

实验报告

课程名称: 电力系统分析实验 实验名称: 实验一: 潮流分析实验

专业-班级: 电气一班 学号: 220330124 姓名: 舒晟超

实验日期: 2024 年 11 月 25 日 同组人: _____

报告总分数: _____

教师评语:

教师签字: _____

日 期: _____

一、实验目的

- 1、掌握复杂电力系统潮流计算原理；
- 2、了解 MATPOWER 及 Powergui 对潮流进行分析的方法；
- 3、掌握并编写牛顿拉夫逊潮流计算算法；

二、实验预习题

1. 在潮流计算中，电力网络的节点分几类？各类节点的已知量和待求量是什么？

电力网络的节点分为三类：PQ 节点，PV 节点和参考节点。

PQ 节点：节点有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 已知，要求得节点电压 e_i, f_i 或者 U_i, δ_i 。

PV 节点：节点有功功率 P_i 和节点电压幅值 U_i 已知，要求得节点的无功功率 Q_i 和节点电压相位 δ_i 。

平衡节点：节点的电压相位 δ_i 和电压幅值 U_i 已知，要求得节点的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 。

2. 潮流计算的方法有几种？简要介绍各种算法的优缺点？

高斯-赛德尔迭代法：收敛速度慢，迭代次数随网络节点增加而上升，往往会发生收敛困难。

阻抗法：改善了收敛性，占用内存大，计算量大。

牛顿-拉夫逊法：收敛性好，内存要求、计算速度都优于阻抗法。

P-Q 分解法：计算速度优于牛顿-拉夫逊法，同时计算精度和牛顿-拉夫逊法一致，占用内存小，计算速度快，但是有超高压电网的前提。

三、实验设备及元器件

Matlab/Simulink 仿真软件

四、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

潮流计算是电力系统分析中的一种最基本的计算，它的任务是对给定运行条件确定系统运行状态，如各母线上的电压（幅值及相角）、网络中的功率分布及功率损耗等。潮流计算的结果是电力系统稳定计算和故障分析的基础。

1. 电力网络的节点

电力系统把节点分成三类：

PQ 节点：节点功率（P、Q）已知，待求的未知量是节点电压向量（U、 θ ），叫 PQ 节点；属于这一类节点的有按给定有功无功功率发电的发电厂母线和没有其他电源的变电所母线。

PV 节点：节点的有功功率和电压幅值 U 已知，待求的是该节点的无功功率 Q 及电压向量的相角 θ 。有一定无功功率储备的发电厂和一定无功功率电源的变电所母线都可选作为 PV 节点。

平衡节点：在潮流计算中，这类节点通常只设一个。给定其电压值，在计算中该节点电压向量的方向作为参考轴，即给定该点电压向量角度为零。担负调整系统频率任务的发电厂母线往往被选作为平衡节点。例如可以选择出线数多或者靠近电网中心的发电厂母线作平衡节点。进行计算时，平衡节点是不可少的；PQ 节点是大量的；PV 节点较少，甚至可能没有。

2. 节点电压方程和导纳矩阵

电力网络的节点电压方程为：

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{U}_B$$

\mathbf{I}_B ：节点注入电流列向量，注入电流有正有负，注入网络的电流为正而流出网络的电流为负。根据这个规定，电源节点的注入电流为正，而负荷节点为负。无电源无负荷的联络节点为零。

\mathbf{U}_B ：节点电压列向量，由于节点电压是对称于参考节点而言的，因此需要先选定参考节点。在电力系统中通常选大地为参考节点。如果网络中无接地支路，则需要选定某一节点为参考点。 \mathbf{I}_B 、 \mathbf{U}_B 均为 $n \times n$ 列向量， \mathbf{Y}_B 为 $n \times n$ 阶节点导纳矩阵。

3. 牛顿-拉夫逊法潮流计算原理

牛顿拉夫逊法是潮流计算中最普遍的一种计算方法。指在每一次迭代过程中，对非线性方程组通过线性化处理逐步近似，从而求解非线性方程组。牛顿-拉夫逊法计算潮流是以导纳矩阵为基础，利用其对称性、稀疏性和节点编号顺序等技巧，使此种计算方法具有很好的收敛性，且占用内存小，计算速度快。

直角坐标下潮流计算的流程：

(1)形成节点导纳矩阵；

(2)给各节点电压赋初始值；

(3)将节点电压初值代入，求出修正方程式的常数项向量；

(4)将节点电压初值代入，求出雅可比矩阵元素；

(5)求解修正方程式，求出变量的修正向量；

(6)求出节点电压的新值；

(7)如有 PV 节点，则检查该类节点的无功功率是否越限；

(8)检查是否收敛，如不收敛则以各节点电压的新值作为初值从第三步重新进行迭代，否则计算支路功率分布、PV 节点无功功率和平衡节点注入功率，最后输出结果。

4. MATPOWER

MATPOWER 是一个用 MATLAB 的 M 文件编写，用来解决电力潮流和优化潮流问题的软件包。MATPOWER 的特点是简单、易懂而且代码公开，为电力系统专业学生深入学习和理解掌握潮流计算中的难点（如节点导纳矩阵、算法及迭代过程等）提供了一个开放、便捷的平台。

编写基准容量 baseMVA，母线参数 bus，发电机参数 gen，支路参数 branch 形成输入文件作为输入，经过潮流计算指令即可得到结果。

5. Powergui

在 Simulink 中，Powergui 模块是用于 Simscape Electrical Specialized Power Systems 模型的环境块。它允许用户选择不同的求解方法，如连续、离散、连续相量或离散相量。Powergui 模块不仅用于求解电路，还提供了工具来分析稳态和仿真结果，以及进行高级参数设计。

Powergui 可以进行电力系统的潮流计算仿真。

实验原始数据和过程记录

原始数据审核：_____

1. MATPOWER 潮流计算

表 1-2 matpower 潮流计算结果

节点号	电压幅值 (p.u.)	电压角度 (°)	发电机 (MW)	负荷 (MW)
1	0.862	-4.779	-	160+j80
2	1.078	17.854	-	200+j100
3	1.036	-4.282	-	370+j130
4	1.050	21.843	500+j181.31	-
5	1.050	0.000	257.94+j229.94	-

2. Powergui 潮流计算

表 1-5 2 机 5 节点电力系统涉及模块

参数值	线路 12	线路 23	线路 31
R1	5.29	10.58	13.225
L1	0.105	0.126	0.147
C1	1.2034×10^{-5}	1.2034×10^{-5}	0

