

919611

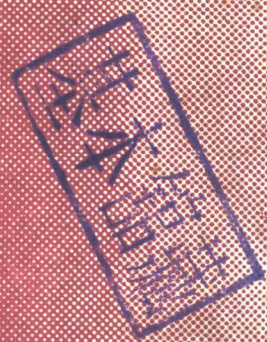
高等学校教材

# 电机设计

(修订本)

西安交通大学 陈世坤 主编

GAO DENG XUE  
XIAO JIAO CAI



机械工业出版社

4  
4.2  
f



504  
7544.2

高等学校教材

# 电机设计

(修订本)

西安交通大学 陈世坤 主编



机械工业出版社

本书是在1982年出版的《电机设计》(上、下册)的基础上修订而成的。全书共分十四章。前九章主要阐述旋转电机设计的基本理论和计算方法,包括电磁计算、通风发热计算、机械计算以及噪声和振动计算等。第十章分别介绍了感应电机的电磁设计和电子计算机在电机设计计算中的应用。第十二、十三、十四章主要阐述变压器的电磁设计和温升计算。为了满足教学的需要,书中还编入了感应电机及变压器设计的计算例题以及感应电机电磁设计的源程序。

本书是高等院校电机专业的教材,也可供有关工程技术人员及教学研究人员参考。

## 电机设计

(修订本)

西安交通大学 陈世坤 主编

责任编辑:朱 岩 责任校对:韩 晶  
责任印制:张俊民 版式设计:冉晓华

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)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本  $787 \times 1092^{1/16}$  · 印张  $26^{1/4}$  · 字数 640 千字

1982年1月北京第一版

1990年10月北京第二版·1990年10月北京第十次印刷

印数 59,111—62,910 · 定价: 5.20 元

ISBN 7-111-02061-8/TM·280(课)

## 前 言

本书是在1982年出版的高等学校试用教材《电机设计》(上、下册)的基础上,根据1983年5月在杭州召开的原国家机械委电工技术类教材编审委员会电机编审小组制订的教学大纲修订的。

全书共分两篇。第一篇为旋转电机设计,共十一章。前九章为基础理论部分,包括电机的电磁计算、冷却和发热计算、结构设计和机械计算以及噪声和振动。后两章分别叙述感应电动机电磁设计和电子计算机在电机设计中的应用。第二篇为变压器设计,共三章,主要阐述变压器的电磁设计和温升计算。

为了精简内容,这次修订时取消了第一版中的凸极同步电机、隐极汽轮发电机、直流电机的电磁设计以及全部附录。为了满足教学的要求,重新改写了“噪声和振动”和“电子计算机应用”两章,增加了感应电动机和变压器设计的计算例题,并对其余各章均进行了适当的增删和修改。

本书贯彻了国家标准GB3100~3102-86中有关量、单位和符号的规定。对计算公式的表达方式进行了适当的修改以符合国家标准中有关规定的要求。公式中各量的单位,除特别指出者外,均采用国际单位制。

本书是高等工业学校电机专业的教材,也可供从事有关电机设计与制造工作的工程技术人员参考。

这次修订主要由原来的编写人执笔。丁梵林同志修改第一、第二、第八章;陈世坤同志修改第三、第四、第五章;周希贤同志修改第六、第七章;李学婧同志修改第十章;黄士鹏同志改写了第十一章。另外由西安交通大学张燕鑫同志改写了第九章;华中理工大学李湘生同志编写了第十二、第十三、第十四章。最后由陈世坤同志对全部修订稿统一作了仔细的修改。参加本书第一版编写的还有何珽、宋文谦、邱贤锬和沈宜秋同志。

本版承蒙华中理工大学林金铭教授进行了仔细审阅,在此表示深切谢意。

FAU 12/1/202

## 主要符号表

|                 |                         |            |                       |
|-----------------|-------------------------|------------|-----------------------|
| $A$             | 线负荷, 面积                 | $D$        | 变压器心柱直径               |
| $A_B$           | 笼型绕组导条的截面积              | $D_1$      | 定子外径, 风扇叶轮内径          |
| $A_o$           | 导体的截面积                  | $D_2$      | 转子外径, 风扇叶轮外径          |
| $A_B$           | 端环截面积                   | $D_{av}$   | 变压器绕组的平均直径            |
| $a_0$           | 变压器一次绕组与二次绕组间漏磁空道宽度     | $D_{i1}$   | 定子内径                  |
| $a_1$           | 定子绕组并联支路数, 变压器一次绕组的辐向宽度 | $D_{i2}$   | 转子内径                  |
| $a_2$           | 转子绕组并联支路数, 变压器二次绕组的辐向宽度 | $D_{j,av}$ | 轭部平均直径                |
| $a_g$           | 变压器心柱中心距                | $D_R$      | 端环平均直径                |
|                 |                         | $d$        | 轴的直径                  |
|                 |                         | $d_{12}$   | 变压器一次绕组与二次绕组漏磁空道的平均直径 |
| $B$             | 磁通密度(简称磁密)              | $E$        | 电(动)势, 弹性模量           |
| $B_j$           | 轭部磁密                    | $E_1$      | 额定负载时定子绕组的相电势         |
| $B_m$           | 磁极极身磁密, 变压器心柱磁密最大值      | $E_{10}$   | 空载时定子绕组的相电势           |
| $B_0$           | 气隙磁密脉振的最大值              |            |                       |
| $B_i$           | 齿部磁密                    | $F$        | 作用力                   |
| $B_\delta$      | 气隙磁密最大值                 | $F_0$      | 空载励磁磁势                |
| $B_{\Delta 1}$  | 气隙磁密基波幅值                | $F_1$      | 定子基波磁势幅值              |
| $B_{\Delta av}$ | 气隙磁密平均值                 | $F_j$      | 轭部磁压降                 |
| $B_v$           | 定子 $v$ 次谐波磁密幅值          | $F_m$      | 磁极磁压降                 |
| $B_\mu$         | 转子谐波磁密幅值                | $F_s$      | 波幅系数                  |
| $b_B$           | 导条宽度                    | $F_i$      | 齿部磁压降                 |
| $b_m$           | 极身宽度                    | $F_\delta$ | 气隙磁压降                 |
| $b_o$           | 槽口宽度                    | $F_v$      | 定子谐波磁势幅值              |
| $b_p$           | 极靴宽度                    | $F_\mu$    | 转子谐波磁势幅值              |
| $b_p$           | 极弧长度                    | $f$        | 频率, 挠度                |
| $b_r$           | 极弧计算长度                  | $f_0$      | 固有振动频率                |
| $b_s$           | 槽宽                      | $f_v$      | $v$ 次谐波磁场在绕组中感应电势的频率  |
| $b_{st}$        | 斜槽的扭斜宽度                 | $G_j$      | 轭部重量                  |
| $b_t$           | 齿宽                      | $G_i$      | 齿部重量                  |
| $b_v$           | 径向通风道宽度                 | $g$        | 重力加速度                 |
| $C$             | 热容                      |            |                       |
| $C_A$           | 电机常数                    | $H$        | 磁场强度, 变压器绕组高度         |
| $C_j$           | 轭部磁压降校正系数               | $H_j$      | 轭部场强                  |
| $c$             | 比热容                     | $H_m$      | 磁极极身中的场强              |
|                 |                         | $H_i$      | 齿部场强                  |

