

第八届控制科学与工程前沿论坛

“网络系统” 感知传输与控制

关新平

上海交通大学

2016年5月6日，天津

汇报提纲

一．研究背景

二．主要成果

三．应用案例

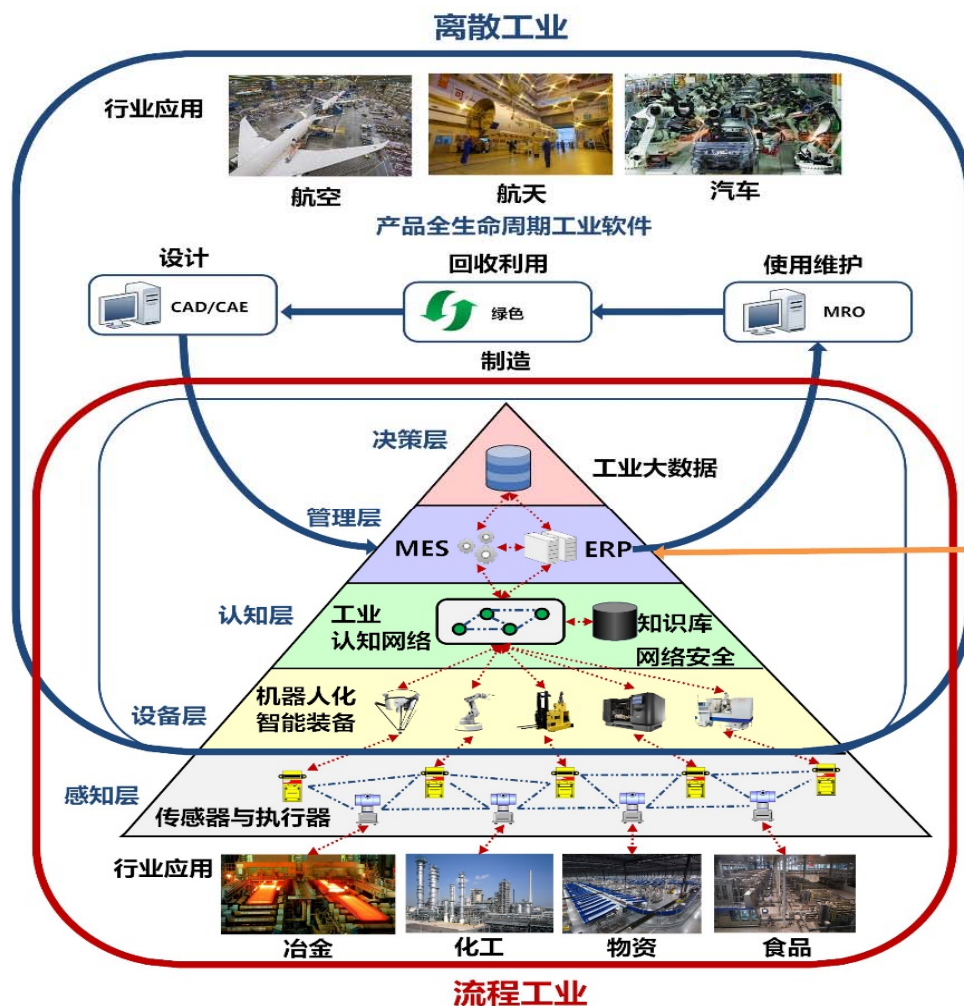
四．进行工作

“智慧工厂”的内涵与特征

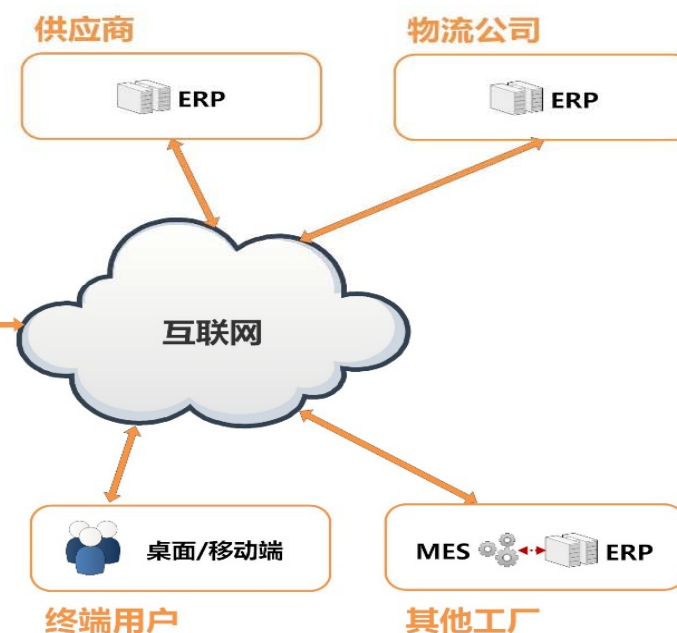
内涵：利用计算机技术、通信技术、网络技术、自动控制技术、人机交互和虚拟现实等先进技术，融合智能装备/设备，形成高度协同的生产系统（含实时监控系统、自动化流程管理、环境监测与管理等系统），达到生产的最优化、流程的最简化和效率的最大化。

特征：广泛利用**工业自动化、智能设备、大数据**等形成具有自感知，自调节、自执行等“**知识自动化**”功能的新一代智能系统：通过**工业网络系统**实现生产的跨层协同与跨域集成；通过**面向服务制造的工业软件**实现柔性生产，通过**工业大数据分析**实现产业链的上下互动，通过工业系统安全标准保证可管、可控与可信。

智慧工厂网络系统架构

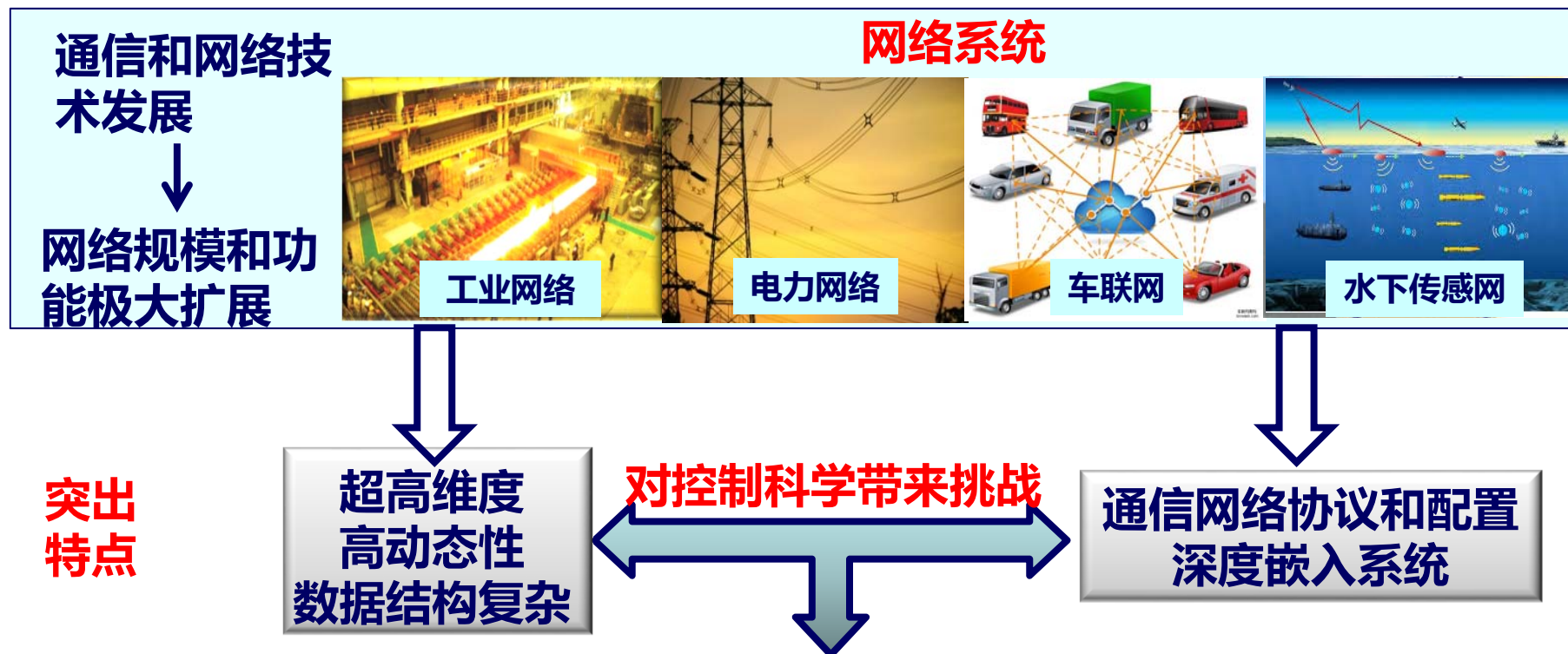


基于智慧工厂网络系统架构：
建设智慧工厂/数字化车间，加快产品全生命周期管理、客户关系管理、供应链管理系统的推广应用



**促进设计与制造、产供销一体
实现智慧管控**

网络系统的特征



- 网络系统：是由具备感知能力的设备和终端通过信息获取、传输、处理和控制等相互作用形成的整体，它具有对动态环境进行定量描述、学习、控制和优化的功能，并以实现“感知、传输、控制一体化”为目标。

工业网络系统



远程公共平台系统

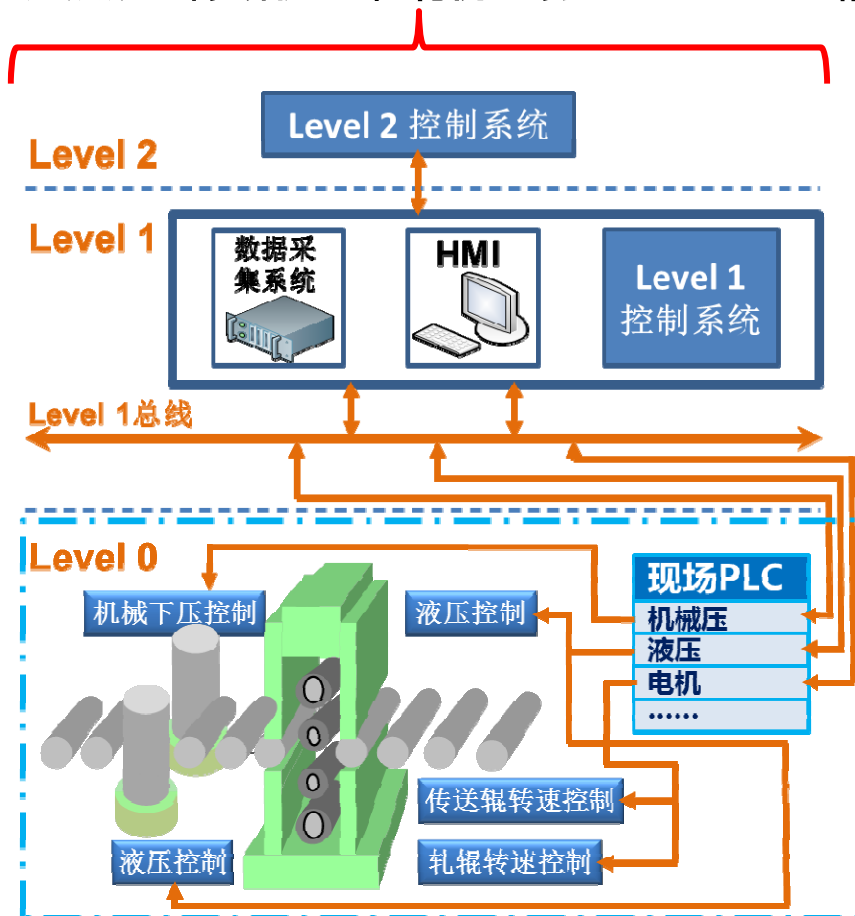
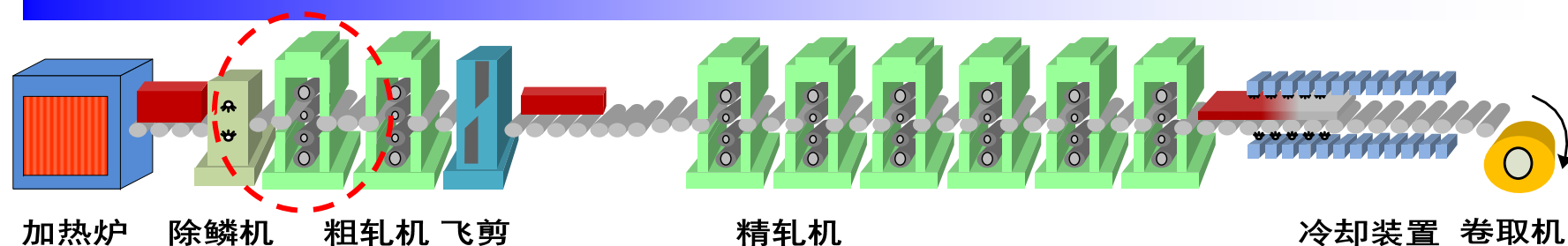