表 1-6 powergui 潮流计算结果

节点号	电压幅值 (p.u.)	电压角度 (°)	电压幅值与 MATPOWER 计算结 果差值 (%)	电压角度与 MATPOWER 计算结 果差值 (%)
1	0.8723	-4.73	1.195	-1.025
2	1.079	17.13	0.093	-4.055
3	1.039	-4.23	0.289	-1.214
4	1.05	21.09	0	-3.447
5	1.05	0.00	0	0

3. 编写牛顿拉夫逊算法 m 文件 放入附录文件

五、实验过程

（叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-1”）

1. MATPOWER 潮流计算

（1）创建数据文件 case5_01.m

```
1. function mpc=case5_01
2. % MATPOWER Case Format:Version 2
3. mpc.version='2';
4. %% Power Flow Data %%
5. %% system MVA base 系统基准容量
6. mpc.baseMVA=100; % 100MVA
7. %% bus data
8. % bus_i      设置母线编号(正整数)
9. % type       设置母线类型, 1 为 PQ 节点母线, 2 为 PV 节点母线, 3 为平衡(参考)节点母线, 4 为孤立节点母线
10. % Pd Qd      设置母线注入负荷的有功功率和无功功率
11. % Gs Bs      设置与母线并联电导和电纳
12. % baseKV     设置该母线基准电压
13. % Vm Va      设置母线电压的幅值、相位初值
14. % Vmax Vmin  设置工作时母线最高、最低电压幅值
15. % area zone  设置电网断面号和分区号, 一般都设置为 1
16. %          bus_i  type  Pd   Qd   Gs   Bs   area  Vm   Va   baseKV  zone Vmax  Vmin
17. mpc.bus=[ 1    1    160    80    0    0    1    1    0    100    1    1.1    0.94;
18.          2    1    200    100    0    0    1    1    0    100    1    1.1    0.94;
19.          3    1    370    130    0    0    1    1    0    100    1    1.1    0.94;
20.          4    2     0     0     0     0    1    1.05  0    100    1    1.1    0.94;
21.          5    3     0     0     0     0    1    1.05  0    100    1    1.1    0.94;];
22.
23. %% generator data
24. % bus      设置接入发电机(电源)的母线编号
25. % Pg Qg    设置接入发电机(电源)的有功功率和无功功率
26. % Pmax Pmin 设置接入发电机(电源)的有功功率最大、最小允许值
27. % Qmax Qmin 设置接入发电机(电源)的无功功率最大、最小允许值
28. % Vg       设置接入发电机(电源)的工作电压
29. % mBase    设置接入发电机(电源)的功率基准, 如果为默认值, 就是 baseMVA 变量的值
30. % status   设置发电机(电源)工作状态, 1 表示投入运行, 0 表示退出运行
31. %          bus  Pg   Qg   Qmax   Qmin   Vg   mBASE   status  Pmax  Pmin
32. mpc.gen=[ 4    500    0    99990    -9999    1.050    100    1    600    0;
33.          5     0     0    99990    -9999    1.050    100    1    600    0; ];
34.
35. %% branch data
36. % fbus tbus  设置该支路由起始节点(母线)编号和终止节点(母线)编号
37. % r, x, b    设置该支路的电阻、电抗和充电电纳
```


38. % rateA,rateB,rateC 设置该支路长期、短期和紧急允许功率

39. % ratio 设置该支路的变比, 如果支路元件是导线,那么 ratio 为 0; 如果支路元件为变压器, 则该变比为 fbus 侧母线的基准电压与 tbus 侧母线的基准电压之比

40. % angle 设置支路的相位角度, 如果支路元件为变压器(或移相器), 就是变压器(或移相器)的转角; 如果支路元件是导线, 相位角度则为 0° 。

41. % status 设置支路工作状态, 1 表示投入运行, 0 表示退出运行

42. % angmin,angmax 设置支路相位角度的最小和最大差值

43. %	fbus	tbus	r	x	b	rateA	rateB	rateC	ratio	angle	status	agmin	agmax
44. mpc.branch=[2	1	0.04	0.25	0.5	0	0	0	0	0	1	-360	360;
45.	3	1	0.1	0.35	0	0	0	0	0	0	1	-360	360;
46.	3	2	0.08	0.3	0.5	0	0	0	0	0	1	-360	360;
47.	3	5	0	0.03	0	0	0	0	1.05	0	1	-360	360;
48.	2	4	0	0.015	0	0	0	0	1.05	0	1	-360	360;];

49. return;

(2) 在命令行中输入指令：

1. `runpf('case5_01');`;

(3) 得到潮流计算结果见表 1-2;

2. Powergui 潮流计算

(1) 创建 simulink 仿真模型，各元件参数如下图所示：

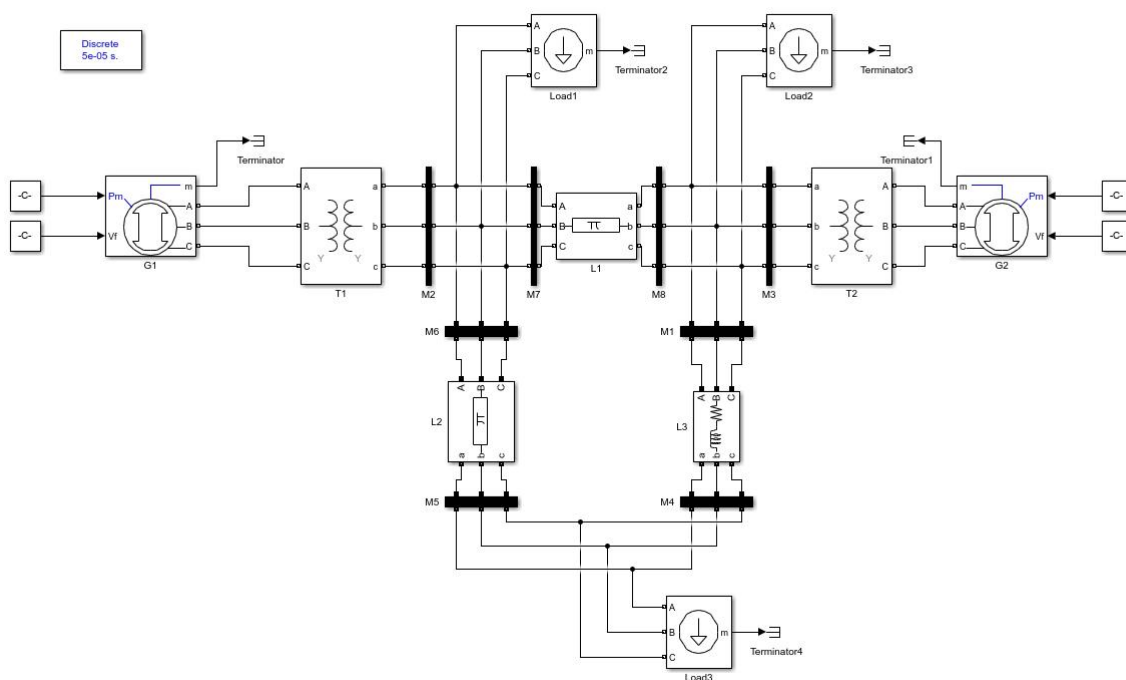


图 1 Simulink 仿真模型

模块参数: G1

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration

Parameters

Advanced

Load Flow

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]: [100e6 10.5e3 50] [100...

Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq' Xl] (pu): [2.24 0.17 0.12 1.02 0.13 0.08] [1x6 double]

Time constants

d axis: Open-circuit

q axis: Short-circuit

[Tdo' Tdo'' Tq'] (s): [4.49 0.0681 0.0513] [4.49, 0.0681, 0.0513]

Stator resistance Rs (pu): 0.037875

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [0.1028 0.02056 2] [0.1028, 0.020...

Initial conditions [dw(%) th(deg) ia, ib, ic(pu) pha, phb, phc(deg) Vf(pu)]: .509 121.491 11.6626

☐ Simulate saturation

Plot

[ifd; vt] (pu): .9956, 1.082, 1.19, 1.316, 1.457; 0.7, 0.7698, 0.8872, 0.9466, 0.9969, 1.046, 1.1, 1.151, 1.201

确定(O)

取消(C)

帮助(H)

应用(A)

图 2 发电机参数

模块参数: L2

Three-Phase PI Section Line (mask) (link)

This block models a three-phase transmission line with a single PI section. The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

参数

Line length (km): 1

Frequency used for rlc specification (Hz): 50

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]: [5.29 0.3864] [5.29, 0.3864]

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]: [0.105 4.1264e-3] [0.105, 0.0041264]

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]: [1.2034e-5 7.751e-9] [1.2034e-05, 7.751e-09]

模块参数: L1

Three-Phase PI Section Line (mask) (link)

This block models a three-phase transmission line with a single PI section. The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

参数

Line length (km): 1

Frequency used for rlc specification (Hz): 50

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]: [10.58 0.3864] [10.58, 0.3864]

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]: [0.126 4.1264e-3] [0.126, 0.0041264]

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]: [1.2034e-5 7.751e-9] [1.2034e-05, 7.751e-09]

模块参数: L3

Three-Phase Series RLC Branch (mask) (link)

Implements a three-phase series RLC branch. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

参数

Branch type RL

Resistance R (Ohms): 13.225

Inductance L (H): 0.147

Measurements None

图 3 线路参数

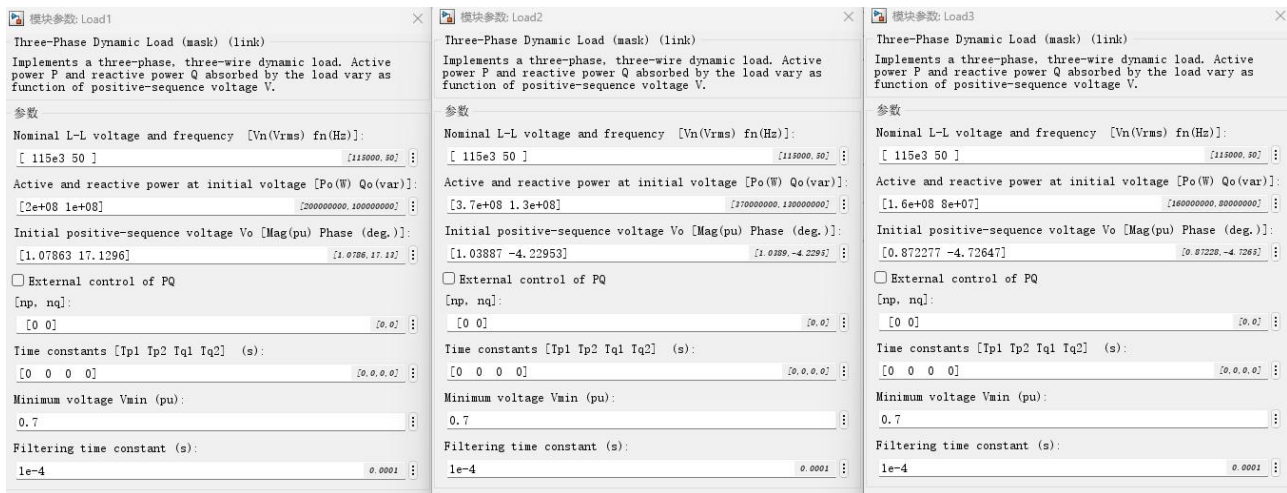


图 4 负荷参数

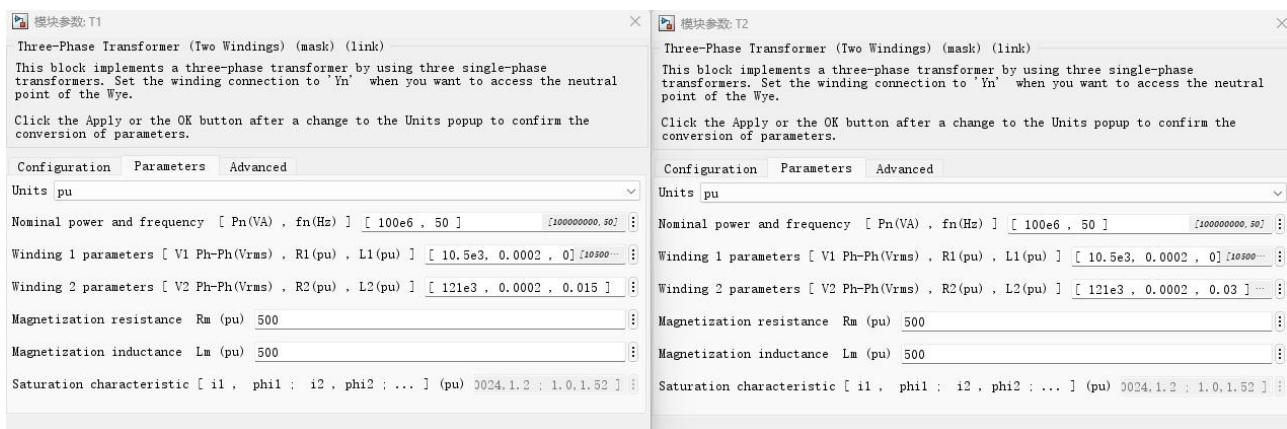


图 5 变压器参数

(2) 得到潮流计算结果见表 1-6;

