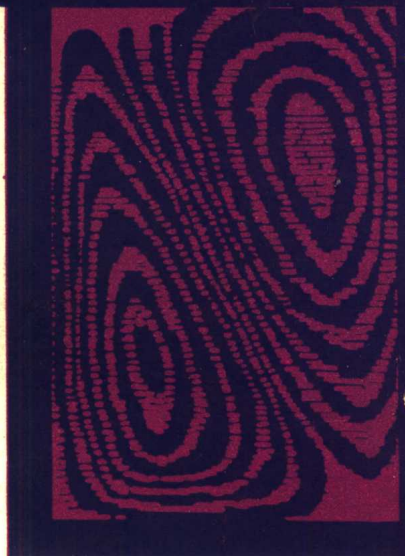




平面电路

〔日〕大越孝敬 三好旦六 著

科学出版社

平 面 电 路

〔日〕大越孝敬 三好旦六 著

王积勤 杨逢春 译

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

这是一本有关平面电路的专著,内容比较系统、概括。其中包括下列几个部分:开路边界平面电路的分析;短路边界平面电路的分析;平面电路的电磁场展开;以开路边界平面电路的积分方程为基础的数值分析;以短路边界平面电路的积分方程为基础的数值分析;以本征函数展开为基础的数值分析;单元电路法;非对称形平面电路;采用各向异性媒质的平面电路;平面电路的综合;平面电路的应用。书后附有参考文献。

本书可供从事微波元件、器件、电路研制、设计的科技工作者和大专院校有关专业教师、研究生及高年级学生参考。

大越孝敬,三好旦六

平 面 回 路

才一出版社, 1975

平 面 电 路

〔日〕大越孝敬 三好旦六 著

王积勤 杨逢春 译

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982 年 4 月第一次印刷 印张: 9 1/2

印数: 0001—7,600 字数: 210,000

统一书号: 15031·398

本社书号: 2542·15—7

定 价: 1.50 元

译者序

本书作者之一大越孝敬教授于1969年首次提出了平面电路的概念并进行了卓有成效的研究，成为平面电路理论的奠基人。在不太长的时间里，平面电路理论已经发展成为微波电路理论中的一个新的分支。

平面电路，就其技术体系而论，乃是现有微波集成电路进一步的发展，而从电路形态来说，它是介于一维空间电路的分布参数电路和三维空间电路的立体电路之间的一种二维空间电路。平面电路的分析与综合主要是借助计算机进行的。

平面电路的问世，为微波集成电路向更高度的集成化和向更高频率范围的发展提供了新的可能性。目前，不少平面电路的实例显示出比微带式集成电路具有更优越的特性。平面电路的一些分析方法，在一定条件下，还可以应用于立体电路的分析。

本书是作者在自己大量研究工作的基础上，广泛吸收了其他研究者的成果并加以系统化而写成的。本书由浅入深地论述了平面电路的解析分析、数值分析（计算机分析）和平面电路的综合等基本理论与技术问题；介绍了平面电路的各种实际应用；提出了今后的主要发展方向。这本书是到目前为止，关于平面电路的第一本专著，对从事微波技术的研究设计人员，大专院校有关专业的教师、研究生和高年级学生都是一本很有用的书。

目前，平面电路还处在发展阶段，有许多问题尚待深入探讨和进一步完善，它的各种应用也具有广阔的发展前景。译

者将此书翻译介绍过来，以期对读者有所裨益。对原书中错漏之处，我们作了必要的更正，但是由于译者水平有限，译文中一定还存在不少缺点错误，如蒙读者批评指教，将不胜感激。

译 者

1980年12月

序 言

“平面电路”是一种介于分布参数电路和立体电路之间的电路概念。自从1969年提出平面电路的概念以来,由于许多研究工作者的努力,又正好顺应时代的要求,平面电路的研究有了很大的进展。关于在此期间的技术发展背景以及开始提倡研究平面电路的直接动机和经过,分别在第一章“概论”和书末的“后记”中详细地谈到了。

1973年秋,我们逐渐感到该写一本平面电路概论的书了。有幸,这种想法得到了オ一ム社出版部的赞同,于是《平面电路》这本书就这样问世了。按日期来说,第一章是在1973年12月2日脱稿的;最后一章的原稿大体上是在第二年8月10日完成的。此后正值暑假,前后用了两个月的时间对全书作了调整和统一。

各章按下列分工执笔,最后由大越审阅全书,并统一符号、术语和文体:

第一章	概论	大越
第二章	开路边界平面电路的分析	大越
第三章	短路边界平面电路的分析	三好
第四章	平面电路的电磁场展开	三好
第五章	以开路边界平面电路的积分方程为基础的数值分析	大越
第六章	以短路边界平面电路的积分方程为基础的数值分析	大越
第七章	以本征函数展开为基础的数值分析	三好
第八章	单元电路法	大越

