

EMTP THEORY BOOK

电力系统
电磁暂态
计算理论

[加拿大] H.W.Dommel 著

李永庄 林集明 曾昭华 译

水利电力出版社

电力系统电磁暂态计算理论

〔加拿大〕H.W.Dommel 著

李永庄 林集明 曾昭华 译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书结合国际上广泛使用的电磁暂态计算程序(EMTP),着重介绍电力和电气网络电磁暂态过程的计算机模拟的实用算法和技术,包括交直流电力系统和电气网络中发电机、变压器、输电线路、电缆、开关、可控硅、电抗器、避雷器、电容器等各种线性或非线性的集中参数与分布参数元件,以及电力系统中常用的控制系统的数学模型和求解方法。书中对电磁暂态模拟的发展趋势也提出了一些建设性的意见。

本书可作为电力、电气、电工制造、电气化铁路、通信等部门的工程技术人员和科研人员的参考书,也可作为大学高年级学生和研究生的教学用书。

H. W. Dommel
EMTP theory book
内部出版物 1986年

电力系统电磁暂态计算理论

(加拿大)H. W. Dommel 著

李永庄 林集明 曾昭华 译

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 22.5印张 503千字

1991年8月第一版 1991年8月北京第一次印刷

印数 0001—2630 册

ISBN 7-120-01337-8/TM·379

定价 16.45元

译 序

电力系统的规划、设计、运行，电机、电器设备的研制都必须对电力网络进行研究。电网研究的内容通常有：

短路分析；

潮流分析；

稳定分析；

电磁暂态分析。

其中电磁暂态分析是最新的也是最为复杂的课题。研究电磁暂态问题可用物理模型和数字程序。电磁暂态分析程序EMTP便是目前国际通用的一种数字程序。它规模大，功能强，最初由加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）的H.W.Dommel教授创立，又经过很多专家们的共同努力而日臻完美。美国邦纳维尔电力局（BPA）对程序的开发作出了很大的贡献。近年来成立的包括美国、加拿大、日本及欧洲一些国家在内的EMTP联合发展中心（DCG）和在欧洲成立的另一个EMTP用户协会（LEC），都还在为该程序的改进提高和推广普及进行着大量工作。本书中提到的UBC版本、BPA版本和DCG版本系指以上述机构各自为主开发的不同版本。

我国于1981年引进EMTP程序后，很快受到有关部门的重视，从1984年以来各地举办过多次研讨班，水利电力部还成立了EMTP工作组（设在能源部电力科学研究院系统所）。目前我国EMTP程序的拥有单位已遍及高等院校、科研、设计、运行和制造部门。在一些国家级重点项目的研究中都已使用了EMTP程序。尽管如此，由于EMTP程序理论较新、难度较大，国内的使用者普遍感到不易掌握，因而使程序的多种功能没有得到充分利用。

以EMTP奠基人H.W.Dommel教授为主编写的本书，全面地介绍了EMTP中涉及的电力系统中各种元件的数学模型和数值计算方法，分析了它们的固有误差和精度，还介绍了积几十年应用实践的一些有益的经验及进一步改进的方向。它的出版无疑会对程序消化吸收奠定坚实的基础，不仅有助于大专院校的师生、电力部门和制造部门的技术人员掌握程序，而且有助于提高他们的电磁暂态理论水平及编程能力。此外，本书所讨论的问题对通信、电气化铁路、自动控制等部门也有重要的参考价值。

本书第四、五章和6.7~6.11节由曾昭华翻译，第6.1~6.5节、第12.2~12.4节、第八、九章和附录VI由林集明翻译，其余部分由李永庄翻译。译者对清华大学吴维韩、黄炜纲、郝逢年为本书所作的校对工作深表感谢，并欢迎读者对译文中的不足和错误及时提出批评和意见。

