

静电学和电动力学

下 册

李 正 武 著

科学出版社

静电学和电动力学

下册

〔美〕W. R. 斯迈思 著

戴世强 译

科学出版社

1982

内 容 简 介

本书系统地介绍宏观电动力学的基本原理和方法。全书共分十四章，前五章阐述静电学的基本概念和方法；第六章至第十章介绍电流、磁场及其相互作用；第十一章至第十三章阐述电磁辐射问题；最后一章简述狭义相对论和带电粒子的运动。此外，每章末尾还汇集了大量习题。中译本分上、下两册出版，下册包括原书第六章至第十四章的内容。

本书可供理工科大学有关专业的高年级学生、研究生和有关科技人员参考。

W. R. Smythe

STATIC AND DYNAMIC ELECTRICITY

McGraw-Hill, 1968

静电学和电动力学

下 册

〔美〕W. R. 斯迈思 著

戴世强 译

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1982年8月第一次印刷 印张：16 1/4

印数：0001—7,800 字数：369,000

统一书号：13031·1976

本社书号：2682·13—3

定价：2.50 元

目 录

第六章 电流	355
6.00 电流密度;连续性方程.....	355
6.01 电动势	356
6.02 欧姆定律;电阻率.....	358
6.03 电流的加热效应	359
6.04 分布介质中的稳恒电流	360
6.05 普遍定理	362
6.06 二维电流	363
6.07 宽度有突变的长条带	365
6.08 三维电流	369
6.09 电极组;两个球;远隔电极	370
6.10 实心球中的源和汇;球形泡.....	371
6.11 实心导体柱	373
6.12 地壳电阻	375
6.13 薄曲面中的电流	377
6.14 球壳上的电流分布	377
6.15 旋转曲面	380
6.16 电阻的上下限	381
6.17 各向异性介质中的电流;地层.....	383
6.18 矢势;圆柱中绕球的电流流动.....	385
6.19 空间电荷电流;恰尔德方程.....	388
习题	390
参考资料	397

第七章 电流的磁相互作用	398
7.00 用磁矩给出的“安培”的定义	398
7.01 磁感应强度和磁导率	399
7.02 磁矢势; 均匀磁场	401
7.03 静磁学的唯一性定理	403
7.04 矢势的正交展开	404
7.05 柱坐标下的矢势	406
7.06 球坐标下的矢势	408
7.07 用轴上的磁感应强度表示的矢势	409
7.08 轴对称磁感应管的方程	410
7.09 双线电路的矢势和磁场	411
7.10 圆环的矢势和磁场	412
7.11 球壳中电流的磁场	415
7.12 球壳中的球带电流	417
7.13 用球调和函数表示的圆环的磁场	419
7.14 毕奥-萨伐尔定律; 直导线的磁场	420
7.15 螺线管的磁场	421
7.16 导体棒中圆柱形孔内的磁场	424
7.17 导体柱壳内直线电流的磁场	426
7.18 作用在磁场中的电路上的力	427
7.19 电路间作用力的实例	429
7.20 矢势和磁化强度	431
7.21 磁边界条件	433
7.22 应用 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{H}$ 的实例	436
7.23 电流关于平面的镜像	436
7.24 晶体中的磁感应强度和磁导率	438
7.25 二维磁场	438
7.26 双线电路的磁屏蔽	439

7.27	二维电流镜像	441
7.28	磁动势和磁场强度	443
7.29	磁路;圆环	445
7.30	磁路中的空气隙	446
7.31	外铁型变压器中的磁场	447
7.32	开槽磁极部;有效空气隙	451
	习题	455
	参考资料	465
第八章	电磁感应	467
8.00	法拉第感应定律	467
8.01	两电路的相互作用能	469
8.02	磁场中的能量	471
8.03	互感	472
8.04	的边界条件	473
8.05	简单电路的互感	474
8.06	圆形线环的互感	475
8.07	可变互感	477
8.08	自感	479
8.09	自感的计算;细导线	480
8.10	圆形线环的自感	481
8.11	螺线管的自感	483
8.12	双股引线的自感	484
8.13	n 个电路的能量	486
8.14	磁场中的应力	487
8.15	静磁场中导磁物体的能量	488
	习题	489
	参考资料	495
第九章	磁性	496

