

一、项目名称

平原水库运行期健康诊断与性能保障关键技术

二、申报奖种

山东省科技进步奖

三、提名专家

专家姓名：张建云

工作单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

职称/职务：教授

学科专业：水利工程

四、专家提名意见

平原水库是跨流域调水及区域供水的重要水利枢纽，全国分布广泛，尤其在北方缺水地区经济社会发展中发挥了重要作用。但是，水库在渗流侵蚀和低温冰冻作用下，服役性能逐渐下降，一旦失事将给下游人民群众生命财产造成重大损失。

山东大学联合南京水科院、河海大学等该领域国内优势力量，针对平原水库运行期病害机理及监控的关键难题，历经十余年科研攻关与工程实践，揭示了围坝薄弱面渗流破坏机理，建立了土工膜下气胀识别方法，形成了护坡冰冻病害评估体系，解决了水库运行期性能演化的机理难题；建立了水库变形及渗流三维监测体系，研发了多源数据融合健康诊断系统，突破了水库性能动态感知与评价技术瓶颈；发展了围坝防渗性能保障技术，创新了土工膜下排气工艺，研发了防冻融新型联锁块，攻克了水库运行期性能保障难题。整体技术应用于山东、新疆、内蒙古等 20 余座水库工程，实现了平原水库病险的有效主动防控，保障水库安全运行，推动了平原水库运维管理科学化，取得了显著经济社会效益。

形成地方行业标准 1 项，授权国家发明专利 14 项、实用新型专利 11 项、软件著作权 8 项，出版专著 4 部，发表 SCI/EI 论文 26 篇，应邀作国际大会报告 4

次、国内学术报告 6 次，多次在国内召开学术和技术培训会，在山东、新疆等地建立了工程示范基地。研发成果有力促进了行业科技进步，扭转了我国平原水库被动防护局面，在平原水库安全防护领域起到了重要的引领作用。

提名该项目为山东省科学技术进步奖二等奖。

五、项目简介

平原蓄水调节水库，丰蓄枯用，是解决水资源短缺问题的重要工程手段，对北方缺水地区区域经济发展、社会秩序稳定起着不可替代的重要作用。但目前我国平原水库病险率达到 35% 以上，其中渗流、低温是主要致灾因素。平原水库性能保障的关键难题在于对多种因素影响下的平原水库性能演化机理认识不足，缺乏系统的指导理论和方法，传统的监控体系、诊断方法与性能保障技术难以满足主动防控需求。

本项目以国家科技支撑计划、水利部“948”课题及水利部公益性行业科研项目作为支撑，结合山东、新疆、内蒙古等省份的一批大中型平原水库工程，组织高校、科研院所、设计院、工程单位等数百名科研人员，历经十余年的联合技术攻关和长期工程实践，解决了平原水库运行期健康诊断及性能保障方面的一系列技术难题，主要科技创新如下：

1. 突破了平原水库运行期性能演化机理的基础理论难题。揭示了围坝薄弱面渗流破坏机理及失稳破坏模式，建立了土工膜膜下气胀识别方法，形成了护坡冰冻病害评估体系，首次系统揭示了平原水库不同病害灾变演化机理，为平原水库性能识别奠定了理论基础。

2. 解决了平原水库性能动态感知和评价难题。建立了基于平原水库破坏模式识别的变形及渗流三维全自动监测方法，构建了从局部到整体的多维诊断指标体系和综合评价模型，搭建了多源数据融合健康诊断系统，为平原水库性能保障提供了强有力的技术支撑。

3. 攻克了平原水库运行期性能保障技术难题。在渗漏冰冻病害控制方面，

发展了围坝防渗性能保障技术，创新了土工膜膜下排气工艺，研发了防冻融新型联锁块，提出了筑坝土冻胀病害改良方法，实现了平原水库由表及里的病险主动防控。

项目成果在我国山东、新疆、内蒙古等省份的水库工程成功推广应用，消除了大屯水库、双王城水库、周村水库、明星水库等 20 余座大中型平原水库运行期病险隐患。

形成地方行业标准 1 项，授权国家发明专利 14 项、实用新型专利 11 项、软件著作权 8 项，出版专著 4 部、发表 SCI/EI 论文 26 篇，应邀作国际大会报告 4 次、国内学术报告 6 次，多次在国内召开学术和技术培训会，在山东、新疆等地建立了工程示范基地。有力促进了行业科技进步，扭转了我国平原水库被动防护局面，在平原水库安全防护领域起到了重要的引领作用。