符 号 说 明

下标符号说明

下标	意义	下标	意义
actual	实际	insu	绝缘
addy	涡流	int	内部的
air	气隙	interp	插值
approx	近似的	inv	逆变
armour	铠装	iron	铁芯
ave	平均	knee	转折
base	基础	limit	极限
branch	支路	left	左边
break	闪络	load	负载
char	特征的	loop	环路
close	合闸	loss	损耗
cont	常数	low	低的
core	芯	master	主
comp	伴随	méch	机械的
coup	耦合	mid	中间
criti	临界	mode	模
current	电流	modi	修正的
delay	延迟	mut	互相
earth	大地	nam	铭牌
eddy	涡流	neg	负(序)的
equiv	等值	net	净
el	电气侧	neutral	中性点
exact	精确	new	新的
exc	励磁	offset	偏置
fault	故障	open	分闸
gen	发电机	order	指令
grod	接地	orig	原始的
high	高	os	振荡
hys	磁滞	out	输出, 外部的
imp	改进	ovhd	架空
incre	增加	phase	相
indu	感应	pipe	管子
input	输入	pos	正(序)的

下标
 prem
 propa
 random
 rating
 rece
 redu
 rect
 residual
 RMS
 satu
 scr
 self
 series
 set
 sheath
 short
 shunt
 s
 slave
 slope
 smo

意义
 初级
 传播
 随机
 额定值
 受端
 简化
 整流
 剩余的
 有效值
 饱和
 屏蔽
 自
 串联
 整定值
 外皮
 短路
 并联
 滑差
 从属
 斜率
 平滑

下标
 source
 spark
 spe
 star
 start
 stop
 surge
 switch
 symm
 turbine
 ter
 Thev
 total
 totaltr
 trape
 tube
 u
 uti
 voltage
 without
 zero

意义
 电源
 放电
 给定
 星形
 开始
 结束
 波
 开关
 对称
 汽(水)轮机
 端点
 戴维南等值
 总的
 变压器
 梯形的
 管子
 不饱和
 电业部门
 电压
 不包括
 零(序)的

上标符号说明

上标
 b
 c
 m
 mod
 new
 old

意义
 支路
 闭合三角形连接
 制造厂
 修正
 新值
 老值

上标
 p
 r
 s
 t
 u

意义
 预报值
 简化
 短路
 试算
 电业部门

目 录

译 序

符号说明

第一章 EMTP解法介绍	1
第二章 线性无耦合集中参数元件	7
2.1 电阻 R	7
2.1.1 误差分析	8
2.1.2 带有电阻的网络实例	9
2.2 自电感 L	10
2.2.1 误差分析	11
2.2.2 利用并联电阻阻尼数值振荡	14
2.2.3 并联电阻的物理意义	18
2.2.4 带有电感的网络实例	20
2.3 电容 C	21
2.3.1 误差分析	22
2.3.2 利用串联电阻阻尼数值振荡	23
2.3.3 串联电阻的物理意义	24
2.3.4 带有电容的网络实例	25
2.4 R 、 L 、 C 串联	26
2.5 单相常规 π 形电路	26
第三章 线性耦合集中参数元件	27
3.1 耦合电阻 $[R]$	27
3.1.1 误差分析	28
3.1.2 耦合支路插入节点方程组	28
3.1.3 耦合电阻实例	29
3.2 耦合电感 $[L]$	30
3.2.1 误差分析	32
3.2.2 利用耦合并联电阻阻尼数值振荡	32
3.2.3 耦合并联电阻的物理意义	32
3.2.4 带有耦合电感的网络实例	32
3.3 耦合电容 $[C]$	34
3.3.1 误差分析	35
3.3.2 利用串联电阻阻尼数值振荡	35
3.3.3 耦合串联电阻的物理意义	36

