

机电一体化工程专业电工学之四

电气传动及应用

马慎兴 主编



航空工业出版社

机电一体化工程专业电工学之四

电气传动及应用

马慎兴 主 编

航空工业出版社

1993

(京)新登字161号

内 容 提 要

本书系根据1989年8月原航空航天工业部教育司重点课程协作组会议为机械类机电一体化专业制订的《电气传动及应用》教学大纲编写的。

本书内容共11章,即磁路和变压器、电气传动的动力学基础、直流电动机、电气传动系统的过渡过程、交流电动机、微控电机、常用机床控制线路、近代电气传动控制系统、电动机的选择、实用电气化线路、安全用电。每章均有习题。本书内容深入浅出,实用性强。

本书可作为大专院校机械类机电结合专业的试用教材,也可供有关专业师生、工程技术人员及工人参考。

机电一体化工程专业电工学之四

电气传动及应用

马慎兴 主 编

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

煤炭工业出版社印刷厂印刷

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.5

印数1—2 000 字数: 384千字

ISBN 7-80046-599-3/G·109

定价: 7.50元

前 言

本书是根据1989年8月原航空航天工业部教育司重点课程协作组会议针对机械类机电一体化专业制订的《电气传动及应用》教学大纲编写的。

本书内容包括磁路和变压器、交流电动机、直流电动机、微控电机、电气传动的动力学基础及过渡过程、电动机的选择、常用机床控制线路、近代电气传动控制系统、实用电气化线路及安全用电常识等。

本书可作为高等院校机械类机电结合专业的试用教材，也可供有关专业师生、工程技术人员及工人参考。

本书由西北工业大学机械系马慎兴主编，其中第一、二、三、十一章由西工大边江艳编写；第四、九章由南昌航院鲍志强编写；第五章由南昌航院姜登山编写；第六、七章由哈工大朱毓芬编写；绪论、第八、十章由马慎兴编写。

全书由西安交通大学吴道悌教授审阅并对书稿提出了许多宝贵的修改意见。谨致以诚挚的谢意。

在编写过程中，参考了有关兄弟院校的讲义及资料，还得到西工大电工教研室老师们的指教，在此表示衷心感谢。

由于作者能力有限，经验不多，成书仓促，难免有不足甚至错误之处，敬请使用本教材的学校老师和同学们给予指正。

编者

1993年7月

目 次

绪论	(1)
第一章 磁路和变压器	(4)
1.1 磁路的基本物理量	(4)
1.2 铁磁物质	(5)
1.3 磁路的基本定律	(7)
1.4 变压器的构造及原理	(11)
1.5 变压器的等值电路	(17)
1.6 变压器的额定值、运行特性及同极性端	(18)
习题	(21)
第二章 电气传动的动力学基础	(24)
2.1 机电能量转换	(24)
2.2 电气传动系统的运动方程式	(26)
2.3 转矩、飞轮矩的折算	(28)
2.4 生产机械的机械特性	(32)
习题	(34)
第三章 直流电动机	(36)
3.1 直流电动机的基本结构和工作原理	(36)
3.2 他励直流电动机的机械特性	(40)
3.3 他励直流电动机的起动特性	(42)
3.4 他励直流电动机的调速特性	(43)
3.5 他励直流电动机的制动特性	(47)
3.6 串励直流电动机	(49)
习题	(51)
第四章 电气传动系统的过渡过程	(53)
4.1 研究过渡过程的实际意义	(53)
4.2 电气传动系统起动时的过渡过程	(53)
4.3 电气传动系统制动时的过渡过程	(59)
4.4 改善电气传动系统过渡过程的方法	(65)
习题	(66)
第五章 交流电动机	(68)
5.1 三相异步电动机的结构	(68)
5.2 三相异步电动机的转动原理	(70)
5.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	(73)
5.4 三相异步电动机的各种运行(电动和制动)状态	(79)
5.5 三相异步电动机的起动	(84)

