

电磁波

S. A. 謝 昆 諾 夫 著

廖 世 靜 譯

人民邮电出版社

电 磁 波

S. A. 謝 昆 諾 夫 著

廖 世 靜 譯

人 民 郵 電 出 版 社

原 序

自 1929 以后，电磁理論的实际应用蔚然繁兴，亟需求得处理此类問題的新途徑。过去那种將每一边界值問題視为一新問題而每次独立求解的方法，因为不能調和各种不同結果，人們認為太重复而又費力，已經予以摒棄。为了求得統一、簡單、紧凑和物理解釋，一維波的理論概念被扩充到三維波，电磁場理論不再認為是与电路理論和傳輸綫理論互不相关了。

所有实际的場都是三維的；但在某些場合中可能其中兩個或甚至三个維都不重要；于是这些維可能被“积分掉”而“隱去了”；去掉兩個維的問題屬於“傳輸綫理論”，去掉三个維的問題屬於“網絡理論”。这种消除一部分或全部維数的情况类似力学中“消去坐标”的方法；这样作可能包含近似因素在內，也可能沒有采用任何近似。假如認為电路理論和傳輸綫理論都是近似的，只有場理論才正确，那就是錯誤的。假如一維問題的解能用一般的量表达出来，所得結論就可以反复应用到更一般的問題求解中去。

这种見解导致对波动現象进一步的了解；节省時間与精力；便于数学家建立对新問題直接求解的方法。广泛采用这种观点可使电磁理論的一大部分被表达成易为粗具工程知識的人們所理解的形式。

常常接触隔离傳輸系統的经典物理学者仅着重于一个关于波的概念，就是傳播速度或者較一般些的傳播常数的概念。可是通信工程師們要处理成“串”的这种系統，因而他們一直就不得不抱着更一般的态度引入第二个关于波的概念，就是阻抗的概念。物理学者集中注意于某一个具体的波，例如一个力波、或速度波、或位移波。他的开头的微分方程組可能是一阶的，且是同时包含力和速度的，但照例他消去其中的一个变数，得到另一个的二阶微分方程式，並称此为“波动方程”。于是他失去了力波与速度波彼此的独立性，不重視虽然波的傳播速度相同而兩種波在不同媒体中可能还存在的区别。正相反，工程師們用原

来的“波动方程对”来进行思考，时时記着力波与速度波彼此的独立性。在这本書里我用通信工程師們的这种态度系統的發展“場理論”。

假如要把电磁学近代理論写成四冊理想的書，那么第一冊將是一般的而不是詳盡的概論，着重比較初淺的論題。第二冊將專門討論沒有空間电荷的無源媒質中的电磁波。在这一冊中仅發电机为預給的数据，或者表現为切于“發电机区域”边界的电場强度或者表現为此区域内的給定电流。再一冊是“机电換能器”，論及机械力与电力間的相互作用。最后一冊“空間电荷波”將專論真空管内現象。本書內容仅限于符合上列第二冊內容为宜的材料。

本書希望作为教科書同时也可作参考書。实际工作的工程師們可从本書取得关于輻射、电波傳播、波导与諧振器的基本理論啟示。从事理論探討的人可从本書發現許多值得作为深入探討起点的方程。

第一章与第三章介紹向量分析和特殊函数，例如貝塞尔函数、勒讓德函数，供作簡便查考。这两章是很簡括的，因为我們只須要讀者熟悉向量的有关術語，而且多半只要讀者熟悉这些特殊函数的初步性質。第二章述及复变函数在振盪与波动理論中的应用，第四章复習一些基本概念和方程。第五章述及初步电路理論，在本章里电磁波的三維性被抑除了，所有討論都以电阻、电感和电容为参数。第六章述及自由空間里、导綫上、和波导內波的某些一般性質。本章最后数节中述及靜电学和靜磁学，但以波动理論所需为限。第七章詳盡的叙述一維波理論。第八章討論在自由空間里和波导中最簡單的几种波。第十章包括对这些波作更一般的、更系統的討論。第九章專論給定电流分佈發出的輻射以及天綫、天綫陣和电角的方向性。第十一章介紹最近的天綫理論。最后第十二章論及波导中某些阻抗突变。

