

项目合同编号：24-50K

陕西省交通运输厅 2024 年度交通科研项目

合同书

项目名称：隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：李震

通讯邮编、地址：陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000-8212

起止年限： 年 月 至 2026 年 12 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：24-50K

陕西省交通运输厅 2024 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：李震

通讯邮编、地址：陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000-8212

起止年限： 年 月 至 2026 年 12 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 光纤与隧道结构本体的耦合作用机制及传感性能影响机理研究；

(2) 分布埋入式光纤传感器选型与机械化布设方法研究；

(3) 隧道健康与安全光纤传感网全域长效监测与评估技术；

(4) 基于光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台开发与应用。

2. 技术关键

(1) 光纤及其封装结构与隧道结构本体的耦合作用机制及光纤传感监测性能影响机理；

(2) 隧道结构光纤传感网成套泵送设备及机械化布设方法；

(3) 隧道结构健康与安全广域长效监测评估技术。

3. 依托工程（依托工作）

本课题依托工程为：德阳绕城南高速公路工程，：德阳绕城南高速公路位于四川省德阳市境内，路线全长约 60.982 公里，共设置 4 座隧道，其中特长隧道 1 座，长隧道 2 座，中隧道 1 座，桥隧比达到 66.07%，地质条件较为复杂，包括一座高瓦斯隧道。中交一公院为德阳绕城南高速公路工程施工图阶段设计单位，为课题研究提供了有利条件。

二、考核指标

1. 预期目标

围绕隧道智能运营领域，针对隧道长距离、全天候、智能化的安全监测需求，开展基于埋入分布式光纤传感器的结构变形场、温度场监测与评估技术应用研究。通过研究光纤及其封装结构与隧道结构本体的耦合作用下传感性能影响机理，为埋入式光纤应变与温度监测、封装方法的选择及胶结材料的选型提供理论依据，研发隧道结构光纤传感器泵送设备及成套机械化布设方法，提出光纤及胶结材料的选型依据，基于隧道安全性要求优选出适宜的光纤传感网搭建方法，形成完备的隧道健康与安全长效、广域监测与评估技术，依托实体工程项目，开展分布埋入式光纤传感网搭建实体工程验证，建立广域性、长持时、高耐久的隧道变形温差一体化监测评估平台。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

- （1）阐明光纤结构层在耦合作用下对应变和温度传递率的影响规律；
- （2）研发隧道结构光纤传感器机械化泵送与一体化安装设备；
- （3）提出基于泵送设备的隧道结构光纤传感机械化布设方法以及光纤传感网搭建方案；
- （4）建立隧道变形温差一体化监测评估平台，满足长距离、全天候、智能化的隧道监测需求。

3. 经济和社会效益

根据《交通运输部关于支持引导交通运输传统基础设施数字化

转型升级的通知》，要求加快推进交通基础设施数字转型，支持重要交通基础设施提升安全预警和应急处置能力，围绕重点路段、隧道、桥梁、浅险航段等重要基础设施，建立完善多源立体监测网络，提高基础设施安全风险识别和预警能力。基于上述要求细则，为了维持隧道的安全稳定运维，加快推进交通基础设施数字转型，全面提升交通基础设施安全风险识别与应急保障能力，需要对混凝土结构保持长期的健康监测，研究多源、多方式联合的桥隧结构健康监测技术，构建拉萨市绕城高速公路工程桥隧结构智慧监测网络，搭载基础设施安全监测与运维管控平台。

光纤传感监测具有测量距离长和空间分辨率高的特点，可以实现远距离监测、全自动全时监测、高耐高韧性监测，对比传统隧道安全监测技术，具备无人化、自动化、智能化的优点，可以实现相比传统点式监测测点数量 10 倍以上的测点，有效节约监测成本，是一种资源节约型的可靠监测手段。构建光纤传感网的隧道变形温差一体化监测评估技术及安全状态评估模块，在节约社会资本，减少生产排放的同时，对进一步提升我国公路隧道工安全智慧运营水平和防灾救灾能力，推动我国公路隧道长寿命安全智慧运维具有重大意义。

4. 成果提供形式

(1) 开发 1 套便携设备：隧道结构光纤传感网机械化泵送布设一体化设备；

(2) 开发 1 个软件平台：隧道结构健康光纤网长效监测预警平

台；

- (3) 申请国内外发明专利不低于 2 项（发明专利 1 项）；
- (4) 申请软件著作权 1 项；
- (5) 发表高水平论文不少于 4 篇（SCI/EI 检索 2 篇以上）；
- (6) 编制研究总报告 1 册，工作报告 1 册。其他考核指标。

5. 其他考核指标

无

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2024 年 10 月—2024 年 12 月	调研收集并系统分析隧道结构健康监测方向有关发展现状与趋势的相关资料和信息,有针对性的进行分类研究。编写申报书,进行项目申报。编制项目研究工作大纲。
2025 年 1 月—2025 年 3 月	建立光纤与结构的耦合力学模型,研究不同封装胶结工艺对光纤传感性能的影响,提出光纤的选型原则;调研,采购光纤传感器、光缆布设设备及设备改造装置。
2025 年 4 月—2025 年 6 月	研发适宜的光纤锚固与张拉锁止器件,开展基于隧道结构预留微孔的便携“手枪式”光纤自动泵送与接收装置研发;开展广域性、长持时隧道光纤传感网搭建方法研究,优选出适用于隧道应变场、温度场监测的光纤传感网络搭建方案,
2025 年 7 月—2025 年 9 月	完善光纤传感器智能机械化泵送铺设装备,形成分布埋入式光纤传感器选型方法,开展室内模拟实验验证布设工艺与布设方法;开展隧道健康与安全监测评估平台的模块开发与平台搭建。
2025 年 10 月—2025 年 12 月	基于实体工程开展调研工作,提出适用于隧道应变场、温度场监测的光纤传感网络搭建方案,研

	究基于搭建方案的光纤信号的应变场、温度场解析分析方法；提出实体工程光纤传感网布设搭建方案。
2026年1月— 2026年3月	开展实体工程传感网布设工作，提出系统的隧道结构光纤传感网长效监测与评估方法，完善隧道变形温差一体化监测评估平台。
2026年4月— 2026年6月	进一步完善实体工程传感网布设，上线并使用隧道变形温差一体化监测评估平台，验证传感网使用效果。
2026年7月— 2026年12月	结合依托工程应用，开展成果总结提炼，完成研究报告、工作报告等成果修编，申请课题验收。

四、项目经费

项目总经费：	59.85	万元
交通运输厅补助：	19.85	万元
承担单位自筹：	40.00	万元
工程配套研究经费：		万元
其他经费：		万元

(注：本合同只约定省交通运输厅补助经费，其他经费由相关单位自行确定。)

经费支出预算表

科目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	55.35	19.85
1. 设备费	0.00	0.00
(1) 购置设备费	0.00	0.00
(2) 设备改造与租赁费	0.00	0.00
2. 业务费	45.75	19.85
(1) 材料费	18.25	8.80
(2) 测试化验实验加工费	12.45	4.45
(3) 燃料动力费	0.00	0.00
(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.80	6.60
(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事费	10.50	0.00
(6) 其他费用	0.75	0.00
3. 劳务费	9.60	0.00
(1) 专家咨询费	3.60	0.00
(2) 聘用人员劳务费	6.00	0.00
(3) 其他劳务费	0.00	0.00
(二) 间接费用	4.50	0.00
1. 管理费	2.00	0.00
2. 绩效支出	2.50	0.00
合计	59.85	19.85

五、承担单位或研究人员分工

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称一公院）始建于 1952 年，原交通部第一公路勘察设计院，现归属中国交通建设股份有限公司，驻陕西省西安市，是国家大型工程勘察、设计、研究、咨询、监理骨干企业之一，是交通系统最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业，是拥有丰富土木工程经验的国际化工程咨询公司。先后被授予“全国创新型试点企业”、“国家火炬计划重点高新企业”，荣获“全国交通建设科技进步先进集体”、“全国勘察设计行业创新型优秀企业”等称号。

建院六十多年来，一公院累计承担了各类纵横向科技研发项目 200 余项，拥有国家博士后科研工作站、国家工程实验室、省部级重点实验室多个高端科技创新平台。共获得国家科技进步奖 8 项（其中一等奖 3 项），省部级科技进步奖、全国工程技术创新奖等各类科技奖 300 余项，获国际专利、国家专利、计算机软件著作权和注册商标等近 264 余项。承担国家及行业、地方技术标准、规范编制修订项目 82 项，出版专著 20 余部，发表学术论文 1500 余篇。

2022 年科技部、财政部、国家发改委提出重新统筹布局国家重点实验室布局，开始进行国家重点实验室重组后，一公院在“高寒高海拔地区道路工程健康国家重点实验室”的基础上进行优化重组，联合长沙理工大学、深圳大学为依托单位，成立了“极端环境绿色长寿道路工程国家重点实验室”，于 2023 年 7 月完成了实验室第一届理事会，该实验室是目前道路工程方向唯一国家重点实验室。

近五年来一公院主持或参与的与本项目相关的监方向科研课题如下：

近五年与项目相关科研课题一览表

序号	项目名称	经费 (万元)	项目来源	项目状态
1	分布式光纤应变监测仪《课题五：基于分布式应变测量的特殊土路基和地质灾害监测研究》	480	国家重点研发计划项目	结题 (2021)
2	分布式光纤应变监测仪《课题六：基于分布式应变测量的地下结构工程监测研究》	45	国家重点研发计划项目	结题 (2021)
3	区域综合交通基础设施安全保障技术《课题三：高陡边坡、高填及特殊路基的健康监测、全生命周期安全评价和预警平台》	500	国家重点研发计划项目	结题 (2020)
4	高寒高海拔地区公路隧道建设与运营关键技术研究《课题七：公路隧道监测与灾变预警技术研究》	150	西藏自治区重点研发与转化计划项目	在研
5	黄延高速公路黄土高边坡预警技术	75	陕西省交通建设支持计划项目	结题 (2021)
6	基于光纤传感的智慧桥梁监测系统前置技术研究	1	陕科协企业创新争先青年人才托举计划	在研
7	沈海高速公路深圳机场至荷坳段改扩建项目双洞叠层隧道火灾特性及防灾救援技术专题研究	92.8	深圳高速公路股份有限公司	在研
8	G0615 线久治(川青界)至马尔康段高速公路项目关键技术与示范项目	409.6	四川久马高速公路有限责任公司	在研
9	混合复用光纤传感器增敏与预处理技术研究	20	中交股份科技计划项目	在研
10	高海拔高寒地区工程构筑物灾变监控体系与预警预报技术	40	陕西省科技计划项目	在研
11	高速公路隧道智慧运营关键技术研究	20	陕西省交通运输厅交通建设科技计划项目	在研

六、项目参加人员表

项目承担单位： 参与单位（排序）：						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	李震	1990年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目总体策划及组织实施
主要研究人员						
2	曹升亮	1984年2月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目组织协调
3	董长松	1982年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目技术负责
4	李博融	1983年1月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目技术指导
5	赵初晔	1987年12月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目技术指导
6	刘智	1977年12月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	桥梁工程	项目分项负责
7	何佳州	1991年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	岩土工程	项目分项负责

