



“十三五”普通高等教育本科规划教材

卓越工程师系列教材

电机及拖动基础

修春波 陈亚光 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

程师系列教材

电机及拖动基础

主编 修春波 陈亚光

编写 李红利 成 怡

主审 张宇河



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书介绍了磁路的基本概念、直流电机的工作原理、直流电力拖动系统、变压器的工作原理、交流电机的工作原理、交流电力拖动系统以及控制电机工作原理等内容。

本书是作者在多年教学和科研实践的基础上,参阅了国内外现有教材和相关文献后编写完成的。全书注重基本概念与基本原理的介绍,重点介绍了电力拖动系统运行性能的分析与计算,简化了较为繁琐的理论推导过程,强调工程意识的培养与训练。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业本科学生的教材,也可作为电气信息类其他专业有关课程及“运动控制”课程的基础教材,对广大工程技术人员也有一定的参考价值。

电机及拖动基础/修春波,陈亚光主编. —北京:中国电力出版社,2016.3

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8825-3

I. ①电… II. ①修… ②陈… III. ①电机—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材 IV. ① TM3
② TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 024773 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 226 千字
定价 21.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是为适应高等教育改革与发展的需求,尤其为适应“卓越工程师教育培养计划”的要求,结合多所高校“电机及拖动基础”课程教学改革中所获得的成果而编写的。

随着科技的发展,新的科研成果和理论不断出现,人才培养的知识结构与体系也不断完善,面临新形势下高等教育人才培养的需求,专业基础课程教学内容需要及时更新和调整。本书在保证基础原理和基础知识完整的情况下,降低了理论深度,删除了繁琐的数学推导,注重物理意义的分析,强调工程应用方法和工程意识的培养。

本书共分为七章,第一章介绍了磁路的基本概念以及简单磁路的分析与计算方法,第二章介绍了直流电机的工作原理及基础知识,第三章介绍了直流电力拖动系统的分析与计算方法,第四章介绍了变压器的工作原理,第五章介绍了三相异步电动机的工作原理及基础知识,第六章介绍了异步电动机的电力拖动,第七章介绍了控制电机的基本原理。

本书第一、二章由修春波、成怡合作编写,第三、四章由修春波、李红利合作编写,第五~七章由陈亚光、修春波合作编写。全书由修春波统稿,北京理工大学张宇河教授主审,并提出了宝贵的修改意见,在此深表感谢。

由于编者能力和水平所限,书中不妥与错误之处在所难免,恳请各位专家和读者不吝指导和帮助。

编者

2015年9月于天津

目 录

前言	
绪论	1
第一章 磁路	4
第一节 磁路的基本概念	4
第二节 磁路的基本定律	7
习题	11
第二章 直流电机	12
第一节 直流电机的工作原理与结构	12
第二节 直流电动机的绕组	16
第三节 直流电机的励磁方式及磁场	21
第四节 感应电动势与电磁转矩的计算	24
第五节 直流电机的运行原理	26
习题	36
第三章 直流电动机的电力拖动	37
第一节 电力拖动系统的动力学基础	37
第二节 他励式直流电动机的机械特性	39
第三节 他励式直流电动机的起动	44
第四节 他励式直流电动机的制动	50
第五节 他励式直流电动机的调速	54
第六节 串励式及复励式直流电动机的机械特性	55
习题	56
第四章 变压器	57
第一节 变压器的工作原理、基本结构及分类	57
第二节 单相变压器的空载运行	62
第三节 单相变压器的负载运行	65
第四节 单相变压器的等效电路及参数测定	67
第五节 三相变压器	71
第六节 自耦变压器和互感器	74
习题	76
第五章 异步电动机	77
第一节 异步电动机的基本功能与用途	77
第二节 三相异步电动机的结构	77
第三节 三相异步电动机的工作原理及铭牌数据	79
第四节 三相异步电动机的定子绕组	83

第五节	三相异步电动机的定子磁动势和电动势	86
第六节	三相异步电动机的基本方程式	93
第七节	三相异步电动机的等效电路	97
第八节	三相异步电动机的功率和转矩	100
第九节	三相异步电动机的工作特性	101
第十节	三相异步电动机参数的测定	102
习题		103
第六章	异步电动机的电力拖动	104
第一节	三相异步电动机电磁转矩的三种表达式	104
第二节	三相异步电动机的机械特性	105
第三节	三相异步电动机的制动	110
第四节	三相异步电动机的起动方法	114
习题		120
第七章	控制电机	122
第一节	单相异步电动机	122
第二节	伺服电动机	124
第三节	步进电动机	128
第四节	测速发电机	131
第五节	旋转变压器	134
习题		136
习题答案		137
参考文献		144

