

高等学校电子信息类系列教材

天线与电波传播理论

闻映红 编著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社

<http://press.bjtu.edu.cn>



高等学校电子信息类系列教材

天线与电波传播理论

闻映红 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书分两大篇,共包含12章内容,主要介绍了有关天线与电波传播的基本理论。天线部分涵盖了天线的发射和接收原理,天线的特性参数,偶极子天线,天线阵,镜像原理,方向性相乘原理及天线的应用;电波传播部分涵盖了3种基本的电波传播模式——天波、空间波和地表面波,以及常用的几种基本电波传播模型。此外,还介绍了移动通信场强测试的方法和原理及预测电波传播特性的例子。本书适合作为大学通信与弱电类专业天线与电波传播课程教材,也可作为研究生的学习参考书和广大工程技术人员的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

天线与电波传播理论/闻映红编著.——北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2005.11

ISBN 7-81082-659-X

I. 天… II. 闻… III. ①天线 ②电波传播 IV. ①TN82 ②TN011

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第113894号

责任编辑:刘 洵

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:16 字数:397千字

版 次:2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-81082-659-X/TN·43

印 数:1~4 000册 定价:23.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@center.bjtu.edu.cn。

前 言

本书为大学通信与弱电类专业天线与电波传播课程教材,也可作为研究生的学习参考书和广大工程技术人员的参考书。学习本书的先修课程为:电路分析、电磁场与电磁波、电子测量等基础课程。本书的理论基础是这几门课程所涵盖的基本概念和基本原理。

天线和电波传播特性对于无线通信、广播、定位和遥测等系统的正常工作具有很大的影响。例如,无线通信系统由收、发设备,天线和信道3部分组成。无线通信系统的传播距离不仅取决于发送设备的输出功率、接收设备的接收灵敏度和信噪比,还取决于天线的性能和电波的传播特性。因此,在系统设计和评定通信质量时必须研究天线的性能和电波在不同频段中的不同传播特性。此外,在研究电子产品的干扰和抗干扰性能及研究电磁环境(或者说,环境的电磁污染)特性时,都需要用到天线和电波传播的基础知识。

本书的编写目标是要适应知识更新和课程体系改革的需要,为本科通信工程专业、自动化专业和电子科学与技术专业学生提供专业技术基础课程教材。

本书尽可能地避免一些繁杂冗长的数学公式的推导,并结合实际应用来描述天线的特点和工程设计方法,以便于学生或其他参阅者容易掌握本书所介绍的知识,而且不感到枯燥。在电波传播部分,除了介绍电波传播的基本知识,还加入了近几年作者在这方面的研究成果,比如,近距离微功率源附近的电波传播特性等,以适应知识快速更新的需要。

本书分为两大篇,第一篇为天线的基础理论,在讨论天线的基本知识的基础上,介绍几种在测量和通信中常用的天线及其应用。第二篇为电波传播部分,主要介绍无线电波传播的基本概念,包括地表面波、空间波和天波3种传播模式及其电波传播的特点,侧重讨论在无线通信系统中的电波传播特性和移动通信场强的测量方法。

具体而言,第一篇中的第1章介绍了分析天线特性与电波传播特性所涉及的电磁场和电磁辐射等基本概念和基础理论;第2章介绍了天线的几个重要特性参数,包括方向性和增益、有效孔径、天线系数等;第3章介绍了理想点源、电偶极子、磁偶极子和半波偶极子天线的概念及其辐射特性,引入分析天线特性的基本方法;第4章在前面几章的基础上介绍了天线阵的构成和天线阵的作用及天线阵的分析方法,包括用于分析天线阵方向性的方向性相乘原理;第5章分析了地面反射对天线特性的影响,介绍了镜像原理和多径效应现象。作为一个镜像原理的应用例子,分析了单级天线的特性;第6章介绍了测量领域的常用宽带天线,包括双锥天线、参数周期天线和喇叭天线;第7章介绍了通信领域的常用天线。

