

普通高等教育机电类规划教材

电机原理及拖动

东北大学 彭鸿才 主编

机械工业出版社

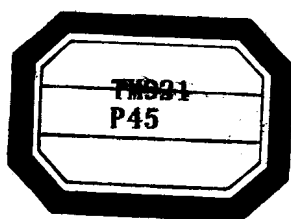
21

429790

普通高等教育机电类规划教材

电机原理及拖动

东北大学 彭鸿才 主编



00429790



机械工业出版社

本书是按高等工业学校工业电气自动化专业教学指导委员会《电机原理及拖动》教学大纲编写的。主要内容包括直流电机原理、电力拖动系统的动力学基础、直流电动机的电力拖动、变压器、三相异步电动机原理、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、控制电机以及电力拖动系统中电动机的选择。书中着重讲述了各种电动机的工作原理、分析方法及电动机的静态、动态特性。内容由浅入深，重点突出，重点内容配有例题，各章附有足够数量的思考题与习题。本书是高等工业学校工业电气自动化专业本科《电机原理及拖动》课程用的“八五”规划教材，也可作成人高等教育有关专业的教材，还可以供有关工程技术人员参考。

电机原理及拖动

东北大学 彭鸿才 主编

*

责任编辑：赖尚元 韩雪清 版式设计：张世琴

责任校对：姚培新 责任印制：卢子祥

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（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 787×1092¹/₁₆·印张 19.25·字数 468 千字

1997年9月第1版第2次印刷

印数 2 001—6 000 定价：22.00 元

*

ISBN 7-111-04830-X/TM·603（课）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

ISBN 7-111-04830-X



9 787111 048305 >



前 言

当前自动化技术发展十分迅速，为工业电气自动化专业教学带来了许多新的内容，为此必须压缩原有课程的内容和学时。据此，高等工业学校工业电气自动化教学指导委员会决定编写少学时的《电机原理及拖动》新教材，在全国各院校招标。并指定哈尔滨工业大学651教研室汇总各校投标情况和编写大纲。

本教材按哈尔滨工业大学汇总的大纲编写，主要压缩了原《电机学》中与结构和制造工艺有关的一些内容，而将《电机学》和《电力拖动基础》中的电机特性融为一体，一气呵成。这样既压缩了学时又保证了《电机原理及拖动》这门重要的专业基础课的主要内容和基本要求不被削弱。

本书第一、四、五、七、八章及第六章第六节由东北大学彭鸿才教授编写，第二、三、九章及第六章的第一至第五节由东北大学贺斌英副教授编写，全书由彭鸿才教授主编。

本书由哈尔滨工业大学宋世光副教授主审，宋老师对全书进行了十分认真的审阅，并提出了许多宝贵意见。在本书编写过程中东北大学任兴权教授、刘宗富教授及电机拖动教研室的老师们给予了大力支持，杨健老师调试了过渡过程仿真程序，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中定有不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

1984年7月

常用符号表

A ——线负荷; 电机的散热系数	GD_m^2 ——等效飞轮力矩
a ——直流绕组并联支路对数; 交流绕组并联支路数	H ——磁场强度
B ——磁通密度(磁感应强度)	H_δ ——气隙磁场强度
B_a ——直流电机电枢磁动势产生的气隙磁通密度	I ——电流
B_{av} ——平均磁通密度	I_a ——电枢电流
B_δ ——气隙磁通密度	I_f ——励磁电流
C ——电容; 热容量	I_k ——堵转电流
C_e ——电动势常数	I_N ——额定电流
C_T ——电磁转矩常数	I_0 ——空载电流
D ——直径; 调速范围	I_1 ——变压器一次侧电流; 异步电动机定子电流
E_a ——直流电机电枢电动势; 导体电动势	I_2 ——变压器二次侧电流; 异步电动机转子电流
E_N ——额定电动势	i_a ——导体电流; 支路电流
E_σ ——漏电动势	J ——转动惯量
E_y —— y 次谐波电动势	J_m ——生产机械的转动惯量
E_1 ——变压器一次侧电动势; 异步电机定子电动势	J_R ——电动机转子转动惯量
E_2 ——变压器二次侧电动势; 异步电机转子电动势	j ——减速比
E_{2s} ——异步电机转子转动时的电动势	K ——直流电机换向片数
E_n ——同步电机励磁磁场感生的电动势	k ——电压比
e_L ——自感电动势	k_e ——异步电机定、转子电动势比
e_k ——换向电动势	k_t ——异步电机定、转子电流比
e_M ——互感电动势	k_p ——分布系数
e_r ——电抗电动势	k_w ——绕组系数
F ——磁动势	k_y ——短距系数
F_a ——电枢磁动势	L ——电感
F_{ad} ——直轴电枢反应磁动势	L_σ ——漏电感
F_{aq} ——交轴电枢反应磁动势	l ——长度; 导体长度
F_m ——单相磁动势幅值	m ——相数; 质量; 串电阻起动级数
F_0 ——空载磁动势	N ——匝数; 直流电机总导体数
F_1 ——变压器一次侧磁动势; 异步电机定子磁动势	N_f ——励磁绕组匝数
F_2 ——变压器二次侧磁动势; 异步电机转子磁动势	N_1 ——变压器一次侧绕组匝数; 异步电动机定子绕组匝数
FS ——负载持续率	N_2 ——变压器二次侧绕组匝数; 异步电动机转子绕组匝数
f ——频率; 力	n ——转速
f_{av} ——平均力	n_t ——过渡过程初始转速
f_2 ——异步电机转子频率	n_N ——额定转速
G ——重力	n_s ——过渡过程稳态转速
GD^2 ——飞轮力矩	

