



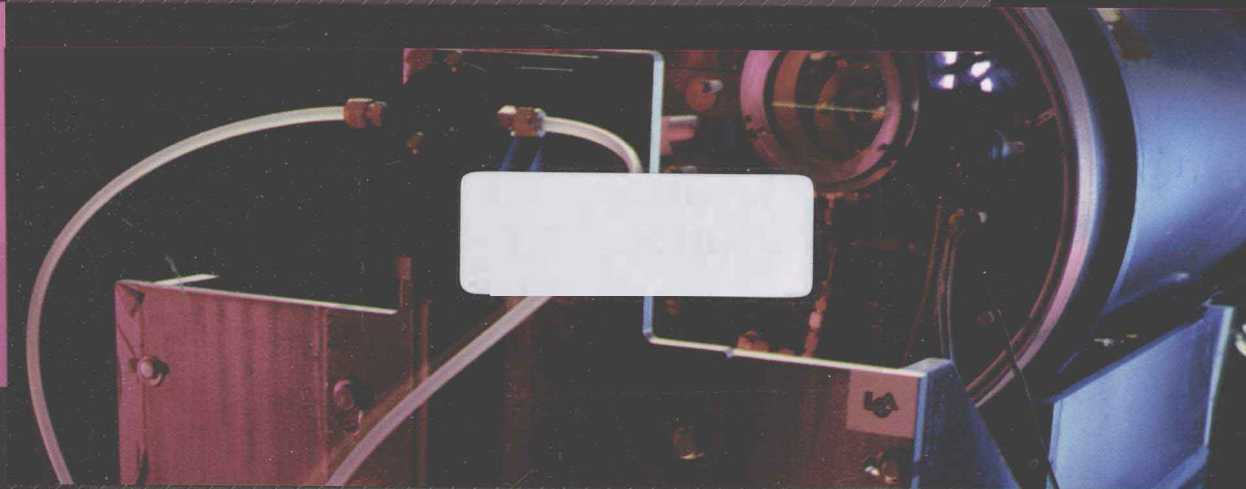
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Electric Machinery and Drivers

电机原理与拖动

边春元 满永奎 主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



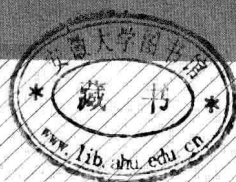
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Electric Machinery and Drivers

电机原理与拖动

边春元 满永奎 主编



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电机原理与拖动 / 边春元, 满永奎主编. — 北京 :
人民邮电出版社, 2013. 1
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-29481-4

I. ①电… II. ①边… ②满… III. ①电机学—高等
学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①
TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第233914号

内 容 提 要

电机原理与拖动包含电机学和电力拖动两门课程的内容。本书并非简单地将两者拼凑,而是将两者有机结合,融为一体。本书以加强基础、突出处理问题的思维方法、培养学生分析问题和解决问题的能力为原则,详细介绍了从电机结构、基本原理到实际运行的特性,包括变压器结构、原理及特性,交流电机和直流电机的结构、基本原理和不同工况下的运动特性等;同时介绍了目前在特殊情况下的特种电机,包括单相电动机、直流伺服电动机、交流两相伺服电动机、步进电机、开关磁阻电机、直线电机等。本书叙述深入浅出,理论联系实际,尽可能从实际背景的分析中提出要讨论的问题、概念和方法。每章最后都附有章节小结和习题。

本书可作为高等学校电子工程、电气工程、工业自动化、电力电子、仪器仪表、检测系统及其自动化等专业与相关的实验指导课的授课教材或主要参考书,也可供从事电气传动设计的人员阅读和参考。

21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

电机原理与拖动

-
- ◆ 主 编 边春元 满永奎
责任编辑 李海涛
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18.25 2013 年 1 月第 1 版
字数: 453 千字 2013 年 1 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-29481-4

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

电机传动技术渗透于各行各业，在机械、航空航天、化工、矿产、生物、医学、军事等各个领域都有应用。随着电力电子技术、计算机技术和自动控制技术的迅速发展，电机调速技术也随之发生巨大的改变。由于直流电机具有换向器和电刷，维护工作复杂，使得交流电机调速的发展日益凸显。交流电机在各个领域正逐步取代直流电机。

目前，几乎所有理工科（特别是电气工程）类的高校都开设了电机相关的课程。本书适应技术发展的需要，并进行了大胆改革。首先加大了交流电机部分的比重，适当增加了授课学时，在内容安排顺序上先讲交流部分，后讲直流部分，改变了以往教材中先直流后交流的结构。编者结合多年的教学与科研经验，在本书中更新了特种电机一章的内容。在表现形式和写作方法上通俗易懂、简洁明晰、重点突出。

