

中等专业学校试用教材

电 机 学

哈尔滨电机制造学校主编

机械工业出版社

电 机 学

哈尔滨电机制造学校 主编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $31 \frac{1}{2}$ ·字数 768 千字

1979年9月北京第一版·1979年9月北京第一次印刷

印数 00,001—60,000·定价 2.25元

*

统一书号: 15033·4807

编 者 的 话

本书是根据第一机械工业部 1977 年 12 月在北京召开的中专教材座谈会及 1978 年 1 月在湘潭召开的中专电机制造专业教材会议制订的《电机学》教材编写大纲编写的。

本书从基本概念和物理现象出发,着重对主要型式电机的基本理论、结构概要、分析方法和运行性能进行阐述;对一些特殊运行状态、暂态过程分析、有关新技术问题的理论分析,进行一般介绍;同时,介绍主要型式电机实验的内容和方法,并重点介绍三相异步电动机的型式试验。各章后面均附有小结、思考题和计算题。

本书可作为中专电机专业的试用教材。也可供电器、工业电气自动化、电力、船舶电机和电力机车等专业的教材或参考书。各专业在选用本书时可根据专业的特点和要求加以选用。

本书由哈尔滨电机制造学校的冯欣南同志担任主编。参加编写的有湘潭电机制造学校的向跃庆同志、哈尔滨电机制造学校的刘福林、孔庆海、刘庆田和黄厅荣等同志。

全书最后由冯欣南同志进行审订。部分章节作了补充和改写。

在编写过程中,得到本校和兄弟院校的领导,教研组及绘图人员的大力支持和帮助。在此一并表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,再加时间短促,书中会有不少缺点和错误,欢迎读者多加指正。

各物理量角标的规定

| | |
|-------------------------|--------------------|
| 0 —— 空载的、零序分量、开路的、槽口的 | q —— 交轴的 |
| 1 —— 定子的、输入的、正序分量 | s —— 串励的、杂散的、同步的 |
| 2 —— 转子的、输出的、负序分量 | t —— 匝的、齿部的 |
| A —— 线负载、面积 | w —— 波绕组的 |
| a —— 电枢的、加速的 | x —— 电抗的 |
| b —— 电刷的 | Y —— 控制的 |
| c_0 —— 导体的 | Fe —— 铁的 |
| c —— 线圈的、补偿的 | Al —— 铝的 |
| Cu —— 铜的 | SK —— 斜槽的 |
| d —— 直轴的、差别的、分布的、附加的 | av —— 平均值、平均的 |
| E —— 端部的 | ef —— 有效的(长度) |
| f —— 励磁的、励磁绕组、并励的、摩擦的 | as —— 异步的 |
| i —— 内径的 | st —— 起动的 |
| J —— 轭部的、惯性的 | max —— 最大值、最大的 |
| k —— 短路的、换向器的 | min —— 最小值、最小的 |
| L —— 透绕组的、自感的 | syn —— 整步的 |
| m —— 磁化的、主极的、峰值 | dp —— 分布短距的(绕组的) |
| M —— 电磁的 | δ —— 气隙 |
| N —— 额定的 | ν, μ —— 谐波次数 |
| P —— 有功的 | ϕ —— 相的 |
| p —— 极靴的、均压线圈的、短距的 | σ —— 漏磁的 |
| Q —— 无功的 | |

主要符号表

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| A —— 线负载、截面积 | b —— 宽度 |
| α —— 并联支路数(交流)、支路对数(直流) | b_p —— 极靴宽度 |
| B —— 磁通密度 | b_s, b_t —— 槽宽、齿宽 |
| B_δ —— 气隙磁密 | E —— 电势 |
| B_j —— 轭磁密 | E_ϕ —— 相电势 |
| B_t —— 齿磁密 | E_0 —— 空载电势 |
| B_ν —— ν 次谐波磁密 | E_a —— 电枢电势 |
| B_{ad} —— 直轴电枢磁场磁密 | E_1 —— 变压器原边(异步电机定子)电势 |
| B_{aq} —— 交轴电枢磁场磁密 | E_2 —— 变压器付边(异步电机转子)电势 |
| B_k —— 换向极磁密 | E'_2 —— E_2 的折算值 |
| | E_{a1} —— 变压器原边(异步电机定子)的漏磁电势 |

E_{o2} ——变压器付边(异步机转子)的漏磁电势
 E_{od} ——直轴电枢反应电势
 E_{oq} ——交轴电枢反应电势
 e_a ——电抗电势
 e_k ——换向电势
 F ——磁势、磁压降
 F_f ——励磁磁势
 F_{f0} ——空载励磁磁势
 F_{fN} ——额定励磁磁势
 F_1 ——变压器原边(异步机定子)磁势
 F_2 ——变压器付边(异步机转子)磁势
 F_a ——电枢反应磁势
 F_{od} ——直轴电枢磁势
 F_{oq} ——交轴电枢磁势
 F_g ——气隙磁势
 F_k ——换向极绕组磁势
 F_c ——线圈磁势
 F_{q1} —— q 个线圈所生的基波磁势
 F_{q1} ——单相绕组所生的基波磁势
 F_{ν} ——单相绕组所生的 ν 次谐波磁势
 f ——频率、力、磁势瞬时值
 f_1 ——定子频率
 f_2 ——转子频率
 f_{ν} —— ν 次谐波频率
 f_N ——额定频率
 I ——电流
 I_N ——额定电流
 I_0 ——空载电流
 I_{ϕ} ——相电流
 I_1 ——变压器原边(异步机定子)电流
 I_2 ——变压器付边(异步机转子)电流
 I'_2 ——折算到定子侧的转子电流
 I_a ——电枢电流
 I_f ——励磁电流
 I_{f0} ——空载励磁电流
 I_{fN} ——额定励磁电流
 I_k ——堵转电流(电动机)或短路电流(发电机)
 I_m ——变压器(异步机)的磁化电流
 I_{0p} ——空载电流的有功分量
 I_{0o} ——空载电流的无功分量
 I_{st} ——起动电流
 I_r ——控制电流
 I_+ ——电流的正序分量
 I_- ——电流的负序分量

