

微波技术基础

(第5版)

闫润卿 编



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

微波技术基础

(第5版)

闫润卿 编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共有7章：传输线的基本理论、规则波导、微带传输线、光波导、微波谐振器、常用（无源）微波元件、微波网络基本知识。与前几版相比，第5版中删除了前几版中冗长、烦琐的数学公式和推导过程，使内容更简洁、精练，更加突出基本概念、基本理论和基本分析方法的阐述；增加了例题解析和部分习题答案，增补了一些附录，使读者更便于对本书内容的理解和掌握。

本书可作为电子与通信技术专业的教材或参考书，也可作为成人高等教育相关专业的教材或参考书，还可供工程技术人员和自学者参考、学习。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

微波技术基础 / 闫润卿编. —5版. —北京：北京理工大学出版社，2020.5
ISBN 978-7-5682-8422-6

I. ①微… II. ①闫… III. ①微波技术—教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 073909 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 30

插 页 / 1

字 数 / 695千字

版 次 / 2020年5月第5版 2020年5月第1次印刷

定 价 / 68.00元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

第5版前言

“微波技术基础”是电子与信息类专业的专业基础课，是必备的基础知识。主要讲述微波传输线、常用（无源）微波元件和微波网络等的基本概念、基本理论和基本分析方法。因为这些内容都是原理性的、基础性的知识，因此，课程内容随着科技发展的变化并不大、相对而言比较稳定。但是，并非一成不变。例如，微波传输线、常用（无源）微波元件，在种类、结构形式、材料、设计方法、测试方法和精度，以及制造工艺等方面，与过去相比，都有很大的变化和改进；再如，除了大功率和超大功率的微波元器件外，很多中小功率的微波元器件都已小型化、集成化，可靠性和使用年限都有很大程度的提高。我们应关注这些变化，吸收新知识、充实课程内容是完全必要的。但是，本书作为基础理论课不可能、也无必要过多、过细地讲述设计、制造和测试等多方面的具体知识，因为有关这方面的内容都有新的、详尽的资料可以查阅。

需要指出的是，尽管随着科技的发展发生了如上所述的各种变化，但是，有关微波传输线、常用（无源）微波元件和微波网络等的基本概念和基本工作原理仍然是正确和适用的。因此，只要掌握了这些基础知识，对于新出现的各种变化就能比较容易地理解和掌握。同时，还可以进一步学习和掌握微波领域中其他方面的知识。

第5版与前几版相比，最主要的变化是：第1章“传输线的基本理论”、第2章“规则波导”和第7章“微波网络基本知识”这三章都重新编写，与之前相比，删除了冗长、烦琐的数学公式和推导过程（特别是第2章和第7章），而代之以更简洁、明了的数学公式和推导过程，与物理概念结合得更紧密，更便于理解。除此之外，针对初学者对本书内容感到抽象、理解困难（特别是在做习题方面），本版增编了“例题解析”作为附录，并对部分习题给出了答案，供参考。除上述三章做了较大的变化外，书中其他部分也做了少许的补充、修订。第5版全部书稿由闫润卿执笔编写。

本书曾获北京市“北京高等教育精品奖”、教育部“国家级精品教材奖”，并被教育部批准为“十一五”国家级规划教材。所有这些都是对编者的鼓励、鞭策。

尽管如此，限于编者水平，书中仍难免有错误和疏漏之处，殷切期望专家、同行、读者不吝指正。最后，特别需要说明的是，在本书第4版的各次印刷中，由于编者、编辑、校对、印刷等诸环节间缺少沟通，以致造成书中个别处的印刷错误，其中，特别是第2章中的一些页次，本应是“媒质”的误印为“介质”，从而造成概念上的混乱，对此，编者深感遗憾，并向读者致以深深的歉意。

编者
2020年8月

第 4 版前言

“微波技术基础”是电子与信息工程专业的专业基础课，是必学的基础知识。因其为基础课，因此，受科技快速发展的影响较小，内容相对稳定，但并非一成不变，应跟踪微波技术的发展动向，不断地更新内容，使之适应相关专业的要求。正是基于这一原则，本书每修订一次都补充一些新的内容，现在的第 4 版也是如此。