绪 论

一、电机及电力拖动技术的基础知识

通常,电机是指利用电磁感应定律或电磁力定律实现能量转换或信号转换的电磁机械装置。其中实现能量转换的电机称为动力电机,实现信号转换的电机称为控制电机。

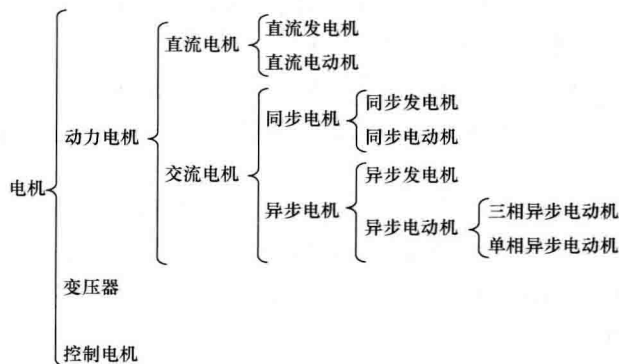
在动力电机中,从能量转换的方向来看,将电能转换为机械能的电机称为电动机,将机械能转换为电能的电机称为发电机。理论上,任何电机既可作电动机运行,也可作发电机运行,因此,电机是一种双向的机电能量转换装置,这一特性称为电机的可逆原理。

按照供电电源的种类不同,电动机又分为直流电动机和交流电动机。按照工作原理不同,交流电动机又分为同步电动机和异步电动机,其中异步电动机又称为感应电动机。异步电动机又分为三相异步电动机和单相异步电动机。而直流电机按照励磁方式不同分为他励式直流电机、并励式直流电机、串励式直流电机和复励式直流电机。

与动力电机相比,控制电机的容量和体积一般都比较小,种类繁多,在自动控制系统中常用作检测、放大、执行和校正等元件使用。

另外,变压器虽然不是机电能量转换装置,但它的工作原理与异步电动机十分相似,换句话说,变压器相当于一台静止的异步电动机,而异步电动机相当于是旋转着的变压器。

由此,本书所涉及的电机类型可归纳如下:



在现代工业生产过程中,生产机械的常用拖动方式有气动、液压和电机拖动,而绝大多数的生产机械都是采用电动机拖动。采用电动机拖动生产机械运行的系统称为电力拖动系统。电力拖动具有起制动特性好、调速控制简单方便、效率高等优点。因此,电力拖动系统在机床设备、起重机、运输机械、纺织机械、电动车等许多领域中得到了广泛的应用。

电动机是电力拖动系统的核心装置之一。采用直流电动机拖动生产机械的系统称为直流电力拖动系统,采用交流电动机拖动生产机械的系统称为交流电力拖动系统。

直流电力拖动系统具有起动转矩大、调速范围宽、控制简单等优点。但直流电动机成本高,结构复杂,具有电刷和换向器等结构,这增加了拖动系统的运行与维护复杂度,且不适合在易燃易爆等场合运行,从而限制了直流电力拖动系统的应用范围。

交流电动机具有结构简单、价格低廉、维护方便等优点,特别是电力电子技术及自动控制技术的发展,改善了交流电动机的控制性能,为交流电力拖动系统的应用提供了理论和技术保障。目前,交流电力拖动系统具有更加广阔的应用领域。

二、电机的发展历史

1820年,丹麦的物理学家、化学家奥斯特发现了电流的磁效应,在此基础上,法国物理学家安培对这一现象进行了深入研究,奠定了电磁学的研究基础。

1831年,英国物理学家、化学家法拉第发现了电磁感应现象,为生产和制造各种发电机提供了理论依据。

1834年,亚哥比制造了世界上第一台可实用的直流电动机。

1838年,亚哥比直流电动机采用化学电池供电,在涅瓦河上成功完成了拖动轮船的试验。

1856年,英国有了电机的记载。

1871年,凡麦尔发明了交流发电机。

1876年,俄国人亚布洛契柯夫制成了一台多相交流发电机。

1878年,亚布洛契柯夫使用交流发电机和变压器为照明装置供电。

1885年,意大利物理学家费拉里斯发明了两相交流感应电动机。

1888年,俄国的多里沃·多勃罗沃尔斯基发明了三相感应电动机,为现代三相电路和三相电机的发展奠定了基础。

1889年,多里沃·多勃罗沃尔斯基发明了第一台实用的三相交流笼型异步电动机。

1890年,多里沃·多勃罗沃尔斯基又发明了三相变压器。

1891年,世界上第一条三相交流输电线铺设完成,三相制在工业中正式得到应用。三相制的建立标志着电工技术发展到了一个新的阶段。

19世纪90年代,异步电动机在欧美等国家得到了广泛的应用。由于用电量的增加,导致三相电网容量迅速扩大,促使电力工业得到了快速发展,推动了三相同步发电机和三相电力变压器的快速发展。

20世纪后,由于异步电动机使用数量的增加,导致电网功率因数下降严重,降低了电网输送有功功率的能力。而同步电动机由于通过调节励磁可为电网提供容性的无功功率,从而改善电网的功率因数,因此,同步电动机的应用得到了快速的发展。

现在的电机与早期的电机相比,原理和结构基本没有变化,但绝缘材料、导电材料和导磁材料得到了新的发展;另外,先进的制造工艺改善了电机冷却和散热的条件,减轻了电机的质量,提高了单机容量。