K ——系数、变压器的变化
 K_s ——饱和系数
 K_e ——异步电机定、转子的电势变化
 K_i ——异步电机定、转子的电流变化
 K_d ——绕组的分布系数(基波)
 K_p ——绕组的短距系数(基波)
 K_{dp} ——绕组系数(基波)
 $K_{dp\nu}$ —— ν 次谐波绕组系数
 K_w ——波形系数
 K_c ——短路比
 L_{o1} ——变压器原边(异步机定子)的漏感
 L_{o2} ——变压器付边(异步机转子)的漏感
 M ——转矩、电磁转矩
 M_0 ——机械转矩
 M_1 ——输入转矩
 M_2 ——输出转矩
 M_{st} ——起动转矩
 M_0 ——空载转矩
 M_N ——额定转矩
 M_{max} ——最大转矩
 M_L ——负载转矩
 M_k ——短路转矩、堵转转矩
 m ——相数
 N ——导体数
 N_s ——每槽导体数
 n ——转速
 n_s ——同步转速
 n_N ——额定转速
 n_0 ——空载转速
 n_{ν} —— ν 次谐波转速
 P ——功率
 P_N ——额定功率
 P_M ——电磁功率
 P_0 ——异步电动机全机械功率
 P_1 ——输入功率
 P_2 ——输出功率
 P_0 ——空载功率
 p_k ——短路损耗
 p ——损耗、极对数
 p_0 ——机械损耗
 p_s ——杂耗
 p_{cu} ——铜损耗
 p_{Fe} ——铁损耗
 Q ——无功功率
 q ——每极每相槽数
 R_p ——调节电阻

- r_1 ——变压器原绕组(异步电机定子)电阻
- r_2 ——变压器付绕组(异步电机转子)电阻
- r'_2 ——折算到定子(原边)侧的转子(付边)电阻
- r_f ——励磁绕组电阻
- r_s ——串励绕组电阻
- r_k ——换向极绕组电阻、短路电阻
- r_a ——电枢电阻
- r_m ——激磁电阻
- S ——转差率、视在功率
- S_N ——额定转差率
- S_m ——临界转差率
- T ——时间常数、周期
- T_k ——换向周期
- t ——时间、齿距
- U ——电压有效值、电源电压
- U_N ——额定电压
- U_1 ——定子相电压(原边电压)
- U_2 ——转子相电压
- U_k ——短路电压、换向器片间电压
- U_v ——控制电压、
- U_{Y+} ——控制电压的正序分量
- U_{Y-} ——控制电压的负序分量
- W ——绕组匝数
- W_f ——励磁绕组匝数
- W_s ——串励绕组匝数
- W_k ——换向极绕组匝数
- W_a ——电枢绕组每元件匝数、支路匝数
- W_1 ——变压器原绕组(定子)匝数
- W_2 ——变压器付绕组(转子)匝数
- x ——电抗
- x_a ——电枢反应电抗
- x_a ——漏抗
- $x_{\sigma 1}$ ——变压器原绕组(定子)漏抗
- $x_{\sigma 2}$ ——变压器付绕组(转子)漏抗
- x_{ad} ——直轴电枢反应电抗
- x_{aq} ——交轴电枢反应电抗
- x_d ——直轴同步电抗
- x_q ——交轴同步电抗
- x_m ——激磁电抗
- x_k ——短路电抗
- x'_d ——直轴暂态电抗
- x''_d ——直轴次暂态电抗
- x_0 ——零序电抗
- x_+ ——正序电抗
- x_- ——负序电抗
- x_p ——波梯电抗
- x_s ——同步电抗
- y ——线圈节距、合成节距
- y_1 ——第一节距
- y_2 ——第二节距
- y_k ——换向器节距
- y_p ——均压线节距
- Z ——槽数、复数阻抗
- z ——阻抗(模)
- $Z_{\sigma 1}$ ——变压器原绕组(定子)漏阻抗(复数)
- $Z_{\sigma 2}$ ——变压器付绕组(转子)漏阻抗(复数)
- $Z'_{\sigma 2}$ ——折算到定子侧的转子漏阻抗
- Z_+ ——正序阻抗
- Z_- ——负序阻抗
- Z_0 ——零序阻抗
- Z_1 ——定子槽数
- Z_2 ——转子槽数
- Z_m ——激磁阻抗
- Z_k ——短路阻抗
- α ——角度、槽距电角、讯号系数、散热系数
- η ——效率
- η_N ——额定效率
- η_{max} ——最大效率
- Λ_a ——漏磁导
- μ ——导磁率
- τ ——极距、温升
- θ ——温升、角度
- ϕ ——磁通量、每极磁通
- Φ_m ——主磁通峰值、线圈交链的磁通最大值
- Φ_a ——漏磁通
- Φ_v —— v 次谐波磁通
- Φ_0 ——空载磁通
- ϕ_{ad} ——直轴电枢反应磁通
- ϕ_{aq} ——交轴电枢反应磁通
- ψ ——磁链、内功率因数角
- φ ——功率因数角、相角
- φ_0 ——空载功率因数角
- φ_k ——短路功率因数角
- ψ_1 —— E_s 和 I_a 的夹角
- ψ_2 ——异步机转子内功率因数角
- Ω ——机械角速度
- Ω_1 ——同步角速度
- λ ——等效比漏磁导(等效单位漏磁导)