为控制系统
提供**实时可靠**
信息交互

支持终端设备
移动性与
传输

有线/无线网络
共存构成
异构网络

冶金行业



□ 热轧现场控制系统(Level 0 和 Level 1) :

- **7个物理区域** : 步进式加热炉, 粗轧, 精轧等
- **有线监控仅集中在轧制设备** : 机械压力控制, 液压压力控制, 电机控制等

□ 提高轧制质量的关键 :

- 轧件温度履历, 尺寸精度, 表面平整度, 化学成分分析出等

现有有线监控系统, 未能实现无盲区覆盖;
工业网络系统将实现全流程, 全面参数获取,
以适应高附加值钢热轧工艺发展的需求

网络系统的三个研究内容

系统分析理论和动态网络协议设计相结合
开展“网络系统的感知、传输与控制”

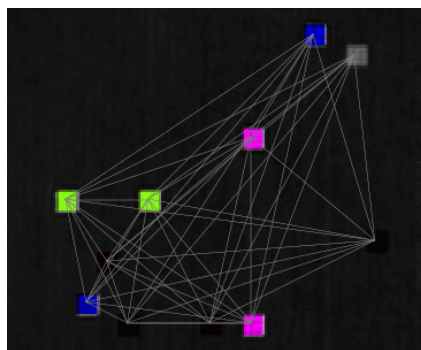
感知

网络感知与网络拓扑关系的解析



传输

多域协同适变传输与资源分配



控制

网络环境下的并行分布式控制



汇报提纲

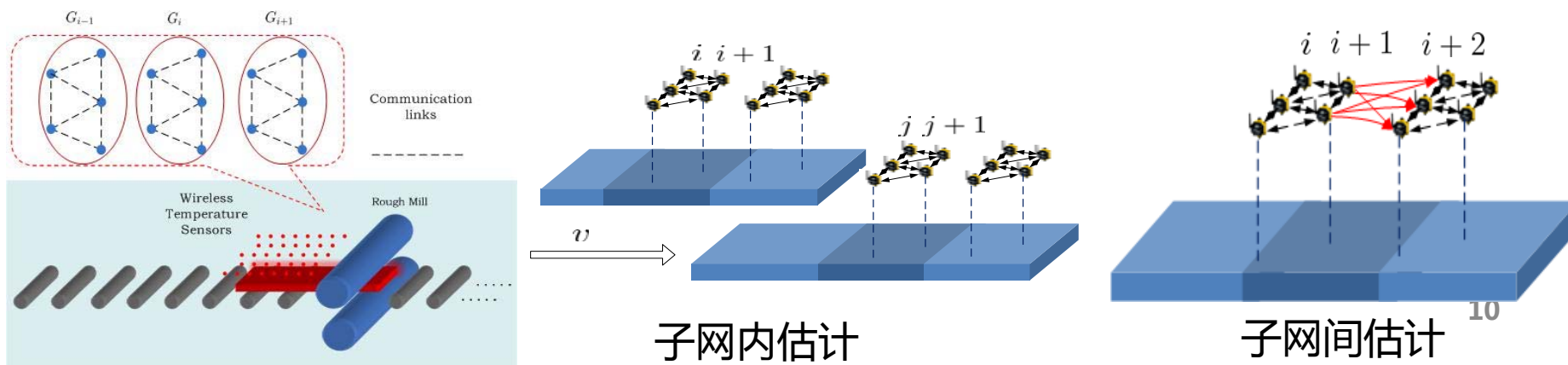
- 一．研究背景
- 二．主要工作
- 三．应用案例
- 四．进行工作

代表性工作1：网络系统的信息获取



问题描述

1. 如何部署功能各异的传感器节点，保证网络估计整体性能？
2. 如何在通信受限情况下设计分布式估计算法多传感器融合机制，保证稳定性与无偏性？



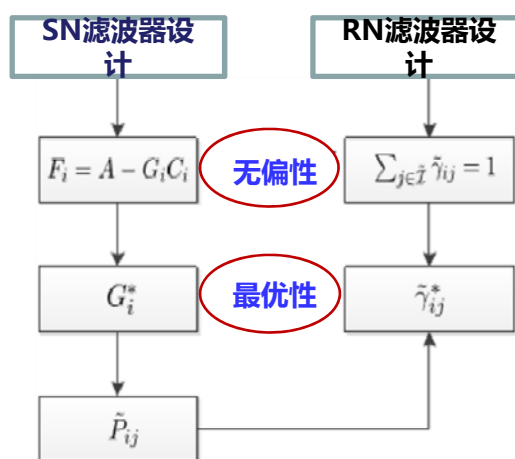
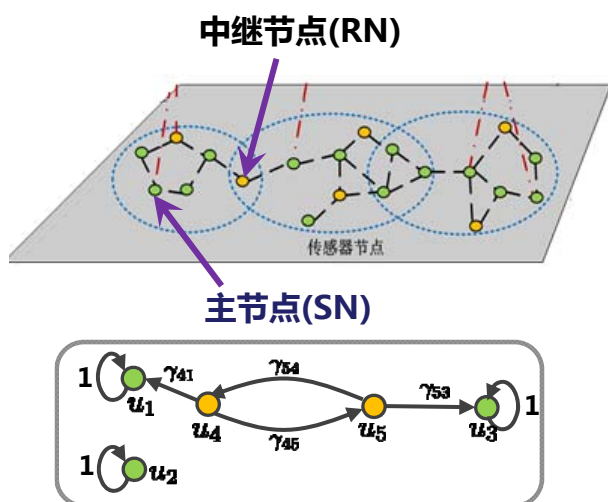
总结

- 揭示了分布式估计能力与网络拓扑、通信性能及节点感知性能的内在关联；
- 设计了通信受限情况下分布式估计算法的补偿机制，消除量化误差

1.1 网络部署与分布式估计的联合设计

目标

考虑工业无线网络的信息交互可靠性问题，最优部署中继节点与传感节点，并设计相应分布式估计算法，保证估计性能。



网络连通性
 $\lambda_2(L) > 0$



主节点邻居数目

$$\sum_{j \in \text{Neigh.}(i)} a_{ij} - \sum_{j \in \text{RN-Neigh.}(i)} a_{ij} \tilde{\gamma}_{ji} > \frac{c_i}{\sigma} (\beta_i - \alpha_i)$$

思路

网络异构性的
Markov链刻画

分离序贯设计
大规模异构网络滤波器

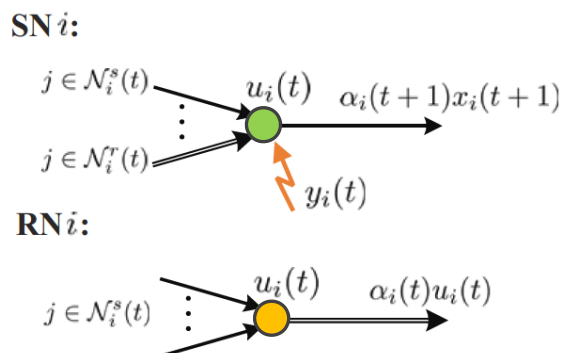
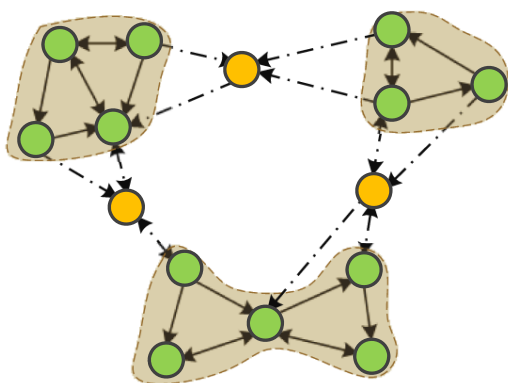
面向估计性能的网络节点部署及拓扑优化

- **创新点**：提出基于中继的多传感器融合算法与基于网络覆盖度、连通性及估计性能的网络部署和拓扑优化新方法，实现能复杂工业环境的多参数监测。
- **代表性论文**：IEEE J. Sel. Topics Signal Process., 2015；IEEE Trans. Cyber., 2013; Ad Hoc Sens. Wirel. Netw., 2012

1.2 通信受限情况下的分布式估计

目标

考虑工业环境的信道衰落、带宽等通信约束，优化设计通信约束补偿机制保证分布式估计性能



1^e Estimation of left eigenvector of Laplacian

1) Evaluate the state vector $\mathbf{z}_i(t+1)$ as

$$\mathbf{z}_i(t+1) = \mathbf{z}_i(t) + \alpha \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\mathcal{Q}(\mathbf{z}_j(t)) - \mathcal{Q}(\mathbf{z}_i(t)));$$

2) Perform the averaging step to update the estimate $\bar{\mathbf{z}}_i(t)$ as

$$\bar{\mathbf{z}}_i(t+1) = \frac{t}{t+1} \bar{\mathbf{z}}_i(t) + \frac{1}{t+1} \mathbf{z}_i(t+1);$$

2^e Approximation of centralized estimate

1) Construct a correction term $\epsilon_i(t)$ as

$$\epsilon_i(t) = \begin{cases} (\frac{1}{N\bar{\mathbf{z}}_{ii}(t_0)} - 1)x_i(t_0), & t = t_0, \\ (\frac{1}{N\bar{\mathbf{z}}_{ii}(t)} - \frac{1}{N\bar{\mathbf{z}}_{ii}(t-1)})x_i(t), & t > t_0; \end{cases}$$

2) Evaluate the state variable $x_i(t+1)$ as

$$x_i(t+1) = m_i(t) + \alpha \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} [\mathcal{Q}(m_j(t)) - \mathcal{Q}(m_i(t))],$$

where $m_i(t) = r_i(t) + \epsilon_i(t)$ is the unquantized message;

3) Perform the averaging step to update the estimate $\bar{x}_i(t)$ as

$$\bar{x}_i(t+1) = \frac{t-t_0}{t-t_0+1} \bar{x}_i(t) + \frac{1}{t-t_0+1} x_i(t+1);$$

滑动平均

思路

异构网络结构
减少长距离通信

AF放大因子
满足节点能量限制

滑动平均机制
消除量化误差

- **创新点**：提出信道衰落补偿机制与带宽受限的滑动平均机制，提高工业网络的信息可靠性。
- **代表性论文**：IEEE Trans. Signal Process. , 2015, 2016 , Automatica , 2015