5.6	三相异步电动机的调速	(89)
5.7	三相异步电动机的铭牌	(91)
5.8	单相异步电动机	(93)
5.9	三相同步电动机简介	(97)
	习题	(99)
第六章	微控电机	(102)
6.1	伺服电动机	(102)
6.2	旋转变压器	(108)
6.3	同步感应器	(113)
6.4	步进电动机	(118)
6.5	力矩电动机	(123)
	习题	(125)
第七章	常用机床控制线路	(127)
7.1	常用低压电器	(127)
7.2	继电-接触器控制的基本电路	(136)
7.3	小型起重设备的控制线路	(143)
7.4	摇臂钻床电气线路	(144)
7.5	万能升降台铣床的电气线路	(146)
7.6	可编程工业控制器 (PC) 简介	(149)
	习题	(160)
第八章	近代电气传动控制系统	(162)
8.1	电气传动控制系统调速方案的选择	(162)
8.2	晶闸管-电动机直流传动控制系统	(167)
8.3	直流脉宽调速系统	(181)
8.4	近代交流变频调速系统原理	(186)
8.5	异步电动机矢量控制系统原理	(202)
	习题	(206)
第九章	电动机的选择	(208)
9.1	电动机的发热与冷却	(208)
9.2	电动机工作制的分类	(210)
9.3	连续工作制电动机容量的选择	(212)
9.4	短时工作制电动机容量的选择	(214)
9.5	周期性断续工作制电动机容量的选择	(214)
9.6	电动机的类型、电压、转速和安装型式的选择	(215)
	习题	(217)
第十章	实用电气化线路	(218)
10.1	光电控制原理及电路	(218)
10.2	温度控制原理及电路	(223)
10.3	压力控制原理及电路	(227)

习题.....	(230)
第十一章 安全用电	(231)
11.1 电流对人体的作用.....	(231)
11.2 对地电压、接触电压、跨步电压.....	(232)
11.3 接地和接零.....	(233)
11.4 防雷措施.....	(236)
11.5 触电与急救.....	(236)
习题.....	(238)
主要参考文献	(240)

绪 论

一、本课程研究的对象及内容

《电气传动及应用》是一门非电专业学生必修的技术基础课，其研究对象是电气传动系统的基本理论及其典型的应用。

电能是现代大量应用的能量，电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等都必须利用电机这种进行能量或信号变换的电磁装置。电气传动就是以电动机为主要原动机驱动生产机械的系统的总称。它的目的是将电能转换为机械能，以实现生产机械的起动、停止、速度调节、位置控制以及各种生产工艺过程的要求。为了实现生产过程自动化的要求，从广义上讲，电气传动系统应该是包括电动机、配套的控制系統以及与之相结合的生产机械在一起的一个整体，随着电子技术、计算机技术的发展和應用，机械技术与这些前沿学科的相互渗透，促进传统的工业、农业、交通运输业的生产方式以至行业结构发生深刻的变化，“机电一体化”已成为国民经济各部门特别是机械工业发展的必然趋势，这就从根本上决定了电气传动系统的内涵必然是一种复合化的技术，其表现有以下两个方面：

1. 机械的电子化

生产机械，如全自动洗衣机、微机控制机床、轧钢机及工业机器人等，由于采用了电子技术，使系统在功能、精度、质量、效率和节能等方面向更高水平发展。

2. 机械技术与电子技术的有机结合开辟了两者单独都不能达到的新的应用领域

各类生产机械，如组合机床、自动线、电火花成形机床、自动包装机、探伤机、搬运机乃至全自动的车间、工厂等，都要用到检测装置，并进行信息的传递和处理，以使生产工艺流程优质、高速地进行。

我们知道各类生产机械对电气传动系统都有正反转、起动、调速等共性要求。同时还要满足各种加工工艺的要求，如热、冷连轧机和造纸机的各机架或分部的转速应保持一定比例关系协调运转；一些精密金属切削机床的进给机构要求在极低的稳速下进给，以保证达到要求的加工精度和粗糙度；对于电梯和提升机则要求起动和制动平稳，并能准确地停在要求的位置上。概括起来，电气传动系统（除电路基础外）涉及的基本原理有：磁路及变压器；电气传动系统的动力学基础；直流、交流电气传动系统的机械特性；电气传动系统的动态特性。

电气传动系统的应用内容是极其丰富的，我们在这里列举了包括电气传动系统方案选择、电动机的选择，常用机床及起重机的电气设备、微型工业控制机等内容作为典型的实例。

为了适应新技术的发展，扩大知识面，我们还介绍了近代电气调速系统的原理和方法、微控电机、实用电气化线路及安全用电的概念。

二、我国电气传动的发展史

电气传动系统在我国，其发展过程大致可分为三个阶段：

1. 大约从30年代到50年代。当时生产机械对电气传动系统的要求,只限于起动、制动和调速。在这一时期主要是用常系数线性微分方程数学工具分析、设计电气传动系统,即分析系统静态机械特性和参数的关系,并依据工艺要求确定系统参数,设计起动、制动电阻,控制继电器的整定值等,系统主要采用继电-接触控制器、鼓式控制器、主令控制器等。大容量的电气系统采用电机放大机,系统实现开环控制,各类金属切削机床以及起重运输机械等,大多属于这类系统,在生产上发挥了很重要的作用。

