高等学校教材

电磁场与微波技术

杨恩耀 周朝栋 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

该教材系按电子工业部制定的《工科电子类专业教材1986～1990年编审出版规划》出版的统编教材，供电子机械专业大学本科生使用，也可作为大学专科无线电专业的教材。

全书共计四编：电磁场基本理论；微波技术；天线；电波传播、电磁干扰及电磁兼容。其内容涉及的面较广，几乎与电磁工程的各重要领域都有关系。

本书也可供非无线电专业的科技人员参考。

电磁场与微波技术

杨恩耀　周朝栋　编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

河北省三河县中赵甫印刷厂印刷

*

787×1092毫米　32开本　13.25印张　295千字

1988年12月第一版　1988年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-074-9/TN·7

印数：1—5000册　定价：2.60元

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合。从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制定了1986～1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极

提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前　言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986～1990年编写出版规划，由电磁场与微波技术教材编审委员会电磁场教材编审小组组织征稿、评选、推荐出版，责任编委是成都电讯工程学院全泽松副教授。

本教材由桂林电子工业学院杨恩耀、周朝栋合编，成都电讯工程学院全泽松副教授担任主审。

本课程参考学时数为60学时。全书共分为四编：第一编为电磁场基本理论，介绍了静态场、时变场及均匀平面电磁波的基本概念；第二编为微波技术，讨论了长线、波导及微带的基本特性，对各类微波元件作了一般性介绍；第三编为天线，讲述了基本辐射元的辐射特性及波的干涉原理，对引向天线和抛物面天线进行了讨论；第四编为电波传播、电磁干扰与电磁兼容，讲述了电波传播的几种主要方式及其特点，讨论了干扰的类型及传递途径，介绍了电磁兼容设计及抑制电磁干扰的基本方法。本书主要是为电子机械专业大学本科生编写的，同时也兼顾无线电专业大学专科的教学需要。考虑到不同专业层次的教学要求不尽相同，在内容的安排上已注意到便于使用者的取舍，例如，阻抗圆图及电波传播等内容，电子机械专业就可删去不讲。

由于课程内容涉及的面很广，几乎与电磁工程的各重要领域都有关系，而授课时数又有限，因此，编写中侧重于基本原理的叙述而不追求数学推导的完整性。此外，由于目前

尚未见到可供借鉴的同类教材，因此在本书内容的选择、广度与深度的掌握方面，殷切希望有关同志与读者提出宝贵的意见和批评。

本书也可供非无线电专业的技术人员自学之用，后三编的内容相对地各具独立性，为自学者按需进行选择提供了方便。

本教材由杨恩耀编写第一、三编，周朝栋编写第二、四编。在本书编写和出版过程中，得到了桂林电子工业学院教务处和北京工业学院出版社有关领导和同志的支持和协助，这里表示深切的谢意。

编者 1987.12

目　录

第一编　电磁场理论基础

第二编　微波技术

第三编 天 线

第一编　电磁场理论基础

第一章　矢量分析与场论

§1-1-1　矢量分析

我们知道，模与方向都恒定不变的矢量称为常矢。然而在很多科学与技术问题中，我们却常常要跟变矢打交道。所谓变矢，即是模与方向（或其中之一）会改变的矢量。为了学好电磁学问题，必须先对变矢的有关数学问题进行一定的讨论。

一、矢性函数与矢端曲线

设有数性变量 t 和变矢 $\boldsymbol{A}$，如果对于 t 在某个范围内的每个数值，$\boldsymbol{A}$ 都有一个确定的矢量与之相对应，则称 $\boldsymbol{A}$ 为数性变量 t 的矢性函数，记作 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(t)$。

如果将此矢量 $\boldsymbol{A}$ 放置在直角坐标系中，并令其起点与坐标原点重合，则矢量 $\boldsymbol{A}$ 的三个坐标 A_x，A_y 与 A_z 将都是 t 的数性函数，故矢量 $\boldsymbol{A}$ 可写为

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(t)=A_x(t)\boldsymbol{e}_x+A_y(t)\boldsymbol{e}_y+A_z(t)\boldsymbol{e}_z \qquad (1\text{-}1\text{-}1)$$

式中　$\boldsymbol{e}_x$，$\boldsymbol{e}_y$，$\boldsymbol{e}_z$ 分别为三个坐标轴的正向单位矢。

我们知道，当两个矢量的模与方向都相同时，可认为这两个矢量是相等的。依此，为了能够用图形直观地表示出矢

性函数$\boldsymbol{A}(t)$的变化状态，我们可以把$\boldsymbol{A}(t)$在坐标系中平移，使其起点总是与坐标系原点相重合。这样，当 t 变化时，矢量 $\boldsymbol{A}(t)$ 的终端将描绘出一条曲线 l，参看图 1-1-1，这条曲线称为矢性函数 $\boldsymbol{A}(t)$ 的矢端曲线。而式（1-1-1）常称为矢端曲线的矢量方程。

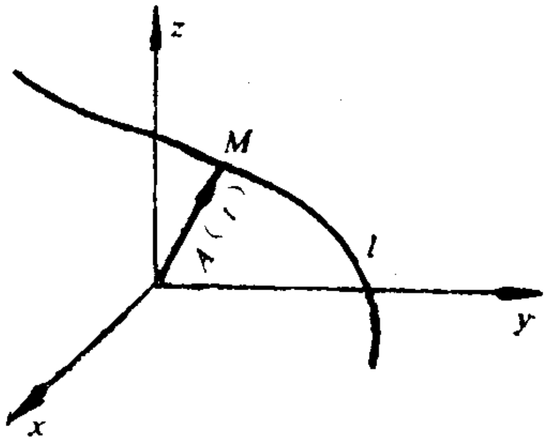

图 1-1-1 矢端曲线 l

二、矢性函数的求导与积分

若$\boldsymbol{A}(t)$由式（1-1-1）给出，且数性函数 $A_x(t)$，$A_y(t)$以及$A_z(t)$可导，则有

$$\frac{\Delta \boldsymbol{A}(t)}{\Delta t}=\frac{\Delta \boldsymbol{A}_x(t)}{\Delta t}\boldsymbol{e}_x+\frac{\Delta \boldsymbol{A}_y(t)}{\Delta t}\boldsymbol{e}_y+\frac{\Delta \boldsymbol{A}_z(t)}{\Delta t}\boldsymbol{e}_z$$

令$\Delta t\to 0$，对上式两端取极限，即得导矢 $\boldsymbol{A}'(t)$ 的坐标表示式为

$$\boldsymbol{A}'(t)=A'_x(t)\boldsymbol{e}_x+A'_y(t)\boldsymbol{e}_y+A'_z(t)\boldsymbol{e}_z \qquad (1\text{-}1\text{-}2)$$

矢性函数导数的几何意义从下面的讨论中可明确看出：

当 t 变到 $t+\Delta t$ 时，相应地有 $\boldsymbol{A}(t)$ 变到$\boldsymbol{A}(t+\Delta t)$，则矢性函数的增量$\Delta\boldsymbol{A}$为

$$\Delta\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(t+\Delta t)-\boldsymbol{A}(t)$$

参看图 1-1-2，图中，$\boldsymbol{MN}$即是$\Delta\boldsymbol{A}$。由于 Δt 是个标量，所以$\dfrac{\Delta\boldsymbol{A}}{\Delta t}$的方向与$\Delta\boldsymbol{A}$相同（$\Delta t$ 为

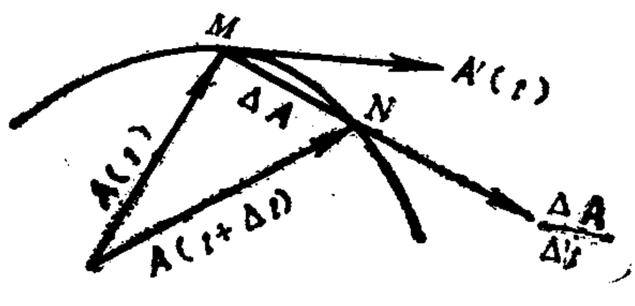

图 1-1-2 矢性函数的增量与导数

正值时）或相反（Δt为负值时）。必须注意的是，$\dfrac{\Delta \boldsymbol{A}}{\Delta t}$的方向永远指向$t$增大的一侧，这一点在图 1-1-3中可以看得很清楚。

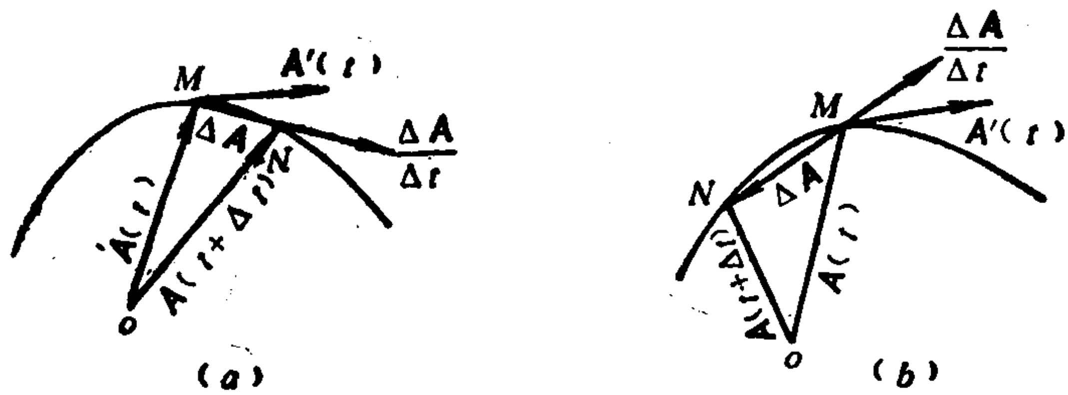

图 1-1-3 $\dfrac{\Delta \boldsymbol{A}}{\Delta t}$的指向

(a) $t>0$；(b) $t<0$

再观察图1-1-2。在$\Delta t\to 0$过程中，割线$\overline{MN}$将绕点M_1转动，且以点M_1处的切线为其极限位置，则位于割线$\overline{MN}$上的矢量$\dfrac{\Delta \boldsymbol{A}}{\Delta t}$其极限位置也必在该切线上，我们知道

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{A}}{\Delta t}=\boldsymbol{A}'(t) \qquad (1\text{-}1\text{-}3)$$

这就是说，导矢$\boldsymbol{A}'(t)$是在点M处的切线上的；且上面已指出，导矢$\boldsymbol{A}'(t)$恒指向t增大的一侧。总之，导矢在几何上为切向矢量。

下面我们给出矢性函数一些基本的导数公式：

（1）$\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{c}=0$，$\boldsymbol{c}$为常矢

（2）$\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{A}\pm\boldsymbol{B})=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}\pm\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t}$

（3）$\frac{d}{dt}(K\boldsymbol{A})=K\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}$，$K$为常数

（4）$\frac{d}{dt}(u\boldsymbol{A})=\frac{du}{dt}\boldsymbol{A}+u\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}$

（5）$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B})=\boldsymbol{A}\cdot\frac{d\boldsymbol{B}}{dt}+\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}\cdot\boldsymbol{B}$

（6）$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{B})=\boldsymbol{A}\times\frac{d\boldsymbol{B}}{dt}+\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}\times\boldsymbol{B}$

（7）若$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(u)$，而$u=u(t)$，则

$$\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}=\frac{d\boldsymbol{A}}{du}\frac{du}{dt}$$

〔例1-1-1〕 求证模为定值的矢量 $\boldsymbol{A}(t)$的导矢必和原矢相互垂直。

证：设$|\boldsymbol{A}|=C$，C为常数，则有

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{A}=A^2=|\boldsymbol{A}|^2=C^2$$

根据上面公式（5），对此式两端求导，得

$$2\boldsymbol{A}\cdot\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}=0$$

即

$$\boldsymbol{A}\cdot\frac{d\boldsymbol{A}}{dt}=0$$

两个矢量点乘为零，说明它们相互垂直。〔证毕〕

至于矢性函数的积分，与数性函数相似，也有不定积分与定积分两种。而且，不论是不定积分还是定积分，矢性函数的积分可归结为三个数性函数的积分，在直角坐标系中，它们是：

$$\int\boldsymbol{A}(t)dt=\boldsymbol{e}_x\int A_x(t)\,dt+\boldsymbol{e}_y\int A_y(t)\,dt+\boldsymbol{e}_z\int A_z(t)dt \tag{1-1-4}$$

$$\int_{T_1}^{T_2}\boldsymbol{A}(t)\,\mathrm{d}t=\boldsymbol{e}_x\int_{T_1}^{T_2}A_x(t)\ \mathrm{d}t+\boldsymbol{e}_y\int_{T_1}^{T_2}A_y(t)\ \mathrm{d}t$$
$$+\boldsymbol{e}_z\int_{T_1}^{T_2}A_z(t)\,\mathrm{d}t \qquad (1\text{-}1\text{-}5)$$

§1-1-2 场 论

一、场的基本概念

广义地说来，如果在全部空间或部分空间里的每一个点，都对应有某个物理量的一个确定的值，就说在这空间内确定了该物理量的场。如果物理量是数性的，就称这个场为数量场；如果物理量是矢性的，就称这个场为矢量场。例如，在置有电荷的某个空间，只要电荷的正负、大小及位置已经确定，空间各处的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 就是确定的，则我们说，在这个空间里确定了电场强度的场，且是个矢量场。

若场中各处物理量不随时间变化，则称该场为稳定场；否则称为不稳定场。这里，我们只讨论稳定场，当然，所得结果也适用于不稳定场每一瞬时的情况。

(1) 数量场的等值面　在数量场 u 中，当取定了 $oxyz$ 坐标以后，即可将 u 表示为

$$u=u(x,\ y,\ z) \qquad (1\text{-}1\text{-}6)$$

在数量场中，为了直观地研究物理量 u 的分布状况，常常要考察场中相同物理量的点，也就是使 $u(x,\ y,\ z)$ 取相同数值的点：

$$u(x,\ y,\ z)=C \qquad (C\text{为常数}) \qquad (1\text{-}1\text{-}7)$$

式（1-1-7）在几何上一般表示一个曲面，称为数量场的等值面。若给式中的常数 C 一系列不同的值，就得到一系列不同值的等值面，如图1-1-4所示。

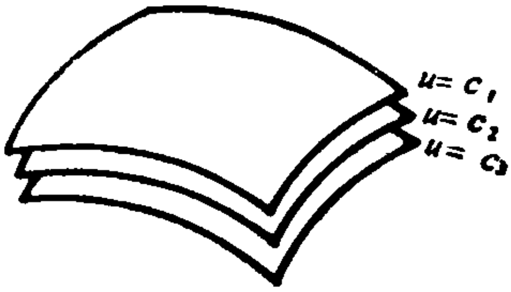

图 1-1-4 等值面

同理，对于由函数 $v=v(x,y)$ 所给定的平面数量场，可按 $v(x,\ y)=C$ 得到一系列不同值的等值线。

(2) 矢量场的矢量线

在矢量场 $\boldsymbol{A}$ 中，当取定了直角坐标系 $oxyz$ 后，即可将 $\boldsymbol{A}$ 表示为

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(x,\ y,\ z)$$

在矢量场中，为了直观地表示物理量 $\boldsymbol{A}$ 的分布状况，可引入矢量线的概念。所谓矢量线，即是这样的曲线：在线上每一点处，场矢量都位于该点处的切线上。电力线与磁感应线均属此例。

二、数量场的梯度

在数量场 u 中任一点 M 处，数量场 u 在不同方向上的变化率一般说来是不同的，那么，可以设想，必定在某个方向上其变化率为最大。为此，我们定义一个矢量 $\boldsymbol{G}$，其方向就是函数 u 在点 M 处变化率为最大的方向，其模就是这个最大变化率的值，这个矢量 $\boldsymbol{G}$ 称为函数 u 在点 M 处的梯度，记作grad u，即

$$\mathrm{grad}\ u=\boldsymbol{G} \qquad (1\text{-}1\text{-}8)$$

由于篇幅有限，我们不准备进行推导而直接给出梯度在直角坐标系中的表示式如下：

$$\mathrm{grad}\ u=\boldsymbol{G}=\frac{\partial u}{\partial x}\boldsymbol{e}_x+\frac{\partial u}{\partial y}\boldsymbol{e}_y+\frac{\partial u}{\partial z}\boldsymbol{e}_z \qquad (1\text{-}1\text{-}9)$$

应该强调的是：既然函数 u 在点 M 处的梯度的方向是函数 u 在点 M 处变化率最大的方向，那么，这个方向必然