第九章 非对称形平面电路	大越
第十章 采用各向异性媒质的平面电路	三好
第十一章 平面电路的综合	大越
第十二章 平面电路的应用	三好
结语	大越
平面电路的有关文献	大越

作为平素在大学从事教学和研究工作的人员，笔者深感在大学的科研工作中必须敢于面对尚未开拓的领域进行挑战，并且应当尽力使这个领域加以系统化。如果说我们有这么一点勇气的话，这本书就是这种挑战和系统化意图的真实记录。虽然有这个勇气，但是由于笔者的水平和能力所限，书中不当之处在所难免。如蒙读者给予批评指正将不胜感激之至。

平面电路最有前途的应用领域是微波集成电路技术。但是笔者并不认为对于平面电路的一切研究目前都已结出了丰硕的实用之果。为了使平面电路技术得到广泛的应用，对其电路理论的研究，特别是对电路综合理论的研究和解决平面电路问题所不可缺少的电子计算机技术必须进一步地发展。在这个意义上，也可以说平面电路的研究乃是一个未来技术的研究。

由本书卷末的文献表中也可以看出，现在日本国内外许多优秀的研究者都正热心地致力于平面电路的研究工作，研究报告也陆续发表出来。在本世纪八十年代以至九十年代，各方面的研究都会结出硕果，而且平面电路的分析和综合中不可缺少的计算机技术也会得到进一步的发展。那时，平面电路的概念对于多数电子技术人员来说，是会有更加切身的体会的。

大越孝敬
三好旦六

目 录

第一章 概论	1
1.1 研究平面电路的历史背景	1
1.1.1 与微波集成电路技术的关系	2
1.1.2 与计算机技术的关系	3
1.1.3 与原有技术的关系	4
1.2 平面电路的地位	4
1.3 平面电路的分类	6
1.4 平面电路的特征	8
1.5 本书的目的和内容	9
参考文献	10
第二章 开路边界平面电路的分析	11
2.1 前言	11
2.2 基本方程式	12
2.2.1 波动方程和边界条件	12
2.2.2 本征函数展开	15
2.2.3 端子处的边界条件	18
2.3 电路特性的计算基础	18
2.3.1 符合互易性的端子电压、端子电流的定义	18
2.3.2 电路参数的确定	20
2.3.3 按本征函数展开格林函数	22
2.4 应用格林函数分析单端对电路	24
2.4.1 矩形电路	24
2.4.2 圆形电路	26
2.4.3 三角形电路	28
2.4.4 环形电路	30

2.4.5 带状线(与分布参数电路理论的对比)	32
2.5 根据能量关系决定电路参数	32
2.6 多端对平面电路的等效电路	34
2.7 开路边界条件的准确性	36
2.8 与带线的耦合	38
附录 2A.1 有损耗平面电路公式(2.5)的导出	41
附录 2A.2 本征值和本征函数	43
参考文献	44
第三章 短路边界平面电路的分析	45
3.1 前言	45
3.2 基本方程式	46
3.3 电路参数的确定	48
3.4 等效电路	51
3.5 分析举例	53
参考文献	55
第四章 平面电路的电磁场展开	57
4.1 前言	57
4.2 平面电路的电磁场展开	58
4.3 开路边界平面电路的电磁场展开	60
4.4 短路边界平面电路的电磁场展开	63
附录 4A.1 归一化正交条件	66
附录 4A.2 展开系数的导出	67
参考文献	68
第五章 以开路边界平面电路的积分方程为基础的 数值分析	69
5.1 前言	69
5.2 积分方程的导出	71
5.3 等效 N 端对平面电路的电路参数	73
5.4 二端对平面电路的链接参数(A 参数)	75
5.5 数值计算的准备及流程图	77

5.5.1	平面电路形状的读入	78
5.5.2	r_{ij} 、 θ_{ij} 的计算	79
5.5.3	决定链接参数的行列式的各元素 u_{ij} 、 h_{ij} 的计算	79
5.5.4	行列式的计算	80
5.5.5	输入导纳 $-Y_p$ 、传输特性 S_{21} 的计算	81
5.5.6	外周上的射频电压分布	83
5.6	计算举例	83
5.6.1	用解析法说明本计算方法的合理性	83
5.6.2	单端对圆形电路	85
5.6.3	二端对圆形电路	87
5.6.4	二端对矩形电路	90
5.6.5	任意形状电路	92
5.7	计算时间的讨论	93
附录 5A.1	对于柱面波的 Weber 解	95
附录 5A.2	积分方程式(5.1)的导出	97
附录 5A.3	$N \rightarrow \infty$ 时的 V 、 Z	98
参考文献		99

