

 国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



微波与高速电路 理论

李征帆 毛军发 著

IN
formation

上海交通大学出版社



国家自然科学基金研究专著

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



微波与高速电路 理论

李征帆 毛军发 著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书共分为两大部分:前面的七章为微波与高速电路的频域分析,其中包括集中参数、分布参数、平面和立体电路以及微波宽带放大器的分析、综合和机助设计。后面四章则叙述高速电路中和互连封装结构相联系的信号完整性问题,包括互连线直接时域分析、频域变换分析、系统的阶数缩减分析、以及由馈电和接地系统引起的同步开关噪声分析。

全书比较注意理论的系统性,同时也反映了作者几年来研究工作的积累,其中相当部分涉及当前这一领域的研究前沿。因此本书适于研究单位、企业研发部门人员作为参考,也可供高校有关专业的研究生作为教学和研究的参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波与高速电路理论/李征帆,毛军发著. —上海:
上海交通大学出版社,2001
ISBN 7-313-02668-4

I. 微… II. ①李…②毛… III. 微波电路—电路理论
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 16005 号

微波与高速电路理论

李征帆 毛军发 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 897 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:25.5 插页:2 字数:634千字

2001年8月第1版 2001年8月第1次印刷

印数:1~1050

ISBN 7-313-02668-4/TN·086 定价:44.00元

版权所有 侵权必究

前 言

目前正处于信息技术飞速发展的时期,信息技术的应用几乎已遍及国民经济和军事技术的各个领域。作者认为信息技术的发展,大体会有两个方向:一是信息技术的本身,它的应用范围将进一步扩大,各种应用的理论和技术将日趋完善;二是信息技术的载体,微电子芯片及由其构成的系统、各种电子和光电子器件及由其构成的系统、信息的传输媒质等方面也必然会迅速发展。就两者关系而言,后者是前者发展的基础,后者的发展水平会极大地促进或限制前者的发展,因此对此绝不能掉以轻心。

为了满足这一方面的需要,我们奉献这一本书——《微波与高速电路理论》。全书内容来自我们多年来教学和科研工作的累积,取材的基本考虑是:尽量反映这一领域的新动态和新成果,内容尽量避免和其他已出版的同类书籍重复,并尽可能地反映作者所在课题组几年来的研究成果。全书的前一部分较多为基础性的内容,后一部分则和我们的科研工作有较为密切的联系,其内容主要来自我们发表于国内外的60余篇论文。

鉴于上述考虑,本书的内容就书名而言不能算完整,其中微波电路部分主要包括各种微波无源电路和微波线性放大器的频域分析、频域网络综合以及优化设计,高速电路则主要叙述近几年来由于工作速度的提高和电路规模的扩大而在电路芯片及组件中引起信号完整性问题,由此对系统中的互连线、馈电和接地系统以及封装结构进行高速时域响应分析。以上问题对整个微波与高速电路领域虽非完整,但在理论、方法以及应用方面都相当重要。

在微波和高速电路领域中尚有其他一些前沿问题,例如CMOS微波和高速电路具有广阔的发展前景,由于我们刚上手研究不久,科研积累较少,未能反映在本书内容中,只能留待今后补充。

作为微波和高速电路系统完整的电特性分析,除电路分析外,电磁场分析也必不可少,两者彼此紧密相联系,在本书出版后,我们将开始编写另一本书——《微波与高速电路中的电磁场理论及其数值方法》作为本书的姊妹篇,希望也能及早与读者见面。

全书虽由作者执笔,但是作者的历届研究生在学期间的研究成果为本书基本内容的构成作出了贡献。他们是博士研究生李新、徐勤卫、袁正宇、曹毅、杨晓平、蔡兴建,李鸿儒,硕士研究生薛理银、赵捷、乔峰、胡震亚、华晓初、秦鹏军、王重玮、陈俊国、汪文奎、蔡正辉、毛吉峰、吕映伟、王钧、王隼。此外硕士生刘晨波、姜祁峰等五位同学为全书绘制插图,在此向他们表示深切的谢意。

尽管本书部分内容尚不很成熟,作者认为其水平也不能算高,但国家自然科学基金会给以大力支持,将本书作为国家自然科学基金资助出版的一本专著,我们除感到荣幸并表示感谢外,还决心以此作为鞭策,将今后工作做得更好。

作者

于上海交大电子信息学院

2000年12月22日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 微波与高速电路理论的进展	1
1.2 微波与高速电路的频域和时域分析	4
1.3 场与路的问题	6
1.4 微波与高速电路系统中的电路单元	7
1.5 本书主要内容.....	10
本章参考文献	11
第 2 章 微波与高速电路的频域特性	12
2.1 序言.....	12
2.2 网络的正实性质,正实函数和正实矩阵	14
2.3 界实函数和界实矩阵.....	18
2.4 零维电路和有理函数.....	21
2.5 无耗网络及电抗函数.....	26
2.6 正实函数的偶部和奇部.....	30
2.7 公度线网络.....	34
2.8 线性、对时间不变网络的传输参量	39
2.9 无源、无耗、可逆二端口网络的传输函数.....	44
2.10 传输零点	48
2.11 网络函数的阶数缩减及 Pade 逼近	49
本章参考文献	54
第 3 章 集中参数电路的分析与综合	55
3.1 电路的分析与综合.....	55
3.2 以 MNA 得出集中参数电路的网络函数.....	57
3.3 集中参数网络的阶数缩减.....	60
3.4 最大平坦度逼近.....	61
3.5 契比雪夫多项式逼近.....	64
3.6 用 CAD 方法对理想梯形特性进行逼近	66
3.7 单端口网络按阻抗函数的实现.....	70
3.8 二端口网络按传输函数的实现.....	77
3.9 由有耗元件构成网络的综合.....	84
3.10 实频综合法	86

