

# 装配式智能路面技术的研究与探索

龚 祚

上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司 上海 200092

**【摘要】**：介绍了装配式智能路面技术的研究与探索的背景和相关技术要点，从功能需求角度对装配式智能路面技术提出了相关建议，有关经验可供相关专业人员参考。

**【关键词】**：新技术；装配式；智能路面

## 引言

随着高端传感器、高端芯片、5G通信等新技术发展迅猛，我国智慧交通产业进入快车道，技术创新日益活跃，路面是道路设施中体量最大的基础设施之一，与智能车辆直接交互作用，是实现道路基础设施智慧化的重点。如果在路面能植入智能装置，实现车辆位置、运行轨迹、速度等信息服务及荷载承重装置，掌握车辆信息，同时实时监测路面破损状况，可提升安全生产监测预警能力，推动基于大数据的综合交通运输安全生产全流程监管，实现对重点营运车辆、超限车辆等重点领域安全生产风险的监测预警和重大风险的防范化解，利用大数据深化“平安交通”建设，也顺应构建综合交通大数据和加快建设交通强国的需求。充分利用大数据开展综合交通运输规划和实施情况评估，也将持续提升规划决策和评估工作的科学性。

相对于传统沥青路面，水泥混凝土路面与相关传感器的结合性更好，更适应于重载交通，且装配式路面可实现可拆卸更换，更有利于后期公路运营维护。分布式光线具有多功能、长距离监测特点，可实现交通与健康状态同步感知，近年来通过分布式振动传感光纤感知结构振动信息，逐渐在长距离安全监测如运输管道监控、周界防区监控等方面得到应用。同济大学借助装配式混凝土路面施工技术，初步验证了将分布式振动传感光纤埋设于路面板中的可行性。分布式光线与水泥混凝土路面的结合性非常好，造价便宜，可以对路面的应力、应变、温度、湿度及车辆特征等进行实时监测。装配式路面也可作为传感设备的布设、管线的埋设、排水设施的安装提供便捷，促进路面工程的标准化、智能化、可持续发展。

## 1 研究背景

为统筹推进交通强国建设，中共中央、国务院近于2019年印发了《交通强国建设纲要》。随着新兴信息科学技术的兴起，尤其是人工智能、大数据及5G通信等技术的突破，智能化已成为社会各行业发展的必然趋势。2019年7月，交

通运输部印发的《数字交通发展规划纲要》中指出，到2025年，交通运输基础设施和运载装备全要素、全周期的数字化升级迈出新步伐，数字化采集体系和网络化传输体系基本形成。2021年8月，交通运输部和科学技术部印发了《关于科技创新驱动加快建设交通强国的意见》，推动基础设施数字化、网联化，实现重点领域交通感知网络全覆盖。推动交通基础设施装配化、工业化、标准化和数字化发展。路面是道路设施中体量最大的基础设施之一，与智能车辆直接交互作用。因此对智能路面技术的研究及应用，将成为实现道路基础设施智慧化的重点。

智能路面是与先进网络和通信技术集成的道路基础设施，即由先进的结构材料、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道路设施。为了适应智能路面的上述特征，需要突破传统粗放式、建成型施工工艺的限制，寻求更加精细、可控、可持续、智能化的建造方式。作为一种新型路面形式，装配式路面可以作为实现路面智能化的载体，其基于标准化工厂预制及标准化施工的特点，可以有效地减少施工污染，保证使用寿命，最大程度保障内嵌传感器性能，节约施工时间，从而实现快速、低污染、高质量施工，并为后期维持持续稳定的路面智能能力提供保障

## 2 国内外研究现状与趋势

在智能化领域，20世纪末开始，国内外开始对路面的附加智能功能展开了研究。这些功能主动降噪、导电、自融雪、自动检测等。进入21世纪以来，在导电铺面和自融雪铺面方面得到了长足发展，其他如自清洁铺面、尾气降解铺面、荧光铺面、抑尘铺面、自愈合路面等新型铺面不断出现。通过对国内外现有智能路面研究成果调研发现，智能路面虽提出了定义及框架，但目前的研究大都基于道路设施的某一附加功能进行，尚未全面的对智能路面进行系统地阐述、研究和应用。另外，对装配式路面的研究尚缺乏高效率、高质量、精细化的建造体系，并且现有研究中装配化在路面智能化的