目 录

各物理量角标的规定

主要符号表

绪论..... 7

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的基本原理和

结构..... 4

§ 1-1 直流电机的基本原理..... 4

§ 1-2 直流电机的基本结构..... 6

§ 1-3 直流电机的铭牌和额定值..... 9

§ 1-4 直流电机的励磁方式..... 10

§ 1-5 小结..... 11

第二章 直流电机的电枢绕组..... 11

§ 2-1 电枢绕组的构成原则和节距..... 11

§ 2-2 单迭绕组..... 13

§ 2-3 复迭绕组..... 15

§ 2-4 单波绕组..... 16

§ 2-5 复波绕组..... 17

§ 2-6 具有死元件的单波绕组..... 18

§ 2-7 直流电枢绕组的对称条件..... 19

§ 2-8 均压线..... 19

§ 2-9 蛙形绕组(*)..... 21

§ 2-10 电枢绕组的感应电势..... 26

§ 2-11 各种绕组的应用范围及

电压功率的划分..... 27

§ 2-12 小结..... 28

第三章 直流电机的运行原理..... 29

§ 3-1 直流电机空载时的磁路和磁势..... 29

§ 3-2 直流电机负载时电枢的磁

势和磁场..... 32

§ 3-3 直流电机的电枢反应..... 34

§ 3-4 直流电机的电磁转矩..... 36

§ 3-5 直流电机的基本方程式..... 37

§ 3-6 直流电机的可逆性..... 39

§ 3-7 小结..... 40

第四章 直流发电机的特性..... 41

§ 4-1 他励发电机的特性..... 41

§ 4-2 并励发电机的自励过程和特性..... 46

§ 4-3 复励发电机的特性..... 48

§ 4-4 小结..... 49

第五章 直流电动机..... 50

§ 5-1 直流电动机的起动..... 50

§ 5-2 直流电动机的工作特性..... 52

§ 5-3 直流电动机的机械特性..... 54

§ 5-4 直流电动机的调速..... 56

§ 5-5 直流电动机的制动..... 58

§ 5-6 各种直流电动机的应用范围..... 59

§ 5-7 小结..... 59

第六章 直流电机的换向..... 61

§ 6-1 换向的电磁理论..... 61

§ 6-2 火花及其产生的原因..... 65

§ 6-3 改善换向的方法..... 66

§ 6-4 无火花区和换向极的试验调整..... 69

§ 6-5 电位差火花、环火及其防

止方法..... 70

§ 6-6 小结..... 71

第七章 旋转电机的发热和冷却..... 72

§ 7-1 电机中常用绝缘材料的等

级和电机各部分的温升限度..... 73

§ 7-2 电机的发热和冷却过程..... 75

§ 7-3 电机的定额..... 78

§ 7-4 旋转电机的通风冷却方式..... 79

§ 7-5 小结..... 82

第八章 国产直流电机简介..... 82

第二篇 变 压 器

第九章 变压器的分类和基本结构..... 86

§ 9-1 变压器的分类..... 86

§ 9-2 电力变压器的基本结构..... 87

§ 9-3 变压器的额定值..... 95

第十章 变压器的运行原理..... 96

| | | | |
|--------------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| § 10-1 变压器的空载运行 | 96 | § 16-6 减少谐波电势的方法 | 172 |
| § 10-2 变压器的负载运行 | 102 | § 16-7 小结 | 175 |
| § 10-3 变压器的折算 | 105 | 第十七章 交流绕组 | 176 |
| § 10-4 变压器的等效电路和相量图 | 106 | § 17-1 交流绕组的构成原则和分类 | 176 |
| § 10-5 变压器参数的测定 | 108 | § 17-2 交流绕组的排列方法 | 177 |
| § 10-6 标么值(相对值)及其应用 | 113 | § 17-3 三相单层绕组 | 179 |
| § 10-7 变压器的运行性能和特性 | 114 | § 17-4 三相双层绕组 | 182 |
| § 10-8 变压器的发热和允许过载 | 119 | § 17-5 单双层绕组(*) | 187 |
| § 10-9 小结 | 120 | § 17-6 波绕组(*) | 188 |
| 第十一章 三相变压器 | 122 | § 17-7 Δ -Y混合连接绕组(*) | 190 |
| § 11-1 三相变压器的磁路系统 | 122 | § 17-8 小结 | 193 |
| § 11-2 三相变压器的连接组 | 124 | 第十八章 交流绕组的磁势 | 194 |
| § 11-3 变压器连接组别的试验测定 | 128 | § 18-1 单相绕组的脉振磁势 | 194 |
| § 11-4 三相变压器空载运行时 的电势波形 | 131 | § 18-2 三相绕组的旋转磁势 | 201 |
| 第十二章 变压器的并联运行 | 134 | § 18-3 小结 | 208 |
| § 12-1 变压器理想并联运行的条件 | 134 | 第四篇 异步电动机 | |
| § 12-2 变比不等时变压器的并联 运行 | 134 | 第十九章 异步电机的基本结构 和原理 | 210 |
| § 12-3 连接组别不同时变压器 的并联运行 | 136 | § 19-1 异步电机的分类和基本结构 | 210 |
| § 12-4 短路阻抗的标么值不等 时变压器的并联运行 | 136 | § 19-2 异步电动机的基本作用原理 | 212 |
| 第十三章 其它用途的变压器 | 138 | § 19-3 异步电动机的铭牌和额定值 | 213 |
| § 13-1 自耦变压器 | 139 | 第二十章 三相异步电动机的运 行分析 | 214 |
| § 13-2 仪用互感器 | 141 | § 20-1 三相异步电动机的空载运行 | 214 |
| § 13-3 电焊变压器 | 143 | § 20-2 异步电动机的负载运行 | 216 |
| § 13-4 整流变压器 | 144 | § 20-3 异步电动机的等效电路 | 219 |
| 第十四章 变压器的过渡过程(*) | 148 | § 20-4 异步电动机的功率和转 矩平衡关系 | 223 |
| § 14-1 过电流现象 | 148 | § 20-5 鼠笼转子参数的折算 | 225 |
| § 14-2 过电压现象 | 154 | § 20-6 小结 | 229 |
| 第十五章 国产变压器简介(*) | 157 | 第二十一章 异步电动机的运行特性 | 230 |
| 第三篇 交流绕组及其 电势和磁势 | | § 21-1 异步电动机的电磁转矩 和机械特性 | 230 |
| 第十六章 交流绕组的感应电势 | 161 | § 21-2 异步电动机的工作特性 | 235 |
| § 16-1 导体中的感应电势 | 162 | § 21-3 用直接负载法求取工作特性 | 237 |
| § 16-2 槽电势星形图 | 164 | § 21-4 异步电动机的圆图 | 237 |
| § 16-3 线圈电势 | 165 | § 21-5 空载试验和短路试验 | 239 |
| § 16-4 分布绕组的电势 | 166 | § 21-6 异步电动机的运行数据 | |
| § 16-5 感应电势中的高次谐波 | 170 | | |

