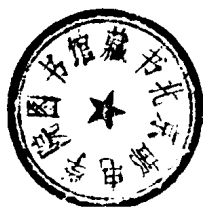


0284380

电 磁 学

[美] J. D. 克劳斯著

安绍董译



21113000827698

人民邮电出版社

ELECTROMAGNETICS

John D Kraus

内 容 提 要

本书共 14 章，系统地论述电磁场的基本理论和它在电子学、电磁波辐射及电磁波传播方面的应用。前七章是较浅的场论，包括静电场、磁场、恒定电流和时变场等。后七章是前七章的延续，包括平面波、传输线、波导、天线等的基本理论。本书可作大学无线电系学生及无线电技术人员的参考书。

电 磁 学

[美] J. D. 克劳斯著

安绍萱译

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 1979 年 3 月北京第一版
印张：20 24/32 页数：332 1979 年 3 月北京第一次印刷
字数：550 千字 印数：1—80,800 册

统一书号：15045·总2256-无653

定价：2.35 元

目 录

第一章 静电场(一)	1
1-1 量纲和单位	1
1-2 基本单位和导出单位	1
1-3 量纲分析	2
1-4 电荷	3
1-5 点电荷之间的力和库仑定律	3
1-6 电场强度	5
1-7 若干个电荷的电场和场的迭加原理	7
1-8 标量电位	8
1-9 标量电位——电场的线积分	11
1-10 标量积或点积	14
1-11 电场线和等位线的关系	15
1-12 电荷密度和电荷的连续分布	16
1-13 分布电荷的电位和电位的迭加原理	17
1-14 梯度	20
1-15 用直角坐标表示的梯度	23
1-16 电通量	26
1-17 通量线	29
1-18 通量管	30
1-19 闭合面的电通量。高斯定律	31
1-20 单层球壳电荷	34
1-21 双层同心球壳电荷	37
1-22 n 层球壳电荷和体分布电荷	38
1-23 导体和感应电荷	41
1-24 导电球壳	41
1-25 导电矩形空腔和导电平板	44
1-26 导体表面的边界关系	48
习题	49

第二章 静电场(二)	52
2-1 电偶极子和电偶极矩	52
2-2 电介质和电容率	54
2-3 介质的极化	56
2-4 边界关系	59
2-5 边界关系表	63
2-6 仿真电介质	64
2-7 电容器和电容	66
2-8 孤立球的电容	67
2-9 双层同心球壳电容器	68
2-10 平行板电容器	68
2-11 电容器里电介质的作用	70
2-12 电介质强度	72
2-13 电容器里的能量	73
2-14 静电场里的能量密度	74
2-15 简单电荷组态的电场	76
2-16 点电荷或球形导体的电场	76
2-17 两个等值异号点电荷(电偶极子)的电场	78
2-18 两个等值同号点电荷的电场	78
2-19 许多个点电荷和球形导体的电场	81
2-20 有限长线电荷的电场	81
2-21 无限长线电荷的电场	82
2-22 无限长圆柱体电荷	83
2-23 无限长同轴传输线	83
2-24 两无限长平行线电荷	85
2-25 无限长二线传输线	88
2-26 无限长单线传输线。镜像法	89
2-27 静电场的场图描绘。场元	90
2-28 90° 和 270° 的转角	98
2-29 通量密度 \mathbf{D} 的散度	99
2-30 麦克斯韦散度方程	102
2-31 散度举例	103

