

2011 高教社杯全国大学生数学建模竞赛

承 诺 书

我们仔细阅读了中国大学生数学建模竞赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们参赛选择的题号是（从 A/B/C/D 中选择一项填写）：_____

我们的参赛报名号为（如果赛区设置报名号的话）：_____

所属学校（请填写完整的全名）：_____

参赛队员（打印并签名）：1. _____

2. _____

3. _____

指导教师或指导教师组负责人（打印并签名）：_____

日期：2010 年 9 月 12 日

赛区评阅编号（由赛区组委会评阅前进行编号）：

2011 高教社杯全国大学生数学建模竞赛

编 号 专 用 页

赛区评阅编号（由赛区组委会评阅前进行编号）：

赛区评阅记录（可供赛区评阅时使用）：

评 阅 人										
评 分										
备 注										

全国统一编号（由赛区组委会送交全国前编号）：

全国评阅编号（由全国组委会评阅前进行编号）：

电力市场的输电阻塞管理

摘要

本题针对给出的电力市场规则和阻塞原理来建立数学模型。

对于问题一，我们建立了多元线性回归模型。根据查阅资料可知：在只计算有功潮流时，潮流计算模型可简化直流潮流模型（又称为线性潮流模型），这时可视各线路上有功潮流关于各发电机组出力为多元线性关系。运用 MATLAB 中的 regress 命令带入相关数据即可得到 6 组关系式。

对于问题二，我们根据题目中给出的“输电阻塞管理原则”可知产生阻塞费用有两种原因。原因一：当各机组出力分配预案时，序内容量不能出力，所以网方应该为因输电阻塞而不能执行初始交易结果付出代价；原因二：序外容量要在低于对应报价的清算价上出力，所以网方在结算时应该适当地给发电商以经济补偿。计算出两种原因产生的费用，二者之和就是阻塞费用。

对于问题三，我们建立了动态规划模型来求解清算价。1. 目标函数：要选择购电费用最小的机组出力方案，即找到段价为清算价的方案。最后一个被选入的段价（最高段价）称为该时段的清算价。2. 影响最后一个被选入的段价的条件有三种。约束条件一：在该时段内，八个机组的出力改变量的和必须达到下一时段的负荷需求预报值与上个时段结束时八个机组出力和之差；约束条件二：每个机组在该时段的工作时间不能超过该时段的时长；约束条件三：每个机组在十个段之内的出力改变量不能超过该段的最大段容。根据模型运用 MATLAB 编程可求出清算价为 303 元/MWh，购电费用为 74416.8 元。并按照电力市场规则即可给出下一个时段各机组的出力分配预案。

对于问题四，我们建立了新的多元线性回归模型，在第三问模型的基础上添加了新的约束条件。具体分为两个步骤：1. 首先判断得到检查得到的出力分配预案会引起输电阻塞。将各机组的出力值带入问题一求得的多元线性回归方程中发现，线路 1、5、6 的潮流值大于该线路的潮流限值，会导致线路阻塞。2. 其次已知会发生输电阻塞，在问题三建立的动态规划模型中加入“实际潮流值应当不能超过每条线路的潮流限值”的约束条件，建立新的动态规划模型，调整各机组出力分配方案。

对于问题五因只改变了负荷需求，所以只需将负荷需求是 1052.8MW 带入到第三、四题的 MATLAB 编程中进行计算，重复问题三、四步骤即可。可得到清算价为 356 元/MWh，购电费用为 93699 元。运用 MATLAB 编程，可知在不超过安全裕度的情况下让输电阻塞费用花费最少来调整各机组出力分配方案。

关键词：多元线性回归模型 regress 函数 动态规划模型 MATLAB

一、 问题重述

需要解决如下问题：

1. 某电网有 8 台发电机组，6 条主要线路，表 1 和表 2 中的方案 0 给出了各机组的当前出力和各线路上对应的有功潮流值，方案 1~32 给出了围绕方案 0 的一些实验数据，试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. 设计一种简明、合理的阻塞费用计算规则，除考虑上述电力市场规则外，还需注意：在输电阻塞发生时公平地对待序内容量不能出力的部分和报价高于清算价的序外容量出力的部分。
3. 假设下一个时段预报的负荷需求是 982.4MW，表 3、表 4 和表 5 分别给出了各机组的段容量、段价和爬坡速率的数据，试按照电力市场规则给出下一个时段各机组的出力分配预案。
4. 按照表 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，并在发生输电阻塞时，根据安全且经济的原则，调整各机组出力分配方案，并给出与该方案相应的阻塞费用。
5. 假设下一个时段预报的负荷需求是 1052.8MW，重复 3~4 的工作。

二、 问题分析

2.1 问题的思路分析

针对问题一：根据已知知识可知各线路上有功潮流关于各发电机组出力为多元线性关系。运用 MATLAB 中的 regress 命令带入相关数据即可得到关系式。

针对问题二：根据输电阻塞管理原则，我们可知产生阻塞费用有两种原因。原因一：当各机组出力分配预案时，序内容量不能出力，所以网方应该为因输电阻塞而不能执行初始交易结果付出代价；原因二：序外容量要在低于对应报价的清算价上出力，所以网方在结算时应该适当地给发电商以经济补偿。两种原因产生的费用之和就是阻塞费用。

针对问题三：先建立动态规划模型得到清算价，再根据每个机组被选入的段容量之和形成该时段该机组的出力分配预案。

针对问题四：首先判断是否会出现输电阻塞。将问题三中得到的负荷需求是 982.4MW 时各机组在各段的出力情况带入问题一得到的近似表达式中，可得到各线路上有功潮流的实际值。将实际值与限值进行比较会发现线路 1、5、6 得到的实际值大于限值，出力分配预案会引起输电阻塞。其次已知会发生输电阻塞，在问题三建立的动态规划模型中加入“实际潮流值应当不能超过每条线路的潮流限值”的约束条件，建立新的动态规划模型，调整各机组出力分配方案。

