

中等专业学校教学用书

电 机 学

(工业企业^{电气化}专业适用)
电气_{设备}

吉林冶金电气化学校电机教研组 编



中国工业出版社

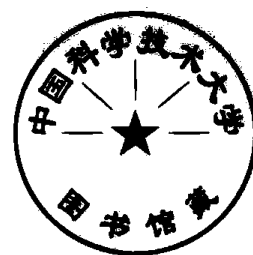
中等专业学校教学用书



电 机 学

(工业企业电气化专业适用)
(电气设备专业适用)

吉林冶金电气化学校电机教研组 编



中国工业出版社

短路

在过

流在

$x_0 =$

三相

本书根据冶金工业部1959年制定的中等专业学校工业企业电气装备专业指导性教学计划与电机学课程教学大纲编写而成。全书共分四篇，第一篇为直流电机，第二篇为变压器，第三篇为异步电机及第四篇为同步电机，其中第三篇——异步电机中包括交流换向器式异步电机。本书比较详细地阐述了电机的一般理论，并相应地介绍了我国电机制造工业的情况。本书可作为中等专业学校工业企业电气装备专业的教材。

电机学

(工业企业电气化专业适用)
电气設備

吉林冶金电气化学校电机教研组 编

冶金工业部工业教育司编辑(北京猪市大街78号)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张18·字数419,000

1962年4月北京第一版·1965年1月重排本

1966年2月北京第六次印刷

印数10,647—13,086·定价(科四)1.70元

统一书号: K15165·1452(冶金-242)

緒 論

1. 电机在国民經济建設中的地位

电能在现代人类的經濟生活中，获得了日益广泛的应用。自然界中蘊藏着許多能源，如煤炭中的热能以及水力、风力、原子能等都可以轉变为电能，然后再将电能轉变为我們所需要的能量形态而加以利用。这是因为电能和其它各种形式的能量相比，有着无比的优越性：它适宜于大量而廉价的生产、集中管理、远距离传输和自动控制等。我們知道，现代化工业的标志，就是生产过程的机械化和自动化，而机械化、自动化又是和电气化分不开的。

我国当前正处在社会主义建設时期。为了把我国建設成为一个具有现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防的社会主义强国，积极地有計劃地发展电力工业，将电力广泛运用在工业、农业以及国民經济的各个方面，就成为我們的一项重要任务。

为了生产电能，电站中装有发电机组，它由原动机和被其带动的发电机組成，通过发电机将机械能轉变为电能。在火电站中，由汽轮机带动的发电机称为汽輪发电机；在水电站中由水轮机带动的发电机称为水輪发电机。

如电站距用戶較远，电能必須沿輸电綫送到用戶所在地，为了經濟地輸送电能，应将电压提高。发电机的电压一般不超过15千伏，为了使它升高到輸电电压，需用变压器。

电能送达用电区域后，須进行分配。配电网路的电压为6000，3000，380和220伏等。降低电压也要用变压器，故变压器在电力系统中有重要的作用。

各种受电器应用电能是电力过程的最后阶段。其中应用最多的是电动机——将电能变为机械能的机械。电动机在各种工业企业中得到最广泛的应用。用它来拖动各种各样的生产机械工作。

此外，现代化的工业企业中，都在逐步走向自动化或半自动化的道路，各种容量极小的微电机，又为自动系統的主要元件。

2. 电机的主要类型

本課程所討論的电机，是指由电磁感应作用而产生的一种能量轉換的机械，所以也叫做电磁机械。

按运行方式的不同可分为：

- 1) 将机械能变为电能——发电机；
- 2) 将电能变为机械能——电动机；
- 3) 将电能变为电能，但有不同的电压——变压器；
- 4) 将电能变为电能，但有不同的頻率——变频机；
- 5) 将交流电能变为直流电能——变流机；
- 6) 在电气机械系統中起調节和放大作用——电机調节器和电机放大机。

按照所应用的电流种类，电机可以分为直流电机和交流电机。

在交流电机中，变压器是一种静止的电磁器械。在旋转的交流电机中，按其速率变化不同的特点可分为：

- 1) 同步电机——速率与电网频率保持恒定的关系，这种速率叫同步速率；
 - 2) 异步电机——速率随负载而变化。
- 异步电机中又可分为无换向器式（通称感应电机）和换向器式两种。

3. 电机制造的初期发展

1831年法拉第所发现的电磁感应定律是电机制造的理论基础。继此发现后，1832年出现了第一个换向器式发电机模型，1834年亚可比做出了第一台由蓄电池供电的直流电动机。最初，电机的发展是从永磁式直流电机开始的。稍后，自1867年起改进为电磁式。至1885年直流电机的结构逐步改进，电枢采用了钢片迭成的鼓形电枢和双层绕组，便取得了现代电机的基本形式。在这个时期内，直流电动机已应用于城市电气铁道。

为了扩大用电区域和输送距离，逐渐感到应用直流电时不能满足要求。因此自1870年起开始了单相交流系统的研究。在1876年，雅勃洛契可夫初次发明了应用交流电的照明装置，并于1878年完成了原始形式的同步发电机，并于主线路中串联一具有开启磁路的变压器。这便是应用变压器的开始。以后逐步发展，至1885年变压器基本上具备了现代结构的形式。

1885年，意大利物理学家费拉利斯发现了应用两相电流产生旋转磁场的原理以后，从1889年至1891年，俄罗斯工程师多里沃—多勃罗沃尔斯基做了一系列工作，他的重要贡献是根据旋转磁场原理做出了工业用的三相异步电动机，并开始应用了三相交流制的输电系统。

