

《超大跨径桥梁结构健康监测系统关键技术》

2018 年度湖南省科技进步奖项目公示材料

一、项目名称：超大跨径桥梁结构健康监测系统关键技术

二、项目简介

桥梁是公路交通的重要节点，而超大跨径桥梁由于结构形式与结构安全的重要性，成为交通线路的重中之中。大桥在投入使用后，不可避免地会受到外界因素（自然灾害、外荷载等）的影响，造成结构安全隐患，最终影响社会经济发展和人民生命财产的安全。

超大跨径桥梁结构健康监测系统关键技术主要以矮寨特大悬索桥（吉茶高速公路控制性工程，创造了最大峡谷跨径、塔梁完全分离结构设计、轨索滑移法架梁以及岩锚吊索结构四项世界第一）为工程依托，在课题组累积的前期研究基础之上，从监测系统整体效能优化设计、健康监测元器件开发、结构损伤分析与评估等方面开展了深入系统的研究，**主要内容及创新点包括：**

（1）针对桥梁健康监测与评估系统功能划分不明确、系统框架不完全等问题，结合现代计算机通信技术，提出了基于网格的超大跨径桥梁结构健康监测系统。对桥梁结构健康监测系统中评估分析模块效率低、系统间存在信息孤岛等问题进行了优化，最终实现健康监测系统评估功能共享。

（2）针对超大跨径桥梁监测任务点繁多，数据量大等问题，以 K-L 信息距离为理论基础，提出了 K-L 信息距离准则。利用该准则研究了超大跨径桥梁传感器优化布置方法，达到用最少测点监测桥梁全面状态的目的。

（3）研究了超大跨径桥梁有限元模型修正方法，提出了基于径向基函数的桥梁有限元模型修正方法，避免了传统的矩阵型和参数型模型修正中修正目标众多、监测自由度与有限元模型自由度不匹配的问题。

（4）根据桥梁的损伤机理与车匀速过桥时与桥梁的耦合特性，提出了基于动能能量比和小波包能量比边缘算子的桥梁结构损伤识别方法。

（5）提出了基于健康监测系统的桥梁拉索疲劳寿命预测方法，研发了低功耗便携式索力在线监测设备等桥梁结构监测元器件。

（6）研发了超大跨径桥梁结构健康监测综合系统，编制了《湖

南省桥梁隧道结构健康监测与服务技术规程》。

基于本项目的研究，在国内外核心期刊发表论文 16 篇（SCI 收录 6 篇）；已获得国家发明专利 3 项、实用新型专利 2 项，软件著作权 1 项，并有多项专利正在申报；培养硕士研究生 16 名，博士研究生 6 名。

项目研究成果经以院士为组长的专家组鉴定为国际领先水平。现已在吉茶高速公路矮寨大桥、洞庭湖大桥、温州东瓯大桥、温州 77 省道公路桥梁等国内数十座桥梁得到成功应用，成果转化的产值达 3000 余万，为应用单位节省桥梁管养经费 1700 余万，产生了显著的社会经济效益。并且能继续推动我省乃至全国桥梁结构健康监测技术研究与应用持续发展，进一步促进科研队伍的发展与壮大，促进相关产业的发展。

三、客观评价

（1）项目鉴定情况

2015 年 1 月 17 日，湖南省交通运输厅在长沙组织召开了《吉茶高速公路矮寨大桥桥梁结构健康监测系统及开发》成果鉴定会，以奥地利科学院、中国工程院两院院士杨永斌为组长的鉴定委员会专家听取了项目组的汇报，通过评审之后一致认为该项目研究具有创新性，尤其是基于网格的桥梁结构健康监测系统及超大跨径桥梁模型修正、传感器布置优化方法为首次提出。**研究成果总体上达到了国际领先水平。**

（2）项目依托工程：矮寨大桥结构健康监测系统运行用户意见

本项目的**主要依托工程**——吉茶高速公路矮寨大桥桥梁结构健康监测系统于 2012 年 11 月完成调试并进行正常运行阶段。到目前为止，该系统各软、硬件运行正常、稳定，均能满足设计要求，监测系统也为桥梁运营提供了必要的技术支持，**证明了本项目成果的适用性和先进性。**

