

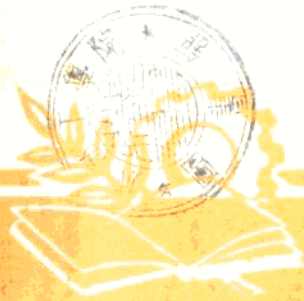
288551

高等学校試用教科书

电 机 学

上 册

浙 江 大 学 編



中国工业出版社

7

高等学校試用教科書



电 机 学

上 册

浙 江 大 学 編

中 國 工 業 出 版 社

本书系根据浙江大学所編的〔电机学〕讲义改編而成，内容为綜合地研究电机的各种問題。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〕課程的教材，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

*

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印張 $16 \frac{3}{4}$ · 字数 388,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数 0,001—6,037 · 定价(10-6)2.00元

統一书号: 15165·981(-第-216)

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。讲授时数大致考虑为120~140学时左右。书中較次要的内容用小字排印，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内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内容。

本书每章之末大多附有例题、思考题和习题。我們希望学生在复习了課堂讲授的内容之后，通过这些题目，能达到进一步巩固和深入掌握的目的，因此这些题目有許多是带有复习性和启发性的。这些题目，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空間和时间关系等基本原理上比交流旋轉电机容易理解些，再则在实验次序上也是先做直流电机实验后做交流电机实验比較困难少些；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来的习惯，将异步电机放在第三册，而将同步电机放在第四册。

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]而編成的。同时还参考了下列各主要书籍和讲义，引用了其中的部分材料：

1. М. П. Костенко и Л. М. Пиотровский, Электрические Машины, ч I и II, ГЭИ, 1958.
2. Л. М. 朴德罗夫斯基著，清华大学电力机械教研組等譯，第一册至第四册，高教出版社出版。
3. Г. Н. 彼特罗夫著，天津大学电力机械教研室等譯，第一册至第三册，高教出版社出版。
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琴主編[电机学]讲义。(II) 直流电机。

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匆促，故缺点和乖謬之处恐尚不少，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學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

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

| | |
|--------------------------|--|
| 8-2 铁耗.....150 | 12-8 漏抗的计算.....203 |
| 8-3 铜耗.....152 | 12-9 变压器的损耗和效率.....205 |
| 8-4 机械损耗.....153 | 第十三章 三相变压器.....209 |
| 8-5 附加损耗.....155 | 13-1 三相变压器的磁路系统.....210 |
| 8-6 直流电机总损耗和效率.....155 | 13-2 三相变压器绕组联接法和联接组.....212 |
| 8-7 电机的发热理论.....156 | 13-3 三相变压器的空载运行.....214 |
| 8-8 电机的绝缘材料和温升限度.....158 | 13-4 在不平衡负载时三相变压器的运行情况.....216 |
| 8-9 电机的主要额定工作方式.....161 | 13-5 V/V联接的变压器的运行.....220 |
| 8-10 电机的通风冷却系统.....162 | 第十四章 多绕组变压器和自耦变压器.....225 |
| 第九章 特殊直流电机.....167 | 14-1 三绕组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 三绕组变压器参数的决定.....228 |
| 9-2 同步发电机的励磁机.....168 | 14-3 三绕组变压器的电压变化率 ΔU 的计算.....229 |
| 9-3 电焊发电机.....168 | 14-4 具有几个原绕组的三绕组变压器.....229 |
| 9-4 汽车用的三电刷发电机.....170 | 14-5 自耦变压器的基本概念.....230 |
| 9-5 列车照明发电机.....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 交磁功率放大器.....173 | 第十五章 变压器的并联运行.....239 |
| 9-9 自激放大器(转控机).....175 | 15-1 变压器并联运行的条件.....239 |
| | 15-2 变比相同而短路电压不同的变压器的并联运行.....239 |
| | 15-3 当变比不同时的负载分配.....240 |
| | 15-4 三绕组变压器的并联运行.....243 |
| | 第十六章 变压器的瞬变情况.....247 |
| | 16-1 变压器瞬变过程的一般情况.....247 |
| | 16-2 变压器接入电网.....247 |
| | 16-3 变压器副边的突然短路.....248 |
| | 16-4 变压器突然短路时的机械力.....249 |
| | 16-5 变压器的过电压.....251 |
| | 16-6 过电压保护.....254 |
| | 第十七章 特殊用途的变压器.....256 |
| | 17-1 利用变压器变换相数.....256 |
| | 17-2 水银整流器中用的变压器.....258 |
| | 17-3 具有平滑调节电压的变压器.....261 |
| | 17-4 试验用变压器.....263 |
| | 17-5 具有铁心的电抗器和电抗线圈.....264 |
| | 17-6 其他特殊用途的变压器.....265 |

