



Equation Chapter 1 Section 1

电网规划课程设计（一）



长沙理工大学

电网规划课程设计

题 目:

学 院: 电气与信息工程学院

班 级: 电气 2307 班

姓 名(电子签名): 王子成

学 号: 202310080241

同组设计者: 祝小宝、陈圣捷

指导教师: 马瑞

任务起止日期:

课 程 设 计 用 纸

基于潮流计算的电网规划设计问题

教师批阅

摘要

根据微分几何中的曲面论，用两个变量就可以完全参数化一个二维曲面。也就是说，当一个粒子约束在曲面上运动时，只需要两个独立的变量就可以完全刻画粒子的运动。

粒子的运动。

.....

.....

.....发现规范相因子会自然出现在动能算符中。

关键词：量子力学；算符次序；厄密算符；正则量子化；规范变换

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

一. 设计任务重述

1.1 设计任务背景

电力作为现代经济社会运行的基础性能源载体，是国民经济高质量发展与人民生活品质提升的重要保障。与一般商品不同，电能难以实现大规模、低成本的长周期储存，其“生产—输送—分配—消费”在时间尺度上高度同步，对电力系统规划、建设与运行提出了更高要求。随着经济结构升级、城市化进程推进以及数字经济、先进制造业快速发展，电力需求总量与用电负荷特性持续演变，电网承载能力、供电可靠性与安全韧性面临新的挑战。

在“双碳”目标与能源绿色低碳转型背景下，我国电力系统正加速由传统化石能源主导向以新能源为主体的“新型电力系统”演进。风电、光伏等可再生能源装机规模快速增长，其间歇性、波动性与随机性显著提高了电力平衡和系统调控难度；同时，储能、抽水蓄能、灵活调节电源、需求响应等多元调节资源加快发展，电力系统由“源随荷动”逐步向“源网荷储协同互动”转变。新能源汽车普及带来的充电负荷增长、车网互动潜力释放，以及分布式电源与微电网的广泛接入，也使配电网从单向供电向双向潮流、主动运行转型，对规划理念、技术路径与工程方案提出了更高要求。

电网规划是电力工程前期工作的核心环节之一，直接关系到电源开发、网架结构、输电通道、变电布点及配电网建设的方向与节奏。科学的电网规划应在国家产业政策与区域能源资源禀赋约束下，统筹安全性、经济性与可持续性，兼顾短期可实施性与长期可扩展性：一方面要满足不断增长且结构变化明显的负荷需求，保障供电可靠性与电能质量；另一方面要适应新能源高比例接入、电力市场化改革与跨区互济格局深化，提升系统灵活性、消纳能力与极端天气下的抗扰动与快速恢复能力。

本次电网规划课程设计的任务，旨在面向规划期电力系统发展需求，根据给定发电厂、变电所原始资料，检验系统的功率平衡和确定电厂的运行方式，研究合理的电源与网架布局方案，论证输电方式、网络结构、变电容量与布点等关键技术原则，并对必要的技术经济指标进行比较评价。在此基础上，提出可实施、可扩展、满足安全稳定要求且兼顾经济的电网建设与运行发展建议，为后续工程

课程设计用纸

教师批阅

设计与建设决策提供依据。

1.2 待规划问题

近年来国民经济持续增长、产业结构加速升级叠加城镇化推进，使区域负荷规模与峰谷特性不断变化，迫使电网规划在安全性、可靠性与经济性之间进行更高水平的统筹优化。电力部门需以用户对电能质量与供电连续性的要求为牵引，面向规划期负荷增长与运行边界变化，提前完善网架结构、提升供电能力与系统韧性。

在某地区拟开展 220kV 主网架输电场景的规划设计：鉴于现有电厂出力与供电能力已难以满足负荷持续攀升带来的电力平衡与可靠性约束，需在规划期内新增电源及配套变电设施，其中 A 为拟建火力发电厂，1、2、3 为拟建变电所，并通过合理的线路通道与接线方案接入上级电网（以 S 表示无穷大电源系统）实现外部支撑与功率交换。

本规划问题的核心在于在满足 N-1、技术比较与经济比较等安全稳定要前提下，确定电网接线方案，形成可实施、可扩展且兼顾投资与运行成本的主网架建设方案。*Equation Chapter (Next) Section 1*

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

二. 任务步骤分析

由于我们关于待规划地区的原始资料主要为其地理接线图、各点地理距离、发电厂参数、负荷数据及有关要求、无穷大电源系统，因此我们主要从基本参数计算与有功功率平衡、电力网接线方案的初步设定与筛选、最终推荐方案确定、变压器的选择与计算、电力系统潮流计算以及无功平衡与调压计算这六个主要方面进行电网规划设计的考虑。

Equation Chapter (Next) Section 1

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

三. 符号说明

变量符号	符号含义	符号单位
P_{Gi}	发电厂 i 输出的有功功率	MW
Q_{Gi}	发电厂 i 输出的无功功率	MVar
$P_{L\max \cdot i}$	负荷 i 最大负荷时吸收的有功功率	MW
$Q_{L\max \cdot i}$	负荷 i 最大负荷时吸收的无功功率	MVar
$P_{L\min \cdot i}$	负荷 i 最小负荷时吸收的有功功率	MW
$Q_{L\min \cdot i}$	负荷 i 最小负荷时吸收的无功功率	MVar
P_i	电气节点 i 注入有功功率	MW
Q_i	电气节点 i 注入无功功率	MVar
U_i	电气节点 i 电压幅值	kV
θ_i	电气节点 i 电压相角	deg
$\cos \varphi_i$	电气节点 i 功率因数	
\tilde{S}_{ij}	电气节点 i, j 间支路流动功率	MVA
ΔS_{ij}	电气节点 i, j 间支路损耗	MVA
$T_{\max \cdot i}$	负荷 i 最大负荷利用小时数	h
$\tau_{\max \cdot i}$	负荷 i 最大负荷损耗时间	h
$\Delta U_{\max} \%$	系统的最大电压偏移量	
AC_m	折算到工程建成年的年费用	千元
$S_{T \cdot i}$	第 i 台变压器的额定容量	MVA
$U_{t \cdot i}$	变压器高压绕组分接头电压	kV

