

第八届控制科学与工程前沿论坛 天津

从单一干扰到多源干扰： 精细抗干扰控制方法及其应用

郭 雷

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院

“飞行器控制一体化” 国防科技重点实验室

“智能感知与控制” 北京市国际合作研究基地

“飞行器抗干扰控制” 教育部长江学者创新团队

“飞行器先进导航与控制系统技术” 科技部重点领域创新团队

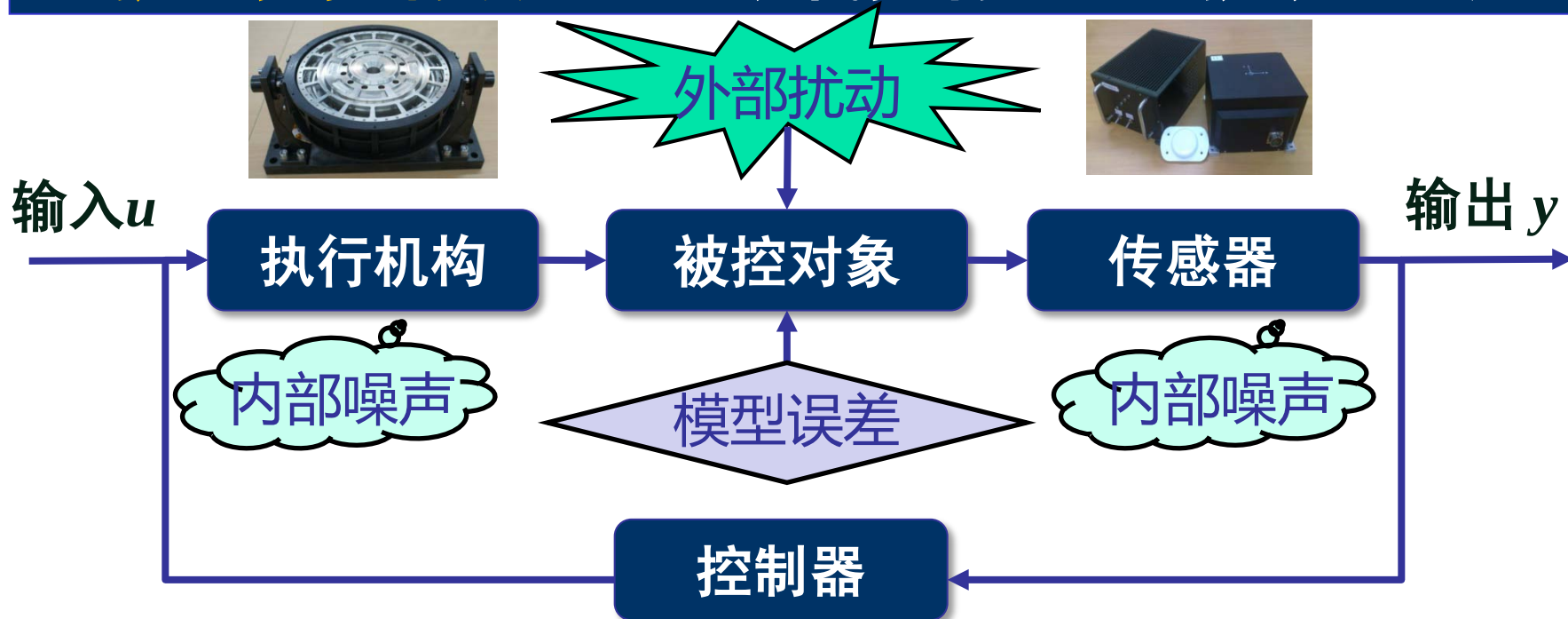
2016年05月06日

报告提纲

- 一、多源干扰与抗干扰控制回顾
- 二、精细抗干扰控制理论进展
(Refined Anti-Disturbance Control)
- 三、精细抗干扰控制应用举例
- 四、工作总结

一、干扰从何而来？

抗干扰控制技术——现代控制工程的挑战性问题



- ①非线性、不确定性和随机性等**模型误差**；
- ②气动、温度变化、电磁辐射等**外部扰动**；
- ③传感器测量噪声、控制误差、机构振动等**内部噪声**。

多源干扰：物理源（内外模），数学元，传递机理；

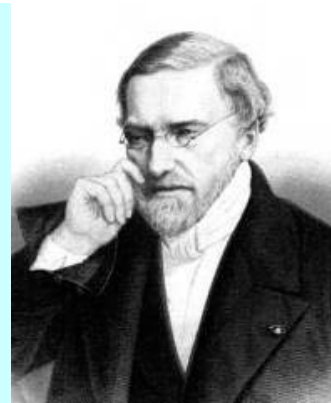
一、研究背景

抗干扰控制——现代控制科学的理论难题

19世纪: Poncelet's Principle (彭赛列准则)

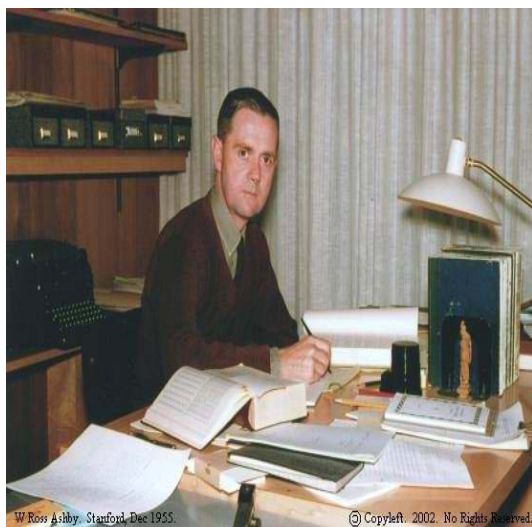
Control—Tend to cancel the effect of the disturbance, 控制的目标——消除干扰的影响

法国数学家Jean-Victor Poncelet (1788-1869), - 1829.



20世纪: An Introduction of Cybernetics (引用6619) ——名著
Survival of organisms: full of disturbances.

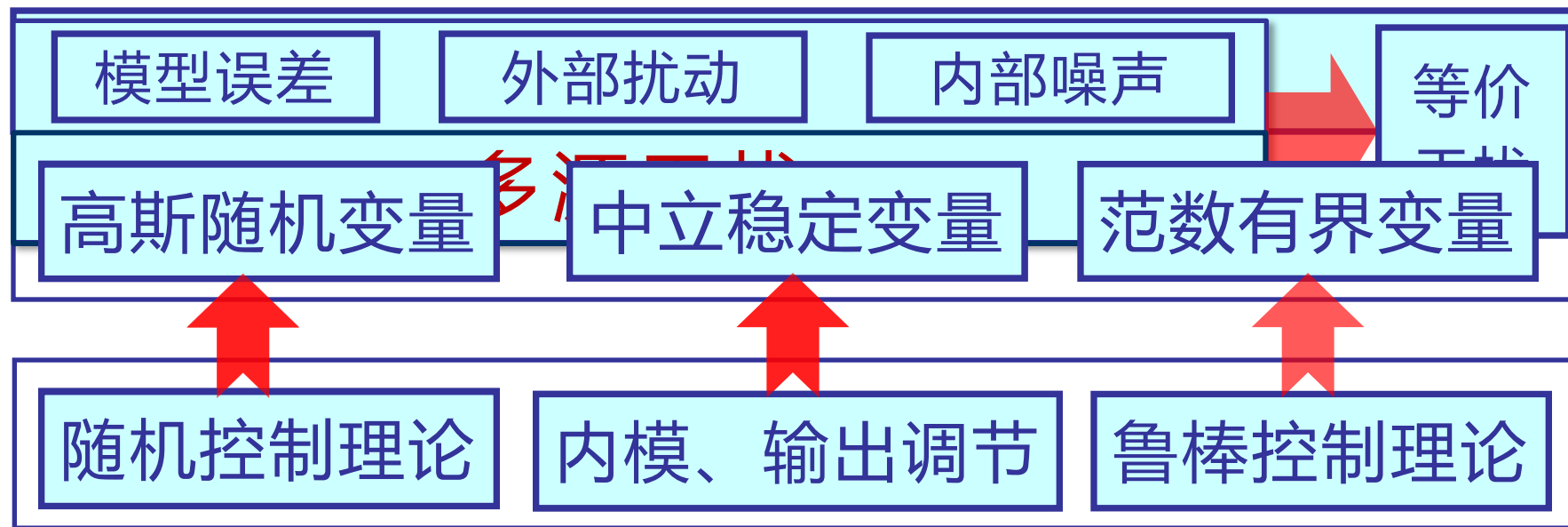
W. Ross Ashby (1903-1972), - 1956.
控制论创始人之一



