

项目合同编号：25-41K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究

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：刘 智

通讯邮编、地址：710065 陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：029-88441415-8205

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 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

面向交通部“2035 数字孪生公路建设目标”，针对极端服役环境下道路工程性能状态感知、评价及工程改扩建、韧性提升方案比选技术难题，研究基于道路工程领域模型的智能孪生感知技术，依托在陕多年参建项目的设计咨询及道路灾害风险排查数据资源禀赋，建立高质量在役道路工程多源感知数据集，构建融合工程信息及知识图谱的道路感知模型，提出数字孪生公路技术框架下道路感知模型“感、算、辨、知、控”应用方案，研发感知模型为核心的道路工程数字孪生智能辅助决策系统，支撑开展省域极端环境多场景道路运行安全及防灾预警技术应用。

(1) 极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系（架构及数据标准）研究

开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术架构研究，主要包括数字主线及孪生统一框架，确保技术架构实现数据的自动采集、交互传输以及服役状态的监测评估与预警，从而提升道路工程的智能化水平和服役性能。开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知数据标准研究，建立统一的数据采集、处理、存储和交换标准，确保数据的互操作性和可扩展性，从而为智能孪生技术在道路工程中的广泛应用提供坚实的数据基础。

(2) 省级典型在役道路工程感知数据集构建研究

开展适用于机器学习的典型在役道路工程感知数据集构建研究，收集并梳理公司多年来积累的既有项目典型工点（高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧）的感知数据和近年来道路灾害风险排查数据，按制定的数据标准进行分类、数字化存储，制作一套工程感知案例数据库。基于上述工程感知案例数据库，研发数据处理软件工具，按照典型工点专业特征和感知模型需求场景生成对应数据集；构建在役道路工程多源感知数据集 1 个，覆盖典型极端服役环境工点不少于 3 个。

(3) 融合工程信息及知识图谱的道路感知模型研究

开展道路工程领域知识图谱构建，覆盖公司既有项目典型工点信息和近年

来道路灾害风险排查的先验知识。开展基于感知数据集、融合知识图谱构建道路工程领域的感知模型研究。

(4) 极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究

开展极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究。拟构建一个包含物理层、虚拟层、数据层和服务层的综合体系结构，并提供可视化的数据分析展示；研究感知算法模型在不同场景下的适用性，为极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统提供科学的决策分析支持。

2. 技术关键

项目主要研究内容涵盖 3 项关键技术研究：

- (1) 适用于机器学习的高质量在役道路工程多源感知数据集构建。
- (2) 基于人工智能技术的道路感知模型研究。
- (3) 极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策技术。

3. 依托工程（依托工作）

(1) 依托工作

① 科技研发：本项目团队主要成员均来自国家级和省部级科研平台，长期以来在相关工程领域累积了丰硕的研究成果，尤其是在数据资源管理、智能算法及预警系统开发等方面所积累的丰富研究与实践经验，将为本研究的开展提供极具价值的参考与借鉴。

② 数字化标准：本项目团队在道路工程数字化标准规范制修订方面成绩突出，尤其是公路工程信息模型、数字化交付及智能勘察设计等方面积累了丰富的编制和工程应用经验，将为本研究的开展提供技术支撑。

(2) 依托工程

本研究拟依托前期有研究基础的黄陵至延安高速公路沿线高边坡、宝坪高速公路天台山超长隧道群、宝汉和西汉等典型项目，梳理科研成果和感知数据资源，凝练共性关键技术。紧抓本公司参建 G5、G70 陕西省域路段高速公路安全韧性提升等工程契机，积极推进研究成果在实际项目中的应用转化。

二、考核指标

1. 预期目标

(1) 针对极端服役环境下道路工程数智化防灾需求，综合运用多学科交叉技术，涵盖感知数据融合、数字孪生、人工智能技术应用等前沿领域，构建适用于极端服役环境的道路工程智能孪生感知技术体系。

(2) 构建高质量在役道路工程多源感知数据集，覆盖极端服役环境道路工程典型高陡边坡、桥隧结构及特殊路基等专业领域的专业数据，采用智能数据挖掘和分析技术，研究适用于道路基础设施感知领域的专业模型。

(3) 集成研发道路工程数字孪生智能辅助决策系统，支撑开展省域极端环境多场景道路运行安全及防灾预警技术应用。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 构建省级在役道路工程多源感知数据集 1 个，覆盖典型极端服役环境工点不少于 3 个。

(2) 道路基础设施多专业感知领域模型 1 个，感知能力包含道路子专业不少于 3 种。

(3) 集成研发极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统 1 个，演示典型场景不少于 3 个。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效益分析

① 建设陕西特色道路基础数据集，赋能精准养护并降低成本。

本项目产出覆盖陕西省内典型极端环境高速公路风险路段的高质量、标准化多源感知数据集。该数据集是研发后续智能算法模型的基础，能支撑对黄土边坡、桥隧病害等风险的精准识别分析，其本身即可作为行业公共数据资源赋能精准养护，显著降低同类技术研发的基础数据成本。

② 集成研发智能辅助决策系统，培育安全运维数据服务新业态。

项目产出的省域道路数字孪生智能辅助预警决策系统，将整合多源感知数据、专业算法模型，形成省域可复用的基础核心数据资产。基于此，可衍生和培育本省在道路交通基础设施安全运维领域的数据服务新模式，创造持续的经

济价值。

(2) 社会效益分析

① 输出陕西特色技术方案，贡献复杂环境防灾智慧。本项目围绕陕西特殊环境形成的“数据-模型-平台”全链条技术成果，具有鲜明的地域针对性和示范价值。这套系统性方案，不仅能为陕西培养一支扎根一线的复合型技术队伍，更能为我国广大面临类似黄土、山地灾害挑战的地区，提供一套经过实践验证、可复制推广的公路智慧防灾分析范式，为提升国家特殊地区重大基础设施韧性贡献关键的“陕西智慧”与解决方案。

② 筑牢三秦路网安全防线，守护公众出行平安。项目成果直接服务于提升陕西公路网在复杂地质气候下的主动防控能力。通过对感知数据的智能分析，能够实现对黄土滑坡、桥隧结构损伤、路基水毁等陕西典型隐患的早期精准识别与动态风险评估。这将显著降低因突发性灾害导致的交通事故与交通中断风险，直接保障人民群众生命财产安全，并确保穿越秦岭、黄土高原等关键战略通道的持续畅通，为全省经济社会稳定运行提供基础保障。

4. 成果提供形式

(1) 有形交付物：

- 1) 研究报告：包括立项、中期及验收报告。
- 2) 数据/数据库：包含边坡及结构的感知数据集。
- 3) 软件：原型系统（demo）1套。

(2) 无形交付物：

- 1) 发表论文 2 篇。
- 2) 申请专利 2 项，提交专利申请受理通知书等证明材料。
- 3) 申请软件著作权 1 项。
- 4) 技术指南 1 项。

5. 其他考核指标

- (1) 开展的技术交流不少于 1 次。
- (2) 提交至少一个陕西省内实际工程应用案例，展示研究成果的实用性与效果。

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
2026.03-2026.06	1. 调研陕西及周边省份在役道路工程多源感知数据分析和监测预警技术现状和管养系统工程应用情况，形成调研报告 1 份； 2. 开展省域极端服役环境的道路工程智能孪生感知技术体系架构设计； 3. 梳理道路工程信息智能感知数据标准规范及关键技术指标，策划依托本项目研究拟申报标准 1 份。
2026.07-2026.12	1. 确定道路工程多源感知数据标准； 2. 极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统架构设计、确定主要功能模块； 3. 开始构建高质量感知数据集； 4. 完成论文投稿 1 项、专利申请 1 项。
2027.01-2027.06	1. 开展道路感知模型研究； 2. 研发道路数字孪生智能辅助预警决策系统主要功能模块； 3. 申请专利 1 项； 4. 完成构建高质量感知数据集 1 份。
2027.07-2028.03	1. 完善项目工作报告、知识产权成果总结； 2. 完成道路数字孪生智能辅助预警决策系统集成测试； 3. 完成《极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术应用指南》（初拟题目）编制。 4. 总结凝练研究成果及报告，准备项目验收。

四、项目经费

项目总经费：60.00 万元
交通运输厅补助：19.87 万元
自筹资金：40.13 万元

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	56.00	19.87
1. 设备费	7.50	2.50
(1) 购置设备费	4.50	1.50
(2) 试制设备费	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	3.00	1.00
2. 业务费	39.20	15.37
(4) 材料支出	1.50	0.50
(5) 测试化验实验加工支出	7.50	2.50
(6) 燃料及动力支出	0.00	0.00
(7) 差旅支出	8.00	6.60
(8) 会议支出	5.00	1.00
(9) 国际合作与交流支出	8.00	1.00
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	6.00	2.50
(11) 其他支出	3.20	1.27
3. 劳务费	9.30	2.00
(12) 劳务性支出	4.80	0.00
(13) 咨询专家支出	4.50	2.00
(二) 间接费用	4.00	0.00
4. 管理费	2.00	0.00
5. 绩效支出	2.00	0.00
合 计	60.00	19.87

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	1
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	2
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、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（简称“中交一公院”）是我国交通工程咨询、勘察、设计、研究领域大型骨干企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。现有职工 3000 余人，各类职业注册人员近 300 人，培养包括中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、万人计划、企业长江学者、全国创新争先奖、国务院特殊津贴专家等省部级以上人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队。经过七十余年的砥砺奋进，中交一公院已发展成为资产总额逾 80 亿元，年新签合同额超过 60 亿元的世界综合交通领域的卓越技术服务商，建设项目遍布全国 30 个省、市、自治区及全球五大洲 30 多个国家，是共建“一带一路”的重要参与者和交通工程的技术贡献者。中交一公院始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系。拥有全国重点实验室、国家野外观测站、国家行业研发中心、博士后科研工作站等高端科技创新平台 22 个，拥有包括工程咨询甲级、工程勘察综合甲级、工程设计综合甲级在内的各类各级资质 30 余项。依托“人才—团队—平台”的创新体系，承担各类科研项目 1000 余项，其中国家和省部级重大项目 200 余项；累计获得国家专利 500 余项，计算机软件著作权 230 余项，发表学术论文 5000 余篇；主编参编国家、行业标准规范制修订项目 200 余项；编译欧、美、日等国外主流标准规范 50 多部，组织编译外文版中国工程建设规范 18 部；累计获得国家级、省部级科技奖 400

