

## 第六讲 机组组合与发电计划



刘锋

西主楼3-406, 62782513

[Lfeng@Tsinghua.edu.cn](mailto:Lfeng@Tsinghua.edu.cn)

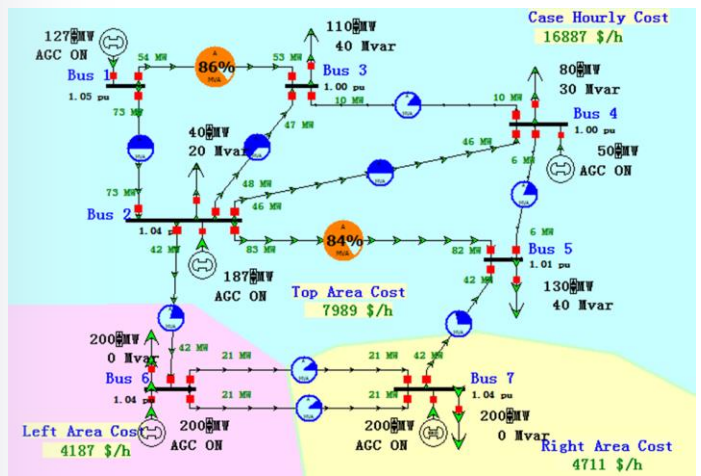
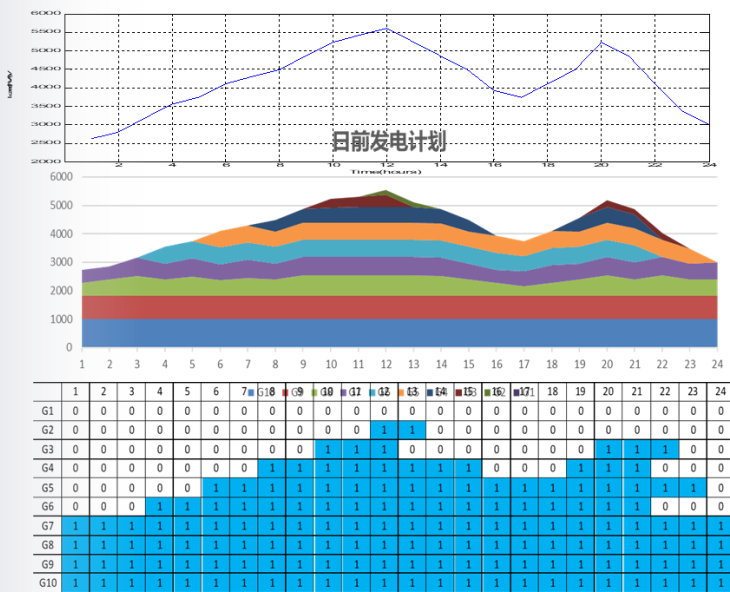




# 主要内容

## 机组组合与发电计划

- 1. 背景动机
- 2. 经济运行
- 3. 机组组合
- 4. 发电计划
- 5. 面临挑战





# 1. 背景与动机

## 排兵布阵

How about power systems in dispatch?

广州恒大

LB 1/3 RB

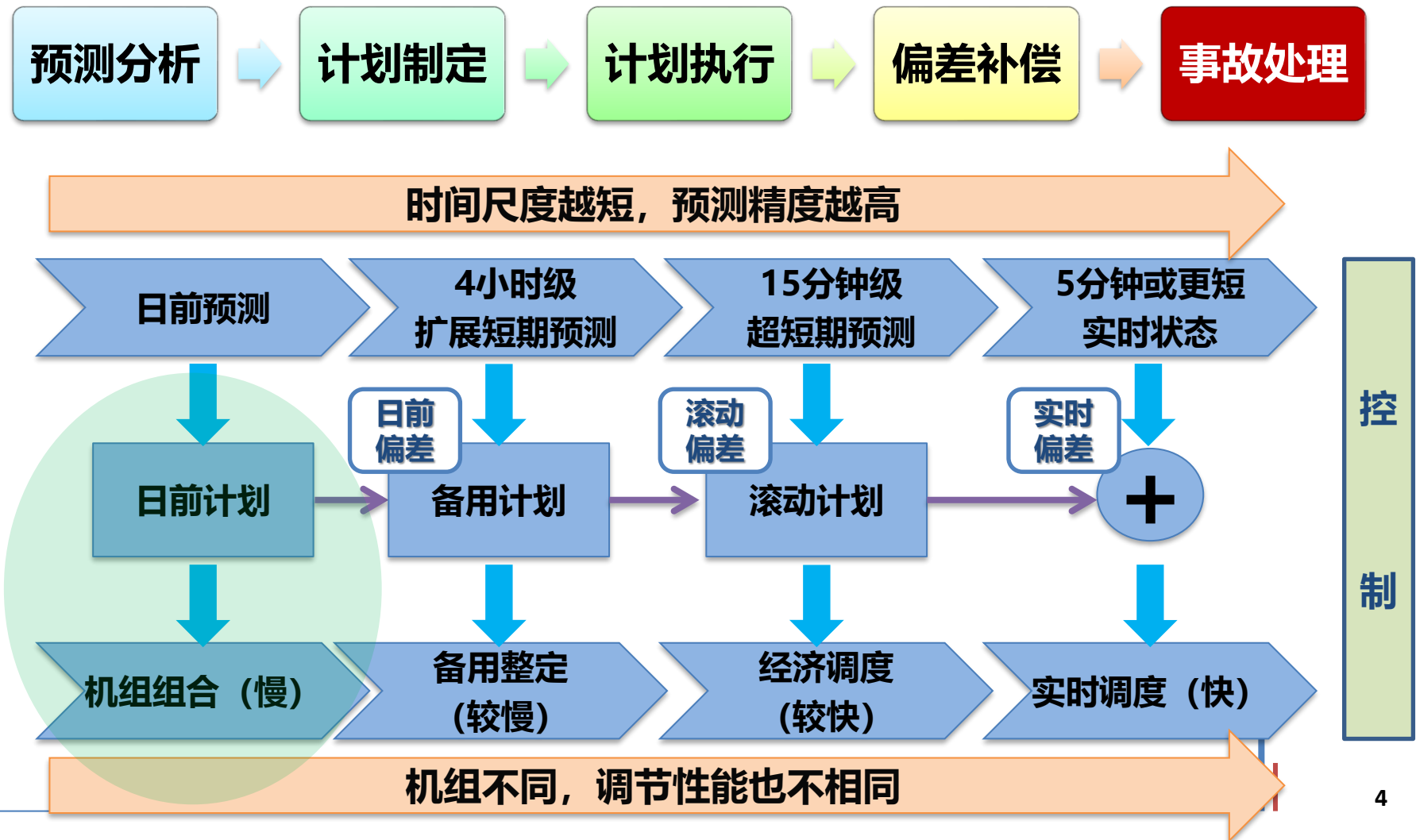
广州富力





# 1. 背景与动机

## 电力系统调度运行过程







## 机组组合与发电计划

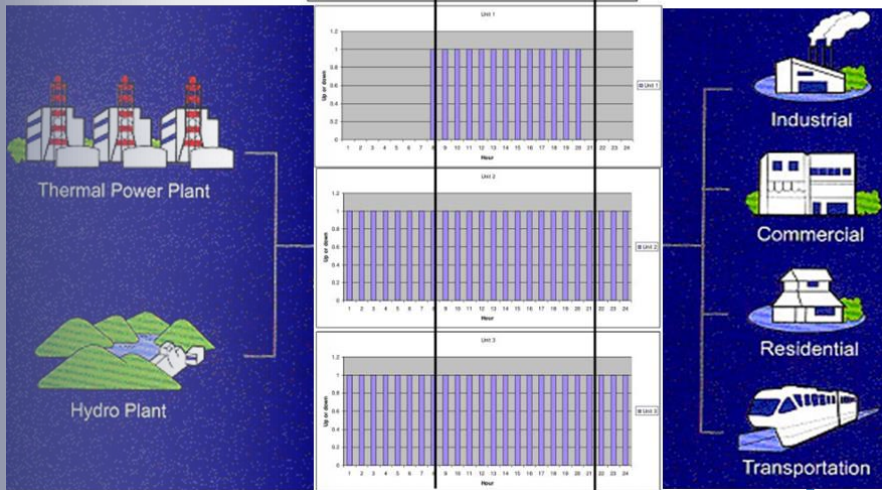
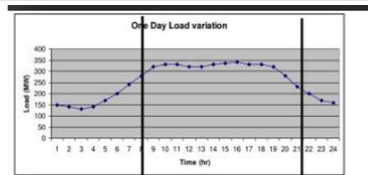
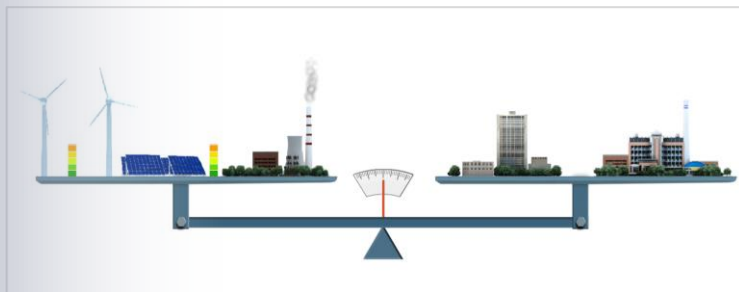
1. 背景动机

