电波与天线 上

修訂本

謝处方編著

人民邮电出版社

电 波 与 天 綫

修 訂 本

（上册　无綫电波传播）

謝 处 方　編著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书是“电波与天綫”一书修訂本的上冊，分为两篇：第一篇是电磁場的基础理論，从向量分析开始，扼要介紹静电場、稳定磁場、交变电磁場的基本概念和电磁波的反射、折射与輻射理論；第二篇是电磁波的传播，介紹地球及其外围空間結构、地面波、空間波、对流层波、电离层波、外球层波的传播理論、特点及其电場强度計算方法等。

本书可作为高等学校无綫电专业的教学参考书及无綫电工程技术人員的参考用书。

电 波 与 天 綫 (上)

(修訂本)

編著者：谢处方
出版者：人民邮电出版社
北京东四6条13号
(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)
印刷者：北京市印刷一厂
发行者：新华书店

开本 850×1168 1/32
印张 10 22/32 页数 171 插页 1
印刷字数 282,000 字
1958 年 7 月北京第一版
1963 年 8 月北京第二版
1965 年 2 月北京第二版第二次印刷
印数 17,361—20,380 册

統一书号：15045 · 总775—无196

定价：(科6) 1.60 元

修訂本序言

近几年来，人們更深入地掌握了对流层、电离层、外球层的結构和其状态的变化規律，大大地丰富了无綫电波在其中传播的知識，使无綫电通信的途径及所采取的方式和方法，有了一系列新的发展。根据国外有关文献所介紹的資料，及作者在教学和进修中的一些体会，认为已經有可能、同时也有必要将作者原著“电波与天綫”一书加以修訂。修訂本分上、中、下三册，上册专門讲述电波传播方式問題，主要是按无綫电波传播方式来安排內容和章节次序的，即按地面波、对流层波、电离层波、外球层波的順序，使討論随着无綫电波传播領域的向外扩展而进展。这样，与旧版本相比，有了較明确的系統性。在修訂本中，除了对旧版本中某些章节作了重点补充外，并增加了新的章节和許多新的內容。

修訂本上册共分十四章。第一章到第七章基础理論与旧版本相同。已經具有这方面預备知識的讀者，閱讀时不妨全部或部分地略去。修訂本中仍然将这部分內容保留下来，只是为了一般工程技术人員自学的方便。第八章是新加的，主要介紹地球及其周围空間环境、无綫电波可能传播的途径等基本知識。第九章着重改写了不同土质接境面上的地面波传播、繞射传播和山地传播等节。第十章对流层电波传播是新写的。第十一章电离层，內容与旧版本相同。第十二章电离层电波传播，对計算短波电場强度作了一些补充，另外增加了电离层散射与流星遺跡散射等內容。第十三章外球层电波传播，全部为新加內容，这一章是为了适应目前发展，需要对电波传播提出新的研究方向而列入的。第十四章主要加强了关于宇宙噪音方面的內容。

由于时間匆促，加以作者水平有限，书中不尽完善之处在所难免，希望讀者不吝指正。

谢处方　一九六三年三月

目　录

第二篇　电磁波的传播

第一篇　电磁場的基础理論

第一章　向量分析

1·1　标量及向量

用向量分析来討論电磁場的問題非但可以节省时間，而且也表現得非常簡单、明确。全部向量分析的內容另有专书介紹，这里只預备将比較重要的、且与今后我們討論問題有关的部份略加說明。

一般对于数量的观念分为两种：一种是**标量**，另外一种是**向量**。只有大小沒有方向的数量称为标量，例如，溫度、高度、质量、功等；既有大小也有方向的数量称为向量，例如，力、速度、加速度、电場等。为了区别标量与向量起見，以后我們用重体字母来代表向量。例如，对于一件物体的溫度是 30°C，我們可以写成 $t=30$°C，而对于这一物体所受的力若是 3 仟克，我們写成 $\mathbf{F}=3$ 仟克。这里因为所施的力既有大小也有方向，是一个向量，所以我們用重体字 $\mathbf{F}$ 来代表。

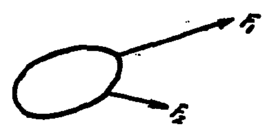

图 1·1　用箭头代表向量

在图解法中往往用一箭头来代表一向量；箭头的方向指着向量的方向，箭头的长短与向量的大小成比例。例如，在图1·1中，向量 $\mathbf{F}$ 的箭头說明了物体受力的方向，它的长短代表力的大小。显然的，在此处 $|\mathbf{F}_1|>|\mathbf{F}_2|$。