|          |                        |          |                             |
|----------|------------------------|----------|-----------------------------|
| $H_{x1}$ | 计算漏磁感应用变压器高低压绕组的轴向平均高度 | $l_p$    | 磁极极靴长度                      |
| $H_{x2}$ | 计算漏磁感应用变压器绕组的辐向高度      | $l_t$    | 铁心总长度                       |
| $h_0$    | 槽口高度                   | $M_b$    | 弯矩                          |
| $h_b$    | 导条高度                   | $m$      | 相数, 质量                      |
| $h_j$    | 轭部高度                   | $m_j$    | 轭部重量                        |
| $h_m$    | 极身高度                   | $m_c$    | 齿部重量                        |
| $h_p$    | 极靴中心线高度                | $N$      | 每相绕组匝数, 风扇的叶片数              |
| $h_{pm}$ | 极靴的平均高度                | $N_a$    | 电枢绕组总导体数                    |
| $h_s$    | 槽高                     | $N_s$    | 每槽串联导体数                     |
| $I$      | 相电流                    | $N_t$    | 线圈的并绕根数                     |
| $I_0$    | 空载电流                   | $n$      | 转速                          |
| $I_b$    | 导条电流                   | $n_1$    | 基波磁场转速                      |
| $I_{L0}$ | 空载励磁电流                 | $n_v$    | $v$ 次谐波磁场转速                 |
| $I_{Kw}$ | 功电流                    | $P$      | 有功功率                        |
| $I_m$    | 感应电机励磁(磁化)电流           | $P'$     | 计算功率                        |
| $I_N$    | 额定电流                   | $P_N$    | 额定功率                        |
| $I_R$    | 端环电流                   | $P_v$    | 风扇功率                        |
| $I_{st}$ | 起动电流                   | $p$      | 基波磁场极对数, 压力, 声压             |
| $J$      | 电流密度, 惯性矩              | $p_{02}$ | 转子表面损耗                      |
| $J_b$    | 导条电流密度                 | $p_{Cu}$ | 绕组铜耗                        |
| $J_R$    | 端环电流密度                 | $p_{Al}$ | 绕组铝耗                        |
| $K$      | 轴的弯曲刚度, 换向片数           | $p_{p1}$ | 定子齿部脉振损耗                    |
| $K_s$    | 绕组分布系数                 | $p_{pl}$ | 短路时漏磁场在定子绕组端部附近金属部件中产生的附加损耗 |
| $K_{Ap}$ | 绕组系数                   | $p_s$    | 额定负载时的附加损耗                  |
| $K_{Ap}$ | 定子基波绕组系数               | $p_v$    | $v$ 次谐波磁场的极对数               |
| $K_{As}$ | 转子基波绕组系数               | $Q$      | 无功功率                        |
| $K_s$    | 额定负载时感应电势与相电压的比值       | $q$      | 每极每相槽数, 热流密度                |
| $K_{Fe}$ | 铁心叠压系数                 | $qv$     | 冷却介质体积流量                    |
| $K_s$    | 饱和系数                   | $R$      | 电阻                          |
| $K_{sk}$ | 斜槽系数                   | $R_1$    | 定子绕组相电阻                     |
| $K_{sm}$ | 磁场波形系数                 | $R_2$    | 转子绕组相电阻                     |
| $K_g$    | 气隙系数                   | $R_b$    | 导条电阻                        |
| $k_s$    | 槽截面与齿截面之比              | $R_R$    | 端环电阻                        |
| $L$      | 电感                     | $S_f$    | 槽满率                         |
| $l_b$    | 导条长度                   | $S_N$    | 变压器额定容量                     |
| $l_s$    | 线圈平均半匝长度               | $S_z$    | 变压器每柱容量                     |
| $l_{or}$ | 电枢计算长度                 |          |                             |
| $l_m$    | 磁极极身长度                 |          |                             |