三、电力拖动的发展历史

早期的生产实践中,人们主要采用人力、畜力、水力和风力等原动力推动生产机械运转。之后发明了蒸汽机和内燃机等作为生产机械的原动机。随着电机制造技术的不断成熟,电力拖动技术得到了迅速发展。由于电能具有输送方便,电力拖动系统具有控制灵活、运行可靠、经济效率高等优点,因此电力拖动迅速成为各种生产机械的主要拖动方式。

早期的电力拖动采用一台电动机拖动多台生产机械的方式工作。电动机距离生产机械较远,需要采用天轴和皮带等装置来拖动生产机械,因此传动损耗大,生产效率低。而且,一台机械的故障会导致多台机械停机,同时,起制动、调速性能等都很难满足生产机械的要

求,运行不够安全可靠。这种拖动方式在 20 世纪 30 年代逐渐被淘汰,取而代之的是单电动机拖动方式和多电动机拖动方式,从而简化了生产机械的结构,提高了控制性能。

20 世纪 60 年代以前,由于没有可供实用的交流变频电源,使得交流拖动系统的性能不如直流拖动系统的性能好,因此,直流拖动系统得到了广泛的应用。进入 20 世纪 60 年代,随着大功率半导体器件的出现,电力电子技术得到了迅速发展,提高了交流拖动系统的调速性能,特别是交流变频调速系统采用矢量控制或直接转矩控制技术后,其拖动性能已经可以和直流拖动系统相媲美,导致直流电动机结构复杂、成本高、维护困难等缺点变得越发明显,因此交流拖动系统的应用迅速超越了直流拖动系统。另外,随着交流变频技术的发展,同步电动机的起动和调速问题也得到了很好的解决,而同步电动机具有补偿电网功率因数和控制精度高等优点,因此,同步电动机拖动系统也得到了应用和发展,具有十分广阔的应用前景。

四、本书主要内容和任务

电机及拖动基础是自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的专业基础课,主要介绍电机原理和电机拖动基础两部分内容。

通过课程要求,本书帮助学生熟悉常用的直流电机、变压器、交流电机的基本结构和运行原理,掌握直流电动机和三相异步电动机的机械特性及各种运行状态的基本分析方法,掌握直流电动机和三相异步电动机起动、制动、调速的基本原理和相关计算,掌握电力拖动系统的基本组成,了解各种控制电机的运行原理。

本书的主要内容为后续“自动控制原理”、“交直流调速系统”、“工厂电气控制技术”、“计算机控制技术”等课程提供了必要的基础知识。

第一章 磁 路

第一节 磁路的基本概念

一、磁场

电机是一种机电能量转换装置,实现能量转换的耦合介质为磁场。描述磁场常用的物理量有磁感应强度、磁通量和磁场强度等。

磁感应强度是一个矢量,它的符号为 B ,单位为 T (特斯拉), $1T=1Wb/m^2$ 。它是用来表征磁场强弱和磁场方向的物理量,与产生它的电流方向满足右手螺旋定则。

磁通量是指通过磁场中某一面积的磁感线数,简称磁通,符号为 Φ ,单位为 Wb 。在均匀磁场中,穿过面积 S 的磁通为

$$\Phi = BS \cos \theta \quad (1-1)$$

式中: θ 为面积 S 的法线与磁感应强度 B 之间的夹角。

磁场强度是表征磁场的另一个基本物理矢量,符号为 H ,单位为 A/m 。磁场强度与磁感应强度满足

$$B = \mu H \quad (1-2)$$

式中: μ 为磁导率。

磁导率是表征物质导磁能力的物理量。它的数值随介质的差异而不同,真空中的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ 。通常,物质按照介质的导磁性能分为非铁磁物质和铁磁物质。非铁磁物质,如空气、铜、铝以及各种绝缘材料等的磁导率可认为等于真空磁导率;铁磁材料,如钢、铁、镍以及其合金等的磁导率远大于真空磁导率几千甚至上万倍。铁磁物质的磁导率 μ_{Fe} 与真空磁导率 μ_0 的关系可表示为

$$\mu_{Fe} = \mu_r \mu_0 \quad (1-3)$$

式中: μ_r 为铁磁物质的相对磁导率。

由于导电体的电导率可比非导电体的电导率大 10^{16} 个数量级,因此,电流一般沿着导体流通,主要存在于由导体构成的电路中。而导磁体(铁磁材料)与非导磁体(非铁磁材料)的磁导率之比仅为 $10^3 \sim 10^5$ 个数量级,因此,磁感应线不仅存在于导磁体中,也存在于非导磁体中。磁是以场的形态存在的。

