

长距离引水隧洞运行期裂损病害 水下智能检测装备

汇报人：韩勃、张柏楠、甘高源

山东大学土建与水利学院教授、副院长、齐鲁青年学者

2021年9月

目

录

CONTENTS

1 | 项目背景和必要性

2 | 项目实施内容及进度安排

3 | 团队介绍及研究基础

4 | 产品规模及经济、社会效益

1.1 项目背景



总书记



以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引



水是制约北方高质量发展的最大刚性约束

山东发展

山东水资源总量仅占全国1.09%
列为世界极度缺水地区

水资源调配工程是解决北方缺水问题的必然途径

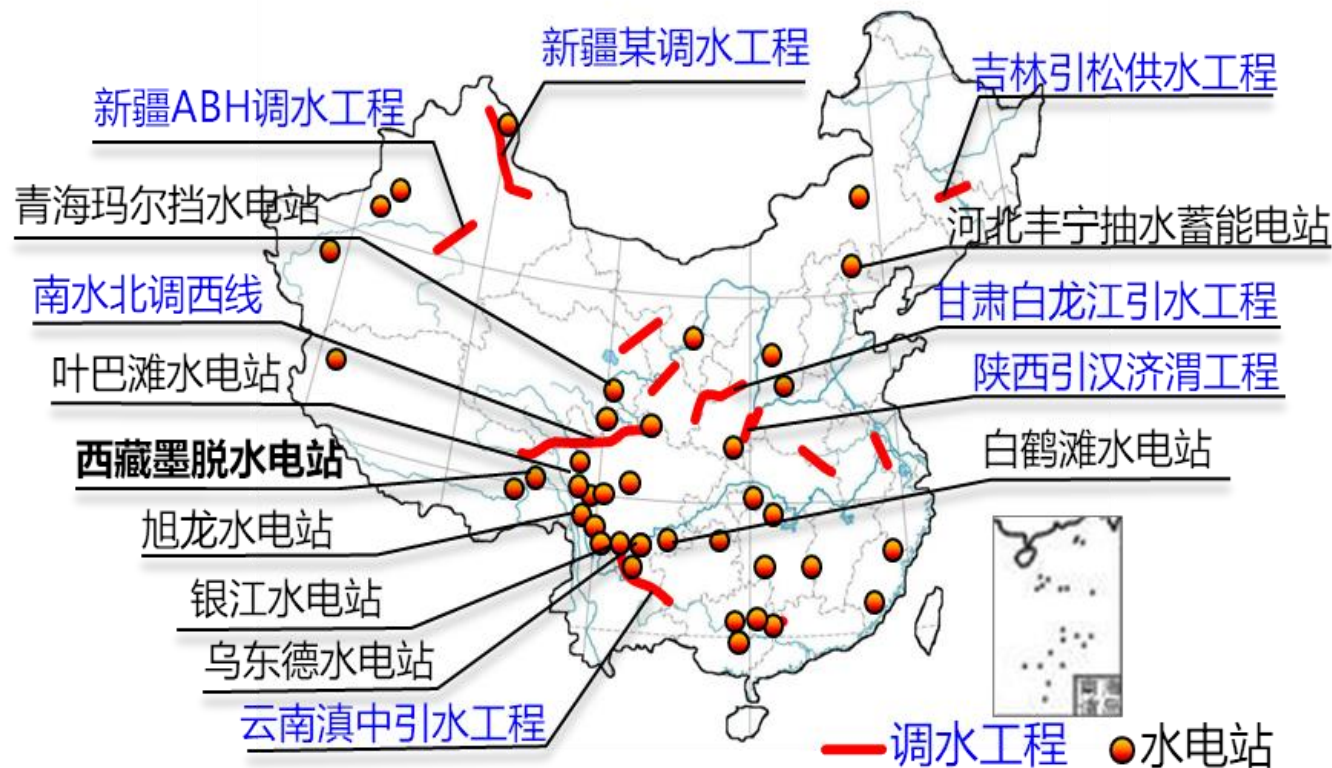
1.1 项目背景



引水隧洞是水资源调配工程的重要水利枢纽

—— 是调水工程的“血管”

- 国家水利水电工程开发建设方兴未艾，滇中引水、引绰济辽等数十个长大调水工程正在建设或规划
- 截至2015年，我国水电站水工隧洞累计长超10000km，锦屏二级水电站有着世界上规模最大的水工隧洞工程
- 山东省现有重点调水工程总长超过1400km，现有与在建总投资超过2500亿



□ 新疆ABH引水工程

隧洞全长512km，18台TBM

□ 云南滇中引水工程

隧洞全长607km，最长洞段55km

□ 规划中墨脱水电站

装机容量超过3个三峡，最大埋深3km

1.2 项目难题



(1) 引水隧洞结构裂损演化机理及灾变机制难题 (如何揭示 “病理”)

复杂地质条件+多病因

“多病因” 引水隧洞结构裂损演化机制不清晰 → 难以判别隧洞安全状态



拱顶裂缝



混凝土破损



顶板拱起、破损



钢筋外露

结构裂损与引水隧洞整体安全互馈关系不明确

演化
机理
难题

无法定量评价引水隧洞结构裂损孕灾性

亟待开展引水隧洞多场耦合、多尺度灾变物理模拟和仿真计算

1.2 项目难题



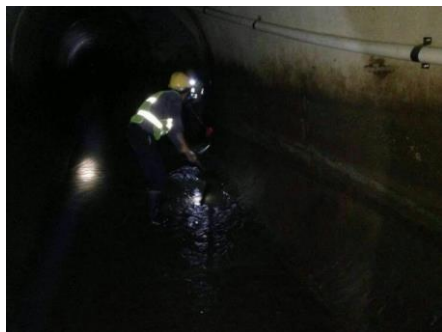
(2) 引水隧洞衬砌病害水下自动智能检测技术难题 (如何快速查明 “病灶”)

病害种类多、内外分布复杂

衬砌病害人工检测效率低 → 易错检漏检，遗漏重大灾变信息



停水检修



人工检测



耗时费力



操作复杂

病害信息识别不准确、易误判

装备
技术
难题

衬砌病害感知和识别**准确性差**，引水隧洞内定位**定姿难**，**通讯难**
亟待开展病害水下自动**智能检测装备**研究

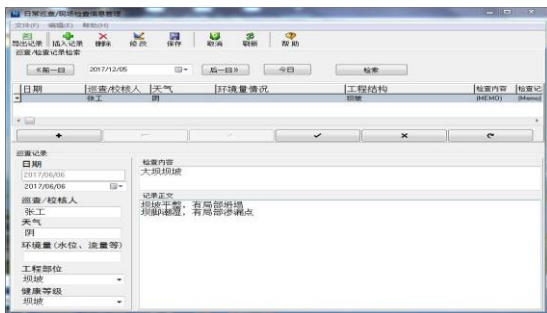
1.2 项目难题



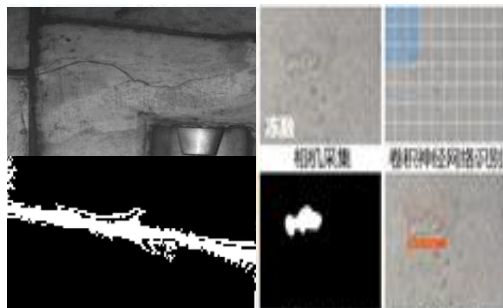
(3) 引水隧洞智慧诊断难题 (如何诊断“病情”)