|                    |                  |                |                                |
|--------------------|------------------|----------------|--------------------------------|
| $s$                | 转差率              | $\lambda_B$    | 端部比漏磁导                         |
| $T$                | 转矩, 发热时间常数       | $\lambda_s$    | 槽部比漏磁导                         |
| $T_m$              | 最大转矩             | $\lambda_l$    | 齿顶比漏磁导                         |
| $T_N$              | 额定转矩             | $\lambda_o$    | 谐波比漏磁导                         |
| $T_{st}$           | 起动转矩             | $\Phi$         | 每极气隙磁通, 热流量                    |
| $t$                | 齿距, 时间           | $\Phi_m$       | 磁极磁通                           |
|                    |                  | $\Psi$         | 磁链                             |
| $U_N$              | 额定端电压            |                |                                |
| $U_{N\phi}$        | 额定相电压            | $\Omega$       | 机械角速度                          |
| $u_R$              | 变压器电阻电压与额定电压之比   | $\Omega_2$     | 转子机械角速度                        |
| $u_x$              | 变压器电抗电压与额定电压之比   | $\Omega_s$     | 同步角速度                          |
|                    |                  |                |                                |
| $v_1$              | 基波磁势的线速度         | $\alpha$       | 风叶的攻角, 表面散热系数, 导体电阻的温度系数       |
| $v_2$              | 转子线速度            | $\alpha_p$     | 极弧系数                           |
|                    |                  | $\alpha'_p$    | 计算极弧系数                         |
| $W$                | 轴的抗弯断面系数         |                |                                |
|                    |                  | $\beta$        | 绕组节距比, 变压器尺寸比, 变压器调压线圈与绕组总高度之比 |
| $X$                | 电抗               |                |                                |
| $X_{l2}$           | 变压器短路电抗          | $\delta$       | 单边气隙长度                         |
| $X_B$              | 端部漏抗             | $\delta_{eff}$ | 有效气隙长度                         |
| $X_m$              | 主电抗, 励磁电抗        | $\delta_{max}$ | 气隙最大值                          |
| $X_s$              | 槽漏抗              | $\eta$         | 效率                             |
| $X_{sk}$           | 斜槽漏抗             | $\eta_N$       | 额定负载时的效率                       |
| $X_s$              | 谐波漏抗             |                |                                |
| $X_\sigma$         | 漏抗               |                |                                |
|                    |                  |                |                                |
| $Z$                | 风阻               | $\theta$       | 温度, 风叶的安装角                     |
| $Z_1$              | 定子槽数             |                |                                |
| $Z_2$              | 转子槽数             | $\mu$          | 转子谐波磁场的次数, 材料的磁导率              |
|                    |                  | $\mu_0$        | 真空磁导率                          |
| $\Delta c_u$       | 换向片厚度            |                |                                |
| $\Delta_i$         | 槽绝缘单边厚度          | $\nu$          | 定子谐波磁场次数                       |
| $\Delta U_b$       | 电刷接触压降           |                |                                |
| $\Delta \tau_a$    | 冷却介质通过电机后的温升     | $\rho$         | 导体材料的电阻率, 密度                   |
| $\Delta \tau_{Cu}$ | 铜的平均温升           |                |                                |
| $\Delta \tau_{Fe}$ | 铁的平均温升           | $\sigma$       | 磁极漏磁系数, 应力                     |
|                    |                  | $\tau$         | 极距                             |
| $\Lambda_m$        | 极身漏磁导            |                |                                |
| $\Lambda_p$        | 极靴漏磁导            | $\omega$       | 交变电流的角频率                       |
| $\lambda$          | 主要尺寸比, 比漏磁导, 热导率 | $\omega_1$     | 主波合成磁势的角频率                     |
|                    |                  | $\omega_\mu$   | $\mu$ 次谐波磁场相对定子的角频率            |

# 目 录

## 主要符号表

### 第一篇 旋转电机设计

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 电机设计概述                      | 1  |
| §1-1 电机制造工业的近况与发展趋势             | 1  |
| §1-2 电机设计的任务与过程                 | 5  |
| §1-3 国家标准                       | 6  |
| §1-4 国际标准                       | 7  |
| 第二章 电机的主要参数之间的关系                | 9  |
| §2-1 电机的主要参数之间的关系式              | 9  |
| §2-2 电机中的几何相似定律概述               | 12 |
| §2-3 电磁负荷的选择                    | 13 |
| §2-4 电机主要尺寸比的选择及确定<br>主要尺寸的一般方法 | 16 |
| §2-5 系列电机及其设计特点                 | 19 |
| 复习思考题                           | 22 |
| 第三章 磁路计算                        | 23 |
| §3-1 概述                         | 23 |
| §3-2 空气隙磁压降的计算                  | 24 |
| §3-3 齿部磁压降的计算                   | 31 |
| §3-4 轭部磁压降的计算                   | 35 |
| §3-5 磁极漏磁系数与磁极磁压降的计算            | 38 |
| §3-6 励磁电流和空载特性计算                | 41 |
| 复习思考题                           | 43 |
| 第四章 参数计算                        | 44 |
| §4-1 绕组电阻的计算                    | 44 |
| §4-2 绕组电抗的一般计算方法                | 47 |
| §4-3 主电抗计算                      | 48 |
| §4-4 漏电抗计算                      | 50 |
| §4-5 漏抗标么值                      | 62 |
| §4-6 集肤效应对电机参数的影响               | 63 |
| §4-7 饱和对电机参数的影响                 | 72 |
| §4-8 斜槽漏抗计算                     | 73 |
| 复习思考题                           | 75 |
| 第五章 损耗与效率                       | 76 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| §5-1 概述                           | 76  |
| §5-2 基本铁耗                         | 76  |
| §5-3 空载时铁心中的附加损耗                  | 80  |
| §5-4 电气损耗                         | 85  |
| §5-5 负载时的附加损耗                     | 86  |
| §5-6 机械损耗                         | 93  |
| §5-7 效率                           | 96  |
| 复习思考题                             | 96  |
| 第六章 电机的冷却                         | 97  |
| §6-1 电机的冷却方式                      | 97  |
| §6-2 关于流体运动的基本知识                  | 99  |
| §6-3 风扇                           | 106 |
| §6-4 径向通风系统中转子上其他风压元件<br>参数的近似计算法 | 117 |
| 复习思考题                             | 117 |
| 第七章 发热计算                          | 118 |
| §7-1 电机允许的温升限度                    | 118 |
| §7-2 传热的基本定律                      | 121 |
| §7-3 电机稳定温升的计算                    | 127 |
| §7-4 电机不稳定温升的计算                   | 134 |
| 复习思考题                             | 139 |
| 第八章 结构设计和机械计算                     | 140 |
| §8-1 电机的基本结构型式                    | 140 |
| §8-2 结构设计的基本内容、原则和方法              | 156 |
| §8-3 机座的机械计算                      | 158 |
| §8-4 转轴的机械计算                      | 161 |
| §8-5 换向器的机械计算                     | 169 |
| §8-6 厚壁圆筒的机械计算原理                  | 179 |
| 复习思考题                             | 184 |
| 第九章 噪声和振动                         | 185 |
| §9-1 噪声的一般概念                      | 185 |
| §9-2 感应电动机的电磁振动                   | 191 |
| §9-3 同步电机的电磁振动                    | 200 |
| §9-4 直流电机的电磁振动                    | 202 |
| §9-5 电机定子的固有振动特性                  | 205 |
| §9-6 电机转子的固有振动特性                  | 213 |
| §9-7 电机的机械振动和噪声                   | 218 |