六、客观评价

（一）科技鉴定评价

（1）山东省水利厅组织专家鉴定委员会，对《平原水库全库盘铺膜防渗关键技术及应用》进行了鉴定。鉴定结论为：“解决了膜下气场数值模拟计算难题，形成了平原水库全库盘铺膜防渗设计方法，制定了平原水库库底铺膜施工指南”，“该研究成果总体达到国际领先水平”。

（2）山东省交通运输厅组织专家鉴定委员会，对《联锁砣块体在京杭运河航道护坡结构中的应用研究》进行了鉴定。鉴定结论为：“提出了基于水泥与固化剂的航道护坡下卧土冻胀改良方法，结合工程特点及荷载特性，提出了适用于京杭运河航道护坡的联锁块结构型式”，“该研究成果总体达到国际先进水平”。

（二）国家及省部级课题验收意见

（1）科技部组织专家对国家科技支撑计划课题《南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范》进行了会议验收。验收意见为：“该课题提出了基于光纤传感技术的平原水库围坝渗流监测方案，建立了平原水库运行期健康

诊断技术体系。揭示了下卧土层水分运移机理和冻胀变形对护坡的破坏机理，研发了环保防冻融护坡材料，提出了冻融冻胀条件下平原水库护坡修复技术，提出了平原水库围坝与穿坝涵管接触渗漏监测、防护和处治成套技术，减少水库渗漏量 10%，表面防护及加固成本降低 20%”。

(2) 水利部组织专家对水利部“948”项目《高精度全自动三维变形实时监测与预警系统》进行了会议验收。验收意见为“建立了一套能满足安全管理要求的高精度全自动三维实时变形监测与预警系统”。

(3) 水利部组织专家对水利部公益性行业科研专项项目《山洪易发区水库致灾预警与减灾关键技术研究》进行了会议验收。验收意见为：“提出了山洪易发区水库致灾因素、致灾模式与分析技术”，“建立了山洪易发区水库安全监控指标与安全评价体系”。

(三) 行业领域评价

(1) 本项目相关成果纳入了地方行业标准《DB 37/1342-2009 平原水库工程设计规范》，为我国平原水库性能设计提供了强有力的技术支撑，引领了水库工程设计领域的技术进步。

(2) 本项目的相关成果纳入了“山洪易发区水库致灾预警与减灾技术”，该项技术列入《2019 年度水利先进实用技术重点推广指导目录》，认定为水利先进实用技术，推动了水库运行期监控技术发展。

(四) 学术评价

(1) 本项目的相关技术成果出版专著 4 部，其中《水库大坝运行调度技术》被纳入到“十三五”国家重点图书出版规划项目，为我国水库大坝运行管理提供了技术支持，提高了平原水库运维管理的科学水平。

(2) 本项目相关成果发表 SCI/EI 论文 26 篇，其中 JCR 1 区/2 区论文 12 篇，发表在《Computers and Geotechnics》、《Soils and Foundations》、《Geotechnique》等国际知名刊物，为平原水库运维管理提供了理论支持，解决了平原水库运行期

性能演化机理方面的难题。

(3) 中国工程院院士孔宪京、英国皇家工程院院士 David M. Potts、日本工程院外籍院士蒋宇静分别在《水利学报》、《Computers and Geotechnics》和《Processes》发表的文章中引用和评价了项目组韩勃、刘健、解全一等发表的《The stability investigation of the Generalised- α time integration method for dynamic coupled consolidation analysis》、《Numerical investigation of the response of the Yele rockfill dam during the 2008 Wenchuan Earthquake》、《Critical hydraulic gradient of internal erosion at the soil-structure interface》文章，对本项目中提出的水库大坝计算模型和渗流破坏模式给予了高度评价。

(五) 产品测试与评价

(1) 山东省水利勘测设计院对本项目研发的“平原水库防渗性能保障技术”进行了测算，结果表明本项目研发的平原水库防渗技术解决了水平和竖直防渗失效处治难题，能够有效减少水库渗漏量 10% 以上。