三相系统的发明是整个电力技术发展的新纪元，同样也是电机制造发展的新纪元。它促使电力各部门获得跃进的发展。由于工业企业和许多国民经济部门的电气化，电能的需要量大增，输电线路也大大地发展，从而引起中央电站容量的增加，高速运转的汽轮发电机不久便代替了以蒸汽机作为原动机的发电机。从19世纪末至20世纪初，包括交流换向器式电机在内的各种电机均已陆续发明。电机的初期发展至此告一段落。

4. 现代电机制造业的发展

20世纪以来，电机的发展进入了新的阶段，随着工业企业生产规模不断扩大和整个工业技术水平不断地提高，使得单机容量不断地提高。以汽轮发电机为例，在1900年，单机容量不超过5000千伏安；至1920年，转速为3000转/分的汽轮发电机的容量则达到25,000千伏安，1937年应用了氢冷以后，转速为3000转/分的汽轮发电机的最大容量已达150,000千瓦。最近数年来，电机的冷却技术有了新的发展，采用空心导线，转子内部氢冷，定子内部油冷或水冷，已制成的汽轮发电机容量高达320,000千瓦。目前世界上已投入运行的水轮发电机，单机容量有达105,000千瓦的。变压器方面，近年来在绝缘结构和过电压保护方面有了新的发展，每台变压器的容量及其电压等级都在迅速提高，已制成容量为135兆伏安500千伏的单相巨型变压器。

除了在结构和工艺方面的技术改进以外，新的材料的应用也对电机的发展起了很大的促进作用。例如，在磁性材料方面冷轧硅钢片的推广使用，及在绝缘材料方面采用环氧树脂和硅有机绝缘等。由于磁性材料和绝缘材料的改进，以及设计技术的进一步掌握，同样

容量的电机的尺寸和重量比以前不断减小。

国民经济各部门生产的发展，要求电机工业除提高产量以外，还需要扩大产品的品种，发展各种特殊类型电机：如石油工业用的潜油电动机，化学和煤气工业用的防爆电动机。随着生产过程中自动化和遥控技术的发展，出现了各种型式的电机放大器，如交磁放大机和自激放大机已在现代工业的电力拖动中获得广泛的应用。此外作为控制元件应用的微电机也在迅速发展着；这类电机的型式很多，最小的容量仅只数瓦。

5. 我国电机制造工业的发展

解放前，在帝国主义的压迫和国民党反动统治之下，我国电机制造工业基础极为薄弱，技术非常落后。其特点是设备简陋，产品容量小，型式混乱，技术标准不统一，一些必要的材料不能自给，仅有的一些电机制造厂实质上是附属于帝国主义的修配车间。解放前所生产的单机容量，直流发电机只做到200千瓦，电动机不过180马力，变压器不过2000千伏安，汽轮发电机和水轮发电机则从未生产过。

解放以后，在党和毛主席的英明领导下，我国的电机制造工业得到了巨大的发展：在第一个五年计划期间，新建和扩建了许多规模宏大的企业，用最新的技术装备来改变原来落后的生产面貌；统一了全国电机工业的技术标准和产品系列；培养了大量的人材，掌握了制造电机的先进生产技术；同时，在工厂、高等学校和科学研究机关中进行了全面的、具体的规划，分工协作开展了电机方面的科学研究工作。

1957年电机工业总产值，为第一个五年计划开始前一年（1952年）的四倍多，在第一个五年计划期间完成了新产品7500种以上。在此期间已试制完成主要产品（单机最大容量）：水轮发电机15000千瓦；汽轮发电机12000千瓦；变压器三相的为154千伏40500千伏安，单相的为200千伏20,000千伏安。

1958年以来，我国已经制成了大功率的水轮发电机组和氢冷汽轮发电机组，以及各种大型三相和单相变压器。除了容量提高以外，由于开展了群众性的技术革新和技术革命运动的结果，在产品质量和品种方面也有了很大提高；并且大力采用了先进技术，推广了新的工艺措施，材料方面的改进也有显著的成绩。

6. 课程的任务和内容

“电机学”是作为电机制造、电气化……等专业的专业基础课而开设的，因此本课程的任务是使学生熟悉各种电机的主要结构、基本理论和运行特性，掌握正常操作各种电机的技能。所以学习时必须理论联系实际，注重基本训练，对习题和实验也应给予充分的重视。

“电机学”是在“电工基础”的基础上讲授的，所以在学习过程中，必须注意复习有关的旧知识，以求对新知识有更好的领会和消化。

本课程主要内容分直流电机、变压器、异步电机和同步电机四个部分，四者间紧密联系衔接；如直流电机的绕组、磁路计算、电枢反应、特性等和交流电机有密切关系，变压器的基本理论（基本方程式、等值电路、向量图）和异步电机的本质上亦是一致的。所以在学习上应该循序渐进，既要依次学好每一部分，还要注意其各部分间的联系和异同，以求达到融会贯通的目的。

序 言

本书是吉林冶金电气化学校电机教研组在校党委领导下，根据1959年冶金工业部制定的工业企业电气装备专业指导性教育计划和吉林冶金电气化学校、鞍山钢铁学校共同制定的“电机学”课程教学大纲，参考国内有关教材和我校部分讲义而编写的。在编写过程中，注意了结合我国实际情况，并吸收了本教研组全体同志多年来的教学经验和国内有关教材的许多优点。

根据指导性教育计划和课程大纲的规定，四年制中专的“电机学”教学总时数为242学时（其中讲授时数179，实验时数35，课堂练习时数9，复习测验和机动时数19）。本书在分量上与四年制教学时数基本适应。三年制学校，采用本书时，可按课程大纲适当删减。