针对问题五：因只改变了负荷需求，所以将负荷需求是 1052.8MW 带入到第三、四题的 MATLAB 编程中进行计算，重复问题三、四的步骤即可。

3.1 模型假设

- 1、假设题目所给的数据真实可靠；
- 2、假设忽略电网结构对潮流值的影响；

3.2 符号说明

a_i :常数项

a_{ij} :第 j 个发电机组关于第 i 条线路上有功潮流的线性组合系数

c :清算价

ω_0 :目标负荷需求

ω :初始各机组出力和

v_i :第 i 个机组的爬坡速率

Δt_{ij} :第 i 个机组在第 j 段内所用时间

m_{ij} :第 i 个机组在第 j 段内的最大段容量

P'_{mk} :第 k 个线路的安全潮流限值

P'_i :第 i 个机组的总出力值

三、模型的建立与求解

5.1 问题一的思路分析

在只计算有功潮流时，潮流计算模型可简化直流潮流模型（又称为线性潮流模型），这时可视各个输电线路上的有功潮流为各个电机组注入网络功率为线性函数。运用 MATLAB 带入相关数据到线性关系式中即可得到关系式。

5.1.1 多元线性回归模型

对于输电网络，功率在网络中流动，称之为潮流。潮流一般由两部分组成：有功潮流和无功潮流。在只计算有功潮流时，潮流计算模型可简化直流潮流模型（又称为线性潮流模型），这时可视各个输电线路上的有功潮流为各个电机组注入网络功率为线性函数。因此，我们设 8 台机组出力分别为 x_1, x_2, \dots, x_8 ，6

条主要线路的有功潮流分别为 y_1, y_2, \dots, y_6 ，可以建立如下线性回归方程：

$$y_i = a_i + \sum_{j=1}^8 a_{ij} x_j \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (j=1,2,\dots,8)$$

其中 a_i 为常数项，表示由线路两端的电压差引起的只在两电源间流动的循环功率等因素造成。 a_{ij} 为第 j 个发电机组关于第 i 条线路上有功潮流的线性组合系数。

5.1.2 模型求解

我们运用 MATLAB 编程，带入表 1 和表 2 中的数据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：

$$\begin{aligned}
y_1 &= 110.5852 + 0.0826x_1 + 0.0477x_2 + 0.0528x_3 + 0.1198x_4 - 0.0258x_5 + 0.1216x_6 + 0.1221x_7 - 0.0023x_8 \\
y_2 &= 131.4291 - 0.0548x_1 + 0.1274x_2 - 0.0002x_3 + 0.0332x_4 + 0.0866x_5 - 0.1127x_6 - 0.0186x_7 + 0.0979x_8 \\
y_3 &= -109.0912 - 0.0694x_1 + 0.0620x_2 - 0.1565x_3 + -0.0099x_4 + 0.1247x_5 + 0.0024x_6 - 0.0028x_7 - 0.2009x_8 \\
y_4 &= 77.4313 - 0.0345x_1 - 0.1026x_2 + 0.2051x_3 - 0.0209x_4 - 0.0119x_5 + 0.0058x_6 + 0.1451x_7 + 0.0777x_8 \\
y_5 &= 133.2132 + 0.0003x_1 + 0.2428x_2 - 0.0647x_3 - 0.0412x_4 - 0.0655x_5 + 0.0700x_6 - 0.0038x_7 - 0.0098x_8 \\
y_6 &= 120.8539 + 0.2376x_1 - 0.0607x_2 - 0.0781x_3 + 0.092x_4 + 0.0466x_5 - 0.0003x_6 + 0.1664x_7 + 0.0003x_8
\end{aligned}$$

