

# 复杂设备故障诊断与维护

王郅维 (Wang Danwei), 教授

新科工程-南洋理工大学企业实验室主任  
电机与电子工程学院  
南洋理工大学, 新加坡

<http://www.ntu.edu.sg/home/edwwang>



# 提纲:

1. 工业 4.0 和中国制造2025
2. 高值复杂设备的完整性与可靠性
3. 远程设备的健康监测与维护
4. 系统故障监测方法
5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测

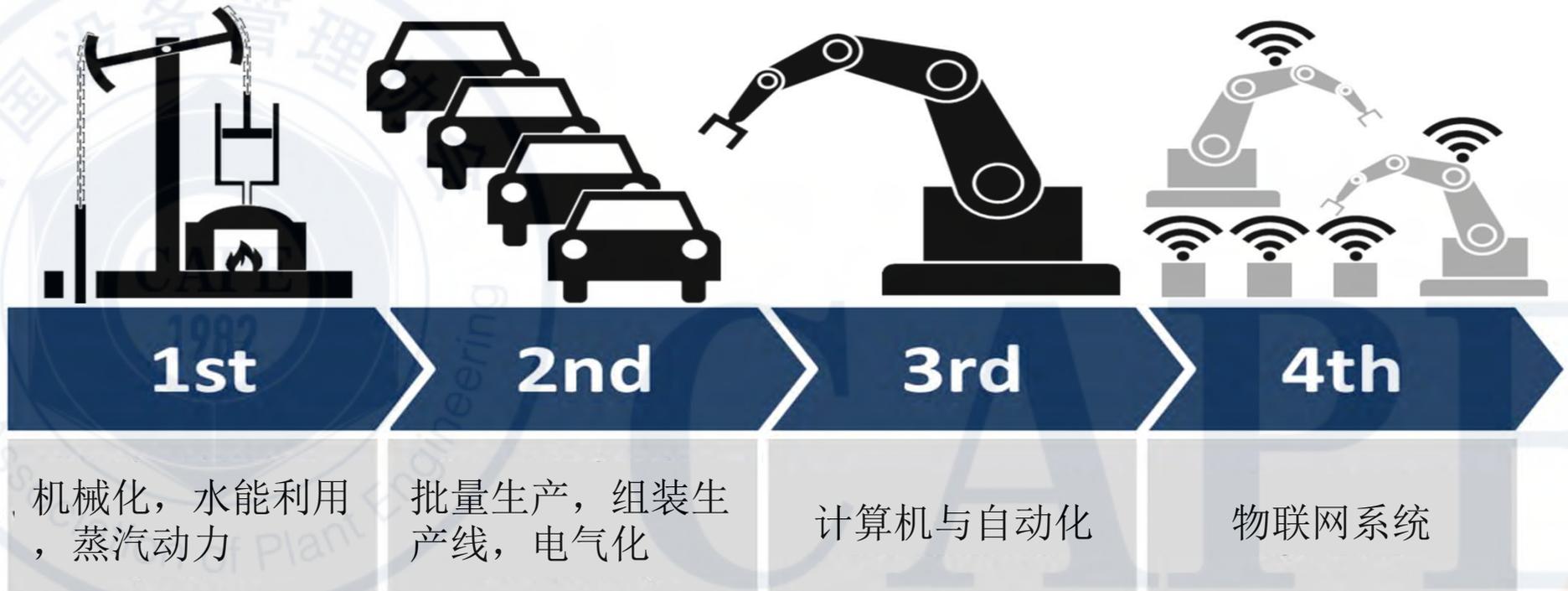
# 提纲:

## 1. 工业 4.0 和中国制造2025

2. 高值复杂设备的完整性与可靠性
3. 远程设备的健康监测与维护
4. 系统故障监测方法
5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测



# 工业4.0



# 工业4.0的影响

1. 服务业与商业模式
2. 可靠性与持续生产力
3. 信息安全
4. 设备安全性
5. 产品的生命周期
6. 产业价值链
7. 工人的学历与技能
8. 社会经济因素
9. ....



# 中国制造2025

2015年政府工作报告提出，要实施“中国制造2025”，坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展，加快从制造大国转向制造强国。在这一过程中，**智能制造是主攻方向**，也是从制造大国转向制造强国的根本路径。

## 10大重点领域



# 智能制造:智能技术

1. 新型传感技术
2. 模块化、嵌入式控制系统设计技术
3. 先进控制与优化技术
4. 系统协同技术
5. 故障诊断与健康维护技术——在线或远程状态监测与故障诊断、自愈合调控与损伤智能识别以及健康维护技术，重大装备的寿命测试和剩余寿命预测技术，可靠性与寿命评估技术。
6. 高可靠实时通信网络技术
7. 功能安全技术—智能装备硬件、软件的功能安全分析、设计、验证技术及方法，建立功能安全验证的测试平台，研究自动化控制系统整体功能安全评估技术。
8. 特种工艺与精密制造技术
9. 识别技术



# 提纲:

1. 工业 4.0 和中国制造2025
- 2. 高值复杂设备的完整性与可靠性**
3. 远程设备的健康监测与维护
4. 系统故障监测方法
5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测