9.00	顺磁性和抗磁性	496
9.01	磁化率	497
9.02	晶体的磁学性质	498
9.03	均匀磁场中的晶体球	499
9.04	铁磁性	500
9.05	磁滞;永久磁性	502
9.06	永久磁性的本质	503
9.07	均匀磁化;等效电流壳	504
9.08	磁化球和磁化圆柱;磁极	505
9.09	永久磁体上的边界条件	507
9.10	均匀磁场中的球形永久磁体	507
9.11	马蹄形磁体的起重能力	509
9.11.1	柱形磁体的磁场	511
9.12	磁针	514
	习题	516
	参考资料	520
第十章	涡电流	521
10.00	分布导体中的感应电流	521
10.01	涡电流的矢势的解	523
10.02	稳态趋肤效应	524
10.03	导体管上的趋肤效应	526
10.04	实心导体柱上的趋肤效应	528
10.05	球坐标下的轴对称解	531
10.06	交变磁场中的导体球	533
10.07	交变磁场中球所吸收的功率	536
10.08	导体球中的瞬变现象	537
10.09	薄平板中的涡电流	539
10.10	用镜像法求得的无限大薄平板中的涡电	

流	541
10.11 作用在旋转的小电流环或磁偶极子上的扭矩	543
10.12 旋转的磁偶极子产生的涡电流	545
10.13 导体薄平板对圆形线圈的屏蔽	548
10.14 磁隙中的旋转的导体平板	550
10.15 磁隙中的旋转的导体圆盘	554
10.16 球壳中的球带涡电流	559
10.17 交变磁场螺线管空隙中的球壳	563
10.18 球壳中的一般涡电流问题	565
10.19 作用在磁极之间的旋转球壳上的扭矩	566
10.20 薄柱壳中的涡电流	569
10.21 旋转的有限长柱壳中的涡电流	571
10.22 涡电流衰减	576
10.23 厚柱壳产生的瞬态屏蔽	576
习题	580
参考资料	589
第十一章 平面电磁波	591
11.00 麦克斯韦方程	591
11.01 传播方程;电磁势;规范;赫兹矢量	592
11.02 坡印廷矢量	595
11.03 不带电均匀电介质中的平面波	596
11.04 各向异性介质中的平面波波速	598
11.05 各向异性介质中的射线面和偏振	600
11.06 平面波的能量、压力和动量	602
11.07 平面波的折射和反射	604
11.08 反射波和折射波的强度	606
11.09 频率;波长;椭圆偏振	609

11.10	全反射	611
11.11	均匀导体中的电磁波	613
11.12	各向同性均匀导体中的平面波	614
11.13	自导体表面的反射	615
11.14	柱形理想导体上的平面波	617
11.15	介质的固有阻抗	619
11.16	间断面上的反射;匹配段	623
11.17	复坡印廷矢量	624
11.18	非理想导体上的近平面波;勒谢尔线	625
11.19	群速度	628
	习题	629
	参考资料	635
第十二章	电磁辐射	637
12.00	辐射问题	637
12.01	球面电磁波;偶极辐射和四极辐射	638
12.02	推迟势	643
12.03	直线天线的辐射	645
12.04	直线天线的远距辐射	650
12.05	行波的辐射	652
12.06	锥形传输线	653
12.07	双锥形天线	656
12.08	天线阵	660
12.09	大地效应	665
12.10	解的唯一性	665
12.11	球坐标下波动方程的解	666
12.12	平面波的勒让德多项式展开式	667
12.13	均匀电流环的辐射;磁偶极子	669
12.14	导体球的自由振荡	671

