

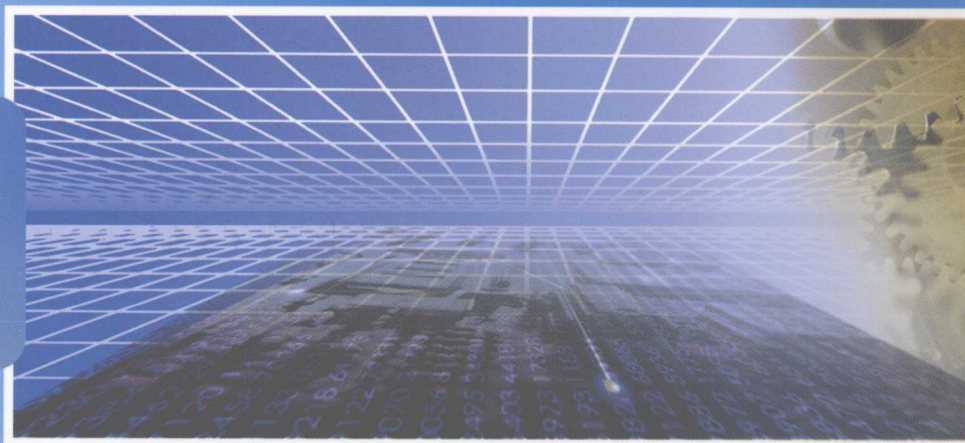


D-K-YT013-0D

空军航空机务系统教材

航空电机学

谢 军 主编



国防工业出版社

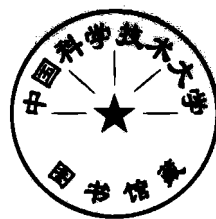
National Defense Industry Press

D-K-YT013-0D

空军航空机务系统教材

航空电机学

谢 军 主编



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共6篇23章。主要介绍航空用变压器、异步电机、同步电机、直流电机的工作原理、基本结构、分析方法、运行性能、特性和一般试验方法等。对电机和磁路的基本知识、交流电机的绕组、电势和磁势作了分析。对航空电机的特点和基本技术要求也作了介绍。

本书是航空电气工程类本科教材,适用于自动化、电气工程及其自动化等专业。其目的是使学生掌握航空电机相关知识以及合理维护和使用电机的方法,并满足后续课程的需要。亦可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空电机学/谢军主编. —北京:国防工业出版社,

2006.1

(空军航空机务系统教材)

ISBN 7-118-04190-4

I. 航... II. 谢... III. 航空电气设备-电机学-
高等学校-教材 IV. V242.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 115479 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 440 千字

2006 年 1 月第 1 版第 2 次印刷 印数 3001—4500 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

总 序

为了加快推进中国特色军事变革,贯彻执行军队人才战略工程规划,培养造就高素质新型航空机务人才,空军决定实施航空机务系统教材体系工程。这是空军航空机务人才建设一项具有战略性、基础性的举措,对于提高空军航空机务人才的现代科学文化水平和综合素质,进而提升航空机务保障力和战斗力,将发挥重要作用和产生深远影响,是一件值得庆贺的大事。

空军历来重视教材建设,20世纪50年代中期到60年代中期,在空军首长亲自领导下,组织全空军的精英力量集中编写了主要学科专业的教程和主干课程的教科书。教程和教科书的编写出版,为航空机务系统教材建设提供了范本和编写经验,推动了航空机务系统教材建设向前发展。改革开放以来,随着以教学内容为核心的军队教育训练改革的不断深化,航空机务系统教材建设进入了一个新阶段。发生在世纪之交的几场局部战争表明,脱胎于20世纪工业文明的机械化战争正在被迅猛发展的信息文明催生的信息化战争所取代。信息化战争的一个显著特点,就是知识和技术密集。实施空军航空机务系统教材体系工程,就是为了适应世界军事领域这种新的变革,实现航空机务系统教材建设的划时代跨越,为培养掌握现代科学文化知识和高新装备技术的航空机务人才服务。