第二篇 变压器

第十章 变压器的分类和结构.....177

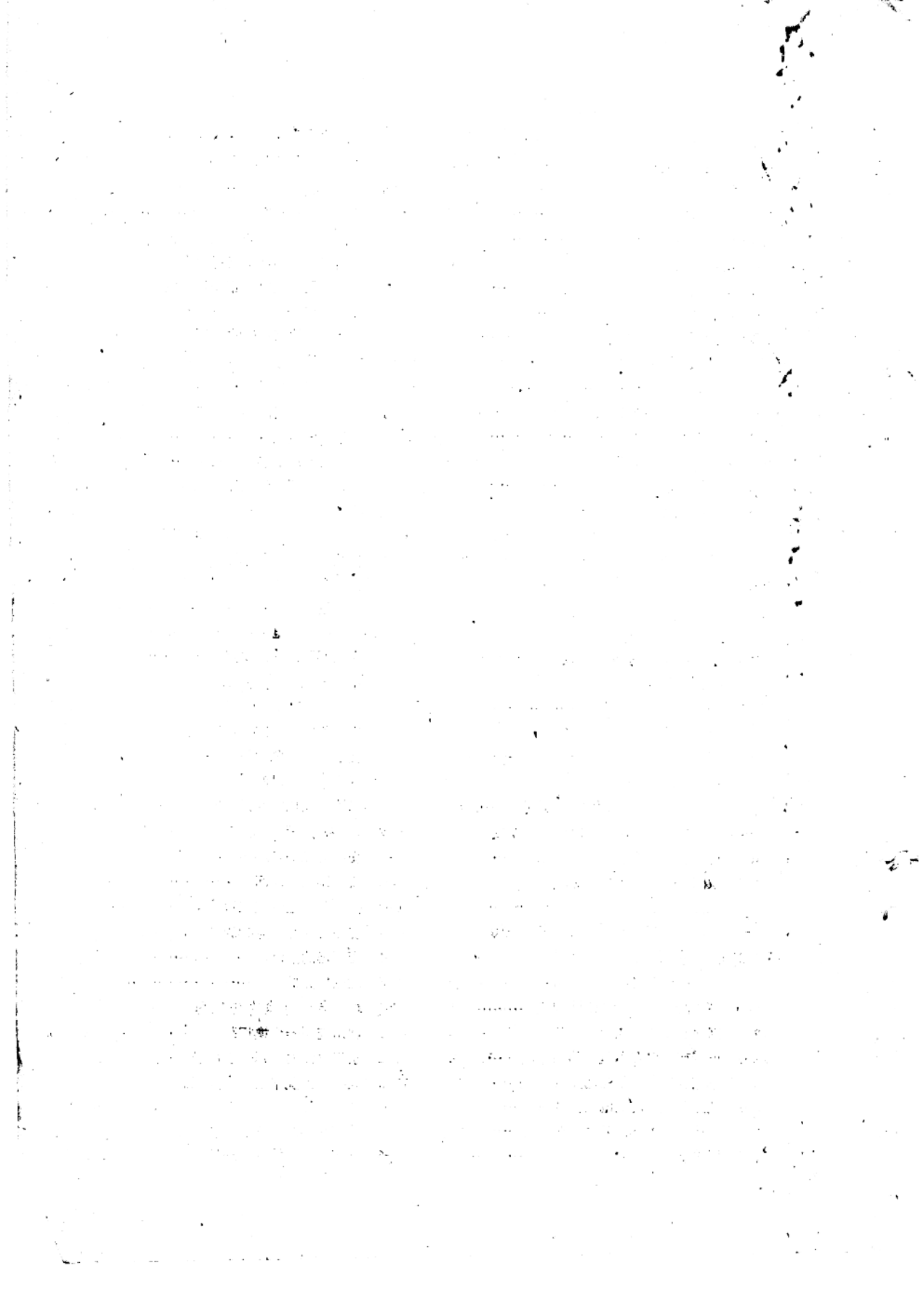
- 10-1 变压器在国民经济中的地位和作用.....177
- 10-2 变压器的主要分类.....177
- 10-3 变压器的主要结构.....178
- 10-4 变压器的发热与冷却.....183
- 10-5 变压器的额定值.....184