在编写过程中，考虑到课程之间的配合以及学生实际水平，在教材系统和某些内容的叙述上，如在主要的基础理论部分，注意了物理概念的充分阐述，并在满足教学要求的前提下，尽量精简次要内容，以压缩篇幅。

在编写过程中，注意了理论联系实际的原则，尽可能反映我国当前的电机生产情况，采用我国现行国家标准，介绍我国电机产品系列和各种电机在工业企业电力拖动方面的运用情况。

为使学生能更好地消化理论和掌握计算方法，列举了一定数量的例题，并在每章后面附有一定数量的复习思考题和作业题，以供教师和学生参考。

对书中某些次要内容任课教师可根据实际需要加以取舍。

本书在1960年完成初稿，其中直流电机、变压器、异步电机等部分曾在本校试用，基本上满足教学要求。但因受到编者水平所限，同时由于这次付印时间比较短促，任务比较紧迫，其中错误和缺点，在所难免，恳切地希望读者批评指正。

吉林冶金电气化学校电机教研组

一九六一年九月

目 录

序 言 緒 論

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的基本知識..... 1	7-1 直流发电机按激磁方法的分类..... 49
1-1 电磁感应定律和电磁力定律..... 1	7-2 直流发电机的能量图, 电势方程式及力矩方程式..... 50
1-2 直流电机的基本原理..... 2	7-3 发电机的特性..... 52
1-3 直流电机各主要部件的叙述..... 5	7-4 他激发电机..... 53
1-4 额定工作情况及各额定值..... 9	7-5 并激发电机..... 54
1-5 我国制造的直流电机..... 9	7-6 串激发电机..... 57
第二章 直流电机电枢繞組..... 10	7-7 复激发电机..... 58
2-1 概述..... 10	7-8 各种发电机特性比較及其应用..... 59
2-2 鼓型电枢繞組的基本特性..... 11	7-9 三刷电焊发电机..... 59
2-3 迭繞組(并聯繞組)..... 13	7-10 电机放大机..... 60
2-4 波繞組(串聯繞組)..... 16	第八章 直流发电机的并联运行 62
2-5 电枢繞組电势..... 17	8-1 并联运行的意义..... 62
2-6 各种繞組的比較..... 18	8-2 直流并激发电机的并联运行..... 63
第三章 直流电机的磁路..... 20	8-3 复激发电机的并联运行..... 65
3-1 直流电机的磁路和計算原則..... 20	第九章 直流电动机 66
3-2 空气隙磁势..... 21	9-1 概述..... 66
3-3 电枢齿部磁势..... 23	9-2 电动机的能量图、电势方程式和力矩方程式..... 67
3-4 电枢鉄心的磁势..... 25	9-3 直流电动机的起动..... 68
3-5 磁极与磁軛的磁势..... 25	9-4 并激电动机的工作特性..... 70
3-6 电机的磁化曲线..... 26	9-5 串激电动机的工作特性..... 72
第四章 直流电机的电枢反应..... 29	9-6 复激电动机..... 74
4-1 电刷在几何中性线上发电机的电枢反应..... 29	9-7 直流电动机的速度調节..... 74
4-2 电刷自几何中性线移动时发电机电枢反应..... 32	9-8 直流电动机的应用范围..... 79
4-3 电动机的电枢反应..... 34	第十章 电机的发热和冷却 80
第五章 直流电机的换向 35	10-1 概述..... 80
5-1 概述..... 35	10-2 均匀固体的发热原理..... 81
5-2 换向过程的分析..... 35	10-3 电机的发热和散热..... 83
5-3 火花发生原因和火花等級..... 40	10-4 絕緣材料的分級..... 83
5-4 改善换向的主要方法..... 41	10-5 測量温度的方法..... 84
5-5 环火和补偿繞組..... 44	10-6 电机的最大許可温度和最大許可温升..... 84
第六章 直流电机的效率 45	10-7 电机的基本額定工作状态..... 86
6-1 損失的分类..... 45	10-8 电机的冷却与通风..... 87
6-2 效率..... 47	
第七章 直流发电机 49	
	第二篇 变压器
	第十一章 变压器概論 89
	11-1 变压器的基本定义..... 89

IV

11-2 变压器的分类.....89	13-4 变压器在不对称负载时的工作..... 124
11-3 变压器的主要构造部分.....90	13-5 各种联接组的应用范围..... 129
11-4 额定值.....94	13-6 变压器的V/V联接..... 129
11-5 我国变压器制造.....94	第十四章 变压器的并联运行..... 131
11-6 变压器制造的近代发展.....95	14-1 变压器并联运行的条件..... 131
第十二章 变压器的运行理论.....96	14-2 短路电压不等时变压器的并联运 行..... 131
12-1 单相变压器的空载运行.....96	14-3 变比不相等时变压器的并联运 行..... 133
12-2 变压器有负载时工作的物理情 况..... 103	14-4 不同组别的变压器并联运行..... 135
12-3 变压器的折算..... 104	第十五章 变压器的过渡过程..... 136
12-4 折算过的变压器有负载时的向量 图..... 105	15-1 概述..... 136
12-5 变压器的等值电路图..... 106	15-2 变压器的空载接入..... 136
12-6 变压器参数的实验测定法..... 108	15-3 变压器突然短路..... 138
12-7 变压器的电压变动..... 112	15-4 变压器的过电压..... 139
12-8 变压器的效率..... 113	第十六章 特种变压器..... 141
第十三章 三相变压器..... 116	16-1 自耦变压器..... 141
13-1 三相变压器的磁路系统..... 116	16-2 三绕组变压器..... 144
13-2 三相变压器的接线..... 117	16-3 其它特种变压器..... 146
13-3 三相变压器空载时的特点..... 120	

