



清华大学电机工程与应用电子技术系  
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University

# 电力系统分析与控制 (30220562-5)

## 第七讲 稳态大作业Part3

2025-4-11



# 分享交流

## 任务二：多时段机组组合

# 课程提纲

Outlines



**随机规划**

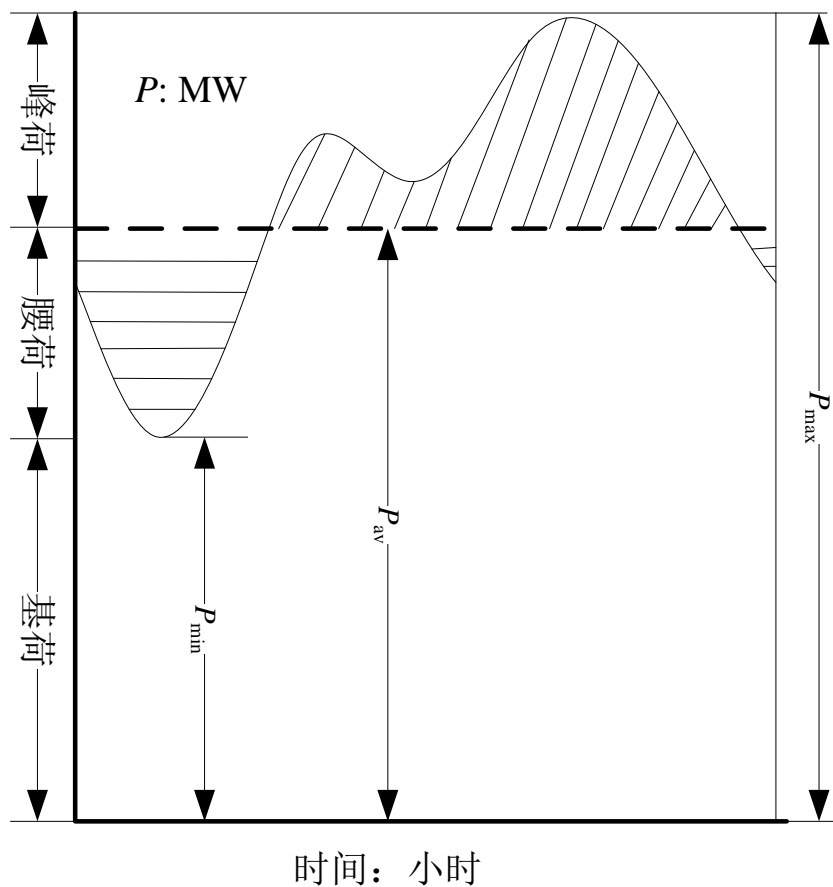
**机会约束规划**

**鲁棒优化**

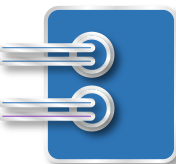
**任务三讲解**

# 考虑不确定性的优化方法

## 背景：电力系统的典型不确定性因素

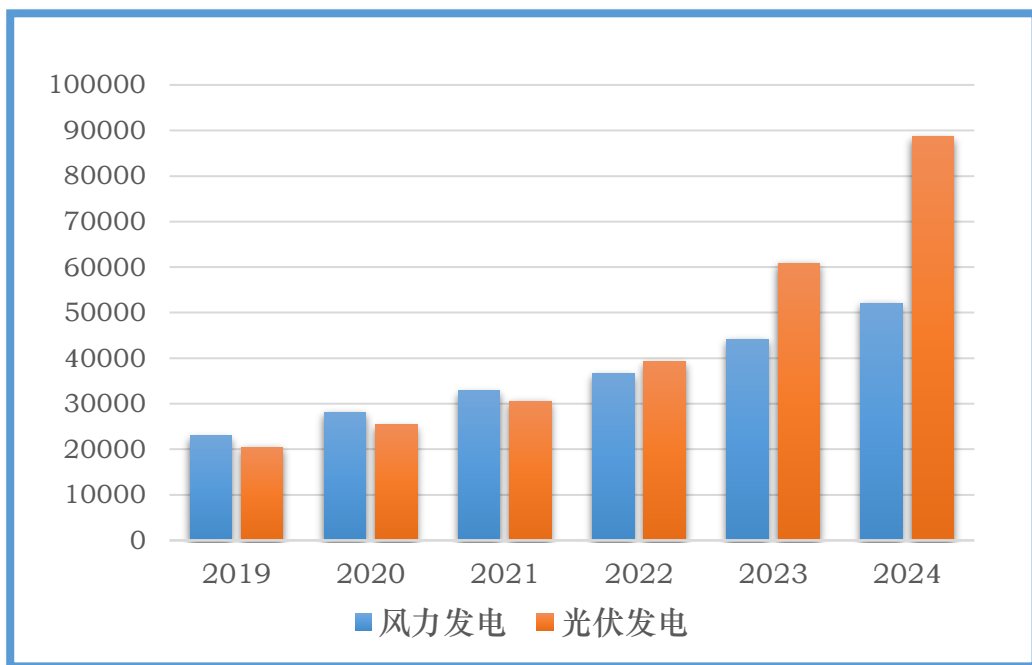


1. **负荷的不确定性** (例如: 气温变化、降雨引起的负荷波动, 经济因素如经济增长率; 突发事件; 新型电子控制负荷, 负荷功率因素的变化)
2. **电源的不确定性** (例如: 非计划停运; 设备故障; 继电保护误动或拒动; 经济因素—燃料价格、市场价格; 备用可用性)
3. **输电的不确定性** (例如: 天气因素如周围环境温度、风和冰暴; 地球物理学事件如雷电、地震、地磁暴; 非计划停运和设备失效 (故障)、区域间功率交换)

