

电力市场的输电阻塞管理

【摘要】

我国电力系统的市场化改革正在积极、稳步地进行。其中，电力市场化改革中的输电阻塞管理是一个重要的问题。根据市场交易规则，建立最优化模型并利用 *Lingo* 求解得到购电费用最小的购电方案。

针对问题一：根据给定的实验数据确定各线路上有功潮流与各发电机组出力的近似表达式。首先通过趋势相关性与皮尔逊相关性分析得出，各机组的出力值与各线路上有功潮流值呈线性相关，将数据导入 *SPSS* 软件利用最小二乘法拟合出各线路上有功潮流关于各发电机组出力的多元线性回归方程，再通过残差直方图以及回归标准化 $P-P$ 图来判断方程的拟合是否准确。

针对问题二：阻塞费用包括对序内序外两个部分费用赔偿的和，本文通过计算出力分配变更前后的差值，再计算平均每段的差值产生的阻塞费用相乘得到阻塞费用公式，各方能够公平地受到影响，并且能够有效地控制阻塞费用。

针对问题三：根据电力市场规则，给出下一个时段各机组的出力分配预案。假设下一个时段的负荷需求是 982.4 MW ，按照电力市场规则计算下一个时段各机组的分配预案。根据负荷预报、机组报价、当前出力和爬坡速率等因素，制定合理的出力分配方案。以最小清算价为目标，建立优化模型 *Lingo* 求解，得到以满足负荷需求并确保电网安全运行的方案，最终清算价为 303 元/MWh ，总采购费用为 74416.8 元 。各机组出力分配值依次为 150 兆瓦 ， 79 兆瓦 ， 180 兆瓦 ， 99.5 兆瓦 ， 125 兆瓦 ， 140 兆瓦 ， 95 兆瓦 ， 113.9 兆瓦 。

针对问题四：首先对问题三中求得的方案进行计算有功潮流值，发现产生输电阻塞。其次根据原则 1，调整出力分配方案，目标为阻塞费用最小，在问题 2 基础上增加约束：各线路的有功潮流小于限值。最终解的各机组出力分配值依次为 153 兆瓦 ， 88 兆瓦 ， 226 兆瓦 ， 87 兆瓦 ， 152 兆瓦 ， 99 兆瓦 ， 60 兆瓦 ， 117.9 兆瓦 。经过计算对比发现不产生输电阻塞，阻塞费用为： 3244.3228 元 。

针对问题五：假设下一个时段的负荷需求是 1052.8 MW ，根据问题三所得最优化模型，使用 *Lingo* 求解得出各机组分配方案，得出清算价为 356 元/MWh ，总采购费 93699.2 元 。进一步计算有功潮流值发现已经超过限值，故此产生输电阻塞。进行问题 4 的模型操作，尝试消除输电阻塞，发现无解，一定会发生输电阻塞。故此依据原则 2，更改目标：总的有功潮流超出限值的百分比最小，最终解得各机组出力分配值依次为 133 兆瓦 ， 74 兆瓦 ， 228 兆瓦 ， 99.5 兆瓦 ， 152 兆瓦 ， 155 兆瓦 ， 92.7 兆瓦 ， 117 兆瓦 。总的百分比为： 6.15% ，阻塞费用为： 3530.5866 元 。

关键词：多元线性回归 残差分析 皮尔逊相关性

一、问题重述

1.1 引言

随着我国人口的增加，经济的发展，用电需求量增加。如今我国的电力系统市场改革积极进行，用电紧张逐渐缓解，对电力市场带来了极大地挑战。电力从生产到使用的四大环节都是瞬间完成的，电力市场采取交易与调度一体化模式，电网公司如何使用最小的费用购电以及当发生输电阻塞时如何制定安全、经济的调度计划成为一个难题。

1.2 问题提出

在本文中，需根据附件所给电力市场交易规则和输电阻塞管理原则，需对以下问题进行解决：

1、某电网拥有 8 台发电机组，6 条主要线路，根据表 1、表 2 方案 0 给出的各机组的当前出力和各线路上的有功潮流值，方案 1 到方案 32 围绕方案 0 给出了一些实验数据，使用这些数据确定各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式。

2、设计简明、合理的阻塞费用计算规则，不仅需要考虑到附件所给电力市场规则外，还需注意：在输电阻塞发生时公平对待序内容量不能出力部分和报价高于清算价的序外容量出力部分。

3、当下一时段预报负荷需求为 982.4 MW ，各机组的段容量、段价和爬坡速率的数据在表 3、表 4、表 5 中分别给出，尝试按照电力市场规则制定下一时段各机组的出力分配预案。

4、根据表 6 给出的潮流限值，检查得到的出力分配预案是否会引起输电阻塞，当发生输电阻塞时，满足安全且经济的原则，对各机组出力分配方案进行调整，并给出相应的阻塞费用。

5、当下一时段预报负荷需求为 1052.8 MW ，重复 3 到 4 的工作。

二、问题分析

本题主要对电力市场的输电阻塞进行管理。需根据附件所给电力市场交易规则和输电阻塞管理原则，制定有功潮流与各发电机组出力的近似表达式，阻塞费用计算规则，出力分配方案，根据潮流限值进行调整，并给出相应的阻塞费用。

2.1 问题 1 分析

问题一中需根据附件所给 0-32 个方案的数据，并使用这些数据确定各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式，解决该问题，需从以下

几个方面进行分析：

① 判断是否呈线性关系，根据各机组的出力变化，各线路的潮流值相应的变化，可对两者是否呈线性关系进行分析。

② 确定拟合函数，使用附件所给 0-32 个方案的数据，利用数学软件得到各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式。

③ 拟合结果分析，根据求解得到的拟合函数，需分析其拟合效果、显著性和残差。

2.2 问题 2 分析

问题二中需根据输电阻塞管理原则，设计一种简明、合理、公平的阻塞费用计算规则，解决该问题，需从以下几个方面进行分析：

① 针对序外报价高于清算价部分，清算价不变的情况下，需给该发电商一定的经济补偿，为了网方的经济考虑，给该发电商的补偿加上该时段的清算价不应该大于发电商的报价。

② 针对公平性，给发电商的序内阻塞费用和序外阻塞费用计算规则应相同。

2.3 问题 3 分析

问题三中假设下一时段预报的负荷需求为 $982.4 MW$ ，需满足该负荷需求的情况下，按照电力市场交易规则，给出下一时段各机组的出力分配预案，针对该问题，需从以下几个方面进行分析：

① 为了满足电力市场交易规则，即根据各机组各段的段价，从低到高选入段容量或其部分，且最后一个被选入的段价为该时段的清算价，即选择的最高段价为清算价。

② 为了满足各机组的爬坡速率，在当前出力的情况下，下一时段各机组的出力值应在该机组当前出力减一个时段变化的出力和加一个时段变化的出力。

③ 为了满足负荷需求，下一时段选取的段容量或其部分之和应等于下一时段预报的负荷需求。

2.4 问题 4 分析

问题四中需根据输电阻塞管理原则，结合各线路的潮流限值和问题三的出力分配预案，对出力分配方案进行调整，并根据问题二制定的阻塞费用给出该方案相应的阻塞费用。

① 为了不引起输电阻塞，需确保各线路上的潮流值不大于其相应的潮流限值，而各线路上的潮流值又与各机组的出力有关，即需调整各机组的出

力，从而改变各线路相应的潮流值。

② 为了确保更经济，需保证调整出力分配方案，使得花费的阻塞费用最少。

2.5 问题 5 分析

问题五中假设下一时段预报的负荷需求为 $1052.8 MW$ ，需满足该负荷需求的情况下，按照电力市场交易规则，给出下一时段各机组的出力分配预案，并且根据潮流限值，对出力分配预案进行调整，并给出相应的阻塞费用，针对该问题，需从以下几个方面进行分析：