第三篇 交流电机理论的一般问题

第十七章 交流电机绕组中的电势..... 149	18-2 交流绕组的主要类型..... 158
17-1 交流电机的主要类型..... 149	18-3 单层全节距绕组..... 158
17-2 同步电机的作用原理概述..... 149	18-4 双层迭绕组..... 161
17-3 异步电机的作用原理概述..... 150	18-5 双层波绕组..... 163
17-4 导线中的电势..... 150	第十九章 交流绕组的磁势..... 166
17-5 线匝中的电势..... 151	19-1 定子磁势和定子磁场..... 166
17-6 单相全距集中绕组(单层)..... 154	19-2 单相全距集中绕组的磁势..... 166
17-7 全距和短距分布绕组电势..... 154	19-3 单相短距分布绕组磁势..... 168
第十八章 交流绕组的绕法..... 158	19-4 三相绕组的磁势..... 170
18-1 交流绕组绕法的基本原则..... 158	

第四篇 交流异步电机

第二十章 异步无换向器式电机概论.....173	21-4 移相器..... 181
20-1 异步电机的类型和应用范围.....173	21-5 感应调压器..... 182
20-2 三相异步电机的原理和它的工作 状态..... 173	第二十二章 异步电动机在旋转时的 现象..... 183
20-3 三相异步电机的主要构成部分的 叙述..... 175	22-1 空载运行..... 183
20-4 我国制造的三相异步电动机..... 177	22-2 异步电动机有负载时的工作..... 184
第二十一章 转子不动时的三相异步 电机..... 178	22-3 异步电动机的等值电路和向量图... 186
21-1 概述..... 178	第二十三章 异步电动机的转动力矩... 188
21-2 转子绕组开路时的情况..... 178	23-1 异步电动机的能量图..... 188
21-3 异步电机的短路..... 180	23-2 异步电动机的转动力矩..... 188
	23-3 力矩和转差率关系曲线的分析..... 190
	23-4 高次谐波对转动力矩的影响..... 192

第二十四章 异步电动机的工作特性 与圆图	196	第二十七章 异步电机特殊运行状态 ...	218
24-1 异步电动机的工作特性	196	27-1 概述	218
24-2 异步电动机的圆图	197	27-2 异步电动机电压低于额定值情况 下的运行	218
24-3 空载试验和短路试验	200	27-3 异步发电机	219
24-4 异步电动机各物理量在圆图上的 表示法	201	27-4 电磁制动状态	222
第二十五章 异步电动机的起动	207	27-5 单相异步电动机	223
25-1 概述	207	27-6 三相电动机转子各相阻抗不对称 的运行	225
25-2 在额定电压下直接起动	208	27-7 异步电机在同步联接系统中的 应用	227
25-3 降低电压起动	208	第二十八章 换向器式异步电动机	229
25-4 滑环式电动机应用起动变阻器起 动	211	28-1 换向器式异步电机概论	229
25-5 特殊制做的鼠笼式电动机	211	28-2 单相串激电动机	229
第二十六章 异步电动机的速度调节 ...	214	28-3 推斥电动机	231
26-1 调速的方法	214	28-4 用转子电路中引入附加电势的方 法调节异步电动机的速度和功率 因数的原理	232
26-2 在转子电路中接入变阻器调节速 度	215	28-5 换向器式电机在换向器上电刷间 的电压	234
26-3 改变电动机的磁极对数以调节转 速	216	28-6 换向器式频率变换机	235
26-4 改变电源网络的频率以调节转速 ...	217	28-7 三相并激电动机	236

第五篇 同步电机

第二十九章 同步电机概论	239	32-5 同步电机在 $M=$ 变数和 $i_B=$ 常数 的条件下运行	258
29-1 同步电机的基本构造型式	239	32-6 整步功率和过载能力	260
29-2 同步电机的主要构造部件简述	239	32-7 同步电机在 $M=$ 常数和 $i_B=$ 变数 条件下运行	262
第三十章 同步电机的电枢反应	242	32-8 同步发电机并联运行时负载的转 移	264
30-1 概述	242	32-9 同步补偿机	265
30-2 同步发电机的电枢反应与负载性 质的关系	243	第三十三章 同步电动机向量图和工 作特性	267
30-3 在混合负载下同步发电机的电枢 反应	245	33-1 同步电动机电势向量图	267
第三十一章 同步发电机的向量图和 特性	246	33-2 同步电动机工作特性	268
31-1 同步发电机的向量图	246	33-3 反应式同步电动机	270
31-2 同步发电机的特性曲线	248	33-4 同步电动机的起动	271
第三十二章 同步电机在电网上并联 运行	252	33-5 同步电动机与异步电动机的比 较	272
32-1 概述	252	第三十四章 同步电机的突然短路	273
32-2 同步发电机并联接入	253	34-1 概述	273
32-3 同步发电机并联接入方法	255	34-2 暂态电抗和次暂态电抗	274
32-4 同步电机的电磁功率	257	34-3 三相突然短路电流	276