2. 经济运行

3. 机组组合

4. 发电计划

5. 面临挑战



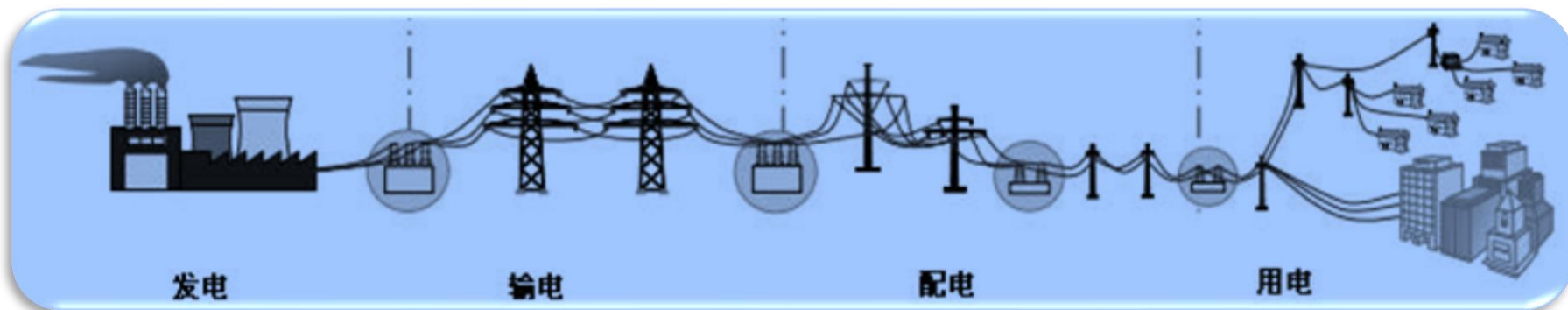


## 2. 电力系统经济运行与计划

### • 1. 电力系统经济运行

#### – 电力系统

• 电源→电网→变电站→负荷（发、输、配、用）



– 约束：电能无法长时间大量存储→实时平衡

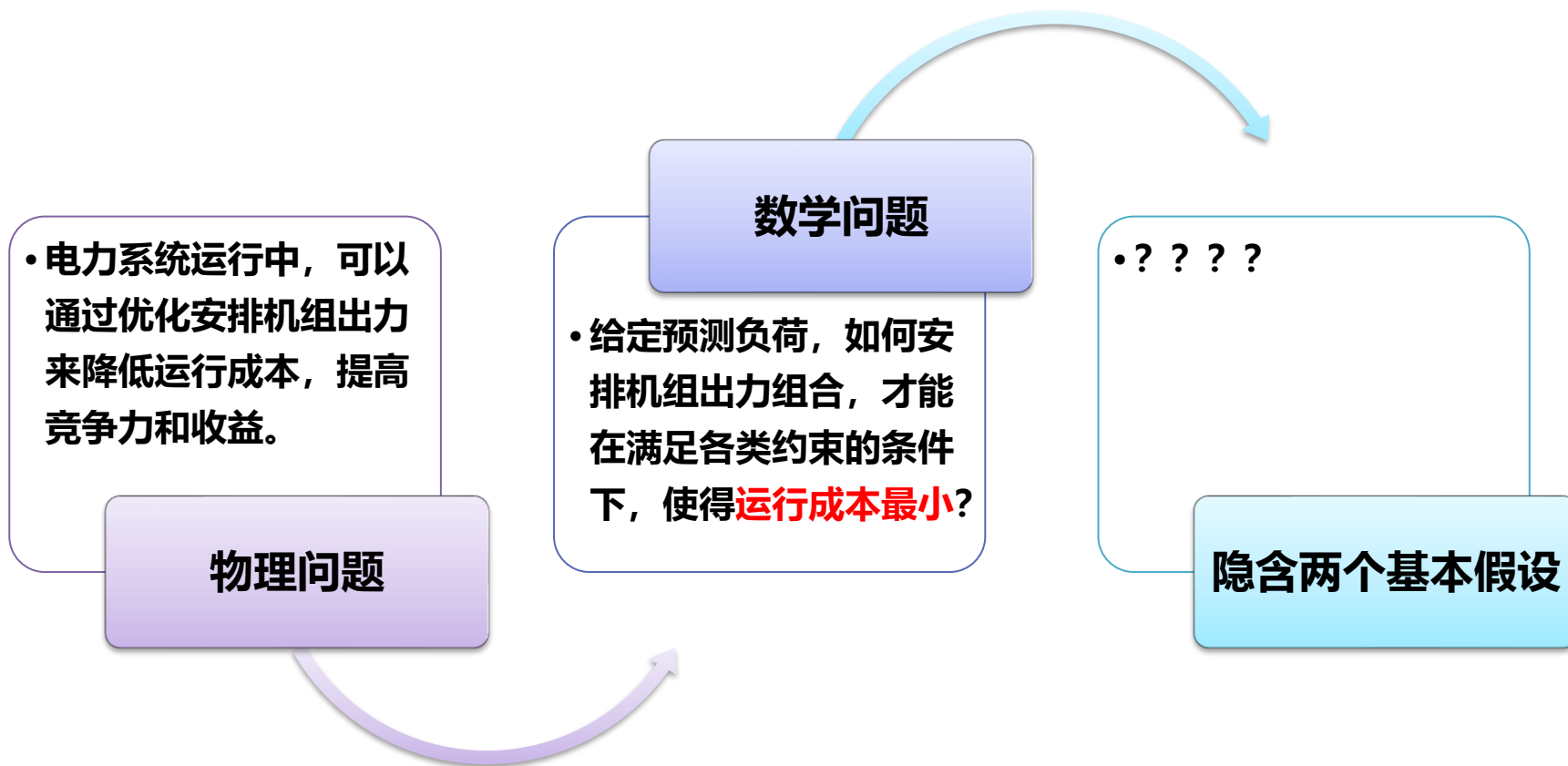
– 目标：能量的转化与传输→安全、优质、**经济**（**环保**）

如何保证？



## 2. 电力系统经济运行与计划

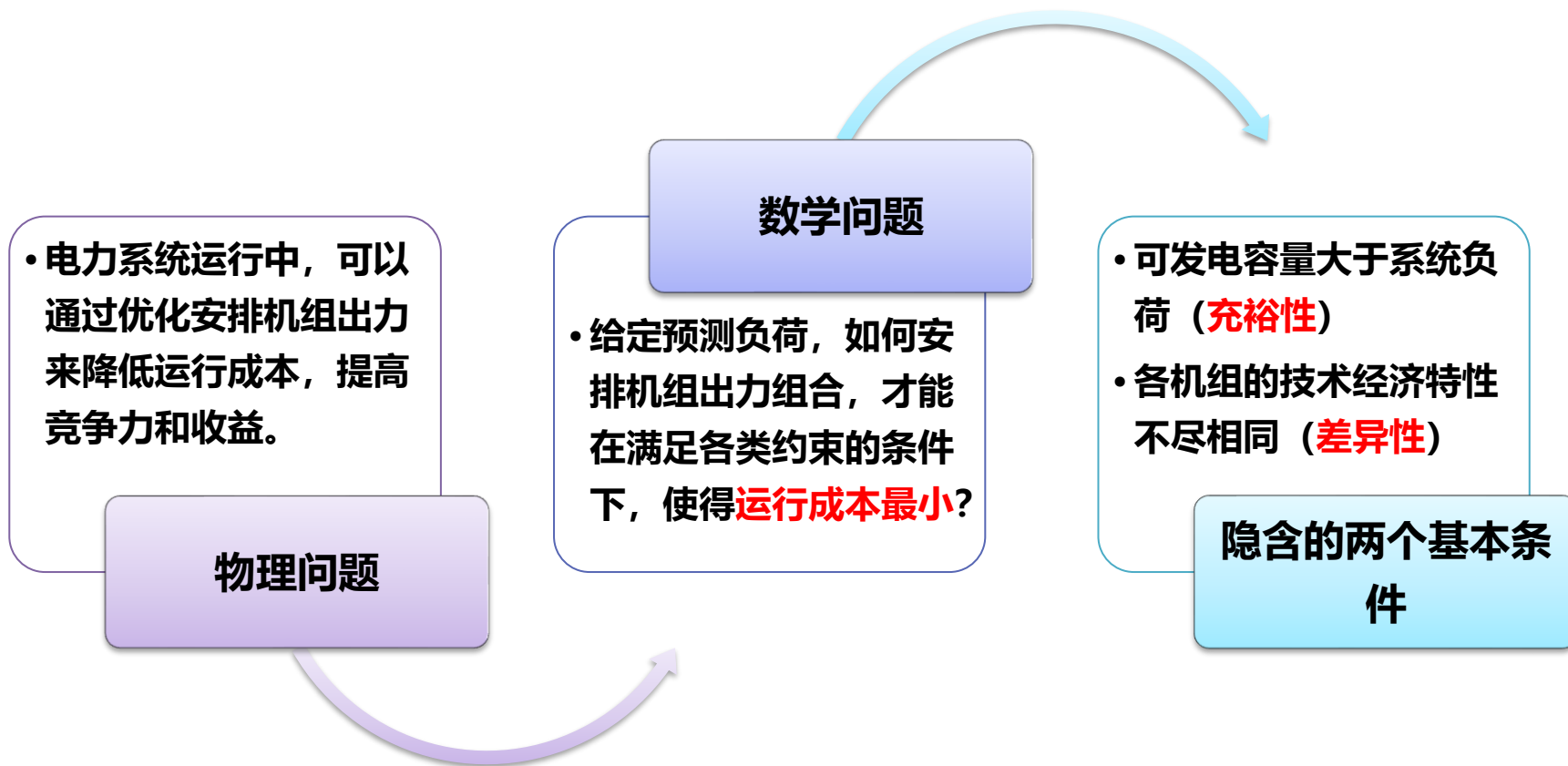
### • 1. 电力系统经济运行





## 2. 电力系统经济运行与计划

### • 1. 电力系统经济运行







## 2. 电力系统经济运行与计划

### 2. 典型机组运行的技术经济特点

#### 火电机组

- 需燃料及运输，受自然条件影响小
- 效率与蒸汽参数相关
- 受锅炉、汽轮机**最小技术负荷限制**，有功处理调整范围较**窄**，增减速度较**慢**
- 机组投入退出慢，耗能多，易损设备
- 热电厂抽汽供热，效率高，技术最小负荷取决于热负荷（强迫功率）
- 存在最佳**经济运行点**

#### 水电机组

- 无需燃料费，水力可梯级开发连续使用，但受来水影响
- 出力调节范围大，50%以上，增减负荷速度快，操作容易，能承担急剧变化负荷
- 发电量受水量和水位差影响
- 抽水蓄能机组负出力能力
- 水力枢纽**兼顾**发电、航运、防洪、灌溉、渔业、旅游，不一定与电力负荷适应
- 维持航运灌溉需维持水量（对应强迫功率）

#### 核电机组

- 可调容量大
- 退、投、增减出力消耗能量大，时间长，易损坏设备，造成**安全**问题
- 一次性投资大
- 运行费用低

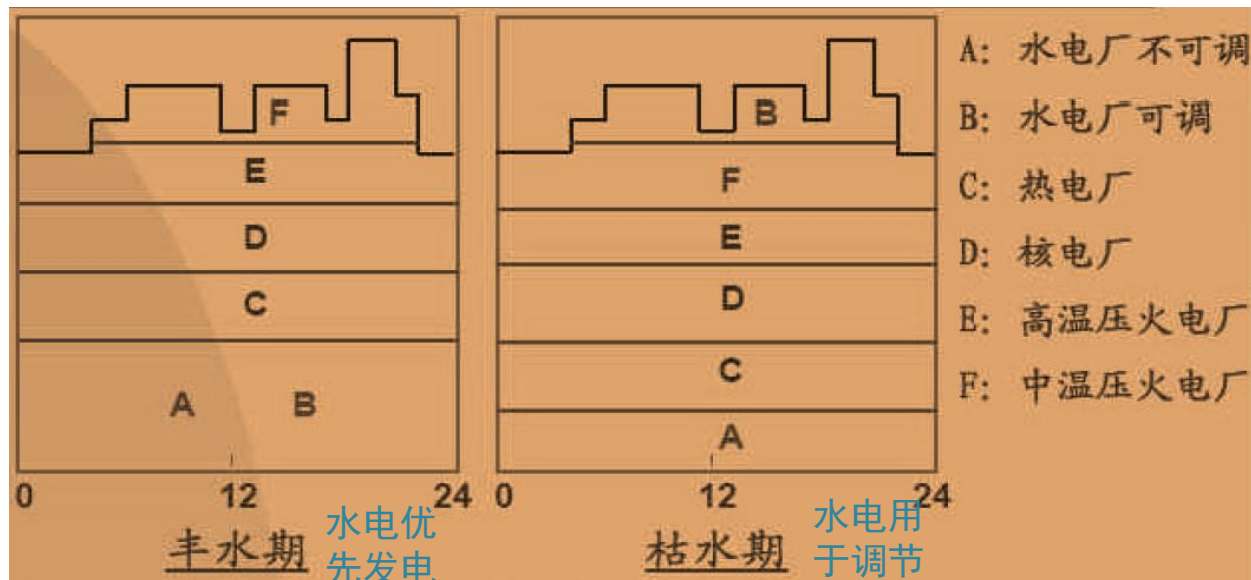
**其它机组：**  
**风电、光伏。。。**



## 2. 电力系统经济运行与计划

### • 3. 负荷在不同类型机组中的分配原则

峰谷差



如何分配出力?

#### 原则

- 充分利用水力资源，避免弃水
- 降低火电成本，发挥大容量高效率机组作用，多烧本地煤，少烧油

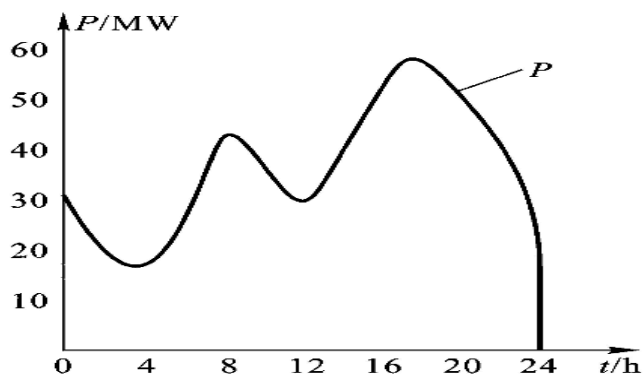
#### 问题

- 大量可调的火电厂、水电厂（E、F、B），如何分配最经济？



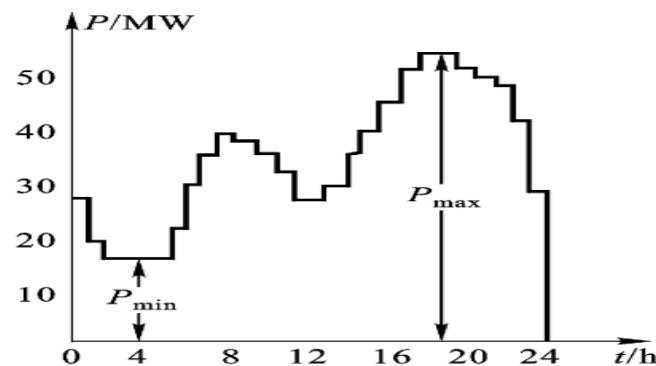
## 2. 电力系统经济运行与计划

### 4. 如何实现电力系统经济运行？——从计划做起



负荷预测

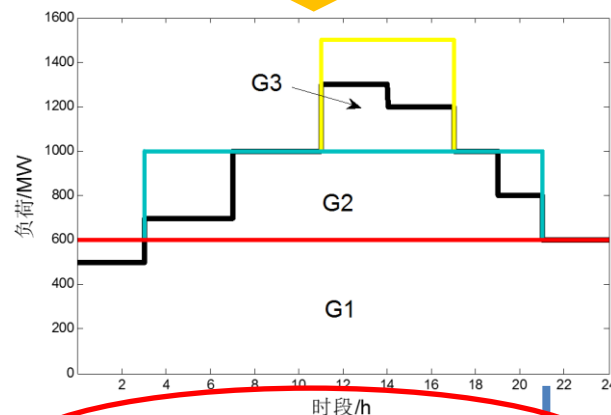
电力平衡



全网发电计划

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
G5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
G6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
G7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

机组启停  
(机组组合)



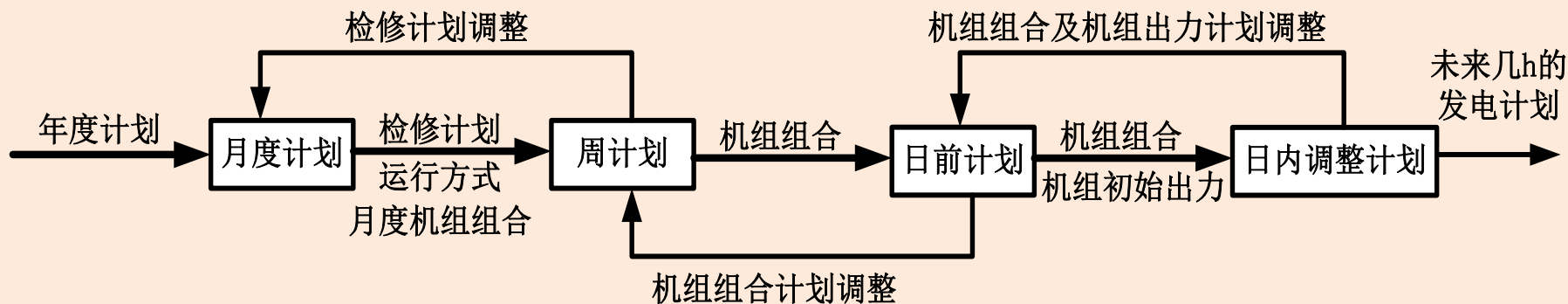
机组发电计划



## 2. 电力系统经济运行与计划

### • 电力系统运行计划

- 安排年度、月度（周）、日前、日内等不同周期的**电力电量平衡**，安排机组的**电量计划、开停机计划和出力计划**
- 电力系统的运行特点决定了运行计划安排是一个**持续滚动修正**的过程，为此，运行计划在时序上分为**年度、月度（周）、日前、日内**等不同周期，进行各周期**持续滚动优化**

