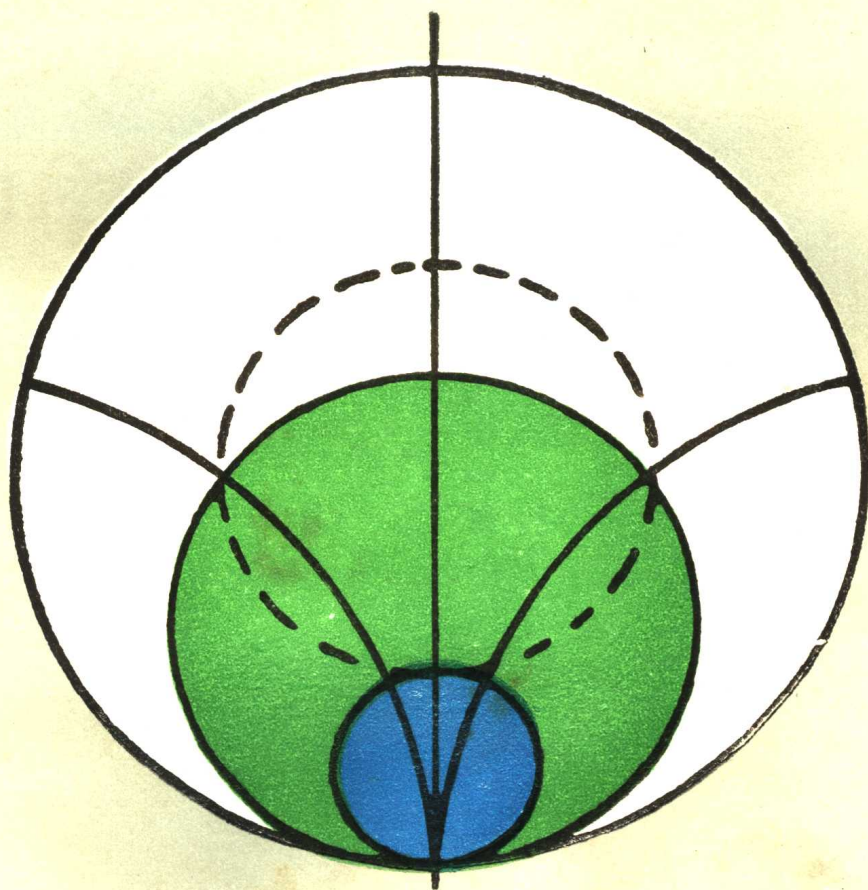


高等学校教学用书

电磁场与微波技术

盛振华 编 杨铨让 审



电子工业出版社

电磁场与微波技术

盛振华 编

杨铨让 审

电子工业出版社

内 容 简 介

本书主要介绍有关微波技术方面的基本理论、基本技术和基本分析方法。

全书共分七章，包括绪论、电磁场与电磁波的基本原理、传输线理论、微波传输线、微波网络基础、微波元件、微波测量和天线。每章附有提要 and 一定数量的例题和习题。

本书为非微波专业电子类各专业的本科生教材。作适当取舍也可作电子类各专业的大专生教材，也可供从事微波技术、电子测量、无线电技术的科技人员参考。

电磁场与微波技术

盛振华 编

杨铨让 审

责任编辑：洋溢

电子工业出版社出版（北京市万寿路）
电子工业出版社发行 各地新华书店经销
北京市隆昌印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：18 插页：1 字数：438千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数：1-2700册 定价：5.50元

ISBN7-3053-0361-3/IN·143

前 言

《电磁场与微波技术》一书，系由高等院校工科电子类《电磁场与微波技术教材编审委员会电磁场理论教材编审小组》评选审定，予以推荐出版。

本书是根据《电磁场理论教材编审小组》审定的编写大纲进行编写的。本书为工科院校非微波专业电子类各专业的本科生教材，作适当取舍也可作电子类各专业的大专生教材，又可供从事无线电技术、电子测量及微波技术的科技人员参考。

本书共分三大部分：第一部分为电磁场理论部分，即第一章的内容。主要讨论电磁场的基本概念、基本定律和基本分析方法；电磁波的传播规律及性质。第二部分为微波技术部分，包括第二章至第六章的内容。主要介绍传输线理论；几种基本形式的微波传输线及其特性；微波网络的网络参量及其性质；几种常用的微波元件的工作原理、工作特性及其一般设计方法；几种常用的微波测量原理及其方法。第三部分为天线部分，即第七章的内容。着重讨论天线的主要特性参量，并介绍元电辐射体、单导线天线对称振子、天线阵及面天线的辐射特性；对常用的一些天线设备也作了一般介绍。

