

电 工 理 論 基 础

上 册

A. E. 卡普梁斯基等著

諸 維 明 張 謹
舒 賢 林 朱 祥 華 譯

人 民 教 育 出 版 社

上册目录

序	vi
---------	----

第一部分 电工学的物理基础

第一章 电工学及其理论基础	1
1-1. 电能及其应用	1
1-2. 电磁场和电工学	3
1-3. 电工学的理论基础课程的任务	6
1-4. 单位制	7
第二章 电介质中的电场	9
2-1. 库仑定律	9
2-2. 电场强度。电位移	10
2-3. 电位。电压	11
2-4. 场的图示法	14
2-5. 电场的形成	14
2-6. 通量。电容	16
2-7. 高斯定理的推广	17
2-8. 电场中的导体和电介质	20
2-9. 非线性电介质	27
第三章 电场的计算	30
3-1. 关于电场的计算	30
3-2. 叠加法	30
3-3. 根据高斯定理的计算法	33
3-4. 镜像法	46
3-5. 电位系数法	58
3-6. 非线性电容器	60

第四章 电场的能量及其变换	63
4-1. 带电体系统的能量	63
4-2. 电场能量的分布	68
4-3. 静止物体系统中电场能量的转换。位移电流	69
4-4. 电场能和机械能的互相转换	72
4-5. 电场中的作用力	74
4-6. 直流电容式电机	78
第五章 导电媒质中的电场	83
5-1. 电流的种类	83
5-2. 导电媒质中的恒定电场	83
5-3. 静电类比	86
第六章 磁场	91
6-1. 毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律	91
6-2. 磁位和磁压	92
6-3. 全电流定律	96
6-4. 磁通和磁链	97
6-5. 电感和互感	98
6-6. 磁场中的磁介质	101
6-7. 铁磁性物质	103
第七章 磁场的计算	108
7-1. 在没有电流和永久磁铁的空间内磁场的计算。静电类比	108
7-2. 载流迴路与永久磁铁的等效性	111
7-3. 依照毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律或全电流定律计算磁场	113
7-4. 非线性磁环	125
第八章 磁场能量及其转换	128
8-1. 载流迴路系统的能量	128
8-2. 磁场能量的分布	132
8-3. 磁场能量和机械能量的相互转换	133
8-4. 在孤立迴路中作用的力	135
8-5. 作用在双迴路系统中的力	139

8-6. 在磁场中的载流导体	140
8-7. 磁铁的起重力	144
8-8. 电磁感应定律	145
8-9. 电磁感应定律的第二种公式表示法	149
8-10. 感应式直流电机	153
8-11. 电容式电机和感应式电机的比较	157

第二部分 直流电路与直流磁路理论

第九章 直流电路计算	159
9-1. 电路定律	159
9-2. 电压源和电流源及它们的等效性	163
9-3. 输电线路理论和电源对负载工作	166
9-4. 变换法	170
9-5. 根据基尔霍夫定律计算电路	174
9-6. 叠加法	177
9-7. 互易法	179
9-8. 等效电源法	181
9-9. 回路电流法	184
9-10. 节点电位法	186
9-11. 非线性电路及其计算	189
9-12. 直流电容电路	196
第十章 直流磁路计算	199
10-1. 磁路定律	199
10-2. 磁路计算	200
10-3. 具有永久磁铁的磁路计算	205

第一部分

电工学的物理基础

第一章 电工学及其理论基础

1-1. 电能及其应用

技术的主要任务之一是把天然的能量资源转换为直接可以利用的各种形式的能量——机械能、热能、光能等等。这就需要将动力原料运输到应用地点去。最近越来越广泛地应用将某些动力原料(煤和油页岩等)在当地变为煤气的方法,因为沿管道来传送煤气是非常有利的。

但是有几种能量,例如江河和海洋的能量、温泉和蒸汽的能量、太阳光的能量,是既不可能运输,也不可能转换为煤气的。燃料的能量只可能直接转换为热能,而直至目前为止,如果不算功率很小的原子电池的话,原子能也只能如此。

电能不同于所有其他形式的能量,它很容易传输到远方去,而且还很容易以很高的效率转换为其他形式的能量。因此目前一般采用的办法就是利用所谓发电机(Γ)把天然的能量资源转换为电能,并依靠导线把电能传输到用电地点,然后在受电器(Πp)中把电能转换为所需的那种能量(图 1-1)。

