

## 一、项目名称

结构复杂系统最优二次及 H 无穷估计/控制理论研究

## 二、申报奖种

自然科学奖

## 三、提名单位

山东省

## 四、提名意见

项目完成人围绕最优控制理论的重要基础问题开展研究，取得如下创新性成果：

1. 创立随机控制分离原理，突破了自上个世纪 70 年代以来随机控制研究的瓶颈，解决了时滞系统随机控制基础性理论问题，实现了随机控制四十年以来的实质性进展。进而利用所提出的分离原理解决了网络控制领域长期挑战性问题。

2. 创立新息重组理论，解决了多输入/输出时滞系统最优估计和控制系列问题，包括长期公开问题和基础理论难题。新息重组理论得到同行学者的广泛认可，已成为多时滞系统控制和多传感器信息融合的最有效工具之一。

3. 提出随机系统精确能检测判据，完善了随机系统的基本理论，解决混合 H<sub>2</sub>/H 无穷控制和 H 无穷滤波问题。

上述成果发展了随机控制理论和时滞系统控制理论，对进一步完善最优控制理论起到了重要推动作用。上述成果发表的论文专著得到国际同行学者的高度认可，包括 IFAC 前主席、多位 IEEE Fellow 在内的一批本领域杰出科学家，产生重要影响，特此推荐国家自然科学奖二等奖。

## 五、项目简介

结构复杂系统是指输入/输出时滞系统和乘性噪声随机系统。该类系统的最优估计/控制是现代控制理论的重要组成部分，具有广泛的应用背景和科学研究价值，半个多世纪以来，得到了数学领域和控制领域众多科学家和工程师的持续关注。但是由于问题的复杂性及现有控制方法的局限性，许多基础性问题至今没有得到根本解决，譬如上个世纪 60 年代所建立的传统控制方法不能直接有效地解决时滞系统的估计/控制问题；70 年代所建立的乘性噪声随机系统控制理论 (J.-M. Bismut, 1976) 无法保证分离原理成立，因此不能根本解决时滞系统随机控

制问题等。

回顾时滞系统和随机系统估计/控制的研究历程，完成人在近 20 年的研究中认识到要彻底解决这些问题，需要从更基础的问题着手，建立一套新理论而不是完全依赖于传统控制方法。为此，完成人采取了与过去不同的研究思路和方法，提出了“随机控制分离原理”，“新息重组理论”，“随机精确能检测判据”三个重要创新方法，由此成功构建了时滞系统和乘性噪声随机系统控制研究的基本框架。提出的“随机控制分离原理”突破了传统的随机控制分离原理不成立的障碍，根本性解决了时滞系统随机 LQ 控制问题、网络系统同时丢包和时滞的控制理论难题，取得了上个世纪 70 年代以来随机控制研究的实质性重要进展；提出的“新息重组理论”为多输入/输出时滞系统的估计/控制奠定了基础，由此完善解决了系列基础理论问题和长期公开问题；提出的“随机精确能检测判据”完善了随机控制理论，为随机系统最优控制和反馈镇定的研究奠定了基础。

7 篇代表性论文发表在控制领域顶级期刊 IEEE TAC、Automatica 和 IEEE TSP，其中 TAC 长文 3 篇、TSP 长文 2 篇；1 部 Springer 出版社专著。SCI 他引 362 次，他引 657 次；成果得到了他人高度评价和认可，引用者包括澳大利亚科学院前院长、国际自动控制联合会前主席 B.D.O. Anderson 等国际著名科学家：

- 提出的‘随机控制分离原理’得到高度认可：被同行学者称之为 Smith 预估理论(随机情形)；被评述为“将经典的无时滞系统最优控制理论完整的推广到了时滞系统”；“发展了具有时滞和丢包的网络控制系统的镇定性条件”等。
- 提出的‘新息重组理论’得到广泛认可和应用：1) 许多同行学者使用了‘新息重组理论’解决时滞系统估计问题；2) 许多同行学者一致认为新息重组理论是处理时滞系统估计的两种重要方法之一；详见第五部分客观评价 2。
- 时滞系统领域权威学者认可完成人解决了 H 无穷固定步长平滑估计、多输入时滞系统 LQ 控制等长期公开问题，问题难度及同行学者认可评述见其他附件 15-17。
- 提出的随机精确能观判据得到高度评价：随机系统权威同行学者多次引用该定义结论并用于解决随机问题；被评述为“另一类重要的由 Brownian 运动（或 Wiener 过程）描述的噪声/干扰滤波问题已被异乎寻常地解决了”。