Equation Chapter Next Section 1

课程设计用纸

教师批阅

四. 基本参数计算与有功功率平衡

4.1 基本参数计算

本节将对原始资料所给出的参数与数据,以及研究过程中延伸所需的相关参数,开展系统性的计算、分析与阐释。

4.1.1 发电厂、变电所相对地理位置及距离

为方便表达,在地理位置上我们将电网待规划地区当中的 A,S 两点分别记作点 4,5,则各地点地理位置示意图如图 4-1:

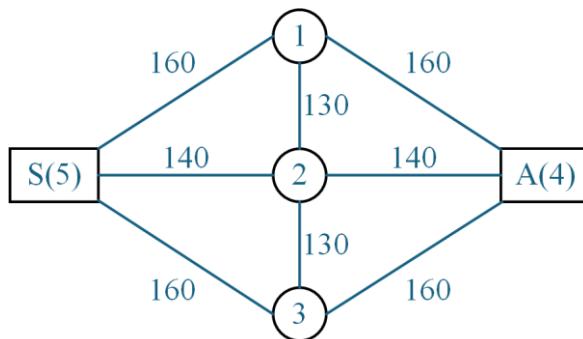


图 4-1 电网待规划地区发电厂、变电所相对地理位置及距离

在研究中,以 d_{ij} 表示地理位置点 i 和点 j 之间的直线距离,由于原始资料中未说明需要考虑直线距离基数与实际距离的区别,因此直接采用原始资料数据。据此构建矩阵 \mathbf{D} 为:

$$\mathbf{D} = (d_{ij})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 00.00 & 130 & 260 & 160 & 160 \\ 130 & 00.00 & 130 & 140 & 140 \\ 260 & 130 & 00.00 & 160 & 160 \\ 160 & 140 & 160 & 00.00 & 280 \\ 160 & 140 & 160 & 280 & 00.00 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

根据各节点相对地理位置可初步分析得出:待规划区域可能为 220kV 主网架结构,采用双端支撑的网状闭环拓扑结构,以无穷大电源 S 和待建火电厂 A 为双侧电源支撑点,变电站 1、2、3 可通过纵向联络线及双侧电源出线形成多组闭合电气回路。其中无穷大电源可以看作电压恒定、频率固定 50Hz、内阻为零的理想电压源。

4.1.2 发电厂技术参数

课程设计用纸

教师批阅

根据原始数据有，该待建火力发电厂 A(5) 装机 $2 \times 340 \text{ MW}$ 、机端额定电压 20 kV 、额定功率因数 $\cos\varphi_N = 0.8$ ，且最小运行方式为 1 台机运行。

对于发电厂 i ，为三相交流系统，其发出的复功率 \dot{S}_{Gi} 与功率因数角 φ_{Gi} 之间有如下关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{S}_{Gi} = \sqrt{3} U_{Gi} I_{Gi}^* \\ P_{Gi} = \sqrt{3} U_{Gi} I_{Gi} \cos\varphi_{Gi} \\ Q_{Gi} = \sqrt{3} U_{Gi} I_{Gi} \sin\varphi_{Gi} \\ |\tilde{S}_{Gi}| = \sqrt{P_{Gi}^2 + Q_{Gi}^2} = \frac{P_{Gi}}{\cos\varphi_{Gi}} = \sqrt{3} U_{Gi} I_{Gi} \\ \tan\varphi_{Gi} = \frac{Q_{Gi}}{P_{Gi}} \\ \tilde{S}_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \end{array} \right. \quad (4-2)$$

结合原始资料参数整理可得表 4-1：

表 4-1 发电厂技术参数

发电厂参数	值	备注
机组台数	2	火力发电机
每台机组额定有功 P_{GNi}	340	MW
每台机组额定无功 Q_{GNi}	255	MVar
额定视在功率 $ \dot{S}_{GNi} $	425	MVA
机端额定线电压 U_{GNi}	20	kV
机端母线电流 I_{GNi}	12.27	kA
总装机容量	$2 \times 340 = 680$	MW
无功能力	$2 \times 255 = 510$	MVar
总视在功率	$2 \times 425 = 850$	MVA

最小运行方式 1 台机运行说明要做单机方式 (N-1) 下的潮流与电压校核，对主变配置、无功与电压支撑和接线可靠性提出要求。从规模上看可认为该火力发电厂为属于大型凝气式火电厂，厂用电率取 10%。

课程设计用纸

教师批阅

4.1.3 负荷数据及有关要求

由于原始资料中未说明需要考虑负荷基数与实际负荷的区别，因此直接采用原始资料数据。对原始数据进行整理得表 4-2：

表 4-2 负荷参数

模块分类	项目	单位	A	1	2	3
负荷基础参数	最大负荷	MW	70	270	260	280
	最小负荷	MW	24	95	85	90
	功率因数	—	0.80	0.80	0.90	0.85
	T_{\max}	h	5000	5500	5000	5000
	负荷电压	kV	10	10	10	10
无功负荷参数	最大无功负荷	MVar	52.5	202.5	125.92	173.52
	最小无功负荷	MVar	18	71.25	41.17	55.77
年电量参数	年最大负荷 用电量	MWh	350000	1485000	1300000	1300000
调压参数	调压范围	%	0~5	2~5	0~5	2~7
	调压方式	—	逆调压	常调压	逆调压	顺调压
负荷分类	I类负荷占比	%	35	10	30	0
	II类负荷占比	%	25	35	30	25
	III类负荷占比	%	40	55	40	75