12.15	电介质球或导体球的强迫振荡	673
12.16	柱坐标下传播方程的解	677
12.17	平面波的圆柱调和函数展开式	678
12.18	从平面导体屏内的孔的辐射	680
12.19	从导体平面内的矩形孔的衍射	683
12.20	衍射问题中的正交函数;同轴线	686
	习题	689
	参考资料	702
第十三章	波导管和谐振腔	704
13.00	中空柱形管中的波	704
13.01	中空波导管中的衰减	708
13.02	矩形波导管	710
13.03	矩形波导管的格林函数	713
13.04	波导的小孔激发;同轴孔	719
13.05	填充两种介质的矩形波导管	722
13.06	矩形波导管中的薄膜片	724
13.07	用于改进近似解的变分法	729
13.08	用变分法求得电感性膜片的电纳	731
13.09	圆形波导管	737
13.10	圆形波导管的格林函数	740
13.11	圆形波导管的线环激发	743
13.12	圆形波导管的孔口激发	745
13.13	同轴波导管	747
13.14	同轴线中的间断平面	748
13.15	任意截面的波导管;椭圆形波导管	750
13.16	谐振腔;简正模式	754
13.17	谐振腔的独立振荡模式	756
13.18	简正模式的能量和阻尼;品质因子	757

13.19	柱形谐振腔的简正模式	759
13.20	矩形谐振腔的性质	762
13.21	正圆柱形谐振腔的性质	763
13.22	复连通柱形谐振腔	765
13.23	同轴电缆谐振器	766
13.24	球形谐振腔的简正模式	767
13.25	非理想谐振腔的简正模式	769
13.26	外来小物体对谐振腔模式频率的影响	770
13.27	壁面变形对模式频率的影响	773
13.28	空腔谐振频率的驻立公式	773
13.29	复合谐振腔	775
13.30	谐振腔的激发;电感耦合	779
13.31	圆柱形谐振腔的电感耦合	781
13.32	谐振腔的内电极激发	783
13.33	谐振腔的小孔激发	785
	习题	786
	参考资料	808
第十四章	狭义相对论和带电粒子的运动	810
14.00	狭义相对论的假设	810
14.01	洛伦兹变换式	810
14.02	速度和加速度的变换公式	812
14.03	质量随速度的变化	813
14.04	力的变换公式	816
14.05	在磁场中运动的电荷所受的力	818
14.06	电荷在均匀磁场中的运动	820
14.07	运动的带电粒子的能量	821
14.08	热离子整流器的磁截止	822
14.09	均匀磁场中宇宙粒子的轨迹	823

14.10	运动电荷的磁场	824
14.11	运动电荷的推迟场和推迟势	826
14.12	受加速电荷所产生的辐射	828
14.13	电荷加速度平行于速度时的辐射	830
14.14	电荷加速度垂直于速度方向时的辐射	833
14.15	切仑科夫辐射	837
14.16	麦克斯韦方程的变换	839
14.17	飞机的对地速度	842
14.18	带电粒子在横向电磁场中的运动	843
14.19	光行差和多普勒效应	846
	习题	848
	参考资料	851
附录		853
电学单位制		853
表 I	CGS 制和 MKS 制力学单位之间的关系	854
表 II	MKS 制公式到 CGS 静电单位制公式的转换	855
表 III	MKS 制公式到 CGS 电磁单位制公式的转换	856
表 IV	CGS 静电单位制公式或 CGS 电磁单位制公式到 MKS 单位制公式的转换.....	857
表 V	电磁量的量纲	859
表 VI	数值表	861

第六章 电 流

6.00 电流密度；连续性方程

我们在 1.00 节中已指出，若电势分别为 V_A 和 V_B 的两导体 A 和 B 与第三个导体上的两点相接触，就有电荷从一导体流至另一导体，直到 A 的电势与 B 的电势相等为止。我们可以观测到与这种电荷传输有关的现象：一种是当有电荷流过时导体变热；另一种是此时导体附近存在磁场。第二种现象将在下一章中讨论。在任一瞬时 A 与 B 之间电荷传输的速率称为电流，所以，在任何单位制下，电流可由下式确定