8	马志伟	1996年10月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	隧道工程	项目技术研发	马志伟
9	黄永益	1982年10月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	计算机科学与技术	项目技术研发	黄永益
10	苟超	1995年3月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	隧道工程	项目技术研发	苟超
11	李琛	1993年11月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	交通运输信息化	项目技术研发	李琛
12	倪勃文	1990年7月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	水利工程	项目技术研发	倪勃文
13	崔锦栋	1994年5月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	道路工程	项目技术研发	崔锦栋
14	王君鹭	1990年3月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	岩土工程	项目技术研发	王君鹭

七、信息表

项目合同编号	24-50K	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部						
项目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究									
项目实施所在地	陕西	起止年限	年 月至 2026 年 12 月							
总经费	59.85	厅拨	19.85							
第一承担单位	单位名称	中交第一公路勘察设计研究院有限公司								
	所在地	省(市、区)			代码	610100				
	通讯地址	陕西省西安市雁塔区科技四路 205 号			邮编	710065				
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其它			代码	22053333-5				
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1									
	2									
	3									
项目负责人	姓名	李震	性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1990				
	学历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其它								
	职称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其它								
	联系电话	18092518680 029-88853000-8212		电子邮箱	1169412350@qq.com					
项目联系人	姓名	崔锦栋		性别	男					
	联系电话	18391489810 029-88853000-8212		电子邮箱	324259682@qq.com					
项目组人数	14	高级	9	中级	5	初级		其它		
主要研究内容 (100 字以内)	(1) 光纤与隧道结构本体的耦合作用机制及传感性能影响机理研究; (2) 分布埋入式光纤传感器选型与机械化布设方法研究; (3) 隧道健康与安全光纤传感网全域长效监测与评估技术; (4) 基于光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台开发与应用。									
成果属性	A	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他								
成果形式	A	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他								

八、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1. 乙方必须分年度向甲方提出上年年度计划执行情况报告。

2. 合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未经接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

3. 乙方因任何主观或客观原因（如：与可行性研究内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

4. 乙方的厅补助经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

5. 项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

6. 项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

7. 合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

8. 本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

九、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李涛

年 月 日

联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位） 中交第一公路勘察设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）

年 月 日

项目负责人：（签字）

李霄

（公章）

电 话：029-88853000

财务负责人：（签字）

王娟娟

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：农行西安科技二路支行

帐 号：26127101040000725

项目编号：24-50K

2024年度陕西省交通运输厅科研项目
可行性研究报告

项目名称：隧道光纤传感监测网高效构建及
广域评估技术研究

申请单位：（盖章）中交第一公路勘察设计
研究院有限公司

联系人：李震

电 话：18092518680

陕西省交通运输厅制

2024年9月

项目编号：24-50K

2024年度陕西省交通运输厅科研项目 可行性研究报告

项目名称：隧道光纤传感监测网高效构建及
广域评估技术研究

申请单位：（盖章）中交第一公路勘察设计
研究院有限公司

联系人：李震

电话：18092518680

陕西省交通运输厅制

2024年9月

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景与意义

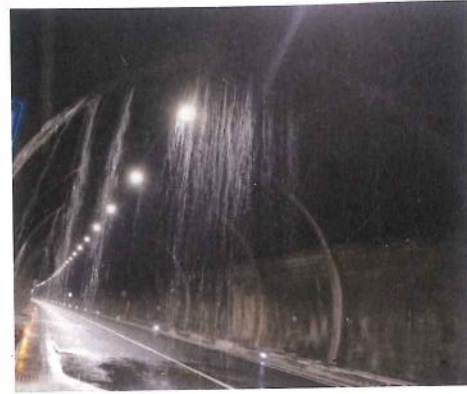
围绕项目申报指南中隧道技术相关领域，响应隧道智能运营主题，从隧道长期性能监测技术、隧道运营智能管控平台等方面开展关键技术攻关和成果应用转化。

我国隧道及地下工程建设技术从 20 世纪 80 年代起，得到了快速发展，在短短几十年里取得了举世瞩目的成就。尤其是公路隧道，在进入 21 世纪后，随着隧道建设技术及设备的升级更新，隧道总里程发展迅速，并向着特长、特难、水下方面发展。据交通运输部统计，截止到 2023 年底，全国公路隧道 27297 处，总里程 3023.18 万延米，其中特长隧道 2050 处、924.07 万延米，长隧道 7552 处、1321.38 万延米，相较上一年新增隧道 2447 处，新增隧道总里程 344.75 万延米，总里程增幅达到了 12.9%，公路隧道总里程数与隧道座数呈现急速增长的趋势，特长隧道的增长尤为迅速。

公路隧道行业在蓬勃发展的同时，也面临着新的挑战，一方面我国隧道开始进入建维并重时期，在长期的运营过程中隧道受围岩荷载和结构性能劣化的影响，容易产生衬砌渗漏水、掉块、翻浆冒泥等病害，降低了隧道服役性能，影响了隧道结构的安全性和稳定性，危及行车安全；另一方面随着隧道技术的发展，越来越多的山岭隧道、特长隧道、水下隧道开始建设运营，这些复杂地质条件下的隧道，对建设及运营期的安全监测提出了更高的要求。



隧道冻害



隧道漏水



衬砌剥落



衬砌开裂

图 1-1 隧道建设及运营期间典型病害

传统的隧道结构健康监测技术，主要运用全站仪、水准仪、静力水准等监测技术，以人工现场操作为主，多采用点式测量，存在误差大、时效性低、受人工干扰大、检查周期长等问题，难以保证结构安全。我国地下结构工程数量庞大，随着服役时间的增加，越来越多的隧道结构需要展开结构监测与健康诊断，故亟需一种经济高效的监测方法来实现对隧道结构全域变形的实时监控。光纤传感器以光纤作为传光介质和传感单元，兼具传感、传输功能于一体，可以实现对待测目标在空间上连续的应变和温度测量，具有测量距离长、空间分辨率高、成本廉价、质量轻便、耐腐蚀等诸多特点，可以做到实时监控、远距离监测、全自动无人监测，填补了传统监测技术的不足，光纤传感技术在世界范围内已广泛应用于建设工程、工业设施、航空航天等

领域。近年来，分布式光纤传感监测技术逐渐应用于隧道工程监测领域中，但现有的光纤敷设方式(埋入式、嵌入式、表面全粘贴、表面固定点粘贴等)仅适合在隧道内进行局部光纤传感监测，存在光纤熔接断点过多，光纤与结构变形耦合差、耐久性差等问题，无法适应智能化、长距离、高耐久的隧道结构健康监测技术发展趋势。除此之外，对于光纤与隧道衬砌混凝土结构的耦合机理、应变传递机制等方面的研究仍有不足，针对隧道衬砌整体收敛变形监测的研究仍不完善，缺乏对隧道衬砌在受压工况下应变场变化规律的研究。

据此，本项目基于分布式光纤应变温度传感技术，探究光纤与隧道衬砌混凝土结构的耦合机理，研发基于隧道结构的分布式光纤传感器高效布设方法，建立基于隧道结构应力场、温度场的长效光纤传感监测网，开发基于分布式光纤网的隧道健康状态监测评估平台。项目研究适应我国公路隧道发展趋势，聚焦隧道智能运营领域，为隧道工程的稳定性与安全性评价提供全域感知数据支撑，对进一步提升我国公路隧道工安全智慧运营水平和防灾救灾能力，推动我国公路隧道长寿命安全智慧运维具有重大意义。

1.2 市场需求前景和推广应用领域

2024年国务院发布了《关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型升级的通知》，要求加快推进交通基础设施数字转型，支持重要交通基础设施提升安全预警和应急处置能力，围绕重点路段、隧道、桥梁、浅险航段等重要基础设施，建立完善多源立体监测网络，提高基础设施安全风险识别和预警能力。隧道工程一般是公路交通基

基础设施的重点控制工程，无论是建设期还是运营期，都需要针对其进行结构安全监测，提高隧道安全风险识别和预警能力，在此基础上通过分布式光纤传感监测技术，进行数字化、智能化监测，可以推动智慧公路建设，加速公路数字化转型升级。

项目致力于探究光纤传感监测网建设方法与工艺，开发基于分布式光纤网的隧道健康状态监测评估平台，对比传统隧道安全监测技术，具备无人化、自动化、智能化的优点。研究成果可广泛应用与陕西和全国公路隧道工程，改善我国交通大型基础设施安全监测水平，对进一步提升我国公路隧道工安全智慧运营水平和防灾救灾能力，推动我国公路隧道长寿命安全智慧运维具有重大意义。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

我国隧道工程建设量之多、发展速度之快，在世界范围的隧道建设领域高居首位。隧道在运营时由于长期受到荷载及其他外力的作用，结构安全易受影响。一旦隧道结构发生破坏，不仅会导致整个交通干线停顿，还将对社会、人民的生命财产造成巨大损失。因此，无论是隧道建设期还是运营期，都需进行隧道结构健康监测^[1]，以确保隧道全生命周期内安全运行。传统的隧道结构监测主要依赖人工，采用常规监测技术和传统电传感器采集数据，不仅监测范围小、效率低、操作繁琐，且监测的数据繁杂而抽象，无法保证其准确性、实时性，难以满足现代隧道施工监测的要求^[2]。隧道结构的监测技术亟待创新，

应由点式向分布式、自动化、高精度的方向发展，以适应现代隧道结构监测与评价的需要。

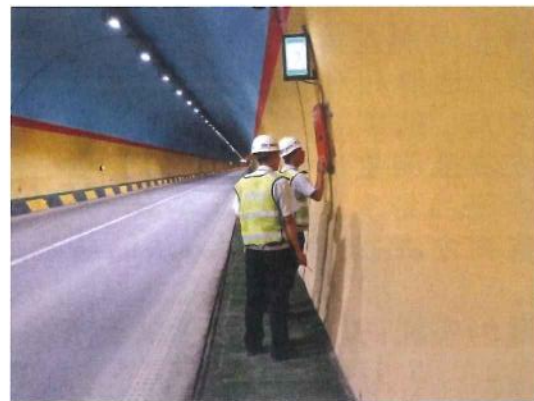
(1) 隧道结构健康监测技术应用现状

隧道在运营期间，长期受复杂地质条件变化、车辆荷载耦合振动等因素的影响，其结构的健康状况随着服役时间的增长而逐渐劣化，容易产生一系列隧道衬砌及其他病害，如衬砌掉块、开裂、渗漏水、材料劣化等，给隧道安全运营带来较大隐患，隧道一旦发生安全事故，将会带来无法预估的人员伤亡和经济损失。从上世纪起末，国内外专家学者针对隧道变形监测进行了大量研究，使得结构健康监测技术（SHM）^[3]在隧道结构健康监测领域取得了长足的发展。