在圆图上的表示法242

§ 21-7 较精确圆图247

§ 21-8 小结249

**第二十二章 三相异步电动机的
启动251**

§ 22-1 鼠笼式异步电动机的启动251

§ 22-2 绕线式异步电动机的启动255

§ 22-3 深槽式及双鼠笼式电动机257

§ 22-4 谐波转矩对启动的影响259

§ 22-5 小结261

**第二十三章 三相异步电动机的
调速262**

§ 23-1 变极调速263

§ 23-2 变频调速267

§ 23-3 改变转差率调速268

§ 23-4 电磁调速异步电动机 (*)270

§ 23-5 三相交流力矩电动机 (*)272

§ 23-6 小结273

**第二十四章 异步电机的其它运
行方式274**

§ 24-1 感应调压器274

§ 24-2 异步发电机275

§ 24-3 异步电机的制动277

§ 24-4 小结278

第二十五章 单相异步电动机279

§ 25-1 单相异步电动机的工作原理279

§ 25-2 单相异步电动机的启动方法280

§ 25-3 单相分布绕组282

§ 25-4 正弦绕组的安排方法 (*)283

**第二十六章 异步电动机在非额
定情况下运行 (*)284**

§ 26-1 异步电动机在非额定电
压下的运行284

§ 26-2 异步电动机在非额定频
率下的运行285

§ 26-3 异步电动机在不平衡电
压下的运行286

第二十七章 国产异步电机简介 (*)288

第五篇 同步电机

第二十八章 同步电机的类型和

基本结构291

§ 28-1 同步电机的基本类型291

§ 28-2 隐极同步发电机的基本结构292

§ 28-3 凸极同步发电机的基本结构294

§ 28-4 同步电机的冷却问题简述296

§ 28-5 额定值296

§ 28-6 分数槽绕组 (*)297

§ 28-7 小结302

第二十九章 同步电机的运行原理302

§ 29-1 同步发电机的空载运行302

§ 29-2 同步电机的电枢反应303

§ 29-3 隐极与凸极电机的电枢
磁势 (*)307

§ 29-4 凸极发电机的电势方程
式和相量图310

§ 29-5 隐极发电机的电势方程
式和相量图312

§ 29-6 直轴和交轴同步电抗的意义313

§ 29-7 磁势——电势相量图314

§ 29-8 小结317

第三十章 同步发电机的特性318

§ 30-1 空载特性318

§ 30-2 短路特性319

§ 30-3 零功率因数负载特性322

§ 30-4 同步发电机的运行特性324

§ 30-5 发电机的电压变化率和
额定励磁电流的确定326

§ 30-6 同步发电机的损耗和效率327

§ 30-7 小结328

**第三十一章 同步发电机的并联运行
..... 330**

§ 31-1 同步发电机的并联合闸330

§ 31-2 同步电机的电磁功率333

§ 31-3 与无穷大电网并联时同
步发电机有功功率的调节335

§ 31-4 与无穷大电网并联时同
步发电机无功功率的调节338

§ 31-5 相近容量的电机并联运
行时的功率调节340

§ 31-6 小结343

第三十二章 同步电动机和补偿机344

| | | | |
|--|------------|--|------------|
| § 32-1 同步电机的可逆原理 | 344 | 第三十七章 伺服电动机 | 385 |
| § 32-2 同步电动机的相量图 | 345 | § 37-1 概述 | 385 |
| § 32-3 同步电动机的电磁功率 和转矩 | 346 | § 37-2 交流伺服电动机的工作原理 | 387 |
| § 32-4 同步电动机的 V 形曲线 | 346 | § 37-3 两相伺服电动机的运行特点 | 390 |
| § 32-5 同步补偿机 | 348 | § 37-4 两相伺服电动机的等效 电路与基本方程 (*) | 391 |
| § 32-6 同步电动机的起动 | 349 | § 37-5 获得圆形旋转磁场的条 件 (*) | 395 |
| § 32-7 反式同步电机 | 350 | § 37-6 两相伺服电动机的运行特性 | 395 |
| § 32-8 小结 | 352 | § 37-7 直流伺服电机的概述 | 400 |
| 第三十三章 同步电机的励磁方式 | 353 | § 37-8 枢控制式直流伺服电动机 的工作原理 | 401 |
| § 33-1 概述 | 353 | § 37-9 枢控制式直流伺服电动机 的运行特性 | 402 |
| § 33-2 他励式励磁方式的简介 | 354 | § 37-10 磁极控制的直流伺服电 动机 (*) | 404 |
| § 33-3 移相补偿复励励磁系统 | 355 | § 37-11 小结 | 405 |
| § 33-4 谐波励磁系统 | 357 | 第三十八章 测速发电机 | 405 |
| § 33-5 谐波励磁凸极同步电机 中的电枢反应 (*) | 359 | § 38-1 概述 | 405 |