## 六、客观评价

### 1. 对‘随机控制分离原理’的他人评价

#### 1.1 完成人提出的‘随机控制分离原理’得到国际同行学者的充分肯定。如：

- ✓ Z. Jiang(IEEE Fellow)及合作者评述“文献[40][44]利用 Smith 预估理论解决了输入时滞最优反馈控制问题”。[详见‘代表性引文 1’]
- ✓ B. Zhou 及合作者评述“Zhang 等人将经典的最优控制从无时滞系统完整推广到时滞系统”[详见‘其他附件 1’]
- ✓ IEEE TAC 在封面 Scanning the Issue(TAC, 60(10), 2015)中评述“该文所涉

及的是时滞系统随机控制领域的长期公开难题。基于提出的 Riccati-ZXL 方程给出了 LQR 控制器的解析解……。该文所提出的结果克服了乘性噪声随机系统分离原理不成立这一重大障碍。”[详见‘其他附件 2’]

**1.2 完成人解决了具有时滞和丢包的网络控制系统的最优控制问题得到国际同行学者的充分肯定。如：**

- ✓ P. Muthukumar 及合作者评述“时滞的存在是导致系统不稳定的一个主要原因……。文献[26]研究并发展了同时具有时滞和丢包网络控制系统的镇定性条件”。[详见‘代表性引文 2’]
- ✓ R. Avinash 及合作者评述“通信网络带来了许多挑战性问题。主要问题之一是时滞和丢包……。文献[10]研究了时滞和丢包同时存在时网络控制系统的稳定性，得到了系统稳定容许的最大丢包概率”。[详见‘其他附件 3’]
- ✓ 其他学者的类似评价：[详见‘其他附件 4’-‘其他附件 7’]

**1.3 同行学者对完成人所解决的上述网络控制问题难度的评价**

- ✓ G. Liu (IEEE Fellow) 评述“网络控制系统的挑战性在于：如何补偿通信时滞，如何克服丢包，……”。[详见‘其他附件 8’]
- ✓ L. Yu 及合作者评述“不同于单独考虑时滞或者丢包，同时具有时滞和丢包的网络控制系统的建模、分析和综合更加困难”。[详见‘其他附件 9’]

**2. 对‘新息重组理论’的他人评价**

**2.1 ‘新息重组理论’(Re-organization innovation) 已得到广泛认可。‘新息重组理论’这一名词被同行学者广泛采用并被应用于诸多理论和实际问题。如：**

- ✓ Y. Hori (IEEE Fellow) 及合作者评述“在过去十年里，新息重组理论得到广泛研究，并被推广到 Markov 跳变参数系统”。[详见‘代表性引文 4’]
- ✓ G. Liu 及合作者采用‘新息重组理论’研究了有界随机量测时滞系统的最优估计问题。[详见‘其他附件 10’]

**2.2 ‘新息重组理论’被认为是“处理时滞系统估计的两种方法之一”。如：**

- ✓ H. Rezaei 及合作者评述“时滞系统的估计问题得到了广泛关注[19]……。对于时滞系统 Kalman 滤波问题的研究主要有两种方法。目前大多数结果采用状态扩维处理时滞。[21]提出了无需扩维的新息重组理论，是处理随机时滞的有效技术。”并利用‘新息重组理论’解决了间歇量测系统的 Kalman 滤波问题。”[详见‘其他附件 11’]
- ✓ L. Shi (Richard M. Murray(美国工程院院士、IEEE Fellow)的博士研究生)在其博士论文中评述：“众所周知，带有定长时滞或有界时变时滞离散系统的状态估计问题可以通过状态扩维或者‘新息重组理论’解决”[详见‘其他附件 12’]

**2.3 完成人基于‘新息重组理论’解决的 Markov 跳变随机时滞系统估计问题得到同行学者的充分肯定。如：**

- ✓ S. Allahyani 及合作者评述“随机时滞系统的状态估计问题……，已有许多重要的研究成果。……文献[15]利用多状态 Markov 链刻画随机时滞，

解决了随机时滞网络化系统的最优滤波问题。”[详见‘其他附件 13’]

### 3. 同行学者对完成人解决 H 无穷步长平滑和滤波的评价

- ✓ B. Shen 评述“Zhang 等人创新性的提出了‘新息重组理论’,在 H 无穷滤波、平滑及预测中具有重要的作用。基于该方法,给出了 H 无穷固定步长平滑器存在的充要条件……。在 Krein 空间框架下,利用新息重组理论解决了更复杂的多时滞量测系统 H 无穷滤波问题”[详见‘其他附件 14’]

需要说明的是完成人所解决的 H 无穷平滑与滤波曾被列入公开问题:

- ✓ G. Tadmor 等人评述“……H 无穷预演控制和估计被证明是具有挑战性的问题……(被 [11](Springer 专著《Open Problem in Mathematics Systems and Control Theory》,1999)列为第 51 个公开问题)”[详见‘其他附件 15’]