二、铁磁物质的磁化

将铁磁物质放置于磁场中,磁场会显著增强。这是由于铁磁物质在外磁场中能够呈现出

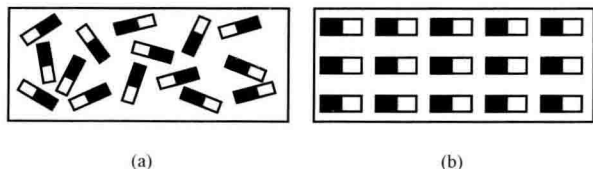


图 1-1 铁磁物质的磁化

(a) 未磁化; (b) 磁化

很强的磁性,这一现象称为铁磁物质的磁化。铁磁物质之所以能够被磁化,是因为在铁磁物质的内部有很多天然磁化区,这些磁化区称为磁畴,如图 1-1 所示。

在没有外磁场作用时,铁磁物质中的磁畴混乱排列,磁效应相互抵消,铁

磁物质对外不显磁性。当铁磁物质放置于外磁场中时,磁畴在外磁场的作用下,沿着磁力线方向旋转,由于磁畴排列有序,铁磁物质对外显现出一定的磁性,此时,铁磁物质就被磁化了。铁磁物质产生的磁化磁场叠加在外磁场上,可使合成磁场大大加强。

三、磁化曲线和磁滞回线

1. 起始磁化曲线

非铁磁材料的磁导率通常可认为是定值,磁感应强度和磁场强度之间呈线性关系。而铁磁材料的磁导率随着铁磁材料磁化程度的不同而变化,造成磁感应强度和磁场强度之间为非线性关系。对一块未被磁化的铁磁材料进行磁化,当磁场强度 H 从零开始逐渐增大时,磁感应强度 B 也随之增大,磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系曲线 $B=f(H)$ 称为起始磁化曲线,如图 1-2 所示。

起始磁化曲线分为四个阶段。第一个阶段是 Oa 段。该阶段外磁场很弱,不足以使铁磁材料中的磁畴大量转向,因此磁感应强度增加很慢。第二个阶段为 ab 段。该阶段随着外磁场的增强,铁磁材料中的磁畴开始转向,趋向于外磁场方向,外磁场越强,转向的磁畴越多,因此,磁感应强度增加得很快。第三阶段为 bc 段, b 点称为膝点或饱和点。该阶段铁磁材料中的大部分磁畴已经转向,可供转向的磁畴数量很少,因此,外磁场虽然进一步增强,但磁感应强度增加得却越来越慢。第四阶段为 cd 段。该阶段铁磁材料中几乎没有可供转向的磁畴,铁磁材料的性质与非铁磁材料的性质相似,磁化曲线成为与非铁磁材料特性基本相平行的直线。

2. 磁滞回线

若将铁磁材料进行周期性反复磁化,磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系曲线就变为如图 1-3 所示的形状。

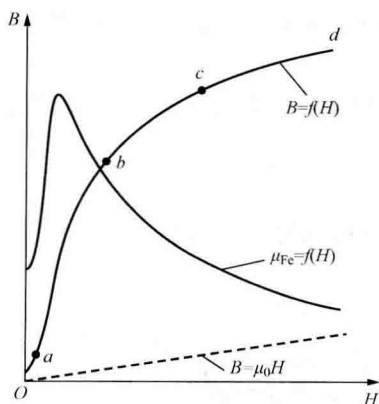


图 1-2 铁磁材料的起始磁化曲线

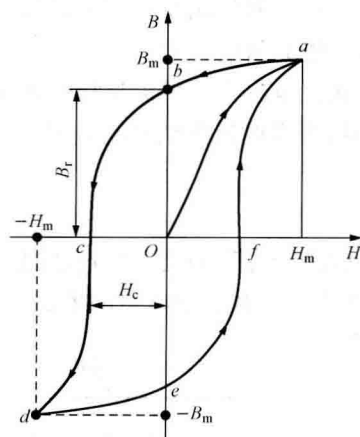


图 1-3 铁磁材料的磁滞回线

当磁场强度 H 从零增加到最大值 H_m 时,磁感应强度沿着起始磁化曲线 Oa 达到 B_m ,之后逐渐减小磁场强度 H ,则一些转向的磁畴开始恢复到原来位置,磁感应强度逐渐减小,但当磁场强度减小至零时(如图 b 点所示),由于摩擦等原因,很多已转向的磁畴并未恢复到原位置,因此磁感应强度并不为 0,而是 B_r ,称为剩磁,也就是说,去掉外磁场后,铁磁材料仍然保留有剩磁。如果要去掉剩磁,则要反向加磁场,迫使转向的磁畴恢复到原来位

置,使磁感应强度变为0,此时所加的外磁场 H_c 称为矫顽力,如图 c 点所示,继续增大反向磁场至 $-H_m$,磁感应强度可达到负的最大值 $-B_m$,如图 d 点所示,去掉反向外磁场,

