



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机与拖动基础(少学时)

邱阿瑞 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电机与拖动基础(少学时)

邱阿瑞 主编

TM3
74



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础:少学时/邱阿瑞主编. —北京:高等教育出版社, 2006.5

ISBN 7-04-019343-4

I. 电... II. 邱... III. ①电机-高等学校-教材 ②电力传动-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 032631 号

策划编辑 金春英 责任编辑 曲文利 封面设计 于文燕 责任绘图 朱 静
版式设计 王 莹 责任校对 杨凤玲 责任印制 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京地质印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 张	19.5	印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
字 数	360 000	定 价	24.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19343-00

内 容 提 要

本书把“电机学”与“电力拖动基础”两门课的内容做了有效整合。在课程学时大为压缩的情况下,本书编写时紧紧围绕直流、交流电力拖动来安排内容。力求做到内容精选,重点突出,物理概念清晰。既保留经典的理论体系,又吸收新的科技成果。

全书主要内容共分8章。在前面的绪论中给出了电机与拖动的基本概念;第1章重点介绍电力拖动系统的运动方程式;第2章主要讨论直流电动机的基本原理与特性;第3章介绍直流电动机的电力拖动,即直流电动机的起动、调速和制动的特性;第4章讨论交流电动机共同的基础理论问题,即磁动势、绕组和感应电动势等;第5章介绍异步电动机的原理和机械特性;第6章讨论异步电动机的起动、调速和制动等拖动内容;第7章介绍同步电动机的原理、起动与调速,以及永磁同步电动机;第8章简要地介绍电力拖动系统中电动机的选择;附录I、II中分别是磁路的基本定律和变压器原理的有关内容。同时,在各章后面附有思考题与习题,供复习和练习用。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校各类自动化专业、电气类专业以及机电一体化专业等的教材或参考书,亦可供有关科技人员学习参考。

与主教材配套的《电机与拖动基础(少学时)思考题与习题解答》将与主教材同期出版。

前 言

为适应 21 世纪全球经济一体化对人才的知识、能力和素质的要求,人才培养模式的转变势在必行。随着高等教育教学改革的深入,整个课程体系与结构发生了较大的变化。为适应这一教学改革的变化,按照拓宽面向、更新知识、减少学时、精选内容的原则,需要对“电机与拖动基础”教材原有的体系、结构与内容进行重新整合。目前,现有的“电机与拖动基础”教材是按长学时的课程体系来编写的。即使现在讲课学时减少了,但使用的教材仍为传统的长学时经典教材,只是所用教材的许多内容不讲而已,甚至出现所用教材有将近一半内容不讲的现象。目前教材中有的内容叙述过于详细,篇幅过长,有的内容已经陈旧,因此,为了适应教学改革和课程学时大为削减的实际情况,需要编写一本少学时的“电机与拖动基础”教材。

本书是传统的“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的有机结合。电力拖动是指利用电动机来拖动生产机械使其运转,按照电动机的种类不同,电力拖动分为直流电力拖动和交流电力拖动,本书紧紧围绕直流电力拖动与交流电力拖动的主线来安排课程内容。因此,本书讨论电机的原理和特性时,主要讨论直流电动机和交流电动机的原理和特性,不再介绍发电机的原理及特性。磁路的基本定律和变压器的有关知识放在附录 I、II 中供自学参考,如果某些院校认为需要讲授,也可安排少量学时来讲解。本书编写时力求做到内容精选,重点突出,物理概念清楚。既保留经典理论体系,又吸收新的科技成果。使学生在学完本教材之后可对电机与电力拖动知识有比较全面和系统的了解和掌握。

本书主要内容部分共分 8 章。绪论中给出了电机与拖动的基本概念;第 1 章重点介绍电力拖动系统的运动方程式;第 2 章主要讨论直流电动机的基本原理与特性;第 3 章介绍直流电动机的电力拖动,即直流电动机的起动、调速和制动的特性;第 4 章讨论交流电动机共同的基础理论问题,即磁动势、绕组和感应电动势等;第 5 章介绍异步电动机的原理和机械特性;第 6 章讨论异步电动机的起动、调速和制动等拖动内容;第 7 章介绍同步电动机的原理、起动与调速以及永磁同步电动机;第 8 章简要地介绍电力拖动系统中电动机的选择;附录 I、II 中分别是磁路的基本定律和变压器原理的有关内容。同时,在各章后面附有思考题与习题,供复习和练习用。

本书由邱阿瑞教授主编,负责全书的编写和整理工作,徐蕴婕参与索引和英文目录的编写,黄宇淇参与本书大部分插图的绘制。本书由罗应立教授审阅,提

出了许多宝贵的意见,对此编者表示衷心的感谢。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校各类自动化专业、电气工程专业以及机电一体化专业的教材或参考书,亦可供有关科技人员学习参考。

与主教材配套的《电机与拖动基础(少学时)思考题与习题解答》将与主教材同期出版。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编者

2005年7月于清华园

目 录

绪论	1
0.1 电机与拖动的基本概念	1
0.2 本课程的性质和内容	2
0.3 本课程内容的学时安排	2
第1章 电力拖动系统动力学	4
1.1 电力拖动系统的运动方程式	4
1.2 负载转矩和飞轮矩的折算	5
1.2.1 旋转运动	6
1.2.2 平移运动	7
1.2.3 升降运动	8
1.3 负载转矩特性	11
1.3.1 恒转矩负载特性	11
1.3.2 通风机与泵类的负载特性	12
1.3.3 恒功率负载特性	13
思考题	13
习题	14
第2章 直流电动机的原理及特性	16
2.1 直流电动机的基本结构和工作原理	16
2.1.1 基本结构	16
2.1.2 励磁方式	19
2.1.3 额定数据	19
2.1.4 工作原理	20
2.2 直流电机的电枢绕组	22
2.2.1 单叠绕组	23
2.2.2 单波绕组	24
2.3 直流电机空载和负载时的磁场	26
2.3.1 直流电机的空载磁场	26
2.3.2 负载时直流电机的磁场	28
2.4 感应电动势和电磁转矩	32
2.4.1 电枢绕组的感应电动势	32
2.4.2 电磁转矩	33
2.5 直流电动机稳态运行时的基本方程式和功率关系	34
2.5.1 基本方程式	34

2.5.2 功率关系	35
2.6 直流电动机的机械特性	36
2.6.1 他励直流电动机的机械特性	36
2.6.2 串励直流电动机的机械特性	41
2.7 电力拖动系统稳定运行条件	42
思考题	44
习题	45
第3章 直流电动机的电力拖动	46
3.1 直流电动机的起动	46
3.1.1 直接起动	46
3.1.2 电枢回路串电阻起动	46
3.1.3 降电压起动	47
3.2 直流电动机的调速	48
3.2.1 电枢串电阻调速	48
3.2.2 改变电枢电源电压调速	49
3.2.3 弱磁调速	50
3.2.4 调速的性能指标	52
3.3 直流电动机的制动	56
3.3.1 能耗制动	57
3.3.2 反接制动	59
3.3.3 倒拉反转制动	61
3.3.4 回馈制动	61
3.4 直流电动机的各种运行状态	65
3.4.1 电动运行状态	67
3.4.2 制动运行状态	67
思考题	68
习题	69
第4章 交流电动机的磁动势、绕组和感应电动势	71
4.1 交流电机绕组产生的磁动势	71
4.1.1 单相集中整距绕组的磁动势	71
4.1.2 三相集中整距绕组的磁动势	80
4.2 交流电动机绕组	86
4.2.1 三相单层整距分布绕组	86
4.2.2 三相双层短距分布绕组	91
4.3 两相绕组产生的磁动势	97
4.3.1 圆形旋转磁动势	97
4.3.2 椭圆旋转磁动势	99
4.4 交流电机绕组的感应电动势	101

4.4.1 整距线圈的感应电动势	101
4.4.2 短距线圈的感应电动势	105
4.4.3 整距分布绕组的感应电动势	107
4.4.4 短距分布绕组的感应电动势	108
思考题	110
习题	111
第5章 三相异步电动机的原理和特性	113
5.1 三相异步电动机的基本结构与工作原理	113
5.1.1 基本结构	113
5.1.2 工作原理	116
5.1.3 额定数据	117
5.2 异步电动机的基本方程式和等效电路	118
5.2.1 转子不转时的异步电动机	118
5.2.2 转子旋转时的异步电动机	132
5.2.3 笼型转子的极数、相数和参数的折合	137
5.2.4 简化等效电路	139
5.3 异步电动机的功率和转矩	140
5.3.1 三相异步电动机的功率	140
5.3.2 三相异步电动机的转矩	143
5.4 异步电动机的机械特性	145
5.4.1 机械特性的参数表达式	145
5.4.2 机械特性的实用公式	148
5.4.3 固有机械特性和人为机械特性	150
5.5 异步电动机的工作特性	155
思考题	156
习题	157
第6章 三相异步电动机的电力拖动	159
6.1 笼型异步电动机的起动	159
6.1.1 在额定电压下直接起动	160
6.1.2 星-三角(Y- Δ)降压起动	161
6.1.3 自耦变压器降压起动	162
6.1.4 定子回路串接电抗器或电阻降压起动	164
6.1.5 软起动	166
6.1.6 高起动转矩异步电动机	169
6.2 绕线转子异步电动机的起动	171
6.2.1 转子回路串电阻起动	172
6.2.2 转子串接频敏变阻器起动	173
6.3 异步电动机的调速	174