多源海量水损病害感知数据

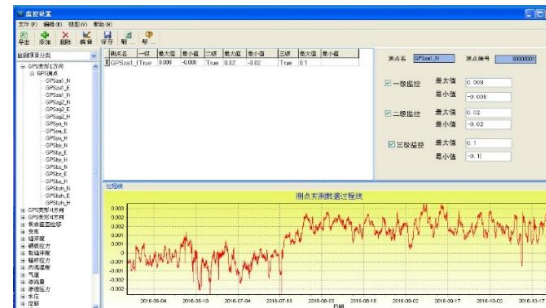
多源检/监测数据融合性差 → 病害信息不同步，感知滞后



人工巡查数据



病害视觉信息



病害检测信息

欠缺系统性诊断方法，诊断不准确

方法
系统
难题

无法准确诊断引水隧洞健康状态

亟待研发基于多源异构感知数据融合的引水隧洞智慧健康诊断体系

1.2 项目难题



卡脖子难题

病害机理**弄不清**

理论 难题

引水隧洞结构裂损演化机理及灾变机制难题—**揭示“病理”**
长距离引水隧洞结构裂损机理尚未明确

灾变信息**查不快**

装备 难题

引水隧洞衬砌病害水下自动智能检测技术难题—**快速查明“病灶”**
病害感知和识别准确性差，引水隧洞内定位定姿难，通讯难

健康状态**断不准**

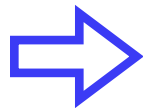
方法 难题

引水隧洞智慧诊断难题—**准确诊断“病情”**
欠缺系统性诊断方法，诊断不准确

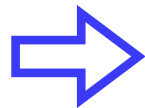
1.3 项目总体思路



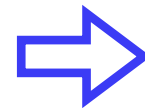
问题驱动



揭示病害机理



研发新型装备



构建诊断体系

创新点一

创新点二

创新点三

病害机理
“弄不清”

灾变信息
“查不快”

健康状态
“断不准”

三套技术

病害检测技术、运动控制技术、水下定位技术

一套装备

引水隧洞智能移动检测机器人

二套体系

病害特征识别体系、裂损病害诊断体系

◆ 发表SCI/EI论文3-5篇

◆ 发明专利2-4项

◆ 软件著作权2项

1.4 技术路线



创新点：检测装备**自动化**、病害识别**智能化**、健康诊断**智慧化**

目

录

CONTENTS

1 | 项目背景和必要性

2 | 项目实施内容及进度安排

3 | 团队介绍及研究基础

4 | 产品规模及经济、社会效益

2 实施内容

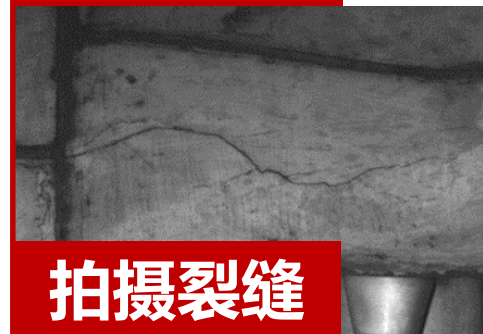


(一) 水工隧洞衬砌裂缝检测与智能识别技术

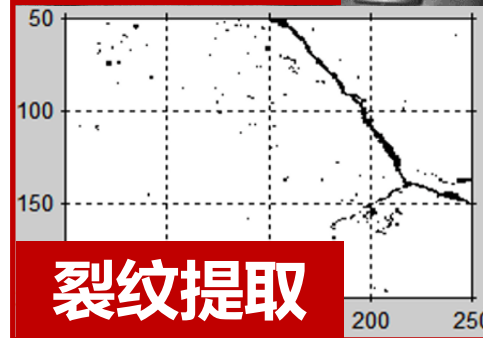
- **数字照相视觉测量技术**：识别引水隧洞内壁损坏部位，为适应引水隧洞环境作业**提供技术支撑**
- **视觉-声呐测量技术**：探测管道内壁裂痕，构建视觉-声呐多传感器融合信息系统，实现裂损**精准定位与识别**



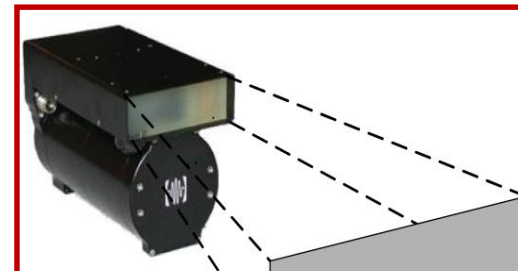
CCD相机



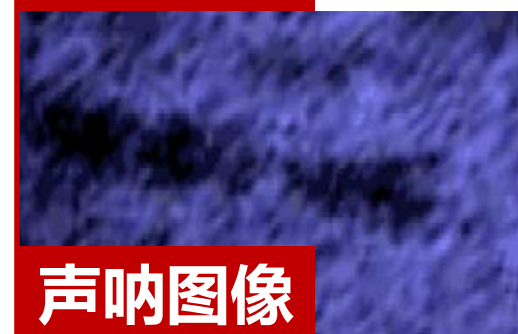
拍摄裂缝



裂纹提取



声呐探测



声呐图像



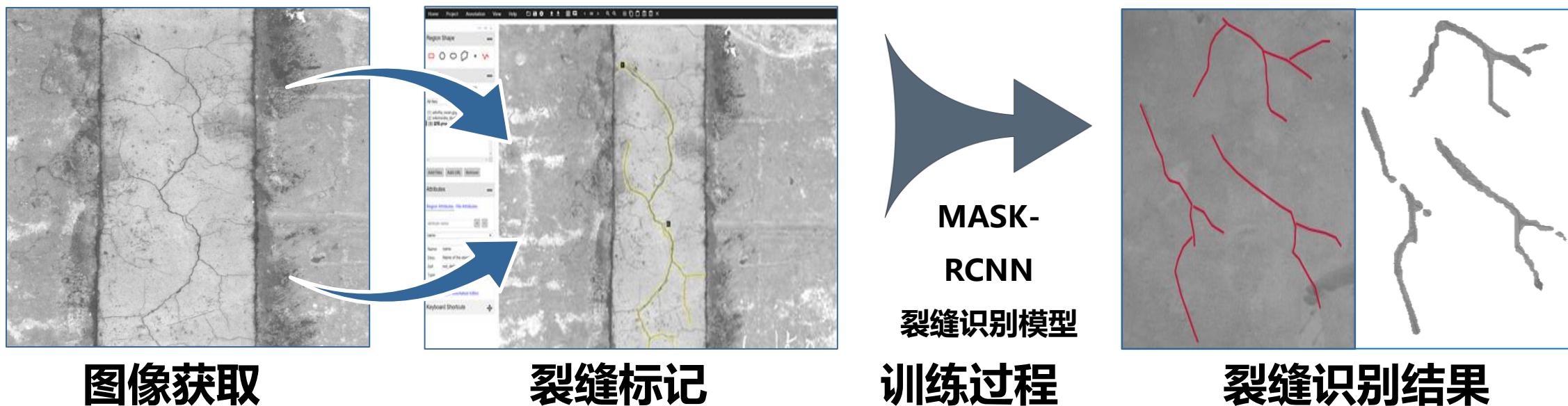
声呐处理

2 实施内容



(一) 水工隧洞衬砌裂缝检测与智能识别技术

- **移动式图像增强技术**：基于空间域与变换域建立图像预处理方法，增强**病害图像清晰处理**
- **裂缝智能识别技术**：通过测量、图像增强等技术获取特征与时空参数，建立引水隧洞裂损特征参数和时空参数的**智能识别方法**