| § 33-6 可控硅励磁系统 (*) | 362 | § 38-2 直流测速发电机 | 406 |
| § 33-7 小结 | 366 | § 38-3 异步测速发电机的工作原理 | 408 |
| 第三十四章 同步发电机的突然 短路 (*) | 367 | § 38-4 异步测速发电机的电路 分析 (*) | 410 |
| § 34-1 超导回路的概念 | 367 | § 38-5 负载对输出特性的影响 (*) | 411 |
| § 34-2 三相突然对称短路的物 理情况 | 368 | § 38-6 异步测速发电机的技术指标 | 413 |
| § 34-3 暂态电抗和次暂态电抗 | 371 | § 38-7 小结 | 415 |
| § 34-4 突然短路电流的大小 | 372 | 第三十九章 旋转变压器 | 416 |
| § 34-5 小结 | 372 | § 39-1 结构与分类 | 416 |
| 第三十五章 国产同步电机简介 | 373 | § 39-2 正、余弦旋转变压器 | 417 |
| § 35-1 同步发电机 | 373 | § 39-3 有补偿的正、余弦旋转变 压器 (*) | 420 |
| § 35-2 同步电动机和补偿机 | 376 | § 39-4 线性旋转变压器 | 421 |
| 第六篇 控制电机 | | § 39-5 旋转变压器的技术指标 | 422 |
| 第三十六章 电机放大机 | 379 | § 39-6 小结 | 423 |
| § 36-1 概述 | 379 | 第四十章 自整角机 | 423 |
| § 36-2 交磁放大机的工作原理 和结构特点 | 379 | § 40-1 概述 | 423 |
| § 36-3 交磁放大机的放大系数、 时间常数和品质系数 | 381 | § 40-2 力矩式自整角机 (ZL) | 425 |
| § 36-4 去磁效应对放大机性能 的影响 | 382 | § 40-3 力矩式自整角机的磁势 和转矩的分析 (*) | 427 |
| § 36-5 交磁放大机的特性 | 383 | § 40-4 差动式自整角机 (ZC) | 430 |
| § 36-6 小结 | 385 | § 40-5 控制式自整角变压器 (ZKB) | 432 |

§40-6 小结433

第四十一章 步进电机434

§41-1 反应式步进电动机的工作
原理434

§41-2 单段式三相反应式步进
电动机436

§41-3 多段式步进电机的工作原理437

§41-4 反应式电动机的特性 (*)438

§41-5 性能指标441

§41-6 小结442

第七篇 电机实验

第四十二章 电机实验的一般问题443

§42-1 电机实验的性质和目的443

§42-2 测取电机特性的方法443

§42-3 实验方法444

§42-4 实验报告及其写法445

§42-5 基本测量方法445

第四十三章 直流电机实验451

§43-1 直流发电机的空载实验451

§43-2 直流发电机的负载实验453

§43-3 并励电动机的起动、调
速和反转456

§43-4 并励电动机的负载实验458

§43-5 串励电动机的实验460

第四十四章 变压器实验462

§44-1 单相变压器的空载和短
路实验462

§44-2 三相变压器连接组实验466

§44-3 变压器工业试验简介 (*)469

第四十五章 三相异步电动机实验473

§45-1 三相异步电动机的空载
和短路实验473

§45-2 三相异步电动机负载实验476

§45-3 三相异步电动机的起动480

§45-4 三相异步电动机温升
试验 (*)481

第四十六章 同步电机实验486

§46-1 三相同步发电机实验486

§46-2 三相同步电动机实验488

§46-3 三相同步电机工业试验
简介 (*)490

〔注〕 章、节标题后有(*)者为选读部分。

绪 论

一、电机在国民经济中的作用和意义

电能是现代最常用的一种能源。它在生产、管理、传输、分配、使用控制以及能量转换等方面均较方便。

电机是与电能有关的能量转换机械。它是工业、农业、交通运输事业中的重要动力设备。

在电力工业中，电机是发电厂的主要动力设备。如将水力、热力、风力、太阳能、核能等转换为电能，都要使用发电机。为了经济地传输和分配电能，尚需用变压器把一种电压的交流电能转换为另一种电压的交流电能。

在机械工业、冶金工业、化学工业以及其它各种工业企业中，都用电动机作为原动机。如机床、电铲、轧钢机、吊车、鼓风机、压缩机、搅拌机、造纸机等，都广泛地应用电动机。

在农业中，随着农业机械化的进展，也广泛地使用电动机。如在排灌、脱粒、碾米、铡草等农业机械中，都采用电动机。

在军事国防和各种自动控制系统中，如雷达、航空、无线电、计算技术和航天技术等，需要大量的控制电机作为自动化系统的元件。如电机放大器能够以小的功率控制大的功率；执行电动机可将电气讯号转变为机械动作；测速发电机将机械旋转变为电气讯号以测量或调节转速；旋转变压器的输出电压是转子偏转角的某种已知函数，或用来求解三角问题；自整角机则可使两个或数个机械上不相联系的轴同时发生偏转以传送讯号等等。