本書材料足供每週六小时課程用。本書各章次序最适于通信工程和微波傳輸的學生。無綫电工程師讀者，在讀完第八章头四节之后可以接着讀第九章；对于学物理或应用数学的讀者，讀完这四节之后可以直接就讀第十章。假如教課比較少，教員可以挑选适合學生需要的章节。

作者

目 录

原 序

第一章 向量和坐标系统

1.1 向量	1
1.2 点的函数	4
1.3 散度	7
1.4 綫积分、循环量和旋度	7
1.5 坐标系统	8
1.6 梯度、散度和旋度的微分表达式	10
1.7 微分不变量和格林定理	12
1.8 其他方程式	13

第二章 有关振盪和波动的数学

2.1 复变数	14
2.2 指数函数	18
2.3 指数的和調和的振盪	20
2.4 波动	23
2.5 奈培、貝尔、分貝	25
2.6 驻波	26
2.7 阻抗概念	26
2.8 平均功率和复数功率	31
2.9 阶躍和脉冲函数	32
2.10 自然波与受迫波	39

第三章 貝塞尔函数和勒讓德函数

3.1 化偏微分方程成尋常微	
----------------	--

分方程	45
3.2 边界条件	47
3.3 貝塞尔函数	48
3.4 变型貝塞尔函数	51
3.5 $n + \frac{1}{2}$ 級的貝塞尔函数以及关联的函数	53
3.6 球諧函数与勒讓德函数	54
3.7 公式集	57

第四章 基本电磁方程式

4.1 采用 MKS 單位制的基 本方程式	61
4.2 迫佈力	72
4.3 通过封闭面的电磁流	74
4.4 电磁感应的微分方程式 和边界条件	74
4.5 电流膜、磁流膜近区的 边界条件	76
4.6 直綫电流絲、磁流絲近 区的条件	76
4.7 运动着的不連續面	76
4.8 能量定理	78
4.9 衍生电磁常数	83
4.10 介質与导体内的波	88
4.11 極化	92
4.12 無源区域中麦克斯韋方 程式的特殊形式	96

第五章 阻抗器、換能器和

網絡

- 5.1 阻抗器和網絡 99
- 5.2 換能器 107
- 5.3 疊接結構 110
- 5.4 对称 T 形網絡鏈 113
- 5.5 对称 π 形網絡鏈 114
- 5.6 連續的傳輸綫 115
- 5.7 濾波器 115
- 5.8 簡單串聯电路內的受迫振盪 118
- 5.9 簡單串聯电路內的自然振盪 121
- 5.10 簡單並聯电路內的受迫振盪 122
- 5.11 輸入阻抗函数的展开式 124

第六章 有关波动的一般理

論

- 6.0 引言 129
- 6.1 無限廣闊的均匀媒質內給定电流分佈所产生的場 130
- 6.2 电流元的場 132
- 6.3 电流元的輻射 136
- 6.4 两个电流元間的互相阻抗和互輻射功率 138
- 6.5 随時間任意变化的迫佈电流 142
- 6.6 理想导电直綫上电磁勢位的分佈 143