抗干扰能力——控制科学的核心任务之一

一、研究背景

现有**典型**抗干扰控制理论：PID（常值偏差）



R. E. Kalman

最小方差控制；
卡尔曼滤波
R. E. Kalman,
1960, 引用14325



Davison

内模控制；
输出调节控制
Davison, 1976,
Isidori, 1990,



J C Doyle

H_∞ 控制；
耗散控制
DGKF, 1989
引用4400

现代控制理论的**重要分支**：干扰抑制；干扰补偿

一、研究背景

□ 抗扰控制理论新兴分支：从DOBC到CHADC

DOBC(1981)



综述

Chen, Guo, Li, Yang

自抗扰控制
(1989?)



综述

Han, Gao, Huang, Xue

□ 成功应用：电机系统；流程工业；航空航天——**实践是检验真理的最好标准**

□ **相同性**；英雄所见略同，互相印证，互相借鉴

□ **相异性**；英雄不问出处，互相包容，取长补短

2015年，成立了控制理论专委会**抗干扰控制学组**

报告提纲

- 一、多源干扰与抗扰控制回顾
- 二、精细抗干扰控制理论进展
(Refined Anti-Disturbance Control)
- 三、精细抗干扰控制应用举例
- 四、工作总结

一、研究思路

精细抗干扰控制（了解干扰，打倒干扰）

非高斯系统
随机分布控制

多源干扰系统
复合分层控制

故障+干扰系统
抗干扰故障检测

稳定性、精确性、可靠性

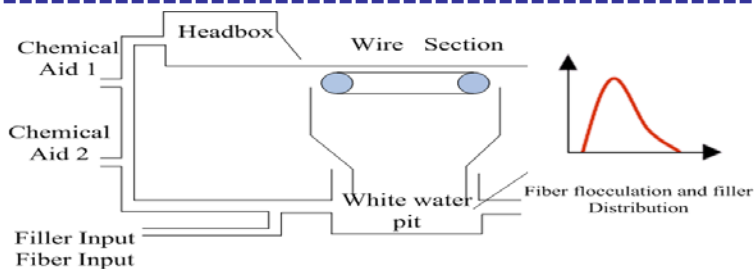
- 从工程需求中提炼科学问题，实际验证和应用
- 知识驱动：揭示干扰特性及影响机理——知己知彼
- 基于干扰观测和估计的控制——对症下药
- 前馈+反馈，多干扰同时抑制+抵消——各个击破