2. 大约处在50~70年代,随着生产工艺的不断强化,生产效率不断提高,劳动条件不断改善,对于电气传动系统提出更多的要求。例如起动、制动过程要求响应快,有的生产机械要求起、制动平稳,如乘客高速电梯、城市地铁或电车等。此外,有的生产机械要求扩大调速范围,以保证较低速度运行。除起、制动快速或平稳运行外,还有准确定位要求,例如电梯平层精度,有的还有多台电机按比例协调运转的要求,如造纸机、塑料挤压机、带钢连轧机等,或位置的跟随要求,如仿型机床、高射炮转塔等。要满足上述较复杂的工艺要求在理论上应用古典控制理论分析闭环电气传动系统的静态和动态特性,主要是应用频率特性法和根轨迹法,间接地分析系统的稳定性和系统调节器参数计算,使系统的静态精度和快速响应指标都达到较高的水平。系统所用功率变换元器件和装置已采用水银整流器、闸流管整流器和可控硅整流器,这些不仅是静止的变流装置,而且其效率均有较大的提高。在控制元件方面,也用磁放大器、电子管放大器、晶体管放大器等组成比例、积分、微分调节器,系统的响应时间大约从一秒左右下降到几毫秒左右,放大倍数从10提高到 10^5 ,装置效率大体上从80%增加到95%,而且装置体积小,重量轻,运行、维护简单。这时期的电气传动系统称为自动电气传动系统,直到目前在我国各技术领域的生产机械上仍大量使用闭环反馈这类电气传动控制系统,它已为国民经济的发展做出积极的贡献。

3. 大约从70年代到现在。随着生产工艺的发展和生产机械的改进,对电气传动系统提出越来越高的要求。例如在加快起制动过程方面,要求在条件允许的前提下起制动时间最短,也就是最大限度充分利用设备的能力,此外,要求电气传动系统在起制动过程消耗能量最小,以最经济的条件运行,在平稳起制动过程方面则要求满足平稳条件下尽量加快起制动过程,即所谓平稳快速的控制规律。这些都是要求传动系统分别满足在某项指标的极值状态下工作,即通常所说的最优控制。有些系统即使在干扰条件下工作,但仍要求系统能满足工艺某项指标的最优控制,这就是所谓的自适应控制规律。目前在控制系统方面已经能比较好地实现系统非线性、变参数、扰动下的最优工作特性。在这阶段分析传动系统应用了现代控制理论,主要是最优控制理论和自适应控制理论。这些理论是用状态空间法建立传动系统的数学模型,然后对数学模型进行最优化处理求得各类最优控制规律,实现具有这样特性的系统所采用的元件和装置主要是大规模集成电路、微型计算机,因为计算机灵活、可靠,且用软件能完成各种复杂的运算控制规律,它是构成近代电气传动控制系统不可缺少的条件。

目前四化建设对生产总的要求是优质、高效、低耗,而具体到各类生产机械的电气传动系统的要求就应当是提高控制质量、加快过渡过程、降低能量消耗。要实现这一总的目标,就必须应用近代控制理论和计算机控制技术。目前,电气传动系统的计算机控制正获得越来越广泛的应用,特别是融电力、微电子、信息与控制为一体的交流电气传动,是近代电气传动系统发展的一个方向。随着电气传动自动控制在理论上和实践上的发展,又反过来促进生产机械和生产工艺的进一步完善。

三、本课程的学习方法

学习任何课程，除了要掌握具体原理、方法、知识之外，更主要的是学习独立分析问题和解决问题的能力。这种能力的培养来自于教师的引导，仔细地消化教材以及自身的实践。

有一本美国专业教材《飞机设计基础》提出了飞机设计实际上是一种“妥协”的观点。书中认为“一架成功的飞机，许多方面是一种在飞机公司各设计、生产部门工作的工程师们的知识、经验、愿望的妥协。”“试想我们如果允许每个设计、生产部门，对自己分管的那一部分采取过分‘认真’的不妥协态度，将会产生什么样的后果？”这种“妥协”的观点，在机械设计中具有一定的普遍意义。