|                                         |     |                                          |     |
|-----------------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| §9-8 电机的空气动力噪声 .....                    | 222 | §13-3 变压器铁心结构型式及其<br>应用范围 .....          | 324 |
| 复习思考题 .....                             | 224 | §13-4 变压器绕组型式及其应用范围 .....                | 327 |
| <b>第十章 感应电机的电磁设计</b> .....              | 225 | §13-5 变压器的主绝缘结构 .....                    | 329 |
| §10-1 概述 .....                          | 225 | §13-6 变压器的过电压与纵绝缘结构 .....                | 332 |
| §10-2 主要尺寸与气隙的确定 .....                  | 227 | §13-7 线圈的设计计算 .....                      | 339 |
| §10-3 定子绕组与铁心的设计 .....                  | 231 | §13-8 变压器的阻抗电压计算 .....                   | 342 |
| §10-4 转子绕组与铁心的设计 .....                  | 239 | §13-9 负载损耗的计算 .....                      | 352 |
| §10-5 工作性能的计算 .....                     | 250 | §13-10 变压器的空载损耗及空载电流 .....               | 359 |
| §10-6 起动性能的计算 .....                     | 253 | §13-11 变压器的电磁力 .....                     | 360 |
| §10-7 深槽转子感应电动机的<br>设计特点 .....          | 258 | 复习思考题 .....                              | 364 |
| §10-8 双笼转子感应电动机的<br>设计特点 .....          | 260 | <b>第十四章 变压器的冷却方式与<br/>温升计算</b> .....     | 366 |
| 计算例题 .....                              | 263 | §14-1 变压器的冷却方式 .....                     | 366 |
| 复习思考题 .....                             | 280 | §14-2 变压器各部分的温升限值 .....                  | 367 |
| <b>第十一章 电子计算机在电机设计<br/>计算中的应用</b> ..... | 281 | §14-3 变压器各部分稳定温升计算 .....                 | 367 |
| §11-1 概述 .....                          | 281 | §14-4 变压器的热稳定计算 .....                    | 371 |
| §11-2 曲线和图表的数学处理方法之一<br>——插值法 .....     | 282 | 计算例题 .....                               | 372 |
| §11-3 曲线和图表的数学处理方法之二<br>——公式化 .....     | 285 | <b>附录</b> .....                          | 380 |
| §11-4 机辅设计中常用的数值<br>计算方法 .....          | 289 | 附录一 中小型三相感应电动机电磁<br>计算程序 .....           | 380 |
| §11-5 设计分析程序 .....                      | 294 | 附录二 导线规格表 .....                          | 396 |
| §11-6 设计综合程序 .....                      | 306 | 附录三 Y、Y-L 系列三相感应电动机<br>绝缘规范(B 级绝缘) ..... | 398 |
| 复习思考题 .....                             | 309 | 附录四 各种槽形比漏磁导计算 .....                     | 398 |
| <b>第二篇 变压器设计</b>                        |     | 附录五 电工硅钢薄板(厚0.5mm)<br>的磁化曲线 .....        | 403 |
| <b>第十二章 变压器设计概述</b> .....               | 311 | 附录六 电工硅钢薄板(厚0.5mm)的<br>损耗曲线 .....        | 404 |
| §12-1 变压器设计的任务 .....                    | 311 | 附录七 电工硅钢薄板(厚0.35mm)的<br>磁化和损耗曲线 .....    | 404 |
| §12-2 变压器的主要技术参数 .....                  | 311 | 附录八 三相60°相带谐波比漏磁<br>导系数 $\Sigma s$ ..... | 406 |
| <b>第十三章 变压器的电磁设计</b> .....              | 315 | 附录九 笼型转子谐波比漏磁<br>导系数 $\Sigma R$ .....    | 407 |
| §13-1 变压器铁心直径的确定 .....                  | 315 | <b>参考文献</b> .....                        | 407 |
| §13-2 变压器主要结构参数最佳值的<br>解析计算 .....       | 319 |                                          |     |