### 4. 对完成人解决输入时滞系统 LQ/H 无穷控制这一基础难题的他人评价

- ✓ 时滞系统领域知名学者 A. Kojima 曾评述多输入时滞系统 LQ 控制为控制理论难题[详见‘其他附件 16’];并在其后期工作中认可我们解决了这一难题,“文献[16]等提出了输入时滞系统的 H<sub>2</sub>/H 无穷最优控制问题的解决方法”[详见‘其他附件 17’]
- ✓ G. Tao(IEEE Fellow)评述“多输入多输出时滞系统……取得了重要进展,如 Zhang & Xie, 2007……”[详见‘代表性引文 3’]

需要说明的是完成人所解决的多输入时滞 LQ/H 无穷控制曾被列入基础性难题:

- ✓ T. Basar(美国科学院院士)及合作者评述多输入时滞系统控制是网络拥塞控制的基础难题。[详见‘其他附件 18’]

### 5. 对随机精确能检测判据及 H<sub>2</sub>/H 无穷控制、滤波的他人评价

- ✓ B. Anderson(澳大利亚科学院院士)及合作者多次引用完成人给出的随机能检测能稳定的定义及结论,并在此基础上提出了解决一类状态扰动的随机 Riccati 方程的迭代算法。[详见‘代表性引文 6’]
- ✓ X. Mao(IEEE Fellow)及合作者评述“只有少数工作(文献[7][10][24])给出了随机系统均方稳定的充要条件”。[详见‘代表性引文 7’]
- ✓ Z. Wang(IEEE Fellow)等人评述“由 Brown 运动描述的噪声/干扰滤波问题被上述文献[2] 异乎寻常地解决了”。[详见‘代表性引文 8’]

## 七、代表性论文专著目录

1. Huanshui Zhang, Lin Li, Juanjuan Xu and Minyue Fu. Linear quadratic regulation and stabilization of discrete-time systems with delay and multiplicative noise. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 60, no. 10, pp. 2599-2613, 2015.
2. Cheng Tan, Lin Li, Huanshui Zhang. Stabilization of networked control systems with both network-induced delay and packet dropout, Automatica, 59: 194-199, 2015.
3. Huanshui Zhang, Lihua Xie. Control and Estimation of Systems with Input/Output Delays. Springer, 2007
4. Huanshui Zhang, Gang Feng, Guangren Duan and Xu Lu, “H infinity filtering for multiple-time-delay measurements,” IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 54, no. 5, pp.





## 九、完成人合作关系说明

1. 项目第二完成人张维海，2004年10月-2006年10月与第一完成人张焕水开展博士后研究工作，合作方向随机控制最优控制，之后保持长期的学术合作关系，至今合作发表期刊论文5篇，是本项目代表性论文论著6-8的主要完成人。
2. 项目第三完成人徐娟娟，2009年9月-2013年12月在第一完成人张焕水指导下攻读博士研究生，研究方向输入时滞系统随机LQ控制，博士学位论文获2015年中国自动化学会“CAA优秀博士学位论文奖”。之后保持长期的学术合作关系，至今合作发表期刊论文22篇，是本项目代表性论文论著1的主要完成人。
3. 项目第四完成人韩春艳，2006年9月-2010年6月在第一完成人张焕水指导下攻读博士研究生，研究方向输出时滞系统滤波估计，之后保持长期的学术合作关系，至今合作发表期刊论文9篇，是本项目代表性论文论著5的主要完成人。
4. 项目第五完成人卢晓，2002年9月-2008年6月在第一完成人张焕水指导下攻读博士研究生，研究方向多输出时滞系统最优估计，之后保持长期的学术合作关系，至今合作发表期刊论文7篇，是本项目代表性论文论著4的主要完成人。

**承诺：**本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

**第一完成人签名：**

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文	张焕水(1) 徐娟娟(3)	2015 年 10 月	Huanshui Zhang, Lin Li, Juanjuan Xu, Minyue Fu, Linear quadratic regulation and stabilization of discrete-time systems with delay and multiplicative noise, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 60, no. 10, pp. 2599-2613, 2015. (Regular paper)	附件 1	
2	论文	张焕水(1) 韩春艳(4)	2013 年 10 月	Chunyan Han, Huanshui Zhang, and Minyue Fu. Optimal Filtering for Networked Systems with Markovian Communication Delays. Automatica, vol. 49, no. 10, pp. 3097-3104, October 2013.	附件 5	
3	论文	张焕水(1) 卢晓 (5)	2006 年 5 月	Huanshui Zhang, Gang Feng, Guangren Duan, Xiao Lu. H-infinity filtering for multiple-time-delay measurements, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 54, no. 5, pp. 1681-1688, May 2006.	附件 4	
4	论文	张焕水(1) 张维海(2)	2008 年 8 月	Weihai Zhang, Huanshui Zhang, Bor-Sen Chen. Generalized Lyapunov equation approach to state-dependent stochastic stabilization/detectability criterion, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 7, pp. 1630-1642, August 2008.	附件 6	