本书自 1988 年第 1 版面世至今已出了 4 个版本，版本更迭的过程也是本书不断完善的过程。因此，后一版相对于前一版而言，在内容的增减、更新，以及在概念的阐述，公式、数据、插图的处理和运用等方面都有不同程度的改进和提高。第 4 版在上述诸方面，与前 3 版相比，又有了较大的提高，内容更加充实，完整性和可读性均有所增强，更便于讲授和自学。另外，为配合读者学习并检验自己的解题能力，特编写了含有本书大部分习题解答的《微波技术基础概念题解与自测》一书（尚洪臣等编）已出版发行，可供读者参考。

本书第 4 版全部书稿由闫润卿执笔修订。在本书历次修订过程中都得到了尚洪臣教授和北京理工大学信息工程学院电子工程系微波技术教研室老师们的指教和帮助，谨向他们表示衷心的感谢。

本书各次版本的出版都得到了北京理工大学出版社的各级领导和责任编辑的热情支持和帮助，特致以诚挚的谢意。

本书曾获 2005 年北京高等教育教材精品奖，此后又被批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（面向 21 世纪高等院校规划教材）。这对作者是鼓励，更是鞭策。尽管如此，限于作者水平，书中仍难免有不妥、疏漏和错误之处，殷切期望专家、同行和读者不吝指正。

编者
2011 年 3 月

第 3 版前言

“微波技术基础”是电子与信息工程专业的一门技术基础课，是必学的基础知识。近年来新的科技成果和新的需求不断地涌现，授课内容和学时数也在变化，为了适应这一新的情况，在保持本书基本框架的基础上，对第 2 版做了必要的修订。

经过修订，全书各章在内容上都有程度不同的修改、删减和补充。概括地讲，就是根据目前的实际情况，增加了一些新的内容，并对原有的内容重新做了审定，删除了与“三基本”关系不大的内容，加强了各章节之间的联系和照应。与第 2 版相比，第 3 版的章节结构更简明，内容更充实，对于“三基本”的阐述更为准确、更为完整，而且也更便于讲授和自学。

通过做习题来进一步地理解和掌握所学内容是十分重要的。因此，为使读者能够掌握解题的方法和步骤，并检查自己所做习题的结果是否正确，特编写了含有本书大部分习题解答的“微波技术基础概念题解与自测”一书（尚洪臣等编），供参考，该书与“微波技术基础”同时出版发行。读者应先行自己做题，而后再参阅辅导书，切忌不做题就直接抄写答案。第 3 版书稿绪论和第 1 章至第 6 章由闫润卿执笔修订，尚洪臣为第 7 章编写了补充内容。

北京理工大学信息技术学院电子工程系电磁场与微波技术教研室主任徐晓文教授，以及尚洪臣教授和薛正辉副教授对修订工作给予了有力的支持和帮助，并仔细地阅读了修订稿，提出了宝贵意见，谨向他们表示衷心的感谢。

北京理工大学出版社的领导和责任编辑对本书的出版和修订给予热情的支持和帮助，特致以诚挚的谢意。

本书第 3 版与第 1 版、第 2 版相比，从各方面讲都有较大的改进和提高，但是限于编者水平，书中仍难免有疏漏或错误之处，敬请读者指正。

编 者
2004 年 5 月

第 2 版前言

本书第 1 版是经原兵器工业部第一教材编审委员会微波技术小组的评审和推荐于 1988 年 12 月出版的，第 2 版是在第 1 版的基础上修订而成。“微波技术基础”是在讲授了“高等数学”“电路分析基础”和“电磁场理论”等课程之后开设的电子与信息工程专业（电磁场与微波技术、电子工程、信息工程、通信工程和应用电子技术等专业）的一门技术基础课，主要讲述微波技术的基本理论、基本概念和基本分析方法（“三基本”）。

第 2 版的章节结构与第 1 版基本相同。全书除了绪论和附录外，共有 7 章。与第 1 版相比，内容有增有减，其中，除了第 3、6 章基本保持原状、只做少量的修改和补充外，其余各章（包括习题）均已重新编写。其主要特点是：对于“三基本”做了比较详细的阐述和补充；对于主要表示式（公式）做了比较完整的推导和补充；删除了与“三基本”的讨论关系不大、展开讲又超出本书范围的内容，使章节结构更简明、内容更充实。对于阅读本书必备的但又不宜在书中正文讲述的某些基础知识、数学公式和数据，都编写了附录，供参考。此外，对于第 1 版中的不妥或错误（包括印刷错误）之处做了更正。