本书每章附有提要 and 一定数量的例题及习题，以帮助读者加深对基本理论及基本概念的理解和掌握。

在编写本书工作中得到了东南大学杨铨让教授的关心和指导，对全书进行了认真的审阅，提出了许多宝贵意见。同时东南大学微波技术教研组的同志们对本书的编写工作也曾给予支持和帮助。编者在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者不吝指教。

编者

1987年11月

3-3 微带传输线	(84)
一、微带线中主要模式	(84)
二、微带线的特性阻抗	(85)
三、微带线的色散特性和尺寸设计考虑	(87)
3-4 耦合带状线和耦合微带线	(88)
3-5 波导传输线的一般理论	(92)
3-6 矩形波导	(94)
一、矩形波导中传输模式及场分布	(94)
二、矩形波导中传输模式的纵向传输特性	(97)
三、矩形波导中传输模式的场结构	(99)
四、矩形波导中传输模式的管壁电流	(102)
五、矩形波导中传输功率和功率容量	(104)
六、矩形波导尺寸的设计考虑	(105)
3-7 圆波导	(106)
一、圆波导中的场分布	(107)
二、圆波导中三个主要模式	(111)
本章提要	(112)
习题	(113)
第四章 微波网络基础	(115)
4-1 引言	(115)
4-2 波导传输线与双线传输线的等效	(115)
4-3 微波元件等效为微波网络的原理	(119)
一、网络参考面的选择	(119)
二、微波元件等效为微波网络原理	(120)
三、微波网络的特性	(121)
4-4 二端口微波网络	(122)
一、二端口微波网络的网络参量	(122)
二、二端口微波网络参量的相互转换	(126)
三、二端口网络参量的性质	(129)
四、参考面移动对网络参量	

的影响	(130)
4-5 基本电路单元的参量矩阵	(131)
4-6 微波网络的工作特性参量	(133)
一、电压传输系数 T	(133)
二、插入衰减 A	(134)
三、插入相移 θ	(135)
四、输入驻波比 ρ	(135)
4-7 微波网络参量的测定方法	(136)
4-8 二、三、四端口无耗可逆网络的基本特性	(137)
一、二端口网络	(138)
二、三端口网络	(138)
三、四端口网络	(139)
4-9 网络对偶电路定理	(139)
一、阻抗与导纳互为对偶	(140)
二、阻抗串联电路与导纳并联电路互为对偶	(140)
三、两梯形电路互为对偶	(141)
四、 $\lambda/4$ 阻抗变换器与 $\lambda/4$ 导纳变换器互为对偶	(141)
本章提要	(142)
习题	(143)
第五章 微波元件	(146)
5-1 引言	(146)
5-2 微波电抗元件	(146)
一、矩形波导中的电抗元件	(146)
二、微带线中的电抗元件	(150)
5-3 微波连接元件和终端元件	(153)
一、连接元件	(153)
二、终接元件	(155)
5-4 衰减器和移相器	(156)
一、衰减器	(156)
二、移相器	(157)
5-5 阻抗调配器和阻抗变换器	(157)
一、阻抗调配器	(157)

3-3 微带传输线.....	(84)	的影响.....	(130)
一、微带线中主要模式.....	(84)	4-5 基本电路单元的参	
二、微带线的特性阻抗.....	(85)	量矩阵.....	(131)
三、微带线的色散特性和尺寸设		4-6 微波网络的工作特	
计考虑.....	(87)	性参量.....	(133)
3-4 耦合带状线和耦合		一、电压传输系数 T	(133)
微带线.....	(88)	二、插入衰减 A	(134)
3-5 波导传输线的一		三、插入相移 θ	(135)
般理论.....	(92)	四、输入驻波比 ρ	(135)
3-6 矩形波导.....	(94)	4-7 微波网络参量的测	
一、矩形波导中传输模式及		定方法.....	(136)
场分布.....	(94)	4-8 二、三、四端口无耗可逆	
二、矩形波导中传输模式的纵向传		网络的基本特性.....	(137)
输特性.....	(97)	一、二端口网络.....	(138)
三、矩形波导中传输模式的		二、三端口网络.....	(138)
场结构.....	(99)	三、四端口网络.....	(139)
四、矩形波导中传输模式的管		4-9 网络对偶电路定理.....	(139)
壁电流.....	(102)	一、阻抗与导纳互为对偶.....	(140)
五、矩形波导中传输功率和功率容量	(104)	二、阻抗串联电路与导纳并联	
六、矩形波导尺寸的设计考虑.....	(105)	电路互为对偶.....	(140)
3-7 圆波导.....	(106)	三、两梯形电路互为对偶.....	(141)
一、圆波导中的场分布.....	(107)	四、 $\lambda/4$ 阻抗变换器与 $\lambda/4$ 导纳变	
二、圆波导中三个主要模式.....	(111)	换器互为对偶.....	(141)
本章提要.....	(112)	本章提要.....	(142)
习题.....	(113)	习题.....	(143)
第四章 微波网络基础.....	(115)	第五章 微波元件.....	(146)
4-1 引言.....	(115)	5-1 引言.....	(146)
4-2 波导传输线与双线传输线		5-2 微波电抗元件.....	(146)
的等效.....	(115)	一、矩形波导中的电抗元件.....	(146)
4-3 微波元件等效为微波网络		二、微带线中的电抗元件.....	(150)
的原理.....	(119)	5-3 微波连接元件和终	
一、网络参考面的选择.....	(119)	接元件.....	(153)
二、微波元件等效为微波网		一、连接元件.....	(153)
络原理.....	(120)	二、终接元件.....	(155)
三、微波网络的特性.....	(121)	5-4 衰减器和移相器.....	(156)
4-4 二端口微波网络.....	(122)	一、衰减器.....	(156)
一、二端口微波网络的网络参量.....	(122)	二、移相器.....	(157)
二、二端口微波网络参量的		5-5 阻抗调配器和阻抗	
相互转换.....	(126)	变换器.....	(157)
三、二端口网络参量的性质.....	(129)	一、阻抗调配器.....	(157)
四、参考面移动对网络参量			