6.7 無限細理想导电的導綫

上电流与电荷的分佈 146

6.8 中点饋电導綫的輻射 146

6.9 两个电流环間的互阻抗; 电流环的阻抗 148

6.10 小平面环載有均匀电流时的輻射 151

6.11 傳輸綫和波导 152

6.12 反射 160

6.13 感应定理 162

6.14 等效定理 162

6.15 靜止場 163

6.16 單荷層与双荷層近区的条件 164

6.17 电流环与双磁荷層的等效 166

6.18 靜止場的感应与等效定理 167

6.19 一羣导体系統的电位和电容系数 169

6.20 用等效电容網来代表一系列导体 170

6.21 靜止場的能量定理 171

6.22 鏡像法 173

6.23 兩維靜止場 177

6.24 平行电流系統的电感量 180

6.25 复变函数与靜止場 184

第七章 傳輸理論 194

7.0 引言 194

7.1 迫佈力和电流 195

7.2 点狀源 196

7.3 能量定理	197
7.4 均匀綫上波动函数的基 本方程組	199
7.5 均匀傳輸綫的特性常数	201
7.6 輸入阻抗	204
7.7 傳輸綫用作換能器	207
7.8 点源产生的波	207
7.9 任意分佈源所产生的波	211
7.10 非均匀傳輸綫	212
7.11 用屢次近似法計算非均 匀波函数	214
7.12 略不均匀的傳輸綫	217
7.13 均匀傳輸綫上的反射	218
7.14 反射系数視為阻抗比的 函数	220
7.15 适用于傳輸綫上的感应 定理和等效定理	225
7.16 饋給阻抗以最大功率的 条件	226
7.17 阻抗的轉換与匹配	227
7.18 錐削傳輸綫和阻抗匹配	230
7.19 越过一段均匀傳輸綫的 傳輸	231
7.20 非均匀綫上的反射	235
7.21 用反射系数來構成波函 数	235
7.22 均匀傳輸綫上的自然振 盪	238
7.23 用反射系数來表示阻抗 匹配和自然振盪的条件	240
7.24 展开成部分分式	241

7.25 多型傳輸綫	243
7.26 疊接結構	245
7.27 略不均匀傳輸綫上的諧 振	246

第八章 各种波、波导和諧 振器(上)

8.0 引言	250
8.1 均匀平面波	250
8.2 橢圓極化的平面波	257
8.3 在一点上的波阻抗	258
8.4 均匀平面波在斜射入时 的反射	260
8.5 均匀柱面波	269
8.6 圆柱狀空腔諧振器	276
8.7 綫圈筒和楔形傳輸綫	282
8.8 同心圆筒中波的傳播	284
8.9 横电磁平面波 (TEM 波)	290
8.10 平行导綫上的横电磁波	292
8.11 横电磁球面波 (TEM 波)	295
8.12 同軸圆锥上的横电磁波	296
8.13 圆柱导綫上的横电磁波	300
8.14 斜交导綫上的波	302
8.15 空心金屬球內的圓磁波	304
8.16 空心球內的圆电波	308
8.17 兩維場	309
8.18 隔离理論	313
8.19 分層隔离理論	322
8.20 一个繞射問題	325
8.21 矩形截面波导管中的主	

波 ($TE_{1,0}$ 型)	325
8.22 圆形波导管中的主波 ($TE_{1,1}$ 型)	332
8.23 曲率对波传播的影响	334

第九章 辐射和绕射

9.0 引言	340
9.1 远区场	341
9.2 一般的辐射公式	343
9.3 辐射向量的计算	343
9.4 指向性	345
9.5 一个电流元的指向性	346
9.6 很小电流环的指向性能	348
9.7 垂直天线的指向性能	350
9.8 导线半径对辐射功率的 影响	351
9.9 振幅均匀分佈的直线阵 列	352
9.10 电流元端射阵列的增益	355
9.11 电流元垂射阵列的增益	358
9.12 导线上前进电流波的辐 射	359
9.13 具有不均匀振幅分配的 阵列	360
9.14 主辐射叶的立体角、形 式因数和增益	361
9.15 由强指向性辐射体组成 的垂射阵列	363
9.16 大地的影响	364
9.17 矩形阵列	364
9.18 平面电流膜与磁流膜的 辐射	365

9.19 通过吸收屏上矩形孔的 传输	366
9.20 通过圆孔的传输和圆盘 片的反射	367
9.21 通过矩形孔的传输: 斜 向射入	369
9.22 矩形波导管开口端上的 辐射	370
9.23 电角	371
9.24 菲涅尔绕射	377
9.25 正弦型分佈电流的场	380
9.26 两根平行金属线间相互 辐射功率	384
9.27 中点激发的直天线的辐 射功率	385
9.28 一对平行金属线的辐射 功率	386

