



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 (30220562-3)

第六讲 稳态大作业Part2

2025-3-28

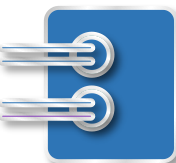


分享交流

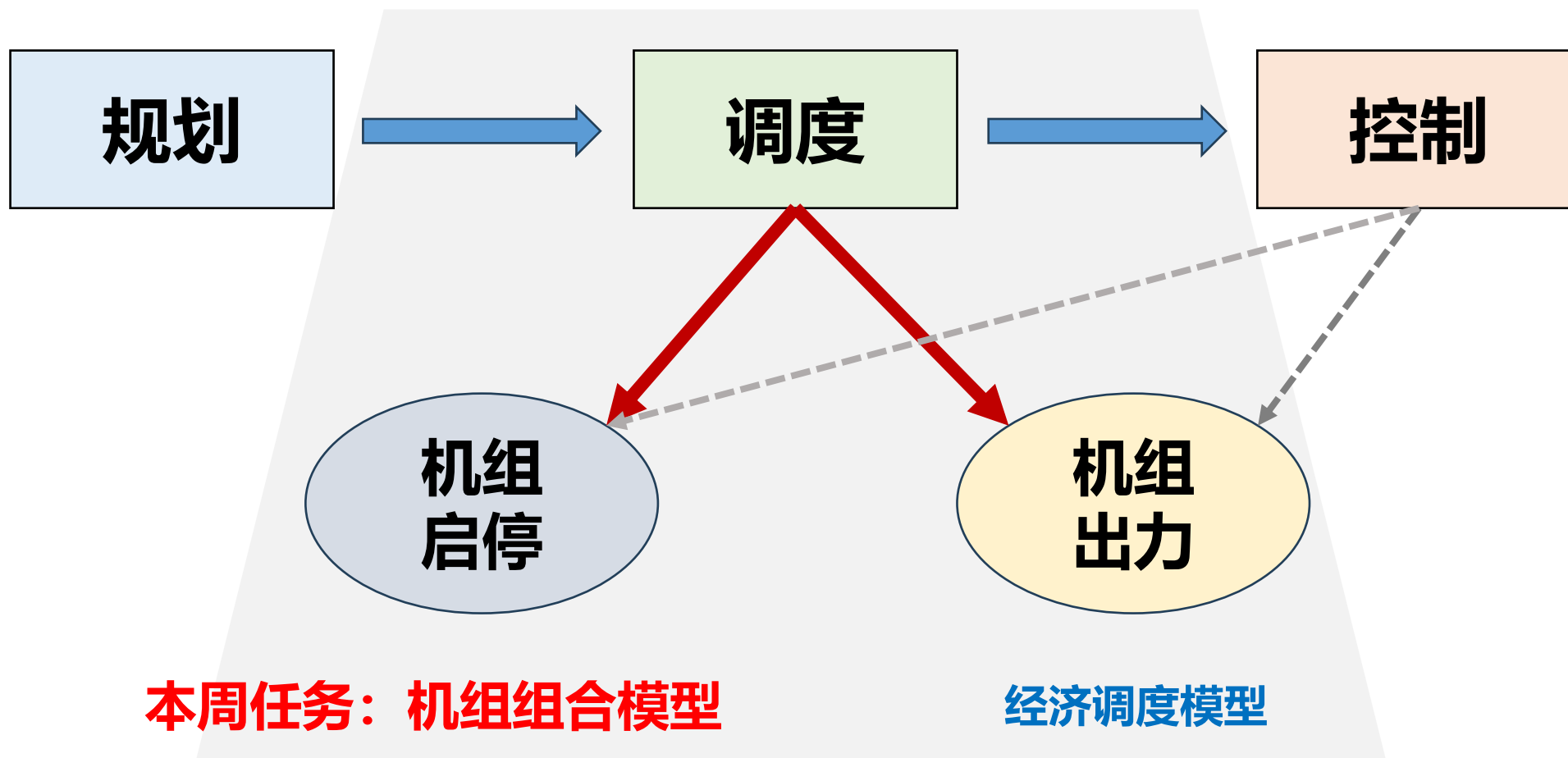
任务一：多时段经济调度

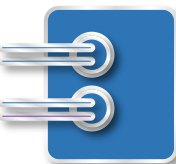
稳态大作业提示

任务二：多时段机组组合



电力系统调度问题





多时段机组组合模型

● 目标函数

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\overset{\text{①运行成本}}{C_i^1 g_{i,t} + C_i^0 x_{i,t}} + c_{i,t}^{oc}]$$