在所有的电工装置中,从功率达几百万千瓦的电力传输起,一直到消耗功率很小的利用温差电源(热电偶)进行

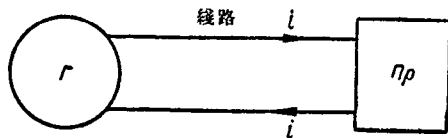


图 1-1

的温度遙測为止(温差电源借导綫与伏特計相联,而伏特計所消耗的功率不到 1 瓦),所应用的电路几乎都如图 1-1 所示。当一个电源饋电給許多受电器时,电路的原理性本质并不由此而改变;在这种情况下傳輸綫就变成有分支的了。在傳輸功率非常微小的无綫电装置中,能量可以不用导綫来傳輸。

发电、輸电、配电和电能轉換的优点保证了电工技术在全世界所有工业国家中得到广泛的应用和发展。

新的生产关系,动力原料矿藏、生产資料和生产工具的私有制的廢除,以及国家計划的拟制,都是促使电工技术发展并使电工技术无所不包地应用到我們的国民經济、日常生活和文化的一切部門中去的有力因素。

弗·伊·列宁在 1921 年說过:“共产主义——这就是苏維埃政权加上全国电气化”。在他领导下拟定的全俄电气化計划的决定性項目在十年內就完成了,而在 1958 年全苏电站所发出的电能为全俄电气化計划所規定的 26 倍,而比帝俄时代电站所能发出的电能增加了 122 倍。在苏維埃政权时代,在工业中每个工人平均消耗的电能增大到 20 倍之多。

在 1959 年至 1965 年的七年計划中規定电站容量和所发出的电能都要提高一倍多。显然,負載(把电能轉換为其他形式能量的設備)功率也应该有相应的增长;例如在七年中有 20,000 公里的铁道要实行电气化。电工技术将愈来愈深入到生产和生活中,使繁重和复杂的劳动过程有可能机械化和自动化,从而減輕劳动强度并提高劳动生产率。

随着电动力企业的增长,电工技术也在质量方面得到发展。在我們这个时代——任何工业部門都具有高参数的时代,在电工技术中正在向着越来越高的电压(500 千伏)、越来越大的功率(正在制造 300,000 千瓦的发电机)、越来越高的速度(特种电动机具有

100,000 轉/分的轉速)过渡;同时,从材料消耗和效率来看,所有設備也变得更加經濟了。

最近几年来,由于原子核科学方面的成就,电工技术也包括把原子能变换为电能的技术;苏联正在建設几座容量为几十万千瓦的原子能发电站。

1-2. 电磁場和电工学

电能就是电磁場的能量,而电磁場則是一种物质形态。同任何物质一样,电磁場具有能量和质量。对于电工学來說,最重要的是能量过程,所以在計算电磁場时,我們限于研究电磁場的能量及其轉換。

现实存在的統一的电磁場具有电场和磁场两个分量,这两个分量往往加以分开研究。这种研究方法是当电現象和磁現象之間的关系尚未清楚的时候在历史上形成的,但就在現在来看,这种研究方法也是完全正确的,因为这种方法便于研究这两种場的性质,从而也便于研究电磁場的性质。电场和磁场之間的关系可以利用直流輸电綫的例子來說明(图 1-2)。