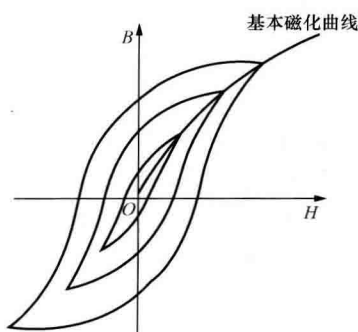


图 1-4 基本磁化曲线

铁磁材料保留反向剩磁,如图 e 点所示,施加正向矫顽力磁场,可去除反向剩磁,如图 f 点所示,继续增大正向磁场至最大值 H_m ,铁磁材料的磁感应强度又增大到最大值 B_m ,如图 a 点所示。此后反复对铁磁材料进行周期性磁化,磁感应强度 B 与磁场强度 H 就沿着曲线 $a-b-c-d-e-f-a$ 变化,铁磁材料的磁感应强度 B 的变化始终滞后于磁场强度 H 的变化,这种现象称为磁滞, $B-H$ 的闭合曲线称为磁滞回线。

选择不同的磁场强度 H_m 对同一铁磁材料进行反复磁化可得到不同的磁滞回线,如图 1-4 所示。将各磁滞回线的

顶点连接起来,所得到的曲线称为基本磁化曲线。

磁滞回线较窄、剩磁和矫顽力都较小的铁磁材料称为软磁材料。磁滞回线较宽、剩磁和矫顽力都较大的铁磁材料称为硬磁材料。软磁材料的磁导率较高,可用来制造电机和变压器的铁心;硬磁材料的剩磁较大,可用来制造永久磁铁。

四、损耗

当铁磁材料处于交变磁场中时,铁磁材料就会被反复磁化,这样,铁磁材料中的磁畴就会因为相互不停摩擦而消耗大量能量,并以热量的形式释放出来,由此造成的损耗称为磁滞损耗。

另外,由于铁心是导体,当磁场变化时,铁心中就会产生感应电动势,引起环流,这些环流在铁心内部作旋涡状流动,称为涡流,涡流在铁心中产生的损耗称为涡流损耗。磁通变化的频率越高、磁通密度越大,产生的感应电动势就越大,涡流损耗也越大。铁心的电阻率越小,产生的涡流也越大,涡流损耗也越大。

磁滞损耗和涡流损耗都消耗有功功率,产生热量,使铁心发热,二者之和称为铁心损耗,一般用 p_{Fe} 表示。

五、磁路

磁通通过的路径称为磁路。磁通通过的路径既可以是铁磁材料,也可以是非铁磁材料。

图 1-5 所示为变压器和直流电机的磁路示意图。

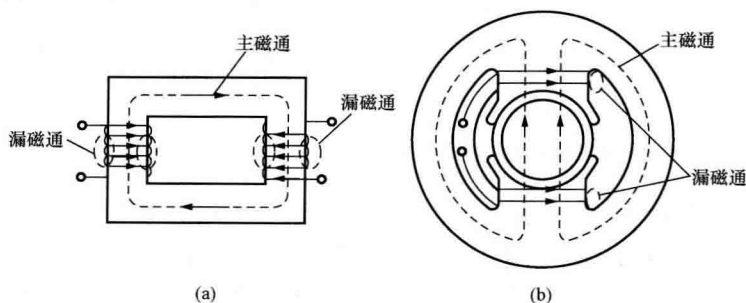


图 1-5 变压器和直流电机的磁路示意图

(a) 变压器磁路; (b) 2 极直流电机磁路

将线圈套装在铁心上,当线圈中通有电流时,线圈的周围就会产生磁场,该线圈称为励磁线圈,线圈中的电流称为励磁电流。如果励磁电流为直流电,磁路中的磁通是不随时间变化而变化的恒定磁通,这样的磁路称为直流磁路。如果励磁电流为交流电,磁路中的磁通就会随着时间的变化而发生变化,这样的磁路称为交流磁路。一般直流电机的磁路属于直流磁路,交流电机和变压器的磁路属于交流磁路。

由于电机中铁磁材料的磁导率远大于空气的磁导率,因使绝大部分磁通都在铁心内通过,因此,铁心内的磁通称为主磁通;空气中存在的少量分散的磁通称为漏磁通。主磁通通过的路径称为主磁路,漏磁通通过的路径称为漏磁路。

第二节 磁路的基本定律

磁路和电路虽然具有完全不同的性质,但在形式上却存在着一定的对偶关系。表 1-1 列出了电路系统与磁路系统中的物理量之间的对偶关系。

表 1-1 电路系统与磁路系统中的物理量之间的对偶关系

电路系统	磁路系统	电路系统	磁路系统
电动势	磁动势	电压降	磁压降
电流	磁通	欧姆定律	磁路欧姆定律
电流密度	磁感应强度	基尔霍夫第一定律	磁路基尔霍夫第一定律
电导率	磁导率	基尔霍夫第二定律	磁路基尔霍夫第二定律
电阻	磁阻		

下面对磁路分析和计算中常用的几个定律进行介绍。

一、磁路的基本定律

1. 安培环路定律

沿着任何一条闭合回线 L , 磁场强度 H 的线积分值 $\oint_L H dl$ 等于该闭合回线所包围的总电流的代数和 $\sum i$, 该定律称为安培环路定律。如图 1-6 所示, 该定律的数学表示式为

$$\oint_L H dl = \sum i$$

如果电流方向与闭合回路的环形方向符合右手螺旋关系, 则式中电流取正号, 否则取负号。图 1-6 所示情况, 电流 i_1 、 i_3 取负号, 电流 i_2 取正号。