1·2　向量的加法及减法

假使一物体同时受 $\mathbf{F}_1$、$\mathbf{F}_2$ 两力的作用，如图 1·1 所示，则物体将沿着两力之間的路綫移动。因此我們可以用一合力 $\mathbf{F}$ 来代表 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 两力的共同作用(图 1·2)。合力的大小及方向可以由图解法求得，它是 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 构成的平行四边形的对角綫；对角綫的方向代

表物体移动的方向，对角綫的长短代表物体受力的大小。因此，求任意二向量的和的方法是用这两个向量构成一平行四边形，从向量交点引出的平行四边形的对角綫代表这两个向量的和，写成数式是

$$\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2=\mathbf{F}$$

向量 $\mathbf{F}$ 本身也是一个向量，所以也应用重体字母来代表。

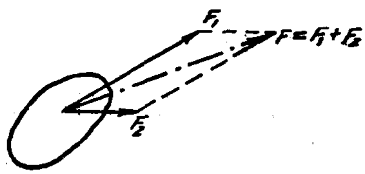

图 1·2　向量的加法

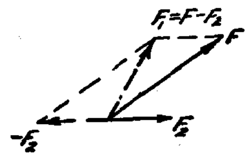

图 1·3　向量的减法

反之，假使我們想求两向量的差，則因为

$$\mathbf{F}-\mathbf{F}_2=\mathbf{F}+(-\mathbf{F}_2)$$

我們可以将 $\mathbf{F}_2$ 反向后再用求和的方法来求解，如图 1·3 所示。

1·3　向 量 乘 法

标量与标量相乘，結果仍得标量。例如，标量 a 乘标量 b，結果得 ab 仍为一标量。但标量与向量相乘，結果是一向量。例如，在图 1·4 中，以标量 a 乘向量 $\mathbf{A}$，結果得一新的向量 $a\mathbf{A}$，此新向量的方向仍在原向量的方向，大小是原向量的 a 倍。

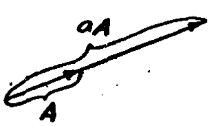

图 1·4　标量乘向量

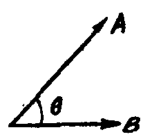

图 1·5　表示标量乘积的图

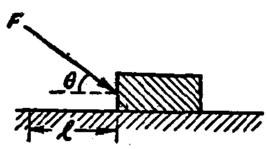

图 1·6　表示标量乘积的例子

向量与向量相乘分为两种，一种称为**标量乘积**，它的定义是

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}=AB\cos\theta \tag{1·1}$$

式中 $\mathbf{A}$、$\mathbf{B}$ 代表二向量，AB 代表它們的絕对值，θ 代表它們之間的夹角（图 1·5）。由（1·1）式可知，所謂标量乘积是将它們的絕对

值相乘后再乘以它們之間的夹角的余弦。乘积的結果是一标量，所以称为标量乘积。表示标量乘积的方法是在二向量之間加一圓点，所以标量乘积又称为**点乘积**。

例如，在图 1·6 中，以 **F** 力使物体移动 **l** 距离[1]，所作的功是 $Fl\cos\theta$，以标量乘积来表示是

$$功=\mathbf{F}\cdot\mathbf{l}$$

乘积的結果（功）是一个标量。

另外一种称为**向量乘积**，它的定义是

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=\mathbf{u}AB\sin\theta \tag{1·2}$$

式中 **A**、**B**、A、B 的意义同前，θ 代表它們之間的較小的夹角，**u** 代表一向量，它的大小是 1，称为**单位向量**，它的方向垂直于向量 **A**、**B** 构成的平面，指向是这样规定的：假使将一个右手螺旋从 **A** 轉到 **B**(轉角小于180°)，則螺旋前进的方向就是 **u** 的方向(图 1·7)。由(1·2)式可知，二向量的向量乘积，結果是一向量，它的大小是 $AB\sin\theta$，它的方向垂直于包含 **A**、**B** 的平面。表示向量乘积的方法是在二向量之間加一叉号，所以向量乘积又称为**叉乘积**。