(2) 本项目开发的“防冻融联锁块及筑坝土冻胀改良技术”应用于菏泽雷泽湖水库，解决了水库护坡的冻胀和冻融问题，据山东农业大学勘测设计院测算，有效减少了运行维护费用 20% 以上。

(3) 国家网络软件产品质量监督检验中心（济南）对本项目开发的“平原水库健康诊断系统”进行了测试，测试结果显示该软件的“系统管理”、“人工巡查管理”、“监测数据管理”、“综合诊断”等功能运行稳定，数据分析可靠，实现了水库监测与诊断的无缝对接。

(4) 国家网络软件产品质量监督检验中心（济南）对本项目开发的“水库大坝高精度三维实时变形监测与预警系统”进行了测试，测试结果显示该软件的“采集系统”、“查询分析”、“监测数据自动化定时录入”、“测值变化量分析”等功能运行稳定，能够有效实现水库变形的实时监测与预警。

(5) 山东景鸿信息科技有限公司对本项目开发的“平原水库健康诊断系统”

和“水库大坝高精度三维实时变形监测与预警系统”进行了测试，经过多组监测数据测试，显示该系统运行稳定可靠。

七、应用情况

本项目成果已在山东、新疆、内蒙古等多个省市全面落地应用，整体技术现场应用均在 2 年以上。相关技术产品包括土工膜膜下排气综合技术、防冻融联锁块结构及材料、筑坝土冻胀改良技术、渗漏注浆处治材料及工艺、平原水库健康诊断技术、水库高精度三维实时变形监测技术等，有效解决了平原水库运行期实时监控、健康诊断及性能保障方面的难题。典型的案例如下：

1. 内蒙古明星水库应用“水库高精度三维实时变形监测技术”：

明星水库围坝长 6 公里，总库容 1953 万立方米。水库流域范围较大，多处坝坡需要进行重点监控。2016 年 9 月，在确定变形监控点的基础上，明星水库采用本项目研发的“水库高精度三维实时变形监测技术”，对水库范围内的多处坝坡进行了 24 小时自动监控，实现了水库变形的实时动态感知，为水库运行状态评价提供了技术支撑，提高了水库运维自动化水平。

2. 新疆塔里木河流域大西海子水库应用“平原水库健康诊断技术”：

大西海子水库是塔里木河最末端的一座水库，水库蓄水面积达 68 平方公里，总库容 1.68 亿立方米。大西海子水库安装了 40 余个各类监测设备，监测数据庞大，分析过程人工投入大。2017 年 3 月，大西海子水库采用本项目研发的“平原水库健康诊断技术”，对水库运行状态进行了健康诊断，有效解决了水库诊断难题，帮助管理人员全面把控水库运行状态，保障了水库安全运行。

3. 潍坊双王城水库应用“平原水库健康诊断技术”：

双王城水库大坝轴线总长 9.64 公里，坝高 12.5 米，正常蓄水位 9 米，最大库容 6150 万立方米，年入库水量 7486 万立方米，出库水量 6375 万立方米。双王城水库运行过程中安装了 36 处监测设备，监测数据繁杂，分析过程人工耗费较大。2017 年 4 月，双王城水库采用了本项目研发的“平原水库健康诊断技术”，结合人工巡查数据、监测数据等进行了健康诊断，实现了水库监测与诊断的无缝

对接，实时感知水库运行状态，为水库运行维护提供了科学依据。

4. 德州大屯水库应用“土工膜膜下排气综合技术”：

南水北调山东段大屯水库围坝轴线总长 8913.99 米，总占地面积 64.90 万平方米。设计最高蓄水位 29.80 米，相应库容 5209 万立方米。坝址地下水位类型为第四系孔隙潜水，贮存于砂壤土、裂隙黏土的裂隙和粉细砂、中细砂的孔隙中，各土层渗透系数处于 0.09-13.6m/d，属中等-强透水性，无相对不透水层。大屯水库采用全库底铺膜技术解决库底渗漏问题，但坝址水位较低，现场试验过程中出现膜下气胀问题。2015 年，大屯水库采用本项目研发的“土工膜膜下排气综合技术”，有效的解决了土工膜膜下气胀渗漏问题，提升了复合土工膜的防渗效果，修建以来未因库底防渗问题而产生大修，产生了巨大的经济效益。