第十一章 单相变压器的空载运行.....185

- 11-1 单相变压器空载运行时的物理情况.....185
- 11-2 单相变压器空载运行的分析.....187
- 11-3 激磁电抗 x_m 、激磁阻抗 z_m 及漏感电抗 x_1189
- 11-4 变压器空载时的等值电路和向量图.....190

第十二章 单相变压器在负载时的运行.....194

- 12-1 负载时变压器的基本方程式.....194
- 12-2 副边的量折合为原边的量.....196
- 12-3 单相变压器在负载时的向量图.....197
- 12-4 单相变压器的等值电路.....198
- 12-5 短路试验(详见电机实验).....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



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驅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，而且有较高的效率。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设备，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设备。在火力发电厂和水电站中，分别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户，还采用变压器把某种电压的交流电能轉换为另一电压的同频率的电能。

在机械工业中，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、搅拌机械，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鐵道的发展，需要大量的具有优良的起动机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统的测量或控制元件。

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，即将机械能轉换为电能的发电机运行方式，和将电能轉换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统的控制电机，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，又可将它们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 电机制造业的发展简史

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，人们就企图利用这种能量来驱动机器。因此在十九世纪三十年代就出现了用电磁铁产生旋转运动的电动机，但这时是应用原电池作为电源的，所以这种电动机很不经济，并没有用到工业上去。与此差不多同时就创造出永久磁铁的换向器式直流发电机。这种发电机最初只用于弧光照明及电解等化学工业。经过三、四十年的生产实践，直流电机的结构不断地作了许多重大的改进，例如自激电机的产生，环型电枢绕组逐渐发展为鼓型电枢绕组等。到了十九世纪七十年代直流电机已具有现代电机的基本结构型式，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，例如远距离输电要求把电压升得很高，但是对于直流电机来说这却是相当困难的，又如直流机换向器的运行不够可靠，单机容量不能作得很大等。所以在十九世纪八十年代里电工界又逐渐加强了对交流电的研究。

在上一世纪七十年代，交流电已开始应用到照明设备上去。同时也创造出多极多相的原始形式的同步发电机，和开路铁心的原始形式的变压器。但是交流电在电力驱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统，并且已造出三相异步电动机和三相变压器。由于三相交流系统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。

在十九世纪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，具有较高经济指标的高转速的汽轮机的出现，不久便代替了蒸汽机来拖动发电机。

与提高发电机转速和容量有连带关系的是交流电的标准频率问题。在制造了许多频率从15到 $133\frac{1}{3}$ 赫范围以内的发电设备以后，为了制造和使用的方便，在九十年代里，交流电的频率逐渐趋于一致，在欧洲及其他大多数国家都采用了50赫作为标准频率，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：作为电力系统来说，交流电比直流电有着绝对的优越性，而作为电动机来说，直流电动机性能却较好。为了解决这一矛盾，就需要创造出能将交流电经济地转换为直流电的变流设备，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——单枢换流机和交流换向器电机的出现。在十九世纪末和二十世纪初，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论和它的设计计算方法。

二十世纪以来，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、重量轻、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和改善电工鋼的性能，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 瓩、1500转/分的异步电动机；每瓩的重量已由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，在发电设备方面，单机容量有了很大的提高。现在看来，数万瓩的发电机，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，有不飽和聚酯胶、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瓩的汽輪发电机，而当采用了氦气表面冷却和氦內冷后，单机容量可提高到10万瓩以上。

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。机械制造工业中出现的一些新成就，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200仟瓦，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，设备簡陋，而且制造的型式規格十分混乱，技术标准不統一，材料也大部分依赖于国外进口，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。根据伪资源委员会的統計，从1937~1945年七年間一共才生产了32464仟瓩的电动机和2489仟瓩的发电机。

解放十一年來，由於黨的正確領導和電機製造部門全體職工的積極努力，我國電機工業的面貌已有了巨大的改變，我們已經從基本上是零星修配的局面，逐步發展為現代化的電機工業。