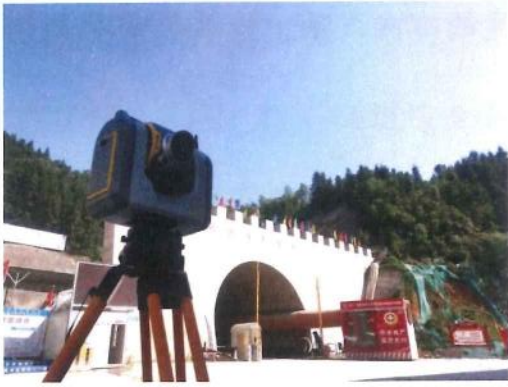
以隧道结构健康监测的方法原理来分类，常见的结构监测方法可分为测绘测量法、人工巡检法、GPS法、激光扫描法和电测法等，如图1所示。



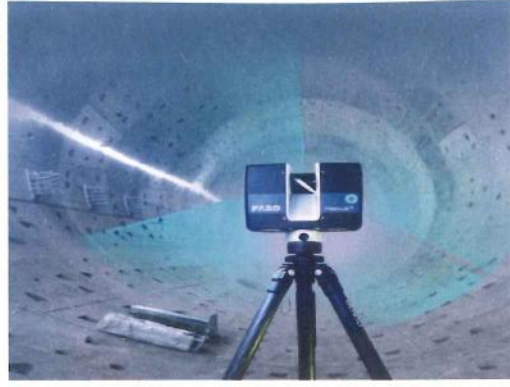
(a) 测绘测量



(b) 人工巡检



(c) BDS/GPS 测量



(d) 激光扫描



(e) 电磁雷达监测

图 2-1 传统隧道结构健康监测手段

① 测绘测量法

测绘测量法通常指使用经纬仪、水准仪和全站仪等，在监测区域以外选取相对稳定的点作为参照基准点，采用水准测量或三角测量等方法来测量比较不同时期观测点位相对参照基准点位移变化的一种监测方法。这种监测方法的精确度在隧道监测应用中随着观测点位的增加而提高。测绘测量法具有技术相对成熟、监测数据直观的优点。高军等^[4]采用全站仪的无尺量测技术对曾家坪 1 号大跨度隧道进行了隧道净空位移三维变形的监测，达到了隧道变形监测的要求。当隧道较长时，观测点设置数量迅速增加，测量工作量大、周期长、测量结果受人为影响大。

② 人工巡检法

人工巡检法是通过派遣工作人员对隧道进行巡逻检查的一种方法。工作人员在巡检过程中可观察盾构隧道有无管片相对错位、渗漏水、管片开裂等异常现象。人工巡检无法对隧道做到全面、精细化的监视，无法对整个隧道的变化趋势进行评价，只能对一些明显的异常现象进行监视。

③ BDS/GPS 测量法

BDS/GPS 测量是利用全站仪、GPS-RTK 等设备在监测点位进行定位，通过一系列的点位建立三维坐标系，进而通过不同时期的定位对比来进行位移监测。国内许多研究学者已将 GPS 控制测量技术应用于隧道的安全监测之中，而随着 BDS（北斗卫星导航系统）技术的成熟和国际环境的变化，BDS 已成为新的热点话题。武汉大学测绘学院的魏二虎^[5]对 BDS、GPS 及组合系统进行了精确度对比研究，验证了不同定位系统的精度水平和抗扰动能力。BDS/GPS 测量法具有测量自由度高、定位迅速和精确度高的特点，可以对被监测物进行整个三维空间变化的监测，但通常监测数据分析研究比较繁琐，需要将测量参考坐标系与工程坐标系进行转换，且受天气卫星定位的影响，在实际应用中有一定的局限性。

④ 激光扫描法

激光扫描技术是通过三维激光扫描法，对比不同时期得到的图像进行监测的一种方法，具有快速和直观等特点。李健等^[6]将地面激光技术在地铁隧道变形安全监测中进行了应用研究，通过相应算法计算得到隧道的三维模型，通过分析模型整体变形情况，结果表明了该方

法能满足地铁隧道变形监测的要求。但在实际应用中,激光扫描法结果容易受到外界光线、水汽等的影响。

⑤ 电测法

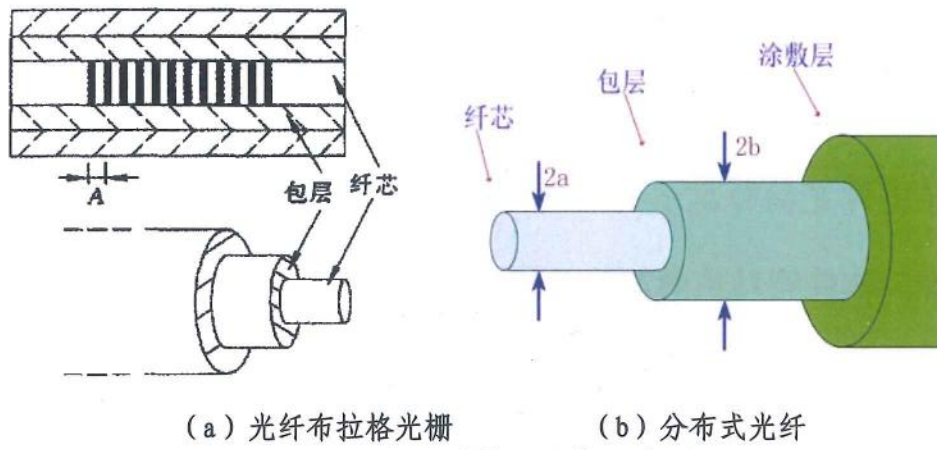
电测法一般是采用振弦式、电阻式和电感式等电子元器件组装制作的点式传感器贴于隧道管片表面或内部,通过电子仪器解读电流、电压或电阻的变化来实施监测。电测法也具有测试简单、成本较低、易实现自动化等优点。然而,电测法一般存在着测量距离有限、成活率不高、易受腐蚀电磁干扰等不足。

综上所述,传统的隧道结构健康监测系统仍存在一定的不足,如易受气候影响、操作成本高、精度较差、长期稳定性差等,亟需一种新型高效检测手段弥补上述不足,满足现代化智能结构监测的需要。

(2) 光纤传感技术的应用与发展现状

20世纪60年代,高锟博士开创性地提出光导纤维在通信上应用的基本原理,描述了长程及高信息量光通信所需绝缘性纤维的结构和材料特性^[7],解决了光导纤维(玻璃丝)传送光信号的理论问题,光纤传感技术就此诞生。上世纪70年代末起,这种以光波作为传感信号,将低耗光纤作为传感媒介的新型传感技术逐渐引起研究者的兴趣,在工业、民用领域开展了广泛的光纤传感器的研发与应用。

光纤传感技术以光为载体、光纤为传递介质,通过被测参量与光纤内部光学参数的关系进行感测,分为准分布式与全分布式光纤传感技术两大类。两者都是由纤芯、包层、涂覆层和护套组成,区别仅在于光信号传输材质不同,其结构如图2-2所示。



(a) 光纤布拉格光栅 (b) 分布式光纤
图 2-2 光纤传感器结构示意图

光纤传感技术以光纤作为传光介质和传感单元，可以实现对待测目标在空间上连续的应变测量，具有测量距离长和空间分辨率高的特点，因此非常适合于像桥梁、隧道、路基边坡这样大尺度构筑物的安全监测。

① 光纤布拉格光栅传感器

光纤布拉格光栅传感器 (FBG) 是迄今为止研究最深入的一种光纤光栅传感器，主要依赖内部刻蚀的 Bragg 光栅，Bragg 中心波长同时对温度和应变敏感，通过分析光栅反射波便可获知被测体某一点位置的状态。第一支 FBG 于 1978 年由加拿大通信研究中心的 K.O.Hill 研制。经过十多年的发展，到 1993 年，人们逐步开发了全息干涉法、相位掩模法和直写法进行光栅刻写，实现了灵活的波长选择，几乎能制备任意中心波长的 FBG；同时也发展了纤芯重掺锗和高压载氢等紫外增敏技术，提高了栅区的折射率变化量，使 FBG 的反射率灵活可控，为光纤光栅的大规模制备和应用奠定了坚实的基础。

1993 年加拿大卡尔加里附近的 Beddington Trail 大桥是最早使用光纤光栅传感器进行测量的桥梁之一。德国德累斯顿附近 A4 高速公

路上有一座跨度 72 m 的预应力混凝土桥铺设了光栅光纤，可以测量荷载下的基本线性响应，并且用常规的应变测量仪器作了对比试验，证实了光纤光栅传感器的应用可行性。意大利科摩大教堂采用 FBG 传感器，来监测结构的沉降量。

国内关于光纤光栅传感在土木工程中的应用研究有：毆进萍等^[8]在渤海海洋平台建立了 JZ20-2MUQ 和 CB32A 导管式海洋平台健康监测系统；姜德生等^[9]光纤光栅传感技术应用于武汉阳逻长江大桥、武汉长江二桥、海口世纪大桥等十余座大型桥梁和湖北清江水布娅水电枢纽工程大坝和三峡白鹤梁水下博物馆等重点工程的长期安全监测。蔡德所等^[10]以长江三峡工程、清江隔河岩土工程、古洞口面板堆石坝、鱼跳面板堆石坝等工程为背景，进行了大坝随机裂缝、位移、温度、挠度监测。

② 分布式光纤传感器

分布式光纤使用光导纤维作为光信号传输材质，根据解析光源在光纤里的不同散射形式散发的信号，可以将光纤用于不同领域的测量，基于拉曼（Raman）散射原理常用于分布式温度监测研究，基于瑞利（Rayleigh）散射原理常用于损耗检测，基于布里渊（Brillouin）散射原理常用于应变测量^[11]。相较于布拉格光纤光栅点式传感器，分布式光纤传感器的感知测量范围大幅增加，最高可达数百公里，测点沿着单根光纤进行参量感知，仅在一根光纤上便可获得上千测点的信息，可实现高分辨率、连续的全分布式测量。

其中,布里渊分布式传感技术可在较高空间分辨率下达到较为理想的测量精度,该项技术尽管起步较晚,却已经得到广泛认可,并成功应用于诸多领域。目前,国际上已经有几家公司推出了商用的布里渊光纤应变温度传感仪,比如日本 NTT 公司、瑞士的 Omnisens 公司、英国的 Sensornet 公司和加拿大的 OZ Optics 公司等,进一步推动了分布式光纤传感技术在结构健康监测领域的应用。

乔迎欣等^[12]进一步对国外光纤传感在土木工程的应用现状总结如下:NTT-AT 和 NTT-Infranet 在日本横滨长跨径悬索大桥安装了 MOI 监测系统,应用了 20 个光纤传感器,系统自从安装以来没有出现过故障,一直良好地跟踪监测承受六车道与两列车道重交通和强烈风荷载高应力作用下大桥的运营状态;在瑞士和法国边界一个 Emosson 水电站水库的大坝上安装了 SOFO 系统,用它来测量坝体的裂纹和基础的位移,测试结果表明光纤传感器与原来杆式伸长计的结果非常吻合,结果也比较精确;德国柏林采用 BOTDR 传感器来进行盐水管道的渗漏探测,利用远程系统监控,一旦管道出现渗漏,系统就会自动报警和管理。Cheung 等^[13]使用 BOTDR 技术对伦敦地铁隧道衬砌的横向、纵向变形进行监测,测的相邻管片内表面间裂缝变化趋势。