n_0 —— 直流电动机理想空载转速	U_f —— 励磁电压
n_1 —— 交流电机同步转速	U_k —— 短路电压
P_M —— 电磁功率	U_{kN} —— 额定短路电压
P_m —— 异步电机总机械功率	U_N —— 额定电压
P_N —— 额定功率	U_0 —— 直流发电机空载电压
P_1 —— 输入功率	U_1 —— 变压器一次侧电压; 异步电机定子电压
P_2 —— 输出功率	U_2 —— 变压器二次侧电压; 异步电机转子电压
p —— 极对数	U_{20} —— 变压器二次侧开路电压; 绕线转子异步电动机转子开路电压
r_{Cu} —— 铜损耗	v —— 速度; 导体切割磁场的线速度
r_{Fe} —— 铁损耗	X_s —— 同步电机电枢反应电抗
r_f —— 励磁损耗	X_{ad} —— 同步电机电枢反应直轴同步电抗
r_k —— 短路损耗	X_{aq} —— 同步电机电枢反应交轴同步电抗
r_m —— 机械损耗	X_s —— 同步电抗
r_e —— 附加损耗	X_d —— 直轴同步电抗
P_0 —— 空载损耗	X_k —— 短路电抗
Q —— 无功功率; 电机单位时间产生的热量	X_q —— 交轴同步电抗
R —— 电阻; 半径	X_1 —— 变压器一次侧漏电抗; 异步电机定子漏电抗
R_a —— 电枢电阻	X_2 —— 变压器二次侧漏电抗; 异步电机转子漏电抗
R_e —— 直流电动机外串电阻	X_{2s} —— 异步电机转子旋转时的漏电抗
R_L —— 负载电阻	X_σ —— 漏电抗
R_{st} —— 起动电阻	y —— 节距, 合成节距
r_m —— 变压器, 异步电动机励磁电阻	y_k —— 换向节距
r_k —— 变压器, 异步电动机短路电阻	y_1 —— 第一节距
r_1 —— 变压器一次侧电阻; 异步电机定子电阻	y_2 —— 第二节距
r_2 —— 变压器二次侧电阻; 异步电机转子电阻	Z —— 阻抗; 槽数
S —— 元件数; 视在功率	Z_k —— 短路阻抗
s —— 异步电机转差率	Z_m —— 励磁阻抗
s_m —— 临界转差率	Z_0 —— 空载阻抗
T —— 转矩, 电磁转矩; 时间常数	Z_1 —— 变压器一次侧漏阻抗; 异步电机定子漏阻抗
T_H —— 电动机发热时间常数	Z_2 —— 变压器二次侧漏阻抗; 异步电机转子漏阻抗
T_k —— 堵转转矩	Z_L —— 负载阻抗
T_i —— 过渡过程初始转矩	α —— 空间电角度; 槽矩角
T_L —— 负载转矩	β —— 直流电机机械特性斜率; 短矩角; 变压器负载系数
T_M —— 机电时间常数	δ —— 气隙长度; 静差率
T_{max} —— 最大转矩	η —— 效率
T_N —— 额定转矩	θ —— 转角; 温度
T_s —— 过渡过程稳态转矩	λ_m —— 过载倍数
T_0 —— 空载转矩	μ —— 磁导率
T_1 —— 输入转矩	μ_0 —— 气隙磁导率
T_2 —— 输出转矩	
t_{st} —— 起动时间	
t_0 —— 制动时间	
U_0 —— 控制电压	

γ ——谐波次数;异步电机能耗制动时的转差率
 ρ ——回转半径
 τ ——极距;温升
 Φ ——磁通;主磁通
 Φ_m ——变压器、异步电机主磁通幅值
 Φ_σ ——漏磁通

φ ——功率因数角
 ψ ——磁链;内功率因数角
 Ω ——机械角速度
 Ω_1 ——同步角速度
 ω ——电角速度,角频率

目 录

前言

常用符号表.....Ⅶ

绪论.....1

第一章 直流电机原理4

- 第一节 直流电机的用途、结构及
基本工作原理4
- 第二节 直流电机的空载磁场8
- 第三节 直流电机的电枢绕组.....10
- 第四节 直流电机的电枢反应.....13
- 第五节 直流电机的电枢电动势与
电磁转矩.....16
- 第六节 直流发电机.....17
- 第七节 直流电动机.....23
- 第八节 直流电机换向简介.....30
- 思考题与习题.....33

第二章 电力拖动系统的动力学

基础35

- 第一节 典型生产机械的运动形式
及转矩.....35
- 第二节 电力拖动系统的运动方程式.....37
- 第三节 多轴电力拖动系统转矩及
飞轮力矩的折算.....40
- 第四节 负载的机械特性.....46
- 思考题与习题.....48