全书共分9章。第1章介绍了磁路的基本规律及常用磁性材料的特性和磁路的计算特性；第2章介绍了变压器的结构、原理和运行情况；第3章、第4章、第5章分别介绍了三相异步电动机和同步电机的原理和特性；第6章、第7章介绍了直流电机的原理和特性；第8章介绍了一些特种电机；第9章介绍了在电力拖动中电机的选择问题。

本书由东北大学边春元副教授、满永奎教授主编。绪论、第1章、第2章由满永奎编写，第3章、第4章、第5章和第8章由边春元编写，第6章由高辉编写，第7章由赵璐编写，第9章由曹琦编写。全书由边春元统稿，满永奎审稿。在本书的编写过程中，东北大学电气实验室研究生孟凡红、刘德仲、祝军、郝文升、罗磊、段小俊、司洋等参与了材料的收集和整理工作，张鑫和东北大学电力系统与电力传动研究所的老师给予了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2012年8月

目 录

绪论	1	2.3.3 绕组折算	31
0.1 电机的发展简况	1	2.3.4 负载运行时的基本方程式、 等效电路和相量图	33
0.2 电力拖动的发展简况	2	2.4 三相变压器	35
0.3 本课程的性质和学习方法	4	2.4.1 三相变压器的磁路系统	36
小结	5	2.4.2 三相变压器绕组的联结	37
习题	6	2.4.3 绕组接法和磁路系统对 二次侧电压波形的影响	40
第1章 电磁理论基础知识	7	2.5 等效电路参数的测定	42
1.1 电磁理论的基本定律	7	2.5.1 空载试验	43
1.1.1 磁路的概念	7	2.5.2 短路试验	43
1.1.2 电磁理论的基本定律	8	2.6 标么值	45
1.2 常用的铁磁材料及其特性	12	2.7 变压器的运行特性	48
1.2.1 铁磁材料的磁化	12	2.7.1 外特性和电压调整率	48
1.2.2 磁化曲线和磁滞回线	13	2.7.2 效率和效率特性	49
1.2.3 铁磁材料	14	2.8 变压器的并联运行	51
1.2.4 铁心损耗	15	2.8.1 变压器的理想并联运行	52
1.3 直流磁路的计算	16	2.8.2 并联运行时变压器的 负载分配	52
1.4 交流磁路的特点	17	2.9 自耦变压器和仪用互感器	53
小结	18	2.9.1 自耦变压器	53
习题	19	2.9.2 仪用互感器	55
第2章 变压器	21	小结	57
2.1 变压器的工作原理和基本结构	21	习题	58
2.1.1 变压器的工作原理	21	第3章 交流电机基础及三相异步 电动机	60
2.1.2 变压器的基本结构	23	3.1 三相异步电动机的结构及 基本工作原理	60
2.1.3 变压器的额定值	24	3.1.1 三相异步电动机的结构	60
2.2 单相变压器的空载运行	25	3.1.2 三相异步电动机的基本 工作原理	63
2.2.1 空载运行时的物理情况	25	3.1.3 三相异步电动机的铭牌 数据	67
2.2.2 主磁通与感应电动势	26	3.2 交流电机的绕组及其感应电动势	68
2.2.3 空载电流、漏磁通与漏电抗	27		
2.2.4 空载运行时的电动势平衡 方程式、相量图和等效电路	28		
2.3 单相变压器的负载运行	30		
2.3.1 负载运行时的物理情况	30		
2.3.2 负载运行时磁动势平衡 方程式	31		

