



21 世纪高等院校**电气工程与自动化规划教材**

21 century institutions of higher learning materials
of Electrical Engineering and Automation Planning

同步电机

原理及应用技术

◆ 范国伟 主编
◆ 韩玉停 史彦 副主编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS





21 世纪高等院校**电气工程与自动化规划教材**

21 century institutions of higher learning materials
of Electrical Engineering and Automation Plannin

同步电机 原理及应用技术

- ◆ 范国伟 主编
- ◆ 韩玉停 史彦 副主编

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

同步电机原理及应用技术 / 范国伟主编. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2014. 11
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-36321-3

I. ①同… II. ①范… III. ①同步电机—高等学校—
教材 IV. ①TM341

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第236887号

内 容 提 要

本书是根据我国高等教育的现状和发展趋势, 针对工程应用型教学改革和就业的需要, 对现有的课程进行有机整合后编写而成的。主要内容有同步电机的基本理论, 同步发电机的运行特性, 同步发电机的并网运行, 同步发电机的异常运行, 同步电动机的运行特性, 同步电动机的调速, 同步电动机的数学模型, 同步电机的 MATLAB 仿真分析, 同步电动机的实践分析等。本书的特点是内容适度、讲述透彻, 深入浅出, 通俗易懂, 便于教学。

本书可以作为高等院校自动化、工业电气工程及自动化、测控技术与仪器、机电一体化等专业相关课程的教材, 也可作为硕士研究生、电工技师和职工岗位培训教材, 还可供有关工程技术人员参考使用。

-
- ◆ 主 编 范国伟
副 主 编 韩玉停 史 彦
责任编辑 张孟玮
执行编辑 税梦玲
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.5 2014 年 11 月第 1 版
字数: 411 千字 2014 年 11 月北京第 1 次印刷
-

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

21 世纪以来,同步电机在国民经济中的作用越来越明显,在电能的生产和大型生产机械的电力拖动中越来越多地采用同步电机。随着电机理论和技术与电力电子技术、微电子技术、计算机技术和控制理论等学科的不断发展和相互渗透,许多新技术、新方法的涌现使得传统电机学与电力拖动领域发生了革命性的变革。

随着科学技术的发展,现代电力拖动系统已和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起,如自动起动、制动、调速,在负载和外部条件变换的情况下自动保持电动机转速恒定,按事先给定的程序或外部条件自动改变运行速度等。电子计算机的应用更进一步赋予电力拖动系统自寻最佳运行规律、自动适应运行条件变化的能力。然而,不论现代自动电力拖动系统的结构如何复杂,拖动生产机械的各类电动机仍然是电力拖动系统完成机电能量转换的主要元件,是控制的对象。

“同步电机原理及应用技术”课程是工业电气自动化等专业的一门主要的专业技术课,它介绍同步电机最基本的内容和应用。本课程的任务是使学生从运行的观点了解各类同步电机的基本结构、工作原理和运行特性,进而掌握正确使用和维护同步电机的基本技能;熟练掌握同步电机在各种运行状态下能量关系的计算;了解电力发电系统过渡过程的基本特征,改善过渡过程的途径,选择解决同步电机运行问题的基本原则等,为进一步学习后续专业课程打好基础。

本课程既带有基础课性质,又有专业课特点,是一门运用基础电工理论来解决实际工程问题的课程。因此,在学习过程中,要联系物理学和电工基础课程中有关的电磁理论和电路基本理论,弄清各种定义、定律和公式的含义,以及它们所表达的实际电磁过程和机电过程。读者必须在学习过程中养成自学和独立思考的习惯,逐步掌握分析问题的方法。

学习本课程要坚持理论与实践相结合的原则,须进行必要的实训和生产实习。通过实训,对交流同步电机的工作特性、机械特性、基本原理和理论计算加以验证;进行独立的实验操作,学会测定同步电机的工作特性及参数的方法,掌握正确操作同步电机运行的方法。实训前要预习实验指导书和课程有关理论,明确实训目的与要求,熟悉操作步骤、实验线路及仪表正确使用方法等;实训过程中,要注意观察、分析及判断;最后要认真完成实训报告。通过实际操作,逐步提高实验技能和熟练程度,培养严谨、求实的科学工作作风。

本书由安徽工业大学范国伟任主编,国网马鞍山供电公司韩玉停工程师、安徽工业大

学工商学院史彦硕士为副主编，另外，马鞍山钢铁股份有限公司能源总厂袁军芳高级技师、中冶华天马鞍山钢铁设计院范翀技师参加了本书的编写。在本书编写的过程中，安徽工业大学电气信息学院和工商学院、马鞍山钢铁股份有限公司能源总厂和热电厂提供了大力的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加上时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请使用本书的读者批评指正。

