

稳态大作业（3）：随机规划

玄松元 吴晨聪 代泽昊

一、基础作业

根据所给算例文件及参数，建立考虑风电出力不确定性的多时段机组组合模型。要求结果中给出总运行成本、各机组出力情况、模型求解速度，并说明第二问对历史数据的处理方法。在原有系统节点 30 中增加风电出力。

（1）向目标函数中加入风电成本，并变为期望形式，使用 SAA 方法求解。在实际中允许弃风，意味着 t 时刻风电上网量允许在 $[0, P_{wmax}^t]$ 之间变化。（见 “powersystem_3.m”）

【录入数据】

录入节点 30 具有风机，出力成本为 0，取 10 组数据做 SAA。

```
bus_if_hasWind = zeros(39,1);%有风机的节点
bus_if_hasWind(30,1) = 1;

% 风机处理成本
gen_cost_wind = 0;
% 取10组数据
N = 10;
```

图 1 风机参数设置

【决策变量】

在机组组合决策变量的基础上，增加“风机发电量”。由于要采用 10 组数据代入约束条件，所有决策变量需要进行维度拓展。

```
% 定义决策变量
% 发电机发电量
gen_generate = sdpvar(length(gen(:,1)),time,N,'full');
% 发电机启停状态（运行为1，停机为0）
gen_state = binvar(length(gen(:,1)),time,N,'full');
% 节点注入有功
bus_P = sdpvar(length(bus(:,1)),time,N,'full');
% 将启停成本改写为决策变量构成约束条件
gen_cost_updown = sdpvar(length(gen(:,1)),time-1,N,'full');
% 风机发电量
gen_wind = sdpvar(1,time,N,'full');
```

图 2 风机参数决策变量设置

【约束条件和目标函数】

为了对 10 组数据进行处理，改为 for 循环，对每一组的数据处理后，添加到约束条件和目标函数中。gen_generate、gen_state、bus_P、gen_cost_updown、gen_wind 决策变量均拓展维度。并增加风机出力约束：

$$P_{wind} \in [0, P_{wind \max}]$$

目标函数改为累加形式，对每一次样本计算后求和除以样本数：

$$\min \frac{1}{N_s} \sum_{sample=1}^{N_s} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_i^1 g_{i,t} + C_i^0 x_{i,t} + C_{i,t}^{OC}) + \sum_{t=1}^T (C_{wind,t}) \right)$$

```
% 风机出力约束
cons = [cons, gen_wind(:, :, sam) >= 0];
cons = [cons, gen_wind(:, :, sam) <= Pwmax(:, sam)'];

% 增加到目标函数中
object = object + (0.25*sum(gen_cost_wind'*gen_wind(:, :, sam)) ...
+ 0.25*sum(gen_cost_1'*gen_generate(:, :, sam)) + 0.25*sum(gen_cost_0'*gen_state(:, :, sam)) + sum(sum(gen_cost_updown(:, :, sam))))/N;
```

图3 风机约束条件和目标函数设置

【优化结果】

经过 102.8 秒的求解，发电成本为 21356.11 美元。

```
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 2.135611148869e+04, best bound 2.135412513185e+04, gap 0.0093%
求解时间: 102.8261 秒
发电成本: 21356.11 Dollars
```

