



电机学

孔昌平 主编

哈尔滨工业大学出版社

电 机 学

孔昌平 主编

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书是为高等院校控制类专业少学时电机学课程编写的，共四篇，二十二章。本书着重阐明各类电机的工作原理、结构和应用，主要特点是将电机的基本部分：直流电机、变压器、异步电机、同步电机和控制类专业常用的微特电机部分综合编写，以求减少学时，并适应近年来电机与控制及机电一体化发展的要求。

本书是高等院校控制类专业、工业企业电气自动化专业电机学课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

电 机 学

孔昌平 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

黑龙江省绥化县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 22.875 字数 460 000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数 1—4 000

ISBN 7-5603-0143-6/TM·6 定价4.35元

前 言

本书是高等院校本科和专科控制类专业少学时电机学课程的教材，是按机械电子工业部电工技术类电机专业教材编审委员会审定的教学大纲编写的。

本书着重阐明各类电机的工作原理、结构和应用。其主要特点：一是学时少（不超过100学时），力求少而精，减轻学生的学习负担；二是将电机的基本部分（直流电机、变压器、异步电机和同步电机）和控制类专业常用的微特电机部分综合编写，并分类对比，以求融会贯通，适应近年来电机、控制和机电一体化发展的要求。

本书由哈尔滨工业大学和重庆大学合作编写。在编写过程中，力求反映两校在电机学课程中积累的教学经验，并征求、吸收多所兄弟院校提供的有益意见，三易其稿，始克付印。

本书共四篇，二十二章。

第一篇直流电机（包括前言、绪论），由哈尔滨工业大学孔昌平教授编写；

第二篇变压器及第三篇异步电机1~3章，由重庆大学杨顺昌教授和孔昌平教授合作编写；

第三篇4~8章，由哈尔滨工业大学张子忠副教授编写；

第四篇同步电机，由哈尔滨工业大学张宝铭副教授编写。

全书由孔昌平教授主编。

本书由清华大学陈汤铭教授主审，承蒙提出不少宝贵意见，特此表示衷心感谢。

在本书初稿试用时，承上海交通大学顾其善教授，江西工业大学何友官教授，燕山大学周绍恩副教授，哈尔滨工业大学王宗培、陆永平、赵昌颖教授多方赐教，在此敬致谢忱。

三十年来，国内外电机事业发展迅速，文献资料，浩如烟海。由于编者水平有限，难免挂一漏万，错误及不妥之处，敬请读者指正。

主编 孔昌平

1990年6月于哈尔滨

目 录

绪 论	1
0-1 电机的分类	1
0-2 电机所用材料	2
0-3 电机的工作制和定额、冷却方式	4
0-4 转矩的产生	6
0-5 机电能量转换原理	7

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的工作原理和构造	10
1-1 直流电机的工作原理	10
1-2 直流电机的构造	16
1-3 电机的额定值	19
第二章 直流电机的电枢绕组	20
2-1 从环形电枢绕组过渡到鼓形电枢绕组	20
2-2 绕组的术语和节距	21
2-3 单迭绕组	23
2-4 复迭绕组	25
2-5 单波绕组	26
2-6 复波绕组	28
2-7 直流电机的感应电势和电磁转矩	30
小结	33
习题	33
第三章 直流电机的磁路	35
3-1 磁化曲线和磁滞回环	35
3-2 退磁曲线及永磁参数	37
3-3 铁损	38
3-4 电磁式电机空载磁路的计算	41
3-5 电枢反应	47
3-6 永磁电机的特点和结构	50
小结	51
习题	52
第四章 直流电机的换向	53