在1949年到1952年的生產恢復時期，在接收、整頓、改造舊的工廠的同時也積極地開展了新品試制工作，發展了生產的規模。那時已能製造出3000仟瓦的水輪發電機，300仟瓦的直流電機和940仟瓦的異步電動機。

在1953到1957年的第一個五年計劃期間，電機製造工業和其它工業一樣，得到了迅速的發展，初步建立了電機工業的基地。在這五年間電機的產量有了巨大的增長，以電動機為例，1957年的年產量達到145.5萬仟瓦，增加為1949年年產量6.1萬仟瓦的23.9倍。同時在這一階段，我國電機製造工業的技術水平有了迅速的提高，逐漸掌握了一系列的產品的設計方法和先進工藝，而且培養出大量的技術工人和技術幹部，試制出大量新品。

1958年我國開始了第二個五年計劃的建設。由於黨提出了「鼓足幹勁、力爭上游、多快好省地建設社會主義」的總路線，和一整套「兩條腿走路」的方針，大大地提高了全國人民加速建設社會主義的積極性。特別是1958年農村人民公社化的結果，出現了農業戰綫的大躍進，因而更促進了工業以及整個國民經濟的全面大躍進。電機製造工業也和其它工業部門一樣，由於堅決貫徹執行了黨的總路線和各項方針政策，在企業中加強了黨的領導，堅持政治掛帥，大搞群眾運動，大鬧技術革新和技術革命，因而獲得了空前的發展。這一年電動機年產量增長為1957年的4.16倍，發電設備也增長為1957年的4.04倍。1959年和1960年電機製造工業在1958年特大躍進的基礎上取得了連續大躍進。與年產量迅速增長的同時，大型電機單機容量的增長也很迅速，例如在1959年我們已經掌握了大功率的汽輪發電機組和大功率的水輪發電機組的生產。

綜上所述，解放十一年來我國電機製造工業的發展速度是空前的，所取得的成就也是巨大的。但是為着儘快地把我國建設成一個具有高度發展的現代工業、現代農業和現代科學文化的偉大的社會主義國家，我們電機製造業的全體職工必須在黨的領導下，繼續努力，在短時間內把我國的電機製造工業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。一八三四年俄国电工界革新者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80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80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、使用维护等基本知識。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

一般的旋轉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为繞于轉动铁心上的线圈,其两端分别与一个固定于轉軸上与线圈有相同轉速的銅环(称滑环)联接,銅环上置有两个接通外电路的靜止电刷A—B。当铁心被原动机带动以某一轉速 n 或綫速度 v 作反时針旋轉时,则由法拉第定律可得每一导体所感应的瞬时电势为

$$e = v/B_{\perp}$$

(1-1)

这里 l ——有效导体长度；

B_x ——有效导体所在位置的磁通密度。

通常电机中 l 和 v 是不变的，故 e 正比于 B_x 。假设在磁极 N 和 S 下，磁通密度在空间上作正弦形分布，则电机转动时，导体中所感应的电势为在时间上亦按正弦变化的交流电势。因为导体 ab 和 cd 所处的位置，其磁通密度值相等而方向相反，故它们的电势值也相等，只是方向相反而已。

试将图 1-1 转动部分表面展开为一平面（相应磁极也改为并排的位置），则得如图 1-2 a) 的图形，再由磁通密度 $B_x = f(x)$ 作正弦分布的假设（如图 1-2 b) 所示），在旋转导体中即可得到相同波形的正弦电势 $e = f(t)$ （如图 1-2 b) 所示）。而且当导体处在磁极轴线时电势最大；处在两极中间（这位置称作几何中性线）时电势为零。

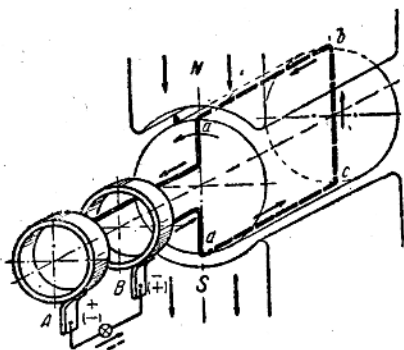


图1-1 交流发电机的工作原理图。

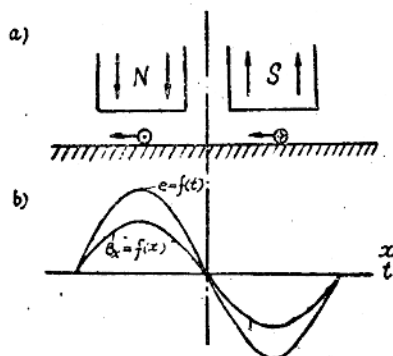


图1-2 正弦性交流电势的产生。

正弦交流电势可以用一旋转向量来表示，向量的长度与电势幅值成正比，应等于 $B_{HE}lv$ ，这里 B_{HE} 为磁极轴线处的最大磁通密度值，而向量的转速则取决于电势变化的频率 f 或周期 $T = \frac{1}{f}$ 。

