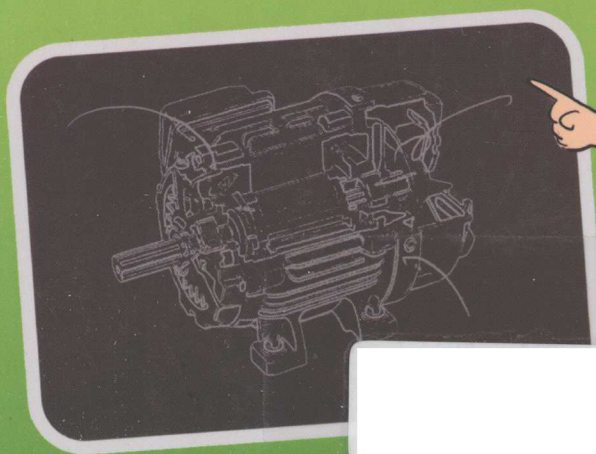


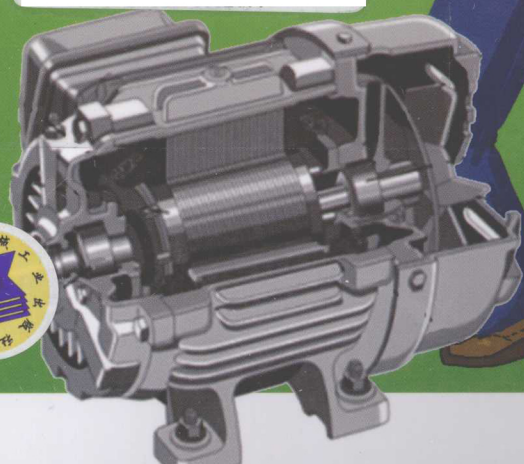
XIAOLI XUE

小李学

异步电动机



张燕宾 编著



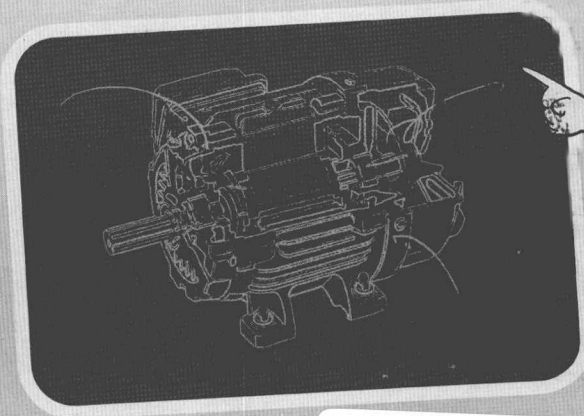
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



XIAOLI XUE

小李学

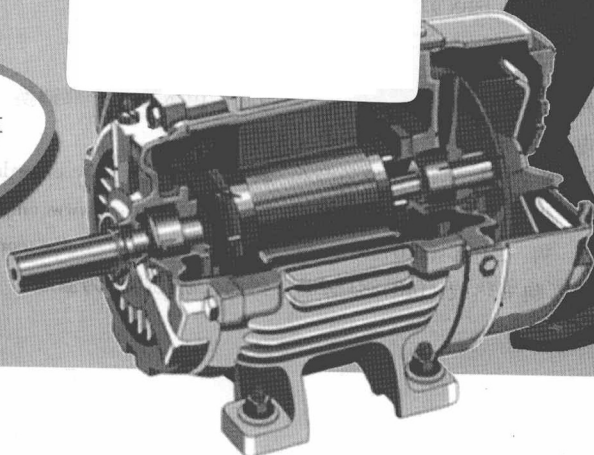
异步电动机



张燕宾 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书以讲故事的方式介绍了三相交流异步电动机。

一方面,以《电机学》的角度,针对三相交流异步电动机比较难学的特点,深入浅出地详细介绍了它的工作原理和等效电路。另一方面,又以《电力拖动》的角度分析了三相交流异步电动机的机械特性以及起动、制动、调速等具体方法和原理。

本书既可以供工矿企业中工程技术人员阅读和参考,也可作为大、中专学校的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

小李学异步电动机/张燕宾编著. —北京:机械工业出版社,2012.8
ISBN 978-7-111-39452-5

I. ①小… II. ①张… III. ①异步电动机—基本知识 IV. ①TM343

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第190510号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:李振标

版式设计:霍永明 责任校对:张玉琴

封面设计:路恩中 责任印制:张楠

北京四季青印刷厂印刷

2012年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.75印张·314千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39452-5

定价:34.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

凡学习自动化专业的同志都有这样的体会：各门专业课程中，最难学的是《电机学》，而在《电机学》中，最难学的当数异步电动机了。而异步电动机恰恰是工厂里用得最多的一种电动机。

近几年来，变频调速发展得很快，而变频调速的绝大多数控制对象，又是异步电动机。对于变频调速系统在运行过程中的种种现象，必须结合异步电动机的基本原理来分析。

我于是就产生了一种想要帮助学员们比较轻松地学好异步电动机的冲动。

我曾经有过十分独特的教学生涯。20世纪60年代初，我在学校教书，就电专业的课程而言，我教过两届技校、三届中专、两届大专，因此知道对于同一个问题的不同层次的讲解方法。后来宜昌市科委要我举办一些讲座和学习班，当时还是20世纪60年代中，听课的学员中，既有初中文化程度的，也有大学毕业生。我的讲座在讲解内容上必须适当深入，使具有大学文化的学员们感到有需要学习的新内容；同时，在讲解方法上又必须尽量地浅出，使具有初中文化的学员们也能听得进去，这使我积累了不少深入浅出地进行讲解的经验。