进程中的应用相对较少。因此，迫切需要对装配式智能路面进行系统而全面的研究。具体可以通过两方面来进行。一是装配式智能路面的智能建造。装配式智能路面的优点基于其高质量、高标准的建造方式，因此，有必要研发一套服务于装配式智能路面设计、施工、验收等阶段的智能建造体系，应包含数字化、信息化的设计方法、高质量施工工艺及装备、高精度质量控制体系及验收标准等。二是综合的智能驱动技术。智能路面系统属于智慧交通系统的子系统，应该服务于全局交通系统。智能感知技术是智能路面的关键技术，是道路基础设施智能化升级的体现。

### 3 装配式智能路面的结构与构造

在对国内外研究资料的调研结果基础上，我们对装配式路面的结构组合进行设计，示意如图1所示，包括：装配式路面板、板底功能层、原有基层以及板间接缝连接结构。装配式路面板所采用的水泥混凝土材料为普通水泥混凝土材料，但考虑到装配式路面板需要进行起吊、运输等作业，因此混凝土材料的强度不应过低，水泥混凝土强度等级应在C40以上。在处置基层的过程中，由于对原基层的变动不大，基层材料的要求与现浇水泥混凝土路面对基层材料的要求相同。为了填充装配式路面板与基层的孔隙、给装配式路面板提供均匀稳定的支撑、辅助荷载传递，必要时需要在基层设板底功能层，且板底功能层材料具有一定的强度以及施工和易性。



图1 装配式路面结构组合示意图

根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40-2011)，板的平面尺寸应根据当地气温、板厚、所采用的集料和施工工艺确定。在设计时还需要考虑装配式路面板的平面尺寸对运输的便利性影响。现代混凝土构件运输车辆，可运输整体长度达25m、宽度达5m的构件。

近年来，通过分布式振动传感光纤感知结构振动信息，逐渐在长距离安全监测如运输管道监控、周界防区监控等方面得到应用。可以借助装配式混凝土路面施工技术，将分布式振动传感光纤埋设于路面板中，可确定路面状态信息类型包括内部应变、动态位移、温度、湿度、土压力、轮迹等，但其阵列布设方法与系统组网方式还需深入研究。

### 4 装配式智能路面的接缝构造与性能

传统水泥混凝土路面接缝形式主要为平缝和企口缝两种，装配式路面宜采用平缝的接缝形式。主要原因有两点：一是现场施工中，装配式路面板放置在基层之后，板的水平位置难以移动；二是周边板由现浇水泥混凝土切割而来，结构形式上为平缝的构造。装配式路面难以实现企口缝的紧密接触，而企口缝不闭合会改变企口的工作状态，降低接缝的传荷能力，荷载作用时槽口上侧内角点出现应力集中现象，因此企口缝不适应装配式路面。

装配式路面板由于设置了规则平缝，无法通过水泥混凝土的嵌挤作用达到类似假缝的传力效果，需要在装配板和周边板以及装配板之间设置传力杆来传递荷载。根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(MHT 5004-2010)，厚度在210—250mm范围内的路面板，应选用直径为25mm、最小长度为450mm、最大间距为300mm的传力杆。

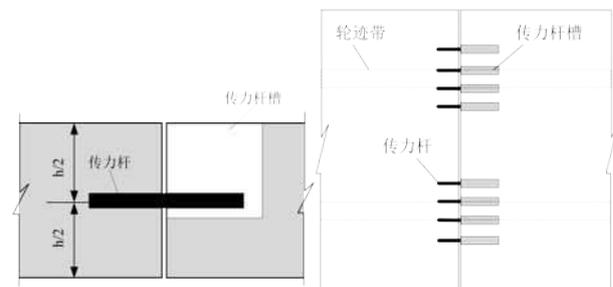


图2 上开口式传力杆布置图

图2为上开传力杆设置方式的侧面图和俯视图。上开口是最简单的一种设置传力杆的形式。在装配式路面板接缝的两端，一端浇筑混凝土板前设置好传力杆，另一端在浇筑混凝土前预留槽口。周边旧板上对应传力杆的位置，切割后开槽，槽口宽度和深度略大于传力杆的设计值。预埋的传力杆和槽口对应拼接起来，向槽口内灌入流动性水泥混凝土，即完成传力杆安装。