第二篇中的第8章介绍了电波传播的基本理论,重点介绍了电波传播的3种主要传播模式和电波传播的费涅尔区的概念;第9章介绍了在不同传播条件下的电波传播理论模型,包括自由空间的传播模型、平面反射传播模型、球面绕射传播模型,并分析了大气对电波传播的影响;第10章介绍了电波在电离层中的传播特性;第11章介绍了移动通信中电波传播的特性,包括描述移动通信电波传播特性的数学模型及几个经典的电波传播模型;第12章介

绍了移动通信电波传播场强的测量和一些传播环境下电波传播特性的仿真和分析。

无论是天线技术，还是电波传播都与电磁波密切相关。电磁波是人类将信息实时地传送到远处的主要手段之一。用电磁波传递信息有一些明显的优点，比如速度快、电磁波可以达到很远的距离等。电磁波按频率或波长来划分，可以分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线。迄今为止，在信息的传递中，人们主要使用可见光和无线电波。而无线电波相对于可见光而言，较少地受到经常出现的大气沉降物(如云、雾和雨等)的影响，适当地选择频率，用无线电波传播信息可以全天候进行。

本书的编写得益于许多老师和同学的共同努力，李焕然、李莹莹、王晓伟、王卓、姜山、梁婷和李坚等同学为本书的图文录入和编辑付出了辛勤的劳动，在此衷心感谢。此外，对北京交通大学电子信息工程学院对本书出版的大力支持也深表感谢。因作者水平和时间所限，本书内容不当之处，敬请各位同行指正。

编 者

2005年11月

目 录

第一篇 天 线

第 1 章 电磁场理论基础	(3)
1.1 矢量分析	(3)
1.2 麦克斯韦方程组	(6)
1.2.1 法拉第定律	(6)
1.2.2 安培定律	(9)
1.2.3 高斯定律	(11)
1.2.4 电荷守恒定理	(12)
1.2.5 媒质的本质参数	(12)
1.3 边界条件	(13)
1.4 正弦稳态状态下的场量	(14)
1.5 功率密度	(15)
1.6 无线电波的辐射	(16)
1.7 均匀平面波	(18)
1.7.1 无耗媒质	(20)
1.7.2 有耗媒质	(22)
1.7.3 功率	(22)
1.7.4 导体与介质	(22)
1.7.5 趋肤深度	(24)
1.8 惠更斯-费涅尔原理	(24)
第 2 章 天线的特性参数	(29)
2.1 辐射功率和辐射电阻	(29)
2.2 天线的效率	(31)
2.3 天线的方向性和增益	(32)
2.3.1 天线的方向性函数和方向性图	(32)
2.3.2 天线的方向性系数和增益	(33)
2.4 天线的有效长度	(37)
2.5 天线的有效孔径	(38)
2.6 天线系数	(40)

2.7 平衡不平衡转换·····	(41)
第3章 点源和偶极子天线 ·····	(44)
3.1 点源·····	(44)
3.1.1 点源的定义·····	(44)
3.1.2 点源的辐射场·····	(44)
3.2 电偶极子·····	(49)
3.3 磁偶极子·····	(52)
3.4 对称振子·····	(53)
3.4.1 对称振子上的电流分布·····	(53)
3.4.2 对称振子的辐射场和方向性函数·····	(57)
3.4.3 对称振子的辐射功率和辐射电阻·····	(60)
3.4.4 用感应电动势求对称振子的辐射阻抗·····	(61)
3.4.5 对称振子的输入阻抗·····	(63)
3.4.6 对称振子的通频带和谐振长度·····	(67)
第4章 天线阵 ·····	(70)
4.1 耦合振子·····	(70)
4.1.1 两耦合振子的方向性·····	(70)
4.1.2 耦合振子的辐射阻抗·····	(76)
4.1.3 耦合振子的输入阻抗·····	(79)
4.2 方向性相乘原理·····	(81)
4.3 均匀直线式天线阵·····	(84)
第5章 地面反射的影响 ·····	(90)
5.1 镜像原理·····	(90)
5.2 理想导电地面对对称振子的影响·····	(92)
5.3 非理想地面对对称振子的影响·····	(95)
5.4 多径效应·····	(97)
5.5 接地单极天线·····	(102)
第6章 测量领域的常用天线 ·····	(104)
6.1 双锥天线·····	(104)
6.2 对数周期天线·····	(106)
6.3 喇叭天线·····	(108)
6.3.1 开口波导与喇叭天线的形式·····	(108)
6.3.2 喇叭天线的内场结构·····	(109)
6.3.3 喇叭天线的方向性·····	(112)