3.2.1 交流电机绕组的基本知识和概念	68	4.1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	106
3.2.2 导体电动势	69	4.1.5 调速方式及调速性能指标	108
3.2.3 线圈电动势	71	4.2 三相异步电动机的3种机械特性表达式	109
3.2.4 线圈组电动势	73	4.2.1 机械特性的物理表达式	109
3.2.5 三相单层对称绕组	75	4.2.2 机械特性的参数表达式	111
3.2.6 三相双层对称绕组	78	4.2.3 机械特性的实用表达式	113
3.2.7 三相对称绕组的相电动势和线电动势	79	4.3 三相异步电动机的固有机械特性与人为机械特性	114
3.3 交流电机绕组的磁动势	79	4.3.1 三相异步电动机的固有机械特性	114
3.3.1 单相绕组的磁动势——脉振磁动势	80	4.3.2 三相异步电动机的人为机械特性	115
3.3.2 三相绕组的磁动势——圆形旋转磁动势	82	4.4 三相笼型异步电动机的起动	118
3.3.3 磁动势的空间矢量表示法	83	4.4.1 三相笼型异步电动机的直接起动	119
3.4 转子不转时的三相异步电动机	85	4.4.2 三相笼型异步电动机的减压起动	119
3.4.1 转子开路的三相异步电动机	85	4.4.3 三相笼型异步电动机的软起动	124
3.4.2 转子堵转的三相异步电动机	88	4.4.4 改善起动性能的三相笼型异步电动机	125
3.5 转子转动时的三相异步电动机	90	4.5 三相绕线型异步电动机的起动	127
3.6 笼型转子的极数、相数、匝数和绕组系数	93	4.5.1 转子串三相对称电阻分级起动	127
3.7 三相异步电动机的功率与转矩	94	4.5.2 转子串频敏变阻器起动	131
3.7.1 三相异步电动机的功率传递与损耗	94	4.6 三相异步电动机的调速	132
3.7.2 三相异步电动机的电磁转矩和转矩平衡	95	4.6.1 三相异步电动机的变极调速	132
3.8 三相异步电动机的参数测定	96	4.6.2 三相异步电动机的变频调速	136
3.8.1 空载试验与励磁参数的确定	97	4.6.3 三相异步电动机的降低定子电压调速	140
3.8.2 堵转试验与漏阻抗参数的确定	98	4.6.4 三相绕线型异步电动机的转子串电阻调速	141
3.9 三相异步电动机的工作特性	99	4.6.5 三相绕线型异步电动机的串级调速	142
小结	100		
习题	101		
第4章 三相异步电动机的电力拖动	103		
4.1 电力拖动的基础知识	103		
4.1.1 电力拖动系统的运动方程式	103		
4.1.2 负载的机械特性	104		
4.1.3 电动机的机械特性及其硬度	105		

4.6.6 笼型异步电动机的 电磁转差离合器调速	144	5.4 同步电动机定子电流与负载的 关系	177
4.7 三相异步电动机的运行状态	146	5.5 同步电动机的励磁调节	178
4.7.1 电动运行	146	5.6 同步电动机的起动	181
4.7.2 反接制动	147	小结	183
4.7.3 回馈制动	151	习题	184
4.7.4 能耗制动	153	第6章 直流电机	185
4.7.5 四象限运行状态	158	6.1 直流电机的基本工作原理及 结构	185
4.8 三相异步电动机拖动系统的 过渡过程及能量损耗	159	6.1.1 直流电机的基本工作原理	185
4.8.1 过渡过程的概念	159	6.1.2 直流电机的结构	187
4.8.2 三相异步电动机拖动系统的 机械过渡过程	159	6.1.3 直流电机的铭牌数据	189
4.8.3 三相异步电动机过渡过程的 能量损耗	161	6.2 直流电机的空载磁场	190
小结	163	6.2.1 磁路、磁通和磁化曲线	190
习题	164	6.2.2 气隙磁密沿电枢圆周 表面的分布	192
第5章 同步电机	168	6.3 直流电机的电枢绕组	192
5.1 同步电机的结构及基本原理	168	6.3.1 电枢绕组的基本知识及 概念	192
5.1.1 同步电机的结构	168	6.3.2 单叠绕组	194
5.1.2 同步电机的基本原理	169	6.4 直流电机的电枢反应	197
5.1.3 同步电机的铭牌数据	170	6.4.1 电枢磁动势与电枢磁场	197
5.2 同步电动机的电动势平衡方程和 相量图	171	6.4.2 电刷位于几何中性线上时的 电枢反应	198
5.2.1 同步电动机的磁动势 平衡关系	171	6.4.3 电刷偏离几何中性线时的 电枢反应	199
5.2.2 隐极同步电动机的电动势 平衡方程和相量图	171	6.5 直流电机的电枢电动势和 电磁转矩	200
5.2.3 凸极同步电动机的电动势 平衡方程和相量图	172	6.5.1 直流电机的电枢 电动势	200
5.3 同步电动机的矩(功)角特性	173	6.5.2 直流电机的电磁转矩	200
5.3.1 同步电动机的功率传递与 转矩平衡	174	6.6 直流电机的励磁方式	201
5.3.2 同步电动机的矩(功)角 特性	174	6.7 直流发电机	202
5.3.3 同步电动机电磁转矩与 功角的关系	175	6.7.1 直流发电机的基本方程和 能流图	202
5.3.4 同步电动机的静态稳定 问题和过载能力	177	6.7.2 他励直流发电机	204
		6.7.3 并励直流发电机	205
		6.7.4 复励直流发电机	207
		6.8 直流电动机	207

