

21世纪高等院校教材

电气工程基础(下册)

刘 笙 主编



 科学出版社
www.sciencep.com

137

21 世纪高等院校教材

电气工程基础

(下册)

刘 笙 主编



科学出版社

2002

内 容 简 介

本书是为适应国家教育部 1998 年颁布的“普通高校工科专业目录以及引导性专业目录”中“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业所编写的专业基础课教材。内容包括引论及基本概念、电力设备的理论及模型、网络分析与运行控制、暂态分析与控制、电力系统绝缘与过电压以及计算机监控及输电系统新技术等 6 篇,共 22 章。全书分为上、下两册,上册包括第一至十一章,下册包括第十二至二十二章。

本教材对原有的“电力系统稳态分析”、“发电厂电气及计算机监控”、“电力工程”以及“高电压技术”等课程教材进行了有机整合并更新了体系,增加了抽水蓄能、电压稳定、直流输电与柔性交流输电等新章节,反映了电力工业技术的整体性、综合性以及时代发展趋势,构思新颖、循序渐进。

本书主要作为“电气工程及其自动化”或“电气工程与自动化”专业的基础课程教材,亦适合电气工程技术人员及工程师作为参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程基础(上、下册)/刘筌主编. —北京:科学出版社,2002
(21 世纪高等院校教材)
ISBN 7-03-010438-2

I. 电… II. 刘… III. 电气工程-高等学校-教材 IV. TM
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 033578 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2002 年 8 月第一次印刷 印张: 23 1/4

印数: 1—3 000 字数: 450 000

定价: 54.00 元(含上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

编委会名单

主 编 刘 笙

编 委 岑文辉 朱子述

顾 洁 金之俭

杨镜非 谢 宁

前 言

“中共中央国务院关于深入教育改革全面推进素质教育的决定(1999.6.13)”中指出:“调整 and 改革课程体系、结构、内容,建立新的基础教育课程体系……。改变课程过分强调学科体系,脱离时代和社会发展以及学生的实际情况,抓紧建立更新教学内容的机制,加强课程的综合性和实践性,重视实验课教学,培养学生实际操作能力。”《电气工程基础》一书就是为了贯彻“决定”的指导精神,为适应专业调整后而成立的“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业教学需要而编写的一部专业基础教材。本书是对原有的四门专业课程内容(《电力系统稳态分析》、《发电厂电气及计算机监控》、《电力工程》、《高电压技术》)进行有机整合并更新体系的一种尝试。

本书包括6篇,共22章。第一篇为引论及基本概念,包括第一、二章;第二篇为电力设备的理论及模型,包括第三至七章;第三篇为网络分析与运行控制,包括第八至十一章;第四篇为暂态分析与控制,包括第十二至十六章;第五篇为电力系统的绝缘与过电压,包括第十七至二十章;第六篇为计算机监控及输电系统新技术,包括第二十一、二十二章。全书分为上、下两册,上册由第一至十一章组成,下册由第十二至二十二章组成。

本书具有以下特点:(1)通过新旧中国电力工业的发展对比,体现德育和智育的统一。旧中国电力工业历尽坎坷,步履蹒跚。新中国电力工业蓬勃向上,发展迅速。改革开放使电力工业腾飞。书中所列举的事实是进行爱国主义教育的生动素材。(2)知识结构反映电力工业技术的整体性及综合性。教材改革前,稳态与暂态、短过程动态与长过程动态(暂态稳定与频率变化过程)、过电压与过电流、电气设备、发电机运行等内容分割在多本教材中,既没有整体概念,又有重复现象。该教材对上述内容进行了整合。(3)知识结构反映了电力工业的时代发展趋势。本教材含抽水蓄能、电压稳定、直流输电、柔性交流输电等新内容。(4)教材配套建设。本教材与即将出版的习题集、CAI教学辅导软件配套建设,用以提高教学效率。