第 7 章 通信领域的常用天线	(116)
7.1 引向天线	(116)
7.1.1 波渠天线	(116)
7.1.2 螺旋天线	(119)
7.2 移动台天线	(124)
7.2.1 对移动台天线的要求	(124)
7.2.2 移动台天线分析	(124)
7.2.3 400 MHz 波段汽车移动台天线举例	(128)
7.2.4 机车车载天线	(129)
7.3 地面台天线	(136)
7.3.1 150 MHz 波段站台天线	(136)
7.3.2 多层同相振子天线阵	(138)
7.4 微带天线	(140)

第二篇 电波传播

第 8 章 电波传播基本理论	(145)
8.1 概述	(145)
8.2 电波传播模式	(146)
8.3 电波传播的费涅尔区	(146)
8.3.1 基尔霍夫积分	(146)
8.3.2 费涅尔带	(150)
第 9 章 电波传播模型	(155)
9.1 自由空间传播模型	(155)
9.1.1 自由空间的概念	(155)
9.1.2 自由空间传播的计算公式	(155)
9.2 平面反射模型	(159)
9.2.1 瑞利准则	(160)
9.2.2 空间波传播模式	(161)
9.2.3 地表面波传播模式	(166)
9.3 球面绕射模型	(170)
9.3.1 照明区、半阴影区和阴影区的划分	(170)
9.3.2 在照明区内直射波与反射波的合成场(空间波传播模式)	(172)
9.4 大气对电波传播的影响	(177)
9.4.1 大气层的特点	(177)
9.4.2 等效地球半径	(178)

第 10 章 电波在电离层中的传播特性	(181)
10.1 电离层介绍	(181)
10.1.1 电离层的结构	(181)
10.1.2 电离层的变化	(181)
10.1.3 电离层的等效电特性	(182)
10.2 电波在电离层中的传播	(185)
10.2.1 电波在非色散媒质和色散媒质中传播的不同	(185)
10.2.2 电波在电离层中的传播速度	(186)
10.2.3 不考虑地磁场的影响时, 电波在电离层中的传播	(187)
10.2.4 电离层的临界频率、最大反射频率和寂静区	(190)
10.3 各波段的波在电离层中的传播特性	(192)
第 11 章 移动通信的电波传播	(198)
11.1 移动通信的电波传播的特点	(198)
11.2 移动通信的电波传播特性的数学模型	(198)
11.2.1 多径传播	(198)
11.2.2 阴影效应	(206)
11.3 经典的移动通信的场强预测模型	(207)
11.3.1 地形特征和传播环境的分类及定义	(207)
11.3.2 移动通信电波传播的场强预测模型	(208)
第 12 章 移动通信电波传播特性的测量与仿真	(220)
12.1 移动通信电波传播场强的测量	(220)
12.1.1 测试原理	(220)
12.1.2 数据处理	(224)
12.2 城市环境中电波传播特性的仿真和分析	(226)
12.2.1 城市环境中的建筑物	(227)
12.2.2 城市环境中电波传播预测模型	(228)
12.2.3 仿真结果	(231)
12.2.4 结论	(238)
附录 A 无线电波波段的划分	(239)
附录 B 半波振子的互阻抗表	(241)
参考文献	(246)