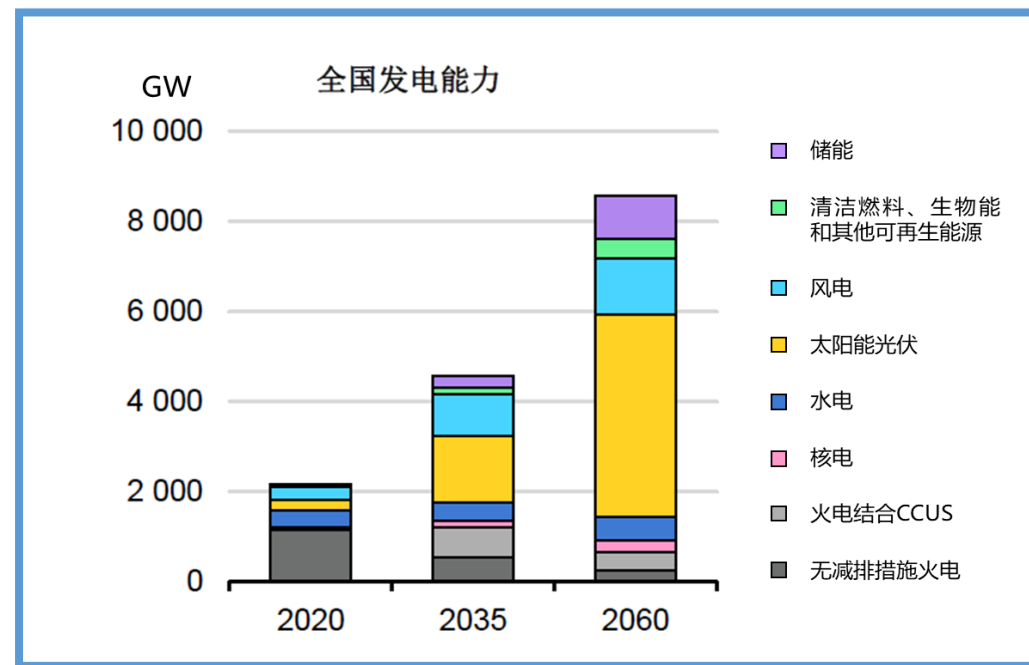


# 背景：电力系统的新不确定性因素

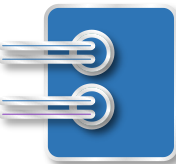
## 新能源发电迅猛发展，为源侧带来新的不确定性



2019-2024年全国风力发电及光伏发电累计装机容量

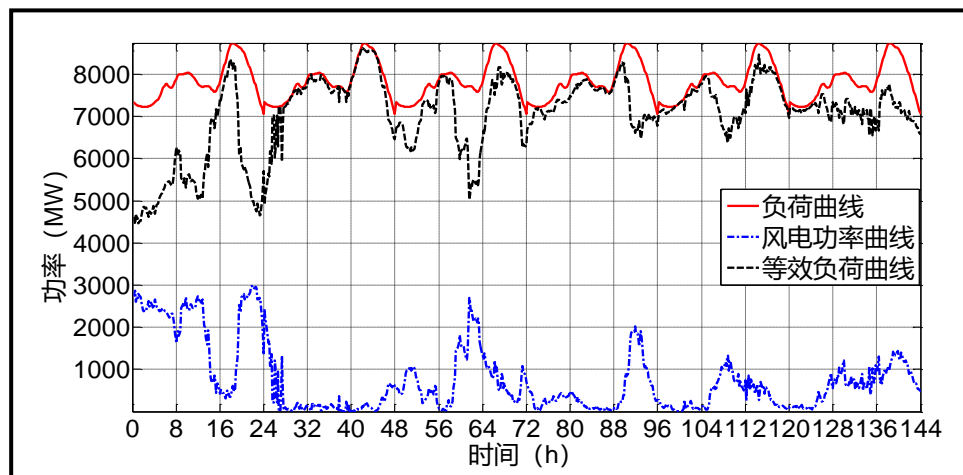


“碳中和” 情境下全国各类型发电能力

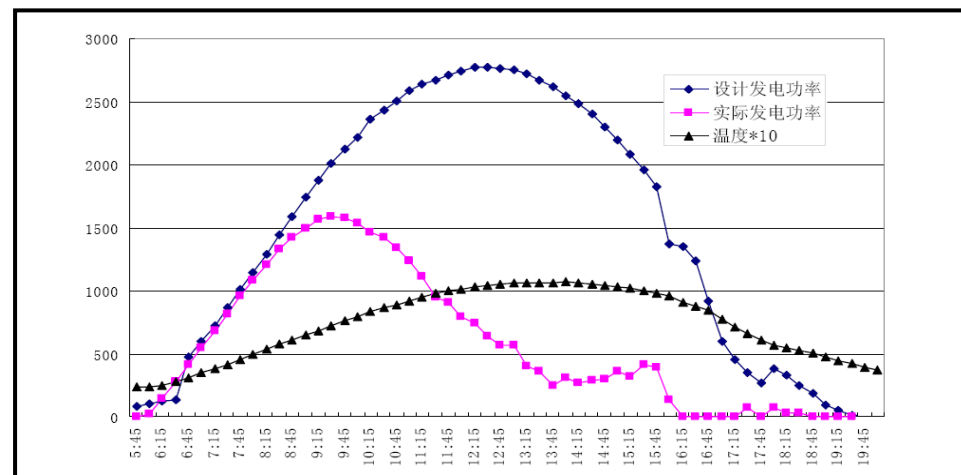


# 背景：电力系统的新不确定性因素

## 新能源发电迅猛发展，为源侧带来新的不确定性



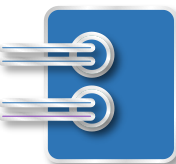
示例：风电出力曲线



示例：光伏出力曲线

### 随机性和波动性

- 机组出力与风、光资源的随机性强耦合
- 机组容量小，数量大，频繁启停，可控性差



# 背景：可再生能源接入的挑战

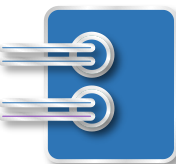
## 集中式接入



- ✓ 大容量
- ✓ 数量多
- ✓ 通常在输网侧

- 除山东、江苏等地外，大部分可再生能源发电基地远离负荷中心，其生产的能源无法在当地进行消纳。
- 这些基地通常位于偏远地区，没有强大的电网覆盖。
- 大量的清洁能源必须远距离输送才能到达负荷。然而，输电电网的建设相对落后。