以及得到的六条线路的有功潮流回归方程的残差图，见图 1：

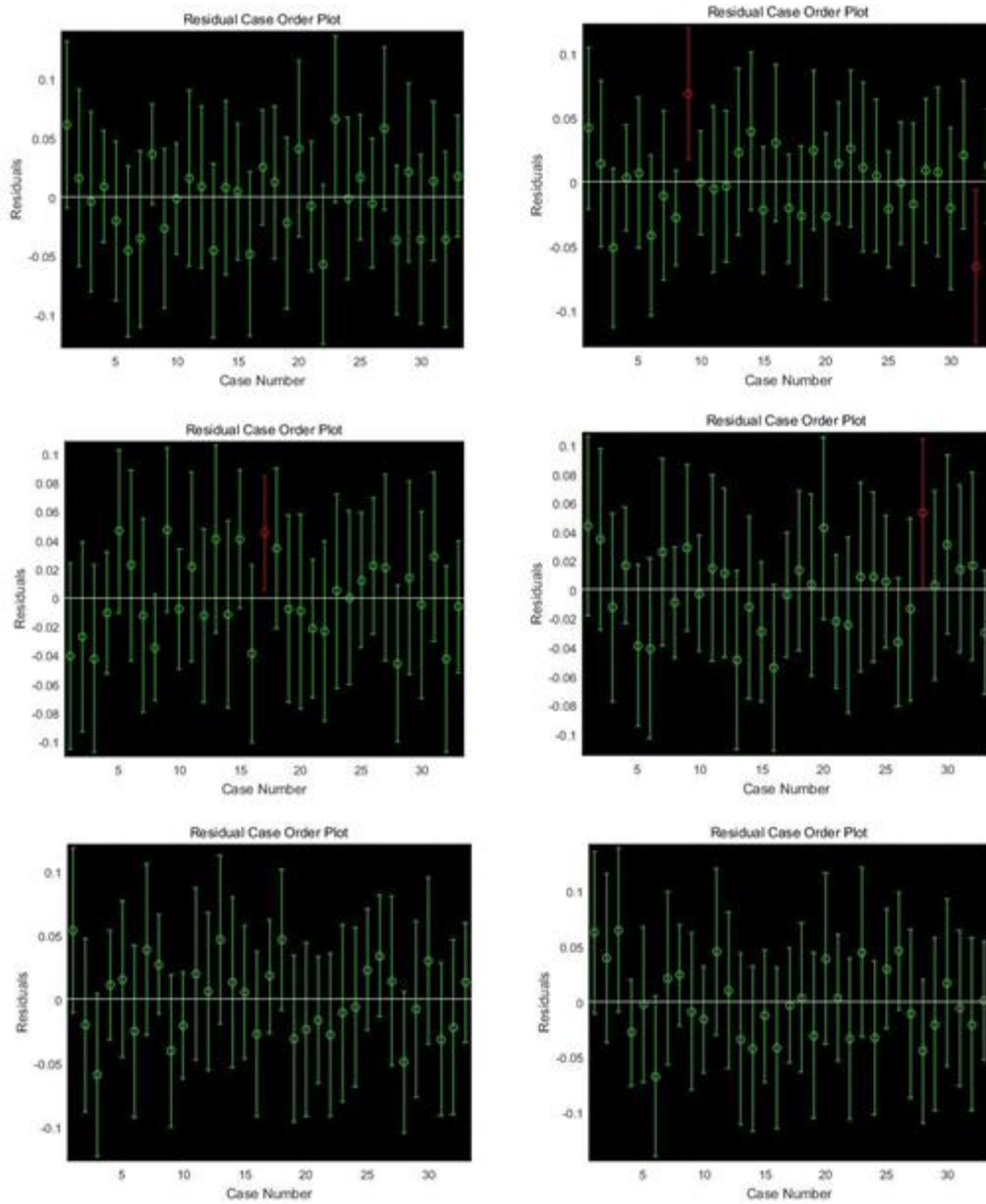


图 1 六条线路的有功潮流回归方程的残差图

从图 1 中可以看出：线路 1、5、6 潮流值的拟合效果最好，所有点均落在置信区间内。而线路 3、4 有 2 个异常点，线路 2 有两个异常点。

根据 MATLAB 得到的相关系数，见表 1：

表 1 各线路的相关系数 （单位：MW）

线路	1	2	3	4	5	6
相关系数/ r^2	0.9994	0.9996	0.9999	0.9998	0.9995	0.9998

相关系数介于 0~1 之间，越接近 1，回归拟合效果越好，一般认为超过 0.8 的模型拟合优度比较高。而表中线路 1 至线路 6 的回归方程的相关系数 r^2 均十分接近 1，说明回归方程十分显著，拟合效果很好。证实了我们得到的多元线性回归方程的可信性。

5.2 问题二的思路分析

由题中给出的关于输电阻塞管理原则中，我们可以知道导致产生阻塞费用有两种情况：

情况一：当改变根据电力市场交易规则得到的各机组出力分配预案时，一些通过竞价取得发电权的发电容量（称序内容量）不能出力，所以网方应该为因输电阻塞而不能执行初始交易结果付出代价。计算公式为：

补偿=（消费-报价）*（预想发电容量-实际发电容量）

$$R = (P - p_i) \times (x_i - x'_i)$$

情况二：而一些在竞价中未取得发电权的发电容量（称序外容量）要在低于对应报价的清算价上出力，所以网方在结算时应该适当地给发电商以经济补偿。计算公式为：

补偿=（清算价-报价）*（实际发电容量-预想发电容量）

$$R' = (p_i - P) \times (x' - x_i)$$

由输电阻塞管理原则可知，两种情况产生的补偿费用之和为阻塞费用，计算公式如下：

$$\text{阻塞费用} = R + R' = (P - p_i) \times (x_i - x'_i) + (p_i - P) \times (x' - x_i)$$

5.3 问题三的思路分析

5.3.2 动态规划模型建立

根据题设，对于清算价的求解可以建立动态规划模型求解，可以得到以下动态规划模型。

1. 目标函数：

要选择购电费用最小的机组出力方案，即找到清算价最低的方案，在模型的各个条件约束下，约束后的最大段价即为清算价：

$$c = \max_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 10}} c_{ij}$$

2.约束条件:

约束条件一: 在该时段内, 八个机组的出力改变量的和必须达到下一时段的负荷需求预报值 ω_0 与上个时段结束时八个机组出力和 ω 之差:

$$\sum_{i=1}^8 v_i \Delta t_{ij} = \omega_0 - \omega$$

约束条件二: 每个机组在该时段的工作时间不能超过该时段的时长:

$$\sum_{j=1}^{10} \Delta t_{ij} \leq 15$$

约束条件三: 每个机组在十个段之内的出力改变量不能超过该段的最大段容:

$$v_i \Delta t_{ij} \leq m_{ij}$$

结论: 最终建立的动态规划模型为:

$$\begin{aligned} c = \max_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 10}} c_{ij} \\ s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^8 v_i \Delta t_{ij} = \omega_0 - \omega \\ \sum_{j=1}^{10} \Delta t_{ij} \leq 15 \\ v_i \Delta t_{ij} \leq m_{ij} \\ 1 \leq i \leq 8, 1 \leq j \leq 10 \end{cases} \end{aligned}$$

