一、项目名称

复杂结构多场多尺度耦合力学行为及其控制

二、申报奖种

山东省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

随着土木工程、航空航天、精密机械、光电子、微电子等技术的不断发展，结构与元器件的功能越来越多、集成度越来越高，集成两种或两种以上单一材料优点和功能的非均匀和多功能材料及其复合结构体系在近三、四十年来得到迅速发展与应用。对这类复合材料和结构的静动态力学行为、失效机理和性能评价方法研究也逐渐成为相关领域研究的热点和难点。与传统均质材料和结构不同，由于非均匀及多功能材料的性能随空间位置变化，是空间坐标的函数，其控制方程复杂，研究其失效行为、科学表征方法及性能就更为困难，其形成的结构体系又具有时变、荷载和抗力具有随机性和不确定性以及强烈的非线性效应。从材料到结构层面的动态性能及其控制面临着多物理场耦合、多尺度分析的挑战等等。本项目研究的主要科学问题及成果如下：

(1) 功能梯度非均匀材料的热/机械耦合失效行为

首次建立了动态热/机械载荷作用下功能梯度材料的断裂力学理论模型，解决了材料性质任意变化时裂纹尖端场的求解问题；得到了一系列材料性质分布函数下功能梯度材料的解析解；获得了材料性质的温度相关性及梯度非均匀性对动态温度场、热应力场、及材料的断裂性能的影响规律。

(2) 非均匀材料的热冲击阻力评价方法学

创造性地提出了非均匀材料在动态热载荷作用下的高温强度评价方法，统一了热冲击阻力评价的应力准则和断裂韧性准则，获得了多裂纹相互作用及高温下材料性质的温度相关性对热冲击阻力的影响机制。

(3) 多层压电介质及电极结构的热/力/电多场耦合失效行为

首次建立了压电多层介质在动态热/力/电耦合载荷作用下的一系列断裂力学分析模型，解决了动态载荷下耦合裂纹尖端场的求解问题；建立了压电材料中的表面电极以及多层压电材料中的界面电极的一系列理论模型，获得了电极尖端场的精确表达式。

(4) 多层材料的微纳米力学行为

率先构造了多层微纳米尺度梁和板的静动态力学行为分析模型，首次获得了材料的表面能和表面弹性对其弯曲和、屈曲和振动行为的影响规律，率先建立了多层材料微纳米力学的有限元数值分析软件。

(5) 结构体系振动的主动控制原理与试验方法

建立了结构体系振动与电磁驱动主动质量阻尼器控制系统耦合相互作用的计算分析理论与若干计算模型，创立了结构摇摆振动控制理论并将其应用于海洋平台结构，率先将混合实验技术应用于结构振动的主动控制系统并完成其性能试验，形成的相关理论和方法为实现高性能的结构振动控制及其工程应用奠定了理论基础。相关原理和方法已经成功指导了众多实际工程结构的抗风抗震设计，其中代表性应用之一是完成了国内自主研发的第一套结构振动混合控制系统并应用于600米高的广州新电视塔，取得了显著的结构抗风振动控制效果。

(6) 智能控制系统

提出了悬挂结构系统基于智能可控流体阻尼装置的半主动控制策略与控制算法，研制了基于多物理场耦合效应的智能振动控制系统，包括压电摩擦阻尼器、磁流变可控流体阻尼器、形状记忆可恢复变形阻尼器等，形成的控制系统已应用于海洋工程结构的抗风浪流抗震设计。

本项目历时16年，在相关领域取得了多项原创性研究成果。在土木工程、机械工程、航空航天和国防工业领域的智能材料与结构体系的可靠性等方面都具有重要的理论意义和科学价值，为复杂结构与材料的优化设计和装备制造及其推广应用奠定了重要理论基础。

