

电力系统 故障分析

DIANLI XITONG
GUZHANG FENXI

[美]P. M. 安德逊著 王际强 胡冰清 译
任 震 刘芳宁
江泽佳 徐国禹 校

电力工业出版社

Analysis of Faulted Power Systems
P. M. Anderson
The Iowa State University Press/Ames 1973

电力系统故障分析

[美]P.M.安德逊著

王际强 胡冰清 任震 刘芳宁译

江泽佳 徐国禹校

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.75印张 621千字

1980年1月第一版 1980年1月北京第一次印刷

印数 00001—13760册 定价 2.85元

书号 15036·4022

内 容 简 介

本书是美国安德逊教授为电力系统研究生编写的高级教材。在内容上著者力求能适应当代使用计算机来分析和解算电力系统故障问题，通篇应用了对称分量法和矩阵表示法。前三章是导论，介绍了电力系统故障的基本计算方法。第四章至第七章，用大量的篇幅对电力系统主要元件的参数作了详尽的阐述和分析。第八章至第十章，对故障的对称性、复合故障及简化的分析方法等作了较深入的论述。最后两章扼要地讲述了用计算机解算大型网络的基本方法。

本书既可作为电力系统研究生的教材，又可供电力工程技术人员、高等院校教师和高年级大学生参考。

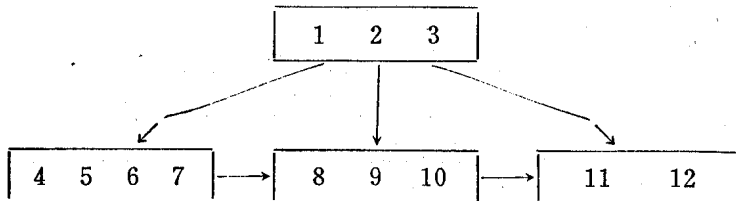
译者的话

众所周知,电力系统的不平衡运行或故障情况的分析是一个十分复杂和伤脑筋的问题。由于故障所引起的后果极其严重,因而它又是一个需要认真对待的问题。现代电力系统日趋庞大以致不可能用手算来进行分析,而数字计算机已经获得广泛的应用,因此无论是正常情况还是故障情况电力系统的理论分析和计算技巧都必须适应于使用数字计算机。国内外已有不少的专家和学者作了大量的研究,并写出了许多论文和书籍。本书是美国衣阿华州立大学安德逊教授为研究生编写的高级教材。我们认为它是目前在电力系统故障分析方面比较完整和比较深入的一本书。

著者运用对称分量的基本原理,从系统故障的分析和解算必须应用计算机这一主导思想出发,在内容的编写上特别强调采用清晰而简明的矩阵表示法。本书对电力系统主要元件的参数作了颇为详尽的精辟的阐述,推导并分析了线路、电机及变压器的序阻抗,这部分内容有不少独到之处。书中大量地使用简明的数学表达式,辅以简短的文字叙述来解释物理实质,并有大量的例题作为文字阐述的补充和继续,能使读者加深对内容的理解。以上是这本书的特点。另一方面,原书在某些地方为了求得内容的完整,还保留了某些在实际上不常用的材料。此外,在公式的推导中尚有几处差错。

本书引用了上千个公式和算式,符号型式繁多,尽管原书在符号上作了大量的校核工作,但仍有不少错误之处。对显而易见的印刷上的错误,译者径行改正。对阅读和理解内容有影响的差错,除作了修改外还附以“译者注”。原书中引用其它文献的著者姓名,为了方便读者查对,对初次出现的人名均附有原文。另外对个别不常见的名词和术语,也附有原文以资参考。

全书的结构、各章的联系和选择阅读的顺序,大致表示如下:



