

高等学校教学参考书

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE CANKAOSHU

# 电 机 学

上 册

浙江大学编



机 械 工 业 出 版 社

高等学校教学参考书



# 电 机 学

上 册

浙 江 大 学 编



机械工业出版社



本书系根据浙江大学所編的《电机学》讲义改編而成，内容为綜合地闡述电机的各种問題。全书分上下册出版，本书为上册，内容包括直流电机和变压器二篇。

本书可作高等学校电机系与电力系各专业《电机学》課程的教学参考书，书中部分次要内容用小字体排印，各专业可以根据需要决定取舍。本书也可供从事电机制造和电机运行的工程技术人员参考。

## 电机学

上册

浙江大学編

\*

第一机械工业部教材編审委员会編輯(北京复兴門外三里河第一机械工业部)

机械工业出版社出版(北京苏州胡同141号)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

\*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $16^{3/4}$ ·字数388千字

1965年7月北京新一版·1965年7月北京第一次印刷(重排本)

印数0,001—1,500·定价(科五)2.00元

(1961年10月中国工业出版社北京第一版)

\*

統一书号: K15033·3909

# 前 言

《电机学》是一門电机系和电力系絕大部分学生都要学习的基础技术課。

本书主要是根据电机制造专业的要求来編写的，同时也兼顧到发电、电器、工企各专业的需要。书中較次要的內容用小字排印，讲授者对这些部分可以根据具体教学情况酌量少讲或不讲，不学习这些較次要的內容并不会影响对电机基本原理的掌握。电机制造专业以外的各专业，可以根据自己的需要，适当地删去若干与专业关系不大的內容。

本书每章之末大多附有例題、思考題和习題。我們希望学生在复习了課堂讲授的內容之后，通过这些題目，能达到进一步巩固和深入掌握的目的，因此这些題目有許多是带有复习性和启发性的。这些題目，并非全部要做，可以由教师根据具体情况指定其中的一部分。

本书共分上、下两册：上册讲直流电机和变压器，下册讲交流电机理論的一般問題、异步电机、同步电机和交流整流子电机。我們从直流电机开始編起，这是因为考虑到多数学校多数教师从直流电机开始讲起的經驗比較丰富，同时考虑到直流电机在电势和磁势产生的基本原理上比交流旋轉电机容易理解些，再則在实验次序上也是先做直流电机实验，后做交流电机实验困难比較少些；但是，根据教和学的具体条件，如有需要，也可以先从上册第二篇开始讲起，我們也曾經做过这样的尝试。至于下册中异步电机和同步电机的讲授次序，則無論孰先孰后都是可以的，根据过去的初步經驗来看，学生学习异步电机时的困难比同步电机少些，而且异步电机和变压器之間的联系比較密切，因此我們沿用了我校数年的习惯，将异步电机放在第四篇，而将同步电机放在第五篇。

本书主要是根据我校1959年春編写和逐年修訂的《电机学》讲义和《电机学习題集》編成的。同时还参考了下列书籍和讲义，引用了其中的部分材料：

1. М. П. Костенко Л. М. Пиотровский, Электрические машины, ч I и II, ГЭИ, 1958.
2. Л. М. 朴德罗夫斯基著, 电机学, 清华大学电力机械教研組等譯, 第一册至第四册, 高等教育出版社出版。
3. Г. Н. 彼特罗夫著, 电机学, 天津大学电力机械教研室等譯, 第一册至第三册, 高等教育出版社出版。
4. Под Редакцией П. С. Сергеева. Проектирование Электрических машин, ГЭИ, 1952.
5. П. С. Сергеев, Электрические машины, ГЭИ, 1955.
6. А. В. Сапожников, Конструирование трансформаторов, ГЭИ, 1952.
7. 华中工学院电机教研室編, 电机学讲义。
8. 哈尔滨工业大学湯蘊璆主編, 电机学讲义 (II) 直流电机。
9. 吳大榕著, 电机学, 上下册。

我們在編写时虽力求把基本原理讲清楚，把疑难和重点处突出讲解，但由于我們經驗不足，水平和学識低淺，同时这次編写時間非常仓促，故缺点和錯誤之处恐尚不少，至于符号、詞句、文体等方面則恐更多缺陷，希望各兄弟学校的教师和同学们以及各方面的讀者多多提出意見和批評指正，以便能进一步修改提高。