1.3 基于信息交互的热轧钢板温度估计

目标

利用有限的红外传感器节点以及温度场模型，通过无线传感器节点之间的信息交互，全面估计热轧钢板不同厚度区的温度

钢板热传导模型

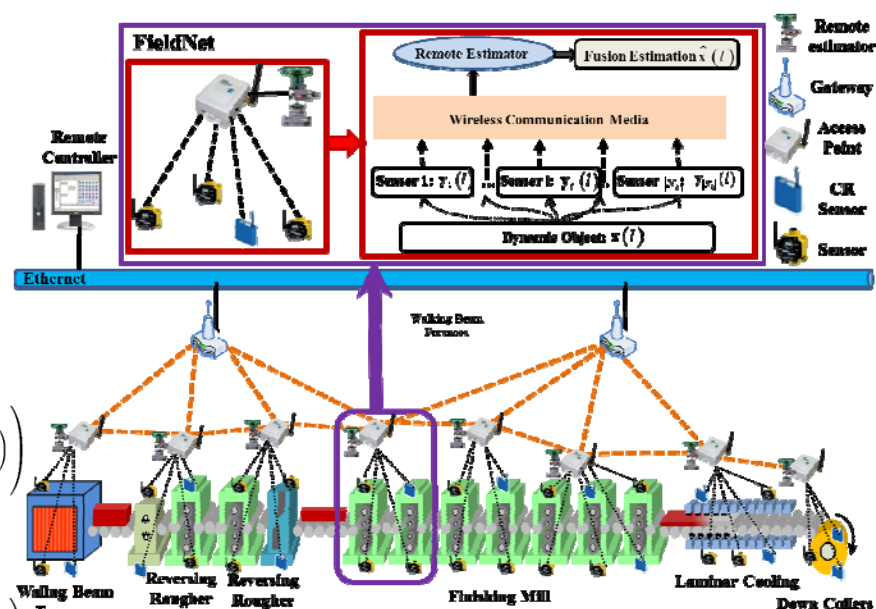
$$\frac{\partial x(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 x(z, t)}{\partial z^2}$$

钢板上表面温度模型

$$x_{\nu,j}^s(k+1) = x_{\nu,j}^s(k) + \frac{2\Delta t \lambda_{\nu,j}^s}{\Delta z^2 \rho_{\nu,j}^s c_{\nu,j}^s} \left(x_{\nu-1,j}^s(k) - x_{\nu,j}^s(k) - \frac{\Delta z \sigma_0 \varepsilon}{\lambda_{\nu,j}^s} ((x_{\nu,j}^s(k))^4 - x_{\infty}^4) \right)$$

钢板下表面温度模型

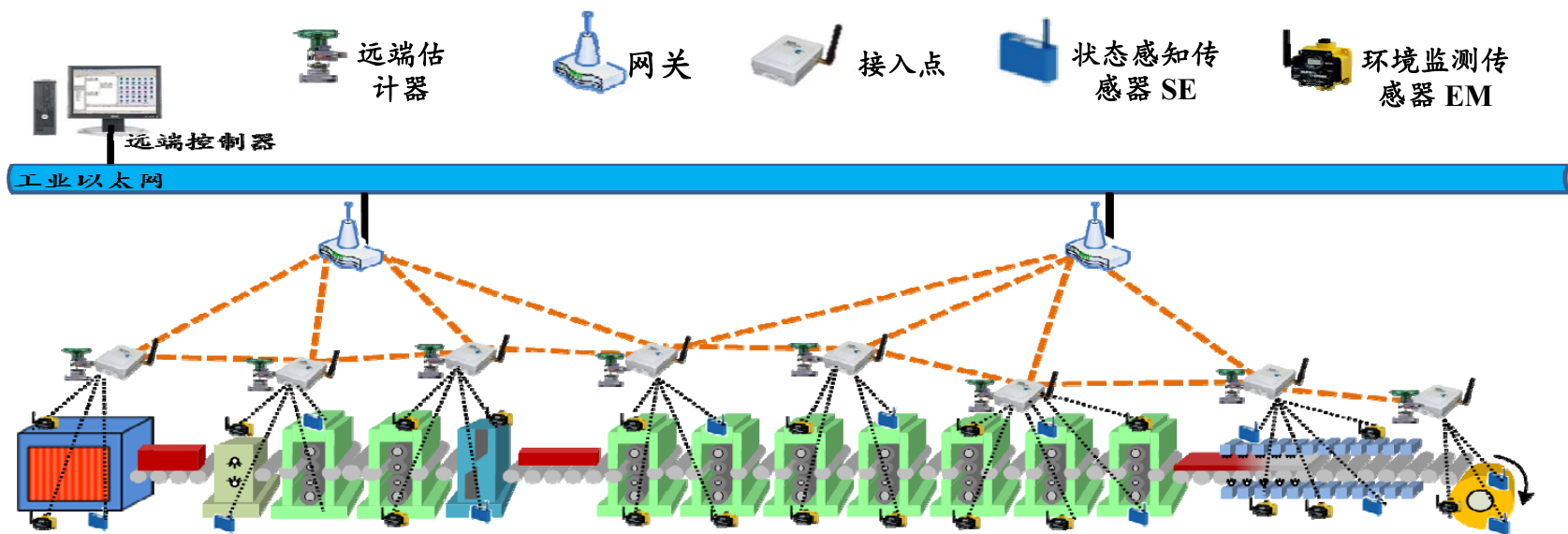
$$x_{\nu,j}^s(k+1) = x_{\nu,j}^s(k) + \frac{2\Delta t \lambda_{\nu,j}^s}{\Delta z^2 \rho_{\nu,j}^s c_{\nu,j}^s} \left(x_{\nu-1,j}^s(k) - x_{\nu,j}^s(k) - \frac{\Delta z \sigma_0 \varepsilon}{\lambda_{\nu,j}^s} ((x_{\nu,j}^s(k))^4 - x_{\infty}^4) \right)$$



- **创新点**：设计了异构网络中的温度状态一致性估计算法；可以实现状态估计的渐近无偏性与概率为“1”的一致性
- **代表性论文**：IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2015

代表性工作2：网络系统的信息传输

- 问题描述
1. 如何应对工业现场电磁干扰？
 2. 如何突破ISM频段限制，提升网络容量？
 3. 如何保证多跳传输实时性与可靠性？



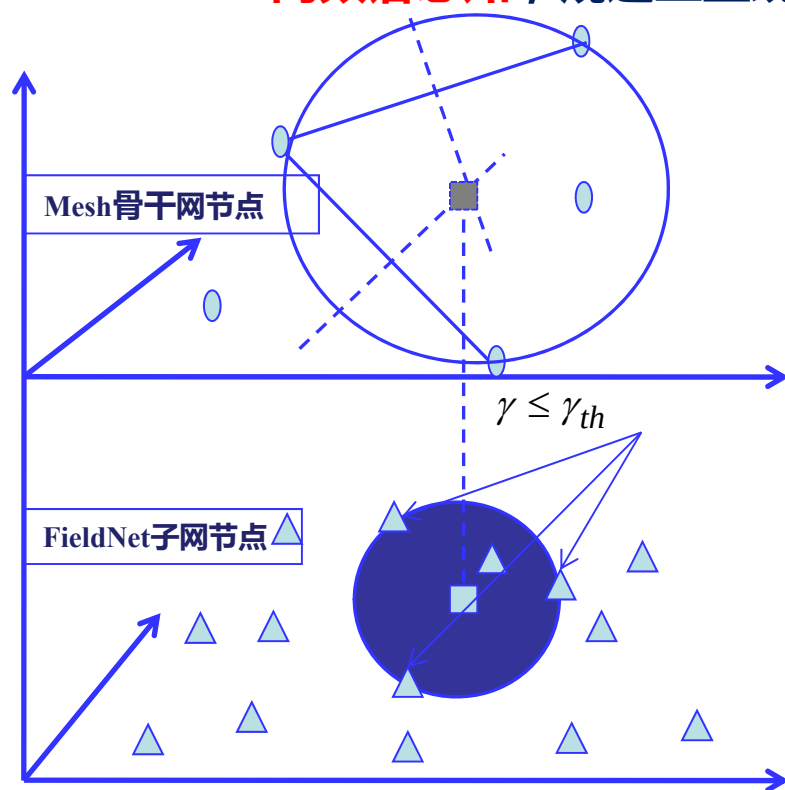
总结

- 提出工业认知无线技术，有效规避工业现场电磁干扰；
- 动态频谱接入技术，实现资源与干扰受限情况下的QoS；
- 时、空、频多域联合，跨层设计协议，优化多目标

2.1 面向感知和控制的频谱发现

目标

工业现场设备层的FieldNet与网络层Mesh骨干网有效实现**精确快速协同频谱感知**，规避工业现场电磁干扰



■ 等效干扰源 □ 干扰源
○ Mesh节点 ▲ FieldNet节点

- ✓ Mesh骨干网对干扰源进行一级感知定位，根据**统计特性**提供**认知导频**
- ✓ FieldNet子网根据导频信息，实现**轻量级精确感知**
- ✓ 分别利用**信息熵和循环谱特征**，来检测识别干扰及强度

创新点：分别针对工业现场**周期性和突发性**干扰源，采用长期统计和短期快速频谱感知相结合的新方案

代表性论文：

Systems and Control Letters, 2011

IEEE Trans. Circuits & Systems II, 2011

2.2 频谱感知与接入的联合设计

目标

考虑频谱感知误差的基础上实现**频谱接入**，提高频谱资源利用率

$$\max \quad \sum_i \sum_k (B'_{i,k} \log(\bar{\gamma}_{i,k}) - 1/a_{i,k})$$

网络吞吐量最大

$$\text{s.t.} \quad \bar{\gamma}_{i,k} \geq \gamma_{th}, \forall i, k$$

认知节点SINR约束

$$\sum_i G'_{ki} p_{i,k} a_{i,k} \leq T_k, \forall k$$

干扰退避

$$\sum_k a_{i,k} \leq 1, \forall i$$

信道选择约束

$$a_{i,k} \in (0, 1], p_{i,k} \in [0, p_{max}]$$

- ✓ 避免频谱感知“0-1”结果的误差影响，考虑多个无线认知节点的**累积干扰**
- ✓ 定义**位置感知误差**的概念，设置感知信息可靠度来降低频谱感知误差对信道选择和功率控制算法的影响

创新点：设置**感知信息可靠度**来降低频谱感知误差对认知无线网络跨层设计的影响

代表性论文：

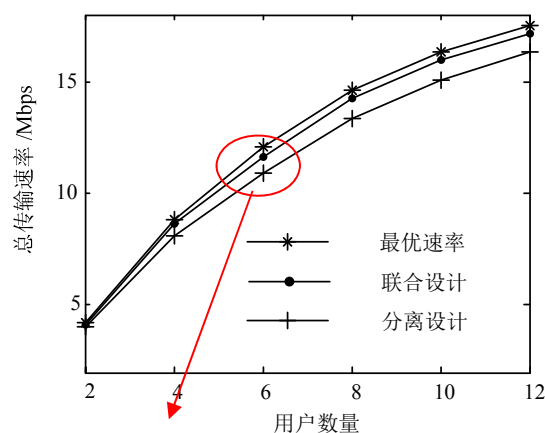
Ad Hoc Networks (Elsevier), 2011

Wireless Comm. & Mobile Computing, 2015

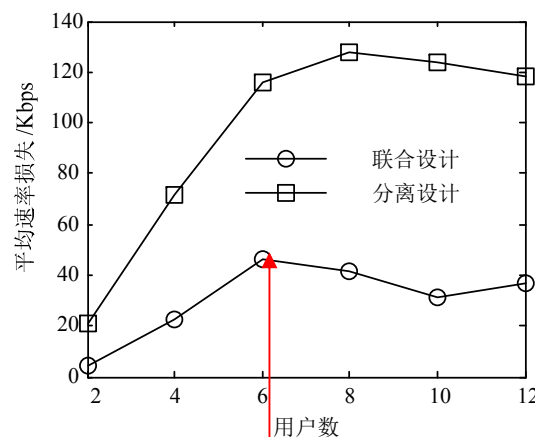
2.3 保证可靠性的合作传输设计

目标

针对工业生产线无线监测网络的链式结构，利用**合作中继策略**提高**传输可靠性**



联合设计更接近最优的网络总传输速率



速率损失减低

中继	用户(最优解)	用户(联合设计)	用户(分离设计)
1	7,10	3,7,10	1,3,7,10
2	1,2,3,4,5,6,8,9	1,2,4,5,6,8,9	2,4,5,6,8,9