空军航空机务系统教材体系工程,以邓小平理论和“三个代表”的重要思想为指导,以新时期军事战略方针为依据,以培养高素质新型航空机务人才为目标,着眼空军向攻防兼备型转变和航空装备发展需要,按照整体对应、系统配套,紧贴实际、适应发展,突出重点、解决急需的思路构建了一个较为完整的教材体系。教材体系的结构由部队、院校、训练机构教育训练教材三部分组成,分为航空机务军官教育训练教材和航空机务士兵教育训练教材两个系列十六个类别的教材组成。规划教材按照新编、修编、再版等不同方式,组织空军航空机务系统近千名专家、教授参与编修工作。新编和修编的教材,充实了新技术、新装备的内容,吸收了近年来航空维修理论研究的新成果,对高技术战争条件下航空机务保障的特点和规律进行了有益探索,院校的专业训练教材与国家人才培养规格接轨并具有鲜明的军事特色,部队训练教材与总参颁布的《空军军事训练与考核大纲》配套,能够适应不同层次、不同专业航空机务人员的教育训练需要,教材的系统性、先进性、科学性、针对性和实践性与原有教材相比有了明显提高。

教材建设是一项学术性很强的工作,教材反映的学术理论内容是随实践的发展而发

展的。当前我军建设正处在一个跨越式发展的历史关键时期,航空装备的飞速发展和空军作战样式的深刻变化,使航空机务人才培养呈现出许多新特点,给航空机务系统教材建设带来许多新问题。全航空机务系统一方面要认真学习新教材,使其真正发挥对航空机务工作的指导作用,另一方面要十分关注航空装备的发展和航空机务教育训练的改革创新,不断发展和完善具有时代特征和我军特色的航空机务系统教材体系,为航空机务人才建设提供知识信息和开发智力资源。



二〇〇四年一月七日

空军航空机务系统教材体系工程编委会

主 任	田绍奇				
副主任	李学忠	毕雁翎	王凤银	宋绪纶	崔祥来
	吴辉建	乔永立	王晓朝	吕 刚	刘凤山
	李瑞迁	蔡风震	马中兴	杨 佐	许志良
委 员	董钢铁	孙海涛	沙云松	赵宝勋	吴 鸿
	朱小军	许家闻	田际平	徐 晓	张凤鸣
	张建华	王 峰	高 俊	戴震球	王培森
	肖仲飞	邹仁斌	杜元海	刘 强	张 纯
	徐玉强				

空军航空机务系统教材体系工程总编审组

组 长	刘桂茂				
副组长	郭威力				
成 员	陶增元	富 强	陈廷楠	周志刚	韩跃敏
	郭汉堂	陈德煌	杨 军	王力军	呼万丰
	高 虹	刘文权	彭家荣	谢先觉	郦 卫

空军航空机务系统教材体系工程 特设专业编审组

组 长 杨 军

成 员 刘惠聪 杨继恩 王丽生 张书城 臧 斌
富 强 池华佑

前 言

航空电机学主要研究航空用变压器、异步电机、同步电机、直流电机的结构、原理、运行性能、特性和一般试验方法,是本科自动化专业和电气工程及其自动化专业一门必修的核心专业基础课。

本书是为了满足教学改革的需要,根据空军航空机务系统教材体系工程规划而编写的。

近几十年中,尽管电机理论和技术的发展没有信息技术那样迅猛,但是成熟孕育出新,经典催生变化。机电相结合、强弱电渗透,显示这门学科和技术日新月异。航空电机作为电机的重要门类,其技术亦是更先进、更可靠。如飞机的主电源由低压直流系统转变为变速恒频交流系统和高压直流系统,飞机主电源的核心——航空发电机,随之也发生了较大变化;机载伺服系统的发展,对用于驱动和控制的电动机性能提出了新要求。我们在本书的编写中,认真汲取了国内外出版的各种电机学教材的成功经验,广泛涉猎了电机理论和技术发展的相关文献,充分结合了我们多年的教学实践经验,注重讲清物理概念,强化“机电相结合、强弱电渗透”这一系统观。内容上力求扼要实用,篇幅上力求剔繁化简,文字上力求精炼易懂。

本书的主要特点有:

(1) 考虑到三相交流系统已成为现代先进飞机主电源的主要形式,无刷直流电机、永磁电机、变频调速异步电机等新型电机逐渐引入机载设备等特点,全书内容从过去的以讲述直流为主,转换为以讲述交流为主,并且增加了飞机用特种电机的内容。