3.3.4 带有耦合电容的网络实例	36
3.4 M 相常规 π 形电路	38
3.4.1 $[R]$ 与 $[L]$ 串联	38
3.4.2 $[R]$ 与 $[L]^{-1}$ 串联	39
第四章 架空输电线路	41
4.1 线路参数	41
4.1.1 单根导线的线路参数	41
4.1.1.1 串联阻抗矩阵 4.1.1.2 并联电容矩阵	
4.1.2 等值相导线的线路参数	51
4.1.2.1 消去地线 4.1.2.2 构成导线束 4.1.2.3 等值相导线的简化矩阵 4.1.2.4 等值相 导线的常规 π 形电路 4.1.2.5 连续地线和分段地线	
4.1.3 平衡线路的正序和零序参数	58
4.1.3.1 单回三相线路的正序和零序参数 4.1.3.2 平衡的 M 相线路的正序和零序参数 4.1.3.3 仅有零序耦合的两条相同的三相线路	
4.1.4 对称分量	66
4.1.5 模量参数	68
4.1.5.1 模域中的线路方程 4.1.5.2 无损高频近似 4.1.5.3 求暂态解的近似转换矩阵	
4.2 EMTP的线路模型	77
4.2.1 交流稳态解	77
4.2.1.1 M 相常规 π 形电路 4.2.1.2 单相线路的等值 π 形电路 4.2.1.3 M 相等值 π 形电路	
4.2.2 暂态解	80
4.2.2.1 常规 π 形电路 4.2.2.2 L' 和 C' 恒定的单相无损线 4.2.2.3 L' 和 C' 恒定的 M 相无损线 4.2.2.4 具有恒定参数的单相和 M 相无畸变线 4.2.2.5 带集中电阻的单相和 M 相线路 4.2.2.6 具有频率相关参数的单相和 M 相线路	
第五章 地下电缆	99
5.1 单芯电缆	100
5.1.1 串联阻抗	100
5.1.2 并联导纳	103
5.2 平行单芯电缆	104
5.3 大地返回阻抗	106
5.3.1 半无限大地中的埋设导线	107
5.3.2 无限大地中的埋设导线	109
5.3.3 架空导线	110
5.3.4 架空导线与埋设导线间的互阻抗	110
5.4 管形电缆	110
5.4.1 管壁厚度无限(无大地返回)	111
5.4.2 管壁厚度有限(有大地返回)	113
5.5 成束导线和消去地线	114
5.6 埋设的管道	115
5.7 部分导体和有限元法	118

5.7.1	剖分为部分导体	118
5.7.2	有限元法	119
5.8	模量参数	120
5.9	EMTP的电缆模型	121
5.9.1	交流稳态解	121
5.9.2	暂态解	122
5.9.2.1	短电缆	
5.9.2.2	单相电缆	
5.9.2.3	三相电缆	
第六章	变压器	130
6.1	戴维南等值电路中的变压器	130
6.2	单相双绕组和三绕组变压器的电感矩阵模型	132
6.2.1	双绕组变压器	132
6.2.2	病态电感矩阵	133
6.2.3	三绕组变压器	134
6.3	单相双绕组和三绕组变压器的逆电感矩阵模型	134
6.3.1	双绕组变压器	134
6.3.2	三绕组变压器	135
6.4	单相 N 线圈变压器的矩阵模型	137
6.5	三相 N 线圈变压器的矩阵模型	140
6.5.1	计算 $[R]$ 和 $[L]^{-1}$ 的方法	141
6.5.2	修正三角形连接绕组的零序数据	142
6.6	励磁电流	143
6.6.1	线性(不饱和)励磁电流	143
6.6.1.1	单相变压器	
6.6.1.2	三相变压器	
6.6.2	饱和影响	147
6.6.2.1	单相变压器	
6.6.2.2	三相变压器	
6.6.3	磁滞和涡流损耗	150
6.6.4	剩磁	153
6.7	自耦变压器	154
6.8	理想变压器	155
6.9	电位浮动的三角接法	156
6.10	支持子程序和饱和变压器元件	156
6.10.1	支持子程序XFORMER	157
6.10.2	支持子程序BCTRAN	157
6.10.3	支持子程序TRELEG	157
6.10.4	支持子程序CONVERT	158
6.10.5	饱和变压器元件	160
6.11	频率相关的变压器模型	161
第七章	简单电压源和电流源	163
7.1	电源与节点相连	163