# 目 录

前言 .....	3	5-2 换向的基本理論 .....	76
緒論 .....	7	5-3 火花 .....	79
<b>第一篇 直流电机</b>			
第一章 直流电机的工作原理和构造 .....	11	5-4 换向元件中电势 $e_L$ 、 $e_r$ 和 $e_K$ 的計算 .....	81
1-1 概述 .....	11	5-5 换向电流对主磁場的影响 .....	86
1-2 直流电机的工作原理 .....	11	5-6 改善换向的方法 .....	87
1-3 直流电机的构造 .....	13	5-7 电位差火花与环火的形成和制止 .....	91
1-4 額定值 (或定額值) .....	19	5-8 现代学者对經典换向理論的批判和 对接触导电的研究 .....	94
第二章 直流电机空載磁路 .....	20	5-9 换向的檢驗方法 .....	99
2-1 磁路的組成和基本計算方法 .....	20	第六章 直流发电机 .....	103
2-2 气隙磁势 $F_g$ 的計算 .....	22	6-1 直流发电机的分类 .....	103
2-3 齿的磁势 .....	24	6-2 发电机的几个基本关系 .....	104
2-4 电樞鉄芯的磁势 .....	27	6-3 直流发电机的基本特性 .....	106
2-5 磁极和磁軛的磁势 .....	27	6-4 他激发电机的特性 .....	106
2-6 电机的磁化曲綫 .....	27	6-5 并激发电机的特性 .....	111
第三章 电樞繞組 .....	32	6-6 串激发电机的特性 .....	115
3-1 概述 .....	32	6-7 复激发电机的特性 .....	115
3-2 环型单叠繞組 .....	33	6-8 各类直流发电机的应用 .....	116
3-3 鼓型电樞繞組的基本特点 .....	37	6-9 并激直流发电机的并联运行 .....	117
3-4 鼓型单叠繞組 .....	40	6-10 复激发电机并联运行的特点 .....	121
3-5 鼓型复叠繞組 .....	43	第七章 直流电动机 .....	126
3-6 鼓型单波繞組 .....	45	7-1 电机的可逆原理 .....	126
3-7 单波繞組的特殊型式 .....	48	7-2 直流电动机能量图 .....	126
3-8 鼓型复波繞組 .....	49	7-3 直流电动机的电压和轉矩方程式 .....	127
3-9 鼓型繞組的对称条件 .....	51	7-4 直流电动机的启动 .....	128
3-10 均压連接 .....	53	7-5 并激电动机的运行特性 .....	131
3-11 复合 (蛙形) 繞組 .....	58	7-6 串激电动机的运行特性 .....	134
3-12 电樞繞組的电势 .....	60	7-7 复激电动机的运行特性 .....	136
3-13 各种繞組的比較 .....	61	7-8 負載的机械特性和电动机稳定 工作的条件 .....	137
第四章 电樞反应 .....	63	7-9 直流电动机的制動 .....	138
4-1 概述 .....	63	7-10 直流电动机的調速方法 .....	140
4-2 負載时直流电机的磁場 .....	63	7-11 改变接入电樞电路的电阻来調速 .....	140
4-3 发电机的电樞反应 .....	67	7-12 改变激磁电流調速 .....	142
4-4 电动机的电樞反应 .....	70	7-13 改变电源电压来調速 .....	144
4-5 橫軸电樞反应的附加去磁磁势的計算 .....	70	7-14 各种电动机的应用 .....	145
4-6 負載时发电机主磁极的磁势 .....	72	第八章 电机的損耗、效率和 发热冷却 .....	150
第五章 换向 .....	75	8-1 电机損耗的分类 .....	150
5-1 概述 .....	75		

