

“复杂环境下缆索承重桥梁运营可靠性保障关键技术及应用”

提名湖南省科技进步奖公示内容

一、项目名称

复杂环境下缆索承重桥梁运营可靠性保障关键技术及应用

二、提名意见

本单位认真审查了该成果推荐书及附件，确认真实有效，相关栏目填写符合湖南省科技奖励要求，候选人和候选单位经公示无异议。

近年来，我国在缆索承重桥梁建设领域取得了举世瞩目的成就。随着缆索承重桥梁的广泛应用，受运营车载、风、温度、环境侵蚀等复杂环境条件的共同作用，其运营可靠性的问题也日益凸显。面向上述工程运维领域的重大问题需求，项目组历经 14 年的深入研究，以一批极具代表性的缆索承重桥梁工程为载体，以“作用与效应推演→状态演化与感知→运营可靠性评估与预警”为研究主线，形成了集理论、方法和技术于一体的缆索承重桥梁运营可靠性保障理论与技术体系。

项目现已完成国家重点基础研究发展计划（973）项目、国家自然科学基金等项目 4 项，发表 SCI/EI 检索论文 84 篇，授权发明专利 14 项，软件著作权 12 项，为国家培养了大量的专业技术人员，显著地推动了行业的进步。

经评价，该项成果具有创新性，总体上达到国际先进水平，其中温度梯度时空演化规律及三维非平稳随机车流荷载模型的研究达到了国际领先水平。

提名该项目为湖南省科学技术进步奖一等奖。

三、项目简介

项目属交通运输工程领域。近年来，我国的缆索承重桥梁设计建造水平得到了飞速发展，全球主跨排名前十的悬索桥和斜拉桥中，我国分别占据 6 席和 7 席。然而，在超载、温度、风、腐蚀等复杂环境因素影响下，主梁钢桥面板疲劳开裂、缆索系统锈蚀断裂、整体刚度降低等服役状态劣化现象日益凸显，严重危及桥梁结构安全。近期虎门大桥异常振动事件引起了全社会的广泛关注，各方对缆索承重桥梁运营可靠性提出了更高的要求，从着重关注结构安全上升至全面保障运营可靠性。为此，本项目历时 14 年，紧扣保障运营可靠性这一重大需求，在缆索承重桥梁“作用效应推演→状态演化感知→

运营可靠性评估与预警”方面取得了实质创新成果。

1. 创建了缆索承重桥梁复杂作用与效应推演方法。围绕车载、温度、风等缆索承重桥梁运营期典型环境条件，提出了基于元胞自动机的三维非平稳随机车流荷载模拟方法，解决了现有车流模型无法捕捉实际车流空间相关性和持续增长的问题，并以此实现了缆索承重桥梁交通分级管控问题；创建了钢主梁多维时空温度作用模型，温度效应计算精度比国内外规范提高 30% 以上；提出了风荷载作用下缆索承重桥梁振动效应的高效计算算法，计算速度提高 50 倍以上。

2. 发展了缆索承重桥梁服役状态演化与智能感知技术。发明了可精准感知缆索钢丝腐蚀疲劳耦合效应的试验装置，提出了缆索钢丝腐蚀疲劳损伤概率的跨尺度演化模型；率先发现了铺装层力学性能随温度变化对主梁钢桥面板疲劳应力的巨大影响，创建了多因素影响下钢桥面全空间疲劳损伤预测模型，预测精度国内外规范提高 35% 以上；首次揭示了桥梁温度场-响应时滞效应机理，建立了基于深度学习的缆索承重桥梁结构响应时空感知的鲁棒性增强方法，成功将感知的敏感度从小时级拓展到分钟级。

3. 构建了缆索承重桥梁运营可靠性评估与预警体系。创建了可考虑桥梁和车辆特征参数及实际交通规则的风-车-桥时变振动分析模型，形成了针对劣化桥梁安全性与桥上行车舒适性的多级评估技术；构建了综合考虑环境条件变化、车桥耦合振动、密集车流效应、车流量非平稳增长的大跨桥梁车载效应极值预测框架，提出缆索承重桥梁安全性能评价准则及多级预警技术体系，在国内首次制定出了具有工程可操作性的缆索承重桥梁完备的运营可靠性预警指标集及预警阈值标准。

项目成果先后应用于宜宾长江大桥、大胜关长江大桥、南溪长江大桥等 20 余项代表性工程，新增产值 4.06 亿元。获发明专利 14 项、软件著作权 12 项，发表 SCI/EI 论文 84 篇。出版中英文专著 8 部，成果纳入 3 部行业/省级标准。