分析可得各节点负荷波动较大三座变电站最终都要向 10 kV 配电侧供电。总最大有功负荷为 880MW，总最小有功负荷为 294MW；最大负荷时总无功需求约 554.44MVar，最 x 小负荷时总无功需求约 186.19MVar，最大负荷时无功需求大，且变电所 1 和发电厂 A 因功率因数为 0.8 是主要无功消耗点。

由无穷大电源或火力发电厂提供电能后，对于负荷 j 有：

$$\begin{cases} \tilde{S}_{Lj} = P_{Lj} + jQ_{Lj} \\ Q_{Lj} = P_{Lj} \tan \varphi_{Lj} \end{cases} \quad (4-3)$$

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

上式中， \dot{S}_{Lj} 为负荷 j 吸收的复功率， φ_{Lj} 为负荷 j 的功率因数角。

则待规划区域系统中总的节点注入功率为

$$\tilde{S}_S = P_S + jQ_S = \tilde{S}_{GS} + \tilde{S}_{Gi} - \tilde{S}_{LS} \quad (4-4)$$

上式中 \dot{S}_{GS} 为无穷大电源系统 S 提供的电能。

结合表 4-2 与式(4-4)可知系统中的各节点注入功率，结果见表 4-3：

表 4-3 各节点注入功率

节点编号	A(4)	1	2	3
最大负荷时 $\dot{S}_{j\max}$	-70-j52.5	-270-j202.5	-260-j125.92	-280-j173.52
最小负荷 $\dot{S}_{j\min}$	-24-j18	-95-j71.25	-85-j41.17	-90-j55.77

4.2 有功功率平衡

有功电源关乎电网频率稳定与负荷正常运行，因此我们需要检验该系统的有功功率平衡，若有功容量不足则应进行补充。综合考虑负荷、负荷的同时系数、网损、厂用电，以及备用容量，在检验系统最大负荷时的有功平衡时，可按下列各式依次计算：

用电负荷：

$$P_y = k_1 \sum_{i=1}^n P_{Lmax \cdot i} \quad (4-5)$$

供电负荷：

$$P_g = \frac{1}{1-k_2} P_y \quad (4-6)$$

发电负荷：

$$P_f = P_g + \sum_{j=1}^m P_{z,j} + \sum_{i=1}^m k_{3,i} P_{Gi} \quad (4-7)$$

式中 $\sum_{i=1}^n P_{Lmax \cdot i}$ 表示 n 个变电所最大负荷之和；

$\sum_{i=1}^m k_{3,i} P_{Gi}$ 表示 m 个发电厂装机容量之和；

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

k_1 表示负荷的同时系数，近似取 0.9；

k_2 表示网损率，近似取 5%；

$k_{3,i}$ 表示第 i 个发电厂的厂用电率，其取值与电厂类型相关，本规划中的大型凝气式火电厂，厂用电率取 10%；

$\sum_{j=1}^m P_{z,j}$ 表示 m 个发电厂的直配负荷。

按规定系统内的总装机容量应大于发电负荷 $\sum P_G > P_f$ ，即系统内应有足够的备用容量，且系统的总备用容量不得低于系统最大发电负荷的 10%，亦即系统的总装机容量应大于或等于系统最大发电负荷的 1.1 倍。如果不满足该情况，即还缺少电源，则需要尽早规划新建相应的电源。

在本研究中， $m = 1, n = 3, P_{z,1} = 70, k_{3,1} = 10\%$ ，得出计算结果如表 4-4：

表 4-4 待规划地区的有功平衡计算结果

参数	数值(MW)
用电负荷 P_y	729
供电负荷 P_g	767.37
发电负荷 P_f	905.37
孤岛功率缺口 $P_{\text{缺}}$	-225.37
备用要求 $P_{\text{备}}$	90.54
系统功率盈亏 $\sum_{i=1}^2 P_{Gni} - 1.1P_f$	-315.91

该地区仅配置火电厂 A 时，最大负荷下需从无穷大电源系统 S 受电约 225.37MW；按 10% 备用标准，则在最不利条件下需具备约 315.91MW 的外部支撑能力，地区内电源不足部分由 S 经联络线受电补足。

Equation Chapter (Next) Section 1

课程设计用纸

教师批阅

五. 初步接线方案的选择

5.1 负荷类型辨析

I类负荷：该类负荷是对供电可靠性要求最高的负荷，中断供电将引发极其严重的后果。其核心定义为：中断供电会造成人身伤亡，或导致重大设备损坏、重大经济损失，或破坏国家重要公共设施功能、引发系统性瘫痪的负荷。从供电可靠性要求来看，I类负荷必须具备“不间断供电”能力，通常采用双电源供电模式，且双电源需满足“独立可靠”要求。

II类负荷：该类负荷对供电可靠性的要求仅次于I类负荷，中断供电会造成较大危害，但未达到灾难性程度。其定义为：中断供电将造成较大经济损失，或导致公共场所秩序严重混乱，影响社会正常运转的负荷。供电可靠性要求方面，II类负荷需保障“尽量减少供电中断时间”，通常采用备用电源供电模式。

III类负荷：该类负荷是对供电可靠性要求最低的负荷，中断供电造成的危害程度较小，仅影响局部功能或产生轻微经济损失。其定义为：中断供电不会造成人身伤亡、重大经济损失，仅会影响部分次要功能正常运转的负荷。供电可靠性要求上，III类负荷无需特殊供电保障，采用单电源供电即可满足需求。