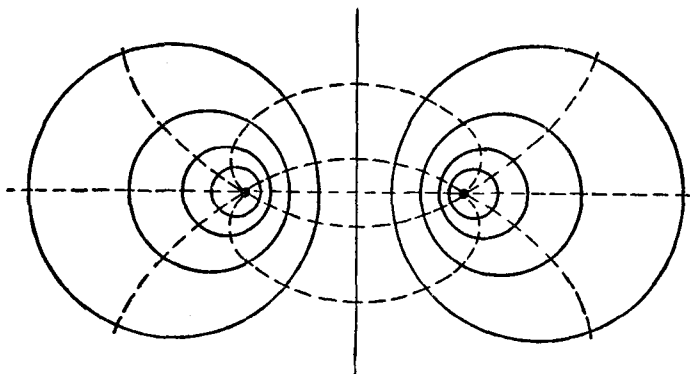


图 1-2

当傳輸能量时，导綫内有电流通过，因而不論在导綫内部，还是在导綫外面都有磁場产生；这磁場在图 1-2 中以力綫(实綫)来表示。互相絕緣并处于发电机所发出的电压作用下的两根輸电导綫，带有符号不同的电荷。因此，在同一空間内还存在着电場(图 1-2 中的虛綫)。在这个图中可以看出电場与磁場之間特征性的区别：电場的力綫是不閉合的，它們起始于带电的导綫，而且也終止于带电的导綫；而磁力綫則总是閉合的，它們既无头也无尾。

电場和磁場相互之間是有联系的，因为发电机电压的变动，因而也是电場的变动，会引起电流的变动，从而引起磁場的变动。

在許多情况下电磁場的一个方面是可以忽略的，因为它和另一个方面相比之下是极其微弱的。例如在輸电綫空载时，即当負載切断时，就可以忽略磁場而只考虑电場。反之，当負載短路时，我們只需要計算磁場，而可以忽略电場。

等于电压、电流和時間三者乘积的电能，其傳輸、产生和消耗只有在出現电場和磁場，即存在电磁場时才是可能的；实际上，当輸电綫空载和短路时，場的一个分量不存在，能量也就不能輸送到受电器中去。在无綫傳輸时，能量的运动也与在发送和接收天綫之間的空间内存在着电磁場有关。

发电机(把轉动的机械能轉換为电能的电机)是利用电磁感应現象(在相对于磁場运动的导体中产生电压)。发电机的負載电流和磁場的相互作用产生反抗轉动的力，这个力应该由轉动发电机的原动机(例如渦輪机)来克服；因此，机械能便轉換为电能。

电机是可逆的，所以电动机的构造与发电机类似，但在电动机中所利用的是电流和磁場之間相互作用的力，从而电能便轉換为机械能。由于发电机和电动机的电压較低，它們的电場是比較弱的，因此我們不妨近似地认为，在二者中只发生了磁場能和机械能的互相轉換。

电场的基本特性是：电荷受到机械作用并当电场改变时在电介质中产生位移电流(即磁场)。

任何媒质中的电场可以用电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 、电位移矢量 $\mathbf{D}$ 和媒质的电容率 ϵ 三者来表征。因为 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ，所以，除了 ϵ 之外，只要用 $\mathbf{E}$ 或 $\mathbf{D}$ 就足以全面地表示电场。

依照用以作为出发点的是哪一种特性，在表征电场的两个量中有一个量是基本的，而另一个量则由它来决定。如果从电荷所受的机械作用出发，那么根据基本关系式(库仑定律)，我们就可以决定电场强度 $\mathbf{E}$ ，然后从 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 的公式中求出电位移。如果从电场的第二个特性出发(在电介质中造成电流)，那么基本量将是电位移 $\mathbf{D}$ ，而电场强度可从公式 $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon}$ 中定出。

磁场的基本特性是：对永久磁铁和载流回路的机械作用，以及磁场的任何改变能引起感应电动势(即电场)。磁场可以用磁场强度矢量 $\mathbf{H}$ 、磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 和媒质的磁导率 μ 三者来表征。因为 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ，所以除了 μ 之外，只要用 $\mathbf{H}$ 或 $\mathbf{B}$ 就足以全面地表示磁场。

如果从永久磁铁所受的作用出发，那么磁场强度 $\mathbf{H}$ 是基本量，而磁感应强度 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 。假使从载流回路所受的作用或从电场的产生出发，则磁感应强度 $\mathbf{B}$ 将是基本量，而磁场强度 $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$ 。

在关于电的科学中，电现象和磁现象之间的联系是在上世紀的二十年代、当安培和奥斯特指出电流伴随有磁场的时候确立的；到了法拉第发现电磁感应现象时(1831年)，电场与磁场之间的联系就完全被证实了。