二、阻抗变换器	(160)
5-6 定向耦合器	(170)
一、定向耦合器的技术指标	(171)
二、定向耦合器的网络分析	(172)
三、波导型定向耦合器	(174)
四、平行耦合线定向耦合器	(175)
五、分支定向耦合器	(179)
六、双 T 和魔 T	(180)
5-7 微波滤波器	(181)
一、引言	(181)
二、低通原型滤波器	(183)
三、频率变换	(189)
四、滤波器的微波实现	(191)
五、微波低通滤波器的设计举例	(193)
六、微波带通滤波器	(194)
5-8 微波铁氧体元件	(196)
一、引言	(196)
二、微波铁氧体的谐振特性	(196)
三、微波铁氧体的场移效应	(199)
四、微波铁氧体的法拉第旋 转效应	(199)
五、微波铁氧体元件	(200)
5-9 微波谐振器	(203)
一、微波谐振器的基本参量	(204)
二、同轴线谐振腔	(207)
三、矩形谐振腔	(208)
四、圆柱形谐振腔	(210)
五、环形谐振腔	(213)
六、谐振器的等效电路及其激 励装置	(214)
本章提要	(217)
习题	(218)
第六章 微波测量	(222)
6-1 引言	(222)
6-2 驻波测量	(222)
一、驻波测量线	(223)
二、驻波测量方法	(225)
6-3 反射计与扫频反射计	(227)
一、精密调配反射计	(227)
二、扫频反射计	(230)
6-4 网络参量的测量	(231)

一、单端口网络的输入阻抗 的测量	(231)
二、二端口网络参量的测量	(232)
6-5 微波功率测量	(234)
一、测量功率的基本方法	(235)
二、热敏电阻小功率计	(237)
三、微波小功率计测量误差	(238)
6-6 频率测量	(241)
一、谐振式频率计	(241)
二、数字式频率计	(243)
本章提要	(244)
习题	(245)
第七章 天线	(246)
7-1 引言	(246)
7-2 天线主要特性参量	(247)
一、效率	(247)
二、方向性图	(247)
三、主瓣宽度与副瓣电平	(248)
四、方向性系数	(248)
五、增益系数	(248)
六、极化	(249)
七、输入阻抗	(249)
八、工作频带宽度	(249)
7-3 元电辐射体	(249)
7-4 单导线天线	(252)
一、单导线行波天线	(252)
二、单导线驻波天线	(254)
7-5 对称振子天线	(255)
一、对称振子的辐射场	(255)
二、对称振子的辐射电阻和输 入阻抗	(257)
7-6 天线阵	(258)
一、二元天线阵	(259)
二、均匀直线阵	(260)
三、方向性图的乘法原理	(261)
7-7 面式天线	(263)
7-8 一些常用的天线设备	(265)
一、长、中波天线	(265)
二、短波天线	(266)
三、超短波天线	(267)
四、微波天线	(268)

本章提要	(269)
习题	(270)
附录一 矢量分析公式	(271)
附录二 国产矩形波导管 参数表	(273)
附录三 常用硬同轴线特 性参数	(274)

附录四 常用同轴射频电 缆特性参数	(275)
附录五 常用导体材料 的特性	(275)
附录六 常用介质材料 的特性	(276)
参考书目	(276)