8-2 鉄耗	150	12-8 漏抗的計算	203
8-3 銅耗	152	12-9 变压器的損耗和效率	205
8-4 机械損耗	153	第十三章 三相变压器	209
8-5 附加損耗	155	13-1 三相变压器的磁路系統	210
8-6 直流电机总損耗和效率	155	13-2 三相变压器繞組联接法和联接組	212
8-7 电机的发热理論	156	13-3 三相变压器的空載运行	214
8-8 电机的絕緣材料和温升限度	158	13-4 在不平衡負載时三相变压器的运行情况	216
8-9 电机的主要額定工作方式	161	13-5 V/V联接的变压器的运行	220
8-10 电机的通風冷却系統	162	第十四章 多繞組变压器和自耦变压器	225
第九章 特殊直流电机	167	14-1 三繞組变压器的基本方程式、等值电路及向量图	225
9-1 单极发电机	167	14-2 三繞組变压器参数的決定	228
9-2 同步发电机的励磁机	168	14-3 三繞組变压器的电压变化率 $\Delta U$ 的計算	229
9-3 电焊发电机	168	14-4 具有几个原繞組的多繞組变压器	229
9-4 汽車用的三电刷发电机	170	14-5 自耦变压器的基本概念	230
9-5 列車照明发电机	171	14-6 自耦变压器的基本电磁方程式及向量图	232
9-6 电动发电机	171	14-7 应用在高压电力网中的自耦变压器	233
9-7 孙菲尔式的直流变流机	172	14-8 自耦变压器的优缺点	234
9-8 交磁功率放大机	173	第十五章 变压器的并联运行	239
9-9 自激放大机(轉控机)	175	15-1 变压器并联运行的条件	239
第二篇 变压器		15-2 变比相同而短路电压不同的变压器的并联运行	239
第十章 变压器的分类和結構	177	15-3 当变比不同时的負載分配	240
10-1 变压器在国民經济中的地位和作用	177	15-4 三繞組变压器的并联运行	243
10-2 变压器的主要分类	177	第十六章 变压器的瞬变情况	247
10-3 变压器的主要結構	178	16-1 变压器瞬变过程的一般情况	247
10-4 变压器的发热与冷却	183	16-2 变压器接入电网	247
10-5 变压器的額定值	184	16-3 变压器副边的突然短路	248
第十一章 单相变压器的空載运行	185	16-4 变压器突然短路时的机械力	249
11-1 单相变压器空載运行时的物理情况	185	16-5 变压器的过电压	251
11-2 单相变压器空載运行的分析	187	16-6 过电压保护	254
11-3 激磁电抗 $x_m$ 、激磁阻抗 $z_m$ 及漏感电抗 $x_1$	189	第十七章 特殊用途的变压器	256
11-4 变压器空載时的等值电路和向量图	190	17-1 利用变压器变换相数	256
第十二章 单相变压器在負載时的运行	194	17-2 水銀整流器中用的变压器	258
12-1 負載时变压器的基本方程式	194	17-3 具有平滑調节电压的变压器	261
12-2 副边的量折合为原边的量	196	17-4 試驗用变压器	263
12-3 单相变压器在負載时的向量图	197	17-5 具有鉄芯的电抗器和电抗綫圈	264
12-4 单相变压器的等值电路	198	17-6 其他特殊用途的变压器	265
12-5 短路試驗(詳見电机实验)	200		
12-6 变压器中的标么值和百分值	201		
12-7 副边电压变化率	202		

高等学校教学参考书



# 电 机 学

上 册

浙 江 大 学 编



机 械 工 业 出 版 社

本书系根据浙江大学所編的《电机学》讲义改編而成，内容为綜合地闡述电机的各种問題。全书分上下册出版，本书为上册，内容包括直流电机和变压器二篇。

本书可作高等学校电机系与电力系各专业《电机学》課程的教学参考书，书中部分次要内容用小字体排印，各专业可以根据需要决定取舍。本书也可供从事电机制造和电机运行的工程技术人员参考。

## 电机学

上册

浙江大学編

\*

第一机械工业部教材編审委员会編輯(北京复兴門外三里河第一机械工业部)

机械工业出版社出版(北京苏州胡同141号)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

\*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $16^{3/4}$ ·字数388千字

1965年7月北京新一版·1965年7月北京第一次印刷(重排本)

印数0,001—1,500·定价(科五)2.00元

(1961年10月中国工业出版社北京第一版)

\*

統一书号: K15033·3909

## 前 言

《电机学》是一門电机系和电力系絕大部分学生都要学习的基础技术課。

本书主要是根据电机制造专业的要求来編写的，同时也兼顾到发电、电器、工企各专业的需要。书中較次要的內容用小字排印，讲授者对这些部分可以根据具体教学情况酌量少讲或不讲，不学习这些較次要的內容并不会影响对电机基本原理的掌握。电机制造专业以外的各专业，可以根据自己的需要，适当地删去若干与专业关系不大的內容。

本书每章之末大多附有例題、思考題和习題。我們希望学生在复习了課堂讲授的內容之后，通过这些題目，能达到进一步巩固和深入掌握的目的，因此这些題目有許多是带有复习性和启发性的。这些題目，并非全部要做，可以由教师根据具体情况指定其中的一部分。

本书共分上、下两册：上册讲直流电机和变压器，下册讲交流电机理論的一般問題、异步电机、同步电机和交流整流子电机。我們从直流电机开始編起，这是因为考虑到多数学校多数教师从直流电机开始讲起的經驗比較丰富，同时考虑到直流电机在电势和磁势产生的基本原理上比交流旋轉电机容易理解些，再則在实验次序上也是先做直流电机实验，后做交流电机实验困难比較少些；但是，根据教和学的具体条件，如有需要，也可以先从上册第二篇开始讲起，我們也曾經做过这样的尝试。至于下册中异步电机和同步电机的讲授次序，則无论孰先孰后都是可以的，根据过去的初步經驗来看，学生学习异步电机时的困难比同步电机少些，而且异步电机和变压器之間的联系比較密切，因此我們沿用了我校数年的习惯，将异步电机放在第四篇，而将同步电机放在第五篇。