研究内容1: 非高斯系统随机分布控制理论

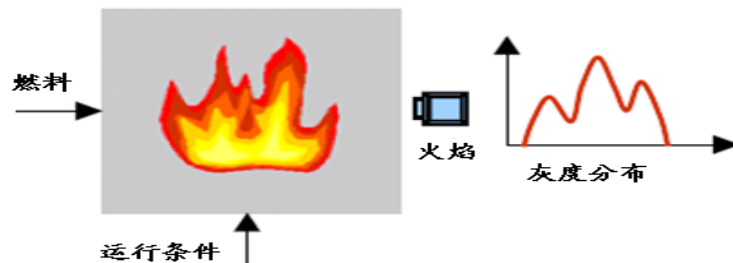
研究
背景

工程需求：广泛存在于造纸、冶金等复杂过程

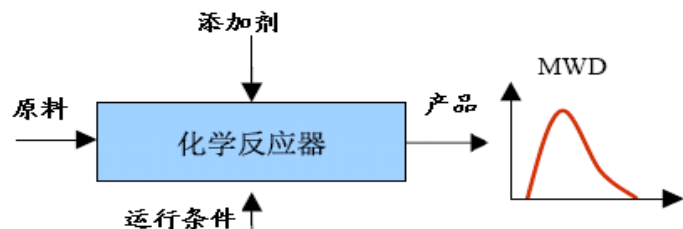
理论难题：非高斯随机变量——概率密度函数



■ **造纸过程灰度分布控制**



■ **冶金过程分布场检测与控制**

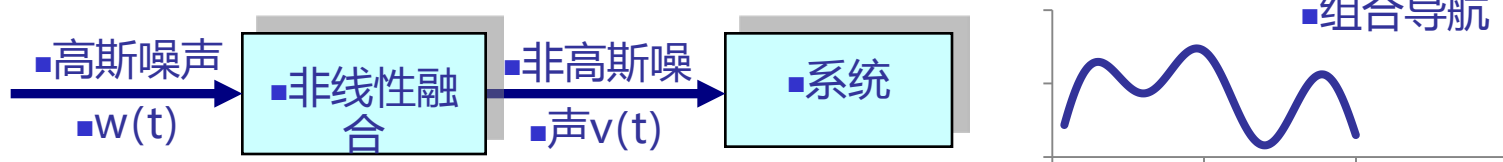


■ **化工过程分子量分布控制**



■ **非线性组合导航系统**

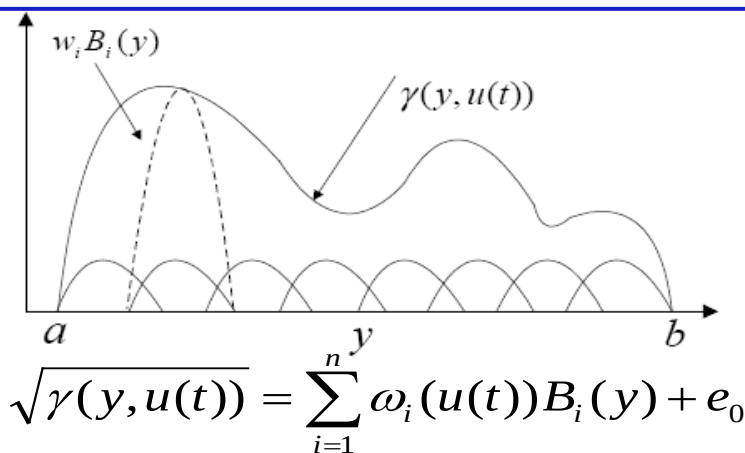
■ 组合导航



■ **随机控制理论 (1960s) 建立以来的一个难题**

研究内容1: 非高斯系统随机分布控制理论

- 非高斯随机分布系统的基于固定基和移动基的有限维约束权空间逼近原理
- 输出条件概率密度函数 (PDF) 和统计信息集合 (包含高阶矩和熵) 的传递规律

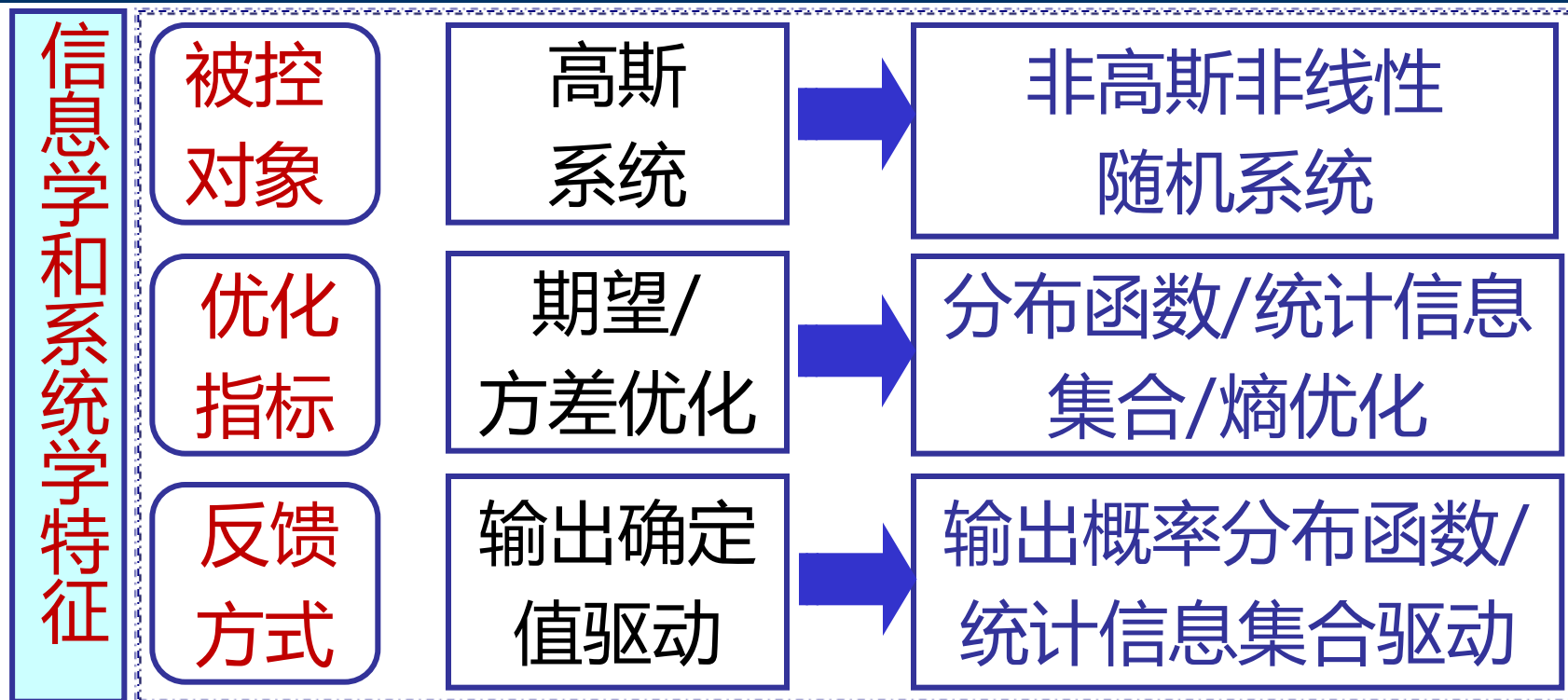


$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= A_0 V(t) + \sum_{i=1}^N A_{0d_i} V(t - d_i(t)) + F_0 f_0(V(t)) \\ &\quad + B_0 u(t) + \sum_{i=1}^N B_{0d_i} u(t - d_i(t)) + B_{01} w(t) \\ u(t) &= K_p V(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{V}(t) = Kx(t) \\ \int_{\Omega} \gamma(y, u(t)) &= 1, \quad \gamma(y, u(t)) \geq 0 \\ V^T(t) \Pi_0 V(t) &\leq 1, \quad \Pi_0 = \Lambda_1 - \Lambda_3^{-1} \Lambda_2 \Lambda_2 \end{aligned}$$

- 郭雷、王宏等, *IEEE Trans. Syst. Man & Cyber.-B*, 2005, pp. 65-71;
- L. Guo, H Wang等. *Stochastic Distribution Control System Design*, Springer Press, 2010, 英国Springer出版
- 2014年获得第11届WCICA最佳理论论文奖 (2300)

■研究内容1: 非高斯系统随机分布控制理论

■科学意义与创新性: 精细——高阶矩和PDF



- 建立了非高斯随机控制理论研究的一个新方向
- 在造纸、冶金过程成功进行了验证和应用

□国家自然科学基金面上基金、杰青基金

研究内容2: 多源干扰系统复合分层控制

研究背景

工程需求：高精度、高可靠性与复杂任务——矛盾
理论难题：干扰的多源性与控制的耦合性——难点

□ 现有方法：单一等价干扰

随机控制(1960s)	需要已知干扰的统计信息
内模与输出调节(1970s)	干扰模型满足严格的限制条件
鲁棒控制(1980s)	依赖于范数上界，保守性较大

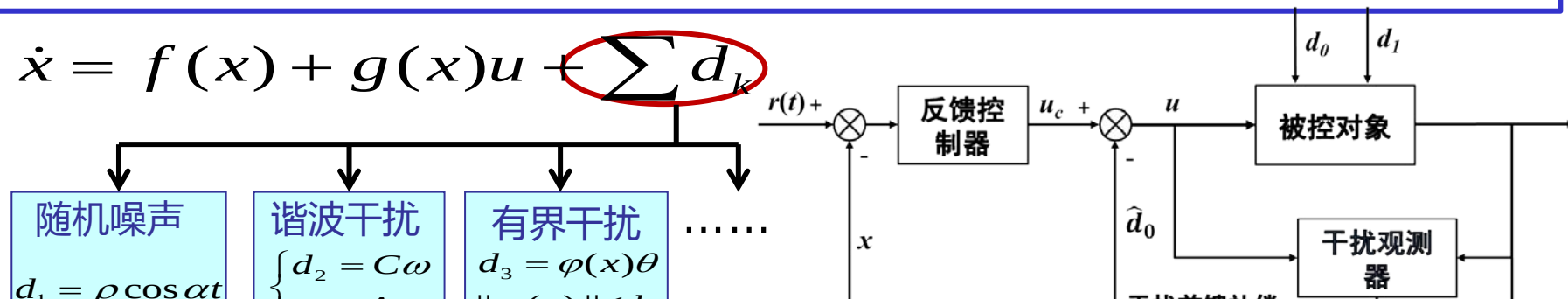
□ 科学问题：多源——好汉难敌四手？谐波+高斯？

- ◆ **控制相容性**：反馈结构互相耦合，难以相容
- ◆ **脆弱性**：内模与输出调节——模型精确已知
- ◆ **粗糙性**：鲁棒——忽略干扰信息，最坏情况

研究内容2: 多源干扰系统复合分层控制

复合分层抗干扰控制理论 (CHADC)

- ◆ 多源干扰系统建模、表征与综合分析：
- ◆ 时域非中立、不确定干扰的观测器控制方法：分离性、低保守性和非脆弱性——从鲁棒DOBC到CHADC
- ◆ 复合分层抗干扰控制结构：干扰观测、前馈补偿和反馈抑制——具有可剪裁性