联合设计的中继选择更精确

创新点：采用纳什议价策略 (NBS) 和动态规划方法，设计了联合中继选择和功率控制算法、带宽分配算法

代表性论文：

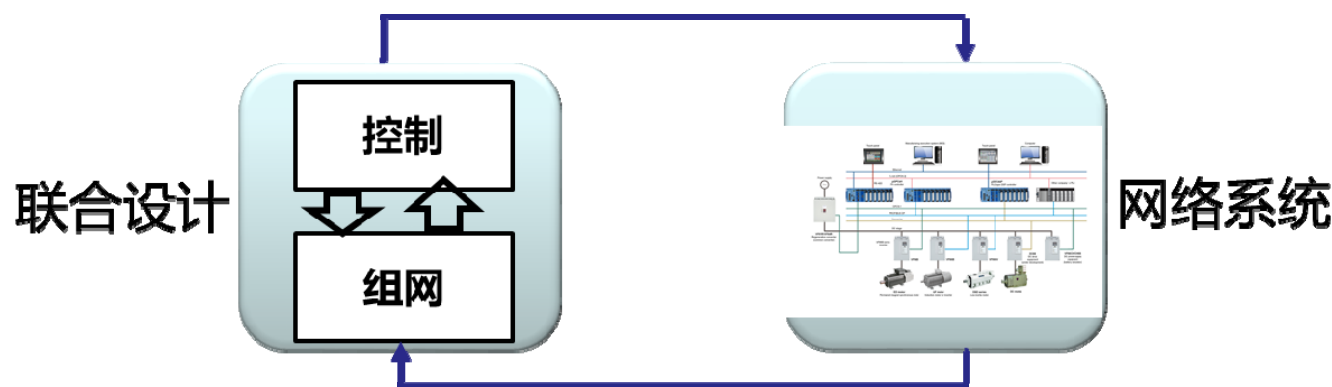
Wireless personal comm. , 2010
Int. J. of Comm. Systems , 2012

IEEE T VEH TECHNOL, 2012
Wireless Networks, 2013

代表性工作3：网络系统的控制

问题描述

1. 如何利用反馈思想，分布式设计网络协议，提升整体性？
2. 如何进行控制与组网的联合设计，协调控制需求与通信资源限制，实现整体优化？



总结

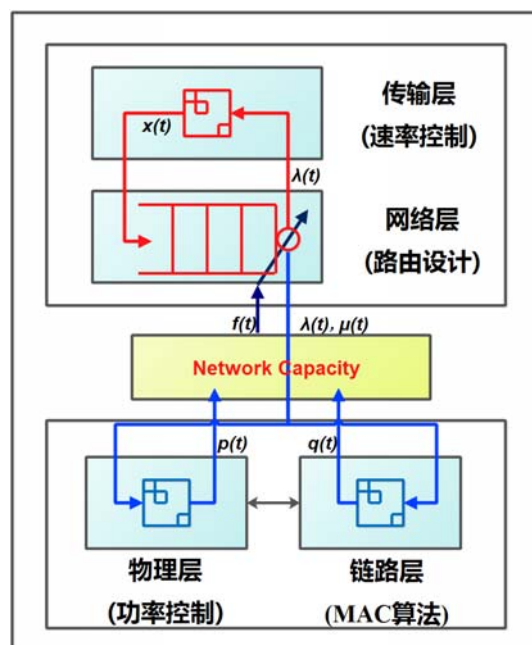
- 引入层间反馈，提出跨层分解分布式协议设计框架；
- 联合设计信息交互策略与资源分配算法实现渐进最优；
- 设计在线算法，实现随机最优性与稳定性的折中

3.1 基于反馈的组网设计

问题

如何解决多种网络频谱
空间复用和干扰抑制？

节点生存期与吞吐量最大
化问题—**NP-Hard问题**

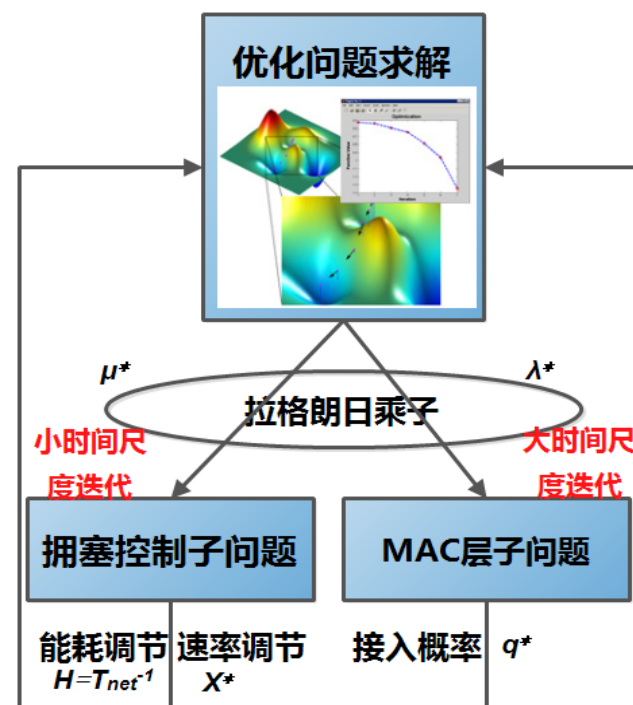


传输层、MAC层、物理层联合优化

创新：利用反馈抑制干扰，利用控制调节速率

代表性论文：

IEEE JSAC08, TVT 2010 , 2012

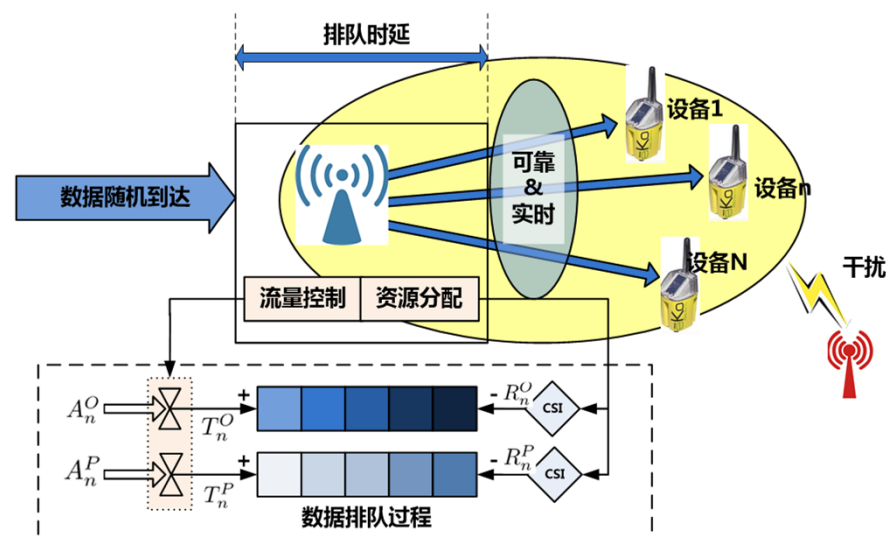
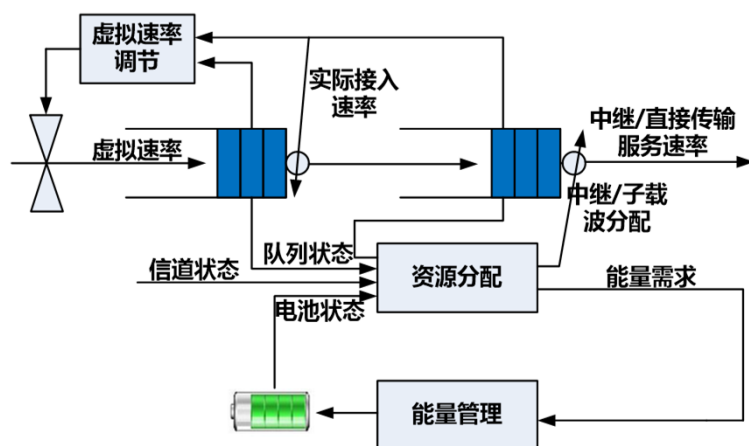


创新：提出具有信道意识的自适应随机接入方法，基于多尺度迭代达到Nash均衡

3.2 信息交互与资源调控联合设计

目标

**根据控制性能需求，研究通信资源受限情况下的信息传输；
分布式协调控制与传输子问题，实现整体优化。**



- 原问题分层解耦子问题
- 基于信息的能源管理与具有能耗意识的传输

- **满足控制性能要求的适变传输**

创新点：揭示了网络系统整体的控制算法与组网协议之间的强耦合性，分布式协同子问题，实现整体优化

代表性论文： IEEE Syst. J 2016, IEEE TPDS 2016.

三、平台构建、应用案例

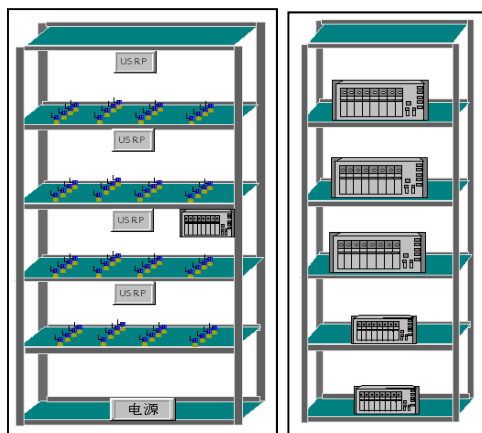
硬件软件开发

- 工业无线节点开发
- 工业认知节点开发
- VC、组态软件开发
- Labview软件开发



算法验证

- 异构组网
- 合作频谱感知
- 认知网络安全验证
- 频谱分配，合作中继



系统测试

- 干扰环境下网络测试
- 工业无线综合测试平台
- 污水处理现场测试



基于软硬件平台开发，进行了协议及算法的功能验证，构建了可控的工业无线网络系统测试平台

硬件设计—无线仪表开发

具有自主知识产权的
MicroRF-Z01系列节点仪表



测试证书：

MicroRF-Z01系列无线仪表通过产品应用测试

秦皇岛市计量测试研究所 QinHuangDao Institute of Meas.		秦皇岛市计量测试研究所 QinHuangDao Institute of Meas.	
测 试 证书编号: 4201000832		测 试 证书编号: 4201000832	
委托单位: 上海交通大学		委托单位: 上海交通大学	
器具名称: 无线电导		器具名称: 无线电导	
规格型号: CC602		规格型号: CC602	
出厂编号: 2#		出厂编号: 2#	
制造单位: 上海交通大学		制造单位: 上海交通大学	
测试日期: 2010 年		测试日期: 2010 年	
地址(Add): 秦皇岛市河北大街西段90号		地址(Add): 秦皇岛市河北大街西段90号	
电话(Tel): 0335-30835095		电话(Tel): 0335-30835095	
传真(Fax):		传真(Fax):	
第 1 页 共 1 页		第 1 页 共 1 页	

秦皇岛市计量测试研究所 QinHuangDao Institute of Meas.		秦皇岛市计量测试研究所 QinHuangDao Institute of Meas.	
检 定 结 果		检 定 结 果	
在25℃标准条件下测量得到如下数据:		在25℃标准条件下测量得到如下数据:	
1. 常数校准	量程200us/cm时常数: 0.908	1. 常数校准	量程200us/cm时常数: 0.908
	量程200us/cm时定数: 1.054		量程200us/cm时定数: 1.054
2. 引用误差	量程200us/cm时: 0.2%	2. 引用误差	量程200us/cm时: 0.2%
	量程200us/cm时: 0.2%		量程200us/cm时: 0.2%
3. 仪器重复性	量程200us/cm, 量程为0.908时标准偏差: 0.002	3. 仪器重复性	量程200us/cm, 量程为0.908时标准偏差: 0.002
	量程200us/cm, 常数为1.054时标准偏差: 0.016		量程200us/cm, 常数为1.054时标准偏差: 0.016
以下空白		以下空白	
注: 1. 我所仅对加贴“秦皇岛市计量测试研究所检定专用章”完整证书负责;		注: 1. 我所仅对加贴“秦皇岛市计量测试研究所检定专用章”完整证书负责;	
2. 本证书的检定结果仅对检定仪器有效;		2. 本证书的检定结果仅对检定仪器有效;	
3. 请妥善保管此证书。		3. 请妥善保管此证书。	
未经授权, 不得部分复印本证书		未经授权, 不得部分复印本证书	
第 2 页 共 2 页		第 2 页 共 2 页	



