电波与天线

(上册)

人民邮电出版社

电波与天綫

（上　册）

謝处方 編著

緒　論

自从 1895 年 A.C. 波波夫發明無綫电开始，所有在这一方面的發展，包括無綫电报、电話、广播、傳真、电視、雷达、遙控……
……都是依靠無綫电波携帶着电磁能量来完成傳遞的使命。因此，研究無綫电波的傳播問題就成为研究無綫电科学的極其重要的一个內容。無綫电波是循着什么途徑傳播的？在傳播过程中它們起了什么变化？場强① 的衰減有多大？訊号稳定的情況怎样？研究这些問題可以直接間接帮助我們提高通信的效率，改进通信的質量。

电波由發射天綫到接收天綫的傳播途徑可分为兩大类：一类是地波，电波的傳播接近地面。又可分为兩种：一种是地面波，电波

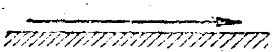

圖 0·1　地面波

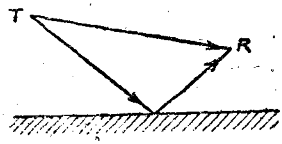

圖 0·2　空間波

沿着地面推进（圖 0·1）；另外一种是空間波，發射天綫与接收天綫离开地面較高，接收点的电場强度由直射波与地面反射波組成（圖 0·2）。除开上面兩种是屬于地波之外，还有一类是天波，靠（离开地面約一百公里以外的）电离層的反射作用將电波傳送到接收点（圖0·3）。

不同波長的电波，它們的傳播方式不尽相同。長波的傳播，在近距离主要是地面波起决定的作用，到远距离（約在 2000 公里以外），天波的影响逐漸加大。無論是地面波或天波，波長愈長衰減愈小。

---

① 任何电磁波都包括电場和磁場兩个成份，一般是用电場强度的分量来說明电磁波的强度。

中波的广播波段，在白天由于天波的衰減很大，一般是靠地面波傳播，到了夜晚，天波的衰減減小，电波的傳播距离大大超过地面波可以到达的有效距离。

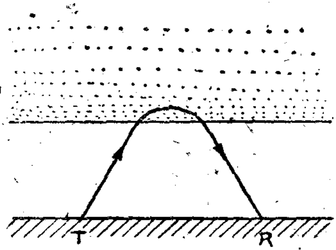

圖 0·3　天波

随着頻率的繼續增加，地面波的衰減愈来愈大，但天波的衰減又开始逐漸变小，因此在短波波段中，除了極近距离（几十公里）是用地面波联絡外，主要的远距离通訊和广播完全靠天波来实現。由于电波穿入电离層比較深，而电离層的情况又是时刻变动的，因此在这一波段的远距离通訊是不稳定的。

到了超短波波段，地面波的衰減太大，而天波又由于頻率过高，电波穿出了电离層不能反射回来，因此一般是采用空間波来通訊。同时由于超短波的波長很短，將天綫架高到几十或几百倍波長高是并不困难的。現將各种波長无綫电波的几种主要特性列表如下。

表 0·1　各种波長無綫电波的主要特性及其应用

名称	長波	中波	短波	超短波		
				米波	分米波	厘米波
波長	20000—3000米	3000—200米	200—10米	10—1米	1米—10厘米	10—1厘米
頻率	15—100仟赫	100—1500仟赫	1.5—30兆赫	30—300兆赫	300—3000兆赫	3000—30000兆赫
应用范圍	越洋通訊、导航	船用通訊、广播	电报、电話、广播、業余	广播、傳眞、电視、导航、業余	电視、雷达、导航、中繼、移动通訊以及其他特种应用	
輻射特性	主要是無方向性的		無方向性与有方向性	主要是有方向性的		
傳播特性	主要是地波	地面波和天波	地波和天波	空間波		
通訊距离	距离比較远，由發射机的功率決定		地波一般比較近天波一般比較远由發射机的功率及运用的頻率決定	在光区由天綫高度決定，在影区由發射功率及天綫方向性決定		