经过修订，书的系统性、完整性和可读性均有所增强，内容详略适宜，更便于讲授和自学。第 6 章可不讲授，完全自学，其他章节也可根据实际情况安排学时数和讲授内容，因此授课时间可望少于 72 学时。

本书的绪论介绍了微波在电磁波谱中的位置、微波波段的划分、微波的特点和应用范围、分布参数的概念、微波技术领域研究的内容，以及本书的主要内容；第 1 章用分布参数理论分析传输线的特性和应用；第 2 章在讲述广义正交曲线（柱）坐标系情况下一般波导理论的基础上，着重讲述了规则波导的特性；第 3 章扼要地讲述了微带传输线的基本特性和分析方法；第 4 章讲述阶跃光纤的射线分析法、波动理论和弱导光纤中的线极化模；第 5 章主要讲述金属圆柱形、矩形和同轴线型谐振腔，谐振腔的等效电路，利用赫兹矢量分析矩形谐振腔，对其他谐振腔（器）（介质谐振器、平面谐振器、渐变形腔、开式腔和 YIG 谐振器等）也做了简要的介绍；第 6 章讲述常用微波元件（包括金属膜片）的工作原理和应用；第 7 章讲述微波网络的基本概念和参量，信号流图在网络分析中的应用。

第 2 版书稿主要由闫润卿执笔修订。北京理工大学电子工程系微波技术教研室主任尚洪臣教授仔细地审阅了书稿，提出了宝贵意见，并为本书编写了第 7 章，教研室的其他老师也给予了热情的指导和帮助，谨向他们致以诚挚的谢意。

北京理工大学教材科、电子工程系和出版社等单位的领导和同志，对本书的出版给予了大力支持和帮助，特向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中难免有不妥或错误之处，殷切期望读者不吝指正。

编 者

1996 年 12 月

第 1 版前言

本书主要讨论微波技术的基本理论、基本技术和分析方法。主要内容为：第 1 章用分布参数电路理论讨论传输线的基本理论和应用；第 2 章讲述在一般坐标系情况下的一般波导理论，并在此基础上讨论了常用波导的特性；第 3、4 两章扼要地讲述了微带类传输线和光波导的基本特性和分析方法；第 5 章讲述了各种具体的微波谐振器，并介绍了用赫兹矢量和等效电路的方法分析微波谐振器的方法；第 6 章讲述常用微波元件的基本工作原理和应用；第 7 章讲述网络分析的基本内容。

“微波技术基础”是工科电子类专业的一门技术基础课。本书在取材上力求做到既突出基本理论和技术，以及分析方法方面的内容，又能紧密地结合实际。在章节的安排和叙述上力求由浅入深、循序渐进，并使“场”与“路”的概念融会贯通起来，使本书能适用于不同专业读者的需要，也便于自学。

本书的授课时数为 72 学时。本书各章之间既有内在的联系，又具有相对的独立性，因此，有关的专业可根据实际情况安排学时数和讲授内容。本书是在读者已经学完了“线性电路基础”和“电磁场理论”课之后开设的一门技术基础课。针对本书各章的内容，选编了一定数量的习题，目的是通过做习题进一步加深理解和掌握所学内容。

本书是在北京理工大学微波技术教研室汤世贤、邓次平、高本庆、尚洪臣和李英惠等所编讲义的基础上、并根据编者多年的教学实践，经修订补充后编写而成的。

本书由华东工学院陈忠嘉教授担任主审，并经原兵器工业部第一教材编审委员会微波技术小组评审和推荐出版。主审人和评审小组对本书进行了仔细认真的审阅，提出了很多宝贵意见，谨向他们表示诚挚的谢意。

本书的出版得到了北京理工大学电子工程系的领导、出版社的领导和编辑以及微波技术教研室的同志们的大力支持和热情帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切期望读者批评指正。