编 者

2014 年 6 月

目 录

第 1 章 电机理论中的基本电磁定律	1
1.1 磁路的基本定律	1
1.1.1 全电流定律	1
1.1.2 电磁感应定律	1
1.1.3 电磁力定律	4
1.2 常用的铁磁材料及其特性	5
1.2.1 铁磁材料的磁导率	5
1.2.2 磁滞与磁滞损耗	6
1.2.3 涡流与涡流损耗	8
1.2.4 交流铁芯损耗	9
1.3 磁路和电感的计算	9
1.3.1 磁路的概念	10
1.3.2 磁路的欧姆定律	10
1.3.3 磁芯磁场和磁路	12
1.3.4 电感计算	21
本章要点	31
习题	31
第 2 章 同步电机的基本理论	33
2.1 同步电机的基本结构和工作原理	33
2.1.1 同步电机的基本结构	33
2.1.2 同步电机的基本工作原理	35
2.1.3 同步电机的额定值及励磁方式	35
2.2 同步电机的定子绕组	37
2.2.1 同步电机定子绕组的基本知识	37
2.2.2 同步电机定子的三相单层叠绕组	40
2.2.3 同步电机定子的三相双层叠绕组	42
2.3 同步电机的磁动势	43
2.3.1 同步电机定子单相绕组的脉振磁动势	43
2.3.2 同步电机磁动势的空间谐波	44
2.3.3 同步电机单相绕组的基波脉振磁动势	44
2.3.4 同步电机三相绕组的旋转磁动势	46
2.3.5 交流同步电机的主磁通、漏磁通	49
2.3.6 交流同步电机削弱谐波磁动势的方法	49
本章要点	50
习题	51
第 3 章 同步发电机的运行特性	53
3.1 同步发电机的空载运行	53
3.2 同步电机的电枢反应	55
3.2.1 隐极同步电机的电枢反应特点	57
3.2.2 凸极同步电机的双反应理论	57
3.3 隐极同步发电机的负载运行	59
3.3.1 不考虑饱和	60
3.3.2 考虑饱和	61
3.4 凸极同步发电机的负载运行	63
3.4.1 不考虑饱和	63
3.4.2 考虑饱和	65
3.5 同步发电机的运行特性	67
3.5.1 空载特性	67
3.5.2 短路特性	67
3.5.3 零功率因数负载特性	68
3.5.4 外特性	69
3.5.5 调整特性	70
3.6 特性曲线在参数计算中的应用	70
3.6.1 同步发电机的特性三角形	70
3.6.2 保梯电抗	71
3.6.3 利用空载特性和短路特性确定 X_d 的不饱和值	71

3.6.4 短路比	72	5.4 同步发电机不对称运行的影响	102
3.6.5 利用空载特性和零功率因数 特性确定 X_d 的饱和值	72	5.4.1 转子的附加损耗和发热	102
3.6.6 电压调整率和额定励磁磁势 的求法	73	5.4.2 附加转矩和振动	102
3.7 同步发电机稳态参数的测定	76	5.5 同步电机的突然短路	102
本章要点	77	5.6 三相突然短路过程中的基本 电磁关系	104
习题	78	5.6.1 定子各相绕组的磁链	104
第4章 同步发电机的并网运行	80	5.6.2 定子各相绕组的电流	105
4.1 投入并联运行的条件和方法	80	5.6.3 转子绕组的电流和磁链	106
4.1.1 投入并联的条件	80	5.6.4 电机磁场分布示意图	106
4.1.2 投入并联的方法	81	5.6.5 阻尼绕组对突然短路过程 的影响	107
4.2 同步发电机功率和转矩平衡方程	83	5.7 同步电机的瞬态参数	108
4.3 同步发电机的功角特性	84	5.7.1 瞬变和超瞬变电抗的物理 意义	108
4.4 同步发电机有功功率调节与静态 稳定	86	5.7.2 瞬变和超瞬变电抗的测定 方法	110
4.4.1 有功功率调节	87	5.8 突然短路电流及其衰减时间 常数	111
4.4.2 静态稳定	87	5.8.1 各个分量的最大值	111
4.5 同步发电机无功功率调节和 V 形曲线	90	5.8.2 突然短路电流的衰减变化 规律	112
本章要点	91	5.9 突然短路对同步发电机的影响	115
习题	92	5.9.1 冲击电流的电磁力	115
第5章 同步发电机的不对称运行	93	5.9.2 短路过程中的电磁转矩	115
5.1 同步发电机相序阻抗和等效电路	93	5.9.3 短路引起的绕组发热	116
5.1.1 正序阻抗	94	本章要点	116
5.1.2 负序阻抗	94	习题	116
5.1.3 零序阻抗	96	第6章 同步电动机和调相机	119
5.2 同步发电机不对称稳态短路	96	6.1 同步电动机的基本电磁关系	119
5.2.1 单相对中点短路	96	6.1.1 从发电机状态过渡到电动机 状态	119
5.2.2 两相短路	98	6.1.2 电动势平衡方程与相量图	119
5.2.3 不同稳定短路情况短路电流 的比较	100	6.2 同步电动机功角特性和功率 平衡方程	121
5.3 同步发电机负序和零序参数 测定	100	6.2.1 同步电动机无功功率调节	121
5.3.1 两相稳定短路法测定阻抗	100	6.2.2 同步电动机的 V 形曲线	122
5.3.2 逆同步旋转法测负序阻抗	100	6.3 同步电动机的起动与调速	123
5.3.3 串联法或并联法测零序阻抗	101		