# 第一篇 旋转电机设计

## 第一章 电机设计概述

### §1-1 电机制造工业的近况与发展趋势

#### 一、我国电机制造业的发展概况

20世纪40年代以前,我国电机制造业极端落后。中华人民共和国成立后,电机工业才获得了迅速发展,产品的品种、数量不断增加,技术水平逐步提高。50年代以仿制国外产品为主,60年代起即走上自行设计的道路;50年代初只能生产一般中小型电机,不久即能制造大型发电设备和特殊用途电机。与此同时,新技术、新材料、新结构和新工艺的应用日益广泛。下面对我国电机制造业的发展概况作一简要介绍。

#### (一) 产品品种、规格不断增加,单机容量迅速增大,技术经济指标逐步提高

在发电机方面,继第一台10MW空冷水轮发电机(1955年)、6MW空冷汽轮发电机(1956年)和12MW双水内冷汽轮发电机(1958年)诞生后,又制成100MW双水内冷和氢内冷、125MW与200MW双水内冷、200MW水氢冷和300MW双水内冷与水氢冷汽轮发电机,225MW空冷、300MW双水内冷与空冷水轮发电机和600MW水氢冷汽轮发电机。国产汽轮发电机在不长时间内,就从空冷、氢冷发展到双水内冷和水氢冷,从而掌握了大型汽轮发电机,除全氢冷以外的各种主要冷却方式的技术。其次,通过大小水电站的兴建,基本掌握了各种主要类型水机组的设计和制造技术,其中产量较多、发展较快的是混流式机组,最大单机容量已达300MW;转桨式机组最大则达170MW。此外还生产了12.5MW冲击式、15MW斜流式、10MW贯流式和15MW蓄能机组等。

在大型交直流电机方面,已制成的重大产品有:6300kW、2极笼型转子感应电动机,4000kW、2极绕线型转子感应电动机,2000/1250kW、3kV、370/295r/min大型变速感应电动机;16000kW、16极同步电动机,6300kW、1500r/min整块(或称实心)磁极同步电动机,3000kW、40极立式同步电动机及250MVA双水内冷同步调相机;4600kW、70/120r/min、额定转矩为627.8kN·m的单枢可逆转直流轧钢电动机,5000kW、500r/min直流发电机,2×4000kW、40/60r/min双枢可逆转直流轧钢电动机,3300kW、500r/min矿井卷扬直流电动机,4600kW、80/160r/min、额定转矩为549.4kN·m的单枢非逆转直流轧钢电动机,2×3250kW、90/180r/min双枢非逆转直流轧钢电动机,600kW、12000A、50V真空电弧炉用低压直流发电机,480kW、330V、3000r/min高速直流电动机,以及25MW、460V、54300A、368r/min、3×0.3s定额大型冲击直流发电机。

在中小型电机方面,自从1953年进行第一次全国统一设计后,中小型电机的生产开始摆

脱过去的混乱局面,走上统一和系列化的道路。据统计,到目前为止,我国生产的中小型电机系列,除一般电机或基本系列外,还有防爆、船用、潜水、单绕组多速、力矩、起重冶金、高起动转矩、辊道、电磁调速、热带型、屏蔽电机、磁阻式同步电动机及永磁电机等派生系列和专用系列。此外,还研制了中小型无槽直流电机、晶闸管供电直流电动机、潜油电机、钻探电机、谐波励磁同步发电机等多种新产品。从目前情况看来,一般或基本系列中小型电机已能满足国民经济各部门的需要,其技术经济指标也在逐步提高。例如Y系列小型三相感应电动机和JO2系列相比,效率提高0.41%,堵转转矩平均提高33%,体积缩小15%,重量减轻12%,有效材料用量则二者相当。中型感应电动机新的JS2、JR2系列(低压部分)比老的JS、JR系列平均节省硅钢片23%、转子用铜量22%,相同功率电机可缩小一个机座号。小型同步发电机新的T2系列采用了晶闸管励磁装置,与原有的T2系列比较,效率(绝对值)平均提高1.18%,总重量降低约35%,有效材料节省10%以上。对于变型、派生及特殊品种电机,在数量、规格和质量方面还有待努力。

## (二) 积极采用新技术、新材料、新结构和新工艺

我国在发展电机工业时,十分注意新技术、新材料、新结构和新工艺的采用。

在采用新技术方面,首先是应用电子计算机来进行电机的电磁计算以及磁场、温度场计算和零部件机械计算。其他像感应电机的单绕组多速绕组和 $\Delta$ -Y混合联接绕组,同步电机的无刷励磁、静止半导体励磁、谐波励磁和整块磁极,直流电动机的晶闸管供电和无槽电枢,以及双水内冷技术、直线电机等也都先后正式用于生产。

在绝缘材料方面,目前我国生产的电机中,主要采用E、B两级(其中E级约占2/3左右),F、H级仅在少数要求较高或特殊用途的电机上应用,但前者正积极地分别向B、F级过渡。环氧玻璃粉云母带和无溶剂浸渍漆、聚酰亚胺、DMD复合绝缘(中间为涤纶薄膜,两面为涤纶纤维纸)、涂敷用环氧粉末和适形材料(由涤纶纤维毡涂上一定的胶粘剂制成,可用于汽轮发电机和水轮发电机端部及槽部固定)等新型绝缘材料中不少已在电机上大量应用。在导磁材料方面,除一般热轧与冷轧取向硅钢片外,无硅低碳电工钢片和半冷轧无取向硅钢片已在部分电机中采用。此外,还在用玻璃钢(即高强度玻璃纤维增强塑料)制造汽轮发电机转子护环以代替价格昂贵的非磁性钢护环方面进行了一系列研究,并已在—台3MW电机上试用。在25、50和75MW汽轮发电机上采用玻璃钢定子端盖也获得较好效果。近年来,我国还在氢冷汽轮发电机上应用了液体塑料密封材料,以代替传统的橡胶皮条等固体密封材料,改善了密封性能。