除此以外，我曾经两次当过工人，一次是刚毕业时，当了九个月的维修电工；另一次是在文化大革命时期，当了整整五年的维修电工；在宜昌市科委期间，我又从一个厂的维修电工成为了全市的维修电工。这使我接触到了各种门类的生产机械及其控制设备，了解到维护这些设备所需要的基础知识。

我还曾经为多位日本电气工程师当过翻译，从而了解了日本人培养电气工程师的特点。

于是我想，我或许还能够利用自己的独特经历，发挥一点余热吧。

这本书，我是把它作为一种教学参考书来写的，所以就具有了以下特点：

首先，凡教科书上已经进行了详细推导的，本书的推导过程就从简；反之，如教科书上只用三言两语带过，而学员们在思想上一时还转不过弯来的，本书则进行比较详细的演绎，这叫做“你繁我简，你简我繁”。当然，这绝不是和教科书对着干，而是互为补充。

其次，教科书对于前面已经讲解过的公式和概念，后面一般不再重复。但我们在读书时，常常有这样的感觉：在后面引用前面的公式或概念时，常常一时找不到在哪里，或者因为相隔太远，懒得到前面去找。本书在遇到这种情况时，则不避重复，使读者能够比较顺利地读下去。

再次，我在写本书时，大部分时间用在对插图的构思上，我力求用比较简单明了的插图来帮助学员较好地理解相关的内容。

毋庸讳言，限于作者的水平，本书中错误或不当之处在所难免，欢迎广大读者们指正。

作 者

2012年8月

目 录

前言

第1章 异步电动机的结构与原理 1

- 1.1 异步电动机的结构 1
- 1.2 三相交流电动机的定子磁动势 3
 - 1.2.1 单相磁动势 3
 - 1.2.2 脉动磁场和旋转磁场 5
 - 1.2.3 三相电流的合成磁场 9
 - 1.2.4 三相旋转磁场的方向和转速 12
- 1.3 异步电动机的工作原理 15
 - 1.3.1 异步电动机的旋转原理 15
 - 1.3.2 关于转速的基本公式 16
- 1.4 异步电动机的额定数据 18
 - 1.4.1 额定电压和额定电流 18
 - 1.4.2 额定频率和转速 18
 - 1.4.3 功率和功率因数 19
 - 1.4.4 电动机的效率和过载能力 20
- 1.5 异步电动机的型号和接法 22
 - 1.5.1 异步电动机的型号 22
 - 1.5.2 绕组的接法 22
- 1.6 异步电动机的定额 24
 - 1.6.1 绝缘材料的耐热等级 24
 - 1.6.2 电动机的温升 25
 - 1.6.3 电动机的运行定额 26

第2章 异步电动机的等效电路 29

- 2.1 关于交流电的复习 29
 - 2.1.1 相量图 29
 - 2.1.2 电感电路和相量图 30
- 2.2 空载时的定子电路 33
 - 2.2.1 转子开路时的定子感应电动势 33
 - 2.2.2 定子等效电路 35
 - 2.2.3 转子短路时的定子电路 37
- 2.3 转子各量与转差率的关系 38
 - 2.3.1 转子短路且不动时的情形 38

- 2.3.2 转子旋转时的情形 39

2.4 转子等效电路 41

- 2.4.1 绕组结构的变换 41
- 2.4.2 动-静变换 42
- 2.4.3 等效电路 43
- 2.5 异步电动机的等效电路 44
 - 2.5.1 磁动势的平衡 44
 - 2.5.2 等效电路 45
- 2.6 异步电动机的相量图 47
 - 2.6.1 转子等效电路相量图 47
 - 2.6.2 异步电动机电流相量 48
 - 2.6.3 定子等效电路相量图 49
 - 2.6.4 异步电动机相量图 49
 - 2.6.5 异步电动机磁路 50
- 2.7 异步电动机参数测定 51
 - 2.7.1 空载试验 51
 - 2.7.2 堵转试验 53

第3章 异步电动机的特性 55

- 3.1 异步电动机的功率流程 55
 - 3.1.1 功率流程 55
 - 3.1.2 定子侧的功率流程 55
 - 3.1.3 转子侧的功率流程 56
- 3.2 电磁转矩 58
 - 3.2.1 和电磁转矩有关的因素 58
 - 3.2.2 电磁转矩与功率因数 59
 - 3.2.3 电磁转矩的表达式 62
- 3.3 异步电动机的机械特性 65
 - 3.3.1 拖动系统概述 65
 - 3.3.2 自然机械特性 67
 - 3.3.3 自然机械特性的4个点 68
- 3.4 机械特性分析 69
 - 3.4.1 机械特性说明的问题 69
 - 3.4.2 机械特性的稳定运行区域 71
- 3.5 附加电磁转矩 73