当转子（转动部分的总称）每转一周，导体电势即完成一个变化周期。令 n 为每分钟转数，则周期 $T = \frac{60}{n}$ ，而频率为：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{n}{60} \text{ 周/秒。}$$

设电机有 p 对极（ p 不一定等于 1），则转子每转一周，电势完成了 p 个周期变化，于是频率的公式为：

$$f = \frac{pn}{60} \text{。} \quad (1-2)$$

而电势向量旋转的角速度为：

$$\omega = 2\pi f \text{ 电弧度/秒。}$$

显而易见，转子每移过一对极的距离，电势就变化一个周期，而电势向量对应地转过 360° 电角度。故如将一对极的空间距离认作 360° 电角度（或电弧度）来量度空间的距离，则有很多方便之处。因为这样转子以电角度表示的角速度将与电势向量的角速度完全一致了。本书以后的公式，凡不再加说明者，式中的角度均是指电角度而言。

由图 1-1 可见，两有效导体的电势相等而相反，由于两有效导体是末端和末端相连接（在滑环的另一端称作末端）。故整个线圈的电势是相加的，它是导体电势的两倍。

由于线端 a 固定接至外环，线端 d 固定接至内环，而每环始终各与一定的电刷相接触，故滑环上的空载电压等于线圈中的感应电势。当外电路接通时，将产生交流电供给负载。

B. 交流电到直流电的变换

在电机中任一匝线圈旋转时，切割磁场所产生的电势总是交流电势。但是我们只要将滑环装置换为另一种特殊的滑动接触装置，就可以变换交流电势为直流电势，而电机遂成为直流电机。这种装置称为换向器（或整流子）。

把图 1-1 的滑环沿几何中性线方向分为互相绝缘的两只半环，两线圈两端分别接在两只半环上。在半环上沿磁极轴线方向按上两个电刷，如图 1-3 所示。这就是一个最简单的换向器。

在图中所示的时刻，电势方向是由 d 到 a ，故 a 为正极， d 为负极。因为线端 a 和 A 刷接触，线端 d 和 B 刷接触，故此时 A 刷是正极， B 刷是负极。刷间电势 $e_{BA} = e_{da}$ 正值。当转子移过 180° 后，导体 dc 处于 N 极下，而导体 ab 处于 S 极下；这时它们的电势值均各与前相等而反向，于是线圈电势方向也变为由 a 到 d 。此时， d 为正极， a 为负极，电势 $e_{ad} = e_{ba}$ 正值。应当注意到这时线端 a 所接的半环也移到下面，变为与电刷 B 接触；而线端 d 变为与电刷 A 接触，所以 A 刷仍为正极， B 刷仍为负极，刷间电势 $e_{BA} = e_{ad}$ 正值。由此可见，电刷极性始终不变，而线圈 $abcd$ 全匝电势 e_{ad} 还是交流电势。

综上所述可知：由于电刷仅和处在一定极性磁极下的导体相联接，例如电刷 A 始终与处在 N 极下的导体相联接（并非联接某一确定的导体，而是轮流接入 N 极下的导体），而处在一定极性下的导体电势方向是不变的，因此，虽然导体内部仍存在交流电势，但电刷间的电势方向却始终不变。

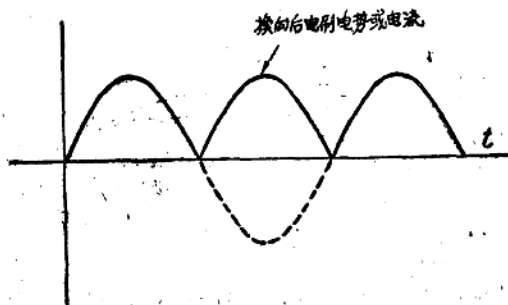


图 1-4 电势和电流的换向。

线圈中的交流电势 e_{ad} 如图 1-4 所示，包括正和负的两个半波；而被换向后电刷上的电势如图中的实线所示。两个半波全是正的。显然可见，电势的数值有着显著的脉动性质。实际应用的直流电机，为了减少电势的脉动，在转子上均匀分布地绕以许多线圈，每个线端的两端均分别接至换向

