



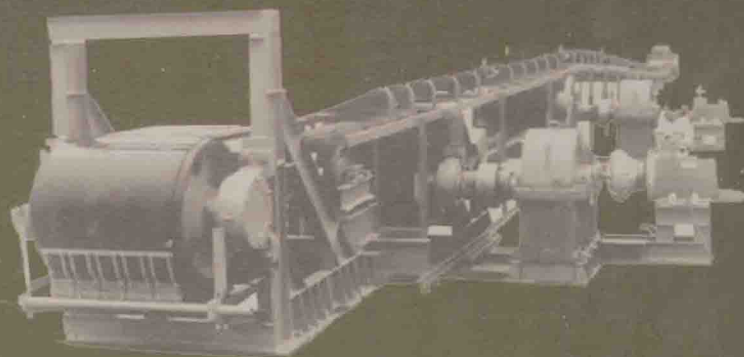
普通高等教育农业部“十二五”规划教材

电机与

DIANJI YU TUODONG

拖动

魏恩甲 张 宁 程良鸿 主编



中国农业大学出版社

CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS

普通高等教育农业部“十二五”规划教材

电机与拖动

魏恩甲 张 宁 程良鸿 主编

中国农业大学出版社

内 容 简 介

本书分为上篇和下篇。上篇为电机学，主要包括电动机基础知识，变压器、异步、同步和直流电机的结构类型、工作原理和特性等基本理论，以及控制电机的原理及应用等。下篇为电力拖动，包括电力拖动系统的运动方程、负载特性，直流、三相异步和同步电动机的启动、调速和制动方法，以及拖动系统中电动机类型的选择。本书既可作为普通高等农业院校农业工程学科专业基础课教材，也可作为非电专业大学生和农村电气从业人员的指导和参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动/魏恩甲, 张宁, 程良鸿主编. —北京: 中国农业大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5655-1122-6

I. ①电… II. ①魏…②张…③程… III. ①电机 ②电力传动 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 285432 号

书 名 电机与拖动
作 者 魏恩甲 张 宁 程良鸿 主编

策划编辑 张秀环
封面设计 郑 川
出版发行 中国农业大学出版社
社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号
电 话 发行部 010-62818525, 8625
编辑部 010-62732617, 2618
网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>
经 销 新华书店
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司
版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
规 格 787×1 092 16 开本 24.25 印张
定 价 51.00 元

责任编辑 洪重光
责任校对 王晓凤
邮政编码 100193
读者服务部 010-62732336
出 版 部 010-62733440
e-mail cbsszs @ cau. edu. cn

图书如有质量问题本社发行部负责调换

编写人员

主 编 魏恩甲 张 宁 程良鸿

副主编 陈松柏 王秀丽 石敏惠

编 者 (按姓氏拼音排序)

陈松柏 程良鸿 李妙祺 刘 利 刘明丹

石敏惠 王秀丽 魏恩甲 张 宁

前 言

依据农业部制定的《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2000—2020）》和《农业部“十二五”教材建设规划》指导纲要，根据高等农业院校农业工程学科的本科生的实际需要，把电机学的经典理论知识与电力拖动的现代控制方法有机地结合在一起，从而增加了教材的科学性、知识性、系统性和实用性。它既可作为普通高等农业院校农业工程专业基础课教材，也可作为非电专业大学生和农村电气从业人员的指导和参考用书。

“电机与拖动”课程属农业工程专业基础课，主要适用于电气工程及自动化、机电一体化、农业机械化工程及自动化、热能与动力工程、水利水电工程专业基础课。

本教材总结长期教学的经验，在分析研究了各类不同的教材的基础上，吸收现有教材的优点，针对农业高等院校工程类普通在校本科学生的知识结构、知识面进行编写，从方式和方法上进行探索，营造良好的教育环境去发展创造力，培养学生对电机与拖动课程的兴趣。本教材坚持教材的理论完整性和逻辑性，着重对传统电机的基本原理、新型电机的设计理念和控制方法进行系统的讲解，同时，还吸收近年来电机与拖动理论在农业现代工程领域方面的研究成果。教材每章还附有本章要点、本章小结和思考题与习题。