- 郭雷, 陈文华, Int. J. of RNC, 2005, 20(1): 106-118. (ESI)
- 郭雷, CHADC (复合分层抗干扰控制) : a Survey , 2014, ISA Trans.
- 郭雷, 曹松银, Anti-disturbance control for system with multiple disturbances. 美国 CRC 2013. (英文专著)

研究内容2: 多源干扰系统复合分层控制

多干扰系统模型

标称被控对象

- 线性时域模型
- 特征模型
- 不确定性模型
- 非线性模型
- 神经网络逼近模型

干扰模型

- 负载干扰 (阶跃)
- 谐波干扰 (周期)
- EXOSYSTEM (不确定)
- 导数有界信号
- 范数有界信号
- 随机信号

干扰抵消

干扰观测器控制 (DOBC)

干扰抑制

H无穷; 随机; 自适应; 变结构

干扰分析与建模 $\Rightarrow$ 前馈干扰抵消 $\Rightarrow$ 设计多目标优化反馈控制进行干扰抑制 $\Rightarrow$ 复合分层抗干扰控制
信息时代的需求, 传感技术、计算机技术、控制理论的发展; 信息获取、处理和应用能力的提高

研究内容2: 多源干扰系统复合分层控制

■ 创新性与科学意义

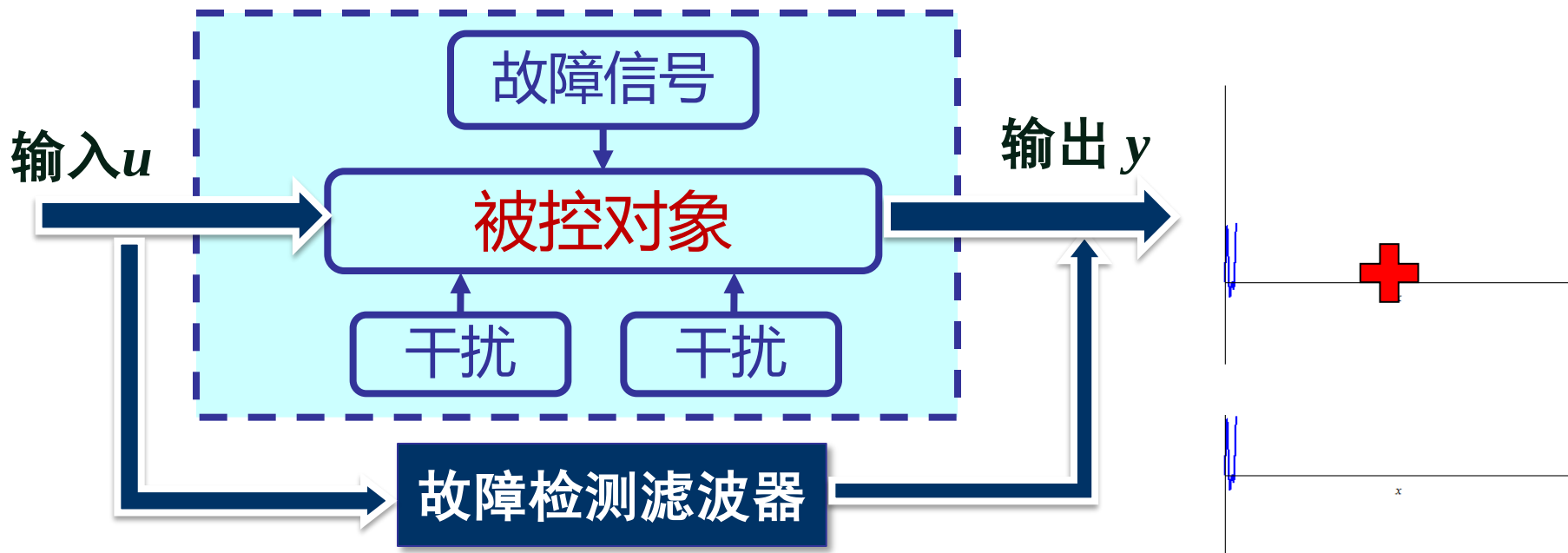
- ◆ 单一干扰——多类干扰 (CHADC)
- ◆ 耦合性——可剪裁性：前馈+反馈的复合控制结构
- ◆ 脆弱性——柔韧性：适用于不确定干扰的补偿
- ◆ 保守性——精细性：多干扰同时抑制和补偿

- 拓展了传统鲁棒控制和内模控制理论研究范畴
- 形成了一个工程上实用的抗干扰控制理论研究方向
- 针对飞行器控制系统成功进行了验证和应用

□ 国家自然科学基金面上项目、杰青项目、重点项目

研究内容3：抗干扰故障检测与容错控制方法

□ 研究背景：突变故障和持续干扰影响系统可靠性



□ 局限性：未充分考虑干扰对故障检测的影响系统

故障检测	干扰影响残差信号灵敏度
容错控制	抗干扰控制与容错控制相互耦合

研究内容3：抗干扰故障检测与容错控制方法

- ◆ 提出了一类非高斯随机系统多通道干扰与故障分离原理——建立了非高斯随机分布滤波与故障检测方法
- ◆ 揭示了非中立、不稳定信号估计与补偿机理——提出了可补偿多类干扰、具有解耦性的容错控制方法
- ◆ 分布参数系统的智能建模与可靠控制

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, \delta_k, \eta_k, \omega_k) \\ y_k = h(x_k, v_k) \end{cases}$$

故障估计

鲁棒主动容错控制器

非线性系统

干扰观测器

故障诊断观测

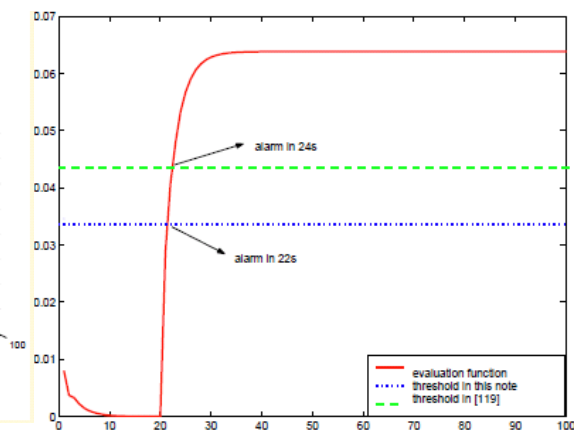
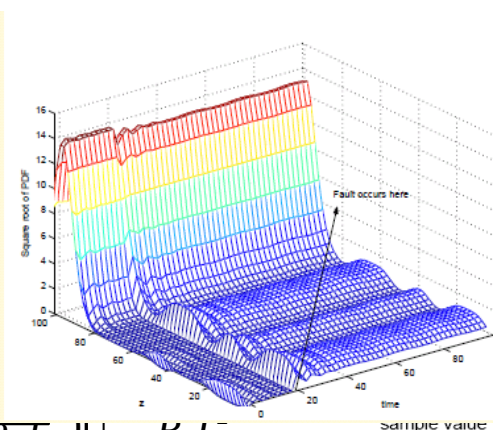
干扰

故障

控制输入

控制输出

故障发生处



故障检测阈值降低25%

- 郭雷等, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, pp. 3712-3719;
- 郭雷等, *IEEE Trans. Circuit & Systems-I*, 2005, pp. 1644-1652

报告提纲

- 一、多源干扰与抗干扰控制回顾
- 二、精细抗干扰控制理论进展
(Refined Anti-Disturbance Control)
- 三、精细抗干扰控制应用举例
- 四、工作总结

应用研究1: 卫星全控制回路多源误差分析与补偿

科学家之问?
理论如何应用?