7.2	两节点间的电流源	163
7.3	两节点间的电压源	164
7.4	同一节点上多个电源	165
7.5	内部简单电源函数	165
7.6	受电流控制的直流电压源	168
7.6.1	稳态解	169
7.6.2	暂态解	170
第八章	三相同步电机	172
8.1	电气部分基本方程式	173
8.2	确定电气参数	177
8.3	机械部分基本方程式	182
8.4	稳态模型和初始条件	185
8.4.1	利用正序值进行初始化	188
8.4.2	利用负序值进行初始化	190
8.4.3	利用零序值进行初始化	193
8.4.4	机械部分的初始化	193
8.5	暂态解	194
8.5.1	解法概述	195
8.5.2	电气部分暂态解	197
8.5.3	机械部分暂态解	201
8.5.4	预报和校正方法	202
8.5.4.1	预报 ω 和 β	8.5.4.2 d 、 q 轴伴随电阻的平均值
8.5.4.3	i_d 和 i_q 的预报	8.5.4.4 旋转电势的预报
8.5.4.5	迭代方法	
8.6	饱和	209
8.6.1	基本假定	209
8.6.2	稳态运行中的饱和	211
8.6.3	暂态条件下的饱和	212
8.6.4	在EMTP中的实现方法	214
8.6.4.1	稳态初始化	8.6.4.2 暂态解
8.6.5	采用Canay特征电抗时饱和影响	215
第九章	通用电机	217
9.1	电气部分基本方程式	217
9.2	确定电气参数	220
9.3	转换到相量	222
9.4	机械部分	224
9.5	稳态模型和初始条件	225
9.5.1	三相同步电机	225
9.5.2	两相同步电机	226
9.5.3	单相同步电机	226

9.5.4	直流电机	227
9.5.5	三相异步电机	227
9.5.6	两相异步电机	229
9.5.7	单相异步电机	229
9.5.8	双馈电异步电机	229
9.6	用补偿法的暂态解	230
9.7	用电枢磁链预报法的暂态解	233
9.8	饱和	234
第十章	开关	236
10.1	基本开关类型	236
10.1.1	时控开关	237
10.1.2	间隙开关	237
10.1.3	二极管开关	238
10.1.4	可控硅开关(由TACS控制)	239
10.1.5	测量开关	239
10.2	操作过电压的统计分布	239
10.2.1	统计开关	241
10.2.2	规律化开关	241
10.3	带开关的网络解法	241
10.3.1	带开关节点的网络化简	242
10.3.2	完全重新三角分解	243
10.3.3	开关闭合	243
10.3.4	开关打开	244
10.4	断路器中的电弧现象	245
第十一章	避雷器与保护间隙	247
11.1	保护间隙	247
11.2	避雷器	247
11.2.1	碳化硅避雷器	247
11.2.2	金属氧化物避雷器	249
第十二章	EMTP中的一些解法	251
12.1	非线性元件	251
12.1.1	时间滞后 Δt 的电流源模型	251
12.1.2	补偿法	251
12.1.2.1	单个非线性元件	12.1.2.2 用传播时间分隔的多个非线性元件
	非线性元件	12.1.2.3 相联的多个
	12.1.2.4 非线性电感	12.1.2.5 牛顿-拉夫逊方法
	12.1.2.6 数值问题	
12.1.3	分段线性模型	257
12.1.3.1	分段线性电感	12.1.3.2 分段线性电阻
	12.1.3.3 数值问题	
12.2	潮流计算	260
12.2.1	Rasmussen的潮流解法	261

12.2.2	电流源迭代法	262
12.3	无谐波时稳态解	265
12.3.1	戴维南等值电路	265
12.3.2	频率扫描	267
12.3.3	网络不相连部分的不同频率	268
12.4	带谐波的稳态解	268
12.4.1	由线性交流稳态解之后的暂态解得到的谐波	269
12.4.2	从稳态解求得谐波	269
12.4.2.1	“潮流”迭代	
12.4.2.2	“畸变”迭代	
12.4.3	在暂态解和稳态解中谐波的差异	271
12.4.4	铁磁谐振	273
第十三章	控制系统的暂态分析 (TACS)	274
13.1	TACS与电气网络接口	275
13.2	可求和的传递函数块	276
13.3	限幅器	279
13.3.1	自由式限幅器	280
13.3.2	非自由式限幅器	281
13.4	限幅器中可能的时延	283
13.5	信号源	284
13.6	特殊装置	285
13.6.1	用FORTRAN定义的特殊装置	285
13.6.2	固有特殊装置	286
13.7	初始条件	286
附录 I	常微分方程的数值解	288
I.1	解析解	288
I.2	用台劳级数近似转移矩阵	291
I.3	转移矩阵的有理近似	292
I.4	梯形积分法	293
I.5	龙格-库塔法	294
I.6	预报-校正法	296
I.7	逐段逼近法	298
I.8	数值稳定和隐式积分	298
I.9	向后欧拉法	301
附录 II	在不连续瞬间重新初始化	302
附录 III	线性方程解, 矩阵化简和求逆, 稀疏性	304
III.1	高斯消去法	305
III.2	对角线化的高斯-约当消去法	308
III.3	子程序REDUCT和CXRED用于对称矩阵求逆、化简和解方程	309
III.4	采用稀疏技术的高斯消去法	310