科学的发展为技术的发展提供了基础，反之，发展着的技术又使新的研究成为必要。电磁感应定律的发现对上世紀四十年代电机的发明起了有力的推动作用。

电工技术萌芽于上世紀三十年代，起初是仅仅作为直流技术

而发展的。只有在 М. О. 多利沃-多勃罗沃尔斯基 (М. О. Доливо-Добровольский) 发明了三相系统和三相电动机之后 (1891 年), 交流电才开始排挤直流电。电能的传输也是借助于三相电而开始实现的。

电磁场理论的完善的数学形式是由麦克斯韦 (Maxwell) 在 1873 年创造的。经过许多学者多次实验的证实, 这一理论终于在本世纪初得到了人们的公认。

麦克斯韦所引入的并由赫兹 (Hertz) 所作的实验证实的电磁波的概念, 使得 А. С. 波波夫 (А. С. Попов) 有可能在 1895 年实现信号的无线传输, 这件事成为电工技术的一个新部门——无线电技术——的开端。

从本世纪初, 作为电工技术装置中的非线性 (不服从欧姆定律) 元件的各种电子-离子和半导体的器件及器械, 就开始出现并正在迅速改进中。采用非线性元件可以解决诸如交流电与直流电的正反变换、电压放大与功率放大等问题, 而又向理论提出了创造计算非线性装置的特殊方法的要求。

1-3. 电工学的理论基础课程的任务

我国进一步电气化的宏大计划的实现、现有电工设备的利用和新的电工设备的创造, 都要求电气工程师深入地理解物理过程并善于进行其技术计算。以从物理、数学和力学三门课程所学得的知識为根据的电工学的理论基础这门课程, 是电工技术教育的基础。这门课程的任务就是要研究电磁现象和能量转换过程及其计算方法。

当空间各点上的场不必要知道时, 上述任务的一部分可以利用电流、电压和通量等积分量来解决; 这些任务的解决由电路与磁场理论来担任。

其他一些任务要求計算空間各点的場;应用于輸电綫(图1-1)时,这类任务就是:綫路特征量(电感和电容)的決定;輸电綫路对其他綫路的影响(例如对邻近通信綫路的影响)的計算;能量运动(例如能量沿着輸电綫的运动和能量向周圍空間的輻射)的計算。这一类任务是用电磁場理論的方法来解决的。

由此可見,电工学的理論基础課程應該包括:物理学中已讲授的但在本課程中用更一般和更适合于計算的形式来表达的基本規律与基本关系、恒定电场与恒定磁場的計算方法、能量轉換的計算、在直流与交流作用下的电路与磁路的計算方法以及交变电磁場的理論与計算。

当分开研究电场和磁场时,尽管其特性有所不同,但联系这些場中各种場量的方程式却可以归結为相似的形式。因此,电场和磁場的計算以及电路和磁路的計算在形式上是彼此相似的。同时,把不同場(路)中的基本关系归結为类似的形式往往需要引入純粹的計算量(虛构量);属于这一类的量有磁阻、磁荷、鏡像和电抗等等。广泛地应用形式上的类比将大大地簡化計算,因此本书以后也将采用这种方法。

如果我們应用各量的瞬时值,即各量同一瞬間的数值来計算直流电路和交流电路,那么这两种电路的計算沒有原則性的区别。但是更加方便的是創造交流电路的一些特殊計算方法,这些方法适用于計算時間上的各平均值,但仍旧能决定瞬时值。

1-4. 单位制

物理过程是用一系列的量来表征的,这些量还可以归結为数目有限的几个量,它們就叫做基本量。基本量及其数目的选择是任意的,在每一門科学中取决于实用上的考虑。譬如說,在几何中以长度 l 为基本量,在力学中长度 l 、质量 m 和時間 t 是通用的基

本量。其余的量叫做导出量，因为它们是通过基本量来决定的。例如速度 $\left(V = \frac{dl}{dt}\right)$ 这个量就是长度与时间之比。

大家知道，导出量与基本量之间的关系是由量纲公式来决定的；例如速度的量纲公式具有下述形式：

$$[V] = [l][t]^{-1}.$$

对于所有的基本量我们选用基本单位；对于导出量则用导出单位。基本单位和导出单位的总和形成单位制。

因为电与磁的现象在原则上不能归结为纯力学的现象，所以通常除了从力学中取用的三个基本量 (m, l, t) 之外，还得加上第四个电学量。

在物理学中最通用的是这两种单位制： CGS_{ϵ_0} 和 CGS_{μ_0} ，在这样的单位制中，厘米、克、秒与真空的电容率或磁导率是基本单位。

对于电工技术来说，这两种单位制都是不方便的，这就导致创造新的实用单位，例如安培、库仑、伏特、法拉、亨利、焦耳、瓦特等等。这些单位是逐渐引入的，因此并不是一开始就构成完整的单位制。