重庆大学符欲梅等在大佛寺长江大桥安装了光纤远程状态监测系统,使得远离桥梁现场进行监测桥梁的实际状态成为可能;北京建筑大学李爱群^[14]等应用现代化的传感及网络通信等技术建立了润扬长江大桥结构的安全监控监测系统,整个系统采用环状网络结构,对大桥外部荷载作用下的响应实时监测,对及时掌握桥梁的结构状态,

全面了解桥梁的运营条件及质量退化状况。侯公羽等^[15]分别采用钢筋开槽植入光纤、钢筋表面粘贴光纤、混凝土试件开槽植入光纤等埋入的布设方式展开加载试验,探究光纤采用不同埋入布设方式与混凝土的耦合性能,并应用于地铁暗挖隧道工程中,结合理论、试验、现场研究,提出植入式光纤传感器的边界效应,为埋入式光纤布设方式提供参考。

综合现有的研究成果,分布式光纤和光纤光栅传感技术多用于土木工程结构的应变、温度监测,相关应用技术已非常成熟,且广泛应用与桥梁、大坝、路基路面等工程构筑物,形成了系统全面的布设、施工及监测运营成套技术。但受限于隧道工程严苛的施工环境,光纤作为脆性材料,在工程现场布设时易损毁,且限于施工模块化作业,光纤布设不能一体成型。因此,光纤传感技术在隧道领域的开发应用仍有很大的发展空间,缺少系统性的长、大隧道的相关实体工程应用,在理论机制方面光纤在隧道衬砌中应变传递机制、光纤在隧道衬砌中的布设方式、监测数据解读等,需要进行进一步的研究完善。

2.2 前期科研及现有工作条件

(1) 项目申报单位拥有多所国家级和省部级重点实验室,具有满足本项目所需的大型试验设备、通用计算机软件,完全可满足项目研究的需要。

项目申报单位构建了“大型路基模型试验系统、路面结构与材料试验系统、野外监测与检测系统”等工程试验研究平台,目前已建成“1个试验中心、3个野外基地、5个观测站、18个试验场”。项目

申报单位目前拥有 1 个国家重点实验室、1 个交通部重点实验室，1 个陕西省重点实验室，1 个中国交建重点实验室；1 个交通部研发中心，1 个交通部协同创新平台；1 个陕西省企业技术中心；共建 2 个国家工程实验室。主要平台如下表所示：

主要科技平台（载体）一览表

类别	平台名称	批准机关/ 认定时间
应用基础研究	极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室	科技部/2022
	多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室	交通运输部/2009
	陕西省公路交通防灾减灾重点实验室	陕西省科技厅/2011
	中国交建寒区旱区道路工程重点实验室	中国交建/2006
应用技术研发	桥梁结构安全技术国家工程实验室(共建)	国家发改委/2011
	陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室(共建)	国家发改委/2011
	西安市桥梁安全技术及装备工程实验室	西安发改委/2011
	交通运输安全应急信息保障技术及设备行业研发中心	交通运输部/2015
	中交西安道路技术研发中心	中国交建/2007
科技成果转化	陕西省省级技术转移示范机构	陕西省科技厅/2012
协同创新组织	工程防减灾及交通安全产业技术创新战略联盟	自主组建/2012
	公路绿色、智能养护技术协同创新平台	交通运输部/2014
	长大隧道建设与养护技术协同创新平台(共建)	交通运输部/2014
	特殊区域公路建设与养护技术协同创新平台(共建)	交通运输部/2014
高端科	博士后科研工作站	国家人社部/2008

技人才	陕西省“三秦学者”岗位	陕西省委组织部等/2009
	院士专家工作站	中共陕西省委/2013
其它创新载体	国家高新技术企业	陕西科技厅等/2022
	陕西省第一批创新型企业	陕西科技厅等/2011
	全国第五批创新试点企业	科技部等/2012
	省级认定企业技术中心	陕西省工信厅等/2013
	2014年国家火炬计划重点高新技术企业	科技部/2014

(2) 项目申报单位在公路隧道工程及交通安全领域取得了丰硕的研究成果，完成了多项国家及省部级科研项目，积累了丰富的科研经验。

申报单位承担各类纵横向科技开发项目 200 余项，其中：省部级以上重大科技项目 50 多项，国家及行业标准规范制修订 100 项(次)。共获得省部级以上科技进步奖、工程技术创新奖各类科技奖励 300 余项，其中国家科技进步奖 8 项（一等奖 3 项、二等奖 5 项）。拥有国际专利、国家专利、计算机软件著作权授权 140 余项。近五年来主持或参与的与本项目相关的科研课题如下：

近五年与项目相关科研课题一览表

序号	项目名称	经费 (万元)	项目来源	项目状态
1	分布式光纤应变监测仪《课题五:基于分布式应变测量的特殊土路基和地质灾害	480	国家重点研发计划项目	结题 (2021)

	监测研究》			
2	分布式光纤应变监测仪《课题六:基于分布式应变测量的地下结构工程监测研究》	45	国家重点研发计划项目	结题(2021)
3	区域综合交通基础设施安全保障技术《课题三:高陡边坡、高填及特殊路基的健康监测、全生命周期安全评价和预警平台》	500	国家重点研发计划项目	结题(2020)
4	高寒高海拔地区公路隧道建设与运营关键技术研究《课题七:公路隧道监测与灾变预警技术研究》	150	西藏自治区重点研发与转化计划项目	在研
5	黄延高速公路黄土高边坡预警技术	75	陕西省交通建设支持计划项目	结题(2021)
6	基于光纤传感的智慧桥梁监测系统前置技术研究	1	陕科协企业创新争先青年人才托举计划	在研
7	沈海高速公路深圳机场至荷坳段改扩建项目 双洞叠层隧道火灾特性及防灾救援技术专题研究	92.8	深圳高速公路股份有限公司	在研
8	G0615线久治(川青界)至马尔康段高速公路项目关键技术研究及示范项目	409.6	四川久马高速公路有限责任公司	在研
9	混合复用光纤传感器增敏与预处理技术研究	20	中交股份科技计划项目	在研
10	高海拔高寒地区工程构筑物灾变监控体系与预警预报技术	40	陕西省科技计划项目	在研
11	高速公路隧道智慧运营关键技术研究	20	陕西省交通运输厅交通建设科技计划项目	在研
12	“空天地体”一体化协同的公路边坡灾害监测应用技术研究	239.2	陕西省交通运输厅交通建设科技计划项目	在研

参考文献

- [1] 柴敬,刘永亮,袁强等.矿山围岩变形与破坏光纤感测理论技术及应用[J].煤炭科学技术, 2021, 49(01):208-217.DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021.01.016.
- [2] 孙梦雅,施斌,段新春等.基于FBG的管道渗漏监测可行性及其影响因素试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(05):715-723.DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2019.05.004.
- [3] 史学涛.结构健康监测系统的研究[D].上海:同济大学,2006.
- [4] 高军,赵运臣.隧道变形监测新技术的应用研究[J].西部探矿工程,2001(03):74-76.
- [5] 魏二虎,刘学习,王凌轩等.BDS/GPS组合精密单点定位精度分析与评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(11):1654-1660.DOI:10.13203/j.whugis20160568.
- [6] 李健,万幼川,江梦华,等.基于地面激光技术的隧道变形监测技术[J].地理空间信息,2012,10(01):14-17.
- [7] M D ROURKE. Measurement of the insertion loss of a single microbend. [J]. Optics letters.1981.
- [8] 欧进萍.土木工程结构用智能感知材料,传感器与健康监测系统的研发现状[J].功能材料信息,2005,2(5):12-22.
- [9] 梁磊,姜德生,周雪芳,等.光纤 Bragg 光栅传感器在桥梁工程中的应用[J].光学与光电技术,2003,1(2):36-39.
- [10] 蔡德所.光纤传感技术在大坝工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [11] PARKER, T.R, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. Optics letters, 1997, 22(11): 787-789.
- [12] 乔迎欣,黎剑华,贺跃光.光纤监测技术在土木工程中的应用现状及展望[J].南昌工程学院学报,2007,26(1):13-18.
- [13] CHEUNG L, SOGA K, BENNETT P J, et al. Optical fibre strain measurement for tunnelling monitoring[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical.Engineering, 2010, 163(ge3): 119-130.
- [14] 李爱群,缪长青,李兆霞等.润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J].东南大学学报(自然科学版),2003(05):544-548.
- [15] 侯公羽,谢冰冰,韩育琛等.分布埋入式光纤与隧道衬砌耦合性能试验及应用[J].岩土力学, 2020, 41(2): 714-726.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

(1) 光纤及其封装结构与隧道本体的耦合作用机制及光纤传感监测性能影响机理；

(2) 基于隧道结构健康监测的光纤传感网机械化布设方法及成套泵送设备；

(3) 基于分布式光纤监测的隧道结构健康与安全广域长效监测评估技术；

2. 主要研究内容及实施方案

项目主要研究内容涵盖：1 项基础研究，探究光纤封装层、胶结层与结构基体的耦合作用对传感性能的影响机理，探明结构层与光纤应变、温度传递率影响关系，为项目奠定理论基础；2 项关键技术研究；埋入式分布式光纤传感器选型与高效布设方法研究、基于光纤传感网的隧道应变场解析与评估技术，解决分布埋入式光纤布设与信号解析应用的问题；1 项平台模块开发，基于多参埋入式光纤传感技术的隧道变形场、温度场一体化监测平台模块。

研究内容 1：光纤与隧道本体的耦合作用机制及传感性能影响机理研究

通过理论模型、数值模拟与室内试验，建立埋入式光纤纤芯、封装层、胶结层与待测结构本体的耦合作用模型，研究不同封装方式、胶结方法与结构本体在耦合作用下，对应变传递率与温度传递率的影响，定量分析水泥砂浆、水泥净浆、环氧树脂等常用光纤注浆胶结封

装材料对光纤传感器应变、温度感知性能的影响,为埋入式光纤应变、温度传感器的封装方法的选择及胶结材料的选型提供理论依据。

研究内容 2: 埋入式分布式光纤传感器选型与机械化布设方法研究

为实现隧道衬砌、仰拱等混凝土结构的广域连续光纤传感监测网智能布设,开展基于隧道结构预留微孔的便携“手枪式”光纤自动泵送与接收装置研发,基于光纤张拉增敏技术,研发适宜的光纤锚固与张拉锁止器件,形成优化泵送-合理张锚-充盈封装的一体化成套光纤传感器机械化泵送铺设装备,提出隧道结构预留孔光纤传感器泵送布设方法。根据隧道智能运营需求,提出基于监测需求和结构基体的光纤封装方式与胶结材料的选型原则,形成埋入式分布式光纤传感器选型方法。

研究内容 3: 隧道健康与安全光纤传感网全域长效监测与评估技术

基于隧道衬砌强度、刚度、变形等结构性能控制指标,开展广域性、长持时隧道光纤传感网搭建方法研究,通过数值模拟、缩尺模型验证等方法,优选出适用于隧道应变场、温度场监测的光纤传感网络搭建方案,提出基于光纤信号的应变场、温度场解析分析方法,基于多参量约束条件对监测结果进行分析评估,形成系统的隧道结构光纤传感网长效监测与评估方法。