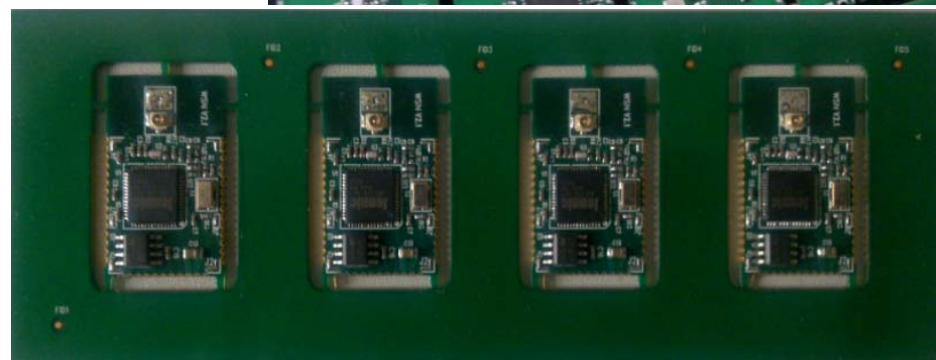
硬件设计—工业无线监控节点设备

具体指标	预期	实际指标
通讯距离	100m	> 200m(可调)
发送功率	0dbm	<20dbm(可调)
传输量	100kbps	<2Mbps(可调)
(百米)功率功耗	27mA	<25mA
频率范围	2400-2483.5MHZ	2400-2483.5MHZ
灵敏度	-92dBm	-92dBm

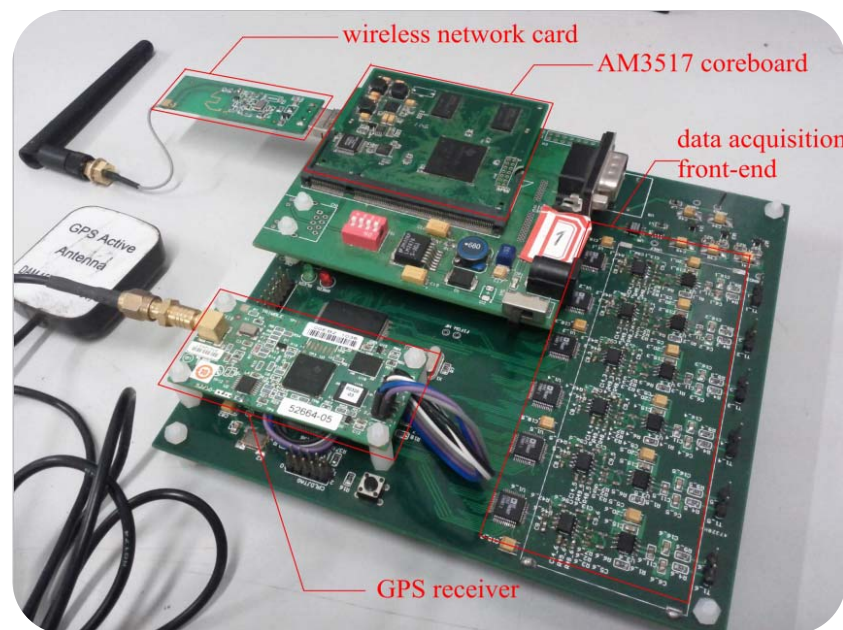
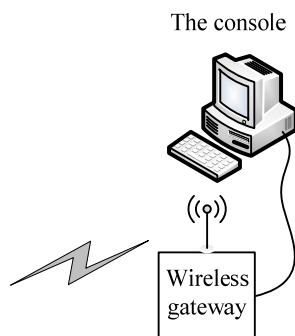
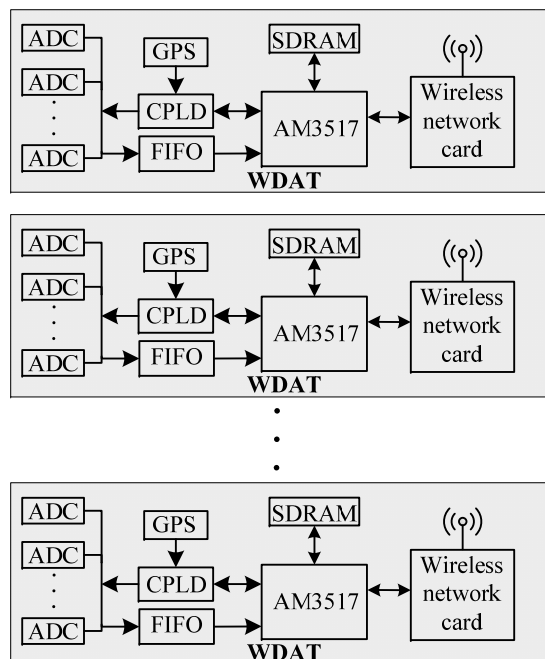


基于CC2530/JN5148/NA5TR1的普通无线节点

- 低功耗、低成本
- 支持无线位置感知
- 支持DSSS与CSS调制方式
- 支持开发定制网络协议栈
- 支持802.15.4标准
- 能实现自主组网功能

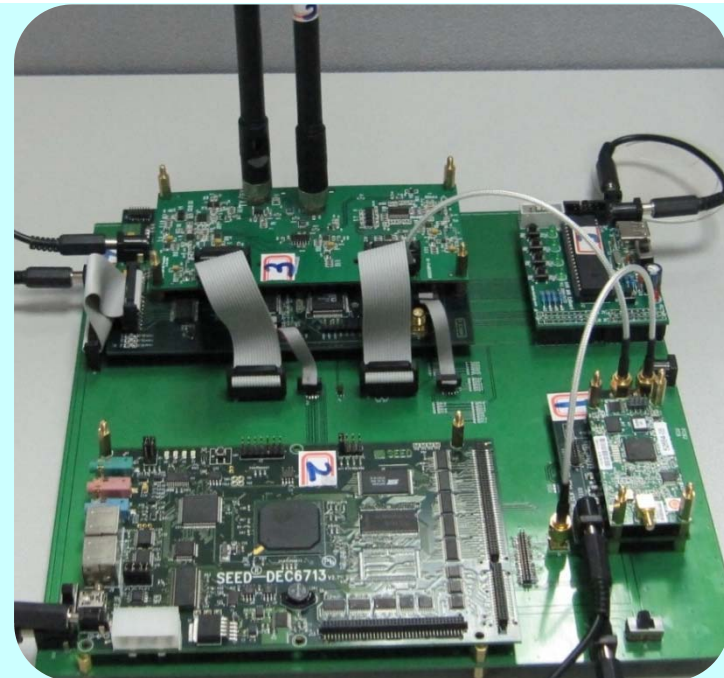
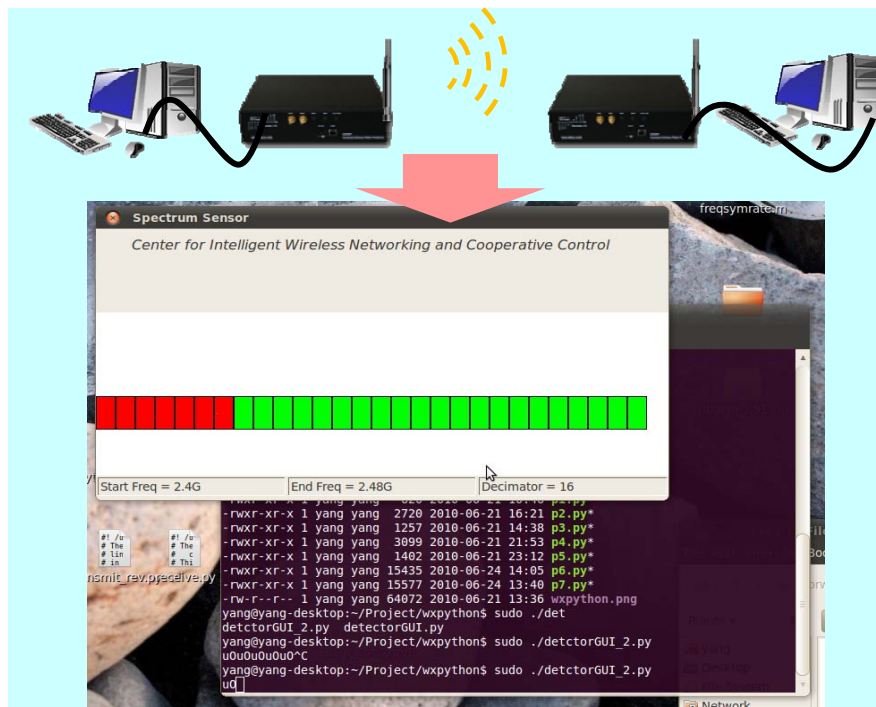


硬件设计—工业无线监控节点设备



- 针对轧制生产线**连续信号监测**研发的无线监控节点
- 主要完成工业连续信号（振动，位移，压力等）采集，为**故障诊断**，**振动特性建模**，**实时监控**提供精确数据源
- 射频前端支持**150M高速无线透明传输**
- 采用Cortex-A8嵌入式架构，在线完成前端信号的**自适应压缩**
- 可通过外部PPS信号实现**多节点，多通道**的同步采集

