



普通高等教育 电气工程
自动化 系列规划教材

Electric Machines:
Principles and drives

电机原理及拖动

第3版

◎ 彭鸿才 边春元 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育 **电气工程
自动化** 系列规划教材

电机原理及拖动

第3版

主编 东北大学 彭鸿才 边春元
参编 东北大学 贺斌英 李爱平
主审 哈尔滨工业大学 宋世光



机械工业出版社

本书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、异步电动机原理、三相异步电动机的电力拖动、同步电动机、特种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。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等专业本科“电机原理及拖动”课程的教材，也可作为机电一体化专业及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。

本书配有电子课件、习题解答及实验指导等资料，请有需要的任课教师访问出版社教育服务网（www.cmpedu.com），注册用户后下载，或发邮件到 yaxin_W74@126.com 索取。

图书在版编目（CIP）数据

电机原理及拖动/彭鸿才，边春元主编. —3版. —北京：机械工业出版社，2015.12
普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材
ISBN 978-7-111-51977-5

I. ①电… II. ①彭…②边… III. ①电机学—高等学校—教材②电力传动—高等学校—教材 IV. ①TM3
②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 254569 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：王雅新 责任编辑：王雅新 路乙达
封面设计：张 静 责任校对：李锦莉 刘秀丽
责任印制：乔 宇
北京京丰印刷厂印刷
2016 年 1 月第 3 版 · 第 1 次印刷
184mm×260mm · 22.75 印张 · 563 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-51977-5
定价：45.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

第3版前言

本书第2版自2007年出版以来,已经使用了八年。在此期间电机与电力拖动技术又有了很大发展,特别是永磁电机的迅速发展和大量应用。在教材再版修订之时,作者征求了一些使用过本教材的东北大学和兄弟院校老师的意见,修订并增添了以下几部分内容:

1. 更新了绪论“第一节 电机与电力拖动的发展简况”中“二、我国电机制造工业的发展简况”部分的内容。

2. 为了适应本版内容体系的修订,第五章的题目“三相异步电动机原理”调整为“异步电动机原理”。

3. 为了更容易理解异步电动机的原理,对第五章的“第一节 异步电动机的用途、结构及基本工作原理”和“第三节 交流绕组的磁动势”两节内容进行了重新编写。

4. 将第2版第八章的“第七节 单相异步电动机”调整为本版第五章的“第七节 单相异步电动机”,相关思考题与习题也进行了相应调整。

5. 删去了第2版第七章的“第六节 自控式同步电动机及“思考题与习题”的“7-15”小题。

6. 按特种电机体系重新编写了第2版的“第八章 控制电机与特种电机”。增添了永磁同步电动机、永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机的相关内容。

本版修订由边春元老师和彭鸿才老师主持完成。东北大学的王大志老师和满永奎老师对本版修订进行了审阅,并提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。此外,东北大学电力系统与电力传动研究所的研究生高白雪、段鹏飞和咸粤飞做了大量资料收集和整理工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

第2版前言

本书第1版自1996年出版以来,已经使用了十年。在此期间电机与电力拖动技术又有了很大发展,特别是交流电力拖动系统变频调速变化更大。在教材再版修订之时,作者也征求了一些使用过本教材的东北大学和兄弟院校老师的意见,修订并增添了以下几部分内容:

1. 重新编写了绪论,较详细地介绍了电机和电力拖动技术的发展概况。在绪论中增加了一节“电机理论中的基本电磁定律”,使学生学习“电机及电力拖动”课程之前,先复习一下这些电磁定律,有利于学生对本课程的学习。

2. 第1版教材中,异步电动机电力拖动系统过渡过程的计算机仿真程序是用BASIC语言编写的,而现在BASIC语言已陈旧过时。第2版修订时用比较先进的MATLAB语言改写了计算机仿真程序。