3.5.1 磁动势的谐波	73	4.8 变频启动	101
3.5.2 齿谐波	74	4.8.1 变频启动概述	101
3.5.3 同步转矩	74	4.8.2 变频器的启动功能	102
3.6 异步电动机工作特性	75	4.8.3 变频器的主要端子	104
3.6.1 转速特性	75	4.8.4 变频器的显示	105
3.6.2 电流特性	76	4.9 绕线转子异步电动机的启动	106
3.6.3 转矩特性	76	4.9.1 绕线转子异步电动机的 启动方法	106
3.6.4 功率因数特性	77	4.9.2 转子串联电阻的机械特性	106
3.6.5 效率特性	77	4.9.3 转子串联电阻的启动控制	108
3.7 拖动系统的折算	78	4.9.4 转子串联频敏变阻器的启动	109
3.7.1 传动机构的作用	78	4.10 高启动转矩笼型电动机	111
3.7.2 折算的必要性	79	4.10.1 深槽式异步电动机	111
3.7.3 折算公式	79	4.10.2 双笼型异步电动机	112
第4章 异步电动机的启动	81	第5章 异步电动机的制动	114
4.1 直接起动的启动电流和转矩	81	5.1 概述	114
4.1.1 直接起动的启动电流	81	5.1.1 关于电磁制动的概念	114
4.1.2 直接起动的启动转矩	83	5.1.2 机械制动简介	114
4.2 起动的过渡过程	84	5.2 再生制动	116
4.2.1 启动过程的基本分析	84	5.2.1 异步发电机怎样发电	116
4.2.2 启动过程的计算	85	5.2.2 异步发电机的特点	117
4.2.3 飞轮力矩的折算和粗测	86	5.2.3 拖动系统里的发电机状态	118
4.3 减压启动综述	88	5.2.4 再生制动状态的机械特性	119
4.3.1 减压限流的原理	88	5.2.5 运行过程中的再生制动	119
4.3.2 减压后的机械特性	90	5.3 反接制动	120
4.4 Y- Δ 启动	91	5.3.1 电源反接制动	120
4.4.1 Y- Δ 启动的方法	91	5.3.2 电源反接制动的控制	121
4.4.2 Y- Δ 启动的效果	91	5.3.3 倒拉反接制动	122
4.4.3 Y- Δ 启动的控制电路	92	5.4 能耗制动	123
4.4.4 Y- Δ 启动需要注意的问题	93	5.4.1 能耗制动的原理	123
4.5 延边三角形启动	94	5.4.2 能耗制动的机械特性	123
4.5.1 基本思路与原理	94	5.4.3 能耗制动的电路	124
4.5.2 延边三角形的控制电路	95	5.4.4 能耗制动的控制	125
4.6 自耦变压器启动	96	5.4.5 电容储能制动电路	125
4.6.1 基本电路	96	5.5 小容量电动机的简易制动方法	127
4.6.2 工作特点	97	5.5.1 三相短路制动	127
4.7 软启动器启动	98	5.5.2 自励磁能耗制动	128
4.7.1 软启动器概述	98	5.5.3 双流制动	128
4.7.2 软启动器的运行方式	98	5.6 电动机的四象限运行	129
4.7.3 软启动器的接线端子	100		



5.6.1 工作点出现在 I、II 象限	130	7.1 变频调速概论	158
5.6.2 工作点出现在 III、IV 象限	130	7.1.1 变频调速的基本原理	158
5.6.3 在 IV 象限运行	131	7.1.2 变频出现的新问题	158
第 6 章 异步电动机的调速		7.1.3 变频同时须变压	160
(非变频)	133	7.1.4 变频器的类别	161
6.1 概述	133	7.2 交-直-交电压型变频器的主电路	163
6.1.1 关于调速的概念	133	7.2.1 交-直-交变频器的变频原理	163
6.1.2 有级调速和无级调速	133	7.2.2 电压型变频器主电路的结构	165
6.1.3 恒转矩调速和恒功率调速	134	7.2.3 变频器各环节的电流	168
6.1.4 异步电动机调速的途径	136	7.2.4 变频器的输入电流	170
6.2 改变磁极对数的调速	136	7.2.5 变频器输入侧的功率因数	172
6.2.1 变极的原理	136	7.3 交-直-交电压型变频器的调制	174
6.2.2 变极电动机的接线和 机械特性	137	7.3.1 变频变压的具体方法	174
6.3 改变电压调速	140	7.3.2 正弦脉宽调制的实施	176
6.3.1 调压调速原理	140	7.3.3 载波频率的影响	178
6.3.2 高转差率电动机的调压调速	143	7.4 变频调速的机械特性	181
6.3.3 调压控制主电路	143	7.4.1 额频以下的机械特性	181
6.4 转子串联电阻调速	145	7.4.2 V/F 控制方式	183
6.4.1 概述	145	7.4.3 额频以上的机械特性	185
6.4.2 能量分析	146	7.4.4 矢量控制	186
6.5 异步电动机串级调速	147	7.4.5 直接转矩控制	189
6.5.1 基本原理	148	7.5 交-直-交电流型变频器	191
6.5.2 实施方案	149	7.5.1 交-直-交电流型逆变电路	191
6.5.3 机械特性	153	7.5.2 电动机状态和变频器状态的 对应	192
6.6 电磁转差离合器调速	154	7.6 交-交变频器	193
6.6.1 滑差电动机的构造和原理	154	7.6.1 交-交变频器里怎样得到 低频电压	193
6.6.2 滑差电动机的机械特性	155	7.6.2 交-交变频器的频率和电压	195
6.6.3 滑差电动机的功率流程	156	7.6.3 交-交变频电路	196
第 7 章 异步电动机的变频调速	158		

第 1 章 异步电动机的结构与原理

小李被明远机械公司录用为电气工程师，负责电气设备的维修。他是学自动化专业的，觉得专业对口，自己很可以有一番作为了。但一进工厂，却惊奇地发现，这工厂里的动力，简直就是异步电动机一统天下的地方。小李在学生时代，最头痛的一门课程就是电机学，而在电机学这门课程里，最最头痛的又是异步电动机。拿他自己的话说，他脑袋里对异步电动机的知识，简直像一片浆糊，当年都不知道是怎么混过来的。但小李是一个十分认真负责的青年，既然已经承担了这份工作，就要力争做好。他下决心要把这门课补上，经人介绍，他找到了一位退休老高工张老师。