解决复杂水下环境衬砌裂损自动识别技术难题，识别精度实现质的提升

2 实施内容



(二) 水工隧洞衬砌病害水下自动智能检测设备

- **隧洞内机器人结构设计及优化**：增强机器人自身的**防腐**
蚀、密封性、抗干扰性，分析机器人**抗水流运动**，**优化**
机器人机械结构设计
- **水流扰动工况下机器人运动控制技术**：建立水下机器人
动力学模型，基于模糊逻辑的直接自适应控制算法，实
现**六自由度控制**，**原地旋转360度**检查



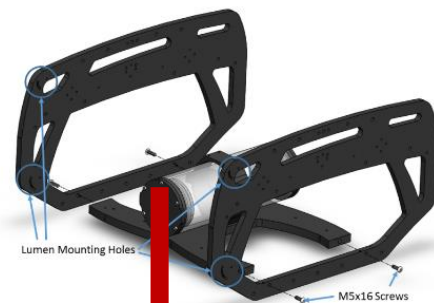
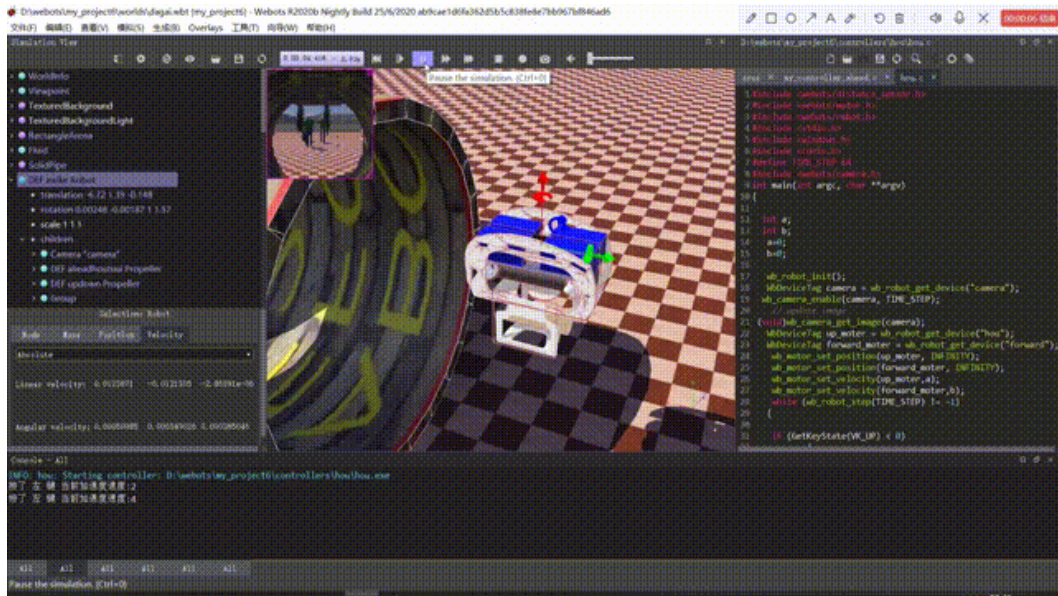
攻克水工输水隧洞中检测装备定位、供电、通讯技术工程难题

2 实施内容

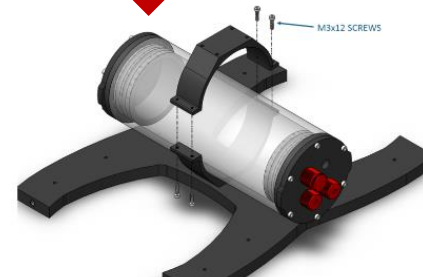


(二) 水工隧洞衬砌病害水下自动智能检测设备

- **隧洞内机器人定位与导航**：提出多里程仪测量数据一致性融合方法，建立**融合导航系统**
- **水工隧洞内长距离供电与通讯技术**：长时**自主供电**驱动实现机器人在管道内**顺水流**、**逆水流**双向长距离作业；**优化**脐带电缆结构，设计**“子母式”**隧洞检测机器人，探索长距离光纤通讯技术



模块化支架



密封舱设计
(传感器防水)