5. 枣庄周村水库应用“防冻融联锁块及筑坝土改良技术”：

枣庄周村水库位于孟庄镇周村南，属省列重点中型水库，总库容 8404 万立方米，兴利库容 4442 万立方米，死库容 658 万立方米。枣庄周村水库属于典型北方平原水库，由于冬季寒冷天气影响，水库护坡出现冰冻病害。2016 年 5 月，枣庄周村水库护坡修复中采用了本项目研发的“防冻融联锁块及筑坝土改良技术”，有效解决了水库护坡的冻融冻胀问题，大幅减少了冻融冻胀的维护费用，修复以来未因冻胀问题而产生大修。

6. 枣庄上善水库下库应用“渗漏注浆处治材料及工艺”：

上善水库下库为枣庄市续建配套工程，同时是南水北调进入山东境内的第二个续建配套工程。上善水库下库围坝为均质土坝，围坝全长 4.27 千米，最大坝高 5.5 米，坝顶宽 8.0 米。水库运行过程中发生渗漏现象，检测后发现水库渗漏主要为粗砂和砾砂透水层间的水平渗漏。2017 年 9 月，上善水库下库采用本项目研发的“渗漏注浆处治材料及工艺”，提高了水库的防渗性能，处治后在水库日常监测中未发现渗漏问题，保障了水库的安全运行。

7. 济宁梁山泊水库应用“新型高锁力联锁块及筑坝土冻胀改良技术”：

梁山泊水库水面面积 13.30 万平方米，水深 5.20 米，蓄水 670 万立方米，于 2014 年 5 月 26 日正式开始蓄水。梁山泊水库运行过程中护坡连锁块在筑坝土的冻胀附加应力作用下发生了顶升破坏。2017 年 7 月，梁山泊水库采用了本项目研发的“新型高锁力连锁块以及筑坝土冻胀改良技术”，有效解决了水库护坡冰冻病害问题，修复以来未产生护坡冰冻病害，保障了水库的稳定运行。

八、主要知识产权和标准规范等目录

知识产权 (标准) 类别	知识产权 (标准)具 体名称	国 家 (地 区)	授权号 (标准 编号)	授权 (标准 发布) 日期	证书编号 (标准批 准发布部 门)	权利人(标 准起草单 位)	发明人(标 准起草人)	发明 专利 (标 准) 有效 状态
计算机软 件著作权	平原水库健 康诊断系统 V1.0	中 国	2017SR 528400	2017-0 9-19	2113684	山东大学, 水利部交通 运输部国家 能源局南京 水利科学研 究院	山东大学、 水利部交通 运输部国家 能源局南京 水利科学研 究院	有效
发明专利	一种监测土 与结构接触 面剪应变的 传感器及方 法	中 国	ZL2017 1012421 3.9	2017-1 1-03	2680054	山东大学	刘健, 解全一, 万志, 刘锐, 李昱莹, 李红涛, 李选正	有效
专著	水库大坝运 行调度技术	中 国	978-7-56 30-4345- 3	2019-1 0	河海大学 出版社	水利部交通 运输部国家 能源局南京 水利科学研 究院	何勇军, 李铮, 许海峰, 李宏恩, 周宁	有效

标准规范	平原水库工程设计规范	中国	DB 37/1342- 2009	2009-0 9-07	山东省质 量技术监 督局	山东省海河 流域水利管 理局	王立民, 徐 又建, 戴同 霞, 柯鸿水, 苗杰, 林仁, 段登选, 高 峰, 朱振安, 郑佃祥, 吴 春友, 周荣 星, 刘华芹, 金瑞清	有效
计算机软 件著作权	水库大坝高 精度三维实 时变形监测 与预警系统 [简称: DMMS] V2.0	中 国	2016SR 235724	2016-0 7-01	1414341	水利部交通 运输部国家 能源局南京 水利科学研 究院	水利部交通 运输部国家 能源局南京 水利科学研 究院	有效
论文	Experimental investigation of interfacial erosion on culvert-soil interface in earth dams	中 国	Soils and Foundati ons	2019-6	10.1016/j. sandf.201 9.02.004	山东大学	Quanyi Xie, Jian Liu, Bo Han, Hongtao Li, Yuying Li, Zhenqiang Jiang	其他 有效 的知 识产 权
发明专利	一种高可定 制型联锁生 态护坡砖及 其应用	中 国	ZL2015 1099273 2.8	2018-0 7-31	3018288	山东大学	刘健, 齐泊良, 胡 南琦, 仲奇, 李红涛, 吴 智敏, 岳秀 丽, 李昱莹, 李选正	有效
论文	Analytical solution for	中 国	Compute rs and	2019-1	10.1016/j. compgeo.	河海大学	Liujiang Wang,	其他 有效