1.1 异步电动机的结构

小李介绍了自己的情况后，就问：“为什么在生产机械里，都喜欢用三相交流异步电动机呢？”

张老师笑着说：“因为它的结构简单、坚固，价格低廉呀。关于电动机的结构，有两个基本要素。

1. 电动机结构要点

- (1) 电动机是要带动生产机械旋转的，因此，它一定有定子和转子。
- (2) 电动机的电动力来自于电流和磁通的相互作用力，因此，它必须既有磁路又有电路。

2. 定子结构

(1) 定子磁路 定子的磁路就是定子铁心，由硅钢片叠成，铁心的内表面有槽，如图 1-1a 所示，以便嵌入线圈。

(2) 线圈安置 在电动机里，通常把线圈称为绕组，定子绕组的大体形状如图 1-1b 所示。如果从 AA'处把绕组‘切开’，其截面的示意如图 1-1c 所示。在分析问题时，图 1-1c 就常常作为绕组的符号。

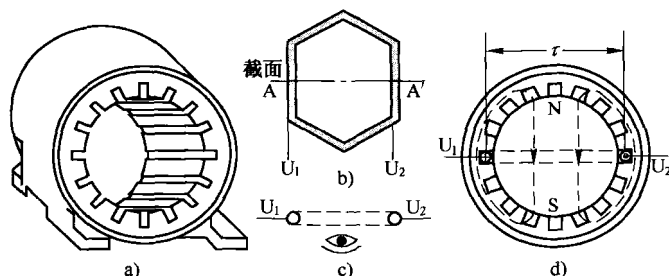


图 1-1 异步电动机的定子结构

a) 定子铁心 b) 定子绕组 c) 绕组断面 d) 定子断面



定子绕组是安置在铁心槽里的，如图 1-1d 所示。两个绕组边之间的距离称为节距，以互相间隔的槽数为单位，用 τ 表示。

绕组里通入电流后，必产生磁通，形成 N 极和 S 极。一对磁极所对应的空间角度称为电角度，在只有一对磁极的情况下，电角度和空间角度是吻合的。

(3) 三相绕组 所谓三相绕组，就是三组在空间位置上互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的绕组，如图 1-2a 所示。

每一相绕组都必须分清‘相头’和‘相尾’，例如，U 相的相头是 U_1 ，相尾是 U_2 ，V 相则分别是 V_1 和 V_2 ，W 相是 W_1 和 W_2 。

在分析问题时，为简洁起见，有时也把三相绕组画成如图 1-2b 所示。

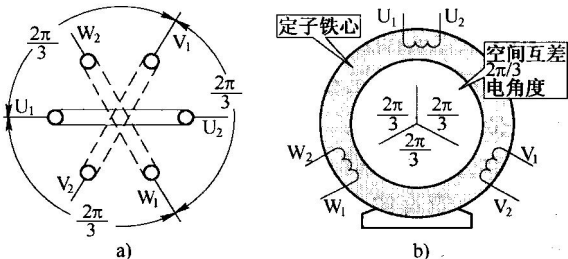


图 1-2 三相绕组特点

a) 剖面图 b) 简易表示

3. 转子结构

(1) 转子铁心 转子铁心也由硅钢片叠成，铁心上也同样有安置绕组的槽，如图 1-3a 所示。

(2) 笼型转子 这是用得最为普遍的一种。转子绕组由铜条或铝条构成，两端由铜环或铝环将所有导体短路，如图 1-3b 和 1-3c 所示。转子绕组不必和外电路相连，这是其结构简单坚固的根本原因，价格也最为低廉。”

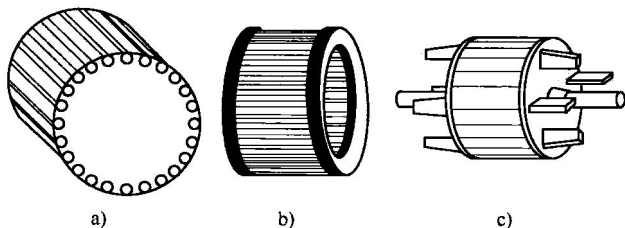


图 1-3 转子的结构

a) 转子铁心 b) 铜条绕组 c) 铸铝绕组

小李问：“我注意到，小容量电动机的笼型转子都是铸铝的，而大容量电动机的笼型转子都是铜条的，有什么道理吗？”

张老师说：“笼型转子的铜条是一根一根地打入转子槽里的，铜条很细时，容易变形，难以打入转子槽，所以，小容量电动机多用铸铝的方法。”

小李又问：“还有一种绕线转子异步电动机，有什么特点？”

(3) 绕线转子 张老师说：“绕线转子异步电动机的转子绕组也是三相绕组，绕组的一端接成 Y 形，另一端接到 3 个集电环，通过集电环和电刷，可以和外电路的电阻或电抗器等相连，如图 1-4a 所示，它在电路

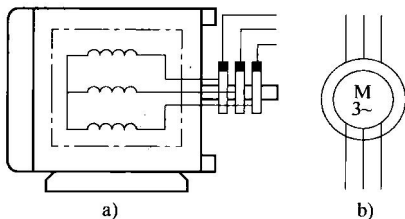


图 1-4 绕线转子异步电动机

a) 转子绕组 b) 符号



中的符号如图 1-4b 所示。这种电动机的主要好处是可以改善异步电动机的起动性能，还能进行有级调速。”