5.3.2 模型求解

见图 2 流程图：

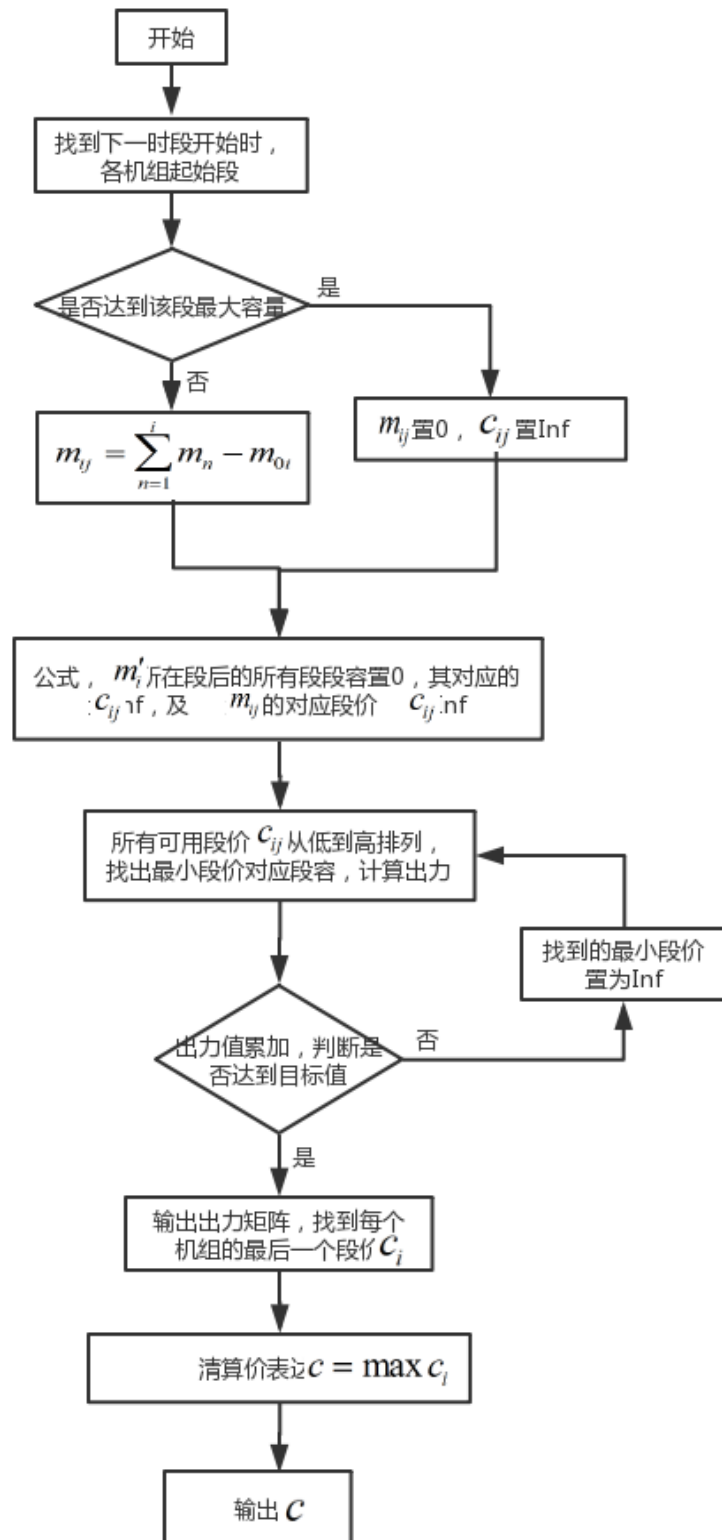


图 2 流程图

第一步：求出下一个时段可以选取的段容量范围：

由题目可知，表 1 中的方案 0 给出了各机组的当前出力；表 3 给出了假设下一个时段预报的负荷需求是 982.4MW 时各机组的段容量；而每个机组被选入的段容量或其部分之和形成该时段该机组的出力分配，所以可运用 MATLAB 编程求出在当前时段各机组选取的段容量（注：在第 7 组第 4 段中，该段出力值只占到其段容的 73.3%。），见表

表 1 当前时段各机组选取的段容量 （单位：MW）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	70	0	50	0	0	0	0	0	0	0
2	30	0	20	8	15	0	0	0	0	0
3	110	0	40	0	30	0	0	0	0	0
4	55	5	10	10	0	0	0	0	0	0
5	75	5	15	0	15	15	0	0	0	0
6	95	0	10	20	0	0	0	0	0	0
7	50	15	5	11.1	0	0	0	0	0	0
8	70	0	20	0	0	0	0	0	0	0

根据表，可以求出下一个时段预报的负荷需求是 982.4MW 时选取的段容量的大致范围，见表：

表 2 各机组的段容量 （单位：MW）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	30	0	0	0	40
2	0	0	0	0	0	6	2	0	0	8
3	0	0	0	0	0	0	20	40	0	40
4	0	0	0	0	10	10	15	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10
6	0	0	0	0	0	15	10	20	0	10
7	0	0	0	3.9	10	10	5	10	3	2
8	0	0	0	0	20	0	20	10	15	5

假设以 15 分钟为一个时段组织交易的全部时间都用在下一个时段进行出力，将爬坡速率与时间相乘可以得到最大出力。

表 3 下个时段各机组的最大出力 （单位：MW）

机组	1	2	3	4	5	6	7	8
出力	33	15	48	19.5	27	30	21	27

得到最大出力后，又可知每个机组被选入的段容量或其部分之和形成该时段该机组的出力，经过 MATLAB 编程计算便可得到下一时段可以选取的最多段中的段容量，即选取的时段的范围的最大范围，进一步缩小范围，使结果更加精确。见表 4：

表 4 在下个时段各机组可以选取的段容量的精确范围 (单位: MW)

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	30	0	0	0	3
2	0	0	0	0	0	6	2	0	0	7
3	0	0	0	0	0	0	20	28	0	0
4	0	0	0	0	10	9.5	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	10	10	7
6	0	0	0	0	0	15	10	5	0	0
7	0	0	0	3.9	10	7.1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	20	0	7	0	0	0

第二步: 求出清算价。

确定选取的段的范围后, 我们也可以得到在下个时段各机组的段价的范围。

见表 5:

表 5 各机组的段价 (单位: 元/兆瓦小时, 记作元/MWh)