6.3.1 起动方法	123	7.3.2 同步机电电压	159
6.3.2 异步起动过程	123	7.3.3 同步电机的设计性能比较	161
6.3.3 同步电动机的调速	125	7.3.4 同步电机的参数	163
6.4 同步调相机	125	7.3.5 变频调速同步电机阻尼绕组的研究	164
6.4.1 调相机的原理和用途	125	本章要点	177
6.4.2 调相机的特点	125	习题	178
本章要点	126	第 8 章 交流同步电机的数学模型	179
习题	126	8.1 交流同步电机的空间矢量	180
第 7 章 交流同步电动机的调速	128	8.2 交流同步电机的基本数学模型	181
7.1 交流同步电机磁场定向控制原理	128	8.2.1 磁链方程	181
7.1.1 直流电机的转矩控制	128	8.2.2 电压方程	184
7.1.2 交流异步电机磁场定向控制	129	8.2.3 转矩方程	185
7.1.3 交流同步电机磁场定向控制原理	134	8.2.4 运动方程	185
7.1.4 同步电机标量控制原理	137	8.3 同步电机的坐标变换	185
7.1.5 经典的同步电机磁场定向控制原理	137	8.3.1 静止坐标 $\alpha\beta 0$ 轴系	186
7.1.6 同步电机磁场定向控制的动态过程	138	8.3.2 旋转坐标 $dq 0$ 轴系	187
7.1.7 带补偿绕组的同步电机	139	8.3.3 磁场旋转坐标 MT 轴系	188
7.1.8 带阻尼绕组的同步电机	139	8.3.4 坐标变换的功率不变约束	188
7.1.9 同步电机磁场定向控制的改进	140	8.4 同步电机 $dq 0$ 轴系的数学模型	189
7.2 交流同步电机的直接转矩控制	142	8.4.1 磁链方程	191
7.2.1 直接转矩控制的基本原理	142	8.4.2 电压方程	192
7.2.2 交流同步电机直接转矩控制的数学模型	144	8.4.3 电磁转矩方程	192
7.2.3 直接转矩的电压空间矢量	146	8.4.4 以磁链为状态变量的状态方程	192
7.2.4 定子磁链轨迹	149	8.5 多相同步电机的数学模型	194
7.2.5 电磁转矩控制	151	8.5.1 多相同步电机数学模型的一般形式	194
7.2.6 电压矢量的选择	152	8.5.2 双电枢绕组同步电机的数学模型	196
7.2.7 转矩观测器模型	153	8.6 同步电机的矢量图	200
7.2.8 定子磁链观测器模型	153	8.6.1 隐极同步电机矢量图	200
7.2.9 交流同步电机直接转矩控制系统	155	8.6.2 凸极同步电机矢量图	201
7.3 交流变频调速同步电机	156	8.7 同步电机的动态参数	202
7.3.1 同步电机极对数与频率的选择	156	8.7.1 同步电机的电抗函数	202
		8.7.2 瞬变电抗与超瞬变电抗	204
		8.7.3 瞬变电抗 x'_d 与超瞬变电抗 x''_d 的物理意义	205

8.7.4 同步电机的时间常数	206	9.2 同步发电机突然短路仿真	222
8.8 同步电机 $\alpha\beta 0$ 轴系的数学模型	208	9.3 同步电动机起动和制动仿真	228
8.9 同步电机 MT 轴系的数学模型	210	9.3.1 同步发电机直接起动和 能耗制动仿真	228
8.9.1 同步电机定子采用 MT 轴系, 转子采用 $dq0$ 轴系的数学 模型	210	9.3.2 同步电动机减压限流起动 仿真	230
8.9.2 同步电机定子、转子均为 MT 轴系的数学模型	212	9.4 同步电动机调速仿真	234
8.9.3 实用的同步电机 MT 轴系 数学模型	214	本章要点	236
本章要点	215	习题	236
习题	216	第 10 章 同步电动机的实践分析	237
第 9 章 同步电机的 MATLAB 仿真	220	实验一 三相同步发电机的运行特性 ...	237
9.1 同步发电机的功角特性仿真	220	实验二 三相同步发电机的并联运行 ...	243
		实验三 三相同步电动机的运行	248
		实验四 三相同步电机参数的测定	252

电机的运行牵涉到电、磁、力三个基本物理量,为了更好地理解电机的工作原理,了解电机内的电磁关系,研究电机的工作特性,就得首先了解一些基本电磁定律。

1.1 磁路的基本定律

各种电机都是靠电和磁的相互作用、相互转换来完成机电能量的转换。电机的理论分析建立在全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律和电路定律等基础上。

1.1.1 全电流定律

在很长时间里,人们都把磁场和电流当作两种独立无关的自然现象,直到 1829 年才发现了它们之间的内在联系,即磁场是由电流的激励而产生的。换句话说,磁场与产生该磁场的电流同时存在。全电流定律就是描述这种电磁联系的基本电磁定律。