图4 基础作业1 求解结果1

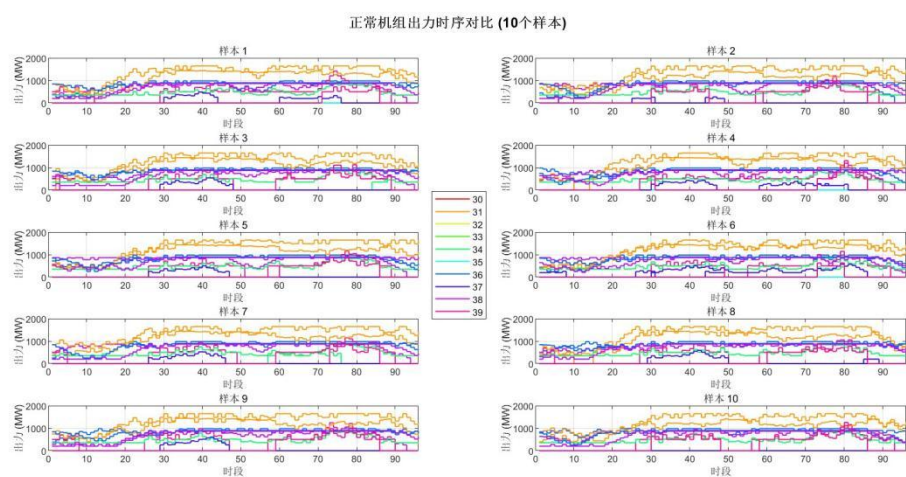
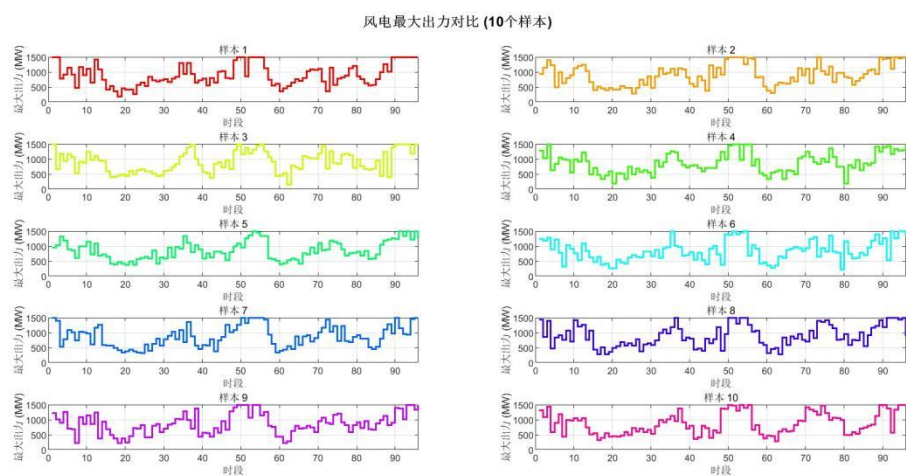
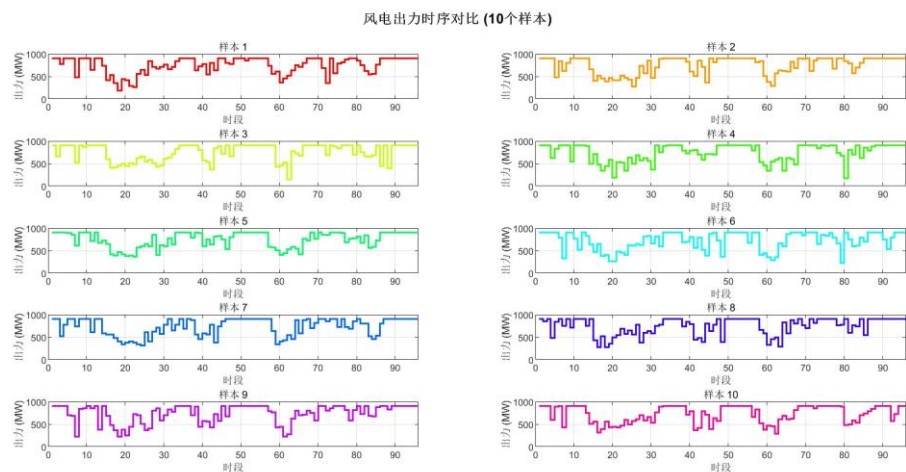


图 5 出力对比

由于是机组组合，并且要对 10 个样本进行计算，优化的时间长了很多。

正常机组出力、风电机组出力和风机最大出力随时间变化的结果如上。由于风力发电成本被设置为 0，在负荷充足的情况下，理论上风电机组应当“应出尽出”。但发现风电机组的实际出力最大为 900MW，小于风电机组最大的出力。这是为什么呢？

IEEE39 节点系统的节点 30 有一台发电机和风电机组。该节点只有一条支路引出，支路最大传输功率 900MW。受到支路潮流约束的影响，优化结果是该节点原有的发电机停用，所以风电实际的最大出力为 900MW。

%% branch data													
%	fbus	tbus	r	x	b	rateA	rateB	rateC	ratio	angle	status	angmin	angmax
mpc.branch = [
1	2	0.0035	0.0411	0.6987	600	600	600	0	0	1	-360	360;	
1	39	0.001	0.025	0.75	1000	1000	1000	0	0	1	-360	360;	
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	500	500	500	0	0	1	-360	360;	
2	25	0.007	0.0086	0.146	500	500	500	0	0	1	-360	360;	
2	30	0	0.0181	0	900	900	2500	1.025	0	1	-360	360;	

图 6 支路数据

【第二种理解】

不增加决策变量（发电机发电量、启停状态、节点注入有功、风机发电量、启停成本）的维数，仍然迭代 N=10 次，每次采用一列风机最大出力的数据，对风机发电量进行约束。最后的目标函数仍然采用 10 组的平均。优化的结果是一种固定的调度方式。见

“powersystem3_1”

优化时间 19.4823 秒，发电成本为 22696.66 美元。
Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)
Best objective 2.269665879028e+04, best bound 2.269665879028e+04, gap 0.0000%
求解时间: 19.4823 秒
发电成本: 22696.66 Dollars