“这两种转子结构的差异挺大的，有什么共同点么？”小李问。

“共同点就是它们的转子电路都是自成回路的，绕线转子虽然和外电路有联系，但所连接的都是无源器件。”张老师回答说。



小结归纳

异步电动机的结构特点

定子	铁心	由硅钢片叠成，表面有槽，以便嵌入线圈	
	绕组	由三组在空间位置上互差 $2\pi/3$ 电角度的线圈构成三相绕组	
转子	铁心	也由硅钢片叠成，铁心上也同样有安置绕组的槽	
	绕组	特点	自成回路
		笼型转子	由铜条或铝条构成，两端由铜环或铝环将所有导体短路
		绕线转子	也是三相绕组，绕组的一端接成 Y 形，另一端接 3 个集电环

1.2 三相交流电动机的定子磁动势

小李说：“我知道把三相交变电流通入到定子绕组里以后，会产生旋转磁场，可我总是不明白，这磁场是怎么旋转起来的呢？”

张老师说：“那我们就来看看这绕组里通入了交变电流后，产生的磁动势有什么特点？不过先别着急看旋转磁场，我们先从简单的内容开始看。”

1.2.1 单相磁动势

1. 假设条件

假设绕组 $U_1 U_2$ 中通入电流后，磁动势在空间是按正弦规律分布的。”

“可是，事实上它不大可能是正弦分布的吧？”小李问。

张老师说：“这个假设可以从两个方面来理解：一是通过对定子绕组的适当安排，可以使定子磁动势的空间分布十分接近于正弦规律；二是作为一般分析，只需要考虑磁动势的基波分量就可以了，因此，可以把它理解为基波分量。”

如果从 U_1 处切开后把线圈展开，则磁动势的空间分布如图 1-5b 所示。因为节距所跨的空间正好和半个圆周相对应，故相当于 180° 电角度 (π)。

在线圈的中间位置，即距 U_1 半个节距处（如图中的 $x_1 = \tau/2$ 处），对应的电角度是 $\pi/2$ ，而在任意位置 x_2 处，其对应的电角度是：

$$\alpha = \frac{x}{\tau} \pi \quad (1-1)$$

式中 α ——沿定子任意位置处对应的电角度；

x ——沿定子任意位置和绕组起点之间相隔的距离（槽数）；

τ ——绕组的节距（槽数）。

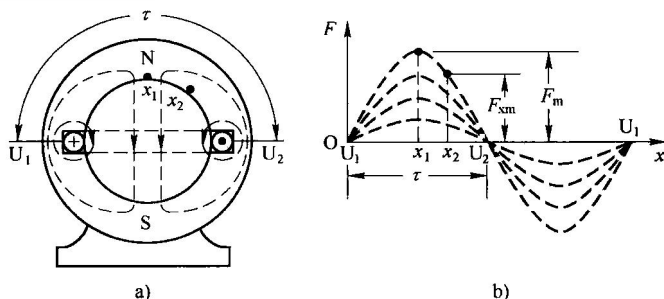


图 1-5 单相磁动势

a) 磁通的路径 b) 磁动势的空间分布

显然，只有在 $x_1 = \tau/2$ 处，才可能得到最大磁动势 F_m 。当在 x_1 处得到 F_m 时，在任意位置 x_2 处所能得到的磁动势的振幅值是：

$$F_{(x)} = F_m \sin \frac{x}{\tau} \pi \quad (1-2)$$

式中 $F_{(x)}$ ——任意位置时，磁动势的振幅值，A；

F_m ——磁动势的最大振幅值，A。

2. 交变磁动势

今向绕组 $U_1 U_2$ 里通入按正弦规律变化的交变电流：

$$i = I_m \sin \omega t$$

式中 i ——电流的瞬时值，A；

I_m ——电流的振幅值，A；

ω ——角频率，rad/s；

t ——时间，s。

因为绕组的匝数是不变的，所以磁动势 F 的变化规律也是按正弦规律变化的：

$$F_{(t)} = i W = I_m W \sin \omega t = F_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

式中 $F_{(t)}$ ——磁动势的瞬时值，A；

F_m ——磁动势的振幅值，A；

W ——线圈的匝数。

所产生的磁动势大小，是随时间不断地变化着的。就是说，即使在 $x_1 = \tau/2$ 处，也并不是总能得到最大磁动势的。因为，磁动势的大小要随时间按照正弦规律变化，或者说，是时大时小地脉动的，如图 1-5b 中的虚线所示。”

“老师，您为什么不用磁感应强度 B 或者磁通量 Φ ，而用磁动势 F ？”小季问。

张老师回答说：“因为磁感应强度 B 和磁通量 Φ 的大小要受到磁路饱和的影响，而磁动势只表示产生磁场的的能力，和磁路的饱和程度无关。我们接着往下讨论吧。”

3. 任意瞬间任意位置的磁动势

(1) $x_1 = \tau/2$ 处的磁动势 如上述，在 $x_1 = \tau/2$ 处，磁动势可以得到最大值 F_m 。这是因为电流是交变的，所以，在 $x_1 = \tau/2$ 处的磁动势实际上是随时间按正弦规律变化的：

$$F_{(x)1} = F_m \sin \omega t$$



(2) 任意瞬间任意位置的磁动势 结合式(1-2)和式(1-3)得,任意瞬间任意位置的磁动势:

$$F_{(x,t)} = F_m \sin \omega t \cdot \sin \frac{x}{\tau} \pi \quad (1-4)$$

式中 $F_{(x,t)}$ ——任意位置任意瞬间的磁动势, A。

4. 驻波因子

式(1-4)中的 $\sin \omega t \cdot \sin \frac{x}{\tau} \pi$ 称为驻波因子,其主要特点是:

(1) 轴线位置不变 这是‘驻波’的最主要特征:尽管所有位置上的磁动势都是交变的,但磁动势轴线的位置始终不变,就好像‘驻扎’在那里一样。

(2) 磁动势在原地交变 既然是‘波’,它一定是变化的,但它只是在原地变化。”

小李拿了一张纸,画了起来,说:“老师,对于驻波,能不能如图1-6那样地理解?就是说,在电动机定子的所有部位,磁动势都同时地按正弦规律交变着,但磁动势在不同位置处,交变的振幅值是各不相同的。

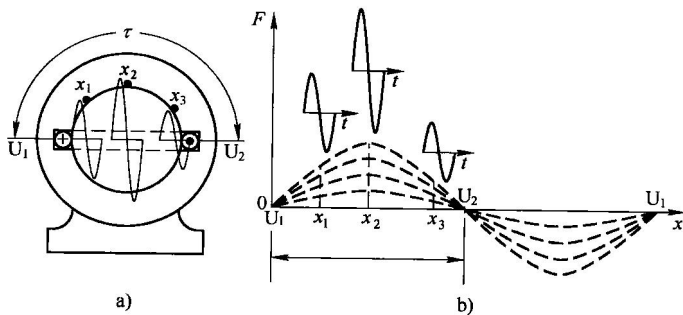


图1-6 驻波示意图

a) 从电动机内部看 b) 把定子展开后看

除此以外,我还依稀记得,在教科书上,把这样的单相磁动势称为脉动磁动势。并且,这脉动磁动势好像可以分解成两个方向相反的旋转磁动势,对不对?”

张老师很欣赏小李的这种能够根据自己的理解进行发挥的能力,笑着说:“很对。现在我们就来看看这脉动磁场和旋转磁场的关系。”

1.2.2 脉动磁场和旋转磁场

1. 脉动磁场的分解

根据三角学里‘积化和差’的公式,式(1-4)可以分解为

$$\begin{aligned} F_{(x,t)} &= F_m \cos\left(\omega t - \frac{x}{\tau} \pi\right) - F_m \cos\left(\omega t + \frac{x}{\tau} \pi\right) \\ &= F_{(x,t)1} + F_{(x,t)2} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式(1-5)表明,脉动磁动势可以分解为两个部分: $F_{(x,t)1}$ 和 $F_{(x,t)2}$ 。两者都是正弦(余弦)函数,它们的振幅值都只有脉动磁动势振幅值的一半:

$$F_{1m} = F_{2m} = \frac{F_m}{2}$$



2. 因子 $\cos\left(\omega t - \frac{x}{\tau}\pi\right)$ 的分析

(1) 在任何时刻 t ，总能够得到一个对应的 x ，使

$$\cos\left(\omega t - \frac{x}{\tau}\pi\right) = 1$$

就是说，在任何时刻，都能得到磁动势的振幅值，这和脉动磁动势是不一样的。

(2) 在不同的时刻，磁动势得到振幅值的位置也是不同的：

$$x = \frac{2\tau}{T}t \quad (1-6)$$

可见，磁动势的轴线是随时间而不断地移动的。或者形象地说，磁动势的轴线是在‘行走’的。所以， $\cos\left(\omega t - \frac{x}{\tau}\pi\right)$ 称为行波因子。

不消说，因子 $\cos\left(\omega t + \frac{x}{\tau}\pi\right)$ 也是行波因子，但

$$x = -2\tau ft$$

所以，移动的方向和式 (1-6) 相反。”

小李简直听得出神，他随手在纸上画了个示意图，兴奋地说：“啊，真有意思！这行波磁动势犹如人在行走，如图 1-7a 所示。因为电动机的定子是圆的，磁动势在定子内‘行走’的结果，就是在旋转，如图 1-7b 所示，对不对？”

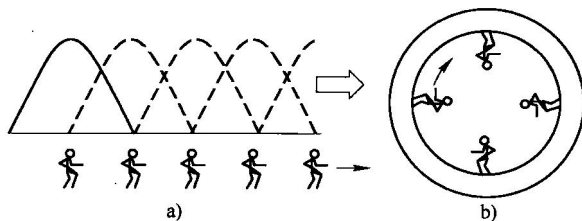


图 1-7 行波示意图

a) 行波的移动 b) 行波在电动机里

张老师赞许说：“画得很形象。”

小李又说：“所以，式 (1-5) 就说明了，脉动磁动势可以分解成两个方向相反的旋转磁动势。但这是从数学公式里推导出来的，总觉得有点玄。”

张老师拿了一张纸，画了起来，说：“我们用图解的方法画出来，就一目了然了。如图 1-8 所示， $F_{(x,t)1}$ 是顺时针方向的旋转磁动势， $F_{(x,t)2}$ 是逆时针方向的旋转磁动势，当它们以相反的方向旋转时，合成磁动势是不是脉动的？”

“式 (1-5) 里 $F_{(x,t)1}$ 和 $F_{(x,t)2}$ 中间的‘-’号说明了什么？”小李又问。

“这说明，在起始位置 ($x=0$) 时， $F_{(x,t)1}$ 和 $F_{(x,t)2}$ 是相等而相反的，如图 1-8 所示的那样。但就宏观效果而言，这里的‘-’号或‘+’号的实际效果是没有什么区别的。”张老师回答说。

“我在一本书上看到，旋转磁动势也可以分解成两个脉动磁动势，”小李一边说，一边在纸上画出了如图 1-9a 所示的示意图，说：“当磁动势在空间以速度 ω 旋转时，它在两个