余项，其中国家科技进步一等奖 3 项、二等奖 7 项、国家技术发明二等奖 1 项。

本项目由中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担全部研究工作执行直至结题验收。

项目负责人：刘智，统筹项目推进与技术质量管理，主导技术路线制定及协调研发资源。

项目技术顾问：富志鹏，项目总体技术顾问，指导框架制定，研究体系搭建咨询，提供顶层设计支撑。

项目协调负责人：曹升亮，项目技术难点提供咨询与解决方案，项目组内资源协调。

项目分项负责人：

董长松，研究内容一分项负责人，负责研究技术体系、标准研究，桥梁与隧道结构感知数据分析，项目技术质量。

李博融，研究内容二分项负责人，负责研究道路边坡感知数据分析、模型验证，技术成果工程应用。

李 震，研究内容三分项负责人，负责研究道路路基感知数据分析、模型验证，技术成果工程应用。

黄永益，研究内容四分项负责人，负责研究系统集成、软件算法适配、模型封装，系统测试及部署。

项目研发骨干：

王君鹭，研究空天地一体化监测技术、路基边坡感知数据分析。

胡 博，研究桥梁与隧道结构数据集构建、算法模型及应用技术。

张 续,研究高质量数据集构建、智能感知算法模型及系统集成。

李文帅,软件工具链、监测预警系统、集成测试研发。

刘 毅,高质量数据集、接口标准、感知数据分析算法研发。

贾润洋,研究数字孪生技术、监测预警系统集成及测试。

王 涵,项目需求调研及技术产业应用示范。

杨钰婷,项目软件测试及依托工程应用。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司							
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	签名
1	刘智	1977-12	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高工/分院副总工程师	智能工程	项目负责人	刘智
主要研究人员							
2	富志鹏	1975-10	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高工/总工程师、副经理	道路与铁道工程	技术顾问	富志鹏
3	曹升亮	1984-02	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高工/分院党委书记、研发中心主任	隧道工程	项目协调	曹升亮
4	董长松	1982-09	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高工/研发中心总工	隧道工程	研究内容一分项负责	董长松

5	李博融	1983-01	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工/分院副总工程师	岩土工程	研究内容二项负责	李博融
6	李震	1990-09	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工/研发中心副总工	道路与铁道工程	研究内容三分项负责	李震
7	黄永益	1982-10	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工	计算机科学与技术	研究内容四分项负责	黄永益
8	王君鹭	1990-03	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工	岩土工程	技术研发	王君鹭
9	胡博	1998-07	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	工程师	桥梁工程	技术研发	胡博
10	张续	1994-05	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	工程师	信息系统项目管理	算法开发	张续
11	李文帅	1995-11	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	助工	信息系统集成	软件开发	李文帅
12	刘毅	1999-04	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	助工	信息系统集成	算法开发	刘毅

13	贾润洋	1999-06	中交第一公路勘察设计院有限公司	助工	交通工程	系统集成测试	贾润洋
14	王 涵	1994-08	中交第一公路勘察设计院有限公司	工程师	产业发展	需求调研及技术应用	王 涵
15	杨钰婷	1999-08	中交第一公路勘察设计院有限公司	助工	道路工程	需求调研及技术应用	杨钰婷

八、信息表

项目合同编号		25-41K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究							
项目实施所在地		陕西省		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		60 万元		厅 拨		19.87 万元			
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	陕西省西安市					代码	610100	
	通讯地址	陕西省西安市科技四路 205 号					邮编	710065	
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码		
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1								
	2								
项目负责人	姓 名	刘智		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1977	
	学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
	职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
	联系电话	13571881466 /029-88441415-8205		电子邮箱		liuzhcccc@163.com			
项目联系人	姓名	胡博		性别		男			
	联系电话	17748994508 /029-88441415-8212		电子邮箱		2767637682@qq.com			
项目组人数	15	高级	8	中级	3	初级	4	其他	
主要研究内容 (100 字以内)	极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系（架构及数据标准）研究；省级典型在役道路工程感知数据集构建研究；融合工程信息及知识图谱的道路感知模型研究；极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究。								
成果属性	G	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							

九、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.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。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，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。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.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。

5.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。

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、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
张喆

2021年3月27日

联系人：（签字）

（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）

王学军
印

2021年3月27日

项目负责人：（签字）

刘智

（公章）

电 话： 029-88441415-8205

财务负责人：（签字）

董育辉

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

账 号：26127101040000725

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：中交第一公路勘察设计
研究院有限公司

项目负责人：

刘智

2026年3月18日

项目编号: 25-41K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 极端服役环境下道路工程智能孪生
感知关键技术及应用研究

申请单位: 中交第一公路勘察设计研究院有限
公司 (盖章)

联系人: 刘智

电 话: 029-88441415-8205

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目 录

一、 项目研究的背景和必要性	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 项目概括	2
1.4 市场推广前景	3
二、 前期科研及工作基础	3
2.1 国内外研究现状	3
2.1.1 国外研究现状	4
2.1.2 国内研究现状	5
2.1.3 国内外发展趋势	7
2.2 项目研究难点	8
2.3 前期工作基础	9
2.4 参考文献	12
三、 实施方案	16
3.1 拟解决的关键问题	16
3.2 主要研究内容及实施方案	16
3.3 研究技术路线	18
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	20
3.5 有关技术经济指标	21
四、 项目承担单位及参加单位概况	21
4.1 单位概况	21
4.2 技术力量及人员构成	23
4.3 各自承担的主要工作	23
4.4 项目主要负责人情况	25

五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	25
5.1 依托工程（工作）概况	25
5.2 投资来源	28
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	28
5.4 组织管理形式	29
六、 项目经费估算及资金筹措情况	31
七、 项目绩效指标	33
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	35
8.1 项目预期目标	35
8.2 提交的研究成果及其形式	35
8.3 经济、社会、环境效益分析	36
8.3.1 经济效益分析	36
8.3.2 社会效益分析	36
九、 其它需要说明的问题	37
无	37
十、 申请单位意见	37

一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

我国幅员辽阔，拥有复杂多样的地形地貌和气候条件，公路交通网络规模宏大，众多高速公路及干线公路服役已超十年甚至三十年。随着全球气候变化加剧和人类工程活动增强，暴雨、暴雪、洪水、滑坡等极端服役环境事件频发，对道路基础设施的安全运营构成了严峻挑战。特别是一些早期建设的公路，其特殊路基、桥梁、隧道、边坡等结构物本身可能存在隐蔽病害或性能退化，在持续增长的交通荷载与极端环境的叠加作用下，极易引发路基塌方、桥梁垮塌等重大安全事故，严重威胁人民群众生命财产安全和交通大动脉的畅通。近年来，广东梅大高速、陕西丹宁高速等路段发生的灾害事故，进一步凸显了道路工程风险监测与防灾预警的重要性。

陕西省地处黄土高原和秦岭山区，高速公路无可避免地穿越众多山体，由于地形、地质条件限制的高速公路沿线滑坡灾害屡见不鲜，多条在役高速公路包含高填深挖路基、高墩大跨桥梁、特长隧道、高陡边坡、隧间桥等风险路段。在极端天气和地质灾害的影响下，运营安全风险尤为突出。为此，急需探索和应用更先进、更智能的技术手段，提升对道路基础设施服役状态的感知能力和风险预警水平。

当前，新一代信息技术，特别是数字孪生、人工智能技术的快速发展，为解决上述问题提供了新的思路。数字孪生技术能够构建物理实体在虚拟空间的映射，实现实时仿真与动态优化；而基于大数据的人工智能模型则能深度挖掘多源信息，提升风险辨识的精准度。然而，现有研究多聚焦于项目级的点状应用，缺乏从省级视角出发，面向多路段、多专业融合的智能化监测预警体系研究。因此，开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术研究，对于提升陕西省乃至全

国公路网的数智化防灾减灾能力具有重要的现实意义。

1.2 研究目的

(1) 极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系研究。面向极端服役环境下在役道路工程运行安全监测、风险识别与预警决策支撑需求,研究构建道路工程智能孪生感知技术体系,形成支撑多源感知数据统一接入、规范管理与协同应用的总体框架,**为道路工程数字孪生技术应用奠定基础。**

(2) 省级典型在役道路工程感知数据集构建研究。面向典型工点感知数据分散、异构性强、难以直接支撑人工智能建模的问题,形成省级典型在役道路工程多源感知数据集与工程感知案例数据库,**夯实道路工程智能感知的数据底座。**

(3) 融合工程信息及知识图谱的道路感知模型研究。面向工程信息、风险排查先验知识与感知数据难以协同利用的问题,构建融合工程信息及知识图谱的道路感知模型,提高模型对典型工点与复杂环境场景的适用性,**为道路工程状态感知、风险研判与预警分析提供模型支撑。**

(4) 极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究。面向现有道路工程监测预警系统数据、模型与业务应用衔接不足的问题,形成道路数字孪生智能辅助预警决策系统,实现感知数据、知识信息与模型结果的集成展示与分析应用,**为极端服役环境下道路工程运行状态研判、风险预警与辅助决策提供技术支撑。**

1.3 项目概括

面向交通部“2035 数字孪生公路建设目标”,针对极端服役环境下道路工程性能状态感知、评价及工程改扩建、韧性提升方案比选技术难题,研究基于道路工程领域模型的智能孪生感知技术,依托在

陕多年参建项目的设计咨询及道路灾害风险排查数据资源禀赋，建立高质量在役道路工程多源感知数据集，构建融合工程信息及知识图谱的道路感知模型，提出数字孪生公路技术框架下道路感知模型“感、算、辨、知、控”应用方案，研发感知模型为核心的道路工程数字孪生智能辅助决策系统，支撑省域极端环境多场景道路运行安全及防灾预警体系建设。

1.4 市场推广前景

(1) 项目产出的省域道路数字孪生智能辅助预警决策系统，将整合多源感知数据、专业算法模型，形成省域可复用的基础核心数据资产。基于此，可衍生和培育本省在道路交通基础设施安全运维领域的的数据服务新模式，创造持续的经济价值。

(2) 项目将同步编制相关技术指南，形成具有行业引领性的规范文件。以标准引领抢占市场先机，确立本成果在数据格式、接口协议等方面的标杆地位，大幅提升成果的竞争力，加速其在道路交通基础设施安全运维领域的规模化应用，为成果的市场推广赢得先发优势。

(3) 团队将积极推进研究成果在实际项目中的应用转化，借助本公司参建的 G5、G70 等路段安全韧性提升等工程契机，为后续向市场推广奠定坚实基础。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