① 为了满足电力市场交易规则，即根据各机组各段的段价，从低到高选入段容量或其部分，且最后一个被选入的段价为该时段的清算价。

② 为了满足各机组的爬坡速率，在当前出力的情况下，下一时段各机组的出力值应在该机组当前出力减一个时段变化的出力和加一个时段变化的出力。

③ 为了满足负荷需求且保证经济，下一时段选取的段容量或其部分之和应等于下一时段预报的负荷需求，需保证调整后的方案所使用的阻塞费用最小。

④ 为了不引起输电阻塞，需确保各线路上的潮流值不大于其相应的潮流限值，若无法调整使输电阻塞消除，则需保证在安全裕度内，而各线路上的潮流值又与各机组的出力有关，即需调整各机组的出力，从而改变各线路相应的潮流值。

结合以上几点，我们建立得出求解问题三到问题五的解题步骤，具体步骤流程图如下：

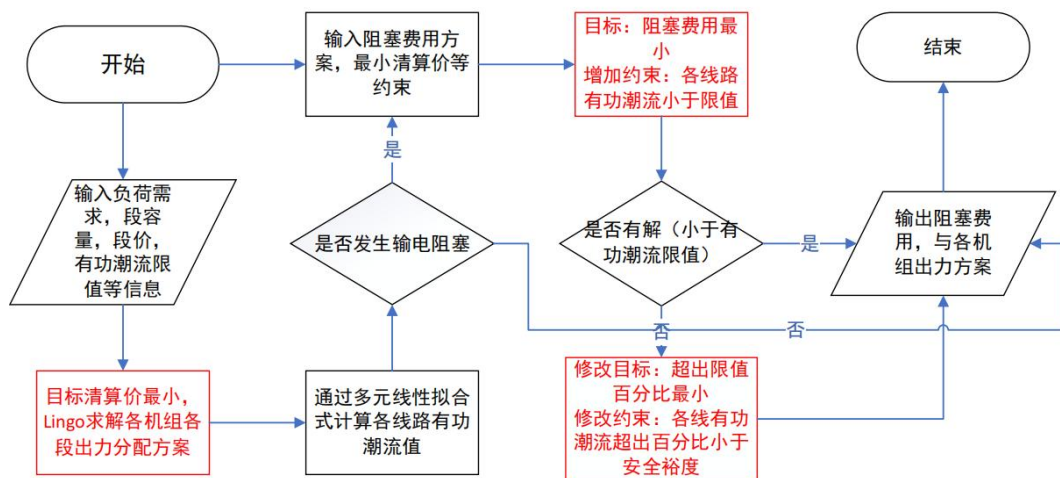


图 1：问题分析流程图

三、符号说明

符号	描述说明
b_{ij}	第 i 个机组第 j 段的出力值
f_{ij}	是否选择第 i 个机组第 j 段
a_{ij}	第 i 个机组第 j 段的段容量
x_{ij}	选择第 i 个机组第 j 段的出力值
c_i	第 i 个机组当前出力
v_i	第 i 个机组的爬坡速率
β_{ij}	第 i 个机组第 j 段的阻塞费用

四、模型假设

- 1、假设购电费用仅为以清算价购买的段容量或部分加上阻塞费用
- 2、假设电商接受制定的阻塞费用
- 3、假设制定的预案内各机组的段容量都能成功竞价获得
- 4、假设下一时段的符合需求
- 5、假设输电阻塞仅与各线路的潮流值有关

五、模型建立与求解

本题主要对电力市场的输电阻塞进行管理。根据附件所给电力市场交易规则和输电阻塞管理原则，拟合出各线路上有功潮流关于各发电机组出力的表达式，并制定阻塞费用、出力分配预案，并对各机组的出力分配预案进行调整。

5.1 问题 1：各线路有功潮流关于各发电机组出力近似表达式

在本问中，需根据附件所给 0-32 方案的实验数据，使用这些数据确定各线路上有功潮流关于各发电机组出力的关系，并使用数学软件给出相应的近似表达式。

5.1.1 线性关系判断

为了判断各线路上有功潮流关于各发电机组出力是否呈现线性关系，需对有功潮流与发电机组之间的关系进行分析。

（一）皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数用于衡量变量间的线性关系，衡量两个数据集合是否在同一条直线上，根据皮尔逊相关系数的计算公式：

$$r_{ki} = \frac{\sum_{q=1}^4 (X_{iq} - \bar{X}_i)(Y_{kq} - \bar{Y}_k)}{\sqrt{\sum_{q=1}^4 (X_{iq} - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{q=1}^4 (Y_{kq} - \bar{Y}_k)^2}} \quad k = 1, 2, \dots, 6, i = 1, 2, \dots, 8$$

分子对两个变量间的协方差进行计算，衡量了两个变量共同变化趋势，分母用于对协方差进行标准化处理，使相关系数取值范围在-1 到 1 之间。根据以上的皮尔逊相关系数公式，对有功潮流与发电机组之间的关系进行计算，下图仅展示机组 1 和机组 2 与各线路的相关系数热力图，其余详见附件 th_dia.doc。

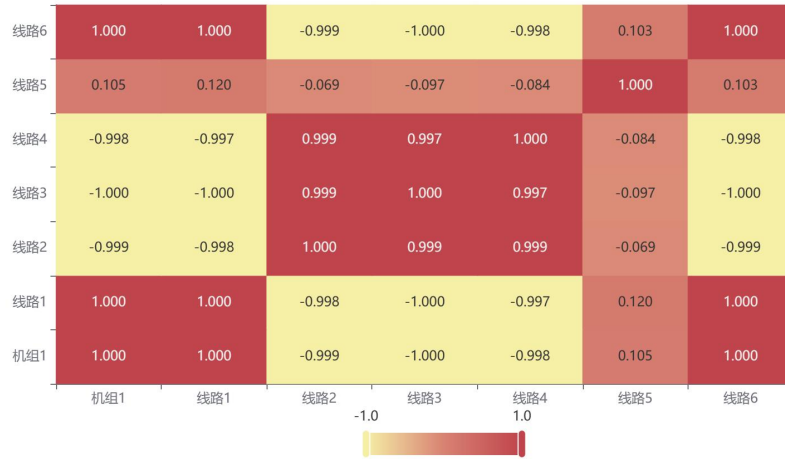


图 2：机组 1 与各线路相关系数热力图

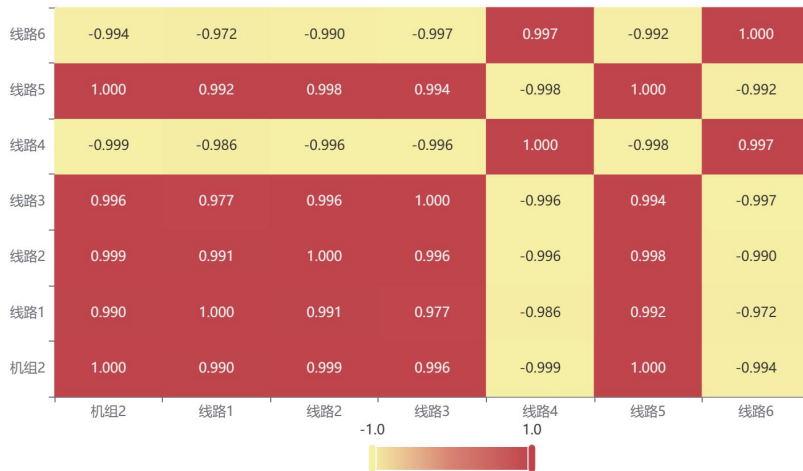


图 3：机组 2 与各线路相关系数热力图

由上图的相关系数热力图可看出机组与各线路的相关性都具有极强的

相关性。

（二）散点图

根据附件所给 0-32 方案的实验数据，绘制线路一潮流值与各机组出力值的散点图，分析是呈现的散点是否具有线性关系，具体的线路一潮流值与各机组出力值的散点图如下图所示：