6.8.1 直流电动机的基本方程和能流图	207	8.1.1 单相异步电动机的分类	244
6.8.2 他(并)励直流电动机	208	8.1.2 单相异步电动机的 工作原理	245
6.8.3 串励直流电动机	210	8.1.3 单相异步电动机的起动	246
6.8.4 复励直流电动机	211	8.2 伺服电动机	247
6.9 直流电机的换向	211	8.2.1 直流伺服电动机	248
6.9.1 换向的电磁现象	212	8.2.2 交流伺服电动机	249
6.9.2 改善换向的措施	213	8.3 步进电动机	251
小结	215	8.3.1 步进电动机的工作原理及 结构	251
习题	216	8.3.2 步进电动机的运行特性	253
第7章 直流电动机的电力拖动	218	8.4 开关磁阻电动机	255
7.1 他励直流电动机的机械特性	218	8.4.1 SR电机的结构及工作原理	255
7.1.1 机械特性的方程式	218	8.4.2 SR电机的电磁关系	257
7.1.2 固有机械特性和人为 机械特性	220	8.4.3 SR电机的控制方式	259
7.1.3 机械特性的绘制	221	8.5 直线电动机	260
7.2 他励直流电动机的起动	222	8.5.1 直线电动机的分类	260
7.2.1 电枢回路串电阻起动	222	8.5.2 直线电动机的结构及 工作原理	261
7.2.2 降低电源电压起动	224	8.5.3 直线电动机的特点	263
7.3 他励直流电动机的调速	224	小结	264
7.3.1 电枢回路串电阻调速	224	习题	265
7.3.2 降低电源电压调速	225	第9章 电力拖动系统中电动机的 选择	266
7.3.3 减弱磁通调速	225	9.1 确定电动机功率的方法与步骤	266
7.4 他励直流电动机的运行状态	226	9.1.1 确定电动机额定功率 应考虑的主要因素	266
7.4.1 电动运行	227	9.1.2 确定电动机额定功率的 方法和步骤	267
7.4.2 能耗制动	227	9.2 电动机的发热及冷却过程	268
7.4.3 反接制动	229	9.2.1 电动机的发热过程	268
7.4.4 回馈制动	230	9.2.2 电动机的冷却过程	269
7.4.5 四象限运行状态	232	9.3 电动机的工作制分类	269
7.5 他励直流电动机拖动系统的 过渡过程及能量损耗	233	9.4 连续工作制负载电动机的 额定功率选择	271
7.5.1 他励直流电动机拖动系统的 机械过渡过程	233	9.4.1 恒定负载连续工作制 电动机的额定功率选择	271
7.5.2 他励直流电动机过渡过程的 能量损耗	237	9.4.2 周期性变化负载连续工作制 电动机的额定功率选择	272
小结	240		
习题	240		
第8章 特种电机	244		
8.1 单相异步电动机	244		

9.5 短时工作制负载电动机的额定功率选择	275	电压、额定转速的选择	278
9.5.1 选用短时工作制电动机	275	9.7.1 电动机类型的选择	278
9.5.2 选用连续工作制电动机	276	9.7.2 电动机结构形式的选择	279
9.5.3 选用断续周期工作制电动机	276	9.7.3 电动机额定电压的选择	279
9.6 断续周期工作制负载电动机的额定功率选择	277	9.7.4 电动机额定转速的选择	280
9.7 电动机类型、结构形式、额定		小结	280
		习题	280
		参考文献	282

在现代社会中，电能起着十分重要的作用，人均消耗的电能量已成为衡量一个国家实力的重要指标。电能的生产、变换、传输、分配、使用、控制等，都必须利用电机作为能量转换或信号转换的机电装置。因此，电机的节能和高性能驱动对于节省能源、提高产品质量和生产率，都具有极其重要的意义。理解和掌握电机的原理及其拖动理论是实现电机的节能化和高性能化发展的关键和基础。

【问题引出】为何交流电机应用越来越多，并逐渐占居主导地位？

0.1 电机的发展简况

【展开讲解】电机的发展简史。

电机是指利用电磁感应原理实现机电能量变换或传递的装置，包括发电机、电动机和变压器。电机是随着生产发展而产生和发展的，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。

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研制出了直流电动机的模型。1834 年，亚哥比研制成了第一台可供实用的直流电动机，并于 1838 年将之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。这是人类制造的最早可供实用的电动机，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，这种化学电池价格昂贵，因此，限制了直流电动机的大量应用。

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理论依据。此后制造出了直流发电机，为直流电动机提供了可用的电源，使直流电机的应用得以扩大，直到 19 世纪 70 年代直流电机在应用中一直占着主导地位。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，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越性。

1871 年，凡·麦尔准发明了交流发电机。1878 年，亚布洛契可夫使用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里斯发现了二相电流可以产生旋转磁场。一年以后费拉里斯和在美国的坦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。1891 年，三相制正式在工业上得到应用，很快显示出它的优越性，并