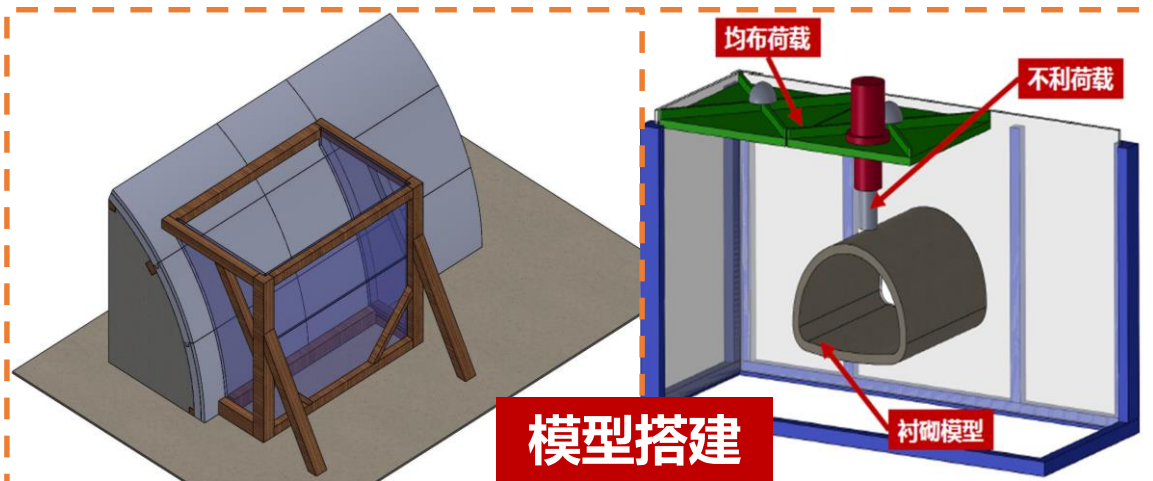
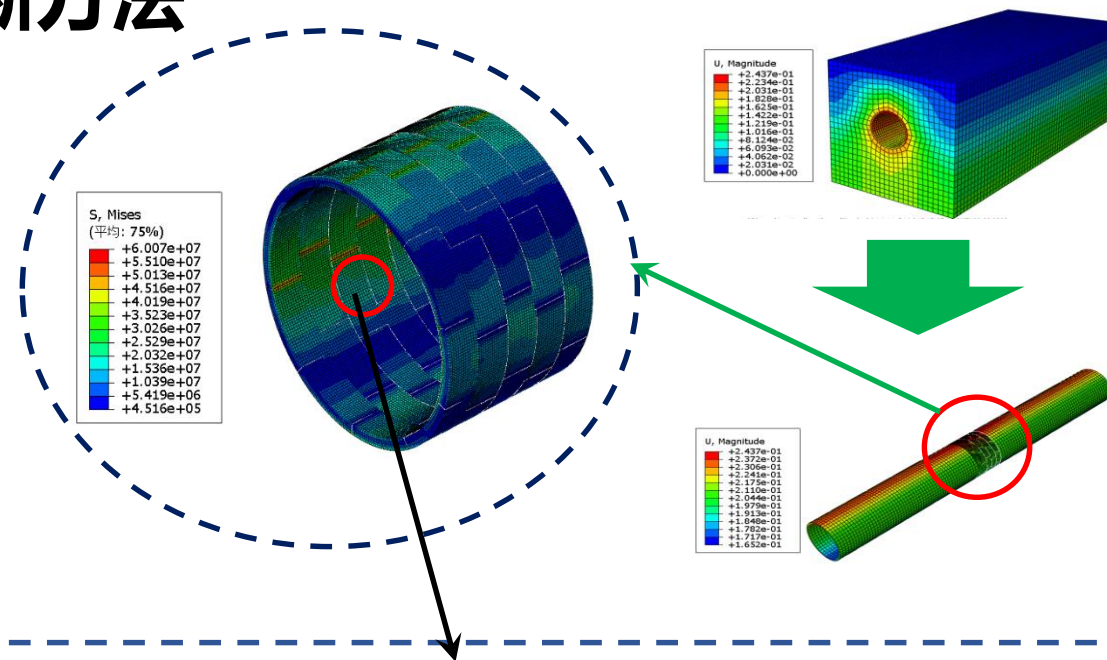
解决隧洞复杂环境下检测装备集成难题，为检测工作提供重要保障

2 实施内容

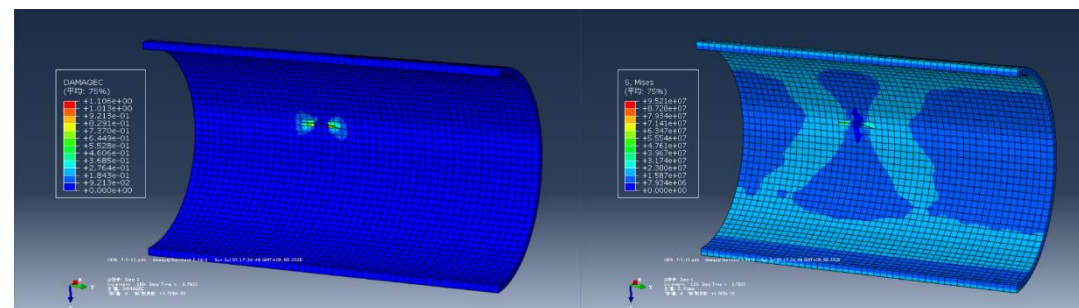


(三) 水工隧洞结构裂损机理与智慧诊断方法

- **模型试验**：通过模型试验分析引水隧洞裂损衬砌变形规律以及破坏形式
- **三维仿真计算**：通过数值模拟分析引水隧洞裂损特征参数演化规律，研究引水隧洞裂损诊断指标及诊断标准



隧洞中部拱腰裂缝扩展情况

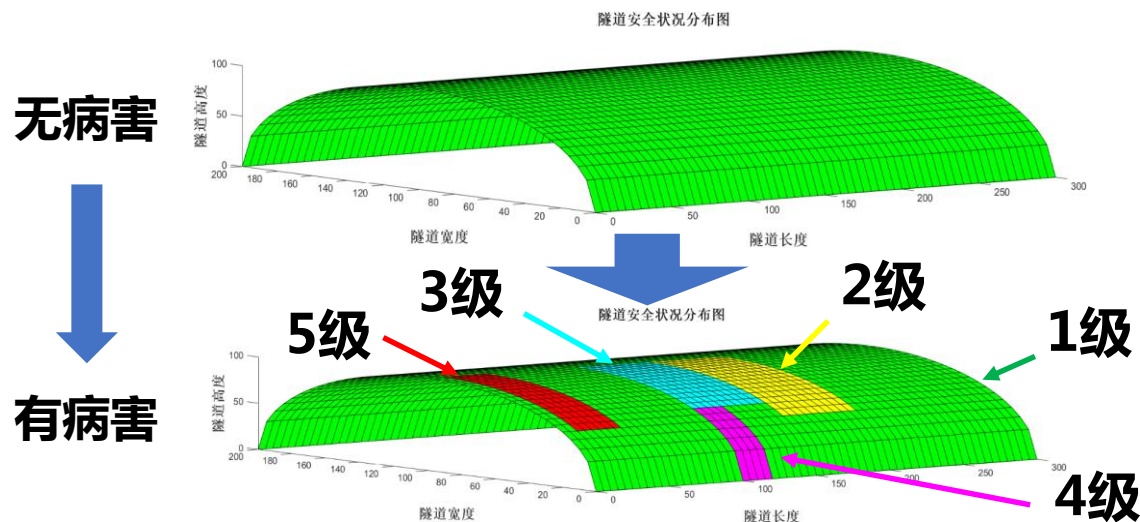


2 实施内容

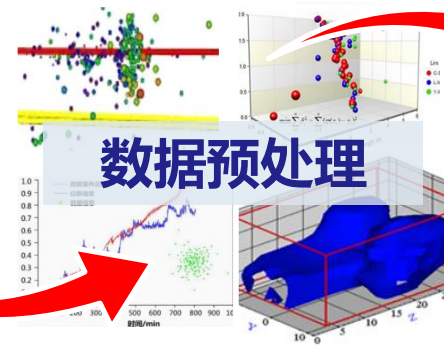


(三) 水工隧洞结构裂损机理与智慧诊断方法

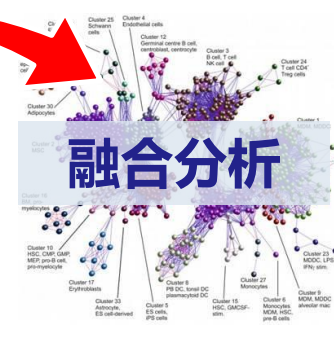
- **综合量化分析方法**：积累水下病害**样本图库**，构建训练**样本集**，建立引水隧洞裂损病害影响程度的**综合量化分析方法**
- **智慧健康诊断系统**：采用神经网络技术与遗传算法相融合的具有自学习和全局搜索能力的**GA-BP****健康诊断模型**，建立引水隧洞**智慧健康诊断方法**