待规划地区中，发电厂和变电所的负荷类型如图 5-1 所示：

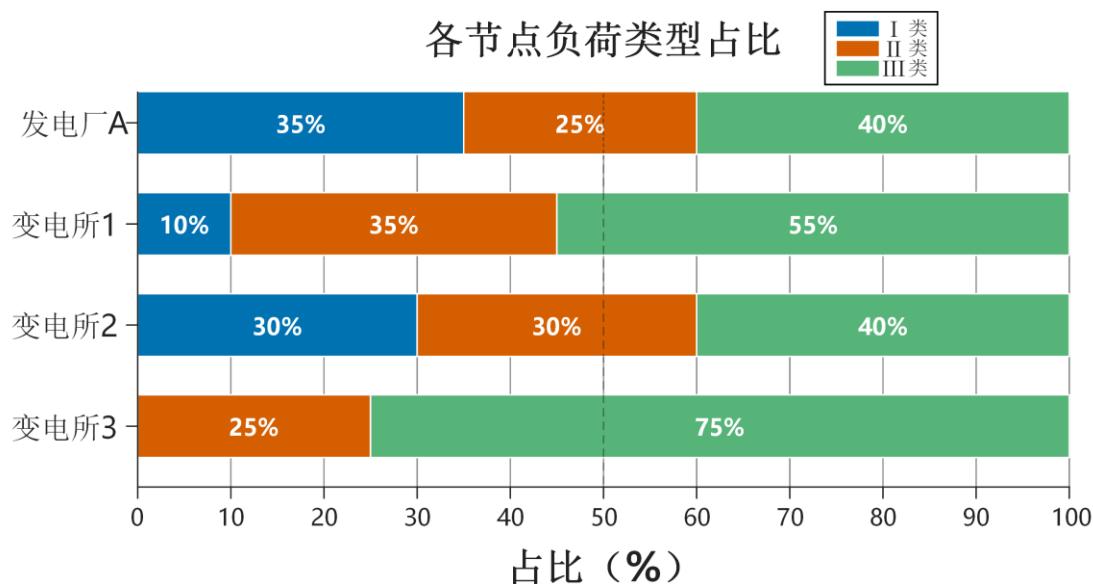


图 5-1 负荷类型占比

观察图像可知，发电厂 A 与变电所 2 中一二级负荷比例较高，变电所 1 次

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

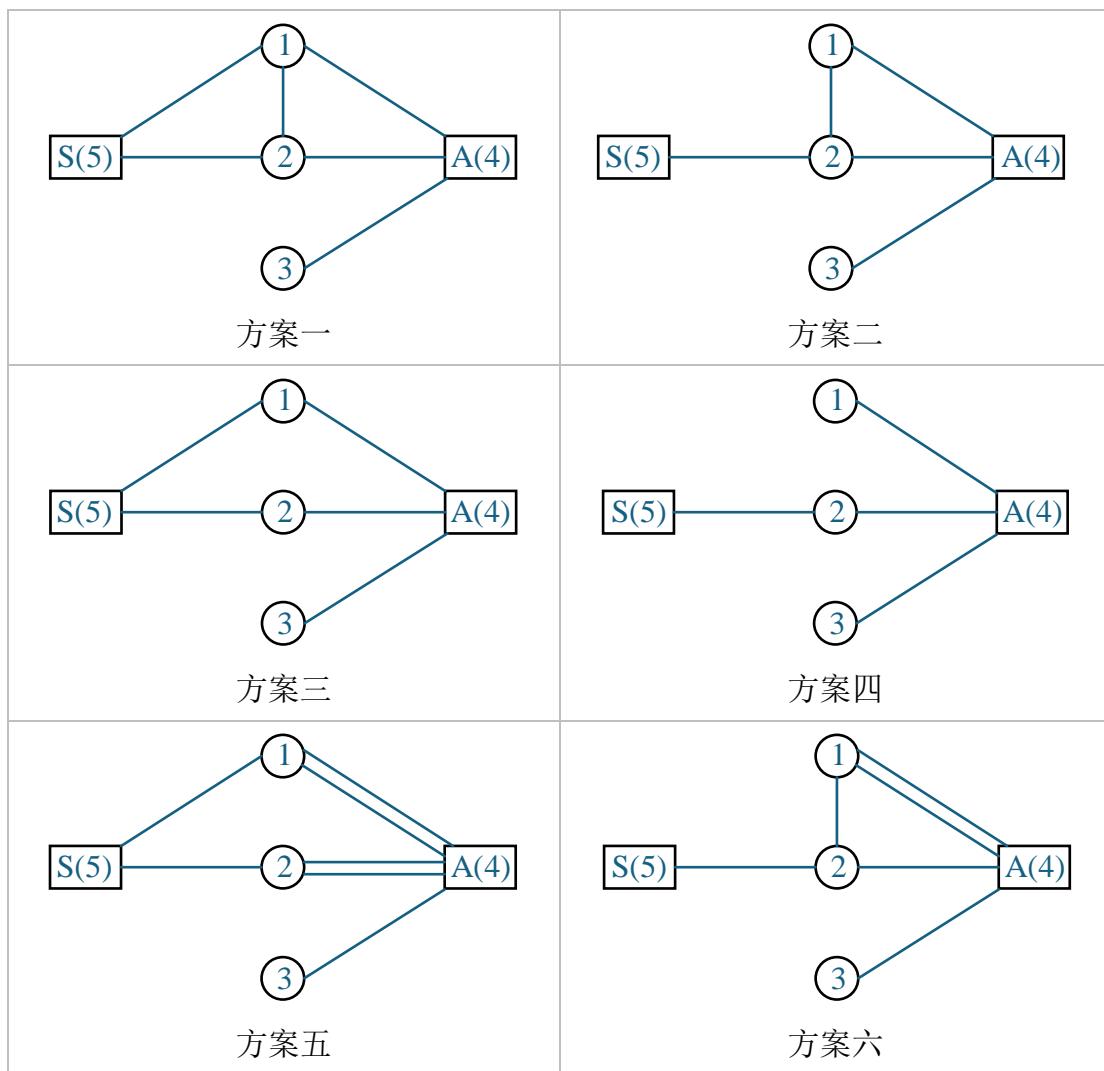
之，变电所 3 最次，则供电重要程度为：发电厂 A=变电所 2>变电所 1>变电所 3。于是我们在设计接线方案时多采用有备用的接线方式——双端供电、双回路供电。