4-1	概述	53
4-2	换向的基本理论	54
4-3	火花及其产生原因	57
4-4	改善换向的方法	58
4-5	电位差火花、环火和补偿绕组	61
4-6	换向的实验调整	63
	小结	64
	习题	64
第五章	直流发电机	65
5-1	他励发电机	66
5-2	并励发电机	67
5-3	复励发电机	70
5-4	效率特性、损耗和功率图	71
5-5	并联运行和标么值	73
	小结	74
	习题	75
第六章	直流电动机	76
6-1	电动机运行的基本方程式	77
6-2	直流电动机的起动	80
6-3	直流电动机的工作特性	82
6-4	机械特性及机组稳定运行条件	85
6-5	直流电动机的调速	88
6-6	直流电动机的制动	95
	小结	98
	习题	98
第七章	直流微电机	100
7-1	直流测速发电机	100
7-2	直流伺服电动机	103
7-3	伺服电动机的控制方法	107
7-4	直流无刷电动机	112
7-5	通用换向器式电动机	116
	小结	119
	习题	119

第二篇 变 压 器

第一章	概述	121
1-1	变压器的用途、分类和结构	121

1-2 变压器的额定值	124
小结	124
习题	124
第二章 变压器的基本原理	125
2-1 理想变压器	125
2-2 变压器的空载运行	127
2-3 变压器的负载运行	130
2-4 变压器的归算	132
2-5 变压器的等值电路	135
2-6 相量图	136
2-7 变压器参数的测定	137
2-8 标么值(相对值)	140
2-9 变压器的运行特性	143
小结	146
习题	146
第三章 三相变压器	148
3-1 三相变压器的构成	148
3-2 联接组号	148
3-3 三相变压器的空载电势波形	151
3-4 变压器的并联运行	153
小结	156
习题	156
第四章 特殊用途的变压器	158
4-1 多绕组变压器	158
4-2 自耦变压器及调压器	159
4-3 仪用互感器	162
4-4 整流变压器	164
4-5 变相和变频变压器	169
小结	171
习题	172

第三篇 异步电机

第一章 交流电机绕组的构成	174
1-1 从直流绕组过渡到交流绕组	174
1-2 三相双层整数槽绕组	176
1-3 三相单层绕组	178

1-4 单相和两相绕组	181
小结	183
习题	183
第二章 交流绕组的感应电势	184
2-1 单根导体中的感应电势	184
2-2 绕组元件中的感应电势和节距系数	186
2-3 分布绕组的感应电势、分布系数和绕组系数	187
2-4 相电势和线电势	188
2-5 感应电势中的高次谐波及其消除方法	189
小结	192
习题	192
第三章 交流电机的磁势	194
3-1 全距元件的磁势	194
3-2 分布绕组的磁势	196
3-3 短距元件的磁势	197
3-4 单相绕组的磁势——脉动磁场	197
3-5 三相绕组的磁势——旋转磁场	198
3-6 高次谐波磁势的性质和影响	201
小结	201
习题	202
第四章 三相异步电动机	203
4-1 三相异步电动机的工作原理、结构和额定值	203
4-2 转子静止时的异步电动机	207
4-3 转子旋转时的异步电动机	212
4-4 异步电机参数的测定	218
4-5 异步电动机的功率和转矩平衡	221
4-6 异步电机的电磁转矩	222
4-7 异步电动机的运行性能	224
4-8 异步电动机的起动	231
4-9 深槽及双鼠笼异步电动机的起动	236
4-10 高次谐波磁场产生的寄生转矩及其影响	238
4-11 三相异步电动机的调速	240
4-12 三相异步电动机的制动	247
4-13 异步发电机	249
小结	250
习题	250
第五章 单相异步电动机	253
5-1 概述	253

5-2	单相异步电动机的运行原理	253
5-3	单相异步电动机的起动方法	258
	小结	262
	习题	262
第六章	交流伺服电动机和交流测速发电机	264
6-1	概述	264
6-2	交流伺服电动机的工作原理和控制方式	265
6-3	交流伺服电动机的基本方程式和无自转条件	267
6-4	交流伺服电动机的运行特性	271
6-5	交流伺服电动机的传递函数、时间常数和始动电压	273
6-6	交流异步测速发电机	276
	小结	278
	习题	279
第七章	旋转变压器	280
7-1	概述	280
7-2	正、余弦旋转变压器工作原理	281
7-3	线性旋转变压器	285
7-4	旋转变压器的运行方式	287
7-5	旋转变压器的误差和准确度	289
	小结	292
	习题	292
第八章	自整角机	293
8-1	概述	293
8-2	力矩式自整角机工作原理	294
8-3	控制式(变压器式)自整角机工作原理	298
8-4	自整角机的工作准确度	299
	小结	300
	习题	300