第十章 各种波、波导和谐振器(下)

10.1 横磁平面波 (TM 波)	387
10.2 横电平面波 (TE 波)	392
10.3 用两个标量波函数表达 一般电磁场	394
10.4 柱形波导内的自然波	395
10.5 矩形波导中的自然波	399
10.6 圆形波导管中的自然波	402
10.7 同心圆管间的自然波	403
10.8 其他截面形状的波导管	404
10.9 近于圆形的波导管	411
10.10 横磁球面波	413
10.11 横电球面波	418

10.12 截面形狀變化的波導管	420
10.13 柱面波	421
10.14 循環波	424
10.15 平波波、柱面波和球面波之間的關聯	424
10.16 無限長導綫上的波	432
10.17 同軸導綫上的波	433
10.18 平行綫上的波	436
10.19 金屬管中受迫波	439
10.20 介質綫中的波	440
10.21 介質板面上的波	443
10.22 平面地面上的波	446
10.23 波在同心球面間的傳播	450
10.24 柱形空腔諧振器內的自然振盪	452

第十一章 天綫理論

11.1 雙錐天綫	456
11.2 關於圓錐天綫輸入阻抗與導納的一般考慮	465
11.3 天綫電流分佈和終端阻抗	466
11.4 終端阻抗逆量的計算	468

11.5 圓錐天綫的輸入阻抗和輸入導納	470
11.6 具有任意形狀和尾端影響的天綫的輸入阻抗	476
11.7 天綫上電流分佈	483
11.8 斜導綫和受不對稱激勵的導綫	487
11.9 球狀天綫	489
11.10 互易定理	493
11.11 接收天綫	496

第十二章 阻抗概念

12.1 回顧	497
12.2 兩阻抗膜間的傳播	502
12.3 關於阻抗和波導中某些不規則地方對波的反射	507
12.4 矩形波導管內橫向導綫所見的阻抗	511

習 題

問題和練習題

書中所用符號

參考文獻提要

譯名對照——譯者附

第一章 向量和坐标系統

1.1 向量

向量是例如速度、力、电场强度等这一类量的通称。它可以用圖解表示为有指向的綫段 PQ (圖 1.1)，其長度与此向量的大小成比例。

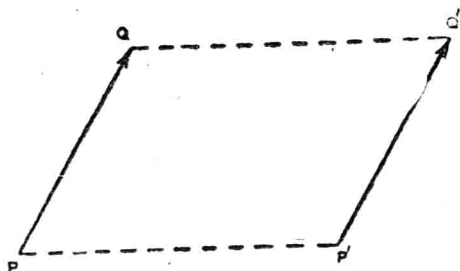


圖 1.1 相等向量

两个平行的向量 PQ 及 $P'Q'$ 如長度和指向均相同就認為是相等的。

向量相加求和的方法与其他量不同。两个向量相加的和等于以这两个向量为鄰边的平行四边形的对角綫 (圖 1.2)，即*

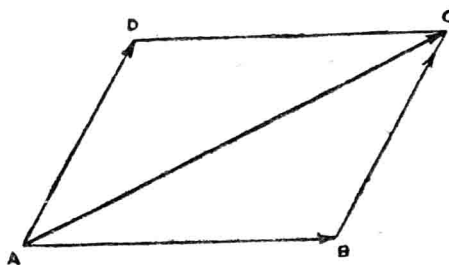


圖 1.2 两个向量相加

* 本書中对向量將不加特別的标志，假如从上下文可以分辨清楚的話；否則就在表示向量的字母頂上加一小橫。

$$AB + AD = AC.$$

兩個以上的向量相加時，以第一個向量箭頭端點作為第二個向量的起點，把所有向量串聯起來，然後從第一個向量的起點到最末一個向量的箭頭端點划一向量，就是向量的總和（圖 1.3）。