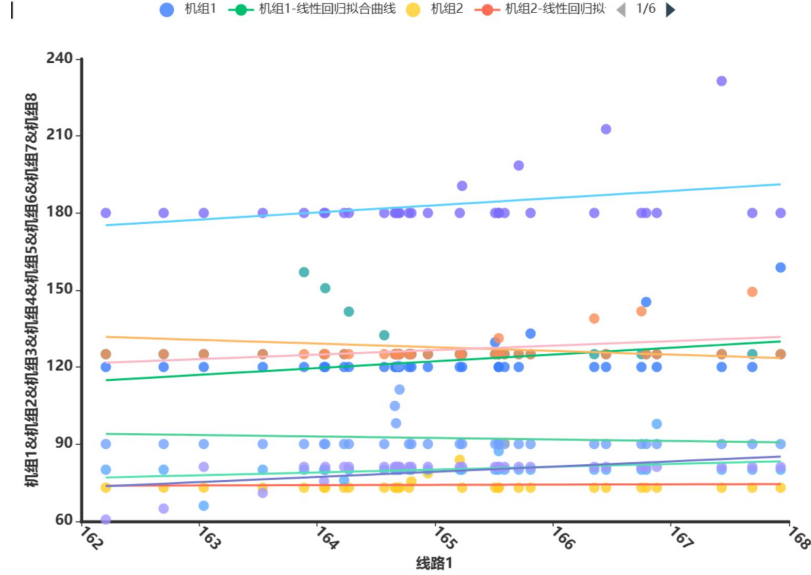


图 4：线路一潮流值与各机组出力值散点图

该散点图显示了各机组的出力值和线路一的潮流值之间有较强的线性联系。

5.1.2 多元线性回归模型

根据线性关系判断，可知各线路上有功潮流关于各发电机组出力呈线性关系。设因变量线路潮流值为 y_k ，自变量各发电机组出力为 x_1, x_2, \dots, x_8 ，描述 y_k 与 x_1, x_2, \dots, x_8 之间的线性关系的数学结构式，即多元线性回归模型：

$$y_k = \sum_{i=1}^8 a_i x_i + b_k \quad k = 1, 2, \dots, 6$$

5.1.3 拟合结果

根据最小二乘法，使用数学软件函数进行回归分析，可得到各线路上有功潮流关于各发电机组出力的拟合函数为：

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.0826x_1 + 0.0478x_2 + 0.0528x_3 + 0.1199x_4 - 0.0257x_5 + 0.1216x_6 + 0.122x_7 - 0.0015x_8 + 110.4775 \\ y_2 &= -0.0547x_1 + 0.1275x_2 - 0.0001x_3 + 0.0332x_4 + 0.0867x_5 - 0.1127x_6 - 0.0186x_7 + 0.0985x_8 + 131.3521 \\ y_3 &= -0.0694x_1 + 0.062x_2 - 0.1565x_3 - 0.0099x_4 + 0.1247x_5 + 0.0024x_6 - 0.0028x_7 + 0.2012x_8 - 108.9928 \\ y_4 &= -0.0346x_1 - 0.1028x_2 + 0.205x_3 - 0.0209x_4 - 0.012x_5 + 0.0057x_6 + 0.1452x_7 + 0.0763x_8 + 77.6116 \\ y_5 &= 0.0003x_1 + 0.2428x_2 - 0.0647x_3 - 0.0412x_4 - 0.0655x_5 + 0.07x_6 - 0.0039x_7 - 0.0092x_8 + 133.1334 \\ y_6 &= 0.2376x_1 - 0.0607x_2 - 0.0781x_3 + 0.0929x_4 + 0.0466x_5 - 0.0003x_6 + 0.1664x_7 + 0.0004x_8 + 120.8481 \end{aligned}$$

针对以上的拟合结果，需做如下分析。

5.1.4 回归模型检验

为了检验拟合函数是否合理，需进行以下的回归模型检验，分析其合理性。

（一）决定系数 R^2

R^2 是对线性模型评估的一种评价指标，根据决定系数计算公式：

$$R_k^2 = 1 - \frac{\sum_{q=1}^{32} (\hat{y}_q - y_q)^2}{\sum_{q=1}^{32} (\bar{y}_q - y_q)^2} \quad k = 1, 2, \dots, 6$$

分子部分为真实值与预测值的平方差之和，分母部分为真实值与均值的平方差之和，其取值范围为 $[0, 1]$ ，当值越接近 1，则说明模型的拟合效果越好，分析结果如下表所示：

表 1：各线路的决定系数

线路	R^2	调整后的 R^2
线路一	0.999	0.999
线路二	1	0.999
线路三	1	1
线路四	1	1
线路五	1	0.999
线路六	1	1

从上表可看出各线路调整后的 R^2 都接近 1，则说明模型的拟合效果较好。

（二）F 检验

为了检验各线路与各机组之间的线性关系是否显著，对各线路与各机组的进行 F 检验，结果如下：

表 2：各线路与各机组的 F 检验数据

线路	F	
	F	P
线路一	5376.754	<0.001
线路二	6970.166	<0.001
线路三	21787.615	<0.001
线路四	24423.904	<0.001
线路五	6433.887	<0.001
线路六	16029.244	<0.001