第四篇 同步电机

第一章	同步发电机	304
1-1	同步发电机的空载运行	304
1-2	对称负载下的电枢反应	306
1-3	电势方程式和相量图	310
1-4	同步发电机的电磁功率和功角特性	313
1-5	同步发电机的基本特性	315
	小结	316

习题.....	317
第二章 同步电动机和同步补偿机.....	318
2-1 从同步发电机过渡到同步电动机.....	318
2-2 同步电动机的电势方程式和相量图.....	318
2-3 同步电动机的起动.....	319
2-4 同步电动机的运行特性.....	321
2-5 同步补偿机.....	322
小结.....	323
习题.....	324
第三章 同步微电机.....	325
3-1 用途和类型.....	325
3-2 微型永磁同步电机.....	325
3-3 磁阻电动机.....	328
3-4 磁滞电动机.....	330
3-5 步进电动机.....	332
小结.....	338
习题.....	338
附录1 国产电刷性能表.....	339
附录2 Z_2 系列220V、1500rpm直流电动机的技术数据.....	340
附录3 SZ系列直流伺服电动机部分额定数据.....	340
附录4 整流电路及其特性.....	342
附录5 Y系列三相异步电动机额定数据.....	343
附录6 单相电容起动异步电动机(CO系列)和单相电容 运转异步电动机(DO系列)主要技术数据.....	345
附录7 两相交流伺服电动机主要技术数据 (SL系列).....	347
附录8 旋转变压器主要技术数据.....	349
附录9 自整角机主要技术数据.....	352
附录10 磁滞电动机技术数据.....	354
附录11 步进电动机技术数据.....	355
参考文献.....	355

绪 论

电机——本书所讨论的对象，是以电磁感应原理为基础的机电能量变换和控制装置。它包括连续圆周运动的旋转电机和直线（往复）运动电机，也包括不连续的（步进的）线位移、角位移以及点位控制等增量运动的电机。

变压器本不属于电机，它是个静止的电器，但电机学各类教材均将变压器列入。除考虑教学传统外，主要在于它的工作原理也是电磁感应。从生产的发展历史看，不少电机厂也是变压器厂。

电能属于二次能源，它由化学能（煤、油、可燃气体等）、位能（水力）、动能（风力）、太阳能、地热能 and 原子能等一次能源转化而来。由于电能便于集中生产，远途输送，按需分配，易于变换形态（如机械、电、声、光、热、磁、放射等）和控制，故一次能源多转变为电能形式以用于国民经济各领域。整个电能的生产和利用过程总是和电机密切相关的。电机有效率高的特点：一般小功率电机效率达65~85%，大功率电机达95~99%，变压器甚至超过99%。一般热机及内燃机效率仅30~40%。此外，和其他机械相比，电机的造价较低，每千瓦功率的重量也较轻。

0-1 电机的分类

1. 电机按功能分类

发电机——将机械能变为电能的电机（磁流体发电机属于直接发电，暂不列入本书）。

电动机——将电能变为机械能的电机。

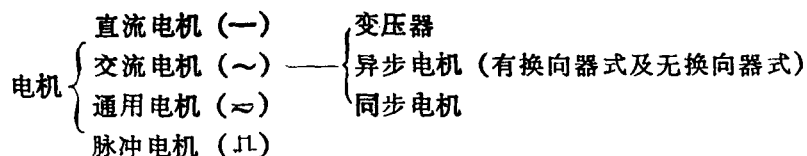
变流机——将电流的性质、频率或电压予以变换的旋转电机。例如，单枢变流机，它将交流电能变为直流电能，或相反；单枢双换向器直流电机（升压机）等。