第三章 直流电动机的电力拖动51

- 第一节 他励直流电动机的机械特性.....51
- 第二节 他励直流电动机的起动和
反转.....59
- 第三节 他励直流电动机的调速.....63
- 第四节 他励直流电动机的制动.....72
- 第五节 电力拖动系统的过渡过程.....81
- 思考题与习题.....95

第四章 变压器.....99

- 第一节 变压器的用途、工作原理
及结构.....99
- 第二节 变压器的空载运行102
- 第三节 变压器的负载运行107

第四节 变压器参数的试验测定112

第五节 变压器的运行特性115

第六节 三相变压器118

第七节 特殊变压器125

思考题与习题131

第五章 三相异步电动机原理135

- 第一节 异步电动机的用途、结构
及基本工作原理135
- 第二节 交流电机的绕组和它的感
应电动势138
- 第三节 交流电机绕组的磁动势149
- 第四节 转子不转时的异步电动机158
- 第五节 转子转动时的异步电动机164
- 第六节 异步电动机的功率传递与
转矩平衡170
- 第七节 异步电动机的参数测定173
- 第八节 异步电动机的工作特性176
- 思考题与习题178

第六章 三相异步电动机的电力

拖动181

- 第一节 三相异步电动机的机械特性181
- 第二节 笼型异步电动机的起动192
- 第三节 绕线转子异步电动机的起动200
- 第四节 三相异步电动机的调速205
- 第五节 三相异步电动机的各种运
行状态222
- 第六节 异步电动机拖动系统的机
械过渡过程及能量损耗231
- 思考题与习题240

第七章 同步电动机.....244

- 第一节 同步电机的基本结构与工
作原理244
- 第二节 同步电动机的电动势相量图246
- 第三节 同步电动机的功率、转矩
和功(矩)角特性249
- 第四节 同步电动机的励磁调节与

U形特性曲线	252
第五节 同步电动机的起动	257
思考题与习题	260
第八章 控制电机	262
第一节 概述	262
第二节 测速发电机	262
第三节 伺服电动机	266
第四节 旋转变压器	274
第五节 自整角机	277
第六节 步进电动机	279
思考题与习题	283
第九章 电力拖动系统中电动机 的选择	284

第一节 电动机选择的一般概念	284
第二节 电动机发热及冷却的规律	286
第三节 电动机的工作制	288
第四节 连续工作制电动机额定功 率的选择	290
第五节 短时工作制电动机额定功 率的选择	294
第六节 断续周期工作制电动机额 定功率的选择	296
第七节 电动机类型、额定电压、额定 转速及外部结构形式的选择	297
思考题与习题	299
参考文献	300

绪 论

一、电机与电力拖动发展简况

1820年奥斯特发现了电流在磁场中受力的物理现象，随后由安培对这种现象进行了总结。在此基础上人们在实验室里制出了直流电动机的模型。1834年亚哥比制成了第一台可供实用的直流电动机，1838年人们将亚哥比直流电动机用于拖动电动轮船试验，小艇在涅瓦河上载运11人，以4km/h的速度顺流而下和逆流而上，获得了成功。这是人类制成的最早的可供实用的电动机，也是最早的电力拖动。当时还没有可供实用的直流发电机，为电动机供电的是化学电池。

1831年法拉第发现了电磁感应定律，为生产制造各种发电机提供了依据。此后制出了直流发电机，替换了价格昂贵的化学电池，为直流电动机的扩大应用提供了电源。可见在电机和电力拖动发展史上首先得到应用的是直流电机。直到19世纪70年代直流电在应用中一直占着主要地位。随着电机应用的扩大，用电量不断增加，由于当时直流电压无法提高，所以在远距离输电方面遇到了困难，人们开始认识到交流电的优点。

1871年凡·麦尔准发明了交流发电机。1878年亚布洛契可夫使用了交流发电机和变压器为他发明的照明装置供电。1885年意大利物理学家费拉利斯发现了二相电流可以产生旋转磁场，一年以后费拉利斯和在美国的垣斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。1888年多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了三相制，并制出了三相感应电动机，奠定了现代三相电路和三相电机的基础。此后三相交流电迅速地发展起来，到20世纪初，现代各种主要电机均已设计制造成功。

进入20世纪之后，人们在降低电机成本、减小电机尺寸、提高电机性能、选用新型电磁材料、改进电机生产工艺等方面进行了大量工作。所以现代电机与本世纪初的电机已有很大的变化。

我国的电机制造工业实际上是解放后才发展起来的，解放前由于我国长期处于半封建半殖民地的地位，工业基础十分薄弱。仅有一些小电机厂，设备简陋，大多数是属于修理和装配性质的，直到1949年解放之前根本没生产过汽轮发电机和水轮发电机。制出的直流发电机最大不过200kW；电动机不过135kW；变压器最大不过2000kV·A。解放后我国的电机制造业得到了迅速的发展。50年代迅速地建成了一批如哈尔滨电机厂，上海电机厂、沈阳变压器厂等大型电机制造骨干企业。到50年代末已经生产出电机容量为5万kW的汽轮发电机、7.25万kW的水轮发电机和12万kV·A的变压器。各种类型的中、小型电机厂已经遍布全国各地。在短短的十年里，我国电机制造的发展速度是十分惊人的。1958年浙江大学与上海电机厂等合作研制出世界上第一台1.2万kW双水内冷汽轮发电机，于同年12月在上海南市发电厂并网发电，一举振动了国际电工界。