电气传动系统从原理到应用也是一个不断“妥协”并完善的过程。例如数控机床发展到今天的水平，就是一步步从手动进给、机械靠模、编码开环控制、多参量闭环控制、多功能的加工中心直到较高境界的“机电一体化”系统的系统工程。这也是哲学家常说的辩证法的基本规律之一：对立的相互渗透的规律。电气传动是它自身和其对立物——传动对象（生产机械）相互渗透的运动。类似的例子还能举出一些，如热轧带钢机分散计算机控制系统分为管理控制级、生产过程控制级（区域控制）以及传动控制三级，这样功能更加完善，控制趋向多级分散的方式，可靠性也相应提高。再如电子缝纫机中用微处理机代替了原来的凸轮机构，这样使结构更加紧凑，性能更齐全，控制又方便，价格还合理。

要是我们能经常地从哲学高度来对待学习，经常运用对立相互渗透的规律来分析课程内容的话，那我们就能领悟到列宁在哲学笔记中指出的“思维的理性（智慧）是使有差别的东西的已经钝化的差别尖锐化，使表象的简单多样性尖锐化，达到本质的差别，达到对立”这句话的含义了。

第一章 磁路和变压器

许多电工设备，如电机、变压器、电磁铁等，都是利用电磁感应原理进行工作的。在学习变压器和电机的工作原理之前，必须具备电、磁方面的基本理论知识。有关电路的知识已经在电路基础中进行了详细的分析研究。本章介绍磁路的知识，并以变压器为实例作较详细的介绍。

1.1 磁路的基本物理量

一、磁感应强度 B

我们知道，永磁体及通电流的导线周围都存在着磁场。描述磁场强弱和方向的物理量就是磁感应强度 B 。用磁力线描绘磁场，磁力线的方向与产生磁场的电流方向之间符合右螺旋定则，如图1-1(a)和(b)所示。磁感应强度 B 的大小通常用与磁感应强度 B 垂直的单位面积上的磁力线根数来表示。当载流导体与磁力线相垂直时，磁场内某一点的磁感应强度可用该点磁场作用于1m长，通过1A电流导体上的电磁力 F 来衡量。

$$B = \frac{F}{lI} \quad (1-1)$$

在国际单位制中， B 的单位是特斯拉，简称特 (T)，工程实际应用中常用高斯(Gs)，

$$1\text{T} = 10^4\text{Gs}$$

F 的单位是牛 (N)， l 的单位是米 (m)， I 的单位是安 (A)。

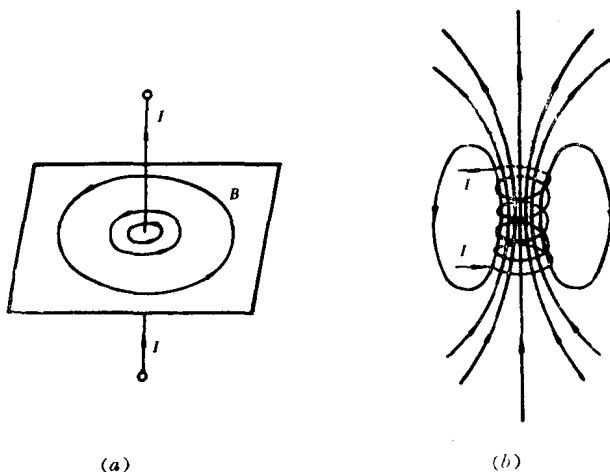


图 1-1 电流与磁力线

二、磁通 Φ

磁感应强度 B 只能描述空间某一点的磁场。如果要描述一个给定面上的磁场，就要引入另一个物理量，即磁通。如果在均匀磁场中，有一个与磁场方向垂直的平面 S ，则磁通 Φ 就是通过截面 S 磁力线的总根数。

$$\Phi = B \cdot S \quad (1-2)$$

在国际单位制中， S 的单位是米²(m²)， Φ 的单位是韦[伯](Wb)， B 的单位是特[斯拉](T)。如果 B 的单位用高斯(Gs)， S 的单位用厘米²(cm²)， Φ 的单位为麦克斯韦(Mx简称麦)。1Wb=10⁸Mx。

∴ (1-2) 式还可以写成
$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

即磁感应强度 B 为单位面积内的磁通。

三、磁导率 μ

通电线圈中所产生磁场的强弱还与线圈中放入的介质有关。当线圈中放入某类介质时，磁场大为增强；而当放入另一类介质时，磁场可能增加不多。表示物质这种磁性质的一个物理量叫做磁导率 μ 。

由实验确定真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米(H/m)。

任何物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 之比称为该物质的相对磁导率 μ_r ，即 $\mu_r = \mu/\mu_0$ 。