在工艺水平和机械化、自动化程度方面,小型电机的机座与转轴加工、静电喷漆、总装试验等自动线均已正式采用;级进式冲模、大型压铸机、定子绕组自动下线机、插槽绝缘机、端部整形机、自动绕线机等新设备及真空压力浸渍、中型感应电机转子导条环氧粉末涂敷、机座射压造型等新工艺的应用,也都使工效大大提高,电机质量进一步改进。

## (三) 标准化、系列化和通用化程度不断提高

1953年以后多次组织了电机产品的改型设计和新系列统一设计,使我国从发电设备、大型交直流电机一直到种类繁多的中小型电机,大多数都有了自己的系列。不但建立了若干量大、使用面广的基本系列,还建立了应用场合比较特殊的派生系列和专用系列。在电机零部件和安装尺寸、机座号等的标准化、系列化、通用化(简称“三化”)方面也进行了大量工作,已形成自己的体系,还制订了电机专业的许多国家标准,这些标准正逐步接近国际电

工委员会的标准。

#### (四) 积极开展电机理论、测试技术和新型发电方式的研究

近年来,我国对电机绕组、附加损耗、附加转矩、电机冷却、大型电机的端部磁场、电机测试技术以及超导电技术在电机中的应用等方面开展了一系列研究,取得不少成果。此外,我国还对原子能、磁流体、地热、太阳能、风力和燃气轮机用于发电方面进行了一系列试验研究工作,已建成一座试验性的地热发电站及制成若干燃气轮发电机组。

建国以来,我国电机工业迅猛发展,取得了可喜的成绩。但是,由于我国工业基础比较薄弱,电机产品品种还不能完全满足国民经济的需要;在产品质量方面,除少数达到世界先进水平外,多数与国外先进水平相比还存在一定差距;在产量、单机容量、新材料供应和劳动生产率等方面,和国外先进水平的差距也较大。改变这一落后面貌,需要我们付出艰苦的努力。

## 二、国外电机制造工业的近况与发展趋势

### (一) 发电设备

一个国家电机工业的发展水平,常以它能为电力工业提供多少和提供什么样的发电装备作为主要衡量标志。1960~1970年间,全世界电站的总装机容量增长了1.1倍,也就是十年间翻了一番以上,这不仅表现于发电设备的产量,还表现于单机容量。下面将国外发电设备的近况与发展趋势简介如下:

#### 1. 汽轮发电机

近年来,一些发达国家可开发的水力资源日趋枯竭,火电站一般又有建厂快、投资少的优点,因而大多数国家多以建设火电站为主;而石油资源日趋减少,有些国家又缺乏石油资源,因此迫使某些国家迅速发展原子能电站,这都促使汽轮发电机的生产蒸蒸日上。在产品方面:50年代,大型汽轮发电机的单机容量多在100~200MW,60年代增至300~600MW,70年代起,已先后制成800~1300MW的机组。

#### 2. 水轮发电机

60年代以前,水轮发电机的最大单机容量接近200MW,60年代增至200~500MW,70年代起开始制造600MW以上的机组。目前水轮发电机定子绕组大多采用水内冷技术,部分国家对转子绕组也用水内冷,但多数仍采用强迫空气冷却。

国外发电设备制造的主要趋势是:在巩固60~70年代已制大型机组及其采用的某些新材料、新结构的基础上,在充分保证可靠性和希望取得足够运行经验的前提下,稳步地发展更大机组;与此同时,努力寻求更好的绝缘材料和结构,以提高电机的电压等级;并采用更为合理的励磁系统与冷却系统,以提高运行稳定性和在可供应的转子锻件范围内提高单机容量等等。

近年来,原子能电站用的4极汽轮发电机、蓄能电站用的水轮发电机或变极变速发电-电动机、以及燃气轮发电机和燃气-蒸汽联合循环发电设备,得到了比以往更快的发展。

对于大型汽轮发电机采用超导电技术的可能性,目前许多国家都在进行研究,已制成容量达20MW的样机,并正在制造300~500MW的半超导汽轮发电机。

能源危机及环境污染的影响,使国外大力开展利用各种能源进行发电的研究。例如磁流体发电、太阳能发电、地热发电、潮汐发电、风力发电、波浪发电、海水温差发电与燃料电池等,其中有些已进入样机试验阶段,但除磁流体发电、燃料电池与传统电机根本不同外,其它发电方式所用发电机多数与传统电机大同小异。



## (二) 大型交、直流电机

### 1. 大型交流电机

大型交流电机在国外已成系列生产。目前生产的同步电动机最大容量已达70MW、2极(日本);同步调相机已达345MVA、8极(瑞典);柴油发电机已达31280kW、56极(西德);绕线型感应电动机为6MW、2极(日本);笼型感应电动机为12MW、2极。

国外大型同步电机采用与汽轮发电机或水轮发电机相似的结构。例如传动高炉鼓风机用的高速2极大容量同步电动机,其结构与汽轮发电机相似;70年代前后发展起来的单纯蓄水式水泵站中采用的立式同步电动机,结构与水轮发电机类似。

此外,近年来还先后出现和发展了带晶闸管变频装置的低速同步电机,户外电动机,低噪声电动机以及与中小型电机类似的大型电机等多种产品。

### 2. 大型直流电机

近年来,在一些先进的工业国家中,直流电动机已普遍使用晶闸管供电,直流发电机主要只用于那些不宜采用晶闸管供电的系统中。当前国外生产出的大型低速可逆转轧钢用直流电动机最大容量已达8840kW、65/90r/min、1304.7kN·m(苏联);大型非逆转轧钢用直流电动机已达11200kW、62/180r/min(法国)。

此外,英国生产的8200kW、76r/min、额定转矩为1033kN·m的矿井卷扬用直流电动机,是目前世界上这类电机中最大的。日本也已生产出2250kW、1800r/min的大容量高速直流电动机。