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

当 Q 以库仑为单位， t 以秒为单位时， I 以安培为单位。如果我们采用某种机械静电装置（例如移动着的绝缘皮带），把电荷连续地从 B 的接触点传输到 A 的接触点，而传输速率使电势差 $V_A - V_B$ 保持为常数，同时把导体冷却，使其温度为定值，那么，就会发现电流和磁场保持不变。因此，我们考察稳恒电流时不必考虑这一磁场。任何一点上的电流显然是一个有向量。如果在一导电介质内的 P 点取一面元 dS ，它垂直于 P 点的电流方向，而且流过该面元的电流为 $d\mathbf{l}$ ，那么，我们把 P 点的电流密度定义成

$$\mathbf{i} = \frac{d\mathbf{l}}{dS} \quad (2)$$

当导体中流过稳恒电流时，流入任一体积元的电量必定

等于流出该体积元的电量。因此，该体积元表面上电流密度法向分量的面积分为零。据此，并由高斯定理 [式 3.00 (2)]，得到

$$\int_S \mathbf{i} \cdot \mathbf{n} dS = \int_v \nabla \cdot \mathbf{i} dv = 0$$

由于此式对所有体积元都成立，故有

$$\nabla \cdot \mathbf{i} = \text{div} \mathbf{i} = 0 \quad (3)$$

这个方程称为连续性方程，处处满足此方程的矢量称为无散矢量。

6.01 电 动 势

在上节所考虑的实验中，皮带所起的作用称为电动势，它在所携带的电荷上施加了一机械力，其大小正好足以克服 A 与 B 之间的静电力。皮带在把 1 库仑的正电荷从 B 移动到 A 时所作的功（以焦耳为单位），减去驱动机构中的摩擦损耗之后，就是电动势 $\mathcal{E}$ 的大小（以伏特为单位）。如果驱动皮带的力增大了，则皮带受到加速，所传送的电荷增多， $V_A - V_B$ 随之增加，直到使带电皮带上的静电力恰好与驱动力相平衡为止。如果 A 与 B 之间的接触中断了，皮带就停止移动（因为驱动机构不能克服增大了的静电力），抵抗皮带摩擦力做功的过程也停止。因此，电动势 $\mathcal{E}$ 正好等于 $V_A - V_B$ 。

为了在通常的温度下维持一电路内的电流，该电路中必须有某种电动势的源。在上述例子中，电动势的位置是非常明确的，它分布在沿 A 、 B 之间的皮带上。在电动势的化学源（如蓄电池和原电池）中，电动势位于电极表面。在热电偶中，它位于两组元的界面上。当我们把整个金属回路放入一变化的磁场内时，感应电动势（第八章讨论）分布在所有的回

路元上. 当一发电机为一电路供电时, 电动势分布在发电机的绕组上. 在上述的所有这些情形中, 如果电路是开路, 而用来测量开路两端电势差的是不通过电流的某种装置, 例如不会产生感应效应的静电式测试仪器或电势计, 那么, 所测得的结果等于沿该电路的电动势之和.

我们通常以另一种方式来确定沿任一给定路径的电动势. 前面, 我们把一点上的静电场强度定义成作用在放于该点的固定单位正电荷上的力, 除去已确定此力正比于电荷这一点以外, 对其性质未予规定. 在以后的章节中将会看到, 这种测量不受介质电阻的影响, 因为介质电阻同粘性摩擦一样, 仅作用在运动物体上. 因此, 如果我们考察作用于皮带上一电荷的力, 就会发现此力为零, 因为机械力与静电力互相平衡. 在有电流流动的那部分电路中, 仅出现静电力. 于是, $\mathbf{E}$ 的沿整个电路的积分正好等于 A 与 B 之间的电势差, 如前所述, 它等于 $\mathcal{E}$, 因此, 我们得到

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

此式确定了沿积分路径的电动势. 有时采用如下做法是有益的: 把电场强度 $\mathbf{E}$ 看成由两部分组成, 即静电部分 $\mathbf{E}'$ 与由电动势产生的部分 $\mathbf{E}''$; $\mathbf{E}'$ 可由一标势导得, 它沿任何闭合路径的线积分为零; $\mathbf{E}''$ 具有无散矢量性质, 沿一闭合路径的积分不一定为零. 采用电场强度 $\mathbf{E}''$ 有助于形象化地描述电动势分布的情况, 但用于电动势处在一表面层时并不令人满意, 因为在后一情形中, $\mathbf{E}''$ 在这些表面层上为无穷大, 而在其余各处均为零. 沿不同的路径 $\mathbf{E}''$ 的积分值各不相同, 前面给出的例子说明了这一点: 若闭合积分路径完全取在皮带上或完全不在皮带上, 该积分值就为零.