（3）科技查新结论

通过在国内外各类文献数据库、专利数据库和成果数据库中对相关内容的检索表明，本项目研究成果与国内外同类研究相比，具备以下特点：

（1）项目组提出的基于网格的桥梁结构健康监测系统国内外没有相关文献报道，该成果的应用优化了结构健康监测系统中评估分析模块效率低等问题。

(2) 国内外有基于人工智能算法的多目标优化算法等桥梁模型修正技术方法的研究,但没有基于径向基函数响应面法的模型修正技术的相关报道,采用径向基函数响应面法修正模型具有更高的精度和准确性。

(3) 国内外有基于遗传算法和退火算法的桥梁布点优化研究,但没有基于 K-L 信息距离准则的悬索桥传感器布点优化研究的相关报道。

(4) 针对桥梁结构损伤识别技术的研究当中,基于动能能量比和小波包边缘算子的结构损伤诊断方法,是基于车过桥振动响应信号的基础上所提出的。能够精确识别结构损伤的发生、损伤位置及损伤程度。

(5) 提出了基于健康监测系统的拉索疲劳寿命预测方法,研发了低功耗便携式索力在线监测设备。

四、推广应用情况

本项目立足于当前桥梁结构健康监测技术亟待解决的问题，将网格技术、传感器优化布设技术、模型修正技术、基于移动荷载的结构损伤诊断技术以及基于自动监测与人工检测相结合策略的监测策略应用到超大跨径桥梁结构健康监测系统的研究与开发中。研究成果应用可行性强，具有较高的成熟度，能够实现桥梁的按需维护，避免维护不当造成的浪费，还能够保障桥梁的及时科学维护避免重大事故的发生。

目前，技术成果已在矮寨大桥、洞庭湖大桥等国内多座桥梁得到应用，创造了显著的经济效益。

序号	应用单位名称	应用技术	应用起止时间	应用单位联系人 / 电话
1	矮寨大桥桥隧管理所	矮寨大桥桥梁结构健康监测综合系统	2011.5-至今	张永健 18073180636
2	现代投资股份有限公司长沙分公司	基于网格的桥梁结构健康监测系统 (浏阳河大桥)	2010.1-至今	张蓉 13647485213
3	现代投资股份有限公司长沙分公司	基于网格的桥梁结构健康监测系统 (新屋天桥)	2010.1-至今	张蓉 13647485213
4	现代投资股份有限公司长沙分公司潭耒分公司	洙水大桥桥梁结构健康监测综合系统	2010.5-至今	黄宁 13873323236
5	岳阳市洞庭湖大桥管理局	基于网格的桥梁结构健康监测系统、结构损伤识别技术	2010.9-至今	伏晓宁 13807301587
6	湘西土家族苗族自治州公路管理局	古丈王村大桥桥梁结构健康监测综合系统	2011.3-至今	彭华 13974368122
7	邵阳市公用事业基础设施建设有限公司	西湖大桥桥梁结构健康监测综合系统	2010.2-至今	曾国洪 18975976679

五、主要知识产权证明目录

知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人	发明专利有效状态
发明专利权	可拆卸式刚性转柔性光纤传感器及其布设方法	中国	ZL201010601038.6	2013年01月30日	1130748	大连理工大学	周智；黄明华；何建平；欧进萍	有效专利
发明专利权	一种纤维增强塑料智能锚杆	中国	ZL201010618198.1	2013年01月30日	1130436	大连理工大学	周智；黄明华；何建平；欧进萍	有效专利
实用新型专利权	一种基于电压补偿的应变采集系统	中国	ZL201220170984.4	2012年11月28日	2530144	湖南省交通科学研究院有限公司	胡柏学；杨春林；欧建平；曾威；黄浩；罗阳青；周斌	有效专利
实用新型专利权	低功耗便携式索力在线监测设备	中国	ZL201420319389.1	2014年10月15日	3857631	哈尔滨工大云帆智慧信息技术有限公司	李宏伟；石胜飞	有效专利
计算机软件著作权	无线动态采集系统嵌入式软件 V1.0	中国	2012SR025359	2012年03月31日	0393395	湖南省交通科学研究院有限公司	胡柏学；曾威；欧建平；黄浩；罗阳青	有效专利