研究内容 4: 基于光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台开发与应用

依托典型示范工程,开展埋入式分布式光纤传感网搭建实体工程验证,验证隧道结构光纤传感网长效监测与评估技术的适用性及可靠性,形成系统化集成的隧道光纤传感网高效搭建技术。开展衬砌变形、温差监控、异常定位、评估评定等模块的研发,建立起广域性、长持时、高耐久的隧道变形温差一体化监测评估平台,提高交通基础设施智能监管技术水平。

3. 技术路线

课题围绕隧道结构健康监测技术,针对隧道长距离、全天候、智能化的安全监测需求,开展基于分布式光纤传感器的传感器耦合机理、埋入式隧道结构监测布设方法、隧道结构变形场、温度场监测与评估技术、集成示范与一体化监测平台模块研究。通过研究光纤及其封装结构与隧道结构本体的耦合作用下传感性能影响机理,为光纤应变与温度监测、封装方法的选择及胶结材料的选型提供理论依据,研发埋入式隧道光纤传感器泵送设备及成套机械化布设方法,提出光纤及胶结材料的选型依据,基于隧道安全性要求优选出适宜的光纤传感网搭建方法,形成完备的隧道健康与安全长效、广域监测与评估技术,依托实体工程项目,开展分布埋入式光纤传感网搭建实体工程验证,建立广域性、长持时、高耐久的隧道变形温差一体化监测评估平台模块。研究技术路线如下图所示:

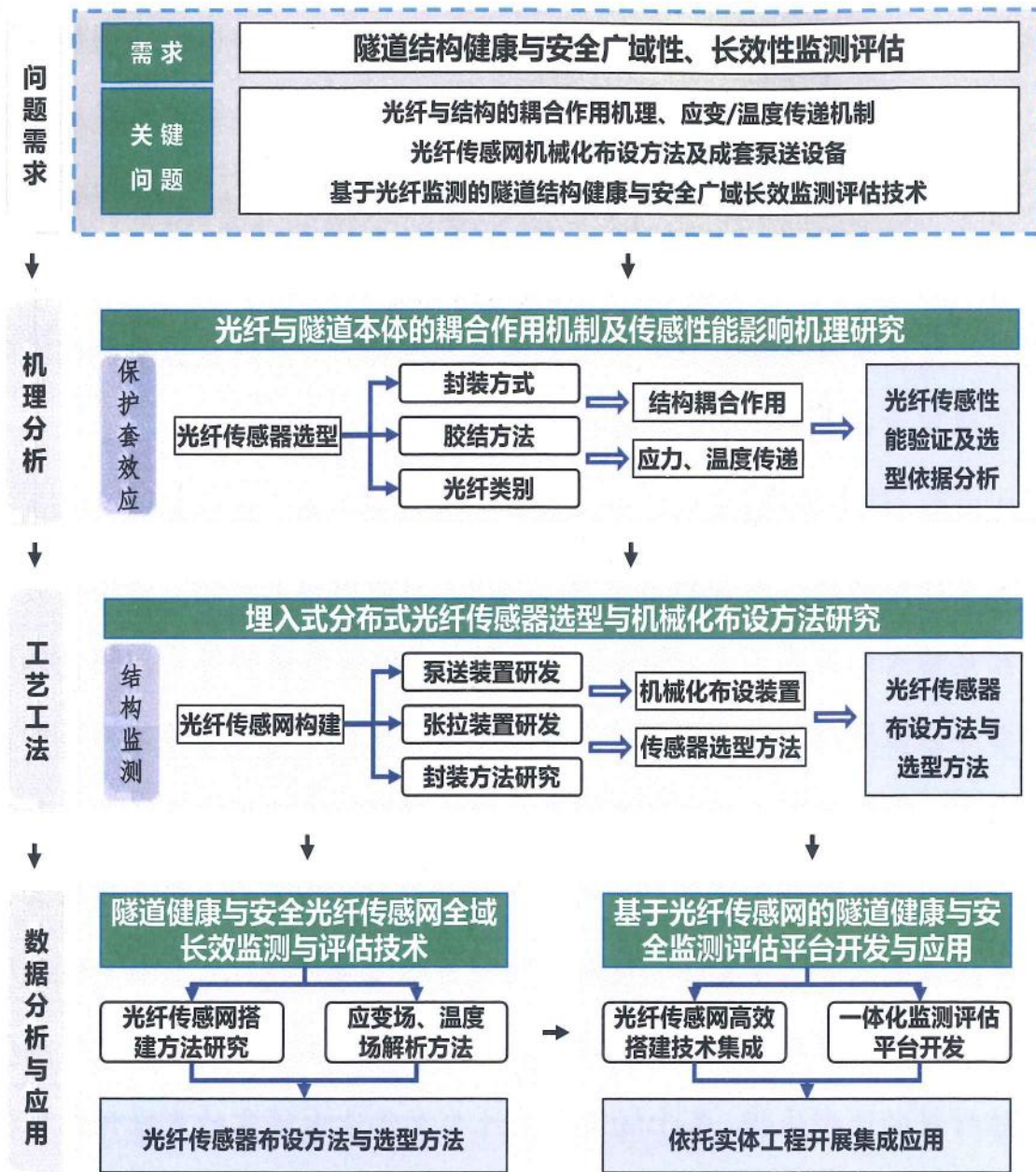


图 3-1 研究技术路线图

根据研究需要，对研究内容进行细化、分解，制订主要实施方案如下：

(1) 收集国外相关技术资料及最新研究成果

开展广泛技术资料收集和分析，收集国内外光纤传感器在隧道结构健康监测方面科研及工程应用相关资料，并进行深入分析和对比；调研分布式光纤的发展现状如市场上传感光纤主要生产厂商以及技

术先进的解调仪设备；开展典型工程调研，深入典型工程，调研掌握现有隧道分布式光纤监测技术及工程应用现状；开展市场调研，基于工程应用，掌握现有光纤及光缆布设装置现状，梳理隧道机械化光纤布设技术需求。

(2) 分布式光纤耦合机制及传感机理数值模拟

建立模型模拟光纤埋入混凝土结构内部，分析并计算光纤应变、温度传递率，探究光纤本体，中间胶结层物理性质对应变、温度传递的影响。

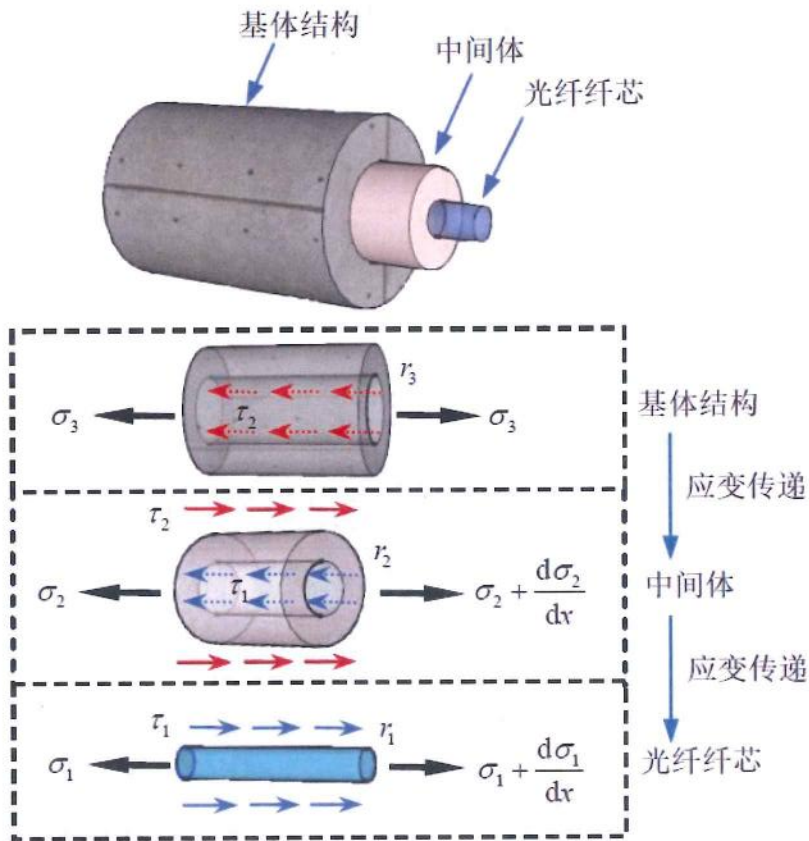


图 3-2 光纤纤芯、中间体和基体结构力学模型

本次研究将光纤传感器和结构简化为 3 个同心的柱体：光纤部分为中心圆柱，胶接层或封装层为中间体，待测结构为基体结构，在此基础上确定假设条件进行简化，设立理想模型。通过建模及求解，探究光纤直径、弹性模量，封装层直径、弹性模量、泊松比等物理量

等不同参数耦合作用下，外部结构应变与最内部光纤应变的变化规律；探究相同温度梯度时光纤直径、导热系数，封装层直径、导热系数等不同参数耦合作用下，外部结构温度与最内部光纤温度的变化规律；最终提出最适宜的光纤类别、层位直径、胶结方式的判断依据。

(3) 分布式光纤传感器布设工艺模拟实验研究

根据前期市场和工程调研结果，优选出具有代表性的分布式光纤温度、应变传感器，比选出适用与隧道光纤布设的胶结材料，收集光纤、胶结材料相关物理参数。在此基础上，模拟光纤实际现场布设工艺，制备光纤传感模拟试件，开展室内试验，探究注浆材料选型、预张拉力对光纤传感试件的影响，为布设工艺提供数据支撑，工作流程如下图所示。

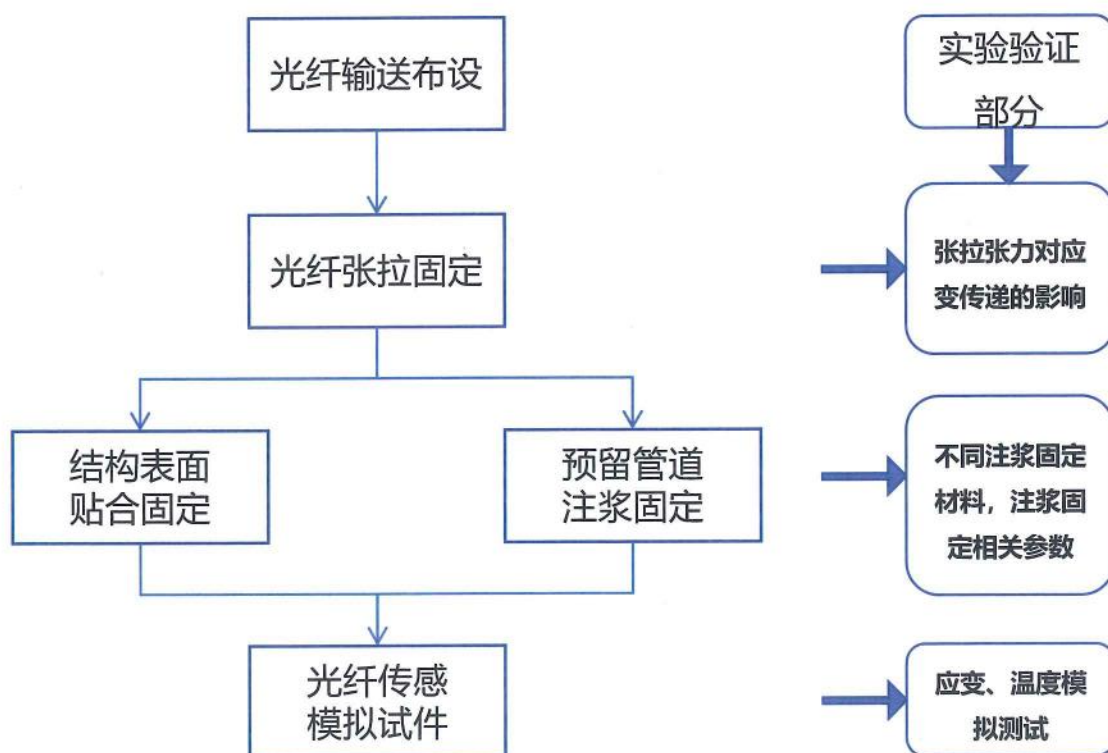


图 3-3 分布式光纤传感器布设工艺模拟实验工作流程图

开展光纤张拉室内试验，使用微型拉力计连接光纤紧固装置和光纤解调仪，探究预张锚拉力对光纤应变监测性能的影响，确定合理的张拉参数。开展注浆材料性能验证试验，确定不同注浆材料凝固后的