	one-dimensional vertical electro-osmotic drainage under unsaturated conditions		Geotechnics		2018.09.011		Yaoming Wang, Sihong Liu, Zhongzhi Fu, Chaomin Shen, Weihai Yuan	的知识产权
专著	脉动齐鲁：南水北调工程工程技术卷	中国	978-7-5170-2183-4	2014-6	中国水利水电出版社	山东省南水北调工程建设管理局，南水北调东线山东干线有限责任公司	孙义福，罗辉，于福春，瞿潇，李永顺，常青，张林，王昊，刘霞，桑国庆，焦瑾玲，瞿雯	有效
实用新型专利	一种土冻胀率测试仪	中国	ZL201520628467.0	2015-12-30	4889404	山东农业大学	刘福胜，王华敬，高明耀，卢少利，郑如岩，王翠娟，唐飞	有效

九、主要完成人情况

1、姓名：刘健 排名：1

行政职务：学院党委书记 技术职称：教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目贡献：

创新点 1、2、3 的主要完成人，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”课题负责人，提出总体思路、技术路线和开发方案，参与技术、工艺开发与推广，对创新点 1、2、3 作出了重要贡献：

创新点 1 中开展了薄弱面渗流破坏试验，再现了薄弱面渗流破坏演化过程，提出了围坝薄弱面渗流破坏条件及失稳模式，研发了薄弱面变形监测装备。

创新点 2 中系统融合了三维变形监测数据、无损检测数据、人工巡查数据及渗流监测数据，搭建了平原水库综合智能诊断系统。

创新点 3 中开发了平原水库围坝防渗性能保障技术，研发了不同防渗失效情况下的单-双液注浆材料及注浆工艺，提出了防渗效果无损检测方法，系统开展了联锁块破坏试验，研发了新型高锁力护坡联锁块结构，提出了护坡快速修复方法。

2、姓名：韩勃

排名：2

行政职务：副院长

技术职称：教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目贡献：

创新点 1 和 2 的主要完成人，揭示了平原水库围坝薄弱面灾变机理，研究了平原水库健康诊断多源数据融合方法，对创新点 1 和 2 作出了如下贡献：

创新点 1 中研制了模拟接触薄弱面的相似材料，系统的开展了平原水库渗流破坏试验，提出了薄弱面颗粒冲蚀和围坝失稳破坏模式。

创新点 2 中基于现代通讯技术与系统网络集成技术，提出了平原水库多源监测数据的融合方法，协助搭建了多源数据融合健康诊断系统。

3、姓名：何勇军

排名：3

行政职务：无

技术职称：教授级高工

工作单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

完成单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

对本项目贡献：

创新点 2 的主要完成人，研究了平原水库诊断指标体系及三维变形监测技术，

对创新点 2 作出了如下贡献：

创新点 2 中基于 GPS、GLONASS 及北斗卫星系统，提出了基于多星解算定位方法和时间平滑算法的水库变形监测方法，结合激光三维变形监测技术，建立了水库变形三维监测体系，提出了平原水库大坝安全影响因素综合评价指标的选取原则，建立了平原水库健康评价指标体系。

4、姓名：李宏恩 排名：4

行政职务：无 技术职称：教授级高工

工作单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

完成单位：水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

对本项目贡献：

创新点 2 的主要完成人，研究了三维变形监测技术，对创新点 2 作出了如下贡献：

创新点 2 中提出了水库变形指标分级量化预警方法，建立了水库大坝变形三维实时监控与预警系统，构建了平原水库大坝安全多层次模糊综合评价模型，提出了平原水库运行期健康综合诊断方法，协助搭建了平原水库健康诊断系统。