国外还出现一些新型直流电机,例如用晶闸管和晶体管来代替换向器,并把电机和整流装置分开安装,使直流电机的极限容量提高数倍。

### 3. 中小型电机

60年代初以来,一些主要工业国家相继发展了中小型电机的新系列,或对原有系列进行了改型。它们的共同特点是:

(1) 应用电子计算机进行设计,从而提高了计算精度,缩短了设计周期,并为获得最佳方案创造了有利条件。

(2) 功率等级和安装尺寸尽量和国际电工委员会的标准接近。

(3) 由一向注意“小型轻量化”(减轻重量、降低中心高)转为注意“省能化”和“无公害化”,提高效率和降低噪声等。

(4) 积极采用新材料。例如绝缘材料方面,目前B级绝缘的电机所占比重日益增大,E级的逐渐减少,而且已呈现出向F级过渡的趋势。有些国家为了提高电机的使用寿命和可靠性,把F级当作B级,留有较大的温升裕度;有的国家在同一系列中,按电机温升高低或机座号大小,分别采用E、B、F级绝缘。磁性材料方面,无硅低碳冷轧电工钢片、半冷轧无取向硅钢片和磁性槽楔等已普遍采用。导电材料方面,有些国家也发展铝线电机新系列,例如瑞典的MK系列。美国在小功率电动机生产方面,铝线电机已多于铜线电机。

(5) 扩大了原来的功率划分范围,例如小型感应电机的功率范围已扩大到原先属于中型感应电机的低压部分,有的甚至还包括一部分中型3kV级的功率,中型感应电机新系列中,6kV 4极的功率已做到3000kW以上。

(6) 改进结构,提高通用化程度,注意维修使用方便。例如中小型同步电机和感应电机都大量采用箱型结构或通用定子。小型电机改用密封轴承,出厂前一次加油,使用过程中

一般不再换油。中型电机采用不停机添加润滑脂的滚动轴承，并有甩油盘自动排除废油。其他像恒压刷握的采用（可不需调整弹簧压力），以及使用径向尺寸较大的电刷（可延长调换电刷的周期）等。

除基本系列外，近年来国外还发展了下列一些特殊用途的中小型电机：

- 1) 中型防爆电动机；
- 2) 交流变速电动机及调速机组；
- 3) 机械-电机组合式机组；
- 4) 无刷励磁同步电机；
- 5) 磁阻式同步电动机；
- 6) 低转动惯量直流电动机；
- 7) 永磁直流电动机；
- 8) 无换向器电动机；
- 9) 潜水、潜油和钻探电动机。

## §1-2 电机设计的任务与过程

### 一、电机设计的任务及设计时给定的数据

#### (一) 电机设计的任务与对设计人员的要求

电机设计的任务是根据用户提出的产品规格（如功率、电压、转速等）、技术要求（如效率、参数、温升限度、机械可靠性要求等），结合技术经济方面国家的方针政策和生产实际情况，运用有关的理论和计算方法，正确处理设计时遇到的各种矛盾，从而设计出性能好、体积小、结构简单、运行可靠、制造和使用维修方便的先进产品。

从事电机设计工作的人员要注意贯彻国家的技术经济政策，并注意所设计电机的经济性和可靠性。既要努力使产品满足用户要求，又要尽可能降低生产成本。

在设计前和设计过程中，设计人员还应认真进行调查研究，听取有关人员的意见和建议，注意理论与实际、设计与工艺相结合。例如深入现场、访问用户和查阅有关技术资料等等，以便对所设计电机的技术要求、现状、发展趋势、生产经验与现有加工条件等有所了解，从而为具体设计打下坚实的基础，减少设计差错。

电机设计是个复杂的过程，需要考虑的因素和确定的尺寸、数据很多，这就难免会遇到错综复杂的矛盾。因此设计人员必须全面地、综合地看问题，并能因地制宜，针对具体情况采取不同的解决方法。例如电机的各项性能之间以及技术指标和经济指标之间，经常存在矛盾。当采取措施改善某个性能时，常会使其他一些性能变差，因此必须全面照顾。又如在设计电机时，不能片面追求体积小和材料省，因为这样容易导致电机性能降低，特别是效率降低，加工工时增加，而使运行费用或制造成本上升，并造成能量浪费。

#### (二) 电机设计时给定的数据和对电机的主要技术要求

电机设计时通常给定下列数据：

(1) 额定功率：发电机为电枢线端输出的电功率；电动机为轴上输出的机械功率；同步调相机为线端超前电流下输出的无功功率。

(2) 额定电压：对交流电机指线电压，对直流电机指电枢端电压。

(3) 相数及相间连接方式。

(4) 额定频率。

(5) 额定转速或同步转速。

(6) 额定功率因数。

对感应电机通常给定(1)~(5),同步电机给定(1)~(6),直流电机给定(1)、(2)、(5)。

除上述一般额定数据外,有时还给定某些其他数据。例如:对水轮发电机、内燃机驱动的同步发电机或负载具有脉动转矩的同步电动机,常再给定惯性矩的数值;对水轮发电机,还需给定飞逸转速倍数 $K_f$ 的数值;飞逸转速是指机组在最高水头运行,突然甩掉满负荷(例如与电网解列),而水轮机的调速系统及其他保护装置失灵、导水机构发生故障致使导叶开度在最大位置时,机组可能达到的最高转速。

对电机的技术要求通常在有关的国家标准或技术条件中规定,其内容视具体电机而异,读者可参看有关标准,详见§1-3。

## 二、电机设计的过程和内容简介

### (一) 准备阶段

通常包括两方面内容:首先是熟悉国家标准,收集相近电机的产品样本(或样机)和技术资料(包括试验数据),并听取生产和使用单位的意见与要求;然后在国家标准有关规定及分析相应资料的基础上,编制技术任务书或技术建议书。