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	252	0	0	0	489
2	0	0	0	0	0	300	320	0	0	495
3	0	0	0	0	0	0	308	356	0	0
4	0	0	0	0	255	302	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	310	396	510
6	0	0	0	0	0	252	305	380	0	0
7	0	0	0	251	260	306	0	0	0	0
8	0	0	0	0	253	0	303	0	0	0

我们将在当前时段下进行完的各机组的段价取成无穷大 (Inf), 方便用 MATLAB 进行编程计算, 见表 6:

表 6 各机组的段价 (单位: 元/兆瓦小时, 记作元/MWh)

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	252	Inf	Inf	Inf	489
2	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	300	320	Inf	Inf	495
3	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	308	356	Inf	Inf
4	Inf	Inf	Inf	Inf	255	302	Inf	Inf	Inf	Inf
5	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	310	396	510
6	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	252	305	380	Inf	Inf
7	Inf	Inf	Inf	251	260	306	Inf	Inf	Inf	Inf
8	Inf	Inf	Inf	Inf	253	Inf	303	Inf	Inf	Inf

我们先运用 MATLAB 编程将表中的段价按从小到大排序，以便找到最后一个被选入的段价（最高段价）为清算价，因为有一些机组的段所对应的段容量为 0，所以需要舍去。见表 7：

表 7 段价从小到大的排序（单位：元/兆瓦小时，记作元/MWh）

段价	机组	段	段容量
251	7	4	3.9
252	6	6	15
252	1	6	30
253	8	5	20
255	4	5	10
260	7	5	10
300	2	6	6
302	4	6	10
303	8	7	20
305	6	7	10
306	7	6	10
308	3	7	20
310	5	8	10
320	2	7	2
356	3	8	40
380	6	8	20
396	5	9	10
489	1	10	40
495	2	10	8
510	5	10	10

计算出方案 0 给出的各机组的当前出力之和为 874.1MW，再根据下一个时段预报的负荷需求是 982.4MW，二者相减为 108.3 MW 即为得到下个时段各机组出力之和变化量。由电力市场交易规则可知：按段价从低到高选取各机组的段容量或其部分，直到它们之和等于预报的负荷，这时每个机组被选入的段容量或其部分之和形成该时段该机组的出力分配预案。所以可以运用 MATLAB 编程得到形成该时段该机组的出力分配预案所选入的段容量。见表 8：

表 8 段价从小到大的排序（单位：元/兆瓦小时，记作元/MWh）

段价	机组	段	段容量
251	7	4	3.9
252	6	6	15
252	1	6	30
253	8	5	20
255	4	5	10
260	7	5	10
300	2	6	6
302	4	6	10

303	8	7	3.4
-----	---	---	-----

由题可知最后一个被选入的段价（最高段价）为该时段的清算价，按表可得清算价为 303 元/MWh（在第 8 机组的第 7 段中，且该段出力值只占到其段容的 17%），按如下公式可计算出购电费用为 74416.8 元。

$$\text{购电费用} = \text{清算价} \times \text{时间} \times \text{负荷需求}$$

第三步：试按照电力市场规则给出下一个时段各机组的出力分配预案。
表 8 对应的各机组的在全部段下的段容量，见表 9：

表 9 各机组的段容量（单位：MW）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	0
2	30	0	20	8	15	6	0	0	0	0
3	110	0	40	0	30	0	0	0	0	0
4	55	5	10	10	10	10	0	0	0	0
5	75	5	15	0	15	15	0	0	0	0
6	95	0	10	20	0	15	0	0	0	0
7	50	15	5	15	10	0	0	0	0	0
8	70	0	20	0	20	0	3.4	0	0	0

将表 9 中时每个机组被选入的段容量相加便是形成该时段该机组的出力分配预案。见表 10：

表 10 负荷需求是 982.4MW 时各机组出力方案（单位：兆瓦，记作 MW）

出力\机组	1	2	3	4	5	6	7	8
	150	79.	180	100	125	140	95	113.4

5.4 问题四的思路分析

根据问题三得到下一个时段各机组出力分配预案，再计算当执行各机组出力分配预案时电网各主要线路上的有功潮流，判断是否会出现输电阻塞。并在发生输电阻塞时，根据安全且经济的原则，调整各机组出力分配方案，并给出与该方案相应的阻塞费用。

5.4.1 模型的建立

根据题设，可以建立如下动态规划模型：

1. 目标函数：

要选择购电费用最小的机组出力方案，即找到清算价最低的方案，在模型的各个条件约束下，约束后的最大段价即为清算价：

$$c = \max_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 10}} c_{ij}$$

2. 约束条件：

约束条件一：在该时段内，八个机组的出力改变量的和必须达到下一时段的负荷需求预报值 ω_0 与上个时段结束时八个机组出力和 ω 之差：

$$\sum_{i=1}^8 v_i \Delta t_{ij} = \omega_0 - \omega$$

约束条件二：每个机组在该时段的工作时间 $\sum_{j=1}^{10} \Delta t_{ij}$ 不能超过该时段的时长

15min：

$$\sum_{j=1}^{10} \Delta t_{ij} \leq 15$$

约束条件三：每个机组在十个段之内的出力改变量 $v_i \Delta t_{ij}$ 不能超过该段的最大段容 m_{ij} ：

$$v_i \Delta t_{ij} \leq m_{ij}$$

约束条件四：由八个机组经过该时段后最终的出力值，再根据问题一可得六条线路的实际有功潮流值 $A_{ik} P'_i + b_k$ ，实际潮流值应当不能超过每条线路的潮流限值 P'_{mk} ：

$$A_{ik} P'_i + b_k \leq P'_{mk}$$

结论：最终建立的动态规划模型为：

$$c = \max_{\substack{1 \leq i \leq 8 \\ 1 \leq j \leq 10}} c_{ij}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^8 v_i \Delta t_{ij} = \omega_0 - \omega \\ \sum_{j=1}^{10} \Delta t_{ij} \leq 15 \\ v_i \Delta t_{ij} \leq m_{ij} \\ A_{ik} P'_i + b_k \leq P'_{mk} \\ 1 \leq i \leq 8, 1 \leq j \leq 10, 1 \leq k \leq 6 \end{cases}$$