硬件设计—无线认知节点



认知无线电平台

- USRP/PXI认知无线电平台
- 能量感知，循环谱特征感知
- 信道切换，自适应跳频

25

认知无线节点

- 覆盖整个ISM 2.4G频段
- 支持多速率可调，多种调制方式
- 支持宽频通信，符合802.15.4中的扩频通信的标准
- 自适应调频

软件设计—基于Labview软件平台

LabVIEW
FPGA

RFSA Driver

RFSG Driver

USRP Driver

NI RIO

Vision Assistant

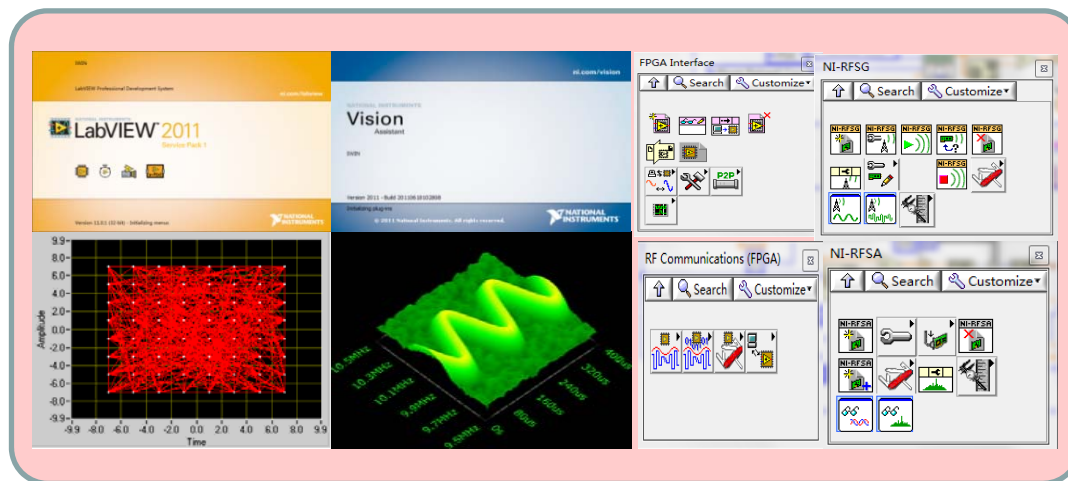
Modulation ToolKit

VISA Driver

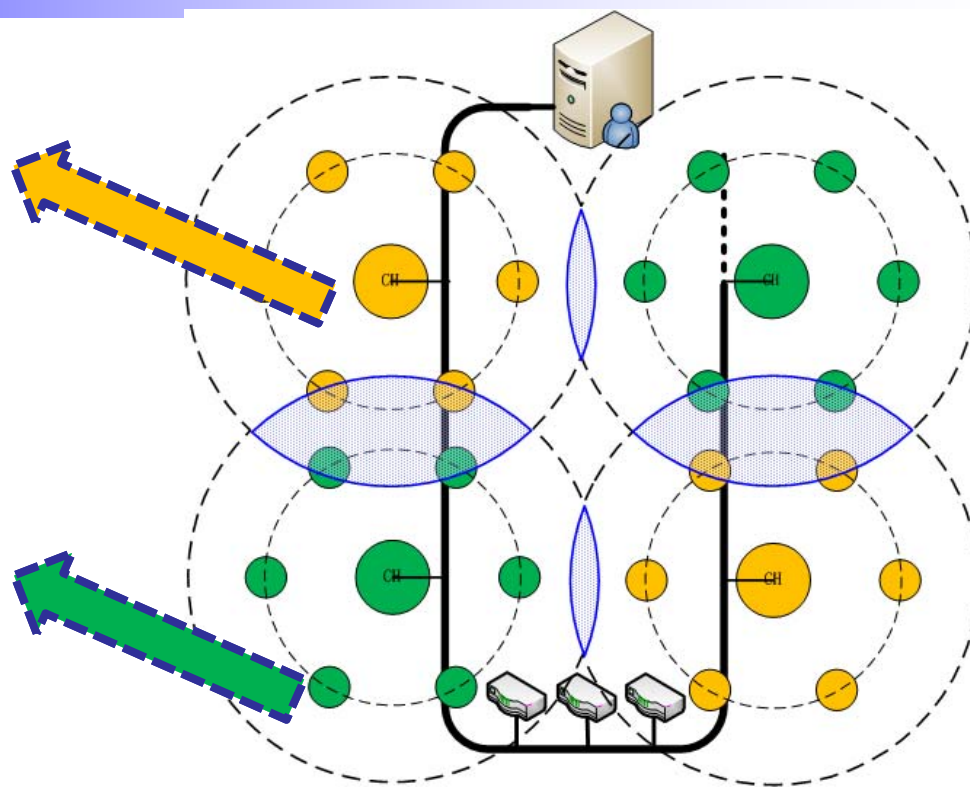
RF Communication(FPGA)

Spectrum Measurement
ToolKit

LabVIEW Graphical Development Environment



组网验证—协议转换组网测试



异构无线组网系统

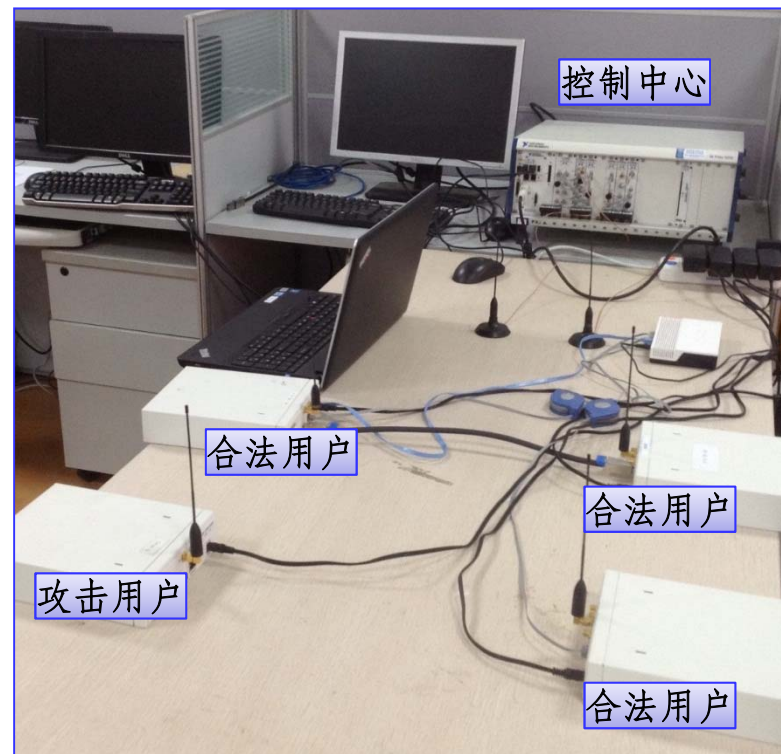
- 主节点支持光纤以太网
 - 主节点具有交换机功能
 - 通过高速SPI总线连接无线节点
 - 无线节点支持高功率射频
 - 无线射频覆盖范围2Km，功率
- 软件可调
 - 无线数据传输速率可调，最大支持2M
 - 兼容模式支持802.15.4协议
 - 节点支持频分复用

算法验证—频谱感知，认知网络安全



合作频谱感知实验验证：

- 针对单个节点无法准确认知整个FieldNet网络中干扰情况的问题
- 采取**合作机制**利用多个节点实现外来干扰检测
- 电磁环境合作分析，实现**移动干扰定位**



工业认知网络安全实验验证：

- 针对攻击用户伪装合法用户**干扰正常通信**问题
- 将信道请求与分配转化为谜题解答问题，大幅增加攻击用户的解谜难度，降低攻击者**80%干扰能力**

算法验证—频谱分配，合作中继



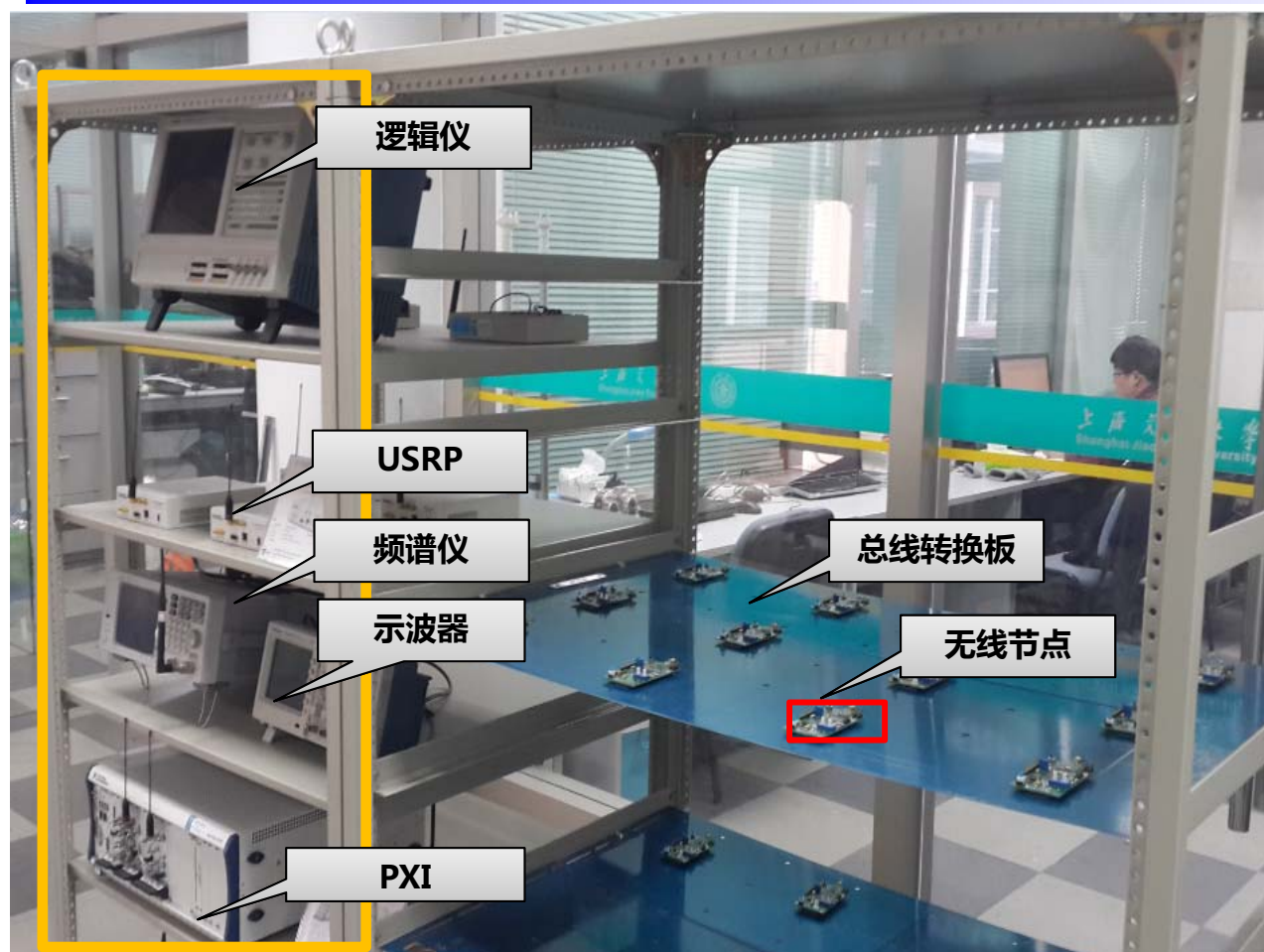
基于频谱感知的自适应跳频平台：

- 能量检测实现干扰快速感知
- 自适应跳频规避无线干扰
- 中继实现多跳传输
- 视频传输模拟高带宽需求



在实验室模拟干扰条件下，利用认知无线电技术实现了宽带视频数据可靠传输，切换时延10ms,传输速率2Mbps

工业无线网络综合验证测试平台

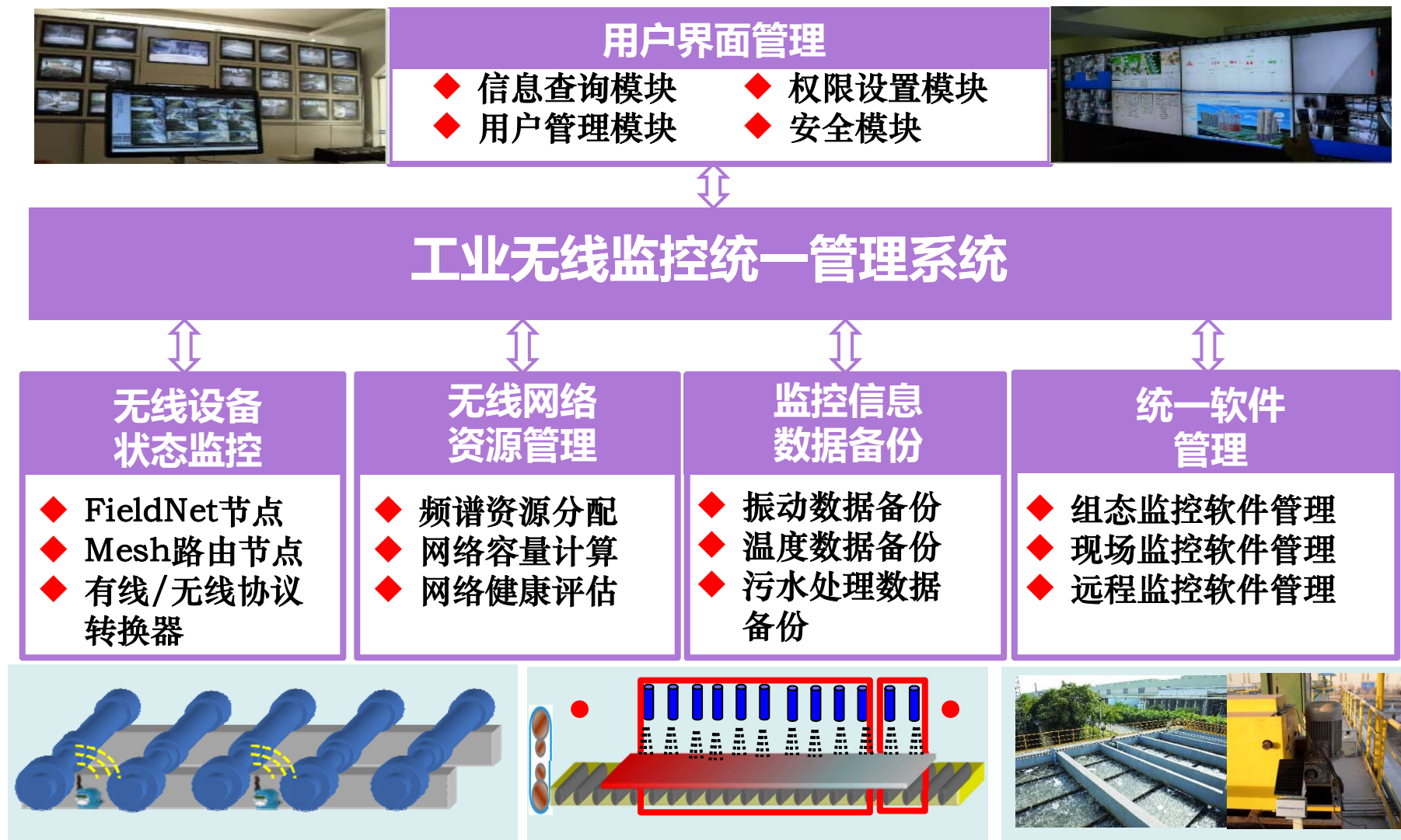


平台特点：

- 模拟工业现场噪声环境实时显示网络传输数据、路由表、信噪比以及丢包率
- 实时显示节点功率消耗
- 支持MODBUS协议，支持高速以太网连接
- 支持2.4GHz的 IEEE 802.15.4
- 实时频谱环境认知，动态频谱分配
- 动态路由协议验证
- 节点规模达到60个