# 背景：可再生能源接入的挑战

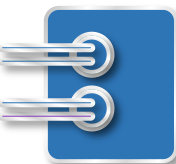
## □ 分布式接入



- ✓ 容量小
- ✓ 数量大
- ✓ 通常在配网侧

分布式发电(DG)将传统配电网改造成了新型的主动配电网(AND)，其中一些配电网能够独立运行，被称为微电网/纳电网。

- 当前的配电网没有足够的自动化和智能化来作为AND运行。  
部分本地配电系统仍然处于“盲管盲调”状态
- DG的接入将给配电网潮流带来更为频繁和不可预测的变化，可能会挑战传统的控制和保护技术
- AND将以更复杂的模式与传输系统交互——鸭形曲线。



# 背景：可再生能源接入的挑战



发电侧

网络：非存储组件

实时平衡

负荷侧



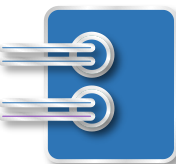
风能和太阳能的整合给发电侧带来了显著的**不确定性**，使得**有功功率平衡**更加困难，同时也加大了现有**电压波动**的幅度

## 有功平衡

- 保证系统频率稳定
- 保证供电可靠
- 减少风力和太阳能的削减

## 电压控制

- 确保电能质量
- 避免频繁剧烈的电压波动
- 避免因电压幅度超出极限而引起的连锁跳闸



# 背景：电力系统如何应对不确定性

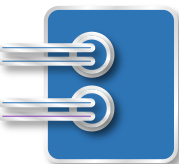
## □ 不确定性的描述方法

- 概率密度分布（正态分布、 $\beta$ 分布、韦伯分布等）： $\tilde{p} \sim N(\mu, \sigma), \tilde{p} \sim \text{Beta}(\alpha, \beta), \tilde{p} \sim \text{Weibull}(\alpha, \beta)$
- 区间： $\tilde{p} \in [p_{\min}, p_{\max}]$
- 抽样仿真： $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_k$

## □ 所有可调度的资源都是防御不确定性的潜在工具

- 水库水力发电机组，抽水蓄能水力发电（快速响应）
- 燃煤机组（大容量、反应慢、燃料成本低）
- 燃气机组（容量小，反应快，燃料成本高）
- 核电（过去用作基本负荷装置，现在可以提供辅助服务）