本书主要作为电气工程及其自动化专业和电气工程与自动化专业的专业基础课教材。其中一些章节可因材施教,供自学用。本书亦可作为电气工程研究和工程技术人员的参考读物。

本教材由编写组集体创作。其中第三、四、五章由岑文辉编写,第十六、十八章由朱子述编写,第十七、十九、二十章由金之俭编写,第七、八、十四章由顾洁编写,

第十二、十三章由杨镜非编写,第二十一章由谢宁编写。第一、二、六、九、十、十一、十五、二十二章由刘笙编写。刘笙任主编。吴际舜教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中得到了我校(上海交通大学)电力学院教学改革指导委员会、李福寿教授以及陈章潮教授的热心指导。张焰教授做了大量的组织工作。上海市电力公司钱重耀高级工程师提供了有关电力工业发展的素材。在此一并向指导和帮助本书编写的各位领导、专家致以衷心的感谢。

由于编写时间仓促,加之编者学术水平及教学经验有限,书中不妥之处在所难免,诚挚希望使用本书的师生、工程技术人员提出宝贵意见。

编 者

2001年12月

目 录

前言

第四篇 暂态分析与控制

第十二章 电磁暂态过程与三相短路电流计算	1
第一节 电力系统短路的概念	1
一、短路的原因和分类	1
二、短路后果和预防措施	2
三、短路计算的目的	2
四、短路计算的简化假设	3
第二节 无穷大功率电源供电系统三相短路电流的分析计算	4
一、无穷大电源	4
二、三相短路的暂态过程	4
三、短路冲击电流、最大有效值电流和短路功率	8
第三节 同步发电机突然三相短路电磁暂态过程	12
一、发电机物理描述	12
二、同步发电机正常运行	12
三、同步发电机机端突然三相短路电流波形	17
四、三相短路物理过程	20
五、三相短路电流计算	22
第四节 实用计算	26
一、运算曲线概念	26
二、运算曲线应用	27
参考文献	28
第十三章 不对称故障分析	29
第一节 对称分量法	29
一、对称分量法物理解释	29
二、对称分量法的应用	34
第二节 电力系统中元件的序参数计算	41
一、三相输电线的零序参数	42
二、变压器的零序参数和等值电路	56
三、同步电机的序参数	66
第三节 电力系统序网的建立	67

第四节 不对称短路分析	71
一、简单不对称短路分析	71
二、简单不对称短路时网络中的电流和电压计算	87
三、电压和电流对称分量经变压器后的相位变化	91
四、各种不对称短路电流值与三相短路电流值的比较	108
参考文献	110
第十四章 导体的发热及电动力计算与电气设备选择	111
第一节 导体的发热问题	111
第二节 均匀导体的发热计算	114
一、均匀导体的长期发热及载流量的确定	114
二、均匀导体的短时发热计算	118
第三节 均匀导体短路时的电动力	123
一、两平行导体间的电动力	123
二、三相导体短路时的电动力	125
第四节 电气设备选择的一般条件	129
一、按正常工作条件选择电气设备	129
二、按短路情况校验热稳定及动稳定	131
第五节 母线及绝缘子与穿墙套管的选择	133
一、母线的材料及类型和敷设方式	133
二、绝缘子与穿墙套管的选择	140
第六节 高压开关电器的选择	143
一、断路器的选择	143
二、隔离开关的选择	144
三、高压熔断器的选择	144
第七节 限流电抗器的选择	146
一、按额定电压和额定电流选择	146
二、电抗百分值的选择	146
三、短路热稳定和动稳定校验	147
参考文献	150
第十五章 机电动态与稳定性	151
第一节 机电动态	151
第二节 电力系统的功角稳定	152
一、电力系统的静态稳定	152
二、电力系统的暂态稳定	157
三、电力系统的振荡与失步	161
第三节 电力系统的电压稳定	162
一、电力系统的静态电压稳定	162
二、电力系统的暂态电压稳定	166