道路交通基础设施的数智化防灾、减灾与抗灾工作，是一项涉及多方面因素、极具挑战性的系统工程。目前国内外研究已经取得了不少成果，理论及工程技术应用方面涉及山区道路减灾^[1]、复杂艰险山区铁路减灾选线^[2]、冻土环境与高速公路建设^[3]；道路基础设施数字化方面近年来围绕研究进展^[4]、道路交通系统数字孪生^[5]、智慧高速

公路系统架构^[6]等热点也取得了系列成果。此外,相似行业如铁路、水利等基础设施运营期数字化研究中,数字孪生技术的融合也在加速^[7-10]。

但是针对极端服役环境下道路工程数智化防灾,尤其是对路域环境、基础设施状态、交通运行状态监测联合感知和融合人工智能技术分类型防灾智能预警及应用的道路工程运维需求,亟待采用融合多学科技术(数字孪生、人工智能领域模型)的进一步研究。

2.1.1 国外研究现状

数字孪生技术(Digital twin, DT)是一种将实体世界的物理系统与数字模型相结合的先进技术,通过实时数据采集、模拟仿真和人工智能算法等手段,创建出物理实体的虚拟模型,以便于进行设计、分析、优化和预测^[11]。

数字孪生的概念最早可以追溯到 Grieves 教授^[12]于 2003 年在美国密歇根大学的产品全生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)课程上提出的“镜像空间模型”,2014 年 Grieves^[13]发布了白皮书,在书中正式确定了“数字孪生”的观点和概念,2016 年 Grieves^[14]进一步丰富了其数字孪生模型的构成;在此之后信息技术行业全球知名的咨询公司 Gartner 将数字孪生连续列入了 2017-2019 年度的十大战略技术,促进了数字孪生的广泛传播,由此数字孪生技术正式走进了大众视野,并逐步稳定发展,在许多行业都发挥了举足轻重的作用^[15]。相较传统的数据库管理或二维平面管理模式,数字孪生通过充分利用实时数据、历史数据、孪生数据以及实体模型,集成多维模拟过程,全面描述和建模物理空间场景中的人、机、物、工况、环境等要素,构建融合交互和高效协同的数字孪生体,具有更高的精度和实用性,被广泛应用于加工制造、建筑管理、医疗健康、装备运维、农业

生产等众多领域,并在学术研究和实际应用中呈现出丰富的发展态势。

2.1.2 国内研究现状

国内学者在道路工程各领域对数字孪生技术的应用开展了大量研究,具体包括:

(1) 数字孪生在公路特殊路基路段应用研究现状

在公路特殊路基路段应用研究领域目前落实的数字实例相对较少,不过已经有学者构建了路基路面结构数字孪生模型的构建的理论。

唐利民^[16]从传统仿真技术与数值模拟知识出发,提出了以“两度三化”作为路基路面工程实体结构数字孪生模型的基本构建准则,其中重点是两度(保真度及精确度)。分析了路基路面结构数字孪生模型的构建框架,依次从数据采集与数据融合、仿真及数字孪生、孪生数据管理、“虚实交互,以虚控实”4个方面讨论了路基路面数字孪生模型的构建技术。近年来,在公路路基路段发生的地质灾害多为路基塌陷。路基塌陷检测面临多种地质条件 and 环境因素的挑战,现阶段已经有学者针对此种灾害的检测方法。一些研究通过集成全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、雷达^[17]和加速度计等多种传感技术,可对路基形变进行实时监测和预警。不过传统的检测方法依赖低效的人工巡检和简单仪器测量,难以准确评估路基塌陷情况^[18]。

(2) 数字孪生在桥梁路段应用研究现状

在桥梁路段,通过建立相应数字空间中的力学分析模型,以实测荷载为连接纽带,来实现桥梁的工作状态和安全预警,为在役桥梁的运维提供重要支撑。数字孪生技术可以实现桥梁结构的实时监测和预测维护,延长桥梁的使用寿命和降低维护成本。

高佐人等^[19]以桥梁构件为单位,一定程度上使工程信息和模型得

到了结合应用。李旭梅^[20]通过建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 技术对桥梁结构进行安全评估, 可视化展示混凝土裂缝病害。赵月悦等^[21]以福厦高铁为依托, 建立了高速铁路桥梁全参数构件库, 实现了基于 BIM 的设计优化与可视化交底等全流程应用。卫星^[22]基于 BIM 和 Dynamo 研发了钢桁梁桥裂纹病害的 4D 信息管理方法, 实现了病害信息的可视化与动态扩展, 为裂纹发展趋势预测提供了支撑。桥梁路段多发生在地震、洪水导致的桥梁冲刷损毁、塌陷, 余静娴等^[23]提出了震后高分辨率遥感图像的道路桥梁灾情信息提取模型, 并以九寨沟地震和汶川地震的震后遥感影像为例, 开展了震后典型生命线工程灾情信息的提取研究。

(3) 数字孪生在隧道路段应用研究现状

在隧道路段, 数字孪生技术通过构建隧道物理实体与虚拟模型之间的实时映射与交互, 能够实现结构健康监测、交通运行状态感知、机电设备智能管控以及突发事件应急推演, 为提升隧道运营安全水平与降低运维成本提供了新的技术路径。近年来, 国内学者围绕隧道数字孪生开展了大量研究工作。

吴兆辉等^[24]提出一种基于三维视频融合的隧道运营管理创新应用方法, 利用 BIM 与点云重建技术构建隧道场景三维模型, 形成虚实融合的静态模型基础, 为隧道虚实融合的数字孪生场景构建奠定基础。梁亚成等^[25]以地铁隧道为对象, 利用智能巡检机器人采集数据, 基于数字孪生构建隧道三维模型, 通过大数据分析实现了对隧道病害与形变的智能预判。许振浩等^[26]针对隧道掘进机的隧道掘进作业, 提出岩-机数字孪生五维模型框架, 搭建了岩-机数字孪生掘进平台, 为实现隧道施工全过程数智化感知、可视、分析、决策提供了理论基础。李明伟等^[27]基于山东沂源隧道工程, 构建了智慧隧道数字孪生系统,

借助物联网技术和数据挖掘技术,实现了基于车牌信息的车道级车辆实时轨迹跟踪,以及“两客一危”等重点车辆的实时跟踪、定位、精准管控与预警功能。周树东^[28]针对高速公路特大断面隧道施工变形监测需求,设计了数字孪生施工变形监测系统,实现了特大断面隧道施工过程中的变形实时监测与预警,为隧道施工安全提供了技术保障。

(4) 数字孪生在边坡路段应用研究现状

在边坡路段,传统地质灾害调查主要依赖人工地面调查,面临效率低、风险高、部分区域无法到达等难题。同时,一些高位隐蔽滑坡发生后地质构造仍不稳定,具有多次致灾能力,因此高位隐蔽滑坡的监测预警既是热点也是难点。近年来,多源监测技术实现了表观评估、卫星智能识别与空天地一体化监测的深度融合与演进^[29]。

随着数字孪生技术的快速发展,公路边坡工程领域正从传统监测向数智化转型。陈超等^[30]提出基于无人机和数字孪生的边坡施工安全动态评估方法,通过无人机采集图像构建三维数字模型,采用点云切片和结构面识别算法获取几何参数,实现了施工活动引起边坡稳定性变化的即时评估与反馈。阿迪力·如苏力等^[31]进一步提出基于数字孪生的边坡工程“及时施工安全控制策略”,构建“场景-实体-关系-事件-控制”建模方法支持跨域信息共享与协同控制,并在黄梅山隧道改扩建工程中应用,实现了施工状态的动态感知与精准干预。

2.1.3 国内外发展趋势

在道路工程领域,数字孪生技术的应用正从点状探索逐步走向系统化发展。目前,数字孪生已在路基塌陷监测、桥梁结构病害评估、隧道施工安全管控、边坡滑移预警等方面取得了一批具有工程实践价值的研究成果,为道路基础设施的数智化运维奠定了技术基础。然而,现有研究多聚焦于单一工点或特定场景的数字建模与仿真分析,面向

道路工程全域的多源感知数据标准化处理、高质量数据集构建,以及融合工程先验知识的专业领域模型研究仍处于起步阶段,在数据融合效率、模型泛化能力等方面存在一定局限性。

作为数字孪生的重要技术基础,信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)的相关标准化工作已取得重要进展。我国于2021年发布的《信息物理系统 术语》(GB/T 40021-2021)和《信息物理系统参考架构》(GB/T 40020-2021)两项国家标准^[32-33],为数字孪生技术的规范发展提供了基础支撑,也为道路工程领域构建可互操作、可扩展的智能孪生感知体系及预警系统研发奠定了标准化基础。如何借鉴上述标准成果,针对高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧等典型工点,合理融合多源极端服役环境监测数据,开展道路数智化防灾预警模型技术研究,形成可支撑工程应用的技术体系,仍是当前研究有待突破的关键问题。

2.2 项目研究难点

尽管数字孪生在道路工程领域的应用研究已取得一定进展,但面向极端服役环境下的工程实际需求,仍面临以下关键技术难点:

(1) **多源感知数据的标准化与高质量数据集构建难度大。**道路工程监测数据来源多样、格式不一、质量参差不齐,缺乏统一的数据采集、处理、存储标准,难以形成可直接用于机器学习的高质量感知数据集。如何制定适应极端服役环境的数据标准,并对历史积累的多源异构数据进行有效清洗、标注与整合,是本研究面临的首要难点。

(2) **融合工程先验知识的道路感知模型构建技术有待突破。**现有道路监测预警多依赖单一数据源和通用算法,缺乏对工程结构专业知识的有效融合。如何构建涵盖高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧等典型工点的知识图谱,并将其与多源感知数据深度耦合,形成具有工程

可解释性的道路感知领域模型，是提升预警准确性的关键难点。

(3) 极端服役环境下多场景协同预警与辅助决策技术尚不成熟。

暴雨、洪水、地震等极端环境叠加作用下，道路基础设施的灾变机理复杂，单一工点的监测预警难以支撑省域路网的协同管控。如何构建涵盖物理层、数据层、模型层、服务层的数字孪生系统架构，实现“感、算、辨、知、控”的闭环应用，并在有限算力条件下满足“全线小时级、工点分钟级”的预警时效要求，是系统集成与应用推广的技术难点。