第一篇 天 线

第1章 电磁场理论基础

为了更好地理解天线和电波传播的重要概念,在这里首先回顾一下电磁场理论的基本概念。在电磁场理论中,麦克斯韦方程组是基础。

麦克斯韦方程组可以解释所有的微观电磁现象。在这里只进行简单的讨论,读者可以从其他参考文献或者其他相关教材中详细了解本章所涉及的基本概念。尽管用“概念”的形式来描述麦克斯韦方程组非常简单,但从数学的角度来说它却是非常复杂的。麦克斯韦方程组描述了电磁场分布的本质,那就是,电磁场分布于整个空间之中。因为电磁场量既是时间 t 的函数,也是三维空间的空间坐标 x, y, z 的函数,因此,麦克斯韦方程组是一组偏微分方程。

1.1 矢量分析

麦克斯韦方程组用三维空间中的矢量的某种数学运算来描述。在本书中矢量用黑斜体符号表示(如 $\mathbf{A}$),书写时用上面带箭头的符号来表示(如 $\vec{A}$)。矢量包含了两种信息:幅度和方向。幅度即矢量的长度可以表示为 $|\mathbf{A}| = A$ 。为了能根据麦克斯韦方程组对矢量进行数学运算,首先需要确定一个坐标系。直角坐标系或者说笛卡儿坐标系是由三个相互垂直的平面构成的, $x = \text{常数}$, $y = \text{常数}$, $z = \text{常数}$ 。某一点的位置由这三个平面的交叉点来描述: $P = (x, y, z)$ 。矢量 $\mathbf{A}$ 在每个坐标轴上的投影分别表示为 A_x, A_y, A_z 。在直角坐标系中,矢量 $\mathbf{A}$ 可以写成单位矢量($\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$)的叠加,如式(1.1)所示。

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z \quad (1.1)$$

除直角坐标系以外,还有其他更便于使用的坐标系,如圆柱坐标系和球面坐标系,本书会在后面要用到的时候予以讨论。

矢量可以通过各个分量的相加来实现叠加,如式(1.2)所示。

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = (A_x + B_x) \mathbf{a}_x + (A_y + B_y) \mathbf{a}_y + (A_z + B_z) \mathbf{a}_z \quad (1.2)$$

矢量还可以通过乘以系数 k 来改变它们的长度,这时,系数 k 应与每个分量相乘。如果系数 k 是个负数,那么,将改变矢量的方向。这实际上表明了矢量应如何相减。简单来说,当进行减法时,在 $\mathbf{A} + k\mathbf{B}$ 中,令 $k = -1$ 。

此外,还经常遇到路径长度微分 $d\mathbf{l}$, 曲面积微分 ds 和体积分量 dv , 为

$$d\mathbf{l} = dx \mathbf{a}_x + dy \mathbf{a}_y + dz \mathbf{a}_z \quad (1.3a)$$

$$ds = dy dz \mathbf{a}_x + dx dz \mathbf{a}_y + dx dy \mathbf{a}_z \quad (1.3b)$$

$$dv = dx dy dz \quad (1.3c)$$

两个矢量的乘积有两种定义:点乘和叉乘,点乘定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} &= |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \cos \theta_{AB} = \\ &A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \end{aligned} \quad (1.4)$$

式(1.4)代表了一个矢量与另一个矢量的投影的乘积, 式中 θ_{AB} 为两矢量的夹角, 如图 1.1(a)所示。

两个矢量的叉乘定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \times \mathbf{B} &= |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \sin \theta_{AB} \mathbf{a}_n = \\ &(A_y B_z - A_z B_y) \mathbf{a}_x + (A_z B_x - A_x B_z) \mathbf{a}_y + (A_x B_y - A_y B_x) \mathbf{a}_z \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中, 单位矢量 $\mathbf{a}_n$ 垂直于由两个矢量构成的平面, 如图 1.1(b)所示。单位矢量的方向由右手螺旋定则确定, 即当右手四指由 $\mathbf{A}$ 弯向 $\mathbf{B}$ 时, 拇指所指的方向就是矢量 $\mathbf{a}_n$ 的方向。

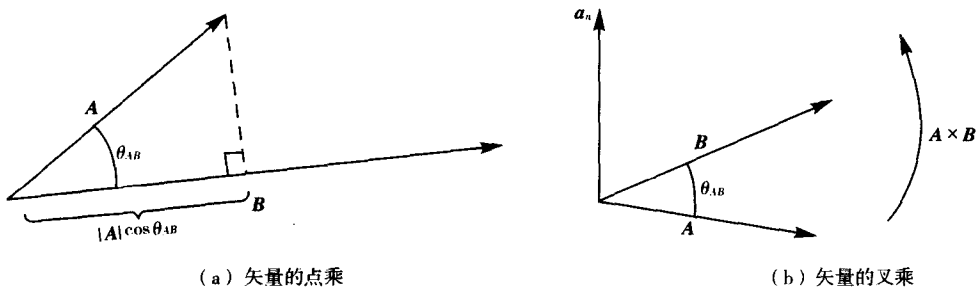


图 1.1 矢量相乘

有一些矢量的微积分运算需要了解, 第一个(式(1.6))就是矢量场 $\mathbf{F}$ 沿闭合回路 C 的积分, 如图 1.2 所示(图 1.2 中所示为闭合回路的一段)。

$$\oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \oint_C |\mathbf{F}| \cos \theta dl = \oint_{C_x} F_x dx + \oint_{C_y} F_y dy + \oint_{C_z} F_z dz \quad (1.6)$$

式中, 带圈的积分符号 $\oint_C$ 表示沿着闭合路径 C 的积分。式(1.6)中的积分表示 $\mathbf{F}$ 沿路径切向的分量 $|\mathbf{F}| \cos \theta$ 与沿闭合回路 C 的路径长度微分 dl 乘积的积分。计算在力场的作用下将目标从 a 点移动到 b 点所需要做的功时经常用到这个结果。例如, 假设力场由 $\mathbf{F} = (2y\mathbf{a}_x + xy\mathbf{a}_y + z\mathbf{a}_z)$ (N) 给出, 将目标由点 $(x=1 \text{ m}, y=1 \text{ m}, z=0 \text{ m})$ 移动到点 $(x=0 \text{ m}, y=$

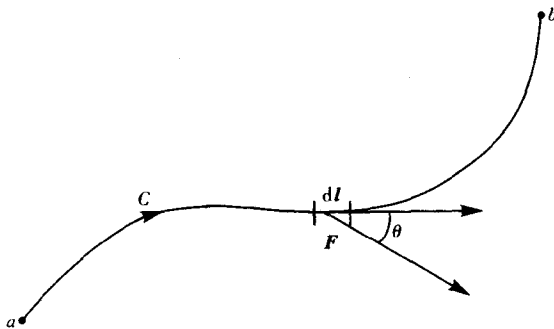


图 1.2 闭合回路积分

2 m, $z=3$ m)所需要做的功为

$$W = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \left(\int_1^0 2y dx + \int_1^2 xy dy + \int_0^3 z dz \right) \quad (\text{J}) \quad (1.7)$$

将路径在 xOy 平面内投影的表达式 $y=-x+2$ 代入式(1.7)中, 可得

$$W = \int_1^0 2(-x+2) dx + \int_1^2 (-y+2)y dy + \int_0^3 z dz = \frac{13}{6} \text{ J}$$

下一个非常有用的积分是矢量场 $\mathbf{F}$ 在曲面 S 上的面积分, 定义为

$$\int_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_S |\mathbf{F}| \cos \theta ds = \iint F_x dydz + \iint F_y dx dz + \iint F_z dx dy \quad (1.8)$$

式中, θ 是矢量 $\mathbf{F}$ 和曲面法线之间的夹角。在式(1.8)中的面积分表示将矢量 $\mathbf{F}$ 垂直于积分面的分量与曲面微分元的乘积进行相加, 如图 1.3 所示。这给出了矢量 $\mathbf{F}$ 通过曲面 S 的通量。带圈的面积分 $\oint_S$ 表示在闭合面 S 上的面积分。例如, 考虑矢量场 $\mathbf{F} = 2x\mathbf{a}_x + \mathbf{a}_y - \mathbf{a}_z$ 在由三个点 $(x=2, y=1, z=0)$, $(x=2, y=3, z=0)$ 和 $(x=2, y=3, z=4)$ 所确定的平面 S 上的积分。由于该平面方程为 $x=2$, 所以其面积为

$$\int_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^4 \int_1^3 2x \cdot \frac{1}{2} dy dz + \iint dx dz - \iint dx dy = 16 \quad (1.9)$$

由于在整个平面上 $dx=0$ (在该平面的所有点上 $x=2$), 所以式(1.9)中第一个等号右边的第二项和第三项的积分为零, 式中第一项中的 $\frac{1}{2}$ 是由于三点确定的平面为三角形而不是矩形所引入的。也可以这样来看, 由于曲面的方向性, 在 $x=2$ 的 yz 平面内, 所需要的通量的方向沿 x 轴的正方向。而由于该矢量的 y 分量和 z 分量与积分面不正交, 所以对于积分没有贡献。很明显, 这对于结果的简化很重要。

另外两种很有用的矢量的运算是: 矢量场的散度和旋度。矢量场的散度定义为

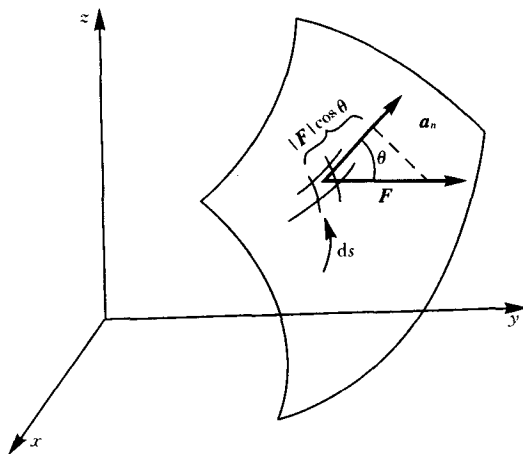


图 1.3 通过面积分确定曲面通量

$$\operatorname{div} \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}}{\Delta v} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (1.10)$$

式中, Δv 为曲面 S 包围的体积。因此矢量场的散度是指当体积趋向于零时, 单位体积内的矢量向外的净通量。实质上, 矢量场的散度表示从一个点出发的场的通量, 它指出了在那个点处的合成源。矢量场的散度是一个纯数值。

一个非常有用的重要恒等式是散度定理, 如式(1.11)所示。

$$\oint_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{F} dv \quad (1.11)$$

散度定理表明: 矢量场通过任意闭合面向外的总通量等于矢量场的散度在闭合面所包围的体积内的积分。这个结论使体积分和面积分能相互转化。

下一个需要了解的矢量运算是矢量场的旋度, 其定义为

$$\operatorname{curl} \mathbf{F} = \nabla \times \mathbf{F} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}}{\Delta S} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \mathbf{a}_x + \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \mathbf{a}_y + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \mathbf{a}_z \quad (1.12)$$

式(1.12)表明矢量场的旋度是当平面面积 S 收缩为零时, 矢量场沿包围不闭合面 S 的边界线 C 的线积分。

实质上, 旋度是矢量场关于一个点的合成环流量。旋度是个矢量, 它表征了矢量在三个相互正交的平面内的环流量。相关的定理是斯托克斯定理, 如式(1.13)所示。

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{s} = \oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.13)$$

斯托克斯定理表明, 通过一个开放平面 S 的矢量场旋度的合成环流量可由沿着包围此开放平面的闭合回路 C 的矢量场的线积分来获得。这个结论使得面积分和线积分之间能相互转换。

