

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 郵 電 出 版 社

内 容 提 要

本书是“电波与天綫”一书修訂本的上册，分为两篇：第一篇是电磁場的基础理論，从向量分析开始，扼要介紹靜电場、穩定磁場、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，介紹地球及其外圍空間結構、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。

378/11

电 波 与 天 綫 (上)

(修訂本)

編 著 者：	謝 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	1958 年 7 月北京第一版
印张 10 22/32 页数 171 插页 1	1963 年 8 月北京第二版
印刷字数 282,000 字	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、外球层的結構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，上册专门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内容和章节次序的，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内容。

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内容保留下来，只是为了一般工程技术人员自学的方便。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，内容与旧版本相同。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内容。第十三章外球层电波传播，全部为新加内容，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内容。

由于時間匆促，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。

謝处方 一九六三年三月

目 录

修訂本序言

第一篇 电磁場的基础理論

第 一 章 向量分析	1
1.1 标量及向量	1
1.2 向量的加法及減法	1
1.3 向量乘法	2
1.4 用直角坐标分量表示向量	4
1.5 向量場及标量場	5
1.6 梯度	5
1.7 散度	6
1.8 高斯定理	8
1.9 旋度	9
1.10 斯篤克定理	12
1.11 哈密尔敦的“納布拉”算子	13
1.12 “拉普拉斯”算子及其他公式	14
1.13 圓柱坐标及球坐标	15
第 二 章 靜电場	18
2.1 庫倫定律	18
2.2 电場强度	18
2.3 电位	19
2.4 电位梯度	20
2.5 电位移	21
2.6 高斯定律	22
2.7 靜电場的能量	23
第 三 章 穩定磁場	24
3.1 磁場及磁感强度	24
3.2 比奧—沙瓦定律及磁場强度	25

3.3 全电流定律	26
3.4 向量磁位	27
3.5 磁场能量	28
第 四 章 交变电磁场	29
4.1 位移电流及麦克斯韦的第一方程式	29
4.2 法拉第定律及麦克斯韦的第二方程式	31
4.3 场量方程式	32
4.4 边界条件	33
第 五 章 平面波	35
5.1 在理想自由空间传播的平面电磁波	35
5.2 波的极化	41
5.3 在导电媒质中传播的平面电磁波	44
5.4 导体与绝缘体	47
5.5 烏莫夫-坡印亭向量	49
第 六 章 电磁波的反射与折射	51
6.1 电磁波在理想介质面上的斜反射	51
6.2 布魯斯脫角(极化角)	56
6.3 在有限导电平面上的斜反射	56
第 七 章 电磁波的辐射	63
7.1 滞后位	63
7.2 元天线的辐射	65
7.3 元天线的辐射功率与辐射电阻	69
7.4 天线的方向性系数	70
7.5 地面的作用	71
7.6 接地元天线	73
7.7 天线的实效高度	75
7.8 电磁波	76

第二篇 电磁波的传播

第 八 章 电波传播的基本知識	79
8.1 地球及其外围空间	79

8.2	无线电波的波段划分及其主要用途	83
8.3	各种波长无线电波传播的途径及其特点	84
第九章 地波传播		86
9.1	地面的电性参量	86
9.2	平面波在导电平面上的场量关系	88
9.3	沿平地传播的地面波	91
9.4	在不同土质面上传播的地面波	96
9.5	在平地面上的空间波传播	103
9.6	在球地面上的空间波传播	113
9.7	球地面上的绕射传播	122
9.8	在不同土质球地面上电波的传播	133
9.9	不平整地面对电波传播的影响	136
第十章 对流层电波传播		146
10.1	对流层的组成与结构	146
10.2	对流层的折射指数及其变化	148
10.3	对流层对地波传播的影响	149
10.4	大气折射的分类与波导的形成	153
10.5	对流层散射传播及其衰减因子的计算	157
10.6	对流层波的衰落	165
10.7	考虑到衰落影响的补偿功率	169
10.8	散射传播的特征及其实用数据	171
10.9	电波在对流层中的吸收作用	173
第十一章 电离层		176
11.1	电离层的形成及其结构	176
11.2	无线电波在均匀电离层内的传播	180
11.3	考虑到电子碰撞的实效介电系数与导电系数	182
11.4	地磁的影响	184
11.5	无线电波在电离层中的折射与反射	194
11.6	相速及群速	197
11.7	电离层的测定	200
11.8	虚高与实高的关系	202
11.9	等效定理——斜投射的虚高	204

