



# 预测控制的应用扩展

## — 现状与思考

上海交通大学

席裕庚

2021年07月26日



## 主要内容

- 预测控制的发展历史简述
- 预测控制应用领域的扩展
- 预测控制应用情况的分析
- 新的可能性和总结与注释



# 主要内容

- 预测控制的发展历史简述
- 预测控制应用领域的扩展
- 预测控制应用情况的分析
- 新的可能性和总结与注释



# 20世纪70年代工业生产从调节向追求优化发展

## ⇒ 预测控制

## 产生于工业实践的启发式优化控制算法

目前普遍把20世纪70年代工业启发式预测控制算法的出现作为其产生的标志

### MPHC (模型预测启发控制)

Richalet 等在1976年IFAC第4届辨识与系统参数估计会议上首先报道了MPHC的原理及IDCOM预测控制软件包的工业应用,

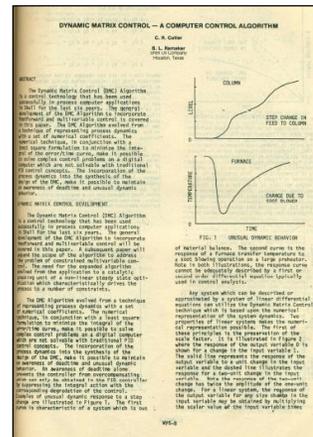
1978年又在Automatica上发表了关于预测控制的首篇期刊论文



### DMC (动态矩阵控制)

美国Shell公司在20世纪70年代初就开始独立研发自己的预测控制技术DMC并在1973年得到初步应用

Cutler等在1979年的美国AIChE会议及1980年的美国控制联合会议(JACC)上公开报道了DMC的原理及其在炼油催化裂化装置上的应用。



“MPC本身并不是由理论工作产生的发展；它的起源不是学术研究，而是行业实施” (Samad et al, ARC, 2020)

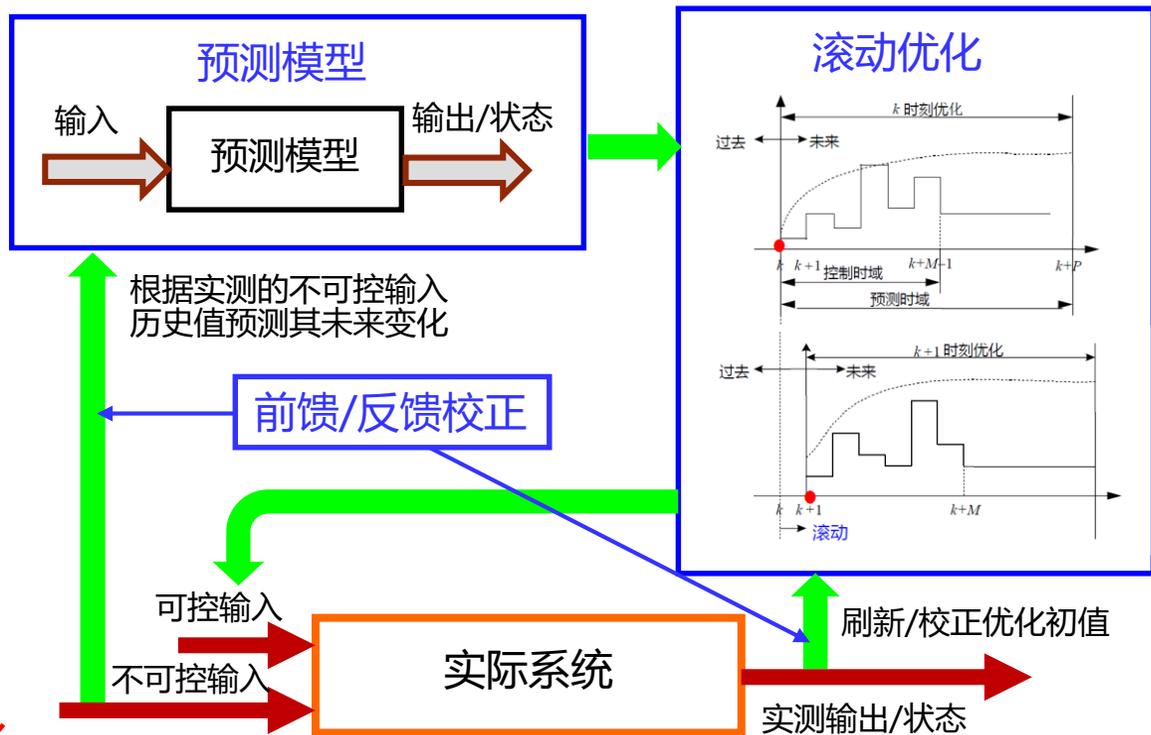


# 预测控制如何在不确定环境下实现以优化为目标的控制？

把优化与反馈结合起来  
滚动推进优化



在每一步向前看几步，确定几步内的最优控制  
每执行一步控制，看看实际情况发生了什么变化



The basic ideas underlying this approach are related to the “scenario technique” used in Predictive Economics. To some extent it is also similar to what the human operator is assumed to do with his internal model of the external world. (Richalet et al, 1978)



## 预测控制的发展轨迹

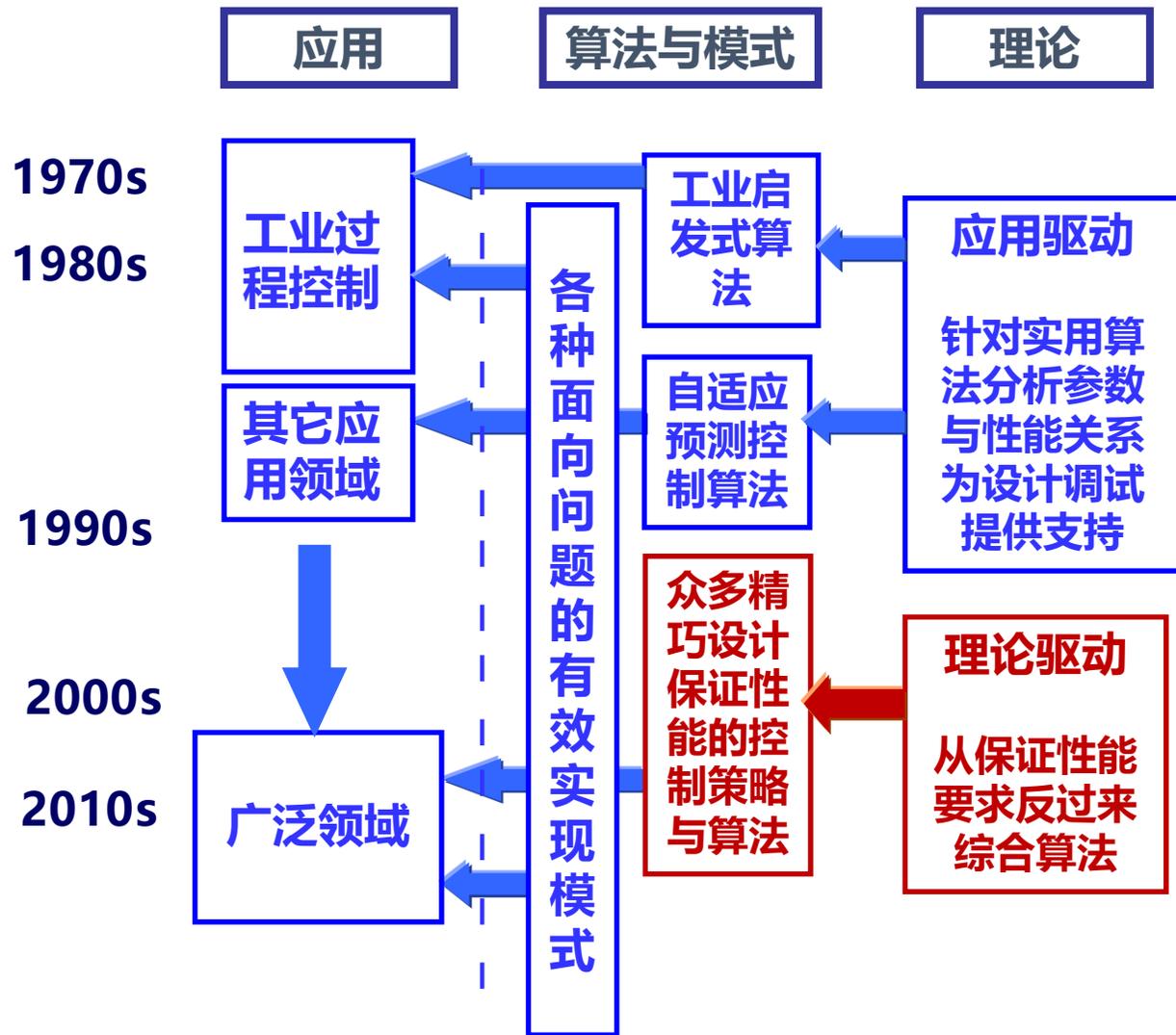
**20世纪70年代** 以阶跃/脉冲响应为模型的工业预测控制算法：一种新型启发式控制算法的诞生

**20世纪80年代** 自适应预测控制理论与算法：预测控制算法和方法的多样性发展

**20世纪90年代** 以最优控制为参照的预测控制定性综合理论：转换思路，突破理论研究瓶颈

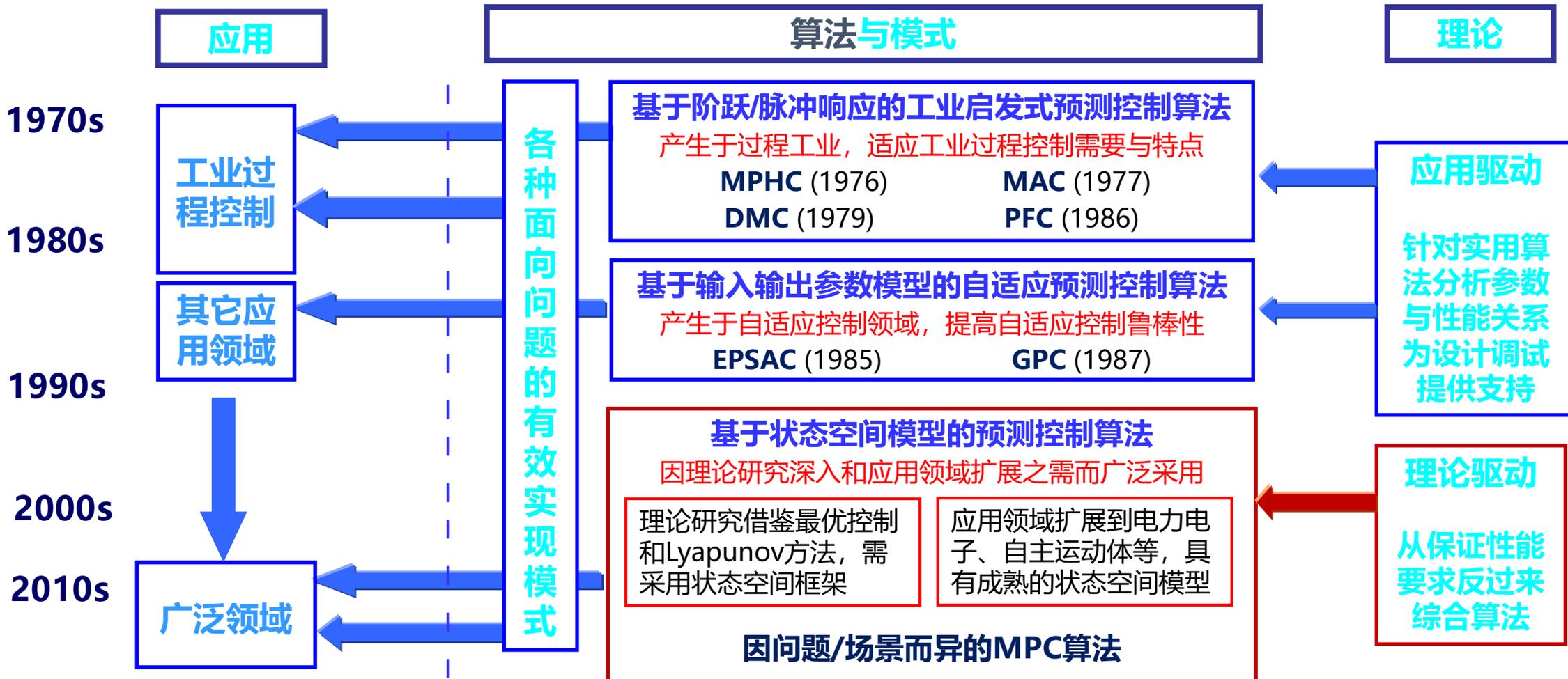
**21世纪以来** 预测控制全方位发展：理论深化及分支化扩展，应用领域快速延申

预测控制已成为一个多元化的学科分支，包含了具有不同目的和不同特色的诸多发展轨迹，不仅受到广大工业界的青睐，成为最有代表性的先进控制算法，而且还形成了具有滚动优化特色的不确定性系统稳定和鲁棒设计的理论体系。