2.3 前期工作基础

(1) 支撑条件

本研究拟依托前期有研究基础的黄陵至延安高速公路沿线高陡边坡、宝坪高速公路天台山超长隧道群、青海路基监测等陕西及邻近省份项目的感知数据资源、变形时序预警算法模型及风险调查项目资料支撑本项目研究，提供典型项目案例和深入研究的基础。研发的关键技术、数据标准和辅助预警决策系统拟应用于 G5、G70 陕西省域路段高速公路安全韧性提升等工程。

(2) 工作基础

科学研究：本项目团队负责人及主要成员来自**极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室**（国家级）科研平台，长期以来在相关工程领域累积了丰硕的研究成果，尤其是在道路工程数据资源管理、智能算法及预警系统开发等方面所积累的丰富研究与实践经验，将为本研究的开展提供极具价值的参考与借鉴。

近五年承担相关科研项目及成果资源信息表

序号	项目名称	项目来源	相关成果资源	项目状态
1	分布式光纤应变监测仪 《课题五：基于分布式应	国家重点研 发计划项目	特殊土 路基 监测 数据 、路基变形	结题 (2021)

	变测量的特殊土路基和地质灾害监测研究》		算法	
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》	国家重点研发计划项目	地铁等 地下结构 监测 数据 、沉降 预警算法	结题 (2021)
3	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》	西藏自治区重点研发与转化计划项目	公路 隧道 建设及运营期监测与灾变 预警数据 、 算法及系统	结题 (2022)
4	黄延高速公路黄土高陡边坡预警技术	陕西省交通建设支持计划项目	高陡 边坡 监测 数据 、 算法及预警系统	结题 (2021)
5	基于光纤传感的智慧桥梁监测系统前置技术研究	陕科协企业创新争先青年人才托举计划	基于光纤传感的 桥梁监测系统	结题 (2022)
6	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	深圳高速公路股份有限公司	双洞叠层 隧道 火灾特性及 防灾技术	结题 (2025)
7	五指山特长隧道机械化智能化建设关键技术研究	海南省交通工程建设局	公路 隧道 施工期监测 数据 、 预警算法及系统	结题 (2023)

本项目承担单位还拥有“青海青藏高原公路冻土工程长期性能国家野外科学观测研究站”，可以为特殊路基长周期监测数据分析研究的顺利开展提供保障。

本项目承担单位正牵头建设“陕西省交通基础设施防灾减灾共性

技术研发平台”。该平台汇聚了陕西省公路局、陕西交控集团等核心管理运营单位，以及西安交通大学、长安大学等优势科研院所。依托此平台，项目研究可获得高端的政策指引与工程智库支撑；同时，平台的研发成果也直接为工程感知数据的自动采集、智能分析及监测预警系统的研发，提供共性关键技术支持。

本项目团队在道路工程数字化标准制修订方面拥有深厚积淀，尤其在公路工程信息模型、数字化交付及智能勘察设计等领域，积累了丰富的标准编制与工程应用经验。这些前期成果和雄厚实力，将为项目技术标准体系的建立提供坚实的标准引领与实践基础。

近五年承担相关数字化标准规范统计表

名称	编号	状态	发布时间	发布机构	角色	类型
公路工程信息模型应用统一标准	JTG/T 2420-2021	发布	2021 年	中华人民共和国交通运输部	主编	行标
公路工程设计信息模型应用标准	JTG/T 2421-2021		2021 年		主编	
公路工程施工信息模型应用标准	JTG/T 2422-2021		2021 年		参编	
公路工程养护信息模型应用标准	JTG/T 51XX-202X	报批	2024 年		主编	
公路工程信息模型规程 第 1 部分 统一技术要求	DB51/T 3092-2023	发布	2023 年	四川省市场监督管理局	参编	地标
公路工程信息模型规程 第 2 部分 设计技术要求	DB51/T 3093-2023				参编	
公路工程信息模型统一标准	Q/CCCC GL501— 2019	发布	2020 年	中国交通建设股份有限公司	主编	企业标准
公路工程设计信息模型应用标准	Q/CCCC GL502—					

	2019					
公路工程养护信息模型建模指南	T/CHTS XXXX-202X	报批	2024 年	中国公路学会	主编	团标
公路明挖隧道工程设计信息模型建模指南	T/CHTS 10279-2026	发布	2026 年			
公路工程 BIM 设计成果交付技术指南	T/CHSDA 0003-2024	发布	2024 年	中国公路勘察设计协会	参编	团标
陆路交通基础设施智能测绘数字化技术规范	T/CCTAS 152-2024	发布	2024 年	中国交通运输协会	参编	
陆路交通基础设施智能勘察数字化技术规范	T/CCTAS 153-2024					
陆路交通基础设施智能选线数字化技术规范	T/CCTAS 154-2024					
陆路交通基础设施路基智能设计数字化技术规范	T/CCTAS 155-2024					
陆路交通基础设施桥梁智能设计数字化技术规范	T/CCTAS 156-2024					
陆路交通基础设施隧道智能设计数字化技术规范	T/CCTAS 157-2024					
陆路交通基础设施智能勘察设计数字化交付技术规范	T/CCTAS 158-2024					

2.4 参考文献

[1]崔鹏,王成华,邓宏艳,陈宁生,等.山区道路山地灾害减灾技术[M].人民交通出版社股份有限公司,2023.

[2]朱颖,姚令侃,魏永幸.复杂艰险山区铁路减灾选线理论与技术[M].科学出版社,2016.

[3]汪双杰,陈建兵,王佐.高海拔高寒地区高速公路建设技术[M].上海科学技术出版社,2017.

- [4]王建伟,高超,董是,等.道路基础设施数字化研究进展与展望[J].中国公路学报,2020,33(11):101-124.
- [5]孙剑,秦国阳.道路交通系统数字孪生:概念、成熟度分级与研究展望[J].中国公路学报,2024,37(07):218-236.
- [6]杜豫川,刘成龙,吴荻非,等.新一代智慧高速公路系统架构设计[J].中国公路学报,2022,35(04):203-214.
- [7]赵鹏,马伟斌.基于数字孪生的铁路隧道智能运维关键技术与实现方法研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(08):1697-1712.
- [8]朱庆,李函侃,曾浩炜,等.面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(09):1319-1327.
- [9]李岸昀,许婧,黄仁勇.数字孪生流域框架下涉河建设项目合规性研判模型[J/OL].人民长江,1-10[2024-10-28].
- [10]吴叶凡.数字孪生水利技术:“以虚预实”助力精准防汛[N].科技日报,2024-09-30(006).
- [11]王玲,张铎,杨卉,等.浅谈数字孪生在桥梁工程中的应用[C]//河海大学,江苏省水利学会,浙江省水利学会,上海市水利学会.2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集.黄河勘测规划设计研究院有限公司;河南康养集团有限公司;,2024:3.
- [12]Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [13]Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. White paper, 2014, 1(2014): 1-7.
- [14]Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. Cham:

Springer International Publishing, 2016: 85-113.

[15]Singh M, Srivastava R, Fuenmayor E, et al. Applications of digital twin across industries: A review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5727.

[16]唐利民.路基路面工程实体结构数字孪生模型构建技术与方法[J].公路,2022,67(12):1-9.

[17]叶春艳.基于探地雷达法检测的城镇道路塌陷风险评估方法及控制对策研究[J].市政技术,2022,40(06):161-166.

[18]王芳.基于多源数据传感技术的公路路基塌陷检测方法[J].工程机械与维修,2024,(08):84-86.

[19]高佐人,彭卫兵,吕建鸣.可设计重构的桥梁信息模型研究[J].公路交通科技(应用技术版),2009,5(04):154-158.

[20]李旭梅.基于 BIM 的桥梁安全评估管理系统研究[D].重庆大学,2019.

[21]赵月悦,彭灿,张超超,等. 福厦高铁桥梁 BIM 技术应用[J]. 世界桥梁,2020,48(z1):106-112.

[22]卫星,邹建豪,肖林,等. 基于 BIM 的钢桁梁桥裂纹病害信息数字化管理[J]. 西南交通大学学报,2021,56(3):461-468,492.

[23]余静娴.震后遥感影像道路桥梁灾情信息提取。[D].中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院),2021.

[24]伍朝辉,常莹,李青,等.基于三维视频融合的隧道运营管理创新应用研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(01):154-161.

[25]梁亚成,虞赛君,马迪迪,等. 基于数字孪生的隧道智能巡检技术研究与应用[J]. 北京测绘,2022,36(7):870-874.

[26]许振浩,王朝阳,张津源,等. TBM 隧道掘进地质感知与岩-机数字孪生:方法、现状与数智化发展方向[J]. 应用基础与工程科学学

报,2023,31(6):1361-1381.

[27]李明伟,蒋俊伟,邹馨锐,等.基于数字孪生的隧道智能管控系统设计[J].智能城市,2025,11(08):18-21.

[28]周树东.高速公路特大断面隧道施工变形数字孪生监测系统设计[J].中国交通信息化,2026,319(1):92-94.

[29]朱淳,龚逸非,宋盛渊,等.滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望[J].西南交通大学学报,2025,60(6):1373-1389.

[30]陈超,阿迪力·如苏力,李晓军,等.基于无人机和数字孪生的边坡施工安全动态评估与反馈方法[J].测绘通报,2025(5):131-137.

[31]阿迪力·如苏力,李晓军,芮易,等.基于数字孪生的边坡工程及时施工安全控制策略[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(9):1361-1371,1456.

[32]全国信息技术标准化技术委员会(SAC/TC 28).信息物理系统 术语:GB/T 40021-2021[S].中国标准出版社,2021.