3.11 二端口网络参考阻抗的变换	89
本章参考文献	92
第4章 分布参数电路的分析与综合	94
4.1 序言	94
4.2 里查兹定理	95
4.3 以级联线构成的公度线网络实现电抗函数	97
4.4 级联传输线二端口网络的传输函数	99
4.5 级联传输线网络传输函数的最佳逼近	104
4.6 级联传输线网络的对称性	109
4.7 带有分支线段的公度线网络	112
4.8 科罗达(Kuroda)等效	116
4.9 科罗达等效的应用	120
4.10 对称双耦合线单元及电路	127
4.11 超宽带多节可变耦合线定向耦合器	132
4.12 多导体耦合线单元的特征模分析	135
4.13 非均匀传输线及其等效电路	139
本章参考文献	144
第5章 平面与立体电路	146
5.1 序言	146
5.2 平面电路二维电磁场方程的求解	146
5.3 各种平面电路的矩阵参量和电路特性	153
5.4 微带不连续性的平面电路解法	163
5.5 带有介质腔的微带电路分析	167
本章参考文献	176
第6章 微波宽带匹配网络与宽带放大器	178
6.1 序言	178
6.2 Bode 的增益带宽理论	179
6.3 微波 FET 器件的线性电路模型	185
6.4 电抗匹配的微波宽带放大器	190
6.5 电抗匹配微波宽带放大器设计实例	197
6.6 利用实频法设计宽带放大器匹配网络	204
6.7 微波超宽带放大器匹配网络分析设计	208
6.8 超宽带行波放大器	215
本章参考文献	219

第 7 章 微波电路的组合及分解	220
7.1 序言	220
7.2 微波电路的广义级联法	221
7.3 微波网络按导纳参量的组合	224
7.4 微波网络按 S 参量的组合	227
7.5 平面电路的分块解法	229
7.6 电路的抽出及微波网络分析仪的校正	232
本章参考文献	235
第 8 章 微波与高速电路时域分析概论	236
8.1 序言	236
8.2 无耗 TEM 传输线时域响应的解析解	238
8.3 公度线网络时域响应的拉氏变换解	241
8.4 混合微波电路系统的时域分析	246
8.5 微波非线性电路的时域解法	252
8.6 传输线状态变量法	256
8.7 以时域方法进行微波网络的频域分析及综合	266
8.8 求解传输线时域响应的直接方法——特征法	271
本章参考文献	276
第 9 章 高速电路互连线时域响应的直接时域法分析	277
9.1 序言	277
9.2 单根有耗互连线时域响应的特征法解	277
9.3 应用特征模变换的多导体互连线时域响应的特征法解	280
9.4 部分特征模变换的多导体互连线时域响应的特征法解	287
9.5 频变电阻互连线时域响应的卷积特征法解	291
9.6 改进特征法	294
9.7 高阶改进特征法的递归卷积算法	298
9.8 微分求积法(DQ 方法)分析高速互连线的时域响应	303
9.9 互连线的灵敏度分析模型	310
本章参考文献	313
第 10 章 高速电路互连线时域响应的频域变换法分析	315
10.1 序言	315
10.2 多导体互连线频域特征模变换结合 FFT 进行时域响应分析	316
10.3 应用 S 参数的互连线时域响应的频域变换解法	318
10.4 广义 ABCD 矩阵级连方法求取多导体线时域响应	322
10.5 波形松弛迭代法求解互连线的时域响应	327

10.6	以广义波形松弛迭代方法计算互连线的广义 ABCD 矩阵	332
10.7	以数值反拉氏变换(NILT)求解互连线的时域响应	336
10.8	改进的 NILT 方法求解互连线时域响应	341
10.9	芯片内频变互连线的时域响应分析	344
	本章参考文献	347
第 11 章	高速电路的系统分析	349
11.1	序言	349
11.2	以改进节点法(MNA)进行高速电路系统分析	350
11.3	半导体器件和基本电路模型的处理—SPICE 模型和 IBIS 行为模型	354
11.4	包括互连线网的高速电路模拟软件 VHIHA 和 VHIHAS	361
11.5	以 PEEC 方法对不规则布线网进行建模	365
11.6	以 Pade 逼近(AWE)进行高速电路系统的阶数缩减分析	369
11.7	Krylov 子空间变换	374
11.8	利用 Krylov 子空间变换进行集中参数电路的系统阶数缩减	378
11.9	Krylov 子空间变换用于含分布参数电路的阶数缩减	381
11.10	高速电路馈电和接地系统的同步开关噪声(SSN)分析	389
	本章参考文献	399