如果没有适当的国家标准,便需编制所设计产品的技术条件。技术条件在一定程度上可以看作是制造厂与用户间的一种技术协议,它是指导全部设计工作和产品验收时的技术依据。技术条件可按单个产品制订,也可根据整个系列或某种型式的电机来制订。

### (二) 电磁设计

本阶段的任务是根据技术条件或技术任务书(技术建议书)的规定,参照生产实践经验,通过计算和方案比较,来确定与所设计电机电磁性能有关的尺寸和数据,选定有关材料,并核算其电磁性能。

### (三) 结构设计

结构设计的任务是确定电机的机械结构、零部件尺寸、加工要求与材料的规格及性能要求,包括必要的机械计算及通风和温升计算。所需考虑的原则和设计方法详见§8-2。

通常,首先根据技术条件或技术任务书(技术建议书)中规定的防护型式、安装方式与冷却方式,再考虑电磁计算中所选负荷的高低,来选取合适的通风冷却系统;然后安排产品的总体结构,绘制总装配草图。最后分别绘制部件的分装配图和零件图,并对总装配草图进行必要的修改。

结构设计通常在电磁设计后进行,但有时也和电磁设计平行交叉地进行,以便相互调整。对于新产品或重大产品,根据需要,设计过程还可再细分成若干小阶段,例如在准备阶段之后,增加初步设计或扩大初步设计阶段。

## §1-3 国家标准

电机的国家标准是国家有关部门在总结以往电机设计、制造和使用经验的基础上,从当

前实际情况出发，并考虑今后发展需要而对电机提出一定要求的文件。它是电机生产的依据，也是评定电机质量优劣的准则。国家标准所规定的各项要求，是综合考虑了产品的实用性、技术上的先进性、经济上的合理性、使用上的可靠性和生产上的可能性而提出的。这些要求之间是密切相关、不可分割的。因此生产部门应力求使所设计、制造的电机全面满足国家标准规定的各项要求。

我国关于电机的国家标准有国家颁发（代号为GB）和中央各部颁发的（例如原机械工业部颁发的标准代号为JB）两种，后者也称为“部颁标准”。就内容讲，它们大体上可归为下列三类：

第一类是对电机的一般规定和技术要求。这一类如国家标准《GB755-87电机基本技术要求》，它规定了适用于各类电机的技术要求、试验项目与试验方法、铭牌及线端标志等；《GB997-81电机结构形式及其代号》规定了适用于各类电机的安装尺寸和外形尺寸的代号。这类标准应用范围较广，是带基本性的标准。

第二类是一种或几种具体类型电机的技术条件。例如：原机械工业部标准《JB3074-82（IP-44）Y系列（IP44）三相异步电动机技术条件（1980-280）》、《JB1104-68Z2系列小型直流电动机技术条件》，它们分别对有关电机的额定数据、使用条件、性能指标及允许偏差（容差）、安装尺寸、试验方法、验收规则，以及标记、包装、保管等作了详细而明确的规定。性能指标之所以规定容差是考虑到大量生产时，由于材料性能和工艺参数等的允许波动，各种测量方法与仪表的允许误差以及各厂具体生产条件的不同，会使实际产品的性能指标不可能绝对准确地达到技术条件所规定的保证值。

第三类是各种电机的试验方法。在这一类标准中，对电动机型式试验和检查试验的方法、测量仪器选择等，在《GB755-87电机基本技术要求》的基础上进一步作了具体规定与说明。

国家标准通常是根据一定时期中国国民经济发展的需要和生产技术水平制定的，因而在一定历史条件下是先进、合理的。但随着科学技术和生产的不断发展，对电机产品的要求会逐步提高或改变，于是国家标准也就需要随之修订，而提出更高或更适合新情况的要求。

## §1-4 国际 标准

采用国际标准已成为世界各国的发展趋势。我国也已把积极采用国际标准和国外先进标准作为一项重要的技术经济政策。

我国采用国际标准和国外先进标准的方针是：认真研究、积极采用、区别对待。采用国际标准分为等效采用和参照采用两类。前者包括两种：（1）对国际标准不作编辑性修改；（2）对国际标准在技术上只作很少修改。参照采用是指根据我国自然资源和经济条件，必须作某些变动，但产品性能和质量指标要与国际标准相当，并在通用互换、安全等方面与国际标准协调一致。

电机行业的国际标准通常是指国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）所制订的有关标准。IEC是制订电工产品国际标准的组织，它成立于1906年，目前共设有76个技术委员会（TC），128个分技术委员会（SC），500多个工作组（WG）。IEC的第二技术委员会（简称TC2）是专门制订旋转电机标准的机构，它目前设有6个分技术委员会，分管汽轮发电机，尺寸和功率等级，电刷、刷握、换向器和集电环，试验方法和程序，外壳防护、冷却方

法和安装方式以及电机绝缘结构分级等工作。它已制订的31项标准主要分基本技术要求和试验方法、安装尺寸和功率等级、零部件标准三部分。此外，还有两个产品标准和一项产品性能要求。

我国的标准体系是参照苏联而逐渐发展形成的。为了积极采用IEC标准，把电机行业的标准化工作和IEC工作密切结合起来，我国于1980年8月正式成立了“IEC/TC2国内对口技术委员会”，开展了大量工作。近几年来，电机行业也已制订或修订了大部分标准，但在标准的数量、技术性能、试验方法与测试精度、绝缘结构功能试验以及产品标准等方面，和IEC标准仍有一定差距。我们必须努力调整电机行业的标准体系，大力进行科学研究，积极落实各项措施，打好基础，缩小差距，在标准化工作方面赶超世界先进水平，促进我国电机工业的进一步发展。