# 预测控制的发展轨迹—算法



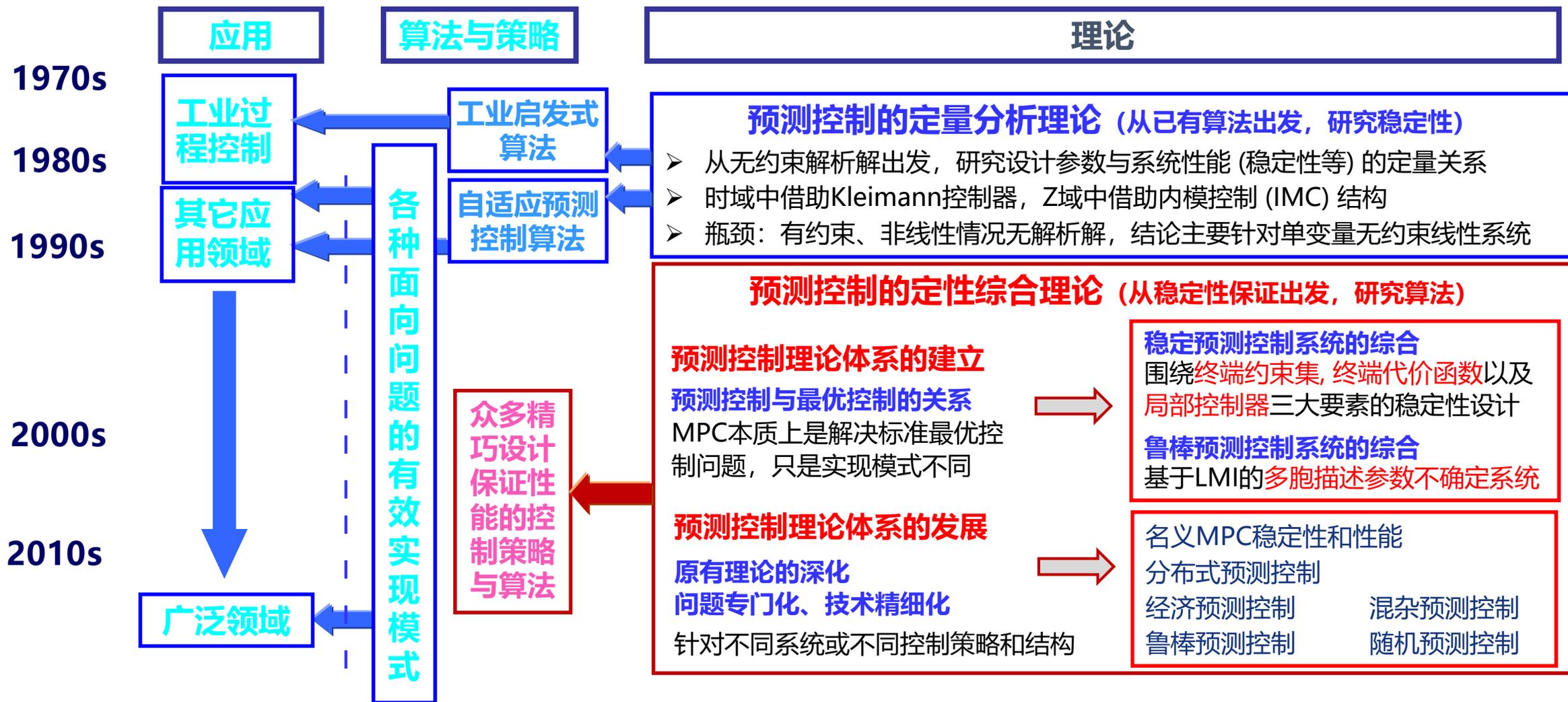


# 预测控制的发展轨迹—模式



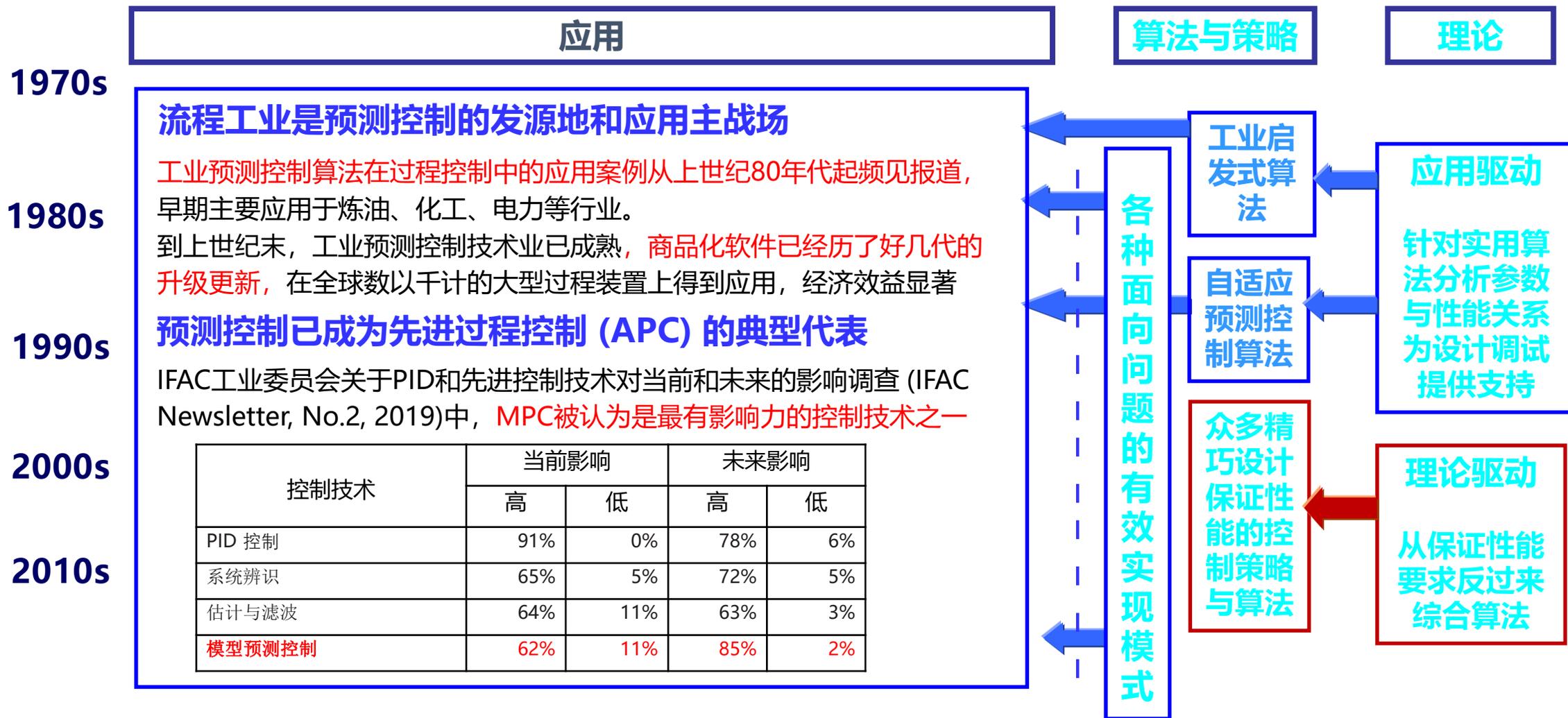


# 预测控制的发展轨迹—理论





# 预测控制的发展轨迹—应用





## 预测控制的发展轨迹—应用

1970s

**流程工业是预测控制的发源地和应用主战场**

工业预测控制算法在过程控制中的应用案例从上世纪80年代早期主要应用于炼油、化工、电力等行业。

1980s

到上世纪末，工业预测控制技术业已成熟，商品化软件已经升级更新，在全球数以千计的大型过程装置上得到应用，经济

1990s

**预测控制已成为先进过程控制 (APC) 的典型代表**

IFAC工业委员会关于PID和先进控制技术对当前和未来的影响调查 (IFAC Newsletter, No.2, 2019)中，MPC被认为是最有影响力的控制

2000s

控制技术	当前影响		未来影响	
	高	低	高	低
PID 控制	91%	0%	78%	6%
系统辨识	65%	5%	72%	5%
估计与滤波	64%	11%	63%	3%
<b>模型预测控制</b>	<b>62%</b>	<b>11%</b>	<b>85%</b>	<b>2%</b>

2010s

### IFAC工业委员会关于PID和先进控制技术对当前和未来的影响调查 (IFAC Newsletter, No.2, 2019)

控制技术	当前影响		未来影响	
	高	低	高	低
PID 控制	91%	0%	78%	6%
系统辨识	65%	5%	72%	5%
估计与滤波	64%	11%	63%	3%
<b>模型预测控制</b>	<b>62%</b>	<b>11%</b>	<b>85%</b>	<b>2%</b>
过程数据分析	51%	15%	70%	8%
故障检测与识别	48%	17%	8%	8%
分散与/或协同控制	29%	33%	54%	11%
鲁棒控制	26%	35%	42%	23%
智能控制	24%	38%	59%	11%
非线性控制	21%	44%	42%	15%
离散事件系统	24%	45%	39%	27%
自适应控制	18%	38%	44%	17%
重复控制	12%	74%	17%	51%
其它先进控制技术	11%	64%	25%	39%
混杂动态系统	11%	68%	33%	33%
博弈理论	5%	76%	17%	52%

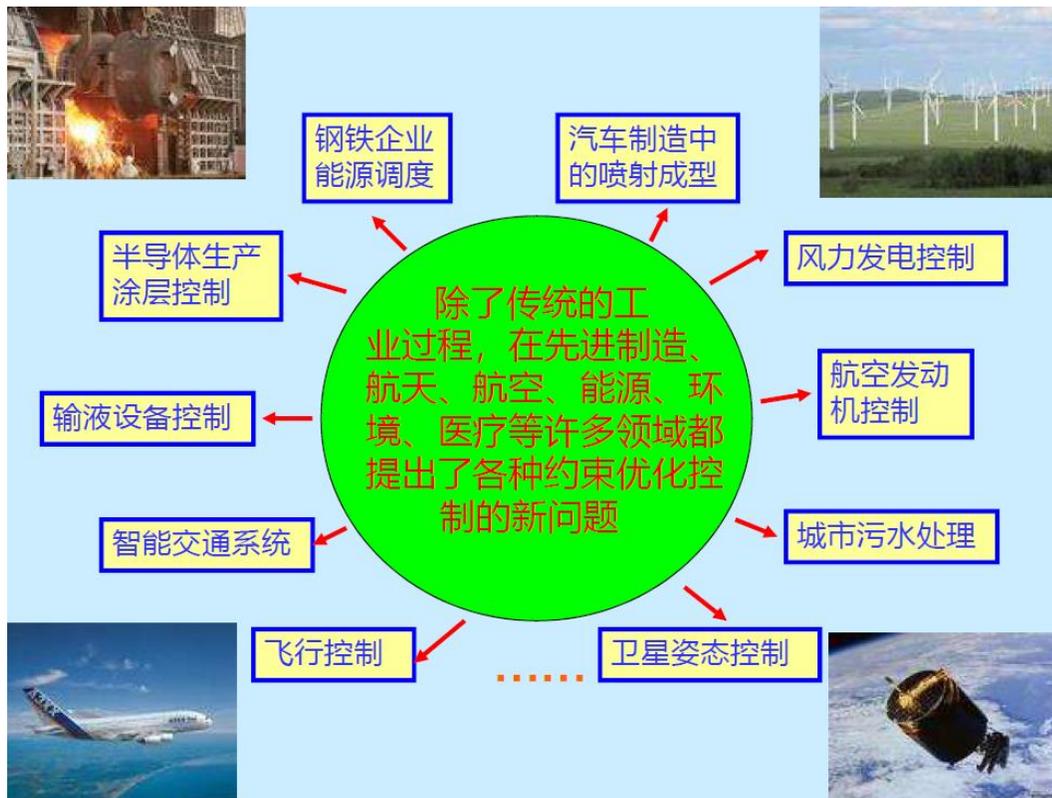


## 主要内容

- 预测控制的发展历史简述
- 预测控制应用领域的扩展
- 预测控制应用情况的分析
- 新的可能性和总结与注释



## 本世纪来预测控制应用领域迅速扩展



### 具有相当普遍性的挑战问题

针对不同领域的对象, 在受到物理、资源、环境、安全等各种约束的情况下, 实现以优化为目标的控制

### 经济社会的需求形成牵引

- 生产企业为提高竞争力, 追求高品质低成本, 优化意识更加强烈, 单纯基于反馈的控制已无法满足, 选择预测控制成为必然
- 针对资源、环境等的约束不断增加, 已成为控制问题的硬性要求, 需要能把约束自然结合在控制问题中求解的方法
- 工艺创新、技术突破, 不断引出新的系统和问题, 要做成做好它, 必须用先进控制方法克服常规控制难以解决的瓶颈
- 为满足社会管理和居民生活需要, 公共服务和设施的自动化和智能化程度需要不断提升, 预测控制可以使其做得更好