《电机与拖动》全书分为上、下两篇。上篇为电机学，电机学主要从电、磁、机械三个方面入手，分析电机内部的电磁过程，包括电动机基础知识，变压器、异步电机、同步电机和直流电机的结构类型、工作原理、工作特性等基本理论，以及控制电机的原理及应用等。下篇为电力拖动，主要包括电力拖动系统的运动方程，电力拖动系统的负载特性，直流电动机、三相异步和同步电动机的启动、调速和制动方法，以及在拖动系统中电动机类型的选择。

本书由西北农林科技大学、华南农业大学、四川农业大学、沈阳农业大学、甘肃农业大学、河北农业大学、河南农业职业学院以及相关电力工程实践部门联合编写完成。第0、5、6、9、10章由张宁编写，第1章由石敏惠编写，第2章由陈松柏、刘明丹编写，第3章由程良鸿编写，第4章由王秀丽编写，第7章由刘利编写，第8章由李妙祺编写。全书由魏恩甲统稿。在本书编写过程中，许景辉、何自立、甘学涛、张巍、陈春玲、王转卫、周玉宏等同志给予了大力的支持与帮助，在此表示感谢。

由于编者学识有限，书中难免存在失误和疏漏之处，敬请广大读者不吝批评指正。

编 者

2014年10月

主要物理量符号及含义

A 面积; A 相

a 交流绕组并联支路数

$a_{\text{=}}$ 直流绕组并联支路对数

B 磁通密度; B 相

B_{av} 平均磁通密度

B_{a} 电枢反应磁场磁通密度

B_{ad} 直轴电枢磁场磁通密度

B_{aq} 交轴电枢磁场磁通密度

B_{fl} 励磁磁场基波磁通密度

B_{m} 最大磁通密度

B_{δ} 气隙磁通密度

B_{ν} ν 次谐波磁通密度

b 宽度; 弧长

b_{k} 换向片宽度

C 常数; 电容; C 相

C_{e} 电势常数

C_{T} 转矩常数

D 直径

E 电势 (交流表示有效值)

E_{a} 电枢反应电势

E_{ad} 直轴电枢反应电势

E_{aq} 交轴电枢反应电势

E_{φ} 相电势

E_{m} 最大电势

E_{cl} 导体有效边基波电势

E_{tl} 匝基波电势

E_{yl} 短距基波电势 (线圈基波电势)

E_{ql} q 个线圈基波电势

E_0 空载电势、励磁电势

E_1 、 E_2 一、二次侧电势

$E_{1\sigma}$ 、 $E_{2\sigma}$ 一、二次侧漏电势

d 轴 直轴

e 电势瞬时值

e_{0A} 、 e_{0B} 、 e_{0C} 三相对称的交变空载电势瞬时值

e_L 自感电势

e_M 互感电势

F 磁势

F_a 电枢磁势

F_{ad} 直轴电枢反应电势

F_{aq} 交轴电枢反应电势

F_δ 气隙磁势

F_1 、 F_2 一、二次侧磁势

F_m 激磁磁势

F_0 空载磁势

F_{f1} 励磁基波磁势

F_{y1} 短距基波磁势

F_{q1} q 个线圈基波磁势

F_φ q 个线圈 ν 次谐波磁势

$F_{\varphi 1}$ 单相绕组基波磁势

F_φ 单相绕组 ν 次谐波磁势

f 频率; 力; 磁势的瞬时值

f_N 额定频率

f_1 、 f_2 感应电机的定、转子频率

f_ν ν 次谐波频率

H 磁场强度

h 高度

I 电流 (交流表示有效值); 直流电机的线电流; 同步发电机电枢电流

I_1 、 I_2 一、二次侧电流

I_a 直流电机的电枢电流

I_f 励磁电流

I_k 短路电流

I_N 额定电流

I_{st} 启动电流

I_L 负载电流

I_m 激磁电流

I_0 空载电流; 零序电流

I_{f0} 励磁空载电流

I_μ 磁化电流

I_d 同步电机电枢电流的直轴分量 (直轴电流)