2-32	散度定理	104
2-33	电容器里的 \mathbf{D} 和 \mathbf{P} 的散度	105
2-34	拉普拉斯算子和泊松及拉普拉斯方程式	108
2-35	孤立导电球体	109
2-36	高斯定律与反平方定律的依从关系	111
	习题	113
第三章	恒定电流	121
3-1	引言	121
3-2	导体与绝缘体	121
3-3	电流	122
3-4	电阻和欧姆定律	123
3-5	功率和焦耳定律	123
3-6	电路	124
3-7	电阻率和电导率	126
3-8	电导率表	128
3-9	电流密度和欧姆定律的微分形式	129
3-10	克希荷夫电压定律, 电位与电动势的区别	131
3-11	电流管	139
3-12	克希荷夫电流定律	140
3-13	\mathbf{J} 的散度和电流的连续性	141
3-14	导体与绝缘体边界上的电流和场	143
3-15	导体与导体边界上的电流和场	146
3-16	电流场图和简单形状导体的电阻、导体元	148
3-17	导电媒质的拉普拉斯方程	153
	习题	155
第四章	恒定电流的静磁场	160
4-1	引言	160
4-2	载流导线间的力	161
4-3	作用于电流元的力	162
4-4	单位电流元的力——磁通密度 B	163
4-5	由电流分布产生的通量密度	164
4-6	磁通量 ψ_m	166

4-7	闭合表面上的磁通	168
4-8	由一无限长直导线产生的磁通密度	168
4-9	两平行直导线间的力	170
4-10	由电流环产生的磁通密度	171
4-11	矢量积或叉积	173
4-12	用矢量符号表示的磁场公式	176
4-13	作用于环路的转矩。磁矩	178
4-14	螺线管	181
4-15	电感器和电感	183
4-16	几何形状简单的电感器的电感	185
4-17	安培定律与 \mathbf{H}	188
4-18	应用于导电媒质的安培定律, 麦克斯韦方程	191
4-19	静磁位 U 和磁通势 F	192
4-20	场元和磁导率	197
4-21	电感器里的能量	199
4-22	静磁场里的能量密度	200
4-23	旋度	201
4-24	$\nabla \times \mathbf{H}$	207
4-25	旋度举例	208
4-26	麦克斯韦第一旋度方程	214
4-27	含有 ∇ 的各种运算的总结	214
4-28	散度与旋度的比较	215
4-29	矢量位	218
4-30	静电场与磁场的比较	224
	习题	226
第五章	铁磁性物质的静磁场	232
5-1	引言	232
5-2	磁棒和磁极	232
5-3	磁性物质	233
5-4	相对磁导率	233
5-5	磁棒间的力与库仑定律	235
5-6	磁偶极子和磁化	237

5-7 均匀磁化铁棒和等值螺线管	239
5-8 磁矢量 B , H 和 M	242
5-9 边界关系	254
5-10 磁场的边界关系表	258
5-11 铁磁体	259
5-12 磁化曲线	260
5-13 磁滞现象	265
5-14 磁铁里的能量	268
5-15 永久磁铁	270
5-16 永磁材料表	271
5-17 去磁	272
5-18 磁路、磁阻和磁导	273
5-19 磁场场图的描绘。磁场场元	278
5-20 电的、磁的和电流的场图比较	283
5-21 铁与空气边界面附近的电流场	286
5-22 没有间隙的磁路	290
5-23 具有空气隙的磁路	292
5-24 气隙的磁力	294
5-25 具有间隙的永久磁铁	295
5-26 含有极化强度和磁化强度的电场和磁场关系式的比较	296
习题	297
第六章 电场和磁场里的带电粒子	302
6-1 引言	302
6-2 静电场里的带电粒子	302
6-3 静磁场里的带电粒子	305
6-4 阴极射线管	307
6-5 回旋加速器	311
6-6 常见粒子的电荷和质量表	314
习题	314
第七章 时变电场和时变磁场	316
7-1 引言	316
7-2 法拉第定律	316