由上表可看出 F 检验的 P 值为 0.000，即表示拟合函数与数据之间的差异是显著的，增强了该拟合函数的可信度。

5.1.5 残差分析

为了对多元线性回归模型的拟合度进行评估，需进行残差分析，以下为路线 2 的标准化残差直方图和 $P-P$ 图。

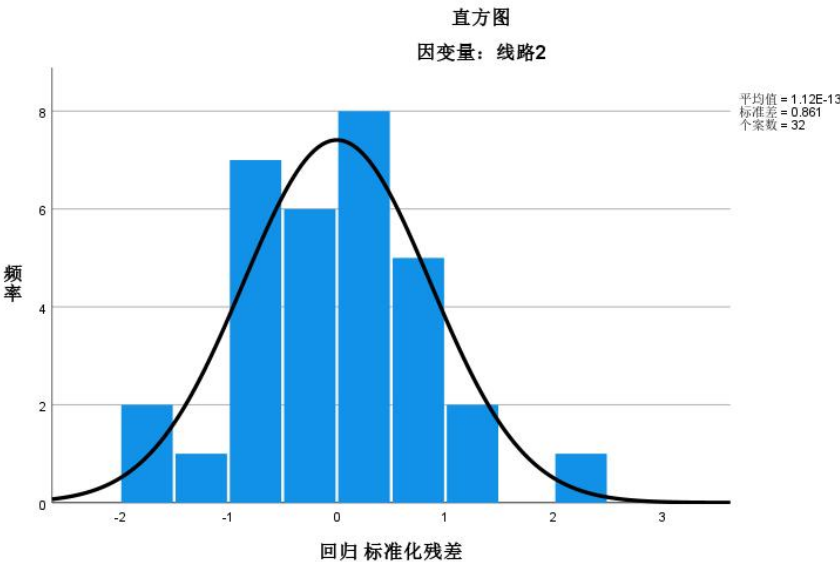


图 5: 标准化残差直方图

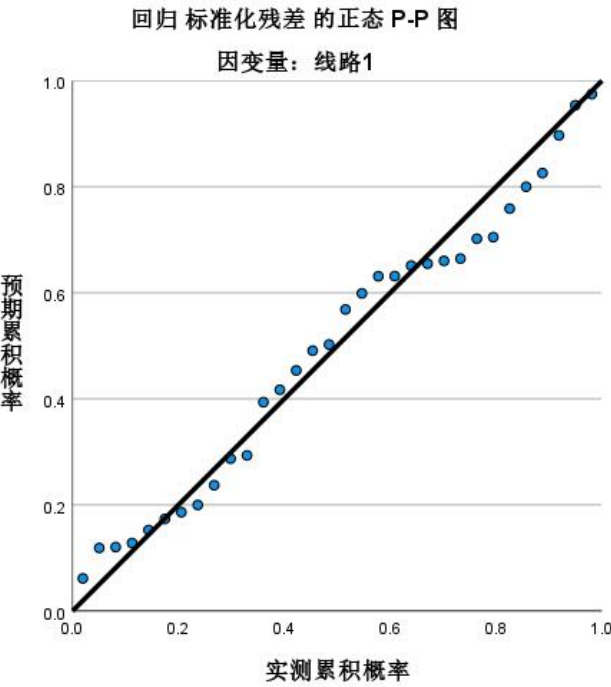


图 6: 标准化残差正态 P-P 图

观察上图可看出，残差直方图服从正态分布，且均值接近于 0，标准差

接近于 1，说明线性回归在正态条件是达到的；P-P 中数据贴合趋势线，说明分布差别不大，即数据基本符合正态分布。

5.2 问题 2：阻塞费用计算规则

在本问中，需根据电力市场交易规则和输电阻塞管理原则，需针对序内容量不能出力部分和序外容量报价高于清算价，给出一种简明、合理的阻塞费用计算规则。

阻塞费用包括序内不能出力和序外段价高于清算价给予赔偿，针对序外容量，需在低于对应报价的清算价上出力，为了确保其公平性，设 Δ_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的调整后的变化值， B_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段价， P 为该时段的清算价， β_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的阻塞费用，具体如下：

$$\beta_{ij} = |\Delta_{ij}| \cdot \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{4} |\Delta_{ij}| \cdot |B_{ij} - P|}{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} |\Delta_{ij}|} \quad i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10$$

综上，一个时段的阻塞费用为序内不能出力部分和序外报价高于清算价部分之和，设 α 为一个时段的阻塞费用，则一个时段的阻塞费用计算规则具体如下：

$$\alpha = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \beta_{ij}$$

5.3 问题 3：出力分配预案

在本问中，需在满足电力市场交易规则和输电阻塞管理原则的情况下，假设下一时段预报的负荷需求为 982.4 MW ，结合附件所给各机组的段容量、段价和爬坡速率的数据，制定出下一时段各机组的出力分配预案。

5.3.1 确定目标

在满足电力市场交易规则的情况下，即按段价从低到高选取段容量，而清算价则为最高段价，相应的目标为清算价最低。设 b_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的出力值， f_{ij} 为是否选择第 i 个机组第 j 段，具体目标如下：

$$\text{Min } Z = \max(b_{ij} f_{ij})$$

5.3.2 约束条件

根据附件所给电力市场交易规则，为了制定出下一时段各机组的出力分配预案，需对各个条件进行如下约束：

(1) “0-1” 变量约束

为了制定下一时段各机组的出力分配预案，可设 f_{ij} 进行“0-1”约束，当 f_{ij} 为 1 时表示选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分， f_{ij} 为 0 时表示不选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分，具体约束如下：

$$f_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10$$

(2) 段容量约束

根据电力市场交易规则，可选择各个机组的段容量或其部分，即所选的出力应不大于各机组的段容量，设 a_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段容量， x_{ij} 为选择第 i 个机组第 j 段的出力值， f_{ij} 为是否选择第 i 个机组第 j 段，具体约束如下：

$$x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} \quad i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10$$

(3) 爬坡速率约束

爬坡速率为各机组单位时间内能增加或减少的出力值，爬坡速率会对下一时段各机组的出力分配造成限制，设 c_i 为第 i 个机组当前出力， v_i 为第 i 个机组的爬坡速率，具体约束如下：

$$c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i \quad i = 1,2,\dots,8$$

(4) 下一时段预报负荷需求限制

根据题目要求，下一时段预报的负荷需求为 982.4 MW，即选取的各个机组的出力之和应满足相应的负荷需求，具体约束如下：

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 982.4$$

5.3.3 出力分配预案模型的建立与求解

综合以上的目标模型和约束条件，以清算价（最高段价）最低为目标，建立数学模型，具体模型如下：

$$\begin{aligned} & \text{目标: } \min Z = \max(b_{ij} f_{ij}) \\ & \begin{cases} x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} & i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10 \\ c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i & i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10 \\ \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 982.4 & i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10 \\ f_{ij} \in \{0,1\} & i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10 \end{cases} \end{aligned}$$

5.3.4 出力分配算法的具体描述

根据以上出力分配预案模型，设计相对应的出力分配算法，具体伪代码如下：

算法 1: 出力分配算法	
Input: $S, p, start, r, c$	
矩阵 S 表示各机组的段容量矩阵	
矩阵 p 表示各机组的段价矩阵	
矩阵 $start$ 表示各机组的初始出力矩阵	
矩阵 r 表示各机组的各机组的爬坡速率矩阵	
c 表示下一个时段预报的负荷需求	
Output: D, ans	
矩阵 D 表示下一个时段各机组的出力分配预案中各机组出力的段位	
ans 表示清算价	
1	begin
2	初始化数组 all_p ,并把矩阵 p 的元素全放入
3	$sort(all_p)$
4	初始化前缀和矩阵 $pres$
5	for $i \leftarrow 1$ to 8 do
6	$sum = 0$
7	for $j \leftarrow 1$ to 10 do
8	$sum = sum + S_{ij}$
9	$pres_{ij} = sum$
10	end
11	end
12	初始化机组初始段位矩阵 $index$
13	for $i \leftarrow all_p.size()$ to 1 do
14	$sum = 0$
15	for $j \leftarrow 1$ to 8 do
16	while $start_j - r_j * 15 > pres_{S_j, index_j}$ do
17	$index_j = index_j + 1$
18	end
19	for $k \leftarrow index_k$ to 10 do
20	if $p_{jk} \geq all_{p_i}$ then
21	$index = k - 1$
22	break
23	end
24	end
25	$sum = sum + \min(pres_{S_j, index_k}, start_j + r_j * 15)$
26	end
27	if $sum \geq c$ then
28	$ans = all_{p_i}$
29	$D = index$
30	end
31	end
32	return D, ans
33	end

5.3.5 具体结果

综上，根据以上的出力分配预案模型，进行编程求解，可得到满足负荷需求条件下各机组各段相应的出力值，下一时段各机组具体的出力分配预案如下表所示：

表：下一时段预报的负荷需求为 982.4MW 时的分配预案（单位：MW）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总出力	最低出力	最高出力
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	0	150	87	153
2	30	0	20	8	15	6	0	0	0	0	79	58	88
3	110	0	40	0	30	0	0	0	0	0	180	132	228
4	55	5	10	10	10	9.5	0	0	0	0	99.5	60.5	99.5
5	75	5	15	0	15	15	0	0	0	0	125	98	152
6	95	0	10	20	0	15	0	0	0	0	140	95	155
7	50	15	5	15	10	0	0	0	0	0	95	60.1	102.1
8	70	0	20	0	20	0	3.9	0	0	0	113.9	63	117