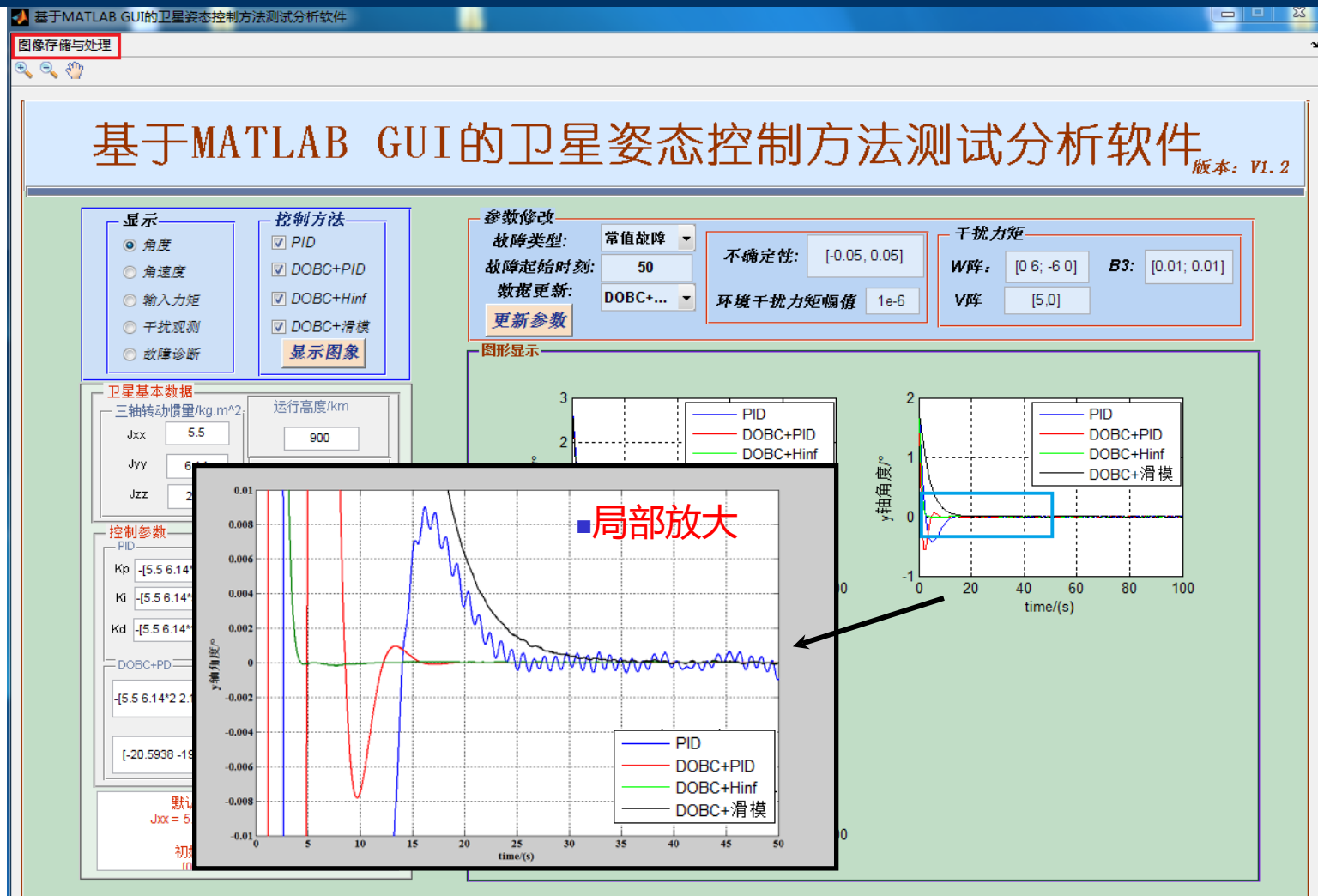
工程师之问?
质量如何提高?

□ 国家自然科学基金委仪器科学专项基金:
卫星抗干扰姿态控制一体化测试分析平台

- **多源干扰综合分析**：典型任务——干扰特性——多源干扰建模——干扰影响机理及鲁棒性分析
- **多源干扰系统算法设计与软件实现**：抗干扰姿态确定方法——抗干扰姿态控制——算法软件编制及测试
- **仿真系统与硬件测试分析平台**

应用研究1: 卫星全控制回路误差分析与补偿

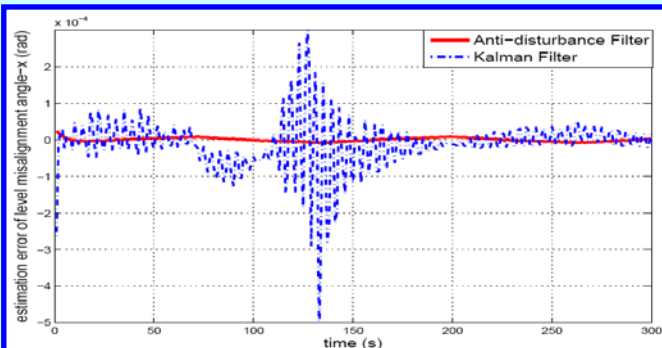
全控制回路多干扰分析与补偿技术软件平台 (三维品质评价)



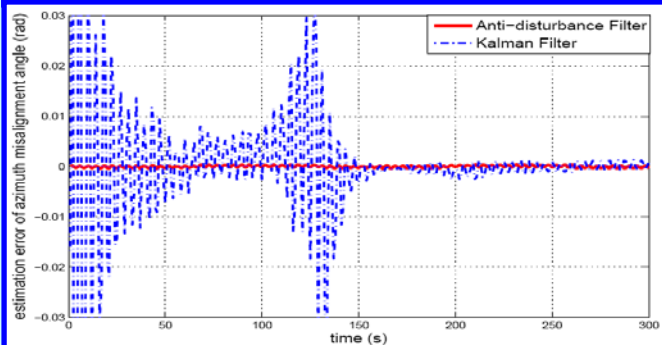
应用研究1: 卫星全控制回路误差分析与补偿

□ 实测数据验证——基于复合分层抗干扰姿态确定算法 能否取代卡尔曼滤波?