数据挖掘



数据预处理



融合分析

实现引水隧洞智慧健康诊断，形成 “检测—诊断” 一体化模式

目

录

CONTENTS

1 | 项目背景和必要性

2 | 项目实施内容及进度安排

3 | 团队介绍及研究基础

4 | 产品规模及经济、社会效益

3.1 单位简介



山东大学

- 山东大学为 “985工程”、“211工程”、“双一流” 高校，是一所综合性全国重点大学，具有完善的项目组织管理体系

土建与水利学院研究条件

- 土建与水利学院拥有教育部工程研究中心1个、省重点实验室1个、省工程技术研究中心4个
- 拥有中国工程院院士1人、长江学者2人、国家杰青3人
- 近五年学院承担各类科研项目1000余项，其中包括国家973计划项目、国家863计划项目
- 近五年获得国家科技进步二等奖3项，山东省科学技术最高奖1项，省部级一等奖15项

机械工程学院研究条件

- 机械工程学院拥有国家重点学科“机械制造及其自动化”，是国家“211工程”及“985工程”重点建设学科，工程学ESI排名前0.34%。
- 学院拥有教育部重点实验室“高效洁净机械制造教育部重点实验室”、7个省级工程技术中心
- 近年来，完成了包括国家重点研发、国家重大专项、国家基金等科研项目500多项。



教授、博导、副院长
齐鲁青年学者

博士

山东大学土建与水利学院副院长

2021齐鲁水利科技进步一等奖、2020中国水力发电科学技术二等奖、第三届“创业齐鲁-共赢未来”高层次人才创业大赛优

~~明倫彙編 家範典 孝行典 卷一百一十五 列女一~~

团队拥有教授**5**人、副教授**2**人、副研究员**1**人、讲师**1**人、工程师**2**人、博后**4**人、博士研究生**12**人、硕士研究生**40**余人

3.3 技术骨干



万 熠

教授、博士生导师
机械工程学院 常务副院长
教育部新世纪优秀人才
山东大学杰出中青年学者

教育经历：

1995.09—1999.06	青岛大学	学士
2000.09—2003.08	山东大学	硕士
2003.09—2006.06	山东大学	博士

工作经历：

2012—2013	英国Brunel University 访问学者
2012—2018	山东大学机械工程学院副院长
2021—至今	山东大学机械工程学院常务副院长

研究方向：

智能装备的环境感知、路径规划与运动控制技术

近年来获奖情况：

获得国防科学技术进步奖二等奖、浙江省科学技术一等奖、湖南省科学技术进步一等奖

3.4 科研项目



国家及省部级 课题

(12项)

- **国家科技支撑计划**：南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范
- **水利部“水公益”**：山洪易发区水库致灾预警与减灾关键技术研究
- **水利部“948”项目**：高精度全自动三维变形实时监测与预警系统
- **国家自然科学基金面上项目**：复杂海洋荷载下大直径单桩海上风机破坏机理及智慧监测预警方法
- **山东省重点研发计划**：海上风电结构实时智能安全监测预警系统研发
- **山东省重点研发计划**：面向开阔环境巡检的智能安防机器人关键技术研究及应用示范
- **山东省重点研发计划**：核电站双臂应急处置机器人
-

团队近五年累计科研经费近4千万元

重大工程科技 项目

(32项)

- **山东省流域中心科研项目**：堤防与穿堤涵闸接触渗流监测与预警技术
- **山东省齐鲁交通发展集团科研项目**：公路交通基础设施智能施工与检测关键技术研究
- **华东院科研项目**：植入型嵌岩单桩海上风机海床岩石弱化机理及承载特性现场检测方法
- **江西省水利科研项目**：江西省水利工程维养项目工程运行管理信息系统
- **安徽省引江济淮**：引江济淮工程（安徽段）河渠安全监测工程
- **内蒙古自治区项目**：明星、九龙水库运行安全鉴定
- **深圳市科技计划项目**：液压救援机器人轻量化设计及双臂协调控制研究
-

-
- The collage displays a variety of intellectual property and academic achievements. On the left, several academic papers are shown, including 'Numerical investigation of the Two Kinds', 'Experimental investigation of the Two Kinds', 'Analytical and numerical study of the Two Kinds', 'Stability investigation of the Generalized time integration method', and 'Computers and Graphics'. In the center, there are several patent documents, including 'Invention Patent' and 'Utility Model Patent'. On the right, there are software copyright certificates, including 'Software Copyright Certificate' and 'Software Copyright Certificate of the People's Republic of China'. The documents are arranged in a way that shows their overlap and variety.



3.6 研究基础



(一) 隧洞病害检测技术：

- 开展了**数字照相**、**三维激光扫描**和**地质雷达**在隧洞/隧道环境下检测方法研究
- 研制了**隧道移动式病害检测平台**，集成了多项传感器的“**三维空间移动测量系统**”
- 拥有可检校传感器的大型室内**三维检校场**



3.6 研究基础



(二) 特种高端装备关键技术研究

- 研发了核电站救援机器人、排爆机器人、多功能地震救援机器人、巡检机器人、破拆机器人等特种作业机器人。获得了**省重大创新工程**等项目资助，已与多家企业开展了技术合作



