

微波原理

(卷 I)

黃宏嘉著

科學出版社

73.459
537
=1

微波原理

(卷 I)

黃 宏 嘉 著

科 學 出 版 社

1963

內 容 簡 介

本书的中心内容是耦合波理論，书中汲取了近年来文献中有关耦合波理論的許多研究成果，其中也包括了作者在这方面发表过的若干論文。

在耦合波理論的观点下，一系列基本的微波理論（如波导的激发、不規則波导理論、空腔諧振器中的耦合振蕩、鉄氧体中的耦合波、微波电子器件的耦合模理論等）都得到了統一的处理。

此外，关于微波技术中的一般原理（如各种波导的传输性能、微波网路和元件的分析与綜合等），书中也作了較全面的論述。

本书分二卷。卷 I 包括广义传输綫理論、簡正波、非理想波导理論及空腔諧振器；卷 II 包括微波网路、元件和微波电子器件等。

本书的主要对象是研究生。如在內容上作适当选择，亦适于作为大学高年級的教材；同时，也适于作为科学研究人員、高等学校教师和工程技术人員的参考书。

微 波 原 理

（ 卷 I ）

黄 宏 嘉 著

*

科学出版社出版（北京朝陽門大街 117 号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 12 月第 一 版

1963 年 12 月第一次印刷

（京）0001—3,800

书号：2934 字数：438,000

开本：787×1092 1/18

印张：19 7/9 插頁：3

定价：3.60 元

序

在这本书中,我尝试从一个统一的观点,即耦合波理论的观点,来论述一系列基本的微波原理。在有关微波的文献中,这样或那样的个别问题都是利用耦合波理论来分析的,而通过许多个别问题的解决,耦合波理论的内容又得到了进一步的丰富和发展。但是,直到现在,还没有见到出版过这样一本著作,它用耦合波的观点将一系列微波问题的分析贯穿起来。看来,我们还需要这样的书,它从耦合波的观点来论述广泛的微波问题,包括不规则波导理论、激发问题、空腔谐振器中的耦合振荡、铁氧体中的耦合波、微波电子管中的耦合波、参量电路中的耦合振荡与耦合波,等等。我写这本书,就将以此为目标。在写作中,我曾参阅了若干经典的微波著作,并且尝试从近几年来有关文献中汲取一些新的特别是在耦合波理论方面的研究成果(在这些文献中,也包括了我自己发表过的一些论文)。

电子学中的一系列物理现象和过程,和其它自然学科中的许许多多现象和过程一样,常常是用“振荡”和“波”的概念来描述的。这是因为,尽管许多物理问题都包含着一系列相互制约的复杂的现象和过程,但是,我们总还是可以研究这些现象和过程的主要方面,并且就这些主要方面来说,除了在某些特殊时间以及在空间的某些特殊点,物理现象和过程又常常可以看成是连续的。振荡和波正是最自然的随时间或时间与空间作连续变化的现象和过程。当不只一个振荡或不只一个波同时存在时,一般的,在这些振荡或在这些波之间总会发生某种程度的联系。这种联系就称为振荡或波之间的耦合,而研究耦合振荡与耦合波的普遍规律的理论就称为耦合波理论(更一般的名称应该是耦合振荡与耦合波理论,或耦合模理论。但习惯上,也常常就用耦合波理论这个名称来代表这种研究振荡与波的一般理论)。正因为耦合波描述了最广泛的物理问题,所以耦合波理论在近代电子学特别是微波理论中占有极其重要的地位。根据这个理论,许多表面上看来是不相关的现象都在统一的观点下联系了起来。

耦合波理论是用来分析不规则波导的有效方法;对于多波型波导更是如此。在各种形式的波导中,由于弯曲、截面改变(包括接头倾斜和阶梯)以及媒质非均匀性、内表面粗糙、介质膜、各向异性结构等原因而发生的波型变换都可以利用耦合波理论来分析。在许多波导元件的设计中,耦合波理论是不可缺少的工具。明显的例子是各种类型的定向耦合器。同样,对于非互易微波元件(铁氧体和等离子体),耦合波理论也用来解释和分析媒质的非互易特性。在近代微波电子管的研究中,耦合波理论吸引了很多人的注意。根据电磁波和“电荷波”(空间电荷波)之间的耦合现象,可以解释和分析一系列的新型微波电子管,包括速调管、各种形式的空间电荷波管、行波管