在1978年1月原水利电力部召集的高等院校发电专业教材座谈会上,已将本书列为教学参考书。全书在王际强同志的指导下由重庆大学四位同志合译。序言、第一、二章和附录A由王际强执笔,第三、五、六章、第四章中1~9节和附录D由胡冰清执笔,第七、八、九章和第四章中10~16节由任震执笔,第十、十一、十二章及附录B、C、E、F由刘芳宁执笔。译文的序言和第一、二章由重庆大学江泽佳同志审校;其余部分均由重庆大学徐国禹同志审校,并对全书作了较细致的校核。

由于译者业务水平低,误译或译得不确切的地方,诚恳地希望读者批评指正。

译者

1978年12月于重庆大学

序 言

研究在平衡或正常情况下运行的电力系统的教科书已经编出很多。有些，特别是W.D.史蒂文森(Stevenson)最近编写的优秀教材^[9]，对系统的正常和故障两种情况均作了初步的分析。但是，大多数论述不平衡和故障系统的书籍已出版多年，由于各种原因，它们已不适用。尽管这些书出版较早，可是认真的读者还是应该熟悉C.F.瓦格纳(Wagner)和R.D.埃文斯(Evans)的名著^[10]，伊迪斯·克拉克(Edith Clarke)的出色著作^[11]以及卡拉布勒斯(Calabrese)的比较近期的作品^[24]。

本书的目的是为能够应用先修课程中的有关知识的研究生提供一本教材。由于这是一本高级教材，学生应能运用通常不对大学本科讲授的电路的概念，并且还领悟矩阵表示法的美妙和简洁。本书特别强调用清晰、简明的符号表示法，著者相信这能促进学习。

虽然本书的主攻方向是在解算高深的问题，但是还是对解决不平衡系统的基本结构作了全面的介绍。这适于建立本书中的代数形式和符号表示法。还可用这些知识对初学的人介绍基本概念。因此，这些基础对某些人是个故障网络解法的系统的复习，对另一些人则是入门。无论哪种人都应该学习这些知识，因为某些以后要用到的习惯规定是以此为依据的。

本书有足够的內容，可供两个学期或三个季度授课之用。前三章是导论，在研究生班中可以很快地带过，因为学生们已经学过对称分量。由于全书中所使用的矩阵表示法在这几章引入，所以这些材料至少应该较快地复习一遍。

本书的中间部分即第四至第七章，论述电力系统参数。在这里，详细地导出了线路、电机以及变压器的序阻抗。这是重要的内容，而在训练电力工程师时，它常常是被忽视的。本书所用的方法能求出常见的实际问题的精确答案，如象计算未经换位的或部分换位的线路的阻抗。矩阵法的采用，使计算清晰，并能适应于计算机的应用。

本书的最后部分给出对称分量在各种类型问题上的应用，并介绍用计算机解大型网络的方法。在这里，读者能领会到用矩阵代数解算复杂问题的好处。这部分内容也能使工程师们加深对用对称分量解算问题技巧的赏识。

在衣阿华州立大学，我们把前十章的绝大部分內容在连续两个季度内授完，剩下的计算机的应用部分，作为另一门课单独开出，我们认为这样安排是方便的。这就意味着第一到第十章的有些节必须略去，但要鼓励学生自学。在这两个季度的教学中，第一到第三章只花很少时间，因为选修本课程前必须学过本科介绍对称分量的课程。因而第一季度余下的时间是要用在电力系统的参数上面，并把应用部分留在第二季度。

没有许多人的大力帮助，写成这本书是不可能的，著者对他们非常感谢。著者对这门课程的兴趣，主要是由衣阿华州立大学的几位同事所引起的，其中，特别是W.B.博斯特(Boast)，J.W.尼尔森(Nilsson)及J.E.莱格斯特姆(现在在内布拉斯加大学)。他们