变压器——将一系统的电参数（电压、电流、相数）转变为同频率的另一系统的电参数的静止电器。

微电机——控制系统和驱动用的小容量电机。

所有电机都有可逆性，即同一电机可作发电机运行，也可作电动机运行（发电机 $\longleftrightarrow$ 电动机）；同一变压器可以升压，也可以降压（升压 $\longleftrightarrow$ 降压）。这是电机基本原理之一，称之为电机可逆原理。

2. 电机按电流性质分类



3. 电机按功率分类可分为：大型、中小型、微型。

微型电机按一般惯例是指功率在750瓦以下（连续定额，1500转/分）的电机。按其应用可分为三大类：

- | | | |
|-----|---|--|
| 微电机 | { | 电源微电机：各类微型发电机、变流机、变频机等。 |
| | | 驱动微电机：各类微型电动机、同步、异步（单、三相）和通用电动机、中频电动机等。 |
| | | 控制微电机：各类伺服电动机、旋转变压器、自整角机、测速发电机、步进电动机、力矩电动机、电机放大器、磁滞电动机等。 |

控制微电机主要用于自动控制系统，可作为检测、放大、执行及解算元件。要求它具有高精度，高灵敏度，高稳定可靠性，重量轻，体积小，耗电量少等特点。

微电机是近期国内外发展较快的一个分支。随着新品种、新原理、新工艺不断涌现，微电机近20年已远远跨出军用范围而进入民用，且步入家庭。据国外一个统计资料：美国每个家庭用微电机50台，西德每家用40台，日本每家用30台。我国部分家用电器产品用量（国家统计局资料）如下表：

产品 \ 年	1965	1978	1986	1989
家用电冰箱（万台）	0.3	2.8	224	465
家用洗衣机（万台）	0	0.04	899	1200

又如，一台自动化车床需用30多台微电机，一台小汽车需用近10台微电机。就其发展速度及产值来说，甚至超过大中型电机。民用微电机的特点是需要量大，要求价廉耐用，噪音低，干扰小，便于维修等。

由于电子技术及永磁材料的发展，固体变频元件、低价的铁氧体及高磁能的稀土永磁已广为应用。据国外近年统计，10瓦以下直流电动机中，永磁式占99%；500瓦以下的永磁式占92%。我国稀土不稀，这方面的发展方兴未艾。

0-2 电机所用材料

电机所用材料主要有：1. 结构材料；2. 有效材料；3. 绝缘材料。

1. 结构材料 主要指各种钢材、铜板、铸钢、铸铁件。微电机机壳要求有足够的刚度和强度，可采用硬铝或不锈钢，采用冷挤压成型。

2. 有效材料 主要指磁性材料和导电材料。磁性材料分软磁、硬磁、磁滞材料。

软磁材料主要有工程纯铁、铁硅系、铁镍系、铁钴系和铁铝系合金，其特征是矫顽力 H_c 小，导磁率高，磁滞回环较窄，磁滞损失小，磁阻低，极易磁化和退磁。如各类电工硅钢片，常用于定、转子冲片，纯铁用于永磁电机的磁轭等。

硬磁材料性能与软磁相反，主要用作永磁材料。常用的有铁氧体、铝镍钴 AlNiCo_5 和稀土 SmCo_5 等三类。主要性能由剩磁感应 B_r 、矫顽力 H_c 及最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 决定，具体数值范围如下：

材料	性能 剩磁 B_r (G) ($1\text{G}=10^{-4}\text{T}$)	矫顽力 H_c (Oe) ($1\text{Oe}=79.5775\text{A/m}$)	最大磁能积 (BH) $_{\max}10^6$ (G·Oe)
$\text{Ba}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_6$	2000	2000	3~4
AlNiCo_5	12500	700~800	7~8
SmCo_5	8000~11000	6000~9000	15~30

其中铁氧体，价格最便宜，它与 AlNiCo_5 及 SmCo_5 价格之比约为1:6:80。目前稀土材料提纯工艺在不断改进， SmCo_5 等稀土永磁材料的价格可以下降，其应用正在进一步推广。