(2) 对过于复杂的电机设计和电磁理论分析作了适当的删减,力求使教材内容具有较好的扼要性和应用性。

(3) 较好地处理了电机经典理论与前沿理论及新技术新装备之间的关系,并对后续课程所涉及的电机相关技术留有接口。

本书由空军工程大学谢军教授、吕永健副教授、刘勇智讲师编写,其中,第1篇和第5篇由吕永健编写,第2篇和第3篇由谢军编写,第4篇和第6篇由刘勇智编写。谢军负责全书的统稿工作,刘勇智绘制了本书的全部插图。本书由西北工业大学博士研究生导师刘卫国教授、空军航空大学富强教授担任主审。空军工程大学李彪教授、朱潼生副教授在审阅过程中提出了许多宝贵意见。空军工程大学工程学院张凤鸣院长、训练部童止戈副部长、三系李学仁主任、电气教研室严东超主任等领导给予了大力支持,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者多提宝贵意见。

编 者

2004年10月于西安市东郊白鹿塬

目 录

第1篇 基础知识

第1章 电机学中的基本电磁理论	1
1.1 电路基本知识	1
1.2 电磁学基本知识	3
1.3 电机的制造材料	6
第2章 航空电机概论	10
2.1 电机在航空工业中的应用与分类	10
2.2 航空电机的工作条件	10
2.3 航空电机的特点与基本技术要求	14
2.4 航空电机的发展概况	21

第2篇 航空变压器

第3章 单相变压器	26
3.1 单相变压器的基本工作原理和结构	26
3.2 单相变压器的空载运行	28
3.3 单相变压器的负载运行	36
第4章 三相变压器	49
4.1 三相变压器的磁路系统	49
4.2 三相变压器的电路系统	50
4.3 磁路系统及连接方法对电势波形的影响	51
第5章 飞机用特种变压器	55
5.1 自耦变压器	55
5.2 仪用变压器及脉冲变压器	57

第3篇 交流电机的绕组、磁势和电势

第6章 交流电机的绕组	62
6.1 三相交流绕组的基本概念	62
6.2 60°相带绕组	63
6.3 120°相带绕组	65

第7章 交流绕组的磁势	68
7.1 一相绕组的磁势	68
7.2 多相绕组的基波磁势	79
第8章 交流绕组的电势	87
8.1 一相绕组的基波电势	87
8.2 一相绕组的谐波电势	93

第4篇 航空异步电机

第9章 异步电机的基本结构和基本工作原理	100
9.1 三相异步电动机的基本结构	100
9.2 三相异步电动机的额定值	102
9.3 三相异步电动机的基本工作原理	103
第10章 异步电动机的基本电磁关系与运行分析	106
10.1 转子不动时的异步电动机	106
10.2 转子转动时的异步电动机	112
第11章 异步电动机的特性和控制	123
11.1 异步电动机的功率平衡与转矩平衡	123
11.2 异步电动机的电磁转矩和机械特性	125
11.3 三相异步电动机的起动	129
11.4 三相异步电动机的调速	132
第12章 飞机用特种异步电机	139
12.1 三相陀螺电机	139
12.2 单相异步电动机	140

第5篇 航空同步电机

第13章 同步电机的基本结构和原理	146
13.1 同步电机的基本结构型式和工作原理	146
13.2 同步电机的额定值	148
13.3 航空同步发电机的基本工作原理和结构	149
第14章 同步发电机的基本电磁关系与运行分析	153
14.1 电枢反应与磁势平衡方程式	153
14.2 同步电抗与电势平衡方程式	155
14.3 隐极同步发电机的电磁关系——时空向量图	158
14.4 凸极同步发电机的电磁关系——时空向量图	160
第15章 同步发电机的特性	167
15.1 同步发电机的运行特性	167

15.2	同步发电机的试验特性及稳态参数	171
15.3	隐极同步发电机的功率平衡和功角特性	177
15.4	凸极同步发电机的功角特性	182
第 16 章	同步发电机的并联运行	187
16.1	接入并联的条件和方法	187
16.2	功率的均衡分配	192
16.3	调节励磁电流对发电机运行状况的影响	197
第 17 章	同步发电机的三相突然短路	202
17.1	超导体回路磁链守恒原理	202
17.2	突然对称短路时的物理过程分析	204
17.3	超瞬变电抗及瞬变电抗	208
17.4	突然短路时各电流的衰减	212
第 18 章	航空用特种同步电机	216
18.1	同步电动机的工作原理	216
18.2	永磁同步电机的结构	219