得到了迅速的发展，电工技术从此进入了三相制的发展新阶段。特别是多里沃·多勃罗沃尔斯基发明的笼式异步电动机结构简单，价格便宜，工作可靠，19世纪90年代在欧美等国家得到了广泛的应用。

进入20世纪，由于异步电动机用量越来越多，这给电网带来了新的问题，即电网功率因数降低，影响了电网输送有功功率的能力。为改善电网的功率因数，人们想到了同步电动机，用它来拖动不需要调速的大型设备，同样可以完成生产任务，同时还可以通过调节励磁，使它对电网呈电容性，为电网提供容性的无功功率，提高电网的功率因数，使发电、输变电设备得到充分利用。此后，同步发电机（包括汽轮发电机和水轮发电机）、同步电动机、异步电动机（包括笼型和绕线型）、直流发电机、直流电动机及电力变压器均已生产制造成功，并且大量投入了生产，它们的一整套设计计算方法也基本成熟。此后的一百年来，这些电机的工作原理、基本结构以及它们的设计计算方法并无太大变化，但现代的电机与当年的这些电机却有很大的不同，这主要体现在选用了新型的绝缘材料、导电材料和导磁材料，采用了先进的制造工艺，改进了电机的冷却和散热条件，因此减轻了电机的质量，提高了电机的单机容量。

20世纪以后，对电机的效率和性能有了更高的要求，伴随着通用型同步电机、异步电机和直流电机尺寸的减小，质量减轻，单机容量在不断增大，同时出现了一些专门为了满足某些生产工艺特殊要求或适应一些特殊工作环境的专用电机，这些电机主要有牵引电动机，防爆电动机，高起动转矩电动机，起重冶金专用电机，船舶专用电机，航天、航空专用电机，潜水、潜油电动机。还有在自动控制系统中执行信号传递与转换速度、转角的测量等任务的控制电机，主要有测速发电机、伺服电机、自整角机、旋转变压器和步进电动机等。此外，还出现了一些中小型特种电动机，如直线电动机、开关磁阻型电动机、无换向器电机（或称自控式同步电动机）、单相交流电动机、电磁调速电机。

进入21世纪，由于生产上的需要以及能源危机的出现，伴随着科学技术的突飞猛进，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法进行摸索、研究和实验工作取得了不少成就，电机在制造上向着大型、巨型发展，中小型电机向着多用途、多品种方向发展，向着高效节能方向发展。尤其是基于永磁材料的各种同步电机因其功率密度更大、效率更高的优点得到了快速的发展和应用。

0.2 电力拖动的发展简况

【展开讲解】电力拖动的发展简史。

随着各类电机的制造成功，电力拖动技术快速地发展起来。在此之前，人们在长期的生产实践中很早就应用了人力、蓄力、风力、水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、控制十分灵活，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。

最初，电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时电动机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的，称为“成组传动”。所谓“成组传动”就是由一台电动机来拖动多台生产机械，从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法，靠天轴及

机械传动系统来实现。电动机离生产机械较远,传动损耗大,生产效率低,也无法满足生产机械的启制动、正反转及其他调速要求。一台生产机械出现故障,很可能引起多台生产机械停机。此外,车间里皮带很多,生产环境、卫生条件较差,易出事故。这是一种陈旧落后的拖动方式。

进入 20 世纪 30 年代,这种拖动方式就逐渐地被淘汰了,取而代之的是“单电动机拖动”和“多电动机拖动”方式。“单电动机拖动”方式就是一台生产机械单独用一台电动机拖动,这样车间可以省去大量的皮带、天轴和一些机械传动机构。电能直接用电缆送到装在每台生产机械上的电动机上,每台电机单独控制,可以满足生产机械的各种调速要求。“多电动机拖动”方式是一台生产机械上有几个工作机构,每个工作机构单独由一台电动机拖动,如车间里的吊车都有大桥,小车和吊钩 3 个工作机构,它们分别由 3 台电动机拖动,这可使生产机械结构大为简化,分别控制也十分方便、更加灵活。

20 世纪 60 年代以前,工业发展很快,电力拖动成为工厂中生产机械的主要拖动方式。从数量上看笼型电动机用量最大,但从拖动系统的性能上看直流电动机拖动系统性能最好、水平最高(当时交流电动机尚无可供实用的变频电源),因而常把这一时期称为直流拖动系统占居首位的时期。在这一时期,各种电动机拖动系统的应用范围大致如下。