3. 增添了自控式同步电动机(无刷直流电动机)、单相异步电动机、直线电动机的相关内容。

4. 电动机容量选择增加了两个综合性例题。

5. 与本教材配套,在本教材出版后,将配制多媒体电子课件,还将另外出版《电机原理及拖动习题解答与实验指导书》。以上两项工作由东北大学李爱平老师、边春元老师完成。

参加本书修订工作的有彭鸿才老师、贺斌英老师、边春元老师、李爱平老师。

本书由哈尔滨工业大学宋世光老师主审,宋老师详细地审阅了全部书稿,并提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

第 1 版前言

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》教材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》教材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

常用符号表

A ——线负荷; 电机的散热系数	GD_{meq}^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_{ν} —— ν 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_B ——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_0 ——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_i ——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; 异步电机转子绕组匝数
f ——频率; 力	n ——转速
f_{av} ——平均力	n_1 ——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 ——变压器一次电压；异步电机定子电压
P_2 ——输出功率	U_2 ——变压器二次电压；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
p_{Cu} ——铜损耗	v ——速度；导体切割磁场的线速度
p_{Fe} ——铁损耗	X_a ——同步电机电枢反应电抗
p_f ——励磁损耗	X_{ad} ——同步电机电枢反应直轴同步电抗
p_k ——短路损耗	X_{aq} ——同步电机电枢反应交轴同步电抗
p_m ——机械损耗	X_o ——同步电抗
p_s ——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_c ——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	γ ——节距；合成节距
r_m ——变压器、异步电动机励磁电阻	γ_k ——换向节距
r_k ——变压器、异步电动机短路电阻	γ_1 ——第一节距
r_1 ——变压器一次侧电阻；异步电机定子电阻	γ_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_δ ——气隙磁导率
T_2 ——输出转矩	γ ——谐波次数；异步电机能耗制动时的转差率
t_{st} ——起动时间	ρ ——回转半径
t_0 ——制动时间	
U_c ——控制电压	