5.2 初步接线方案

5.2.1 初步接线方案示意图

依照上述章节的分析，我们将规划网络视为均一网，进一步设计了以下初步接线方案：

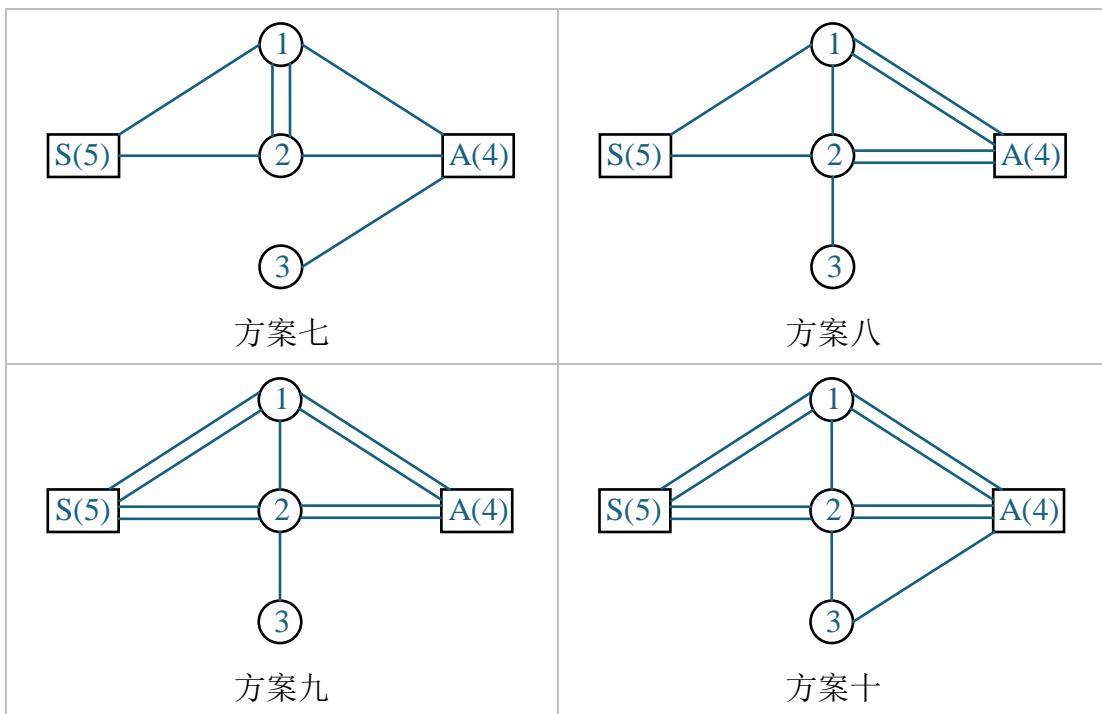
表 5-1 可供选择的初步接线方案



课程设计用纸

教师批阅

(续表 5-1)



5.2.2 初步接线方案的对比模型的建立

首先，我们先对接线方案的供电可靠性进行比较——假设任意一条输电线断开，观察是否有重要负荷无法得到供电。分析上述方案我们可以发现，若“方案四”中连接发电厂 A 与变电所 1 的输电线断开，则变电所 1 中的一、二级负荷无法得到有效供电，故先排除“方案四”。其他接线方案都具有良好的供电可靠性。

剩余方案运行维护的灵活性和网络的可扩展性和未来发展的适应性都较佳。

接下来我们将系统视为电压等级和线路参数相同的均一网络，通过对不同方案所确定的电力系统进行初步功率分布计算，并联合相关技术和经济指标来比较不同方案然后加以筛选。

记 $n = 5$ 为完成折算后系统中独立电气节点个数，初步功率分布计算时认为独立电气节点与独立地理节点序号相同。

用 0-1 逻辑变量 f_{ij} 表示独立电气节点 i 和 j 之间的连接关系：

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{点 } i \text{ 和点 } j \text{ 之间有输电线} \\ 0, & \text{点 } i \text{ 和点 } j \text{ 之间无输电线} \end{cases}$$

通过对接线方案的技术、经济的定性分析，本研究设置以下优化目标：

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

为使得所确定接线方案的电能质量更高，则设置目标函数 1：

$$\min Z_1 = \max S_l D_l \quad (5-1)$$

为使得所确定接线方案的线路投资尽可能少，则设置目标函数 2：

$$\min Z_2 = \sum_{l=1}^L D_l \quad (5-2)$$

为使得所确定接线方案的线路损耗尽量低，则设置目标函数 3：

$$\min Z_3 = \sum_l^L D_l S_l^2 \quad (5-3)$$

上述表达式中， L 为方案系统中输电线路总数， D_l 为第 l 条线路的长度， S_l 为第 l 条线路的流动功率，有：

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (5-4)$$

为更好对输电线路进行描述，我们将“第 l 条输电线路”的表述更改为“独立电气节点 i 和 j 之间的输电线路”，同时引入整数变量 a ：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间不为双回路输电线} \\ 2, & \text{点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间为双回路输电线} \end{cases} \quad (5-5)$$

分析可知，约束条件有：点 i 和 j 点之间不建线时 a_{ij} 必然为 1；点 i 和 j 点之间为双回路输电线时 f_{ij} 必然为 1；该网架为无向图，功率被认为可以双向流动。通过引入混合整数线性规划（MILP）中的 Big-M 逻辑约束，得出以下关系式：

$$\begin{cases} -10f_{ij} \leq 1 - a_{ij} \leq 10f_{ij} \\ -10(2 - a_{ij}) \leq 1 - f_{ij} \leq 10(2 - a_{ij}) \\ a_{ij} = a_{ji} \text{ 且 } f_{ij} = f_{ji} \end{cases} \quad (5-6)$$