(1) 笼型电动机拖动系统。由于笼型电动机结构简单、价格便宜、坚固耐用、易于维护等一系列优点,工厂中凡是不经常启动,基本上不需要调速的生产机械多用笼型电动机拖动,如工厂中大量的风机、水泵、空压机和皮带运输机等通用机械。在一些工厂中它的用电量常占全厂用电量的 60%~70%,个别工厂占到 80%以上,可见它的用量最大。理论上笼型电机也可用定子串电抗、调压等方法在小范围内调速,但因性能不好很少应用。变极调速属有级调速,仅用于极少数特殊场合。

(2) 绕线型异步电动机拖动系统。由于绕线型异步电动机可以通过转子串电阻等方式解决起动和调速问题,虽然它的起动和调速性能不如直流拖动系统,但因其价格比直流系统便宜,维护比直流系统简单,所以在一些要求性能不太高的拖动系统中还是得到了较为广泛的应用,如冶金厂的一些辅助生产机械,要求性能不太高的高炉卷扬、矿井卷扬、吊车、电铲,甚至一些轧钢机也选用了绕线型异步电动机拖动系统。

(3) 同步电动机拖动系统。由于同步电动机起动困难,容易产生振荡,一般用得不多。但有时为了改善电网功率因数,在一些不调速、不常起动的大型设备中也得到了应用,如选矿厂的大型球磨机常用同步电动机拖动。

(4) 直流电动机拖动系统。因直流电动机可以通过调压和调磁平滑地调节速度,起制动和正反转速度快、性能好,因此一些对拖动系统要求高的生产机械都采用直流电动机拖动系统。如龙门刨床、可逆轧机要求快速起制动、正反转;连轧机、造纸机、印染机要求多台电动机速度协调旋转;高性能的电梯、矿井卷扬要求起制动快而平稳,并要求准确停车,这些都由他励直流拖动系统来完成。要求起动转矩大的电机车、城市电车由串励直流牵引电动机拖动。

在此期间,还有一些其他电机拖动系统,如在纺织、印染、造纸等行业也常用整流子机、滑差电机(也称电磁转差离合器)拖动系统。

进入 20 世纪 60 年代以后,随着电力电子器件(也称大功率半导体器件)的出现,并很快地投入批量生产,使电力拖动技术逐渐地进入了以交流调速为主的新阶段。随着电力电子技术、微电子技术、微计算机技术的迅速发展,晶闸管、大功率晶体管(GTO)大量应用之

后, 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、功率场效应管 (MOSFET) 和智能功率模块 (IPM) 等新器件使可控整流器及变频器的主回路发生了巨大变化; 微电子技术和微计算机技术的发展使控制回路集成化、模块化、数字化、硬件标准化。这些使变流器 (包括整流器和逆变器) 主回路和控制回路体积减小, 成本降低, 可靠性提高。此外, 由于交流变频调速系统采用了矢量控制或直接转矩控制, 使交流拖动系统性能大为提高, 已经赶上了直流拖动系统。目前, 采用矢量控制或直接转矩控制变频器的交流拖动系统与采用数字化可控整流器的直流拖动系统在技术的先进性、工作的可靠性及拖动系统的性能上都不相上下。

直流电动机虽然控制简单, 但因存在换向器和电刷使其结构复杂、造价高、维护困难, 并且换向器上的火花常常影响生产, 换向能力使直流电机转速受限, 单机容量受限。与直流电机相比, 笼型异步电动机结构简单、价格便宜、易于维护、故障少、检修停机时间短, 可以比直流电动机单机容量大、转速高、转动惯量小、动态性能好。此外, 交流电动机结构简单, 有可能与机械合为一体, 形成机电一体化产品, 使机械结构大为简化, 体积减小, 质量减轻, 也提高了设备的可靠性。例如, 无齿轮水泥球磨机, 电动机转子与球磨机滚筒合为一体; 矿井卷扬机钢丝绳卷筒可以与电动机外转子合为一体。

综上所述, 目前由变频器和交流电动机组成的交流拖动系统与由可控整流调速器和直流电动机组成的直流拖动系统相比, 已经显示出了很大的优越性, 越来越多的领域采用交流变频调速系统, 特别是在大型拖动系统中, 例如, 电机容量在数兆瓦以上的大型可逆轧机、连轧机中直流拖动系统已经被交流拖动系统所取代。此外, 在过去一些应该调速而未调速的很多设备中 (如大量风机、水泵), 现在也多采用了交流变频调速, 取得了很大的节能效果, 使交流变频调速的应用领域迅速扩大。因此, 可以说现在已经进入了以交流变频调速为主的新阶段。但是直流拖动系统也没有完全被淘汰, 在几百千瓦以下这个容量段, 数字式直流拖动系统尚有一定用户, 国内外整流柜和直流电动机的生产厂家仍在生产, 市场上仍在销售, 个别客户反映小容量直流调速系统在性能上仍然优于交流, 在价格上数字可控整流柜也比变频柜略低。