目前苏联和许多其他国家，在电工技术方面都采用统一的单位制——MKSA 制，在这种单位制中，米、千克（质量单位）、秒和安培是基本单位。

这种单位制的方便之点，就是所有的电与磁的单位以及能量与功率的单位是和实用单位一致的。但在这种单位制中，对于非电量却采用异常的单位（例如，力的单位为牛顿，1 牛顿等于 102 克），不过在大多数电学计算中这些量是很少碰到的。

MKSA 单位制通常可以和赫维赛德(Heaviside)所建议的方程式的合理化写法结合起来。在合理化形式中，电场和磁场的基本关系都具有对称形式，而乘数 4π 和 2π 只包括在那些相应于对称特性的关系中（球形对称为 4π ，轴向对称为 2π ）。

在本书中我们将应用 MKSA 单位制和方程式的合理化写法。

第二章 电介质中的电场

2-1. 庫倫定律

靜电场(即静止电荷的电场)的基本规律就是以实验方法确立的庫倫定律。这个定律决定在各向同性的均匀媒质中两个点电荷 Q 与 Q_1 相互之间的作用力 F , 也就是决定其尺寸远小于间隔距离的两个带电体之间的作用力:

$$F = \frac{QQ_1}{4\pi\epsilon r^2},$$

式中 r 为电荷之间的距离, ϵ 为媒质的电容率, 而乘数 4π 是由于把庫倫定律写成合理化形式而引入的。

在 MKSA 单位制中, 如果电荷以庫倫計, 距离以米計, 电容率以每米多少法拉計(法/米, 法拉为电容的单位), 那么力的单位为牛頓。

大家知道, 任何媒质是由各个带电质点組成的, 所以放到媒质中去的电荷 Q 与 Q_1 不仅互相作用, 而且与媒质的电荷也有相互作用。这种会改变电荷 Q 与 Q_1 之間作用力的媒质电荷的影响, 是由于在庫倫定律中引入电容率来考虑的。

在靜电学中电荷量只能以測量它們的相互作用力的办法来决定。測量距离相等而处于不同介电媒质中的同一对电荷之間的作用力, 使我們能够决定这些媒质的电容率的比值, 但不能决定其絕對值。因此, 在各种媒质中可以任意选定一种媒质的电容率的数值; 通常选定真空作为这种媒质。在 MKSA 制中选定的真空电容率(电常数)等于:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{ 法/米};$$

ϵ_0 值之所以这样选定不过是为了使 MKSA 制中一些对于电工技术最重要的单位能够符合通用的实用单位。

在 CGS ϵ_0 制中

$$\epsilon_0 = 1,$$

而在 CGS μ_0 制中

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-20}}{9} \text{ 秒/厘米。}$$

正像以下将要指出的, 所有其他媒质的电容率都大于电常数:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0,$$

式中 $\epsilon_r > 1$, 它是一个无量纲的量, 叫做相对电容率。相对电容率的值和 CGS ϵ_0 制中电容率的值是一致的。

大多数电介质的电容率是常数; 这些电介质叫做线性电介质。

作用在电荷 Q_1 上的力的方向是沿着从电荷 Q 所在点引出的矢径 $\mathbf{r}$; 库仑定律的矢量形式如下所示:

$$\mathbf{F} = \frac{QQ_1}{4\pi\epsilon r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}.$$

2-2. 电场强度。电位移

在任何一点的电场强度, 等于作用在位于该点上的一个微小电荷 Q_1 上的力 F 与该电荷数值之比:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q_1},$$

由于 Q_1 很小, 不会使产生电场的物体上的电荷显著地重新分配, 因此不会使电场发生畸变。

在 MKSA 制中电场强度以伏/米来计量。

从库仑定律得出, 一个点电荷 Q 在与之距离为 r 的地方产生的电场强度是与 r 平方成反比例地递减的: