

[美] V. D. 托罗 著

电工学基础

下 册

上海交通大学电工学教研室 译

高等教育出版社



[美] V. D. 托罗 著

电 工 学 基 础

下 册

上海交通大学电工学教研室 译



高等教育出版社

8510140

【美】V. D. 托罗 著

电工学基础

下 册

上海交通大学电工学教研室 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.375 字数 320,000

1983年5月第1版 1984年10月第1次印刷

印数 00,001—15,700

书号 15010·0494 定价 2.60 元

下册目录

第 III 部 机电能量转换	1
12. 磁学原理与磁路	2
12-1 安培定律-磁学量的定义	3
磁导率	
磁通 ϕ	
磁场强度 H	
推导出的关系式	
12-2 磁学原理	12
12-3 铁磁材料的磁化曲线	14
12-4 磁路: 概念与相似性	18
12-5 磁路计算的单位	22
12-6 磁路计算	23
12-7 铁磁材料的磁滞与涡流损失	33
12-8 继电器——电磁力的一种应用	37
13. 变压器	48
13-1 工作原理与相量图的研究	49
13-2 等效电路	60
13-3 由空载试验得到的参数	71
13-4 效率与电压调整	76
13-5 互感	79
14. 机电能量转换	87
14-1 电磁转矩的基本分析	88
正弦 B 与 Ni (交流电机情况) 产生的转矩	
非正弦 B 与均匀安培导体分布曲线(直流电机情况)的转矩	
14-2 感应电压的分析	95
14-3 电机的构造特点	97
14-4 转矩与电压公式的实际形式	104

交流电机

直流电机

15. 三相感应电动机	115
15-1 旋转磁场	116
15-2 感应电动机如同一台变压器	120
15-3 等效电路	124
15-4 性能的计算	128
15-5 转矩-转速特性·启动转矩与最大发生转矩	132
15-6 从空载试验得到的参数	135
15-7 三相感应电动机的额定值与应用	137
15-8 三相感应电动机的控制器	140
16. 三相同步电机	149
16-1 三相电压系统的产生	149
16-2 同步发电机的相量图和等效电路	151
16-3 同步电动机	154
16-4 同步电动机的相量图和等效电路	156
16-5 同步电动机的性能计算	158
16-6 功率因数的控制	162
16-7 同步电动机的应用	164
17. 直流电机	169
17-1 直流发电机的分析	169
17-2 直流电动机的分析	176
17-3 电动机的转速-转矩特性·转速控制	179
17-4 直流电动机的应用	184
17-5 直流电动机的起动器和控制器	186
18. 单相感应电动机	195
18-1 如何获得旋转磁场	195
18-2 单相电动机的各种类型	198
18-3 特性与典型应用	201
19. 直接能量转换法	204
19-1 光电能量转换: 太阳能电池	204
19-2 热电能量转换	206

19-3	电化学能转换: 燃料电池	209
19-4	磁流体动力能量转换	214
第 IV 部	控制系统与计算机	223
20.	自动控制原理	224
20-1	开环与闭环(反馈)控制之间的差别	225
20-2	反馈控制系统的方框图·术语	226
20-3	位置反馈控制系统·伺服机构	231
20-4	典型的反馈控制应用	234
20-5	反馈及其影响	240
21.	控制系统的动态特性	255
21-1	二阶伺服机构的动态响应	255
	阶跃-位置输入	
	无阻尼解	
	确定暂态响应的品质因数	
	传递函数分析	
21-2	误差变化率控制	272
21-3	输出变化率控制	276
21-4	积分-误差(或复位)控制	281
22.	频率响应法分析动态特性	288
22-1	系统部件的传递函数	289
	滞后网络(或积分电路)	
	具有固定最大衰减的滞后网络	
	超前网络(或微分电路)	
	具有固定低频衰减的超前网络	
	欠阻尼的二阶系数	
	线性加速表	
	陀螺仪	
	输出执行机构	
22-2	系统的传递函数	313
22-3	系统分类	315
	0型系统的稳态特性	
	1型系统的稳态特性	
	2型系统的稳态特性	