第 6 篇 航空直流电机

第 19 章	航空直流电机的基本工作原理和结构	224
19.1	直流电机的基本工作原理	224
19.2	飞机直流电机的基本结构	227
19.3	直流电机的励磁方式	232
19.4	直流电机的额定值及其型号	233
第 20 章	直流电机的基本电磁关系与运行分析	236
20.1	直流电机的电势、磁势和转矩	236
20.2	直流电机的换向	244
第 21 章	直流发电机的特性与调节	252
21.1	飞机直流发电机的空载特性和自激特性	252
21.2	飞机直流发电机的外特性和调节特性	256
第 22 章	直流电动机的特性与控制	262
22.1	直流电动机的特性	262
22.2	直流电动机的调速	266
22.3	直流电动机的反转与制动	270
第 23 章	无刷直流电动机	278
23.1	无刷直流电动机的结构特点	278
23.2	无刷直流电动机的工作原理	279
参考文献		282

第 1 篇 基础知识

电机是通过电磁感应原理来实现机电能量转换的电磁机械。将机械能转换成电能的电机称为发电机;将电能转换成机械能的电机称为电动机。

由于电能有直流和交流两种,所以不管是发电机还是电动机,都可分为直流电机和交流电机两类。交流电机又可根据其转速与频率的关系分为同步电机和异步电机。另外,实现电能与电能之间的互相转换,也常常用到电机。例如变压器,它可将一种电压的交流电变换成为另一种电压的交流电;又如变流机,它可将直流电能变换成交流电能输出。

本篇主要介绍电机学中的基本电磁理论和航空电机的基本知识,为后续学习奠定基础。

第 1 章 电机学中的基本电磁理论

电磁感应原理是各种电机工作原理的基础,学习电机的原理、结构及性能,必须具备电、磁方面的基础理论知识。本章对电机学中所涉及的基本电磁理论进行简要的回顾和补充,便于进一步学习电机学的理论。主要介绍航空电机学所涉及的有关电路、磁路和电磁感应方面的概念及公式,以及电机的制造材料和性质等。

1.1 电路基本知识

电在电机中主要以路的形式出现,即由电机内的线圈(或绕组)构成电机的电路。

1.1.1 电路的主要参数及正方向的规定

电路的主要参数有:电压、电势、电流、功率和相位等。电路中常用的元件有:电阻、电感和电容。描述电路特征的数学方程式都与电压、电流等参数的参考方向有关。通常规定:对于受电端,电压和电流的正方向一致,变压器中,电势的正方向往往也取为和电流的正方向一致。

1.1.2 基尔霍夫定律

1.1.2.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律:电路中的任意节点在任意时刻流入和流出的电流之代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-1)$$

式中,各电流 i 的正方向均可取为流入方向,即 i 为正值时,实际电流为流入该节点; i 为负值时,实际电流为流出该节点。

1.1.2.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律:电路中的任一回路在任意时刻沿着回路循行方向所有支路的电位降之和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-2)$$

对于图 1-1 所示的电路,其回路方程为

$$IR + Ir_a - E = 0 \quad (1-3)$$

因

$$U = IR$$

有

$$U = E - Ir_a \quad (1-4)$$

该电压平衡方程式反映了加在“+”、“-”受电端的电压的构成,即电势 E 减去内阻 r_a 上的电压降后全部加在受电端形成外部电压降 U 。

1.1.3 三相交流电路

三相交流电,以 A 相为参考相量,相序为 A-B-C 时,其数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t \\ i_B &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

对应的向量分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= I \angle 0^\circ \\ \dot{I}_B &= I \angle -120^\circ \\ \dot{I}_C &= I \angle -240^\circ \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 I_m —— 每相电流的幅值;