四、 客观评价

2020 年 6 月 1 日，湖南乐盛信息科技服务有限公司在株洲主持召开了由长沙理工大学、湖南工业大学、东南大学、北京建筑大学等单位完成的“复杂环境下缆索承重桥梁运营可靠性保障关键技术及应用”项目科技成果评价会。评价专家委员会审阅了资料，听取了项目完成单位汇报，经质询和讨论，形成如下评价意见：

1. 成果完成单位提交的评价资料规范、齐全，符合科技成果评价要求。

2. 项目的主要创新点如下：

(1) 在缆索承重桥梁复杂作用与效应推演方面：提出了基于元胞自动机的三维非平稳随机车流荷载模拟方法，基于大数据分析建立了随机车流作用模型；揭示了钢主梁温度梯度时间-空间多尺度演化规律，创建了多维时空温度作用模型；发展了风荷载下桥梁振动效应的高效分析方法。

(2) 在缆索承重桥梁服役状态演化与智能感知方面：研发了可精准感知缆索钢丝腐蚀疲劳耦合效应的试验装置；创建了缆索钢丝腐蚀疲劳损伤概率的跨尺度演化模型和多因素影响下钢桥面全空间疲劳损伤预测模型；提出了基于机器学习的缆索承重桥梁结构响应时空感知的鲁棒性增强方法。

(3) 在缆索承重桥梁运营可靠性评估与预警方面：建立了考虑车辆特征参数及实际交通规则的风-车-桥时变振动模型和行车舒适安全性的评估准则；提出了在役缆索承重桥梁时变体系可靠性评估方法，构建了缆索承重桥梁安全性能评价准则及多级预警技术体系。

3. 该研究成果已在南溪长江大桥、宜宾长江大桥、合江长江二桥、大胜关长江大桥等 20 余座桥梁工程中成功应用，取得了显著的社会经济效益，推广应用前景广阔。

综上所述，专家一致认为，该项成果具有创新性，总体上达到国际先进水平，其中温度梯度时空演化规律及三维非平稳随机车流荷载模型的研究达到了国际领先水平。

五、推广应用情况

本项目通过产学研紧密合作，实现理论创新、技术研发与工程应用的协同融合，研发了具有自主知识产权的特大跨度缆索承重桥梁运营可靠性保障通用关键技术，且已在多座重大缆索承重桥梁典型工程的运维工作中集成示范应用，产生了显著的经济和社会效益。譬如：南溪长江大桥采用本项目研发的桥梁振动性能及桥面线形实时监控预警技术，保障了桥梁结构与桥上车辆的高效运营，提升了车-桥系统劣化风险的感知能力，降低了运维时间、成本的刚性需求；基于结构健康监测系统荷载-响应多源大数据，研发了合江长江二桥、金沙江南门大桥、宜宾长江大桥的缆索与钢箱梁（包括焊缝）服役状态智能分析与评估关键技术，为大桥的营运管理及重要部件的维护决策提供了重要参考依据，受到业主的高度好评；针对江阴长江公路大桥、润扬长江公路大桥、泰州大桥，开发了特大跨悬索桥关键构件-整体结构运营可靠性保障关键技术并集成应用，为最高