第六章 以短路边界平面电路的积分方程为基础的

数值分析	101
6.1 前言	101
6.2 分析的基础	102
6.3 具有两个同轴耦合端的短路边界平面电路	104
6.3.1 基本方程式的导出	104
6.3.2 基本方程式的简化	105
6.3.3 导纳矩阵的导出	107
6.3.4 链接参数的导出	107
6.4 具有两个波导管耦合端的短路边界平面电路	109
6.4.1 基本方程式的导出	109
6.4.2 基本方程式的简化和链接参数的导出	110

6.5 计算实例	112
6.5.1 单端对同轴耦合电路举例	112
6.5.2 二端对波导耦合电路举例	114
6.6 小结	120
附录 6A.1 式(6.1)也适用于复连域的证明	121
参考文献	122
第七章 以本征函数展开为基础的数值分析	123
7.1 前言	123
7.1.1 本征函数分析法的特征	123
7.1.2 本征值问题的数值解法	124
7.1.3 Silvester 的理论	125
7.2 本征值问题的变分法	126
7.3 瑞利-里兹法	128
7.3.1 纽曼问题	129
7.3.2 狄利克莱问题	130
7.4 有限元素法	131
7.5 解法的比较	136
7.6 矩阵特征值问题的解法	137
7.7 数值计算举例	139
7.7.1 本征值、本征函数的计算举例	139
7.7.2 矩形二端对电路的电路参数	142
7.7.3 带线宽度的不连续部分	148
7.7.4 T 形分支电路	150
7.8 小结	153
附录 7A.1 $S^{(k)}$, $T^{(k)}$ 的性质	153
附录 7A.2 科列斯基 (Choleski) 分解	157
参考文献	158
第八章 单元电路法	160
8.1 前言	160
8.2 单元电路法的理论	161

8.2.1	基本概念	161
8.2.2	“接续电路”的引入	163
8.2.3	二端对电路的情况	164
8.2.4	四端对电路的情况	166
8.3	分析实例	167
8.3.1	二端对电路	168
8.3.2	四端对电路	173
8.4	关于单元电路法分析实例的考察	175
8.4.1	四端对电路的分析结果	175
8.4.2	二端对电路的分析结果	175
8.4.3	计算时间	176
8.5	小结	176
	参考文献	176
第九章 非对称形平面电路		178
9.1	前言	178
9.1.1	开放形平面电路和非对称形平面电路的定义	178
9.1.2	非对称形平面电路的特性	179
9.1.3	本章讨论的内容	180
9.2	近似理论	180
9.2.1	非对称三线形的情况	180
9.2.2	开放形的情况	181
9.2.3	与测量结果的比较	182
9.3	非均匀媒质情况下的近似理论	185
9.3.1	分析方法	185
9.3.2	静电容的计算方法	186
9.3.3	静电容的计算值与实测值的比较	188
9.3.4	谐振频率的计算值与实测值的比较	189
9.4	非均匀媒质情况下的严格理论	191
附录 9A.1	$\tilde{G}(\alpha)$ 的计算	193
附录 9A.2	式(9.10)~(9.12)的证明	195

参考文献	196
第十章 采用各向异性媒质的平面电路	197
10.1 前言	197
10.2 基本关系式	198
10.3 铁氧体基片平面电路的分析	203
10.4 平面谐振器	208
10.4.1 理论	208
10.4.2 实验	211
10.5 带状线环流器	214
10.6 边导模隔离器和环流器	217
10.6.1 理论	217
10.6.2 实验	221
附录 10A.1 归一化正交条件	224
附录 10A.2 展开系数的导出	225
参考文献	226
第十一章 平面电路的综合	228
11.1 前言	228
11.2 具有预期电路特性的平面电路的综合方法	229
11.2.1 试行错误法	229
11.2.2 导抗参数的部分分数级数法	230
11.2.3 集中参数等效电路法	231
11.3 具有预期本征频率的平面电路的综合方法	232
11.3.1 基本方程式	233
11.3.2 按变分问题的定式化	234
11.3.3 极点综合法	235
11.3.4 收敛条件	238
11.3.5 计算举例	238
11.4 小结	240
参考文献	241
第十二章 平面电路的应用	242

12.1 前言	242
12.2 平面电路形 3dB 混合电桥	243
12.2.1 工作原理	243
12.2.2 理论	244
12.2.3 实验	250
12.3 模耦合滤波器	252
12.3.1 工作原理	252
12.3.2 理论	253
12.3.3 实验	255
12.4 矩形陷波滤波器	257
12.4.1 理论	257
12.4.2 分析结果	259
12.5 平面电路甘氏振荡器	262
12.5.1 多端对耦合圆形电路	262
12.5.2 变容管调谐甘氏振荡器	265
12.5.3 双管甘氏振荡器	266
12.6 其他应用	267
附录 12A.1 用扰动法分析模耦合滤波器	270
参考文献	272
结语	274
平面电路的有关文献	275
后记	281
索引	285