5.4.1 模型的求解

1.判断是否会出现输电阻塞：

步骤一：在问题三中我们可以运用 MATLAB 得到了负荷需求是 982.4MW 时各机组在各段的出力情况，见表 9。

步骤二：已知问题一得到的各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式，带入第三问得到的各机组的出力方案（表 9），可得到各线路上有功潮流的实际值：

表 11 负荷需求是 982.4MW 时各线路的潮流实际值与潮流限值（单位：MW）

线路	1	2	3	4	5	6
实际值	173.3654	140.9723	150.8278	120.8628	136.8105	168.5652
限值	165	150	160	155	132	162

结论：将实际值与限值进行比较会发现线路 1、5、6 得到的实际值大于限值，出力分配预案会引起输电阻塞。

2.在发生输电阻塞时，调整各机组出力分配方案，并给出与该方案相应的阻塞费用：

由问题一得到的多元线性回归方程表达式可知：

1、若 $a_{ij} < 0$, 则 a_{ij} 系数对应的机组出力值 x_j 对该线路的有功潮流值 y_i 起到抑制作用，即 y_i 随着 x_j 的增大而减小；

2、若 $a_{ij} > 0$, 则 a_{ij} 系数对应的机组出力值 x_j 对该线路的有功潮流值 y_i 起到促进作用，即 y_i 随着 x_j 的增大而增大。

综上所述，应根据 a_{ij} 的正负，对应调整 x_j 的值，使得各线路的潮流值 y_i 均在潮流限值以下。

运用 MATLAB 编程，调整各机组出力分配方案如下：

表 12 改进后的各机组出力方案（单位：兆瓦，记作 MW）

方案\机组	1	2	3	4	5	6	7	8
	150	79.	180	99.5	125	140	95	113.9

5.5 问题的思路分析

因只改变了负荷需求，所以将负荷需求是 1052.8MW 带入到第三题的 MATLAB 编程中进行计算，每个机组被选入的段容量之和形成该时段该机组的出力分配预案。可得到清算价为 356 元/MWh，购电费用为 93699 元。得到结果见表 13,表 14:

表 13 负荷需求是 1052.8MW 时各机组的出力情况（单位：MW）

机组\段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	70	0	50	0	0	30	0	0	0	0
2	30	0	20	8	15	6	2	0	0	0
3	110	0	40	0	30	0	20	1.8	0	0
4	55	5	10	10	10	10	0	0	0	0
5	75	5	15	0	15	15	0	10	0	0
6	95	0	10	20	0	15	10	0	0	0
7	50	15	5	15	10	10	0	0	0	0
8	70	0	20	0	20	0	20	0	0	0

表 14 负荷需求是 1052.8MW 时各机组出力方案（单位：兆瓦，记作 MW）

方案\机组	1	2	3	4	5	6	7	8
	150	81	201.8	100	135	150	105	130

已知问题一得到的各线路上有功潮流关于各发电机组出力的近似表达式，带入得到的负荷需求是 1052.8MW 时各机组的出力方案（表 9），可得到各线路上有功潮流的实际值。见表 15：

表 15 负荷需求是 1052.8MW 时各线路的潮流实际值与潮流限值（单位：MW）

线路	1	2	3	4	5	6
实际值	176.7660	142.4130	156.2130	127.7832	135.7400	168.8757
限值	165	150	160	155	132	162

将实际值与限值进行比较会发现线路 1、5、6 得到的实际值大于限值，出力分配预案会引起输电阻塞。

运用 MATLAB 编程，可知在不超过安全裕度的情况下让输电阻塞费用花费最少来调整各机组出力分配方案如下，见表 16：

表 16 改进后的各机组出力方案（单位：兆瓦，记作 MW）

方案\机组	1	2	3	4	5	6	7	8
	153	88.	228	99.5	152	121.6785	93.6215	117

四、模型的检验

我们对问题一中建立的多元回归模型进行了检验。根据得到的六条线路的有功潮流回归方程的残差图，可以分析出线路 1、5、6 潮流值的拟合效果最好，所有点均落在置信区间内。而线路 3、4 有 2 个异常点，线路 2 有两个异常点。并根据 MATLAB 得到的相关系数，相关系数介于 0~1 之间，越接近 1，回归拟合效果越好，一般认为超过 0.8 的模型拟合优度比较高。而表中线路 1 至线路 6 的回归方程的相关系数 r^2 均十分接近 1，说明回归方程十分显著，拟合效果很好。证实了我们运用 MATLAB 得到的多元线性回归方程的可信性。

五、模型的评价与优化

8.1 模型的优缺点分析

8.1.1 模型的优点

1、问题一中的多元线性回归模型，运用起来简单、方便，能够准确地计量因变量和自变量之间的相关程度以及回归拟合程度的高低，提高预测方程式的效果。

2、问题三中的动态规划模型，能够根据约束条件有效得到目标函数的最优解。在解决生产调度之类以时间划分阶段的多阶段决策问题时，动态规划模型要比其他方法更为简便。

8.1.2 模型的缺点

1、求解问题二时，若存在某线路阻塞，但考虑输电阻塞时得到的清算价与未考虑输电阻塞得到的清算价相同，则阻塞费用为零，显然矛盾。

2、求解问题四，选取步长，调整问题三中各机组的出力，进行 MATLAB 编程时，无法确定最终结果的范围，导致 MATLAB 代码运行时间过长。

8.2 模型的优化

求解问题三的动态规划模型时，可以改用 LINGO 编程求解，减少代码冗余。

六、 模型的推广

通过对题目的解读，不难发现这是一类规划问题。本文模型的建立是为了解决多个机组出力在规定时间内达到一定量的目标需求的问题。虽然方案有多种，但是要尽可能使购电费用最少，使用动态规划，可以得到其问题的最优解。规划问题是运筹学的一个重要分支。它在解决工业生产组织、经济计划、组织管理人机系统中，都发挥着重要的作用。比如，工厂选址时，要兼顾距离原料区和服务区之间的距离；涉及到资源分配时，如何能够同时满足各部门的需求.....这类问题都能够很好的得到解决。规划模型在商业、工业、交通运输等领域都有广泛的应用。