21 年桥龄的无事故运营提供支撑。总之，本项目已经形成了具有行业领先核心技术、世界级公路缆索承重桥梁工程的推广应用示范效应，具有强劲的市场竞争力和应用前景。

六、 主要应用单位情况表

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	应用情况
四川宜泸高速公路开发有限责任公司	(1) 基于振动监测数据建立了桥塔和钢箱梁振动性能监控与预警技术；(2) 基于主桥线形监测数据建立了桥面线形实时监控与预警技术；(3) 基于钢箱梁动应变监测数据建立了钢箱梁焊接细节疲劳性能监控与预警技术。	2013年至2019年	白权 18181661627	该成果的应用为南溪长江大桥悬索桥的日常管理与维护提供了科学依据，通过对恶劣气候环境或突发事件下大桥的安全监测与评估，减少了大桥结构潜在损伤、延长了使用寿命。
矮寨大桥桥隧管理所	(1) 风荷载作用下缆索承重桥梁振动效应推演技术；(2) 基于振动监测数据建立了桥塔和加劲梁振动性能监控与预警技术；(3) 基于主桥线形监测数据建立了桥面线形实时监控与预警技术。	2014年至2019年	陈临安 13974827246	该成果的应用为矮寨大桥悬索桥的日常管理与维护提供了科学依据，通过对恶劣气候环境或突发事件下大桥的安全监测与评估，减少了大桥结构潜在损伤、延长了使用寿命。
江苏润扬大桥发展有限责任公司	(1) 风荷载作用下缆索承重桥梁振动效应推演技术；(2) 基于振动监测数据建立了桥塔和加劲梁振动性能监控与预警技术。	2014年至2019年	钱立峰 052384638700	该成果的应用为润扬大桥的日常管理与维护提供了科学依据，减少了桥梁检测频次与周期
江苏扬子大桥股份有限公司	(1) 复杂环境下桥梁结构服役状态智能感知技术；(2) 劣化缆索承重桥梁时变体系可靠性评估方法。	2014年至2019年	孙洪滨 052384638700	通过采集数据并进行监测，为实时掌握大桥的变形、车载流量、台风等极端条件下的响应与日常运营管理等提供了重要的依据和参考。
苏交科集团股份有限公司	(1) 桥梁荷载与效应监测技术；(2) 关键构件动态性能辨识技术；(3) 桥梁结构性能劣化评估技术。	2010年至2019年	符冠华 025-86576852	该项目的成果，提高了特大跨度悬索桥健康监测技术能力和技术竞争力，在多个大跨悬索桥检测、监测与荷载试验中得到了应用。
江苏泰州大桥	(1) 缆索承重桥梁复杂作用与效应推演；(2) 缆索承	2010年至	0523-8696055	该项目的应用成果为泰州大桥的日常管理与维护提供了科学

有限公司	重桥梁时变体系可靠性评估方法。	2019年		依据。为大桥的吊索、钢箱梁、伸缩缝等的维护提供支持并提高效率。
宜宾长江大桥四桥管理处	(1) 缆索承重桥梁复杂作用与效应推演；(2) 腐蚀-疲劳耦合作用下缆索生命周期损伤演化；(3) 劣化缆索承重桥梁时变体系可靠性评估技术。	2011年至2019年	李凌 13568079995	该成果的应用为宜宾长江大桥斜拉桥的日常管理与维护提供了科学依据，避免了日常养护检测的盲目性，节省了养护管理费用，减少了大桥结构潜在损伤、延长了使用寿命。
湖南酒仙湖生态旅游开发有限公司	(1) 缆索承重桥梁复杂作用与效应推演；(2) 劣化缆索承重桥梁时变体系可靠性评估方法；(3) 多源感知信息下桥梁运营可靠性的多级预警技术。	2018年至2019年	颜新建 13017316676	该成果的应用为水云桥的日常管理与维护提供了科学依据，减少了桥梁检测频次与周期。
长沙理工大学	(1) 缆索承重桥梁复杂作用与效应推演；(2) 复杂环境下缆索承重桥梁结构服役状态演化与智能感知；(3) 劣化缆索承重桥梁运营可靠性评估与预警。	2010年至2019年	张康 073185258698	该成果提高了技术能力和技术竞争力，在澧水河大桥、嘉鱼长江大桥、北盘江大桥、赤水河红军大桥等多个大跨度缆索承重桥梁的检测、监测与荷载试验中得以应用。
长沙金码测控科技股份有限公司	(1) 复杂环境下缆索承重桥梁结构服役状态演化与智能感知；(2) 多源感知信息下桥梁运营可靠性的多级预警技术。	2014年至2019年	刘克明 0731-88902188	通过复杂环境下缆索承重桥梁运营可靠性保障关键技术及应用项目的研究，提高了技术能力和技术竞争力，应用于多个重大项目。