目　录

緒　論

第一篇　电磁場的理論

第二篇 电磁波的傳播

第一篇　电磁場的理論

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單、明确。全部向量分析的內容另有專書介紹，这里只預备將比較重要的、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兩种：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、質量、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。

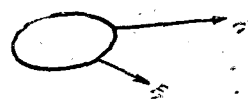

圖 1·1　用箭头代表向量

在圖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，箭头的長短与向量的大小成比例。例如，在圖 1·1 中，向量 $\mathbf{F}$ 的箭头說明了物体受力的方向，它的長短代表力的大小，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 $\mathbf{F}_1$、$\mathbf{F}_2$ 兩力的作用，如圖 1·1 所示，則物体將沿着兩力之間的路綫移动。因此我們可以用一合力 $\mathbf{F}$ 来代表 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 兩力的共同作用（圖 1·2）。合力的大小及方向可以由圖解法求

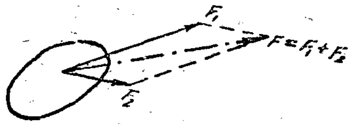

圖-1·2 向量的加法

得，它是 $\mathbf{F}_1$ 与 $\mathbf{F}_2$ 構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，对角綫的長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兩个向量構成一平行四边形，从向量交点引出的平行四边形的对角綫代表这兩个向量的和，写成数式是

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

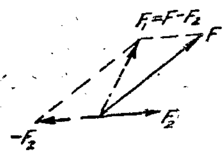

圖 1·3 向量的減法

向量 $\mathbf{F}$本身也是一个向量，所以也应用重体字母来代表。

反之，假使我們想求兩向量的差，則因为

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

我們可以將$\mathbf{F}_2$反向后再用求和的方法来求解，如圖 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，在圖 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。

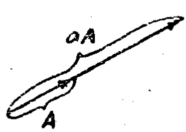

圖 1·4 标量乘向量

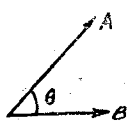

圖 1·5 表示标量乘积的圖

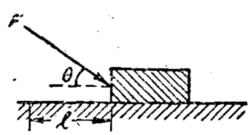

圖 1·6 表示标量乘积的例子

向量与向量相乘分为兩种，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 $\mathbf{AB}$ 代表二向量，AB 代表它們的絕对値，θ 代表它們之間的夾角（圖1·5）。由(1·1)式可知，所謂标量乘积是將它們的絕对値相

乘后再乘以它們之間的夾角的余弦。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，在圖 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

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B} = \mathbf{u}AB\sin\theta \quad (1\cdot2)$$

式中 **A**、**B**、A、B 的意义同前，θ 代表它們之間的較小的夾角，**u** 代表一向量，它的大小是 1，称为**單位向量**，它的方向垂直于向量 **AB** 構成的平面，指向是这样規定的：假使將一个右手螺旋从 **A** 轉到 **B**（轉角小于 180°），則螺旋前进的方向就是 **u** 的方向（圖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 **AB** 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**。

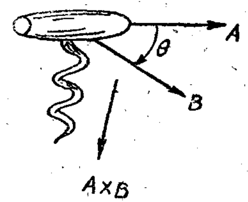

圖 1·7 表示向量乘積的圖

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** 应該是將右手螺旋由 **B** 轉到 **A**。不难推出：

$$\mathbf{A}\times\mathbf{B} = -(\mathbf{B}\times\mathbf{A}) \quad (1\cdot3)$$

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。在圖1·8中，导体的長度是 l，电流的向量是 **I**，磁場的向量是 **B**，导体所受的力是