7-3	从法拉第定律推导的麦克斯韦方程, 积分形式	320
7-4	在磁场里运动的导体	321
7-5	感应的一般情形	323
7-6	举例	324
7-7	电子感应加速器	329
7-8	斯托克斯定理	333
7-9	从法拉第定律推导的麦克斯韦方程, 微分形式	335
7-10	串联回路(只含电感)	336
7-11	串联回路(只含电阻)	337
7-12	串联回路(含有电阻和电感)	338
7-13	串联回路(含有电阻、电感和电容)	340
7-14	电感器里的能量	341
7-15	互感和自感	342
7-16	变压器	347
7-17	铁磁性物质的交流性质	348
7-18	涡流	351
7-19	磁场测量。磁通计	351
7-20	位移电流	354
7-21	从安培定律导出的麦克斯韦方程, 完整的表示式	356
7-22	电介质滞后现象	358
7-23	边界关系	361
7-24	场的普遍公式	362
7-25	电场和磁场关系式的比较	364
	习题	365
第八章	场论和路论间的关系。麦克斯韦方程组	368
8-1	引言	368
8-2	路和场的理论的应用	369
8-3	串联电路、场论和路论的比较	371
8-4	作为路方程一般化形式的麦克斯韦方程组	374
8-5	运用于自由空间的麦克斯韦方程组	378
8-6	简谐变化场的麦克斯韦方程组	378
8-7	麦克斯韦方程组表	379

习题	381
第九章 电介质中的平面波	383
9-1 引言	383
9-2 平面波和波动方程	383
9-3 波动方程的解	387
9-4 波动方程的解的表	391
9-5 相速度	392
9-6 折射率	394
9-7 群速度	395
9-8 电介媒质的阻抗	398
9-9 传输线元的阻抗	401
9-10 两个从相反方向行进的平面波。驻波	403
9-11 行波里的能量关系	411
9-12 坡印亭矢量	411
9-13 驻波里的能量关系	419
9-14 波的偏振	422
9-15 交叉场	426
习题	430
第十章 导电媒质里的平面波	434
10-1 导体和电介质	434
10-2 导电媒质里的波动方程	438
10-3 渗透深度	440
10-4 弛豫时间	443
10-5 导电媒质的阻抗	444
10-6 波在边界上的反射和透射	448
10-7 终止波	452
10-8 导电媒质里的坡印亭矢量	455
10-9 坡印亭矢量在电路里的应用	458
10-10 波动方程的一般形式	460
习题	462
第十一章 传输线	464
11-1 引言	464

11-2	同轴传输线, 二线传输线和无限平面传输线	465
11-3	无限长均匀传输线	466
11-4	路量和场量的比较	472
11-5	特性阻抗的确定	474
11-6	终接以负载的均匀传输线	478
11-7	传输线圆图	483
11-8	四分之一波长变换器	489
	习题	491
第十二章	波导	495
12-1	引言	495
12-2	无限大平行平面传输线里的 TE 波	495
12-3	空心矩形波导	502
12-4	其它形状的空心波导	520
12-5	频率低于截止频率时的衰减	522
12-6	频率高于截止频率时的衰减	524
12-7	行进方向与平面边界平行的波	528
12-8	单导线开式波导	532
	习题	534
第十三章	天线	538
13-1	引言	538
13-2	传播时间和波长	538
13-3	迟后位	539
13-4	小环形天线	541
13-5	短偶极子天线	545
13-6	短偶极子的辐射电阻	556
13-7	方向性和增益	559
13-8	接收天线和天线孔径	562
13-9	天线和终接以阻抗的传输线	564
13-10	天线的形状和阻抗	567
13-11	接收天线与发射天线	570
13-12	天线的网络表示法	573
	习题	575

第十四章 边界值问题	578
14-1 引言	578
14-2 用直角坐标系表示的波动方程的解	579
14-3 用圆柱坐标系表示的波动方程的解	580
14-4 用球面坐标系表示的波动方程的解	582
14-5 例题 1 两导电平板间的导电片	586
14-6 例题 2 同轴线	592
14-7 例题 3 均匀场里的不带电圆柱导体	597
14-8 例题 4 均匀场里的介质球	600
14-9 保角变换 引言	603
14-10 例题 5 无限大扁平板的缝隙	611
14-11 其它保角变换。 $w=c^z$ 的变换	613
习题	618
附录	621
1 单位表	621
2 场图作图方法	626
3 三角函数公式	632
4 双曲线函数公式	633
5 对数函数公式	633
6 微量的近似公式	634
7 级数	634
8 二次方程的解	635
9 矢量恒等式	635
10 用直角坐标、圆柱坐标和球面坐标表示的梯度、散度、旋度和拉普拉斯	635
11 贝塞尔函数	637
12 贝塞尔函数的递推公式	643
13 球面贝塞尔函数	643
14 勒让德函数	644
15 电介质材料表	647
参考资料	648