到了70年代，我国已经生产出单机容量为30万kW的汽轮发电机和30.8万kW的水轮发电机。现在我国已经制出了单机容量为60万kW的发电机。变压器的单机容量也达55万kV·A，电压等级为330~500kV。现在我国已能对外出口成套大型发电设备。目前，美、俄、瑞士等

国已经制出了115~123万kW的汽轮发电机,美国制出了70万kW的水轮发电机。与这些国际先进水平相比,我国的电机制造业尚有一定的差距,尚需我国电气科技工作者和广大职工继续努力。

随着各类电机的制造成功,电力拖动技术也迅速地发展起来。在此之前,人们在长期的生产实践中,很早就应用了人力、畜力、水力、风力等作为原动力来推动生产机械,此后又发明了蒸汽机、内燃机等作为生产机械的原动机。但自从电力拖动技术发展以来,由于电能的传输和分配十分方便、控制容易、电动机效率高、运行经济等一系列优点,电力拖动很快成为拖动各种生产机械的主要方式。现在各行各业的各种生产机械绝大多数都已经采用了电力拖动。电力拖动发展之初,普遍采用的是“成组传动”方式,就是用一台电动机通过天轴和皮带拖动多台生产机械,这种拖动方式的传动损耗大、效率低、控制不灵活、劳动条件差、容易发生事故,又无法满足某些生产机械的起、制动,正、反转及调速等方面的要求,故是一种陈旧的拖动方式。进入本世纪20~30年代这种拖动方式已基本被淘汰。继之而广泛采用的是“单电动机拖动”和“多电动机拖动”方式,也就是一台生产机械单独由一台电动机拖动或者是一台生产机械的多个工作机构分别由多台电动机拖动。这就使生产机械的结构大为简化,每台电机可以分别加以控制和调速,更好地满足了生产机械的工艺要求。

现在各种生产机械对电力拖动系统提出了更高的要求,例如可逆轧机、龙门刨床等,要求拖动电机快速地起、制动,快速地正、反转。连轧机、造纸机、印染机等要求多台电机协调旋转,对拖动系统的要求很高。一些精密机床的进给系统、机器人的执行机构等要求拖动系统的调速范围宽、调速精度高。又如电梯及一些提升机构要求平稳的起、制动,准确停车。这些对电力拖动系统的要求都要靠电动机和控制系统组成的自动电力拖动系统来完成。因此,现代的电力拖动系统不单是电动机拖动系统,还必须与上面的控制系统结合起来实现生产机械提出的各种工艺要求。

二、本课程的性质、任务及学习方法

在工业电气自动化专业中,《电机原理及拖动》是一门十分重要的专业基础课或称技术基础课。它有基础课的性质,因为它是学习后续课《自动控制系统》、《工业企业供电》、《电气控制技术》等课程的基础。不很好地掌握各种电机(包括变压器)的工作原理及各种电力拖动系统的静态、动态特性,不掌握被控对象的性能,就不能很好地组成各种自动控制系统。也学不好后续的各门专业课。《电机原理及拖动》的基础课性质就电机自身也有所体现,因为现代各种电机特别是各式各样的控制电机种类繁多,我们在电机原理中也不可能一一讲述,只能通过对几种典型电机分析来讲述各种电机的共同分析方法,这些方法不仅可以用来分析各种特殊电机,在分析控制系统中经常遇到的各种其他电磁器件(如电抗器、接触器、继电器等)时也可借鉴。《电机原理及拖动》除具有基础课的性质外,它也开始接触工业实际,开始带有专业课的性质。它与学习《电路》、《物理》、《高等数学》等基础课有所不同,因为电机毕竟是一个具体的工业设备,它要受很多条件的制约,它已经开始接触工程实际,从这门课开始就要逐渐地培养同学的工程观点和处理一些实际问题的工程分析方法。

电力拖动是工业电气自动化专业学生毕业后所要从事的主要工作之一。在现代化的工业企业当中,性能优良的自动电力拖动系统是必不可少的。这些系统中电动机是被控对象,是系统的核心部件,是工厂的主要动力设备。控制系统是通过控制电动机特性的控制,由电动机拖动生产机械来完成生产任务,满足各种不同工艺要求的。因此透彻地掌握各种电机(包括

变压器)的工作原理和各种电力拖动系统的静态、动态特性是十分重要的。

我们所从事的专业决定了我们是从使用的角度来研究电机的。因此,我们着重分析各种电机的工作原理和运行特性,而对电机设计和制造工艺涉及得不多。但为了更深入地掌握各种电机的原理和特性,对各种电机的结构还要有一定深度的了解。