# 复杂系统的故障案例



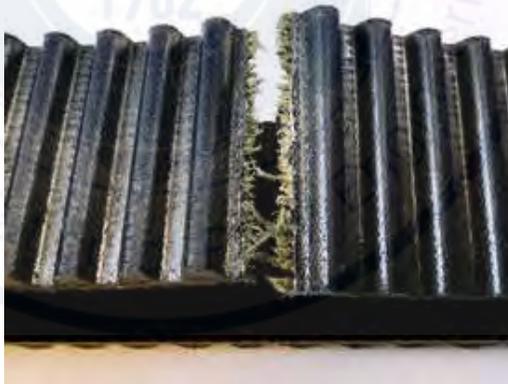
轴承损坏



齿轮箱损坏



电机损坏



传送带断裂



液压油泄漏



传感器故障

# 复杂系统的故障案例



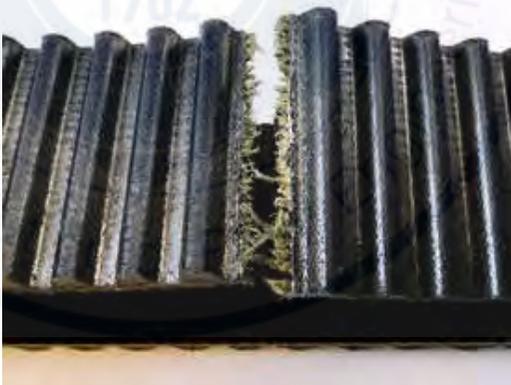
轴承损坏



齿轮箱损坏



电机损坏



传送带断裂

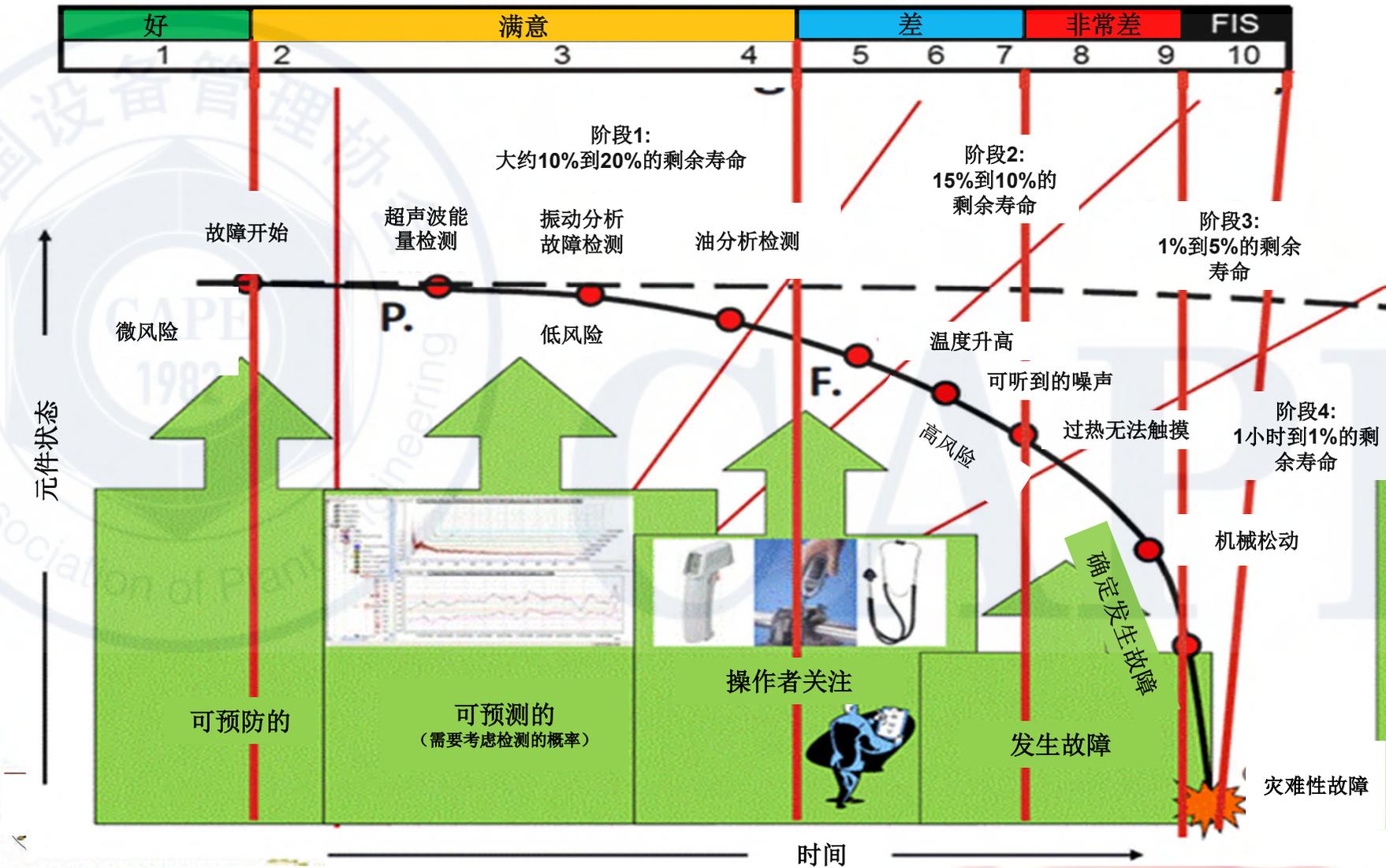


液压油泄漏

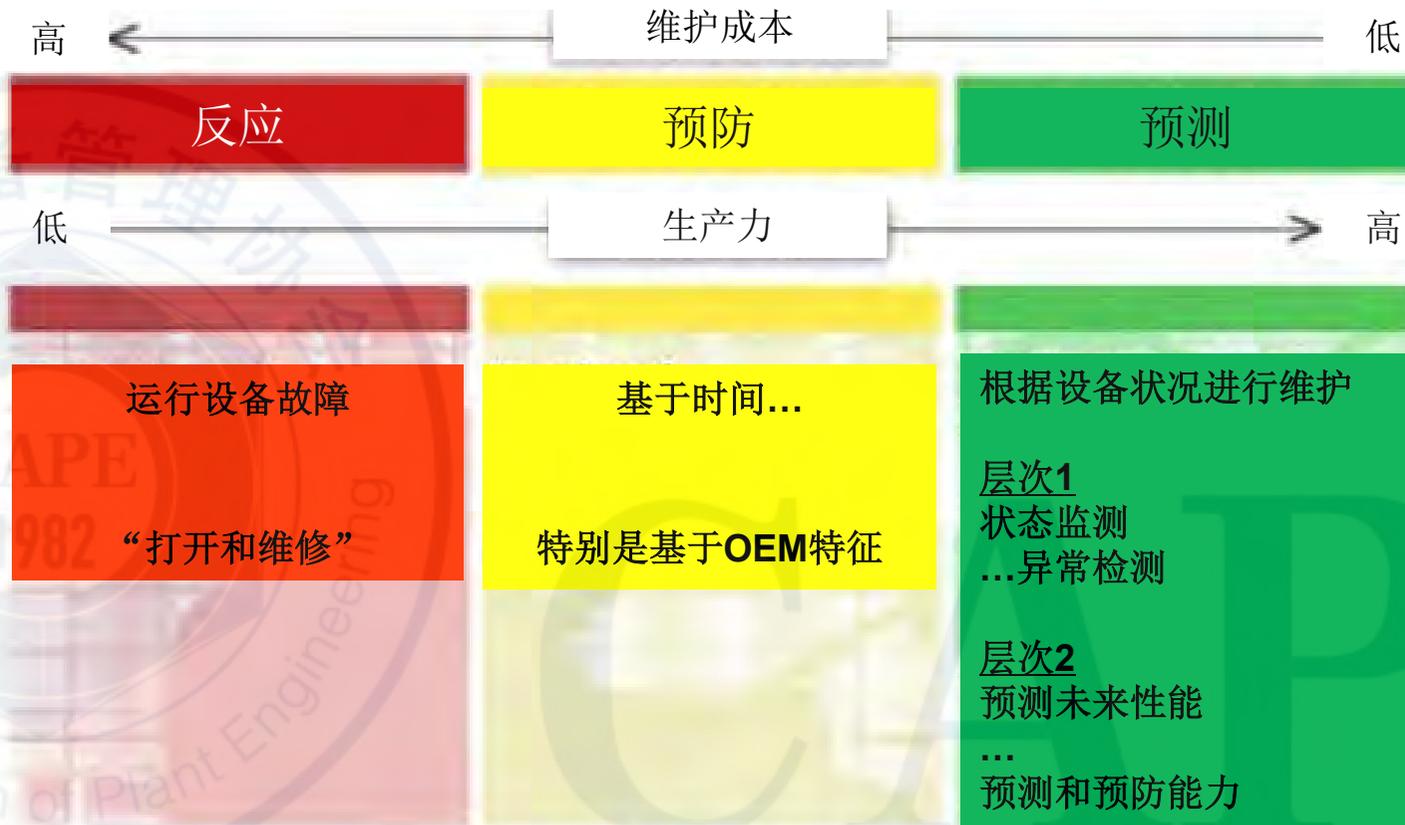


传感器故障

# 设备运行状态与可靠性测量



# 分类维护方法



不要忘记安全!