第一章 静 电 场 (一)

1-1 量纲和单位

我们量度某种事物以前，必须先确定它的量纲，并且要先确立一些标准单位或参考单位，借以把该事物的量用数值表示出来。

量纲能表达某些事物的物理特性，例如：长度、质量、时间、速度和力等都是量纲^①。量纲中的长度、质量、时间和电荷被取作基本量纲，因为其它各量纲都能用这四个量纲来表示。我们用字母 L 、 M 、 T 和 Q 分别表示长度、质量、时间和电荷的量纲。其它量纲都是由此推演出来的，即所谓导出量纲。例如，面积是导出量纲，它是长度的平方 (L^2)。其它如速度的量纲是 L/T ，力的是 ML/T^2 ，等等。

单位是标准或参考基准。有了单位，量纲才能用数值表示，例如，米就是一种单位，长度的量纲可用米表示。公斤是另一种单位，质量的量纲可用公斤表示等等。例如我们说：某一铁棒长为 2 米，质量为 5 公斤等。

1-2 基本单位和导出单位

表示基本量纲的单位叫作基本单位。在米、公斤、秒或乔治(Giorgi)制(缩写作 MKS 制)中，基本单位是米，公斤和秒。再取库作第四个基本单位组成全部基本单位，这就是米、公斤、秒、库制(MKSC 制)。这四个基本单位的定义是：

米：铂铱合金棒国际标准尺两标点间的长度，

千克：铂铱合金块国际标准公斤的质量，

秒：一个平均太阳日的 $1/86400$ ，

① “量纲”这一名词，常用作“量”的同义词。

库：1 国际安-秒为 1 库。一个国际安的电流是指稳定地通过硝酸银溶液，每秒能析出 1.11800×10^{-6} 公斤银的电流。

除了质量、长度、时间和电荷以外，其它各量纲的单位都叫做二次单位或导出单位，它们都是从上述基本单位推导出来的。

在本书里，我们采用 MKSG 合理化单位制。合理化单位制的优点是：虽在某些关系式里会出现因子 4π ，但却不出现在麦克斯韦方程里。我们在附录里，给出了较完整的 MKSG 单位制的关系表，其中包括各个物理量（基础、机械、电和磁）的量纲，对每个物理量都列有符号、说明、MKSG 单位、等值单位和基本量纲等项目。

建议读者当读到新的量和单位时，最好先看一看这个表，并希望记住各量的量纲。

1-3 量纲分析

验证方程式是否正确以前，必须先看一看它的量纲是否平衡。例如，有某一假想公式

$$M/L = DA \quad (1-1)$$

式中， M = 质量

L = 长度

D = 密度（单位体积的质量）

A = 面积

(1-1) 式左边的量纲符号是 M/L ，右边的量纲符号是

$$\frac{M}{L^3} L^2 = \frac{M}{L}$$

方程式 (1-1) 两边的量纲都是单位长度的质量，所以这一方程式的量纲是平衡的。但还不能说假想关系式 (1-1) 就是正确的了。这是因为量纲平衡只是关系式成立的必要条件而不是充分条件。这种验证方程式的方法有助于分析方程是否达到量纲的平衡。

量纲分析也可用来决定某物理量的量纲。例如，为了决定力的量纲，我们可引用牛顿第二定律，即

$$\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$$

由于加速度的量纲是[长度/(时间)²]，所以力的量纲是

$$\text{质量} \times \text{长度}/(\text{时间})^2$$

用量纲符号表示，则为

$$\text{力} = \frac{ML}{T^2}$$

1-4 电 荷

电荷是 MKSC 制的第四个基本量纲。质量只有正质量一种，而电荷却有正和负两种。一个电子所带的电荷是负电荷的最小自然单位，等于 -1.6×10^{-19} 库。把电子的电荷符号记作“负”，是任意的，是定义的结果。