3. 牛顿-拉夫逊法潮流计算

按照牛顿-拉夫逊法潮流计算的流程编写代码（见附录），得到潮流计算结果。

六、思考题

(回答指导书中的思考题)

1、节点导纳矩阵和雅各比矩阵的特点，并简要分析？

节点导纳矩阵：

节点导纳矩阵是一个对称矩阵，通常较稀疏而且对角占优。这些特点使得节点导纳矩阵直观的反映了各节点之间的连接关系并且易于收敛，便于进行潮流计算。

Jacobi 矩阵：

(1) 直角坐标系下的 Jacobi 矩阵不是对称阵且为 $2(n-1)$ 阶方阵，在使用牛顿-拉夫逊法迭代进行潮流计算的过程中，各元素在每次迭代时均发生变化，计算量和存储空间占用大，同时 Jacobi 矩阵的子块和节点导纳矩阵相对应，为稀疏矩阵，使得 Jacobi 矩阵易于收敛。

(2) 极坐标系下的 Jacobi 矩阵不是对称阵且为 $2(n-1)-r$ 阶方阵，在使用牛顿-拉夫逊法迭代进行潮流计算的过程中，各元素在每次迭代时均发生变化，计算量和存储空间占用大，同时 Jacobi 矩阵的子块和节点导纳矩阵相对应，为稀疏矩阵，使得 Jacobi 矩阵易于收敛。

2、牛顿-拉夫逊潮流分析的基本流程？

(1) 输入原始数据形成节点导纳矩阵 Y，并输入给定节点电压(e,f 或者 U, δ)的迭代初值。节点的编号按照 PQ->PV->V θ 的顺序进行编号。

(2) 开始迭代：

1. 计算每个节点的功率/电压偏移量，如果小于一定值则判定为收敛，此时使用 e,f(U, δ)计算线路的潮流；
2. 如果不收敛，计算 Jacobi 矩阵，通过 Jacobi 矩阵解修正方程从而得到节点电压修正量，加入修正量修正节点电压，迭代次数加一；
3. 重复步骤 1；

3. 对比 MATPOWER 和 Powergui 潮流计算结果，对比分析影响差值的因素为什么？

MathPower 和 Powergui 潮流计算的结果差异不大，可以认为潮流计算的结果均正确，但是仍然存在一定的差值。

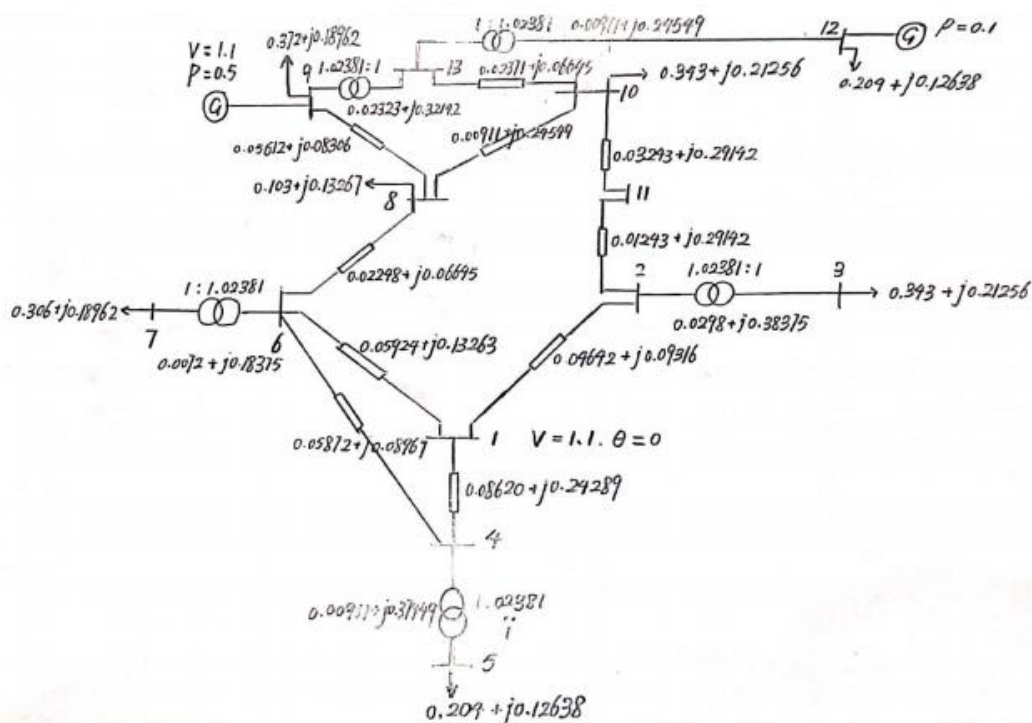
影响差值的因素：

MathPower 在参数设置时仅仅输入的元件的基本参数，其建立的等值电路模型相对简单（仅仅设置支路的电阻、电抗和充电电纳），计算得到的结果相对精确性不高，计算结果偏向于理论计算情况。

Powergui 在参数设置时更加复杂，不仅考虑了输入元件的基本参数，还需要设置元件的其他参数（比如发电机的 dq 轴电抗），计算得到的结果相对更接近真实情况，精确性较高。

同时，二者差异还可能与采用的数值算法，仿真步长和仿真精度设置等方面的区别有

4、根据输入数据简要绘制潮流分析图，记录牛顿-拉夫逊实验输入数据和输出数据。
潮流分析图：



节点导纳矩阵:

[illegible]