6.3.1 变频调速	175
6.3.2 变极调速	178
6.3.3 转子串电阻调速	181
6.3.4 串级调速	182
6.3.5 调压调速	182
6.4 三相异步电动机的制动	183
6.4.1 回馈制动	183
6.4.2 反接制动	185
6.4.3 倒拉反转制动	187
6.4.4 能耗制动	189
6.4.5 软制动与软停车	191
6.5 异步电动机的各种运行状态	192
思考题	193
习题	195
第7章 同步电动机	197
7.1 同步电动机的基本结构与工作原理	197
7.1.1 基本结构	197
7.1.2 工作原理	198
7.1.3 额定数据	198
7.2 同步电动机的运行特性	199
7.2.1 感应电动势	199
7.2.2 功率与转矩	204
7.2.3 功角特性和矩角特性	204
7.2.4 功率因数调节	206
7.3 同步电动机的起动	208
7.3.1 辅助电动机起动法	208
7.3.2 异步起动法	208
7.3.3 变频起动法	209
7.4 同步电动机的调速	209
7.5 永磁同步电动机	210
7.5.1 永磁同步电动机的结构	210
7.5.2 永磁同步电动机的调速	211
思考题	212
习题	212
第8章 电动机的选择	213
8.1 电动机类型、电压和转速的选择	213
8.1.1 电动机种类的选择	213
8.1.2 电动机型式的选择	214

8.1.3 电动机额定电压的选择	215
8.1.4 电动机额定转速的选择	215
8.2 电动机额定功率的选择	216
8.2.1 电动机绝缘材料等级和温升	216
8.2.2 电动机的发热与冷却过程	217
8.2.3 电动机的工作制	219
8.2.4 负载图	221
8.2.5 连续工作制下电动机额定功率的选择	223
8.2.6 短时工作制下电动机额定功率的选择	227
8.2.7 断续周期工作制下电动机额定功率的选择	230
8.2.8 电动机起动能力和过载能力的校验	231
思考题	232
习题	233
附录 I 磁路的基本知识和定律	234
附录 II 变压器的原理与特性	241
附录 III Z4 系列直流电动机的技术数据	267
附录 IV Y3 系列三相异步电动机的技术数据	280
参考文献	284
索引	285

Contents

Introduction	1
0.1 Basic Concepts of Electric Machines and Drives	1
0.2 Characters and Contents of the Courses	2
0.3 Period Schedule of the Course	2
Chapter 1 Dynamics of Electric Drive Systems	4
1.1 Dynamic Equations of Electric Drive Systems	4
1.2 Referring of Load Torque and Flywheel Moment	5
1.2.1 Rotary Motion	6
1.2.2 Translational Motion	7
1.2.3 Up – and – down Motion	8
1.3 Load Torque Characteristics	11
1.3.1 Constant – torque Load Characteristics	11
1.3.2 Fans and Pumps’ Load Characteristics	12
1.3.3 Constant – power Load Characteristics	13
Questions and Problems	13
Chapter 2 Principles and Characteristics of DC Motors	16
2.1 Basic Structures and Operating Principles of DC Motors	16
2.1.1 Basic Structures	16
2.1.2 Exciting Mode	19
2.1.3 Rating Data	19
2.1.4 Operating Principles	20
2.2 Armature Windings of DC Machines	22
2.2.1 Simplex Lap Winding	23
2.2.2 Simplex Wave Winding	24
2.3 Magnetic Fields of DC Machines at No Load and Load	26
2.3.1 Magnetic Fields of DC Machines at No Load	26
2.3.2 Magnetic Fields of DC Machines at Load	28
2.4 Induced EMF and Electromagnetic Torque	32
2.4.1 Induced EMF of Armature Windings	32
2.4.2 Electromagnetic Torque	33
2.5 Fundamental Equations and Power Relations of DC Motors in Steady – state Operation	34
2.5.1 Fundamental Equations	34