地震救援机器人



破拆机器人



排爆机器人



核电站应急救援机器人



消防机器人

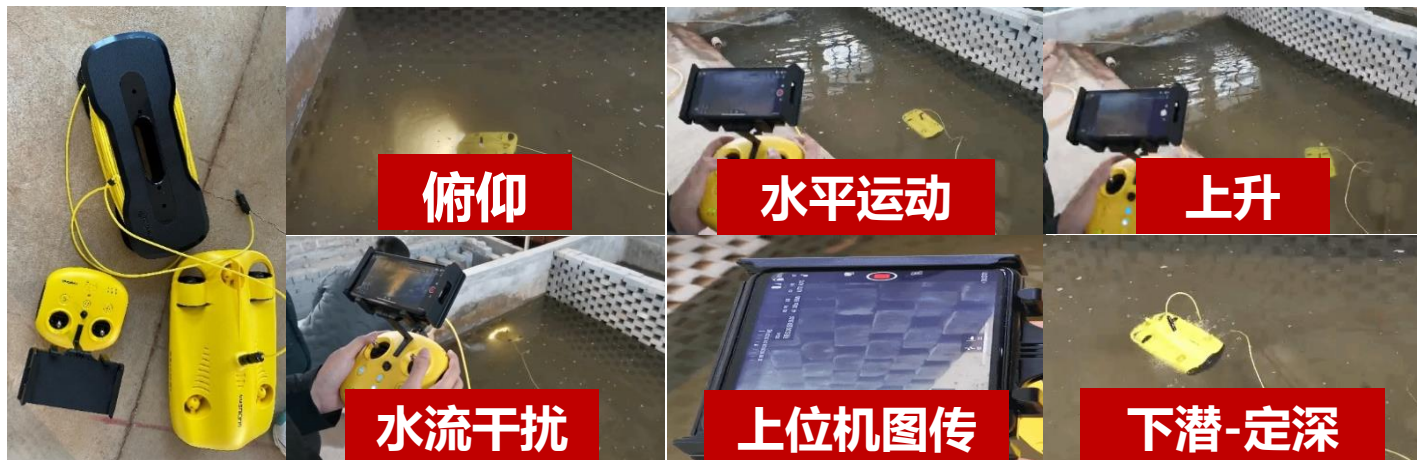
3.6 研究基础



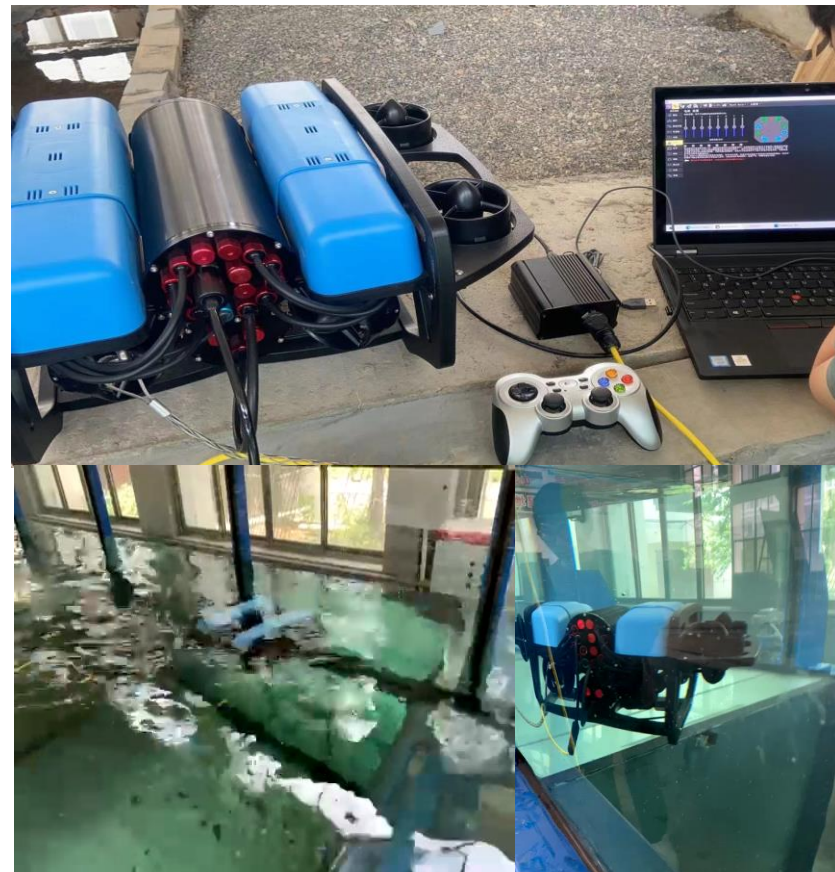
(三) 水下自动检测装备：

- 研究了基于光纤总线开发的**远程遥操作技术**
- 基于机器人控制系统，实现了机器人**远距离**数据传输
- 研发了**快速定位方法**，建立了机器人**运动控制方法**
- 完成了水下推进等多领域机器**自动检测装备**研发

I 型水下检测机器人



II型水下检测机器人



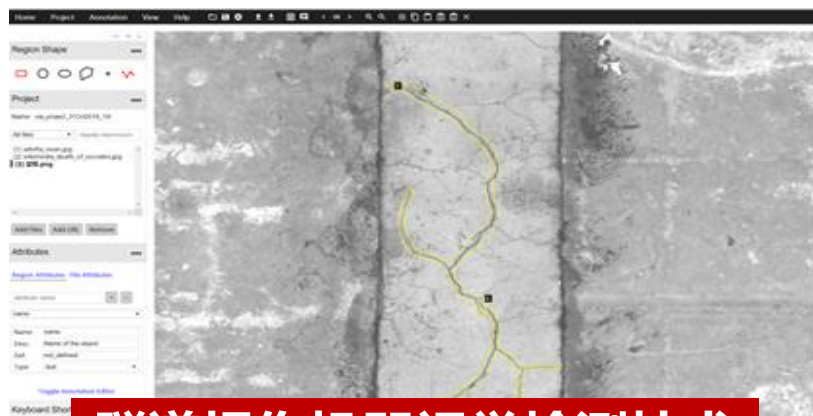
为引水隧洞**检测技术**研究提供了仪器、试验场地支撑和研究基础

3.6 研究基础

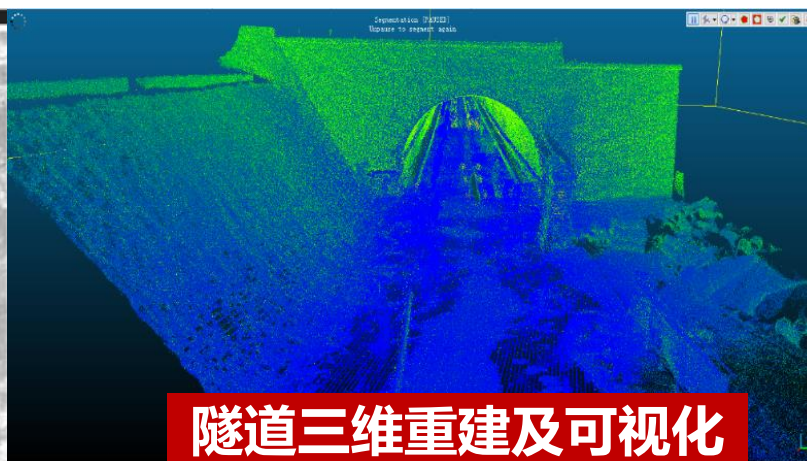


（四）隧洞病害智能识别：

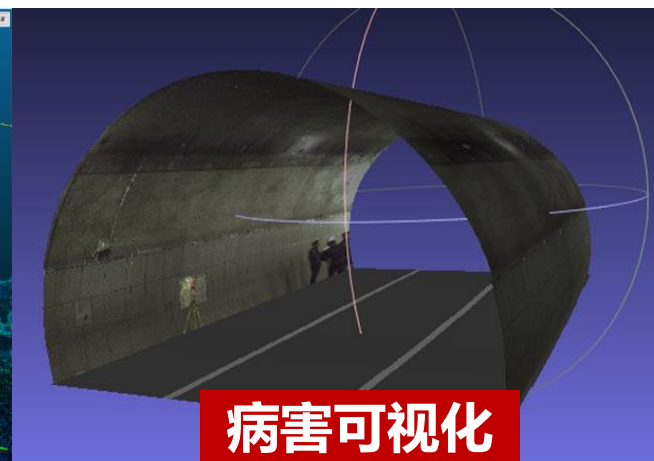
- 针对隧洞/隧道病害数据特征，研究了图像裂缝灰度特征**自动提取技术**
- 实现了三维点云数据去噪及重建方法，分析了**隧洞/隧道变形信息**
- 根据地质雷达病害信息特征，建立了地质雷达病害信息**智能识别算法**