设空间有 n 根载流导体,导体中的电流分别为 $I_1, I_2, \dots, I_n$, 则沿任意可包含所有这些导体的闭合路径 l , 磁场强度 H 的线积分等于这些导体电流的代数和, 即

$$\oint H dl = \sum I \quad (1.1)$$

式 (1.1) 就是全电流定律, 亦称作安培环路定律。式中电流的符号由右手螺旋法则确定, 即当导体电流的方向与积分路径的方向呈右手螺旋关系时, 该电流为正, 反之为负。以图 1.1 为例, 虽有积分路径 l , 但其中包含的载流导体相同, 积分结果必然相等, 并且就是电流 I_1, I_2 和 I_3 的代数和。依右手螺旋法则, I_1 和 I_2 应取正号, 而 I_3 应取负号。写成数学表达形式就是

$$\oint H dl = I_1 + I_2 - I_3 \quad (1.2)$$

即积分与路径无关, 只与路径内包含的导体电流的大小和方向有关。全电流定律在电机中应用很广, 它是电机和变压器磁路计算的基础。

1.1.2 电磁感应定律

电磁感应定律是法拉第 1831 年发现的。将一个匝数为 N 的线圈置于磁场中, 与线圈交链的磁链为 Ψ , 则不论什么原因 (如线圈与磁场发生相对运动或磁场本身发生变化等), 只要 Ψ 发生了变化, 线圈内就会感应出电动势。该电动势倾向于在线圈内产生电流, 以阻止 Ψ 的

变化。设电流的正方向与电动势的正方向一致，即正电动势产生正电流，而正电流又产生正磁通，即电流方向与磁通方向符合右手螺旋法则（见图 1.2），则电磁感应定律的数学描述为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1.3)$$

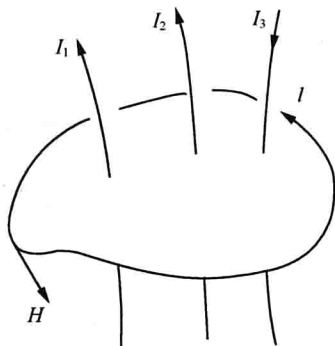


图 1.1 全电流定律

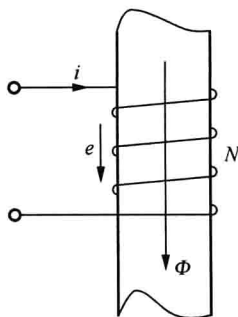


图 1.2 电磁感应定律

式中负号表明感应电动势产生的电流所激励的磁场总是倾向于阻止线圈中磁链的变化，常称为楞次定律。

特别地，若 N 匝线圈中通过的磁通均为 Φ ，即磁链

$$\Psi = N\Phi \quad (1.4)$$

则式 (1.3) 可改写为：

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

导致磁通变化的原因可归纳为两大类，一类是磁通由时变电流产生，即磁通是时间 t 的函数；另一类是线圈与磁场间有相对运动，即磁通是位移变量 x 的函数。综合起来，磁通的全增量就是

$$d\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial t} dt + \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx \quad (1.6)$$

从而有

$$e = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} - Nv \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e_t + e_v \quad (1.7)$$

式 (1.7) 中， $v = \frac{dx}{dt}$ 为线圈与磁场间相对运动的速度； $e_t = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ 为变压器电动势，它是线圈与磁场相对静止时，单由磁通随时间变化而在线圈中产生的感应电动势，与变压器工作时的情况一样，由此而得名； $e_v = -Nv \frac{\partial \Phi}{\partial x}$ 为运动电动势，在电机学中也叫速度电动势或旋转电动势，或俗称为切割电动势，它是磁场恒定时，单由线圈（或导体）与磁场之间的相对运动所产生的。

虽然普遍说来，任一线圈中都可能同时存在上述两种电动势，但为了简化分析，同时也利于突出重点，下面将两种电动势分别予以讨论，并尽可能与电机中的实际情况相符。

1. 变压器电动势

设线圈与磁场相对静止，与线圈交链的磁通随时间变化，特别地，按正弦规律变化，即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.8)$$

式中, Φ_m 为磁通幅值; $\omega = 2\pi f$ 为磁通交变角频率, 单位是 rad/s。

于是可得

$$e = e_i = -N\omega\Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1.9)$$

式中, E_m 为感应电动势幅值。

式 (1.9) 表明, 电动势的变化规律与磁通变化规律相同, 但相位上滞后 90° , 如图 1.3 所示。

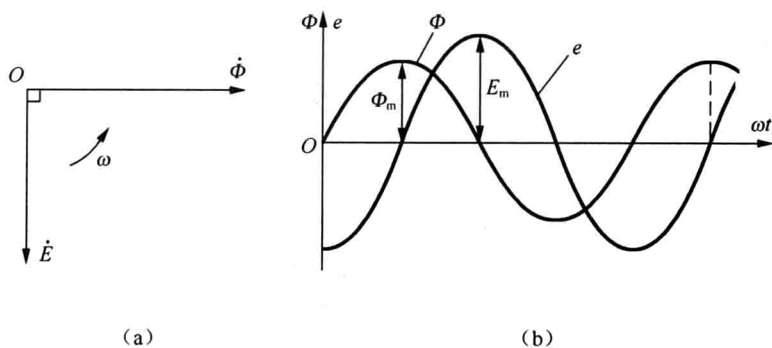


图 1.3 电动势与磁通的相位关系

在交流正弦分析中, 相量的大小用有效值表示。感应电动势的有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}N\pi f\Phi_m = 4.44fN\Phi_m \quad (1.10)$$