2. 磁路的欧姆定律

作用在磁路上的磁动势等于磁路内的磁通量与磁阻的乘积, 该定律称为磁路的欧姆定律, 其形式与电路的欧姆定律相似。

磁路的磁阻 R_m 公式与电路的电阻公式在形式上相似, 即

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (1-4)$$

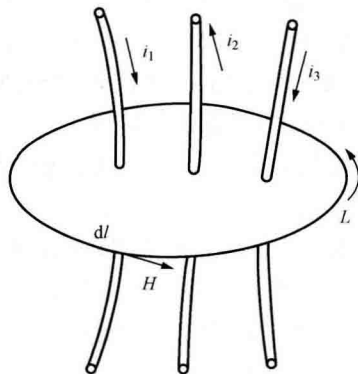


图 1-6 安培环路定律

式中: l 为磁路的平均长度; μ 为材料的磁导率; A 为铁心截面积。

磁阻的大小与磁路的尺寸和磁路的材料有关。磁阻与磁路的平均长度成正比, 与磁路的截面积和磁路材料的磁导率成反比, 其单位为 H^{-1} , $1 \text{ H}^{-1} = 1 \text{ A/Wb}$ 。

磁阻的公式虽然和电阻的公式相似, 但性质却完全不同。在不考虑温度等影响的情况下, 导电材料的电导率是常数, 因此电阻也是常数; 而铁磁材料的磁导率是随着磁路中磁感应强度 B 的饱和程度不同而变化的, 因此磁路的磁阻也不是常数, 产生磁路系统的是一种非线性系统, 因此磁路的计算要比电路复杂得多。

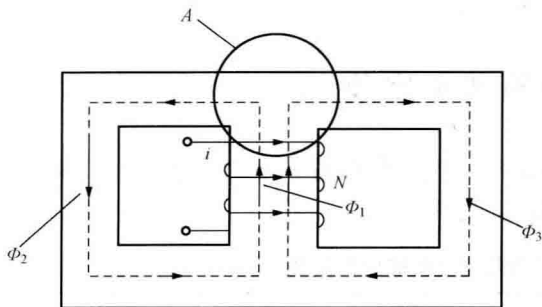


图 1-7 磁路的基尔霍夫第一定律

3. 磁路的基尔霍夫定律

(1) 磁路的基尔霍夫第一定律。根据磁通的连续性, 穿出或进入任何一闭合面的总磁通恒等于零, 这就是磁路的基尔霍夫第一定律, 也称为磁通连续性定律, 与电路中的基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$ 相似。如图 1-7 所示, 设进入闭合面 A 的磁通为负, 穿出闭合面 A 的磁通为正, 则

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 \quad (1-5)$$

即 $\sum \Phi = 0$ 。

(2) 磁路的基尔霍夫第二定律。与电路中的基尔霍夫第二定律相似, 沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁压降的代数和, 该定律称为磁路的基尔霍夫第二定律, 该定律实际上可看作是安培环路定律的另一种表达形式。如图 1-8 所示, 磁路可分为三段: 两段是不同截面积的铁磁材料, 第三段为气隙。设铁心上的励磁磁动势为 Ni , 根据安培环路定律可得

$$\begin{aligned} Ni &= \sum_{k=1}^3 H_k l_k \\ &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_\delta \delta \\ &= \Phi_1 R_{m1} + \Phi_2 R_{m2} + \Phi_\delta R_{m\delta} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中: l_1 为截面积为 A_1 的铁心段的平均长度; l_2 为截面积为 A_2 的铁心段的平均长度; H_1 为截面积为 A_1 的铁心磁路的磁场强度; H_2 为截面积为 A_2 的铁心磁路的磁场强度; H_δ 为气隙内的磁场强度; Φ_1 为截面积为 A_1 的铁心内的磁通; Φ_2 为截面积为 A_2 的铁心内的磁通; Φ_δ 为气隙内的磁通; R_{m1} 为截面积为 A_1 的铁心磁路的磁阻; R_{m2} 为截面积为 A_2 的铁心磁路的磁阻; R_δ 为气隙内的磁阻。

由于 H_k 也是磁路单位长度上的磁压降, 因此 $H_k l_k$ (也就是 l_k 段的磁压降) 等于 $\Phi_k R_{mk}$, 而 Ni 是作用在该磁路上的总磁动势。

磁路和电路虽然存在形式上的相似性和对偶关系, 但它们的物理本质完全不同:

(1) 电路中有电流时, 就会有功率损耗; 而在直流磁路中, 维持一定的磁通时, 铁心中没有功率损耗。

(2) 在电路中一般可认为电流全部在导线中流通, 导线外没有电流; 而在磁路中由于没

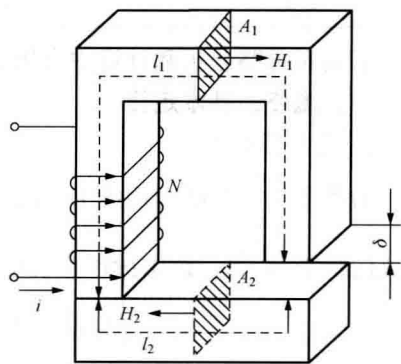


图 1-8 磁路的基尔霍夫第二定律

有绝对的磁绝缘体,因此除了铁心中有磁通外,周围的空气中也散布着一定的漏磁通。

(3) 电路中的电导率在一定温度下是不变的,而磁路中的磁导率是随着铁磁材料磁饱和程度的不同而变化的。

(4) 对于线性电路,可采用叠加原理进行计算;而由于磁路属于非线性系统,因此计算时不能采用叠加原理。

二、简单直流磁路的计算

磁路的计算一般分为正问题和逆问题两种类型。正问题是指给定磁通量计算所需要的励磁磁动势,逆问题是给定励磁磁动势求磁路内的磁通量。逆问题比较复杂,常用试探法求解。电机和变压器的磁路计算问题一般属于正问题,正问题的求解步骤如下:

(1) 根据材料和截面尺寸的不同对磁路进行分段。

(2) 计算各段磁路的平均长度 l_k 和有效截面积 A_k 。

(3) 利用 $B_k = \Phi_k / A_k$ 计算各段磁路的平均磁通密度 B_k 。

(4) 根据平均磁通密度 B_k 求出对应的磁场强度 H_k 。

(5) 计算各段磁路的磁压降 $H_k l_k$, 根据 $F = \sum H_k l_k$ 求得产生给定磁通量时所需的励磁磁动势。

【例 1-1】 有一闭合铁心磁路,铁心的截面积 $A = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,磁路的平均长度 $l = 0.5 \text{ m}$,铁心的磁导率 $\mu_{\text{Fe}} = 5000 \mu_0$,套装在铁心上的励磁绕组匝数 $N = 100$ 匝,如果要在铁心中产生 1 T 的磁通密度,试求需要多少励磁磁动势和励磁电流。

$$\text{解 磁场强度 } H = B / \mu_{\text{Fe}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 159 (\text{A/m})$$

$$\text{磁动势 } F = Hl = 159 \times 0.5 = 79.5 (\text{A})$$

$$\text{励磁电流 } i = F / N = \frac{79.5}{100} = 0.795 (\text{A})$$

【例 1-2】 铁心材料由铸钢和空气隙构成,铁心截面积 $A_{\text{Fe}} = 3 \times 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,磁路平均长度 $l_{\text{Fe}} = 0.3 \text{ m}$,气隙长度 $\delta = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$,如图 1-9 所示。求该磁路获得磁通量 $\Phi = 0.0009 \text{ Wb}$ 时,所需的励磁磁动势。考虑到气隙磁场的边缘效应,在计算气隙有效面积时,通常在长、宽方向各增加一个 δ 值。根据铸钢磁化曲线可查得,与 $B_{\text{Fe}} = 1 \text{ T}$ 对应的 $H_{\text{Fe}} = 9 \times 10^2 \text{ A/m}$ 。

解 铁心内磁通密度为

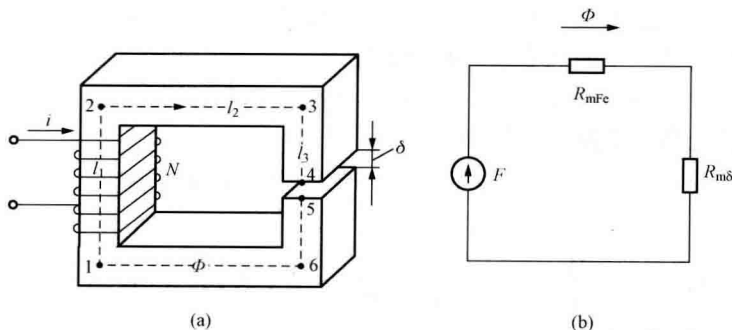


图 1-9 简单串联磁路

(a) 串联磁路; (b) 模拟磁路图

$$B_{\text{Fe}} = \frac{\Phi}{A_{\text{Fe}}} = \frac{0.0009}{9 \times 10^{-4}} = 1(\text{T})$$

由于与 B_{Fe} 对应的 $H_{\text{Fe}} = 9 \times 10^2 \text{ A/m}$, 可得

$$\text{铁心段的磁位降 } H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} = 9 \times 10^2 \times 0.3 = 270 (\text{A})$$

$$\text{空气隙内磁通密度 } B_{\delta} = \frac{\Phi}{A_{\delta}} = \frac{0.0009}{3.05^2 \times 10^{-4}} = 0.967 (\text{T})$$

$$\text{气隙磁场强度 } H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0.967}{4\pi \times 10^{-7}} = 77 \times 10^4 (\text{A/m})$$

$$\text{气隙磁位降 } H_{\delta} l_{\delta} = 77 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-4} = 385 (\text{A})$$

$$\text{励磁磁动势 } F = H_{\text{Fe}} l_{\text{Fe}} + H_{\delta} l_{\delta} = 270 + 385 = 655 (\text{A})$$