第一篇 直流电机

第一章 直流电机的基本知識

1-1 电磁感应定律和电磁力定律

各种电机的基本原理，都是从电磁的相互作用出发，而以电磁感应定律和电磁力定律为理論基础的。

1. 电磁感应定律

按照法拉第电磁感应基本定律，当一匝线圈迴路內所包围的磁通发生变化时，线圈內便有感应电势产生。这一电势的大小等于迴路內磁通对时间的变化率的負值：

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

設所有的磁通 Φ 都鏈連线圈的全部匝数 w ，則上式应写为：

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

式中

Φ 的单位为伏-秒；

e 的单位为伏特。当 Φ 的单位为馬克斯威尔时，(1-2)式右方应乘以 10^{-8} 。

感应电势的方向，通常用楞次定律来确定：电势引起的感应电流所产生的磁通总是朝着阻止迴路內磁通发生变化的方向。电势的方向亦可借磁通增量的正負来决定。当通过迴路的磁通减少时，即 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ，电势的符号是正的。当通过迴路的磁通增加时，即 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ ，

电势的符号是負的。电势与磁通的正方向，則用右手螺旋定則来决定。

电磁感应定律指出：不論任何原因使迴路內的磁通发生变化，都会有电势产生。当迴路內的磁通随時間作周期性交变时，則这样感应的电势便成为一切电磁线圈和变压器的理論基础。

应用电磁感应定律于迴路中的某一段导綫上，便可計算每一导綫中的感应电势。当一直綫导体在磁場中运动并割切磁力綫时（图1-1），由电磁感应定律可推得：

$$e = Blv, \quad (1-3)$$

其中 l 、 v 和 B 三者应互相垂直，电势的方向，可用右手定則决定（图1-2）。

式中

e ——导綫中感应电势的瞬时值，单位为伏特；

l ——导綫的有效长度，即割切磁力綫的导綫长度，单位为米；

v ——导綫在磁場中运动的速度，单位为米/秒；

B ——磁場的磁感应强度，单位为伏-秒/米²；1伏-秒/米² = 10^4 高斯。

以上公式，是計算电机繞組电势的基本公式，应很好記憶。必須明确导綫只有在割切

磁力綫时才有电势产生，亦即磁場和导綫作相对运动是产生电势的必要条件，至于割切的方式可以不同。在各种电机中，磁場和导綫的相对运动大致有下面的三种情形：

- 1) 磁場靜止，而导綫移动；
- 2) 导綫靜止，而磁場旋轉；
- 3) 磁場和导綫都移动，但它們之間作相对运动。

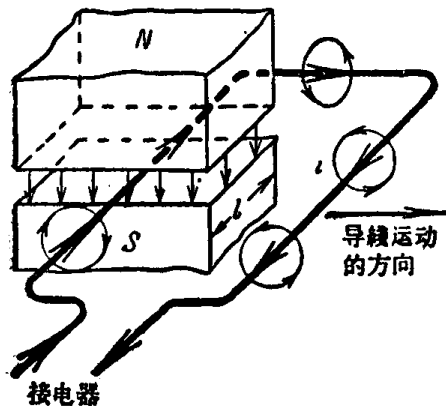


图 1-1 导线中的电势

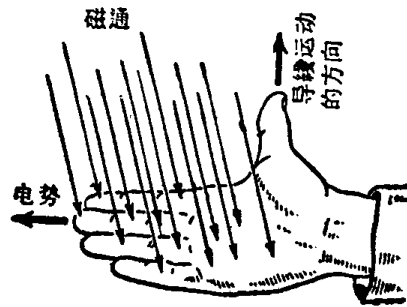


图 1-2 右手手掌法則

2. 电磁力定律

磁場对电流有相互作用。磁場对带电流导体的作用力，称为电磁力。一段长 l ，带电流 i 的直导体处在磁感应强度为 B 的磁場中，当 $l \perp B$ 时，导体受到的电磁力为：

$$F = Bli \quad (1-4)$$

这力的方向，按左手定則决定。式中如 B 的单位为伏-秒/米²， l 的单位为米， i 的单位为安培，则 F 的单位为牛頓。1 牛頓等于 10^5 达因，或 $\frac{1}{9.81}$ 公斤。

电磁力使带电流的导体作机械运动，所以它是电动机的理論基础。各种电机都是旋轉的，設所考虑的导体位于轉子上，若将导体通入电源电流，则所产生的电磁力作用于每一导体上而使轉子获得旋轉力矩：

$$M = Blir, \quad (1-5)$$

式中 r 为轉子的半径，这便是一最简单的电动机运行情况。

1-2 直流电机的基本原理

1. 直流电机换向器的基本概念

图 1-3 表示一两极交流发电机的簡图，固定部分主要是由两个磁极， N 极和 S 极組成。两个磁极可以由永久磁鉄做成；但通常是在两个磁极上繞有激磁綫圈，通以一定方向的电流，即可产生由 N 极到 S 极的磁通。繞有綫圈 $abcd$ 的轉动部分叫电枢。电枢在两极中間旋轉，綫圈的两端和固定于轉軸上的两个滑环相連，滑环上装有两个接通外电路的靜止电刷 $A-B$ ，而外电路是由某些用电器組成，外电路的用电器叫負載。

今設图 1-3 电机的电枢被原动机拖动，以恒定速率逆时針方向旋轉。应用右手定則可决定导綫 ab 和 cd 的电势方向。如图 1-3 所示的瞬間，导綫 ab 中的电势方向指向讀者（由 b 至 a ），而导綫 cd 則背向讀者（由 d 至 c ）。故外电路的电流自滑环 1 流至电刷 A ，而

后再到电刷B和滑环2。电机为发电机时，設电流流出处的电刷A为正电位，用正号(+)标示之，而电流流回电机处的电刷B为负电位，用负号(-)标示之。此时电刷A具有正极性；电刷B具有负极性。