物质根据磁性的不同，可分为非磁性物质和铁磁性物质。

非磁性物质的 $\mu \approx \mu_0$ ，即 $\mu_r \approx 1$ ，如铜、银、铝、空气等。铁磁物质的 $\mu_r \gg 1$ ，如铸铁 $\mu_r \approx 200 \sim 400$ 、铸钢 $\mu_r \approx 1000$ 、硅钢片 μ_r 为6000~7000、坡莫合金的 μ_r 甚至可达几万。

铁磁物质导磁性能很强，广泛用于电磁铁、变压器、电机等电工设备中。

四、磁场强度 H

表示磁场中与介质无关的磁场强弱和方向的物理量为磁场强度 H 。它可以定义为介质中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 之比，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-4)$$

在国际单位制中， H 的单位是安/米(A/m)。

1.2 铁磁物质

一、铁磁物质的磁化

铁磁物质主要是指铁、钴、镍及其合金。如果将铁磁物质放入磁场后，磁场将显著增强。铁磁物质呈现很强的磁性，这种现象称为铁磁物质的磁化。

铁磁物质为什么具有被磁化的特性呢？因为铁磁物质不同于其它物质，铁磁物质内部存

在许多很小的天然磁化区叫做磁畴。这些磁畴用一些小磁铁来代表，在铁磁物质未放入磁场以前，这些磁畴杂乱无章地排列着，磁效应互相抵消，对外不呈现磁性，如图1-2(a)所示。当铁磁物质放入磁场后，在外磁场的作用下，磁畴的方向渐趋一致，形成一个附加磁场与外磁场相叠加，从而使磁场大大增强，如图1-2(b)所示。

铁磁物质的这一磁性被广泛用于电工设备中，例如电机、变压器及各种铁磁设备的线圈中都放有铁心。具有铁心的线圈中通入不大的励磁电流，便可以产生足够大的磁通和磁感应强度，这就解决了既要磁通大，又要励磁电流小的矛盾。利用品优的铁磁材料可使同一容量电机、变压器的重量减轻、体积减小。

二、铁磁物质的磁化曲线

将一块尚未磁化的铁磁物质进行磁化，在磁场强度 H 由零开始逐渐增加时，磁感应强度 B 也随着逐渐增加。这种 $B=f(H)$ 的曲线就称为原始磁化曲线。其形状如图1-3所示。

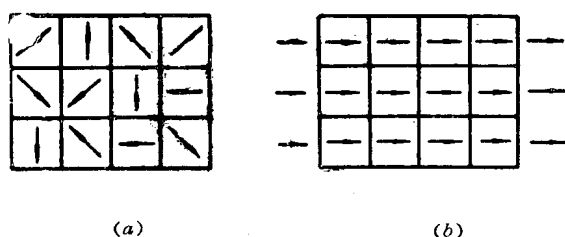


图 1-2 铁磁物质的磁化

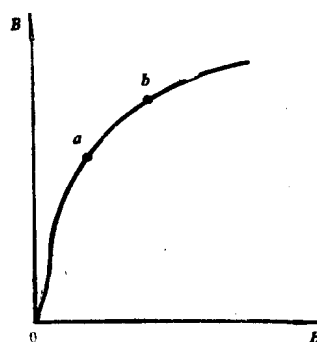


图 1-3 原始磁化曲线

当铁磁物质反复磁化时，得到 B 与 H 的关系如图1-4所示。即磁场强度从 $-H_m$ 向 $+H_m$ 增加时，磁化过程沿曲线 $defa$ 进行，当磁场强度从 $+H_m$ 向 $-H_m$ 减小时，磁化过程沿 $abcd$ 进行。从上述的磁化过程可以看出， B 的变化总是落后于 H 的变化，这种现象称为磁滞。图1-4所示的闭合曲线称为磁滞回线。从图上可以看出，当 H 减小到零时， B 并没有减小到零，而是保持一定数值 B_r ，这是因为外磁场虽然消失了，但磁畴还不能恢复到原来状态，保留一定磁性，称为剩磁感应强度，简称剩磁。去掉剩磁使 $B=0$ ，必须施加反方向磁场强度（图1-4中的 oc 段或 of 段）， H_c 称为矫顽力。

依磁滞回线形状的不同，铁磁物质可分为软磁材料和硬磁材料。磁滞回线窄，剩磁和矫顽力小的材料称为软磁材料，如铸铁、铸钢、硅钢、坡莫合金及铁氧体等。软磁材料的磁导率较高，可用以制造变压器及电机的铁心。磁滞回线宽，剩磁和矫顽力大的材料称为硬磁材料，如铁、钴、镍的合金等。由于硬磁材料的剩磁大，所以常用来制造永久磁铁。