确定稳态特性的品质因数	
22-4 系统稳定性	325
劳斯准则	
乃奎斯特准则	
相对稳定性	
相位裕量和阻尼比的相互关系	
22-5 由开环传递函数预测系统特性	340
22-6 根轨迹法	344
23. 电子模拟计算机	362
23-1 模拟计算机的分类	363
23-2 直流电子模拟计算机的基本计算	366
23-3 模拟程序·微分方程法·幅值标定系数	375
23-4 时标	389
23-5 模拟程序·传递函数法	392
23-6 变量的乘法和除法	395
23-7 一般非线性函数的模拟	399
23-8 举例和主要结论	403
附录 F: 转矩方程的推导	409
正弦 B 和正弦 Ni (交流电机) 下产生的转矩	409
非正弦 B 和均匀安培导体分布曲线下的转矩	413
附录 G: 文献目录	416
习题选答	419

III

机电能量转换

8510140

• 1 •

磁学原理与磁路

因为电磁学是工业上以及家庭中所遇到的大部分电气装置运用的关键,若要研究电工技术,必须了解电磁学。从家用设备中的分马力装置到某些工业上应用的 25,000 马力大型设备的一切大大小小电动机和发电机,都取决于电磁场作为电系统和机械系统间进行能量转换的耦合装置,反之亦然。同样地,静止的变压器通过磁场的媒介将能量由一个电系统转换到另一个电系统。如在收音机、电视接收机和配电线路等各种各样的应用中都用到变压器。其它重要器件——例如断路器、自动开关和继电器——为了它们能正常运行需要有个有限范围的磁场。本章目的在于向读者提供基础知识,好让读者能识别磁场及其显著的特征,并能更便于理解磁场在电气设备中的作用。

正如前面所指出的,电工学这门学科是以从基础实验导出的几个基本定律为根据的。在电磁学的领域里,安培定律实际上作为我们论述^①的出发点。根据安培在 1820 年对两根载流导体间存在的力所做的实验中得到的结果,就容易定义诸如磁通密度、磁场强度、磁导率及磁通等的量值。这个基础一经建立以后,便注意着眼于某些实用的工程材料磁性能的讨论以及“磁路”的概念,以

^① 这里不应得出在研究磁路的定量分析中这是唯一的出发点的推论。法拉第感应定律作为出发点也同样正确,而且当目的在于研究电磁波理论而不是论述机电能量转换的理论时,宁可采用法拉第感应定律。

有助于简化与分析磁性设备有关的计算。

12-1 安培定律——磁学量的定义

图 12-1 所示的是一个经过简化改进了的安培实验。其结构是由一根很长的载有数值恒定的电流 I_1 的导体 1，和长度为 l 载

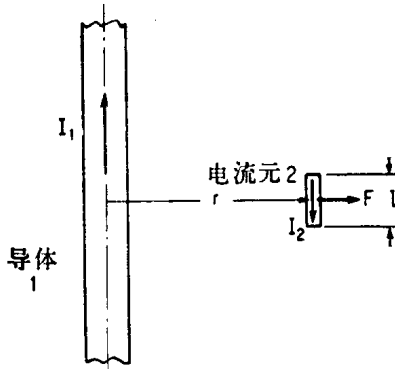


图 12-1 说明由安培定律所描述的在电流元 $I_2 l$ 与载有电流 I_1 的很长导体之间存在的力

有数值恒定，方向与 I_1 相反的电流 I_2 的导体元所组成。导体元与电流 I_2 一起组成了电流元 $I_2 l$ 。实际上导体元 2 是其中通过 I_2 的闭合电路的一部分，但为了简便起见，除了长度 l 电路部分均被忽略。此外，假定导体 1 和 2 位于同一水平面且相互平行。根据安培定律，对于这种结构，在导体元上存在着朝右的力，而且其大小是和 I_1 、 I_2 、 l 以及导体四周的介质成正比，和导体间的距离成反比。按照 MKS 制，此力的大小可表示为

$$F = \frac{\mu I_1}{2\pi r} I_2 l \quad \text{牛} \quad (12-1)$$

式中 I_1 、 I_2 的单位为安培， l 、 r 的单位为米， μ 是介质的特性。这个实验更为有意义的一个发现，就是如果导体元 2 被用作一个测试

装置来找出大小恒定,方向沿径向朝外的力的空间各点,则其轨迹是半径为 r , 圆心位置沿导体 1 轴线的圆。换言之,这就能够确定具有恒定力线的磁场。在这方面,这里需要将式(12-1)重写成如下形式:

$$F = I_2 l B \quad (12-2)$$

其中

$$B \equiv \frac{\mu I_1}{2\pi r} \quad (12-3)$$

显而易见,由式(12-2)定义量 B 具有力/(电流-长度)的单位。在有理化 MKS 制中表示为

$$B \propto \frac{\text{牛}}{\text{安} \times \text{米}} \quad (12-4)$$

式中 \propto 表示“正比于”。更仔细地观察上面的关系式可以发现 B 的含量的一个重要而又十分有用的方式。记得

$$\text{牛} = \frac{\text{能量}}{\text{长度}} = \frac{\text{瓦} \cdot \text{秒}}{\text{米}} = \frac{\text{伏} \times \text{安} \times \text{秒}}{\text{米}} \quad (12-5)$$

代入式(12-4)可将 B 用另一种方式表示为

$$B \propto \frac{\text{伏} \times \text{秒} \times \text{安}}{\text{安} \times \text{米}^2} = \frac{\text{伏} \times \text{秒}}{\text{米}^2} \quad (12-6)$$

由法拉第定律 ($d\phi = edt$) 进一步注意到 (伏 \times 秒) 的单位与磁通单位等效。所以便能正常地得出 B 实际上是个磁通密度的结论,因为它的单位是磁通/平方米。当用韦伯表示磁通,则 B 的单位为韦伯/米² 或特斯拉。式(12-3)表明决定 B 的大小的系数,但它也作为确定电流 I_1 在电流元附近影响力场的方式。值得注意的是只要 I_2 不等于零,力场与磁场具有同样的特性——二者都具有圆周轨迹,都是具有大小和方向的矢量。然而,由于 B 所定义的方式,不论 I_2 值为何,只要 I_1 不等于零总是有磁场存在的。

在下面将要研究到的电机学中,导体 1 将称为磁场绕组,因为

它建立工作磁场，而导体元为其中一部分的整个电路则称为电枢绕组。

磁场方向很容易由右手定则来确定，它指出，若用右手握住磁场绕组导体（在此情况下为导体1）大拇指所指为电流流动的方向，则磁力线（或磁通密度）将位于包围导体的四指所指的方向。

磁导率 看一下式(12-1)就知道此公式中除了比例因数 μ 以外，所有其他因数均为已知， μ 是周围介质的一个特性。当在铁中而不是在空气中重复图 12-1 的实验时，在 I_1 、 I_2 、 l 和 r 为同样数值的情况下，则发现力要大上许多倍。所以，对于不同的介质 μ 可由式(12-1)来确定，因为其中 μ 是唯一的未知量。此外，由于磁通密度的定义，式(12-3)指出在特定的电流 I_1 下使磁通密度增加或减少的程度能用来描述周围介质的效应。于是，当介质是铁而不是自由空间时，可以说在给定的区域内，铁提供更大的磁场穿透率，也就是说有更大的磁通密度。其中嵌有导体的周围介质的这种性质称为磁导率。

假设图 12-1 的导体是放置在真空（自由空间）中，并且力是在特定的 I_1 、 I_2 、 l 和 r 值下测定的，对由式(12-1)得出的用 MKS 单位表示的自由空间磁导率的结果是

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (12-7)$$

磁导率的单位亦可从式(12-1)得出。于是

$$\mu_0 \propto \frac{\text{牛}}{\text{安}^2}$$

但是

$$\text{牛} \cdot \text{米} = \text{焦} = \text{伏} \times \text{安} \times \text{秒}$$

或

$$\mu_0 \propto \frac{\text{伏} \times \text{安} \times \text{秒}}{\text{安}^2 \times \text{米}} = \frac{\text{伏} \times \text{秒}}{\text{安} \times \text{米}}$$

然而, 伏 \times 秒/安就是用亨利表示的电感单位. 因此, 磁导率的单位是以亨/米表示的.

在周围介质非自由空间的情况下, 绝对磁导率仍然容易由式(12-1)求出. 与从自由空间所获得的结果相比较而得出的量称作相对磁导率. 用数学表示为

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (12-8)$$

式(12-8)清楚地指出, 相对磁导率仅是个数, 它表示磁通密度较自由空间的磁通密度值增加或减少的程度. 对有些材料诸如镍铁合金, μ_r 值可超过十万. 然而, 大多数铁磁材料的 μ_r 值为数百或数千.