维修工作中发生安全事故的几率要比按正常计划运行时高出大约28%

Source: Occupational Safety and Health Administration, 2000

# 复杂系统的完整性与可靠性

系统的复杂性在于

- 多功能
- 自主性

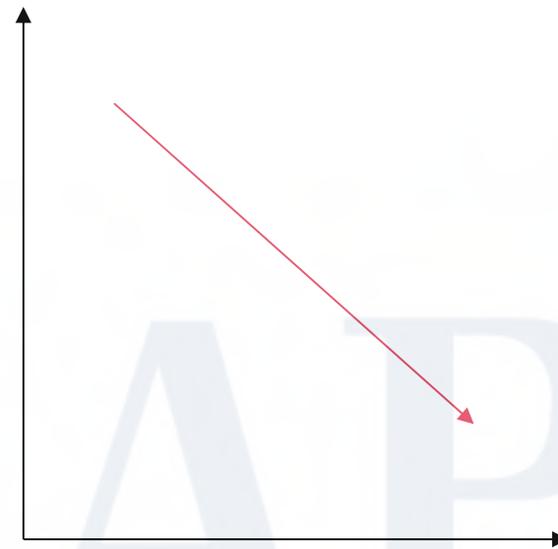
完整性与可靠性相对于

- 系统设计缺陷
- 元件故障
- 敌对干扰和电子战

产生的后果包含

- 停产期延长
- 生产力丧失
- 贵重设备的损坏
- 系统层面的故障

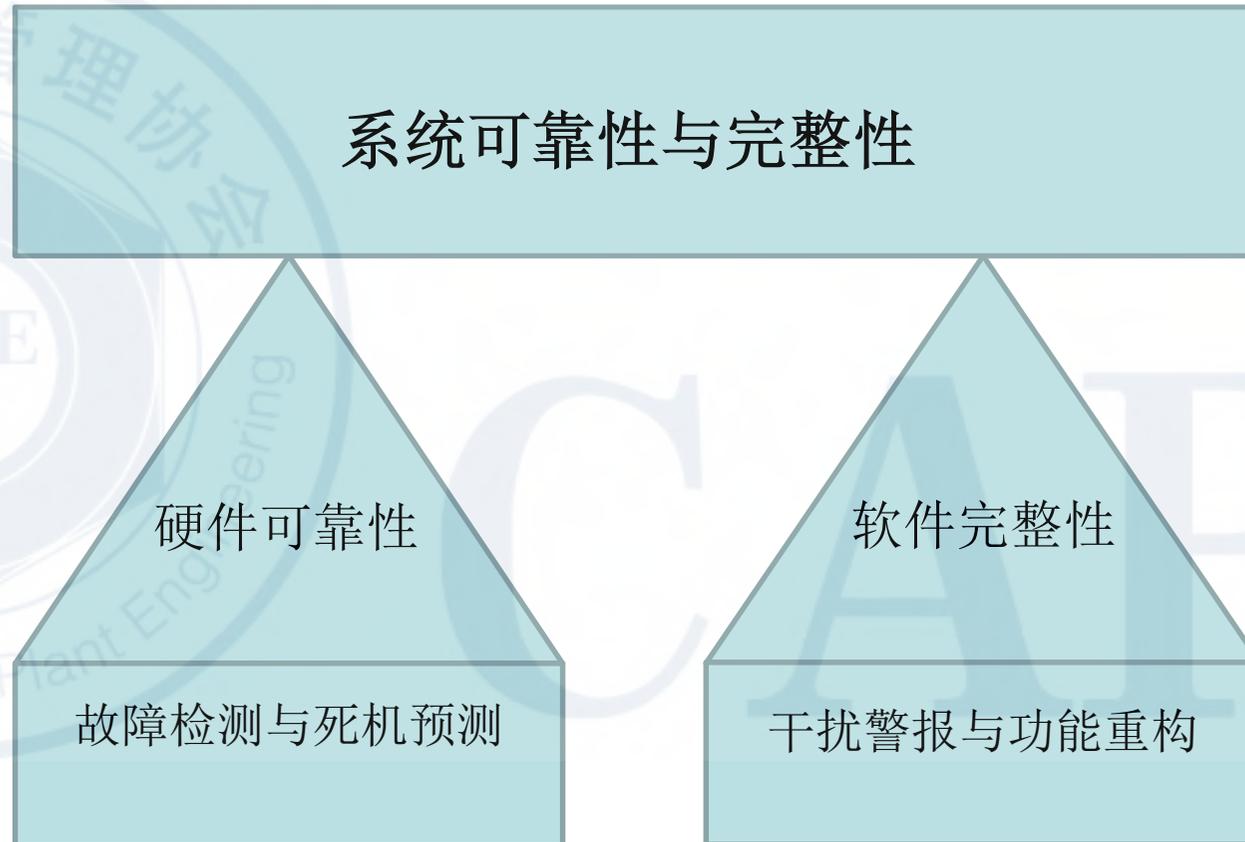
完整性与可靠性



系统复杂度



# 复杂系统的完整性与可靠性



# 网络化制造系统的综合监督控制

销售, 生产, 计划, 调度, 重调度

生产调度



车间信息

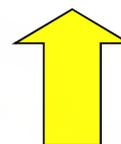


动态资源分配与管理 (DRAM)  
资源分配, 优化, 动态重配置, 自我管理, 自愈与自恢复

在线决策



在线反馈

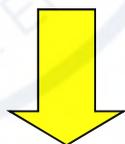


实时控制与自动复原 (RCAR)  
鲁棒控制, 容错控制

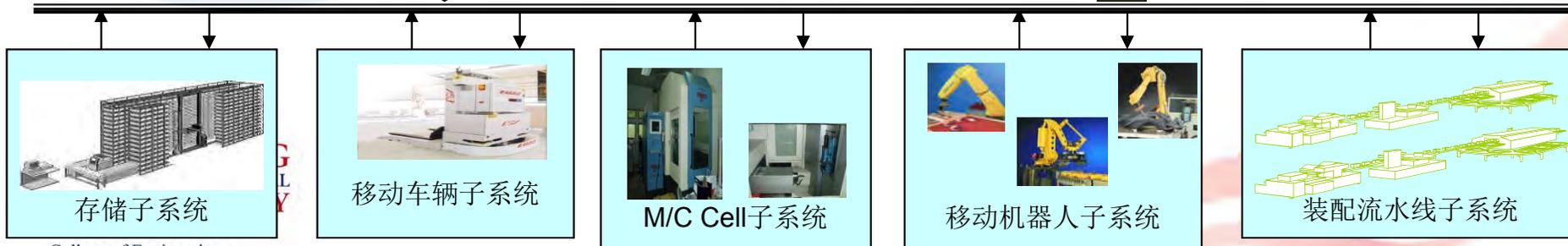
性能监测, 诊断与预测 (PMDP)  
故障分析, 健康情况评价, 剩余有效寿命预测



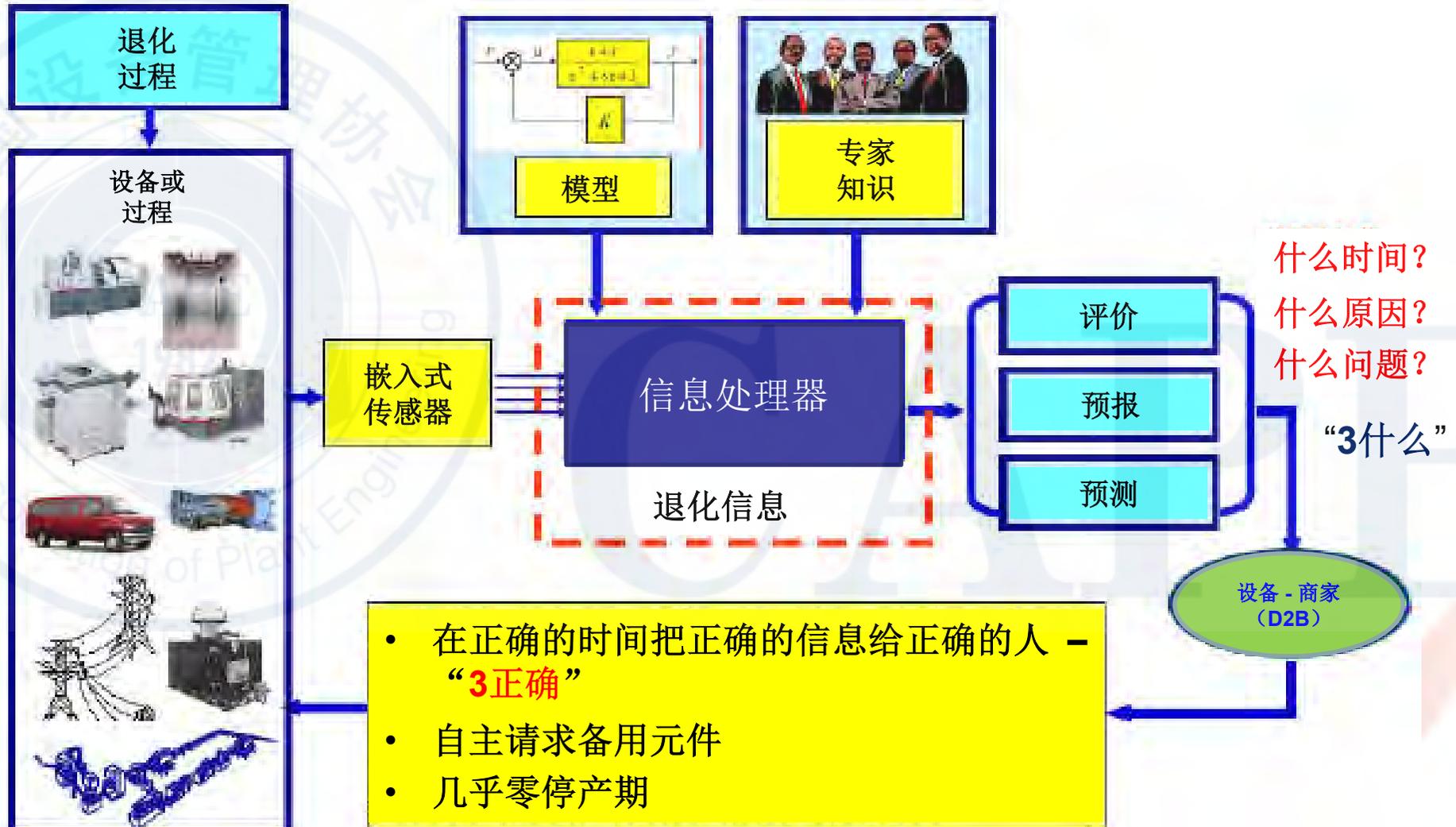
执行说明



实时数据



# 设备健康监测



# 提纲:

1. 工业 4.0 和中国制造2025
2. 高值复杂设备的完整性与可靠性
- 3. 远程设备的健康监测与维护**
4. 系统故障监测方法
5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测

# 远程诊断服务

## 远程诊断服务

With the Remote Diagnostic Service, our complete range of oil & gas and industrial rotating equipment is monitored to identify potential issues before they impact operations. How does it work?

### 机器现场操作

It features a close connection to allow the ability monitor performance and condition of the main control system.

### 数据安全

Equipment data is collected at the plant via our secure 4G network and certified VPN connection.

为顾客把数据变成价值

with data analytic methods and experienced diagnostic engineers.