### 先进技术的发展提供支撑

- 现代信息技术的发展, 为信息处理、高性能计算、嵌入式实现等提供了支持, 增强了在不同领域探索预测控制应用的能力

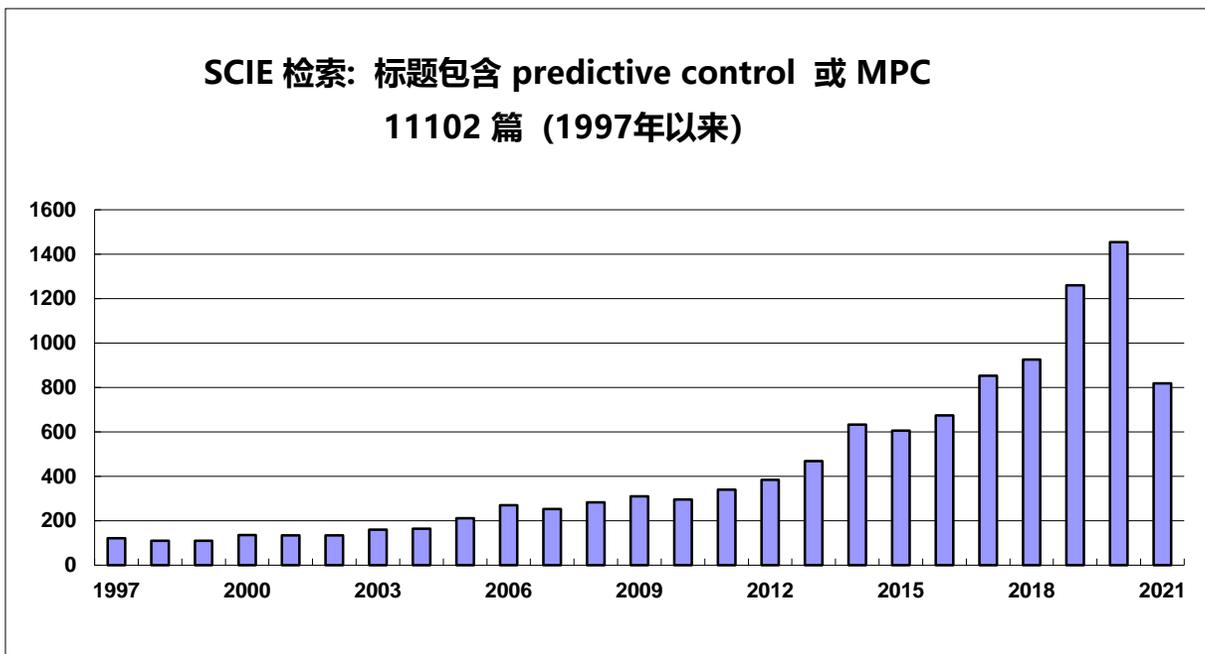
预测控制在工业过程控制中的成功应用, 使人们对用其解决各自领域中的约束优化问题充满期待



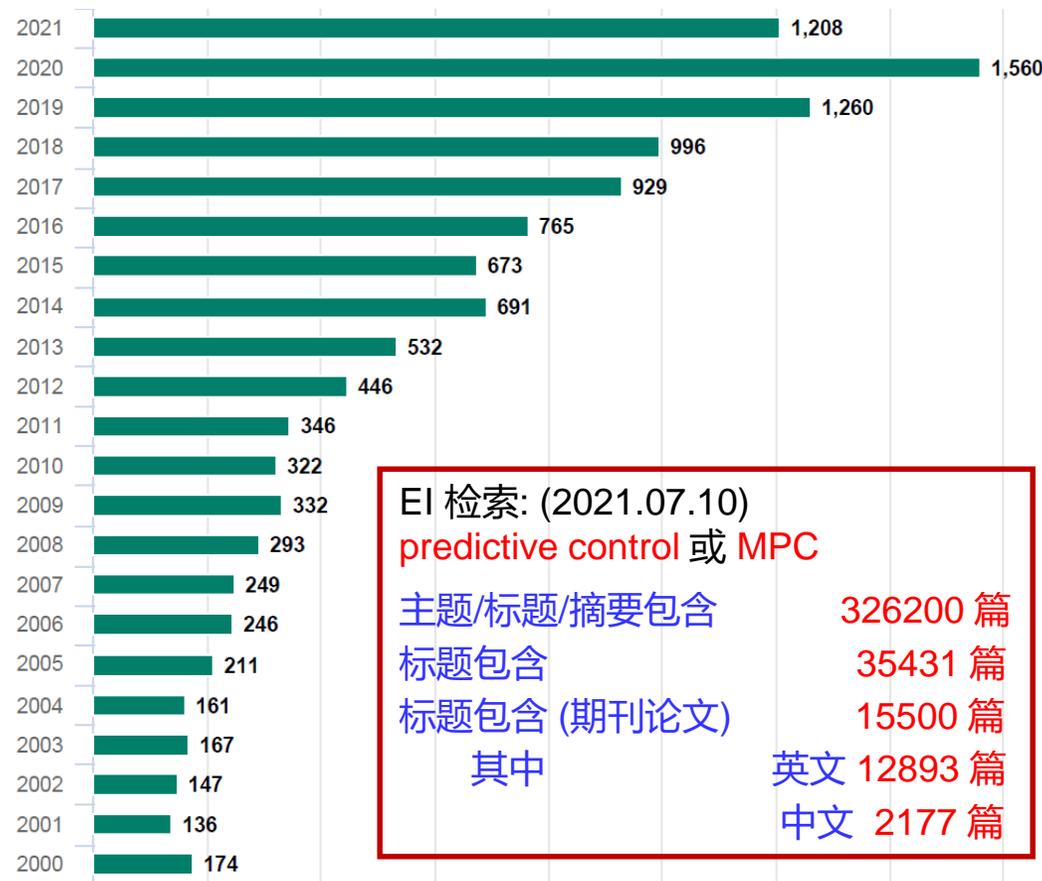
# 预测控制相关论文数急剧增长

SCIE 检索 predictive control 或 MPC (2021.07.10)

主题包含 (1997年以来) 89102 篇  
标题包含 (1997年以来) 11102 篇



EI 检索: 标题含 predictive control 或 MPC 期刊论文(英文) 12893 篇



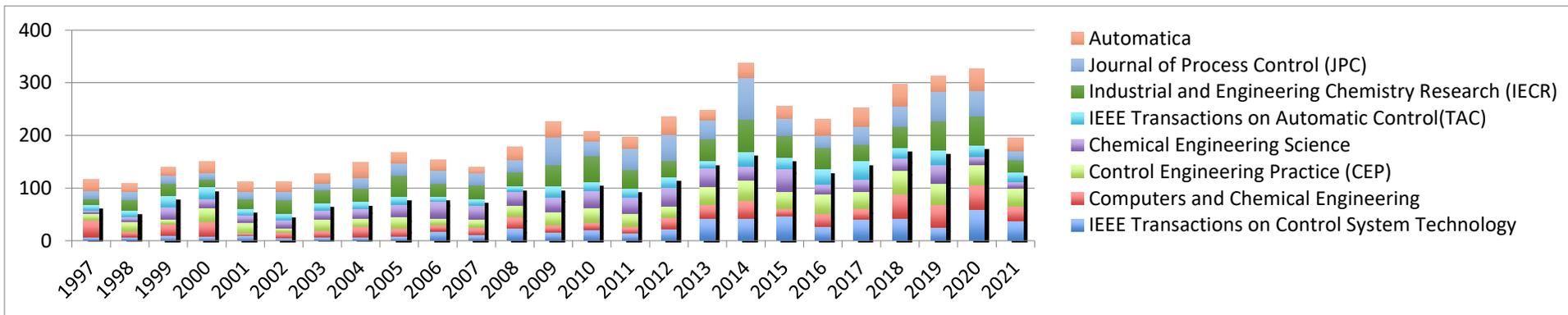
EI 检索: (2021.07.10)  
predictive control 或 MPC

主题/标题/摘要包含 326200 篇  
标题包含 35431 篇  
标题包含 (期刊论文) 15500 篇  
其中 英文 12893 篇  
中文 2177 篇

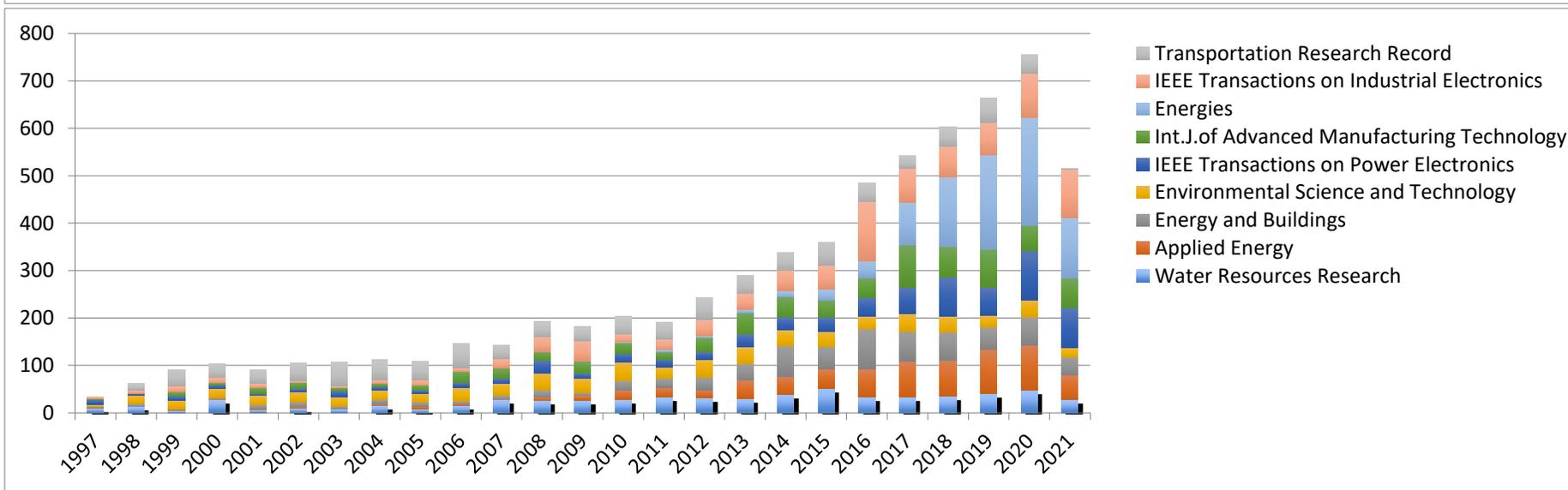


# 与应用领域相关期刊上论文增长数更为明显

主题、标题、摘要包含predictive control或MPC (2021.07.10)



控制或过程控制主流期刊上预测控制论文数平稳增长



交通、电力电子、先进制造、能源、环境等期刊上预测控制论文数增长迅速

## 先进制造与装备

### 单个装置→生产全过程

#### 醋酸乙烯生产非线性大型过程网络 (Tu et al, 2013)

- ✓ 179个状态变量和13个操作变量
- ✓ 179个常微分方程、351个代数方程和23个不等式约束
- ✓ 最大化最终产品中醋酸乙烯总产量，具体通过反应器及分离器和吸收塔中的相关量表达

### 变量控制→指标控制

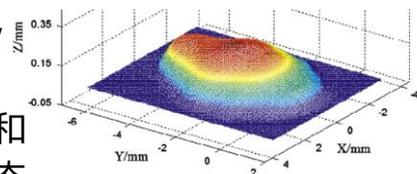
#### 优化薄膜光反射率和透射率(Zhang et al, 2010)

- ✓ 二阶随机偏微分方程描述薄膜表面高度分布动力学演化
- ✓ 优化薄膜光反射率和透射率归结为调节薄膜表面粗糙度和平均斜率，通过控制衬底温度和沉积速率实现

### 物理量反馈→视觉反馈

#### 钨极氩弧焊三维熔池形状控制 (Liu, Zhang, 2013)

- ✓ 熔池表面由宽、长及凸度描述，是监控焊接质量的依据
- ✓ 对视觉传感信息通过图像处理和三维重构得到实时熔池表面状态



## 面向过程→面向新工艺新装备需求

### 涡轮增压汽油发动机MPC (Bemporad et al, 2018)

在Industry engagement with control research: Perspective and messages (Samad et al, 2020, ARC) 中作为**工业中成功故事的样板之一**介绍

MPC用于涡轮增压汽油发动机扭矩跟踪。由意大利ODYS (Optimization of Dynamical Systems) 公司与通用汽车合作开发并用于通用汽车，目前正在全球平台上大量生产。



- 基于发动机工况实时调度的一组线性MPC控制器
- 优化瞬态/稳态操作的扭矩跟踪，最小化燃料消耗
- 考虑对节油稳态执行器位置及输入/输出变量的约束
- 采用卡尔曼滤波器通过测量重构系统状态

### 空间望远镜预测热控制(PTC)技术稳定温度 (Stahl & Brooks, 2019)

克服空间望远镜旋转或滚动时结构或镜面温度改变导致的波前误差 (WFE)

#### 2017年NASA启动预测热控制技术(PTCT) 开发项目

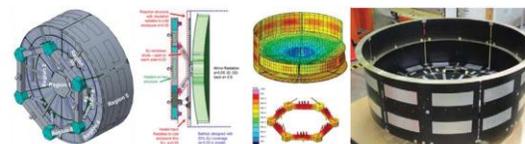


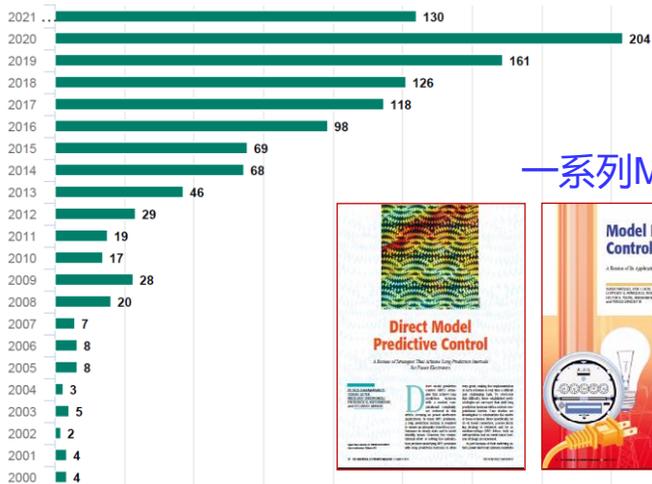
Figure 25: Thermal Control System with 37 zone control for AMTD-2 1.5-m ULE<sup>5</sup> mirror (ITAR)

- 预测热模型可在给定的旋转或滚动下预测热负荷的变化与传播
- 根据测量和估计的温度分布，确定产生期望温度轨线所需加热轨线
- 根据多区温度与加热器功率间的耦合关系优化加热器输出补偿WFE

## 电力电子

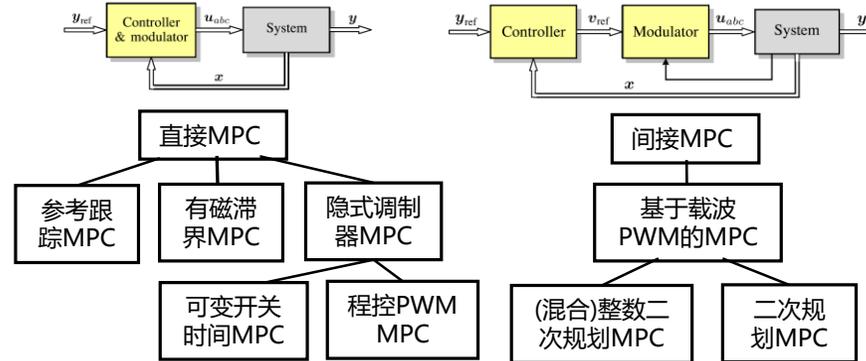
MPC应用于电力电子领域始于1980s  
(Holtz & Stadtfeld, 1983, Schröder & Kennel, 1983,1985)

MPC应用于电力电子领域方法分类  
(Karamankos et al, 2020)



EI Citation: Papers in English journals=1201  
Title=predictive control or MPC  
Subject/Title/Abstract=power electronic or converter.