I_q 同步电机电枢电流的交轴分量 (交轴电流)

I_+ 正序电流

I_- 负序电流

i 电流瞬时值

J	转动惯量
K	换向片数
k	变压器的电压比; 系数
k_i	电流比
k_{y1}	电势或磁势基波的线圈短距系数
k_{q1}	电势或磁势基波的线圈分布系数
k_{w1}	电势或磁势基波的绕组系数
$k_{y\nu}$	电势或磁势 ν 次谐波的线圈短距系数
$k_{q\nu}$	电势或磁势 ν 次谐波的线圈分布系数
$k_{w\nu}$	电势或磁势 ν 次谐波的绕组系数
k_c	短路比
k_m	过载能力倍数
k_{st}	启动能力倍数
L	自感; 电感
$L_{1\sigma}$ 、 $L_{2\sigma}$	一、二次侧漏电感
l	长度; 导体有效长度
M	互感
m	相数; 物体的质量
m_1 、 m_2	感应电机的定、转子相数
N	电枢导体数 (每相串联匝数); 匝数
N_1 、 N_2	变压器一、二次侧绕组匝数
N_y	元件匝数
n	转速
n_1	同步转速, 定子基波旋转磁场的转速
n_2	转子基波旋转磁场相对转子的转速
n_ν	ν 次谐波旋转磁场的转速
n_0	空载转速
Δn	转速差
P	功率
P_N	额定功率 (额定容量)
P_e	电磁功率
P_m	机械功率
P_1 、 P_2	输入、输出功率
P_0	空载功率 (空载损耗)
p	损耗; 极对数
p_{Cu}	铜耗
p_{Fe}	铁耗
p_{mec}	机械损耗
p_{ad}	杂散损耗 (附加损耗)

- q 每极每相槽数
- q 轴 交轴
- R 电阻
- R_m 激磁电阻, 磁阻
- R_1 、 R_2 一、二次侧绕组电阻
- R_a 电枢电阻
- R_f 励磁绕组电阻
- R_k 短路电阻
- R_{st} 启动电阻
- R_L 负载电阻
- S 视在功率; 元件数
- S_N 额定视在功率 (变压器容量)
- s 转差率
- s_N 额定转差率
- s_m 临界转差率
- s_+ 转子对正转磁场的转差率
- s_- 转子对反转磁场的转差率
- T 转矩; 时间常数
- T_N 额定转矩
- T_e 电磁转矩
- T_m 机械转矩
- T_{st} 启动转矩
- T_1 原动机转矩; 输入转矩
- T_2 负载转矩; 输出转矩
- T_0 空载转矩
- T_{max} 最大转矩
- T_{e+} 正序电磁转矩
- T_{e-} 负序电磁转矩
- t 时间
- t_1 齿距
- T_a 定子绕组的时间常数
- T'_d 直轴瞬态的时间常数
- T''_d 直轴超瞬态的时间常数
- U 电压
- U_N 额定电压
- U_f 励磁电压
- U_φ 相电压
- U_l 线电压
- U_+ 正序电压

U_-	负序电压
U_0	零序电压
U_k	短路电压
u	电压瞬时值; 虚槽数
u_k	短路电压 (阻抗电压)
Δu	电压调整率
$2\Delta u_b$	每对电刷电压降
v	线速度
W	功; 能 (储能)
W_m	磁能密度的体积分
w_m	体能密度
X	电抗
X_a	电枢反应电抗
X_1 、 X_2	一、二次侧电抗
$X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$	一、二次侧漏电抗
X_m	激磁电抗
X_k	短路电抗
X_t	同步电抗
X_d	直轴同步电抗
X_q	交轴同步电抗
X_{ad}	直轴电枢反应电抗
X_{aq}	交轴电枢反应电抗
X'_d	直轴瞬变电抗
X''_d	直轴超瞬变电抗
X''_q	交轴超瞬变电抗
X_+	正序电抗
X_-	负序电抗
X_0	零序电抗
y	绕组合成节距
y_1	第一节距
y_2	第二节距
y_k	换向节距
Z	电枢槽数; 阻抗
Z_1 、 Z_2	一、二次侧漏阻抗
Z_k	短路阻抗
Z_L	负载阻抗
Z_+	正序阻抗
Z_-	负序阻抗
Z_0	零序阻抗