其他硬磁合金，如 CeCoCuFe 及 NdFeB 等，由于耐高温性能的提高，价廉，应用也日益广泛。

磁滞材料主要用于磁滞电动机，其特征是有较大的比磁滞损耗，凸度系数 ≈ 1 。磁滞材料以铁钴钕系合金为主，也常用价格较便宜的铁锰镍系合金。

导电材料主要为各种线规的铜线、铝线和各种牌号的电刷，各种金属弹性材料。近期超导材料的研究，尤其是提高常温下的导电率，进展很大，值得关注*我国科学院物理所的研究成果已居国际领先地位。

3. 绝缘材料 按其结构的耐热性分为七级，每级的极限温度及材料见表0-1。

值得指出的是各种塑料（热固型、热塑型），在微特电机中的应用日益增多，它不仅作为良好的绝缘材料，且兼作结构材料，如塑料（酚醛胶木粉）换向器、刷架、出线盒、机壳、端盖轴承套及风叶等。

上述各种材料的更新，不仅提高了电机的性能，而且促进了电机的微型化，如用稀土永磁代替电磁，可使电机体积缩为原来的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ 。据介绍，由于采用合成绝缘材料（包括塑料），微电机的重量比三十年前已减轻60%，体积缩小80%。因此，对电机的各种新材料的研究动态，应予以足够重视。

* 氧化物系列超陶瓷超导物质的结构：钽2，钆1，铜2.98，氧6.66，其晶体为锥形四面体结构。

表0-1

耐热分级	极限温度	常 用 材 料
Y	90°C	用未浸渍过的棉纱、丝和纸等材料及其组合物
A	105°C	用浸渍过的或浸在液体电解质中的棉纱、丝及纸等材料，或其组合物
E	120°C	用合成有机薄膜、合成有机瓷漆等材料，或其组合物
B	130°C	用合适的树脂粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料、合适的有机材料，或其组合物
F	155°C	同 B 级所述，树脂耐热提高
H	180°C	用合适的树脂（硅有机树脂）粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维、石棉材料，或其组合物
C	>180°C	用合适的树脂粘合或浸渍、涂复后的云母、玻璃纤维，以及未浸渍处理的云母、陶瓷、石英等材料，或其组合物

0-3 电机的工作制和定额、冷却方式

电机的发热与电机工作时间的长短（使用方式）及冷却方式有关，电机的容量及寿命由各种绝缘结构允许的温升决定。

按国标 GB755-81 规定：电机的定额分为连续定额、短时定额和断续定额三种。共有 $S_1 \sim S_8$ 八种工作制*。

(1) 连续定额电机 按照规定的全部电量和机械量的数值，不受时间的限制，连续运行的电机。

(2) 短时定额电机 按照规定的全部电量和机械量的数值，在规定的持续时间限值内运行的电机。标准持续时间限值分为15、30、60和90分钟四种。

(3) 断续定额电机 按照规定的全部电量和机械量的数值，长期运行于一系列完全

* $S_1 \sim S_8$ (GB755-81) 表示：

S_1 ——连续工作制；

S_2 ——短时工作制；

S_3 ——断续周期工作制；

S_4 ——包括起动的断续周期工作制；

S_5 ——包括电制动的断续周期工作制；

S_6 ——连续周期工作制；

S_7 ——包括电制动的连续周期工作制；

S_8 ——包括负载与转速相应变化的连续周期工作制。

相同的周期的电机。此周期包括一个额定负载时间 N 和一个停止时间 R ，用负载持续率表征，即

$$\text{负载持续率 } FC\% = \frac{\text{额定负载时间}}{\text{整个周期时间}} \times 100\% = \frac{N}{N+R} \times 100\%$$

标准的负载持续率为15%、25%、40%和60%，每个周期为10分钟，图0-1、0-2、0-3为上述三种工作制的负载、电损耗、温度（ $S_1 \sim S_3$ ）对时间的曲线。