[33]全国信息技术标准化技术委员会(SAC/TC 28).信息物理系统 参考架构:GB/T 40020-2021[S].中国标准出版社,2021.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

(1) 道路工程高质量多源感知数据集构建及评价标准缺失

在役道路工程数据来源多样、形态差异大，如何在统一数据标准约束下完成多源感知数据与灾害风险排查数据的分类整理、数字化存储与案例库沉淀，并形成可直接支撑机器学习建模的数据组织与加工流程，是决定数据集可用性与可复用性的核心难点。

(2) 工程知识图谱与道路感知融合建模难题

工程信息、风险排查先验知识与多源感知数据异构性强、语义粒度不一、关联关系隐性复杂，如何将典型工点工程信息与风险排查先验知识结构化为领域知识图谱，并探究知识图谱与多源感知数据集的融合建模，形成可测试、适配性强的道路感知模型，是决定模型竞争力与自主创新空间的关键。智能体

(3) 数字孪生智能辅助预警决策技术场景适配及验证困难

极端服役环境下场景差异大、数据波动强、风险演化快，如何构建数字孪生预警决策所需的综合体系结构，打通数据接入、融合处理与模型算法协同，并形成面向不同场景的鲁棒算法与孪生库，输出可用的预警建议与决策分析支撑，是决定系统工程化应用效果与可推广性的核心难点。

3.2 主要研究内容及实施方案

本项目研究将紧密依托承担单位所拥有的**科创平台优势**：国家级、省级科技创新平台及陕西省“交通基础设施健康保障”创新团队；**数据优势**：多年参建国内外道路工程项目所积累的设计咨询、监测检测数据；**技术优势**：“陕西省交通基础设施防灾减灾共性技术研发平台”的软硬件研发能力。通过整合上述“平台-数据-技术”资源，聚焦以下

四大核心研究方向开展系统攻关：

研究内容一：极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系

开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术架构研究，主要包括围绕道路工程数字孪生总体架构与数据链路，确保技术架构实现数据的自动采集、交互传输以及服役状态的监测评估与预警，从而提升道路工程的智能化水平和服役性能。开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知数据标准研究，建立统一的数据采集、处理、存储和交换标准，确保数据的互操作性和可扩展性，从而为智能孪生技术在道路工程中的广泛应用提供坚实的数据基础。

研究内容二：省级典型在役道路工程感知数据集构建

开展适用于机器学习的典型在役道路工程感知数据集构建研究，收集并梳理公司多年来积累的既有项目典型工点（高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧）的感知数据和近年来道路灾害风险排查数据，按制定的数据标准进行分类、数字化存储，制作一套工程感知案例数据库。基于上述工程感知案例数据库，研发数据处理软件工具，按照典型工点专业特征和感知模型需求场景生成对应数据集；构建在役道路工程多源感知数据集 1 个，覆盖典型极端服役环境工点不少于 3 个。

研究内容三：融合工程信息及知识图谱的道路感知模型

开展道路工程领域知识图谱构建研究，围绕典型工点工程信息与道路灾害风险排查先验知识，对高陡边坡、特殊路基、桥隧等典型工程对象相关工程信息与先验知识进行梳理与结构化表达，构建道路工程领域知识图谱。进一步开展道路感知模型构建研究，通过对典型算法模型进行选型与对比分析，构建面向道路工程场景的感知模型，并结合典型工点与不同应用场景开展模型测试，分析模型在不同环境条件下的适用性，为后续智能辅助预警与决策分析提供模型基础。

研究内容四：极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统

开展极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究。构建包含物理层、虚拟层、数据层和服务层的道路数字孪生综合体系结构，明确系统功能组成及数据交互关系；在此基础上，开展感知数据接入与模型结果调用机制设计，实现感知数据、知识图谱信息与模型分析结果的统一管理与协同调用，并提供可视化的数据分析与展示功能。进一步探索面向典型工点与极端环境场景的预警信息组织与决策分析方法，为道路工程运行状态研判与风险预警提供技术支撑。

3.3 研究技术路线

本项目技术研究路线遵循“架构标准—数据底座—模型构建—系统集成”的闭环逻辑：首先，构建极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术架构与数据标准，统一数据采集、处理、存储与交换规范；其次，汇聚典型工点（高陡边坡、特殊路基、桥隧）感知数据与灾害风险排查数据，形成工程感知案例库并构建多源感知数据集；进而，构建融合工程信息与先验知识的道路工程知识图谱，基于数据集和知识图谱形成道路感知模型；最后，研发道路数字孪生智能辅助预警决策系统，完成数据—模型—服务的集成与可视化分析展示。

（1）构建极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系：

2026年3月至2026年6月计划围绕道路工程数字孪生总体架构与数据链路开展技术架构设计，形成支撑多源数据自动采集、交互传输以及服役状态监测评估与预警的总体技术方案，提升道路工程智能化水平与服役性能；同步开展智能孪生感知数据标准研究，2026年12月建立覆盖数据采集、处理、存储与交换的统一规范，明确数据口径一致性与交换要求，确保数据互操作性与可扩展性。

（2）构建省级典型在役道路工程感知数据集：

2026 年 6 月至 2026 年 12 月计划面向人工智能模型建模需求，收集并梳理公司多年既有项目典型工点，如高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧等工程感知数据及近年来道路灾害风险排查数据，依据已制定的数据标准完成分类整理与数字化存储，制作工程感知案例数据库；在此基础上研发数据处理软件工具，结合典型工点专业特征与感知模型需求场景生成对应数据集，2027 年 3 月形成可直接支撑后续模型研究的数据底座。

（3）构建融合工程信息及知识图谱的道路感知模型：

2026 年 10 月至 2027 年 3 月计划构建道路工程领域知识图谱，围绕典型工点工程信息与道路灾害风险先验知识开展梳理与结构化表达，形成道路工程领域知识图谱；在多源感知数据集支撑下开展道路感知模型构建研究，通过对典型算法模型进行选型与对比分析，2027 年 6 月完成构建面向道路工程场景的感知模型；结合典型工点与不同应用场景开展模型测试，分析模型在不同环境条件下的适用性，为后续智能辅助预警与决策分析提供模型基础。

（4）开发极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统：

2027 年 3 月至 2027 年 12 月计划以智能辅助预警决策技术为核心牵引，构建包含物理层、虚拟层、数据层和服务层的道路数字孪生综合体系结构，明确系统功能组成及数据交互关系；面向感知数据、知识图谱信息与模型分析结果的集成应用，2028 年 1 月开展数据接入、结果调用与协同管理机制设计，形成可视化的数据分析展示能力；在此基础上开展系统集成测试，探索面向典型工点与极端环境场景的预警信息组织与决策分析方法，为道路工程运行状态研判与风险预警提供技术支撑。

项目的研究技术路线框架如图 1 所示：

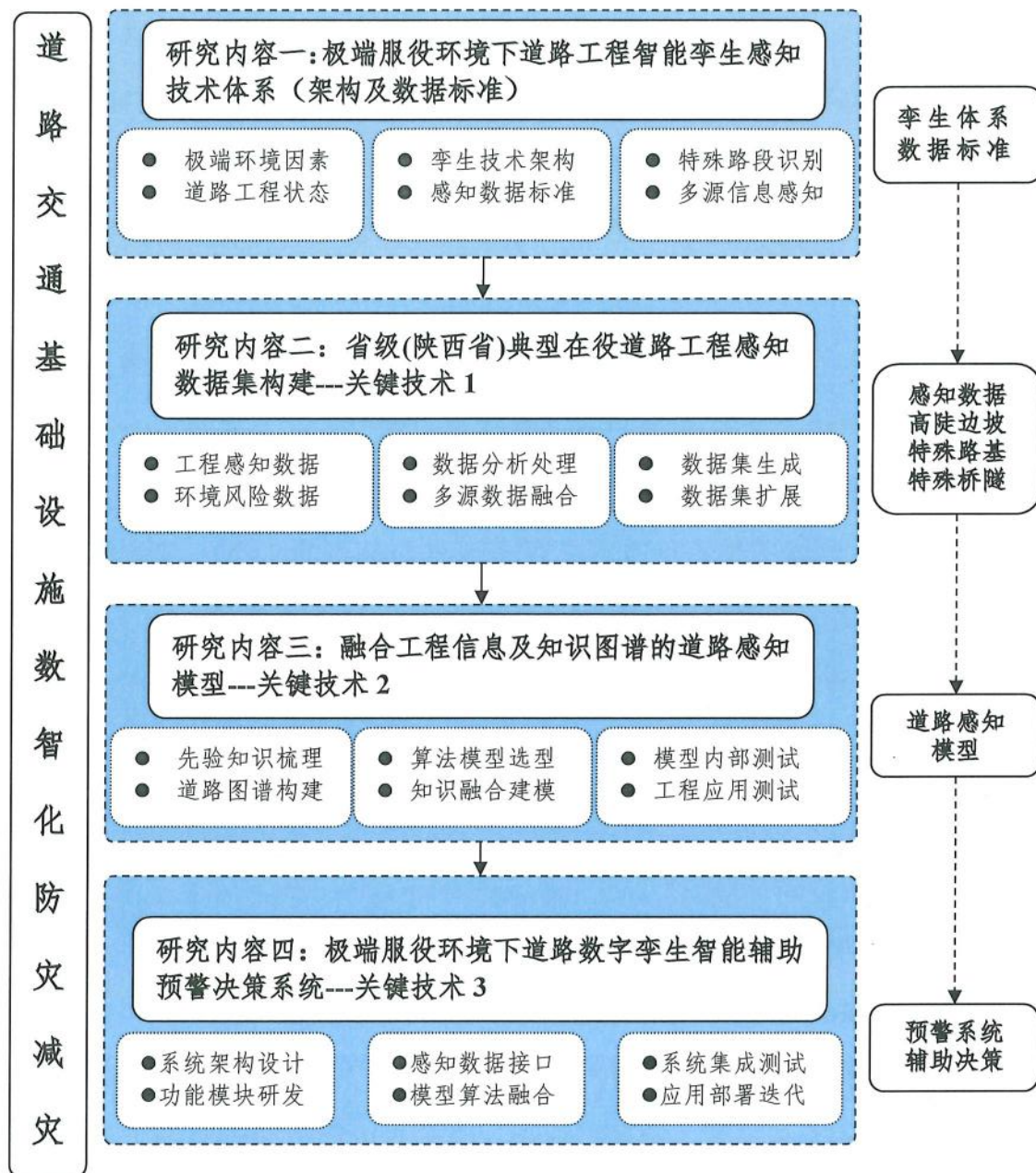


图 1 研究技术路线图

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目形成的技术手段重点面向极端服役环境下在役道路工程安全运维需求，围绕“数据标准与数据底座—道路感知模型—数字孪生预警辅助决策系统”提供可实施的成套方案，旨在以统一的数据采集、处理、存储与交换标准为牵引，打通多源监测与风险排查数据的

归集与共享通道，夯实省级在役道路工程多源感知数据集与知识图谱等基础支撑，在此之上研发道路感知模型与智能辅助预警决策系统，实现从状态感知、风险识别到预警与辅助决策的链条化支撑。该路线聚焦解决当前道路工程多源数据分散、模型与业务脱节、系统割裂导致的综合研判与协同处置能力不足等问题，通过“统一架构、统一接口”的方式强化数据调用与综合分析能力，降低运营单位多系统管理负担，并在工程应用中固化形成可推广的技术成果与应用指南，支撑省域多场景道路运行安全与防灾预警能力提升。