第四节 电力系统的频率稳定	172
一、功率缺额与系统频率的下降	173
二、系统频率变化的动态过程	173
三、自动低频减载	175
参考文献	176
第十六章 线路和绕组中的波过程	177
第一节 单相均匀无损耗线路上的行波	177
一、波动方程	177
二、波动方程解的物理意义——前行波和反行波	178
第二节 波的折射和反射	181
一、计算节点电压的等值电路(彼德逊法则)	181
二、由几条线路同时来波时的节点电压计算	184
第三节 波通过串联电感和并联电容	185
第四节 波在有限长线段上的多次折反射	188
第五节 波在平行多导线系统中的传播	191
第六节 波的衰减和变形	194
第七节 单相变压器绕组中的波过程	195
一、起始电位分布	196
二、稳态电位分布	198
三、过渡过程	198
第八节 三相变压器绕组中的波过程	201
一、星形接法且中性点接地(Y_0)	201
二、星形接法且中性点不接地(Y)	201
三、三角形接法	202
第九节 冲击电压在绕组间的传递	202
一、静电分量	203
二、磁分量	203
参考文献	203

第五篇 电力系统的绝缘与过电压

第十七章 电力系统的绝缘	204
第一节 气体放电及气体绝缘电气设备	204
一、均匀电场中的气体放电	204
二、放电类型	207
三、影响气体放电过程的各种因素	208
四、空气间隙的击穿电压	213
五、高电气强度气体 SF_6 及气体绝缘设备	214
第二节 绝缘子和沿面放电	216

一、绝缘子类型	216
二、干湿状态下绝缘子的沿面放电	217
三、长绝缘子串的电压分布	217
四、沿套管表面的放电	218
五、污秽绝缘子的沿面放电	220
第三节 液体及固体电介质的电气特性和电气设备的内绝缘	222
一、液、固体电介质的电气特性	222
二、绝缘的老化	224
三、电气设备的内绝缘	227
参考文献	232
第十八章 电力系统过电压	233
第一节 稳态过电压的电路基础	233
一、电感-电容效应	233
二、基波铁磁谐振过电压	234
三、参数谐振过电压	236
第二节 稳态过电压举例	236
一、空载长线的电容效应	236
二、单相接地时的健全相电压升高	240
第三节 暂态过电压的电路基础	242
一、直流电源合闸于 $L-C$ 串联回路	242
二、直流电源合闸于 $R-L-C$ 回路	248
三、交流电源合闸于 $R-L-C$ 回路	249
第四节 暂态过电压举例	252
一、空载线路的合闸过电压	252
二、空载线路的拉闸过电压	254
第五节 雷电侵入波过电压的保护	256
一、避雷器直接装设在变压器端口	256
二、被保护设备与避雷器间有一段距离	257
参考文献	259
第十九章 电力系统中性点接地方式	260
第一节 电力系统的中性点	260
第二节 中性点不接地系统	261
第三节 中性点直接接地系统	262
第四节 中性点经电阻接地	263
一、高电阻接地	264
二、低电阻接地	264
第五节 中性点经电抗器接地	265
第六节 中性点谐振接地	266

一、基本原理	266
二、消弧线圈的配置与运行	269
第七节 中性点接地变压器	270
第八节 各种接地方式的比较	272
参考文献	273
第二十章 交流电气装置的绝缘配合	274
第一节 影响绝缘水平的因素	274
一、按系统最高电压划分范围	274
二、中性点接地方式	274
第二节 绝缘配合的方法	275
一、惯用法	275
二、统计法	276
第三节 架空送电线路的绝缘配合	276
第四节 变电所电气设备的绝缘配合	278
一、雷电过电压下的绝缘配合	278
二、操作过电压下的绝缘配合	278
参考文献	279

第六篇 计算机监控及输电系统新技术

第二十一章 计算机在电力系统中的应用	280
第一节 发电厂的计算机监控系统	280
一、计算机监控系统的发展历史	280
二、计算机监控系统的组成	281
三、计算机监控系统的特点和功能	283
四、计算机控制系统的分类	284
第二节 发电厂计算机监控系统的数据采集及处理	287
一、模拟量通道	288
二、开关量通道	291
第三节 发电厂生产过程的监视与控制	291
一、运行参数的监视	291
二、运行参数的制表打印	292
三、屏幕显示	293
四、报警分析	293
五、运行参数的趋势预测	294
第四节 变电站的计算机监控系统	294
一、监控系统的基本功能	295
二、监控系统的功能结构	296
三、监控系统的组态	297