七、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
发明专利	一种钢筋混凝土 粘结段拉拔 疲劳与腐蚀耦 合试验装置及 试验方法	中国	ZL 2016101 27317.0	2018年 08月07 日	3026799	长沙理 工大学	刘扬, 江楠, 姜鸿韬, 张海萍, 李德如	有效
发明专利	一种确定大跨 桥梁结构主梁 横向静位移的 方法	中国	ZL 2014101 49343.4	2016年 01月20 日	1928670	东南大 学	丁幼亮, 王高新, 谢辉, 宋永生	有效
发明专利	基于横向风载 效应的桥梁加 劲梁抗侧力性 能退化报警方 法	中国	ZL 2013103 40367.3	2016年 07月06 日	2142627	东南大 学	丁幼亮, 王高新, 宋永生	有效
发明专利	一种确定大跨 桥梁结构主梁 横向动位移的 方法	中国	ZL 2014101 49424.4	2016年 03月16 日	1988412	东南大 学	王高新, 丁幼亮, 谢辉, 宋永生	有效
发明专利	多塔斜拉桥结 构纵向风致响 应的混合控制 系统	中国	ZL 2013103 65485.X	2015年 07月01 日	1709165	东南大 学	丁幼亮, 耿方方, 葛文浩, 宋永生, 王高新	有效
发明专利	基于傅立叶级 数和 ARMA 模 型的日照温度 时程模拟 方法	中国	ZL 2013105 00042.7	2013年 10月22 日	2011583	东南大 学	王高新, 丁幼亮, 宋永生	有效
发明专利	一种垂直变形 检测方法及装 置	中国	ZL 2016102 74770.4	2016年 04月28 日	2337431	长沙金 码高科 技术实 业有限 公司	刘克明, 杨金喜, 曹龙, 童佳杰.	有效
发明专利	一种便携式金 属线材拉伸应 力腐蚀试验装 置	中国	ZL 2014102 64150.3	2017年 02月15 日	2380155	东南大 学	缪长青 尉廷华 梅明星 陈先亮	有效

软件著作	复杂结构可靠性分析软件	中国	2013SR 057482	2013年 02月28 日	0663244	长沙理工大学	刘扬, 鲁乃 唯, 肖 新辉.	有效
著作	Structural Health Monitoring for Suspension Bridges Interpretation of Field Measurements	中国	ISBN: 978-981 -13-334 6-0	2019年	出版社: Science Press Springer	北京建 筑大学	邓扬	-

八、主要完成人情况

排名	姓名	职称/职务	工作单位	完成单位	对本项目科技创新和推广应用情况的贡献
1	刘扬	教授	湖南工业大学	湖南工业大学	项目的总负责人，主导整个项目的研究方向、技术路线、核心创新工作；创新点1的总负责人；创新点2和3的主要参与者。
2	丁幼亮	研究员	东南大学	东南大学	创新点2的总负责人；创新点1的主要参与者。
3	王达	教授	长沙理工大学	长沙理工大学	负责多维时空温度梯度作用研究，对主要科技创新点1、2做出了重要贡献。在本项目中投入的工作量占本人工作总量的60%。
4	邓扬	教授	北京建筑大学	北京建筑大学	负责温度及车载随机作用下钢桥面多维疲劳损伤预测研究，对主要科技创新点1、2做出了重要贡献。在本项目中投入的工作量占本人工作总量的60%。
5	殷新锋	副教授	长沙理工大学	长沙理工大学	负责风-车-桥耦合作用下劣化桥梁行车舒适性和安全性研究，对主要科技创新点2、3做

					出了重要贡献。在本项目中投入的工作量占本人工作总量的60%。
6	韩燕	教授	长沙理工大学	长沙理工大学	投入工作量占本人工作量的40%，创新点1的主要参与者。
7	鲁乃唯	副教授	长沙理工大学	长沙理工大学	投入工作量占本人工作量的40%，对主要科技创新点1和2做出了贡献。
8	缪长青	教授	东南大学	东南大学	投入工作量占本人工作量的40%，创新点2的主要参与者。
9	赵瀚玮	助理研究员	东南大学	东南大学	投入工作量占本人工作量的40%，创新点2和3的主要参与者。
10	张海萍	讲师	湖南工业大学	湖南工业大学	主要对科技创新点1、2做出了重要贡献，支持本人贡献的旁证材料为在国内外期刊发表相关论文3篇，专著1部。
11	孙震	高级工程师	苏交科集团股份有限公司	苏交科集团股份有限公司	投入工作量占本人工作量的40%，主要对科技创新点3做出了重要贡献。
12	刘克明	工程师	长沙金码测控科技股份有限公司	长沙金码测控科技股份有限公司	投入工作量占本人工作量的40%，主要对科技创新点3做出了重要贡献。

九、主要完成单位情况

单位名称	长沙理工大学				
排 名	1	法定代表人	曹一家	所 在 地	湖南长沙
单位性质	学校	传 真	073185256006	邮政编码	410114
通讯地址	湖南省长沙市(天心区)万家丽南路 2 段 960 号				
联 系 人	张拥华	单位电话	0731-85256006	移动电话	13574860534
电子邮箱	597449980@qq.com				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献:					
本项目成果主持完成单位, 全面组织了项目申报, 试验研究和成果总结工作, 并在湖北省、湖南省、四川省开展了成果应用研究。对主要科技创新 (1) ~ (3) 有主要贡献。					