3.5 有关技术经济指标

(1) 构建省级在役道路工程多源感知数据集 1 个，覆盖典型极端服役环境工点不少于 3 个。

(2) 道路基础设施多专业感知领域模型 1 个，感知能力包含道路子专业不少于 3 种。

(3) 集成研发极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统 1 个，演示典型场景不少于 3 个。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（简称“中交一公院”）是我国交通工程咨询、勘察、设计、研究领域大型骨干企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。现有职工 3000 余人，各类职业注册人员近 300 人，培养包括中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、万人计划、企业长江学者、全国创新争先奖、国务院特殊津贴专家等省部级以上人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队。经过七十余年的砥砺奋进，中交一公院已发展成为资产总额逾 80 亿元，年新签合同额超过 60 亿元的世界

综合交通领域的卓越技术服务商，建设项目遍布全国 30 个省、市、自治区及全球五大洲 30 多个国家，是共建“一带一路”的重要参与者和交通工程的技术贡献者。

中交一公院始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系。拥有全国重点实验室、国家野外观测站、国家行业研发中心、博士后科研工作站等高端科技创新平台 22 个，拥有包括工程咨询甲级、工程勘察综合甲级、工程设计综合甲级在内的各类各级资质 30 余项。依托“人才—团队—平台”的创新体系，承担各类科研项目 1000 余项，其中国家和省部级重大项目 200 余项；累计获得国家专利 500 余项，计算机软件著作权 230 余项，发表学术论文 5000 余篇；主编参编国家、行业标准规范制修订项目 200 余项；编译欧、美、日等国外主流标准规范 50 多部，组织编译外文版中国工程建设规范 18 部；累计获得国家级、省部级科技奖 400 余项，其中国家科技进步一等奖 3 项、二等奖 7 项、国家技术发明二等奖 1 项。

中交一公院在新材料研发、防灾减灾、数字公路、交通安全等多个领域，取得一系列重要科研成果，为我国公路行业的科技进步、工程建设和公路设计技术等作出了重要贡献，在行业有重要影响。在进一步巩固和提高已有领域传统优势的基础上，中交一公院按照国家重大科技需要、行业技术进步趋势和市场技术需求，积极拓展科研新领域，聚焦公路行业的智能化、数字化，赋能传统产业，聚焦生态环保、3D 打印、智慧交通、工程信息智能感知等领域，促进行业技术进步和引领企业发展。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专 业	在项目中担任 具体工作
刘智		男	48	正高级	智能工程	项目负责人
富志鹏		男	50	正高级	道路与铁道工程	项目技术顾问
曹升亮		男	42	正高级	隧道工程	项目协调负责
董长松		男	44	正高级	隧道工程	研究内容一分项负责
李博融		男	43	副高级	岩土工程	研究内容二分项负责
李 震		男	35	副高级	道路与铁道工程	研究内容三分项负责
黄永益		男	43	副高级	计算机科学与技术	研究内容四分项负责
王君鹭		女	36	副高级	岩土工程	技术研究
胡 博		男	28	中级	桥梁工程	技术研究
张 续		女	32	中级	信息系统项目管理	算法开发
李文帅		男	31	初级	信息系统集成	软件开发
刘 毅		女	26	初级	信息系统集成	算法开发
贾润洋		男	26	初级	交通工程	系统集成测试
王 涵		女	31	中级	产业发展	需求调研及技术应用
杨钰婷		女	26	初级	道路工程	软件测试及工程应用

4.3 各自承担的主要工作

本项目由中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担全部研究工作执行直至结题验收。

项目负责人：刘智，统筹项目推进与技术质量管理，主导技术路

线制定及协调研发资源。

项目技术顾问：富志鹏，项目总体技术顾问，指导框架制定，研究体系搭建咨询，提供顶层设计支撑。

项目协调负责人：曹升亮，项目技术难点提供咨询与解决方案，项目组内资源协调。

项目分项负责人：

董长松，研究内容一分项负责人，负责研究技术体系、标准研究，桥梁与隧道结构感知数据分析，项目技术质量。

李博融，研究内容二分项负责人，负责研究道路边坡感知数据分析、模型验证，技术成果工程应用。

李震，研究内容三分项负责人，负责研究道路路基感知数据分析、模型验证，技术成果工程应用。

黄永益，研究内容四分项负责人，负责研究系统集成、软件算法适配、模型封装，系统测试及部署。

项目研发骨干：

王君鹭，研究空天地一体化监测技术、路基边坡感知数据分析。

胡博，研究桥梁与隧道结构数据集构建、算法模型及应用技术。

张续，研究高质量数据集构建、智能感知算法模型及系统集成。

李文帅，软件工具链、监测预警系统、集成测试研发。

刘毅，高质量数据集、接口标准、感知数据分析算法研发。

贾润洋，研究数字孪生技术、监测预警系统集成及测试。

王涵，项目需求调研及技术产业应用示范。

杨钰婷，项目软件测试及依托工程应用。

4.4 项目主要负责人情况

刘智，正高级工程师，道路交通基础设施数智化领域专家，现任中交第一公路勘察设计研究院有限公司全国重点实验室/工程技术研究院副总工程师。公司技术专家委员会“数智专业委员会”专家，认证的国际项目经理（CPM）。主要从事科技研发项目管理、工程技术研究工作。先后主持和参与近 20 项国内外公路工程勘察设计和科研工作。累计获得省部级工程和科技奖励十余项，参编技术标准 3 项。发表论文 18 篇，获得专利 16 项，拥有计算机软件著作权 15 项。

长期深耕公路与城市道路工程设计及科研一线，目前在**极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室**供职于智慧感知与监测研究中心，近年来聚焦道路工程信息智慧感知及孪生智能应用，围绕工程信息感知数据标准制定、数据分析算法研究、软件系统集成及工程应用参研多个国家级、省部级和集团公司级科研项目，道路工程科研及项目管理经验丰富。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

本研究将依托承担单位在陕西省及周边邻省的前期科研积淀，系统开展技术攻关与成果转化。在**共性技术凝练**方面，依托黄陵至延安高速公路沿线高边坡、宝坪高速公路天台山超长隧道群（交通运输部科技示范工程）等典型项目，全面梳理既有科研成果与多源感知数据，深度挖掘并提炼其中的共性关键技术。在**模型研发验证**层面，结合目前承担的 G85 银昆高速关口高边坡监测等技术服务项目，开展专项深度数据挖掘，推进工程信息感知模型的研发与实地验证，实现技术迭代。在此基础之上，紧扣当前行业“公路安全韧性提升”的重大工程契机，拟以承担单位参建的 G5 京昆高速、G70 福银高速陕西省域

路段安全韧性提升工程为切入点,积极推进研究成果在更多实际项目中的应用转化,形成可复制、可推广的技术解决方案。

典型工程(工作)情况介绍如下:

(1) 相关典型科研项目简介

① 2016年至2021年,本项目承担单位参研并完成了陕西省交通运输科技研发项目“**黄延高速公路黄土高陡边坡预警技术(16-18K)**”研究。该项目以包茂高速(G65w)陕西境黄陵-延安高速公路为依托,以高速公路支挡型黄土高陡边坡和古滑坡为对象,以设计、施工资料为基础,辅以现场踏勘和实地调查,选取了具有代表性8个典型黄土边坡分别开展了“黄土高陡边坡破坏机制与灾变预警模型”、“多方式、多方法相结合的黄土高边坡实时监测技术”和“基于灾害表征量可重编译的黄-延高速黄土边坡监测与实时预警平台研发”的研究。通过对黄-延高速多个边坡运营期的长期监测,分析了不同监测方法之间监测数据的异同和方法的优劣及其对边坡灾害的监测效果,提出来了适合本项目黄土高陡边坡的多方法、多方式相结合的监测技术;基于影响因素的黄土边坡稳定性分级评价系统;基于DLL动态链接库编程技术、MySQL数据库编程技术和局域网的C/S运行模式、互联网的B/S运行模式,研发了基于影响因素的黄土边坡稳定性分级评价系统、基于多源异构监测数据的同源统一的自动化数据集成管理系统和基于灾害表征量可编辑的边坡灾害分级预警系统,这三个系统共同构建了基于灾害表征量可编辑的黄-延高速黄土边坡监测与实时预警平台,并将该平台应用于黄-延高速高陡黄土边坡运营期的长期监测中,有效保障了项目的健康运营。

②2020年1月至2022年12月本项目承担单位参研并完成了“**秦岭天台山超长隧道群安全绿色科技示范工程**”。秦岭天台山隧道及其

所在的 32km 公路隧道群在设计、施工和运营过程中，面临诸多技术难题和瓶颈，集中体现在“安全智慧运营、安全快速施工、单层支护体系、绿色自然节能、生态环境保护”五大方面，亟待科技支撑。科技示范工程实施紧扣“安全、绿色”主题，以实现“安全施工、绿色环保、智慧运营”为目标，着力隧道群运营防灾减灾、自然能源利用、生态保护修复、机械化施工等新技术集成应用和关键技术创新。在“超长隧道群安全智慧运营技术研究与应用”专题研究中基于超长双向六车道隧道群运营环境特征，开展超长隧道群交通安全保障技术和大数据智能运营管控技术的研发与应用，提高隧道群运营智能化水平，进一步降低超长隧道群运营安全风险等级，提升防灾减灾能力。代表性成果方面编制《超长多车道公路隧道群运营安全保障技术指南》等 6 项技术指南；出版专著《秦岭天台山超长隧道群安全绿色科技示范工程建设技术与实践》。

(2) G5、G70 陕西省域路段安全韧性提升工程

2024 年 12 月，经交通运输部审核陕西省 G70 福银高速西安至陕鄂界段、G5 京昆高速公路西安至陕川界段两个项目纳入了 2025 年全国第一批试点项目。本项目承担单位作为 G70 福银高速西安至陕鄂界段的总体单位承担并顺利完成了 G70 福银高速蓝田县席家河至商州区林岔河段、G5 京昆高速公路筒车湾至洋县段的安全韧性提升勘察设计工作，目前两个路段均正式开工建设。在安全韧性提升勘察设计工作期间本项目承担单位还系统性开展了提升两条交通动脉防灾减灾与快速恢复能力研究，在监测预警专题研究方案中拟集成部署桥梁轻量化监测与边坡智能监测系统，分别对关键桥梁的结构状态和高风险边坡的变形位移进行实时、连续感知。同时，针对抗震薄弱环节，专门设置了桥梁防落梁监测点，以预防极端情况下的重大风险。本项