这种传力杆设置形式因槽口较宽，影响车辆行驶，在传力杆槽内灌入混凝土前，不能开放交通。据资料显示，传力杆槽内混凝土受到传力杆力的作用和行车荷载的影响双重影响下，较易出现破坏。但是由于施工方式简单，可应用在局部修复和整板修复中。

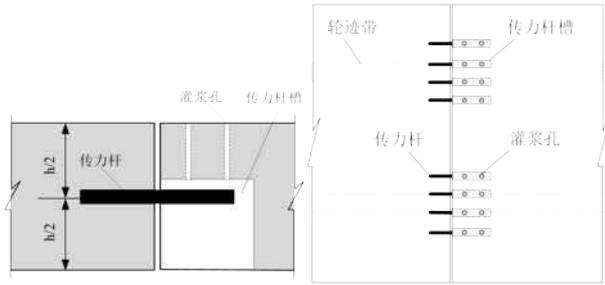


图3 下开口式传力杆布置图

图3为下开口传力杆设置方式的侧面图和俯视图。该连接方式为将传力杆槽口设置在装配式路面板的下侧，槽口向下，在槽口上设置一至两个灌浆孔；在接缝的另一端，板中位置预埋传力杆，传力杆和槽口相互拼接。与周边板拼接的装配式路面板，在相应位置预留向下槽口；周边板在侧面板中对应位置钻孔，孔内灌入快凝水泥混凝土，埋置传力杆。传力杆就位后，从灌浆孔内注入流动性较好的快凝水泥混凝土，即完成传力杆安装作业。

下开口传力杆设置方式，改善了传力杆设置形式。由于槽口向下，即使传力杆槽内未注入水泥混凝土，仍可暂时开放交通，便于分阶段施工；避免了传力杆槽内的水泥混凝土承受车辆荷载的作用。

## 5 基于三维扫描与虚拟装配的路面三维建模和 BIM 技术

装配式智能路面是一个包含了各类构造（如传力构造、起吊调平构造）及内置智能传感器的综合系统，因此在设计过程中，应充分考虑各构件间及路面板块与外部环境间的三维位置关系，提出合适的结构组合和构造形式。基于 BIM 的设计方法可以与上述需求结合起来，实现路面设计的数字化和信息化，从而提升预制板块的质量。此外，基于 BIM 平台进行设计可为装配式智能路面的全寿命周期一体化管理提供基础条件。

用于装配式路面时，预制的装配板是对象，对象与其他界面的接触状态是我们关注的重点，当其板底接触状态劣化后，将会影响该处的振动特性，故可通过监测装配板不同位置振动特性的变化以监测板底接触状态。根据预制装配式板块的设计精度要求是 2mm，因此常用的振动扫描精度不低于 2mm。采用超高精度测量，可以极其精确地绘制出目标物的形状。通过呈现“真实形状”，从而实现精确的尺寸测量和外观检测。在实体路面上进行人工的 3D 尺寸采集。根据输入 BIM 平台进行重构，进行重构前进行多帧点云精配准研究结果，可以将这些数据进行整合，基于 BIM 的设计方法可以与上述需求结合起来，实现路面设计的数字化和信息化，从

而提升预制板块的质量。

## 6 装配式路面施工工艺及质量控制技术

经充分调研与试验，总结出面向装配式路面成套的施工工艺。面向水泥混凝土路面新建的装配方式的具体流程为：路面原始资料调查及实地测量→新建工程整体设计→装配式路面板预制→板块放样→预制板起吊→预制板平面控制、高程控制→板底注浆→接缝处理→现场清理。

面向水泥混凝土路面的装配式修复技术思路与新建略有不同，具体流程包括：原有路面资料调查及旧路检测→修复工程整体设计→装配式路面板预制→旧板拆除→基层清理→预制板起吊→预制板平面控制、高程控制→板底注浆→接缝处理→现场清理。