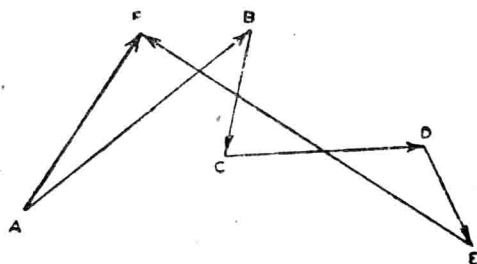


圖 1.3 幾個向量相加

按照定義有

$$AB + BA = 0, \text{ 或 } BA = -AB,$$

所以向量的相減實質上與相加相同；因此（見圖 1.4）

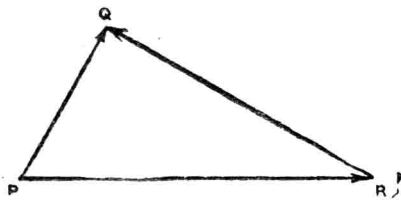


圖 1.4 向量相減

$$PQ - PR = PQ + RP = RQ.$$

可見有共同起點的兩個向量的差就是將第二個向量終點連接到第一個向量起點的向量。

兩個向量的無向積定義為它們的長度值相乘再乘以它們的夾角的余弦；寫成

$$A \cdot B = (A, B) = ab \cos \psi,$$

兩個單位向量的無向積等於兩者之間的夾角的余弦。當兩個向量的無

向积等于零时，兩者便是直交。無向积的运算服从交換律和分配律，

$$A \cdot B = B \cdot A, (A + B) \cdot C = A \cdot C + B \cdot C.$$

向量在給定的單位向量方向上的分量等于它們兩者的無向积，即这个向量在單位向量上的投影。从点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 到点 $Q(x_2, y_2, z_2)$ 的向量的指向分量，沿坐标軸的正方向取，是差 $x_2 - x_1$ 、 $y_2 - y_1$ 、和 $z_2 - z_1$ 。如 l 是这向量的長度，同时 α, β, γ 是它与坐标軸的交角，則

$$PQ_x = x_2 - x_1 = l \cos \alpha,$$

$$PQ_y = y_2 - y_1 = l \cos \beta,$$

$$PQ_z = z_2 - z_1 = l \cos \gamma.$$

任意兩個向量的無向积可以表成它們的相应指向分量的乘积的和，即

$$A' \cdot A'' = A'_x A''_x + A'_y A''_y + A'_z A''_z.$$

因此，兩個向量之間的夾角的余弦等于它們的相应指向余弦乘积之和，即

$$\cos \psi = \cos \alpha'_x \cos \alpha''_x + \cos \alpha'_y \cos \alpha''_y + \cos \alpha'_z \cos \alpha''_z.$$

向量 A 和 B 的有向积 $A \times B$ 或 $[A, B]$ 是一个向量；它同时垂直于 A 和 B ；它的指向是右旋螺釘的前进方向，假如这螺釘的旋向是从 A 經過較小的夾角到 B (圖 1.5) 的話；它的長度等于 A 与 B 的長度值相乘再乘以 A 与 B 間的夾角的正弦，也就是以 A 和 B 为鄰边的平行四边形的面积。有向积具有下式所示性質：

$$A \times B = -B \times A, (A + B) \times C = A \times C + B \times C.$$

有向积的各分量与它的構成向量的各分量之間有下列关系式：

$$(A' \times A'')_x = A'_y A''_z - A'_z A''_y,$$

$$(A' \times A'')_y = A'_z A''_x - A'_x A''_z,$$

$$(A' \times A'')_z = A'_x A''_y - A'_y A''_x.$$

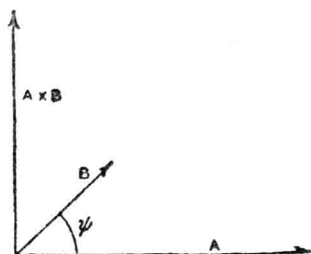


圖 1.5 有向积

离，而虛綫是圖 1.6 (a) 所示 BP 和 PA 間夾角 ϑ 的等值綫。

点函数的变动率不但有賴于点的位置，还依賴于該点变动路徑的方向。如以 ΔV 表示点函数 $V(x, y)$ 从点 $A(x, y)$ 到点 $B(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 的变动值，並以 ΔS 表示距离 AB (圖 1.7)，則比值 $\frac{\Delta V}{\Delta S}$ 便是 $V(x, y)$ 沿 AB 方向的平均变动率。当点不离开 AB 綫而趋近于 A 时这个比值的極限值称为 $V(x, y)$ 沿 AB 方向的定向导数。这个导数記为 $\frac{\partial V}{\partial s}$ 。偏导数 $\frac{\partial V}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial V}{\partial y}$ 就是沿坐标軸的定向导数。