第 1 章 绪 论

1.1 微波与高速电路理论的进展

1.1.1 微波电路理论与技术的进展

20 世纪 40 年代雷达技术开始被广泛应用于军事领域后,微波部件被大量应用于电子系统中,并且经常采取等效方法,将微波部件由复杂的电磁场问题转化为相对较为简单的电路问题进行分析。但微波电路理论比较成熟和系统化还是在 20 世纪 60 年代后期微波集成电路技术崛起以后,由于微波集成电路可将半导体微波器件和无源电路紧凑地集成在一块基片上,不仅实现了微波系统的复杂化、大型化和多功能化,而且有可能实现电路功能的最优化。在此基础上各种微波电路的理论和分析方法如微波电路综合理论、微波非线性电路理论、变参数微波电路理论、微波宽带和超宽带电路理论和设计方法等纷纷涌现,对微波电路与系统的发展起了推动作用。

近几年来随着无线通信技术的发展及其使用频段向微波波段发展的趋势,以及其他和微波技术相关领域的发展,微波电路在技术及理论方面又出现迅速发展的局面,而且在理论和技术方面产生不少新的发展苗头,现举以下几个方面说明之:

1. 微波宽带和超宽带电路理论和技术

无论是现代化的仪器(如宽带扫频仪),以及军事上的宽带电子对抗,都需宽带(1~2 个倍频程)和超宽带(可在 10 个倍频程以上)的微波电路元部件。并且由于光通信调制信号速率的提高(现已至 Gbit/s 的数量级),其频谱高端可达到微波甚至毫米波,因此在光端机中对高速信号进行处理的电路部件(如放大器)很明显地应为超宽带微波电路,应使高速脉冲信号经处理后不产生明显失真。

设计宽带和超宽带微波电路元部件的基础性理论为微波网络综合理论和优化方法,此即为给定电路指标下的最佳设计理论,这种理论存在一定的应用局限性(例如对电路的结构和元件参数的性质都限于一种理想化的假设),与实际可实现的电路有一定距离,需在此种理论基础上加以必要的修正并和优化算法结合起来。

2. 微波电路互连和封装寄生参量的估值和电特性仿真

由于微波电路系统的复杂化以及微波系统和其他部分的组化,在过去混合式微波集成电路和微波单片集成电路的基础上,又出现一些新的电路组装和封装形式,如微波三维集成电路、微波多芯片组件(MCM)、微波芯片和其他芯片的混合 BGA 封装等,上述形式实际上都是为了实现系统的紧凑组合。

在上述的各种组装形式中,必然存在各个电路部分间的互连线和必要的封装结构(例如芯

片引出线、组件引出接线脚、多布线层间的通孔等),在微波频率下上述部分的寄生参量必然会构成对系统电特性的影响,这一部分是原先设计时未预先考虑的,因此对这一部分的寄生参量进行提取或估值,然后通过仿真确定其对系统电特性的影响是必要的,如果影响严重时就必须对内部电路的原设计进行修改。从更高的层次来看,可进行系统的所谓抽出(De-embed)设计,即在给定系统的外特性以及已知互连和封装元件寄生参量和电路特性的情况下,用反推的方法算出内部电路应具有的电特性,再据此进行设计,使经过互连和封装后的组件最终特性能满足要求。

3. 微波非线性电路理论

微波电路系统中存在相当数量的有源器件完成大量的功能,这些有源器件除少部分可用线性模型表示外,大量的属于非线性范围,事实上许多功能如限幅、调制、混频、倍频、振荡等都需借非线性作用才能实现。在微波技术初创时期,对非线性器件往往以非常近似的模型表示,非线性模型和外线性电路相互作用的处理也十分粗糙,最后制成的实际电路要经过反复调试,才能达到较优性能。上述做法对当前复杂的集成电路形式不再可行,一方面是集成电路的形式不允许调试,另一方面由于系统越来越复杂,系统中包含大量的功能部分,每一单独部分设计计算的不准确将影响其他部分,最终影响系统整体的设计质量。

相对而言,微波系统中的线性元件的电磁建模和电路计算已基本解决,可保证相当的精确度,但非线性部分成了难点。最近几年微波非线性器件参数的准确提取以及微波非线性电路的算法也成为研究热点之一。用 Monte-Carlo 方法提取参数,用谐波平衡法、时域法和 Volterra 级数法进行微波非线性电路分析等都引起了广泛的注意。

1.1.2 高速电路技术和理论的进展

近几年来最令人瞩目的是大规模集成电路迅速地向高速度和大规模的方向进展,近期 Si 晶片的 CMOS 技术所制成的芯片,时钟频率已达到 1GHz,甚至达到 1.5 GHz,已到达微波频率,而相应的脉冲信号的频谱高端则趋向更高的频率范围。