本书主要是根据我校1959年春編写和逐年修訂的《电机学》讲义和《电机学习題集》編成的。同时还参考了下列书籍和讲义，引用了其中的部分材料：

1. М. П. Костенко Л. М. Пиотровский, Электрические машины, ч I и II, ГЭИ, 1958.
2. Л. М. 朴德罗夫斯基著，电机学，清华大学电力机械教研組等譯，第一册至第四册，高等教育出版社出版。
3. Г. Н. 彼特罗夫著，电机学，天津大学电力机械教研室等譯，第一册至第三册，高等教育出版社出版。
4. Под Редакцией П. С. Сергеева. Проектирование Электрических машин, ГЭИ, 1952.
5. П. С. Сергеев, Электрические машины, ГЭИ, 1955.
6. А. В. Сапожников, Конструирование трансформаторов, ГЭИ, 1952.
7. 华中工学院电机教研室編，电机学讲义。
8. 哈尔滨工业大学湯蘊璆主編，电机学讲义（II）直流电机。
9. 吳大榕著，电机学，上下册。

我們在編写时虽力求把基本原理讲清楚，把疑难和重点处突出讲解，但由于我們經驗不足，水平和学識低淺，同时这次編写時間非常仓促，故缺点和錯誤之处恐尚不少，至于符号、詞句、文体等方面則恐更多缺陷，希望各兄弟学校的教师和同学們以及各方面的讀者多多提出意見和批評指正，以便能进一步修改提高。



# 目 录

前言 .....	3	5-2 换向的基本理論 .....	76
緒論 .....	7	5-3 火花 .....	79
<b>第一篇 直流电机</b>		5-4 换向元件中电势 $e_L$ 、 $e_r$ 和 $e_K$ 的計算 .....	81
<b>第一章 直流电机的工作原理和构造 .....</b>		5-5 换向电流对主磁場的影响 .....	86
1-1 概述 .....	11	5-6 改善换向的方法 .....	87
1-2 直流电机的工作原理 .....	11	5-7 电位差火花与环火的形成和制止 .....	91
1-3 直流电机的构造 .....	13	5-8 現代学者对經典换向理論的批判和 对接触导电的研究 .....	94
1-4 額定值 (或定額值) .....	19	5-9 换向的檢驗方法 .....	99
<b>第二章 直流电机空載磁路 .....</b>		<b>第六章 直流发电机 .....</b>	103
2-1 磁路的組成和基本計算方法 .....	20	6-1 直流发电机的分类 .....	103
2-2 气隙磁势 $F_g$ 的計算 .....	22	6-2 发电机的几个基本关系 .....	104
2-3 齿的磁势 .....	24	6-3 直流发电机的基本特性 .....	106
2-4 电樞鉄芯的磁势 .....	27	6-4 他激发电机的特性 .....	106
2-5 磁极和磁軛的磁势 .....	27	6-5 并激发电机的特性 .....	111
2-6 电机的磁化曲綫 .....	27	6-6 串激发电机的特性 .....	115
<b>第三章 电樞繞組 .....</b>		6-7 复激发电机的特性 .....	115
3-1 概述 .....	32	6-8 各类直流发电机的应用 .....	116
3-2 环型单叠繞組 .....	33	6-9 并激直流发电机的并联运行 .....	117
3-3 鼓型电樞繞組的基本特点 .....	37	6-10 复激发电机并联运行的特点 .....	121
3-4 鼓型单叠繞組 .....	40	<b>第七章 直流电动机 .....</b>	126
3-5 鼓型复叠繞組 .....	43	7-1 电机的可逆原理 .....	126
3-6 鼓型单波繞組 .....	45	7-2 直流电动机能量图 .....	126
3-7 单波繞組的特殊型式 .....	48	7-3 直流电动机的电压和轉矩方程式 .....	127
3-8 鼓型复波繞組 .....	49	7-4 直流电动机的启动 .....	128
3-9 鼓型繞組的对称条件 .....	51	7-5 并激电动机的运行特性 .....	131
3-10 均压連接 .....	53	7-6 串激电动机的运行特性 .....	134
3-11 复合 (蛙形) 繞組 .....	58	7-7 复激电动机的运行特性 .....	136
3-12 电樞繞組的电势 .....	60	7-8 負載的机械特性和电动机稳定 工作的条件 .....	137
3-13 各种繞組的比較 .....	61	7-9 直流电动机的制动 .....	138
<b>第四章 电樞反应 .....</b>		7-10 直流电动机的調速方法 .....	140
4-1 概述 .....	63	7-11 改变接入电樞电路的电阻来調速 .....	140
4-2 負載时直流电机的磁場 .....	63	7-12 改变激磁电流調速 .....	142
4-3 发电机的电樞反应 .....	67	7-13 改变电源电压来調速 .....	144
4-4 电动机的电樞反应 .....	70	7-14 各种电动机的应用 .....	145
4-5 橫軸电樞反应的附加去磁磁势的計算 .....	70	<b>第八章 电机的損耗、效率和 发热冷却 .....</b>	150
4-6 負載时发电机主磁极的磁势 .....	72	8-1 电机損耗的分类 .....	150
<b>第五章 换向 .....</b>			
5-1 概述 .....	75		