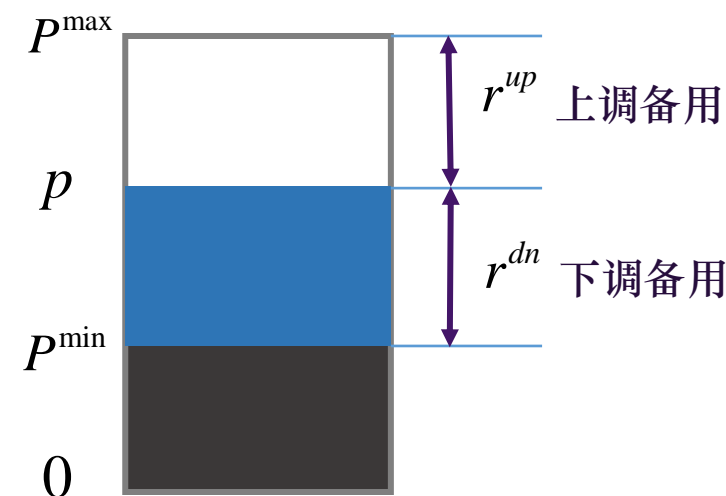


# 背景：电力系统如何应对不确定性

## 应对不确定性的传统方法

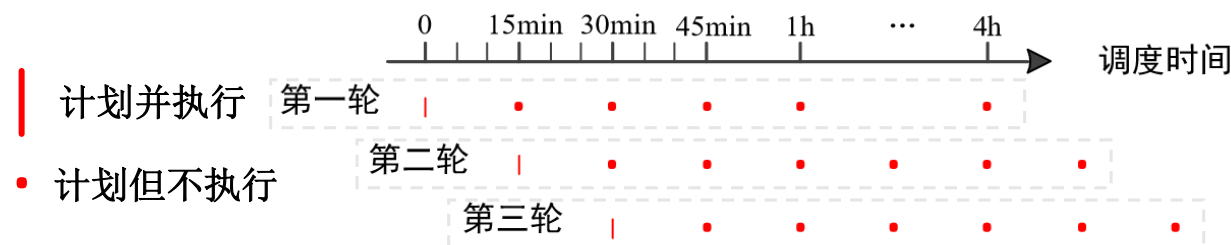
□ 调度时考虑备用容量：  $\sum_{g \in G} r_{g,t}^{up} \geq R^{up}$ ,  $\sum_{g \in G} r_{g,t}^{dn} \geq R^{dn}$

- 优点：简单，实际中常用
- 缺点：需要确定备用量；不够灵活、经济



## □ 滚动优化

- 依据：时间越近，预测越准
- 做法：间隔一段时间进行一次优化，每次优化只执行前几个时段



# 随机规划

## Stochastic Programming

# 随机规划 (Stochastic Programming, SP)

## □ 用可能性替代不确定性:

通过生成大量可能的未来场景（例如风电出力、负荷需求等），将不确定性问题转化为多个确定性场景的加权平均问题（目标函数以期望的形式给出）

目标函数

成本期望（给定概率分布）

约束条件

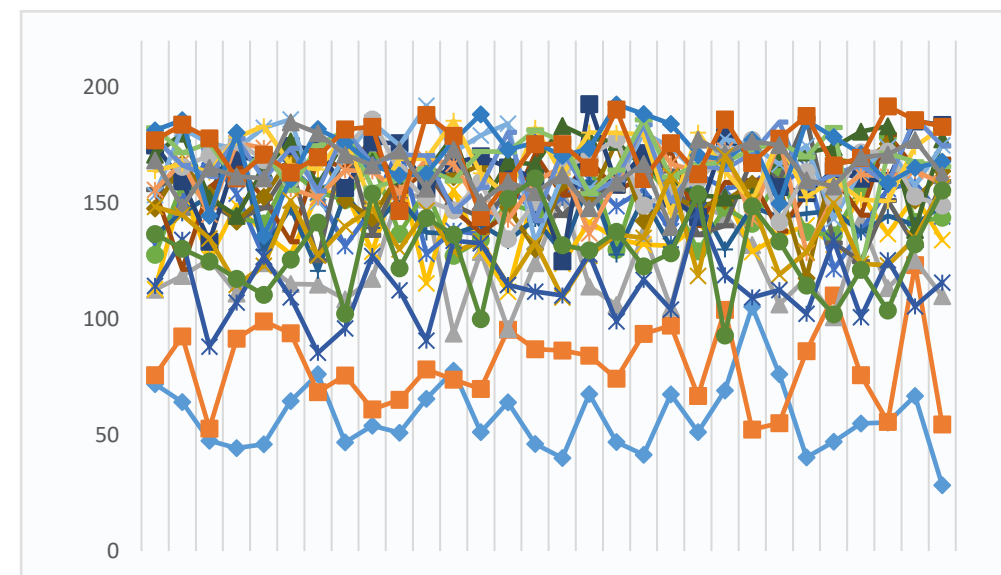
其他约束

功率平衡

机组运行

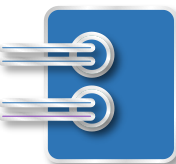
潮流安全

× 场景数



**优点:** 简单直观，不改变原本模型的数学性质。

**缺点:** **计算量巨大**，无法应用于多不确定性大规模系统的多时段优化。



# 样本平均近似 (Sample Average Approximation, SAA)

## □ 期望值目标函数的处理方法：

由于目标函数（即期望）涉及积分，很难计算它的梯度，因此需要采取特殊的方法求解，如**样本平均近似**。

$$\min f(x) \equiv E_{\alpha}[F(x, \alpha)] = \int F(x, \alpha) dP(\alpha) \quad \longrightarrow \quad \min f_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(x, \alpha_i)$$