选择不同的磁场强度 H 进行反复磁化，可以得到一系列大小不同的磁滞回线，如图1-5所示。将各磁滞回线的顶点连接起来，所得的一条曲线称为基本磁化曲线。基本磁化曲线并不是原始磁化曲线，但两者差别不大。工程上采用的都是基本磁化曲线。

在进行磁路计算时，铁磁物质的磁化特性用 $B-H$ 曲线（由实验得出）表示。图1-6为几种材料的磁化曲线。

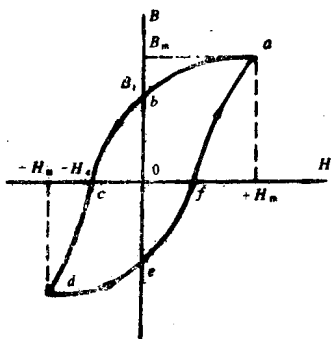


图 1-4 磁滞回线

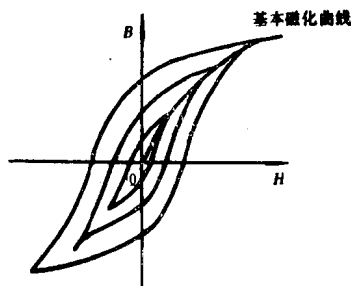


图 1-5 基本磁化曲线

变压器、电机中使用磁滞回线很窄的软磁材料，因此进行磁路计算时，不考虑磁滞现象，可用基本磁化曲线表示 B 与 H 的关系，这样就使计算变得简单了。通常讲的铁磁材料 $B-H$ 曲线即指基本磁化曲线。

由于 $B-H$ 曲线是非线性的，磁导率 $\mu = B/H$ 不是常数，见图1-7， oa 段 μ 较低， ab 段 μ 较高，过了 b 点以后 μ 又较低；进入饱和区后， μ 急剧下降，若 H 再增大， μ 将继续减小，直至逐渐趋近于 μ_0 。

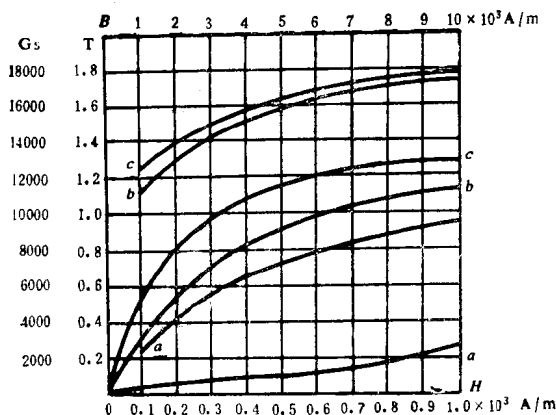


图 1-6 铁磁物质的基本磁化曲线

a —铸铁； b —铸钢； c —硅钢片

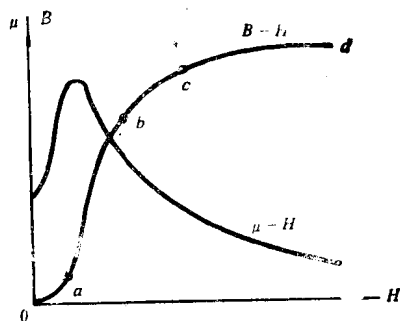


图 1-7 $B-H$ 与 $\mu-H$ 的关系曲线

各种变压器、电机的磁路中，为了在一定的励磁电流下获得强磁场，希望铁磁材料的 μ 较高，因此材料的磁感应强度 B 就不能取得太高。但是 B 也不能取得太低，因为在电压一定的条件下，磁路中的磁通 Φ 为常数。如果 B 取得太低，铁心截面积 S 会很大，铁心材料消耗过多。一般 B 取在磁化曲线拐弯处的膝点附近为好。

1.3 磁路的基本定律

电流流过的区域称为电路，也可以把磁通通过的区域称为磁路。但是电路和磁路只是形式上的相似，本质上是区别的。在变压器、电机及各种铁磁元件中常用磁性材料做成一定

形状的铁心。铁心比周围空气或其它物质的磁导率高得多。因此磁通的绝大部分经过铁心而形成一闭合通路,这种人为造成磁通的路径即磁路。在进行磁路分析计算时,要用到如下几个定律。

一、安培环路定律

实验证明,沿着一个闭合回路 l ,磁场强度 H 的线积分为 $\oint H \cdot dl$ 等于闭合回路所包围的总电流,这就是安培环路定律,或称全电流定律。如用公式表示,即为

$$\oint H \cdot dl = \sum i \quad (1-5)$$

在式(1-5)中,电流的方向与闭合线上磁场强度的方向满足右螺旋规律时,电流 i 取正值,否则 i 取负值。如图1-8中, i_1 、 i_3 取正值, i_2 取负值。