力学参数，研究不同管径、不同管道长度对不同注浆材料凝固时间、粘接性能的影响。制备成完整的光纤传感模拟试件，模拟外界应变、温度变化，对比应变片、温度计等传感器与光纤监测数据，探究光纤监测性能并进行修正。



图 3-4 光纤张拉模拟装置及光纤张拉实验

(4) 分布式光纤传感器布设装置改良与研发

根据前期市场和工程调研结果，参考光缆输送装置、弹簧钢螺旋疏通器等装置原理，优选出适用于中短距离微管道的光缆/光纤泵送式输送或传输装置，基于隧道针对隧道施工环境昏暗、施工位置相对有限的特殊工况，针对分布式光纤小直径（一般直径小于 2cm）进行便携化、自动化、小型化改造，形成适用于隧道混凝土预留管道的光纤“泵送运输”装置；优选改造出适用于小尺寸管道注浆的适宜的光纤两端锚固与张拉锁止器、适用于长距离微管道注浆的注浆与封堵装置；梳理实验成果、注浆工艺及选型原则，探明光纤泵送最长距离、注浆最适宜距离、张拉锚固力度等工艺参数，整合优化布设装置，最终形成优化泵送-合理张锚-充盈封堵的一体化成套光纤传感网智能泵送铺设装置，提出隧道结构预留孔光纤传感器泵送布设方法。



图 3-5 常用管线输送装置

(5) 光纤传感网解析数值模拟及实验验证

依托实际工程应用实践经验，考虑埋入式布设、粘贴开槽式布设等多种布设方式，基于隧道不同结构、位置应变监测需求，提出“1字形”直线布设、“Z字形”菱形布设、绕拱架断面“半环形”布设等光纤传感网络布设方案；建立基于不同光纤传感网布设方案的隧道应力、温度监测计算模型，探究不同布设方案下结构体三维层面应变、温度变化与光纤线性监测数据的关系，提出基于不同布设方案的光纤应变、温度监测数据解调计算公式；使用可拼装的小型钢管道或砼管道开展室内缩尺模型试验，模拟不同光纤传感网络布设方案，进行光纤监测性能验证，优化不同布设方案的光纤应变监测、温度监测解析方法，形成系统的隧道结构光纤传感网长效监测与评估方法。

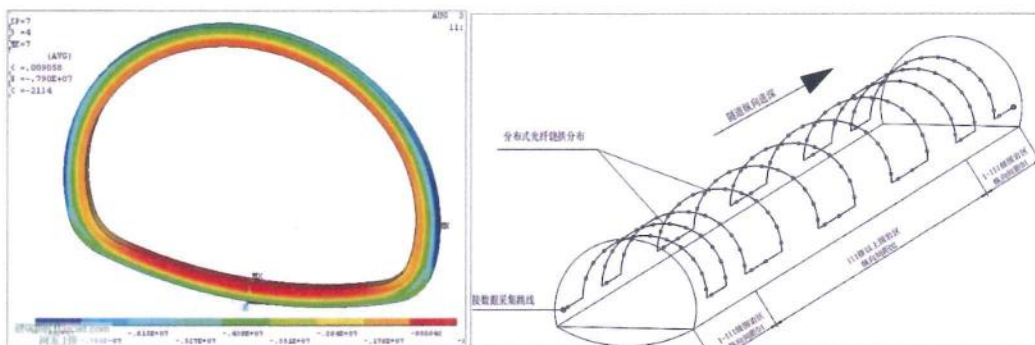


图 3-6 光纤布设方案及模型建设

(6) 光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台模块开发与应用

依据理论公式及试验数据，综合考虑不同光纤监测网络下应变、温度解析方法及修正系数，提出分布式光纤应变、温度监测智能监测及评估算法，开展模块系统开发，完善衬砌变形、温差监控、异常定位、评估展示等功能子模块，形成基于光纤传感网的隧道健康与安全平台模块；依托典型示范工程，开展集成应用研究，搭建埋入式分布式光纤传感网，针对隧道二衬收敛变形开展结构健康监测，连接隧道健康与安全监测评估平台模块开展隧道工程结构健康监测与评估预警，提高隧道智能监管技术水平。

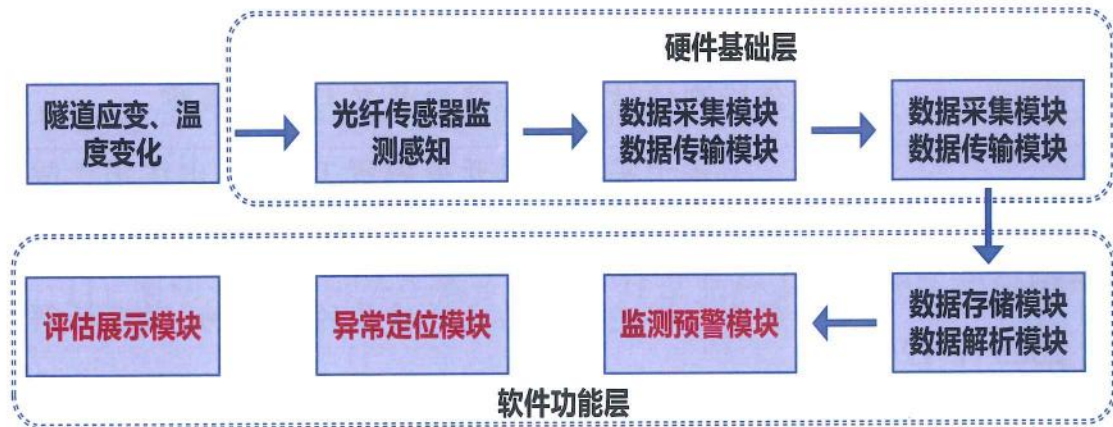


图 3-7 隧道健康与安全监测评估平台开发与设计

初拟项目周期为 2 年，项目进度计划如下：

年度	计划内容及考核目标
2024 年 10 月— 2024 年 12 月	调研收集并系统分析隧道结构健康监测方向有关发展现状与趋势的相关资料和信息，有针对性的进行分类研究。编写申报书，进行项目申报。编制项目研究工作大纲。
2025 年 1 月— 2025 年 3 月	建立光纤与结构的耦合力学模型，研究不同封装胶结工艺对光纤传感性能的影响，提出光纤的选型原则；调研，采购光纤传感器、光缆布设设备及

	设备改造装置。
2025年4月— 2025年6月	研发适宜的光纤锚固与张拉锁止器件,开展基于隧道结构预留微孔的便携“手枪式”光纤自动泵送与接收装置研发;开展广域性、长持时隧道光纤传感网搭建方法研究,优选出适用于隧道应变场、温度场监测的光纤传感网络搭建方案。
2025年7月— 2025年9月	完善光纤传感器智能机械化泵送铺设装备,形成分布埋入式光纤传感器选型方法,开展室内模拟实验验证布设工艺与布设方法;开展隧道健康与安全监测评估平台的模块开发与平台搭建。
2025年10月— 2025年12月	基于实体工程开展调研工作,提出适用于隧道应变场、温度场监测的光纤传感网络搭建方案,研究基于搭建方案的光纤信号的应变场、温度场解析分析方法;提出实体工程光纤传感网布设搭建方案。
2026年1月— 2026年3月	开展实体工程传感网布设工作,提出系统的隧道结构光纤传感网长效监测与评估方法,完善隧道变形温差一体化监测评估平台模块。
2026年4月— 2026年6月	进一步完善实体工程传感网布设,上线并使用隧道变形温差一体化监测评估平台模块,验证传感网监测评估预警效果。
2026年7月— 2026年9月	结合依托工程应用,开展成果总结提炼,完成研究报告、工作报告等成果修编,申请课题验收。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本课题依托工程为:安康至岚皋高速公路,起点位于安康市汉滨

区建民镇忠诚村，设枢纽立交与已建成通车的十天高速公路连通；终点位于岚皋县大巴山隧道中的省界处，与重庆市城口段高速公路相接。项目全长 91.34 公里，其中安康至岚皋段全长 47.83 公里，岚皋至陕渝界段全长 41.17 公里。

岚皋至陕渝界段项目地处秦岭、巴山之间，桥隧比高达 96%，是全省在建项目中桥隧比最高的山区高速公路，主线设置隧道 17 座(不含大巴山隧道重庆段)，其中特长隧道 16382.04m/3 座，长隧道 1046.81m/1 座，特长隧道凤树梁隧道和大巴山隧道作为控制工程。项目于 2022 年 11 月全面开工建设，计划于 2025 年底建成通车

5. 有关技术经济指标

(1) 阐明光纤结构层在耦合作用下对应变和温度传递率的影响规律；

(2) 研发隧道结构光纤传感器机械化泵送与一体化安装装置；

(3) 提出基于泵送设备的隧道结构光纤传感机械化布设方法以及光纤传感网搭建方案；

(4) 建立隧道变形温差一体化监测评估平台模块，满足长距离、全天候、智能化的隧道监测需求。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称一公院）始建于1952年，原交通部第一公路勘察设计院，现归属中国交通建设股份有限公司，驻陕西省西安市，是国家大型工程勘察、设计、研究、咨询、监理骨干企业之一，是交通系统最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业，是拥有丰富土木工程经验的国际化工程咨询公司。先后被授予“全国创新型试点企业”、“国家火炬计划重点高新企业”，荣获“全国交通建设科技进步先进集体”、“全国勘察设计行业创新型优秀企业”等称号。

建院六十多年来，一公院累计承担了各类纵横向科技研发项目200余项，拥有国家博士后科研工作站、国家工程实验室、省部级重点实验室多个高端科技创新平台。共获得国家科技进步奖8项（其中一等奖3项），省部级科技进步奖、全国工程技术创新奖等各类科技奖300余项，获国际专利、国家专利、计算机软件著作权和注册商标等近264余项。承担国家及行业、地方技术标准、规范编制修订项目82项，出版专著20余部，发表学术论文1500余篇。