众所周知,在过去相当长的一段时间内,单块 IC 芯片只能构成单一功能的部件,如存储器,处理器等,尽管芯片中电路规模已很大,但尚不能认为已构成具有较完整功能的系统,芯片基本上为具有相同功能的大量单元电路的组合,只能借助于印刷电路板(PCB)将不同类型经封装后的 IC 芯片组合而得到功能较为齐全的系统。近期来由于微电子技术的高度发展,尤其是亚微米和深亚微米技术的进展,器件和单元电路的尺寸可做得更小,而集成度则可以非常高,因此创造了在单块芯片上实现系统的可能(即所谓 System on Chip)。目前已有相当多芯片按专门的使用要求设计,在一块芯片上包含存储、处理等不同功能,称为专用集成电路芯片(即 ASIC),以紧凑的尺寸,较廉的价格,更好的性能实现了很高集成度的系统。

当然,为了实现复杂的系统,并非只有 ASIC 一条途径,PCB 技术目前仍在被广泛应用。除此以外,将规模较小、功能相对简单的芯片经各种封装形式构成组件者也为数不少,多芯片组件(Multichip Module 简称 MCM),混合形式的 BGA 封装等都被广泛应用,下面对 MCM 作一简单介绍。

图 1-1 为 MCM 的剖面,可以看出 MCM 由多块裸芯片通过多层布线组合而成,相比较于 PCB 而言,MCM 具有结构紧凑、集成度高的特点,有利于小型化。同时由于裸芯片安装除

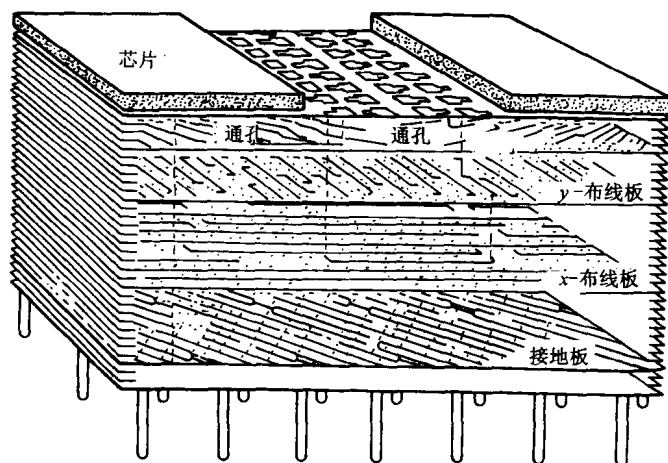


图 1-1 MCM 的示意图

去了管壳封装的影响,多层布线网的布线紧凑使互连线长度较短等因素,都对提高 MCM 的整体电性能有利。相对于 ASIC 芯片, MCM 的小型化程度和互连封装的影响程度虽较差些,但其设计制作的灵活性较大,在 MCM 的基片上甚至可以组合不同基片材料的芯片(例如一般的硅芯片和砷化镓芯片,后者往往用来实现微波系统),并可在基片上制作一些特殊的电路元件,这些方面在单块芯片上是难以实现的。

不论以上述何种方式构成系统,当工作速度提高以后,高速电路系统都有相同的特点。由于亚微米和深亚微米技术的应用,半导体器件和由若干器件组成的单元电路(如门电路、触发器……)尺寸都非常小,因此由寄生参数引起的影响不算大,基本上还可用一般的电路理论处理(但高速器件的内部机理和模型较常规器件有所变化)。主要问题在于芯片中的各单元电路间、PCB 及 MCM 的各块芯片间互连线的相对长度比较可观,布线又比较密集,将引起相当严重的寄生效应。同时无论芯片或组件,为保护电路及支撑整体电路结构的封装部分是不可避免的,一些封装结构如馈电线或板、接地线或板、芯片引出焊线或带、多层布线间的通孔、封装后的引出线或插脚等对高速信号的传输亦产生非常明显的影响。互连和封装效应随着工作速度的不断提高,逐渐从 PCB, MCM 最后向芯片内部延伸,最近在芯片范围的互连线效应也日益明显,这方面的研究工作正在引起广泛的注意。

因此所谓高速电路理论,即是在高速脉冲作用的情况下,研究高速电路系统互连和封装结构和半导体单元电路通过接口构成的整体系统的电特性分析,由于半导体单元电路的电特性机理和过去并无明显差别,因此研究的重点自然集中在互连和封装结构这一部分。

互连和封装结构对系统电特性的影响可归结于所谓信号完整性(Signal Integrity),即在理想的情况下,高速电路系统中脉冲信号应按照单元电路的作用并依据逻辑设计得到的单元电路连接关系进行动作。事实上由于互连和封装结构的寄生因素的影响而导致信号完整性受到削弱和破坏,从而使系统的指标降低,系统工作在潜在的不可靠状态,严重时甚至导致逻辑错误,系统的整体工作状态受到破坏。