1.2 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组可以用上一节中矢量的运算形式简明地表达出来。麦克斯韦方程组构成了电磁现象的基础, 因此这也是学习天线与电波传播的理论基础。求解麦克斯韦方程组并不是一个简单的过程, 但这并不会减弱其作为基础的重要性。为了简化对某个特定问题的求解, 常常会利用某种近似, 比如集中参数电路模型。只要对象是电小尺寸, 这样的近似就是允许的。无论如何, 总是应认识到麦克斯韦方程组适用于所有的电磁现象, 并且它们的复杂性并不能改变这个事实。

1.2.1 法拉第定律

法拉第定律可以简单地用积分形式来表示, 如式(1.14)所示。

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.14)$$

其中, $\mathbf{E}$ 表示电场强度矢量, 单位是伏特每米(V/m); $\mathbf{B}$ 表示磁通密度矢量, 单位是韦伯每平方米(Wb/m²)。

法拉第定律假定沿闭合回路 C 产生的电动势(emf)与穿过这个闭合回路所包围的开放面 S 的总的磁通量的时间变化率有关。此电动势可表示为

$$\text{emf} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.15)$$

其单位是伏特(V)。

穿过被闭合回路所包围的开放面 S 的总磁通量为

$$\psi_m = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.16)$$

其单位是韦伯(Wb)。因此法拉第定律可以写成

$$\text{emf} = - \frac{d\psi_m}{dt} \quad (1.17)$$

如果没有磁通量穿过闭合回路所包围的曲面, 即 $\psi_m = 0$, 那么 $\text{emf} = 0$, 这与集中参数电路理论中的基尔霍夫电压定律很相似。当外部源的磁通穿过被闭合回路所包围的面积时, 可以利用集中参数电路理论中的互感作用来进行分析。其中, 可根据式(1.17), 在闭合回路中插入一个电压源来表示这种作用, 这样就可以利用基尔霍夫电压定律来分析这个问题。

如图 1.4 所示, 回路 C 和曲面 S 之间通过右手螺旋定则紧密联系起来。如果右手的四指指向回路 C 的方向, 大拇指的方向就表示闭合曲面 S 的法线方向。矢量曲面可以表示成 $d\mathbf{s} = ds \mathbf{a}_n$, 其中 $\mathbf{a}_n$ 是开放曲面 S 的单位法线。

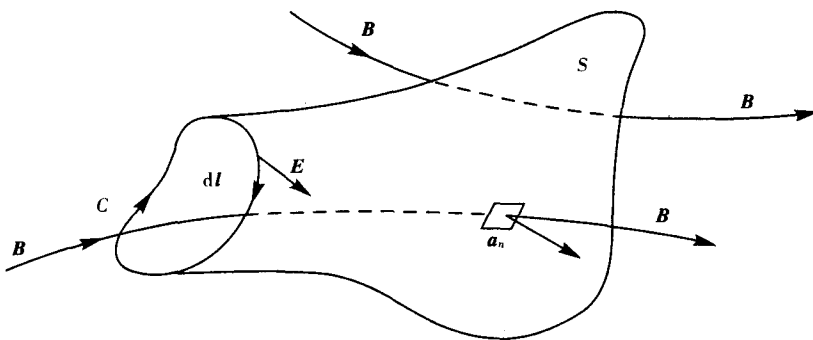


图 1.4 法拉第定律

式(1.14)和式(1.17)中的负号指的是楞次定律的内容, 表明回路中所产生的感应电动势的极性总是使产生的感应电流的磁通量趋向于阻碍原磁通量的变化。所给出的一个平面例子如图 1.5 所示。考虑图 1.5(a), 磁通密度矢量方向向上, 幅度减小。回路中感应的电动势的极性使得回路中所感应的电流 i_{induced} 的磁通量趋向于阻碍 $\mathbf{B}$ 的减小(根据右手螺旋法则)。将感应电动势等效为回路中新插入的电压源是很重要的。但是, 感应电动势是一个分布参