《电机原理及拖动》这门课的学习方法也要注意它的专业基础课特点。它既有基础理论的学习,又有结合工程实际综合应用的性质。对于学习基础理论,学员已经比较熟悉,在此我们提一下它结合工程实际综合应用的特点。首先电机是一个包括电路、磁路及力学平衡系统的综合性装置。它的电路系统、磁路系统和力学平衡系统各有各的规律,但是在电机内部这几套系统又是相互关联、相互影响的。分析问题时必须综合考虑,也就是说要列写这些系统的联立方程式。孤立地只看某一系统,就有可能导致错误的结论。例如直流电动机减弱磁场时将使转速升高,如果不是综合分析,孤立地看,就有可能得出磁场减弱,从而转矩减小,以致转速下降的错误结论。其次,电机是一个实际的工业设备,在分析和计算电机的题目时不能脱离现场实际。在现场能够拿到的电机数据是电机铭牌和产品样本中所列的电机数据。有时在电机的计算题中给出这些数据,但在计算中并没全都用上,也可能需要的数据没有给出(例如在计算直流电机特性时,电枢电阻是必不可少的,但铭牌和产品样本中都没有),需要用其他工程方法估算。

在工程计算中,有时允许工程近似,但这又要具体问题具体分析。有时,在分析这个问题时被忽略的次要因素,在分析另一问题时它恰恰又是不可忽略的重要因素。例如,在计算电机特性时,有时可以忽略空载转矩,认为电磁转矩等于输出转矩;在分析同步电动机功角特性时,认为电磁功率等于输入功率,忽略了定子铜耗。而在分析电机效率时这些损耗恰恰是不可忽略的重要因素。

这些都说明,《电机原理及拖动》已经开始接触工程实际。要逐渐地培养学员的工程观点,使学员逐渐熟悉一些工程问题的处理方法。

第一章 直流电机原理

第一节 直流电机的用途、结构及基本工作原理

一、直流电机的用途

直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能；能快速起、制动，正、反转；能在十分宽广的范围内平滑而经济地调节速度。因此，在一些要求较高的电力拖动系统中，得到了广泛的应用。例如，在一些机床、轧钢机、电气牵引机车及起重设备中，都采用了直流电动机拖动。目前，虽然交流变频调速正在发展，在一些领域中已经取代了直流拖动系统，但直流电动机的应用仍占有较大的比重。

直流发电机是一种高质量的直流电源，常在化工、冶炼、交通运输等部门作为独立的直流电源。在一些要求较高的直流电力拖动系统中，由一台直流发电机给一台直流电动机单独供电，构成了所谓的“电动机—发电机组”简称M—G机组。当前，这些发电机虽然已经部分地被晶闸管、二极管等整流电源所代替，但从电源质量和可靠性等方面看，直流发电机仍有它的长处，有它的应用领域。

二、直流电机的基本工作原理

(一) 直流发电机的基本工作原理

图1-1a绘出了一台最简单的直流发电机模型。上下是两个固定的永久磁铁，上面是N极，下面是S极。在两极之间是一个转动的圆柱体铁心称为电枢。磁极与电枢铁心之间的缝隙称为空气隙。在电枢表面槽中安放着ab和cd两根导体，由ab和cd两根导体连成的线圈称为电枢绕组，线圈两端分别联到两个相互绝缘的半圆形铜换向片上，由换向片构成的圆柱体称为换向器，它随电枢铁心旋转。为引出电枢绕组的电流，在换向器上压紧两个电刷A和B，电刷固定不动。电刷和换向器的作用不单能把转动的电路与外面不转的电路连接起来，而且能把电枢绕组中的交流电整流成外电路的直流电。因此，也称它为整流器或整流子。

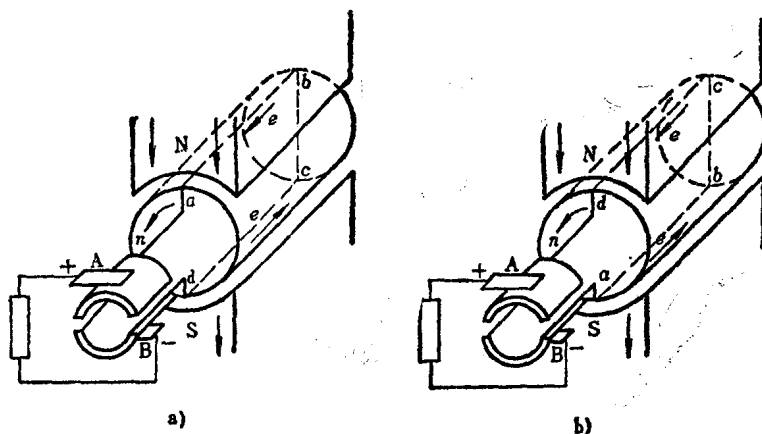


图1-1 直流发电机基本工作原理

下面我们就利用这个简单的模型来说明直流发电机的基本工作原理。

直流发电机把机械能转换成直流电能。当原动机拖动发电机逆时针方向旋转，转子（即

电枢)刚好转到图1-1a所示位置时,导体 ab 正好在N极下,导体 cd 正好在S极下。如果这时导体所在处的磁通密度为 B ,导体长度为 l ,导体切割磁场的速度为 v ,根据电磁感应定律可知导体感应电动势为 $e = Blv$ 。电动势方向由右手定则判定为由 d 到 c 和由 b 到 a ,如图1-1a中箭头所示。显然这时线圈的电动势 a 端为正, d 端为负。此时电刷A与线圈 a 端的换向片相接,极性为正;电刷B与线圈的 d 端换向片相接,极性为负。