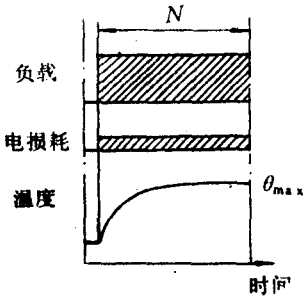


图0-1 连续工作制 S_1
 N —在额定条件下运行；
 θ_{max} —达到的最高温度

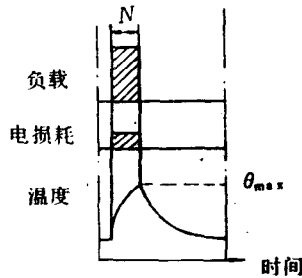


图0-2 短时工作制 S_2
 N —在额定条件下运行；
 θ_{max} —在工作周期中达到的最高温度

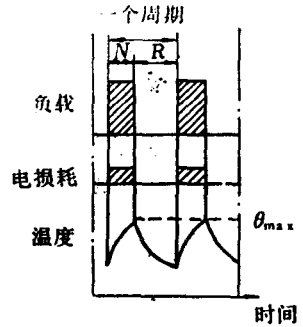


图0-3 断续周期性工作制 S_3
 N —在额定条件下运行；
 R —停机和断能；
 θ_{max} —在工作周期中达到的最高温度；负载持续率：
 $FC = (N/(N+R)) \times 100\%$

同一电机运行于不同的 $FC\%$ 时功率互换的关系如下：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{I_1}{I_2} = \sqrt{\frac{FC_2}{FC_1}}$$

若 P_2 为连续定额（即 $FC = 100$ ），当改为断续定额（如15%，25%，40%，60%）时，其对应的功率 $P_1 = (2.6, 2, 1.6, 1.3) P_2$ 。也就是说，连续定额1kW的电机，当运行于 $FC = 25\%$ 时，可增加功率一倍，当2kW使用。反之，则减少一半。

电机的冷却方式：

(1) 空气冷却 (a) 自冷式；(b) 自扇冷式；(c) 他扇冷式；(d) 管道通风式。

(2) 液体冷却 电机用液体（水、油）冷却。

(3) 闭路循环气体冷却 冷却介质（氢或空气）经过电机吸收热量，而在经过冷却器时放出热量，冷却介质闭路循环。

(4) 表面冷却和内部冷却 冷却介质仅通过导体表面者称为表面冷却（外冷），通过导体内部（空心导线）者为内部冷却（内冷）。

0-4 转矩的产生

旋转电机的转矩可直接由带电导体在磁场中受力 $f = Bli$ 公式求得，分析于下。

图0-4(a)所示为定、转子都由电励磁而产生的两个磁极系统（永磁也可）。当两系统的磁极轴线重合时， $\delta = 0$ ，此时只存在平衡的磁拉力，而无任何转动的趋势，角 δ 称为转矩角或功角。当 $\delta = 180^\circ$ ，两磁极系统处于不稳定平衡状态，稍一扰动，它们即回复到 $\delta = 0$ 的稳定平衡状态。

如图0-4(b)所示，当定、转子两磁极系统的 $\delta \neq 0$ 时，可将转子磁势 F_r 分解为切向分量 $F_r \sin \delta$ 和径向分量 $F_r \cos \delta$ ，切向分量将产生转矩，而径向分量只产生如图0-4(a)所示的平衡磁拉力（如气隙不等，将产生单边磁拉力）。当 $\delta = 90^\circ$ ，产生的转矩最大，其切向分量如图0-4(b)中箭头所示的吸力和斥力，它们力图使转子回到同轴位置（ $\delta = 0$ ），显然其作用力是两个电流形成的磁势产生的。

当 $\delta = 0$ 时，则转动停止。必须指出，旋转电机即使已经旋转，仍需保持两磁轴间有一定的转矩角 δ ，才能连续产生转矩和维持运动，这在工程实践中是通过多种途径实现的。