11·10 电离层的吸收作用	207
11·11 电离层的正常结构及其正规变化	208
11·12 电离层的不正规变化	212
第十二章 电离层电波传播	214

长波和超长波

12·1 长波传播的物理过程及其特点	214
12·2 电场强度的计算	216
12·3 最佳波长的选择	218

中 波

12·4 中波传播的物理过程及其特点	219
12·5 电场强度的计算	222
12·6 广播电台的服务面积——无衰落半径	228

短 波

12·7 短波传播的物理过程	231
12·8 短波传播的特点	232
12·9 短波通信中的衰落现象	234
12·10 回波现象	237
12·11 短波传播中的寂静区	239
12·12 跳越距离及最高可用频率	240
12·13 传播曲线	246
12·14 短波通信线路的计算任务之一——确定最高可用频率	248
12·15 选择工作波长	257
12·16 确定通信频率举例	257
12·17 短波通信线路的计算任务之二——计算接收点的电场强度	270
12·18 最小辐射功率与最低可用频率	281

超 短 波

12·19 超短波从 F_2 层及不稳定 E_c 层的反射	283
12·20 超短波从不均匀电离层散射传播	284
12·21 超短波从流星的电离遗迹散射传播	287
第十三章 外球层电波传播	288
13·1 外球层的结构及其电波传播	288

13·2	飞行体在 F_2 层以上的地对空传播	290
13·3	定位误差、多普勒频率误差及法拉第旋转	292
13·4	电波的衰减	300
第十四章 干扰对无线电接收的影响		303
14·1	干扰的来源	303
14·2	一般无线电通信业务需要的电场强度	306
14·3	噪音温度	309
14·4	宇宙噪音	313
附录		316

第一篇 电磁场的基础理论

第一章 向量分析

1.1 标量及向量

用向量分析来讨论电磁场的问题非但可以节省时间，而且也表现得非常简单、明确。全部向量分析的内容另有专书介绍，这里只预备将比较重要的、且与今后我们讨论问题有关的部份略加说明。

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。只有大小没有方向的数量称为标量，例如，温度、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、电场等。为了区别标量与向量起见，以后我们用重体字母来代表向量。例如，对于一件物体的温度是 30°C ，我们可以写成 $t=30^{\circ}\text{C}$ ，而对于这一物体所受的力若是 3 千克，我们写成 $F=3$ 千克。这里因为所施的力既有大小也有方向，是一个向量，所以我们用重体字 F 来代表。

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 F 的箭头说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 $|F_1| > |F_2|$ 。



图 1.1 用箭头代表向量

1.2 向量的加法及减法

假使一物体同时受 F_1 、 F_2 两力的作用，如图 1.1 所示，则物体将沿着两力之间的路线移动。因此我们可以用一合力 F 来代表 F_1 与 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 F_1 与 F_2 构成的平行四边形的对角线；对角线的方向代

表物体移动的方向, 对角线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线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。

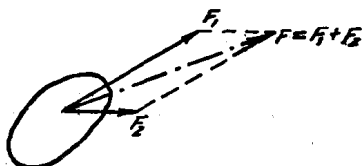


图 1.2 向量的加法

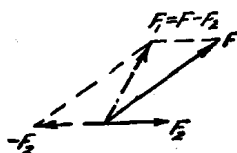


图 1.3 向量的减法

反之, 假使我们想求两向量的差, 则因为

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

我们可以将 $\mathbf{F}_2$ 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, 结果仍得标量。例如, 标量 a 乘标量 b , 结果得 ab 仍为一标量。但标量与向量相乘, 结果是一向量。例如, 在图 1.4 中, 以标量 a 乘向量 $\mathbf{A}$, 结果得一新的向量 $a\mathbf{A}$, 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

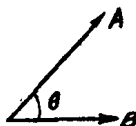


图 1.5 表示标量乘积的图

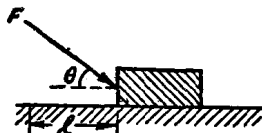


图 1.6 表示标量乘积的例子

向量与向量相乘分为两种, 一种称为标量乘积, 它的定义是

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \theta \quad (1.1)$$

式中 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 代表二向量, AB 代表它们的绝对值, θ 代表它们之间的来角 (图 1.5)。由 (1.1) 式可知, 所谓标量乘积是將它們的绝对

值相乘后再乘以它們之間的夾角的余弦。乘積的結果是一標量，所以稱為標量乘積。表示標量乘積的方法是在二向量之間加一圓點，所以標量乘積又稱為點乘積。

例如，在圖 1-6 中，以 $\mathbf{F}$ 力使物體移動 $\mathbf{l}$ 距離^①，所作的功是 $F l \cos \theta$ ，以標量乘積來表示是

$$\text{功} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{l}$$

乘積的結果（功）是一個標量。

另外一種稱為向量乘積，它的定義是

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = u A B \sin \theta \quad (1.2)$$