通知

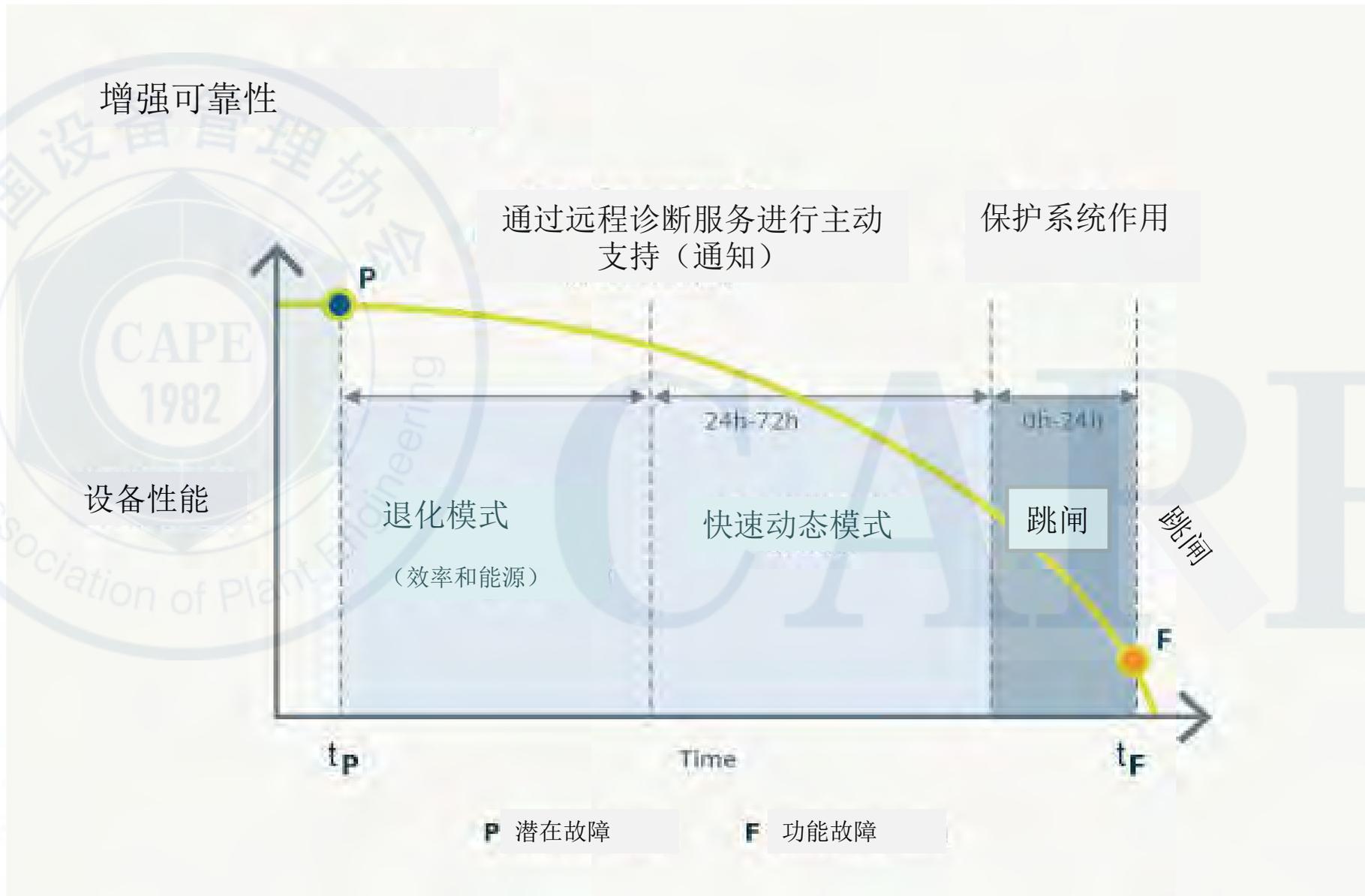
主动支持

连续数据处理

专家对安全隐患作出回应



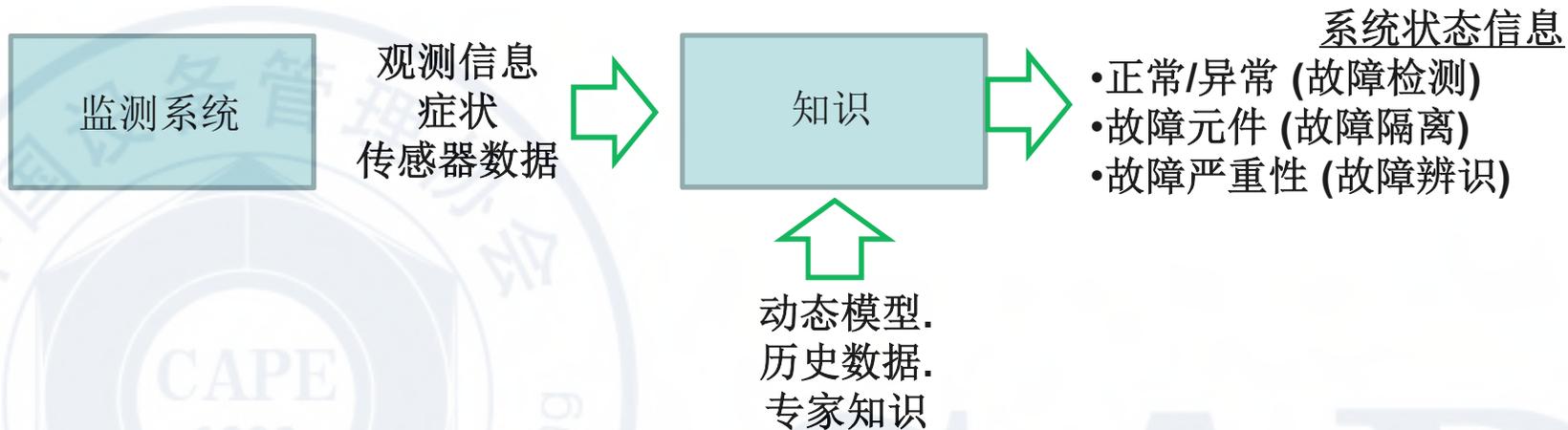
# 远程诊断的好处



# 提纲:

1. 工业 4.0 和中国制造2025
2. 高值复杂设备的完整性与可靠性
3. 远程设备的健康监测与维护
- 4. 系统故障监测方法**
5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测

# 故障诊断



## 基于模型的健康诊断原理:

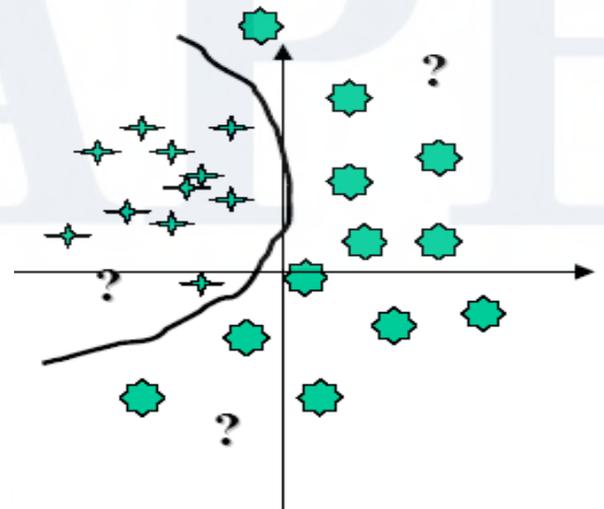
- 模型表示系统的正常(无故障)行为.
- 期望行为与实际行为对比.
- 比较结果(差别)由残差表示.

# 基于数据驱动故障诊断方法

**数据驱动方法:** 基于模式识别, 主成分分析(PCA), 神经网络(NN), 图形模型(贝叶斯网络, 隐马尔可夫模型)和谱分析理论中的统计与学习技术。

**优点:** 适用于系统数学模型未知的情况

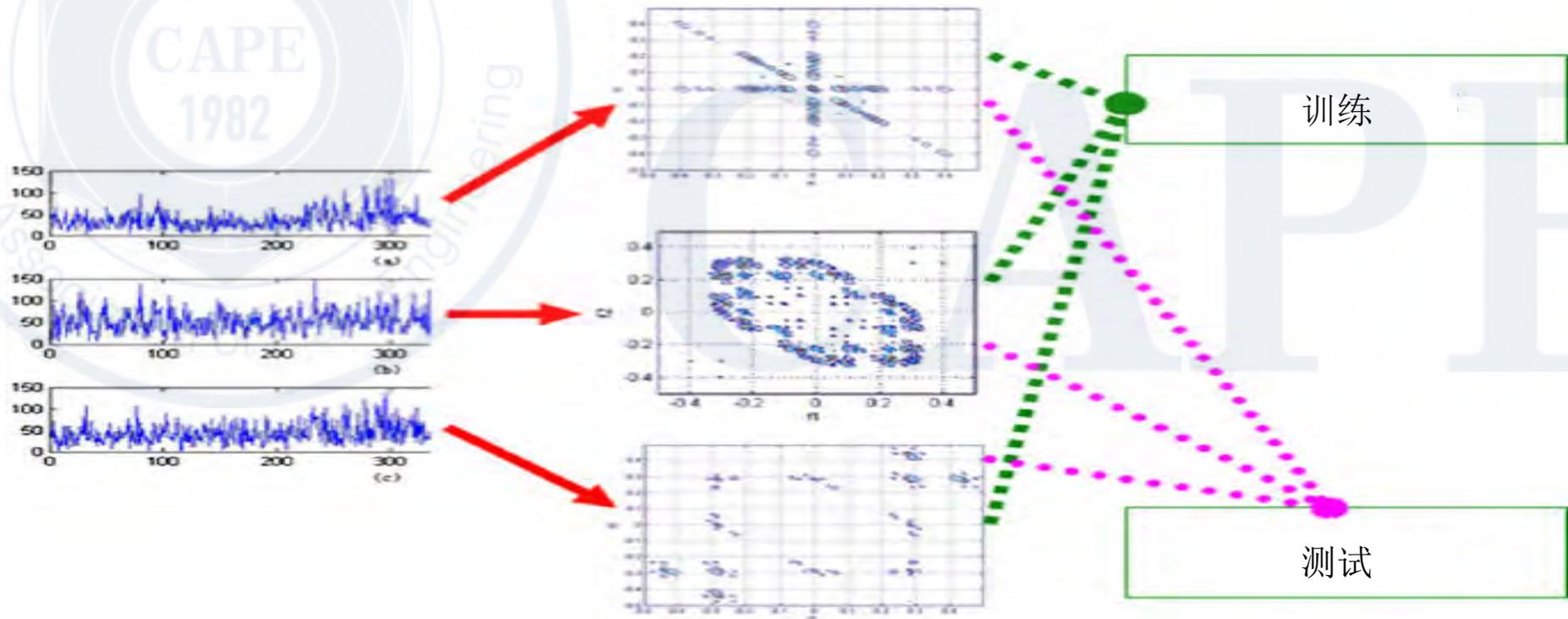
**缺点:** 没有考虑系统的物理特性, 数据量很大



# 基于数据驱动故障诊断方法

三步骤: 故障数据  $\Rightarrow$  模式分类  $\Rightarrow$  在线测试

- 需要大量的故障数据
- 可检测重复故障



# 基于专家系统故障诊断方法

基于知识的方法(专家系统): 专家将他们的启发式知识编成规则, 该方法基于软计算: 结合数据和启发式知识, 神经网络, 模糊逻辑, 遗传算法。



优点:

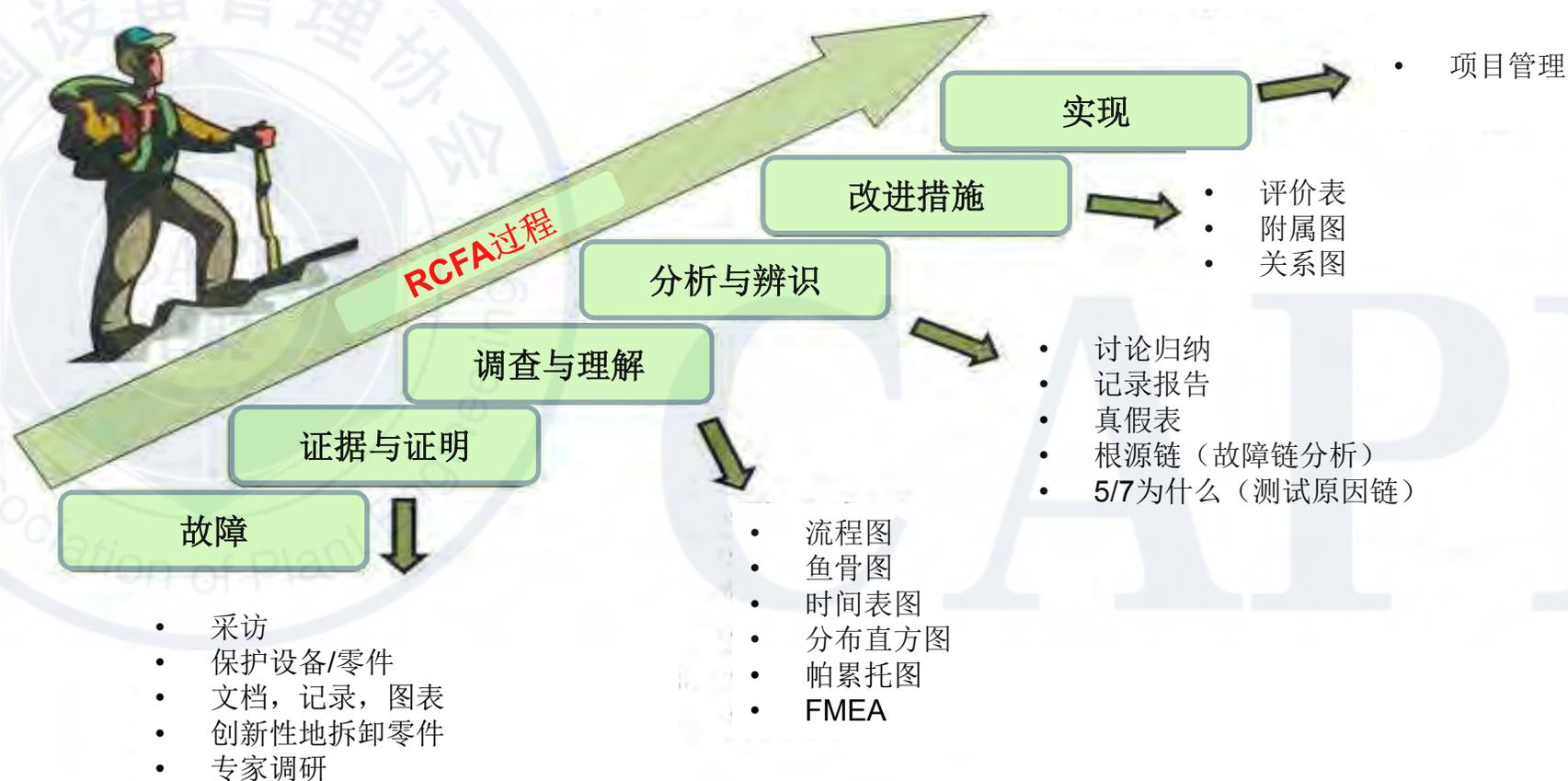
- 综合方法

缺点:

- 与经验有关 (获取知识是一项复杂的任务, 设备依赖性)
- 与分类方法有关 (新型故障, 多种故障)
- 与软件有关: 知识库的维护 (一致性)

# 构建专家故障数据库的步骤

## 使用适应性根源分析过程

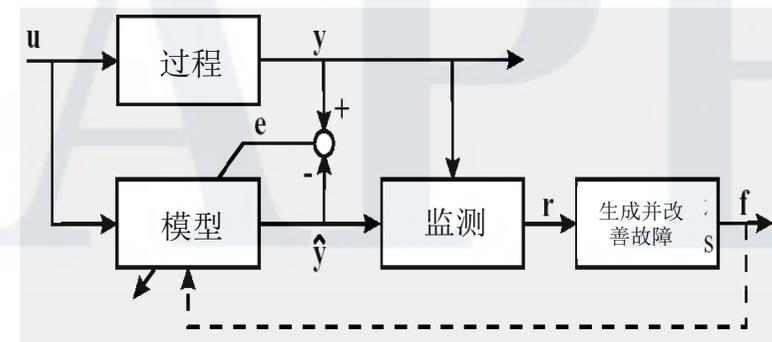
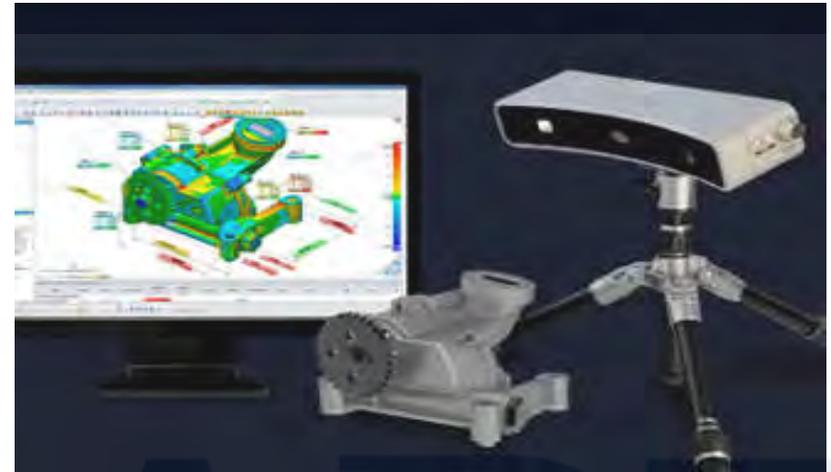