三位也是对称分量这门短期课程的组织者和讲授者，这门课程配合衣阿华州立大学的交流网络分析器而讲授约达十年之久。著者在作学生时和后来当教师时对这门课程的重视使他胜任这门课程。诚然，本书中的许多概念是直接或间接地取材于短期课程的讲义。已故的 W.L. 卡斯尔 (Cassel) 的影响也是必须提到的，他坚持使用明确的符号从而帮助学生，也包括著者在内，得到训练和理解。著者特别向戴维·D. 罗布 (Robb) 致谢，他在研究生班中使用了这本书的大量内容，并提出无数的、有价值的改进意见。本书计算机解题中的一部分内容是 J.R. 帕夫莱 (Pavlat) 和 G.N. 约翰逊 (Johnson) 两人的成果，著者对这些帮助表示深切的谢意。

最后，我要对给我写这本书机会的衣阿华州立大学电机系和系主任 W.B. 博斯特谨表感谢。还要特别感谢我的妻子珍妮，她给予我精神上的支持并进行熟练的校对，还要感谢我的编辑，南希·波伦，她在熟谙数学符号和善于对待古怪的著者这两个方面简直是个奇迹。

符 号 表

1. 大 写 字 母

A	安, 电流单位的缩写符号
\mathbf{A}	复变换矩阵; 传输参数矩阵; 结点关联矩阵
A	磁位矢量
\mathbf{A}'	传输参数逆矩阵
B	$= I_m Y$, 电纳
\mathbf{B}	复变换矩阵; 并联电纳矩阵
C	电容
C	库, 电荷单位的缩写符号
\mathbf{C}	复变换矩阵; 麦克斯韦尔系数; 电容系数
D	距离或间距
E	电源电动势; 电压
\mathbf{E}	原始电压源矢量
F	法, 电容单位的缩写符号
F, F'	故障点的标志
$F-D-Q$	同步机的转子回路
G	$= R_o Y$, 电导
\mathbf{G}	混合参数逆矩阵
GMD, GMR	互几何均距; 几何平均半径
H	亨, 电感单位的缩写符号
Hz	赫, 频率单位的缩写符号
\mathbf{H}	混合参数矩阵
I	均方根电流相量
I_{abc}	$= [I_a I_b I_c]'$, 线电流矢量
I_{012}	$= [I_{a0} I_{a1} I_{a2}]'$, 序电流矢量
I_B	基准线电流, 安
J	焦, 能量单位的缩写符号
\mathbf{J}	原始电流源矢量
K	介电常数
\mathbf{K}	克朗变换或连接矩阵
L	电感
LL	线(相)间
LN	线(相)对中线
\mathbf{L}	电感矩阵
M	$= 10^6$, 兆, 前缀
M	互感
M_{ij}	矩阵的子式

M	两口网络矢量
N	牛, 力的单位的缩写符号
N	零电位母线(结点)的标志
N	两口网络矢量
P'	相量算子
P	平均功率; 变压器回路的标志
P	范德蒙德(Vandermonde)矩阵; 电位系数矩阵; 派克(Park)变换矩阵
Q	平均无功功率; 变压器回路的标志; 总电荷; 电荷密度相量
R	$= R_0 Z$, 电阻; 变压器回路的标志
R	电阻矩阵
S	$= P + jQ$, 复视在功率
S_B	基准视在功率, 伏安
SLG	单相接地
T	时间; 时间常数; 转矩; 等值电路图形
T_B	基准时间, 秒
T_φ	对换矩阵
U	单位矩阵
V	均方根电压相量
V	伏, 电压单位的缩写符号
VA	伏安, 视在功率单位的缩写符号
V_{abc}	$= [V_a, V_b, V_c]^t$, 相电压矢量
V₀₁₂	$= [V_{a0}, V_{a1}, V_{a2}]^t$, 序电压矢量
V_B	基准电压, 伏
W	瓦, 功率单位的缩写符号
Wb	韦, 磁通单位的缩写符号
X	$= I_m Z$, 电抗
Y₁₀	原始导纳矩阵
Y	$= G + jB$, 复导纳
Y_B	基准导纳, 西
Y	导纳矩阵
Z₁₀	原始阻抗矩阵
Z	$= R + jX$, 复阻抗
Z_B	基准阻抗, 欧
Z	阻抗矩阵