式中 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 A 、 B 的意義同前， 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，稱為單位向量，它的方向垂直於向量 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 構成的平面，指向是這樣規定的：假使將一個右手螺旋從 $\mathbf{A}$ 轉到 $\mathbf{B}$ （轉角小於 180° ），則螺旋前進的方向就是 u 的方向（圖 1-7）。由 (1.2) 式可知，二向量的向量乘積，結果是一向量，它的大小是 $AB \sin \theta$ ，它的方向垂直於包含 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 的平面。表示向量乘積的方法是在二向量之間加一叉號，所以向量乘積又稱為叉乘積。

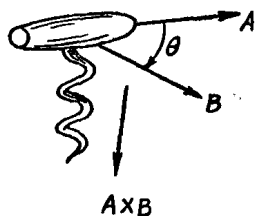


圖 1-7 表示向量乘積的圖

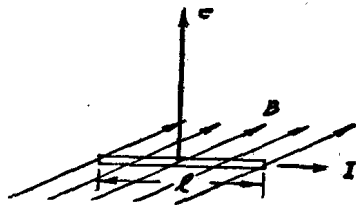


圖 1-8 表示向量乘積的例子

根據確定向量乘積指向的規定， $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$ 是用右手螺旋由 $\mathbf{A}$ 轉到 $\mathbf{B}$ ，因此 $\mathbf{B} \times \mathbf{A}$ 應該是将右手螺旋由 $\mathbf{B}$ 轉到 $\mathbf{A}$ 。顯然，

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -(\mathbf{B} \times \mathbf{A}) \quad (1.3)$$

向量乘積的運用可以拿載有電流的導體在磁場內受力的例子來說明。在圖 1-8 中，導體的長度是 l ，電流的向量是 $\mathbf{l}$ ，磁場的向

① 這裡的距離也是一向量，因為它不只有大小，而且還有方向。

量是 B ，导体所受的力是

$$F = l(I \times B)$$

1.4 用直角坐标分量表示向量

我們說過，絕對值是 1 的向量称为单位向量。用单位向量来表示向量 A 时可写成

$$A = u_a A \quad (1.4)$$

式中 u_a 代表一单位向量，它的方向与 A 相同(图 1.9)， A 代表向量 A 的絕對值。

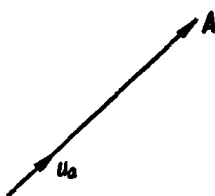


图 1.9 单位向量

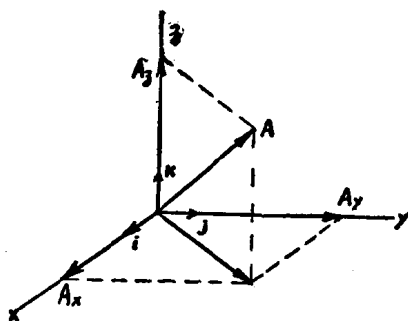


图 1.10 向量 A 的直角坐标分量

在直角坐标系中，通常用 i, j, k 分别代表 x, y, z 軸向的单位向量。假使一向量 A 的 x, y, z 軸向分量是 A_x, A_y, A_z (图 1.10)，則用分量的和来表示合成向量的公式應該是

$$\begin{aligned} A &= A_x + A_y + A_z \\ &= iA_x + jA_y + kA_z \end{aligned} \quad (1.5)$$

按照标量乘积和向量乘积的定义，我們很容易証明到，

$$\begin{aligned} i \cdot i &= 1 & i \times i &= 0 \\ i \cdot j &= 0 & i \times j &= k \\ i \cdot k &= 0 & i \times k &= -j \end{aligned} \quad (1.6)$$

二向量的标量乘积，若用直角坐标的分量来表示时，应是

$$A \cdot B = (iA_x + jA_y + kA_z) \cdot (iB_x + jB_y + kB_z)$$

将上式展开，并利用(1.6)式的关系，結果可得

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \quad (1.7)$$

仿此，对于向量乘积我們也可証明：

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \times \mathbf{B} &= (\mathbf{i}A_x + \mathbf{j}A_y + \mathbf{k}A_z) \times (\mathbf{i}B_x + \mathbf{j}B_y + \mathbf{k}B_z) \\ &= \mathbf{i}(A_y B_z - A_z B_y) + \mathbf{j}(A_z B_x - A_x B_z) + \mathbf{k}(A_x B_y - A_y B_x) \end{aligned} \quad (1.8)$$