5、姓名：王柳江 排名：5

行政职务：无 技术职称：副教授

工作单位：河海大学

完成单位：河海大学

对本项目贡献：

创新点 1 的主要参与者，对创新点 1 作出了如下贡献：

创新点 1 中研发了土工膜膜下水气运移模型试验装置，创新了非饱和多孔连续介质多相多场耦合数学模型，揭示了膜下气胀渗漏机理，提出了土工膜渗漏的电渗检测方法。

6、姓名：高峰 排名：6

病害评估方法。

创新点 3 中研发了新型防冻融混凝土材料，提出了筑坝土冻胀改良方法。

9、姓名：解全一 排名：9

行政职务：无 技术职称：博士后

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目贡献：

创新点 1 的主要参与者，对创新点 1 作出了如下贡献：

创新点 1 中协助完成薄弱面渗流破坏试验及平原水库渗流破坏试验，建立了渗流梯度和变形相结合的薄弱面渗流破坏识别方法。

十、主要完成单位及创新推广贡献

1、山东大学 排名：1

山东大学是本项目第一完成单位，山东大学负责本项目“平原水库围坝薄弱面渗流破坏条件及失稳模式”、“平原水库围坝防渗性能保障技术”、“平原水库健康诊断系统”三部分的研究工作，对创新点 1、创新点 2 及创新点 3 做出了重要贡献：

(1) 开展了薄弱面渗流破坏试验，再现了薄弱面渗流破坏演化过程，提出了围坝薄弱面渗流破坏条件及失稳模式，研发了薄弱面变形监测装备。

(2) 提出了平原水库多源监测数据的融合方法，系统融合了三维变形监测数据、无损检测数据、人工巡查数据及渗流监测数据，搭建了平原水库综合智能诊断系统。

(3) 开发了平原水库围坝防渗性能保障技术，研发了不同防渗失效情况下的单-双液注浆材料及注浆工艺，提出了防渗效果无损检测方法，系统开展联锁块破坏试验，研发了新型高锁力护坡联锁块结构，提出了护坡快速修复方法。

(4) 推广项目研究成果应用于公路隧道、轨道交通隧道等领域。

通过学科交叉研发，推动了水利、交通、信息等多学科交叉合作发展，解决了平原水库围坝渗流性能识别和保障方面的难题。

2、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院 排名：2

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院是本项目的第二完成单位，负责“水库变形全自动三维监测技术”、“平原水库综合健康评价体系”两部分的研究工作，对创新点 2 做出了重要贡献：

(1) 基于 GPS、GLONASS 及北斗卫星系统，提出了基于多星解算定位方法和时间平滑算法的变形速率监测方法，提出了水库变形三维监测体系，建立了水库大坝变形三维实时监控与预警系统。

(2) 提出了平原水库安全影响因素综合评价指标的选取原则，建立了平原水库健康评价指标体系，构建了平原水库多层次模糊综合评价模型，提出了平原水库运行期综合健康诊断方法，协助搭建了平原水库健康诊断系统。