当转子转过 180° ,转到图1-1b所示位置时,这时导体 ab 转到S极下, cd 转到N极下。根据右手定则可知,导体和线圈中的感应电动势改变了方向,线圈电动势 a 端为负, d 端为正,如图1-1b中箭头方向所示。但因电刷不随换向片旋转,A刷此时与转到N极下的导体 d 端所接换向片相接,所以A刷电动势仍为正极性,B刷此时与导体 a 端所接换向片相接,电动势仍为负极性。不难看出电枢连续旋转时,A刷引出的总是N极下导体的正电动势,B刷引出的总是S极下导体的负电动势。经过电刷和换向器把电枢绕组内感应的交流电动势变成了由电刷输出的极性不变的直流电动势。这就是直流发电机的基本工作原理。

现在我们来分析一下输出电动势波形。由式 $e = Blv$ 可知,如果线圈有效导体总长度 l 和切割速度 v 恒定不变,则感应电动势 e 正比于导体所在位置的磁通密度 B 。如果 B 沿定转子之间的气隙空间分布波形为 $B = f(\alpha)$ 。则线圈两端感应电动势 e 随时间变化的波形 $e = f(\omega t)$ 与 $B = f(\alpha)$ 有相同的形状。图1-2a绘出了 $B = f(\alpha)$ 和 $e = f(\omega t)$ 波形,两波形重合。

经过整流由电刷A、B输出的电动势波形则如图1-2b所示。可见直流发电机电枢绕组的感应电动势是交流电动势,但由电刷引出的是经过机械整流的直流电动势。

(二) 直流电动机的工作原理

直流电动机的结构与直流发电机一样。它把直流电能转换成机械能,带动轴上的生产机械做功。图1-3绘出了直流电动机的工作原理图。当电动机转到图1-3a所示位置时, ab 导体刚好在N极下, cd 导体在S极下。直流电流由电源正极经A刷流入电枢绕组,在线圈内部电流的方向是由 a 到 b ,由 c 到 d 。然后经B刷返回电源负极。如果导体所在处的磁通密度为 B ,导体长度为 l 、电流为 i ,根据电磁力

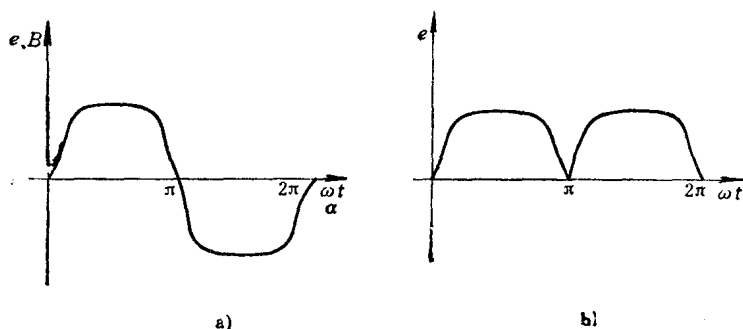


图1-2 电动势波形图
a) 气隙磁密与线圈电动势波形 b) 刷间电动势波形

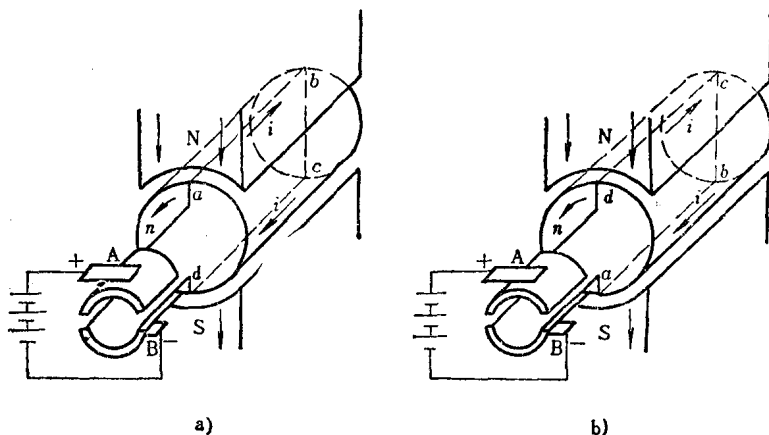


图1-3 直流电动机基本工作原理

定律可知,这时导体受力为 $f = Bli$ 。受力方向由左手定则判定,判定结果导体 ab 和 cd 受力产生的转矩均为逆时针方向。当电机转子转过 180° 时转到图1-3b所示位置,这时导体 cd 在N极下,导体 ab 在S极下。电流经A刷由 d 端流入线圈。在线圈内部方向是由 d 到 c 、由 b 到 a ,如图中箭头所示。根据左手定则仍可判定导体 ab 和导体 cd 受力产生的转矩为逆时针方向。由此可知,虽然导体内部电流方向变了,但受力产生的转矩方向不变,因此转子连续旋转,这就是直流电动机的基本工作原理。

三、直流电机的结构

图1-4绘出了我国生产的 Z_2 系列直流电机的纵向剖面图。它主要由定子(固定部分)和转子(旋转部分)两大部分组成。定子的作用是产生磁场和支撑电机。转子用来产生感应电动势和电磁转矩。下面我们介绍定、转子的主要部件。