第一章 EMTP 解法介绍

本书主要讨论EMTP中所采用的一些解法。书中并不包括关于电磁暂态现象数字模拟解法的全部理论，只着重介绍EMTP开发者们所选择的一些方法，在他们看来，这些方法最适合于EMTP这类通用程序。在分析一些特殊问题时，其它方法也不相上下，甚至更好些。例如，对于研究的时间段很短，行波尚来不及从线路末端反射回来的算例，用傅里叶变换法来研究行波沿线路的畸变与衰减可能更合适。

虽然EMTP是为研究电力系统问题而研制的，其中一些方法也适用于电子电路分析。EMTP的开发者们在一定程度上注意到了电子电路分析程序如TRAC，ECAP等中所采用的一些方法，而近至1976年出版的有关电子电路分析程序的调查^[22]中一次也未发现提及EMTP。

计算机技术发展很快，新的进步可能使本书在出版时已经过时。同时，也可能出现一些更好的数值解法来代替目前EMTP中所用的方法。这两个因素曾使作者泄气。但是，作者希望人们在研制更好的程序并利用先进的计算机硬件时能从目前状况的记录说明中找到有用的信息，这是写完本书的动力。

数字计算机不可能连续地模拟暂态现象，只能在离散的时间点（步长 Δt ）求解，这便导致一步一步的累积误差，并且偏离真实解。EMTP所采用的大部分方法在数值上是稳定的，可以避免这类误差的积累。

EMTP可以解由电阻、电感、电容、单相或多相 π 形电路、分布参数输电线路或其它元件相互连接组成的任意网络。为了使说明简单化，先只考虑单相网络元件，以后再介绍多相网络元件以及其它复杂问题。图1.1为一个较大网络中节点1附近的网络详图。假定在 0 、 Δt 、 $2\Delta t$ ，直至 $t - \Delta t$ 时刻的电压和电流已经算出，现在要求 t 时刻的解。在任何瞬间，从节点1经各支路流出的电流必须等于注入电流 i_1 ，即

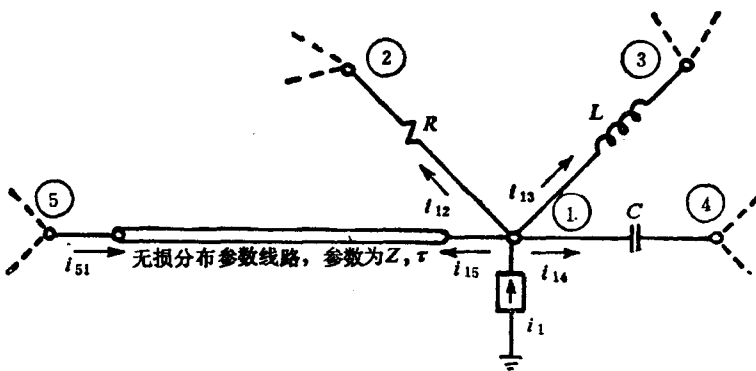


图 1.1 节点 1 附近网络详图

$$i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{14}(t) + i_{15}(t) = i_1(t) \quad (1.1)$$

EMTP采用节点电压作为状态变量，因而必须将支路电流 i_{12} 等表示为节点电压的函数。电阻的方程式为

$$i_{12}(t) = \frac{1}{R} \{v_1(t) - v_2(t)\} \quad (1.2)$$

电感的微分方程式为

$$v = L \frac{di}{dt}$$

代之以中心差分方程可以得到简单的关系式

$$\frac{v(t) + v(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i(t) - i(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