0.000	2.530	2.590	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00000	00396	24336	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
00000	70915	15479	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
0i	3i	7i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i
-1.29	0.000	0.000	6.469	-0.061	-5.11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
76847	00000	00000	08840	75158	10881	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
95888	00000	00000	67639	83398	34038	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
81 +	0 +	0 +	5 -	465 +	77 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +
3.656	0.000	0.000	13.97	2.572	7.805	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
55058	00000	00000	41059	35019	02849	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
08982	00000	00000	98652	30942	07911	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
9i	0i	0i	7i	2i	6i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i
0.000	0.000	0.000	-0.061	0.063	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	75158	22189	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
00000	00000	00000	83398	36582	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
0 +	0 +	0 +	465 +	182 -	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +
0.000	0.000	0.000	2.572	2.633	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	35019	59785	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
00000	00000	00000	30942	11917	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
0i	0i	0i	2i	9i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i
-2.80	0.000	0.000	-5.111	0.000	13.00	-0.20	-4.88	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75703	00000	00000	08813	00000	32675	79659	14796	00000	00000	00000	00000	00000
64199	00000	00000	40387	00000	43571	08009	48267	00000	00000	00000	00000	00000
08 +	0 +	0 +	7 +	0 +	3 -	675 +	86 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +
6.285	0.000	0.000	7.805	0.000	32.52	5.307	13.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75383	00000	00000	02849	00000	53988	46327	05850	00000	00000	00000	00000	00000
86854	00000	00000	07911	00000	91735	73302	74648	00000	00000	00000	00000	00000
1i	0i	0i	6i	0i	5i	4i	7i	0i	0i	0i	0i	0i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.20	0.212	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	00000	00000	79659	91757	00000	00000	00000	00000	00000	00000
00000	00000	00000	00000	00000	08009	62793	00000	00000	00000	00000	00000	00000
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	675 +	85 -	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.307	5.433	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	00000	00000	46327	83397	00000	00000	00000	00000	00000	00000
00000	00000	00000	00000	00000	73302	79634	00000	00000	00000	00000	00000	00000
0i	0i	0i	0i	0i	4i	8i	0i	0i	0i	0i	0i	0i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-4.88	0.000	10.61	-5.58	-0.15	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	00000	00000	14796	00000	73953	49587	09569	00000	00000	00000
00000	00000	00000	00000	00000	48267	00000	42248	46740	47241	00000	00000	00000
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	86 +	0 +	9 -	04 +	037 +	0 +	0 +	0 +
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	13.25	0.000	25.58	8.265	4.067	0.000	0.000	0.000
00000	00000	00000	00000	00000	05850	00000	44466	97778	88375	00000	00000	00000
00000	00000	00000	00000	00000	74648	00000	15114	87424	17236	00000	00000	00000
0i	0i	0i	0i	0i	7i	0i	8i	7i	3i	0i	0i	0i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-5.58	5.798	0.000	0.000	0.000	-0.21
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	49587	36252	00000	00000	00000	84849

00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	46740	07735	00000	00000	00000	17893
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	04 +	2 -	0 +	0 +	0 +	226 +
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	8.265	11.21	0.000	0.000	0.000	3.023
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	97778	87216	00000	00000	00000	04874
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	87424	99626	00000	00000	00000	34025
0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	7i	8i	0i	0i	0i	3i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.15	0.000	5.291	-0.37	0.000	-4.76
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	09569	00000	32977	71924	00000	31803
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	47241	00000	70984	91108	00000	38748
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	037 +	0 +	4 -	699 +	0 +	71 +
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.067	0.000	20.80	3.389	0.000	13.34
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	88375	00000	67425	49848	00000	93603
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	17236	00000	66950	16187	00000	33608
0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	3i	0i	7i	8i	0i	3i
0.000	-0.14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.37	0.523	0.000	0.000
00000	60975	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	71924	29007	00000	00000
00000	82021	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	91108	31298	00000	00000
0 +	195 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	699 +	94 -	0 +	0 +
0.000	3.425	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.389	6.814	0.000	0.000
00000	24194	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	49848	74042	00000	00000
00000	30906	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	16187	47094	00000	00000
0i	5i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	8i	3i	0i	0i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.144	-0.14
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	01720	74462
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	23923	51981
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	98 -	361 +
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.880	3.973
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	87629	27995
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	14719	59719
0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	9i	4i
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.21	-4.76	0.000	-0.14	5.137
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	84849	31803	00000	74462	82432
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	17893	38748	00000	51981	97780
0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	0 +	226 +	71 +	0 +	361 +	1 -
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.023	13.34	0.000	3.973	20.51
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	04874	93603	00000	27995	22716
00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	34025	33608	00000	59719	19314
0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	0i	3i	3i	0i	4i	8i

输出数据：

1. 迭代次数：4

2. 节点电压标么值：

1.100	1.046	0.901	1.053	0.969	1.054	0.987	1.057	1.094	1.013	1.031	1.002	1.014
0000	92451	15526	96910	23397	92332	33761	96413	96801	26709	66609	30679	50004
0000	34812	66284	61692	66841	08707	20503	68909	98309	30125	43854	47464	00555
000 +	0 -	16 -	9 -	57 -	3 -	20 -	5 -	1 -	1 -	6 -	4 -	4 -

0.000	0.029	0.148	0.050	0.120	0.057	0.107	0.079	0.105	0.119	0.074	0.143	0.120
0000	62645	02710	01730	07844	77750	32004	00194	09536	10095	82031	98934	83832
0000	67257	14077	87715	78201	99044	14272	83159	40632	01266	40641	26660	72981
000i	846i	07i	231i	54i	159i	32i	422i	78i	27i	323i	59i	63i

3. 节点电压：

电	1.100	1.047	0.913	1.055	0.976	1.056	0.993	1.060	1.100	1.020	1.034	1.012	1.021
压	0000	3436	23208	1552	64391	5043	15313	9097	0000	2427	3756	5965	6712
幅	0000	2263	29467	5300	42235	5567	59569	1471	0000	3489	6178	8383	9382
值	000	107	72	120	43	852	74	899	000	355	889	597	052
电		-1.62	-9.32	-2.71	-7.06	-3.13		-4.27	-5.48	-6.70	-4.14	-8.17	-6.79
压		0955	83116	6998	23908	4922	-6.20	0553	2472	3872	8043	5062	2567
相	0	486	49	3	75	971	34901	854	284	126	597	699	125
角													

4. 节点功率：

1.3359	4.77535	-0.342	3.92214	-0.203	9.45897	-0.306	-0.102	0.1280	-0.343	3.78193	-0.104	1.39027
91006	091782	99999	763757	99999	590114	00000	99999	00000	00000	020141	00000	105280
56213	510e-1	99887	014e-1	99999	422e-1	00000	99999	00018	00000	518e-1	00000	180e-1
+	3 +	21 -	5 +	94 -	5 +	03 -	93 -	9 +	00 -	7 +	07 -	4 +
0.6093	2.23145	0.2125	3.56675	0.1263	1.82773	0.1896	0.1326	0.6661	0.2125	9.18380	0.1263	9.31012
94872	595546	59999	328347	79999	519237	19999	69999	16029	59999	242254	79999	058424
09890	675e-1	91715	138e-1	99988	455e-1	99996	99998	73197	99992	070e-1	99995	244e-1
5i	4i	6i	5i	3i	4i	6i	7i	7i	3i	6i	6i	5i