四、监控系统的信息处理及远方终端	297
五、监控系统的交流采样方法	298
第五节 电网调度管理自动化	299
一、SCADA 功能	299
二、电网控制和管理	300
参考文献	303
第二十二章 远距离输电与电网互联	304
第一节 远距离输电概念	304
第二节 交流远距离输电	305
一、交流远距离输电基本特征	305
二、线路的理想功率极限	307
三、输电线受端 PU 曲线分析	310
四、交流远距离输电的参数补偿	311
第三节 直流输电	316
一、直流输电系统的接线方式与构成	317
二、直流输电系统的工作原理	321
三、直流输电系统的基本调节方式	329
四、高压直流输电技术的发展	331
第四节 灵活交流输电	332
一、晶闸管控制的串联电容器(TCSC)	333
二、静止调相机(STATCOM)	341
三、统一潮流控制器(UPFC)	349
第五节 电网互联	353
一、电网互联的经济效益	353
二、电网互联方法	354
三、我国全国联网的格局	355
参考文献	357

第十六章 线路和绕组中的波过程

本章从线路和变压器绕组的电路模型出发,阐明了电磁波在线路上传播规律和在其端结点发生折、反射的节点电压计算方法,电机绕组的波过程的简化分析类似于线路波过程;阐明了阶跃波作用下变压器绕组中的起始电位梯度不均匀的原因,论述了最大电位包络线的估算方法及其在三相变压器绕组波过程分析中的应用。

第一节 单相均匀无损耗线路上的行波

一、波动方程

输电线路是电力系统中广泛分布的元件,它在过电压的产生和传播过程中起重要作用。

首先,着重分析单导线一地系统情况,雷电过电压的计算常按此处理;虽然在计算操作过电压时涉及到三相线路,但应用相模变换,可以把三相网络转换为等效的单相网络来处理。因此,单根导线一地系统是分析计算线路上的电磁暂态过程的基础。

本节讨论对象为均匀的无损耗线路。若引入导线、大地的电阻和导线对地的漏电导,则将增加数学上的复杂性,且不易得到清晰的物理概念。至于损耗问题,以后再考虑把它引入。在图 16-1 中表示出均匀无损耗长线的一微分元。 L_0 为每米导线一地形成的回路的电感, C_0 为每米导线的对地电容。该微分元离线路首端的距离为 x 。线路上的电压 $u(x, t)$ 和电流 $i(x, t)$ 都是距离和时间的函数。

取电压的参考方向为线路对地,电流的参考方向与 x 的正方向一致。由基尔霍夫定则建立下列偏微分方程组:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (16-1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (16-2)$$

其解为

$$u = u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + u^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (16-3a)$$

$$i = i^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(t + \frac{x}{v} \right) = \frac{u^+}{Z} \left(t - \frac{x}{v} \right) + \frac{u^-}{-Z} \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (16-3b)$$

式中, $v = (L_0 C_0)^{-\frac{1}{2}}$ 为波速度; $Z = (L_0 / C_0)^{1/2}$ 为波阻抗。

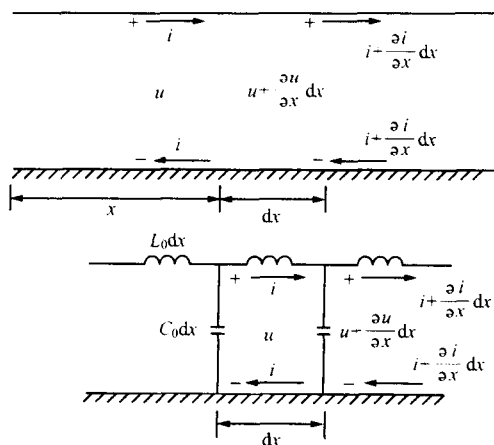


图 16-1 单相无损耗长线上的微分单元

上两式表明:线路上任一点的电压、电流波形是前行波和反行波叠加的结果。分别由 u^+ , u^- , i^+ 和 i^- 表示。

有时,为表达线路上某时刻的电压、电流沿线分布,它们可改写为

$$u = u^+ (x - vt) + u^- (x + vt) \quad (16-4a)$$

$$i = \frac{1}{Z} [u^+ (x - vt) - u^- (x + vt)] \quad (16-4b)$$

二、波动方程解的物理意义——前行波和反行波

1. 波的运动特性

组成电压(伴随着电流)的两个分量 $u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 和 $u^- \left(t + \frac{x}{v} \right)$ 分别以波速度 v 向 x 正方向和 x 负方向运动,它们分别被称为前行波电压和反行波电压。