### 一系列MPC在电力电子领域应用的综述



MPC应用于电力电子领域的内容  
(Vazquez et al, 2014)

- 并网变换器控制 (有源前端、有源滤波器)
- RL负载逆变器控制 (矩阵逆变器、选择性谐波消除与抑制、多层逆变器等)
- 输出LC滤波器的逆变器控制
- 高性能驱动

最新综述: Model Predictive Control of Power Electronic Systems: Methods, Results, and Challenges (Karamankos et al, 2020)

### 产品与应用 (ABB Review 01|2021)

#### 模型预测脉冲模式控制 (Model Predictive Pulse Pattern Control, MP3C)

针对船舶、采矿等行业的电力驱动应用开发

MP3C把MPC与最优脉冲模式 (Optimized Pulse Pattern, OPP) 技术结合起来, 可以提供最小谐波失真、快速动态响应和出色的鲁棒性

2019年, ABB推出了**配备MP3C的ACS6080驱动器**, 该驱动器已用于抽水蓄能电站。

**新 MP<sup>3</sup>C 控制方法: 最大限度地提高效率和动态性**

ABB 针对船舶、采矿、冶炼、工程机械等行业电力驱动应用开发了模型预测脉冲模式控制 (MP<sup>3</sup>C)。它在最大程度上提高了效率和动态性, 同时保持高转矩控制 (OTC) 的出色动态性能。

MP<sup>3</sup>C 结合了模型预测控制 (MPC) 和优化的脉冲模式 (OPP)。MPC 用于优化电流谐波, 而 OPP 则用于优化开关频率和电压应力。这种组合使得 MP<sup>3</sup>C 能够在高功率密度应用中实现更小的体积和更低的成本。

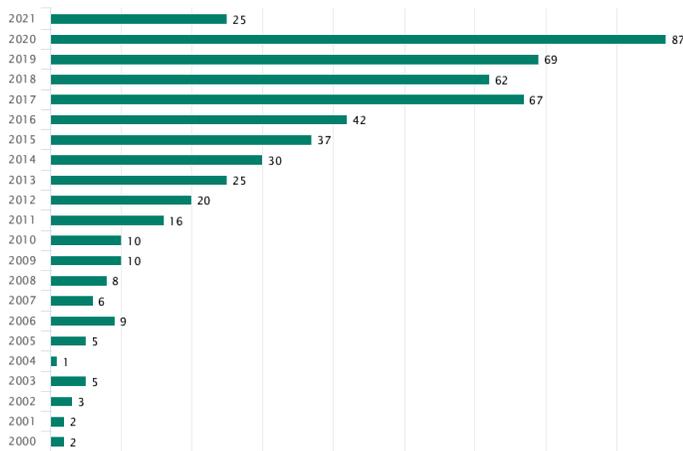
在大型工业应用中, ABB 的 MP<sup>3</sup>C 技术为驱动系统提供了更高的效率和更长的使用寿命。它还能够适应变化的负载条件, 确保系统始终处于最佳运行状态。



# 机器人及运动体

**机器人** 最早文献: PFC用于工业柔性机械臂控制 (Kuntze et al, 1986)

EI检索标题含predictive control或 MPC且主题标题摘要含robot英文期刊论文数573篇



- 研究对象: 机械臂、移动机器人、行走、水下、空间机器人等
- 研究内容: 跟踪控制、视觉伺服、避障、欠驱动控制、多机器人编队等

结构化环境→非结构化环境

单一要求→综合要求

单机器人→多机器人

**飞行器** 最早: 飞行器地形跟踪 (Reid, 1981)

早期研究内容包含飞行控制、追/逃、蒸汽压缩系统、到达调度等

近期更聚焦于**无人机 (UAV)**



## 航天器

研究内容包括空间交会对接、姿态控制、超近距离接近、软着陆等



**空天领域综述:** Eren et al, Model Predictive Control in Aerospace Systems: Current State and Opportunities. J. Guidance, Control and Dynamics, 40(7), 2017

## 船舶和水下航行器

船舶滚摇镇定控制、全电动船舶电压稳定控制

水下机器人自主导航、跟踪控制



# 预测控制应用领域的扩展

## MPC技术用于最新研制的机器狗/人



MIT猎豹四足机器狗 Mini Cheetah (2019)

MPC用于实时运动规划, 为机器狗躯体和车轮的跟踪控制器提供期望关节速度和地面反作用力



波士顿动力公司Atlas 双足机器人 (2019)



腾讯机器狗Max (2021)

论文arXiv:2010.06322 (Bjelonic et al, 2020)



瑞士ANYbotics 公司推出机器ANYmal (2020)

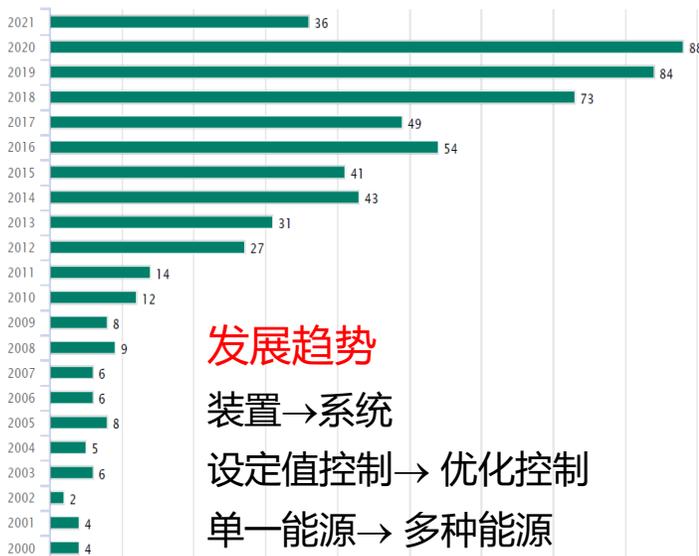


# 智能建筑 (采暖、通风、空调, HVAC)

据国际能源机构2015年报告, 当今建筑约占全球能源使用量的40%, 其中大部分用于采暖、通风和空调 (HVAC) (Drgona et al, 2021)

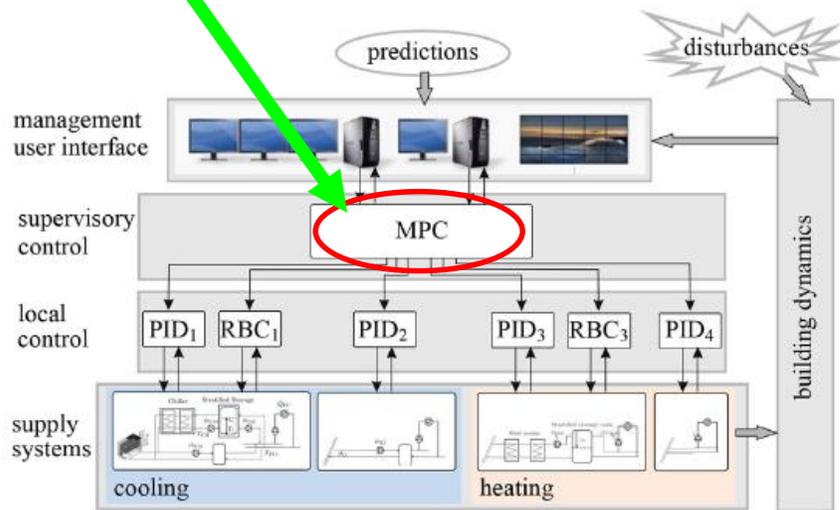
## MPC已成为智能建筑节能运行的主要控制策略

最新综述 "All you need to know about model predictive control for buildings" (Drgona et al, 2021)



El检索标题含predictive control或 MPC且主题标题摘要含Building英文期刊论文数631篇

典型应用-MPC作为监督控制器  
为底层设备PID或RB提供设定值



### MPC用于建筑的优点

- 可有效预测未来扰动 (环境温度、辐射、占用率)
- 易于处理大时间常数
- 可简单地将热约束和技术约束纳入优化

### MPC用于建筑的缺点

- 缺乏适合于MPC建模的商业工具
  - 领域工程师通常不熟悉建模和预测控制
  - MPC设计需要对每一特定建筑物单独设计
- 关于节能建筑MPC的10个问题 (Killian & Kozek 2016)

实际应用-已有在实际建筑中测试的案例报道, 但还未达到商业化应用



# 交通

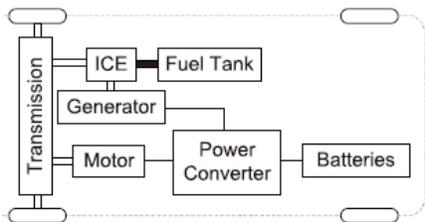
## 车-车辆控制

### 主动转向 (Active Steering)

基于车辆模型轮胎模型  
给定期望轨线 (航向角/偏航角速度等)  
求出前轮转向角  
Borrelli et al, 2005, Falcone et al, 2007, Besselmann & Morari, 2008

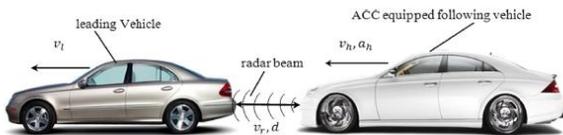
### 混合动力车 (HEV)

如何在不同能源间分配功率需求, 以维持电池充电, 优化传动效率, 降低燃料消耗与排放 (Tie & Tan, 2013)

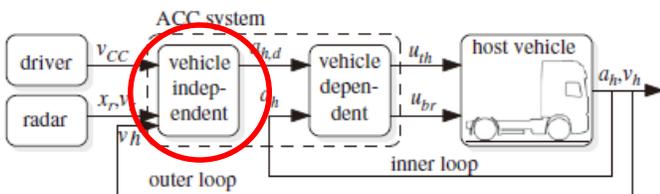


MPC用于HEV能量管理综述 (Huang et al, 2017)

### 自适应巡航控制 (ACC)

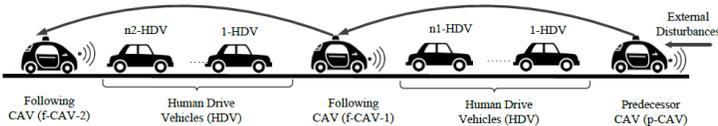


自动跟踪前方车辆并保持安全距离  
目标: 安全性及舒适性  
采用双层递阶结构 (Naus et al, 2010)  
下层: 调节油门与刹车 (一般为车载)  
上层: 提供加速度期望轨线 (MPC)



有大量研究文献, 原理同样适用于列车自动驾驶、农业机械等航迹控制

### 自动驾驶+车联网环境 (IoV) → 网联自动驾驶 (CAVs)



## 路-道路交通控制

信号控制 针对城市路口或高速路 → 区域性城市交通路网  
交通信号控制MPC方法综述 (Ye et al, 2019)

### 集中MPC

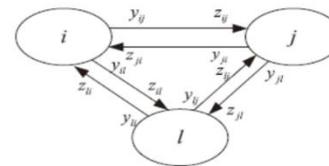
采用简化模型 (如采用路段传输模型)  
适当简化优化问题 (如将NL转化为MILP问题求解)

### 递阶MPC

多级结构  
多层结构

### 分布式MPC

多智能体方法  
分布式协调控制



## 车 ↔ 路 车路协同

### 协作自适应巡航控制 (CACC)

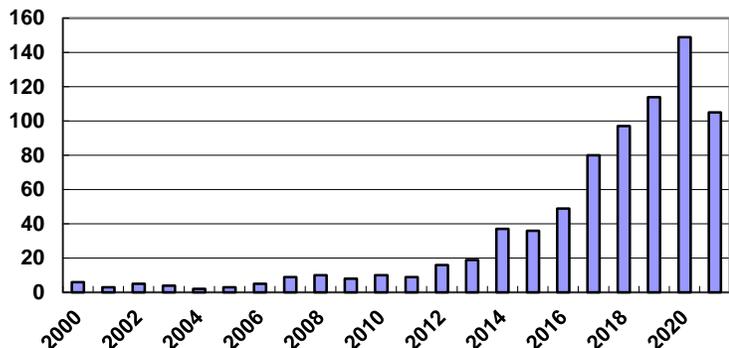
基于V2V通信和前馈扰动预测的MPC (van Nunen et al, 2019)

### 车辆编队 (Vehicle platooning) 控制

基于V2V&V2I通信, 利用交通信号和车辆速度 (Smith et al, 2020)