多节点，立体化，可重配，环境可控，实验可重复的综合测试平台

构建工业无线监控统一管理平台



应用案例1：无线污水监控系统

已有工厂有线监控网络：现场总线

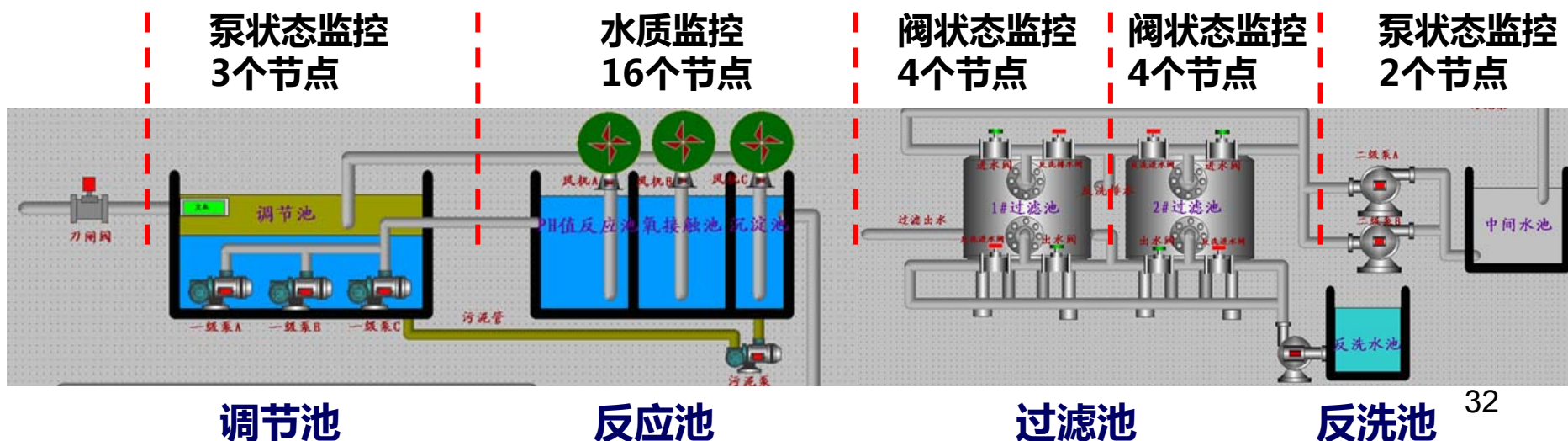
路由层网络：
MESH

- 网络配置：
- 子网接入点：2+2备份
 - 有线无线转换网关：2+2备份

设备层网络：FieldNet 无线子网

热轧污水处理系统无线监测网络配置方案

- 有线无线转换网关：4
- 子网接入点：4
- PH值变送器：8
- COD变送器：4
- 电导变送器：4
- 状态监控：13



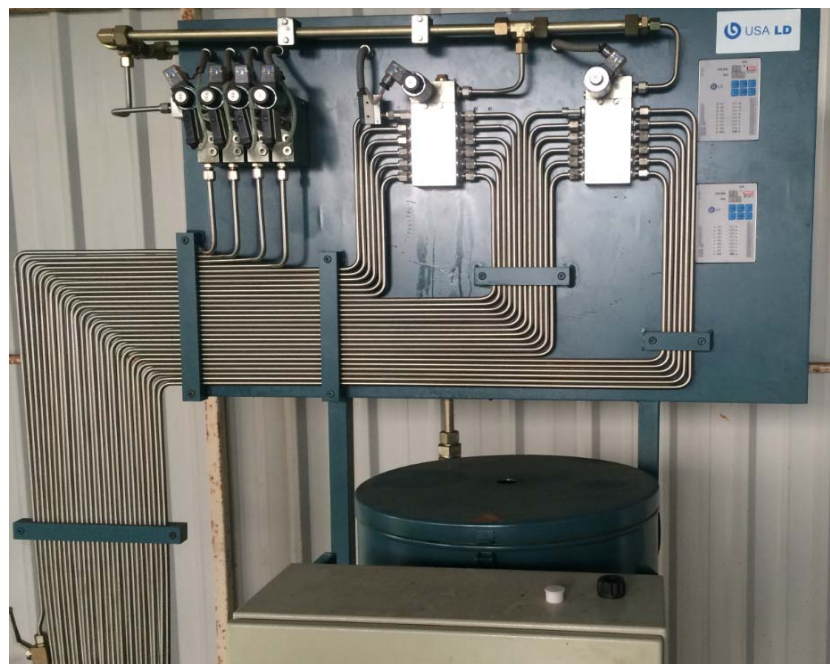
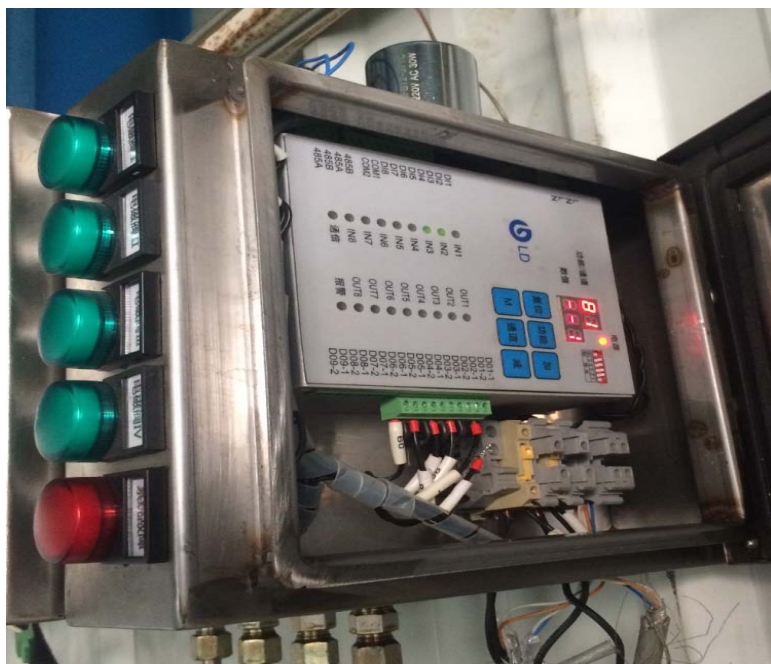
以污水处理监控系统为例

成果名称	数量	描述
无线通讯模块	63个	无线数传，实现自组网，防雷击设计
工业总线/ 无线协议的转换模块	2个	实现对现有工业协议所传输数据转换为无线通讯协议传输的数据
自组织、低功耗的 无线通讯协议软件	1套	MicroRF协议栈设计
远距离无线通讯模块	10只	可靠性、实时性的低功耗无线模块
系统监控软件	3套	工业组态、现场及远程监控软件

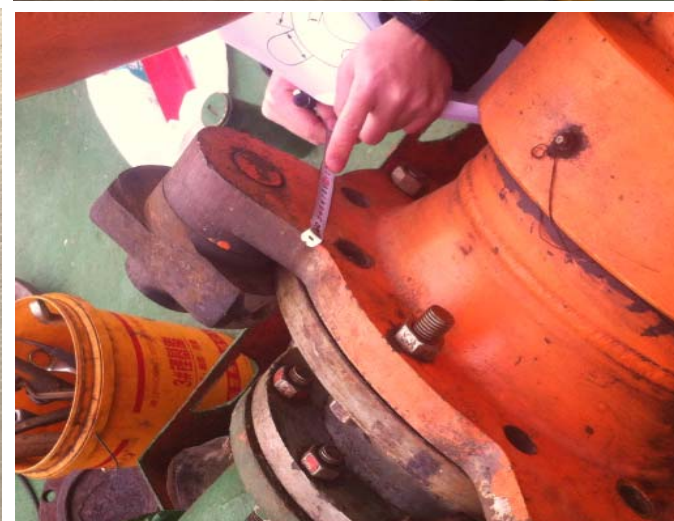
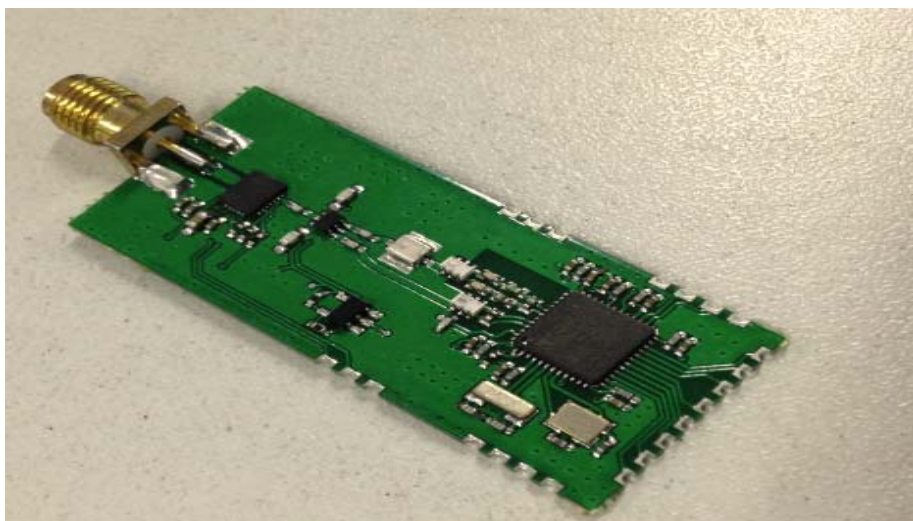
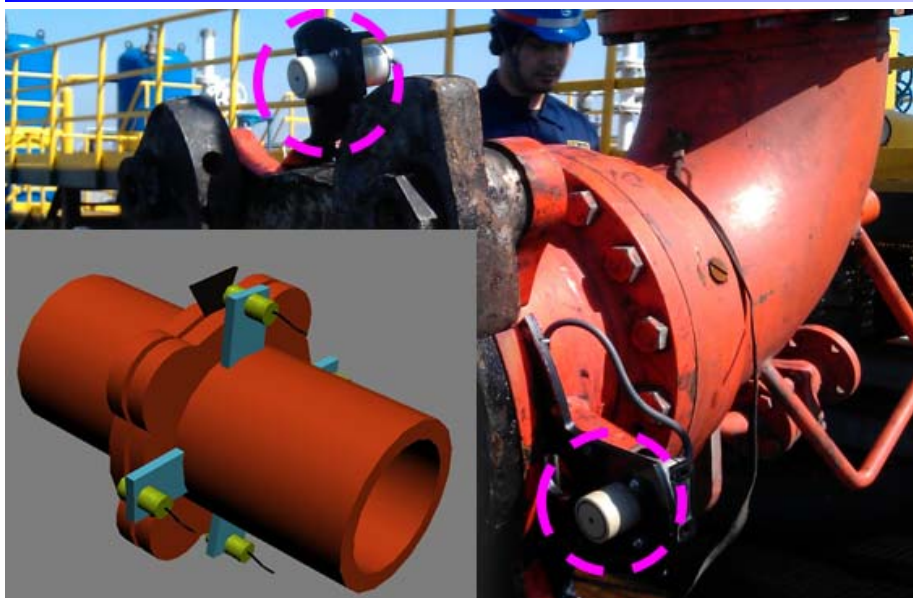
- 提高了污水处理系统的管理效率，降低了管理维护费用



