

**项目名称：**强非线性随机振动系统的最优控制

**推荐单位：**中国力学学会

**推荐单位意见：**

我单位认真审核了该项目推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合国家自然科学奖推荐书填写要求。

多自由度强非线性随机振动系统的最优控制是振动控制理论与随机振动力学学科迫切需要发展的学科前沿，同时也是一个极为困难的研究领域，原有的研究成果极少。该项目针对多种随机激励下多自由度强非线性随机系统的多种不同目标的最优控制进行了系统深入的研究，取得了一系列原创性成果。提出并发展了多自由度强非线性随机振动系统多种不同目标的最优控制理论、计及实际应用中多种非理想因素的最优控制理论、以及多种随机激励下多自由度强非线性系统的随机平均法，构成了一个非线性随机振动系统最优控制的较为完整的理论体系，对振动控制理论与随机振动力学学科的发展具有里程碑意义，并为解决科学与工程中广泛存在又十分困难的强非线性随机振动系统的控制问题提供了一整套崭新而有效的理论方法。该项目的研究成果得到了美国工程院院士 Y.K. Lin、印度国家工程院院士 T.K. Datta、中国科学院院士胡海岩、方同教授、李杰教授等国内外动力学与控制领域著名专家学者的广为引用与高度评价，认为该项目具有首创性与系统性，首次建立了非线性随机振动最优控制的系统的理论方法，整体上达到了国际领先水平。特推荐该项目申报国家自然科学奖。

对照国家自然科学奖授奖条件，推荐该项目申报国家自然科学奖二等奖。

## 项目简介

该项目属振动控制理论、随机振动力学学科。多自由度强非线性随机振动系统的最优控制是振动控制理论与随机振动力学学科迫切需要发展的前沿，是一个极为困难的研究领域，原有研究成果极少。该项目针对多种随机激励下多自由度强非线性随机振动系统的多种目标并计及多种非理想因素的最优控制进行了系统深入的研究，取得了一系列原创性成果。

**主要研究内容：**研究多种随机激励下多自由度强非线性振动系统的响应、稳定性及可靠性的最优控制理论，发展计及实际控制中可能出现的各种因素的强非线性随机振动系统的最优控制方法。

**主要科学发现点：**（1）建立了多自由度强非线性随机振动系统的最优控制理论，提出并发展了分别以响应最小、稳定性裕度最大、可靠度最大、平均寿命最长及给定平稳概率密度为目标的非线性随机最优控制设计方法；（2）针对实际控制系统的部分可观测与不确定，实际控制力的时滞、有界及不能完全执行最优控制律等难题，提出并发展了有效解决这些难题的多自由度强非线性随机振动系统的最优控制理论方法；（3）提出并发展了非高斯白噪声激励、非经典（包括滞迟、时滞及含分数阶导数阻尼等）多自由度强非线性系统的随机平均法，解决了在泊松白噪声、宽带平稳噪声、窄带有界噪声、谐和函数及多种噪声的组合激励下，多自由度强非线性随机振动系统的最优控制难题。

**科学价值：**该项目首次提出了能计及实际控制中多种非理想因素、多种随机激励、多种目标的多自由度强非线性随机振动系统最优控制的较为完整的理论体系，对振动控制理论与随机振动力学学科的发展具有里程碑意义。同时为解决科学与工程中广泛存在又十分困难的强非线性随机振动系统的控制问题提供了一整套崭新而有效的理论方法，具有广阔的应用前景。

**同行引用与评价：**该项目由科学出版社出版专著一部，第一完成人应邀在权威期刊 ASME Appl. Mech. Rev. 上发表综述论文，多次任重要国际会议主席，多次在重要国际学术会议上作特邀报告。论著得到美国工程院院士 Y.K. Lin 和 W.D. Iwan、印度国家工程院院士 T.K. Datta 及国内方同、李杰教授等振动控制理论与随机振动力学学科著名专家的广泛引用与高度评价。八篇代表性论著他引 646 篇次，其中 SCI 他引 298 篇次。第一完成人连续两年（2014、2015）被列入机械工程领域中国高被引学者榜单。Y.K. Lin 院士认为专著 [代表性论著 1] “理论上发展以统一哈密顿框架为基础，乃朱位秋教授首创，尤属独特可贵”。方同教授称该专著“第八章详细论述作者首创的拟 Hamilton 系统的非线性随机最优控制策略”，该专著“反映了这一领域当代的最新成就，可谓非线性随机动力学发展过程中一个新的里程碑”。以中国科学院院士胡海岩教授为主任的鉴定委员会鉴定结论称“该项目首次建立了非线性随机振动最优控制的系统的理论方法”，“是一项高水平的基础研究，具有首创性与系统性，整体上达到了国际领先水平”。