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目技术创造性贡献
胡柏学	1	院副总工	研究员级高工	湖南省交通科学研究院有限公司	湖南省交通科学研究院有限公司	项目总负责人，提出总方案并组织实施，同时负责协调项目承担单位和项目参与单位之间技术成果的沟通与组织协调。在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的50%。为项目创新点4、5和6的完成作出了突出贡献。提出将项目研究成果融入到矮寨大桥结构健康监测系统的思路。
周智	2	室主任	教授	大连理工大学	大连理工大学	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的40%。为项目创新点2、3和5的完成作出了突出贡献，提出了基于K-L信息矩阵的桥梁传感器优化布设方法，以及基于径向基响应面法的超大跨径桥梁有限元模型修正方法，同时作为主要技术人员负责了桥梁结构健康监测设备的研发工作。
曾威	3	无	工程师	湖南省交通科学研究院有限公司	湖南省交通科学研究院有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的40%。为项目创新点1和4的完成作出了突出贡献，主要负责基于网格的超大跨径桥梁结构健康监测技术的研究与开发，参与了桥梁结构损伤识别方法的研究，同时在健康监测设备软件的开发工作中提出了关键思路。
李宏伟	4	董事长	高级工程师	宁波杉工结构监测与控制工程中心有限公司	宁波杉工结构监测与控制工程中心有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的40%。为项目创新点5的完成作出了突出贡献。作为本项目仪器、设备开发的主要单位负责人承担了桥梁拉索监测系统的主要研发工作，同时也参与了矮寨大桥结构健康监测系统的设计工作，为设备、系统的现场安装和优化提供了技术支持。
黄浩	5	无	工程师	湖南省交通科学研究院有限公司	湖南省交通科学研究院有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的40%，为项目创新点5和6的完成作出了突出贡献，提出了基于桥梁结构健康监测系统的拉索疲劳寿命预测方法，对矮寨大桥拉索安全性进行了评估分析，同时参与了健康监测设备软件的开发工作以及数据采集设备的研发。

杜召华	6	无	工程师	湖南省交通科学研究院有限公司	湖南省交通科学研究院有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的 30%，为项目创新点 2、6 的完成作出了突出贡献，负责矮寨大桥健康监测系统采集数据的分析，参与了吊索疲劳性能的分析，同时也参与了健康监测设备软硬件的开发。
欧进萍	7	无	教授	大连理工大学	大连理工大学	项目技术负责人，把握项目研究总体方向，落实理论成果的应用。在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的 30%，为项目创新点 2、3、4 和 5 的完成作出了突出贡献。提出了超大跨径桥梁的传感器优化布设方法，在桥梁有限元模型修正技术和损伤识别技术的研究中给出了关键思路，同时，作为总技术负责人参与了其余创新点的科技攻关，负责成果的整合应用与系统优化。
冷志鹏	8	副总工程师	工程师	宁波杉工结构监测与控制工程中心有限公司	宁波杉工结构监测与控制工程中心有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的 35%，为项目创新点 5 的完成作出了突出贡献，主要负责参与了桥梁拉索监测系统等设备的研究开发，同时参与了现有的健康监测设备软硬件的更新优化。
罗阳青	9	室副主任	高级工程师	湖南省交通科学研究院有限公司	湖南省交通科学研究院有限公司	在技术研发工作中投入的工作量占工作总量的 30%，为项目创新点 4 的完成作出了突出贡献。参与了基于动能能量比和基于小波包能量比边缘算子的桥梁结构损伤识别方法的研究，将研究成果应用于现有桥梁的结构损伤诊断当中，验证了方法的有效性。同时也参与了健康监测设备软硬件的开发。