以 $u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 为例进行分析

$$u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) = u^+ \left(t + \Delta t - \frac{x + v\Delta t}{v} \right) = u^+ \left(t + \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right)$$

上式可见: t 时刻 x 处的前行波电压, 随时间推移, 在 $t + \Delta t$ 时刻将跑到 $x + \Delta x = x + v\Delta t$ 那一点, 故其运动速度为 v 。

对于架空线路, 设导线离地平均高度为 h 米, 导线半径为 r 米, 则每米导线对地电容和每米导线对地回路电感分别为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad \text{F/m} \quad (16-5)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad \text{H/m} \quad (16-6)$$

式中 $\epsilon_0 = (36\pi)^{-1} \times 10^{-9} \text{F/m}$, 为空气的介电常数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 为空气的导磁系数。因此,

$$v = (L_0 C_0)^{-\frac{1}{2}} = (\mu_0 \epsilon_0)^{-\frac{1}{2}} = 3 \times 10^8 \text{m/s} = 300 \text{m}/\mu\text{s} \quad (16-7)$$

对于电缆线路, $\mu = \mu_0, \epsilon_r \approx 4$, 故 $v \approx 150 \text{m}/\mu\text{s}$, 约为光速的一半。电机绕组的绝大部分被嵌在铁芯槽内, 其周围介质的 μ_r 很大, 故其波速度更慢。

前行波的运动情景如图 16-2 所示。在运动过程中, 波形上的每个点的运动速度相等且其幅值保持不变, 所以它在线路范围内运动是不变形、不衰减的。

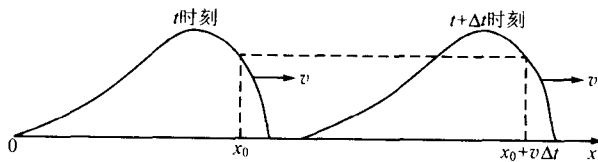


图 16-2 波的空间传播

类似的分析可知: u^- 的运动速度是 $-v$, 是以速度 v 向 x 负方向运动的波。

在此, 要专门说明的是: 线路末端的前行波 $u^+ \left(t + \tau - \frac{l}{v} \right)$ 等于首端的前行波 $u^+ \left(t - \frac{0}{v} \right)$ (式中 l 是线路长度, $\tau = \frac{l}{v}$ 是波从线路一端走到另一端所花费的时间), 即前者来源于后者, 但两者存在“时差” τ 。另外, 到达末端的前行波电压、电流值并不受末端边界状态的影响。

2. 波的能量特性

若以波的运动方向作为其电流的正方向来表达单波的电压、电流比值, 则有

$$\frac{u^+}{i^+} = \frac{u^-}{-i^-} = \left(\frac{L_0}{C_0}\right)^{\frac{1}{2}} = Z$$

Z 具有电阻的量纲,称为波阻抗,对于架空线,

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2h}{r} = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad \Omega \quad (16-8)$$

一般架空线的 Z 约为 500Ω ,分裂导线的 Z 约为 300Ω 。与波速度不同,波阻抗不仅取决于线路空间介质的 ϵ 和 μ ,而且取决于导线半径与导线离地高度的相对比值。对于电缆线路,因芯线离外皮间距小,故 L_0 较小;加之电缆绝缘层的 ϵ 约为 $4\epsilon_0$,故 C_0 比架空线大得多。电力电缆的 Z 约在几欧至几十欧。电机绕组周围介质的 μ 大, L_0 较大,其 Z 与电机容量相关,一般容量大的电机 Z 较小。