一个中性的原子，含有一个或若干个电子（带负电荷的）和一个重得多的、带有等值正电荷的原子核。正常原子所带的总电荷（净电荷）为零。如果移去一个或若干个价电子，原子即被电离。移去一个电子的电离原子，带有净电荷 $+1.6 \times 10^{-19}$ 库，移去两个电子的电离原子，带有净电荷 $+3.2 \times 10^{-19}$ 库，余类推。负电荷由电子组成，而正电荷则由缺少电子的原子组成。因而，带有多余电子的物体带负电荷，而缺少电子的物体带正电荷。

1-5 点电荷之间的力和库仑定律

一组原子或电子的带电粒子，占有一个有限^①空间，甚至单独一个电子也有一定的大小。通常为了方便起见，常把带电粒子集中的小区域看作是一个点电荷，只要带电粒子所占体积与其它相关距离比较小到可忽略不计，这种假设就不致引起显著误差。

1785年库仑首先进行了静电的基础试验，试验所用的一些小带电体均可以看作为点电荷。试验结果如库仑定律所述：两个点电荷

① 所谓“有限”就是指“不是无限小”

Q_1 和 Q_2 间相互作用的力与两电荷的乘积成正比，与电荷间的距离的平方成反比，即

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ 牛顿} \quad (1-2)$$

式中 k 是一个比例常数。因为表示式有距离反平方的关系，所以这个

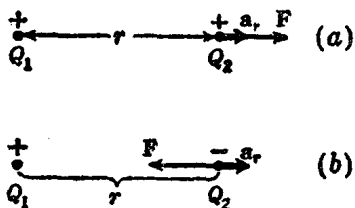


图 1-1

- (a) 两个符号相同的点电荷；
(b) 两个符号相反的点电荷

定律又叫作反平方定律。力的方向在两电荷的连接线上。如电荷符号相同，则作用力向外（斥力），如图 1-1 a 所示；如电荷符号相反，作用力向内（引力），如图 1-1 b 所示。

在 MKSG 单位制中，比例常数为

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

式中 ϵ 是电荷所在媒质的电容率^①。用 1-2 节的量纲分析，可求得 ϵ 的量纲是单位长度的电容量^②，或用量纲符号表示为： $T^2 Q^2 / M L^3$ 。在 MKSG 单位制里，电容率的单位是法/米。真空的电容率以 ϵ_0 表示，其值为：

$$8.85 \times 10^{-12} \simeq \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ 法/米}$$

空气的电容率近似等于真空的电容率 ϵ_0 。

力是一个矢量，它既有大小又有方向。本书里用黑体字表示矢量。例如，矢量的力用 \mathbf{F} 表示，它的标量用斜体字 F 表示，即 $F = |\mathbf{F}|$ 。重新把 (1-2) 式写成矢量方程的形式，并代入 k 值，得

① 又名介电常数。关于电容率的进一步讨论见 2-2 节。也可用比电容来表示电容率。

② 关于电容量的讨论，见 2-7 节。读了 2-26 节场元电容器这一部分以后，对 ϵ 的意义就更为清楚一些。

$$\mathbf{F} = \mathbf{a}_r \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon_r r^2} \quad (1-3)$$

式中, \mathbf{F} = 力 (牛顿)①

\mathbf{a}_r = 电荷连接线方向的单位矢量 (见图 1-1) (即 $\mathbf{F} = \mathbf{a}_r F$)

Q_1 = 电荷 1 (库)

Q_2 = 电荷 2 (库)

ϵ = 媒质的电容率 (法/米)

r = 点电荷间的距离 (米)

