

一、项目名称

严酷环境下混凝土全时域性能感知机制与结构劣化监测成套技术

二、提名单位意见及提名等级

我单位认真审阅了该项目推荐书及其附件材料，确认真实有效，相关栏目符合填写要求。

按照要求，我单位及完成人所在单位均进行了公示，确认完成人排序无异议。

本项目瞄准严酷环境下混凝土全时域性能感知机制与结构劣化监测成套技术工程需求，在国家自然科学基金、教育部高等学校博士点基金等项目持续支持下历经开展 10 余年科研攻关。率先用近场微波参数无损感知严酷环境下混凝土早期施工缺陷，并基于电磁波耦合场时变规律建立混凝土预测模型；揭示近场微波参数与混凝土设施早期物化指标耦合机理。探索纳米功能混凝土力/电学性能与智能传感效能提升成套技术，基于嵌入封装后纳米功能混凝土电学参数智慧感知严酷环境下混凝土结构损伤劣化，构建混凝土施工及服役阶段全时域智能劣化监测与评估预警成套体系。研发的电磁波耦合快速检测技术、基于纳米功能混凝土的结构劣化监测成套技术已成功应用于严酷环境下滨海混凝土早期诊断，湿式冷却塔、烟囱、防腐型预制箱涵等结构劣化监测，提升了滨海混凝土早期质量检测效率，防腐型预制箱涵、排水管等滨海混凝土产品竞争力，具有良好的经济效益，并实现结构设施平稳运维，降低维修成本，社会效益显著。科研成果为严酷环境下混凝土早期性能快速检测、基于纳米功能混凝土传感器的服役期结

构劣化监测成套技术提供重要科技与理论支撑。

参照山东省科学技术奖申报和推荐基本条件，推荐该项目申报山东省科技进步奖二等奖。

三、项目简介

项目围绕严酷环境下混凝土全时域性能感知机制与多场耦合理论、纳米功能混凝土传感器性能提升成套工艺、混凝土全时域结构劣化监测成套技术的关键科学问题，具体工作包括：

创新点 1. 率先发现了微波近场法实时检测混凝土早期固化状态方法，揭示了电磁波物理场参数与混凝土早期物化参数内在关系；率先结合容舍尔及德拜模型，并通过双指数、双幂律函数非线性回归，发现近场微波耦合参数与混凝土早期物化指标耦合机理；成功将微波近场技术应用于防腐型预制箱涵混凝土、排水管、湿式冷却塔、烟囱等混凝土工程，实现了相应混凝土设施施工期早期施工缺陷快速检测。

创新点 2. 研究了纳米功能混凝土中纳米纤维分散稳定工艺，掌握其分散稳定调控的关键技术指标；率先同步引入韧性纤维、水性树脂来调控纳米功能混凝土传感器件封装韧性与抗渗耐久性；通过湿润角、电阻、阻抗等电学参数表征浸渍反应性防水剂功能混凝土传感器件封装膜的抗渗防水性能；引入纳米填料改善功能混凝土封装材料减振降噪效能，并率先探明纳米纤维/填料混杂对纳米功能混凝土增韧补强与阻尼减振提升机理。

创新点 3. 研究了纳米功能混凝土本征力/电传感特性及其性能提升方法；率先发现通过无机纳米填料与导电聚合物共轭导电效应可协

同改善纳米功能混凝土“神经树突”式双轨网络导电机理；率先模拟交叉指形电极工艺提升压电功能混凝土正交异性特性和压电传感性能。成功将灵敏高、性能稳定且封装良好的纳米功能混凝土传感器嵌入湿式冷却塔、烟囱、防腐型预制箱涵等混凝土结构，智慧感知服役期结构所承受的应力/应变，并实现劣化监测，构建了严酷环境下混凝土结构劣化监测与预警成套体系。

四、主要知识产权和标准规范等目录

1. 发明专利——GO 增强 CNT 覆膜砂的智能混凝土、无线传感器及制法. 发明人：罗健林；李秋义；张春巍；钟国麟. 专利号：201710096272.X, 申请日：2017.02.22，公开日：2017.05.17，授权日期：2019.09.24（有效）

2. 标准——烟囱工程技术标准（报批稿）（GB 50051—201X）. 起草人：牛春良；许嘉庆；杜宣刚；王立成；车轶；陈飞；李国树；陆士平；侯锐钢；李晓民；李继宏；李涛；李秋义等；起草单位：中冶华天工程技术有限公司；上海必立结构设计事务所有限公司；青岛农业大学等，颁布部门：中华人民共和国住房和城乡建设部，日期：2020.12.30（有效）

