

2025年亚太数学建模竞赛

问题D

基于量子优化的电力系统机组调度问题

机组调度（UC）是电力系统运行中的基础优化问题。其目标是在给定时间范围内确定热机组的启停状态及发电水平，以满足需求与系统约束的同时最小化运行成本。该问题本质上是大规模混合整数规划（MIP）挑战，其计算复杂度随系统规模呈指数级增长。

随着量子优化技术（如相干伊辛机CIM）的出现，UC问题可重构为二次无约束二进制优化（QUBO）模型。这种转换使量子启发式求解器能够快速并行搜索最优解，为在量子硬件上实现实时电力系统运行铺平道路。

我们邀请参与者通过三阶段工作流程实现经典电力系统优化与量子计算的融合：首先构建经典机组调度模型；其次将其转化为QUBO形式；最后设计可扩展的简化策略以适应当前量子硬件限制。

问题描述

参赛者需构建融合经典与量子方法的完整机组调度优化框架。

经典UC建模通常基于标准经济调度原则，涵盖燃料成本、启停成本及运行约束。

Padhy等[1]对UC建模与求解方法进行了全面综述，可作为关键参考。此外，Mehta等[2]分析了QUBO问题的计算难度，为在组合优化框架中映射和求解UC问题提供了重要启示。

参赛者需构建融合经典与量子优化方法的完整UC优化框架。表1-5提供了UC建模所需的所有发电机、电网及负荷参数。参赛者须基于这些数据依次完成以下四项任务，并在目标量子硬件位宽限制超出QUBO矩阵时，可酌情简化电网与单元参数。

参与者需完成多步骤流程：1) 构建并求解经典UC模型；2) 扩展该模型以纳入网络与安全约束；3) 将完整UC公式转化为QUBO模型，并运用量子启发式方法求解；最终4) 设计缩减策略以确保问题规模符合量子位约束。

以下各任务的权重依据其在量子优化工作流中的难度与重要性设定。

问题1. 经典UC建模与优化：使用常规优化工具（如Gurobi或CPLEX）构建并求解经典单元调度模型。

为确保各团队一致性与公平性，经典UC模型必须包含以下要素：

1. 目标函数

(1) 燃料成本：每个发电单元采用二次或分段线性生产成本模型

；

(2) 启动/停机成本：与机组启动/停机转换相关的成本。

2. 约束条件

- (1) 功率平衡约束：每个时段的总发电量必须与系统负荷匹配。
- (2) 发电限制：每台机组投入运行时，必须在其最小和最大输出限制范围内运行。
- (3) 最小运行/停机时间约束：机组启动后必须保持在线运行至少若干时段；停机后必须保持离线状态至少若干时段。
- (4) 爬坡率约束：相邻时段间机组输出变化不得超过爬升/下降限值。
- (5) 启停逻辑约束：确保机组启用状态、启动指示器与停机指示器逻辑一致的约束关系。

问题2. 带网络与安全约束的UC建模：基于问题1中建立的经典UC模型，参赛者需通过整合系统级网络与安全约束进一步完善模型。本任务要求UC模型扩展包含：

- (1) 网络功率流约束：例如所有输电线路的直流功率流限值。
- (2) N-1安全约束：确保系统在任意单台发电机或输电线路故障时仍具备运行可行性。
- (3) 旋转备用要求：保证每个时间段具备充足备用容量以维持可靠性。

以下约束条件并非完成**问题2**的强制要求：

- (4) 最小安全惯性约束（可选）：参照文献[3]强制执行全系统最小惯性要求。

仅当设备在各时段内处于在线状态时，其惯性值(H)才计入计算。

这些附加约束旨在使统一协调模型更贴近实际运行条件，并提升其建模深度与复杂度。参赛者需使用与**问题1相同的优化求解器**（如Gurobi或CPLEX）求解此扩展模型，并需对比**问题1与问题2的求解结果**。

问题3. QUBO转换与开物SDK量子求解：将**问题2中的UC模型**转换为QUBO表示形式，并使用开物SDK进行求解。参赛者需对比量子求解方案与传统优化方案的计算结果

问题4. 量子硬件约束下的问题规模缩减：参赛者需针对**问题2的UC模型**（或**问题3对应的QUBO模型**）设计并实现有效的规模缩减策略，因其QUBO表示通常过大而无法直接在现有量子硬件上执行。该缩减方法需确保在CIM位容量限制（例如XXX位）下，生成的QUBO模型可被成功求解。