2. 小写字母

a	$= e^{j2\pi/3}$, 120°算子
ac	交流
a—b—c	同步机的定子回路; 相的标志
adj	伴随(矩阵)

b	$=\omega c$, 单位长度的电纳
ber, bei	贝塞尔(Bessel)函数的实部和虚部
c	单位长度的电容
dc	直流
d_0, d_2	零序, 负序静电不平衡系数
d, q	归算到转子的定子回路
det	(矩阵的)行列式
e	自然对数的底
f	频率
f_k	第 k 段线路占全线长的分数
g	接地端
h	两口网络混合参数的标志
h	常数 (1 或 $\sqrt{3}$)
i	瞬时电流
i	瞬时电流矢量
j	$=\sqrt{-1}$, 90° 算子
k, k'	计算 L, C 所用的常数
k	$=10^3$, 千, 前缀
k	$=\sqrt{3/2}$, 同步机理论中所用的常数
l	单位长度的电感; 漏感
ln, log	自然对数(底为 e), 底为10的常用对数
m	$=10^{-3}$, 毫, 前缀; 计算趋肤效应所用的常数
m	单位长度的互感
m_0, m_2	零序、负序电磁不平衡系数
m	复数变比
n	相数; 结点数; $=10^{-9}$, 纳, 前缀
n	中性点端; 中性点电压; 匝数比; 匝数
pu	标么
p	瞬时功率
q	导线的线电荷密度
q	一组导线的线电荷矢量
r	半径; (电源)内电阻; 单位长度的电阻
s	线长; 线段 k 的长; 感应电动机的转差
s	转速电压矢量
t	时间
u	单位阶跃函数
v	瞬时电压
v	瞬时电压矢量
x	单位长度的导线电抗; (电源)内电抗
y	两口导纳参数的标志
z	两口阻抗参数的标志; (电源)内阻抗; 单位长度的阻抗

输电线的原始阻抗

3. 大写希腊字母

Δ	三角形连接; (矩阵的)行列式
Σ	累加符号
Ω	欧, 阻抗单位的缩写符号

4. 小写希腊字母

α	相角
α_R, α_L	趋肤效应的交流对直流(电阻, 电感)的比值
δ	同步机的转矩角
δ_{ij}	克氏(Kronecker) δ
ϵ	$= \epsilon_0 \epsilon_r$, 介电常数
θ	相角; 同步机的转子角
κ	介电常数
λ	范德蒙德矩阵元素; 磁链
μ	$= \mu_0 \mu_r$, 磁导率(μ_0 为真空的; μ_r 为相对的)
μ	$= 10^{-6}$, 微, 前缀
π	圆周率, 3.14159265.....
ρ	电阻率
τ	时间常数
ϕ	磁通; 相角
ω	角频率; 同步机转速

5. 下 标

a	a 相; 电枢
A	a 相
b	b 相
B	b 相
B	基准量
c	c 相; 铁芯损耗量
C	c 相; 变压器回路的标志
d	直轴; 直轴回路的量
D	直轴阻尼绕组的量
e	变压器励磁的量
eq	等值电路的量; 等值间距
env	交流电波形的包络线
F	归属于故障点; 磁场绕组
f	归属于故障点
g	归属于故障点

H	变压器绕组的标志
LN	线(相)对中线
LL	线(相)间
m	磁化的量(变压器中); 电动机的量; 互(耦合或GMD)
max	最大
min	最小
M	互(常见于 M_0, M_1, M_2)
n	中性点
q	交轴; 交轴回路的量
Q	交轴阻尼绕组的量
r	转子量
R	转子量
s	电源量; 定子量; 自(GMD)
S	定子量, 变压器回路的标志; 自(常见于 S_0, S_1, S_2)
sym	对称
T	变压器回路的标志
u	标么
X	变压器绕组的标志
Y	变压器绕组的标志
$1\phi, 3\phi$	单相; 三相
$0, 1, 2$	零, 正, 负序量
$0, \Sigma, \Delta$	零, 和, 差序量
$0, \Delta$	初始条件; 变化条件