编者
1988 年 6 月

目 录

绪论	1
第 1 章 传输线的基本理论	6
§1.1 引言	6
§1.2 均匀无耗传输线上的行波	11
一、传输线方程及其解	12
二、均匀无耗传输线的特性阻抗	15
§1.3 接有负载的均匀无耗传输线	17
一、接有任意负载时均匀无耗传输线上电压波和电流波的一般表示式	17
二、反射系数、驻波比和输入阻抗	19
三、均匀无耗传输线接有不同类型负载时的工作状态	24
§1.4 应用举例	33
一、用作元、器件的有限长传输线	34
二、在传输能量方面的应用举例	35
§1.5 阻抗圆图和导纳圆图	38
一、阻抗圆图	39
二、阻抗圆图应用举例	43
三、导纳圆图	45
§1.6 阻抗匹配	47
一、阻抗匹配的概念	47
二、负载与传输线阻抗匹配的方法	49
§1.7 均匀和非均匀有耗传输线	54
一、均匀有耗传输线	54
二、非均匀有耗传输线	60
附录 1.1 双导线和同轴线的分布参数	61
附录 1.2 某些传输线的特性阻抗	62
附录 1.3 阻抗的测量方法	62
习题	64
第 2 章 规则波导	67
§2.1 引言	67
一、梯度、散度和旋度	68
二、麦克斯韦方程	72
§2.2 波动方程与导行波	78
一、波动方程	78

二、导行电磁波	81
§2.3 规则波导中的导行波	84
一、模式	84
二、传输特性	88
§2.4 矩形波导管中电磁波的传输特性	102
一、波动方程在直角坐标系中的解	102
二、模式及场结构	104
三、矩形波导管中电磁波的传输特性	108
四、矩形波导管的管壁电流	115
五、等效阻抗	116
六、激励与耦合	118
§2.5 圆形波导管中电磁波的传输特性	119
一、波动方程在圆柱坐标系中的解	120
二、模式及场结构	123
三、传输功率和衰减	130
§2.6 同轴线及其中的高次模	133
一、同轴线中的 TEM 模	134
二、同轴线中的高次模	136
三、同轴线尺寸的选择	141
§2.7 过极限波导	144
一、过极限波导的特性	144
二、过极限波导的应用	146
§2.8 过模波导	147
§2.9 脊形波导简介	148
一、截止波长	148
二、等效阻抗	151
§2.10 椭圆形波导简介	151
附录 2.1 贝塞尔函数简介	152
附录 2.2 部分同轴线、矩形软波导管结构示意图	156
附录 2.3 媒质和介质	157
习题	157
第 3 章 微带传输线	160
§3.1 带状传输线	160
一、特性阻抗	161
二、相速和导波波长	164
三、带状线的损耗和衰减	164
四、带状线的功率容量	165
五、带状线尺寸的选择	165

§3.2 耦合带状线	166
一、薄带侧耦合带状线的主要特性	167
二、厚带侧耦合带状线的主要特性	169
§3.3 微带线	174
一、微带线中的模式	175
二、微带线的特性阻抗	176
三、相速和导波波长	179
四、微带线的损耗	180
五、微带线的色散特性与尺寸选择	180
§3.4 耦合微带线	183
一、奇模和偶模特性阻抗	183
二、相速和导波波长	185
三、功率损耗	186
§3.5 用于微波集成电路的其他传输线简介	188
一、悬置和倒置微带线	188
二、槽线	188
三、共面波导	189
四、鳍线	189
习题	190
附录 3.1 用保角变换法求带状线的特性阻抗	192
附录 3.2 零厚度微带线特性阻抗数据表	202
第 4 章 光波导	208
§4.1 引言	208
§4.2 阶跃光纤的射线分析	212
一、在不同介质分界面上波的反射和折射	213
二、阶跃光纤的射线分析	217
§4.3 阶跃光纤的波动理论	222
一、波动方程及其解	222
二、特征方程和传输模	227
三、各类模式的截止条件	230
四、各类模式远离截止的条件	234
五、光纤的色散特性	237
§4.4 弱导光纤的线极化模	239
一、弱导条件下场量在圆柱坐标系中的表示式	239
二、弱导条件下场量在直角坐标系中的表示式	241
三、弱导光纤的线极化模 (LP 模)	242
§4.5 阶跃光纤中的传输功率	248
一、芯子内的传输功率	248