I —— 每相电流的有效值。

三相交流电通入或流出三相绕组时,会因三相绕组的连接方式不同,而产生不同的线电压和相电压。三相绕组有 Y 形连接和 Δ 形连接两种,如图 1-2 所示。

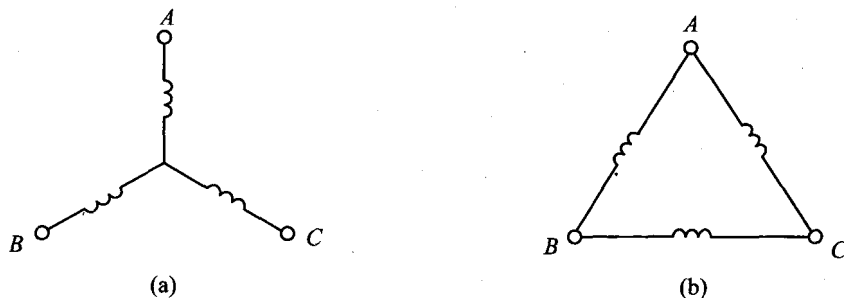


图 1-2 三相绕组的连接

(a) Y 形连接; (b) Δ 形连接。

当绕组为 Y 形连接时,线电压 $U_{\text{线}}$ 与相电压 $U_{\text{相}}$ 之间的关系为 $U_{\text{线}} = \sqrt{3} U_{\text{相}}$,线电流 $I_{\text{线}}$ 与相电流 $I_{\text{相}}$ 相等。

当绕组为 $\triangle$ 形连接时, $U_{\text{线}} = U_{\text{相}}$, $I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}}$ 。

1.2 电磁学基本知识

磁在电机中是以场的形式存在的,一般工程分析计算时,常把磁场简化为磁路来处理,其准确度已能够满足要求。

1.2.1 基本物理量

1.2.1.1 磁感应强度

磁感应强度是表示磁场强弱的一个物理量,符号是 $\vec{B}$,单位是 T,它是一个矢量。磁场的强弱可由位于该磁场中的载流导体所受的电磁力来反映,当载流导体元 $d\vec{l}$ 与磁力线相垂直时,作用在该导体上的电磁力 $d\vec{F}$ 可表示为

$$d\vec{F} = I B d\vec{l} \quad (1-7)$$

式中 $d\vec{F}$ —— 载流导体元上所受到的电磁力(洛伦兹力),单位是 N;

I —— 电流,单位是 A;

$d\vec{l}$ —— 导体元,单位是 m;

B —— 磁感应强度,单位是 T。

在电机中,气隙中的磁感应强度约为 0.4T~0.8T;铁芯中的磁感应强度约为 1T~1.8T。

1.2.1.2 磁通量

磁感应强度 $\vec{B}$ 描述的只是空间每一点的磁场,如果要描述一个给定面上的磁场,就要引入另外一个物理量,叫磁通量,简称磁通,用 Φ 表示,单位是 Wb。如果在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的平面,面积为 S ,则通过该平面的磁通量为

$$\Phi = BS \quad (1-8)$$

当平面与磁场方向不垂直时,通过该平面的磁通量为

$$\Phi = BS \cos \theta \quad (1-9)$$

式中 θ —— 面积 S 的法线与 $\vec{B}$ 的夹角。

通过任意曲面的磁通量为

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos \theta dS \quad (1-10)$$

dS 为曲面的面积单元,其面积分即为通过该曲面的磁通量。

由式(1-10)可知,如果取该面积单元 dS 垂直于该点处的磁感应强度 $\vec{B}$,则 $\cos \theta = 1$, $B = d\Phi/dS$,说明某点的磁感应强度就是该点的磁通密度,因此,磁感应强度又叫磁通密度。

为了形象直观地表示看不见的磁场,可以用假想的磁力线表示磁感应强度 $\vec{B}$ 和磁通量 Φ 的大小。规定磁力线上每一点的切线方向就是 $\vec{B}$ 的方向,同时规定通过磁场某点处垂直于 $\vec{B}$ 的单位面积上的磁力线数目等于该点磁感应强度的大小。由磁力线的定义可以看出:磁场强的地方,磁感应强度 $\vec{B}$ 大,磁力线密,单位面积内的磁通一定也多;反之亦然。