6. 上 标

$()'$	矩阵的转置
$()^{-1}$	矩阵的逆
(\sim)	区分各种量的波浪符号
(\wedge)	区分各种量的尖角符号
(\cdot)	$= d/dt$, 对时间的导数
$()^*$	相量或矩阵的共轭
$()'$	一撇, 暂态
$()''$	两撇, 次暂态

7. 数 字 符 号

1ϕ	单相
2LG	两相接地
3ϕ	三相
1LO	单相断线
2LO	两相断线

目 录

译者的话

序言

符号表

第一章 概述	1
1-1 标么值的计算	2
1-2 基准的变换	4
1-3 基准值表	4
1-4 三相系统	4
1-5 标么值换算为系统值	6
1-6 用标么制计算的实例	7
1-7 相量表示法	10
1-8 相量 a 或算子 a	11
习题	12
第二章 对称分量	14
2-1 n 相系统的对称分量	14
2-2 三相系统的对称分量	18
2-3 电流相量的对称分量	18
2-4 根据对称分量计算功率	19
2-5 不平衡网络阻抗的序分量	20
2-6 电机阻抗的序分量	23
2-7 序网的定义	24
习题	26
第三章 不对称故障的分析: 三分量法	28
I 并联故障	28
3-1 单相接地故障	28
3-2 两相故障	32
3-3 两相接地故障	34
3-4 三相故障	37
3-5 其它型式的并联故障	40
3-6 并联故障计算的评述	40
II 串联故障	41
3-7 串联故障的等值序网	42
3-8 不相等的串联阻抗	46
3-9 单相断线	48
3-10 两相断线	48

3-11 其它串联故障	49
习题	50
第四章 输电线路的序阻抗	53
4-1 线路的正序和负序阻抗	53
4-2 相互耦合	55
4-3 平行的圆柱形导线的自感和互感	56
4-4 卡森 (Carson) 线路	59
4-5 三相线路的阻抗	61
4-6 线路导线的换位和对换	64
4-7 完全换位的线路	75
4-8 由于不完全换位引起的电路不平衡	78
4-9 具有分裂导线的线路的序阻抗	81
4-10 具有一根地线的线路的序阻抗	87
4-11 具有两根地线的线路的序阻抗	97
4-12 具有 n 根地线的线路的序阻抗	102
4-13 具有地线的换位线路的零序阻抗	102
4-14 含有钢的导线的计算	105
4-15 平行的换位和未换位的多回路线路	109
4-16 平行回路最小不平衡的最优化	114
习题	116
第五章 输电线路的序电容	123
5-1 换位线路的正序和负序电容	123
5-2 换位线路的零序电容	126
5-3 输电线路的互电容	128
5-4 没有地线的三相线路的互电容	131
5-5 没有地线的换位线路的序电容	134
5-6 有地线的三相线路的互电容	136
5-7 双回线路的电容	139
5-8 不换位线路的静电不平衡	143
习题	145
第六章 电机的序阻抗	147
I 同步电机的阻抗	147
6-1 概述	147
6-2 正序阻抗	151
6-3 负序阻抗	160
6-4 零序阻抗	161
6-5 时间常数	162
6-6 同步发电机的等值电路	165
6-7 同步发电机的相量图	166
6-8 次暂态相量图和等值电路	171