互连和封装结构对系统中信号完整性的影响主要来自两方面:其一直接通过信号的传输通道,即由信号互连线产生的延时、波形畸变和线间互扰;其二则通过接地线(板)、馈电线

(板)、公共引线及接线脚等引起的同步开关噪声(Simultaneous Switching Noise, SSN)。

高速电路理论即是针对上述互连和封装结构所构成的电路进行高速脉冲信号的时域响应分析,并进一步和半导体基本电路单元组合后进行系统电特性分析。

在微电子技术和电路与系统技术迈向新的发展阶段的今天,高速电路理论有其特殊重要性,某种程度上已成为新一代微电子系统分析设计体系中的重要组成部分。目前高速电路理论及应用的研究在海外已受到广泛的重视,尤其是 PCB, MCM 和芯片中信号完整性的分析已成为一个研究热点。

1.1.3 微波电路理论和高速电路理论之间的联系

微波电路和脉冲电路原先作为两个不同的学科领域,具有不同的应用范围,但近年来随着 IC 的规模和速度的迅速增加,两者之间的联系日趋密切。首先微波和高速两者就有相似的含意,即都属于“快”的范畴,前者为快速变化的正弦波,后者则为快速变化的脉冲波形,只是表述有所不同。例如,当电路的尺寸和相应的波长可以比拟时电路中波的效应开始明显,其性质可归于微波电路的范畴;而当电路尺寸可以和脉冲信号的时间参量(如上升下降时间和脉冲持续时间)所对应的波传播距离相比拟时,同样由于波动效应而使其归于高速电路范畴。以下概括两类电路的相同和不同点。

相同点:

1) 可以用类似的电路方程描述,例如对传输线,不论在微波信号或高速脉冲信号的作用下,均可用电报方程描述。

2) 两者均以波动效应的存在作为电路的特色。

不同点:

1) 微波电路一般采用频域分析,而高速电路一般用时域分析。

2) 微波电路既可工作于较宽的频段范围,也可工作于较窄的范围,甚至可视为工作于点频;但作为一个高速脉冲信号,必须考虑其主要频谱范围,可从直流开始延伸至相当高频率的宽阔区域,因此从频域角度分析,高速电路属于超宽频带电路。这对电路的结构也提出限制,除 L, C, R 等集中参数元件外,分布参数传输线必限于色散甚小的 TEM 或准 TEM 类型(如微带、带状线、同轴或多芯电缆等),以保证从直流开始的超宽带特性。但对微波传输线就无此种限制,除上述传输线类型外,还可包括金属波导、介质波导、槽线等色散甚强的传输线类型。

因此微波与高速电路理论两者既有共同点和密切联系,又有其各自的特点。

1.2 微波与高速电路的频域和时域分析

众所周知,电路分析存在频域和时域两种体系,严格而言实际存在的信号可表示为时间波形,因此电路系统中的时域分析是本质的,而所谓频域则是信号对时间变量 t 的一种积分变换,通过变换将一时间函数变为频率函数。根据傅氏变换和拉氏变换理论时间变量 t 可转换为虚频率变量 $j\omega$ 或复频率变量 s ,在 $j\omega$ 域或 s 域可使电路分析过程大为简化,微分和积分将被代数运算所代替,繁杂的卷积积分变为极简单的乘法,因此所谓频域分析有其特有的优越性。

如果电路分析的目的是求电路对某一特定波形信号的时域响应,则原则上时域分析方法是基本的手段,频域方法只是为了简化分析过程的一个中间步骤。除频域分析本身外还需包

括时域至频域间的正反变换,可以根据所针对实际情况的情况,确定采用直接时域方法(即求解过程全部在时域进行),或频域变换方法(即先从时域变换至频域,在频域进行频域响应分析后再反变换到时域而求得时域响应)。

但是信息系统的发展过程中也出现一些比较典型的频域问题,例如对一个 LC 回路振荡器(或谐振腔振荡器),可以产生比较纯粹的正弦波,它本身不代表信号,但受到信号调制后成为已调波,就携带了信号。一般而言信号占据的频带宽度远小于载波频率,因此当已调波作用于电路系统,即由载频和与其距离很近的旁频的组合作用于电路时,为简单起见,也可近似地只考虑载频,从而确定电路对该载频所产生的作用(如放大、衰减、相移、滤波等),电路对载频的响应确知后,事实上对相对频带较窄的已调波的响应也大致确定,在这种情况下,独立的频域分析方法满足了电路分析的要求。

由于技术和应用的限制,过去相当长时间内信号脉冲相对的速度很低,其频谱高端远低于微波频率,因此信号脉冲电路不可能产生波效应,不能列入高速电路范畴。而在信号调制于微波载波作用于微波电路系统时,按前述则可用独立的频域分析解决之。

近几年来由于集成电路技术的发展和应用的推动,脉冲信号的速度越来越高,按前节所述,在信号电路中波效应已较为明显,应列入高速电路的范畴,和微波电路相对应。为区分两者,前者是高速信号波形作用于电路,而后者则是速度较低的信号调制于微波载波的已调波作用于电路。因此对于前者,时域分析是基本的,频域分析只是中间步骤,对于后者频域分析则是基本手段。