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

第3版前言

第2版前言

第1版前言

常用符号表

绪论 1

第一节 电机与电力拖动的发展简况 1

第二节 本课程的性质、任务和 学习方法 7

第三节 电机理论中的基本电磁定律 9

第一章 直流电机原理 13

第一节 直流电机的用途、结构及基本 工作原理 13

第二节 直流电机的空载磁场 17

第三节 直流电机的电枢绕组 19

第四节 直流电机的电枢反应 23

第五节 直流电机的电枢电动势 与电磁转矩 26

第六节 直流发电机 27

第七节 直流电动机 33

第八节 直流电机换向简介 40

思考题与习题 44

第二章 电力拖动系统的动力

学基础 46

第一节 典型生产机械的运动形式 及转矩 46

第二节 电力拖动系统的运动方程式 48

第三节 多轴电力拖动系统转矩及 飞轮力矩的折算 52

第四节 负载的机械特性 58

思考题与习题 60

第三章 直流电动机的电力拖动 63

第一节 他励直流电动机的机械特性 63

第二节 他励直流电动机的

启动和反转 71

第三节 他励直流电动机的调速 76

第四节 他励直流电动机的制动 85

第五节 电力拖动系统的过渡过程 95

思考题与习题 110

第四章 变压器 114

第一节 变压器的用途、工作 原理及结构 114

第二节 变压器的空载运行 118

第三节 变压器的负载运行 122

第四节 变压器参数的试验测定 128

第五节 变压器的运行特性 131

第六节 三相变压器 134

第七节 特殊变压器 142

思考题与习题 148

第五章 异步电动机原理 151

第一节 异步电动机的用途、结构及 基本原理 151

第二节 交流电机的绕组和它的感应 电动势 158

第三节 交流绕组的磁动势 169

第四节 转子不转时的异步电动机 175

第五节 转子转动时的异步电动机 182

第六节 异步电动机的功率传递 与转矩平衡 187

第七节 单相异步电动机 191

第八节 异步电动机的工作特性 195

思考题与习题 197

第六章 三相异步电动机的

电力拖动 200

第一节 三相异步电动机的机械特性 200

第二节 笼型异步电动机的启动 212

第三节 绕线转子异步电动机的启动 221

第四节 三相异步电动机的调速 226

第五节 三相异步电动机的各种运行状态	243	第七节 直线电动机	313
第六节 异步电动机拖动系统的机械过渡过程及能量损耗	254	第八节 测速发电机	317
思考题与习题	260	第九节 自整角机	320
第七章 同步电动机	264	第十节 旋转变压器	322
第一节 同步电机的基本结构与工作原理	264	思考题与习题	326
第二节 同步电动机的电动势相量图	266	第九章 电力拖动系统中电动机的选择	328
第三节 同步电动机的功率、转矩和功(矩)角特性	269	第一节 电动机选择的一般概念	328
第四节 同步电动机的励磁调节与U形特性曲线	273	第二节 电动机发热及冷却的规律	330
第五节 同步电动机的起动	277	第三节 电动机的工作制	332
思考题与习题	281	第四节 连续工作制电动机额定功率的选择	334
第八章 特种电机	283	第五节 短时工作制电动机额定功率的选择	339
第一节 概述	283	第六节 断续周期工作制电动机额定功率的选择	341
第二节 永磁同步电动机	286	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	342
第三节 永磁无刷直流电动机	290	第八节 容量选择举例	344
第四节 步进电动机	296	思考题与习题	351
第五节 开关磁阻电动机	300	参考文献	353
第六节 伺服电动机	304		

绪 论

第一节 电机与电力拖动的发展简况

一、电机制造工业的发展简况

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,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依据。此后制出了直流发电机,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,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两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。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型异步电动机结构简单,价格便宜,工作可靠,19 世纪 90 年代在欧美国家得到了广泛应用。用电量的大增,使得三相电网容量迅速扩大,电力工业迅速发展,从而使三相同步发电机和三相电力变压器的产量迅速增加。

进入 20 世纪,由于异步电动机用量越来越大,给电网带来了新的问题,就是使电网功率因数降低,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,使发电和输变电设备得到充分利用。因此,同步电动机在一定范围内得到了应用。

到 20 世纪初,几种主要类型的电机——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(包括笼型异步电动机和绕线转子异步电动机)、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。此后的一百多年里,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,因此减轻了电机的重量,提高了电机的单机容量。

20 世纪以后,生产厂家、科研院所的广大电机科技工作者为减小电机尺寸,减轻电机重量,提高电机单机容量进行了大量的科学研究工作。他们不断地更新电机的绝缘材料,提高电机的耐热等级;选用更好的导电材料和导磁材料,使电机的电磁性能不断提高;不断改善电机的生产工艺;研究电机的发热和冷却过程,改善电机的通风和散热条件,使电机的尺寸减小,重量减轻。

从表 0-1 可以大致看出电机尺寸在逐年减小,重量在逐年降低的情况。

表 0-1 电机尺寸和重量的变化

年份	容量/kW	转速/(r/min)	外径/mm	总长/mm	总重/kg
1893	3.7	1500	450	600	150
1903	3.7	1500	430	550	105
1913	4.0	1500	390	500	94
1926	4.0	1500	350	470	65
1937	4.0	1500	290	400	56

随着电机尺寸的减小,重量减轻,单机容量在不断增大。单机容量越大,电机中单位容量所需的材料越少,电机的损耗越小,效率越高。另外,单机容量越大,电站中的机组数量可以减少,从而可以减少电站的工作人员,减少厂房面积,节省大量投资,有很好的经济效益。因此尽量把单机容量做大。在把单机容量做大的过程中除采用高性能的绝缘、导电、导磁材料外,采用先进的冷却散热方法也起到重要作用。如采用氢冷、水内冷、双水内冷等方法对提高单机容量都起到了极大的作用。单机容量的增加以汽轮发电机为例:1900 年单机容量不超过 $5\text{MV} \cdot \text{A}$,1920 年增至 $60\text{MV} \cdot \text{A}$,1937 年达 150MW ,1956 年制成了 208MW 机组,20 世纪 70 年代以后先后制成了单机容量为 $800 \sim 1300\text{MW}$ 的汽轮发电机。