3. 发明专利——水泥基导电复合材料、制备方法及应用. 发明人：冯超，万菲；刘强；蔡祥；钟丽杰. 专利号：201610634220.9, 申请日：2016.08.04，公开日：2017.01.04，授权日期：2018.09.04（有效）

4. 发明专利——轻质混凝土以及采用该混凝土的多功能防护板与制备方法. 发明人：罗健林；李秋义；赵铁军；诸雪青. 专利号：

201410116217.9, 申请日: 2014.03.26, 公开日: 2014.07.16, 授权日 2016.03.02 (有效)

5. 发明专利——水性聚吡咯水泥基导电复合材料、制备方法及应用.发明人:冯超; 万菲; 刘强; 蔡祥; 钟丽杰. 专利号: 201610632941.6, 申请日: 2016.08.04, 公开日: 2017.01.04, 授权日期: 2018.06.22(有效)

6.发明专利——聚苯胺@碳纳米管导电压敏复合材料及其应用, 发明人: 冯超; 万菲; 黄微波; 杨阳. 专利号: 201510811855.7, 申请日: 2015.11.20, 公开日: 2016.02.17, 授权日期: 2017.09.29 (有效)

7.发明专利——聚吡咯@石墨烯导电压敏复合材料及其应用, 发明人:冯超; 万菲; 黄微波; 梁龙强. 专利号: 201510809577.1, 申请日: 2015.11.20, 公开日: 2016.02.24, 授权日期: 2017.09.27 (有效)

8.发明专利——三相导电复合材料、制备方法及应用. 发明人: 冯超; 黄微波; 万菲; 赵斌; 刘强; 蔡祥; 李亚男. 专利号: 201610634633.7, 申请日: 2016.08.04, 公开日: 2017.01.04, 授权日期: 2018.09.04(有效)

9. 标准——火力发电厂湿式冷却塔可靠性鉴定与维护导则(报批稿)(T/CEC×××—201×).起草人: 牛春良; 李涛; 纪连举; 李继宏; 周勇; 王立成; 刘绍中; 倪桂红; 李秋义等; 起草单位: 国家电投集团科学技术研究院有限公司; 上海必立结构设计事务所有限公司; 上海必立建设工程检测有限公司; 国家电投内蒙古能源有限公司; 大连理工大学; 青岛农业大学等, 颁布部门: 中国电力企业联合会, 日期: 2020.12.31 (有效)

10.发明专利——压阻/压电复合材料制法及采用该材料的传感器

及制法。发明人：罗健林；李秋义；赵铁军；高嵩。专利号：201210417696.9，申请日：2012.10.26，公开日：2013.02.13，授权日期：2014.11.26（失效）

五、主要完成人情况

1.姓名：罗健林，排序：1/9，职务：无，职称：副教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学。对本项目主要学术贡献：

对创新点 1~3 均有贡献，对创新点 1 贡献是：成型用于微波测试的混凝土试样，协同探索微波导纳率与混凝土早期性能耦合机理；率先将电磁波耦合技术预测混凝土早期强度与固化状态。对创新点 2 贡献是：探明纳米功能混凝土制备工艺关键指标；掺杂提升封装材料抗渗防水、抗裂韧性及阻尼性能；探明纳米纤维/填料混杂对纳米功能混凝土增韧补强、阻尼减振及断裂韧性影响。对创新点 3 贡献是：研究纳米功能混凝土电学性能，探索其力-电传感效能，并优化压阻/压电功能混凝土力电传感性能。构建基于纳米功能混凝土传感器的全时域智能监测成套体系，并应用于严酷环境下各类混凝土结构，实现应力/应变的智慧感知与劣化监测。

2. 姓名：李秋义，排序：2/9，职务：院长，职称：教授，工作单位：青岛农业大学，完成单位：青岛农业大学、青岛理工大学。对本项目主要学术贡献：

对创新点 2、3 有贡献，对创新点 2 的贡献是：指导开展功能混凝土基封装材料冲击韧性测试工艺，并共同分析功能混凝土抗渗防水机

理。对创新点 3 的贡献是：合作开展纳米功能混凝土制备与压电功能混凝土性能优化方法；指导构建了严酷环境各类混凝土设施劣化监测体系。

3. 姓名：冯超，排序：3/9，职务：无，职称：讲师，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学。对本项目主要学术贡献：

对创新点 2、3 有贡献，对创新点 2 的贡献是：率先以纳米材料表面羧基为活化点，通过原位聚合手段生长导电高分子材料，并通过功能助剂进一步改进，提升纳米材料在水性体系中的分散性；对创新点 3 的贡献是：率先以纳米材料表面羧基为活化点，通过原位聚合手段生长导电高分子材料，并通过功能助剂进一步改进，提升相应纳米功能混凝土的电导传感智能特性；率先协同导电聚合物发展纳米功能混凝土“神经树突”式双轨导电网络，并结合 π - π 堆积及渗滤理论探明纳米功能混凝土的共轭导电机理。