# 电网与能源

EI检索标题含predictive control或 MPC且主题标题摘要含power network或microgrid英文期刊论文数796篇

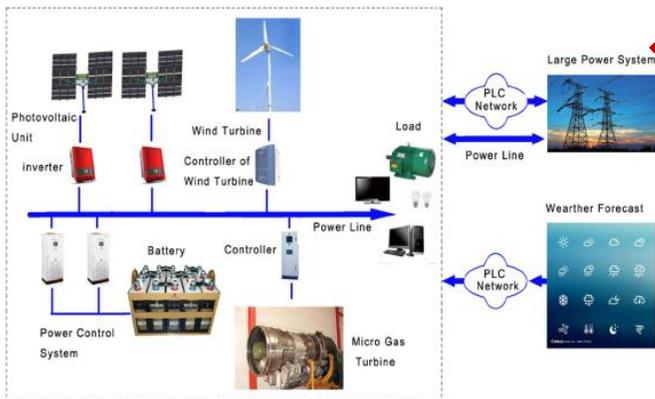


## 单元预测控制

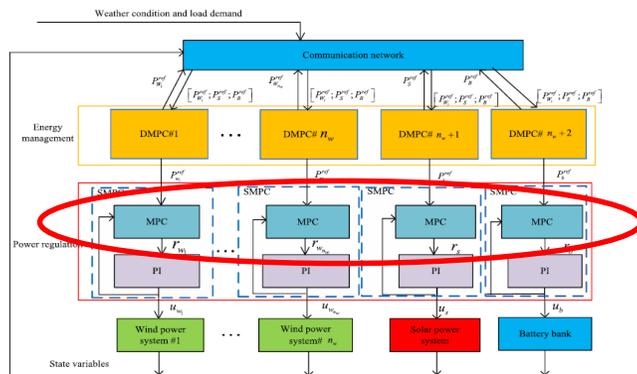
## 大规模电网/智能电网

- 集中、分布式和递阶控制的比较 (Wang et al, 2014)
- 有源配电网集中式电压功率控制 (Nguyen et al, 2021)
- 智能电网负荷递阶控制 (Brandstetter et al, 2017)
- 关联电网分布式负荷调度频率控制 (Jia et al, 2019)
- 电力系统系统级分布式谐波抑制 (Skjong et al, 2019)

## 微电网



综述: Villalón et al, 2020, Hu et al, 2021



风能/太阳能/电池递阶分布式控制 (Kong et al, 2019)

## 微电网分层递阶控制

**三级控制:** 微电网集群之间或微电网与上游电网之间的潮流管理, 及相关经济优化目标

**二级控制:** 补偿频率/电压偏差, 恢复到稳态额定值, 实现与公用电网安全并网

**一级控制:** 稳定系统频率/电压, 合理分担负载, 维持微电网基本运行 (MPC取代串级结构)

## 微电网能源优化

### 单个微网能源管理

微电网能量调度 (Zhou et al, 2019)

多能源微网的经济MPC管理 (Vasilij et al, 2020)

### 多微网互联

互联微网递阶分布式能源优化 (Hans et al, 2019)

多微网分布式协调能源有效利用 (Du et al, 2019)

## 可再生能源应用综述

控制光伏和风能系统各种转换器上的电压、电流和功率等各种目标的MPC (Sultana et al, 2017)

利用数据驱动预测控制加物联网发挥建筑能源在智能电网中灵活性 (Kathirgamanathan et al, 2021)

# 关键基础设施 (Critical Infrastructure Systems, CIS)

**CIS 的特征:** 分布式、网络化结构; 变量规模大、异构; 非线性动力学和不确定性; 操作条件变化范围大; 受到扰动或攻击

**CIS中应用MPC的共同点:**

- **目标:** 在负载不确定变化情况下满足用户需求并降低运行成本
- **定位:** 用于中间优化层, 优化底层设备控制器的设定点

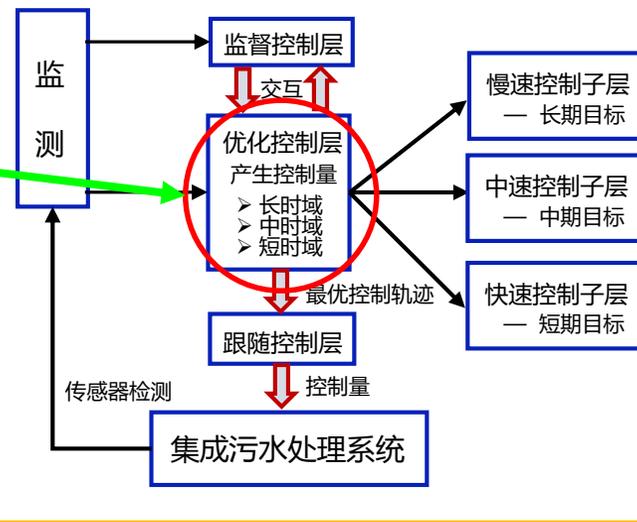
## 排水系统 - 溢流控制+污水处理

目标: 减少下水道污水溢流并对污水进行处理

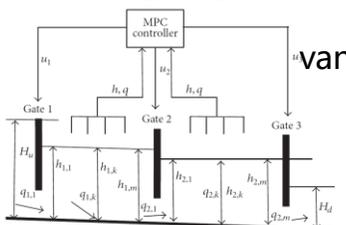
城市排水系统MPC综述 (Lund et al, 2018)



污水处理系统递阶预测控制 (Brdys et al, 2008)



## 供水系统 - 灌渠 (irrigation)



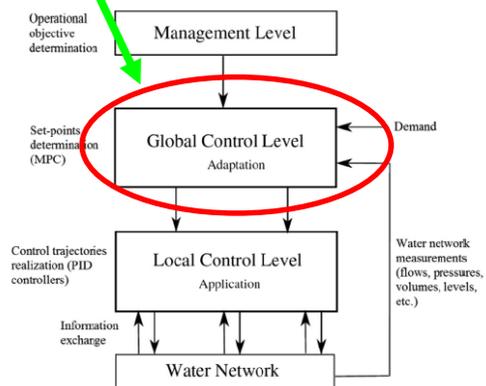
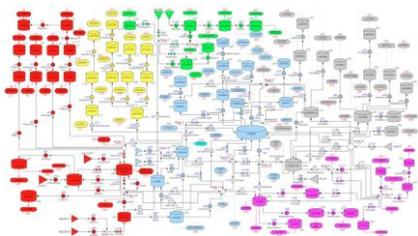
van Overloop et al, 2010



MPC通过预测需求流量变化, 把反馈与前馈相结合, 调节闸门高度保持水位在设定值并满足下游灌溉需要

## 供水系统 - 给配水

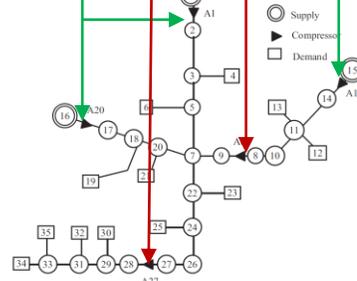
巴塞罗那饮用水供水网运行优化 (Pascual et al, 2013)



**上层**  
所有压缩站离线全局优化  
长周期 (例如24小时)

**下层**  
仅对直接邻接供气点的  
压缩站在线优化  
短周期 (例如1小时)

期望输出压力 (在线)



## 气体传输网络 (Marques & Morari, 1988)

- 用户需要具有一定压力的天然气
  - 在传输过程中气压下降, 增压需要代价
- 如何在用户用气存在不确定性的情况下, 以较低成本为用户提供满足压力要求的天然气

# 医疗

## 麻醉控制

**目的:** 催眠、镇痛和肌肉放松

**挑战:** (Nascu et al, 2015)

患者变异性、多变量、可变时延、动力学依赖于催眠药物、模型变异性等



早期用**GPC算法**: Mahfouf et al, 1997, 1998, 2003

近期采用**先进MPC算法与策略**

- 多参数规划 (Dua et al, 2010, Nascu et al, 2017)
- 模糊预测控制 (Méndez et al, 2016)
- 多模型切换 (Jing & Syafiie, 2020)

**不同方法的临床比较:** Yelneedi et al, 2009, Sreenivas et al, 2009, Neckebroek et al, 2019, Hosseinzadeh et al, 2020

## 药物治疗优化

**目的:** 安全、稳定、降低成本

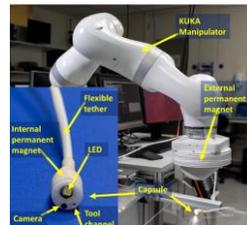
### 血液透析期间稳定性

维持血透期间相对血容量和心率变化稳定, 避免低血压及相关并发症发生 (Javed et al, 2010)

### 艾滋病感染的高活性抗逆转录病毒疗法 (HAART)

满足健康细胞浓度下界约束、感染细胞浓度上界约束, 降低用药成本 (Pannocchia et al, 2010)

## 医疗设备



**手术机器人**辅助心脏外科手术 (如二尖瓣成形术) (Bowthorpe, 2016)

用EKF预测心脏跳动运动, MPC控制手术机器人与跳动心脏同步运动, 外科医生可以对一个看似不动的心脏进行遥操作, 提高手术精度与效率

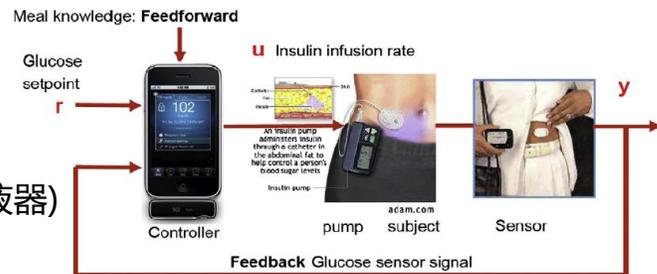
**磁驱动柔性内窥镜控制, 室内环境下自动轮椅等**

## 1型糖尿病人胰岛素注射-MPC在医疗中应用的热门

- 从1990s就开始研究MPC用于糖尿病人胰岛素注射
- 从开环→闭环, 从间隔输入→连续输入
- 既要降低血糖, 又要防止低血糖
- 主要难点: 个性化, 餐食干扰

### 人工胰腺

植入式血糖传感器+胰岛素泵 (及储液器)+控制算法 (Bequette, 2012)