七、主要完成单位及创新推广贡献

排名	完成单位	创新推广贡献
1	湖南省交通科学研究院有限公司	<p>本项目的承担单位，负责编制可行性研究报告，研究大纲，制定详细的工作计划。其主要贡献为：参与并完成了基于网格的超大跨径桥梁结构健康监测系统的研究及开发，对评估分析模块效率低、各系统间评估功能无法共享等问题进行了优化；针对超大跨径桥梁在运营期可能出现的结构损伤，提出了基于动能能量比的桥梁结构损伤识别方法；联合参与了桥梁结构健康监测设备的研发；提出了基于健康监测系统的拉索疲劳寿命预测方法以及自动在线监测系统与人工巡检系统相结合的桥梁结构安全评价策略；参与完成了基于 K-L 信息距离准则的健康监测系统传感器布置优化方法研究。在成果的推广应用方面，将基于网格的桥梁结构健康监测系统推广到洞庭湖大桥、长潭高速浏阳河大桥等数十座桥梁结构健康监测当中，为桥梁管理部门节省了大量的人力和维护资金，此外，编制了《湖南省桥梁隧道结构健康监测与服务技术规程》。对推动我省乃至全国桥梁结构健康监测技术研究与应用持续发展作出了贡献。</p>
2	大连理工大学	<p>本项目的参与单位之一。其主要贡献为：提出了超大跨径桥梁结构健康监测系统传感器布置优化方法，与项目承担单位共同对矮寨大桥传感器布设位置进行了分析与优化设计，实现了以最少的传感器测点，使其测量内容达到最大化的目的；另外，提出了基于径向基响应面法的超大跨径桥梁有限元模型修正方法，采用该方法建立的桥梁整体模型具有更高的精度和准确性，并以此项研究成果作为基础应用于桥梁结构损伤识别的研究与系统预警值设定；联合参与了桥梁结构健康监测设备的研发工作。在成果的推广应用方面，积极配合承担单位将相关成果应用于矮寨大桥结构健康监测项目当中，在系统的调试、运行与优化设计中给出了重要建议。</p>
3	宁波杉工结构监测与控制工程有限公司	<p>本项目的参与单位之一，主要负责健康监测系统的安装调试与监测设备的研发工作。其主要贡献为：对桥梁拉索监测系统等设备进行了研发或更新，参与了矮寨大桥结构健康监测系统的安装、设计与优化工作。积极配合项目承担单位，将科研成果融入到系统设计之中，在后期系统的调试、优化中作出了突出贡献。同时，参与了超大跨径桥梁结构健康监测系统传感器布置优化技术和结构损伤识别技术的研究。</p>

八、完成人合作关系说明

课题承担单位：湖南省交通科学研究院有限公司

课题合作单位：大连理工大学、宁波杉工结构监测与控制工程有限公司

合作人：胡柏学、周智、曾威、李宏伟、黄浩、杜召华、欧进萍、冷志鹏、罗阳青

1. 合作时间：

2008年3月至2014年12月。

2. 合作方式：

将课题进行技术分解，各单位根据科研团队特长承担相应科研内容，期间不定期组织学术交流合作，在技术上相互支持，最终由项目承担单位对成果进行汇总整理并实施推广应用。

3. 合作经历：

2008年5月，湖南省交通科学研究院有限公司、大连理工大学、宁波杉工结构监测与控制工程有限公司相关技术团队进行了本项目的首次技术交流，确定了合作关系，提出了矮寨大桥结构健康监测系统研究框架和研发方向。

2009年至2012年，课题合作单位先后进行了9次正式技术交流，促进了本项目的圆满完成。

2012年，矮寨大桥结构健康监测系统交工验收之后，课题合作单位组织了3次正式学术交流，针对项目创新成果进行汇总与提炼。

4. 合作佐证材料：

技术开发合同：矮寨大桥结构健康监测系统研究及开发

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	技术开发	完成人 1-9	2008-2014	项目鉴定报告 材料、项目鉴定 证书	技术开发合同:矮 寨大桥结构健康 监测系统研究及 开发	
2	技术合作	完成人 1、3、5、9	2012	实用新型专利	附件实用新型专 利 1	
3	技术合作	完成人 4	2014	实用新型专利	附件实用新型专 利 2	
4	技术合作	完成人 1、3、5、9	2012	软件著作权	附件软件著作权 1	
5	技术合作	完成人 2、7	2013	发明专利	附件发明专利 1	
6	技术合作	完成人 2、7	2013	发明专利	附件发明专利 2	
7	技术合作	完成人 1-9	2008-2014	论文	附件论文 1-8	