8-2 鉄耗	150	12-8 漏抗的計算	203
8-3 銅耗	152	12-9 變壓器的損耗和效率	205
8-4 機械損耗	153	第十三章 三相變壓器	209
8-5 附加損耗	155	13-1 三相變壓器的磁路系統	210
8-6 直流電機總損耗和效率	155	13-2 三相變壓器繞組連接法和連接組	212
8-7 電機的發熱理論	156	13-3 三相變壓器的空載運行	214
8-8 電機的絕緣材料和溫升限度	158	13-4 在不平衡負載時三相變壓器的 運行情況	216
8-9 電機的主要額定工作方式	161	13-5 $V/V$ 連接的變壓器的運行	220
8-10 電機的通風冷卻系統	162	第十四章 多繞組變壓器和 自耦變壓器	225
第九章 特殊直流電機	167	14-1 三繞組變壓器的基本方程式、等值 電路及向量圖	225
9-1 單極發電機	167	14-2 三繞組變壓器參數的決定	228
9-2 同步發電機的勵磁機	168	14-3 三繞組變壓器的電壓變化率 $\Delta U$ 的計算	229
9-3 電焊發電機	168	14-4 具有幾個原繞組的多繞組變壓器	229
9-4 汽車用的三電刷發電機	170	14-5 自耦變壓器的基本概念	230
9-5 列車照明發電機	171	14-6 自耦變壓器的基本電磁方程式 及向量圖	232
9-6 電動發電機	171	14-7 應用在高压電力網中的自耦變壓器	233
9-7 孫菲爾式的直流變流機	172	14-8 自耦變壓器的優缺點	234
9-8 交磁功率放大機	173	第十五章 變壓器的並聯運行	239
9-9 自激放大機(轉控機)	175	15-1 變壓器並聯運行的條件	239
		15-2 變比相同而短路電壓不同的 變壓器的並聯運行	239
		15-3 當變比不同時的負載分配	240
		15-4 三繞組變壓器的並聯運行	243
		第十六章 變壓器的瞬變情況	247
		16-1 變壓器瞬變過程的一般情況	247
		16-2 變壓器接入電網	247
		16-3 變壓器副邊的突然短路	248
		16-4 變壓器突然短路時的機械力	249
		16-5 變壓器的過電壓	251
		16-6 過電壓保護	254
		第十七章 特殊用途的變壓器	256
		17-1 利用變壓器變換相數	256
		17-2 水銀整流器中用的變壓器	258
		17-3 具有平滑調節電壓的變壓器	261
		17-4 試驗用變壓器	263
		17-5 具有鉄芯的電抗器和電抗綫圈	264
		17-6 其他特殊用途的變壓器	265
第二篇 變壓器			
第十章 變壓器的分類和結構	177		
10-1 變壓器在國民經濟中的地位 and 作用	177		
10-2 變壓器的主要分類	177		
10-3 變壓器的主要結構	178		
10-4 變壓器的發熱與冷卻	183		
10-5 變壓器的額定值	184		
第十一章 單相變壓器的空載運行	185		
11-1 單相變壓器空載運行時的物理情況	185		
11-2 單相變壓器空載運行的分析	187		
11-3 激磁電抗 $x_m$ 、激磁阻抗 $z_m$ 及漏感電抗 $x_1$	189		
11-4 變壓器空載時的等值電路和向量圖	190		
第十二章 單相變壓器在負載 時的運行	194		
12-1 負載時變壓器的基本方程式	194		
12-2 副邊的量折合為原邊的量	196		
12-3 單相變壓器在負載時的向量圖	197		
12-4 單相變壓器的等值電路	198		
12-5 短路試驗(詳見電機實驗)	200		
12-6 變壓器中的標么值和百分值	201		
12-7 副邊電壓變化率	202		