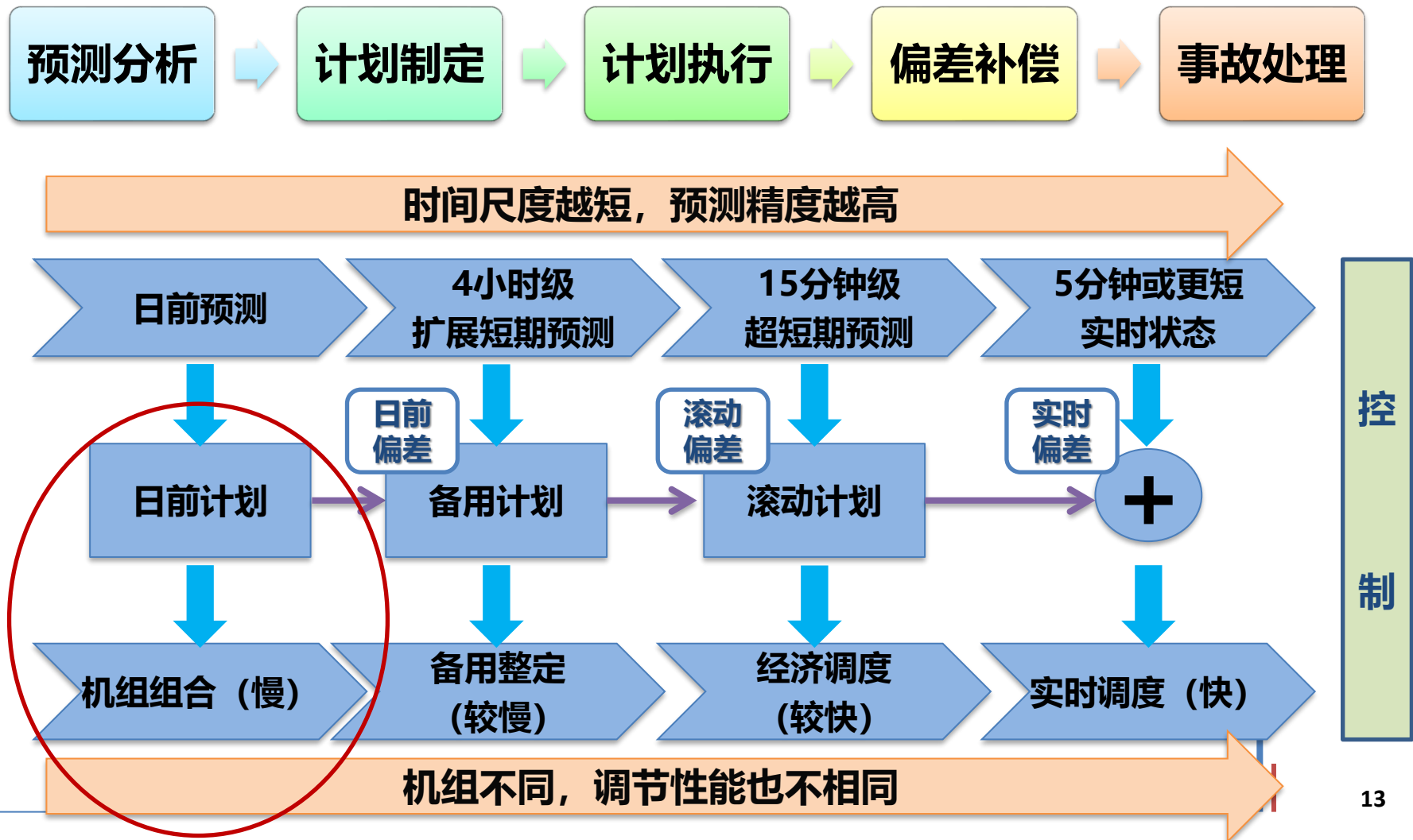


**核心业务：发电计划、机组组合、检修计划**



## 2. 电力系统经济运行与计划

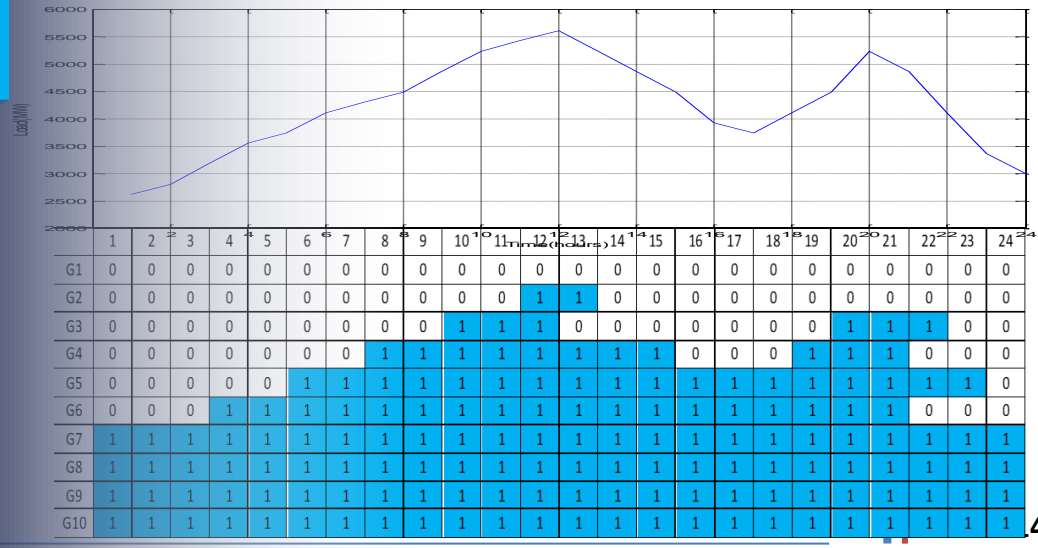
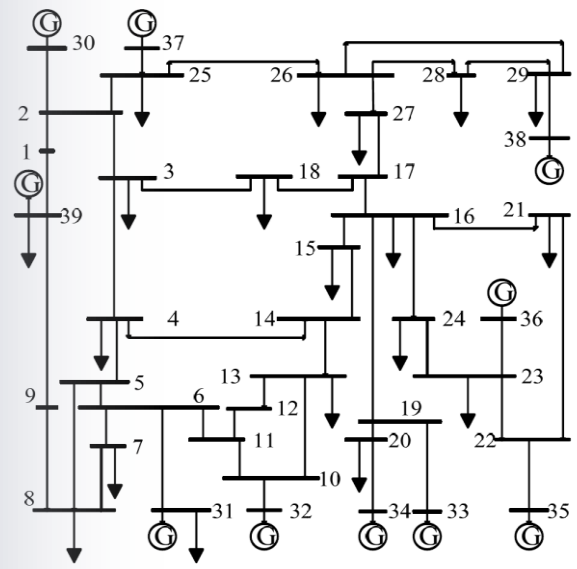
### 电力系统调度运行过程





## 机组组合与发电计划

- 1. 背景动机
- 2. 经济运行
- 3. 机组组合
- 4. 发电计划
- 5. 面临挑战







# 3. 电力系统的机组组合

## 什么是机组组合？

在满足符合要求和各类机组**约束**条件下，确定未来一定周期内各机组的**开停机时间和出力**情况，使系统实现一定**目标**下（运行费用、风险等）的优化运行

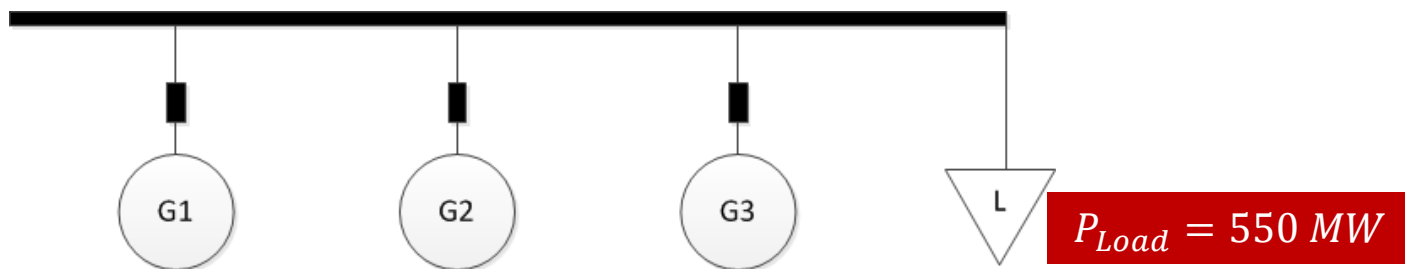
## 为什么要机组组合？

- 电力系统运行中，负荷、工况在不停**变化**
- 发电机组的启停通常需要一定**时间**，很多情况下**代价较高**
- 为满足**实时平衡和其他约束**，需要提前确定各机组在各时间段上的开停机情况以及出力情况，以保证**可行性**（及安全性）
- 为提升系统运行的**经济性和效率**，需要优化机组的**开停状态及出力**情况。



### 3. 电力系统的机组组合

例：



$$G1: P_{1,min} = 250 \text{ MW}, P_{1,max} = 600 \text{ MW}$$

$$G2: P_{2,min} = 250 \text{ MW}, P_{2,max} = 400 \text{ MW}$$

$$G3: P_{3,min} = 100 \text{ MW}, P_{3,max} = 500 \text{ MW}$$

➤ Q: 若所有发电机都开机，每台机需要发多少电才能达到供需平衡？

◆ 其数学模型如下：

$$\left. \begin{aligned} P_{1,min} &\leq P_1 \leq P_{1,max} \\ P_{2,min} &\leq P_2 \leq P_{2,max} \\ P_{3,min} &\leq P_3 \leq P_{3,max} \end{aligned} \right\} \text{发电机最大/小出力约束}$$
$$P_1 + P_2 + P_3 = P_{Load} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P_{1,min} &\leq P_1 \leq P_{1,max} \\ P_{2,min} &\leq P_2 \leq P_{2,max} \\ P_{3,min} &\leq P_3 \leq P_{3,max} \end{aligned}} \right\} \text{功率平衡约束}$$

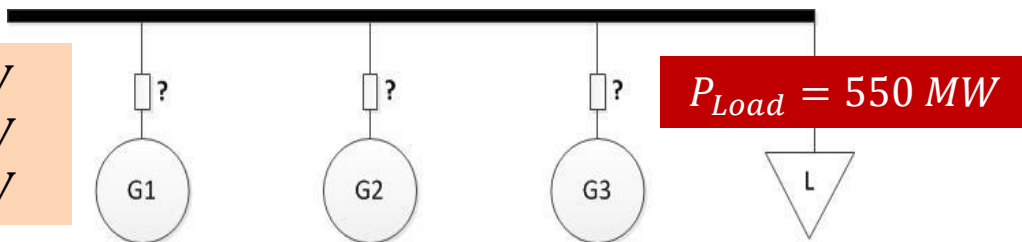


### 3. 电力系统的机组组合

G1:  $P_{1,min} = 250 \text{ MW}$ ,  $P_{1,max} = 600 \text{ MW}$

G2:  $P_{2,min} = 250 \text{ MW}$ ,  $P_{2,max} = 400 \text{ MW}$

G3:  $P_{3,min} = 100 \text{ MW}$ ,  $P_{3,max} = 500 \text{ MW}$



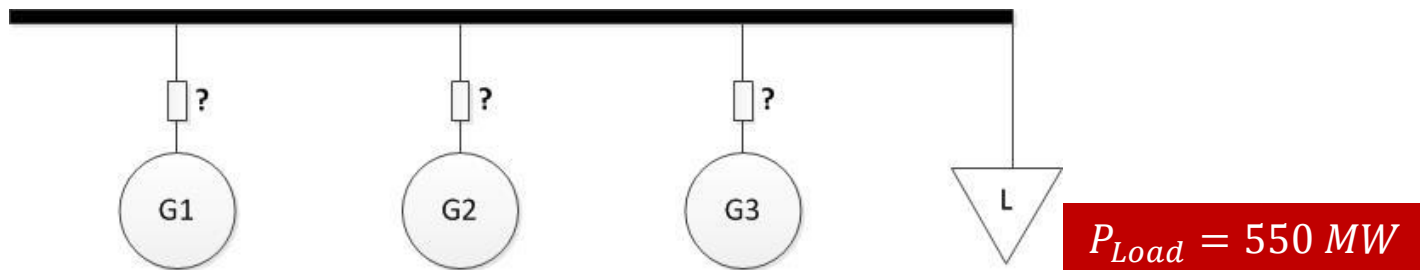
- 若每台机均可自由选择启停机，哪些发电机应该启动，每台发电机的发电量是少？  
(启停机策略+发电量策略)

G1	G2	G3	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Off	Off	Off	0	0	Infeasible		
On	Off	Off	250	600	Feasible		
Off	On	Off	250	400	Infeasible		
Off	Off	On	100	500	Infeasible		
On	On	Off	500	1000	Feasible		
Off	On	On	350	900	Feasible		
On	Off	On	350	1100	Feasible		
On	On	On	600	1500	Infeasible		





### 3. 电力系统的机组组合



➤ 上述问题的数学模型如下:

$$\begin{aligned} u_1 P_{1,min} &\leq P_1 \leq u_1 P_{1,max} \\ u_2 P_{2,min} &\leq P_2 \leq u_2 P_{2,max} \\ u_3 P_{3,min} &\leq P_3 \leq u_3 P_{3,max} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} u_1 P_{1,min} &\leq P_1 \leq u_1 P_{1,max} \\ u_2 P_{2,min} &\leq P_2 \leq u_2 P_{2,max} \\ u_3 P_{3,min} &\leq P_3 \leq u_3 P_{3,max} \end{aligned}} \right\} \text{发电机最大/小出力约束}$$
$$P_1 + P_2 + P_3 = P_{Load} \quad \left. \vphantom{P_1 + P_2 + P_3 = P_{Load}} \right\} \text{功率平衡约束}$$
$$u_1, u_2, u_3 \in \{0,1\} \quad \left. \vphantom{u_1, u_2, u_3 \in \{0,1\}} \right\} \text{机组状态约束}$$

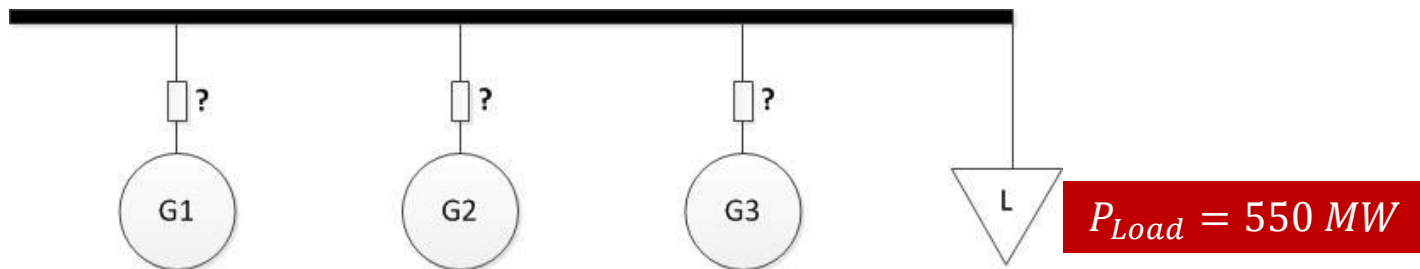
若已知发电机运行成本（发电成本和启动成本）如下:

$$\begin{aligned} C_1 &= 7.9P_1 + 0.00172P_1^2, & S_1 &= 510; \\ C_2 &= 7.8P_2 + 0.00194P_2^2, & S_2 &= 310; \\ C_3 &= 10.56P_3 + 0.00694P_3^2, & S_3 &= 78; \end{aligned}$$

➤ 在最小化运行成本的目标下，哪些发电机应该启动，每台发电机的发电量是多少？



### 3. 电力系统的机组组合



- 在最小化运行成本的前提下，哪些发电机应该启动，每台发电机的发电量是多少？  
(启停机+发电量+最佳策略)

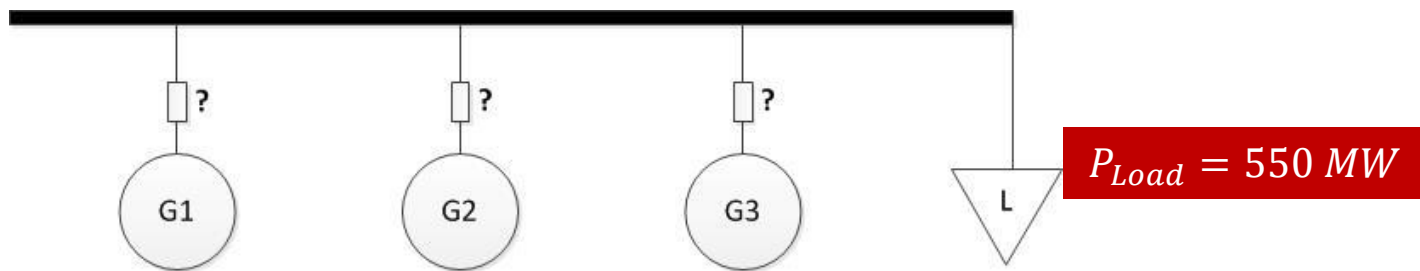
G1	G2	G3	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$C_{total}$
Off	Off	Off	0	0	Infeasible			
On	Off	Off	250	600	550	0	0	5375
Off	On	Off	250	400	Infeasible			
Off	Off	On	100	500	Infeasible			
On	On	Off	500	1000	300	250	0	5417
Off	On	On	350	900	0	450	100	5416
On	Off	On	350	1100	450	0	100	5617
On	On	On	600	1500	Infeasible			

G1:  $P_{1,min} = 250 \text{ MW}$ ,  
 $P_{1,max} = 600 \text{ MW}$   
G2:  $P_{2,min} = 250 \text{ MW}$ ,  
 $P_{2,max} = 400 \text{ MW}$   
G3:  $P_{3,min} = 100 \text{ MW}$ ,  
 $P_{3,max} = 500 \text{ MW}$





### 3. 电力系统的机组组合



➤ 上述问题的数学模型如下：

$$\min_{P,u} u_1 \cdot f_1(P_1, S_1) + u_2 \cdot f_2(P_2, S_2) + u_3 \cdot f_3(P_3, S_3)$$

$$u_1 P_{1,min} \leq P_1 \leq u_1 P_{1,max}$$

$$u_2 P_{2,min} \leq P_2 \leq u_2 P_{2,max}$$

$$u_3 P_{3,min} \leq P_3 \leq u_3 P_{3,max}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_{Load}$$

$$u_1, u_2, u_3 \in \{0,1\}$$

} 发电机最大/小出力约束

} 功率平衡约束

} 机组状态约束

其中， $f_1(P_1, u_1)$ ,  $f_2(P_2, u_2)$ ,  $f_3(P_3, u_3)$  分别代表各发电机的运行成本，包括发电成本和启动成本。





# 3. 电力系统的机组组合

## 避免不恰当的机组组合

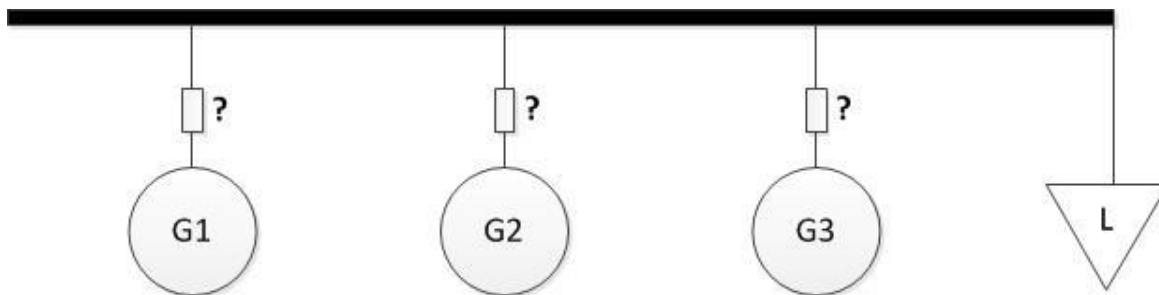
- 安排的发电机数量远远不够：不能满足负荷需求（最大出力限制）
- 安排的发电机数量不够：某些发电机运行在其最优运行点以上（运行经济性）
- 安排的发电机数量较多：某些发电机运行在其最优运行点以下（运行经济性）
- 安排的发电机数量过多：发电机最小出力之和大于负荷需求（最小出力限制）

G1	G2	G3	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$C_{total}$
Off	Off	Off	0	0	Infeasible			
On	Off	Off	250	600	550	0	0	5375
Off	On	Off	250	400	Infeasible			
Off	Off	On	100	500	Infeasible			
On	On	Off	500	1000	250	300	0	5417
Off	On	On	350	900	0	450	100	5416
On	Off	On	350	1100	450	0	100	5617
On	On	On	600	1500	Infeasible			



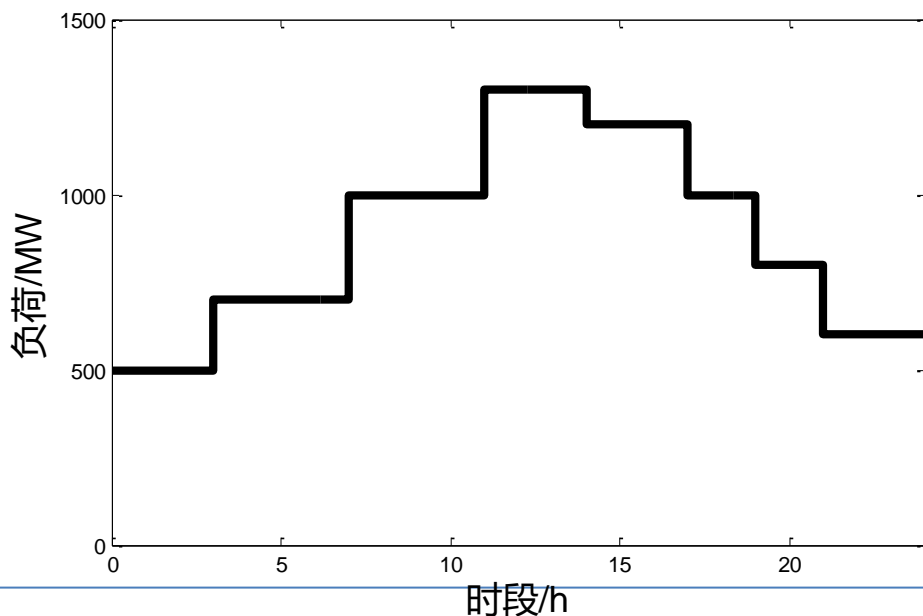
### 3. 电力系统的机组组合

例2



假定发电机各项参数同例1，若负荷需求不再固定，而是随时间变化，在最小化运行成本的前提下，哪些发电机应该启动？

(启停机+发电量+多个时段+最佳策略)

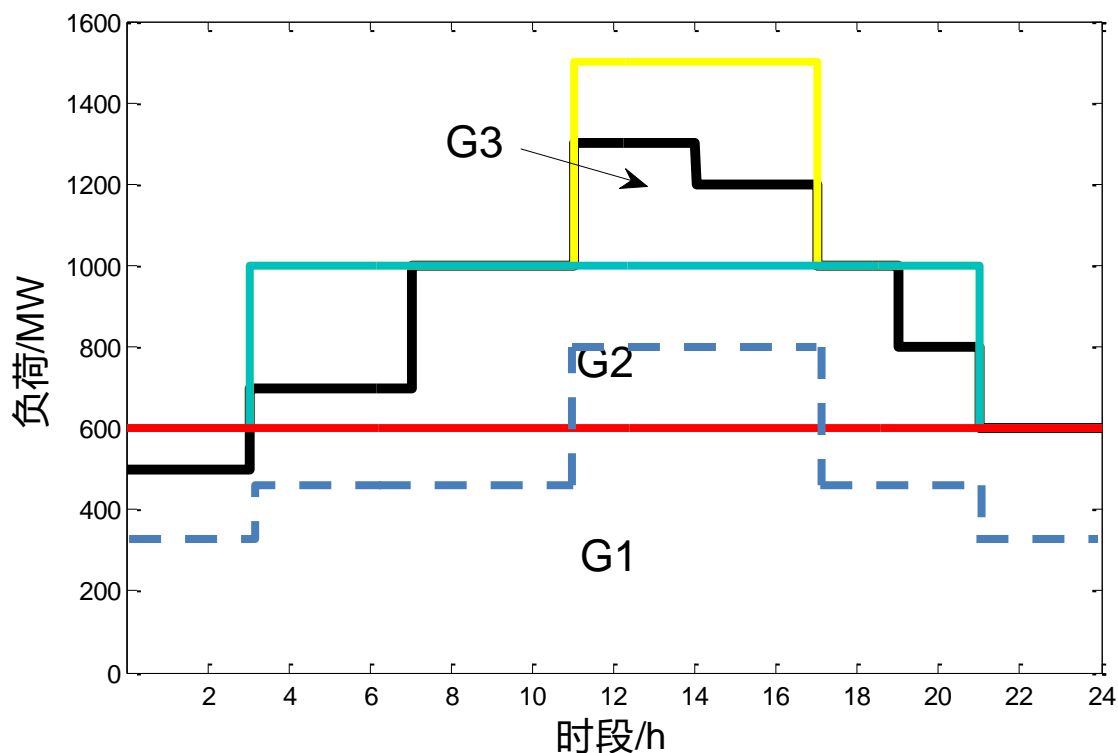




### 3. 电力系统的机组组合

按照左表中的优化结果启停发电机，则该系统的最大（最小）发电能力与负荷需求的关系如右图所示。

时段	Load(MW)	G1	G2	G3
1	500	On	Off	Off
2	700	On	On	Off
3	1000	On	On	Off
4	1300	On	On	On
5	1200	On	On	On
6	800	On	On	Off
7	600	On	Off	Off



机组组合确定后，系统的最大和最小发电能力就已经确定。因此机组组合必须满足最大最小发电能力的要求。



### 3. 电力系统的机组组合

在电力系统的实际运行中，机组组合通常每隔24小时优化确定一次。

#### ◆为什么要优化？

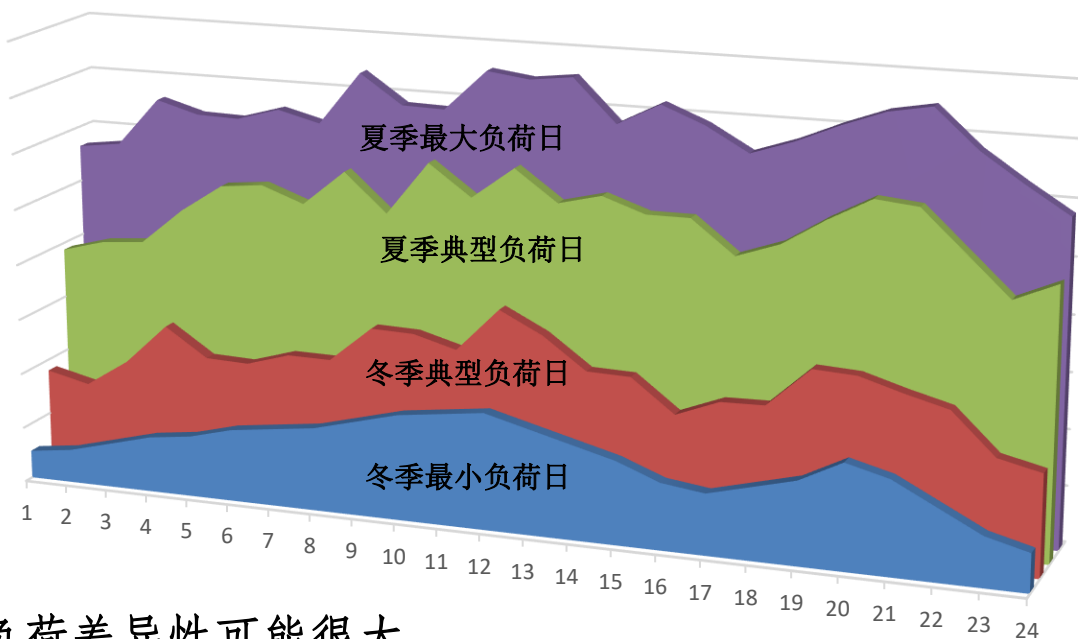
英国每年的电力交易总额为700亿欧元，如果合理优化机组组合使得系统运行总成本降低0.1%，就意味着节省了7000万欧元。





### 3. 电力系统的机组组合

为什么日前机组组合每隔24小时优化而不是每天使用同一套“最优方案”或每隔48小时优化？



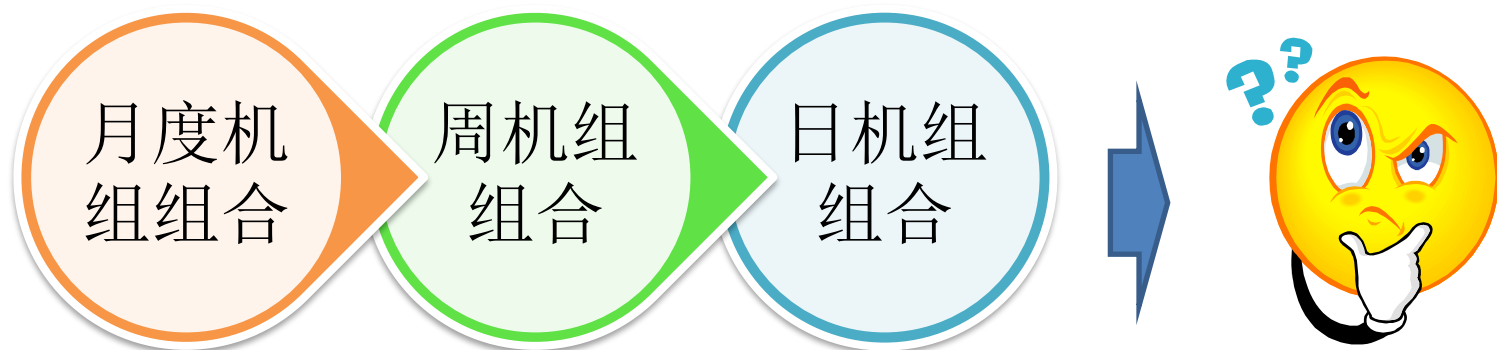
- 电力系统日负荷差异性可能很大
- 由于发电机定期检修等，每天可组合的发电机不完全相同
- 24小时是人类的正常生产生活周期

还需要其他时间尺度的机组组合吗？





### 3. 电力系统的机组组合



#### 电力系统机组组合:

- 在给定时间周期的 **负荷预测** 基础上，合理安排机组在各时段上的 **启停** 状态，使得系统以 **最小代价** 具备足够的发电能力，以满足 **电力平衡** 以及其它 **运行约束**。
- 机组组合问题一般可建模为一个 **带约束的混合整数动态优化问题**。
- 机组组合制定时需要同时考虑检修计划的制定
- 机组组合一般按月度-周-日前进行滚动修订（应对预测偏差）



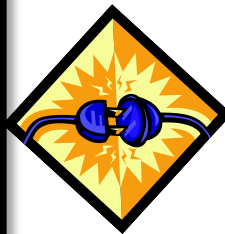


# 3. 电力系统的机组组合

## 2. 电力系统中如何确定机组组合？

有明确物理意义（常量、变量、约束、目标函数）的带约束优化问题！

- ◆ 每台发电机因其性能不同，给机组组合带来的约束也不同：跑步
  - 最大发电能力（最快速度）
  - 最小稳定发电能力（保持运动量前提下，最慢速度）
  - 最小开机时间（上场前热身）
  - 最小停机时间（剧烈运动后不能立即停止，缓冲）
  - 正负爬坡率（正负加速度）
  - 灵活性（短跑？长跑？马拉松？）





### 3. 电力系统的机组组合

**灵活性较高的机组：短跑、中短跑**

**——发电机出力在一定范围内灵活可调**

- 煤电机组
- 油电机组
- 开式循环燃气轮机
- 联合循环燃气轮机
- 带储能的水电机组（抽蓄）

**热力机组**



**发电机的启停机状态（离散变量 $u_i$ ）及出力设定值（连续变量 $P_i$ ）**

**视作变量，均可优化。**



### 3. 电力系统的机组组合

灵活性较低（技术或经济原因）的机组：中长跑、长跑、马拉松

——**发电机出力不可调**

- 核电机组
- 运行的河流水电机组
- 可再生能源（风电、光伏）
- 热电联产机组（CHP, combined heat and power）

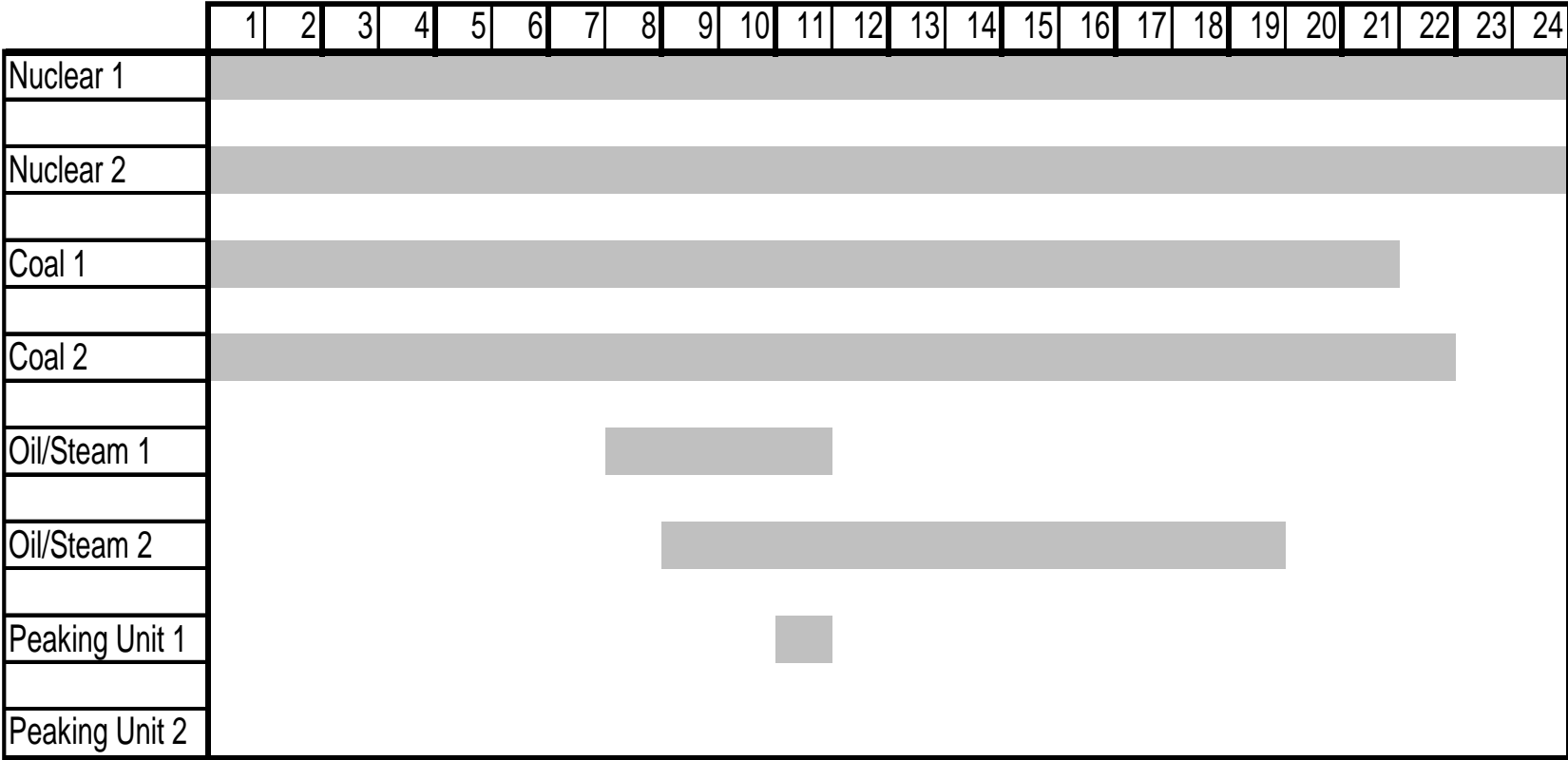


发电机的启停机状态（ $u_i$ ）及出力（ $P_i$ ）视作确定量（常量或者固定曲线），不作优化。



## 二、电力系统的机组组合

### 考虑发电机组灵活性的机组组合方案示例





### 3. 电力系统的机组组合

机组组合问题中的约束除发电机组性能约束外，还有电力系统的固有约束。

#### 实时功率平衡

- 发电总功率 = 负荷总功率

#### 网络约束

- 输电线输送功率限制
- N-1标准

#### 备用调节能力（爬坡约束）

- 应对负荷突变或运行中发电机组故障，在全网分布

#### 电压无功约束

- 部分机组提供电网电压稳定支持

#### 排放约束

- $SO_2, NO_x$ ; 对某机组或发电厂一段时间内的污染排放约束

#### 发电厂人员约束

- 机组启动需要一定数量的操作员，自动化技术弱化了这个约束



# 3. 电力系统的机组组合

## 3. 机组组合的数学模型

- 目标函数:最小化发电成本 (运行成本和启停机成本)
- 约束: 发电机组约束、系统固有约束——一些约束可能将不同时段关联起来
- 基本模型:  $\min\{f(x)\} \text{ st. } g(x) \leq 0, l(x) = 0$

约束

$$\min_{u,p} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(p_{it}, u_{it})$$

$$s.t. -u_{i(t-1)} + u_{it} - u_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{on}^i + t - 1\}$$

$$u_{i(t-1)} - u_{it} + u_{ik} \leq 1, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{off}^i + t - 1\}$$

$$-u_{i(t-1)} + u_{it} - z_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{\max}^i \geq (1 + \tilde{r}) D_L \quad \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{\min}^i \leq (1 - \tilde{r}) D_L \quad \forall t$$

$$u_{it} P_{\min}^i \leq p_{it} \leq u_{it} P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$p_{i(t+1)} - p_{it} \leq u_{it} R_+^i + (1 - u_{it}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$p_{it} - p_{i(t+1)} \leq u_{i(t+1)} R_-^i + (1 - u_{i(t+1)}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N p_{it} = D_t$$

$$-F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \leq \sum_{i=1}^N \pi_{il} p_{it} \leq F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \quad \forall l, \forall t$$

$$u_{it}, z_{ik} \in \{0, 1\}$$

发电机启停机约束

系统备用约束

发电机最大/小出力约束

发电机爬坡约束

功率平衡约束

线路传输能力约束





### 3. 电力系统的机组组合

**思考：既然机组组合确定的是系统次日各时段的最大发电能力，为何在目标函数中仍包含每个时段的运行成本，下面的模型是否合理？**

$$\min_u \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(u_{it})$$

仅包含机组启停成本，不包含运行成本

$$s.t. -u_{i(t-1)} + u_{it} - u_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{on}^i + t - 1\}$$

$$u_{i(t-1)} - u_{it} + u_{ik} \leq 1, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{off}^i + t - 1\}$$

$$-u_{i(t-1)} + u_{it} - z_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{\max}^i \geq (1 + \tilde{r}) D_L \quad \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{\min}^i \leq (1 - \tilde{r}) D_L \quad \forall t$$

$$u_{it} P_{\min}^i \leq p_{it} \leq u_{it} P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$p_{i(t+1)} - p_{it} \leq u_{it} R_+^i + (1 - u_{it}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$p_{it} - p_{i(t+1)} \leq u_{i(t+1)} R_-^i + (1 - u_{i(t+1)}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N p_{it} = D_t$$

$$-F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \leq \sum_{i=1}^N \pi_{il} p_{it} \leq F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \quad \forall l, \forall t$$

$$u_{it}, z_{ik} \in \{0, 1\}$$

发电机启停机约束

系统备用约束

发电机最大/小出力约束

发电机爬坡约束

功率平衡约束

线路传输能力约束





### 3. 电力系统的机组组合

仅凭发电机启停机成本确定机组组合可能会增加总的发电成本!

G1	G2	G3	$C_{total}$	$C_{start}$
Off	Off	Off		
On	Off	Off	5375	510
Off	On	Off		
Off	Off	On		
On	On	Off	5417	820
Off	On	On	5416	388
On	Off	On	5617	588
On	On	On		



前提：负荷预测准确！  
如果不准确呢？

不确定性优化



### 3. 电力系统的机组组合

#### 4. 机组组合问题的求解

——混合整数规划问题 (Mixed Integer Programming Problem)

##### ➤ 连续变量

- 能取到可行集中的任意值
- 可以跟随梯度优化



$$\begin{aligned} \max_{x_1, x_2} & x_1^2 + x_2^2 \\ \text{s.t.} & 0 \leq x_1 \leq 2 \\ & 1 \leq x_2 \leq 3 \\ & 0 \leq x_1 + x_2 \leq 2 \end{aligned}$$



##### ➤ 离散变量

- 只能取到有限个值
- 没有梯度
- 求解只能尝试离散值的组合

以例1中3台发电机为例，共有 $2^3$ 种组合。

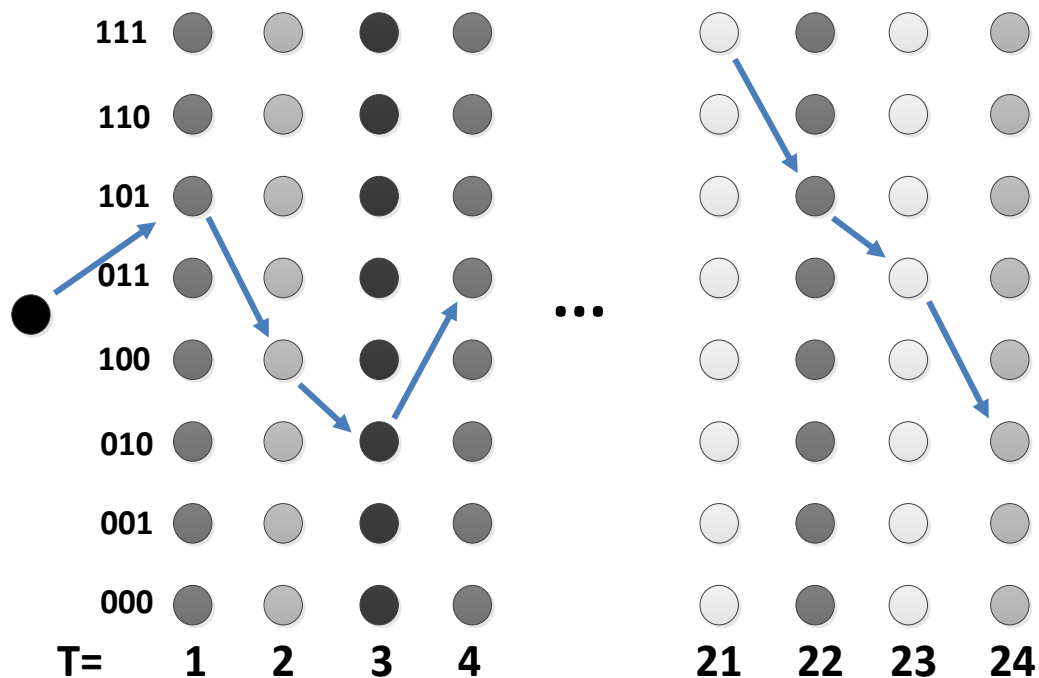
**如果有N台发电机？共有 $2^N$ 种组合！**





### 3. 电力系统的机组组合

以例1中3台发电机系统为例，若共有24个调度时段，共有多少种可能的情形？



每条将不同时段组合方案连接起来的路径代表一种可能的情形，共有 $(2^3)^{24}$ 种。



### 3. 电力系统的机组组合

#### 机组组合问题中的“维数灾” (Curse of Dimensionality)

- 若系统中有5台发电机，24个调度时段

$$(2^N)^T = (2^5)^{24} = 6.2 \times 10^{35}$$

- 若计算机每秒处理 $10^9$ 种组合，则完全求解该问题需花费 $2 \times 10^{19}$ 年

- 实际的电力系统中的发电机数量基本在100台以上



- 其中大部分机组组合方案并不满足约束





# 3. 电力系统的机组组合

## 实际电力系统:

- 美国PJM电网 (世界上最大的区域电网)

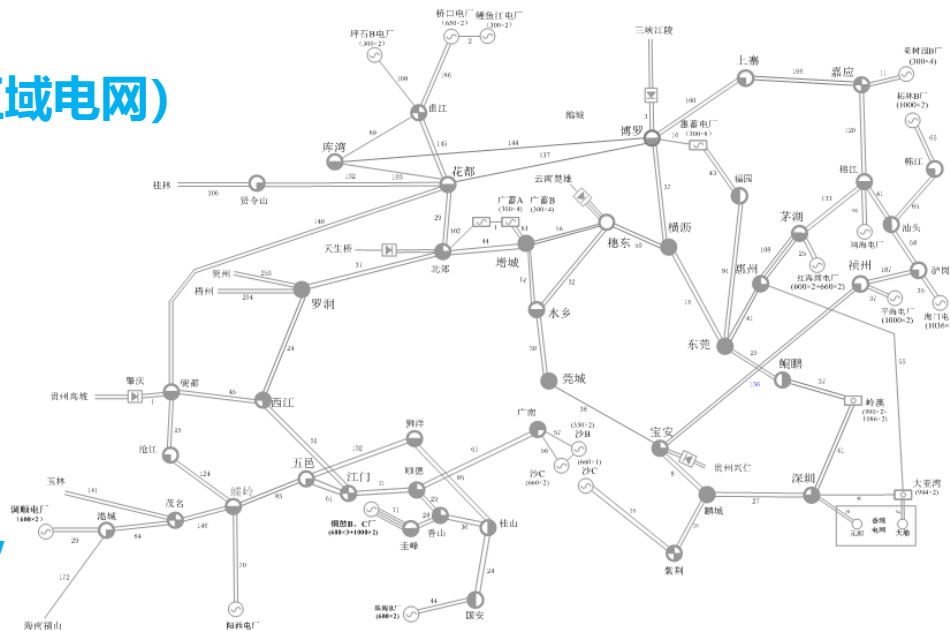
- 1200台发电机, 6000条线路

- 美国加州CAISO

- 1000台发电机, 7000条线路

- 中国广东电网

- 175台大型发电机 (发电厂) ,  
2452条线路



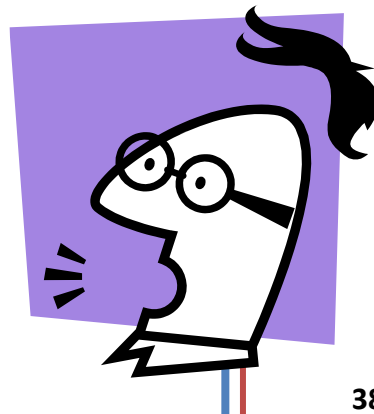
以求解广东电网机组组合问题为例:

- 12600个变量: 4200个连续变量, 8400个0/1变量

- 76000个约束

求解规模十分巨大!

But,笔记本电脑30-60秒或更低:  
算法的力量!





# 3. 电力系统的机组组合

## 机组组合问题求解的主要问题与主要方法

### 如何击败维数灾？

- Brute force approach is not scalable!
- 剔除不可能的解和不起作用约束
- 尝试选取所有组合情况集合的较小子集计算
- 不保证结果的最优性
- 在可以接受的时间内尽可能的接近最优解

### 主要的求解方法

- 优先级列表/启发式方法
- 动态规划
- 拉格朗日松弛
- 混合整数规划
- Bender's分解方法
- 智能计算方法
- ...

### 好的求解方法

- 结果接近最优解
- 计算时间少
- 建模方便





# 求解大规模机组组合的商用求解器

求解器	主要特点	优势	应用场景
CPLEX	支持线性规划、混合整数规划、二次规划等；多种高级特性	大规模问题求解性能强，适合复杂工业应用	供应链优化、交通运输、能源调度
Gurobi	支持多种优化问题类型；速度快	全球最快的 MIP 求解器，用户友好的接口	物流、生产调度、金融投资组合
YALMIP	MATLAB 建模接口；支持多求解器	与 MATLAB 无缝集成，灵活性高	控制系统、信号处理、系统优化
MOSEK	擅长凸优化、二次锥规划、半定规划	SOCP 和 SDP 求解性能卓越，精度高	金融优化、机器学习、信号处理
MATPOWER	电力系统优化与仿真；支持潮流计算与最优潮流	专用于电力系统仿真，开源且支持扩展	电力系统潮流分析、经济调度、电力市场仿真
OR-Tools	支持多种优化方法；专注组合优化	免费开源，专用车辆路径规划与调度求解强大	物流优化、车辆路径规划、生产调度
MindOpt	技术来自达摩院决策智能实验室的MindOpt Solver。可广泛应用于云计算、电力能源等领域	面向工业应用，支持大规模并行计算	物流、能源、生产调度
COPT	高性能 MIP 和 LP 求解器	性价比高，适合大规模优化问题	物流优化、资源调度、供应链管理

国产求解器

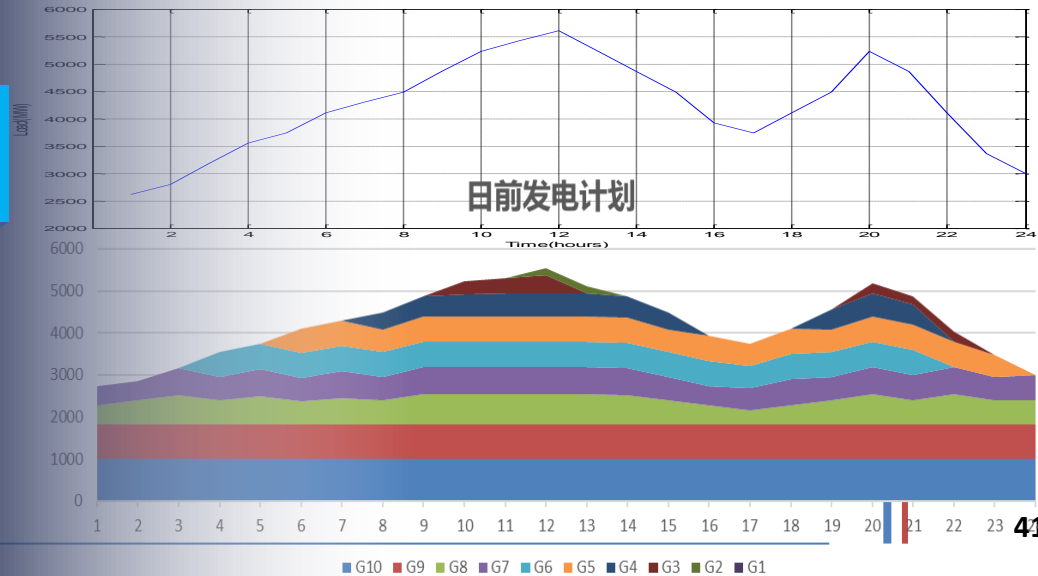
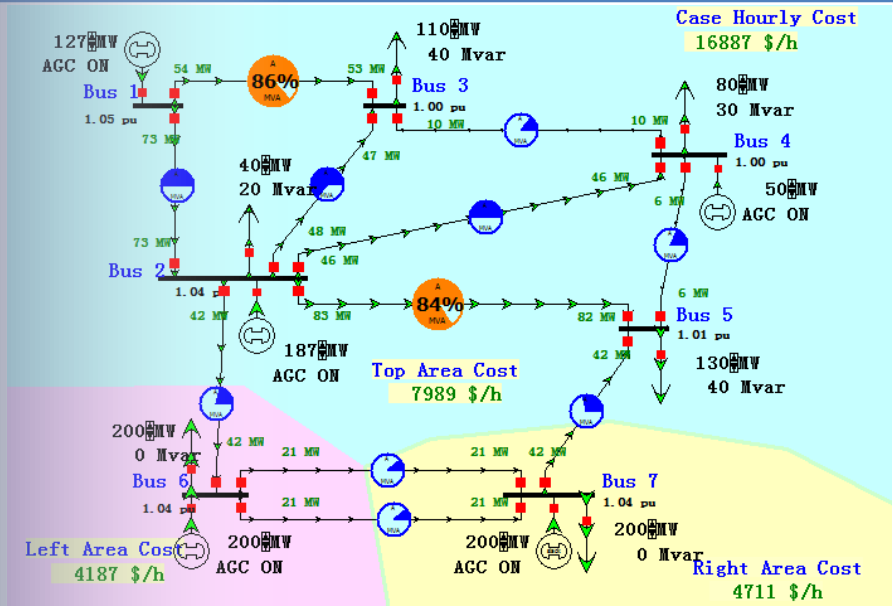




# 主要内容

## 机组组合与发电计划

- 1. 背景动机
- 2. 经济运行
- 3. 机组组合
- 4. 发电计划
- 5. 面临挑战





## 4. 电力系统的发电计划

2001年1月17日，美国加利福尼亚州遭遇了前所未有的供电危机。为防输电网络瘫痪，加州北部实行轮流停电管制，受影响人口达100多万。这也是加州自二战以来首次实行电力管制。

——《人民日报》

**原因之一：发电计划不合理，以致潜在发电容量不足。**

### ◆ 电力系统发电计划——保证电力电量平衡

- 满足系统安全和电能质量
- 依据电厂发电能力、电网输送能力及用户的需求
- 预先制定的运行方式，提高系统运行经济性
- 时间尺度：

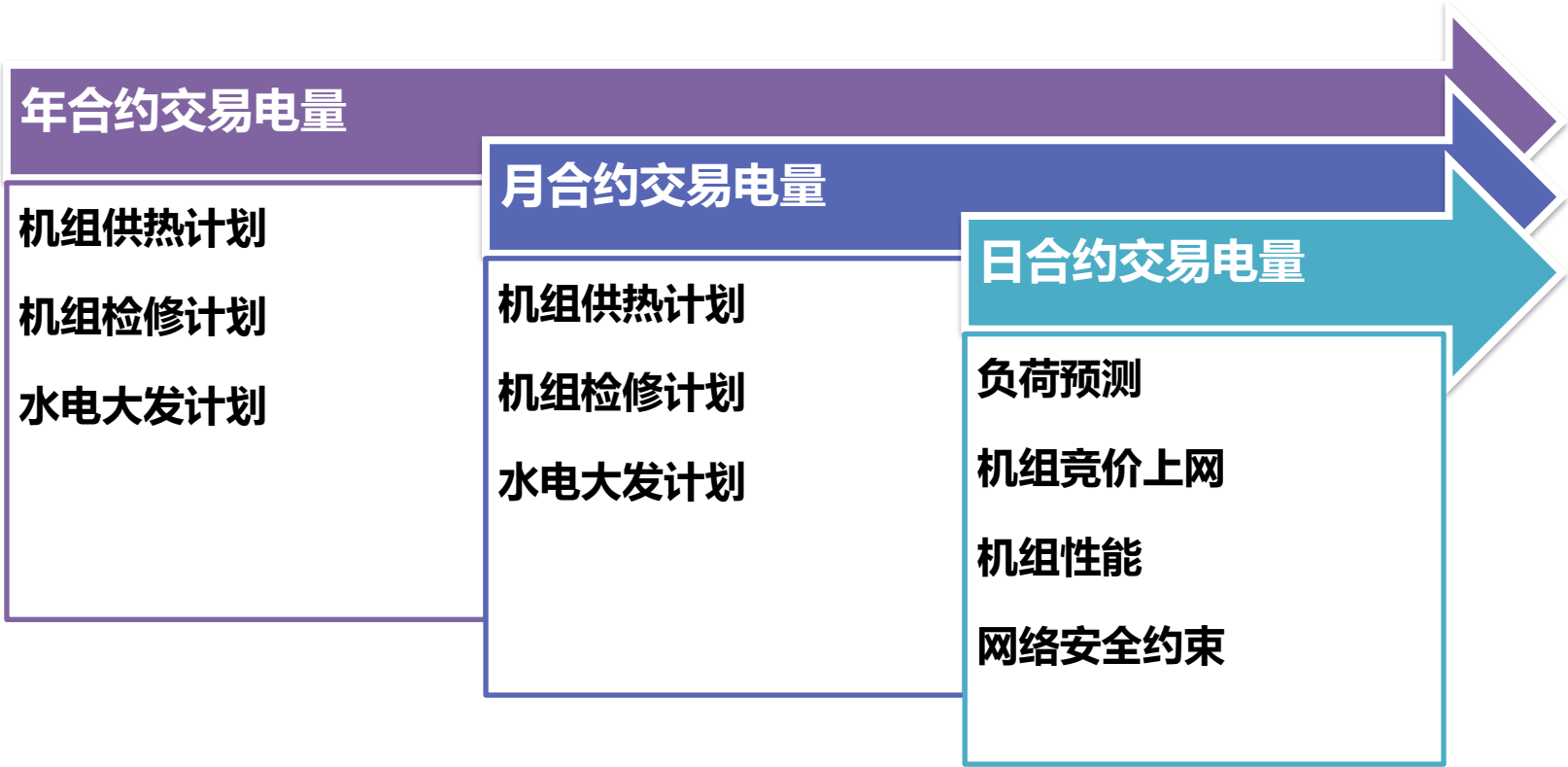




# 4. 电力系统的发电计划

## 电力系统发电计划的分解

——国内：普遍实行电力合约交易





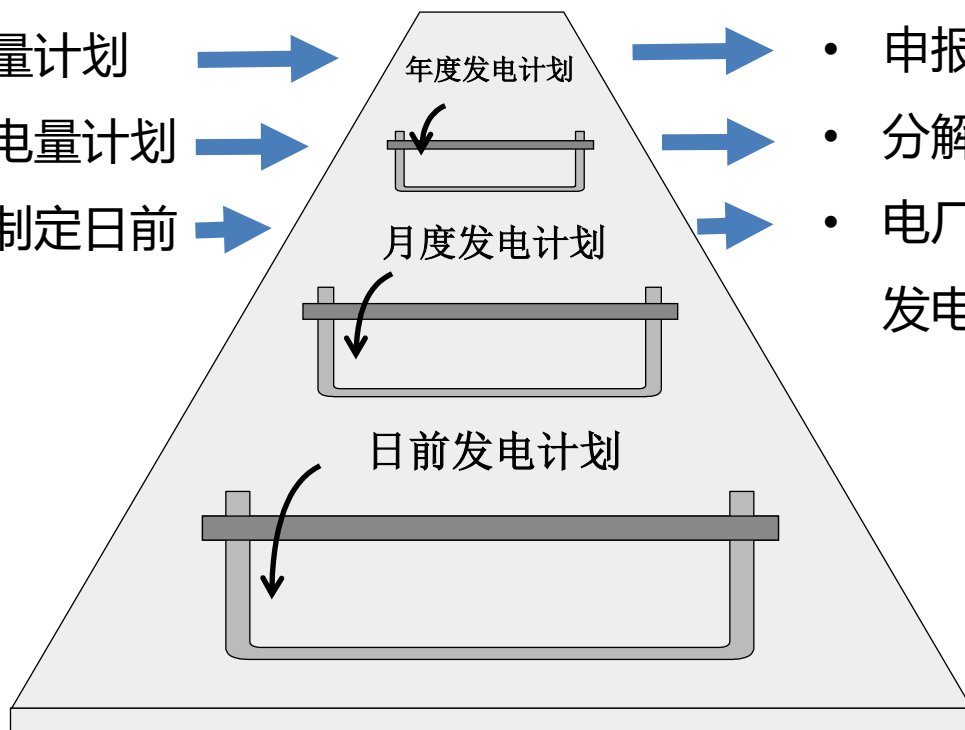
# 4. 电力系统的发电计划

## 电力系统发电计划的分解

——国内：厂网分开，竞价上网

### 电网侧

- 发改委制定年度电量计划
- 电网公司制定月度电量计划
- 参考机组年累电量制定日前发电计划



### 电厂侧

- 申报年度合同电量
- 分解到月度合同电量
- 电厂日前运行中滚动调整发电计划



## 4. 电力系统的发电计划

### 电力系统节能发电调度

——《节能发电调度办法》

发展改革委、环保总局、电监会、能源办《节能发电调度办法（试行）》2007年国务院正式发布

- 发改委制定年度、季度、月度机组组合基础方案
- 电网公司根据机组排序和发电组合基础方案确定日前机组组合方案并制定日前发电计划

#### 机组排序表：

- 优先调度可再生能源发电
- 按照机组煤耗和排污水平依次调度化石能源发电
  - 较早投产的小机组能耗高、污染大、成本低
  - 新投产的机组能耗低、污染小、成本高



在经济性和节能性之间取得平衡



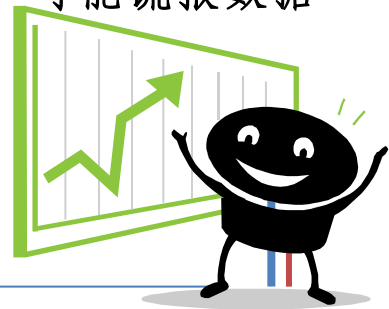


## 4. 电力系统的发电计划

### 电力系统日前发电计划

#### 电力市场中的日前发电计划 (Pool)

- 每日午前，发电厂向电网调度管理机构(pool)上报每台机组每半小时运行数据，包括：最低发电容量和费用、启停机费用、不同功率水平的费用和每半小时的可供最大功率。
- Pool对发电厂上报数据及每半小时的负荷预测结果进行处理
  - 首先对发电机进行排序，得出次序表，并于下午3时公布
  - 随后根据全网运行成本最低的原则，确定日发电计划
- 存在的问题
  - 计划制定依据不完全是系统实际运行的效率，发电厂可能谎报数据
  - 电力系统自上而下的管理功能削弱
  - 不能兼顾发电的经济性和网络的输送能力