当 S 为单位面积时, $\vec{B}$ 可以看成单位面积内的磁通。

1.2.1.3 磁场强度

表征磁场性质的另一个物理量是磁场强度,它也是一个矢量,用 $\vec{H}$ 表示,单位是 A/m,磁场的两个基本物理量 $\vec{B}$ 与 $\vec{H}$ 之间的存在下列关系,即

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-11)$$

式中 μ —— 磁导率,由磁场该点处的介质性质决定,单位是 H/m。 μ 的数值随介质的性质不同变化很大,真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。在电机中应用的介质,其磁导率也因材料的不同而不同。

1.2.1.4 磁链、电感与感抗

导线流过电流将产生磁场,电机中的线圈中流过电流 i 也将产生磁场,穿过线圈的磁通将形成磁链。磁链通常用符号 ψ 表示,单位为 H·A。设线圈匝数为 N ,流过电流产生匝链线圈的磁通为 ϕ ,则磁链为

$$\psi = N\phi \quad (1-12)$$

该磁链与流过线圈的电流有关系,即

$$\psi = LI \quad (1-13)$$

或

$$L = \psi/I \quad (1-14)$$

式中 L 称为电感,单位为 H。

由磁路的欧姆定律(见 1.2.2.4 节)可知,磁通等于磁势乘以磁导,线圈的磁势是线圈匝数与流过电流的乘积。于是式(1-14)可写成

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{N\Delta IN}{I} = \Delta N^2 \quad (1-15)$$

当线圈中流过角频率为 ω 的交流电时,线圈中存在的感抗 X 为

$$X = \omega L \quad (1-16)$$

1.2.1.5 电磁力与电磁力矩

载流导体在匀强磁场中受到电磁力的作用,该电磁力为

$$f = Bli \quad (1-17)$$

如果有一面积为 S 的刚性矩形载流线圈位于磁感应强度为 $\vec{B}$ 的匀强磁场中,线圈中的电流为 I ,磁场作用于载流线圈的电磁力矩为

$$M = BIS\sin\varphi \quad (1-18)$$

式中 M —— 电磁力矩,单位为 N·m;

φ —— 是线圈平面的法线方向与磁感应强度 $\vec{B}$ 的方向之间的夹角,规定线圈平面的法线方向与电流方向成右手螺旋关系。

1.2.2 基本定律

1.2.2.1 磁场的高斯定理

由于磁力线是无头无尾的闭合曲线,从一个闭合曲面 S 某处穿进的磁力线必定要从另一处穿出,所以穿过任一闭合曲面的磁通量恰好正、负抵消,即通过磁场中任一闭合曲面总的磁通量恒等于零,即

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1-19)$$

式(1-19)称为磁场的高斯定理。

1.2.2.2 安培环路定律

在恒定磁场中,磁感应强度 $\vec{B}$ 沿任一闭合路径 L 的线积分等于该闭合路径 L 包围的所有电流代数和的 μ_0 倍,这就是恒定磁场的安培环路定理,其数学表达式为

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k \quad (1-20)$$

当积分回路的绕行方向和电流的方向之间满足右手螺旋关系时, I 取正值;反之, I 取负值。由于 $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (真空中),因此该定理的另一表达式为

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{L} = \sum_{k=1}^N I_k \quad (1-21)$$

1.2.2.3 电磁感应定律

英国物理学家法拉第于 1831 年发现了电磁感应现象,并总结出电磁感应定律。即不论用什么方法,只要使穿过闭合导体回路的磁通量发生变化,此回路中就会产生感应电流,而驱动感应电流的电动势称为感应电动势,用 e 表示, e 的大小与穿过回路的磁通量的变化率 $d\psi/dt$ 成正比,这就是法拉第电磁感应定律,如果采用国际单位制,该定律可表示为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1-22)$$

式中 “-” 号反映了感应电动势的方向,判定 e 的方向时可按照楞次定律进行判断。楞次定律为:在闭合回路中,感应电动势所驱动的感应电流的方向总是使它自身所产生的磁通量反抗引起感应电流的磁通量的变化。

由于导体回路与磁场只要产生相对运动,就会产生感应电动势。按照磁通量变化原因的不同,感应电动势可分为两类:

(1) 动生电动势。由于导体或导体回路在恒定磁场中运动,导体或导体回路中产生的感应电动势;