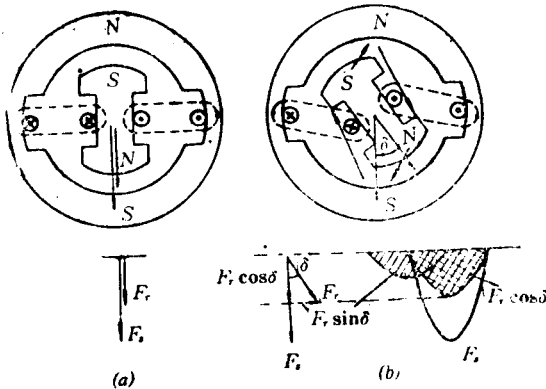


图0-4 转矩的产生
(a) $\delta = 0$ (b) $\delta \neq 0$

对于直流电机，如图0-5所示，转子在恒定磁场中旋转，电刷依次与导体滑动接触，直流电由A电刷分两条支路流入，由B电刷两路流出，不论电枢是否旋转，其电流总是如此分配，使转子电流建立的磁场轴线始终和电刷联线重合。两磁系统所产生的吸力和斥力将使电枢按顺时针方向旋转。为获得最大转矩，电刷常置于 $\delta = 90^\circ$ ，即与定子磁极轴线垂直的位置。

有关同步和异步电机的定、转子产生转矩的原理也是相同的，即它们正常工作时，定、转子两磁极系统极数相等，并且没有相对运动，转矩角 δ 在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内变化，这是电机基本原理之二，称之为定、转子磁势相对静止原理。

一般情况下，定、转子磁势可以用空间矢量表示（非正弦时可取其基波分量），则

转矩正比于两磁势矢量的幅值与其夹角的正弦的乘积,即

$$T \propto F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (0-1)$$

将 F_s 和 F_r 相加为气隙的合成磁势 F_δ ,则三个磁轴矢量对应三个夹角,如图0-6所示。

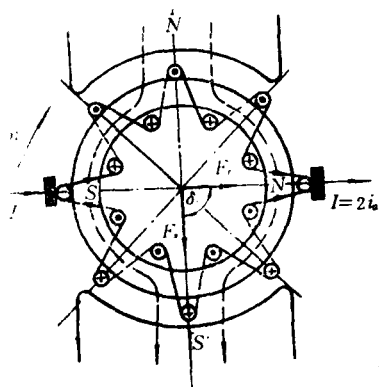


图0-5

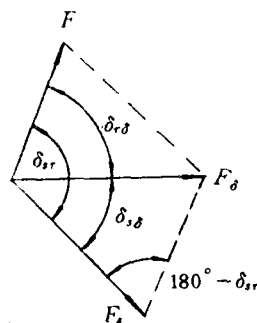


图0-6 定、转子合成气隙磁势 F_δ 、 F_r 及 F_s 矢量图

由正弦定律得

$$\frac{F_s}{\sin \delta_{rs}} = \frac{F_r}{\sin \delta_{ss}} = \frac{F_\delta}{\sin (180^\circ - \delta_{sr})} = \frac{F_\delta}{\sin \delta_{sr}}$$

故转矩公式(0-1)又可表示为

$$T \propto F_s F_\delta \sin \delta_{sr} \quad (0-2)$$

$$T \propto F_r F_\delta \sin \delta_{rs} \quad (0-3)$$

式(0-2)适用于同步电机,而式(0-3)适用于异步电机。

0-5 机电能量转换原理

机电能量转换原理——电机基本原理之三。

在质量不变的物理系统内,能量不能自行增减,仅能改变其存在的形式,这就是“能量守恒原理”。这样,作为机电能量转换元件的电机,由于工作频率低,忽略电磁能的辐射,仅涉及电能、机械能、磁场储能和热能等四种能量形式,它们之间的关系为

$$\left(\begin{array}{c} \text{由电源输入} \\ \text{的电能} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{输出的} \\ \text{机械能} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{磁场} \\ \text{储能} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{热能} \end{array} \right)$$

上式是以电动机为例的能量关系式。对发电机来说,则输出电能,输入机械能。

热能是损耗,是不可逆的,它常由三方面原因造成:铜损耗($I^2 R$)、机械损耗(摩擦和通风)和铁损耗(磁滞和涡流),把这三种损耗归并于与之对应的电路、机械和磁场系统,则能量平衡关系式为