## 客观评价

该项目在科学出版社出版专著一部，第一完成人应邀在权威期刊 ASME Appl. Mech. Rev.上发表综述论文，多次任重要国际会议主席，多次在重要国际学术会议上作特邀报告。论著得到美国工程院院士 Y.K. Lin 和 W.D. Iwan、印度国家工程院院士 T.K. Datta 及国内方同、李杰教授等随机动力学与控制领域著名专家的广泛引用与高度评价，八篇代表性论著他引 646 篇次，其中 SCI 他引 298 篇次。第一完成人连续两年（2014、2015）被列入机械工程领域中国高被引学者榜单，认为该研究成果具有原创性与重要科学价值。八篇代表性论著及项目综合评价如下：

1. 国内随机动力学著名学者方同教授在为代表性论著 1 所作之书评 [代表性他引之 1] 中，称该专著“反映了这一领域中当代的最新成就，可谓非线性随机动力学发展过程中一个新的里程碑”、“第八章详细论述作者首创的拟 Hamilton 系统的非线性随机最优控制。……上述非线性随机最优控制策略的优点是：受控系统方程可降维、简化，适用于非白噪声激励情形，动态规划方程的扩散项非退化，从而有古典解，避免了粘性解。通过数值例子比较表明：该策略比迄今常用的线性二次高斯（LQG）控制及确定性最优多项式控制效果好、效率高”、“拟 Hamilton 系统随机平均法是随机激励下耗散的 Hamilton 系统理论体系的核心。……5.6 节与 5.7 节介绍了单自由度强非线性系统分别在谐和与白噪声联合激励下，或在有界噪声激励下的随机平均法，这些也是作者的独特贡献”。（发现点 1,3）

2. 国际随机动力学领域资深权威、美国工程院院士 Y.K. Lin 教授在为代表性论著 1 所作之序中称：朱位秋教授在非线性和系统稳定性及系统控制“三方面均有显著贡献，在随机动力学领域内，成为国际著名专家之一”、该专著“实属学术上重要贡献。书中理论上发展，以统一之哈密顿框架为基础，乃朱位秋教授之首创”。（发现点 1,3）

3. 美国随机动力学著名学者 G.Q. Cai 教授等在代表性他引 3 中引用代表性论著 2 等多篇论文，并称：“最近，朱与其合作者在随机动态规划基础上提出一个非线性随机最优控制策略，已证明它比 LQG 控制更有效，并已应用于各类非线性随机系统”。（发现点 1）

4. 印度科学研究所著名学者 D. Roy 与随机动力学著名学者 C.S. Manohar 教授等在代表性他引 4 中引用代表性论著 2, 3, 4 等多篇论文，指出：非线性系统的随机最优控制只在本项目的论文中考虑到。代表性论著 4“给出了非线性随机系统控制的近期进展的全面评述”。（发现点 1,2）

5. 韩国著名学者 K.W. Min 教授等在代表性他引 5 中引用了代表性论著 2, 3 等 11 篇论文，指出：朱与合作者应用随机动态规划原理于经随机平均法简化的各种控制系统，所得控制律一般是非线性的，特别是在首次穿越损坏概率最小化中得到了 bang-bang 控制律。（发现点 1,2）

6. 美国工程院院士、加州理工学院的 W.D. Iwan 教授等在代表性他引 6 中引用代表性论著 3，指出：该文中所提出的控制方法是正确合理的。（发现点 2）

7. 印度国家工程院院士、第 15 届夸瑞兹密国际奖获得者 T.K. Datta 教授在“不确定

性工程的国际研讨会”上所做的题为“结构随机控制简评”的报告 [代表性他引 7] 中，引用了代表性论著 3 等多篇论文，其中第 4, 8, 10, 11.1 节几乎全文引用本项目的成果。(发现点 2)

8. 国内随机结构动力学著名学者李杰教授等在代表性他引 2 中，引用代表性论著 1 和 4，并称：“对于**非线性系统**，尤其是**多自由度体系**分析方面，人们仍然面临巨大困难。20 世纪 90 年代以来，以朱位秋等基于 **Hamilton 理论体系**获取 **FPK 方程**平稳解的努力为代表，**非线性随机振动理论取得了令人瞩目的重要进展**”。(发现点 3)

9. 印度国家工程院院士 T.K. Datta 教授等在代表性他引 8 中，引用代表性论著 6 等多篇论文，应用该文提出的随机平均法，并与其他方法进行比较，证实了该方法的有效性。在他的其它多篇论文中也引用了本项目的方法，并将其应用于**研究北极区单腿塔**的响应与稳定性等。(发现点 3)