隧道损伤机器视觉检测技术



隧道三维重建及可视化



病害可视化

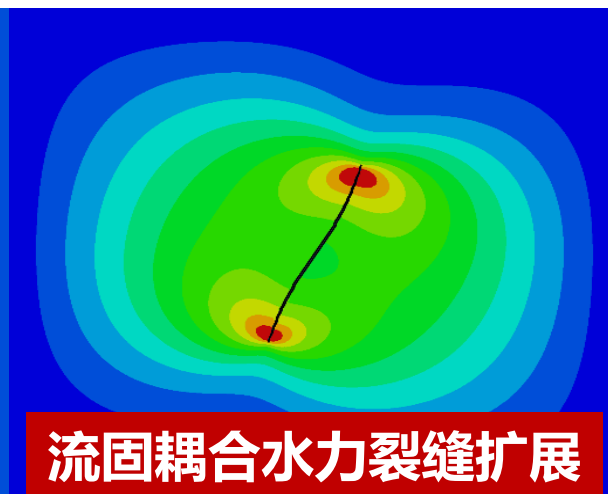
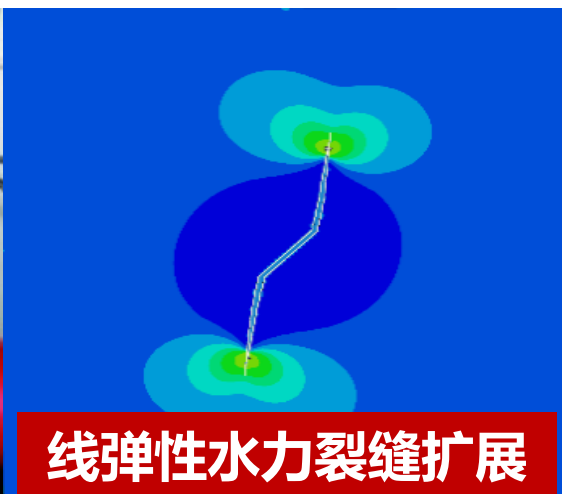
为引水隧洞**病害智能识别**研究奠定了良好的**研究基础**

3.6 研究基础



(五) 岩体裂缝演化规律：

- 对含预制裂隙的水泥砂浆试块进行了**水力压裂**试验和**疲劳水力压裂**试验
- 结合数值计算模型分析了预置裂隙倾角与水平应力对水力裂纹扩展路径及起裂水压力的影响



为引水隧洞**裂损演化机理**研究提供了良好的理论与实验基础

3.6 研究基础



（六）隧洞病害智慧健康诊断系统：

- 研究了输水隧洞岩土结构的监测参数时空变化规律和综合**智慧安全诊断**方法
- 提出了相应岩土结构的安全评价体系，建立了综合智慧诊断系统、病害评价管理平台
- 形成了一套岩土结构**安全监测**与**健康诊断**评价的关键技术