- α 角度; 电角度; 系数
 β 角度; 系数
 δ 气隙长度
 η 效率
 η_N 额定效率
 $\eta_{\max}$ 最大效率
 θ 角度; 温度
 Δ 磁导
 λ 单位面积磁导
 μ 磁导率
 μ_0 空气磁导率
 μ_{Fe} 铁心磁导率
 ν 谐波次数
 τ 极距
 Φ 磁通; 每极磁通; 变压器主磁通
 Φ_0 空载磁通
 Φ_a 电枢反应磁通
 Φ_σ 漏磁通
 Φ_m 磁通最大值
 Φ_{ad} 直轴电枢反应磁通
 Φ_{aq} 交轴电枢反应磁通
 ϕ 磁通瞬时值
 $\phi_{1\sigma}$ 、 $\phi_{2\sigma}$ 一、二次绕组漏磁通瞬时值
 φ 相角; 功率因数角; 速度的平滑系数
 φ_0 空载功率因数角
 φ_k 短路功率因数角
 Ψ 磁链
 ψ 相位角
 Ω 机械角速度
 Ω_1 同步机械角速度
 Ω 角频率; 电角速度
 右上角标“*”表示标么值
 右上角标“'”表示折算值

目 录

上篇 电 机 学

0 绪论	3
0.1 电机在国民经济中的作用	3
0.2 电机的基本特点和主要类型	3
0.3 国内外电机工业发展概况	4
0.4 本课程的性质和任务	5
0.5 磁路	7
思考题与习题	21
1 直流电机	23
1.1 直流电机的工作原理及结构	23
1.2 直流电机的基本理论	32
1.3 直流发电机的运行特性	42
1.4 直流电动机的工作特性	46
本章小结	52
思考题与习题	53
2 变压器	55
2.1 变压器的结构、分类与额定值	55
2.2 变压器的工作原理	59
2.3 三相变压器	75
2.4 三相变压器的不对称运行	83
2.5 特殊变压器	89
2.6 变压器的动态分析	99
本章小结	104
思考题与习题	105
3 交流旋转电机的共同问题	107
3.1 交流旋转电机的绕组	107
3.2 交流旋转电机的感应电势	117
3.3 交流绕组产生的磁势	124
本章小结	133
思考题与习题	135
4 异步电机	137
4.1 三相异步电机的基本理论	137
4.2 三相异步电机的运行原理	141

4.3 单相异步电动机	163
本章小结	167
思考题与习题	167
5 同步电机	171
5.1 同步电机的原理、结构及额定值	171
5.2 同步发电机的基本理论	178
5.3 同步发电机的并网运行	194
5.4 三相同步电动机与补偿机	201
5.5 同步发电机的不正常运行*	204
5.6 控制电机*	220
本章小结	235
思考题与习题	237

下篇 电力拖动

6 电力拖动系统的动力学基础	243
6.1 电力拖动系统的组成和分类	243
6.2 电力拖动系统的运动方程式	244
6.3 工作机构转矩和飞轮矩的折算	245
6.4 生产机械的负载转矩特性	251
6.5 电力拖动系统的稳定运行条件	253
6.6 电力拖动系统调速的基本概念	255
本章小结	257
思考题与习题	258
7 直流电动机的电力拖动	260
7.1 他励直流电动机的机械特性	260
7.2 他励直流电动机的启动	263
7.3 他励直流电动机的调速	267
7.4 直流电动机的制动	271
7.5 他励直流电动机的四象限运行	280
7.6 串励直流电动机的电力拖动	281
本章小结	283
思考题与习题	283
8 三相异步电动机的电力拖动	286
8.1 三相异步电动机机械特性的三种表达式	286
8.2 三相异步电动机固有机械特性和人为机械特性	291
8.3 三相异步电动机的启动	295
8.4 三相异步电动机的调速	309
8.5 三相异步电动机的制动	324
8.6 三相异步电动机的各种运行状态	334