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

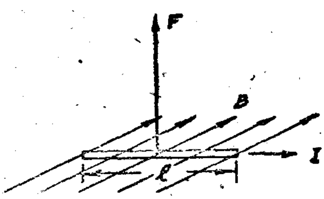

圖 1·8 表示向量乘积的例子

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。

1.4 用直角坐标分量表示向量

我們說过，絕对値是 1 的向量称为單位向量。用單位向量来表示向量 $\mathbf{A}$ 时可写成

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

式中 $\mathbf{u}_a$ 代表一單位向量，它的方向与 $\mathbf{A}$ 相同（圖 1·9），A 代表向量 $\mathbf{A}$ 的絕对値。

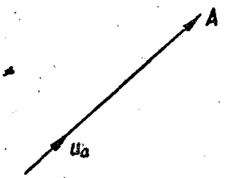

圖 1·9 單位向量

在直角坐标系中，通常用 $\mathbf{i}$、$\mathbf{j}$、$\mathbf{k}$ 分别代表 x、y、z 軸向的單位向量，假使一向量 $\mathbf{A}$ 的 x、y、z 軸向分量是 $\mathbf{A}_x$、$\mathbf{A}_y$、$\mathbf{A}_z$（圖 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：

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

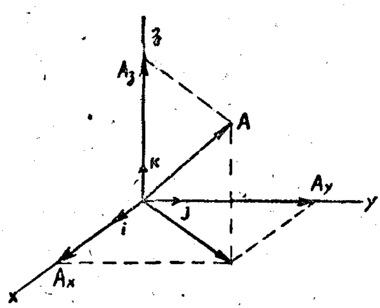

圖 1·10 向量 A 的直角坐標分量

二向量的标量乘积，若用直角坐标系的分量来表示时，应是

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

將上式展开，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，温度場是一个标量場。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，我們在下面几节中將介紹关于場量的梯度、散度及旋度的意义。

在电磁波所牽涉的問題中，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。垂直峭壁上一点的高度变化率在垂直方向是無限大，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，则

$$\text{函数 } V \text{ 的梯度}=\frac{dV}{d\mathbf{l}}.$$

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：

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

它的絕对値是

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

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，現分别說明于下：

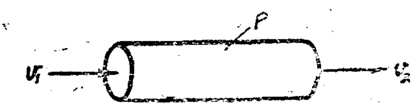

圖 1·11　說明散度的圖

圖 1·11 的 P 代表一水管，水从管的左面流入，右面流出。假設水流入的速率是 $\mathbf{v}_1$，流出的速率是 $\mathbf{v}_2$，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 管內有一發散的水源，这个發散的水源不断將水向右發散出来，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，为了解釋这个变化，我們說，向量場內有**散度**存在（意即有發散的水源存在）。$\mathbf{v}_2$ 与 $\mathbf{v}_1$ 相差愈大，水的發散愈急，散度也愈大。

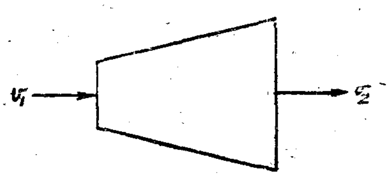

圖 1·12　說明散度的圖

以上是說向量变化便有散度存在，但这也得看面积的大小。例如，在圖 1·12 中，河水从左边流入的速度較从右边流出的速率为大，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。通常我們將向量与它所通过面积的标量乘积称为这个向量的通量，只有当通量發生变化的时候才有散度存在。

当圖 1·11 的水管 P 逐漸縮小，最后縮到几乎一"点"时，则若通过此点的流速 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圍此点，一般来說，在此小体积的表面各点，各有不同的向量，將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，即得小体积的总發散通量，將总發散通量除以該体积并令此体积趋近于零，所得極限即称为該点的散度。例如，在圖 1·13 中，欲求向量場 **A** 內一点 P 的散度，可在 P 点外圍的閉合面上先求出各点的 $\mathbf{A}\cdot ds$ 通量，然后按定义，

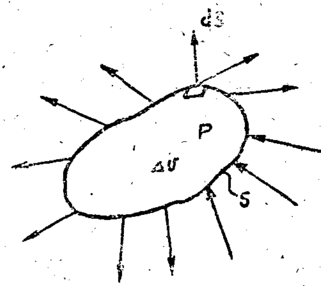

圖 1·13 求向量場內一点 P 的散度

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

或写成

$$\operatorname{div}\mathbf{A} = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\oint_S \mathbf{A}\cdot ds}{\Delta v} \qquad (1\cdot13)$$