在医疗、文教以及日常生活中，电机的应用也日趋广泛。

为了适应实现四个现代化的新形势，工业、农业、国防都将提出新的要求，不仅要求电机能适应各种不同的工作条件，而且要在品种、质量和性能等方面满足特定的要求。因之，电机工业与国民经济各部门之间的关系是十分密切的，是国民经济各部门中所不可缺少的一个重要环节。

二、我国电机制造工业发展情况

解放前，我国电机制造工业极为落后。当时的电机制造厂主要做些装配和修理工作，生产的发电机的单机容量不超过 200 千瓦，电动机不超过 180 马力，变压器不超过 2000 千伏安，汽轮和水轮发电机组就从未生产过。

解放后，我国电机制造工业得到了巨大的发展。仅在十年内，我国已能制造 50000 千瓦的汽轮发电机、72500 千瓦的水轮发电机、120000 千伏安的变压器和 2000 千瓦的异步电机等。整个电机制造工业的技术水平有了显著提高，掌握了产品的设计方法和制造工艺，电机自给率达到 75%。

随着国民经济的进一步发展，我国的电机制造工业已进入自行试验研究和自行设计的阶段，建立了我们自己的系列产品。

在大型发电设备方面，1969 年制成了 125000 千瓦的双水内冷汽轮发电机，1972 年又试制成功了 30 万千瓦的双水内冷汽轮发电机和 30 万千瓦的双水内冷水轮发电机。在变压器方面，自行设计和制造了电压为 330 千伏、容量为 360000 千伏安的各种类型的变压器(包括水

内冷变压器和渐开线铁心变压器)。

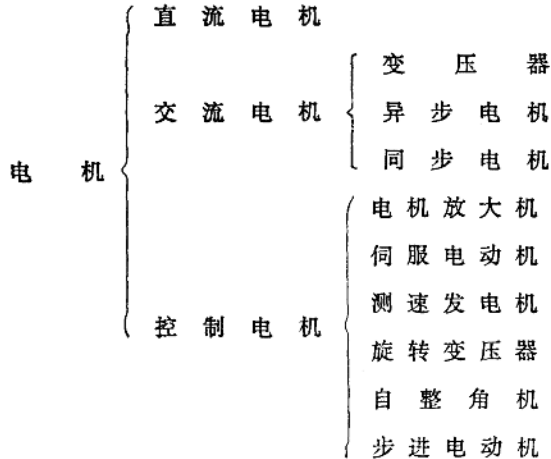
综上所述可以看出：我国电机制造工业的发展速度是极为迅速的。但在年产量，单机容量、品种、效率、性能、成本、劳动生产率等方面和世界先进水平比较，尚有一定的差距。只要我们紧密地团结在以华主席为首的党中央周围，解放思想，大鼓干劲，我们一定能在本世纪内赶超世界水平，为加速实现我国的四个现代化做出贡献。

三、电机的主要类型

电机是一种动力机械，其主要任务是进行能量转换，按照能量的转换方式，电机可分为：

- (一) 将机械能变为电能——发电机；
- (二) 将电能变为机械能——电动机；
- (三) 将电能变为电能——用来变化电流即交流变直流的换流机；用来变化频率的变频器；用来变化电压的变压器。

应当指出，从基本原理上看，发电机和电动机只是电机的两种运行方式，它们本身是可逆的。电机的主要类别如下所示：



分类不是绝对的，它们之间有极密切的内在联系。分类是为了便于分析研究，所有电机的工作原理都是建立在下列几个基本定律的基础上，即：

- (1) 法拉第电磁感应定律；
- (2) 基尔霍夫回路定律；
- (3) 安培全电流定律；
- (4) 毕——萨电磁力定律；
- (5) 能量守恒定律。

熟悉并牢固地掌握这几个基本定律，对研究电机十分有用。

四、本课程的任务和电机的研究方法

电机学是电工专业的技术基础课。它与电工基础课的性质不同，在电工基础课中所研究的问题总是理想化的和单纯的，在电机学中要求运用理论来解决实际问题；而在实际问题中，情况往往是复杂的又是综合的。因此在分析时，又需将问题简化，找出主要矛盾，运用理论加以解决。这样所得的结果有一定的近似性，并能够正确反映客观规律。在学习这门功课

时,要从实际出发,不仅要了解公式中数量上的关系,更重要的是从公式中看到它们所表达的物理概念。由于事物是相互联系的,所以在学习时应注意把各种电机联系起来学。这样才能对各种电机有深入的了解。

(一) 分析和研究电机原理的方法和步骤:

(1) 分析电机在空载和负载运行时电机内部的物理情况(即磁势和磁场);

(2) 列出电机的电势、磁势、功率和转矩平衡方程式;

(3) 求解方程求取运行特性并加以分析。对发电机来说,特性中以外特性为最重要,在电动机中以机械特性为最重要;其次,是电机的效率、功率因数、温升和过载能力等性能指标。

(二) 分析和研究电机的磁场与基本方程式:

(1) 不计饱和时,常用迭加原理来分析电机的各个磁场及相应的电势。考虑饱和时,常把主磁通和漏磁通分开处理,前者用磁化曲线来确定,后者用其效果作为漏抗压降来处理;