(一) 定子

1. 主磁极 图1-5是四极直流电机的横剖面图。主磁极的铁心包括极身和极靴(极掌),通常由薄钢板冲压后叠成。磁极用螺钉固定在机壳上,机壳也是定子磁轭。在磁极上套有励磁绕组,用来产生磁场。主磁极数总是偶数,且N、S极相间出现。极靴与转子之间的气隙是不均匀的,极轴处气隙短,极靴两侧气隙稍长,以便使气隙圆周上有较好的磁通密度波形。

2. 换向极 换向极的结构与主磁极相似,由铁心和绕组组成。铁心由薄钢板或整块钢制成,安放在主磁极之间(见图1-5),用螺钉固定在机壳上。换向极的数目一般与主磁极相等,在小直流电机中,换向极数也可以是主磁极数的 $1/2$,个别小电机不装换向极。换向极的作用是改善换向,消除或减小电刷与换向器之间的火花。

3. 机壳 机壳也称机座,由铸钢铸成或由厚钢板焊接而成,机壳底部焊上或铸上底脚,以便安装电机之用。机壳除支撑电机之外也是主磁路的一部分,称为定子磁轭。

4. 电刷装置 如图1-6所示,电刷装置的作用是把转动的电枢电路与不转的外电路接通。电刷装置是固定不动的,它由电刷、刷握、握杆、握杆座及铜丝辫等零部件组成。电刷放在刷握中由弹簧把电刷压在换向器表面上。刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,彼此之间相互绝缘。整个电刷座装在端盖或轴承内盖上,可以在一定范围内移动,用来调整电刷位

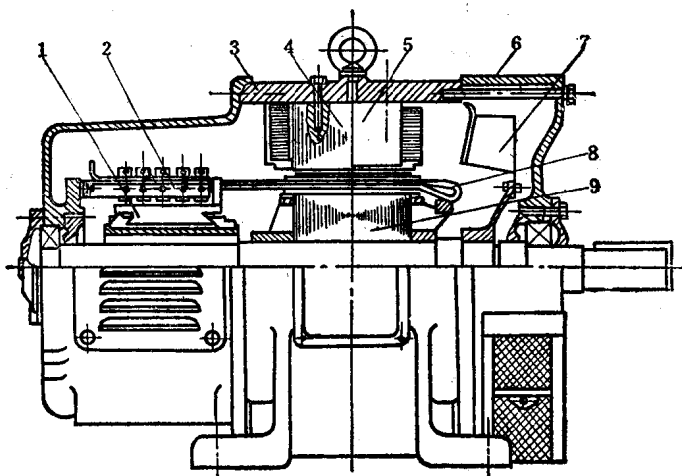


图1-4 Z_2 -92型直流电机剖面图

1—换向器 2—电刷装置 3—机座 4—主磁极 5—换向极
6—端盖 7—风扇 8—电枢绕组 9—电枢铁心

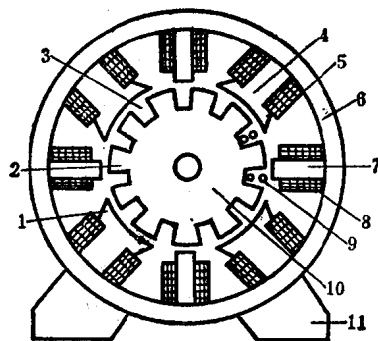


图1-5 直流电机剖面图

1—极掌 2—电枢齿 3—电枢槽 4—极身
5—励磁绕组 6—定子磁轭 7—换向极
8—换向极绕组 9—电枢绕组 10—电枢磁轭
11—底脚

置。

(二) 转子

1. 电枢铁心 电枢铁心是主磁路的一部分, 为减少旋转时因磁通方向变化引起的铁心损耗, 常由涂有绝缘漆的0.5mm厚硅钢片叠压而成。电枢铁心槽中安放电枢绕组。

2. 电枢绕组 电枢绕组是直流电机主要电路, 是直流电机实现机电能量转换的关键部件。当电枢在磁场中旋转时电枢绕组中产生感应电动势; 当电枢绕组中流过电流时, 它在磁场中受力产生电磁转矩。电枢绕组由绕组元件组成, 绕组元件也称线圈, 安放在铁心槽中。每个线圈有两个端头, 焊接在换向片上, 按一定规律连成电枢绕组。

3. 换向器 换向器由许多换向片组成, 换向片间用云母绝缘, 整体成圆筒形。换向片靠一种燕尾槽结构夹紧, 如图1-7所示。它是直流电机的一个十分重要的部件, 也是一个薄弱环节。