6-9	电枢电流的包络线	175
6-10	冲击电流	177
II	感应电动机的阻抗	178
6-11	概述	178
6-12	感应电动机的等值电路	178
6-13	感应电动机次暂态期间的故障反馈电流	180
6-14	单相断线运行	182
	习题	182
第七章	变压器的序阻抗	186
I	单相变压器	186
7-1	单相变压器的等值电路	186
7-2	变压器阻抗	187
7-3	变压器的极性和接线端标记	188
7-4	三绕组变压器	190
7-5	自耦变压器的等值电路	193
7-6	单相变压器的三相组	195
II	三相变压器	199
7-7	三相变压器接线端的标记	199
7-8	Y/ Δ 连接时变压器的相位移	199
7-9	三相变压器的零序阻抗	203
7-10	接地变压器	205
7-11	Z/ Δ 电力变压器	207
III	在系统研究中的变压器	211
7-12	非标称变比	211
7-13	三绕组非标称变压器	214
	习题	215
第八章	对称性的变更	221
8-1	用标记建立对称性	221
8-2	并联(横向)故障的通用故障图	221
8-3	串联(纵向)故障的通用故障图	224
8-4	故障电流和电压的计算	226
8-5	基本结果: 功率的不变性	229
8-6	约束矩阵 \mathbf{K}	231
8-7	克朗(Kron)的原始网络	232
8-8	其它有用的变换	234
8-9	并联故障的变换	236
8-10	具有阻抗的并联故障的变换	240
8-11	串联故障的变换	244
8-12	小结	245
	习题	245

第九章 复合故障	248
I 应用两口网络原理分析复合故障	248
9-1 两口网络	248
9-2 两口网络的互连	256
9-3 复故障序网的连接	260
9-4 串联-串联接法 (Z 型故障)	261
9-5 并联-并联接法 (Y 型故障)	265
9-6 串联-并联接法 (H 型故障)	269
II 应用矩阵变换分析复合故障	271
9-7 Z 型故障的约束矩阵	271
9-8 Y 型和 H 型故障的约束矩阵	273
习题	275
第十章 简化的分析方法	278
10-1 两分量法	278
I 并联故障	280
10-2 单相接地故障	280
10-3 相间故障	281
10-4 两相接地故障	282
10-5 三相故障	284
II 串联故障	285
10-6 两相断线	285
10-7 单相断线	286
III 用两分量法计算的对称性的变更	287
10-8 移相变压器的关系式	287
10-9 任意对称相的单相接地故障	288
10-10 任意对称相的两相接地故障	289
10-11 任意对称相的串联故障	291
IV 通用故障图的解算法	293
10-12 网络的串联连接—单相接地和两相断线故障	293
10-13 网络的并联连接—两相接地和单相断线故障	294
习题	294
第十一章 使用导纳矩阵的计算机解法	296
11-1 原始矩阵	296
11-2 结点关联矩阵	299
11-3 结点导纳矩阵和结点阻抗矩阵	302
11-4 不定导纳矩阵	304
11-5 定导纳矩阵	312
习题	315
第十二章 使用阻抗矩阵的计算机解法	319

12-1	并联故障计算中的阻抗矩阵	319
12-2	阻抗矩阵算法	325
12-3	对参考结点追加辐射支路	325
12-4	追加一条辐射支路到一个新结点	326
12-5	对参考点闭合一个回路	327
12-6	闭合一个不含参考结点的回路	328
12-7	追加一互耦的辐射元件	332
12-8	追加一组互耦的支路	337
12-9	导纳矩阵法和阻抗矩阵法的比较	341
	习题	341
附录A	矩阵代数	344
附录B	线路阻抗表	358
附录C	三相系统的三角恒等式	386
附录D	圆柱形有限长度的直导线的自感	387
附录E	解算实例	390
附录F	三角形-星形变换	421
参考文献	422