表1 各单元参数

单元 (总 线)	最大发电 量 (MW)	最小发电 量 (兆瓦)	最 小 运 行时间 (小时)	启 动 成 本 (美 元)	停 机 成 本 (美元)	爬 坡 限 制 (MW/h)
1	300	50	8	180	180	80
2	180	20	8	180	180	80
5	50	15	5	40	40	50
8	35	10	5	60	60	50
11	30	10	6	60	60	60
13	40	12	3	40	40	60

表2 每台设备的参数

单元 (母 线)	降速限制 (MW/h)	最小运行 时间 (小 时)	最小停机 时间 (小 时)	初始 运行 时间 (小时)	初 始 停 机 时间 (小时)	a	b	c	H
1	80	5	3	5	0	0.02	2.00	0	7.0
2	80	4	2	4	0	0.0175	1.75	0	4.5
5	50	3	2	3	0	0.0625	1.00	0	4.5
8	50	3	2	3	0	0.00834	3.25	0	3.2
11	60	1	1	3	0	0.025	3.00	0	3.0
13	60	4	2	4	0	0.025	3.00	0	3.0

表3 网格参数

分支编号	母线	至母线	r	x	b	最大功率 传输功率 (MW)
1	1	2	0.02	0.06	0.03	650
2	1	3	0.05	0.19	0.02	650
3	2	4	0.06	0.17	0.02	325
4	3	4	0.01	0.04	0	650
5	2	5	0.05	0.20	0.02	650
6	2	6	0.06	0.18	0.02	325
7	4	6	0.01	0.04	0	450
8	5	7	0.05	0.12	0.01	350
9	6	7	0.03	0.08	0.01	650
10	6	8	0.01	0.04	0	160
11	6	9	0	0.21	0	325
12	6	10	0	0.56	0	160
13	9	11	0	0.21	0	325
14	9	10	0	0.11	0	325
15	4	12	0	0.26	0	325
16	12	13	0	0.14	0	325
17	12	14	0.12	0.26	0	160
18	12	15	0.07	0.13	0	160
19	12	16	0.09	0.20	0	160
20	14	15	0.22	0.20	0	80
21	16	17	0.08	0.19	0	80
22	15	18	0.11	0.22	0	80
23	18	19	0.06	0.13	0	80

24	19	20	0.03	0.07	0	80
25	10	20	0.09	0.21	0	80
26	10	17	0.03	0.08	0	80
27	10	21	0.03	0.07	0	80
28	10	22	0.07	0.15	0	80
29	21	22	0.01	0.02	0	160
30	15	23	0.10	0.20	0	160
31	22	24	0.12	0.18	0	160
32	23	24	0.13	0.27	0	160
33	24	25	0.19	0.33	0	80
34	25	26	0.25	0.38	0	80
35	25	27	0.11	0.21	0	80
36	27	28	0	0.40	0	80
37	27	29	0.22	0.42	0	80
38	27	30	0.32	0.60	0	80
39	29	30	0.24	0.45	0	80
40	8	28	0.06	0.20	0.02	160
41	6	28	0.02	0.06	0.01	160

表4 24个时段的负荷需求

时间段 (小时)	负荷需求 (兆瓦)
1	166
2	196
3	229
4	257
5	263
6	252
7	246
8	213
9	192
10	161
11	147
12	160
13	170
14	185
15	208
16	232
17	246
18	241
19	236

20	225
21	204
22	182
23	161
24	131

表5 惯性相关安全参数

ROCOF(HZ/s)	F	负载阶跃(MW)
0.5	2.118	600

参考文献：

- [1] Padhy, Narayana Prasad. "机组调度——文献综述." IEEE电力系统交易. 19.2 (2004): 1196-1205.
- [2] Mehta V, Jin F, Michielsen K 等. 关于二次无约束二进制优化问题的难度[J]. 物理前沿, 2022, 10: 956882.
- [3] 夏伟, 王志, 王军等. 考虑频率变化率的新能源电力系统最小安全惯性评估 [C]//2022第十二届国际电力与能源系统会议(ICPES). IEEE, 2022: 618-622.
- [4] 开物SDK下载: <https://platform.qboson.com/login>