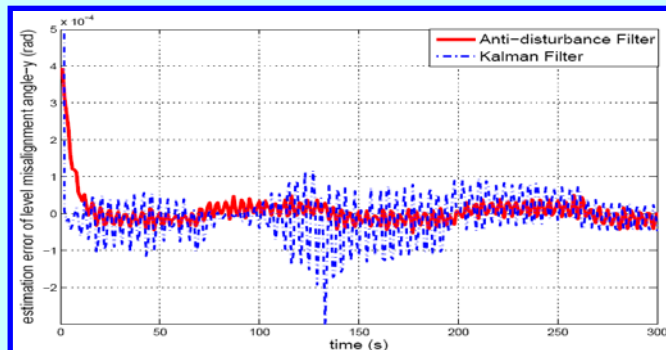
■ 轴角度偏差



■ 方位角偏差



■ 轴角度偏差



■ 算法对比

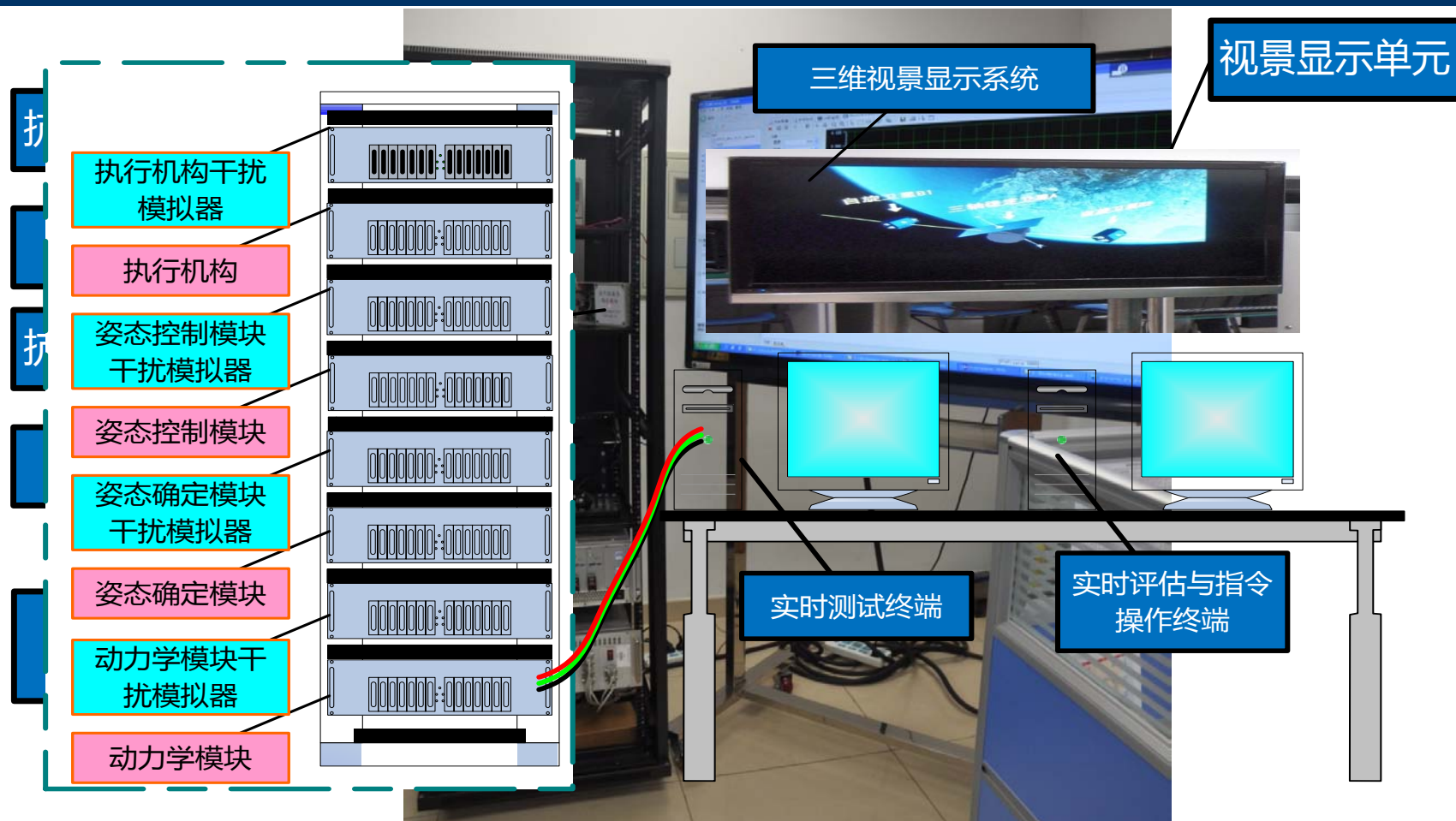
机载SINS失准角估计误差的标准差(STD) ($10^{-5}rad$)

	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z
抗干扰滤波器	0.462194	2.164209	24.666823
卡尔曼滤波器	7.669007	6.339486	730.335094

- **Lei Guo**, SY Cao, CT Qi, XY Gao. Initial alignment for nonlinear inertial navigation systems with multiple disturbances based on enhanced anti-disturbance filtering. *International Journal of Control*, vol. 85, no.5, 491-501, 2012. (SCI & EI) (与航天12所合作)

应用研究1：卫星全控制回路误差分析与补偿

抗干扰控制系统硬件平台：惯导、飞轮等典型组件



■ 抗干扰姿态控制一体化测试分析平台

■ 抗干扰姿态控制一体化测试分析平台实物图

授权发明专利8项：多源干扰环境卫星姿态控制多干扰分析与测试平台

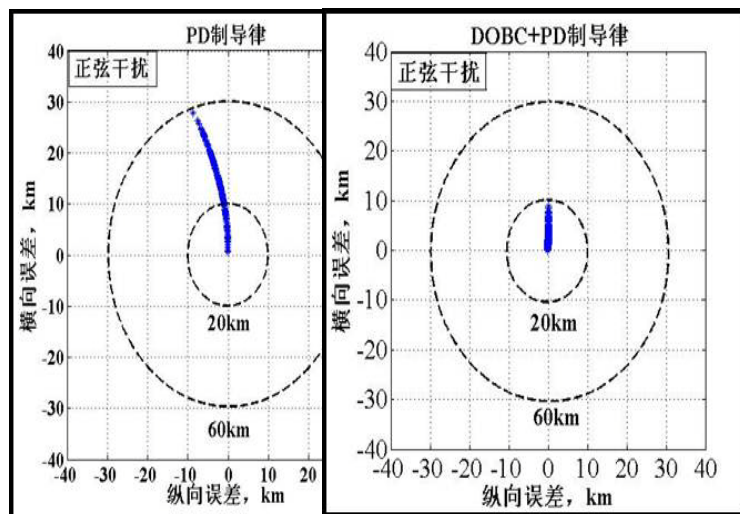
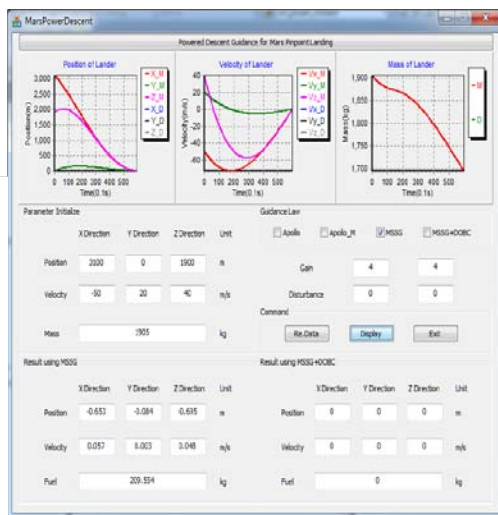
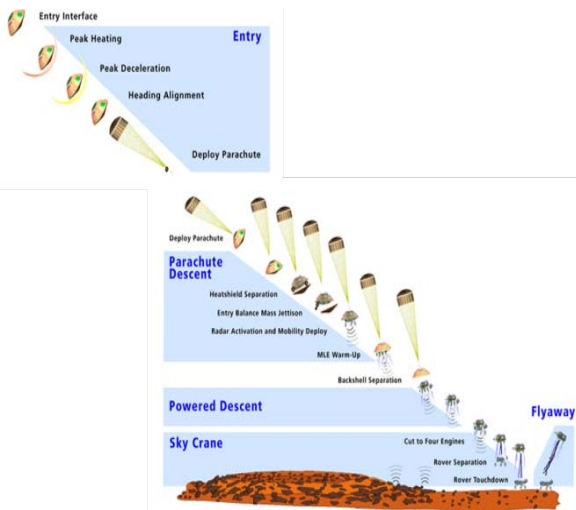
应用研究1: 卫星全控制回路误差分析与补偿