式(16-8)可转化成下列形式而显见其物理涵义

$$\frac{1}{2} C_0 (u^+)^2 = \frac{1}{2} L_0 (i^+)^2$$

$$\frac{1}{2} C_0 (u^-)^2 = \frac{1}{2} L_0 (i^-)^2$$

从中可得出结论:前行波和反行波在传播过程中,在导线周围的介质中建立了电磁场。对于每一个独立的行波而言,其电场能量恒等于磁场能量。这就是电磁波在无损耗线路中传播必定遵循的能量关系,线路的 Z 值就反映了这一关系。

综上所述,可以想象出有两组电荷沿导线表面—地表面同步地以波速度分别向 x 正方向和 x 负方向运动,它们在空间建立了电磁场,造就了导线上的电压和电流。在此,导线-介质-地系统起到了引导电磁波的作用,因而,这一过程被称为波过程。

为了区分线路波阻抗与集中参数电阻元件的不同本质和特点,作以下几点说明:

① 当一条空载线路接到电源上去,由于不存在末端向首端传播的反行波,故方程解只有“+”项,即 $\frac{u}{i} = \frac{u^+}{i^+} = Z$ 。因此,从电源看来如同接在一个阻值为 Z 的电阻器。当然,两者的物理本质是截然不同的。电流通过电阻器,对应于电压降落和功率损耗;而电荷在无损的导线—地面流动时,伴随而生的 u^+ 、 i^+ 的传播对应着线路电磁能量储存正以速度 v 向远方扩展,并不存在任何的电压降落和功率损耗。

② 线路与外界发生关系的只是端接处这一长度元,中间部分只起到“通道”作用。

③ 要把波的传播方向和电压、电流的正负号区分开。负波并非即是朝 x 负方向传播的波,只有 $\frac{u}{i} = -Z$ 的波才被认为是反行波。至于式中的负号,完全是由于人为地把电流参考方向指定为 x 正方向而引入的,当正电荷沿导线向 x 负方向运动(反行波),在导线对地形成正电压,而流过导线截面的电流是负的。

④ 如果导线上某点既有前行波,又有反行波,则该点的电压与电流的比值不等于波阻抗, $\frac{u^+ + u^-}{\frac{u^+}{z} - \frac{u^-}{z}} \neq z$ 。

第二节 波的折射和反射

一、计算节点电压的等值电路(彼德逊法则)

分析图 16-3 情况:前行波(此时称为入射波)电压是一幅值为 U_0 的阶跃波,它由波阻抗较大的架空线路向波阻抗较小的电缆线路传播,即有 $Z_1 > Z_2$ 。A 点为节点。

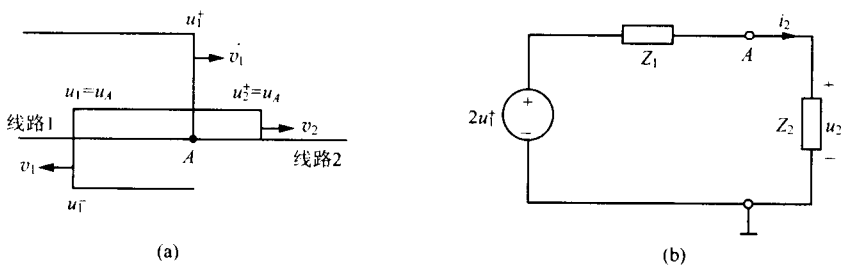


图 16-3 波在节点上的折射和反射

假定入射波达到节点后能原封不动地折射到线路 2 上。那么,线路 2 上的折射波的电场能量将大于磁场能量,这就不能满足线路 2 上的单波的电、磁能量相等这一电磁波传播时所遵循的规律。由此推测:节点电压将减小,电流将增大;相应地,在线路 1 上将会出现从节点返回的负的电压波和伴随的正的电流波(反射波)。

对于图 16-3 中节点电压的计算,涉及到载波线路的端口等值电路。

与节点 A 相连的有二个线路微分元,左方为线路 1 末端微分元,有

$$u_1 = u_1^+ + u_1^-$$