上表为满足下一时段预报的负荷需求情况下，即满足各机组的总出力之和为 982.4MW，且各个机组的出力值不超过爬坡速率的约束值，其最大段价为 303 元/MWh，即相应的清算价为 303 元/MWh，相应该时段的费用为 74416.8 元。

5.4 问题 4：调整出力分配方案并给出相应的阻塞费用

在本问中，需在满足电力市场交易规则和输电阻塞管理原则的情况下，按照附件所给潮流限制，对问题三制定的出力分配预案检查是否会引起输电阻塞，并在发生阻塞时，调整各机组的出力分配预案，并给出该方案下相应的阻塞费用。

5.4.1 阻塞判断

根据问题三制定的满足下一时段的负荷需求和爬坡速率限制情况下的出力分配预案，需考虑输电阻塞管理原则，结合附件所给潮流限值，计算各线路是否发生输电阻塞，各个线路具体的潮流值和相应的潮流限值如下表所示：

表 3：各个线路具体的潮流值和相应的潮流限值（单位：MW）

线路	调整前的潮流值	潮流限值
1	173.0457	165
2	153.2935	150
3	124.1429	160
4	86.7593	155
5	156.1948	132
6	139.2016	162

由上表可看出，线路 1、2、5 的潮流值都超出其相应的潮流限值，据此，需对该出力分配方案进行调整。

5.4.2 确定目标

在满足电力市场交易规则的情况下，保证经济的情况下，即以阻塞费用最小为目标。设 β_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的阻塞费用，具体目标如下：

$$\alpha = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \beta_{ij}$$

5.4.3 约束条件

根据附件所给输电阻塞管理原则，为了对问题三制定的出力分配预案进行调整，需对各个条件进行如下约束：

（1）“0-1”变量约束

为了制定下一时段各机组的出力分配预案，可设 f_{ij} 进行“0-1”约束，当 f_{ij} 为 1 时表示选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分， f_{ij} 为 0 时表示不选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分，具体约束如下：

$$f_{ij} \in \{0,1\} \quad i = 1,2,\dots,8, j = 1,2,\dots,10$$

（2）潮流限值约束

根据输电阻塞管理原则，在不使用线路安全裕度输电的情况下，需满足各线路上的潮流值不大于相应的潮流限值，设 y_k 为第 k 条线路的潮流值， h_k 为第 k 条线路的潮流限值，具体约束如下：

$$y_k \leq h_k \quad k = 1,2,\dots,6$$

(3) 各机组出力

各机组的出力应为该机组被选入的段容量或其部分之和，设 w_i 为第 i 个机组的出力值， x_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段容量或其部分，具体式子如下：

$$w_i = \sum_{j=1}^{10} x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 8$$

(4) 线路潮流

根据问题二拟合的各线路上有功潮流与各发电机组出力的近似表达式，求解第 k 条线路的潮流值，设 y_k 为第 k 条线路的潮流值， s_{kj} 为第 k 条线路上有功潮流值与各发电机组出力拟合函数第 i 个机组的系数值， w_i 为第 i 个机组的出力值， ε_k 为第 k 条线路上有功潮流值与各发电机组出力拟合函数的常数项，具体式子如下：

$$y_k = \left| \sum_{i=1}^8 s_{ki} w_i + \varepsilon_k \right| \quad k = 1, 2, \dots, 6$$

(5) 段容量约束

根据电力市场交易规则，可选择各个机组的段容量或其部分，即所选的出力应不大于各机组的段容量，设 a_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段容量， x_{ij} 为选择第 i 个机组第 j 段的出力值， f_{ij} 为是否选择第 i 个机组第 j 段，具体约束如下：

$$x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10$$

(6) 爬坡速率约束

爬坡速率为各机组单位时间内能增加或减少的出力值，爬坡速率会对下一时段各机组的出力分配造成限制，设 c_i 为第 i 个机组当前出力， v_i 为第 i 个机组的爬坡速率，具体约束如下：

$$c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i \quad i = 1, 2, \dots, 8$$

(7) 下一时段预报负荷需求限制

根据题目要求，下一时段预报的负荷需求为 $982.4 MW$ ，即选取的各个机组的出力之和应满足相应的负荷需求，具体约束如下：

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 982.4$$

5.4.4 最优调整出力方案模型的建立与求解

综合以上的目标模型和约束条件，以清算价（最高段价）最低为目标，建立数学模型，具体模型如下：

$$\begin{aligned}
 & \text{目标: } \text{Min} = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \beta_{ij} \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \beta_{ij} = |\Delta_{ij}| \cdot \bar{E} & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10 \\
 & \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{4} |\Delta_{ij}| \cdot |B_{ij} - P|}{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} |\Delta_{ij}|} \\
 & \Delta_{ij} = x_{ij} - x'_{ij} & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10 \\
 & y_k \leq h_k & k=1,2,\dots,6 \\
 & w_i = \sum_{j=1}^{10} x_{ij} & i=1,2,\dots,8 \\
 & y_k = \left| \sum_{i=1}^8 s_{ki} w_i + \varepsilon_k \right| & k=1,2,\dots,6 \\
 & x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10 \\
 & c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10 \\
 & \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 982.4 & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10 \\
 & f_{ij} \in \{0,1\} & i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

5.4.5 具体结果

综上，根据问题三制定的出力分配预案和附件所给潮流限值，Lingo 求解可到调整后各机组各段相应的出力值，调整后下一时段各机组具体的出力分配预案如下表所示：

表 4：调整后下一时段预报的负荷需求为 982.4MW 时的分配预案（单位：MW）

机组 \段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总出力	最低 出力	最高 出力
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	3	153	87	153
2	30	0	20	8	15	6	2	0	0	7	88	58	88
3	110	0	40	0	30	0	20	26.0656	0	0	226.0656	132	228
4	55	5	10	10	7.4205	0	0	0	0	0	87.4205	60.5	99.5
5	75	5	15	0	15	15	0	10	10	7	152	98	152
6	95	0	3.8139	0	0	0	0	0	0	0	98.8139	95	155
7	50	10.1	0	0	0	0	0	0	0	0	60.1	60.1	102.1
8	70	0	20	0	20	0	7	0	0	0	117	63	117

在该出力分配方案下，相应的阻塞费用为：3244.3228 元。各机组各段需要支付的阻塞费用如下表所示：

表 5：下一时段预报的负荷需求为 982.4MW 各机组各段的阻塞费用（单位：元）

段\机组	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	90.1552	0
3	0	0	0	0	0	113.8182	91.9951	0
4	0	0	0	0	0	367.9806	275.9854	0
5	0	0	0	47.4603	0	0	183.9903	0
6	0	0	0	174.7908	0	275.9854	0	0
7	0	36.7981	367.9806	0	0	0	0	57.037
8	0	0	479.5817	0	183.9903	0	0	0
9	0	0	0	0	183.9903	0	0	0
10	55.1971	128.7932	0	0	128.7932	0	0	0

各线路的潮流值和潮流限值如下表所示：

表 6：各线路潮流值和潮流限值

线路	调整前的潮流值	调整后的潮流值	潮流限值
1	173.0457	165	165
2	153.2935	149.8185	150
3	124.1429	154.9382	160
4	86.7593	124.1226	155
5	156.1948	131.7591	132
6	139.2016	159.6346	162