这就是电机学中计算变压器电动势的一般化公式。

2. 运动电动势

如图 1.4 所示, 设匝数为 N 的线圈在恒定磁场 (即 B 不随时间变化, 仅在长度 l 范围内沿 ξ 方向按一定规律分布, 其函数为 $B(\xi)$, 正方向 n 垂直进入纸面) 中以速度 v 沿 ξ 方向运动, 线圈两边平行但与 ξ 垂直, 宽度为 b , 有效长度为 l , 距原点距离为 x , 则任意时刻穿过线圈的磁通为

$$\Phi = l \int_x^{x+b} B_n(\xi) d\xi \quad (1.11)$$

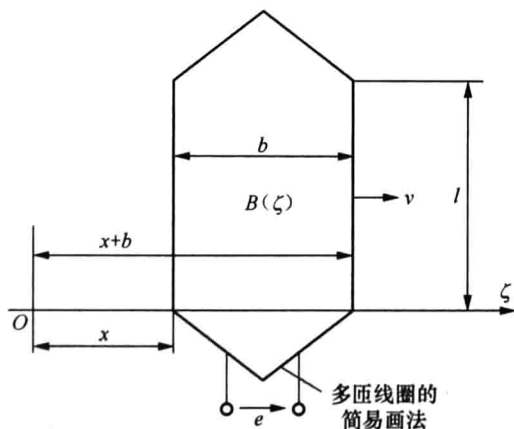


图 1.4 线圈切割磁场感应电动势

线圈内产生的感应电动势即运动电动势为

$$e = e_v = -Nv[l[B_n(x+b) - B_n(x)]] = N\Delta B_n lv \quad (1.12)$$

式中, 磁场 B_n 、线圈运动方向 v 和感应电动势 e 之间的关系由右手定则 (又称发电机定则) 确定。

显然, 若希望磁场得以最充分利用, 则磁场应只有垂直于线圈平面的分量, 即 $B(\xi) = B_n(\xi)$, 若进一步希望在线圈中得到最大感应电动势, 还应要求 $B(x) = -B(x+b)$, 即线圈一侧边与另一侧边处的磁场大小恒相等, 但方向 (极性) 恒相反。事实上, 这也是电机设计的基本准则。

对于单根导体, 在 B 、 v 及 l 相互垂直的条件下, 由式 (1.12) 可得 $|e| = Blv$, 这与物理学中的结果是一致的。

1.1.3 电磁力定律

1. 电磁力定律

磁场对电流的作用是磁场的基本特征之一。实验表明, 将长度为 l 的导体置于磁场 B 中, 通入电流 i 后, 导体会受到力的作用, 称为电磁力。其计算公式为

$$F = \sum dF = i \sum dl \times B \quad (1.13)$$

特别地, 对于长直载流导体, 若磁场与之垂直, 则计算电磁力大小的公式可简化为

$$F = Bli \quad (1.14)$$

这就是通常所说的电磁力定律, 也叫毕奥-萨伐电磁力定律。式中电磁力 F 、磁场 B 和载流导体 I 的关系由左手定则 (又称电动机定则) 确定。

显然, 当磁场与载流导体相互垂直时, 由式 (1.14) 计算的电磁力有最大值。普通电机中, 载流导体通常沿轴线方向, 而 B 在径向方向, 正是出于这种考虑。这种考虑与产生最大感应电动势的基本设计准则完全一致, 实际上隐含了电机的可逆性原理。

由左手定则可知, 电磁力作用在转子的切向方向, 因而就会在转子上产生转矩。

2. 电磁转矩

由电磁力产生的转矩称为电磁转矩。设转子半径为 r , 单根导体产生的电磁转矩就是

$$T_s = Fr = Blir \quad (1.15)$$

对匝数为 N 的线圈, 仿运动电动势分析过程, 设线圈两侧边所在处的磁场分别为 B_1 和 B_2 , 则有

$$T_c = Nlir(B_1 - B_2) \quad (1.16)$$

同理, 若希望获得最大电磁转矩, $B_1 = -B_2$ 是期望的。也就是说, 线圈两侧边处的磁场大小恒相等、极性恒相反。对于一台沿圆周均匀布置线圈的电机来说, 这种需要进而就上升为要求气隙磁场尽可能均匀, 即 B 的大小处处都比较接近。这样, 电机的最大可能电磁转矩就是

$$T_{em} = \sum_{j=1}^M T_{cj} = MNBlrD \quad (1.17)$$

式中, M 为总线圈个数; D 为转子直径。

在电动机里, 电磁转矩是驱使电机旋转的原动力, 即电磁转矩是驱动性质的转矩, 在电磁转矩作用下, 电能转换为机械能。在发电机里, 可以证明, 电磁转矩是制动性质的转矩, 即电磁转矩的方向与拖动发电机的原动机的驱动转矩的方向相反, 原动机的驱动转矩克服发电机内制动性质的电磁转矩而做功, 机械能转换为电能。