电枢旋轉180度后，导綫ab和cd的位置互换，导綫所处的磁場极性变更，所以导綫ab和cd的电势方向也发生变更，同时也改变了电刷A和B的极性及其外电路电流的方向。

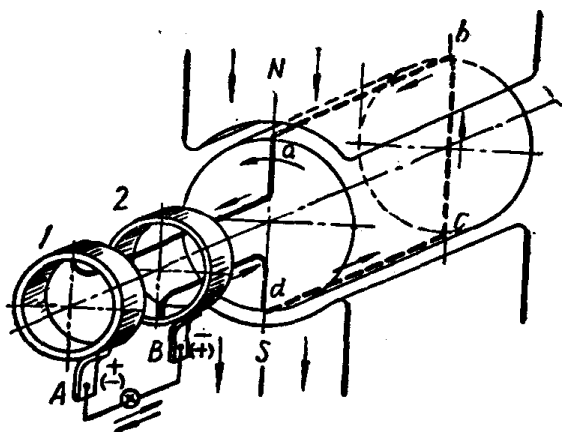


图 1-3 交流发电机原理图

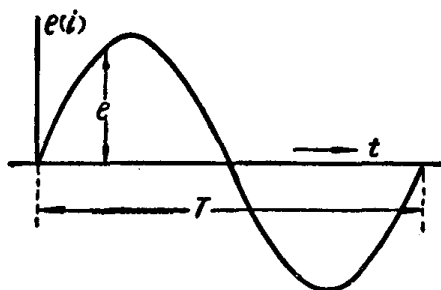


图 1-4 线圈中的电势

由图1-3可見在电枢旋轉时，电刷A通过滑环1永远保持着和导綫ab的一端相接触；电刷B通过滑环2永远保持着和导綫cd的一端相接触。由于导綫的电势是交变的，因此电刷A和B的极性也是交变的，亦即加在外电路用电器两端的电势和流过的电流是交变的，这种发电机称为交流发电机。設电枢周沿磁感应作正弦分布，則电枢旋轉一周时，电刷两端的感应电势随时间的变化如图1-4所示为正弦曲线。

为使上述的交流电流变为直流，即使电流在外电路中永恒地按一个方向流动，則应装置一个如图1-5所示的换向器。綫圈abcd的两端接到换向器的两个銅片1和2上，两銅片称为换向片，紧装于軸上；它們互相間及和轉軸間都妥为絕緣，在换向片上安置有靜止于空間的电刷A—B使发电机和外电路联接。

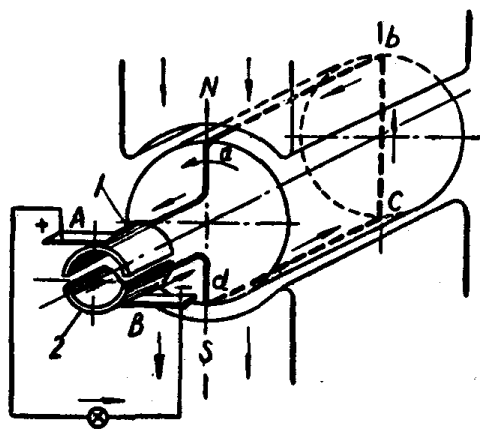


图 1-5 直流发电机原理图

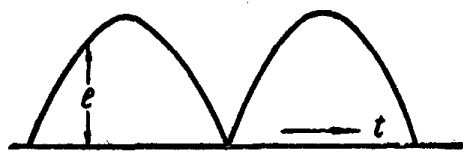


图 1-6 电枢上一个线圈的脉动电势

在图1-5所示瞬間，接触换向片1的电刷A的极性为正，因为此时和电刷A相接触的导綫ab位于N极下，同一瞬間电刷B的极性则为负；电枢轉180度后，电刷A不再通过换

狗片 1 和导线 ab 相联接，而通过换向片 2 和 cd 相联接，此时导线 cd 已取代原来导线 ab 所在的位置，即转到 N 极下，所以这时电刷 A 的极性仍然为正，同理电刷 B 的极性仍然为负。这样一来，虽然导线 ab 和 cd 的电势仍然是交变的，但是因为电刷 A 通过换向器作用并不固定和导线 ab 相接触，而是固定地和 N 极下的导线相接触，由于一定的磁极下，导线的电势方向是一定的，所以电刷的极性也就是一定的。

所以通过换向器及其电刷的作用，及时地改变线圈与外电路的连接可以将线圈的交变电势改变为外电路的直流电势，使外电路中的电流仅按一个方向流动，即自正电刷 A 流向负电刷 B ，这种过程称为电流换向。此时电刷两端电势的波形如图 1-6 所示。由图可见电势的方向虽然不变，但电势和所产生电流大小都在零和最大值之间脉动。故此种发电机是不适于实际应用的。

2. 减小电势脉动方法

图 1-5 所示简单的直流发电机，是不能应用到实际的，因为它产生很大的脉动电势和电流，此外它的线圈太少，产生的电压很低。为了减小外电路上电势和电流的脉动，应当增加分布在电枢上的线圈数目。为简单起见，以图 1-7 环型电枢为例，设磁极数 $2p=2$ ，在此环型电枢上，安放均匀分布的线圈 4 个，从某一标以数字 1 的线圈开始，顺序串联在电枢上的全部 4 个线圈，再将第 4 号线圈的尾和第 1 号线圈的头相接，于是即得一自成闭合的绕组，在每一个线圈的尾和下一线圈的头相连的接点上引出端接线与一个换向片相接，因此全部换向片数等于线圈数，换向片间互相绝缘。图 1-7 所示的线圈可以由单匝或多匝的导线绕成，它的两端联接到两个换向片上，它是构成整个电枢绕组的基本组成部分，称为绕组元件。