四、客观评价

美国俄亥俄州立大学土木工程系N.R. Fisco, H. Adeli发表在Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering (2011)Smart structures: Part I—Active and semi-active control对代表性文献1做出如下引用和评价：Zhang and Ou investigate control–structure interaction in a 2D two-story frame, using an electromagnetic mass damper system (which is similar to an ATMD, but uses magnetic forces to move the mass). They determined through shaking table tests and numerical simulation that control–structure interaction must be considered when designing an active control system in order to obtain maximum performance.对我们研究提出的电磁驱动主动控制系统与结构的相互作用进行了客观评价，指出这是实现高性能结构主动控制的必由之路。发表于Int. J. Solids Struct (37(9) 2000)，至今已被SCI他引68次，所提出的多层板模型得到了包括美国工程院院士、国际断裂力学权威F. Erdogan教授等众多学者的引用。国际材料科学与工程学界权威专家、德国Max-Born大学的Manfred Fiebig教授在其综述文章《磁电效应研究的复兴》(J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) R123–R152)中，专门用一段文字介绍了我们的工作，指出：电磁耦合断裂力学问题被一组研究磁电复合材料的人员进一步推广到宏观裂纹问题，以便研究开裂对电磁材料的力、电、磁性质的影响。国际材料科学与工程学界权威专家、德国Max-Born大学的Manfred Fiebig教授在其综述文章《磁电效应研究的复兴》(J. Phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) R123–R152)中，专门用一段文字介绍了我们的工作，指出：电磁耦合断裂力学问题被一组研究磁电复合材料的人员进一步推广到宏观裂纹问题，以便研究开裂对电磁材料的力、电、磁性质的影响。ASME工程材料与技术杂志副主编、工程结构国际杂志主编、加拿大多伦多大学（Toronto University）S.A. Meguid教授的研究组多次引用本项目研究成果（代表性文献2）：“研究界面开裂对多层压电介质整体力/电耦合行为的影响具有非常重要的意义….。研究了含裂纹的多层压电介质在力/电冲击载荷下的断裂问题。”引证文献：X. Zhao, S. A. Meguid & K. M. Liew. Acta Mechanica. 2002,(159):11-27.评价：However, most piezoelectric devices in smart structures are surface-mounted, and debonding may take place along the interface between those devices and the host structure. It is, therefore, of great importance to investigate the effect of debonding on the coupled electro-mechanical behavior of an integrated structure. Wang et al. analyzed a cracked piezoelectric laminate subjected to electro-mechanical impact loads.

五、代表性论文专著目录

1、Zhang，Chunwei；Ou，Jinping.，“ Control Structure Interaction of Electromagnetic Mass Damper System for Structural Vibration Control”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2008, 134(5), 428-437.

2、Wang, Baolin；Han, Jiecai，Du，Shanyi., “Cracks problem for non-homogeneous composite material subjected to dynamic loading”, INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES，2000，37（9），1251-1274.

3、Wang, Baolin;Wang, Kaifa，“[Vibration analysis of embedded nanotubes using nonlocal continuum theory](http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.uws.edu.au/full_record.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&qid=17&SID=U2S2QHPJqpLFzpZpOXq&page=4&doc=34)”,[COMPOSITES PART B-ENGINEERING](javascript:;),2013，47，96-101.

4、Zhang，Chun-Wei；Ou，Jin-Ping；Zhang，Jin-Qiu.,“ [Parameter optimization and analysis of a vehicle suspension system  controlled bymagnetorheological fluid dampers](http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=43&SID=4AGBC6LcFtxZ7CWnQSE&page=1&doc=5)”，STRUCTURAL CONTROL & HEALTH MONITORING，2006，13（5），885-896.

5、Zhang，Chunwei；Li，Luyu；Ou，Jinping.,“[Swinging motion control  of suspended structures: Principles and applications](http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=61&SID=4AGBC6LcFtxZ7CWnQSE&page=1&doc=2)”，

STRUCTURAL CONTROL & HEALTH MONITORING,2010,17（5），549-562.

6、Wang，Baolin; Noda N.，“[Design of a smart functionally graded thermopiezoelectric composite structure](http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.uws.edu.au/full_record.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&qid=17&SID=U2S2QHPJqpLFzpZpOXq&page=1&doc=10)”,[SMART MATERIALS&STRUCTURES,](javascript:;)2001,10(2),189-193.

7、Wang, Baolin; Mai, Yiuwing; Zhang, Xinghong.,“[Thermal shock resistance of functionally graded materials](http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.uws.edu.au/full_record.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&qid=17&SID=U2S2QHPJqpLFzpZpOXq&page=1&doc=9)”，[ACTA MATERIALIA,](javascript:;" \o "View journal information)2004,52（17），4961-4972.

8、Han,Jiecai; Wang,Baolin,“[Thermal shock resistance enhancement of functionally graded materials by multiple cracking](http://apps.webofknowledge.com.ezproxy.uws.edu.au/full_record.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&qid=17&SID=U2S2QHPJqpLFzpZpOXq&page=2&doc=19)”，[ACTA MATERIALIA，](javascript:;)2006,54（4），963-973.