起吊过程中使用吊环与预埋构件连接，每块板设置四个吊点，采用 M56 的吊环，设计荷载 10t。在板块的放置过程中要注意板块的方向，并使用拉链手板葫芦控制板块下落时的平面位置。注浆按照分仓式注浆，注浆前在板块表面覆盖一层塑料薄膜，防止注浆过程中浆液流出污染板块表面。使用连续式注浆机对注浆孔进行注浆，从标高高低处往标高高处注入，当释放孔冒浆时，应继续注浆 5s—15s 后停止注浆，并使用止浆塞封住注浆孔；注浆后应对注浆结果进行检验，使用直尺测量浆液深度，对未满足条件的板块进行补注；注浆完成后，及时对浆液搅拌机和注浆机进行清洗，防止浆液凝固堵塞机器。对于预制水泥混凝土板之间的接缝可按照传统水泥混凝土路面的接缝处理方法，使用填缝材料进行填充，常用的填缝材料有硅酮类填缝材料、聚氨酯类填缝材料等。

## 7 板底注浆材料研发

在装配式路面的安装过程中，由于预制水泥混凝土板板底的几何形状与基层顶面的几何形状存在差异，在完成预制水泥混凝土板的换装后，板与基层之间存在一定的空隙，需要在层间设置板底功能层以填充此空隙，从而为预制水泥混凝土板提供一个均匀而稳定的支撑。装配式路面板底功能层的设置方法有两种，一种是在置板前直接在基层表面进行摊铺找平，另一种是在置板调平后通过注浆的方式设置板底功能层。

通过对几种注浆材料的调研和比选，选择具有优良性能的 CA 砂浆作为板底注浆材料。由于现阶段常用的 CA 砂浆的材料性能不能完全满足板底注浆材料的性能要求，我们采用正交设计的方法，探究 CA 砂浆各组成原料的掺量对其性能的影响，从而确定 CA 砂浆的最佳配合比，制备出符合路面

装配式修复施工要求的注浆材料。该注浆材料具有流动性好、力学性能优良、凝结时间可控的特点。基于流体力学理论推导获得了水泥浆液扩散模型，据此提出适宜的板底间隙高度和分仓间距，明确了合理的注浆孔、释放孔和导流槽布置方式。

## 8 结语

路面是道路设施中体量最大的基础设施之一，与智能车辆直接交互作用，公路装配式智能路面技术的研究将会为路面智能化发展提供一个良好的样板，为促进道路交通更安

全、更高效、更舒适、更便捷提供可能。

现阶段，随着北斗卫星、3D打印、物联网等新兴技术的快速发展，可在部分货车流量较大的高速公路改扩建项目，打造一段具备一定主动感知、自动辨析、自主适应、动态交互及持续供能力的绿色智能路面试验段，为新一代道路运输系统提供安全、可靠的技术储备。由于对路面装配式施工技术的研究还处于起步阶段，且运用的工程项目较少，其路面结构的长期性能有待进一步观测，所用的施工工艺和施工器械需要进行优化和改进。

## 参考文献：

- [1] 吴荻非,赵鸿铎,凌建明,等.一种接触状态监测装置[P].2017-1-18.
- [2] 赵鸿铎,吴世涛,杨戈,等.一种装配式水泥铺面起吊调平装置[P].2016-3-16.
- [3] 许夏荧,何璐.水泥混凝土路面预制拼装路面板底后处理研究[J].公路交通科技:应用技术版,2014,(04):113-115.
- [4] 李娣.预制混凝土板体快速修复水泥路面结构设计研究[D].南京:东南大学,2014.
- [5] 蔡爵威,钟盛,赵基焕.崇明陈海公路庙港桥头引道装配式修复试验工程总结报告[R].上海:上海市路政局,同济大学,2017.
- [6] 赵基焕.装配式水泥混凝土铺面的三维信息获取与应用[D].上海:同济大学.2018.
- [7] 姬丽苗,张德海,管栎瑜,等.基于 BIM 技术的预制装配式混凝土结构设计方法初探[J].土木工程信息技术,2013,5(1):54-56.

作者简介：龚祚（1984-），男，安徽淮南人，大学本科毕业，工学学士，高级工程师。