单位名称	湖南工业大学				
排 名	2	法定代表人	谭益民	所 在 地	湖南省株洲市
单位性质	学校	传 真	0731-2218343 9	邮政编码	412007
通讯地址	湖南省株洲市天元区泰山路 88 号湖南工业大学				
联 系 人	刘水长	单位电话	0731-2218343	移动电话	15292200781
电子邮箱	37709356@qq.com				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献:					
作为创新点 2 第二部分内容的主要参与单位。					

单位名称	北京建筑大学				
排 名	3	法定代表人	张爱林	所 在 地	北京
单位性质	学校	传 真	010-68331930	邮政编码	100044
通讯地址	北京市西城区展览馆路 1 号				
联 系 人	焦驰宇	单位电话	010-68322319	移动电话	13522488668
电子邮箱	jcy@bucea.edu.cn				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献：					
作为创新点 2 第二部分内容的主要参与单位					

单位名称	东南大学				
排 名	4	法定代表人	张广军	所 在 地	南京
单位性质	高等院校	传 真		邮政编码	210096
通讯地址	南京市四牌楼 2 号				
联 系 人	朱婷	单位电话	025-83793955	移动电话	15805191906
电子邮箱	zhuting@seu.edu.cn				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献：					
作为创新点 2 第三部分内容的主要参与单位。					

单位名称	苏交科集团股份有限公司				
排 名	5	法定代表人	李大鹏	所 在 地	南京
单位性质	企业	传 真	025-86576666	邮政编码	410006
通讯地址	南京市水西门大街 22 号				
联 系 人	孙震	单位电话	88801406	移动电话	18351983479
电子邮箱	2393569166@qq.com				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献：					
作为创新点 3 第三部分内容的主要参与单位。					

单位名称	长沙金码测控科技股份有限公司				
排 名	6	法定代表人	杨金喜	所 在 地	湖南省长沙市
单位性质	民营企业	传 真	0731-8880140	邮政编码	410006
通讯地址	湖南省长沙市岳麓区桐梓坡西路 188 号金码（麓谷）高科技园				
联 系 人	刘克明	单位电话	88801406	移动电话	13807488751
电子邮箱	380353118@qq.com				
对本项目科技创新和推广应用情况的贡献：					
作为创新点 3 第 3 部分内容的主要参与单位。					

十、完成人合作关系说明

项目完成人来自长沙理工大学、湖南工业大学、北京建筑大学、东南大学、苏交科集团股份有限公司、长沙金码测控科技股份有限公司。

2006 年，长沙理工大学刘扬针对大跨度桥梁工程建设的大规模工程需求，在国内率先开展大跨度桥梁全寿命周期安全监控研究，王达（博士毕业于长安大学）、邓扬（博士毕业于东南大学）、殷新锋（博士毕业于湖南大学）分别于 2008 年、2011 年和 2010 年加入团队参加大跨度悬索桥全寿命周期安全监控研究，鲁乃唯（当时为博士研究生，后毕业留校）于 2011 年加入团队，十余年以来，5 位完成人在多项国家与省部级科研项目的支持下，并结合多座大跨度悬索桥工程建设技术研究课题，针对悬索桥全寿命周期安全性能监控关键技术进行了合作攻关，共同发表论文和申报国家发明专利，共同参与

了由长沙理工大学牵头申报的“南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室”。

2006年，邓扬（当时为硕士生）进入东南大学丁幼亮、缪长青科研团队，开始大跨度悬索桥结构安全性能监测与评估领域的学习与研究，参与了江苏江阴长江大桥、润扬长江大桥运营期安全性能监测的研究课题，在硕、博期间以及工作之后，邓扬与丁幼亮、缪长青两位老师紧密合作，共同发表了多篇论文。

2008年，针对四川省第一座跨长江的特大跨度悬索桥，被称为蜀中第一跨的南溪长江大桥，长沙理工大学为大桥的建设全过程提供了全面技术支撑，与长沙金码测控科技股份有限公司(杨金喜)紧密合作，共同攻关，在该桥运营期健康监测预警评估关键技术方面取得系列突破性进展，共同发表了论文并申报了多项国家发明专利。

2010年，交通运输部启动了重大科技专项项目“特大型桥梁灾变安全监测预警与应急管理平台研究”申报工作，东南大学和苏交科集团股份有限公司参与的联合体投标成功获得该研究项目，丁幼亮、缪长青和孙震等紧密合作，在桥梁安全性能预警关键技术的研究与应用方面取得了突出成果，并且共同发表了论文。