绪 论

微波技术经过几十年的发展，现已成为一门比较成熟的学科。在雷达 通信、电子对抗、工农业生产及科学研究方面已得到广泛应用。

表1 国际无线电频谱的波段划分

波段号数	符号(中译名)	频率范围 (下限除外包括上限)	相当米制划分	波段缩写
4	VLF(甚低频)	3至30kHz	万 米 波	B、Mam
5	LF (低频)	30至300kHz	千 米 波	B、km
6	MF (中频)	300至3000kHz	百 米 波	B、hm
7	HF (高频)	3至30MHz	十 米 波	B、dam
8	VHF(甚高频)	30至300MHz	米 波	B、m
9	UHF(超高频)	300至3000MHz	分米波(十分之一米波)	B、am
10	SHF(特高频)	3至30GHz	厘米波(百分之一米波)	B、cm
11	EHF(极高频)	30至300GHz	毫米波(千分之一米波)	B、mm
12	超极高频	300至3000GHz	亚毫米波(万分之一米波)	

微波是指频率范围为 300MHz 到 3000 GHz 的电磁波。即波长是从1m到 0.1mm的电磁波为微波。表 1 列出了国际无线电频谱的波段划分。图 1 表示电磁波的频谱图。由图可见，微波的低频端接近于超短波，高频端靠近红外线。

在通信和雷达工程中，常使用拉丁字母来表示微波波段的名称。例如，S 波段表示 10厘米波段，C 波段表示 5 厘米波段，X 波段表示 3 厘米波段等等。微波波段是相当宽的电磁波，它几乎是普通无线电波的长，中，短各波段总和的1000倍。

一、微波的特点

既然微波也是电磁波，为什么又要把微波从整个电磁波谱中划出来专门加以研究呢？主要是因为其波长比普通无线电波小得多，相应的频率高得多，由于量的变化引起电磁波性质的变化，使得微波具有一系列不同于普通无线电波的特点。

(一) 微波波长短

微波的波长范围为0.1mm~1m，如此短的波长与地球上的物体（如建筑物，飞机及导弹）的尺寸相比要小得多或属同一个数量级。当波长比物体尺寸小得多时，微波的性质类似于可见光（0.076~0.04mm），称为似光特性。利用这个特性可以获得方向性很高的天线（如抛物面天线）。还可利用微波直线传播的特点进行微波中继通信，无线电定位等；当微波波长与物体尺寸是属同一个数量级时，微波与声波相似。许多波导系统的元件可以在声学系统中找到相应的器件，例如：波导管相当于声学中的传声筒，号角天线相当于声学中的喇叭，各种谐振腔也可以在声学中找到相应的器件，如开槽天线相当于声学中的笛或箫等。