二、包层内的传输功率	249
三、芯子和包层内的功率与总功率之比	249
§4.6 无线光通信基本知识简介	251
习题	252
第 5 章 微波谐振器	253
§5.1 谐振器的主要特性参数	254
一、谐振频率	254
二、品质因数	257
三、等效电导	260
§5.2 圆柱形谐振腔	261
一、电磁场的表示式	262
二、谐振频率与模式图	265
三、固有品质因数	269
四、圆柱形谐振腔中常用的三种主要模式	269
§5.3 矩形谐振腔	272
一、电磁场的表示式	272
二、特性参数的计算	276
§5.4 同轴线谐振腔	279
一、二分之一波长同轴线谐振腔	279
二、四分之一波长同轴线谐振腔	281
三、电容加载同轴线谐振腔	283
§5.5 谐振腔的等效电路	284
§5.6 其他类型微波谐振器简介	288
一、介质谐振器	288
二、平面谐振器	291
三、渐变形谐振腔	293
四、开式谐振腔	293
五、YIG 磁谐振器	294
习题	297
第 6 章 常用(无源)微波元件	300
§6.1 连接元件	300
一、矩形波导接头	300
二、同轴线接头	303
§6.2 变换元件	305
一、传输线尺寸变换器	306
二、阶梯式阻抗变换器	309
三、连续式阻抗变换器	318
四、模式转换器	321

§6.3 分支元件	323
一、同轴线功率分配器	324
二、微带线功率分配器	326
三、矩形波导管分支接头	329
§6.4 终端元件	332
一、匹配负载	332
二、全反射终端器(短路器)	335
§6.5 衰减器和移相器	339
一、矩形波导管中的衰减器和移相器	339
二、同轴线衰减器和移相器	340
§6.6 定向耦合器	341
一、双孔定向耦合器	343
二、均匀多孔阵列定向耦合器	344
三、裂缝电桥	347
§6.7 微波滤波器	349
一、利用四分之一(导波)波长传输线并联电抗元件的滤波器	350
二、利用高低阻抗线构成的滤波器	351
§6.8 场移式隔离器	355
§6.9 Y形结环行器	356
§6.10 电抗性元件	357
一、矩形波导管中的膜片、谐振窗和金属杆	358
二、矩形波导管中的阶梯	365
三、同轴线中的阶梯	366
习题	367
第7章 微波网络基本知识	370
§7.1 引言	370
§7.2 波导等效为双线和不均匀性等效为网络	371
一、波导等效为双导线传输线	371
二、不均匀性等效为网络	375
§7.3 归一化参量	377
一、阻抗的归一化	377
二、电压和电流的归一化	378
三、场强复振幅的归一化	378
四、归一化电压、电流与归一化的场强复振幅之间的关系	379
§7.4 微波网络的参量	379
一、微波网络的电路参量	380
二、微波网络的波参量	388
三、常用网络参量之间的互换关系	390

四、基本电路单元的网络参量	395
§7.5 二端口网络的工作特性参量	398
一、插入反射系数和插入驻波比	398
二、插入衰减	398
三、插入相移	400
四、电压波的传输系数	400
§7.6 网络的连接	401
一、二端口网络的串联	401
二、二端口网络的并联	402
三、二端口网络的级联	403
§7.7 网络参量的性质	404
一、互易(可逆)网络	405
二、无耗网络	405
§7.8 信号流图在网络分析中的应用	407
一、信号流图与线性方程组	407
二、信号流图中的节点、支路、通路和回路	407
三、信号流图的简化法则	408
四、不接触环路法则(Mason 公式)	410
五、切割法	411
六、节点分裂法	412
七、闭环信号流图	413
附录 7.1 矩阵知识初步	414
附录 7.2 复功率定理	417
习题	418
书末附录	419
附录一 例题解析	419
附录二 部分习题答案	431
附录三 数学公式	436
附录四 奈培和分贝	444
附录五 常用导体材料的特性	446
附录六 常用介质基片材料的高频特性	447
附录七 微带线常用导体材料的特性	447
附录八 空心矩形和圆形金属波导管参数	448
附录九 同轴线参数	454
参考文献	459