将上表的数据进行可视化展示，具体如下图所示：

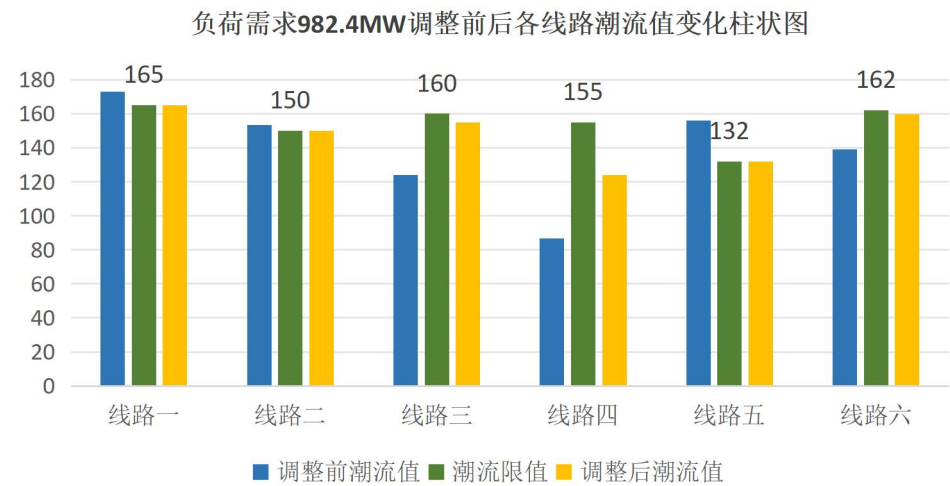


图 7：负荷需求 982.4MW 调整前后各线路潮流值变化柱状图

由上图对比可看出，各线路的潮流值都小于其潮流限值，对该预案进行

调整后。

5.5 问题5：负荷需求 1052.8MW 的出力分配预案和阻塞费用

在本问中假设下一时段预报的负荷需求，根据各机组的段容量、段价和爬坡速率数据，给出下一时段的出力分配预案，并结合各线路的潮流限值，对出力分配预案进行调整。

5.5.1 出力分配预案

在本问中，需在满足电力市场交易规则和输电阻塞管理原则的情况下，假设下一时段预报的负荷需求为 1052.8 MW，结合附件所给各机组的段容量、段价和爬坡速率的数据，制定出下一时段各机组的出力分配预案。

5.5.1.1 确定目标

在满足电力市场交易规则的情况下，即按段价从低到高选取段容量，而清算价则为最高段价，相应的目标为清算价最低。设 b_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的出力值， f_{ij} 为是否选择第 i 个机组第 j 段，具体目标如下：

$$\text{Min } Z = \max(b_{ij}f_{ij})$$

5.5.1.2 约束条件

为了制定出下一时段各机组的出力分配预案，需对部分条件进行约束，部分 5.3 已有的约束条件不再赘述，其他具体约束条件如下：

(1) 下一时段预报负荷需求限制

根据题目要求，下一时段预报的负荷需求为 1052.8 MW，即选取的各个机组的出力之和应满足相应的负荷需求，具体约束如下：

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij}f_{ij} = 1052.8$$

5.5.1.3 出力分配预案模型的建立与求解

综合以上的目标模型和约束条件，以清算价（最高段价）最低为目标，建立数学模型，具体模型如下：

$$\begin{aligned} &\text{目标: } \text{Min } Z = \max(b_{ij}f_{ij}) \\ &\begin{cases} x_{ij} \leq a_{ij}f_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\ c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij}f_{ij} \leq c_i + 15v_i & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\ \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij}f_{ij} = 1052.8 & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\ f_{ij} \in \{0, 1\} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \end{cases} \end{aligned}$$

5.5.1.4 具体结果

综上，根据以上的出力分配预案模型，进行编程求解，可到各个机组各段相应的出力值及各机组的总出力值，下一时段各机组具体的出力分配预案如下表所示：

表 7：下一时段预报的负荷需求为 1052.8MW 时的分配预案

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总出力	最低出力	最高出力
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	40	150	87	153
2	30	0	20	8	15	6	2	0	0	8	81	58	88
3	110	0	40	0	30	0	20	18.2	0	40	218.2	132	228
4	55	5	10	10	10	9.5	15	0	0	1	99.5	60.5	99.5
5	75	5	15	0	15	15	0	10	10	10	135	98	152
6	95	0	10	20	0	15	10	20	0	10	150	95	155
7	50	15	5	15	10	7.1	5	10	3	2	102.1	60.1	102.1
8	70	0	20	0	20	0	7	10	15	5	117	63	117

上表为满足下一时段预报的负荷需求情况下，即满足各机组的总出力之和为 1052.8 MW，且各个机组的出力值不超过爬坡速率的约束值，其最大段价为 356 元/MWh，即相应的清算价为 356 元/MWh，相应该时段的费用为 93699.2 元。

5.5.2 调整出力分配方案并给出相应的阻塞费用

在本问中，需在满足电力市场交易规则和输电阻塞管理原则的情况下，按照附件所给潮流限制，对问题三制定的出力分配预案检查是否会引起输电阻塞，并在发生阻塞时，利用各线路有功潮流与各发电机组出力的近似表达式和潮流限制，调整各机组的出力分配预案，并给出该方案下相应的阻塞费用。

5.5.2.1 输电阻塞判断

根据 5.5.1 制定的满足下一时段的负荷需求和爬坡速率限制情况下的出力分配预案，需考虑输电阻塞管理原则，结合附件所给潮流限值，计算各线路上是否发生输电阻塞，各个线路具体的潮流值和相应的潮流限值如下表所示：

表 8：各个线路具体的潮流值和相应的潮流限值（单位：MW）

线路	调整前的潮流值	潮流限值
1	190.4834	165
2	163.6362	150
3	130.215	160
4	90.2714	155
5	162.9365	132
6	144.7259	162

由上表可看出，线路 1、2、5 的潮流值都超出其相应的潮流限值，据此，需对该出力分配方案进行调整。

5.5.2.2 输电阻塞消除

根据 5.5.1 的最优调整出力方案模型，以阻塞费用最小为目标，建立数学模型，具体模型如下：

$$\begin{aligned}
 & \text{目标: } \min = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \beta_{ij} \\
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \beta_{ij} = |\Delta_{ij}| \cdot \bar{E} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\
 & \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{4} |\Delta_{ij}| \cdot |B_{ij} - P|}{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} |\Delta_{ij}|} \\
 & \Delta_{ij} = x_{ij} - x'_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\
 & y_k \leq h_k & k = 1, 2, \dots, 6 \\
 & w_i = \sum_{j=1}^{10} x_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8 \\
 & y_k = \left| \sum_{i=1}^8 s_{ki} w_i + \varepsilon_k \right| & k = 1, 2, \dots, 6 \\
 & x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\
 & c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\
 & \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 1052.8 & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\
 & f_{ij} \in \{0, 1\} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

使用 *Lingo* 进行求解，答案为无解，即无法对各机组出力分配方案进行

调整使得输电阻塞消除，故需使各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比尽量小。

5.5.2.3 确定目标

由于调整各机组出力分配方案无法使输电阻塞消除，故需使各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比尽量小，设 y_k 为第 k 条线路上的潮流值， h_k 为第 k 条线路上的潮流限值， g_k 为第 k 条线路是否超过潮流限值，以各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比最小为目标，具体目标如下：