六、主要完成人情况

1.姓名：张春巍，排序：1/5，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：哈尔滨工业大学

主要学术贡献：

建立了结构体系振动与电磁驱动主动质量阻尼器控制系统耦合相互作用的计算分析理论与若干计算模型，提出了悬挂结构系统基于智能可控流体阻尼装置的半主动控制策略与控制算法，形成的相关理论和方法为实现高性能的结构振动控制及其工程应用奠定了理论基础。相关原理和方法已经成功指导了众多实际工程结构的抗风抗震设计，其中代表性应用之一是完成了国内自主研发的第一套结构振动混合控制系统并应用于600米高的广州新电视塔，取得了显著的结构抗风振动控制效果。

曾获科技奖励情况：获日本免震构造学会创新奖、国家科技进步奖（二等）、教育部科技进步奖（一等）、广东省科技进步奖（一等）各1项。

2.姓名：王保林，排序：2/5，职称：教授，工作单位：哈尔滨工业大学，完成单位：哈尔滨工业大学

主要学术贡献：

首次建立了动态热/机械载荷作用下功能梯度材料的断裂力学理论模型，解决了材料性质任意变化时裂纹尖端场的求解问题；得到了一系列材料性质分布函数下功能梯度材料的解析解；获得了材料性质的温度相关性及梯度非均匀性对动态温度场、热应力场、及材料的断裂性能的影响规律。创造性地提出了非均匀材料在动态热载荷作用下的高温强度评价方法，统一了热冲击阻力评价的应力准则和断裂韧性准则，获得了多裂纹相互作用及高温下材料性质的温度相关性对热冲击阻力的影响机制。首次建立了压电多层介质在动态热/力/电耦合载荷作用下的一系列断裂力学分析模型，解决了动态载荷下耦合裂纹尖端场的求解问题；建立了压电材料中的表面电极以及多层压电材料中的界面电极的一系列理论模型，获得了电极尖端场的精确表达式。

曾获科技奖励情况：国家自然科学奖（二等）、教育部科技进步奖（一等）各1项。

3.姓名：张纪刚，排序：3/5，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，完成单位：哈尔滨工业大学

主要学术贡献：

创立了结构摇摆振动控制理论并将其应用于海洋平台结构，研究了若干基于多物理场耦合效应的智能振动控制系统，相关原理和方法已经成功指导了众多实际工程结构的抗风抗震设计。

曾获科技奖励情况：中国建设工程施工技术创新成果奖、山东省科技进步奖(二等)、青岛市科技进步奖（一等）、青岛市科技进步奖（二等），山东省高等学校优秀科研成果自然科学类奖（三等），山东省建设技术创新奖（二等）各1项。

4.姓名：王开发，排序：4/5，职称：博士后，工作单位：哈尔滨工业大学，完成单位：哈尔滨工业大学

主要学术贡献：

率先构造了多层微纳米尺度梁和板的静动态力学行为分析模型，首次获得了材料的表面能和表面弹性对其弯曲和、屈曲和振动行为的影响规律，率先建立了多层材料微纳米力学的有限元数值分析软件。

5.姓名：徐怀兵，排序：5/5，职称：讲师，工作单位：北京科技大学，完成单位：哈尔滨工业大学

主要学术贡献：

首次将结构动力子系统实验方法引入到结构主动控制系统性能试验中，完成了足尺主动质量驱动器控制系统的性能试验，并在此基础上将其应用于大型结构混合控制系统的工程实施，进行了现场实测和控制效果分析，为系统性能评价提供依据。

七、完成人合作关系说明

完成人张春巍、张纪刚为青岛理工大学教师，是山东省泰山学者优势特色学科人才团队领军人才和核心成员。完成人王保林为哈尔滨工业大学教师，完成人王开发为王保林教授的博士研究生，完成人徐怀兵为张春巍教授与哈尔工业大学欧进萍院士共同指导的博士研究生，是山东省泰山学者优势特色学科人才团队客座教授和骨干成员。从2000年开始，张春巍教授、王保林教授、张纪刚教授承担了多项结构振动控制、非均匀及多功能材料方向的研究课题。2013年青岛理工大学牵头、哈尔滨工业大学参与共同组建“蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心”，2014年泰山学者优势特色学科获批组建人才团队，以此为平台与契机，张春巍教授、王保林教授、张纪刚教授共同就结构振动与控制、非均匀及多功能材料、智能控制系统相关方向的研究课题进行了密切合作。作为王保林教授的博士研究生，王开发博士在王保林教授的指导下主要开展了微纳米多层材料力学行为方面的理论工作。作为张春巍教授的博士研究生，徐怀兵博士在张春巍教授的指导下主要开展了结构主动控制系统性能试验与结构振动控制分析方法方面的工作。