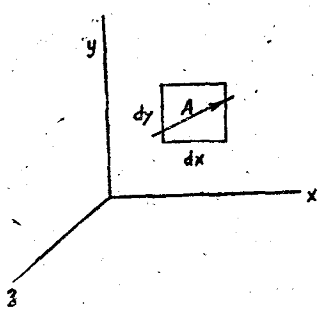

圖 1·14 求向量場內一点的散度

現在我們来証明，在直角坐标系中向量場 **A** 的散度是

$$\operatorname{div}\mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \qquad (1\cdot14)$$

在圖 1·14 中，相当于圖 1·13 的 Δv 現在是 $dx\,dy\,dz$ 所構成的直角長方体。穿入長方体左边的通量是 $A_x\,dy\,dz$，穿出長方体右边的通量是 $\left(A_x + \frac{\partial A_x}{\partial x}dx\right)dy\,dz$，兩者相差 $\frac{\partial A_x}{\partial x}dx\,dy\,dz$。仿此，从長方体頂

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。

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

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

但是散度的定义是單位体积所發散的通量，因此

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

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

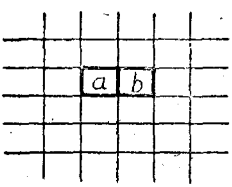

圖 1·15 說明高斯定理的圖

現在假設我們將空間分成無限多的小方塊，如圖1•15所示。从一个小方塊，如圖中的a，出来的通量比进去的多$\mathrm{div}\mathbf{A}dv$，这里dv代表小方塊的体积。仿此，从鄰近小方塊b發散出来的通量应等于該处的散度乘以小方塊的体积。当我們將这兩个小方塊合起来看成一个整体的时候，这个整体發散出来的通量应該等于兩个小方塊个别發散出来的通量的和，即等于兩个散度各与体积相乘后的和。从这一組出發，將許多小方塊合起来，則从这个被合起来的任意大小的体积中，發散出来的总通量应等于所有这些散度与体积的各别乘积的积分，即

$$\text{發散出来的总通量}=\int_v \mathrm{div}\mathbf{A}\,dv$$

但从一个任意閉合面里穿出来的总通量也可由向量 **A** 在整个閉合面上的积分得到，即

$$\text{發散出来的总通量}=\oint_S \mathbf{A}\cdot d\mathbf{s}$$

与上面一式相比較，可得

$$\oint_S \mathbf{A}\cdot d\mathbf{s}=\int_v \mathrm{div}\mathbf{A}\ dv \tag{1.15}$$

这公式非常重要，它說明了怎样在向量場里用面积分来代替体积分，这一关系称为高斯定理，也称为散度定理。

1.9 旋　　度

另外一个描述向量場改变率的重要方法称为旋度。以一桶水来說，圖 1·16 表示从上面看下去的水桶圖，桶里的水已經被攪动过了。圖中的向量代表水流速度 **v**。桶旁繪了一个小翼輪，假使这个翼輪安置在一个沒有磨擦的軸承上放入水桶的中心，它就会反时鐘方向旋轉起来。無論翼輪被放在桶內任何地点，它都会被水推轉起来，这是因为即使翼輪不在桶的正中，翼輪一边的水流速度总比另一边的水流速度快。翼輪的旋轉，表示在水桶里流动的水，它的速度的向量場有一改变率，这种改变率称为**旋度**。

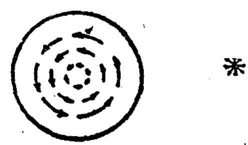

圖 1·16　說明旋度的圖

旋度这兩个字，好像表示与沿着曲綫的运动有关，这也不尽然，因为直綫移动也可以有旋度。例如，河道里的水，在接近表面的流速快，沿河床的流速慢。如圖 1.17，虽然每一水的質点都作直綫移动，但是在这里仍然有旋度存在，这件事可以用一試驗翼輪得到証明。由圖可知，上面翼板的水流速度比下面的快，所以翼輪是順着时鐘方向旋轉的。

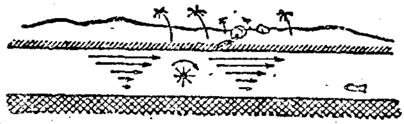

圖 1·17　直綫移动也可以有旋度