5. 首末端功率和功率损耗：

各条支路的首端功率 S_i 为(顺序与 B1 一致)：

$$S(1,2)=0.5304+0.36241i$$

$$S(2,3)=0.34882+0.28748i$$

$$S(1,4)=0.26689+0.11375i$$

$$S(4,5)=0.20455+0.14929i$$

$$S(1,6)=0.5387+0.13324i$$

$$S(4,6)=0.056341-0.052439i$$

$$S(6,7)=0.30695+0.21376i$$

$$S(6,8)=0.27271-0.16719i$$

$$S(8,10)=0.1936+0.17254i$$

$$S(8,9)=-0.026132-0.47849i$$

$$S(10,11)=-0.16455-0.027565i$$

$$S(10,13)=0.014604-0.027125i$$

$$S(12,13)=-0.104-0.12638i$$

$$S(2,11)=0.16575+0.043151i$$

$$S(9,13)=0.090418+0.17068i$$

各条支路的末端功率 S_j 为(顺序与 B1 一致)：

$$S(2,1)=-0.51457-0.33064i$$

$$S(3,2)=-0.343-0.21256i$$

$$S(4,1)=-0.26089-0.096853i$$

$$S(5,4)=-0.204-0.12638i$$

$$S(6,1)=-0.52363-0.099484i$$

$$S(6,4)=-0.056028+0.052916i$$

$$S(7,6)=-0.306-0.18962i$$

$$S(8,6)=-0.27047+0.17329i$$

$$S(10,8)=-0.19305-0.15787i$$

$$S(9,8)=0.037582+0.49544i$$

$$S(11,10)=0.16542+0.035358i$$

$$S(13,10)=-0.014582+0.027186i$$

$$S(13,12)=0.10425+0.1331i$$

$$S(11,2)=-0.16542-0.035358i$$

$$S(13,9)=-0.089667-0.16029i$$

各条支路的功率损耗 **DS** 为(顺序与 **B1** 一致):

$$dS(1,2)=0.015831+0.031772i$$

$$dS(2,3)=0.0058182+0.074924i$$

$$dS(1,4)=0.005996+0.016895i$$

$$dS(4,5)=0.00055002+0.022912i$$

$$dS(1,6)=0.015077+0.033755i$$

$$dS(4,6)=0.00031245+0.00047713i$$

$$dS(6,7)=0.00094597+0.024142i$$

$$dS(6,8)=0.0022441+0.0060916i$$

$$dS(8,10)=0.00054431+0.014668i$$

$$dS(8,9)=0.01145+0.016947i$$

$$dS(10,11)=0.00086728+0.0077935i$$

$$dS(10,13)=2.1618e-05+6.0588e-05i$$

$$dS(12,13)=0.00024947+0.0067226i$$

$$dS(2,11)=0.00033242+0.0077935i$$

$$dS(9,13)=0.00075072+0.010387i$$

七、实验体会与建议

机房电脑有点卡。

附件：牛顿拉夫逊文件（填全）

```
1. %% 220330124-舒晟超-电力系统分析实验 1-3
2. clear;
3.
4. n=13;          % 节点数;
5. nl=15;         % 支路数;
6. isb=1;         % 平衡母线节点号;
7. pr=0.00001;   % 误差精度;
8.
9. % B1 矩阵:
10. % [支路首端号; 支路末端号; 支路串联阻抗; 支路对地导纳; 变压器的变比; 支路首端处于 K 侧为 1, 1 侧为 0]
11. B1 =[1          2          0.04642+0.09316i    0          1          0;
12.      2          3          0.0298+0.38375i    0          1.02381    1;
13.      1          4          0.08620+0.24289i    0          1          0;
14.      4          5          0.00911+0.37949i    0          1.02381    1;
15.      1          6          0.05924+0.13263i    0          1          0;
16.      4          6          0.05872+0.08967i    0          1          0;
17.      6          7          0.0072+0.18375i    0          1.02381    1;
18.      6          8          0.02448+0.06645i    0          1          0;
19.      8          10         0.00911+0.24549i    0          1          1;
20.      8          9          0.05612+0.08306i    0          1          0;
21.      10         11         0.03243+0.29142i    0          1          1;
22.      10         13         0.02371+0.06645i    0          1          0;
23.      12         13         0.00911+0.24549i    0          1.02381    1;
24.      2          11         0.01243+0.29142i    0          1          0;
25.      9          13         0.02323+0.32142i    0          1.02381    1];
26.
27. % Bn 矩阵:
28. % [该节点发电机功率; 该节点负荷功率; 节点电压初始值; PV 节点电压 V 的给定值; 节点所接的无功补偿设备的容量; 节点分类标号;
    % 0 为平衡节点; 1 为 PQ 节点; 2 为 PV 节点]
29. Bn=[0          0          1.1          1.1          0          0;
30.      0          0          1          0          0          1;
31.      0          0.343+0.21256i    1          0          0          1;
32.      0          0          1          0          0          1;
33.      0          0.204+0.12638i    1          0          0          1;
34.      0          0          1          0          0          1;
35.      0          0.306+0.18962i    1          0          0          1;
36.      0          0.103+0.13267i    1          0          0          1;
37.      0.5        0.372+0.18962i    1.1        1.1        0          2;
38.      0          0.343+0.21256i    1          0          0          1;
39.      0          0          1          0          0          1;
40.      0.1        0.204+0.12638i    1          0          0          1;
41.      0          0          1          0          0          1];
42.
```

```

43. %% 求导纳矩阵
44. Y=zeros(n);
45. e=zeros(1,n);
46. f=zeros(1,n);
47. V=zeros(1,n);
48. sida=zeros(1,n);
49. S1=zeros(n1);
50.
51. for i=1:n1                                % 支路数
52.     if B1(i,6)==0                            % 左节点处于 1 侧
53.         p=B1(i,1);q=B1(i,2);
54.     else                                    % 左节点处于 K 侧
55.         p=B1(i,2);q=B1(i,1);
56.     end
57.     Y(p,q)=Y(p,q)-1./(B1(i,3)*B1(i,5));        % 非对角元
58.     Y(q,p)=Y(p,q);                            % 非对角元
59.     Y(q,q)=Y(q,q)+1./(B1(i,3)*B1(i,5)^2+B1(i,4)./2; % 对角元 K 侧
60.     Y(p,p)=Y(p,p)+1./B1(i,3)+B1(i,4)./2;        % 对角元 1 侧
61. end
62.
63. % disp('导纳矩阵 Y=');
64. % disp(Y)
65.
66. % 分解导纳阵的实部和虚部
67. G=real(Y);
68. B=imag(Y);
69.
70. %% 电压初值(直角坐标)
71. for i=1:n                                % 给定各节点初始电压的实部和虚部
72.     e(i)=real(Bn(i,3));
73.     f(i)=imag(Bn(i,3));
74.     V(i)=Bn(i,4);                        % PV 节点电压给定模值
75. end
76.
77.
78.
79. %% 功率初值
80. for i=1:n                                % 给定各节点注入功率
81.     S(i)=Bn(i,1)-Bn(i,2);                % i 节点注入功率 SG-SL
82.     B(i,i)=B(i,i)+Bn(i,5);              % i 节点无功补偿
83. end
84. % 分解出各节点注入的有功和无功功率
85. P=real(S);