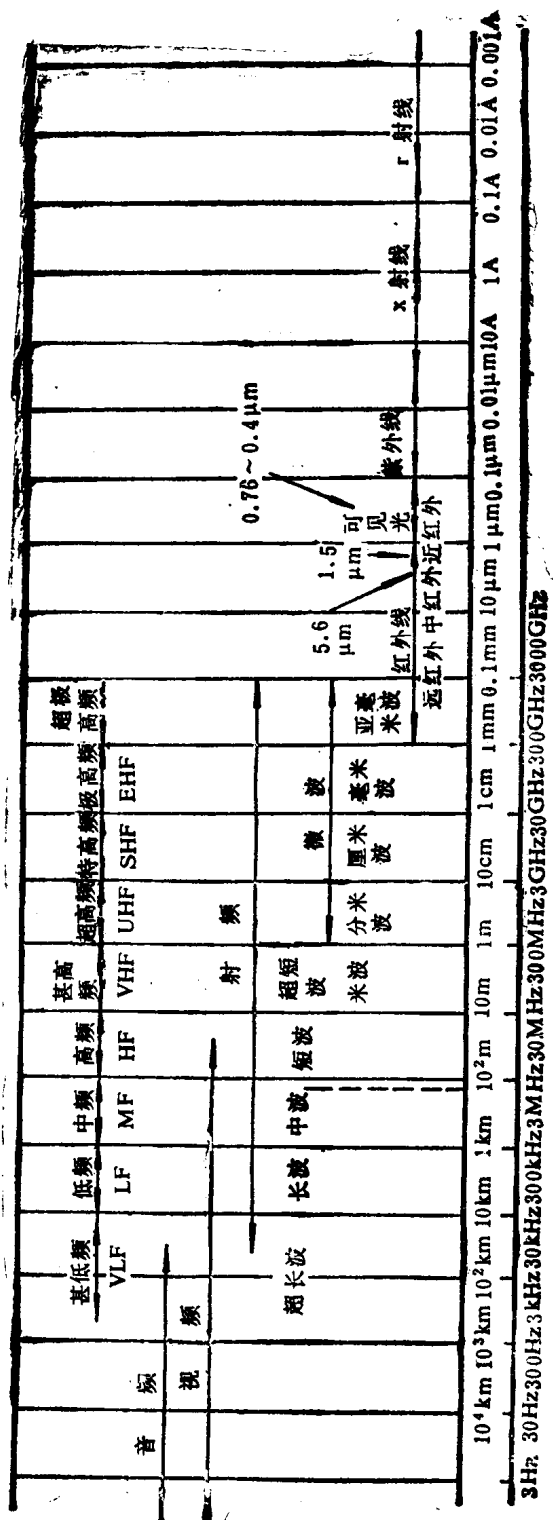


图1

(二) 微波振荡周期短(10^{-2} - 10^{-12} s)

这样短的周期已和真空器件中的电子渡越时间属同一个数量级,因此微波所用的管子必须采用新的方法来制造。如微波电子管有速调管、磁控管和行波管等,微波固体器件有体效应管、PIN管和场效应管等。

(三) 微波能穿透电离层

由于微波频率很高,它能穿透高空的电离层。利用这一特点可以进行卫星通讯和宇航通讯。同时也为天文观察增加了一个窗口,使射电天文学的研究成为可能。

由于微波具有这些特点,使微波的应用范围、研究方法、传输系统、微波元件和器件以及测量方法均与普通无线电波不同,因此有必要将微波从普通无线电波中划分出来专门加以研究。

二、微波的分析方法

对于微波问题的分析方法常采用两种方法,一种为“路”的方法即应用克希霍夫定律和初始条件去研究系统中电压和电流随时间的变化规律;另一种为“场”的分析方法即应用麦克斯韦方程和边界条件去研究系统中电场和磁场随空间和时间的变化规律。严格来说,微波问题主要是研究“场”的问题,但并不意味着“路”的概念和方法就不重要,事实上许多微波问题往往是从“场”的概念出发,最后归结为“路”的问题来加以处理的。因此,在处理微波问题时,往往采用“场”和“路”相结合,相互补充的方法。

三、微波技术的发展

微波技术是从二十世纪初开始发展起来的。1940年以前是实验室的早期研究阶段,主要研究微波产生的方法;1940年至1945年是微波技术迅速发展并应用于实际的阶段;1945年以后,不仅开辟了新的波段,扩展了应用范围,并逐步形成一系列的新学科,如:微波波谱学、射电天文学、射电气象学等等。同时在前一阶段实践的基础上,比较完整而又系统地建立了一整套的微波电子学理论,这为微波技术的进一步发展和提高打下了理论基础。

1965年以后,随着微波固体器件和微波集成电路的出现和发展,使微波技术进一步向固体化、小型化方向发展。

目前微波技术正向毫米波和亚毫米波方向迅速发展并逐步得到了实际应用。

四、微波的应用

微波的实际应用相当广泛,尤其近年来发展更快,新的应用层出不穷。这里简单介绍几种主要的用途。

1. 雷达是微波技术的最早应用。微波雷达能够准确地测定目标的方向、距离和速度。它不仅用来发现敌机,跟踪和侦察导弹、宇宙火箭、导航飞机和船只,跟踪人造卫星、

控制宇宙飞船飞行，而且能够测定风速、风向、雨和雪的分布、云层的高度和厚度，从而对天气进行预报。

2. 微波通讯是微波技术的重要应用。由于微波频带宽，信息容量大，因此微波设备可用于多路通讯，例如，960路、1860路等；由于微波频率高，它既不受外界工业干扰及天电干扰的影响，又不受季节、昼夜变化的影响，因而性能稳定，通讯质量高；由于微波波长短，可以用合理尺寸制作出高增益，强方向性的天线，这就提供了小功率发射机实现稳定通讯的可能性；由于微波会穿透电离层，因此，不能利用电离层的反射来实现远距离通讯，只能借助于微波中继通讯和卫星通讯来实现远距离通讯。只要利用太平洋、大西洋和印度洋上空三个卫星就能进行全球通讯。

3. 微波加热器是微波技术的新应用。在最近几十年，微波单纯作为能源，在微波技术应用发展史上是一件新事物。微波加热具有加热均匀，加热时间短、产品质量好等优点。因此微波加热在工农业生产、食品加工方面得到了广泛的应用。

4. 在生物医学方面，微波技术具有更广泛的应用。应用微波不仅可以诊断疾病，如肺气肿和肺水肿、癌症及测量心电图等，又能用来治病，如微波理疗机和微波针灸可以治疗关节炎、风湿等疾病。