这是库伦定律的 MKSC 合理化制完整矢量表示式。让我们通过下面的例题来说明如何应用这一定律。

例题 空气中有一负点电荷 -10^{-6} 库, 位于直角坐标系的原点上, 另一负点电荷 -10^{-4} 库, 位于正 x 轴上距原点 50 厘米处。求作用于第二个点电荷的力。

解: 由库仑定律知, 作用力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{i} \frac{(-10^{-6})(-10^{-4})}{4 \pi \times 0.5^2 \times 10^{-9} / 36 \pi} = +\mathbf{i} 3.6 \text{ (牛顿)}$$

也就是说作用于第二个点电荷的力是 3.6 牛顿, 并指向 x 轴正方向。

1-6 电场强度

试在极坐标系的原点上置一正点电荷 Q_1 。如把另一正点电荷 Q_2 放到 Q_1 的附近, Q_2 就要受到一个力的作用。这个力沿径向朝外。 Q_2 越趋近于 Q_1 , 作用力就越大。我们说 Q_1 位于场的中心, 场就是会受到力的作用的区域。这个场的性质用矢量图表示, 则如图 1-2, 各矢量的长度与作用于该点的力成正比。

将(1-3)式除以 Q_2 , 可把方程式写成单位电荷受力的量纲形式:

$$\frac{F}{Q_2} = \frac{\text{力}}{\text{电荷}}$$

以量纲符号表示, 则为

① 使 1 公斤质量产生 1 米/秒²的加速度的力为 1 牛顿。1 牛顿 = 10⁵达因 = 0.102 千克(重)

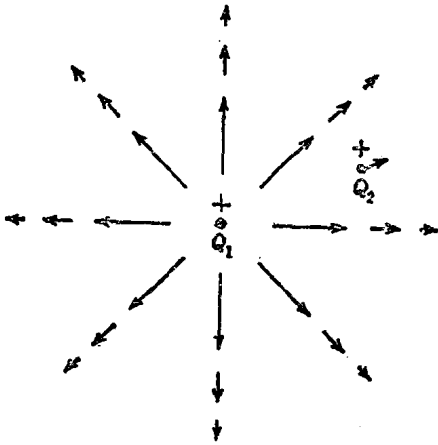


图 1-2 点电荷 Q_1 与其电场的矢量的大小和方向

$$\frac{ML}{T^2Q}$$

如果 Q_2 是带正电的试验电荷，则单位电荷所受的力就定义为电荷 Q_2 所在点的电场强度 E 。从式 (1-3) 知

$$E = \frac{F}{Q_2} = a_r \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-4)$$

式中， Q_2 为正试验电荷。在 MKSC 单位制里，电场强度的单位为牛顿/库。在讨论电位 (1-8 节) 以后，我们还会知道电场强度的另一个等值单位是伏/米。

从 (1-4) 式知， Q_1 位于自己所形成的电场的中心，电场强度 E 与 Q_1 成正比，与 r^2 成反比。电场强度为一矢量，它和力的方向相同，但大小及量纲却不相同。

在 (1-4) 式中并不规定试验电荷 Q_2 为 1 库，它可以是任意值，因为只要引入的试验电荷不影响原来的电场，那么，力 (牛顿) 和试验电荷 (库) 的比值就与电荷的大小没有关系。1 库的电荷是一个远远大于一般静态场问题中实际可能遇到的数量级。例如两个 1 库的正电荷，相距 1 米时，其斥力按库仑定律计算，应为 9×10^9 牛顿 (一百万吨)。这是一个巨大的力。若使用如此大的试验电荷，将会完全扰乱原来待测场的电荷分布，因此必须选用小的试验电荷。事实上，试验电荷应当小到它不致显著扰乱待测场的电荷分布的程度。

如果把试验电荷取得足够小，使它达到微量值，那么，试验电荷 ΔQ 所在点的电场强度的最精确数值应等于在试验电荷趋于零的极限情形下、作用于试验正电荷 ΔQ 的力 ΔF 与此电荷的比值：

$$E = \lim_{\Delta Q \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta Q} \quad (1-5)$$