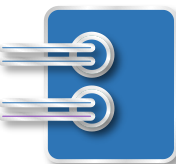
其中， $\alpha_i$ 为第*i*次采样得到的场景。

根据大数律， $N \rightarrow \infty$ ， $f_N(x)$ 收敛于 $f(x)$ ， $f_N(x)$ 的最小值 $f_N^*$ 也收敛于 $f(x)$ 的最小值 $f^*$ 。目标函数转成场景样本的平均值。

# 机会约束规划

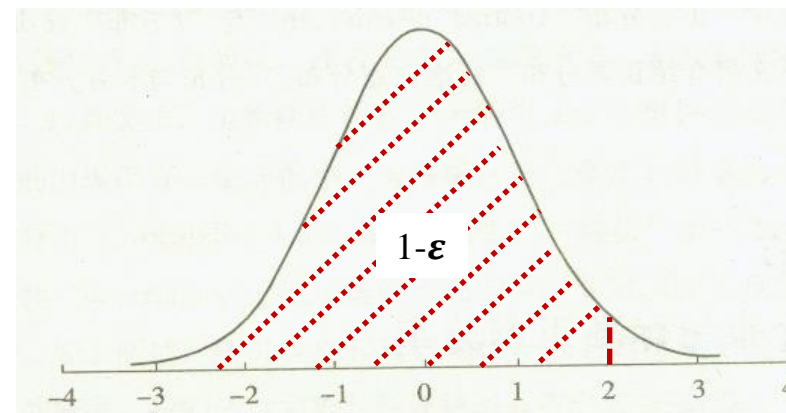
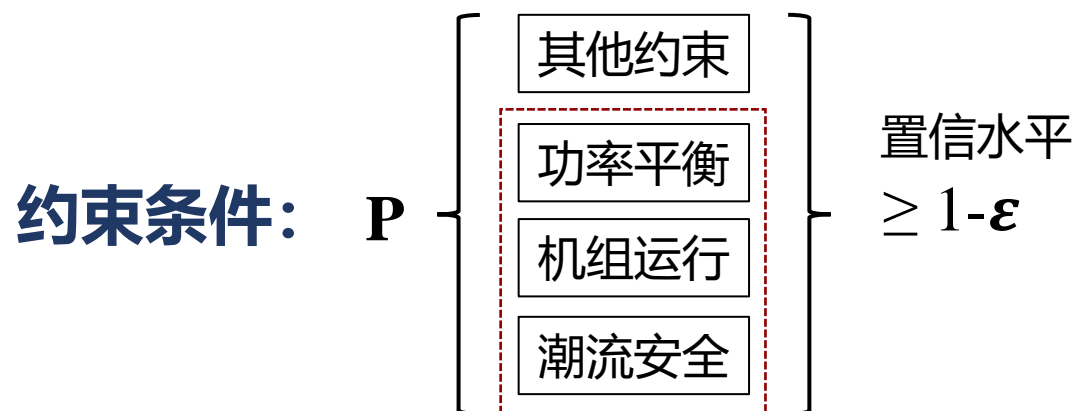
# Chance Constrained Programming