□ 主持我国深空探测领域首个973项目课题

□ 研发针对火星着陆任务的测试分析软件平台

◆ 难题 (多源干扰) : 5500万公里, 火星大气, 测量不确定性

◆ 突破行星 (高超) 精确可靠着陆导航与制导关键技术



- 一种可估计密度不确定性的行星进入段制导方法. 专利: 201410336625. 5
- 一种基于干扰观测的动力下降段优化控制方法. 专利: 201410136042. 8
- 一种行星动力下降段轨迹在线生成的抗干扰方法. 专利: 201410336625. 5

应用研究1：卫星全控制回路误差分析与补偿

□ 国家863计划重大项目课题（2300万）

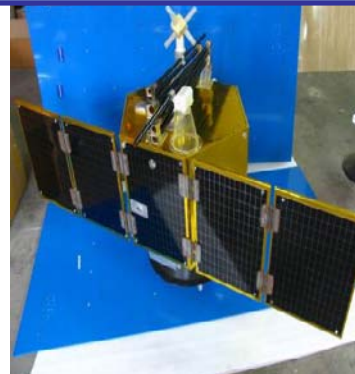
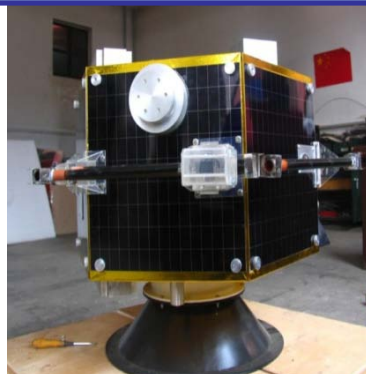
分布式微纳卫星组网监测编队系统

- ◆ 研制成功首个分布异构式微纳卫星组网监测系统
- ◆ 设计探测指标超过美国ST-6（2006）编队系统

□ 国防973计划课题：空间非合作目标XXXXXXXXX技术

□ 国防863计划项目：空间XX目标XX接近与XX技术

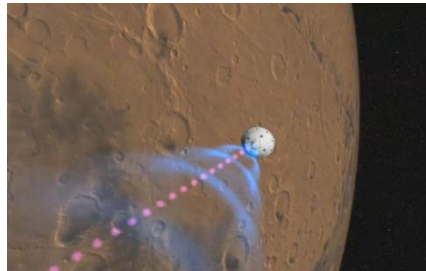
- ◆ 多传感器精细抗干扰信息融合理论
- ◆ 多组合体航天器状态感知与协同控制技术



应用研究2：无源自主**仿生**组合导航系统技术

□ 研究重点：仿生导航技术——**超越人类智能的感知**

- 优点：无电磁联系——**无源、无辐射、隐蔽性好——自主性强**
- 工程意义显著——可**取代GNSS**与惯导等组合
- 电子战——伊朗利用**GPS干扰技术**，捕获美军RQ-170“哨兵”无人机，军事需求迫切



火星探测



极地考察



行星登陆



伊朗的RQ-170

科学意义显著：2014年诺贝尔医学与生理学奖——在大脑的海马体发现了一种“位置细胞”，作为空间记忆的认知地图，具有预测定位功能；

2003年美国NASA——BEES研究计划：长期技术封锁，无报道

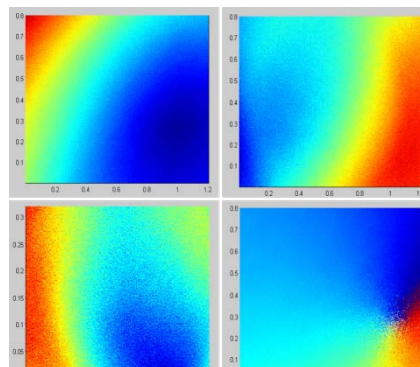
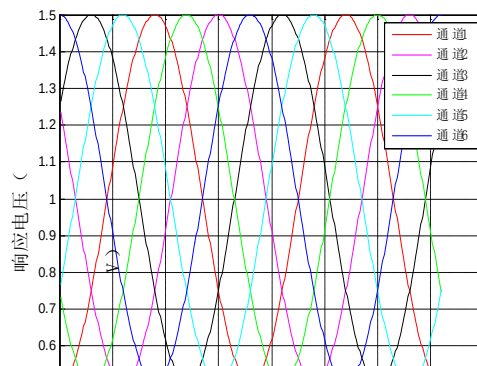
国内在无人机仿生导航系统领域：起步阶段（颠覆性技术）

应用研究2：无源自主**仿生**组合导航系统技术

□ 突破**仿生偏振组合导航抗干扰滤波技术**

□ 研制成功无人机用**仿生组合导航系统样机** (苏6055)

- ◆ 解决了仿生导航系统**多源干扰**的抑制问题：散射不确定性
- ◆ 提出了六通道偏振传感方法并研制**新型偏振传感器样机**
- ◆ 研制成功无人机惯性/仿生/地磁组合导航系统



■ 首届全球机器人（沈阳）大会特邀报告（2015）（郭雷）

■ 16届北京国际航空展特邀报告（2015）（郭雷）

□ 科技部国际合作项目 “全自主仿生偏振组合导航系统技术”

□ 基金委国际合作项目 “仿生偏振组合导航系统建模与滤波理论研究”

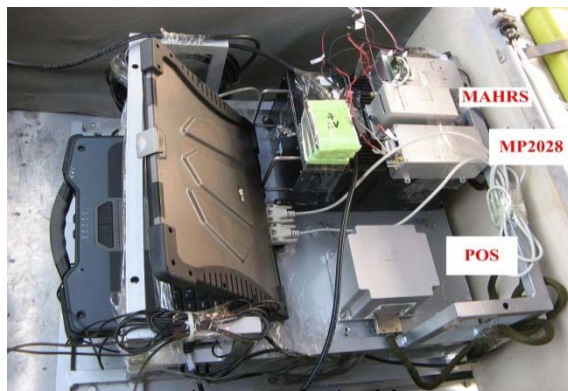
应用研究2：仿生导航无人机自主控制系统

□ 完成无人机抗干扰控制系统飞行验证

- ◆ 提出了复合分层抗干扰控制方法，提高无人机抗风能力
- ◆ 设计研制仿生导航无人机自驾仪，用于电网和石油管线巡检
- ◆ 设计研制近空间探测可变体无人飞行器
- ◆ 设计研制多尺度空间同步监测平台，用于遥感、气象和环保