5. 科学研究方面的应用。根据各种物质对微波吸收的情况不同，可以用来研究物质内部的结构，这种技术称为微波波谱技术。有关这方面的知识称为微波波谱学；利用微波能穿透电离层并受天体反射的特点，可借助雷达来观察天体情况，为研究宇宙天体提供了新的途径。应用微波技术来研究天文的科学称为射电天文学和雷达天文学；利用大气对微波的吸收和反射特性，借助雷达来观察雨、雪、冰雹、雾、云等的存在和变化的情况，可以预报附近地区的天气情况。把微波技术应用于气象研究而形成一门新的科学，称为无线电气象学。

五、微波内容

微波内容包括微波理论和微波技术两个方面。微波电动力学是微波技术的基础理论。它主要研究微波波段的电磁场理论的一般问题以及电磁场和运动电荷之间的相互作用的一般规律。主要包括微波场论和微波电子学。

要掌握一个波段就意味着要解决这个波段一系列的技术问题，包括电磁波的产生、放大、发射、接收、传输、控制及测量等等。这些微波技术是在无线电技术基础上发展起来的，又是建立在新的原理和基础上的。例如，一般无线电振荡信号的产生和放大是利用普通电子管来完成的，它的基本原理是利用栅极和阴极之间的电场来控制电子流的密度实现的。在微波的低频范围内，也是采用在普通电子管基础上发展起来的微波三极管、四极管。但是微波电子管的主要形式是速调管、磁控管和行波管，这些管子的原理是利用电子速度调制实现的。随频率的提高，必须采用新的原理和方法来产生和放大微波信号。总而言之，微波技术和普通无线电技术相比，有许多不同之处，必须专门加以研究。

第一章 电磁场与电磁波的基本原理

本章主要讨论电磁场和电磁波两个方面的基本概念和基本理论。在普通物理电磁学部分的基础上,引出麦克斯韦方程组,导出电磁场的边界条件和能量关系,然后分别对静电场、恒流电场和恒流磁场进行讨论,最后讨论平面电磁波在无界媒质和有界媒质中的传播规律。

1-1 电磁场基本方程

一、电磁场中的基本场矢量

电磁场中的基本场矢量有四个:电场强度 E ,电位移矢量 D ,磁感应强度 B 和磁场强度 H 。

(一) 电场强度 E

场中某点的电场强度 E 定义为单位正电荷在该点所受的力。即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1-1-1)$$

在上式中 q 为检验电荷的电量,它必须足够小,不致会影响原来的电场。 F 为 q 所受到的电场力。在国际单位制(SI)中,力 F 的单位为牛顿(N),电量 q 的单位为库伦(C),电场强度 E 的单位为伏/米(V/m)。

(二) 电位移矢量 D

如果电解质中存在电场,则电介质中分子将被极化,极化的程度用极化强度 P 来表示。此时电介质中的电场必须用电位移矢量 D 来描写。它定义为:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (1-1-2)$$

式中 ϵ_0 为真空或空气的介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 法拉/米(F/m)。在SI单位制中, D 的单位为库伦/米²(C/m²)。

对于线性媒质中某点的电极化强度 P 正比于该点的电场强度 E 。在各向同性媒质中某点的 P 和 E 方向相同,即

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (1-1-3)$$

式中 χ_e 为电极化率,它是没有量纲的纯数,不同的介质就有不同的 χ_e 。将式(1-1-3)代入式(1-1-2)得:

$$D = \epsilon_0 E + \chi_e \epsilon_0 E = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon E \quad (1-1-4)$$

式中 $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e)$ 称为介质的介电常数,而 $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ 称为介质的相对介电常数。对于各向异性介质, P 的方向和 E 方向不一定相同, D 的方向和 E 的方向也不一定相同,即 χ_e 和 ϵ 为张量。

(三) 磁感应强度 B

磁感应强度 B 是描写磁场性质的基本物理量。它表示运动电荷在磁场中某点受洛伦兹力的大小。假如，一个速度为 v 的电荷 q 在磁场中运动经过该点时，运动电荷 q 受到磁场力 F 的作用，则该点的磁感应强度 B 定义为：

$$F = qv \times B \quad (1-1-5)$$

在SI单位制中 B 的单位为特斯拉 (T)。

(四) 磁场强度 H

如果磁介质中有磁场，则磁介质被磁化。描写磁介质磁化的程度用磁化强度 M 来表示。此时磁介质中的磁场必须引入磁场强度 H 来描写，它定义为：

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (1-1-6)$$

式中 μ_0 为真空或空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米 (H/m)。 M 的单位为安培/米 (A/m)。