这个式子可以用行列式写出来：

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}. \quad (1.9)$$

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時間的函数。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，它的場量还随時間而改变。

1.6 梯 度

梯度的意义可以拿山的陡度來說明。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。一般來說，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。

假使我们以 V 代表标量场内的标量值, l 代表最大增加率的方向, 则

$$\text{函数 } V \text{ 的梯度} = \frac{dV}{dl}$$

$$\text{或写成} \quad \text{grad } V = \frac{dV}{dl} \quad (1.10)$$

我们很容易证明到, 用直角坐标系的分量来表示时:

$$\text{grad } V = \mathbf{i} \frac{\partial V}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial V}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (1.11)$$

它的绝对值是

$$|\text{grad } V| = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} \quad (1.12)$$

1.7 散 度

标量场的变化率称为梯度, 向量场的变化率有散度及旋度二种, 现分别说明于下:

图 1.11 的 P 代表一水管, 水从管的左面流入, 右面流出。假设水流入的速度是 $\mathbf{v}_1$, 流出的速度是 $\mathbf{v}_2$, 而 $|\mathbf{v}_2| > |\mathbf{v}_1|$, 则经常维持这个流速关系的必要条件是 P 管内有一发散的水源, 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 管内水的流速是一个向量场。 $\mathbf{v}_2 > \mathbf{v}_1$ 是说明向量有变化, 为了解释这个变化, 我们说, 向量场内有散度存在 (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。

以上是说向量变化便有散度存在, 但这也得看面积的大小。例

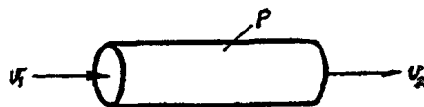


图 1.11 说明散度的图

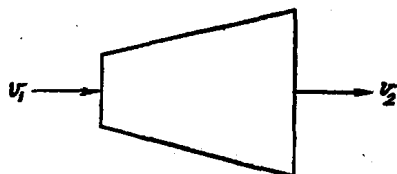


图 1.12 说明散度的图

如，图 1·12 示一段河流的截面，河水从左边流入的速度较从右边流出的速度为大，但散度却是零。所以在讨论散度时，向量以及向量所通过的面积都有影响。通常我们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时才有散度存在。

当图 1·11 的水管 P 逐渐缩小，最后缩到几乎一“点”时，则若通过此点的流速 $\mathbf{v}$ 有变化，我们便说该“点”有散度存在。因此欲求向量场内一点的散度，可任意取一小体积包围此点，一般来说，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该点元面积（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，将总发散通量除以该体积并令此体积趋近于零，所得极限即称为该点的散度。例如，在图 1·13 中，欲求向量场 $\mathbf{A}$ 内一点

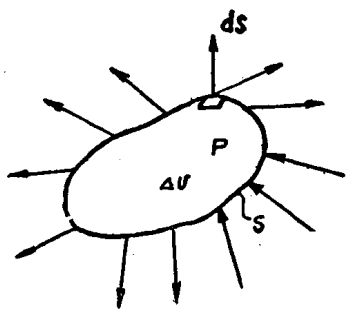
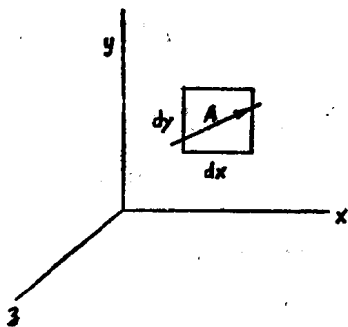
图 1·13 求向量场内一点 P 的散度

图 1·14 求向量场内一点的散度

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

$$\text{向量场 } \mathbf{A} \text{ 的散度} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s}}{\Delta V}$$

或写成

① 面积向量的方向在该面积的法线方向，对于一个封闭面来说，我们以向外的法线方向代表面积向量的指向。

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\oint_s \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s}}{\Delta v} \quad (1.13)$$

現在我們來証明，在直角坐标系中向量場 $\mathbf{A}$ 的散度是

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (1.14)$$

在图 1.14 中，相当于图 1.13 的 Δv 现在是 $dx dy dz$ 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 $(A_x + \frac{\partial A_x}{\partial x} dx) dy dz$ ，两者相差 $\frac{\partial A_x}{\partial x} dx dy dz$ 。仿此，从长方体頂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

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

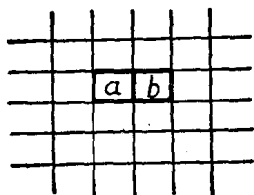
但是散度的定义是单位体积所发散的通量，因此

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

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

現在假設我們將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。当我们把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