令 ΔS_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的流动功率，则目标函数可以等价转换为：

课程设计用纸

教师批阅

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Z_1 = \max \frac{d_{ij} f_{ij} \Delta S_{ij}}{a_{ij}} \\ \min Z_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} a_{ij} f_{ij} \\ \min Z_3 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij} f_{ij} \Delta S_{ij}^2}{a_{ij}} \end{array} \right. \quad (5-7)$$

忽略对地导纳支路，设均一网络中线路单位阻抗为 $z_1 = r_1 + jx_1$ ，则节点 i 和节点 j 之间的阻抗为：

$$Z_{ij} = \frac{z_1 d_{ij}}{a_{ij} f_{ij}}, y_{ij} = \frac{a_{ij} f_{ij}}{z_1 d_{ij}} \quad (5-8)$$

对于节点 i 有：

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5-9)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5-10)$$

$$\Delta S_{ij} = \sqrt{(P_i - P_j)^2 + (Q_i - Q_j)^2} \quad (5-11)$$

其中， P_i, Q_i 分别为节点 i 的注入有功功率、无功功率， U_i, θ_i 分别为节点 i 的电压幅值和相角， $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ， G_{ij}, B_{ij} 分别为系统节点导纳矩阵的实部和虚部。

在初步功率分布计算中，我们将系统 S 视为平衡节点，折算后电压均为系统额定电压，则此时系统 S 的注入功率满足：

$$\tilde{S}_S = \tilde{S}_{GS} - \tilde{S}_{LS} \quad (5-12)$$

其中 \tilde{S}_{LS} 为定值 $1.1 P_f$ 。

把火力发电厂 A 视为 PQ 节点，认为满载运行，则 A 的两台机组注入功率满足：

$$\tilde{S}_A = (1 - k_{3,1}) \tilde{S}_{GNA} \quad (5-13)$$

将其他节点均视作 PQ 节点，负荷均以最大负荷运行，所以节点 i 的注入功

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

率为：

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \tilde{S}_{G_i} - \tilde{S}_{L_i} \quad (5-14)$$

设独立电气节点*i*和节点*j*之间的输电线路流动功率为 \tilde{S}_{ij} ，则

$$\tilde{S}_{ij} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* = \dot{U}_i [\dot{U}_i^* y_{i0}^* + (\dot{U}_i^* - \dot{U}_j^*) y_{ij}^*] \quad (5-15)$$

$$\Delta S_{ij} = |\tilde{S}_{ij} + \tilde{S}_{ji}| \quad (5-16)$$

其中， y_{ij} 是电气节点*i*和节点*j*之间的互导纳， y_{i0} 是节点*i*对地导纳。

综上所述，关于初步接线方案的比较，本研究建立了一个多目标规划模型如下：

目标函数：

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Z_1 = \max \frac{d_{ij} f_{ij} \Delta S_{ij}}{a_{ij}} \\ \min Z_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} a_{ij} f_{ij} \\ \min Z_3 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij} f_{ij} \Delta S_{ij}^2}{a_{ij}} \end{array} \right.$$

约束条件：

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Z_{ij} = \frac{z_1 d_{ij}}{a_{ij} f_{ij}}, y_{ij} = \frac{a_{ij} f_{ij}}{z_1 d_{ij}} \\
 P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\
 Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\
 \tilde{S}_{ij} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* = \dot{U}_i [\dot{U}_i^* y_{i0}^* + (\dot{U}_i^* - \dot{U}_j^*) y_{ij}^*] \\
 \Delta S_{ij} = |\tilde{S}_{ij} + \tilde{S}_{ji}| \\
 \dot{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{S}_{G_i} - \dot{S}_{L_i} \\
 \tilde{S}_S = \tilde{S}_{GS} - \tilde{S}_{LS} \\
 \tilde{S}_A = (1 - k_{3,1}) \tilde{S}_{GNA} \\
 -10f_{ij} \leq 1 - a_{ij} \leq 10f_{ij} \\
 -10(2 - a_{ij}) \leq 1 - f_{ij} \leq 10(2 - a_{ij}) \\
 a_{ij} = a_{ji} \text{ 且 } f_{ij} = f_{ji} \\
 a_{ij} \in \{1, 2\}, f_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{array} \right. \quad (5-17)$$

5.2.3 初步接线方案的对比模型的求解

(1) 功率潮流分布计算

已知 m 元函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 在点 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ 处二阶可微，则它在 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ 处的泰勒展开式为：

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)}{\partial x_i} (x_i - x_i^0) + O^2$$

当 $(x_1, x_2, \dots, x_m) \rightarrow (x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)$ 时，有

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) \approx f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0)}{\partial x_i} (x_i - x_i^0)$$

对于非线性方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2 \\
 \vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n
 \end{array} \right.$$

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

采用迭代法求解方程组，设 $\mathbf{x}^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}]^T$, $\Delta x_i^{(k)} = x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}$,

其中 $x_i^{(k)}$ 为变量 x_i 在第 k 次迭代中对应的数值。

将每个式子均进行一阶多元泰勒展开可得：

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_1}|_{\mathbf{x}^{(k)}} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}|_{\mathbf{x}^{(k)}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_n}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}|_{\mathbf{x}^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}|_{\mathbf{x}^{(k)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix}$$

记为：

$$\Delta \mathbf{f}^{(k)} = \mathbf{J}^{(k)} \Delta \mathbf{x}^{(k)}$$

上述通过迭代求解非线性方程组的方法成为“牛顿——拉夫孙迭代法”，简称“牛拉法”。

同样地，我们可以运用“牛拉法”计算电力系统中的潮流分布，对于电力系统中的方程组：

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

同上计算可得：

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \mathbf{N} \\ \mathbf{J} \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