2. 5. 2 Power Relations	35
2. 6 Torque – speed Characteristics of DC Motors	36
2. 6. 1 Torque – speed Characteristics of Separately Excited DC Motors	36
2. 6. 2 Torque – speed Characteristics of Series Excited DC Motors	41
2. 7 Steady – State Operating Conditions of Electric Drive Systems	42
Questions and Problems	44
Chapter 3 Electric Drives of DC Motors	46
3. 1 Starting of DC Motors	46
3. 1. 1 Direct Starting	46
3. 1. 2 Armature – loop Resistance Starting	46
3. 1. 3 Voltage – reducing Starting	47
3. 2 Speed Control of DC Motors	48
3. 2. 1 Armature – loop Resistance Speed Control	48
3. 2. 2 Changing Armature Voltage Speed Control	49
3. 2. 3 Field – weakening Speed Control	50
3. 2. 4 Performance Indexes of Speed Control	52
3. 3 Braking of DC Motors	56
3. 3. 1 Dynamic Braking	57
3. 3. 2 Plug Braking	59
3. 3. 3 Reversal – rotation Braking	61
3. 3. 4 Regenerative Braking	61
3. 4 Operating States of DC Motors	65
3. 4. 1 The Motor State	67
3. 4. 2 The Braking State	67
Questions and Problems	68
Chapter 4 MMF , Windings and EMF of AC Machines	71
4. 1 MMF of AC Motors' Windings	71
4. 1. 1 MMF of Single – phase Concentrated Full – pitched Windings	71
4. 1. 2 MMF of Three – phase Concentrated Full – pitched Windings	80
4. 2 Windings of AC Motors	86
4. 2. 1 Three – phase Single – layer Distributed Full – pitched Windings	86
4. 2. 2 Three – phase Double – layer Distributed Short – pitched Windings	91
4. 3 MMF of Two – phase Windings	97
4. 3. 1 Round Rotating MMF	97
4. 3. 2 Ellipse Rotating MMF	99
4. 4 Induced EMF of AC Motors' Windings	101
4. 4. 1 Induced EMF of Full – pitched Coils	101
4. 4. 2 Induced EMF of Short – pitched Coils	105

4. 4. 3 Induced EMF of Distributed Full – pitched Windings	107
4. 4. 4 Induced EMF of Distributed Short – pitched Windings	108
Questions and Problems	110
Chapter 5 Principles and Characteristics of Three – phase	
Induction Motors	113
5. 1 Basic Structures and Operating Principles of Three – phase Induction Motors	113
5. 1. 1 Basic Structures	113
5. 1. 2 Operating Principles	116
5. 1. 3 Rating Data	117
5. 2 Fundamental Equations and Equivalent Circuits of Induction Motors	118
5. 2. 1 Induction Motors at Standstill	118
5. 2. 2 Induction Motors at Running	132
5. 2. 3 Number of Poles and Phases, Referring Parameters of the Cage Rotor	137
5. 2. 4 Simplified Equivalent Circuits	139
5. 3 Powers and Torques of Induction Motors	140
5. 3. 1 Powers of Three – phase Induction Motors	140
5. 3. 2 Torques of Three – phase Induction Motors	143
5. 4 Torque – speed Characteristics of Induction Motors	145
5. 4. 1 Parametric Expressions of Torque – speed Characteristics	145
5. 4. 2 Practical Formulas of Torque – speed Characteristics	148
5. 4. 3 Inherent and Artificial Torque – speed Characteristics	150
5. 5 Operating Characteristics of Induction Motors	155
Questions and Problems	156
Chapter 6 Electric Drives of Three – phase Induction Motors	159
6. 1 Starting of Squirrel – cage Induction Motors	159
6. 1. 1 Direct Starting under the Voltage Rating	160
6. 1. 2 Wye – delta (Y – Δ) Voltage – reducing Starting	161
6. 1. 3 Autotransformer Voltage – reducing Starting	162
6. 1. 4 Stator – loop Reactance or Resistance Voltage – reducing Starting	164
6. 1. 5 Soft Starting	166
6. 1. 6 High Starting Torque Induction Motors	169
6. 2 Starting of Wound – rotor Induction Motors	171
6. 2. 1 Rotor – loop Resistance Starting	172
6. 2. 2 Rotor – loop Frequency Sensitive Rheostat Starting	173
6. 3 Speed Control of Induction Motors	174
6. 3. 1 Variable frequency Speed Control	175
6. 3. 2 Pole changing Speed Control	178
6. 3. 3 Rotor – loop Resistance Speed Control	181