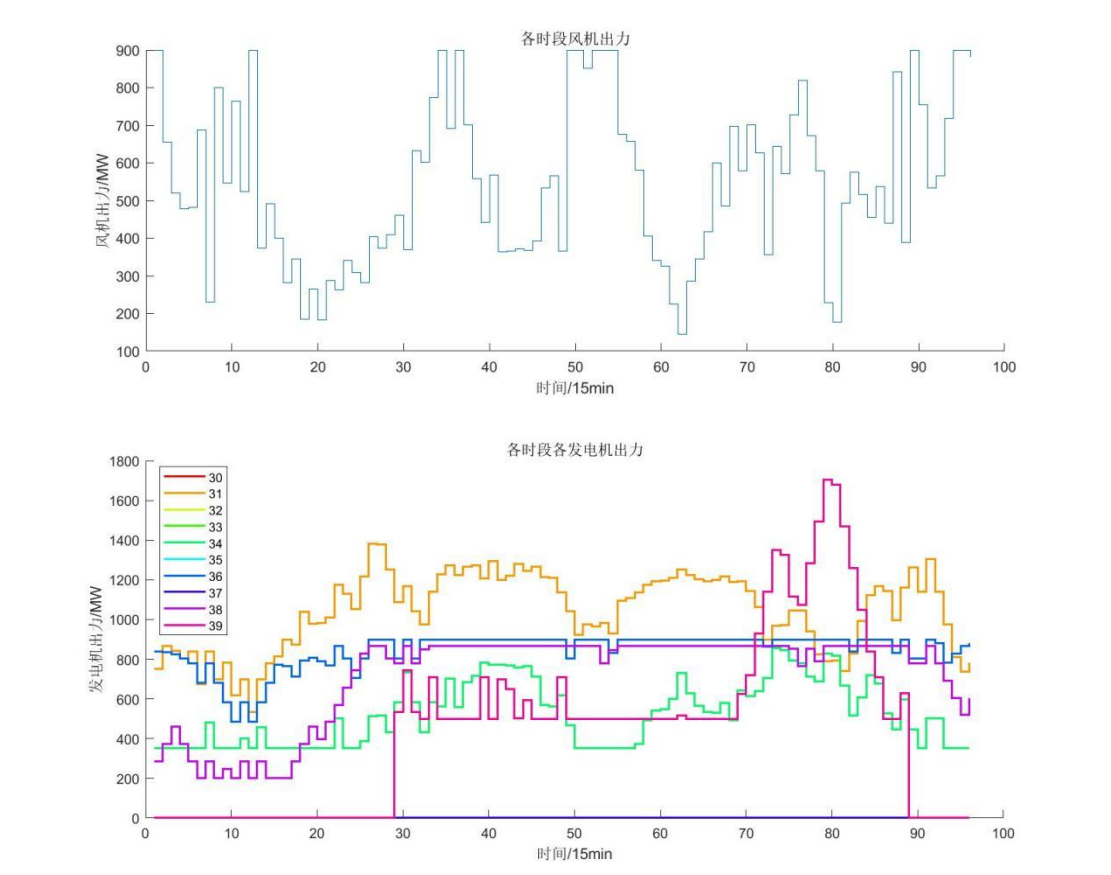


图 7 基础作业 1 求解结果 2

(2) 自主利用风电历史出力数据，将原本的“硬”约束改为用概率表示的机会约束，并进行约束转化后求解。置信水平为 95%。（见“powersystem_3_2.m”）

【求置信区间】

根据课件，风电并网的机会约束：

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

首先定义风电最大出力的上分位数：

$$P(W \leq W_{1-\varepsilon}) = 1 - \varepsilon$$

对历史数据的 1000 组数，从小到大排序，取第 50 个点即置信水平 95% 的 95% 上分位数。求出并转成列向量。

```
% 取风机出力每个时段的95%分位数
Pwnew = zeros(size(Pwmax));
for i = 1:size(Pwmax,1)
    Pwnew(i,:) = sort(Pwmax(i,:));
end
Pwconfidence = Pwnew(:,50)'; %转成列向量
```