引水综合管廊工程安全监测智慧预警平台



轨交隧道智能健康系统及病害评价管理平台



3.7 应用推广



典型工程一：济南地铁隧道

应用前

- 隧道站点之间长约为1.5km，3人协同日常巡查需2小时

一体化快速巡检装备

- 巡查时间缩短至0.3小时，巡检速度提升5倍，解决了人工巡检耗时长、效率低、危险高的问题



3.7 应用推广



典型工程二：南水北调东线大屯水库

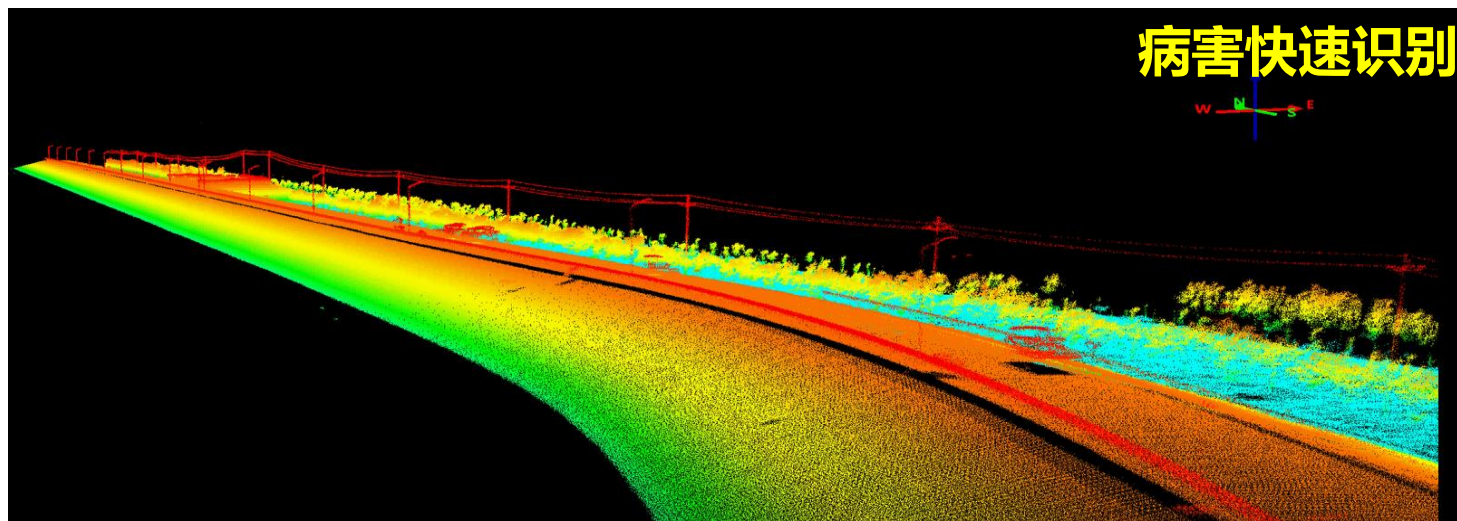
应用前

- **全国最大**全库底铺膜平原水库，围坝总长8.9km，3人协同日常巡查需**8小时**



一体化快速巡检装备

- 巡查时间缩短致**1.5小时**，巡检速度提升**5倍**，解决了人工巡检耗时长、效率低的问题
- 半年巡检过程中共发现冲刷病害12处、渗流塌陷病害1处



检测速度提升4-8倍，突破了平原水库传统检测理念，填补了领域空白

3.7 应用推广



典型工程三：隧洞/隧道病害智慧健康诊断系统



建立了引水综合管廊工程安全监测智慧预警平台，实现了管廊安全监测的实时化、智慧化



建立了隧道/隧洞智能健康系统及病害评价管理平台，形成了一套岩土结构安全监测与健康诊断评价的关键技术

为引水隧洞病害健康诊断系统研究提供了试验基础和系统开发经验

目

录

CONTENTS

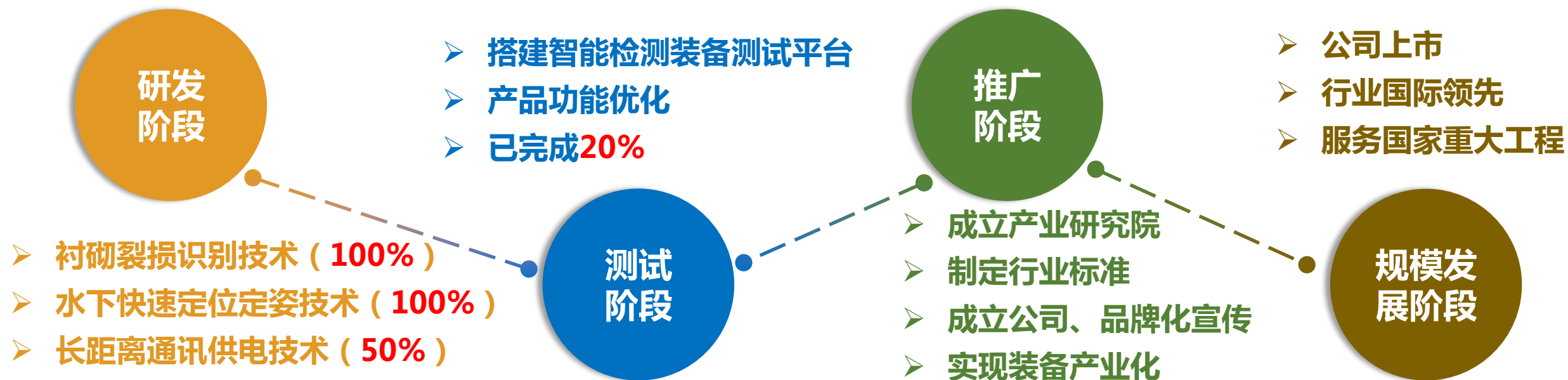
1 | 项目背景和必要性

2 | 项目实施内容及进度安排

3 | 团队介绍及研究基础

4 | 产品规模及经济、社会效益

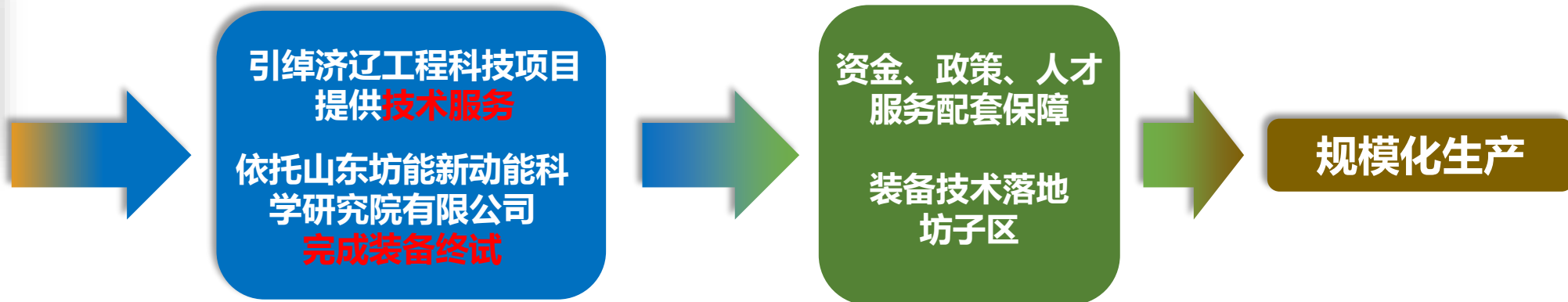
4.1 装备研发与产业化



装备室内初试完成，即将进入终试阶段



专利
样机



4.2 公司规模及其股本结构

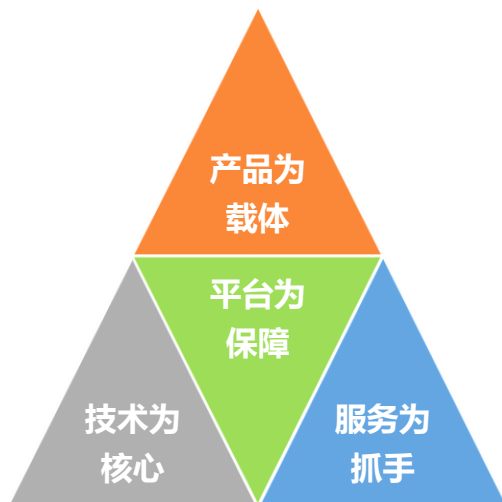


公司初期注册资金**200**万元，其中创业团队以技术入股

来源	出资方式	股权比例
韩勃	专利、软著技术	41%
潍坊市坊子区人才发展集团有限公司	货币资金	39%
山东坊能新动能科学研究院有限公司	货币资金	20%
总计		100%

- 2021年7月底，与内蒙古引绰济辽供水有限责任公司讨论关于**引绰济辽工程隧洞段检测工作**的具体需求
- 目前已经完成前期对接，准备签订引绰济辽工程隧洞段检测装备合同，经费预计**400万元**

4.3 市场定位与商业模式



“四位一体” 商业模式

- ❖ **目标客户**——服务于**调水工程、水库大坝、海上作业平台、隧道/隧洞**等各类基础设施的病害检测，产品技术涉及**人工智能、自动化控制、远程通讯**等多项领域
- ❖ **服务类型**——为用户提供国际领先的**产品服务、技术服务**等

	型号	单价	洞内流速	洞内温度	续航	拍摄精度	检测速度
产品服务	R1-100	30万	1~3m/s	-10℃~45℃	2~4h	6M	1m/s
	R1-200	40万	1~5m/s	-10℃~45℃	2~4h	6M	2m/s
	R2-100	50万	>5m/s	-10℃~45℃	4~8h	12M	3m/s
技术服务	R1-100	1.0万/km	根据运维需求，引水工程年平均抽检隧洞超10段 单段隧洞年检1-2次，年检距离超60km 每年单项引水工程隧洞检测服务费用达60万				
	R1-200	1.2万/km					
	R2-100	1.5万/km					

4.4 经济及社会效益



- 本项目针对长距离引水隧洞运维检测难题，研发水下综合智能检测装备，解决**传统检测手段效率低、效果差、需退水、非智能**等问题

人工检测

- 费用大约**80-200元/m**
- 单人检测速度**0.3-0.5km/h**
- 信息集成效率低
- 病害识别速度慢
- 安全诊断不准确

水下自动检测装备

- 费用大约**15-40元/m**，检测成本降低**60%-80%**
- 检测速度**1-2km/h**，检测效率提高**50%以上**
- 病害信息集成系统，检测信息集成效率提高**90%以上**
- 病害智能识别方法，**极大提高识别速度**
- 智慧健康诊断方法，**提高诊断精度及准确性**

避免灾害，节省灾害处置费用，保障供水安全

4.5 市场效益前景分析



市场效益

截至2017年，全国**172项**节水供水重大水利工程已开工106项

在建工程如滇中引水、引绰济辽（内蒙古）、引汉济渭（陕西）等

重大引水工程在建投资规模超过**8000亿元**

单项工程每年运维费用约**1000-5000万**，市场份额超**17亿**

综上，本项目市场前景广阔



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

敬请各位专家指导！

谢 谢！