磁通 ϕ 既然 B 表示磁通密度, 乘以 B 所穿过的有效面积, 有理由期望得出总磁通. 为了说明这一点, 参阅图 12-2, 它表示一个面积为 ab 的线圈与导体 1 处在同一水平面上. 已知当电流 I_1

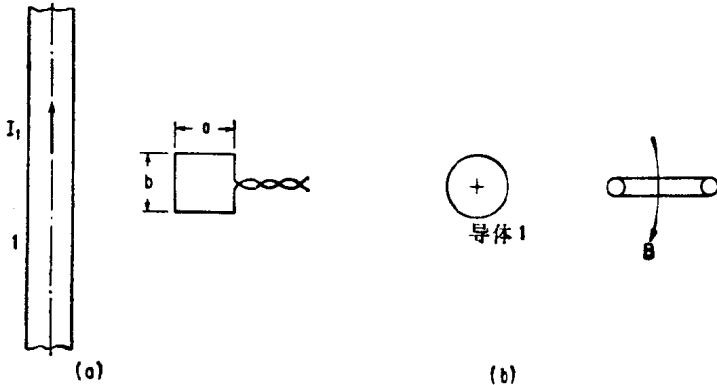


图 12-2 将一块面积与磁场 B 联系起来以确定磁通
(a) 顶视图; (b) 正面图

流过此导体时, 在空间产生一磁场, 它是专门由式(12-3)来描述. 为了求出穿过线圈的总磁通, 仅需在有关的表面积范围内进行积

分。当然，若在有关的面积范围内 B 为常数，磁通就不过是 B 与面积 ab 的乘积。其次假设线圈平面相对导体 1 的平面倾斜 60° 角，如图 12-3 所示。显然现在穿过线圈的总磁通减少为原来的二分之一。



图 12-3 与图 12-2(b) 相同，只是线圈相对于水平面倾斜了 60°

之一。若线圈相对水平面转过 90° 位置，则没有磁通穿过线圈。

因此，根据上述观察，通过任意表面的磁通是更严格地定义为磁场 B 矢量的法线分量的面积分。用数学表示为

$$\phi = \int_s B_n dA \quad (12-9)$$

式中 s 代表面积分， A 代表线圈的面积， B_n 是线圈面积上 B 的法线分量。从表示式(12-6)可知，磁通必须具有伏·秒的量纲。然而更为普遍的是称为韦伯。根据法拉第感应定律可更好地理解磁通的伏·秒单位。

磁场强度 H 往往在磁路的计算中使用一个能表示磁场且和其中存在着磁通的介质无关的量是有用的。如在电机学中所遇到的一些情况尤其是如此，其中公共磁通穿过包括空气在内的好几种不同材料。看一下式(12-3)得出 B 除以 μ 便确定了这个量。因此，磁场强度定义为

$$H \equiv \frac{B}{\mu} \quad (12-10)$$

并具有单位

$$\frac{\frac{\text{牛}}{\text{安} \times \text{米}}}{\frac{\text{牛}}{\text{安}^2}} = \frac{\text{安}}{\text{米}}$$

这样, H 取决于产生它的电流, 也和结构的几何形状有关, 但与介质无关. 对图 12-1 的系统而言, 磁场强度值立即由式(12-3)给出为

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I_1}{2\pi r} \quad (12-11)$$

由于 H 与介质无关, 它常被视为决定磁通密度穿过介质的一个强度. 实际上 H 仍然是个推导结果.

更一般地说, H 的单位是安-匝/米而不是安/米. 每当磁场绕组不止是由单根导体所制成时, 这一点是明显的.