4. 姓名：钟国麟，排序：4/9，职务：无，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学。对本项目主要学术贡献：

对创新点 1、3 有贡献，对创新点 1 的贡献是：率先结合近场微波参数来无损智慧感知混凝土早期施工缺陷，并建立了早期强度、模量预测相关模型，实现混凝土施工阶段早期损伤诊断，揭示近场微波耦合参数与混凝土早期物化指标关联机理。对创新点 3 的贡献是：协助用纳米功能混凝土电学参数来实时感知嵌入混凝土结构所受荷载变形与损伤劣化监测。

5. 姓名：段忠东，排序：5/9，职务：无，职称：教授，工作单位：

哈尔滨工业大学（深圳），完成单位：哈尔滨工业大学（深圳）。对本项目主要学术贡献：

对创新点 2、3 有贡献，对创新点 2 的贡献是：指导纳米材料分散稳定以及相应纳米功能混凝土制备工艺；指导纳米功能混凝土封装材料阻尼减振性能，协助探明纳米功能混凝土增韧补强与阻尼减振机理。对创新点 3 贡献是：协助研究了纳米功能混凝土本征力/电传感特性，并共同探讨了各因素对其本征力电传感特性的影响机理。

6. 姓名：张纪刚，排序：6/9，职务：副院长，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：青岛理工大学。对本项目主要学术贡献：

对创新点 2、3 有贡献，对创新点 2 的贡献是：协助分析纳米材料不同修饰分散工艺以及相应纳米功能混凝土封装性能提升技术。对创新点 3 的贡献是：协助将纳米功能混凝土传感器嵌入各类结构，开展其劣化监测分析。

7. 姓名：牛春良，排序：7/9，职务：执行董事，职称：教授级高级工程师，工作单位：上海必立建设工程检测有限公司，完成单位：上海必立结构设计事务所有限公司、上海必立建设工程检测有限公司。对本项目主要学术贡献：

对创新点 1、3 有贡献，对创新点 1 的贡献是：推广利用电磁波耦合技术快速检测严酷环境下湿式冷却塔、烟囱筒壁混凝土早期施工缺陷与质量诊断；对创新点 3 的贡献是：推广基于纳米功能混凝土传感器结构劣化监测成套技术分别在严酷环境下湿式冷却塔及烟囱筒壁

混凝土性能劣化的工程应用。

8. 姓名：曹剑，排序：8/9，职务：副总经理，职称：高级工程师，工作单位：山东中建西部建设有限公司，完成单位：青岛理工大学、山东中建西部建设有限公司。对本项目主要学术贡献：

对创新点 1、3 有贡献，对创新点 1 的贡献是：推广利用电磁波耦合技术快速检测滨海混凝土的早期质量检测，并诊断滨海混凝土施工缺陷的应用。对创新点 3 贡献是：推广基于纳米功能混凝土传感器结构劣化监测成套技术在滨海混凝土结构劣化监测与预警的应用。

9. 姓名：王本新，排序：9/9，职务：董事长，职称：无，工作单位：青岛青新建材有限公司，完成单位：青岛青新建材有限公司。对本项目主要学术贡献：

对创新点 1 有贡献，对创新点 1 的贡献是：推广用电磁波耦合技术检测防腐型预制箱涵、排水管等滨海混凝土早期质量，并快速诊断滨海混凝土施工缺陷的应用。

六、主要完成单位情况

“严酷环境混凝土全时域性能感知机制与结构监测成套技术”为青岛理工大学、青岛农业大学、哈尔滨工业大学（深圳）、上海必立建设工程检测有限公司、山东中建西部建设有限公司及青岛青新建材有限公司共同研究的项目。

第一完成单位：青岛理工大学

本单位组织参与了本项目所有创新研究和推广应用的实施，在人员配备、场地提供、资金支持等方面均有贡献，主要学术贡献有：

青岛理工大学对本项目创新点 1~3 均作出了创造性贡献。对创新点 1 贡献是：率先结合近场微波参数来无损智慧感知混凝土早期实时状态，并建立了简单而准确的早期强度、模量预测相关模型，实现混凝土施工阶段早期损伤诊断；探索微波导纳率与混凝土早期性能耦合机理；用近场微波参数来无损智慧感知施工期混凝土工程早期实时状态。对创新点 2 贡献是：探明纳米功能混凝土制备工艺关键指标；掺杂水性环氧提升纳米功能混凝土抗渗耐久、抗裂韧性及阻尼性能；探明纳米纤维/填料混杂对纳米功能混凝土增韧补强及阻尼减振机理。对创新点 3 贡献是：分析纳米功能混凝土压阻、压电传感性能，探索提升其力-电传感效能措施；通过原位聚合手段生长（水性）聚吡咯、聚苯胺等导电高分子材料提升碳纳米管改性水泥混凝土的导电性；探明协同导电聚合物发展纳米功能混凝土“神经树突”式双轨导电网络。将纳米功能混凝土传感器应用于热电烟囱/冷却塔筒壁、防腐型预制构件等混凝土结构劣化监测，为相关严酷环境混凝土设施的长期服役提供安全保障，实现全时域结构劣化监测成套技术。

授权国家发明专利 15 项，发表高水平学术论文 62 篇，培养研究生 21 名。

第二完成单位：青岛农业大学

本单位组织参与了本项目纳米功能混凝土表面防水工艺以及将灵敏高、性能稳定且封装良好的纳米功能混凝土传感器嵌入湿式冷却塔、烟囱结构，智慧感知服役期结构所承受的应力/应变，并进行劣化监测相关创新研究，主要学术贡献有：

青岛农业大学对本项目创新点 2、3 作出了创造性贡献。对创新点 2 贡献是：合作探讨纳米功能混凝土表面防水性能提升技术，对创新点 3 贡献是：合作开展结构劣化监测成套技术在湿式冷却塔、烟囱筒壁结构监测与性能预警的工程应用。

与第一完成单位共同发表学术论文 7 篇，申请国家专利 3 项；与第四完成单位合作编写国家、行业标准 2 项。

第三完成单位：哈尔滨工业大学（深圳）

本单位组织参与了本项目纳米功能混凝土传感器件封装韧性与阻尼减振特性以及纳米功能混凝土本征力/电传感特性及其性能提升方法相关创新研究，主要学术贡献有：

哈尔滨工业大学（深圳）对本项目创新点 2~3 均作出了创造性贡献。对创新点 2 贡献是：共同探讨纳米功能混凝土封装材料阻尼减振性能，协助探明纳米功能混凝土增韧补强及阻尼减振机理；对创新点 3 贡献是：共同分析纳米功能混凝土电学性能与力电特性及智能传感机理。

与第一完成单位共同发表学术论文 9 篇，授权国家发明专利 1 项。

第四完成单位：上海必立建设工程检测有限公司

本单位组织参与了本项目利用电磁波耦合技术快速检测混凝土早期施工缺陷以及基于纳米功能混凝土传感器的结构劣化监测成套体系相关应用研究，主要学术贡献有：

上海必立建设工程检测有限公司对本项目创新点 1、3 作出了创造性贡献。对创新点 1 的贡献是：推广利用电磁波耦合技术快速检测严

酷环境下湿式冷却塔、烟囱筒壁混凝土早期施工缺陷与质量诊断。对创新点 3 贡献是：推广基于纳米功能混凝土传感器结构劣化监测成套技术在严酷环境下湿式冷却塔及烟囱性能劣化监测的工程应用。

与第二完成单位共同参与国家、行业标准制定 2 项。

第五完成单位：山东中建西部建设有限公司

本单位组织参与了本项目利用电磁波耦合技术快速检测滨海混凝土早期施工缺陷，利用纳米功能混凝土传感器实时监测滨海结构劣化并预警相关应用研究，主要学术贡献有：

山东中建西部建设有限公司对本项目创新点 1、3 作出了创造性贡献。对创新点 1 的贡献是：推广利用电磁波耦合技术快速检测滨海混凝土的早期质量检测，并诊断滨海混凝土施工缺陷的应用。对创新点 3 贡献是：推广基于纳米功能混凝土传感器结构劣化监测成套技术在滨海混凝土结构劣化监测与预警的应用。

与第一完成单位共同发表学术论文 2 篇，共同开展科研项目 1 项。

第六完成单位：青岛青新建材有限公司

本单位组织参与了本项目用电磁波耦合技术检测防腐型预制箱涵、排水管等滨海混凝土早期质量，并快速诊断滨海混凝土施工缺陷相关应用研究，主要学术贡献有：

青岛青新建材有限公司对本项目创新点 1 作出了创造性贡献。对创新点 1 贡献是：推广用电磁波耦合技术检测防腐型预制箱涵、排水管等滨海混凝土早期质量，并快速诊断滨海混凝土施工缺陷的应用。

与第一完成单位合作开展项目评定 1 项。