但是对高速电路而言,频域方法相对于时域方法是同样重要的,尽管最终所求为时域响应,但直接用时域方法求取时域响应有时比较困难,这一点和低速脉冲电路有所不同,对低速脉冲线性电路,所针对的电路元件为 L, C, R , 其时域方法为求解常系数线性常微分方程,可按常规求解步骤解决。但对于高速电路,由于包含分布参数元件,时域方法必须求解同时包含时间和空间变量的偏微分方程,求解难度加大。在满足一定限制条件下可以找到一些较有效的方法,但对于一般情况,时域直接求解就相当困难,尤其对频变电路参数更难以处理。相对而言,对分布参数电路甚至包含频变元件时,在频域仍可进行处理,如配合以频域和时域之间数值形式积分变换(如快速傅氏变换和数值拉氏变换),即可用频域变换的方法进行高速电路系统的时域响应分析。

还应指出的是,对微波电路当然应侧重于频域分析,但近几年来时域分析方法也受到注意,主要从分析的角度考虑而非最终的目的。因为在某些情况下,例如宽带微波线性电路的优化设计、微波非线性电路分析等在频域分析遇到一些困难或受到一些局限,如果换一种思路,将这种分析或设计先在时域进行,然后再转换至频域,将存在独特的优点。因此时域方法在某些情况下对微波电路也被应用,事实上微波与高速电路的频域与时域分析已相互交错,其间的界限已比较模糊。

我们对线性集中参数电路中低速信号的时域及频域分析很熟悉,而对微波电路和高速电路的时域和频域分析尚不熟知,由于其中包含一维甚至二维分布参数元件使其分析过程远比集中参数情况复杂,但除了牵涉到一些特殊性质需专门处理外,也常运用集中参数模型或处理方法经过变换后用来解决微波和高速电路的频域和时域分析,在以后的具体章节中将详细叙述。

1.3 场与路的问题

任何电路系统的分析按其本质均是一个系统的电磁场分析问题,按电磁场方法分析虽然最为严密,但在进行数值计算时要耗用大量内存和机时,而且在遇到无源部分和有源器件、所分析的系统和外接部件间的接口时都较为困难。因此无论在处理微波和高速电路系统时,基本上都采用电路分析方法,其步骤为:

1) 系统的等效电路参数提取。根据不同情况建立等效电路,再应用电磁场的解析或数值方法计算电路元件参数。

a) 比较明显的由集中参数元件构成的系统。用静电场及静磁场方法根据定义计算各类元件的电感、电容和电阻参数。

b) 对于二维的 TEM 或准 TEM 结构用二维静电场和静磁场方法提取分布电感、电容、电阻和电导,或由其所构成的矩阵,一般情况下不考虑参数随频率的变化,但当速度或频率非常高时,应考虑它们的频变特性,并用电磁场全波方法(例如时域有限差分法)进行参数提取。

c) 对于三维的分布形式结构,可以用所谓部分单元电路法(PEEC),以静电场和静磁场的交互分析得出一系列分布形式的电感电容电阻元件表示系统的各个组成单元,以互电感互电容表示各单元间的电耦合和磁耦合。

d) 传输线的跳变、弯曲、分支等称为不均匀性(或不连续性)结构,往往以集中参数等效电路表示,可用静电场或静磁场方法提取元件参数,并将它们和传输线二维分布参数电路组合成系统进行分析。

2) 将上述参量提取过程得到的电路进行电路分析,以求取系统的频域或时域响应。

从以上过程可以看出:整个系统分析过程不能脱离电磁场分析,但和系统的全过程电磁场分析相比,应用电路方法时电磁场问题只存在于参数提取过程,其后就成为电路分析问题。在参数提取过程中所涉及的场问题范围较小,分析过程较为简单,例如对 TEM 传输线问题,用全过程电磁场分析,是一个三维交变电磁场问题,但对于分布参数电路参数提取,不仅电磁场问题由三维缩小为二维,而且由交变场简化为静态场,显然场问题比全过程场分析要简单得多。

由于系统分析的后半过程成为电路分析,就具有以下优点:

1) 由于用电路方程替代复杂的场方程,即可使整个分析过程简化。

2) 全过程电磁场分析与系统的各部分几何形状尺寸和媒质分布情况有关,分析时极为复杂,如采用电路方法,在参数提取时只涉及局部单元的几何问题,用场方法处理比较简单,而后半段用电路方法时,不再需要处理单元间的几何关系,只需考虑单元间的拓扑连接关系,将各单元组合成系统的只需用电路方法(如串并联、级联等),对分析带来极大的方便。

3) 进行电路分析时,可将各种具体电路抽象化为网络,以研究各种电路的共性。

4) 由于电路分析的规整性,例如集中参数电路的电路参量可表示为有理函数,便于数学处理,并可实现网络综合,得到性能最优而结构最为简单的电路。对分布参数电路或其他较复杂的电路,经过一定的数学处理也可实现系统的优化。

5) 应用电路方法便于使系统和半导体器件和外接部件建立接口,对于半导体器件其内部机理并非完全为电磁作用,也难以用电磁场方程全部描述,但是将器件内部各种复杂机理综合成电压电流之间的器件外特性(即所谓器件模型)却是可行的。如果器件外的无源部分也以电