第一章 概 述

电力系统的分析通常指的是，在给定的一组条件下计算网络的电压和电流。在许多情况下，计算是按一个特殊目的为求出特定种类数据而安排的。例如，我们也许期望求得在特定情况下流经地中的电流，以便整定接地保护继电器。图1-1给出电力系统计算的分类。图中，左边的一类问题叫做“稳态”，因为这些问题可用代数方程解出。这并不意味着需要求得解答的那一瞬间系统是静止的，或者是不随时间而变化的。恰恰相反，系统可能正经历一个迅速的变化，例如，在故障的情况下。关键是解代数方程比解微分方程容易得多，所以我们已经学会充分运用稳态解算来作系统规划，并确定系统的保护。这同在某些规定的条件下将系统特性拍成一系列照片一样。根据这些照片，我们就能设计系统的附加设备和保护方案，并能对系统的强度及其弱点有较多的了解。

图 1-1 中右边所示的动态问题通常叫做电力系统运行中的“稳定问题”。在此，我们求解一组微分方程，以求得把电压、电流以及其它变量的特性作为时间的函数表达出来。

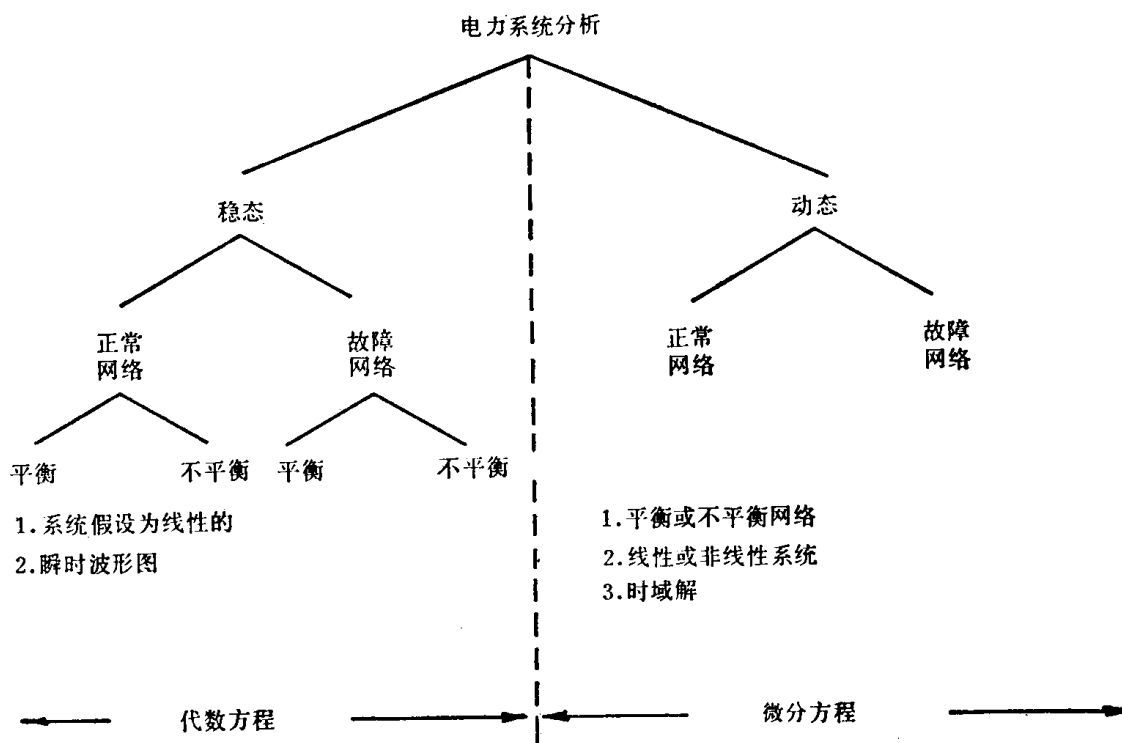


图 1-1 分析电力系统问题的分类

电力系统运行中的稳态和动态这两类问题通常均属于大型问题。有几百个结点的网络是很平常的，而且在动态问题中还可能包含为数众多的机组。因此，对这两类问题，我们都必须设法觅取某种方式的计算机解法。

本书的重点是放在平衡的和不平衡的故障网络上。以后将要指出，用于不平衡故障网