对于图1.1中的电感支路，其方程可以写作：

$$i_{13}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t) - v_2(t)\} + \text{hist}_{13}(t - \Delta t) \quad (1.3a)$$

式中 hist_{13} 称为历史项，可以用前一时步的结果求出：

$$\text{hist}_{13}(t - \Delta t) = i_{13}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_1(t - \Delta t) - v_2(t - \Delta t)\} \quad (1.3b)$$

类似地推导电容支路方程，得到

$$i_{14}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t) - v_2(t)\} + \text{hist}_{14}(t - \Delta t) \quad (1.4a)$$

式中 hist_{14} 也可用前一时步的结果求出：

$$\text{hist}_{14}(t - \Delta t) = -i_{14}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{v_1(t - \Delta t) - v_2(t - \Delta t)\} \quad (1.4b)$$

大学刚毕业的读者以及读过许多电路和网络方面书籍的工程师们可能错误地认为，求解集中参数元件的系统必须利用拉普拉斯变换。其实，拉氏变换只适合于用手算解较小的网络，它对于EMTP所分析的那类大型网络的计算机解用处并不大。因为甚至连一些新的教科书都推崇拉氏变换的有用性，附录I特为熟悉数学的读者总结了线性常微分方程的各种数值解法。

节点1到节点5是一条输电线路，忽略了损耗后，它的波动方程为

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v}{\partial x} &= L' \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C' \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned}$$

式中 L' , C' ——单位长度上的电感和电容●；

x ——与送端的距离。

它的达朗贝尔解为

● L' 和 C' 表示分布参数，以区别于集中参数 L 、 C 。

$$\left. \begin{aligned} i &= F(x-ct) - f(x+ct) \\ v &= ZF(x-ct) + Zf(x+ct) \end{aligned} \right\} \quad (1.5a)$$

式中 $F(x-ct), f(x+ct)$ ——用 $x-ct$ 和 $x+ct$ 表示的函数;

Z ——波阻抗, $Z = \sqrt{L'/C'}$ (常数);

c ——波传播速度 (常数)。

将式 (1.5a) 中电流式乘以 Z 并与电压式相加得到

$$v + Zi = 2ZF(x-ct) \quad (1.5b)$$

从式 (1.5b) 看出, 如果 $(x-ct)$ 不变, $(v + Zi)$ 也不改变。可以设想为一个人沿线路以波速前进, 他所经过的距离是 $x = x_0 + ct$ (x_0 为起始点位置), $(x-ct)$ 为常数。由于 $(x-ct)$ 不变, 他沿线路看到的 $v + Zi$ 必定也是常数。由于波的传播时间

$$\tau = \text{线路长度}/c$$

当他离开节点 5 的时刻 $(t - \tau)$ 看到 $v_5(t - \tau) + Zi_{s1}(t - \tau)$, 经过 τ 后到达节点 1 时将看到 $v_1(t) - Zi_{1s}(t)$ (因为 i_{1s} 与 i_{s1} 方向相反而引入负号)。因为他所看到的值不变, 这二个式子应当相等。可写为

$$i_{1s}(t) = \frac{1}{Z} v_1(t) + \text{hist}_{1s}(t - \tau) \quad (1.6a)$$

式中 hist_{1s} 亦为历史项, 可用前一时步的结果求得:

$$\text{hist}_{1s}(t - \tau) = -\frac{1}{Z} v_5(t - \tau) - i_{s1}(t - \tau) \quad (1.6b)$$

例如, 令 $\Delta t = 100\mu\text{s}$, $\tau = 1\text{ms}$, 因为式 (1.6b) 中所需要的值是 10 步以前算出的, 所以, 线路的已知历史项必须贮存起来长达时间间隔 τ 。如果 τ 是 Δt 的整数倍, 式 (1.6) 给出无损线的精确解, 否则就要采用线性插值法并产生插值误差。沿线路插入几个集中电阻以表示损耗是足够准确的, 这将在 4.2.2.5 节中讨论。4.2.2.6 节将介绍处理损耗的较复杂方法, 特别是对与频率相关参数的处理方法。