**商业化系统OmniPod Horizon自动血糖控制系统** (Buckingham et al, 2018)

个性化MPC算法嵌入胰岛素泵(Pod)中, 与最新连续血糖监测技术直接通信。手持设备可传输胰岛素注入命令, 调整算法参数并允许连接到云服务器进行数据管理



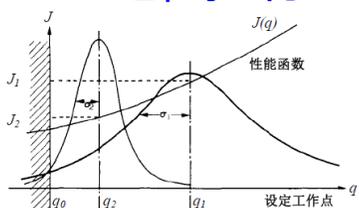
## 主要内容

- 预测控制的发展历史简述
- 预测控制应用领域的扩展
- 预测控制应用情况的分析
- 新的可能性和总结与注释



# 为什么要用?

## 过程控制



提高精度，减少方差，实现约束下的卡边控制，提高质量和效益

## 电力电子

根据不同应用场景的需要，例如对变速驱动器进行精确控制，要求最大程度地提高效率 and 电机友好性，同时保持直接转矩控制的出色动态性能和鲁棒性



## 公共基础设施

在地域分布广、不确定性大、约束多的情况下，以最低代价满足用户需求—卡边



## 微电网

考虑功率平衡及对各组成部分物理约束和功率交换约束，最优分配发电功率、与主网交换功率及电池充电量，最小化系统运行成本



## 自动驾驶



考虑由系统关键特征所加入的冲突要求和可能约束，提高安全性和舒适性，滚动时域方式使控制器能自适应变化的交通环境

## 智能建筑

预测未来干扰 (环境温度、太阳辐射、占用率)，将热约束和技术约束纳入到优化问题中，考虑时滞及多变量控制问题的解耦，解决用户舒适度最大化和能耗最小化这一冲突目标



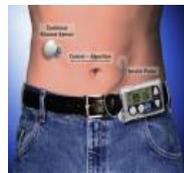
## 机器狗

实时运动规划，为机器狗躯体和车轮的跟踪控制器提供期望关节速度和地面反作用力，考虑整体运动动力学提高精度



## 人工胰腺

预测血糖浓度在未来有限时间内的变化，以确定相对于特定性能指数的最优胰岛素输注率，保持血糖在安全范围内



**追求更高精度、更快速度、更优质量**  
**在实际约束下卡边获取最优效益**  
**协调各种可能冲突的目标**  
**适应环境条件的不确定变化，增强鲁棒性**

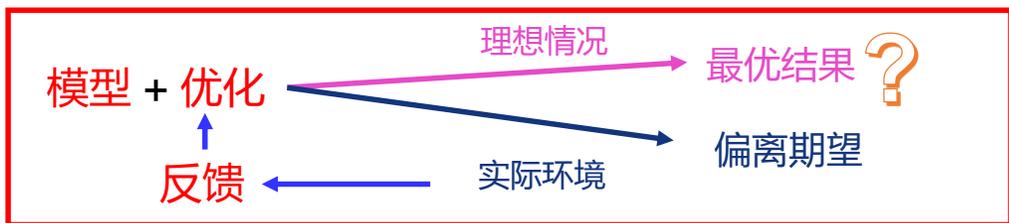
## 为什么能用？ 方法原理 — 不确定环境下追求最优的合理机制

预测控制的基本原理从系统和信息的角度融合了控制论的最基本要素：**模型、优化与反馈**

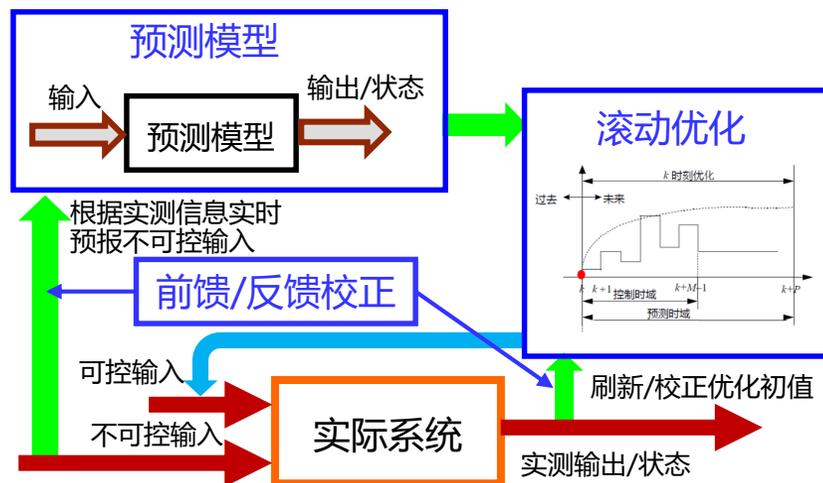
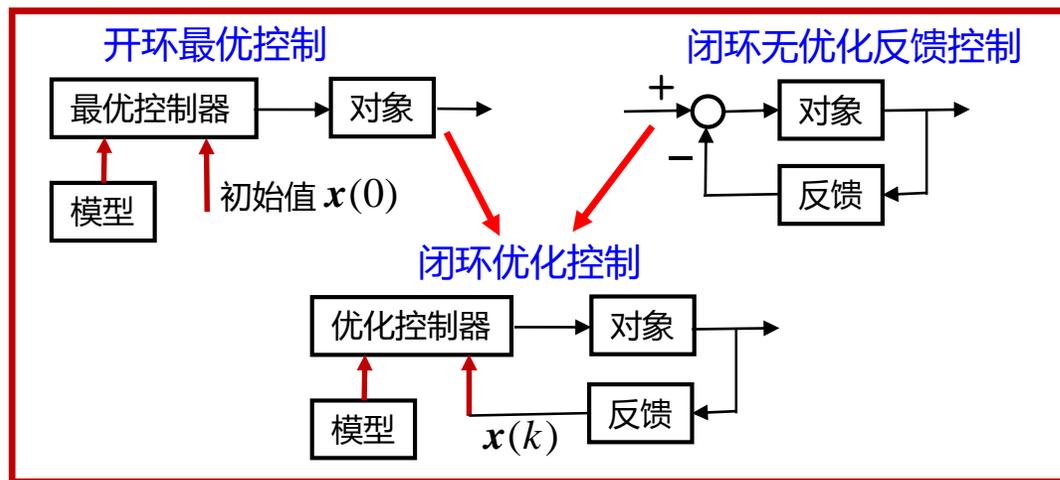
**模型**描述对象动态行为的规律性，是**优化**的基础

**优化**针对系统未来行为，需要借助**模型**进行预测

**反馈**得到系统实际信息，隐含了未知不确定性影响

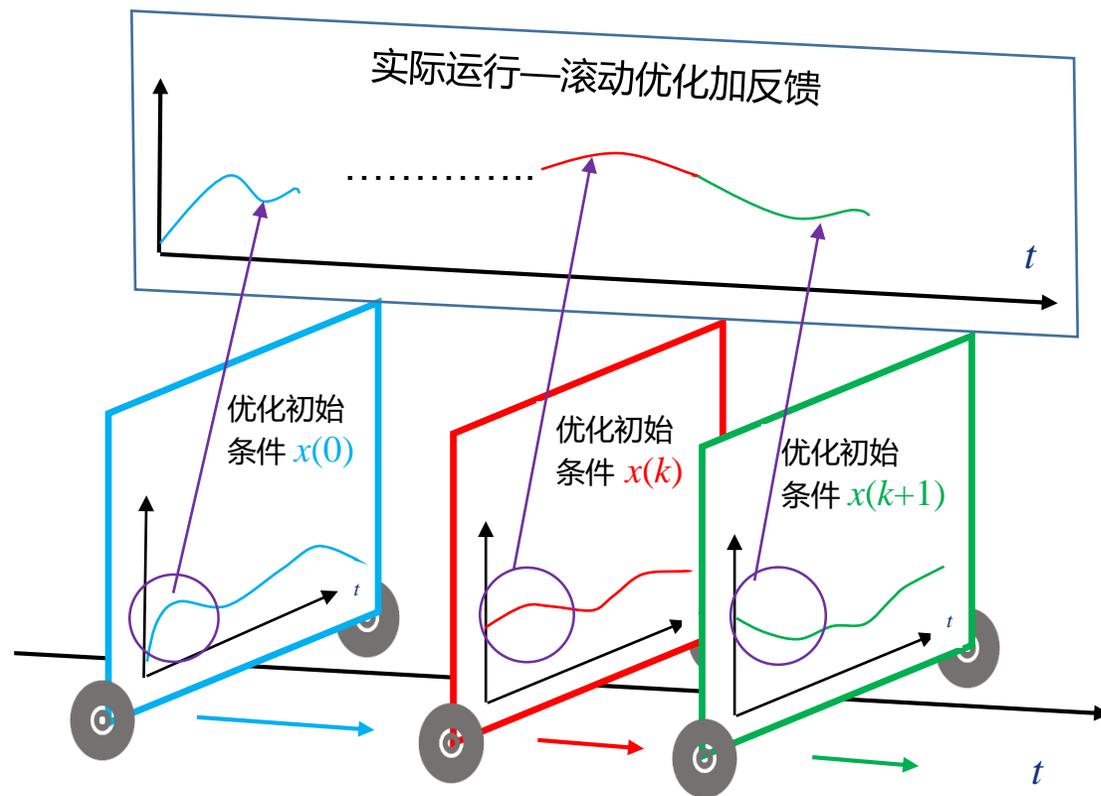
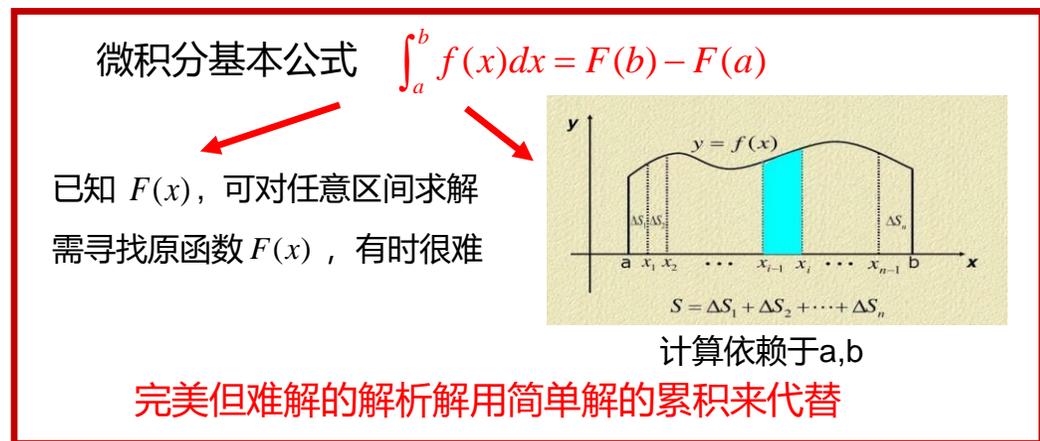
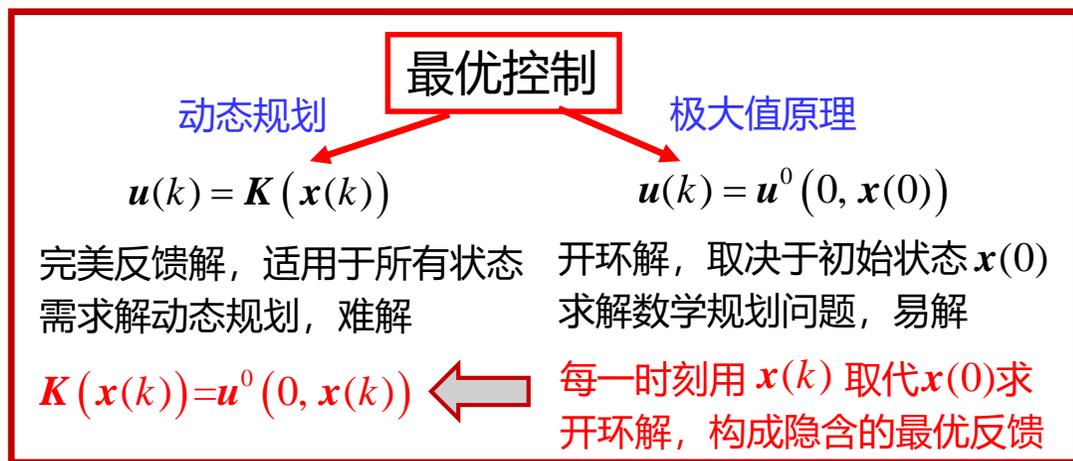


预测控制构建了**优化与反馈相结合的合理机制**，提供了在**不确定环境下追求最优的合适途径**，并为**模型选择、优化问题定义和求解、反馈信息利用**提供了自由的空间，由此可演绎出无数新结构和新算法





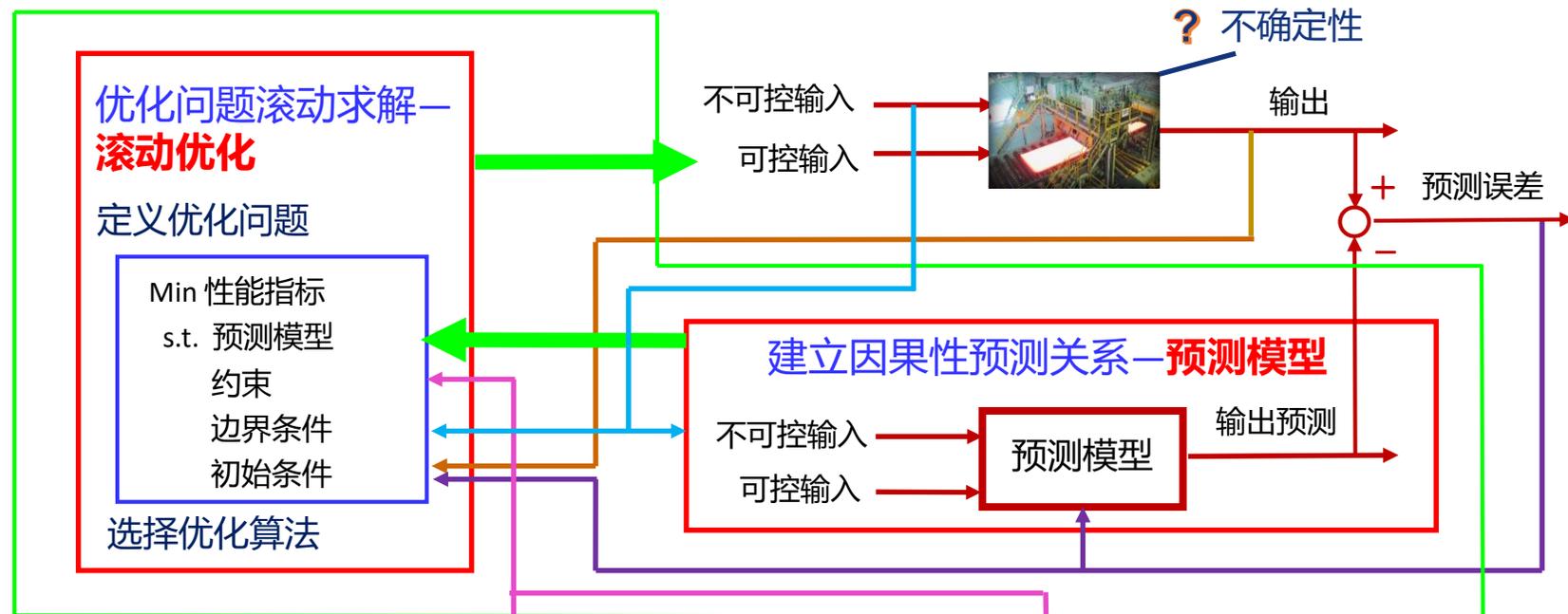
# 为什么能用？ 运行机制 — 最优控制求得最优反馈解的可行方法



预测控制给优化装上了时间的轮子，把动态系统最优控制难解的函数(反馈律)优化问题替代为持续在每一时刻求解开环优化的参数优化问题



# 为什么好用？ 问题驱动，构造定制算法的思路清晰直观



## 怎么做 (闭环)?

- 如何处理不可控输入量的不确定性?
- 如何克服因不确定性出现的预测误差?

## 对不可知因素非因果性预报—反馈校正

未来不可控输入预报需根据实测结果更新

刷新初始状态

估计/校正初始输出预测

## 怎么做 (开环)?

- 如何设计可控输入量使被控量达到期望要求?

## 知道什么?

- 这些量的变化受到哪些变量的影响?
- 输入量如何定量影响被控量的变化?

## 能做什么?

- 可控输入量变化的范围?

## 要做什么?

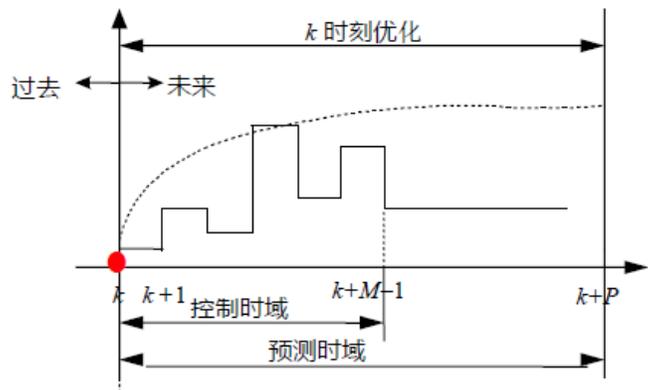
- 控制的要求是什么?
- 哪些变量可以用来反映控制的要求?