# 基于模型故障诊断方法

基于模型的方法: 第一原理, 基于物理或经验的模型, 疲劳裂纹动力学参数随机模型, 确定性裂纹扩展模型

优点: 考虑到了系统的物理特性, 适用于细微性能和不重复问题

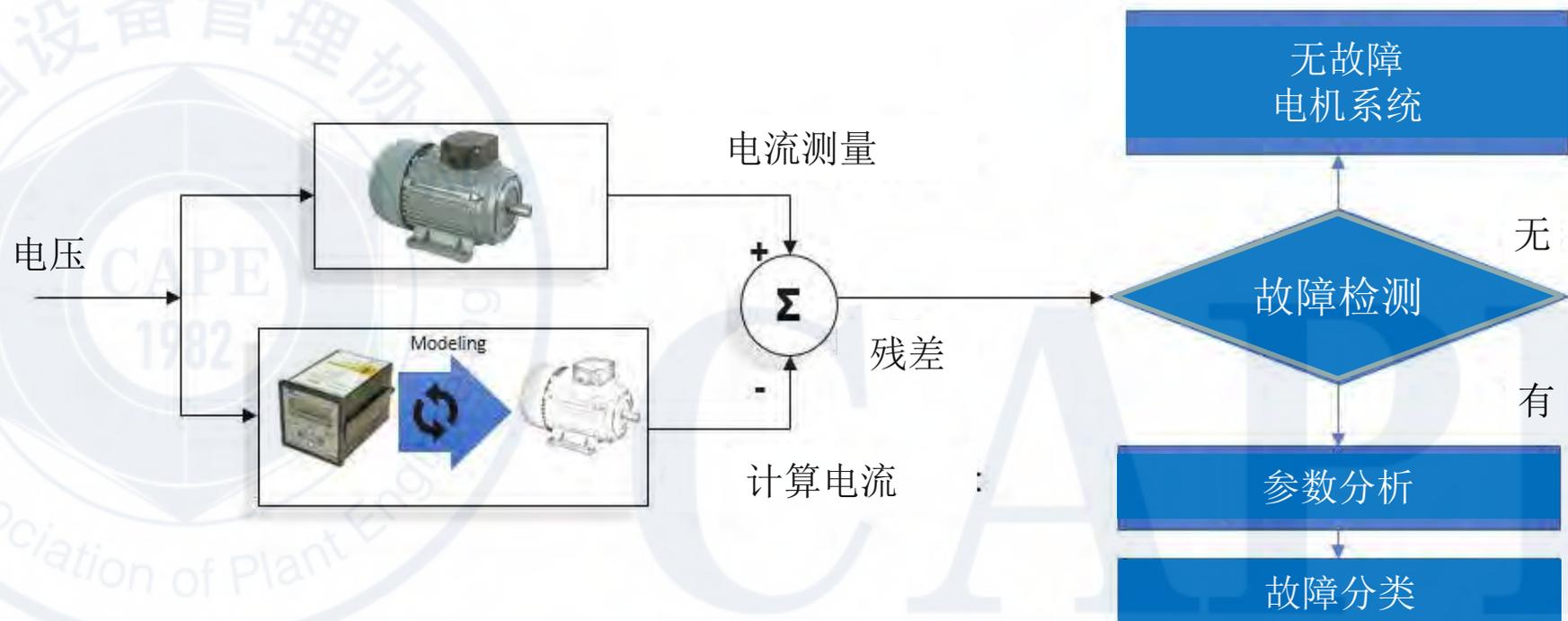
缺点: 对物理模型和参数有精度要求



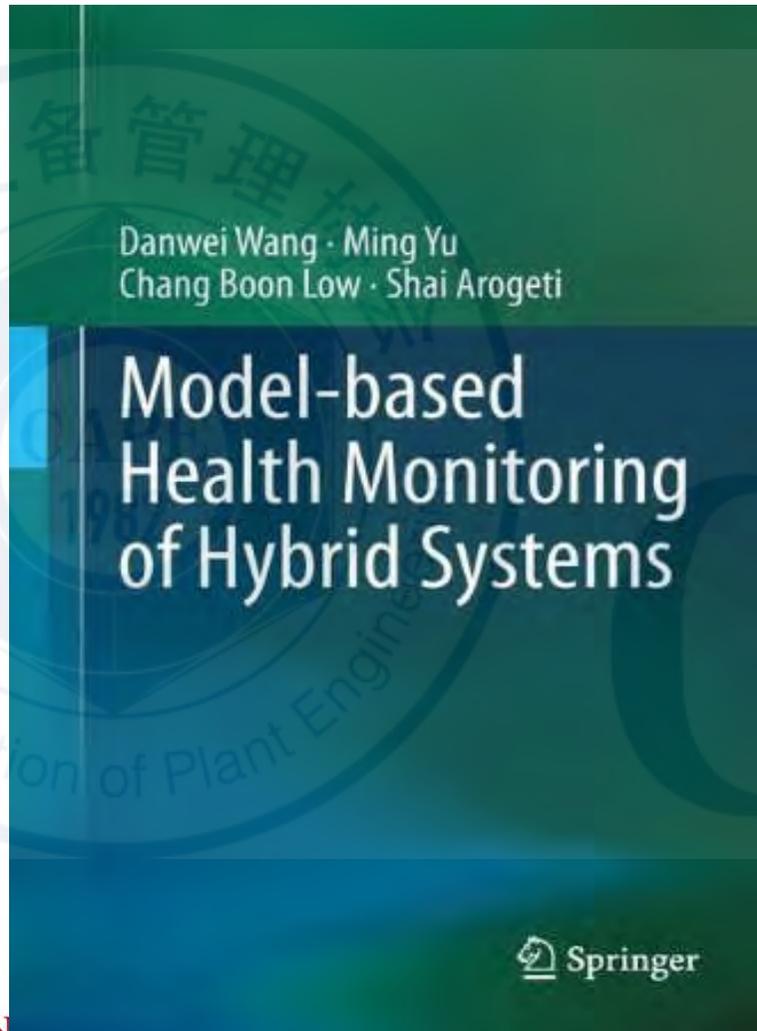
动态系统的诊断

S,

# 基于模型的故障诊断方法



# 基于模型的故障诊断与隔离

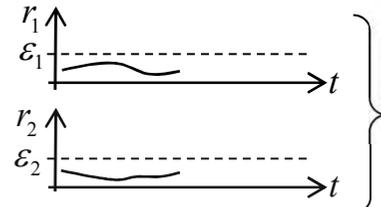
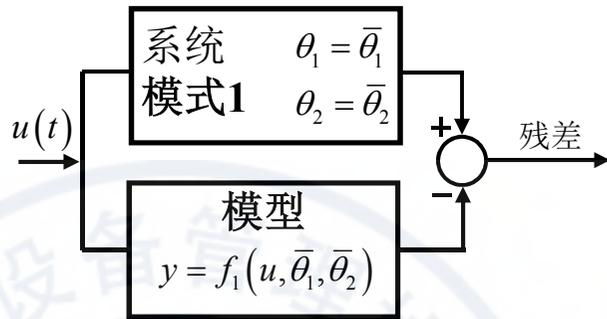


1. 混杂系统与故障类型简介
2. 故障签名与模式变化签名
3. 故障混杂系统的键结图建模
4. 因果关系的系统性分析
5. 车辆转向系统的实例研究
6. 结论及相关工作

2013年6月



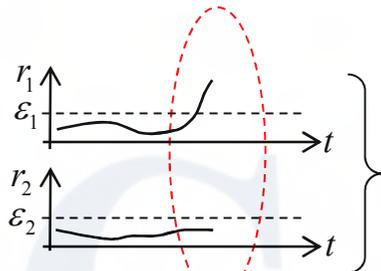
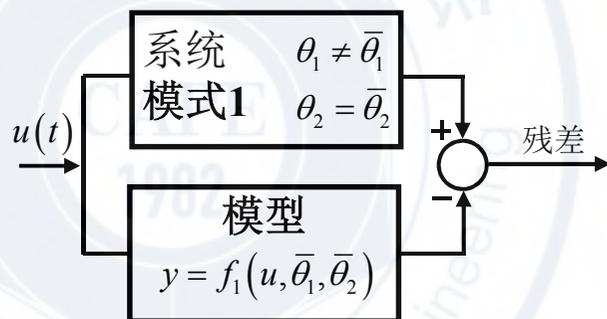
# 参数故障签名



$$\begin{aligned}
 r_1 < \varepsilon_1 &\rightarrow c_1 = 0 \\
 r_2 < \varepsilon_2 &\rightarrow c_2 = 0 \\
 &\vdots \\
 \mathbf{c} &= [0 \ 0 \ \dots]
 \end{aligned}$$

系统处于正常状态(处于模式1)

$\theta_1$  发生参数故障 ( $\theta_1$  偏离了其正常值):

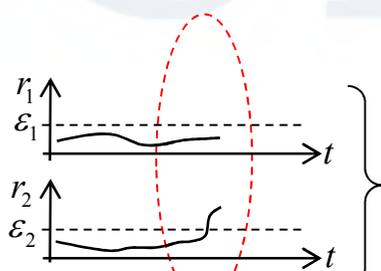
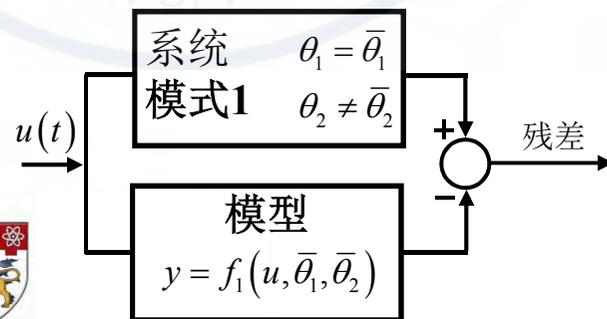


$$\begin{aligned}
 r_1 > \varepsilon_1 &\rightarrow c_1 = 1 \\
 r_2 < \varepsilon_2 &\rightarrow c_2 = 0 \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

一致向量

$$c = [1 \ 0 \ \dots]$$

$\theta_2$  发生参数故障



$$\begin{aligned}
 r_1 < \varepsilon_1 &\rightarrow c_1 = 0 \\
 r_2 > \varepsilon_2 &\rightarrow c_2 = 1 \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

一致向量

$$c = [0 \ 1 \ \dots]$$

不同的参数故障对应不同的签名



# 提纲:

1. 工业 4.0 和中国制造2025
2. 高值复杂设备的完整性与可靠性
3. 远程设备的健康监测与维护
4. 系统故障监测方法
- 5. 无人车辆方向控制系统的故障诊断**
6. 电机故障诊断和剩余有效寿命预测