飞行测试用AC2飞机



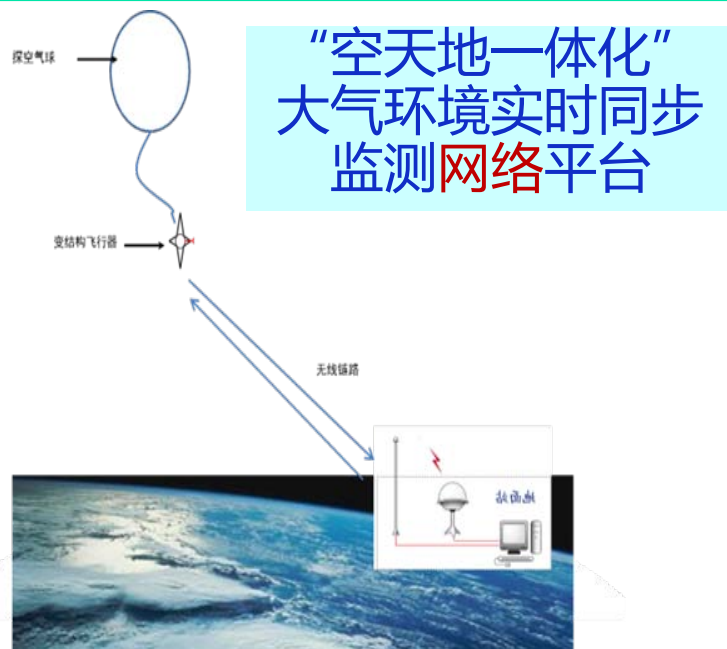
飞行测试安装图



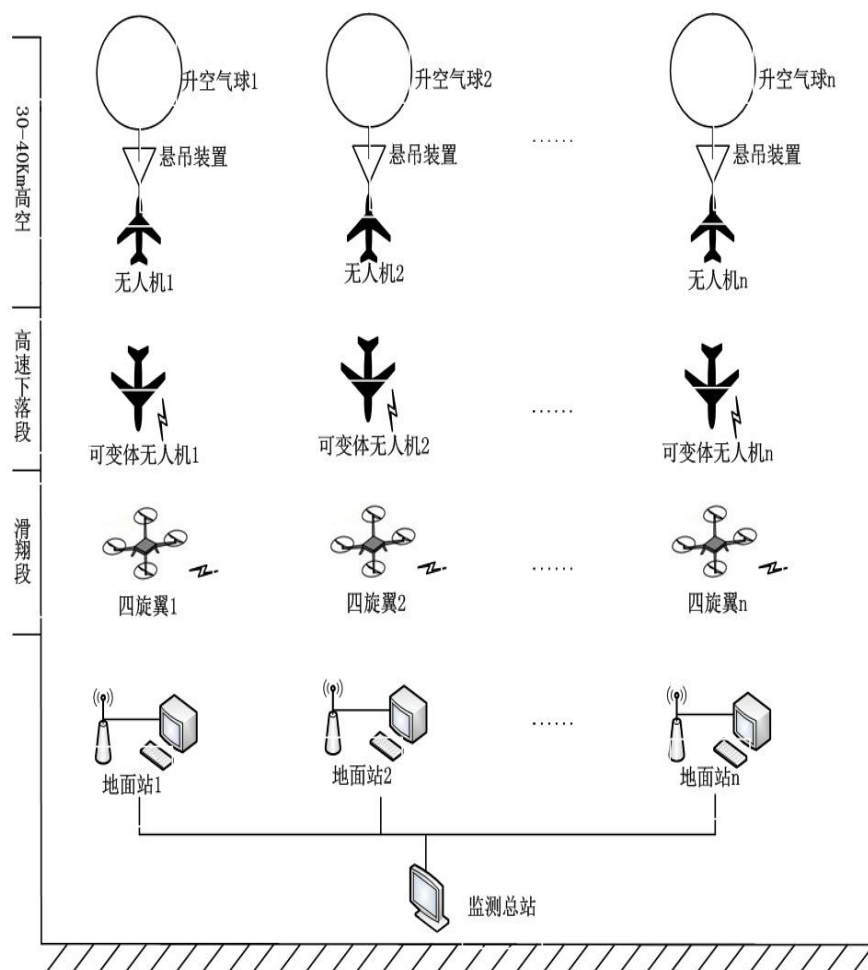
载重100KG蚊子无人机

- 主持完成国家863计划项目“XXXX空中机器人”（2008-2010）
- 一种隐式结构微型惯性测量单元．专利：ZL200710063635.6
- 一种微小型飞行器GNC的冗余方法．专利：ZL200610113986.9

应用研究2：无源自主**仿生**组合导航系统技术



- ◆ 飞机与载荷高低温实验
- ◆ 地面连调实验
- ◆ 可变体无人机地面组装调试
- ◆ 近地面低空带动力飞行实验
- ◆ 气球携带低空滑翔实验



常驻留、大范围、高机动
多尺度、快响应、

报告提纲

- 一、多源干扰与抗扰控制回顾
- 二、精细抗干扰控制理论进展
(Refined Anti-Disturbance Control)
- 三、精细抗干扰控制应用举例
- 四、工作总结与思考

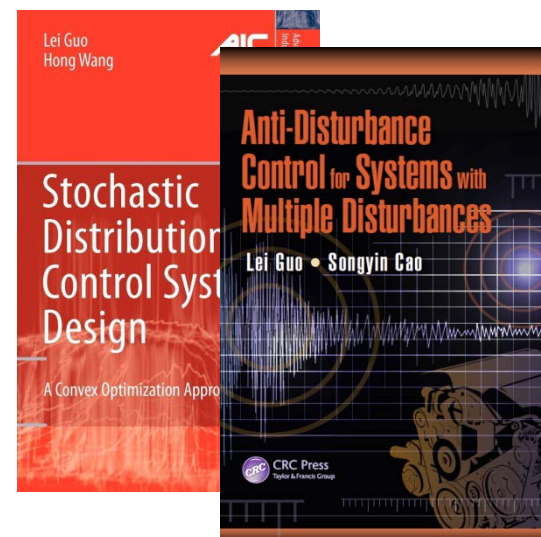
论文发表与引用

□ 精细抗干扰控制理论研究新方向：多源干扰系统

- 第一篇文章：Guo & Chen, IJRNC 2005 (IFAC 2002)
- 第一部专著：Guo & Cao, CRC Press, 2013 (美国)
- 第一篇综述：Guo & Cao, ISA Transaction, 2013 (CCC)
- 第一个授权专利：一种复合分层抗干扰控制器，2013
- 第一个研究生抗扰控制课程：2014—
- 第一个Matlab软件工具：DOBC V1.3

◆ 英文专著2部，被欧洲数学评论高度评价：

- **L. Guo, 等. Stochastic Distribution Control System Design, Springer Press, 2010**
- **L. Guo 等. Anti-Disturbance Control and Filtering for Systems with Multiple Disturbances, CRC Press, Taylor& Francis, 2013**



研究团队：飞行器抗干扰控制教育部创新团队

- “飞行器控制一体化技术” 国家级重点实验室
- “智能感知与控制一体化技术” 北京市国际合作基地
- 郭雷教授：教育部长江学者特聘教授
- 陈文华教授：教育部长江学者讲座教授
- 闫鹏教授：第二批中组部 “青年千人计划”
- 吴淮宁教授：北航 “蓝天学者特聘教授”
- 胡庆雷教授：北航 “卓越计划特聘教授”
- 国家自然科学基金委员会自动化学科组成员
- 国家科技部863计划重大项目专家组成员
- 国家民用航天计划 “信息与控制” 领域专家组成员
- 博士研究生20余名；硕士研究生30余名

多学科交叉；理论与工程结合；和谐、团结、奋进

才飲長江水，又食武昌魚。
東風吹浪，卷上魚鱗去。
箭定鷹隼，聲已隨風去。
今日偏知，西華信步。
歸去。子安在，白頭如雪。
壯！風塵荏苒，老病更何處。
靜。胡空闊。獨。楊柳深青，
南北天然，多事。又逢文
立。西江石壁，龍蛇爭處。
重雨。高樓出，神女。
座無餘。南。世界。
殊。

不管风吹浪打，胜似闲庭信步！
谢谢各位老师和同学！

水調歌頭 游泳