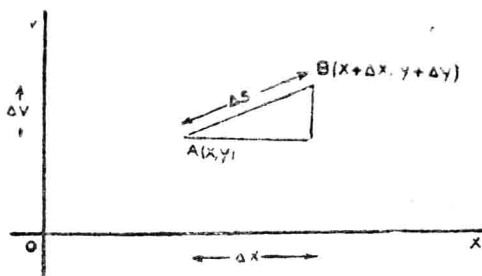


圖 1.7 表示定向增量

最大变动率出现在通过 A 点的等位綫的法綫方向上 (圖 1.8)。 V 的梯度的定义为沿这个法綫方向的下列向量：

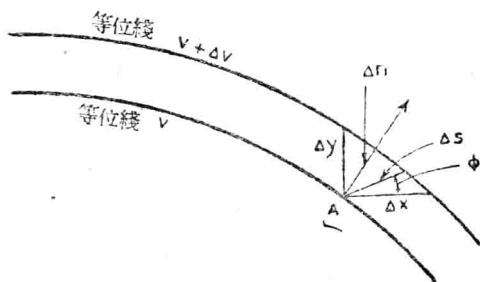


圖 1.8 表示梯度

$$\text{grad } V = \frac{\partial V}{\partial n} \bar{n},$$

其中 $\bar{n}$ 是与等位綫正交的單位向量。就無限小的曲綫三角形說，有

$$\Delta n = (\Delta s) \cos \psi,$$

$$\text{于是} \quad \frac{\partial V}{\partial n} \cos \psi = \frac{\partial V}{\partial s}. \quad (2-1)$$

所以点函数的定向导数等于它的梯度在这方向上的分量。

上述方程式自然适用于三维空间的点函数。设 α, β, γ 是过点 A 的等位面的法线三个坐标轴的交角，于是按 (1) 有

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial n} \cos \alpha, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial n} \cos \beta, \quad \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial V}{\partial n} \cos \gamma, \quad (2-2)$$

其中偏导数是梯度的指向分量，因而

$$\frac{\partial V}{\partial n} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2}.$$

法向导数的另一表达式可从方程组 (2) 分别乘以 $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 然后相加得到，即

$$\frac{\partial V}{\partial n} = \frac{\partial V}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial V}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial V}{\partial z} \cos \gamma.$$

这个方程式可以直接写出，只要想到梯度等于它的各个分量在它本身上的投影之和。

复数点函数是这样函数，它的实部和虚部都是点函数，即

$$V(x, y, z) = V_1(x, y, z) + iV_2(x, y, z).$$

我们不能说复数点函数的等位面，因为它的实部有一族等位面，它的虚部又有一族等位面，它的绝对值也有一族等位面，还有其他等等。复数点函数有相同相角的点的轨迹

$$\psi = \tan^{-1} \frac{V_2(x, y, z)}{V_1(x, y, z)}$$

称为等相（位角）面，在划分平面波、柱面波、和球面波时要用到等相面。复数点函数的梯度的定义是一个复数向量，其各个分量是这函数的各个偏函数。

有向点函数是一个向量，它的指向分量是普通的点函数。

1.3 散度

一向量 $F(x, y, z)$ 通过面 S 的通量的定义为面积分

$$\Phi = \iint F_n dS,$$

其中 F_n 是正交于积分面的分量。向量通过單連通封閉曲面 S 的外出通量除以 S 面所包的体积 v 所得的值称为 F 的平均散度。当封閉面 S 收縮成一个点时，平均散度的極限值称为 F 在該点上的散度，写成

$$\operatorname{div} F = \lim \frac{\iint F_n dS}{v}, \text{ 当 } S \rightarrow 0.$$