片上。这时电势的脉动大为减少（详见第三章），而电刷上的电势实际上可认为是恒定不变的。

1-3 直流电机的构造

图 1-5 是一台 Z 系列的中型直流电机的结构，它大致可分为两个主要部分——定子和转子。今分别详述其结构于下：

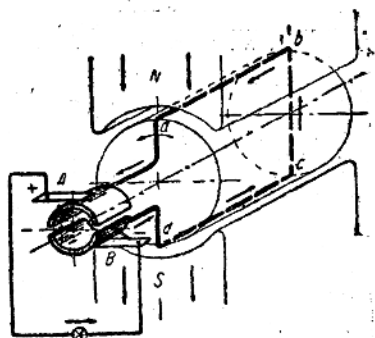


图 1-3 直流发电机的工作原理图。

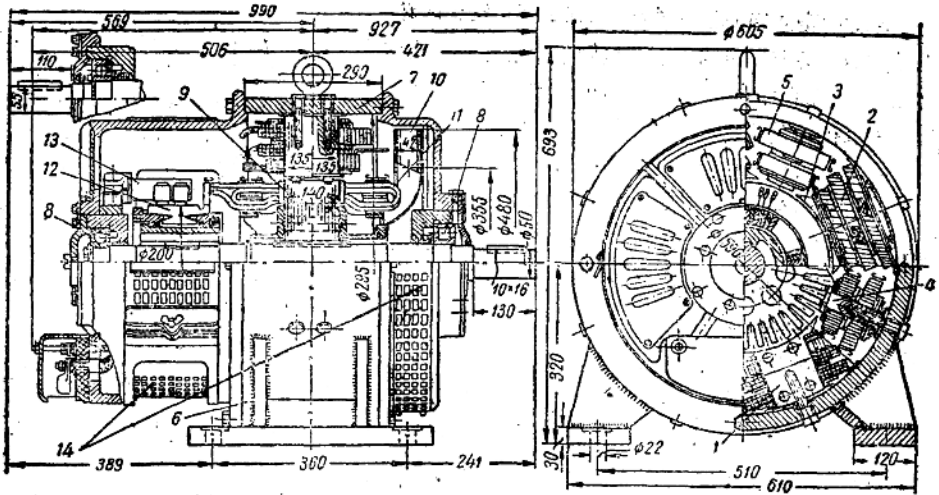


图1-5 Z系列中型电机的结构:

- 1—主磁极; 2—激磁绕组; 3—极掌; 4—附加磁极; 5—附加极激磁绕组;
- 6—机座; 7—磁轭; 8—轴承; 9—电枢铁心; 10—风扇; 11—电枢绕组;
- 12—换向器; 13—刷杆; 14—端盖。

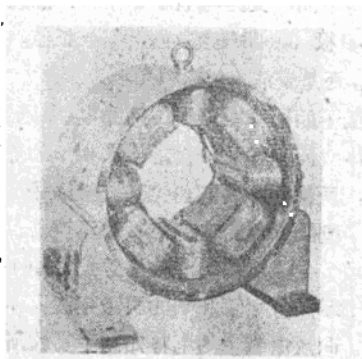


图1-6 直流电机定子简图。

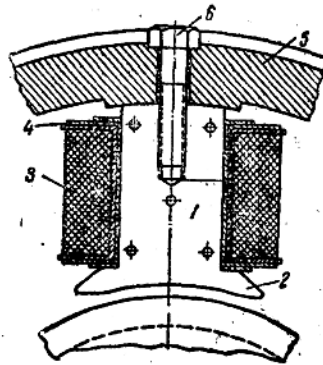


图1-7 直流电机的主磁极:

- 1—磁极铁心; 2—极掌(或极靴); 3—激磁绕组; 4—线圈框架; 5—机座; 6—螺杆。

A. 定子

电机的静止部分称作定子。它主要由主磁极、附加极和机座构成(图1-6);此外还包括端盖、电刷装置和吊攀等(参考图1-5)。

1. 主磁极 它是用来产生主磁场的,其中包括铁心和套在上面的激磁绕组(或线圈)两部分(图1-7)。铁心下面扩大部分称为极掌,它的作用是为了通过空气隙磁通的磁阻减小,并使激磁绕组能更牢地套在铁心上。极掌的弧线有着一定的形状,而外缘微有倾斜,以改善磁密的分布。

为了降低由于电枢转动时齿和槽相对于磁极移动,在极靴表面引起磁密的变化而产生的涡流损耗,磁极铁心一般均采用0.5~1毫米的钢片叠集起来。每片之间靠钢片的氧化膜

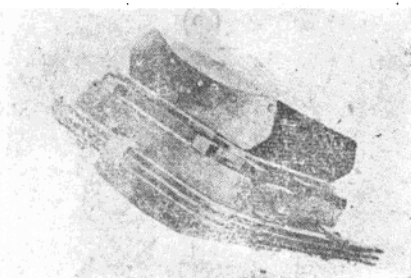


图1-8 直流电机的磁极装配。

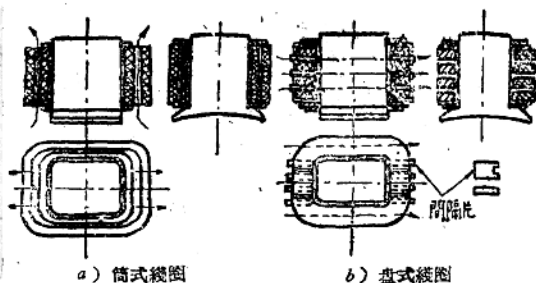


图1-9 磁极绕组的冷却方式。

层来绝缘后再用沉头螺钉铆接而成，最后借螺杆固定在机座上。主极也可以用整块铸钢制成，但是它在电磁性能和制造工艺上都不如叠片优越。

激磁绕组（图1-8）分并激和串激两种（参考第六章）。并激绕组由匝数很多的圆形铜线绕成。有时为了改善冷却条件，增加散热面，将绕组制成具有径向通风沟的筒式线圈或具有轴向通风沟的盘式线圈（图1-9）。绕组通常是用纱包线、漆包线先在模型上绕好，然后经过浸漆处理，套在极上；有时绕组直接绕在框架上，并一起套入磁极。框架通常用1~2毫米厚钢片或绝缘材料（硬纸、压制品等）制成。

串激绕组往往是由匝数很少，截面积较大的矩形裸铜线制成，每匝之间皆垫以绝缘纸。并、串激绕组都要妥善地和铁心绝缘。一般采用在铁心外圈包虫胶纸、云母线等绝缘材料。

2. 附加磁极（换向极）它是用来改善电机的换向的。这种磁极被准确地装在主磁极间的几何中性线上，故也称为间极（图1-10）。由于附加极对转子有较大的气隙，因此涡流损耗不大，并且形状比较简单，大多用整块钢加工而成；只有在大型电机和一些负载变动急剧的电机中，极心才采用钢片叠成。此时极的下端两边切成斜角，以减少漏磁通。附加极的绕组一般由矩形铜线扁绕后套入极心上，各线匝间通常用石棉纸或木块绝缘，整个绕组也要妥善地与磁极铁心绝缘（图1-11）。最后装配好的附加磁极也以螺栓固定在机座上。