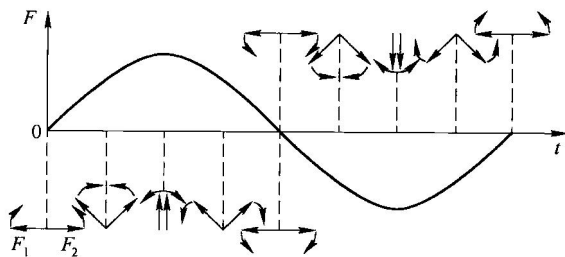


图 1-8 脉动磁场分解成旋转磁场

坐标轴上的投影就是两个互相垂直的脉动磁动势：

$$F_{\alpha} = F \cos \omega t$$

$$= \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$F_{\beta} = F \sin \omega t$$

这也是从数学概念上分解出来的，有实际意义吗？”。

3. 旋转磁动势的分解

张老师就在小李的图旁边又画了个图 1-9b，说：“有啊，例如在定子里安排两组互相垂直的绕组 α 和 β ，如图 1-9b 所示。在这两组绕组里，分别通入两相交变电流：

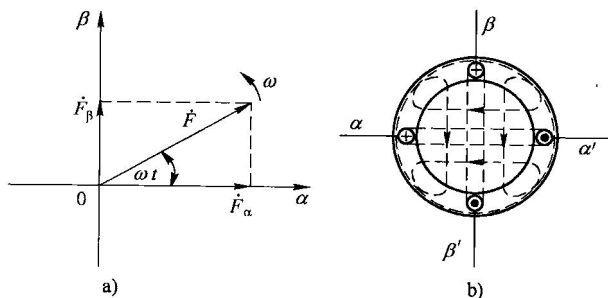


图 1-9 旋转磁场的分解

a) 分解旋转磁场 b) 两相磁场

$$i_{\alpha} = I_m \sin \omega t$$

$$i_{\beta} = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-7)$$

式中 i_{α} —— α 相电流的瞬时值，A；

i_{β} —— β 相电流的瞬时值，A；

I_m ——电流的振幅值，A。

毫无疑问，它们将分别产生各自的脉动磁动势 F_{α} 和 F_{β} ，你观察一下，它们的合成磁动势有什么特点？”

小李接过图，说：“我来试试看吧。首先假设：电流从相头流入时为 ‘+’，从相尾流入时为 ‘-’。由式 (1-7)：

当 $t=0$ 时：



$i_\alpha = 0$, α 相的磁动势 $F_\alpha = 0$;

$i_\beta = -I_m$, β 相的磁动势为负的最大值。

合成磁动势如图 1-10b 所示。

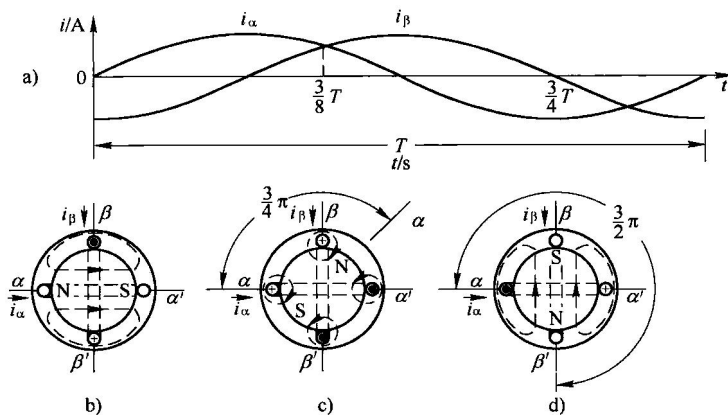


图 1-10 两相旋转磁场

a) 两相电流 b) $t=0$ c) $t=3T/8$ d) $t=3T/4$

当 $t = \frac{3}{8}T$ 时:

$i_\alpha = I_m \sin \frac{3\pi}{4} = 0.7I_m$, α 相的磁动势 $F_\alpha = 0.7F_m$;

$i_\beta = I_m \sin \left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2} \right) = 0.7I_m$, β 相的磁动势 $F_\beta = 0.7F_m$ 。

合成磁场旋转了 $45^\circ \left(\frac{\pi}{4} \right)$ 如图 1-10c 所示。

当 $t = \frac{3}{4}T$ 时:

$i_\alpha = I_m \sin \frac{3\pi}{2} = -I_m$, α 相的磁动势 $F_\alpha = -F_m$;

$i_\beta = I_m \sin \left(\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) = 0$, β 相的磁动势 $F_\beta = 0$ 。

合成磁场又旋转了 $45^\circ \left(\frac{\pi}{4} \right)$ 如图 1-10d 所示。

啊, 这两个脉动磁动势合成的结果, 的确是旋转磁动势。

这可真有意思: 脉动磁动势可以分解为两个方向相反的旋转磁动势; 而旋转磁动势又可以分解为两个互相垂直的脉动磁动势。

可是, 在实际工作中, 有没有两相电源呢?”