构造出定制预测控制问题





## 为什么好用？ 按需优化，确定目标约束的方式显式灵活



预测控制每一时刻求解以未来控制量为优化变量的**优化问题**，是**数学规划问题**

- **约束显式加入**，允许把各种实际的约束写到优化问题中
- **目标按需定义**，可根据实际控制需要由用户定义优化性能指标
- **冲突便于协调**，可通过加权或软约束协调不同的甚至相互冲突的控制要求
- **问题类型不限**，归结为LP、QP、IP、MILP、NP等不同类型的数学规划问题
- **求解算法成熟**，优化理论和算法积累丰富，有不少高效的求解工具

**软要求**  
出于经济性要求所附加的性能指标和对操作变量的期望

**软/硬要求**  
应尽量得到满足但存在一定柔性的工艺要求，允许松弛到一定范围，超出则转化为硬约束

**硬要求**  
由执行机构的物理性质和生产安全性要求给出的必须满足的约束

性能指标

约束

优化问题

		最小值	最大值	期望值	优先级
被控变量	CV1	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XX
	CV2	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XX
	...				
操作变量	MV1	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XX
	MV2	XXXXX	XXXXX		XX
	...				

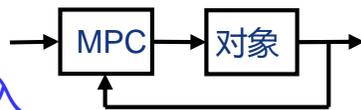
操作者可以**按照从硬到软的优先级**，把各种实际要求**表达**到优化问题的约束和/或性能指标中

## 为什么好用？ 模式多样，结合特色结构的应用包容有效

### 直接控制

直接优化控制输入

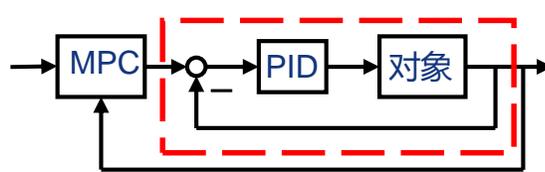
用于简单回路/过程控制，替代原有控制算法  
在制造、电力电子、医疗等领域应用较多



### 透明控制

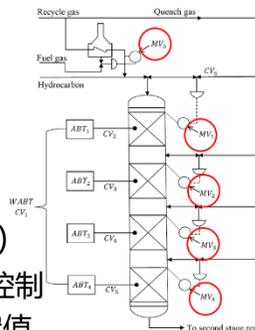
动态调整下层  
PID回路设定值

在工业过程、基础设施、智能建筑、自动驾驶等普遍应用

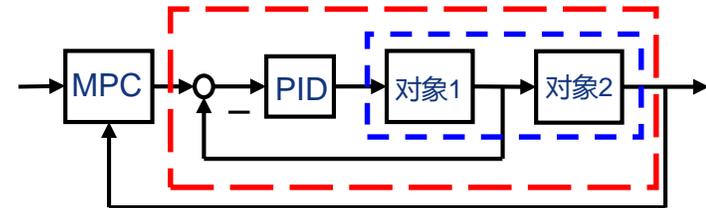


精馏塔控制  
(Kelly et al, 1988)

底层DCS实现PID闭环控制  
MPC给出底层回路设定值



### 串级 及时克服中间干扰

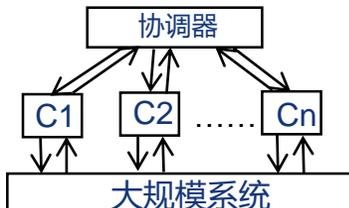


在工业过程、电力电子中应用较多

### 递阶 大规模问题分解-协调

上层：根据全局目标  
协调下层子问题  
下层：在上层干预下  
分解为低维子问题

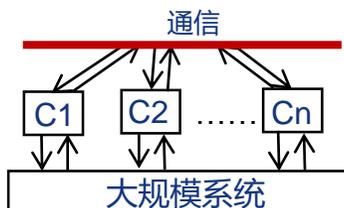
常用于工业过程、交通、电网、能源管理等



### 分布式 信息不完全时的协同

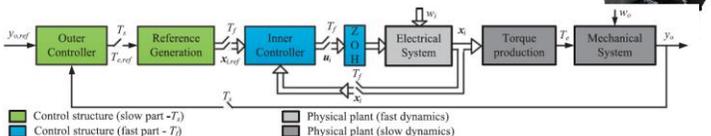
大系统的各部分或多个  
体协同实现全局目标  
个体获取信息不完全，  
相互可交换部分信息

在各应用领域都有较普遍应用

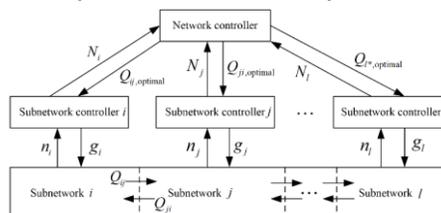


外激励同步电机 (Carpiuc & Lazar, 2016)

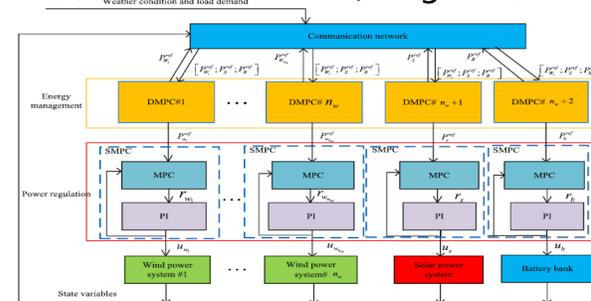
串级结构实现多速率控制



交通路网优化控制  
(Zhou et al, 2017)



智能电网分布式控制 (Kong et al, 2019)

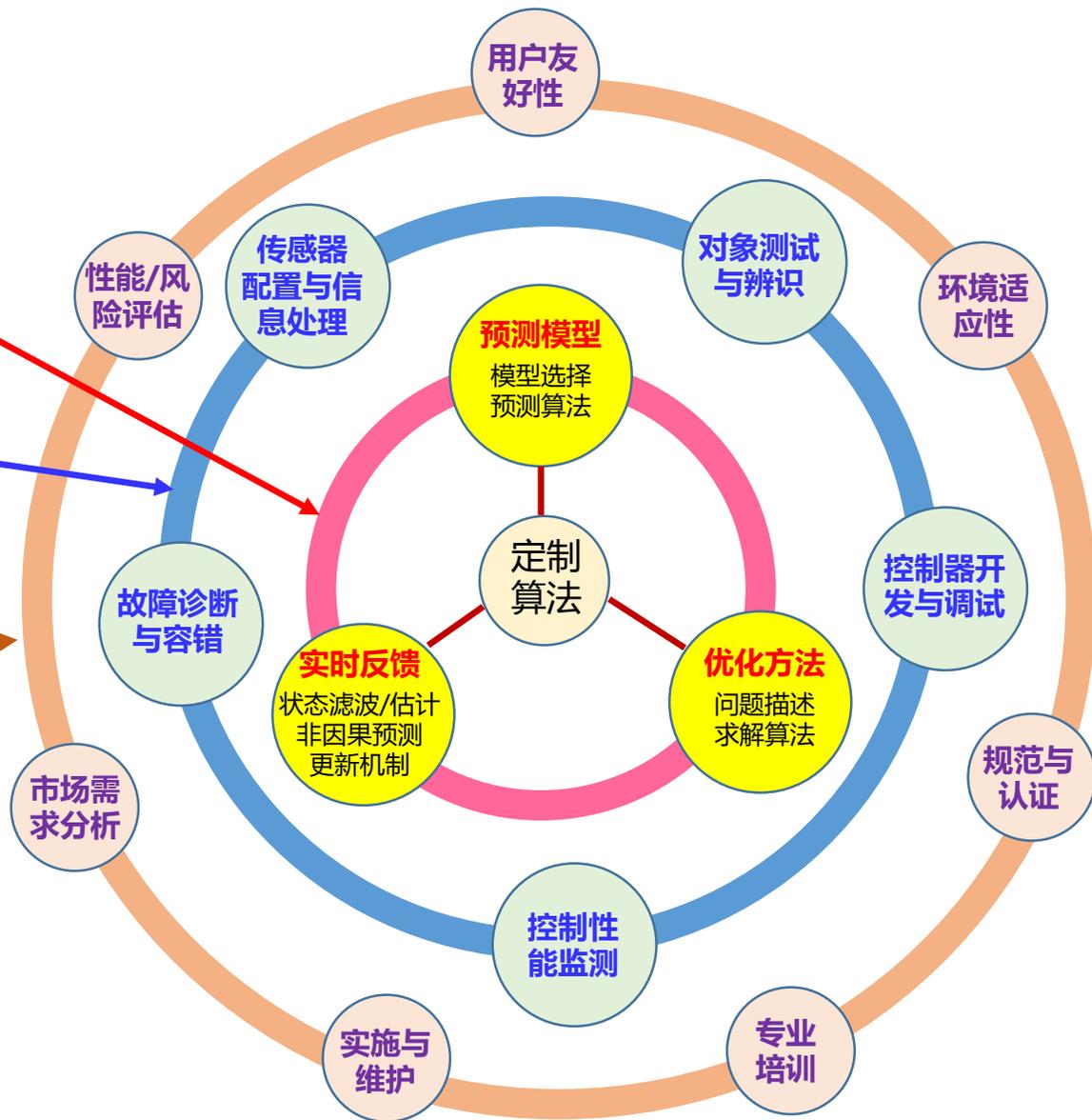




# 用得怎么样？

- 面向问题的定制算法**
  - 研究针对特定问题的算法，通过仿真验证
  - 在文献中占有最大的比例
- 系统集成的解决方案**
  - 在实验室或现场应用或验证控制方案
  - 较多出现于工业过程、先进制造、机器人、智能建筑、电力电子、医疗等领域
- 面向行业的商用软件/产品**
  - 工业控制已有成熟软件产品
  - 电力电子、医疗等领域已出现商业化产品
  - 智能建筑、自动驾驶、机器人等近期有望突破

- **受欢迎**：经济社会的发展需求使“约束”，“优化”在控制问题中明显突出，预测控制正在成为实际应用中可接受的优化控制算法的基本选项
- **欠成熟**：向不同领域扩展的深度不同，目前大多仍停留在算法研究，系统技术推广应用正在铺开，商用软件或系统则远未达到过程控制领域的成熟程度





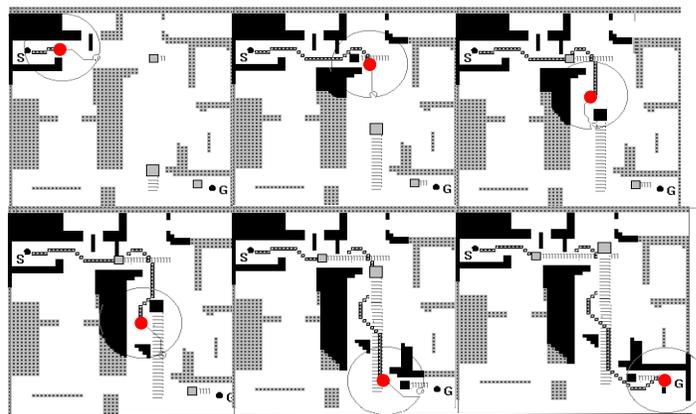
## 主要内容

- 预测控制的发展历史简述
- 预测控制应用领域的扩展
- 预测控制应用情况的分析
- 新的可能性和总结与注释

# 预测控制原理向优化决策问题的推广——拟解问题的扩展

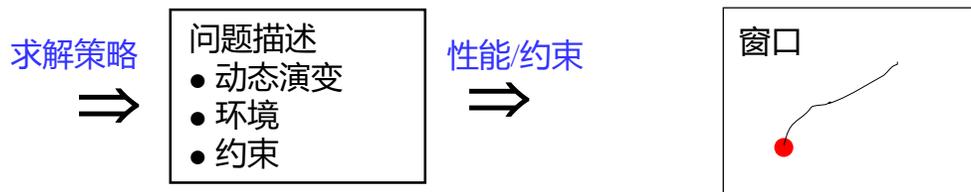
控制问题  $\Rightarrow$  动态不确定环境下的调度、规划、决策问题