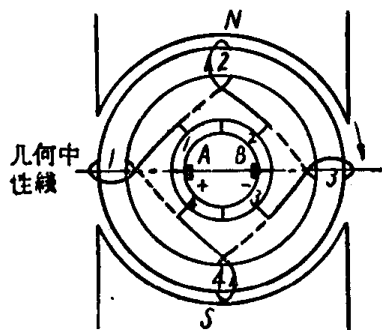


图 1-7 直流电机环型电枢及其绕组

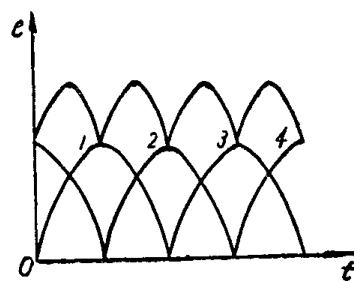


图 1-8 电刷间合成电势波形

电枢旋转时，各元件均感应产生交变电势，设电枢顺时针方向旋转，则此刻位于 N 极下的元件的电势方向（即处于电枢表面元件有效边电势方向）是背向读者的，而在 S 极下的则指向读者的。两极之间的几何中性线上元件电势为零。在图 1-7 所示的瞬间，电势为零的元件为 1 号与 3 号。我们可以看到两个磁极下对应的元件电势大小相等方向相反，在任何瞬间，绕组内部电势的总和为零；换句话说，即绕组内部的电势互相平衡。

为了要从这绕组获得直流电流，必须安置静止在空间的电刷，使绕组和外电路相联；电刷的位置必须使正负两端电刷尽可能得到最大电势，这样电刷必须放在和电势为零的元件相连接的换向片上，这个位置叫做换向器中性线，在图 1-7 所示的环型电枢绕组中，换向器中性线的位置就是在几何中性线上。于是电刷将绕组分为两个并联支路——在 N 极

下的元件构成一个支路；在 S 极下的元件构成另一支路。虽然每一元件的电势是交变的，但在电枢旋轉时，在一定磁极下的元件电势方向并不改变，因而电刷两端得到恒定方向电势。电刷 A 极性永远为正，电刷 B 极性永远为负。

对每个元件电势来说，电势波形仍然和图 1-6 相同，但因为每个元件在空间相差 90 度电气角，所以每个元件电势在时间上也相差 90 度电气角。因此如欲得到电刷上两端电枢绕组合成电势，必须将支路串联的各元件电势相加。相加后所得的曲线，如图 1-8 所示，脉动程度显见已比以前减低。电枢上分布绕组愈多，则脉动程度愈低。根据数学分析证明，每一极下有 8 片换向片时，则电刷上电压的脉动不超过平均电压的 1%，此时流经外电路的电流实际上可认为是直流。

1-3 直流电机各主要部件的叙述

直流电机和所有其他电机一样，由两个主要部分组成：

1. 静止部分——简称为定子；
2. 转动部分——简称为转子，在直流电机中又称为电枢。

静止部分和转动部分之间的间隙，称为空气隙。

静止部分主要由下列部件组成：1) 主磁极；2) 换向磁极；3) 机座。转动部分则由 1) 电枢铁心；2) 电枢绕组；3) 换向器所组成。

今将直流电机主要构成部件简述于下：

1. 静止部分

1) 主磁极

主磁极的形状和位置可由图 1-9 所示的电机的纵横剖面及图 1-10 了解之。

主磁极的作用是产生主磁通，它由铁心 1 和绕组 2 (见图 1-10) 组成。

主磁极铁心普通用 0.5—1 毫米的电工钢片迭合起来，用螺杆铆紧，套上激磁绕组以后，再用螺杆 5 固定在磁轭 6 上。铁心靠近电枢的一端称为极掌 3。它的主要作用在使磁通易于通过空气隙，极掌外缘微加切削，目的是尽可能地使磁极边缘的磁感应分布均匀的变化；极掌在机械上的作用是使套在铁心上的激磁绕组更为紧实。

激磁绕组先用模型在绕线机上绕成，然后套在铁心上。对较大容量的电机，需先将绕组绕在由某种绝缘材料制成的套管 4 上，然后将它固定在铁心的特殊支架上。为了改善绕组的冷却条件，可将绕组按磁极高度分为两部分或数部分，在各部分间留有适当的通风沟。

2) 换向磁极

换向磁极放置在主磁极中间如图 1-9 所示，它的作用是改善换向情况(将在第五章详细讨论)。换向磁极和主磁极一样，由铁心 4 和绕在它上面的绕组 5 组成(见图 1-9)。换向磁极同样用螺杆固定在磁轭上。

3) 机座

和电机的地基相连。固定着主磁极和换向磁极的整个电机外壳部分称为机座(如图 1-9 之 6)。其中用作传导主磁极及换向磁极磁通的部分(如图 1-9 之 7)称为磁轭。

机座可用铸铁或合金钢做成，其选择以电机容量的大小而定。若电枢直径不超过 35—45 厘米，则除磁极外，装有轴承的端盖也装在机座上(图 1-9 之 8)。如端盖直径大于 1