电磁转矩还可以用功率的关系求得。设 P 为电机的电磁功率, Ω 为电机气隙磁场旋转角

速度，则有

$$T_{\text{em}} = \frac{P}{\Omega} \quad (1.18)$$

式中， P 可为输入电磁功率，也可为输出电磁功率；相应地，电磁转矩也就分别有输入、输出之分。

1.2 常用的铁磁材料及其特性

1.2.1 铁磁材料的磁导率

电磁学中定义磁介质的磁导率为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.19)$$

式中， B 为磁感应强度（习惯叫磁通密度）矢量； H 为磁场强度矢量； μ 为磁导率。对于均匀各向性磁介质， B 和 H 显然是同方向的。

铁磁材料包括铁、钴、镍以及它们的合金。实验表明，所有非铁磁材料的磁导率都是常数，并且都接近于真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。但铁磁材料的磁导率却是非线性的，即其中 B 与 H 的比值不是常数，磁导率 μ_{Fe} 在较大的范围内变化，而且数值远大于 μ_0 ，一般为 μ_0 的数百乃至数千倍。对电机中常用的铁磁材料来说， μ_{Fe} 在 $2000\mu_0 \sim 6000\mu_0$ 之间。因此，当线圈匝数和励磁电流相同时，铁芯线圈激发的磁通量比空心线圈的大得多，从而电机的体积也就可以减小了。

铁磁材料之所以有高导磁性能，依磁畴假说，从微观角度看，就在于铁磁材料内部存在着很多很小的具有确定磁极性的自发磁化区域，并且有很强的磁化强度，就相当于一个个超微型小磁铁，称之为磁畴，如图 1.5 (a) 所示。磁化前，这些磁畴随机排列，磁效应相互抵消，宏观上对外不显磁性。但在外界磁场作用下，这些磁畴将沿外磁场方向重新作有规则排列，与外磁场同方向的磁畴不断增加，其他方向上的磁畴不断减少，甚至在外磁场足够强时全部消失，被完全磁化，如图 1.5 (b) 所示。结果内部磁效应不能相互抵消，宏观上对外显示磁性，也就相当于形成了一个附加磁场叠加在外磁场上，从而使实际产生的磁场要比非铁磁材料中的磁场大很多，用特性参数磁导率来表示，就是 $\mu_{\text{Fe}} \gg \mu_0$ 。

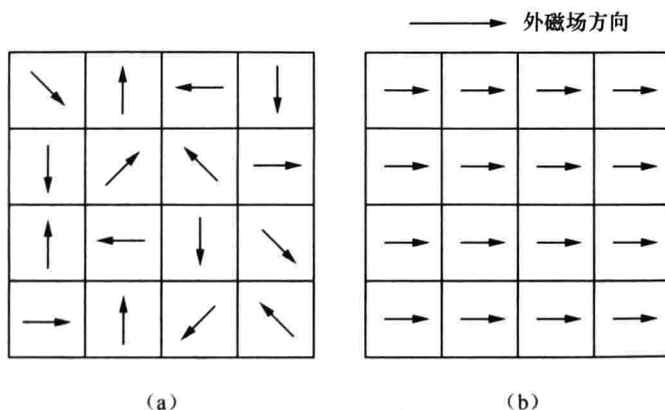


图 1.5 铁磁材料中的磁畴

下面结合铁磁材料的磁化特性具体介绍其磁化过程。

在外磁场 H 作用下, 磁感应强度 B 将发生变化, 二者之间的关系曲线称为磁化曲线, 记为 $B=f(H)$ 。相应地, 还可以描绘磁导率与磁场强度的关系曲线, 记为 $\mu=f(H)$, 叫作磁导率曲线。铁磁材料的基本磁化曲线如图 1.6 所示, 该曲线一般由材料生产厂家以实验结果数据提供。

将图 1.6 中的磁化曲线分为四段。在 Oa 段, 外磁场 H 较弱, 与外磁场方向接近的磁畴发生偏转, 顺外磁场方向的磁畴缓缓增加, B 增长缓慢。在 ab 段, H 较强, 且不断增加, 绝大部分非顺磁方向的磁畴开始转动, 甚至少量逆外磁场方向的磁畴也发生倒转, B 迅速增加。在 bc 段, 外磁场进一步加强, 非顺磁或逆磁方向磁畴的转动不断减少, B 的增加逐渐缓慢下来, 开始出现了所谓磁饱和现象。至 c 点以后, 所有磁畴都转到与外磁场一致的方向, H 再增加, B 的增加也很有限, 出现了深度饱和, B 和 H 的关系类似于真空中的情况。图 1.6 中还画出了磁导率曲线。由于饱和现象在 bc 段开始出现, 其标志就是磁导率随 H 的增加反而变小, 故存在最大值 $\mu_{\max}$ 。

1.2.2 磁滞与磁滞损耗

以上仅讨论了铁磁材料的单向磁化过程。事实上, 被极化了的铁磁材料在外磁场撤除后, 磁畴的排列将不可能完全恢复到原始状态, 即初始随机排列不复存在, 对外也就会显示出磁性。铁磁材料中这种 B 的变化滞后于 H 的变化的现象被称为磁滞。