目研究团队将持续跟踪工程项目进度，做好科创和技术应用支撑。

5.2 投资来源

本项目总投资人民币陆拾万元（¥ 600000.00 元），投资经费由政府科研经费拨款与单位科创基金配套经费共同构成，其中陕西省交通运输厅拨款 19.87 万元，中交第一公路勘察设计研究院有限公司科技创新研发基金配套 40.13 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

为确保科研任务与依托工程同步推进，项目实行“工程需求牵引、科研任务对齐、阶段成果可交付”的组织方式，先以工程实施计划为主线建立总体时间表，将科研任务按研究内容分解到各阶段节点，明确每阶段的数据来源、工作内容与交付成果，使科研安排与工程进度在计划层面实现同频对齐。

建立常态化沟通机制，通过定期联动交流会议与需求确认闭环，及时同步工程进展、数据获取与风险排查情况，确保科研输入与工程实际需求保持一致，对关键需求及确认等形成可追踪的记录。

实行里程碑与优先级管理，优先保障技术架构与数据标准、数据入库与数据集生成等对后续模型构建和系统集成具有前置约束的工作，避免关键环节滞后导致后续研发任务整体延误。

开展阶段性科研进度评估与对标检查，形成阶段报告与测试材料，及时识别数据缺口、模型适用性与系统集成适配风险，组织针对性动态纠偏，确保阶段成果可验收、可复用。

强化研究协同与动态调整机制，当工程条件、现场组织或数据获取节奏发生变化时，及时调整科研计划与资源配置，保证关键节点按期完成并持续支撑工程应用推进。

5.4 组织管理形式

为了确保本项目的顺利进行，按时完成各项研究任务，同时提高科研成果的质量和数量。根据本项目特点及管理需要，计划组建单位内跨部门成员构成的科技攻关项目组，项目组由项目负责人、技术负责人和各分项研究负责人等组成。主要研究人员大都是参加过大型项目科研项目，由各部门经验丰富的骨干组成，同时，项目主要技术顾问及协调负责人由部门管理人员组成，突出加强技术指导、资源协调和管理的能力。同时，因为课题实施的关键性，设置项目技术顾问岗并特邀公司学术带头人出任。以下是各类人员的具体工作分工。

项目负责人:负责指挥、督促该项目按要求实施，负责组建项目组，对项目的质量、技术和进度全面控制。

各分项研究负责人:对项目负责人负责，根据项目负责人的总体安排，具体负责本分项研究的研发组织和实施，承担本分项研究的管理及质量、技术、进度三个环节控制，对本分项研究的技术成果质量负责。在课题执行过程中，形成以下几个基础制度:

(一)项目会议制度

为保证项目工作顺利进行，通过项目周报及时把握项目的进展情况，每个小组指定一位联系人负责编写项目周报，说明每周按照时间进度表工作的完成情况、存在的问题、需要协调的内容，项目月报提交领导小组所有成员。通过定期召开项目月例会，进行项目进展检查、质量检查、问题沟通、配合协调、资源配置优化、计划偏差管理。

(二)项目协调会

在项目研发过程中，将采用项目协调会制度，通过定期和不定期地召开项目工作推进协调会，进行项目进展检查、质量检查、问题沟通、多方配合协调，资源配置优化，动态纠偏管理。

当项目进展过程中出现重大事项时,项目负责人在规定时间内召开进度工作会议,以保证重大问题的及时解决;当项目出现较严重的质量偏离及协调工作时,质量管控小组要求项目负责人在规定的时间内召开项目研发技术质量专项会议,以保证项目的进度及质量。项目管理的各组必须遵守项目协调会的定期会议制度和不定期会议制度。

(三)课题报告制度

项目成员提供项目日报、周报等报告,通过报告与上级交流阶段的工作成果及出现的问题。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

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	19.87	合 计	60.0	19.87	40.13
工程配套研究经费	0.00	（一）直接费用	53.0	17.87	35.13
单位自筹	40.13	1.设备费	7.5	2.5	5.0
其他经费	0.00	（1）购置设备费	4.5	1.5	3.0
		（2）设备改造与租赁费	3.0	1.0	2.0
		2.业务费	36.2	12.0	24.2
		（1）材料费	1.5	0.5	1.0
		（2）测试化验实验加工费	7.5	2.5	5.0
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	18.0	6.0	12.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	6.0	2.0	4.0
		（6）其他费用	3.2	1.0	2.2
		3.劳务费	9.3	3.37	5.93
		（1）专家咨询费	4.5	1.5	3.0
		（2）聘用人员劳务费	4.8	1.87	2.93
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	7.0	2.0	5.0
		4.管理费	4.2	1.2	3.0
		5.绩效支出	2.8	0.8	2.0

经费测算详细说明：

本项目经费预算按照《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）文件编制，分为“直接费用”和“间接费用”两大部分。

本单位承诺，将严格执行相关财务管理制度，确保经费专款专用，独立核算，并接受上级主管部门和审计部门的监督检查。

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	1
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	2
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标

(1) 针对极端服役环境下道路工程数智化防灾需求,综合运用多学科交叉技术,涵盖感知数据融合、数字孪生、人工智能技术应用等前沿领域,构建适用于极端服役环境的道路工程智能孪生感知技术体系。

(2) 构建高质量在役道路工程多源感知数据集,覆盖极端服役环境道路工程典型高陡边坡、桥隧结构及特殊路基等专业领域的的数据,采用智能数据挖掘和分析技术,研究适用于道路基础设施感知领域的专业模型。

(3) 集成研发道路工程数字孪生智能辅助决策系统,支撑开展省域极端环境多场景道路运行安全及防灾预警技术应用。

8.2 提交的研究成果及其形式

8.2.1 有形交付物:

- 1)研究报告:包括立项、中期及验收报告。
- 2)数据/数据库:包含边坡及结构的感知数据集。
- 3)软件:原型系统(demo)1套。

8.2.2 无形交付物:

- 1)发表论文2篇。
- 2)申请专利2项,提交专利申请受理通知书等证明材料。
- 3)申请软件著作权1项。
- 4)技术指南1项,初拟名称《极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术应用指南》。

8.2.3 提交至少一个陕西省内实际工程应用案例,展示研究成果

的实用性与效果。

8.3 经济、社会、环境效益分析

8.3.1 经济效益分析

①建设陕西特色道路基础数据集，赋能精准养护并降低成本。

本项目产出覆盖陕西省内典型极端环境公路风险路段的高质量、标准化多源感知数据集。该数据集是研发后续智能算法模型的基础，能支撑对黄土边坡、桥隧病害等风险的精准识别分析，其本身即可作为行业公共数据资源赋能精准养护，显著降低同类技术研发的基础数据成本。

②集成研发智能辅助决策系统，培育安全运维数据服务新业态。

项目产出的省域道路数字孪生智能辅助预警决策系统，将整合多源感知数据、专业算法模型，形成省域可复用的基础核心数据资产。基于此，可衍生和培育本省在道路交通基础设施安全运维领域的数据服务新模式，创造持续的经济价值。

8.3.2 社会效益分析

①输出陕西特色技术方案，贡献复杂环境防灾智慧。本项目围绕陕西特殊环境形成的“数据-模型-平台”全链条技术成果，具有鲜明的地域针对性和示范价值。这套系统性方案，不仅能为陕西培养一支扎根一线的复合型技术队伍，更能为我国广大面临类似黄土、山地灾害挑战的地区，提供一套经过实践验证、可复制推广的公路智慧防灾分析范式，为提升国家特殊地区重大基础设施韧性贡献关键的“陕西智慧”与解决方案。

②筑牢三秦路网安全防线，守护公众出行平安。项目成果直接服务于提升陕西公路网在复杂地质气候下的主动防控能力。通过对感知数据的智能分析，实现对边坡失稳、桥隧结构损伤、路基水毁等典型隐患的早期精准识别与动态风险评估。这将显著降低因突发性灾害导致的交通事故与交通中断风险，直接保障人民群众生命财产安全，并确保穿越秦岭、黄土高原等关键战略通道的持续畅通，为全省经济社会稳定运行提供基础保障。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

本项目已落实相关依托工程以及配套经费。



单位负责人：（签字）



年 月 日

极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究大纲评审意见

2026年3月11日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究”（项目编号：25-41K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成比较合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果基本覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架基本契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：提交至少一个省内实际工程应用案例，展示研究成果的实用性与效果。

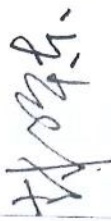
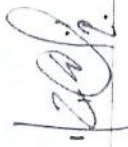
主任委员：



2026年3月11日

极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术研究 (项目编号: 25-41K)

大纲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	边世斌	陕西交通技术咨询有限公司	道路工程	交通土建	正高工	
2	委员	封捍东	陕西省公路学会	桥梁工程	公路工程质量管理	正高工	
3	委员	师延强	铜川市交通运输综合执法支队	道路与桥梁工程	交通运输工程	正高工	
4	委员	牛开民	交通运输部公路科学研究院	道路工程	道路工程	教授	
5	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	道路工程	正高工	

专家审查意见表

项目名称	极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究				
专家姓名	边世斌	职务/职称	正高工	专 业	交通土建
专家单位	陕西交通技术咨询有限公司			联系电话	13709187350

评 审 意 见

1. 在快速发展的智能交通与基础设施领域，极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术正逐渐成为研究的热点。项目针对“极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究”很有必要。

2. 该研究大纲充分探讨了极端服役环境下道路工程智能孪生感知的关键技术问题，涵盖了极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系（架构及数据标准）、在役道路工程感知数据集构建、融合工程信息及知识图谱的道路感知模型、极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策的全过程。研究内容全面且具体，具有较高的学术价值和应用前景。

3. 技术路线比较明确。从现场调研与数据收集、算法研发与模型构建、系统开发与测试、应用推广与评估，逻辑清晰，步骤明确，具有可操作性。

4. 成果提交形式建议 ~~提交至少一个实际工程应用案例~~
提交至少一个实际工程应用案例，展示研究成果的实用性与效果。

5. 综上所述，“极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究”大纲具有较高的研究价值与可行性。建议研究团队在后续工作中，进一步细化技术路线，加强算法优化与模型验证；同时，积极拓展应用场景，提升研究成果的实用性与影响力。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表

项目名称	极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究				
专家姓名	封捍东	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西交控科技集团			联系电话	13991816558

评 审 意 见

一、项目研究目标明确，研究内容全面，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，依托工程落实，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果完全覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