```

```

86. Q=imag(S);
87.
88. %% Newton--Rapshon 法迭代
89. ICT1=0;
90. IT2=1;
91. N0=2*n;
92. N=N0+1;
93. a=0; % 迭代次数 ICT1, a; 不满足收敛要求的节点数 IT2; N0=2*n; 雅可比矩阵的阶数; N=N0+1: 扩展列
94.
95. while IT2~=0
96.     % 迭代初始化
97.     IT2=0;
98.     a=a+1;
99.     for i=1:n
100.         %% 除平衡节点外其它节点的功率计算
101.         if i~=isb % 非平衡节点
102.             C(i)=0;
103.             D(i)=0;
104.             for j1=1:n
105.                 C(i)=C(i)+G(i,j1)*e(j1)-B(i,j1)*f(j1); %  $\sum(G_{ij}*e_j - B_{ij}*f_j)$ 
106.                 D(i)=D(i)+G(i,j1)*f(j1)+B(i,j1)*e(j1); %  $\sum(G_{ij}*f_j + B_{ij}*e_j)$ 
107.             end
108.             P1=e(i)*(C(i))+f(i)*(D(i)); % 节点功率 P 计
            算  $e i \sum(G_{ij}*e_j - B_{ij}*f_j) + f i \sum(G_{ij}*f_j + B_{ij}*e_j)$ 
109.             Q1=f(i)*(C(i))-e(i)*(D(i)); % 节点功率 Q 计
            算  $f i \sum(G_{ij}*e_j - B_{ij}*f_j) - e i \sum(G_{ij}*f_j + B_{ij}*e_j)$ 
110.             V2=e(i)^2 + f(i)^2; % 电压模平方
111.         %% 针对非 PV 节点来求功率差及 Jacobi 矩阵元素
112.         if Bn(i,6)~=2 % 非 PV 节点
113.             DP=P(i)-P1; % 节点有功功率差
114.             DQ=Q(i)-Q1; % 节点无功功率差
115.             for j1=1:n
116.                 if j1~=isb & j1~=i % 非平衡节点 & 非对角元
117.                     X1=-(G(i,j1)*e(i)+B(i,j1)*f(i)); %  $X1=dP_i/de_j$ 
118.                     X2=B(i,j1)*e(i)-G(i,j1)*f(i); %  $X2=dP_i/df_j$ 
119.                     X3=X2; %  $X3=dQ_i/de_j$   $X3=X2$ 
120.                     X4=-X1; %  $X4=dQ_i/df_j$   $X4=-X1$ 
121.                     p=2*i-1;
122.                     q=2*j1-1;
123.                     J(p,q)=X3; J(p,N)=DQ; m=p+1; %  $X3=dQ/de$   $J(p,N)=DQ$  节点无功功率差
124.                     J(m,q)=X1; J(m,N)=DP; q=q+1; %  $X1=dP/de$   $J(m,N)=DP$  节点有功功率差
125.                     J(p,q)=X4; J(m,q)=X2; %  $X4=dQ/df$   $X2=dp/df$ 
126.                 elseif j1==i & j1~=isb % 非平衡节点 & 对角元

```

```

127.          X1=-C(i)-G(i,i)*e(i)-B(i,i)*f(i);          % X1=dPi/dei
128.          X2=-D(i)+B(i,i)*e(i)-G(i,i)*f(i);          % X2=dPi/dfi
129.          X3=D(i)+B(i,i)*e(i)-G(i,i)*f(i);          % X3=dQi/dei
130.          X4=-C(i)+G(i,i)*e(i)+B(i,i)*f(i);          % X4=dQi/dfi
131.          p=2*i-1;q=2*j1-1;J(p,q)=X3;J(p,N)=DQ;      %扩展列△Q
132.          m=p+1;
133.          J(m,q)=X1;q=q+1;J(p,q)=X4;J(m,N)=DP;        %扩展列△P
134.          J(m,q)=X2;
135.          end
136.          end
137.          else
138.          %% 针对 PV 节点来求取 Jacobi 矩阵的元素
139.          DP=P(i)-P1;          % PV 节点有功误差
140.          DV=V(i)^2-V2;          % PV 节点电压误差
141.          for j1=1:n
142.              if j1~=isb & j1~=i          % 非平衡节点 & 非对角元
143.                  X1=-(G(i,j1)*e(i)+B(i,j1)*f(i));      % X1=dPi/dej
144.                  X2=B(i,j1)*e(i)-G(i,j1)*f(i);          % X2=dPi/dfj
145.                  X5=0;          % X5=dvi2/dej
146.                  X6=0;          % X6=dvi2/dfj
147.                  p=2*i-1;q=2*j1-1;J(p,q)=X5;J(p,N)=DV; % PV 节点电压误差
148.                  m=p+1;
149.                  J(m,q)=X1;J(m,N)=DP;q=q+1;J(p,q)=X6;  % PV 节点有功误差
150.                  J(m,q)=X2;
151.              elseif j1==i & j1~=isb          % 非平衡节点 & 对角元
152.                  X1=-C(i)-G(i,i)*e(i)-B(i,i)*f(i);      % X1=dPi/dei
153.                  X2=-D(i)+B(i,i)*e(i)-G(i,i)*f(i);      % X2=dPi/dfi
154.                  X5=-2*e(i);          % X5=dvi2/dei
155.                  X6=-2*f(i);          % X6=dvi2/dfi
156.                  p=2*i-1;q=2*j1-1;J(p,q)=X5;J(p,N)=DV; % PV 节点电压误差
157.                  m=p+1;
158.                  J(m,q)=X1;J(m,N)=DP;q=q+1;J(p,q)=X6;  % PV 节点有功误差
159.                  J(m,q)=X2;
160.              end
161.          end
162.          end
163.          end
164.          end
165.          %% 将 Jacobi 矩阵化成单位矩阵
166.          for k=3:N0          % N0=2*n (从第三行开始, 第一、二行是平衡节点)
167.              k1=k+1;N1=N;          % N=N0+1 即 N=2*n+1 扩展列△P、△Q 或 △U
168.              for k2=k1:N1          % 从 k+1 列的 Jacobi 元素到扩展列的△P、△Q 或 △U
169.                  J(k,k2)=J(k,k2)./J(k,k);% 用 K 行 K 列对角元素去除 K 行 K 列后的非对角元素进行规格化
170.              end