(2) 用等效电路来表示电机需用折算法;

(3) 在分析交流电机的稳态运行时,常利用等效电路和相量图;

(4) 分析不对称运行时常用双旋转理论和对称分量法;

(5) 研究凸极电机(直流电机、凸极同步电机)问题时,常用双反应理论。

研究电机的又一重要方法是科学实验,其实验方法基本上分两种:一种是直接法,另一种是间接法。直接法是将电机带上负载,在接近实际情况下进行实验,并测得数据与理论计算的结果相比较,以判定理论计算是否正确;间接法是利用空载、短路试验,测得电机的参数,然后间接算出电机的性能。

本课程的任务主要是为培养学员的专业知识和解决实际问题的能力打下理论基础,及电机实验的操作技术。

第一篇 直流电机

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。它可以将机械能转换为直流电能，称为直流发电机；也可以将直流电能转换为机械能，称为直流电动机。直流电动机具有良好的起动机性能，且能在宽广的范围内平滑而经济地调节速度。因此直流电动机在起动和调速要求较高的机械上广泛地使用。例如用来拖动轧钢机、电气机车、内燃机车、船舶机械、矿井卷扬机和要求广泛调速的切削机床等。直流发电机可作为各种直流电源。例如直流电动机的直流电源、同步电机的励磁机以及化学工业方面用作电解电镀的低压大电流的直流电源等。与交流电机比较，直流电机的结构复杂，消耗较多的有色金属，运行中维修比较麻烦，致使直流电机的应用受到一定的限制。随着电子技术的迅速发展，采用可控硅供电作为直流电源，在生产上的应用越来越广泛，大有取代直流发电机的趋势。可控硅供电虽有优越的控制特性，但也存在脉动电流的影响，使直流电动机的损耗增加和换向不良，给科研工作带来新的课题。我国最近正在试制的 Z₂ 系列小型直流电机，既贯彻了“以铝代铜”的技术政策，又具有较高的技术经济指标，且基本适应可控硅供电的要求。由于目前交流电动机在调速性能方面还不能完全满足生产上的要求，因此直流电动机在我国实现社会主义四个现代化的宏伟目标中仍然占有重要的地位。

第一章 直流电机的基本原理和结构

本章将说明直流电机的基本原理、主要结构、部件和直流电机的主要类型。

§ 1-1 直流电机的基本原理

一般所讲的直流电机均系对换向器式直流电机而言，它实质上是交流电机，只是具有一个专门的装置——换向器，使在一定的条件下变交流为直流。为了说明在换向器式电机内变交流为直流的过程，让我们先来研究一下最简单的交流发电机的工作原理。图 1-1 中表示交流发电机模型。电机的磁场是由在空间上静止的磁极 N、S 所建立，并能产生恒定的磁通量，磁极之间的空间内装置一个能转动的电枢，在电枢铁心直径平面的表面上安置一个导体线圈 $ab-cd$ ，简称电枢元件，元件的线端分别与固定在轴上的两个集电环 I、II 相连接，固定不动的电刷 A、B 与集电环为滑动接触，并与用电设备组成的外电路（简称负载）相连接。

图 1-2 是图 1-1 b 的展开图。如果磁极下气隙中的磁密 B 是按正弦分布的，如图 1-2 b 中曲线所示。当电枢被原动机拖动以顺时针方向旋转时，根据电磁感应定律，则元件边在任一 x 处所感应的电势为：

$$e = B_x l v \quad (1-1)$$

式中 B_x ——气隙中 x 处的磁密；

l ——元件边的有效长度；

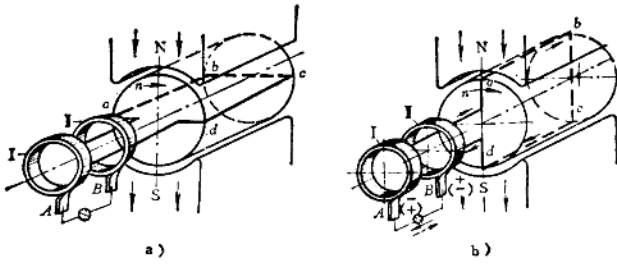


图1-1 交流发电机工作原理图

a) 电刷 A、B 之间电势为零 b) 电刷 A、B 之间电势最大

v ——元件边切向线速度。

在图 1-1 a 所示位置，元件边 ab 和 cd 处在两个磁极之间的中心线上，称为几何中性线，该处磁密为零，元件边切割的磁通为零，其感应电势为零，因此电刷 A、B 之间的电势为零。当电枢顺时针方向转过 90° 时，元件边 ab 位于 N 极的轴线上，元件边 cd 位于 S 极的轴线上，由右手定则可以确定元件边中感应电势方向如图 1-1 b 所示。从图可知：电刷 A 的极性为“-”，电刷 B 的极性为“+”。由于该处磁密为最大，所以感应电势为最大，电刷 A、B 之间的电势也是最大。当元件边 ab 转到 180° 时，元件两边又处在几何中性线上，电刷 A、B 之间的电势又为零。若元件边 ab 转到 270° 时，元件两边又处在磁极轴线上，故 A、B 之间的电势又为最大。但 ab 与 cd 在磁极下的位置互相对换了，元件边中的电势改变了方向，因此电刷 A 的极性变为“(+)”，电刷 B 的极性变为“(-)”。由此可见，当电枢旋转一周时，电刷 A、B 之间极性改变一次。若保持速度 v 恒定不变，则元件边感应电势的大小正比于 B_x ($e \propto B_x$)。所以电刷 A、B 之间的电势大小是随时间作正弦变化，如图 1-3 所示。这就是交流发电机原理。