随着交流变频技术的发展, 同步电动机的起动和调速问题迎刃而解, 而同步电动机的优点除调磁可以改善电网功率因数外, 同步电动机无转差, 转子可以一步不差地跟随数字控制的旋转磁场, 其速度控制精度是异步电动机无法与之相比的, 同步电动机可以当作大功率步进电机使用。现在大型轧钢厂中的连轧机已经大部分换成同步电动机变频调速拖动系统。如果中小容量同步电动机能够扩大生产, 特别是永磁式同步电动机如能批量生产, 交流变频调速同步电动机拖动系统的应用前景是十分可观的。

0.3 本课程的性质和学习方法

对于电气工程与自动化和自动化, “电机原理与拖动” 是一门十分重要的专业基础课。它有基础课的性质, 因为它是后续学习 “自动控制系统”、“工业企业供电”、“交流控制技术” 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, 不掌握被控制对象的性能, 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。“电机原理与拖动” 除具有基础课的性质外, 它与工程实际联系非常密切, 毕竟电机 (包括变压器) 是一个实际应用的电能转换或传输装置, 除了涉及基础理论, 还涉及实际综合应用的工程分析方法, 具有专业课的性质。

“电机原理与拖动”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,学生已经比较熟悉,在此着重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,就有可能得到磁场减弱,从而转矩减少,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,但在计算中并没有全都用上,也可能需要的数据没有给出(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,电机原理与拖动与工程实际联系紧密,要逐渐地培养学生的工程观点,使学生逐渐熟悉一些工程问题的处理方法。

本书主要从使用的角度来研究电机,因此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。电机的学习要与实验紧密结合进行,学生才能加深对电机理论的理解,但电机实验一般独立开课,因此,本书涉及电机实验部分仅讲解原理部分。

小 结

在现代社会中,电能起着十分重要的作用,人均消耗的电能量已成为衡量一个国家实力的重要指标。电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等,都必须利用电机作为能量转换或信号转换的机电装置。因此,电机的节能和高性能驱动对于节省能源、提高产品质量和生产率,都具有极其重要的意义。

电机是指利用电磁感应原理实现机电能量变换或传递的装置,包括发电机、电动机和变压器。电机是随着生产发展而产生和发展的,而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。

直流电动机虽然控制简单,但因存在换向器和电刷使其结构复杂、造价高、维护困难,并且换向器上的火花常常影响生产,换向能力使直流电机转速受限,单机容量受限。与直流电机相比,笼型异步电动机结构简单、价格便宜、易于维护、故障少、检修停机时间短,可以比直流电动机单机容量大、转速高、转动惯量小、动态性能好。

随着电力电子技术、微电子技术、微计算机技术的迅速发展,变流器(包括整流器和逆变器)主回路和控制回路体积减小,成本降低,可靠性提高。此外,由于交流变频调速系统采用了矢量控制或直接转矩控制,使交流拖动系统性能大为提高,已经赶上了直流拖动系统。目前,采用矢量控制或直接转矩控制变频器的交流拖动系统与采用数字化可控整流器的直流拖动系统在技术的先进性、工作的可靠性及拖动系统的性能上都不相上下。

“电机原理与拖动”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。要逐渐地培养学生的工程观点，使学生逐渐熟悉一些工程问题的处理方法。

习 题

1. 试述电机的发展简况。
2. 试述电力拖动的发展简况。
3. 试述直流电机与交流电机的优缺点。
4. 为何目前交流电机应用越来越多？
5. 试举电机应用的例子。

各种电机都是靠电和磁的相互作用、相互转化来完成能量转换的。电机的理论分析建立在全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律和电路定律等基础上,为了更好地理解电机原理,对电磁理论的相关知识和基本电磁定律予以复习是十分必要的。

1.1 电磁理论的基本定律

【问题引出】何为磁路?如何分析磁路?

1.1.1 磁路的概念

【展开讲解】磁路、主磁通和漏磁通的基本概念。

很多电工设备中需要较强的磁场或较大的磁通。由于铁磁材料的磁导率远比非铁磁材料的磁导率大得多,通常都是将铁磁材料做成闭合或近似闭合的环路,即所谓的铁心。绕在铁心上的线圈通有较小的电流,能得到很强的磁场,而且这种磁场几乎被约束在铁心构成的环路中,而铁心周围的非铁磁物质(包括周围的空气)中的磁场则非常微弱。这种约束在铁心构成的环路中的磁场称为磁路,磁路就是磁通走的路径。如同电流在电导率很大的导体中流通一样,磁路与电路相对应。图 1-1 所示为几种常见电工设备中的磁路。图 1-1 (a) 所示为磁电式仪表的磁路;图 1-1 (b) 所示为继电器的磁路;图 1-1 (c) 所示为心式变压器的磁路;图 1-1 (d) 所示为壳式变压器的磁路。