```

```

171.         J(k,k)=1;           % 对角元规格化 K 行 K 列对角元素赋 1
172.         %% 回代运算
173.         if k~=3             % 不是第三行 k > 3
174.             k4=k-1;
175.             for k3=3:k4      % 用 k3 行从第三行开始到当前行的前一行 k4 行消去
176.                 for k2=k1:N1 % k3 行后各行上三角元素
177.                     J(k3,k2)=J(k3,k2)-J(k3,k)*J(k,k2); % 消去运算（当前行 k 列元素消为 0）
178.                 end        % 用当前行 K2 列元素减去当前行 k 列元素乘以第 k 行 K2
列元素
179.                 J(k3,k)=0; % 当前行第 k 列元素已消为 0
180.             end
181.             if k==N0        % 若已到最后一行
182.                 break;
183.             end
184.         %% 前代运算
185.         for k3=k1:N0        % 从 k+1 行到 2*n 最后一行
186.             for k2=k1:N1    % 从 k+1 列到扩展列消去 k+1 行后各行下三角元素
187.                 J(k3,k2)=J(k3,k2)-J(k3,k)*J(k,k2); % 消去运算
188.             end            % 用当前行 K2 列元素减去当前行 k 列元素乘以第 k 行 K2
列元素
189.             J(k3,k)=0;      % 当前行第 k 列元素已消为 0
190.         end
191.     else                    % 是第三行 k=3
192.         %% 第三行 k=3 的前代运算
193.         for k3=k1:N0        % 从第四行到 2n 行（最后一行）
194.             for k2=k1:N1    % 从第四列到 2n+1 列（即扩展列）
195.                 J(k3,k2)=J(k3,k2)-J(k3,k)*J(k,k2); % 消去运算（当前行 3 列元素消为 0）
196.             end            % 用当前行 K2 列元素减去当前行 3 列元素乘以第三行 K2
列元素
197.             J(k3,k)=0;      % 当前行第 3 列元素已消为 0
198.         end
199.     end
200. end
201.
202. for k=3:2:N0-1
203.     L=(k+1)./2;
204.     e(L)=e(L)-J(k,N);      % 修改节点电压实部
205.     k1=k+1;
206.     f(L)=f(L)-J(k1,N);     % 修改节点电压虚部
207. end
208.
209. % 修改节点电压
210. for k=3:N0

```

```

211.     DET=abs(J(k,N));
212.     if DET>=pr           % 电压偏差量是否满足要求
213.         IT2=IT2+1;       % 不满足要求的节点数加 1
214.     end
215. end
216. ICT2(a)=IT2;           % 不满足要求的节点数
217. ICT1=ICT1+1;          % 迭代次数
218. end
219.
220. disp('迭代次数: ');
221. disp(ICT1);
222. disp('没有达到精度要求的个数: ');
223. disp(ICT2);
224. for k=1:n
225.     V(k)=sqrt(e(k)^2+f(k)^2);           % 计算各节点电压的模值
226.     sida(k)=atan(f(k)./e(k))*180./pi;   % 计算各节点电压的角度
227.     E(k)=e(k)+f(k)*j;                   % 将各节点电压用复数表示
228. end
229. %% 计算各输出量
230. disp('各节点的实际电压标幺值 E 为(节点号从小到大排列): ');
231. disp(E);    %显示各节点的实际电压标幺值 E 用复数表示
232. disp('各节点的电压大小 V 为(节点号从小到大排列): ');
233. disp(V);     %显示各节点的电压大小 V 的模值
234. disp('各节点的电压相角 sida 为(节点号从小到大排列): ');
235. disp(sida);   %显示各节点的电压相角
236. for p=1:n
237.     C(p)=0;
238.     for q=1:n
239.         C(p)=C(p)+conj(Y(p,q))*conj(E(q)); %计算各节点的注入电流的共轭值
240.     end
241.     S(p)=E(p)*C(p);      %计算各节点的功率 S = 电压 X 注入电流的共轭值
242. end
243. disp('各节点的功率 S 为(节点号从小到大排列): ');
244. disp(S);               %显示各节点的注入功率
245. disp('各条支路的首端功率 Si 为(顺序与 B1 一致): ');
246. for i=1:n1
247.     p=B1(i,1);q=B1(i,2);
248.     if B1(i,6)==0
249.         Si(p,q)=E(p)*(conj(E(p))*conj(B1(i,4)./2)+(conj(E(p))*B1(i,5))...
250.         -conj(E(q))*conj(1./(B1(i,3)*B1(i,5))));
251.         Siz(i)=Si(p,q);
252.     else
253.         Si(p,q)=E(p)*(conj(E(p))*conj(B1(i,4)./2)+(conj(E(p))./B1(i,5))...
254.         -conj(E(q))*conj(1./(B1(i,3)*B1(i,5))));
255.         Siz(i)=Si(p,q);

```



```

256.         end
257.         disp(Si(p,q));
258.         SSi(p,q)=Si(p,q);
259.         ZF=[ 'S(',num2str(p),',',',num2str(q),')=' ,num2str(SSi(p,q))];
260.         disp(ZF);
261.     end
262.     disp('各条支路的末端功率 Sj 为(顺序与 B1 一致): ');
263.     for i=1:n1
264.         p=B1(i,1);q=B1(i,2);
265.         if B1(i,6)==0
266.             Sj(q,p)=E(q)*(conj(E(q))*conj(B1(i,4)./2)+(conj(E(q)./B1(i,5))...
267.             -conj(E(p)))*conj(1./(B1(i,3)*B1(i,5))));
268.             Sji(i)=Sj(q,p);
269.         else
270.             Sj(q,p)=E(q)*(conj(E(q))*conj(B1(i,4)./2)+(conj(E(q)*B1(i,5))...
271.             -conj(E(p)))*conj(1./(B1(i,3)*B1(i,5))));
272.             Sji(i)=Sj(q,p);
273.         end
274.         disp(Sj(q,p));
275.         SSj(q,p)=Sj(q,p);
276.         ZF=[ 'S(',num2str(q),',',',num2str(p),')=' ,num2str(SSj(q,p))];
277.         disp(ZF);
278.     end
279.     disp('各条支路的功率损耗 DS 为(顺序与 B1 一致): ');
280.     for i=1:n1
281.         p=B1(i,1);q=B1(i,2);
282.         dS(i)=Si(p,q)+Sj(q,p);
283.         disp(dS(i));
284.         ddS(i)=dS(i);
285.         ZF=[ 'dS(',num2str(p),',',',num2str(q),')=' ,num2str(ddS(i))];
286.         disp(ZF);
287.     end

```