06732

和迴波管、磁控管等等。在微波管理論中，耦合波理論不仅比电子运动学給出了更加精确的結果，并且还引出了从电子运动学不能得到的若干重要的有助于設計工作的結論(如噪声在微波管中以駐波的形式出現)。此外，耦合波理論也用来分析参量放大器。在耦合波理論的观点下，許多电子器件都可以看成是“热波导”；这样，电子器件就通过耦合波理論和普通波导(“冷波导”)联系了起来。在更广泛的意义下，波导中的耦合波和空腔諧振器中的耦合振蕩又有着紧密的联系。在这两类問題中，我們遇到許多十分相似的現象(如波导中簡并波之間的能量交換和空腔諧振器中簡并振蕩之間的相互作用)。綜上所述，很明显地，在原理上同时也在实际上，耦合波理論是研究許多微波問題的焦点。从数学理論来看，耦合波理論和热传导、弹性振动的經典問題以及近代的量子力学和薛定諤方程一样，都是建立在相同的数学方法上，这就是“正交函数的展开理論。”

本书共分六篇(十四章)，即：广义傳輸綫理論、簡正波、非理想波导理論、空腔諧振器、微波网路和元件、微波电子器件。

第一章概述电磁場的基本理論以及場和路的基本概念，它既是“电学原理”的复习，也是“微波原理”的开始。在微波理論中，广泛地应用着“場”的概念、“場”的理論和分析方法；但这并不意味着“路”的概念、“路”的理論和分析方法不适用了。事实上，只要我們將低頻問題中“路”的若干概念加以补充和推广，它們也同样能够准确地(而不是近似地)描述一系列的微波現象。因而，在本书中，我們把“場”和“路”看成是同样重要的两种观点。經驗告訴我們，善于將場和路的概念結合起來应用，常常能够幫助我們解决許多單純依靠場或路的方法所不能解决的复杂的微波問題。

微波原理的基础是波导理論，而首先是規則波导理論。在近代的波导理論中，一个重要的步驟是將波导中的場分成橫向和縱向两个部分来处理。从理論上講，究竟先研究橫向問題，或是先研究縱向問題，是没有什么区别的。为了強調波导的傳輸綫概念，在第二章中我們首先討論了波导的縱向問題，它研究具有任何橫截面形状的規則波导所遵守的一些共同規律。

在第二篇中，分析了規則波导的橫向問題。因为橫向場是依賴于波导的橫截面形状的，所以在这一篇的第三至第六章中我們依次分析了不同形式的波导：矩形波导，圓波导，横电磁波傳輸綫和开波导。从波导橫截面上二維边值問題的求解，我們导出了不同波导結構中的簡正波；这些簡正波(特別是矩形波导和圓波导中的簡正波)在以后的分析中是經常需要知道的。

第三篇研究不規則波导，它是前两篇規則波导理論的發展。这里，我們將波导的激发和耦合波理論放在一起來討論，原因是这两类問題無論从物理概念来看，或从分析方法来看，都有着极其紧密的联系。事实上，許多微波現象(如小孔或縫隙繞射，具有几何小变形的波导等)，它們既是激发問題(一次源或二次源的激发)，也是耦合波問題。从数学方法来看，上述两类問題发生联系的基础是，在很多情况下，一个由齐

58700

次微分方程和非齐次边界条件所构成的边值問題等效于一个由非齐次微分方程和齐次边界条件构成的边值問題。

在第四篇中,討論了空腔諧振器。和处理波导問題的情形相似,在这一篇中我們首先分析了几种形式的空腔中的簡正振蕩,最后則引用耦合振蕩理論来分析非理想空腔。从这个分析,可以看出耦合振蕩理論和耦合波理論之間的紧密联系。

第五篇(微波网路和元件,第十至第十三章)研究了微波网路的一般規律、各种类型的微波元件、微波天綫以及微波非互易元件。在第十三章中,我們从簡正波,同时也从耦合波的观点描述了鉄氧体的最基本的傳輸特性——法拉第旋轉現象。

最后一篇(第六篇)討論微波电子器件,叙述了耦合波理論和耦合振蕩理論在一系列新型微波电子管中以及在参量电路中的应用。正是利用了耦合波理論,近代参量电子学的理論研究才得到了重要的新发展。