绪 论

微波也是电磁波，但它是一个比普通无线电波段的频率更高、波长更短的波段，故名微波。微波技术是在继普通无线电波的长波、中波、短波和超短波之后，在波长更短的基础上发展起来的。它们之间既有相同之处，又有很多差别，因此，微波技术已成为现代电子学中独树一帜的学科领域，微波技术的研究成果在科技、经济及社会生活等方面都有广泛的应用，微波技术已经成为现代科技领域的重要组成部分之一。

微波技术的研究最早始于 1933 年，当时只处于实验室研究阶段（研究微波的产生、传输），以后，直到 1940—1945 年这个阶段，正是第二次世界大战时期，由于军事方面的需求，微波技术在实际应用方面有了快速的发展，是微波技术发展的重要阶段。在当时，为了测量目标飞机的距离、方位，以及为了引导自己一方飞机按要求的路线飞行，而制造出了工作于微波波段的雷达、导航和遥控设备、测量设备等。在这些设备中，用来产生微波振荡源的有：磁控管、速调管、三极管（电子管）等。同时，还使用了具有各种功能的微波元件和微波器件。从那时起，直到现在，微波技术在理论研究和实际应用方面都有了突飞猛进的发展，它的应用已不仅仅限于军事方面，而是已渗透到人类工作和生活的各个方面，尤其是在高科技的应用领域。例如，在宽频带通信、广播和电视直播、微波遥感、遥控、全球定位系统、飞行体的导航系统、雷达和电子抗干扰系统，以及移动通信等方面，都有着广泛的应用；与此同时，由于微波技术的发展还催生了一些新兴学科，例如射电天文学、微波频谱学等，还可以利用微波探测物质的内部结构；微波技术在工业、农业、医学、食品加工等方面也都有着广泛的应用。总之，应用范围十分广泛，不胜枚举。

随着科学技术的发展，微波技术中使用的元件、器件也有很多改进，并制造出了一些新的微波元件和器件。目前，在中等和大功率的微波系统中，电真空器件，例如，磁控管、速调管、行波管、返波管和正交场放大管等，仍在使用，它们的主要用途是产生较大功率的微波，并把它加以放大；与此相适应，能够承受较大功率的波导管、同轴线、微波元件和器件也在被广泛地应用。另外，从 20 世纪 60 年代以来，由于微波半导体材料的研制成功，从而制造出了可用于微波范围的微波半导体器件，例如，金属半导体二极管、雪崩二极管、场效应管、隧道二极管、耿氏（Gunn）二极管和 PIN 管等，一般把它们称为固态器件或固态微波源，其特点是，体积小、坚固耐用，制造成本低，而且，这些器件特别适合与平面结构的微波传输线（微带线、槽线、共面波导）相结合，或者与单片集成技术相结合，从而构成微波集成电路（MIC）或单片微波集成电路（MMIC），像这一类的所谓微波固态电路系统，在中等功率以下的小功率范围内，例如发射机和接收机，都有着广泛的应用。可见，把传统的微波元件、微波器件和现代的微波元件、微波器件结合在一起，使微波技术的理论和实际应用原有的基础上又前进了一大步，其发展前景也更为广阔。

从以上的概述可知，微波技术涉及的领域很广泛，每一领域都有专门的学科或课程在进行研究和讨论，本书不可能包罗万象地都讲，而主要讲述工程微波技术的基本概念、基本知

识和基本理论, 目的是给初学者进一步学习与微波技术有关的其他学科或课程, 或者进一步提高理论水平和实际工作能力打下基础。

最后需要说明的是, 本绪论只是很粗略地概述了微波技术的发展简况, 肯定是不全面的, 若读者有兴趣和有需要, 可以查阅相关的资料, 在此不再赘述。

1. 微波在电磁波谱中的位置

对于电磁波谱, 按照从波长较长 (频率较低) 到波长越来越短 (频率越高) 的次序可排列为: 普通无线电波 (从超长波到超短波)、微波、红外线、可见光、X 射线和 γ 射线。可见, 微波波段的低频端与普通无线电波中超短波的高频端 (波长为 1 m, 频率为 300 MHz) 相毗邻, 而高频端则与红外线的低频端 (波长为 1 mm, 频率为 300 GHz, 或波长为 0.1 mm, 频率为 3 000 GHz) 相衔接。表 0-1 给出了普通频率波段中各波段的名称、波长和频率范围, 以及它们的频段名称, 这里的波长是指波在自由空间 (理想的真空状态) 中随着时间做简谐振荡时 TEM (横电磁波) 的波长。波的频率是由波源决定的, 因此同一频率的波在不同媒质中的频率是不变的, 但波长和传播速度是变化的。不同频率的波在自由空间中的波长虽然不同, 但传播速度相同, 这就是通常所说的光速 (3×10^8 m/s)。