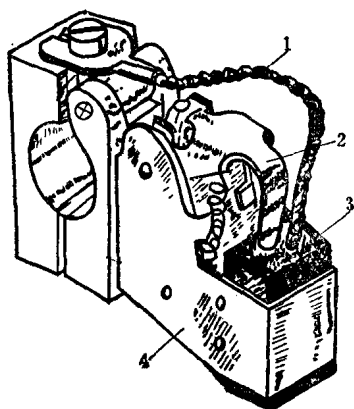


图1-6 直流电机的电刷装置
1—铜丝辫 2—弹簧 3—电刷 4—刷握

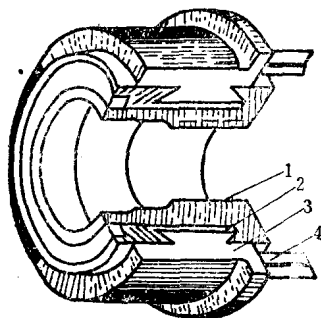


图1-7 换向器结构
1—V形套筒 2—云母环 3—换向片 4—连接片

以上介绍了直流电机的主要部件, 一些次要部件不再一一叙述。

四、直流电机的铭牌数据及主要系列

(一) 铭牌数据及额定值

直流电机的额定值是电机制造厂按国家标准, 根据电机设计及实验得出的电机在正常运行条件下最合适的技术数据。电机按所给额定数据运行, 可以保证可靠工作, 并有良好性能。电机的主要额定数据标在电机的铭牌上, 有额定功率 P_N (kW)、额定电压 U_N (V)、额定电流 I_N (A)、额定转速 n_N (r/min), 还标出励磁方式、绝缘等级和额定温升等。

在直流电机的额定数据中要注意额定功率的意义, 它是指电机的额定输出功率。对于发电机, $P_N = U_N I_N$ 是输出的电功率; 对于电动机, $P_N = U_N I_N \eta_N$ 是额定输出机械功率, 式中 η_N 是额定效率。

(二) 我国生产的直流电机主要系列

当前我国生产的直流电机主要有以下系列,

Z系列一般用途直流电动机

ZF系列一般用途直流发电机

ZZJ系列冶金、起重用直流电动机

ZT系列用于恒功率宽调速的直流电动机

ZQ系列电力机车牵引用直流电动机

ZH系列船用直流电动机

ZA系列矿用防爆直流电动机

还有其它系列直流电机，可参看有关的产品目录。

第二节 直流电机的空载磁场

由直流电机工作原理可知，直流电机在正常工作时必须有磁场，电枢绕组切割磁场才能产生感应电动势。电枢电流在磁场中受力才能产生电磁转矩，从而才能实现机电能量的转换。因此，要弄清直流电机的工作原理和特性，就必须对直流电机的磁场情况有一个正确的了解。为此，我们先来分析直流电机空载时的磁场，它是由励磁绕组通入励磁电流产生的，是直流电机中最主要的磁场。其它绕组流过电流产生的磁场对它的影响，我们将在后面陆续加以介绍。

一、直流电机的磁路、磁通和磁化曲线

图1-8是一台四极直流电机空载磁场的示意图。空载时，只有主磁极的励磁绕组流过励磁电流产生的磁场。一个主磁极的磁动势为 $F = N_f I_f$ ，式中 N_f 是励磁绕组的匝数， I_f 是直流励磁电流。这一磁动势在磁路中产生的磁通可分为主磁通 Φ 和漏磁通 Φ_σ 两部分。

主磁通 Φ 走主磁路。其闭合回路的路线如下：从N极铁心出发，经气隙进入电枢齿部，然后进入电枢轭，经相邻的S极下电枢齿，再经气隙进入S极铁心，然后由定子轭回到N极形成闭合回路。主磁通与电枢绕组交链，占总磁通的80%以上。

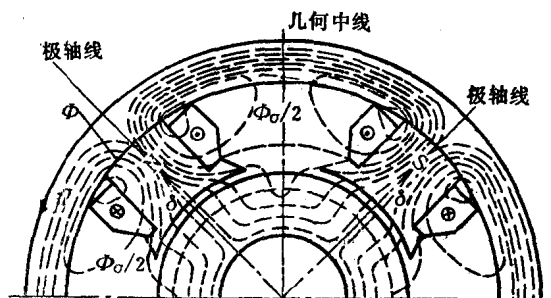


图1-8 直流电机空载时的磁场分布

漏磁通 Φ_σ 走漏磁路闭合，不进入电枢，仅交链励磁绕组自身，不与电枢绕组交链，不参加机电能量的转换，不能在电枢绕组中产生感应电动势，也不能产生电磁转矩，只增加磁极的饱和程度。漏磁通一般不超过总磁通的20%。

下面我们仅对主磁路进行分析。对于主磁路中任何一条闭合磁力线所走的路径，应用全电流定律得，磁场强度 H 的线积分等于该闭合回路所包围的总电流。即

$$\oint H dl = \Sigma i \quad (1-1)$$

在电机中，总是把场的问题简化为路的问题来处理。因此全电流定律可以简化成磁路第二定律，即

$$\Sigma H l = \Sigma N i \quad (1-2)$$

式中， N 为线圈匝数。

式(1-2)具体可以写成：

$$2H_\delta \delta + 2H_i l_i + H_{r,i} l_{r,i} + 2H_p l_p + H_{s,i} l_{s,i} = 2N_f I_f \quad (1-3)$$

式中， $2H_\delta \delta$ 为两段气隙的磁压降； $2H_i l_i$ 为两段电枢齿磁压降； $H_{r,i} l_{r,i}$ 为转子轭磁压降； $2H_p l_p$