参考文献

- [1] 袁志发, 周静芋.多元统计分析(M).北京: 科学出版社,2002.
- [2] 张瑞丰.精通 MATLAB 6.5(M).北京: 中国水利水电出版社,2004.
- [3] 姜启源, 谢金星, 叶俊.数学模型 (第三版) (M).北京: 高等教育出版社,1991.
- [4] 全国大学生数学建模竞赛组委会.大学数学建模的理论与实践(M).长沙: 湖南教育出版社,2004.
- [5] 彭安福.电力企业现代管理(M).北京: 中国水利水电出版社,2000.
- [6] 何仰赞.电力系统分析(M).武昌: 华中工学院出版社,1985

附件

运行环境 matlab2015b

1. 数据录入

利用 matlab 的数据导入功能，将问题中的表 1-6 中的数据，通过复制、粘贴建立数据文件 (*.txt)，分别命名为 m,p,v,mmax,m0,y,x，并保存至 matlab 的工作文件夹中，等待程序读取数据。

1. 建立.m 文件，并命名为 run0

```
load x.txt, load y.txt, load m0.txt, load m.txt, load p.txt, load v.txt, load
mmax.txt;
b11=[ones(33,1),x];
b22=[ones(33,1),y];
for i= 1: 6
    [b,bint,r,rint,stats]=regress(y(:,i),b11);
    stats1(i,:)= stats;
    a1(i)=b(1);
    A1(i,:)=b(2:9)';
end
a1= a1';
a1, A1, format long , stats1, format short,
for j=1:1:8
    [b,bint,r,rint,stats]=regress(x(:,j),b22);
    stats2(j,:)=stats;
    a2(j)=b(1);
    A2(j,:)=b(2:7)';
end
a2= a2';
a2, A2, format long , stats2, format short,
运行该 run0.m 文件即可得到第一问的结果。
```

2. 建立.m 文件，并命名为 run1

```
function asdasdad=run1(m0,m,v,p,get,A1,a1,ymax)
mubiao=get-sum(m0);
J=[0 0 0 0 0 0 0 0];%所处段
for i=1:1:8%获取各机组当前段
    y=0;
    for j=1:1:10
        y=y+m(i,j);
        if y>=m0(i)
            J(i)=j;
            break;
        end
    end
end
end
```

```

start=zeros(8,10);%价值矩阵
m0change=m0;%初始出力
for i=1:1:8
    time1=0;
    for j=1:1:10
        if (m0change(i)>=m(i,j))
            start(i,j)=m(i,j);
            m0change(i)= m0change(i)-m(i,j);
        else
            time1=time1+1;
            if time1==1
                start(i,j)=m0change(i);
                m0change(i)=0;
            end
        end
    end
end
doing=zeros(8,10);%可出力矩阵
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        doing(i,j)=m(i,j)-start(i,j);
    end
end
stop=zeros(8,10);%最多可出力矩阵
give=v.*15;%各机组最多可出力
givechange=give;
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if doing(i,j)~=0
            if doing(i,j)<givechange(i)
                stop(i,j)=doing(i,j);
                givechange(i)=givechange(i)-doing(i,j);
            else
                stop(i,j)=givechange(i);
                givechange(i)=0;
            end
        end
    end
end
mid=zeros(8,10);
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if stop(i,j)~=0
            mid(i,j)=1;

```

```

        end
    end
end
first=zeros(8,10);%可出力价格矩阵
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        first(i,j)=mid(i,j)*p(i,j);
    end
end
second=zeros(8,10);%可出力待排序价格矩阵
duan=0;
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if first(i,j)==0
            second(i,j)=inf;
        else
            second(i,j)=first(i,j);
            duan=duan+1;
        end
    end
end
third=zeros(duan,3);%价格排序及位置矩阵
secondchange=second;
for k=1:1:duan
    R=inf;%最小值
    x=0;%行
    y=0;%列
    for i=1:1:8
        for j=1:1:10
            if R>=secondchange(i,j)
                R=secondchange(i,j);
                x=i;
                y=j;
            end
        end
    end
    secondchange(x,y)=inf;
    third(k,1)=R;
    third(k,2)=x;
    third(k,3)=y;
end
four=zeros(duan,4);%加入该位置段容量
for k=1:1:duan
    for i=1:1:8

```

```

        for j=1:1:10
            if p(i,j)==third(k,1)
                four(k,1)=third(k,1);
                four(k,2)=third(k,2);
                four(k,3)=third(k,3);
                four(k,4)=doing(four(k,2),four(k,3));
            end
        end
    end
end
xchange=mubiao;
five=[];%选取需要达到的地方
do=0;
for k=1:1:duan
    if xchange>0
        if xchange>four(k,4)
            five(k,1)=four(k,1);
            five(k,2)=four(k,2);
            five(k,3)=four(k,3);
            five(k,4)=four(k,4);
            xchange=xchange-four(k,4);
            do=do+1;
        else
            five(k,1)=four(k,1);
            five(k,2)=four(k,2);
            five(k,3)=four(k,3);
            five(k,4)=xchange;
            xchange=0;
            do=do+1;
        end
    else
        break
    end
end
six=zeros(8,10);%出力段容量矩阵
for k=1:1:do
    six(five(k,2),five(k,3))=five(k,4);
end
seven=zeros(8,10);
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        seven(i,j)=six(i,j)+start(i,j);
    end
end
end