图 8 风机参数置信区间设置

【更改约束条件】

原机会约束等价于确定性约束

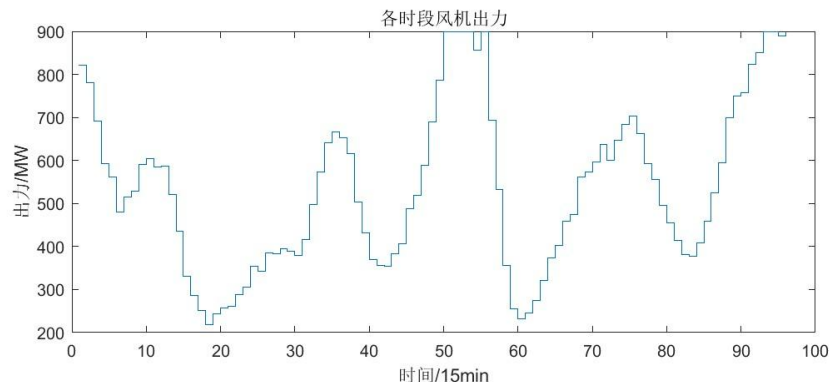
$$L_{\max} - G \geq W_{1-\varepsilon}$$

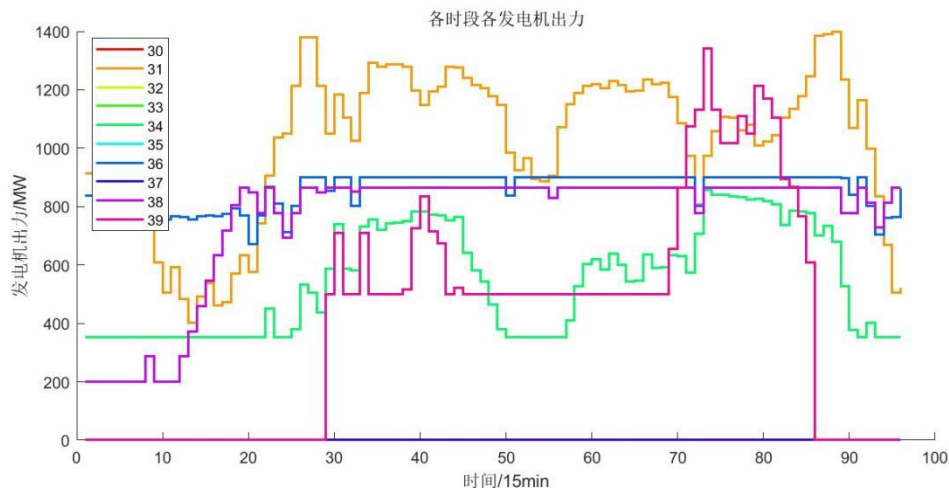
照此写成含风力发电的有功平衡约束，并设定风电出力的最大值为 $W_{1-\varepsilon}$ 。

```
% 系统有功平衡约束，各节点的功率是平衡的
cons = [cons, bus_P(bus_index_noGen,:) == -load(bus_index_noGen,:)] ; %无发电机节点
cons = [cons, bus_P(bus_index_hasGen,:) == gen_generate(gen_index,:) + bus_if_hasWind(bus_index_hasGen,1)*gen_wind - load(bus_index_hasGen,:)] ; %单发电机节点
```

```
% 发电机出力约束，注意改写为乘以状态
cons = [cons, gen_generate <= gen_state.*repmat(gen_Pmax,1,time)];
cons = [cons, gen_generate >= gen_state.*repmat(gen_Pmin,1,time)];
cons = [cons, gen_wind <= Pwconfidence];
```

图 9 新风机约束条件和目标函数设置





Explored 227 nodes (18925 simplex iterations) in 7.08 seconds (4.06 work units)
Thread count was 8 (of 8 available processors)

Solution count 4: 22718.1 22718.6 22750 22766.6

Optimal solution found (tolerance 1.00e-04)

Best objective 2.271812467919e+04, best bound 2.271812467919e+04, gap 0.0000%

求解时间: 7.1697 秒

发电成本: 22718.12 Dollars

图 10 基础作业 2 求解结果

优化后的出力如上，发电成本为 22718.12 美元，求解时间 7.1697 秒。

二、挑战作业（两周，不强制要求全部完成，但会根据完成情况计算作业分数）

请根据论文《风火联合发电系统日前-日内两阶段协同优化调度》，完成日前-日内两阶段鲁棒优化程序。可以对原文约束进行如下简化：

- （1）目标函数中火电机组的运行成本仅考虑线性成本；
- （2）日前调度忽略风电的不确定性（即论文约束（4））
- （3）日内调度的风电不确定集（论文式（17））替换为简单的箱式不确定性集，即 $\{0.8 \times p_{w,max}^{fore} \leq p_{w,max}^{real} \leq 1.2 \times p_{w,max}^{fore}\}$ ，其中 $p_{w,max}^{real}$ 是风电真实最大出力， $p_{w,max}^{fore}$ 是预测的风电最大出力。

编写程序时，系统拓扑、火电机组参数等按照论文设定值选取。风电预测数据见“Pwind.csv”。