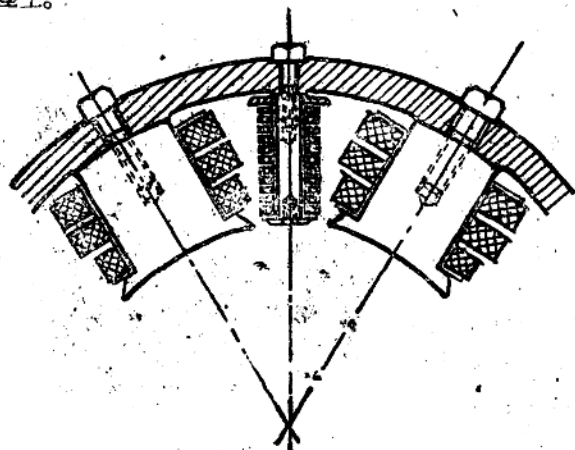


图1-10 中型电机的主极和附加极。

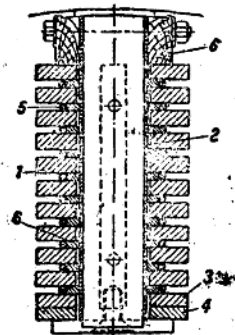


图1-11 大型电机的附加极：
1—绕组；2—绝缘纸板；3—棉布带；
4—纸板；5—麻绳；6—木块。

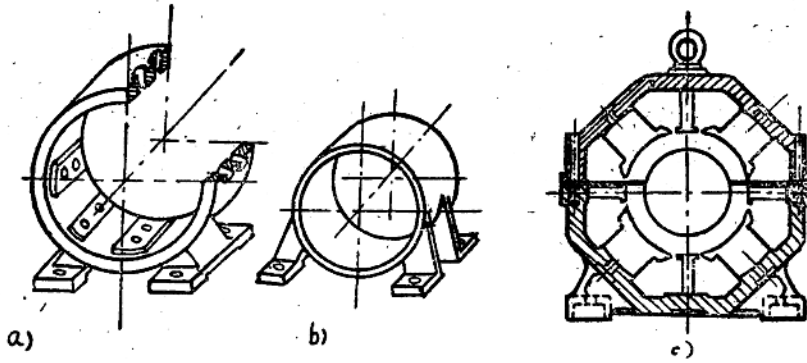


图1-12 直流电机的机座:

a) 鑄鋼機座; b) 焊接機座; c) 水平面剖分多角形機座。

3. 机座 电机静止部分的外壳称作机座。主磁极和附加极都固定在上面。它本身除了有支撑电机的作用外，也当作磁轭来形成磁通的闭合迴路。图1-12为几种常见的机座形状。机座中圆筒状的导磁部分称为磁轭；底下向两侧伸出的部分称为底脚，它借底脚螺钉把机座牢靠地固定在基础上。

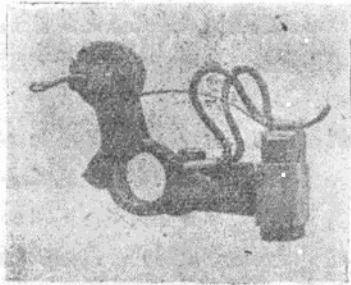


图1-13 电刷装置。

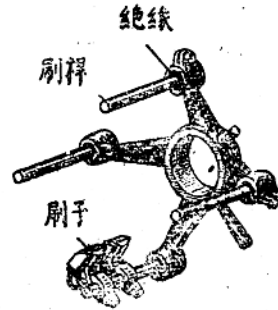


图1-14 刷杆座。

机座可分鑄鉄、鑄鋼和鋼板焊接三种。鑄鋼的导磁性能和机械强度均较高，普遍地用于中小型电机中；鑄鉄的浇鑄性能虽然较好，但由于导磁性能比鑄鋼差得多，故只在电机的重量和体积不很重要的场合才有使用。鋼板焊接的机座较轻，而且比鑄鋼机座便宜，亦常用于小型电机中。机座一般均采用圆筒形状，但在某些特殊场合下（如电车电动机、矿山电机、吊车电机等），机座亦采用多角形来减小空间位置。

4. 端盖（见图1-15中第14项）电机机座两端各装一个端盖，用以保护电机免受外界损害，同时也保护运行人员安全，防止触电事故。在中小型电机中端盖还负有支持转动部分的任务，此时轴承（一般选用滚动轴承）就装在端盖中，此种端盖必须保证有足够的机械强

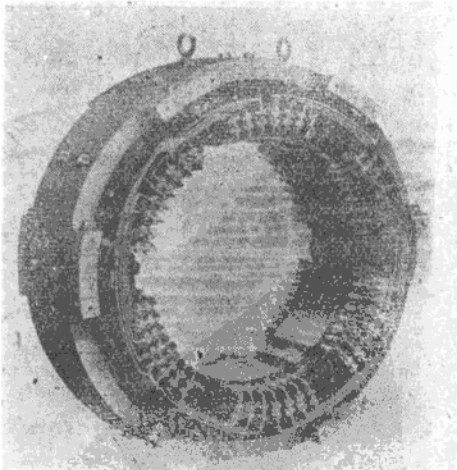


图1-15 补偿绕组。