在许多场合下, 有可能在积分路径上设置障碍, 以便在积

分时把电动势源(如上述例子中的皮带)排除在外。在所有允许的闭合路径上 $\mathbf{E}$ 的线积分为零, 因此, 在整个这样的区域内可以利用标势进行计算。即使在具有分布电动势的场合下, 也可以设置一障碍, 使得对所有允许的闭合路径, 式(1)中的积分为零。在这种场合下, 我们不可能把 $\mathbf{E}'$ 和 $\mathbf{E}''$ 区分开来, 并可互换地使用术语“电动势”和“电势”。在下节中(除式(4)以外)出现的 $\mathcal{E}$ 正具有这种意义。这时, 我们可以令

$$\mathbf{E} = -\nabla V = \nabla \mathcal{E} \quad (2)$$

6.02 欧姆定律; 电阻率

如果在 6.00 节所述的实验中, 所有的物理条件 (诸如温度和工作效率等) 保持不变而使电动势增大, 就会发现, 当达到平衡时, 电流的增加与电动势的增大成正比。这就是欧姆定律。对于具有理想效率的装置来说, A 点与 B 点之间的电动势与流过的电流的比值称为这两点之间的电阻 R_{AB} , 因此有

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{I_{AB}} = \frac{\mathcal{E}_{AB}}{I_{AB}} \quad (1)$$

现在考虑一导电介质中 P 点上的一柱体元, 其底面垂直于电流方向, 面积为 dS ; 其侧面平行于电流方向, 长度为 ds 。于是, 两底面之间的电动势为 $(\partial \mathcal{E} / \partial s) ds = \nabla \mathcal{E} \cdot \mathbf{ds}$, 而流过底面的电流为 $i dS$ 。假定欧姆定律适用于该柱体, 就可把式(1)写成

$$R_P = \frac{\nabla \mathcal{E} \cdot \mathbf{ds}}{i dS} = \frac{|\nabla \mathcal{E}| \cos \alpha ds}{i dS}$$

其中 α 为 $\nabla \mathcal{E}$ 与 $\mathbf{ds}$ 之间的夹角。若取 ds 的数值等于 dS , 则把 R_P 记作 τ , 我们称 τ 为介质在 P 点的电阻率或比电阻, 于

是

$$\tau = \frac{|\nabla \mathcal{E}|}{i} \cos \alpha \quad (2)$$

如果 τ 与电流方向无关, 则 $\alpha = 0$, 因此电势梯度必定与电流同方向. 在这种情况下, 我们称导体为各向同性导体. 电导率 γ 的定义是电阻率 τ 的倒数, 因而, 对于各向同性介质来说, 式(2)变成

$$\mathbf{i} = \frac{\nabla \mathcal{E}}{\tau} = \gamma \nabla \mathcal{E} \quad (3)$$

根据式(3)和 6.01 (1) 得知, 对于导电介质中的闭合路径, 有

$$\oint \mathbf{i} \cdot d\mathbf{s} = \gamma \mathcal{E} \quad (4)$$

6.03 电流的加热效应

在 6.00 节中我们已指出, 电流通过导体时使导体受到加热. 要保持导体的温度不变, 就必须用某种冷却装置去除这一热量. 如果在导体中不发生任何变化, 那么, 这样所得的能量必定以某种方式进入该系统. 显而易见, 在上述的绝缘皮带上把电荷从 B 输送到 A 时, 我们为反抗静电力作了机械功, 根据电势的定义, 此功为 $W = Q(V_A - V_B)$, 因此所提供的功率为

$$P = \frac{dW}{dt} = (V_A - V_B) \left(\frac{dQ}{dt} \right) = (V_A - V_B) I_{AB} \quad (1)$$

把由式 6.02 (1) 得到的 $V_A - V_B$ 代入上式, 得到

$$P = I_{AB}^2 R_{AB} \quad (2)$$

若 I, V, R 的单位均为静电单位或者均为绝对电磁单位, 则 P 的单位为尔格/秒. 若用 MKS 实用单位制, I, V, R 的单位分别为安培、伏特、库仑, 则 P 的单位是瓦特. 附录中有这些