二、磁路的基尔霍夫第一定律

在图1-9中,如果在中间铁心柱的线圈中通以电流,则产生磁通。其路径如虚线所示,从图中可以看出

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_2 + \Phi_3 \\ \sum \Phi &= 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

这就是磁路的基尔霍夫第一定律。

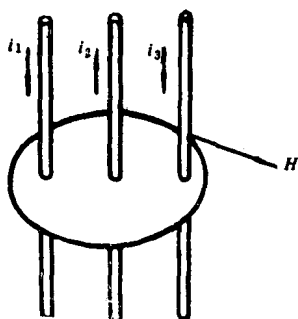


图 1-8 安培环路定律

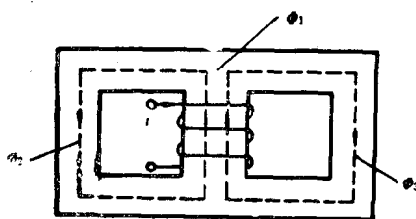


图 1-9 磁路的基尔霍夫第一定律

三、磁路的基尔霍夫第二定律

在磁路计算中,总是将磁路分为若干段,凡材料及截面积相同的取为一段。每一段磁路中,由于截面积相同,所以磁感应强度 B 必定处处相等。又因为使用同一材料做成,磁导率一样,所以磁场强度相等。例如,在图1-10中磁路由铁磁材料及空气隙两部分构成,而铁磁材料这部分的截面积为 A ,故整个磁路应分为二段,每段长度分别为 l_1 、 l_0 。每段磁场强度分别为 H_1 、 H_0 。根据安培环路定律 $H_1 l_1 + H_0 l_0 = \sum IN$

$$\text{或 } \sum Hl = \sum IN \quad (1-7)$$

H 的方向与电流 I 的方向符合右螺旋规律时,都取正号,否则取负号。 H 为单位长度上的磁压降, Hl 为 l 长度磁路上的磁压降。 $\sum Hl$ 是闭合回路的磁压降。 $\sum IN$ 是磁通所包围的总电流,并且由它产生磁通。 N 为线圈匝数, I 为每匝的电流。所以 $\sum IN$ 为磁动势。式(1-7)就是磁路基尔霍夫第二定律。

四、磁路的欧姆定律

根据磁路基尔霍夫第二定律 $Hl = IN$ ， IN 为磁动势， Hl 为磁压降。

$$Hl = \frac{B}{\mu} \cdot l = \frac{\Phi}{\mu S} l$$

$$\frac{\Phi}{\mu S} l = IN$$

$$\Phi = \frac{IN}{l/\mu S}$$

令

$$R_m = \frac{l}{\mu S}, \quad F = IN$$

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 与电路的欧姆定律 $I = E/R$ 形式相似，故称式 (1-8) 为磁路欧姆定律的表达式。

R_m 称为磁阻，它是表示物质对磁通具有阻碍作用的物理量。 R_m 与磁路的平均长度 l 成正比，与磁路截面积 S 、磁导率 μ 成反比。铁磁材料的磁导率 μ 不是一个常数，故铁磁材料的磁阻是非线性的。 F 为磁动势。

五、直流磁路的计算

磁路计算的第一类问题是给定铁心尺寸，欲使磁路产生磁通 Φ ，计算需要施加多大的磁动势 IN 。

下面以直流继电器的磁路为例，介绍直流磁路的计算方法。图 1-11 中磁路由三部分组成，U 形铁心的平均长度为 l_1 ，截面积为 S_1 ；衔铁（指可活动的铁心）的平均长度为 l_2 ，截面积为 S_2 ；空气隙的长度为 δ ，截面积为 S_0 。通常 $\delta \ll l_1$ ， $\delta \ll l_2$ 。现已知气隙的磁通 Φ ，求磁动势 IN 。

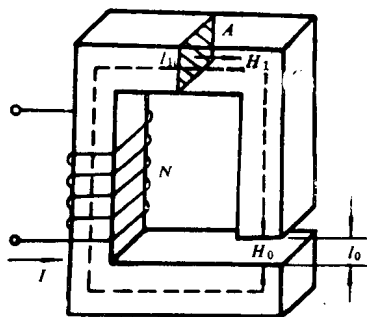


图 1-10 磁路的基尔霍夫第二定律

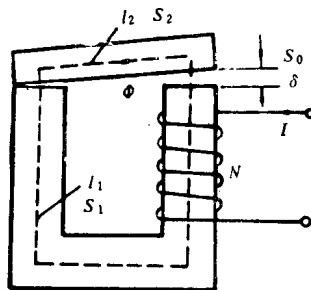


图 1-11 直流继电器的磁路

如果气隙 δ 很小，而且铁心尚未饱和，则铁心周围空气中的磁通（常称为漏磁通）远比铁心中的磁通小，可以忽略不计。这时可认为整个磁路中的磁通 Φ 是相同的，而且每一段磁