变量

$g_{i,t}$: 机组*i*在第*t*个调度周期内的出力

$x_{i,t}$: 机组*i*在第*t*个调度周期内的开关机状态, 为0表示停机, 为1表示开机

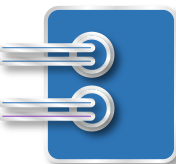
常数

N : 机组个数 T : 调度周期数

C_i^1, C_i^0 : 机组*i*成本函数 (本次作业考虑一次函数) 一次项系数和常数项

表达式推导

- I. 不考虑机组启停时, 机组*i*成本函数: $C_i^1 g_{i,t} + \overset{\text{①}}{C_i^0}$ 机组运行但出力为0, 此时有成本, 机组关停出力也为0, 此时没成本, 怎么区分?
- II. 一种思路: $(C_i^1 g_{i,t} + C_i^0) x_{i,t} = C_i^1 \overset{\text{①}}{g_{i,t} x_{i,t}} + C_i^0 x_{i,t}$ 出现了变量相乘, 难以求解
- III. 分析线性成本项: $x_{i,t} = 1, C_i^1 g_{i,t} x_{i,t} = C_i^1 g_{i,t}; x_{i,t} = 0, C_i^1 g_{i,t} x_{i,t} = \overset{\text{①}}{0} = C_i^1 g_{i,t}$ 机组关停时出力应为零, 但数学上如何保证?



多时段机组组合模型

● 目标函数

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_i^1 g_{i,t} + C_i^0 x_{i,t} + c_{i,t}^{oc}]$$

② 启停成本

【变量】： $c_{i,t}^{oc}$ 为机组*i*在调度周期*t*的启停成本 (why?)

【常数】： M_i^o, M_i^c 分别为机组*i*单次启动、关停成本

【表达式推导】

I. 计算启停成本 $c_{i,t}^{oc} = \begin{cases} M_i^o, & x_{i,t} = 0, x_{i,t+1} = 1 \\ M_i^c, & x_{i,t} = 1, x_{i,t+1} = 0 \\ 0, & x_{i,t} = x_{i,t+1} \end{cases}$

逻辑运算“与”： $(1 - x_{i,t})x_{i,t+1}$

出现变量相乘，难以求解！

II. 引入机组开关机动作变量 $z_{i,t} = x_{i,t+1} - x_{i,t}$ ，则启停成本 $c_{i,t}^{oc} = \begin{cases} M_i^o, & z_{i,t} = 1 \\ M_i^c, & z_{i,t} = -1 \\ 0, & z_{i,t} = 0 \end{cases}$

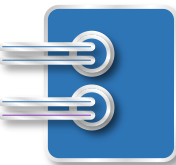
计算机无法直接

理解条件函数的表达方式

III. 将条件函数改写为约束： $\begin{cases} c_{i,t}^{oc} \geq z_{i,t} M_i^o \\ c_{i,t}^{oc} \geq -z_{i,t} M_i^c \end{cases}$

将 $c_{i,t}^{oc}$ 看作独立变量，作为目标函数的一部分求极小值

因此可将II.中启停成本中的=放缩为 \geq (求极小值自动收缩到约束下限) 6



多时段机组组合模型

●约束条件

- 任务一多时段经济调度已有约束（注意表达式的**区别**）

机组出力矩阵 $G = \{g_{i,t}\}^{N \times T}$ 的第 t 列

【系统负荷平衡约束】： $P_t = \textcircled{g_t} - d_t, \forall t$, d_t 为第 t 个调度周期的系统负荷

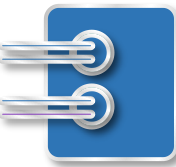
【支路潮流约束】： $HP_t \in [P_l^{\min}, P_l^{\max}], \forall t$, H 为功率传输分布因子矩阵（PTDF）

【机组发电功率限制约束】： $g_{i,t} \in [x_{i,t} g_i^{\min}, x_{i,t} g_i^{\max}], \forall i, t$ 这里保证了机组关停时出力应为零
(巧妙地用线性约束做到这点!)