其中，上式中：

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$H_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), N_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) i \neq j$$

$$J_{ij} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), L_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) i \neq j$$

$$H_{ii} = -U_i \sum_{\tau=1, \tau \neq i}^n U_\tau (G_{i\tau} \sin \theta_{i\tau} - B_{i\tau} \cos \theta_{i\tau})$$

$$N_i = U_i \sum_{\tau=1, \tau \neq i}^n U_\tau (G_{i\tau} \cos \theta_{i\tau} + B_{i\tau} \sin \theta_{i\tau}) + 2U_i^2 G_{ii}$$

$$J_{ii} = U_i \sum_{\tau=1, \tau \neq i}^n U_\tau (G_{i\tau} \cos \theta_{i\tau} + B_{i\tau} \sin \theta_{i\tau})$$

$$L_{ii} = U_i \sum_{\tau=1, \tau \neq i}^n U_\tau (G_{i\tau} \sin \theta_{i\tau} - B_{i\tau} \cos \theta_{i\tau}) - 2U_i^2 B_{ii}$$

迭代的停止条件：达到最大迭代次数——本研究中设置为 100 次。或满足：

$$\max \{\Delta P_i, \Delta Q_i\} \leq 0.000001$$

运用“牛拉法”进行潮流计算的大致流程图如下：

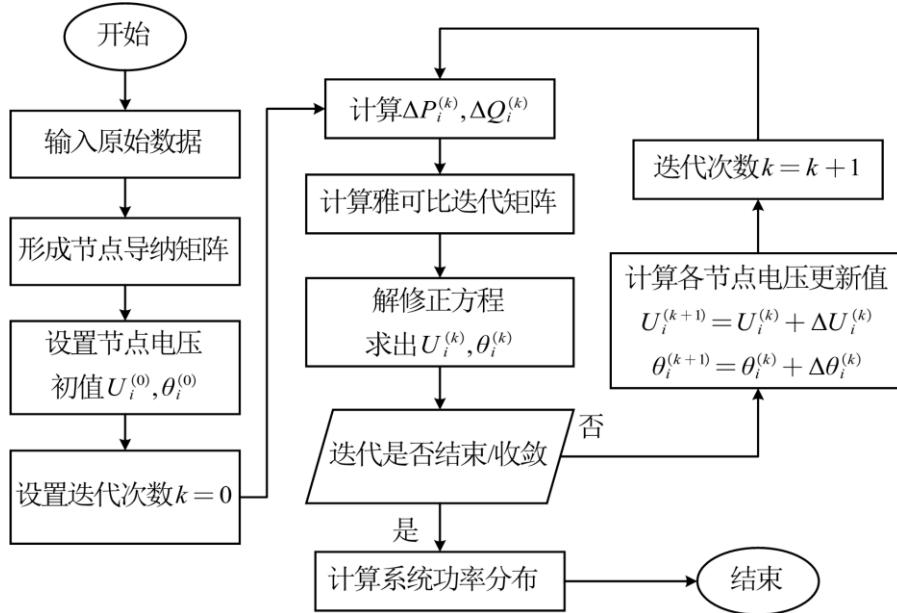


图 5-3 牛顿——拉夫逊法流程图

(2) 多目标优化模型求解

我们取 z_1 为常用参数： $z_1 = 0.05 + j0.4 (\Omega/\text{km})$ ，额定电压取

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

$$U = 220 \angle 0^\circ (\text{kV})。$$

对于特定接线方案， f_{ij}, a_{ij} 均为确定值，且方案及需要考虑的情况总数并不多。因此，我们采取遍历的方法对多目标优化模型进行求解，步骤如下：

第一步：确定每个接线图的基本参数值；

第二步：在每种方案下对火力发电厂 A 的两台机组进行一台满载、两台满载的情况进行潮流计算，得到各个情况下目标函数值；

第三步：将各情况下目标函数值线性加权得到最终的目标函数值，把这个方案目标函数值进行比较以抉择，线性加权规则如下：

$$\text{最终目标函数值} = 0.7 \times (\text{两台均满载}) + 0.3 \times (\text{一台满载、一台空载})。$$

5.2.4 接线方案对比模型求解结果及分析

对本章构建的混合整数多目标优化模型进行求解，采用 Matlab 进行编程，使用 matpower 工具箱函数进行潮流计算。结果如表 5-1 所示：

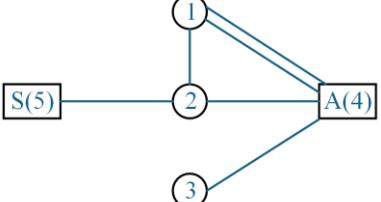
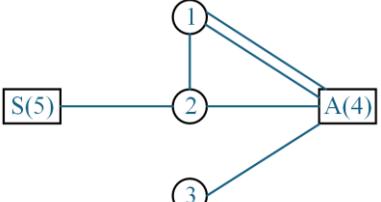
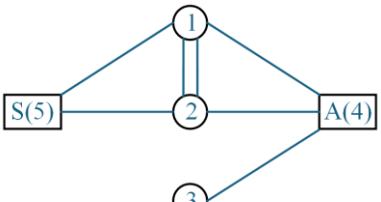
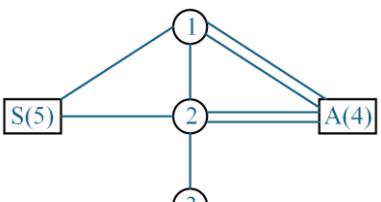
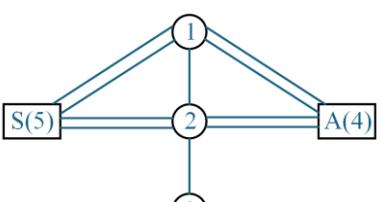
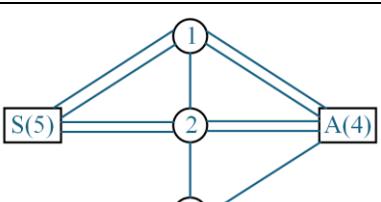
表 5-2 不同初步接线方案计算结果