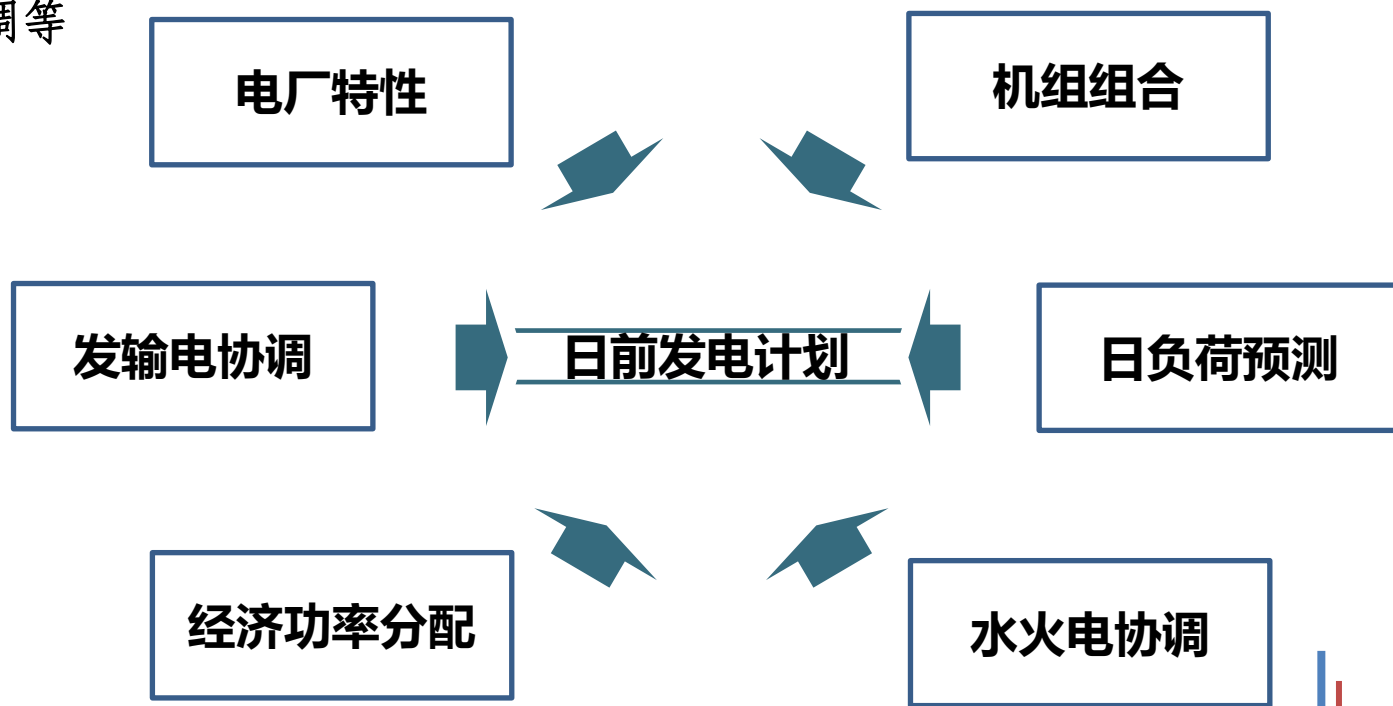




## 4. 电力系统的发电计划

### 我国日前发电计划

- 发电侧单边开放的电力市场，负荷需求无弹性，电网公司为单一买家
- 发电厂性质较为复杂，新电厂要还贷，老电厂发电成本较高
- 综合考虑负荷预测、机组组合、发电机间经济功率分配、水火电协调、发电与输电协调等







# 4. 电力系统的发电计划

## 我国电网常用日前发电计划的数学模型

### 阶段1：确定

#### 机组组合

目标：完成购电合同

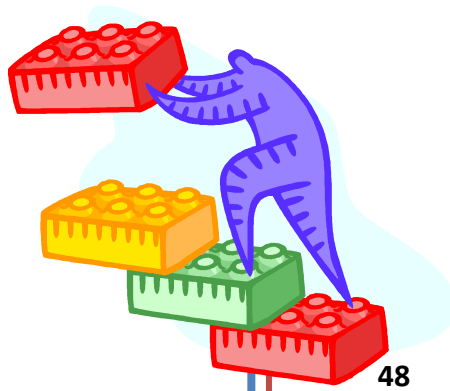
- ——机组性能约束
- ——系统固有约束
- ——各机组上网紧迫程度（视购电合同完成情况而定）

### 阶段2：确定

#### 机组出力

目标：系统总发电费用最小

- ——机组性能约束
- ——系统固有约束
- ——合同电量约束





# 4. 电力系统的发电计划

阶段1: 确定机组组合  $\min_u \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \lambda_i u_{it}$

$$\begin{aligned}
 s.t. \quad & -u_{i(t-1)} + u_{it} - u_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{on}^i + t-1\} \\
 & u_{i(t-1)} - u_{it} + u_{ik} \leq 1, \forall i, \forall t, \forall k \in \{t, t+1, \dots, T_{off}^i + t-1\} \\
 & -u_{i(t-1)} + u_{it} - z_{ik} \leq 0, \forall i, \forall t \\
 & \sum_{i=1}^N u_{it} P_{\max}^i \geq (1 + \tilde{r}) D_L \quad \forall t \\
 & \sum_{i=1}^N u_{it} P_{\min}^i \leq (1 - \tilde{r}) D_L \quad \forall t \\
 & u_{it} P_{\min}^i \leq p_{it} \leq u_{it} P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t \\
 & p_{i(t+1)} - p_{it} \leq u_{it} R_+^i + (1 - u_{it}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t \\
 & p_{it} - p_{i(t+1)} \leq u_{i(t+1)} R_-^i + (1 - u_{i(t+1)}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t \\
 & \sum_{i=1}^N p_{it} = D_t \\
 & -F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \leq \sum_{i=1}^N \pi_{il} p_{it} \leq F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \quad \forall l, \forall t \\
 & u_i, z_i \in \{0, 1\}
 \end{aligned}$$

} 发电机启停机约束  
 } 系统备用约束  
 } 发电机最大/小出力约束  
 } 发电机爬坡约束  
 } 功率平衡约束  
 } 线路传输能力约束  
 } 机组状态约束

其中,  $\lambda_i = \frac{\text{机组日最大发电量/月发电合同剩余量}}{\text{当月天数-月发电剩余天数}}$



## 4. 电力系统的发电计划

阶段2：确定机组出力  $\min_p \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(p_{it})$

s.t.

$$u_{it} P_{\min}^i \leq p_{it} \leq u_{it} P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t \quad \left. \vphantom{u_{it} P_{\min}^i} \right\} \text{发电机最大/小出力约束}$$

$$p_{i(t+1)} - p_{it} \leq u_{it} R_+^i + (1 - u_{it}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t \quad \left. \vphantom{p_{i(t+1)} - p_{it}} \right\} \text{发电机爬坡约束}$$

$$p_{it} - p_{i(t+1)} \leq u_{i(t+1)} R_-^i + (1 - u_{i(t+1)}) P_{\max}^i \quad \forall i, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^N p_{it} = D_t \quad \left. \vphantom{\sum_{i=1}^N p_{it}} \right\} \text{功率平衡约束}$$

$$-F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \leq \sum_{i=1}^N \pi_{il} p_{it} \leq F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt} \quad \forall l, \forall t \quad \left. \vphantom{-F_l + \sum_{l=1}^L \pi_{ql} p_{qt}} \right\} \text{线路传输能力约束}$$

$$(1 - \alpha) E_i \leq \sum_{t=1}^T p_{it} \leq (1 + \alpha) E_i, \quad \forall i \quad \left. \vphantom{(1 - \alpha) E_i} \right\} \text{合同电量约束}$$

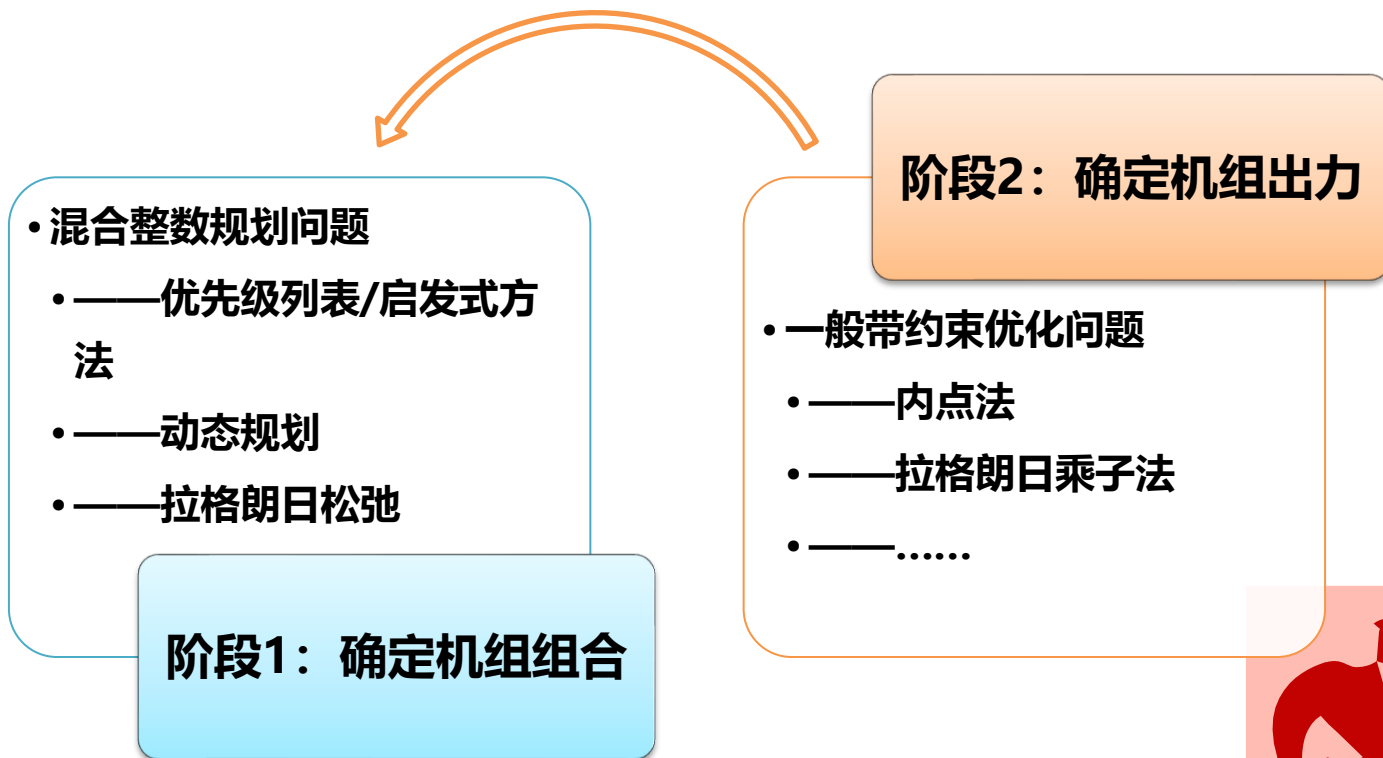
其中， $u_{it}$ 为阶段1确定的发电机启停变量。

**此种模型有何问题？你有什么改进的思路？**



# 4. 电力系统的发电计划

## 日前发电计划的求解





# 4. 电力系统的发电计划

## 日前发电计划实例

——IEEE 39节点标准测试系统

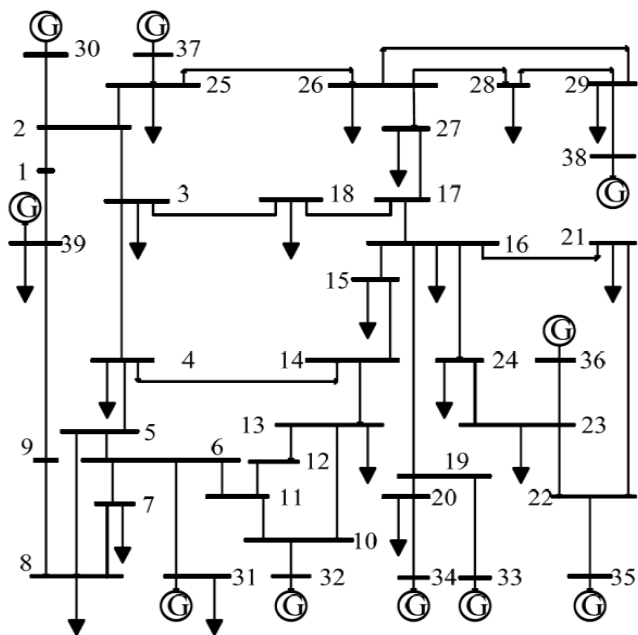


图1 IEEE39节点系统

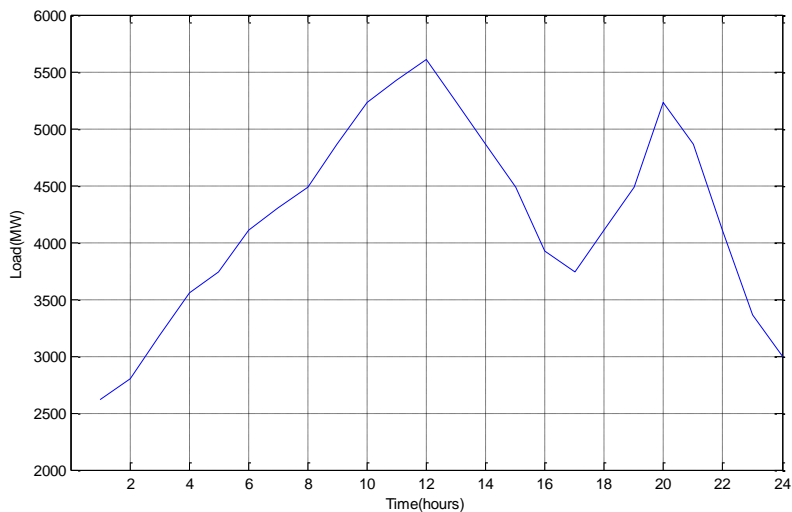


图2 典型日负荷曲线

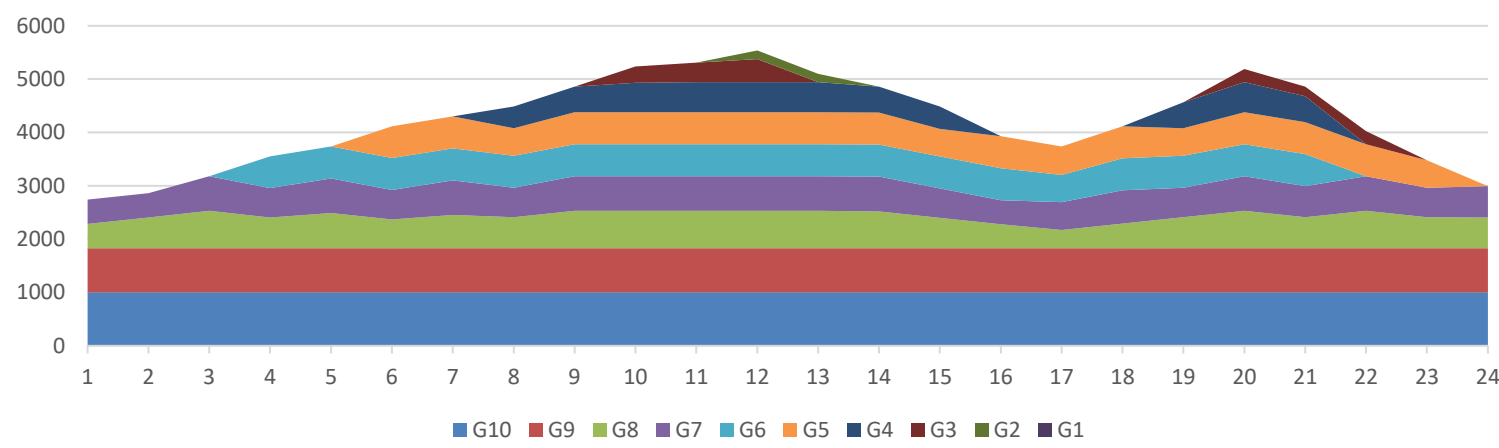


# 4. 电力系统的发电计划

## ◆ 机组组合与发电计划方案

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
G5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
G6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
G7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