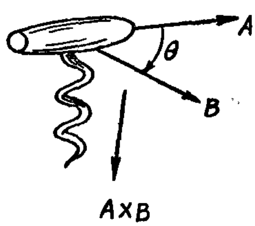

图 1·7 表示向量乘积的图

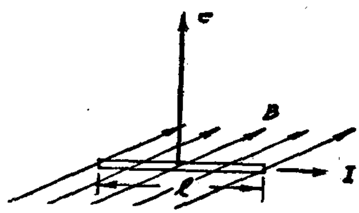

图 1·8 表示向量乘积的例子

根据确定向量乘积指向的規定，**A**×**B** 是用右手螺旋由 **A** 轉到 **B**，因此 **B**×**A** 应該是将右手螺旋由 **B** 轉到 **A**。显然，

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=-(\mathbf{B}\times\mathbf{A}) \tag{1·3}$$

向量乘积的运用可以拿載有电流的导体在磁場內受力的例子来說明。在图 1·8 中，导体的长度是 l，电流的向量是 **I**，磁場的向

[1] 这里的距离也是一向量，因为它不只有大小，而且还有方向。

量是 $\mathbf{B}$，导体所受的力是

$$\mathbf{F}=l(\mathbf{I}\times\mathbf{B})$$

1·4 用直角坐标分量表示向量

我們說过，絕对值是 1 的向量称为单位向量。用单位向量来表示向量 $\mathbf{A}$ 时可写成

$$\mathbf{A}=\mathbf{u}_a A \tag{1·4}$$

式中 $\mathbf{u}_a$ 代表一单位向量，它的方向与 $\mathbf{A}$ 相同(图 1·9)，A 代表向量 $\mathbf{A}$ 的絕对值。

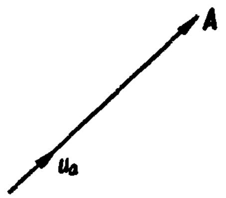

图 1·9 单位向量

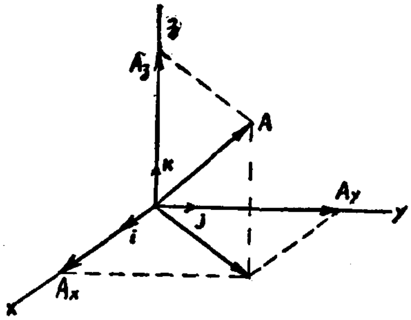

图 1·10 向量A的直角坐标分量

在直角坐标系中，通常用 $\mathbf{i}$、$\mathbf{j}$、$\mathbf{k}$ 分别代表 x、y、z 軸向的单位向量。假使一向量 $\mathbf{A}$ 的 x、y、z 軸向分量是 $\mathbf{A}_x$、$\mathbf{A}_y$、$\mathbf{A}_z$（图 1·10），則用分量的和来表示合成向量的公式应該是

$$\begin{aligned}\mathbf{A}&=\mathbf{A}_x+\mathbf{A}_y+\mathbf{A}_z\\&=\mathbf{i}A_x+\mathbf{j}A_y+\mathbf{k}A_z\end{aligned} \tag{1·5}$$

按照标量乘积和向量乘积的定义，我們很容易証明到：

$$\begin{aligned}&\mathbf{i}\cdot\mathbf{i}=1 \quad \mathbf{i}\times\mathbf{i}=0\\&\mathbf{i}\cdot\mathbf{j}=0 \quad \mathbf{i}\times\mathbf{j}=\mathbf{k}\\&\mathbf{i}\cdot\mathbf{k}=0 \quad \mathbf{i}\times\mathbf{k}=-\mathbf{j}\end{aligned} \tag{1·6}$$

二向量的标量乘积，若用直角坐标系的分量来表示时，应是

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}=(\mathbf{i}A_x+\mathbf{j}A_y+\mathbf{k}A_z)\cdot(\mathbf{i}B_x+\mathbf{j}B_y+\mathbf{k}B_z)$$

将上式展开，并利用(1·6)式的关系，結果可得

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}=A_xB_x+A_yB_y+A_zB_z \tag{1·7}$$