(2) 感生电动势。导体或导体回路不动,由于磁场随时间发生变化,导体或导体回路中产生的感应电动势。

动生电动势一般用式(1-23)计算,即

$$e = Blv \quad (1-23)$$

动生电动势的方向按右手定则判断。

感生电动势一般用式(1-24)计算,即

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-24)$$

式中 ψ —— 穿过各线圈的总磁通量,也称磁链, $\psi = \sum \phi_i$;

N —— 线圈的匝数。

1.2.2.4 磁路的欧姆定律

在一般的工程计算中,电机中磁场常简化为磁路来处理。如果某一段匀强磁路长为 l ,则该段磁路上的磁势可用 F_m 表示为

$$F_m = Hl \quad (1-25)$$

由于 $H = \frac{B}{\mu}$, 而 $B = \frac{\Phi}{S}$, 因此有

$$F_m = \frac{1}{\mu S} \Phi = R_m \Phi \quad (1-26)$$

式中 $R_m = 1/\mu S$, 式(1-26)与电路的欧姆定律 $U = RI$ 在形式上完全一样, 故 R_m 称为磁阻, 单位为 A/Wb , 该关系式称为磁路的欧姆定律; F_m 的单位为 A 。

从磁阻 R_m 的表达式可以看出, R_m 与 μ 成反比, 由于铁磁材料的磁导率不是常数, 故铁磁材料的磁阻是非线性的。

磁阻的倒数称为磁导, 用 Λ 来表示。于是

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} \quad (1-27)$$

磁阻的实用单位是 $1/H$; 磁导的实用单位是 H 。

1.3 电机的制造材料

1.3.1 电机的制造材料

电机的技术经济指标在很大程度上与其制造材料有关, 在选择电机制造材料时, 不仅要考虑电磁性能指标, 还要考虑机械强度要求, 即使在按技术条件所允许的非正常运行状态下运行时, 也必须保证电机能承受较大的电磁力而不致毁坏。

总的来说, 制造电机的材料有 5 种功用: 导电、导磁、绝缘、散热和机械支撑。

铜是最常用的导电材料, 电机中的绕组一般都是用铜线绕制成, 电机绕组用的铜线是硬拉后经退火处理的。换向片的铜片则是硬拉或轧制的。铝由于密度小, 在电机中使用不普遍, 鼠笼式异步电机的转子绕组通常用铝浇铸而成。黄铜、青铜和钢都可以作为集电环的材料。炭也是应用于电机的一种导电材料, 电机中的电刷可用炭—石墨、石墨或电化石墨制成。

钢是良好的导磁材料。铸铁因导磁性能较差, 应用较少, 仅用于截面积较大的、形状较复杂的结构部件, 如机壳、端盖等。各种成分的铸钢因导磁性能较好, 应用广泛。特性较好的铸钢为合金钢, 如镍钢和镍铬钢, 但价格较贵。电机中的磁通一般会变化, 为了减少铁芯中的涡流损耗, 导磁材料应当用薄钢片, 称为电工钢片。电工钢片中含有少量的硅, 使它有较高的电阻, 同时又有很好的磁性能, 因此, 电工钢片又称为硅钢片。

电工钢片的厚度为 $0.35mm$, $0.5mm$, $1mm$ 等。旋转电机用较厚的钢片; 变压器用较薄的钢片; 高频电机需用更薄的钢片, 其厚度可为 $0.2mm$, $0.15mm$, $0.1mm$ 等。钢片与钢片之间常涂有一层很薄的绝缘漆。

电机中导体与导体间、导体与机壳或铁芯间, 都必须用绝缘材料隔开。绝缘材料的种类很多, 可分为天然的和人工的、有机的和无机的; 有时也用不同绝缘材料的组合。绝缘材料的寿命和它的工作温度有很大的关系, 在热作用下, 绝缘材料会逐渐老化, 逐渐丧失其机械强度和绝缘性能。为了保证电机能在寿命周期内可靠地运行, 对绝缘材料都规定了极限温度。航空电机中常用的绝缘材料有: 云母和石棉等。

变压器油是一种特殊的矿物油, 在变压器中它同时起绝缘和散热两种作用。

电机中有些部件是专为机械支撑用的, 如机座、端盖、轴与轴承、螺杆等。