日前发电计划



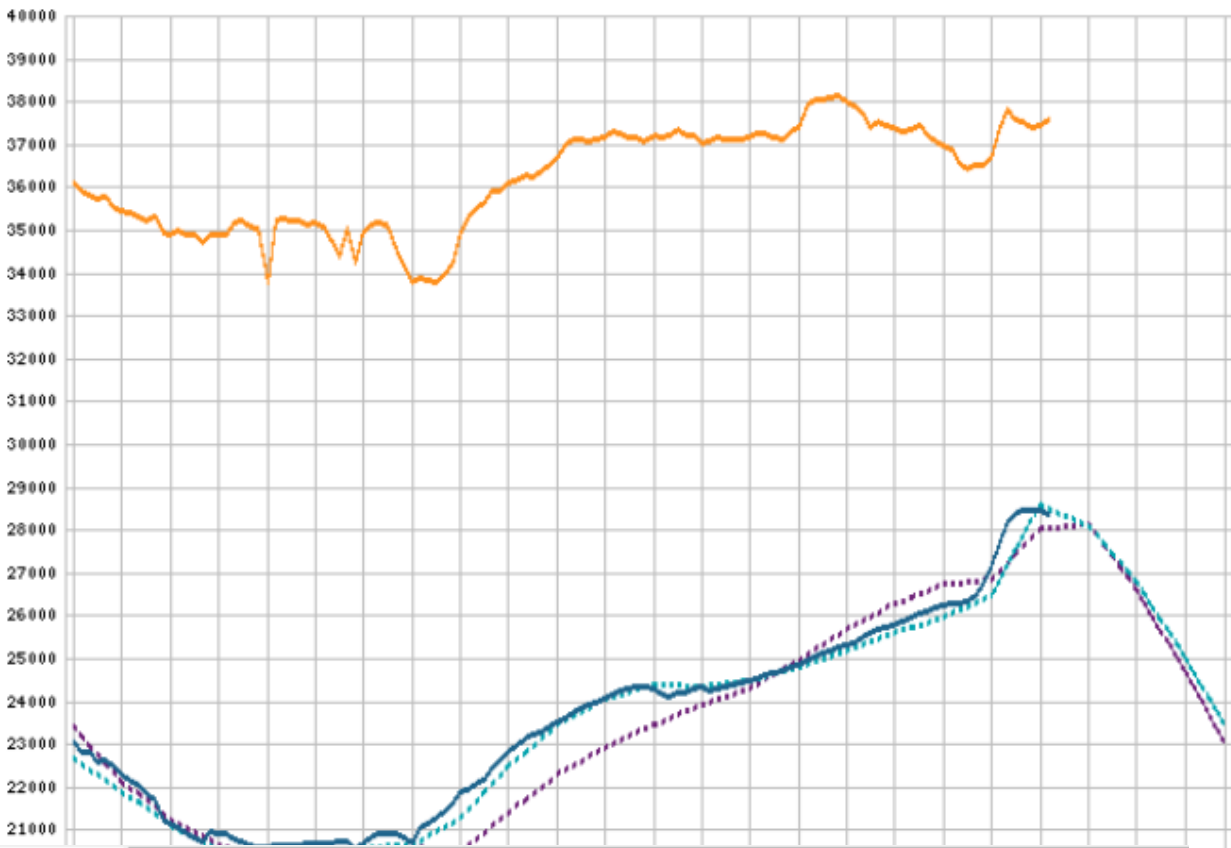


# 4. 电力系统的发电计划

## ◆ 成熟电力市场下的发电计划



数据来源: <http://www.caiso.com>



	Hour Beginning (MWs)								
	12a	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a
	00	01	02	03	04	05	06	07	08
Day-Ahead Demand Forecast <a href="#">more info&gt;&gt;</a>	23361	22094	21213	20618	20266	20199	20422	20573	20446
Hour-Ahead Demand Forecast <a href="#">more info&gt;&gt;</a>	22640	21864	21082	20527	20237	20258	20554	20609	21234
Actual Demand <a href="#">more info&gt;&gt;</a>	23002	22267	21098	20898	20545	20638	20636	20655	21853
Available Resources <a href="#">more info&gt;&gt;</a>	36058	35408	34879	34872	33763	35156	34890	33759	34079

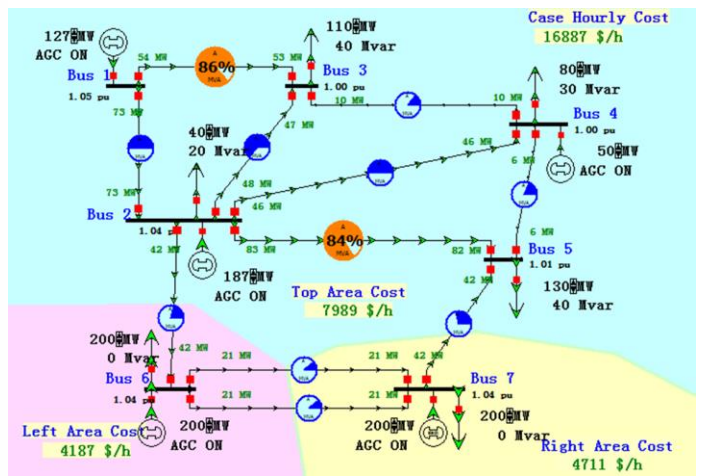
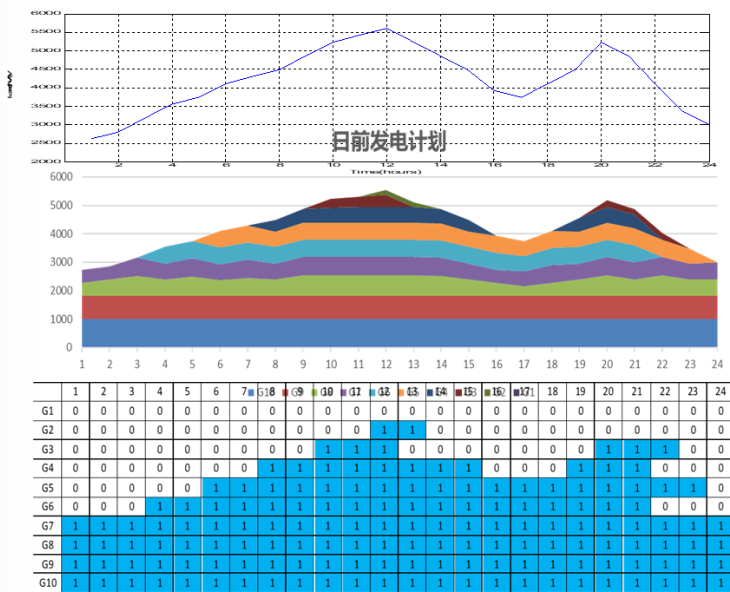


# 主要内容

## 机组组合与发电计划

- 1. 背景动机
- 2. 经济运行
- 3. 机组组合
- 4. 发电计划
- 5. 面临挑战

排兵布阵





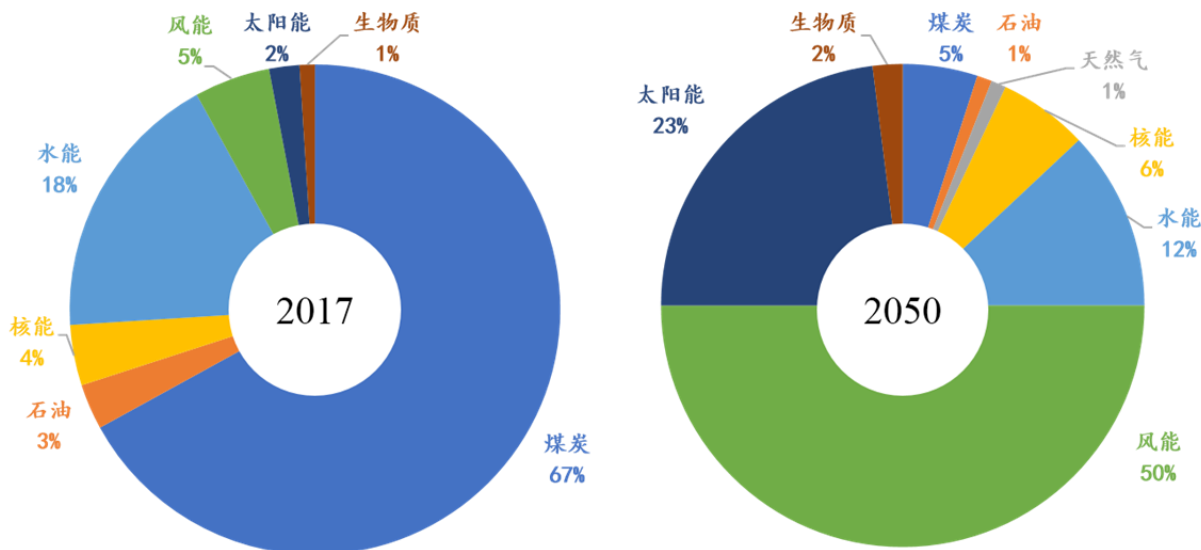


## 5. 机组组合与发电计划问题面临的新挑战

### • 我国电力能源构成情况—远期（30·60双碳目标）

面对全球日益严峻的环境与气候变化压力，规模化开发和利用可再生能源能大幅提升能源安全水平，实现低碳绿色发展

据国际能源署估计，到2040年，风能、太阳能等可再生能源将成为电力系统的主导电源。在中国，到2050年，风能和太阳能将成为电力能源的主力，在总发电量中的占比超过70%

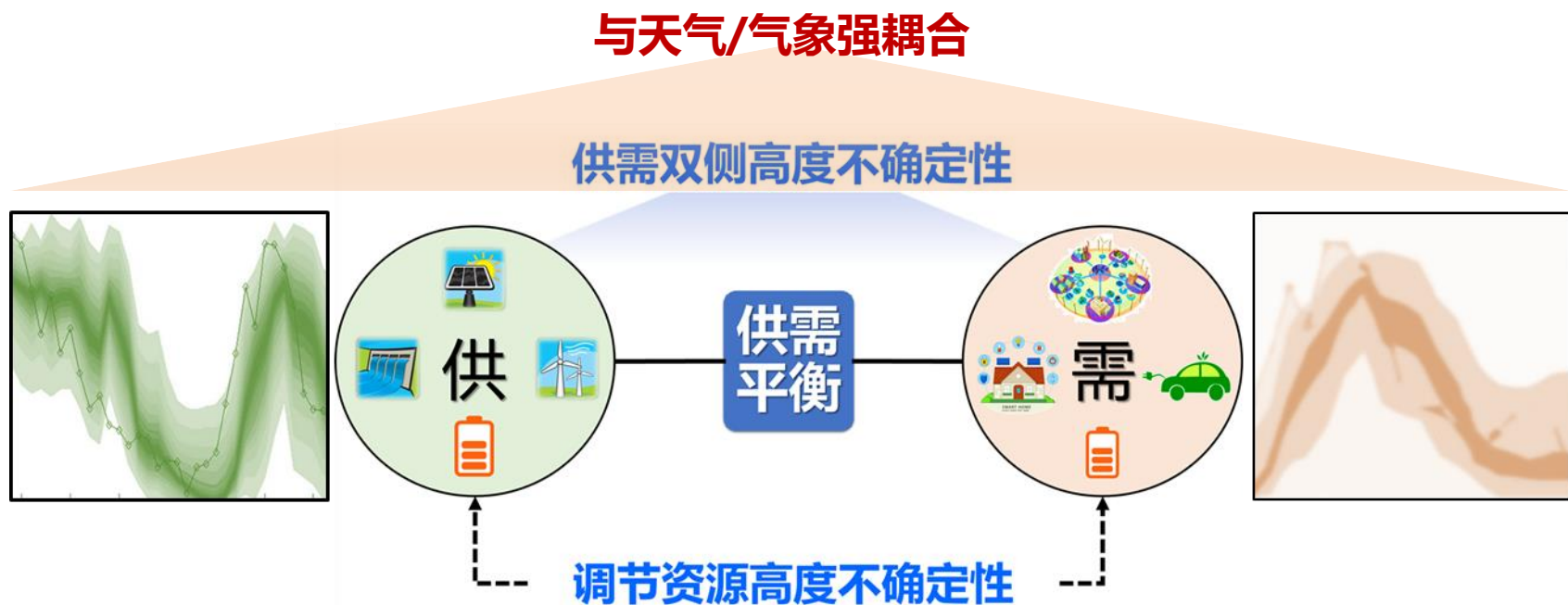


2017年和2050年中国的发电量构成



## 5. 机组组合与发电计划问题面临的新挑战

随着可再生能源占比持续升高，**供需双侧与系统调节资源均呈现高度不确定性**。在高不确定性场景下，电力系统的机组组合与发电计划问题面临的严峻挑战。





# 5. 机组组合与发电计划问题面临的新挑战



## 电力系统中的不确定性

- 负荷预测
- 可再生能源发电 (风电、光伏、小水电)
- 紧急事件 (发电机停运、线路跳闸)
- 连锁故障
- 各种新的调节手段 (抽蓄、储能、新型可调节/交易负荷)



## 应对措施

- 带安全约束的机组组合 (Security Constrained Unit Commitment, SCUC)
- 随机机组组合 (Stochastic Unit Commitment, SUC)
- 鲁棒机组组合 (Robust Unit Commitment, RUC)
- 机会约束机组组合 (Chance-constrained Unit Commitment CCUC)





## 5. 机组组合与发电计划问题面临的新挑战

### 思考

新型电力系统中的安全经济运行面临什么重大挑战？

未来解决超大规模电力系统机组组合有什么样的新技术？



## Topic 4 : 电力系统运行操作与维护

建议  
准备  
要点

1. 什么是电力系统运行操作
2. 为什么电力系统要进行运行操作
3. 电力系统有哪些典型的运行操作
4. 电力系统运行操作的基本制度是什么
5. 为什么电力系统操作中要采用“五防”措施
6. 什么是电力系统维护
7. 为什么要进行电力系统维护
8. 什么是电力系统检修
9. 电力系统检修有哪些主要的方式

抽签确定汇报组

两周准备时间

第9周汇报, 25分钟,  
组内每个同学都参与  
汇报

同学提问 (按组计成  
绩)

第2节课老师串讲



# 抽奖结果

周次	组别	题目
第六周	第二组	电力系统运行方式
第七周	第九组	机组组合与发电计划
第八周	第十组	电力系统调度
第九周		电力系统的运行操作与维护
第十周		电力系统稳定
第十一周		电力系统控制
第十二周		继电保护原理
第十三周		电力营销与资产管理
第十四周		电力系统应急管理
第十五周		电力市场



## 第六讲 机组组合与发电计划



谢谢!