第一章 概 论

本章首先介绍平面电路这一概念产生的背景及其在各种电气和光学回路中所处的地位；后半部分叙述平面电路的分类和平面电路应用上的一些特征；最后说明本书的目的和内容。

1.1 研究平面电路的历史背景

1969年初，笔者曾提出应该着手研究介于三维空间电路（立体电路）和一维空间电路（分布参数电路）之间的二维空间电路，并把这种电路称之为平面电路（planar circuit）^[1-4]。此后，在这个领域从事研究的人，首先在日本国内，然后在国外都在不断增加。直到最近，随着研究成果的不断积累，平面电路的理论已经在微波电路理论中形成了一个小的分支。另一方面，建立在平面电路概念基础上的新的电路结构实例也开始出现。可以预料：随着微波电路的集成化，这些新电路的实例今后还要逐渐增加。

平面电路这个新术语和新概念之所以能够迅速地固定下来，而且在这方面的研究进展很快，是有两个重要的契机作为背景的：第一是近年来微波集成电路获得了长足的进展；第二是计算机技术达到了一定的水平，因而可以借助计算机对平面电路进行分析与综合。

1.1.1 与微波集成电路技术的关系

首先我们来考察第一个背景。在第二次世界大战以后，微波技术以微波电子管、立体电路及波导技术为中心，获得了巨大的发展。就其技术体系来说，于1960年前后，可以说在理论和实用两个方面基本上都已经达到了成熟的阶段。而后，经过了几年的停滞时期，到了1965年前后，以微波中继设备和空载雷达的小型化、轻量化和可靠性的要求为背景，微波电路的集成化成了新的奋斗目标。在这一时期，不断出现或研制出来的性能更好的微波半导体器件就是向这一目标努力的结果；同时，这些器件的出现和性能的提高又对微波电路提出了更高度集成化的目标。

甘氏二极管、雪崩二极管、肖特基二极管等微波半导体器件，一般都具有较低的阻抗，从而要求与之耦合的电路也具有较低的阻抗。另一方面，微波集成电路，不管是单片式的还是混合式的，多数情况下其无源电路部分基本上都是由带线系统构成的。因而，为了使无源电路与半导体器件很好地匹配，主要是应该降低所使用的带线的阻抗。带线的阻抗一般是由导电带的宽度和介质基片的厚度之比来决定的，因此也有采用减小介质基片厚度的方法来降低带线阻抗的。可是这里面存在着制造上的困难以及导体损耗增加两方面的问题，于是实际上就要想办法展宽带线的宽度。根据情况，其宽度有的可接近四分之一波长。

图1.1所示的电路图形是新近采用肖特基二极管的集成化混频器电路的一个例子^[4]。由图可知，带线与构成电路的线长相比是相当宽的。由于微波半导体器件的发展，要求微波低阻抗电路的机会也随着增加，近来已见到不少这类的电路了。

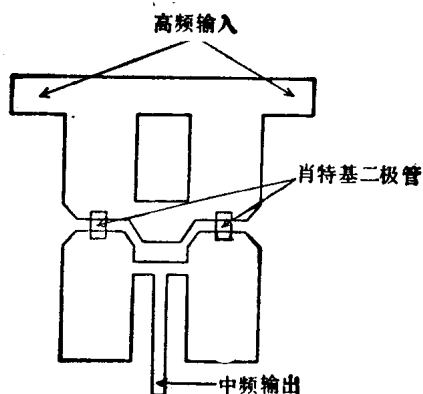


图 1.1 宽幅带线电路之一例(文献[5])

一般来说,在这种场合,还用以前处理分布参数电路的方法已经不能对这类电路进行精确地分析了,因此就要求有一个考虑到二维空间电磁场分布的更严密的电路分析方法。此外,在以前的仅由带线系统构成的微波集成电路中,由于引入充分利用二维电磁场扩展的电路,电路设计的自由度可能会增加。这是将来要考虑的一个问题。

上述背景,就是平面电路问世的第一个契机。

1.1.2 与计算机技术的关系

下面,我们再谈谈作为第二个契机的计算机技术的问题。例如,象上述那样把宽幅带线电路做为平面电路来处理,显然这时需要某种形式的计算机分析。因此,如果平面电路的概念出现在二十年前,而那时还没有完善的计算机技术,可以设想这个新概念最后也不会有多大意义的。

另一方面,如果要问当前的计算机技术能否对任意形状的立体电路进行分析和设计,回答恐怕是否定的。要想自由地进行这种计算,可能还要十年乃至二十年的时间。