在各向同性媒质中 M 和 H 方向相同。即有

$$M = \chi_m H \quad (1-1-7)$$

将式 (1-1-7) 代入式 (1-1-6)，得：

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (1-1-8)$$

式中 χ_m 称为媒质的磁极化率，它是一个没有单位的纯数。 $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$ 称为媒质的磁导率。 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 称为相对磁导率。对于各向异性媒质， B 和 H 及 M 和 H 方向不一定相同，即 μ 和 χ_m 均为张量。

二、全电流定律

在普通物理中，曾经讨论了恒流磁场中的安培环路定律，即为

$$\oint_l H \cdot dl = I = \int_S J \cdot dS \quad (1-1-9)$$

上式表明，磁场强度 H 沿任一闭合回路的环流等于此闭合回路所包围的传导电流的代数和。那么这个定律是否适用于非恒流磁场呢？

我们来分析电容器充放电的情况，如图 1-1-1 所示，在任何时刻穿过金属导体任一横截面的电流总是相等的，但在电容器的两块极板间的传导电流等于零。因此，就整个电路而言，传导电流是不连续的，此时应用安培环路定律将会得出矛盾的结果。如图 (a) 中作一个包围电容器 A 极板的封闭曲面，这个封闭曲面由平面 S_1 和曲面 S_2 组成。根据安培环路定律， H 沿两个面的交界线 l 作闭合积分，则得出两个矛盾的结果。

如取 S_1 面，则有

$$\oint_l H \cdot dl = i \quad (1-1-10)$$

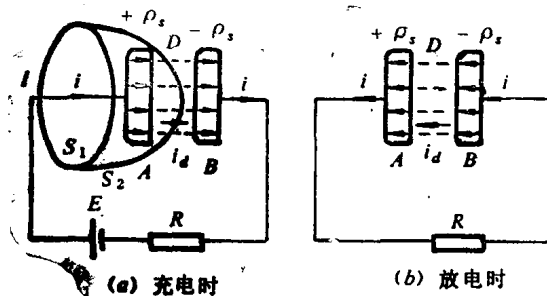


图1-1-1

如取 S_a 面, 则有

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-1-11)$$

上式结果表明, 在非恒流的磁场中, $\mathbf{H}$ 的环流与闭合回路 l 为边界的曲面有关, 选取不同的曲面, 环流值就不同。这说明非恒流磁场中安培环路定律不再适用。后来麦克斯韦提出了位移电流的假设, 修正了安培环路定律, 使它适用于非恒流磁场。

当电容器充、放电时, 电容器极板上的电荷量 q 和电荷密度 ρ_s 均随时间变化。流向极板的电流 $i = \frac{dq}{dt}$, 而其电流密度为 $J_s = \frac{d\rho_s}{dt}$ 。在两极板间的电位移矢量 $\mathbf{D}$ 和穿过整个极板间截面的电位移通量 $\phi_D = SD$ 均随时间变化。电位移矢量 $\mathbf{D}$ 的大小等于极板上电荷密度 ρ_s , 而电位移通量 ϕ_D 等于极板上的总电量 $\phi_D = S\rho_s$ 。因此电位移矢量 $\mathbf{D}$ 和电位移通量随时间的变化率分别为

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= \frac{d\rho_s}{dt} = J_s \\ \frac{d\phi_D}{dt} &= \frac{dq}{dt} = S \frac{d\rho_s}{dt} = i_s \end{aligned} \quad (1-1-12)$$

可见, 极板间的电位移通量随时间的变化率 $\frac{d\phi_D}{dt}$ 在数值上等于极板间的电流 i_s 、而极板间电位移矢量随时间的变化率 $\frac{dD}{dt}$, 在数值上等于板内的电流密度 J_s 。在电容器充电时, $\frac{dD}{dt}$ 的方向和 $\mathbf{D}$ 的方向相同; 而放电时, $\frac{dD}{dt}$ 的方向和 $\mathbf{D}$ 的方向相反。因极板间不可能存在传导电流, 因此, 我们称 $\frac{d\phi_D}{dt}$ 为位移电流, $\frac{dD}{dt}$ 为位移电流密度。即

$$\begin{cases} J_s = \frac{dD}{dt} \\ i_s = \frac{d\phi_D}{dt} \end{cases} \quad (1-1-13)$$

引入位移电流以后, 极板间的位移电流和电容器外的传导电流形成了全电流 i , 构成了电流的连续性。此时安培环路定律可以修正为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i = i_s + i_s = i_s + \frac{d\phi_D}{dt}$$

或者

$$\begin{aligned} \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= \int_s (\mathbf{J}_s + \mathbf{J}_s) \cdot d\mathbf{S} \\ &= \int_s \left(\mathbf{J}_s + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad (1-1-14)$$