路表示,就易和器件建立接口,使整个系统的分析也成为可能。

尽管电路分析方法有其许多优点,但在某些时候可能不再有效:

1) 在信号频率或速度很高时,系统的引出端口或传输线不再维持静态或准静态场特性,在此情况下维持确定的电压和电流的定义比较困难(例如电场的线积分和路径有关,因而不能得到确定的电压),因而由场到路时无论在功率关系或匹配关系都不能很好对应,尽管已想出一些办法定义电压和电流,但效果不甚理想。

2) 在频率或速度很高,系统结构又非常复杂时(例如为一很不规则的三维结构),即使要建立等效电路模型时,也由数量庞大、连接关系复杂的元件组成,由于趋肤效应、滞后效应等因素,元件的参数可能为频率、几何尺寸的复杂函数,对系统继续用电路分析方法得到信号响应(尤其是时域响应)不再具有优点。

在上述情况下,系统电特性分析又回归到全过程电磁场分析,近期来时域有限差分法(FDTD法)受到广泛的重视,FDTD法即在全空域划分为很多网格并在时域也划分成许多步长情况下用数值方法求时域马克士威方程组的解。由直接求解电磁场方程,只要网格划分足够细,对各种复杂的几何结构或介质分布构成的系统原则上均能得到精确解。FDTD法的缺点是耗用计算机资源(内存和机时)相当大,但随着计算机各项指标的迅速提高以及计算机并行算法的进展,上述问题正在得到解决。

综上所述,为解决微波和高速电路问题,场和路的理论和方法都是需要的,而且两者密切相关。由于本书着重于电路理论和方法,因此不涉及系统的全过程电磁场分析,而且在进行电路分析时,除电磁场问题和电路分析关系很紧密的少数情况外,也不涉及用电磁场方法提取参量的问题,这些问题准备在另一专著《微波与高速电路中的电磁场理论及其数值方法》中详细讨论。

1.4 微波与高速电路系统中的电路单元

电路单元也称电路元件,是电路系统中的基本单位。电路系统由不同类型的许多电路单元组合而成,电路单元可分为以下各种类型:

1.4.1 零维单元(集中参数元件)

单元沿坐标 x, y, z 的尺寸 $\ll \lambda$, 其中 λ 对微波电路为相应的波长;对高速电路为信号频谱高端频率对应的波长,或脉冲时间参量对应的电磁波传播距离。

集中参数元件有电感、电容、电阻等类型,可分别用静电场和静磁场方法提取 L, C, R 等参数。

由若干零维单元或集中参数元件通过串并联和混联等方式可组合成集中参数电路,考虑到单元的数量为有限,故所组成的电路一般仍认为是零维电路。当单元数量为无限时,有可能成为一维或二维电路,如微波传输的等效电路即为无限数量的 L, C, R, G 组成的链形电路。此外有时零维单元数虽有限,但数量相当大,电路系统的工作频率或速度又很高时,相隔较远的元件之间将产生波动效应(有滞后作用而非瞬间作用),此时的电路不能再视为常规的集中参数电路。

按照微波和高速电路的基本含意(见本章 1.1.3),零维单元应不属其范畴,而应归入一般

低频或低速电路。但考虑到:

a) 鉴于当前的微电子工艺水平,在微波频率和高速脉冲(时钟频率在几百兆赫以上)作用下,完全可以得到尺寸很小、满足上述条件的集中参数元件。

b) 相对于分布参数元件,集中参数元件往往可产生更优的电路特性,例如较好的宽带性能,当然由于尺寸小,元件的品质因数(Q值)较低。

c) 由集中参数 L, C, R 构成的线性电路,其网络参量表示为复频率变量 s 的有理函数(即分式的分子分母均为 s 的多项式),有理函数无论在频域的处理以及从频域向时域的转换的处理均具有特殊的优点,在频域通过网络综合实现最佳电路较为方便,同时通过拉氏或傅氏变换可用简单的解析方法转换至时域。非集中参数电路就不具备此种特性,但可将相应的集中参数电路作为原型电路,建立其和非集中参数电路间的变换关系以实现最优电路设计。在时域分析时,可以通过某种矩量匹配关系(Moment Matching)将非集中参数电路近似地以集中参数的电路函数表示,然后再变换至时域。

由于集中参数元件及电路具有上述特点,因此无论从实际的电路构成或理论分析的需要,零维单元在微波和高速电路系统中都是不可缺少的。

零维单元的参数可用静电场和静磁场方法,但由于是三维电磁场问题,且几何形状及介质分布较为复杂,求解仍相当费力,除部分结构简单的单元(如平板电容、环形螺线管电感)可用解析公式外,一般均需通过数值方法求解,将在另一专著中详述。

1.4.2 一维单元(分布参数元件)