# 緒 論

## 一 电机在国民經济各生产部門中的作用和主要类型

在国民經济的各个部門中，都需要大量的原动机来拖动各种生产机械以完成其一定的生产任务。电能是现代原动机最常采用的一种重要的能源，这是因为它在生产、傳輸、分配、使用、控制方面都很方便，而且有較高的效率。因此，作为与电能有关的能量变换机械的电机，不論在工业、农业、交通运输业中都是重要的設備，而且在日常生活中也常常用到。电机制造工业的发展对于国民經济其它部門的发展有着一定的影响。

首先，对于电力工业來說，电机是电站和变电所的主要設備。在火力发电厂和水电站中，分別应用汽輪发电机和水輪发电机将机械能轉变成电能。同时，为了經济地傳輸和分配电能到各个用戶，还采用变压器把某种电压的交流电能轉換为另一电压的同频率的电能。

在机械工业以及其他各种工业企业中都广泛地应用着各种电动机。例如各种工作母机都需要电动机来驅动，又如高炉运料装置、电鍍、軋鋼机、吊車、抽水机、鼓風机、攪拌机械以及紡織机械和造紙机等等都可以用电动机作为原动机。

随着农业技术改造的进展，电机在农业上的应用也日趋广泛，例如在排灌机械、打稻机、碾米机、榨油机、茶叶揉捻机和飼料粉碎机等农业机械中，也都逐渐地采用电动机作为原动机。

在交通运输业中，随着城市电气交通运输事业和电气鉄道的发展，需要大量的具有优良的起动和調速性能的牵引电动机，和将交流电变换为直流电的变流机。此外在航运和航空事业中，也需要很多具有特殊性能的船舶电机和航空用电机。

由于近代工业企业生产过程的机械化和自动化程度的不断提高，还需要采用多种多样的微型电机作为自动化系統的測量或控制元件。

最后还应指出，除了以上几个主要方面以外，在国防、文教、医疗等等事业中以及日常生活中，电机也起着日益重要的作用。

綜上所述可見，电机主要是用作能量变换机械。按照能量变换方式的不同，它可分为两大类：一类是作为机械能和电能的变换机械，它具有两种最基本的运行方式，即将机械能轉換为电能的发电机运行方式，和将电能轉換为机械能的电动机运行方式；另一类是将一种电能变换为另一种形式电能的机械，例如将一种电压的交流电能变为另一种电压的交流电能的变压器，和将交流电能变为直流电能的变流机等，这一类电机也可总称为电能变换机。

除上述两大类以外，近年来还有一类用于各种自动化系統的控制电机，也得到了迅速的发展，例如电机調节器和电机放大机等。

从另一种观点来看，根据这些电机（包括发电机、电动机、电能变换机）所采用的电流种类来划分，又可将其分为直流电机和交流电机两大类。其中交流电机又可根据作用原

理的不同而分成变压器、同步电机和异步电机等。

## 二 电机制造业的发展簡史

电机是随着生产的发展而产生和发展的，迄今已有百余年的历史。它在各个时期的发展都取决于当时的生产水平和整个工业的发展情况，而反过来它的每一个重大的发展又促进了其他工业的发展和生产水平的提高。

由于生产企业中对动力的需要，因而当化学能源（原电池）被发现后，人們就企图利用这种能量来拖动机器。因此在十九世紀三十年代就出现了用电磁鉄产生旋轉运动的电动机，但这时是应用原电池作为电源的，所以这种电动机很不經濟，并没有用到工业上去。与此差不多同时就創造出永久磁鉄的換向器式直流发电机。这种发电机最初只用于弧光照明及电解等化学工业。經過三、四十年的生产实践，直流电机的結構不断地作了許多重大的改进，例如自激电机的产生，环型电樞繞組逐渐发展为鼓型电樞繞組等。到了十九世紀七十年代直流电机已具有現代电机的基本結構型式，而且它的应用范围也逐渐扩大了。

由于工业企业对直流电机需要的增长，很快地就揭露出它所存在的重大的缺点，例如远距离輸电要求把电压升得很高，但是对于直流电机来說这却是相当困难的，又如直流机換向器的运行不够可靠，单机容量不能作得很大等。所以在十九世紀八十年代里电工界又逐渐加强了对交流电的研究。

在上一世紀七十年代，交流电已开始应用到照明設備上去。同时也創造出多极多相的原始形式的同步发电机，和开路鉄心的原始形式的变压器。但是交流电在电力拖动上的应用却是一直到 1889 年才开始的，因为那时开始出现了三相交流电力系統，并且已造出三相异步电动机和三相变压器。由于三相交流系統具有比直流电很明显的优点，所以发展很快，不久后就占有了主导地位。

在十九世紀八十年代末和九十年代里，随着交流电站迅速发展，和电机容量的增大，提出了高速原动机的要求，以便和发电机直接联接。所以，具有較高經濟指标的高轉速的汽輪机的出現，不久便代替了蒸汽机来拖动发电机。