本章小结.....	334
思考题与习题.....	335
9 同步电动机的电力拖动	337
9.1 同步电动机的机械特性	337
9.2 同步电动机的启动	338
9.3 同步电动机的调速和制动	340
本章小结.....	341
思考题与习题.....	341
10 电力拖动系统电动机的选择.....	342
10.1 电动机选择基本原则.....	342
10.2 电动机的发热和冷却.....	348
10.3 电动机工作制的分类.....	351
10.4 电动机功率的选择.....	353
10.5 现代农业生产中的电机控制系统*	361
本章小结.....	367
思考题与习题.....	368
参考文献.....	370

上篇

电 机 学

- 0 绪论
- 1 直流电机
- 2 变压器
- 3 交流旋转电机的共同问题
- 4 异步电机
- 5 同步电机

0.1 电机在国民经济中的作用

电机是实现能量转换和信号传递的电磁机械装置,在现代社会中起着极为重要的作用。电机包括变压器和旋转电机两类,旋转电机又分为发电机和电动机。电机是电能生产、传输和分配的主要设备。在发电厂,发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动,这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的原子能等转换为机械能输入到发电机,由发电机将机械能转换为电能,经过输电网的升压变压器远距离输送到各用电区域,又通过不同电压等级的配电网的降压变压器将电压降低,供给城市和乡村的工矿企业、事业单位、家庭等各种场合使用。

电动机即可以作为电能转换为机械能的电力机械,又可以在控制系统中作为执行、检测、放大和解算元件。在工农业生产和国民经济的各个领域,作为电力机械的电动机已广泛应用于生产机械行业的工作设备,交通运输业的电力机车、电车,冶金行业的锅炉、轧钢机,各类企业的通风、起吊、传送,农业中的电力排灌、农副产品加工。作为控制电机和微电机,由于其精度高、响应快,也被用于医疗器械、家用电器、自动化加工流程控制、计算机、自动记录仪表、人造卫星发射和飞行控制、雷达和火炮自动定位等场合。例如,一个现代企业需要几百台以至几万台各种不同的电动机;高级汽车中有 50 多台电机,豪华轿车中电机甚至多达近百台,用以满足控制燃料、显示有关装置状态和改善乘车感觉的需要;在现代工业化国家的家庭中,家用电器和一些高档消费品,使用的电机可达 40 多台。

随着社会的发展和科学技术的进步,特别是近年来大功率电力电子技术、微电子技术、变频技术、超导技术、磁流体发电技术、压电技术以及计算机技术的迅猛发展,已研制出多种交流电动机系统和变频供电一体化电机,以达到性能优良、效率高的调速性能,为新型电机技术研究与发展开辟了更广阔的前景。

0.2 电机的基本特点和主要类型

电机种类很多,其工作原理都是以电磁感应为基础的,利用导磁和导电材料构成磁路和电路,相互进行电磁感应,产生电磁功率和电磁转矩,以达到能量转换的目的。

电机的分类方法很多,按照电机在能量转换和信号传递中所起作用的不同,电机可以分为发电机、电动机、变压器(含变流器、变频器、移相器)、控制电机。发电机是将机械功率转换为电功率。电动机是将电功率转换为机械功率。变压器、变流器、变频器、移相器都将一种形式的电能转换为另一种形式的电能。其中,变压器用于改变交流电的电压;变流器用于改变交流电流的形式,如将交流变为直流;变频器用于改变交流电的频率;移相器用于改变交流电的相位。控制电机在自动控制系统中起检测、放大、执行和校正作用,作为控制系统的控制元件。