式中 $\mathbf{J}_s$ 和 $\mathbf{J}_s$ 分别为传导电流密度和位移电流密度, i_s 和 i_s 分别为传导电流和位移电流。

上式表明磁场强度 $\mathbf{H}$ 沿任意闭合回路的环流等于通过此闭合回路所围曲面的全电流, 这就称为全电流定律。这个定律揭示了除传导电流会产生磁场外, 位移电流同样会产生磁场。换言之, 变化的电场也会产生磁场。在麦克斯韦提出的位移电流假设的基础上, 所导出的一些

结果与实验符合得很好，从而证明了麦克斯韦假设的正确性。

三、电磁感应定律

由全电流定律可知，变化的电场会产生磁场，那么变化的磁场能否产生电场呢？通过各种实验证明：变化的磁场也会产生电场。

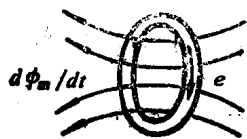


图1-1-2

实验证明，当穿过线圈所包围面积的磁通量随时间变化时，线圈内会产生感应电动势，如图1-1-2所示。它的大小等于磁通量随时间的变化率，它的方向是阻止磁通变化的方向。

用数学式子表示为

$$e = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1-1-15)$$

式中 e 为感应电动势，单位为V。 $-\frac{d\phi_m}{dt}$ 是磁通变化率，单位为 W_b/s 。

感应电势的存在，使得线圈中产生感应电流，即说明线圈中存在电场，促使电子作规则运动，从而形成感应电流。这个电场不是由电荷产生的，而是由磁通的变化产生的，故称它为感应电场，感应电场沿着任意的封闭曲线的积分应等于感应电势，用数学式子表示即为

$$e = \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1-1-16)$$

由此得出一个结论：随时间变化的磁场会产生电场，而且磁通量的时间变化率愈大，则感应电动势愈大、电场愈强；反之则弱。

同时，穿过一个曲面 S 的磁通量为

$$\phi_m = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-1-17)$$

将上式代入(1-1-16)式，就有

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-1-18)$$

式中 S 面是以封闭曲线 l 为周界的任意曲面。

以上结论是由实验得到的，即假设 S 面的周界 l 一定是个导体线圈。而麦克斯韦把这个实验定律推广到包括真空在内的任意介质中，即认为变化磁场引起的感应电场的现象不仅发生在导体回路中，而且在一切介质中，只要有变化的磁场就会产生感应电场。

麦克斯韦对安培环路定律和磁感应定律所作的推广，通过大量的实验证明是正确的。

四、高斯定律

在普通物理中讨论了静电场的高斯定律，即

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \Sigma q = \int_V \rho dV \quad (1-1-19)$$

式中 V 是封闭曲面 S 所包围的体积， Σq 为 S 曲面所包围的自由电荷电量的代数和， ρ 为 S 曲面所包围的自由电荷的体密度。

这个定律说明了电荷和电场强度之间的关系，它是静电场的一个基本定律。这个定律可

推广到任意电场,即不仅适用于静电场,而且适用于时变电场。换言之,在任意电场中穿过任意闭合曲面的电位移通量都等于该闭合曲面所包围的自由电荷电量的代数和。

五、磁通连续性原理

在普通物理中讨论了恒流磁场的磁通连续性原理,即

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1-1-20)$$

它表示磁感应线永远是闭合的。如果在磁场中取一个封闭面,那么进入闭合面的磁感应线等于穿出闭合面的磁感线,这个原理可推广到任意磁场,即不仅适用于恒流磁场,而且适用于时变磁场。

六、麦克斯韦方程组

(一) 麦克斯韦方程组的积分形式

麦克斯韦方程是电磁场的基本方程,是麦克斯韦在他提出位移电流的假设下,全面总结电场产生磁场和磁场产生电场的现象后提出来的。

将式(1-1-14)、(1-1-18)、(1-1-19)和(1-1-20)组合在一起就称为麦克斯韦方程组的积分形式。即

$$\begin{cases} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \end{cases} \quad (1-1-21)$$

上述方程组中 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 及 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 的关系,决定于媒质特性。对于各向同性媒质,则有

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (1-1-22)$$

麦克斯韦方程组描写了 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 几个场矢量之间的基本关系,因此它是研究和分析电磁场和电磁波的依据。

(二) 麦克斯韦方程组的微分形式

麦克斯韦方程组的积分形式是讨论场中某一个区域内场矢量之间的关系的方程。在讨论实际问题时,经常需要知道场中某一点场矢量之间的关系,此时不能应用麦克斯韦方程组的积分形式来求解,而必须采用麦克斯韦方程组的微分形式。

将麦克斯韦方程的积分形式转化为微分形式,既可以用矢量分析的方法进行推导,也可以利用物理概念进行分析。这里我们采用矢量分析的方法进行讨论。

应用矢量分析中的散度定理,即