除了上述几种主要类型电机外,还有一些专门为了满足某些生产工艺特殊要求,适应一些特殊工作环境的专用电机,这些电机主要有:

- 1) 牵引电动机。
- 2) 防爆电动机。
- 3) 高起动转矩电动机。
- 4) 起重冶金专用电机。
- 5) 船舶专用电机。
- 6) 航天、航空专用电机。
- 7) 潜水、潜油电动机。

在自动控制系统中应用着各种各样的控制电机或称控制系统用微电机。它们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。这些电机主要有:

- 1) 测速发电机。
- 2) 伺服电机。

- 3) 自整角机。
- 4) 旋转变压器。
- 5) 步进电动机。

还有一些中小型电动机,如:直线电动机、开关磁阻型电动机、无换向器电动机(或称自控式同步电动机)、单相交流电动机、电磁调速电动机等。这些电动机也在不同场合得到了应用,现在这些电机大部分都已经形成了系列产品。

二、我国电机制造工业的发展简况

我国的电机制造工业实际上是在 1949 年建国后才发展起来的。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,仅有的一些小电机厂设备简陋,大多数是属于修理和装配性质的,根本没制造过大型汽轮发电机和水轮发电机。生产的发电机最大不过 200kW,电动机不过 180kW,变压器最大不过 2MV·A。成套的发电设备全是从国外进口的。

解放后,我国的电机制造工业和其他事业一样得到了迅速的发展。第一个五年计划期间就建成了一批如上海电机厂、哈尔滨电机厂、沈阳变压器厂等大型电机制造企业,为我国的电力工业生产各种大型的发电机和电力变压器,各种中小型电机厂更是遍布全国。到第一个五年计划末的 1957 年,我国电机的年产量已达 1455MW,是 1949 年年产量 61MW 的 23.9 倍,电机产品的自给率已达 75%。

大型同步发电机——汽轮发电机和水轮发电机的单机容量在一定程度上反映了我国电机制造工业的水平。建国后,我国在 1954 年就生产出单机容量为 6MW 的汽轮发电机,1955 年生产出 10MW 的水轮发电机。到 20 世纪 50 年代末,我国已能生产单机容量为 50MW 的汽轮发电机、75MW 的水轮发电机和 120MV·A 的电力变压器。特别是 1958 年浙江大学和上海电机厂等单位合作研制出世界上第一台 12MW 的双水内冷汽轮发电机,于同年 12 月在上海发电厂并网发电,一举震动了国际电工界。到 20 世纪 70 年代,我国已经生产出 300MW 的汽轮发电机和 308MW 的水轮发电机。电力变压器的电压等级达到 500kW,容量达 550MV·A。现在国产汽轮发电机的单机容量已超过 1000MW,水轮发电机的单机容量超过 800MW,电力变压器的单机容量为已达 1500MV·A,电压等级为 1000kV。我国已能对外出口大型成套发电和输变电设备。可见我国的电机制造工业发展速度是十分惊人的,正在向世界先进水平靠近。

在大型交流电动机方面我国在 20 世纪 60~80 年代已经生产出单机容量为 16MW 的同步电动机,6.3MW 的笼型异步电动机和 4MW 的绕线转子异步电动机。

在大型直流电机方面,我国在 1964 年生产出 1150 初轧机用的 4.93MW 和 4.5MW 的直流发电机——直流电动机机组。1975 年为 1700 连轧机生产了 2×3000 kW 的直流电动机。国产最大直流电机为 7MW、1000V、电机外径为 3.8m,它的换向难度和整体水平已接近世界先进水平。1975 年我国生产了晶闸管供电的 GZ 型直流电动机系列,1982 年改进为 GZ2 系列。

对于使用量最大的中小型异步电动机,我国早在 1953 年就进行了第一次全国统一设计,系列化生产后摆脱了过去的混乱局面。1961 年第二次全国统一设计的 J2、J02 系列与老系列 J、JO 系列相比性能有很大提高,效率提高 1%~2%,体积缩小了 25.5%,重量减轻了