铁磁材料磁滞现象的完整描述需要考察铁磁材料的交变 (循环) 磁化过程。图 1.7 就是铁磁材料交变 (循环) 磁化过程的磁滞回线, 由实验测定。测取过程为: H 由 0 上升至最大值 H_m , B 沿 Oa 上升至 B_m ; 接下来 H 由 H_m 下降至 0, 但 B 不是沿 aO 下降到 0, 而是沿 ab 下降到 B_r , B_r 称为剩余磁感应强度, 简称剩磁密度; 要使 B 进一步从 B_r 下降至 0, 就要求 H 继续往反方向变化, 直至 $-H_c$ (曲线中的 c 点), H_c 称为矫顽力, 而所谓磁滞也就是形象表述这种 B 滞后于 H 过 0 的磁化过程; H 继续反向增加至 $-H_m$, B 沿 cd 至 $-B_m$; 尔后, H 再从 $-H_m$ 上升至 0, B 沿 de 变化至 $-B_r$, 进而 H 从 0 经 H_c 到 H_m , B 沿 efa 从 $-B_r$ 经 0 到 B_m 。这样经历了一个循环, 就得到了闭合回线 $abcdefa$, 称之为磁滞回线。

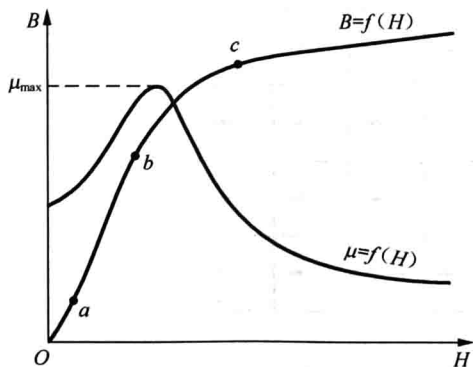


图 1.6 铁磁材料的基本磁化曲线

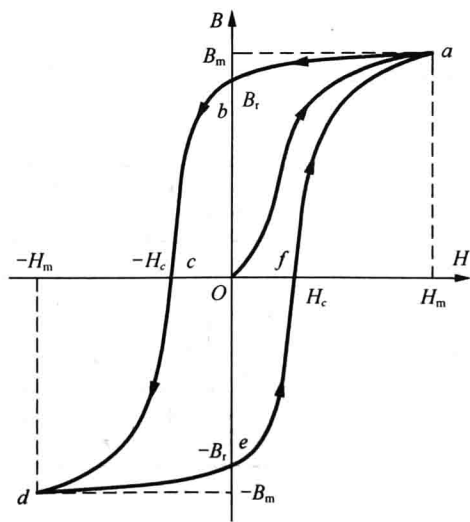


图 1.7 铁磁材料的磁滞回线

磁滞回线表明, 上升磁化曲线与下降磁化曲线不重合, 或者说, 铁磁材料的磁化过程是不可逆的。不同铁磁材料有不同的磁滞回线, 且同一铁磁材料, B_m 愈大, 磁滞回线所包围的面积也愈大。因此, 用不同的 B_m 值可测出不同的磁滞回线, 而将所有磁滞回线在第 I 象限内的顶点连接起来得到的磁化曲线就叫作基本磁化曲线或平均磁化曲线, 如图 1.8 所示。基本磁化曲线解决了磁滞回线上 B 与 H 的多值函数问题, 在工程中得以广泛应用。一般情况下, 若无特别说明, 生产厂家提供的铁磁材料磁化曲线或相应数据都是指基本磁化曲线。严格说来, 用基本磁化曲线代替磁滞回线是有误差的, 但这种误差一般为工程所允许。因为大多数铁磁材料的磁滞回线都很窄, 即 B_r 和 H_c 都很小。磁滞回线很窄的铁磁材料也叫软磁材料, 在电机中常用的有硅钢片、铸铁、铸钢等。

B_r 和 H_c 都比较大, 即磁滞回线很宽的铁磁材料, 通常也形象地称为硬磁材料或叫永磁材料。电机中常用的永磁材料有铁氧体、稀土钴、钕铁硼等。需要特别说明的是, 与软磁材料相比, 硬磁材料的磁导率很小, 如常用永磁材料的磁导率都接近 μ_0 。

铁磁材料在交变磁场作用下的反复磁化过程中, 磁畴会不停转动, 相互之间会不断摩擦, 因而就要消耗一定的能量, 产生功率损耗。这种损耗称为磁滞损耗, 定量分析如下。