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^6 \left(\frac{y_k - h_k}{h_k} \right) * g_k * 100\%$$

5.5.2.4 约束条件

根据附件所给输电阻塞管理原则，为了对下一时段各机组的出力分配预案进行调整，需对各个条件进行如下约束：

(1) “0-1” 变量约束

为了制定下一时段各机组的出力分配预案，可设 f_{ij} 进行“0-1”约束，当 f_{ij} 为 1 时表示选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分， f_{ij} 为 0 时表示不选择第 i 个机组第 j 段的段容量或部分，具体约束如下：

$$f_{ij} \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,10$$

(2) 是否超过限值

根据输电阻塞管理原则，对各线路是否超过潮流限值进行判断。设 y_k 为第 k 条线路上的潮流值， h_k 为第 k 条线路上的潮流限值， g_k 为第 k 条线路是否超过潮流限值，若潮流值比潮流限值大，则表示超过潮流限值，反之则表示未超过潮流限值，具体约束如下：

$$(y_k - h_k) \cdot g_k \geq 0$$

$$(y_k - h_k) \cdot (1 - g_k) \leq 0$$

(3) 各机组出力

各机组的出力应为该机组被选入的段容量或其部分之和，设 w_i 为第 i 个机组的出力值， x_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段容量或其部分，具体式子如下：

$$w_i = \sum_{j=1}^{10} x_{ij} \quad i=1,2,\dots,8$$

(4) 线路潮流

根据问题二拟合的各线路上有功潮流与各发电机组出力的近似表达式，求解第 k 条线路的潮流值，设 y_k 为第 k 条线路的潮流值， s_{ki} 为第 k 条线路上有功潮流值与各发电机组出力拟合函数第 i 个机组的系数值， w_i 为第 i 个机组的出力值， ε_k 为第 k 条线路上有功潮流值与各发电机组出力拟合函数的常数项，具体式子如下：

$$y_k = \left| \sum_{i=1}^8 s_{ki} w_i + \varepsilon_k \right| \quad k = 1, 2, \dots, 6$$

(5) 段容量约束

根据电力市场交易规则，可选择各个机组的段容量或其部分，即所选的出力应不大于各机组的段容量，设 a_{ij} 为第 i 个机组第 j 段的段容量， x_{ij} 为选择第 i 个机组第 j 段的出力值， f_{ij} 为是否选择第 i 个机组第 j 段，具体约束如下：

$$x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10$$

(6) 爬坡速率约束

爬坡速率为各机组单位时间内能增加或减少的出力值，爬坡速率会对下一时段各机组的出力分配造成限制，设 c_i 为第 i 个机组当前出力， v_i 为第 i 个机组的爬坡速率，具体约束如下：

$$c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i \quad i = 1, 2, \dots, 8$$

(7) 下一时段预报负荷需求限制

根据题目要求，下一时段预报的负荷需求为 1052.8 MW ，即选取的各个机组的出力之和应满足相应的负荷需求，具体约束如下：

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 1052.8$$

(8) 安全裕度约束

根据题目要求，若调整出力分配方案无法使输电阻塞消除，则还可使用线路的安全裕度输电，即保证各线路上潮流超过限值的百分比不比安全裕度大，设 Q_k 为第 k 条线路的潮流限值，具体约束如下：

$$\frac{|y_k - h_k|}{h_k} \cdot 100\% \leq Q_k$$

5.5.2.5 调整出力分配模型 II 的建立与求解

综合以上的目标模型和约束条件，以各线路上潮流的绝对值超过限值的百分比最小为目标，建立数学模型，具体模型如下：

$$\begin{aligned} \text{目标: } \min \quad Z &= \sum_{k=1}^6 \left(\frac{y_k - h_k}{h_k} \right) * g_k * 100\% \\ \left\{ \begin{array}{ll} w_i = \sum_{j=1}^{10} x_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8 \\ y_k = \left| \sum_{i=1}^8 s_{ki} w_i + \varepsilon_k \right| & k = 1, 2, \dots, 6 \\ x_{ij} \leq a_{ij} f_{ij} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\ c_i - 15v_i \leq \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} \leq c_i + 15v_i & i = 1, 2, \dots, 8 \\ \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{10} x_{ij} f_{ij} = 1052.8 & \\ \frac{|y_k - h_k|}{h_k} \cdot 100\% \leq Q_k & k = 1, 2, \dots, 6 \\ (y_k - h_k) \cdot g_k \geq 0 & k = 1, 2, \dots, 6 \\ (y_k - h_k) \cdot (1 - g_k) \leq 0 & k = 1, 2, \dots, 6 \\ f_{ij} \in \{0, 1\} & i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 10 \\ g_k \in \{0, 1\} & k = 1, 2, \dots, 6 \end{array} \right. \end{aligned}$$

5.5.2.6 具体结果

综上，根据 5.5.1 制定的出力分配预案和附件所给潮流限值，Lingo 求解可到调整后各机组各段相应的出力值，调整后下一时段各机组具体的出力分配预案如下表所示：

表 9：调整后下一时段预报的负荷需求为 1052.8MW 时的分配预案

机组 \段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	总出力	最低 出力	最高 出力
1	70	0	50	0	0	13.6119	0	0	0	0	133.6119	87	153
2	30	0	20	8	15	1.9697		0	0	0	74.9697	58	88
3	110	0	40	0	30	0	20	28	0	0	228	132	228
4	55	5	10	10	10	9.5	0	0	0	0	99.5	60.5	99.5
5	75	5	15	0	15	15	0	10	10	7	152	98	152
6	95	0	10	20	0	15	10	5	0	0	155	95	155
7	50	15	5	15	7.7184	0	0	0	0	0	92.7184	60.1	102.1
8	70	0	20	0	20	0	7	0	0	0	117	63	117

在该出力分配方案下，相应的阻塞费用为：3530.5866 元，各机组各段需要支付的阻塞费用如下表所示：

表 10：下一时段预报的负荷需求为 1052.8MW 各机组各段的阻塞费用（单位：元）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	258.7639	0	0	0	631.5897
2	0	0	0	0	0	63.6374	31.5795	0	0	126.3179
3	0	0	0	0	0	0	0	154.7395	0	631.5897
4	0	0	0	0	0	0	236.8461	0	0	15.7897
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47.3692
6	0	0	0	0	0	0	0	236.8461	0	157.8974
7	0	0	0	0	36.0259	112.1072	78.9487	157.8974	47.36923	31.5795
8	0	0	0	0	0	0	0	157.8974	236.8461	78.9487

各线路的潮流值和潮流限值如下表所示：

表 11：各线路潮流值和潮流限值

线路	调整前的潮流值	调整后的潮流值	潮流限值	超过限值的百分比	安全裕度
1	190.4834	175.1402	165	6.15%	13%
2	163.6362	142.3784	150	—	18%
3	130.215	154.7641	160	—	9%
4	90.2714	131.4012	155	—	11%
5	162.9365	132	132	—	15%
6	144.7259	162	162	—	14%