2022年科技部、财政部、国家发改委提出重新统筹布局国家重点实验室布局，开始进行国家重点实验室重组后，一公院在“高寒高海拔地区道路工程健康国家重点实验室”的基础上进行优化重组，联合长沙理工大学、深圳大学为依托单位，成立了“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”，于2023年7月完成了实验室第一届理事会，该实验室是目前道路工程方向唯一全国重点实验室。

近五年来一公院主持或参与的与本项目相关的监方向科研课题如下：

表 5-1 近五年与项目相关科研课题一览表

序号	项目名称	经费 (万元)	项目来源	项目状态
1	分布式光纤应变监测仪《课题五:基于分布式应变测量的特殊土路基和地质灾害监测研究》	480	国家重点研发计划项目	结题 (2021)
2	分布式光纤应变监测仪《课题六:基于分布式应变测量的地下结构工程监测研究》	45	国家重点研发计划项目	结题 (2021)
3	区域综合交通基础设施安全保障技术《课题三:高陡边坡、高填及特殊路基的健康监测、全生命期安全评价和预警平台》	500	国家重点研发计划项目	结题 (2020)
5	黄延高速公路黄土高边坡预警技术	75	陕西省交通建设支持计划项目	结题 (2021)
6	基于光纤传感的智慧桥梁监测系统前置技术研究	1	陕科协企业创新争先青年人才托举计划	在研
7	沈海高速公路深圳机场至荷坳段改扩建项目双洞叠层隧道火灾特性及防灾救援技术专题研究	92.8	深圳高速公路股份有限公司	在研
8	G0615 线久治(川青界)至马尔康段高速公路项目关键技术与示范项目	409.6	四川久马高速公路有限责任公司	在研
9	混合复用光纤传感器增敏与预处理技术研究	20	中交股份科技计划项目	在研
10	高海拔高寒地区工程构筑物灾变监控体系与预警预报技术	40	陕西省科技计划项目	在研

2. 技术力量及人员构成及各自承担的主要工作

姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
李震	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	34	副高级	隧道工程	项目总体负责
董长松	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	42	正高级	隧道工程	项目技术负责
崔锦栋	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	30	中级	道路工程	项目专题负责
黄永益	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	42	中级	计算机科学与技术	项目技术研发
李博融	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	41	副高级	隧道工程	项目技术研发
曹升亮	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	40	副高级	隧道工程	项目技术研发
赵初晔	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	37	副高级	隧道工程	项目技术研发
刘智	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	47	副高级	桥梁工程	项目技术研发
何佳州	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	33	中级	岩土工程	项目技术研发
马志伟	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	28	中级	隧道工程	项目技术研发
苟超	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	29	中级	隧道工程	项目技术研发

李琛	中交第一公路勘察设计院有限公司	男	31	中级	交通运输信息化	项目技术研发
倪勃文	中交第一公路勘察设计院有限公司	男	34	副高级	水利工程	项目技术研发
王君鹭	中交第一公路勘察设计院有限公司	女	34	副高级	岩土工程	项目技术研发
刘昭	中交第一公路勘察设计院有限公司	男	37	中级	隧道工程	项目技术研发
胡博	中交第一公路勘察设计院有限公司	男	28	中级	桥梁工程	项目技术研发
朱佩章	中交第一公路勘察设计院有限公司	男	43	副高级	桥梁工程	项目技术研发

3. 项目主要负责人情况

李震，男，工学硕士，高级工程师，现任中交第一公路勘察设计院有限公司工程信息感知与病害诊治研发中心副总工程师，主要从事工程智能监测、评估预警方法研究。主持科研项目（课题）1项，参与科研项目（课题）21项，参编标准规范2部，授权发明专利7项、软件著作权3项，发表SCI/EI论文6篇，参编专著1部，获陕西省科协企业创新争先青年人才托举计划人才称号，荣获海员建设工会全国委员会科技成果优秀奖1项、中交集团科技进步二等奖1项。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

安岚高速公路岚皋至陕渝界段是安岚高速公路的二期工程，起点位于岚皋县境内，与已经建成通车的安康至岚皋高速公路相接；终点位于大巴山特长隧道陕渝两省（市）交界处，与重庆市在建的城口（陕渝界）至开县高速公路相接，项目全长 41.17 公里，桥隧比高达 96%，是陕西省在建高速公路项目中桥隧比最高的山区高速公路，大巴山特长隧道是安岚高速岚皋至陕渝界工程中的重要部分，全长 13.6 公里，是陕西省在建的最长高速公路隧道。

该项目的实施将促进沿线资源开发和经济社会协调发展，加强陕西、重庆两省市的经济联系和人员往来，为区域经济高质量发展创造更多机遇。同时，它也将成为联系陕西、重庆的重要省际通道，加速密切关中平原城市群、成渝城市群和长江中游城市群三大城市群间的交流合作。

课题拟选取依托工程中围岩等级高、地质条件复杂、施工难度大的隧道作为典型隧道，在隧道建设期间布设分布式光纤传感网，针对隧道二衬收敛变形开展结构健康监测，通过连接隧道健康与安全监测评估平台，为项目提供隧道全天候、自动化、长时域结构健康监测。

2. 投资来源

项目经费估算为 59.85 万元，其中，省交通运输厅补助 19.85 万元，承担单位自筹 40 万元。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

依托工程项目于 2022 年底前开始施工建设，预计工期四年。本课题研究成果拟在安岚高速公路岚皋至陕渝界段工程选择一典型隧道区段开展实验应用。

六、项目经费估算及资金筹措情况

项目经费估算为 59.85 万元，其中，省交通运输厅补助 19.85 万元，承担单位自筹经费 40 万元。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科目	估算数	科目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.85	合计	59.35	19.85	40.00
工程配套研究经费		1.设备费	0	0	0
单位自筹	40.00	(1) 购置设备费	0	0	0
其他经费		(2) 设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	45.75	19.85	25.90
		(1) 材料费	18.25	8.80	9.45
		(2) 测试化验实验加工费	12.45	4.45	8.0
		(3) 燃料动力费	0	0	0
		(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	6.60	6.60	0
		(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事费	7.70	0	7.70
		(6) 其他费用	0.75	0	0.75
		3.劳务费	9.6	0	9.6
		(1) 专家咨询费	3.6	0	3.6
		(2) 聘用人员劳务费	6.0	0	6.0
		(3) 其他劳务费	0	0	0
		(二) 间接费用	4.5	0	4.5
		1.管理费	2.0	0	2.0
		2.绩效支出	2.5	0	2.5

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发[2022]3号）文件执行。

经费预算详细测算说明

一、直接费用

1. 设备费：无。

2. 业务费

(1) 材料费：

主要用于室内模拟实验和实体工程集成验证中分布式光纤测试材料、试验材料，注浆修复材料，装置改造耗材等材料、运输和装卸费用，共计 18.25 万元。

(2) 测试化验实验加工费

主要用于室内模拟实验的混凝土构件缩尺模型、注浆实验模拟、光纤输送装置、张拉装置、传感监测系统等的加工制作，共计 12.45 万元。

(3) 燃料动力费

无。

(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费

差旅费：主要包含依托工程现场调研、测试、工作等所发生的食宿、交通、补贴等费用。按每人每次进出现场往返路费、住宿费、市内交通费等计 2300 元/人次，每次 4 人，按 5 次计算，共计： $2300 \times 4 \times 5 = 4.60$ 万元。

会议费：根据项目需要，组织举行立项评审、研究大纲评审、中期审查、验收鉴定等会议共 4 次，每次会议为期 1 天。按 5000 元/天计算，共计 $5000 \text{ 元} \times 1 \text{ 天} \times 4 \text{ 次} = 2$ 万元。

国际合作与交流费：无

差旅费/会议费/国际合作与交流费合计 6.6 万元。

(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费/印刷费

主要包括文章发表、专利申请、科技查新以及各阶段成果报告印刷费，共计 7.7 万元。

(6) 其他费用

主要包括其它科研项目实施过程中不可或缺的支出服用，共计 0.75 万元。

3. 劳务费

(1) 专家咨询费

为保证项目研究过程的顺利进行以及研究成果的先进性，历次会议邀请行业内知名专家对课题研究进行咨询，咨询费用标准，按照 1500 元/人*天计算。 $(1500 \text{ 元/人*天}) * 6 \text{ 人/次} * 4 \text{ 次} * 1 \text{ 天} = 3.60 \text{ 万元}$ 。

(2) 聘用人员劳务费

根据项目需要，投入临时聘用人员协助项目的开展，临时工聘用人员主要服务于现场科研监测协助和车辆驾驶等。

计划聘用临时工 1 人，标准为 5000 元/人*月，每人累计工作 12 个月，共计 $1 \text{ 人} * 5000 \text{ 元/人*月} * 12 \text{ 月} = 6.0 \text{ 万元}$ 。

(3) 其他劳务费

无。

二、间接费用

(1) 管理费

根据本项目情况，申报单位作为企业单位，其占用的公用资源折旧以及日常损耗等计入间接费用，按不超过直接费 8% 计，管理费为 2 万元。

(2) 绩效支出

用于科研技术开发人员的绩效支出，按不超过直接费 5% 计，费用为 2.5 万元。

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标

围绕隧道智能运营领域，针对隧道长距离、全天候、智能化的安全监测需求，开展基于埋入分布式光纤传感器的结构变形场、温度场监测与评估技术应用研究。通过研究光纤及其封装结构与隧道结构本体的耦合作用下传感性能影响机理，为埋入式光纤应变与温度监测、封装方法的选择及胶结材料的选型提供理论依据，研发隧道结构光纤传感器泵送设备及成套机械化布设方法，提出光纤及胶结材料的选型依据，基于隧道安全性要求优选出适宜的光纤传感网搭建方法，形成完备的隧道健康与安全长效、广域监测与评估技术，依托实体工程项目，开展分布埋入式光纤传感网搭建实体工程验证，建立广域性、长持时、高耐久的隧道变形温差一体化监测评估平台。主要考核指标如下：

(1) 阐明光纤结构层在耦合作用下对应变和温度传递率的影响规律；

(2) 研发隧道结构光纤传感器机械化泵送与一体化安装装置；

(3) 提出基于泵送设备的隧道结构光纤传感机械化布设方法及光纤传感网搭建方案；

(4) 建立隧道变形温差一体化监测预警平台模块，满足长距离、全天候、智能化的隧道监测需求。

2.提交的研究成果及其形式

(1) 开发1套便携装置：隧道结构光纤传感网机械化泵送布设

一体化装置；

(2) 开发 1 个软件平台模块：隧道结构健康光纤网长效监测预警平台模块；

(3) 申请国内外发明专利 1 项；

(4) 申请软件著作权 1 项；

(5) 发表核心以上论文 2 篇；

(6) 编制研究总报告 1 册，工作报告 1 册。

3.经济、社会、环境效益分析

根据《交通运输部关于支持引导交通运输传统基础设施数字化转型升级的通知》，要求加快推进交通基础设施数字转型，支持重要交通基础设施提升安全预警和应急处置能力，围绕重点路段、隧道、桥梁、浅险航段等重要基础设施，建立完善多源立体监测网络，提高基础设施安全风险识别和预警能力。基于上述要求细则，为了维持隧道的安全稳定运维，加快推进交通基础设施数字转型，全面提升交通基础设施安全风险识别与应急保障能力，需要对混凝土结构保持长期的健康监测，研究多源、多方式联合的桥隧结构健康监测技术，构建拉萨市绕城高速公路工程桥隧结构智慧监测网络，搭载基础设施安全监测与运维管控平台。