有的磁路完全由闭合的铁心构成,如变压器的磁路;也有的磁路中具有很小的空气间隙,称为气隙,如继电器和磁电式仪表的磁路。

磁通的绝大部分是通过磁路(包括微小的气隙)而闭合的,称为主磁通 Φ ;磁通的极少部分穿出铁心,大部分经过磁路周围非铁磁材料(包括空气)而闭合的,称为漏磁通 Φ_{σ} ,如图 1-1 (c) 所示中的 Φ 为主磁通, $\Phi_{\sigma 1}$ 和 $\Phi_{\sigma 2}$ 为漏磁通。工程实践中,采取了很多措施来减小漏磁通,因而在磁路的计算中,往往忽略漏磁通的影响。概括起来,对磁路有以下几点说明。

(1) 磁路由铁磁材料组成的闭合路径,在某些情况下,也含有微小的空气间隙。

(2) 磁路中的磁通是由通有电流的线圈产生的,也可以是永久磁铁产生的,磁通基本上沿着磁路而闭合。

(3) 磁路分为无分支磁路(见图 1-1 (a)、(b)、(c))和有分支磁路(见图 1-1 (d))。

有分支磁路的分支处称为磁路的节点。

(4) 无分支磁路中, 若磁路由同一种材料组成, 而且截面积处处相等, 称为均匀磁路, 否则称为非均匀磁路。

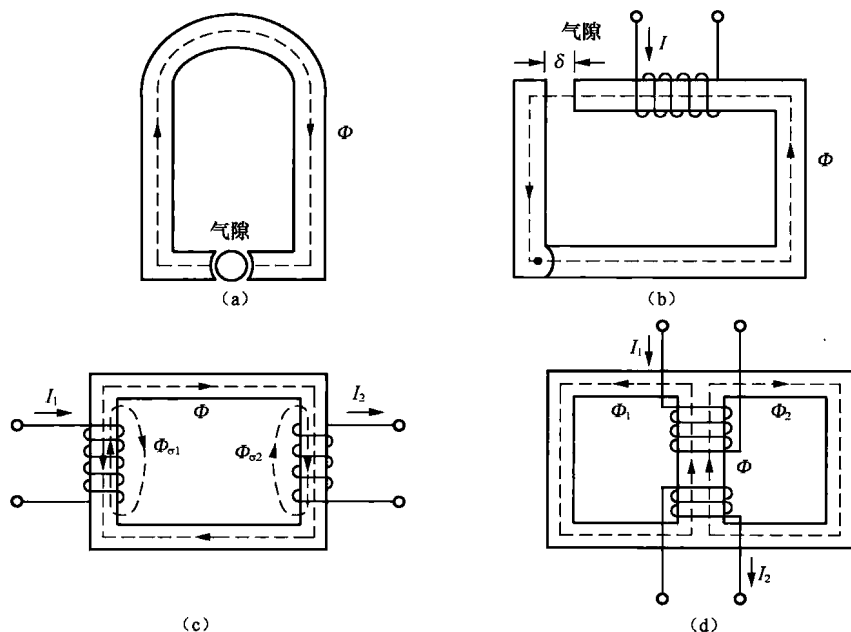


图 1-1 部分电工设备的磁路

1.1.2 电磁理论的基本定律

【展开讲解】全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律和电路定律。

1. 全电流定律

在电机中通常都是由线圈通电来建立磁场, 电流大小和方向决定着它所产生磁场的强弱和方向。

(1) 右手螺旋定则

电流与它所产生的磁场, 两者的方向关系用右手螺旋定则来判定。判定通电直导线所产生磁场的方向时, 用大拇指代表电流方向, 其他四指所指环绕方向则为磁力线方向 (见图 1-2 (a))。判定通电线圈所产生磁场的方向时, 用四指环绕方向代表线圈中电流方向, 则大拇指所指方向即线圈内部的磁场方向 (见图 1-2 (b)), 图 1-2 (c) 是图 1-2 (b) 的一种示意图。

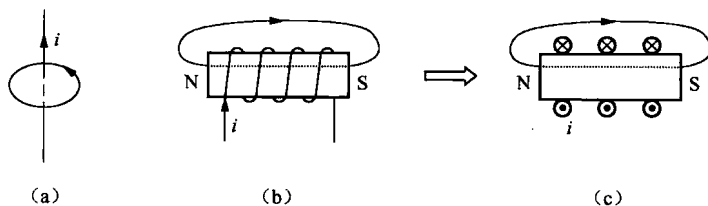


图 1-2 右手螺旋定则