安培环路定律 既然磁场强度已下过了定义, 且具有安-匝/米的量纲, 下面来研究一个十分有用的关系式. 记得 H 是与磁场 B 有着相同方向的矢量. 对图 12-1 的结构而言, H 具有与 B 相同的圆轨迹. 沿任何给定的闭合圆周路径进行 H 的线积分表明是有意义的. 由于 H 含有每单位长度的量纲, 要考虑的当然是线积分. 因而

$$\oint H dl = \int_0^{2\pi r} \frac{I_1}{2\pi r} dl = I_1 \text{ 安} \quad (12-12)$$

(仍应记住若图 12-1 中包括的不止是一根导体, 这里的单位应该是安-匝). 式(12-12)说明磁场强度的闭合线积分等于产生磁力线的所被包围的电流(或安-匝数), 这一关系式称为**安培环路定律**, 更一般地写成

$$\boxed{\oint H dl = \mathcal{F}} \quad (12-13)$$

式中 \mathcal{F} 表示假设的闭合磁力线路径所包围的安-匝数. \mathcal{F} 这个量也叫作**磁动势**, 常简写成 mmf . 此关系式在研究电磁装置时有用,

并在以后章节中会涉及到。

推导出的关系式 基本的磁学量——磁通密度、磁通、磁场强度与磁导率——在前面几页中是从含有两根载流导体的安培基本实验出发来定义的。经过适当的变换可以获得另外的有用结果。

式(12-10)是对已知的几何形状和电流描述磁场强度的一个矢量方程。若假设磁力线的总路径长度为 l ，则与给定的磁力线有关的总磁动势为

$$\mathcal{F} = Hl = \frac{B}{\mu} l \quad (12-14)$$

现在在 B 为常数且穿过固定的已知面积 A 的情况下，对应的磁通可由式(12-9)写成

$$\phi = BA \quad (12-15)$$

将式(12-15)代入式(12-14)得

$$\mathcal{F} = Hl = \phi \left(\frac{l}{\mu A} \right) \quad (12-16)$$

令人感兴趣的是上面表示式中括号内的量，因为它和电路中电阻的定义非常相似。参看式(2-16)。记得在电路中电阻所代表的是对电流在激励电压影响下流动的一种阻碍。观察式(12-16)可对磁路得出类似的解释。已经知道 \mathcal{F} 是造成磁通穿过规定截面 A 的激励磁动势。然而此磁通在数值上受到被称为磁路的磁阻的限制，磁阻定义为

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (12-17)$$

除了用同样多的磁阻单位来表示以外，对磁阻的量纲并不给予特定的名称。

式(12-17)得出磁路对磁通的阻碍是与长度成正比而与磁导率以及截面积成反比——结果跟物理推理完全一致。

将式(12-17)代入式(12-16)得

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (12-18)$$

上式常称为磁路的欧姆定律。然而，重要的是要记住只要 B 与 A 是固定量，这些形式上的变换是容许的。

关于电流元不同取向的安培定律 在图 12-1 中是假设电流元与导体 1 平行，且位于同一平面。由于这一取向对于目前实际应用来说——定义基本磁学量——已足够，所以为了方便起见就采用它。但是，为了给出这一实验的更加完整的图形，现在来研究将电流元 $I_2 l$ 置于两个附加的不同取向时对于力的作用。首先研究电流元不再与导体 1 平行放置但继续位于同一平面上的情况。参阅图 12-4。正如右手定则所指出的，图中点号表示在导体左侧

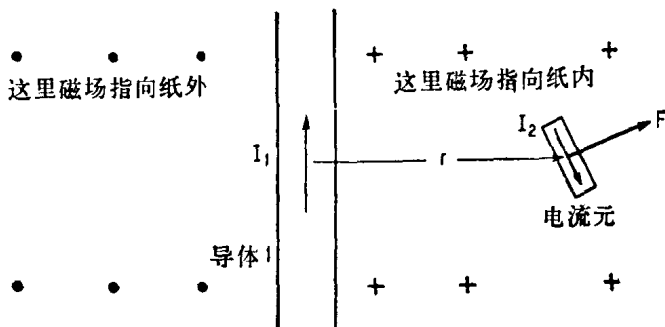


图 12-4 表示电流元不再与导体 1 平行但仍位于同一平面上的受力方向。磁场方向是指向纸外，而在导体右侧是指向纸内（均就纸面而言）。实验结果表明力的大小是和应用图 12-1 所示结构得出的相同^①。这个结论并不意外，由于磁通密度值以及 I_2 与 l 并未改变，因此式(12-2)在描述力时仍能成立。唯一的变化是力的方向。然而如图 12-4 所表明的，力继续与电流元垂直。记住这一点是值得的。

^① 由于电流元的无限小的性质，不论 $I_2 l$ 取向如何， $I_2 l$ 附近的 B 假设恒定。