仿此，对于向量乘积我們也可証明：

$$\begin{aligned}\mathbf{A}\times\mathbf{B}&=(\mathbf{i}A_x+\mathbf{j}A_y+\mathbf{k}A_z)\times(\mathbf{i}B_x+\mathbf{j}B_y+\mathbf{k}B_z)\\&=\mathbf{i}(A_yB_z-A_zB_y)+\mathbf{j}(A_zB_x-A_xB_z)+\mathbf{k}(A_xB_y-A_yB_x)\end{aligned} \tag{1·8}$$

这个式子可以用行列式写出来：

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B}=\begin{vmatrix}\mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k}\\ A_x & A_y & A_z\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix}. \tag{1·9}$$

1·5 向量場及标量場

空間的每一点都附有某一向量或标量的值时称为**向量場**或**标量場**。例如，重力場是一个向量場，溫度場是一个标量場。各点的場量是空間的函数，意即每一点的場量随該点所在位置而不同。为了說明它們在空間的变化情况，我們在下面几节中将介紹关于場量的梯度、散度及旋度的意义。

在电磁波所牵涉的問題中，每一点的場量不只是空間的函数而且还是时間的函数。意即每一点的場量不只是随各該点的位置而不同，而且即使是在某一固定点，它的場量还随时間而改变。

1·6 梯 度

梯度的意义可以拿山的陡度来說明。一座山的各点各有它的陡度。陡度是說明各点高度（是一个标量）的变化率。变化率愈快，陡度愈大；变化率愈慢，陡度愈小。但是变化率也要看是什么方向的变化率。垂直削壁上一点的高度变化率在垂直方向是无限大，但在平行地面的方向却是零。所以要决定某点的高度变化率，同时应說明变化率所沿的方向。一般来說，在决定任何标量場內某点的变化率时，应同时說明变化率所取的方向。通常我們以标量場中一点的最大增加率称为該点的**梯度**。所以梯度是一个向量，它的方向就

是最大增加率的方向。

假使我們以 V 代表标量場內的标量值，$\mathbf{l}$ 代表最大增加率的方向，則

$$函数\ V\ 的梯度=\frac{dV}{d\mathbf{l}}$$

或写成

$$\operatorname{grad} V=\frac{dV}{d\mathbf{l}} \tag{1·10}$$

我們很容易証明到，用直角坐标系的分量来表示时：

$$\operatorname{grad} V=\mathbf{i}\frac{\partial V}{\partial x}+\mathbf{j}\frac{\partial V}{\partial y}+\mathbf{k}\frac{\partial V}{\partial z} \tag{1·11}$$

它的絕对值是

$$|\operatorname{grad} V|=\sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} \tag{1·12}$$

1·7　散　　度

标量場的变化率称为梯度，向量場的变化率有散度及旋度二种，現分別說明于下：

图 1·11 的 P 代表一水管，水从管的左面流入，右面流出。假設水流入的速度是 $\mathbf{v}_1$，流出的速度是 $\mathbf{v}_2$，而 $|\mathbf{v}_2|>|\mathbf{v}_1|$，則經常維持这个流速关系的必要条件是 P 管內有一发散的水源，这个发散的水源不断将水向右发散出来，这样才可能使 $|\mathbf{v}_2|>|\mathbf{v}_1|$。$P$ 管內水的流速是一个向量場。$\mathbf{v}_2>\mathbf{v}_1$ 是說明向量有变化，为了解释这个变化，我們說，向量場內有**散度**存在（意即有发散的水源存在）。$\mathbf{v}_2$ 与 $\mathbf{v}_1$ 相差愈大，水的发散愈急，散度也愈大。

以上是說向量变化便有散度存在，但这也得看面积的大小。例

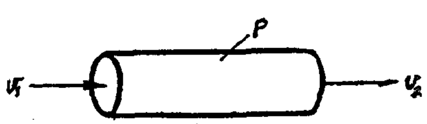

图 1·11　說明散度的图

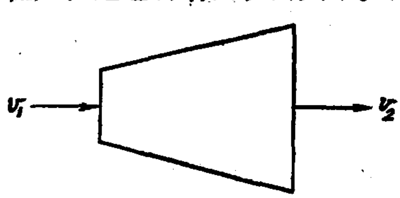

图 1·12　說明散度的图

如，图 1·12 示一段河流的截面，河水从左边流入的速度較从右边流出的速度为大，但散度却是零。所以在討論散度时，向量以及向量所通过的面积都有影响。通常我們将向量与它所通过面积的标量乘积称为这个向量的**通量**，只有当通量发生变化的时候才有散度存在。