把封閉面 S 所包的体积 v 划分为許多小細胞体积元，我們可以观察到：越过 S 面的 F 的总通量等于越过各个小細胞体积分界面的通量之和，相鄰兩細胞公共分界部分上的通量对于总通量沒有影响。由于通过每一个細胞体积分界面的通量是 $\operatorname{div} F dv$ ，我們得到

$$\iint F_n dS = \iiint \operatorname{div} F dv. \quad (3-1)$$

面散度可以比照体积散度来下定义，即

$$\operatorname{div}' F = \lim \frac{\int F_n ds}{S}, \text{ 当 } s \rightarrow 0,$$

其中 s 是面 S 的分界綫。至于綫散度，就是尋常的导数。

1.4 綫积分、循环量和旋度

向量 F 沿路徑 AB (圖 1.9) 的綫积分的定义为这向量的切綫分量 F_s 的积分 $\int_{(AB)} F_s ds$ 。假如 F 代表力，这个綫积分就表示力 F 在沿着 AB 运动的質点上所做的功。假如路徑曲綫是閉合的，这个积分便称为循环量。調整無限小閉合环的方位使沿着它的循环量为最大，此时环上單位面积的循环量称为 F 的旋度 $\operatorname{curl} F$ ，它是一个向量，垂直于环所在的平面。旋度与循环量的正指向的关系如圖 1.10 所示。

設由簡單閉合曲綫圈定一曲面 S 。將此曲面分为許多小面积元，

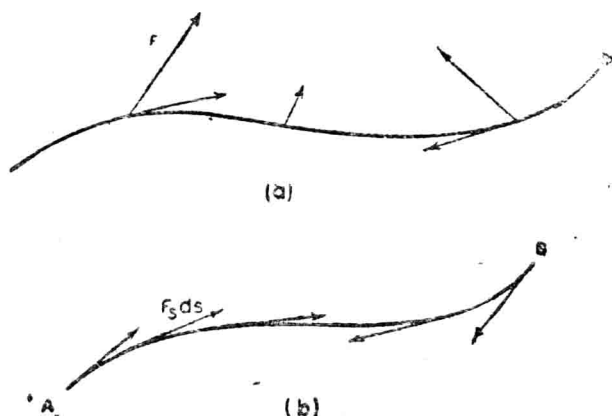
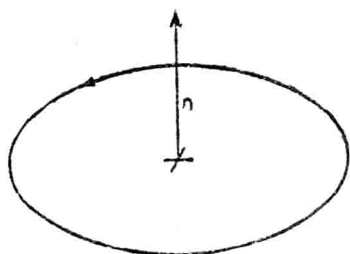


圖 1.9 說明綫積分

圖 1.10 F 的旋度和 F 的
循環量正指向間的关系

我們可以觀察到：沿着面 S 的边界綫所取 F 的循環量等于沿着各小面积元边界所取循環量之和，因为相鄰兩面积元公共边界部分对于总循環量的貢獻互相抵消。由于沿着每一面积元分界綫的循環量是 $\text{curl}_n F dS$ ，我們得到

$$\int F_s ds = \iint \text{curl}_n F dS. \quad (4-1)$$

1.5 坐标系統

实用中常用的坐标系統有**直角坐标**、**柱面坐标**和**球面坐标**；空間中一点 P 在这些坐标系中分別用 (x, y, z) 、 (ρ, φ, z) 和 (r, θ, φ) 表示。这些坐标的意义可从圖 1.11 上看出； x, y, z 是到三个互成垂直的平面的距离； ρ 是到 z 軸的距离； r 是到原点的距离；“極角” θ 是半徑 r 与 z 軸間的夾角；“經度” φ 是 xz 平面与由 z 軸和 P 点所定平面間的夾角。

在一般坐标系中，点 $P(u, v, w)$ 是由三个面