图 1.9 所示为截面积为 A 、平均周长为 l 的铁磁材料圆环 (简称为铁芯), 其上均匀而紧密地绕有 N 匝线圈。设线圈中通以电流 i , 在铁芯内产生的磁场强度均为 H , 由全电流定律

$$\oint H dl = \sum I \text{ 有}$$

$$Hl = Ni \quad (1.20)$$

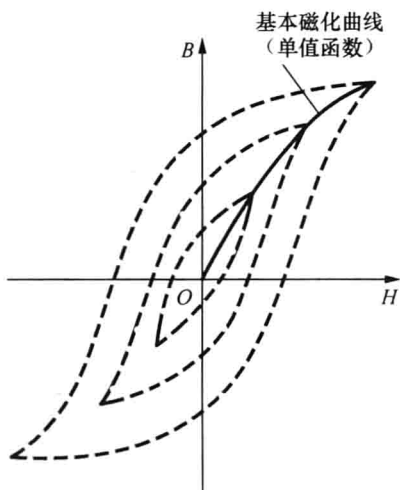


图 1.8 磁滞回线与基本磁化曲线

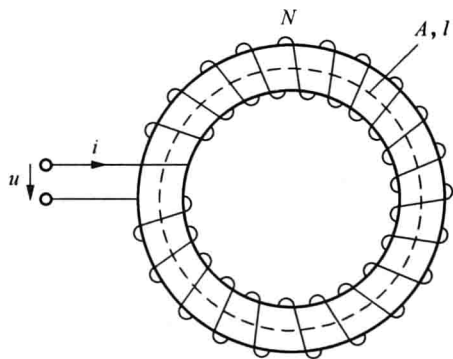


图 1.9 带铁芯的螺旋线圈

即

$$i = \frac{Hl}{N} \quad (1.21)$$

而电源供给线圈的瞬时功率为

$$P = ui \quad (1.22)$$

忽略线圈电阻, 线圈端电压应与感应电动势平衡, 由电磁感应定律有

$$u = -e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.23)$$

式中, Φ 为铁芯内的磁通量。设铁芯内的磁感应强度为 B , 则

$$\Phi = BA \quad (1.24)$$

$$P = ui = N \frac{d\Phi}{dt} i = NA \frac{dB}{dt} \cdot \frac{Hl}{N} = VH \frac{dB}{dt} \quad (1.25)$$

式中, $V=Al$ 为铁芯的体积。

实际上, P 也就是在铁芯中建立交变磁通、克服磁畴回转所需要的瞬时功率, 其在一个周期 T 内的平均值即铁芯磁滞损耗为

$$p_h = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = fV \oint H dB \quad (1.26)$$

式中, T 为电流 i 的变化周期, f 为其频率, 二者关系为 $f = \frac{1}{T}$ 。

式 (1.26) 表明, 磁滞损耗与磁滞回线的面积 $\oint H dB$ 、电流频率 f 和铁芯体积 V 成正比。

如前所述, 磁滞回线的面积首先取决于不同的铁磁材料, 而对于同一铁磁材料, 则取决于磁感应强度的最大值 B_m 。综合二者考虑, 为避免提供完整磁滞回线的困难, 根据经验式 (1.26) 在工程上可改写为

$$p_h = K_h f B_m^a V \quad (1.27)$$

式中, K_h 为不同材料的计算系数; a 为由实验确定的指数。

由于硅钢片的磁滞回线面积很小, 而且导磁性能好, 可有效减小铁芯体积, 因此, 大多数电机、变压器或普通电器的铁芯都采用硅钢片制成, 目的之一也就是要尽量减少磁滞损耗。

1.2.3 涡流与涡流损耗

上面介绍了铁磁材料的磁滞现象, 并定量计算了磁滞损耗。铁磁材料在交变磁场作用下的磁滞现象和磁滞损耗是铁磁材料的固有特性之一。与此同时, 对于硅钢片一类具有导电能力的铁磁材料, 在交变磁场作用下, 还有另外一个重要的特性, 那就是产生涡流及涡流损耗。图 1.10 所示是铁芯中的一片硅钢片, 厚度为 d , 高度为 b ($b \gg d$), 长度为 l , 体积 $V=lb d$ 。在垂直进入的交变磁场 B_m 的作用下, 根据电磁感应定律, 硅钢片中将有围绕磁通呈涡旋状的感应电动势和电流产生, 简称涡流。涡流在其流电路径上的等效电阻中产生的功率损耗 $I^2 R$ 称为涡流损耗 (单位为 J)。具体分析如下。

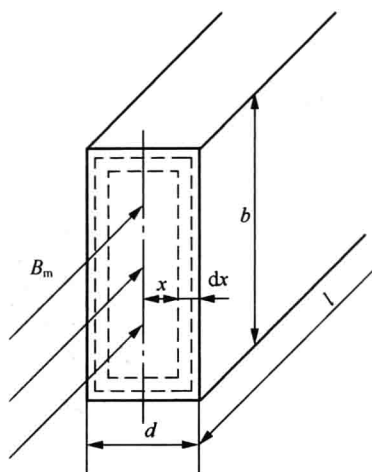


图 1.10 硅钢片中的涡流

根据电磁感应定律, 参照图 1.10, 涡流回路的感应电动势为

$$E_w = K f b 2x B_m \quad (1.28)$$

式中, K 为电动势比例常数; f 为磁场交变频率; x 为涡流回路与硅钢片对称轴线间的距离。

忽略两短边影响, 涡流回路的等效电阻为

$$dR = \rho \frac{2b}{ldx} \quad (1.29)$$

式中, ρ 为硅钢片的电阻率。

从而给定涡流回路中的功率损耗为

$$dp_w = \frac{E_w^2}{dR} = \frac{2K^2 f^2 l b B_m^2 x^2 dx}{\rho} \quad (1.30)$$