当图 1·11 的水管 P 逐漸縮小，最后縮到几乎一"点"时，則若通过此点的流速 $\mathbf{v}$ 有变化，我們便說該"点"有散度存在。因此欲求向量場內一点的散度，可任意取一小体积包围此点，一般来說，在此小体积的表面各点，各有不同的向量，将周面上各点向量与該点元面积（也是一个向量①）的标量乘积积分起来，即得小体积的总发散通量，将总发散通量除以該体积并令此体积趋近于零，所得极限即称为該点的散度。例如，在图 1·13 中，欲求向量場 $\mathbf{A}$ 內一点

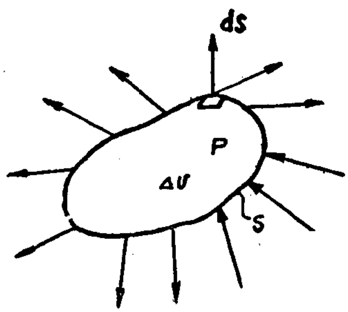

图 1·13　求向量場內一点 P 的散度

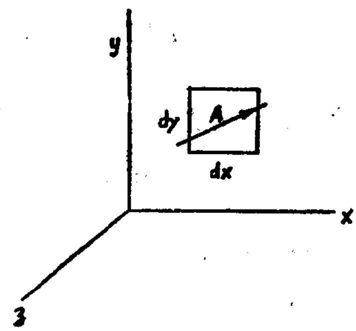

图 1·14　求向量場內一点的散度

P 的散度，可在 P 点外围的閉合面上先求出各点的 $\mathbf{A}\cdot d\mathbf{s}$ 通量，然后按定义，

$$向量場\ \mathbf{A}\ 的散度 = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\oint_S \mathbf{A}\cdot d\mathbf{s}}{\Delta v}$$

或写成

① 面积向量的方向在該面积的法綫方向，对于一个封閉面来說，我們以向外的法綫方向代表面积向量的指向。

$$\operatorname{div}\mathbf{A}=\lim_{\Delta v\to 0}\frac{\oint_S \mathbf{A}\cdot d\mathbf{s}}{\Delta v} \tag{1·13}$$

現在我們来証明，在直角坐标系中向量場 $\mathbf{A}$ 的散度是

$$\operatorname{div}\mathbf{A}=\frac{\partial A_x}{\partial x}+\frac{\partial A_y}{\partial y}+\frac{\partial A_z}{\partial z} \tag{1·14}$$

在图 1·14 中，相当于图 1·13 的 Δv 現在是 $dxdydz$ 所构成的直角长方体。穿入长方体左边的通量是 $A_x\,dy\,dz$，穿出长方体右边的通量是$\left(A_x+\frac{\partial A_x}{\partial x}dx\right)dydz$，两者相差$\frac{\partial A_x}{\partial x}dx\,dy\,dz$。仿此，从长方体顶面出来的通量比底面进去的多$\frac{\partial A_y}{\partial y}dy\,dx\,dz$，从前面出来的比后面进去的多$\frac{\partial A_z}{\partial z}dz\,dx\,dy$，这些多出来的通量的总数是

$$\left(\frac{\partial A_x}{\partial x}+\frac{\partial A_y}{\partial y}+\frac{\partial A_z}{\partial z}\right)dx\,dy\,dz$$

但是散度的定义是单位体积所发散的通量，因此

$$\operatorname{div}\mathbf{A}=\frac{\partial A_x}{\partial x}+\frac{\partial A_y}{\partial y}+\frac{\partial A_z}{\partial z}$$

这便是(1·14)式，这式的右边是一标量，所以求向量場的散度結果得一标量。

1·8 高斯定理

現在假設我們将空間分成无限多的小方块，如图1·15所示。从一个小方块，如图中的 a，出来的通量比进去的多 $\operatorname{div}\mathbf{A}dv$，这里 dv 代表小方块的体积。仿此，从邻近小方块 b 发散出来的通量应等于該处的散度乘以小方块的体积。当我們将这两个小方块合起来看成一个整体的时候，这个整体发散出来的通量

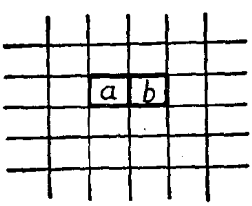

图 1·15 說明高斯定理的图