# 移动机器人实验平台的故障检测与隔离

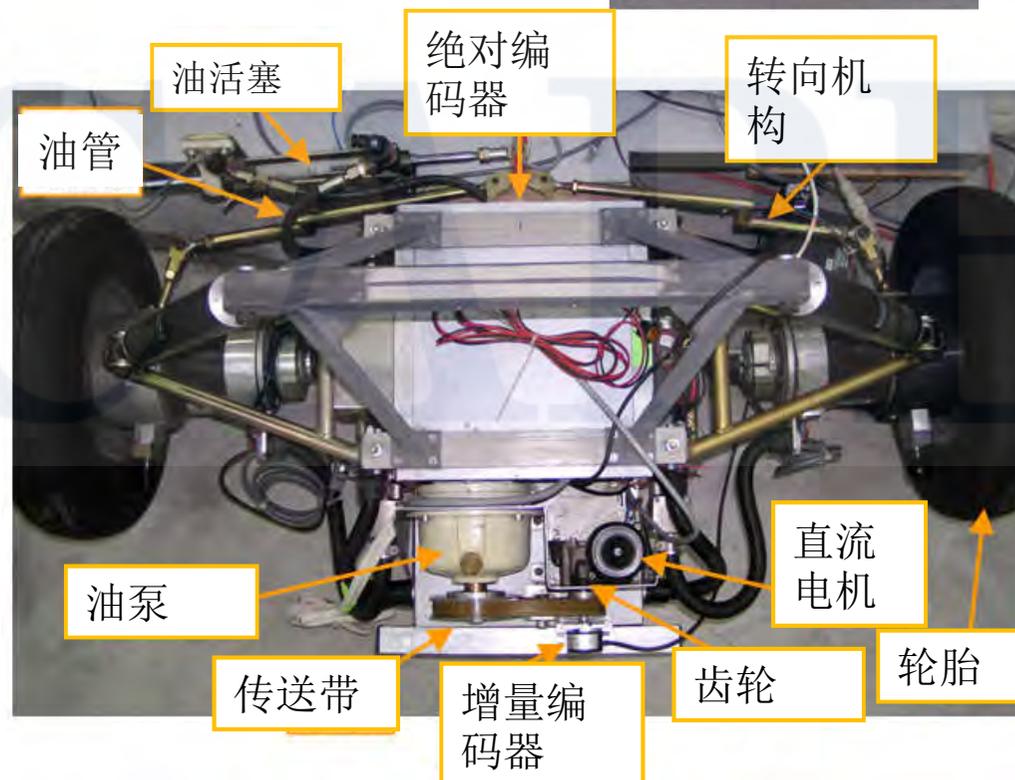
CyCab是一辆带有双转向系统的四轮驱动电动车。

该研究的重点是CyCab电液方向控制系统中的故障检测与隔离(FDI)。

## CyCab转向系统

CyCab的转向系统是一个复杂机电系统。

它集成了: 运动控制器, 直流电机, 齿轮, 传送带, 油泵, 油管, 液压缸, 转向机构, 车轮和轮胎。



# 移动机器人实验平台的故障检测与隔离

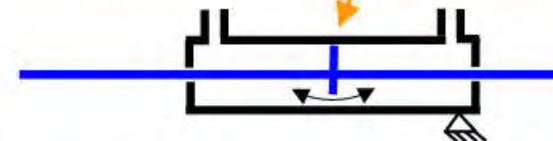
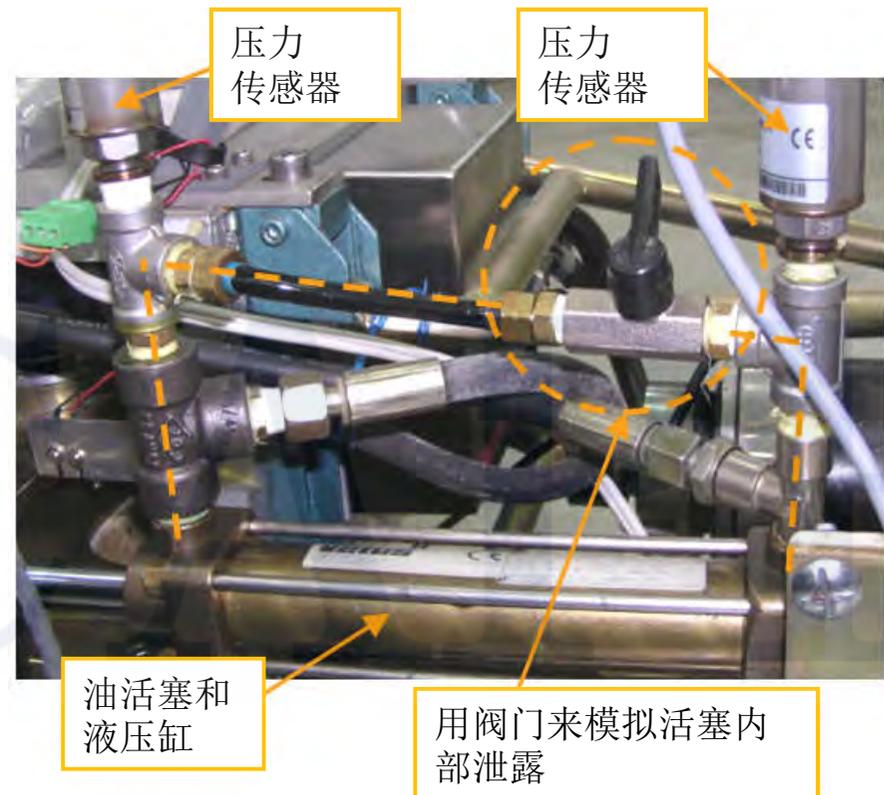
考虑了三种传感器故障: 压力传感器（液压缸的两端），增量编码器（齿轮输出）和绝对编码器（转向角）。

考虑了两种故障模式:

- 1) 直流电机或驱动器烧毁（动力无法传送到系统中去）；
- 2) 传送带损坏（电机和齿轮在旋转，但是动力无法传送到泵中去）。

讨论了两种参数故障:

- 1) 轮胎漏气；
- 2) 活塞内部泄露（由于密封磨损而导致的活塞效率降低）。



通过安装旁路槽和阀门来模拟内部泄露故障。

## 实验结果

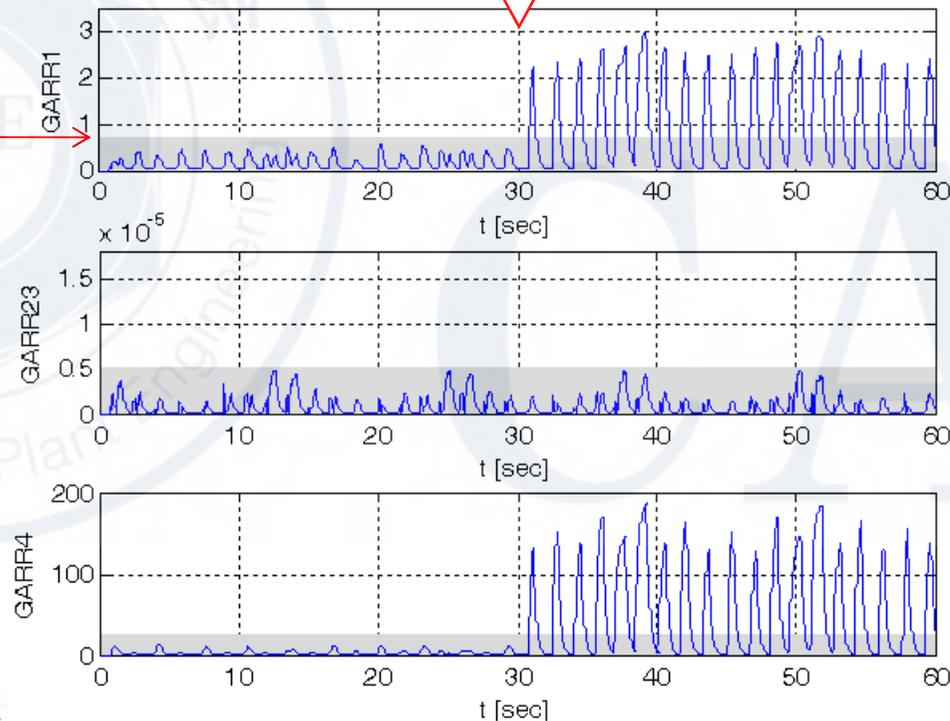
第一种情况是压力传感器  $p_1$  故障。

由于传感器电路的短路，传感器输出为 5 Volt（正常情况下为 25 bar）。

故障在30秒时引入

30 sec

阈值



检测到的签名是  
[1 0 1]

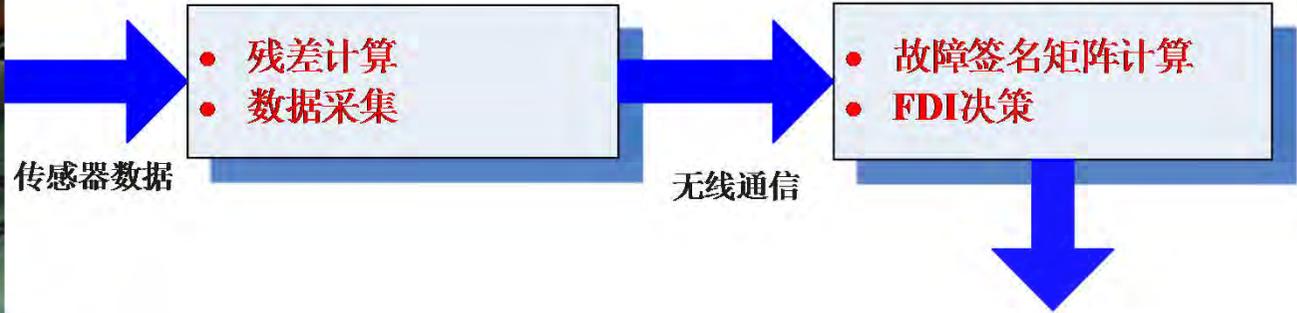
采用MD-FSM，参  
数故障 ( $p_2 - p_1$ ) 被  
隔离。

GARRs:  $p_1$  的传感器故障 (压力传感器)