机器人滚动路径规划

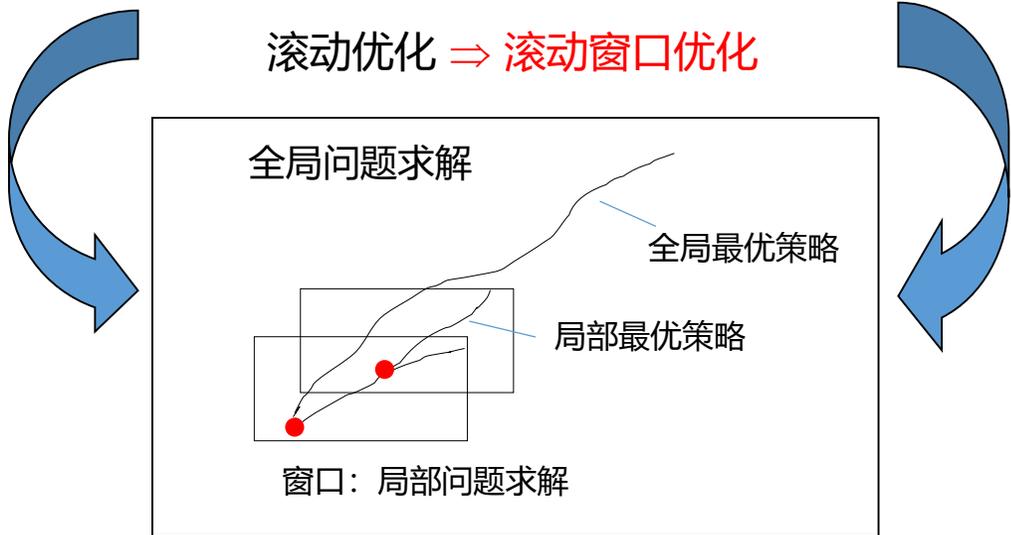


预测模型  $\Rightarrow$  场景预测

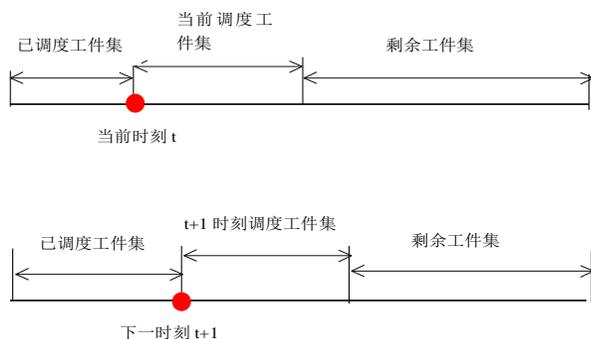
反馈校正  $\Rightarrow$  反馈初始化



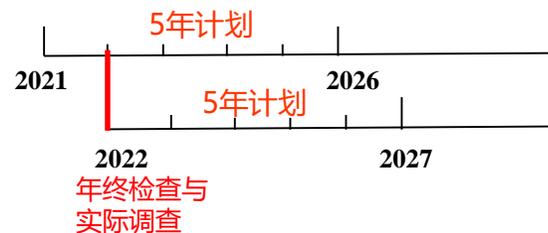
滚动优化  $\Rightarrow$  滚动窗口优化



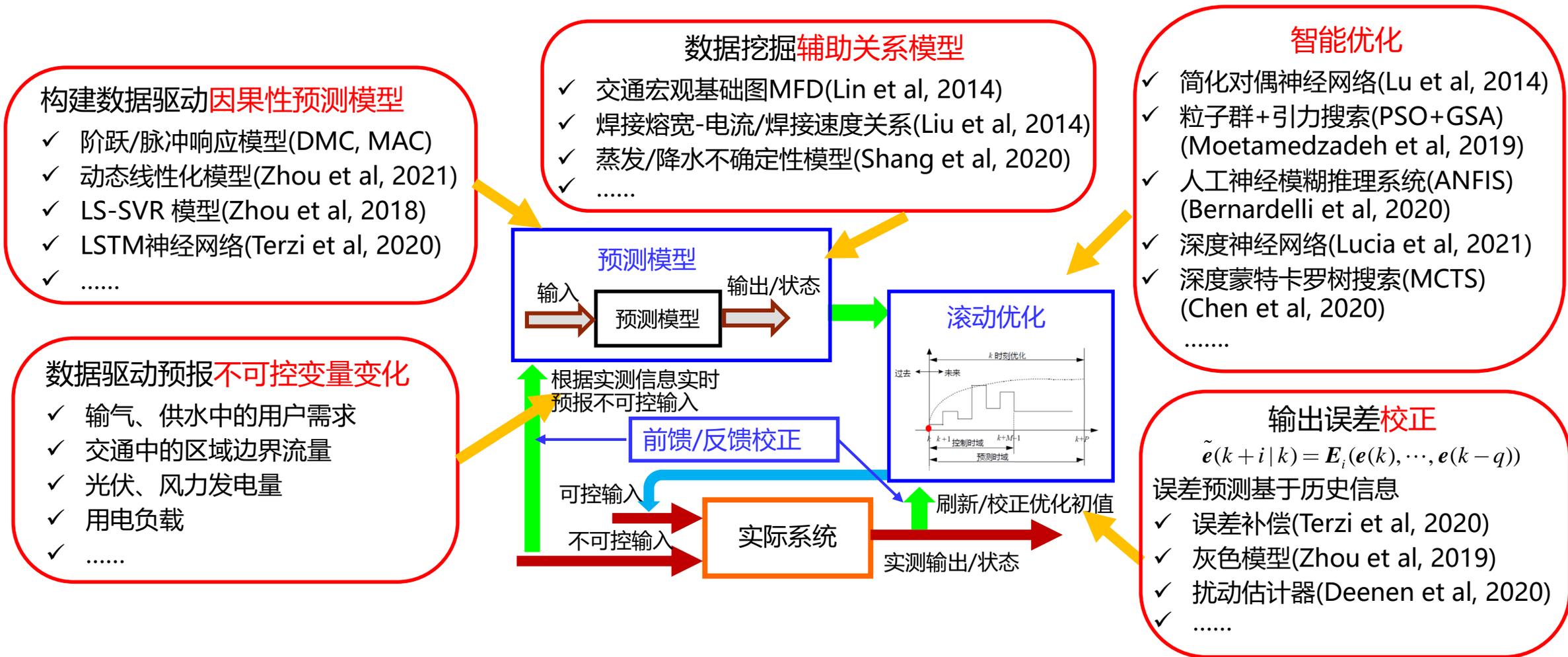
滚动调度



滚动计划

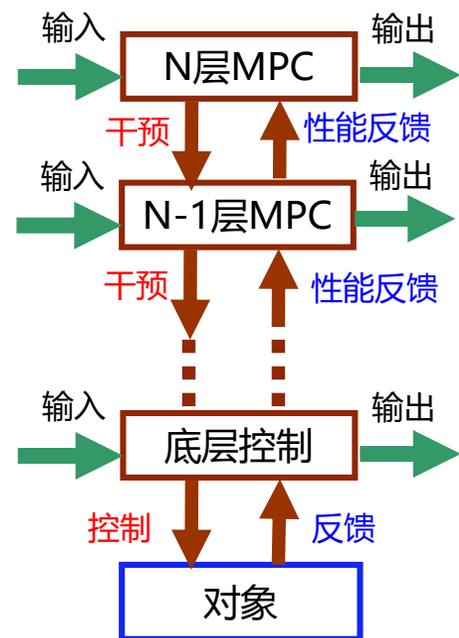


# 预测控制与数据/智能技术的结合 — 算法工具的扩展



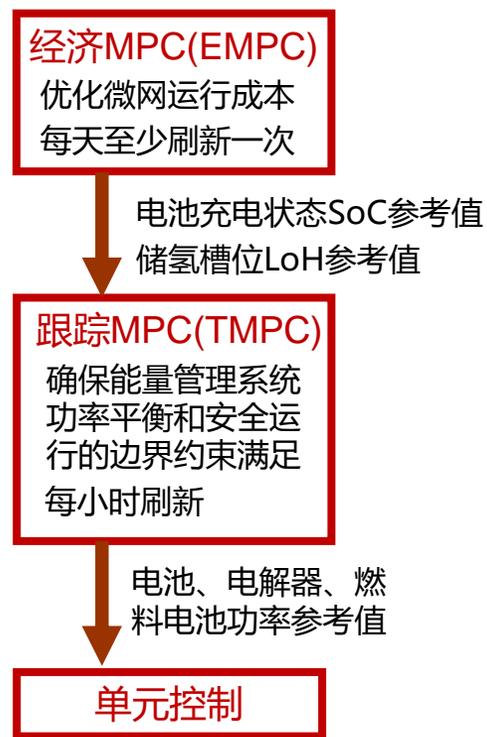
# 预测控制与智能结构的结合 — 应用模式的扩展

## 智能递阶结构中的多层预测控制

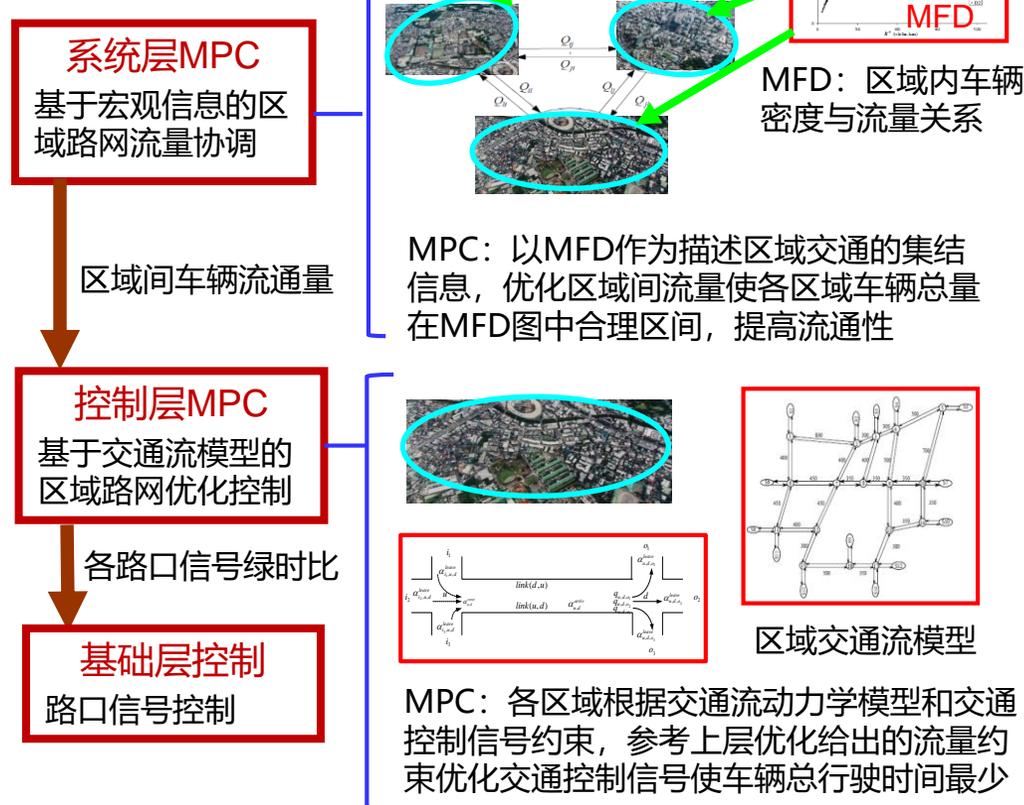


- 根据决策功能分层，越高越有战略意义
- 每层有特定的MPC问题和要实现的目标
- 每层的结果以某种方式干预下一层问题
- 可有不同的时标，高层滚动决策频率低

### 建筑微网能源管理 (Yamashita et al, 2021)



### 城市交通路网优化控制 (Zhou et al, 2017)





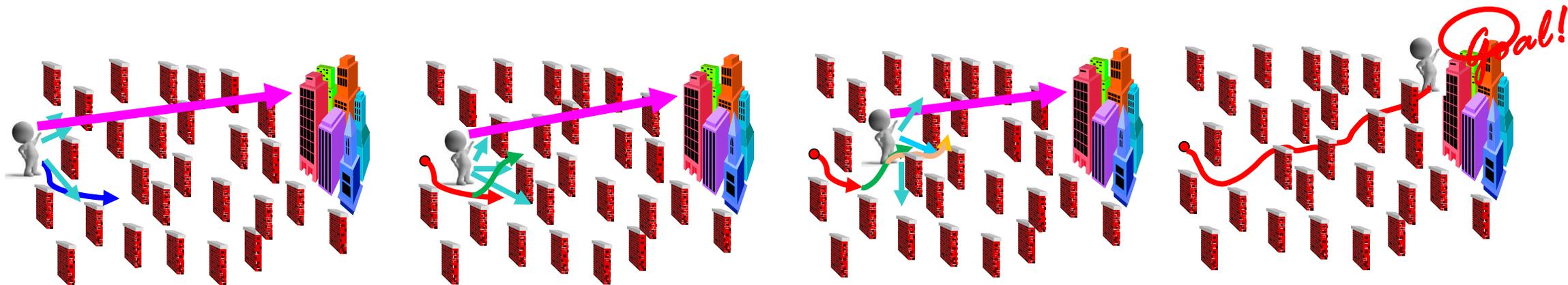
## 预测控制应用扩展的总结

- 预测控制在各应用领域的快速扩展主要源自经济社会发展对**约束优化增长的需求**。选择预测控制的理由主要包括：
  - 设计思路清晰直观，应用控制论思维，易于理解掌握，便于对特定场景定制
  - 求解问题自由方便，优化中可显式纳入约束灵活定义目标，数学规划易于求解
  - 实现模式灵活多样，兼容现有控制，易于融入先进数据/智能技术
- 预测控制向不同领域扩展的深度不同，**技术成熟度差别很大**。文献所反映的预测控制应用大多仍属于依托于特定背景的算法和仿真研究，落实到实验或实际系统为数不多，离开规模性、系统性的商用产品或系统开发的距离更大，远未达到过程控制领域预测控制软件和系统的成熟度。



## 结论与注释

- 预测控制应用的扩展并不归结于某些特定的算法，而归结于它**特定的方法原理**，这些原理包含了控制论的基本要素，并且以合理的机制组织起来。对不同问题，虽然具体演绎形式和工具不同，但思考方式相似，易于向新领域、新问题、新工具扩展。
- “预测控制就是解决标准最优控制问题，只是实施的方式不同”。理论界从预测控制就是标准最优控制出发开展研究，应用界则因为最优控制在工业环境中的不适用提出预测控制，把它作为一种新型控制与最优控制相区别，是**优化控制**而不是最优控制。
- 优化控制机制的引入，把最优控制的整体问题替代为**每一时刻求解优化问题的过程累积**。不仅在每一时刻可用熟悉的优化思路定义问题、引入约束并用数学规划求解，而且可实时嵌入反馈信息，预测控制受应用领域欢迎的众多优点正来源于此。



追求卓越，砥砺前行！

不是最优，胜似最优！

欢迎提出宝贵意见!

[ygxi@sjtu.edu.cn](mailto:ygxi@sjtu.edu.cn)