方案名	接线图	电能质量	线路投资	线路损耗
方案一		3934.4	1780	416509
方案二		6003.81	1460	748030
方案三		4376.97	1520	435970

课 程 设 计 用 纸

教师批阅

(续表 5-2)

方案名	接线图	电能质量	线路投资	线路损耗
方案五		2360.9	1820	157088
方案六		4410.31	1620	457725
方案七		3862.75	1910	414678
方案八		2129.86	2020	149032
方案九		1850.14	2320	137537
方案十		1597.62	2640	87070.7

计算所得各个方案的技术指标和经济指标如图

课程设计用纸

教师批阅

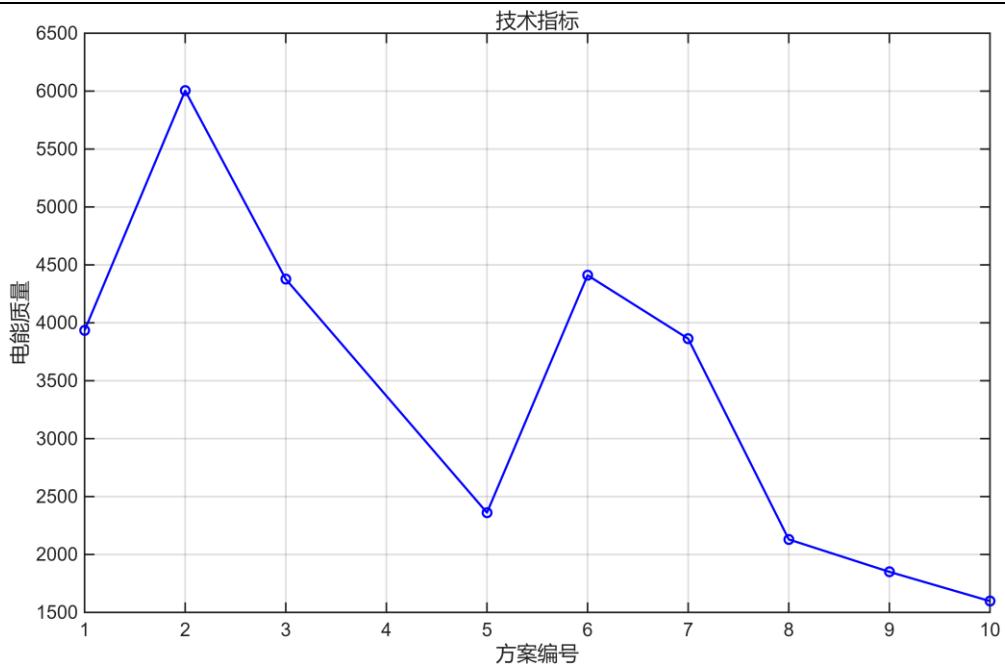


图 5-4 初步接线方案技术指标比较

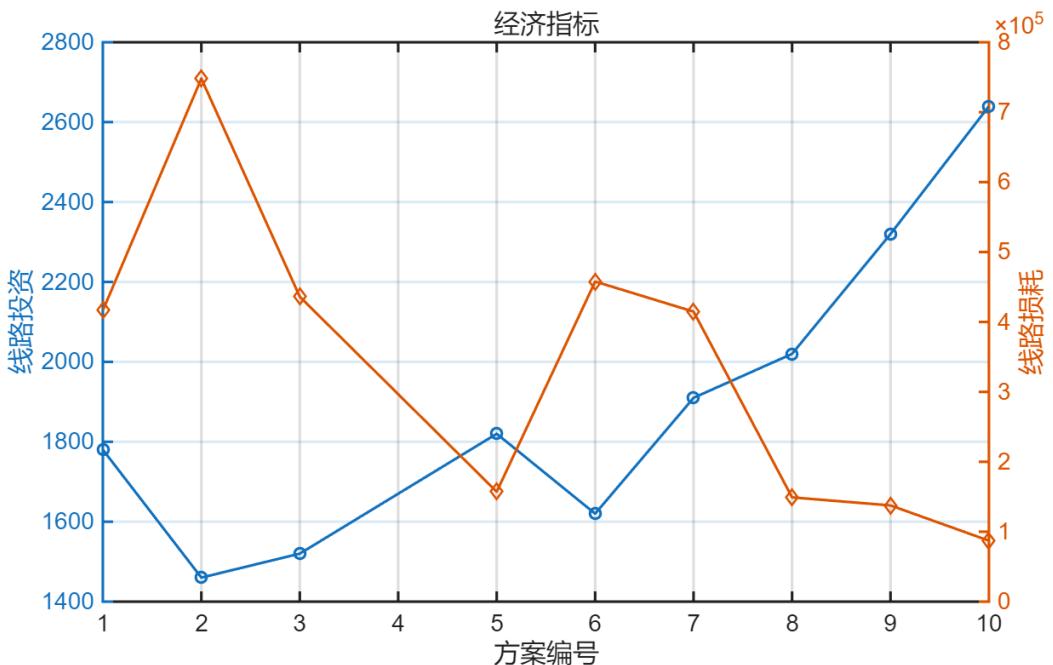


图 5-5 初步接线方案经济指标比较

通过分析图 5-4 与图 5-5，三项指标均是数值越低工程效果越好。本研究发现“方案五”在保证技术指标优秀的同时，两项经济指标均处于不错的值；“方案八”在牺牲一定的线路投资下，提升了电能质量，减少了线路损耗。

因此，本研究选择“方案五”与“方案八”作为初步接线方案，进行后续分析。