与提高发电机轉速和容量有連带关系的是交流电的标准頻率問題。在制造了許多頻率从 15 到  $133\frac{1}{3}$  赫范围以內的发电設備以后，为了制造和使用的方便，在九十年代里，交流电的頻率逐渐趋于一致，在欧洲及其他大多数国家都采用了 50 赫作为标准頻率，美国等少数国家采用了 60 赫。

随着工业和交通运输业对电力要求的日益增长，又暴露了新的矛盾，就是：作为电力系統来說，交流电比直流电有着絕对的优越性，而作为电动机来說，直流电动机性能却較好。为了解决这一矛盾，就需要創造出能将交流电經濟地轉換为直流电的变流設備，或者性能符合特殊要求的交流电动机，这就促成了在九十年代新型电机——单樞換流机和交流換向器电机的出現。在十九世紀末和二十世紀初，电机的各种主要类型都已造出来了，同时也完成了电机的基本理論和它的設計計算方法。

二十世紀以来，电机又有了进一步的发展。这时随着工业和交通运输业的蓬勃发展，因此对电机的成本低、重量輕、尺寸小、单机容量大、性能好、用途广等各个方面都提出了全面的更高的要求。相应地就要求广泛地开展科学研究工作，来研究在电机里发生的电

磁过程和发热过程，并寻求新的絕緣材料、改善电工鋼的性能以及改进电机的結構和制造工艺等。因此在这几十年中，即使各种电机的基本原理沒有多大改变，但是它們的結構型式却有了很大的变化，同时电机的类型和品种也大大增多。

首先，二十世紀以来，电机的重量和外形尺寸有了显著的减小。例如，3.7~4千瓦、1500轉/分的异步电动机，每千瓦的重量已由1896年的67公斤降低到第一次世界大战后（1924年）的21公斤，和現在的11公斤以下的先进水平。其次，在发电設備方面，单机容量有了很大的提高。現在看来，数万千瓦的发电机，在工业較发达的国家中，已經是屢見不鮮的了。

此外，电机中所用的絕緣材料和导磁材料也获得了很大的发展。例如，在新的絕緣薄膜方面，有聚酯薄膜（即拉夫桑薄膜）、聚四氟乙烯薄膜等；在新的浸漬漆方面，有醇酸树脂漆、硅有机漆、环氧硅有机混合漆等；在新的浸漬胶方面，有不饱和聚酯胶、环氧树脂胶、热彈性胶等。目前还开始广泛地采用玻璃纖維制成的新型絕緣材料，它的耐热性、电气性能和机械强度都較好。在导磁材料上已生产了0.35毫米厚、損耗小、并塗有耐热絕緣膜的成卷的方向性的冷軋硅鋼片。

同时，在这一段时期內，对电机的电磁、热、机械及其它过程方面进行大量的全面而深入的理論性和实际性的試驗研究工作，对于电机制造的发展也具有重要的意义。例如，在电机冷却技术的研究上，当采用空气冷却时一般只能造到数万千瓦的汽輪发电机，而当采用了氫气表面冷却和氫內冷后，单机容量可提高到20万千瓦以上。

最后，从二十世紀三十年代末期起，需要应用大量的特殊电机的企业部門取得了广泛的发展，这就促使了許多特殊电机的产生和发展，如电机放大机、測速发电机、自整角机、步进电机等特种电机和微型电机。

在二十世紀中，电机制造工业所以能取得这么大的进步，是和整个机械制造工业的迅速发展分不开的。机械制造工业中出現的一些新成就，如电渣焊、压鑄、高速切削、大型离心澆鑄、电火花加工等新工艺都对电机制造工业有着很大的影响。

但是，不能认为电机的发展現在已經达到登峰造极的阶段了。电机制造工业也和其它工业一样总是在不断发展，特别是为了满足社会生产发展的需要，应该不断地提高电机的质量和效率，减低材料消耗和制造成本，此外还要不断地扩大品种和应用范围，例如精密的微型电机，以及能适应各种特殊需要的特种电机等。因此，还有許多复杂的理論問題、結構設計和制造工艺問題、以及新材料、新技术的应用問題等都需要进一步解决。

### 三、我国电机制造工业的发展簡况

解放前帝国主义为了霸占我国市場掠夺我国人民财富，尽力窒息我国民族工业的发展，因此当时的电机制造工业基础十分薄弱，主要是做些装配修理工作。在解放前曾制造过的交流发电机单机容量不超过200千瓦，交流电动机不超过300馬力，变压器不超过2000千伏安，其电压等級最高只有33千伏。当时的电机制造厂不仅規模小、設備簡陋，而且制造的形式規格十分混乱，技术标准不統一，材料也大部分依賴于国外进口，所有这些工厂基本上是半殖民地性质的修配工厂，其生产能力是微不足道的。根据伪資源委员会的統計，从1937~1945年七年間一共才生产了32464千瓦的电动机和2489千瓦的发电机。