20.1%。1981年我国又按国际电工协会(IEC)标准设计了Y系列异步电动机,取代了J2、J02系列,性能比J2、J02又有很大的提高,效率提高了0.41%,体积减小15%,重量减轻12%。除上述基本系列外,各阶段还有对应的绕线转子异步电动机和其他派生系列及专用系列电机,如防爆电机、潜水电机、起重冶金用电机、高起动转矩电机等。

我国的电机制造业在建国后几十年里的发展速度是相当快的。制造电机所用的绝缘、导磁和导电材料在不断地更新,制造工艺和冷却散热方式也在不断地改善,单机容量在不断地增大,电机的尺寸在不断地减小,重量在不断地减轻。到上世纪八十年代初期我国已经建成了十分完整的各种电机制造体系,各式各样的电机制造厂分布在全国各地。

20世纪80年代以后,电机制造业发展得更快。特别是进入21世纪出现了多项的世界第一,下面仅举几例:

1. 哈尔滨电机厂为三峡电站制造的十台大型水轮发电机

哈尔滨电机厂为三峡公司溪洛渡水电站制造了六台770MW水轮发电机及为向家坝水电站制造了四台812MW水轮发电机。这十台巨型机组从2013年7月第一台机组开始吊装调试到2014年7月初第十台机组并网发电仅仅用了一年的时间就全部吊装调试成功,从机组生产到吊装调试都达到了世界先进水平。812MW的水轮发电机组是当今世界上容量最大的水轮发电机组。

2. 哈尔滨电机厂制造出我国最大容量的汽轮发电机

哈尔滨电机厂引进日本东芝技术,全面消化吸收,于2007年制造出我国最大的汽轮发电机,容量为1000MW,最大发电能力可达1100MW。

3. 我国建成世界上第一条1000kV特高压输电线

这条特高压输电线路北起山西省的长治,中国经过河南省的南阳,南到湖北省荆门。全长654公里,变电容量6000MV·A,电压1000kV,最高运行电压1100kV。2008年12月全面竣工,2009年1月投入商业运行,这是世界上第一条特高压输电线路。

4. 我国研制成功世界电压最高、容量最大的电力变压器

保定天威保变电器股份有限公司自行研发设计了具有完全自主知识产权和核心技术的世界首台最高电压、最大容量的单相特高压电力变压器样机。这台变压器容量为1500MV·A,电压为1000kV,于2011年12月顺利通过所有试验项目考核,主要性能技术指标达到国际先进水平。

5. 中国东方电气集团东方电机有限公司造出世界最大单机容量核能发电机

到2012年底东方电机厂已为我国核电站生产了14台核能发电机,总容量达15790MW。其中最大发电机单机容量为1750MW,技术难度最大,是当今世界上单机容量最大的核能发电机。

6. 我国自主研发的高铁永磁同步牵引电动机达到了世界先进水平

电气牵引电动机的发展大致可分为三代。20世纪上半期可称为第一代,当时的城市电车,矿山电机车用的牵引电动机都是直流串激电动机,因为它的起动和制动转矩大,能较好的满足机车的起制动要求;20世纪60~70年代可称为第二代,这时由于交流变频调速的发展,牵引电机用的是异步电动机,当时的永磁同步牵引电动机技术尚不过关;20世纪末到现在为第三代,用的是永磁同步牵引电动机。

我国中车株洲电力机车研究所,历时11年,耗资1亿元攻克了永磁同步电动机牵引系

统。研发出可用于 500km/h 高铁动车的 690kW 永磁同步电动机牵引系统,并即将小批量生产。此前 2011 年株州所为沈阳地铁 2 号线安装的 190kW 永磁同步电动机牵引系统,已经无故障运行了 7 万公里。

7. 现在我国水电装机总容量世界第一

2015 年世界水电大会在北京召开,到 2014 年底全球水电装机总容量约为 10 亿千瓦,我国装机总容量超过 3 亿千瓦,占全球的 27%。我国已先后与世界上 80 多个国家建立了水电规划、建设和投资的长期合作关系,成为推动世界水电发展的重要力量。