单元沿 x, y 轴的尺寸 $\ll \lambda$, 单元沿 z 轴的尺寸 $\approx \lambda$ 。

一维单元(见图 1-2)即通常所谓分布参数元件,按上述尺寸遵守的条件,即在 x 和 y 方向(或 xy 面)为静态特性,不存在波效应,但在 z 方向则存在波效应。显然单根或多根 TEM 或准 TEM 模式的传输线段为最典型的一维单元,对于多根传输线段,其横截面伸展尺寸应满足上述条件。

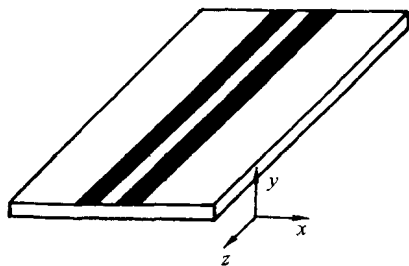


图 1-2 一维单元

一维单元对微波电路和高速电路中为最有代表性也经常出现的元件,一方面沿线方向出现波动特性而使电压和电流沿线变化成为这类单元的基本特性,另一方面和更为复杂的单元类型相比较,一维单元的分析相对比较简单,其电路参数 L, C, R, G 均为常数,不随频率变化,因此用典型的分布参数电路理论可以求解,也较易和集中参数电路之间建立对应和变换关系,便于进行电路的最佳设计。同时一维元件的参数提取为二维静场分析,也较为简单。一般而言,由一维单元构成的分布参数电路的频域分析体系已比较成熟,但在时域,由于存在某些特殊问题,目前仍是一个研究的课题。

由若干一维单元组合成的电路在尺度上虽可为一维、二维甚至三维形式,但电路分析仍可按一维元件通过常规电路组合的方式进行处理,这也是电路方法的优点。

1.4.3 二维单元(平面电路元件)

单元沿 x, y 轴的尺寸 $\approx \lambda$, 单元沿 z 轴尺寸 $\ll \lambda$ 。

根据上述尺寸所遵守的条件, 二维单元沿 xy 平面具有波特性, 沿 z 轴则仍呈现静态场特性, 许多实用的二维单元, 由于沿 z 轴的尺寸相当小(远小于沿 x, y 方向尺寸), 因此沿 z 轴的场分布常常恒定不变, 故也可称之为平面电路单元, 如图 1-3 所示。

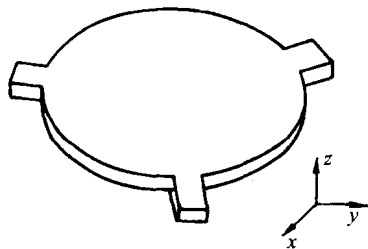


图 1-3 平面电路单元

因为二维电路单元沿两个坐标轴方向存在波效应, 其分析肯定比一维单元复杂得多, 但是考虑到沿 z 方向场分布恒定不变的平面电路单元, 可以用二维交变电磁场方法求得其特性, 所得结果难以像一维电路可用几个简单的分布参数描述, 只能表示为端口间的网络参量, 这些参量又为频变。尽管如此, 相对于求解三维交变场问题还是简单得多。

二维单元的出现有其现实性, 对于微波集成电路结构, 基片的厚度不仅远小于波长, 也远小于电路(包括单元)的平面尺寸, 微波集成电路中的传输线段通常作为一维单元看待, 但对某些特殊情况, 例如在微带低通滤波器中的低阻微带线段, 其宽度尺寸已增加到相当程度甚至可大于长度尺寸, 在此情况下再按一维单元考虑已不合实际, 在电路设计中也将产生较大误差, 此时完全应将其作为二维元件并按平面电路分析方法处理。同时在微波集成电路中也确实存在一些有用的平面电路单元, 如矩形和圆形平面谐振腔、扇形线等, 都应按平面电路方法进行分析计算。此外在微波集成电路中处理一些不连续性参量计算(例如 T 形结、十字形结、微带弯曲等)时, 常常将其视为平面电路结构而采用相应的分析方法以得到不连续区的等效电路或端口网络参量, 其所得结果的精度要高于静态场方法, 而分析处理过程则比一般的三维电磁场全波方法简单得多。

在高速电路系统中, 也将遇到平面电路单元, MCM 中的馈电板和接地板对即是典型的平面电路结构。

1.4.4 三维单元(立体电路元件)

单元沿 x, y, z 方向的尺寸 $\approx \lambda$ 。

此时单元三个方向的尺寸均可和波长相比拟, 亦即在三个方向上均存在波效应, 单元的电特性应根据一般三维交变电磁场方程求解而得, 除了规则几何形状的单元(如矩形六面体、圆柱体、球体等)外, 求解过程非常困难。

过去在波导结构作为微波系统的主体时, 三维电路单元比比皆是。但对于目前微波和高速集成电路结构中, 三维单元已较为少见, 在微波混合集成电路中出现的介质腔为三维单元的一个实例。但是即使在平面型的微波和高速集成电路中, 为提高精度, 对一些不连续性结构有时也视为三维单元进行分析。

应该将几何形状的三维结构和三维单元相区分, 一些集中参数元件具有三维的结构, 需用三维静态场方法提取其参数, 但按定义应为零维元件。