计算、基站等
空中	定位和通信无人机、飞艇、卫星等

(5) 智能铺面的 P2X 服务架构

在智能铺面中,为了给交通工具、人员、管理部门等提供各类服务,需构建优良的 P2X 服务架构,示意如图 4 所示。

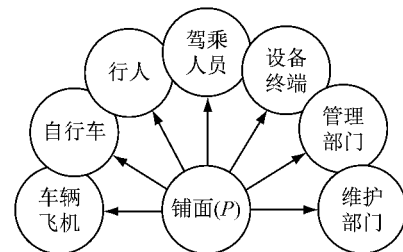


图 4 智能铺面的 P2X 架构  
Fig.4 P2X framework of smart pavement

针对不同的铺面类型,智能铺面的架构会存在一定的差别。智能铺面中的传感器件选型、组网方式、所需的信息种类、P2X 内涵、各类设施的布设位置等,需要针对具体的铺面类型和工程条件等进行

有针对性的设计。

## 4 智能铺面的建造途径

智能铺面内往往埋设有大量的传感器,这些传感器一般都对振动、压力、变形等敏感。因此,传统的粗旷式铺面施工工艺,会对传感器带来极大的威胁,轻则影响传感器的采集精度,重则会使传感器失效。为了给智能铺面提供一个可靠的实施途径,建议采用装配化、模块化、工业化的建造手段来替代传统的铺面施工工艺。如装配式水泥混凝土铺面、装配式复合铺面、装配式沥青混合料铺面、沥青混合料卷材等。建筑信息模型(BIM)、3D打印等先进技术的研发与应用,将为智能铺面的工业化途径提供更加有力的支撑。

为了使智能铺面有更大的推广应用空间,需要控制智能铺面的建设成本,并尽可能地延长铺面的使用寿命。因此,在铺面的智能感知技术上,宜采用分布式光纤等低成本感知器件,对不同的信息尽可能采用同样的技术进行感知,以减少对解调设备的投入。以装配式水泥混凝土铺面为例,若板块为长5 m、宽3.75 m、厚0.25 cm,采用单层的分布式光纤作为感知铺面状态和交通流的手段,其增加的成本约为普通装配式水泥混凝土铺面的10%(不包括解调仪)。随着智能化技术的发展和大规模应用,智能铺面的成本还将进一步降低。

## 5 结论

本文诠释和定义了智能铺面的内涵与架构,主要结论如下:

(1) 给出了未来交通运输系统的愿景,在此基础上明确了智能铺面的基本要素为传感网络、数据中心、结构材料、通信网络、能源系统,并进一步给出了智能铺面的内涵与定义。

(2) 从4个方面出发明确了智能铺面的特征,提出了5层级智能铺面智能能力等级,以及智能铺面的P2X信息服务的概念。

(3) 分别从物理要素、信息流向、能量路径、空间分布和P2X服务5个方面构建了智能铺面的基本架构。

(4) 智能铺面的建设不仅使铺面本身具有智能能力,同时使铺面成为信息源,从而为智能网联车和智慧交通提供新模式服务,这将对未来交通运输系统的智能化带来技术变革和新支撑点。

### 参考文献:

- [1] NITA C. Smart road, smart car: the automated highway system [J]. *Public Roads*, 1996, 60(2): 46.
- [2] Committee for a Review of the National Automated Highway System Consortium Research Program. Review of the national automated highway system research program [R]. Washington D C: National Academy Press, 1998.
- [3] 杨佩昆. 智能交通[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002. YANG Peikun. Intelligent transportation [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [4] Bernie A, Santanu R, Joshua S, *et al.* Autonomous and connected vehicles—preparing for the future of surface transportation [R]. Dubai: HDR Inc, 2015.
- [5] NIZAR L, KARIM C, SHANTANUS C, *et al.* Smart pavement monitoring system (FHWA-HRT-12-072) [R]. McLean: Turner-Fairbank Highway Research Center, 2013.
- [6] ZHAO Hongduo, WU Can, WANG Xiaohong *et al.* Pavement condition monitoring system at Shanghai pudong international airport [C]// *Geotechnical Special Publication*. Reston: ASCE, 2014: 283-295.
- [7] SUN Daquan, HU Jinlong, ZHU Xingyi. Size optimization and self-healing evaluation of microcapsules in asphalt binder [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2015, 293(12): 3505.
- [8] ZHAO Hongduo, YU Jian, LING Jianming. Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(10): 909.
- [9] YASUHIRO H, MAKOTO N, HIDEKI K. Field measurements and analyses for a hybrid system for snow storage/melting and air conditioning by using renewable energy [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(2): 117.
- [10] LAMB M J, COLLIS R, DEIX S, *et al.* The forever open road—defining the next generation road [C]// *24th World Road Congress Proceedings—Roads for a Better Life: Mobility, Sustainability and Development*. Mexico City: World Road Association(PIARC), 2011:1-16.
- [11] ZHAO Hongduo, WU Difei. Definition, Function, and framework construction of a smart road [C]// *New Frontiers in Road and Airport Engineering*. Reston: ASCE, 2015: 204-218.
- [12] 孙立军. 铺面工程学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2012. SUN Lijun. *Pavement engineering* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.