光纤传感监测具有测量距离长和空间分辨率高的特点，可以实现远距离监测、全自动全时监测、高耐高韧性监测，对比传统隧道安全监测技术，具备无人化、自动化、智能化的优点，可以实现相比传统点式监测测点数量 10 倍以上的测点，有效节约监测成本，是一种资

源节约型的可靠监测手段。构建光纤传感网的隧道变形温差一体化监测评估技术及安全状态评估模块，在节约社会资本，减少生产排放的同时，对进一步提升我国公路隧道工安全智慧运营水平和防灾救灾能力，推动我国公路隧道长寿命安全智慧运维具有重大意义。

八、其它需要说明的问题

无。

九、申请单位意见

课题适应我国公路隧道运营发展趋势，聚焦隧道结构健康智能监测预警，探究光纤与隧道结构耦合作用传感机理，开展光纤传感器机械化布设方法、隧道结构健康监测与评估技术等关键技术研发，开发隧道健康与安全监测评估平台，为隧道智能化、全天候结构健康监测提供技术支持，进一步提升我国公路隧道结构健康监测能力和安全智慧运营水平

课题依托工程和配套经费落实，具备开展科技攻关的条件！



单位负责人：(签字)



年 月 日

隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究

可行性研究报告评审意见

2024年8月23日，陕西省交通运输厅在西安主持召开了“隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究”(项目编号:24-50K)项目可行性研究报告评审会。与会专家(名单附后)听取了项目组的汇报，审阅了可行性研究报告，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目开展基于分布式光纤传感器布设工艺、结构应变场温度场监测与评估技术的应用研究，对提升公路隧道数字化运维水平具有现实意义，立项必要。

二、研究内容基本合理，目标明确，技术路线基本可行。

三、研究人员组成合理，前期研究基础扎实，依托工程落实，经费预算合理，具备开展研究工作的条件。

建议：

- 1.完善研究内容，凝练创新性；
- 2.进一步明确技术的应用场景。

主任委员：



2024年8月23日

可行性研究报告评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	苏臣宏	西安公路研究院有限公司	隧道工程	隧道工程	正高工	苏臣宏
2	委员	李宗华	陕西西韩城际铁路集团公司	交通工程	公路工程	正高工	李宗华
3	委员	卜东平	西安建工集团	土木工程	桥隧专业	正高工	卜东平
4	委员	王明年	西南交通大学	隧道及地下工程	隧道及地下工程	教授	线上
5	委员	焦康杰	中铁二院工程集团有限责任公司	隧道工程	隧道工程	高工	线上

专家审查意见表

项目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究				
专家姓名	杨平	职务/职称	高工	专业	土建
专家单位	西安建工集团有限公司		联系电话	18991319680	

评审意见

本项目基于分布式光纤网的隧道健康状态监测,具备无人化、自动化、智能化的优点,立项必要。

建议:

1. 后期植入与前期埋入结合起来。
2. 明确检测的主要内容,无人化、自动化、智能化的分类或共同的项目。
3. 应用结果对运营的结果指导,成果展示。

评审专家(签字):

杨平

2024年8月23日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究				
专家姓名	李宗华	职务/职称	正高工	专业	隧道工程
专家单位	陕西西韩城际铁路有限公司			联系电话	15029929222

本课题基于分布式光纤应变温度传感技术，探究光纤与隧道衬砌混凝土结构耦合机理，研发隧道结构的分布式光纤传感器高效布设方法，建立基于隧道结|应力场、温度场的长效光纤传感监测网并开发分布式光纤网的隧道健康状态监|评估平台。该研究成果对进一步提升公路隧道安全智慧运营水平和防灾救灾能|具有一定的意义，同意项目立项。课题组前期工作基础扎实，研究目标明确，|技术线路基本可行，考核指标基本明确，研究人员结构合理，依托工程落实，具|开展研究工作条件。

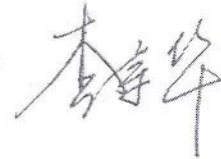
建议：

1、细化研究内容，针对光纤传感器的布设位置研究、锚固方法研究、传输距|研究等，应充分考虑隧道工程施工因素、洞内施工环境因素以及运营过程车辆|行干扰等因素；

2、前期调研和基础工作中，补充已成熟的隧道健康监测方法及成果资料的收|和分析；

3、结合隧道施工安全、运营安全要求，拓展一体化监测评估平台研发子模块。

评审专家(签字):



2024年8月23日

专家审查意见表

页目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究				
专家姓名	李平	职务/职称	正高	专业	隧道
专家单位	西安研究院有限公司			联系电话	13991276266

评审意见

课题研究对提高隧道结构监测的效率及准确度是有较大的现实意义，立项必要。

1. 疏理课题研究技术路线，突出创新性。
2. 依托项目应具有代表性，即地质复杂、施工难度大等。

评审专家（签字）：

李平

2024 年 8 月 23 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究				
专家姓名	焦康杰	职务/职称	高工	专业	隧道工程
专家单位	中铁二院工程集团有限责任公司			联系电话	18786784873

评审意见

一、总体评价

本项目研究内容基本合理，具有一定的现实意义，立项必要。

二、建议

1. 完善研究内容，凝练创新点。
2. 进一步明确技术研究应用的主要场景。

评审专家（签字）：

焦康杰

2024年8月23日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究				
专家姓名	王明年	职务/职称	副院长、教授	专业	隧道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13808029798

评审意见

、总体评价

项目研究具有一定的实际工程应用价值。

、建议

进一步明确课题的创新性

明确隧道内具体应用场景。

评审专家（签字）： 王明年

2024年8月23日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家意见处理表

项目名称：隧道光纤传感监测网高效构建及广域评估技术研究（项目编号：24-50K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	苏臣宏	梳理课题技术路线, 突出创新性。	答: 已重新梳理技术路线, 并在可研报告中进行修改。“课题通过研究光纤与隧道结构的耦合作用下传感性能影响机理, 为埋入式光纤应变与温度监测、封装方法的选择及胶结材料的选型提供理论依据, 研发埋入式隧道光纤传感器泵送设备及成套机械化布设方法, 提出光纤及胶结材料的选型依据, 基于隧道安全性要求优选出适宜的光纤传感网搭建方法, 形成完备的隧道健康与安全长效、广域监测与评估技术, 依托实体工程项目, 开展分布埋入式光纤传感网搭建实体工程验证, 建立广域性、长历时、高耐久度的隧道变形温差一体化监测评估平台模块。”
2	苏臣宏	依托工程具有代表性, 即地质复杂, 施工难度大等。	答: 依托工程描述中, 按建议增加以下内容“课题拟选取依托工程中围岩等级高、地质条件复杂、施工难度大的隧道作为典型隧道。”
3	李宗华	细化研究内容, 针对光纤传感器的布设位置研究、锚固方法研究、传输距离研究等, 应充分考虑隧道工程施工因素、洞内施工环境因素以及运营过程车辆通行干扰等因素。	答: 技术路线实施方案(4)分布式光纤传感器布设装置改良与研发中, 已计划开展研究, 改造适用于小尺寸管道注浆的光纤两端锚固与张拉锁止器, 按建议增加以下内容“探明光纤泵送最长距离、注浆最适宜距离、张拉锚固力度等工艺参数。”光纤传感器的布设位置主要由光纤传感网布设方式决定不做单独研究, 将在实体工程光纤传感网布设中, 充分考虑隧道工程施工因素、洞内施工环境因素以及运营过程车辆通行干扰等因素,

4	李宗华	前期调研和基础工作中,补充已成熟的隧道健康监测方法及成果资料的收集和分析。	答: 技术路线实施方案(1)收集国外相关技术资料及最新研究成果中,按建议增加以下内容“收集国内外光纤传感器在隧道结构健康监测方面材料及工程应用相关资料”。
5	李宗华	结合隧道施工安全、运营安全要求,拓展一体化监测评估平台研发子模块。	答: 项目将目标聚焦于开发具备衬砌变形、温差监控、异常定位、评估评定等功能的监测评估平台模块,一方面因为项目规模有限,一方面因为目前大部分高速或隧道均有自行设计、研发监测平台系统,因此项目研发平台模块,后期按照施工安全、运营安全等实际需求,对接不同监测平台系统,融入实体工程监测网络。
6	卜东平	后期植入与前期植入结合起来。	答: 项目研究的埋入式分布式光纤传感器,目的是针对隧道二衬结构开展隧道收敛变形监测,属于前期植入;但项目研究的光纤传感网搭建方案及监测评估平台模块也适用于隧道拱顶监测、周边沉降监测等其他结构,针对这些结构监测,可以采用前期植入等方案,通过此方式将后期植入与前期植入相结合。
7	卜东平	明确检测的主要内容,无人化、自动化、智能化的分类或共同的项目。	答: 技术路线实施方案(6)光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台模块开发与应用和依托工程中增加以下内容“针对隧道二衬收敛变形开展结构健康监测”。项目使用的分布式光纤监测技术,可以监测全线隧道二衬结构的变形情况,大大降低人力巡检频次,实现无人化;将监测数据连接到云端监测评估平台模块,可以对监测数据进行自动化采集、评估,基于算法和异常数据库开展智能化预警。

8	卜东平	应用对运营的结果指导，成果展示。	<p>答：在技术路线实施方案(6)光纤传感网的隧道健康与安全监测评估平台模块开发与应用中，按建议增加评估展示模块。项目研发的监测评估平台模块，可以反应结构的变形场、温度场变化，识别异常情况，可以辅助隧道运营期日常管理与应急决策。</p>
9	王明年	进一步明确课题的创新性。	<p>答：项目创新性的研发适用于隧道二衬的光纤成套布设装置，提出适用于不同光纤传感网的变形场解析方法，开发适用于分布式光纤监测技术的评估平台模块，在课题研究过程中，将进一步明确课题的创新性。</p>
10	王明年	明确隧道内具体应用场景。	<p>答：项目研究的埋入式分布式光纤传感器，目的是针对隧道二衬结构开展隧道收敛变形监测，开展结构健康监测，已按照建议在可行性研究报告中明确具体应用场景。</p>
11	焦康杰	完善研究内容，凝练创新点。	<p>答：项目创新性的研发适用于隧道二衬的光纤成套布设装置，提出适用于不同光纤传感网的变形场解析方法，开发适用于分布式光纤监测技术的评估平台模块，在课题研究过程中，将进一步完善研究内容，凝练创新点。</p>
12	焦康杰	进一步明确技术研究应用的主要场景。	<p>答：项目研究的埋入式分布式光纤传感器，目的是针对隧道二衬结构开展隧道收敛变形监测，在后续实体工程应用中，将进一步明确技术研究应用的主要场景。</p>

李岩

项目负责人（签字）：_____