路（只要截面积和材料相同）中磁场强度也是相等的。根据安培环路定律沿磁路中心线取 H 的闭合线积分，则得

$$\oint H \cdot dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta = IN \quad (1-9)$$

U形铁心中的磁感应强度 $B_1 = \Phi / S_1$ ，查铁心材料的磁化曲线可得 H_1 ，衔铁的 $B_2 = \Phi / S_2$ ，查衔铁材料的磁化曲线可得 H_2 ；气隙 $B_0 = \Phi / S_0$ ， $H_0 = B_0 / \mu_0$ 代入式 (1-9)。

$$\begin{array}{l} S_1 \rightarrow B_1 = \frac{\Phi}{S_1} \xrightarrow{\text{查 } B_1 = f(H_1)} H_1 \rightarrow H_1 l_1 \\ \text{即 } \Phi \rightarrow S_2 \rightarrow B_2 = \frac{\Phi}{S_2} \xrightarrow{\text{查 } B_2 = f(H_2)} H_2 \rightarrow H_2 l_2 \\ S_0 \rightarrow B_0 = \frac{\Phi}{S_0} \xrightarrow{\text{计算}} H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} \rightarrow H_0 \delta \end{array} \rightarrow \sum Hl = IN$$

计算各段磁路的磁压降即可求出总磁压降 $\sum Hl$ ，依 $\sum Hl = IN$ 可求出磁动势。

例1-1 如图1-12所示的直流继电器磁路的尺寸（单位为mm）。铁心和衔铁材料都是铸钢，气隙的平均长度1mm，线圈匝数 $N = 1000$ ，欲使气隙中的磁通为 $\Phi = 3 \times 10^{-4} \text{Wb}$ ，试计算线圈中应通入的电流 I 值。

解 U形铁心的尺寸：

$$S_1 = 30 \times 30 = 900 \text{mm}^2 = 9 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$l_1 = (120 - 15) \times 2 + (60 + 15 \times 2) = 300 \text{mm} = 0.3 \text{m}$$

衔铁的尺寸：

$$S_2 = 20 \times 30 = 600 \text{mm}^2 = 6 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$l_2 = 60 + 15 \times 2 + 20 = 110 \text{mm} = 0.11 \text{m}$$

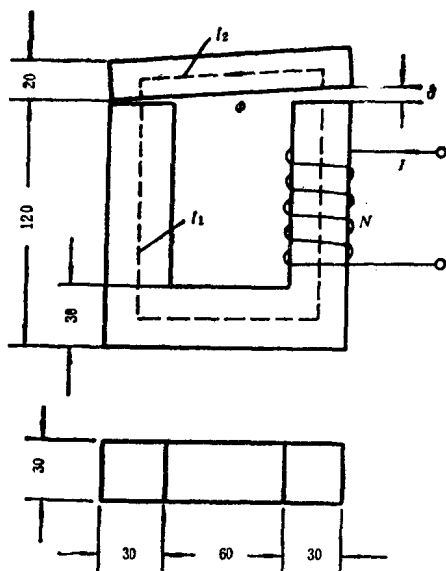


图 1-12 例1-1的磁路

因气隙很小，可认为 $S_0 = S_1 = 9 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。忽略漏磁，认为磁路各部分的磁通相等。

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{3 \times 10^{-4}}{9 \times 10^{-4}} = 0.333 \text{ (T)}$$

查铸钢磁化曲线 $H_1 = 140 \text{ A/m}$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{3 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-4}} = 0.5 \text{ (T)}$$

查铸钢磁化曲线 $H_2 = 200 \text{ A/m}$

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{\Phi}{S_1} = B_1 = 0.333 \text{ T}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.333}{4\pi \times 10^{-7}} = 2.65 \times 10^5 \text{ (A/m)}$$

$$\begin{aligned} IN &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta = 140 \times 0.3 \\ &\quad + 200 \times 0.11 + 2.65 \times 10^5 \times 1 \times 10^{-3} \\ &= 42 + 22 + 265 = 329 \text{ (A)} \end{aligned}$$