上面,我們是以耦合波理論作为一条理論的綫索來說明本书的主要內容的。当然,任何一种科学理論都有它自己的适用范围和条件,而耦合波理論也不例外。不能认为耦合波理論能够解决一切的微波問題。事实上,为了解决許多具体問題,还需要采用不同的特殊的数学方法(在本书中,我們也将引用一些数学方法来处理若干具体的微波問題)。但是,尽管这样,在我看来,在微波問題中很难找到一种别的理論,它象耦合波理論一样貫穿着这样全面而广泛的内容。

本书采用米-仟克-秒实用单位制。取自文献中的材料,一部分原来不是采用这种单位的,也都換成了这种单位。为了閱讀的方便,在本书附录中列出了一个“主要符号表”。

感謝中国科学院馬大猷学部委員对我写作本书所給予的鼓励和帮助。感謝陈敬熊、李桂生、徐燕生等同志对本书初稿提出的許多宝贵意見;根据这些意見,我对全书作了一次較大的修訂。同时还感謝黃武汉、呂保維、黃国祥、吳鴻适、李苾、楊弃疾、陆志刚、何章祥等同志,在写作本书的过程中曾和他們有过多多次有益的討論。錢景仁同志也曾在許多具体工作上給我以帮助,在此特向他表示深切的謝意。

著 者

一九六三,北京

卷 I 目 录

序

緒 論·····	1
----------	---

第一篇 广义传输綫理論

第一章 电磁場的基本理論·····	7
§ 1.1. 麦克斯韦方程組的若干形式·····	8
§ 1.2. 交变电磁場的边界条件·····	14
§ 1.3. 平面电磁波·····	16
§ 1.4. 电磁場的能量关系·····	21
§ 1.5. 波的反射和折射·····	24
§ 1.6. 电磁場边值問題和唯一性·····	26
§ 1.7. 磁流与磁荷·····	28
§ 1.8. 罗伦茲引理·····	29
§ 1.9. 位函数和赫茲矢量·····	31
§ 1.10. 幅 射·····	35
§ 1.11. 格林函数·····	43
§ 1.12. 电磁場理論和电路理論·····	45
第二章 規則波导理論·····	51
§ 2.1. 电波与磁波·····	51
§ 2.2. 广义传输綫方程·····	58
§ 2.3. 波的速度·····	59
§ 2.4. 波长、相波长和截止波长·····	63
§ 2.5. 电波和磁波的阻抗·····	65
§ 2.6. 横电磁波·····	68
§ 2.7. “纵向場方法”·····	69
§ 2.8. “非消失波”与“消失波”的衰減·····	73
§ 2.9. 广义传输綫理論与波导技术·····	76
§ 2.10. 規則波导的一般理論·····	81

第二篇 簡 正 波

第三章 矩形波导·····	103
§ 3.1. 矩形波导中的主波·····	103
§ 3.2. 矩形波导中的电波与磁波·····	107

§ 3.3. 矩形波导的若干传输特性·····	115
§ 3.4. 平行板波导中的波型·····	121
第四章 圆波导·····	125
普通圆波导	
§ 4.1. 圆波导中的电波与磁波·····	125
§ 4.2. 圆波导的若干传输特性·····	132
§ 4.3. 圆波导的一些变型·····	138
特殊圆波导	
§ 4.4. 介质膜波导·····	142
§ 4.5. 螺旋波导·····	146
§ 4.6. 非普通圆波导中的简正孪生波·····	151
§ 4.7. 椭圆波导·····	163
第五章 横电磁波传输线·····	169
§ 5.1. 同轴线中横电磁波的场结构·····	170
§ 5.2. 同轴线中横电磁波的传输特性·····	172
§ 5.3. 同轴线中的高阶波型·····	175
§ 5.4. 软同轴线·····	180
§ 5.5. 微带·····	181
第六章 “开波导”·····	186
平面结构上的表面波	
§ 6.1. 非均匀平面波·····	188
§ 6.2. 横向谐振法·····	192
圆柱形结构上的表面波	
§ 6.3. 介质线和介质镜象线·····	196
§ 6.4. 单线波导·····	201
§ 6.5. 表面阻抗法·····	202
§ 6.6. “工”字形波导·····	205

第三篇 非理想波导理论

第七章 波导的激发·····	213
§ 7.1. 激发方法·····	213
§ 7.2. 激发方程组·····	215
§ 7.3. 矩形波导的激发·····	221
§ 7.4. 小孔激发理论·····	223
§ 7.5. 格林函数法·····	229
§ 7.6. 开波导的激发·····	236
§ 7.7. 激发问题与耦合波理论·····	241
第八章 耦合波理论·····	247

耦合波的一般理論	
§ 8.1. 离散耦合	247
§ 8.2. 連續耦合	250
§ 8.3. “弱耦合”問題	252
§ 8.4. “强耦合”問題	253
§ 8.5. 常耦合的一般問題	255
§ 8.6. 变耦合理論	260
耦合波方程組	
§ 8.7. 弯曲波导	264
§ 8.8. 行波展开法(“橫截面法”)	270
§ 8.9. 非均匀介电質填充波导	278
§ 8.10. 对称变截面波导	279
§ 8.11. 普遍变截面問題	282
§ 8.12. 耦合波导理論	286
§ 8.13. 非普通波导中的耦合孿生波	293
§ 8.14. 非理想波导接头	294
§ 8.15. 等效边界条件法	298
§ 8.16. 伴 流	301
§ 8.17. 周期性結構	302

第 四 篇

第九章 空腔諧振器	307
§ 9.1. 空腔諧振器的若干問題	307
§ 9.2. 波导式空腔諧振器	313
§ 9.3. 空腔諧振器的工程計算法	320
§ 9.4. 径向波导中的高阶波	326
§ 9.5. 球形腔	329
§ 9.6. 空腔諧振器的一般理論	339

緒 論

一

什么是微波？这是从事微波研究的人们首先想要知道的问题。但是，这个看来是非常简单的问题，却很难用几句话来说清楚。通常，一种省事的回答是用频率范围来规定微波的定义。不过，关于微波频率范围的问题，也还没有一致的意見。一般說，微波的频率下限不低于 300 兆赫（波长 1 米），上限为 300 千兆赫（波长 1 毫米）。至于从短于 1 毫米到紅外線（百分之几毫米）之間的頻帶究竟是否属于微波的范围，是一个有待于研究的问题；也有人称这个波段为“超微波”。

微波既是一个很高的波段，同时也是一个很寬的波段；它的頻帶比下面所有波段（长波、中波、短波……）的頻帶加在一起还要寬約一千倍。为方便起见，通常将微波划分为分米波、厘米波和毫米波；或者作更細的划分，并且用不同的拉丁字母作为各个“分波段”的代号。在雷达和一般的微波技术中，采用下面的代号：

拉丁字母代号	标称波长(厘米)	标称频率(千兆赫)
L	50/23	0.6/1.3
S	10	3
C	5.5	5.5
X	3.2	10
J	1.5	20
K	1.25	24
Q	0.8	34

在微波波譜学中，采用下面的代号：

拉丁字母代号	标称波长(毫米)	标称频率(千兆赫)
K	12.5	24
J	8	35
I	6	50
H	4	75
G	2.5	120
F	1.5	200

但是，用微波的频率范围来说明微波的特点，是远远不够的。事实上，频率范围并不是微波所独有的特点；其它的波段（长波、中波、短波……）也都有它們自己的频率范围。究竟为什么要把微波从电磁波譜中划分出来单独加以研究，这里面还存在着更加深刻的电子学的和物理学的意义。

从电子学的观点来看,微波的特点表现在它的波长和地球上很多物体的尺寸相比要小很多,或者在同一数量级;所以称为微波,显然就包含有波长短的意思。微波波长比物体尺寸还大很多的情形虽然也有,但这种情形是比较少见的。

当波长远小于物体(如飞机、船只、火箭、建筑物等)的尺寸时,微波的特点和几何光学很相似。利用这个特点,就能在微波波段制成方向性极高的天线系统(特别是抛物面反射器),这种系统无论在微波中继通信、对流层散射通信或是在雷达定位以及其它一系列无线电技术中都是重要的。

当波长和物体(如实验室中的无线电设备)的尺寸有相同的数量级时,微波的特点又与声波很相近。因而,微波技术中的一些基本元件都可以在声学中找到相应的东西。例如,微波所用的波导有如声学中的传声筒,号角天线和开槽天线有如喇叭、箫和笛,各种形式的空腔谐振器有如不同的乐器。

作为微波波长比外界尺寸大很多的例子,可以举出微波越过小物体边缘或通过小孔和缝隙所发生的绕射现象。这和光学中的绕射现象当然也是相似的。

对于普通无线电波来说,情形就不一样。这时,无线电波的波长比物体尺寸大很多的情形是更多见的。和空间尺寸相近的情形(如“大气波导”)是个别的。至于波长远小于物体尺寸的情形就更少了。

微波在电子学上的另一个特点是微波的电磁振荡周期(10^{-9} — 10^{-12} 秒)已经短到和电真空器件中电子的渡越时间在相同的数量级。正是利用这个特性,才研制出一系列的新型微波电子管。

从物理学的观点来看,微波的基本特点表现在它和物质的内部运动有着紧密的联系。一般顺磁物质在磁场作用下所产生的许多能级间的能量差额(10^{-4} — 10^{-5} 电子伏)恰好落在微波波段电磁波每个量子的能量范围(10^{-4} — 10^{-6} 电子伏)之内。既然在这个范围内的量子可以影响分子和原子的能级跃迁,也就可用来研究分子和原子核的结构。同样,在接近绝对温度零度时,每一自由度的热能量也落在这个范围内,所以在低温时,物体吸收一个微波量子,也有可能产生显著的效应。以上两点正是近代微波波谱学和量子电子学所依据的基本物理事实。

除此以外,微波还有一些其它的特点,如这个波段的电磁波并不由高空大气游离层反射,而可以毫无阻碍地透过这些游离层。因此,对于人类来说,微波波段是电磁波谱中的一个宇宙“窗户”,它给宇宙通信、导航、定位以及射电天文学的研究指出了广阔的前途。

二

一般说来,微波包含微波理论和微波技术两方面的内容。

微波电动力学是微波技术的理论基础,它是经典电动力学和电磁波理论发展的最高峰。微波电动力学是研究在微波波段电磁场的一般问题以及电磁场和运动电荷

之間相互作用的一般規律。它主要包括兩部分：微波場論和微波電子學。在微波場論中，正交函數展開理論和許多數學物理方法的應用占有重要的地位。在微波電子學中，重要的是電子運動學和空間電荷波理論。

可以說，在電子學中再沒有別的分支象微波的研究那樣對經典電動力學作出了如此豐富的貢獻。正是通過微波的研究，法拉第和麥克斯韋的電磁波理論才牢固地建立了起來。關於電磁現象以有限的光速通過媒質而傳播的這個基本事實，在麥克斯韋的時候還有不少人懷疑。但是，在這以後的實踐中，特別是通過微波的研究，這些懷疑就不存在了。我們今天都深刻地理解到，所有形式的傳輸綫都是起着引導電磁波作用的波導。在微波的今後實踐中，新的現象還會被發現，但這些都將會給電磁波學說以更加有力的証據。

微波的研究不僅豐富了經典電動力學的內容，同時還促進了數學物理的發展。在微波的理論研究中，我們找到了最典型的邊值問題。

微波電動力學具有技術科學理論的特色，它一方面以基礎科學為基礎，一方面又與生產實踐有密切聯繫。微波理論一旦脫離了生產實踐，就會失去它的生命力；相反，微波的科學實踐如果離開了微波理論的指導，也很難走得很遠。

現在來看看微波技術所包括的內容。掌握一個波段，意味着解決這一波段的一系列有關技術問題，包括電磁波的產生、放大、發射、接收、傳輸、控制和測量。微波波段的這些技術在某些方面是較低頻率的無線電技術的發展，但整個說來，它們是建立在新的原理和基礎上。一般無線電振蕩的產生和放大是利用普通電子管來完成的，它的基本工作原理是利用柵極、陰極間的电場來控制電子流的密度。在微波的較低頻率範圍（分米波）內也採用在普通電子管的基礎上發展起來的微波三極管和四極管。但是，微波電子管的主要形式（速調管、磁控管、行波管）却是基於完全不同的原理——電子的“速度調制”。最近幾年出現的固體器件則是在無線電波譜學的基礎上產生的；在這些器件中利用了和分子、原子內部運動相聯系的能量。隨着微波技術朝着更高頻率的发展，在毫米波和亞毫米波的產生和放大方面，正在尋求一些新的途徑（其中利用高能電子產生輻射的方法已經取得了重要的成果）。在微波傳輸方面也採用了一整套的新技术。微波波段的主要傳輸綫形式是波導，雖然在若干情形下也還採用從低頻技術發展起來的同軸綫。在微波測量方面，情形也是相似的。在波導的駐波測量中，就採用了模擬低頻傳輸綫的測量技術和方法。但是，從根本上說，微波測量技術是和無線電其它波段的測量技術不相同的；一般無線電測量是以電流和電壓的測量為基礎的，但是在微波技術中基本的被測的量却是電磁波的波長、功率和相位。

三

任何一門科學技術的發展都是和它的實際應用緊密聯系着的。微波的現有應用

已經非常多了,新的应用还不断在扩大。

微波在国防上最重要的应用是雷达和导弹控制。雷达是在二次大战时期发展起来的一門技术,人們常說,它的成就可以和原子能的研究相媲美。正是由于雷达的实际需要,才推动了微波技术的飞速发展。近年来,在各种远程雷达中,在信息論的基础上研究出許多新穎的接收方法;与此同时,在微波技术方面,也有很大的进展,如发射功率不断提高、天綫尺寸繼續加大、在接收机中采用低噪声量子放大器等。另一方面,雷达的发展还表现在它的应用范围的不断扩大,例如,在国民經济中,构造简单的雷达設備已用于大地測量和交通運輸等部門。

在国民經济中,微波的最重要应用是多路通信。微波多路通信的主要形式是中繼通信,它是指工作在微波波段(通常頻率范围在 1,000 到 10,000 兆赫之間)的无綫电通信系統。这种系統是一条由彼此相隔視綫距离(40—60 公里)的一連串中繼站所組成的綫路。它具有有綫通信、同軸电綫和海底电綫所沒有的若干优点,如:通信容量高而伸縮性很大,从几个電話話路到几个电视通路(相当于上万个電話話路);扩大通信容量容易(完成了中繼通信系統的初建,增加信道是方便的);安装時間短;不受地理的限制,因而只要保証中繼站間的直綫視距,宜于用在山区、森林和河流地帶(和有綫或电綫系統相比,在上述地帶采用微波中繼無論从初建或維護費用来看都是經济的)。散射通信是另一种重要的多路通信方式。它的优点是:不受太阳活动的影响,不受地理条件的限制,可以在相当远的距离内进行有效通信而不需要中繼站。在超短波(米波)波段利用电离层散射传播可以获得 2,000 公里左右的可靠通信,在厘米波段利用对流层的散射传播可以获得 500 公里以上的可靠通信。

除了雷达和多路通信,微波还用于航空和海运中的导航系統。工作在微波波段的无綫电六分仪(这种仪器代替了过去所用的光学六分仪),它的显著优点是不依賴“光見度”而工作。近年来,微波技术已用于“空間通信和跟踪”。

此外,微波在工业、工程和工艺学等方面也有着广泛的应用。目前,微波在工业上的应用主要是基于在这个波段电磁波輻射的热效应,例如,利用磁控管“微波加热器”来进行精密木制器件的接合。金属加工表面的光洁度測量是微波用于工艺学的一个例子。

在科学研究中,微波技术也占有很重要的地位。例如,原子能研究中一种不可缺少的器件“加速器”(直綫加速器和迴旋加速器)就是微波技术高度发展的結果。又如,在控制热核反应的等离子区測量方面,毫米波微波技术提供了非常有效的方法。

微波不仅本身是一門日新月异的尖端学科,它的应用正在不断扩大,同时,它和几乎所有近代尖端技术和学科都发生极其紧密的联系。事实上,随着这門学科的飞速发展,微波的一部分內容在結合物理学的某些分支的基础上已經逐漸从原来的微波領域中划分出来,形成了若干个新的科学分支,如微波天文学、微波气象学、微波波

譜学、量子电动力学、微波半导体电子学等等。在近代的自然科学中，微波发展的快慢对很多学科的发展都起着重要的影响。

四

从微波的历史过程来看，它是发展得很迟，而又是发展得极为迅速的一門技术科学。

說它发展得很迟，是因为在空腔諧振器或金属容器中激发起电磁振荡并且通过波导或空金属管来传输电磁波，这些可能性已經包含在十九世紀末当时已經建立起来的麦克斯韦場方程組和电磁場理論之中。但是，微波技术的发展实际上却开始于二十世紀三十年代。

說它发展得极为迅速，是因为，微波电子学的基本客观規律一旦为人們所認識，它就在不到三十年的時間内发展成为一門無論在科学理論或应用技术方面都极为重要的科学，并且和一系列其它的自然科学分支与尖端技术錯綜紧密地联系着。

將微波技术的历史过程划分为若干明确的阶段是困难的。但是，我們还是可以大致地以二十世紀四十年代作为界限，將微波的发展过程划分为三个阶段：即在1940年以前为第一阶段，1940—1945 为第二阶段，1945 到現在为第三阶段。

在第一阶段，微波的研究具有实验室的特点。約在 1933 年，在实验室中发现了空金属管可以用来传输微波功率。虽然在原理上很早就有人推断在空金属管中能够存在着电磁波，但是，这和实际上作到这一步还有一定的距离。因此，近代微波技术的起点应该由波导的实际应用变为现实来标志。在这一阶段，另一个方面的重要发展是发明了若干形式的微波电子管。这些发明是推动微波技术向前发展的决定性因素。

和实际工作并行的是波导和空腔諧振器的理論研究以及在微波电子管中电磁場和运动电荷相互作用問題的理論研究。这些研究初步奠定了微波电动力学的基础，为微波技术的进一步发展作好了理論方面的准备。

第二阶段是微波技术迅速应用于实际的阶段。这一阶段正是第二次世界大战的时期。在战争的年代里，各国都投入巨大的力量研究微波技术，而研究的焦点是将雷达用于軍事。在这一阶段，微波电路（包括一系列微波元件）的研究、微波測量技术的研究得到了巨大的发展。同时，近代一些新型微波管的原始結構（如多諧振腔磁控管、双腔和反射式速調管、特殊結構的微波三极管……）也大量地用于实际。

在第二阶段，微波在导航及遙控等部門中的应用也已經开始。实际設備中应用的微波波段扩展到 1 厘米。在提高微波功率和效率方面也取得了巨大成就。

在第二阶段，微波发展的特点之一是理論远远赶不上实际。在战争的年代里，迫切要求解决一系列的設計問題和实际应用問題，很多工作不能等待理論上的严格探討。

第三阶段是从第二次世界大战結束到現在。这一阶段的重要成就一方面是在前一阶段大量实践的基础上比較完整而系統地建立了一整套的微波电子学。另一方面則是微波技术在一系列的科學領域中得到了极其广泛的应用。

总起来看,微波的发展过程正是从实践到理論、从理論又回到实践的循环上升的过程。

*

*

*

在这篇緒論里,我們敘述了微波的特点、內容、应用和发展过程。現在,很自然地还会提出这样的問題:从理論与实际方面来看,微波在今后还要朝哪些方向发展?关于这个問題,我們将在书末“結語”中再来探討。現在,讓我們轉入正文。

第一篇 广义传输綫理論

第一章 电磁場的基本理論

本章的目的是叙述电磁場的基本理論,作为进一步研究微波理論的基础。

电磁場理論的发展清楚地說明了在这个科学領域中的实践、認識,再实践、再認識的循环上升过程。从辯証唯物論的認識論的观点来看电磁場理論的发展,更能够加深对它的理解。

認識是从实践而来的。我們伟大的祖先在紀元前 1000 年以前就发现并应用了磁铁,写下了电和磁的認識历史的第一頁。約在紀元前 600 年,希腊人首先发现摩擦生电的現象。

从电和磁的发现起,經過了 2000 多年,人們对于电和磁的認識增加的不多,这是因为,当时粗陋的技术条件限制了科学的发展。18 世紀末,发明了电池,这就为电磁学的研究創造了物质条件,迅速地推动了电磁認識过程的发展。在短短的 30 多年中,人們发现了电流产生磁場的現象、电磁感应現象...,提出了一系列的学說和理論。

到 19 世紀中叶,人們已經有了极其丰富的电磁学的知識。麦克斯韦首先用严謹的数学方法描述并发展了法拉第提出的关于場的概念,正确地总結了宏观电磁現象的基本規律。

麦克斯韦对电磁場基本規律所作的总結通常是用下列四个方程(即麦克斯韦方程組)来表示的:

- (1) 位移矢量的散度等于电荷密度;
- (2) 磁感应矢量的散度处处等于零;
- (3) 电場強度的旋度等于磁感应的減少率;
- (4) 磁場強度的旋度等于全电流密度(即传导电流密度加上位移电流密度)。

除了上述的四个方程外,完整的电磁理論还包括以下三个基本定义(或附加条件):

- (1) 在各向同性的綫性的介电質中,位移矢量和电場強度成正比;
- (2) 在各向同性的綫性的导电媒質中,传导电流密度和电場強度成正比;
- (3) 在一般的非鉄磁性媒質中,磁感应和磁場強度成正比。

麦克斯韦方程組不过是以数学形式表达了人們在长期实践即自然科学的實驗中所发现的几个基本物理事实,它們是:(1)电荷間作用的力和距离平方成反比(庫伦定律);(2)孤立的磁极(或“磁荷”)从来没有被发現过¹⁾;(3)变化的磁場产生电場(法拉

1) “磁荷”不存在,当然是从物理本质方面來說的。这并不妨碍我們从数学方法上引出磁荷与磁流的定义(見 § 1.7)。

第定律); (4) 电流或变化的电场产生磁场(安培定律, 加上麦克斯韦关于位移电流的概念)。正因为麦克斯韦方程组主要是以实验为根据的, 所以它们是来源于感性的可靠的东西。同样, 前面叙述过的三个基本定义也无一不是以大量的实验为根据的; 定义(2)也就是欧姆定律, 定义(1)、(3)是从电容和电感测量得出的结果。

但是, 辩证唯物论者并不认为理论永远跟随在实践之后。在大量实践的基础上, 当理论发展到一定高度时, 它又走在实践之前反过来指导人们的再实践。

麦克斯韦的理论(即电磁波理论)之所以被重视, 不仅在于它总结了在它以前的许多个别规律, 更重要的是它预见了电磁波的存在, 在理论上指导了一系列的电磁学领域中的研究。电磁波的存在首先是为赫兹的实验所证实的, 但是直到波波夫发明了无线电, 而特别是在微波技术发展了以后, 人们才更加深刻地认识到电磁波理论的重要意义。微波的研究使人们进一步理解, 从前一直被个别处理的传输线问题和电路问题都是波导问题的特殊形式, 一切的宏观现象原来都遵守相同的规律。

§ 1.1. 麦克斯韦方程组的若干形式

(1) 麦克斯韦方程组的微分形式——小尺度形式

法拉第在实验中发现, 当一个线圈所环链的磁通改变时, 在线圈中将感应出和磁链变率成正比的电压, 或和磁链减少率成正比的电动势。这是一条以实验为根据的基本定律, 它不需要从更基本的公式推导出来。

法拉第定律是适用于闭合的导电回路(线圈)的。我们很自然地会问: 它是否适用于空间任何一个闭合回路呢? 回答是这样: 因为定律中并不包含回路的电阻, 所以将它推广应用到空间任何一个闭合回路看来是合理的(从电子回旋加速器的工作原理来看, 可以得到合理的解释: 电子回旋加速器正是利用变化磁场所产生的电场, 使带电质点发生加速运动的)。

将电动势写成电场强度沿任意闭合回路的线积分, 则法拉第定律可表示为¹⁾

$$\oint_C \tilde{\mathbf{E}} \cdot \mathbf{i}_t dl = - \frac{d}{dt} \int_Q \tilde{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{i}_n dQ.$$

式中 $\tilde{\mathbf{E}}$ 和 $\tilde{\mathbf{B}}$ 分别代表电场强度和磁感应强度²⁾, C 指闭合回路, Q 指以 C 为周界的任一个面, $\mathbf{i}_t$ 和 $\mathbf{i}_n$ 分别代表切向和法向单位矢。应用斯托克定理, 可以将上式左边写成面积分, 即

1) 本书将一律采用米-千克-秒单位制。在电磁理论中, 另一种常用的单位制是所谓高斯制(在这种制度中, $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$)。从米-千克-秒制的公式很容易转换成高斯单位制的公式(只要将 ϵ_0 和 μ_0 都换成 $1/c$, 将 $\mathbf{J}$ 和 ρ 分别换成 $\mathbf{J}/c$ 和 ρ/c , 就可以了; 这里 c 是光速)。

2) 黑体代表矢量。字母上的 $\sim$ 号表明场矢量是空间坐标和时间的函数。以后在研究正弦交变场问题时我们将引入复矢量的定义, 这时, 字母上将不加 $\sim$ 号(复矢量仅仅是空间坐标的函数, 它不包含时间函数部分)。