【例 1-3】 图 1-10 所示为简单并联磁路, 铁心所用材料为 DR530 硅钢片, 铁心柱和铁轭的截面积均为 $A = 2 \times 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 磁路段的平均长度为 $l = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$, 气隙长度 $\delta_1 = \delta_2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 励磁线圈匝数 $N_1 = N_2 = 1000$ 匝。不计漏磁通, 试求在气隙内产生 $B_{\delta} = 1.211 \text{ T}$ 的磁通密度时, 所需的励磁电流 i 。

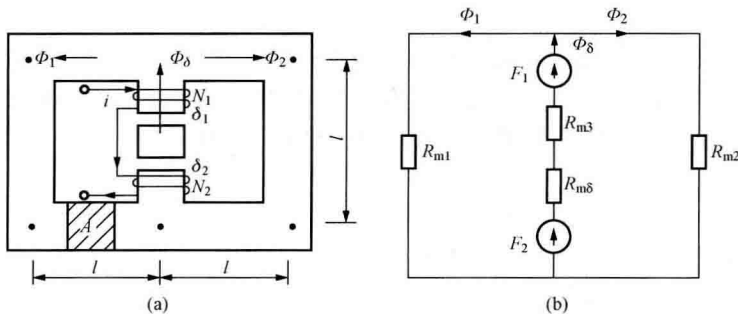


图 1-10 简单并联磁路

(a) 并联磁路; (b) 模拟磁路图

解 由于磁路是并联并且对称的, 故只需计算其中一个磁回路即可。

根据磁路基尔霍夫第一定律, 得

$$\Phi_{\delta} = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi_1 = 2\Phi_2$$

根据磁路基尔霍夫第二定律, 得

$$\sum H_k l_k = H_1 l_1 + H_3 l_3 + 2H_{\delta} \delta = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

由图 1-10 (a) 知, 中间铁心段的磁路长度为

$$l_3 = l - 2\delta = (5 - 0.5) \times 10^{-2} = 4.5 \times 10^{-2} (\text{m})$$

左、右两边铁心段的磁路长度均为

$$l_1 = l_2 = 3l = 3 \times 5 \times 10^{-2} = 15 \times 10^{-2} (\text{m})$$

气隙磁位降为

$$2H_{\delta} \delta = 2 \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta = 2 \times \frac{1.211}{4\pi \times 10^{-7}} \times 2.5 \times 10^{-3} = 4818 (\text{A})$$

中间铁心段的磁位降为

$$B_3 = \frac{\Phi_{\delta}}{A} = \frac{1.211 \times (2 + 0.25)^2 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 1.533 (\text{T})$$

由于根据 DR530 的磁化曲线可得, 与 B_3 对应的 $H_3 = 19.5 \times 10^2 \text{ A/m}$, 则中间铁心段的磁位降为

$$H_3 l_3 = 19.5 \times 10^2 \times 4.5 \times 10^{-2} = 87.75 (\text{A})$$

左、右两边铁心的磁位降磁通密度为

$$B_1 = B_2 = \frac{\Phi_\delta / 2}{A} = \frac{0.613 \times 10^{-3} / 2}{4 \times 10^{-4}} = 0.766 (\text{T})$$

根据 DR530 的磁化曲线查得, $H_1 = H_2 = 215 \text{ A/m}$, 由此得左、右两边铁心段的磁位降为

$$H_1 l_1 = H_2 l_2 = 215 \times 15 \times 10^{-2} = 32.25 (\text{A})$$

总磁动势和励磁电流为

$$\sum Ni = 2H_\delta \delta + H_3 l_3 + H_1 l_1 = 4818 + 87.75 + 32.25 = 4938 (\text{A})$$

$$i = \frac{\sum Ni}{N} = \frac{4938}{2000} = 2.469 (\text{A})$$

三、交流磁路

当铁心线圈中的励磁电流是恒定的直流电时, 所得到的磁路为直流磁路, 由于此时不会在线圈和铁心中产生感应电动势, 因此功率损耗只有线圈电阻所产生的铜耗 $I^2 R$ 。当励磁电流为交流电时, 由于电流随时间变化, 因此其电磁关系较直流磁路复杂得多, 但每一瞬间可看作与直流磁路一样, 都遵循磁路的基本定律。

另外, 交变的磁通会在铁心中产生铁心损耗, 而且由于磁通量随时间变化, 因此会在励磁线圈中产生感应电动势 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 。通过后续章节的学习还可知, 磁饱和现象会导致励磁电流、磁通和电动势等波形发生畸变。

习 题



- 1.1 磁路与电路的本质区别是什么?
- 1.2 什么是铁心损耗? 铁心损耗是如何产生的?
- 1.3 磁路的基尔霍夫定律的内容是什么?
- 1.4 铁磁材料有几类? 各自有何用途?
- 1.5 与电路计算相比, 磁路计算需要注意哪些问题?