(3) 推广水库变形全自动三维监测技术应用于新疆的大西海子水库、内蒙古明星水库等水库工程。

推动了水库自动三维监测技术和综合诊断技术的发展，实现了平原水库性能感知及评价自动化、智能化和综合化。

3、山东省水利勘测设计院 排名：3

山东省水利勘测设计院是本项目的第三完成单位，负责“复合土工膜膜下排气技术”方面的研究工作，对创新点 3 做出了重要贡献：

(1) 建立了“排水排气盲沟+逆止阀+膜上覆土”的防气胀综合技术，形成了平原水库全库盘铺膜防渗设计方法。

(2) 推广项目相关研究成果纳入《DB 37/1342-2009 平原水库工程设计规范》。

(3) 推广了平原水库的库底铺膜防渗技术和防气胀技术应用于禹城市施女湖水库、东平县稻屯洼水库等工程，取得了显著的经济社会效益。

4、河海大学 排名：4

河海大学是本项目的第四完成单位，负责“复合土工膜膜下气胀机理”方面的研究工作，对创新点 1 和创新点 3 做出了重要贡献：

(1) 研发了土工膜下水气运移模型试验装置，创新了非饱和多孔连续介质多相多场耦合数学模型，揭示了膜下气胀渗漏机理，提出了土工膜渗漏的电渗检测方法。

(2) 协助第三完成单位山东省水利勘测设计院建立了复合土工膜膜下防气胀综合技术。

5、山东农业大学 排名：5

山东农业大学是本项目的第五完成单位，负责“平原水库护坡冰冻病害机理及修复技术”方面的研究工作，对创新点 1 和创新点 3 做出了重要贡献：

(1) 建立了筑坝土及混凝土护坡的“水-温-力”三场耦合模型，系统揭示了筑坝土冻胀和混凝土护坡冻融破坏机理。

(2) 研发了防冻融混凝土材料，提出了筑坝土冻胀改良方法。

6、南水北调东线山东干线有限责任公司 排名：6

南水北调东线山东干线有限责任公司是本项目的第六完成单位，协助完成“平原水库围坝薄弱面渗流破坏条件及失稳模式”和“复合土工膜膜下排气技术”方面的研究工作，对创新点 1 和创新点 3 做出了重要贡献：

(1) 协助完成了薄弱面渗流破坏试验，再现了薄弱面渗流破坏演化过程。

(2) 研发了逆止阀与土工膜连接结构及密封性检测装备，推广该技术应用于大屯水库、双王城水库、周村水库等工程，参与编写专著《脉动齐鲁：南水北调工程 工程技术卷》。

十一、完成人合作关系说明

山东大学、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院、山东省水利勘测设计院、河海大学、山东农业大学、南水北调东线山东干线有限责任公司等单位，分工明确、优势互补、联合攻关，对平原水库性能演化机理、动态感知与

评价以及控制保障技术进行了深入研究。

(1) 本项目第一完成人刘健与第五完成人王柳江、第七完成人王昊、第八完成人刘福胜于 2015 年-2018 年共同申请并完成了国家科技支撑计划“南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范”课题。本项目第一完成人刘健作为课题负责人制定了课题整体研究思路及技术路线，并完成围坝薄弱面渗透破坏机理、围坝渗漏处治技术、健康诊断技术等方面的研究。王柳江作为主要研发人员完成了土工膜膜下气胀机理方面的研究。刘福胜作为主要研发人员完成了平原水库护坡冰冻病害机理及处治技术方面的研究。王昊作为主要研发人员协助完成了围坝薄弱面渗透破坏机理方面的研究，并将课题研发成果推广应用于大屯水库等工程。

(2) 本项目第一完成人刘健与第二完成人韩勃、第三完成人何勇军、第四完成人李宏恩依托国家科技支撑计划“南水北调平原水库运行期健康诊断及防护技术与示范”课题，深入研究了平原水库病险特点和致灾机理，构建了从局部到整体的多维诊断指标体系和综合评价模型，搭建了多源数据融合健康诊断系统，共同申请了软件著作权“平原水库健康诊断系统”，并将研发成果推广应用于大西海子水库、双王城水库等工程。

(3) 本项目第一完成人刘健与第二完成人韩勃、第九完成人解全一，共同开展室内模型试验和数值计算，研究了平原水库围坝薄弱面渗流破坏条件及模式，共同发表论文《Experimental investigation of interfacial erosion on culvert-soil interface in earth dams》、《Experimental and Numerical Investigation of Bottom Outlet Leakage in Earth-Fill Dams》、《Investigation on Reinforcement and Lapping Effect of Fracture Grouting in Yellow River Embankment》等。上述完成人并将本项目研发的“变形三维监测技术”以及“综合诊断系统”推广应用于公路隧道以及轨道交通隧道的运行期检测中。

(4) 第一完成人刘健与第五完成人王柳江、第六完成人高峰共同开发了土

工膜膜下排气综合技术，相关成果已纳入到《DB 37/1342-2009 平原水库工程设计规范》中，并将相关成果推广应用到禹城市施女湖水库、东平县稻屯洼水库等工程的设计中。

（5）本项目的第五完成人王柳江与第六完成人高峰于 2012 年-2014 年共同申请并完成课题“平原水库全库盘防渗关键技术及应用”，双方合作共同提出了平原水库全库底铺膜膜下排气技术。