【机组爬坡约束】：
$$\begin{cases} g_{i,t+1} - g_{i,t} \leq S_i^u + (R_i^u - S_i^u)x_{i,t} \\ g_{i,t} - g_{i,t+1} \leq S_i^d + (R_i^d - S_i^d)x_{i,t+1} \end{cases}, \forall i, \forall t \in [1, T-1]$$

其中 R_i^u, R_i^d 分别为机组 i 上/下爬坡的最大速率, S_i^u, S_i^d 分别为机组 i 启动/关停最大升/降出力速率

动笔写一写： $x_{i,t}, x_{i,t+1}$ 四种取值组合下机组爬坡约束实际表达形式



多时段机组组合模型

●约束条件

• 新加约束

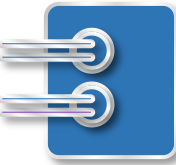
【启停成本约束】：
$$\begin{cases} c_{i,t}^{oc} \geq z_{i,t} M_i^o \\ c_{i,t}^{oc} \geq -z_{i,t} M_i^c \end{cases}, \forall i, \forall t \in [1, T-1]$$

【机组最小持续开停机时间约束】：在实际运行过程中，由于锅炉加热需要一定的时间，火电机组受最小启动时间的约束；同时，火电机组的启动需消耗大量燃料，启动后短时间运行立即停机将造成极大浪费且不符合实际，因此火电机组运行还受最小停机时间约束。

$$\begin{cases} \sum_{k=t+1}^{t+T_i^o} x_{i,k} \geq z_{i,t} T_i^o, \forall i, \forall t \in [1, T-T_i^o] \\ \sum_{k=t+1}^{t+T_i^c} (1-x_{i,k}) \geq -z_{i,t} T_i^c, \forall i, \forall t \in [1, T-T_i^c] \end{cases}$$

T_i^o, T_i^c 分别为机组 i 开/停机最短调度周期数

如何改写为矩阵形式？



稳态大作业二

● 任务要求

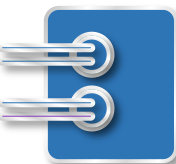
根据所给算例文件及参数，建立多时段机组组合模型求解。要求结果中给出总运行成本、机组启停成本、各机组启停及出力情况、模型求解速度，并探究启停约束对系统运行状态的影响。

● 参数说明

“case39_UC.m”为本次的mpc文件，负荷文件仍使用“load3996.mat”。机组启停成本见mpc.gencost，设定机组最少开启/关停时间为1小时，各机组开机最大升出力和关停最小降出力均为0.3出倍最大力。其余参数设置同经济调度。

● 拓展阅读

[1] 杨楠, 电力系统机组组合问题的建模与求解[M]. 北京: 科学出版社, 2020.



完成指导

●思路建议

- (1) 定位任务二和任务一的不同点，由易（机组出力约束）到难（机组最小持续开停机时间约束、启停成本约束、爬坡约束）进行修改扩充
- (2) 参考机组最小持续开停机时间约束的改写方法，将课件中的其他约束（启停成本约束、爬坡约束）改写为矩阵表达形式

●提示

如 $z = ax + by$ 可写成 $z = (a \ b) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

- (1) 引入辅助计算的常数向量/矩阵表示逐项作差、相邻项求和等线性公式
- (2) 注意变量维度，区分矩阵乘法和对应元素相乘两种运算

矩阵乘法：机组最小持续开停机时间约束 $XU_o \geq T_o * XU(:, 1:T - T_o)$

对应元素相乘：机组发电功率限制 $G \geq X.* g^{min}$ ， $G = \{g_{i,t}\}^{N \times T}$ 是发电机出力矩阵， $g^{min} = \{g_i^{min}\}^{N \times 1}$ 是机组出力下限向量