```

```

eight=zeros(8,3);%最后一段假
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if seven(i,10-j)~=0
            eight(i,1)=i;
            eight(i,2)=10-j;
            eight(i,3)=p(i,10-j);
            break
        end
    end
end
R=0;
for i=1:1:8
    if R<=eight(i,3)
        x=eight(i,1);
        y=eight(i,2);
        R=eight(i,3);
    end
end
nine=[x,y,R];%清算价位置及值
qsj=nine(3)%清算价
zj=qsj*get*15/60%总价
out=seven%出力矩阵
ten=[0 0 0 0 0 0 0 0];%每个机组的总出力量
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        ten(i)=ten(i)+seven(i,j);
    end
end
%计算各线路分摊量
Ten=ten'
Y0=A1*Ten+(a1');
Y1=(abs(Y0))'
K=[];time3=0;
for k=1:1:6
    if Y1(k)> ymax(1,k)
        time3=time3+1;
        K(time3)=k;
    end
end
disp('第 K 条线路阻塞')
K
asdasdad=Ten;
运行 run1.m 文件。输入负荷需求,即可得到该需求下的清算价(qsj),总报价(zj),

```

各机组在各段的出力矩阵（out），各线路的输电量（Ten），及线路堵塞情况

3. 建立.m 文件，并命名为 run3

```
function asdasdad=run1(m0,m,v,p,get,A1,a1,A2,a2,ymax)
mubiao=get-sum(m0);
J=[0 0 0 0 0 0 0 0];%所处段
for i=1:1:8%获取各机组当前段
    y=0;
    for j=1:1:10
        y=y+m(i,j);
        if y>=m0(i)
            J(i)=j;
            break;
        end
    end
end
start=zeros(8,10);%价值矩阵
m0change=m0;%初始出力
for i=1:1:8
    time1=0;
    for j=1:1:10
        if (m0change(i)>=m(i,j))
            start(i,j)=m(i,j);
            m0change(i)= m0change(i)-m(i,j);
        else
            time1=time1+1;
            if time1==1
                start(i,j)=m0change(i);
                m0change(i)=0;
            end
        end
    end
end
doing=zeros(8,10);%可出力矩阵
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        doing(i,j)=m(i,j)-start(i,j);
    end
end
stop=zeros(8,10);%最多可出力矩阵
give=v.*15;%各机组最多可出力
givechange=give;
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if doing(i,j)~=0
```



```

        if doing(i,j)<givechange(i)
            stop(i,j)=doing(i,j);
            givechange(i)=givechange(i)-doing(i,j);
        else
            stop(i,j)=givechange(i);
            givechange(i)=0;
        end
    end
end
mid=zeros(8,10);
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if stop(i,j)~=0
            mid(i,j)=1;
        end
    end
end
first=zeros(8,10);%可出力价格矩阵
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        first(i,j)=mid(i,j)*p(i,j);
    end
end
second=zeros(8,10);%可出力待排序价格矩阵
duan=0;
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        if first(i,j)==0
            second(i,j)=inf;
        else
            second(i,j)=first(i,j);
            duan=duan+1;
        end
    end
end
third=zeros(duan,3);%价格排序及位置矩阵
secondchange=second;
for k=1:1:duan
    R=inf;%最小值
    x=0;%行
    y=0;%列
    for i=1:1:8
        for j=1:1:10

```

```

        if R>=secondchange(i,j)
            R=secondchange(i,j);
            x=i;
            y=j;
        end
    end
end
secondchange(x,y)=inf;
third(k,1)=R;
third(k,2)=x;
third(k,3)=y;
end
four=zeros(duan,4);%加入该位置段容量
for k=1:1:duan
    for i=1:1:8
        for j=1:1:10
            if p(i,j)==third(k,1)
                four(k,1)=third(k,1);
                four(k,2)=third(k,2);
                four(k,3)=third(k,3);
                four(k,4)=doing(four(k,2),four(k,3));
            end
        end
    end
end
fourchange=four;
startchange=start;
h=0.1;
a=1;
while a>0
    xchange=mubiao;
    for k=1:1:duan
        if
            (m(fourchange(k,2),fourchange(k,3))-startchange(fourchange(k,2),fourchange(k,3)))>0
                if
                    (m(fourchange(k,2),fourchange(k,3))-startchange(fourchange(k,2),fourchange(k,3)))>h
                        startchange(fourchange(k,2),fourchange(k,3))=startchange(fourchange(k,2),fourchange(k,3))+h;
                        fourchange(k,4)=fourchange(k,4)-h;
                        xchange=xchange-h;
                    else

```

```

startchange(fourchange(k,2),fourchange(k,3))=m(fourchange(k,2),fourchange(k,3));
    xchange=xchange-fourchange(k,4);
    end
end
putout=[0 0 0 0 0 0 0 0];%每个机组的总出力量
for i=1:1:8
    for j=1:1:10
        putout(i)=putout(i)+startchange(i,j);
    end
end
Putout=putout';
Y0=A1*Putout+(a1);
Y1=(abs(Y0))';
time3=0;
for d=1:1:6
    if Y1(d)> ymax(1,d)
        time3=time3+1;
    end
end
if time3~=0
    continue
else
    if sum(Putout)==108.3
        Putout
        a=-1;
    end
end
end
end
end

```

运行 run3.m 文件。输入负荷需求，即可得到满足需求并且不堵塞的清算价 (qsj)，总报价 (zj)，各机组在各段的出力矩阵 (out)，各线路的输电量 (Ten)。