由以上几个例子可以看出,我国的电机制造工业在一些领域已经赶上和达到了世界水平,在个别领域已经领先于世界水平。

三、电力拖动的发展简况

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、畜力、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。

20 世纪 20 年代以前,属于电力拖动的初始阶段,这一时期采用的是“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,电动机离生产机械较远,电动机通过天轴和皮带拖动生产机械。这种拖动方式传动损耗大,生产效率低,控制不灵活。一台生产机械出现故障,很可能引起多台生产机械停机。车间里传动带很多,生产环境、卫生条件较差,易出人身事故,也无法满足生产机械的起制动、正反转及其他调速要求,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,这样车间里可以省去大量的传动带、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,每台电动机单独控制,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,例如车间里的吊车都有大桥、小车和吊钩三个工作机构,它们分别由三台电动机拖动,这可使生产机械结构大为简化,控制也十分方便,更加灵活。

如前所述,在电力拖动的发展历史上,最早出现的是直流电机拖动。但在几十年的发展过程中,由于直流电机电压无法提高,电网无法扩大,应用受到限制。直到 19 世纪末,三相交流电的出现,使得三相发电、输变电、用电迅速扩大,极大地促进了工业的发展。特别是三相异步电动机的大量生产,使得生产机械的电力拖动迅速扩大,在此后几十年里工业发展很快,电力拖动成为工厂中生产机械的主要拖动方式。在这一时期里(20 世纪初到 60 年代)拖动生产机械的电动机主要有笼型异步电动机、绕线转子异步电动机、同步电动机和直流电动机。从数量上看,笼型异步电动机用量最大;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),所以常把这一时期称为直流拖动系统占居首位的时期。在这一时期中,各种电动机拖动系统的应用范围大致如下:

(1) 笼型异步电动机拖动系统 由于笼型异步电动机结构简单、价格便宜、坚固耐用、易于维护等一系列优点,工厂中凡是不经常起动,基本上不需要调速的生产机械多用笼型异步电动机拖动。如工厂中大量的风机、水泵、空压机和带传动运输机等通用机械,机械制造厂中的各种工作母机绝大多数都由笼型异步电动机拖动。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,笼型异步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) 绕线转子异步电动机拖动系统 由于绕线转子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转子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,一般用的不多。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。例如,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。他励直流电动机常用一台单独的直流发电机为它供电,这就组成了直流发电机—直流电动机机组(F—D)。最早的(F—D)机组出现在20世纪30年代。当时的机组由一些继电器和接触器等开关电器控制,其中并无放大环节。到20世纪50年代出现了交磁放大器、磁放大器等中间放大环节。它们的加入使拖动系统的调速和控制性能大为提高,形成了自动化的直流电力拖动系统。

从20世纪初到60年代这段时间,除上述几种电机拖动系统外也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,随着电力电子器件(也称大功率半导体器件)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。实际上,从交流电动机一出现,人们就已经知道变频可以调速,并且是一种相当好的调速方法。但苦于没有找到可供实用的变频电源,使这种调速方式当时没有得到应用。20世纪30年代,人们又对异步电动机的各种调速方法进行了详细的研究,力图找到一种有效的调速方法取代价格昂贵、维护困难的直流拖动系统,但一直没有取得很大进展。直到20世纪60~70年代,电力电子器件晶闸管(可控硅)、大功率晶体管批量投产后,使电力拖动系统发生了巨大变化。在直流拖动系统中由晶闸管可控整流器代替了(F—D)机组中的直流发电机,成为晶闸管可控整流器—直流电动机拖动系统。在交流拖动方面出现了绕线转子异步电动机串级调速、无换向器电动机调速及各种变频调速。此后的20~30年里,电力电子技术、微电子技术、微计算机技术的发展非常迅速。在晶闸管、大功率晶体管(GTR)大量应用之后,绝缘栅双