解放十几年来，由于党的正确领导和电机制造部门全体职工的积极努力，我国电机工业的面貌已有了巨大的改变，我們已经从基本上是零星修配的局面，逐步发展为现代化的电机工业。

在 1949 年到 1952 年的生产恢复时期，在接收、整顿、改造旧的工厂的同时也积极地开展了新产品试制工作，发展了生产的规模。那时已能制造出 3000 千瓦的水轮发电机，300 千瓦的直流电机和 940 千瓦的异步电动机。

在 1953 到 1957 年的第一个五年计划期间，电机制造工业和其它工业一样，得到了迅速的发展，初步建立了电机工业的基地。在这五年间电机的产量有了巨大的增长，以电动机为例，1957 年的年产量达到 145.5 万千瓦，增加为 1949 年年产量 6.1 万千瓦的 23.9 倍。同时在这一阶段，我国电机制造工业的技术水平有了迅速的提高，逐渐掌握了一系列的产品的设计方法和先进工艺，而且培养出大量的技术工人和技术干部，试制出大量新产品。

1958 年我国开始了第二个五年计划的建设。由于党提出了「鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义」的总路线，大大地提高了全国人民加速建设社会主义的积极性。电机制造工业也和其它工业部门一样，由于坚决贯彻执行了党的总路线和各项方针政策，在企业中加强了党的领导，坚持政治挂帅，大搞群众运动，大闹技术革新和技术革命，因而获得了空前的发展。

综上所述，解放十几年来我国电机制造工业的发展速度是空前的，所取得的成就也是巨大的。但是为了在不太长的历史时期内，把我国建设成为一个具有现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的社会主义强国，我们电机制造业的全体职工必须在党的领导下，自力更生、奋发图强，在短时期内把我国的电机制造工业提高到一个新的更高的水平。

# 第一篇 直流电机

## 第一章 直流电机的工作原理和构造

### 1-1 概 述

直流电机是最先发展的一种电机。1834年俄国B. C. 雅哥比根据电磁感应定律完成了第一台可供实用的直流电动机。以后，通过各国的生产实践和不断的研究改进，到了十九世纪八十年代时，直流电机已具备了今日直流电机的全部主要特征。近八十年来，在结构基本定型的基础上，对于节省原材料、改进工艺、提高单机容量、改善电气性能等各方面展开了全面的研究，并已取得巨大的成就。

直流电机可分为换向器式和单极式两大类。前者是最广泛使用的一种，它是利用称作“换向器”的特殊部件把电枢线圈在磁场中迴轉感应出的交流电转换为直流电，并引出到外电路上。单向直流电机（亦称单极电机）则没有换向器，电枢导体的感应电势本身就是直流电。由于它只能造成低电压大电流的电机，而且效率较差，因此仅使用于某些特殊场合下。

直流电动机具有较优良的调速特性——调节平滑、范围广、设备简单、操作方便，因此它被大量使用于机床设备、起重设备、搬运机械、电力机车和轧钢设备等许多方面，作为这些机械的原动机。在使用直流电机的厂矿中，一般都备有直流发电机作为直流电源。直到现在为止，绝大部分的同步电机均用直流发电机作为励磁机。低压大电流的直流发电机，更是化学工业中电解和电镀不可缺少的电源。此外，直流发电机还可供蓄电池充电和电焊之用。在自动控制系统中，小容量直流电机的应用更是极为广泛。随着工业的发展，对直流电机的需要将会愈来愈多。

本篇主要的篇幅用来分析目前普遍使用的一般的换向器式直流发电机和电动机。我们将着重系统地分析它们的电磁过程和运行特性，同时也介绍有关这些电机的结构、冷却方式、使用维护等基本知识。最后，再对某些常用的，供特殊用途的电机作一简要的介绍。

### 1-2 直流电机的工作原理

一般的旋转电机都是基于电磁感应的原理来进行能量转换的，这可以用一个最简单的模型电机来说明它的基本工作原理。

#### A. 电势的产生

图中  $abcd$  为绕于转动铁芯上的线圈，其两端分别与一个固定于转轴上与线圈有相同转速的铜环（称滑环）联接，铜环上置有两个接通外电路的静止电刷  $A - B$ 。当铁芯被原动机带动以某一转速  $n$  或线速度  $v$  作反时针旋转时，则由法拉第定律可得每一导体所感应的瞬时电势为：

$$e = v l B_{\tau} \quad (1-1)$$