一、直流发电机原理

图 1-4 表示直流发电机模型，它与交流发电机模型不同的地方，只是将两个集电环改为一个特殊的滑动接触装置，称为换向器（或称整流子）。元件 ab 和 cd 的两线端分别接在互相绝缘的两个铜换向片 I 和 II 上，并将电刷 A、B 移至磁极位置而与换向器保持滑动接触。

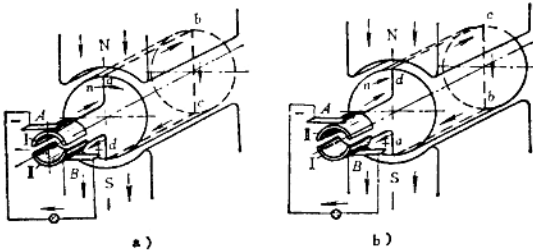


图1-4 直流发电机工作原理图

据右手定则，元件中的电势方向是由 a 到 d ，故电刷 A 的极性为“-”，电刷 B 的极性为“+”，负载上的电流方向是由 B 流向 A。当电枢转过 180° 时，元件的两个有效边的位置互

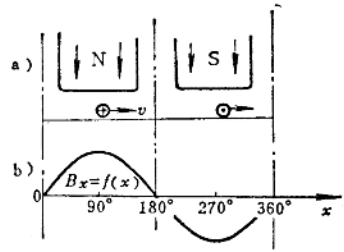


图1-2 图1-1 b 的展开图

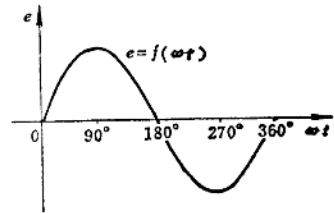


图1-3 正弦交流电势波形图

相调换,如图 1-4 b 所示,此时电刷 A 通过换向片 II 与 N 极下的元件边 cd 相连,电刷 B 通过换向片 I 与 S 极下的元件边 ab 相连,此时元件中的电势方向相反了(从 d 到 a),但电刷的极性还是不变。由此可见,通过换向器的作用,使电刷 A 始终与 N 极下的元件边相连,电刷 B 始终与 S 极下的元件边相连,所以当电枢在磁场中继续旋转时,元件中的电势虽与在交流发电机中一样,每转过一对磁极(N 和 S)电势方向改变一次,但在电刷 A 和 B 之间的电势却是一个方向不变的脉振电势,如图 1-5 实线所示,这就是直流发电机原理。

从图 1-5 可以看出,电刷 A、B 之间的电势在零和最大值之间脉动,这种电势称为脉振电势,因为电势波动太大,不能用做直流电源。如果将电枢铁心上的元件数和相应的换向片增多,就可以减少电势的脉振程度,所以实际应用的直流电机中,由于元件数较多,电势脉振已很小,可以认为是恒定电势了。

二、直流电动机原理

如图 1-6 a 所示,电机的电刷 A、B 上外加直流电压,这时元件中的电流就由 d 流向 a ,于是载流导体在磁场中就会受到电磁力的作用,其大小为

$$F = B_x li \quad (1-2)$$

式中 i ——流过元件中的电流。

电磁力的方向,可用左手定则确定,从图可知电枢上受到顺时针方向的力矩,称为电磁转矩。当电枢转过 180° 时,如图 1-6 b 所示,这时元件中的电流从 a 流向 d ,元件边中的电流改变了方向,但电磁转矩的方向仍旧不变,保持电枢始终向一个方向旋转。这就是直流电动机原理。

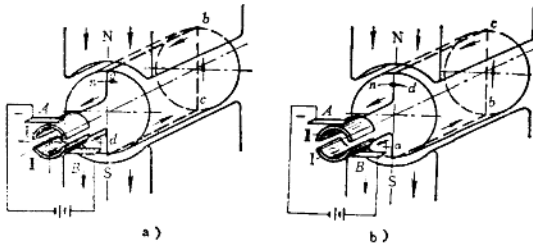


图 1-6 直流电动机工作原理

§ 1-2 直流电机的基本结构

从上述直流电机的基本原理可知,直流电机由两个主要部分组成:1. 静止部分(称为定子),主要用来产生磁通;2. 转动部分(称为转子,通称电枢)是机械能变为电能(发电机),或电能变为机械能(电动机)的枢纽。在定子与转子之间留有一定的间隙称为气隙。图 1-7 是拆开图、图 1-8 是结构图。从图可见,定子主要由主磁极(简称主极)、换向极、机座、端盖、轴承和电刷装置等部件组成;转子主要由电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等部件组成。下面简要介绍直流电机的主要零部件的基本构造、作用及其材料。

主磁极 主磁极的作用是产生主磁通。它由主极铁心和励磁绕组两部分组成如图 1-9,主极铁心一般由 1~1.5 毫米的钢板冲片迭压而成。主磁极总是成对的,各主极上的励磁绕组联接时要能保证相邻磁极的极性按 N 极和 S 极依次排列。为了减小气隙中有效磁通的磁阻,改善气隙磁密的分布,磁极下的极掌(或称极靴)较极身宽,这样还可使励磁绕组牢固地套

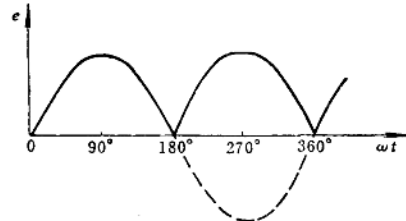


图 1-5 直流电势波形图