表 0-1 普通频率波段的划分

波段名称	波长范围/m	频率范围	频段名称
极长波	$10^8 \sim 10^7$	3 Hz~30 Hz	极低频 (ELF)
超特长波	$10^7 \sim 10^6$	30 Hz~300 Hz	超低频 (SLF)
特长波	$10^6 \sim 10^5$	300 Hz~3 kHz	特低频 (ULF)
超长波	$10^5 \sim 10^4$	3 kHz~30 kHz	甚低频 (VLF)
长波	$10^4 \sim 10^3$	30 kHz~300 kHz	低频 (LF)
中波	$10^3 \sim 10^2$	300 kHz~3 MHz	中频 (MF)
短波	$10^2 \sim 10^1$	3 MHz~30 MHz	高频 (HF)
超短波	$10 \sim 1$	30 MHz~300 MHz	甚高频 (VHF)

注: 目前用实验方法测得的最低频率为 10^{-2} Hz。

对于微波常把它划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波 4 个波段, 表 0-2 给出了各波段的名称、波长和频率范围, 以及它们的频段名称。

表 0-2 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围/GHz	频段名称
分米波	1 m~10 cm	0.3~3	特高频 (UHF)
厘米波	10 cm~1 cm	3~30	超高频 (SHF)
毫米波	1 cm~1 mm	30~300	极高频 (EHF)
亚毫米波	1 mm~0.1 mm	300~3 000	超极高频

在实际应用中，还常把微波波段划分为更细的分段，并用拉丁字母作为各分段的代号和称谓，如表 0-3 所示。各文献资料列出的波长与频率范围基本相同，个别数据稍有差别，但这并不影响使用。

表 0-3 常用微波波段及其代号

波段代号	标称波长/cm	频率范围/GHz	波长范围/cm
P	80	0.23~1	130~30
L	22	1~2	30~15
S	10	2~4	15~7.5
C	5	4~8	7.5~3.75
X	3	8~12.5	3.75~2.4
Ku	2	12.5~18	2.4~1.67
K	1.3	18~26.5	1.67~1.13
Ka	0.8	26.5~40	1.13~0.75
毫米波		30~300	1~0.1
亚毫米波		300~3 000	0.1~0.01

在某些文献资料中，有时还用到另外一种波段划分的方法，它是按照英文字母的排列顺序而命名的，如表 0-4 所示。

表 0-4 微波波段划分及其代号

波段代号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
频率范围/GHz	0.1~0.25	0.25~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~8	8~10	10~20	20~40	40~60	60~100	100~140

微波波段之后各个波段（在自由空间中）波长的范围为：红外线 0.75 mm~0.76 μm（远、中、近红外线的范围分别为 0.75 mm~15 μm，15 μm~1.5 μm，1.5 μm~0.76 μm；远红外线波段的一部分与亚毫米波段相重叠）；可见光 0.76 μm~0.39 μm；紫外线 0.39 μm~0.005 μm；X 射线 0.005 μm~10⁻⁸ μm；γ 射线 10⁻⁸ μm 以下。

2. 微波的特点和应用

从频率最低（波长最长）到频率极高（波长极短）的电磁波，它们本质上都是电场和磁场，是一种波动，这是共同之处；但是，频率不同，它们的性质和特点也不同，例如 X 射线和 γ 射线，通常电磁波的特点已不明显，而射线贯穿物质能力的特点却比较显著，当然，还有其他的一些特点。不同频率的电磁波与物质的分子和原子之间的相互作用也不相同。微波只是电磁波谱中的一部分，下面将要讨论的微波的特点，不是与整个电磁波谱中的电磁波相