10. 国内石家庄铁道大学校长、著名学者杨绍普教授等在“Primary resonance of Duffing oscillator with two kinds of fractional-order derivatives” (《International Journal of Non-Linear Mechanics》2012 年 47 卷) 中引用了代表性论著 7，指出：“该论文研究了不同的分数阶系统，并分析给出了**重要的结果**”。(发现点 3)

11. 塞尔维亚贝尔格莱德大学 N·特里索维奇教授等在“Gauss 白噪声激励下分数阶导数系统的非平稳响应” (《应用数学和力学》2014 年 35 卷 1 期) 中引用了代表性论著 7 等多篇论文，称本项目发展的“**随机平均法是一种更为有效的处理随机微分方程的近似方法**”，并应用该方法于他们的研究。(发现点 3)

12. 法国学者 K. Mallick 在“Influence of the noise spectrum on the anomalous diffusion in a stochastic system” (《Physical Review E》2009 年 80 卷) 中引用了代表性论著 4 等多篇论文，并称本项目发展的**随机平均法变成一种强有力的方法**。(发现点 3)

13. **鉴定意见** 2015 年 12 月 12 日，以胡海岩院士为主任的鉴定委员会对项目“强非线性随机振动系统的最优控制”进行了鉴定，鉴定结论称：“强非线性随机振动系统的最优控制是非线性动力学与控制领域的十分重要的**学科前沿**，该项目**首次建立了非线性随机振动最优控制的系统的理论方法**，对非线性随机动力学与控制学科的发展具有重要意义，并有广阔应用前景，是一项**高水平的基础研究**，具有**首创性与系统性**，整体上达到了国际领先水平”。

## 代表性论文专著目录

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影 响 因 子	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发 表 时 间 年 月 日	通 讯 作 者	第 一 作 者	国 内 作 者	SCI 他 引 次 数	他 引 总 次 数	知 识 产 权 是 否 归 国 内 所 有
1	非线性随机动力学与控制-Hamilton 理论体系框架/科学出版社/朱位秋	——	2003 年 2 月	2003 年 02 月 28 日	朱位秋	朱位秋	朱位秋	49	258	是
2	An optimal nonlinear feedback control strategy for randomly excited structural systems/ Nonlinear Dynamics/W.Q. Zhu, Z.G. Ying, T.T. Soong	3	2001 年 24 卷 31-51 页	2001 年 01 月 30 日	W.Q. Zhu	W.Q. Zhu	朱位秋, 应祖光	20	56	是
3	A stochastic optimal semi-active control strategy for ER/MR dampers/Journal of Sound and Vibration/Z.G. Ying, W.Q. Zhu, T.T. Soong	2.107	2003 年 259 卷 45-62 页	2003 年 01 月 02 日	Z.G. Ying	Z.G. Ying	应祖光, 朱位秋	31	47	是
4	Nonlinear Stochastic dynamics and control in Hamiltonian formulation/Applied Mechanics Reviews/ W.Q. Zhu	4.671	2006 年 59 卷 230-248 页	2006 年 07 月 01 日	W.Q. Zhu	W.Q. Zhu	朱位秋	45	69	是
5	Stochastic optimal semi-active control of stay cables by using magneto-rheological damper/Journal of Vibration and Control/M. Zhao, W.Q. Zhu	1.643	2011 年 17 卷 1921-1929 页	2011 年 11 月 30 日	W.Q. Zhu	M. Zhao	赵明, 朱位秋	21	23	是
6	Response and stability of strongly non-linear oscillators under wide-band random excitation/International Journal of Non-Linear Mechanics/ W.Q. Zhu, Z.L. Huang, Y. Suzuki	1.92	2001 年 36 卷 1235-1250 页	2001 年 12 月 30 日	W.Q. Zhu	W.Q. Zhu	朱位秋, 黄志龙	33	52	是
7	Response and stability of SDOF strongly nonlinear stochastic system with light fractional derivative damping/Journal of Sound and Vibration/ Z.L. Huang, X.L. Jin	2.1	2009 年 319 卷 1121-1135 页	2009 年 01 月 23 日	Z.L. Huang	Z.L. Huang	黄志龙, 金肖玲	48	64	是
8	Effect of bounded noise on chaotic motion of duffing oscillator under parametric excitation/Chaos Solitons & Fractals/ W.Y. Liu, W.Q. Zhu, Z.L. Huang	1.61	2001 年 12 卷 527-537 页	2001 年 03 月 30 日	W.Q. Zhu	W.Y. Liu	刘雯彦, 朱位秋, 黄志龙	51	77	是
合 计								298	646	