张老师又在纸上画了起来, 同时说: “两相电源很少见, 但两相电流是常见的。例如, 在两个互相垂直的绕组里, 让其中一个 (β 相绕组) 和电容器串联, 如图 1-11a 所示, 今假设 β 相电流的振幅值只有 α 相的一半, 如图 1-11b 所示:

$$I_{\beta m} = 0.5I_{\alpha m}$$

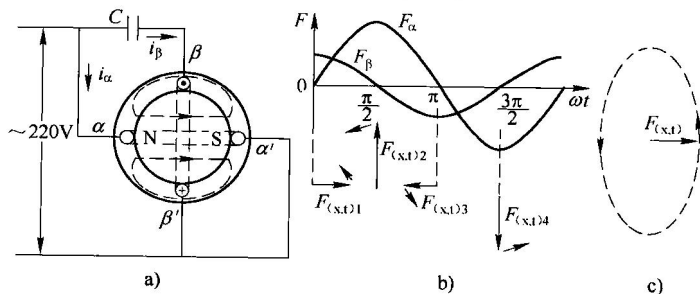


图 1-11 两相电流的磁场

a) 两相电路 b) 两相磁动势 c) 磁场轨迹

你看看，它们的合成磁动势是怎样的？”

小李一边在张老师的图上继续画了起来，一边说：“很明显，磁动势 F_β 比 F_α 超前。

当 $\omega t = 0$ 时， $F_\alpha = 0$ ， $F_\beta = 0.5F_m$ ，合成磁动势如 $F_{(x,t)1}$ 所示；

当 $\omega t = \frac{\pi}{2}$ 时， $F_\alpha = F_m$ ， $F_\beta = 0$ ，合成磁动势如 $F_{(x,t)2}$ 所示，比 $F_{(x,t)1}$ 逆时针旋转了 90° ；

当 $\omega t = \pi$ 时， $F_\alpha = 0$ ， $F_\beta = -0.5F_m$ ，合成磁动势如 $F_{(x,t)3}$ 所示，比 $F_{(x,t)2}$ 又逆时针旋转了 90° ；

当 $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ 时， $F_\alpha = -F_m$ ， $F_\beta = 0$ ，合成磁动势如 $F_{(x,t)4}$ 所示，比 $F_{(x,t)3}$ 又逆时针旋转了 90° 。

可是，这合成磁动势的幅值却总在变化，也叫旋转磁动势吗？”

“当然也是旋转磁动势，”张老师边说，边顺手又画了个图 1-11c。接着说：“不过，这旋转磁动势的轨迹是椭圆形的，称为椭圆旋转磁动势。

现在，我们该讨论三相电流的合成磁动势了。

1.2.3 三相电流的合成磁场

1. 三相绕组的空间位置

我们在 1.1 节中已经说过，三相绕组在空间位置上是互差 $2\pi/3$ (120°) 电角度的，它们所产生的磁动势的轴线在空间也互差 $2\pi/3$ (120°)，如图 1-12a 所示。

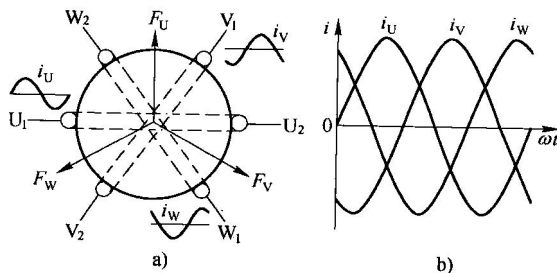


图 1-12 三相电流及其磁动势

a) 三相电流通入三相绕组 b) 三相交变电流



2. 三相绕组里的电流

在三相绕组里，分别通入三相交变电流：

$$\begin{aligned} i_U &= I_m \sin \omega t \\ i_V &= I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_W &= I_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1-8)$$

3. 三相绕组产生的磁动势

我们假设，每相磁动势在空间都是按正弦规律分布的。同时，它们又在各自的位置上脉动着。因此，各相电流在定子任意位置磁动势的表达式是：

$$\left. \begin{aligned} F_{U(x,t)} &= F_m \sin \omega t \cdot \sin \frac{x}{\tau} \pi \\ F_{V(x,t)} &= F_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \sin\left(\frac{x}{\tau} \pi - \frac{2}{3}\pi\right) \\ F_{W(x,t)} &= F_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \sin\left(\frac{x}{\tau} \pi - \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

这3个磁动势将同时作用在定子的任意一个位置 x ，所以，在定子的任意位置 x 处，磁动势的表达式是：

$$\begin{aligned} F_{(x,t)} &= F_{U(x)} + F_{V(x)} + F_{W(x)} \\ &= \frac{3}{2} F_m \sin\left(\omega t - \frac{x}{\tau} \pi\right) \end{aligned} \quad (1-10)$$

从式 (1-9) 到式 (1-10) 的数学演算过程，你自己回去推导吧。

式 (1-10) 表明：

(1) 三相合成磁动势的振幅值等于每相磁动势振幅值的 1.5 倍。

(2) 三相合成磁动势里具有行波因子，所以，是一个旋转磁动势。

以上是通过解析的方法得到的结论，比较抽象。下面我们用图解的方法来说明，如图 1-13 所示，你来进行具体分析吧。”

4. 三相旋转磁场的图解

小李对着图看了一会儿，说：“您在图上已经标志得很清楚了，我试着结合式 (1-9) 和图 1-13 来分析吧：

(1) $t=0$ ， $\omega t=0$ 由式 (1-6)，合成磁动势振幅值的位置：

$$x=0$$

又由式 (1-9)，各相的磁动势分别是：

$$\begin{aligned} F_{U(x,t)} &= 0; \\ F_{V(x,t)} &= F_m \sin\left(-\frac{2}{3}\pi\right) \sin\left(-\frac{2}{3}\pi\right) = F_m \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} F_m; \\ F_{W(x,t)} &= F_m \sin\left(-\frac{4}{3}\pi\right) \sin\left(-\frac{4}{3}\pi\right) = F_m \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} F_m; \\ F_{(x,t)} &= F_{U(x,t)} + F_{V(x,t)} + F_{W(x,t)} = \frac{3}{2} F_m \end{aligned}$$

磁场轴线如图 1-13b 所示。