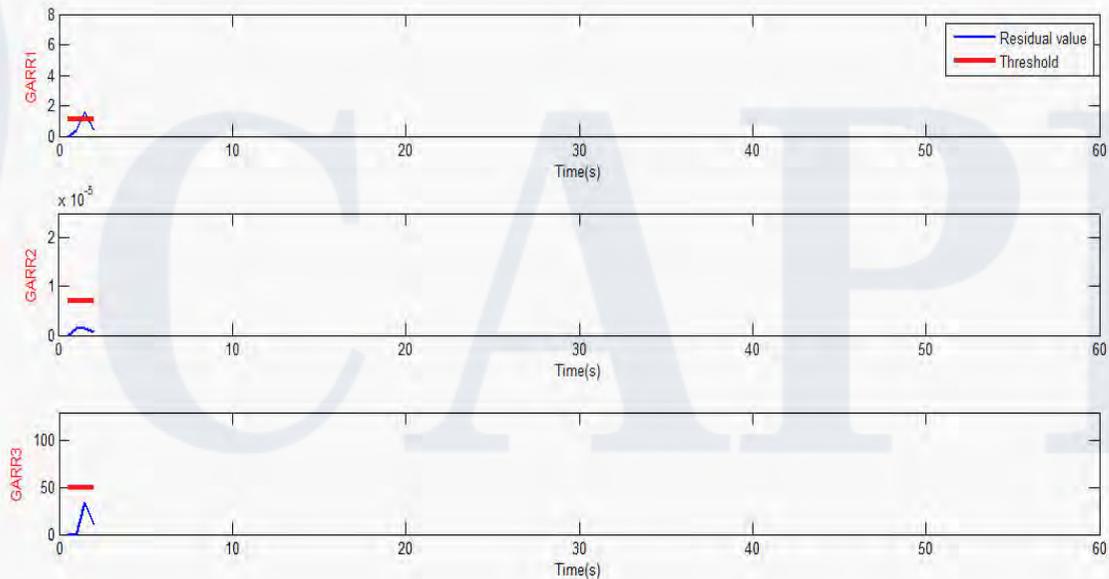
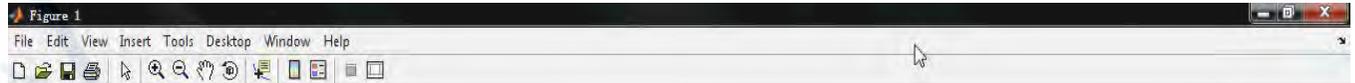
目标计算机

主计算机(Matlab Simulink  
xPC)



- 残差计算
- 数据采集

- 故障签名矩阵计算
- FDI决策



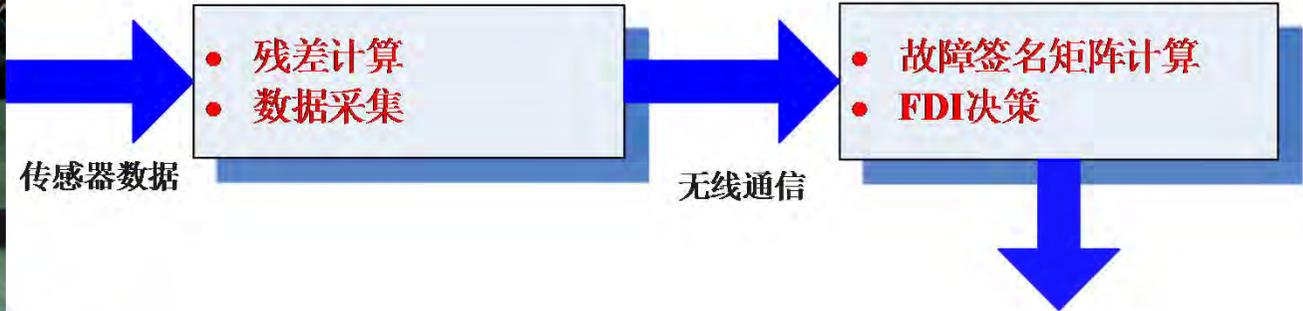
### 1. 情况一

传感器故障在30秒时引入。



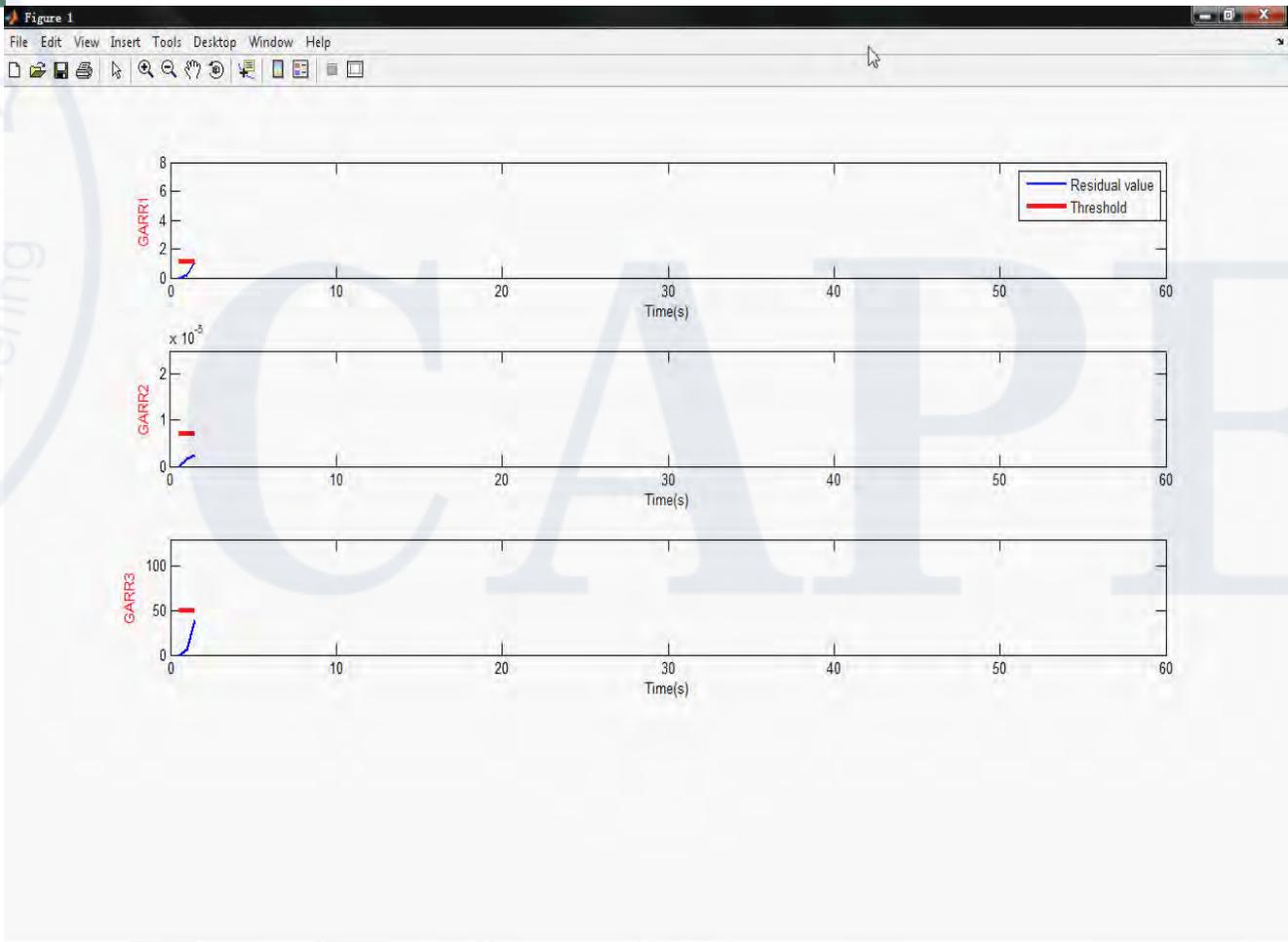
目标计算机

主计算机  
(Matlab Simulink xPC)



- 残差计算
- 数据采集

- 故障签名矩阵计算
- FDI决策



## 2. 情况二

一个内部漏油故障在20~40秒之间发生。

# 基于模型的电气设备剩余使用寿命预测

## 简介

- 在电动飞机不断发展的今天，电气系统是飞机中的一个非常重要的组成部分。应该采用状态监测来提供电气系统的先进诊断和剩余使用寿命预测。
- 电气设备的可靠性在安全关键应用和关键任务应用（像飞机和轮船）中是非常重要的。
- 基于物理模型的预测通常会提供精确的剩余有效寿命(RUL)预测结果，这些预测结果在关键任务系统（像飞机和轮船）中具有最高的优先级。

飞机动力系统中的机电执行器和高速感应发电机



跨领域



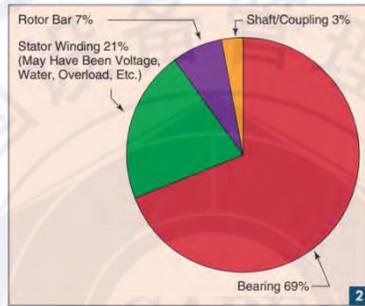
推进驱动系统，如推进器驱动，直接驱动，齿轮驱动以及驱动泵

# 研究动机和含故障物理(POF)模型

## 动机

- 匝间故障是常见的;
- 一旦发生就会导致其它严重的故障。

## 健康机器和故障机器的POF模型



A.H. Bonnett, C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," IEEE Industry Application Magazine, Vol. 14, N° 1, pp. 29-36, 2008.



定子绕组损坏

<http://ecmweb.com/motors/repair-guidelines-motors-generators>

### 电气设备的多种物理特性



- $r_f = 0$ : 完全短路
- $r_f = \infty$ : 故障正在发生 (绝缘材料正在退化)

## 相关成果

- 基于模型的渐变故障诊断和预测
- 针对有开关故障的功率电子器件的基于电压空间模式的故障检测与隔离
- 复杂系统的传感器最优配置

## 在研工作

- 针对绕组故障的电气设备的寿命预测方法
- 自主车辆的导航和控制软件系统的完整性



*Thank you!*

王郸维 (Wang Danwei), 教授  
新科工程 – 南洋理工大学企业实验室主任  
电机与电子工程学院

<http://www.ntu.edu.sg/home/edwwang>  
[edwwang@ntu.edu.sg](mailto:edwwang@ntu.edu.sg)