## 主要完成人情况

1) 朱位秋, 排名 1, 工作单位: 浙江大学, 教授, 所长, 中国科学院院士。完成单位: 浙江大学。项目负责人, 主要学术贡献: 在主要科学发现点 1, 2, 3 中, 主要贡献为提出总体学术思想与解决各难题的思路; 独立发表专著 [代表性论著 1] 与综述论文 [代表性论著 4]; 参与发表论文 [代表性论著 2], 第一作者, 参与发表论文 [代表性论著 2, 3, 5, 6, 8], 除论著 3 皆为通讯作者。

2) 应祖光, 排名 2, 工作单位: 浙江大学, 教授。完成单位: 浙江大学。项目主要参与者, 主要学术贡献: 在主要科学发现点 1 中, 贡献为发展了以响应最小为目标的非线性随机最优控制理论, 参与发表论文 [代表性论著 2], 排名第二; 在主要科学发现点 2 中, 贡献为发展了包含执行器动力学的非线性随机最优半主动控制理论, 参与发表论文 [代表性论著 3], 排名第一。

3) 黄志龙, 排名 3, 工作单位: 浙江大学, 教授, 副院长。完成单位: 浙江大学。项目主要参与者, 主要学术贡献: 在主要科学发现点 3 中, 贡献为发展了在宽带噪声激励下多自由度强非线性系统的随机平均法, 参与发表论文 [代表性论著 6], 排名第二, [代表性论著 8], 排名第三; 提出并发展了含分数阶导数阻尼的非线性系统的随机平均法, 参与发表论文 [代表性论著 7], 排名第一。

## 完成人合作关系说明

1) 完成人朱位秋主持整个项目的研究，合作发表研究论文，具体情况如下：

合作方式：论文合著。

合作者（项目排名）：朱位秋（项目排名第一）、应祖光（项目排名第二）、黄志龙（项目排名第三）。

合作时间：2000年1月1日至2011年11月30日。

合作成果：论文“An optimal nonlinear feedback control strategy for randomly excited structural systems”（代表性论文2）；“A stochastic optimal semi-active control strategy for ER/MR dampers”（代表性论文3）；“Response and stability of strongly non-linear oscillators under wide-band random excitation”（代表性论文6）；“Effect of bounded noise on chaotic motion of duffing oscillator under parametric excitation”（代表性论文8）。

证明材料：附件1。

2) 完成人应祖光参与整个项目的研究，合作发表研究论文，具体情况如下：

合作方式：论文合著。

合作者（项目排名）：朱位秋（项目排名第一）、应祖光（项目排名第二）。

合作时间：2000年1月1日至2011年11月30日。

合作成果：论文“An optimal nonlinear feedback control strategy for randomly excited structural systems”（代表性论文2）；“A stochastic optimal semi-active control strategy for ER/MR dampers”（代表性论文3）。

证明材料：附件1。

3) 完成人黄志龙参与整个项目的研究，合作发表研究论文，具体情况如下：

合作方式：论文合著。

合作者（项目排名）：朱位秋（项目排名第一）、黄志龙（项目排名第三）。

合作时间：2000年1月1日至2011年11月30日。

合作成果：论文“Response and stability of strongly non-linear oscillators under wide-band random excitation”（代表性论文6）；“Effect of bounded noise on chaotic motion of duffing oscillator under parametric excitation”（代表性论文8）。

证明材料：附件1。

## 知情同意证明

1) 代表性论文[5]“Stochastic optimal semi-active control of stay cables by using magneto-rheological damper”的第一作者赵明，已出具知情同意证明。

2) 代表性论文[8]“Effect of bounded noise on chaotic motion of duffing oscillator under parametric excitation”的第一作者刘雯彦，已出具知情同意证明。

## 知情同意书

朱位秋老师：

我与您作为共同作者发表的论文“Zhao M, Zhu WQ. Stochastic optimal semi-active control of stay cables by using magneto-rheological damper, *JOURNAL OF VIBRATION AND CONTROL*, 2011, 17 (13): 1921-1929”，是我在浙江大学工程力学系学习期间，在您的悉心指导下完成的。我同意您将其用于自然科学奖申报。

签名：



日期：

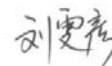
2016.12.17

## 知情同意书

朱位秋老师：

我与您作为共同作者发表的论文“Liu WY, Zhu WQ, Huang ZL. Effect of bounded noise on chaotic motion of duffing oscillator under parametric excitation, *CHAOS SOLITONS & FRACTALS*, 2001, 12: 527-537”，是我在浙江大学工程力学系学习期间，在您的悉心指导下完成的。我同意您将其用于自然科学奖申报。

签名：



日期：

2016.12.16