将式 (1.2)、(1.3a)、(1.4a) 和 (1.6a) 代入式 (1.1), 便得到节点 1 的节点方程式

$$\left[\frac{1}{R} + \frac{\Delta t}{2L} + \frac{2C}{\Delta t} + \frac{1}{Z} \right] v_1(t) - \frac{1}{R} v_2(t) - \frac{\Delta t}{2L} v_3(t) - \frac{2C}{\Delta t} v_4(t) \\ = i_1(t) - \text{hist}_{1s}(t - \Delta t) - \text{hist}_{14}(t - \Delta t) - \text{hist}_{1s}(t - \tau) \quad (1-7)$$

这是简单的线性代数方程, 电压是未知量, 方程式的右端为从前一时步计算而得到的已知量。

对于有 n 个节点的任意电网, 可以写出 n 个这样的方程

$$[G][v(t)] = [i(t)] - [\text{hist}] \bullet \quad (1.8a)$$

式中 $[G]$ —— $n \times n$ 对称节点电导矩阵;

● 用方括号表示矩阵或向量。

$[v(t)]$ —— n 个节点的电压向量;

$[i(t)]$ —— n 个节点的电流源向量;

$[hist]$ —— n 个已知历史项的向量。

如果某节点连在电压源上或接地, 它的电压值便已知。这样, 式(1.8a)可以分为两块: 电压值未知的节点块A和电压值已知的节点块B。

$$[G_{AA}][v_A(t)] = [i_A(t)] - [hist_A] - [G_{AB}][v_B(t)] \quad (1.8b)$$

解式(1.8b)便可以求得未知电压 $[v_A(t)]$ 。

EMTP中实际计算过程为: 先建立矩阵 $[G_{AA}]$ 和 $[G_{AB}]$; 利用顺序消元及稀疏技术对 $[G_{AA}]$ 作三角分解; 在每一时步中从已知的历史项、电流源和电压源得到式(1.8b)的右端项; 利用三角分解电导矩阵的信息解线性代数方程得到 $[v(t)]$ 。在重复求解的过程中利用了矩阵的对称性, 同一三角分解矩阵不仅用在前代运算过程中, 也在回代运算过程中。在下一时步计算之前要更新式(1.3b)、(1.4b)和(1.6b)中的历史项 $hist$ 以备下一时步计算之用。

起初, EMTP仅适用于从零初值开始的算例。那时, 将式(1.7)中 $hist_{13}$ 、 $hist_{14}$ 和 $hist_{15}$ 项简单地置为零。但是, 不久出现一些暂态模拟必须从工频稳态初值开始的算例。起先采用输入初值的方法^①, 这对使用者来说很麻烦, 他必须从其它的稳态解程序先得到这些初值, 不仅传递数据很费事, 而且其它稳态解程序中的网络模型与EMTP所采用的模型多少有些不同。后来便决定直接在EMTP中增加一个解交流稳态的子程序, 它是由J.W. Walker研制的。

仍用图1.1的算例来说明交流稳态解。利用节点方程, 式(1.1)可以写成

$$I_{12} + I_{13} + I_{14} + I_{15} = I_1 \quad (1.9)$$

式中电流 I 是复数相量 $|I| e^{j\omega t}$ ^②。集中参数元件的支路方程是显而易见的。

对于电阻, 其支路方程为

$$I_{12} = \frac{1}{R} (V_1 - V_2) \quad (1.10)$$

对于电感, 其支路方程为

$$I_{13} = \frac{1}{j\omega L} (V_1 - V_2) \quad (1.11)$$

- 式(1.8a)分块后得到以下两式:

$$\begin{cases} [G_{AA}][v_A(t)] + [G_{AB}][v_B(t)] = [i_A(t)] - [hist_A] \\ [G_{BA}][v_A(t)] + [G_{BB}][v_B(t)] = [i_B(t)] - [hist_B] \end{cases}$$

式(1.8b)为从前式导出。——译者

- EMTP中仍然保留这一功能。不过在增加了交流稳态解的子程序后, 它有点过时而很少使用。对于有些支路来说根本不能用^[1, 116页]。
- 本稿相量用上部不加“.”的物理量符号表示。