6.3.4	Cascade Speed Control	182
6.3.5	Changing Voltage Speed Control	182
6.4	Braking of Three – phase Induction Motors	183
6.4.1	Regenerative Braking	183
6.4.2	Plug Braking	185
6.4.3	Reversal – rotation Braking	187
6.4.4	Braking with direct current	189
6.4.5	Soft Braking and Soft Stopping	191
6.5	Operating States of Induction Motors	192
	Questions and Problems	193
Chapter 7	Synchronous Motors	197
7.1	Basic Structures and Operating Principles of Synchronous Motors	197
7.1.1	Basic Structures	197
7.1.2	Operating Principles	198
7.1.3	Rating Data	198
7.2	Operating Characteristics of Synchronous Motors	199
7.2.1	Induced EMF	199
7.2.2	Powers and Torques	204
7.2.3	Power – Angle Characteristics and Torque – Angle Characteristics	204
7.2.4	Adjustments of Power Factor	206
7.3	Starting of Synchronous Motors	208
7.3.1	Auxiliary Motor Starting	208
7.3.2	Asynchronous Starting	208
7.3.3	Variable Frequency Starting	209
7.4	Speed Control of Synchronous Motors	209
7.5	Permanent Magnet Synchronous Motors	210
7.5.1	Structures of Permanent Magnet Synchronous Motors	210
7.5.2	Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors	211
	Questions and Problems	212
Chapter 8	Selections of Motors	213
8.1	Selection of Motors' Type, Voltage and Speed	213
8.1.1	Selections of Motors' Classes	213
8.1.2	Selections of Motors' Types	214
8.1.3	Selections of Motors' Voltage Rating	215
8.1.4	Selections of Motors' Speed Rating	215
8.2	Selection of Motors' Power Rating	216
8.2.1	Insulation Material Classification and Temperature Rises of Motors	216
8.2.2	Heating and Cooling Process of Motors	217

8. 2. 3	Duty Types of Motors	219
8. 2. 4	Load Diagrams	221
8. 2. 5	Selections of Motors' Power Rating in Continuous Duty Type	223
8. 2. 6	Selections of Motors' Power Rating in Short – Time Duty Type	227
8. 2. 7	Selections of Motors' Power Rating in Intermittent Periodic Duty Type	230
8. 2. 8	Verification of Motors' Starting Capability and Overload Capability	231
	Questions and Problems	232
Appendix I	Fundamental Concepts and Laws of Magnetic Circuits	234
Appendix II	Principles and Characteristics of Transformers	241
Appendix III	Technical Data of Z4 Series DC Motors	267
Appendix IV	Technical Data of Y3 Series Three – phase Induction Motors	280
References		284
Index		285

结 论

0.1 电机与拖动的基本概念

电机的种类和规格很多,按电源性质分:有直流电机和交流电机;按功能分:有发电机、电动机、变压器和控制电机等;按运动方式分:静止的有变压器,运动的有旋转电机、直线电机和三维运动电机;旋转的交流电机又可分为异步电机和同步电机。本课程所讨论的电机主要是电动机,而电动机的作用是将电能转换成机械能。所以,只要有电能的场合,就可利用电动机拖动各种电气设备和生产机械,以满足人们生活、工作和进行各种生产的要求。这种以电动机为动力来拖动各种设备和生产机械的拖动方式,就称为电力拖动(简称拖动)。由于电力拖动方式效率高,便于控制,所以在各行各业中得到广泛应用。

从家庭、学校到工厂、农村,到处都可看到以电动机为动力的各种家用电器和形式多样的机械设备。例如:电风扇、洗衣机、冰箱、空调机、打印机、电梯、风机、水泵、油泵、起重机、搅拌机、电动工具、机床、轧钢机、空气压缩机以及各种农业机械等。

根据电源性质和工作原理的不同,电动机主要有直流电动机、交流异步电动机、交流同步电动机等。直流电动机把直流电能转变为机械能,其突出优点是调速范围宽,易于平滑调速,起动、制动和过载转矩大,并且易于控制。缺点是电机结构较复杂,制造成本较高,存在换向问题使其单机容量、最高转速和使用环境受到限制,维护不便;交流电动机把交流电能转变为机械能,它和直流电动机相比,尤其是异步电动机,由于结构简单、价格低廉、运行可靠、维护方便,因此成为各行各业中使用最广泛的一种电动机。缺点是起动电流大,其调速与转矩控制比较复杂,调速性能不够理想。但随着电力电子技术、计算机技术、微电子技术和现代控制技术的发展,交流电动机的调速性能和经济指标已赶上或超过直流电动机,一些原来用直流电动机拖动的生产机械和设备正逐步被交流电动机所取代。

用于生产实际的电力拖动系统一般由电源、电动机、控制设备、传动机构和生产机械等几部分组成,如图 0.1 所示。

电力拖动系统按照电源类型分为直流拖动系统和交流拖动系统;按照机组形式分为单台电动机拖动系统和成组多机拖动系统;按照运动方式分为单方向