量,无法把它真正集中起来。但如果回路是电小尺寸的,作为一种合理的近似,就能把它认为是集中参数电压源。相反地,如果磁通量穿过曲面且方向指向幅度增加的方向,如图 1.5(b)所示,那么感应电动势及相关的感应电流方向相反,由感应电流产生的磁通量的方向将趋向于阻碍 B 的增加(根据右手螺旋法则)。所有这些都是有意义的,因为如果方向相反,由感应电流产生的磁通量将使原来的磁场增加,从而导致感应电流进一步增加,这样能量并没有发生改变。应注意这是将曲面 S 视为平面得到的简化结果。曲面 S 的实际形状并不重要,因为用法拉第定律可以得到,对于由回路 C 包围的所有面积相同的曲面的感应电动势相同。任何穿过球状曲面开口的磁通密度矢量都必然返回该曲面而对 ϕ_m 没有任何贡献。另一方面,如果磁通量进入曲面但没有穿过开口,它也必然返回该曲面而对 ϕ_m 没有任何贡献。这都与高斯定律紧密联系。高斯定律描述的是磁力线本身必须是闭合的,因为不存在已知的孤立磁场源。

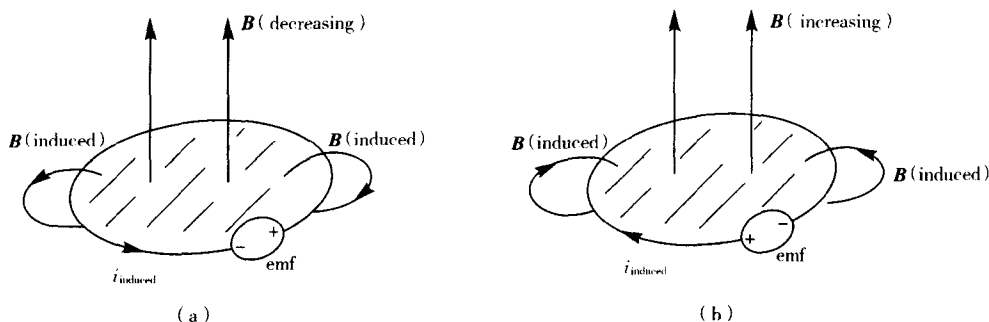


图 1.5 感应电动势和穿过曲面的磁通密度之间的关系

并不是必须有闭合的回路才能使时变的磁场在此回路中产生(感应)电动势。例如,假设如图 1.5 所示的回路在某点断开,如图 1.6 所示,沿着回路还是会感应出感应电压源形式的电动势。这个电动势将会出现在电路的两端。虽然由于回路是断开的,回路中没有电流,但回路的两端还是会出现电压。回路两端的电压实质上是回路的开路电压,即感应电动势电压源。

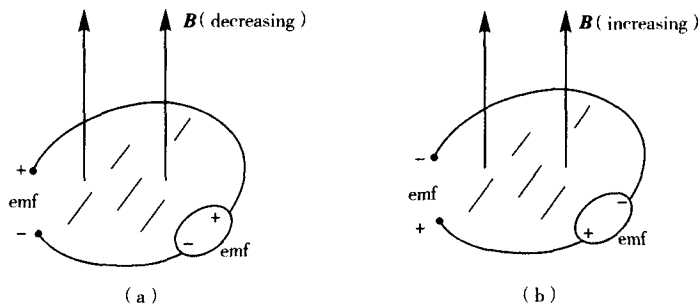


图 1.6 在开路环两端以开路电压形式出现的感应电动势

法拉第定律从本质上表明变化的磁场产生电场,该电场与静电荷产生的电场的分布形式相同。然而,时变磁场所产生的感应电力线自身必须闭合,而静电荷所产生的电力线起始于正电荷,终止于负电荷。