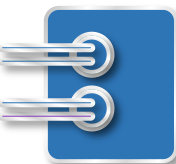




# 机会约束规划 (Chance Constrained Programming, CCP)

机会约束规划允许所作决策在一定程度上不满足约束条件，并根据随机变量的分布，使约束条件成立的概率**不小于某一置信水平**。





# 机会约束规划 (Chance Constrained Programming, CCP)

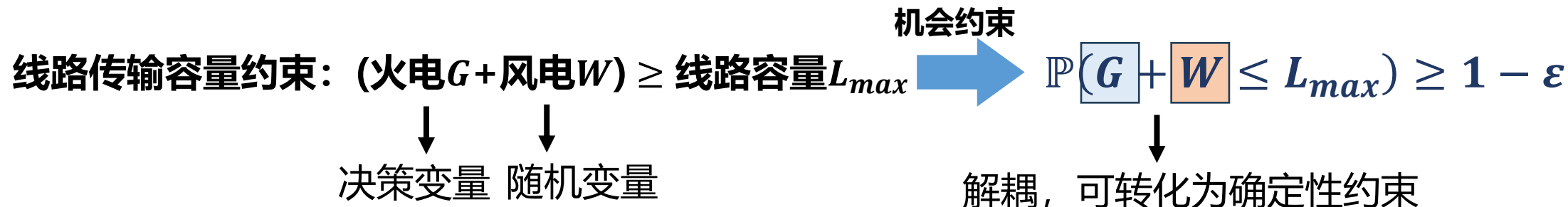
## □ 机会约束的一般形式

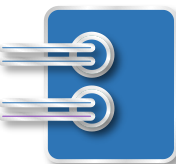
$$P[g(x, \alpha) \leq 0] \geq 1 - \varepsilon$$

- $x$  为决策变量
- $\alpha$  为随机变量
- $\varepsilon \in (0, 1)$  为允许的约束违反概率

当  $g(x, \alpha)$  形式简单,  $x$  与  $\alpha$  可以解耦, 机会约束可以转化为确定性约束

## □ 例：风电并网的机会约束





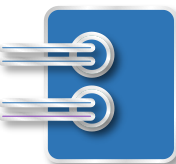
# 机会约束规划 (Chance Constrained Programming, CCP)

## □ 例：风电并网的机会约束

$$\mathbb{P}(G + W \leq L_{max}) \geq 1 - \varepsilon$$

- 式中风电  $W$  包含不确定性，并且可以和决策变量  $G$  解耦： $\mathbb{P}(W \leq L_{max} - G) \geq 1 - \varepsilon$
- 定义随机变量  $W$  的上分位数  $W_{1-\varepsilon}$ ： $\mathbb{P}(W \leq W_{1-\varepsilon}) = 1 - \varepsilon$  ← 上分位数给定分布即可求解
- 原机会约束等价于： $L_{max} - G \geq W_{1-\varepsilon}$  → 确定性约束

如果  $g(x, \alpha)$  表达式比较复杂，无法解析求解出等价的确定性约束，  
则可采用样本平均抽样 (SAA) 方法进行转化——**面临与随机规划同样的问题！**



## 机会约束规划 (Chance Constrained Programming, CCP)

□例：由于负荷预测存在偏差，所以在最优潮流中可以加入火电机组出力和旋转备用约束

$$P[\sum_i (P_{i,t}^G + R_{i,t}^G) \geq \sum_i P_{i,t}^D] \geq 1 - \varepsilon, \quad \forall t$$

其中， $P_{i,t}^G$ ,  $R_{i,t}^G$ ,  $P_{i,t}^D$  分别是节点*i*在时刻*t*的火电机组出力、火电机组旋转备用和负荷。同时输电线路的有功潮流会以指定概率保证不越界：

$$P[P_{l,t}^L \leq P_{l,max}^L] \geq 1 - \theta, \quad P[P_{l,min}^L \leq P_{l,t}^L] \geq 1 - \theta, \quad \forall t, \quad \forall l$$

其中， $P_{l,min}^L$ 和 $P_{l,max}^L$ 为线路*l*有功潮流的上下限， $P_{l,t}^L$ 为*t*时刻线路*l*的有功潮流。



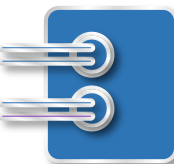
# 总结

方法	核心思想	适用场景
随机规划	用概率分布或场景描述不确定性，优化“平均性能”	不确定性可统计建模，接受平均最优
机会约束优化	允许约束以一定概率被违反，平衡经济性与风险	需量化风险容忍度（如5%越限）

# 稳态部分进阶大作业

## 任务三：随机规划

详见作业文档



## 课外延伸学习

### 机会约束规划:

[1] Wu, Hongyu, et al. "Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation." *IEEE Transactions on Power Systems* 29.4 (2014): 1583-1591.

[2] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(02): 20-24.

# 谢谢!