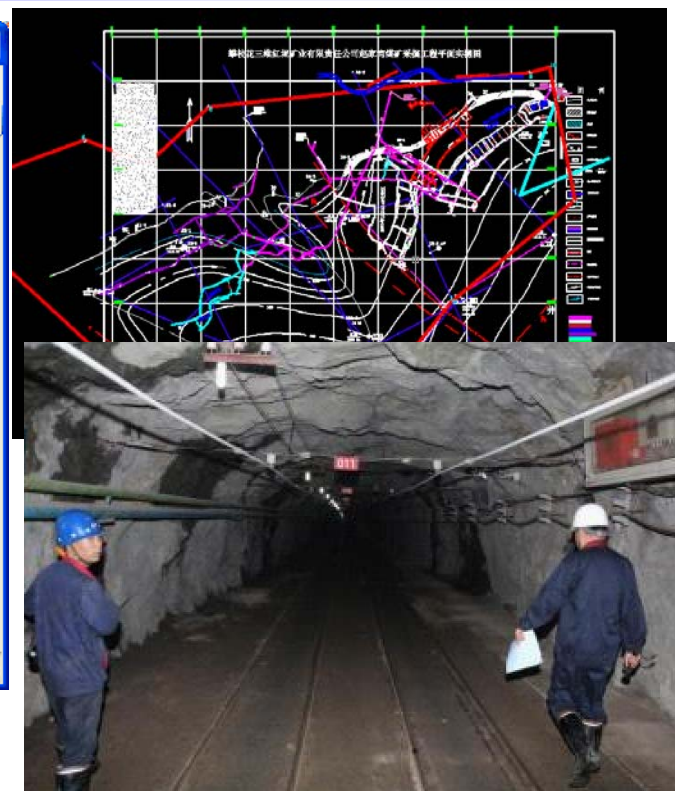
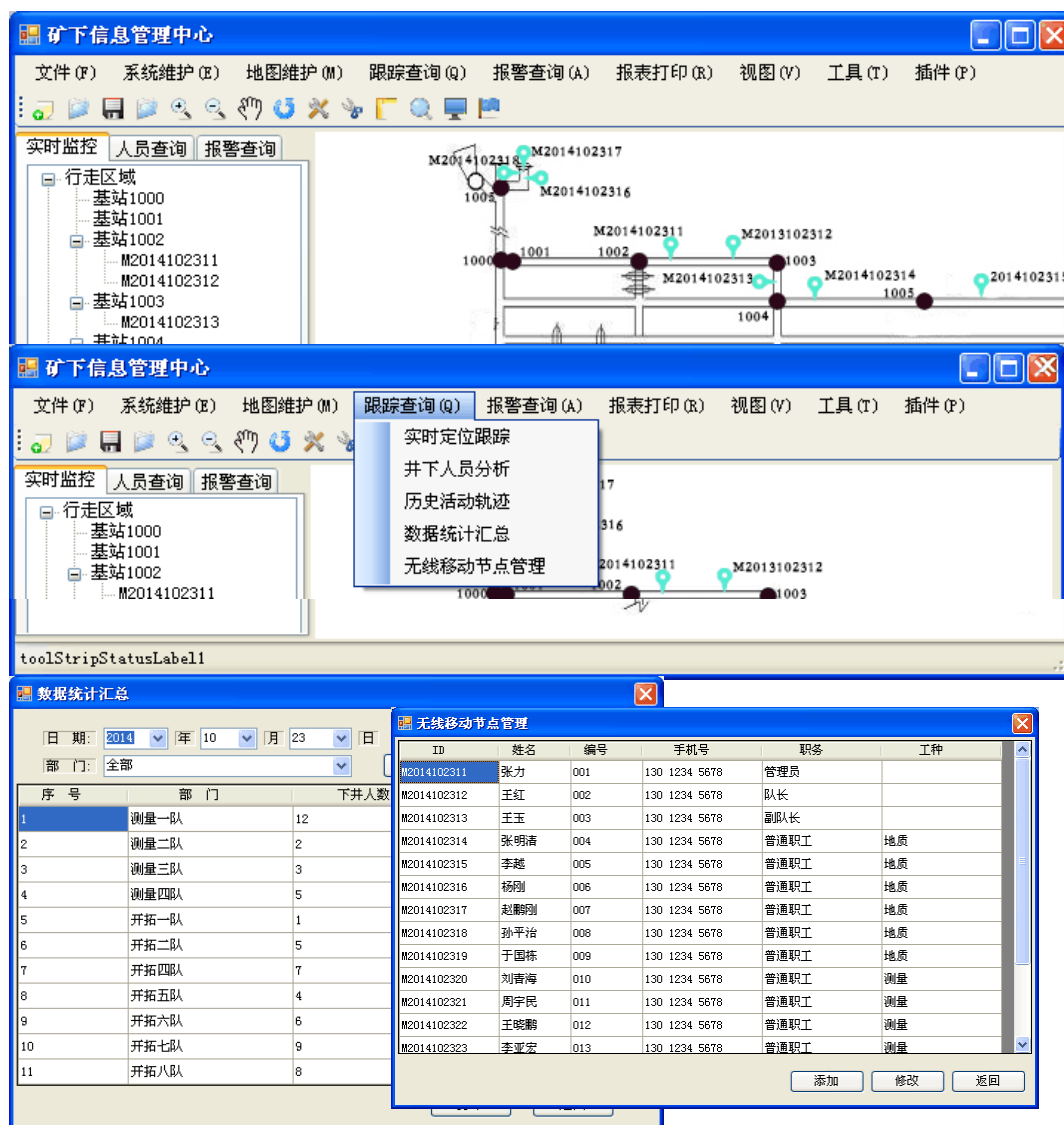
应用案例2：无线智能注油监控系统



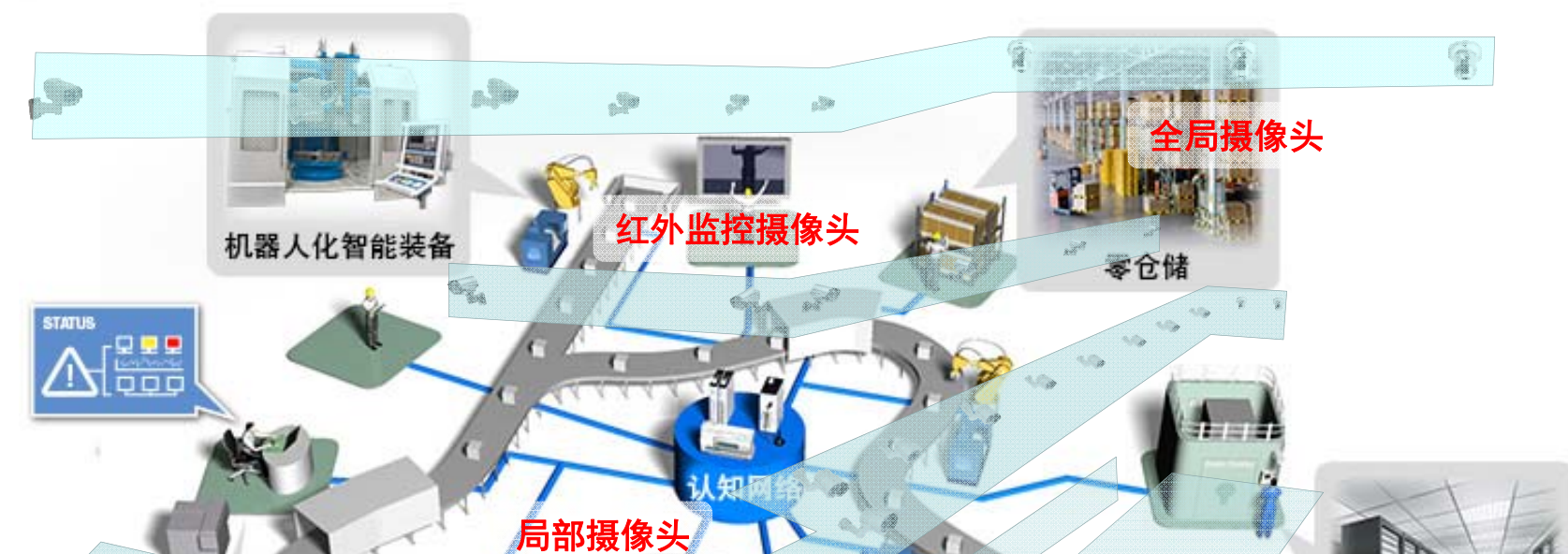
应用案例3：港口输油臂漏油无线监测系统



应用案例4：矿下高精度定位系统



四、进行工作-感知、传输、控制与优化一体化的工业网络系统



感传一体：泛在信息环境下的交互特征获取、共享与传输

控制优化：工业网络环境下控制与优化的一体化设计

协同设计：感知、传输、控制与优化的联合实现

实现

面向服务型
工业软件
工业认知网络安全

1. 工业网络系统组网理论与技术

- 研究基于软件定义的、扁平化、统一管理的新
型工业控制网络架构
- 研究基于工业物联网泛在感知理论，多域资源
约束情况下的网络自适应感知与资源优化配置
方法
- 开发多种工业有线、无线网络的兼容性与统一
标准化技术

实现感知网、控制网、互联网的全面互联集成

2. 工业网络系统控制与优化

- 研究工业网络系统建模技术，建立知识、数据与模型融合的工业网络系统模型体系
- 研究网络系统状态在线估计，提出难测工艺参数与性能指标的软测量与预报方法
- 研究基于大数据、事件模型的多目标实时优化方法，解决网络系统中多目标优化控制与可实现难题

实现网络系统集成优化与管控一体

3. 网络系统多工业机器人协同控制

- 基于工业网络多机器人**控制策略生成与任务分解**
- 泛在信息环境下的机器人群智**视觉交互理论与伺服控制技术**
- 表征空间下工业机器人可完成任务的**定量评估理论与智能机器人系统的可重配置技术**

实现网络系统非结构环境多机器人协同完成复杂任务

4. 工业网络系统协同设计理论

- 建立信息物理融合模型，揭示网络系统信息与物理交互特性及互动机理
- 研究网络系统组网、控制与优化的自治与协调以及面向工业实现的子系统协同设计与集成
- 设计层次化的安全响应控制，建立网络系统的系统级纵深防御体系

实现网络系统协同设计与一体化安全防护

共性关键技术

1. 渗透在生产制造和管理各个环节的**IT技术及其集成**，包括工业认知网络实践技术、分布式云计算的工业实现、基于Web2.0的工业互联网技术、物理信息融合系统的工业实践；
2. 垂直集成和横向集成的**工业信息技术**，包括基于互联互通的设备集成与工业互联网的整合技术、机器与机器之间的通信（M2M）、基于统一架构（OPCUA）的垂直集成语义互操作性的实现技术等；
3. **软件技术**，包括面向分布式自动化的各类高效可靠的模块化软件开发平台、应用于分布式自动化中的SOA和多智能体系统的软件技术等；
4. **智能化机电功能模块**的设计、开发和实践；
5. 下一代**工业辅助系统技术和标准化技术**，包括基于增强实境技术的虚拟现实技术、人机交互技术等；
6. **模式识别技术**用于产品质量自动检测；
7. **工业系统安全技术**。

敬请批评指正
谢谢！