将上表数据进行可视化展示，具体如下图所示：

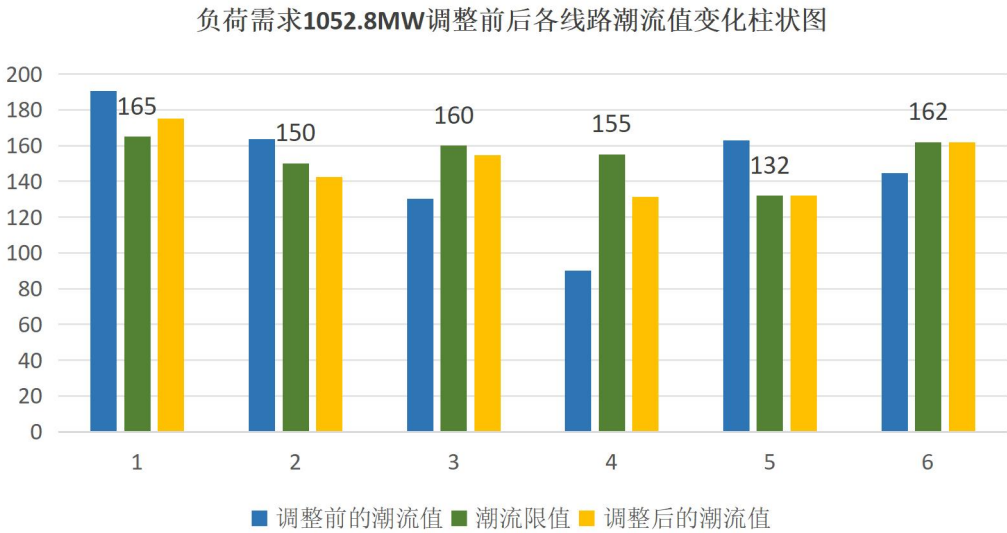


图 8：负荷需求 1052.8MW 调整前后各线路潮流值变化柱状图

由表和图可看出，除了线路一，其余线路都在潮流限值内，且线路一也满足小于安全裕度。

六、模型评价与推广

6.1 模型优点

- 1) 本模型对爬坡速率和潮流限值进行考虑
- 2) 本模型考虑购电费用最小的经济目标最小
- 3) 本模型符合现实中电力市场的输电阻塞管理

6.2 模型缺点

- 1) 需预先对各线路与各发电机组的近似表达式进行求解

6.3 模型推广

对电力市场输电阻塞进行管理是生活中一类比较常见的事件，与现实中电网公司购电较为类似，满足电力市场交易规则和输电阻塞管理原则，按照购电费用最小的经济目标来运作，给出下一时段的出力分配预案，且发生输电阻塞时对预案进行调整，本模型能制定安全又经济的计划。

七、参考文献

- [1]郭琪. 应对灵活性不足与输电阻塞的源-储-网联合规划方法[D]. 东北电力大学, 2024. DOI:10.27008/d.cnki.gdbdc.2023.000016.
- [2]刘军, 胡嘉骅, 叶泽, 等. 输电阻塞状态计量及其电网投资机制研究——基于节点边际电价的分析[J]. 价格理论与实践, 2023(07):116-120+210. DOI:10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2023.07.184.
- [3]陈湘源, 秦伟, 刘晏驰, 等. 融合卷积神经网络与线性回归的带式输送机托辊故障音频识别方法[J/OL]. 煤炭科学技术:1-9[2024-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240701.1327.001.html>.
- [4]周亭攸, 张耀武, 朱利平. 超高维参数单指标模型的拟合优度检验[J/OL]. 中国科学:数学:1-22[2024-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5836.01.20240625.0849.002.html>.

附录

一、支撑材料的文件列表

- 1、th_dia.doc
- 2、LINGO2.lg4

二、程序代码

1、Lingo 代码

```
#include <iostream>
#include <map>
#include <vector>
#include <queue>
#include <set>
#include <tuple>
#include <cstring>
#include <cmath>
#include <limits>
#include <ostream>
#include <fstream>
#include <algorithm>

using namespace std;

const double sum_capacity = 1052.8;
const int max_price = 405; // 人为规定最大段价
int max_index ; // 最大段价对应的 i

int Segment_capacity[9][11]; // 各机组的段容量
int pre_capacity[9][11]; // 前缀和算出来各段的总容量
int price[9][11]; // 各机组的段价
double ramp_rate[9];
double start[9];

double accuracy = 0.1; // 精度
```

```

double min_price = 500;
double now_price;

map<double , double >ma[9] ; // 8 个机组的容量到段价

double now_capacity;
double now[9];
double ans[9];

vector<int>all_price;

void init();
void solve3(); // 问题 3
void infile();
void outfile();

int main() {
    solve3();
    return 0;
}

void solve3(){
    init();
    for(int i=max_index ;i >= 0 ; i--){
        double sum = 0;

        for(int j=1;j<=8;j++){
            int index_k = 1;
            while(start[j]-ramp_rate[j] > pre_capacity[j][index_k])index_k++;
            for(int k=index_k;k<=10;k++){
                if(price[j][k] > all_price[i] ){ // found max
                    index_k = k-1;
                    break;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
    sum +=
min((double)pre_capacity[j][index_k],start[j]+ramp_rate[j]);

    now[j] = index_k;
}

if(sum >= sum_capacity){
    min_price = all_price[i];
    for(int j = 1;j<=8;j++){
        ans[j] = now[j];
    }
    else
        break; // no answer
}
cout << min_price << '\n';
for(int j=1;j<=8;j++){
    cout << ans[j] << ' ';
}
}

void init(){
    //input file
    infile();

    //step 1. 前缀和
    for(int i=1;i<=8;i++){
        int sum = 0;
        for(int j=1;j<=10;j++){
            sum += Segment_capacity[i][j];
            pre_capacity[i][j] = sum;
        }
    }
}

```

```

    }
    //outfile();

    //15min
    for(int i=1;i<=8;i++){
        ramp_rate[i] *= 15.0;
    }

    for(int i=1;i<=8;i++){
        for(int j=1;j<=10;j++){
            all_price.push_back(price[i][j]);
        }
    }

    sort(all_price.begin(),all_price.end());

    for(int i=0;i<all_price.size();i++){
        if(all_price[i] == max_price){
            max_index = i;
            break;
        }
    }
}

void infile(){
    std::ifstream file("Segment capacity.txt"); // 打开文件
    if(file.is_open()) { // 检查文件是否成功打开
        for(int i=1;i<=8;i++){
            for(int j=1;j<=10;j++){
                file >> Segment_capacity[i][j];
            }
        }
        file.close(); // 关闭文件
    }
}

```

```

else {
    std::cout << "无法打开文件" << std::endl;
}

file.open("start.txt");
if(file.is_open()) { // 检查文件是否成功打开
    for(int i=1;i<=8;i++){
        file >> start[i];
    }
    file.close(); // 关闭文件
}
else {
    std::cout << "无法打开文件" << std::endl;
}

file.open("Segment price.txt");
if(file.is_open()) { // 检查文件是否成功打开
    for(int i=1;i<=8;i++){
        for(int j=1;j<=10;j++){
            file >> price[i][j];
        }
        file.close(); // 关闭文件
    }
}
else {
    std::cout << "无法打开文件" << std::endl;
}

file.open("ramp rate.txt");
if(file.is_open()) { // 检查文件是否成功打开
    for(int i=1;i<=8;i++){
        file >> ramp_rate[i];
    }
    file.close(); // 关闭文件
}

```

```

    else {
        std::cout << "无法打开文件" << std::endl;
    }
}

void outfile(){
    std::ofstream file("ans.xls"); // 创建 ofstream 对象并打开文件
    if (!file.is_open()) {
        std::cerr << "无法打开文件" << std::endl;
    }
    for(int i=1;i<=8;i++){
        int sum = 0;
        for(int j=1;j<=10;j++){
            sum += Segment_capacity[i][j];
            pre_capacity[i][j] = sum;
            file << pre_capacity[i][j] << '\t';
        }
        file << '\n';
    }
    file.close(); // 关闭文件
}

```