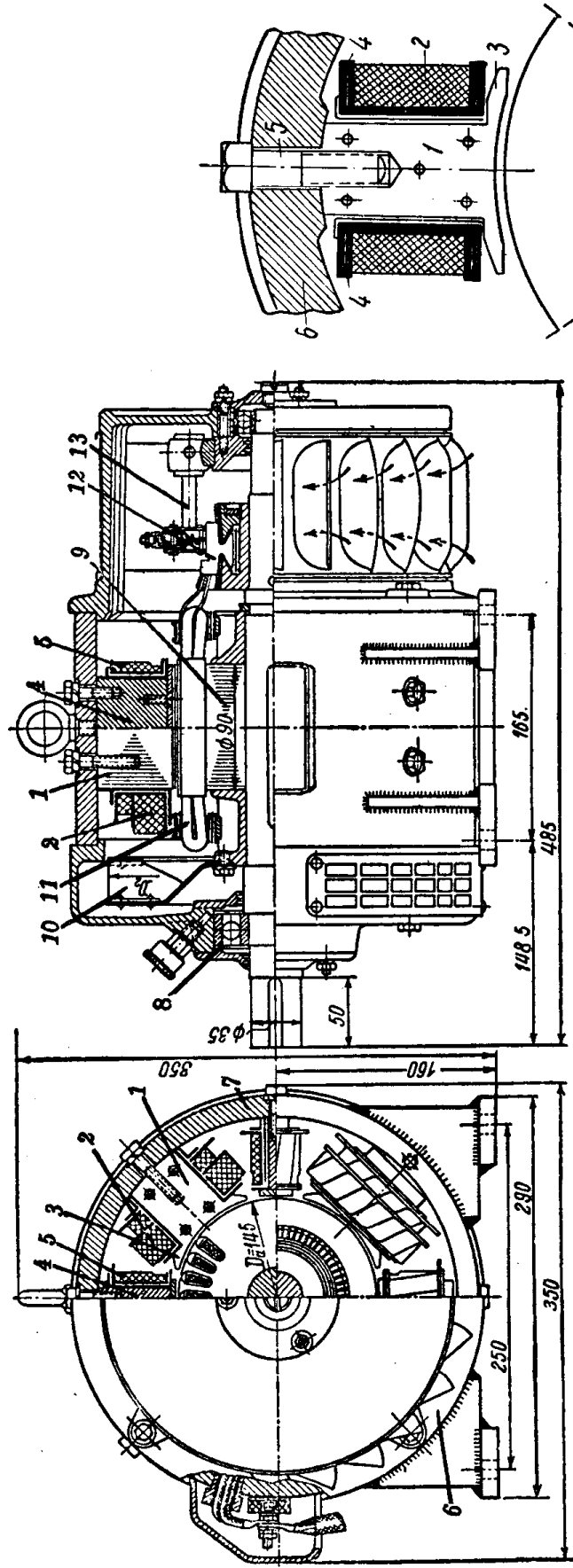


图 1-9 Z-290型直流电机的纵横剖面图

图 1-10 主磁极

米，一般改用装在底板上的支架式轴承。

端盖式、有时支架式轴承均采用滚动式轴承，即滚珠或滚柱轴承；而支架式轴承则一般采用滑动式轴承并大都带有油环。

2. 转动部分

1) 电枢铁心

电枢铁心（图1-9之9）的作用是固紧电枢绕组，并为主磁通和换向极磁通所经过的一部分磁路，因此应有良好的导磁性。

电枢铁心由和机轴方向相垂直的有齿电工钢片迭合组成，电工钢片形状如图1-11所示。在一般交变磁化频率下（20~50赫），电工钢片厚度约为0.5毫米，每片间涂以绝缘漆或以表面的氧化膜互相绝缘，其绝缘物厚度为0.03~0.05毫米。这样做是为了减小由电枢在磁场中旋转所感应平行于机轴的涡流，因为实心电枢涡流的损失甚大，会影响电机的效率和过度发热。

电工钢片是由含硅的合金钢轧制成的，采用此种材料的钢片可以减少涡流损失。

图1-11所示的电工钢片，由冲床冲制而成，故又称冲片。小容量电机的冲片为圆形或环形的整块，大容量的冲片由数片扇形片组成。

冲片迭齐后，两端用较厚的钢板借压力机自两面压紧装于轴上，或用螺杆拴紧。

为改善电枢的冷却条件，小容量电机采用顺轴式通风沟（图1-11）；中等容量的电机则将电枢铁心分成几个小段，每小段的厚度为4~6厘米，每小段间有宽8~10毫米的径向通风沟，径向通风沟侧的冲片加厚至1毫米，上面焊上突出附着物，这种特制冲片如图1-12所示。

除此之外，小容量的电机在转子上装有风翼，大容量电机则装有风扇（图1-9之10）。

直流电机常用矩形开口槽，形状如图1-13所示，在小容量电机中也有用梯形槽的。

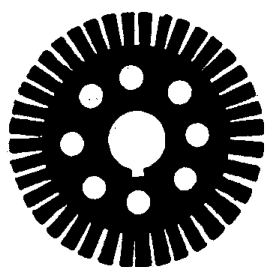


图 1-11 鼓形电枢的硅钢片

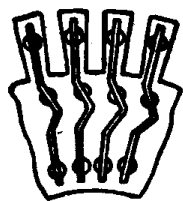


图 1-12 径向通风沟片

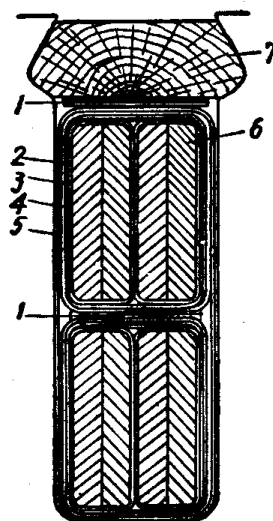


图 1-13 电枢槽

1—绝缘填充物；2—匝间绝缘；3和4—元件绝缘；
5—槽绝缘；6—导线；7—楔子

2) 电枢绕组

电枢绕组（图1-9之11）是由装在电枢铁心槽中的绕组元件，按一定规律（在第二章