建议：

加强对公路管理部门、公路运营管理单位的调研与沟通，做好“道路数字孪生智能辅助预警决策系统”的技术与管理融合，便于研究成果的应用转化。

评审专家（签字）：封捍东

2026 年 3 月 11 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	极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究 (项目编号: 25-41K)				
专家姓名	师延强	职务/职称	正高工	专 业	道路与桥梁
专家单位	铜川市交通运输综合执法支队			联系电话	13309195936

评 审 意 见

(一) 极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系研究

1. 优势与亮点

架构设计贴合省级协同需求: 突破传统项目级点状应用局限, 构建覆盖 “数据采集 - 传输 - 处理 - 应用” 全链路的技术架构, 明确物理层、数据层、模型层、服务层的协同逻辑, 适配省域多路段、多专业融合的监测预警需求, 技术定位精准。

数据标准化设计前瞻: 聚焦多源数据异构性难题, 建立统一的数据采集、处理、存储与交换标准, 兼顾数据互操作性与可扩展性, 为后续省级数据集构建和跨系统协同奠定基础, 解决了行业数据 “孤岛化” 的核心瓶颈。

2. 优化建议

(1) 细化数据标准的实操性: 建议针对不同工点 (边坡、路基、桥隧) 的核心监测指标 (如位移、应变、环境参数) 制定差异化的数据采集频率、精度阈值和存储格式, 形成 “指标 - 精度 - 格式” 三维标准体系; 增加数据质量评价标准, 明确数据缺失、异常的判定与修复规则, 提升数据标准化的可操作性。

(2) 强化与现有标准的衔接: 建议系统梳理《信息物理系统 参考架构》(GB/T 40020-2021)、公路工程 BIM 相关标准等现有规范, 明确本项目技术体系与现有标准的衔接点, 避免重复研发, 提升成果的行业兼容性。

(二) 省级典型在役道路工程感知数据集构建研究

1. 优势与亮点

数据覆盖的典型性突出: 聚焦高陡边坡、特殊路基、特殊桥隧三类核心工点, 整合既有项目感知数据与灾害风险排查数据, 覆盖极端服役环境下的关键监测场景, 数据代表性强, 能有效支撑后续模型训练。

数据资产的复用性设计: 构建工程感知案例数据库与多源感知数据集双层数据架构, 既保留原始案

例数据，又形成标准化建模数据集，实现数据资产的长期复用，符合省级数据底座的建设需求。

2. 优化建议

(1) 强化数据标注的精细化：建议制定统一的数据标注规范，明确灾害类型（如边坡滑移、路基沉陷）、风险等级（如一般、较大、重大）、环境条件（如暴雨、常温）等标注维度，为监督学习模型训练提供高质量标签数据；增加数据溯源信息标注，明确数据采集设备、时间、点位等关键元数据，提升数据可信度。

(2) 完善数据质量控制流程：建议构建“采集 - 预处理 - 清洗 - 验证”四级质量控制体系，引入异常值检测算法自动识别异常数据，结合人工复核进行修正；建立数据质量评价指标（如数据完整性 $\geq 95\%$ 、准确率 $\geq 98\%$ ），确保数据集满足机器学习建模要求。

（三）融合工程信息及知识图谱的道路感知模型研究

1. 优势与亮点

建模思路创新且科学：突破传统模型“重数据、轻知识”的局限，将工程信息、风险排查先验知识结构化构建领域知识图谱，实现知识与多源感知数据的深度融合，提升模型的工程可解释性与泛化能力，技术路线先进。

模型适配性考量全面：针对高陡边坡、路基、桥隧等不同工点的专业特征，开展模型选型与对比分析，结合不同极端环境场景进行测试优化，避免单一模型适配性不足的问题，实用价值高。

理论与工程结合紧密：知识图谱构建紧密围绕典型工点的工程设计参数、病害演化规律、风险排查经验等实际工程信息，确保模型训练既基于数据规律，又符合工程实际逻辑，模型结果更具工程指导意义。

2. 优化建议

(1) 细化知识图谱的构建维度：建议扩展知识图谱的核心维度，涵盖工点基础信息（如地形、岩性）、病害特征（如裂缝宽度、沉降速率）、诱发因素（如降雨量、交通荷载）、处置措施等关联关系，构建“实体-关系-属性”三维知识网络；增加知识图谱的动态更新机制，结合新的工程案例与监测数据持续丰富知识储备，提升模型的动态适配能力。

(2) 强化模型融合的技术细节：建议明确知识图谱与感知数据的融合方式，量化知识图谱对模型预测的贡献权重；针对不同工点的核心监测目标（如边坡位移、桥梁应变），优化模型的特征提取模块，提升模型对关键指标的预测精度。

(3) 明确模型的量化评价指标：建议制定多维度的模型评价体系，包括预测精度（如位移预测误差 $\leq 5\text{mm}$ 、病害识别准确率 $\geq 90\%$ ）、响应速度（如单工点预测时间 $\leq 10\text{s}$ ）等量化指标，确保模型性能

可考核、可验证。

（四）极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统研究

1. 优势与亮点

系统架构逻辑严密：构建“物理层 - 虚拟层 - 数据层 - 服务层”的四层体系结构，明确各层功能边界与数据交互关系，实现感知数据、知识图谱、模型结果的深度融合，形成“感 - 算 - 辨 - 知 - 控”的闭环应用，架构设计科学。

功能设计贴合业务需求：集成数据接入、可视化展示、预警分析、辅助决策等核心功能，聚焦极端环境下的风险研判与应急处置需求，提供针对性的预警信息与决策建议，解决现有系统“数据与业务脱节”的问题，落地性强。

场景适配性突出：针对不同工点、不同极端场景设计差异化的预警与决策流程，演示场景覆盖高陡边坡、桥隧、特殊路基等核心工点，能有效支撑省域多场景协同管控，适配性全面。

2. 优化建议

（1）强化系统的轻量化与兼容性：建议采用微服务架构设计，实现功能模块的灵活部署与扩展，适配省、市、县不同层级管理部门的算力资源与应用需求；明确系统与现有公路养护管理平台、监测终端的数据接口标准，实现无缝对接与数据共享，避免重复建设。

（2）细化预警与决策的实操性：建议建立多级预警机制（如一般预警、紧急预警、特紧急预警），明确不同预警等级的触发阈值、推送方式（如短信、平台弹窗、声光报警）与响应流程；优化辅助决策功能，提供可落地的处置方案库（如边坡滑移的临时加固措施、桥隧病害的应急处置流程），提升系统的业务支撑能力。

（五）其他建议

1. 补充应用场景的技术适配：建议增加极端灾害突发场景（如边坡坍塌、桥梁突发事件）的应急感知与决策支持研究、增加对公路事故多发点的事故轨迹及路线分析，优化系统的数据优先级处理、快速预警推送、应急处置方案智能匹配等功能，提升系统的应急响应能力。

评审专家（签字）：

师强

2026 年 3 月 11 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	极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究				
专家姓名	牛开民	职务/职称	研究员	专 业	道路工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	13701028353

评 审 意 见

△同意项目研究大纲通过评审。

△建议：

- 研究中应分析极端服役环境下感知感知的难点和应攻克的关键技术，然后再进行数字孪生。
- 进一步细化智能感知和数字孪生的相关技术经济指标。

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表（25-41K）

项目名称	极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术及应用研究				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091

评 审 意 见

本项目开展极端服役环境下道路工程智能孪生感知技术体系、省级典型在役道路工程感知数据集构建、融合工程信息及知识图谱的道路感知模型、极端服役环境下道路数字孪生智能辅助预警决策系统等内容的研究，具有一定的现实意义和创新性。

提交的研究大纲，内容全面、技术路线和实施方案可行，项目承担单位和研究团队人员组成可满足项目研究要求，工作基础扎实，依托工程和项目研究经费已落实，具备开展项目研究的条件。

同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 进一步说明极端服役环境和数字孪生设施对象的筛选要求。
2. 增加数字孪生系统的建设、运营、维护费用分析内容。
3. 明确数字孪生系统所需的数据范围、数据来源、数据质量保证等要求。

评审专家（签字）：王松根

2026 年 03 月 11 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： 极端服役环境下道路工程智能孪生感知关键技术与应用研究 （项目编号： 25-41K ）

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	边世斌	1、成果提交形式建议提交至少一个实际工程应用案例，展示研究成果的实用性与效果； 2、建议研究团队在后续工作中，进一步细化技术路线，加强算法优化与模型验证；同时，积极拓展应用场景，研究成果的实用性与影响力。	1、按专家意见执行，修改了预期目标、成果提供形式；依托工程拟应用于 G5、G70 陕西省域路段高速公路安全韧性提升等省内工程。 2、按专家意见执行，修改了实施方案内容，将逐步细化技术路线，加强算法优化与模型验证；积极拓展省内外相关工程应用场景，凝练提升成果质量，基于研究成果策划地标、团标等技术标准，提升研究成果的实用性与影响力。
2	封捍东	1、加强对公路管理部门、公路运营管理部门的调研与沟通，做好“道路数字孪生智能辅助预警决策系统”的技术与管理融合，便于研究成果的应用转化。	1、按专家意见修改了主要研究内容及实施方案，开展深度调研工作，细化需求分析和技术沟通交流计划。
3	师延强	1、细化数据标准的实操性，强化与现有标准的衔接。 2、强化数据标注的精细化，完善数据质量控制流程。 3、细化知识图谱的构建维度，强化模型融合的技术细节，明确模型的量化评价指标。 4、强化系统的轻量化与兼容性，细化预警与决策的实操性。 5、补充应用场景的技术适配。	1、按专家意见执行，研究中将细化数据标准的实操性，强化与现有标准的衔接。 2、按专家意见执行，研究中将细化数据标准的实操性，强化与现有标准的衔接。 3、按专家意见执行，研究中将细化知识图谱的构建维度，强化模型融合的技术细节，明确模型的量化评价指标。 4、按专家意见执行，研究中将强化系统的轻量化与兼容性，细化预警与决策的实操性。 5、按专家意见执行，研究中将努力补充应用场景的技术适配。
4	牛开民	1、研究中应分析极端服役环境下智能感知的难点和攻克的关键技术，然后再进行数字孪生。 2、进一步细化智能感知和数字孪生的相关技术经济指标。	1、按专家意见执行，研究中聚焦智能感知难点及关键技术，细化数字孪生研究。 2、按专家意见执行，研究中进一步细化智能感知和数字孪生的相关技术经济指标。

